

中图分类号: TU111.19+5

单位代码: 10425

学号: Z18080020



中國石油大學

工程硕士学位论文

China University of Petroleum

Degree Thesis of Engineering Master

基于 BIM 与 LCA 的绿色建筑能耗与环境影响评价研究

Research on Green Building Energy Consumption and
Environmental Impact Assessment Based on BIM and LCA

工程领域: 工业工程

研究方向: 项目管理与工程管理

作者姓名: 崔萧

指导教师: 何立华 副教授

二〇二一年五月

**Research on Green Building Energy Consumption and
Environmental Impact Assessment
Based on BIM and LCA**

A Thesis Submitted for the Degree of Engineering Master

Candidate: Cui Xiao

Supervisor: vice-prof. He Lihua

College of Economics & Management
China University of Petroleum (East China)

摘 要

能源危机与环境保护是全世界关心的焦点，建筑行业作为三大高耗能行业之一，近年来建筑市场规模不断扩大，建筑耗能不断增多，随之引发环境污染问题愈发严重。绿色建筑作为建筑行业节能减排的新兴发展领域，研究绿色建筑全生命周期的能耗与环境评价方法，对减少建筑高耗能与环境污染问题具有重要意义。

建筑生命周期的各个阶段，原材料的生产、运输，施工，运行直至废弃，期间资源、能源消耗都与环境影响有着密切联系，且每个阶段的研究相对独立；此外，传统的绿色建筑能耗模拟具有精度差、耗时长、工作繁琐等问题。为了解决上述不足，本文基于 BIM 平台可视化、参数化以及模型可延续性的特点，提出“BIM-LCA”结合的绿色建筑能耗与环境影响评价模型。

本研究基于生命周期评价框架，将研究范围划分为原材料获取阶段、施工阶段、运行阶段、废弃与回收阶段，将少有研究且易被忽视的回收再利用阶段纳入研究范围中；在绿色建筑早期的设计阶段进行全生命周期的环境影响评价，利用 BIM 物理模型生成生命周期评价与影响评价的工程量清单，并针对时间周期最长的运行阶段建立 BIM 能耗模型，对建筑围护结构的热工参数、制冷与采暖的性能参数、照明设备的照度值等参数进行模拟，提高运行阶段建筑能耗的计算精度。本文以山东青岛的一个 7 层绿色建筑为研究对象开展实例研究，使用上述方法建立全生命周期模型进行环境影响评价，并对评价结果进行完整性检查、贡献分析，并对三种不同情境的模型进行敏感性分析。结果得出，海洋水生态毒性是全生命周期中受影响最大的环境类型，最小的是臭氧层消耗；加长运行阶段的服务年限对前期资源投入所产生的环境影响起到抵消作用，并且确定使环境影响最低的合理使用年限为 55 年；运行阶段采暖、制冷、照明设备的参数对降能减耗起重要作用；废弃与回收阶段对上游资源的投入产生有利的环境效益，绿色建材的资源使用不仅会减少环境影响，还会减少资源的浪费。

研究表明，基于“BIM-LCA”的绿色建筑能耗与环境影响评价模型，对全生命周期的关键影响类型、影响阶段、影响因素进行识别并确定，为减少环境污染提供可行建议，进而提高整个生命周期的环境效益，减少绿色建筑产生的环境影响。

关键词：BIM；LCA；绿色建筑；建筑能耗；环境影响评价

Research on Green Building Energy Consumption and Environmental Impact Assessment Based on BIM and LCA

Cui Xiao (Industrial Engineering)

Directed by vice-prof. He Lihua

Abstract

Energy crisis and environmental protection are the focus of worldwide concern. As one of the three high-energy-consuming industries, the construction industry has been expanding in recent years and the energy consumption of buildings has continued to increase, which has led to more and more serious environmental pollution problems. Green building is an emerging development field of energy saving and emission reduction in the construction industry. The study of energy consumption and environmental assessment methods for the whole life cycle of green buildings is of great significance to reducing the problems of high energy consumption and environmental pollution in buildings.

At each stage of the building life cycle, from the production, transportation, construction, operation and disposal of raw materials, the resource and energy consumption during the period are closely related to the environmental impact, and the research at each stage is relatively independent. In addition, the traditional green building energy consumption simulation has many problems such as poor accuracy, long time-consuming, and cumbersome work. In order to solve the above shortcomings, based on the characteristics of BIM platform visualization, parameterization and model continuity, this paper proposes a "BIM-LCA" combination of green building energy consumption and environmental impact assessment model.

Based on the life cycle assessment framework, this research divides the research scope into the raw material acquisition phase, construction phase, operation phase, abandonment and recycling phase, and incorporates the recycling and reuse phase that is rarely studied and easily overlooked into the research scope. In the early design stage of the green building, the environmental impact assessment of the whole life cycle is carried out, the BIM physical model is used to generate the engineering quantity list of the life cycle assessment and the impact

assessment, and the BIM energy consumption model is established for the operation stage with the longest time cycle. In addition, the thermal parameters of the protective structure, the performance parameters of cooling and heating, the illuminance value of the lighting equipment and other parameters are simulated to improve the calculation accuracy of the building energy consumption during the operation phase. This paper takes a 7-story green building in Qingdao, Shandong Province as the research object to carry out a case study, uses the above methods to establish a full life cycle model for environmental impact assessment, Apart from this, the author conducts completeness inspection and contribution analysis of the evaluation results, and three different scenarios of models Conduct a sensitivity analysis. The results show that marine water eco-toxicity is the most affected environment type in the whole life cycle, and the least is ozone layer depletion. In addition to this, the extended service life in the operation phase can offset the environmental impact caused by the previous resource input, and it is determined that the environment will be affected. The reasonable service life with the lowest impact is 55 years. Secondly, the parameters of heating, cooling and lighting equipment in the operation stage play an important role in energy reduction and consumption reduction. Finally, the waste and recycling stages produce favorable environmental benefits for the input of upstream resources, and the use of green building materials is not only will reduce the environmental impact, but also reduce the waste of resources.

This research shows that based on the “BIM-LCA” green building energy consumption and environmental impact assessment model, the key impact types, impact stages, and impact factors of the entire life cycle are identified and determined, providing feasible suggestions for reducing environmental pollution, and improving the environmental benefits of the entire life cycle reduce the environmental impact of the green building.

Key words: BIM; LCA; Green buildings; Building energy consumption; Environmental impact assessment

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 绿色建筑能耗研究现状.....	3
1.2.2 基于 BIM 技术的建筑能耗研究现状.....	4
1.2.3 基于 BIM-LCA 的建筑能耗研究现状.....	6
1.2.4 全生命周期环境影响评价研究现状.....	7
1.3 研究内容和技术路线.....	8
1.3.1 研究思路.....	8
1.3.2 技术路线.....	9
1.4 研究思路和研究方法.....	10
1.4.1 研究内容.....	10
1.4.2 研究方法.....	11
第 2 章 “BIM-LCA”及建筑能耗基本理论概述.....	12
2.1 建筑能耗分析.....	12
2.1.1 能耗分析的概念.....	12
2.1.2 建筑能耗分析方法.....	12
2.1.3 绿色建筑能耗影响因素分析.....	12
2.2 基于 BIM 的绿色建筑能耗分析.....	13
2.2.1 BIM 的特点.....	13
2.2.2 基于 BIM 的绿色建筑能耗分析方法的优势与特点.....	14
2.3 全生命周期评价(LCA)方法.....	15
2.3.1 全生命周期评价定义.....	15
2.3.2 全生命周期评价框架.....	16
2.3.3 建设项目 LCA 方法.....	17
2.3.4 生命周期评价工具.....	18
第 3 章 BIM-LCA 的绿色建筑能耗评价分析.....	20
3.1 BIM-LCA 结合的绿色建筑能耗评价分析.....	20
3.1.1 BIM 与 LCA 工具选用.....	20
3.1.2 BIM-LCA 结合的分析流程.....	20
3.2 分析框架与步骤.....	22
3.2.1 确定研究目标.....	22

3.2.2 确定研究范围.....	22
3.3 模型构建.....	23
3.3.1 BIM 模型构建.....	24
3.3.2 能耗模型构建.....	27
3.3.3 LCA 模型构建.....	28
第 4 章 绿色建筑全生命周期分析与环境影响评价模型.....	30
4.1 生命周期清单分析.....	30
4.1.1 目标及范围确定.....	30
4.1.2 相关假设.....	30
4.1.3 过程清单.....	31
4.2 生命周期环境影响评价.....	33
4.2.1 影响分类.....	33
4.2.2 特征化与标准化.....	34
4.2.3 加权.....	35
4.2.4 影响计算.....	35
4.3 结果解释.....	36
4.3.1 完整性检查.....	37
4.3.2 贡献分析.....	37
4.3.3 敏感性分析.....	37
第 5 章 实例分析.....	38
5.1 实例介绍.....	38
5.2 研究目的及范围确定.....	38
5.2.1 研究目的.....	38
5.2.2 研究范围.....	38
5.3 基于 BIM 的生命周期模型建立.....	39
5.3.1 BIM 模型建模.....	39
5.3.2 清单与收集.....	40
5.4 全生命周期能耗清单分析.....	41
5.4.1 原材料获取阶段.....	41
5.4.2 施工阶段.....	41
5.4.3 运行阶段.....	42
5.4.4 废弃与回收阶段.....	46
5.5 环境影响评价与结果解释.....	47
5.5.1 环境影响评价.....	47
5.5.2 完整性检查及结果表示.....	48
5.5.3 贡献分析.....	53
5.5.4 敏感性分析.....	60
5.5.5 相关建议.....	64

第 6 章 结论.....	66
6.1 总结.....	66
6.2 展望.....	67
参考文献.....	68
附录.....	73

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

能源危机一直是全世界重点关心的问题，与人口膨胀、资源不足、粮食匮乏以及环境污染并称为世界五大挑战^[1]。而建筑领域作为城市新陈代谢与区域发展的重要组成部分，承载着各种经济活动，是经济社会发展过程中的中坚力量^[2]。除了工业与交通业，建筑业是三大能源消耗行业之一，也是温室气体排放的重要来源，建筑领域的能源消耗约占中国总能源消耗的 46.7%^[3]。根据《中国建筑能耗研究报告 2019》中的内容^[4]，得到 2000~2017 年中国分类型建筑能耗状况数据图，如图 1-1 所示。

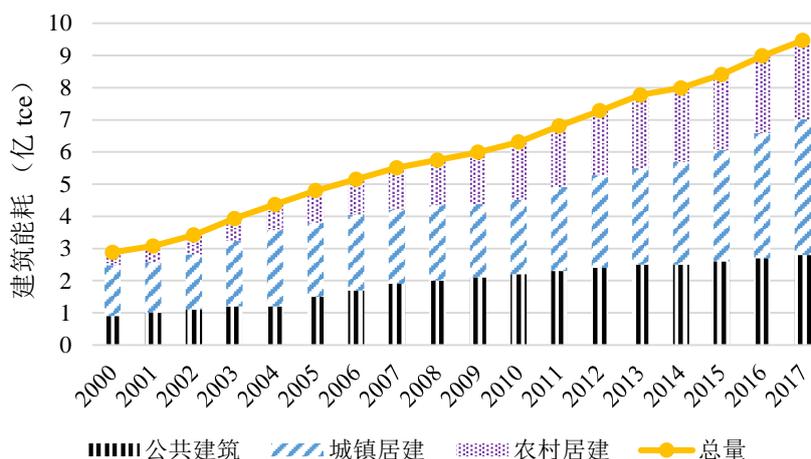


图 1-1 2000~2017 年中国分类型建筑能耗状况

Fig1-1 Energy consumption of different types of buildings in China from 2000 to 2017

建筑业的能耗影响日益扩大，进而对生态环境造成了更大的威胁。经济的发展与人民对美好生活日益增长的需求将对建筑能耗造成更大的挑战。由此可见，建筑节能将是我国在十四五规划中发展可持续规划的重要一环，研究如何减少建筑对资源的消耗以及降低对环境的影响迫在眉睫。此外，绿色建筑作为建筑业节能减排的研究重点，对建筑业的可持续绿色发展以及转变建筑业的发展模式都具有重要且长远的现实意义，而其中绿色建筑能耗分析与环境影响分析是两个关键步骤。

传统的建筑能耗分析方法包括两种，一种是静态估算法，由于其稳态传热的特点，无法对影响建筑能耗的诸多因素综合分析，因而误差较大；另一种是计算机模拟法，但

是后期一旦需要改变建筑物的各项参数，整个建筑能耗分析无法进行合理调整甚至会重新返工。近年来，BIM（Building information modeling）技术作为未来建筑领域发展的大势所趋，已经在建筑结构设计、运营管理、资产移交等方面得到了广泛应用^[5-7]。相比于传统的建筑能耗分析方法，BIM 技术的动态模拟、参数化设计等特点为建筑能耗评价方法注入了新的活力。

此外，绿色建筑在整个生命周期的全过程都会产生直接和间接的能源消耗与环境污染，目前大多数学者仅对绿色建筑能耗消耗量最多的运营与维护阶段进行分析，但建筑物从设计阶段直至废弃阶段都会产生建筑能耗，因此仅针对某一阶段进行分析是不全面的。LCA（Life Cycle Assessment）被广泛认为是评估全生命周期的建筑环境影响的有力工具，LCA 涵盖建筑物的整个生命周期，包括原材料的获取加工，建筑构件制造，使用和报废^[8-12]。绝大多数与建筑相关的生命周期评估研究都集中在建筑物生命周期的一个或一些特定部分，例如：材料制造，运输，建造或运营与维护阶段。少有研究关注建筑物的整个生命周期或是废弃回收阶段；并且在初期的设计阶段进行全生命周期的环境影响评价，可以实现材料的优化替代，减少对全生命周期的环境影响。

只有全面系统的对绿色建筑能耗以及产生的环境影响进行分析，才能更有效合理的采取节能措施，从而达到低耗节能并减少环境负荷，实现绿色可持续发展。

1.1.2 研究意义

BIM 集成了海量的建筑信息数据，并直接生成工程量清单，为建筑物在 LCA 的应用过程中有助于简化数据输入，优化数据输出和最终结果，而生命周期评价为 BIM 模型数据的应用拓展了道路，二者相结合不仅提高了准确率又能降低耗时。本文的研究意义主要有以下方面：

（1）理论意义

通过建筑信息模型（BIM）和生命周期评估（LCA）对绿色建筑能耗及环境影响进行评价，不仅实现了过程的可视化，并简化了数据输入，优化数据输出和最终结果。“BIM-LCA”的集成框架可用来估算绿色建筑能源消耗对环境产生的影响，并用来探索节能解决方案以改善生命周期性能。此外，BIM 软件参数化设计的特点参与可以在之前的基础上不仅允许分析各种替代材料和不同类型的建筑构件的组合，进行方案的优化并寻找更优的设计方案，而且在寻求最优设计的同时考虑对环境所产生的影

响。所开发的方法可用于实现更大的能耗降低并实现可持续建筑决策。

（2）实践意义

本文所提出的框架在绿色建筑进行设计阶段时即可运用，不仅对整个全生命周期中时间阶段最长的运营维护阶段进行能耗分析，主要的运营期内绿色建筑能发挥最大的环境优势，还对原材料获取阶段及建筑废弃与回收阶段也可进行建筑能耗的环境影响分析，对绿色建筑的可持续发展具有重要意义。

这个方法不仅适用于绿色建筑，还可以应用于同类型的建筑物，如零能耗建筑物等，以便确定建筑物的哪些部件产生最大的资源消耗并导致最高水平的环境影响。此外，BIM 工具提供了在建筑物整个生命周期内不同利益相关者之间协作和整合工作的机会，以便在设计建筑项目的早期阶段提供各种参数的多种设计方案，分析各种替代材料和不同的建筑构件的组合进行方案优化，以实现绿色建筑能耗的大幅降低并提高利用效率，为建筑业的节能绿色发展提供参考依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 绿色建筑能耗研究现状

绿色建筑是建筑行业实现节能减排最有力的武器，也是建筑行业实现绿色可持续发展，转变建筑业发展方式的关键路径^[13]。因此，研究绿色建筑的能源消耗及环境影响评价具有重要意义。

陈彦熹、佟昕等人指出绿色建筑尤其是绿色公共建筑的节能潜力巨大，使用人工神经网络、遗传算法对绿色建筑的能源消耗进行预测，对绿色建筑的设计与优化具有重要意义^[14,15]。刘宇等人指出绿色建筑的选材对环境负荷的研究至关重要，因此，基于生命周期评价理论对建筑保温材料中的围护结果等节能材料进行研究，对绿色建筑的科学选材提供指导建议^[16]。Aslani A. 等人在建筑材料中贡献关键作用的建筑围护结构以全生命周期的角度进行全面分析，包括其生产技术，利益相关方，并验证了该生命周期方法的适用性^[17]。

对于绿色建筑运行阶段的能耗评价，主要包括定额法、统计分析法，以及计算机模拟方法，但前两种方法无法对真实的运行情况进行模拟，因此精度相对较低^[18]。故本文采用计算机动态模拟方法对绿色建筑的运行能耗进行模拟。

1.2.2 基于 BIM 技术的建筑能耗研究现状

BIM 技术由于其动态模拟、参数化设计、可视化等特点为建筑能耗分析方法带来了创新发展。按照全生命周期阶段的划分，基于 BIM 技术的建筑能耗分析可以概括为以下几个部分。

(1) 设计阶段

高明指出建筑节能设计如果在施工图设计之后进行的话，会导致精确度降低，因此提出在项目的概念设计阶段利用 BIM 技术对建筑能耗进行计算，并运用实例来验证节能效果良好^[19]。相比于概念设计阶段，蔡毓剑等人指出在项目设计阶段中运用 BIM 技术对建筑能耗进行分析，可以在初期进行协同设计，减少后期返工的工作量，对工程的质量和节能具有重要意义^[20]。在该概念的基础上，Raja Shahmir Nizam 等人提出了一个框架，用于估算建筑设计阶段所包含的能耗，估算涵盖材料，运输和安装的影响，整个框架基于 BIM 平台来促进流程的自动化，并在案例研究中将原项目用于测试框架的适用性^[21]。梁玉美等人基于传统能耗分析方法的不足，利用 BIM 平台在建筑设计阶段整合提取建筑数据并进行建筑能耗计算，对建筑节能材料的比选具有重要意义，为能耗定量评价提供参考^[22]。在此研究的基础上，杨文领侧重于建筑能耗的评价，在与传统的建筑能耗评价方法的对比基础之上，提出了基于 BIM 的建筑能耗评价模型，并通过具体案例验证了所提模型的可行性^[23]。大多数的研究侧重于在设计阶段对某一影响因素的研究，利用 BIM 的参数化设计特点，更改构件或者建筑参数的信息，从而研究该因素对建筑能耗的影响。Abanda F. H.等人基于 BIM 平台调查了建筑方向对小规模建筑能耗的影响，基于对不同方向对应的能量消耗的分析，发现一个好的建筑朝向在建筑物的整个生命周期中可以节省大量的能量^[24]。Feng G.等人指出窗墙比（WWR）是影响严寒地区近零能耗建筑（NZEB）能耗的关键节能设计参数之一，并通过单变量双能耗影响因子的仿真方法和 Energy Plus 仿真软件研究了不同建筑方位的 WWR 对 NZEB 能耗的影响^[25]。

(2) 施工阶段

Zhang C.等人指出以往的研究主要集中在在建筑运营期，而整个施工过程中的材料运输及施工活动的能源消耗少有关注，因此提出了一种将隐含能集成到 BIM 平台的方法，根据可用信息提供无缝分析，并在 BIM 平台上开发插件实现 BIM 模型和外部数据库之间的便捷连接，创建仿真模型，可用作运输和施工期间能源优化的模型，通过分析

不同的资源组合的场景，可以实现更低的能耗^[26]。Han M.Y.等人提出了一个详细的建筑建筑工程能耗估算框架，采用过程和投入产出分析相结合的混合方法来量化建造过程的实际能耗，并指出所提出的具体能耗评估框架还可以用于计算其他类型建筑物的能耗，此外，借助具体的能耗核算结果，可以设计建筑物的节能措施，从而减轻环境污染和中国的能源紧缩压力^[27]。

（3）运营阶段

Ma H.等人为了研究公共建筑运营能耗的特点，对中国华北 119 座公共建筑的能耗进行了计算和讨论，利用 e-QUEST 软件分析了影响公共建筑能耗的主要因素，得到结果，在所研究的因素中，空调系统，照明密度和建筑围护结构对运营能耗的贡献率远高于其他因素^[28]。在各种建筑能耗影响因素的基础上，学者们将影响因素进行细分，Shoubi M.V.等人侧重于对建筑本体因素的研究，使用 BIM 软件评估各种建筑材料组合，并确定可替代的可持续解决方案，以降低建筑运营阶段的能耗^[29]。De Rosa M.等人则侧重于对建筑能耗贡献最多的空调及采暖能耗的研究，即提出了一种简单的动态模型来模拟建筑物中的加热、冷却能耗，该模型由几个根据集总电容方法的外墙和内部空气的瞬态能量平衡方程组成，通过 TRNSYS 和 BIM 能耗估算软件 Energy Plus 的输出的对比结果来验证模型的可靠性^[30]。除了空调及采暖能耗，运营阶段还有太阳辐射分析、日照遮挡分析、围护结构的热工性能分析以及光环境分析等内容，何立华等人以公共建筑为研究对象，在系统化分析了影响能耗的诸多因素的基础上，建立了其能耗估算体系，借助 BIM 平台对建筑运营阶段的太阳辐射、日照遮挡等进行了分析^[31]。

（4）维护改造阶段

既有建筑的能耗问题是实现降能减耗的重要环节，因此，既有建筑的相关改造是目前学者重点关注的问题。基于 BIM 平台的建筑改造项目也成为了热点话题。Sanhudo L.等人将目光集中于现有建筑物的快速能源改造，提出了一种基于 BIM 的建筑能源改造方法，有助于实现降低能耗提高效率的能源目标^[32]。陈浩以既有建筑中的办公建筑为研究对象，将 BIM 与传统流程方法相结合，得出基于 BIM 平台的节能改造的具体应用方法，并应用案例验证改造策略的科学性^[33]。

基于 BIM 平台的建筑能耗分析方法解决了传统建筑能耗分析方法的诸多短板，得到了创新性发展，并借助 BIM 技术实现了更多模块的能耗分析，如日照遮挡分析、太

阳辐射分析、室内通风分析以及声学环境分析，信息内容涉及建筑围护结构、照明设备、空调设备、采暖系统等内容^[34]。但是大多数建筑能耗分析仅集中在运营阶段或者设计阶段，而未从建筑的全生命周期角度来进行分析。

1.2.3 基于 BIM-LCA 的建筑能耗研究现状

近年来，诸多学者将生命周期评价（LCA）的方法运用到建筑能耗的分析中，陈孚江等人引入生命评价方法，并将原材料的获取与加工、施工、运营维护、建筑废弃与回收四个阶段作为建筑寿命周期的研究范围^[35]。BIM 软件的出现，使得该方法得到了发展和更新。学者们开始研究如何将 BIM 引入生命周期评价中，使得计算更加快捷。

如何将 BIM 与 LCA 理论相结合，学者们做了许多努力，选择一个有效和高效的建筑设计方案进行能源管理以及减少与建筑生命周期相关的温室气体排放对于应对全球气候变化问题的任何设计者来说总是极具挑战性，Jin R.等人通过文献计量分析回顾了 60 多项关于 BIM 技术应用到建筑生命周期性能分析的相关研究，包括互操作性，语义和可持续性评级系统^[36]。Soust-Verdaguer B.等人对近年来 BIM-LCA 的文献研究进行系统梳理，重点关注 LCA 引入 BIM 工具的优势，主要集中于数据的获取与输出，结果显示了基于 BIM 模型开发方法的可行性，用于组织建筑信息，用于估算基于 LCA 的环境和能源消耗影响^[37]。Eleftheriadis S.等人研究了 BIM 技术在评估生命周期环境和能源影响方面的应用，包括材料分析，结构系统比较和建筑施工关系，并指出未来建筑的可持续发展方向的决策内容离不开 BIM 的支持，利用 BIM 来提高建筑在可持续领域的转型升级是不可避免的^[38]。Bueno C.以及沈琳等人通过在 BIM 平台中使用插件将 LCA 与 BIM 软件相集成，对建筑材料所引起的环境影响进行分析，借此工具来分析简化 LCA 数据和方法所带来的后果，为 BIM-LCA 全面整合提供借鉴和指导^[39, 40]。Tam W.Y.V.等人综述了截至 2016 年所有关于仿生算法的可持续建筑设计和模块建模开发的重要研究，即评估建筑物 LCA 的适当软件，同时实现 Green Star 在建筑物使用寿命期间减少温室气体排放的要求^[41]。

李奇莞等人在研究环境效益的基础上同时考虑到了经济效益，以小型节能建筑为研究对象，在三种不同的情景下分析全球变暖潜势值、一次能源和生命周期成本，结果表明，零能耗乃至正能源建筑的全球变暖潜势值、一次能源的产生值较低，但其生命周期成本较高^[42]。韩旭亮等人在考虑经济效益的同时，提出更综合性的经济评价方法，即基

于费用年制与追加投资期相结合的方法，并使用能耗模拟软件对建筑热设计方案及改进方案进行模拟分析与对比参照，验证了改进方案的可行性^[43]。

此外，Wang J.等人指出绝大多数与建筑相关的 LCA 研究都集中在建筑物生命周期的一个或一些特定部分，例如：材料制造，建造或操作，然而，很少有研究特别关注建筑物寿命终止碳排放的评估，建筑和拆除废物处理的碳排在很大程度上被忽视；因此研究开发了一个基于 BIM-LCA 的概念框架，以便于评估建筑拆除废物生命周期内的碳排放^[44]。Najjar M.等人提出一个新的框架，用于整合数学优化，建筑信息模型和生命周期评估，以提高所采用的最终建筑设计的运营能效，同时克服与建筑成本相关的建设成本方面的困难；该框架通过整合数学优化规划，建筑信息模型和生命周期评估来适应各种参数，以提高建筑性能，识别替代可持续设计，并赋予建筑行业决策过程和可持续性^[45]。

基于学者们对 BIM 与 LCA 理论与应用的研究，本文提出“BIM-LCA”集成的绿色建筑能耗与环境影响评价框架，利用 BIM 解决生命周期清单中数据导出的问题，提高了分析的精确度，BIM 软件对建筑能耗的模拟，实现了建筑能耗可视化，BIM 软件对运营阶段进行全面的模拟，并反馈到 LCA 评价中，二者相互辅助，这是至关重要恰恰也是目前研究中鲜有学者关注的点。

1.2.4 全生命周期环境影响评价研究现状

全生命周期环境影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)是 LCA 流程中的至关重要的一个环节，该步骤是对生命周期评价中的结果进行定量的环境影响评价。主要内容包括影响类型的选择、特征化、标准化、加权、不确定性分析、贡献分析、敏感性分析等内容。LCIA 评价体系起初由欧美一些重视环境保护的国家提出并主导，目前已扩展至诸多发达国家乃至发展中国家。肖汉雄等多国内外相关研究进行梳理与分析，指出目前该体系仍由发达国家进行主导与应用，发展中国本土化的评价体系对中国制造大国的国情来说迫在眉睫^[46]。姜雪等人使用生命周期的评价方法系统的对碳钢喷涂产品进行环境影响及对比分析，结果表明，对该产品来说，富营养化的影响是最大的，产品加工阶段的初级能源消耗量占比最大^[47]。A F Abd Rashid 等人对 LCA 方法进行回顾总结，并区分对环境有重大影响的阶段和材料，确定了运行阶段的消耗量占比最大，而混凝土消耗了最高的物化能，研究结果还表明，具有较低体现能量的建筑材料不一定具有

较低的生命周期能量^[48]。陈莹等人基于生命周期评价理论，建立了建筑全生命周期的能耗计算模型，包括建筑材料的开采以及建筑拆除等具体活动，得到结论，生命周期划分的完整性对计算建筑能耗以及环境排放具有重要意义^[49]。

Cavalliere C.等人提出了一种 BIM 与 LCA 集成的新方法，利用 BIM 为每个阶段提供数据，LCA 来对此进行评价具体的环境影响，结果表明，研究可以计算所有设计阶段的物化影响，同时与已完成项目的结果保持一致^[50]。M A van Eldik 等人基于 BIM 提出一个环境影响评价的框架，旨在为设计人员提供有关设计潜在环境影响的信息，以使设计团队能够基于设计做出选择，该团队展示了自动化和集成的 EIA 在基础设施设计中的巨大潜力^[51]。

基于上述研究现状，本文将全生命周期划分为原材料获取阶段、施工阶段、运行阶段，以及上述研究未涉及的废弃与回收再利用阶段，并基于 BIM 平台对四个阶段的环境影响进行评价。

1.3 研究内容和技术路线

1.3.1 研究思路

本文以绿色建筑全生命周期的能耗与环境影响评价为研究目标，构建“BIM-LCA”的评价模型，以实际建筑为案例，对模型进行验证与模拟，并根据结果提出可行建议。

本文遵循“提出问题-构建模型-实例应用”的研究思路，首先提出传统绿色建筑能耗计算精度差、工作量繁琐以及研究时间范围不全面的问题，提出“BIM-LCA”相结合的模型，以 BIM 为平台在初期的设计阶段进行介入，并对运行阶段的建筑能耗动态模拟，并导出生命周期清单；然后构建以原材料获取阶段、施工阶段、运行阶段、废弃与回收为研究范围的生命周期模型；最后对构建的模型进行环境影响评价，包括完整性结果分析、贡献分析、敏感性分析，以实际建筑为案例进行模型的验证与模拟，为减少绿色建筑能耗与环境影响提供可行建议与措施。

1.3.2 技术路线

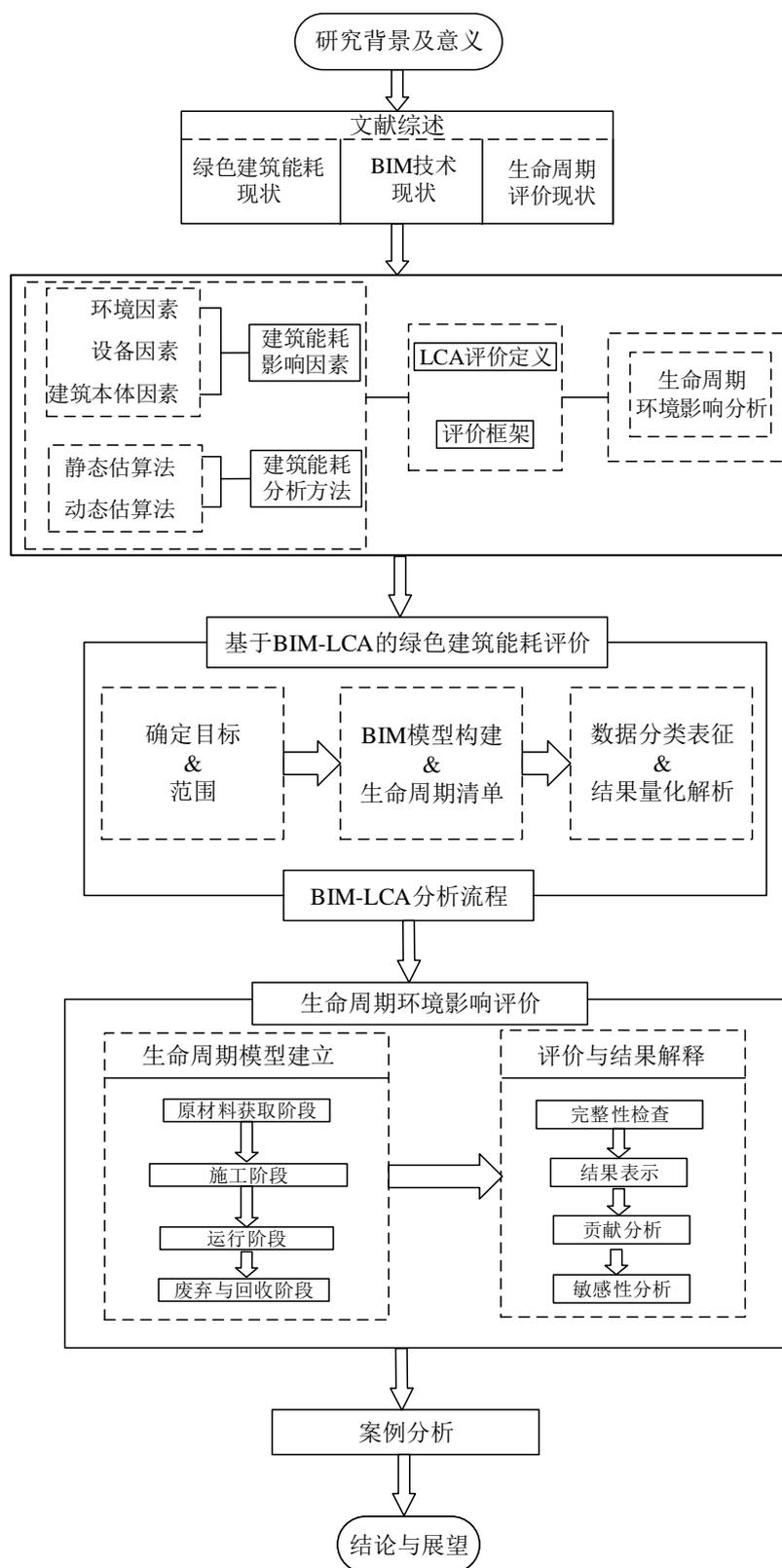


图 1-2 技术路线图

Fig1-2 Technology Roadmap

1.4 研究思路和研究方法

1.4.1 研究内容

本文以研究绿色建筑的全生命周期的能耗与环境影响为研究内容，论文一共分为六个章节，第一章为绪论，包括研究背景与研究意义，目前基于 BIM 技术、“BIM-LCA”的绿色建筑能耗分析现状，以及本文的研究思路、研究路线等内容；第二章是“BIM-LCA”以及建筑能耗的基本理论概述，为后续研究提供基础；第三章是“BIM-LCA”结合的框架模型；第四章是生命周期分析与环境影响评价内容；第五章为实例分析；第六章为结论与展望，本文的核心内容是第三章至第六章，如图 1-3 所示。

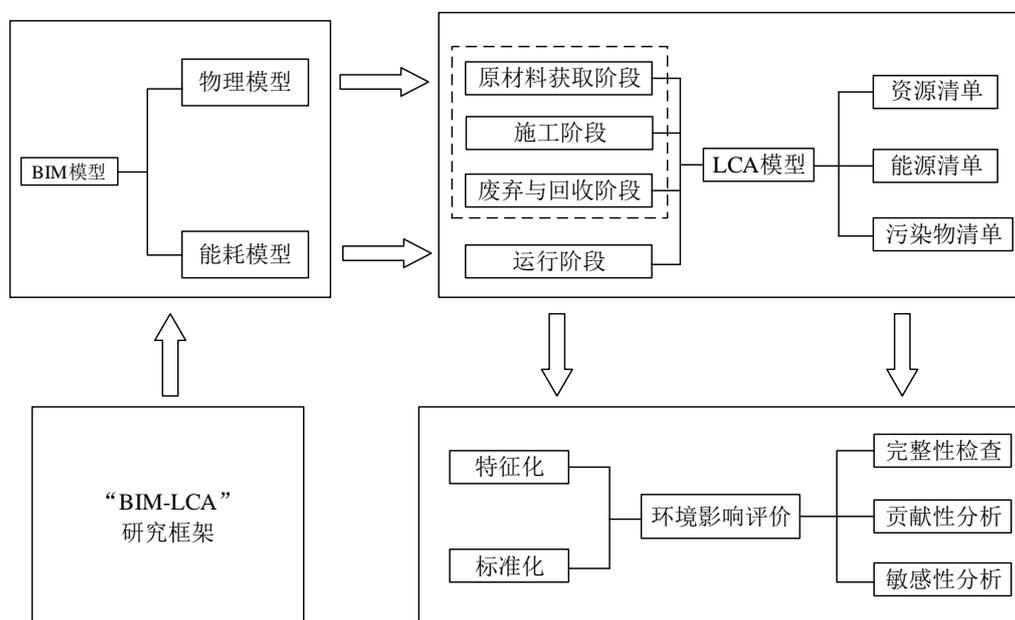


图 1-3 研究内容逻辑结构

Fig1-3 Research content logical structure

(1) BIM 模型构建：BIM 模型的构建包括两个部分，一个是物理模型，为后续的生命周期分析提供工程量清单，即 LCA 数据库；一个是能耗模型，负责运行阶段的建筑能耗模拟，对其进行采暖、制冷系统的功能参数，围护结构的热工系数进行设置，并对运维阶段进行精确的能耗计算，为后续影响分析提供可靠的数据支持，并实现模拟的动态可视化。此部分主要对应第三章的内容。

(2) LCA 模型构建：生命周期划分为原材料获取、施工、运行以及废弃与回收阶段，并且确定各阶段的资源消耗清单、能源消耗清单、污染物排放清单的内容，确立建筑 LCA 计算模型，以及目标及范围确定、相关假设等内容。此部分主要对应第四章的

部分内容。

(3) 生命周期影响评价：确定影响分类及计算规则，特征化与标准化的意义，此部分对应第四章的部分内容。以山东青岛一学校办公楼为案例建筑，对上述研究内容，即“BIM 模型-LCA 模型-影响评价”，进行完整的建筑生命周期能耗与环境影响评价，并对结果进行结果解释，为根据结果提出可行建议与未来展望，此部分主要对应第五章及第六章的内容。

1.4.2 研究方法

(1) 文献综述

本文广泛查阅国内外相关文献资料，梳理国内外绿色建筑能耗研究现状、基于 BIM 技术的建筑能耗分析现状、基于 BIM- LCA 的建筑能耗分析现状，为本文提出的“BIM-LCA”集成框架提供理论与资料支持。

(2) 动态模拟法

本文采用计算机动态模拟分析法对绿色建筑建筑能耗进行直观分析，利用 BIM 软件 Revit 进行物理建模，利用 Energy Plus 对运行阶段的建筑能耗进行分析，以及采用 Simapro 生命周期评价软件评估对环境产生的影响。

(3) 生命周期评价法

本文采用了整合的生命周期评价方法，即将 BIM 与生命周期评价方法相结合，对整个建筑单体的全生命周期能耗进行计算，并评价对环境的具体影响。

(4) 案例分析法

本文将以实际的建筑为例，对文章所提出的基于 BIM-LCA 集成的建筑能耗及环境影响评价方法进行应用，验证所提模型的科学性与合理性。

(5) 敏感性分析法

本文对实际绿色建筑产生的环境影响评价结果进行敏感性分析，分析三种不同情境下的结果，对降低能耗与环境污染提供可行建议。

第2章 “BIM-LCA”及建筑能耗基本理论概述

2.1 建筑能耗分析

2.1.1 能耗分析的概念

建筑物的能源消耗会对建筑物的整个生命周期产生直接和间接的影响。而建筑能耗的定义有广义与狭义之分，广义的定义一般是指建筑整个全生命周期所产生的资源消耗，包括原材料的获取加工、施工阶段造成的资源消耗等，涉及的时间跨度及活动内容比较宽泛；狭义的定义指在建筑运行阶段所消耗的能源，主要包括电力设备的运转所消耗的能耗活动，如空调、通风、采暖等^[52]。运行阶段的能源消耗所占的比重较大，因此对建筑的节能减排、运营维护、绿色设计有着重要的指导意义。

建筑能耗分析是指通过对建筑能耗进行模拟，通过更改各种参数例如房屋的方向、周围环境，建筑材料以及其他相应的内部和外部参数来对建筑物进行多组分能源评估，进行最优的建筑设计方案选择，从而达到节能减排与降低成本的作用。

2.1.2 建筑能耗分析方法

建筑能耗分析存在于建筑的全生命周期中，从设计阶段、建造阶段以及运营维护阶段直至最后的拆除报废阶段都会产生建筑能耗，但是因为受到特殊条件的约束，某些阶段如建造阶段受到施工人员行为还有工艺手法的影响较大，无法进行建筑能耗模拟，即做数据统计计算；但是对于在建筑运维过程，可以对各种用能设备进行统计与监测^[53]。

一种是静态分析法，由于其稳态传热的特点，无法对影响建筑能耗的诸多因素综合分析，因而计算结果会出现误差较大的问题。

另一种是动态分析法，传统的计算机模拟尽管考虑到了各个因素间的影响作用，但是可协调性较差，后期一旦需要改变建筑物的各项参数，整个建筑能耗分析无法进行合理调整甚至会重新返工。引入 BIM 技术，不仅可以进行情景分析，即将太阳辐射分析、日照遮挡分析、围护结构的热工性能分析以及光环境分析以生动的图画、动画进行展示，还可以实现参与各方的交互操作，方便后期修改。

2.1.3 绿色建筑能耗影响因素分析

建筑能耗的影响因素包括两个方面，一类是宏观因素，主要包括社会、政治、经济

各方面因素的制约，例如人口总量，居民消费水平，科技发展等。绿色建筑的影响因素还包括利益相关方、激励政策、评价体系等因素。另一类是微观因素，也是本文在绿色建筑的运维阶段所探究的能耗影响因素，这些因素种类繁多，互相影响，并不是某一个或者某一类因素所决定的，例如建筑物的外形、围护结构的材料、天气因素等等，本文将影响绿色建筑能耗的因素总体上概括为以下三个方面：内扰因素、外扰因素和建筑本体因素，如表 2-1 所示。

内扰因素是指在建筑运行阶段中由于使用人员对电气设备的使用行为而造成的一系列影响，这个过程主要包括电气设备的散热过程^[54]。内扰因素主要包括人均占有面积、采光调试设备、通风设备、温湿度参数、输送系统效率等。

外扰因素是指建筑所处的地理环境受到的影响，包括室外的光环境、太阳辐射强度、风力强度、温湿度等气象参数。外扰通过围护结构，以热对流或热辐射方式和室内环境进行热交换^[55]。

建筑本体指的是建筑本身的结构属性及参数。建筑本体作为内外环境热传递的介质，对建筑节能减排具有重要意义。主要包括建筑朝向、大小及位置、围护结构的材料及相关参数、遮阳系数等因素。建筑能耗的影响因素如下表 2-1 所示。

表 2-1 绿色建筑能耗影响因素

Table2-1 Factors affecting green building energy consumption

影响因素	具体指标
内扰因素	设备
	人员占用行为
	人均占有面积
外扰因素	太阳辐射
	通风
	气候
建筑本体因素	建筑朝向、大小及位置
	外墙
	窗户
	屋面

2.2 基于 BIM 的绿色建筑能耗分析

2.2.1 BIM 的特点

BIM (Building Information Modeling)，作为建筑行业信息技术转型的新兴力量，为

建筑业的发展注入了新生活力。它以 3D 信息技术为平台，集成了建筑物理模型、构件、功能等特征及相关工程信息，这种特征不仅能使得建筑参与各方实现信息共享，方便提取、修改建筑信息，还能够将一个项目的不同时期的资源、数据以及信息相集成，贯穿建筑从设计直至拆除的全过程^[56]。

BIM 的特点主要包括以下几个方面，如下图 2-1 所示：

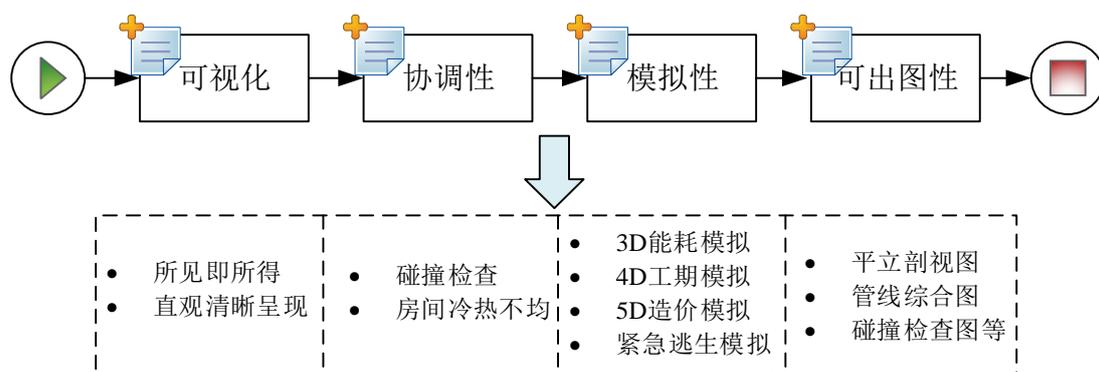


图 2-1 BIM 的特点

Fig2-2 Features of BIM

2.2.2 基于 BIM 的绿色建筑能耗分析方法的优势与特点

传统的绿色建筑能耗在运行阶段主要采用定额法、统计分析方法，其采用统计学的原理对运行数据进行调查收集，从而进行能耗计算，或者采用稳态传热的原理进行能耗计算，这种方法的弊端是没有考虑建筑能耗因素间的相互作用，而影响建筑能耗的因素众多，因此会对结果带来较大的误差。

基于 BIM 的绿色建筑能耗模拟方法采用动态模拟的方式，对实际运行的空调系统、通风、采暖等系统的相互作用进行模拟，并且对影响绿色建筑的诸多因素进行设置，解决了上述方法的不足，使估算结果更具有科学性和严谨性；此外，基于 BIM 平台参数化、可视化、协调性等特点，使得该方法的操作更具灵活性，它对绿色建筑模型的区域数量的划分没有限制，并且会采用动态模拟的方式直观将模拟结果呈现出来。二者的特点对比见表 2-2。

目前，准入系数法的精确且灵活的特点使它成为建筑能耗估算方法中最常使用的方法。

表 2-2 基于 BIM 与传统的绿色建筑能耗估算流程对比

Table2-2 Comparison between BIM and traditional green building energy consumption estimation process

指标	传统建筑能耗估算流程	基于 BIM 的建筑能耗估算流程
介入时间	施工图设计阶段后	概念设计阶段后
参与方协作	各专业设计人员存在交流壁垒	沟通交流通过模型表达与共享
模拟结果表达	仅数字	动画，图表，数字
模型利用性	仅用于指导建筑能耗估算模拟	可指导施工以及后期的运营维护

2.3 全生命周期评价（LCA）方法

2.3.1 全生命周期评价定义

随着建筑物的运营与维护阶段对环境的影响逐渐减少，相应的材料的物化能影响正在增加。但是，后者在很少被考虑在内；当它们存在时，它们倾向于在建筑物建成后计算，或者仅通过考虑初始材料阶段而被低估。2010 年，英国政府建议为早期设计决策制定计算建筑物实际影响的标准方法。随后在 2011-2012 年出版了欧洲 TC350 标准，通过生命周期分析过程确定了建筑物和产品的“从摇篮到坟墓”的影响^[57]。

LCA 是一种旨在量化产品对环境的影响的方法，其中要考虑到从原材料提取，制造和运输到现场，建筑，运营和维护，直到报废、拆除回收利用的整个生命周期^[58]。这种集成的方法有助于开发和扩展框架，影响评估和数据质量。

生命周期评价方法的应用可以分为两类，一类是对具体产品的生产过程分析，按照系统边界的划分可以分为从摇篮到坟墓（Cradle-to-Grave），从摇篮到大门（Cradle-to-Gate），从摇篮到现场（Cradle-to-Site），从大门到大门(Gate-to-Gate)等过程（如图 2-2）；另一类评价方法是以宏观角度出发，从某一国家或者地区的角度出发，对某一产品的生产对该区域的资源消耗与环境影响进行定性或定量评价，从而衡量该产业对该地区或者国家的影响，因此被称为投入产出生命周期评价（IO-based LCA）^[59]。

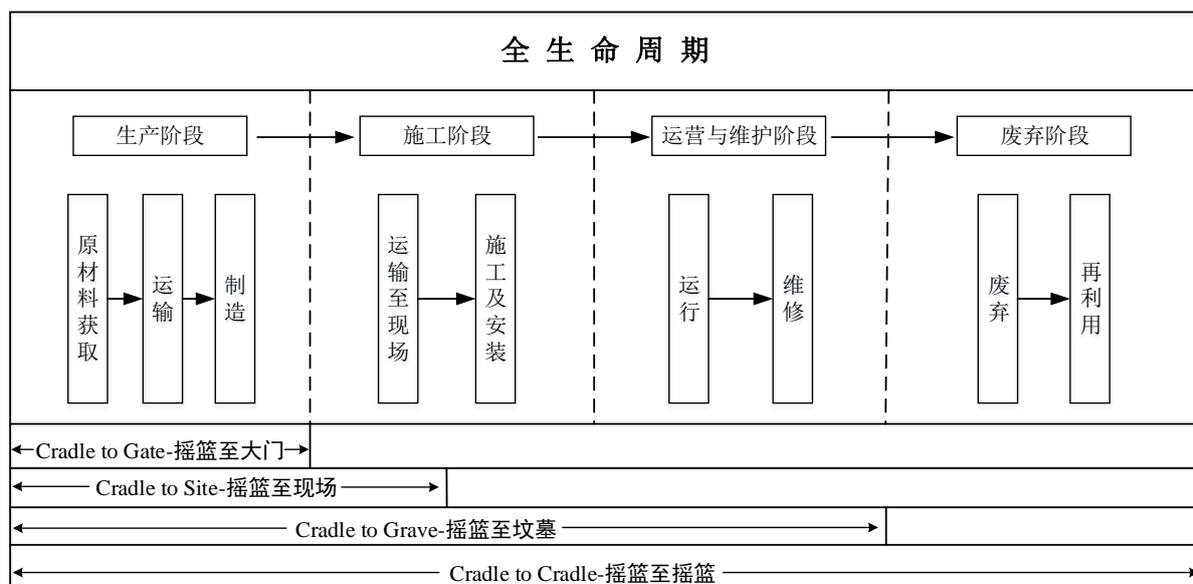


图 2-2 整个生命周期阶段的划分

Fig2-2 Division of the entire life cycle stage

2.3.2 全生命周期评价框架

生命周期评价框架主要包括四部分内容，即：目标和范围定义（Goal Define and Scoping）、清单分析（Inventory Analysis）、生命周期影响评估（Impact Assessment）以及结果解释（Interpretation）^[40]。LCA 评价框架见图 2-3。

目标和范围定义：作为整个 LCA 流程中的第一步，其实施对后续评价的有效性具有决定性作用，因此这一步是至关重要的。目的及范围需要对所评价的产品或流程的功能单位、系统边界、选用数据库、环境影响类型等基本条件进行说明。并且，如果后续的流程或者材料需要优化修改，需要对目的及范围进行重新设定，以满足评价的科学性。

清单分析：生命周期清单分析是对数据输入并输出的一个过程，将产品的生产过程按照生命周期进行划分，主要包括原材料的获取加工、制造、使用、废弃及回收，并对每个阶段所涉及的原材料、资源的投入进行数据采集，是整个 LCA 过程中最复杂最困难的一个环节。与目的及范围相同的地方是，这个阶段也是一个不断循环的过程，需要随时对数据的质量进行筛选并不断调整。

生命周期影响评估：这个过程对产品的生产造成的环境影响定性及定量评价的关键步骤，主要的环境类型包括影响人体身体健康的指标或生态环境等，对具体的环境类型及其影响程度可输出为表格或 2D、3D 的图表。这一阶段为接下来的结果解释提供基本的信息。

结果解释：对影响评价输出的结果进行敏感性分析、完整性分析、不确定性分析等过程，对产品的生产过程中材料或者资源消耗等方面给出合理性的优化建议。

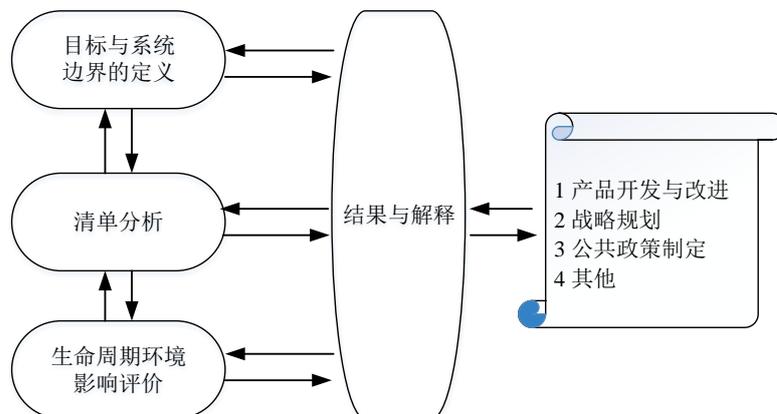


图 2-3 LCA 评价框架

Fig2-3 LCA Evaluation Framework

2.3.3 建设项目 LCA 方法

目前，LCA 方法已被应用于各种行业，涵盖了从化学品到交通，再到发电的各个行业，其中建筑领域尤其广泛应用。而建筑领域的应用范围上至整个建筑领域，下至一个建筑项目都可以使用生命周期评价分析方法，表 2-3 为建筑领域 LCA 主要应用层级。本研究针对一个建筑单体项目展开，属于 LCA 在单体建筑整体层面的研究与应用。

表 2-3 建筑领域 LCA 主要应用层级

Table2-3 Main application levels of LCA in construction

建筑 LCA 层级	研究对象	建筑 LCA 应用方面
建筑材料	主要建筑材料	LCA 在建筑产品选择方面的应用
建筑部件	建筑构件（门、窗等）	LCA 在建筑评价体系方面的应用
建筑整体	建筑单体项目	LCA 在建筑理论方面的应用
建筑行业	国家或地区的建筑行业	分析建筑行业的环境影响，为制定建筑领域的环保政策提供决策支持

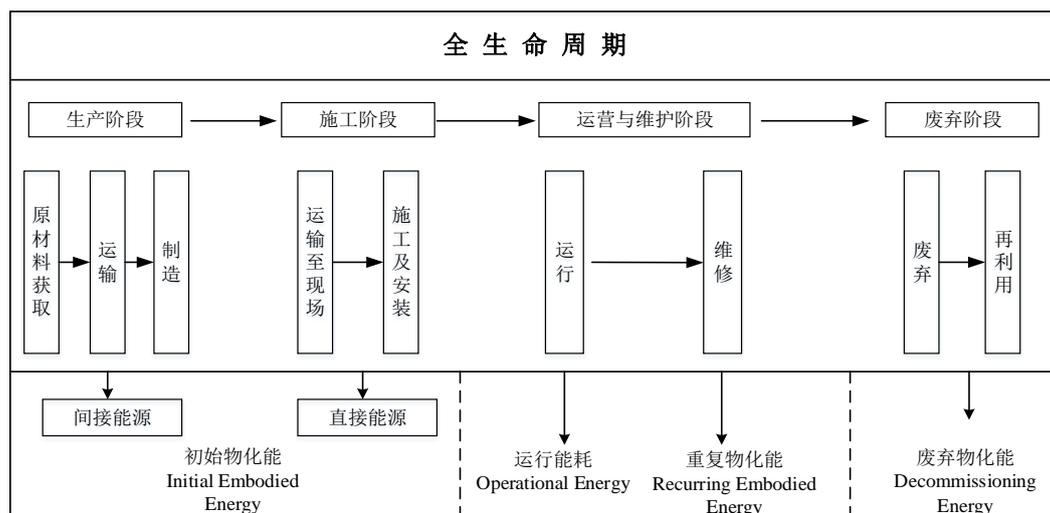


图 2-4 绿色建筑的生命周期分析 (LCA) 以及相关能耗

Fig2-4 Life cycle analysis (LCA) of green buildings and related energy consumption

2.3.4 生命周期评价工具

生命周期评价工具发展迅速，目前已经较为完善，不仅有科研机构或者院校研发的软件，也包括一些企业开发的商业软件。国外已经开发了诸多较为成熟的商业软件如 Gabi、Umberto、Ecopro、SimaPro 等商业化软件，我国也开发了相应的生命周期评价软件 eBlance^[60]。

目前，SimaPro 和 Gabi 是目前研究中使用最广泛的生命周期评估软件^[61]。二者比较如下：

(1) 特点比较

SimaPro: 软件最大的特点是涵盖不同的数据库，将数据库进行整合并分级归类，数据库的庞大与种类整合的特点，使其具有实用性与保密性；此外，数据库的背景数据清单来源清晰，方便识别与操作，再加上其特征化、标准化以及权重计算的多元环境影响评价方法，使使用者无需过多培训即可运用生命周期的理念进行设计与操作；清晰的网络结果直观简洁的展示了生命周期的流向与贡献占比。

Gabi 4: 软件不仅涵盖产业的清单数据库，还在此基础上整合了研究单位的数据库，数据库种类与数量内容较多；自动计算流程图同 SimaPro 一样强大，并且数据库同 SimaPro 一样分类整合清晰；除此之外，相比 SimaPro，Gabi 4 可进行冲击分析。

(2) 数据全面性、丰富性比较

SimaPro: 由以 Ecoinvent 为代表的多数据库联合组成，其中 Ecoinvent 数据库包含电力、化学产品、农业足迹等诸多方面的数据，并且包括碳和水足迹等数据，为用户提供充足的数据依据。且 9.0 版本更新了最新的数据库系统，数据加载更快、更稳定并且数据涵盖更全面。

Gabi 4: 由 Codes、Eco Inventories of the European Polymer Industry(APME)、IKP、与 BUWAL 等数据库联合组成，涵盖诸多行业，包括农业、建筑业、化学材料、电子通信、工业产品、金属与采矿等数据。数据库涵盖内容比较丰富，但是与 SimaPro 相比，种类侧重有所不同，可为用户提供足够的支撑。

(3) 操作与便利性比较

SimaPro: SimaPro 的操作界面根据 LCA 理论框架进行布局，分成目标范围分析、清单分析、分析方法、解释说明、比较分析等内容，按照 LCA 的评价内容进行组织，只需在 SimaPro 中按照清单找到相应项目即可操作。

Gabi 4: 尽管 Gabi 4 的数据库涵盖专业范围较广，但是操作界面不如 SimaPro 方便快捷，引用数据库时，连结过程较为复杂繁琐，要求使用者有专业的技术培训，不适用于普通的使用者。

第3章 BIM-LCA 的绿色建筑能耗评价分析

3.1 BIM-LCA 结合的绿色建筑能耗评价分析

3.1.1 BIM 与 LCA 工具选用

目前, BIM 软件涵盖的领域比较广, 每个领域的建模软件又各式各样, 挑选适合的建模软件会使整个建筑能耗分析过程事半功倍。

(1) Revit 在工程建模方面处于优势地位, 除了最基本的精准建模的性能外, 还兼具别的 BIM 软件无法做到的功能, 即可以解决多个软件解决的问题, 比如碰撞分析、3D 渲染、工程量计算、全生命周期分析以及绿色建筑性能分析等功能。本文选用 Revit 不仅可以建造三维模型, 建模完成的同时还可以得到工程量清单, 为接下来的生命周期分析做基础, 减少了以往人工手输变量的工作量, 而且大大提高了分析的效率和精度。

(2) Energy Plus 是一款功能全面的仿真与模拟软件, 这是其他仿真软件无法实现的一点, 3D 界面的升级以及交互操作的便捷, 使能耗模拟更生动、直观^[62]。本文选用 Energy Plus 的原因不仅是它可以全面的进行能源仿真的模拟, 它还可以实现与 Revit 之间信息的交互操作, 即 Revit 的三维模型可以以 gbXML 的格式传输到 Energy Plus 中, 省去了再次建模的麻烦, 节省分析时间并提高效率^[60]。

(3) SimaPro 是一款 LCA 系统分析软件, 软件通过对产品生产过程的建模, 通过生命周期清单分析与环境影响分析后, 定性或定量评价环境影响类型, 并自动生成树状图、2D 及 3D 图表, 以直观、清晰的方式呈现给用户进行结果解释, 不需要过多的专业技能与专业知识, 方便用户的使用, 通过敏感性分析等操作后可以对产品设计进行优化, 有利于减少资源浪费及环境污染^[63]。

3.1.2 BIM-LCA 结合的分析流程

(1) BIM 模型构建与工程量数据清单导出

以往建筑能耗生命周期评价的数据都是手动收集、转化并输入, 这个过程是繁琐且精确度较低的, 而 BIM 模型不仅涉及基本的建筑和结构模型, 还包括机电、给排水、通风、通信以专业, 这些复杂的模型不仅可以直观的体现, 所涉及的数据可以在 BIM 软件中直接导出, 这是相比传统的手输与收集数据过程最大的简化。BIM 参数化设计与关联

性设计的特点，使得工作时间减少工作效率大大提高，参数化设计使得物理信息属性很容易被修改，并且修改的构件在相应的建筑模型里会自动修改，这对于设计师来说是极大的便利。

工程量数据清单导出有多种方式，Revit 软件可以导出所建模型的构件表，但是主要内容包括所建模型比如主体结构的梁、柱子尺寸及其他材料参数信息，而生命周期评价中很重要的一个清单部分是所消耗的资源，并不能一齐显示，除此之外，还有荷载信息、场地信息，这些信息无法通过 BIM 模型提取出来，单独计算或者再次现场调查数据十分繁琐。

此时，相比之下可以选择第二种方式，与 BIM 造价软件结合。BIM 软件各式各样，一个完整的项目不可能仅依靠一个功能单一的软件，BIM 造价软件的快速且完整的工程量计算和造价汇总的功能，恰好弥补了 BIM 建模软件的不足，而与 BIM 造价软件的相结合，相比独立的 BIM 软件可以导出更详细的工程量清单，包括人员，材料的类型及消耗，机械的类型和消耗以及运输距离等数据。

（2）生命周期影响评价

生命周期影响评价是生命周期理论新的延伸和应用，可以评价某种材料或者某种工艺在某一个阶段或者整个全生命周期内对环境的影响，而不同的阶段、不同的工艺乃至不同的技术都会对环境产生不同的效果，因此要对材料、工艺或者资源消耗的路线进行追踪，使得结果可测算、可量化、可比较。

BIM 所建模型的数据清单导出后，数据清单以生命周期各阶段为基础进行划分，并转化成资源消耗清单进行汇总，同时对 BIM 模型提供信息的渠道进行追溯并挖掘，找到 BIM 模型与生命周期各阶段数据之间的对应关系。由于各个阶段的数据来源与处理方法不完全相同，具体阶段需具体分析，详细的数据来源放到 3.3 节进行集中介绍。数据清单导出后，然后建立 LCA 模型，并进行环境影响评价，并生成环境释放清单。图 3-1 为 BIM 与 LCA 结合的分析流程。



图 3-1 BIM 与 LCA 结合的分析流程

Fig3-1 Analysis process of combining BIM and LCA

3.2 分析框架与步骤

3.2.1 确定研究目标

建设项目的生命周期包括多个阶段，但是每个阶段生命周期的分析目的全然不同。设计阶段是在满足相同的使用要求的前提下，如何选择使环境的影响降到最小的方案是其目的；材料设计阶段的过程中，因为材料构成的建筑单体会长久的存在，因此它需要在整个过程中的能耗和环境影响都需要最低；运营与维护阶段作为全生命周期中最长的时间阶段，如何确定可行的运营方案，并实现建筑物最节能是分析的主要目的；废弃与拆除阶段的主要目的是使材料如何回收再利用，使材料更具有可持续性。

3.2.2 确定研究范围

根据 TC350 标准，建筑能耗是从建筑物“摇篮到坟墓”的整个生命周期中与建筑物相关的直接和间接过程消耗的能量。这包括材料的提取、制造、运输、建造、翻新和更换以及废弃处理的所有活动，但是它排除了建筑物在运营维护期间的能量，例如空调负荷、照明以及其他运行设备的耗能^[57]。而一些学者收集建筑建造、使用、废弃三个阶段资源能源消耗的信息，以装配式建筑为研究对象，构建其生命周期评价模型，并利用该模型系统核算全生命周期的总碳排放量^[64]。

本研究将绿色建筑的生命周期划分为原材料获取阶段、施工阶段、运营维护阶段以及废弃处置阶段四个阶段，整个生命周期涉及时间跨度较大，并且与之相关的工程量及数据十分复杂，而且策划与设计阶段实际并未进行建筑活动，即并未产生能耗及对环境有所影响，故该部分的能耗忽略不计，生命周期阶段划分图 3-2，框架部分表示本文的研究范围。

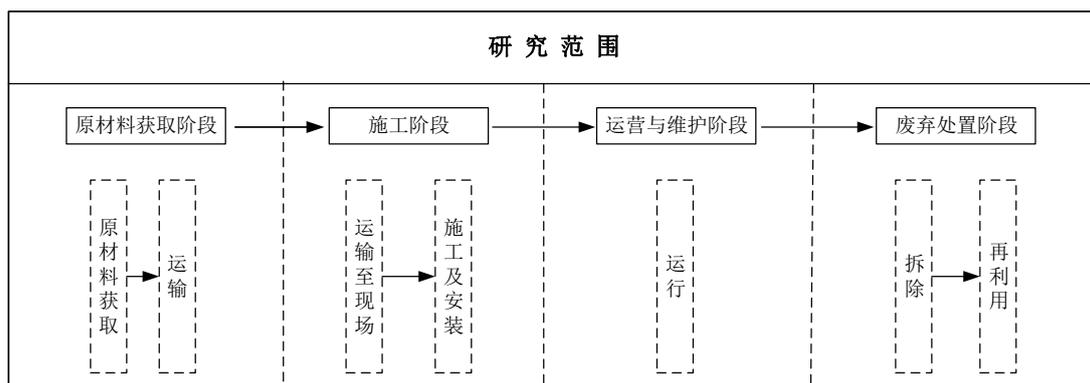


图 3-2 生命周期划分与研究范围

Fig3-2 Life cycle division and research scope

3.3 模型构建

确定了研究目标和研究范围后，需要对绿色建筑进行生命周期清单分析。清单分析即对该绿色建筑在全生命周期内所涉及的能源与资源消耗、环境影响所涉及的相关活动进行量化的过程。传统的清单分析是在建筑物建成后编制出一份投入产出清单，投入是对能源与资源的消耗，产出是污染物与废弃物的排放。

基于 BIM 技术的全生命周期清单分析解决了上述传统分析的弊端，设计阶段对建筑进行建模，机电、通信、给排水、通风、暖通全专业的模型包括参数、物理信息及数据，这些数据来源于参与建模的各专业设计师，各组件的厂商录入信息，这是对模型进行规范量化的一个过程。所完成的 BIM 模型直接将涵盖的信息进行导出并交互到生命周期分析软件进行计算，这个过程不仅解决了以往搜集数据的繁琐过程，大大节省了计算时间提高了模拟效率与计算精度。

此外，使用 BIM 模型可以在建筑前期的设计阶段介入，对建筑材料的替代进行模拟，优化材料的选择与组合，这对降低建筑材料在全生命周期的环境影响具有重要意义。本文提出的“BIM-LCA”的方法模型如下图。

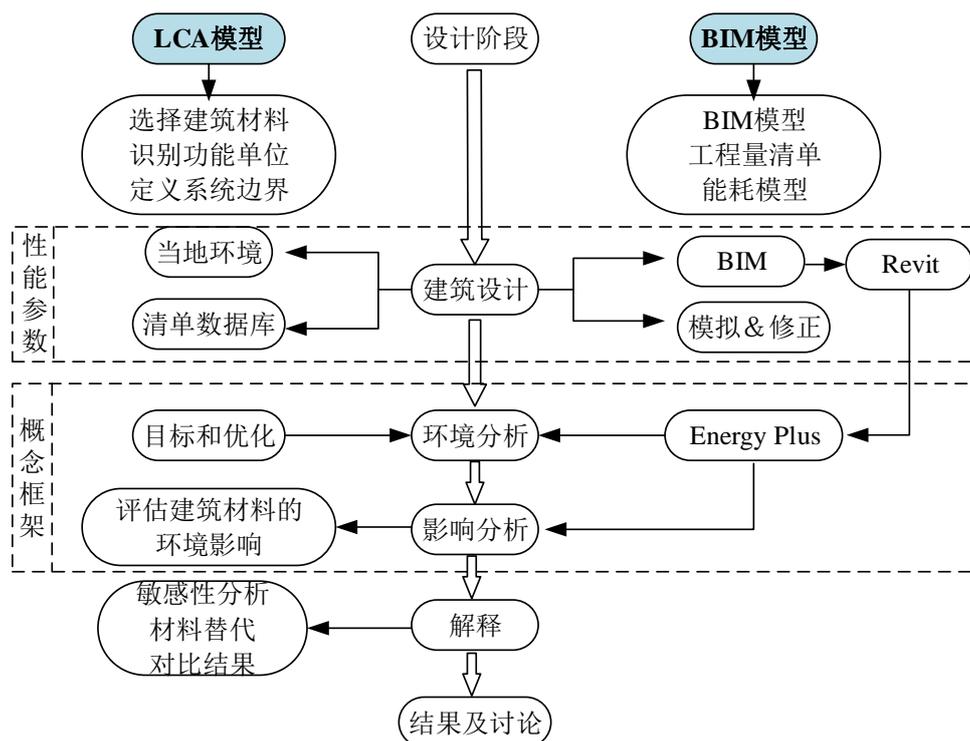


图 3-3 “BIM-LCA”的方法模型

Fig3-3 "BIM-LCA" method model

3.3.1 BIM 模型构建

BIM 软件的种类较多，为了使全生命周期分析更简便，本文使用 Revit 对项目进行三维建模，应用 Revit 中建筑构件材料明细表导出功能，导入到 Excel 表格中，然后进行后续生命周期环境影响的计算。此外，Revit 的三维模型可以与建筑能耗模拟软件进行交互，无须再次建模，减少了再次建模的工作量重复以及期间产生的误差。

建模步骤：

(1) 创建样板文件

新建模型时，需要选择样板文件，Revit 模型是基于样板文件来创建的，样板文件为模型提供了族、项目信息、材质以及尺寸参数等基本设置，样板文件的类型有四种：构造、建筑、结构、机械，根据需要绘制图纸的类型，选择合适的样板，调用项目样板如下图所示。

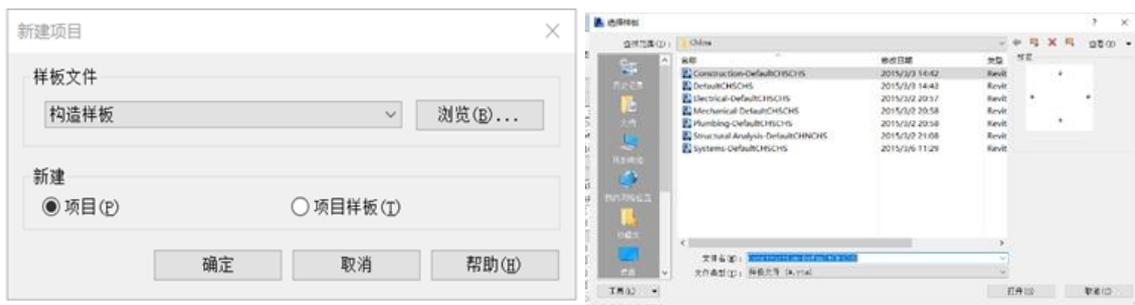


图 3-4 调用项目样板

Fig3-4 Call project template

(2) 设置标高与轴网

在项目样板中设置好所需图元属性，载入与图纸对应的族文件，根据分割的 CAD 图纸建立标高轴网，复核准确无误后进行锁定，用统一的样板文件创建模型，有利于后期模型的整合工作。

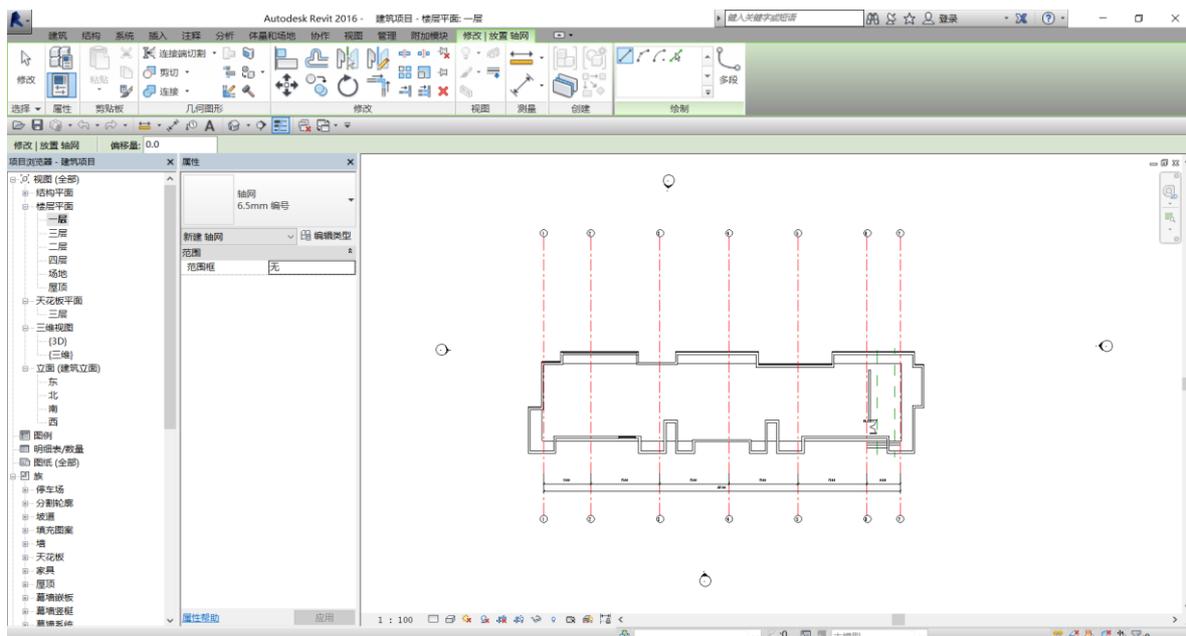


图 3-5 设置标高与轴网

Fig3-5 Set elevation and grid

(3) 链接 CAD 图纸，分层建模

使用统一的样板文件新建项目后，将分割好的图纸链接到 Revit 平面视图中作为参照，在此基础上分层建模，这里有链接 CAD 和导入 CAD 两种方式，导入图纸会增大模型的容量，影响电脑的运行速率，减慢建模的速度。链接时要注意图纸所在楼层。

3.3.2 能耗模型构建

将 BIM 模型以 gbXML 格式或 IFC 格式从 revit 导出，可以实现与 BIM 能耗仿真软件的交互，导入 Ecotect 软件可以实现建筑能耗的太阳辐射、日照遮挡等功能分析。Energy Plus 与 eQUEST 能耗仿真软件实现与 BIM 软件的交互暂时无法实现，如果要进行深入的能耗定量计算，需在该能耗仿真软件建模，然后进行照明系统、HVAC 系统、人员行为等参数设置，进行具体的运行阶段的能耗计算。

- (1) 创建能耗仿真 BIM 模型
- (2) 参数设置：
 - 1) 围护结构参数
 - 2) 房间温度设置与能耗功率
 - 3) 照明系统设置
 - 4) HVAC 系统
 - 5) 建筑使用者特征设置
- (3) 能耗计算
- (4) 运行阶段能耗输出

应用 Energy Plus 进行建筑能耗模拟的具体方法与流程如下图 3-8 所示：

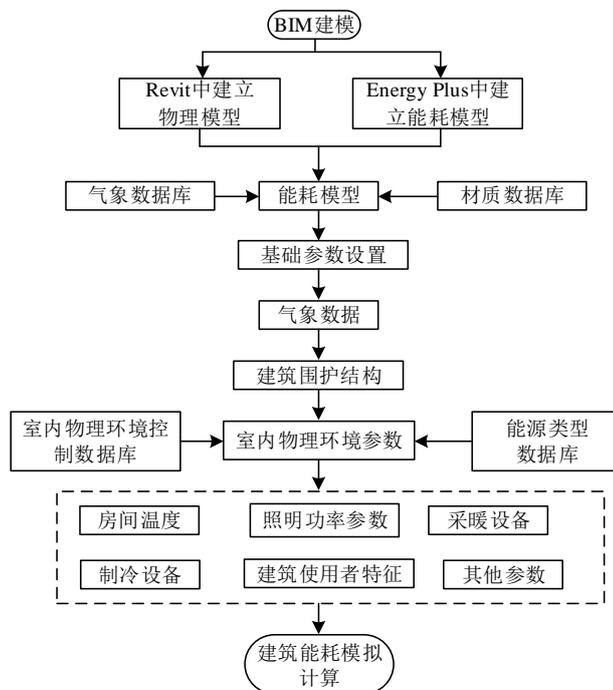


图 3-8 应用 Energy Plus 进行建筑能耗的流程

Fig3-8 Process of applying Energy Plus to building energy consumption

BIM 模型构建与能耗模型构建的逻辑图如下图 3-9 所示：

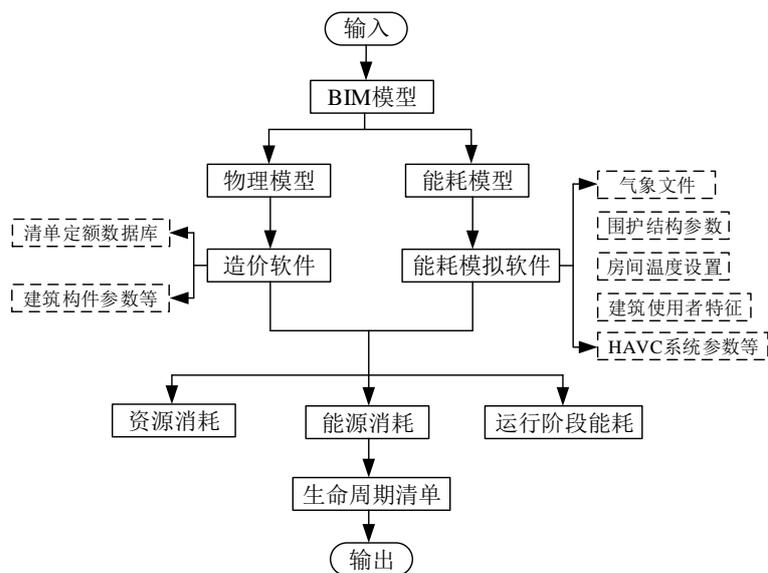


图 3-9 BIM 模型与能耗模型建模逻辑

Fig3-9 Modeling logic of BIM model and energy consumption model

3.3.3 LCA 模型构建

根据国际标准组织颁布的 ISO14040 和 ISO14044 的 LCA 评价框架，本文以绿色建筑单体项目为评价对象，对整个建筑的生命周期内资源消耗、能源消耗及产生的环境影响进行分析。绿色建筑项目生命周期模型构建流程如图 3-10 所示。

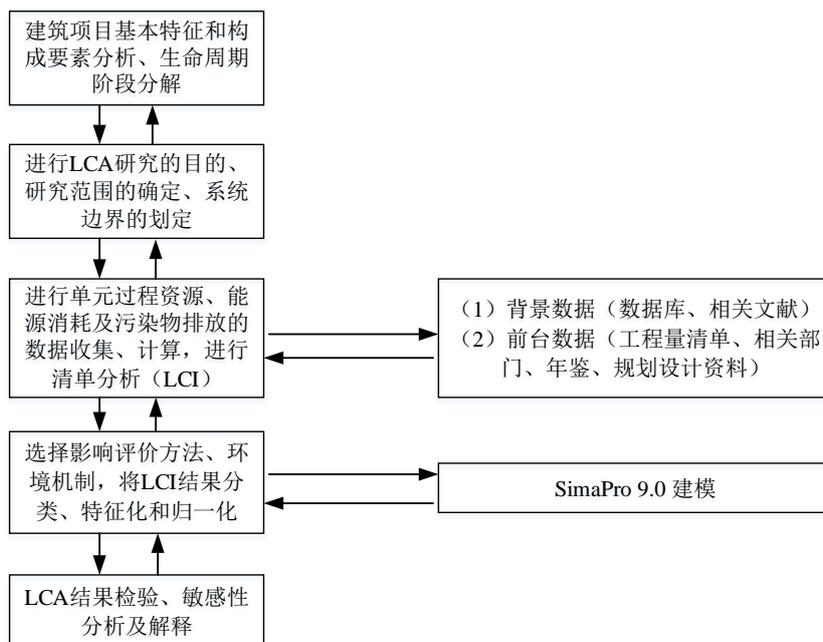


图 3-10 绿色建筑项目生命周期模型构建流程

Fig3-10 Construction process of green building project life cycle model

(1) 选择 LCA 分析工具

本文选择 SimaPro 作为测算整个绿色建筑生命周期环境影响的工具，通过划分生命周期来确定研究范围，进行全生命周期的建模，SimaPro 通过丰富的数据库进行特征化与标准化计算，并自动生成整个流程网状图，操作方便快捷，无需专业的技术培训即可上手，降低了建模与分析难度，支持生成 2D 与 3D 直观结果图，便于用户理解与使用，流程图生动的展现了生命周期的产品设计，使用户通过生命周期理念达到保护环境的目的；此外，SimaPro 可支持多种应用程序分析，例如例如可持续性报告，碳和水足迹，产品设计，生成环境产品声明并确定关键性能指标^[65]。

1) 高阶建模：

使用 SimaPro 可以构建复杂，透明，系统的模型。设计师可以从生命周期的角度对不确定性计算，过程和项目参数进行建模。此外，还可以深入了解单元过程和多个输出过程的分配，进行薄弱点分析并为复杂的废物处理系统建模。

2) 可视化结果

SimaPro 具有强大的网络视图，可以深入研究模型并可视化结果。这种表示结果的方式可帮助设计师轻松找到热点并进行进一步调查。

3) 多用户选项

SimaPro 的多用户功能在 LCA 软件解决方案中是独一无二的。它允许几个人在一个共享的中央数据库中同时处理同一个项目。与同事实时协作，即使他们在不同的办公室甚至不同的国家工作也是如此。

(2) 边界条件

建筑考察期限：对该建筑单体，采用设计年限 50 年进行分析，并后续对建筑使用年限进行敏感性分析，以考察建筑年限的使用合理性。

第4章 绿色建筑全生命周期分析与环境影响评价模型

4.1 生命周期清单分析

4.1.1 目标及范围确定

本文以某绿色建筑单体项目为研究对象，主要针对绿色建筑全生命周期的能耗与环境影响的定量评价与分析，从而计算出不同的阶段对环境影响的贡献程度表现，利用所得出的结果对减少建筑生命周期各阶段的环境影响进行有效指导。

绿色建筑生命周期清单分析的目标及范围确定对分析结果及后续指导有着重要意义。整个生命周期的影响因素众多且错综复杂，目标及范围的确定会对环境影响评价结果造成一定程度的影响。本研究将绿色建筑的全生命周期作为研究范围，主要针对有能源、资源消耗以及污染物排放的阶段进行量化和评价。

本文将绿色建筑全生命周期阶段划分为原材料获取阶段、施工阶段、运行阶段与废弃处置阶段，并且数据来源以及清单分析以生命周期的划分为基础。以3.3节的研究内容为基础，在BIM模型的基础上导出工程量清单，结合现场实际调查情况，对每个过程的数据来源进行详细介绍，并建立全生命周期能耗计算模型为：

$$E_{\text{build}} = E_{\text{mater}} + E_{\text{const}} + E_{\text{opear}} + E_{\text{dis}} - E_{\text{recyc}} \quad (4-1)$$

式中 E_{build} ——整个寿命周期的建筑能耗；

E_{mater} ——原材料获取阶段的能耗；

E_{const} ——施工阶段的能耗；

E_{opear} ——运营阶段的能耗；

E_{dis} ——废弃阶段的能耗；

E_{recyc} ——回收阶段的能耗。

4.1.2 相关假设

绿色建筑的寿命时长决定了建筑运营与维护的时长，而这一部分在整个生命周期中的占比是最大的，因此对整个生命周期评价与影响评价具有重要意义。此外，建筑寿命

进行假设时，需考虑设计的合理值，如果假定时间过长，后期的不确定性、不稳定性因素逐渐增多，会影响分析结果的可靠性。由于不同的建筑等级不同，且时长跨度相对较长，通常对新建建筑的假设时长的合理区间为 40-100 年^[48]。

根据文献综述的考察，大多数的假设时长多集中于 50 年左右，目前关于建筑年限的假设所参考的资料相对匮乏，研究者需对建筑实例的具体设计与实际需求合理假设。

4.1.3 过程清单

过程清单主要包括两个部分，即数据收集与数据计算，以此为基础进行建筑项目后续的输出与产出。清单分析需要考虑的数据包括资源消耗、能源消耗以及污染物的排放，整个过程以研究范围为基础进行阶段划分，在 LCA 的分析过程中，数据的收集是整个阶段最复杂且艰巨的任务，每个阶段的资源消耗及污染物排放的重点并非一致。由于目前的数据库的限制，许多数据在数据库找不到相对应的条目，需要对其进行转换来保证研究范围与目的的一致性。此外，一些数据需要进行现场调查或者基于历史数据查阅数据库、文献资料才可以获得。

(1) 数据收集

本文根据研究范围将所需要的数据分为四个部分，即原材料获取阶段的数据收集、建设阶段的数据收集、运营维护阶段的数据收集以及废弃阶段的收据收集。

1) 原材料获取阶段

这个阶段的能量消耗为物化能 EE (Embodied energy)，主要包括原材料从采集、运输到制造为建筑材料，并在施工现场进行安装直至拆卸的全过程^[66]。本文将建筑活动所需要运输而非现场制作的建筑材料均划分到原材料获取阶段。主要包括：

- ① 原材料及资源的消耗：主要是指混凝土、水泥、砂子、砌块墙、钢筋、石灰膏等；
- ② 能源消耗：原材料制作中设备运转所消耗的能耗（以电能为单位），原材料运输至施工现场的运输能耗。

原材料获取阶段的数据来源是：a.工程量清单、工程设计施工图纸、相关施工数据；
b.年鉴、权威出版物、相关的 LCA 研究文献；c.现场调研所得数据。

2) 施工阶段

以往学者大多集中于建筑的运行能耗 OE (Operation energy)，研究得出运行阶段消耗的比重较大，但是最近学者们的目光开始集中于建筑的物化能，尽管运行阶段是全生

命周期所占比重最大的时间阶段,但是如果考虑材料的能源消耗,结果可能会大不相同。此外,受气候条件以及能源供应条件的影响,全生命周期中 EE 的占比相比之前要多得多,因此,EE 和 OE 要同时考虑。

本文将原材料获取阶段与施工阶段的原材料及资源消耗进行了明确划分,施工阶段的原材料主要是指在建筑现场直接制作加工的材料。施工阶段的能耗主要包括:

① 原材料及资源消耗:模板、脚手架、混凝土以及木头等;

② 能源消耗:施工过程设备运转消耗的汽油、机油、液化石油气以及氧气、电等资源。由于施工现场的水资源消耗难以统计,因此不予考虑。

建设施工阶段的数据来源是:a. 工程量清单、工程设计施工图纸、相关施工数据;b.年鉴、权威出版物、相关的 LCA 研究文献;c.现场调研所得数据。

3) 运营与维护阶段

狭义的建筑能耗即建筑运行过程中所产生的能耗 OE,包括空调、取暖以及各种电器设备运行的能耗,作为全生命周期中时间周期最长的一个阶段,其建筑能耗的计算对建筑节能工作至关重要^[67]。

目前,对于建筑运行能耗的方法主要有能耗定额法、统计分析法和计算机模拟法^[18]。计算机模拟法目前是最广泛运用的一种方法,相比传统的基于数据与统计的计算方法,其建筑模型更精细,结果更精确;此外,在模型里改动参数,减少了返工计算的工作量,并可以基于不同的场景进行能耗计算。因此,本文对于建筑运营阶段的能耗采用计算机模拟法进行分析。

运营维护阶段的能源消耗主要是以设备运转所产生的电能为主,由于此阶段的周期较长,无法确定维修更换所消耗的原材料,因此不予考虑,此外,此阶段污染物的排放主要是生活废水,但由于数据库没有生活废水这一清单,故此次分析不予考虑。

运营阶段的数据来源:图纸计算及调研实际运行数据,相关的 LCA 研究文献等。

4) 废弃处置阶段

建筑物的废弃和拆除部分也是全生命周期中的一部分,而且建筑垃圾的处置与回收会对环境产生重要的影响。此阶段能量的消耗主要以电耗和油耗为主,而建筑物的拆除所涉及工程量是十分巨大的,包括混凝土、钢材以及各种管材等材料,其中,钢材、铝制品等金属的回收率是相对来说比较高的;而混凝土、玻璃制品以及塑料的回收率是比

较低的，但是其量确是占得比重比较大，如何更节能的回收并减少对环境的影响，比如近距离的铺路、填坑是值得研究的；而有的建筑废品几乎没有回收价值。

① 原材料及资源消耗包括：废弃处置阶段相比前几阶段的不同之处，原材料及资源消耗可以为负值，即考虑对前几阶段资源的回收，主要包括钢筋及铝制品等材料；运输消耗为将废弃物运输到垃圾填埋场所消耗的能源。

② 能源消耗：拆除过程所消耗的电、水等能源。

③ 污染物的排放：需要考虑固体废弃物的堆放，如混凝土、砖、木头等。

废弃处置阶段的数据来源：a.施工图资料、计价软件的资料；b.年鉴、出版物及相关 LCA 研究文献。

（2）数据计算

数据计算的步骤包括：

1) 数据的识别与确认：对于 BIM 模型导出的数据、计价软件导出的数据、通过施工现场调查及翻阅文献资料获得的数据需要进行有效性的检查，以确保数据的完整性与有效性，并在生命周期清单的目标范围之内；

2) 数据单位换算联：根据数据库要求，将数据单位进行换算，方便计算；

3) 系统边界的调整：将收集来的数据进行筛选，去粗取精，并根据数据的取舍对初始的系统边界进行相应调整。

4.2 生命周期环境影响评价

生命周期影响评价是对产品的生产造成的环境影响定性及定量评价的关键步骤，是整个 LCA 中的关键一环。

4.2.1 影响分类

环境影响类型以生态系统、能源消耗、人体健康为标准对将环境产生相同或类似影响的排放物进行分类，这三大类别下分许多小类别，主要包括再生能源（renewable energy）、人类毒性（HTP）、初级能源需求（PED）、潜在性富营养化（EP）、陆地生态毒性（TEAP）、不可再生能源（non-renewable energy）、臭氧破坏潜势（ODP）、酸化潜势（AP）等。

本文主要研究的影响类型如表 4-1 所示：

表 4-1 BIM-LCA 模型中各环境影响指标及考察单位

影响指标	能源需求单位	生态足迹单位
非生物资源消耗 (Abiotic depletion, ADP)	kg Sb eq	kg Sb eq/m ² a
非生物资源消耗 (化石燃料) (Abiotic depletion-fossil fuels, ADP-ff)	MJ	MJ/m ² a
温室气体效应 (Global warming, GWP100a)	kg CO ₂ eq	kg CO ₂ eq/m ² a
臭氧层消耗 (Ozone layer depletion, ODP)	kg CFC-11 eq	kg CFC-11 eq/m ² a
人类毒性 (Human toxicity, HTP)	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq/m ² a
淡水水生态毒性 (Fresh water Aquatic ecotoxicity, FAEFP)	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq/m ² a
海洋水生态毒性 (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq/m ² a
陆地生态毒性 (Terrestrial ecotoxicity, TEAP)	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq/m ² a
光化学氧化剂 (Photochemical oxidation, POCP)	kg C ₂ H ₄ eq	kg C ₂ H ₄ eq/m ² a
酸化 (Acidification, AP)	kg SO ₂ eq	kg SO ₂ eq/m ² a
富营养化 (Eutrophication, EP)	kg PO ₄ ²⁻ eq	kg PO ₄ ²⁻ eq/m ² a

4.2.2 特征化与标准化

特征化是指根据环境影响类别对清单分析的结果进行统一的单位换算，目的是将 LCA 指标换算汇总成更加综合性的评价指标，具体表现为将相关的因子以某一代表物进行表示，从而方便环境影响的量化与更全面的分析。比如，富营养化值就是将 NO₃、NO₂ 及 NO 等引起水质污染的营养盐以 NO₃ 当量为标准进行归类。此外，特征化因子受到当地环境背景及环境目标的影响，因此本地化特点需重点考虑。因此，特征化结果即对同种环境影响类型中的清单结果进行统一单位换算，并对换算结果进行合并，计算过程见公式 (4-2)。

$$C_i = \sum D_i \times mi \quad (4-2)$$

D_i 为第 i 种物质排放量；

mi 为潜在环境影响的当量因子。

对于许多 Mid-point 类型的特征化因子来说，是基于物质的基本特性所得出，而与环境的背景条件无关，且较简单、通用性较强，并且可以重复计算，比如，CML 方法中的 NO₂ 基于酸性气体与营养盐理论可同时被记入酸化与富营养化的环境影响中。这些因子原则上不需要本地化，适用于任何国家与地区

标准化即对不同的环境影响类型特征化结果进行换算，便于比较各种环境影响类型的重要性，具体计算过程如公式（4-3）。

$$N_i = C_i / B_i \quad (4-3)$$

B_i 为标准化基准值。

4.2.3 加权

将不同类型的环境影响指标进行换算，转化并尽可能的合并成一个指标，方便解读，这个过程的实质就是对贡献值进行加权。在不同的方法、环境、乃至地区规定中优先度的排序是不同的，因为主观因素的影响较大，目前还没有统一的规定。

4.2.4 影响计算

（1）各类环境影响的计算

对于各类环境影响的计算主要分为两部分，一类是由各种污染物排放所造成的环境影响，如酸化潜势（AP）、潜在性富营养化（EP）、全球变暖潜势（GWP）、臭氧破坏潜势（ODP）等。其计算需要考虑原材料、资源消耗过程以及污染物排放过程消耗或排放的总量乘以相应环境因子：

$$EI = \sum_{i=1}^n Q_i \times EI_{\text{factor}_i} \quad (4-4)$$

其中 EI 表示某种环境影响类型的指标， Q_i 表示导致该环境影响类别的第 i 种物质排放量， EI_{factor_i} 表示排放物所导致的相应环境影响因子。

另一类是由于常见能源消耗对环境造成的影响，如初级能源需求（PED）、不可再生能源（non-renewable energy）、再生能源（renewable energy）等。其计算是将各个阶段所消耗的同类能源进行汇总：

$$EI = \sum_i^m \sum_j^n EORC_{ij} \quad (4-5)$$

(2) 全生命周期环境影响汇总

建筑全生命周期的环境影响是指将阶段的某种环境影响指标结果进行汇总, 本文的建筑全生命周期包括原材料获取阶段、建设阶段、运营维护阶段及废弃回收阶段。值得注意的是, 相比其他阶段, 废弃回收阶段中会涉及到某些建筑原材料的回收再利用, 这个原材料再生的过程会抵消掉一部分环境影响, 其计算方法为:

$$EI_{all} = EI_{mater} + EI_{const} + EI_{opear} + EI_{dis} - EI_{recyc} \quad (4-6)$$

其中 EI_{mater} 表示原材料获取阶段所产生的环境影响, EI_{const} 表示施工建设阶段所产生的环境影响, EI_{opear} 表示运营维护阶段所产生的环境影响, EI_{dis} 表示废弃处置阶段所产生的环境影响, EI_{recyc} 表示回收再利用过程所抵扣的相应环境影响指标值。

生命周期环境影响评价体系包括影响分类、特征化及标准化计算、加权及影响计算等部分, 具体环境影响指标量化体系流程如图 4-1。

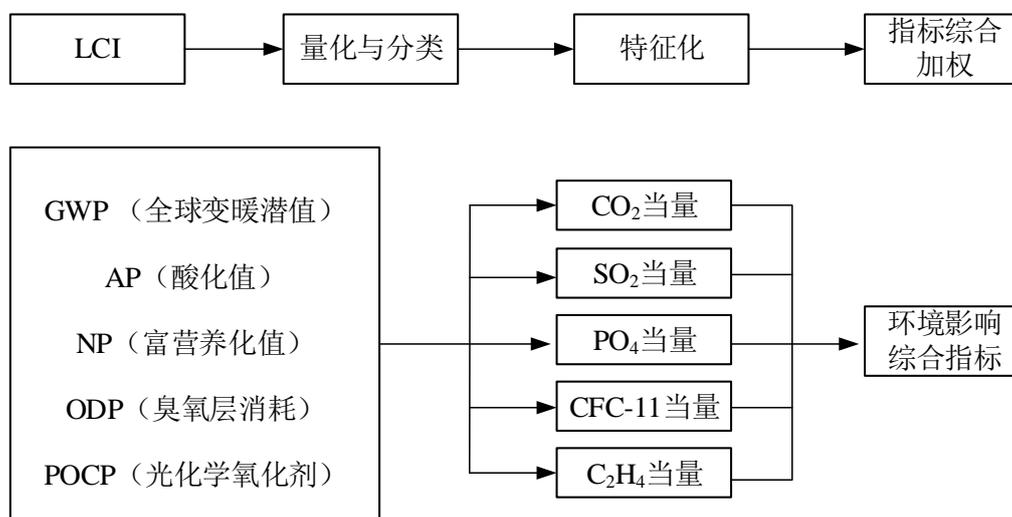


图 4-1 环境影响指标量化体系

Fig4-1 Environmental Impact Index Quantification System

4.3 结果解释

生命周期评价的结果以一个完整的原材料及排放的数量清单呈现, 几十甚至上百的

清单详细的记录并展现了每个材料及排放物的环境影响及贡献量。对于如此详细的清单结果，本文所使用的 SimaPro 生命周期评价工具可以对其进行分类：

- (1) 可以通过字母表、数量、单位甚至是排放走向对 LCI 结果进行分类；
- (2) 可以仅列出 LCI 中的某一部分；
- (3) 可以隐藏贡献率较低的过程或者原材料；
- (4) 过程网络中可以双击一个 LCI 结果得到过程网络或者树的说明。

4.3.1 完整性检查

对全生命周期内的各阶段的数据进行检查，对相关信息进行检查。如果出现重点信息的缺失，可能需要对目的及范围进行重新确定，必要时需要修改相关假设，确保重要信息在计算范围内。

4.3.2 贡献分析

贡献分析有助于对不确定分析的理解，通过贡献分析可以完整展现整个生命周期的各个子流程，而这个过程所涉及的过程成百。本文使用的生命周期评价工具 SimaPro 可以通过流程树以及网络图标的形式来对其进行表现，并清晰的展现出哪些过程或者因素是整个生命周期中的重要角色，并分析这些过程是否具有完整性、代表性以及这些过程中是否存在重要假设。

在流程树中，一个温度计代表了该过程的相对贡献，直观明确的展示了哪些过程是重要角色，对于贡献率仅有百分之零点几的过程我们通过设置标准进行筛去，从而更高效准确的确定贡献率较高的过程。

4.3.3 敏感性分析

在 LCA 评价过程中或结束后进行敏感性分析对整个生命周期评价来说具有重要意义。我们可以通过改变假设再次执行 LCA 计算，通过这个过程可以发现假设对于 LCA 的计算结果影响相当大。本文我们通过对建筑运行阶段的设计参数、服务年限以及原材料获取与施工阶段资源三个方面进行敏感性分析。

第5章 实例分析

本文选取了青岛市某绿色建筑为例来验证所提出的“BIM-LCA”复合框架模型，在本案例研究中建立了办公楼的 BIM 模型，并导出工程量清单，在此数据清单的基础上，将该建筑项目的生命周期进行目的与范围划分，使用 SimaPro 生命周期分析软件建立 LCA 模型，并对环境影响分析进行评价，计算出 LCA 结果。

5.1 实例介绍

本实例建筑位于青岛市黄岛开发区，是一栋学校办公楼，建筑高度为 22.6m，宿舍楼建筑面积约 11000m²，共计七层，钢筋混凝土框架结构。

本文在 4.3.2 节中详细讲述了生命周期评价过程中的各种不确定性，这种不确定性是无法避免的。在原材料采集与建设阶段，制造工艺或者施工工序会存在不同且复杂多变；建筑物的运营周期时间过长，无法保证运行情况是否有意外情况，因此以建筑物的设计年限为标准进行计算；此外，建筑物的废弃拆除阶段，由于是未来的时间节点，处置方式及人的行为都是相当大的不确定性，我们只能结合实际情况并基于相关文献参考在合理范围内进行假设，以得到较合理的模型。

5.2 研究目的及范围确定

5.2.1 研究目的

本文以某绿色建筑单体项目为研究对象，主要针对建筑项目全生命周期的能耗与环境影响的定量评价分析，从而计算出不同的阶段对环境影响的贡献程度表现，找出环境影响最大的阶段或者某个环节，以及利用所得出的结果对减少建筑生命周期各阶段的环境影响进行有效指导。

5.2.2 研究范围

研究范围包括整个建筑项目的原材料获取阶段、建设阶段、运营维护阶段以及废弃回收阶段整个生命周期的资源、能源消耗及环境影响。评价的主要内容根据每个阶段的特点进行资源、能源以及排放量的划分，组成每个阶段的清单内容。功能单位为整栋建筑，使用时间按 50 年计算。

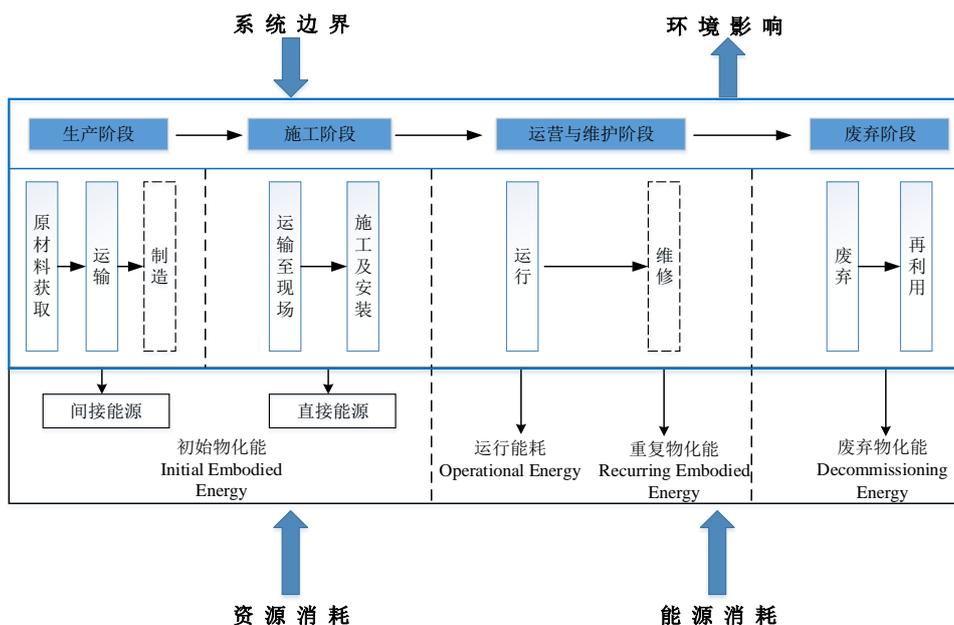


图 5-1 绿色建筑项目 LCA 研究的系统边界

Fig5-1 The system boundary of LCA research of green building project

5.3 基于 BIM 的生命周期模型建立

5.3.1 BIM 模型建模

本文对该建筑项目使用 Autodesk Revit 2019 进行三维建模，主要集中在建筑与结构模型的建立，对于机电、通信、给排水等全专业部分的模型暂不涉及，故不再进行机电模型的建立，图 5-2 为该建筑的 BIM 模型，图 5-3 为所建的建筑能耗仿真模型。

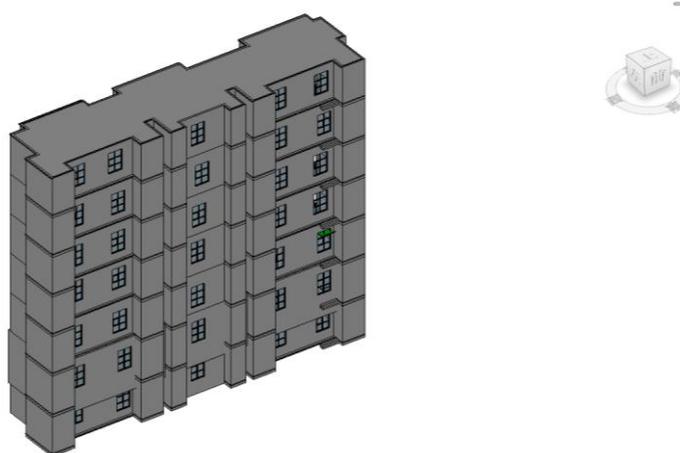


图 5-2 案例建筑 BIM 模型

Fig5-2 BIM model of case building

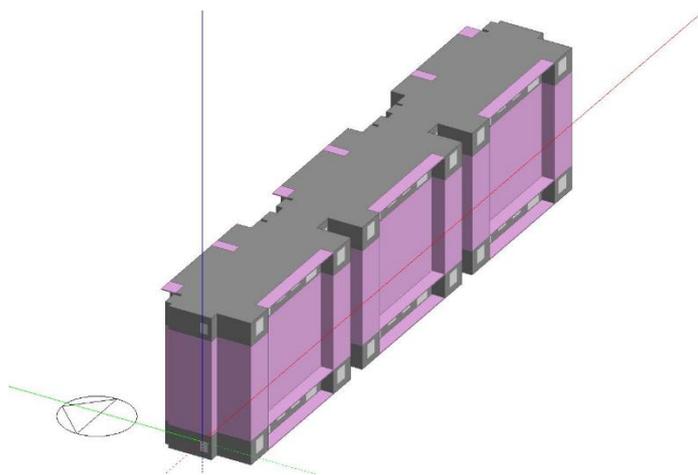


图 5-3 案例建筑能耗仿真模型

Fig5-3 Energy consumption simulation model of the case building

5.3.2 清单与收集

利用所建模型,可以导出 gbXML 格式进行建筑能耗的模拟,也可以通过广联达 GFC 插件实现与造价软件的交互,对工程量、资源、原材料等清单进行提取,由于工程项目的复杂性,其工程量清单的内容是具有详细且繁杂的特点,需要根据研究需要进行筛选。此外,对于建筑模型内未涉及的内容,需要结合现场调查,施工标准,清单数据库、前人的研究成果等内容进行研究。

进行生命周期能耗与环境影响评价所需的数据,主要是来源于工程量清单,并进行工程量计算。目前工程量计算的方法普遍使用的是造价软件进行计算,其中方便、应用广泛,且与 BIM 建模软件交互的有广联达的系列产品。通过广联达 GFC 插件实现 BIM 模型与造价软件的交互,将所建 BIM 模型的数据生产工程量清单并导出,如图 5-4。

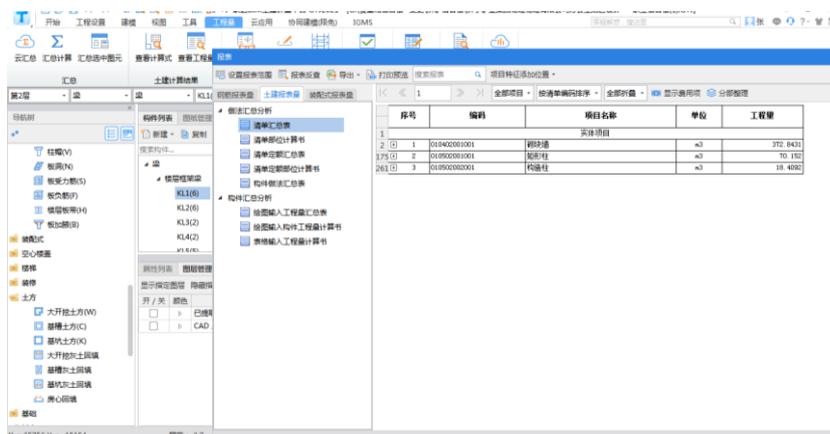


图 5-4 导出工程量清单

Fig5-4 Export bill of quantities

5.4 全生命周期能耗清单分析

5.4.1 原材料获取阶段

根据 5.2.2 节确定的研究范围，原材料获取阶段主要包括建筑材料、资源的消耗以及能源的消耗。

(1) 建筑材料及资源消耗清单

原材料获取阶段的资源消耗主要考虑的是钢筋、混凝土、水泥、砂子等占比较大的资源，以上数据中资源消耗来源于 BIM 模型输出的工程量清单，具体清单如下表所示。

表 5-1 原材料获取阶段的建筑材料及资源消耗清单

Table5-1 List of building materials and resource consumption at the raw material acquisition stage

序号	名称	单位	数量
1	钢筋	t	928.8
2	水泥抹灰砂浆	t	1960.72
3	混凝土	m ³	8630.7
4	焊接钢管	t	32.15
5	PPR 给水管	kg	1856
6	砌块墙	t	1573
7	水泥	t	102.63
8	砂子	t	3.63
9	铝方管	t	6

(2) 能源消耗清单

能源消耗是以原材料获取阶段的电力及原材料运输到施工现场过程中所消耗的资源。能源消耗根据实际运输距离、相关设计材料以及标准图集中的指标换算进行计算。

表 5-2 原材料获取阶段的能源消耗清单

Table5-2 List of energy consumption during the raw material acquisition stage

序号	名称	单位	数量
1	电力	kW h	531.92
2	运输	t km	24841.44

在 SimaPro 中建立原材料获取阶段的模型，将上述资源消耗清单及能源消耗清单输入并选用合适的数据库。

5.4.2 施工阶段

(1) 建筑材料及资源消耗清单

施工过程相比于原材料获取阶段，主要考虑的是施工现场安装、二次结构以及措施

费用中包含的资源消耗，如脚手架、模板、混凝土等资源。

表 5-3 施工阶段的建筑材料及资源消耗清单

Table5-3 List of building materials and resource consumption during the construction phase

序号	名称	单位	数量
1	模板	m ³	237.92904
2	脚手架	t	12
3	木头	m ³	1.52
4	混凝土	m ³	15923.74

(2) 能源消耗清单

整个施工过程中，主要考虑施工器械的油耗，包括汽油、机油、液化天然气等能源；此外，包括水、电以及运输的能耗，其中，直接运输考虑的是上述材料运输到施工现场，主要采取公路运输的方式。

表 5-4 施工阶段的能源消耗清单

Table5-4 List of energy consumption during construction

序号	名称	单位	数量
1	汽油	kg	855.17
2	机油	kg	147.50161
3	氧气	m ³	583.23
4	液化石油气	kg	2478.69
5	水	m ³	4011.39
6	电	kW h	3147.62
7	运输	t km	284

在 SimaPro 中建立施工阶段的模型，将上述资源消耗清单及能源消耗清单输入并选用合适的数据库。

5.4.3 运行阶段

通过 BIM 能耗模拟软件对其进行参数设置后，并参考标准《民用建筑热工设计规范》(GB50176-93)；《绿色建筑评价标准》GB/T50378-2014；《绿色建筑设计自评估报告（居住建筑）》，得到运行阶段的能源消耗。

运行阶段周期较长，无法预计维护所需的材料，故不考虑此阶段的原材料资源消耗。

(1) 参照建筑外围护

参照建筑外围护按照《山东省居住建筑热环境和节能设计标准》(DB375026-2014)（节能 65%）的最低限制取定，和设计建筑的外围护指标性能对比如下表所示。

表 5-5 围护结构热工参数对比表

Table5-5 Comparison table of thermal parameters of envelope structure

构件名称	设计热工参数	参照建筑热工参数
屋面	$K=0.46 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$K=0.6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
外墙	$K=0.51 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (加权平均)	$K=1.0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
分户墙	$K=0.79 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$K=2.0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
普通楼板	$K=1.23 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$K=2.0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
外窗	东向 $K=1.9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $SC=0.4$	$K=3.0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $SC=0.4$
	南向 $K=1.9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $SC=0.67$	$K=2.8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $SC=0.3$
	西向 $K=1.9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $SC=1.0$	$K=3.0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $SC=0.4$
	北向 $K=1.9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $SC=0.63$	$K=3.0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $SC=0.5$

(2) 暖通系统

根据《绿色建筑评级标准 GB503708-2014》在进行综合能耗判定时，设计建筑与参照建筑采用同一种系统。因此在对比模型中均采用本项目的“天棚辐射+置换新风+地源热泵”的系统。系统构架如图 5-5 所示：

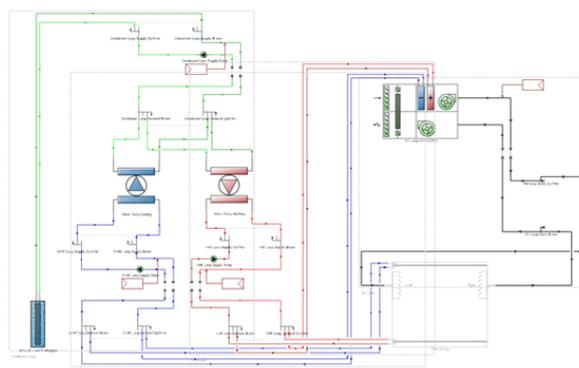


图 5-5 暖通系统图

Fig5-5 Diagram of HVAC system

设计建筑的制冷/采暖及输配的性能参数参照本项目设备性能列表。参照建筑制冷系统性能参数参照《公共建筑节能设计标准》GB50189；采暖系统性能参数参照《山东省居住建筑热环境和节能设计标准》(DB375026-2014)；输配系统性能参数在计算对比时保持一致。系统参数对比性能表见表 5-6 和表 5-7：

表 5-6 制冷系统性能参数对比表

Table5-6 Comparison table of Refrigeration system performance parameter

设备名称	数量	设计建筑			参照建筑 COP
		制冷量 (kW)	功率 (kW)	COP	
天棚热泵机组	2	1376.6	230	5.99	4.6
新风热泵机组	2	1069.5	179.7	5.95	4.3
新风用制冷机组	2	1238.5	239.7	5.17	4.6
地源循环泵	4	—	42	—	—
过渡季节地源循环泵	1	—	15	—	—
天棚循环泵	4	—	45	—	—
新风循环泵	3	—	40	—	—
冷却循环泵	3	—	33	—	—
系统综合 COP				3.92	3.32

表 5-7 采暖系统性能参数对比表

Table5-7 Comparison table of Heating system performance parameter

设备名称	数量	设计建筑			参照建筑 COP
		制热量 (kW)	功率 (kW)	COP	
天棚热泵机组	2	1377.7	299.1	4.61	2.1
新风热泵机组	2	1066	228.9	4.66	2.1
地源循环泵	4	—	42	—	—
过渡季节地源循环泵	1	—	15	—	—
天棚循环泵	4	—	45	—	—
新风循环泵	3	—	40	—	—
冷却循环泵	3	—	33	—	—
系统综合 COP				2.08	1.68

(3) 照明设备

根据本项目《照明功率密度计算书》，本项目仅公共区域考虑照明节能，与设计标准值的差异如表 5-8 所示：

表 5-8 公共区域照明功率密度

Fig5-8 Lighting power density of public area

房间名称	照明功率密度值 (W/m ²)			照度值 (lx)	
	设计值	现行值	目标值	设计值	标准值
门厅	3.4	4	3.5	94	100
电梯厅	2-3	3.5	3	75	75
楼梯间	2	2.5	2	50	50
走道、楼梯间	1.2	2.5	2	46	50
机动车库	1.8	2	1.8	29	30
风机房	2.43	4	3.5	106	100

由于设计建筑和参照建筑仅公共部分照明设计有差异，且差异较小，因此在计算分析时设计建筑与公共建筑的照明功率密度相差不大，设计建筑的照明功率密度值为 $7\text{W}/\text{m}^2$ ，参照建筑的密度值取 $8\text{W}/\text{m}^2$ 。

(4) 室内设计参数

设计建筑和参照建筑室内设计参数与有关指标计算根据“暖通设计说明”设置，具体参数参见表 5-9。

表 5-9 室内设计参数

Table5-9 Interior design parameters

房间名称	室内温度	
	夏季	冬季
起居室	26 °C	18 °C
卧室	26 °C	18 °C
活动室	26 °C	18 °C
卫生间	26 °C	16 °C

输出的建筑能耗模拟结果如表 5-10 所示：

表 5-10 运行阶段的建筑能耗模拟结果

Table5-10 Simulation results of building energy consumption during operation

耗能类型	建筑单位能耗 (kWh)	使用年限 (年)	总能耗 (kWh)
制冷能耗	19976.54	50	998827
采暖能耗	24689.12	50	1234456
输配系统能耗	1362.92	50	68146
照明能耗	40099.64	50	2004982
总计	86128.22	50	4306411

运行阶段的能源消耗主要包括水、电的消耗。

表 5-11 运行阶段的能源消耗清单

Table5-11 List of energy consumption during operation

序号	名称	单位	数量
1	电	kW h	4306411
2	水	m ³	365000000

根据《室外给水设计规范》(GBJ13—86)，规定了城镇居民生活用水定额，安装大便器、洗涤盆、淋浴设备以及热水供应的场景，每人每日生活用水定额（最高日）约为 170L-250L，本文取 200L，人员密度取 100 人，50 年水资源的消耗约为 365000000m^3 。

在 SimaPro 中建立运行阶段的模型，将上述资源消耗清单及能源消耗清单输入并选用合适的数据库。

5.4.4 废弃与回收阶段

建筑项目报废阶段需要考虑对其的废弃、拆除以及可回收处理。相比于其他阶段的资源与能源消耗，此阶段还包括对前期投入的一个回收，即可回收再利用的材料。

(1) 资源消耗

对废弃部分的运输，如混凝土填埋等运输能耗，以公路运输为主，并按照标准及规范中的数据进行计算；而前期原材料等资源的投入，还需考虑回收再利用。

设计阶段必须考虑的主要建筑材料包括钢材、铝材、水泥、建筑玻璃、混凝土砌块、木材制品等。但某些材料存在可回收性，如木材、铝材、钢材等材料，因此在资源消耗时必须考虑其可回收性。但是木材和玻璃的回收难以再利用到新型建筑建设中，而是用于道路建设或者其他装饰品中，无法构成建筑项目的资源循环，因此不考虑木头和玻璃的回收利用。

表 5-12 废弃与回收阶段的建筑材料及资源消耗清单

Table5-12 List of building materials and resource consumption in the phase of abandonment and recycling

序号	名称	单位	数量
1	钢筋	t	-464.4
2	运输	t km	19873.15
3	铝	t	-4.8t
5	焊接钢管	t	-28.94

(2) 能源消耗

表 5-13 废弃与回收阶段的能源消耗清单

Table5-13 List of energy consumption during disposal and recycling

序号	名称	单位	数量
1	电	kw h	2832.86
2	水	m ³	3610.25

在 SimaPro 中建立运行阶段的模型，将上述资源消耗清单及能源消耗清单输入并选用合适的数据库。

5.5 环境影响评价与结果解释

5.5.1 环境影响评价

(1) 建立 LCA 模型

根据确定的研究范围与目的，在清单分析的基础上，采用 SimaPro 9.0 对整个建筑的全生命周期进行建模，将上述阶段原材料获取阶段、施工阶段、运行阶段以及废弃与回收阶段进行整合，构成整个全生命周期模型（如下图所示）。采用 CML-IA baseline 影响评价方法，计算整个生命周期的环境影响结果。

使用 SimaPro 进行建模时，数据库清单主要包括：

表 5-14 数据库及背景数据过程

Table5-14 Database and background data process

序号	项目	数据库	SimaPro9.0 建模时使用的背景数据过程
1	铝合金 (Aluminium alloy)	Ecoinvent 3.0	Aluminium alloy, AlMg3 {GLO} market for APOS, S
2	铝 (Aluminium)	Ecoinvent 3.0	Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, S
3	水泥砂浆 (Cement mortar)	Ecoinvent 3.0	Cement mortar {RoW} market for cement mortar APOS, S
4	波特兰水泥 (Cement, Portland)	Ecoinvent 3.0	Cement, Portland {RoW} market for APOS, S
5	钢管 (Chromium steel pipe)	Ecoinvent 3.0	Chromium steel pipe {GLO} market for APOS, S
6	混凝土 (Concrete)	Ecoinvent 3.0	Concrete, 30-32MPa {GLO} market for APOS, S
7	柴油 (Diesel)	Ecoinvent 3.0	Diesel {RoW} market for APOS, S
8	电 (Electricity)	Ecoinvent 3.0	Electricity, low voltage {GLO} market group for APOS, S
9	轻质粘土砖 (Light clay brick)	Ecoinvent 3.0	Light clay brick {GLO} market for APOS, S
10	液化石油气 (Liquefied petroleum gas)	Ecoinvent 3.0	Liquefied petroleum gas {RoW} market for APOS, S
11	氧气 (Oxygen)	Ecoinvent 3.0	Oxygen, liquid {RER} market for APOS, S
12	胶合板 (Plywood)	Ecoinvent 3.0	Plywood, for outdoor use {RER} market for APOS, S
13	聚丙烯管 (Polypropylene)	Ecoinvent 3.0	Polypropylene, granulate {GLO} market for APOS, S

表 5-14 数据库及背景数据过程（续）

序号	项目	数据库	SimaPro9.0 建模时使用的背景数据过程
14	钢筋 (Reinforcing steel)	Ecoinvent 3.0	Reinforcing steel {GLO} market for APOS, S
15	砂 (Sand)	Ecoinvent 3.0	Sand {GLO} market for APOS, S
16	锯木 (Sawnwood)	Ecoinvent 3.0	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER} market for APOS, S
17	钢 (Steel)	Ecoinvent 3.0	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S
18	运输 (Transport)	Ecoinvent 3.0	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro3 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 APOS, S
19	水 (Water)	Ecoinvent 3.0	Water, ultrapure {GLO} market for APOS, S

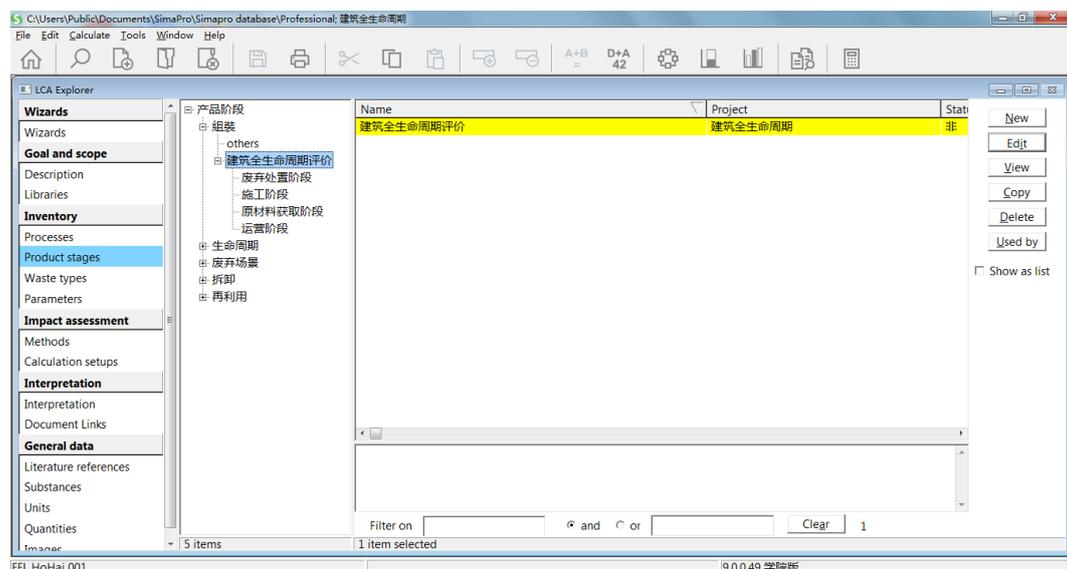


图 5-6 案例建筑全生命周期模型

Fig5-6 The full life cycle model of the case building

5.5.2 完整性检查及结果表示

通过 Simapro9.0 软件的计算, 得到该绿色建筑在整个全生命周期所产生的环境负荷与环境效益, 以及生命周期范围内产生对环境的影响。通过该结果, 可以对设计方案进行改进, 从而减少对环境的影响; 此外, 可以对原材料获取阶段、施工阶段、运行阶段以及废弃与回收阶段进行对比研究, 包括不同的阶段产生的环境影响大小对比, 以及同种影响不同阶段的占比等研究。

经过完整性检查及系统范围设置后，得到该建筑项目在全生命周期影响评价特征化与标准化的结果，生命周期四个阶段评价特征化结果如表 5-15 和图 5-7 所示。

由图 5-7 所知，对于运行阶段来说，有 10 个影响类型的特征化结果均高于原材料获取、施工以及废弃与回收阶段，除了陆地生态毒性（TEAP）影响指标远低于原材料获取与施工阶段，占比低于原材料获取阶段 27%，低于施工阶段 50%。

对于原材料获取阶段而言，除了陆地生态毒性（TEAP）影响指标低于施工阶段 15%，在其余 10 个影响类型中，原材料获取阶段的影响占比均高于施工阶段。包括温室气体效应（GWP100a）、臭氧层消耗（ODP），二者分别占比 18.58%、18.49%；8.97%、8.80%。

对于废弃与回收阶段，由表与图中可以得到每种环境影响类型其占比均是最小，此外，由于该阶段会对之前材料的投入有回收再利用的过程，会抵消掉环境的影响，尤其对人类毒性（HDP）的抵消比例最为突出，占比-38.38%。

表 5-15 建筑生命周期评价特征化结果

Table5-15 Characterization results of building life cycle assessment

影响类型	单位	原材料获取阶段	施工阶段	运行阶段	废弃与回收阶段
非生物资源消耗 (Abiotic depletion, ADP)	kg Sb eq	16.95	8.34	41.14	- 10.7606
非生物资源消耗（化石燃料） (Abiotic depletion-fossil fuels, ADP-ff)	MJ	39514352.19	32645817.93	263868042.26	- 1.1E+07
温室气体效应 (Global warming, GWP100a)	kg CO ₂ eq	5453139.46	5426611.43	19728984.69	- 1259919
臭氧层消耗 (Ozone layer depletion, ODP)	kg CFC-11 eq	0.30	0.29	2.81	- 0.06581
人类毒性 (Human toxicity, HTP)	kg 1,4-DB eq	3763850.00	1909623.95	7876211.93	- 3758117
淡水水生态毒性 (Fresh water Aquatic ecotoxicity, FAEFP)	kg 1,4-DB eq	2283943.15	1568545.60	4646985.68	- 1165837

表 5-15 建筑生命周期评价特征化结果 (续)

影响类型	单位	原材料获取阶段	施工阶段	运行阶段	废弃与回收阶段
海洋水生态毒性 (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)	kg 1,4-DB eq	4122733471 .26	2087087332 .36	13598991757 .54	-2E+09
陆地生态毒性 (Terrestrial ecotoxicity, TEAP)	kg 1,4-DB eq	199321.20	339698.06	45761.70	-10459.3
光化学氧化剂 (Photochemical oxidation, POCP)	kg C ₂ H ₄ eq	1463.03	677.57	3765.64	-593.55
酸化 (Acidification, AP)	kg SO ₂ eq	16346.16	13853.65	99048.92	-4897.05
富营养化 (Eutrophication, EP)	kg PO ₄ ²⁻ eq	7233.63	4850.07	65573.50	-2453.92

表 5-16 各阶段不同影响类型占比结果

Table5-16 Proportion results of different impact types at each stage

影响类型	单位	Total	原材料获取阶段	施工阶段	运营阶段	废弃与回收阶段
非生物资源消耗 (Abiotic depletion, ADP)	%	100.00	30.45	14.98	73.90	-19.33
非生物资源消耗 (化石燃料) (Abiotic depletion-fossil fuels, ADP-ff)	%	100.00	12.15	10.04	81.13	-3.32
温室气体效应 (Global warming, GWP100a)	%	100.00	18.58	18.49	67.22	-4.29
臭氧层消耗 (Ozone layer depletion, ODP)	%	100.00	8.97	8.80	84.20	-1.97
人类毒性 (Human toxicity, HTP)	%	100.00	38.44	19.50	80.44	-38.38
淡水水生态毒性 (Fresh water Aquatic ecotoxicity, FAEFP)	%	100.00	31.14	21.39	63.37	-15.90
海洋水生态毒性 (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)	%	100.00	23.13	11.71	76.30	-11.14
陆地生态毒性 (Terrestrial ecotoxicity, TEAP)	%	100.00	34.71	59.15	7.97	-1.82

表 5-16 各阶段不同影响类型占比结果（续）

影响类型	单位	Total	原材料获取阶段	施工阶段	运营阶段	废弃与回收阶段
光化学氧化剂 (Photochemical oxidation, POCP)	%	100.00	27.54	12.75	70.88	-11.17
酸化 (Acidification, AP)	%	100.00	13.15	11.14	79.65	-3.94
富营养化 (Eutrophication, EP)	%	100.00	9.62	6.45	87.19	-3.26

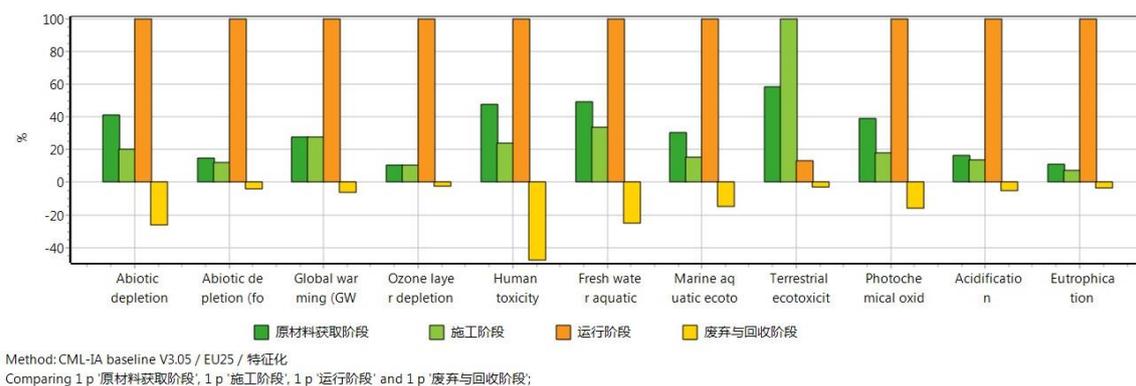


图 5-7 建筑生命周期评价的特征化结果图

Fig. 5-7. Characterized result chart of building life cycle assessment

另外，对原材料获取阶段、施工阶段、运行阶段以及废弃与回收阶段的特征化进行标准化处理，归一化结果呈现出不同阶段对每一类环境影响的贡献程度，通过此步骤，还可以直观的得到 11 种环境类型的影响程度排序。该建筑项目生命周期评价标准化结果如表 5-17 和图 5-8 所示。

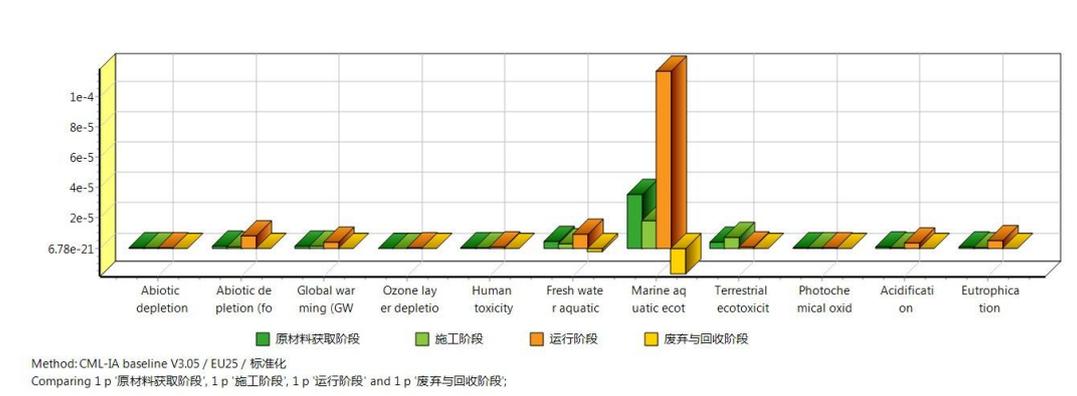


图 5-8 建筑生命周期评价的标准化结果图

Fig5-8 Standardized result chart of building life cycle assessment

表 5-17 建筑生命周期评价标准化结果

Table 5-17 Standardized results of building life cycle assessment

影响类型	原材料获取阶段	施工阶段	运行阶段	废弃与回收阶段
非生物资源消耗 (Abiotic depletion, ADP)	2.00026E-07	9.83799E-08	4.85399E-07	-1.26975E-07
非生物资源消耗(化石燃料) (Abiotic depletion-fossil fuels, ADP-ff)	1.25656E-06	1.03814E-06	8.391E-06	-3.43423E-07
温室气体效应 (Global warming, GWP100a)	1.08517E-06	1.0799E-06	3.92607E-06	-2.50724E-07
臭氧层消耗 (Ozone layer depletion, ODP)	3.35121E-09	3.2848E-09	3.14437E-08	-7.37057E-10
人类毒性 (Human toxicity, HTP)	4.85537E-07	2.46341E-07	1.01603E-06	-4.84797E-07
淡水水生生态毒性 (Fresh water Aquatic ecotoxicity, FAEFP)	4.40801E-06	3.02729E-06	8.96868E-06	-2.25007E-06
海洋水生生态毒性 (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)	3.53318E-05	1.78863E-05	0.000116543	-1.70095E-05
陆地生态毒性 (Terrestrial ecotoxicity, TEAP)	4.10602E-06	6.99778E-06	9.42691E-07	-2.15461E-07
光化学氧化剂 (Photochemical oxidation, POCP)	1.72637E-07	7.99527E-08	4.44345E-07	-7.00389E-08
酸化(Acidification, AP)	5.80289E-07	4.91805E-07	3.51624E-06	-1.73845E-07
富营养化(Eutrophication, EP)	5.48309E-07	3.67635E-07	4.97047E-06	-1.86007E-07

从表 5-17 与图 5-8 中可以得到, 四个阶段对海洋水生生态毒性(MAETP)的影响远高于其余几种影响类型。表明在建筑项目中, MAETP 是其主要的环境影响因子, 而主要贡献者是材料加工过程中能源消耗带来的排放物相关, 即电力和蒸汽生产中排放到空气中的氟化氢、硒等, 和能源消耗关联度大。

对于原材料获取阶段, 11 种影响贡献大小排序为: 臭氧层消耗<光化学氧化剂<非生物资源消耗<人类毒性<富营养化<酸化<温室气体效应<非生物资源消耗(化石燃料)<陆地生态毒性<淡水水生生态毒性<海洋水生生态毒性。

对于施工阶段, 其影响类型贡献大小排序为: 臭氧层消耗<光化学氧化剂<非生物资源消耗<人类毒性<富营养化<酸化<非生物资源消耗(化石燃料)<温室气体效应<淡

水生生态毒性<陆地生态毒性<海洋水生态毒性。

对于运行阶段，其影响类型贡献大小排序为：臭氧层消耗<光化学氧化剂<非生物资源消耗<陆地生态毒性<人类毒性<酸化<温室气体效应<富营养化<非生物资源消耗（化石燃料）<淡水生态毒性<海洋水生态毒性。

而对于废弃与回收阶段，由于回收利用的作用，使得与拆除废弃所产生的环境影响进行抵消，并大于拆除所产生的环境影响，因此，此阶段是对环境优化的贡献大小排序为：臭氧层消耗<光化学氧化剂<非生物资源消耗<酸化<富营养化<陆地生态毒性<温室气体效应<非生物资源消耗（化石燃料）<人类毒性<淡水生态毒性<海洋水生态毒性。

因此，生命周期中的任一阶段，海洋水生态毒性所受的影响都是最大的，其次是淡水生态毒性，臭氧层消耗所受的影响是最小的，其次是光化学氧化剂。

5.5.3 贡献分析

对该建筑项目的整个生命周期阶段进行贡献分析，目的是识别出该项目所产生环境影响的关键阶段及关键因子，即通过 SimaPro9.0 对所建模型进行特征化、标准化计算以及过程树分析来识别产生环境影响的主要因素及阶段。

(1) 对全生命周期整体的贡献分析

对全生命周期原材料获取阶段、施工阶段、运行阶段以及废弃回收阶段进行特征化、标准化计算，得到特征化结果图 5-9 与标准化结果图 5-10。由图可知，整个生命周期对海洋水生态毒性的影响是最大的，远高于其他几种环境类型。因此，对海洋生态毒性进行全生命周期的特征化网状图分析，得到图 5-11：由图可知，网状图的连接线越粗代表占比越多，红绿颜色之分代表对环境产生的是有利或不利影响，运营阶段对其的环境影响是最大的，产生的环境负荷约为 76.3%，其次是原材料获取阶段，约占 23.1%，施工阶段占 11.7%，最小的为废弃与回收阶段，环境负荷约占-11.1%左右。

对于环境负荷占比最大的运行阶段，对于富营养化(87.1%)以及臭氧层消耗(84.2%)的影响程度（占比大小）是最高的，主要是因为运行阶段，水资源的消耗占比较大，贡献了 45.5%的环境负荷。

环境负荷占比位居第二的是原材料获取阶段，由图可知，人类毒性（38.44%）与陆地生态毒性（34.71%）的影响程度分别占比是第一和第二，主要是由于钢筋的制作在原

材料获取阶段产生影响，并且贡献了 8.08%的环境负荷。

其次是施工阶段，由图可知，对陆地生态毒性（59.15%）的影响远高于其余 10 种环境影响类型，这是由于在施工阶段混凝土制作与浇筑产生的环境负荷过多，贡献了约为 15.1%。

最后是废弃与回收阶段，相比之前三个阶段，其最大的不同是产生有利的环境效益，是因为该阶段对前几阶段投入的原材料存在回收再利用，尤其是对人类毒性的影响最大，约占 38.38%。

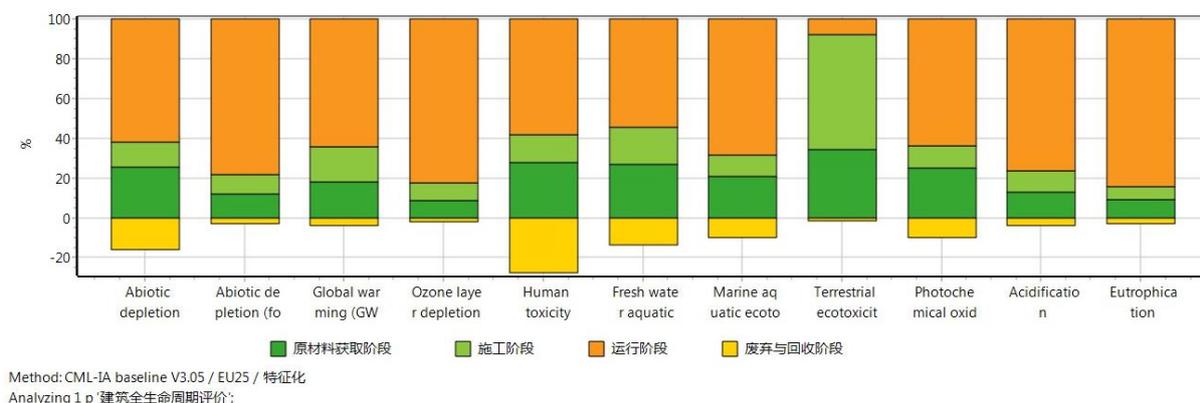


图 5-9 建筑项目不同阶段特征化比较结果

Fig5-9 Characterization comparison results at different stages of construction project

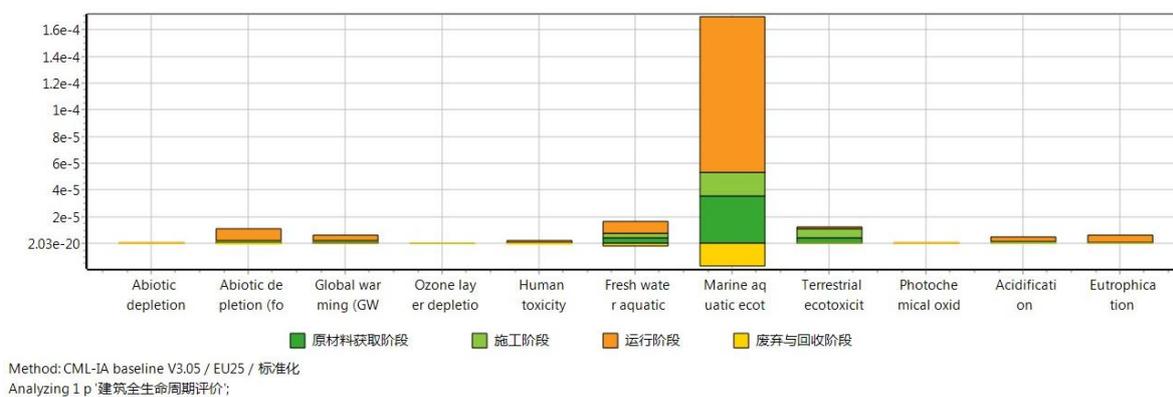


图 5-10 建筑项目不同阶段标准化比较结果

Fig5-10 Standardized comparison results at different stages of construction projects

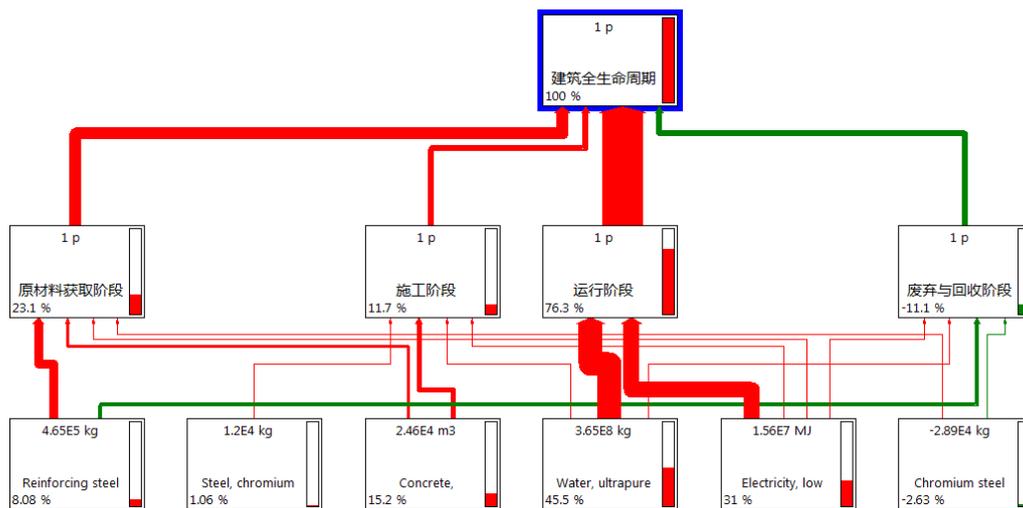


图 5-11 建筑项目不同阶段 MAETP 值特征化结果网状图

Fig5-11 Network diagram of MAETP value characterization results in different stages of construction projects

(2) 对各个阶段的贡献分析

1) 运行阶段

对该建筑项目的运行阶段进行环境影响的特征化与标准化计算，得到特征化结果图 5-12，标准化结果图 5-13。由图可知，整个运行阶段对海洋水生态毒性产生的影响是最大的，远高于其余 10 个影响类型。

因此，对运行阶段海洋水生态毒性进行特征化网络图分析，得到特征化网络图 5-14，根据特征化结果，得到整个运行阶段阶段对该影响类型的环境负荷约 59.6%来自于水资源的消耗，40.4%来自于维持宿舍楼正常生活的电力消耗。因此，尽管电力资源与水资源的差距不是很悬殊，但是水资源的消耗的贡献度要更多一些。

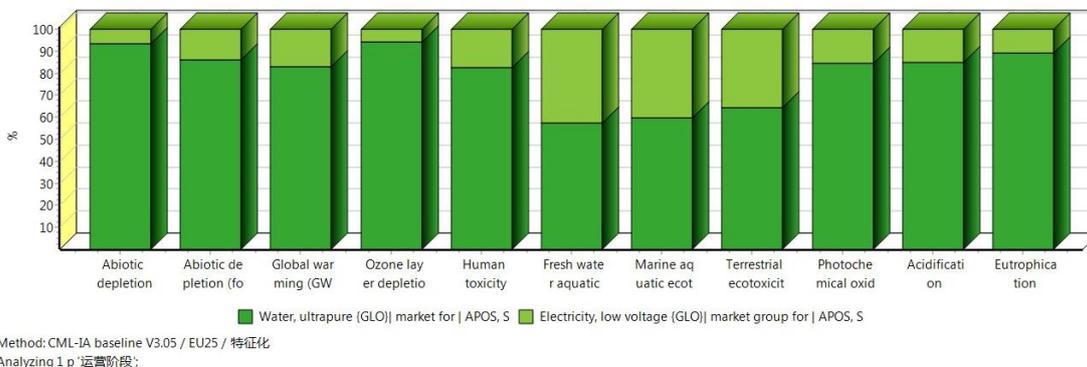


图 5-12 建筑项目运行阶段特征化结果

Fig5-12 Characterization results of construction project operation phase

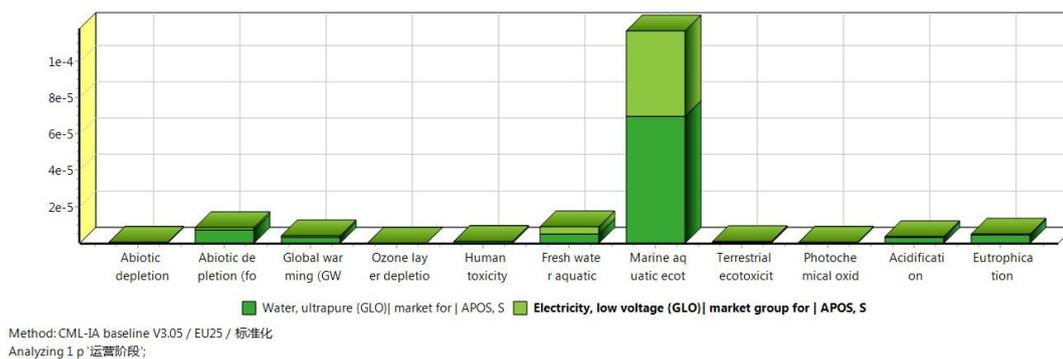


图 5-13 建筑项目运行阶段标准化结果

Fig5-13 Standardized results of construction project operation phase

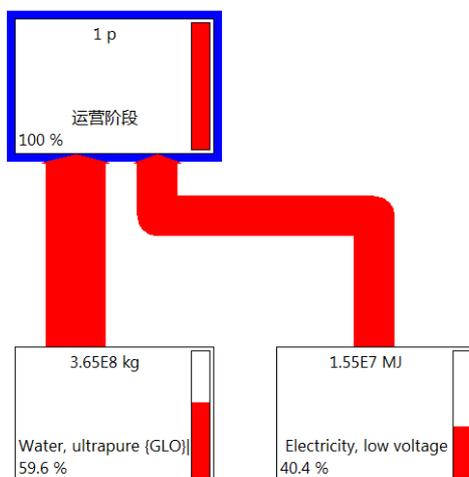


图 5-14 建筑项目运行阶段 MATEP 值特征化结果网状图

Fig5-14 Network graph of MATEP value characterization results during construction project operation stage

2) 原材料获取阶段

原材料获取阶段作为对整个生命周期环境影响贡献次多的阶段，资源消耗清单相比其他阶段较复杂，对该阶段进行贡献分析具有重要意义。

对该建筑项目的原材料获取阶段进行环境影响的特征化与标准化计算，得到特征化结果图 5-15，标准化结果图 5-16。由图可知，整个阶段对海洋水生态毒性的影响是最大的，其次是淡水水生态毒性与陆地生态毒性，其余 8 种类型所受影响较小。因此，对原材料获取阶段海洋水生态毒性进行特征化网络图分析，得到特征化网络图 5-17，此外，将截断系数设置为 0.2%，对占比小于 0.2% 的原材料进行剔除，根据特征化结果，得到钢筋的影响最大，占比 69.8%，其次是混凝土，占比 23.1%，铝占比 3.04%，空心砖占比

3.12%，其余 8 种原材料的占比不足 1%。

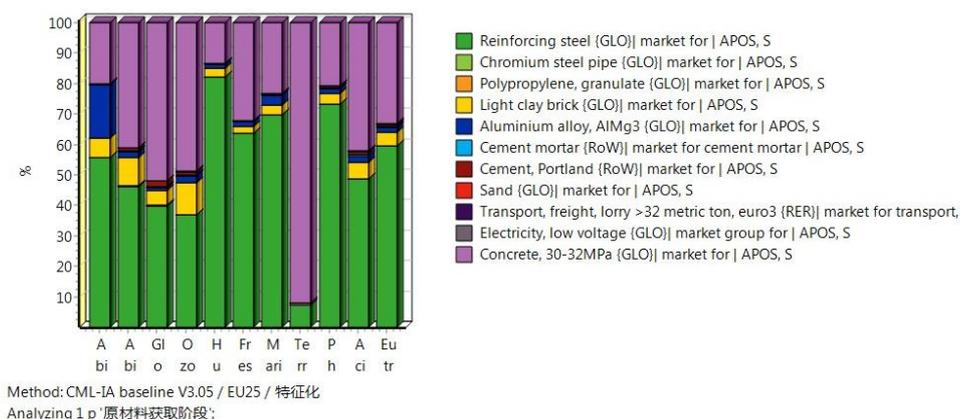


图 5-15 建筑项目原材料获取阶段特征化结果

Fig5-15 Characterization results of construction project raw material acquisition stage

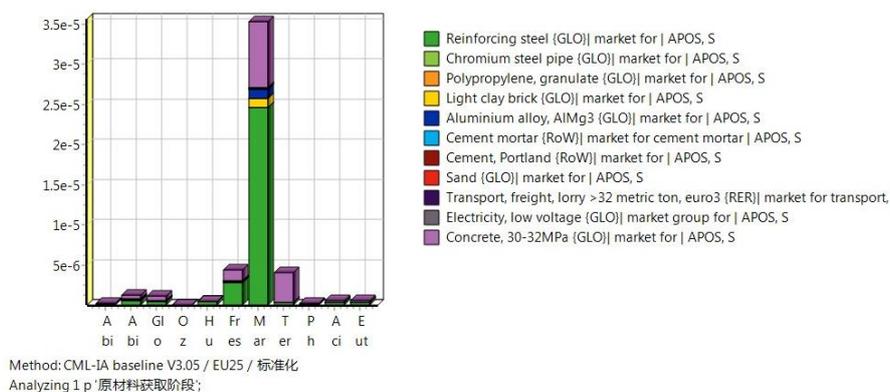


图 5-16 建筑项目原材料获取阶段标准化结果

Fig5-16 Standardized results in the raw material acquisition phase of construction projects

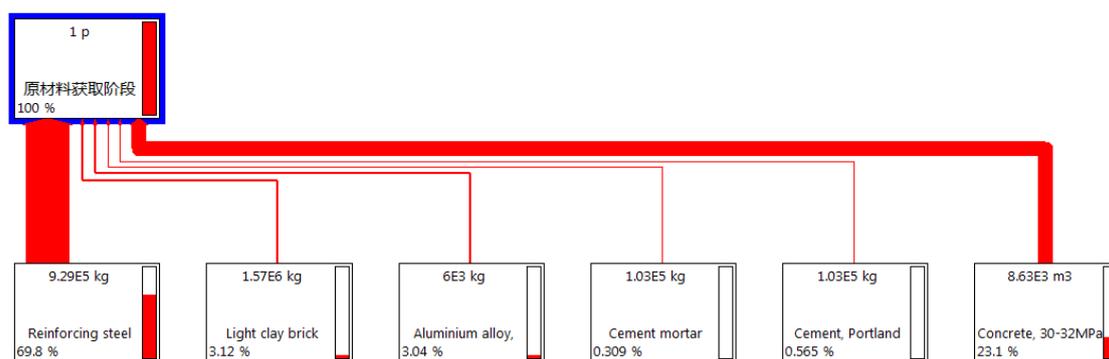


图 5-17 建筑项目原材料获取阶段 MATEP 值特征化结果网状图

Fig5-17 Network diagram of MATEP value characterization results during the raw material acquisition stage of construction projects construction projects

3) 施工阶段

由于范围设置时将上游的原材料的获取、生产以及运输划分到原材料获取阶段，因此施工阶段主要分析现场制作以及二次结构施工的原材料消耗。

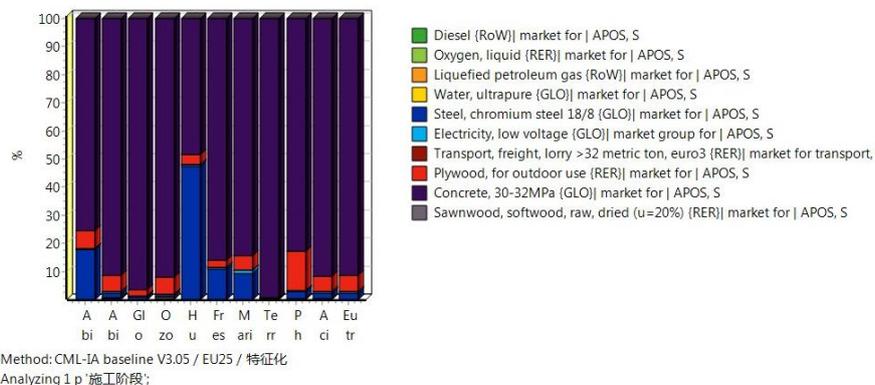


图 5-18 建筑项目施工阶段特征化结果

Fig5-18 Characterization results of construction projects

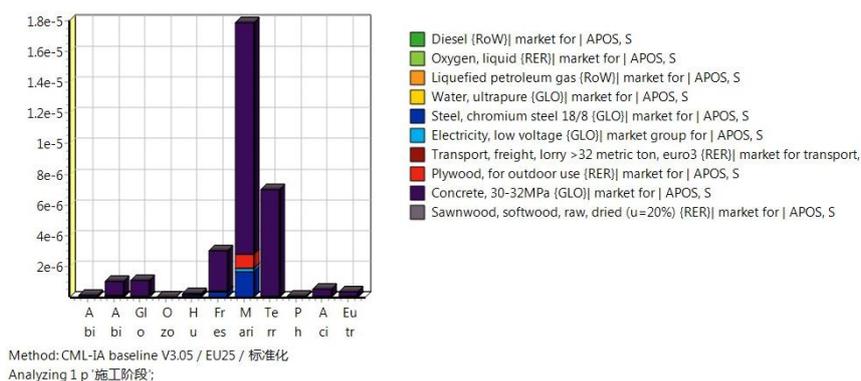


图 5-19 建筑项目施工阶段标准化结果

Fig5-19 Standardized results of construction projects

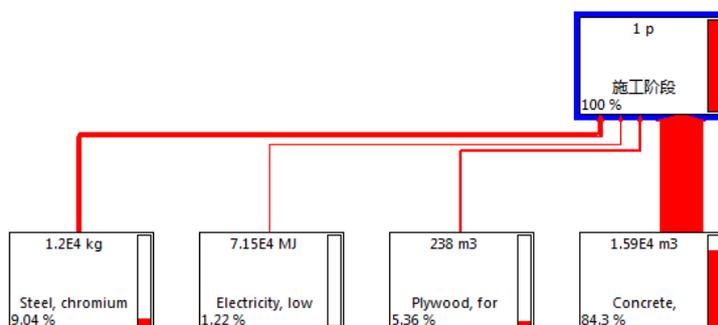


图 5-20 建筑项目施工阶段 MATEP 值特征化结果网状图

Fig5-20 Network diagram of characterization results of MATEP value during construction phase of construction project

对该建筑项目的施工阶段进行环境影响的特征化与标准化计算，得到特征化结果图 5-18，标准化结果图 5-19。由图可知，对海洋水生生态毒性的影响最大，其次是陆地生态毒性、淡水水生生态毒性。因此，对施工阶段海洋水生生态毒性进行特征化网络图分析，得到特征化网络图 5-20，此外，将截断系数设置为 0.5%，即对占比小于 0.5% 的原材料进行筛除，根据特征化结果，得到混凝土的贡献度最大，约占 84.3%，其次是钢筋约占 9.04%，制作脚手架所需的木头贡献约占 5.36%，机器运转耗费的电能约占 1.22%，其余资源消耗不足 0.1%。

4) 废弃与回收阶段

作为建筑全生命周期的终结阶段，建筑物会被拆除，然后还存在对前几阶段原材料投入的一个回收再利用，分析此阶段对环境的影响对指导建筑回收有重要意义。

对该建筑项目的废弃与回收阶段进行环境影响的特征化与标准化计算，得到特征化结果图 5-21，标准化结果图 5-22。由图可知，建筑项目的废弃与回收阶段出现负值，即回收再利用产生的环境效益，这是区别于其他阶段的地方。建筑废弃物的填埋与运输过程、所耗费的电能等过程会对环境产生不利影响，对铝、钢筋以及钢管等原材料的回收产生的有益影响。同时，对海洋水生生态毒性的影响最大，并远高于其他 10 中环境影响。对影响最大的海洋水生生态毒性进行特征化分析，得到其特征化网状图 5-23，钢筋的回收对该环境效益的贡献最大，占比 72.4%，其次是圆形钢管的回收，占比约为 23.7%，而对海洋水生生态毒性的影响占比最大的是废弃回收阶段电能的消耗。

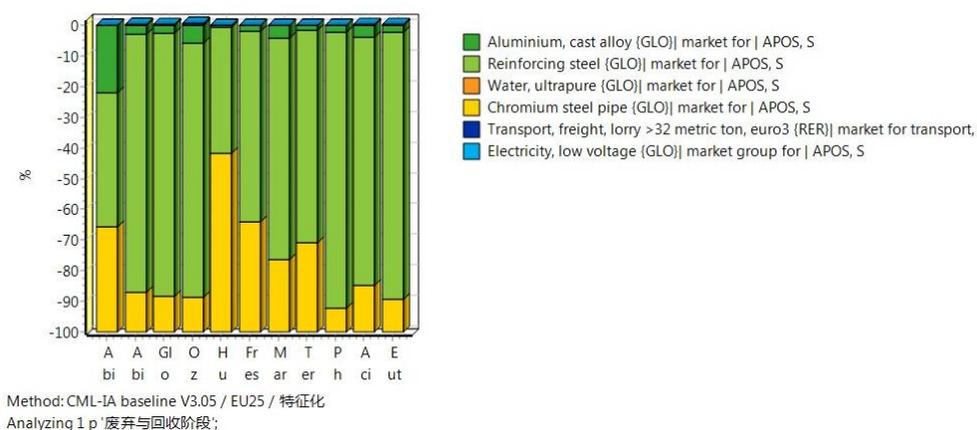


图 5-21 建筑项目废弃与回收阶段特征化结果

Fig5-21 Characterization results of construction project abandonment and recycling

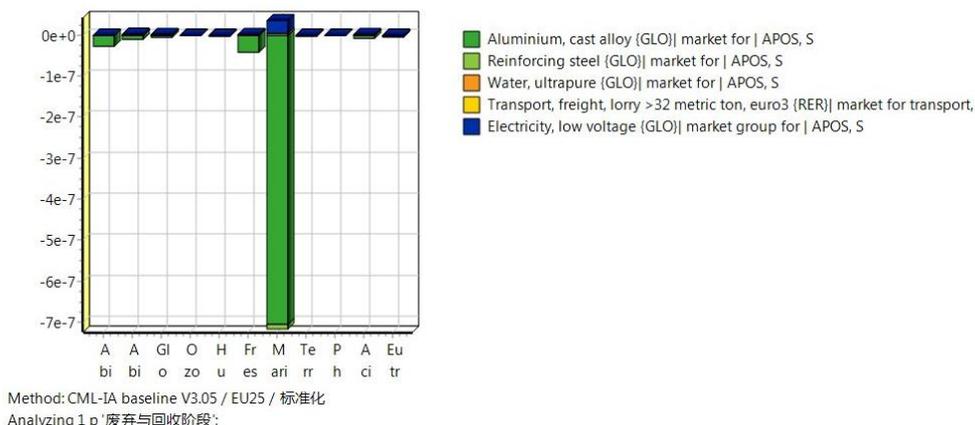


图 5-22 建筑项目废弃与回收阶段标准化结果

Fig5-22 Standardization results in the abandonment and recycling phase of construction projects

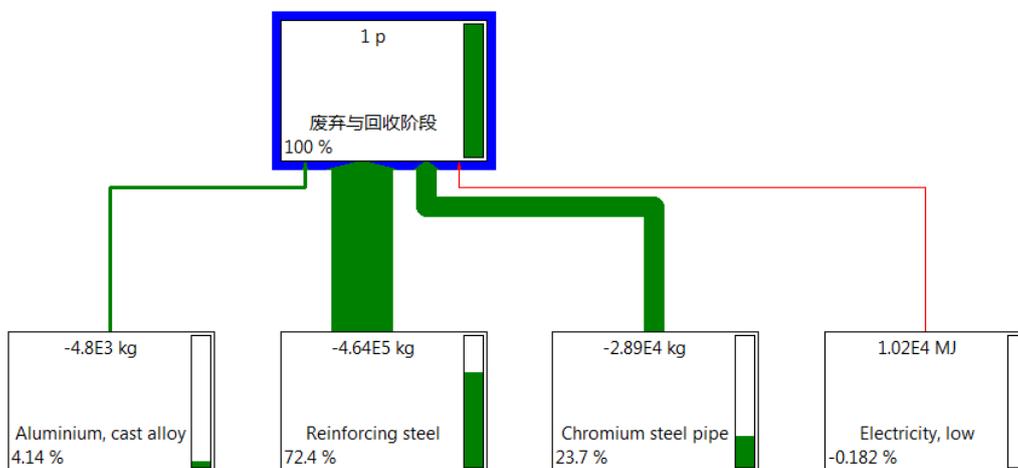


图 5-23 建筑项目废弃与回收阶段 MATEP 值特征化结果网状图

Fig5-23 Network diagram of characterization results of MATEP values in the abandonment and recycling stages of construction projects

5.5.4 敏感性分析

针对上述环境影响评价结果，对占比最大的运行阶段以下两方面的敏感性分析，以及对原材料获取阶段、施工阶段的资源投入进行敏感性分析，识别对最终评价结果的重要，并对改善环境做出建议贡献。

(1) 运行阶段设计参数的敏感性分析

对 5.4.3 小节中参照建筑的外围护结构热工参数、制冷、采暖系统性能参数以及照明设备的照度值进行建筑能耗模拟，得到其建筑能耗模拟结果表 5-18。

表 5-18 参照建筑的能耗分析结果

Table5-18 Energy analysis results of the reference building

耗能类型	建筑单位能耗 (kWh)	使用年限 (年)	总能耗 (kWh)
制冷能耗	28519.89	50	1425994.5
采暖能耗	44494.99	50	2224749.5
照明能耗	43239.68	50	2161984

根据上表统计数据,以及 5.4.3 小节中对该建筑能耗分析结果表 5-10 中的统计数据,该建筑的设计能耗计算值相比参照建筑的计算值减少的百分比统计如下表所示:

表 5-19 运行设备参数变化数据结果

Table5-19 Operating equipment parameter change data results

能耗减少率	制冷能耗减少率	采暖能耗减少率	照明能耗减少率	总能耗减少率
百分数	29.96%	44.51%	7%	>20%

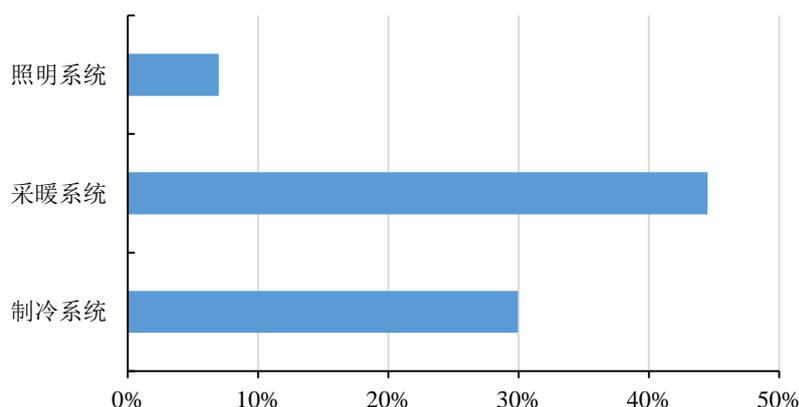


图 5-24 参数相同变化幅度下不同系统的能耗敏感性分析

Fig5-24 Sensitivity analysis of energy consumption of different systems under the same change range of parameters

根据设计建筑与参照建筑的不同系统参数的敏感性分析,当制冷系统的 COP 值、采暖系统的 COP 值以及照明系统功率密度值同时增加 40%时,不同系统的能耗减少率是不同的,可以得到,采暖系统的敏感性最强,其次是制冷系统,最小的是照明系统,并且此时的总能耗减少大于 20%,满足《绿色建筑评价标准》(GB50378-2014)中 5.2.6 条合理选择和优化供暖、通风与空调系统中“系统能耗降低幅度达到 15%”的得分要求。

(2) 运行阶段建筑服务年限的敏感性分析

由 4.1.2 小节中所述,本文假设的建筑服务年限为 50 年,对服务年限进行敏感性分

析,将服务年限进行上下 10%与 20%的调整,分别研究建筑运行阶段的服务年限对环境的影响。

在服务年限调整后,计算生命周期环境影响的标准化结果,对比分析调整前与调整后的环境影响,得到服务年限对各环境影响类型的影响程度,如下表 5-20 所示。

表 5-20 不同服务年限的结果与变化

Table5-20 Results and changes of different service years

影响类型	运行 40 年	运行 45 年	运行 55 年	运行 60 年
非生物资源消耗 (ADP)	4.62671E-07	8.21037E-07	5.7801E-07	7.22513E-07
非生物资源消耗(化石燃料) (ADP-ff)	6.98587E-06	1.32381E-05	9.61832E-06	1.12731E-05
温室气体效应(GWP100a)	4.26999E-06	6.59967E-06	5.37318E-06	6.71648E-06
臭氧层消耗(ODP)	2.47652E-08	4.70518E-08	3.28616E-08	4.25707E-08
人类毒性(HTP)	8.567E-07	1.61678E-06	1.14943E-06	1.41469E-06
淡水水生态毒性(FAEFP)	1.05664E-05	1.64185E-05	1.48616E-05	1.52862E-05
海洋水生态毒性(MAETP)	0.000106135	0.00019094	0.000140532	0.000168027
陆地生态毒性(TEAP)	1.1454E-05	1.19493E-05	1.1831E-05	1.17127E-05
光化学氧化剂(POCP)	4.49158E-07	7.39738E-07	5.64207E-07	7.02124E-07
酸化(AP)	3.00799E-06	5.42982E-06	3.79646E-06	5.03251E-06
富营养化(EP)	3.71222E-06	7.35353E-06	4.84535E-06	6.66948E-06

由表 5-20 与图 5-25 可以得知,以运行 50 年为基准,当服务年限为 40、45 年时,全生命周期各个类型的环境影响的标准化结果均会增长,说明此时尽管运行阶段的时长较短,但是原材料获取阶段与施工阶段的资源与能源投入仍会变大,到服务年限为 55 年时,发现全生命周期阶段的环境影响会变小,说明此时随着运行时间增长,会对前期上游阶段,即原材料生产、运输以及施工现场的原材料生产的消耗会减少,降低对环境的影响;但是增加到 60 年时,发现相比服务年限 50 年的环境影响结果还会增大,这是由于建筑老化以及设备的老化会增加电能、水资源的消耗。

因此,运行阶段服务年限的增加会减少上游阶段资源、能源投入所产生的环境影响,但当达到一定的临界值后,环境影响不会再减少,反而会增大,即本宿舍建筑运行的服务年限大约在 55 年左右,会对全生命周期的环境影响负荷最小。

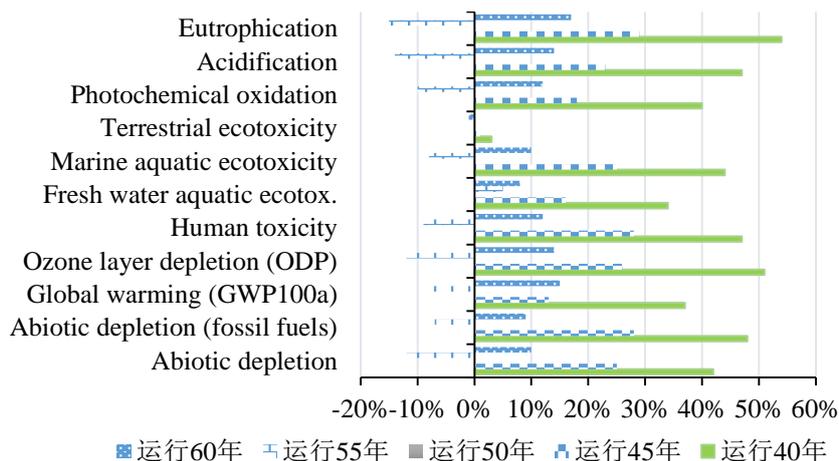


图 5-25 服务年限敏感性分析结果

Fig5-25 Sensitivity analysis results of service life

(3) 原材料获取与施工阶段资源的敏感性分析

对上游原材料获取阶段以及施工阶段的资源投入进行敏感性分析，分析其对整个生命周期以及环境的影响，因此，将 335 兆帕螺纹的钢筋换成 400 兆帕与 500 兆帕螺纹钢筋，铝合金窗的材质由 90%硅含量换成 95%与 98%硅含量，即 P1：335MPa 钢筋+90%硅的铝制品（为材料初始值），P2：400Mpa 钢筋+95%硅含量铝制品，P3：500MPa 钢筋+98%硅含量铝制品，研究不同材料组合对整个生命周期的影响，重新建模后得到其环境影响结果，如表 5-21 所示。

表 5-21 不同材料组合的环境影响结果

Table5-21 Environmental impact results of different material combinations

影响类型	P1	P2	P3
非生物资源消耗 (Abiotic depletion, ADP)	6.5683E-07	6.18182E-07	6.04284E-07
非生物资源消耗（化石燃料） (Abiotic depletion-fossil fuels, ADP-ff)	1.03423E-05	1.01659E-05	9.82519E-06
温室气体效应 (Global warming, GWP100a)	5.84041E-06	5.70908E-06	5.54839E-06
臭氧层消耗 (Ozone layer depletion, ODP)	3.73427E-08	3.69644E-08	3.62224E-08
人类毒性 (Human toxicity, HTP)	1.26311E-06	1.1429E-06	1.07364E-06

表 5-21 不同材料组合的环境影响结果 (续)

影响类型	P1	P2	P3
淡水水生态毒性 (Fresh water Aquatic ecotoxicity, FAEFP)	1.41539E-05	1.33019E-05	1.30216E-05
海洋水生态毒性 (Marine aquatic ecotoxicity, MAETP)	0.000152752	0.000145212	0.000142059
陆地生态毒性 (Terrestrial ecotoxicity, TEAP)	1.1831E-05	1.17404E-05	1.14761E-05
光化学氧化剂 (Photochemical oxidation, POCP)	6.26896E-07	5.88655E-07	5.76744E-07
酸化 (Acidification, AP)	4.41448E-06	4.32838E-06	4.2379E-06
富营养化 (Eutrophication, EP)	5.70041E-06	5.60171E-06	5.47239E-06

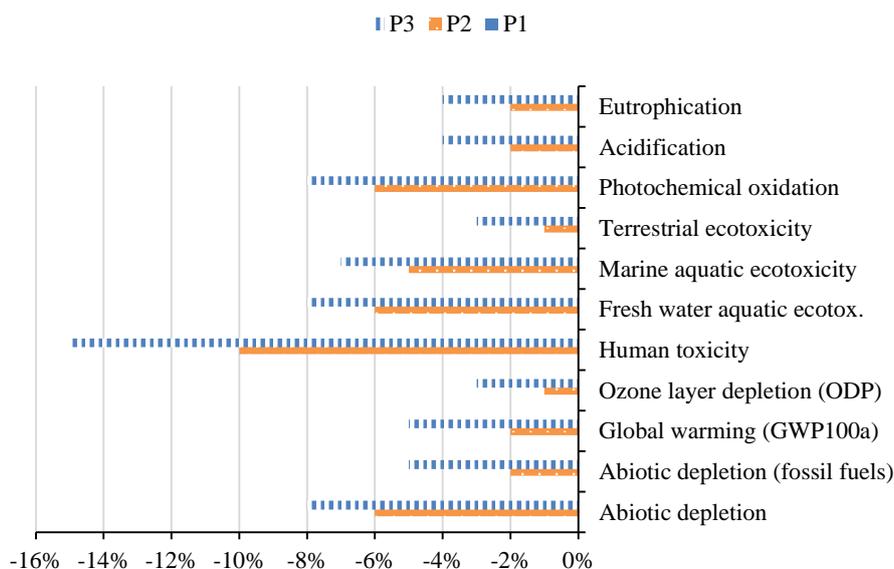


图 5-26 不同材料组合的敏感性分析

Fig5-26 Sensitivity analysis of different material combinations

由表中数据可以得出，节能材料的更换会对 11 种环境均产生良好的环境效益，尤其人类毒性的环境影响变化为大，金属的回收再利用不仅对资源的再利用有着重要意义，还会对各种环境类型产生有益影响。

5.5.5 相关建议

根据对该绿色建筑全生命周期的能耗计算与环境影响评价结果，三种不同的情境进行敏感性分析，得到以下几个方面的结论与建议。

(1) 加大运行阶段采暖系统、制冷系统的 COP 值。据 5.5.4 小节对运行阶段的敏感性分析，优化设备设计参数，并且采暖系统的能耗敏感性更强一些，对运行阶段的建筑能耗起着决定作用，因此运行阶段的减耗降能措施可以通过加大采暖与制冷系统的 COP 系数来调节。

(2) 合理确定建筑的使用年限。本实例通过运行服务年限的敏感性分析得到，过长或过短的运行阶段都会增加全生命周期的环境影响，最合适的服务年限大约为 55 年。

(3) 优化绿色建筑原材料的选择。根据 5.5.4 小节对上游原材料获取阶段、施工阶段的资源投入进行敏感性分析结果，采用含硅量高的铝制品以及高强钢筋会减少对环境的影响，在废弃与回收阶段的回收量会变大，同时避免了资源的浪费，因此优化绿色建材组合的使用，会让原材料在整个生命周期阶段产生更小的环境影响。

(4) 重点关注废弃与回收阶段。尽管废弃与回收阶段产生的影响在整个生命周期中的占比相对较小，但是相比其他三个阶段，回收再利用环节会产生良好的环境效益，抵消前期资源投入所产生的影响，对环境影响的研究具有重要意义。

第6章 结 论

6.1 总结

本文提出“BIM-LCA”的评价框架，以研究绿色建筑全生命周期内的建筑能耗与环境影响评价为目标，通过 BIM 建模、能耗模拟软件，清单分析，生命周期评价方法模拟整个建筑项目从“摇篮-摇篮”的全过程。通过案例分析，以原材料获取阶段、施工阶段、运行阶段、废弃与回收阶段的全过程的资源、能源、污染物的排放为研究对象，分析并评价整个生命周期的建筑能耗、环境负荷与环境效益。本文的主要结论如下：

(1) BIM 物理模型简化了 LCA 数据的收集，能耗模型对运行阶段的采暖、制冷、照明、人员使用行为进行能耗模拟，提高了能耗计算准确度。“BIM-LCA”相结合的评价模型会简化数据的收集，大大减少评价的工作量，并适用于生命周期的各个阶段。利用 BIM 平台的可视性模拟绿色建筑运行阶段的能耗，对建筑围护结构热工参数、空调系统性能参数、人员情况进行设置与能耗模拟，得到运行阶段较为精确的能耗值，提高计算精度，解决以往静态估算方法的不足；其次，利用 BIM 模型参数化特征与模型的可交互性，可直接生成工程量清单，简化了传统手输与收集数据的过程，BIM 参数化设计与关联性设计的特点，使得工作时间减少工作效率大大提高，参数化设计使得物理信息属性很容易被修改，并且修改的构件在相应的建筑模型里会自动修改，减少了重复修改的工作量。

(2) 废弃与回收阶段对环境影响产生重要的环境效益。本文确定全生命周期的评价框架，包括研究范围及目的的确定、清单分析、影响评价及结果解释四部分。确定了从“摇篮-摇篮”的研究范围：原材料获取阶段、施工阶段、运行阶段、废弃与回收阶段的全生命周期。结果表明除了传统认知的运行阶段的环境影响占比最大以外，原材料获取阶段的资源投入对环境产生相对较大的影响，建筑材料的回收再利用会抵消前期资源的投入所产生的环境负荷。

(3) 运行阶段的设备参数、服务年限以及原材料的优化选择对环境的影响起着决定作用。通过加大运行阶段采暖系统、制冷系统的 COP 值与照明系统的功率密度值，运行阶段的能耗降低了 20%以上；此外，确定了建筑产生环境负荷的合理服务年限为 55 年，过长或过短都会增加环境影响；优化原材料的配置，使用绿色建材，如可再生混凝土

土,回收系数大的钢筋与铝合金,不仅会降低能耗减少环境影响,还会避免资源的浪费。

(4) 通过 11 种环境影响指标较为全面的确定绿色建筑环境影响的关键要素。对四个阶段分别并系统分析其环境影响的特征化、标准化、关键影响的特征化网状图,得出结论:在 11 个环境影响类型中,受到影响最大的是海洋水生态毒性,最小的是臭氧层消耗。主要原因是运行阶段水、电资源的消耗,原材料阶段钢筋的投入,施工阶段现浇混凝土的投入占比较多,随着电消耗的增加,冷却水排向海洋的流量增加,进而产生海洋水生态毒性的不利影响,从而引起水体富营养化等后续一系列不良反应。这对确定研究海洋水生态毒性的影响路径,对海洋生态环境研究具有重要意义。

6.2 展望

近年来,环境保护是各国亟待解决的现实问题,而建筑行业作为高耗能的三大产业之一,其耗能控制与环境影响问题是关注的重点。在本文的研究过程中,针对目前存在的不足提出若干展望。

(1) BIM 与 LCA 软件的交互。本文通过 BIM 软件导出工程量清单,然后将清单输入到 LCA 软件中,一定程度上简化了以往工程量清单分析的步骤。BIM 近年来是建筑领域的热点,其应用及发展变得更加广泛,但是在与 LCA 的交互领域目前还存在困难,且 BIM 软件之间格式语言的转化复杂,难以实现统一。因此,未来 BIM 的深入研究还有待提高。

(2) 生命周期清单数据库的本土化。本文所使用的生命周期评价方法是 CML-IA baseline,使用的数据库是欧洲 Ecoinvent 3.0,而中国的生命周期清单数据库比较匮乏,清单内容不完善,这对本土的产品、材料的全生命周期评价是不利的。因此,未来要加强对中国本土生命周期清单数据的开发与完善。

(3) 废弃与回收阶段未受重视。本文将废弃与回收阶段纳入研究范围,结果表明回收再利用对上游资源的投入有较大的环境效益,抵消上游阶段的环境负荷影响,对环境保护有重要作用。然而,由于建筑项目时间周期较长的特点,很少有人关注废弃与回收阶段。因此,未来要加强对此阶段的研究,对减少资源的浪费与环境的破坏有重要意义。

参考文献

- [1] 冯亚娟, 杨楠. 城市居住建筑能耗预测模型[J]. 资源开发与市场, 2015(01):21-24.
- [2] Y L Li, M Y Han, S Y Liu, et al. Energy consumption and greenhouse gas emissions by buildings: A multi-scale perspective[J]. Building and Environment, 2019,151:240-250.
- [3] T Huo, H Ren, W Cai. Estimating urban residential building-related energy consumption and energy intensity in China based on improved building stock turnover model[J]. Science of the Total Environment, 2019,650:427-437.
- [4] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告[J]. 2020.
- [5] 纪博雅, 戚振强. 国内BIM技术研究现状[J]. 科技管理研究, 2015,35(06):184-190.
- [6] 王广斌, 张雷, 谭丹, 等. 我国建筑信息模型应用及政府政策研究[J]. 中国科技论坛, 2012(08):38-43.
- [7] 曹伟, 李晓伟. 从数字生态建筑走向智慧城市之路[J]. 城市发展研究, 2012,19(07):61-69.
- [8] L F Cabeza, L Rincón, V Vilariño, et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014,29:394-416.
- [9] Y Yoon, K Kim, S Lee, et al. Sustainable design for reinforced concrete columns through embodied energy and CO₂ emission optimization[J]. Energy and Buildings, 2018,174:44-53.
- [10] A M Moncaster, K E Symons. A method and tool for ‘cradle to grave’ embodied carbon and energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350 standards[J]. Energy and Buildings, 2013,66:514-523.
- [11] B Liu, D Wang, Y Xu, et al. A multi-regional input - output analysis of energy embodied in international trade of construction goods and services[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,201:439-451.
- [12] S Vares, T Häkkinen, J Ketomäki, et al. Impact of renewable energy technologies on the embodied and operational GHG emissions of a nearly zero energy building[J]. Journal of Building Engineering, 2019,22:439-450.
- [13] 陈立文, 赵士雯, 张志静. 绿色建筑发展相关驱动因素研究——一个文献综述[J].

资源开发与市场, 2018,34(09):1229-1236.

[14]陈彦熹, 刘建华, 李旭东, 等. 基于ANN的绿色办公建筑HVAC系统运行能耗预测[J]. 建筑节能, 2017(10):1-5.

[15]佟昕, 李大鹏, 李宁. 遗传算法参数对估算低能耗建筑能量消耗的影响[J]. 建筑节能, 2018,46(01):108-111.

[16]刘宇, 张宇峰, 孙燕琼, 等. 基于生命周期评价的绿色建筑选材研究[J]. 中国材料进展, 2016,35(10):769-775.

[17]A Aslani, A Bakhtiar, M H Akbarzadeh. Energy-efficiency technologies in the building envelope: Life cycle and adaptation assessment[J]. Journal of Building Engineering, 2019,21:55-63.

[18]李灏如, 李晓锋. 绿色建筑空调系统节能评价方法研究[J]. 建设科技, 2016(22):40-43.

[19]高明. 基于BIM技术的多层办公室建筑节能设计与应用研究[J]. 建筑技术, 2016,47(09):846-849.

[20]蔡毓剑, 杨太华. 基于BIM技术的建筑工程能耗分析[J]. 绿色科技, 2018(16):182-185.

[21]R S Nizam, C Zhang, L Tian. A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings[J]. Energy and Buildings, 2018,170:1-14.

[22]梁玉美, 陈小波. 基于BIM的建筑能耗分析与模型构建[J]. 工程管理学报, 2018(03):86-91.

[23]杨文领. 基于BIM技术的绿色建筑能耗评价[J]. 城市发展研究, 2016(03):14-17.

[24]F H Abanda, L Byers. An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling)[J]. Energy, 2016,97:517-527.

[25]G Feng, D Chi, X Xu, et al. Study on the Influence of Window-wall Ratio on the Energy Consumption of Nearly Zero Energy Buildings[J]. Procedia Engineering, 2017,205:730-737.

[26]C Zhang, R S Nizam, L Tian. BIM-based investigation of total energy consumption in delivering building products[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018,38:370-380.

[27]M Y Han, G Q Chen, L Shao, et al. Embodied energy consumption of building construction engineering: Case study in E-town, Beijing[J]. Energy and Buildings,

2013,64:62-72.

[28]H Ma, N Du, S Yu, et al. Analysis of typical public building energy consumption in northern China[J]. Energy and Buildings, 2017,136:139-150.

[29]M V Shoubi, M V Shoubi, A Bagchi, et al. Reducing the operational energy demand in buildings using building information modeling tools and sustainability approaches[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2015,6(1):41-55.

[30]M De Rosa, V Bianco, F Scarpa, et al. Heating and cooling building energy demand evaluation; a simplified model and a modified degree days approach[J]. Applied Energy, 2014,128:217-229.

[31]何立华, 崔萧, 胡清畅. 基于BIM的公共建筑能耗估算与模拟[J]. 工程管理学报, 2020,34(02):84-89.

[32]L Sanhudo, N M M Ramos, J Poças Martins, et al. Building information modeling for energy retrofitting - A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,89:249-260.

[33]陈浩. BIM在既有办公建筑节能改造中的应用研究[D]. 重庆大学, 2017.

[34]云朋, 吴海斌. BIM与建筑的生态节能分析与设计[J]. 时代建筑, 2013(02):44-47.

[35]陈孚江, 陈焕新, 华虹, 等. 建筑能耗寿命周期评价: 全国暖通空调制冷2008年学术年会, 中国重庆, 2008[C].

[36]R Jin, B Zhong, L Ma, et al. Integrating BIM with building performance analysis in project life-cycle[J]. Automation in Construction, 2019,106:102861.

[37]B Soust-Verdaguer, C Llatas, A Garc á-Mart ínez. Critical review of bim-based LCA method to buildings[J]. Energy and Buildings, 2017,136:110-120.

[38]S Eleftheriadis, D Mumovic, P Greening. Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,67:811-825.

[39]C Bueno, M M Fabricio. Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in[J]. Automation in Construction, 2018,90:188-200.

[40]沈琳, 李希胜, 李明瑞, 等. 基于BIM-LCA的建筑环境影响评价方法[J]. 森林工程, 2015,31(01):149-155.

[41]W Y V Tam, K N Le, C N N Tran, et al. A review on contemporary computational

- programs for Building's life-cycle energy consumption and greenhouse-gas emissions assessment: An empirical study in Australia[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,172:4220-4230.
- [42]李奇荒, 杨向群, 杨巍. 基于BIM的小型节能建筑生命周期环境影响和成本分析[J]. *南方建筑*, 2017(02):45-50.
- [43]韩旭亮, 陈滨, 朱佳音. 建筑热设计优化经济性分析及案例研究[J]. *建筑科学*, 2014,30(04):65-71.
- [44]J Wang, H Wu, H Duan, et al. Combining life cycle assessment and Building Information Modelling to account for carbon emission of building demolition waste: A case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,172:3154-3166.
- [45]M Najjar, K Figueiredo, A W A Hammad, et al. Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy efficient buildings[J]. *Applied Energy*, 2019,250:1366-1382.
- [46]肖汉雄, 杨丹辉. 基于产品生命周期的环境影响评价方法及应用[J]. *城市与环境研究*, 2018(01):88-105.
- [47]姜雪, 李小平, 董珑丽, 等. LCA在产品生命周期环境影响评价中的应用[J]. *中国人口 资源与环境*, 2014,24(S2):188-191.
- [48]A F Abd Rashid, S Yusoff. A review of life cycle assessment method for building industry[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015,45:244-248.
- [49]陈莹, 朱熾. 住宅建筑生命周期能耗及环境排放模型[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010,50(03):325-329.
- [50]C Cavalliere, G Habert, G R Dell'Osso, et al. Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design process[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,211:941-952.
- [51]M A van Eldik, F Vahdatikhaki, J M O Dos Santos, et al. BIM-based environmental impact assessment for infrastructure design projects[J]. *Automation in Construction*, 2020,120:103379.
- [52]程敏, 施霞君. 建筑节能的全生命周期研究[J]. *生态经济*, 2009(07):118-120.
- [53]钟滨. 基于BIM的建筑能耗分析与节能评估研究[D]. 北京建筑大学, 2016.
- [54]郭菲菲. BIM技术在建筑负荷预测方面的应用[D]. 郑州大学, 2016.

- [55]刘长城. 基于BIM理论的建筑能耗评估和分析[D]. 安徽建筑大学, 2013.
- [56]杨麒麟. 基于BIM的可视化协同设计应用研究[D]. 西南交通大学, 2016.
- [57]A M Moncaster, K E Symons. A method and tool for ‘cradle to grave’ embodied carbon and energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350 standards[J]. Energy and Buildings, 2013,66:514-523.
- [58]M Najjar, K Figueiredo, M Palumbo, et al. Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building[J]. Journal of Building Engineering, 2017,14:115-76.
- [59]杨希宁. 基于BIM的建筑改造项目生命周期环境影响评价研究[D]. 重庆大学, 2018.
- [60]建娜. 城镇排水系统的生命周期环境影响评价研究[D]. 重庆大学市政工程, 2015.
- [61]D A Lopes Silva, A O Nunes, C M Piekarski, et al. Why using different Life Cycle Assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause - effect analysis of the problem[J]. Sustainable Production and Consumption, 2019,20:304-315.
- [62]张玉红, 姜晓龙. 基于BIM技术的建筑能耗分析方法研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2017(02):93-96.
- [63]于利伟. 基于目标距离原理的产品生命周期影响评价方法研究[D]. 山东大学, 2009.
- [64]郑晓云, 徐金秀. 基于LCA的装配式建筑全生命周期碳排放研究——以重庆市某轻钢装配式集成别墅为例[J]. 建筑经济, 2019(01):107-111.
- [65]江九龙. 基于LCA的建筑结构环境影响评价[D]. 中原工学院, 2016.
- [66]程博. 建筑物化能耗与建筑能耗[J]. 低碳世界, 2018(12):152-153.
- [67]高盛立, 吴苏龙. 能耗标识与建筑全寿命能耗估算的构想与实践[J]. 建筑节能, 2013,41(03):54-56.

附录

	编码	类别	名称	规格型号	单位	数量	不含税省单价	不含税预算价	不含税市场价	含税市场价
1	01000017	材	吊筋	——	kg	2140.76149	3.64	3.64	3.64	4.11
2	01010009	材	钢筋	HPB300≤φ10	t	4.14138	3911.5	3911.5	3654.87	4130
3	01010027	材	钢筋	HRB335≤φ10	t	146.9718	4070.8	4070.8	3654.87	4130
4	01010029	材	钢筋	HRB335≤φ18	t	206.46392	3938.05	3938.05	3548.67	4010
5	01010033	材	钢筋	HRB335≤φ25	t	362.59192	3902.65	3902.65	3548.67	4010
6	01010065	材	钢筋	φ6.5	t	24.00672	4247.79	4247.79	4097.35	4630
7	01010069	材	钢筋	φ8	t	2.26032	3938.05	3938.05	3654.87	4130
8	01010073	材	钢筋	≤φ10	t	5.632	3938.05	3938.05	3654.87	4130
9	01010089	材	钢筋	≤φ16	t	7.3088	3929.2	3929.2	3548.67	4010
10	01010109	材	箍筋	≤φ10	t	102.13668	3938.05	3938.05	3654.87	4130
11	01010111	材	箍筋	>φ10	t	20.12712	3938.05	3938.05	3654.87	4130
12	01010129	材	螺纹钢	φ16	kg	68.7616	3.89	3.89	3.89	4.4
13	01010131	材	螺纹钢	φ18	kg	99.1062	3.85	3.85	3.85	4.35
14	01010133	材	螺纹钢	φ20	kg	451.73466	3.85	3.85	3.85	4.35
15	01010135	材	螺纹钢	φ22	kg	723.00004	3.85	3.85	3.85	4.35
16	01010177	材	带肋钢筋	φ10-12	kg	152.016	4.03	4.03	4.03	4.55
17	01090005	材	圆钢	φ5.5~9.0	kg	192.25252	4.12	4.12	4.12	4.66
18	01090009	材	圆钢	≤φ10	kg	48.37387	4.12	4.12	4.12	4.66
19	01090019	材	圆钢	φ9~14	kg	309.33	4.01	4.01	4.01	4.53
20	01090021	材	圆钢	φ10~14	kg	401.669	4.01	4.01	4.01	4.53
21	01130019	材	扁钢	≤59	kg	842.93676	4.02	4.02	4.02	4.54
22	01130021	材	扁钢	≤60	kg	0.659	4.02	4.02	4.02	4.54
23	01130029	材	镀锌扁钢	-25×4	kg	280.92	4.19	4.19	4.19	4.73

附 录

	编码	类别	名称	规格型号	单位	数量	不含税省单价	不含税预算价	不含税市场价	含税市场价
24	01130033	材	镀锌扁钢	-40×4	kg	2.52	4.19	4.19	4.19	4.73
25	01130039	材	镀锌扁钢	-25~40	kg	71.68696	4.19	4.19	4.19	4.73
26	01130041	材	镀锌扁钢	(综合)	kg	9.45	4.19	4.19	4.19	4.73
27	04010001	材	水泥	——	kg	3850.23776	0.44	0.44	0.36	0.41
28	04010009	材	水泥	42.5MPa	kg	164.91	0.46	0.46	0.4	0.45
29	04010009	材	水泥	42.5MPa	kg	94.082	0.46	0.46	0.46	0.52
30	04010019	材	普通硅酸盐水泥	42.5MPa	t	85.69277	460.18	460.18	402.65	455
31	04010021	材	普通硅酸盐水泥	42.5MPa	kg	8846.63574	0.46	0.46	0.41	0.46
32	04010021	材	普通硅酸盐水泥	42.5MPa	kg	5274.96185	0.46	0.46	4.03	4.55
33	04030007	材	砂子	——	m ³	0.522	166.02	166.02	145.63	150
34	04030009	材	砂子	——	kg	3344.259	0.12	0.12	0.15	0.15
35	04030009	材	砂子	——	kg	282.065	0.12	0.12	0.12	0.12
36	04030023	材	中砂	——	m ³	3.4131	166.5	166.5	145.63	150
37	04090015	材	石灰	——	t	237.26706	369.75	369.75	349.51	360
38	04090017	材	石灰膏	——	m ³	1.073	291.75	291.75	291.75	300.5
39	05030051	材	垫木	——	m ³	0.03004	2123.89	2123.89	2123.89	2400
40	06110003	材	中空玻璃	——	m ²	338.1628	85.26	85.26	44.25	50
41	14010003	材	清油	——	kg	1.24	16.19	16.19	16.19	18.29
42	14010005	材	清油	C01-1	kg	3.079	15.75	15.75	15.75	17.8
43	14030011	材	汽油	60#~70#	kg	13.6538	7.49	7.49	7.49	8.46
44	14030013	材	汽油	70#~90#	kg	7.548	7.63	7.63	7.63	8.62
45	14030017	材	汽油	92#~95#	kg	549.32213	8.12	8.12	8.12	9.18
46	14030021	材	溶剂汽油	——	kg	51.37533	7.81	7.81	7.81	8.83
47	14030023	材	溶剂汽油	200#	kg	35.489	8.46	8.46	8.46	9.56
48	14050005	材	油漆溶剂油	——	kg	197.78465	4.96	4.96	4.96	5.6
49	14070001	材	铅油	——	kg	34.98653	6.93	6.93	6.93	7.83

	编码	类别	名称	规格型号	单位	数量	不含税省单价	不含税预算价	不含税市场价	含税市场价
50	14070003	材	白铅油	——	kg	27.94	7.1	7.1	7.1	8.02
51	14070011	材	机油	——	kg	147.50161	9.43	9.43	9.43	10.66
52	14390001	材	氧气	——	m ³	583.22914	4.27	4.27	4.27	4.65
53	14390003	材	乙炔气	——	m ³	1.26168	14.61	14.61	14.61	15.92
54	14390005	材	乙炔气	——	kg	193.14891	14.86	14.86	14.86	16.2
55	14390031	材	丙烷	——	kg	13	6.28	6.28	6.28	6.85
56	14390035	材	氩气	——	m ³	162.80807	16.13	16.13	16.13	17.58
57	14390041	材	液化石油气	——	kg	2478.69384	4.92	4.92	4.92	5.36
58	17010005	材	焊接钢管	(综合)	kg	1055.4163	3.98	3.98	3.98	4.5
59	17010023	材	焊接钢管	DN20	m	21.44534	5.79	5.79	5.79	6.54
60	17010057	材	钢管	φ48.3×3.6	m	5042.27114	15.29	15.29	15.29	17.28
61	17050003	材	不锈钢管	φ32×1.5	m	2596.26419	22.75	22.75	22.75	25.71
62	17050005	材	不锈钢管	φ60×2	m	483.4077	61.14	61.14	61.14	69.09
63	17070029	材	无缝钢管	D22×2	m	3.124	4.03	4.03	4.03	4.55
64	34110003	材	水	——	m ³	3889.74965	5.87	5.87	1.94	2
65	34110003	材	水	——	m ³	121.64171	5.87	5.87	5.87	6.05
66	34110009	材	电	——	kW h	3069.7323	0.8	0.8	1.33	1.5
67	34110009	材	电	——	kW h	77.88964	0.8	0.8	0.8	0.9
68	34110019	材	木柴	——	kg	824.40657	1.11	1.11	1.11	1.25
69	35010005	材	复合木模板	——	m ²	9437.92904	32.54	32.54	32.54	36.77
70	35010015	材	木模板	——	m ³	0.8912	1619.47	1619.47	1619.47	1830
71	35030019	材	木脚手板	Δ=5cm	m ³	63.72129	1725.66	1725.66	1725.66	1950
72	35030023	材	木脚手杆	φ100	m ³	2.0226	1438.05	1438.05	1438.05	1625
73	GB80010001	材	混合砂浆(干拌)	M5.0	m ³	337.97538	299.51	299.51	466.02	480
74	GB80010011	材	水泥砂浆(干拌)	M5.0	m ³	3.9311	270.5	270.5	466.02	480
75	GB80050005	材	水泥抹灰砂浆(干拌)	1:1	m ³	46.08594	494.83	494.83	466.02	480

附 录

	编码	类别	名称	规格型号	单位	数量	不含税省单价	不含税预算价	不含税市场价	含税市场价
76	GB80050009	材	水泥抹灰砂浆(干拌)	1:2	m ³	300.02914	463.65	463.65	466.02	480
77	GB80050011	材	水泥抹灰砂浆(干拌)	1:2.5	m ³	84.88209	452.72	452.72	466.02	480
78	GB80050013	材	水泥抹灰砂浆(干拌)	1:3	m ³	850.61894	415.45	415.45	466.02	480
79	GB80110007	材	水泥珍珠岩(干拌)	1:10	m ³	269.87976	204.22	204.22	485.44	500
80	80210003	商砼	C15 现浇混凝土	碎石<40	m ³	364.59788	436.89	436.89	451.46	465
81	80210003	商砼	C15 细石砼	碎石<40	m ³	130.8051	436.89	436.89	461.17	475
82	80210003	商砼	C15 细石混凝土	碎石<40	m ³	127.87267	436.89	436.89	461.17	475
83	80210007	商砼	C20 现浇混凝土	碎石<20	m ³	44.58968	456.31	456.31	470.87	485
84	80210009	商砼	C20 现浇混凝土	碎石<31.5	m ³	133.92095	456.31	456.31	470.87	485
85	80210015	商砼	C25 现浇混凝土	碎石<20	m ³	130.40312	466.02	466.02	480.58	495
86	80210017	商砼	C25 现浇混凝土	碎石<31.5	m ³	240.82578	466.02	466.02	480.58	495
87	80210021	商砼	C30 现浇混凝土	碎石<20	m ³	3675.45889	475.73	475.73	490.29	505
88	80210023	商砼	C30 现浇混凝土	碎石<31.5	m ³	1361.49453	475.73	475.73	490.29	505
89	80210025	商砼	C30 现浇混凝土	碎石<40	m ³	1358.5409	475.73	475.73	490.29	505
90	80210077	商砼	细石混凝土	C20	m ³	278.93993	514.56	514.56	490.29	505
91	80210081	商砼	预拌混凝土	C35	m ³	34.16658	0	0	500	515
92	Z01000041	主	角钢	40×5	kg	56.5992	0	4.07	4.07	4.6
93	Z17000015	主	镀锌钢管	DN65	m	440.04	0	26.52	26.52	29.97
94	Z17000015	主	镀锌钢管	DN100	m	419.10317	0	43.05	43.05	48.65
95	Z17000015	主	镀锌钢管	DN80	m	167.0994	0	33.17	33.17	37.48
96	Z17000015	主	镀锌钢管	DN150	m	1271.889	0	75.49	75.49	85.3
97	Z17000015	主	钢管 SC40	——	m	109.3963	0	13.08	13.08	14.78
98	Z17000015	主	钢管 SC50	——	m	74.3866	0	16.63	16.63	18.79
99	Z17000019	主	焊接钢管 SC50	——	m	182.1246	0	16.63	16.63	18.79
100	Z17000019	主	焊接钢管 SC65	——	m	235.0254	0	22.62	22.62	25.56
101	Z17000019	主	焊接钢管 SC80	——	m	48.8735	0	28.42	28.42	32.11

	编码	类别	名称	规格型号	单位	数量	不含税省单价	不含税预算价	不含税市场价	含税市场价
102	Z17000019	主	焊接钢管 SC100	——	m	2.8943	0	36.96	36.96	41.77
103	Z17000019	主	焊接钢管 SC120	——	m	148.1552	0	51.24	51.24	57.9
104	Z17000029	主	焊接钢管	DN50	m	103.35	0	16.63	16.63	18.79
105	Z17000031	主	焊接钢管	DN80	m	120.84	0	28.42	28.42	32.11
106	Z17000033	主	焊接钢管	DN100	m	20.988	0	35	35	39.55
107	Z17000053	主	镀锌钢管	DN20	m	449.36949	0	7.3	7.3	8.25
108	Z17000053	主	镀锌钢管	DN25	m	1058.57224	0	10.42	10.42	11.77
109	Z17000053	主	镀锌钢管	DN32	m	951.28	0	13.19	13.19	14.91
110	Z17000053	主	镀锌钢管	DN40	m	951.94792	0	16.18	16.18	18.28
111	Z17000053	主	镀锌钢管	DN50	m	580.19984	0	20.27	20.27	22.9
112	Z17000265	主	PP-R 热水管	dn125	m	265.8872	0	91.55	91.55	106.2
113	Z17000265	主	PP-R 热水管	dn110	m	22.43328	0	54.16	54.16	61.2
114	Z17000265	主	PP-R 热水管	dn90	m	67.09664	0	35.84	35.84	40.5
115	Z17000265	主	PP-R 热水管	dn75	m	58.63336	0	28.67	28.67	32.4
116	Z17000265	主	PP-R 热水管	dn63	m	45.3644	0	25.49	25.49	28.8
117	Z17000265	主	PP-R 热水管	dn50	m	243.21008	0	18.32	18.32	20.7
118	Z17000265	主	PP-R 热水管	dn40	m	278.49576	0	11.95	11.95	13.5
119	Z17000265	主	PP-R 热水管	dn32	m	52.02936	0	6.37	6.37	7.2
120	Z17000265	主	PP-R 热水管	dn25	m	143.27632	0	4.38	4.38	4.95
121	Z17000265	主	PP-R 热水管	dn20	m	186.4868	0	2.39	2.39	2.7
122	Z17000265	主	PPR 给水管	dn63	m	57.912	0	21.65	21.65	25.33
123	Z17000265	主	PPR 给水管	dn50	m	87.1728	0	15.4	15.4	18.02
124	Z17000265	主	PPR 给水管	dn40	m	21.9456	0	10.41	10.41	12.18
125	Z17000265	主	PPR 给水管	dn25	m	818.09336	0	3.74	3.74	4.38
126	Z17000265	主	PPR 给水管	dn20	m	3225.82032	0	1.83	1.83	2.14
127	Z17000295	主	UPVC 排水管	dn200	m	101.764	0	32.31	32.31	37.8

附 录

	编码	类别	名称	规格型号	单位	数量	不含税省单价	不含税预算价	不含税市场价	含税市场价
128	Z17000295	主	UPVC 排水管	dn160	m	47.6425	0	21.54	21.54	25.2
129	Z17000295	主	UPVC 排水管	dn75	m	1166.5332	0	9.23	9.23	10.8
130	Z17000295	主	UPVC 排水管	dn50	m	743.86048	0	5.77	5.77	6.75
131	Z17000295	主	UPVC 排水管	dn110	m	1446.318	0	12.15	12.15	14.22
132	Z17000321	主	钢塑复合管	DN150	m	26.052	0	112.63	112.63	127.27
133	Z17000321	主	钢塑复合管	DN125	m	93.81726	0	95.09	95.09	107.45
134	Z17000321	主	钢塑复合管	DN100	m	90.59082	0	66.13	66.13	74.73
135	Z17000321	主	钢塑复合管	DN80	m	104.83926	0	51.05	51.05	57.69
136	Z17000321	主	钢塑复合管	DN65	m	71.92356	0	40.71	40.71	46
137	Z17000321	主	钢塑复合管	DN50	m	112.49454	0	30.5	30.5	34.47
138	Z17000321	主	钢塑复合管	DN40	m	216.9831	0	24.02	24.02	27.14
139	Z17000321	主	钢塑复合管	DN32	m	216.01818	0	19.59	19.59	22.14
140	Z17000321	主	钢塑复合管	DN25	m	132.0012	0	15.37	15.37	17.37
141	Z17000321	主	钢塑复合管	DN20	m	303.3451	0	10.83	10.83	12.24
142	80010001	浆	混合砂浆	M5.0	m ³	0.04281	299.51	299.51	242.28	255.9
143	80010015	浆	水泥砂浆	M10.0	m ³	0.06522	292.17	292.17	233.95	249.53
144	80010057	浆	干硬性水泥砂浆	1:3	m ³	5.04468	414.27	414.27	337.62	364.02
145	80050009	浆	水泥抹灰砂浆	1:2	m ³	4.40867	463.65	463.65	382.23	415.85
146	80050011	浆	水泥抹灰砂浆	1:2.5	m ³	11.21239	452.72	452.72	370.62	401.28
147	80050011	浆	水泥抹灰砂浆	1:2.5	m ³	1.60547	452.72	452.72	452.72	488.62
148	80050013	浆	水泥抹灰砂浆	1:3	m ³	2.38065	415.45	415.45	338.01	364.42