

分类号 TU2

学号 1602811139

西安建筑科技大学

学位论文

寒冷地区城市住宅全生命周期碳排放测算及
减碳策略研究

作者 李金潞

指导教师姓名 李岳岩 教授

申请学位级别 硕士 专业名称 建筑学

论文提交日期 2019.06.05 论文答辩日期 2019.04.28

学位授予单位 西安建筑科技大学

答辩委员会主席 毛刚 教授

评阅人 高庆龙

陈静

寒冷地区城市住宅全生命周期碳排放测算及 减碳策略研究

专 业：建筑学

硕 士：李金潞

指导教师：李岳岩 教授

摘 要

近年来全球由于碳排放急剧增加而导致的环境恶化成为全球的首要环境问题。根据联合国环境署计算，建筑行业消耗了全球大约 30-40% 的能源，并排放了几乎占全球 30% 的温室气体，给环境问题带来了巨大挑战。

中国应对气候变化国家自主贡献文件《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》确定二氧化碳排放 2030 年左右达到峰值并争取尽早达峰，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%-65%^[1]。如何落实我国在《巴黎气候变化协定》60%~65% 的减排承诺，占国内生产总值逾 7% 的建筑行业责任重大。而城市住宅作为建设量最大的建筑类型，对建筑领域的节能减排影响巨大。因此，对 2005 年左右的住宅全生命周期的碳排放进行测算，研究其生命周期各阶段的碳排放构成特点，从而建立 2005 年典型城市住宅类型的碳排放的参照样本，为当下建筑行业的节能减碳提供对标参照。

首先，本研究提出从生命周期的角度来研究建筑的碳排放，在总结国内外建筑全生命周期阶段划分的相关研究基础上将建筑全生命周期划分为规划设计阶段、物化阶段、使用维护阶段、拆除清理四个阶段，以基于过程的生命周期清单分析法，结合碳排放系数法来进行建筑碳排放计算。同时，对建筑全生命周期各阶段的主要碳排放单元过程进行界定，并在此基础上构建了建筑全生命周期的碳排放计算模型。

其次，本研究对 2005 年国家住宅工程建设量构成进行分析，选取 2005 年全国住宅工程建设量占比最多的城市住宅类型——高层钢筋混凝土结构的住宅为减碳对标建筑类型，并以西安（寒冷 B 区）地区一栋高层钢筋混凝土结构的住宅楼为例进行全生命周期碳排放计算，得出该住宅的全生命周期及各阶段的碳排放量。

再次，对案例住宅全生命周期各阶段的碳排放构成特点进行分析，得出全生命周期各阶段碳排放的主要影响因素。其中在建筑全生命周期过程中，使用维护阶段的碳排放占比约为 87.88%，其次为物化阶段（考虑了建材的回收率）碳排放占比约为 11.13%，最后为拆除清理阶段约为 0.98%；在物化阶段，建材生产阶段的碳排放占比约为 95.20%；在使用维护阶段，在使用阶段因采暖耗能产生的碳排放占比最大，为 59.10%，其次为照明的碳排放，为 24%，空调制冷引起的碳排放为 12%；在拆除清理阶段，拆解机具运营产生的碳排放约占该阶段的 3.75%，废旧建材回收利用带来的碳减量约占该阶段碳排放的 80.22%，废旧建材运输引起的碳排放量约占 5.08%，废旧建材的回收率是影响该阶段碳排放的主要因素。

最后，根据对标建筑的碳排放构成分析，从全生命周期各个阶段有针对性的提出寒冷地区城市居住建筑的减碳策略，并以案例建筑为例，对减碳策略的减排贡献率进行具体测算，经测算得出在寒冷地区，以西安市为例，减少城市住宅全生命周期碳排放量的重点有效策略有 1) 提高采暖能源的使用效率；2) 延长建筑的使用寿命；3) 使用低碳能源，降低电力碳排放因子；4) 提高围护结构的热工性能；5) 利用可再生能源；6) 减少建筑的体形系数；7) 选用回收率高的建材；8) 使用高性能建材；9) 使用节能灯具；10) 以建筑拆解的方式来代替拆毁；

关键词：碳排放、全生命周期、减碳策略、碳排构成、城市住宅

*本论文得到“国家十三五科技支撑计划项目——目标和效果导向的绿色建筑设计新方法及工具”下的子课题“建筑绿色性能模拟分析技术流程和策略”（子课题编号 2016YFC0700200-01）的资助。

Study on Carbon Emissions Calculation and Carbon education Strategy of Urban Residential Life Cycle in Cold Areas

Specialty: Architecture

Name: Li JinLu

Instructor: Prof. Li Yue Yan

Abstract

In recent years, global environmental degradation due to the sharp increase in carbon emissions has become the world's top environmental issue. According to UNEP, the construction industry consumes about 30-40% of the world's energy and emits almost 30% of the world's greenhouse gases, posing a huge environmental challenge.

China's national contribution document on climate change, "Strengthening Climate Change Actions - China's National Independence Contribution" determines that carbon dioxide emissions peak in around 2030 and strives to reach peak as early as possible. The carbon dioxide emissions per unit of GDP are 60%-65 lower than in 2005. How to implement China's 60%~65% emission reduction commitments in the Paris Climate Change Agreement, and the construction industry accounts for more than 7% of GDP. Urban housing, as the largest construction type, has a huge impact on energy conservation and emission reduction in the construction sector. Therefore, the carbon emissions of urban residential life cycle around 2005 are measured, and the carbon emission characteristics of each stage of the life cycle are studied to establish a reference sample of carbon emissions of typical urban residential types in 2005, which is the current construction industry. Energy saving and carbon reduction provide benchmarking.

Firstly, this study proposes to study the carbon emissions of buildings from the perspective of life cycle. On the basis of summarizing the relevant research on the whole life cycle stages of buildings at home and abroad, the whole life cycle of buildings is divided into planning and design stage, materialization stage, use and maintenance stage. The four stages of demolition and clean-up are based on a

process-based life cycle inventory analysis method combined with a carbon emission factor method for building carbon emissions calculations. At the same time, the main carbon emission unit process of each stage of the whole life cycle of the building is defined, and on this basis, the carbon emission calculation model of the whole life cycle of the building is constructed.

Secondly, this study analyzes the composition of the national residential construction in 2005, and selects the urban residential type with the largest proportion of residential construction in 2005. The urban residential building with high-rise reinforced concrete structure is the type of carbon reduction benchmark building, and A high-rise reinforced concrete residential building in Xi'an (C-B area) takes the life cycle carbon emission calculation as an example, and derives the full life cycle and carbon emissions of the house.

Thirdly, the characteristics of carbon emissions in each stage of the life cycle of the case are analyzed, and the main influencing factors of carbon emissions in all stages of the life cycle are obtained. In the whole life cycle of the building, the carbon emissions in the maintenance phase accounted for about 87.88%, followed by the materialization phase (taking into account the recovery rate of building materials), the carbon emissions accounted for about 11.13%, and finally the demolition and cleanup phase was about 0.98%; in the materialization stage, the carbon emissions in the building materials production phase accounted for about 95.20%; in the use and maintenance phase, the carbon emissions in the use phase due to heating energy consumption accounted for the largest proportion, 59.10%, followed by the carbon emissions of the lighting 24%, the carbon emission caused by air conditioning refrigeration is 12%; in the demolition and cleanup stage, the carbon emissions generated by the dismantling equipment operation account for about 3.75% of this stage, and the carbon reduction caused by the recycling of waste building materials accounts for this stage. 80.22% of carbon emissions, carbon emissions caused by transportation of waste building materials accounted for about 5.08%, and the recovery rate of waste building materials is the main factor affecting carbon emissions at this stage.

Finally, according to the analysis of the carbon emission of the benchmark building, the carbon reduction strategy of urban residential buildings in cold regions is proposed from all stages of the whole life cycle, and the case building is taken as an example to contribute to the emission reduction contribution of the carbon reduction strategy.

According to the specific calculations, it is estimated that in the cold regions, taking Xi'an as an example, the key effective strategies for reducing the carbon emissions of urban residential life cycles are: 1) improving the efficiency of heating energy use; 2) extending the service life of buildings; Use low-carbon energy to reduce electricity carbon emission factors; 4) Improve thermal performance of enclosures; 5) Use renewable energy; 6) Reduce building shape factor; 7) Use high recovery materials; 8) Use high Performance building materials; 9) use of energy-saving lamps; 10) instead of demolishing in the form of building dismantling;

Keywords: carbon emissions, full life cycle, carbon reduction strategy, carbon emissions, urban housing

* This paper is given the sub-project "Building Green Performance Simulation Analysis Technology Process and Strategy" under the National 13th Five-Year Science and Technology Support Program Project - Target and Effect-Oriented New Method and Tool for Green Building Design (Sub-project No. 2016YFC0700200-01) funding.

1 绪论.....	13
1.1 研究背景与课题来源.....	13
1.1.1 研究背景.....	13
1.1.2 课题来源及性质.....	16
1.2 研究意义.....	17
1.3 国内外研究现状.....	17
1.3.1 国内住宅建筑碳足迹研究与应用.....	17
1.3.2 国外住宅建筑碳足迹研究与应用.....	19
1.4 当前研究存在的问题.....	20
1.5 研究目的.....	21
1.6 研究内容.....	21
1.7 研究方法.....	22
1.8 研究技术路线.....	23
2 基本理论研究及建筑碳排放.....	25
2.1 生命周期评价（LCA）.....	25
2.1.1 生命周期评价（LCA）的定义.....	25
2.1.2 生命周期评价（LCA）的发展.....	25
2.1.3 生命周期评价（LCA）在国内外的应用.....	26
2.1.4 生命周期评价（LCA）的方法.....	26
2.1.5 生命周期评价（LCA）的优缺点.....	29
2.2 建筑生命周期评价（LCA）.....	31
2.2.1 建筑生命周期评价（LCA）的意义与内涵.....	31
2.2.2 从建筑的全生命周期角度进行建筑碳排放研究的必要性.....	31
2.2.3 建筑 LCA 软件.....	32
2.3 建筑全生命周期阶段划分.....	34
2.3.1 国内外建筑全生命周期阶段划分相关研究综述.....	34
2.3.2 基于国内外研究现状提出本研究建筑全生命周期的阶段划分.....	40
2.3.3 建筑全生命周期各阶段概述.....	42
2.4 建筑碳排放.....	44
2.4.1 基本概念.....	44

2.4.2	国内外建筑碳排放计算标准.....	44
2.4.3	建筑碳排放计算的方法研究综述.....	46
2.5	碳排放因子.....	52
2.5.1	碳排放因子概念.....	52
2.5.2	碳排放因子的获取.....	52
2.5.3	典型的国内建材数据库介绍.....	53
2.5.4	本研究碳排放因子选取.....	55
2.6	本章小结.....	56
3	建筑生命周期碳排放核算体系框架与计算方法.....	57
3.1	核算目的.....	57
3.2	核算范围.....	57
3.2.1	碳排放核算边界.....	57
3.2.2	功能单位.....	58
3.3	建筑生命周期碳排放计算方法.....	58
3.3.1	清单分析的方法.....	58
3.4	各阶段碳排放来源的分析.....	59
3.5	全生命周期各阶段清单分析计算公式.....	60
3.5.1	公式来源.....	60
3.5.2	建筑全生命周期碳排放总量计算模型.....	61
3.5.3	规划设计阶段的碳排放计算.....	61
3.5.4	物化阶段碳排放计算.....	61
3.5.5	使用维护阶段碳排放计算公式:	65
3.5.6	拆除清理阶段碳排放计算模型.....	66
3.6	本章小结.....	68
4	2005年城市住宅全生命周期二氧化碳排放案例研究.....	69
4.1	2005年国家住宅工程建设量构成分析.....	69
4.1.1	2005年国家新开工房屋面积构成分析.....	69
4.1.2	2005年城镇住宅和农村住宅比例分析.....	70
4.1.3	2005年城镇住宅中高层比例分析.....	70
4.1.4	2005年城镇住宅不同建筑结构比例分析.....	71
4.2	减碳对标建筑的选取.....	72

4.3 案例建筑资料来源.....	72
4.4 对标住宅建筑工程简介.....	73
4.5 案例建筑物化阶段碳排放量计算.....	74
4.5.1 建材生产阶段的碳排放量计算.....	74
4.5.2 建材运输阶段碳排放量计算.....	80
4.5.3 施工阶段碳排放量计算.....	81
4.5.4 施工阶段临时设施碳排放.....	82
4.5.5 物化阶段碳排放总量计算.....	84
4.6 案例使用维护阶段碳排放量计算.....	85
4.6.1 建筑使用阶段碳排放量计算.....	85
4.6.2 案例建筑维护阶段碳排放量计算.....	91
4.6.3 案例建筑使用维护阶段碳排放总量计算.....	93
4.7 案例拆除清理阶段碳排放量计算.....	93
4.7.1 拆解工具运行的碳排放量.....	93
4.7.2 废旧建材运输碳排放量.....	96
4.7.3 废旧建材回收利用阶段碳排放减量.....	96
4.7.4 拆解阶段碳排放总量.....	98
4.8 案例建筑当前生命周期阶段的碳排放量.....	99
4.9 建筑全生命周期碳排放总量计算.....	99
4.10 与其他相关研究的对比及分析.....	100
4.10.1 不同研究住宅全生命周期段碳排放构成对比及分析.....	100
4.10.2 不同研究物化阶段碳排放量对比及分析.....	104
4.10.3 不同研究使用维护阶段碳排放量对比及分析.....	107
4.10.3 不同研究拆除清理阶段碳排放量对比及分析.....	110
4.11 本章小结.....	113
5 案例住宅全生命周期碳排放构成分析.....	115
5.1 建筑全生命周期各阶段比例分析.....	115
5.2 物化阶段碳排放比例分析.....	116
5.2.1 物化阶段碳排放构成分析.....	116
5.2.2 建材生产阶段建材料用量及建材碳排放量分析.....	118
5.2.4 建材运输阶段碳构成分析.....	124

5.2.5	施工阶段碳排放构成分析.....	124
5.2.6	施工阶段临时设施碳排放构成分析.....	127
5.3	案例建筑使用维护阶段碳排放量计算及碳排放构成分析.....	127
5.3.1	使用维护阶段碳排放总体水平分析.....	127
5.3.2	使用阶段碳排放构成分析.....	128
5.4	拆解回收阶段碳排放构成分析.....	129
5.4.1	拆解回收阶段碳排放量构成分析.....	129
5.4.2	建筑拆解碳排放量构成分析.....	130
5.4.3	废旧建材回收利用排放减量构成分析.....	131
5.5	住宅建筑全生命周期各阶段碳排放主要影响因素分析.....	133
5.5.1	建筑物化阶段碳排放主要影响因素.....	133
5.5.2	建筑使用维护阶段碳排放主要影响因素.....	134
5.5.3	拆除清理阶段碳排放主要影响因素.....	134
5.6	本章小结.....	135
6	住宅建筑全生命周期减碳策略研究——以西安市某高层住宅为例.....	137
6.1	规划设计阶段减排策略.....	137
6.1.1	改善建筑节能设计.....	137
6.1.2	优化设计方案.....	140
6.2	建筑物化阶段减排策略.....	141
6.2.1	建材生产阶段减排策略.....	142
6.2.2	建材运输阶段减排策略.....	145
6.2.3	施工阶段减排策略.....	146
6.3	使用维护阶段减排策略.....	147
6.3.1	使用阶段.....	148
6.4	拆除清理阶段减排策略.....	151
6.4.1	拆除阶段的减排策略.....	151
6.4.2	减少废旧建材运输所产生的碳排放.....	153
6.4.3	提高废旧建材回收利用率.....	153
6.4.4	延长建筑的使用年限.....	154
6.5	寒冷地区城市居住建筑全生命周期减碳策略总结.....	156
6.5.1	寒冷地区城市居住建筑全生命周期各阶段减碳策略总结.....	156

6.5.2 不同减碳策略减排率分析.....	159
6.5.3 住宅建筑现有常见的减碳策略.....	159
6.5.4 在常见减排策略基础上优化提升的减碳策略.....	160
6.5.5 寒冷地区城市居住建筑减碳策略总结.....	161
7 总结与展望.....	163
7.1 研究成果.....	163
7.2 研究工作展望.....	165
附录.....	167
附录一.....	167
附录二.....	169
致 谢.....	184
图片目录.....	185
表目录.....	188
参考文献.....	191
在学期间发表研究成果.....	199

1 绪论

1.1 研究背景与课题来源

1.1.1 研究背景

1. 气候变化与二氧化碳排放

工业革命以来，由于人类活动而引起的温室气体过量排放造成的全球变暖与世界气候的剧烈变化，已经成为人类面临的巨大威胁之一。其中化石燃料燃烧所产生的 CO₂ 是温室气体中所占比例最大的，约占整个温室气体排放的 82.9%。

目前，我国已经成为世界上温室气体排放最多的国家^[2-5]。2005 年我国温室气体排放总量约为 7.467 Gt CO_{2e}，其中二氧化碳排放量为 5.976 Gt（能源活动排放 5.404 Gt，工业生产过程排放 569 Mt，废弃物处理 3 Mt）^[6]。从 1994 年到 2005 年，我国的温室气体增长了 89%，其中二氧化碳排放更是增长 109%；据预测，到 2020 年我国能源活动所产生的二氧化碳将超过 10 Gt^[6]。

2. 节能减排的时代背景

2015 年 12 月 12 日各国首脑在巴黎的全球气候变化大会通过并于 2016 年 4 月 22 日签署了《巴黎协定》。国家主席习近平承诺 2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%—65%，非化石能源占一次能源消费比重达到 20%左右，森林蓄积量比 2005 年增加 45 亿立方米左右^[7]。面对这一承诺，占国内生产总值逾 7% 的建筑业如何实现我国在《巴黎气候变化协定》60%—65% 的减排承诺，必须有切实的应对措施。对建筑全生命周期的碳排放量进行测算，提出降低建筑碳排放的相关策略，对于实现建筑行业减排承诺意义重大。

3. 我国建筑行业目前的发展与减排潜力

建筑与工业、交通并列成为温室气体排放的三大重点领域^[8-9]。根据联合国环境署计算，建筑行业消耗了全球大约 30-40% 的能源，并排放了几乎占全球 30% 的温室气体，如果不提高建筑能效，降低建筑用能和碳排放，到 2050 年建筑行业温室气体排放将占总排放量的 50% 以上^[10]。

现阶段，我国建筑业正处在高速发展的时期，根据《中国统计年鉴》2005—2016 年数据显示，我国建筑施工面积、竣工面积的增速虽然放缓，但面积却逐年

增加（见图 1.1）。根据《中国建筑能耗研究报告（2017 年）》，2015 年全国建筑总面积达到 613 亿 m²，其中城镇居住建筑面积 248 亿 m²[11]。

建筑业的发展伴随着大量的能源和资源的消耗。根据《中国建筑能耗研究报告（2017 年）》，2015 年中国建筑能源消费总量为 8.57 亿 t 标准煤，占全国能源消费总量的 20%，其中城镇居住建筑能耗 3.2 亿 t 标准煤。建筑行业控制碳排放的未来形势十分严峻。

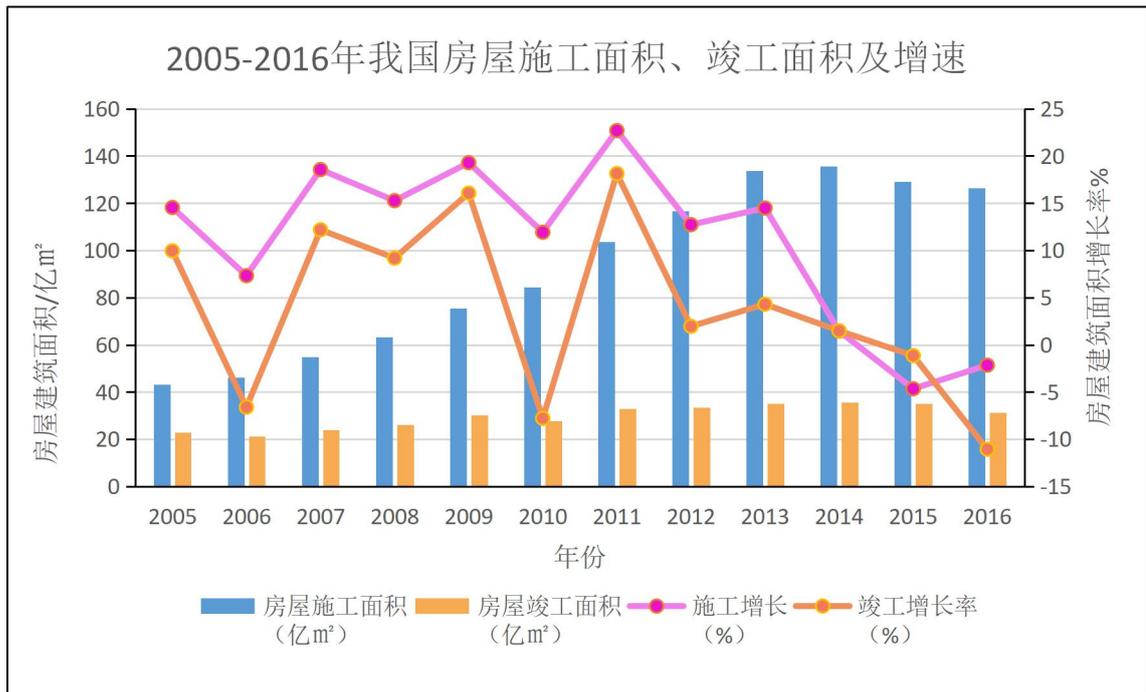


图 1.1 2005-2016 年我国房屋施工、竣工面积及增速

图片来源：作者自绘

但是，建筑行业的节能潜力巨大，根据中科院技术科学部咨询报告的研究，建筑只要节能设计合理、运营管理科学，可以取得 30%~70%的节能效果[12]。同时，建筑领域也是碳减排成本相对较低的领域，联合国环境规划署的相关报告表明，无论未来碳减排成本如何变化，建筑领域始终是成本效益最大的[13]。

4. 我国城市住宅的发展与碳排放现状

目前我国正处于快速城镇化阶段，城镇人口的持续增长对住宅的刚性需求强烈，在未来较长的一段时间内，每年都要新增大量住宅[14]。

《中国统计年鉴》2005—2016 年数据显示，我国住宅施工、竣工面积增速虽然放缓，但面积却逐年增加（见图 1.2），其中城镇住宅每年施工面积占住宅施工面积的 50%以上（见图 1.3）。

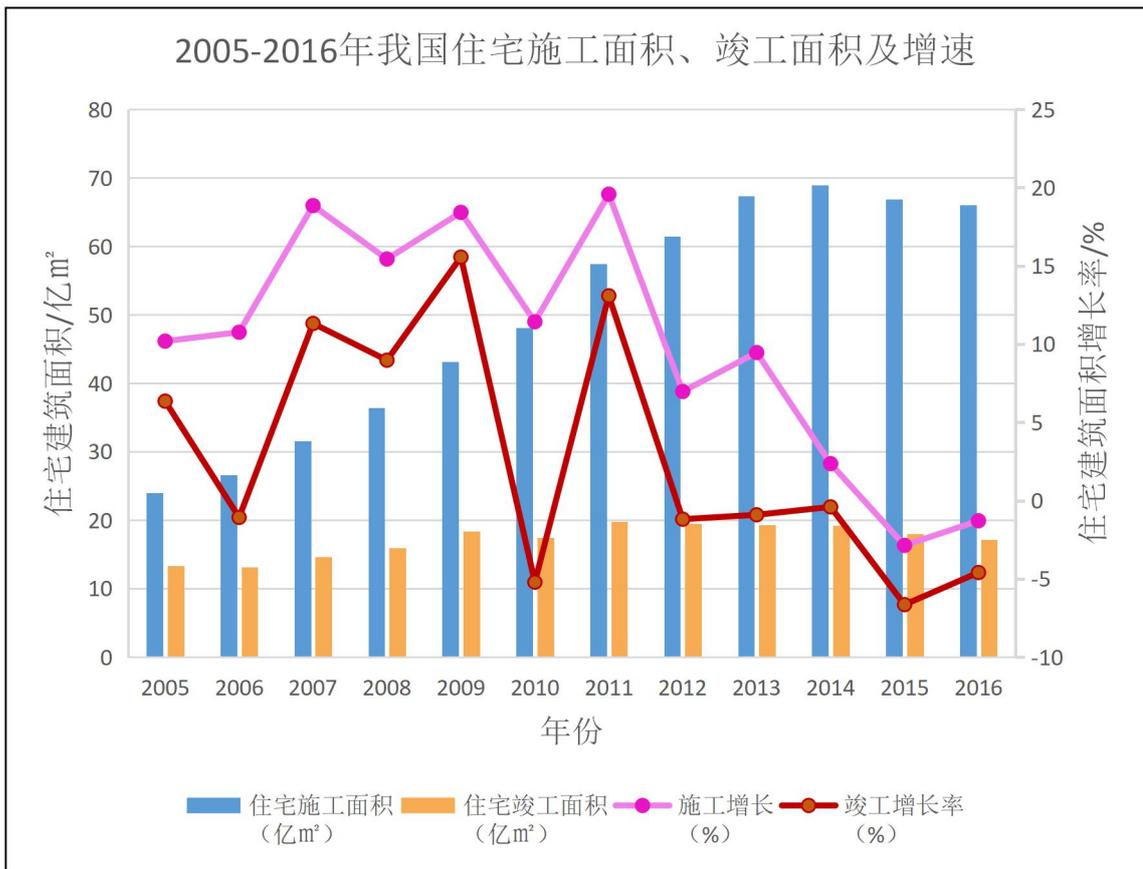


图 1.2 2005-2016 年我国住宅施工、竣工面积及增速

资料来源：作者自绘

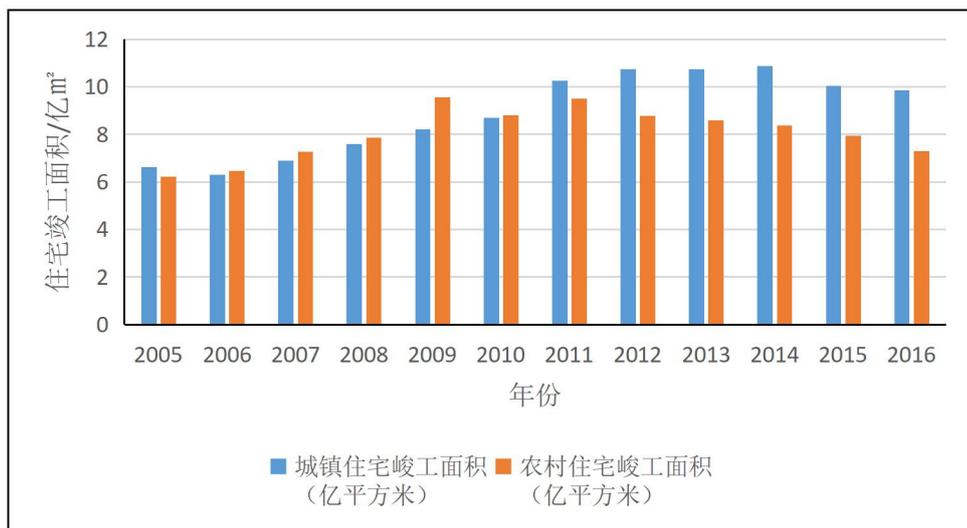


图 1.3 2005-2016 年全国城镇、农村住宅每年竣工面积

图片来源：作者自绘

根据《中国建筑能耗研究报告（2017年）》，2015年城镇居住建筑面积248亿m²，占全国建筑总面积的40.46%。2015年城镇居住建筑能耗3.2亿t标准煤，

占建筑能耗的 37.30%；其中城镇居住建筑能耗为 12.9 kgce/m²。（具体见图 1.4、图 1.5、图 1.6）

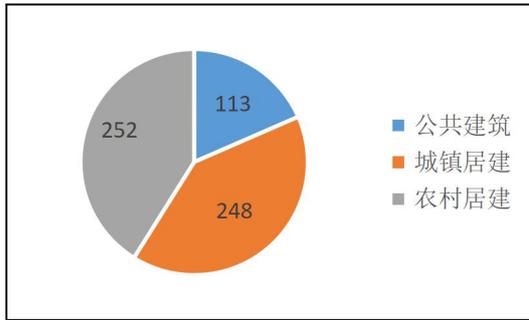


图 1.4 2015 年建筑面积 (亿 m²)

图片来源：作者自绘

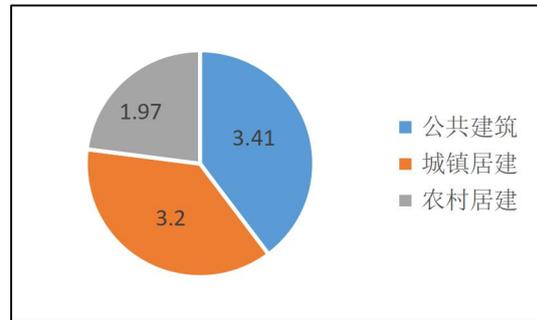


图 1.5 2015 年建筑能耗 (亿 tce)

图片来源：作者自绘

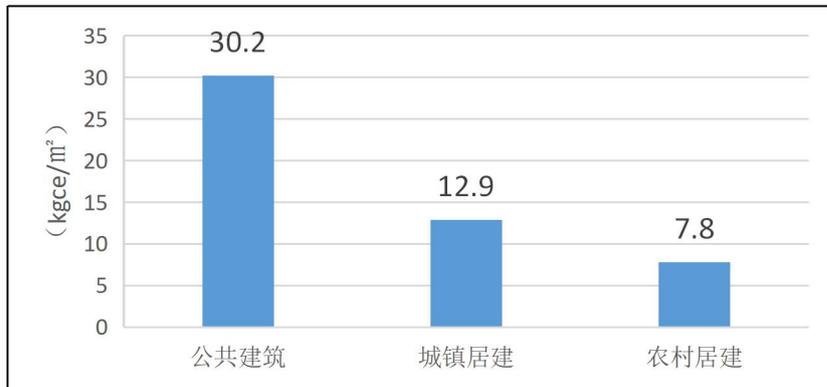


图 1.6 2015 建筑能耗强度 (kgce/m²)

图片来源：作者自绘

研究表明，住宅建筑碳排放在整个社会碳排放中占有很大的比重。据联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 计算，各国的住宅建筑能源消耗量占总能耗的比例基本维持在 1/3 左右，伴随这些能耗的碳排放量同样占有较大的份额。在中国，住宅建筑建设阶段的碳排放比例为 7%，而与建筑相关的热电联产的碳排放比例为 42%^[15]。因此，研究住宅建筑的碳排放计算对于整个社会的节能减排具有重要的意义。

1.1.2 课题来源及性质

本课题来源于李岳岩教授负责的“国家十三五科技支撑计划项目——目标和效果导向的绿色建筑设计新方法及工具”下的子课题“建筑绿色性能模拟分析技术流程和策略”（子课题编号 2016YFC0700200-01）属应用技术研究。

1.2 研究意义

对城市住宅全生命周期碳排放进行研究，其研究意义如下：

1. 通过构建建筑碳排放计算方法，可以引导建筑物在设计阶段考虑其全生命周期节能节碳，增强建筑及建材企业对碳排放核算、报送、核查（MRV）的意识。
2. 有助于我国的可持续发展，为低碳经济做基础研究。
3. 通过对不同建筑设计方案的全生命周期碳排放量进行计算比较，可优选建筑设计和低碳建材，为建筑物低碳建造和使用提供技术依据。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 国内住宅建筑碳足迹研究与应用

目前，国内学者大多基于生命周期评价（LCA）理论对建筑生命周期部分或全部阶段的碳排放进行研究。

清华大学的刘念雄^[16]对城市住区全生命周期碳足迹进行了研究，并对绿地的碳汇情况进行了分析，把建筑全生命周期分成了建材准备、建造施工、建筑使用和维护、建筑拆卸共4个阶段，建立了城市住区全生命周期CO₂净排放量计算模型和住宅建筑全生命周期CO₂排放量计算模型，并以北京为例选择典型多层住区单元地块进行了初步核算。其中计算模型具体如下：

$$P_n = P - S$$

其中，P_n为城市住区全生命周期CO₂净排放量、P、S分别为住宅建筑排放量和绿地吸收量。

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

其中，P为住宅建筑的全生命周期碳排放量，P₁、P₂、P₃、P₄分别为上述4个阶段的CO₂排放量，而各阶段的碳排放量由各阶段活动程度的信息与量化单位活动程度排放系数或排放因子相乘得到。

北京大学的于萍、陈效速等^[17]对住宅建筑的碳足迹模型进行了研究，提出在消耗型生命周期中加入了循环的概念，提出建筑材料回收的概念；在计算住宅建筑碳排放时提出重视使用阶段，忽略施工阶段的理念。

勒俊淑^[18]运用层次分析法分析了影响居住建筑能耗的几大因素，结合建立的节能建筑模型提出了建筑人均碳排放的概念。

朱熾等^[19]对 3 栋不同规模混凝土住宅建筑进行了全生命周期量化剖析, 结果表明:住宅建筑环境排放质量大小依次为 CO₂、SO₂、NO_x、CO 和 PM10。建材开采生产与建筑施工两阶段能耗与各种环境排放在全生命周期能耗与排放中的比例最高达到 80%, 节能减排潜力显著。

在单体建筑的碳排放计算上, 张智慧等^[20]调研了多栋北京市住宅环境影响数据, 并量化比较了它们的环境影响, 结果表明高层建筑单位建筑面积的环境影响大于多层建筑。

李海峰^[21]对上海地区的一栋多层住宅建筑碳排放进行了核算, 以每年每平方米温室气体排放量为计算单位, 并将生命周期划分为建材生产、建材运输、建筑施工、建筑运行和建筑拆除 5 个阶段, 建立了建筑全生命周期碳排放计算公式:

$$E = E_m + E_i + E_c + E_n + E_d$$

其中 E_m、E_i、E_c、E_n、E_d 分别为建材生产、建材运输、建筑施工、建筑运行和建筑拆除的 CO₂ 排放量。计算结果表明, 该住宅单位建筑面积年 CO₂ 排放量为 22.8 kg CO₂/(m²·y), 相对其他城市的结果较低, 并分析得到是由于上海市清洁电力比重较大导致。

郭而鄂等^[22]以天津生态城 75 栋绿色居住建筑为样本, 计算并比较了不同星级绿色居住建筑全生命周期碳排放水平。结果表明, 单位建筑面积年碳排放量为 43-64 kg CO₂/m²·a, 且绿色住宅的碳排放水平与绿色建筑星级无明显关系。

在不同结构住宅建筑碳排放研究方面, 尚春静等^[23]选取木结构、轻钢结构和钢筋混凝土结构这 3 种不同结构形式的建筑, 对其在生命周期内的碳排放进行定量的测算与对比分析, 结果显示, 在符合相同使用功能的基础上, 木结构建筑相比其它两种结构的建筑具有较低的生命周期碳排放。顾道金等^[24]分析了北京地区典型住宅生命周期能耗和环境负荷, 结果表明, 不同结构体系住宅的建材总焓能大小依次为: 框剪≈剪力墙>砖混≈框架>砌体>轻钢, 住宅的建造环境负荷(主要包括建材生产和运输)相当于其运行 12 年的环境负荷;

在不同气候分区住宅建筑碳排放研究方面, 王松庆^[25]以哈尔滨地区的四幢居住建筑为例, 对我国严寒地区的居住建筑能耗与碳排放情况进行了定量的计算和分析, 研究得出建筑使用阶段的能耗与碳排放都达到了总量 80%以上, 建材生产阶段达到 10%以上, 并运用 C++语言, 开发出计算住宅建筑能耗与碳排放的软件。该研究中建筑物生命周期能耗的计算模型如下:

$$Q_T = Q_m + Q_e + Q_o + Q_d + Q_p$$

其中, Q_T 为建筑物整个生命周期的能耗; Q_m 为建筑物建筑材料生产阶段的能耗; Q_e 为建筑物施工阶段的能耗; Q_o 为建筑物使用阶段的能耗; Q_d 为建筑物拆除阶段的能耗; Q_p 为建筑废料回收和废物处理阶段的能耗。

贺勇^[26]并以厦门地区某学生公寓为例,对夏热冬暖地区多层居住建筑全生命周期碳排放及减排措施进行了研究,研究得出居住使用阶段的碳排放量最大,其比值占 65.49%;其次是建材生产阶段,其碳排放量占总数的 30.44%;并在碳金融视角下定量探讨了夏热冬暖地区居住建筑的减排潜力和减排措施。

刘君怡^[27]对夏热冬冷地区低碳住宅的使用和建造阶段分别运用计算机模拟和数学模型相结合的方法对住宅减排效果进行量化分析。

林波荣等^[28]从数据的角度出发,以我国寒冷地区某住宅建筑为例,分别讨论了数据时效性、代表性和技术差异对建筑生命周期能耗(LCE)和碳排放(LCCO₂)的影响,并将建筑生命周期分为建材生产、建造施工、运行维护和拆除回收 4 个主要阶段, LCE 和 LCCO₂ 计算公式如下:

$$LCE = E_m + E_{or} + E_d$$

$$LCCO_2 = C_m + C_{or} + C_d$$

其中, E_m 为建材生产阶段能耗; E_{or} 为运行维护阶段能耗; E_d 为拆除回收阶段能耗; C_m 为建材生产阶段 CO₂排放量; C_{or} 为运行维护阶段 CO₂排放量; C_d 为拆除回收阶段 CO₂排放量。

研究发现使用不同年份的电力能耗因子对 LCE 结果造成的差异可达 6.36%,使用当地电力能耗及排放因子和使用全国均值的 LCE 和 LCCO₂ 结果相差 12.52% 和 10.42%。此外考虑墙体保温性能随时间变化时的 LCE 结果比忽略这一影响因素时大 90%, LCCO₂ 大 2.28%。外窗传热系数从 2.3 W/(m².K)减小到 1.7 W/(m².K)时, LCE 和 LCCO₂ 分别减小 4.19%和 3.23%;相同传热系数时不同的外窗配置对 LCE 和 LCCO₂ 的影响仅为 1%左右。

1.3.2 国外住宅建筑碳足迹研究与应用

G.Verbeeck 等^[29]对比利时五种不同结构形式的住宅建筑进行研究,分析计算了其全生命周期的能耗和碳排放,建立了全生命周期碳排放计算清单,在此基础上构建全生命周期碳排放计算模型; Leif Gustavsson^[30]等从全生命周期的角度考虑,

利用排放系数法对各个阶段的 CO₂ 排放量进行计算，并以瑞典一栋木质结构的住宅建筑为例，采用自下而上的方法计算其能源消耗和碳排放量，文中还从木质材料的角度，考虑了木质结构建筑碳足迹的平衡；在不同结构建筑碳排放研究方面，Jaehun Sim 和 Jehean Sim^[31]对本国传统建筑空气排放进行评估发现木框架建筑相比混凝土和钢框架结构体现出较低的能源消耗，产生更少碳排放量。同时，屋顶瓦对全球变暖的潜在影响最大，水泥对臭氧消耗潜力最大。此外，Suzuki^[32]等对日本的住宅建筑展开研究，采用产业平衡表的方法对住宅建筑的全生命周期碳排放以及能源消耗进行计算，提出了针对建筑建造施工、使用维护、拆除和清理全过程的计算 CO₂ 排放的投入产出计算方法。

1.4 当前研究存在的问题

针对目前的国内外研究，发现在住宅全生命周期阶段碳排放研究方面存在以下主要问题：

1. 各研究的住宅建筑全生命周期的碳排放结果缺乏可比性

不同研究对于建筑全生命周期阶段的划定不同，特别是每个阶段内所包含的子阶段差异较大，从而导致截断误差增加，不同研究的建筑生命周期碳排放很难比较。

同时各文献的建筑全生命周期碳排放计算没考虑碳排放数据库由于时效性、代表性和地域性所带来的影响，从而导致不同年份、地区的建筑全生命周期碳排放无法准确的比较。

2. 建筑碳排放计算系统边界标准不统一

主要表现在系统边界不完整——大多数研究中所谓的住宅的“生命周期”都是“简化的生命周期”，即省略了建筑生命周期中一个部分或几个部分，特别是原料开采、建筑运营中的维护、修缮以及废弃物处理等阶段通常被忽略，从而降低了居住建筑碳排放计算的科学性与可靠性。

3. 建筑碳排放计算方法难以实际应用

建筑碳排放计算主要目的之一是在设计阶段能够实时的预测建筑生命周期内碳足迹，并以此进行优化设计。但目前建筑碳排放计算方法过于繁琐与复杂，不能适应建筑设计流程和习惯，实际应用上存在相当大的障碍与不可执行性的缺点。

4. 碳排放因子数据匮乏

目前,我国缺乏国家公布的、权威的本地建材碳排放因子数据库,导致在进行建筑全生命周期碳排放计算时缺乏充足的数据支持。

5. 对拆除清理阶段的碳排放研究不足

目前已有的研究对于该阶段的碳排放计算很少通过实际统计测算得出结论,多是根据台湾学者张又升的经验公式法计算;对大陆地区具体建筑的拆除清理阶段的碳排放构成研究尚少。

1.5 研究目的

本研究基于生命周期评价(LCA)理论对城市住宅全生命周期碳排放进行研究,建立建筑全生命周期碳排放核算体系框架,通过对对标建筑全生命周期碳排放计算,分析城市住宅碳排放构成特点,有针对性的提出建筑减排的策略。最终,将本研究的成果应用于建筑设计,使建筑师在建筑设计阶段能对建筑生命周期的二氧化碳排放预测,并形成易于建筑师把控的低碳建筑设计导则。

1.6 研究内容

本课题的主要研究内容如下:

第一部分,绪论。介绍研究背景及选题来源、研究意义、研究目的、同时对国内外住宅碳排放的研究现状进行总结,找出当前现有研究存在的问题,进而提出本课题的研究内容、方法和技术路线等。

第二部分,介绍了建筑碳排放相关理论。主要包括生命周期评价理论(LCA)、建筑生命周期评价碳排放理论、建筑生命周期阶段划分等,总结了国内外建筑碳排放的计算方法,并选择基于过程的生命周期清单分析法与碳排放系数法为本研究建筑碳排放计算方法。

第三部分,构建建筑生命周期碳排放核算体系与计算公式。基于LCA理论,构建本研究建筑全生命周期碳排放核算体系框架,分析了建筑全生命周期各个阶段的碳排放来源,并在此基础上建立了建筑全生命周期碳排放总量及各个阶段的碳排放计算模型。

第四部分,案例计算。根据第三部分建立的建筑碳排放计算公式,对具体建筑进行碳排放计算。选取2005年左右寒冷地区城市西安的一栋高层钢筋混凝土结构的住宅楼为对标建筑,计算该住宅楼的生命周期及各个阶段的碳排放。

第五部分，对标建筑碳排放构成分析。根据第四部分的计算结果，对全生命周期各个阶段的碳排放构成进行分析，分析各阶段影响建筑碳排放的因子。

第六部分，住宅减碳策略研究。根据对标建筑碳排放构成分析，分别从规划设计阶段、物化阶段、建筑使用维护阶段、拆除清理等阶段提出降低城市住宅碳排放的策略，并以对标建筑为例，通过对减碳策略进行减碳贡献率分析得到适合寒冷地区城市住宅的减碳策略。

第七部分，总结与展望。

1.7 研究方法

本文采用文献研究法、数据分析与演算法、数学模型计算法、案例分析法、总结归纳法进行研究。具体研究方法如下：

1. 文献研究法

通过对生命周期评价理论、建筑碳排放、建筑全生命周期能源消耗等相关文献的阅读，了解国内外研究现状及相关研究成果。

2. 数据分析与演算法

搜集整理案例建筑相关能耗以及碳排放计算的基础数据，如案例建筑的工程清单、设计图纸、案例建筑的概预算书、碳排放因子数据库及能耗清单等，对上述资料数据进行分析和演算，得出对标建筑的建材用量、施工台班数量、能源耗用量及相关建材、能源的碳排放因子等相关数据。

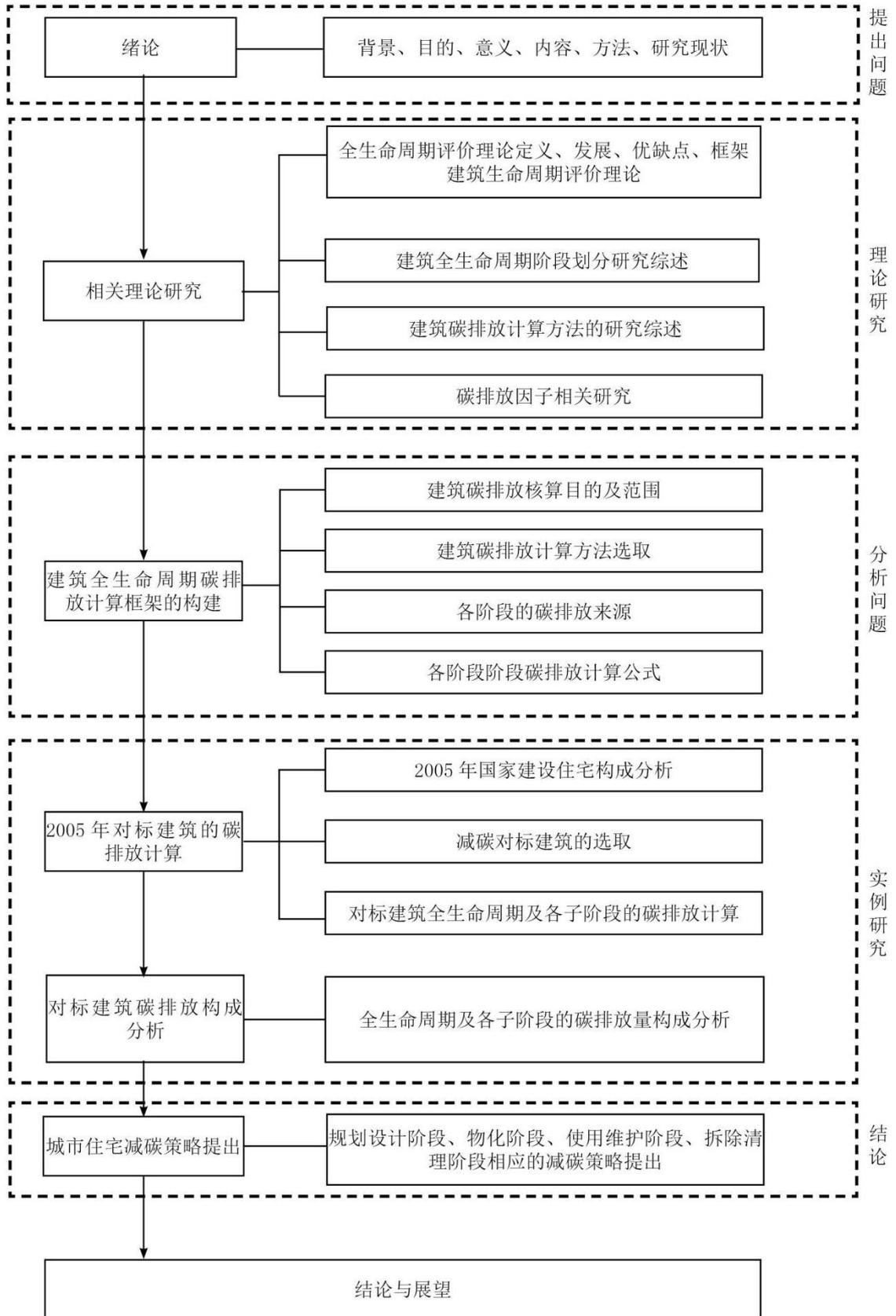
3. 案例分析法

选取一栋 2005 年具有代表性的典型城市住宅类型——高层钢筋混凝土结构的城市住宅为对标案例，计算并分析该案例住宅全生命周期的碳排放量及其构成特点，为节能减排策略的提出提供数据支撑。

4. 总结归纳法

对相关的碳排放计算数据进行分析和总结，在此基础上对对标建筑全生命周期各阶段碳排放的各影响因素进行分析总结，归纳出城市住宅全生命周期碳排放的主要影响因素，从而提出寒冷地区城市住宅全生命周期减碳策略。

1.8 研究技术路线



2 基本理论研究及建筑碳排放

2.1 生命周期评价 (LCA)

生命周期评价是目前国际上分析产品环境问题的主流工具之一，在工业生产企业的产品生产决策中应用超过了 40 年。随着可持续性建筑的发展，LCA 自 1990 年被用于建筑部门后，也成为评估建筑对环境的影响的重要方法。建筑碳足迹评价作为建筑 LCA 的重要组成部分，近年来国内外的相关研究也迅速增加，因此需要对 LCA 与建筑碳足迹的相关研究进行系统的梳理和总结。

2.1.1 生命周期评价 (LCA) 的定义

根据国际标准组织 ISO (ISO-14040 总则) 对 LCA 的定义如下：生命周期评价是在产品的生命过程中（从摇篮到坟墓），从原料的获取、制造、使用与废弃等阶段评估其产生的环境影响。整个架构分为四个阶段：（一）定义目的及范围；（二）生命周期清单分析；（三）生命周期影响评价；（四）生命周期阐释^[33]。

美国环境毒物化学协会 (SETAC) 将 LCA 定义为：生命周期评估是一个衡量产品或人类活动所伴随产生之环境负荷的工具，不仅要知道整个生产过程的能量、原料需求量及环境的排放量，还要将这些能量、原料及排放量所造成的影响予以评估，并提出改善的机会及方法^[33]。

生命周期评价过程完整的涵盖了整个产品的生命周期的各个阶段对环境造成的影响，可以识别并可能避免整个生命周期阶段各阶段潜在的环境负荷转移问题，是一种十分精细的评估方法。

2.1.2 生命周期评价 (LCA) 的发展

生命周期评价的历史可以追溯到二十世纪六十年代。1969 年，美国中西部资源研究所 (Midwest Research Institute) 对饮料容器进行了 LCA 的最初研究^[34]。

1992 年美国环境毒物化学协会 (SETAC) 为进一步推动生命周期评价技术的发展，出台了生命周期评价的基本方法框架，后被列入到 ISO-14000 的生命周期评价的标准草案中^[35]。1992 年，欧洲联合会开始执行“生态标签计划”，并把生命周期的概念作为产品选择的一个标准。

1993年国际标准化组织(ISO)将生命周期评价纳入 ISO-14000 标准中,并于 1997 年颁布 ISO14040 标准,以国际标准形式提出了生命周期分析方法的基本原则与框架^[36]。

我国国家技术监督局从 1999 年起将 1997 版的 ISO-14040s 四项国际标准引进并转化为国家标准,最终形成了 GB/T24040 系列标准^[37]。

如今,生命周期评价作为一种对环境负荷进行量化评价的方法,已广泛的应用于公共政策制定、建筑与施工领域以及企业的嵌入式管理模式之中,成为未来企业在可持续经营与环境保护评价上的重要工具。

2.1.3 生命周期评价(LCA)在国内外的应用

LCA 作为目前国际上分析产品环境问题的主流工具,一直受到国际社会的关注。欧盟委员会于 2013 年出台了“建立统一的绿色产品市场”政策,提出采用基于 LCA 方法的、统一的绿色产品评价方法,即产品环境足迹(PEF)评价方法^[38]。

在建筑生命周期评价方面,近年来采用 LCA 理念的绿色建筑评估体系越来越多(ENVEST、BEES、AIJ-LCA 等),已经成为相当精密详细的环境影响系统评估。其中又以日本相关的建筑 LCA 评估最为成熟,相关评估工具有 10 种以上。

我国关于生命周期评价的研究及应用与发达国家相比起步较晚,但发展非常迅速,近年来 LCA 也受到国内相关政府部门的重视。

2013 年前后国内多个政府部门出台了多项与 LCA 有关的政策文件,如国家工信部 2012 年、2013 年的“能效之星”产品评价实施方案,要求企业提供基于 LCA 的产品生态报告等^[38]。

2016 年 7 月工业和信息化部正式发布的《工业绿色发展规划(2016-2020)》中要求加快建设覆盖工业产品全生命周期的生态影响基础数据库。

在建筑生命周期评价方面,我国建设部于 2011 年 7 月颁布了行业标准《建筑工程可持续性评价标准》(JGJ/T 222-2011),该标准对建筑工程物化阶段、运行维护阶段、拆除处置阶段的环境影响进行定量测算和评价,并对建筑工程可持续性评价的评价对象、内容、步骤等做了相关规定。

2.1.4 生命周期评价(LCA)的方法

ISO-14040s 中将生命周期评价分成相互联系、相互循环的四个步骤:目的和

范围的确定；清单分析（Life Cycle Inventory Analysis, LCI）；生命周期影响评价（Life Cycle Impact Assessment, LCIA）；生命周期解释说明（Life Cycle Interpretation），具体见图 2.1。

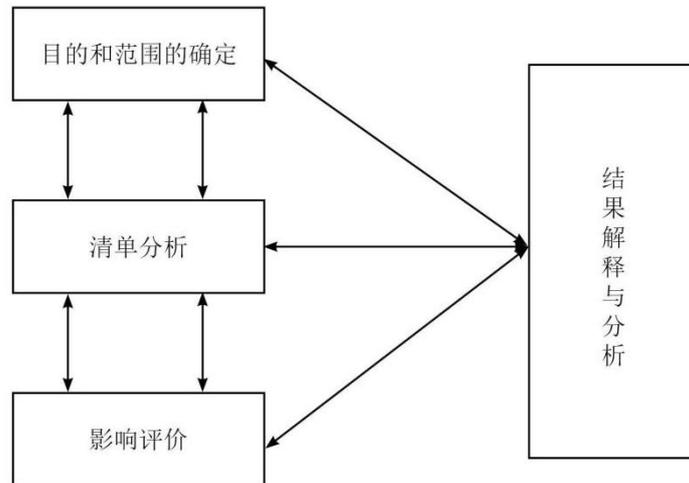


图 2.1 生命周期结构框架示意图

图片来源：作者自绘

1. 目的和范围的确定

该阶段是 LCA 研究的第一步，主要是对 LCA 研究的目的和范围进行界定，其中目的的定义主要说明进行 LCA 的原因和应用意图，而范围确定则主要确定产品系统边界、功能单位、数据输入输出、数据要求及原始数据质量要求等。

2. 生命周期清单分析（Life Cycle Inventory Analysis, LCI）

生命周期清单分析是对所评价对象在其生命周期内的输入和输出进行编码和量化的过程。其中输入包括评价对象整个生命周期阶段资源和能源的使用量；输出除了产品之外还包括整个生命周期阶段对环境的各种污染排放。

清单分析主要任务是进行基础数据的收集与计算，从而得出产品的输入和输出量来作为 LCA 评价的依据。其中生命周期清单分析（LCI）的方法有三种：

1) “基于过程的 LCA”（Process-based LCA, P-LCA）。

“基于过程的 LCA”是 ISO 所推荐的 LCI 方法，主要是根据生命周期评价目的和范围的确定步骤中所确定的研究范围建立产品生命周期模型，采集单元过程中的各项水平活动数据，根据收集的数据进行计算，并基于过程分析从下至上累加汇总得到产品生命周期的清单结果。

这种方法通过对具体的单元过程详细分析，可以找出可以改进或提升的单元

过程，而且不同产品生命周期的清单结果可以进行对比。但是这种方法也存在着如下缺点：评估过程太过繁琐复杂，基础数据的收集成本很高，详细的清单数据的获取需投入大量的人力物力，同时数据的质量、时效性难以获得保证。

2) “投入—产出 LCA” (Economic Input-Output LCA, EIO-LCA)。

基于投入产出的清单分析是指基于某一国家或地区的经济投入产出表，通常以某一国家或地区的经济系统为边界，利用投入—产出矩阵来反映系统内部各产业间的相互影响^[39]。

该方法单纯的以金额来计算能源与排放量，是一种十分简便的环境负荷评价方法。而且投入产出表由各个国家的统计部门定期发布，基础数据的获得较为方便，且来源权威、时效性强。

但是这种方法也存在着如下缺点：(1) 该方法对具体过程不做深入的分析，是以细节的缺失为代价，仅能反映行业的平均水平；(2) 投入产出表仅能反映产品的生产情况，而不包含产品废弃后的处理情况，因此这种方法对产品的环境负荷评估的并不完全。

3) “复合型 LCA” (Hybrid LCA, H-LCA)，其中“复合型 LCA”结合了 P-LCA 和 EIO-LCA 的优势。

表 2.1 分别从方法学、优缺点三个方面对基于过程的 LCA 与投入—产出 LCA 进行了总结对比。

表 2.1 生命周期评价的两种方法对比表

资料来源：作者自绘

类型	基于过程的生命周期清单分析方法	投入产出法
方法学	自下而上	自上而下
优点	1. 可以对不同产品的环境影响进行对比 2. 对具体单元过程进行详细分析 3. 可以发现单元过程中的需要改进提升的地方	1. 以全部经济为系统边界 2. 包含了生产资料和间接成本 3. 时效性强 4. 数据来源于权威结构核算较为简单
缺点	1. 系统边界选择有主观性 2. 为获取详细的清单数据需投入大量的人力物力 3. 数据质量难以得到保证 4. 间接投入被忽略	1. 仅能反应行业平均排放强度，对具体的过程不做深入的分析，以细节缺失为代价。 2. 无法区别能源结构 3. 包含太多间接的影响因素，导致数据严重偏大 4. 仅反映产品的生产情况，不包含产品废弃后的处理情况

3. 生命周期影响评价

影响评价具体就是对清单阶段的数据进行分类、量化和评估，将其转换为具体的影响类型和指标参数，更便于了解产品生命周期的环境影响。ISO 将影响评价分为“三步”模型，分别是分类、特征化和量化。

4. 结果解释

结果解释是指根据规定的目的和范围的要求对清单分析和影响评价的结果进行分析评估，以形成结论和改进建议的阶段。

2.1.5 生命周期评价（LCA）的优缺点

传统的环境评估多半把重点放在产品生产制造阶段产生的环境影响或使用废弃产生的污染，这样的环境负荷评估不够周全，疏于考量生命周期其他阶段的污染条件。而 LCA 改善了以往对产品单一性环节考量的评估概念，以系统性的整体的观念对产品的环境负荷进行评估，扩展了评估范围和边界，涵盖了产品生命周期的各个阶段，避免了传统环境评估中因某一生命周期阶段环境负荷的改善造成的另一阶段环境负荷加重的污染转嫁问题。

由于目前生命周期评估尚属于一门发展中的技术，相关评估方法与资料库仍需要进一步研究与建构，虽然该法在产品环境影响评估方面具有独特的优势，但

在实际应用中仍有以下问题有待改善：

1.评估过程过于繁琐，不易推广

LCA 较为繁琐，所需的资料库非常庞大，不仅要知道整个产品生产过程资源和能源的使用量以及向环境的各种排放量，还要将这些资源、能量以及各种排放量所造成的环境影响予以评估。这会涉及到很多的细节过程与相应的数据库，其中可能会碰到许多数据信息的缺失。

2.评估方法不确认

目前，国际间还没有达成共识的关于生命周期评估的相关标准，同时由于不同研究机构的 LCA 系统边界的设定存在着相当不同的假设条件与主观性，导致使用不同 LCA 的评估方法的评估的结果存在较大的差异而无法相互参考和比较。

3.数据的质量难以保证

LCA 的数据质量评估与控制是比较困难的问题。LCA 评估结果的准确性关键在于其基础数据库的可获得性和正确性。虽然目前已有国家和地区建立了 LCA 数据库可以量化评估 LCA 结果的质量，但由于不同国家和地区的能源结构和生产方式的不同，同时数据具有时效性的特点，导致了不同数据库相差较大。如何选择运用现有资料库，收集准确的数据，是亟待解决的难题。

综上，经总结后的 LCA 的优缺点见表 2.2。

表 2.2 LCA 的优缺点

资料来源：作者自绘

LCA 优点	LCA 的缺点
1.改善了以往对产品单一性环节考量的环境评估的概念， 2.评价的过程涵盖了整个产品的生命周期的各个阶段，完整的考量到每个环节。 3.能够提供评估产品与环境之间的更完整的互动讯息	1.评估过程太过繁琐 2.评估方法不确认 3.数据库资料透明度不足 4.不考虑产品系统中的经济和社会因素

2.2 建筑生命周期评价 (LCA)

2.2.1 建筑生命周期评价 (LCA) 的意义与内涵

事实上, 建筑物本身也可视为一种市场产品, 构成建筑物的各种建材都是高能耗的工业产品, 而建筑物使用寿命远比其它工业产品长, 因此相对的其环境负荷影响较其它产业也更为深远。在建筑中采用生命周期的评估手法, 考虑生命各个环节的耗能结构与环境负荷, 更有利于创造出低环境负荷量的绿色建筑。

1. 建筑的生命周期评价(LCA)

所谓建筑的生命周期评价, 就是从规划设计、建材生产、建筑施工、日常使用、维护修缮、更新到建筑物拆解、废弃物处理等生命周期各阶段进行详细的环境影响评估, 亦即从建筑物的出生到死亡, 进行全面性、系统性的环境负荷评估^[40]。其中建筑的生命周期示意图见图 2.2。

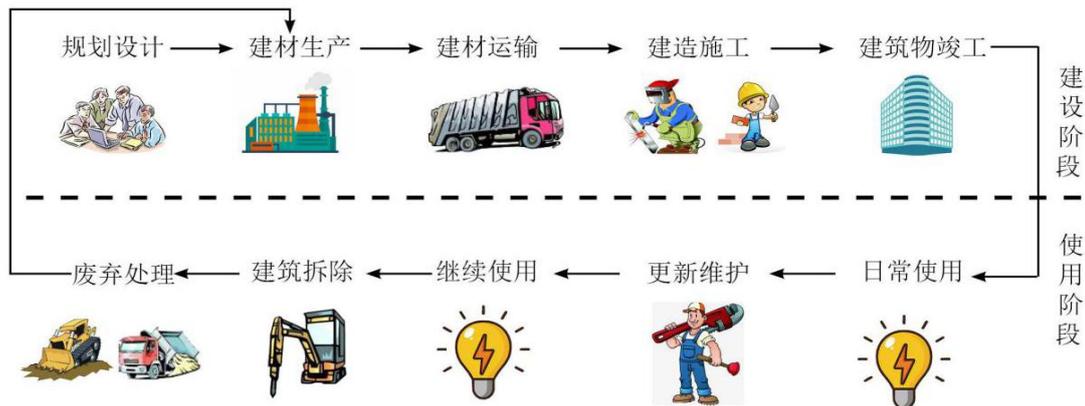


图 2.2 建筑物生命周期示意图

资料来源: 作者自绘

由于这样的评估观念具有宏观的眼光, 完整的涵盖了建筑生命周期各个阶段, 能够全面的反映建筑物生命周期各个阶段对环境的影响。因此本研究采用生命周期评估法来研究建筑物的 CO₂ 排放量。

2.2.2 从建筑的全生命周期角度进行建筑碳排放研究的必要性

建筑在建造、使用及拆除、消亡的全周期中始终对环境产生扰动, 各个阶段都伴随能源及材料的消耗, 引起直接或间接的碳排放, 如果只针对部分生命周期阶段的碳排放计量, 难以全面了解建筑碳排放行为对自然界产生的影响, 也无法对未来碳排放情况进行预测并进行控制。

因此本研究提出从建筑生命周期的角度来研究建筑物的碳排放，具体理由如下：

1. 从建筑生命周期的角度来研究建筑物的碳排放，可以将原来零散、孤立的阶段组合成一个有机的、系统的整体，从而对生命周期各阶段的碳排放单元过程进行界定，使设计人员对建筑碳排放情况有一个更全面的了解，有针对性地提出减排策略。

2. 从全生命周期的角度研究建筑碳排放可以清晰的阐明生命周期不同阶段的碳排放影响因素，并通过对各阶段影响因素的分析和评估，找出有可能减排减能耗的环节，辅助各个阶段工作人员有针对性的改善建筑系统的环境性能。

因此，从建筑的全生命周期出发，全面研究建筑各阶段的能耗和排放，有十分重大的必要性，应得到充分的关注。

2.2.3 建筑 LCA 软件

LCA 评价的过程中通常需要处理大量数据和进行复杂计算，消耗了大量人力物力，降低了 LCA 在实际应用中的可行性。为了在保持 LCA 方法精确性的同时能大幅度提高评估过程的工作效率，最有效的办法就是进行 LCA 软件的开发。LCA 软件能使繁琐的清单数据收集、分析工作以及后继的影响评价阶段得以程序化和简易化。

1. LCA 软件

Trusty 和 Horst^[41]将 LCA 工具分为三个级别：

1) 级别-1：建材类工具；2) 级别-2：建筑整体决策支持工具；3) 级别-3：建筑整体评估体系和框架；其中级别-3 的工具既不使用 LCA（例如 BREEAM、LEED），在其背景中也不使用 LCA（例如 Athena 影响评估工具）。

表 2.3 按上述分类原则统计了现有建筑 LCA 工具。

表 2.3 现有建筑 LCA 工具统计表

资料来源：作者自绘

软件类型	软件名称	主流 使用 国家	特点及应用
建材类工具	BEES	美国	生命周期清单数据库是以混凝土、玻璃等建筑材料为基本分析单元，界面简洁，操作简单，无需用户创建产品的 LCA 过程
	eBalance	中国	有国内外权威数据库的支持，具有数据收集支持功能，可以对量化的数据质量进行评价与控制，可以对不同方案的环境影响进行对比分析，支持本国的节能减排评价。
	WHUE-LCA	中国	具有较强的标准性和规范性；适用于各种类型产品的 LCA 分析，使用范围比较广泛；LCA 数据库系统存储我国行业和部门基础材料数据库；操作相对简单，便于用户理解软件，有效的操作软件。
	GaBi	德国	丰富的生命周期数据库；适用范围广泛，目标用户为各个行业的 LCA 分析师；需要用户依据 ISO 对 LCA 理论制定的框架，创建产品的 LCA 过程
	SamaPro	荷兰、 中国	丰富的生命周期数据库；综合型 LCA 软件，目标用户是专业的 LCA 分析师；使用时，需要用户自己建立产品的生命周期模型；软件已对中国用户进行了部分汉化
建筑决策支持工具	Athena EcoCalculator	美国	用于建筑结构和建筑围护构件的材料在全生命周期内的能源及资源消耗情况，并得出所有材料的碳排放量；适用范围为美国的主要城市和地区的居住建筑和商业建筑。
	Eco-QUANTUM	荷兰	计算居住建筑的环境性能，分析方案带来的环境影响；最终评价结果由 Excel 表格的柱状图形式表达。

软件类型	软件名称	主流使用国家	特点及应用
建筑决策支持工具	Envest 2	英国	可用于设计人员早期阶段对建筑工程进行环境影响的分析,从而帮助设计者选择环境影响较小的建筑形式;提供建筑构件及建材的环境影响基本数据,可以对不同方案的环境影响进行比较分析。

根据统计分析可知现大多数 LCA 工具 (如 BEES, eBalance, WHUE-LCA, Athena EcoCalculator 等) 采取自下而上的方法,即开始分析建材 LCA 之前假定建筑已经存在;只有 Envest 2 采用了自上而下的方法,即从建筑体形开始分析,再分析建筑材料,最后分析构造细节。

2.3 建筑全生命周期阶段划分

2.3.1 国内外建筑全生命周期阶段划分相关研究综述

随着目前 LCA 理论的应用越来越广泛,国内外学者根据其自身研究特点从不同的角度对建筑全生命周期进行了不同的阶段性划分。

1) 国内阶段划分现状

关于建筑全生命周期阶段划分,我国学者有不同的划分结果,有三个阶段、四个阶段、五个阶段、六个阶段、九个阶段等,以下为文献中出现的关于建筑全生命周期划分结果,见表 2.4。

表 2.4 建筑碳排放文献 (国内) 的阶段划分统计表 (资料来源:作者自绘)

阶段划分数目	文献	阶段内容	划分依据
三	《建筑碳排放计算标准》 ^[10] (征求意见稿)	建筑材料生产及运输、建造与拆除、使用阶段	_____
	张孝存 ^[42]	物化阶段、运营阶段、处置阶段	对绿色建筑结构体系碳排放量的计算对比研究
	罗智星 ^[43] (2016)	物化阶段、使用阶段、拆除阶段	基于 LCA 理论的从“摇篮”到“坟墓”的思想
	刘军明、陈易 ^[44]	规划与设计 (建造前)、建造与施工、后期使用运营	从设计师参与关联度方面来划分

阶段划分 数目	文献	阶段内容	划分依据
四	刘汉卿 ^[45] (台湾 1994)	建材生产、运输、施工、日常使用	以建筑躯体为评估对象
	张智慧 ^[20]	物化阶段、使用阶段、拆除 处置阶段	---
	熊宝玉 ^[46]	建材生产、建造施工、运营 使用、拆除报废	---
	林波荣 ^[47] (2010)	建材生产、建造施工、建筑 运行、拆毁处置	基于 LCA 理论
	刘念雄 ^[16]	建材准备、建造施工、 建筑使用和维护、建筑拆卸	---
	李兵 ^[48]	规划设计阶段、施工安装阶 段、使用维护阶段、 拆除清理阶段	由于原材料开采、建筑物材 料、设备生产和构件加工均属 于既用建筑材料本身所带来 的碳排放,将其都归入建筑物 施工安装过程。
五	张又升 ^[49] (台湾 1997)	建材生产、建材运输、建筑 物施工、日常使用、 废弃处理	以建筑躯体为评估对象
	《CECS 374 2014 建筑 碳排放计量标准》 ^[50]	材料生产阶段、施工建造阶 段、运行维护阶段、 拆解阶段、回收阶段	依据碳排放的主要时间范围 和活动顺序一致原则、保证每 个具体阶段的碳排放单元过 程中,每种能源和材料的输入 和输出都是清晰和独立
	朱熾等 ^[19]	建材开采生产、建筑施工、 运行、维护以及建筑拆除固 体废物处置	站在对住宅建筑相关活动能 耗与环境排放的影响因素的 角度提出划分依据

阶段划分 数目	文献	阶段内容	划分依据
五	周晓 ^[51]	建材生产、建材运输、建筑施工、建筑使用（包括建筑运行和维护更新）、建筑拆除废弃（包括建筑拆除和废弃物处理）	生命周期各阶段的研究对象要与建筑有关且相互匹配
	李岳岩 ^[52] (2017)	规划设计、建材生产、建造施工、使用维护、拆除清理	基于全生命周期评价理论(LCA)
	燕艳 ^[53]	建材生产、建材运输、建造施工、运营使用阶段、拆除废弃阶段	——
	阴世超 ^[54]	建筑设计阶段、建材开采、生产阶段、建筑施工阶段 建筑使用和维护阶段	——
	刘娜 ^[55]	规划设计、建材生产、建造施工、使用维护、拆除清理	——
	蔡向荣等 ^[56]	建材阶段、施工阶段、使用阶段、拆除阶段、 废旧建材处理阶段	——
	江亿、李兆坚 ^[57]	项目前期立项、设计、建筑建造、建筑使用、建筑拆除	站在建筑能耗角度，依据能耗需求把建筑的能耗分为间接能耗、运行能耗、材料能耗五个阶段
六	张又升 ^[58] (2002 台湾)	建材生产、建材运输、建筑物施工、日常使用、更新修缮、建筑物拆除与处理	为了解决目前完整详细的生命周期评估有过于繁琐与复杂，实际应用上存在相当大的障碍与不可执行性的缺点，以建筑生命周期主要的经历阶段作为碳排放评估过程，除了将生命周期评估中的盘查分析程序与环境评估冲击评估作业于 CO2 排放评估外，通过简化部分生命周期过于繁琐的细节阶段（例如建筑设计阶段等），改良简化成易操作的简约式建筑生命周期评估。

阶段划分 数目	文献	阶段内容	划分依据
六	黄国仓 ^[59] (2006 台湾)	建材生产与运输、营建施工、 日常使用、更新修缮、拆除 废弃处理、建材回收利用	依据简约式生命周期评估,并 以生命周期的角度来看建筑 物之能源消耗,大致来划分建 筑全生命周期阶段
	张陶新 ^[60]	建筑材料准备、建造、使用、 拆除、处置和回收	按照过程分析法的基本思路
九	陈国谦 ^[61]	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 和废弃物处置	———

2) 国外阶段划分现状

国外的建筑全生命周期研究理论则更加丰富。以下为文献中出现的关于建筑全生命周期划分结果,见表 2.5。

表 2.5 建筑碳排放文献(国外)的阶段划分统计表

资料来源:作者自绘

阶段划分 数目	文献	阶段内容	划分依据
三	Huberman ^[62]	使用前(内含能源), 使用阶段(运行时能源), 使用后(处置或者可能的回 收利用)	从建筑能源消耗的综合性价 方面来划分
四	日本建筑学会 ^[63] (1999)	建材生产、日常使用、维护 修缮、日常更新	——
	德国可持续建筑 协会 ^[64] (DGNB)	建材生产与建筑建造、建筑 使用、建筑维护与更新、建 筑拆除与重新利用	——
	Leif ^[30]	原材料生产、定点建设、运 行、拆除及材料处理	——

阶段划分 数目	文献	阶段内容	划分依据
四	Cole ^[65]	原材料生产、建筑雏形、建筑装修和维护、废弃及拆除	研究不同性质建筑的碳排放结构
	Bribian ^[66]	生产、建设、使用及结束四个阶段	根据住宅建筑的使用过程，将建筑物的全生命周期分为了生产、建设、使用及结束四个阶段，其中为了简化分析直接概括为建设系统和使用系统。
	Gerilla ^[67]	建设施工、建筑维护、运行、废弃处理	——
	Gian ^[68]	产品阶段（原材料供应、运输和制造）、建造阶段（运输和建造）、使用阶段（维护、维修和更换，运营能源使用：供暖、制冷、通风、热水和照明）、建筑寿命终结阶段（拆除、运输、回收/重用和处置）	——
五	大成建设 ^[69] （日本 2001）	建材生产、营建、日常使用、维护修缮、日常更新	——
	Deepak ^[70]	材料生产、建筑建造、材料更换、冷热设备运行及建筑的终结	——

将上述国内外全生命周期阶段及包含的子阶段进行汇总，具体见图 2.3。

阶段划分	人物	物化阶段		使用维护		拆除清理						
三个阶段	《建筑碳排放计算标准》（征求意见稿）	○		○		○						
	张孝存	○		○		○						
	罗智星	○		○		○						
	张智慧, 尚春静, 钱坤	○		○		○						
	陈国谦	○		○		○						
	Huberman	○		○		○						
阶段划分	人物	规划设计	物化阶段		使用维护		拆除清理					
			建材生产	建造施工	使用	维护						
四个阶段	刘念雄, 汪静, 李嵘		○	○	○		○					
	熊宝玉		○	○	○		○					
	李兵	○	○		○		○					
	Leif		○	○	○		○					
	Cole		○	○	○		○					
	Germa		○		○	○	○					
	Bribian		○	○	○		○					
	Gian		○	○	○		○					
阶段划分	人物	规划设计	建材生产	建造施工		使用维护		拆除清理				
				建造	施工	使用	维护					
五个阶段	李岳岩	○	○	○		○		○				
	陈宝、朱嫵		○	○	○	○	○	○				
	于萍、陈效速		○	○	○	○	○	○				
	周晓		○	○	○	○	○		○			
	燕艳		○	○	○	○	○		○			
	刘娜	○	○	○	○		○		○			
	江艺、李兆坚	○	○	○	○		○		○			
	大成建设（日本2001）		○	○	○	○	○	○	○			
Deepak		○	○	○	○	○	○	○				
阶段划分	人物	规划设计	建材生产	建造施工		使用维护		拆除清理				
				建造	施工	使用	维护	拆除	处置	回收		
六个阶段	张又升		○	○	○	○	○	○				
	黄国仓		○	○	○	○	○	○				
	张陶新		○	○		○		○	○	○		
阶段划分	人物	规划设计	建材生产	建造施工		使用维护		拆除清理				
			生产	运输	建造	施工			处理	管理	拆卸	回收
九个阶段	陈国谦		○	○	○	○	○		○	○	○	○

图 2.3 建筑全生命周期阶段划分汇总

资料来源：作者自绘

综合国内外文献的研究汇总表 2.3 和表 2.4, 可以看出建筑生命周期的划定有
一下特点:

虽然不同研究全生命周期划分的主要的阶段大体一致, 基本都包含了建材生
产阶段、建材运输、建筑施工、建筑使用及建筑拆除阶段, 但是不同研究中每个
阶段所涵盖的子阶段差异较大。

由以上文献整理可以将建筑的生命周期的阶段划分方法分为 2 类:

1) 线性的生命周期划分: 单纯地按照建筑的原材料生产、建设、运行和拆除
进行生命周期划分, 而不考虑建材的回收利用, 建筑的更新等内容, 这一类包含
了各种基本的划分方法。如 Leif;

2) 按照建筑服务类型的生命周期划分: 可以划分为建设、运行、维护、翻新、
拆卸等相关服务阶段, 并进行分阶段的计算, 这样的生命周期更加详细和完善。

2.3.2 基于国内外研究现状提出本研究建筑全生命周期的阶段划分

综合国内外文献的研究情况, 建筑生命周期主要包含的过程有规划设计、建
筑材料与设备的生产与运输, 建筑施工, 建筑使用与维护, 建筑拆除, 废弃物处
理, 可再生材料回收等过程; 而在具体的阶段划分上, 从 3 阶段到 9 阶段不等。
其中 3-4 阶段的划分方法应用较广泛。

本研究的建筑全生命周期阶段的划定基于 LCA 理论, 采用 3 阶段的划分方式,
在传统消耗型建筑的全生命周期中加入了循环的概念, 同时将规划设计阶段考虑
在内, 将建筑生命周期划分为四个阶段: 规划设计阶段、物化阶段、使用维护阶
段及拆除回收阶段, 具体见图 2.4。

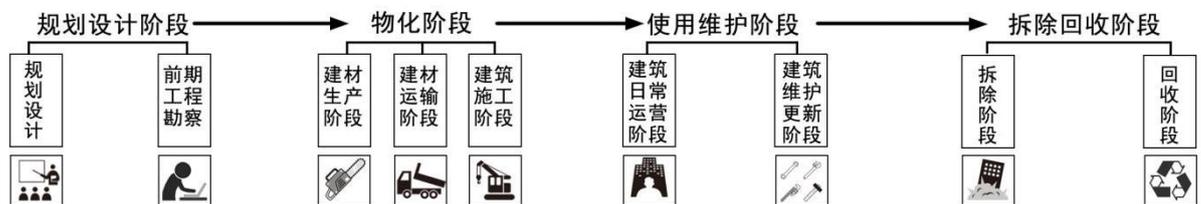


图 2.4 建筑全生命周期阶段划分示意图
资料来源: 作者自绘

首先, 增加规划设计阶段, 可以更好的保证全生命周期的完整性, 使计算结
果更加准确, 而且建筑的前期规划设计对后续阶段的碳排放影响较大, 不容忽视。
李兵、刘娜、燕艳等人也将此阶段考虑在内。

其次，通过对国内外学者关于建筑生命周期阶段划分的研究发现，在建筑的建设初期都包含原材料的生产、运输及建造施工这两个大的方面，有些学者将其划分为一个阶段，如张智慧、李兵、张孝存等人。在此，本研究将建设初期的两个大的方面统一划分为物化阶段，这两部分是一个连续的过程，划分为一个阶段利于过程的连续性及方便计算。

再次，建筑使用维护阶段指从建筑开始投入使用之后到建筑不能使用为止的全过程。基本所有学者都将此过程划分为一个阶段，该过程主要包含建筑的正常运营及建筑维护、修缮，两者在此过程是同时共存的，没有明确的时间区分，因此将该过程划分为一个阶段。

最后，通过对国内外学者关于建筑生命周期阶段划分的研究发现，大多学者将建筑从开始拆除到后续的所有操作（主要包括建筑物的拆除，废弃物运输，材料的回收利用）划分为一个阶段，而蔡向荣、陈莹、于萍等人将该过程划分为建筑物的拆除和废旧建筑处理两个阶段。在此，本文将建筑从开始拆除到后续的所有操作划分为一个阶段，主要是考虑到该过程所有作业都包含在建筑不能使用后处置阶段，之所以不将材料的回收利用单独划分，是因为废旧建材的处理主要是关注拆除后的废弃物，且处理过程大多发生废弃物综合处理厂，与建筑躯体无太大关联。

同时本研究的全生命周期各阶段划分也体现了全生命周期的完整性、关联性、空间差异性和相关人物差异性的特点，具体见图 2.5。



图 2.5 建筑全生命周期阶段划分依据图
资料来源：作者自绘

2.3.3 建筑全生命周期各阶段概述

1. 规划设计阶段

规划设计阶段主要包括规划设计、前期工程勘察等过程。在该阶段中因消耗能源产生的碳排放量很少，在计算建筑碳排放时可以忽略不计。

虽然规划设计阶段产生的碳排放量很少，但是由于规划设计阶段中设定的建筑体形系数、保温传热系数、窗墙比以及采暖、制冷、采光、通风等参数对后续阶段的碳排放有非常大的影响，因此规划设计阶段是建筑全生命周期中不可忽视的阶段。

2. 物化阶段

物化阶段指的是建筑在投入使用之前，形成工程实体所需要的建筑材料生产、构配件加工制造以及现场施工安装过程^[43]。具体包括建材生产阶段、建材运输阶段、建筑施工建造阶段。

1) 建材生产阶段

建材生产阶段的碳排放是指建材在原材料开采、加工制造过程中由于各种能源消耗带来的间接的温室气体排放以及在建材生产过程中由生产工艺引起的化学反应而直接产生的温室气体排放^[71]。国内现有研究普遍认为，该阶段是除运营阶段之外碳排放量最大的阶段，占整个生命周期的 10%—30%左右^[72]，同时建材的选择也直接影响到建筑使用阶段的碳排放。

把建材生产阶段纳入到全生命周期内，一方面更符合全生命周期“摇篮”到“坟墓”的理念，另一方面也符合碳排放标准 PAS2050 及 ISO14064 中关于将有关供货、材料、产品设计、制造等过程融入产品的碳排放影响的规定，同时也可以促进低碳、绿色建材的使用与开发。

2) 建材运输阶段

建材运输阶段的碳排放是指建材从生产地到施工现场的运输过程中的直接碳排放和由于所耗的能源的开采加工而导致大量的温室气体排放。其中，建材的运输距离、方式、运输工具、建材的数量都会对建材运输阶段的碳排放产生很大的影响。

3) 建筑施工建造阶段

建筑施工建造是形成建筑实体的重要环节，是建筑企业组织按照设计文件的要求，使用一定的机具和物料、通过一定的工艺过程将图纸上的建筑进行物质实现的生产过程^[73]。

施工建造阶段的碳排放主要来源于建筑施工区域内所有施工机械在场地内的移动、使用、维护过程中消耗的电、柴油、汽油等能源和办公、生活区办公设备、照明、供暖、制冷及炊事所耗的能源而导致大量的温室气体排放。

3.使用维护阶段

建筑的使用周期长，在整个生命周期中持续时间最久，相应的该阶段的碳排放较于其他阶段来说也较大。该阶段分为建筑使用和建筑维护两个阶段。

建筑使用时期的碳排放主要是指建筑供暖供冷、照明、生活热水及电梯的使用、可再生能源系统在建筑使用期间的综合碳排放量。

建筑更新维护碳排放是指建筑物在使用期间因材料、构件、部品、设备的维护活动所带来的碳排放。

4.拆除清理阶段

建筑拆除清理阶段指废弃建筑在拆除过程中的现场施工、废弃建筑材料和垃圾的运输和处理等过程^[72]。根据建筑拆除和回收阶段的碳源为依据，把整个阶段划分为如下三个子阶段：

1) 建筑拆除阶段

建筑的拆除方式可以分为拆解和拆毁两种方式，拆除过程中的碳排放来自各种拆除工法与机具的能耗，大致包括：破碎 / 构建拆除工艺、开挖 / 移除土方、平整土方、起重机搬运等。

2) 废弃物运输阶段

主要是对拆除后的材料进行分类（分类出金属、钢筋、铝合金门窗、废弃的砖瓦混凝土、木质材料、塑料、玻璃等）、装载清运、处理。碳排放源自废弃物的运输耗用能源。

3) 废弃物回收再利用阶段

建筑在拆解后，相当一部分材料、构件、部品以及设备可以通过回收再利用进入到其他建筑的生命周期循环中。对于可循环材料，虽然在建材生产过程中产生了碳排放，但在回收并进行循环利用后，这部分碳排放又进入到了新的建筑生命周期中，没有对环境造成实际影响，应予以核减。

2.4 建筑碳排放

2.4.1 基本概念

1. 碳排放

碳排放是关于温室气体排放的一个总称或简称。主要指二氧化碳（CO₂）气体的排放，也包《京都议定书》中规定的其他温室气体如氧化亚氮（N₂O）、甲烷（CH₄）等的排放^[10]。

2. 建筑碳排放

建筑碳排放指建筑全生命周期内产生的温室气体排放的总和，以二氧化碳当量表示。

2.4.2 国内外建筑碳排放计算标准

1. 联合国环境规划署（UNEP）建筑碳排放通用指标

UNEP 于 2006 年联合世界多家研究机构开展了建筑物通用碳排放计量的研究——碳排放通用指标（Common Carbon Metrics）^[74]。主要目的是为国际机构、政府、大型建筑群的持有者的政策制定提供一种针对既有建筑运营阶段碳排放的通用计算方法，通过计算其能耗和碳排放，评估各个国家的碳减排潜力，为政策的制定提供技术依据。主要的技术手段为统计实际建筑物的能耗，通过不同的碳足迹因子将其折算为当量碳排放。

2. 英国 SAP 和 SBEM

英国政府采纳《居住建筑能效标识标准评估程序》（SAP）对居住建筑的能耗和碳排放进行计算。同时，采纳由英国社区与地方政府管理局（DCLG）制定的《英格兰及威尔士地区除居住建筑外建筑国家计算方法建模导则》（NCM）^[75]和与之配套的《简化建筑能源模型技术导则》（SBEM）对公共建筑的能耗和碳排放进行计算。

3. 德国 DGNB 可持续建筑评估技术体系

德国可持续建筑协会（DGNB）在 2008 年推出了 DGNB 可持续建筑评估技术体系，以每年单位建筑面积的碳排放为计算单位^[64]，提出了建筑碳排放完整明确的计算方法，建立了建材和建筑设备碳排放的数据库。将建筑全生命周期划为建材生产与建筑建造、建筑使用、建筑维护与更新、建筑拆除和重新利用 4 大阶

段，并规定了相应的计算方法。

4. 香港《香港建筑物（商业、住宅或公共用途）的温室气体排放及减除的计算和报告指引》（2008）

2008年香港政府出台了《香港建筑物（商业、住宅或公共用途）的温室气体排放及减除的计算和报告指引》。该指引主要借鉴了温室气体议定书和ISO14604标准的定义和方法，针对商业或住宅及公共建筑物在使用阶段的碳足迹计量方法提供指导^[76]。该指引将排放源分为三类：直接排放及减除；使用能源间接引致的排放；其他间接排放。

5. 台湾《绿色建筑解说与评估手册》

1999年出版的《绿色建筑解说与评估手册》中包含了有关建筑业CO₂的排放指标、计算方法与控制CO₂排放的简易方式，并立足于台湾地区实际情况给出了部分建材碳排放因子，并不断对各种建材的基础数据进行更新^[77]。

6. 大陆《建筑碳排放计量标准》CECS374:2014

《建筑碳排放计量标准》由中国工程建设标准化协会批准，由中国建筑设计研究院主编，适用于新建、改建、和扩建建筑以及既有建筑的全生命周期碳排放计算。该标准以国际碳排放计量通则为基础，针对建筑全生命周期碳排放的数据采集、数据核算以及数据发布等方面提出相关标准。标准规定了建筑碳排放计算的基本框架，一是要覆盖全生命周期，二是要以碳排放活动单元过程为基本单位计量工作，同时也给出了全生命周期碳排放的计算模型，对于实现我国建筑碳排放的规范化计量，推动建筑领域的节能减排有着重要意义。

7. 大陆《建筑碳排放计算标准》征求意见稿

《建筑碳排放计算标准》征求意见稿是由中华人民共和国城乡建设部主编，该标准规定了新建、改建和扩建的民用建筑碳排放量计算方法。该标准将建筑全生命周期划分为建材生产及运输阶段、使用阶段和建造及拆除阶段三个阶段，并将分段计算结果累计为全生命期碳排放。

2.4.3 建筑碳排放计算的方法研究综述

国际现行的碳排放计算方法可大致归纳为四种：实测法、投入产出法、基于过程的生命周期清单分析法、排放系数法。

1. 实测法

实测碳排放量的方法主要通过监测工具或国家认定的计量设施，对目标气体的流量、浓度、流速等进行测量，得到国家环境部门认可的数据来计算目标气体总排放量^[78]。

这种方法收集到的数据最为可靠，但也不可避免的带有一些缺点，例如，一定要保证所选取的样品的代表性和精确度，如果没有这个前提条件，最终的监测数据也就失去了意义，在实测成本方面，如果只对 CO₂ 一种气体进行监测太不符合实际，因此实测法不太适合建筑全生命周期碳排放计算。

目前，实测法应用最好的是美国在火电行业实施的二氧化硫排污交易，该方法在测二氧化硫排放量准确度极高，在单独测二氧化碳排放量时精度不是很准确^[71]。

该方法目前在国内应用较少，其中西安建筑科技大学于洋教授带领的低碳城市研究团队在科研项目——基于能源绩效的历史城市低碳转换肌理与规划方法的研究中采用了实测法对住宅使用阶段二氧化碳浓度进行监测。该项目先将西安市中心区划分为 144 个 1.6km *1.6km 的方格，包含 109 个主要居民区，之后在西安市中心区挑选出 112 个志愿者家庭为样本，该 112 个家庭分布于包括主要居民区在内的 68 个网格中。最后对样本家庭进行入户测试安装采集，建立实测数据库。检测工具为该团队自主研发，包含二氧化碳浓度监测器、实时功率（用电量）测定仪及温湿度传感器。项目测试周期为一年，一年内每分钟可进行一次数据采集，其中包含二氧化碳、温度、湿度指标。

2. 投入产出法

投入产出法通常是以一个国家或地区的经济作为分析边界，利用投入—产出矩阵反映系统内部各产业间的相互影响。

在具体碳排放计算时主要是通过构建投入产出表，利用投入产出的数学模型来计算整个生产链上用户在获得产品或者接受服务引起的 CO₂ 的排放量。

用投入产出法进行碳排放计算时使用的仅仅是搜集的一些部门或行业的平均

排放强度数据,运用该法求出的数据通常是某种建材或行业的平均碳排放量,很难用来进行准确的碳排放计算。再者,投入产出法对具体的过程不做深入的分析,是以细节的缺失为代价,对于产品和过程等微观系统的碳排放计算存在局限性,仅仅适用于商业、工业、政府、产品群等宏观层面碳排放计算。

在具体的研究上,祁神军等^[79]基于投入产出分析法,对我国建筑业 1995 - 2009 年的碳排放进行测算,并运用 Kaya 恒等式对直接碳排放和间接碳排放的影响因素进行分解分析。

孙建卫等^[80]以投入产出法为基础,分析了我国国民经济消费品中的直接碳排放量和间接碳排放量,并分析了各个部门间的碳关联,最终得出的结论是:2002 年中国碳排放总量为 176528.10 万 t,人均排放 1.37426t,其中制造业、热力行业、电力和农业是碳排放量比较大的产业部门,达到总排放量的 80%以上。

3. 基于过程的生命周期清单分析法

基于过程的生命周期清单分析法主要是以过程分析为出发点,详细地解释碳排放的各个过程,然后将各个过程分解计算,最终累加求和得出碳排放总量,特别适合微观角度下的建筑物碳排放计算。运用该法进行碳排放计算时,通常与碳排放系数法结合使用,其中各阶段碳排放计算模型的基本原理是以碳排放系数法中“碳排放量 = 活动数据 × 排放因子”为基础^[81]。

但是这种方法计算碳排放也存在以下缺点:1) 生命周期阶段的划定存在很大的主观性,导致不同研究中计算的能耗和碳排放结果差别较大,缺乏可比性;2) 计算过程较为繁琐,计算时所需的基础数据量大,数据的质量难以保证。

在具体应用上,目前国内外学者对微观角度下的建筑物碳排放计算研究多数是基于全生命周期理念,界定建筑生命周期碳排放的核算范围,并对建筑生命周期从建造、使用到拆除、处置各阶段的碳排放进行清单分析,从而提出建筑生命周期碳排放量的评价框架和方法^[82](尚春静、张智慧等)。

台湾学者张又升^[58]基于全生命周期理念,针对完整的使用寿命评估中评估过程过于复杂、数据获取困难等缺点,提出了简约式生命周期评估,通过删减部分生命周期评估阶段,将生命周期清单分析与生命周期影响评价的评估对象限制于 CO₂ 的排放量,将建筑全生命周期划分为建材生产运输、营建施工、日常使用、更新维护、拆除废弃处理、建材回收利用六个阶段,根据各个阶段的耗能情况,构

建了建筑全生命周期碳排放计算模型，见公式（2-1）、（2-2）。

$$TLCCO_2 = \sum (LCCO_{2M} + LCCO_{2T} + LCCO_{2C} + LCCO_{2U} + LCCO_{2R} + LCCO_{2r} + LCCO_{2D} + LCCO_{2w}) \dots\dots\dots (公式 2-1)$$

$$TLCCO_2 = \{ \sum CO_{2i} \times Mi \} + CO_{2C} \times Af + CO_{2U} \times Af \times n + \{ \sum CO_{2i} \times Mi_r \times 1\% \times n \} + CO_{2r} \times p + CO_{2d} \times Af + CO_{2w} \times Af \} \dots\dots\dots (公式 2-2)$$

式中，TLCCO₂：建筑物生命周期 CO₂ 排放量；

LCCO_{2M}：建材生产阶段 CO₂ 排放量；

LCCO_{2T}：建材运输阶段 CO₂ 排放量；

LCCO_{2U}：建筑物营建阶段 CO₂ 排放量；

LCCO_{2R}：建筑物日常修缮 CO₂ 排放量；

LCCO_{2r}：建筑物改修更新阶段 CO₂ 排放量；

LCCO_{2D}：建筑拆除阶段 CO₂ 排放量；

LCCO_{2w}：建筑物拆除废弃物处理 CO₂ 排放量；

CO_{2i}：各类建材生产含运输阶段的单位 CO₂ 排放量；

CO_{2C}：单位楼地板面积施工 CO₂ 排放量；

CO_{2U}：单位楼地板面积每年日常使用 CO₂ 排放量；

CO_{2r}：建筑物大规模更新 CO₂ 量（外装+内装+设备全部材料更新总 CO₂ 量）；

CO_{2d}：单位楼地板面积拆除 CO₂ 排放量；

CO_{2w}：单位楼地板面积拆除废弃物运输处理 CO₂ 排放量；

Mi：建筑物各类建材实际使用量；

Mi_r：建筑物扣除主体结构外各类建材实际使用量；

Af：建筑物总楼地板面积；n：建筑物使用寿命；

P：建筑物大规模更新次数，更新次数=（建筑使用寿命-1）/20（小数点无条件舍去）；

通过研究，张又升建立了台湾建筑物生命周期 CO₂ 排放量基础数据库，并建立了评估法的计算流程和评估公式；在此基础上推算出 RC 建筑物主体工程的 CO₂ 排放量的简易预测公式，具体如下：

住宅类 $Y = 0.01 X^2 + 4.39 X + 278.08$

办公类 $Y = 0.12 X^2 + 4.45 X + 275.23$

$$\text{学校类 } Y = -0.18 X^2 + 10.5 X + 251.86,$$

其中 Y: 单位面积拆除阶段 CO₂ 排放量 (kg/m²), X: 建筑物地上楼层数量。

同时对建筑物拆除阶段年限进行了大规模的调查, 并得到了建筑物不同楼层规模的拆除阶段的碳排放公式, 具体如下:

$$Y = 0.06 X + 2.01,$$

其中 Y: 单位面积拆除阶段 CO₂ 排放量 (kg/m²), X: 建筑物地上楼层数量。

该研究不仅在台湾有较大影响力, 如赵又婵^[83]对百货公司室内装修生命周期二氧化碳的研究、曾正雄^[84]关于公寓住宅设备管线的二氧化碳排放研究, 王育中^[85]关于建筑空调设备二氧化碳排放量的研究都受到了张又升的影响, 在大陆地区也影响了众多研究。如罗智星^[36]、燕艳^[53]等。

罗智星^[86]将全生命周期划分为物化阶段、使用阶段、生命终止三个阶段, 并利用基于过程的生命周期清单分析方法, 构建了办公建筑在物化阶段二氧化碳排放的计算模型, 如下:

$$TLCCO_{2M} = TLCCO_{2ma} + TLCCO_{2tr} + TLCCO_{2o}$$

其中: TLCCO_{2M} 为办公建筑物物化阶段 CO₂ 排放量, TLCCO_{2ma} 为办公建筑建材、设备生产的 CO₂ 排放量; TLCCO_{2o} 为办公建筑施工过程的 CO₂ 排放量。

同时利用该计算模型分析计算了 78 栋办公建筑物物化阶段的 CO₂ 排放量, 并分别以建筑层数和建材用量为自变量做了办公建筑物物化阶段 CO₂ 排放量的预测模型。其中:

建筑层数与办公建筑物物化阶段 CO₂ 排放量预测方程为

$$LCCO_{2M} = 4.1 H + 288.54$$

其中, LCCO_{2M} 为办公建筑建筑物物化阶段 CO₂ 排放量 (kg/m²), H 为建筑的层数。

建材用量与办公建筑物物化阶段 CO₂ 排放量预测方程为

$$LCCO_{2f} = 1.58 X_1 + 378.97 X_2 + 64.57 X_3 + 94.1$$

其中: X₁ 为钢材的使用量, kg; X₂ 为混凝土的使用量, m³; X₃ 为墙材的使用量, m³。

仓玉洁, 罗智星等^[87]利用基于过程的清单分析方法, 研究了 129 栋城市住宅在物化阶段的建材碳排放量。研究表明, 城市住宅在物化阶段建筑材料的碳排放量按面积加权平均值为 514.66 kg CO_{2e}/m²。其中, 钢、商品砼、墙体材料、砂浆、铜

芯导线电缆、建筑陶瓷、PVC 管材、保温材料、门窗和水性涂料十类建材的碳排放量达到了建筑物化阶段总建材碳排放量的 99% ,是物化阶段碳排放最为主要的建材。同时仓玉洁^[88]对基于过程的清单分析法进行了优化,提出了基于十类主要建材清单的建筑物化阶段碳排放计算方法和基于 BIM 以建筑构造为“基本单元”的建筑物化阶段碳排放计算方法,大大的简化了清单分析的繁琐工作。

由中国建筑设计研究院主编并于 2014 年 12 月 1 日施行的《建筑碳排放计量标准》(CECS374:2014)也是基于全生命周期理念,采用清单统计法和信息模型法针对新建、改建和扩建建筑以及既有建筑全生命周期各阶段由于消耗能源、资源和材料所排放的二氧化碳进行计量。

4. 排放系数法

排放系数法是联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)在《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南修订本》和《国家温室气体清单优良做法指南和不确定性管理》中推荐的一种方法,目前已经在碳交易计算和碳排放量计算上得到了各个国家的默认,成为国际上一种通用的碳排放计算方法。

排放系数也称为排放因子,这种方法把影响碳排放的活动数据与单位活动的排放系数相结合,得到总的碳排放量。排放系数法的基本计算公式为:排放量 = 活动数据×排放系数。

在建筑碳排放计算方面,碳排放的数据应与建筑相关的数据资料一致。例如,在建材生产阶段,活动数据指的是各种建筑材料的使用量;在建筑使用阶段,活动数据指的是建筑中各种能源的消耗量。

对以上四种方法分别从原理、计算方法、优缺点、适应范围等方面进行比较,详见表 2.6。

表 2.6 国内外几种碳排放计算方法比较

资料来源：作者自绘

方法	实测法	基于过程的生命周期清单分析法	碳排放系数法	投入产出法
原理	连续进行实时测量	基于 LCA 评价理论,对建筑全生命周期 CO ₂ 排放计算的边界进行界定,根据对各阶段碳排放清单的分析,分别计算各个阶段的碳排放量,最终累加求和得到总碳排放量。	把影响碳排放的活动数据与单位活动的排放系数相结合,得到总的碳排放量	利用投入—产出矩阵反映整个经济的相互依存关系
计算方法	通过监测工具或国家认定的计量设施测量目标气体总排放量	以过程分析为出发点,详细地解释建筑碳排放的各个过程,然后将各个过程分解计算,最终累加求和得出碳排放总量。	排放量=活动数据×排放系数	通过构建投入产出表,利用投入产出的数学模型来计算
优点	收集到的数据最为可靠	该方法详细的计算过程能够反映出整个过程各个阶段的碳排放量,从而对具体的阶段进行详细的分析	全面具体地考虑了温室气体,几乎涵盖所有的温室气体排放源,并且提供了相应的计算方法。	数据获取方便、时效性强、碳排放方计算考虑了生产资料和间接成本
缺点	需具备实验条件、限制性较大	1. 需要大量的基础数据做支撑,数据的时效性难以保证。 2. 排放边界的划定存在很大的主观性,不同研究中计算的能耗和碳排放结果差别较大,缺乏可比性	只从产品生产角度进行碳足迹考虑,而从消费者角度来说隐含的碳排放量无法计算,不同国家、地区的排放系数差异较大	计算时对具体的过程不做深入的分析,以细节的缺失为代价,使用的数据是行业平均排放强度数据计算结果存在较大的不确定性。
适用范围	有可靠数据并采用高级技术的国家或研究部门	微观角度下的建筑物碳排放计算	国际上一种通用的碳排放计算方法	适用于商业、工业、政府、产品群等宏观层面碳排放计算

虽然建筑碳排放计算方法数目多,但大多方法之间彼此相互渗透,很多情况下都是几种方法的综合使用以便达到较为理想的研究效果。

本文主要是以基于过程的生命周期清单分析法,结合排放系数法,对全生命周期的各个过程进行分析得到建筑的碳排放量。

2.5 碳排放因子

2.5.1 碳排放因子概念

《建筑碳排放计算标准》征求意见稿中将碳排放因子定义为：将相关活动与碳排放当量相对应的系数，用于量化建筑物不同阶段相关活动的碳排放量。碳排放因子是进行建筑碳排放计算的重要基础，具体包括能源碳足迹因子、运输碳足迹因子和建筑材料碳足迹因子。

目前，世界上已有数个国家和地区完成了本地的建材碳排放因子数据库的构建。但由于各个国家或地区的用能特点不同、建材生产技术差别很大，导致碳排放数据的通用性较差，在具体计算时不能引用其它国家的碳排放因子数据来取代，否则可能会产生巨大的差异。根据澎湖^[89]的研究同类建材由于不同的生产工艺和以及能源结构的差异，中国的能耗和碳排放数据普遍大于北美的数值。

2.5.2 碳排放因子的获取

1. LCA 数据库

LCA 数据库中包含产品的环境负荷，其中涵盖产品的碳排放因子，如能源与建材的碳排放因子，因此 LCA 数据库是建筑碳排放因子获取的来源之一。

但 LCA 数据的有一些显著的特征：一是数据的复杂和多样性，二是数据的地域性和时效性。在进行具体的碳排放计算时很难获得全面的、最新的、准确的数据。

因此，很多国家、研究单位和商业性咨询公司致力于建立专业的 LCA 数据库，几乎每种材料的 LCA 数据库都在建设和完善的过程中，比较著名并广泛应用的有十多个，如瑞士 Ecoinvent、荷兰 IVAM、德国 Gabi 数据库、美国 LCI 数据库、欧洲 ILCA Data 等^[90]。

我国在上世纪九十年代开始进行 LCA 数据方面的研究，目前国内已有高校和研究机构构建了建材 LCA 数据库，例如清华大学的 BELES，四川大学的 CLCD 数据库，北京工业大学的中国生命周期分析基础数据库 SinoCenter，浙江大学的建材能耗及碳排放清单数据库等。

2. 根据建材生产能源、材料投入清单计算

由于建筑材料的种类众多，LCA 数据库不可能涵盖所有建材的碳排放因子，对于 LCA 数据库中没有涵盖的建材碳排放因子，可以通过查阅相关建材生产中消耗

的能源和材料投入清单，通过清单分析计算得到相关建材碳排放因子。以 2005 年某建材的碳排放因子为例，具体步骤如下：

1) 文献调研中选取 2005 年前后生产该类建材的原料开采、建筑材料生产的资源和能源清单。需要注意的是收集过程中应保证边界条件尽量一致，都包括上游阶段，即从原料开采、运输到建材加工的全部碳足迹。

2) 根据所需能源和原材料的碳排放因子，求出建材生产中因消耗的能源和原材料而引起的碳排放量，再与生产过程中排放的温室气体量相加即可得出该建材的碳排放因子。

2.5.3 典型的国内建材数据库介绍

1. 四川大学 CLCD 数据库

四川大学 CLCD 数据库是国内目前唯一可公开获得的 LCA 基础数据库，CLCD 数据库在 eBalance 软件中使用，用户可以在 eBalance 的数据库管理器中浏览数据集的文档描述和清单数据查看，详见图 2.6。

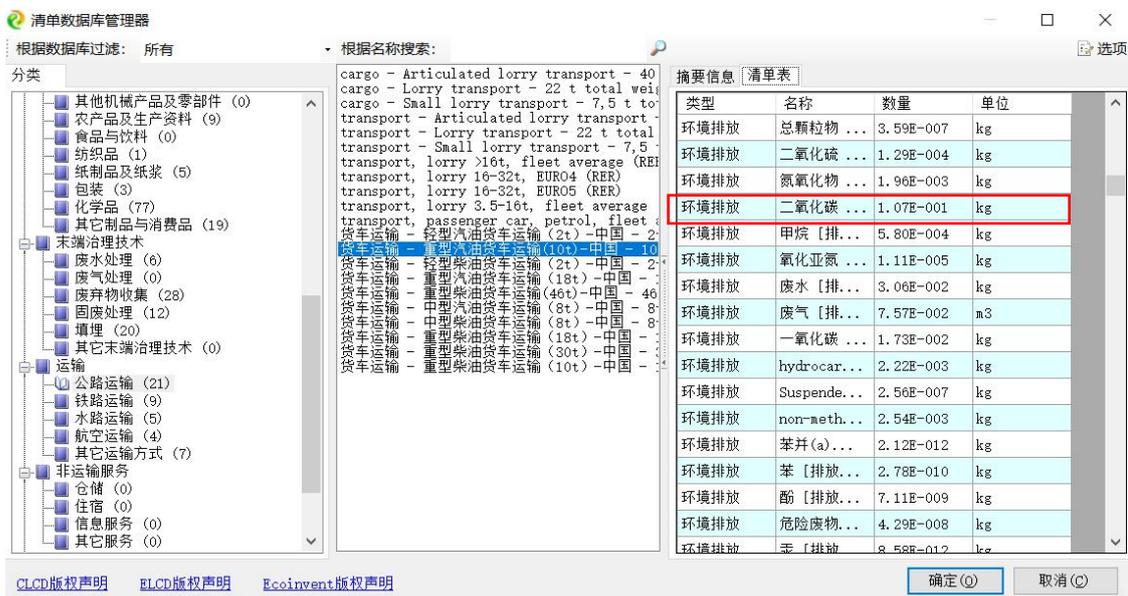


图 2.6 eBalance 中的清单数据库

资料来源：eBalance 软件界面

CLCD0.8 数据库涵盖的主要产品种类有十类：行业、能源、黑色金属、有色金属、有色金属、无机非金属、无机化学品、有机化学品、运输、污染治理、废水处理，其中包含了能源、交通运输的碳排放因子。在行业数据中，以建材数据库为例，CLCD 数据库涵盖了无机非金属类、钢材、有色、塑料、涂料、木材六类

建材产品种类的生命周期汇总数据，其中包含碳排放因子数据。但 CLCD 数据库中的数据基本以 2013 年以后为主。

2. 北京工业大学 SinoCenter

自 1998 年以来，由北京工业大学研发建立的中国生命周期分析基础数据库 (SinoCenter)，涵盖了钢铁、墙材、陶瓷、水泥、有色金属、玻璃、高分子材料等建材产品生产过程中环境负荷数据，是我们目前见到的包含材料种类最多、基础数据比较完整的中国生命周期数据。目前 SinoCenter 数据库被 SimaPro 应用，在全球 50 多个国家销售使用。SinoCenter 提供了不同年份的建材碳排放因子数据。

3. 清华 BELES

BELES (建筑环境负荷评价体系) 由清华大学建筑技术系研究开发的评价应用软件和建材数据库。利用 BELES，可以对建筑以及建材的生命周期能耗和碳排放进行计算和评价^[91]，具体见图 2.7。

相较于 CLCD，SinoCenter 数据库，BELES 更符合建筑师的使用习惯，更易于建筑师操作使用。

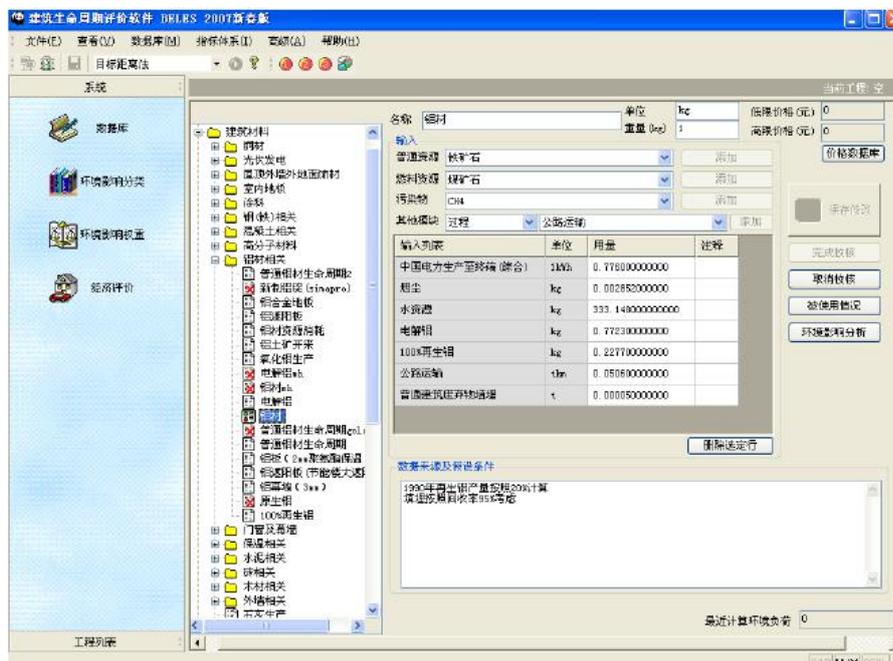


图 2.7 BELES 软件使用界面

图片来源：绿色建筑全生命周期能耗及二氧化碳排放案例研究

2.5.4 本研究碳排放因子选取

目前我国尚未建立起完善的针对建筑产品的环境影响数据库（尤其是各种材料、构件、部品、设备），但是目前针对能源消耗排放基础数据的研究已经比较客观。考虑到碳排放因子的时效性及地域性带来的误差，本研究尽量选取靠近 2005 年左右的碳排放因子，以西安建筑科技大学罗智星团队构建的碳排放因子库为主，经整理后的建材及电力碳排放因子见附录一表 2.7、表 2.8，化石能源及施工台班、交通运输碳排放因子详见表 2.9、表 2.10，表 2.11。

表 2.9 化石能源的碳排放因子

资料来源：依据罗智星研究整理

能源品种	单位	碳足迹因子			
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	合计
原煤	kgCO ₂ e/kg	1.98E+00	5.23E-03	9.24E-03	2.00E+00
原油	kgCO ₂ e/m ³	3.02E+00	3.13E-03	7.45E-03	3.03E+00
汽油	kgCO ₂ e/m ³	2.93E+00	3.23E-03	7.45E-03	2.94E+00
柴油	kgCO ₂ e/m ³	3.10E+00	3.18E-03	7.45E-03	3.11E+00
燃料油	kgCO ₂ e/m ³	3.17E+00	3.13E-03	7.45E-03	3.18E+00
天然气	kgCO ₂ e/m ³	2.16E+00	9.75E-04	1.19E-03	2.16E+00
标煤	kgCO ₂ e/kg	2.77E+00	7.33E-03	1.31E-02	2.79E+00

表 2.10 各种运输方式的碳排放因子 kgCO₂e/（10²t·km）

资料来源：作者自绘

运输方式	单位	碳足迹因子			
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	合计
铁路运输	kgCO ₂ e/（10 ² t·km）	9.19E-01	5.14E-04	3.30E-03	9.23E-01
公路运输（汽油）	kgCO ₂ e/（10 ² t·km）	2.28E+01	2.18E-01	5.95E-02	2.28E+01
公路运输（柴油）	kgCO ₂ e/（10 ² t·km）	1.95E+01	1.81E-02	4.86E-02	1.96E+01

表 2.11 常用机械台班碳排放因子 $\text{kgCO}_2\text{e}/(10^2\text{t}\cdot\text{km})$

资料来源：仓玉洁《建筑物物化阶段碳排放核算方法研究》

机械名称	规格型号	单位	碳足迹因子			
			CO_2	CH_4	N_2O	合计
履带式单斗挖掘机	液压 1m^3	台班	1.95E+02	2.00E-01	4.69E-01	1.96E+02
自卸汽车	8t	台班	1.27E+02	1.30E-01	3.05E-01	1.27E+02
汽车式起重机	8t	台班	8.81E+01	9.04E-02	2.12E-01	8.84E+01
载货汽车	装载质量(t) 12 大	台班	1.43E+02	1.47E-01	3.45E-01	1.44E+02
洒水车	罐容量(L) 8000 大	台班	1.02E+02	1.05E-01	2.46E-01	1.03E+02
电动卷扬机	单筒快速 20kN	台班	5.69E+01	1.49E-02	2.54E-01	5.72E+01
短螺旋钻孔机	$\phi 1200\text{mm}$	台班	2.26E+02	1.40E-01	7.91E-01	2.27E+02
钢筋切断机	$\phi 40\text{mm}$	台班	2.72E+01	7.13E-03	1.22E-01	2.73E+01

2.6 本章小结

1. 介绍了生命周期评价 (LCA) 的定义与发展, 对 LCA 理论框架、基本方法、优缺点、应用范围进行了阐述。

2. 介绍了建筑生命周期评价 (LCA) 的定义与内涵, 分析了从建筑全生命周期角度研究建筑碳排放的必要性, 同时对当下建筑 LCA 工具进行了总结, 为本文的后续研究提供理论指导及技术框架。

3. 将建筑全生命周期划分为规划设计阶段、物化阶段、使用维护阶段和拆除清理共四个阶段, 并分别阐述了每个阶段划的具体内容。

4. 阐述了建筑碳排放的相关基本概念, 介绍了国内外建筑碳排放的相关标准、现行的建筑碳排放三种计算方法, 并选用碳排放系数法来进行建筑碳排放的计算研究。

5. 介绍了建筑碳排放的计算的基础数据—碳足迹因子的获取方法及选取原则, 介绍了典型的国内包含碳排放因子的建材数据库。

3 建筑生命周期碳排放核算体系框架与计算方法

3.1 核算目的

本研究的建筑全生命周期二氧化碳排放核算的目的在于：

1.通过建立建筑碳排放计算体系框架，可以引导设计师等工程建设人员在设计阶段考虑建筑物全生命周期节能节碳。

2.增强建筑及建材企业对碳排放核算、报送、核查（MRV）的意识。

3.通过对建筑全生命周期各个阶段碳排放量的构成分析，为建筑师、设计师和建筑委托者等工程项目建设各方相关人等的决策提供必要的的数据参考。

3.2 核算范围

3.2.1 碳排放核算边界

严格的说，碳排放核算边界从建筑的全生命周期出发，凡是涉及到温室气体排放的活动都应计算在内，但在实际核算中通常会因研究深度及数据获得难度导致不能全面进行核算^[92]。

在本研究中，建筑的碳排放核算范围包括规划设计阶段的办公设备碳排放、物化阶段的建材生产及运输碳排放、施工机械碳排放、施工临时设施的碳排放，使用维护阶段的碳排放以及拆除回收利用阶段的碳排放，见图 3.1。

排除核算边界之外主要有 1) 全生命周期中投入的人力；2) 非实质排放源（不足碳排放总量的 1%），如建筑设备的更换产生更换的能耗、大型设备基础的施工和拆除、大型机械设备的安装和拆除、简易临时房屋安装和拆除等。

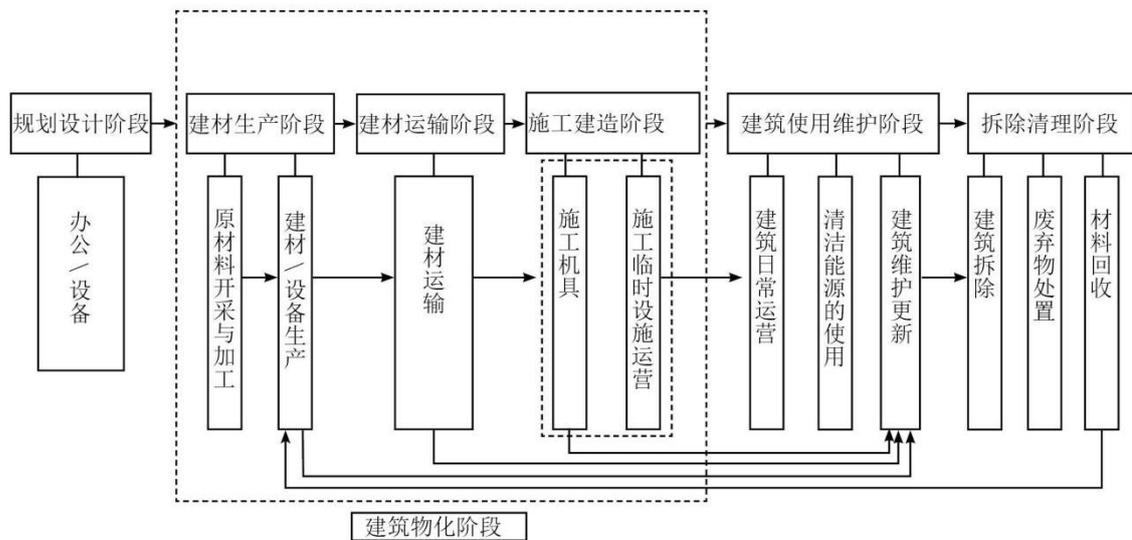


图 3.1 建筑温室气体排放核算边界图

资料来源：作者自绘

3.2.2 功能单位

本研究以“每年每平方米建筑面积的等效二氧化碳排放量”即“ $\text{kg-CO}_2\text{e}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ”为功能单位。此功能单位可以有效消除由于建筑物的规模、设计年限不同带来的影响，使得核算结果之间具有一致性和可比性。

3.3 建筑生命周期碳排放计算方法

3.3.1 清单分析的方法

清单分析就是通过采集各阶段碳单元过程中的各项水平活动数据及单位活动的排放系数，基于过程分析，从上至下的累加各阶段碳排放量来计算建筑碳排放。其中各阶段碳排放计算模型的基本原理是以“碳排放量 = 活动数据 \times 排放因子”为基础。

清单分析的主要任务是分阶段的基础数据的收集，并进行相关计算，得出该阶段的总输入和总输出量，作为评价的依据。

基于过程的清单分析法的特点在于计量过程与建筑碳排放活动顺序一致，输入和输出对象清晰，可逐一进行量化与汇编，具体计算框架见图 3.2。

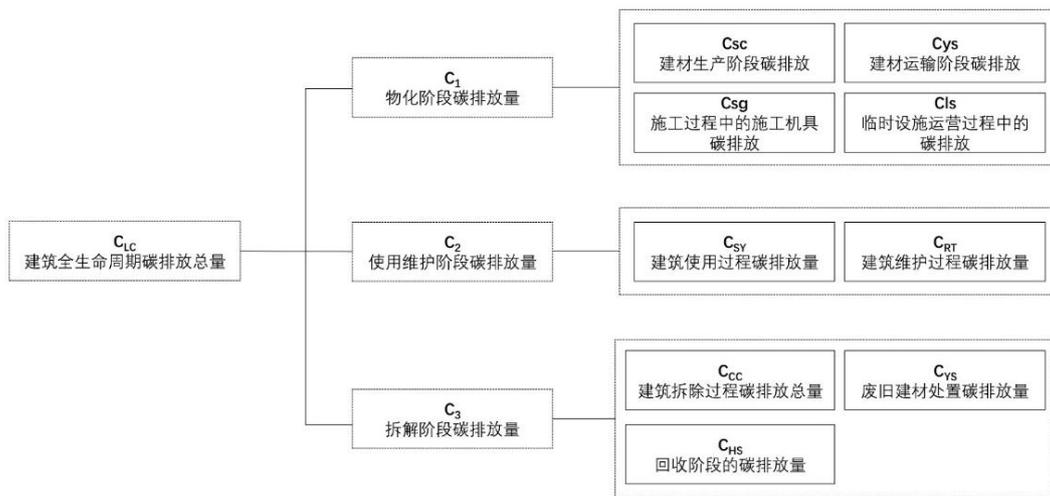


图 3.2 建筑碳排放计算框架

资料来源：作者自绘

3.4 各阶段碳排放来源的分析

在运用全生命周期理论计算建筑全生命周期过程中的碳排放量时，不可避免要进行大量的清单分析工作，而进行清单分析工作之前需要对各阶段碳排放的来源进行界定。

本研究分别对建筑全生命周期各阶段的主要建筑碳排放单元过程进行界定，结果如下：

1. 规划阶段的碳排放来源

1) 该阶段所用能源和物资的消耗

2. 建材生产阶段的碳排放来源

1) 建筑材料、构件、部品、设备的使用

3. 建材运输阶段碳排放来源

1) 建筑材料、构件、部品、设备的运输

4. 施工建造主要的碳排放单元过程碳排放来源

1) 施工机具在场地内的移动、使用、维护的能耗

2) 施工现场办公

3) 生活区炊事、供暖、制冷和照明

5. 建筑使用维护阶段碳排放来源

1) 建筑设备系统（供暖、空调、生活热水、照明、可再生能源等）的运营

- 2) 建筑材料、构件、部品的维护与更替
- 3) 更替的建筑材料、构件、部品的运输

6. 建筑拆除清理阶段碳排放来源

- 1) 拆除机具的运行
- 2) 废弃物的运输
- 3) 建筑可循环材料构件的回收利用

将上述建筑全生命周期各阶段的主要建筑碳排放单元过程进行总结, 见图 3.3, 以便后期的碳排放计算。

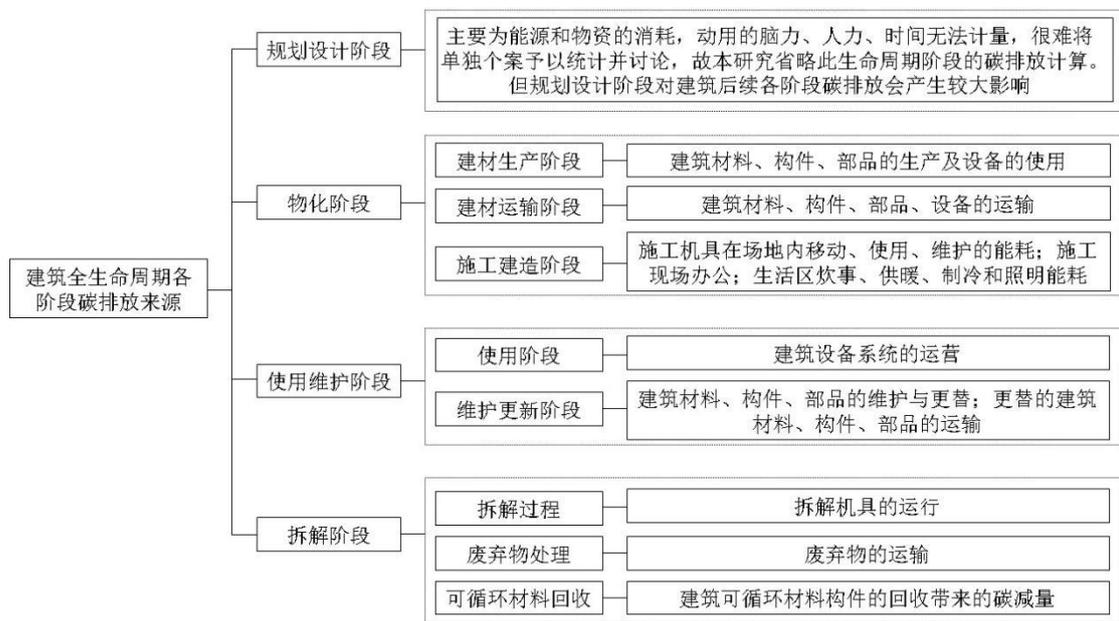


图 3.3 建筑全生命周期各阶段主要碳排放单元过程

资料来源: 作者自绘

3.5 全生命周期各阶段清单分析计算公式

3.5.1 公式来源

本研究的碳排放计算公式在参照《建筑碳排放计算标准（征求意见稿）》规定的碳排放计算的公式的基础上进行补充, 增加了建筑维护阶段的碳排放计算公式及拆除清理阶段中因废旧建材回收带来的碳减量的计算公式。

其中建材生产、运输阶段、建造阶段、使用阶段、拆除阶段的碳排放计算公式来源于《建筑碳排放计算标准（征求意见稿）》，而建筑维护阶段的碳排放计算公式来源于罗智星的研究成果, 拆除阶段的废旧建材回收带来的碳减量计算公式来源于《建筑碳排放计量标准》CECS 374:2014。

3.5.2 建筑全生命周期碳排放总量计算模型

分别对建筑全生命周期各阶段的碳排放展开计算，并汇总得到建筑全生命周期的碳排放总量。

建筑全生命周期的碳排放总量可由式(3-1)计算：

$$C_{LC} = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 \quad (3-1)$$

式中， C_{LC} ——建筑全生命周期碳排放总量(kg CO₂eq)；

C_0 ——规划设计阶段碳排放量(kg CO₂eq)；

C_1 ——物化阶段碳排放量(kg CO₂eq)；

C_2 ——使用维护阶段碳排放量(kg CO₂eq)；

C_3 ——拆除清理阶段碳排放量(kg CO₂eq)；

在碳排放核算时，如果只考虑建筑生命周期碳排放量的绝对数值，是无法对不同规模、不同使用年限建筑的碳排放进行比较。鉴于此，以单位建筑面积每年碳排放量作为建筑全生命周期碳排放的评价指标才能满足碳排放程度的分析比较的需求。其中，单位建筑面积每年碳排放量按照下式进行计算：

$$C_A = \frac{C_{LC}}{A \cdot L} \quad (3-2)$$

式中 C_A ——单位建筑面积每年碳排放量 (kg CO₂eq/m²)；

C_{LC} ——建筑全生命周期碳排放总量(kg CO₂eq)；

A ——建筑面积 (m²)；

L ——建筑使用年限 (a)。

3.5.3 规划设计阶段的碳排放计算

设计阶段的碳排放主要是指设计阶段所用能源和物资的消耗产生的总碳排放量。由于设计阶段较短，其发生多为办公室内消耗，同时一般事务所进行规划、设计通常都是多案同时进行操作，而且除了办公室用电等能源消费外，动用的脑力、人力、时间无法计量，很难将单独个案予以统计并讨论，且原始能源消费值并不大，故本研究省略此生命周期阶段的碳排放计算。

3.5.4 物化阶段碳排放计算

物化阶段具体包括建材生产阶段、建材运输阶段、建筑施工建造阶段三个阶

段，分别计算以上三个阶段的碳排放量并汇总得到物化阶段的碳排放量。

建筑物化阶段的碳排放计算：

$$C_1 = C_{sc} + C_{ys} + C_{jz} \quad (3-3)$$

式中， C_1 ——物化阶段碳排放量 (kgCO₂eq)；

C_{sc} ——建材生产阶段碳排放 (kgCO₂eq)；

C_{ys} ——建材运输阶段碳排放 (kgCO₂eq)；

C_{jz} ——建造过程中的施工机具碳排放 (kg CO₂eq)；

1、建材生产阶段

1) 计算公式

建材生产阶段计算的碳排放计算的生命周期边界采取“从摇篮到大门”的模型，即从建筑材料的上游阶段原材料开采、能源生产开始到建筑材料出厂为止。

建材生产阶段碳排放计算按下式计算：

$$C_{sc} = \sum_{i=1}^n M_i \times F_i \quad (3-4)$$

式中， C_{sc} ——建材生产阶段碳排放 (kg CO₂eq)；

M_i ——第 i 种主要建材的消耗量；

F_i ——第 i 种主要建材的碳排放因子 (kg CO₂eq /单位建材数量)。

2) 数据来源

M_i 的数据来源可以从工程概（予）算书或工程决算清单中获得。

F_i 的数据来源参看附录一表 2.7 建材碳排放因子。

2、建材运输阶段的计算

1) 计算公式

运输过程主要考虑将建材、设备机械等固体物资运送至施工现场所发生的运输过程。建材运输阶段碳排放计算按下式计算：

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i \times D_i \times T_i \quad (3-5)$$

式中： C_{ys} ——建材运输过程碳排放 (kg CO₂e/m²)；

M_i ——第 i 种主要建材的消耗量 (t)；

D_i ——第 i 种建材的平均运输距离 (km)；

T_i ——第 i 种建材的运输方式下，单位重量运输距离的碳排放因子 (kg CO₂e/t*km)；

2) 数据来源

M_i 的数据由工程预算清单或工程决算清单中数据折换为重量得到。

D_i 主要通过工程决算清单获得。

T_i 的数据来源参看表 2.10 运输碳排放因子。

3、建筑建造阶段碳排放计算

1) 建造阶段的碳排放计算公式

建造阶段的碳排放来源主要有：1.施工机具的运行；2.临时设施的碳排放，主要包括施工现场办公能耗和生活区的炊事、供暖、制冷及照明能耗；分别对以上两个阶段的碳排放计算后进行汇总即可得到建造阶段的碳排放。

建造阶段的碳排放量计算：

$$C_{jz} = C_{sg} + C_{lg} \quad (3-6)$$

式中： C_{jz} ——建造过程中的碳排放（kg CO₂eq）；

C_{sg} ——施工过程中的施工机具碳排放（kg CO₂eq）；

C_{lg} ——临时设施运营过程中的碳排放（kg CO₂eq）；

(1) 施工机具的碳排放计算公式

C_{sg} ——施工过程中施工机具的碳排放，主要由建筑施工区域内施工机具耗能所引起的。该部分的碳排放可以根据施工过程的台班数量来统计计算：

$$C_{sg} = \sum_{i=1}^n C_{Bi} \times n_i \quad (3-7)$$

式中， C_{sg} 为施工过程中施工机具的碳排放

C_{Bi} 为第 i 种工程机械的碳足迹因子，kgCO₂e/台班；

n_i 为第 i 种工程机械的台班数据量。

(2) 数据来源

n_i 可根据工程预算清单或决算清单中各分部分项工程的工程量乘以各地方出台的施工定额中单位工程的机械台班消耗量逐一计算，汇总得到。

C_{Bi} 可由每台班机械的能源消耗量乘以相应的能源碳排放因子，逐一计算汇总得到。具体各台班的碳排放因子详见表 2.11 机械台班碳排放因子。

2) 临时设施运营的碳排放计算

(1) 临时设施运营的碳排放计算公式

临时设施运营过程中的碳排放主要由建筑施工区域内的办公区办公设备、空

调、照明消耗的电能，生活区空调、照明、食堂消耗的电、燃气等能源所引起的。临时设施运营的碳排放计算：

$$C_{LS} = \sum_{i=1}^n Elsi \times Fi \quad (3-8)$$

式中，

C_{LS} ——临时设施运营过程中碳排放总量；

$Elsi$ ——临时建筑建造过程第 i 种能源消耗总用量；

Fi ——第 i 种能源的碳排放因子，

临时设施的能耗应根据施工组织设计和施工方案按下列公式估算：

$$Els = Ebg + Esh \quad (3-9)$$

$$Ebg = Abg \times (fzm \times T1 + fcn \times T2 + fzl \times T3) \quad (3-10)$$

$$Esh = Ash \times (fzm \times T1 + fcn \times T2 + fzl \times T3) \quad (3-11)$$

式中： Els ——临时设施使用能耗；

Ebg 、 Esh ——办公区、生活区能耗；

Abg 、 Ash ——办公区、生活区用房面积；

fzm 、 fcn 、 fzl ——每平米办公区和生活区的照明、供暖和空调制冷能耗系数；

$T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ ——每平米办公区和生活区的照明时间、供暖时间、空调制冷时间，根据工期等因素确定。

(2) 数据来源

Fi 具体参见表 2.9 能源碳排放因子表。

Abg 、 Ash 可按下表 3.1 估算

表 3.1 工地办公、生活用房屋设施参考指标（资料来源：建筑碳排放计算标准（征求意见稿））

临时房屋名称	指标使用方法	参考指标 (m ² /人)
一、办公室	按管理人员人数	3~4
二、宿舍	按高峰年（季）平均职工人数	2.5~3.5
三、食堂	按高峰年平均职工人数	0.5~0.8
四、厕所	按高峰年平均职工人数	0.02~0.07
五、其他合计	按高峰年平均职工人数	0.5~0.6

3.5.5 使用维护阶段碳排放计算公式:

1. 使用维护阶段碳排放计算

建筑使用维护阶段的碳排放包括建筑使用和建筑维护两个方面的碳排放,可由式 (3-12) 计算:

$$C_2 = C_{SY} + C_{RT} \quad (3-12)$$

式中, C_2 ——建筑使用维护过程碳排放量 (kg CO₂eq.);

C_{SY} ——建筑使用过程碳排放量 (kg CO₂eq.);

C_{RT} ——建筑维护过程碳排放量 (kg CO₂eq.)。

1) 建筑使用阶段的碳排放计算公式

建筑使用阶段的碳排放就是建筑投入使用后,日常能源消耗所产生的温室气体的排放,如采暖、制冷、照明、机械通风等设备系统所消耗的化石能源与电力^[93]。

建筑使用阶段单位建筑面积的总碳排放量 C_{SY} 可按式计算:

$$C_{SY} = \frac{c_h + c_c + c_w + c_l + c_{re}}{A} \times N \quad (3-13)$$

式中, C_{SY} ——建筑使用阶段单位建筑面积碳排放量 (kgCO₂/m²);

A —— 建筑面积 (m²);

C_h ——建筑供暖系统年碳排放量 (kgCO₂/y);

C_c ——建筑空调系统年碳排放量 (kgCO₂/y);

C_w ——建筑生活热水系统年碳排放量 (kgCO₂/y);

C_l ——建筑照明系统年碳排放量 (kgCO₂/y);

C_{re} ——可再生能源系统年碳减排量 (kgCO₂/y);

N ——建筑使用年限 (y);

2) 数据来源

对于设计中的项目,能源消耗量可采用专业能耗模拟软件动态模拟得到。

2. 建筑维护碳排放计算公式

建筑部件,如保温材料、门窗,建筑设备,如中央空调主机、分体式空调或冷水机组的使用寿命一般都小于建筑的使用寿命,在建筑生命周期内存在更换的可能。这些被更换的建筑材料、构件或设备的生产、加工、运输、施工和安装都会产生碳排放,其详细计算公式如下:

$$C_{rt} = \sum_{i=1}^n (CM_{ri} + CM_{ti} + CM_{ci}) \times m_i \times \left[\frac{n}{r_i} \right] \quad (3-14)$$

式中, C_{rt} 为建筑更新的温室气体排放当量, $\text{kg-CO}_2\text{e}$;

CM_{ri} 为第 i 种建材或设备生产的碳足迹因子 $\text{kg-CO}_2\text{e}/\text{单位}$;

CM_{ti} 为第 i 种建材或设备运输的碳足迹因子 $\text{kg-CO}_2\text{e}/\text{单位}$;

CM_{ci} 为第 i 种建材或设备加工和施工安装的碳足迹因子 $\text{kg-CO}_2\text{e}/\text{单位}$;

m_i 为第 i 种建材或设备的重量; t

n 为建筑使用的寿命; a 。

r_i 为第 i 种建材或设备的寿命; a 。

$\frac{n}{r_i}$ 表示材料或设备的更换次数, 应为整数。

3.5.6 拆除清理阶段碳排放计算模型

拆除清理阶段的碳排放主要包括拆解机具的运行产生的碳排放和废旧建材的运输、回收利用产生的碳排放^[55], 可由式 (3-15) 计算:

$$C_3 = C_{CC} + C_{HS} \quad (3-15)$$

式中, C_{CC} ——拆除过程碳排放量;

C_{HS} ——废旧建材处置碳排放量。

1. 拆除阶段碳排放计算公式

建筑拆除阶段的碳排放量应根据拆除阶段的各种燃料动力用量及对应能源碳排放因子按下式计算:

$$C_{CC} = \sum_{i=1}^n E_{cci} \times F_i \quad (3-16)$$

式中: C_{CC} ——建筑拆除过程碳排放总量;

E_{cci} ——建筑拆除过程第 i 种燃料动力总用量;

F_i ——第 i 种燃料动力的碳排放因子。

2. 运输阶段碳排放计算

废弃物运输是指将建筑废弃物从施工现场运至填埋场、循环利用场或其他运输终点的过程。运输阶段碳排放可参照公式 (3-5) 计算。

为了便于对运输阶段各机械设备的工作时间进行计算, 有必要对所产生的废弃物总量和各组成成分的量进行估算^[94]。根据深圳市住房和建设局发布的《建筑

《废弃物减排技术规范》，拆除建筑的废弃物产生量计算公式如下：

$$W_c = A_c \times q_c \quad (3-17)$$

其中， W_c ——拆除建筑的废弃物产生量（kg）；

A_c ——被拆除建筑的建筑总面积（m²）；

q_c ——拆除建筑的废弃物产生量指标（kg/m²），其取值按表 3.2 所示。

表 3.2 拆除建筑废弃物产生量指标

资料来源：深圳市《建筑废弃物减排技术规范》

建筑类别	废弃物产生量指标 (kg/m ²)	废弃物产生量分类指标 (kg/m ²)	
		混凝土	其他
住宅建筑	1450	混凝土	800
		砖和砌块	180
		砂浆	200
		金属	65
		玻璃	3
商业建筑	1380	混凝土	880
		砖和砌块	150
		砂浆	220
		金属	60
		玻璃	3
公共建筑	1480	混凝土	950
		砖和砌块	125
		砂浆	240
		金属	90
		玻璃	2
建筑类别	废弃物产生量指标 (kg/m ²)	废弃物产生量分类指标 (kg/m ²)	建筑类别
工业建筑	1130	混凝土	830
		砖和砌块	35
		砂浆	150
		金属	60
		玻璃	3

3.回收阶段的碳排放计算公式

在回收阶段，因废旧建材回收利用带来的碳减量计算可按公式（3-18）

$$C_{HS} = \sum_{i=1}^n (AD_{HSi} \cdot \alpha_{HSi} \cdot EF_{HSi}) \quad (3-18)$$

式中， C_{HS} ——回收阶段的碳排放量

AD_{HS} ——材料的数量;t

α_{HS} ——材料的回收比例（%）

EF_{HS} ——回收材料的碳排因子 ($\text{kg-CO}_2\text{e/单位}$)；

i ——材料的种类

3.6 本章小结

本章节基于第二章建筑全生命周期的阶段划分及 LCA 理论，构建了建筑全生命周期碳排放核算框架，提出了建筑碳排放的核算目的、核算范围，核算方法；同时详细的分析了建筑全生命周期各个阶段的碳排放活动单元过程，并在此基础上建立了建筑全生命周期碳排放总量及各个阶段的碳排放计算模型。

4 2005 年城市住宅全生命周期二氧化碳排放案例研究

本章节在第三章所构建的建筑生命周期碳排放计算公式的基础上，采取清单分析及软件模拟等方法，选取一栋具有代表性的 2005 年城市住宅为研究对象，对其生命周期碳排放进行详细的计算，为城市住宅的减碳策略提供借鉴和参考。

中国应对气候变化国家自主贡献文件《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》确定 2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%-65%。城市住宅作为建设量最大的建筑类型，对建筑行业实现减排 60%~65%的承诺意义重大。

在提出城市住宅有关减碳策略之前，必须要对 2005 年及 2005 年以后我国居住建筑的建设情况及相关建筑类型进行研究。

4.1 2005 年国家住宅工程建设量构成分析

4.1.1 2005 年国家新开工房屋面积构成分析

根据《国家统计年鉴——2006》数据显示，按用途分房地产开发企业（单位）新开工房屋面积中，2005 年全国新开工房屋面积为 68064.44 万平方米，其中最多的为住宅 55185.07 万平方米，占总量的 81%，其次是商业营业用房 7675.47 万平方米，占总量的 11%，然后是办公楼 1671.1 万平方米，占总量的 3%，其他类型 3532.79 万平方米，占总量的 5%，详见图 4.1。

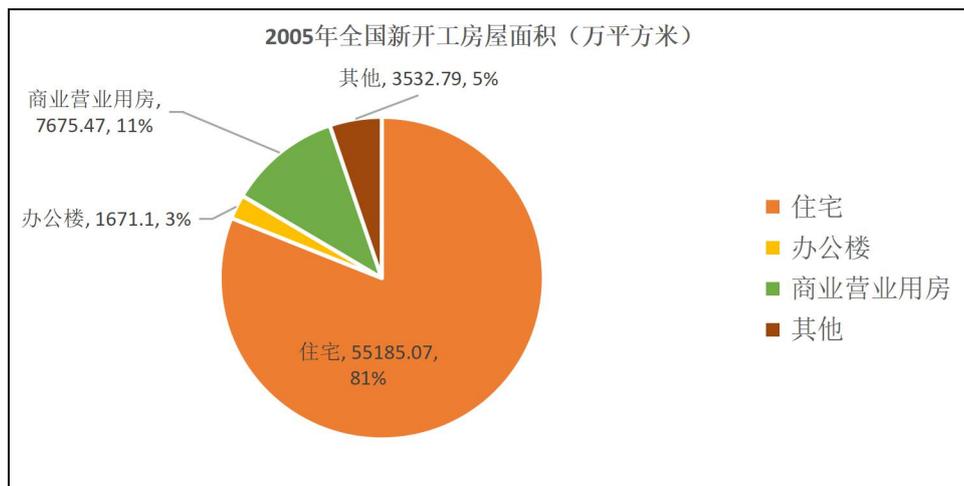


图 4.1 2005 年全国新开工房屋面积（万平方米）

图片来源：作者自绘

根据图 4.1 可以看出 2005 年新开工房屋面积中，占建设总量最多的是住宅，

约为 81%，因此选取住宅建筑作为对标建筑具有现实意义。

4.1.2 2005 年城镇住宅和农村住宅比例分析

根据《国家统计年鉴—2006》数据显示，2005 年城镇和农村房屋的施工、竣工面积见图 4.2。其中城镇住宅竣工面积约占总住宅竣工面积的 51.50%。

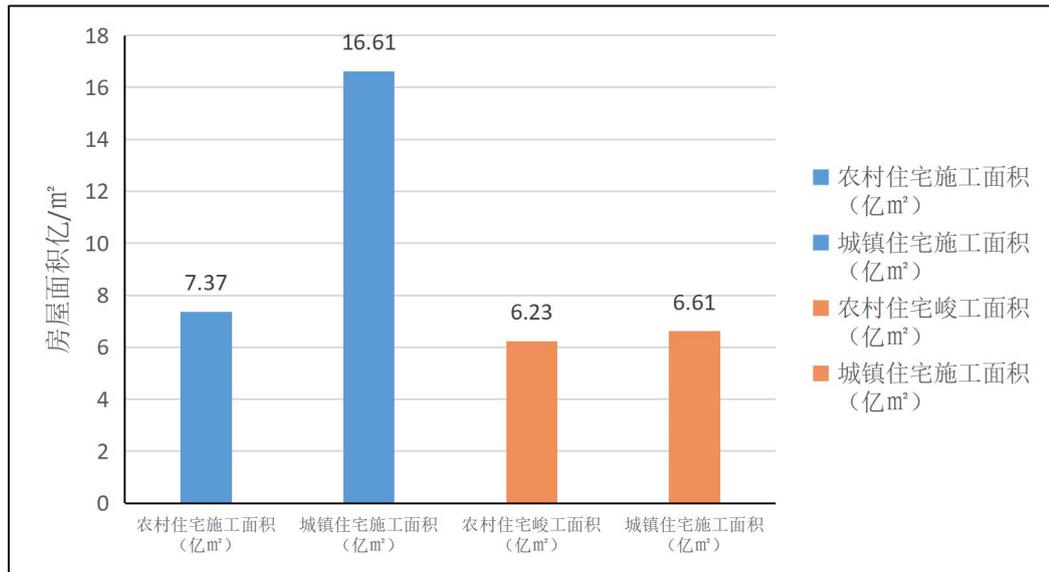


图 4.2 2005 年住宅建筑施工、竣工面积

图片来源：作者自绘

由图 4.2 可以看出，2005 年城镇住宅施工面积约占总住宅施工面积的 51.48%，但由于农村住宅建设自发性较大，且受村民经济因素影响较大，且建设较为随意，不易统一管理建设；而城镇住宅的建设具有规律性，且较易管控，故本研究选取 2005 年的城市住宅进行研究。

4.1.3 2005 年城镇住宅中高层比例分析

城市住宅多以多层和高层为主，但随着城镇化进程加快，城镇人口的持续增长以及城市建设用地日益紧张，目前我国城市住宅的高层化日益严重，在 2005 年非常明显。如淄博市 2005 年市场高层项目在整个市场中占据主导地位；东营楼市上楼盘自 2004 年底开始，开始出现小高层；十堰市 2005 年中心区成规模的楼盘中，高层住宅已占主导地位；

山东淄博房地产淄博（高层项目）市调报告^[95]中提到的 2005 年市场高层项目在整个市场中占据主导地位；而多层住宅项目数量巨减，2005 年成为高层项目的

爆发年。

由于国家权威统计机构的统计数据没有涵盖 2005 年不同层数的住宅的建筑面积，本研究根据收集到的合肥市 2005 年城市商品住宅的统计数据来推测 2005 年全国城镇住宅不同层数的建筑所占的份额。

根据 2005 年合肥房地产市场调查报告^[96]显示，高层、小高层住宅面积比例占整体楼盘份额的 57%左右，其次是多层、别墅，具体见如图 4.3。

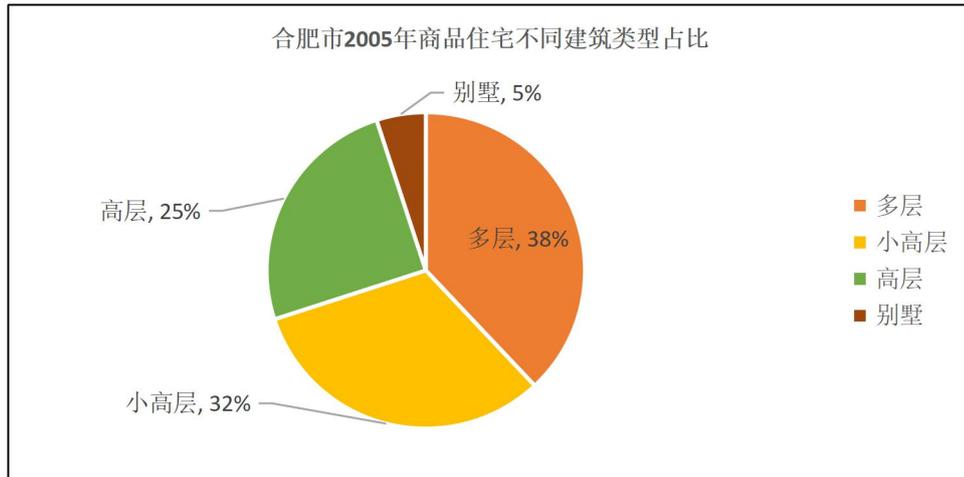


图 4.3 合肥市 2005 年商品住宅不同建筑类型占比 (%)

资料来源：作者自绘

参考合肥市 2005 年商品住宅的不同建筑类型施工情况，本研究选择占比较多多的多层（约为 38%）及高层建筑（约为 57%）进行全生命周期碳排放计算分析。

4.1.4 2005 年城镇住宅不同建筑结构比例分析

由于国家权威统计机构的统计数据涵盖范围没有 2005 年不同住宅建筑结构的建筑面积，本研究根据收集到的长春市的 2005 年城市商品住宅的统计数据来推测 2005 年全国城镇住宅不同建筑结构所占的份额。

根据 2005 年长春市房地产市场监测分析报告^[97]显示，2005 年长春市房地产施工面积 698.6 万平方米，其中：砖木结构房屋施工面积 0.6 万平方米，砖混结构房屋施工面积 232.9 万平方米，钢筋混凝土结构房屋施工面积 423.9 万平方米，钢结构房屋施工面积 41.2 万平方米，见图 4.4 所示。

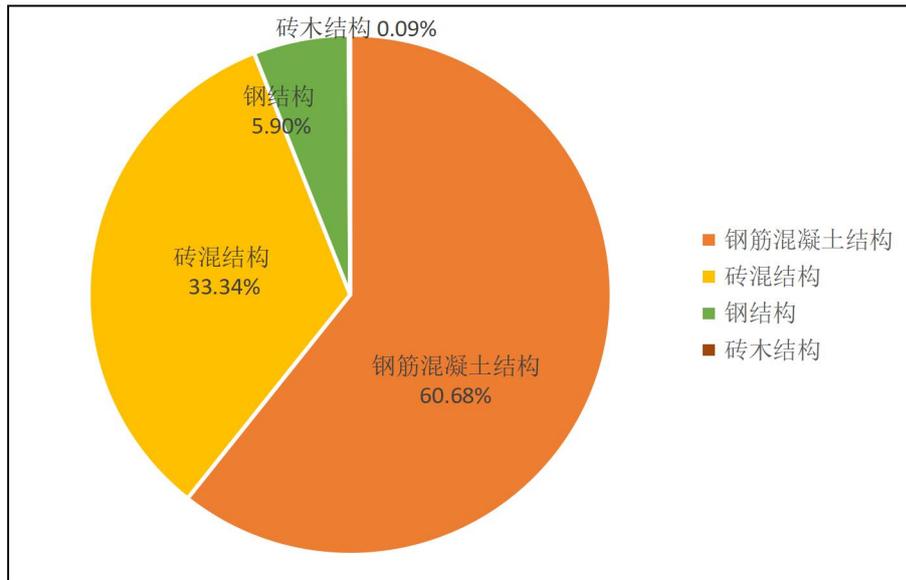


图 4.4 长春市 2005 年商品住宅不同结构类型施工面积占比（图片来源：作者自绘）

由图 4.4 可见长春市城市建筑主要以钢筋混凝土结构和砖混结构建筑为主。

参考长春市 2005 年商品住宅不同结构类型的施工情况，本研究选择占比较大的钢筋混凝土结构（约为 60.68%）和砖混结构建筑（33.34%）进行全生命周期碳排放计算分析。

4.2 减碳对标建筑的选取

根据上述分析，2005 年国家城市商品住宅建设量最多的类型为高层（约为 57%）、混凝土结构（约为 60.68%）的住宅。

因此本研究拟选取具有普遍代表性的 2005 年一栋高层钢筋混凝土结构的城市住宅为对标建筑。

由于当前新建住宅建筑多为 20-30 层的高层建筑，在未来的发展中，住宅建筑仍以高层为主。本文先选取一栋钢筋混凝土结构的高层城市住宅作为对标建筑。

由于不同气候分区的建筑碳排放差异较大，本研究先选取寒冷地区的建筑为研究对象，构建基本的研究方法，为后续的其他气候分区的建筑碳排放研究打下基础。

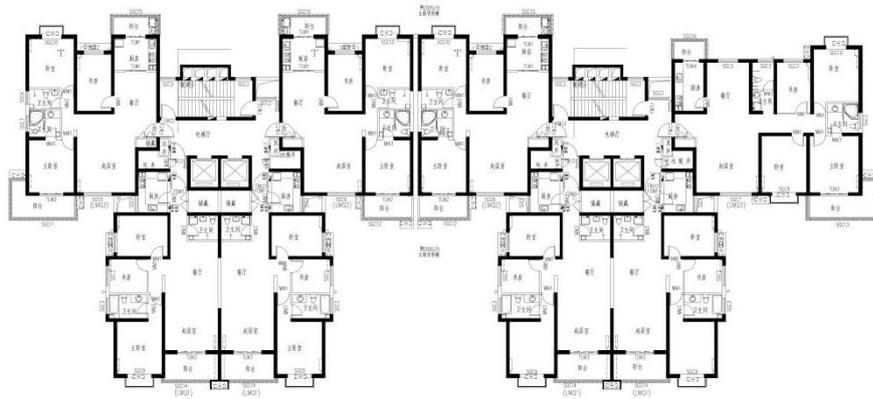
4.3 案例建筑资料来源

本研究中案例建筑资料来源于西北院档案室保存的 2005 年相关住宅案例。其中设计图纸来源于存档的 CAD 电子版，相应的工程量数据是根据存档的概算书中的单位工程概预算表抽取整理得到的。

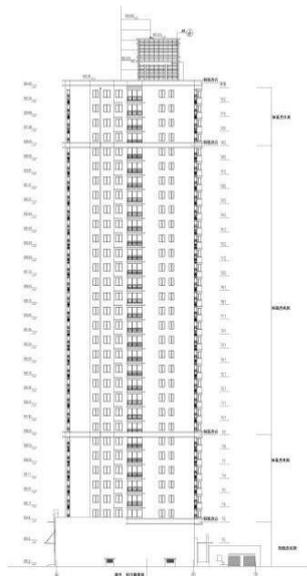
4.4 对标住宅建筑工程简介

太乙路经济适用房小区，位于陕西省西安市，属于寒冷（B区）气候。本研究以其中1#楼为例，核算该住宅楼的碳排放。

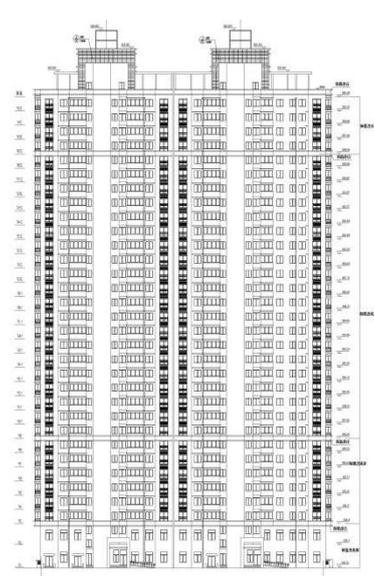
太乙路经济适用房1#楼的设计使用年限为50年；建筑高度为95.40m；地上32层，地下1层，其中一二层为商场，三层以上为住宅；结构形式为钢筋混凝土剪力墙结构，抗震设防烈度为8度；共2个单元，每个单元一梯四户（见图4.5），共有240户住宅，总建筑面积39173m²，其中地上36363m²，地下2810m²，该住宅楼折合的占地面积1710m²。



a.1#住宅楼标准单元平面图



b.1#住宅楼西立面图



c.1#住宅楼北立面图

图 4.5 1#住宅楼设计图纸

资料来源：根据西北院相关设计图纸改绘

4.5 案例建筑物化阶段碳排放量计算

4.5.1 建材生产阶段的碳排放量计算

由于 1#住宅楼完工时为毛坯房，因此主要对土建工程和安装工程的材料进行统计，并依据公式（3-4）对 1#住宅楼的建筑材料进行碳排放计算整理见附录二表 4.1，表中数据来自 1#楼的概算书中的单位工程概预算表。

统计过程中，部分建筑材料的碳排放没有计算，造成这一的结果的原因有以下几点：

1.建筑中使用到的建筑材料种类繁多，产品复杂，目前我国还缺乏完整统一的建材碳排放因子数据库，部分建材由于缺少相应的碳排放因子数据而无法进行计算。例如 PB 采暖地热管、电梯、等由于没有相应的碳排放因子而无法计入。

2.建材清单中某些建材的单位是“个”、“台”、“付”、“部”、“张”、“系统”、“套”等，很难对建材的具体属性、用量等信息进行统计，如“法兰阀门”、“铸铁斗口”、“座灯头”、“瓷蹲式大便器”、“配电(电源)屏低压开关柜”等建筑材料，由于无法确定其质量或体积，导致这类建材的碳排放量没有纳入碳排放的合算范围中。

尽管以上几点原因导致了计算结果的不完整性，但是，在计算过程中可以计算或近似估算的建筑材料都纳入了碳排放计算，其中没有计算到的建材用量极少，不是主要用量的建材，相对于整栋建筑的其他建材而言，其碳排放量几乎可以忽略。因此，本研究建材生产阶段的碳排放量核算结果较完整。

建筑中使用到的建筑材料种类繁多，如果对每种建材的碳排放量都进行统计计算，不仅其碳排放因子数据不全，而且费时费力，因此主要计算建筑中主要建材的碳排放量。本研究从 1#住宅楼众多建材中筛选出主要的建材，统计其所耗用的工程量并计算相应的碳排放量，在统计过程中，对不同的材料进行了归类，把主要建材分为钢（铁）、商品砼、水泥、砂石、木材、砌体材料、建筑陶瓷、门窗、保温材料、铜芯电线电缆、建筑装饰涂料、化学类和塑胶类管材、石材、防水涂料共计十四大类。特别指出的是：

1) 商品混凝土，依据 2004 年商务部、财政部、住建部等六部委联合发布的《散装水泥管理办法》和各省相应出台的政策，无论采取是泵送还是非泵送的方式，在城市中的施工现场现拌混凝土的现象基本已经绝迹。因此在研究中将商

品砼单独作为一类建材列出，不再分析其原料如水泥、粗细骨料等的碳排放量。

2) 木材分类中包含施工中用到的木模板。

3) 水泥为抹灰类水泥的用量，不包含商品砼里面含的水泥。

其中 1#住宅楼建材进行归类后的碳排放计算结果见表 4.2。

表 4.2 住宅项目物化阶段主要建筑材料碳排放量

资料来源：作者自绘

序号	建材类别	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
1	钢	圆钢Φ10 内外钢筋	t	602.97	1392860.70
2		Φ10 以上螺纹钢筋	t	1436.67	3318707.70
3		铁件	kg	1550.17	3394.87
4		型钢	kg	3413.20	7474.91
5		镀锌钢板 δ 0.5	10m ²	14.59	1261.26
6		镀锌钢板 δ 0.75	10m ²	77.54	10043.00
7		镀锌钢板 δ 1	10m ²	4.97	858.22
8		桥架 300*150	m	167.43	8143.08
9		弱电桥架 200*100	m	161.60	5838.54
10		桥架 GPQ1A-300*150J-G)	m	40.20	1955.17
11		桥架 GPQ1A-400*150J-G	m	156.38	8496.11
12		热镀锌钢管 DN25	m	1001.10	7195.40
13		热镀锌钢管 DN32	m	310.08	3103.84
14		热镀锌钢管 DN40	m	511.66	5901.52
15		镀锌钢管 DN50	m	184.64	2912.49
16		钢管 DN65	m	621.18	12983.80
17		热镀锌钢管 DN80	m	192.84	4817.57
18		镀锌钢管 DN100	m	565.10	18141.86
19		镀锌钢管 DN150	m	950.60	37550.02
20		碳排放合计(kgCO ₂ e)			

序号	建材类别	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
21	商品砼	C35P8 商品混凝土	m ³	581.76	179001.73
22		C30P8 商品混凝土	m ³	1337.12	562793.81
23		C35 商品混凝土	m ³	2978.71	916519.28
24		C30 商品混凝土	m ³	3068.37	911305.89
25		C25 商品混凝土	m ³	4492.32	1112702.74
26		C15 商品混凝土	m ³	196.36	44709.21
27		碳排放合计(kgCO ₂ e) 3727032.664 (占比 25.46%)			
28	水泥 (抹灰类 水泥)	硅酸盐水泥 325#	kg	873.51	853.42
29		硅酸盐水泥 425#	kg	2762794.96	2699250.68
30		白水泥	kg	1223.79	1195.64
31		碳排放合计(kgCO ₂ e) 2701299.74 (占比 18.45%)			
32	砂石	石灰	t	301.78	528115.00
33		净砂	m ³	4303.13	15017.92
34		砾石	m ³	3057.53	27128.85
35		碳排放合计(kgCO ₂ e) 570261.78 (占比 3.89%)			
36	木材 (包含施 工木模板)	东北松、进口松木	m ³	0.27	237.06
37		规格料	m ³	226.33	198717.74
38		碳排放合计(kgCO ₂ e) 198954.80 (占比 1.36%)			
39	砌体材料	承重黏土砖 (KP1、DS1) 240×115×90	千块	104.38	36428.62
40		承重黏土砖 (DS2) 240×190×90	千块	115.93	40459.57
41		非承重黏土多孔 (KF17) 240×115×240	千块	42.46	14818.54
42		机制红砖	千块	116.56	40679.44
43		碳排放合计(kgCO ₂ e) 132386.17 (占比 0.90%)			

序号	建材类别	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
44	建筑陶瓷	地砖缸砖 (30mm 厚)	m ²	4400.98	23237.17
45		面砖 0.015 m ² 以内	m ²	11913.77	180684.24
46		碳排放合计 (kgCO ₂ e) 203921.41 (占比 1.39%)			
47	门窗	甲级防火门	m ²	11.01	531.67
48		三防门	m ²	448.20	77052.30
49		乙级防火门	m ²	370.26	16254.41
50		丙级防火门	m ²	198.20	6960.78
51		铝合金地弹门	m ²	38.74	1793.66
52		铝合金推拉窗	m ²	1798.39	83265.46
53		铝合金推拉门	m ²	1566.58	72532.65
54		中空玻璃塑钢窗	m ²	3494.19	343828.30
55		碳排放合计 (kgCO ₂ e) 602219.24 (占比 4.11%)			
56		保温材料	屋面聚苯乙烯泡沫板保温	10m ³	37.580
57	挤塑保温板		m ²	19223.990	437230.97
59	碳排放合计 (kgCO ₂ e) 644887.67 (占比 4.40%)				
60	铜芯导线 电缆	铜管 DN15	10m	410.40	19685.72
61		铜管 D19.1(含保温)	m	3280.00	15733.52
62		管内穿线 导线截面(1.5mm ² 以内)铜芯	100m 单线	138.24	5373.11
63		管内穿线 导线截面(2.5mm ² 以内)铜芯	100m 单线	68.54	8327.85
64		管内穿线导线截面(4mm ² 以 内)铜芯	100m 单线	68.20	12562.35
65		绝缘导线 RVS -2*1.5	m	7911.20	1985.51
66		绝缘导线 RVS-2*1.0	m	7950.64	131.74
67		绝缘导线 BV-2.5	m	74967.32	15871.85

序号	建材类别	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
68	铜芯导线 电缆	绝缘导线 BV-4	m	35908.40	12028.80
69		铜芯绝缘导线 BV-10	m	6652.80	837.49
70		同轴电缆 SYKV-75-5-1	m	8184.96	544.54
71		同轴电缆 SYKV-75-7	m	2143.68	296.53
72		同轴电缆 SYKV-75-9	m	263.90	45.44
73		管内穿线 照明线路导线截面(2.5mm ² 以内)铜芯	100m 单线	646.27	78480.34
74		管内穿线 照明线路导线截面(4mm ² 以内)铜芯	100m 单线	326.44	60145.90
75		管内穿线 动力线路导线截面(10mm ² 以内)铜芯	100m 单线	63.36	30776.35
76		铜芯电力电缆敷设(截面35mm ² 以下)	100m	22.42	59145.61
77		铜芯电力电缆敷设(截面240mm ² 以下)	100m	10.76	86506.13
78		碳排放合计(kgCO ₂ e) 408478.77 (占比 3%)			
79	建筑装饰 涂料	红丹防锈漆	100kg	164.97	106091.01
80		调和漆	100kg	164.31	107622.40
81		乳胶漆	kg	3433.14	22475.67
82		碳排放合计(kgCO ₂ e) 236189.07 (占比 1.61%)			
83	化学类和 塑胶类管 材	塑料排水管	m	568.00	7457.79
84		PP-R 塑料给水管 D25	m	12272.64	10071.16
85		PP-R 塑料给水管 D25	m	590.84	2443.06
86		隔音多孔塑料排水管 D75	m	849.37	6003.93
87		隔音多孔塑料排水管 D100	m	1803.68	23682.15
88		隔音多孔塑料排水管 D150	m	1116.51	27344.84

序号	建材类别	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)	
89	化学类和 塑胶类管 材	塑料管 PVC16	m	67081.85	70844.46	
90		塑料管 PVC20	m	11435.41	18072.61	
91		塑料管 PVC32	m	2247.59	5436.73	
92		室内钢塑复合管(螺紋连接) 公称直径 25mm 以内	10m	29.60	1174.59	
93		室内钢塑复合管(螺紋连接) 公称直径 32mm 以内	10m	2.60	135.53	
94		室内钢塑复合管(螺紋连接) 公称直径 40mm 以内	10m	3.60	225.88	
95		室内钢塑复合管(螺紋连接) 公称直径 50mm 以内	10m	10.80	865.89	
96		室内钢塑复合管(螺紋连接) 公称直径 65mm 以内	10m	22.90	2480.20	
97		室内钢塑复合管(螺紋连接) 公称直径 80mm 以内	10m	8.40	1159.54	
98		室内钢塑复合管(螺紋连接) 公称直径 100mm 以内	10m	18.80	3358.13	
99		室内钢塑复合管(螺紋连接) 公称直径 150mm 以内	10m	5.00	1474.27	
100		室内钢塑复合管(螺紋连接) 公称直径 200mm 以内	10m	0.80	346.35	
101		碳排放合计(kgCO ₂ e) 182577.12 (占比 1.0%)				
102		石材	花岗石条石	100m ²	0.98	249.92 (占比 0.001%)
103	防水材料	氯化聚乙烯卷材 平面	100m ²	8.27	1968.26	
104		石油沥青 30#	kg	4998.65	14.18	

序号	建材类别	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
105	防水材料	聚氨酯 二布三涂 涂膜厚 2.5mm 平面	100m ²	88.57	178625.71
106		碳排放合计(kgCO ₂ e) 180858.07 (占比 1.24%)			
碳排放总量合计(kgCO ₂ e)				14640956.46	

4.5.2 建材运输阶段碳排放量计算

主要建材的运输距离见表 4.3，以上数据均来自工程决算书。依据公式 (3-5) 可计算求出 1#住宅楼运输阶段的碳排放量，见表 4.3。

表 4.3 1#住宅楼主要建筑运输阶段碳排放量

资料来源：作者自绘

序号	材料名称	单位	材料量	运输方式	运输距离 (单位: km)	建材运输碳排放 量(kgCO ₂ e)
1	钢材	t	2094.19754	铁路运输	1000	19329.44
2	石灰	t	301.78	公路(柴油)	50	2957.44
3	水泥	t	2764.89226	公路(柴油)	30	16257.57
4	木材	m ³	1.13299	公路(柴油)	35	684.17
5	砂石	m ³	106.10677	公路(柴油)	40	81998.01
6	砖	千块	379.33	公路(柴油)	30	8614.72
7	门窗	m ²	7925.57	公路(柴油)	100	5068.96
8	陶瓷	m ²	16314.75	公路(柴油)	2000	183409.78
9	涂料	t	63.3305	公路(柴油)	100	1241.28
10	保温材料	m ³	691.139	公路(柴油)	50	228.95
11	石板材	t	78.84	公路(柴油)	800	12362.11
12	塑料水管	t	25.0440941	公路(柴油)	30	147.26
13	铜芯电缆	t	43.409	公路(柴油)	70	595.57
14	商品砼	m ³	12654.64	公路(柴油)	20	117371.91
碳排放合计(kgCO ₂ e)					450267.19	

4.5.3 施工阶段碳排放量计算

依据 1#住宅楼的概算书中的单位工程定额编号, 根据《陕西省建筑装饰工程消耗量定额 2004》, 整理出建筑施工过程中的施工台班见表 4.4, 以上数据来自于 1#住宅楼的概算书中的单位工程概预算表。

根据建造施工所采用的机械台班的使用量及每台班二氧化碳的排放量并依据公式 (3-7) 来计算建造施工中施工机具的碳排放量见表 4.4。

表 4.4 1#住宅楼施工机具的碳排放量

资料来源: 作者自绘

序号	名称及规格	单位	数量	机械台班碳排放量 (kgCO ₂ e)
1	履带式单斗挖掘机 (液压) 0.8m ³	台班	37.1750	5799.30
2	履带式起重机 15t	台班	2.7010	270.10
3	轮胎式起重机 20t	台班	3.2070	413.70
4	汽车式起重机 16t	台班	27.5500	3058.05
5	汽车式起重机 5t	台班	192.2540	13938.42
6	载重汽车 8t	台班	5.8230	645.48
7	载重汽车 6t	台班	408.9660	39955.98
8	机动翻斗车 1t	台班	5.0260	94.49
9	洒水车 4000L	台班	8.9220	786.03
10	推土机 (综合)	台班	4.4610	820.82
11	电动卷扬机 (单筒慢速) 50kN	台班	339.7720	9717.48
12	双锥反转出料混凝土搅拌机 350L	台班	107.5730	3990.96
13	灰浆搅拌机 200L	台班	412.8979	3030.67
14	石料切割机	台班	365.5690	4028.94
15	钢筋切断机 Φ 40mm	台班	661.4075	18056.42
16	钢筋调直机 Φ 14mm	台班	2.1885	22.10
17	木工圆锯机 Φ 600mm	台班	168.0804	3941.15
18	木工压刨床 (单面) 600mm	台班	94.1150	1186.16

序号	名称及规格	单位	数量	机械台班碳排放量(kgCO ₂ e)
19	长螺旋钻孔机 Φ400mm	台班	128.1964	13460.62
20	短螺旋钻孔机 Φ1200mm	台班	152.3840	34591.17
21	混凝土震捣器(插入式)	台班	6.3790	74.79
22	混凝土震捣器(平板式)	台班	86.8720	509.24
23	对焊机 75kV·A	台班	96.2360	10104.78
24	电渣焊机 1000A	台班	206.2200	25777.50
25	交流弧焊机 30kV·A	台班	82.2000	6756.84
26	交流弧焊机 32kV·A	台班	2.7285	224.28
27	直流电焊机 30kW	台班	563.6680	46333.51
28	电钻	台班	530.9310	3361.32
29	电锤(小功率) 520W	台班	42.2510	171.72
30	木工平刨床 500mm	台班	15.9185	200.63
31	木工开榫机 160mm	台班	13.9672	368.44
32	木工裁口机(多面) 400mm	台班	6.2647	192.12
33	木工打眼机 MK212	台班	13.9672	64.14
34	夯实机(电动) 20~62N·m	台班	7.1388	115.78
碳排放合计(kgCO ₂ e)			252063.12	

4.5.4 施工阶段临时设施碳排放

该部分的能耗主要包括 1) 建筑施工区域内的办公区办公设备、空调、照明消耗的电能的碳排放 2) 生活区空调、照明、食堂消耗的电、燃气等能源的碳排放。

根据走访, 该项目施工周期为两年, 其中临时设施的采暖时间为 11 月 15 至次年 3 月 15, 空调时间为 6 月 15 至 8 月 31。

依据《建筑碳排放计算标准(征求意见稿)》表 B.0.1, 住宅居住空间照明时间为每年 1980h, 住宅建筑居住空间的照明功率现行值为 6W/m²; 食堂的照明时间为每年 840h, 食堂的照明功率密度现行值为 13W/m²; 厕所的照明时间为每年 1152h, 厕所的照明功率密度现行值为 6W/m²; 办公室的照明时间为每年 3528h, 办公室设备能耗密度为 13W/m²; 宿舍设备能耗密度为 12.7W/m²。空调供暖时间 1920h, 空调

制冷时间 1200h。

工地办公区和生活区的临时房屋面积参照表 3.1 进行估算得出 1 号楼施工期间临时设施的面积见表 4.5。

表 4.5 1#楼施工期间工地办公、生活用房屋设施面积

资料来源：作者自绘

临时房屋名称	指标使用方法	参考指标 (m ² /人)	人数	总面积
一、办公室	按管理人员人数	3.5	8	28
二、宿舍	按高峰年平均职工人数	3	161	483
三、食堂	按高峰年平均职工人数	0.65	161	104.65
四、厕所	按高峰年平均职工人数	0.07	161	11.27
五、其他合计	按高峰年平均职工人数	0.55	161	88.55

依据公式 (3-8)、(3-9)、(3-10)、(3-11) 可求得 1#楼施工期间工地临时设施碳排放量，见表 4.6。

表 4.6 1#住宅楼施工期间工地临时设碳排放量

资料来源：作者绘制

临时设施	临时房屋	用房面积 (单位： m ²)	照明耗电 量 (kw·h)	供暖耗电量 (kw·h)	空调制冷耗 电量 (kw·h)	总耗电量 (kw·h)	临时设施的 碳排放量 (kgCO ₂ e)
办公区	办公室	28.00	2173.25	698.88	436.80	3308.93	3232.82
生活区	宿舍	483.00	11476.08	11777.47	7360.92	30614.47	29910.34
	食堂	104.65	2285.56	0.00	0.00	2285.56	2232.99
	厕所	11.27	155.80	0.00	0.00	155.80	152.21
	其他合计	93.50	——	——	——	——	——
碳排放合计 (kgCO ₂ e)					35528.36		

4.5.5 物化阶段碳排放总量计算

依据公式（3-3），可以计算出 1#住宅楼物化阶段的总计碳排放量，具体见表 4.7 及图 4.6。

表 4.7 1#楼物化阶段中各子阶段的碳排放统计表

资料来源：作者自绘

阶段/子阶段	碳排放量 (kgCO ₂ e)
建材生产	14640956.46 (占比 95.20%)
建材运输	450267.19 (占比 2.93%)
施工机具	252063.12 (占比 1.64%)
临时设施运营	35528.36 (占比 0.23%)
碳排放合计(kgCO ₂ e)	15378815.13

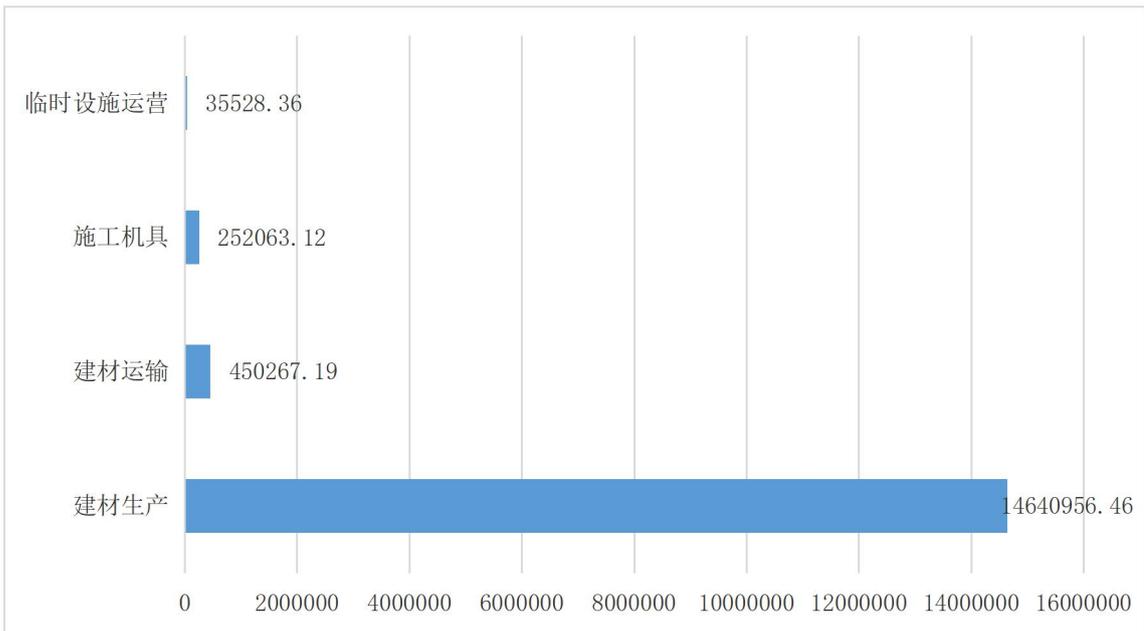


图 4.6 物化阶段中各子阶段的碳排放量 (kgCO₂e)

图片来源：作者自绘

4.6 案例使用维护阶段碳排放量计算

4.6.1 建筑使用阶段碳排放量计算

本研究中，建筑使用阶段的碳排放计算主要考虑建筑供暖、建筑供冷、生活热水、照明及可再生能源系统在建筑使用期间的综合碳排放量。

由于家用电器、办公电器、炊事、等碳排放与建筑物设计关联度低，因此其产生的碳排放不包含在建筑碳排放计算范围内。化粪池、建筑给水排水等产生的碳排放也不在本研究的碳排放计算范围内。

1. 建筑采暖与空调的能耗

由于实际计量建筑使用阶段的能源消耗可行性较低，因此本研究采用 DeST-h 软件模拟的方法来计算 1#住宅楼全年的采暖空调系统的能耗。

该住宅楼冬季采暖形式为散热器低温水采暖，为集中燃煤供热系统，其中供热锅炉热效率为 83%，采暖消耗的能源类型为原煤；夏季制冷采用分体式空调，空调能效比 3.4。其中采暖时间自 11 月 15 开始至次年 3 月 15，空调时间为 6 月 15 至 8 月 31。

1) 模拟软件的选用

(1) DEST-h 软件简介

DeST-h 是在清华大学研发的建筑热环境设计模拟软件—DeST 的基础上开发的一款针对住宅建筑专用的能耗模拟软件^[98]。

(2) DeST 软件的优点

本研究采用 DeST-h 对 1#住宅楼空调、采暖能耗进行模拟，主要是考虑 DeST-h 具有以下几点独特优势：

①DeST-h 在模拟建筑物的热性能时，以自然室温为桥梁来联系建筑物和环境控制系统，全面反映了建筑本身的性能和各种被动性热扰动（室外气象参数，室内发热量）对建筑物的影响^[99]。

②DeST-h 能够精确模拟：夜间通风对建筑各个室内房间的热环境影响；建筑内部任意邻室传热对其他各房间热环境的影响；建筑各个室内房间的实时室温；建筑的间歇空调启停对装机容量和运行能耗的影响；建筑的内外实时温度对其空调供暖负荷的影响^[100]。

③DeST-h 的模拟结果与实测值较为接近。

2) 建立模型

(1) 构建围护结构

在 DeST-h 中严格按照设计图纸依次构建 1#住宅楼的墙体、门、窗、地板、楼板、屋顶等围护结构。其中 1#住宅楼围护结构的构造做法见表 4.8，具体步骤如图 4.7、图 4.8。

表 4.8 1#住宅楼围护结构做法（资料来源：作者自绘）

外墙	钢筋混凝土剪力墙及非承重空心砖外贴 45mm 厚挤塑保温板
填充墙（内墙）	非承重粘土空心砖厚度随剪力墙走
住宅户内隔墙（内墙）	中空内膜金属网水泥隔墙 隔墙板厚 90mm
卫生间、地上管井（内墙）	120mm 厚承重黏土多孔砖
户门	塑钢门 K=2.0
内部房间门	胶合板门
外窗	塑钢门窗（中空玻璃，中空 12mm），传热系数 $K=2.6\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{k}$ ，遮阳系数 $SC=0.83$
屋顶	屋顶保温层采用 150mm 厚的水泥聚苯保温板

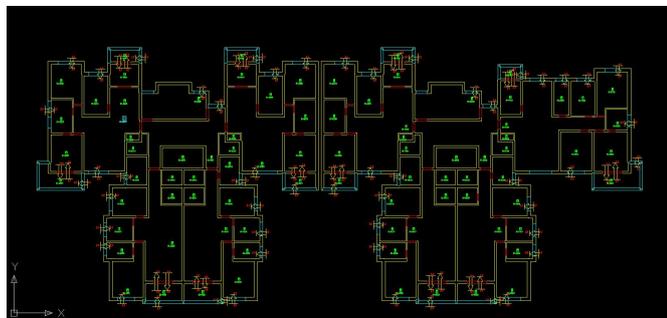


图 4.7 建筑模型构建（图片来源：作者自绘）

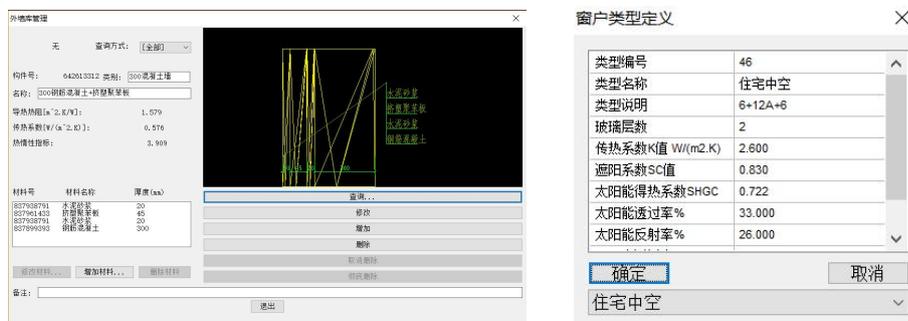


图 4.8 自定义建筑构件设定（图片来源：作者自绘）

(2) 内扰、作息表的设定

房间的内扰包含人员热忱、灯光热忱和设备热忱等。其中，灯光和设备热忱采用软件默认的主卧热忱，而人员热忱由实际的情况而定。特别指出的是由于 1# 住宅楼 1F、2F 为商业和办公，可采用 DeST-c 软件的商场、办公室的相关系统参数为参考，其设置的具体步骤如图 4.9，4.10。

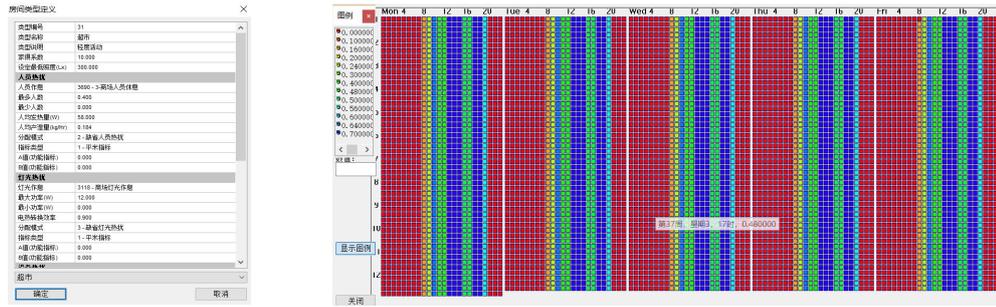


图 4.9 房间热扰设置 (资料来源: 作者自绘)

标识号	名称	面积(平方米)	容积(立方米)	空间类型	是否空调	房间功能	相邻房间	所邻大气	外
83162	R3-83163	12.670000	36.743000	0 - 普通房间	1 - 是	30 次卧室	5	1	1
83327	R3-83328	15.120000	43.848000	0 - 普通房间	1 - 是	37 主卧室李金澍	5	1	1
83321	R3-83322	9.433026	27.355776	0 - 普通房间	0 - 否	36 卫生间李金澍	5	1	3
83305	R3-83304	4.480000	12.992000	0 - 普通房间	0 - 否	17 空房间	6	0	0
83324	R3-83325	45.503722	131.960794	0 - 普通房间	1 - 是	3 起居室	14	1	2
83168	R3-83169	7.920000	22.968000	0 - 普通房间	0 - 否	5 厨房	7	1	1
83342	R3-83343	4.493500	13.031150	0 - 普通房间	0 - 否	17 空房间	6	0	0
83294	R3-83295	11.196000	32.468400	0 - 普通房间	1 - 是	17 空房间	6	0	0
83345	R3-83346	4.370000	12.673000	0 - 普通房间	0 - 否	17 空房间	6	0	0
83300	R3-83301	4.600000	13.340000	0 - 普通房间	0 - 否	36 卫生间李金澍	5	0	0
83297	R3-83298	4.730000	13.717000	0 - 普通房间	0 - 否	36 卫生间李金澍	5	0	0
83171	R3-83172	13.200000	38.280000	0 - 普通房间	1 - 是	30 次卧室	5	1	0
83291	R3-83292	43.917258	127.360047	0 - 普通房间	1 - 是	3 起居室	11	0	0
83261	R3-83262	8.137742	23.599453	0 - 普通房间	0 - 否	36 卫生间李金澍	5	1	2

图 4.10 房间功能设置 (图片来源: 作者自绘)

(3) 系统空调、通风的设定

添加空调系统，添加通风系统，采用逐时通风定义，具体步骤见图 4.11。



图 4.11 系统空调设置 (图片来源: 作者自绘)

3) 建筑能耗的模拟计算

利用 DeST-h 模拟出 1#住宅楼的全年采暖空调能耗结果见表 4.9。从表 4.9 可知, 1#住宅楼的全年采暖总能耗为 647MWh/a, 折合使用燃煤 449.02 t/a, 全年空调总用电为 187MWh/a, 折合使用电量为 4.9KWh/ (m².a)。

表 4.9 1#住宅楼每月采暖空调能耗

资料来源: 作者自绘

月份	采暖能耗 (KWh)	空调用电 (KWh)
1	2.30E+05	0.00E+00
2	1.49E+05	0.00E+00
3	5.14E+04	0.00E+00
4	0.00E+00	0.00E+00
5	0.00E+00	0.00E+00
6	0.00E+00	2.48E+04
7	0.00E+00	7.83E+04
8	0.00E+00	8.35E+04
9	0.00E+00	0.00E+00
10	0.00E+00	0.00E+00
11	2.71E+04	0.00E+00
12	1.89E+05	0.00E+00
合计	6.47E+05	1.87E+05

使用阶段采暖的消耗主要是原煤, 空调制冷的能源消耗为电力, 原煤碳排放因子为 2061.53 kg/t, 陕西省的电力碳排放因子为 0.9578 kgCO₂e/KWh。因此, 经计算 1#住宅楼使用阶段的年碳排放总量为 1111706.80kg, 折合单位建筑面积碳排放量为 28.38 kgCO₂e/(m².a)。具体见表 4.10。

表 4.10 1#住宅楼全年空调采暖碳排放量

资料来源：作者自绘

采暖碳排放量(kgCO ₂ e)	925682.63
制冷碳排放量(kgCO ₂ e)	186024.17
碳排放总量(kgCO ₂ e)	1111706.80

2. 建筑照明的能耗

建筑物照明能耗是建筑物能源消耗的重要组成部分。照明系统的能耗可按建筑照明功率密度与照明时间的乘积进行计算得到。

根据《建筑碳排放计算标准（征求意见稿）》表 B.0，住宅楼的居住空间及底层商业的照明功率现行值及照明时间见表 4.11。

表 4.11 不同建筑物的月照明时间

资料来源：根据相关文献整理

建筑类型	房间类型	月照明小时数 (h)	照明功率密度 (W/m ²)
居住建筑	起居室	165	6
	卧室	135	6
	餐厅	75	6
	厨房	96	6
	洗手间	165	6
	储物间	0	0
	走廊等公共空间	5	15
	车库	30	2
公共建筑	办公室	294	18
	设备用房	0	5
	一般商店、超市	390	12

本研究 1#住宅楼照明系统的照明时间和照明功率密度按表 4.11 取值，具体计算过程见附录二表 4.12。

经过计算，1#住宅楼的全年照明能耗为 9.87kWh/(m²·a)。西北电网的电力碳排放因子为 0.977 kgCO₂e/kWh, 可以得出 1#住宅楼的全年因照明能耗引起的碳排

放为 $9.64 \text{ kgCO}_2\text{e}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

3. 电梯的能耗

根据《电梯技术条件》GB/T 10058-2009 提供的电梯能耗预测模型，电梯能耗可以根据以下公式计算：

$$E_{el} = (K_1 \times K_2 \times K_3 \times H \times F \times P) / (V \times 3600) + Est \quad [43] \quad (\text{公式 } 6.1)$$

式中： E_{el} 为电梯使用一年的能耗，kWh/a；

K_1 为驱动系统系数， $K_1=1.6$ (交流调压调速驱动系统时)， $K_1=1.0$ (VVVF 驱动系统时)， $K_1=0.6$ (带能量反馈的 VVVF 驱动系统时)；

K_2 为平均运行距离系数， $K_2=1.0$ (2 层时)， $K_2=0.5$ (单梯或两台电梯并联且多于 2 层时)， $K_2=0.3$ (3 台及以上的电梯群控时)；

K_3 为轿内平均载荷系数， $K_3=0.35$ ；

H 为最大运行距离，m；

F 为年启动次数，根据文献[44]的研究标准住宅约为 146000 次；

P 为电梯的额定功率，kW；

V 为额定速度，m/s；

Est 为一年内的待机总能耗，根据文献[44]的研究住宅电梯待机能耗占总能耗的 70%。

1#住宅楼共 2 个单元，总计 4 部电梯，每部电梯都采用 VVVF 驱动系统，额定功率 14kW，额定载重量为 1000kg，最大运行距离 103.8m，额定速度为 1.75 m/s。根据上述公式可以计算得到 1#住宅楼全年电梯能耗约为 $2.01 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。西北电网的电力碳排放因子为 $0.9578 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{kWh}$ ，可以得出 1#住宅楼的全年因电梯耗能引起的碳排放为 $1.96 \text{ kgCO}_2\text{e}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

4. 生活热水系统能耗

生活热水消耗的能源是建筑物碳排放的重要组成部分。生活热水的需求量同室内人员的数量、使用习惯和活动类型有关，具有很大的随机性，很难找到准确的规律，因此，本研究使用阶段不考虑生活热水系统的能耗。

5. 使用阶段碳排放总量

根据以上数据，可求得 1#住宅楼使用阶段碳排放总计为 $1566436.12 \text{ kgCO}_2\text{e}$ ，具体见表 4.13。

表 4.13 1#楼使用阶段年碳排放排放量 (kgCO₂e/a)

资料来源：作者自绘

使用阶段各阶段年碳排放量 (kgCO ₂ e. a)	
项目	碳排放量
采暖	9.26E+05
空调	1.86E+05
照明	3.78E+05
电梯	7.69E+04
总计	1.57E+06

4.6.2 案例建筑维护阶段碳排放量计算

普通房屋的设计使用寿命一般为 50 年，而建筑部件，如保温材料、门窗，建筑设备，如锅炉、冷水机组的使用寿命一般小于建筑的使用寿命，在建筑的全生命周期内存在更换的可能。与此同时建筑设备的更换会产生更换的能耗，会带来相应的碳排放。其中常见的建筑设备常用使用年限见表 4.14。

建筑设备更换产生的碳排放包括被更换的建筑部件、设备的生产、加工、运输、施工和安装过程产生的碳排放。

表 4.14 建筑设备常用使用年限

资料来源《建筑碳排放计量标准》

序号	项目	使用年限 (年)
1	外保温	15-50
2	门窗	20-50
3	供电系统设备	15-20
4	供热系统设备	11-18
5	空调系统设备	10-20
6	通讯设备	8-10
7	电梯	10

一般而言，建筑维护过程中替换的是建筑的构造层或施工项目，而不是某建筑材料。如替换防水材料需要重新施工整个防水层和屋面层^[101]。由于建筑构造做法种类繁多，为便于研究，选取《陕西省 09 系列建筑标准设计图集》中的相关构造做法，同时参考仓玉洁^[88]所构建的建筑构造碳排放因子库（部分建筑构造碳排放因子见附录二表 4.15），将需要维护的材料量与相应的构造碳排放因子相乘后

累加即可得出 1#楼需要维护的构件维护过程中材料生产与施工安装的碳排放量，详见附录二表 4.16。需要维护的构件、部品运输过程中产生的碳排放量见附录二表 4.17。

需要指出的是虽然供电系统设备、供热系统设备、空调系统设备、通讯设备、电梯在建筑生命周期内也需要维护，但由于相应的碳排放因子的缺乏，因此该部分维护的碳排放量没有计入。

最后，1#楼需要维护的构件维护过程中材料生产与施工安装的碳排放量与需要维护的构件、部品运输过程中产生的碳排放量相加可以计算出 1#楼维护阶段碳排放量见表 4.18。

表 4.18 1#楼维护阶段碳排放量

资料来源：作者自绘

序号	项目	需维护建材生产和施工安装中碳排放量 (kgCO ₂ e)	需维护建材运输碳排放量 (kgCO ₂ e)	维护阶段碳排放量 (kgCO ₂ e)
1	墙体保温	476755.76	197.19	476952.95
2	屋面保温	173069.40	31.76	173101.16
3	防火门	23746.87	10472.10	644107.64
	三防门	77052.30		
	铝合金门窗	157591.77		
	中空玻璃塑钢窗	343828.30		
4	防水层	257981.8	133.94	258115.74
5	供电系统设备	---	---	---
6	供热系统设备	---	---	---
7	空调系统设备	---	---	---
8	通讯设备	---	---	---
9	电梯	---	---	---
碳排放量总计 (kgCO ₂ e)			1552277.49	

由表 4.18 可以看出 1#楼在使用寿命期间，因维护带来的碳排放量为

1552277.49 kgCO₂e, 折合成单位建筑面积碳排放量为 39.64kgCO₂e/m²。

4.6.3 案例建筑使用维护阶段碳排放总量计算

由以上结果,按建筑使用寿命为 50 年,可求出 1#住宅楼使用维护阶段总的碳排放量为 80052277.49 kgCO₂e,折合成单位建筑面积碳排放量为 2043.56 kgCO₂e/m²。具体见 4.19。

表 4.19 1#住宅楼使用维护阶段碳排放量

资料来源:作者自绘

阶段/子阶段	碳排放量 (kgCO ₂ e)
建筑日常使用阶段	78500000 (占比 98.06%)
建筑维护阶段	1552277.49 (占比 1.94%)
碳排放合计 (kgCO ₂ e)	80052277.49

4.7 案例拆除清理阶段碳排放量计算

建筑拆解阶段的碳排放主要包括拆解机具的运行和拆解废弃物的运输耗能引起的碳排放量,及由于废弃建筑回收带来的碳减量。建筑拆除是建筑建造的逆过程,除采用爆破或整体拆除方式外,拆除阶段可以参照建造阶段的计算方法来计算拆除过程的能耗。

4.7.1 拆解工具运行的碳排放量

由于本建筑尚未进行实际拆解,本研究借鉴欧阳磊^[94]等人的研究成果,对该建筑拆除阶段的拆解机具的运行能耗进行估算。

本案例总建筑面积 39173m²,其中地上 36363m²,地下 2810 m²。本建筑拆除方式拟采用人工拆解与机械拆解结合的方式。首先拆解建筑装饰、管道、设备、照明、水卫、通风、门窗等,清空室内后拆解主体结构,按照屋面、墙、梁、柱的顺序逐层向下,直至基础。根据本建筑工程量清单,可以采集到主体结构、围护结构、装饰工程等的拆解工程量,见表 4.20。

表 4.20 分部分项工程量清单

资料来源：作者自绘

序号	项目名称	项目特征描述	计量单位	工程量
1	砖砌体拆除	砖及砌块砌体 机械拆除	m ³	2833.42
2	钢筋混凝土构件拆除	现浇钢筋混凝土楼板 机械拆除	m ³	2723.45
3	钢筋混凝土构件拆除	现浇钢筋混凝土梁、柱 机械拆除	m ³	901.42
4	钢筋混凝土构件拆除	现浇钢筋混凝土墙 机械拆除	m ³	6780.09
5	钢筋混凝土构件拆除	现浇钢筋混凝土楼梯 机械拆除	m ³	196.51
6	钢筋混凝土构件拆除	现浇钢筋混凝土阳台 机械拆除	m ³	219.20
7	钢筋混凝土构件拆除	现浇钢筋混凝土其他构件 有筋 机械拆除	m ³	42.63
8	金属门窗拆除	铝合金、塑钢窗拆除 铝合金门拆除	m ² m ²	5569.00 1734.00
9	立面抹灰层拆除	墙面抹灰铲除 水泥砂浆混 合砂浆	m ²	9752.00
10	天棚抹灰面拆除	天棚抹灰铲除 水泥砂浆混 合砂浆	m ²	6616.00
11	平面块料拆除	面砖地面拆除	m ²	165.00
12	立面块料拆除	墙面块料面层铲除 陶瓷块 料	m ²	2794.00
13	栏杆、栏板拆除	栏杆(板)的高度:扶手及栏 杆拆除 靠墙扶手	m ²	314.30

参考《全国统一房屋修缮工程预算定额》及深圳市东方盛世花园二期 E 栋 12 号楼拆除工程项目^[94]（建筑面积 8470.19 m²）拆除阶段使用机械种类及台班，估算出本研究案例的机械台班种类及数量见表 4.21，根据公式（3-16）可计算出施工机具运行的碳排放量，见表 4.22。

表 4.21 机械台班汇总

资料来源：作者自绘

序号	机械名称	单位	数量
1	履带式推土机 功率 90kW	台班	112.82
2	履带式单斗挖掘机 机械斗容量 1.0m ³	台班	80.52
3	风动凿岩机 手持式	台班	2269.54
4	履带式液压岩石破碎机 105kW	台班	374.22
5	载货汽车(装载质量 4t 中型)	台班	46.90
6	洒水车 罐容量 4000L	台班	13.65
7	内燃空气压缩机 排气量 3m ³ /min	台班	1185.62
8	履带式推土机 功率 75kW	台班	93.94

表 4.22 拆解过程机械台班碳排放量

资料来源：作者自绘

机械名称	单位	数量	消耗能源类型	台班碳排放因子 (kg/台班)	碳排放量
履带式推土机 功率 90kW	台班	112.82	柴油	184	20759.6
履带式单斗挖掘机 机械斗容量 1.0m ³	台班	80.52	柴油	196	15782.68
风动凿岩机 手持式	台班	2269.54	电	15.25	34610.49
履带式液压岩石破碎机 105kW	台班	374.22	柴油	91.56	34263.41
载货汽车(装载质量 4t 中型)	台班	46.9	汽油	74.9	3512.78
洒水车 罐容量 4000L	台班	13.65	汽油	88.82	1212.1
内燃空气压缩机 排气量 3m ³ /min	台班	1185.62	电	87.57	103824.46
履带式推土机 功率 75kW	台班	93.94	柴油	168	15781.6
合计碳排放量 (kgCO ₂ e)					229747.12

4.7.2 废旧建材运输碳排放量

根据建材工程量清单，可得建筑拆解后废旧建材产生量见表 4.23。

表格 4.23 1#住宅楼拆解后废旧建材产生量

资料来源：作者自绘

废弃建材	混凝土	砖、砌块 石材	废弃砂浆	废弃 金属	废弃 木材	其他废弃 物	总量
产生量 (t)	29941.81	1543.93	13525.60	2094.20	99.73	3525.57	50730.85

废旧建材运输阶段的碳排放量主要由运输车辆消耗能源产生。建筑拆除时废弃金属和木材可以当场回收，其余建筑废弃物总量约为 52883.54t，废旧建筑材料由所在地运往西安市阎良区振兴街道建筑垃圾综合利用场，采用公路运输方式，单程距离约为 70km，所采用的运输工具为额定载重 12t 的自卸汽车，消耗能源类型为柴油，根据公式（3-5）可计算得出废旧建材运输碳排放量见表 4.24。

表格 4.24 1#住宅楼拆解后废旧建材运输碳排放量

资料来源：作者自绘

运输距离 (km)	废旧材料量 (t)	运输碳排放因子 kgCO ₂ e/(10 ² t•km)	运输碳排放量 (kg)
70	48536.91	19.6	665926.46

4.7.3 废旧建材回收利用阶段碳排放减量

1. 废旧建材回收利用的碳减量

废旧建材的回收利用可以减少原料开采、提纯环节的能耗，所以材料回收利用率，建筑拆解的减排效果就更加明显。例如钢材的回收可以节约钢材生产过程中从铁矿石开采到粗钢的生产过程。

本阶段同样以钢、混凝土、水泥、砂石、砖、铜芯电线电缆、墙体材料、门窗、木材、建筑陶瓷、保温材料和涂料等十四种建材为研究对象。其中，水泥、陶瓷、砂石、保温材料、涂料等建筑材料经过长时间使用，很难独立拆除并进行二次回收加工使用。

但对于门窗、砖、钢筋、铜芯电线电缆、PVC 管材等因其可独立拆除（或在拆

除破坏时可单独分类)，并可经过二次加工后再次成为建材，故属于可回收建材。

常见的可回收建材利用方式如下：

(1) 废弃混凝土：废弃的建筑混凝土通过新的技术手段可制成混凝土的各种原材料——再生骨料、再生水泥等，通过建筑和拆除废物获得的再生骨料质量较差，一些研究人员建议使用 30%至 50%的再生骨料，以达到与天然骨料混凝土相当的强度，并辅以水泥材料。同时废旧混凝土再生细骨料可用于制备混凝土砖石及公共用地铺路砖等。

(2) 废旧砖、砌块：一是回收利用，可以将旧砖、砌块和石材粉碎作为混凝土骨料等多种途径来加以利用。二是再利用，作为地面铺装、墙面装饰材料来加以利用。

(3) 废弃钢材：废弃的钢材的回收加工过程中，常采用剪切、打包、破碎、分选、清洗、预热等形式，使废旧钢铁最终形成能被利用的优质炉料，根据废料的的不同形式、尺寸和受污染程度以及回收用途和质量要求，选用不同的处理方式^[102]。

(4) 废电线电缆：主要是将覆于铜线外缘的塑料等物质予以分离，使铜线得以熔炼再生。机械法资源拆解技术是目前国内外使用最广泛的方法，其原理主要是利用机械剪刀将电线电缆破碎成颗粒状，再利用比重、磁力或静电分选方法，将破碎后非金属与金属予以分离^[103]。

对主要建材回收利用方式做出简要总结见表 4. 25。

表 4. 25 部分建材回收利用方式

资料来源：作者自绘

废弃建材种类	回收利用方式简述	碳排放减量对应过程
废弃混凝土	制成混凝土的各种原材料	天然石料到再生骨料
废弃砖、砌块	旧砖粉碎作为混凝土骨料等多种途径	天然石料到骨料
废弃钢材	废旧钢铁最终形成能被利用的优质炉料	矿石到粗钢
废电线电缆	机械粉碎，将金属与非金属分离	铜矿石到粗铜

本研究在此基础上并依据案例建筑工程清单，选择废旧混凝土、多孔砖、钢材、铜芯导线电缆、门窗、木材和 PVC 管材七种可回收建材为研究对象，根据公式 (3-18) 计算在拆解方式下废旧建材回收利用碳排放减量，结果见表 4. 26。

表 4.26 1#住宅楼拆解后废旧建材回收利用碳排放减量

资料来源：作者自绘

废旧建材种类	废旧建材产生量	回收利用率	建材回收量	回收后的材料种类	碳排放因子	碳排放减量 (kg)
混凝土	29941.81t	0.70 ^[104]	24130.57t	骨料、砾石	6.43kgCO ₂ e/t	134768.09
砖	379 千块	0.70 ^[104]	265.30 千块	砖	349kgCO ₂ e/千块标准砖	92589.70
各种型钢	41.85t	0.90 ^[104]	37.67t	粗钢	2308.9kgCO ₂ e/t	86976.26
钢筋	2039.64t	0.90 ^[104]	1835.68 t	粗钢	2308.9kgCO ₂ e/t	4238401.55
铜芯电线电缆	43409.1kg	0.90 ^[104]	39068.19 kg	粗铜	9.41kgCO ₂ e/kg	367631.67
门窗 (铝合金中空)	6897.9 m ²	0.80 ^[104]	5518.32 m ²	门窗	46.3kgCO ₂ e/m ²	255498.22
木材	226.6m ³	0.65 ^[104]	147.29m ³	木材	139kgCO ₂ e/m ³	20473.31
PVC 管材	17.59t	0.25 ^[104]	4.40t	再生料	9.74kgCO ₂ e/kg	42856.00
合计碳排放减量 (kgCO ₂ e)					5239194.80	

4.7.4 拆解阶段碳排放总量

根据以上数据，根据公式（3-15）可以计算出拆解过程的建筑碳排放总量-4112082.79 kgCO₂e，见表 4.27。

表 4.27 1#楼拆解方式下碳排放总量

资料来源：作者自绘

子阶段	碳排放增量 (kg)	碳排放减量 (kg)	单位建筑面积碳排放量 (kg/m ²)
机械台班施工	229747.11	——	5.87
废旧建材运输	665926.46	——	17.00
废旧建材回收利用	——	5239194.80	-133.74
合计	895673.57	5239194.80	-110.87

由上表可知，建筑拆解阶段因施工和废旧建材运输所产生的碳排放增量为

22.87 kgCO₂e/m²，而拆解后，由于部分废旧建材回收利用带来的碳减量为碳排放减量为 133.74 kgCO₂e/m²，故拆解阶段总计碳排放量为 -4343521.23 kgCO₂e，拆解阶段单位建筑面积的碳排放量为-110.87 kgCO₂e/m²。

4.8 案例建筑当前生命周期阶段的碳排放量

案例建筑竣工于 2007 年，至 2018 年已运行使用 11 年，期间没有发生建筑主体、保温层、防水层、设备的维护，可以求出当前生命周期碳排放量为 32450611.06 kgCO₂e，折合单位建筑碳排放量为 828.39 kgCO₂e/m²，占建筑全生命周期中碳排放量的 26%。

4.9 建筑全生命周期碳排放总量计算

根据公式（3-1）可求出建筑全生命周期碳排放量为 91087571.39 kgCO₂e，见表 4.28，折合单位建筑面积的碳排放量为 2325.26 kgCO₂e/m²，根据公式（3-2）可求出 1#住宅楼年单位建筑面积的碳排放量为 46.51 kg CO₂e/m². a。

表 4.28 1#住宅楼建筑全生命周期碳排放量（kgCO₂e/m²）

资料来源：作者自绘

阶段/子阶段		碳排放量 (kgCO ₂ e/m ²)
物化阶段		392.59
使用维护阶段		2043.56
拆除清理阶段	拆除阶段	22.86
	废旧建材回收	-133.75
全生命周期碳排放合计(kgCO ₂ e)		2325.26

4.10 与其他相关研究的对比及分析

表 4.29 统计了近年来国内其他相关研究的住宅建筑生命周期碳排放量和全生命周期碳排放量构成。

表 4.29 国内住宅建筑生命周期碳排放研究对比表（单位 kgCO₂e/m²）

资料来源：作者自绘

文献	地区	研究对象	物化阶段		使用维护阶段		拆除清理阶段		生命周期
			碳排放量	百分比	碳排放量	百分比	碳排放量	百分比	碳排放量
			(kg/m ²)	(%)	(kg/m ²)	(%)	(kg/m ²)	(%)	(kg/m ²)
张婷 ^[105]	马鞍山	住宅小区	697.16	20.66%	2420.76	77.92%	48.1	1.42%	3166.02
阴世超 ^[54]	哈尔滨	多层砖混	373.43	18.87%	1535.85	77.59%	70.1	3.54%	1979.37
罗智星 ^[36]	渭南	钢筋混凝土高层	820.3	20.52%	3086.5	77.22%	90.3	2.26%	3997.1
王上 ^[78]	成都	多层框架	617.7	13.55%	1566.4	85.57%	16.35	0.88%	1867.2
熊宝玉 ^[46]	深圳	钢筋混凝土高层	220.95	11.21%	1731.33	87.83%	19.85	0.96%	1971.5
李海峰 ^[21]	上海	多层住宅	240.1	21.09%	885.8	77.81%	12.1	1.10%	1138.4
周晓 ^[51]	杭州	钢筋混凝土高层	627.5	22.46%	2116.0	75.73%	50.5	1.81%	2794.0
本研究	西安	钢筋混凝土高层	258.84	11.13%	2043.56	87.89%	22.86	0.98%	2325.26

注：为方便比较，将本研究拆中除清理阶段因建材回收带来的碳减量归入物化阶段，并在物化阶段予以减除。

4.10.1 不同研究住宅全生命周期段碳排放构成对比及分析

相关研究的住宅全生命周期阶段的碳排放量（kgCO₂e/m²）及所占比例见图 4.12，相关研究的碳排放构成见图 4.13。

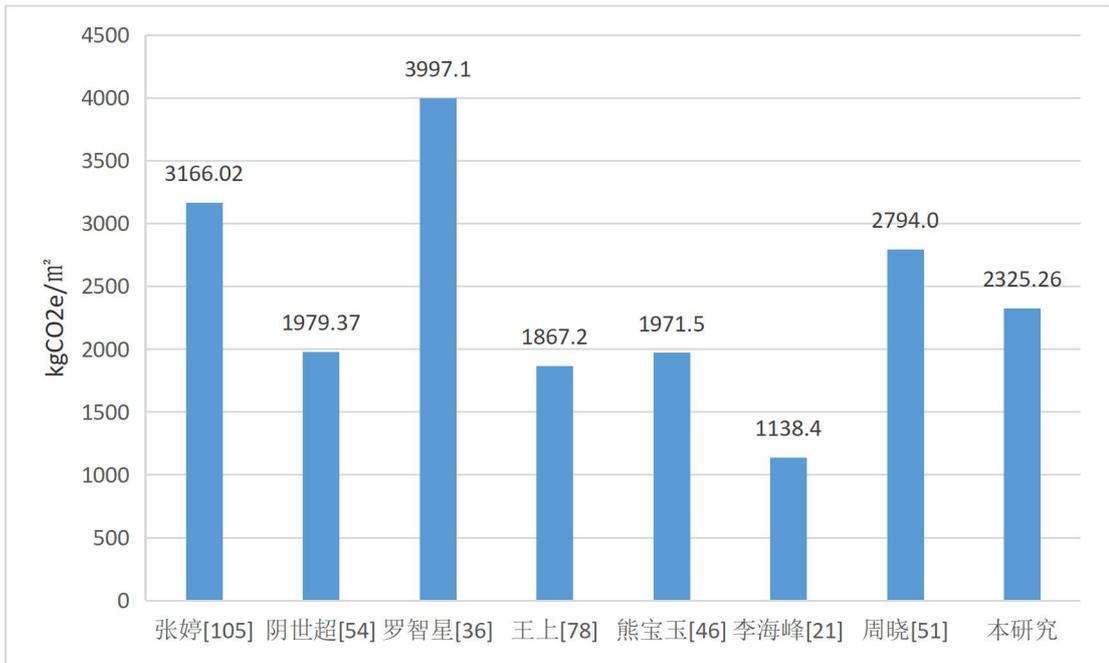
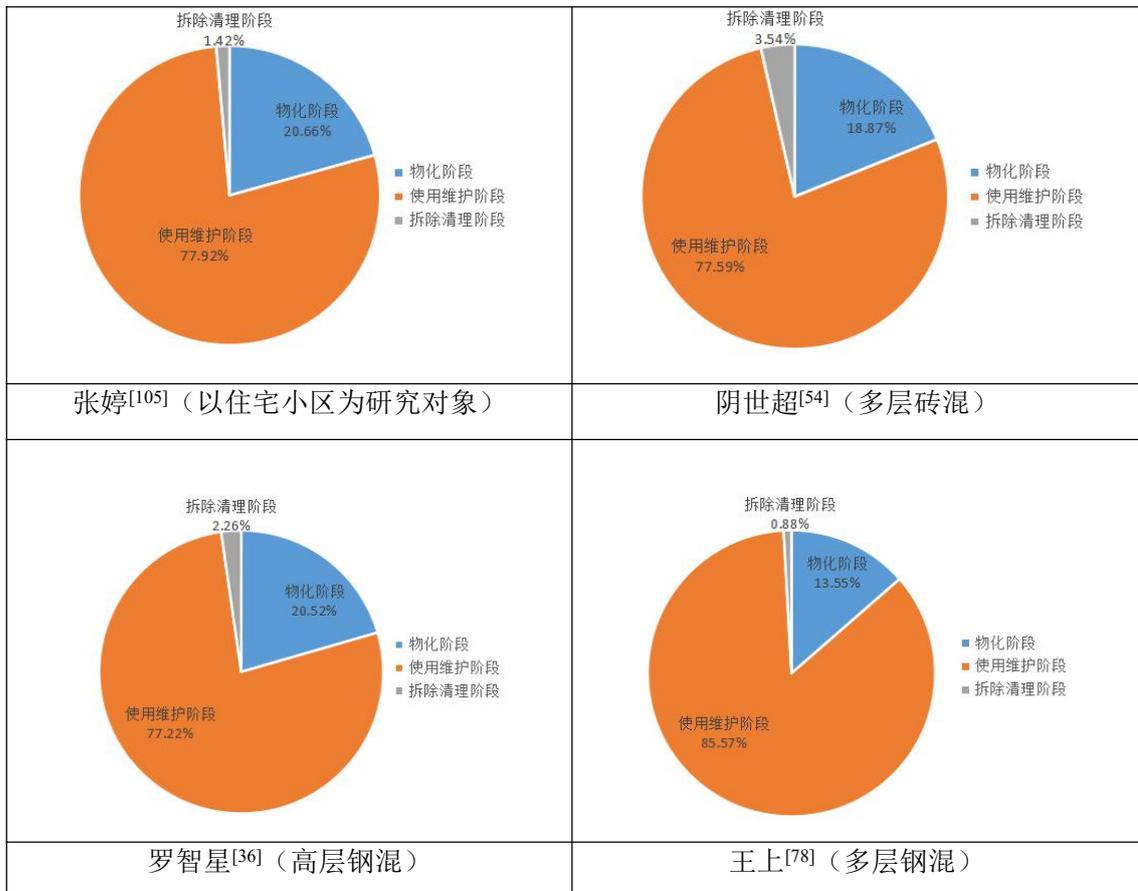


图 4.12 不同研究的住宅建筑全生命周期碳排放量对比

图片来源：作者自绘



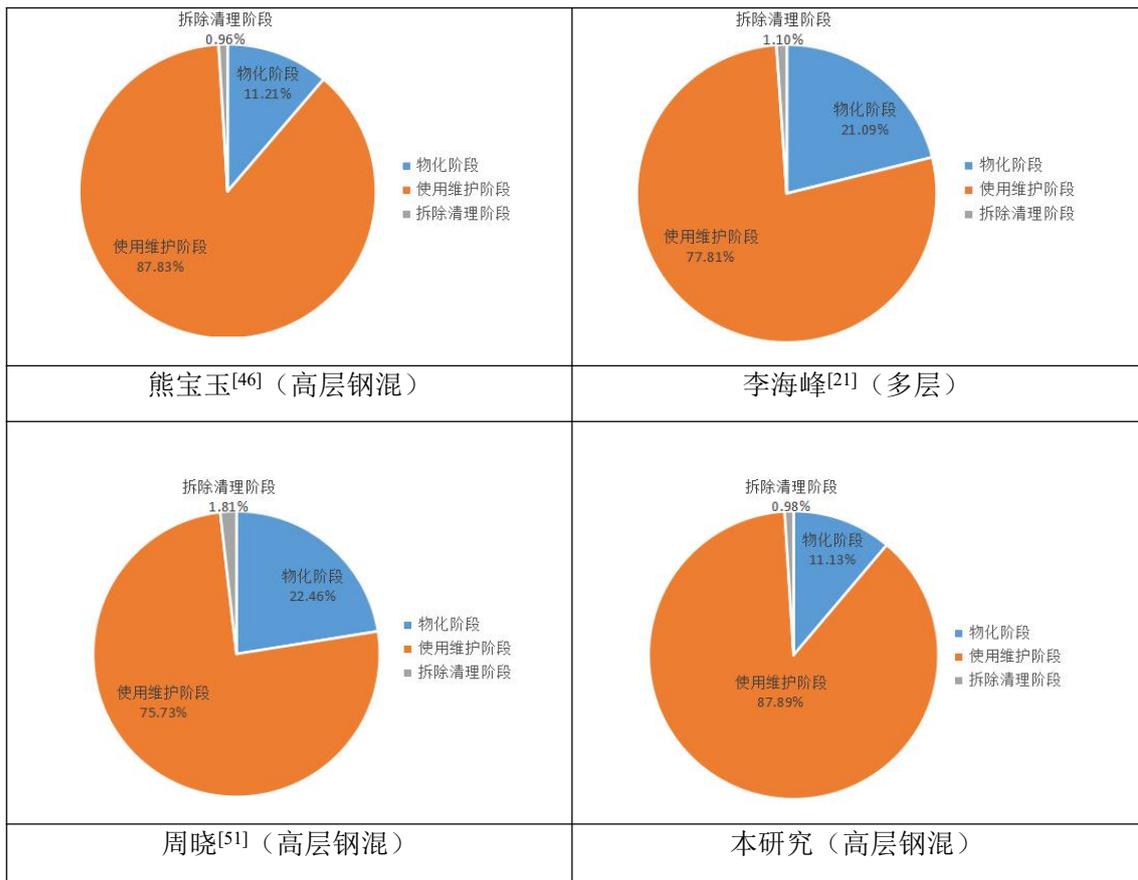


图 4.13 不同研究的住宅建筑生命周期碳排放构成对比

图片来源：作者自绘

1. 相关研究全生命周期碳排放量比较

由图 4.12, 4.13 可看出国内相关研究与本案例研究相比, 生命周期碳排放量差异较大, 范围在 1138.4 - 3997.1 kgCO₂e/m², 但生命周期各阶段所占的比例较为接近, 都是使用维护阶段占比最大, 其次为物化阶段, 最后为拆除清理阶段。

本研究住宅建筑全生命周期碳排放为 2325.26 kgCO₂e/m², 与同是高层钢筋混凝土结构的熊宝玉^[46]相比碳排放较大的原因在于本研究处于寒冷地区, 冬季需要采暖, 使用阶段采暖能耗较大, 导致本研究的结论大于熊宝玉^[46]的研究。

而周晓^[51]的研究虽然在杭州, 但附带有底层商业, 使用阶段的碳排放计算考虑了生活用气、水处理和家电的碳排放, 同时更新维护阶段的碳排放与本研究相差十倍之多。

2. 相关研究全生命周期碳排放构成差异原因分析

1) 生命周期各阶段纳入计算的单元不同

将以上相关研究的每个阶段的碳排放纳入碳排放计算的碳源统计见表 4.30。

表 4.30 相关研究各阶段纳入碳排放计算的碳源统计

资料来源：作者自绘

文献	物化阶段碳源	使用维护阶段碳源	拆除清理阶段碳源
张婷 ^[105]	建材生产(考虑回收率)(17.75%) 建材运输 (0.02%) 施工机具运行 (1.6%) 装饰装修 (1.78%)	空调设备运行 采暖 建筑更新维护	拆除施工 垃圾运输 回收处置
阴世超 ^[54]	建材生产(考虑回收率)(14.71%) 建材运输 (0.33%) 施工机具运行 (3.82%)	电能 (62.44%) 煤炭 (32.03%) 天然气 4.63%) 液化石油气 (0.90%)	拆除施工 (0.1%) 垃圾运输 (3.44%)
罗智星 ^[36]	建材生产及运输 (考虑回收率) (11.30%) 施工机具运行 (1.30%) 土地利用 (7.9%)	采暖 (15%) 空调 (9.5%) 照明 (6.8%) 电梯 (2.8%) 制冷剂泄露 (14.7%) 给排水 (2.1%) 生活用气 (3.2%) 家电 (3.9%) 建筑更新维护 (18.2%)	拆除施工 (1%) 垃圾运输 (0.20%) 回收处置 (1%)
王上 ^[78]	建材生产 (30.43%) 建材运输 (0.63%) 施工机具运行 (1.65%) 管理设备运行 (0.39%)	电 (65.31%) 水 (3.10%) 生活用气 (15.48%) 维护更新 (1.69%)	拆除施工 (0.38%) 垃圾运输 (0.49%) 建材回收利用 (-19.53%)
熊宝玉 ^[46]	建材生产(考虑回收率)(9.65%) 建材运输 (0.93%) 建筑施工 (0.63%)	空调等设备生产 (2.22%) 电 (65.41%) 生活用气 (0.07%) 水 (4.51%) 维护更新的碳排放 (15.62%)	拆除施工 (0.06%) 垃圾运输 (0.40%) 建筑垃圾处理 (填埋和焚 烧) (0.50%)
李海峰 ^[21]	建材生产(考虑回收率)(17.72%) 建材运输 (0.50%) 施工机具运行 (2.87%)	耗电量 (60.43%) 耗气量 (17.38%)	拆除施工 垃圾运输
周晓 ^[51]	建材生产 (考虑回收率) 建材运输 施工机具运行	空调设备运行 照明 电梯 家电 建筑更新维护	拆除施工 (0.52%) 垃圾运输 (1.30%) 建材回收处置利用耗用的 能源

文献	物化阶段碳源	使用维护阶段碳源	拆除清理阶段碳源
本研究	建材生产阶段 (16.07%) 建材运输阶段 (0.50%) 施工机具运行 (0.28%) 管理设备运行 (0.04%)	采暖 (50.83%) 空调 (10.21%) 照明 (20.75%) 电梯 (4.21%) 维护 (1.70%)	拆除施工 (0.25%) 垃圾运输 (0.73%) 建材回收利用 (-5.76%)

由表 4.30 可以看出，各阶段的碳排放活动单元的不同是造成不同研究碳排放构成差异的主要因素。

2) 不同气候分区、不同建筑类型导致的差异

相关研究由于建筑处于不同的气候分区、不同的地域，同时住宅建筑有多层钢筋混凝土框架结构的、有高层钢筋混凝土剪力墙结构、有多层砖混。不同的结构形式，不同的层高也会导致碳排放构成的不同。

4.10.2 不同研究物化阶段碳排放量对比及分析

相关研究的住宅建筑物化阶段的碳排放量(kgCO₂e/m²)及所占比例见图 4.14。相关研究物化阶段的碳排放构成见图 4.15。

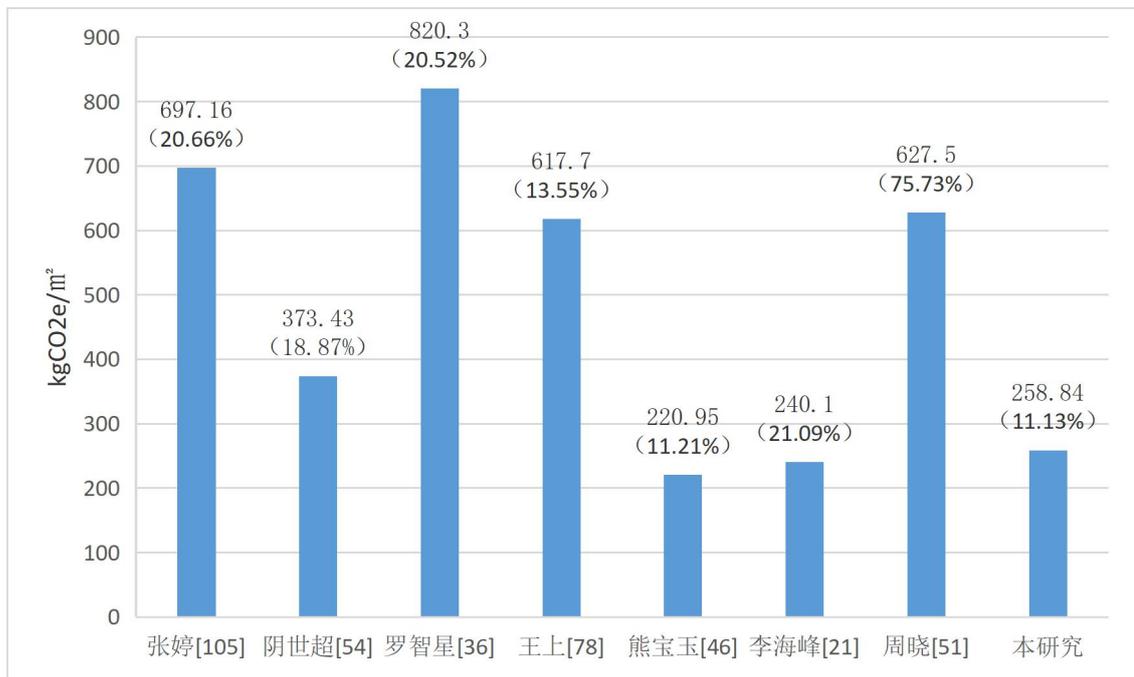


图 4.14 不同研究的住宅物化阶段碳排量对比

资料来源：作者自绘

<p>张婷^[105]（以住宅小区为研究对象）</p>	<p>阴世超^[54]（多层砖混）</p>
<p>罗智星^[36]（高层钢混）</p>	<p>王上^[78]（多层框架）</p>
<p>熊宝玉^[46]（高层钢混）</p>	<p>李海峰^[21]（多层）</p>
<p>周晓^[51]（高层钢混）</p>	<p>本研究（高层钢混） （物化阶段未考虑材料回收）</p>

图 4.15 相关研究物化阶段碳排放构成统计

资料来源：作者自绘

1. 相关研究物化阶段的碳排放构成

由图 4.14、图 4.15 可以看出，其他相关研究住宅的物化阶段碳排放量在 240.10 — 697.16 kgCO₂e/m²，物化阶段的碳排放占全生命周期的比重为 11.21% — 31.89%。其中建材生产阶段的碳排放放在物化阶段的占比最大，为 55%—99.38%，其他子阶段的占比权重不同研究有所不同。

2. 相关研究物化阶段碳排放构成差异原因分析

以上研究住宅研究除阴世超^[54]的研究为多层砖混外，其他的都为混凝土结构的住宅，结构形式差异不大，造成物化阶段差异较大的原因有以下几点：

1) 物化阶段划分边界的差异

造成物化阶段差异较大的原因主要是不同研究物化阶段划分子阶段、纳入碳排放计算的分项工程的差别。

在物化阶段的子阶段划分上，不同研究的物化阶段基本都包含建材生产阶段、建材运输阶段及施工建造阶段。但罗智星^[36]将建筑基地内，由于建造活动所带来的土地碳汇的减少也考虑进来，造成了与其他相关的研究差别很大。

在施工建造阶段的分项工程上，相关研究大多只统计土建工程的数量，张婷^[105]统计了土建工程、建筑装修工程的数量。造成了与其他研究结果在施工建造方面的不同。

2) 数据获取方式的差异

对于建材生产阶段 阴世超^[54]、熊宝玉^[46]与其他研究差别较大的原因在于他们仅根据土建工程几类常见的建材进行估算，导致计算的建材生产阶段碳排放量偏小，而其他阶段的碳排放量所占比偏大。而其他研究者都是基于工程决算书里面的建材种类及用量来计算，较为准确。

对于建材运输阶段，运输距离的确定有两种方法：一种是地区统计平均值，即以国内各种建材的平均运输距离为参考，如周晓^[51]、王上^[78]，阴世超^[54]等。另一种办法即是实际追溯，按照实际项目具体追溯来确定。如本研究和李海峰^[21]、罗智星^[36]等采用此方法。两种方法获取的数据会存在很大差距，导致了不同研究中建材运输阶段的碳排放不同。

对于建筑建造施工过程的能耗有两种办法：一种是根据施工现场项目部统计

的施工建造阶段所消耗的能源用量，直接计算得出碳排放量。相关研究中王上^[78]采取了这种方法。另外一种是根据施工工艺，确定每种施工工艺的单位碳排放系数，与相应的施工量乘积得到^[106]。如李海峰^[21]，罗智星^[36]，本研究等。其中施工现场直接统计的能耗数据通常大于根据施工工艺及施工台班计算出来的能耗。

3) 是否考虑建材回收

本研究与周晓^[51]的研究与其他相关研究建材生产阶段占比较大的原因在于，本研究与周晓^[51]物化阶段没有考虑建材回收率，而在拆除清理阶段给与考虑。

而其他学者把建筑材料的回收率也考虑进去，把拆除清理阶段因材料回收带来的碳减量计入到了物化阶段，如熊宝玉^[46]的研究，导致了物化阶段的碳排放量及占比的不同。

4.10.3 不同研究使用维护阶段碳排放量对比及分析

相关研究的住宅使用维护阶段的碳排放量(kgCO₂e/m²)及所占比例见图 4. 16, 相关研究使用维护阶段的碳排放构成见图 4. 17。

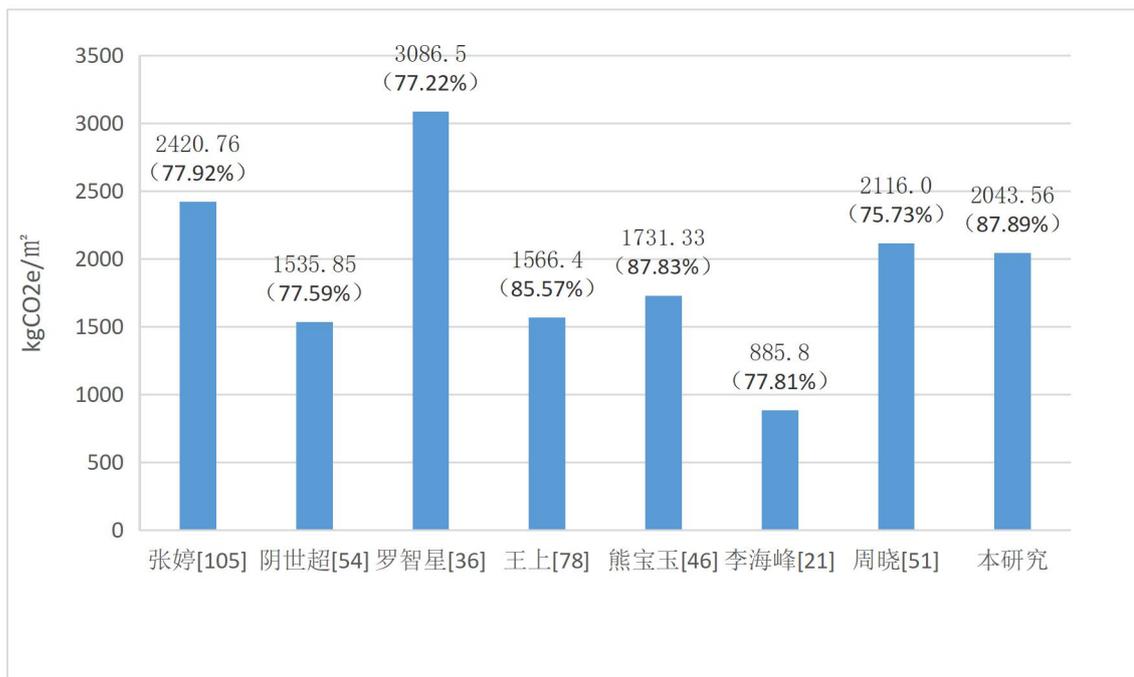
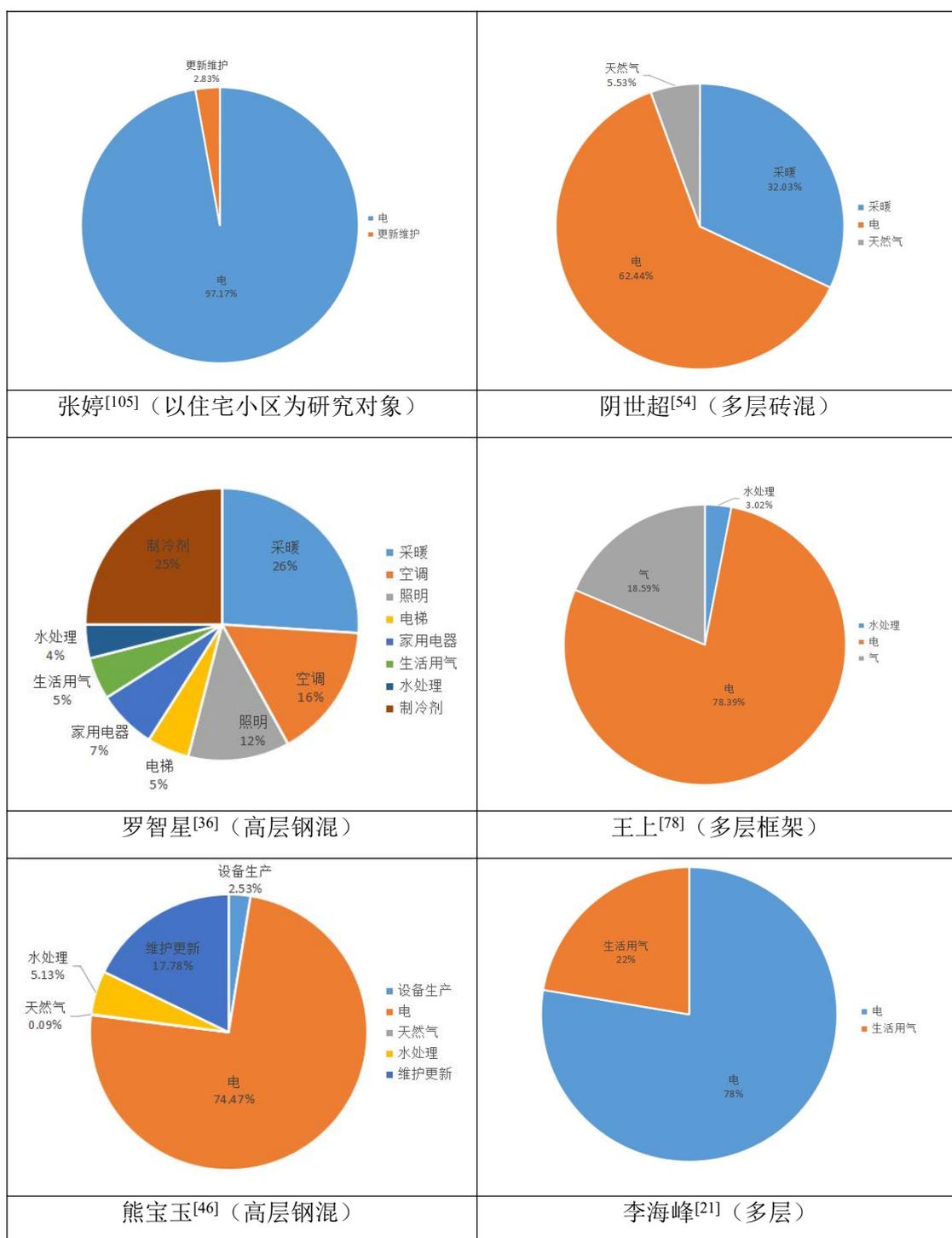


图 4. 16 不同研究的住宅使用维护阶段碳排量对比

资料来源：作者自绘



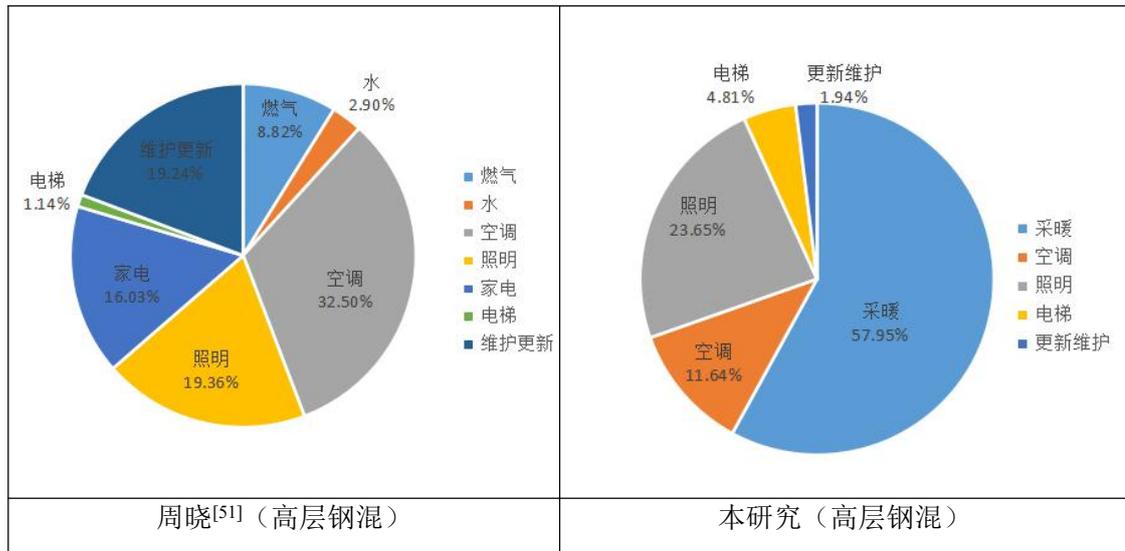


图 4.17 相关研究使用维护阶段碳排放构成统计

资料来源：作者自绘

1. 相关研究使用维护阶段碳排放构成

由图 4.16，图 4.17 可以看出其他相关研究住宅建筑使用阶段的碳排放量在 858.8—3086.5 kgCO₂e/m²，使用阶段的占比在全生命周期占比最大，在 62.32%—87.83%之间。

2. 相关研究使用维护阶段碳排放构成差异原因分析

以上相关研究结果差别较大，造成使用维护阶段差异较大的原因有以下几点：

1) 研究建筑所处气候分区不同

不同气候分区的地区，因气候差异引起的空调采暖能耗差别较大，如周晓^[51]、李海峰^[21]均处于夏热冬暖地区，冬季不需要集中采暖，而罗智星^[36]、本研究均处于寒冷地区采暖能耗较大，导致了使用维护阶段的碳排放较大。

2) 使用维护阶段涵盖的碳源不同

由于基础数据的缺失，不同研究的使用阶段包含的碳源也有不同，如熊宝玉^[46]的研究将空调等设备生产、日常生活用水处理、生活用气、使用维护阶段、照明用电、家电、空调用电等都考虑进去，导致该研究的建筑虽然处于深圳，不需要采暖，但使用阶段的碳排放依然较大。

而王上^[78]的研究没有考虑到建筑维护带来的碳排，罗智星^[36]和本研究虽然都处于西安，但罗智星^[36]考虑了使用阶段的制冷剂泄露带来的碳排放，同时考虑了生活用气、家用电器、水处理的碳排放，导致了使用维护阶段的碳排放构成不一样。

3) 使用阶段能耗数据获取方式差异导致

目前，使用阶段能耗数据获取有两种方式，一种是从宏观方面进行推算，主要通过大面积的实际建筑能耗平均的数据、《中国统计年鉴》提供的数据和指标定额来估算住宅的能耗及排放量标准值。如：熊宝玉^[46]、阴世超^[54]、王上^[78]、周晓^[51]的研究均采用此法。如熊宝玉^[46]的电消耗量的数据来源于采用统计分析结果中的夏热冬暖地区住宅年均电能消耗 57.23 KW h/m²。阴世超^[54]鉴于建筑使用阶段能耗数据无法精确统计，以严寒地区住宅建筑能耗的平均统计值来进行碳排放量计算。

另一种是从微观层面进行分析，主要通过成熟的建筑能耗分析软件或其它计算方法对住宅能耗情况作出具体分析，了解住宅内部各设备的能耗情况。张婷^[105]、罗智星^[36]、本研究均采用此法。

4) 维护阶段计算方法不同

熊宝玉^[46]、周晓^[51]参照日本岗建雄的研究成果，建筑维护更新过程每年的二氧化碳排放量按照建造施工阶段（包括施工和运输）碳排放的 20%计算的。该方法算出的建筑维护阶段的碳排放占比较大。

罗智星^[36]建筑维护更新过程每年的二氧化碳排放量则按照建材生产、运输和施工阶段的总碳排放量的 8%来计算。

而本研究和张婷^[105]则是根据建筑部件的使用寿命，对建筑生命周期内被更换的建筑部件、设备的生产、运输、安装带来的碳排放量进行累计求和得到。

4.10.4 不同研究拆除清理阶段碳排放量对比及分析

相关研究的住宅建筑拆除清理阶段的碳排放量（kgCO₂e/m²）及所占比例见图 4.21。相关研究物化阶段的碳排放构成见图 4.22。

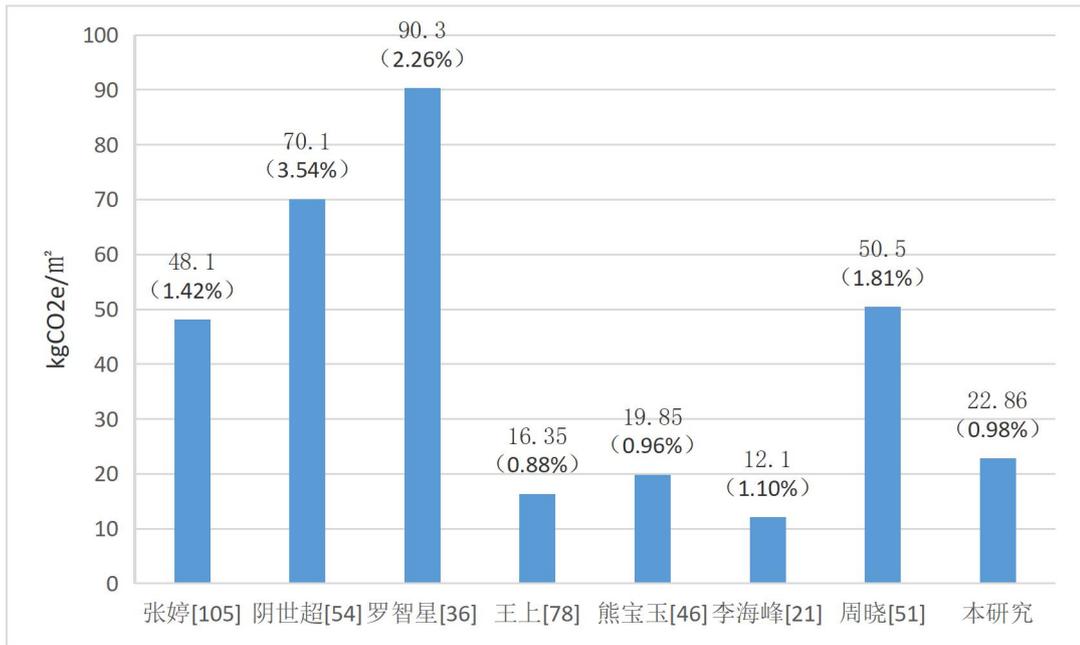
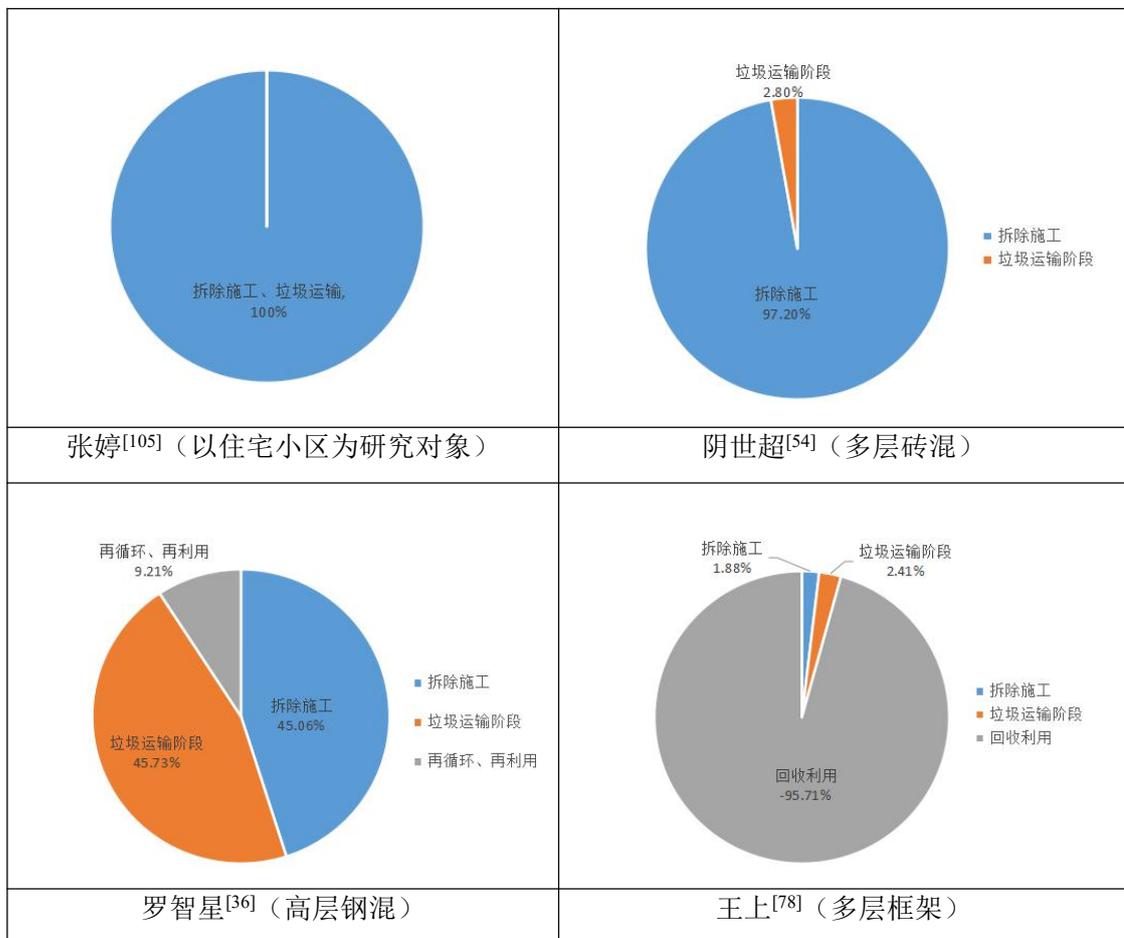


图 4.18 不同研究的住宅拆除清理阶段碳排量对比

资料来源：作者自绘



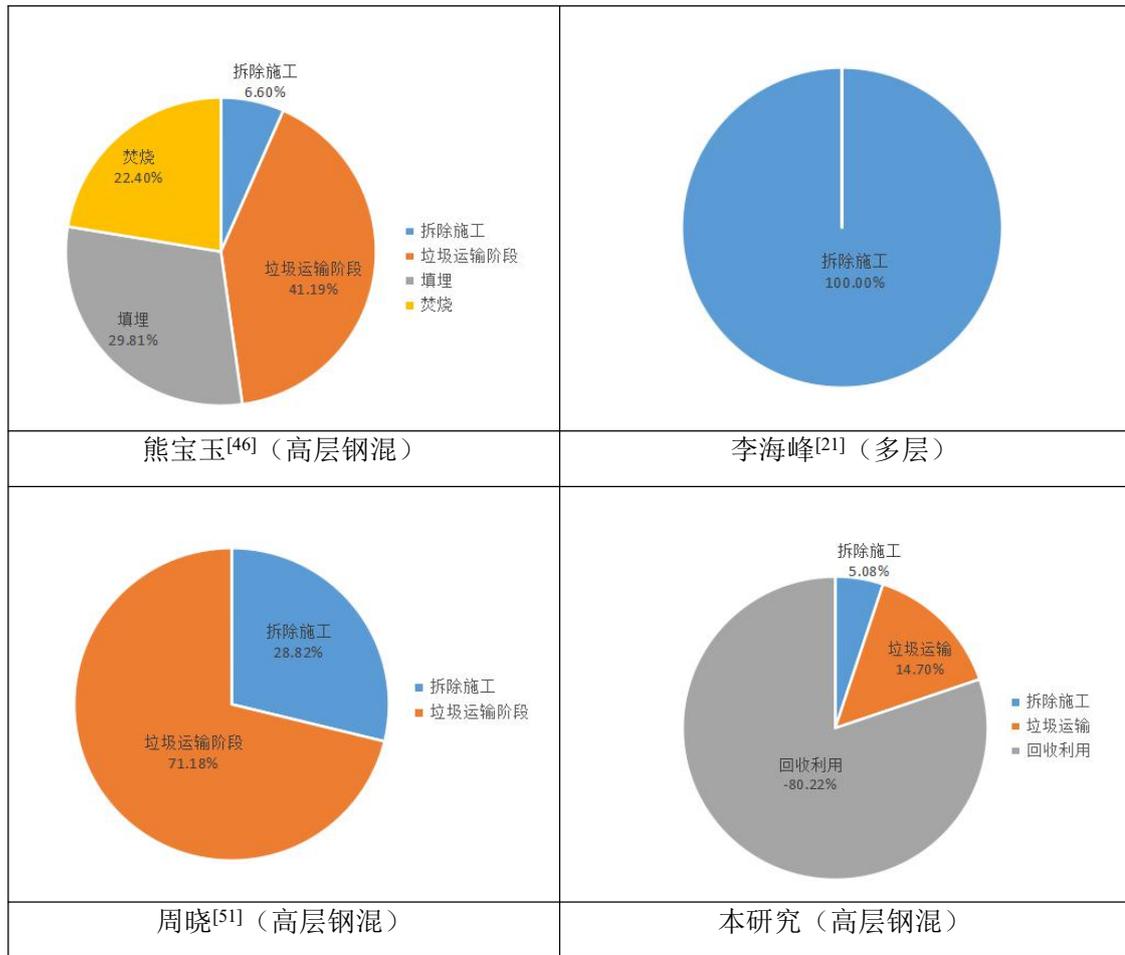


图 4.19 相关研究拆除清理阶段碳排放构成统计

资料来源：作者自绘

1. 相关研究拆除清理阶段碳排放构成

由图 4.21 可知，其他相关研究的拆除清理阶段的碳排放 $-348.3 - 90.3\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ ，占比为 0.96%–13.59%之间，但不同研究的拆除清理阶段的碳排放比例差别较大。

2. 相关研究拆除清理阶段碳排放构成差异原因分析

1) 拆除清理阶段划分边界的差异

拆除清理阶段划分边界的差异，即统计计算的分项工程的差别。其中本研究和王上^[78]都考虑了拆除清理因材料的回收利用带来的负的碳排放，而其他研究都将材料回收带来的负碳排放纳入了物化阶段考虑。从而造成了本研究和王上^[78]的研究与其他研究相差较大。

熊宝玉^[46]将建筑废弃物在垃圾处理厂的填埋和焚烧所带来的的碳排放也纳入了该阶段的碳排放评价，从而导致了研究结果与其他研究相差较大。

周晓^[51]、李海峰^[21]、张婷^[105]、阴世超^[54]拆除阶段的仅考虑拆除施工及废弃物运

输所产生的碳排放，研究结果较为相近。

2) 拆除阶段、运输阶段的计算方法差异

由于建筑拆除阶段缺乏相关方面实际调查统计数据的情况下，相关研究的拆除施工阶段的碳排放计算大多根据相关研究文献的结果来估算。

如罗智星^[36]、周晓^[51]参照张又升^[49]的研究结果推算的，按施工阶段的碳排放量的90%来算。

熊宝玉^[46]参照王霞^[107]的研究成果按建筑拆除施工阶段的二氧化碳排放量是建造施工过程的10%来计算。

张婷^[105]参照黄志甲^[108]等人的研究结论按拆除阶段单位面积二氧化碳排放量为 $48.1\text{kg}/\text{m}^2$ 来计算拆除阶段碳排放。

本研究数据则基于深圳市东方盛世花园二期E栋12号楼拆除工程项目^[94]的拆除阶段使用机械种类及台班数量，估算出本研究案例的机械台班种类及数量，根据机械台班的碳排放因子求出来的。

4.11 本章小结

本章根据第三章构建的建筑碳排放计算模型，选取了2005年西安地区的一栋高层住宅楼为对标建筑，对该建筑全生命周期及各个子阶段的碳排放进行了计算，并与其他相关的研究进行了对比。

其中，经计算得出该住宅楼的全生命周期碳排放量为 $91087571.39\text{ kgCO}_2\text{e}$ ，折合单位建筑面积的碳排放量为 $2325.26\text{kgCO}_{2\text{e}}/\text{m}^2$ 。其中物化阶段的碳排放量为 $15378815.13\text{ kgCO}_{2\text{e}}$ ，折合单位建筑面积的碳排放量为 $392.59\text{ kgCO}_{2\text{e}}/\text{m}^2$ ；使用维护阶段的碳排放量为 $180052277.49\text{ kg CO}_{2\text{e}}$ ，折合成单位建筑面积碳排放量为 $2043.56\text{ kgCO}_{2\text{e}}/\text{m}^2$ ；拆解阶段总计碳排放量为 $-4343521.23\text{ kgCO}_{2\text{e}}$ ，拆解阶段单位建筑面积的碳排放量为 $-110.87\text{kgCO}_{2\text{e}}/\text{m}^2$ 。

5 案例住宅全生命周期碳排放构成分析

5.1 建筑全生命周期各阶段比例分析

根据第四章的计算结果，总结各阶段碳排放量及所占比例，具体见图 5.1 和图 5.2。生命周期各个子阶段的碳排放量及占比见图 5.3。

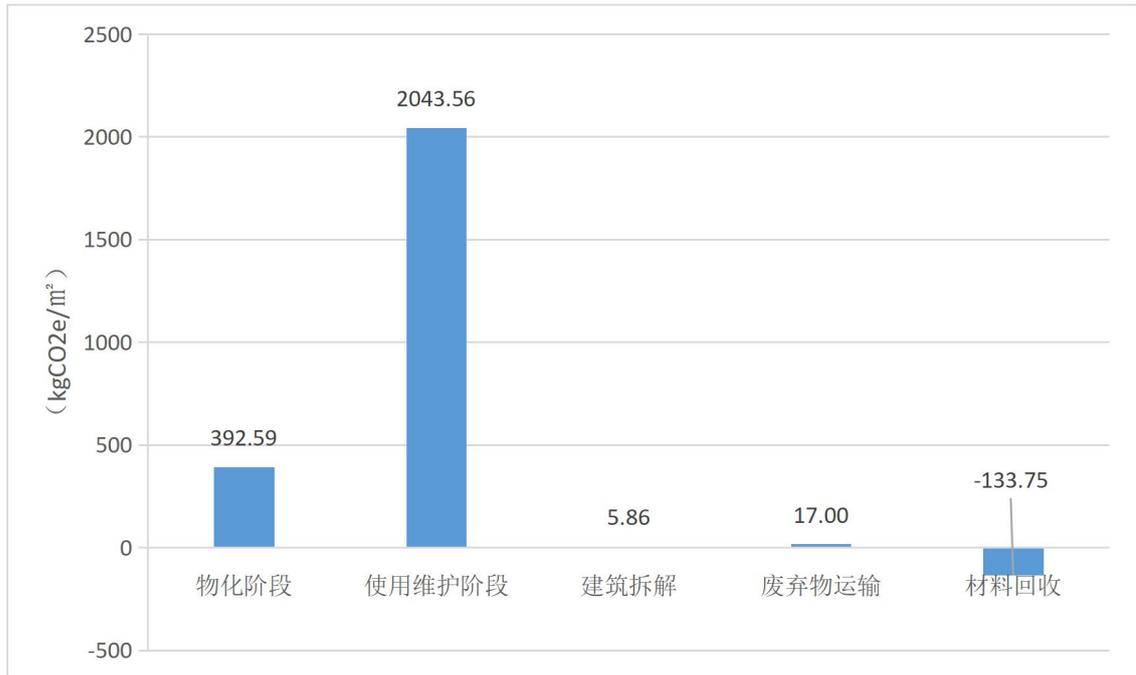


图 5.1 1#住宅楼生命周期主要阶段的碳排放量

资料来源：作者自绘

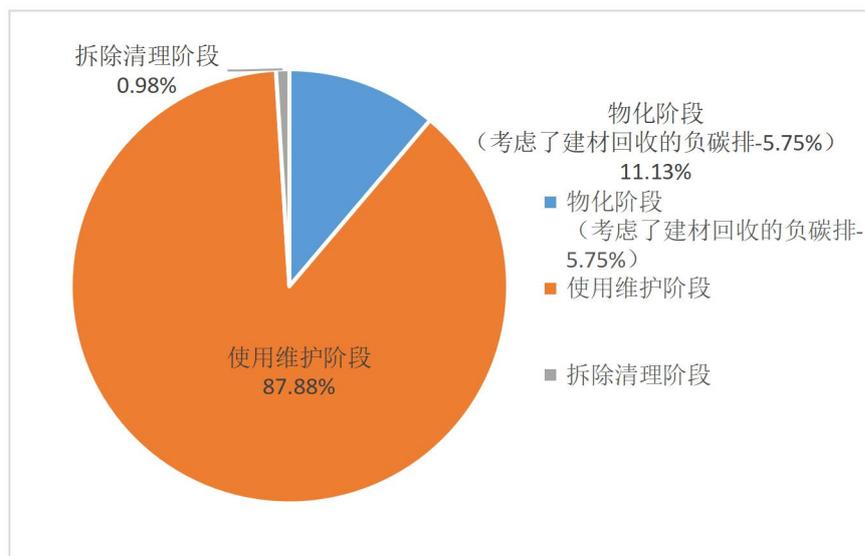


图 5.2 1#住宅楼生命周期主要阶段的碳排放绝对量所占百分比图

资料来源：作者自绘

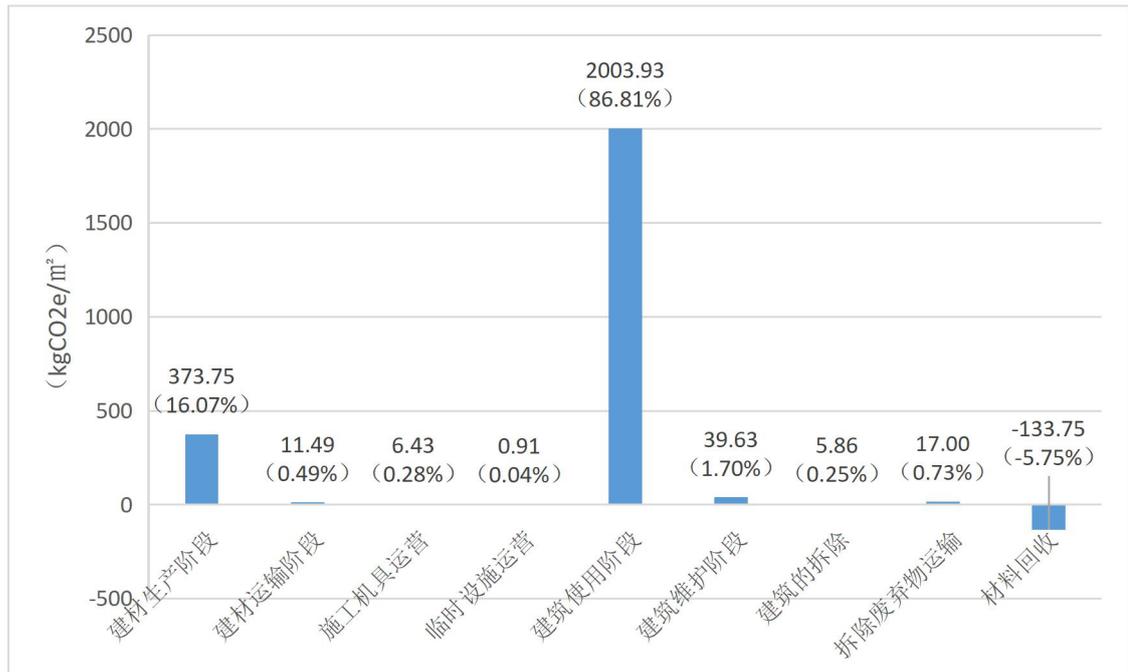


图 5.3 全生命周期各子阶段单位建筑面积碳排放量及占比

资料来源：作者自绘

从以上分析可以看出，1#住宅楼物化阶段的碳排放量为 392.59 kgCO₂e/m²，运营维护阶段的碳排放量为 2043.56 kgCO₂e/m²，拆除清理阶段的碳排放量为 104.97 kgCO₂e/m²，

1#住宅楼运营维护阶段的碳排放量比例最大，达到了 80.23%，其次是物化阶段，它的碳排放量所占比例为 15.41%，拆解回收阶段的碳排放减量所占比例为 4.35%。

其中，在物化阶段，建材生产阶段的碳排放量最大，为 373.75 kgCO₂e/m²，占该阶段碳排放量比为 95.2%；在使用维护阶段，日常使用阶段的碳排放最大，为 2003.93 kgCO₂e/m²，占该阶段碳排放量比例为 98.07%；在拆除清理阶段，材料回收利用带来的碳减量占比最大，为 133.75 kgCO₂e/m²，约占该阶段碳排放量的 80.22%。

5.2 物化阶段碳排放比例分析

5.2.1 物化阶段碳排放构成分析

根据案例建筑物物化阶段的碳排放计算结果，得出各阶段单位建筑面积碳排放量及所占比例，具体见图 5.4 和图 5.5。

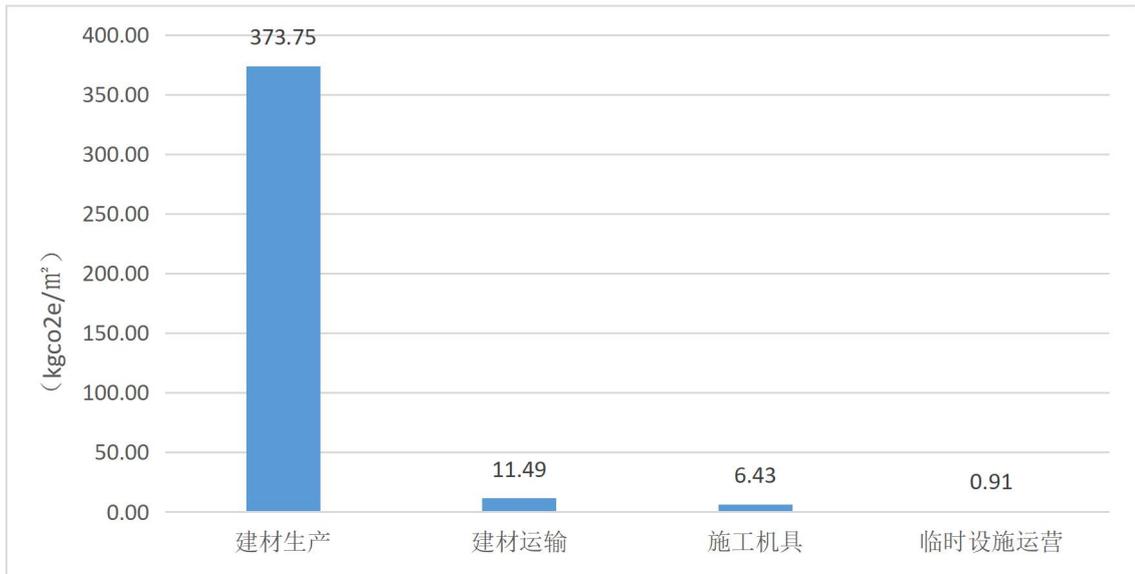


图 5.4 1#楼物化阶段各子阶段单位建筑面积碳排放量 (kgCO₂e/m²)

资料来源：作者自绘

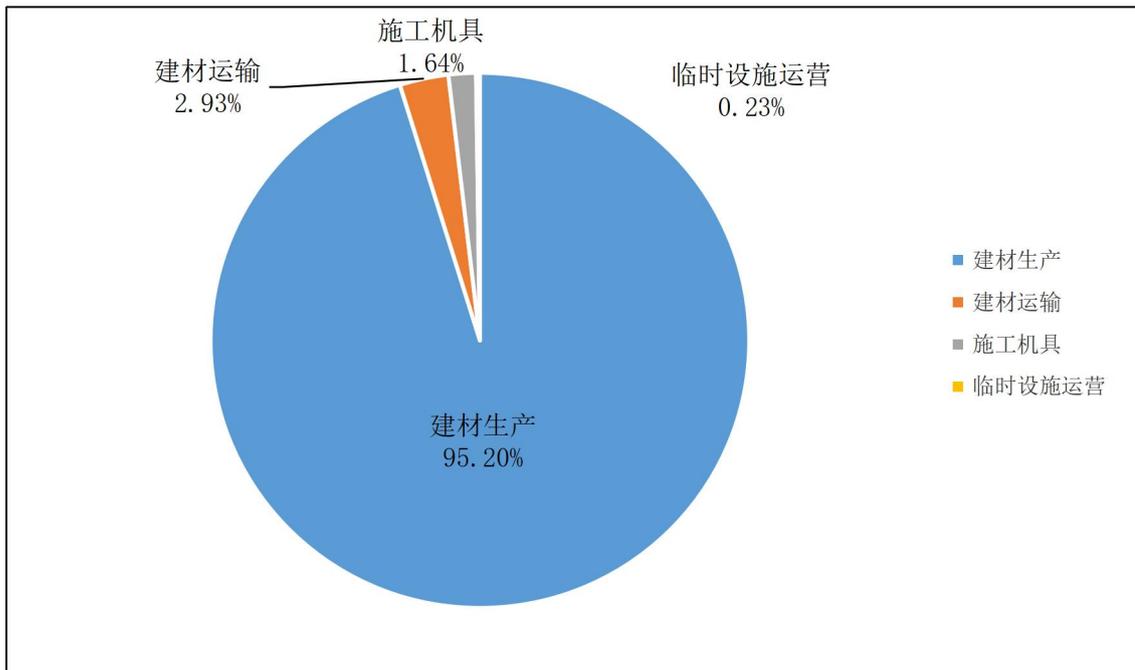


图 5.5 1#住宅楼物化阶段各子阶段碳排放比例

资料来源：作者自绘

由图 5.4、图 5.5 可以看出，物化阶段中碳排放程度最大的是建材生产阶段，达到 95.20%，其次为建材运输阶段，达到 2.9%，施工阶段的碳排放所占的比例为 1.87%。其中建材生产、建材运输、施工阶段的施工机具运行三个子阶段碳排放总量约占到了物化阶段的 99.5%，临时设施运营所占的碳排放最小，不足 0.5%。根据《PAS2050》中对实质性贡献的定义，本研究中临时设施运行碳排放不足 1%，做了非实质性的贡献，为非实质性排放源，可不纳入碳排放评价。

5.2.2 建材生产阶段建材料用量及建材碳排放量分析

在对 1#住宅楼建材用量及碳排放量分析统计时，根据第四章对 1#住宅楼主要建材的归类，分别对 1#住宅楼主要建材如钢（铁）、商品砼、水泥、砂石、木材、砌体材料、建筑陶瓷、门窗、保温材料、铜芯电线电缆、建筑装饰涂料、化学类和塑胶类管材、石材、防水涂料等十四类建材的用量及碳排放量进行分析总结，从中发现建材的碳排放规律。

1. 建筑材料用量分析

1) 单位面积 1#楼的建筑材料使用量

1#住宅楼单位建筑面积的建材使用量见表 5.1。

表 5.1 1#住宅楼单位建筑面积（m²）的建材使用量

资料来源：作者自绘

建筑材料		单位	住宅
钢	钢筋	kg/m ²	52.06
	钢型材	kg/m ²	0.55
	钢管	kg/m ²	0.84
商品砼		m ³ /m ²	0.32
砌体材料	多孔砖	块/m ²	6.71
	标准砖	块/m ²	2.98
水泥		kg/m ²	70.58
砂石	石灰	kg/m ²	7.7
	净砂	m ³ /m ²	0.11
	砾石	m ³ /m ²	0.08
铜芯电线电缆		kg/m ²	1.11
木材		m ³ /m ²	0.006
建筑陶瓷		m ² /m ²	0.42
门窗		m ² /m ²	0.21
建筑装饰涂料		kg/m ²	0.92
保温材料		m ³ /m ²	0.026
化学类和塑胶类管材		kg/m ²	0.64
石材		kg/m ²	0.64
防水材料	防水卷材	m ² /m ²	0.25
	石油沥青	kg/m ²	0.13
其他		——	——

2) 单位建筑面积建筑的建材重量所占百分比

单位面积建筑的建材重量所占百分比见表 5.2, 各建材重量所占百分比饼图见图 5.6。

表 5.2 1#楼单位面积的建筑材料重量所占百分比 (%)

资料来源: 作者自绘

	钢	商品 砼	水泥	保温 材料	门窗	砂石	铜芯 导线 电缆	建筑 装饰 涂料	建筑 陶瓷	木材	防水 涂料	化学 塑胶 类管 材	砌体 材料	石材
住宅	4.35	62.16	5.74	0.05	0.54	22.34	0.09	0.07	0.97	0.21	0.07	0.05	3.04	0.16

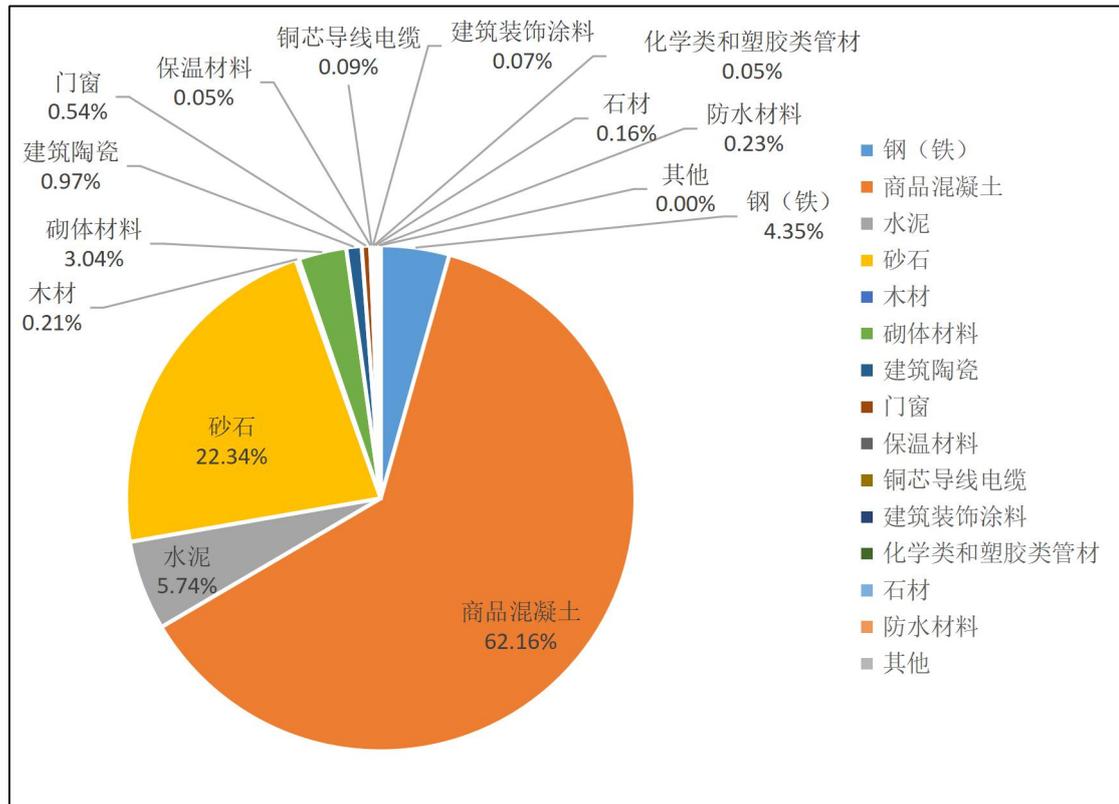


图 5.6 1#住宅楼单位面积建筑材料重量所占百分比饼图

(资料来源: 作者自绘)

3) 结论

根据《建筑碳排放计算标准(征求意见稿)》中 6.1.3 规定:

6.1.3 建材生产阶段碳排放计算应包含建筑主体结构材料和建筑围护结构材料, 并按下列规定确定纳入计算的主要建筑材料:

- 1、所选主要建筑材料的总重量不应低于建筑中所耗建材总重量的 95%；
- 2、满足第一条前提下，重量比小于 0.1% 的建筑材料可不予考虑^[109]。

在本研究案例中，钢（铁）、商品砼、水泥、砂石这四类建材的总重量占到了所耗建材总重量的 94.59% 以上，根据 6.1.3 的第二条款，保温材料、铜芯电缆、建筑装饰涂料、化学类和塑胶类管材的重量比小于 0.1%，故此类建筑材料可不予考虑。

2. 建筑材料碳排放量分析

1) 主要建材的碳排放因子

主要建材如钢（铁）、商品砼、水泥、砂石、木材、砌体材料、建筑陶瓷、门窗、保温材料、铜芯导线电缆、建筑装饰涂料、化学类和塑胶类管材、石材、防水涂料的碳排放因子见表 5.3。

表 5.3 主要建材的碳排放因子

资料来源：作者自绘

建筑材料类别	建筑材料碳排放因子	
	数值	单位
钢材	2200	kg CO ₂ eq/t
C30 混凝土	321.3	kg CO ₂ eq/m ³
标准砖	349	kg CO ₂ eq/千块标准砖
木材	878	kg CO ₂ eq/m ³
页岩石	4.845	kg CO ₂ eq/t
普通硅酸盐水泥	977	kg CO ₂ eq/t
石灰	1344	kg CO ₂ eq/t
砂 (f=1.6~3.0)	2.796	kg CO ₂ eq/t
碎石 (d=10~30mm)	2.425	kg CO ₂ eq/t
EPS 板	5.64	kg CO ₂ eq/kg
铝合金门窗	41.6	kg CO ₂ eq/m ²
塑钢窗	121.1	kg CO ₂ eq/m ²
铜芯电缆	9410	kg CO ₂ eq/t
釉面砖	15.16	kg CO ₂ eq/m ²

建筑材料类别	建筑材料碳排放因子	
	数值	单位
PVC-U 管	7.93	kg CO ₂ eq/kg
水性涂料	6550	kg CO ₂ eq/t
改性沥青卷材	2.38	kg CO ₂ eq/m ²
PE 管	3.6	kg CO ₂ eq/kg

2) 单位面积 1#楼的建筑材料的碳排放量 (kgCO₂eq/m²)

单位建筑面积 1#楼的建筑材料碳排放量见图 5.7。

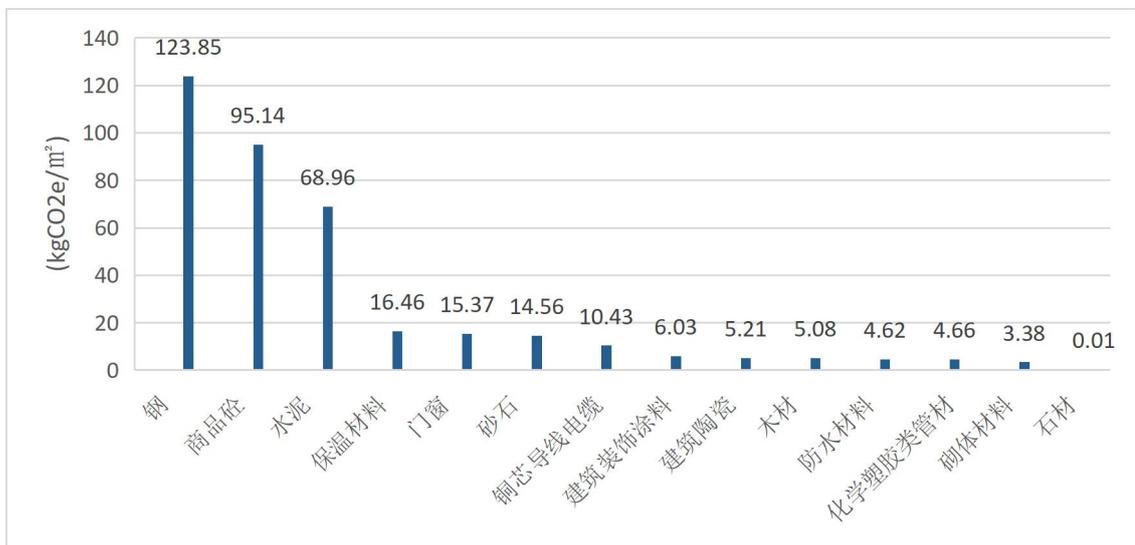


图 5.7 单位面积建筑材料碳排放量 (kgCO₂eq/m²)

图片来源：作者自绘

由图 5.7 中可以看出，钢和商品砼的碳排放量很大，分别为 123.85kgCO₂eq/m²和 95.14kgCO₂eq/m²；水泥、保温材料的碳排放量分别为 68.96kgCO₂eq/m²和 16.46kgCO₂eq/m²，这些建材的碳排放量都比较大；门窗，砂石，碳排放量为 15.37kgCO₂eq/m²和 14.56kgCO₂eq/m²，电气工程中铜芯电线电缆和给排水工程中的化学塑胶类管材的碳排放量分别为 10.43kgCO₂eq/m²和 4.66kgCO₂eq/m²，建筑装饰涂料、建筑陶瓷、木材、防水材料的碳排放量分别为 6.03kgCO₂eq/m²、5.21kgCO₂eq/m²、5.08kgCO₂eq/m²、4.62kgCO₂eq/m²；砌体材料和石材的碳排放量仅占 3.38kgCO₂eq/m²和 0.01kgCO₂eq/m²。

3) 单位建筑面积建筑的建材碳排放量所占百分比

1#住宅楼单位面积建筑的建材碳排放量所占百分比见表 5.4, 各建材碳排放所占百分比饼图见图 5.8。

表 5.4 1#楼单位面积的建筑材料碳排放量所占百分比 (%)

资料来源：作者自绘

	钢	商品 砼	水泥	保温 材料	门窗	砂石	铜芯 导线 电缆	建筑 装饰 涂料	建筑 陶瓷	木材	防水 涂料	化学 塑胶 类管 材	砌体 材料	石材
住宅	33.14	25.46	18.45	4.40	4.11	3.89	3.0	1.61	1.39	1.36	1.24	1.0	0.90	0.02

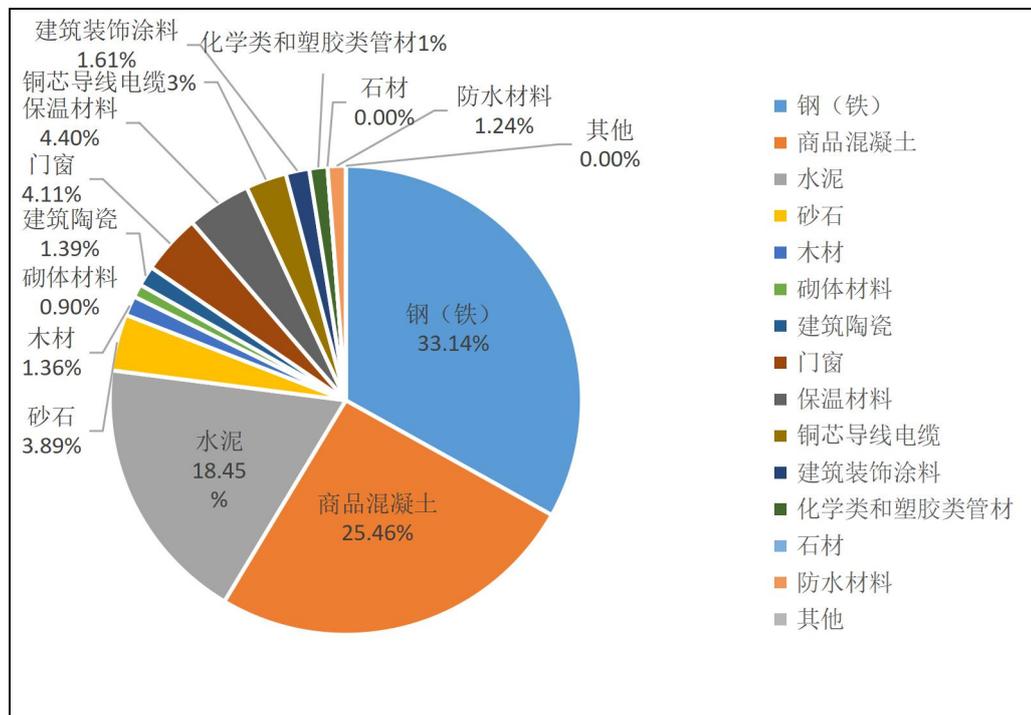


图 5.8 1#住宅楼单位面积建筑材料碳排放量所占百分比饼图

(资料来源：作者自绘)

4) 单位面积的建筑材料碳排放量累计百分比

1#住宅楼单位建筑面积的建筑材料碳排放量所占的百分比统计见表 5.5。

表 5.5 1#住宅楼单位建筑面积的建筑材料碳排放量累计百分比

资料来源：作者自绘

累计比重	钢	商品混凝土	水泥	砂石	木材	砌体材料	建筑陶瓷	门窗	保温材料	铜芯导线电缆	建筑装饰涂料	化学类和塑胶类管材	石材	防水材料
70%	√	√	√											
80%	√	√	√	√				√						
90%	√	√	√	√				√	√	√				
95%	√	√	√	√			√	√	√	√	√			
99%	√	√	√	√	√		√	√	√	√	√	√		√

在 1#住宅建筑中，钢、商品砼、和水泥这三者的碳排放量之和占建材生产阶段 70%以上；钢、商品砼、水泥、砂石、门窗，这四类建材的碳排放量之和占建材生产阶段的 80%以上；以上五类建材加上铜芯导线电缆、保温材料，碳排放量之和占建材生产阶段的 90%以上；建筑陶瓷和装饰涂料加上以上七类建材，碳排放量总和占建材生产阶段的 95%以上；木材、防水材料、PVC 管材加上以上八类建材，碳排放量总和占建材生产阶段的 99%以上；

5) 结论

(1) 根据《建筑工程可持续性评价标准》(JGJ/T222-2011)，本研究中累积碳排放量比例达到建筑物化阶段总建材碳排放量 80%以上的建材可以纳入评价范围，即在方案设计阶段，仅统计钢材、商品砼、水泥、砂石、门窗这四建材的碳排放量可以有有效的评估建筑方案的环境影响和控制建材用量。

(2) 根据《PAS2050》中对实质性贡献的定义，本研究中石材、砌体材料、和其他建材作了非实质性贡献，即为非实质性排放源，而其余十类建材则为实质性排放源；

(3) 钢、混凝土、水泥、砂石、铜芯导线电缆、建筑陶瓷、保温材料、化学类和塑胶类管材、建筑涂料是建材生产阶段碳排放的主要来源，统计这最主要十类建材碳排放即可以预测建筑物化阶段建材生产阶段碳排放量，并为合理选择低碳建材进行优化设计提供指导。

5.2.4 建材运输阶段碳构成分析

1#住宅楼建材运输阶段碳排放构成见图 5.9。

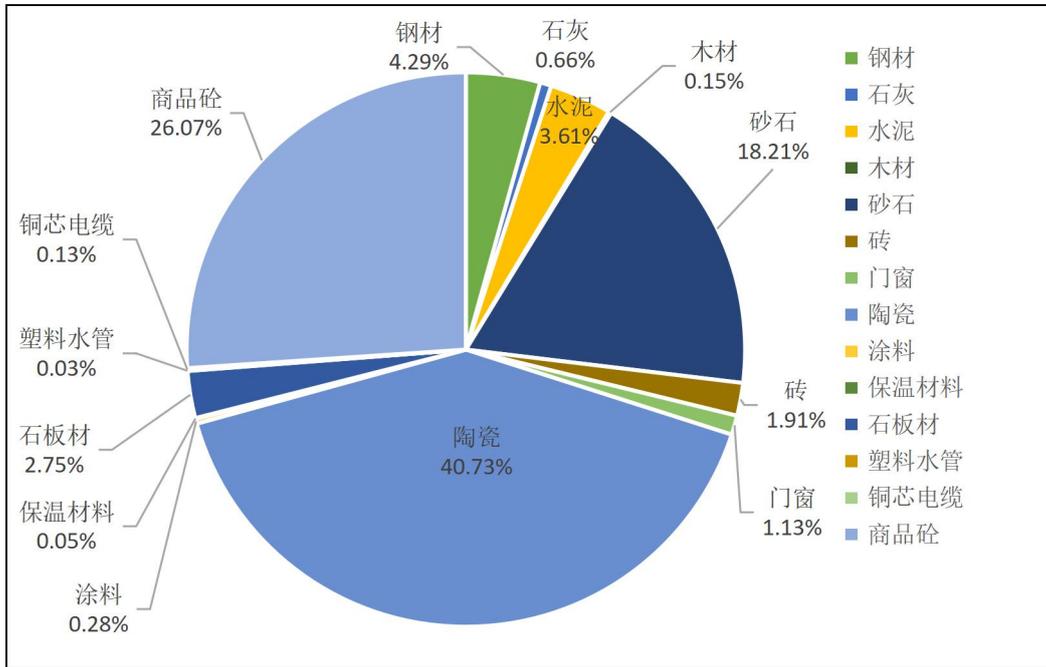


图 5.9 1#楼建材运输阶段碳排放量所占百分比图

资料来源：作者自绘

由图 5.9 可以看出 1#楼建材的陶瓷运输碳排放量占建材运输阶段 40.73%；商品砼运输的碳排放量占 26.07%；砂石运输的碳排放量占建材运输的 18%，钢材运输的碳排放量占建材运输阶段的 4.29%，以上四类建材运输的碳排放约占建材运输阶段碳排放的 90%。

5.2.5 施工阶段碳排放构成分析

1#楼施工阶段各施工机具碳排放量见图 5.10，各施工机具碳排放量所占百分比饼图见图 5.11。



图 5.10 各施工机具碳排放量 (kgCO₂eq)

图片来源：作者自绘

5.2.6 施工阶段临时设施碳排放构成分析

施工阶段临时设施碳排放构成百分比饼状图见图 5.12。由图 5.12 可以看出，临时设施中宿舍和管理办公的碳排放占比最大。

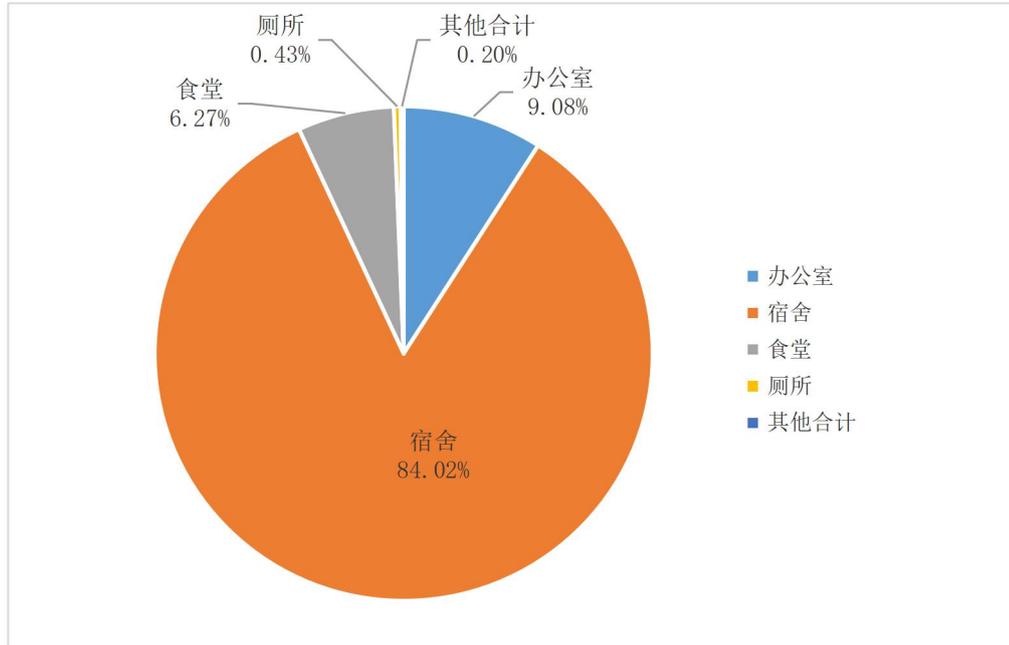


图 5.12 1#住宅楼物化阶段临时设施碳排放构成分析

资料来源：作者自绘

5.3 案例建筑使用维护阶段碳排放量计算及碳排放构成分析

5.3.1 使用维护阶段碳排放总体水平分析

根据第四章的计算结果，总结各阶段碳排放量及所占比例，具体见图 5.13 和图 5.14。



图 5.13 1#住宅楼使用维护阶段各子阶段单位建筑面积碳排放量 (kgCO₂e/m²)

资料来源：作者自绘

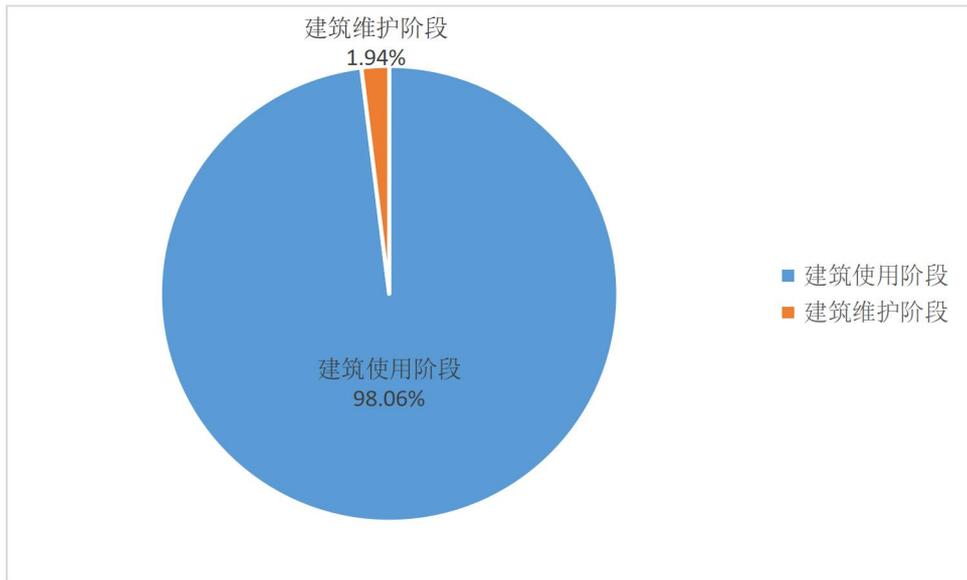


图 5.14 1#住宅楼使用维护阶段各子阶段碳排放量占百分比饼图

资料来源：作者自绘

由图 5.14 可以看出，建筑使用维护阶段碳排放量最大的阶段为建筑使用阶段，达到了 98.05%，该阶段单位建筑面积碳排放量为 $2003.93\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ ；建筑维护阶段的碳排放为 $39.65\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ ，占建筑维护阶段的碳排放量比为 1.94%。

5.3.2 使用阶段碳排放构成分析

根据第四章的计算结果，总结使用阶段的年单位建筑面积采暖、空调、照明、电梯的碳排放量及所占比例，具体见图 5.15 和图 5.16。

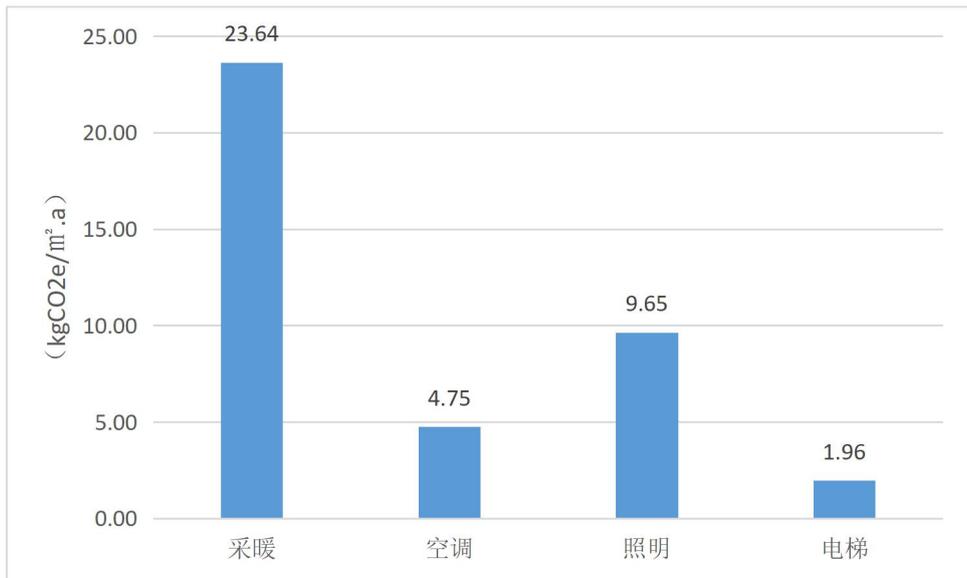


图 5.15 1# 住宅楼使用阶段采暖、空调等建筑面积年碳排放量 ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$)

资料来源：作者自绘

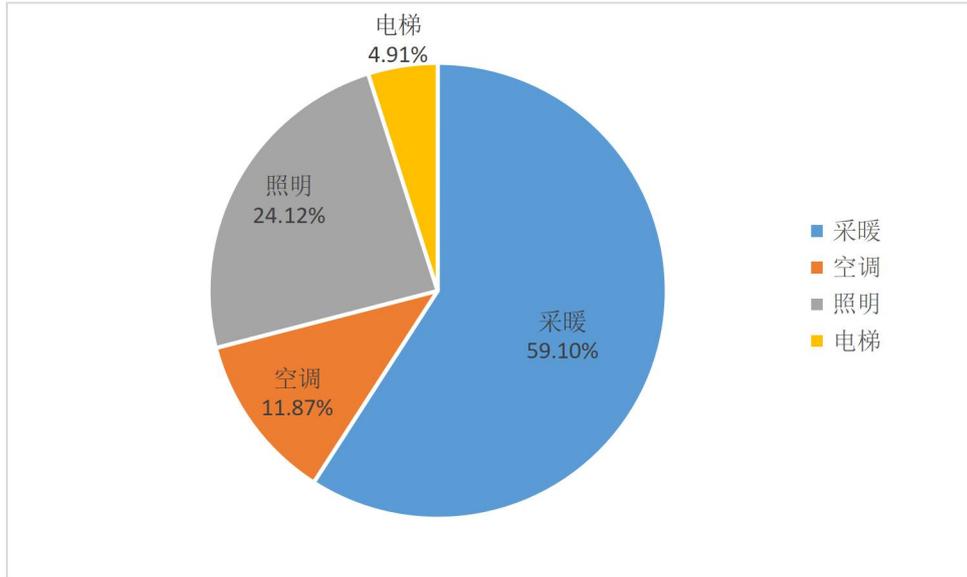


图 5.16 1#住宅楼使用阶段采暖、空调等建筑面积年碳排放量占百分比饼图

资料来源：作者自绘

由图 5.16 可知，建筑日常使用阶段，因采暖耗能引起的碳排放量，占比最大，占比为 59.10%，其次为照明引起的碳排放为 24%，空调制冷引起碳排放占比约为 12%，电梯运行引起的碳排放占比为 4.91%。

5.4 拆解回收阶段碳排放构成分析

5.4.1 拆解回收阶段碳排放量构成分析

根据第四章的计算结果，总结拆解回收阶段各个子阶段碳排放量及所占比例，具体见图 5.17 和图 5.18。



图 5.17 1#住宅楼拆解回收阶段各子阶段碳排放量 (kgCO₂e/m²)

资料来源：作者自绘

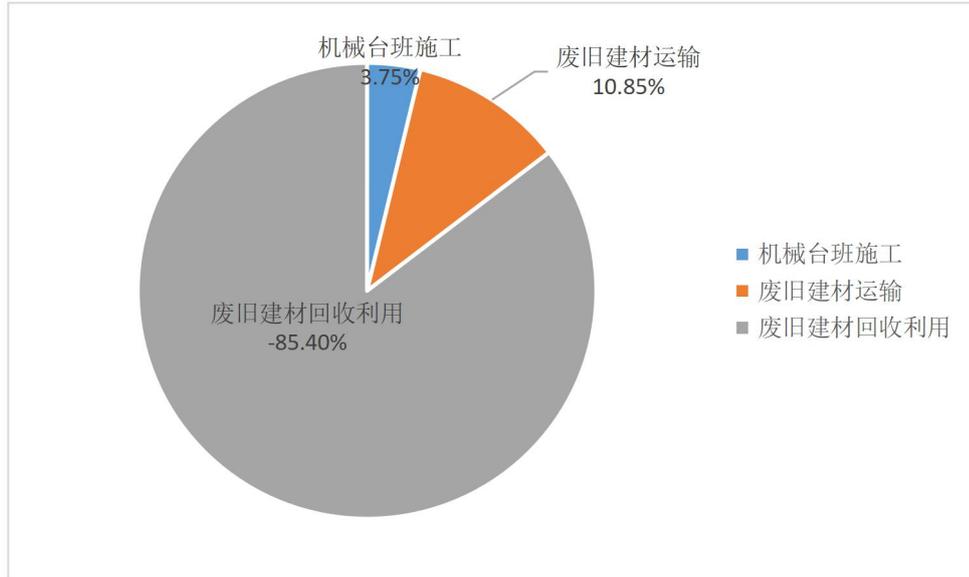


图 5.18 1#住宅楼拆解回收阶段各子阶段碳排所占百分比饼状图

资料来源：作者自绘

由图 5.18 可以看出，1# 住宅楼拆解回收阶段中废旧建材回收利用带来的碳减量占比 85.40%，达到了 133.74 kgCO₂e/m²；废旧建材运输的碳排放占比 10.85%，达到了 17.00 kgCO₂e/m²；建筑拆解过程的施工台班碳排放占比 3.75%，达到了 5.87 kgCO₂e/m²。因此提高废旧建材的回收率能减少建筑生命周期的碳排放量。

5.4.2 建筑拆解碳排放量构成分析

根据第四章中计算结果，进一步得出每种机械台班单位建筑面积的碳排放量，见图 5.19。各类机械台班的碳排放量占百分比饼状图见图 5.20。



图 5.19 建筑拆解各类机械台班的碳排放量 (kgCO₂e)

资料来源：作者自绘

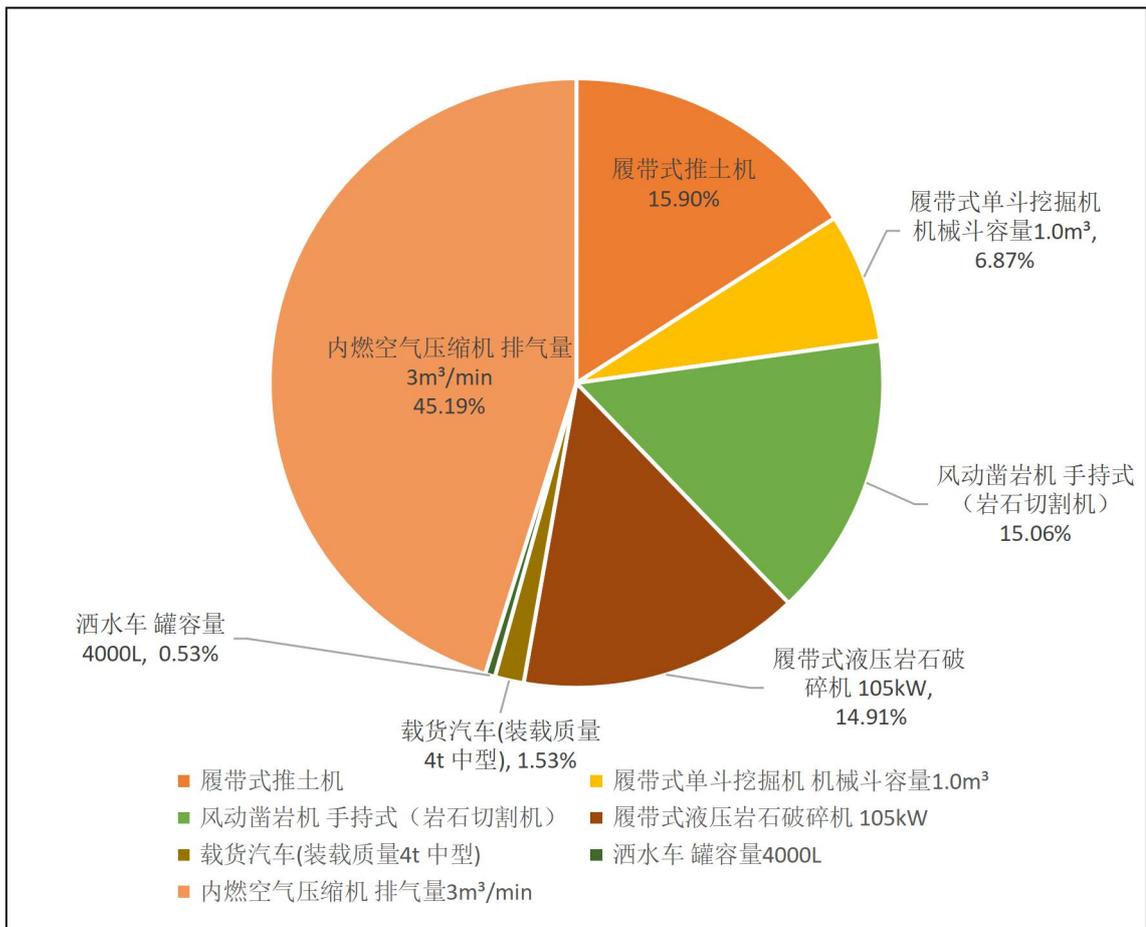


图 5.20 建筑拆解各类机械台班所占百分比饼状图

资料来源：作者自绘

由上图分析可知，拆解过程机械台班的碳排放量中，内燃空气压缩机产生碳排放量所占比例最大，为 45.19%，其次是履带式推土机，为 15.90%，然后是手持式风动凿岩机、单斗挖掘机，这五种机械产生的碳排放量占拆解施工阶段的 97.93%。

5.4.3 废旧建材回收利用排放减量构成分析

根据第四章中计算结果，整理出各类废旧建材因回收利用而产生的碳排放减量，见图 5.21。各类废旧建材因回收利用带来碳减量所占百分比饼状图见 5.22。

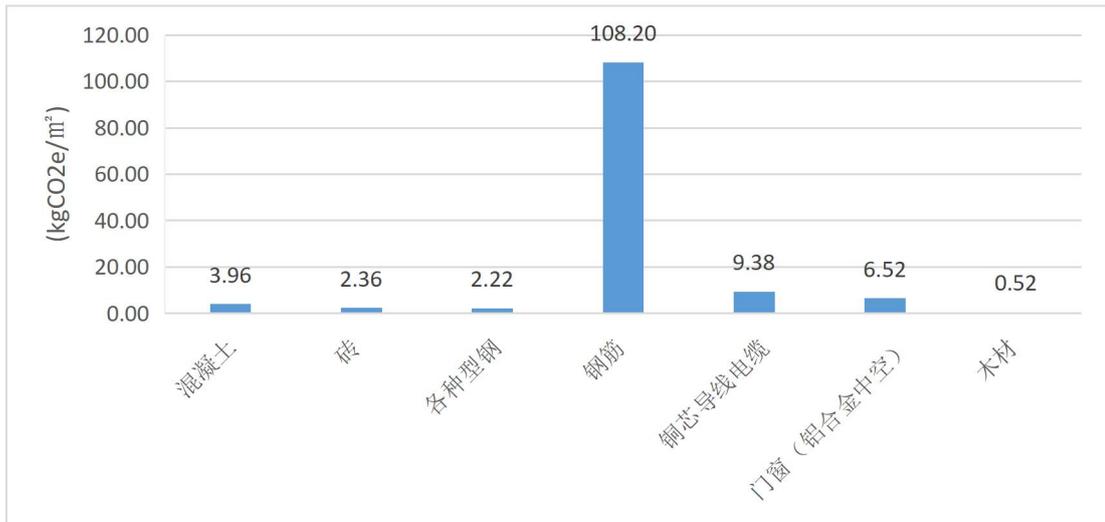


图 5.21 各类废旧建材因回收利用而产生的碳排放减量 (kgCO₂e/m²)

资料来源：作者自绘

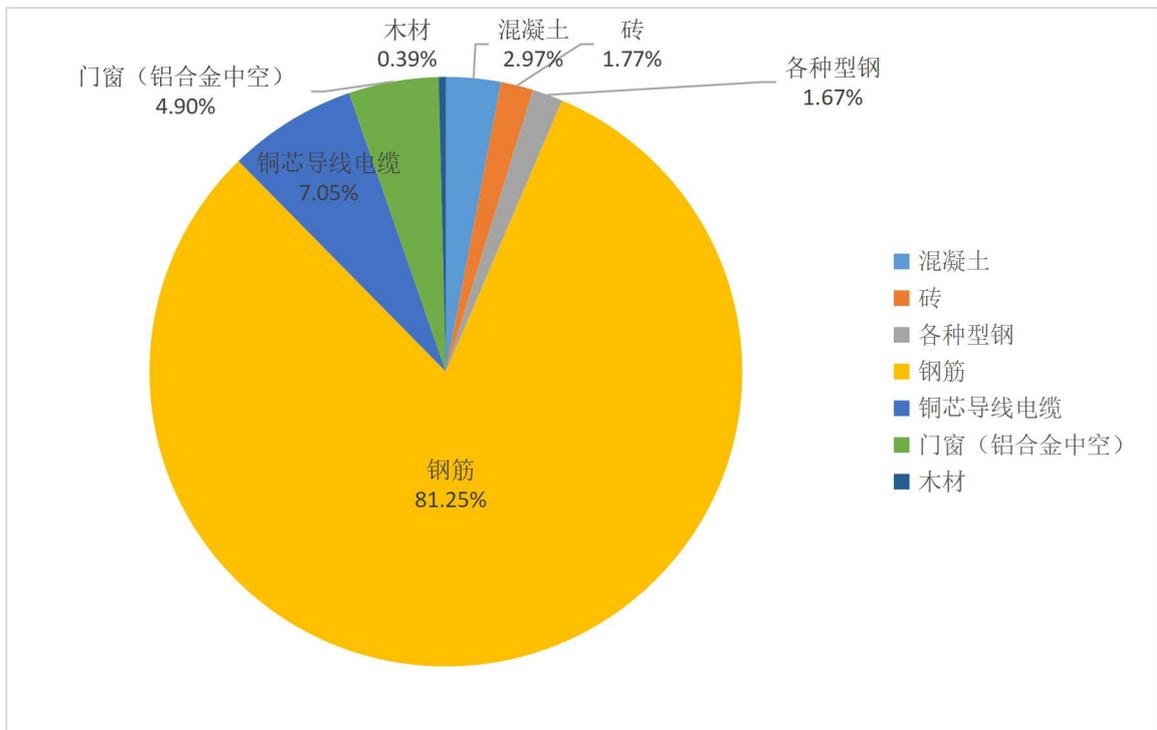


图 5.22 各类废旧建材回收利用产生的碳减量所占百分比饼状图

资料来源：作者自绘

由上图分析可知，在拆解阶段因废旧建材的回收利用而产生的碳减量中，废旧钢材的回收利用产生的碳减量占比达到 81.25%，达到 108.20 kgCO₂e/m²，其次是铜芯导线电缆，然后是门窗、混凝土、砖、各种型钢、木材。

由以上分析可以得出，采用拆解的方法对废旧建筑材料进行回收利用所产生的碳排放减量是拆解过程施工以及废旧建材运输产生碳排放增量的将近 5.8 倍。所以，在建筑全生命周期碳排放研究中，建筑拆除方式及废旧建材的回收利用至关

重要，应予以考虑。同时提倡用建筑拆解的方法代替拆毁，进一步研究废旧建材的回收利用方式以及综合回收利用率，减少建全生命周期碳排放。

5.5 住宅建筑全生命周期各阶段碳排放主要影响因素分析

5.5.1 建筑物化阶段碳排放主要影响因素

物化阶段是将规划的图纸实现为建筑实体的过程，该阶段的资源和能源消耗量大，产生的温室气体较使用阶段表现为短时间内排放更集中、强度更大。下面根据前面对案例建筑物化阶段碳排放量构成分析研究，对影响建筑物化阶段碳排放的主要影响因素加以总结：

1. 建筑材料的消耗

建材生产阶段的碳排放约占到物化阶段碳排放的 95%，根据对案例建筑建材生产阶段建筑材料用量及碳排放量的相关研究可知住宅建筑材料的消耗量最大的是商品砼、砂石、水泥、钢，砌体材料、建筑陶瓷、门窗，以上七种建材的总重量约占到所耗建材总重量的 98%。

钢、商品砼、水泥、砂石、木材、建筑陶瓷、门窗、保温材料、铜芯电线电缆、建筑涂料、PVC 管材、防水材料，以上十二种的碳排放约占到建材生产阶段碳排放的 99%。其中钢材、商品砼、水泥、保温材料的碳排放四类建材的碳排放占比最大，约为 85%。

因此，在物化阶段建材的消耗量及绿色低碳建材的使用量对物化阶段的碳排放有很大的影响。

2. 能源的消耗

建筑建造过程中的能源消耗也是物化阶段碳排放不可忽略的影响因素，具体有施工现场的临时办公及住所的能源的消耗以及施工过程中由于一些大型施工机械的能源消耗，特别是焊机、螺旋孔转机、载重汽车、钢筋切断机、起重机，以上五类的施工机具碳排放约占施工阶段的碳排放的 85%。

3. 建材设备运输

运输方式、运输工具、运输距离及建材设备的种类和数量都会对运输碳排放产生很大影响。

4. 施工方式

目前建筑施工方式主要以湿式工法为主。而湿式工法的现场产生废弃物与污染较多，现场使用的施工机具种类多且能耗大，比如钢筋切割机、混凝土搅拌机、

混凝土振捣器、灰浆搅拌机、木工机具的碳排放量占施工机具碳排放量的 16%。

5.5.2 建筑使用维护阶段碳排放主要影响因素

建筑物在竣工投入使用后，使用周期长，在整个生命周期中碳排放占比最大。建筑物在使用阶段中，二氧化碳的排放会涉及到各个方面，现根据第五章的研究建筑使用维护阶段的碳排放的主要影响因素总结如下：

1. 能源的消耗

建筑使用阶段的能源消耗主要包括建筑供暖、建筑供冷、生活热水、照明的能耗。其中在寒冷地区，建筑采暖带来的碳排放最大，约为 59.10%，其次为照明的碳排放约为 24.12%，及空调制冷的碳排放，约为 11.87%。

2. 能源的结构

建筑使用阶段的能源结构主要集中于电能，居住建筑的电力结构对使用阶段的碳排放影响较大。通过大力发展太阳能、风能、海洋能等低碳能源，来降低电力碳排放因子。如上海市电力来源的构成中水电和核电等清洁能源的比例较大，导致上海市的电能的碳排放因子较低，仅为 0.43 kgCO₂e/KWh，使用阶段的碳排放量相较于其他城市较低。

3. 材料消耗

由于建筑使用寿命较长，建筑部件及建筑设备进行维护及更新会涉及到碳排放，其中围护结构的更新、设备更新为重点。

4. 可再生能源的使用

可再生的能源是来自自然界的能源，具体包括太阳能、风力、潮汐能、地热能等。建筑中常用的可再生能源系统包括太阳能热水、光伏系统、地源热泵系统和风力发电系统。

可再生能源的使用，能大大降低使用阶段对化石能源的消耗，降低使用阶段的碳排放。

5.5.3 拆除清理阶段碳排放主要影响因素

1. 拆除阶段能源的消耗

建筑拆除阶段的耗能主要是指拆除过程中施工机具的能耗，其中，内燃空气压缩机的碳排放量最大，其次为推土机，液压破碎机，以上三种机械占拆除施工机具的 70%以上。

2. 拆除方式

建筑拆除方式一般有拆解和拆毁两种方式，不同拆除方式在技术、设备层面上大致相同，但在废旧建材的循环利用率上，差别很大。拆解方式下的建材回收率远远大于拆毁方式。

3. 废弃物回收利用

建筑拆除后，有相当一部分材料、构件、部品以及设备可以通过回收再利用进入到新产品的生命周期循环中。对于可循环材料，虽然在建材生产过程中产生了碳排放，但在回收并进行循环利用后，减少新产品原料开采、提纯环节的能耗，废旧建材的回收利用率越高，新产品的原料开采、提纯环节的碳减量就越大。

4. 建筑废弃物运输

建筑废弃物的运输距离、方式及废弃物重量都会对运输碳排放产生很大影响。

5.6 本章小结

本章依据第四章的1#住宅楼全生命周期各个阶段的碳排放计算结果，分别对1#住宅楼全生命周期各个阶段的碳排放量构成进行分析，从中找出各个阶段的碳排放规律和每个阶段对碳排放量影响较大的因素，为后面减碳策略的提出打下基础。其中：

1) 在建筑全生命周期阶段，使用维护阶段的碳排放占比最大，达到87.88%。因此控制使用维护阶段应该是建筑减排的重点阶段。

2) 在物化阶段，建材生产阶段的碳排放占比最大，达到95.2%，其中钢材、商品砼、抹灰类水泥、门窗、砂石五类建材的碳排放量达到80%，在方案阶段通过统计上述四类建材的量可以有效的预测建筑物物化阶段建材生产阶段碳排放量，并为合理选择低碳建材和优化设计提供指导。

3) 在使用维护阶段，建筑使用过程中的碳排放占比最大，达到98.06%，其中采暖的碳排放最大，占整个使用阶段的碳排放比列为59.01%

4) 在拆除清理阶段，建材回收在利用带来的碳减量占比最大，达到80.22%。其中建筑拆除方式，废旧建材的回收率对碳减量影响最大。

6 住宅建筑全生命周期减碳策略研究——以西安市某高层住宅为例

本章基于第五章的实证研究，通过以下方式来梳理住宅建筑的减碳策略：1) 通过文献调研，总结相关文献中关于住宅的减碳策略；2) 根据国内外住宅建筑节能标准规范所规定的相关指标来寻找住宅的减排策略；

需要指出的是虽然所有的减碳策略都是从设计阶段开始考虑的，但不同的减碳策略着重点不同，比如选用绿色低碳建材所对应的建材生产阶段的减碳，减少体形系数对应的是使用阶段的节能减碳，使用本地建材对应的是建材运输阶段的减碳。因此，需要将收集到的住宅减碳策略根据减碳策略的着重点，分别从规划设计阶段、物化阶段、使用阶段、拆除清理阶段进行筛选、梳理归类。

经过梳理总结后的住宅全生命周期各阶段的减排策略如下：

6.1 规划设计阶段减排策略

虽然规划设计阶段产生的碳排放量很少，但是建筑规划设计对建材的选择以及建筑使用阶段的空调采暖、采光照明等有很大的影响，对建筑后期使用阶段的能耗起决定性的作用。因此，规划设计阶段的减排策略不容忽视。

6.1.1 改善建筑节能设计

1. 遵循低碳建筑设计原则

低碳建筑设计的设计重点是在满足使用者和社会对建筑物所期望的各种要求及用途的前提之下，排放尽可能少的 CO_2 。在这里，设计人员将减少建筑全生命周期碳排放量作为设计的核心推动力^[110]。

2. 优化建筑朝向

适宜的建筑朝向的选择不仅要考虑增加建筑在冬季的光照面积和光照时间来降低冬季的采暖能耗，同时也要考虑降低夏季的热辐射^[111]。

在 DeST-h 中分别模拟 1#住宅楼从正东朝向 (-90°) 到正南朝向 (0°) 再到正西朝向 (90°) 由建筑的采暖制冷引起全生命周期的碳排放，模拟中考虑了自然通风对碳排放的影响，结果如图 6.1。

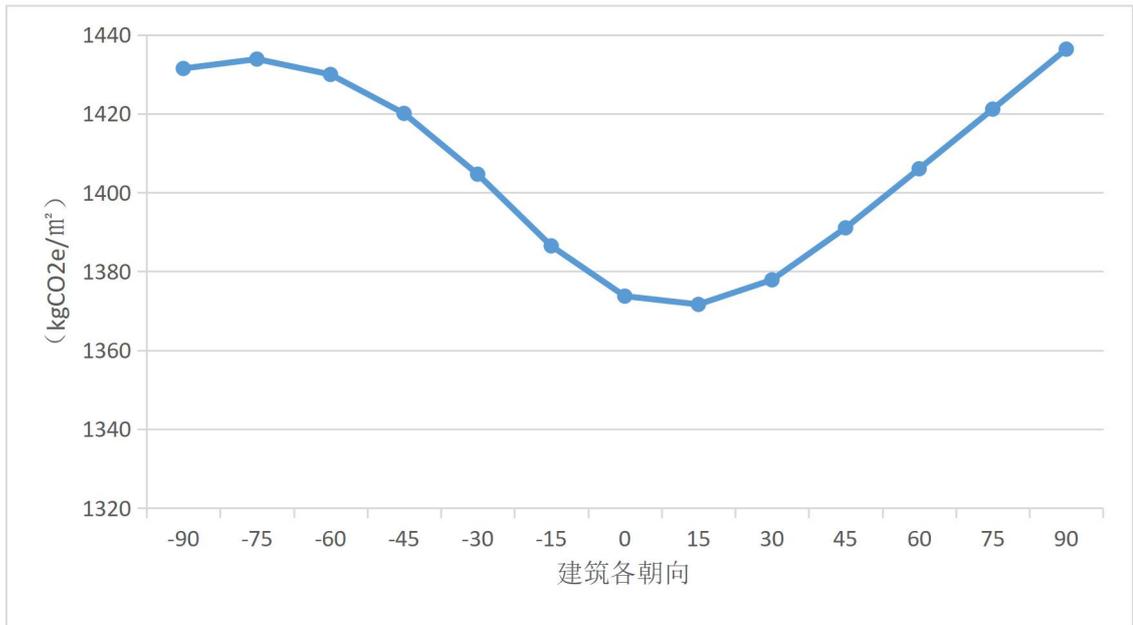


图 6. 11#住宅楼各朝向的全生命周期空调采暖碳排放量 (kgCO₂e/m²)

资料来源：作者自绘

由图 6.1 可知，当 1#住宅楼朝向为南偏西 15° 左右时空调采暖的碳排量最小为 1371.62 kgCO₂eq/m²。

假设 1#住宅楼的朝向为南偏西 15°，则 1#住宅楼的碳排放将降低 2.09 kg CO₂eq/m²。

3. 提高围护结构的热工性能

建筑围护结构组成部分如屋顶、外墙、门和窗等设计对建筑能耗与室内的热舒适度有很大的影响。通过提高围护结构的热工性能，可以改善建筑的热环境，减少建筑的冷、热能耗。

目前我国建筑节能标准的要求相对较低，围护结构的热工性能有较大的改进空间。现行标准 JGJ26-2010《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》中对于严寒 A 区、严寒 B 区、寒冷 B 区，大于等于 9 层的建筑围护结构热工性能参数限值见表 6.1。

表 6.1 严寒 A 区、严寒 B 区、寒冷 B 区 $\geq 9F$ 建筑围护结构热工性能参数限值

(资料来源: 严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准)

围护结构部位		传热系数 K [(W/(m ² ·K))]		
		严寒 (A) 区	严寒 (B) 区	寒冷 (B 区) 西安
屋面		0.25	0.3	0.45
外墙		0.5	0.55	0.7
架空或外挑楼板		0.4	0.45	0.6
外窗	窗墙比 ≤ 0.2	2.5	2.5	3.1
	$0.2 < \text{窗墙比} \leq 0.3$	2.2	2.2	2.8
	$0.3 < \text{窗墙比} \leq 0.4$	2.0	2.0	2.5
	$0.4 < \text{窗墙比} \leq 0.45$	1.8	1.8	2.3

假设 1#住宅楼的围护结构热工性能提高到严寒 A 区建筑围护结构热工性能参数限值, 即外墙传热系数为 $0.5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 屋面传热系数为 $0.25\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 外窗传热系数为 $2.0\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 扣除增加保温材料用量本身所增加的碳排放并通过软件 DeST-h 模拟分析, 1#住宅楼的碳排放将降低 $255.80 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 。

4. 减少建筑体形系数

体形系数是指建筑物与室外大气接触的表面积与其所包围体积的比值, 一般来讲, 体形系数越小对节能越有利。现有研究表明, 建筑的体形系数增加 0.01, 耗热量的指标就会随之而增加 2.5%^[112]。在建筑设计中可以通过建筑平面布局、建筑长度及进深、建筑高度等方面对建筑体形系数进行优化。

根据罗智星^[36]的研究, 住宅建筑的体形系数与空调采暖碳排放之间存在指数函数关系, 体形系数每降低 0.01, 空调采暖的碳排放量可以降低 1.6%-2.9%。

假设 1#住宅楼的体形系数在现有的基础上减少 0.05, 则 1#住宅楼的全生命周期碳排放量将降低 $154.54 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 。

5. 控制建筑窗墙比

在现有的技术经济条件下, 一般外窗的传热系数通常是外墙传热系数的 2-3

倍，合理地控制窗墙比对降低建筑能耗及保证室内通风、采光非常重要。

住宅相关的节能规范根据建筑物所处的气候分区、朝向等特性对每个朝向窗墙比限值做了规定。

6. 室外环境绿化设计

绿色植物可以通过光合作用吸收 CO₂，根据刘念雄^[16]的研究住区建筑 CO₂ 排放量中约 3%可由住区绿地吸收。通过提高住区绿地率和配置植被类型不仅可以增加 CO₂ 吸收量，还可以延长建筑主体的使用寿命，降低噪声、遮阳隔热和改善室内的热环境。

根据资料显示，茂密的树木可以阻拦 50~90%的太阳辐射热量，减少了传入室内的热量，大大节约了空调制冷所带来的能耗^[113]。因此，绿化可以说是节约建筑能耗的最有效措施之一。

6.1.2 优化设计方案

1. 优化建筑节能设计流程

为了优化建筑节能设计方案，节能设计人员要不断优化建筑节能设计流程，保证建筑设计初期的节能设计方案得到更加合理的实施^[114]。

通过不断优化建筑节能设计流程，能够帮助节能设计人员全面了解建筑工程结构特点，保证设计初期的建筑节能设计方案更加合理。

2. 合理运用绿色性能模拟软件

合理运用绿色性能模拟软件能够帮助设计师在设计初期对建筑工程的节能方案进行优化，制定更加科学合理的节能方案。

根据李享^[110]等人对国内设计人员关于绿色性能模拟软件的使用情况调研可知建筑设计行业相关人员使用绿色建筑分析工具比例不高，建筑师在方案设计初期仅凭经验来对建筑的能耗及绿色性能进行把控。

因此需要改变建筑师设计习惯，在建筑设计初期运用绿色性能模拟软件对建筑方案进行把控，选择低能耗、低碳排放的方案。

表 6.2 统计了目前国内外适合建筑师使用的绿色性能模拟软件及每种软件的特点。

表 6.2 国内外绿色性能模拟软件

资料来源：作者自绘

模拟类型	声环境模拟	光环境模拟	风环境模拟	湿热环境模拟	能耗模拟
软件名称	Ecotect SoundPlan Canda/A Paynoise	Ecotect DIALux Radiance V-ray 渲染 斯维尔 IES eQUEST	Ecotect Phoenics Fluent 斯维尔 DesignBuilder Autodesk -Simulation CFD eQUEST GBS IES	Ecotect Fluent DEST E+DesignBuilder Autodesk -Simulation CFD eQUEST DeST-c Trnsys IES	Ecotect DOE-2 Energy Plus Equest Visual DOE TRNSYS ESP-r DesignBuilder IES 天正 斯维尔 (BECS2010) PKPM(CHEC)

6.2 建筑物化阶段减排策略

在太乙路经济适用房 1#楼全生命周期碳排放计算中，物化阶段的碳排放约占到全生命周期碳排放的 15.41%。现对 1#住宅楼建筑物化阶段中建材生产、建材运输、施工阶段的每平方米年碳排放量和比例进行了统计分析，详见表 6.3。

表 6.3 1#住宅楼建筑物化阶段的碳排放分布情况

资料来源：作者自绘

建筑类型	每平方米年碳排放量 (kg/a. m ²)			建筑碳排放比例 (%)		
	建材生产	建材运输	施工	建材生产	建材运输	施工
居住建筑	7.48	0.23	0.15	95.24	2.93	1.84

由表 6.3 可以看出，居住建筑物化阶段的碳排放主要集中于建材生产的阶段，约占到物化阶段碳排放的 95%，其次是建材运输阶段，建筑施工阶段的碳排放量很少。因此，建筑物化阶段减排的重点应放在建材生产阶段。

6.2.1 建材生产阶段减排策略

在太乙路经济适用房 1#楼全生命周期碳排放计算中，物化阶段的建材生产的每平方米碳排放量和比例见表 6.4。由表 6.4 可知钢的单位面积碳排放最大，其次是商品砼和水泥，因此要在合理的范围内最大地节约这 3 类建材。

表 6.4 居住建筑建材碳排放分布情况

资料来源：作者自绘

建材	居住建筑	
	每平方米排放量	比例
	(kg/m ²)	(%)
钢	123.85	33.14
商品砼	95.14	25.46
水泥	68.96	18.45
保温材料	16.46	4.40
门窗	15.37	4.11
砂石	14.56	3.89
铜芯导线 电缆	10.43	2.79
涂料	6.03	1.61
陶瓷	5.21	2.79
木材	5.08	1.36
防水材料	4.62	1.24
PVC 管材	4.66	1.25
砌体	3.38	0.90
石材	0.01	0.00

居住建筑的钢材、商品砼、水泥、砂石、门窗、保温材料、铜芯电缆的碳排放占建材生产碳排放累计贡献达 90%以上，应作为重点控制区域，该类构件应该尽量产业化、标准化。因此从选材上，应降低由建材固化的 CO₂排放量，具体可从以下六个方面着手：

1. 选用天然建材

各种建筑材料的碳排放因子不同，差别很大，具体见表 6.5。一些需要高度加工与高耗能的建材产品如钢铁、水泥等建材的碳排放因子较天然建材如木材、砂石为高^[115]。因此，对于建材的选择可以考虑多使用如木材、砂石等天然建材，尽量减少高能耗、深度加工的建材，如钢铁、EPS、混凝土等。

表 6.5 部分建材的碳排放因子

资料来源：作者自绘

建筑材料类别	建筑材料碳排放因子	
	数值	单位
钢材	2200	kg CO ₂ eq/t
C30 混凝土	321.3	kg CO ₂ eq/m ³
标准砖	349	kg CO ₂ eq/千块标准砖
木材	878	kg CO ₂ eq/m ³
普通硅酸盐水泥	977	kg CO ₂ eq/t
石灰	1344	kg CO ₂ eq/t
砂 (f=1.6~3.0)	2.796	kg CO ₂ eq/t
碎石 (d=10~30mm)	2.425	kg CO ₂ eq/t
塑钢窗	121.1	kg CO ₂ eq/m ²
釉面砖	15.16	kg CO ₂ eq/m ²
水性涂料	6550	kg CO ₂ eq/t

2. 选用回收利用率高的建材

从生命周期角度考虑，建材的可回收、再利用性质可以增加建材的使用周期，避免新开采资源对环境的破坏，因此建筑物在建造时应该尽可能利用可回收利用的建材，如砌块、木材、钢筋、金属等建材。部分常见建材的回收率见表 6.6。

表 6.6 主要建材的再利用率 (资料来源: 作者自绘)

建材种类	再利用率%	建材种类	再利用率%
钢材	95	废铁金属	90
钢	90	玻璃	80
混凝土	60	木材	65
碎石	60	塑料	25
门窗	80	PVC 管材	35

以钢材为例, 原生钢材的碳排放因子为 2200 kgCO₂eq/t, 而再生钢材的碳排放因子仅为 377kgCO₂eq/t, 大约减少了 82.86%的碳排放。假设 1#住宅楼的钢材都使用可再生钢材, 则可以减少碳排放 95.15 kgCO₂eq/m²。

3. 使用以废弃物为原料生产的建材

以废弃物为原料生产的建材主要是指建材生产过程中使用了一种或多种废弃物为生产原料。以废弃物为原料生产的建材主要有利用建筑废弃物生产的再生骨料制作的混凝土砌块, 水泥制品和再生混凝土。以及利用工业废弃物、农作物秸秆、建筑垃圾、淤泥为原料制作的水泥、墙体材料和保温材料等。特别是保温材料, 如 EPS 板, 碳排放因子为 5640 kgCO₂eq/t, 如果采用如用农作物秸秆制作的保温材料, 建筑的碳排放将大幅度降低。

假设 1#住宅楼采用再生骨料混凝土, 混凝土中的水泥采用矿渣硅酸盐水泥, 可以减少碳排放 32.30kgCO₂eq/m²。

4. 使用高性能建材

高性能建材主要是指高强混凝土、高耐久性高性能混凝土、高强度钢等结构材料, 这些材料在耐久性和节材等方面具有明显优势, 可以有效的降低建筑的碳排放。

根据文献[116]、[117]研究, 用 HRB400 钢筋代替 HRB335 钢筋, 可节省 10%~14%的钢材, 用 C50 的高强度混凝土替代 C30 混凝土可以节省约 18.61%的混凝土用量。

假设 1#住宅楼的主要受力钢筋都使用 HRB400 钢筋, 并采用 C50 的高强度混凝土则减少可以减少生命周期碳排放量 28.10kgCO₂eq/m²。

5. 提高建材生产能力与技术

目前，由于我国的建材生产技术较为落后，生产工艺粗糙导致建材生产过程中具有较高的生产碳排放和生产损耗率^[118]。

因此，引用先进的生产技术和科学的管理方法，淘汰落后的生产能力和生产线，对于降低生产碳排放和生产损耗率具有重要意义。

6. 延长建材的使用寿命

有些建材的使用寿命比较短，比如涂料、玻璃、防水材料、保温材料等，对它们进行更换不仅会因为更新的材料消耗造成了碳排放，而且更新过程中材料的运输以及更新过程中的施工都会产生新的碳排放。

由于建材使用寿命导致的更新维护的构造碳排放因子见表 6.7。

表 6.7 部分建筑构造的碳排放因子

资料来源：仓玉洁 建筑物物化阶段碳排放核算方法研究

构造名称	计量单位	碳排放量
		(kgCO ₂ e)
成品木门安装	100m ²	7.08E+03
外墙保温层 (以外保温，保温层为挤塑聚苯板为例)	10m ³	6.76E+03
屋面防水层 (以卷材屋面防水、改性沥青卷材冷粘为例)	100m ²	8.88E+02

假设 1#住宅楼的保温材料、防水材料、门窗建材的使用寿命和建筑的使用寿命一致为 50 年，因为建材寿命的增加而其减少的不必要的建筑维护的碳排放为 39.63 kgCO₂eq/m²。

因此，延长建材的使用寿命，可以在一定程度上减少居住建筑建材的生产碳排放。

6.2.2 建材运输阶段减排策略

运输方式、运输工具、运输距离及建材设备的种类和数量都会对建材运输碳排放产生很大影响，因此可以从以下四个方面来控制碳排放量。

1. 尽量选取离施工地点的原料点，使用本地建材

使用本地化建材，尽可能选择当地生产或富有的材料，减少运输距离，从而减少运输过程中的碳排放。在建筑的建造中应该鼓励使用当地生产的建材，提高当地建材在建造中用到的建材的比例。

以 1#住宅楼为例，主要建材的公路运输距离每增加 100KM, 相应的建筑全生命周期碳排放量将增加 23.66kgCO₂eq/m²。以 1#住宅楼陶瓷运输为例，如果陶瓷的采购运输距离控制在 100km 以内，建筑全生命周期碳排放量将减少 4.5kgCO₂eq/m²。假设 1#住宅楼的主要建材的采购距离都在 100km 以内，则全生命周期碳排放量将减少 5.2kgCO₂eq/m²。

2. 调整货车运力结构

在货运装备方面，尽量选用自重轻、承载量大、能耗低、污染小的环保型、节约型运输车辆，优先发展运输效率高、能耗低的重型货车和特种专用货车，并辅之以数量适当的轻型货车，形成中长途运输以重型货车和特种专用货车为主，短途运输尤其是市内配送以轻型货车为主的格局^[119]。

3. 运输公司加强车辆维护管理

运输公司定期对车辆进行保养，车体内部传动结构的摩擦虽然量虽然小，但是依然会带来额外的能量消耗，同时也会对车体造成一定的影响，减少车辆的使用寿命。因此选择合适的润滑剂，减磨剂对于减少车辆各种零件损耗，减少噪音和废气污染都有一定的成效。

6.2.3 施工阶段减排策略

1 采用绿色施工

营建工法最大的分类即为湿式工法与干式工法之差异，湿式工法的现场产生废弃物与污染较多，例如管建工程使用的砂石混凝土、水泥、砂浆等，都会产生大量粉尘与废水、废泥污染，同时湿式工法现场使用的施工机具种类多且能耗大，比如钢筋切割机、混凝土搅拌机、混凝土振捣器、灰浆搅拌机、木工机具的碳排放量占施工机具碳排放量的 16%。

而以现场焊接、组装等干式接合的干式施工法，施工过程中使用高粉尘污染的建材远较湿式工法少，用水量也相当少，不易产生如 RC 构造般的营建污染，对于工地现场碳排放减量有相当的帮助，是探讨营建阶段 CO₂ 排放减量对策的重点。

施工中推动“营建的合理化”，是绿色施工的一个重要工作，即将建筑部品生产工业化、预铸化、标准化以及营建施工的模矩化、省工化、干式化等方法。

根据文献[120]的研究，绿色施工可以减少施工过程中对环境的不利影响，综合环境负荷可以减少约 22%。

以 1#住宅楼为例，假设 1#住宅楼施工过程中采用干式施工法，做到绿色施工，建筑全生命周期碳排放量可以减少 1.59kgCO₂eq/m²。

2 推广低碳施工新技术

在施工过程中加大太阳能、风能、地热能等清洁能源的使用比例。在施工区域优先使用节能产品，比如 LED 照明灯、高效的利勃海尔轮式装载机等。

6.3 使用维护阶段减排策略

通过对 1#住宅楼全生命周期碳排放构成分析（见图 6.2）可以看出，

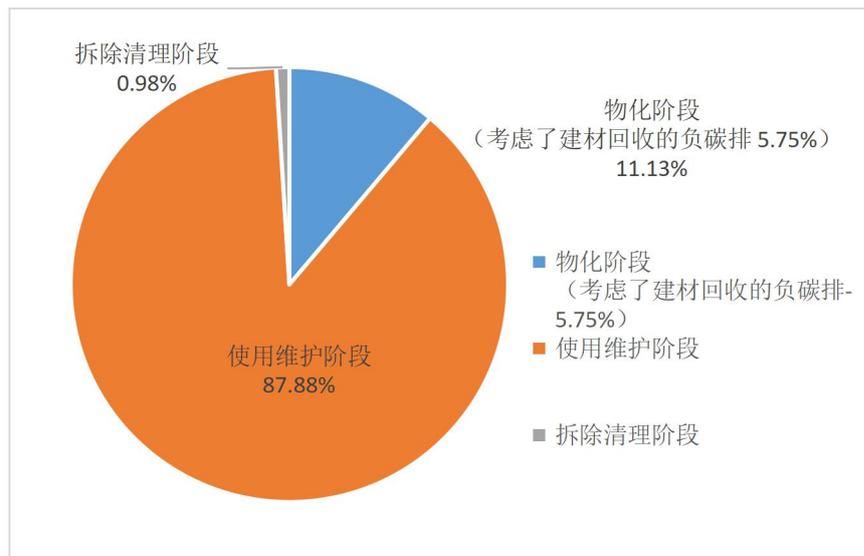


图 6.2 1#住宅楼生命周期三个主要阶段的碳排放量所占百分比图

资料来源：作者自绘

城市住宅全生命周期的碳排放主要集中于使用阶段，其次是物化阶段，拆除阶段较少。因此，居住建筑的减排重点应该在使用维护阶段上。建筑物使用维护阶段碳排放主要来源于以下两个方面：

- 1) 建筑日常使用的能源消耗
- 2) 建筑设备、部件、日常修缮工程

所以该阶段的减排可以围绕这两个方面来展开 1) 降低日常使用能源消耗；2) 提高建筑主体工程质量减少建筑躯体修缮工程，提高设备质量减少建筑设备更新，

避免室内复层化装修造成多余的耗材。

6.3.1 使用阶段

以 1#楼为例，在建筑使用阶段，采暖碳排放占 59.10%，空调碳排放占 11.87%，照明用电的碳排放占 24.12%，具体见图 6.3。

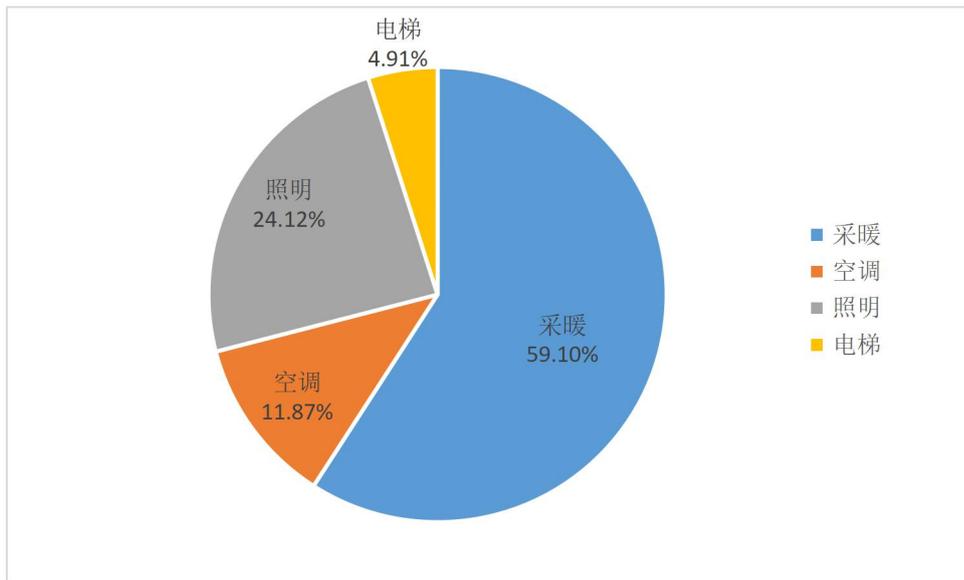


图 6.3 1# 住宅楼使用阶段采暖、空调等建筑面积年碳排放量占百分比饼图

资料来源：作者自绘

由图 6.3 可知，住宅建筑的空调及照明用电占了最大比例，建筑冬季采暖及夏季空调制冷碳排放约占建筑物总碳排放的 84%左右，是所有生命周期阶段中占比最大者，所以进行空调设备日常使用的节能，可以说是建筑物 CO₂ 减量中最有效的方法。具体可以从以下几个方面考虑：

1 提升空调设备性能，采用高效供冷供热设备

以下为空调设备日常使用阶段 CO₂ 减量对策：

1) 防止空调主机处于低负载状态运转：空调主机耗能占空调耗能约 60%左右，如使空调主机全年处于效率差的低负荷状态，将造成额外耗能损失。

2) 提高空调主机 COP 性能值：空调主机 COP 值每上升 1.0，大约会使空调用电量下降 5.8%，由此可见安装高效率空调主机的重要性。

3) 导入建筑能源管理（BEMS）系统与空调节能系统：在建筑空调设计之初，导入空调节能系统，可降低空调耗能。目前空调节能技术已经是非常成熟技术，例如空调主机台数控制、储冰空调系统、可变冷媒 VRV 系统、变风量 VAV 系统、变水量 VWV 系统、全热交换器系统、CO₂ 浓度外气量控制系统等。

假设 1#住宅楼使用了 1 级能效的分体空调, 空调主机 COP 为 3.6, 则其建筑全生命周期的碳排放将降低 $13.72\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 。

2 提高采暖能源使用效率, 利用清洁可再生能源采暖

目前, 我国的集中采暖多以燃煤为主, 若能够提高燃煤系统使用效率, 则可以从一定程度上减少能源的消耗以及碳排放的产生。集中燃煤采暖系统的使用效率主要与锅炉运行效率和室外管网输送效率有关。《民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)》(JGJ26-95)提出, 如果采用室外管网输送效率由 0.85 提高到 0.90, 锅炉运行效率由 0.55 提高到 0.68 的节能措施, 则能够实现采暖系统节能 20%的任务目标^[121]。

根据刘念雄^[6]的研究, 如果采用太阳能与燃气锅炉复合供暖系统, 在屋顶满铺太阳能集热器时, 可实现减排约 35%。如果采用地源热泵、燃气锅炉和冷却塔复合式空调采暖系统, 由地源热泵系统承担总热负荷的 60%, 且设备效率 COP=5 时, 可实现减排约 26%。

假设 1#住宅楼使用了地源热泵、燃气锅炉和冷却塔复合式空调采暖系统, 由地源热泵系统承担总热负荷的 60%, 且设备效率 COP=5, 其建筑全生命周期的碳排放将降低 $307.20\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 。假设 1#住宅楼使用了采用太阳能与燃气锅炉复合供暖系统, 在屋顶满铺太阳能集热器时, 其建筑全生命周期的碳排放将降低 $413.54\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 。

3 使用低碳能源, 降低电力碳排放因子

使用阶段所耗用的能源类型主要为电能, 而且电能的碳排放因子高于其他能源的碳排放因子, 致使建筑使用阶段的碳排放较高。而电能的高排放, 一方面是由于电能属于二次能源, 在一次能源转换或加工的过程中, 会有一定的能量损失; 另一方面是由于目前电能对于煤与燃油有极大的依赖性, 而煤与燃油都是高排放能源^[118]。

因此, 应该改变居住建筑的电源结构, 大力发展太阳能、风能、海洋能等低排放的清洁能源, 推广高效、清洁、低碳的供电技术和供电体系, 降低电能的碳排放因子, 减少使用阶段的碳排放。

根据文献研究, 普及煤的多联产技术, 比单独生产电力等产品的煤炭消耗量减少 10%~20%。假设 1#住宅楼使用的电力为普及煤的多联产技术的电厂发的电,

其建筑其建筑全生命周期的碳排放将降低 $163.60\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 。

4 利用可再生能源

可再生的能源是来自自然界的能源，是取之不尽，用之不竭的能源，具体包括太阳能、风力、潮汐能、地热能等。可再生能源对环境无害或危害极小，而且资源分布广泛，适宜就地开发。可再生能源与建筑的结合，已经成为推动建筑节能减排的必然趋势。建筑中常用的可再生能源系统包括太阳能热水、光伏系统、地源热泵系统和风力发电系统。

假设 1#住宅楼 50%的屋顶安装转化效率 15%的太阳能光伏板，单块尺寸为 $1001*1685\text{mm}$ ，单块发电 24.5w ，经过计算，在理想状态下，每年可以产生电力 150000kWh 的电力，可以减少建筑全生命周期碳排放 $187.05\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 。

5 使用节能电梯

假设 1#住宅楼四部电梯都采用带能量反馈的 VVVF 驱动系统，则电梯耗电量可降低至 $0.30\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ，可以减少碳排放 $12.7\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 。

6 使用节能灯具

以照明系统为例，《建筑照明设计标准》(GB50034-2013)中给出了各房间或通道的设计照明功率密度为 $6\text{W}/\text{m}^2$ 的设计标准。

假设 1#住宅楼将照明灯具改为节能灯具或者对通道的照明采用智能控制，将设计照明功率密度降至 $5\text{W}/\text{m}^2$ ，则其全生命周期可以减少碳排放 $46.12\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 。

7 增加建筑外遮阳

遮阳可以减弱辐射传热对建筑负荷的影响，可以通过控制室内得热来降低夏季空调的负荷。在采用遮阳时，可以人为的根据昼夜变化和室外气象条件灵活的调整内外遮阳设施，冬季白天利用太阳辐射得热，晚上利用调整遮阳措施，减少室内对外界的辐射散热；夏季则采用相反的措施，这样就可以同时减低建筑的冷热负荷^[122]。

假设 1#住宅楼根据以上原则使用了可调节的建筑外遮阳，通过 DeST-h 模拟分析，碳排放将降低 $21.77\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 。

8 增设窗帘

窗帘具有遮阳和调节室内光线等优点，假设 1#住宅楼室内安装浅色窗帘，通

过 DeST-h 模拟分析，建筑全生命周期碳排放将降低 13.2kgCO₂eq/m²。

9 强制推广能耗分项计量系统

缺乏准确、细致的分项用能数据是目前建筑进行碳排放计算的一大瓶颈，而能耗分项计量系统解决了这一数据获取难题。通过采集和整理建筑各类功能的能耗数据（空调、照明、设备用电等），能耗分项计量系统实时显示能耗信息、对比分析能耗数据，实现节能降耗入手点的定位、节能效果差异的对比等功能，为建筑科学用能、合理用能、节能管理提供支持^[118]。

6.4 拆除清理阶段减排策略

根据第五章对 1#住宅楼拆除清理阶段的碳排放构成的分析（见图 6.4），可知拆除清理阶段中废旧建材运输带来的碳排放以及由废旧建材的回收利用带来的碳减量占比最大，因此该阶段的减排重点应在于废旧建材的回收利用与废弃建材的运输上，以下为各个子阶段的减排策略。

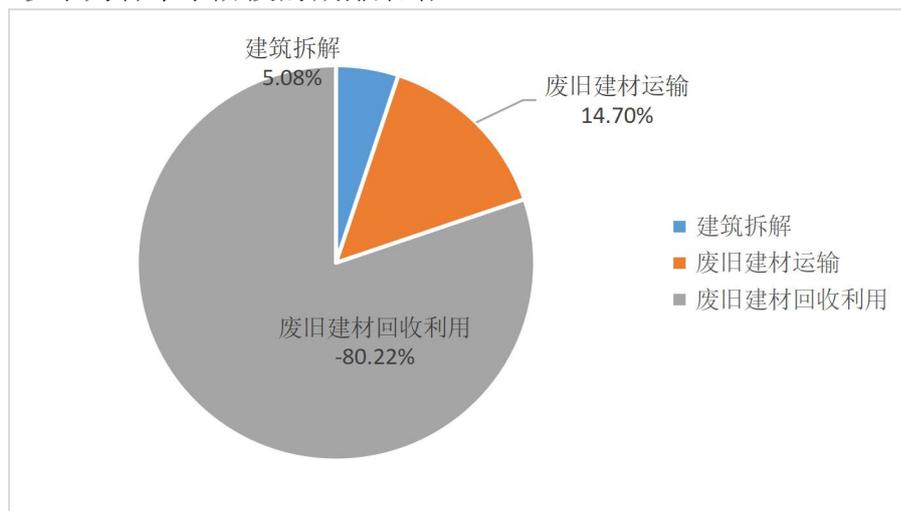


图 6.4 1#住宅楼拆解回收阶段各子阶段碳排所占百分比饼状图（资料来源：作者自绘）

6.4.1 拆除阶段的减排策略

1. 以建筑拆解的方式代替拆毁

使用建筑拆毁方式拆除主体结构时，常在建筑物底层选择合适的打击点，使建筑物向一定方向整体倒塌。这种粗放式的建筑拆毁使大部分废旧材料破碎、混合，变为很难回收、只能填埋的建筑垃圾^[123]。

而建筑拆解则是尽可能以小型机械将构件从主体结构中分离。拆解步骤按照“由内至外，由上至下”的顺序进行，即“室内装饰材料——门窗、暖气、管线

——屋顶防水、保温层——屋顶结构——隔墙与承重墙或柱——楼板，逐层向下直至基础” [123]。

在技术、设备层面上拆解与拆毁两种方式大致相同，但在废旧建材的循环利用率上，差别很大。根据贡小雷^[104]的研究，拆毁方式下钢铁的回收利用率仅为 70%，而水泥、碎石、砖瓦等材料的利用率差更低，拆毁方式使这些材料混合为渣土而无法回收，砖瓦的再利用率仅 10%，远远低于拆解方式下的建材回收率。

假设 1#住宅楼采用拆毁的方式，根据计算得出其拆除阶段废旧建材回收利用带来的碳减量为 92.74kgCO₂eq/m²，而拆解方式下废旧建材回收利用带来的碳减量为 133.74kgCO₂eq/m²，碳排放量增加 41.0kgCO₂eq/m²。

2. 优化拆除方案和方法

在拆除过程中，设备的台班消耗量与拆除阶段的碳排放量有很大的关系（见表 6.8）。

表 6.8 1#楼拆除阶段各机械设备能源碳排放量（资料来源：作者自绘）

序号	机械名称	台班数量 (台班)	碳排放量 (kgCO ₂ e)	台班碳排放因子 (kgCO ₂ e/台班)
1	履带式推土机 功率 90kW	112.82	20759.60	184.00
2	履带式单斗挖掘机 机械斗容量 1.0m ³	80.52	15782.68	196.00
3	风动凿岩机 手持式	2269.54	34610.49	15.25
4	履带式液压岩石破碎机 105kW	374.22	34263.41	91.56
5	载货汽车(装载质量 4t 中型)	46.90	3512.78	74.90
6	洒水车 罐容量 4000L	13.65	1212.10	88.82
7	内燃空气压缩机 排气量 3m ³ /min	1185.62	103824.46	87.57
8	履带式推土机 功率 75kW	93.94	15781.60	168.00

通过第五章分析及表 6.11 可知，拆除阶段的履带式推土机、内燃空气压缩机和履带式液压岩石破碎机是机械设备的主要来源，履带式推土机虽然碳排放率

高，但消耗的台班不多。而内燃空气机压缩机和履带式液压岩石破碎机虽然碳排放率不高，它们的碳排放量较大主要是其消耗的机械台班多导致。因此，在进行拆除阶段的碳排放优化时，

1) 对于履带式推土机的在功能相近的情况下，应当优先选用耗油量更低的型号设备。

2) 项目拆除时应优化拆除方案和方法，安排合理科学的施工组织设计，在保证项目能按照要求拆除的情况下，最大限度的减少内燃空气压缩机、手持式风镐和履带式液压破碎机的使用时间。

假设 1#住宅楼经过拆除方案的优化，在保证项目按照要求拆除的情况下，减少了 1/3 的内燃机台班使用量，则全生命周期的碳排放量将减少为 $0.87 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ 。

6.4.2 减少废旧建材运输所产生的碳排放

废弃建材的运输距离和单位运输碳排放是碳减排的两个关键性因素，减少废旧建材运输所产生的碳排放就是要确定合理的运输距离和运输工具。

1. 选择耗油少的运输工具

对于运输阶段而言，运输汽车所消耗的能源是产生的碳排放的主要来源。因此在运输过程中选择功能相似，耗油较少的运输工具是减少运输过程碳排放总量的有效途径。

2. 减少废弃物运输次数

通过拆除现场对垃圾的巧妙处理可以减少废弃物的运输次数，首先是对拆除后的材料进行分类，分出金属、钢筋、铝合金口窗、砖瓦、混凝土、木料、塑料、玻璃等，然后利用自动回收分类机、移动式混凝土破碎筛分等先进技术和机器对部分材料进行就地处理，就地回收、就地使用，最后再装载清运和处理其余的废弃建材。由此一来可以大大提高建筑废弃物利用效率，并减少多次运输造成的运输碳排放。

6.4.3 提高废旧建材回收利用率

根据第五章的分析可知道，建筑中建材使用量大的建材为商品混凝土、砂石、水泥、钢、砌体这五类建材约占建材总重量的 95%以上，而目前国内钢材的回收利用较为普遍，其余四类的建材回收利用率很低，在拆毁形式下的混凝土的回收

率几乎为零、砌体的回收率仅为 10%。根据 6.4.1 的研究，仅通过改变拆除方式来提高建材回收率带来的碳减排就达到 41kgCO₂eq/m²，以此提高废旧建材的再利用有极大的减排空间。

因此我们应加强技术研发投入，提高废旧建材的再生利用水平，以求达到欧洲一些国家和日本的建筑材料回收率。

6.4.4 延长建筑的使用年限

我国城市住宅的房屋产权为 70 年，建筑的一般设计使用年限为 50 年。有报道称，我国建筑的平均寿命仅 30 年^[124]。以 1#住宅楼为例，分别分析该建筑在 30 年、50 年、70 年时，全生命周期各阶段的单位建筑面积碳排放量及所占比例，见表 6.9。

表 6.9 1#楼不同使用年限下的生命周期各阶段单位面积碳排放量及构成比例

资料来源：作者自绘

子阶段	20 年		30 年		50 年		70 年	
	碳排放量	百分比	碳排放量	百分比	碳排放量	百分比	碳排放量	百分比
	(kgCO ₂ e/ m ²)	(%)						
物化阶段	392.59	30.08%	392.59	22.56%	392.59	15.41%	392.59	11.74%
使用维护阶段	801.79	61.42%	1236.83	71.07%	2043.56	80.23%	2840.42	84.94%
拆除清理阶段	110.88	8.50%	110.88	6.37%	110.88	4.36%	110.88	3.32%
全生命周期 碳排放量 (kgCO ₂ e/m ²)	1083.50		1518.54		2325.27		3122.13	
全生命周期 碳排放量 (kgCO ₂ e/ m ² .a)	54.17		50.62		46.51		44.60	

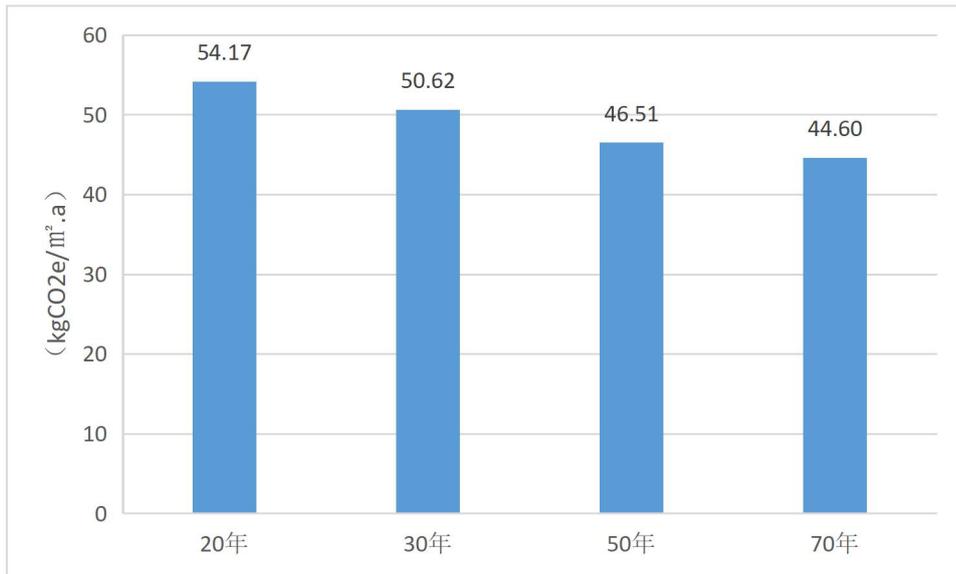


图 6.5 不同使用年限下单位面积年碳排放变化率

资料来源：作者自绘

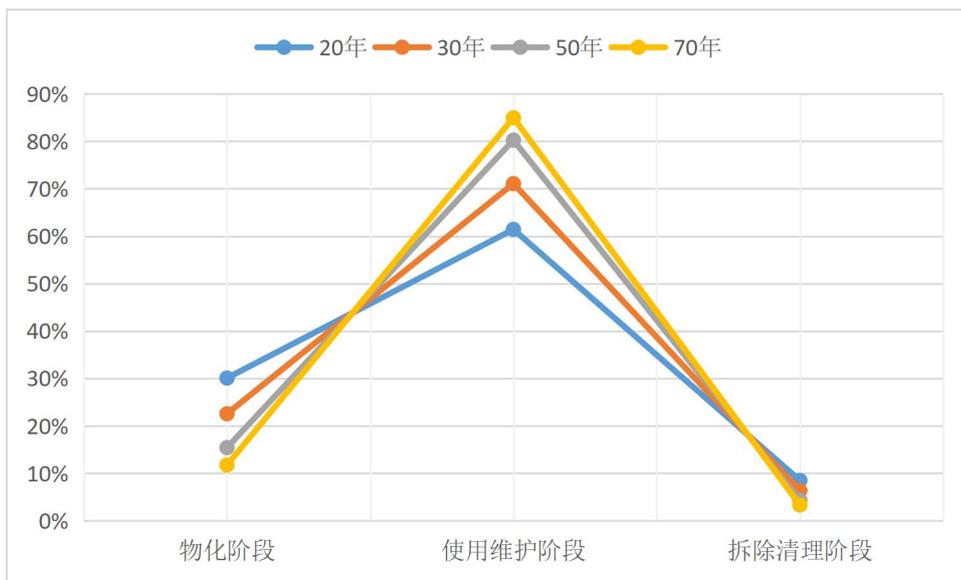


图 6.6 不同使用年限下的建筑全生命周期三个子阶段碳排放构成比例 (%)

资料来源：作者自绘

由表 6.9 和图 6.5、图 6.6 可知，随着住宅使用寿命的增加，运行阶段的单位面积的碳排放量逐渐增加，但是每年单位建筑面积的碳排放量却逐渐减少，由 20 年的 54.17kgCO₂e/m².a 减少到 70 年的 44.60kgCO₂e/m².a。

假设 1#住宅楼的使用寿命从 30 年增至 70 年，其每年单位建筑面积的碳排放量减少 6.46kgCO₂e/m².a。

由以上分析可知增加建筑大的使用寿命无形之中降低了建筑的单位面积年碳排放，因此，通过改造、加固等措施，延长建筑的使用寿命、改善建筑的使用功

能、提高建筑的功能质量，是很有效的减碳措施。

6.5 寒冷地区城市居住建筑全生命周期减碳策略总结

6.5.1 寒冷地区城市居住建筑全生命周期各阶段减碳策略总结

对上述全生命周期各个阶段的减碳策略进行总结，并将减排策略使用后建筑全生命周期的碳排放减少的百分比定义为该项减排措施的减排贡献率，计算公式如下：

$$\delta_i = ((C_{LC} - C_{LCi}) / C_{LC}) \times 100\% \quad (\text{公式 6-1})$$

式中， δ_i 为第 i 种减碳策略的减排贡献率，%

C_{LC} 为建筑全生命周期碳排放量， $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ 。

C_{LCi} 为第 i 种策略使用后建筑全生命周期碳排放量， $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ 。

以 1#住宅楼为例，将 6.1、6.2、6.3、6.4 章节中所采取的减碳策略所带来的全生命周期的碳排放量变化及减排贡献率进行整理，见表 6.10，图 6.7。

表 6.10 寒冷地区城市居住建筑全生命周期减碳策略总结

资料来源：作者自绘

阶段	减碳策略	1#楼全生命周期碳减量 ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$)	减排贡献率 (%)	
规划设计阶段	1. 改善建筑节能设计	1. 遵循低碳设计原则	-----	
		2. 优化建筑朝向	2.09	0.08%
		3. 提高围护结构热工性能	255.8	11.47%
		4. 减少建筑体形系数	154.54	6.64%
		5. 控制窗墙比	-----	-----
		6. 室外绿化设计	-----	-----
		7. 利用新节能技术	-----	-----
	2. 优化设计方案	1. 优化建筑节能	-----	-----
		2. 合理运用绿色性能模拟软件	-----	-----

阶段	减碳策略		1#楼全生命周期碳减量 (kgCO ₂ e/ m ²)	减排贡献率 (%)	
物化阶段	1. 降低建材生产阶段碳排放	1. 选用天然建材	-----	-----	
		2. 选用回收率高的建材	95.15	4.10%	
		3. 使用以废弃物为原料生产的建材	32.30	1.39%	
		4. 使用高性能建材	28.10	1.21%	
		5. 提高建材生产能力与技术	-----	-----	
		6. 延长建材的使用寿命	39.63	1.70%	
	2. 降低运输阶段的碳排放	1. 使用本地建材	5.20	0.23%	
		2. 调整货车运力结构	-----	-----	
		3. 加强车辆维护管理	-----	-----	
	3. 降低施工阶段的碳排放	1. 采用干式工法施工	1.59	0.07%	
		2. 加强施工管理	-----	-----	
		3. 使用低碳施工新技术	-----	-----	
	使用维护阶段	1. 降低使用阶段碳排放	1. 提高空调设备性能	13.72	0.06%
			2. 提高采暖能源使用效率, 利用清洁可再生能源采暖	413.54	17.78%
			3. 使用低碳能源, 降低电力碳排放因子	163.60	7.03%
4. 利用可再生能源			187.05	8.04%	
5. 使用节能电梯			12.70	0.54%	
6. 使用节能灯具			46.12	1.98%	
7. 增设窗帘			13.12	0.56%	
8. 增加建筑外遮阳			21.77	0.94%	
9. 推广能耗分项计量系统			-----	-----	

阶段	减碳策略	1#楼全生命周期碳减量 (kgCO ₂ e/ m ²)	减排贡献率 (%)	
拆除回收阶段	1. 降低拆除阶段的碳排放	1. 以建筑拆解方式代替拆毁	41.00	1.76%
		2. 优化拆解方案和方法	0.87	0.04%
	2. 降低废弃物运输的碳排放	1. 选择耗油少的运输工具	-----	-----
		2. 减少废弃物运输次数	-----	-----
	3. 增加废旧建材回收利用的碳减量	1. 提高废旧建材的回收率	41.00	1.76%
		4. 延长建筑使用寿命	6.46kg/m ² .a	12.76%

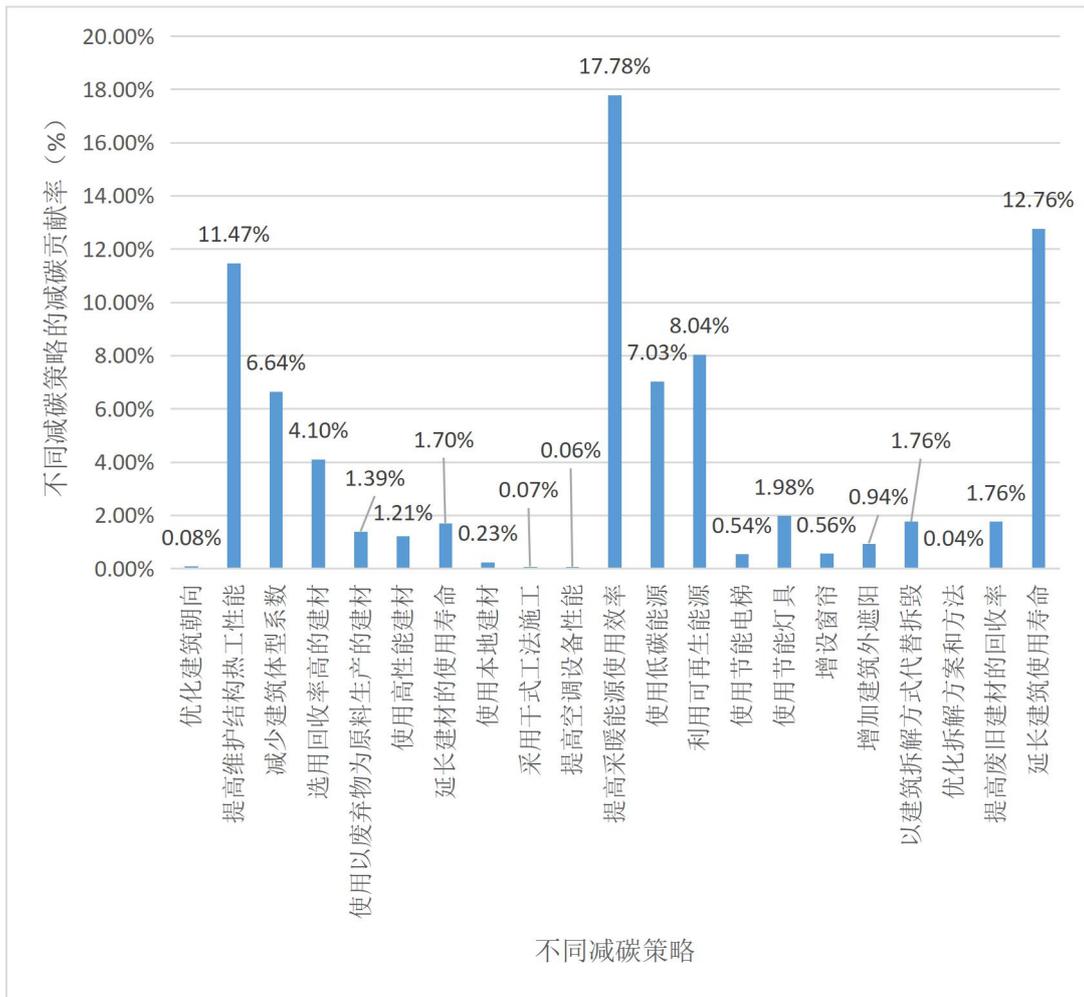


图 6.7 1#楼不同减碳策略的减排贡献率 (%) (资料来源: 作者自绘)

6.5.2 不同减碳策略减排率分析

由以上分析可知，以 1#住宅楼为例，不同的减碳策略所带来的减排效果差异较大。其中使用阶段中提高采暖能源的使用效率，利用可再生能源采暖、使用低碳能源、延长建筑的使用寿命以及提高维护结构的热工性能等策略带来的减排效果明显，减排率均超过 7%。

6.5.3 住宅建筑现有常见的减碳策略

目前，国内住宅建筑常见的减碳策略的落脚点多集中于使用阶段，如优化建筑朝向、提高围护结构的热工性能、减少体形系数、提高空调设备的性能、增设窗帘及增加建筑外遮阳等。将上述经过总结后的寒冷地区城市住宅建筑全生命周期减碳策略中现有常见的减碳策略进行整理见表 6.11。

表 6.11 寒冷地区城市住宅常见的减碳策略总结

资料来源：作者自绘

阶段	策略		1#住宅楼全生命周期碳减量 (kgCO ₂ e/m ²)	减排贡献率 (%)
规划设计阶段	改善建筑节能设计	1. 遵循低碳设计原则	-----	-----
		2. 优化建筑朝向	2.09	0.08%
		3. 提高围护结构热工性能	255.8	11.47%
		4. 减少建筑体形系数	154.54	6.64%
		5. 控制窗墙比	-----	-----
		6. 室外绿化设计	-----	-----
		7. 利用新节能技术	-----	-----
使用维护阶段	降低使用阶段碳排放	1. 提高空调设备性能	13.72	0.06%
		2. 增设窗帘	13.12	0.56%
		3. 增加建筑外遮阳	21.77	0.94%

由表 6.11 可知，以 1#住宅楼为例，采用目前常见的城市住宅减碳策略可以减少碳排放 19.75%。

6.5.4 在常见减排策略基础上优化提升的减碳策略

通过本研究可知，住宅建筑的减碳应该从全生命周期各个阶段进行，而不应只限于使用阶段的减碳。物化阶段中的建材生产运输和施工建造过程、拆除清理阶段的拆除工程、废旧建材运输的能耗和排放也是不可忽视的。建筑拆解后废旧建材的回收率的提高同样也能带来减碳。

表 6.12 总结了在目前常见的住宅减碳策略基础上提升优化的减碳措施。

表 6.12 寒冷地区城市住宅提升优化的减碳策略总结

资料来源：作者自绘

阶段	策略		1#住宅楼全生命周期碳减量 (kgCO ₂ e/m ²)	减排贡献率 (%)
规划设计阶段	1. 优化设计方案	1. 优化建筑节能	-----	-----
		2. 合理运用绿色性能模拟软件	-----	-----
物化阶段	1. 降低建材生产阶段碳排放	1. 选用天然建材	-----	-----
		2. 选用回收率高的建材	95.15	4.10%
		3. 使用以废弃物为原料生产的建材	32.30	1.39%
		4. 使用高性能建材	28.10	1.21%
		5. 提高建材生产能力与技术	-----	-----
		6. 延长建材的使用寿命	39.63	1.70%
	2. 降低运输阶段的碳排放	1. 使用本地建材	5.20	0.23%
		2. 调整货车运力结构	-----	-----
		3. 加强车辆维护管理	-----	-----
	3. 降低施工阶段的碳排放	1. 采用干式工法施工	1.59	0.07%
		2. 加强施工管理	-----	-----
		3. 提高现场施工人员低碳意识	-----	-----
		4. 使用低碳施工新技术	-----	-----

阶段	策略		1#住宅楼全生命周期碳减量 (kgCO ₂ e/m ²)	减排贡献率 (%)
使用维护阶段	1. 降低使用阶段碳排放	1. 提高采暖能源使用效率, 利用清洁可再生能源采暖	413.54	17.78%
		2. 使用低碳能源, 降低电力碳排放因子	163.60	7.03%
		3. 利用可再生能源	187.05	8.04%
		4. 使用节能电梯	12.70	0.54%
		5. 使用节能灯具	46.12	1.98%
		6. 推广能耗分项计量系统	————	————
拆除回收阶段	1. 降低拆除阶段的碳排放	1. 以建筑拆解方式代替拆毁	41.00	1.76%
		2. 优化拆解方案和方法	0.87	0.04%
	2. 降低废弃物运输的碳排放	1. 选择耗油少的运输工具	————	————
		2. 减少废弃物运输次数	————	————
	3. 增加废旧建材回收利用的碳减量	1. 提高废旧建材的回收率	41.00	1.76%
	4. 延长建筑使用寿命	2. 延长建筑使用寿命	6.46kgCO ₂ e/m ² ·a	12.76%

由表 6.15 可知, 以 1#住宅楼为例, 在目前常见的城市住宅减碳策略基础上还可以减少碳排放 51.74 %。

6.5.5 寒冷地区城市居住建筑减碳策略总结

综上所述, 在寒冷地区, 以西安市为例, 减少城市住宅全生命周期碳排放量的重点策略有 1) 提高采暖能源的使用效率; 2) 延长建筑的使用寿命; 3) 使用低碳能源, 降低电力碳排放因子; 4) 提高围护结构的热工性能; 5) 利用可再生能源; 6) 减少建筑的体形系数; 7) 选用回收率高的建材; 8) 使用高性能建材; 9) 使用节能灯具; 10) 以建筑拆解的方式来代替拆毁;

7 总结与展望

本研究基于国家 2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60% - 65% 的节能减排时代背景, 分析研究了 2005 年城市居住建筑全生命周期碳排放构成, 在此基础上提出城市住宅减碳 60%~65% 的减碳策略。

本研究基于 LCA 理论, 从全生命周期的角度来研究建筑的碳排放, 将建筑生命周期划分为四个阶段: 规划设计阶段、物化阶段、使用维护阶段、拆除清理阶段, 在此基础上构建了建筑全生命周期碳排放核算体系与框架; 并选取西安地区一栋 2005 年建造的高层混凝土结构的居住建筑为对标建筑进行碳排放计算, 研究其生命周期碳排放构成, 找到建筑生命周期各阶段的碳排放影响因素, 并在此基础上提出寒冷地区城市居住建筑减碳 60%-65% 的策略。

7.1 研究成果

本文的主要研究成果和研究成果总结如下:

1. 建立了建筑全生命周期碳排放核算体系框架

本研究在总结相关研究基础上提出了建筑全生命周期碳排放计算体系框架, 确定了各个阶段的碳排放活动来源, 以及计算公式。

2. 计算了 2005 年典型城市住宅减碳对标建筑全生命周期的碳排放

本研究通过调研分析得出 2005 年国家城市住宅建设以高层钢筋混凝土结构为主, 并选取一栋西安地区的高层钢筋混凝土居住建筑为对标建筑, 进行建筑全生命周期碳排放计算。经过计算得出, 对标建筑的全生命周期碳排放量为 2325.26 kgCO₂e/m²。其中物化阶段的碳排放量为 392.59 kgCO₂e/m², 使用维护阶段的碳排放量为 2043.56 kgCO₂e/m², 拆除清理阶段中拆除阶段碳排放量为 22.86kgCO₂e/m², 因材料回收带来的碳减量为 133.75kgCO₂e/m²。

其中建材生产阶段碳排放量为 373.75 kgCO₂e/m², 建材运阶段的碳排放量为 11.49 kgCO₂e/m², 施工建造的碳排放量为 7.34 kgCO₂e/m², 其中施工机具运行产生的碳排放量为 6.43 kgCO₂e/m², 施工管理临时设施的碳排放量为 0.91 kgCO₂e/m², 建筑使用阶段的碳排放量为 2003.93 kgCO₂e/m², 建筑维护阶段的碳排放量为 39.63 kgCO₂e/m², 建筑拆除的碳排放量为 5.86 kgCO₂e/m², 废弃物运输的碳排放量为 17 kgCO₂e/m², 废弃物材料回收带来的碳减量为 133.75 kgCO₂e/m²。

3. 分析了 2005 年城市住宅对标建筑全生命周期碳排放构成

本研究对对标建筑的生命周期碳排放构成进行了分析，分析了影响住宅建筑碳排放的因素。研究发现：

1) 建筑全生命周期碳排放构成

在建筑全生命周期中，使用维护阶段的碳排放量占比最大，达到 80.23%，其次为物化阶段，占比约为 15.41%，拆除清理阶段（考虑建材回收带来的负碳排）的减碳贡献率为 4.35%。

2) 建筑物化阶段建筑材料碳排放规律研究

本研究针对建材生产阶段中建筑材料的碳排放进行了研究，得到建材生产阶段建材碳排放量的规律。

研究表明：钢、商品砼、水泥、砂石、木材、铜芯电线电缆、建筑陶瓷、PVC 管材、保温材料、门窗、防水材料和建筑装饰涂料十二类建材的碳排放量达到了建筑物化阶段总建材碳排放量的 99%，是物化阶段碳排放最为主要的建材。而砌体材料、石材和其他建材的碳排放量之和所占百分比不到 1%。

3) 建筑使用维护阶段碳排放构成研究

在建筑使用维护阶段中，建筑使用阶段的碳排放占比最大，达到 98.06%，维护阶段的碳排放占比约 1.94%，其中在建筑的使用阶段里，因采暖耗能引起的碳排放量占比最大，达到 59.10%，其次为照明，约占 24%，空调制冷碳排放量占比为 4.91%。

4) 建筑拆除清理阶段碳排放构成研究

在建筑拆除清理阶段中，废旧建材回收带来的碳减量占比最大，达到 80.22%，其次为废旧建材运输阶段约为 14.70%，建筑拆除占比最小，约为 5.08%。

4. 寒冷地区城市居住建筑减排策略的研究

本研究依据对标建筑全生命周期的碳排放构成的分析结果，分别从规划设计阶段、物化阶段、使用维护阶段、拆除清理阶段来总结了减少建筑碳排放的低碳设计策略。并以 1#住宅楼为例，对总结后的减碳策略的减排率进行了测算，得出寒冷地区城市住宅全生命周期重点减碳策略。

经测算及总结后的城市住宅全生命周期重点减碳策略有 1) 提高采暖能源的使用效率；2) 延长建筑的使用寿命；3) 使用低碳能源，降低电力碳排放因子；4) 提高围护结构的热工性能；5) 利用可再生能源；6) 减少建筑的体形系数；7) 选用回收率高的建材；8) 使用高性能建材；9) 使用节能灯具；10) 以建筑拆解的

方式来代替拆毁；

7.2 研究工作展望

由于影响建筑全生命周期碳排放的因素很多，可用的数据又很缺乏，因此结合相关的研究现状，提出以下几点展望：

1) 通过大量的基础研究，收集、整理建材生产、施工、使用维护、拆除等各阶段的碳排放因子的基础数据，建立“本土化”的碳排放因子数据库。

2) 增加 2005 年城市住宅对标建筑的数量，对不同气候分区、不同结构形式的城市住宅等进行碳排放计算，得到不同气候分区、不同结构类型的城市住宅碳排放的对标参照样本，使得最终结果具有充足的数据支持。

3) 建立基于我国现阶段国情的碳排放评估体系，用于衡量不同类型、不同使用年限的建筑碳排放程度，使得最终结果更具有可比性。

4) 细化、深化建筑能耗统计工作

当前建筑使用阶段碳排放量计算由于缺乏准确、细致的分项用能数据，因此主要是根据建筑使用模拟能耗折算的，在模拟过程中，模拟条件的假定、模拟过程、模拟软件都会带来结果与实际的差异。同时实际中建筑的能耗与使用者的习惯也有很大的关系，因此深化建筑能耗统计工作，推广能耗分项计量系统，为建筑碳排放核算提供基础数据支持。

附录

附录一

表 2.7 主要建筑材料碳排放因子

资料来源：仓玉洁《建筑物化阶段碳排放核算方法研究》

建材名称	建材类别	单位	碳足迹因子			
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	合计
预制砼块	混凝土	kgCO ₂ e/m ³	1.71E+02	2.84E-01	6.38E-01	1.71E+02
商品砼(坍落度10~90mm)C30	混凝土	kgCO ₂ e/m ³	2.96E+02	4.39E-01	6.94E-01	2.97E+02
商品砼(坍落度10~90mm)C20	混凝土	kgCO ₂ e/m ³	—	—	—	2.70E+02
铝合金门窗	铝合金门窗	kgCO ₂ e/m ²	5.63E+01	1.74E+00	1.40E-01	4.63E+01
挤塑聚苯板	XPS	kgCO ₂ e/m ³	6.42E+02	2.37E+01	3.83E+00	6.69E+02
石油沥青油毡	防水卷材	kgCO ₂ e/kg	2.37E+00	2.17E-03	1.28E-02	2.38E+00
平板玻璃 3mm	平板玻璃	kgCO ₂ e/t	1.79E+03	7.23E+01	5.21E+00	1.86E+03
木料	规格材	kgCO ₂ e/m ³	8.72E+02	2.08E+00	3.83E+00	8.78E+02
水泥	水泥	kgCO ₂ e/t	9.73E+02	1.63E+00	2.17E+00	9.77E+02
方整石	石料	kgCO ₂ e/t	3.15E+00	2.00E-03	1.06E-02	3.17E+00
铜丝	铜	kgCO ₂ e/t	9.25E+03	1.24E+02	3.85E+01	9.41E+03
铁钉	钢、铁	kgCO ₂ e/t	2.02E+03	3.80E+01	1.57E+02	2.20E+03
标准砖	标准砖	kgCO ₂ e/千块标准砖	3.46E+02	9.05E-01	1.60E+00	3.49E+02
非承重粘土多孔砖	非承重粘土多孔砖	kgCO ₂ e/千块标准砖	3.46E+02	9.05E-01	1.60E+00	3.49E+02
硅酸盐砌块	硅酸盐砌块	kgCO ₂ e/m ³	6.12E+02	9.38E+00	1.59E+00	6.23E+02
加气混凝土砌块	加气混凝土砌块	kgCO ₂ e/m ³	3.22E+02	4.05E+00	9.74E-01	3.27E+02

表 2.8 全国不同区域电力供应碳排放因子（单位：kgCO₂e/kWh）

资料来源：建筑碳排放计算标准（征求意见稿）

2014 年中国区域电网基准线排放因子	覆盖省市	电力碳排放因子
		kgCO ₂ /KWh
华北区域电网	北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、内蒙古自治区	1.058
东北区域电网	辽宁省、吉林省、黑龙江省	1.1281
华东区域电网	上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省	0.8095
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

2014 年中国区域电网基准线排放因子	覆盖省市	电力碳排放因子
		kgCO ₂ /KWh
西北区域电网	陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区	0.9578
南方区域电网	广东省、广西壮族自治区、云南省、贵州省、海南省	0.9183
全国平均值		0.974

附录二

表 4.1 1#住宅楼主要建筑材料用量统计表

资料来源：作者自绘

序号	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
1	圆钢Φ10 内外钢筋	t	602.97	1392860.70
2	Φ10 以上螺纹钢	t	1436.67	3318707.70
3	铁件	kg	1550.17	3394.87
4	型钢	kg	3413.20	7474.91
5	C35P8 商品混凝土	m ³	581.76	179001.73
6	C30P8 商品混凝土	m ³	1337.12	562793.81
7	C35 商品混凝土	m ³	2978.71	916519.28
8	C30 商品混凝土	m ³	3068.37	911305.89
9	C25 商品混凝土	m ³	4492.32	1112702.74
10	C15 商品混凝土	m ³	196.36	44709.21
11	硅酸盐水泥 325#	kg	873.51	853.42
12	硅酸盐水泥 425#	kg	2762794.96	2699250.68
13	白水泥	kg	1223.79	1195.64
14	石油沥青 30#	kg	4998.65	14.18
15	乳胶漆	kg	3433.14	22475.67
16	东北松、进口松木	m ³	0.27	237.06
17	规格料	m ³	226.33	198717.74
18	承重黏土砖 (KP1、DS1) 240×115×90	千块	104.38	36428.62
19	承重黏土砖 (DS2) 240×190×90	千块	115.93	40459.57
20	非承重黏土多孔 (KF17) 240×115×240	千块	42.46	14818.54
21	机制红砖	千块	116.56	40679.44

序号	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
22	地砖缸砖(30mm厚)	m ²	4400.98	23237.17
23	花岗石条石	100m ²	0.98	249.92
24	石灰	t	301.78	528115.00
25	净砂	m ³	4303.13	15017.92
26	砾石	m ³	3057.53	27128.85
27	面砖 0.015 m ² 以内	m ²	11913.77	180684.24
28	甲级防火门	m ²	11.01	531.67
29	三防门	m ²	448.20	77052.30
30	乙级防火门	m ²	370.26	16254.41
31	丙级防火门	m ²	198.20	6960.78
32	铝合金地弹门	m ²	38.74	1793.66
33	铝合金推拉窗	m ²	1798.39	83265.46
34	铝合金推拉门	m ²	1566.58	72532.65
35	中空玻璃塑钢窗	m ²	3494.19	343828.30
36	聚苯乙烯泡沫板保温	10m ³	37.58	207656.70
37	挤塑保温板	m ²	19223.99	437230.97
38	氯化聚乙烯卷材 平面	100m ²	8.27	1968.26
39	聚氨酯 二布三涂 涂膜厚 2.5mm	100m ²	88.57	178625.71
40	铸铁斗口	10 个	0.80	---
41	铸铁落水口	10 个	0.80	---
42	铜管 DN15	10m	410.40	19685.72
43	铜管 D19.1(含保温)	m	3280.00	15733.52
44	管内穿线 导线截面(1.5mm ² 以内)铜芯	100m 单 线	138.24	5373.11
45	管内穿线 导线截面(2.5mm ² 以内)铜芯	100m 单 线	68.54	8327.85
46	管内穿线导线截面(4mm ² 以内)铜芯	100m 单	68.20	12562.35

序号	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
		线		
47	绝缘导线 RVS -2*1.5	m	7911.20	1985.51
48	绝缘导线 RVS-2*1.0	m	7950.64	131.74
49	绝缘导线 BV-2.5	m	74967.32	15871.85
50	绝缘导线 BV-4	m	35908.40	12028.80
51	铜芯绝缘导线 BV-10	m	6652.80	837.49
52	同轴电缆 SYKV-75-5-1	m	8184.96	544.54
53	同轴电缆 SYKV-75-7	m	2143.68	296.53
54	同轴电缆 SYKV-75-9	m	263.90	45.44
55	管内穿线 照明线路导线截面(2.5mm ² 100m 单 以内)铜芯	线	646.27	78480.34
56	管内穿线 照明线路导线截面(4mm ² 以 100m 单 内)铜芯	线	326.44	60145.90
57	管内穿线 动力线路导线截面(10mm ² 以 100m 单 内)铜芯	线	63.36	30776.35
58	铜芯电力电缆敷设 (截面 35mm ² 以下)	100m	22.42	59145.61
59	铜芯电力电缆敷设 (截面 240mm ² 以下)	100m	10.76	86506.13
60	红丹防锈漆	100kg	164.97	106091.01
61	调和漆	100kg	164.31	107622.40
62	桥架 300*150	m	167.43	8143.08
63	弱电桥架 200*100	m	161.60	5838.54
64	桥架 GPQ1A-300*150J-G)	m	40.20	1955.17
65	桥架 GPQ1A-400*150J-G	m	156.38	8496.11
66	塑料排水管	m	568.00	7457.79
67	PP-R 塑料给水管 D25	m	12272.64	10071.16

序号	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
68	PP-R 塑料给水管 D25	m	590.84	2443.06
69	隔音多孔塑料排水管 D75	m	849.37	6003.93
70	隔音多孔塑料排水管 D100	m	1803.68	23682.15
71	隔音多孔塑料排水管 D150	m	1116.51	27344.84
72	塑料管 PVC16	m	67081.85	70844.46
73	塑料管 PVC20	m	11435.41	18072.61
74	塑料管 PVC32	m	2247.59	5436.73
75	PB 采暖地热管	m	16609.68	——
76	室内钢塑复合管(螺纹连接)公称直径 25mm 以内	10m	29.60	1174.59
77	室内钢塑复合管(螺纹连接)公称直径 32mm 以内	10m	2.60	135.53
78	室内钢塑复合管(螺纹连接)公称直径 40mm 以内	10m	3.60	225.88
79	室内钢塑复合管(螺纹连接)公称直径 50mm 以内	10m	10.80	865.89
80	室内钢塑复合管(螺纹连接)公称直径 65mm 以内	10m	22.90	2480.20
81	室内钢塑复合管(螺纹连接)公称直径 80mm 以内	10m	8.40	1159.54
82	室内钢塑复合管(螺纹连接)公称直径 100mm 以内	10m	18.80	3358.13
83	室内钢塑复合管(螺纹连接)公称直径 150mm 以内	10m	5.00	1474.27
84	室内钢塑复合管(螺纹连接)公称直径 200mm 以内	10m	0.80	346.35
85	热镀锌钢管 DN25	m	1001.10	7195.40

序号	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
86	热镀锌钢管 DN32	m	310.08	3103.84
87	热镀锌钢管 DN40	m	511.66	5901.52
88	镀锌钢管 DN50	m	184.64	2912.49
89	钢管 DN65	m	621.18	12983.80
90	热镀锌钢管 DN80	m	192.84	4817.57
91	镀锌钢管 DN100	m	565.10	18141.86
92	镀锌钢管 DN150	m	950.60	37550.02
93	镀锌钢板	10m ²	97.10	12162.48
94	商用室内机 FXYF25	台	40.00	1203.20
95	商用室内机 FXYF32	台	8.00	246.08
96	商用室内机 FXYF40	台	80.00	3317.60
97	螺纹阀门 DN20	个	1351.38	---
98	螺纹阀门 DN32	个	2.02	---
99	螺纹阀门 DN40	个	4.04	---
100	法兰阀门 DN50	个	1.00	---
101	法兰阀门 DN65	个	8.00	---
102	法兰阀门 DN80	个	4.00	---
103	法兰阀门 DN100	个	16.00	---
104	螺纹浮球阀 DN32	个	2.00	---
105	螺纹水表 DN25	个	202.00	---
106	台式洗脸盆及感应龙头	套	18.18	---
107	瓷蹲式大便器	套	16.16	---
108	低水箱坐便器	套	2.02	---
109	挂斗式小便器及感应冲水器	套	12.12	---
110	铜水嘴 水龙头安装 公称直径 (15mm 以内)	个	202.00	---
111	地漏 DN50	个	494.00	---

序号	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
112	柔性防水套管制作	个	68.00	---
113	沟槽式热镀锌钢管管件 DN150	个	37.26	---
114	沟槽式热镀锌钢管管件 DN100	个	10.99	---
115	自动喷水灭火系统管网水冲洗	100m	27.93	---
116	低压螺纹阀门	个	2.02	---
117	低压法兰阀门	个	49.00	---
118	低中压碳钢平焊法兰	片	98.00	---
119	平焊法兰	片	137.00	---
120	柔性防水套管制作	个	6.00	---
121	柔性软风管 d150	m	28.00	---
122	风管防火阀 VD 150*100	个	38.00	---
123	风管远控排烟防火阀 BSFD 400*250	个	2.00	---
124	风管远控排烟防火阀 BSFD 630*250	个	1.00	---
125	风管远控排烟防火阀 BSFD 800*320	个	1.00	---
126	自垂百叶风口 150*100	个	4.00	---
127	单层百叶风口 150*100	个	38.00	---
128	单层百叶风口 400*200	个	20.00	---
129	单层百叶风口 630*500	个	1.00	---
130	单层百叶风口 500*1200	个	4.00	---
131	双面防火风口 1000*400	个	1.00	---
132	双面防火风口 1500*400	个	1.00	---
133	排烟风口 630*500	个	2.00	---
134	轴流式通风机 YT-35 2.5# N=0.04KW	台	2.00	---
135	轴流式通风机 YT-35 5# N=0.37KW	台	1.00	---
136	轴流式通风机 W-X-5# N=1.1KW	台	1.00	---
137	轴流式通风机 W-X-5# N=0.18KW	台	2.00	---
138	斜流式通风机 YX-9# N=5.5KW	台	2.00	---

序号	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
139	斜流式通风机 YX-10# N=7.5KW	台	4.00	---
140	屋顶式通风机 YT-35 4# N=0.18KW	台	4.00	---
141	屋顶式通风机 YCW-5# N=0.75KW	台	8.00	---
142	卫生间通风器 BPT15-24	台	12.00	---
143	全热交换器 VAM2000	台	10.00	---
144	室内管道沟槽式卡箍连接公称直径 150mm 以内	10m	3.00	---
145	室内管道沟槽式卡箍连接公称直径 200mm 以内	10m	1.00	---
146	焊接钢管(电弧焊)公称直径(mm 以 内)150	10m	3.00	---
147	焊接钢管(电弧焊)公称直径(mm 以 内)250	10m	1.00	---
148	螺纹旋塞阀门公称直径(15mm 以内)	个	19.00	---
149	法兰闸阀门公称直径(50mm 以内)	个	2.00	---
150	法兰闸阀门公称直径(65mm 以内)	个	4.00	---
151	法兰闸阀门公称直径(80mm 以内)	个	7.00	---
152	法兰闸阀门公称直径(150mm 以内)	个	15.00	---
153	法兰闸阀门公称直径(200mm 以内)	个	3.00	---
154	法兰闸阀门公称直径(250mm 以内)	个	2.00	---
155	法兰止回阀门公称直径 (80mm 以内)	个	7.00	---
156	法兰止回阀门公称直径 (150mm 以内)	个	4.00	---
157	法兰遥控浮球阀门公称直径(150mm 以 内)	个	4.00	---
158	法兰软接头公称直径(80mm 以内)	个	14.00	---

序号	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
159	法兰软接头公称直径(150mm 以内)	个	11.00	---
160	法兰软接头公称直径(200mm 以内)	个	2.00	---
161	法兰软接头公称直径(250mm 以内)	个	2.00	---
162	碳钢平焊法兰(电弧焊)公称直径(50mm 以内)	付	2.00	---
163	碳钢平焊法兰(电弧焊)公称直径(65mm 以内)	付	4.00	---
164	碳钢平焊法兰(电弧焊)公称直径(80mm 以内)	付	28.00	---
165	碳钢平焊法兰(电弧焊)公称直径(150mm 以内)	付	34.00	---
166	碳钢平焊法兰(电弧焊)公称直径(200mm 以内)	付	5.00	---
167	碳钢平焊法兰(电弧焊)公称直径(250mm 以内)	付	4.00	---
168	螺纹铜截止阀(镀锌活接头)安装 公称 直径(mm 以内)15	个	1368.00	---
169	螺纹铜截止阀(镀锌活接头)安装 公称 直径(mm 以内)40	个	48.00	---
170	螺纹铜闸阀(镀锌活接头)安装 公称直 径(mm 以内)20	个	104.00	---
171	螺纹铜球阀(镀锌活接头)安装 公称直 径(mm 以内)25	个	192.00	---
172	螺纹黄铜锁闭阀(镀锌活接头)安装 公 称直径(mm 以内)25	个	192.00	---
173	螺纹温控阀(镀锌活接头)安装 公称直 径(mm 以内)15	个	1368.00	---

序号	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
174	螺纹多功能过滤阀(镀锌活接头)安装 公称直径(mm 以内)25	个	192.00	---
175	螺纹静态平衡阀(镀锌活接头)安装 公 称直径(mm 以内)40	个	48.00	---
176	自动排气阀 20	个	104.00	---
177	自动放风阀	个	1368.00	---
178	干式变压器安装 容量 (1000KVA 以下)	台	4.00	---
179	高压成套配电柜安装双母线柜电容器柜	台	10.00	---
180	高压成套配电柜 KYN28-12Z-006	台	5.00	---
181	高压成套配电柜 KYN28-12Z-045	台	3.00	---
182	高压成套配电柜 KYN28-12Z-051	台	2.00	---
183	配电(电源)屏低压开关柜	台	31.00	---
184	配电(电源)屏低压开关柜	台	8.00	---
185	配电(电源)屏低压开关柜	台	5.00	---
186	电力变压器 系统调试 10kV 以 下变压 器(容量 2000kV·A 以下)	系统	4.00	---
187	送配电装置系统调试 1kV 以 下交流供 电(综合)	系统	44.00	---
188	送配电装置系统调试 10kV 以下交流供 电 断路器	系统	10.00	---
189	母线系统(1KV 以下)调试	段	8.00	---
190	电缆过路箱	台	6.00	---
191	成套配电箱安装落地式	台	4.00	---
192	成套配电箱安装悬挂嵌入式(半周长 0.5m)	台	390.00	---

序号	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
193	成套配电箱安装悬挂嵌入式(半周长 1.0m)	台	58.00	---
194	成套配电箱安装悬挂嵌入式(半周长 1.5m)	台	16.00	---
195	砖、混凝土结构暗配钢管公称口径(15mm 以内) 钢管 SC15	100m	4.40	---
196	砖、混凝土结构暗配钢管公称口径(50mm 以内) 钢管 SC50	100m	1.20	---
197	暗装接线盒	10 个	375.40	---
198	暗装开关盒	10 个	899.00	---
199	半球吸顶灯灯罩直径(250mm 以内)	10 套	33.60	---
200	座灯头	10 套	158.40	---
201	安全指示灯 墙壁式	10 套	0.30	---
202	疏散指示灯 墙壁式	10 套	6.40	---
203	楼层指示灯 墙壁式	10 套	5.20	---
204	成套型荧光灯具安装 吸顶式双管	10 套	51.50	---
205	扳式暗开关(单控)单联	10 套	156.80	---
206	扳式暗开关(单控)双联	10 套	21.60	---
207	板式暗开关(单控)三联	10 套	19.20	---
208	板式暗开关(单控)四联	10 套	9.60	---
209	扳式暗开关(双控)双联	10 套	19.20	---
210	单相暗插座 15A 3 孔	10 套	182.80	---
211	单相暗插座 15A 5 孔	10 套	509.80	---
212	金属软管活接头 ϕ 25	套	12.24	---
213	金属软管活接头 ϕ 40	套	4.08	---
214	金属软管活接头 ϕ 50	套	4.08	---
215	金属软管活接头	套	40.80	---

序号	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
216	全属软管 φ 20	m	25.00	---
217	金属软管 φ 25	m	7.50	---
218	金属软管 φ 40	m	2.50	---
219	金属软管 φ 50	m	2.50	---
220	等电位联结暖子箱	10 处	28.80	---
221	等电位联结端子箱	个	288.00	---
222	弱电箱安装 半周长 1mm 以内	台	184.00	---
223	电话电缆敷设	100m	6.37	---
224	电话分线箱安装	10 个	1.60	---
225	电话线出口	10 套	92.60	---
226	电视前端箱安装	10 个	0.40	---
227	四分支器安装	个	48.00	---
228	成套插座	套	685.44	---
229	接线盒	个	1629.96	---
230	感烟探测器	套	260.00	---
231	手动报警按钮	套	58.00	---
232	消火栓报警按钮	套	58.00	---
233	警铃	套	52.00	---
234	报警控制器安装 总线制 (壁挂式) 500 点以下	台	1.00	---
235	钢制梯式桥架安装 (宽十高 500mm 以下)	10m	16.66	---
236	砖、混凝土结构暗配钢管公称口径(15mm 以内)	100m	93.66	---
237	自动报警系统装置调试 500 点以下	系统	1.00	---
238	27 层 27 站电梯	部	2.00	---

序号	名称规格	单位	材料量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
239	26层26站电梯	部	2.00	——
碳排放合计(kgCO ₂ e)			14645473.42	

表 4.12 1#住宅楼全年照明碳排放量

资料来源：作者自绘

房间类型	建筑面积 (m ²)	照明密度 (W/m ²)	照明时间 (h/年)	照明能耗 (kW·h)	碳排放量 (kgCO ₂ e)
卧室面积	9023.40	6	1620	87707.45	71744.69
厨房	1701.90	6	1152	11763.53	9622.57
卫生间	1668.30	6	1980	19819.40	16212.27
餐厅	2034.00	6	900	10983.60	8984.58
起居室	7969.20	6	1980	94674.10	77443.41
走廊等公共空间	1824.00	5	180	1641.60	1342.83
商场商业	2512.00	12	4680	141073.92	115398.47
商场卫生间	87.33	6	1980	1037.48	848.66
商场办公室	275.09	18	3528	17469.32	14289.90
一层公共区域	80.00	5	730	292.00	238.86
地下室走廊	299.00	2	360	215.28	176.10
地下室电梯厅	21.00	5	180	18.90	15.46
全年碳排放量总计 (kgCO ₂ e)				377802.56	

表 4.15 被维护相应构造层的碳排放因子

资料来源：（仓玉洁. 建筑物化阶段碳排放核算方法研究）

构造名称	子目名称	计量单位	碳排放量 (kgCO ₂ e)
木门, 木门框(有亮) (用规格料)	木门框(有亮)制作 (用规格料)	100m ²	1.54E+03
	木门框(有亮)安装	100m ²	9.84E+01
	门亮制作 (用规格料)	100m ²	5.69E+02
	门亮安装	100m ²	1.29E+02
	成品木门安装	100m ²	7.08E+03
矩形木百叶窗, 不带 纱制作 (用规格料)	矩形木百叶窗, 不带纱制作 (用规格料)	100m ²	4.33E+03
	矩形木百叶窗, 不带纱安 装	100m ²	1.31E+02
墙体保温层	挤塑保温板	10m ³	6.76E+03
屋面保温层	聚苯乙烯泡沫板保温	10m ³	5.34 E+03
防水层	聚合物水泥砂浆	100m ²	8.88E+02
	镀锌铁皮		
	水泥钢钉		
	改性 1 沥青卷材		
	氯丁胶乳沥青		
	二甲苯		
	乙酸乙酯		

表 4.16 1#楼需要维护的构件设备材料生产与施工安装过程中的碳排放量

资料来源：作者自绘

序号	项目	平均使用年限 (年)	维护次数	材料量	需维护建材生产、 施工安装中碳排放 (kgCO ₂ e)
1	墙体保温	35.000	1.000	705.26m ³	476755.76
2	屋面保温	35.000	1.000	324.1m ³	173069.40
3	防火门	35.000	1.000	27.047m ³	23746.8709
	三防门			448.2 m ²	77052.303
	铝合金门窗			3403.71 m ²	157591.773
	中空玻璃塑钢窗			3494.19 m ²	343828.296
4	屋面防水层	15	3.000	9684 m ²	257981.8
5	供电系统设备	18.000	3.000	——	——
6	供热系统设备	15.000	3.000	——	——
7	空调系统设备	15.000	3.000	——	——
8	通讯设备	9.000	5.000	——	——
9	电梯	10.000	4.000	——	——

表 4.17 1#楼需要维护的构件运输过程中的碳排放量

资料来源（作者自绘）

序号	项目	维护用的材 料量	建材运输方式	运输距离 (单位: km)	需维护建材运输碳 排放量(kgCO ₂ e)
1	墙体保温	705.26m ³	公路运输(柴油)	50.000	197.19
2	屋面保温	324.1m ³	公路运输(柴油)	50.000	31.76
3	防火门	27.047m ³	公路运输(柴油)	100.000	10472.100
	三防门	448.2 m ²	公路运输(柴油)	100.000	
	铝合金门窗	3403.71 m ²	公路运输(柴油)	100.000	
	中空玻璃塑钢 窗	3494.19 m ²	公路运输(柴油)	100.000	
4	防水层	9684 m ²	公路运输(柴油)	8*3	133.94

序号	项目	维护用的材料量	建材运输方式	运输距离 (单位: km)	需维护建材运输碳排放量 (kgCO ₂ e)
5	供电系统设备	---	---	---	---
6	供热系统设备	---	---	---	---
7	空调系统设备	---	---	---	---
8	通讯设备	---	---	---	---
9	电梯	---	---	---	---

致 谢

在本论文即将完成之际，谨此向我的恩师李岳岩教授、陈静教授致以衷心的感谢，从论文选题、研究框架的拟定到论文最终定稿，导师们的悉心教诲每每让我豁然开朗、茅塞顿开。在授业解惑间，导师们开阔的研究视野、广博的知识和丰富的理论素养、敏锐的学术嗅觉、严谨的科学态度、严格的教学作风、开朗的生活态度、对专业以及对城市的热爱、对专业的坚定信仰和不断奔涌的激情使我学到的绝不仅是书本上的知识。

感谢青石工作室的各位老师、师兄、师姐们，他们为我创造了良好的学习环境和浓厚的科研氛围，这是我的学业和论文得以顺利进行的保证。

同门之谊，终生难忘！感谢这三年来与我互勉互励的林美君、李芸、李江铃、杨定宇、邵强、刘晖、朱振南、王心恬、王旭、李雪晗、马康维等十一位同学对我学习的无私帮助！

朝夕相处，共同进步！感谢课题小组中杨伟同、王瑶、张婧、尤娟、陈冰鑫、张希六位学妹，你们在学习中给了我莫大的鼓励和支持，在课题的研究过程和论文基础资料调查收集的过程中，是你们给了我无私的帮助。

感谢中国建筑西北设计研究院有限公司为本研究提供案例工程资料及相关设计图纸。

感谢“国家十三五科技支撑计划项目——目标和效果导向的绿色建筑设计新方法及工具”课题组为本论文的研究提供支持。

感谢我的父母及女朋友，你们作为我学习和工作的后盾，给予了我默默的支持与帮助。

最后，衷心感谢参与评审本篇硕士论文和出席答辩的各位专家和教授们，十分感谢你们在百忙之中抽出时间审阅论文！你们，辛苦了！

李金潞 谨致

2019年6月

于西安建筑科技大学

图片目录

图 1.1 2005-2016 年我国房屋施工、竣工面积及增速.....	14
图 1.2 2005-2016 年我国住宅施工面积、竣工面积及增.....	15
图 1.3 2005-2016 年全国城镇、农村住宅每年竣工面积.....	15
图 1.4 2015 年建筑面积 (亿 m ²)	16
图 1.5 2015 年建筑能耗(亿 tce).....	16
图 1.6 2015 建筑能耗强度(kgce/m ²).....	16
图 2.1 生命周期结构框架示意图.....	27
图 2.2 建筑物生命周期示意图.....	31
图 2.3 建筑全生命周期阶段划分汇总.....	39
图 2.4 建筑全生命周期阶段划分示意图.....	40
图 2.5 建筑全生命周期阶段划分依据图.....	41
图 2.6 eBalance 中的清单数据库.....	53
图 2.7 BELES 软件使用界面.....	54
图 3.1 建筑温室气体排放核算边界图.....	58
图 3.2 建筑碳排放计算框架.....	59
图 3.3 建筑全生命周期各阶段主要碳排放活动单元过程.....	60
图 4.1 2005 年全国新开工房屋面积 (万平方米).....	69
图 4.2 2005 年住宅建筑施工、竣工面积.....	70
图 4.3 合肥市 2005 年商品住宅不同建筑类型占比(%).....	71
图 4.4 长春市 2005 年商品住宅不同结构类型施工面积占比.....	72
图 4.5 1#住宅楼设计图纸.....	73
图 4.6 物化阶段中各子阶段的碳排放量(kgCO ₂ e)	84
图 4.7 建筑模型构建.....	86
图 4.8 自定义建筑构件设定.....	86
图 4.9 房间热扰设置.....	87
图 4.10 房间功能设置.....	87
图 4.11 系统空调设置.....	87

图 4.12 不同研究的住宅建筑全生命周期碳排放量对比.....	101
图 4.13 不同研究的住宅建筑生命周期碳排放构成对比.....	103
图 4.14 不同研究的住宅物化阶段碳排量对比.....	104
图 4.15 相关研究物化阶段碳排放构成统计.....	105
图 4.16 不同研究的住宅使用维护阶段碳排量对比.....	109
图 4.18 不同研究的住宅拆除清理阶段碳排量对比.....	111
图 4.19 相关研究拆除清理阶段碳排放构成统计.....	112
图 5.1 1#住宅楼生命周期主要阶段的碳排放量.....	115
图 5.2 1#住宅楼生命周期主要阶段的碳排放量所占百分比图.....	115
图 5.3 全生命周期各子阶段单位建筑面积碳排放量及占比.....	116
图 5.4 1#楼物化阶段各子阶段单位建筑面积碳排放量(kgCO ₂ e/m ²).....	117
图 5.5 1#住宅楼物化阶段各子阶段碳排放比例.....	117
图 5.6 1#住宅楼单位面积建筑材料重量所占百分比饼图.....	119
图 5.7 单位面积建筑材料碳排放量(kgCO ₂ eq/m ²).....	121
图 5.8 1#住宅楼单位面积建筑材料碳排放量所占百分比饼图.....	122
图 5.9 1#楼建材运输阶段碳排放量所占百分比图.....	124
图 5.10 各施工机具碳排放量(kgCO ₂ eq).....	125
图 5.11 1#住宅楼建筑施工过程中各施工机具所占百分比饼状图.....	126
图 5.12 1#住宅楼物化阶段临时设施碳排放构成分析.....	127
图 5.13 使用维护阶段各子阶段单位建筑面积碳排放量(kgCO ₂ e/m ²).....	127
图 5.14 使用维护阶段各子阶段碳排放量占百分比饼图.....	128
图 5.15 1#住宅楼使用阶段采暖空调等建筑面积年碳排放量(kgCO ₂ e/m ² . a).....	128
图 5.16 1#住宅楼使用阶段采暖空调等建筑面积年碳排放量占百分比饼图.....	129
图 5.17 1#住宅楼拆解回收阶段各子阶段碳排放量(kgCO ₂ e/m ²).....	129
图 5.18 1#住宅楼拆解回收阶段各子阶段碳排所占百分比饼状图.....	130
图 5.19 建筑拆解各类机械台班的碳排放量(kgCO ₂ e).....	130
图 5.20 建筑拆解各类机械台班所占百分比饼状图.....	131
图 5.21 各类废旧建材因回收利用而产生的碳排放减量(kgCO ₂ e/m ²).....	132
图 5.22 各类废旧建材因回收利用而产生的碳排放减量所占百分比饼状图.....	132

图 6.1 1#住宅楼各朝向的全生命周期空调采暖碳排放量(kgCO ₂ e/m ²).....	138
图 6.2 1#住宅楼生命周期三个主要阶段的碳排放量所占百分比图.....	147
图 6.3 1#住宅楼使用阶段采暖、空调等建筑面积年碳排放量占百分比饼图.....	148
图 6.4 1#住宅楼拆解回收阶段各子阶段碳排所占百分比饼状图.....	151
图 6.5 不同使用年限下单位面积年碳排放变化率.....	155
图 6.6 不同使用年限下的建筑全生命周期三个子阶段碳排放构成比例(%).....	155
图 6.7 1#楼不同减碳策略的减排率(%).....	158

表目录

表 2.1 生命周期评价的两种方法对比表.....	29
表 2.2 LCA 优缺点.....	30
表 2.3 现有建筑 LCA 工具统计表.....	33
表 2.4 建筑碳排放文献(国内)的阶段划分统计表.....	34
表 2.5 建筑碳排放文献(国外)的阶段划分统计表.....	37
表 2.6 国内外几种碳排放计算方法比较.....	51
表 2.7 主要建筑材料碳排放因子.....	167
表 2.8 全国不同区域电力供应碳排放因子(单位: kgCO ₂ e/kWh).....	167
表 2.9 化石能源的碳排放因子.....	55
表 2.10 各种运输方式的碳排放因子 kgCO ₂ e/(10 ² t. km).....	55
表 2.11 常用机械台班碳排放因子 kgCO ₂ e/(102t. km).....	56
表 3.1 工地办公、生活用房屋设施参考指标.....	64
表 3.2 拆除建筑废弃物产生量指标.....	67
表 4.1 1#住宅楼主要建筑材料用量统计表.....	169
表 4.2 住宅项目物化阶段主要建筑材料碳排放量.....	75
表 4.3 1#住宅楼主要建筑运输阶段碳排放量.....	80
表 4.4 1#住宅楼施工台班碳排放量.....	81
表 4.5 1#楼施工期间工地办公、生活用房屋设施面积.....	83
表 4.6 1#楼施工期间工地临时设碳排放量.....	83
表 4.7 物化阶段中各子阶段的碳排放统计表.....	84
表 4.8 1#住宅楼围护结构做法.....	86
表 4.9 1#住宅楼逐月采暖空调能耗.....	88
表 4.10 1#住宅楼全年空调采暖碳排放量.....	89
表 4.11 不同建筑物月照明时间.....	89
表 4.12 1#住宅楼全年照明碳排放量.....	179
表 4.13 1#楼使用阶段年碳排放排放量(kgCO ₂ e/a).....	91
表 4.14 建筑设备常用使用年限.....	91

表 4. 15 建筑构造层的碳排放因子.....	180
表 4. 16 1#楼需要维护的构件维护过程中的碳排放量.....	181
表 4. 17 1#楼需要维护的构件运输过程中的碳排放量.....	181
表 4. 18 1#楼维护阶段碳排放量.....	92
表 4. 19 1#楼使用维护阶段碳排放量.....	93
表 4. 20 1#楼分部分项工程量清单.....	94
表 4. 21 机械台班汇总.....	95
表 4. 22 拆解过程机械台班碳排放量.....	95
表 4. 23 1#住宅楼拆解后废旧建材产生量.....	96
表 4. 24 1#住宅楼拆解后废旧建材运输碳排放量.....	96
表 4. 25 部分建材回收利用方式.....	97
表 4. 26 建筑拆解废旧建材回收利用碳排放减量.....	98
表 4. 27 1#楼拆解方式下碳排放总量.....	98
表 4. 28 建筑全生命周期各阶段碳排放量(kgCO ₂ e).....	99
表 4. 29 国内住宅建筑生命周期碳排放研究对比表.....	100
表 4. 30 相关研究各阶段纳入碳排放计算的碳源统计.....	103
表 5. 1 1#住宅楼单位建筑面积(m ²)的建材使用量.....	118
表 5. 2 1#楼单位面积的建筑材料重量所占百分比(%).....	119
表 5. 3 主要建材的碳排因子.....	120
表 5. 4 1#楼单位面积的建筑材料碳排放量所占百分比(%).....	122
表 5. 5 单位建筑面积的1#住宅楼的建筑材料碳排放量所占的百分比.....	123
表 6. 1 严寒A区、严寒B区、寒冷B区≥9F建筑围护结构热工性能参数限值.....	139
表 6. 2 国内外绿色性能模拟软件.....	139
表 6. 3 居住建筑物化阶段的碳排放分布情况.....	141
表 6. 4 居住建筑建材碳排放分布情况.....	142
表 6. 5 部分建材的碳排放因子.....	143
表 6. 6 主要建材的再利用率.....	144
表 6. 7 部分建筑构造的碳排放因子.....	145
表 6. 8 1#楼拆除阶段各机械设备能源碳排放量.....	152

表 6.9 1#楼不同使用年限下的生命周期各阶段单位面积碳排放量及构成比例....	154
表 6.10 寒冷地区城市住宅建筑全生命周期减碳策略总结.....	156
表 6.11 寒冷地区城市住宅常见减碳策略总结.....	159
表 6.12 寒冷地区城市住宅提升优化减碳策略总结.....	160

参考文献

- [1] 纪学朋. 基于夜间灯光数据的环渤海地区能源消费碳排放模拟、格局及机理[D]. 西北师范大学,2017.
- [2] WRI. Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) Version 8.0 [EB/OL].
<http://cait.wri.org>. 2010-12-01.
- [3] IEA. CO2 Emissions from fuel combustion, 2010 edition [M]. Paris: OECD/IEA, 2010.
- [4] USEIA. International energy statistics—CO2 emissions [EB/OL].
<http://tonto.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=90&pid=44&aid=8>.
2010-07-14.
- [5] Boden T A, Marland G, Andres R J. Global, regional, and national fossil fuel CO₂ emissions [EB/OL]. <http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/emissions/prc.dat>, 2010-06-08.
- [6] 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[R/OL].
<http://nc.ccchina.gov.cn/WebSite/NationalCCC/UpFile/File115.pdf>, 2013.02.18.
- [7] 孙瑶. 习近平绿色发展思想理论渊源研究[D].湖南工业大学,2018.
- [8] Charles J. Kibert. Sustainable construction—Green building design and delivery [M]. 3rd Ed. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [9] United States Department of Energy (USDOE). USDOE 2009 Buildings Energy Databook[R/OL]. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, USDOE.
<http://buildingsdatabook.eere.energy.gov/ChapterView.aspx?chap=1#1>, 2009.11.15.
- [10] GB50XXX—201×, 建筑碳排放计算标准征求意见稿 V7.
- [11] 林宣益.2017 年建筑涂料分析和 2018 年展望——高质量发展[J].中国涂料,2018,33(03):40-46.
- [12] 吴硕贤, 赵越喆. 推行绿色建筑,促进节能减排,改善人居环境—中科院技术科学部咨询报告[J]. 动感(生态城市与绿色建筑), 2011(04): 20-27.
- [13] United Nations Environment Programme. Buildings and Climate Change R/OL]. New York: UNEP. <http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>, 2009.
- [14] 白静,曲建升,韦沁,曾静静.我国城乡住宅建筑物化阶段碳排放量现状与趋势分析

- [J].环境工程,2016,34(10):161-165.
- [15]于萍,陈效述,马禄义.住宅建筑生命周期碳排放研究综述[J].建筑科学,2011,27(04):9-12+35.
- [16]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(09):1433-1436.
- [17]于萍,陈效述,马禄义.住宅建筑生命周期碳排放研究综述[J].建筑科学,2011,27(04):9-12+35.
- [18]靳俊淑. 基于碳排放的居住建筑节能研究[D].长安大学,2010.
- [19]朱熾,陈莹.住宅建筑生命周期能耗及环境排放案例[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(03):330-334.
- [20]张智慧,吴星,肖厚忠.北京市住宅建筑的环境影响实证研究[J].环境保护,2004(09):40-43.
- [21]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]. 中国城市科学研究会、中国建筑节能协会、中国城科会绿色建筑与节能专业委员会.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].中国城市科学研究会、中国建筑节能协会、中国城科会绿色建筑与节能专业委员会:中国城市科学研究会,2011:4.
- [22]郭而郭,崔雅楠,王瀛,曹晨.绿色居住建筑全生命周期碳排放研究[J].中国建材科技,2017,26(05):9-12+15.
- [23]尚春静, 储成龙, 张智慧. 不同结构建筑生命周期的碳排放比较[J]. 北京:建筑科学, 2012, 27(12): 66-70.
- [24]顾道金,谷立静,朱颖心,林波荣,盖甲子.建筑建造与运行能耗的对比分析[J].暖通空调,2007(05):58-60+50.
- [25]王松庆,王威,张旭.基于生命周期理论的严寒地区居住建筑能耗计算和分析[J].建筑科学,2008(04):58-61.
- [26]贺勇. 夏热冬暖地区多层居住建筑碳排放及减排研究[D].华侨大学,2013.
- [27]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].华中科技大学,2010.
- [28]张春晖,林波荣,彭渤.我国寒冷地区住宅生命周期能耗和 CO₂ 排放影响因素研究[J].建筑科学,2014,30(10):76-83.
- [29]GVERBEECK,HHENS. Life cycle inventory of buildings: A calculation method[J].

- Building and Environment, 2010, 33(45): 1037-1041.
- [30]Leif Gustavsson,Anna 3oelsson,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.
- [31]Jaehun Sim , Jehean Sim.The air emission assessment of a South Korean traditional building during its life cycle[J].Building and Environment, 2016.
- [32]Suzuki M., Oka T., Okada K. The Estimation of Energy Consumption and CO₂ Emission Due to Housing Construction in Japan. Energy and Buildings, 1995, 22(2):
- [33]杨磊. 农村住宅全生命周期二氧化碳排放量评估研究[D].沈阳建筑大学,2013.
- [34]卢海涛. 高速公路全生命周期能耗统计模型研究[D].长沙理工大学,2011.
- [35]苏新梅,王仁人.产品全生命周期绿色评价体系的研究[J].现代制造工程,2008(07):113-115.
- [36]罗智星. 建筑生命周期二氧化碳排放计算方法与减排策略研究[D].西安建筑科技大学,2016.
- [37]郭安. 基于终点破坏法的绿色建筑环境影响评价研究[D].华中科技大学,2009.
- [38]马雪,王洪涛.生命周期评价在国内的研究与应用进展分析[J].化学工程与装备, 2015(02):164-166.
- [39]相文强. 框架结构建筑工程施工阶段的碳排放核算研究[D].福建农林大学,2017.
- [40]王瑞. 围护结构节能改造与暖通空调系统生命周期评价方法研究[D].湖南大学,2009.
- [41]Wayne Trusty, Scot Horst. LCA tools around the world [J]. USA, Building Design & Construction, 2005(11): 12-15.
- [42]张孝存. 绿色建筑结构体系碳排放计量方法与对比研究[D].哈尔滨工业大学,2014.
- [43]罗智星. 办公建筑生命周期二氧化碳排放评价研究[D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2011.
- [44]刘军明,陈易.崇明东滩农业园低碳建筑评价体系初探[J].住宅科技,2010,30(09):9-12.
- [45]刘汉卿. 建筑物生命周期能源消费分析与温室气体排放量估算[D]. 台湾: 成功大学, 1994.

- [46]熊宝玉. 住宅建筑全生命周期碳排放量测算研究[D].深圳大学,2015.
- [47]林波荣,彭渤.我国典型城市全生命周期建筑焓能及 CO₂ 排放研究[J].动感(生态城市与绿色建筑),2010(03):45-49.
- [48]李兵. 低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D].华中科技大学,2012.
- [49]张又升.RC 建筑物生命周期环境负荷评估——以耗能量与二氧化碳排放量解析[D]. 台湾: 成功大学,1997.
- [50]中国工程建设协会标准 CECS 374:2014 《建筑碳排放计量标准》 [S].
- [51]周晓. 浙江省城市住宅生命周期 CO₂ 排放评价研究[D].浙江大学,2012.
- [52]李岳岩,李享.建筑全生命周期碳排放的计算方法和实现途径 [J],西安建筑科技大学建筑学院
- [53]燕艳. 浙江省建筑全生命周期能耗和 CO₂ 排放评价研究[D].浙江大学,2011.
- [54]阴世超. 建筑全生命周期碳排放核算分析[D].哈尔滨工业大学,2012.
- [55]刘娜. 建筑全生命周期碳排放计算与减排策略研究[D].石家庄铁道大学, 2014.
- [56]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(S1):428-431.
- [57]李兆坚,江亿.我国广义建筑能耗状况的分析与思考[J].建筑学,2006(07):30-33.
- [58]张又升.建筑物生命周期二氧化碳减量评估[D]. 台湾: 成功大学,2002.
- [59]黄国仓. 办公建筑生命周期节能与二氧化碳减量评价之研究[D]. 台湾: 成功大学, 2003.
- [60]张陶新,周跃云,芦鹏.中国城市低碳建筑的内涵与碳排放量的估算模型[J].湖南工业大学学报,2011,25(01):77-80.
- [61]张博,陈国谦,陈彬.甲烷排放与应对气候变化国家战略探析[J].中国人口·资源与环境,2012,22(07):8-14.
- [62]N.Huberman,D.Pearlmutter,A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings*,2008,40(5):837-848.
- [63]日本建筑学会.建物の LCA 指針 (第三版) [M].日本: 日本建筑学会,2006.
- [64]卢求. 德国 DGNB——世界第二代绿色建筑评估体系[J]. 世界建筑, 2010(01): 105-107.
- [65]Cole RJ. Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems [J]. *Building and Environment*,1999,34(3) :335-348.
- [66]Bribian,U}son,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.
- [67] Gerilla GP, Teknomo K, Hokao K. An environmental assessment of wood and steel reinforced housing construction [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(7): 2778-2784.
- [68] Gian Andrea Blengini, Tiziana Di Carlo, The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 2010, 6(2): 869-880.
- [69] 大成建设, LCCO₂による事務所ビルの試算[M]. 日本: 大成建设, 2001.
- [70] Deepak Sivaraman, An integrated life cycle assessment model: Energy and greenhouse gas performance of residential heritage buildings, and the influence of retrofit strategies in the state of Victoria in Australia. *Energy and Buildings*, In Press, Corrected Proof, Available online, 2011, (5): 29-35.
- [71] 王大川. 四川省制造业碳排放源分类与计量研究[D]. 成都理工大学, 2012.
- [72] 鞠颖, 陈易. 全生命周期理论下的建筑碳排放计算方法研究——基于 1997~2013 年间 CNKI 的国内文献统计分析[J]. *住宅科技*, 2014, 34(05): 32-37.
- [73] 李裕平. 建筑施工环境污染剖析与绿色施工组织管理方法研究[J]. *科技创新导报*, 2010(35): 133.
- [74] UNEP. Common Carbon Metric [EB/OL].
www.unep.org/sbci/pdfs/UNEPSBCICarbonMetric.pdf
- [75] DCLG. National Calculation Methodology Modeling Guide (For Buildings Other Than Dwellings in England and Wales) [EB/OL]. <http://www.ncm.bre.co.uk/>.
- [76] 香港环境保护署. 香港建筑物(商业、住宅或公共用途)的温室气体排放及减除的计算和报告指引[S]. 香港: 2008.
- [77] 陈瑞铃等. 绿建筑解说与评估手册: 新建建筑物(2012年版)[M]. 台湾: “内政部”建筑研究所, 2012.
- [78] 王上. 典型住宅建筑全生命周期碳排放计算模型及案例研究[D]. 西南交通大学, 2014.
- [79] 冯博, 王雪青. 中国各省建筑业碳排放脱钩及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(04): 28-34.
- [80] 孙建卫, 陈志刚, 赵荣钦, 黄贤金, 赖力. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究

- [J].中国人口·资源与环境,2010,20(05):28-34.
- [81]高鑫,朱建君,陈敏,沈帅.装配式混凝土建筑物化阶段碳足迹测算模型研究[J].建筑节能,2019,47(02):97-101.
- [82]陈洪波,王新春.建筑温室气体排放核算方法研究[J].城市与环境研究,2015(04):49-59.
- [83]赵又婵.百货公司室内装修生命周期二氧化碳排放量评估[D].台湾:成功大学,2004.
- [84]曾正雄.公寓住宅设备管线二氧化碳排放量评估[D].台湾:成功大学,2006.
- [85]王育忠.建筑空调设备生命周期二氧化碳排放量评估[D].台湾:成功大学,2007.
- [86]罗智星,杨柳,刘加平.办公建筑物化阶段 CO₂ 排放研究[J].土木建筑与环境工程,2014,36(05):37-43.
- [87]仓玉洁,罗智星,杨柳,刘加平.城市住宅建筑物化阶段建材碳排放研究[J].城市建筑,2018(17):17-21.
- [88]仓玉洁.建筑物化阶段碳排放核算方法研究[D].西安建筑科技大学,2018.
- [89]彭渤.绿色建筑全生命周期能耗及二氧化碳排放案例研究[D].清华大学,2012.
- [90]龚先政,聂祚仁,王志宏,高峰,陈文娟,左铁镛.中国材料生命周期分析数据库开发及应用[J].中国材料进展,2011,30(08):1-7+49.
- [91]欧晓星.低碳建筑设计评估与优化研究[D].东南大学,2016.
- [92]李静,刘燕.基于全生命周期的建筑工程碳排放计算模型[J].工程管理学报,2015,29(04):12-16.
- [93]高源.整合碳排放评价的中国绿色建筑评价体系研究[D].天津大学,2014.
- [94]欧阳磊.基于碳排放视角的拆除建筑废弃物管理过程研究[D].深圳大学,2016.
- [95]<http://www.docin.com/p-1113829431.html>
- [96]<http://jz.docin.com/p-798804729.html>
- [97]<http://jz.docin.com/p-172367939.html>
- [98]王琳.重庆市高校学生宿舍热环境研究[D].重庆大学,2009.
- [99]燕达,谢晓娜,宋芳婷,江亿.建筑环境设计模拟分析软件 DeST 第一讲 建筑模拟技术与 DeST 发展简介[J].暖通空调,2004(07):48-56.
- [100]陈国杰.衡阳农村居住建筑舒适性调查与能耗模拟分析[D].南华大学,2007.
- [101]杨倩苗.建筑产品的全生命周期环境影响定量评价[D].天津大学,2009.
- [102]吴金龙.加强进口废钢铁检验,促进我国钢铁工业的可持续发展[J].矿业快

- 报,2008(05):51-53.
- [103]周清,王先建.废电线电缆拆解回收利用研究[J].江西化工,2015(06):50-51.
- [104]贡小雷. 建筑拆解及材料再利用技术研究[D].天津大学,2010.
- [105]张婷. 住宅全生命周期碳排放核算方法及低碳住宅评价体系[D].安徽工业大学,2013.
- [106]魏书威. 城市住区修规碳效应评价及其低碳规划研究体系建构[D].西安建筑科技大学,2015.
- [107]王霞. 住宅建筑生命周期碳排放研究[D].天津大学,2012.
- [108]黄志甲,赵玲玲,张婷,刘钊.住宅建筑生命周期 CO₂ 排放的核算方法[J].土木建筑与环境工程,2011,33(S2):103-105.
- [109]王蕊. 建筑物化阶段 CO₂ 和 PM_{2.5} 排放及其不确定性分析[D].北京交通大学,2018.
- [110]李享. 建筑全生命周期碳足迹设计分析工具初探[D].西安建筑科技大学,2018.
- [111]赵辉.建筑设计中的建筑节能措施分析[J].技术与市场,2018,25(03):123-124.
- [112]陈海强. 建筑学中节能设计的探索与思考[J].中华民居(下旬刊),2014(08):166-167.
- [113]赖灿.建筑方案设计中如何贯彻节能设计思想[J].低碳世界,2017(15):122-123.
- [114]郑薇倩.面向设计初期的建筑节能优化方法初探[J].智能城市,2018,4(14):84-85.
- [115]汪静. 中国城市住区生命周期 CO₂ 排放量计算与分析[D].清华大学,2009.
- [116]王欣英. 再生混凝土技术研究的现状与分析[J]. 辽宁建材, 2007 (5): 32-33.
- [117]帅小根. 建设项目“隐性”环境影响评价的量化研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009
- [118]余洁卿. 基于 LCA 的夏热冬暖地区公共建筑碳排放及减排策略研究[D].华侨大学,2014.
- [119]杨婧. 道路运输行业节能减排战略措施研究[D].长安大学,2009.
- [120]申琪玉. 绿色建造理论与施工环境负荷评价研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [121]中国建筑科学研究院. JGJ26-95 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [122]熊国武.窗墙比和遮阳对住宅供暖空调总能耗的影响分析[J].门窗,2013(10):44-46.

[123]贡小雷,张玉坤.物尽其用——废旧建筑材料利用的低碳发展之路[J].天津大学学报(社会科学版),2011,13(02):138-144.

[124]华西都市报. 中国建筑平均寿命 30 年[EB/OL]. //

http://www.wccdaily.com.cn/epaper/hxdsb/html/2011-09/09/content_378447.htm

在学期间发表研究成果

1. 参与课题及项目

1.参与“国家十三五科技支撑计划项目——目标和效果导向的绿色建筑设计新方法及工具”下的子课题“建筑绿色性能模拟分析技术流程和策略”（子课题编号 2016YFC0700200-01）

2.东山县文体中心规划设计

3.洛阳地铁控制指挥中心规划设计

4.西安市体育中心规划设计

5.河南偃师体育场规划设计

2、获得荣誉

2017-2018 年度西安建筑科技大学二等学业奖学金

2018-2019 年度西安建筑科技大学二等学业奖学金