



博士学位论文

中国城市住区碳足迹及低碳策略研究
Study on Carbon Footprint and Low-Carbon
Strategies of Urban Settlements in China

作 者：高 涛
导 师：王建平 教授

中国矿业大学
二〇一五年五月

中图分类号_____

学校代码_____10290

UDC_____

密 级_____公开

中国矿业大学
博士学位论文

中国城市住区碳足迹及低碳策略研究
Study on Carbon Footprint Assessment and
Low-carbon Strategies of Urban Settlements in
China

作 者_____高 涛

导 师_____王建平 教授

申请学位_____管理学博士

培养单位_____力学与建筑工程学院

学科专业_____工程管理

研究方向_____低碳建筑

答辩委员会主席_____

评 阅 人_____

二〇一五年五月

论文审阅认定书

研究生_____在规定的学习年限内,按照研究生培养方案的要求,完成了研究生课程的学习,成绩合格;在我的指导下完成本学位论文,经审阅,论文中的观点、数据、表述和结构为我所认同,论文撰写格式符合学校的相关规定,同意将本论文作为学位申请论文送专家评审。

导师签字:

年 月 日

致谢

博士生活即将结束，回顾起来，有很多的艰辛，也有很多的收获，更有很多的感谢。

首先，感谢我的导师王建平教授。在论文的选题、研究方案、应用案例、修改及定稿等环节无不凝聚着王老师的心血。王老师严谨求实的治学态度，开拓创新的研究精神，开阔敏锐的研究视野，忘我的工作精神，无不深深地感染着我。王老师不仅传授了我丰富的专业知识，而且教会了我做人的道理，这是我在人生道路上收获的最宝贵财富。值此，谨向我的导师王老师致以深深的敬意和衷心的感谢！

感谢力建学院和工程管理研究所全体老师在博士期间给予的指导、帮助和鼓励；特别感谢靖洪文院长、吕恒林书记、王文顺院长、周建亮所长、倪国栋书记、王林秀教授、赵利副教授、肖跃军副教授、乔志春副教授、杨建平老师、张辉老师、许娜老师和王莉老师等在工作和学习给予的帮助和支持。

感谢北京大学国家 973 计划项目《城市生态特征及演变机理》课题组邵玲博士和北京万通地产创新研发中心总经理谢丹先生在论文资料收集与撰写过程中给予的帮助。

衷心地感谢妻子刘晴女士在我攻读博士期间给予了深深的理解和默默的奉献；感谢父母和岳父岳母以及所有的亲友对我学业的支持和理解。

论文能够顺利完成，凝结着众多师长、同学和朋友的心血与期望，还有很多人默默地关心和支持着我，很难一一列出名字致以谢意，在此诚恳地向关心、帮助、鼓励过我的所有人表示我最真诚的谢意。

论文参考了大量的研究文献，值此，向文献的作者表示感谢。

摘 要

城市住区是我国城市住宅的主要建造形式,城市住区的节能减排是我国建筑业应对气候变化,实现低碳发展的重要领域。城市住区碳排放量的核算方法的确定是城市住区节能减排、低碳发展的重要前提;同时,城市住区低碳评价、低碳技术、低碳成本效益等相关研究,都成为城市住区低碳发展顺利实施的关键。

论文分析了城市住区的碳排放特性,确定城市住区碳足迹研究的目的和原则;将住区生命周期划分为决策设计、材料设备生产、建设施工、运行维护和处置五个阶段,分析了住区生命周期及各阶段碳足迹分析的系统边界;对系统边界内的主要碳排放活动单元过程进行清单分析,确定了单元过程的碳排放活动数据,并构建了住区生命周期及各阶段的碳排放量计算模型。

根据城市住区碳足迹及住区低碳评价的特点,提出城市住区低碳评价原则;从生命周期、各阶段和主要碳源碳汇系统角度出发,选取住区生命周期低碳指数、用材低碳指数、建设施工低碳指数、运行使用低碳指数、用能低碳指数、用水低碳指数等不同层次的评价指标,构建相应的评价基准;根据选取的评价指标及评价基准,提出相对应的低碳评级方法。

通过对城市住区低碳运行机理的深入研究,从城市住区生命周期各阶段和住区的功能系统两个维度出发,将城市住区相关低碳技术分为建筑本体、建筑设备系统和建筑环境三类进行分析研究,分析了部分对住区减排影响较大的低碳技术,并构建了双维度三大类的城市住区低碳技术体系。

根据城市住区生命周期成本理论和成本效益分析方法,从经济、环境和社会三个角度,分析城市住区低碳增量成本效益,构建城市住区成本效益分析模型;对建筑本体、建筑设备系统和住区环境三方面的部分低碳技术进行成本效益分析,确定相应的低碳技术选择方案;在综合考虑城市住区全生命周期的低碳技术增量成本、增量效益及资金预算等影响因素下,采用 0-1 型多目标规划方法,建立城市住区生命周期低碳技术优化选择模型,实现不同优先级需求下的住区生命周期的低碳技术方案的优化选择。

选取某城市住区为案例,根据研究成果对案例住区碳足迹进行分析和计算,在确定相关低碳指数的基础上,对住区进行低碳评级;对住区的主要碳源碳汇及相应的低碳技术进行分析,提出相应的低碳减排建议。结果显示,案例住区的碳足迹、低碳评价、低碳技术等方面的分析结果,较好地支持了论文的理论研究成果。

论文有图 43 幅,表 56 个,参考文献 194 篇。

关键词: 城市住区; 碳足迹; 低碳评价; 低碳技术; 成本效益分析;

Abstract

Urban settlements are the main mode of urban residential buildings, energy conservation and emission reduction for urban settlements is an important field of construction industry to address climate change and achieve low-carbon development. Calculation method of the carbon emissions is an important prerequisite for energy conservation, low-carbon development of urban settlements; at the same time, researches about urban settlements Low-Carbon Assessment, Low-Carbon Techniques, and Low-Carbon Cost-Effectiveness have become the key factors of successful implementation of low-carbon development of urban settlements.

The characteristics of urban settlements and its carbon emissions were analyzed and the research purpose and principles of urban settlements carbon footprint were also determined; urban settlement's life cycle was divided into planning & design, materials & equipment production, construction, operation & maintenance and disposal five phases, and the system boundary of carbon footprint analysis about the settlements in different stages of the life cycle has been elicited; Within the system boundary on main carbon unit process were analyzed, followed by the analysis of carbon emissions inventory for all stages, in order to determine the level of unit process carbon emission activity and to build the carbon footprint calculation models for each phase of the urban settlements life cycle.

According to the characteristics of the carbon footprint of urban settlements, proposed low-carbon evaluation principles of urban settlements and build a low-carbon evaluation system, including design, construction and operation, three-phase dynamic evaluation models; from the phases of life cycle and major carbon source, carbon sink systems, the two perspective views, selected urban settlements lifecycle carbon index, construction low-carbon index, operation low-carbon index, energy using low-carbon index and water using carbon index etc., evaluation elements in different levels, to build the appropriate evaluation criteria; and proposed corresponding low-carbon rating methods based on the selected evaluation factors and evaluation criteria.

Through in-depth studying of the operation mechanism of low-carbon urban settlements, from the two dimensions of lifecycle phases and function systems of urban settlements, low-carbon technologies related to urban settlements in accordance with the building, equipment systems and the built environment were divided into

three categories. Based on this classification system, the dissertation focused on the analysis of these low-carbon technologies which have great influence to the energy conservation and emission reduction of urban settlements, and their potential emission reduction abilities. Thus, proposed a two-dimensional and three-category low-carbon technology system of urban settlements.

According to the cost-effectiveness characteristics of urban settlements, in the perspectives of economic, environmental and social, an approach of incremental cost and incremental effectiveness for analyzing the low-carbon cost-effectiveness of urban settlements was proposed to build cost-effectiveness analysis model; through analyzing cost-effectiveness of main low-carbon techniques of building, equipment system and environmental aspects, the appropriate options for low-carbon technologies were determined; considering the influence factors of incremental costs and incremental effectiveness of low-carbon technologies, and the total investment, utilizing methods of 0-1 programming and multi-objective planning to establish the low-carbon technology options optimization model of urban settlements lifecycle, to achieve selecting best options of low-carbon technique system in urban settlement life cycle in the different targets of needs within different priorities.

A certain urban settlement was selected as the case study, based on the previous research results, the carbon footprint of this settlement was analyzed, low-carbon index was rated, major low-carbon techniques were analyzed and the corresponding carbon emissions strategies were proposed. The results show that the analysis of carbon emissions calculation, low-carbon assessment, and low-carbon techniques of this case study is fair good to support and verify the theoretical achievements of this research.

There are 43 figures, 56 tables and 194 references in the paper.

Keywords: Urban Settlement; Carbon Footprint; Low-Carbon Assessment;
Low-Carbon Techniques; Cost-effectiveness Analysis

Extended Abstract

Urban settlements are the main mode of urban residential buildings, energy conservation and emission reduction for urban settlements is an important field of construction industry to address climate change and achieve low-carbon development. Calculation method of the carbon emissions is an important prerequisite for energy conservation, low-carbon development of urban settlements; at the same time, researches about urban settlements Low-Carbon Assessment, Low-Carbon Techniques, and Low-Carbon Cost-Effectiveness have become the key factors of successful implementation of low-carbon development of urban settlements.

Based on life cycle theory, system theory, technology innovation theory, life cycle assessment method, cost-effectiveness analysis and other relevant theories, in combination with the practical situation of the development of low carbon urban settlements, through using the method of theoretical analysis and empirical research, the carbon footprint of urban settlements and low carbon reduction technology and strategy are studied, the followed are the conclusions and points of view of this dissertation:

The characteristics of urban settlements and its carbon emissions were analyzed, from the perspective of primary resources, energy input and waste discharge, the system boundary of carbon footprint analysis about the settlements in different stages of the life cycle and primary carbon emission unit process in different stages have been explicated; and the research purpose and principles of urban settlements carbon footprint were also determined; urban settlement's life cycle was divided into planning & design, materials & equipment production, construction, operation & maintenance and disposal five phases, within the system boundary on main carbon unit process were analyzed, the method of main carbon activity levels and the carbon emission factor in every stage was put forward. Combined with existing research results and calculations, the carbon emission factors of coal, oil, natural gas, electricity, water and other basic energy resources, and main building materials were summarized. Based on the main carbon activity levels and the carbon emission factor in every stage, the carbon emission inventory and carbon footprint calculation models for each phase of the urban settlements life cycle were built.

According to the characteristics of the carbon footprint of urban settlements, combined with the existing built environment evaluation system, the low-carbon

evaluation principles of urban settlements were proposed and a low-carbon evaluation system was build, which should be applied to the planning and design, construction and operation three stages; from the two perspectives of the phases of life cycle and primary carbon source, carbon sink system, selected urban settlements lifecycle carbon index, construction low-carbon index, operation low-carbon index, energy using low-carbon index and water using carbon index etc., evaluation elements of different levels to build the appropriate evaluation criteria; and proposed corresponding low-carbon rating methods based on the selected evaluation factors and evaluation criteria. Making the basic value as a cut-off point, according to the carbon footprint basic value and the actual value difference of the percentage of the basic value of the different stages of settlements life cycle, settlement low carbon rating system can be divided into five grades.

Through in-depth studying of the operation mechanism of low-carbon urban settlements, from the two dimensions of lifecycle phases and function systems of urban settlements, low-carbon technologies related to urban settlements in accordance with the building, equipment systems and the built environment were divided into three categories. Based on this classification system, the dissertation focused on the analysis of these low-carbon technologies that have great influence to the energy conservation and emission reduction of urban settlements, and their potential emission reduction abilities. Thus, proposed a two-dimensional and three-category low-carbon technology system of urban settlements.

According to the cost-effectiveness characteristics of urban settlements, in the perspectives of economic, environmental and social, an approach of incremental cost and incremental effectiveness for analyzing the low-carbon cost-effectiveness of urban settlements was proposed to build cost-effectiveness analysis model; through analyzing cost-effectiveness of main low-carbon techniques of building, equipment system and environmental, e.g. the cost-effectiveness analysis of exterior wall thermal insulation and the solar hot water heater and electric water heater, the appropriate options for low-carbon technologies were determined; considering the influence factors of incremental costs and incremental effectiveness of low-carbon technologies, and the total investment, utilizing methods of 0-1 programming and multi-objective planning to establish the low-carbon technology options optimization model of urban settlements lifecycle, to achieve selecting best options of low-carbon technique system in urban settlement life cycle in the different targets of needs within different

priorities.

A certain urban settlement was selected as the case study, based on the previous research results, the carbon footprint of this settlement was analyzed, and carbon emission of material manufacture, construction and operation phase was calculated; the low-carbon index of material manufacture, construction, heating system, cooling system, water system, greenery system and energy system were rated; primary low-carbon techniques were analyzed and the corresponding carbon emissions strategies were proposed. The results show that the analysis of carbon emissions calculation, low-carbon assessment, and low-carbon techniques of this case study is fair good to support and verify the theoretical achievements of this research.

Keywords: Urban Settlement; Carbon Footprint; Low-Carbon Assessment;
Low-Carbon Techniques; Cost-effectiveness Analysis

目 录

摘 要.....	I
目 录.....	VII
图清单.....	XI
表清单.....	XIV
1 绪论.....	1
1.1 概述.....	1
1.2 国内外研究现状.....	8
1.3 课题研究方案.....	33
1.4 本章小结.....	35
2 城市住区碳足迹及低碳策略相关理论分析.....	36
2.1 低碳经济与低碳建筑.....	36
2.2 生命周期评价及碳足迹理论.....	45
2.3 住区低碳技术分析理论与方法.....	56
2.4 住区低碳成本效益理论分析.....	58
2.5 本章小结.....	62
3 城市住区碳足迹研究.....	63
3.1 城市住区及其碳排放特性分析.....	63
3.2 城市住区碳足迹研究的目的和原则.....	66
3.3 城市住区碳足迹研究范围分析和界定.....	67
3.4 城市住区碳足迹清单分析.....	72
3.5 城市住区碳足迹计算模型建立.....	90
3.6 本章小结.....	92
4 城市住区低碳评价体系研究.....	93
4.1 城市住区低碳评价体系目标分析.....	93
4.2 住区低碳评价体系的要素分析.....	97
4.3 住区低碳评价结果及应用.....	107
4.4 本章小结.....	108
5 城市住区低碳技术体系研究.....	109
5.1 城市住区低碳技术运行机理分析.....	109

5.2 城市住区低碳技术集成模型	112
5.3 城市住区低碳技术体系	115
5.4 本章小结	124
6 城市住区低碳成本效益分析.....	125
6.1 城市住区低碳成本效益分析模型构建	125
6.2 城市住区主要低碳技术成本收益分析	131
6.3 基于 0-1 型多目标规划的住区低碳技术优化选择模型	142
6.4 本章小结	151
7 案例分析.....	152
7.1 案例住区简介	152
7.2 案例住区碳足迹计算	153
7.3 案例住区低碳评价分析.....	159
7.4 案例住区低碳技术分析	163
7.5 本章小结	169
8 结论及展望	170
8.1 结论	170
8.2 创新点	171
8.3 研究展望	172
参考文献.....	174
附录 1.....	186
作者简介.....	194
学位论文原创性声明.....	196
学位论文数据集	197

Contents

Abstract.....	II
Extended Abstract.....	IV
Contents.....	IX
Contents.....	IX
List of Figures	XI
List of Tables.....	XIV
1 Introduction.....	1
1.1 Introduction	1
1.2 Research Review at Home and Abroad.....	8
1.3 Scheme of Research.....	33
1.4 Brief Summary	35
2 Theoretical Analysis of Carbon Footprint and Low carbon Strategies of Urban Settlements.....	36
2.1 Low-Carbon Economy and Low-Carbon building	36
2.2 Life Cycle Assessment and Carbon Footprint.....	45
2.3 Theory and Method of Low-Carbon Technique Analysis.....	56
2.4 Theoretical Analysis of Cost effectiveness of Urban Settlements Low-Carbon	58
2.5 Brief Summary	62
3. Research of Carbon footprint of Urban Settlements.....	63
3.1 Characteristics Analysis of Urban Settlements and its Carbon Emission	63
3.2 Objectives and Principles of Urban Settlements Carbon Footprint Research.....	66
3.3 Research Scope of urban settlements carbon Footprint.....	67
3.4 Inventory Analysis of Urban Settlements Carbon Footprint	72
3.5 Build Calculation Model of Urban Settlements Carbon Footprint.....	90
3.6 Brief Summary	92
4 Urban Settlements Low Carbon Assessment system	93
4.1 Goal Analysis of Urban Settlements Low Carbon Assessment System	93
4.2 Elements Analysis of Urban Settlements Low Carbon Assessment	97
4.3 Results and Application of Assessment of Urban Settlements Low Carbon Assessment System	107

4.4 Brief Summary	108
5 Urban Settlements Low-Carbon Technique System.....	109
5.1 Urban Settlements Low-Carbon Technique Operation Mechanism	109
5.2 Urban Settlements Low-Carbon Technique Integration Model.....	112
5.3 Urban Settlements Low-Carbon Technique System.....	115
5.4 Brief Summary	124
6 Low-Carbon Cost-Effectiveness Analysis of Urban Settlements.....	125
6.1 Build Urban Settlements Low-Carbon Cost Effectiveness Analysis Model	125
6.2 Urban Settlements Low-Carbon Technique Cost Effectiveness Analysis Model	131
6.3 Urban Settlements Low-Carbon Technique Selection Model based on 0-1 Goal Programming.....	142
6.4 Brief Summary	151
7 Case Study.....	152
7.1 Project Overview	152
7.2 Carbon Footprint Calculation of case study	153
7.3 Low-Carbon Assessment of case study	159
7.4 Low-Carbon Technique of case study	163
7.5 Brief Summary	169
8 Conclusions and Prospects	170
8.1 Conclusions	170
8.2 Innovations	171
8.3 Research Prospects.....	172
References	174
Appendix.....	186
Author Resume.....	194
Declaration of thesis originality	196
Dissertation Data Collection	197

图清单

List of Figures

图序号	图名称	页码
图 1-1	有气象记录以来的全球平均气温变化	1
Figure 1-1	The global average temperature change since the record	1
图 1-2	人类活动对环境造成各种影响	1
Figure 1-2	Human activities affects environment	1
图 1-3	1965-2013 年全球每年 CO ₂ 排放量	2
Figure 1-3	Global CO ₂ emissions per year from 1965-20	2
图 1-4	“G8+5” 国家 CO ₂ 排放量变化比较	3
Figure 1-4	The comparison of "G8 + 5 countries" CO ₂ emissions	3
图 1-5	1995-2012 年我国房屋建筑施工及竣工面积	4
Figure 1-5	Area of Residential buildings under construction and completed	4
图 1-6	能源之星住宅性能标识认证程序	19
Figure 1-6	The procedure of Energy Star in building function identification	19
图 1-7	课题研究的总体思路	34
Figure 1-7	Outline of Research	34
图 2-1	人类活动、气候暖化及其影响关系	37
Figure 2-1	Relation of human activities and climate warming	37
图 2-2	低碳经济内涵及实现路径关系	42
Figure 2-2	The connotation and realization path of low-carbon economy	42
图 2-3	建筑与环境之间的输入输出关系	47
Figure 2-3	Input and output relationship between buildings and Environment	47
图 2-4	SETAC 的 LCA 技术框架	49
Figure 2-4	Technical framework of LCA by SETAC	49
图 2-5	ISO 的 LCA 技术框架	50
Figure 2-5	Technical framework of LCA by ISO	50
图 2-6	不同尺度对象的碳足迹及研究方法	53
Figure 2-6	Carbon footprint and research methods of different scale objectives	53
图 2-7	基于 LCA 的产品碳足迹研究框架	55
Figure 2-7	Research framework of PCF based LCA	55
图 3-1	城市住区系统图	67
Figure 3-1	Urban settlements system	67
图 3-2	住区生命周期各阶段资源投入、碳排放量及减排成本关系图	68
Figure 3-2	Resource input, carbon emission and cost of reduction emission in settlement life cycle	68
图 3-3	城市住区生命周期阶段划分	70
Figure 3-3	Urban settlement life cycle phases	70

图 3-4	城市住区决策设计阶段碳足迹研究系统边界图	71
Figure 3-4	Urban settlement carbon footprint system boundary in programing & design phase	71
图 3-5	城市住区材料设备运输阶段碳足迹研究系统边界图	72
Figure 3-5	Urban settlement carbon footprint system boundary in material & equipment transportation phase	72
图 3-6	城市住区决策施工阶段碳足迹研究系统边界图	72
Figure 3-6	Urban settlement carbon footprint system boundary in construction phase	72
图 3-7	城市住区运行阶段碳足迹研究系统边界图	73
Figure 3-7	Urban settlement carbon footprint system boundary in operation phase	73
图 3-8	城市住区处置再利用阶段碳足迹研究系统边界图	74
Figure 3-8	Urban settlement carbon footprint system boundary in disposing & reuse phase	74
图 3-9	城市住区碳足迹研究总体范围	75
Figure3-9	Boundary of urban settlement carbon footprint system	75
图 3-10	运输能耗及其影响因素的关系图	81
Figure 3-10	Transportation energy consumption and influence factors relation	81
图 3-11	施工过程WBS分解图	84
Figure3-11	WBS of construction process	84
图 4-1	住区低碳评价体系框架与评价时期	100
Figure 4-1	Evaluation period and framework of Low-Carbon Assessment System	100
图 4-2	城市住区低碳评价体系的评价指标	102
Figure 4-2	Evaluation index of carbon evaluation system of urban settlements	102
图 4-3	住区低碳评价结果、范围划分和体系应用之间的关系图	110
Figure 4-3	Relation chart of low-carbon assessment, scope and system	110
图 5-1	城市住区低碳技术运行机理	117
Figure 5-1	Urban settlements Low-Carbon technique operation mechanism	117
图 5-2	城市住区外部环境	118
Figure 5-2	Exterior environment of urban settlement	118
图 5-3	城市住区设备系统	118
Figure 5-3	Equipment system of urban settlement	118
图 5-4	城市住区外部环境	119
Figure 5-4	Building structure of urban settlement	119
图 5-5	住区低碳技术运行集成模型	120
Figure 5-5	Urban settlements Low-Carbon technique operation integration model	120
图 5-6	屋顶雨水收集流程图	129
Figure 5-6	The flow chart of roof rainwater collection	129
图 5-7	地面雨水收集流程图	130
Figure 5-7	The flow chart of ground rainwater collection	130
图 6-1	按成本类型划分的建筑设备全生命周期成本构成	135

Figure 6-1	Construction of Building Equipment LCC According to the Types of the Cost	135
图 6-2	住区低碳全生命周期增量成本与效益模型	141
Figure6-2	Incremental costs and benefit model in life cycle	141
图 6-3	真空管太阳能热水器系统边界	147
Figure 6-3	System Boundary of Vacuum Tube Solar Water Heater	147
6-4	太阳能热水器生命周期成本构成比例图	152
Figure 6-4	Ratio Chart of Life Cycle Cost of Solar Water Heater	152
图 6-5	电热水器生命周期成本构成比例	152
Figure 6-5	Ratio Chart of Life Cycle Cost of Electronica Water Heater	152
图 7-1	G6#楼单元户型图	163
Figure7-1	The unit door type of G6#	163
图 7-2	案例住区主要建材生产阶段单位面积碳排放比例	165
Figure 7-2	Carbon emissions ratio of major building materials of production phase	165
图 7-3	案例住区用能系统和用水系统碳排放比例	169
Figure 7-3	Emissions ratio of energy systems and water systems of case Settlements	169

表清单

List of Tables

表序号	表名称	页码
表 1-1	林宪德研究团队关于建筑系统碳排放的研究情况	14
Table 1-1	Research status of Building system Carbon emission by Lin Xiande's Research team	14
表 1-2	Ecohomes 中的评价项目及认证标准	17
Table 1-2	Evaluation items and attestation standard in Ecohomes	17
表 1-3	SAP2005 中的评价指标与评价方法	18
Table1-3	Evaluation indexes and methods in SAP2005	18
表 1-4	LEED 2009-NC 对新建建筑的评价项目及认证标准	19
Table 1-4	Evaluation items and attestation standard in LEED 2009-NC	19
表 1-5	DGNB 评价项目及认证标准	20
Table 1-5	Evaluation items and attestation standard in DGNB	20
表 1-6	EEWH 评价项目及认证标准	22
Table 1-6	Evaluation items and attestation standard in EEWH	22
表 1-7	住宅建筑划分绿色生态等级的项数要求	23
Table 1-7	The requested residence building number of green ecosystem grade	23
表 1-8	中国绿色低碳住区技术评估体系分析	24
Table 1-8	The analysis of China Low-Carbon settlements technical assessment system	24
表 1-9	碳排放相关建筑评价标准和体系评价指标和评价方法对比	25
Table 1-9	Comparision of standards and systems in assessment index and methods for carbon emission	25
表 2-1	低碳建筑相关概念对比分析表	45
Table 2-1	Comparison and analysis of Low-Carbon related conceptions	45
表 2-2	部分学者和组织对碳足迹的定义	52
Table 2-2	Conceptions of Carbon Footprint created by some scholars and organizations	52
表 2-3	主要温室气体的全球变暖潜在特征化当量因子	58
Table 2-3	GWP of major greenhouse gases	58
表 3-1	国内外部分组织发布的煤炭碳排放因子汇总表	76
Table3-1	Carbon emission factor of coal released by domestic and overseas organizations	76
表 3-2	国内外部分组织发布的石油碳排放因子汇总表	76
Table3-2	Carbon emission factor of petroleuml released by domestic and overseas organization	76
表 3-3	国内外部分组织发布的天然气碳排放因子汇总表	77
Table 3-3	Carbon emission factor of natural gas released by domestic and overseas	77

	organizations	
表 3-4	国内外部分组织发布的电力能源碳排放因子汇总表	77
Table 3-4	Carbon emission factor of electrical energy released by domestic and overseas organizations	77
表 3-5	2014年中国区域电网的基准线排放因子	78
Table 3-5	2014 China regional power grid line-based emission factor	78
表 3-6	决策设计阶段碳排放清单计算表	79
Table 3-6	Carbon emission inventory calculation table for planning and design phase	79
表 3-7	主要材料设备碳排放因子汇总表	79
Table3-7	Carbon emission factors summary sheet for main materials and equipments	79
表 3-8	我国铁路运输的单位运距碳排放量计算表	82
Table 3-8	Rail transportation unit distance of carbon emissions calculation table	82
表 3-9	建筑材料生产（含运输）阶段碳排放清单计算表	82
Table 3-9	Carbon emission inventory calculation sheet for materials manufacture (including transportation) phase	82
表 3-10	钢筋加工机械单位台班能耗	84
Table 3-10	Energy consumption of steel reinforcement processing mechanical units machine-team	84
表 3-11	钢筋加工调直工序单位能耗	85
Table 3-11	Unit energy consumption Steel straightening processing	85
表 3-12	建设施工阶段生活、办公区碳排放清单计算表	85
Table 3-12	Carbon emission inventory calculation sheet for living and working area in construction phase	85
表 3-13	建设施工阶段施工区碳排放清单计算表	86
Table 3-13	Carbon emission inventory calculation sheet for construction area in construction phase	86
表 3-14	不同栽种方式单位面积40年CO ₂ 固定量比较表	87
Table3-14	Comparison of CO ₂ fix amount per unit area for 40 years by different planting	87
表 3-15	住区运行维护阶段碳排放清单计算	91
Table3-15	Carbon emission inventory calculation sheet for operation and maintenance phase	91
表 3-16	处置阶段生活、办公区碳排放清单计算表	92
Table 3-16	Carbon emission inventory calculation sheet for living and working areas in disposition phase	92
表 3-17	处置阶段施工区碳排放清单计算表	93
Table 3-17	Carbon emission inventory calculation sheet for construction areas in disposition phase	93
表 3-18	处置阶段材料回收碳排放清单计算表	93
Table 3-18	Carbon emission inventory calculation sheet for materials recycle in	93

	disposition phase	
表 4-1	建材生产过程碳排放因子基准值	103
Table 4-1	Carbon emission factor reference value of building materials during production process	103
表 4-2	各类结构体系单位面积碳排放排放基准值 (t/m ²)	103
Tab4-2	Reference value of carbon emissions per m ² of different kinds of structural systems	103
表 4-3	徐州市居住建筑采暖耗热量指标	107
Table 4-3	Heat consumption indicator of residential buildings in Xuzhou	107
表 4-4	不同评价时期住区低碳评价指标相关参数的选择方式	109
Table 4-4	Related parameters choose method of low carbon indexes during different periods	109
表 5-1	城市住区建筑本体低碳技术系统分类	121
Table 5-1	Classification of Low-Carbon technique building body structure system of Urban settlement	121
表 5-2	城市住区低碳技术设备系统分类	123
Table 5-2	Classification of Low-Carbon technique Equipment system of urban settlement	123
表 5-3	不同热电冷联供原动机相关特性比较	125
Table 5-3	Comparison of characters of different combined cooling heating and power	125
表 5-4	BIPV 主要形式及其光伏组件	126
Table 5-4	Type and components of BIPV	126
表 5-5	城市住区建筑环境低碳技术系统分	130
Table 5-5	Classification of Low-Carbon technique System of Urban Settlement Environment	130
表 5-6	地被植物单位叶面积日释氧固碳量及蒸腾吸热量	132
Table 5-6	Oxygen releasing, carbon and calories absorbing of ground plants' unit leaf in a day	132
表 6-1	QBJ1-190/2.89 型热水器主要原材料消耗量	149
Table 6-1	Main Raw Material Consumption of QBJ1-190/2.89 Type Water Heater	149
表 6-2	QBJ1-190/2.89 型热水器能耗及环境排放清单	149
Table 6-2	Energy Consumption and Environmental Emissions Inventory of QBJ1-190/2.89 Type Water Heater	149
表 6-3	电热水器能耗及环境排放清单	150
Table 6-3	Energy Consumption and Environmental Emissions Inventory of Electric Water Heater	150
表 6-4	两种热水器运行成本比较表	150
Table 6-4	Comparison of Running Costs of Two Water Heaters	150
表 6-5	案例中各技术方案节能经济效益计算表	159
Table 6-5	Economic Benefits Analysis of technical solutions	159
表 6-6	案例中各技术方案成本效益表	159

Table 6-5	Cost-effectiveness Analysis of technical solutions	159
表 6-7	案例 0-1 型多目标规划模型中变量系数	160
Table 6-7	Variation coefficients of 0-1 multi-objective programming model	160
表 6-8	案例 0-1 型多目标规划模型中各期望值	161
Table 6-8	Variations expectations of 0-1 multi-objective programming model	161
表 7-1	案例住区 G6 楼主要建材碳排放量计算表	164
Table 7-1	Main building materials carbon emissions calculation of case settlements G6	164
表 7-2	案例住区施工电力消耗碳排放计算表	165
Table 7-2	Carbon emissions calculation of construction electricity consumption	165
表 7-3	案例住区绿化固碳计算表	168
Table7-3	Greening carbon sequestration calculation of case settlement	168
表 7-4	案例住区运行使用阶段碳足迹计算表	169
Table 7-4	Operational phase carbon footprint calculation of case Settlements	169
表 7-5	案例住区生命周期碳足迹计算表	170
Table 7-5	Lifecycle carbon footprint calculation of case Settlements	170
表 7-6	案例住区各个评价对象的碳排放量实际值、基准值、低碳指数及低 碳评级表	174
Table 7-6	Carbon emission value, reference value, low-carbon index and carbon Rating of the evaluation object of case settlements	174
表 7-7	案例住区屋顶绿化构造表	179
Table7-7	Construction of the Green Roof of case settlement	179

1 绪论

1 Introduction

1.1 概述 (Introduction)

1.1.1 课题研究的背景

目前,全球气候变暖使人类社会可持续发展面临巨大挑战。全球气候变暖的趋势引发一系列问题,如冰川融化、海平面上升、生态系统退化、自然灾害频发等,已经危及农业和粮食安全、水资源安全、能源安全、生态安全和公共卫生安全,直接威胁到人类的生存和发展。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在1990年发表的首份评估报告中指出了全球气温升高的危险。2007年IPCC发布的《第四份气候变化评估报告》指出^[1]:在过去的100年中,由二氧化碳等温室气体造成的温室效应使全球平均地表气温上升了 $0.3^{\circ}\text{C}\sim 0.6^{\circ}\text{C}$,如图1-1所示;IPCC以90%的可信度认为:近50年来的气候变化主要是人为活动排放的二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等温室气体造成的,并预测,到2100年全球平均气温将升高 $1.8^{\circ}\text{C}\sim 4.0^{\circ}\text{C}$ 。IPCC的相关研究同时表明,在人类活动对环境造成的各种影响中,全球气候变暖占87.94%,如图1-2所示。

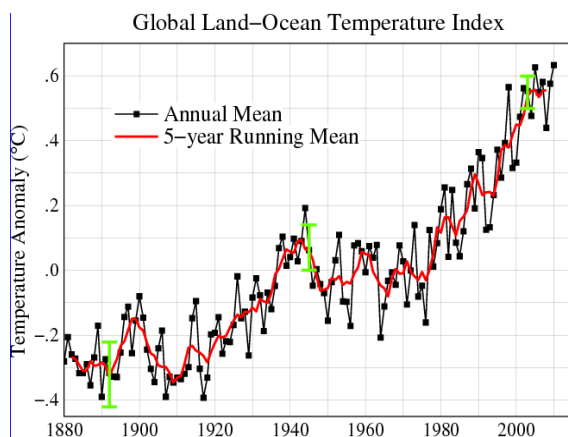


图1-1 有气象记录以来的全球平均气温变化

Figure 1-1 The global average temperature change since meteorological records

资料来源: <http://www.wikipedia.org/>

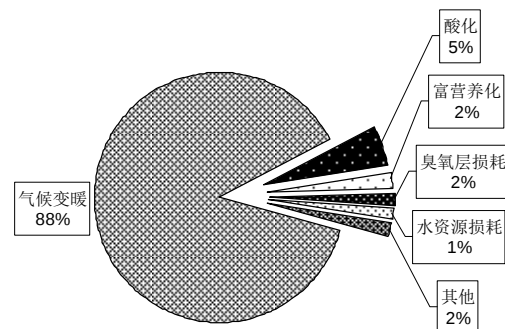


图1-2 人类活动对环境造成各种影响

Figure 1-2 Various environment effects caused by human activities

资料来源: IPCC.气候变化2007: 综合报告

在工业化和城市化进程中,人口猛增和碳基能源大量使用、土地不合理利用、森林被大面积砍伐等人类活动,导致大气中二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化物、全氟化碳和六氟化硫等六种温室气体浓度急剧增加,是引起全球气候变暖

的主要原因。对气候变暖所有影响的温室气体中,影响最大的是CO₂¹,其产生的增温效应占所有温室气体总增温效应的 65%以上,在大气中存留期最长,可达 200 年。IPCC研究认为,2℃(相对 1860 年)是人类社会可容忍的最高升温,否则全球遭遇沿海洪涝、饥饿、疟疾、水短缺的人数将大大增加。根据这一目标,2020 年温度只能比 1961~1990 年平均值升高约 0.8℃,温室气体浓度应稳定在 450ppm以下,而 2005 年全球温室气体浓度已达 379ppm,并于每年 2ppm的速度递增,减少温室气体排放刻不容缓。

据美国世界资源研究所的研究和统计,从 1850 年至 2013 年的 160 余年间,全球共排放二氧化碳 11222 亿吨,仅 2013 年,全球范围的仅有煤炭、石油、天然气消耗产生的二氧化碳排放量就超过 300 亿吨,图 1-3 所示为 1965 年至 2013 年,全球每年 CO₂ 排放量及其增长变化情况。而根据国际能源署(IEA)的报告,2007 年中国由于能源消耗所引起的碳排放量达到 62 亿吨,已经超过了美国,达到世界第一;同时,中国的人均碳排放量和单位 GDP 碳排放量也都高于世界平均水平,图 1-4 所示为 1965 年至 2009 年“G8+5”国家 CO₂ 排放量变化情况。

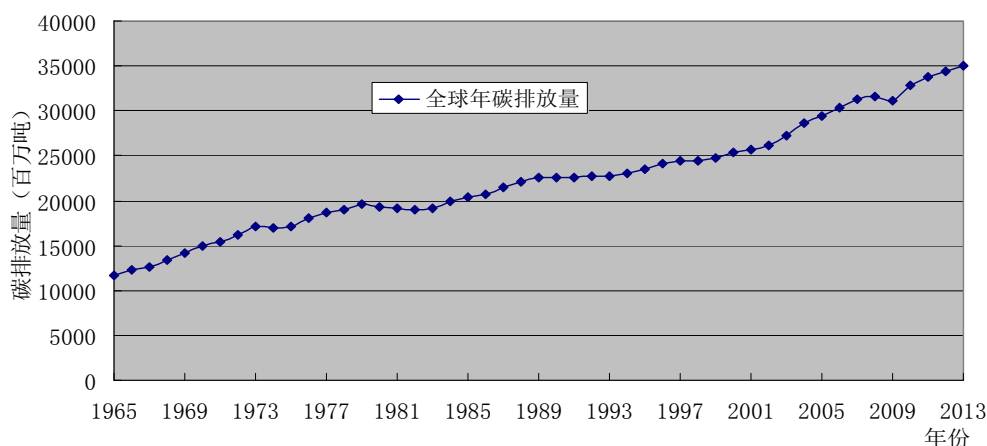


图 1-3 1965-2013 年全球每年 CO₂ 排放量

Figure 1-3 Global CO₂ emissions per year from 1965-2013

(数据来源: BP Statistical Review of World Energy 2014.)

全球气候变暖及其引发一系列问题已引起国际社会的强烈关注,《联合国气候变化框架公约》(1992)、《京都议定书》(1997)、《巴厘路线图》(2007)、《哥本哈根协议》(2009)、《德班一揽子决议》(2011)等一系列国际公约的签订和共识的达成,表明了世界各国政府应对全球气候变暖决心和努力。与此同时,基于气候变化是人类发展的主要挑战之一这一共识,以低能耗、低排放、低污染为基础的低碳理念如潮而至,“低碳经济”、“低碳城市”、“低碳生活”、“碳交易”、“碳

¹ 京都议定书明订针对六种主要的温室气体进行削减,包括:二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化物、全氟碳化物及六氟化硫。其中二氧化碳含量较多,所占的比例也最大,约为 65%。为了统一度量整体温室效应的结果,把不同温室气体的效应标准化,规定以二氧化碳当量为度量温室效应的基本单位,各种不同温室效应气体的二氧化碳当量是将其吨数乘以其温室效应值后得出,本文将温室气体排放统称为碳排放。

税”等一系列新概念和名词的出现，都意味着如何减少碳排放，实现经济社会的低碳发展，也日益成为全球关注的焦点和世界各国发展的重要战略。各国政府、组织机构及研究人员从经济、社会、生活等各个方面，围绕着碳排放权分配、碳排放的计量与核算、碳减排的技术和措施、碳排放权交易的规则制定与交易平台建设、碳税的设立、碳减排相关发展法规及引导政策的制定等方面进行探索和研究，试图找出一条以低能耗、低排放、低污染为主要特征的低碳发展道路。

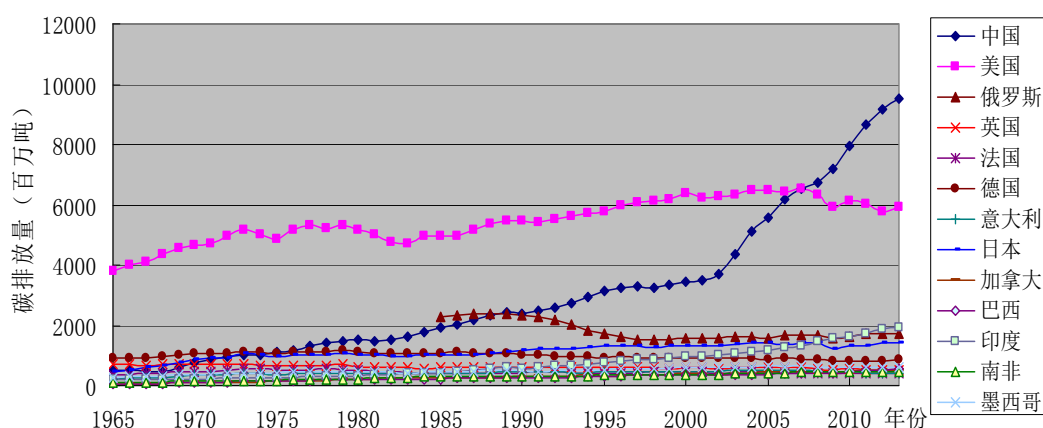


图 1-4 “G8+5” 国家 CO₂ 排放量变化比较

Figure 1-4 The comparison of "G8 + 5 countries" CO₂ emissions

注：“G8”指八国集团（Group 8），即八大工业国：美国、英国、法国、德国、加拿大、日本、意大利、俄罗斯。“5”指应邀出席八国首脑会议的五个发展中国家：中国、印度、巴西、墨西哥、南非。这 13 个国家简称“G8+5”。

（数据来源：BP Statistical Review of World Energy, 2014.）

建筑是人类生产、生活必需的场所和工具。在对地球温暖化有着直接影响的碳排放中，占据相当大的比重。联合国环境规划署 2009 年发布的《建筑与气候变化》报告指出^[2]，在全球范围内，建筑消耗了全球能源的 40% 左右，并造成了 30% 左右碳排放，全球建筑物每年产生 86 亿 t 当量 CO₂，并预测到 2030 年这一数字将增至 156 亿 t 当量 CO₂。在发达国家中，建筑所消耗的能源一般占到总能源消耗的 40% 左右，产生约占总排放量 36% 的二氧化碳。而受人口增长、城市化和现代化进程影响，发展中国家的建筑物数量到 2050 年几乎将比现在增长 1 倍，其消耗的能源、资源及产生的碳排放也将达到惊人的程度。

建筑在整个生命周期中都存在能源资源消耗，并产生相应的环境影响。其中造成全球暖化的碳排放主要是由建筑材料设备生产的能源、资源消耗和使用阶段供暖、制冷、通风、照明、电器等设备的能源、资源消耗引起的。在我国，仅从主要建筑材料的角度测算，每建成 1 m² 的房屋建筑，就会造成平均大约 0.8 吨的碳排放；而使用阶段，我国建筑能耗也已经占到总量的 25% 左右^[3]。随着我国经济的发展，生活水平的提高，人们对房屋的性能、居住环境、舒适程度的要求

也提高,这对建筑提出“质”的要求;同时,我国的2013年的城镇化率已经提升到53.7%,城镇常住人口达到7.3亿人,城市化进程不断加快,建筑的建设需求不断增加,对建筑提出“量”的要求;“质”和“量”的双重要求,会造成建设规模的不断扩大和使用能耗的提高,造成更大的能源、资源消耗并产生更多的碳排放。据预测,在未来的几年中,我国建筑生命周期能耗(包括建筑材料生产、运输,建筑施工和运行、拆除等)将占到社会总能耗的40%-50%,超过工业、交通等其他行业,同时也意味着建筑生命周期的碳排放的总量及其所占比例也很有可能位居各行业之首。

全球的所有建筑中,住宅建筑所占的比例约占60%,其消耗的能源和产生的碳排放约占能源消耗总量和碳排放总量的20%^[4]。目前,中国的建筑业正以惊人的速度发展,每年新建建筑的竣工面积大于各发达国家每年新建建筑竣工面积之和,而且预计到2015年,全世界新建建筑中的50%将建成于中国^[5]。图1-7所示为我国1995年到2012年每年房屋建筑施工和竣工面积变化情况。截至2012年底,我国住房建筑总面积已达到472.45亿m²,城镇住房建筑面积达到约234.19亿m²。城镇住房建筑生命周期消耗的能源和产生的碳排放约占能源消耗总量和碳排放总量的20%-25%¹,其中仅新建住宅消耗的资源所排放的CO₂就达到我国全年CO₂排放量的8%左右²。

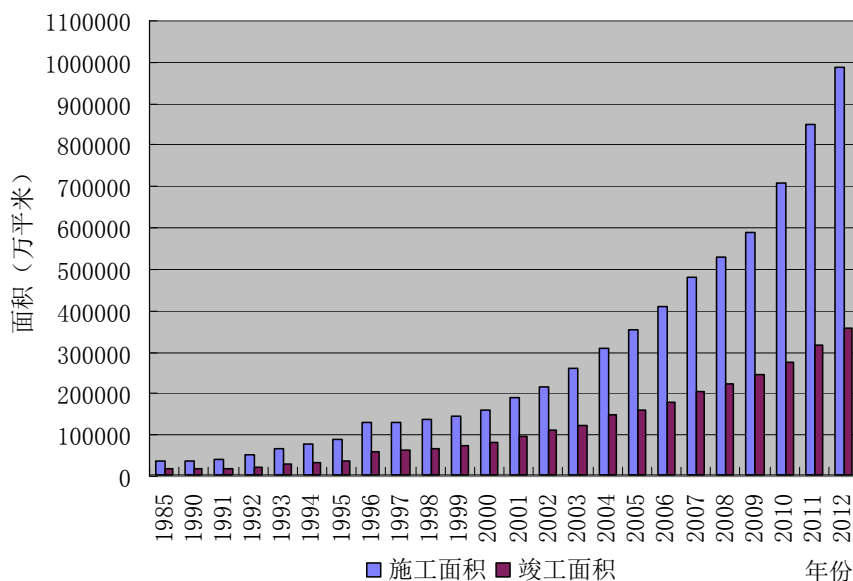


图 1-5 1995-2012 年我国房屋建筑施工及竣工面积

Figure 1-5 Area of Residential buildings under construction and completed

(数据来源: 中国统计年鉴 2013)

城市住区是我国城市居住建筑主要的建设型式,也是城市中最重要聚居形态。正在新建的城市房屋建筑中,住区建设型的比例达到70%以上,仅近五

¹ 数据来源: 根据中国城市科学研究会《绿色建筑2008》、《绿色建筑2009》、《绿色建筑2010》计算。

² 数据来源: 根据中国国家统计局发布的《2013年中国统计年鉴》数据计算。

年来有近 5000 个 5 万 m^2 以上的住区投入使用^[6]，而目前的既有住区中，只有不足 5% 采取了节能减排措施，约 95% 的既有城市住区属于高耗能高排放住区。巨大的住区建设量和保有量，造成了住区在建设和使用中巨大的资源能源消耗和碳排放，因此，城市住区的低碳减排成为我国建筑领域乃至整个国家应对气候暖化的重要领域之一。

为了应对低碳时代的挑战，应该在我国城市住区领域，充分利用新的减排思想、方法和技术手段，实现城市住区由高耗能、高排放、高污染向低能耗、低排放和低污染转变，从而实现我国城市住区的减排目标，推动整个建筑业和整个国家减排的工作的顺利开展。因此，城市住区领域的减排技术、方法和策略的研究，成为我国建筑领域减排探索和研究的重点领域。

1.1.2 研究课题的提出

城市住区生命周期碳排放在我国的碳排放总量中占有很大的比例。城市住区低碳减排是建筑低碳减排的重要部分，也是我国走向低碳经济，实现低碳排放的最为重要的领域之一，所以努力探索实现城市住区的低耗能、低污染、低碳排放，成为建筑业发展不可逆转的趋势。

城市住区的碳排放活动是一个复杂的系统，处在一定的自然、经济、社会、技术的外部环境中，从住区建设程序角度分析，住区由决策设计阶段、建设施工阶段、运行维护阶段等组成；从物质和能量的流动角度分析，住区经历一个资源开采、材料设备生产、施工、使用和处置再利用过程。这些阶段和过程相互联系、相互影响，构成了住区碳排放的整体。

住区低碳减排的实现，不仅是部分阶段和部分系统的低碳，也不是传统住区与低碳技术的简单叠加或组合，而是需要在利益相关者共同作用下，以住区生命周期碳排放目标为导向，以低碳理论、系统理论、生命周期理论为理论基础，采用技术、经济、政策等手段，综合考虑住区生命周期各阶段及利益相关者需求的协调统一，结合并运用住区利益相关者的知识和能力，才能实现住区生命周期碳低能耗、低污染、低排放的目标。

城市住区作为节能减排和应对气候暖化的重要领域，在国内外得到了广泛的关注，许多专家学者都对其进行了研究，取得了一定的理论成果。但是，在城市住区的实践中，其减排效果和成功率却并不尽如人意。许多标榜着低碳字眼的城市住区，仅仅是传统城市住区和“低碳技术”的简单叠加，或者单纯的沦落成为开发商吸引消费者眼球的噱头，并未实现住区功能满足前提下的减排最大，甚至造成生命周期碳排放的增加。城市住区的低碳研究和实践中存在的一些问题，主要包括：

(1) 城市住区碳排放计量问题。碳排放的计量是整个城市住区低碳研究的

基础。目前,对于碳排放的计算,成为目前低碳相关研究的重点。一些组织和机构推出了碳排放的计量的方法、规则 and 标准,主要应用于产品和组织层面。但是,作为一种特殊的建筑产品,城市住区投资大、生命周期长、利益相关者多、外部环境复杂,其碳排放计量的原则、计算方法、计算边界的确定都十分的困难。

(2) 城市住区低碳减排的评价问题。对于建筑/住区,一些国家和组织已经制定出多个生态、绿色建筑/住区评价体系,这些评价体系已包含了单一或部分阶段的碳排放指标和评价标准,对住区的节能减排及环境保护起到了积极的作用。但目前,针对住区碳排放的评价的阶段割裂、指标复杂,少有从住区生命周期及各阶段及各主要影响要素进行系统全面的研究。住区低碳评价方法和标准的缺失,使得住区低碳的认证、标识、监管体系无从谈起。

(3) 城市住区的低碳技术问题。低碳技术是住区低碳减排实现的基础,受低碳材料、技术、设备的制约。建材、技术、设备减排的相关研究和推广已取得一定成果,但仍少有从全寿命周期系统综合的考虑住区碳排放,也未能进一步对主要的碳源和碳汇的碳排放潜力进行研究。同时,现有的研究未能系统对主要建筑材料、技术、设备的生命周期碳排成本效益进行对比研究,无法系统的指导住区生命周期视角下的材料、技术和设备的选取。

(4) 建筑业碳交易问题。由于建筑业碳排放计量标准的缺失,因此无论是在国际还是国内碳交易市场,无论碳交易市场是强制性的还是自愿性的,建筑业都鲜有介入其中^[7]。没有利益的驱动,城市住区的利益相关者很难做到只为环境保护而建设、购买、使用真正意义上的低碳住区。

(5) 城市住区的低碳驱动力问题。城市住区的利益相关者众多,利益诉求不尽相同,有时甚至相悖,低碳驱动力不足,社会参与意识薄弱。从社会角度看,还没有充分认识到低碳住区的重要意义,缺乏低碳住区的基本知识和主动意识;从经济角度看,低碳住区的成本效益不明确,开发商、建筑商、消费者等利益相关者更关注建设期的成本增加,而忽视经济上的长期回报和环境、社会效益^[8]。

(6) 相关的法律法规及引导政策问题。目前虽然已有部分节能、绿色建筑的法律法规和引导政策,但尚特别未针对建筑碳排放考虑制定特定的法律法规和引导政策,进一步造成了利益相关者低碳驱动力较低的局面,严重阻碍城市住区的低碳发展。

城市住区低碳研究和开展是一项系统工程。首先,需要从住区的碳排放的计量开始进行,城市住区碳排放的计算思想、计算方法及计算模型是低碳相关研究的前提和基础。在目前的各中碳排放的研究中,源于生态足迹的碳足迹思想成为一种重要的研究思路,被应用于分析和计算一项活动、产品的整个生命周期、或者某一地理范围内碳排放活动的进程分析、碳排放边界的确定,碳排放量的计算

及不确定性分析等。因此,城市住区碳足迹的研究成为住区低碳研究的关键;其次,城市住区是否低碳及低碳程度如何评价,是制约住区低碳发展的另一瓶颈,因此,必须对住区生命周期、各阶段和各系统低碳程度进行评价;再次,住区的低碳发展主要目的是实现生命周期内的低能耗、低污染和低排放,所以,需要根据住区碳足迹和住区低碳评价的研究成果,明确住区生命周期的主要碳源、碳汇,分析、选择生命周期内减排潜力大的相关的材料、技术、设备,这成为实现住区低碳发展的重要保障;最后,住区要实现低碳目标一般会造成初期成本的增加,使得开发商和消费者等主要利益相关者对选择低碳的住区产生疑虑,尽管这些初期的低碳投入可能会使得生命周期费用的减少。所以,需要对住区低碳的成本和效益进行分析和研究,以坚定利益相关者的信心,共同促进住区的低碳发展。

基于以上观点,本文以生命周期理论为理论基础,结合系统理论、低碳理论、可持续发展理论、技术创新理论、成本效益理论,以城市住区碳足迹及低碳评价、低碳技术等策略为研究对象,以城市住区低碳健康有序发展为研究目标,提出“**城市住区碳足迹及低碳策略研究**”课题。

1.1.3 课题研究的目的和意义

以全球变暖为主要特征的全球气候变化,已成为 21 世纪人类面临的最重大环境挑战。探索低碳发展道路,是人类社会应对气候变化的重要选择。城市住区是我国城市结构中重要的聚居形态,规模大、分布广,在城市住区生命周期全过程需要消耗大量的能源和资源,并排放大量温室气体,对环境造成了巨大的影响。如何减少城市住区碳排放,促进城市住区的低碳建设和既有城市社区的节能低碳改造,成为建筑业发展的时代要求。

本课题研究的目的是对城市住区碳足迹和低碳策略进行研究,以解决城市住区低碳发展中面临的问题,推进城市住区节能减排和低碳发展。具体的研究目的包括:研究确定城市住区碳足迹的核算原则、计算方法和计算边界,构建碳排放清单和碳足迹计算模型,进行住区生命周期碳排放的计算;构建城市住区生命周期及其各阶段、各子系统低碳评价的方法和体系;研究确定住区材料、设备、技术的选取对住区生命周期碳排放的影响,确定住区的低碳技术体系;进行城市住区低碳成本和效益的分析,构建基于经济、环境和社会的低碳增量成本和增量效益模成本效益型,并对主要的低碳技术进行低碳成本效益分析。

本课题研究的意义在于:有利于推动低碳住区和低碳建筑相关研究的进一步发展;可以为城市住区的碳排放计算提供相关计算方法,为城市住区的减排措施的制定和选择提供相应的指导,为住区的低碳评价、认证、监督,住区低碳发展的相关法律法规和引导政策的制定提供相关参考,从而指导低碳城市住区的建设和既有城市住区的低碳改造;促进住区和建筑业碳交易市场的形成,促进城市住

区和整个建筑业利益相关者乃至整个社会的低碳意识增强,进而促进我国低碳建筑业和整个低碳经济和低碳社会的发展。同时,本课题研究对于其他建筑产品及其他领域产品和活动的碳排放的计算和减排策略的制定有一定的借鉴作用。

1.2 国内外研究现状 (Research Review at Home and Abroad)

1.2.1 城市住区碳足迹相关研究综述

碳足迹 (Carbon Footprint), 最初来自于生态学的生态足迹^[9] (Ecological Footprint), 是指能够持续地提供资源或消纳废物的、具有生物生产力的地域空间, 其含义就是要维持一个人、地区、国家或者全球的生存所需要的或者能够容纳人类所排放的废物的、具有生物生产力的地域面积。生态足迹估计要承载一定生活质量的人口, 需要多大的可供人类使用的可再生资源或者能够消纳废物的生态系统, 又称之为“适当的承载力”。碳足迹虽然起源于生态足迹的概念, 却有其特有的含义: 即考虑了全球变暖潜能 (GWP) 的温室气体排放量的一种表征^[10], 碳足迹的研究能够为产品和服务生命周期碳排放活动的分析和计算提供思想和方法, 已经成为目前的研究热点之一。

目前对于城市住区或住宅建筑碳足迹的研究主要集中在碳足迹的概念、研究边界、计算方法等方面。

(1) 城市住区碳足迹概念研究概述

目前对于城市住区的碳足迹, 国内外相关的系统研究较少, 仅有部分针对住宅、建筑部分系统或部分阶段的碳足迹研究。

对于传统的住宅或非住宅建筑而言, 使用阶段能源消耗占其生命周期耗能达到 80%-90%以上, 由此产生的碳排放占建筑生命周期碳排放的 70%-80%以上, 且排放源相对集中, 因此, 早期对于建筑产品的碳足迹概念的理解, 主要集中于对其在使用阶段由于能源消耗产生碳排放的分析和研究。近年来, 随着节能建筑、低能耗建筑、零能耗建筑的研究和实践, 建筑产品的物化能 (内能, 焓能) 可能占到建筑生命周期能耗和碳排放的 40%-50%以上, 同时随着生命周期理论的在建筑的研究和实践, 建筑产品碳足迹的概念延伸到建筑生命周期全过程,

郑忠海, 付林 (2010) 对建筑能源碳足迹进行研究, 认为建筑能源碳足迹是为城市人口提供一定的室内环境品质、生活水平和质量, 满足建筑供热、空调、炊事、生活热水和电力负荷需求所引起的煤、燃气、热力和电力等一次能源或二次能源消耗造成的碳足迹或所占用的生态足迹^[11]。魏小清等 (2011) 提出大型公共建筑碳足迹是指大型公共建筑全生命周期内温室气体总排放量, 也可称为大型公共建筑碳指纹。碳足迹分析所得的温室气体排放量以 CO₂ 当量表示, 故也称为碳排量^[12]。樊瑛, 龙惟定 (2009) 认为 HVAC 系统碳足迹指的是 HVAC 系统在运行

过程中的温室气体排放量,用CO₂当量表示^[13]。罗智星等(2011)认为建筑材料CO₂排放量为各种能源单位CO₂排放量、单位电量的CO₂排放量,分别与建筑材料生产过程中对应的能源消耗量相乘并求和,即可计算出建筑材料生产阶段的单位建筑材料CO₂排放量^[14]。另外,还有其他学者从建材生产、建造施工、运行维护、建筑拆除等角度进行了建筑部分阶段或生命周期的碳排放的统计分析或计算。

上述成果可以看出:建筑产品碳足迹的概念内涵上,目前还缺乏统一而明确的定义,建筑产品碳足迹的概念直接关系到其计算对象和计算边界等,是碳足迹计算方法的理论基础和约束条件。城市住区是一种特殊的复杂的产品,研究城市住区碳足迹应该从城市住区土地利用、建筑材料设备生产、运输、住区建设、住区运行使用及维护、住区拆除的城市住区生命周期内范围内分析和计算直接和间接二氧化碳排放量(二氧化碳当量排放量),可见在今后的研究应继续加强对建筑产品碳足迹理论体系的构建,不断充实并完善建筑产品碳足迹的概念内涵。

(2) 城市碳排放系统边界研究概述

碳足迹的系统边界确定的目的是定义其计算的范围,即哪些碳排放活动的输入和输出需要纳入碳足迹的分析和研究,就产品的碳足迹系统边界而言,需要确定的是其时间和空间的边界确定:时间角度上,就是要确定其生命周期的哪些阶段的输入和输出计入系统;空间角度上,就是要确定产品供应链上的直接和间接排放及其范围。

时间角度上,对于产品碳足迹的阶段进行划分,一般考虑从产品原材料的开采、制造、分销/零售、使用、处置/在利用等不同阶段分别进行研究,城市住区是一种特殊的建筑产品,其生命周期长、投资大、利益相关者众多,阶段划分更加复杂和繁琐。国内外学者也进行了相关的研究和探索。刘念雄(2009)等认为住宅建筑的全寿命周期可以分为建材准备、建造施工、建筑使用和维护、建筑拆卸4个阶段^[15]。Chen等(2011)将建筑的全生命周期分为了建设施工、装修、室外设施建设、运输、运行、废物处理、物业管理、拆卸和废弃物的处置总共9个阶段,并对每个阶段碳排放的可能来源进行了详细分析^[16]。张智慧等(2010)将建筑的生命周期概括为物化阶段、使用阶段和拆除处置阶段,并列出了各阶段碳排放的来源^[17]。Leif等(2010)分析了一个八层木框公寓大楼的生命周期初级能源使用和二氧化碳排放情况,将建筑生命周期分为采购和加工材料,现场施工,建设运行,拆卸和物料的处置四个阶段^[18]。Cole(1999)在将建筑的生命周期分为原材料生产、利用原材料建成建筑雏形、建筑的装修和维护、废弃及拆除四个阶段的同时,还将第一阶段划分为工人运输、材料运输、大型设备运输、定点施工设备消耗和建筑支持措施共5个部分,以研究不同性质建筑的碳排放结构^[19]。

Gerilla等（2007）忽略了原材料生产阶段，主要考虑了建设施工、维护、运行、废弃处理四个阶段^[20]。Bribian等（2009）根据住宅建筑的使用过程，将生命周期分为了生产、建设、使用和结束四个阶段，并且为了更简便地操作生命周期分析，将其直接概括为了建设和使用两大系统^[21]。

由上述成果可以看出：关于城市住区或者建筑系统的计算能耗和碳排放时的阶段划分研究还有很多，主要划分为以下几个阶段：材料设备生产阶段、运输阶段、建筑施工阶段、装饰装修阶段、使用运行阶段（维护）、拆除阶段、废弃物在利用阶段等，不同学者根据各自研究的思路、方法和重点，对阶段划分进行调整，以期满足各自的研究需要；但基于使用阶段耗能产生的碳排放比例最大的共识，对于各阶段的研究，又多集中在使用阶段。

对于产品碳足迹供应链上游相关过程中的直接和间接排放及其边界的确定，现有研究中存在以下两种的观点：一类观点是只有直接相关的排放量才应该被包括在内^{[22][23]}，因为包含间接排放可能引起重复计算^{[24][25]}且难以确定排放责任^[26]。

Matthews等（2008）核算了美国 491 个经济部门产品和服务的温室气体排放量，发现总体上直接排放仅占温室气体总排放量的 26%，大部分是间接排放^[27]。可见，仅考虑直接排放会低估与产品或活动相关的温室气体排放量，这种低估不利于减排技术、减排经济和减排政策的制订和实践。

另一类观点是碳足迹应当包括产品或活动在生命周期内直接和间接排放的温室气体量^{[28][29][30]}。为便于描述“直接”和“间接”排放源，同时也为避免重复计算，不同学者及研究机构提出了多种碳足迹清单^{[31][32]}。这些清单可归纳为范围逐渐增大的“层”：第一层包含产品或活动引起的直接排放，第二层包括因电力消费所引起的间接排放，第三层包括其他所有间接排放。分层的优点是便于研究者识别碳足迹的主要来源，从而制定相应的减排对策。

综上，对于建筑系统的计算边界确定，目前的研究多集中于直接能源消耗和电力能源消耗产生的碳排放进行，但从实践角度出发，住区碳足迹应当包含产品或活动整个生命周期内直接及间接排放的温室气体量，同时为便于分析应建立分层的碳足迹清单，详细的住区碳足迹边界的研究应进一步加强，以确保碳足迹研究的严谨和完善。

（3）城市住区碳足迹（碳排放量）的计算方法研究概述

现有文献主要采用了三种不同但相关的碳排放核算方法：投入产出分析，生命周期评价以及混合生命周期评价，目前混合法核算碳足迹的研究不多，现有文献中仅有挪威的研究人员利用该法对挪威特隆赫姆市（Trondheim）的碳足迹进行了核算^[33]。

1) 投入产出分析法

投入产出分析法主要通过编制投入产出表及建立相应的数学模型,反映经济系统各个部门(产业间)的关系。结合各部门的温室气体排放数据后,投入产出分析法可用于计算各部门为终端用户生产产品或提供服务而在整个生产链上引起的温室气体排放,是自上而下计算碳足迹的一种方法,以整个经济系统为边界,且核算碳足迹所需的人力、物力资源较少,适用于宏观系统的分析。目前,已有学者利用投入产出分析法对中国、美国、英国、澳大利亚以及全球的碳足迹进行了核算。

Michiya Suzuki等(1995)基于行业投入产出分类表计算出各类房屋建设的包括直接和间接影响的能源消费总量和二氧化碳排放量:钢筋混凝土结构 8-10GJ/m²,木质单家庭住房 3GJ/m²,轻钢结构单家庭住房 4.5GJ/m²,二氧化碳排放量是 850, 250 和 400kg/m²^[34]。Jonas Nassauen等(2007)使用自上而下的投入产出分析估计瑞典建筑部门主要的能源使用和CO₂排放,分析结果被分解到各个部门和活动,与先前使用生命周期评估过程方法的 18 个自下而上的研究做比较。建筑材料的生产和运输、建设活动都需要大量的能源消耗,排放相当多的CO₂^[35]。G.Q.Chen等(2011)提出低碳建筑的评估框架,利用投入—产出分析方法进行了计算,可以用于不同尺度的碳排放分析,也可以比较不同性质替代材料的碳排放量,对于进行碳排放规划至关重要,但要求有较为详细的碳排放数据库。

不过,由于投入产出分析法仅使用部门平均排放强度数据,因此不太适合用于分析城市住区这样的中微观系统,也无法进一步由研究结果进行具体的碳源碳汇分析、减排潜力分析及其经济技术评价等。

2) 生命周期评价法

生命周期评价指分析一项产品在生产、使用、废弃及回收再利用等各阶段造成的环境影响,包括能源使用、资源消耗、污染物排放等。该方法包含四个部分,分别是目标和范围定义、清单分析、影响评价和结果解释^[36]。生命周期评价是自下而上计算碳足迹的一种方法,分析结果有针对性,适合于微观系统的碳足迹核算。已有学者利用该方法对卫生设备、铲车、制水、小型社区、小型经济体及生物能源等进行核算^[37]。所以,生命周期评价的方法,成为研究产品和服务等中微观系统碳足迹的重要研究方法之一。

Leif(2006, 2010)对木质建材和混凝土建材生命周期的能源消耗和二氧化碳排放进行了比较,研究结果表明,多种因素影响建筑材料生命周期的能源消耗和二氧化碳排放,使用木材建造的,一般会降低能源使用和二氧化碳排放,使用的木结构建筑的材料代替混凝土,是减少化石燃料的使用和二氧化碳净排放的一种有效手段^{[38][39][40]}。

Jonathan等(2006)以伦多市的两个案例,分析比较高密度住区和低密度住

区在生命周期能源的使用和温室气体排放情况,研究结果表明低密度住区比高密度住区的单位面积能耗和温室气体排放高出 2.0-2.5 倍,并指出,应着眼于建设行动,采取针对性措施,减少住区的能源消耗,从而降低温室气体排放^[41]。

Frank Werner, Klaus Richter(2007) 根据现有研究成果,采用生命周期评估方法比较木材建筑产品与其他建筑产品的能耗和碳排放情况,研究结果表明其他材料相比,同等功能的木制建筑产品的化石燃料的消耗,温室效应和固体废物数量的潜在贡献往往是较小的^[42]。

T. Ramesh等(2010)应用全生命周期分析法对建筑生命周期能耗进行分析,包括建设、使用和拆除阶段。建设阶段包括建设和维修时材料和设施的制造、运输,使用阶段包括所有与建筑寿命期限相关的使用活动,拆除阶段包括摧毁建筑、运输拆卸材料^[43]。

Leif Gustavsson ,Anna Joelsson (2010) 分析传统和低能源住宅建筑生产和运行阶段的主要能源使用和CO₂ 排放以及不同类型的能源供应系统。对于传统的和低能源建筑,用于生产的主要能源使用分别占总量构成 45%和 60%的比例。木质结构建筑中用于生产的能源和CO₂ 排放比混凝土结构的房屋要低^[44]。

J. Monahan, J.C. Powell (2011) 应用生命周期评估方法对英国诺福克市(Norfolk) 一种现代房屋施工方法的房屋内能和内碳进行了案例分析,研究结果表明,新型的木质建筑施工方法碳排放量为 3 居室的独立房屋每平方米内碳为 34.6 吨,每平方米使用碳排放为 405 吨,与传统的钢筋混凝土结构相比内碳减少 34%^[45]。

Gian Andre等(2010)采用生命周期评估的方法对意大利北部兴建的低能耗住房进行了详细的生命周期评估。研究结果表明在低能耗建筑系统中嵌入式材料消耗的能源和排放的温室气体最多,但对使用阶段的节能和减排发挥了重大作用。建设过程中和运输、植物的能源消耗和温室气体排放的贡献是次要的^[46]。

N. Huberman, D. Pearlmuter(2008)分析了以色列内盖夫沙漠地区建筑材料产品的全生命周期能量,目的是为了分析建筑物材料的选择对使用阶段耗能的影响,以及材料内能与使用阶段耗能的关系^[47]。

Mari'a Jesu's 等(2006)将建筑的生命周期分为材料及制品的生产,施工建设,装修,使用,拆除。并对案例建筑进行分析,结果显示,在施工阶段,通过精心挑选的低环境影响的材料可以减少生命周期 30%二氧化碳排放量^[48]。

Jacob N.Hacker等(2008)研究建筑材料和运行的碳排放,忽略来源于建筑生命周期其他阶段的碳排放,研究结果表明,运行阶段的碳排放集中于设备的能源使用^[49]。

B.V. Venkatarama Reddy (2009) 通过比较古代、近代、现代不同材料的耗能

及碳排放,发现当前的建筑材料使用模式存在缺陷,指出可从建筑材料入手,关注建材的耗能、自然资源与原材料的消耗、材料的回收与利用及其对环境的影响等方面减少碳排放,使用低能耗的建材能减少 50%的建筑自含能^[50]。

中国台湾的一些学者较早的进行了建筑生命周期评价的研究,主要有国立成功大学林宪德及其研究生,主要研究对象和内容如表 1-1 所示,其中又以张又升、黄国仓的研究为代表。

表 1-1 林宪德研究团队关于建筑系统碳排放的研究情况

Table 1-1 Research status of Building system Carbon emission by Lin Xiande's Research team

作者	时间	研究对象	建设阶段			使用阶段		拆除阶段		
			建材生产	运输	施工	日常使用	维护更新	拆除	废弃	回收
黄国仓	2006	建筑主体	√	√	√	√	√	√	√	√
曾正雄 ^[51]	2006	建筑设备	√	√						
赵又婵	2004	室内装修建材	√	√	√	√				
林建隆	2003	建筑设备	√		√	√	√			
张又升	2002	建筑主体	√	√	√	√	√	√	√	√
欧文生	2000	室内装修建材	√	√	√		√			
张又升	1997	建筑主体	√	√	√	√				
杨煦照	1996	建筑主体	√	√	√	√				
刘汉卿	1994	建筑主体	√	√	√	√				

(资料来源:根据相关文献整理)

张又升(2002)对台湾的建筑物进行生命周期的评估分析结合基础资料统计,建立了台湾建筑物生命周期CO₂排放量评估法的计算流程与评估公式,用于预测不同规模与建筑类型的RC建筑物躯体的CO₂排放量,以CO₂排放量探讨建筑物的环境影响程度。在对案例的分析中,发现台湾建筑物新建工程的CO₂排放比例偏低,而日常使用能源的CO₂排放比例偏高,给出台湾建筑生命周期减排的重要部分是日常节能措施^[52]。

黄国仓(2006)构建了办公建筑完整生命周期CO₂评估系统,使得建筑从业人员在建筑设计阶段即可估算建筑物对地球环境影响程度.其中建筑的日常能源使用部分,以理论的数学方法估算各种建筑设备系统的全年能耗量以换算成全年CO₂排放量。经计算,办公建筑日常能源使用阶段所占CO₂排放量比例的 80%以上,是所有各阶段的最大者,得出进行建筑日常节能是建筑部门最重要最有效的CO₂减量对策^[53]。

Qingyuan Zhang(2004)分析了中国七个气候地区和加热度日之间的关系,并于日本,加拿大、美国的的城市住宅每户每年(UEC)的能源消耗进行了对比,研究的结论显示:1) 1997 年中国的城市地区UEC的值是 11 和 24 之间的GJ每年每户;2) UEC的二次能源基础趋于减少,而同时对一次能源的基础上不断增长;3) 1997 年中国的城市住宅的平均UEC的 17.2GJ,分别是日本,美国和加拿大约

的 39%, 16%和 12%^[54]。

陈滨等(2005)利用生命周期评价方法,计算出了 1999 年我国住宅中由于家用电器的使用、冬季集中供暖及农村生活能源消费所造成的温室气体排放量。通过数据分析得出住宅中主要能源消耗所产生的,排放量约占全国总排放量的 34.34%^[55]。

刘博宇(2008)选取上海地区住宅平面中的 5 类典型问题—体系系数问题、平面开槽问题、功能复合问题、厨卫间距问题和卫生间功能问题—作为研究对象,提出住宅碳排放的具体计算方法,并计算得出相应的碳减排效果^[56]。

李沁等(2009)分析了重庆地区住宅建筑能源消费引起的碳排放,指出建筑碳排放主要源于使用阶段的能源消耗,利用灰色理论对重庆住宅建筑使用阶段用水、空调使用等能耗的定量分析,得出重庆住宅使用阶段由建筑能耗产生的碳排放的预测模型^[57]。

樊瑛,龙惟定(2009)介绍了 HVAC 系统碳足迹的分析方法,并采用生命周期分析的方法,计算了 HVAC 系统使用阶段由能源使用产生的碳足迹,提出了评价 HVAC 系统对环境影响程度的两个指标:碳排放量和单位输出能量的碳排放量^[13]。

汪静(2009)采用生命周期评价框架,结合我国实际情况和建筑活动各阶段的情况与特点提出了城市住区生命周期 CO₂ 排放评价方法,并在此基础上,运用基于过程的 CO₂ 排放清单分析,对住区建筑在其生命周期各阶段的 CO₂ 排放情况及重要影响因素进行研究,建立建筑物生命周期 CO₂ 排放模型^[58]。

刘念雄等(2009)研究了中国城市住区寿命周期 CO₂ 排放情况,综合考虑住区住宅建筑排放量和绿地吸收量,提出计算方法,并以北京为例选择典型多层住区单元地块进行计算,讨论减排方法和减排潜力^[35]。

刘君怡(2010)研究了夏热冬冷地区低碳住宅的碳排放情况,建立了建筑全生命周期能耗的数学模型,提出各阶段的 CO₂ 排放数学模型,然后通过案例分析,对比传统方式和工业化方式在建造阶段带来的 CO₂ 排放差异^[59]。

Hui Yan等(2010)定义了来源于建筑材料制造和运输、施工设备的能源消耗、加工资源的能源消耗、建筑废物处理四个方面的碳排放,建立了碳排放的计算方法,并对香港建设案例进行研究。研究结果表明,建筑材料制造、建筑材料的运输、施工设备的能源消耗的碳排分别占上述四个方面碳排放总量占中建筑材料中的碳排放量的 82-87%, 6-8%, 6-9%。结果还表明,所有建筑材料内能产生的碳排放中,混凝土和钢材占到 94-95%,所以使用再生建筑材料,尤其是钢筋,将减少相当数量的碳排放量^[60]。

李海峰(2011)从全生命周期的角度,对建筑的 CO₂ 排放量的计算方法进行研究,并选取上海市实际住宅案例进行计算。计算结果表明,案例住宅单位建筑面

积年CO₂ 排放量为 22.8 kgCO₂/(m² · y)^[61]。

李兵等(2011)采用欧盟的温室气体盘查议定书(ENCORD)的碳足迹评价标准,对建筑施工中的碳源进行了归类整理,提出了基于BIM及相关软件的建筑施工碳排放测算方法,详细介绍了碳排放测算步骤^[62]。

尚春静等(2010)基于生命周期评价理论界定了建筑生命周期碳排放的核算范围,建立了建筑生命周期碳排放的核算模型。选取北京地区钢筋混凝土结构低层住宅作为案例研究,对其生命周期碳排放进行了测算^[63]。

蔡向荣等(2010)从建材的生产,运输、建筑施工、正常使用、拆除以及拆除以后废弃物的处理等方面,对住宅建筑的能源消耗、CO₂ 排放量及节能减排的措施和潜力进行了分析,归纳了建筑能耗的类别并对其进行了解析。分析结果表明,住宅建筑在使用阶段和建材生产阶段的能耗和碳排放量占建筑总能耗和总碳排放量的 90%以上,而且这 2 个阶段的能耗和碳排放量均具有较大的节能减排潜力^[64]。

燕艳(2011)在生命周期评价法,结合浙江省的建筑案例建立了浙江省建筑生命周期能耗和CO₂ 排放清单数据库和评价体系框架,探讨不同类型建筑不同阶段的能耗和CO₂ 排放特点^[65]。

Fang You等(2011)对城市建筑系统碳排放进行了分析,将城市建筑系统生命周期划分为材料制备、建筑施工、装修、建设运作、房屋拆迁以及废物处理与回收等阶段,采用生命周期评估方法,建立城市建筑系统生命周期碳排放模型(LCCE),选取砖混建筑和钢筋混凝土建筑为主要研究对象,确定了二氧化碳排放的四种主要来源,即工业过程排放、能耗、无组织排放的温室气体排放和土地足迹的排放。研究结果表明,后者比前者单位面积产生更少的二氧化碳排放。具体来说,二氧化碳排放量分别为每 100 平方米 329.61 吨和 315.79 吨。在城市建筑体系生命周期中大多数二氧化碳排放来自能源消耗和土地占用,分别占排放总量的 78-83%和 13-20%。根据建立的LCCE模型,认为减少城市建筑的生命周期二氧化碳排放量的关键是根据当地城市发展的特点加强建设废物回收利用,改善能源和材料消费模式,建设中等容积率建筑系统,优先使用自然能源和生态友好的建筑材料^[66]。

由上述成果可以看出:国内外采用生命周期评估方法进行的碳足迹研究中,由于对生命周期的划分不同,所以生命周期碳排放的计算方法也不尽相同,造成各种方法差别的原因还包括建筑类型(主要集中在木结构、轻钢结构、混凝土结构等)、碳排放源清单的详细程度,以及生命周期考虑的因素等,国内的对建筑单体、住宅单体、部分建筑系统进行了分析和计算,并针对部分特定的气候分区进行了研究;台湾的相关研究则主要建立在台湾地区大量的施工和使用阶段住区

或其他建筑相关系统上进行的，并建立了碳排放与结构类型、建筑面积、建筑高度等指标的回归方程，用于指导台湾地区的碳排放研究；国外一些研究则主要针对木质结构的单体建筑/住宅、低耗能建筑/住宅，并与普通的钢筋混凝土结构的建筑/住宅进行对比分析。

上述研究表明：对于建筑系统生命周期的碳排放主要集中在使用阶段，因为使用阶段的时间较长（一般认为 50-70 年），其排放比例可能达到 50%-90%；同时对于采取了低碳、节能等措施的建筑，其前期物化阶段的碳排放比例会有所提高，甚至有可能达到总量的 40-50%以上，但其生命周期耗能和碳排放的总量却会大幅减少；不同的建筑结构类型对建筑的碳排放可能存在很大的影响，在典型的建筑结构类型中(木结构、轻钢结构、混凝土结构等)，研究发现，同等功能的情况下，碳排放从小到大依次为木结构、轻钢结构、混凝土结构；同时生命周期评价法存在边界问题，即只有直接的和少数间接的影响被考虑在内，结果可能存在截断误差，且为获取详细的清单数据，投入的人力、物力资源较大^[67]。

（4）城市住区碳足迹相关研究的综合评述

国内外大量研究表明：目前对于碳足迹的研究已取得了丰富的成果，被广泛应用于分析企业、组织和服务的碳排放分析和计算中。建筑产品生命周期长、投资大、碳排放计算边界复杂，利益相关者众多，目前为止尚未建立统一的建筑碳排放的计算方法、规则、标准；对已有的关于城市住区或建筑碳足迹或碳排放的研究中，对于生命周期划分、计算边界确定、计算规则、碳排放清单数据库、计算模型等，虽然已有初步成果，但多处于初步阶段，未能系统对建筑系统尤其是城市住区碳足迹进行系统全面的研究，不利于减排策略和措施的制定，制约了城市住区减排的发展。

1.2.2 国内外建筑环境评价体系综述

20 世纪 90 年代以来，世界各国都发展了各种不同类型的建筑环境影响评价体系，国外比较有代表性的建筑环境影响评价体系和标准有英国建筑研究所(BRE, The Building Research Establishment)推出的“建筑环境评价方法”(BREEAM, BRE Building Environment Assessment Method)、美国绿色建筑委员会(USGBC, U.S.Green Building Council)的“能源与环境设计先导的绿色建筑评估体系”(LEED, Leadership in Energy and Environmental Design, LEED)、澳大利亚国家建筑环境评价系统(the National Australian Build Enviroment Ration System, NABERS)由加拿大发起，多国参与的“绿色建筑挑战”(GBC, Green Building Challenge)运动的 GBtool，国内的《绿色建筑评价标准》、《中国绿色低碳住区技术评估手册》、《台湾绿建筑解说评估手册》等体系和标准等，本文选取有代表性的几个评价体系进行分析比较。

(1) 国外建筑环境评价体系综述

1) 英国建筑能耗评价体系

英国建筑研究组织环境评价体系 (The Building Research Establishment Environmental Assessment Method, 简称 BREEAM) 是由英国建筑研究组织 (the Building Research Establishment, BRE) 和一些私人部门的研究者于 1990 年共同制定的, 是世界上第一个绿色生态建筑评价体系。其基础是根据环境性能评分授予建筑单体绿色生态认证。

为了易于被理解和接受, BREEAM 采用了一个相当透明、开放和相对简单的体系构架。所有的评价条款分别归类于不同的环境类别, 包括对全球、区域、场地和室内环境的影响。评价体系包括 8 大方面, 具体评价内容及其所占的权重如表 1-2 所示。从表中可以看出, 能源的消耗量是衡量建筑绿色与否的最主要因素。在 EcoHomes 中能源方面比例占 22%, 并将二氧化碳排放作为能源项的独立指标, 对 $-10\text{kg}/\text{m}^2/\text{year}$ — $40\text{kg}/\text{m}^2/\text{year}$ 之间的具体值给出对应的评分, 并赋予其 13.75 的最高分。

表 1-2 Ecohomes 中的评价项目及认证标准^[68]

Table 1-2 Evaluation items and attestation standard in Ecohomes

评价项目	权重	评价内容
能源	22%	二氧化碳排放、围护结构性能、干燥空间、白色产品、室内照明、室外照明
材料	14%	对环境的影响、基本建材、装修建材来源可靠性、家庭垃圾回收利用
康居	14%	天然采光、隔声状况、私密空间
土地使用及其生态性	12%	生态价值、生态价值的提高、保护基地生态特色、生态价值的改变、建筑的生态足迹
水资源	10%	室内饮用水利用、室外水利用
污染	10%	保温材料、氮氧化物排放量、雨水表面流失量、可再生和低污染能源利用、减轻泛洪的危险性
管理	10%	居室用户指南、施工建造、建造对基地的影响、安全性
交通	8%	公共交通、循环存储器、服务设施、总机构
认证标准	合格 (Pass 36 分)、良好 (Good 48 分)、优良 (Very Good 58 分)、优异 (Excellent 70 分及以上)	

虽然 BREEAM 确定了二氧化碳排放量作为衡量建筑单体是否绿色的重要地位, 但并没有针对二氧化碳的排放做更详细的分解。因此, 为了评价住宅能耗及 CO_2 排放对环境的影响, 1993 年, 基于 BRE 的家庭能量模型 (Domestic Energy Model, BREDEM), BRE 与英国环境食品与农村事务部 DEFRA (the Department for Environment, Food and Rural Affairs) 共同开发了对于新建住宅的能耗标识标准评估程序 (The Standard Assessment Procedure, SAP) 以及对于既有住宅能耗标识的简

化标准评估程序(Reduced Data SAP, RDSAP)。SAP 是英国政府对能源的住房等级标准评估程序,是英国政府作为建筑能源性能计算的一部分,集住宅采暖、照明、通风、热水供应于一体。经过 1994、1996、1997 年几次的补充修改,相继推出了“SAP1998”及“SAP2001”版本。目前最新的版本为 2008 年进行再度修改完善的“SAP2005”,评价指标及评价方法如表 2.5 所示。在指标的设置上,采用“基于 CO₂ 排放的环境影响率”和“住宅 CO₂ 年排放率”两个指标替代原有的“CO₂ 指标”。同时,为了适应不同的住宅建筑形式,评价指标均以单位建筑面积作为评价计算的基础。其中,对于能源消耗量的计算方法是通过 BRE 推出的一款 SAP 计算软件,考虑了一系列能源消耗的影响因素,包括住宅所使用的材料、保温隔热性能、通风性能及通风设备、采暖效率、太阳辐射吸收量、用于热水供应、通风、照明的燃料以及新能源技术的使用等。

表 1-3 SAP2005 中的评价指标与评价方法^[69]

Table1-3 Evaluation indexes and methods in SAP2005

评价指标	评价方法
单位建筑面积能源消耗量	对单位建筑面积的采暖、热水供应、通风、照明以及新能源的利用等进行计算,单位 kg/m ² /year,用于评价建筑是否满足建筑标准的要求
住宅 CO ₂ 年排放率	
能效率	基于每平方单位建筑面积的性能评价,百分制进行打分,100 代表能源零消耗,表明分值越高所消耗的能源越少,对环境的影响越小
基于 CO ₂ 排放的环境影响率	

目前,SAP 仅适用于英国新建住宅和既有住宅能耗的评价,并且随着当前建筑形式的多样化以及新型应用技术的开发与利用,SAP 计算数据的缺失使得能耗计算不再准确。例如,在对起居室的计算中,SAP 中的计算是基于传统的设计方法进行计算的,而对于新型的采暖形式等则无法进行度量。

2) 美国能源之星计划 (ENERGY STAR) 及 LEED 评价体系

为了遏制能源的过度使用,推广高效的生产、生活方式,美国环保署 (EPA) 自 1992 年开始组织实施自愿性能效标识制度——能源之星计划 (ENERGY STAR),旨在通过更有效利用能源的途径来减少温室气体的排放和其他污染,同时帮助消费者鉴别和选购更为优良的节能型产品。自 2011 年 1 月 1 日起,能源之星计划要求任何有意参与该计划的产品在贴上能源之星标志之前,必须接受指定第三方认证机构的验证,客观地对产品节能效果进行评估,以更好推动能源之星项目的开展。最新的能源之星住宅性能标识程序如图 1-6 所示。



图 1-6 能源之星住宅性能标识认证程序

Figure1-6 The procedure of Energy Star in building function identification

能源之星住宅性能标识通过对比样板房,以及对新建住宅的现场检测,通过住宅能源评价系统(HERS)来确定住宅的能源效率分值,对新建住宅的能源效率进行客观、标准的评价。在HERS的计算中,将现场检测的结果,连同住宅的其他信息,输入计算机模拟程序中以计算出HERS分值,并估算出每年的能源费用。HERS分值实行百分制,样板房的标准分值是80分,与样板房相比,每降低5%的能源消耗,HERS增加1分。要获得能源之星标识的住宅,HERS最低为86分。获得能源之星新建住宅比按通用的标准建造的住宅节能30%。

能源及环境设计先导计划(Leadership in Energy and Environmental Design,简称LEED)是美国绿色建筑委员会(USGBC)于1995年创建的评价体系。2009年LEED推出最新的LEED V3版,如表1-4所示,通过“建筑场地的可持续性、水资源有效利用、能源与大气环境、材料和资源、室内环境质量、设计创新和区域性”七大项对新建建筑进行评价,并提高了环境管理、节水、能源与大气的评分项权重,其中,能源与大气环境的评分权重由原来的25%上调到35%。然而,在能源与大气环境项目中,LEED仅将氟氯烃(CFC)排放量作为影响大气质量的主要考虑因素,并未重视二氧化碳对气候环境造成的影响。

表 1-4 LEED 2009-NC 对新建建筑的评价项目及认证标准

Table 1-4 Evaluation items and attestation standard in LEED 2009-NC

评价项目	权重	前提项	得分项
建筑场地的可持续性	26%	工程建设污染防治	建筑选址、建筑密度和社区连接性、褐地开发、交通运输、场地发展保护、强降雨设计、城市热岛效应、减少光污染
水资源有效利用	10%	节水	节水景观设计、废水回收利用技术、节水
能源与大气环境	35%	建筑能源系统的基础代理;最低能源消耗;基础制冷设备管理;	优化能源利用、可再生能源利用、其他代理、提高制冷设备管理、测量与校核、绿色电力
材料和资源	14%	可回收物质的存储与收集	旧建筑改造、施工废弃物管理、材料回收利用、可循环材料利用、就地取材、快速再生材料利用、使用经过认证的木材
室内环境质量	15%	满足室内空气质量最低要求;环境中烟草烟雾控制	室外空气检测、提高通风效率、施工阶段室内空气质量管理计划、低挥发材料、室内化学品和污染源控制、照明和热舒适系统可控制度、热舒适度、自然采光和视野
设计创新	6%		设计创新、LEED 认证的专家
区域性	4%		本土区域性差异
认证标准	合格(Certified 40-49分)、银奖(Silver 50-59分)、金奖(Gold 60-79分)、白金奖(Platinum 80分及以上)		

3) 德国建筑能耗评价体系

2008 年,德国交通、建设与城市规划部和德国可持续建筑协会共同参与制定,推出了可持续建筑评估技术体系—DGNB (Deutsche Guetesiegel Nachhaltiges Bauen)。DGNB 体系包括生态质量、经济质量、社会文化及功能质量、技术质量、过程质量、场地质量 6 个方面,以保护自然环境、降低生命周期成本、保护健康和社会文化为目标,充分体现了建筑的自然价值、经济价值和社会价值。DGNB 评价内容及评价标准如表 1-5 所示,最终的评价结果分为金银铜三级,并以罗盘状图形反映,直观地显示了被评价建筑各项的达标情况。

表 1-5 DGNB 评价项目及认证标准

Table 1-5 Evaluation items and attestation standard in DGNB

评价项目	权重	评价内容
生态质量	22.5%	全球温室效应的影响、臭氧层消耗量、臭氧形成量、环境酸化形成潜势、化肥成分在环境含量中过度、对当地环境的影响、其他对全球环境的影响因素、小环境气候、一次性能源的需求、可再生能源所占比重、水需求和废水处理、土地使用
经济质量	22.5%	全寿命周期的建筑成本与费用、第三方使用可能性
社会文化及功能质量	22.5%	冬季的热舒适度、夏季的热舒适度、室内空气质量、声环境舒适度、视觉舒适度、使用者的干预与可调性、屋面设计、安全性和故障稳定性、无障碍设计、面积使用率、使用功能可变性与适用性、公共可达性、自行车使用舒适性、通过竞赛保证设计和规划质量、建筑上的艺术设施
技术质量	22.5%	建筑防火、噪音防护、建筑外围护结构节能及防潮技术质量、建筑外立面易于清洁与维护、环境可恢复性,可循环使用,易于拆除
过程质量	10%	项目准备质量、整合设计、设计步骤方法的优化和完整性、在工程招标文件和发标过程中考虑可持续因素及其证明文件、创造最佳的使用及运行的前提条件、建筑工地,建设过程、施工单位的质量,资格预审、施工质量保证、系统性的验收调试与投入使用
场地质量*		基地局部环境的风险、与基地局部环境的关系、基地及小区的形象及现状条件、交通状况、临近的相关市政服务设施设施、临近的城市基础设施
认证标准	铜级 (50%以上)、银级 (65%以上)、金级 (80%以上)	

为了对建筑 CO₂ 排放量给出一个定量值,在 DGNB 体系中以每年每平方米建筑排放二氧化碳当量的公斤数为单位,计算建筑全寿命周期的碳排放总量,主要表现在建筑的材料生产与建造、使用期间能耗、维护与更新、拆除和重新利用四大方面。但由于其计算的复杂性,该体系还未在世界范围内得到有效的推广应用。从以上 DGNB 四大方面的计算方法中可以看出,除了使用期间能耗,其余三大方面的计算方法都是相类似的。无论是在建造阶段、维修阶段,还是拆除阶段,首先都是对建筑各构成材料进行详细的分解和分类,再通过与相应数据库的比较,求得各材料的二氧化碳排放量。在这一过程中最为困难的,就是相关数据库的形成,需要以大量的实验及调研数据为基础,这个工作量是极其巨大的。

我国目前就缺乏此类相关的数据库，因此在现阶段我国要从全寿命周期角度出发，对构成建筑的各材料和设备二氧化碳排放量进行计算还很困难，缺乏规范性和系统性。

4) 欧盟《建筑能效指令 2002/91/EC》

为了实现建筑的节能减排，欧盟委员会在 2003 年发布了《建筑能效指令 2002/91/EC》。根据建筑能效指令中关于建筑能效证书的相关规定，从 2006 年起，所有建筑在出售或出租前必须提供建筑能源护照。建筑能源护照是对建筑物能耗进行评估，并标明相应的等级划分的证书。同时，在建筑能源护照中还包含有关于一次能源消耗和 CO₂ 排放量的内容并根据建筑的能耗情况，提出一些优化的节能建议。建筑物的能耗使用欧盟 25 个成员国统一的计算方法进行计算，考虑了引起建筑耗能的所有因素，包括建筑维护结构、供暖设备、所采用的能源等，计算得到以建筑每平方米一次能耗为基础的建筑物能耗指标，并根据能耗指标对建筑物进行能耗分级。其中，对于 CO₂ 的排放量是根据建筑能耗进行定性的评价，分为较低、低、中等、高、较高五个等级，反映了建筑对环境的影响程度。

(2) 国内绿色建筑评价体系

1) 中国《绿色建筑评价标准》

2006 年 3 月，由住房和城乡建设部与国家质检总局联合发布了工程建设国家标准《绿色建筑评价标准 GB/T50378-2006》，是我国第一部从住宅和公共建筑全寿命周期出发，多目标、多层次，对绿色生态建筑进行综合性评价的国家标准。

《绿色建筑评价标准》的指标体系由节地与室外环境、节能与能源利用、节水与水资源利用、节材与材料资源利用、室内环境质量和运行管理六大指标组成，每类指标分为控制项、一般项和优选项。在对建筑进行评价时，评价标准不采用打分的形式，而是在必须满足所有控制项的基础上，按满足一般项数和优选项数的多少将绿色建筑划分为一星级、二星级和三星级。划分标准如表 1-7 所示。

表 1-7 住宅建筑划分绿色生态等级的项数要求

Table 1-7 The requested residence building number of green ecosystem grade

等级	一般项数（共 40 项）						优选项数（9 项）
	节地与室外环境（共 8 项）	节能与能源利用（共 6 项）	节水与水资源利用（共 6 项）	节材与材料资源利用（共 7 项）	室内环境质量（共 6 项）	运行管理（共 7 项）	
一星级	4	2	3	3	2	4	—
二星级	5	3	4	4	3	5	3
三星级	6	4	5	5	4	6	5

为了更好地实行《绿色建筑评价标准》，引导绿色建筑健康发展，2007 年 11 月，《绿色建筑评价技术细则》发布，系统地总结了国内外绿色建筑的实践经验，

从三个层面上——为绿色建筑的规划、设计、建设和管理提供更加规范的具体指导，为绿色建筑评价标识提供更加明确的技术原则，为绿色建筑创新奖的评审提供更加详细的评判依据，推进绿色建筑理论和实践的探索与创新，其内容既有符合中国国情的一面，也有与国际绿色建筑发展趋势相适应的一面，具有较好的适应性及先进性。

目前我国的绿色建筑标准已较为成熟，但是大多数标准更多的是以作法为导向，体现了技术层面上的指导用，在实践过程中一味的追求达标项数容易产生绿色却高耗能的建筑。同时，虽然节能减排也是绿色建筑很重要的一个方面，但在绿色建筑标准的评价指标上，大多采用的是定性评价的方法，没有针对二氧化碳排放进行定量计算。因此，为了满足低碳建筑对二氧化碳定量的需求，构建一个适用于低碳建筑的评价体系势在必行。

2) 中国《绿色低碳住区技术评估手册》

2011 年 5 月，全国工商联房地产商会正式发布了《中国绿色低碳住区技术评估手册》这是国内首个“低碳住区标准”，共分三个部分，第一部分为绿色生态住区评估体系，继承了第《中国生态住宅技术评估手册》（第四版）的评估体系；第二部分为绿色低碳住区减碳评价，包括建筑节能及相应的 CO_2 减排量、住区节水及相应的 CO_2 排放指标、住区绿化系统对 CO_2 的固定量、低碳交通及对应的 CO_2 减排量、住区运行期低碳评价、住区建造期（仅考虑材料生产阶段）低碳评价，并设定了相关基准值；第三部分为绿色低碳住区评价技术指南，包括绿色生态评价和减碳量化评价两部分，以住区使用阶段每年每平方米的综合减碳量为评估指标，综合减碳量达到 $20\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 为 AAA 绿色低碳住区，综合减碳量达到 $16\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 为 AA 绿色低碳住区，综合减碳量达到 $12\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 为 A 绿色低碳住区。中国绿色低碳住区技术评估体系如表 1-8 所示。

表 1-8 中国绿色低碳住区技术评估体系分析

Table 1-8 The analysis of China Low-Carbon settlements technical assessment system

绿色生态住区生态评价		绿色低碳住区减碳评价		
		建造期评价	运行期评价	评价等级
必要条件审核	住区规划与环境	仅考虑建材 减碳量 (单独考虑)	节能及相应的减排量 节水及相应的减排量 绿化及相应的减排量 交通及相应的减排量	A 级：减碳量 $20\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;
规划设计阶段	能源与环境 室内环境质量			B 级：减碳量 $16\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;
验收阶段	住区水环境 材料与资源 运行管理			C 级：减碳量 $12\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

中国工商联合会房地产商推出的《中国绿色低碳住区技术评估手册》评价

内容和减排指标，来源于中国工商联合会房地产商会对国内一些采取减排策技术的住区统计分析而得出并制定的，仅针对材料生产和住区使用阶段进行评价，对于其余阶段未予考虑。

3) 绿色建筑解说评估手册 (EEWH)

1999 年，台湾地区为了推动绿色生态建筑政策制定了《绿色建筑解说评估手册》，以绿化、基地保水率、日常节能、二氧化碳减少量、废弃物减少量、水资源、污水垃圾改善 7 大指标，作为绿色生态建筑草创期的评价体系指标。随着人们对居住舒适性及生态性要求的提高，2003 年，相关部门建筑研究所对原指标的内容进行了增改，新增了生物多样性和室内环境 2 项指标。同时，将内容属性相近的指标进行整合，归纳为生态 (Ecology)、节能 (Energy Saving)、减废 (Waste Reduction)、健康 (Health) 四大领域，简称 EEWH 评价体系，如表 1-6 所示。

表 1-6 EEWH 评价项目及认证标准
Table 1-6 Evaluation items and attestation standard in EEWH

评价项目	权重	评价内容
生态	27%	生物多样性 (生态网络、小生物栖地、植物多样性、土壤生态)
		绿化量
		基地保水
节能	28%	日常节能 (建筑外壳节能、空调系统、照明系统)
减废	18%	CO ₂ 减量
		废弃物减量
健康	27%	室内环境 (声环境、光环境、通风换气、室内材料)
		水资源
		污水垃圾改善
认证标准	合格级 (22-30 分)、铜级 (31-36 分)、银级 (37-42 分)、黄金级 (43-53 分)、钻石级 (53 分以上)	

在认证标准上，最初的 EEWH 评价体系采用的是分项评价的方法，将每一项的评价结果与基准值进行比较，只要其中 4 个指标达标即为合格。因此，最初的 EEWH 评价体系只能用以评定建筑是否符合“绿色生态”的基本要求，而不能评判合格建筑物之间的优劣。通过不断的研究更新，2005 年，EEWH 通过制定 9 大指标综合计分值及权重比例，建立了最新的“绿色建筑分级方法”与“绿色建筑创新科技优惠评估法”，以综合评价最高分 100 分，合格最低分 22 分，将建筑分为合格级、铜级、银级、黄金级和钻石级五级。

EEWH 强调对评价指标的量化，相对于国外几大评价体系，EEWH 忽略了不能量化的人文、社会、经济等指标，如社区参与、交通状况等。但 EEWH 突出了绿色建筑环境的生物多样性对保护地球环境的特点，强调了绿化对减少二氧

化碳排放量的积极效应。

(3) 现有建筑评价体系及其碳排放指标、评价方法对比分析

综上所述,为了分析和评价建筑系统的资源能源消耗及环境影响,国内外推出了许多评价的体系和标准,这些体系和标准大多从能源消耗、土地、水、材料等资源消耗、固液气态废弃物排放等环境负荷、室内外环境质量、使用和管理等角度,对建筑的环境影响进行评价,但是这些评价体系涉及到自然环境、社会状况、建筑性能等多种因素的影响,使得对建筑环境影响的度量和评价与使用地区的资源条件、经济技术状况、用户的环境意识等都有着极为密切的联系。所以这些评价体系在系统功能、范围、结构与运行过程等方面各有不同,有各自的特点和优缺点,但大都建立在明确的环境保护和可持续发展原则基础上,采用多目标多层次的综合评估方法,从建筑整体和多学科综合角度出发,建立明确的评价标准和环境影响等级;同时,这些评价体系和标准的推出也为绿色、生态、可持续等建筑类型的评价和认定提供了标准和依据,促进了这些新型建筑系统的发展。

现有的建筑评价体系和标准,对于建筑系统的碳排放情况进行了初步的探索,提出了一些评价的指标和评价方法,如下表 1-9 所示,但是到目前为止,建筑系统的低碳评价体系和标准还是一个空白的领域,尚无法判定一个建筑系统生命周期、各个阶段及各碳源碳汇系统是否低碳,也无法判断这些评价对象的低碳程度及减排潜力。

1.2.3 城市住区减排技术及其减排潜力研究综述

城市住区减排的实现离不开减排技术、材料、设备的选择和使用,它们是住区减排实现的基础。对于城市住区减排技术、材料和设备系统的研究,目前集中在住区建筑结构本体减排、住区建筑系统减排和住区环境减排三个方面。

1) 住区建筑结构本体减排研究

对于住区建筑结构本体减排研究主要包括设计、施工、维护结构等方面。

赵春明(2010)从节能建筑的规划设计,墙体节能技术,隔离太阳辐射,外窗的节能设计,合理控制窗墙比,屋顶的节能设计等几个方面论述建筑低碳化的实现途径,表明建筑节能需要通过各个方面的共同努力才能实现^[70]。

张庆欢(2010)研究了铝酸盐水泥生产过程中的能耗及碳排放情况,研究结果表明,铝酸盐水泥生产过程中的碳排放较普通水泥排放量低 35%^[71]。

高育欣等(2011)通过分析预拌混凝土生产的碳排放,推导出单位立方米混凝土的碳排放计算公式,对预拌混凝土生产所导致的碳排放进行评估,通过对比预拌混凝土常规生产与绿色生产单位立方米混凝土的碳排放量,提出减少预拌混凝土生产碳排放的措施^[72]。

表 1-9 相关建筑评价体系中碳排放评价指标和评价方法对比

Table 1-9 Comparison of carbon emission index and methods in different assessment systems

评价体系/标准	评价指标	评价方法
BREDEM&SAP2005	单位建筑面积能源消耗量	对单位建筑面积的采暖、热水供应、通风、照明以及新能源的利用等进行计算，单位 $\text{kg}/\text{m}^2/\text{year}$ ，用于评价建筑是否满足建筑标准的要求。
	住宅 CO_2 年排放率	
	能效率	基于每平方单位建筑面积的性能评价，百分制进行打分，100 代表能源零消耗，表明分值越高所消耗的能源越少，对环境的影响越小。
	基于 CO_2 排放的环境影响率	
日本环境共生建筑 A-Z	平均每户每年 CO_2 排放量	定量计算，取平均值。 由使用阶段能源消耗引起的 CO_2 排放量。
	生命周期 CO_2 排放量	查表，定量计算。 住宅建设期、使用期、修缮期、更新期、废弃期碳排放总量。
建筑能效指令 2002/91/EC	建筑能耗产生的每平方米 CO_2 排放量	定量计算后评级。 由于建筑使用阶段耗能产生的碳排放。 分为较低、低、中等、高、较高五个等级，反映了建筑碳排放程度。
BREEAM	建筑每年每平方米 CO_2 排放量	定量计算，打分（60-0）。 仅考虑使用阶段能源消耗引起的碳排放。
DGNB	建筑每年每平方米 CO_2 排放量	定量计算。 单位建筑面积的材料生产与建造、使用期间能耗、维护与更新、拆除和重新利用碳排放总量。
台湾绿建筑解说	建筑物化 CO_2 排放量（/M2）	定量计算后，打分法。 建筑材料引起的碳排放总量与总建筑面积的比值/基准值。
	绿化 CO_2 固定量	打分法。 绿化 CO_2 固定量与基准值的比较。
中国绿色低碳住区技术评估	建造期 CO_2 排放指数	定量计算。 单位面积建筑建材碳排放量与基准值的比值。
	运行期 CO_2 排放指数	定量计算后评级。 单位面积建筑节能、节水、绿化、交通碳排放量之和与基准值的比值。 A 级：减碳量 $20\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ；B 级：减碳量 $16\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ； C 级：减碳量 $12\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

覃维祖（2010）提出在建设新结构物时少用混凝土；在混凝土中减少水泥消耗量，需要大力发展绿色高性能混凝土和超高性能混凝土是减少建筑物物化阶段和生命周期碳排放的重要手段^[73]。

廖敏英和祝昌曦(2010)结合杭州市区“浙江航达集团综合楼工程项目”实例,提出建筑单位实现绿色施工的具体方法:成立管理小组、现场调查、确认要因、制定对策、实施效果反馈和评价等,认为建筑单位的绿色施工是低碳建筑发展的一个有效手段^[74]。

陈冰等(2010)通过对英国低碳建筑研究和设计方面的分析,为中国学者和建筑师在建筑全生命周期的角度从社会和技术双重层面看待建筑节能和CO₂减排提供经验^[75]。

Ikbal Cetiner等采用全生命周期成本分析法和计算机模拟技术,分析气候温和地区双层玻璃相对于单层玻璃的优越性,实验证明双层玻璃比单层玻璃大约节能22.84%,建筑材料的合理利用、有效组合可以减碳^[76]。

Ambrose Dodoo等(2009)对建筑材料结束生命阶段管理的碳影响,并比较了混凝土框架建筑和一个木结构建筑的碳平衡。研究结果表明,使用后的混凝土碳化的影响是小的。木材和钢筋回收能量回收使用后的碳减排量,均高于混凝土碳化的吸收的碳排放^[77]。

H. Radhi(2009)对巴林现有的建筑维护结构标准对建筑电力能源节约和减少CO₂排放量的贡献程度,模拟研究结果显示,现有的巴林建筑维护结构标准最多能减少25%的电力能源消耗及相应CO₂排放,可以使巴林净CO₂排放量下降7.1%,无法实现巴林制定的减少碳排放40%的既定目标,建议相关部门采取更多的有效措施实现减排目标^[78]。

N. Huberman, D. Pearlmutter(2008)分析了以色列内盖夫沙漠地区建筑材料产品的全生命周期能量,目的是为了分析建筑物材料的选择对使用阶段耗能的影响,以及材料内能与使用阶段耗能的关系。研究结果表明内盖夫沙漠地区建筑的材料内能达到了建筑生命周期能耗的60%,采取新型的墙体系统(墙体、保温材料及饰面材料)可以将这一比例降低20%,研究结果同时表明,新型墙体系统虽然在建筑结构内能中占有很高的比例,但混凝土结构(梁、柱、板)依然占到建筑结构内能的50%^[47]。

Piyush Tiwari(2001)指出建筑设计对节能的重要性,应寻求建筑全生命周期能耗最小化的方法,尤其是建设阶段。将建材按单位重量生产所需总能耗分为高能耗材料、中能耗材料和低能耗材料,通过能效住房选择评价模型对不同施工方法进行估计和比较,指出住房紧张将使能源浪费更加严峻,低成本、低能源技术可实现印度政府的节能减排目标^[79]。

Leif(2006)对木质建材和混凝土建材生命周期的能源消耗和二氧化碳排放进行了比较,研究结果表明,木材和混凝土结构建筑生命周期碳排放存在从30至130KGC/每平方米建筑面积的差异^{[80][81]}。

James Salazar, Jamie Meil(2009)分析了提高木材的使用率对于独立住宅碳足迹的影响,研究表明,木建筑的生命周期所产生的二氧化碳排放量 20 吨至 72 吨。是典型的房子使用化石燃料消耗的 45%^[82]。

Mark Hinnells(2008)基于建筑计量和控制系统方法、节能技术运用,提出当前建筑维护结构的设计和施工方式不利于低碳建筑的实施,应采用更现代、更先进的施工方法^[83]。

Mari'a Jesu's 等(2006)将建筑的生命周期分为材料及制品的生产,施工建设,装修,使用,拆除。并对案例建筑进行分析,结果显示,在施工阶段,通过精心挑选的低环境影响的材料可以减少生命周期 30%二氧化碳排放量^[48]

J. Monahan, J.C. Powell (2011)应用生命周期评估方法对英国诺福克市(Norfolk)一种现代木结构房屋施工方法的房屋内能和内碳进行了案例分析,研究结果表明,新型的木质建筑施工方法碳排放量为每平方米内碳为 34.6 吨,使用碳排放为 405 吨,与传统的钢筋混凝土结构相比内碳减少 34%^[45]。

Ann Kristin Petersen, Birger Solberg (2002)比较了在奥斯陆新机场使用胶合木梁和钢梁两种情况下的生命周期温室气体排放量和能源使用。研究结果显示,钢梁制造的能源消费总量是木结构的两到三倍,使用化石燃料是木梁的 6-12 倍。排放的温室气体是木梁的 5 倍^[84]。

Gian Andre等(2010)采用生命周期评估的方法对意大利北部兴建的低能耗住房进行了详细的生命周期评估。研究结果表明在低能耗建筑系统中嵌入式材料消耗的能源和排放的温室气体最多,但对使用阶段的节能和减排发挥了重大作用。研究证实,低能耗住房与一个标准的住房相比,冬季采暖的能耗减少 90%,但生命周期的能耗只减少约 50%,碳足迹只减少 55%^[85]。

2) 住区建筑系统减排研究

住区建筑系统减排研究主要包括能源系统、排放系统、建筑设备系统、通风系统等。

刘君怡等(2010)根据国家节能和能效标准及相关研究,从围护结构设计和空调器制冷/采暖两个方面总结出夏热冬冷地区低碳住宅的设计策略并采集数据,按能耗水平的不同赋值于 4 组情景假设,再运用DesignBuilder/Energy Plus 模拟软件计算空调器能耗值和CO₂ 排放值。结果显示,当采取节能减排措施后,该地区低碳住宅的空调器能耗(含采暖)区间为 14.0~4.9 kwh/(m²·a), CO₂ 排放区间为 11.5~4.0 kg/(m²·a)^[86]。

龙惟定等在《低碳城市的区域建筑能源规划》一书中,研究了各类锅炉、热泵、供冷系统的减排效果,提出用碳减排效率指标对减排效果进行表述^[87]。

J. Monahan等(2011)研究了地源热泵、主动太阳能技术(太阳能热水、发

电)、被动太阳能技术和热回收机械通风技术三大类新型供热系统与常规高效的燃气热水器系统在假定的 20 年的生命周期内的能源需求、CO₂ 排放和运行费用,结果表明,三大类新型供热系统在假定的 20 年的生命周期内的能源需求、CO₂ 排放和运行费用均低于常规高效燃气供热系统,在三大类新型供热系统中,地源热泵的年均一次能源需求、CO₂ 排放量和运行费用最高,主动太阳能系统最低^[88]。

Ce'line Weber等(2006)分析了东京部分办公大楼提供电力、制冷、加热的分散能源系统的CO₂ 减排潜力和成本,研究结果表明,完全分散的固体氧化物燃料电池为基础的能源系统与传统的能源供应系统相分散能源系统相比,可以减少 30%以上的二氧化碳排放量,但是一次性成本投入将增加约 70%^[89]。

W.P. Sung等(2010)分析了台湾地区建筑中常风量(CAV)通风空调系统或变风量(VAV) 通风空调系统对于节能减排的影响,研究结果显示变风量通风空调系统比常风量通风空调系统节能 46%,减少CO₂ 排放的范围为 67-3687 公斤,表明在亚热带地区采用变风量空调系统对节能减排有重要意义^[90]。

Leif等(2010)分析了一个八层木框公寓大楼的生命周期初级能源使用和二氧化碳排放情况,研究同时显示,供暖系统类型,强烈地影响着初级能源使用和二氧化碳排放量,区域供热的热电联产和电力的生物质为基础的能源系统,可以实现低的初级能源使用和低二氧化碳排放量^[38]。

M.T. Iqbal(2004)基于纽芬兰(Newfoundland)地区 2000 个房屋全年的风速、太阳能和用能三种数据,对该地零能耗住宅对风能的转化系统进行可行性研究。应用HOMER(Hybrid Optimization Model for Electric Renewable)软件,通过详细数据分析得出在纽芬兰使用风能转换系统是可行的,运用太阳能系统则不经济,选用节能技术应因地制宜^[91]。

Hassan Radhi(2009)研究阿拉伯联合酋长国(United Arab Emirates)地区热气候下空调能源使用对气候变暖的潜在影响,选取雷恩(Al-Ain)城市为研究对象。应用仿真研究和能源分析调查建筑能耗,使用最有效的措施处理不同气候情境下的影响。仿真结果表明能源设计措施如隔热、保温对气候变暖的重要性,窗户面积和玻璃装配系统对气候变化的好处及敏感度,遮蔽设备对于建筑CO₂ 排放是节约的并且对全球变暖是不敏感的^[92]。

A.R. Day等(2009)展示了伦敦南岸大学为大伦敦政府所做的包含在伦敦计划中的有关能源政策的研究结论。相关政策要求开发商演示伦敦新发展的工程如何满足特定的能效和可再生能源目标以获得相应建筑许可证。研究表明应用可再生能源技术可以减少 10%的CO₂ 排放,也明显地表明良好品质的解决方案需要良好的工程设计^[93]。

M. Thyholt等(2008)基于住宅CO₂排放量和最大电力需求,研究CO₂排放和电力需求保证,比较低能源住宅建筑与新的建筑条例和地区热源使用相一致的住宅建筑。基于每月负荷的变化和区域热源的最大生产负荷,给出一种区域热源终端使用造成的CO₂排放的计算方法。指出建筑CO₂排放取决于供热系统的建筑节能水平和能源供应系统的类型^[94]。

3) 住区环境减排研究

住区环境减排研究主要包括住区绿化、住区管理、废弃物循环再利用等。

郑中华等(2010)以绿地碳平衡理论为基础,对低碳型社区绿化技术进行了分析,主要包括:适宜绿化植物选择技术,高固碳植物群落构建技术以及生态材料与节约型绿化技术,并对低碳绿化技术的政策引导提出了建议^[95]。

郭新想等(2010)对居住区绿化种植方式的固碳能力进行研究,分别计算出各绿地类型的单位绿地面积的净日固碳量,得出乔灌草的种植结构的固碳水平最高,其他依次为灌草型、草坪型和草地^[96]。

胡红波等(2011)对《绿色建筑评价标准》关于植物绿色的多个条文进行了分析,指出大多绿色建筑的绿化设计以简单的指标来衡量绿色建筑绿化质量及功能建设,对绿化的要求仅从景观效果出发,没有充分考虑植物在固碳释氧等生态效益功能,建议从绿色建筑的绿化质量评价指标,乡土植物,CO₂固定量三个方面入手,对植物生态效益进行调研分析^[97]。

包志毅等(2011)认为在植物景观营造和维护中,植物的呼吸作用、植物材料生产供应、植物种植工程、植物养护管理等产生碳排放。影响植物景观碳效应的主要因素有植物景观结构、设计风格、植物类型和特性、植物规格和种植密度等。提出植物景观的碳效应不是唯一的,植物景观的多种功能和效应需要平衡和协调^[98]。

宋华伟(2011)提出了绿色住宅的固碳机制,总结和分析了绿色住宅的实用固碳方法和技术措施,建议优化采用生物固碳、生态建筑材料、废品再造等三个方面的实用技术,逐步拓展绿色住宅固碳技术的应用范围和深度^[99]。

郭新想(2010)以植物叶片一绿量(单株)—群落固碳量研究为主线,建立了比较详细的植物固碳量测算方法流程,并将居住区植物固碳能力绝对量与相对量评价相结合,形成较为完整的居住区绿化固碳能力评价体系^[100]。

Timothy Carter, Andrew Keeler(2008)采用成本效益法对一个实验性的屋顶绿化系统进行生命周期分析,分析结果表明:与传统屋顶比较,这种类型的屋顶绿化的净现值的超过传统屋顶10%至14%。在绿化屋顶的建筑成本减少20%的情况下,其社会净现值将比传统的屋顶净现值少。但考虑到新型屋顶绿化积极的社会效益和相对较新的实践的性质,强烈建议政府鼓励在高度城市化的地区使用这

种屋顶绿化的做法^[101]。

Catarina(2002)从建筑内能、运行能耗和循环利用潜力角度分析了瑞典低能耗建筑生命周期耗能情况,研究表明,对于低耗能建筑来说,建筑内能在总能耗总站有较高的比例,好在材料设备的循环利用可以减低建筑的内能,并以瑞典最节能的房屋进行研究,分析建筑内能、运行能耗和循环利用潜力之间的关系,结果显示,在建筑 50 年的寿命周期里,建筑内能占到总能耗的 45%,循环利用潜力是内能的 35%-45%^[102]。

上述城市住区减排技术策略的研究成果可以看出:

(1) 对于住区建筑结构本体减排措施和潜力的研究主要针对建筑维护结构方面进行,研究表明维护结构对后期使用阶段的耗能及其碳排放有非常大的影响,但研究结果并未表明主要的维护结构材料设备的选择与后期使用阶段碳排放的直接关系;

(2) 对于住区建筑系统减排措施和潜力的研究,主要集中在能源系统和建筑设备系统上,研究表明新能源的利用对住区碳排放的影响是积极的,也有部分定量分系,但忽略了能源设备系统本身生命周期的碳排放;对于建筑设备系统的研究集中在建筑设备系统,研究表明,建筑供暖制冷系统对住区碳排放影响巨大,但同样忽略了系统本身的生命周期碳排放的研究。所以从生命周期角度看,目前对于住区建筑系统的研究,未能从生命周期考虑,需进一步研究。

(3) 对于住区环境减排措施和潜力的研究,主要集中在住区绿化上,研究肯定了绿化对减排的积极影响,对于减排量却多以统计结果分析,绿化系统生命周期考虑的研究略显不足。

1.2.4 城市住区减排成本效益分析研究综述

目前,对住区减排成本效益的研究主要分为两个方面:从整体角度,对住区减排成本效益进行研究;从微观角度,针对具体的减排措施的成本效益进行研究。

1) 从住区建筑整体角度

曹小琳、屈婷(2011)借鉴既有的理论研究,设计低碳建筑全寿命周期费用指标体系,对其费用组成进行探索,并结合目前国内低碳建筑碳排放有关数据,综合考虑低碳建筑的节能、绿化、节水、区内交通减少的碳排放费用和政府补贴等因素,从全寿命周期费用的角度构建低碳建筑费用估算模型^[103]。

高泉平(2010)借鉴碳排放交易的理念,从企业角度出发,将其中碳排放量的计算和价值计算引入到绿色建筑的经济效益评价中,从而使得绿色建筑的一些隐性效益价值化,进而可以正确判断绿色建筑的经济效益^[104]。

马素贞等(2010)提出了绿色建筑增量成本的定义及计算方法和绿色建筑技术增量成本的比较依据,即基准方案成本,并针对不同的建筑情况,提出了 2 种

不同的基准方案,为合理确定绿色建筑技术增量成本提供了依据。以某绿色建筑项目为例,采用前述计算方法和基准方案成本对其进行了绿色建筑技术增量的成本分析,结果显示该项目每年可节省费用为 691545 元,每年投资费用为 3854444 元,则静态投资回收期为 5.57 年^[105]。

李云舟等(2009)从绿色建筑建造过程中的主要成本增量构成出发,实例分析南宁裕丰英伦绿色建筑住宅小区项目通过优化设计控制建造增量,分析了成本增量的构成和比例,以低建造成本增量实现理想状态下低建筑运行能耗的目的,在保证良好的居住舒适度的前提下降低建筑全生命周期中的资源及能源消耗量,实现绿色建筑成本增量的短期回收^[106]。

孙大明等(2009)统计自 2006 年至 2008 年底国内绿色建筑数十项目,分析结果显示:影响增量成本较大的技术措施中,可再生能源的利用所占比例为 48.2%,室内环境占 7.5%、中水利用占 2.6%、围护结构占 23.2%。同时根据样本统计信息得出,一星级绿色建筑每平方米平均造价在 70 元左右,二星级绿色建筑平均单位造价是 207 元,三星级绿色建筑平均单位造价是 360 元,增量成本分别占总造价的 2.6%, 4.2%, 9.3%^[107]。

Northbridge(2003)将绿色建筑的增量成本分为软成本、绿色建筑技术成本和认证成本。软成本包括绿色建筑设计成本(绿色咨询费用)、调试费用、申报材料整理费用、模拟分析费用(也有人将认证成本包含在软成本中)^[108]。

Gregory H Kats(2003)统计了LEED认证的软成本,一般占建造成本的 3%~5%,项目越小,比例越大。其中,增加的绿色设计费用大概占 0.7%;调试费用占 0.5%~1.5%;整理申报材料费用为 0.05%~3.8%,小建筑取上限,大型建筑取下限,平均为 0.7%;模拟分析费用约占 0.1%^[109]。

2) 从微观技术角度

陆炜等(2008)介绍了低辐射夹层玻璃的节能特性指标和节能效果,以 6mm 低辐射夹层玻璃代替 6mm 普通玻璃,每一万 m² 所需一次性增加投入的成本约为 240.43 万元,由此每年所产生的节能和减排经济效益合计约为 212.15 万元,年投资回报率为 88.2%,投资回收期为 1.13 年^[110]。

苏明山(2002)针对大中型沼气工程,在讨论基准线和系统边界的基础上,构造了估计其减少 CO₂ 的排放数量及其相应的减排成本的方法,并对一个案例进行分析,结果表明,案例沼气站在其 20 年的寿命期内减少的 CO₂ 排放量 9619 吨,每吨 CO₂ 的减排成本为 352 元^[111]。

谢自强等(2008)结合重庆地区低层、多层、高层建筑的典型设计案例,探讨了建筑体形系数对建筑节能增量成本的影响,分析了不同的维护结构和体型系数下绿色建筑增量成本,并提出了建筑体形系数控制的建议及措施^[112]。

柴宏祥(2010)分析了绿色建筑节水项目直接增量成本和全生命周期增量成本的构成,构建了含初始成本和未来成本在内的全生命周期增量经济模型,提出了直接增量成本的计算方法,并在西部某绿色建筑住宅小区节水示范项目进行模拟和算法应用比较。结果表明:该示范项目单位建筑面积直接增量成本为 21.0 元/m²,单位建筑面积全生命周期增量成本为 31.5 元/m²^[113]。

Timothy Carter, Andrew Keeler(2008)采用成本效益法对一个实验性的屋顶绿化系统进行生命周期分析,分析结果表明与传统屋顶比较,这种类型的屋顶绿化的净现值的超过传统屋顶 10%至 14%。在绿化屋顶的建筑成本减少 20%的情况下,其社会净现值将比传统的屋顶净现值少^[101]。

I. Sartori, A.G. Hestnes (2007)根据九个国家的 60 个比较了常规建筑和低能量建筑物的生命周期的能源使用,结果表明低能量建筑设计在整个生命周期的能源需求的净效益优于常规建筑,低能量建筑生命周期的碳排放量远低于常规建筑,生命周期成本却小于常规建筑^[114]。

Ce'line Weber等(2006)分析了东京部分办公大楼提供电力、制冷、加热的分散能源系统的CO₂减排潜力和成本,研究结果表明,完全分散的固体氧化物燃料电池为基础的能源系统与传统的能源供应系统相比分散能源系统相比,可以减少 30%以上的二氧化碳排放量,但是一次性成本投入将增加约 70%^[89]。

Joshua Kneifel (2010)对位于 12 个城市的 192 个建筑进行模拟分析,在不同的模拟情景下估计建筑的能源节约量和碳减排量,并确定每个模拟情况下节能减排措施的成本效益,实验结果表明传统的能源效率技术可以减少 20-30%,平均超过 40%,虽然这些削减经常可能面临生命周期成本分析不可行的情况,但是通过提高暖通设备系统效率的提高,可以平均减少 16%的建筑物的碳足迹^[115]。

Jonathan G Koomey等(1998)概括了一份详细的可达到的成本效益潜能的评估报告以减少 2010 年美国住宅和商业建筑部门的CO₂排放。基于情景分析法,分析了常态”、“节能”和“最节能”三种状态下减排的成本,结果表明通过更多既省钱又减少污染的能效技术的使用,将来温室气体的排放能够大量减少^[116]。

上述成果可以看出:住区减排成本效益的研究主要从整体和微观两个方面进行。对国内外已有的绿色生态住区整体成本效益进行统计分析研究,对住区的减排成本效益有一定借鉴意义,但缺少总体增量成本与减排量之间关系的大量低碳住区的统计分析;从微观角度针对具体的低碳措施进行研究,未能形成多个减排措施的组合分析,缺少单个或多个减排措施增量成本与减排量之间关系的定量分析。同时,不论是从整体还是从微观角度对于住区成本效益的分析都多集中经济成本收益的分析,而对于住区低碳造成的环境和社会成本效益分析的研究较少,需要进一步加强对住区低碳的环境和社会成本效益的分析。

1.3 课题研究方案 (Scheme of Research)

1.3.1 课题研究的思路

本课题在系统分析城市住区及其碳排放特性的基础上，以生命周期评价为理论基础，构建城市住区碳足迹研究的方法和计算模型；在此基础上，结合系统理论、低碳理论、技术创新理论、建筑耗能理论、成本收益理论等，构建住区低碳评价体系，进行住区低碳技术分类和住区低碳成本效益分析，以解决城市住区低碳发展和实践过程中所出现的问题和障碍。

本课题研究的总体思路如图 1-7 所示：

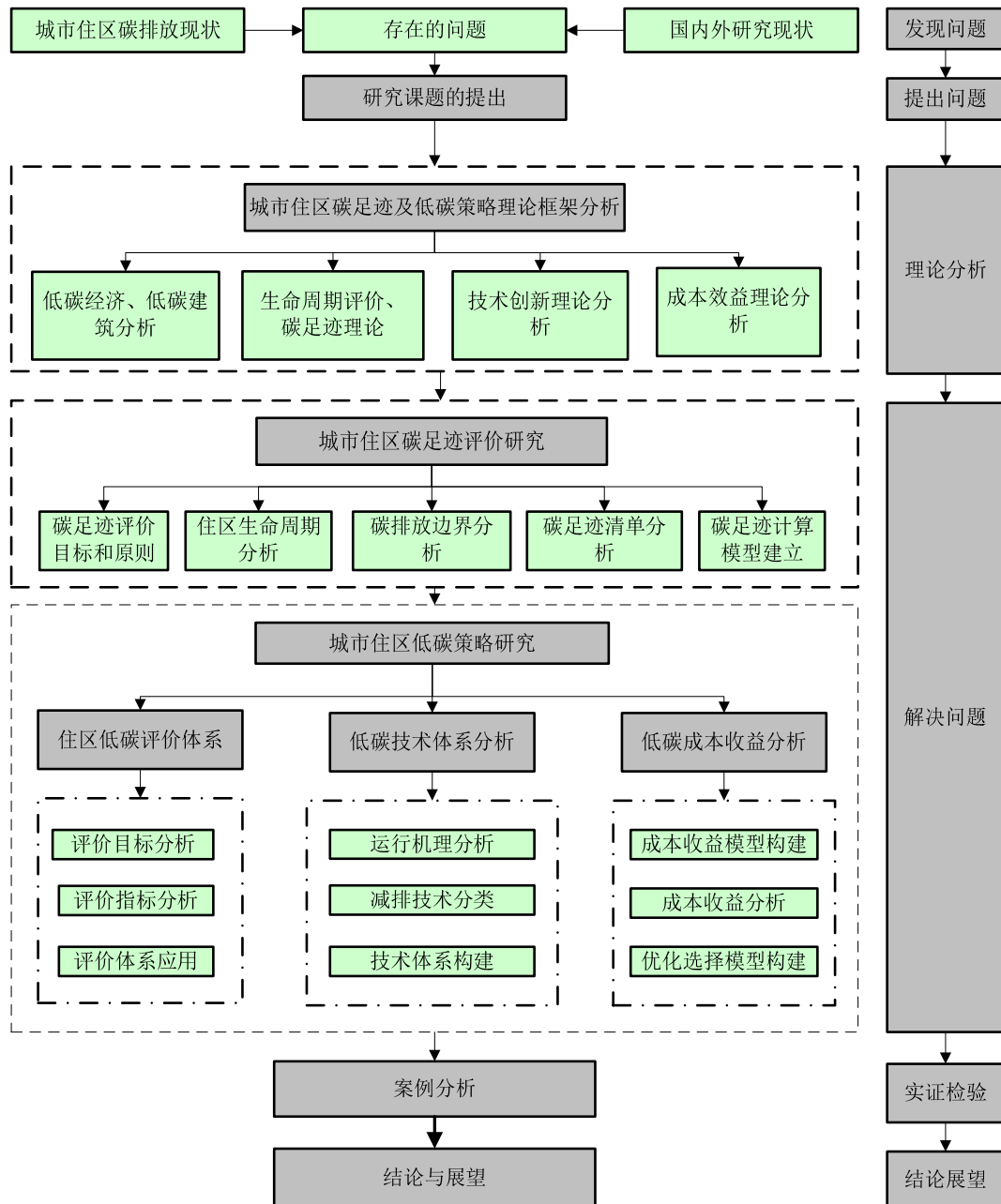


图 1-7 课题研究的总体思路

Figure 1-7 Outline of Research

1.3.2 课题研究的内容

本论文共分八章，各章主要研究内容如下：

第1章 绪论：对论文的选题背景、研究课题的提出、国内外相关研究综述、文献分析与研究范围的界定、研究目的与意义、研究思路、研究内容、研究方法与技术路线等做简要的分析与描述。

第2章 相关理论研究：从低碳经济、低碳建筑内涵、生命周期评价及碳足迹理论、住区低碳技术和成本效益等几个方面分析了城市住区碳足迹及低碳策略相关的理论基础。

第3章 城市住区碳足迹研究：在分析城市住区及其碳排放特性的基础上，确定住区碳足迹研究的目的和原则；对住区生命周期进行阶段划分，绘制住区生命周期的过程图，确定住区生命周期及各阶段碳足迹分析的系统边界；对系统边界内的主要碳排放单元过程进行分析，对各阶段进行碳排放清单分析，确定单元过程的碳排放活动水平，并建立各阶段的碳排放清单分析表；建立住区生命周期及各阶段的碳排放量计算模型。

第4章 城市住区低碳评价体系研究：针对城市住区碳排放评价的特点，明确住区碳排放评价的原则；设定城市住区低碳评价体系的目标，选取评价指标，构建相应的评价基准，对住区生命周期、各阶段、各功能系统的碳排放情况进行评价，构建相应的低碳评级方法。

第5章 城市住区低碳技术体系研究：分析城市住区低碳运行机理，从生命周期和住区不同的功能系统两个维度，对住区进行低碳技术分类分析，选取不同类别的部分低碳技术进行详细分析；构建的城市住区低碳技术体系。

第6章 城市住区低碳成本效益研究：分析了城市住区成本收益分析的特点，从经济、环境和社会三个方面的增量成本和增量效益角度，构建住区成本效益分析模型；对部分低碳技术进行成本效益分析；采用运筹学0-1型多目标规划的方法，建立住区低碳技术优化选择模型，并通过行算例分析验证该模型的适用性。

第7章 案例研究：选取某城市住区为案例，根据研究成果对案例住区碳足迹进行研究，对住区低碳相关指数进行评级，对住区采取的主要低碳技术进行分析，提出相应的低碳减排建议。通过以上的案例分析和研究验证课题研究成果的准确性和可行性。

第8章 结论与展望：对整个课题的研究做了概括性的总结，并对应进一步研究的问题做出了展望。

1.3.3 课题研究的理论与方法

本课题所涉及理论和技术主要包括：系统论、低碳经济理论、可持续发展理

论、技术创新理论、生命周期理论、生命周期评价（LCA）技术、建筑生命周期耗能理论、技术经济理论、成本效益理论等。

本课题的研究方法主要包括：

（1）文献研究和借鉴国内外最新研究成果

通过收集和查阅国内外相关文献资料，充分借鉴国内外在温室气体排放、生命周期评价、国内外与建筑能耗和 CO₂ 排放相关的研究资料，分析借鉴其研究方法，收集基础数据资料，并将文献研究贯穿全文，为城市住区碳足迹及低碳策略研究提供相关数据基础。

（2）理论分析与逻辑推演

基于文献检索和相关理论，如系统论、低碳经济理论、可持续发展理论、技术创新理论、生命周期理论、生命周期评价技术、建筑生命周期耗能理论、技术经济理论、成本效益理论等，经过理论分析与逻辑推演，构建城市住区碳排放清单、碳足迹计算模型，并对住区减排的成本增量进行分析。

（3）数据演算与统计分析

收集与建筑能耗和 CO₂ 排放相关的数据资料，包括政府部门的统计资料、相关研究成果及本研究的调研资料，通过分析与演算，归纳总结住区生命周期各阶段的相关碳排放因子。

（4）理论研究与案例分析

通过城市住区建设项目资料查阅、实地调研等，按照课题取得的相关成果，根据案例城市住区实际情况，进行案例住区的碳足迹计算、住区低碳评价、低碳技术分析，并借以验证课题研究成果的准确性和可行性。

1.4 本章小结（Brief Summary）

城市住区生命周期消耗大量的能源、资源，并排放大量温室气体，对环境造成了巨大的影响。针对我国城市住区碳足迹研究及低碳减排实施与应用过程中出现的种种问题，提出“城市住区碳足迹及低碳策略研究”课题，并论述了其理论意义和现实意义；在综述住区碳足迹、低碳评价体系、低碳技术及其成本效益分析的国内外研究现状的基础上，确立了论文的研究目标、内容、思路与技术路线。

2 城市住区碳足迹及低碳策略相关理论分析

2 Theoretical Analysis of Carbon Footprint and Low carbon Strategies of Urban Settlements

2.1 低碳经济与低碳建筑 (Low-Carbon Economy and Low-Carbon building)

2.1.1 气候暖化问题及其本质

19 世纪末, 瑞典科学家 Arrhenius 首次提出人为温室效应问题, 指出人类大量燃烧化石燃料导致大气中 CO_2 浓度升高, 可能造成气候变暖。随着人类活动造成的温室气体排放不断增加, 以全球暖化为主要特征的全球气候变化及其造成的危害不断加剧, 开始威胁人类社会的生存和发展, 成为目前人类社会最重要的挑战之一, 人类活动、气候暖化及其影响关系如图 2-1 所示。

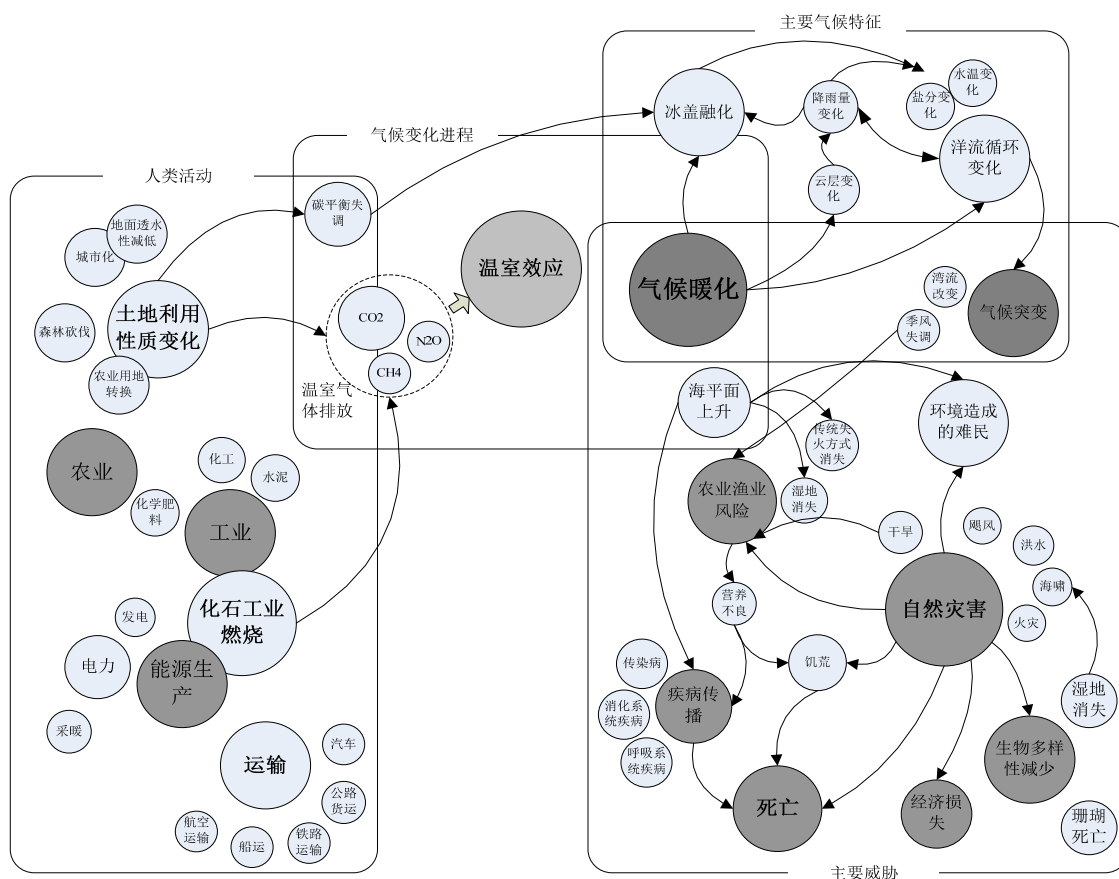


图2-1 人类活动、气候暖化及其影响关系

Figure2-1 Relation of human activities and climate warming

资料来源: United Nations Environment Programme. Kick The Habit, A UN guide to climate neutrality

[EB/OL] [2014-8-1] http://www.unep.org/publications/ebooks/kick-the-habit/pdfs/KickTheHabit_en_lr.pdf

随着气候变化影响和危害的加剧,人类社会开始持续关注这一现象和挑战。直到1985年,联合国环境规划署(UNEP)、世界气象组织(WMO)和国际科学联盟理事会(ICSU)在奥地利Villach共同召开国际会议,科学界终于就气候变暖基本达成共识,并标志着气候变化成为一个国际性问题。

世界各国在气候变化问题上基本沿着两条路线推进:科学研究和国际谈判。

(1) 对气候变化的科学研究和评价。

对于气候变化的科学研究和评价,除了各国的学者进行研究外,最权威的就是联合国政府间气候变化专业委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC),IPCC是由世界气象组织和联合国环境规划署于1988年共同创建的一个政府间机构,由来自150多个国家和地区的2500多名学者组成,主要任务是对气候变化科学知识的现状,气候变化对社会、经济的潜在影响,以及适应和减缓气候变化的可能对策进行评估。同时,IPCC还根据需求为《联合国气候变化框架公约》实施提供科学技术咨询。IPCC分别在1990年、1995年、2001年和2007年发表了4份全球气候评估报告,这些报告主要从人类活动引起的气候变化的确定性、人类活动引起的气候变化的影响、适应和减缓这些影响的方案和路径。而贯穿IPCC报告的是对“气候变化是否是由于人类活动造成的”这一观点的证明。IPCC的四次报告指出气候变化归因于人类活动的可能性,也从第一次报告的“可能归因于自然”,第二次报告的“有明显证据表明”,第三次报告的“60%以上”,到第四次报告的“90%以上”。2008年4月,IPCC开始起草第五次报告,势必会将重点从“气候变化是事实”转向“为利益相关者提供更多的信息,以利于他们做出正确的决策”。

(2) 政府间气候变化的国际谈判。

政府间气候变化的国际谈判是从1992年6月的巴西里约日内卢召开的联合国环境与发展大会上正式开始的,154个国家签署《联合国气候变化框架公约》,成为世界上第一个为全面控制温室气体排放的国际公约,也是国际社会在对付全球气候变化问题上进行国际合作的一个基本框架,标志着可持续发展观已不仅仅是全人类的一种共识,而是已经从观念认识进入到具体的实施阶段。1994年3月,公约在得到50个国家批准后生效。从1995年开始,每年举行一次公约缔约方大会(COP)。其中,1997年12月在日本京都召开的第三次缔约方会议(COP3)通过了《京都议定书》,首次为附件I国家(包括发达国家与转轨经济国家)规定具有法律约束力的具体减排目标,成为气候变化的国际谈判的一个重要里程碑。但是,与气候变化的科学研究和评价在全球范围内趋于一致不同,政府间气候变化的国际谈判之路却并不一帆风顺,甚至可以说是充满了曲折,“巴厘路线图”(2007)、《哥本哈根协议》(2009)、《德班一揽子决议》(2011)都在艰难中通过。

全球气候变化的国际谈判之所以如此坎坷,主要由于温室气体的本质属性造成的。第一,由于大气层的流动性,无论哪一国排放温室气体,地球上所有人类均受害;第二,温室气体在大气层中留存和危害期长。比如,二氧化碳在100年会衰减一半,但数百年后仍有20%留存^[117]。目前大气层中留存的温室气体,大部分是发达国家在工业革命以后所排放;第三,温室气体危害具有非竞争性,即每个人遭受的危害不会因人口的增加而减少。

由此可以看出,全球气候暖化问题具有广泛性、滞后性、不可逆性和不确定性等特点,决定了认识和解决气候变化问题需要世界各国从保护全人类共同利益出发,开展广泛的全球合作。

但问题远不这么简单,因为气候变化问题不仅是一个环境问题,同时也是全球经济问题和政治问题。对于气候变化谈判艰难的更深层次的原因在于减排成本的经济性和利益的均衡性。其具体表现如下:

(1) 在目前的国际政治经济环境,发展成为各国的首要任务,但在现有技术条件下,经济的发展和和其他人类活动必然带来温室气体的排放,虽然温室气体排放给人类带来危害,但却成为各国发展必不可少的条件。例如,澳大利亚是温室气体人均排放量第二高的国家,但却没有批准京都议定书。美国曾于1998年11月签署《京都议定书》,但在2001年3月却单方面退出京都议定书。2011年,加拿大成为继美国之后第二个退出《京都议定书》的国家。上述三国最主要的理由便是《京都议定书》限制了其经济发展。减排会使预期损失减少,而在给定收入水平的条件下,损失减少就相当于福利增加,这是减排的好处。减排的成本或坏处,则表现为减排国短期内产出减少或投入增加^[118]。

(2) 大气层是典型的全球公共资源,温室气体是公共负产品,其排放权在成为稀缺资源后会表现出强经济性,所以温室气体排放权的界定成为国际气候谈判的核心问题之一。同时,由于温室气体排放的历史原因,低排放国遭受高排放国的净外部危害,逻辑上高排放国应就其超额排放向低排放国进行补偿。正如太平洋岛国图瓦卢^[1]居民Mitiana Trevor在接受采访时所说:“我觉得,地球上60亿人都应该向我们说抱歉。”虽然“共同但有区别的责任”的原则目前不要求发展中国家承担减排义务,但发展中国家的正当权益并未因此而得到充分保护。《京都议定书》等国际气候谈判成果达成的发达国家向发展中国家提供的资金和技术支持,实际上并未完全兑现,同时,部分国家和地区已经开始用温室气体排放为由,对其他国家和地区进行了限制,如欧盟的航空碳税事件。在此情况下,发展中国家难以有激励参与全球减排行动,从而全球减排目标也就难以达成。

¹ 图瓦卢是南太平洋岛国,该国海拔最高的地点只有4.5米,由于持续上升的气温和海平面严重威胁着图瓦卢,使这个国家面临被遗弃的困境。从1993年迄今为止的19年间,图瓦卢的海平面总共上升了9.15厘米,按照这个数字推算,50年之后,海平面将上升37.6厘米,这意味图瓦卢至少将有60%的国土彻底沉入海中。

尽管对于国际间对于气候变化的谈判进行的异常艰难,但是世界各国对于应对气候变化和减少温室气体排放都表现出极大的热情,不论从经济增长方式的转变、技术的创新与发展,还是生态环境的保护来说,以低碳排放的为主要特征的经济、社会、环境的协调发展方式都日益变得重要和紧迫,同时,这种发展方式甚至可能改变世界格局,甚至有观点认为,气候变化谈判的结果甚至可能成为继《联合国宪章》和《关税贸易总协定》之后的影响世界政治经济格局的第三个重要成果。

2.1.2 低碳经济概述

最早研究低碳经济的文献是Ann P Kinzig等于1998年发表于《Global Environmental Change》的文章。Ann P Kinzig和Daniel M Kammen指出为了遏制气候变暖趋势,必须发展低碳经济^[119]。不过在英国《能源白皮书》发布以前,对低碳经济的研究并没有引起学术界的注意。2003年英国首相布莱尔发表了《我们能源的未来—创造一个低碳经济》的白皮书,该白皮书列举了英国正面临的气候变化、能源供应和基础设施更新三项挑战,并提出了能源政策的目标^[120]。2006年10月,世界银行前首席经济学家、气候经济学之父Stern N 发布了《气候变化的经济学》的报告,该报告从经济学的角度来探索气候变化的影响^[121]。

IPCC第四份气候变化评估报告和《斯特恩气候变化报告》发表之后,低碳经济开始受到广泛关注,引起了国际社会的广泛关注,标志着减少温室气体排放不仅是世界各国应对全球气候变暖的重要举措,而且是人类社会发展模式的重大变革。

低碳经济(Low-Carbon Economy)没有约定俗成的定义,现有的定义和理解还不尽一致。主要的观点包括:

(1) 方法论的观点认为,低碳经济是指在气候暖化的背景下,尽可能减少温室气体排放的经济发展方式,从而避免气候发生灾难性的变化,从而保证人类的可持续发展^[122]。

(2) 形态论的观点认为,低碳经济是低能耗、低污染、低排放和高效能、高效率、高效益(三低三高)为基础,以低碳发展为发展方向,以节能减排为发展方式,以碳中和技术为发展方法的绿色可持续发展的新的经济发展模式^[123]。

(3) 革命论的观点认为,低碳经济是经济发展方式、能源消费方式,人类生活方式的一次新变革,它将全方位地改造建立在化石燃料(能源)基础之上的现代工业文明,转向生态经济和生态文明,并且碳排放量成为衡量人类经济发展方式的新标识^[124]。

虽然这三种观点不尽一致,但是比较一致的是认为:低碳经济是为了实现“把大气中温室气体的浓度稳定防止气候系统受到威胁的人为干扰的水平上”,在保

持经济发展的同时,通过技术、市场、政策和国际交流合作的措施和策略,减少温室气体的排放,切断经济增长与温室气体排放之间的关系。

但总体看来,低碳经济作为一种新经济模式,主要包含以下几个方面的内涵:

(1) 二氧化碳等温室气体的增加很大程度上来自于人类活动的排放,而且人类向大气中排放二氧化碳的趋势还呈现逐渐加速趋势。因此,发展低碳经济首先要实现低碳排放。低碳经济是相对于传统碳密集能源生产方式和能源消费方式的高碳经济而言的。因此,发展低碳经济的核心在于降低单位能源消费量的碳排放量,控制CO₂排放量的增长速度;关键在于改变经济发展方式和高碳的生活消费习惯,降低经济发展对煤炭、石油、天然气等化石能源的依赖,促进经济体摆脱碳锁定状态。同时,积极改变人们的高碳消费倾向和碳偏好,减少化石能源的消费量,减缓碳足迹,实现低碳生存。目前,关于降低碳排放相关的研究主要集中在能源消费与碳排放的关系^{[125][126]}、提高能源利用效率^{[127][128][129]}、开发清洁能源^[130]、低碳政策引导等方面^[131]。

(2) 无论温室气体在何处排放,其造成的影响是没有差别的,这种温室气体排放和减少的地点无差别性使得全球温室气体管理变得有意义,也就为全球碳市场的形成奠定了现实基础。通过碳交易可以有效地实现碳减排的成本最小化原则,更好地促进减排战略的实现。目前,关于碳交易方面的相关研究主要集中在碳交易市场的建设和作用^{[132][133][134][135][136][137]}、碳定价等方面^{[138][139]}。

(3) 人类活动产生大量的二氧化碳,如果不经处理就将其排放入大气,势必增加大气中二氧化碳的含量。那么如何解决这些大气中现存的二氧化碳及工业生产当中排放的二氧化碳也是建设低碳经济、应对气候变化的重要方面。目前对碳消除可以从自然碳汇^{[140][141]}和人工碳汇(碳封存和碳捕捉)两个方面着手^{[142][143][144]}。

在理论研究和国际气候谈判的同时,部分国家的也已经从市场、政策、技术等角度开始了低碳经济发展道路的探索,主要包括以下方面:

(1) 实施碳排放交易

通过总量限制和交易的方法,碳排放交易可以降低排放成本,引导能效提高和可再生能源发展。目前欧盟、美国(部分地区)新西兰、韩国、日本、澳大利亚、南非等国已经开始或正在研究和制定强制性和自愿性碳排放贸易政策。需要特别指出,由于建筑领域的碳排放计算、监测、减排量认证等方法 and 标准,各类建筑在不同气候条件下碳排放基准线,碳减排成本分担、碳减排交易所的归属权等问题一直未能得到很好的解决,在全球碳交易市场和清洁发展机制项目中很少有建筑项目的身影。

(2) 征收碳税

目前挪威、瑞典、荷兰、丹麦、德国和英国等欧盟国家征收碳税，不仅促进能效提高和可再生能源的发展，减少排放，而且还对经济发展起到了促进作用^[145]。欧盟、美国、加拿大、新西兰和南非也在讨论研究相关税收。

(3) 提高能效和环境监管标准

美国、欧盟、日本等国在汽车、交通、建筑及其他产品和领域的能效监管方面设定最低监管标准，鼓励能效提高。

(4) 能效提高和可再生能源发展

美国、日本等国提高了设备能效，加拿大在太阳能、风能等可再生能源领域的投资并提供财政补贴和税收优惠^[146]。

(5) 研究开发投入

技术是温室气体减排和发展碳经济的重要支持，例如，G7国家在过去的二十年内政府的R&D投入减少了30%，但是在清洁能源、碳捕捉和封存等方面的投入却在增加，促进低碳减排技术的发展。

通过以上分析可以看出，部分发达国家已开始了低碳经济的发展道路，以往经济增长、能源消耗和温室气体排放同步增长的趋势开始改变，经济增长和温室气体排放分离，而这种分离需要技术、市场、政策、社会人文和国际关系等多方面的支持、协调和相互作用才能得以实现，低碳经济的内涵和实现方式的关系，如图2-2所示。

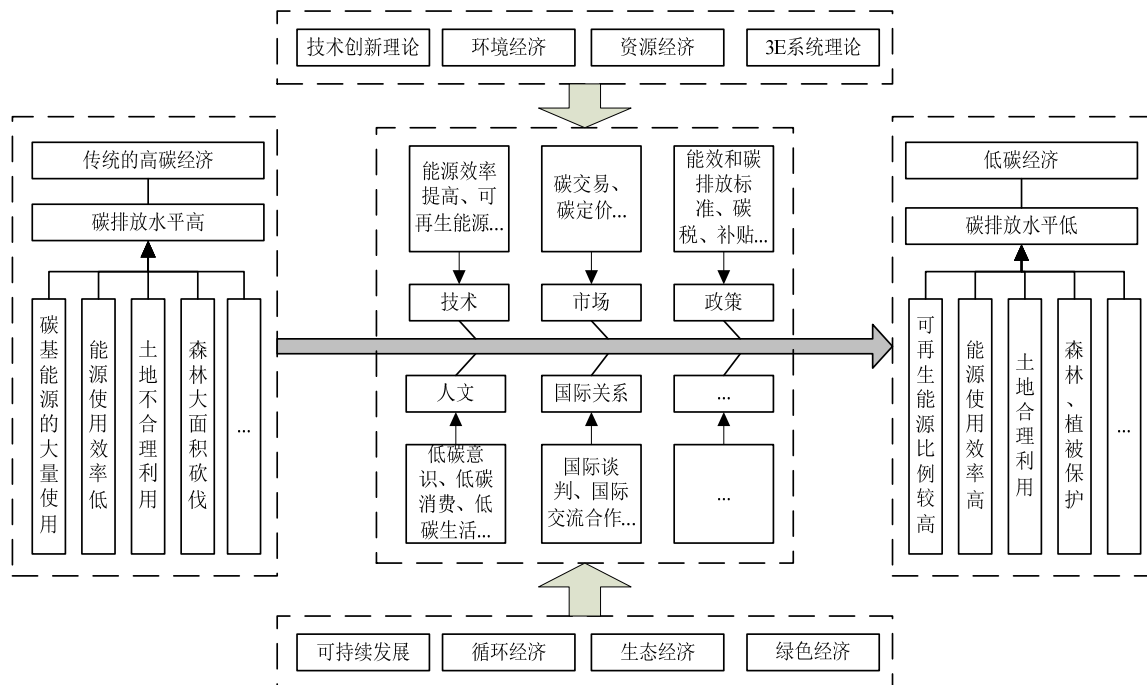


图2-2 低碳经济内涵及实现路径关系

Figure 2-2 The connotation and realization path of low-carbon economy

全球向低碳经济转型，既对中国带来压力，更带来发展的新机遇。中国向低

碳经济转型外部的压力主要是国际经济转型和温室气体减排的压力¹，而内部压力则来自于资源环境压力、能源结构和能源安全压力、经济结构转型压力和城市化压力等。但同时发展低碳经济有助于我国建设资源节约、环境友好型社会和发展循环经济；为积极探索的转变经济发展模式和新型工业化提供了一条路径；能够避免走西方国家的高消耗、高污染的工业化发展道路，走出一条低消耗、低排放的新型工业化道路；转向更为高效的制造业和低碳产业结构，这有利于中国保持国际贸易领域的持久竞争力。

早在2009年，中国政府就首次提出把培育低碳经济作为我国经济新的增长点，要大力发展绿色经济，并针对能源、工业、建筑和交通等重点排放领域，作出了具体计划和部署，加快建设以低碳排放为特征的工业、建筑和交通体系。“十二五”规划明确提出了节能降耗和减少排放的具体目标，把“资源利用效率显著提高”等减排措施和目标作为“十二五”时期经济和社会发展的主要目标之一提出。努力建设资源节约型、环境友好型社会，提高减缓与适应气候变化的能力，为保护全球气候继续做出贡献。

2.1.3 低碳建筑相关概念辨析

随着人类经济、社会发展，对自然和自身的认识的不断提升和改变，人们对建筑这一重要生产生活工具及其资源环境影响的关注也在不断改变，生态建筑、节能建筑、绿色建筑、低碳建筑、可持续建筑等理念和名词，应不同时代的需求和关注点的变化而提出的。

生态建筑将建筑看成一个生态系统，通过组织、设计建筑内外空间中的各种物态因素，使能源在建筑生态系统内有序转换，创造低能耗、高效益、无废物、无污染、生态平衡的建筑环境。同时，尽可能不破坏当地的环境因素循环，确保生态体系健全运行。真正的生态建筑应该在设计、建设、使用、拆除等方面都达到无害化标准。生态建筑强调与自然的融合，避免破坏自然环境，从人的自然环境角度出发。

20世纪70年代，石油危机的发生使得人们意识到节约能源的重要性，建筑作为能源消耗大户，“节能”与“建筑”被联系在一起，“节能建筑”的概念被提出，作为缓解世界能源危机的一项重要举措。节能建筑一般指遵循气候设计和节能的基本方法，按照节能设计标准，采取技术上可行、经济上合理、环境和社会可以接受的措施进行设计和建造，在使用过程中加强用能管理，更加有效、合理地利用能源，降低能耗的建筑。20世纪70年代中到80年代初，建筑节能就是

¹ 我国经济的快速发展和能源需求量的持续增长，碳排放量也不断增加，目前已成为世界第一大碳排放国，国际社会要求我国参与温室气体减排或限排承诺的压力与日俱增，据预计，这一期限最晚不会晚于2020年。

在建筑中“节省能源”，也就是少用或尽量不用能源；上世纪 80 年代中到 90 年代中，建筑节能意味着在建筑中减少能量的散失，即在建筑中“保存能源”；近年来，建筑节能普遍被理解为“提高能源转换和利用效率”，不仅指建筑运行使用中的节能，更强调在建筑全寿命周期的所有阶段对建筑及其相关行为提出节能要求，进行节能约束。节能建筑的核心是节约资源和降低能耗，从节约的角度出发，侧重从物理学的角度节约建筑采暖、制冷、电力等的能源使用。

绿色建筑一般指在建筑的全寿命周期内，最大限度地节约资源（节能，节地，节水，节材），减少污染和保护环境，为人们提供健康、适用和高效的使用空间，与自然和谐共生的建筑。绿色建筑强调是在建筑的全寿命周期内，使能源利用率最大化，环境冲击最小化，并为人们提供健康、适用和高效的使用空间，与自然和谐共生。绿色建筑主要包含了资源使用（包括能源、材料、水和土地）、生态占用（包括温室气体排放、破坏臭氧层的物质排放、固体和液体垃圾等）以及室内环境质量三个方面的内容，通过统一、系统的方法，有效利用资源，预防污染（包括提高室内空气质量及减少噪音等），与环境协调一致。

可持续的建筑实在在有效利用资源和遵守生态原则的基础上，创造一个健康的建筑环境并对其保持负责的维护。世界经济合作与发展组织 3 对可持续建筑，给出了四个原则和一个评定因素。四个原则指“资源的应用效率原则”、“能源的使用效率原则”、“污染的防止原则(室内空气质量，二氧化碳的排放量)”、“环境的和谐原则”。评定因素是对以上四个原则方面内容的研究评定。可持续发展主要是考虑资源的高效利用和保持环境的可持续性，从社会可持续发展的角度出发。

目前对于低碳建筑，学术界尚未形成统一的概念。但一般地，低碳建筑指在建筑材料与设备制造、施工建造和建筑物使用的整个生命周期内，减少化石能源的使用，提高能效，降低能耗，减少二氧化碳的排放量。低碳建筑除了包涵建筑的“节约”外，还强调了“减排”、“低排放”。

根据低碳、节能、绿色、生态、可持续建筑的不同的建筑理念和内涵，可以分析出他们之间的联系和区别。

（1）提出时期

建筑与资源、能源和环境关系的探索始于 20 世纪 60 年代。20 世纪 60 年代，建筑师保罗·索勒瑞把生态学（Ecology）和建筑学两词合并为“Arology”，提出“生态建筑学”的新理念。20 世纪 70 年代世界能源危机到来时，人们意识到节约能源的重要性，建筑作为能源消耗大户，“节能”与“建筑”被联系在一起，“节能建筑”的概念被提出，作为缓解世界能源危机的一项重要举措。20 世纪 80 年代，世界自然保护组织首次提出“可持续发展”的口号，同时节能建筑体系

逐渐完善，并在德、英、法、加拿大等发达国家广泛应用。1987年，联合国环境署发表《我们共同的未来》报告，确立了可持续发展的思想。20世纪90年代，生态环境破坏日益严峻，严重危及人类健康，并制约经济增长。建筑作为与人类生产、生活息息相关的环境要素，从规划设计到拆除报废全寿命周期中需要消耗各类资源，如土地资源占用、森林砍伐、建筑垃圾等，都给自然生态环境造成严重的破坏。为了减轻建筑对自然环境造成的破坏，并且最大限度地满足人类对居住环境健康舒适的要求，绿色建筑、可持续建筑等概念开始在全球范围内兴起。新世纪伊始，随着全球气候暖化及其危害的日益严重，对于建筑领域的温室气体排放的关注持续升温，成为目前建筑领域环境影响最主要的关注点之一，以低能耗、低污染、低排放的低碳建筑产品成为压倒性的课题。

（2）应用范围

随着实践发展，人们发现“生态”一词广泛应用于城市或更大尺度层面的概念，生态学的概念和原理更适合研究城市发展过程中出现的诸多现象，而对于城市居住系统或者某一单体建筑，研究应用结果并不令人满意；节能建筑，为应对能源危机而生，更多的是从微观的公共建筑、住宅建筑单体而言，考虑建筑单体的节能；同样的，绿色建筑的研究也多放在单体建筑研究层面，而在单体建筑中强调通过技术手段减少能源消耗、增加可再生能源利用相对比较容易，因而单体建筑层面的研究更多地与绿色技术相结合；而“可持续”的概念是绝对的，所包含的延伸范围更大，从宏观的角度评价建筑达到可持续发展的程度，目前可持续的概念在人类住区¹层面的研究应用较为广泛。正如Ray Cale教授所言^[147]，单个建筑是不可能可持续发展的，虽然这个词我们在这么用。单个建筑只可能符合可持续发展模式。一个城市也不可能是可持续发展的，一个城市只可以对可持续发展做出贡献。可持续发展的尺度是针对这个地球而言的，而不是其中的哪一个部分，整个地球能否负荷才是可持续发展研究的问题。”现有的可持续评价体系主要还是在建筑全生命周期内对建筑的生态、环保、健康以及舒适性的评价。用绝对性概念对单体建筑或小区建筑进行评价是不确切的，应采用相对性概念对其进行衡量，更符合实际。“低碳”是一个更加政治化的概念，应用范围更加宽泛，从低碳经济、低碳城市、低碳社区，一直到低碳建筑，各个层面都有以“低碳”作为定语的词汇，低碳已经渗透到人类生活的各个方面。低碳建筑实际只是可持续发展问题中有关能源消耗和二氧化碳减排的问题，所以对于从单体到住区、城市和全球等更大范围，都可以使用低碳建筑的概念。

¹ “人类住区”，泛指城市、集镇和村庄，以及维系人类一切活动所需的物质和非物质的结构整体，其范围大至人类生活的地球，小至人类聚居的城市、乡村。广义的住区概念包含了从人类居住的人权、资源、环境、社会政策等方面改善人类居住状况的含义，并且超越了地理范围，延伸到人类定居活动所涉及的环境、社会诸层面。

(3) 内涵和研究重点

节能建筑的关注点是能源资源的节约和能源使用效率的提高，这些观点和措施是与低碳建筑和绿色（生态、可持续）建筑一致的，可以说建筑的节能，是实现低碳、绿色、生态、可持续建筑的重要手段之一；低碳建筑更强调运用先进的设计理念与低碳技术来降低建筑全生命周期中的碳排放量，可以说，低碳建筑的建设和发展并不是一个全新的领域，减少温室气体的排放是绿色建筑、生态建筑、可持续建筑理念的目标之一，只是在低碳经济时代，低碳的理念及碳交易市场促使了低碳建筑概念的形成，要求将碳定量化，通过碳排放量来评价和标识建筑；至于绿色、生态、可持续建筑三个理念基本是一致的，属于更高层次的建筑理念，关注点是满足人类需求并与自然和谐共处，追求的是持续发展的终极愿景。

综上所述，在进行低碳建筑和建筑碳排放相关问题研究时，借鉴节能建筑、绿色（生态、可持续）建筑的相关成果是非常必要的。各种类型建筑的概念和内涵对比分析如表 2-1 所示。

表 2-1 低碳建筑相关概念对比分析表

Table 2-1 Comparison and analysis of Low-Carbon related conceptions

建筑类型	提出时间	应用范围	研究重点	低碳建筑与其他类型的联系
生态建筑	20 世纪 60 年代	城市或更大尺度层面	建筑及其环境的有机联系。	节能是实现低碳、绿色、生态、可持续建筑的重要手段之一；低碳是绿色建筑、生态建筑、可持续建筑理念的目标之一，绿色、生态、可持续建筑三个理念基本是一致的，属于更高层次的建筑理念，关注点是满足人类需求并与自然和谐共处，追求的是持续发展的终极愿景。
节能建筑	20 世纪 70 年代	主要是应用单体建筑	能源资源的节约和能源使用效率的提高。	
绿色建筑	20 世纪 70 年代	主要用于建筑和住区范围	尽可能减少对环境的影响和危害，与自然和谐共生，强调对环境的关注。	
可持续建筑	20 世纪 70 年代	人类住区层面	追求社会、经济、环境的协调发展，强调经济的持续发展。	
低碳建筑	21 世纪初	无固定范围	较低（更低）的碳排放。	

2.2 生命周期评价及碳足迹理论 (Life Cycle Assessment and Carbon Footprint)

2.2.1 生命周期评价概述

环境¹为人类提供了生存和发展所需的条件和物质。人类活动对整个环境的影响是综合性的，而环境系统也是从各个方面反作用于人类。人类与其他的生物不同，不仅仅以自己的生存为目的来影响环境、使自己的身体适应环境，而

¹这里的环境特指自然环境，即于人类周围的自然界。

是为了提高 生存质量,通过自己的劳动来改造环境,把自然环境转变为新的生存环境。这种新的生存环境有可能更适合人类生存,但也有可能恶化了人类的生存环境。

随着社会的发展和科技的进步,人类对环境的索求越来越多,逐步超越了环境的承受能力,使环境的自然形态过快过多地改变,自身的净化能力和再生能力越来越慢、越来越弱,进而威胁到人类的生存和社会的进一步发展。自工业革命以来伴随着工业化和城市化,人口迅速地增长。但同时,随着地球的自然面貌被极大的改变,人类对自然环境的资源、能源的开采和使用,以及对大气环境、水环境、土壤环境、地质环境和 生物环境的污染和破坏,已到了惊人的地步。全球环境问题也日渐突出,已成为人类共同面临的全球性危机之一。

建筑作为人工环境,是满足人类物质和精神生活需要的重要组成部分,人的一生平均有 90%以上的时间是在建筑中度过的。然而,人类对感官享受的过度追求,以及不加节制的开发与建设,使现代建筑不仅疏离了人与自然的天然联系和交流,也给环境与资源带来了沉重的负担。

建筑对环境影响一个复杂、持续、系统的过程,同时也是多方面的,包含能源耗竭、资源耗竭和污染物排放等方面^[148],其中,能源、资源耗竭包括矿产、森林、水、土地等资源的超负荷使用和破坏;污染物排放主要在消耗能源和资源过程中产生的,包括CO₂、SO₂、NO_x、烟尘、固体废弃物,可能造成的环境影响包括全球气候暖化、臭氧层破坏、光化学污染、酸雨、富营养化、大气悬浮颗粒等。据统计,人类从自然界所获得的 50%以上的物质原料用来建造各类建筑及其附属设备,这些建筑在建造与使用过程中又消耗了全球能量的 50%左右^[149];在环境总体污染中,与建筑有关的空气污染、光污染、电磁污染等就占了 34%;建筑垃圾则占人类活动产生垃圾总量的 40%;急剧增加的建筑,还造成土地尤其是耕地的侵占、生态资源破坏等现象。所以,建筑已成为人类活动对自然环境影响的重要载体和途径之一。图 2-3 表示的是目前建筑与环境之间的输入输出关系。

随着,全球气候暖化及其危害的日益加剧,人类社会对温室气体排放的关注也到了无以复加的程度。对地球温暖化有着直接影响的 CO₂ 等气体的排放,建筑承担了相当大的比重,占全球温室气体排放总量的 30%-40%以上,成为全球温室气体排放的最主要来源之一。

生命周期评价是一种新型的环境影响评价技术和方法体系,针对产品或服务从“摇篮”到“坟墓”的生命周期全过程来评价,克服了传统环境影响评价的片面性、局部性的弊端,有助于建筑的利益相关者作出正确的决策,减轻和减缓建设项目的资源消耗和污染排放给环境带来的承载压力。而依据生命周期评价理论进行建筑环境影响评价,虽然较条款式评价体系更为繁琐和复杂,但是可以很好的

解决条款式评价体系存在的阶段割裂、指标片面、量化差异等问题，成为建筑环境影响评价的重要方法和研究热点之一。

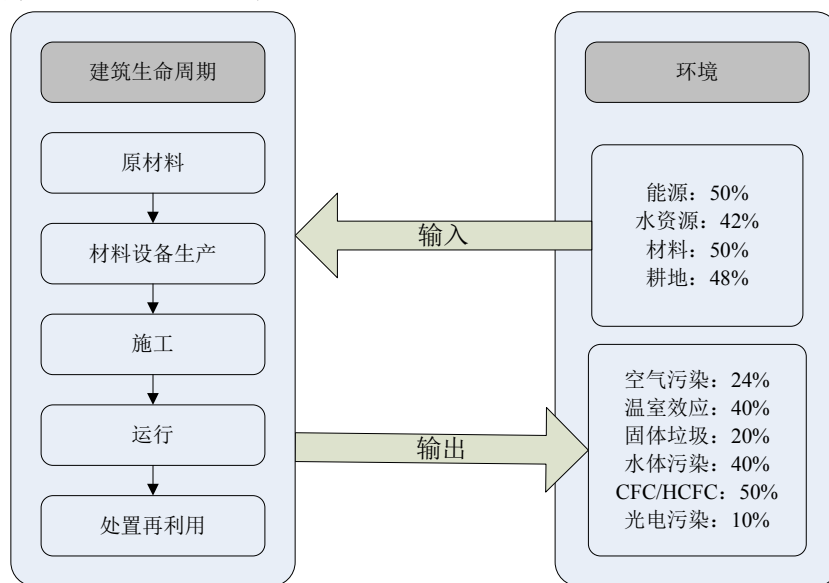


图 2-3 建筑与环境之间的输入输出关系

Figure 2-3 Input and output relationship between buildings and Environment

(1) LCA 的产生历史

生命周期评价研究开始的标志，是 1969 年由美国中西部资源研究所针对可口可乐公司的饮料包装瓶进行的，从最初的原材料采掘到最终的废弃物处理全过程的资源与环境状况定量分析。之后，相关的研究咨询机构也纷纷开始进行类似的研究工作。随后，美国、瑞士等国政府开始积极支持并参与生命周期评价的研究，并丰富完善了清单数据库和一些重要工业部门的生产工艺数据和能源利用数据。随着区域性与全球性环境问题的日益严重，全球环境保护意识的加强，可持续发展思想的普及以及可持续性行动计划的兴起，公众和社会也开始日益关注产品生命周期内的环境影响。1990 年，荷兰国家居住、规划与环境部针对传统的末端控制的环境政策，首次提出了制定面向产品的环境政策。该政策提出要对产品整个生命周期内的所有环境影响进行评价，同时也提出要对生命周期评价的基本方法和数据进行标准化。

1991 年由国际环境毒理学会与化学学会(SETAC)首次主持召开了有关生命周期评价的国际研讨会，会议首次提出了生命周期评价的概念。在以后的几年里，该组织对生命周期评价从理论到方法上进行了广泛地研究。1993 年，EPA 出版了《生命周期评价——清单分析的原则与指南》，比较系统地规范了生命周期清单分析的框架。1995 年，EPA 又出版了《生命周期分析质量环境评价指南》、《生命周期影响评价：概念框架、关键问题和方法简介》，这些都使 LCA 的方法有了一定的方法论依据，使 LCA 进入实质性地推广之中。1993 年国际标准化组织开始起草环境管理系列的(ISO14000)国际标准，正式将生命周期评价纳入该体系。

1997 至 2000 年间, 关于生命周期评价的国际标准 ISO14040-ISO14043 《环境管理—生命周期评价—原则与框架; 目标与范围确定, 清单分析; 生命周期影响评价; 生命周期解释》相继颁布。参照国际标准, 我国相继出台了 GB/T24040-1999 《环境管理生命周期评价原则与框架》及 GB/T24040-2000 《环境管理生命周期评价目的与范围的确定和清单分析》等国家标准。2002 年又出版了 GB/T24042 《环境管理—生命周期评价—生命周期影响评价》、GB/T24043 《环境管理—生命周期评价—生命周期解释》。至此, 生命周期评价已经成为企业在可持续经营与环境保护上的重要评价工具。

(2) LCA 概念及意义

LCA 是一种评价产品、工艺过程或活动从原材料的采集和加工到生产、运输、销售、使用、回收、养护、循环利用和最终处理整个生命周期系统有关的环境负荷的过程。LCA 突出强调产品的“生命周期”, 早期曾被形象地称为“从摇篮到坟墓”的评价。它通过对整个生命周期内能量和物质的使用及释放的辨识和定量, 评价其对环境的影响, 寻求改善环境影响的机会以及如何利用这种机会。

国际标准组织 ISO 对 LCA 的定义如下:“生命周期评价是在产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价”。而 SETAC 对 LCA 的定义为:“生命周期评价是一种对产品、生产工艺以及活动对环境的压力进行评价的客观过程, 它是通过对能量和物质利用以及由此造成的环境废物排放进行辨识和量化来实现的。”

关于 LCA 的定义, 尽管表述不尽相同, 但各国机构采用的评价框架与内容已经趋向一致, 即 LCA 是对贯穿产品生命周期全过程的环境因素和潜在影响的研究。

(3) 生命周期评价的技术框架

作为环境管理工具和环境保护手段, LCA 主要通过分析研究生命周期全过程的能源、物质使用情况和环境排放情况来估算产品、工序和生产活动造成的环境负荷, 然后评估这种影响, 最后辨别和评价减少这种影响的机会。LCA 按照其技术复杂程度可分为三类: 根据有限的、通常是定性的清单分析来评估环境影响的概念型 LCA, 包涵全部生命周期, 但仅限于进行简化的评价的简化型 LCA 和包涵目的和范围确定、清单分析、影响评价和结果解释全部步骤的详细型 LCA。

1993 年环境毒理学和化学学会 (SETAC) 在“生命周期评价纲要——实用指南”中将 LCA 描述成四个相互关联的组分组成的三角型模型, 它们分别是目标定义和范围界定、清单分析、影响评价和改进评价, 如图 2-4 所示^[150]。

1997 年 ISO 颁布的 ISO14040 标准中, LCA 的分析步骤分为目的和范围的确定 (ISO14040)、清单分析 (ISO14041)、影响评价 (ISO14042)、结果解释与改

进评价（ISO14043），如图 2-5 所示^[151]。

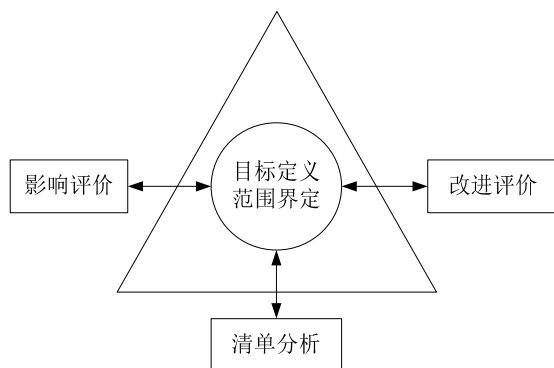


图 2-4 SETAC 的 LCA 技术框架

Figure 2-4 Technical framework of LCA by SETAC

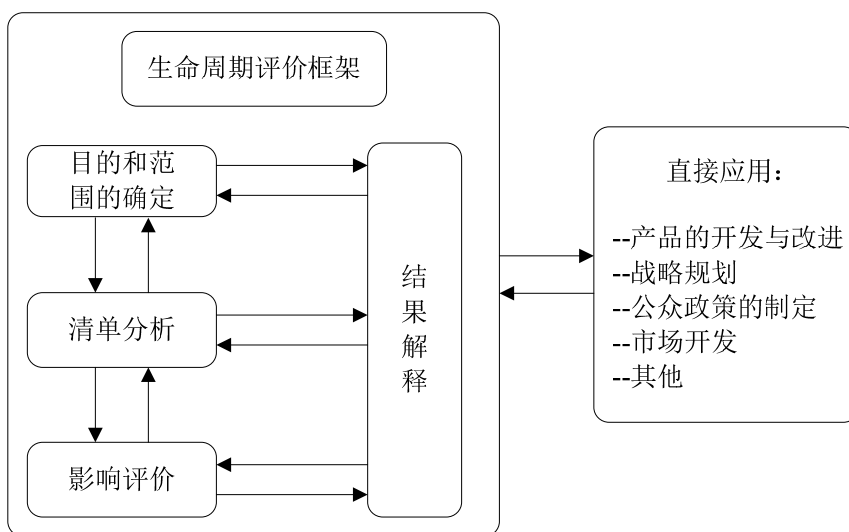


图 2-5 ISO 的 LCA 技术框架

Figure 2-5 Technical framework of LCA by ISO

两种技术框架最大的区别在于第四步，SETAC 定义为前瞻性的“改进评价”，侧重于在前三步的基础上提出改进建议。而 ISO 定义为回顾性的“结果解释”，由敏感性分析和一般性分析组成，研究整个分析的可靠性。以 ISO14040 系列标准为例，LCA 的主要步骤包括：

1) 目标和范围的确定

根据项目研究的应用意图和决策者的信息需求，确定评价目的，并根据评价目的来确定研究范围，包括系统功能、功能单位、系统边界、环境影响类型、数据要求、假设和限制条件等。这是生命周期评价的第一步，直接影响到整个评价工作程序以及最终研究结论的准确度。功能单位是衡量待分析对象功能所选用的定量单位。当 LCA 用于比较分析两个产品的环境影响时，需要基于同一基准进行。系统边界包括空间、时间和环境影响三种边界。在进行生命周期评价时，首先需要根据研究目的，确定研究对象所在的空间区域，所包括的时间范围，以及所研究的环境负荷种类。生命周期评价是建立在清单数据基础上的。因此需要根

据研究目的确定对数据的质量要求：即对数据时间阶段、空间范围和精度等方面的要求。

2) 清单分析

清单分析是一份关于所研究产品或生产活动整个生命周期过程的数据清单，这份数据清单记录了会形成环境负荷的相关物质的输入和输出量信息。清单分析主要包括数据收集与确认、数据与特定系统的关联和分配、数据的合并与检验等工作。输入—输出清单模型（Input-output Model）是目前国际 LCA 评价中最常用的数据处理模型，应用该模型进行评价，输入数据一般是产品或工程所耗用的原料和能源用量，输出数据一般为各类污染物的排放量以及副产品产量。清单模型数据的获得主要有两种途径：一是对某产品的生产过程进行跟踪从而获得清单数据；另一种方法是按照行业的输入输出总量进行统计。前一种途径包括了整条生产链的清单数据，获得的数据精度高，可以区别不同工艺过程的环境影响程度，但往往清单数据庞大，工作量巨大。后一种途径只能反应行业总体的环境影响程度，无法区分个别行业的环境影响水平，但相对工作量小，易于实行。

3) 影响评价

影响评价就是对产品或生产活动生命周期过程中的各种环境影响进行评价。它需要对清单阶段所识别的环境影响进行分类、特征化和加权，使清单数据进一步与环境影响联系起来，让非专业的环境管理决策者更容易理解。这是生命周期评价最重要的阶段，也是最重要的环节，目前还缺乏公认的统一方法。

4) 结果解释

根据规定的目的和范围，综合考虑清单分析和影响评价的发现，从而形成结论并提出建议。结果解释需要根据前几个阶段的发现，尽量客观地分析结果、得出结论、解释结果的局限性，提出建议。说明应尽可能易于理解，完整一致。

（4）生命周期评价的局限性

生命周期评价方法是为解决产品的环境问题而发展起来的一种评价工具，它并不是万能的，在范围、方法、数据等多方面存在着一定的局限性。

首先，在应用范围上，只能反映研究对象整个生命周期内的环境冲击或环境影响，不可能涉及到经济、社会、文化等方面的因素；在评价范围上，如系统边界的确定存在一定的主观性，造成清单数据来源的不确定性，因此研究成果在研究区域内可能适用，在其他区域要考虑时间和空间不同造成的影响。

其次，LCA 的实施既依赖于 LCA 标准，也依赖具体执行实施者对方法的理解和对评价对象的认识程度，以及自身的经验和背景，如目的和范围界定存在很大的主观性，有许多环节因为信息来源或科学背景不详而被省略，这样就影响了评价的客观性和完整性，造成不同评价者对同一对象所做评价，结论不同。

第三,生命周期评价缺乏标准化的清单分析方法;数据来源和数据量化分配具有很大的困难,缺乏有效的标准化的数据库;将清单分析结果转化为影响评价指标时,缺乏标准、科学的模型;造成评价结果可比性差,也会对其可信度产生一定的影响。

第四, LCA 涉及整个生命周期的评价,并且不同地区产品或工艺对环境有不同影响, LCA 均须对此进行评价,因此工作量较大,这就带来一个时间和费用的问题。

(5) 生命周期评价的发展趋势

生命周期评价的发展趋势归纳起来有如下特点:

1) 科学问题简单化

以往的 LCA 研究多局限于专业的科学研究,仅仅为少数研究人员所掌握。这种情况制约了该学科向社会推进的步伐。近年来,在 LCA 研究领域出现了被称为简化 LCA 的概念,但简化的具体方法缺乏共识。

2) 清单数据的标准化

清单分析数据是决定 LCA 结果的最重要基础。目前,各国 LCA 研究确定的系统边界、数据选择标准、分析处理方法不太一致。清单数据不标准,使得 LCA 的结果常常无法得到令人信服的解释。

3) 重点从清单分析向影响评价转移

当前国际上 LCA 的研究,很多只是停留在清单分析阶段,未进行影响评价。清单分析的结果以各种各样的表格表示,难以反映环境问题的总体特征和趋势,尤其在政策支持和消费支持方面缺乏可理解性。

2.2.2 碳足迹研究概述

碳足迹的概念最早出现于英国 2007 年 6 月的一个学术研讨会,与会学者综述了 1960-2007 年的 Scopus 和 Science Direct 中的 42 篇文章,从生态足迹(ecological footprint)、碳排放(carbon emission)、温室气体排放(GHG emission)等人类环境影响特别是温室气体排放的研究中归纳出了“碳足迹”这个词条^[10],用以表述某一产品或组织的碳排放量的多少。

(1) 碳足迹的概念分析

虽然目前尚未有碳足迹的准确定义,但是许多学者和组织对于碳足迹的概念进行了研究,针对不同的研究对象,提出了碳足迹的定义和研究方法,如表 2-2 所示。

针对碳足迹定义分歧较大的问题, Glen 等(2010)试图将碳足迹概念应用到不同尺度和对象,并将碳足迹从一个单一的量的概念延伸扩展为一种温室气体排放的度量方法,即认为碳足迹是指在气候的影响下,具有特定功能单元在一定时空

和系统边界内考虑所有活动的碳排放的专门度量方法^[152]。

表 2-2 部分学者和组织对碳足迹的定义

Table 2-2 Conceptions of Carbon Footprint created by some scholars and organizations

学者/组织	“碳足迹”的定义	对象	单位	方法
Wiedmann 等 (2007)	碳足迹一项活动中直接和间接产生的二氧化碳排放量, 或者产品的各生命周期阶段累积的二氧化碳排放量 ^[153] 。	活动	CO2 质量当量	--
Carbon Trust (2007)	碳足迹是衡量某一种产品在其全生命周期中所排放的CO2 以及其他温室气体转化的CO2 等价物 ^[154] 。	产品	CO2 质量当量	过程分析
WRI/WBCSD (2007)	将碳足迹定义为三个层面: 第一层面是来自机构自身的直接碳排放; 第二层面将边界扩大到为该机构提供能源的部门的直接碳排放; 第三层面包括供应链全生命周期的直接和间接碳排放 ^[155] 。	组织	CO2 质量当量	过程分析
Hammon (2007)	碳足迹是一个人或一项活动所产生的碳重量, 建议称碳足迹为碳重量。 ^[156]	活动	CO2 质量当量	过程分析
B P (2008)	碳足迹是指人类日常活动过程中所排放的CO2 总量。 ^[157]	不同尺度对象	CO2 质量当量	投入产出分析
BSI (2008,2011)	某个特定活动或实体产生温室气体排放量 ^{[158][159]} 。	产品/服务	CO2 质量当量	过程分析
Matthews (2008)	商品或服务在生产、运输、使用、处置的整个生命周期内排放的温室气体总量。 ^[160]	产品/服务	CO2 质量当量	过程分析
Barthelmie (2008)	产品或活动在整个生命周期中产生的CO2 总量 ^[161] 。	产品/服务	CO2 质量当量	过程分析
Strutt 等 (2008)	某项活动在整个生命周期或特定时段内排放到环境中 (或从环境中去除) 的CO2、CH4、N2O 及氟化物等气体的量 ^[162] 。	产品/服务	CO2 质量当量	过程分析
Edwards 等 (2009)	在商品的生产、加工、销售及使用过程中排放的温室气体总量 ^[163] 。	产品	CO2 质量当量	混合法
Sinden (2009)	产品在生命周期内产生的温室气体的影响 ^[164] 。	产品	CO2 质量当量	投入产出分析
Larsen 等 (2009)	某一边界内消费的商品和服务在生产、消费整个生命周期中排放的温室气体量 ^[165] 。	产品/服务	CO2 质量当量	投入产出分析
Druckman 等 (2009)	由某一活动直接及间接引起的CO2 排放总量, 或是某一产品在整个生命周期内累积的CO2 排放总量 ^[166] 。	产品/服务	CO2 质量当量	投入产出分析
Hertwich 等 Baldo 等 (2009)	用于最终消费的商品、服务在生产及消费过程中排放的CO2、CH4、N2O及氟化物等温室气体的量 ^{[167][168]} 。	产品/服务	CO2 质量当量	投入产出分析

(2) 碳足迹的研究对象及研究方法

碳足迹研究的目标是提供一种用于评估不同尺度的功能单元在一定时空和

排技术和策略的制定提供依据。目前碳足迹思想的应用范围已经扩展到个人/家庭碳足迹、产品/服务碳足迹、组织碳足迹、国家/城市碳足迹等各个层面。目前碳足迹的研究方法主要有三种，第一种是投入产出分析法，第二种生命周期评价方法，第三种是混合研究方法。

投入产出分析法主要通过编制投入产出表及建立相应的数学模型，反映经济系统各部门之间的相互关系，被广泛应用于区域产业构成分析、区域相互作用分析，以及资源利用与环境保护等各个方面。采用投入产出分析法进行碳足迹研究时，由于其数据多为国家、地区、行业或部门平均数据，不利于碳足迹的精确分析和研究，同时无法进一步精确的具体的碳源碳汇分析、减排潜力分析及其经济技术评价等，所以主要应用于城市大尺度或宏观层面的碳足迹评价研究^[169]。而生命周期评价是自下而上计算碳足迹的过程分析方法，分析数据、过程和结果更具有针对性和准确性，适合于产品等小尺度或微观层面的碳足迹评价研究。而混合研究方法，则将投入产出分析和生命周期分析结合，其精确性高于投入产出分析法，而比生命周期评价方法更为简介和灵活。不同尺度对象的碳足迹及其研究方法，如图 2-6 所示。

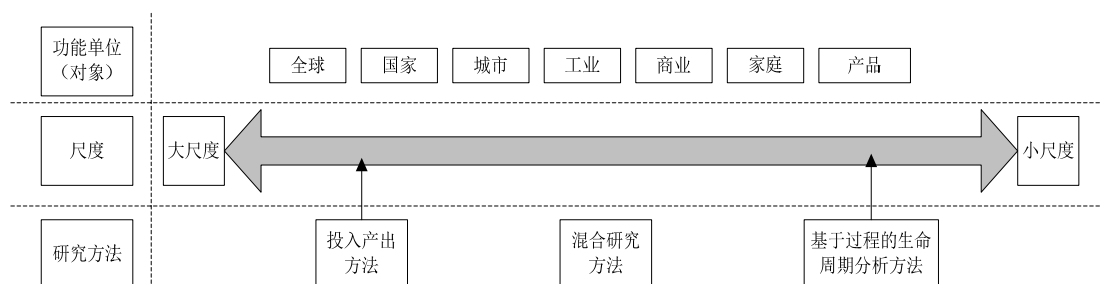


图 2-6 不同尺度对象的碳足迹及研究方法

Figure 2-6 Carbon footprint and research methods for different scale objectives

（3）产品碳足迹的概念

产品是指能够提供给市场，被人们使用和消费，并能满足人们某种需求的任何东西，包括有形的物品、无形的服务、组织、观念或它们的组合。产品碳足迹（Product Carbon Footprint, PCF）是指某个产品在其整个生命周期内的温室气体排放，即从原材料开采、生产、销售、使用和最终处理再利用等生命周期（即“从摇篮到坟墓”）所有阶段内的温室气体排放。其中，固体、液体废弃物处理、运输及其他相关活动的碳排放可以作为生命周期的一部分，也可以作为单独阶段进行处理。

（4）产品碳足迹评价的研究框架和研究内容

生命周期评价是对一个产品系统的生命周期中的输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价，产品碳足迹评价，则仅对产品系统生命周期与温室气体排放有关的输入、输出及潜在的气候暖化影响进行分析和评价；采用LCA方法进行产品

碳足迹评价研究，也可以说对在产品LCA的节选，分析与温室气体和气候暖化有关的功能单位、单元过程、产品、物质和能量的输入、输出，并分析计算由这些造成的温室气体排放及其全球暖化的影响。所以，采用LCA方法进行产品碳足迹研究时，其框架与LCA评价基本一致，主要包括碳足迹目标与范围界定、清单分析、影响评价、结果解释等，其框架如图2-7所示。

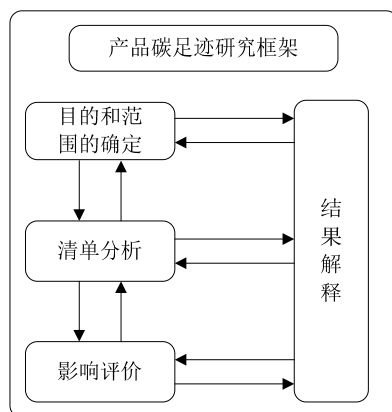


图2-7 基于LCA的产品碳足迹研究框架

Figure 2-7 Research framework of PCF based LCA

1) 产品碳足迹研究目的和范围的确定

目前，气候暖化及其危害日益严重，产品碳足迹研究的重要性和紧迫性愈发的明显，其研究目标是评估产品生命周期内温室气体排放情况，并分析其对气候暖化的影响。产品碳足迹评价的研究范围主要包括：确定产品系统、功能及功能单位、系统边界、分配程序、特殊温室气体排放处理方法、温室气体及气候暖化的计算和评价方法、数据要求等。

产品碳足迹评价与 LCA 一样将产品的生命周期作为产品系统进行模拟，该系统具有一个或多个特定功能。一个产品系统的基本性质取决于它的功能，而不能仅从最终产品的角度来表述。一般来说对于产品系统的分析是通过流程图的形式实现的，产品生命周期的流程图可以展示出各个单元过程和他们之间的相互关系。单元过程之间通过中间产品流和(或)待处理的废物流相联系，与其他产品系统之间通过产品流相联系，与环境之间通过基本流相联系。

确定产品碳足迹研究的系统边界，即确定在产品碳足迹评价研究时系统的哪些单元过程需要被计入，而选择取决于研究的目的和范围、应用意图和沟通对象、所做的假设、数据和费用的限制，以及取舍准则。一般来说，在设定系统边界时，原材料的获取、产品生产、使用、废弃等几个生命周期阶段，这些阶段中的能源利用、燃烧过程、化学反应等单元过程和流都需要被考虑，以确保研究的完整和准确。

2) 清单分析

产品碳足迹评价清单分析是对产品生命周期内的能量与原材料需要量，以及

产品碳足迹评价清单分析是对产品生命周期内的能量与原材料需要量,以及对环境温室气体进行以数据为基础的客观量化过程。要求对所需数据进行收集和计算。清单分析的核心是建立以产品功能单位表示的产品系统的输入和输出。也就是说为明确与产品系统相关的输入、输出而收集数据进行温室气体排放计算的阶段。产品碳足迹评价清单分析的主要内容包括数据收集、数据确认、数据与单元过程和功能单位的关联、系统边界的优化、分配程序(再利用和回收的分配程序)等。同时,与 LCA 不同的是,在进行产品碳足迹评价清单分析时有一些特别需要注意的内容,如碳源碳汇的评价期、特殊碳源碳汇的处理方式等。

数据的收集是生命周期内每一个单元过程中的定性和定量的数据,用以量化单元过程的输入输出,其中输入数据主要包括能量输入、原材料输入、辅助性输入和其他实物输入,输出主要包括产品、共生产品和废弃物、固液气态废弃物可能引起的温室气体排放。而输入输出数据确定的方法则方法包括检测、计算和估计等。

数据清单是清单分析中的一项重要内容。数据清单主要有两种,即单元过程数据清单和产品汇总数据清单。单元过程数据清单是以研究的单元过程为依据建立起来的,主要内容应包括单元过程的环境输入和输出,环境参数的单位,数据来源,建立的时间等。其中,输入项包括原材料、能量等;输出项则包括气体排放、液体排放、固体排放和产品或中间产品。

3) 影响评价

产品碳足迹研究仅关注众多环境影响中温室气体引起的气候暖化,产品生命周期内温室气体排放和清除的潜在环境影响评价,一般通过温室气体排放量与其 100 年的全球变暖潜势(GWP)的乘积表示,产品碳足迹是这些温室气体气候暖化影响的总和¹,主要包括二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、氢氟碳化物、全氟碳化物及六氟化硫等,通常以CO₂作为基准,GWP作为其余温室气体的特征化因子,用温室气体含量与GWP因子的乘积表示各种物质全球变暖潜在影响的贡献。如表 2-3 所示,主要温室气体的全球变暖潜在特征化当量因子。

4) 结果解释

产品碳足迹评价的结果解释主要包括重大问题识别、完整性、敏感性、一致性等检查、结论、局限和建议等内容。根据确定的目的和范围以及与评价要素的相互作用,对LCI或LCIA阶段得出的结果进行组织,以便有助于确定重大问题;评估的主要目的是建立和增强识别的重大问题的LCA或LCI研究结果的可信性和

¹严格来说,对于温室气体造成的温室效应和全球暖化的影响评价应该界定在一定的时间范围内(评价期内),即应考虑在一定浓度条件下,CO₂等温室气体随时间的衰减系数,对于在评价期内不同时间产生的温室气体在评价期内造成的温室效应和全球气候暖化的影响是不同的,本文在进行产品碳足迹研究和计算将这种情况忽略。

一致性检查等；针对产品碳足迹评价的研究，针对不同的对象形成结论、识别局限，并提出建议。

表 2-3 主要温室气体的全球变暖潜在特征化当量因子^[45]

Table 2-3 GWP of major greenhouse gases

物质	分子式	全球变暖潜在当量因子 (gCO ₂ /g 物质)		
		20 年	100 年	500 年
CO ₂	CO ₂	1	1	1
甲烷	CH ₄	62	23	8
氮氧化物	NO _x	290	320	180
CFC-11	CFCl ₃	6300	4600	1600
CFC-12	CF ₂ Cl ₂	10200	10600	5200
HCFC-22	CHF ₂ Cl	4800	1700	540
HCFC-141b	CFCl ₂ CH ₃	2100	700	220
HCFC-142b	CF ₂ ClCH ₃	5200	2400	740
HFC-134a	CF ₂ FCF ₃	3300	1300	400
HFC-152a	CHF ₂ CH ₃	410	120	37
四氯化碳	CCl ₄	2700	1800	580
三氯乙烷	CH ₃ CCl ₃	450	140	42
氯仿	CHCl ₃	100	30	9
二氯甲烷	CH ₂ Cl ₂	35	10	3
一氧化碳	CO	2	2	2

2.3 住区低碳技术分析理论与方法 (Theory and Method of Low-Carbon Technique Analysis)

2.3.1 低碳技术分类

低碳技术的创新和应用是减少温室气体排放、应对气候暖化和发展碳经济的重要支持。低碳技术与低碳经济相伴而生，是与以利用石油、煤炭等能源资源为主，排放大量的二氧化碳及其相关物的高碳技术相对而言。广义来讲，低碳技术是指能有效控制温室气体排放的技术，对应于温室气体的产生和消除的整个过程，主要包括三个方面：

(1) 开始端，即为了人类发展而进行的所有活动的选择，对应的低碳技术可称为“无碳技术”，即在满足人类经济、社会、环境发展的前提下，选择不会产生温室气体排放的活动，例如将传统化石能源的使用，改变为绿色可再生能源使用行为；

使用行为;

(2) 过程中,即为了人类发展而进行的所有会产生温室气体排放的活动中,对应的低碳技术可称为“减碳技术”,即在会产生温室气体排放的活动中,减少温室气体的排放量和排放程度,例如提高能源利用的效率;

(3) 终点端,即处理已经排放出的温室气体,对应的低碳技术可称为“除碳技术”,即将温室气体从大气中的清除,以其他的形态“存储”,例如碳捕获与埋存(CCS)、绿化固碳等。

住区低碳技术是建筑领域的低碳技术,是指住区的规划设计、材料设备生产、运输、施工、运行、维护更新、处置在利用等生命周期各个阶段的低碳排放技术的总称,包括住区低碳规划设计技、住区建筑材料设备的低碳生产技术、材料设备的低碳运输技术、住区低碳施工技术、住区的低碳使用技术、住区低碳维护更新技术、住区低碳处置及再利用技术、既有住区低碳改造技术等。

2.3.2 低碳住区技术分析的原则

(1) 因地制宜原则

低碳技术低碳理念源于可持续发展思想,本身强调实事求是和因地制宜。我国幅员广大、气候条件、地理环境、自然资源、经济发展、生活水平与社会习俗等差异性巨大,这要求在低碳技术策略上要考虑因地制宜。因地制宜的原则体现在,不是每种低碳技术在任何气候、地理条件和不同的建筑类型都适用。

(2) “权衡优化”和总量控制原则^[170]

低碳住区希望消耗最少的资源能源,给环境和生态带来的影响最小,尤其是减少温室气体排放,同时,又要为住区的居住和使用者的提供健康舒适的建筑环境与良好的服务,这本身就存在一定的矛盾。一般来说,追求优良的建筑质量和舒适健康的环境往往需要付出较大的资源和环境负荷,并导致成本的增加,显而易见的是“豪华住区”和“原始部落”这两个极端,都不是低碳住区所提倡的,所以必须通过低碳住区技术来解决这一矛盾,并在总量上进行控制。

(3) 生命周期评价原则

低碳住区的实现和发展,不仅仅关注点一阶段的碳排放的减少,更要从住区生命周期碳足迹评价和和碳源碳汇分析的结果,对低碳技术的生命周期碳排放量和住区生命周期及各阶段碳排放的影响程度,进而对不同的技术进行分析对比,确定适用的低碳技术。

(4) 全过程控制原则

在低碳住区的实施的各阶段中,低碳思想和低碳技术能否得到持续有效的贯彻和应用,对于低碳住区能否实现至关重要,任何阶段和环节的技术缺失或失效,都可能导致低碳住区的失败,因此低碳技术的全过程控制、分阶段的管理显得尤

为重要。

(5) 经济性原则

低碳住区的发展,不是传统住区和低碳技术的简单叠加,更不等同于高科技或高成本住区,其强调的是通过低碳技术的创新和优化运用,实现资源、能源的节约和循环使用,强调因地制宜和材料的本地,从而将初期的成本增量尽量减小,并通过的节能、节水、节材等措施在最短的时间内收回。

(6) 无悔减排原则

无悔减排(non-regret mitigation)概念由IPCC提出,是指即使全球没有变暖,人类也要做的一些有助于减排的行为,做了总不会后悔。无悔减排意味着无成本或者低成本也能减排,或者说在应对气候变化的同时,不以牺牲经济发展为代价的减排,也是一个国家或城市实现可持续发展的减排。从经济学的意义上,无悔减排是指可以实现经济回报大于成本投入、并在一定程度上减少碳排放的行动。所以,在住区低碳技术的选择和应用中,应该坚持优先选择那些无悔减排技术。

2.3.3 低碳技术选择的内容和程序

(1) 低碳住区技术的分类

根据住区碳足迹评价及各阶段、生命周期碳源碳汇分析结果,结合现有的节能建筑技术、绿色建筑技术、生态可持续建筑技术等,从住区系统结构的空间角度和住区生命周期的时间角度,分析确定各个阶段、各个系统对象的适宜低碳技术的选择范围;

(2) 住区低碳技术分析

比较各个阶段低碳技术对住区生命周期碳足迹的影响程度,分析其减排潜力;对于低碳建筑材料和设备的相关分析时,还应加强其本身的碳排放情况,即考虑材料设备物化碳排放与住区使用阶段碳排放的关系。

(3) 低碳住区技术体系的建立

针对不同气候地区 and 不同建筑类型的住区,根据低碳住区技术的分类和减排潜力分析,确定各阶段和各个结构系统较为通用和适宜的低碳住区技术,建立相应的低碳住区技术体系。

2.4 住区低碳成本效益理论分析 (Theoretical Analysis of Cost effectiveness of Urban Settlements Low-Carbon)

住区低碳发展需要在一定技术、经济条件下的一种均衡情况下才能得以实施。除了技术上的可行,成本上是否合理,同样是住区利益相关者和研究者非常关注的问题。低碳技术的应用无疑会造成住区成本和效益的变化,这些成本和效益的变化不确定,对于政府、开发商、消费者等住区利益相关者造成困扰和疑

惑，成为低碳住区的实施和发展的一个重要障碍。

2.4.1 减排领域和建筑产品成本效益分析方法比较

对于温室气体减排的成本分析，一般分为部门/区域、技术/项目两个层面。对于部门/区域的减排成本分析一般建立在“局部均衡”的条件下，采用自上而下的宏观经济和一般均衡模型进行分析，讨论部门和区域的减排成本、政策措施对部门和区域的影响情况；而分析单个技术/项目的减排成本基于的假设是其不会对其他领域产生重大的二次影响，其主要研究方法是自下而上的成本效益分析和生命周期分析等方法。

建筑产品成本效益的分析，一般主要从技术/项目、国家/社会两个层面以及经济、社会、环境三个方面进行。目前，一般传统的建筑产品的成本分析主要是从技术/项目、国家/社会来个层面和经济角度进行的，主要运用工程经济和技术经济方法对建筑产品进行技术经济、财务和国民经济等分析评价；同时，对于社会和环境方面的分析则一般采用多目标准则的定量和定性分析方法。

由于温室气体减排的显著性外部性特性，所以，本文认为对于城市住区低碳减排的成本效益，需要运用成本效益理论和生命周期理论，采用工程经济和技术经济分析的方法，从经济、环境、社会三个方面分析研究。

2.4.2 住区低碳减排的成本效益特性分析

住区低碳成本效益分析将住区成本效益分析的对象和内容作为已知条件，分析并确定能够实现住区减排目标的技术和经济路径，并在一定的技术、经济、政策、环境约束条件下研究比较技术和经济路径的优劣。低碳住区成本效益分析基于成本效益理论，其基本思想、原理和分析方法基本相同，但是，低碳住区和节能、绿色等新型建筑产品一样，由于其不同的关注点，使得他们的成本效益与传统建筑产品的成本效益分析存在差异，在利用成本效益理论和方法对低碳住区进行分析和研究时，应该充分考虑其特异性：

（1）从空间角度看，住区低碳发展受到外部性效应的影响。

所谓外部效应是指在实际经济活动中，生产者或者消费者的活动对其他生产者或消费者带来的非市场性影响^[171]。低碳理念本身就从根本上强烈的经济外部性，必须建立在全球气候谈判、交流与合作以及各国政府的减排计划和减排政策工具实施和应用的基础上，否则，市场经济主体仅从自身的利益，很难做到自主的减排。在建筑领域的减排，由于经济外部性的存在，住区的低碳发展需要一定的政策和措施的支持，例如强制性的建筑排放标准、认证，经济和市场领域的碳税、减排补贴，国际上的碳排放交易等。

（2）从时间角度看，住区低碳发展受到时间效应的影响。

时间效应是由于人的时间偏好造成的,在社会和经济活动中,人们一般都喜欢先效益后支出成本,例如,在经济活动中一般倾向于认为现在的一笔资金比将来同等数额的资金价值更高,即资金的时间价值,在社会、环境方面的成本支出和效益的获取也是一样。虽然住区的低碳减排更多的关注生命周期经济、社会、环境的成本和效益,而非仅仅考虑初期成本的增加,但遥远以后发生的环境破坏和节约的成本,由于人的时间偏好而变得不那么重要。因此,受时间效应的影响,低碳住区的成本效益分析更多的应关注在有低碳技术等造成的增量成本和效益的分析,运用生命周期思想,从经济、社会和环境三个方面进行,以分析确定低碳住区尤其是低碳技术引发的成本增量生命周期内是否有效益、有多少效益、什么时候开始有效益等问题。

(3) 从技术和经济的角度看,低碳住区受到效益递减效应的影响。

效益递减是指人类的经济活动都是通过投入得到产出,当投入增加时产出虽然也能增加,但是最后必定会达到效益递减的状态,即产出的增加赶不上投入的增加。换句话讲,从投入得到产出的活动,其效率最后必然是递减的。在住区和其他建筑类型的低碳减排过程中,无论是单个的低碳减排技术、材料,还是整个低碳住区的低碳技术体系,都并不是一味的增加成本,就可以获得更好的减排效益,在一定的自然环境、社会环境、功能定位和成本预算等条件限制下,一般都呈现出初期的成本线性增长时,后期的成本曲线下降的现象。因此在进行技术和经济分析时,需要对单个低碳技术进行优化分析,进而确定在不同限制条件下低碳住区的成本效益最优,即在住区的哪些方面进行低碳成本的投入,增加多少,才能使住区的经济、环境和社会效益最大。

从上面的分析中可以看出,低碳住区成本效益分析与传统建筑存在较大的差别,除了传统的成本和效益的识别、分析和对比,还必须考虑外部性、时间效应和效益递减效应等问题。

2.4.3 住区低碳成本效益分析的原则

(1) 以项目技术层面的经济成本效益分析为主,兼顾国家/社会层面的经济、社会、环境成本效益分析;

根据国内外绿色、节能建筑等新型建筑产品的相关研究表明,技术/项目层面的经济成本和效益的变化是最为显著,也是利益相关者最为关注的,同时,住区或其他建筑领域许多的低碳减排措施和技术从生命周期来看是负成本的,属于典型的“无悔减排”技术措施,并且可以取得相应的社会和环境效益。住区低碳减排的经济成本和效益的变化主要是由低碳技术引起的,所以对于住区的成本效益变化的分析应该以项目技术层面的经济成本效益分析为主。

然而,低碳住区的关注点是低碳,与传统住区相比显现出更为强烈的环境和

社会效益。同时,引起低碳住区成本发生变化的原因是多方面的,比如政策方面强制性的法律法规、建筑标准、激励性的节能减排补贴,经济方面的技术投资,环境方面的地域环境、气候环境,住区开发商业动机和住区减排定位等,由此带来不同程度的经济、社会、环境效益的改变,所以,在进行住区成本效益分析时,在经济成本效益分析的同时,应兼顾国家/社会层面的经济、社会、环境成本效益分析。

(2) 有无对比原则和增量分析原则

由于较传统住区相比,住区低碳减排的成本效益变化是由于低碳技术、政策、经济、环境等措施和影响因素造成的,对于传统住区或建筑产品成本效益分析的思想和方法已经建立,并已付诸实施和应用,对于住区低碳减排成本效益的分析可以建立在传统住区成本效益分析的基础上,将传统住区作为比较基准,视为“无”,而将低碳住区较传统住区增加的低碳技术、政策、经济等措施视为“有”,并对这些“有”进行成本效益分析,而分析的方法则应采用增量分析的方法,即对其产生的增量成本和增量效益进行分析比较。

(3) 全方面、全过程分析的系统性原则

住区低碳减排的成本效益的变化可能出现在生命周期的每一个过程和环节,同时不同阶段和不同影响因素的成本效益的改变,都可能对其他阶段和其他影响因素产生不同程度的影响,所以,对于住区成本效益的分析,不应只局限于某个阶段和某个影响因素,而应该从住区生命周期全过程和技术、经济、政策、环境的多方面统筹考虑。

(4) 定量分析的原则

一般的成本分析方法包括成本效益分析、成本效益分析、成本效用分析和成本可行性分析等,成本效益分析与其他成本分析方法相比,最大优点便是分析评价指标的统一,即将成本和效益统一采用货币化价值表示。在住区低碳技术、经济、社会、环境等措施和影响因素中,经济成本和效益的分析一般都采用货币化价值指标,社会成本效益和环境成本效益分析评价一般多采用多目标准则分析评价方法,需要通过社会经济学、环境经济学等理论和方法将社会和环境成本和效益采用货币化指标表示,使得对不同措施的分析 and 比较更为直观清晰;同时,为分析和评价不同措施减排效果,碳排放和减排的物理量指标也需要单独使用,或与货币化指标结合使用。

2.4.4 住区低碳成本效益分析的内容和程序分析

根据成本效益分析的理论和方法,结合上述分析与研究,可以得出住区低碳成本效益分析的主要内容和程序如下:

(1) 低碳住区成本效益分析模型建立和分析指标的确定

根据低碳住区成本效益分析的目标和环境的分析结果,根据有无对比、增量分析、系统全面和量化分析的原则,从引起住区成本效益变化的主要因素—低碳技术的经济成本的变化角度,并统筹分析由此引起的经济、社会和环境效益:

1) 采用工程经济学原理和方法,分析主要低碳技术的经济成本分析,建立经济成本分析模型,确定相关指标;

2) 根据低碳技术经济成本分析结果和生命周期社会环境情况,采用社会经济学和环境经济学原理和方法,确定社会成本效益和环境成本效益分析模型;

3) 将技术成本效益分析结果和社会、环境成本效益分析结果结合,构建低碳住区总体成本效益分析模型。

(2) 低碳住区成本效益分析

在低碳住区成本效益分析目标、环境明确和分析模型建立的情况下,对引起住区成本效益改变的主要因素进行具体分析。

(3) 低碳技术体系的优化选择模型构建

在不同的成本、节能减排要求和技术约束条件下,根据技术经济、社会 and 环境的成本效益分析结果,采用运筹学 0-1 模型和目标规划的方法,建立基于成本效益分析的低碳技术体系的优化选择模型。

2.5 本章小结 (Brief Summary)

本章主要从从低碳经济、低碳建筑、生命周期评价及碳足迹理论、住区低碳技术和成本效益等几个方面分析了城市住区碳足迹及低碳策略相关的理论基础。构筑我国城市住区碳足迹、低碳技术体系、低碳成本效益研究的研究内容、研究原则和研究框架。

3 城市住区碳足迹研究

3. Research of Carbon footprint of Urban Settlements

3.1 城市住区及其碳排放特性分析 (Characteristics Analysis of Urban Settlements and its Carbon Emission)

城市住区系统众多、生命周期漫长、碳排放边界复杂,这些特征给城市住区碳足迹研究带来巨大的影响。因此,在分析和研究城市住区碳足迹之前,分析城市住区系统构成、内在特征及其碳排放特性,有利于更有效、更有针对性的构建城市住区碳足迹的分析研究方法,克服因住区及其碳排放活动内在特征所带来的各种问题,以确保城市住区碳足迹研究的准确性。

3.1.1 城市住区概述

人类的聚居生活是人类与自然之间相互作用、相互选择、相互适应的过程。居住是人类最主要的生存活动之一,与农村村庄不同,城市住区是城市中实现居民居住功能的重要载体之一,是城市中特定规模下具有一定空间、形态和功能的聚居型式。在城市中,人居环境有几种不同的概念,基本上可以归纳为住宅、住区和社区。其中住宅多指房屋建筑,是一个单体的概念,住宅建设更强调房屋建筑本身的功能合理和建造经济等因素;住区则包括住宅及与其相关的道路、绿地,以及居住所必需的基础设施和公建配套设施等,因此是一个区域的概念,其范围可大可小,包括居住区、居住小区、居住组团等,住区建设侧重于区域范围内居住功能的实现以及居住环境的形成;社区则是属于社会学范畴,一般是指在一定地域范围内的社会群体和社会组织,是根据一整套规范和制度结合而成的社会实体^[172]。

城市居民的一生中,约有三分之二以上的时间是在住区内度过,住区必须满足居民对物质与文化、生理和心理及安全避灾措施等需求,以便为居民创造良好的居住生活环境。目前,我国城市住区的规划主要依据《城市居住区规划设计规范》进行,规范中的居住区泛指不同居住人口规模的居住生活聚居地和特指城市干道或自然分界线所围合,并与居住人口规模(30000—50000 人)相对应,配建有一整套较完善的、能满足该区居民物质与文化生活所需的公共服务设施的居住生活聚居地。

不同居住人口规模的住区,配置不同层次的配套设施。一般来说,一个完整的城市住区系统主要由建筑主体工程 and 一系列的附属结构系统组成,主要包括住宅建筑、公共建筑、道路、绿化、管线系统等相关子系统,如图 3-1 所示。而对

于住区最重要的住宅建筑，其主要是砖混和框架结构形式为主的多层建筑，和以框架、框剪结构形式为主的高层建筑。

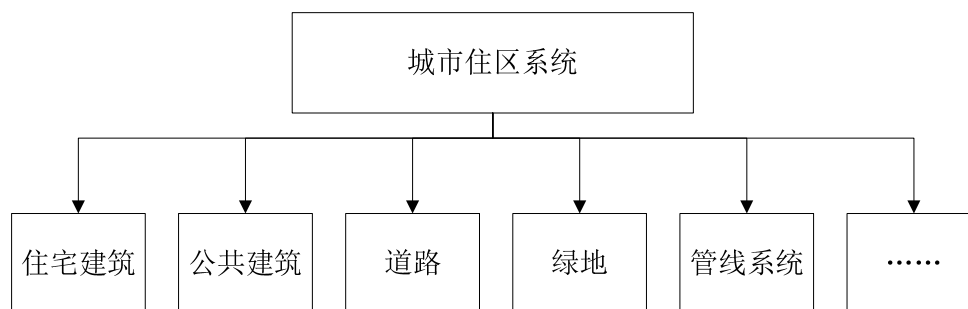


图 3-1 城市住区系统图

Figure 3-1 Urban settlements system

3.1.2 城市住区的建筑产品及其碳排放特性分析

城市住区是城市居住建筑的主要型式，是一种特殊的建筑产品，与一般普通产品在构思、计划、生产、销售的、使用等方面有很大的不同，同时，由于城市住区的碳排放贯穿于城市住区的全过程，城市住区建筑产品的特性对住区碳排放产生巨大的影响。城市住区产品及其碳排放特性主要表现在以下几个方面：

（1）独特性与多样性

一般的工业产品都可以按照统一的设计图纸、同一种生产工艺进行批量生产。因此，一旦某种产品定型，生产工艺和生产流程确定后，即可以重复地、连续地进行生产。然而，几乎每一个城市住区都有其独特的形式和结构，需要一套单独的设计图纸，在生产时采用不同的施工工艺和方案，城市住区生产具有突出的独特性特征。同时，城市住区的单件性特征决定了城市住区的多样性特征。而城市住区独特性与多样性的特征就决定了其碳排放研究的复杂多变性。

（2）体积庞大、资源能源消耗和环境影响大

城市住区体积大，占用空间多，在其生产和使用过程中，消耗的资源以及社会劳动量比一般的工业产品大得多，由此产生的碳排放量也就相应的增多，对环境的影响巨大。

（3）受自然环境、技术条件的影响大

城市住区的构思、决策、设计、计划、生产和使用的各个环节，都受到自然环境和社会环境的影响，不同地理、气候等自然环境和技术、经济、社会环境都会对城市住区的性能提出不同的要求。不同的自然环境，包括地理、气候、地形、位置的等，决定了城市住区的性能要求，如温度、湿度、采光等，这些不同的要求对住区的构思、规划设计、施工建设、运行使用产生巨大的影响，从而影响住区生命周期的资源能源消耗碳排放。同时，住区的建设和使用受到社会技术

水平的制约，不同的技术条件对住区的建设和使用产生巨大的影响，造成不同的能源资源消耗和碳排放。

（4）利益相关者众多

城市住区在生命周期中，利益相关者众多，主要包括开发商、设计单位、施工单位、监理（项目管理）单位、供应商、消费者、政府、金融机构等，这些利益相关者对城市住区存在不同的利益诉求：开发商在决策、设计、建设和销售过程中，更注重的是其投资的回报；消费者在消费购买及使用过程中，则更为注重住区的价格和使用时的性能；政府关注住区规划是否符合城市的整体规划发展和节能减排目标的实现。住区的利益相关者不同的利益诉求，造成了住区的性能的不同，从而影响住区的资源能源消耗和碳排放产生。

（5）生命周期长，受建设程序和生命周期各个阶段的影响大

城市住区和一般的工程项目一样，都经历构思到消亡的一系列过程。从建设程序的角度考虑，城市住区可以划分为，决策设计阶段、建设施工阶段、运行使用阶段和处置再利用阶段等，尽管这些阶段的碳排放相互独立，但前期的决策设计、施工阶段对后期的使用阶段产生巨大的影响，如图 3-2 所示，住区生命周期碳排放量随着时间和资源的投入量的增加而不断增大，其相应的低碳减排能力和机会则不断减少。

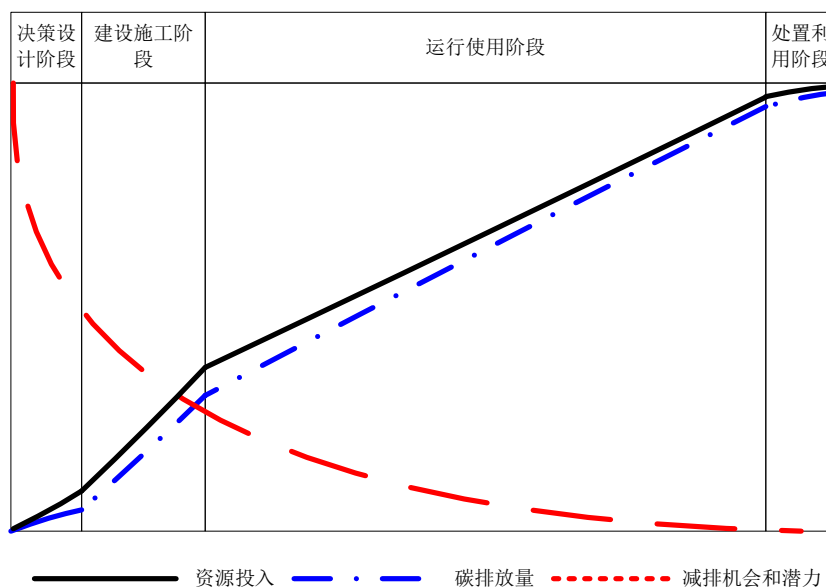


图 3-2 住区生命周期各阶段资源投入、碳排放量及减排成本关系图

Figure 3-2 Resource input, Carbon emission and cost of reduction emission in life cycle

从城市住区产品及其碳排放特性可以看出：一方面，城市住区领域的节能减排，对于整个社会的节能减排目标和经济社会的低碳发展具有重要的意义；另一方面，城市住区一旦未能达到其产品性能和节能减排的目标，将会造成不可逆转的损失。

3.2 城市住区碳足迹研究的目的和原则 (Objectives and Principles of Urban Settlements Carbon Footprint Research)

3.2.1 城市住区碳足迹研究的目的

目前,气候暖化及其危害日益严重,城市住区生命周期内碳排放对建筑领域和整个全球气候暖化存在巨大贡献,城市住区碳足迹评价研究的重要性和紧迫性愈发的明显,其目的和意义表现在:

- (1) 可以为住区利益相关者提供明确、一致的城市住区生命周期、各阶段、重要系统和活动的碳排放定性分析、定量计算的方法和程序;
- (2) 可对城市住区生命周期内主要的碳源碳汇分析,识别重大的减排的潜力的减排机会,以便确定相应的减排策略;
- (3) 有利于优化城市住区规划设计、建设施工方法以及原材料、设备和供应商的选择;
- (4) 有利于提高消费者环保意识,改变消费者购买、使用行为,减少碳排放;
- (5) 可以促进城市住区生命周期内温室气体管理战略和计划的实施和发展,如,城市住区碳排放的评价、认证、标识和监管等体系,并有利于发现产品供应链上的额外效率和减排机会,可以促进城市住区减排效果的长期跟踪、优化调整;
- (6) 有利于城市住区环境管理政策和城市住区生命周期中相关企业社会责任相关政策的制定和实施。

3.2.2 城市住区碳足迹研究的原则

对于城市住区碳足迹研究来说,其研究的范围不仅包括住区的某个阶段,更需要追溯至原料开采、制造,及最终废弃处理阶段,这些阶段都需要纳入碳足迹的研究范围。所以,要达成此目的,需应用生命周期评价 LCA 方法提升碳足迹研究的完整性和准确性。采用生命周期评价方法进行住区碳足迹研究时,应结合 LCA 的相关原则^[36]进行考虑:

- (1) 相关性: 选择适合于研究城市住区所产生的碳源碳汇及相应的计算数据和计算方法;
- (2) 完整性: 研究应包括所有指定的、对评估产品的GHG排放有实质性贡献的温室气体排放和清除;
- (3) 一致性: 采用与城市住区碳足迹研究目标和范围定义相一致的假设、研究方法和数据;
- (4) 准确性: 尽可能地减少偏见、误差及不确定性;
- (5) 透明度: 进行碳足迹研究时,需要公开相关假设、方法和数据,清楚解

释说明评价的过程，同时避免偏见，确保如实反映城市住区真实情况，并真实一致的方式处理和记录评价中的相关问题，确保评价结果的使用者作出相关的决定。

(6) 避免重复计算：尽量避免城市住区生命周期内及系统的温室气体排放和（或）清除的重复计算；

除了上述的原则外，在采用LCA方法进行城市住区碳足迹研究时，应考虑LCA的其他原则和要求，如生命周期观点、以环境为焦点、相对的方法和功能、反复的方法、科学方法优先等原则。

3.3 城市住区碳足迹研究范围分析和界定（Research Scope of urban settlements carbon Footprint）

城市住区是城市的重要组成部分，其最主要的功能是为居住者提供生活居住空间和各类服务设施，以满足居民日常物质和精神生活的需求。城市住区的功能单位则可以按照其功能定义为满足一定数量居住者的正常生活需要提供的住区的物质条件和环境，这些物质条件和环境是依靠城市住区的生命周期的各个阶段、单元过程及其相关的流而实现的。

一般的，一个完整的城市住区由建筑主体工程 and 一系列的附属结构系统组成，主要包括住宅建筑系统、附属公共建筑系统、交通（住区道路）系统、园林绿化系统、能源系统、水系统、废弃物处理系统、相关附属设施等各个子系统等。

从城市住区建设程序角度考虑，城市住区可以划分为，前期策划决策阶段、设计计划阶段、施工阶段、使用阶段等，同时，从生命周期评价的角度看，住区又是一个从自然界获取原材料到住区被最终处置的一系列阶段，包括原材料获取阶段、材料设备生产阶段、施工阶段、运行阶段、处置阶段等。

本文从以上两种分析角度进行的住区生命周期的阶段划分，将城市住区划分为决策设计阶段、原材料的获取和材料设备的生产（含运输）阶段、建设施工阶段、运行维护阶段和处置再利用阶段，如图 3-3 所示，并从这五个阶段对住区碳足迹进行范围分析和界定。

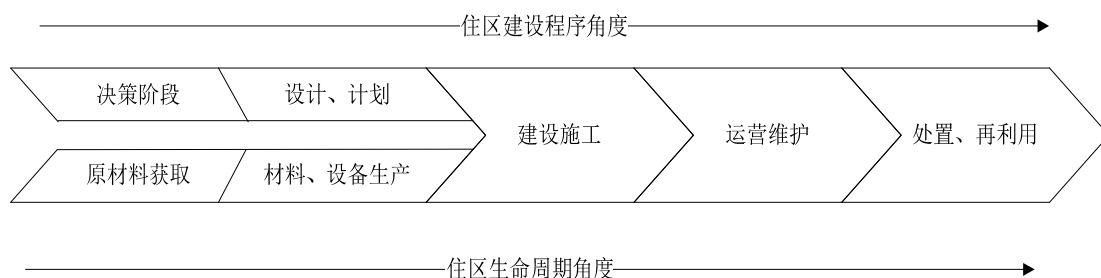


图 3-3 城市住区生命周期阶段划分
Figure 3-3 Urban settlement life cycle phases

本文将分阶段对城市住区碳足迹的边界进行界定,并由此归纳总结出城市住区全生命周期的碳足迹研究边界。

3.3.1 决策设计阶段碳足迹边界分析

决策设计阶段是指从住区构思到现场开工为止,其工作内容包括住区的构思、目标设计、可行性研究和项目立项、设计、计划、招标投标和各种施工前准备工作。这个阶段的碳排放主要是上述活动使用照明、采暖/制冷、办公、交通设备等消耗电力、煤炭、燃油等能源形成的。现有研究表明,这些活动消耗的能源和产生的碳排放占整个住区生命周期中碳排放的比例小于为0.5%,虽然该阶段的资源能源消耗和碳排放量比例很小,但是若不考虑施工、使用阶段人为因素的影响,一旦城市住区的设计方案确定,对住区生命周期尤其是运行使用阶段的能源资源消耗和碳排放会起到决定性的作用。

本文将该阶段的碳排放研究范围界定为相关决策、设计等办公、生活、交通等活动,如图3-4所示。

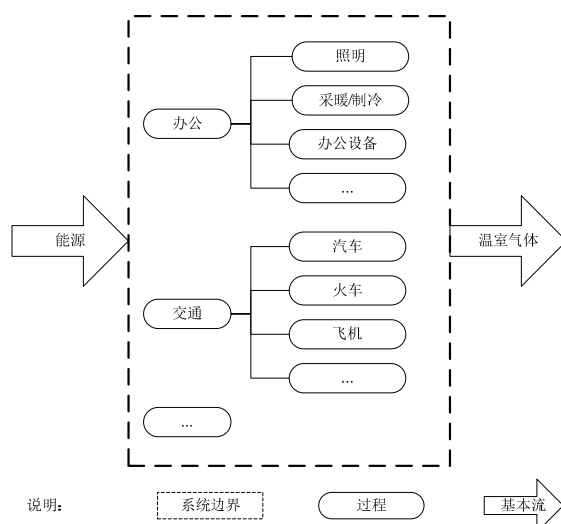


图3-4 城市住区决策设计阶段碳足迹研究系统边界图

Figure 3-4 Urban settlement carbon footprint system boundary in programming & design phase

3.3.2 原材料生产运输阶段碳足迹边界分析

城市住区原材料的获取和材料设备的生产(含运输)阶段是其生命周期碳排放的重要组成部分之一。原材料的获取是从自然界获得住区所需材料,这些原材料有些可以直接用于建设施工活动,如,水、石子、沙子、土方等,但更多的是用于进行材料设备的生产,如石料用于水泥的生产,煤炭、铁矿用于钢材的生产等。原材料获取所产生的碳排放主要是由于在原材料的获取过程中的能源消耗,温室气体逸散、土地利用性质改变等造成的^[173]。

材料设备的生产,是将从自然界获取的原材料加工生产形成住区建设所需要

的材料设备的生产过程。材料设备的生产过程产生的碳排放，主要是材料设备生产中消耗能源、生产过程中的化学过程造成的。而运输过程的碳排放主要是由于不同的运载工具消耗能源造成的。

值得注意的是，无论是从生命周期评价角度、现有的建筑碳排放研究的角度，还是研究可行性的角度，对于研究对象都不可能无限溯源，所以，需要根据研究的目标对材料设备碳排放进行界定。所以，本文将该阶段的碳排放研究范围界定为原材料开采、建筑材料设备生产、加工及相关的运输过程等活动单元，如图3-5所示。这些活动消耗电力、煤炭、燃油等能源，造成相应的碳排放，同时在部分活动过程中可能存在的温室气体逃逸等。

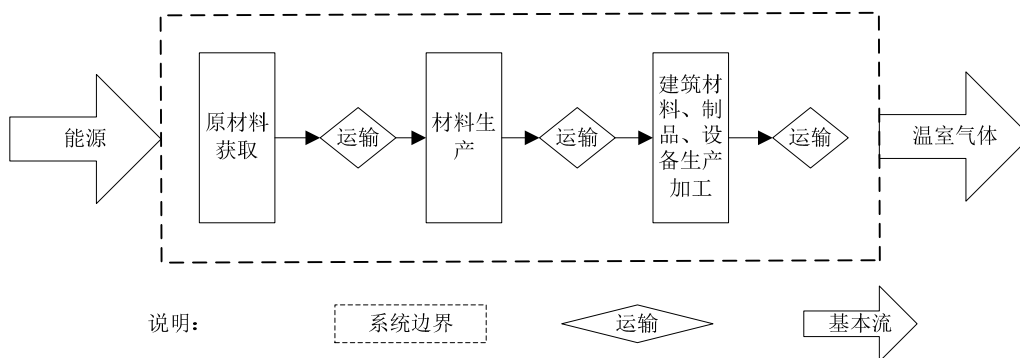


图3-5 城市住区材料设备运输阶段碳足迹研究系统边界图

Figure 3-5 Urban settlement carbon footprint system boundary in material & equipment transportation phase

3.3.3 建设施工阶段碳足迹边界分析

这个阶段从现场开工开始，各专业各部分工程按照设计完成，最终建成整个工程，并通过验收为止。这也是城市住区建筑材料设备投入形成住区各系统和住区最终实体实现的过程。建设施工阶段主要的碳排放是由于住区的建设施工活动、生活活动及相关的管理活动所消耗的能源造成的。主要包括施工区施工机械设备、办公区和生活区的采暖、制冷、照明、电器等。

本文将该阶段的碳排放研究范围界定为建设施工机械设备运行及相关办公、生活、交通等活动。主要包括施工照明、机械、设备照明及办公生活照明、采暖/制冷、办公设备、交通等消耗电力、煤炭、燃油等能源，产生相应的碳排放，如图3-6所示。

3.3.4 运行维护阶段碳足迹边界分析

目前，我国城市住区设计使用年限一般为50年，运行（维护）阶段是住区生命期中时间最长的。住区通过运行实现它的使用价值，包括住宅建筑功能、公共建筑功能、道路功能、绿化功能及相应的住区管理功能等。在这些功能的实现过

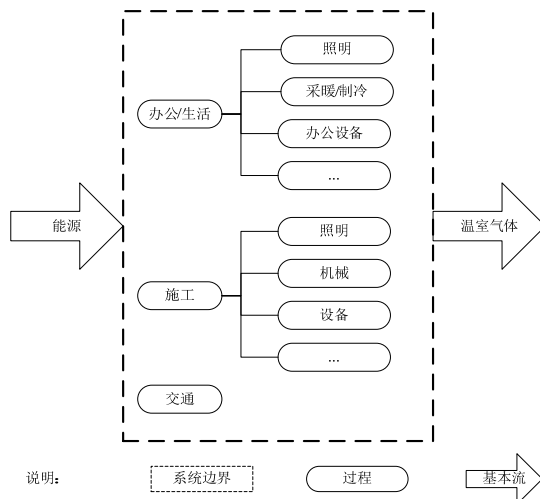


图3-6 城市住区决策施工阶段碳足迹研究系统边界图

Figure 3-6 Urban settlement carbon footprint system boundary in construction phase

程中，采暖、制冷、照明、热水、给排水、绿化管理、住区管理等活动消耗的能源，是住区运行使用碳排放的主要来源。对于炊事、其它家用电器使用等和使用者习惯有很大管理的活动消耗能源造成的碳排放不在本文研究范围内。在住区长达数十年的使用阶段，需要对住区进行经常性维护（维修），可能有对工程的更新改造、扩建等工作，这些活动也会造成碳排放，其碳排放研究的范围界定和决策设计及建设施工阶段相似。同时，住区的绿化可以产生一定量的碳汇。

所以，本文将该阶段的碳排放研究范围界定为住宅及配套建筑照明、采暖/制冷、热水、给排水等及住区绿化、管理、住区维护等活动，如图3-7所示。

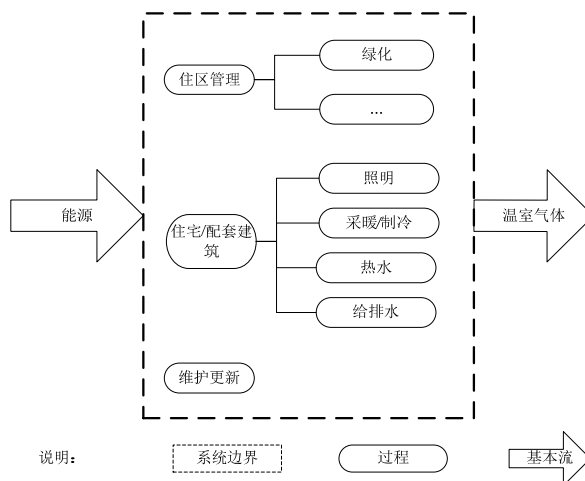


图3-7 城市住区运行阶段碳足迹研究系统边界图

Figure 3-7 Urban settlement carbon footprint system boundary in operation phase

3.3.5 处置再利用阶段碳足迹边界分析

处置阶段可以近似的看成建设施工阶段的逆过程，其碳排放研究边界的与建

设施工阶段研究边界类似, 本文将该阶段的碳排放研究范围界定为施工机械设备运行、相关办公、生活、资源回收、交通、运输等活动。主要包括施工照明、机械、设备照明及办公生活照明、采暖/制冷、办公设备、交通等消耗电力、煤炭、燃油等能源, 造成相应的碳排放和资源回收的碳汇。城市住区碳排放系统边界分析汇总如图3-8所示。

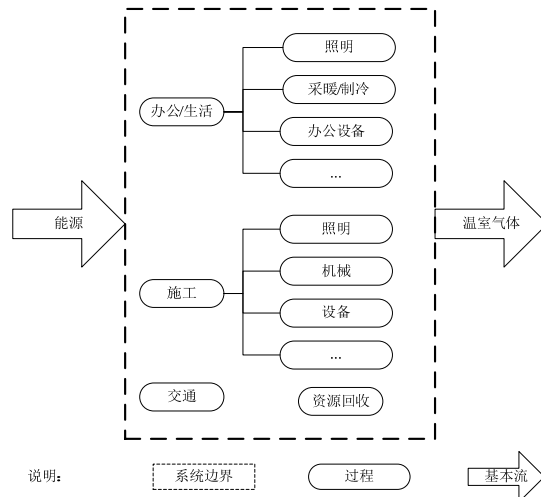


图3-8 城市住区处置再利用阶段碳足迹研究系统边界图

Figure 3-8 Urban settlement carbon footprint system boundary in disposing & reuse phase

3.3.6 城市住区碳足迹研究生命周期边界

通过以上对城市住区五个阶段的边界分析, 可以得到生命周期内城市住区碳足迹研究的边界, 如图 3-9 所示。

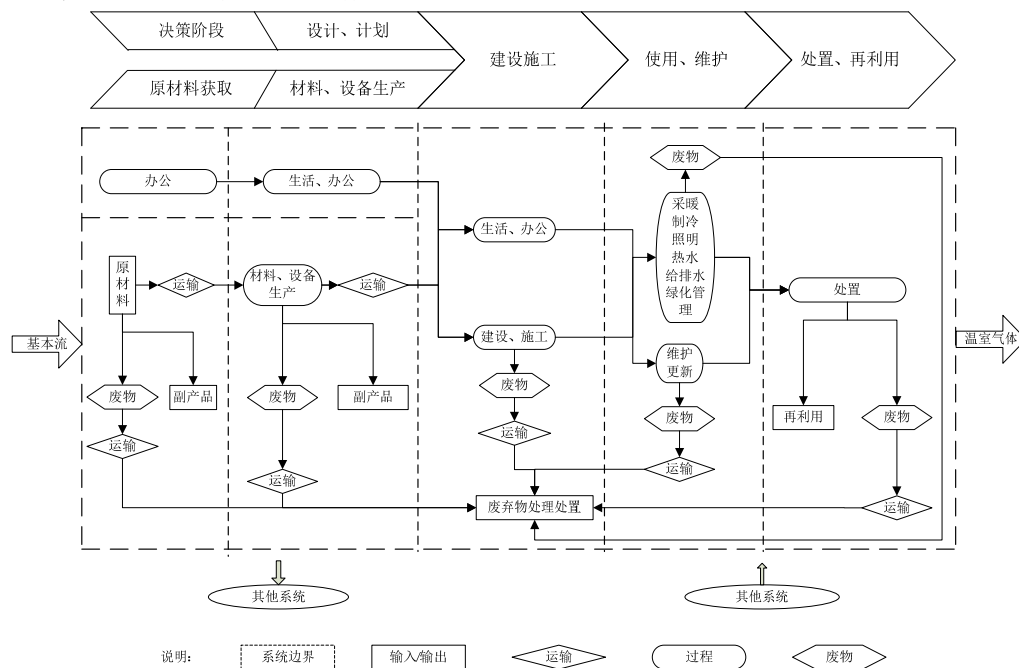


图 3-9 城市住区碳足迹研究总体范围

Figure3-9 Boundary of Urban settlement carbon footprint system

3.4 城市住区碳足迹清单分析 (Inventory Analysis of Urban Settlements Carbon Footprint)

3.4.1 决策设计阶段碳足迹清单分析

通过3.3.1小节对住区决策设计阶段碳足迹范围的分析结果可知,住区决策设计阶段的主要碳排放是由办公、生活等活动消耗的各类能源引起的。所以,该阶段的主要清单分析工作主要包括照明、采暖/制冷、办公设备使用等单元过程的活动水平和相应的能源排放因子的确定。

(1) 城市住区决策设计阶段相关活动排放因子分析

能源、资源消耗产生的碳排放,不仅是在决策设计阶段,同时也是城市住区生命周期其他各个阶段碳足迹的重要组成部分,所以确定能源碳排放因子对住区各个阶段及生命周期的清单分析都是十分重要的。目前,城市住区生命周期内涉及到能源主要有煤炭、石油、天然气等化石能源、电力能源和水资源等。

1) 化石能源碳排放因子

能源碳排放因子(Carbon Emission Factor)是指消耗单位质量能源伴随的温室气体的生成量,是表征某种能源温室气体排放特征的重要参数,也是计算碳足迹的基础数据。它将有关活动的数据和温室气体排放相关联。

目前,化石能源的碳排放因子一般通过一定范围内的能源消耗和碳排放的统计方法,或者实验测定方法进行,然而,无论这两种方法的哪一种都是非常艰难和复杂的,所以在进行相关的碳足迹研究时,都进行化石能源碳排放因子的统计和测定是不可能和不必要的。国内外许多组织和机构都对通过不同的方式和方法确定并发布了化石能源排放因子,如表3-1, 3-2, 3-3所示。

表3-1 国内外部分组织发布的煤炭碳排放因子汇总表

Table3-1 Carbon emission factor of coal released by domestic and overseas organizations

发布机构		碳排放系数 kg(c)/kg		CO ₂ 排放系数 kg(co ₂)/kg
国内机构和组织	中国工程院	0.68		2.4956
	国家发展和改革委员会能源研究所	0.7476		2.743692
	国家环境局温室气体控制项目	0.748		2.74516
	国家科委气候变化项目	0.726		2.66442
	国家科委北京项目	0.656		2.40752
国外机构及组织	IPCC—国家温室气体排放清单	原煤	0.7559	2.774153
		精洗煤	0.7559	2.774153
		焦煤	0.855	3.13785
	美国能源部/美国能源信息协会	0.702		2.57634
	美国橡树岭国家实验室	0.719		2.63873
	日本能源经济研究所	0.756		2.77452

注: CO₂排放系数=碳排放系数*44/12

表3-2 国内外部分组织发布的石油碳排放因子汇总表

Table3-2 Carbon emission factor of petroleum released by domestic and overseas organizations

发布机构		碳排放系数 kg(c)/kg		CO2排放系数 kg(co ₂)/kg
国内机构和组织	中国工程院	0.54		1.9818
	国家环境局温室气体控制项目	0.583		2.13961
	国家科委气候变化项目	0.583		2.13961
	国家发展和改革委员会能源研究所	0.591		2.16897
	国家科委北京项目	0.5825		2.137775
国外机构及组织	IPCC—国家温室气体排放清单	原油	0.5857	2.149519
		汽油	0.5538	2.032446
		煤油	0.5714	2.097038
		柴油	0.5921	2.173007
	美国能源部/美国能源信息协会	0.478		1.75426
	美国橡树岭国家实验室	0.585		2.14695
	日本能源经济研究所	0.586		2.15062

表3-3 国内外部分组织发布的天然气碳排放因子汇总表

Table 3-3 Carbon emission factor of natural gas released by domestic and overseas organizations

发布机构		碳排放系数 kg(c)/kg	CO ₂ 排放系数 kg(co ₂)/kg
国内机构和组织	中国工程院	0.41	1.5047
	国家环境局温室气体控制项目	0.444	1.62948
	国家科委气候变化项目	0.409	1.50103
	国家发展和改革委员会能源研究所	0.4435	1.627645
	国家科委北京项目	0.452	1.65884
国外机构及组织	IPCC—国家温室气体排放清单	0.4483	1.645261
	美国能源部/美国能源信息协会	0.389	1.42763
	日本能源经济研究所	0.449	1.64783

注：组织碳足迹和产品碳足迹计算中都需要追溯上游电力生产过程的温室气体排放，但二者在边界范围上也有差别。组织碳足迹的范畴只需包含发电过程，而产品碳足迹的计算还需追溯电力上游燃料和原料的生产及运输过程。

2) 电力能源碳排放因子

电力能源是目前最重要、使用最广泛的二次能源。城市住区在其生命周期各阶段中直接和间接的使用大量电力能源，因此电力能源消耗产生的碳排放在住区生命周期及各个阶段的碳足迹中都的常常占有显著的比例。所以，电力能源碳排放因子的准确性对城市住区碳足迹的研究和核算有重要的影响。

作为二次能源的电力，其碳排放因子的确定较石化等初级能源碳排放因子的确定更为复杂，主要受到发电的能源结构的影响，目前的主要包括火电、水电、风电、核电等。除此之外，电力能源碳排放因子还受到电站建设形式、发电系统、

输配电系统性能等因素影响。因此,对于电力能源碳排放因子的确定主要靠统计计算的方法确定。

目前,国内外一些组织和机构也确定和公布了电力能源碳排放因子,如表3-4所示。

表3-4 国内外部分组织发布的电力能源碳排放因子汇总表

Table 3-4 Carbon emission factor of electrical energy released by domestic and overseas organizations

发布机构		碳排放系数 kg(c)/ kwh	CO ₂ 排放系数 kg(co ₂)/kwh
国内机构和组织	中国工程院	0.26	0.9542
	国家环境局温室气体控制项目	0.286	1.04962
	国家科委气候变化项目	0.278	1.02026
	国家科委北京项目	0.251	0.92117
国外机构及组织	美国能源部/美国能源信息协会	0.269	0.98723
	日本能源经济研究所	0.29	1.0643

此外,为了更准确、更方便地开发符合国际CDM规则和中国清洁发展机制重点领域的CDM项目,以及中国温室气体自愿减排项目(CCER项目),国家发展和改革委员会应对气候变化司根据国内六大电网的发电量、能源结构、网间调配等情况,研究确定了中国区域电网的基准线排放因子,并每年予以发布。表3-5为2014年中国区域电网的基准线排放因子。

表3-5 2014年中国区域电网的基准线排放因子

Table 3-5 2014 China regional power grid line-based emission factor

地区区域		排放因子 kg(co ₂)/kwh	
		EF _{grid,OM,y}	EF _{grid,BM,y}
华北区域电网	北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、内蒙古西部地区	1.0580	0.5410
东北区域电网	辽宁省、吉林省、黑龙江省、内蒙古东部地区	1.1281	0.5537
华东区域电网	上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省	0.8095	0.6861
华中区域电网	河南省、湖北省、湖南省、江西省、四川省、重庆市	0.9724	0.4737
西北区域电网	陕西省、甘肃省、青海省、宁夏、新疆	0.9578	0.4512
南方区域电网	广东省、广西自治区、云南省、贵州省、海南省	0.9183	0.4367

注:(1) EF_{grid,OMsimple,y}是第y年简单电量边际CO₂排放因子;

EF_{grid,BM,y}是第y年的BM(M个样本)排放因子。

(2) 表中OM为2010-2012年电量边际排放因子的加权平均值;BM为截至2012年的容量边际排放因子。

3) 给排水碳排放因子

水是城市住区生命周期中重要的资源，在城市住区生命周期中可以将水分为给水和排水两个部分进行考虑，城市给排水系统的碳排放与城市水量、水质、水压、水温、水生产和雨污水处理技术等因素有密切相关，其排放因子取决于制水和污水系统建设、运行和维护过程中能源和物质的消耗及水处理过程中生化反应产生的温室气体。

目前，我国给水行业平均的制水能耗为 $0.3\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{m}^3$ ，主要是由于制水过程中动力消耗；而我国污水处理的电力消耗引起的碳排放为 $0.25\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{m}^3$ ，污水处理过程中碳源转化引起的碳排放为 $0.55-0.85\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{m}^3$ ，所以污水处理的碳排放因子为 $0.80\text{kg}-1.10\text{g}(\text{CO}_2)/\text{m}^3$ ^[174]。

(2) 决策设计阶段相关活动的活动水平分析

城市住区决策设计阶段碳排放的相关活动主要是由相关办公、生活活动引起的照明、采暖、制冷、办公设备使用等。相关的活动水平主要是相关设备电力、热力等消耗量，可以通过对电力、热力消耗量的统计方法获取，如用电量可以通过电表读数或电费电量查询等获得。

(3) 决策设计阶段碳排放清单计算

通过对住区决策设计阶段碳足迹相关活动水平和排放因子的分析，完成相关数据的审定和关联，本文通过列表形式完成清单的计算，如表3-6所示。

表3-6 决策设计阶段碳排放清单计算表

Table 3-6 Carbon emission inventory calculation table for planning and design phase											
序号	单元过程	活动水平				排放因子				时间 (月)	碳排 放量 (kg)
		电 力	煤 炭	汽 油	柴 油	电 力	煤 炭	汽 油	柴 油		
		kwh	kg	kg	kg	kg(co ₂)/kwh	kg(co ₂)/kg	kg(co ₂)/kg	kg(co ₂)/kg		
1	照明										
2	电器										
3	供热										
4	制冷										

3.4.2 建筑材料生产（含运输）阶段碳足迹清单分析

建筑材料生产阶段碳排放是住区生命周期碳足迹的重要组成部分，现有研究

表明，该阶段碳排放是除了运行阶段碳排放量外所占比例最大的。这一阶段碳足迹活动水平数据和排放因子的确定，就是对住区建设施工所需建筑材料数量和材料设备排放因子的确定。同时，本阶段还考虑建筑材料运输产生的碳排放，主要考虑的是运输方式及其排放因子。

(1) 建筑材料生产（含运输）阶段碳排放因子分析

1) 建筑材料碳排放因子分析

住区使用的建筑材料设备众多，每种材料生产所处的自然环境、社会环境和技术环境的不同，且多数建材设备不是一次建材，需要进行多次的加工处理，这些因素使材料设备的碳排放研究十分复杂。虽然，理论上可以对这些建材设备分别进行碳排放分析，但是，这样将使工作变的异常繁琐。目前，建材设备生产的环境影响、内涵能和碳排放等方面的研究资料不少，常用的研究方法包括LCA方法、投入产出分析法，混合计算方法等；同时，在许多组织和企业发布的建筑环境影响分析数据库中，也包含的部分材料设备的碳排放情况的信息，所以，本文对现有研究成果进行整理、统计，并进行相应的计算，将主要的建材设备碳排放因子整理如表3-7所示。

表3-7 主要材料设备碳排放因子汇总表

Table3-7 Carbon emission factors summary sheet for main materials and equipments

材料设备类别	材料设备名称	单位	排放因子 T (CO ₂) /单位	备注
一次建材	沙	T	0.002	
	碎石	T	0.002	
	水泥	T	0.73	
	石灰	T	1.2	
	钢材	T	2.6	
	生铁	T	2.3	
	铸铁	T	2.5	
	铜	T	3.8	
	铝	T	9.5	
预制混凝土	C20混凝土	M ³	0.23	
	C25混凝土	M ³	0.25	
	C30混凝土	M ³	0.27	
	C35混凝土	M ³	0.29	
	C40混凝土	M ³	0.31	
	C50混凝土	M ³	0.35	

材料设备类别	材料设备名称	单位	排放因子 T (CO ₂) /单位	备注
建筑砂浆	砌筑砂浆M2.5	M ³	0.15	
	砌筑砂浆M5	M ³	0.19	
	砌筑砂浆M7.5	M ³	0.22	
	砌筑砂浆M10	M ³	0.26	
	1: 1水泥砂浆	M ³	0.13	
	1: 2水泥砂浆	M ³	0.10	
	1: 3水泥砂浆	M ³	0.07	
	1: 1: 2混合砂浆	M ³	0.10	
	1: 1: 4混合砂浆	M ³	0.08	
	1: 1: 6混合砂浆	M ³	0.05	
墙体材料	加气混凝土块	M ³	0.17	
	烧结砖	T	0.14	
	烧结多孔砖	T	0.17	
门窗材料	PVC塑料门窗框	T	4.6	
	玻璃	T	1.40	
	铝合金固定	M ²	0.018	白玻5mm
	铝合金平开	M ²	0.020	白玻5mm
	铝合金推拉	M ²	0.023	白玻5mm
陶瓷制品	建筑陶瓷	T	1.40	
	卫生陶瓷	T	2.3	
管材	UPVC水管	T	4.7	
	PPR管	T	6.2	
采暖设备	铸铁散热器	M ²	0.06	
	钢管散热器	M ²	0.03	

注：根据文献[8][56][173][174]整理。

2) 建筑材料运输碳排放因子分析

建筑材料设备运输的碳排放主要是由运输工具消耗能源造成的，所以对于其碳排放的核算主要是对不同运输工具消耗能源量的统计，进而结合能源碳排放因子，得到建筑材料设备运输碳排放量。能源碳排放因子前文已经进行分析，然而对于运输工具能耗量的统计却比较复杂，不仅因为材料设备种类数量和运输方式的繁多，而且，铁路运输和水路运输等存在的碳排放的分配问题，因为这些运输工具往往不是单独运输一种货物，采用统计运输工具能源消耗量与能源因子结合

的方法,进行材料设备运输碳排放核算往往并不可行,尤其是采用铁路运输和水路运输时。

可以看出,在材料设备运输过程中,运输能耗主要受到运输方式、能源类型和运输距离的影响。目前,我国的建材设备运输方式主要有公路运输、铁路运输和水路运输等,而这些运输方式又可能采用不同的运载工具,这些运载工具有不同的运载能力和能源效率、消耗不同的能源类型,造成不同的碳排放强度。运输能耗及其影响因素的关系如图3-10^[175]所示。

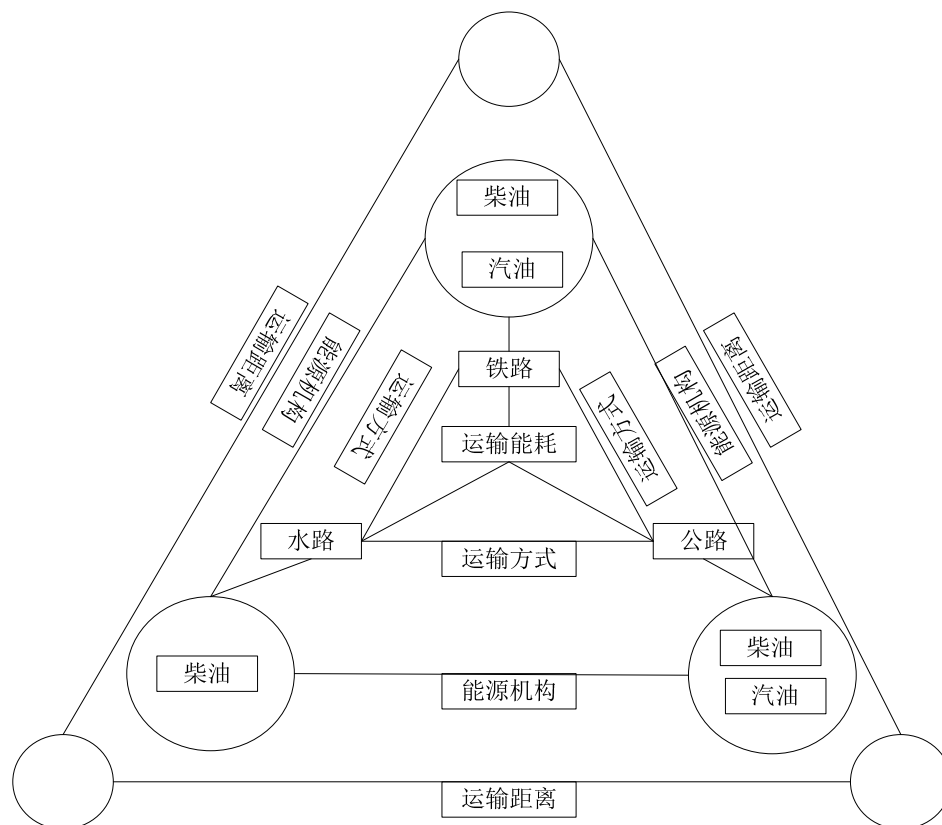


图3-10 运输能耗及其影响因素的关系图

Figure 3-10 Transportation Energy consumption and influence factors relation

从图3-10中可以看出,要对运输碳排放进行核算,可以分析的单位质量(体积、数量)的材料设备,使用不同运载工具和能源类型,在单位距离消耗能耗产生的碳排放量,并与材料质量、运输距离结合得到。所以,本文的建筑材料运输碳排放因子即为单位质量(体积、数量)的材料设备使用不同运载工具和能源类型,在单位距离消耗能耗产生的碳排放量。

以铁路运输为例,根据《中国统计年鉴2014》,本文对不同的铁路机车类型、数量及能耗水平按比例进行分配,可以得到我国铁路运输的单位运距碳排放量,即排放因子为 $77.61\text{kg}(\text{CO}_2)/(\text{10}^4\text{t}\cdot\text{km})$,相关数据和计算过程,如表3-8所示。

同理,可以计算得出,公路和水路运输单位运距碳排放量(排放因子)分别为 $1880\text{kg}(\text{CO}_2)/(\text{10}^4\text{t}\cdot\text{km})$ 和 $177\text{kg}(\text{CO}_2)/(\text{10}^4\text{t}\cdot\text{km})$ 。

表3-8 我国铁路运输的单位运距碳排放量计算表

Table 3-8 Rail transportation unit distance of carbon emissions calculation table

机车类型	能源类型	能源CO ₂ 排放系数	能耗水平	排放因子	日产量	比例	1km铁路运输CO ₂ 碳排放量
内燃机车	柴油	2.17 kg(CO ₂)/kg	27.3 kg/(10 ⁴ t*km)	58.807 kg(CO ₂)/(10 ⁴ t*km)	106.0 (10 ⁴ t*km)	0.41	24.11 kg(CO ₂)/(10 ⁴ t*km)
电力机车	电力	0.89 kg(CO ₂)/kwh	101.9 kwh/(10 ⁴ t*km)	90.691 kg(CO ₂)/(10 ⁴ t*km)	154.3 (10 ⁴ t*km)	0.59	53.51 kg(CO ₂)/(10 ⁴ t*km)
我国铁路运输的单位运距（1km）平均碳排放量（排放因子）							77.61 kg(CO ₂)/(10 ⁴ t*km)

- 注：1. 内燃/电力机车所占比例由内燃机车日产量和电力机车日产量数据得出。
 2. 内燃/电力机车1km运输CO₂碳排放量=内燃机车/电力机车能耗水平*能源CO₂排放系数。
 3. 我国铁路运输的单位运距（1km）平均碳排放量（排放因子）=内燃机车1km运输CO₂碳排放量*内燃机车日产量比例+电力机车1km运输CO₂碳排放量*电力机车日产量比例。

（2）建筑材料生产（含运输）阶段相关活动的活动水平分析

城市住区建筑材料生产（含运输）阶段的相关活动主要是指材料设备的生产和运输情况，需要明确的活动水平数据主要包括材料设备的使用量和材料设备的运输距离。

在建设施工之前材料设备的使用量主要可以通过工程量清单等资料获取，而运输距离的确定可以参考当地类似工程或采用全国或各地区的建材平均运输距离，例如，全国范围内钢材的平均运输距离为1146km。在施工建设完成后，材料设备的使用量则可以根据施工单位建筑材料设备实际使用量，而运输距离也同样收集建材的实际运输距离，相关数据可以通过施工单位的统计报表、竣工决算书等文件获得。

（3）建筑材料生产（含运输）阶段碳排放清单计算

通过对住区决策设计阶段碳足迹相关活动水平和排放因子的分析，完成相关数据的审定和关联，本文通过列表形式完成清单的计算，如表3-9所示。

表3-9 建筑材料生产（含运输）阶段碳排放清单计算表
Table 3-9 Carbon emission inventory calculation sheet for materials manufacture（transportation）
phase

序 号	建 材 名 称	建 材 用 量	单 位	建筑材料生产碳排放		建筑材料运输碳排放				总碳 排放 量	
				生产碳 排放因 子	生产碳排放 量	运 距	运输排放因子				运输 碳排放量
							铁 路 运 输	公 路 运 输	水 路 运 输		
1											
2											
3											
4											
....											
合 计											

3.4.3 建设施工阶段碳足迹清单分析

建设施工阶段主要的碳排放是由于住区的建设施工活动、相关的管理活动、生活活动所消耗的能源造成的。主要包括施工区施工机械设备耗能、办公区和生活区的采暖、制冷、照明、电器用电等。

（1）办公区和生活区碳足迹清单分析

对于施工阶段办公区和生活区的碳足迹清单分析过程与决策设计阶段碳足迹清单分析类似，本文不再赘述。

（2）施工区碳足迹清单分析

施工区碳足迹主要的清单分析内容主要是各种施工机械设备能耗量的确定。施工机械设备数量型号众多，使用情况复杂，同时，机械设备的能耗量与施工单位的施工组织方案、现场管理水平有很大关系，且施工单位又缺乏相关能耗统计的意识和动力，往往致使施工机械设备能耗统计数据缺失，这些因素的存在大大增加了施工区机械设备能耗量统计和碳足迹清单的难度。

要确定施工区的碳足迹，需要对拟建住区进行施工过程分析，运用WBS方法将其施工过程逐级分解，划分为一系列可能会使用到机械设备的技术的过程单元，如图3-11所示；对每个过程单元进行分析，这些过程单元即为施工区的碳足迹清单。

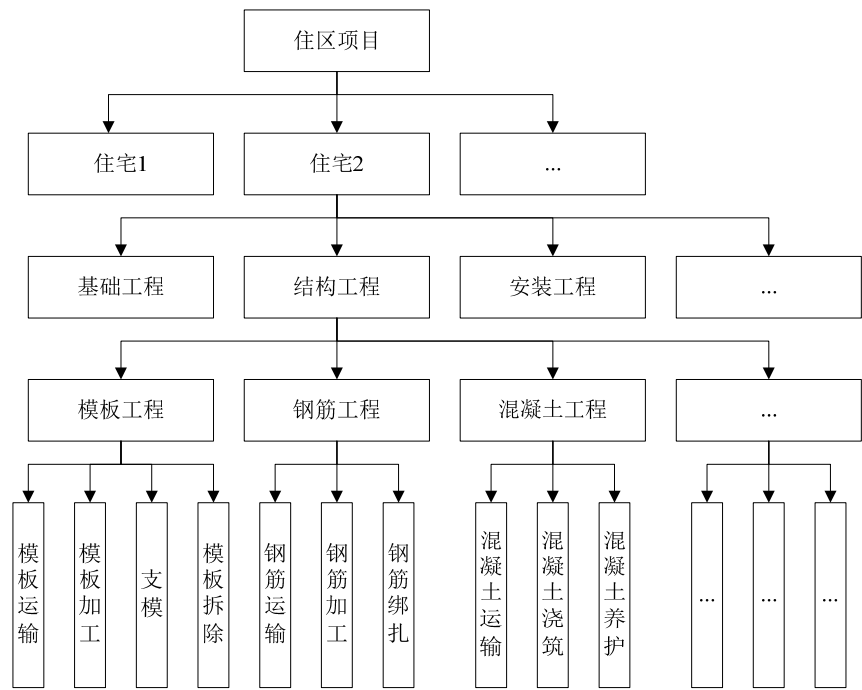


图3-11 施工过程WBS分解图
Figure3-11 WBS of construction process

(2) 施工区相关活动的活动水平分析

结合清单分析的结果，通过工程量清单，并结合全国和各地的《建筑工程消耗量定额》、《机械台班费用编制规则》、《施工机械台班费用定额》中各个分部分项工程、措施项目、单位工程量的机械设备台班的能耗量；最后，与各分部分项、措施项目所需台班数及相应能源的排放因子结合，即可以得到各个施工工艺的碳排放量，从而确定施工区内碳排放量。而在建设施工完成后，根据使用单位现场的各类机械设备能耗量统计，并与相应能源排放因子结合，则可以获得更为准确的施工区内碳排放量。

以住区住宅结构工程的钢筋工程为例，根据《施工机械台班费用定额》，钢筋加工机械规格型号及对应的单位台班的能耗，如表3-10。

表 3-10 钢筋加工机械单位台班能耗
Table 3-10 Energy consumption of steel reinforcement processing mechanical units machine-team

机械台班定额编号	机械名称	规格型号	单位台班能耗 kwh /台班	能源排放因子 kg (co ₂)/kg	单位台班能耗 Kg (CO ₂) /台班
7-1	钢筋调直机	直径/mm Φ14	11. 90	0. 95	11. 305
7-2	钢筋切断机	直径/mm Φ40	32. 10	0. 95	30. 495
7-3	钢筋弯曲机	直径/mm Φ40	12. 80	0. 95	12. 16
7-4	钢筋镦头机	直径/mm Φ5	42. 47	0. 95	40. 35
9-13	直流电焊机	功率/kW 30	90. 80	0. 95	86. 26
9-18	对焊机	容量/kVA 75	122. 90	0. 95	116. 755

在《施工机械台班费用定额》中，对于不同直径的钢筋调直、切断、弯曲和焊接的机械台班消耗量又有不同的标准，例如，不同直径单位质量（1t）的钢筋调直消耗的台班、能耗及产生的碳排放，如表3-11所示：

表 3-11 钢筋加工调直工序单位能耗
Table 3-11 Unit energy consumption Steel straightening processing

定额编号	机械名称规格型号	单位台班能耗 kwh/台班	定额编号	钢筋直径	台班消耗量台班/t	单位能耗kwh/t	单位质量碳排放量 Kg(CO2) /t
7-1	钢筋调直机直径 Φ14 mm	11. 90	5-294	Φ6.5	0. 37	4. 40	4. 18
			5-295	Φ8	0. 32	3. 81	3. 62
			5-307	Φ10	0. 33	3. 93	3. 73
			5-308	Φ12	0. 31	3. 69	3. 51
			5-309	Φ14	0. 22	2. 62	2. 49

同理，可以得出不同直径单位质量（1t）的钢筋进行切断、弯曲、焊接消耗的能耗及产生的碳排放。同样的，可以由《建筑工程消耗量定额》、《机械台班费用编制规则》、《施工机械台班费用定额》等得出其它各个分部分项工程、辅助工程等机械台班的能耗和碳排放量。

（3）建设施工阶段碳排放清单计算

通过对住区建设施工阶段碳足迹相关活动水平和排放因子的分析得出，施工阶段碳排放即为生活办公区域和施工区碳排放，具体的计算清单，如表3-12所示

表 3-12 建设施工阶段生活、办公区碳排放清单计算表
Table 3-12 Carbon emission inventory calculation sheet for living and working area

序号	单元过程	活动水平				排放因子				时间 (月)	碳排放量
		电	煤	汽	柴	电力	煤炭	汽油	柴油		
		力	炭	油	油						
		kwh	kg	kg	kg	kg(co ₂)/kwh	kg(co ₂)/kg	kg(co ₂)/kg	kg(co ₂)/kg		
1	照明										
2	电器										
3	供热										
4	制冷										
...											

3.4.4 运行维护阶段碳足迹清单分析

住区运行维护阶段可以分为住区运行和住区维护两个部分。其中，住区的维护可以近似的理解为又一次的决策设计、材料设备生产运输、施工建设过程，对住区维护更新的分析，可以参考决策设计、材料设备生产运输、建设施工阶段的分析。所以，住区运行维护阶段碳足迹的分析主要是对运行部分进行。

(1) 住区运行阶段相关活动排放因子分析

通过对住区运行碳排放边界的分析，住区运行主要的碳排放是由住宅/配建中的采暖、制冷、照明、热水、给排水以及住区绿化、住区管理过程中的能源资源消耗造成的，这些能源、资源主要包括，电力、给排水、煤炭、石油、天然气等，其碳排放因子已在上文中进行分析，在此不再累述。

表 3-13 建设施工阶段施工区碳排放清单计算表

Table 3-13 Carbon emission inventory calculation sheet for construction area in construction phase

			机械名称	型号规格	台班数	台班能耗	台班碳排放	碳排放量
基础工程	场地平整							
	地基处理							
	桩基处理							
结构工程	基坑支护							
	基坑降水							
	钢筋工程	钢筋运输						
		钢筋调直						
		钢筋切割						
		钢筋弯曲						
		钢筋焊接						
	模板工程							
	混凝土工程							
	砌筑工程							
	脚手架工程							

			机械 名称	型号 规格	台班 数	台班 能耗	台班 碳排 放	碳排 放量
装饰 工程	门窗工程							
	幕墙工程							
	屋面工程							
	保温工程							
	防水工程							
安装 工程	给水工程							
	排水工程							
	通风空调							
	电梯工程							

需要注意的是，住区绿化固碳这一主要的碳汇，其固碳因子主要是指各类植被的固碳能力。目前我国的城市住区中，住区的绿化主要包括住区内部的绿地绿化和住宅的外墙和屋面绿化，目前住宅外墙和屋面绿化使用较少，且藤蔓、地被和小型灌木固碳能力很小，所以，本文主要分析住区的绿地绿化固碳。

由于住区所处的自然环境不同，种植的植被不同，其固碳能力差别很大。对于不同区域、不同植被、不同混种方式的绿化固碳能力，本文引用中国绿色住区评估手册中绿化固碳数据，如表3-14所示。

表3-14 不同栽种方式单位面积40年CO₂固定量比较表
Table3-14 Comparison of CO₂ fix amount per unit area for 40 years by different planting

栽植方式	CO ₂ 固定量
大小乔木、灌木、花草密植混种（乔木平均种植间距<3.0m，土壤深度>1.0m）	1100
大小乔木密植混种（平均种植间距<3.0m，土壤深度>0.9m）	900
落叶大乔木（土壤深度>1.0m）	808
落叶小乔木、针叶木或疏叶性乔木（土壤深度>1.0m）	537
大棕榈类（土壤深度>1.0m）	410
密植灌木丛（高约1.3m，土壤深度>0.5m）	438
密植灌木丛（高约0.9m，土壤深度>0.5m）	326
密植灌木丛（高约0.45m，土壤深度>0.5m）	205
多年生藤蔓（土壤深度>0.5m）	103
高草花花圃或高茎野草地（高约1.0m，土壤深度>0.3m）	46
一年生藤蔓、低草花花圃或低茎野草地（高约0.25m，土壤深度>0.3m）	14
人工修剪草坪	0

(2) 住区运行相关活动活动水平分析

在住区运行前,住区住宅和配建采暖、制冷、照明、热水、给排水等系统相关能源、资源消耗量和绿化固碳量,可以按照设计文件并结合《城市居住区设计规范》、《民用建筑设计规范》等相应的设计规范进行计算或通过软件模拟,确定其碳排放活动水平。在住区运行时,则需要对不同住宅建筑主要设备系统及住区绿化、住区管理实际情况进行统计。

本文对住区住宅运行阶段采暖、制冷、照明和给排水系统为例,计算各系统碳排放活动的活动水平的预测值,即能源消耗水平预测值。

1) 采暖能源消耗量分析

住宅建筑采暖期的单位面积的耗热量,主要由通过外围护结构的传热耗热量和建筑门窗缝隙渗入冷空气的耗热量组成:

$$q_h = (Q_{h(r)} + Q_{inf})/A_0 \\ = [(t_i - t_e) \cdot \sum \varepsilon_{h(r)} A_{h(r)} K_{h(r)} + 0.278 \cdot L \cdot l \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_i - t_e) \cdot m]/A_0 \quad (3-1)$$

式中, q_h —单位面积建筑物耗热量指标, W/m^2 。

$Q_{h(r)}$ —通过外围护结构的传热耗热量, W ;

Q_{inf} —建筑门窗缝隙渗入冷空气的耗热量, W ;

A_0 —建筑面积, m^2 。

$A_{h(r)}$ —各个朝向的外墙和屋面面积, m^2 ;

$K_{h(r)}$ —各个朝向的外墙和屋面的传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

$\varepsilon_{h(r)}$ —采暖期各朝向外围护结构传热系数修正值;

t_i —采暖期房间室内计算温度;

t_e —采暖期室外平均温度。

Q_{inf} —建筑门窗缝隙渗入冷空气的耗热量, W ;

L —经每米门窗缝隙渗入室内的冷空气量, $m^3/(h \cdot m)$;

l —门窗缝隙长度, m ;

c_p —空气定压比热, $c_p = 1kJ/(kg \cdot ^\circ C)$;

ρ —室外空气密度,取采暖期室外计算温度相应值;

m —冷风渗透量的朝向修正系数。

所以,采暖系统(以住区燃煤锅炉集中供暖为例)能耗量为:

$$q_c = 24 \cdot z_h \cdot q_h / H_c \eta_1 \eta_2 \quad (3-2)$$

式中, q_c —采暖耗煤量,标准煤, kg/m^2 ;

z_h —采暖期天数;

q_h —单位面积建筑物耗热量指标, W/m^2 ;

H_c —标准煤热值, $H_c = 8.14 \cdot 10^3 w \cdot h/kg$;

η_1 —室外管网输送效率;

η_2 —锅炉运行效率。

2) 空调制冷耗能量分析

空调制冷能耗量,是指在设计计算温度条件下,为保持室内计算温度,单位建筑面积空调制冷消耗的能量,单位为 kWh/m^2 。

由于人们对不同房间的使用要求及在其中的活动状况各异,所以,人们对不同房间室内热环境的需求也各不相同。安装空调的房间一般为客厅、餐厅、卧室、书房,不安装空调的房间一般为厨房、卫生间等。根据空调冷负荷计算方法,分别计算每个空调房间的空调负荷,从而求得建筑总体空调能耗。

住宅冷负荷主要是考虑每个空调制冷房间的冷负荷,从而求得空调制冷的能耗。住宅的冷负荷主要由围护结构瞬变传热形成的冷负荷、透过玻璃窗的日射得热引起的冷负荷和内部得热所引起的冷负荷构成,其中围护结构瞬变传热形成的冷负荷主要由外墙和屋面瞬变传热引起的冷负荷、内围护结构冷负荷和外玻璃窗瞬变传热引起的冷负荷组成。

因此,住宅建筑空调降温期单位建筑面积总的冷负荷:

$$\begin{aligned} q_c &= (Q_{w(r)} + Q_{w,i} + Q_{g,w} + Q_g + Q_i)/A_{0i} \\ &= [\sum A_{w(r)} K_{w(r)} (t_{w(r)} k_\alpha k_\rho - t_n) \\ &\quad + \sum A_{w,i} K_{w,i} (t_{w,p} + \Delta t_f - t_n) \\ &\quad + \sum C_{g,w} A_{g,w} K_{g,w} (t_{g,w} - t_n) \\ &\quad + \sum C_a A_g C_s C_i D_{j\text{-max}} C_{LQ} \\ &\quad + A_{0i} \cdot q_i]/A \end{aligned} \quad (3-3)$$

式中, q_c —单位面积建筑物耗冷量指标, W/m^2 ;

$Q_{w(r)}$ —外墙和屋面瞬变传热引起的逐时冷负荷, W ;

$Q_{w,i}$ —内围护结构冷负荷, W ;

$Q_{g,w}$ —外玻璃窗瞬变传热引起的冷负荷, W ;

Q_g —透过玻璃窗的日射得热形成的冷负荷, W ;

Q_i —空调房间内部得热引起的冷负荷, W ;

A_0 —建筑面积, m^2 ;

$A_{w(r)}$ —各个朝向的外墙和屋面面积, m^2 ;

$K_{w(r)}$ —各个朝向的外墙和屋面的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\text{°C})$;

$t_{w(r)}$ —外墙和屋面冷负荷计算温度的逐时值, °C ;

t_n —室内设计温度;

k_α —外表面放热系数修正值;

k_{ρ} —围护结构外表面对于太阳辐射的吸收系数修正值;
 $A_{w,i}$ —各朝向内墙面积, m^2 ;
 $K_{w,i}$ —各朝向内墙传热系数, $W/(m^2\cdot^{\circ}C)$;
 $t_{w,p}$ —夏季空调室外平均计算日平均温度;
 Δt_f —附加温升, 取邻室平均温度与室外平均温度的差值, $^{\circ}C$;
 $A_{g,w}$ —各朝向外窗面积, m^2 ;
 $K_{g,w}$ —各朝向外玻璃窗传热系数, $W/(m^2\cdot K)$;
 $t_{g,w}$ —玻璃窗冷负荷温度逐时值, $^{\circ}C$, ;
 $C_{g,w}$ —玻璃窗传热系数修正值;
 A_g —各朝向窗口面积, m^2 ;
 C_a —窗口有效面积系数;
 C_s —窗玻璃的遮阳系数;
 C_i —室内遮阳设施的遮阳系数;
 C_z —窗玻璃的综合遮挡系数, $C_z = C_s \cdot C_i$;
 C_{LQ} —窗玻璃冷负荷系数;
 $D_{j,max}$ —日射得热因素的最大值, W/m^2 , ;
 A_{0i} —空调房间建筑面积, m^2 ;
 q_i —单位面积内部得热引起的冷负荷 (包括炊事、照明、家电和人体散热)。

体散热)。

所以, 住区住宅建筑空调制冷耗能量:

$$q_e = 24 \times 10^{-3} \cdot z_c \cdot q_c / EER \quad (3-4)$$

式中, q_e —空调降温耗电量, kwh/m^2 ;

z_c —空调降温期天数;

q_c —建筑物耗冷量指标, W/m^2 ;

EER—冷源设备能效比。

3) 住宅照明耗能量分析

住宅照明耗能量主要是满足住宅不同用途房间的照度的电光源的耗电量。目前, 国内外多数国家均采用照明功率密度 (LPD) 作为建筑照明节能评价指标。LPD 指单位面积上安装照明功率, 单位 W/m^2 。评价房间照明功率密度必须在满足房间照度标准值的前提下进行。

住宅房间平均照度:

$$\begin{aligned}
 E_{av} &= (N \cdot \Phi \cdot U \cdot K) / A \\
 &= (N \cdot \eta \cdot P \cdot U \cdot K) / A
 \end{aligned} \quad (3-5)$$

式中, E_{av} —工作面平均照度, lx;

N—光源数量;
 Φ —光源光通量, lm;
 U—利用系数, 一般取 0.4-0.6;
 K—灯具维护系数;
 A—房间面积, m^2 。
 η —光源的光效, lm/W;
 P—灯具实际功率, W。

由平均照度验算的照明功率密度为:

$$\begin{aligned} LPD &= (N \cdot P) / A \\ &= E_{av} / (\eta \cdot U \cdot K) \end{aligned} \quad (3-6)$$

式中, LPD—照明功率密度, W/m^2 ;

4) 给排水量分析

住区住宅建筑给水主要包括生活用水、消防用水、绿化用水等等, 考虑到消防用水较少使用, 绿化用水量较少, 所以本文只考生活用水, 同时, 认为生活污水排水量和生活用水量相同¹。

一般居住建筑生活用水可分为饮用水、洗涤用水、冲厕用水、沐浴用水等。生活用水量受当地气候、生活习惯、卫生器具以及用水设备的完善程度等诸多因素影响, 所以, 本文主要考虑洁具用水量及其污水排水量, 所以住区住宅给水和污水排水量分别为:

$$W_s = W_d = \frac{q_z n_z D_z}{1000A} \quad (3-7)$$

式中, W_s —住宅单位面积年生活用水用水量, $m^3/a \cdot m^2$;

W_d —住宅单位面积年生活污水排水量, $m^3/a \cdot m^2$;

q_z —各卫生器具日均用水量, L/人 d;

n_z —住区居住人数, 人;

D_z —一年用水天数, 可取 $D_z = 365d/a$ 。

A—住区住宅建筑面积, m^2 。

(3) 住区运行维护阶段碳排放清单计算

通过对住区建设运行维护碳足迹相关活动水平和排放因子的分析得出其具体的清单计算, 如表3-15所示

¹ 《室外排水设计规范》(GB50014-2006)规定, 按居民生活用水定额确定污水定额。对给水排水系统完善的地区可按用水定额的 90%计, 一般地区可按用水定额的 80%计。本文只考虑卫生洁具用水量及相应的污水排放量, 故认为二者相等。

表3-15 住区运行维护阶段碳排放清单计算

Table3-15 Carbon emission inventory calculation sheet for operation and maintenance phase

				能源资源消耗量	排放/固碳因子	时间	碳排放量
住宅/配建	住宅楼1	住户1	照明				
			热水				
			采暖				
			制冷				
			给水				
		住户2					
		...					
		电梯					
	住宅楼2						
	...						
住区管理	绿化						
	雨污水						
	...						
维护更新							

3. 4. 5 处置阶段碳足迹清单分析

目前，我国城市住区处置的主要方式是住区的拆除，其方式主要采用机械拆除。拆除过程可以近似的看做建设施工的逆过程，碳排放源主要包括拆除机械设备运行、相关办公、生活、资源回收、废弃物运输等活动，其中机械设备运行、相关办公、生活等清单清单分析与建设施工阶段类似，大量废弃物的运输废弃物的运输与运输阶段的清单分析类似，主要区别在于可循环使用资源的回收。

住区可循环使用的资源主要包括钢铁、铝、玻璃、木材等。例如，回收废钢目前的可再生率达到90%以上，与使用铁矿石相比，用废钢炼钢可节约能源约60%；以废铝为主要原料生产再生铝，能耗仅为电解铝的5%左右，废弃物排放也将减少95%以上；以回收玻璃生产新玻璃则可减少40%的能源消耗。所以，可循环使用资源回收可以视作为住区的一个重要碳汇，对于这些主要的可循环使用的资源，需要考虑其回收量及其与相应新生产资源比较所减少的碳排放量。如，每回收1t废钢铁可减少碳排放1.20t，每回收1t废铝回收可减少碳排放9.01t，每回收1t玻璃可减少碳排放0.56t。

综上，住区处置阶段的碳足迹清单计算，如表3-16，3-17和3-18所示。

表3-16 处置阶段生活、办公区碳排放清单计算表

Table 3-16 Carbon emission inventory calculation sheet for living and working areas in disposition phase

序号	单元过程	活动水平				排放因子				时间 (月)	碳排放量
		电力	煤炭	汽油	柴油	电力	煤炭	汽油	柴油		
		kwh	kg	kg	kg	kg(co ₂)/kwh	kg(co ₂)/kg	kg(co ₂)/kg	kg(co ₂)/kg		
1	照明										
2	电器										
3	供热										
4	制冷										

表3-17 处置阶段施工区碳排放清单计算表

Table 3-17 Carbon emission inventory calculation sheet for construction areas in disposition phase

序号	机械名称	型号规格	台班数	台班能耗	台班碳排放	碳排放量
1						
2						
3						
4						

表3-18 处置阶段材料回收碳排放清单计算表

Table 3-18 Carbon emission inventory calculation sheet for materials recycle in disposition phase

材料名称	材料数量t	减排系数tCO ₂ /t	碳减排量
钢铁		1.56	
铝		9.01	
玻璃		0.56	
...			

3.5 城市住区碳足迹计算模型建立 (Build Calculation Model of Urban Settlements Carbon Footprint)

根据以上对城市住区生命周期分析、碳排放核算边界分析及相关的活动水平

数据和排放因子的分析结果，本文将住区生命周期碳足迹总量定义为 E ，则：

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \quad (3-8)$$

其中：

E 为住区生命周期碳排放总量；

E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 分别为决策设计、建筑材料生产、建设施工、运行维护及处置五个阶段的碳排放量。

(1) 决策设计阶段碳排放计算模型

$$E_1 = \sum_{i=1}^m S_{1i} F_{1i} \quad (3-9)$$

其中：

S_{1i} 为决策设计阶段第 i 种能耗设备的耗能量；

F_{1i} 为决策设计阶段第 i 种能耗设备对应能源的排放因子。

(2) 建筑材料生产（运输）阶段碳排放计算模型

$$E_2 = \sum C_{2i} F_{2i} + \sum_{i,j=1} C_{2i} Y_{2ij} R_{2ij} \quad (3-10)$$

其中：

C_{2i} 为建筑材料设备生产阶段第 i 种材料的数量；

F_{2i} 为生产阶段第 i 种材料排放因子；

Y_{2ij} 为第 i 种建筑材料设备在第 j 种运输方式单位运距的排放因子；

R_{2ij} 为第 i 种建筑材料设备在第 j 种运输方式下的运距。

(3) 建设施工阶段碳排放计算模型

$$E_3 = \sum_{j,i=1} S_{3ji} F_{3i} + E_{3c} \quad (3-11)$$

其中：

S_{3ji} 为建设施工阶段第 j 个分部分项工程中第 i 种设备的台班数；

F_{3i} 为建设施工阶段第 i 种设备的台班排放因子；

E_{3c} 为建设施工阶段办公和生活的碳排放量，计算方法同 E_1 。

(4) 运行维护阶段碳排放计算模型

$$\begin{aligned} E_4 &= \sum_{i=1}^n (E_{4y,i} - E_{4l,i}) + \sum_{i=1}^a \frac{n}{m_i} (E_{41} + E_{42} + E_{43}) \\ &= \sum_{i=1}^n (E_{4k,i} + E_{4c,i} + E_{4z,i} + E_{4s,i} + E_{4r,i} - E_{4l,i}) + \sum_{i=1}^a \frac{n}{m_i} (E_{41} + E_{42} + E_{43}) \end{aligned} \quad (3-12)$$

其中：

n 为住区使用年限;

$E_{4y,i}$ 为住区相关系统的第 i 年碳排放量;

$E_{4l,i}$ 为住区绿化系统的第 i 年固碳量;

m_i 为住区第 i 种材料设备的使用年限;

E_{41}, E_{42}, E_{43} 分别为住区维护是材料设备的制造、运输、施工碳排放量, 其计算方法同 E_1, E_2, E_3 ;

$E_{4k,i}, E_{4c,i}, E_{4z,i}, E_{4s,i}, E_{4r,i}$ 分别为住区使用阶段空调、采暖、照明、用水、热水系统年碳排放量。

(5) 处置段碳排放计算模型

$$E_5 = E_{5c} - E_{5h} \quad (3-13)$$

其中:

E_{5c} 为住区拆除的碳排放量, 计算方法同 E_3 ;

E_{5h} 为材料设备回收在利用形成的减排量, 计算方法同 E_2 (忽略其中的运输碳排放)。

3.6 本章小结 (Brief Summary)

本章分析了城市住区的碳排放特性, 确定城市住区碳足迹研究的目的和原则; 将住区生命周期划分为决策设计、材料设备生产、建设施工、运行维护和再处置五个阶段, 明确了住区生命周期及各阶段碳足迹分析的系统边界; 对系统边界内的主要碳排放单元过程进行分析, 对各阶段进行碳排放清单分析, 确定单元过程的碳排放活动水平, 并构建了住区生命周期及各阶段的碳排放量计算模型。

4 城市住区低碳评价体系研究

4 Urban Settlements Low Carbon Assessment system

4.1 城市住区低碳评价体系目标分析 (Goal Analysis of Urban Settlements Low Carbon Assessment System)

4.1.1 城市住区低碳评价的特点

城市住区的低碳评价需要与绿色、生态、可持续建筑等新型建筑评价一样，都注重以人为本、健康舒适、保护环境、节约资源、建筑与经济、社会、自然环境的协调发展，并以资源能源消耗、各种环境影响、经济、技术等多个方面作为评价指标，但是住区的低碳评价却因为“碳”这一个关键字，使其更加关注以下几个方面：

(1) 政治经济性

城市住区的低碳减排是针对住区生命周期内的能源资源消耗和碳排量大的特点，在全球气候变化和应对全球气候变化的国际国内环境下提出的，住区的低碳减排是低碳经济和低碳建筑的重要组成部分和实现途径，同其它“低碳”概念一样，因为“碳”，表现出强烈的政治经济性。

(2) 目标单一性

城市住区要实现生命周期的低碳减排目标，实现其自身的减排贡献，应该满足其功能定位和并实现以人为本、健康舒适、保护环境、节约资源、实现建筑系统与经济、社会、自然环境的协调发展，但应当与其它新型建筑评价不同的是，需要将关注点更多的放在住区碳排放程度的评价上。

(3) 评价的量化

城市住区的低碳评价与其他的建筑系统评价体系不同的是，因为更加关注住区生命住区、各阶段及主要碳源碳汇系统的碳排放程度情况，所以，住区低碳的评价的指标应该而且必须是定量的。

(4) 金融经济属性

虽然，目前在全球和我国范围内建筑系统的碳排放交易的身影还鲜有显现，但可以预见，建筑系统尤其是我国城市住区这一碳排放和减排潜力巨大的领域，在不久的将来碳交易市场上活跃起来；同时，随着可能的碳税等环境税的制定和出台，住区的低碳减排会受到更多的关注，住区的低碳减排将会表现出强烈的金融经济属性。

城市住区的评价是一项复杂的工作，本文仅针对城市住区低碳程度这一评价目标，系统全面的确定评价要素，选择合理的评价方法，确定评价结果的应用方

法和方式,以构建城市住区低碳评价体系,这样既可单独用以住区低碳程度的评价,也可与其它评价体系结合,从而促进城市住区的低碳、绿色可持续发展。

4.1.2 城市住区低碳评价体系构建原则

通过住区碳排放的特性和住区低碳评价侧重点的分析,结合国内外现行绿色建筑、生态建筑评价标准和体系及其碳排放评价指标的比较研究,在构建住区低碳评价体系时,应该遵循以下原则:

(1) 科学性原则

评价体系必须科学、客观的建立反映不同地域、类型的住区碳排放基准值和拟评价住区碳排放情况,这些必须建立在统计分析和碳足迹评价标准的基础上,并结合我国相关标准,如民用建筑节能、建筑照明设计标准、建筑给水排水设计规范等,对各个指标的量化提出合理的计算方法,使各个数据来源标准化、规范化。

(2) 系统全面原则

住区低碳评价体系应反映了住区低碳情况的各项要素,保证住区低碳评价的系统性和全面性,主要包括两个方面,一是评价体系应当包括对住区生命周期及各阶段的低碳评价,包括对住区建筑材料生产、运行使用等生命周期主要碳排放阶段低碳评价;同时,评价体系应当包括各主要能源资源消耗系统的评价,如采暖系统、制冷系统、照明系统、给排水等。

(3) 简洁实用原则

“复杂的体系不是好的体系”,好的体系应该减少评价要素(指标、标准和措施)的数量,简化评价体系的结构和评价方法,所以在住区低碳评价体系构建时,应遵循简洁性原则,力求所构建出来的住区低碳评价体系简单明了、容易理解且无歧义,从而最大限度降低住区低碳评价的人力、时间和资金等成本。

(4) 定量原则

住区低碳评价体系关注点是碳排放,需要定量计算相关评价对象的碳排放量,构建相应的排放基准值;同时,由于住区低碳评价体系存在目标单一性和碳排放的金融属性,所以住区低碳评价体系的构建必须遵循定量的原则。

(5) 公正性原则

住区评价体系中的评价要素(指标、标准和措施)和评价方法选取、评价结构的建立,必须不偏向住区利益相关者中的任意一方,保证评价结果的公正性和客观性,以便如实反映被评价住区的碳排放的真实情况。

(6) 针对性原则

由于住区所处地域环境、建筑类型、建筑性质等不同,导致住区碳排放活动情况不同,相应的碳排放基准值也不相同,所以评价对象应根据不同的情况设定

不同的基准值，使得住区低碳评价更有针对性。

(7) 开放性原则

住区低碳评价体系的研究目前尚处于探索阶段，随着国际国内碳排放情况的改变、低碳经济、低碳技术、低碳建筑研究的不断深入，评价体系也需要随之不断的补充和修正，以满足住区低碳评价发展的需要。

4.1.3 城市住区低碳评价体系的目标分析

城市低碳评价的目标是进行城市住区低碳评价的出发点，低碳评价的评价指标、基准、评价结构、评价方法都需要围绕评价体系的目标开展的；同时，评价要素、评价结构和评价方法的选取是否合理有效，能否真实客观的反映评价对的碳排放情况，都需要根据目标的实现效果进行的检验。

通过对住区低碳评价体系特点和构建原则分析，本文对于城市住区低碳评价体系目标的设定，主要基于以下三个方面考虑：

(1) 对住区生命周期及各阶段的低碳评价

城市住区低碳评价，不仅仅需要对住区整个生命周期的进行低碳评价，虽然这一指标反映了住区的整个生命周期的碳排放情况，但是对于住区建材生产、建设施工、运行使用等阶段的碳排放程度却无法进行分析，所以，需要对住区生命周期及各个阶段进行相应的低碳评价，明确各阶段的低碳程度，调动各阶段利益相关者的积极性，明确各阶段利益相关者的责任和制定相应的减排措施。

对于阶段选取，本文选择生命周期、建设施工阶段、运行使用阶段的碳排放情况作为评价对象；由于目前建材生产厂商大多无法提供准确的建材碳排放因子，对于住区建材生产阶段的低碳评价难以进行。而由于不同地区、不同结构类型的住区建筑，在设计时采用不同的结构体系，使建材使用及相应的碳排放存在较大差异，所以本文将建材使用量作为另一评价对象，以衡量住区用材是否低碳及低碳程度。

(2) 对住区主要碳源碳汇系统的低碳评价

从住区生命周期看，住区碳排放主要集中在建材生产阶段和运行使用阶段，尤其是运行阶段由采暖、制冷、照明、给排水等系统的能源资源消耗¹造成的；同时，住区生命周期的绿化固碳也主要存在于其运行使用阶段。所以，分析和评价这些主要的能源资源消耗系统的碳排放和绿化固碳情况，对于住区利益相关者尤其是使用者来说是非常重要的。所以，对住区主要能源消耗系统和绿化固碳情况进行低碳评价，为利益相关者对主要能源消耗系统和绿化系统的设计、选型、实际使用等提供依据。

¹ 我国大部分气候区域的城市住区使用阶段都存在采暖、制冷、照明、给排水需求，对于部分不需要采暖或制冷的地区，在进行相关系统低碳评价时，可以取消相关评价对象和指标。

1) 住区运行阶段的能源资源消耗主要包括采暖、制冷、照明、给排水等系统,从能源和资源消耗的角度考虑主要分为用能和用水两个方面。所以,对于住区主要碳源系统的低碳评价,本文将分为住区运行用能系统低碳评价和用水系统低碳评价,其中用能低碳评价主要包括采暖系统、制冷系统、照明低碳评价。

2) 对于住区的碳汇评价,主要评价住区绿化固碳情况。

(3) 评价体系的不同应用时期

城市住区生命周期是一个长期过程,从住区项目构思直至住区处置可能达到数十年甚至更长,对住区进行低碳的评价,不能仅仅只在项目开始、终结或是某一时期进行,而需要在其生命周期中重要节点进行,已达到事前预测决策、事中监督控制和事后结果反馈。所以,本文认为,对于住区的低碳评价,不能在单一的某一时期的应用评价体系,而是一个连续的过程,主要包括规划设计时期应用、施工(竣工验收)时期应用和运行使用时期应用。在这三个时期的低碳评价体系的应用,可以很好的实现住区碳排放的事前、事中和事后的控制和评价。城市住区低碳评价体系及不同应用时期关系如图 4-1 所示:

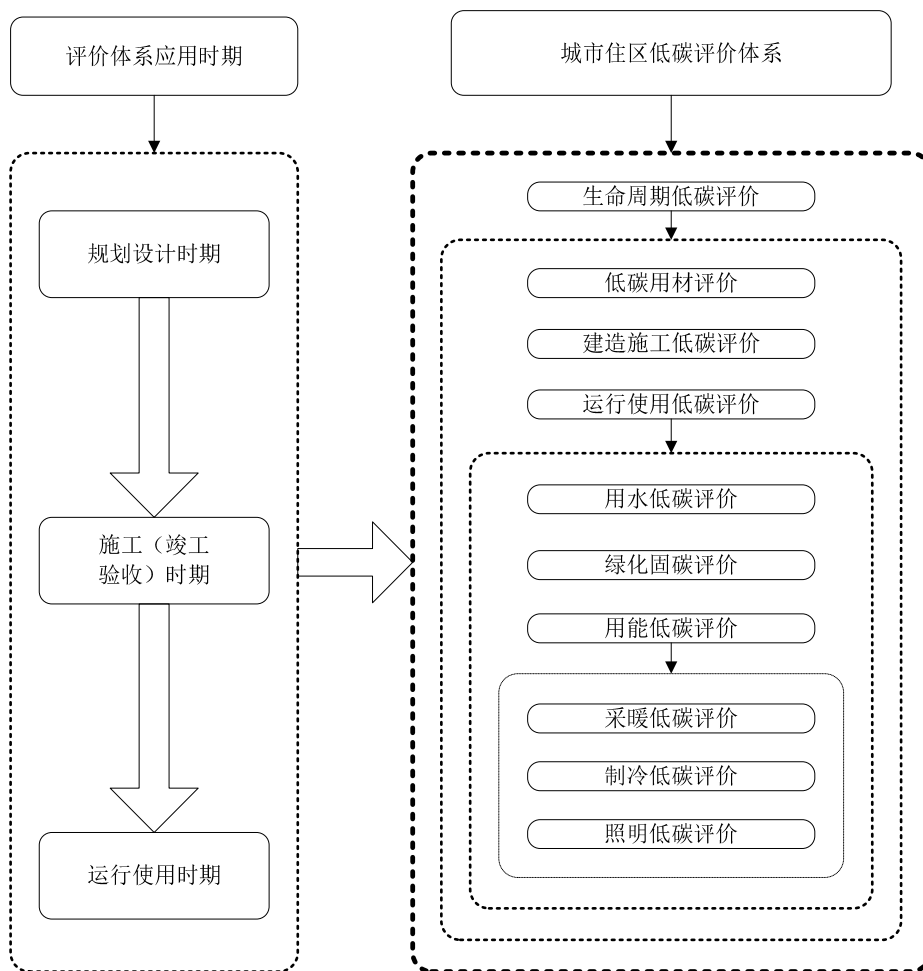


图 4-1 住区低碳评价体系框架与评价时期

Figure 4-1 Evaluation period and framework of Low-Carbon Assessment System

综上,城市住区低碳评价的目标主要包括是在规划设计、施工(竣工)验收、运行使用三个时期对城市住区生命周期、各个阶段以及住区采暖、制冷、照明、给排水、绿化等主要碳源碳汇进行低碳评估,评价他们是否低碳及其低碳程度,实现对住区碳排放(减排)的事前、事中和事后控制,并制定相应的减排措施。

4.2 住区低碳评价体系的要素分析 (Elements Analysis of Urban Settlements Low Carbon Assessment)

住区低碳评价体系模型的要素包括低碳评价指标、低碳评价标准与低碳评价措施。评价指标和标准的选取是住区低碳评价体系的重要组成部分和基础。

城市住区因所处环境不同,其能源资源消耗量及相应的标准也不同,在进行住区低碳评价时,应该根据住区所处地域环境等,设立不同的评价指标和基准;同时,住区因其建设规模、建筑类型、使用年限等不同,其碳排放量也不大相同,需要在相同的评价基准上进行,本文选择各评价对象的单位面积年平均碳排放量作为住区低碳评价的基准。

所以,根据住区低碳评价的特点、原则和的目标分析结果,本文采用低碳指数作为指标评价对生命周期、各阶段及各碳源碳汇系统等对象进行低碳评价,即采用各个评价对象的模拟、预测或实际碳排放量与相应的评价标准进行比较,利用评价对象碳排放基准值与模拟、预测或实际碳排放量的差值与基准值的比值方式进行确定,则住区低碳评价各对象的低碳指数 L 为:

$$L = \frac{E_B - E_A}{E_B} \times 100\% \quad (4-1)$$

式中, L —住区低碳评价对象的低碳指数;

E_A —住区低碳评价对象碳排放的模拟值、预测值或实际值;

E_B —住区低碳评价对象碳排放的基准值。

低碳评价的标准即拟评价对象的碳排放量的基准值,其确定方法要根据不同的住区环境、类型等因素进行设定,主要包括参考国家及地区的法律、法规和相关规范的规定,参考节能、绿色、生态等评价体系的相关基准值,通过调研统计确定等方法。

城市住区低碳评价体系的相关评价指标,如图 4-2 所示。

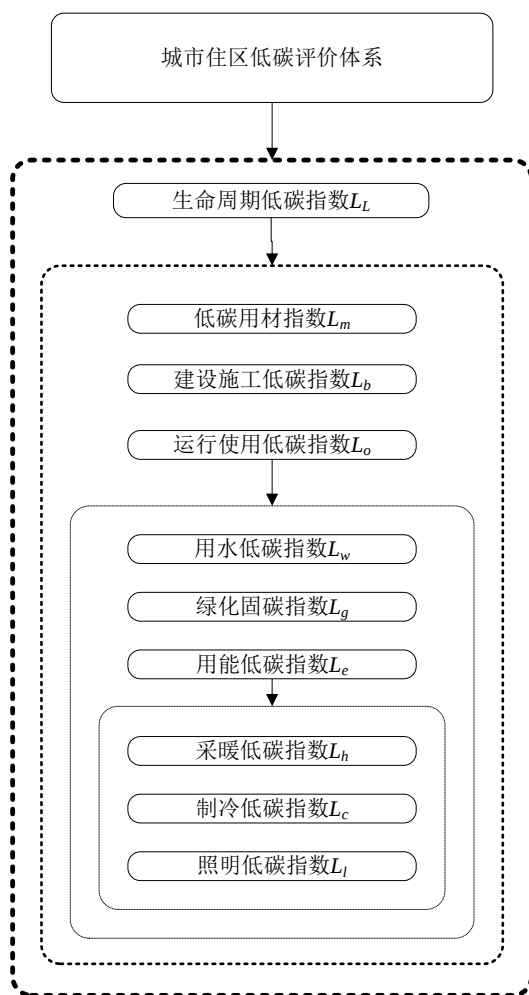


图 4-2 城市住区低碳评价体系的评价指标

Figuer.4-2 Evaluation index of carbon evaluation system of urban settlements

4. 2. 1 用材低碳指数分析

城市住区由于所处地区不同、抗震设防等级不同、功能设计不同等原因，采用不同的结构体系，使建材使用及相应的碳排放存在较大差异，本文从建材使用量角度考虑，采用低碳用材指数进行住区建筑材料使用碳排评价，则

$$L_m = \frac{E_{m,B} - E_m}{E_{m,B}} \times 100\%$$

$$E_{m,B} = \frac{\sum W_i \times [f_i(1-\alpha) + \alpha f_{i,r}]}{A_0}$$

$$= \frac{E_{m,B} - \sum W_i \times [f_i(1-\alpha) + \alpha f_{i,r}]}{E_{m,B}} \times 100\% \quad (4-2)$$

式中， L_m —住区低碳用材指数；

$E_{m,B}$ —住区单位建筑面积用材碳排放量基准值， $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{kg}$ ；

E_m —住区单位建筑面积用材实际碳排放量， $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{kg}$ ；

W_i —住区建筑第*i*种建材使用总量， kg ；

α —第*i*种建材的回收率，%；

f_i —第*i*种建材生产过程中的碳排放系数, $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{kg}$;

$f_{i,r}$ —第*i*种建材回收过程中的碳排放系数, $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{kg}$;

A_0 —住区建筑总面积, m^2 。

建材生产碳排放系数可以本文给出的排放系数或通过厂商提供的实际数据获得, 建材回收率及再生产碳排放因子, 本文参考《中国绿色地碳住区技术评估手册》中和相关研究^[65]结论进行设定, 如表4-1所示。

表4-1 建材生产过程碳排放因子、回收率及再生产碳排放因子

Table 4-1 Carbon emission factor of building materials during production process

建材	钢材	铝材	水泥	玻璃	混凝土 C30	混凝土 C35	混凝土 C40	加气混凝土 砌块
碳排放因子	2.0	9.5	0.73	1.4	0.27	0.29	0.31	0.17
回收系数 (%)	95	95	-	80	-	-	-	-
再生产碳排放因子	0.80	0.57	-	0.49	-	-	-	-

对于单位建筑面积用材碳排放量基准值的确定, 国家住宅与居住环境工程技术研究中心对全国226个案例进行统计分析, 给出不同抗震设防烈度和不同结构体系住宅建筑单位单位平米的 CO_2 排放指标^[176], 本文采用这一统计指标作为单位建筑面积用材碳排放量基准值, 各类结构体系单位面积 CO_2 排放基准值, 如表4-2所示。

表4-2 各类结构体系单位面积碳排放排放基准值 (t/m^2)

Table 4-2 Reference value of carbon emissions per m^2 of different kinds of structural systems

		结构类型						
		砖砌体	小砌体 结构	混凝土 框架	混凝土 框架减 震墙	混凝土 抗震墙	钢-混凝 土组合	钢框架
设防 烈度	6-7度	0.262	0.203	0.273	0.383	0.381	0.292	0.294
	8度	0.262	0.203	0.340	0.383	0.381	0.292	0.294

4.2.2 建设施工低碳指数分析

建设施工阶段主要的碳排放是由于住区的建设施工活动、相关的管理活动、生活活动所消耗的能源造成的。研究表明^{[177][178]}, 建设施工碳排放占生命周期比例较小; 同时, 由于建设施工活动繁多, 能源和资源使用情况复杂, 所以给施工碳排放能源资源消耗、碳排放的统计计算及相应的能耗、碳排放标准制定增加了难度。一般住区建筑施工的能源消耗中, 电力资源约占能源消耗总量的75%以上, 为实现对建筑施工能耗和碳排放的控制, 国内部分省市, 如上海, 江苏、湖南等地区均以电力消耗量为控制指标, 所以, 为简化评价, 本文采用建设施工阶段由电力使用引起的碳排放量作为建设施工低碳指标 L_c 的评价措施, 即:

$$L_b = \frac{E_{b,B} - E_c}{E_{b,B}} = \frac{Q_{b,B} f_b / a \cdot A_0 - Q_b f_b / a \cdot A_0}{Q_{b,B} f_b / a \cdot A_0} = \frac{Q_{b,B} - Q_b}{Q_{b,B}} \quad (4-3)$$

式中, $E_{b,B}$ — 建设施工用电引起的单位建筑面积年碳排放量的基准值,
kg(co₂)/a·m²;

E_b — 建设施工用电引起的单位建筑面积年碳排放量的实际值,
kg(co₂)/a·m²;

$Q_{b,B}$ — 单位建筑面积建设施工用电量基准值, kwh/m²;

f_b — 电力能源碳排放因子 kg(co₂)/kg;

a — 建筑使用年限, a;

Q_b — 单位建筑面积建设施工用电量实际值, kwh/m²;

对于建设施工用电引起的单位建筑面积年碳排放量的基准值, 根据各地公布的建设施工能耗用电限制确定。如, 湖南长沙规定的房屋建筑施工用电能耗为 100kwh/万元, 根据中国统计年鉴查询长沙市 2014 年住宅平均造价约为 2519 元/m², 则长沙市住宅单位建筑面积建设施工用电量基准值约为 25.19kwh/m²。未公布建设施工能耗用电限制的参考类似地区的相关数值。单位建筑面积建设施工用电量实际值由施工现场电量统计确定。

4.2.3 运行使用低碳指数分析

(1) 用水系统低碳指数分析

城市住区用水主要分为生活给水和污水排放两个方面。假设生活污水排水量和生活用水量相同的, 二者的基准值也相同, 所以, 用水低碳指数可以用给水系统或污水系统碳排放量的模拟值和基准值计算, 以给水系统为例:

$$\begin{aligned} L_w &= \frac{(E_{s,B} + E_{d,B}) - (E_s + E_d)}{(E_{s,B} + E_{d,B})} \times 100\% \\ &= \frac{E_{s,B} - E_s}{E_{s,B}} \times 100\% \end{aligned} \quad (4-4)$$

式中, L_s — 给水系统低碳指数;

$E_{s,B}$ — 给水系统引起的单位建筑面积年碳排放量的基准值,
kg(co₂)/a·m²;

$E_{d,B}$ — 污水系统引起的单位建筑面积年碳排放量的基准值,
kg(co₂)/a·m²;

E_s — 给水系统引起的单位建筑面积年碳排放量模拟值或实际值,
kg(co₂)/am²;

E_d —污水系统引起的单位建筑面积年碳排放量模拟值或实际值，
kg(co₂)/a·m²；

由于生活中炊事、洗衣等用水量难以确定，本文主要考虑洁具用水量及其污水排水量，所以住区住宅给水和污水排水量分别为：

$$W_s = W_d = \frac{q_z n_z D_z}{1000 A_0} \quad (4-5)$$

式中， W_s —单位建筑面积年生活用水用水量，m³/a·m²；

W_d —单位建筑面积年生活污水排水量，m³/a·m²；

q_z —各卫生器具日均用水量，L/人·d；

n_z —住区居住人数，人；

D_z —一年用水天数，可取 $D_z = 365 \text{d/a}$ 。

由此，可以计算得出给水系统的单位面积年碳排放量分别为：

$$E_s = W_s \times f_s \quad (4-6)$$

式中， W_s —住宅单位面积年生活用水用水量，m³/a·m²；

f_s —给水系统的碳排放因子，kg(co₂)/m³， $f_s = 0.3$ [174]。

《建筑给水排水设计规范》中根据不同的建筑类别和卫生器具设置给出了不同的用水定额 $W_{s,B}$ ，一些省市也颁布了居住建筑用水定额，通过这些规范和标准可以计算出住宅建筑给水量基准值，需要注意的是本文对于给水系统的考虑仅包括卫生器具用水，而用卫生器具用水约占建筑给水总量的 21% 左右，所以计算给水系统用水基准值时，需要按照此比例对相关规范和标准给出的基准值进行修正。则 $E_{s,B} = 0.21 \times W_{s,B} f_s$ 。

此时，

$$L_w = \frac{E_{s,B} - E_s}{E_{s,B}} \times 100\% = \frac{0.21 \times W_{s,B} f_s - W_s f_s}{0.21 \times W_{s,B} f_s} \times 100\% = \frac{0.21 \times W_{s,B} - W_s}{0.21 \times W_{s,B}} \times 100\% \quad (4-7)$$

(2) 绿化固碳指数分析

绿化是住区生命周期中重要的碳汇形式。对住区绿化固碳指数有：

$$L_g = \frac{S_g - S_{g,B}}{S_{g,B}} \times 100\% \quad (4-8)$$

式中： S_g —住区单位建筑面积年绿化固碳量，kg(co₂)/m²；

$S_{g,B}$ —住区住区单位建筑面积年绿化固碳量基准值，kg(co₂)/m²。

本文在住区使用阶段碳足迹清单分析时，已经给出了对住区不同栽种方式

植物 40 年绿化固碳量，则：

$$S_g = \frac{\sum S_i \cdot X_i}{40A_0} \quad (4-9)$$

式中， S_i —不同栽种方式植物的面积， m^2 ；

X_i —单位面积不同栽种方式植物 40 年 CO_2 的固定量， $kg(co_2)/m^2$ ；

我国《绿色建筑评价标准》中规定，住区的绿地率不得低于 30%，人均公共绿地面积不低于 $1m^2$ 。同时，根据《中国绿色低碳住区技术评估手册》，绿化 40 年对 CO_2 的固定量基准值为 $600kg/m^2$ ，即每年绿化对 CO_2 的固定量应为 $15kg/m^2$ 。所以，本文设定，住区单位建筑面积年绿化固碳量基准值为：

$$\begin{aligned} S_{g,B} &= 0.3 \times 15 \times S_0 / A_0 \\ &= 4.5 \times S_0 / A_0 \end{aligned} \quad (4-10)$$

式中， S_0 —住区用地面积， m^2 ；

(3) 用能系统低碳分析

城市住区在使用过程中存在许多用能系统，本文只考虑采暖系统、制冷系统和照明系统这三个主要的用能系统。

1) 采暖系统低碳指数分析

$$L_h = \frac{E_{h,B} - E_h}{E_{h,B}} \times 100\% = \frac{q_{h,B} f_{h,B} - q_h f_h}{q_{h,B} f_{h,B}} \times 100\% \quad (4-11)$$

式中， $E_{h,B}$ —单位建筑面积年采暖系统碳排放基准值， $kg(co_2)/a \cdot m^2$ 。

E_h —单位建筑面积年采暖系统碳排放模拟值或实测值， $kg(co_2)/a \cdot m^2$ 。

$q_{h,B}$ —单位建筑面积年采暖系统耗能量基准值， $kg/a \cdot m^2$ ；

q_h —单位建筑面积年采暖系统耗能量模拟值或实测值， $kg/a \cdot m^2$ ；

$f_{h,B}$ —采暖系统能耗基准值采用的能源的碳排放因子， $kg(co_2)/kg$ 。

f_h —采暖系统实际采用能源的碳排放因子， $kg(co_2)/kg$ 。

采暖系统能耗量主要受住区所处的气候环境、住区建筑围护结构的设计等因素影响，可以通过相关计算、软件模拟和实测确定采暖系统能耗的模拟值和实际值。本文在住区使用阶段碳足迹清单分析时，采用简化计算方法已经给了采暖系统耗能量的计算公式，结合相应的碳排放因子，可以计算得出采暖系统的单位面积年碳排放量：

$$E_h = q_h \times f_h \quad (4-12)$$

式中， q_h —住区单位面积年采暖耗能量， $kg/a \cdot m^2$ ；

f_h —采暖能源对应的碳排放因子, $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{kg}$;

采暖碳排放基准值需要根据不同地区进行分析。我国出台了针对不同气候区域的居住建筑节能设计规范, 如《严寒、寒冷地区居住建筑节能设计标准》等, 为了合理设定节能目标的基准值, 并便于衔接与对比, 目前的这些居住建筑设计标准提出的节能目标的基准仍基本上沿用《民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)》(JGJ 26-95)的规定。即严寒地区和寒冷地区的建筑, 以各地 1980—1981 年住宅通用设计、4 个单元 6 层楼, 体形系数为 0.30 左右的建筑物的耗热量指标计算值, 经线性处理后的数据作为基准能耗; 在此能耗值的基础上, 确定节能居住建筑全年的采暖能耗降低 65%左右作为节能目标。

所以, 采暖碳排放基准值 $E_{h,B}$, 可以按照《严寒、寒冷地区居住建筑节能设计标准》的采暖节能规定进行计算得出, 即按照《民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)》规定的基准能耗的 65%与相应的能耗碳排放因子的确定。

以江苏省徐州市为例, 《严寒、寒冷地区居住建筑节能设计标准》规定的徐州市不同不同类型住宅建筑的采暖耗热量指标如表 4-3 所示。以多层为例, 耗热量指标为 $12.8\text{W}/\text{m}^2$, 则相应的耗煤量指标为 $5.82\text{kg}/\text{m}^2$, 假设煤炭的碳排放因子 $f=2.50 \text{ kg}(\text{CO}_2)/\text{kg}$, 则徐州市多层住宅单位面积采暖碳排放基准值 $E_{h,B}=14.55 \text{ kg}(\text{CO}_2)/\text{m}^2$ 。

表 4-3 徐州市居住建筑采暖耗热量指标

Table 4-3 Heat consumption indicator of residential buildings in Xuzhou

城 市	气候区属	建筑耗热量指标 W/m^2			
		低层	多层	中高层	高层
徐州	II (B)	13.5	12.8	11.3	8.4

数据来源:《严寒、寒冷地区居住建筑节能设计标准》

2) 制冷系统低碳指数分析

$$L_c = \frac{E_{c,B} - E_c}{E_{c,B}} \times 100\% = \frac{q_{c,B} f_{c,b} - q_c f_c}{q_{c,B} f_{c,b}} \times 100\% \quad (4-13)$$

式中, $E_{c,B}$ —单位建筑面积年制冷系统碳排放基准值, $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{a} \cdot \text{m}^2$ 。

E_c —单位建筑面积年制冷系统碳排放模拟值或实测值, $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{a} \cdot \text{m}^2$ 。

$q_{c,B}$ —单位建筑面积年制冷系统耗能量基准值, $\text{kg}/\text{a} \cdot \text{m}^2$;

q_c —单位建筑面积年制冷系统耗能量模拟值或实测值, $\text{kg}/\text{a} \cdot \text{m}^2$;

$f_{c,b}$ —制冷系统能耗基准值采用的能源的碳排放因子, $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{kg}$ 。

f_h —制冷系统实际采用能源的碳排放因子, $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{kg}$ 。

同采暖系统类似, 制冷系统能耗量可以通过相关计算、软件模拟和实测确定制冷系统能耗的模拟值。本文在住区使用阶段碳足迹清单分析时, 采用简化计算

方法已经给了采暖系统耗能量的计算公式,结合相应的碳排放因子,可以计算得出制冷系统的单位面积年碳排放量:

$$E_c = q_c \times f_c \quad (4-14)$$

式中, q_c —住区单位面积年制冷耗能量, kwh/a m^2 ;

f_c —制冷系统能源对应的碳排放因子, $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{kwh}$ 。

与采暖系统不同,在我国发布如《严寒、寒冷地区居住建筑节能设计标准》、《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》、《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》中对居住建筑制冷系统能耗量的基准值并未进行直接给出相关的规定。其中《严寒、寒冷地区居住建筑节能设计标准》将制冷系统的基准值设定忽略,而《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》、《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》则均提出建立与拟评价居住建筑完全相同,并符合节能设计标准相关要求的参考建筑模型,并通过计算或计算机模拟等手段确定参考建筑的空调制冷耗电量,此时的耗电量即为住宅空调制冷耗能量的基准值。此外,部分地区,如江苏省颁布了《江苏省居住建筑热环境和节能设计标准》(DGJ32/J 71-2008),并对省内城市空调耗电指标作出规定,以徐州市为例,空调制冷耗电量指标为 6.3kwh/a m^2 ,假设电力碳排放因子¹为 $f=0.81 \text{ kg}(\text{CO}_2)/\text{kwh}$,则徐州市住宅单位面积年空调制冷碳排放基准值 $E_{c,B} = 5.10 \text{ kg}(\text{CO}_2)/\text{a m}^2$ 。

3) 照明系统低碳指数分析

$$L_l = \frac{E_{l,B} - E_l}{E_{l,B}} \times 100\% \quad (4-15)$$

式中, L_l —照明系统低碳指数;

E_l —单位面积照明系统年碳排放量模拟值或实测值, $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{a} \cdot \text{m}^2$;

$E_{l,B}$ —单位面积照明系统年碳排放量基准值, $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{a} \cdot \text{m}^2$ 。

本文在住区使用阶段碳足迹清单分析时,已经给了照明系统耗能量的计算公式,结合相应的碳排放因子,可以计算得出照明系统的单位面积年碳排放量:

$$E_l = 365 \times 10^{-3} \times n \cdot \text{LPD} \times f_l \quad (4-16)$$

式中, n —每日照明时间, h ;

LPD —照明功率密度, W/m^2 ;

f_l —电力碳排放因子, $\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{kwh}$;

《建筑照明设计标准 GB50034-2004》中对居住建筑规定了两种照明功率密度值,现行值和目标值。现行值是根据对我国居住建筑的照明能耗现状调研结果、我国建筑照明设计标准以及光源、灯具等照明产品的现有水平并参考国内外有关

¹ 徐州地区属华东电网,故取华东电网的碳排放因子。

照明节能标准,经综合分析研究后制定的。目标值则是在现行值的基础上降低照明能耗 10%-20%得出的。《建筑照明设计标准 GB50034-2004》中,将居住建筑照明功率密度目标值设定为 $6\text{W}/\text{m}^2$ 。因此,在满足照度标准值的前提下,假设照明时间 $n=8\text{h}/\text{d}$,电力碳排放因子为 $f=0.81\text{ kg}(\text{CO}_2)/\text{kWh}$,则照明系统单位面积年碳排放量基准值:

$$E_{l,B} = 0.81 \times (8 \times 6 \times 365 \times 10^{-3}) = 0.81 \times 17.52 = 14.25 \text{kg} / \text{a} \cdot \text{m}^2 \quad (4-17)$$

通过对采暖系统、制冷系统和照明系统碳排放量的分析,用能低碳指数可以通过这三个系统的碳排放总量与三个系统碳排放量的基准值总量进行比较获得,因此,用能低碳指数为:

$$L_e = \frac{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{l,B}) - (E_h + E_c + E_l)}{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{l,B})} \times 100\% \quad (4-18)$$

同样的,通过对用水系统、用能系统和绿化系统的碳排放和固碳情况分析,运行阶段低碳指数可以通过采暖系统碳排放、制冷系统碳排放、照明系统碳排放、给排水系统碳排放,绿化固碳量与相应的基准值总量进行比较获得,因此,用能低碳指数为:

$$L_o = \frac{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{l,B} + E_{s,B} + E_{d,B} - S_{g,B}) - (E_h + E_c + E_l + E_s + E_d - S_g)}{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{l,B} + E_{s,B} + E_{d,B} - S_{g,B})} \times 100\% \quad (4-19)$$

4.2.4 城市住区生命周期低碳指数分析

通过对住区建材使用、建设施工和运行使用碳排放情况的分析,本文给出了住区相关阶段和相关系统的碳排放模拟值、实际值以及住区相关阶段和相关系统碳排放基准值的确定方法,由此进一步可以得出城市住区生命周期低碳指数:

$$\begin{aligned} L_L &= \left(1 - \frac{A_0(E_m + E_b) + A_0 \cdot n \cdot (E_h + E_c + E_l + E_s + E_d - S_g)}{A_0(E_{m,B} + E_{b,B}) + A_0 \cdot n \cdot (E_{c,B} + E_{h,B} + E_{l,B} + E_{s,B} + E_{d,B} - S_{g,B})} \right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{E_m + E_b + n \cdot (E_h + E_c + E_l + E_s + E_d - S_g)}{E_{m,B} + E_{b,B} + n \cdot (E_{c,B} + E_{h,B} + E_{l,B} + E_{s,B} + E_{d,B} - S_{g,B})} \right) \times 100\% \end{aligned} \quad (4-20)$$

式中, L_L —住区生命周期低碳指数;

n —住区使用年限;

由于住区的低碳评价体系的应用时期包括规划设计时期、施工(竣工验收)时期应用和运行使用时期应用。所以,在这三个时期进行评价时,各评价对象的碳排放量的确定有的是实际值,有的是模拟预测值,有的则无法进行模拟预测或实测,所以,本文将不同时期评价所需的各对象的碳排放模拟值和实际值以及

基准值进行分析，如表 4-4 所示。

表 4-4 不同评价时期住区低碳评价指标相关参数的选择方式

Table 4-4 Related parameters choose method of low carbon indexs during different periods

			规划设计			施工（竣工验收			运行使用		
			时期			时期)			时期		
			模 拟 预 测	实 际 值	规 范/ 统 计	模 拟 预 测	实 际 值	规 范/ 统 计	模 拟 预 测	实 际 值	规 范/ 统 计
生 命 周 期	用材低碳指数 L_m		E_m	√			√			√	
			$E_{m,B}$		√			√			√
	建设施工低碳指数 L_b		E_b				√			√	
			$E_{b,B}$					√			√
	运 行 使 用	用 能 系 统	采暖低碳指数 L_h	E_h	√		√			√	
				$E_{h,B}$		√		√			√
			制冷低碳指数 L_c	E_c	√		√			√	
				$E_{c,B}$		√		√			√
			照明低碳指数 L_l	E_l	√		√			√	
				$E_{l,B}$		√		√			√
		用 水 系 统	用能低碳指数 L_e	E_e	√		√			√	
				$E_{e,B}$		√		√			√
		绿化固碳指数 L_s		E_s	√		√			√	
				$E_{s,B}$		√		√			√
		用 水 系 统	排水低碳指数 L_d	E_d	√		√			√	
				$E_{d,B}$		√		√			√
			给水低碳指数 L_q	S_q	√		√			√	
				$S_{q,B}$		√		√			√
		运行使用低碳指数 L_o		E_o	√		√			√	
				$E_{o,B}$		√		√			√
	生命周期低碳 L_L		E_L	√			√			√	
			$E_{L,B}$			√		√			√

4.3 住区低碳评价结果及应用 (Results and application of assessment of Urban Settlements Low Carbon Assessment System)

住区低碳评价的结果包括得分数据、表现方式,目前建筑系统评价体系的得分数据根据其评价指标和评价体系结构的不同,分为分率和总体得分等形式,表达方式则多为直方图、雷达图,等级图等。

评价体系的最终目的是为了应用,住区低碳评价体系对住区碳排放情况的进行分析评价得到确定结果后,可以对结果经过分级控制或达标控制来对住区的低碳程度进行认证。当然,分级范围或是达标及格线,是无法通过建筑环境评估体系自身界定,它们由评估体系的制定者决定。评估体系的认证范围划分需要基于大量样本的测定与反馈,但在现实生活中难以在短时间内实现。所以,也可按照一定规则先制定认证范围,然后在实践中根据反馈情况再对范围进行调整。同时,结果控制的调整应该与体系自身的更新发展、经济、社会及国内外环境改变保持同步。住区低碳评价结果、范围划分和体系应用之间的关系,如图 4-3 所示

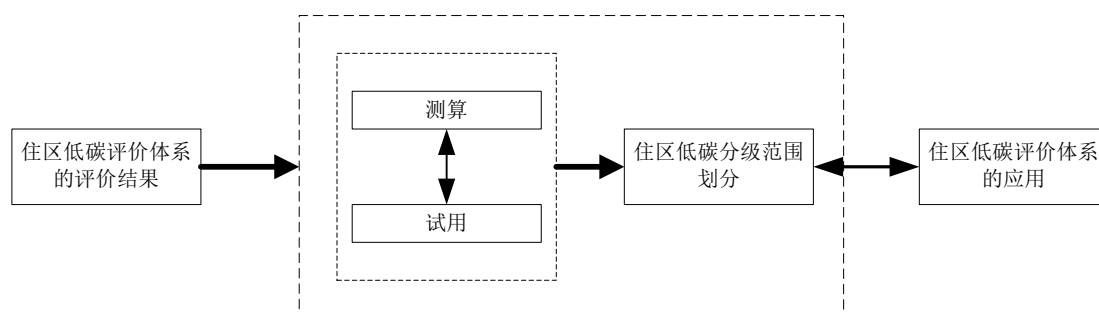


图 4-3 住区低碳评价结果、范围划分和体系应用之间的关系图

Figure 4-3 Relation chart of low-carbon assessment, scope and system

在对住区生命周期、各阶段及各主要能耗系统等对象碳排放情况的进行分析评价,得到确定结果后,可以对结果经过分级控制或达标控制来对城市住区的低碳程度进行认证。分级范围或是达标与否,无法通过评价体系自身界定,必须经由评价体系设计者决定。城市住区低碳评价分级和认证的范围需要经过设定、反馈、调整等一系列过程,并需要根据经济社会环境变化而调整。

由于城市住区低碳评价对象众多,不同的评价对象的减排能力或潜力可能存在较大差异,需要根据不同的情况对评价对象设置不同的评级标准,这是一项庞大和复杂的工作,本文将这一工作进行简化处理,在利用低碳指数对住区生命周期、各阶段及各主要能耗系统等进行低碳评价的基础上,采用分级的方式直观的反映住区各评价对象的低碳程度,即将不同的评价对象的低碳等级分为差级($L < -30\%$)、较差($-30\% \leq L < -10\%$)、合格($-10\% \leq L \leq 10\%$)、良好($10\% < L \leq 30\%$)、优秀($L > 30\%$)五个梯度,以便简洁直观的表现评价对象的低碳程度。

4.4 本章小结 (Brief Summary)

本章主要根据城市住区碳足迹的特点,分析了城市住区低碳评价原则,构建城市住区低碳评价体系,建立设计、施工和运行三阶段评价模型;从生命周期各阶段和主要碳源碳汇系统两个角度出发,选取住区生命周期低碳指数、用材低碳指数、运行低碳指数、用能低碳指数、用水低碳指数等 10 个不同层次的评价指标,构建相应的评价基准;根据选取的评价指标及评价基准,提出相对应的低碳评级方法。

5 城市住区低碳技术体系研究

5 Urban Settlements Low-Carbon Technique System

5.1 城市住区低碳技术运行机理分析 (Urban Settlements Low-Carbon Technique Operation Mechanism)

5.1.1 城市住区中的基本流分析

城市住区是一个开封的系统,包括着物质流、能量流、信息流、资金流与人口流¹等五个方面的基本流,通过这五个方面的基本流,住区实现自身内部系统及住区与外部自然、经济、社会等系统之间交流。同样的,住区低碳技术在住区生命周期过程中也以这些基本流作为其活动和运行的基础。

(1) 城市住区中的物质流

住区中的物质流是指住区与内外部环境中的物质在一定范围内按照一定的路径和方式形成的流动,其本质住区利益相关者对物质的需求与住区内外部环境之间相互物质使用关系,即住区利益相关者则住区生命周期中对于自然资源的开发和使用。在住区生命周期中,利益相关者会使用到众多的物质,尤其是在住区建设和使用过程中,如建设过程中使用的各种建材、设备,运行使用过程中煤炭、天然气、水等。在这些物质的使用过程中,一般都会带来不同程度的资源耗竭和环境影响。因此,在住区生命周期中需要对物质流进行设计和控制,减少自然资源的需求,提高建材、设备等物质的使用效率。

(2) 城市住区中的能量流

住区中的能量流是指住区与内外部系统之间的能量按照一定方式和途径进行的流动,其本质是住区利益相关者能源需求引起的住区内外部系统之间能量的流动和转化,伴随着物质流,能量流存在于住区系统整个生命周期中;同时,由于在住区生命周期中,主要的能量是由化石能源的使用提供的,一直同时产生的是大量温室气体的排放。因此,在对于住区系统而言,需要在生命周期中减少能源需求,节约石化能源并增加绿色能源的使用。

(3) 城市住区中的信息流

住区中的信息流是指利益相关者对住区内外部系统物质流和能量流的设计和控制实现而产生的信息流动,其本质是利益相关者为满足各自需求造成的物质流动和能量流动的产生的相关信息。在城市住区生命周期中,利益相关者对物质流、能量流等基本流的设计和控制,实现住区功能要求,以满足不同利益相关者

¹ 物质流、能量流、信息流是构成客观世界的基本流。资金流和人口流作为城市住区中特殊的物质流,对住区及其碳排有重要影响,因此,本文将资金流和人口流单独列出进行分析。

的利益诉求。

（4）城市住区中的资金流

住区中的资金流是指利益相关者对住区内外部系统物质流、能量流、信息流的设计和控制实现而产生的资金流动，包括投融资、借贷款、工程款支付、销售、购买、税收、补贴等一些列相关活动。不同的利益相关者通过各自的资金活动，设计和控制住区系统中的物质流、能量流和信息流，并通过这些基本流实现住区和各自的需求。

（5）城市住区中的人口流

住区中的人口流是指住区生命周期中住区利益相关者的人员流动情况。在住区构思、设计、建设和使用等一系列活动过程中，利益相关者根据各自的利益诉求，设计和控制物质流、能量流、信息流和资金流，而伴随着的是利益相关者的自身流动，如住区建设施工引起施工单位相关人员的流动，而使用阶段消费者也可能会根据需求购买、居住或是搬离城市住区。因此，城市住区中的人口流同样会对城市住区的性能和环境影响产生重要影响。

5.1.2 城市住区低碳技术选取的影响因素分析

低碳技术是实现住区低碳发展的重要基础。低碳技术的选择和使用贯穿于住区规划设计、材料设备生产、运输、施工、运行、维护更新、处置在利用等生命周期各个阶段，但住区低碳技术的选择却受到许多因素的影响，主要包括自然环境、经济环境、社会环境、技术环境、住区定位等。

（1）自然环境

城市住区所处的自然环境，主要包括经纬度、地形、海拔、日照、气温、湿度、风速风向等。自然环境为城市住区生命周期提供必要的建材、能源、阳光、空气、水等，以完成住区的功能，实现利益相关者的不同需求。在一定的条件下，自然环境的资源能源是有限的、其变化是规律的，所以，在进行住区低碳技术选择时，应充分考虑住区所处的自然条件，根据自然环境合理利用资源能源、根据气候条件选择合理的设计、施工和使用等低碳技术。

（2）经济环境

住区所处的经济环境包括住区所处地区的经济发展水平以及住区利益相关者的经济能力等。地区经济发展水平和利益相关者经济能力在很大程度上影响了住区低碳技术的选择，这是因为低碳技术的选择一般会造成住区成本和效益的变化，经济上是否能够承受、成本上是否合理，是住区利益相关者非常关注的问题。因此，需要根据住区所处的经济环境，明确住区低碳技术的成本效益，选择利益相关者经济上可以承受的低碳技术，以利于政府、开发商、消费者等住区利益相关者接受并共同促进住区低碳技术的选择和发展。

（3）社会环境

住区所处的社会环境包括住区所处地区的社会发展水平以及住区利益相关者对住区低碳减排的认知程度等。目前，政府、开发商、消费者等住区利益相关者低碳驱动力尚不充足，整个社会层面还未充分认识到城市住区低碳减排的意义，缺乏低碳住区的基本知识和主动意识，对住区低碳减排成本效益的疑虑，再加上建筑碳交易市场和低碳法律法规的缺失，这些法律法规、政策、宣传教育等多个方面社会因素都影响这住区低碳技术的选择，

（4）技术环境

住区所处的技术环境主要包括住区低碳技术的先进性、可靠性、适用性、经济性等。住区低碳技术种类繁多，包括低碳规划设计技术、低碳建材设备生产技术、低碳建设施工技术、低碳运行使用技术等，这些技术的选择需要环境、经济、社会环境、住区功能定及住区低碳减排目标的条件下进行选择。而在选择时还需要考虑这些技术发展水平，是否先进，能够满足低碳减排要求，是否可靠，能够减少低碳减排造成的风险，是否适用，能够满足住区所处地区的自然条件，是否经济，能够实现低碳减排效益的最大化。

（5）住区定位

城市住区是为实现住区利益相关者的不同诉求而存在的。住区居住、生活等功能的实现受到自然环境、社会环境、经济环境和技术环境的影响，消费者对住区性能的不同要求同样使住区功能存在很大差异；不同的利益相关者对城市住区定位的诉求相差很大，政府希望城市住区符合城市整体规划，促进城市经济、社会发展，满足居民居住需求；开发商希望住区开发建设顺利，实现利益最大化；而消费者希望住区“物美价廉”，价格上便宜，性能上优越；同时，住区减排目标的设定同样对住区低碳技术的选择存在重大影响。因此，自然环境、社会环境、经济环境、技术环境、利益相关者利益诉求及住区减排目标等最终决定了住区的功能定位，从而影响了住区低碳技术的选择。

5.1.3 城市住区低碳技术运行机理分析

通过对城市住区物质流、能量流、信息流、资金流和人口流的分析，城市住区生命周期内部是由这五种基本流构成的，与城市住区系统类似，这五种基本流系统都是开放系统，五种基本流在城市住区生命周期、各阶段、各子系统之间相互作用、相互影响，从而形成了住区全生命周期及实体物理组成。在城市住区系统中，利益相关者围绕城市住区流动形成人口流；同时，为了各自的利益诉求，设计和控制各自的资金流，并资金活动设计和控制住区系统中的物质流、能量流和信息流；而在城市住区生命周期中，利益相关者通过资金等活动获得住区相关信息，从而控制物质流、能量流形成住区建筑实体，并保证住区运行。

同时，通过对住区低碳技术选取影响因素的分析可以得出，自然环境、社会环境、经济环境、技术环境以及住区定位等会对城市住区低碳选择产生重要影响。住区定位是由城市住区所处的自然环境、社会环境、经济环境、技术环境、住区功能以及住区减排目标决定的，是城市住区低碳技术存在的基础；自然环境通过气候、地形等因素影响住区功能的实现，地区经济发展水平和利益相关者经济能力等经济环境决定了利益相关者在选择低碳技术经济上是否能够承受，社会发展水平以及住区利益相关者对住区低碳减排的认知程度等社会因素决定了住区低碳技术选择的驱动力，而相关技术先进性、可靠性、适用性、经济性等技术环境则成为了住区低碳技术得以实现的技术基础。

因此，城市住区内部系统物质流、能量流、信息流、资金流和人口流五种基本流和自然环境、社会环境、经济环境、技术环境以及住区定位五个主要影响因素相互作用，共同构成了城市住区低碳技术运行系统，如图 5-1 所示。

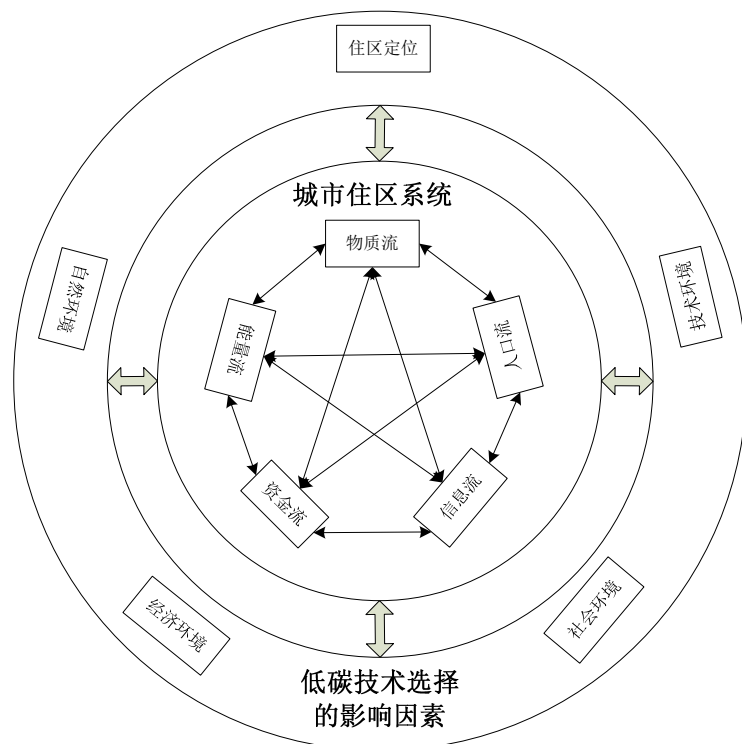


图 5-1 城市住区低碳技术运行机理

Figure 5-1 Urban settlements Low-Carbon technique operation mechnism

5.2 城市住区低碳技术集成模型 (Urban Settlements Low-Carbon Technique Integration Model)

技术集成是一种普遍的、长期的、重要的技术管理和生产组织方式，是人类对产品的多样化需求以及技术日益复杂的必然产物。现有技术集成的研究一般包括技术集成和技术管理集成，本文主要从技术集成角度进行城市住区低碳技术集成的分析。

自从建筑与资源、能源和环境关系的探索开始,生态、节能、绿色、低碳建筑的概念被陆续提出,相应的绿色、节能、低碳技术也陆续兴起,成为节约能源资源、减少污染物和碳排放的重要应对措施。这些技术主要是考虑建筑与环境的协调、建筑能源资源的节约以及使用效率的提高等,从生命周期来看包括建筑规划设计技术、建设施工技术、建筑物理技术、建筑构造技术、建筑设备技术等,而从住区的实体构成来看这些技术则主要应用于住区外部环境的控制协调,住区建筑本体的建设和维护以及住区设备系统的使用等方面。

(1) 城市住区低碳技术运行的外部环境

住区外部气候、地形等外部自然环境对住区低碳技术的选择和使用产生重大影响,应根据住区所处的不同外部自然环境,选择适用的低碳技术。如在严寒和寒冷地区需要更加注意选择能够降低住区建筑采暖能耗的相关低碳技术,在南方夏热冬暖地区则应更加注意选择能够降低住区建筑夏季空调制冷能耗的相关低碳技术,在日照充足地区可以选择太阳能利用技术,而在雨水充足地区则可以考虑雨水回收相关技术。住区可用利用的外部自然环境如图 5-2 所示。

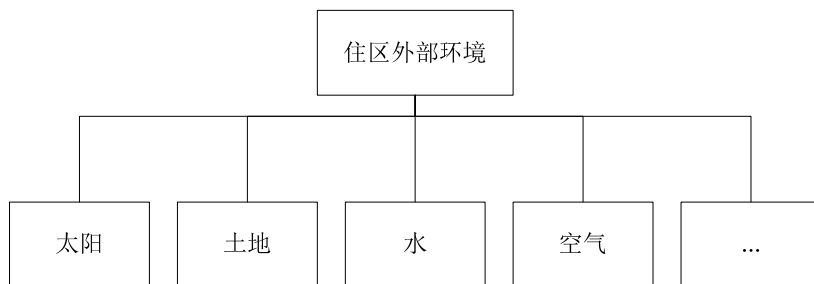


图 5-2 城市住区外部环境

Figure 5-2 Exterior environment of urban settlement

(2) 城市住区建筑结构本体

住区建筑本体主要功能是实现住区者温度、湿度、光照、空气等要求与外界自然环境相对隔离。这些功能要求需要外墙、屋面、门窗等住区建筑结构和建筑构件实现。在这些结构和构件的设计、施工和使用过程中,选择相关的低碳技术,可以减少实现温度、湿度、光照、空气等所需的能源、资源,减少污染物和碳排放。城市住区建筑结构本体中可采用相关低碳技术的结构和构件如图 5-3 所示。

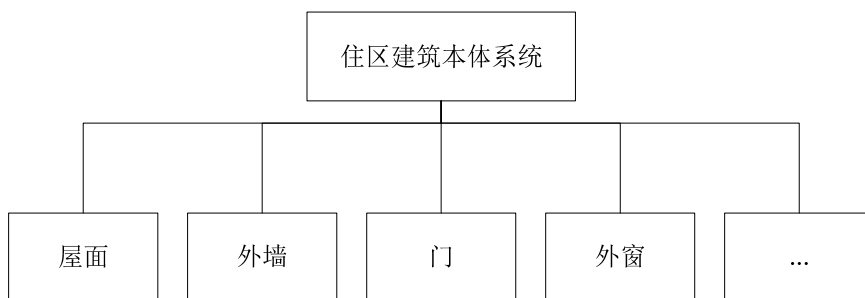


图 5-3 城市住区建筑本体系统

Figure 5-3 Building structure of urban settlement

(3) 城市住区设备系统

住区功能的实现,不仅需要住区的外部环境和住区建筑本体结构,还需要使用众多设备系统才能得以完成,主要包括采暖系统、制冷系统、电力系统、照明系统,供水系统等,如图 5-4 所示。

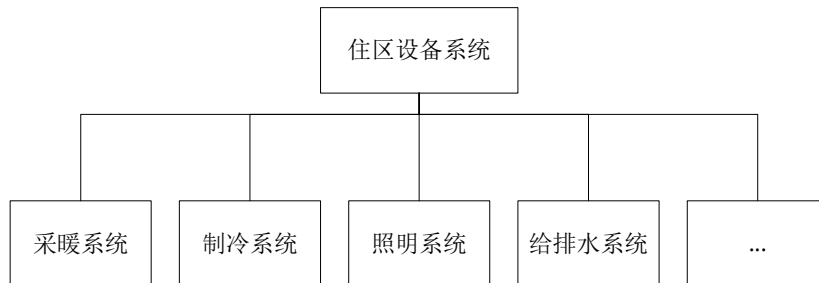


图 5-4 城市住区设备系统

Figure 5-4 Equipment system of urban settlement

通过上节对住区低碳技术选择影响因素及本节对住区不同部位低碳技术的分析,住区低碳技术的选择、使用和运行需要在住区充分考虑住区的自然环境、社会环境、经济环境、技术环境、住区定位等影响因素,在住区外部环境、住区建筑本体、住区设备系统三个方面的不同结构、构建和部位合理选择相应的低碳技术,并充分考虑影响因素和不同结构、构建和部位之间的相互作用和影响。图 5-5 所示为城市住区低碳技术集成运行模型。

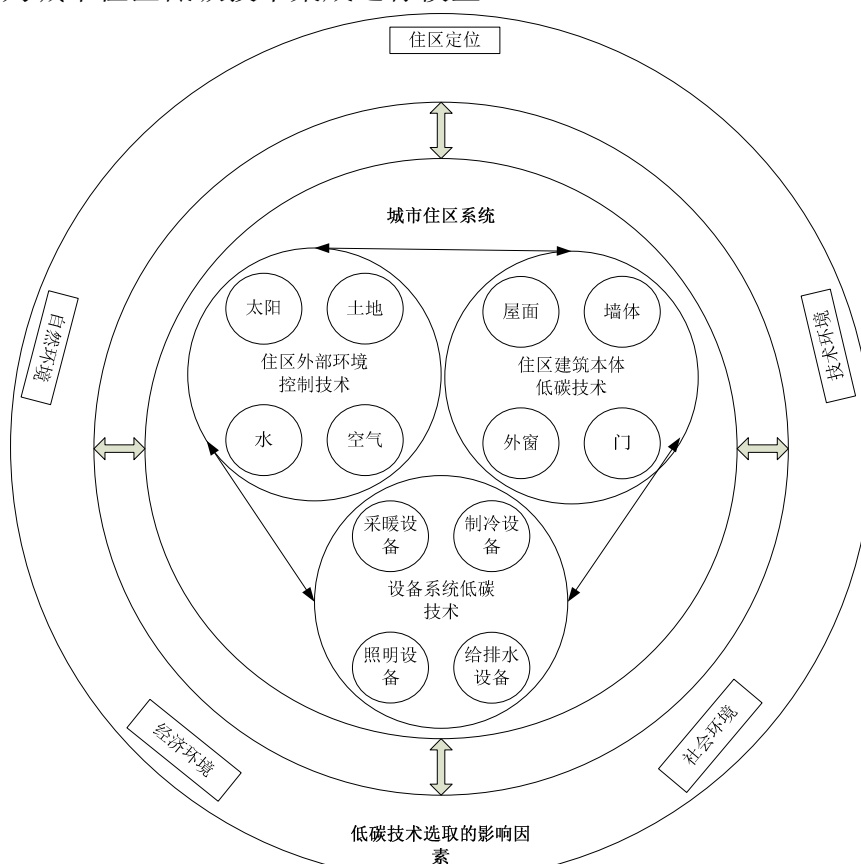


图 5-5 住区低碳技术运行集成模型

Figure 5-5 Urban settlements Low-Carbon technique operation integration model

5.3 城市住区低碳技术体系 (Urban Settlements Low-Carbon Technique System)

城市住区减排目标的实现和低碳发展, 需要建立合理的住区低碳技术体系。本文从住区建筑本体、住区设备系统及住区环境系统三个方面, 对城市住区可能采用的低碳技术进行归纳总结。

5.3.1 城市住区住宅建筑本体低碳技术体系

城市住区建筑本体低碳技术体系分类主要从低碳设计、低碳建造、低碳构造、低碳用材四个方面, 对建筑本体系统可能采用的低碳技术进行总结归纳, 这四个子系统通过不同低碳技术的选取组合, 从而达到实现住区低碳减排的目标, 如表 5-1 所示。

表 5-1 城市住区建筑本体低碳技术系统分类

Table 5-1 Classification of Low-Carbon technique building body structure system of urban settlement

体系分类	技术系统		
低碳构造	墙体系统	外墙外保温隔热技术、外墙内保温隔热技术、多层复合墙体技术、夹芯墙保温隔热技术、涂料保温隔热技术 (Low-E 涂料)、相变 (内) 墙体材料;	
	门窗系统	断桥式节能窗、复合材料节能窗、中空玻璃门窗、多层中空玻璃门窗、Low-E 中空玻璃门窗;	
	屋面系统	架空通风屋面、倒置式屋面、架空保温隔热复合屋面、冷屋面系统 (金属反射、浅色涂层反射);	
	遮阳系统	窗户外遮阳系统、窗户内遮阳系统、中空玻璃夹百叶遮阳技术;	
	楼地面系统	浮筑式楼面, 架空楼面。	
低碳建造	建筑结构系统	高强度结构体系; 混凝土大空间结构体系 (框架、预应力等); 工业化预制装配式结构体系 (外挂板、装配板柱等); 砌筑结构体系 (承重混凝土砌体、水泥基蒸压砖等)。	
	建筑施工系统	新型施工工艺和技术	
		可循环利用施工材料	钢筋机械连接技术; 模板技术 (免拆模技术、预制外模技术、预支底板模技术); 新型脚手架技术。
		高性能施工技术	混凝土泵送技术; 混凝土预制件施工连接技术
低碳设计	建筑装修系统	设计施工一体化; 工业化集成装修。	
	被动房屋构成	朝向控制、日照控制、通风控制、窗墙比控制、面宽进深控制、体形系数控制、屋高层数控制;	
	气候响应条件	通风呼吸式墙体、调节温湿度墙体	

体系分类	技术系统	
低碳用材	新型墙材	围护材料（混凝土砌块、加气、陶粒、粉煤灰砌块等）； 墙板材料（轻质条板、钢丝网架板、聚苯轻质混凝土板、轻 钢龙骨系列等）
	保温隔热材料	防火聚氨酯、泡沫玻璃等；聚苯乙烯泡沫塑料板 EPS、挤塑 聚苯乙烯泡沫塑料板 XPS 等；岩棉等
	新型防水材料	刚性防水、柔性防水、复合式防水技术
	废弃材料循环利用	工业废渣利用技术、生物质材料应用技术、建筑废弃物再利 用技术

本文选取部分对住区生命周期碳足迹影响较大的本体低碳技术进行简要分析和说明，主要包括体形系数、窗墙比、建筑外窗就外遮阳等。

（1）建筑体型系数

建筑体型系数是建筑物与室外大气接触的外表面积与其所包围的建筑空间体积的比值。体型系数越大，说明单位建筑空间所分担的热散失面积越大，能耗就越多。有研究表明，体型系数每增加 0.1，建筑的累积耗热量指标将增加 10%-20%。

（2）窗墙比控制

影响外窗整体热工性能的因素主要包括外窗的朝向、位置、大小及其自身构成部件的热工性能等。其中，窗墙比就反映了外窗大小对于建筑能耗的影响。窗墙比一般是外窗洞口面积与房间立面单元面积之比。一方面，窗墙比越大，建筑的自然采光越好，通过玻璃窗进入室内的日射得热越大。另一方面，与建筑围护结构的其他部分相比，外窗属薄壁轻质构件，保温隔热性能较差，窗墙比的增大会增强室内外的热量传递。不同季节不同朝向上的太阳得热量不同，因此，不同朝向上窗墙比对于夏季空调耗冷量以及冬季供暖耗热量的影响程度是不同的。

（3）节能外窗系统

外窗是居住建筑外围护结构中的薄弱环节，是影响室内热环境和建筑节能的主要因素之一，其能耗在建筑总能耗中占有相当大的比例，约占建筑总能耗的 40%-50%。因此，加强外窗整体的热工性能成为建筑节能的重点。外窗玻璃约能占外窗总面积的 70%，玻璃的热工性能在很大程度上决定了整窗的热工性能。近年来，随着节能技术的不断发展，热反射玻璃、中空玻璃，特别是中空低辐射镀膜玻璃(Low-E 玻璃)等新型玻璃的出现，使得玻璃的热阻技术得到了显著提高。

外窗的保温性能虽然主要取决于外窗玻璃的热工性能，但同时也与外窗的非透明材料有关。金属材质的窗框具有较好的强度，稳定性能好，能承受较大的竖向荷载与水平荷载。但是由于金属的热传导性能强，因此通过窗框的热损失也较大，特别是当玻璃的保温性能提高之后，玻璃与金属窗框之间会存在明显的冷桥，从而大大影响外窗的综合传热系数。采用塑料窗框等能减少与玻璃之间的冷桥影

响,特别是窗框热桥阻断技术的应用,约能使窗框保温性能提高 30%,有效降低外窗的整体传热系数。但是塑料窗框的强度较弱,抗荷载能力较差,而且寿命较金属窗框短,容易产生过早老化等问题。玻璃钢型材等新型窗框材料综合了以上两者的优点,但较高的价格使其未能得到普遍推广。因此确定合理的外窗结构形式应从外窗的节能性、适用性以及经济性上进行综合考虑。

(4) 外窗遮阳

外窗的遮阳形式多种多样,内遮阳因其安装、使用和维护保养都十分方便而得到普遍应用,比如室内窗帘、百叶等,但在阻挡太阳辐射的同时,由于自身温度的提高,也将很大一部分热量滞留在室内,因此内遮阳对改善室内热环境和建筑节能的作用相当有限。采用外遮阳的结构形式,不仅能够有效的减少室内太阳辐射得热,还能避免由于太阳直射引起的眩光,使室内照度分布均匀。

5.3.2 城市住区建筑设备系统低碳技术体系

城市住区低碳技术设备系统分类主要从低碳用能、低碳运行、低碳用材、低碳排放四个方面,对建筑设备系统可能采用的低碳技术进行总结归纳,这四个子系统通过不同低碳技术的使用从而达到实现不同的功能的目的,如表 5-2 所示。

表 5-2 城市住区低碳技术设备系统分类

Table 5-2 Classification of Low-Carbon technique Equipment system of urban settlement

体系分类	技术系统			
低碳用能	能源供给系统	热电冷联供系统(燃气型、燃料电池型、热电联产机组等); 热电煤气三联供系统; 余热利用系统(烟气或余热换热器、余热型吸收式热泵等)。		
	可再生能源系统	太阳能利用技术	光热利用	太阳能生活热水,太阳能采暖,太阳能制冷空调
			光电利用	带有蓄电池的独立光伏发电系统,并网光伏发电系统
			阳光采光	主动阳光采光技术、被动阳光采光技术
		风力发电技术		
		生物质能应用技术(秸秆气化技术、沼气应用技术)		
		地热发电供暖梯级利用技术		
		浅层地能利用技术(水源热泵、地源热泵)		
		污水和废水热泵技术		
低碳运行	建筑设备系统	供热制冷系统	管道保温隔热技术、集中供热/制冷技术、分散供热/制冷技术	
		冷暖供给末端系统	高效散热器、低温辐射技术(地板系统、顶棚系统)	
		采暖分户计量	流量式、分配式、计量收费表(IC卡)	

体系分类	技术系统		
	配电照明系统	节能光源灯具	高效节能灯具、光导照明系统
低碳排放	优化给排水系统	节水设备系统	叠压供水、变频调速、直饮水系统、节水型卫生器具、计量付费系统
	再生水利用系统	中水回用技术、雨水收集利用技术、污水处理回用技术	
低碳用材	新型管材	新型可回收利用管材	铜质管材、聚乙烯、聚丙烯管材

本文选取部分对住区生命周期碳足迹影响较大的设备系统低碳技术进行简要分析和说明，主要包括：冷热电联供系统、太阳能光电技术、太阳能光热技术、中水回用技术、雨水收集利用技术

(1) 低碳用能

1) 冷热电联供系统

冷热电三联供（Combined Cooling heating and power，简称 CCHP）是分布式能源系统（Distributed Energy System）的发展方向之一，是一种建立在能量梯级利用的基础上，同时产生电、热、冷三种能量的总能系统，不仅可以提高能源的综合利用效率，还有利于环保和降低投资成本。

冷热电联供系统是指利用各种能电转换装置发电过程中排出的废热，直接或间接用于满足供暖、生活用热水等各种热负荷外，另外还可以用来作为吸收式制冷机的热源，用于制冷的系统。其中燃气冷热电三联供系统是较为常用的一种冷热电联供系统，论文以此为例，分析其工作原理和在节能减排方面的作用。

燃气冷热电三联供系统是一种建立在能量的梯级利用概念基础上，以天然气为一次能源，产生热、电、冷的联产联供系统。它以天然气为燃料，利用小型燃气轮机、燃气内燃机、微燃机等设备将天然气燃烧后获得的高温烟气首先用于发电，然后利用余热在冬季供暖；在夏季通过驱动吸收式制冷机供冷；同时还可提供生活热水，充分利用了排气热量。一次能源利用率可提高到 80% 左右，大量节省了一次能源。

常见的燃气冷热电三联供系统的原动机可以分为：燃气内燃机、小型燃气轮机、微燃机等几类。下表是不同热电冷联供原动机相关特性比较。

目前我国电力供应主要靠燃煤的大型火力发电厂，发电效率 35% 左右，一般燃煤采暖锅炉的效率为 70%，而且燃煤对环境污染严重，对人类社会造成的极大的危害和损失。而冷热电三联供系统在同时满足冷、热、电需求的情况下，能量综合利用率可达到 90%。据有关专家估算：如果从 2000 年起每年有 4% 的现有建筑的供电、供暖和供冷采用 CCHP，从 2005 年起 25% 的新建建筑及从 2010 年起 50% 的新建建筑均采用 CCHP 的话，到 2020 年的二氧化碳的排放量将减少 19%。如果将现有建筑实施 CCHP 的比例从 4% 提高到 8%，到 2020 年二氧化碳的

排放量将减少 30%^[179]。

表 5-3 不同热电冷联供原动机相关特性比较^[180]

Table 5-3 Comparison of characters of different combined cooling heating and power

	燃气内燃机	燃气轮机	微燃机
容量(kW)	20-5000	1000-50000	30-350
发电效率(%)	22-40	22-36	18-27
综合效率(%)	70-90	50-70	50-70
燃料	燃气	燃气	燃气
启动时间	10s	6min-1hr	60s
燃料供应压力	低压	中压	中压
检修时间(kh)	24-60	30-50	5-40
设备造价(元/kW)	2000-5000	2500-5000	3000-6500
工程总包造价(元/kW)	5000-8000	5500-7500	5000-10000
余热回收加价(元/kW)	625-1250	800-1600	625-2900
运行管理成本 (元/kwh)	6-13	2.5-6.5	4.2-8.3

2) 太阳能光电技术

太阳能发电分为光热发电和光伏发电。而通常说的太阳能发电指的是太阳能光伏发电，简称“光电”。光伏发电是太阳能的一种主动利用形式，即光电转换，是利用半导体界面的光生伏特效应而将光能直接转变为电能的一种技术，这种技术的关键元件是太阳能电池供电系统。太阳能电池经过串联后进行封装保护可形成大面积的太阳电池组件，再配合上功率控制器等部件就形成了光伏发电装置。

其中，太阳能光伏建筑一体化(Building Integrated Photovoltaic, BIPV)，是应用太阳能发电的一种新概念，简单地讲就是将太阳能光伏发电方阵安装在建筑的维护结构外表面来提供电力。由于光伏方阵与建筑的结合不占用额外的地面空间，是光伏发电系统在城市中广泛应用的最佳方式，因而倍受关注。

根据光伏方阵与建筑结合形式的不同，BIPV 可分为两大类：一类是光伏方阵与建筑的结合。将光伏方阵依附于建筑物上，建筑物作为光伏方阵载体，起支撑作用；光伏方阵与建筑的结合是一种常用的形式，特别是与建筑屋面的结合。由于光伏方阵与建筑的结合不占用额外的地面空间，是光伏发电系统在城市中广泛应用的最佳安装方式，因而倍受关注。另一类是光伏方阵与建筑的集成。光伏组件以一种建筑材料的形式出现，光伏方阵成为建筑不可分割的一部分，如光电瓦屋顶、光电幕墙和光电采光顶等。光伏方阵与建筑的集成是 BIPV 的一种高级形式，它对光伏组件的要求较高。光伏组件不仅要满足光伏发电的功能要求同时还要兼顾建筑的基本功能要求。

光伏组件与建筑的结合，主要有光伏屋面、光伏幕墙、光伏采光顶、光伏遮阳板等形式，如表 5-4 所示。

表 5-4 BIPV 主要形式及其光伏组件^[181]

Table 5-4 Type and components of BIPV

BIPV 形式	光伏组件	建筑要求	类型
斜屋顶光伏方阵	普通光伏组件	建筑效果	结合
光伏屋顶	光伏屋面瓦	建筑效果、结构强度、遮风挡雨	集成
平屋顶光伏方阵	普通光伏组件	建筑效果	结合
光伏屋顶	光伏屋面建材组件	建筑效果、结构强度、遮风挡雨	集成
墙面光伏方阵	普通光伏组件	建筑效果	结合
光伏幕墙	光伏玻璃组件	建筑效果、结构强度、遮风挡雨	集成
光伏采光顶天棚	光伏玻璃组件	建筑效果、结构强度、遮风挡雨	集成
光伏遮阳板	光伏组件	建筑效果、结构强度	集成

太阳能光伏发电在 21 世纪会占据世界能源消费的重要席位，不但要替代部分常规能源，而且将成为世界能源供应的主体。预计到 2030 年，可再生能源在总能源结构中将占到 30% 以上，而太阳能光伏发电在世界总电力供应中的占比也将达到 10% 以上；到 2040 年，可再生能源将占总能耗的 50% 以上，太阳能光伏发电将占总电力的 20% 以上；到 21 世纪末，可再生能源在能源结构中将占到 80% 以上，太阳能发电将占到 60% 以上。这些数字足以显示出太阳能光伏产业的发展前景及其在能源领域重要的战略地位^[182]。

3) 太阳能光热技术

太阳能热利用虽然属于光能“被动利用”的一种，基本原理是将太阳辐射能收集起来，通过与物质的相互作用转换成热能加以利用。

目前使用最多的 太阳能收集装置，主要有平板型集热器、真空管集热器、陶瓷太阳能集热器和聚焦集热器（槽式、碟式和塔式）等 4 种。通常根据所能达到的温度和用途的不同，而把 太阳能光热利用分为 低温利用（<200℃）、中温利用（200~800℃）和高温利用（>800℃）。目前低温利用主要有 太阳能热水器、太阳能干燥器、太阳能 蒸馏器、太阳能采暖（太阳房）、太阳能温室、太阳能空调制冷系统等，中温利用主要有 太阳灶、太阳能热发电聚光集热装置等，高温利用主要有高温太阳炉等。

在中国，太阳能的热利用一直是热门话题，太阳能热水器是中国太阳能利用中应用最广泛、产业化发展最迅速的产品。中国太阳能热利用起源于上世纪 70 年代，早期以平板太阳热水器、闷晒热水器产品为主，平板型热水器在 1996 年之前的市场占有率达 70% 以上。随着真空管太阳能热水器的问世，它逐步成为中

国市场的主导产品，现已经占市场份额的 87.5%以上。

（2）低碳排放系统

我国是世界上水资源最贫乏的国家之一。按照联合国有关机构的标准，人均水资源量 3000m^3 以下为轻度缺水，人均 2000m^3 以下为中度缺水，人均 1000m^3 以下为严重缺水，人均 500m^3 以下为极度缺水。而根据我国水利部门的相关统计，目前，我国水资源的总量虽为 2.8 万亿 m^3 ，约占全球水资源的 6%，仅次于俄罗斯、巴西和加拿大，居世界第 4 位，但人均只有 2202m^3 ，仅为世界平均水平的 1/4，北方地区的人均水资源量是世界平均量的 1/30，属于极度缺水地区。面对我国水资源短缺形势日益严峻，要大力推广建筑和住宅小区污水处理及中水回用设施的建设，加快创建节水型城市的步伐。

1) 中水回用技术

中水回用技术系指将小区居民生活废(污)水（沐浴、盥洗、洗衣、厨房、厕所）集中处理后，达到一定的标准回用于小区的绿化浇灌、车辆冲洗、道路冲洗、家庭坐便器冲洗等，从而达到节约用水的目的。按用途分类，一种是将其处理到饮用水的标准而直接回用到日常生活中，即实现水资源直接循环利用，这种处理方式适用于水资源极度缺乏的地区，但投资高，工艺复杂；另一种是将其处理到非饮用水的标准，主要用于不与人体直接接触的用水，如便器的冲洗，地面、汽车清洗，绿化浇洒，消防，工业普通用水等，这是通常的中水处理方式。

中水处理的主要方法物理处理法、物理化学法、生物处理法等。其中物理处理法：膜滤法，适用于水质变化大的情况。采用这种流程的特点是装置紧凑，容易操作，以及受负荷变动的影响小。膜滤法是在外力的作用下，被分离的溶液以一定的流速沿着滤膜表面流动，溶液中溶剂和低分子量物质、无机离子从高压侧透过滤膜进入低压侧，并作为滤液而排出；而溶液中高分子物质、胶体微粒及微生物等被超滤膜截留，溶液被浓缩并以浓缩形式排出；物理化学法：适用于污水水质变化较大的情况。一般采用的方法有：砂滤、活性炭吸附、浮选、混凝沉淀等。这种流程的特点是：采用中空纤维超滤器进行处理，技术先进，结构紧凑，占地少，系统间歇运行，管理简单。而生物处理法适用于有机物含量较高的污水。一般采用活性污泥法、接触氧化法（如图所示）、生物转盘等生物处理方法。单独使用或是几种生物处理方法组合使用，如接触氧化加生物滤池；生物滤池加活性炭吸附；转盘加砂滤等流程。这种流程具有适应水力负荷变动能力强、产生污泥量少、维护管理容易等优点。

2) 雨水收集利用技术

雨水收集系统，是将雨水根据需求进行收集后，并经过对收集的雨水进行处理后达到符合设计使用标准的系统。现今多数由弃流过滤系统、蓄水系统、净化

系统组成。

雨水收集系统根据雨水源不同，可粗略分为两类：屋顶雨水和地面雨水。屋顶雨水相对干净，杂质、泥沙及其他污染物少，可通过弃流和简单过滤后，直接排入蓄水系统，进行处理后使用；地面的雨水杂质多，污染物源复杂。在弃流和粗略过滤后，还必须进行沉淀才能排入蓄水系统。

雨水收集系统，是指雨水收集的整个全过程，雨水收集主要包括四个主要方面：初期弃流—过滤—储存—回用。完成了这四个阶段，就是一个雨水收集的全过程，也就是雨水收集系统。初期雨水经过多道预处理环节，保证了所收集雨水的水质。采用蓄水模块进行蓄水，有效保证了蓄水水质，同时不占用空间，施工简单、方便，更加环保、安全。通过压力控制泵和雨水控制器可以很方便地将雨水送至用水点，同时雨水控制器可以实时反应雨水蓄水池的水位状况，从而到达用水点。图 5-6，图 5-7 分别显示了屋顶、地面雨水收集流程步骤。

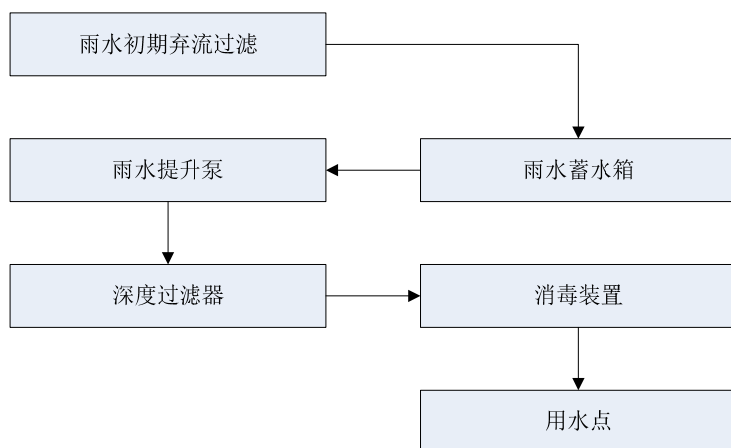


图 5-6 屋顶雨水收集流程图

Figure 5-6 the flow chart of roof rainwater collection

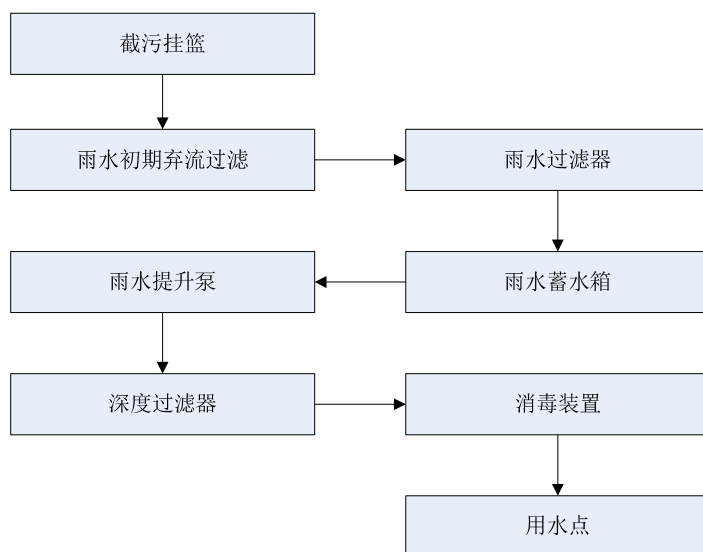


图 5-7 地面雨水收集流程图

Figure 5-7 the flow chart of ground rainwater collection

雨水回收技术可以达到节能减排,绿色环保,减少雨水的排放量,使干旱,紧急情况(如火灾)能有水可取。另外可以用到生活中的杂用水,节约自来水,减少水处理的成本。

5.3.3 城市住区环境系统低碳技术体系

城市住区建筑环境低碳技术系统分类主要从绿植碳汇的角度出发,对建筑环境系统可能采用的低碳技术进行总结归纳,如表 5-5 所示。

表 5-5 城市住区建筑环境低碳技术系统分类

Table 5-5 Classification of Low-Carbon technique System of Urban Settlement Environment

体系分类	技术系统	
绿植碳汇	环境质量控制	建筑风环境评价、排污讲耗评价
	绿化种植系统	树木移栽技术、人工绿化栽培技术、反季节种植技术、
	屋顶与屋面垂直绿化系统	轻型屋顶绿化技术、薄层基质屋顶绿化和垂直栽培技术
	坡地绿化系统	驳岸绿化种植技术、TBS 护坡绿化技术
	绿化景观用水系统	透水材料应用技术(干硬性混凝土砖等)、地下水涵养技术、水体生态净化系统、江河水处理循环系统、绿化景观用水控制技术、智能程控微喷灌技术、湿地水环境保护技术。

本文选取屋顶与屋面垂直绿化系统对技术进行分析和说明。

屋顶绿化,从狭义上来说,指的是在建筑屋顶上实施绿化;从广义上来讲,泛指在非渗透性的人工构筑物上进行绿化,包括各类建筑物的顶部以及建筑物的露天阳台、裙楼屋顶、空中平台等,也被称为“建筑种植”或“立体绿化”,它使建筑物的空间潜能与绿色植物的多种效益得到完美的结合和充分的发挥。

屋顶绿化能有效节约能源,是冬暖夏凉的“绿色空调”。日本“屋顶绿化研究会”经过调查,认为“如果大厦实施 1000m² 的屋顶绿化,大厦的空调使用量可以减少 30%”。建筑屋顶绿化可明显使建筑物周围环境温度降低 0.5~4℃,而建筑物周围环境的温度每降低 1℃,建筑物内部的空调容量可降低 6%。低层大面积的建筑物,由于屋面面积比壁面面积大,夏季从屋面进入室内的热量占总围护结构得热量的 70%以上。绿化覆盖的屋顶能在夏季吸收阳光的辐射热量,有效地阻止屋顶表面温度升高,从而降低屋顶下的室内温度。一个城市的屋顶面积约占城市总面积的 60%~70%,如果都进行屋顶绿化,那么这座城市中的二氧化碳较之绿化前将降低 70%左右。

墙面垂直绿化泛指用攀缘植物或其他植物装饰建筑墙面或各种围墙的一种立体绿化形式,以达到美化和维护生态的目的。虽然在建筑表面设置种植池等方法也行之有效,但有研究表明,在我国,种植地锦是最适宜、最简便的绿化墙面方法,也是改善城市环境最直接、经济的手段。利用地锦对墙面进行绿化,在夏

季可降低墙体表面温度 10-14℃，并降低室内表面温度 2-2.4℃。

由于植物绿化对改善空气质量、降低温室效应的作用显著，近年来，我国不少学者对不同绿化植物的固碳释氧能力及蒸腾增湿能力进行了研究分析。中国林业科学研究院的杨学军在其对植物立体绿化的评价研究中分别分析了地锦、五叶地锦、绿爬山虎、川鄂爬山虎四种地锦属植物的固碳释氧、蒸腾增湿、滞尘和抑菌能力，并对其在不同立体条件下的应用效果进行了评价。青岛农业大学赵萱、李海梅在对 11 种地被植物固碳释氧与降温增湿效益的研究中得出，不同类型地被植物之间，其固碳释氧能力存在着差异，灌木地被植物在固碳释氧能力方面要显著高于草本和藤本地被植物。部分地被植物单位叶面积的日释氧固碳量及蒸腾吸热量如表 5-6 所示。

表 5-6 地被植物单位叶面积日释氧固碳量及蒸腾吸热量

Table 5-6 Oxygen releasing, carbon and calories absorbing of ground plants' unit leaf in a day

植物名称		固碳量(g/m ²)	释氧量(g/m ²)	蒸腾吸热量(kJ/m ²)	降温度数(℃)
灌木	火棘	18.94	13.77	3728.34	0.29
	锦带	15.07	10.96	3298.82	0.26
	月季	12.38	8.99	3398.30	0.28
	金叶女贞	6.93	5.04	2774.55	0.22
	大叶黄杨	4.73	3.44	3467.79	0.27
草本	鸢尾	13.43	9.77	2282.75	0.18
	大花萱草	7.69	5.59	2536.39	0.20
藤本	金银花	5.47	3.97	5539.61	0.44
	五叶地锦	5.19	3.77	6087.34	0.48

然而，由于各地气候的差异，即使是同一种植物，在不同的地域及气候条件下其固碳释氧及蒸腾增湿等生态能力也大不相同。因此，在对不同地区的城市及建筑绿化植物的选取上，应考虑选择适宜当地气候，并能充分发挥植物最大生态功能的绿化植物。

5. 4 本章小结（Brief Summary）

分析了城市住区低碳运行机理，从生命周期和住区系统构成两个维度，对住区进行低碳技术分类分析，对不同类别、不同类型的低碳技术分别进行简要分析，讨论其减排潜力；根据现有研究成果，总结构建双维度的城市住区低碳技术体系。

6 城市住区低碳成本效益分析

6 Low-Carbon Cost-Effectiveness Analysis of Urban Settlements

6.1 城市住区低碳成本效益分析模型构建 (Build Urban Settlements Low-Carbon Cost Effectiveness Analysis Model)

6.1.1 城市住区全生命周期成本分析

美国国家标准和技术局手册将建筑生命周期成本 (LCC) 定义为^[183]: 一个建筑物或建筑物系统在一段时期内的拥有、运行、维护和拆除的总的折现后的货币成本。生命周期成本包括初始化成本和未来成本。初始化成本是在设施获得之前将要发生的成本及建设成本, 也就是我国所说的工程造价, 包括资本投资成本, 购买和安装成本。未来成本从设施开始运行到设施被拆除期间所发生的成本, 包括能源成本、运行成本, 维护和修理成本, 剩余值等。在计算LCC时, 要首先确定研究周期、折现率等研究参数。初始化成本发生在研究周期的第 0 年, 即基年。未来成本要考虑资金的时间价值, 一般采用现值法折现到基年。

全生命周期成本可以按时间、相关内容、成本范畴等不同角度进行划分, 根据本文的研究目的, 主要是将其按成本的类型加以划分, 即将住区生命周期成本 (LCC) 分为经济成本、环境成本、社会成本, 如图 6-1 所示^[184]。

(1) 城市住区全生命周期经济成本

住区全生命周期经济成本, 也称为资金成本、财务成本, 是指住区从设备决策、设计、施工、使用直至寿命终结全过程所发生的一切可直接体现为资金耗费投入的总和, 主要包括建设成本、使用成本和处置成本。

建设成本是指住区从决策到竣工验收为止所投入的全部成本费用, 包括决策费用、设计费用、施工费用等。使用成本则是指住区在使用过程中发生的各种费用, 包括各种能耗成本、维护成本和管理成本等。处置成本是指在住区的生命周期末由于处置相关资产所发生的成本, 包括废弃成本及出售过程所发生的费用等。

经济成本从其性质上说, 可以是资金的直接投入, 也包括资源性投入, 如人力资源、自然资源等; 从其投入时间上说, 可以是一次性投入, 如建设成本; 也可以是分批、连续投入, 如使用成本等。

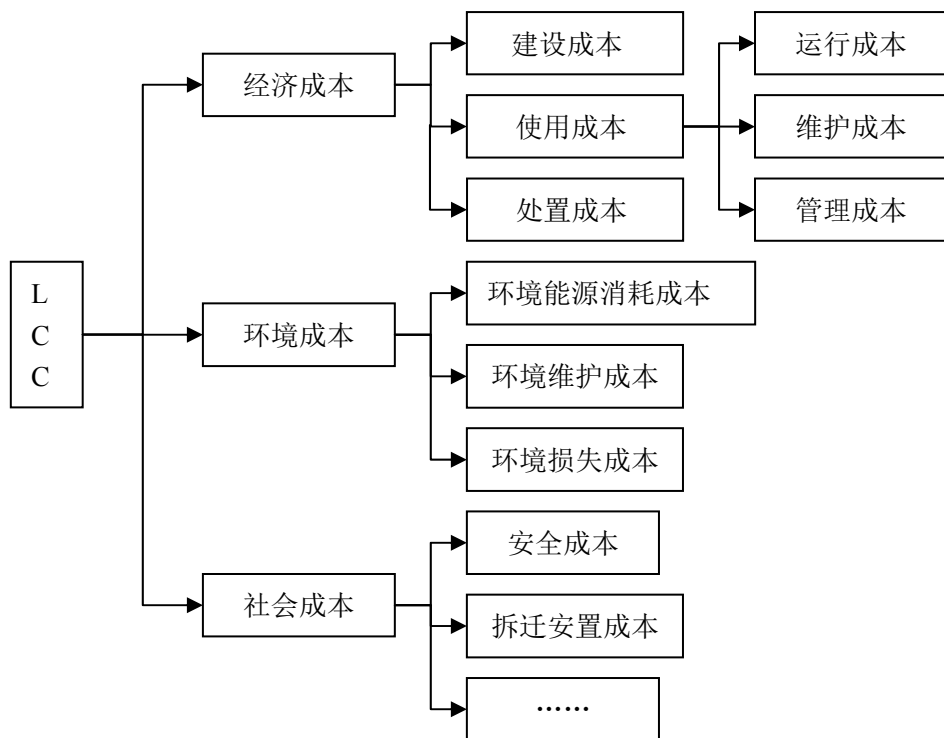


图 6-1 按成本类型划分的建筑设备全生命周期成本构成

Figure 6-1 Construction of Building Equipment LCC According to the Types of the Cost

（2）全生命周期环境成本

1998 年 2 月，联合国通过了《环境会计和财务报告的立场公告》，对“环境成本”定义为^[185]：本着对环境成本负责的原则，为管理企业经营活动对环境造成的影响而发生的支出，以及因企业执行环境目标和要求所付出的其他成本。这一定义指出了环境成本的形成来自企业活动对环境造成的影响，而对环境成本的控制正是要减轻或消除这种影响，这是狭义的环境成本。

广义的环境成本是指企业的生产经营活动对自然环境和社会造成的经济损失总和，包括环境资源消耗成本、环境维护成本和环境损失成本。环境资源消耗成本是指企业在生产经营过程中消耗的那部分环境资产的成本。环境维护成本是为减少环境资源的人为破坏，维护环境质量达到一定水平所采取的各种保护措施的成本，包括“三废”治理支出、排污费、环境管理和监测费用、购置污染治理设备、交纳环保税费、环保科研支出等。环境损失成本是指由于生产造成的环境污染和自然资源破坏而进行的恢复成本。

全生命周期环境成本是与原材料生产、产品的制造、消费、使用和最终的报废处理全过程有关的环境成本。这种成本不但包括企业的内部环境成本，还包括企业外部成本(企业应承担的对环境进行恢复的费用)。住区建设及使用等整个生命周期内对于环境的影响可能是正面的，也可能是负面的。在分析及计算环境成本时，应对环境影响进行分析、甄别，剔除不属于成本的系列。

(3) 全生命周期社会成本

在经济学中所指的社会成本更多的是指企业或个人行为对社会经济造成的负面影响。全生命周期社会成本是指住区生命周期过程中对社会经济造成的不利影响。与环境成本一样，住区建设及使用对于社会的影响可以是正面的，也可以是负面的。因此，也必须进行甄别，剔除不属于成本的系列。

在住区生命周期成本中，环境成本和社会成本都是隐性成本，它们不直接表现为量化成本，而必须借助于其他方法转化为可直接计量的成本，这就使得它们比经济成本更难以计量。目前，在我国项目建设实践中，通常只偏重于经济成本的管理，而对于环境成本和社会成本则考虑得较少，这也是我国的成本管理与西方发达国家差距较大的方面。

6.1.2 城市住区低碳增量成本分析

住区低碳的增量成本是指住区低碳成本与基准成本之间的差价，基准成本是指在满足国家及项目建设所在地强制节能标准基础的同规模、同功能住区，其相应的规划设计、施工建造、设备安装和运行管理等投资成本。住区低碳的增量成本分为前期咨询设计成本、低碳技术增量成本。住区低碳全生命周期增量成本的计算公式为：

$$LCC = C_{\text{前期}} + C_{\text{低碳技术}}$$

住区低碳技术增量成本主要有三方面的内容：一是住区低碳增加的技术措施，即从无到有产生的增量，如增加可再生能源设备；二是强化技术措施，即效率提高产生的增量成本，如提高空调设备的效率；三是交互影响产生的成本增量，可能为正，也可能为负，如增强围护结构保温效果增加投资，但会减少采暖制冷负荷，从而减少采暖制冷设备的初始投资。

经济学中的增量成本是指在各种方案的成本比较选择时，选定某一方案为基本方案，将其它方案与之进行比较时增加的成本。因此，基准方案的确定对增量成本的计算非常重要。要想得到住区低碳技术增量成本，则必须明确界定住区低碳技术的基准方案，本文定义了两种情况的基准方案。

(1) 按国家、省、市及其他相关标准、规范要求设计的方案

在设计开始前，住区低碳技术增量成本的基准方案为按国家、省、市及其他相关标准、规范要求设计的方案所采用的住区低碳技术。住区低碳技术增量成本为：以目前国家或地方节能设计标准要求设计的方案、当地的材料和设备市场准入制度规定定价的产品为基准方案成本，住区项目实际设计因采用先进方案或高效设备而增加的成本。

(2) 不同设计方案中的一种设计方案

在设计进行过程中，基准方案为现有设计方案中的某一种设计方案。增量成

本为在该方案基础上增加的成本。对开发商、业主等主要利益相关者来说，他们更加关注不同设计方案比基准方案增加的成本，也就是根据基准方案 2 得到的住区低碳技术增量成本。

通过上述分析，参考绿色建筑评价标准的相关评价项目设置，本文将住区低碳技术增量成本¹分为以下部分：

- 1) 节地与室外环境项目的增量成本；
- 2) 节能与能用利用项目增量成本；
- 3) 节水与水资源利用项目的增量成本；
- 4) 节材与材料利用项目增量成本；
- 5) 室内环境质量项目增量成本；
- 6) 运行管理项目的增量成本。

则，住区低碳技术增量成本可以表示为：

$$S_{\text{增量成本}} = S_{\text{节地增量成本}} + S_{\text{节能增量成本}} + S_{\text{节水增量成本}} + S_{\text{节材增量成本}} + S_{\text{环境增量成本}} + S_{\text{运行增量成本}} \quad (6-1)$$

6.1.3 城市住区低碳增量效益分析

(1) 住区低碳全生命期增量效益

住区低碳全生命期增量成本期待的是增量效益。住区低碳全生命周期效益分为直接经济效益、环境效益和社会效益，其中环境效益和社会效益为间接效益。直接效益是由住区低碳带来的、能够为其投资主体带来的经济利益。间接效益是住区低碳外部性特性带来的社会成员共享的效益。住区低碳全生命周期的增量效益计算公式为：

$$S_{\text{增量效益}} = S_{\text{增量经济效益}} + S_{\text{增量环境效益}} + S_{\text{增量社会效益}} \quad (6-2)$$

(2) 增量经济效益

同增量经济成本类似，本文将增量经济考虑分为以下部分：

- 1) 节地与室外环境项目的增量经济效益；
- 2) 节能与能用利用项目的增量经济效益；
- 3) 节水与水资源利用项目的增量经济效益；
- 4) 节材与材料利用项目的增量经济效益；
- 5) 室内环境质量项目的增量经济效益；
- 6) 运行管理项目的增量经济效益；

则，住区低碳技术增量成本可以表示为：

$$S_{\text{增量经济效益}} = S_{\text{节地增量经济效益}} + S_{\text{节能增量经济效益}} + S_{\text{节水增量经济效益}} + S_{\text{节材增量经济效益}} + S_{\text{环境增量经济效益}} + S_{\text{运行增量经济效益}} \quad (6-2)$$

¹ 本文只考虑低碳技术引起的增量经济成本，对于增量环境成本和增量社会成本，本文不予考虑。

(3) 增量环境效益

住区低碳技术带来的增量环境效益主要包括由低碳减排造成能源资源衰竭的减轻和温室气体及污染物排放减少。本文主要考虑温室气体及污染物排放减少带来的环境效益。

1) CO₂ 减排环境效益

CO₂ 减排是因住区低碳技术减少的 CO₂ 排放和绿化增加的碳汇能力造成的。在不考虑碳交易和碳处理时, CO₂ 减排环境效益为 0。考虑到碳交易和碳处理时, CO₂ 的处理成本为 205~486 元/t, 而目前, 欧盟碳交易的价格则在约 160 元/t。

2) SO₂ 减排环境效益

对于SO₂ 减排效益的计算, 主要参考相关排污费价格, 目前对SO₂ 征收价格为 0.63 元/kg。同时, 研究表明, 每排放 1 吨SO₂ 所造成的国民经济损失约为 2 万元人民币。因此, 在考虑国民经济损失时SO₂ 减排价值为 2 万元/吨^[186]。

3) 烟尘和 NO_x 减排环境效益

对于烟尘和 NO_x 减排效益的计算, 从排污费收费来计算, 烟尘减排价值为 275.2 元/吨, NO_x 减排价值为 631.6 元/吨。同时, 与 SO₂ 类似, 在考虑国民经济损失时 NO_x 减排价值为 4.863 万元/吨^[186]。

由于在进行住区低碳技术增量环境效益分析时, 煤炭、电力等能源节约是住区低碳技术的重要表现形式, 所以, 本文将煤炭和电力考虑 CO₂, SO₂, 烟尘和 NO_x 的外部性因子进行计算, 如表 6-1 所示。

表 6-1 煤炭和电力外部性因子计算表
Table 6-1 External factor of coal and electricity

	排污费 (不含 碳交易)	碳交易 及 SO ₂ 损失费 用	标煤排放 系数	电排放系 数	标准煤的外部性因子		电力外部性因子	
					(排污费 (不含碳 交易))	(碳交易 及 SO ₂ 损 失费用)	(排污费(不 含碳交易))	(碳交易 及 SO ₂ 损 失费用)
	元/kg	元/kg	kg/kg(c)	kg/kwh	元/kg	元/kg	元/kwh	元/kwh
CO ₂	0.0000	0.1600	2.4560	0.8350	0.0000	0.3930	0.0000	0.1336
SO ₂	0.6300	20.0000	0.0165	0.0056	0.0104	0.3300	0.0035	0.1122
Nox	0.6300	48.6300	0.0156	0.0053	0.0098	0.7586	0.0033	0.2579
烟尘	0.2800	0.2800	0.0096	0.0033	0.0027	0.0027	0.0009	0.0009
合计					0.0229	1.4843	0.0078	0.5047

所以, 住区低碳技术增量环境效益为:

$$S_{\text{增量环境效益}} = S_{\text{CO}_2 \text{ 减排环境效益}} + S_{\text{SO}_2 \text{ 减排环境效益}} + S_{\text{NO}_x \text{ 减排环境效益}} + S_{\text{烟尘减排环境效益}} \quad (6-3)$$

(4) 增量社会效益

住区低碳技术带来的增量社会效益主要包括由低碳减排造成污染物处理设施的节约、相关财政损失的减少,住区居民工作效率和福利的提高。

对于污染物处理设施,如雨污水设施节约费用,节水项目实施后,减少了小区的雨水和污水的排放量,节省的排污费的同时减少了市政排水管网和市政污水处理厂的投资。

对于财政损失的减少,仍以节水为例,目前,我国由于缺水造成国家财政收入为每年 2300 亿元,相当于每缺水 1m^3 就要损失 5.75~7.67 元。实施节水项目可以减少国家的财政损失。

综上所述,住区低碳的社会增量效益包括节约的排污费 $S_{\text{排污费}}$, 排污设施费 $S_{\text{设施费}}$, 财政损失费 $S_{\text{财政损失}}$ 以及因工作效率提高增加的收入 $S_{\text{效率}}$ 和居民福利 $S_{\text{福利}}$ 。则有:

$$S_{\text{增量社会效益}} = S_{\text{排污费}} + S_{\text{设施费}} + S_{\text{财政损失}} + S_{\text{效率}} + S_{\text{福利}} \quad (6-4)$$

6.1.4 城市住区低碳成本效益分析模型

(1) 模型的构成分析

本文构建的住区低碳增量成本效益模型,从全生命周期的角度出发,从节地、节能、节水、节材、室内、运行六个方面,按初始投资和运行使用产生的增量成本和增量效益构建。住区低碳全生命周期的增量成本效益模型,采用净现值法将建设期和运行期产生的增量成本和增量效益分别进行计算。

住区低碳全生命周期的成本收益分析模型由增量效益净现值和增量效益成本比两个指标表示,计算公式如下:

$$SE = NPV_{S_{NPV}} - NPV_{LCC} \quad (6-5)$$

$$CE = NPV_{S_{NPV}} / NPV_{LCC} \quad (6-6)$$

式中, SE —生命周期住区低碳综合效益(元);

$NPV_{S_{NPV}}$ —生命周期住区低碳增量效益现值(元);

NPV_{LCC} —生命周期住区低碳增量成本现值(元);

CE —生命周期住区低碳增量效益成本比。

如果 $SE > 0$, $CE > 1$, 说明该住区低碳项目经济可行。反之,在经济上不可行。

(2) 成本收益模型参数分析

住区低碳生命周期增量成本效益模型的参数分为静态参数和动态参数。在对该模型进行分析时,应考虑动态(随时间而变化)参数的概率分布。

1) 研究时期。住区的建设期以项目可行性研究中的计划建设周期或实际建筑期为准,服务期则为使用年限。

2) 折现率。住区全生命周期增量成本和增量效益以净现值(NPV)体现,

因此折现率是非常重要的参数，可以取折现率等于行业或社会基准收益率。

(3) 基础能源、资源价格。煤炭、石油、天然气、水和电价格对成本效益分析的结果有重要影响，但目前却难以准确统计、预测和确定相关基础能源、资源价格，所以需要加强其概率分布的研究，并考虑经济、社会环境的实际情况。

6.2 城市住区主要低碳技术成本收益分析 (Urban Settlements Low-Carbon Technique Cost Effectiveness Analysis Model)

虽然，住区低碳减排的实现不仅仅是靠低碳技术的简单叠加，同时也受社会、政策、经济等方面因素的影响。但是，低碳技术却是住区低碳减排的实现基础，基于住区低碳成本收益分析模型的研究，分别对主要的住区低碳减排技术进行详细的成本收益分析，从而为住区低碳技术的选择提供必要的依据，是十分可行和必要的。通过第五章对住区低碳技术体系的分析，本文从住区住宅建筑本体、建筑设备系统主要方面的低碳技术进行成本效益分析。

6.2.1 住区住宅建筑本体系统低碳技术成本效益分析

住区建筑造型及围护结构形式对建筑物性能有决定性影响。直接的影响包括建筑物与外环境的换热量、自然通风状况和自然采光水平等。而这三方面涉及的内容将构成 70% 以上的建筑采暖通风制冷能耗。不同的建筑设计形式会造成能耗的巨大差别。然而建筑物是复杂系统，各方面因素相互影响，很难简单地确定建筑设计的优劣。现有研究表明，目前我国的城镇住宅建筑中，住宅外墙和外窗的能耗损失量占了整个建筑物围护结构的约 70%-90%^[187]，因此，外墙是住宅节能减排的重点部位，本节主要对外墙进行成本效益分析。

建筑耗热量主要是通过围护结构的传热耗热量构成，建筑物外墙传热面占整个建筑物外围护结构总面积的 66% 左右，通过外墙体传热所造成的能耗损失约占建筑的外围护结构总能耗损失可以达到 48%，可见外墙保温技术对降低建筑能耗有很大作用。墙体是外围护结构的主体，要降低建筑物的能耗，首先要考虑墙体的节能，外墙节能主要是增加基本结构层的热阻和增设保温层。本小节通过采暖及制冷度日数来计算建筑冷热负荷，从单位面积围护结构的年采暖制冷总费用出发，再结合外墙保温层初始化建筑成本，建立墙体保温层生命周期成本分析的模型。为简化计算，生命周期成本只考虑了建筑成本和运行维护成本。

1) 外墙年度总负荷的计算

一般来说，单位面积建筑冷热损失可用式 (6-7) 计算：

$$Q = K \cdot \Delta T \quad (6-7)$$

式中： Q —单位面积的耗能量， W/m^2 ；

K —传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ；

ΔT —冬（夏）季室内外温差，K。

本文只分析建筑外墙的能量损失（负荷），为简化计算，通过采暖度日数及空调度日数来计算外墙传热负荷，得出单位面积外墙年度总负荷计算公式：

$$Q=Q_w+Q_s \quad (6-8)$$

$$Q_w=86400 \times K \times HDD \quad (6-9)$$

$$Q_s=86400 \times K \times CDD \quad (6-10)$$

式中：Q—单位面积外墙年度总负荷，J/m²；

Q_w —单位面积外墙采暖负荷，J/m²；

Q_s —单位面积外墙制冷负荷，J/m²；

HDD、CDD—分别代表住宅建筑的采暖度日数和制冷度日数，℃·d；

K—住宅外墙平均传热系数，W/m²·K；本节主要考虑墙体和保温层的热阻，所以， $K=1/(R_{wt}+R_{in})$ ， $R_{in}=\delta/\lambda$ ， R_{wt} 为室内空气热阻、室外空气的热阻和基层墙体的热阻之和，m²·K/W， R_{in} 是保温层的热阻，m²·K/W； δ 为保温层厚度，m； λ 为保温材料的计算导热系数，W·m/K。

2) 住宅单位面积外墙年采暖制冷能耗总费用

单位面积外墙在采暖期、制冷期消耗能元的总费用分别为

$$C_w=Q_w C_{e1}/H_1 \eta_1 \quad (6-11)$$

$$C_s=Q_s C_{e2}/H_2 \eta_2 \quad (6-12)$$

式中： C_w ， C_s —分别为住宅采暖和制冷的费用，元/m²；

η_1 ， η_2 —分别为供暖系统和制冷系统的效率，%。

C_{e1} ， C_{e2} —采暖和制冷能源价格；

H_1 ， H_2 —为采暖和制冷燃料热值，对于燃煤或油：J/kg，对于燃气J/m³，对于用电：J/kwh。

采用生命周期成本方法可以计算在生命周期时间内单位面积外墙要花费的能耗总费用 C_t ，即：

$$C_t=(C_w+C_s) \times PWF \quad (6-13)$$

式中：PWF（Present Worth Factor）是现值因子：当 $g < i$ 时： $I^*=(I-g)/(1+g)$ ；当 $g > i$ 时： $I^*=(g-I)/(1+I)$ ；上面两种情况下： $PWF=[1-(1+I^*)^{-N}]/I^*$ ；当 $g=i$ 时： $PWF=(1+I)^{-1}$ ； i —银行利率，%； g —通货膨胀率，%； N —住宅建筑外墙的年限，a； I^* —贴现率，%。

3) 外墙的生命周期成本

外墙的生命周期成本包括运行维护能耗成本和外墙建设成本，运行维护成本包括生命周期内采暖、制冷耗能总成本；外墙建设成本包括外墙结构成本和保温材料成本，（忽略其它材料和施工成本）。

$$LCC = C_t + C_o = (C_w + C_s) \times PWF + C_o \quad (6-14)$$

$$C_o = C_{wt} + C_{in} \quad (6-15)$$

式中： LCC 为单位面积外墙的生命周期成本；

C_o 为单位面积外墙建设成本，元/ m^2 ；

C_{wt} 为单位面积外墙基本结构成本，元/ m^2 ；

C_{in} 为是单位面积保温材料价格，元/ m^2 ， $C_{in} = C_i \times \delta$ ， C_i 是单位体积保温材料价格，元/ m^3 ，因为增设保温层的初始费用主要是保温层材料成本，所以为了简化计算，这里忽略了其他的相关费用只计取了保温材料费。

进一步可以得到外墙的生命周期成本 LCC ：

$$\begin{aligned} LCC &= (Q_w C_{e1} / H_1 \eta_1 + Q_s C_{e2} / H_2 \eta_2) + C_{in} + C_{wt} \quad (6-16) \\ &= 86400K (HDD \times C_{e1} / H_1 \eta_1 + CDD \times C_{e2} / H_2 \eta_2) \times PWF + C_i \times \delta + C_{wt} \end{aligned}$$

4) 外墙低碳减排技术的生命周期成本效益分析

未采取保温措施时的单位面积外墙能耗费用 C_{tl} 和外墙建设成本 C_{o1} 分别为：

$$C_{tl} = 86400 \times K_1 \times (HDD \times C_{e1} / H_1 \eta_1 + CDD \times C_{e2} / H_2 \eta_2) \times PWF \quad (6-17)$$

$$C_{o1} = C_{wt} \quad (6-18)$$

式中： K_1 —无保温措施住宅外墙的平均传热系数， $W / (m^2 \cdot K)$ ；

C_{wt} —无保温措施时住宅单位面积外墙基本结构成本，元/ m^2 。

采用保温措施后，住宅单位面积外墙可以节约能耗的费用，即其每年的能源节约带来的收益为：

$$C_A = C_{tl} - C_t \quad (6-19)$$

从以上公式可推出外墙生命周期经济成本节约 LCS ，即外墙无保温措施的生命周期成本与采用保温措施生命周期成本之差，也即为外墙保温所节约的能耗费用减去前期投入的保温措施成本。

$$\begin{aligned} LCS &= \frac{C_A \times [(1+I)^N - 1]}{I(1+I)^N} - C_{in} \\ &= \frac{86400 \times (K_1 - K) \times (HDD \times C_{e1} / H_1 \eta_1 + CDD \times C_{e2} / H_2 \eta_2) \times [(1+I)^N - 1]}{I(1+I)^N} - C_{in} \quad (6-20) \end{aligned}$$

同时，根据本章上一节的分析，当考虑到外墙保温这一低碳技术在使用阶段带来的环境和社会效益时，如 CO_2 减排效益时，可以将其收益计入，假设 CO_2 的处理成本为 C_{CO_2} ，元/t，采暖和制冷每年的能源节约量为 Q_{s1} 和 Q_{s2} ，采暖和制冷能源的碳排放因子分别为 f_1 和 f_2 ，则每年由外墙保温减排 CO_2 带来的环境效益

$C_{en} = (Q_{s1} \times f_1 + Q_{s2} \times f_2) \times C_{CO_2}$ ，则由此得到外墙保温的生命周期成本 LCS_q ：

$$\begin{aligned}
 LCS_q &= \frac{C_A \times [(1+I)^N - 1]}{I(1+I)^N} + \frac{C_{en} \times [(1+I)^N - 1]}{I(1+I)^N} - C_{in} \\
 &= \frac{C_A \times [(1+I)^N - 1]}{I(1+I)^N} + \frac{(Q_{s1} \times f_1 + Q_{s2} \times f_2) \times C_{CO_2} \times [(1+I)^N - 1]}{I(1+I)^N} - C_{in} \\
 &= \frac{86400 \times (K_1 - K) \times (HDD \times C_{e1} / H_1 \eta_1 + CDD \times C_{e2} / H_2 \eta_2) \times [(1+I)^N - 1]}{I(1+I)^N} \\
 &\quad + \frac{86400 \times (K_1 - K) \times (HDD \times f_1 / H_1 \eta_1 + CDD \times f_2 / H_2 \eta_2) \times C_{CO_2} \times [(1+I)^N - 1]}{I(1+I)^N} - C_{in}
 \end{aligned} \tag{6-21}$$

LCS 与 LCS_q 的结果分析方法一致，不同的是 LCS 仅从经济成本效益考虑， LCS_q 则从经济和环境角度考虑外墙保温的成本效益问题：

当 $LCS/LCS_q=0$ 时，外墙的采用的低碳技术的经济效果相当于外墙不采取时低碳技术的经济效果，即该低碳技术在住宅使用阶段节约的能源费用与该方案的增加的初始成本相同；

当 $LCS/LCS_q<0$ 时，即该低碳技术在住宅使用阶段节约的能源费用比该方案的增加的初始成本少，说明该节能方案不可行；

当 $LCS/LCS_q>0$ 时，即该低碳技术在住宅使用阶段节约的能源费用比该方案的增加的初始成本多，说明该节能方案可行。

5) 外墙保温层经济厚度

$$\begin{aligned}
 LCC &= (Q_w C_{e1} / H_1 \eta_1 + Q_s C_{e2} / H_2 \eta_2) + C_{in} + C_{wt} \\
 &= 86400 \times K \times (HDD \times C_{e1} / H_1 \eta_1 + CDD \times C_{e2} / H_2 \eta_2) \times PWF + C_i \times \delta + C_{wt}
 \end{aligned} \tag{6-22}$$

由上式可得，外墙生命周期成本与墙体基本结构的建设成本，燃料的价格和保温层材料的类型、厚度和价格有关，假设 C_{wt} 、燃料价格已确定，那么 LCC 只与保温层厚度有关：当保温层厚度 δ 越大，供暖燃料费用将逐渐减少，而保温层造价将会越来越大，而总费用先减小而后增大，存在最佳保温层厚度使单位面积保温墙体在其生命周期内的总费用 C 最小，这个厚度值就是最佳保温层厚度，即存在：

$$\frac{\partial LCC}{\partial \delta} = \frac{86400 \times (HDD \times C_{e1} / H_1 \eta_1 + CDD \times C_{e2} / H_2 \eta_2) \times PWF}{\lambda(R_{wt} + \delta / \lambda)^2} - C_i = 0 \tag{6-23}$$

由上式所得的保温层厚度为最佳保温层厚度

$$\delta_{op} = \sqrt{\frac{86400 \times (HDD \times C_{e1} / H_1 \eta_1 + CDD \times C_{e2} / H_2 \eta_2) \times PWF}{C_i}} - R_{wt} \times \lambda \tag{6-24}$$

同样的，当考虑到由外墙保温减排带来的环境效益时，外墙全生命周期成本

为 LCC' ：

$$\begin{aligned} LCC' &= (Q_w C_{e1} / H_1 \eta_1 + Q_s C_{e2} / H_2 \eta_2) + C_{in} + C_{wt} - C_{en} \\ &= 86400 \times K \times (HDD \times C_{e1} / H_1 \eta_1 + CDD \times C_{e2} / H_2 \eta_2) \times PWF + C_i \times \delta + C_{wt} \\ &\quad - 86400 \times (K_1 - K) \times (HDD \times f_1 / H_1 \eta_1 + CDD \times f_2 / H_2 \eta_2) \times C_{CO_2} \times PWF \end{aligned} \quad (6-25)$$

此时， LCC' 最小的保温层厚度，即为考虑外墙保温减排 CO_2 带来的环境效益时，保温层最佳厚度

$$\begin{aligned} \frac{\partial LCC'}{\partial \delta} &= \frac{86400 \times (HDD \times C_{e1} / H_1 \eta_1 + CDD \times C_{e2} / H_2 \eta_2) \times PWF}{\lambda (R_{wt} + \delta / \lambda)^2} \\ &\quad + \frac{86400 \times (HDD \times f_1 / H_1 \eta_1 + CDD \times f_2 / H_2 \eta_2) \times C_{CO_2} \times PWF - C_i}{\lambda (R_{wt} + \delta / \lambda)^2} = 0 \end{aligned} \quad (6-26)$$

由上式所得的保温层厚度为最佳保温层厚度

$$\begin{aligned} \delta_{op}' &= \sqrt{\frac{86400 \times [(HDD \times C_{e1} / H_1 \eta_1 + CDD \times C_{e2} / H_2 \eta_2) + (HDD \times f_1 / H_1 \eta_1 + CDD \times f_2 / H_2 \eta_2) \times C_{CO_2}] \times PWF}{C_i}} \\ &\quad - R_{wt} \times \lambda \end{aligned} \quad (6-27)$$

6.2.2 住区建筑设备系统低碳技术成本效益分析

住区设备系统运行使用的能耗及其碳排放在住区使用阶段的和生命周期的占有很大比例。所以，对住区设备系统进行低碳成本效益的分析，进行低碳设备系统的选择，对住区使用阶段的和生命周期的节能减排有重要意义。本节选取热水系统，进行城市住区建筑设备系统低碳技术成本效益分析。

(1) 热水系统低碳技术成本分析

目前常见的热水供应系统主要有三大类：太阳能热水器、电热水器、燃气热水器。本小节主要运用生命周期方法(LCA)对太阳能热水器、电热水器进行系统、全面的环境影响评价。主要从热水器的用材、生产和运输三个阶段，分别计算三个阶段的单位能耗、碳排放量和环境影响，并进行三类系统的技术成本比较和分析。

随着全球传统能源供应的日趋紧张，新能源不仅受到众多企业的追捧，也受到国家和各级政府的高度重视，其中太阳能产业尤其备受青睐。在太阳能热利用技术中，太阳能热水器是目前实际应用最多、技术上比较成熟的产品。近年来，无论国外还是国内，太阳能热水器的利用都呈现良好的景象。据太阳能协会公布的最新数据显示，全国太阳能热水器的产量以每年 30% 的速度增长，我国在 2009

年太阳能热水器年产量突破 4000 万平方米，占世界的 50%，保有量达 1.45 亿平方米，占全世界总量的 70%左右，我国已成为世界最大的太阳能热水器生产国和使用国^[188]。

1) 研究对象

太阳能热水器是利用玻璃真空集热管将太阳的能量转换成热能，使水从低温度加热到高温度的装置。集热管受阳光照射面的温度高，集热管背阳面温度低，管内水产生温差反应，利用热水上浮、冷水下沉的原理，使水产生微循环而达到所需热水。目前国内市场上用的太阳能集热器的类型主要有：平板式、真空管式、热管式、U 型管式等四种，其中真空管式市场占有率最高。本节主要选取某品牌某型（190/2.0）全玻璃真空管太阳能集热器，即水箱容量为 190L、采光面积为 2 平方米真空管式太阳能热水器作为研究对象。

同时，本文选择容积为 80L、功率为 1500W 的电热水器作为比较对象，对太阳能热水器的生命周期环境影响进行分析与评价。电热水器的工作原理主要是依靠电力使发热管产生热量，从而把冷水加热。下文将通过电热水器和太阳能热水器的 LCA，分析比较这两种类型热水器的能耗和环境排放。

(2) 生命周期系统边界确定

本文把太阳能热水器系统边界分为 5 个阶段：原材料获取阶段、生产阶段、使用阶段、运输阶段和固废处理，如图 6-3 所示。由于固废处理较为复杂，本文只考虑前 4 个阶段。因为太阳能热水器有辅助加热设备，本文假设采用电加热方式，所以使用阶段要消耗电力，并有相应的污染排放。

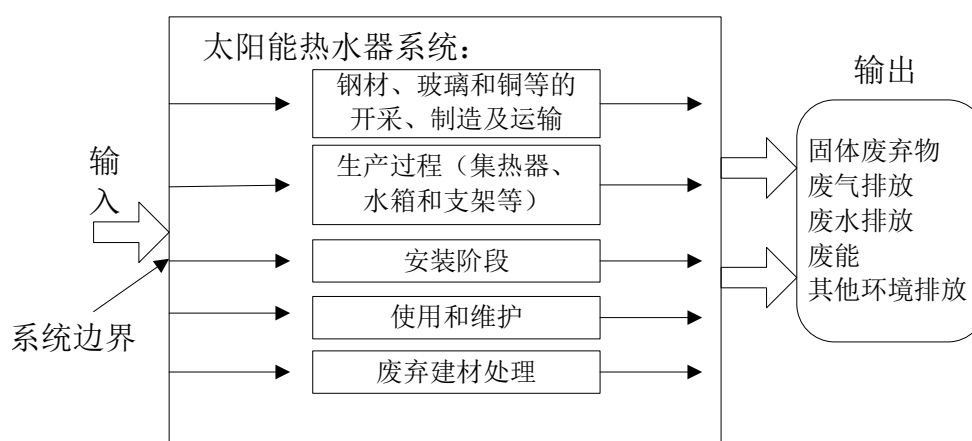


图 6-3 真空管太阳能热水器系统边界

Figure 6-3 System Boundary of Vacuum Tube Solar Water Heater

(3) 热水器能耗确定

1) 热水器总的产水量

假定热水器系统的寿命假设为 15 年，因为选择的功能单元为 1t 热水从 15℃

升到 45℃, 需要计算全生命周期产水量。根据热平衡原理, 太阳能热水器生命周期的总的产水量用下式计算:

$$Q_s = (E \cdot A_c \cdot \eta \cdot G \cdot T) / (\Delta T \cdot C_p) \quad (6-28)$$

$$= 5.4 \times 10^6 \times 2 \times 0.5 \times 0.58 \times 15 / 30 \times 4.2 = 372857 \text{ kg}$$

其中: Q_s 为太阳能热水器产水量, kg; $/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;

E 为徐州地区年太阳能热辐射总量, 取 $5.4 \times 10^6 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{a}$;

A_c 为太阳能热水器集热面积, m^2 , 2 m^2 ;

η 为太阳能热水器的平均热效率, %, 取 $\eta = 50\%$ (国家标准要求大于 45%);

G 为太阳能辐射能全年可利用系数, %, 取 $G = 58\%$;

T 为热水器的使用寿命, a, 取 15 a;

ΔT 为水的温升, $^\circ\text{C}$, 取温升为 30°C ;

C_p 为水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 取 $C_p = 4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

据以上数据, 得到太阳能热水器全生命周期的产水量 Q_s 为 373 t。本文以此数据为基准计算每吨热水的各种 LCA 分析需要的数据。

2) 生活需水量

根据国家颁布的《建筑给排水设计规范》(GB50015-2003) 2009 版规定, 住宅用户使用淋浴器的用水, 每人每次为 70~100L, 这里所需用水量按每人每天平均需用 45°C 的热水量为 80kg, 每户按 3 名家庭人员考虑, 计算可得每日用热水量 240kg, 假设徐州地区一年中利用太阳能的天数为 300 天, 则每年用 72000kg, 太阳能热水器生命周期内 (15a) 的需水量 Q_x 为 $1.08 \times 10^6 \text{ kg}$, 折合 1080t 水。

3) 能耗计算

对于太阳能热水器来说, 产水量和需水量的不足由电辅助加热来完成, 即生命周期内电辅助加热所用总电量 M_b 为:

$$M_b = (Q_x - Q_s) \cdot C_p \cdot \Delta T = (1080000 - 372857) \times 4.2 \times 10^{-3} \times (45 - 15) = 89100 \text{ MJ}$$

而对于电热水器, 通过调研, 电热水器的正常使用寿命约为 7~8 年, 为了与太阳能热水器进行比较, 这里采用使用期 15 年 (使用 8 年后更换同类型的电热水器继续使用), 同时国标中要求的电热水器的热交换效率为 90%, 但实际往往大于此数值, 这里按 95% 计算, 产水量就按照实际的需水量进行计算:

$$\text{即: } Q_d = Q_x = 1080 \text{ t}$$

电热水器 15 年共消耗电能 M_d 为:

$$M_d = Q_d \cdot C_p \cdot \Delta T = 1080000 \times 4.2 \times 10^{-3} \times (45 - 15) / 95\% = 143242 \text{ MJ}$$

(4) 成本清单构成及分析

1) 太阳能热水器

通过现场调研和查阅相关资料, 本论文研究的 QBJ1-190/2.89 型紧凑式真空

管太阳能热水器系统主要的原材料耗用量如表 6-1 所示:

表 6-1 QBJ1-190/2.89 型热水器主要原材料消耗量

Table 6-1 Main Raw Material Consumption of QBJ1-190/2.89 Type Water Heater

材料名称	钢材	铜	玻璃	铝
消耗量 (Kg)	57.8	15.73	28.9	9.1

这里假设管路系统采用铝塑管, 这款产品的主要部件包括: 水箱、真空管、支架等, 水箱外桶、内胆消耗钢材, 水箱发泡层采用聚氨酯整体发泡, 支架为铝型材, 真空管主要材料是玻璃, 其内部导热的热管为铜管。像其他材料如塑料、喷漆、涂层、焊接材料等, 按照 5%规则予以取舍, 根据此表并结合相关文献 [189][190][191][192], 由各个所用材料进行清单分析得到的能耗和排放相加而得到原材料生产加工阶段(即物化阶段)清单, 如表 6-2 所示。

表 6-2 QBJ1-190/2.89 型热水器能耗及环境排放清单

Table 6-2 Energy Consumption and Environmental Emissions

Inventory of QBJ1-190/2.89 Type Water Heater

各阶段		能耗 (MJ)	CO ₂ (g)	SO ₂ (g)	NO _x (g)	CO (g)	CH ₄ (g)	COD (g)	NH ₄ (g)	烟尘 与灰 尘(g)	固废 (g)
物化阶段	钢材 (/kg)	3274	473960	2948	925	6358	1041	16	57	17051	280330
	玻璃 (/kg)	708	37545	267	225	159	3	15		343	433
	铜(/kg)	659	86043	912	771					208	5160
	铝(/kg)	112	3731	18	9						
生产制造阶段			99314	528	229	3					
运输/km.t		25	2651	2	10	38					
电力生产消耗/mj		18387	5828679	5268	26643	14158		159		48762	
生命周期汇总		23165	6531924	9943	28812	20716	1044	190	57	66365	285923

2) 电热水器

电热水器系统同样要经过物化、生产、安装、使用与维护及废弃建材处理等几个阶段, 由于电热水器在使用运行阶段要消耗大量的电能, 而从前面对太阳能热水器的研究可以发现, 即使在电能只起辅助作用的情况下, 太阳能热水器的电辅助加热都要占其整个生命周期能耗和环境排放的很大份额, 所以这里只对电热水器使用运行阶段进行清单分析。

根据前面能耗计算,得到的 15 年共消耗的电能为 143242MJ,相应电力生产环境污染物排放见表 6-3。

表 6-3 电热水器能耗及环境排放清单

Table 6-3 Energy Consumption and Environmental Emissions Inventory of Electric Water Heater

排放物	CO ₂ (g)	SO ₂ (g)	NOX (g)	CO (g)	烟尘与灰尘 (g)
电热水器	45407714	41038	207557	110296	379878

热水器全生命周期成本计算:

由于热水器设备相对于其它民用建筑设备来说比较简单,故将其分为初始一次性投资(包括安装与调试成本,即 $C_{ic} + C_{in}$)、运行成本 C_o 、保养及维修成本 C_m 。假设设备淘汰处理成本 C_d 与残值 C_r 相互抵消,不在本文研究之内。

1) 初始一次性投资 $C_{ic} + C_{in}$

采用市场价值法,太阳能热水器取 4500 元/台,电热水器取 2000 元/台,均包含所有初始费用。

2) 运行成本 C_o

根据需水量及第 4 章研究结果,假设电价取为 0.5 元/kwh,经计算可得运行成本,见表 6-4 所示,此表给出了两种热水器的运行费用比较,可以看出,太阳能热水器运行费用较低,由于全年绝大部分时间都能充分利用太阳能制取热水,对于商品能源的消耗很小,电辅助加热所需电量根据每个人的洗澡习惯不同而有所不同,这里只是按照国家给排水设计规范进行的估算。

表 6-4 两种热水器运行成本比较表

Table 6-4 Comparison of Running Costs of Two Water Heaters

热水器类型	太阳能热水器	电热水器
给水温度 (°C)	15	15
温升 (°C)	30	30
每户日需水量(L)	240	240
每日需理论热量 (MJ)	30.1	30.1
每日需理论耗电量 (kwh)	8.36	8.36
热交换效率 (%)	50	95
每日需实际耗电量 (kwh)	1.095 (电辅助加热)	8.8
每年需耗电量 (kwh)	328.5	2640
运行成本 C_o (元)	164.25	1320

3) 保养及维修成本 C_m

这部分费用采用比例估算法,由于热水器设备功能比较单一,基本不需要保养,维修费用也很低,综合考虑按初始一次性投资 $C_{ic} + C_{in}$ 的 3%估算,即每年发

生的成本分别为 135 元（太阳能热水器）及 60 元（电热水器）。

将以上三部分成本汇总并取现值，可得：

太阳能热水器生命周期成本为：

$$LCC = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+k)^t} - C_r(1+k)^{-n}$$

$$= (C_{ic} + C_{in}) + (C_o + C_m)(P / A, 2.68\%, 15) = 8156 \text{元} \quad (6-29)$$

电热水器的生命周期成本为：

$$LCC' = (C_{ic}' + C_{in}')(1 + (P / F, 2.68\%, 7.5))$$

$$+ (C_o' + C_m')(P / A, 2.68\%, 15)$$

$$= 18503 \text{元} \quad (6-30)$$

其中：名义年利率 i 取 3-5 年期的贷款利率 5.76% 计算；

预期通货膨胀率 p ：假定为 3%；

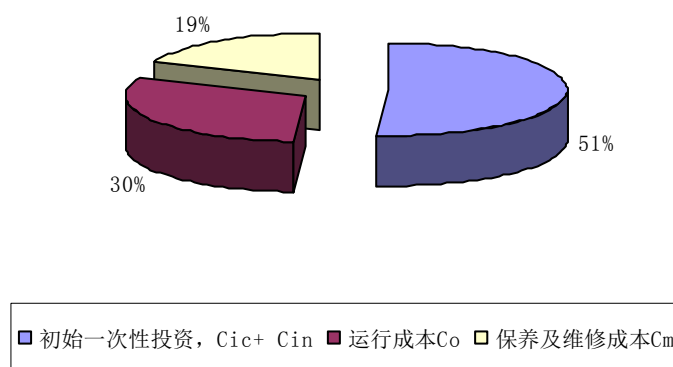
折现率取 2.68%；

研究期：取 15a，太阳能热水器使用寿命按 15 年，电热水器使用寿命按 7.5 年，这样，在 15 年的研究期内需要考虑 7.5 年后进行同类型更新。

需用水量：日需 240L，全年按 300 天考虑。

（5）热水器成本效益分析

首先对全生命周期成本构成比例进行分析比较，见图 6-4 及图 6-5 所示。从图中可以看出，太阳能热水器虽然初始成本较高，但运行成本较低，其 LCC 也比电热水器小的多，使用寿命也较长，而电热水器和太阳能热水器恰好相反，运行成本是初始成本的近 8 倍，占 LCC 的 88%，所以如果从全生命周期经济成本 LCC 来比较，应该选择太阳能热水器。



6-4 太阳能热水器生命周期成本构成比例图

Figure 6-4 Ratio Chart of Life Cycle Cost of Solar Water Heater

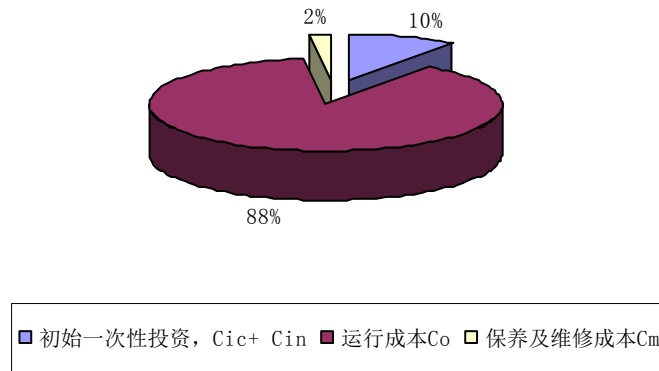


图 6-5 电热水器生命周期成本构成比例

Figure 6-5 Ratio Chart of Life Cycle Cost of Electric Water Heater

使用太阳能热水器由于其能源来源是无偿的，每年可以节约一定量的能源费用，这部分能源费用通常可以作为收入来计算。平衡成本算法就是按这种思路进行分析评价的，它主要是根据其可利用的总净产值 A（节能费用，假定为收入）扣除总消耗（全生命周期成本，即 LCC）G 后所剩下的“净收入 E”这一指标，来确定太阳能热水器系统在经济上是否具有竞争力。

从表 6-4 可以得出总产值 A：

$$A = \Delta C_0 (P/A, 2.68\%, 15) \quad (6-31)$$

$$= (C_2 - C_1) \times \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

$$= 14122 \text{ 元}$$

其中： $\Delta C_0 = C_2 - C_1$ ，

C_2 为电热水器运行成本 = 1320 元；

C_1 为太阳能热水器运行成本 = 164.25 元；

太阳能热水器的净收入：

$$E_1 = A - G_1 = 14122 - 8156 = 7186 \text{ 元}$$

$$E_2 = A - G_2 = 14049 - 18314 = -4265 \text{ 元。}$$

其中： G_1 为太阳能热水器生命周期成本；

G_2 为电热水器生命周期成本；

按照技术经济学相关知识，可得太阳能热水器的投资偿还期 m 满足以下方程：

$$(C_{ic} + C_{in})(1+k)^m + (C_o + C_m) \cdot \left(\frac{(1+k)^m - 1}{k}\right) = \Delta C_o \cdot \left(\frac{(1+k)^m - 1}{k}\right) \quad (6-32)$$

解此方程, 得 $m = 5.74a$

就是说只用 5.74 年就可以收回成本, 远比其使用寿命 15 年要小得多, 可见其经济效益还是相当可观的。由于电热水器净收入为负值, 没有计算投资偿还期的必要。

6.3 基于 0-1 型多目标规划的住区低碳技术优化选择模型(Urban Settlements Low-Carbon Technique Selection Model based on 0-1 Goal Programming)

通过第 5 章有关城市住区低碳技术集成体系研究, 在城市住区规划设计、建设施工、运行维护等各个阶段中都存在大量的低碳减排技术, 如何在综合考虑城市住区的经济成本、社会效益和环境效益情况下, 合理选择相应的低碳减排技术, 是一项复杂的工作。根据上文从建筑物本体、设备和外部环境系统三个方面, 在对低碳技术进行的经济、社会、环境成本收益分析的基础上, 采用运筹学 0-1 型多目标规划的方法, 建立住区低碳技术优化选择模型。建立该模型的假设条件是:

- 将住区系统分解成不同的元素, 针对每个元素选取相应的低碳技术;
- 每个元素都有多种的可选的低碳技术, 明确每种低碳技术成本和效益;
- 选择的成本、节能减排和舒适要求, 作为低碳技术取舍的限制因素。

6.3.1 建立目标规划模型

目标规划(Goal Programming)是由美国经济学家查恩斯(A Charnes)和库柏(W. W. Cooper)在 1961 年出版的《管理模型及线性规划的工业应用》一书中首先提出的。目标规划的基本概念是, 当规定的目标与求得的实际目标值之间的差值为未知时, 可用偏差量 d 来表示。 d 表示实际目标值超过规定目标值的数量, d^+ 称为正偏差量, d^- 表示实际目标值未达到规定目标值的数量, 称为负偏差量。最后使未能达到目标值的偏差量总和为最小。

多目标函数是指具有两个或两个以上的目标函数, 其主要的求解方法有以下三种:

(1) 加权系数法

为每一目标赋一个权系数, 把多目标模型转化成单一目标的模型。但困难是要确定合理的权系数, 以反映不同目标之间的重要程度。

(2) 优先等级法

将各目标按其重要程度不同的优先等级, 转化为单目标模型。

(3) 有效解法

由于多目标规划中各个目标之间常常互相矛盾,一部分目标的改善总是会牺牲另一部分目标的利益,因此,多目标规划问题的绝对最优解是不存在的。只能选取能够照顾到各个目标,并使决策者感到满意的解。选取哪一个解,即得到一个满意解。但有效解的数目太多而难以将其一一求出。

本文采用加权系数法和优先等级法相结合的方法,对城市住区低碳技术优选模型进行求解。

(1) 确定目标期望值 E_k

对于第 k 个目标,首先要确定一个期望值(目标值) E_k ,这些目标期望值一般会互相矛盾,而且一般也不会同时满足。但是目标规划的目的就是寻找某个可行解,使这些目标的期望值能够最好的、最接近的得以实现。

(2) 正、负偏差变量 d^+ , d^-

每个目标函数的期望值 E_k 确定以后,目标的实际值和期望值之间就有正负偏差,设 d 为决策变量的函数,正偏差变量 $d^+ = \max\{d - d_0, 0\}$ 表示决策值超过期望值的部分,负偏差变量 $d^- = -\min\{d - d_0, 0\}$ 表示决策值未达到目标值的部分,这里 d_0 表示 d 的期望值。因决策值不可能既超过期望值同时又未达到期望值,即恒有 $d^+ \times d^- = 0$ 。

(3) 绝对(刚性)约束和目标约束

绝对约束是指必须严格满足的等式约束和不等式约束;如线性规划问题的所有约束条件,不能满足这些约束条件的解称为非可行解,所以它们是硬约束。目标约束是目标规划特有的,可把约束右端项看作要追求的目标值。在达到此目标值时允许发生正或负偏差,因此在这些约束中加入正、负偏差变量,它们是软约束。线性规划问题的目标函数,在给定目标值和加入正、负偏差变量后可变换为目标约束。也可根据问题的需要将绝对约束变换为目标约束。

(4) 目标规划的目标函数

多目标规划模型的各个目标函数,通过引入期望值和正负偏差变量,而被列入目标约束。为实现各目标的实际值接近于各自的期望值,就应该使偏差变量达到最小,为此构造一个新的目标函数,称作目标达成函数,简称达成函数,它是目标的偏差变量的函数。

目标规划的目标函数(准则函数)是按各目标约束的正、负偏差变量和赋予相应的优先因子而构造的。当每一目标值确定后,决策者的要求是尽可能缩小偏离目标值。因此目标规划的目标函数只能是 $\min z = f(d^+, d^-)$ 。

- 要求恰好达到目标值,即正、负偏差变量都要尽可能地小,此时:

$$\min z = f(d^+ + d^-) \quad (6-33)$$

- 要求不超过目标值,即允许达不到目标值,就是正偏差变量要尽可能地

小，此时：

$$\min z=f(d^+) \quad (6-34)$$

- 要求超过目标值，即超过量无限，但必须是负偏差变量要尽可能地小，此时：

$$\min z=f(d^-) \quad (6-35)$$

(5) 优先因子(优先等级)与加权系数

对于多目标问题，一个规划问题常常有若干目标，各个目标对于决策者来说是有主次或轻重缓急的不同。在所有目标不能同时满足的情况下，决策者要先考虑某些最重要的目标，在满足这些目标的前提下再考虑次要目标。为此，目标规划引入目标优先等级和加权系数的概念。根据目标的重要程度，为所有目标设置不同的优先等级，用优先等级因子 P_k ($k=1, 2, \dots, K$) 来表示第 k 等级的目标。 P_1 优先于 P_2 ， P_2 优先于 P_3 等等。当在同一优先级别中同时有几个目标时，为区别他们之间的重要性，可以分别赋予不同的加权系数 w_e 。如若 d_{k1} 和 d_{k2} 同时为第 k 级目标，分别赋予加权系数 w_{k1} 和 w_{k2} ，此时，第 k 级目标可以表示为 $P_k (w_{k1}d_{k1}^- + w_{k2}d_{k2}^+)$ 。

综上所述，各目标约束的达成函数如下：

$$\min Z = \sum P_k \sum (w_i d_i^- + w_i d_i^+) \quad (6-36)$$

6.3.2 0-1 型多目标规划的住区低碳技术优化选择模型

假设对于城市住区元素 j 共有 k_j 种可选用的低碳技术，对于住区元素 j 的第 t 种低碳技术而言，“选用与否”是求解“是”或“否”的决策问题，可以将其转化为 0-1 规划问题，可以引入决策变量 X_{jt} 作为住区元素 j 第 t 种低碳技术的取舍因子等于 0 或 1：

$$X_{jt} = \begin{cases} 0 & \text{表示 } j \text{ 元素不选择第 } t \text{ 种低碳技术;} \\ 1 & \text{表示 } j \text{ 元素选择第 } t \text{ 种低碳技术。} \end{cases}$$

(1) 绝对约束条件

1) 城市住区总预算约束

城市住区元素 j 采用第 t 种低碳技术的初始费用为 IC_{jt} ，要满足不能超过低碳技术总预算 E 。

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} IC_{jt} X_{jt} \leq E \quad (6-37)$$

2) 城市住区耗能量约束

城市住区元素 j 采用第 t 种低碳技术的能耗为 Q_{jt} ，要满足不能超过住区所

在地区的建筑节能强制标准值 Q 。

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} Q_{jt} X_{jt} \leq Q \quad (6-38)$$

3) 城市住区建筑内部环境舒适标准约束

住区元素 j 采用第 t 种低碳技术后对住区建筑空间内部环境带来的可能性空间改变 A_{jt} ，要满足建筑内部环境的可能性空间标准，即建筑的舒适标准 B 。

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} A_{jt} X_{jt} \leq B \quad (6-39)$$

低碳技术对住区建筑内部环境改变这一指标，其实就是该元素采用的低碳技术对建筑内部环境的影响，具体来说就是当某部位采用某种低碳技术后，建筑内部环境的变化。

4) 决策变量是或否约束

决策变量取值为 1 或 0，即： $X_{jt}=1$ 或 0

(2) 目标约束条件

除了以上绝对约束条件之外，还存在另一种不同级别的目标约束。对于每一个约束都要建立一个希望达到的目标期望值 E_k ，作为目标约束的右端项。假设城市住区第 k 个目标的实现值是 g_k 由如下目标约束：

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} g_{ik} X_{it} + d_k^- - d_k^+ = E_k \quad (6-40)$$

1) 生命周期费用最小化

本文将生命周期费用简化为初始投资成本和运行维护成本两部分，其期望值设为 LC^* ，其中初始投资费用包括建设成本、工程建设其他费用和其他动态建设成本，城市住区元素 j 采用第 t 种低碳技术的初始建设成本记为 IC_{jt} ，运行和维护费用包括能耗成本、维护成本、管理成本和报废成本，城市住区元素 j 采用第 t 种低碳技术的运行和维护费用记为 OC_{jt} ，则有：

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} LC_{jt} X_{jt} + d_1^- - d_1^+ = LC^* \quad (6-41)$$

2) 低碳减排经济效益最大化

低碳减排的经济效益主要包括节地经济效益 S_l 、节能经济效益 S_e 、节水经济效益 S_w 、节材经济效益 S_m 等，期望值设为 S_{ec}^* ，则城市住区低碳技术经济效益的约束如下：

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} (S_{l_{jt}} + S_{e_{jt}} + S_{w_{jt}} + S_{m_{jt}}) X_{jt} + d_2^- - d_2^+ = S_{ec}^* \quad (6-42)$$

3) 低碳减排社会效益最大化

社会效益包括非传统水源利用节约的排污费 $S_{减排}$ 、排污设施费 $S_{排水}$ 、财政损失费 $S_{财政损失}$ 以及因工作效率提高增加的收入 $S_{效率}$ 和居民福利 $S_{福利}$ ，其期望值设为 S_{so}^* ，则城市住区低碳技术社会效益约束如下：

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} (S_{排污费_{jt}} + S_{设施费_{jt}} + S_{财政损失_{jt}} + S_{效率_{jt}} + S_{福利_{jt}}) X_{jt} + d_3^- - d_3^+ = S_{so}^* \quad (6-43)$$

4) 低碳减排环境效益最大化

环境效益包括： CO_2 减排环境效益 S_{CO_2} ， SO_2 减排环境效益 S_{SO_2} ， NO_x 减排环境效益 S_{NO_x} ，烟尘减排环境效益 $S_{烟尘}$ ，城市住区低碳技术环境效益约束如下：

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} (S_{CO_2_{jt}} + S_{SO_2_{jt}} + S_{NO_x_{jt}} + S_{烟尘_{jt}}) X_{jt} + d_4^- - d_4^+ = S_{en}^* \quad (6-44)$$

(3) 目标达成函数

本节考虑二级目标，目标达成函数分别如下：

P_1 级目标有生命周期成本最小，即有：

$$\min Z = P_1 d_1^+ \quad (6-45)$$

P_2 级目标有经济效益最大化、环境效益最大化、社会效益最大化，其权重分别 w_2 ， w_3 ， w_4 ，即有：

$$\min Z = P_2 (w_2 d_2^- + w_3 d_3^- + w_4 d_4^-) \quad (6-46)$$

即目标约束的达成函数如下：

$$\min Z = P_1 d_1^+ + P_2 (w_2 d_2^- + w_3 d_3^- + w_4 d_4^-) \quad (6-47)$$

综上所述，城市住区低碳技术选择优化模型的数学表达式如下公式 6-48 所示。

对于 0-1 规划的最优解不能按照实际实数最优解求解方式简单的取整来进行，求解方法主要有分支定界法、割平面法、隐枚举法、匈牙利法、蒙特卡洛法等方法；同时，由于计算机技术的快速发展，线性规划、目标规划等都可以通过软件来实现。本文建立的住区低碳技术优化选择的 0-1 型多目标规划，可以通过 lingo，matlab 等计算机软件实现模型的求解。

具体的，对于求解城市住区在全生命周期成本最小条件下的经济、社会和环境增量效益最大化的低碳技术选择模型，首先在不考虑低碳技术体系的经济、社会和环境效益约束下，进行最小生命周期成本计算；若在单目标最小生命周期

成本情况下低碳技术体系的增量效益小于零,即该低碳技术体系的选择没有带来经济、社会或者环境增量效益,则在原来的模型中再加入所求出的最小生命周期成本的约束条件,重新优化并计算低碳技术体系的增量效益;若在单目标最小生命周期成本情况下低碳技术体系的增量效益大于等于零,即该低碳技术体系的选择带来了一定的经济、社会或者环境增量效益,则为最优解。

$$\begin{aligned}
 \min Z &= P_1 d_1^+ + P_2 (w_2 d_2^- + w_3 d_3^- + w_4 d_4^-) \\
 \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} IC_{jt} X_{jt} \leq E \\ \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} Q_{jt} X_{jt} \leq Q \\ \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} A_{jt} X_{jt} \leq B \\ X_{jt} = 0, 1 \quad (j=1, 2, \dots, n, t=1, 2, \dots, k_j) \\ \sum_{t=1}^{k_j} X_{jt} = 1 \quad (j=1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} LC_{jt} X_{jt} + d_1^- - d_1^+ = LC^* \\ \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} (S_{l_{jt}} + S_{e_{jt}} + S_{w_{jt}} + S_{m_{jt}}) X_{jt} + d_2^- - d_2^+ = S_{ec}^* \\ \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} (S_{\text{排污费}_{jt}} + S_{\text{设施费}_{jt}} + S_{\text{财政损失}_{jt}} + S_{\text{效率}_{jt}} + S_{\text{福利}_{jt}}) X_{jt} + d_3^- - d_3^+ = S_{so}^* \\ \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} (S_{CO_2_{jt}} + S_{SO_2_{jt}} + S_{NOx_{jt}} + S_{\text{烟尘}_{jt}}) X_{jt} + d_4^- - d_4^+ = S_{en}^* \end{cases} \quad (6-48)
 \end{aligned}$$

6.3.3 算例仿真

本小节选取相应城市住区低碳经济技术参数指标,对上节提出的城市住区低碳技术选择优化模型进行验证分析。

(1) 算例假设

根据文献^{[193][194]}中的案例参数,假设某住区的三个部位或系统需要进行低碳技术的优化选择:围护结构中的墙体保温层、外窗以及设备系统中的能源供应系统,保温层、外窗和能源供应系统各有三种选择,其中:

1) 保温层:

方案一: 10mm 膨胀聚苯板板 (K=1.88);

方案二: 20mm 膨胀聚苯板板 (K=1.34);

方案三：40mm 膨胀聚苯板板 (K=0.85)。

2) 外窗：

方案一：铝合金普通中空玻璃窗 (6+12A+6) (K=3.6)；

方案二：断热铝合金普通中空玻璃窗 (6+12A+6) (K=3.3)；

方案三：塑钢普通中空玻璃窗(6+12A+6)(K=2.7)。

3) 能源供应系统：

方案一：冷水机组集中制冷+燃气锅炉集中采暖、热水；

方案二：热电联供发电、集中采暖、集中热水+冷水机组集中制冷；

方案三：冷热电三联供集中制冷、集中供热、集中热水。

通过文献中的相关参数和结论，并按照本章中对于低碳技术的环境和社会效益的、研究结论进行相关计算，本文得出了三个建筑部位、系统各个方案的初始投资成本、运行使用成本、节能量、节能经济效益、节能减排的环境效益等相关数据，如表 6-5 和表 6-6 所示。

表 6-5 案例中各技术方案节能经济效益计算表

Table 6-5 Economic Benefits Analysis of technical solutions

建筑部位或系统 j	技术方案	决策变量 X_{jt}	节能量 Q_{it} (kwh/m ²)	电力价格 C_{it} (元/ kwh)	节能经济效益 C_e (元/a m ²)
外墙保温层 $j=1$	方案一	X_{11}	22.21	0.5	11.11
	方案二	X_{12}	30.8	0.5	15.4
	方案三	X_{13}	38.03	0.5	19.02
外窗 $j=2$	方案一	X_{21}	10.06	0.5	5.03
	方案二	X_{22}	11.93	0.5	5.97
	方案三	X_{23}	14	0.5	7
能源供应系统 $j=3$	方案一	X_{31}	0	0.5	0
	方案二	X_{32}	10.69	0.5	5.35
	方案三	X_{33}	-2.7	0.5	-1.35

注：(1) 外墙保温层引起的节能量的计算，以无保温层 $K=3.17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ 的外墙的单位能耗 98.58 为 kwh/m^2 为基准。10mm 膨胀聚苯板， $K=1.88$ 的耗电量为 $76.37 \text{ kwh}/\text{m}^2$ ；20mm 膨胀聚苯板， $K=1.34$ 的耗电量为 $67.78 \text{ kwh}/\text{m}^2$ ；40mm 膨胀聚苯板， $K=0.85$ 耗电量为 $60.55 \text{ kwh}/\text{m}^2$ 。

(2) 外窗引起的节能量的计算，以铝合金普通单层玻璃窗(5mm)， $K=6.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ 的单位能耗量 $98.58 \text{ kwh}/\text{m}^2$ 为基准。铝合金普通中空玻璃窗 (6+12A+6)， $K=3.6$ 的耗电量为 $88.52 \text{ kwh}/\text{m}^2$ ；断热铝合金普通中空玻璃窗 (6+12A+6)， $K=3.3$ 的耗电量为 $886.65 \text{ kwh}/\text{m}^2$ ；塑钢普通中空玻璃窗(6+12A+6)， $K=2.7$ 的耗电量为 $84.58 \text{ kwh}/\text{m}^2$ 。

(3) 能源供应系统的节能量的计算，以冷水机组集中制冷+燃气锅炉集中采暖、热水方案的能耗 $52.67 \text{ kwh}/\text{a m}^2$ 为基准。热电联供发电、集中采暖、集中热水+冷水机组集中制冷方案能耗为 $46.72 \text{ kwh}/\text{a m}^2$ ；冷热电三联供集中制冷、集中供热、集中热水方案能耗为 $46.72 \text{ kwh}/\text{a m}^2$ 为 $54.02 \text{ kwh}/\text{a m}^2$ 。

(4) 电力能源价格假定为 0.5 元/ kwh。

表 6-6 案例中各技术方案成本效益表

Table 6-5 Cost-effectiveness Analysis of technical solutions

建筑部位或系统 j	技术方案	决策变量 X_{jt}	初始成本(元/ m^2) IC_{it}	运行成本(元/a m^2) OC_{it}	经济效益(元/a m^2) Sec_{it}	环境效益(元/a m^2) Sen_{it}	社会效益(元/a m^2) Sso_{it}
外墙保温层 $j=1$	方案一	X_{11}	80	0	11.11	11.21	0
	方案二	X_{12}	160	0	15.4	15.54	0
	方案三	X_{13}	320	0	19.02	19.19	0
外窗 $j=2$	方案一	X_{21}	78	0	5.03	5.08	0
	方案二	X_{22}	90	0	5.97	6.02	0
	方案三	X_{23}	54	0	7	7.07	0
能源供应系统 $j=3$	方案一	X_{41}	230	45.95	0	0	0
	方案二	X_{42}	250	40.13	5.35	5.39	0
	方案三	X_{43}	304	37.56	-1.35	-1.36	0

注：(1) 各项技术方案初始成本的单位为单位建筑面积的平均技术方案成本；运行成本、节能减排的经济效益、环境效益、社会效益的单位为单位建筑面积每年成本或效益；
 (2) 本案例环境效益计算中，CO₂减排环境效益计算时考虑碳交易收益，即 0.136 元/kwh；
 SO₂减排环境效益计算时考虑 SO₂排放造成损失的成本，即 0.1122 元/kwh；
 (3) 本案例的各项方案中，未涉及本文研究结论中的社会效益，故各项社会效益为 0。

(2) 建立模型

由表 6-5 和表 6-6，可以获得案例 0-1 型多目标规划模型中变量系数，如表 6-7 示，同时根据参考文献^{[193][194]}的结论和本文分析，本文将各技术方案的预算 E 、节能期望值 Q 、生命周期成本期望值 LC^* 、减排经济效益期望值 Sec^* 、减排环境期望值 Sen^* 、减排环境期望值 Sso^* 进行相应的赋值，如表 6-7 所示。

表 6-7 案例 0-1 型多目标规划模型中变量系数

Table 6-7 Variation coefficients of 0-1 multi-objective programming model

	IC_{jt} (元/ m^2)	Q_{jt} (kwh/a m^2)	LC_{jt} (元/ m^2)	Sec_{jt} (元/ m^2)	Sen_{jt} (元/ m^2)	Sso_{jt} (元/ m^2)
X_{11}	80	22.21	80	115.32	116.36	0
X_{12}	160	30.8	160	159.85	161.31	0
X_{13}	320	38.03	320	197.43	199.19	0
X_{21}	78	10.06	78	52.21	52.73	0
X_{22}	90	11.93	90	61.97	62.49	0
X_{23}	54	14	54	72.66	73.39	0
X_{31}	230	0	706.96	0.00	0.00	0
X_{32}	250	10.69	666.55	55.53	55.95	0
X_{33}	304	-2.7	693.87	-14.01	-14.12	0

注：假设各方案中技术服务年限为 $n=15$ 年，年利率 $i=5\%$ ，表中 LC_{jt} ， Sec_{jt} ， Sen_{jt} ， Sso_{jt} 数值为现值；

表 6-8 案例 0-1 型多目标规划模型中各期望值

Table 6-8 Variations expectations of 0-1 multi-objective programming model

	E	Q	LC^*	Sec^*	Sen^*	Sso^*
单位	(元/ m^2)	(kwh/ a m^2)	(元/ m^2)	(元/ m^2)	(元/ m^2)	(元/ m^2)
期望值	530	45	300	70	70	0

由此，本文构建了案例的基于 0-1 型多目标规划的低碳技术优化选择模型：

$$\begin{aligned}
 \min Z &= P_1 d_1^+ + P_2 (w_2 d_2^- + w_3 d_3^- + w_4 d_4^-) \\
 &\begin{cases} \sum_{j=1}^3 \sum_{t=1}^3 IC_{jt} X_{jt} \leq 530 \\ -\sum_{j=1}^3 \sum_{t=1}^3 Q_{jt} X_{jt} \leq -45 \\ X_{jt} = 0, 1 \quad (j=1, 2, 3 \quad t=1, 2, 3) \\ \sum_{t=1}^3 X_{jt} = 1 \quad (j=1, 2, 3) \end{cases} \quad (6-49) \\
 s.t. &\begin{cases} \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} LC_{jt} X_{jt} + d_1^- - d_1^+ = 300 \\ \sum_{j=1}^3 \sum_{t=1}^3 S_{ec_{jt}} X_{jt} + d_2^- - d_2^+ = 70 \\ \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} S_{so_{jt}} X_{jt} + d_3^- - d_3^+ = 70 \\ \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^{k_j} S_{en_{jt}} X_{jt} + d_4^- - d_4^+ = 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

(3) 模型求解

LINGO (linear interactive and general optimizer) 是美国 LINDO 系统公司开发的一套专门用于求解最优化问题的软件包。LINGO 也是一种最优化问题的建模语言，有许多常用的函数供使用者建模时调用，还提供了与其它数据文件的接口，易于方便地输入、求解和分析大规模最优化问题。本文采用 LINGO 软件 (V11.0 版) 求解 0-1 型多目标规划转化后的单目标规划问题。

按照模型求解思路进行 LINGO 软件编程，详见附录，经过两轮求解，得出最优解为 X_2 ， X_6 ， X_8 ，即低碳技术方案选择为 X_{12} ：20mm 膨胀聚苯板板($K=1.34$)； X_{23} ：塑钢普通中空玻璃窗($6+12A+6$)($K=2.7$)； X_{32} —热电联供发电、集中采暖、集中热水+冷水机组集中制冷。此时 $d_1^+ = 580.55$ ， $d_2^+ = 218.04$ ， $d_3^+ = 220.65$ ，由此可得，案例中最优组合方案的初始成本为 464 元/ m^2 、节能量为 55.49 kwh/ a m^2 、生命周期成本为 880.55 元/ m^2 、经济效益为 288.04 元/ m^2 、环境效益为 290.65 元/ m^2 。

Lingo 程序及两轮计算求解过程详见附录一。

6.4 本章小结 (Brief Summary)

本章分析了城市住区成本收益分析的特点, 提出用增量成本和增量效益分析住区低碳成本效益, 并从经济、环境和社会三个方面的增量成本和增量效益角度, 构建了住区成本效益分析模型。选取本体结构中的外墙保温层、建筑设系统中的热水供应系统、统进行分析。研究建立了外墙保温层的成本收益分析模型, 并确定了其经济厚度分析模型; 比较了太阳能热水和电热水器的生命周期成本收益分析, 构建了太阳能热水器增量成本收益分析模型, 确定了其投资回收期。从建筑物本体、设备和外部环境系统三个方面, 在对低碳技术进行的经济、社会、环境成本收益分析的基础上, 采用运筹学 0-1 型多目标规划的方法, 建立住区低碳技术优化选择模型, 并运用 LINGO 软件进行算例分析, 验证该模型的合理有效性。

7 案例分析

7 Case Study

本文选取徐州市某住区作为案例，对该住区进行碳足迹计算、低碳程度评价及相关低碳技术分析，以验证本文理论研究成果。

7.1 案例住区简介（Project Overview）

案例住区地处徐州市，住区总规划面积 51200m²，总建筑面积 76800m²，包括 9 幢小高层住宅楼，基本户型分为 G1.2、G4.5.6、G3.8、G6.7，地下一层，主体十一层，均采用梁板式筏型基础，整体采用现浇钢筋混凝土框架结构。本文对该住区进行碳足迹计算、低碳程度评价及相关低碳技术分析时，选择 G6 楼作为计算基础。

G6 楼建筑面积 9533.7m²，东西长 64.42m，南北宽 16.30m，室外地坪-1.6m，层高 3m，总高度 33.00m，属二类建筑，耐火等级一级，使用年限 50 年，7 度抗震设防。共 3 个单元，每个单元 2 户，即一层 6 户，共 66 户。每层楼有 2 种户型，其中靠东、西外墙的 2 户建筑面积相同，为 144.87m²，其余 4 户建筑面积相同，为 136.61m²。G6 楼单元户型图如图 7-1 所示。

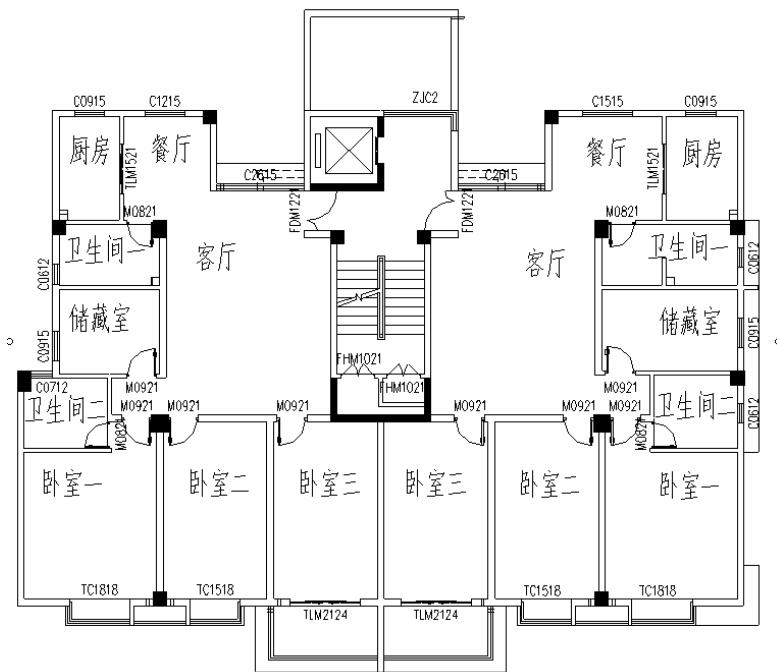


图 7-1 G6#楼单元户型图

Figure7-1 The unit door type of G6

7.2 案例住区碳足迹计算 (Carbon Footprint Calculation of case study)

根据本文第三章城市住区碳足迹研究的相关结论,对案例住区生命周期碳足迹进行计算,选取的生命周期的阶段包括建材生产阶段、建设施工阶段和运行使用阶段。

7.2.1 案例住区建材生产阶段碳足迹计算

案例住区使用的建筑材料共计 60 多种,本文选择钢材、水泥、混凝土、砌块等主要的建材,对住区建材生产阶段的碳排放进行计算。根据本文第三章的研究,需要确定案例住区主要建材的使用量和相应的碳排放因子,建材使用量由住区 G6 楼工程量清单获得,但在建设施工采购时,建材供应商没有提供各种建材的碳排放因子,本文采用第三章整理的相应碳排放因子代替。由此,本文对住区钢材类、水泥类、砌块类等主要建材生产碳排放进行计算,主要建材使用量、建材碳排放因子和碳排放量,如表 7-1 所示。

表 7-1 案例住区 G6 楼主要建材碳排放量计算表

Table 7-1 Main building materials carbon emissions calculation of case settlements G6

建材名称	单位	建材用量	建材碳排放因子 (kg(CO ₂)/单位)	建材碳排放量 (kg)
钢材	kg	514819.80	2.60	1338531.48
水泥	kg	562500.00	0.73	410625.00
C20 混凝土	m ³	183.60	230	42228.00
C30 混凝土	m ³	1820.49	250	455122.68
C35 混凝土	m ³	880.73	270	237797.00
C40 混凝土	m ³	1321.09	290	383117.39
C45 混凝土	m ³	220.18	310	68256.55
空心砌块	m ³	8280.77	70.00	579654.16
烧结砖	m ³	169.66	140.00	23752.40
加气混凝土块	m ³	1170.75	170.00	199028.28
合计				3738112.93

以 G6 楼为例,通过计算,可以得住区主要建筑材料单位建筑面积碳排放量为 357.35kg(CO₂)/m₂。则整个住区建材生产碳排放为 274444805kg。同时,通过计算,可以得到钢材、水泥、砌块三大类主要建材的排放比例,如图 7-2 所示。可以看出在案例住区的主要建材中,水泥类和钢筋建材生产的碳排放占最大比重,这两类建材的碳排放之和占主要尖建材总量的 85%以上。

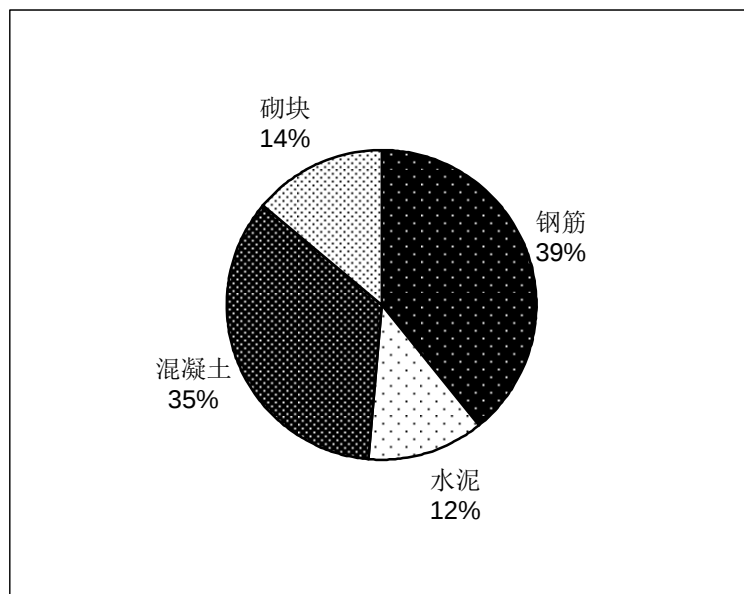


图 7-2 案例住区主要建材生产阶段单位面积碳排放比例

Figure 7-2 Carbon emissions ratio of major building materials of production phase

7.2.2 案例住区建设施工阶段碳足迹计算

案例住区施工阶段的碳排放主要包括施工机械设备的燃油、电力消耗以及管理、生活耗电量造成，由于本文仅获取整个住区施工阶段施工、生活、管理总电力消耗量，未能获各机械台班的燃油消耗量；同时，通过本文第四章的分析，施工阶段电力消耗占施工阶段总能耗的75%以上，所以，本文仅计算施工电力消耗造成的碳排，相关统计量和计算结果如表7-2所示。

表 7-2 案例住区施工电力消耗碳排放计算表

Table 7-2 Carbon emissions calculation of construction electricity consumption

电力消耗量(kwh)	电力碳排放因子 ¹⁴ (kg(co ₂)/kwh)	碳排放量 (kg)
2304000	0.81	1866240

7.2.3 案例住区运行使用阶段碳足迹计算

对于案例住区使用运行阶段的碳排放量，本文主要从采暖、制冷、照明、用水和绿化方面考虑，其中采暖、制冷、照明、用水系统能耗和碳排放的计算以G6楼为例，通过模拟计算获得。

(1) 用能系统能耗及碳排放量计算

1) 制冷耗电量及相应的碳排放量

基本参数：

¹⁴ 徐州地区属华东电网，故取华东电网的碳排放因子。

$$K = \frac{1}{R_i + \sum R + R_e}$$

式中, K —材料综合传热系数;

R —各层材料热阻;

R_i —内表面换热阻, 取 $0.11\text{m}^2\text{K/W}$;

R_e —外表面换热阻, 取 $0.05\text{m}^2\text{K/W}$ 。

G6 楼的维护结构做法如下:

- 外墙: 200mm 厚加气混凝土砌块, M5 混合砂浆砌筑, 20mm 挤塑聚苯乙烯泡沫保温板, 传热系数 $K=0.46\text{W}/(\text{m}^2\text{℃})$;
- 内墙: 200mm 厚加气混凝土砌块, M5 混合砂浆砌筑, 传热系数 $K=0.75\text{W}/(\text{m}^2\text{℃})$;
- 外窗: 单框双层玻璃彩色塑钢窗, 外窗均配纱窗, 传热系数 $K=2.70\text{W}/(\text{m}^2\text{℃})$, 南、东、西向窗户内侧采用浅绿色合金软百叶活动遮阳措施, 遮阳率为 92%;
- 楼板: 160mm 现浇钢筋混凝土, 30mm 阻燃聚苯乙烯泡沫塑料, 直径 20mmPB 加热管, 50mm 豆石混凝土填充, 传热系数 $K=0.99\text{W}/(\text{m}^2\text{℃})$;
- 屋面: 150mm 现浇钢筋混凝土, 40mm 挤塑聚苯乙烯泡沫保温板, 25mm 厚 1: 2.5 水泥砂浆, 40mm 细石混凝土保护层, 传热系数 $K=0.63\text{W}/(\text{m}^2\text{℃})$ 。

根据《江苏省居住建筑热环境和节能设计标准》, 徐州市夏季空调室外计算日平均温度 26.6℃ , 夏季空调降温期室内设计温度取 26℃ , 空调降温期 49 天, 空调额定能效比 2.5, 居住建筑单位面积内部得热引起的冷负荷平均值为 $4.3\text{W}/\text{m}^2$ 。

经计算, G6 楼在下午 13 时达到最大的冷负荷需求值, 因此, G6 楼空调降温期单位建筑面积总的冷负荷:

$$\begin{aligned} q_c &= (Q_{w(r)} + Q_{w-i} + Q_{g-w} + Q_g + Q_i)/A_0 \\ &= 119253.26 / (144.87 \times 2 \times 11 + 136.61 \times 4 \times 11) \\ &= 12.97 \text{ W} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

G6 楼空调制冷用电量指标:

$$\begin{aligned} q_e &= 24 \times 10^{-3} \cdot z_c \cdot q_c / \text{EER} \\ &= (24 \times 10^{-3} \times 49 \times 12.97) / 2.5 \\ &= 6.10 \text{ kWh} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

因此, G6 由于空调制冷耗电所排放的二氧化碳量:

$$E_c = 0.89 \times 6.10 = 5.43 \text{ kg} / \text{a} \cdot \text{m}^2$$

2) 冬季采暖期耗煤量及相应的 CO₂ 排放量

G6 楼采用低温地面辐射供暖系统, 加热管为直径 20mm 的密度聚乙烯管 (PERT), 水平管铺设间距 300mm。热源为热电厂提供的 130℃/90℃ 一次性热水, 经小区换热站换出 50℃/40℃ 的低温热水。G6 楼采暖系统采用的是集中供暖一户一表的分户热计量, 因此在房间计算热负荷的基础上, 应考虑间歇供暖、户间建筑热工条件和户间传热等因素, 增加 1.2 倍负荷放大系数的附加量。

冬季采暖期室外设计温度为 -5℃, 根据《空气密度表》, 相应的空气密度为 1.317kg/m³; 室内设计温度: 客厅、卧室、储藏间 18℃, 卫生间 23℃。根据《低温热水地板辐射供暖应用技术归程》, 供暖热负荷计算宜将室内计算温度取值降低 2℃。这是由于当采用低温地板辐射供暖时, 人们同时感受到对流热以及地面和内墙表面的辐射热, 所以给人造成的实感温度比室内空气温度高。因此, 在对 G6#楼进行供暖热负荷计算时, 分别采用 16℃ 和 21℃ 进行热负荷计算; 冬季室外平均风速: 2.8m/s; 冬季采暖期天数: 97 天。

经计算, G6 楼冬季采暖期单位面积耗热量:

$$\begin{aligned} q_h &= (Q_{h(r)} + Q_{inf}) / A_0 \\ &= (132368.61 \times 1.2) / 9197.98 \\ &= 17.27 \text{ W} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

冬季采暖期耗煤量:

$$\begin{aligned} q_c &= 24 \cdot z_h \cdot q_h / H_c \eta_1 \eta_2 \\ &= (24 \times 97 \times 17.27) / (8.14 \times 10^3 \times 0.90 \times 0.68) \\ &= 8.07 \text{ kg} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

因此, 由于冬季采暖期耗煤所排放的二氧化碳量:

$$E_h = 2.62 \times 8.07 = 21.14 \text{ kg} / \text{m}^2$$

3) 照明及相应的 CO₂ 排放量

G6 楼每一户共九个房间外加一个阳台, 每个房间设置一盏 T5 三基色环形荧光吸顶灯, 光效 68lm/W, 灯具实际功率为标记功率的 90%, 利用系数 0.6。经计算, 每个房间的平均照度均能达到标准照度值的要求, 因此, G6 楼照明功率密度:

$$\begin{aligned} \text{LPD} &= E_{av} / (\eta \cdot U \cdot K) \\ &= 3.16 \text{ W} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

假设每户每天照明 4 个小时, 每年由于照明耗能所排放的二氧化碳量:

$$E_l = 0.89 \times (8 \times 3.16 \times 365 \times 10^{-3}) = 8.21 \text{ kg} / \text{m}^2$$

因此, G6 楼每年每平米由于夏季空调制冷、冬季采暖以及日常照明的引起的碳排放量: $E_e = E_c + E_h + E_l = 34.78 \text{ kg} / \text{m}^2$ 。

(2) 用水系统碳排放量计算

G6 楼生活用水给水系统采用下行上给式, 由变频调速泵组供水, 供水压力 0.4MPa, 在水压大于 0.35MPa 的入户管上通过阀门进行调压减压。最大时供水 $8.8\text{m}^3/\text{d}$, 最高日供水 $84.4\text{m}^3/\text{d}$; 卫生间及厨房的污废水自流至室外污水检查井, 汇集后经化粪池排至市政污水管。最大小时排水量为 $7.48\text{m}^3/\text{d}$, 最高日排水 $71.8\text{m}^3/\text{d}$ 。一般生活用水, 全部来自市政自来水供水。因此, G6 楼共 66 户, 取入住率 90%, 则 G6#楼生活用水量及相应的污水处理量为:

$$\begin{aligned} W_s = W_d &= \sum \frac{q_z n_z D_z}{1000} \\ &= (150 \times 3.5 \times 66 \times 0.9 \times 365) / 1000 \\ &= 11382.53 \text{ m}^3 / \text{a} \end{aligned}$$

假定制水过程碳排放因子和污水处理过程碳排放因子分别为 $0.30 \text{ kg}(\text{CO}_2)/\text{m}^3$ 和 $0.80\text{kg}(\text{CO}_2)/\text{m}^3$, 则 G6 楼单位面积每年由于水资源的利用及水处理所排放的二氧化碳量:

$$\begin{aligned} E_w &= E_s + E_d \\ &= 11382.53 \times 0.3 / 9533.7 + 11382.53 \times 0.8 / 9533.7 \\ &= 3414.759 / 9533.7 + 9106.024 / 9533.7 \\ &= 0.36 + 0.96 \\ &= 1.32 \text{ kg/a} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

(3 绿化固碳量计算

通过对住区绿地不同绿化植物栽种方式和栽种面积的统计, 结合本文第三章确定的绿化固碳因子, 本文计算得出住区绿化固碳量, 计算过程如表 7-3 所示。

表7-3 案例住区绿化固碳计算表

Table7-3 Greening carbon sequestration calculation of case settlement

栽植方式	栽种面积 m^2	40年单位面积 CO_2 固定量 Kg/m^2	40年总固碳量 kg
大小乔木、灌木、花草密植混种（乔木平均种植间距 $<3.0\text{m}$, 土壤深度 $>1.0\text{m}$ ）	1100	1100	1210000
落叶大乔木（土壤深度 $>1.0\text{m}$ ）	1100	808	888800
落叶小乔木、针叶木或疏叶性乔木（土壤深度 $>1.0\text{m}$ ）	900	537	483300
密植灌木丛（高约 0.45m , 土壤深度 $>0.5\text{m}$ ）	1800	205	369000
合计			2458200.00

由此可以计算出，案例住区单位建筑面积年绿化固碳量为：

$$S_g = 2458200 / (40 \times 76800) = 0.8 \text{ kg} / \text{a} \cdot \text{m}^2$$

假设住区运行使用寿命为 50 年，住区各楼制冷系统、采暖系统和照明系统能耗量与 G6 楼相同，则案例住区 50 年用能系统产生的碳排放总量为 $34.78 \times 76800 \times 50 = 133555200 \text{ kg}$ ；假设各楼与年用水量和污水处理量与 G6 相同，则案例住区 50 年中用水系统产生的碳排放量为 $12520.74 \times 50 \times 9 = 5634352 \text{ kg}$ 。制冷、采暖、照明、给水、污水系统碳排放来比例如图 7-3 所示。

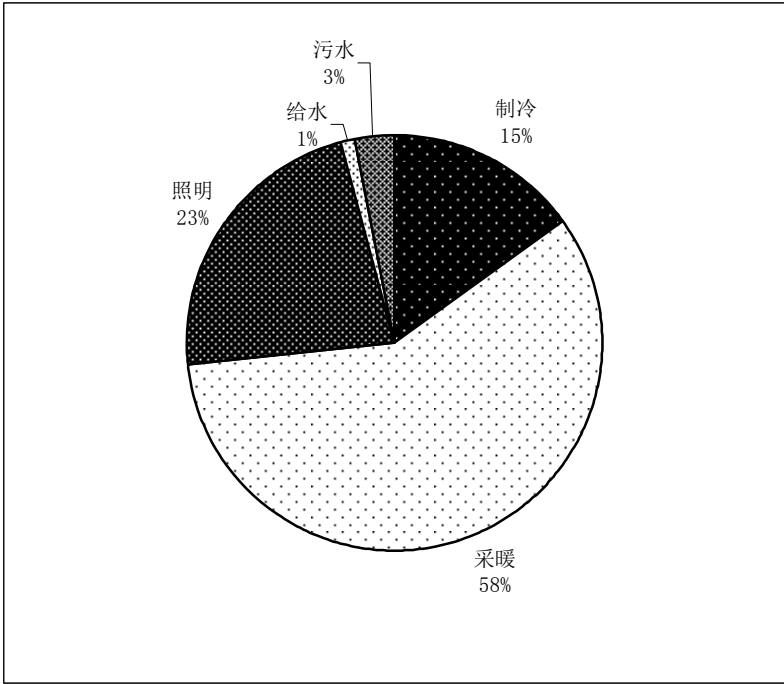


图 7-3 案例住区用能系统和用水系统碳排放比例

Figure 7-3 Emissions ratio of energy systems and water systems of case Settlements

对于绿化固碳，将 40 年固碳量换算为假定的住区运行年限 50 年，则案例住区 50 年绿化固碳量为 $2458200 \times 50 / 40 = 2949840 \text{ kg}$ 。

所以，案例住区运行使用阶段碳足迹汇总如表 7-4 所示。

表 7-4 案例住区运行使用阶段碳足迹计算表

Table 7-4 Operational phase carbon footprint calculation of case Settlements

计算对象		年单位面积碳排放量 kg(CO ₂)/a m ²	住区碳排放总量 (50 年) kg
用能系统	制冷系统	5.43	20851200.00
	采暖系统	21.14	81177600.00
	照明系统	8.21	31526400.00
用水系统	给水	0.36	1536641.55
	污水	0.96	4097710.80
绿化系统			-2949840.00
合计			136239712.35

由此可以计算出案例住区运行使用产生的碳排放量为 136239712.35。

7.2.4 案例住区生命周期碳足迹计算

通过对案例住区生命周期中建材生产、建设施工和运行使用碳足迹的计算,可以计算出案例住区生命周期碳足迹为 141844065.30kg,如表 7-5 所示,每年单位建筑面积碳排放量为 297.56 kg(CO₂)/a m²。

表 7-5 案例住区生命周期碳足迹计算表

Table 7-5 Lifecycle carbon footprint calculation of case Settlements

	住区碳足迹 (kg)	所占比例
建材生产	27444480.00	0.17
建设施工	1866240.00	0.01
运行使用	136239712.35	0.82
合计	165550432.40	1

7.3 案例住区低碳评价分析 (Low-Carbon Assessment of case study)

根据上一小节对案例住区建材生产、建设施工和运行使用阶段及使用阶段用能系统、用水系统和绿化系统碳足迹的计算,结合本文第四章建立的城市住区低碳评价体系,本文选取用材低碳指数、建设施工低碳指数、用能系统低碳指数、用水系统低碳指数、绿化固碳指数、采暖低碳指数、制冷低碳指数、照明低碳指数、生命周期低碳指数对案例住区进行低碳评价。

7.3.1 用材低碳指数

通过对案例住区碳足迹的计算,得到住区主要建筑材料单位建筑面积碳排放量为 357.35kg(co₂)/m²。又该住区所在地区属 7 度抗震,所以,取单位建筑面积碳排放量基准值为 383.0kg(co₂)/m²,所以,案例住区用材低碳指数:

$$\begin{aligned}
 L_m &= \frac{E_{m,B} - E_m}{E_{m,B}} \times 100\% \\
 &= \frac{383.0 - 357.35}{383.0} \times 100\% \\
 &= 6.70\%
 \end{aligned}$$

7.3.2 建设施工低碳指数

根据江苏省建筑协会 2012 年发布的《江苏省建筑工程绿色施工评价实施办法》,要求绿色施工用电量占工程总造价的比例控制在 1%以内。根据中国统计年鉴查询江苏省 2014 年住宅平均造价约为 3064 元/m²,用电价格取 0.81 元/kwh,则江苏省宅单位建筑面积建设施工用电量基准值约为 $E_{b,B}=38.3\text{kwh/m}^2$ 。所以,案例住区建设施工低碳指数:

$$\begin{aligned}
 L_b &= \frac{E_{b,B} - E_c}{E_{b,B}} \times 100\% \\
 &= \frac{38.4 - 30}{38.4} \times 100\% \\
 &= 21.88\%
 \end{aligned}$$

7.3.3 运行使用低碳指数

(1) 用能系统低碳指数

1) 制冷低碳指数

根据《江苏省居住建筑热环境和节能设计标准 DGJ32/J 71-2008》规定，徐州市属于寒冷地区，其新建建筑按节能 65%标准设计时，建筑物通过空调降温措施使室内平均温度保持在 26℃时，降温期空调耗电量指标为 6.3kwh/m²，假设电力碳排放因子为 f=0.81 kg(co₂)/kwh，则徐州市住宅单位面积年空调制冷碳排放基准值

$$E_{c,B} = 0.81 \times 6.3 = 5.61 \text{ kg / m}^2$$

所以，制冷低碳指数：

$$\begin{aligned}
 L_c &= \frac{E_{c,B} - E_c}{E_{c,B}} \times 100\% \\
 &= \frac{5.61 - 5.43}{5.61} \times 100\% \\
 &= 32.10\%
 \end{aligned}$$

2) 采暖低碳指数

《江苏省居住建筑热环境和节能设计标准 DGJ32/J 71-2008》中规定，寒冷地区新建建筑按节能 65%标准设计时，建筑物采暖期为使室内平均温度保持在 18℃，采暖期耗热量指标为 18.0w/m²，其中并未对耗煤量给出具体数据。《民用建筑节能设计标准（采暖居住建筑部分）JGJ26-95》中规定新建建筑按节能 50%标准进行设计时，寒冷地区采暖期耗热量指标为 20.0w/m²，耗煤量指标为 9.1kg/m²。根据相关换算可以求出，当寒冷地区新建建筑按节能 65%标准进行设计时，其相应的耗煤量指标为 8.2kg/m²。因此，采暖能耗所排放的二氧化碳量基准值：

$$E_{h,B} = 2.62 \times 8.2 = 21.48 \text{ kg / m}^2$$

所以，采暖低碳指数：

$$\begin{aligned}
L_h &= \frac{E_{h,B} - E_h}{E_{h,B}} \times 100\% \\
&= \frac{21.48 - 21.14}{21.48} \times 100\% \\
&= 15.83\%
\end{aligned}$$

3) 照明低碳指数

根据本文第四章的研究结论, 照明系统单位面积年碳排放量基准值:

$$E_{l,B} = 0.81 \times (8 \times 6 \times 365 \times 10^{-3}) = 0.81 \times 17.52 = 14.25 \text{ kg} / \text{a} \cdot \text{m}^2$$

所以, 照明低碳指数:

$$\begin{aligned}
L_l &= \frac{E_{l,B} - E_l}{E_{l,B}} \times 100\% \\
&= \frac{14.25 - 8.21}{14.25} \times 100\% \\
&= 42.39\%
\end{aligned}$$

通过对案例住区采暖系统、制冷系统和照明系统碳排放量的分析, 用能低碳指数可以通过这三个系统的碳排放总量与三个系统碳排放量的基准值总量进行比较获得, 因此, 用能低碳指数为:

$$\begin{aligned}
L_e &= \frac{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{l,B}) - (E_h + E_c + E_l)}{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{l,B})} \times 100\% \\
&= \frac{(5.61 + 21.48 + 14.15) - (5.43 + 21.14 + 8.21)}{(5.61 + 21.48 + 14.15)} \\
&= 15.68\%
\end{aligned}$$

(2) 用水系统低碳指数

采用符合《节水型生活用水器具 CJ164-2002》标准的节水型生活用水器具作为低碳建筑卫生器具使用标准。节水型生活用水器具是指在满足相同的饮用、厨用、洁厕、洗浴、洗衣等用水功能的前提下, 较同类常规产品能减少用水量的器件、用具。标准中针对水嘴、便器及便器系统、便器冲洗阀、淋浴器、家用洗衣机等五种常用的生活用水器具用水量做了相应的规定。本文以此作为生活用水量参考标准之一。

1) 生活用水

根据《民用建筑节能设计标准 GB50555-2010》或者各省市城市生活用水定额中相应的日均用水量作为基准值。并且利用中水和雨水回用系统, 将中水或雨水回用水用于冲厕用水。由于住宅冲厕用水占建筑分项给水百分率为 21%。因此, 各卫生器具日均用水量取节水用水定额平均值 $q_z' = q_z \times (1 - 0.21) = 0.79 q_z L / (p \cdot d)$,

居住人数 3-5 人，取 $n_z=3.5$ 人。因此，住宅生活用水每个家庭年用水量：

$$W_s = 1.0 \times (0.79q_z \times 3.5 \times 365) / 1000 = q_z \text{ t/a}$$

2) 中水和雨水回用系统

中水和雨水回用水主要用于冲厕用水及绿化用水，并作为消防用水的备用水源。《绿色建筑评价标准》对节水和水资源利用的优选项中规定，非传统水源利用率不低于 30%。因此，中水和雨水回用水每个家庭年用水量：

$$W_d = (q_z \times 3.5 \times 365 \times 0.3) / 1000 = 0.38q_z \text{ t/a}$$

因此，若一栋住宅有 N 户，按入住率 80% 计，则这栋住宅建筑每年由于水资源的利用所排放的二氧化碳基准值：

$$E_{w,B} = [0.8N \cdot (q_z \times 105.85 + 0.38q_z \times 70.81) / 1000] / A_0 = 0.106q_z \cdot N / A_0 \text{ t/a}$$

根据徐州市 2007 年出台的《徐州市用水定额》地方标准，居民生活用水每人每天 150L，因此取 $q_z=150\text{L}$ ，所以，用水系统低碳指数：

$$\begin{aligned} L_w &= \frac{E_{s,B} - E_s}{E_{s,B}} \times 100\% \\ &= \frac{1049.4 - 1204.8}{1049.4} \times 100\% \\ &= -14.81\% \end{aligned}$$

(3) 绿化固碳指数

根据本文第四章的研究结论，绿化单位建筑面积年固碳基准值：

$$\begin{aligned} S_{g,B} &= 0.3 \times 15 \times S_0 / A_0 \\ &= 4.5 \times S_0 / A_0 \end{aligned}$$

所以，照明低碳指数：

$$\begin{aligned} L_g &= \frac{S_g - S_{g,B}}{S_{g,B}} \times 100\% \\ &= -74.39 \end{aligned}$$

通过对案例住区用水系统、用能系统和绿化系统的碳排放和固碳情况分析，运行阶段低碳指数可以通过采暖系统碳排放、制冷系统碳排放、照明系统碳排放、给排水系统碳排放，绿化固碳量与相应的基准值总量进行比较获得，因此，用能低碳指数为：

$$\begin{aligned} L_o &= \frac{147383760 - 136239712.35}{147383760} \times 100\% \\ &= 7.76\% \end{aligned}$$

7.3.4 生命周期低碳指数及低碳评级

通过对案例住区建材生产、建设施工和运行使用碳排放情况的分析,得出各个评价对象的碳排放量实际值、基准值,进一步可以计算的出住区生命周期低碳指数,同时,根据本文第四章设定的低碳等级评定方法,可以对各评价对象定性低碳等级的评定。案例住区各个评价对象的碳排放量实际值、基准值及相应的低碳指数、低碳等级如表 7-6 所示。

表 7-6 案例住区各个评价对象的碳排放量实际值、基准值、低碳指数及低碳评级表
Table 7-6 Carbon emission value, reference value, low-carbon index and carbon Rating of the evaluation object of case settlements

各评价对象			碳排放实际值 (kg)	碳排放基准值 (kg)	低碳指数 (%)	低碳评级
生 命 周 期 使 用	用材		27444480.00	29414400.00	6.70	合格
	建设施工		1866240.00	2388787.20	21.88	良好
	运 行 能	制冷	20851200.00	21542400.00	3.21	合格
		采暖	81177600.00	82483200.00	1.58	合格
		照明	31526400.00	54720000.00	42.39	优秀
		用能合计	133555200.00	158745600.00	15.87	良好
		用水	542160.00	472230.00	-14.81	较差
		绿化	-2949840.00	-11520000.00	-74.39	差级
		运行合计	136239712.35	147697830.00	7.76	合格
	生命周期合计		165550432.35	179501017.20	7.77	合格

通过上表可以看出,案例住区生命周期低碳指数 7.77,低碳等级为合格,即可以认为该住区为合格的低碳住区;在所有的评价对象中照明低碳指数最高,为 42.39,等级为优秀,是因为该住区建筑选用了节能减排效果较好的灯具;采暖系统碳排放量最大,低碳指数为 1.58,低碳等级为合格,需要进一步提高采暖系统效率和维护结构性能;用水系统低碳指数为-14.81,等级为较差,是因为该住区用水量节约量较低,未使用采用雨水及中水回收系统;而得分最低项为绿化,得分为-74.39,低碳等级为差级,需要进一步增加绿化面积,并调整绿植栽种品种和方式,增加绿化减排贡献。

7.4 案例住区低碳技术分析(Low-Carbon Technique of case study)

通过对案例住区碳足迹的计算和低碳评价,可以得出采暖系统碳排放量最大,采暖系统的能耗对住区运行和生命周期碳排放影响很大,通过提高系统效率和改变维护结构性能不仅可以实现采暖系统的减排,也可以减少制冷系统的碳排放;同时,案例住区得分较差的两项为用水系统和绿化,所以,本文对用能系统

中的采暖、制冷系统，用水系统及住区绿化进行进一步的分析。

7.4.1 案例住区用能系统低碳技术分析

(1) 能耗分析

1) 制冷系统分析

以 G6 楼为例，对 G6 楼夏季空调降温期冷负荷的计算表明，G6 楼整体单位建筑面积冷负荷 $q_c = 12.97 \text{ W/m}^2$ ，空调降温期耗电量 $q_e = 6.10 \text{ kWh/m}^2$ ，符合建筑节能的基准值要求。其中：一层单位建筑面积冷负荷 $q_c = 13.27 \text{ W/m}^2$ ，空调降温期耗电量 $q_e = 6.24 \text{ kWh/m}^2$ ；二至十层单位建筑面积冷负荷 $q_c = 12.43 \text{ W/m}^2$ ，空调降温期耗电量 $q_e = 5.85 \text{ kWh/m}^2$ ；顶层单位建筑面积冷负荷 $q_c = 17.63 \text{ W/m}^2$ ，空调降温期耗电量 $q_e = 8.30 \text{ kWh/m}^2$ 。

在外维护结构引起的冷负荷中，通过外墙体瞬变传热引起的冷负荷 $Q_w = 6017.86 \text{ W/m}^2$ ，占建筑全部冷负荷的 2.05%；通过屋面瞬变传热引起的冷负荷 $Q_r = 2448.48 \text{ W/m}^2$ ，占建筑全部冷负荷的 5.05%；通过外窗玻璃瞬变传热引起的冷负荷 $Q_{g,w} = 12578.44 \text{ W/m}^2$ ，占建筑全部冷负荷的 10.55%；透过外窗玻璃的日射得热引起的冷负荷 $Q_g = 29173.68 \text{ W/m}^2$ ，占建筑全部冷负荷的 24.46%；

由此可见，由于外窗玻璃引起的冷负荷占夏季空调总冷负荷的 35%，是影响夏季空调冷负荷最主要的因素。采取有效的遮阳措施，降低透过外窗玻璃的日射得热，是 G6 楼进一步降低空调负荷，减少制冷系统碳排放的重要手段。

2) 采暖系统分析

冬季采暖期，G6#楼住宅整体单位面积耗热量 $q_h = 17.27 \text{ W/m}^2$ ，耗煤量 $q_c = 8.07 \text{ kg/m}^2$ ，符合建筑节能的基准值要求。其中：一至十层单位建筑面积耗热量 $q_h = 15.99 \text{ W/m}^2$ ，耗煤量 $q_c = 7.47 \text{ kg/m}^2$ ；顶层单位建筑面积耗热量 $q_h = 30.11 \text{ W/m}^2$ ，耗煤量 $q_c = 14.07 \text{ kg/m}^2$ 。

在外围护结构传热耗热量中，通过外墙的传热耗热量 $Q_{h(w)} = 28261.90 \text{ W/m}^2$ ，占建筑全部热负荷的 21.35%；通过屋面的传热耗热量 $Q_{h(r)} = 6556.00 \text{ W/m}^2$ ，占建筑全部热负荷的 4.95%；通过外窗的传热耗热量 $Q_{h(g,w)} = 20682.16 \text{ W/m}^2$ ，占建筑全部热负荷的 15.62%；通过门窗缝隙渗入冷空气的耗热量 $Q_{inf} = 36830.13 \text{ W/m}^2$ ，占建筑全部热负荷的 27.82%；

由此可见，通过门窗缝隙渗入冷空气以及通过外墙所产生的耗热量是影响冬季建筑热负荷的最主要的两大因素。因此，应通过加强门窗的气密性，减少冷空气的渗入量，并采取一定的外墙保温措施来进一步减少 G6 楼的供暖热负荷。

此外，从对 G6 楼的分层计算中可以看出，无论是夏季降温期，还是冬季采暖期，G6 楼整体是满足建筑节能要求的，然而，建筑顶层却均不符合建筑节能

水,避免传统供水系统中按供水最不利情况计算所引起的水量浪费问题,并且通过泵组直接将储水池内的水输送至用户使用,取消了高位水箱,减少了由于水箱污染而导致供水二次污染的几率。供水压力 0.40MPa,并通过设置减压阀,在水压大于 0.35MPa 时进行调压减压,有效减少了由于压力过大而造成的超压出流现象,并通过节水型器具的使用,减少了用水量及无效用水时间。给水管采用 PP-R 塑料管,PP-R 塑料管轻质易加工,内壁光滑,水力阻力小,耐腐防锈,减少给水系统二次污染的几率。户内给水支管采用直埋嵌墙式暗敷,穿墙、板处均设套管保护,有效防止外界因素对管材的破坏。

住区节水包含有三层含义,第一层含义是指在日常水资源的使用过程中减少生活用水量,推广采用节水型卫生器具,节约用水;第二层是指提高用水过程中的使用效率,包括降低供水管网的漏损率、防止二次污染造成的水量浪费等。前二者通常是为人们所熟知的,第三层含义则常被人们所忽视,即在水资源使用完排放的过程中应控制排水的水量及水质。在住宅建筑中,会排放大量的沐浴及盥洗用水,这些污水受到的污染较轻,经适当处理后完全可以供生活杂用及补充冷却水,这样可以替代等量的自来水,相当于增加了城市的供水量。

虽然通过供水设备的设置以及节水型卫生器具及配件的使用,在一定程度上起到了节约用水的作用。但是,在节水方面,案例住区还有许多值得改进的地方。案例住区排水系统中设置了生活污水管和生活废水管,但是并没有达到污废水分流的目的。卫生间淋浴、盥洗、冲厕排水均排入污水立管中,废水立管接厨房排水,自流至室外污水检查井汇集后排入化粪池,最后排入市政污水管中。一般情况下,生活污水多为冲厕排水,水质中含有较多的有机物,需经化粪池沉淀污物,并在厌氧菌的作用下腐化、发酵、分解有机物。而在住宅建筑排水量中,生活废水所占比例为 69%。淋浴排水及盥洗排水等生活废水,有机物含量较少,属于优质杂排水。若将大量生活废水排入化粪池,不利于有机物厌氧分解的条件。因此,通过生活污水与生活废水分流系统,将优质杂排水收集后可作为中水水源加以利用,减少自来水用水量,同时减少了排入化粪池的污水量,有利于减小化粪池容积,并有利于提高粪便污水的处理效果。

同时,案例住区没有设置中水及雨水收集系统,大量的生活废水及空调冷凝水被直接排入污水井中。这些优质杂排水可以作为很好的中水水源加以充分利用。屋顶的雨水通过雨水管,直接排入市政雨水管道中。在雨水量充沛期,这不仅增加了市政雨水管道的承受能力,同时也是对水资源的一种浪费。《徐州市节约用水条例》建议有条件的住宅小区应当建设雨水收集、储存和利用工程。但是,徐州市属于缺水城市,近年来,随着城市化进程的加快和全市工农业生产的发展,水资源供需矛盾日益突出。在中国矿业大学苏梅林、冯启言、吴晴晴通过对徐州

市近 58 年（1948-2005）降雨量的研究分析得出，徐州市降雨量较稳定，年平均降雨量为 876.81mm，降雨期多集中在夏季，占平均年降雨量的 67.4%。其中，2005 年年降雨量最多，达 1283mm。我国 2010 年出台的《民用建筑节能设计标准》中建议，雨水收集系统宜用于年降雨量大于 400mm 的地区，常年降雨量超过 800mm 的城市应优先采用屋面雨水收集回用方式对雨水进行回收利用。在 G6#楼中，倘若能通过屋面雨水收集系统将雨水收集起来，经过一定的处理，使其达到《城市污水再生利用城市杂用水水质标准》的要求，就可将其用于生活杂用水中，如冲厕用水、绿化用水，有助于缓解徐州市水资源短缺的问题，并对汛期的防洪排涝起到积极的作用。

7.4.3 案例住区绿化低碳技术分析

案例住区绿化低碳指数最低，可以通过增加绿化面积改变绿化类型和方式，增加住区绿化固碳量，但是受绿化用地面积、气候条件的因素的影响，通过住区绿地绿化增加固碳量在实施起来较为困难。所以，可以增加屋面和垂直绿化，可以实现住区绿化系统的减排贡献。本文仅以屋顶绿化为例，分析屋顶绿化前后对建筑整体二氧化碳排放量的影响。

在对案例住区建筑现有屋面进行绿化改造时，由于现浇框架结构建筑的屋面荷载余量较大，建造屋顶绿化的条件较好，因此可以直接铺种草坪或小型灌木等重量较轻的植物。有适宜的环境，植物才能正常生长，选择的植物是否合适直接关系到屋顶绿化的成效。案例住区周围没有高层建筑，屋面未被其他建筑的阴影遮挡，因此在进行屋顶绿化时，绿化植物将长时间直接暴露在阳光之下，极易干燥缺水，选择耐晒、耐旱、喜阳的植物较为合适。其次，由于屋面缺少遮挡物，顶面风力将较大，因此应尽量选择低矮、抗风能力强、生长较缓慢的植物。最后，考虑选取固碳量较大的植物，以降低建筑整体碳排放量。根据《绿色生态住宅小区建设要点与技术导则》，在建筑绿化中，立体或复层种植群落占绿地面积应大于等于 20%。同时，有关研究表明，以种植地被植物、耐旱灌木为主的简单式屋顶绿化，地被植物与灌木植物的配合比以 7: 3 为宜。因此，综合以上几点考虑因素，假设采用 70%的草本植物佛甲草配以 30%的榆叶梅或月季等花灌木作为屋顶绿化植物，对住区建筑二氧化碳排放量变化进行分析。

佛甲草具有较强的抗逆性，生命力顽强，几乎适应于各种气候，容易栽培，且质量轻，是屋顶绿化的理想选择。每平方米绿地每天约吸收 0.02kg 二氧化碳，因此，对于佛甲草，取其每平方米每天二氧化碳吸收量 0.02kg，即每平方米每年吸收二氧化碳 7.3kg。榆叶梅每平方米每天二氧化碳吸收量为 23.77g，即每平方米每年吸收二氧化碳 8.7kg。以 G6 楼为例，对以 G6#楼进行屋顶绿化后，屋顶绿化的固定量为 10.19t/a。

此外,在对屋顶进行绿化后,将减少由屋面瞬变传热引起的冷热负荷,从而相应的减少由建筑能耗所引起的二氧化碳排放量。屋顶绿化构造如表 7-7 所示,屋顶绿化后,在夏季建筑的整体温度约可降低 2°C ,屋面传热系数 K 值可由 $0.63\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 下降为 $0.53\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 。

夏季空调制冷期, G6#楼住宅整体单位建筑面积冷负荷 q_c 由 $12.97\text{W}/\text{m}^2$ 下降为 $12.82\text{W}/\text{m}^2$, 空调降温期耗电量 q_e 由 $6.10\text{kwh}/\text{m}^2$ 下降为 $6.03\text{kwh}/\text{m}^2$ 。

表 7-7 案例住区屋顶绿化构造表

Table7-7 Construction of the Green Roof of case settlement

	1	2	3	4	6	7	8
	混凝土板	聚苯乙烯泡沫保温板	水泥砂浆	保护层	水泥砂浆	石棉保湿层	基质层
材料层厚度 m	0.15	0.04	0.025	0.04	0.025	0.005	0.06
导热系数 $\text{W}/(\text{m K})$	1.74	0.03	0.93	1.74	0.93	0.048	0.47
热阻 $\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$	0.086	1.333	0.027	0.023	0.027	0.104	0.128

其中,顶层单位建筑面积冷负荷 q_c 由 $17.63\text{W}/\text{m}^2$ 下降为 $16.02\text{W}/\text{m}^2$, 空调降温期耗电量 q_e 由 $8.03\text{kwh}/\text{m}^2$ 下降为 $7.54\text{kwh}/\text{m}^2$ 。在外维护结构引起的冷负荷中,通过屋面瞬变传热引起的冷负荷 Q_r 由 $2448.48\text{W}/\text{m}^2$ 下降为 $1684.10\text{W}/\text{m}^2$, 占建筑全部冷负荷的比重由 5.05% 下降为 1.41% 。同时,由于空调期降温耗电所排放的二氧化碳量: $E_c = 0.89 \times 6.03 = 5.37 \text{ kg} / \text{m}^2$

冬季采暖期, G6#楼住宅整体单位面积耗热量 q_h 由 $17.27\text{W}/\text{m}^2$ 调整为 $17.07\text{W}/\text{m}^2$, 耗煤量 q_c 由 $8.07\text{kg}/\text{m}^2$ 调整为 $7.98\text{kg}/\text{m}^2$ 。

其中,顶层单位建筑面积耗热量 q_h 由 $30.11\text{W}/\text{m}^2$ 下降为 $27.89\text{W}/\text{m}^2$, 耗煤量 q_c 由 $14.07\text{kg}/\text{m}^2$ 下降为 $13.03\text{kg}/\text{m}^2$ 。在外围护结构传热耗热量中,通过屋面的传热耗热量 $Q_{h(r)}$ 由 $6556\text{W}/\text{m}^2$ 下降为 $5515.42\text{W}/\text{m}^2$, 占建筑全部热负荷的比重由 4.95% 降为 4.17% 。同时,由于冬季采暖期耗煤所排放的二氧化碳量: $E_h = 2.62 \times 7.98 = 20.91 \text{ kg} / \text{m}^2$ 。

虽然屋顶绿化对建筑整体减排贡献率不大,然而,屋顶绿化的价值不仅仅体现在降低二氧化碳排放上,还能通过调节空气湿度、滞留粉尘、降低噪音等作用有效提高建筑室内外环境质量。特别是当其与雨水收集系统相结合时,能有效的提高雨水收集率,进而提高建筑节水率,并减少相应的二氧化碳排放量。因此,不论是从经济效益,还是从环境效益、社会效益出发,屋顶绿化都值得提倡和推广。

7.5 本章小结 (Brief Summary)

本章选取徐州市某住区作为案例,介绍了住区基本情况,并利用论文理论研究成果对该住区进行碳足迹计算、低碳程度评价及相关低碳技术分析。对案例住区建材生产阶段、建设施工阶段和运行使用阶段碳足迹进行了核算,各阶段碳排放量分别为 27444480.00kg, 1866240.00kg, 136239712.35kg, 所占比例分别为 17%, 1%, 82%, 生命周期碳足迹为 165550432.40kg。对案例住区进行低碳评价,确定了各评价对象的低碳指数,并进行了相应的评级,最终确定案例住区生命周期低碳指数为 7.77%, 低碳等级为合格。对案例住区采暖制冷系统,用水系统及住区绿化进行详细分析。通过对案例住区碳足迹计算、低碳程度评价及相关低碳技术分析得出的结果,较好的支持了本文的理论研究成果。

8 结论及展望

8 Conclusions and Prospects

8.1 结论 (Conclusions)

以全球变暖为主要特征的全球气候变化,已成为 21 世纪人类面临的最重大环境挑战。探索低碳发展道路,是人类社会应对气候变化的重要选择。城市住区是我国城市居住建筑主要的建设型式,也是城市中最重要、最集中的聚居形态。巨大的住区建设量和保有量,造成了住区在建设和使用中巨大的资源能源消耗和碳排放,使城市住区的减排成为我国建筑领域和整个国家低碳减排应对气候变化的重要领域之一。为了应对低碳时代的挑战,我国应该在城市住区领域,充分利用新的减排思想、方法和技术手段,实现城市住区由高耗能、高排放、高污染向低能耗、低排放和低污染转变,从而实现我国城市住区的减排目标,推动整个建筑业和整个减排的工作的顺利开展。因此,城市住区领域的碳排放核算方法、减排技术、方法和策略,成为我国建筑领域减排探索和研究的重点领域。

论文基于生命周期理论、系统理论、技术创新理论、生命周期评价方法、成本效益分析方法等相关理论方法,结合城市住区低碳减排发展的实际情况,利用理论分析和实证研究的方法,对城市住区碳足迹和低碳减排技术、策略进行了研究,得出以下结论和观点:

(1) 基于生命周期评价方法,分析比较了较一般工业产品和住区等建筑产品异同,认为城市住区碳排放特性受到住区空间范围大、生命周期长、建筑排放独特性、受自然技术环境影响大、利益相关者影响大以及功能单位定义和系统边界描述困难等特点影响,使用生命周期评价方法进行城市住区碳足迹的研究造成困难,其有效的解决途径是采用碳足迹思想构建城市住区碳足迹研究方法。

(2) 根据城市住区及其碳排放特性和碳足迹研究思想,确定城市住区碳足迹研究的目的和原则,并结合住区建设程序将城市住区碳足迹研究划分为五个阶段:决策设计阶段、建筑材料设备生产阶段、建设施工阶段、运行维护阶段和处置阶段,从主要的资源、能源输入和废弃物排放角度,确定了各阶段的碳足迹分析的系统边界,确定了各阶段主要的碳排放单元过程,并对系统边界内的主要碳排放单元过程进行分析,对各阶段进行碳排放清单分析,确定单元过程的碳排放活动水平,并构建了住区生命周期及各阶段的碳排放量计算模型。

(3) 在各阶段的清单分析过程中,提出了各阶段主要碳排放活动活动水平和碳排放因子的确定方法,借鉴已有研究成果并结合计算,确定了煤炭、石油、天然气、电力、水等基础能源资源碳排放因子、铁路运输、公路运输和水路运输

碳排放因子及主要建筑材料的碳排放因子；结合阶段主要碳排放单元过程的活动数据水平和相应的碳排放因子，构建了各阶段的碳排放核清单计算表。

(4) 通过对住区低碳评价目标的分析，并与绿色、生态、可持续等新型建筑环境影响评价体系的对比，明确了住区低碳评价的特殊性，即政治经济性、目标单一性、评价的量化性和金融经济性。

(5) 通过对住区低碳评价特殊性的分析，在住区低碳评价体系中选取住区生命周期低碳指数、施工低碳指数、运行低碳指数、低碳用能、低碳用水等不同层次的 10 个低碳指数作为评价要素，构建相应的 10 个评价基准；

(6) 以构建的基准值作为分界点，根据住区生命周期、各阶段和各子系统的碳排放量基准值与实际值差值占基准值的百分比，将住宅建筑的低碳评级分为差级 ($L < -30\%$)、较差 ($-30\% \leq L < -10\%$)、合格 ($-10\% \leq L \leq 10\%$)、良好 ($10\% < L \leq 30\%$)、优秀 ($L > 30\%$) 五个等级。

(7) 分析了对城市住区低碳运行机理，从生命周期和住区不同的功能系统两个维度，对住区进行低碳技术分类分析，对不同类别、不同类型的低碳技术分别进行详细分析，明确其减排潜力；构建双维度的城市住区低碳技术体系。

(8) 分析了城市住区成本收益分析的特点，提出用增量成本和增量效益分析住区低碳成本效益，并从经济、环境和社会三个方面的增量成本和增量效益角度，构建了住区成本效益分析模型。

(9) 对住区住宅建筑本体、建筑设备系统和住区环境三个方面的部分低碳技术进行了成本效益分析。选取本体结构中的外墙保温层、建筑设系统中的热水供应系统系统进行分析。研究建立了外墙保温层的成本收益分析模型，并确定了其经济厚度分析模型；比较了太阳能热水和电热水器的生命周期成本收益分析，构建了太阳能热水器增量成本收益分析模型，确定了其投资回收期。

(10) 从建筑物本体、设备和外部环境系统三个方面，在对低碳技术进行的经济、社会、环境成本收益分析的基础上，采用运筹学 0-1 型多目标规划的方法，建立住区低碳技术优化选择模型，并运用 LINGO 软件进行算例分析以验证该模型的适用性。

(11) 选取某城市住区为案例，根据研究成果对案例住区碳足迹进行研究，对住区相关低碳指数进行评级，对住区采取的主要低碳技术进行分析，提出相应的低碳减排建议。案例住区的碳排放核算、低碳评价、低碳技术等方面的分析结果很好的验证了论文的理论研究成果。

8.2 创新点 (Innovations)

本论文主要有以下创新点：

(1) 根据住区生命周期理论和碳足迹思想，将城市住区划分为：规划设计、

建筑材料设备生产运输、建造施工、运行维护和处置五个阶段,对五个阶段进行了碳排放单元过程的清单分析,确定单元过程的碳排放活动水平,构建了各阶段碳排放清单计算表,并建立了住区生命周期及各阶段的碳排放量计算模型。

(2) 根据城市住区碳排放评价特点并结合现有的新型建筑环境影响评价体系,构建了城市住区低碳评价体系,选取住区生命周期及各阶段低碳指数、各主要碳排放源系统低碳指数作为城市住区的低碳评价指标,确定了相应的评价基准,并根据不同的评价要素及评价基准,确定了相应的低碳评级方法。

(3) 根据城市住区低碳运行机理,从生命周期和住区主要的功能系统两个维度,对住区进行低碳技术分类分析,对不同类别、不同类型的低碳技术分别进行详细分析,构建基于双维度的城市住区低碳技术体系。

(4) 根据城市住区低碳成本收益分析的特点,提出用低碳增量成本和低碳增量效益进行住区低碳成本效益分析,并从经济、环境和社会三个方面考虑低碳增量成本和低碳增量效益,构建了住区成本效益分析模型。在此基础上对住区住宅建筑本体、建筑设备系统和住区环境三个方面的部分主要低碳技术进行了成本效益分析,确定相应的低碳技术方案。

(5) 从建筑物本体、设备和外部环境系统三个方面,在对低碳技术进行的经济、社会、环境成本收益分析的基础上,采用运筹学 0-1 型多目标规划的方法,建立住区低碳技术优化选择模型,并运用 LINGO 软件进行算例分析以验证该模型的合理有效性。

8.3 研究展望 (Research Prosepects)

城市住区碳足迹和低碳策略研究尚处于起步和发展阶段,目前尚未形成成熟的理论方法和体系,还需要从以下几个刚面进行进一步的研究和探索:

(1) 在城市住区碳足迹研究方面,采用生命周期评价方法进行住区碳足迹研究时,由于缺少相应的建筑材料设备排放因子数据库和施工现场机械设备能耗及运行使用阶段的相关设备能耗数据统计资料,而大多采用特定地区的平均水平和个别案例的分析计算,影响了住区碳足迹研究和核算的准确性。所以,需要加强建筑材料设备排放因子的研究,尤其需要建立统一的建筑材料、设备产品的生命周期评价技术规范(产品种类规则),确保排放因子的准确性;同时需要加强施工现场机械设备能耗及运行使用阶段的相关设备能耗数据统计工作,从而形成较为完整的住区生命周期评价数据库,从而减轻住区碳足迹研究的工作量,并确保其准确性。

(2) 在城市住区低碳技术体系研究方面,本文的低碳技术体系是一个通用概念,进一步的研究可以从不同的气候区域,不同的住区和住宅建筑类型进行详细的分类分析,以构建适用于不同气候区域,不同住区和住宅建筑结构类型的住

区低碳技术体系。

(3) 在城市住区成本效益分析研究方面, 在进行住区及相关低碳技术成本收益分析时, 本文只选取的部分技术进行, 下一步可以根据住区低碳技术体系, 进行全面的低碳技术成本收益分析, 以利于对低碳技术的综合选择。

(4) 在城市住区的利益相关者和低碳政策制定方面, 城市住区的低碳实现不仅需要技术经济方面的分析, 还需要政策方面的支持, 因此, 可以根据利益相关者的不同低碳利益需求, 对住区利益相关者进行博弈分析, 并根据博弈分析结果制定住区低碳发展相关政策。

参考文献

- [1] 联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC).气候变化 2007: 综合报告[R].日内瓦: IPCC,2007 年 10 月
- [2] United Nations Environment Programme -Sustainable Buildings and Climate Initiative, Buildings and Climate Change: a Summary for Decision-Makers- 2009 [EB/OL] [2012-8-1] <http://www.unep.org/SBCI/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>
- [3] 中国城市科学研究会, 绿色建筑 2011[M] 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.3
- [4] 中国城市科学研究会, 绿色建筑 2010[M] 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.3
- [5] 中国城市科学研究会, 绿色建筑 2008 [M] 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.3
- [6] 王静.城市住区绿色评估体系的应用与优化[M] 北京: 中国建筑工业出版社,2010.8.
- [7] 赵沛楠.低碳评估:量化建筑碳排放[N].中国能源报.2010(3):23.
- [8] 武慧君.基于生命周期评价的建筑物环境影响分析[D]. 大连: 大连理工大学.2006.
- [9] Wackernagel M, Rees W. Our Ecological Footprint: reducing human impact on the earth [M] New Society Pub, 1996.
- [10] Finkbeiner M. Carbon Footprinting-Opportunities and Threats [J] .International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(2): 91- 94.
- [11] 郑忠海, 付林.城市建筑能源系统的碳足迹分析[A] 2010 城市发展与规划国际大会论文集[C], 2010.
- [12] 魏小清, 李念平, 张絮涵.大型公共建筑碳足迹框架体系研究[J]建筑节能,2011(3):26-28
- [13] 樊瑛,龙惟定.HVAC 系统的碳足迹分析及环境评价指标[J] 暖通空调 2009 (12): 53-56
- [14] 罗智星,杨柳,刘加平,韩冰.建筑材料 CO₂ 排放计算方法及其减排策略研究[J] 建筑科学 2011(4):1-8
- [15] 刘念雄,汪静,李嵘. 中国城市住区 CO₂ 排放量计算方法 [J] .清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(9) :1433~1436.
- [16] Chen GQ, Chen H, Chen ZM, et al. Low-carbon building assessment and multi-scale input-output analysis [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2011, 16(1) :583-595.
- [17] 张智慧, 尚春静, 钱坤. 建筑生命周期碳排放评价[J]. 建筑经济, 2010, (2):44-46.
- [18] Leif Gustavsson, Anna Joelsson, Roger Sathre. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building [J]. Energy and Buildings, 2010, 42 (2) :230-242.
- [19] Cole RJ. Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems[J]. Building and Environment, 1999, 34(3) :335-348.

- [20] Gerilla GP, Teknomo K, Hokao K. An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction[J]. *Building and Environment*, 2007, 42(7): 2778-2784.
- [21] Bribian, Uson, Scarpellini. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification[J]. *Building and Environment*, 2009, 44(12): 2510-2520.
- [22] Kenny T, Gray N F. Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2009, 29(1): 1-6.
- [23] Padgett J P, Steinemann A C, Clarke J H, et al. A comparison of carbon calculators [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2008, 28(2-3): 106-115.
- [24] Lenzen M. Double-counting in life cycle calculations [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(4): 583-599.
- [25] Hammerschlag R, Barbour W. Life-cycle assessment and indirect emission reductions: Issues associated with ownership and trading [R]. Seattle: Institute for Lifecycle Environmental Assessment, 2003.
- [26] Lenzen M, Murray J, Sack F, et al. Shared producer and consumer responsibility: Theory and practice [J]. *Ecological Economics*, 2007, 61(1): 27-42.
- [27] Matthews H S, Hendrickson C T, Weber C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(16): 5839-5842.
- [28] BSI. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services (PAS 2050) [R]. London: British Standards Institution, 2008.
- [29] Matthews H S, Weber C, Hendrickson C T. Estimating carbon footprints with input-output models [R]. Pittsburgh: Department of Civil & Environmental Engineering, Carnegie Mellon University, 2008.
- [30] Chambers J Q, Fisher J I, Zeng H C, et al. Hurricane Katrina's carbon footprint on U. S. gulf coast forests [J]. *Science*, 2007, 318(5853): 1107.
- [31] WRI. The greenhouse gas protocol: a corporate accounting and reporting standard (Revised Edition) [M]. Geneva, Switzerland: World Business Council for Sustainable Development and World Resource Institute, 2004.
- [32] Matthews H S, Hendrickson C T, Weber C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(16): 5839-5842.
- [33] Larsen H N, Hertwich E G. The case for consumption-based accounting of greenhouse gas emissions to promote local climate action [J]. *Environmental Science & Policy*, 2009, 12(7): 791-798.

- [34] Michiya Suzuki, Tatsuo Oka, Kiyoshi Okada. The estimation of energy consumption and CO₂ emission due to housing construction in Japan.[J]. Energy and Buildings 1995,(22):165-169
- [35] Jonas Nassen, John Holmberg, Anders Wadeskog, Madeleine Nyman. Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input - output analysis[J]. Energy, 2007 (32) : 1593 - 1602.
- [36] ISO. Environmental management - life cycle assessment: principles and framework (iso 14040) [R]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
- [37] 计军平,马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展[J]. 生态经济, 2011(4):76-79
- [38] Leif Gustavsson, Anna Joelsson, Roger Sathre. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building [J] . Energy and Buildings, 2010,(42) :230~242.
- [39] LEIF GUSTAVSSON, KIM PINGOUD, ROGER SATHRE. CARBON DIOXIDE ALANCE OFWOOD SUBSTITUTION: COMPARING CONCRETE-AND WOOD-FRAMED BUILDINGS [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 2006, (11): 667-691
- [40] Leif Gustavsson, Roger Sathre. Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials [J]. Building and Environment, 2006,(41): 940-951
- [41] Jonathan Norman, Heather L. MacLean, M.ASCE, hristopher A. Kennedy. Comparing High and Low Residential Density: Life-Cycle Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions[J]. JOURNAL OF URBAN PLANNING AND DEVELOPMENT.2006,(4):10-21
- [42] Frank Werner, Klaus Richter. Wooden Building Products in Comparative LCA [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, (7): 470 - 479.
- [43] T. Ramesh, Ravi Prakash, K.K. Shukla. Life cycle energy analysis of buildings: An overview [J]. Energy and Buildings, 2010 (42): 1592-1600.
- [44] Leif Gustavsson, Anna Joelsson. Life cycle primary energy analysis of residential buildings [J]. Energy and Buildings, 2010 (42): 210-220.
- [45] J. Monahan, J.C. Powell. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework [J]. Energy and Buildings, 2011,(43): 179 - 188
- [46] Gian Andre, Blengini, Tiziana Di Carlo. The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. [J]. Energy and Buildings, 2010,(42): 869-880
- [47] N. Huberman, D. Pearlmutter. A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert [J]. Energy and Buildings 2008, (40) 837-848

- [48] Mari'a Jesu' s Gonza' lez, Justo Garcí'a Navarro. Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. [J]. Building and Environment, 2006(41): 902 - 909
- [49] Jacob N.Hacker, Tom P. De Saulles, Andrew Minson, Michael J. Holmes. Embodied and operational carbon dioxide emissions from housing: A case study on the effects of thermal mass and climate change[J]. Energy and Building, 2008, 40: 375 - 384.
- [50] B.V. Venkatarama Reddy. Sustainable materials for low carbon buildings[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2009 (4): 175-181.
- [51] 曾正雄.公寓住宅设备管线二氧化碳排放量评估[D].台湾:国立成功大学,2006.
- [52] 张又升.建筑物生命周期二氧化碳减量评估.[D] 台湾:国立成功大学,2002.
- [53] 黄国仓.办公建筑生命周期节能与二氧化碳减量评估之研究.[D] 台湾:国立成功大学, 2006.
- [54] Qingyuan Zhang. Residential energy consumption in China and its comparison with Japan, Canada, and USA. [J]. Energy and Buildings, 2004, (36): 1217-1225
- [55] 陈滨, 孟世荣, 陈星, 刘毓伟.中国住宅中能源消耗的 CO₂ 排放量及减排对策[J]. 可再生能源,2005,(5):75-79
- [56] 刘博宇.住宅节约化设计与碳减排研究.[D] 上海, 同济大学, 2008, 3.
- [57] LI Qin, LIU Meng, QIAN Fa. Analysis and forecast of residential building energy consumption in Chongqing on carbon emissions [J]. J.Cent.South Univ.Technol.2009 (16) (s1):214-218
- [58] 汪静. 中国城市住区生命周期 CO₂ 排放量计算与分析[D]. 北京, 清华大学, 2009.6
- [59] 刘君怡.夏热冬冷地区低碳住宅技术策略的 CO₂ 减排效用研究[D] 武汉: 华中科技大学,2010,5.
- [60] Hui Yan, Qiping Shen, Linda C.H. Fan, Yaowu Wang, Lei Zhang. Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong [J]. Building and Environment, 2010, 45(4): 949-955.
- [61] 李海峰.上海地区住宅建筑全生命周期碳排放量计算研究[A]. 第 7 届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集[C], 2011
- [62] 李兵,李云霞,吴斌付,菲菲.建筑施工碳排放测算模型研究[J].土木工程信息技术, 2011,(3)2:5-9
- [63] 尚春静,张智慧.建筑生命周期碳排放核算[J]. 工程管理学报,2010,(2)1:7-12
- [64] 蔡向荣, 王敏权, 傅柏权. 住宅建筑的碳排放量分析与节能减排措施[J]. 防灾减灾工程学报, 2010,(30):428-431

- [65] 燕艳.浙江省建筑全生命周期能耗和 CO₂ 排放评价研究.[D].杭州, 浙江大学,2011.3
- [66] Fang You, Dan Hua, Haitao Zhang, Zhen Guo, Yanhua Zhao, Bennan Wang, Ye Yuan. Carbon emissions in the life cycle of urban building system in China—A case study of residential buildings. [J]. Ecological Complexity, 2011, (8): 201–212
- [67] Curran M A. Environmental life-cycle assessment [M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [68] The Building Research Establishment Environmental Assessment Method [EB/OL] [2012-8-1]<http://www.breeam.org/page.jsp?id=21>
- [69] The Standard Assessment Procedure, SAP [EB/OL] [2012-8-1] [http:// projects. bre.co. uk /sap2005/](http://projects.bre.co.uk/sap2005/)
- [70] 赵春明. 建筑的低碳化——浅谈建筑的节能[J]. 黑龙江科技信息, 2010 (16): 286.
- [71] 张庆欢,永模.铝酸盐水泥: 低碳水泥混凝土发展的重要领域[J].中国混凝土, 2010, (15) :3-37
- [72] 高育欣,王军,徐芬莲,林喜华,陈景.预拌混凝土绿色生产碳排放评估[J].混凝土,2011,(1):110-112.
- [73] 覃维祖. 混凝土材料与结构在低碳经济新形势下的发展方向[J].施工技术, 2010,(3),6-7.
- [74] 廖敏英, 祝昌曦. 绿色施工与低碳建筑[J]. 施工技术, 2010, 39: 591-593.
- [75] 陈冰, 康健. 英国低碳建筑: 综合视角的研究与发展[J]. 世界建筑, 2010 (2): 54-59.
- [76] Ikbāl Cetiner, Ertan Özkan. An approach for the evaluation of energy and cost efficiency of glass facades[J]. Energy and Buildings, 2005 (37): 673-684.
- [77] Ambrose Dodoo, Leif Gustavsson, Roger Sathre. Carbon implications of end-of-life management of building materials. [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2009,(53): 276-286
- [78] H. Radhi. Can envelope codes reduce electricity and CO₂ emissions in different types of buildings in the hot climate of Bahrain? [J]. Energy 2009, (34): 205–215
- [79] Piyush Tiwari. Energy efficiency and building construction in India[J]. Building and Environment, 2001 (36): 1127-1135.
- [80] LEIF GUSTAVSSON, KIM PINGOUD, ROGER SATHRE. CARBON DIOXIDE ALANCE OF WOOD SUBSTITUTION: COMPARING CONCRETE-AND WOOD-FRAMED BUILDINGS [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 2006, (11): 667–691
- [81] Leif Gustavsson, Roger Sathre. Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials [J]. Building and Environment, 2006,(41): 940-951
- [82] James Salazar, Jamie Meil. [J]. Prospects for carbon-neutral housing: the influence of greater wood use on the carbon footprint of a single-family residence. Journal of Cleaner Production. 2009,(17): 1563-1571

- [83] Mark Hinnells, Technologies to achieve demand reduction and microgeneration in buildings [J]. Energy Policy, 36, 2008:4427-4433.
- [84] Ann Kristin Petersen, Birger Solberg. Greenhouse gas emissions, life-cycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction Case: beams at Gardermoen airport [J]. Environmental Science & Policy 2002,(5) 169–182
- [85] Gian Andre, Blengini, Tiziana Di Carlo. The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. [J]. Energy and Buildings, 2010,(42): 869-880
- [86] 刘君怡,李保峰,Khee Poh Lam.夏热冬冷地区低碳住宅设计策略效用的量化分析[J].建筑学报, 2010 学术专刊, 116-119.
- [87] 龙惟定, 白玮, 范蕊.低碳城市的区域建筑能源规划[M] 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.3
- [88] J. Monahan, J.C.Powell. A comparison of the energy and carbon implications of new systems of energy provision in new build housing in the UK [J]. Energy Policy2011 (39)290–298
- [89] Ce' line Weber, Michihisa Koyama, Steven Kraines. CO2 emissions reduction potential and costs of a decentralized energy system for providing electricity, cooling and heating in an office building in Tokyo. [J]. Energy, 2006, (31): 3041 – 3061
- [90] W.P. Sung, T.T. Tsai, K.S. Chen. Assessment of the energy-saving and carbon reduction efficiency of an air-conditioned office in Taiwan. [A]. ICRM2010-Green Manufacturing, Ningbo, China. 128-133
- [91] M.T. Iqbal. A feasibility study of a zero energy home in Newfoundland[J]. Renewable Energy, 2004 (29): 277-289.
- [92] Hassan Radhi. Evaluating the potential impact of global warming on the UAE residential buildings – A contribution to reduce the CO2 emissions[J]. Building and Environment, 2009 (44): 2451-2462.
- [93] A.R. Day, P. Ogumka, P.G. Jones, A. Dunsdon. The use of the planning system to encourage low carbon energy technologies in buildings[J]. Renewable Energy, 2009 (34): 2016-2021.
- [94] M. Thyholt. A.G. Hestnes. Heat supply to low-energy buildings in district heating areas Analyses of CO2 emissions and electricity supply security[J]. Energy and Buildings, 2008 (40): 131-139.
- [95] 郑中华,吴永波,张陆平,杨学军,陈杰,司慧萍.低碳型社区绿化技术分析及展望[J] 中国城市林业,2010,8(3):19-21.
- [96] 郭新想, 吴珍珍, 何华.居住区绿化种植方式的固碳能力研究[A]第六届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集[C], 2010.

- [97] 胡红波,李景广.绿色建筑植物生态参数的研究及标准修正建议[A]城市发展研究——第7届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集[C],2011.
- [98] 包志毅,马婕婷.试论低碳植物景观设计和营造[J]中国园林, 2011 (1): 7-10
- [99] 宋华伟,丰剑利.绿色住宅的固碳技术与应用[J]华中建筑, 2011,(6):77-79.
- [100] 郭新想.居住区绿化植物固碳能力评价方法研究[D] 重庆大学,2010,10.
- [101] Timothy Carter, Andrew Keeler. Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. [J]. Journal of Environmental Management, 2008, (87): 350-363
- [102] Catarina Thormark. A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential [J]. Building and Environment, 2002, (37): 429-435
- [103] 曹小琳,屈婷.低碳建筑全寿命周期费用估算模型研究[J]建筑经济,2011(6):92-95.
- [104] 高泉平.低碳理念下绿色建筑的经济效益分析[J] 武汉理工大学学报, 2010 (32) 15: 189-192.
- [105] 马素贞, 孙大明, 邵文晞.绿色建筑技术增量成本分析[J]建筑科学,2010,26(6):91-95.
- [106] 李云舟,何少剑,朱惠英,陶尚儒.绿色建筑住宅小区的建造成本增量控制分析[J]建筑科学, 2009, 25 (4):76-81.
- [107] 孙大明,邵文晞,李菊.我国绿色建筑成本增量调查分析[J]建设科技, 2009(6):34-37.
- [108] Northbridge. Environmental Management Consultants. Analyzing the Cost of Obtaining LEED Certification[EB /OL][R]. http://www.Cleanair-coolplanet.org/for_communities/LEED_links/Analyzingthe-CostofLEED.pdf, 2003.
- [109] Gregory H Kats, Capital E. The Costs and Financial Benefits of Green Buildings [EB /OL][R]. <http://www.usgbc.org/Docs/News/News477.pdf>, 2003.
- [110] 陆炜,江皓.低辐射夹层玻璃节能减排的经济效益分析[J]建筑科学, 2008, 11 (24) 109-110.
- [111] 苏明山,何建坤,顾树华.大中型沼气工程的 CO₂ 减排量和减排成本的估计方法[J]中国沼气 2002 ,20 (1):26-28.
- [112] 谢自强,董孟能,邓瑛鹏,陈亮.建筑体形系数对建筑节能增量成本的影响分析[J] 重庆建筑,2008,(12): 8-10.
- [113] 柴宏祥,胡学斌,彭述娟,王天云.绿色建筑节水项目全生命周期增量成本经济模型[J] 华南理工大学学报(自然科学版),2010,38(11):59-63.
- [114] I. Sartori, A.G. Hestnes. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article [J]. Energy and Buildings 2007,(39):249-257
- [115] Joshua Kneifel. Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings. [J]. Energy and Buildings, 2010,(42): 333-340
- [116] Jonathan G Koomey, Nathan C Martin, Marilyn Brown, Lynn K Price, Mark D Levine.

- Costs of reducing carbon emissions: US building sector scenarios[J]. Energy Policy, 1998, 26 (5): 433-440.
- [117] http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm
- [118] 国务院发展研究中心课题组. 全球温室气体减排:理论框架和解决方案[J].经济研究,2009(3):4-13
- [119] ANN P KINZIG, DANIEL M KAMMEN. National Trajectories of Carbon Emissions Analysis of Proposals to Foster the Transition to Low-Carbon Economies [J].Global Environmental Change, 1998, 8(3):183-208.
- [120] Department for Transport, Department for Environment and Rural Food. Energy White Paper: Our Energy Future-Creating a Low Carbon Economy[M]. The Stationery Office, 2003.
- [121] STERN N. The Economics of Climate Change: The Stern Review[M].Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006
- [122] 庄贵阳.气候变化挑战与中国经济低碳发展.国际经济评论 2007(5):50-52
- [123] 付允等.低碳城市的发展路径研究.科学对社会的影响, 2008(2):5-10
- [124] 鲍健强等.低碳经济:人类经济发展方式的新变革.中国工业经济, 2008(4)153-160.
- [125] UGUR SOYTASA, RAMAZAN SARIB, BRADLEY T EWINGC. Energy Consumption, Income, and Carbon Emissions in the United States [J].Ecological Economics, 2007, 62: 482-489.
- [126] SCHOBHAKAR DHAKAL. Urban Energy Use and Carbon Emissions from Cities in China and Policy Implications [J].Energy Policy, 2009, 37: 4208-4219.
- [127] SCOTT MURTISHAW, LEE SCHIPPER, FRIDTJOF UNADER, SOHBET KARBUZ, MARTA KHRUSHCH. Lost Carbon Emissions: the Role of Non-Manufacturing other Industries and Refining in Industrial Energy Use and Carbon Emissions in IEA Countries[J].Energy Policy, 2001, 29: 83-102.
- [128] CLAUDIA SHEINBAUM, LETICIA OZAWA, DANIEL CASTILLO. Using Logarithmic Mean Divisia Index to Analyze Changes in EnergyUse and Carbon Dioxide Emissions inMexico's Iron and Steel Industry[J].Energy Economics, 2010.
- [129] JUN LI, MICHEL COLOMBIER. Managing Carbon Emissions in China through Building Energy Efficiency [J].Journal of Environmental Management, 2009, 90: 2436-2447.
- [130] MIKHAIL GRANOVSKII, IBRAHIM DINCER, MARC A ROSEN. Greenhouse Gas Emissions Reduction by Use of Wind and Solar Energies for Hydrogen and Electricity Production: Economic Factors [J].International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 32: 927-931.

- [131] REHAN R, NEHDI M. Carbon Dioxide Emissions and Climate Change: Policy Implications for the Cement Industry [J].Environmental Science&Policy, 2005, 8:105-114.
- [132] PEYER LUND. Impacts of EU Carbon Emission Trade Directive on Energy-Intensive Industries-Indicative Micro-Economic Analyses [J].Ecological Economics, 2007, 63: 799-806.
- [133] LORI A BIRD, EDWARD HOLT, GHITA LEVENSTEIN CARROLL. Implications of Carbon Cap-and-Trade for U Voluntary Renewable Energy Markets [J].Energy Policy 2008, 36:2063-2073.
- [134] TYLER MCNISH, ARNE JACOBSON, DAN KAMMEN ANAND GOOAL, RANJIT DESHMUKH. Sweet Carbon: A Analysis of Sugar Industry Carbon Market Opportunities under the Clean Development Mechanism [J].Energy Policy 2009, 37:5459-5468.
- [135] ROBERT BONNIE, MELISSA CAREY, ANNIE PETSONK Protecting Terrestrial Ecosystems and the Climate through Global Carbon Market, Philosophical Transactions: Mathematical [J].Physical and Engineering Sciences, 2002, 36(1797): 1853-1873.
- [136] EDUARD NIESTEN, PETER C FRUMHOFF, MICHELL MANION, JARED J HARDNER. Designing a Carbon Market That Protects Forests in Developing Countries, Philosophical Transactions: Mathematical [J].Physical and Engineering Sciences, 2002, 360(1797): 1875-1888.
- [137] MUSTAFA H BABIKER. Climate Change Policy, Market Structure, and Carbon Leakage [J].Journal of International Economics, 2005, 65: 421-445.
- [138] WILLIAM BLYTH, DEREK BUNN, JANNE KETTUNEN TOMWILSON. Policy Interactions, Risk and Price Formation Carbon Markets [J].Energy Policy, 2009, 37:5192-5207.
- [139] HYUNSEOKKIM, WONWKOO. Factors Affecting the Carbon Allowance Market in the US [J].Energy Policy, 2009
- [140] MASSIMO TAVONI, BRENT SOHNGEN, VALENTIN BOSETTI. Forestry and the Carbon Market Response to Stabilize Climate [J].Energy Policy, 2007, 35:5346-5353.
- [141] MASSIMO TAVONI, BRENT SOHNGEN, VALENTIN BOSETTI. Forestry and the Carbon Market Response to Stabilize Climate [J].Energy Policy, 2007, 35:5346-5353.
- [142] LALR. Forest Soils and Carbon Sequestration [J].Forest Ecology and Management, 2005, 220: 242-258.
- [143] DAHOWSKI RT, XLI, CLDAVIDSON, R H GENTILE. A Preliminary Cost Curve Assessment of Carbon Dioxide Capture and Storage Potential in China [J].Energy Procedia, 2009, 1: 2849-2856.
- [144] CHEN WENYING, LIU JIA, MA LINWEI, DU LANOWSKY, G K BURNARD. Role for

- Carbon Capture and Storage in China [J].Energy Procedia, 2009, 1: 4209-4216.
- [145] Barker, T., S. Junankar, H. Pollitt and P. Summerton (forthcoming) “The macroeconomic effects of unilateral environmental tax reforms in Europe, 1995-2012” in Innovation, Technology and Employment: Impacts of Environmental Fiscal Reforms and Other Market-Based Instruments, edited volume of "Critical Issues in Environmental Taxation VOL VI", Oxford University Press.
- [146] 中国环境与发展国际合作委员会(国合会),中国发展低碳经济途径研究[EB/OL] (2008-12-30)[2011-8-1]http://www.cciced.net/zlk_1/ztbg/ztzcbg_2009/200908/P020090819365541499723.pdf
- [147] 刘小虎,冯勇. LEED 指标、绿色建筑和可持续发展——Ray Cale 教授访谈[J].华中建筑 2005 年第 5 期 P76-77.
- [148] 顾道金,朱颖心,谷立静. 中国建筑环境影响的生命周期评价[J]. 清华大学学报(自然科学版) 2006 年第 46 卷第 12 期 1953-1956.
- [149] Roodman D M, Lenssen N . A building Revolution: How Ecology and Health Concerns Are Transforming Construction. Washington: World Watch Institute, 1995.
- [150] 王寿兵, 杨建新, 胡聃. 生命周期评价方法及其进展[J]. 上海环境科学,1998,17(1): 7-10.
- [151] ISO14040:Environmental management life-cycle assessment principles and framework [R],1997.
- [152] Glen P Peters. Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2010, 2(4):245–250.
- [153] 林而达,李玉娥.全球气候变化和温室气体排放清单编制方法[M].北京:气象出版社,1998.
- [154] Wiedmann T, Minx J. A definition of Carbon Footprint [J]. ISA Research Report, 2007: 1-7.
- [155] Carbon Trust. Carbon footprint measurement methodology (version 1.3) [R]. London: The Carbon Trust, 2007.
- [156] WRI. The greenhouse gas protocol: product and supply chain (Under Development) [M]. Geneva, Switzerland: World Business Council for Sustainable Development and World Resource Institute, 2011.
- [157] Hammond G. Time to Give due Weight to the Carbon Footprint Issue [J]. Nature, 2007, 445(7125): 256- 256.
- [158] BP. What is a carbon footprint? British Petroleum. [http://www. p.com liveassets/p_internet/globalbp/](http://www.bp.com/liveassets/p_internet/globalbp/), 2007.
- [159] British Standards Institution. PAS 2050-2008 Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services[M].UK: British Standards Institution,2008.

- [160] British Standards Institution. PAS 2050-2010 Specification for the Assessment of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Goods and Services[M].UK: British Standards Institution,2010.
- [161]Matthews H S, Hendrickson C T, Weber C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(16): 5839-5842.
- [162]Barthelmie R J, Morris S D, Schechter P. Carbon neutral biggar: Calculating the community carbon footprint and renewable energy options for footprint reduction [J]. Sustainability Science, 2008, 3(2): 267-282.
- [163]Strutt J, Wilson S, Shorney-Darby H, et al. Assessing the carbon footprint of water production [J]. Journal of the American Water Works Association, 2008, 100(6): 80.
- [164] Edwards-Jones G, Plassmann K, York E H, et al. Vulnerability of exporting nations to the development of a carbon label in the United Kingdom [J]. Environmental Science & Policy, 2009(12): 479-490.
- [165] Sinden G. The contribution of pas 2050 to the evolution of international greenhouse gas emission standards [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(3): 195-203.
- [166]Larsen H N, Hertwich E G. The case for consumption-based accounting of greenhouse gas emissions to promote local climate action [J]. Environmental Science & Policy, 2009, 12(7): 791-798.
- [167] Druckman A, Jackson T. The carbon footprint of UK households 1990-2004: a socio-economically disaggregated, quasi-multiregional input-output model [J]. Ecological Economics, 2009, 68(7): 2066-2077.
- [168] Hertwich E G, Peters G P. Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade Linked Analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(16): 6414- 6420.
- [169] Baldo G L, Marino M, Montani M, et al. The Carbon Footprint Measurement Toolkit for the EU Ecolabel [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(7): 591- 596.
- [170] 中国城市科学研究会, 绿色建筑 2007M] 北京: 中国建筑工业出版社, 20073
- [171] 樊星,马树才,朱连洲. 中国碳减排政策的模拟分析——基于中国能源CGE模型的研究[J]. 生态经济. 2013(09)
- [172] 魏小清, 李念平, 张絮涵.大型公共建筑碳足迹框架体系研究[J]建筑节能,2011(3):26-28
- [173] 顾道金, 朱颖心, 谷立静. 中国建筑环境影响的生命周期评价[J]. 清华大学学报(自然科学版) 2006 年第 46 卷第 12 期 1953-1956.
- [174]聂梅生, 秦佑国, 江亿. 中国绿色低碳住区低碳技术评估手册[M] 北京: 中国建筑工业出版社,2011.6.
- [175] Meng LIU , Calculation model for energy carbon emission of building material

- transportation [C] International Conference on E-product E-service & E-entertainment,2010
- [176] 娄霓,等.绿色建筑结构体系评价与选型技术.[M]北京: 中国建筑工业出版社,2011.3.
- [177] Fang You, Dan Hua, Haitao Zhang, Zhen Guo, Yanhua Zhao, Bennan Wang, Ye Yuan. Carbon emissions in the life cycle of urban building system in China—A case study of residential buildings. [J]. Ecological Complexity, 2011, (8): 201–212
- [178] 尚春静,张智慧.建筑生命周期碳排放核算[J]. 工程管理学报,2010,(2)1:7-12
- [179] 韩晓平, 小型热电联产的选择. 中国能源网, <http://www.china5e.com/dissertation/cogen/20030721145223.htmlzbah>
- [180] 王超群, 城市热电(冷)联产经济性分析[D].上海: 同济大学硕士论文, 2004
- [181] 晁阳, 建筑产生能量—光伏建筑一体化[J]. 建筑与文化, 2011.11
- [182] 光伏应用欣赏: 太阳能与建筑的完美结合, http://www.big-bit.com/news/78763_p3.html
- [183] National Institute of Standards and Technology. National Institute of Standards and Technology (NIST) Handbook 135[M]. Gaithersburg 1995.
- [184] 中国建设工程造价管理协会. 建设项目全寿命周期成本控制理论与方法[M]. 北京: 中国计划出版社, 2007: 22-23.
- [185] 陈毓圭. 环境会计和报告的第一份国际指南——联合国国际会计和报告标准政府间专家工作组第 15 次会议记述[J]. 会计研究, 1998, 5: 1-5
- [186] 张建国等,节能项目节能量与减排量计算及价值分析[J].中国能源,2009 年 3 月
- [187] 张雯.居住建筑外窗的节能设计研究——以杭州地区为例[D], 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2003
- [188] 中国家用电器网, <http://homea.chinairn.com/news/20140430/162356807.html>, 2014.4
- [189] 杨建新, 徐成, 王如松. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [190] 陈敏. 平板玻璃产品能耗对比研究[J]. 建筑玻璃与工业玻璃, 1997, 4: 5-7.
- [191] 邓南圣, 王小兵. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003
- [192] 王承瑜, 陶瑛. 玻璃工业对环境的污染和防治(八) [J]. 玻璃与陶瓷, 2001, 29 (3): 61-63.
- [193] 于芳.上海地区住宅建筑节能窗设计技术探讨[D].上海: 同济大学硕士论文, 2008
- [194] 李兵.低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D].武汉: 华中科技大学博士学位论文, 2012 年 5 月

附录 1

(1) 算例 lingo 程序

```
model:
sets:
level/1..2/:p,z,goal;
variable/1..9/:x;
h_con_num/1..2/:b;
h_variable_num/1..3/:e;
s_con_num/1..4/:g,dplus,dminus;
h_con(h_con_num,variable):a;
h_variable(h_variable_num,variable):l;
s_con(s_con_num,variable):c;
Obj(level, s_con_num)/1 1,2 2,2 3,2 4/:wplus,wminus;
endsets
data:
ctr=?;
goal=? 0;
b=530 -45;
a=80.00 160.00 320.00 78.00 90.00 54.00 230.00 250.00 304.00
-22.21 -30.80 -38.03 -10.06 -11.93 -14.00 -0.00 -10.69 2.70;
e=1 1 1;
l=1 1 1 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1 1 1 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 1 1;
g=300 70 70 0;
c=80.00 160.00 320.00 78.00 90.00 54.00 706.96 666.55 693.87 115.32 159.85 197.43 52.21 61.97
72.66 0.00 55.53 -14.01 116.36 161.31 199.19 52.73 62.49 73.39 0.00 55.95 -14.12 0 0 0 0 0 0 0 0;
wplus=1 0 0 0;
wminus=0 1 1 1;
enddata
min=@sum(level:p*z);
p(ctr)=1;
@for(level(i)|i#ne#ctr:p(i)=0);
@for(level(i):z(i)=@sum(obj(i,j):wplus(i,j)*dplus(j)+wminus(i,j)*dminus(j)));
@for(h_con_num(i):@sum(variable(j):a(i,j)*x(j))<=b(i));
@for(variable(i):@bin(x));
@for(h_variable_num(i):@sum(variable(j):l(i,j)*x(j))=e(i));
@for(s_con_num(i):@sum(variable(j):c(i,j)*x(j))+dminus(i)-dplus(i)=g(i));
@for(level(i)|i #lt# @size(level):@bnd(0,z(i),goal));
End
```

(2) 程序运行结果:

1) 第一轮求解结果

Global optimal solution found.

Objective value:	500.5500
Objective bound:	500.5500
Infeasibilities:	0.2842171E-13
Extended solver steps:	0
Total solver iterations:	0

Variable	Value	Reduced Cost
CTR	1.000000	0.000000
P(1)	1.000000	0.000000
P(2)	0.000000	0.000000
Z(1)	500.5500	0.000000
Z(2)	0.000000	0.000000
GOAL(1)	0.1000000+308	0.000000
GOAL(2)	0.000000	0.000000
X(1)	1.000000	80.00000
X(2)	0.000000	160.0000
X(3)	0.000000	320.0000
X(4)	0.000000	78.00000
X(5)	0.000000	90.00000
X(6)	1.000000	54.00000
X(7)	0.000000	706.9600
X(8)	1.000000	666.5500
X(9)	0.000000	693.8700
B(1)	530.0000	0.000000
B(2)	-45.00000	0.000000
E(1)	1.000000	0.000000
E(2)	1.000000	0.000000
E(3)	1.000000	0.000000
G(1)	300.0000	0.000000
G(2)	70.00000	0.000000
G(3)	70.00000	0.000000
G(4)	0.000000	0.000000
DPLUS(1)	500.5500	0.000000
DPLUS(2)	173.5100	0.000000
DPLUS(3)	175.7000	0.000000
DPLUS(4)	0.000000	0.000000
DMINUS(1)	0.000000	1.000000
DMINUS(2)	0.000000	0.000000
DMINUS(3)	0.000000	0.000000
DMINUS(4)	0.000000	0.000000

A(1, 1)	80.00000	0.000000
A(1, 2)	160.0000	0.000000
A(1, 3)	320.0000	0.000000
A(1, 4)	78.00000	0.000000
A(1, 5)	90.00000	0.000000
A(1, 6)	54.00000	0.000000
A(1, 7)	230.0000	0.000000
A(1, 8)	250.0000	0.000000
A(1, 9)	304.0000	0.000000
A(2, 1)	-22.21000	0.000000
A(2, 2)	-30.80000	0.000000
A(2, 3)	-38.03000	0.000000
A(2, 4)	-10.06000	0.000000
A(2, 5)	-11.93000	0.000000
A(2, 6)	-14.00000	0.000000
A(2, 7)	0.000000	0.000000
A(2, 8)	-10.69000	0.000000
A(2, 9)	2.700000	0.000000
L(1, 1)	1.000000	0.000000
L(1, 2)	1.000000	0.000000
L(1, 3)	1.000000	0.000000
L(1, 4)	0.000000	0.000000
L(1, 5)	0.000000	0.000000
L(1, 6)	0.000000	0.000000
L(1, 7)	0.000000	0.000000
L(1, 8)	0.000000	0.000000
L(1, 9)	0.000000	0.000000
L(2, 1)	0.000000	0.000000
L(2, 2)	0.000000	0.000000
L(2, 3)	0.000000	0.000000
L(2, 4)	1.000000	0.000000
L(2, 5)	1.000000	0.000000
L(2, 6)	1.000000	0.000000
L(2, 7)	0.000000	0.000000
L(2, 8)	0.000000	0.000000
L(2, 9)	0.000000	0.000000
L(3, 1)	0.000000	0.000000
L(3, 2)	0.000000	0.000000
L(3, 3)	0.000000	0.000000
L(3, 4)	0.000000	0.000000
L(3, 5)	0.000000	0.000000
L(3, 6)	0.000000	0.000000
L(3, 7)	1.000000	0.000000
L(3, 8)	1.000000	0.000000

L(3, 9)	1.000000	0.000000
C(1, 1)	80.00000	0.000000
C(1, 2)	160.0000	0.000000
C(1, 3)	320.0000	0.000000
C(1, 4)	78.00000	0.000000
C(1, 5)	90.00000	0.000000
C(1, 6)	54.00000	0.000000
C(1, 7)	706.9600	0.000000
C(1, 8)	666.5500	0.000000
C(1, 9)	693.8700	0.000000
C(2, 1)	115.3200	0.000000
C(2, 2)	159.8500	0.000000
C(2, 3)	197.4300	0.000000
C(2, 4)	52.21000	0.000000
C(2, 5)	61.97000	0.000000
C(2, 6)	72.66000	0.000000
C(2, 7)	0.000000	0.000000
C(2, 8)	55.53000	0.000000
C(2, 9)	-14.01000	0.000000
C(3, 1)	116.3600	0.000000
C(3, 2)	161.3100	0.000000
C(3, 3)	199.1900	0.000000
C(3, 4)	52.73000	0.000000
C(3, 5)	62.49000	0.000000
C(3, 6)	73.39000	0.000000
C(3, 7)	0.000000	0.000000
C(3, 8)	55.95000	0.000000
C(3, 9)	-14.12000	0.000000
C(4, 1)	0.000000	0.000000
C(4, 2)	0.000000	0.000000
C(4, 3)	0.000000	0.000000
C(4, 4)	0.000000	0.000000
C(4, 5)	0.000000	0.000000
C(4, 6)	0.000000	0.000000
C(4, 7)	0.000000	0.000000
C(4, 8)	0.000000	0.000000
C(4, 9)	0.000000	0.000000
WPLUS(1, 1)	1.000000	0.000000
WPLUS(2, 2)	0.000000	0.000000
WPLUS(2, 3)	0.000000	0.000000
WPLUS(2, 4)	0.000000	0.000000
WMINUS(1, 1)	0.000000	0.000000
WMINUS(2, 2)	1.000000	0.000000
WMINUS(2, 3)	1.000000	0.000000

WMINUS(2, 4) 1.000000 0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	500.5500	-1.000000
2	0.000000	-500.5500
3	0.000000	0.000000
4	0.000000	-1.000000
5	0.000000	0.000000
6	146.0000	0.000000
7	1.900000	0.000000
8	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000
11	0.000000	1.000000
12	0.000000	0.000000
13	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000

2) 第二轮求解结果

Global optimal solution found.

Objective value: 0.000000

Objective bound: 0.000000

Infeasibilities: 0.2842171E-13

Extended solver steps: 0

Total solver iterations: 0

Variable	Value	Reduced Cost
CTR	2.000000	0.000000
P(1)	0.000000	0.000000
P(2)	1.000000	0.000000
Z(1)	580.5500	0.000000
Z(2)	0.000000	0.000000
GOAL(1)	0.1000000+308	0.000000
GOAL(2)	0.000000	0.000000
X(1)	0.000000	0.000000
X(2)	1.000000	0.000000
X(3)	0.000000	0.000000
X(4)	0.000000	0.000000
X(5)	0.000000	0.000000
X(6)	1.000000	0.000000
X(7)	0.000000	0.000000
X(8)	1.000000	0.000000
X(9)	0.000000	0.000000

B(1)	530.0000	0.000000
B(2)	-45.00000	0.000000
E(1)	1.000000	0.000000
E(2)	1.000000	0.000000
E(3)	1.000000	0.000000
G(1)	300.0000	0.000000
G(2)	70.00000	0.000000
G(3)	70.00000	0.000000
G(4)	0.000000	0.000000
DPLUS(1)	580.5500	0.000000
DPLUS(2)	218.0400	0.000000
DPLUS(3)	220.6500	0.000000
DPLUS(4)	0.000000	0.000000
DMINUS(1)	0.000000	0.000000
DMINUS(2)	0.000000	1.000000
DMINUS(3)	0.000000	1.000000
DMINUS(4)	0.000000	1.000000
A(1, 1)	80.00000	0.000000
A(1, 2)	160.0000	0.000000
A(1, 3)	320.0000	0.000000
A(1, 4)	78.00000	0.000000
A(1, 5)	90.00000	0.000000
A(1, 6)	54.00000	0.000000
A(1, 7)	230.0000	0.000000
A(1, 8)	250.0000	0.000000
A(1, 9)	304.0000	0.000000
A(2, 1)	-22.21000	0.000000
A(2, 2)	-30.80000	0.000000
A(2, 3)	-38.03000	0.000000
A(2, 4)	-10.06000	0.000000
A(2, 5)	-11.93000	0.000000
A(2, 6)	-14.00000	0.000000
A(2, 7)	0.000000	0.000000
A(2, 8)	-10.69000	0.000000
A(2, 9)	2.700000	0.000000
L(1, 1)	1.000000	0.000000
L(1, 2)	1.000000	0.000000
L(1, 3)	1.000000	0.000000
L(1, 4)	0.000000	0.000000
L(1, 5)	0.000000	0.000000
L(1, 6)	0.000000	0.000000
L(1, 7)	0.000000	0.000000
L(1, 8)	0.000000	0.000000
L(1, 9)	0.000000	0.000000

L(2, 1)	0.000000	0.000000
L(2, 2)	0.000000	0.000000
L(2, 3)	0.000000	0.000000
L(2, 4)	1.000000	0.000000
L(2, 5)	1.000000	0.000000
L(2, 6)	1.000000	0.000000
L(2, 7)	0.000000	0.000000
L(2, 8)	0.000000	0.000000
L(2, 9)	0.000000	0.000000
L(3, 1)	0.000000	0.000000
L(3, 2)	0.000000	0.000000
L(3, 3)	0.000000	0.000000
L(3, 4)	0.000000	0.000000
L(3, 5)	0.000000	0.000000
L(3, 6)	0.000000	0.000000
L(3, 7)	1.000000	0.000000
L(3, 8)	1.000000	0.000000
L(3, 9)	1.000000	0.000000
C(1, 1)	80.00000	0.000000
C(1, 2)	160.0000	0.000000
C(1, 3)	320.0000	0.000000
C(1, 4)	78.00000	0.000000
C(1, 5)	90.00000	0.000000
C(1, 6)	54.00000	0.000000
C(1, 7)	706.9600	0.000000
C(1, 8)	666.5500	0.000000
C(1, 9)	693.8700	0.000000
C(2, 1)	115.3200	0.000000
C(2, 2)	159.8500	0.000000
C(2, 3)	197.4300	0.000000
C(2, 4)	52.21000	0.000000
C(2, 5)	61.97000	0.000000
C(2, 6)	72.66000	0.000000
C(2, 7)	0.000000	0.000000
C(2, 8)	55.53000	0.000000
C(2, 9)	-14.01000	0.000000
C(3, 1)	116.3600	0.000000
C(3, 2)	161.3100	0.000000
C(3, 3)	199.1900	0.000000
C(3, 4)	52.73000	0.000000
C(3, 5)	62.49000	0.000000
C(3, 6)	73.39000	0.000000
C(3, 7)	0.000000	0.000000
C(3, 8)	55.95000	0.000000

C(3, 9)	-14.12000	0.000000
C(4, 1)	0.000000	0.000000
C(4, 2)	0.000000	0.000000
C(4, 3)	0.000000	0.000000
C(4, 4)	0.000000	0.000000
C(4, 5)	0.000000	0.000000
C(4, 6)	0.000000	0.000000
C(4, 7)	0.000000	0.000000
C(4, 8)	0.000000	0.000000
C(4, 9)	0.000000	0.000000
WPLUS(1, 1)	1.000000	0.000000
WPLUS(2, 2)	0.000000	0.000000
WPLUS(2, 3)	0.000000	0.000000
WPLUS(2, 4)	0.000000	0.000000
WMINUS(1, 1)	0.000000	0.000000
WMINUS(2, 2)	1.000000	0.000000
WMINUS(2, 3)	1.000000	0.000000
WMINUS(2, 4)	1.000000	0.000000

Row	Slack or Surplus	Dual Price
1	0.000000	-1.000000
2	0.000000	0.000000
3	0.000000	-580.5500
4	0.000000	0.000000
5	0.000000	-1.000000
6	66.00000	0.000000
7	10.49000	0.000000
8	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000
11	0.000000	0.000000
12	0.000000	0.000000
13	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文《城市住区碳足迹及低碳策略研究》，是本人在导师指导下，在中国矿业大学攻读学位期间进行的研究工作所取得的成果。据我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

学位论文数据集

关键词*	密级*	中图分类号*	UDC	论文资助
城市住区；碳足迹；低碳评价；低碳技术；成本效益分析；	公开	F407.9	624	
学位授予单位名称*	学位授予单位代码*	学位类别*	学位级别*	
中国矿业大学	10290	管理学	博士	
论文题名*		并列题名*	论文语种*	
中国城市住区碳足迹及低碳策略研究		Study on Carbon Footprint and Low-Carbon Strategies of Urban Settlements in China	中文	
作者姓名*	高涛	学号*	ZB09030010	
培养单位名称*	培养单位代码*	培养单位地址	邮编	
中国矿业大学	10290	江苏省徐州市	221008	
学科专业*	研究方向*	学制*	学位授予年*	
工程管理	低碳建筑	3	2015	
论文提交日期*		2015 年 6 月		
导师姓名*	王建平	职称*	教授	
评阅人		答辩委员会主席*	答辩委员会成员	
		成虎	成虎、杨平、王建平 王文顺、周建亮	
电子版论文提交格式 文本（ ） 图像（ ） 视频（ ） 音频（ ） 多媒体（ ） 其他（ ） 推荐格式：application/msword; application/pdf				
电子版论文出版（发布）者		电子版论文出版（发布）地	权限声明	
论文总页数*		197		
注：共 33 项，其中带*为必填数据，共 22 项。				