

**BIM Based Evaluation and Analysis**  
on Building Energy Consumption



# BIM 技术

## 与建筑能耗评价分析方法

徐 照 · 著



东南大学出版社  
THEAST UNIVERSITY PRESS

**BIM 技术**

与建筑能耗评价分析方法

**BIM Based Evaluation and Analysis**  
on Building Energy Consumption

责任编辑：丁 丁  
责任印制：周荣虎  
封面设计：毕 真  
封面图片绘制：叶鑫涛

ISBN 978-7-5641-6418-8



9 787564 164188 >

定价：58.00元

国家自然科学基金青年基金资助项目(71302138)

江苏高校优势学科建设工程资助项目

# BIM 技术与建筑能耗评价分析方法

徐 照 著



东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

## 内 容 提 要

随着“绿色建筑”“住宅产业现代化”等概念的提出,资源节约与环境友好是今后建筑业的发展方向,人们对于建筑的能耗与其带来的环境影响越来越关注。如果在建设的各个阶段将环境保护放在重要的地位可以减少建筑能耗的负面影响。本书的研究目标就是基于建筑信息模型(BIM)技术的角度,建立针对建筑工程项目能耗计算、性能评价的定量与定性相结合的方法体系,并进行案例分析。构建 BIM 模型,然后对模型进行有效处理并进行绿色建筑分析。在建筑工程能耗分析方面,将分析结果与绿色建筑评价指标相联系,确定评价指标体系,结合贝叶斯网络确定指标间的关系,构建 BIM-Bayes 综合评价优化模型,利用贝叶斯网络的推理功能,提出改进绿色建筑设计方案的优化建议。

本书可供绿色建筑与绿色施工相关领域研究人员和工程项目设计、施工与运维阶段的管理人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

BIM 技术与建筑能耗评价分析方法/徐照著. —南京:  
东南大学出版社, 2017. 9

ISBN 978-7-5641-6418-8

I. ①B… II. ①徐… III. ①建筑能耗—能耗计算—  
应用软件 IV. ①TU111.19-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 234577 号

## BIM 技术与建筑能耗评价分析方法

著 者 徐 照

---

出版发行 东南大学出版社  
社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096  
出 版 人 江建中  
责任编辑 丁 丁  
编辑邮箱 d.d.00@163.com  
网 址 <http://www.seupress.com>  
电子邮箱 [press@seupress.com](mailto:press@seupress.com)  
经 销 全国各地新华书店  
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司  
版 次 2017 年 9 月第 1 版  
印 次 2017 年 9 月第 1 次印刷  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 黑白:12 彩色:1  
字 数 316 千  
书 号 ISBN 978-7-5641-6418-8  
定 价 58.00 元

---

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

# 前言

近年来,我国建筑行业迅猛发展,取得了巨大成就,但建筑市场规模的不断扩大也带来了不可忽视的环境问题。根据世界可持续发展工商理事会(WBCSD)的报告,目前在全世界能源消耗中,建筑能耗占40%,是工业能耗的1.5倍。随着环境与资源问题的日益严峻,绿色建筑设计与建筑的关注程度得到提高,环境保护已经走上法制化道路。如何分析建筑物在全生命周期过程中对环境产生的负面影响及可能导致的一些环境问题,如何采取措施将建筑业发展对环境的负面影响降到最低水平,是摆在环保者和建设者面前的一项艰巨任务。本书的研究目标就是基于建筑信息模型(BIM)技术的角度,建立针对建筑工程项目能耗计算、性能评价的定量与定性相结合的方法体系,并进行案例分析。

本书首先针对大规模进行项目建设带来的资源消耗与环境问题说明了开展建设项目建筑信息模型和全生命周期能源消耗与环境影响评价集成方法研究的背景及意义,分析目前国内外的研究现状并指出存在的不足。目前,专家学者们对绿色建筑评价方法的研究很多,但是对结合BIM技术的绿色建筑评价方法的研究却很少。BIM技术可对建设项目全生命周期的全部信息进行高效管理,促进信息及时有效沟通,实现信息共享。考虑建筑行业信息化的转型趋势,构建基于BIM技术的绿色建筑评价模型具有较高的理论价值和实际应用价值。基于此背景,本书主要从建筑能耗分析与环境影响评价方法两个部分进行了研究。

在建筑工程能耗分析方面,本书以绿色建筑为研究对象,主要目的是研究建立客观的评价与优化模型。在国内外研究的基础上,运用文献综述法、模型构建法、问卷调查法、实证分析法等方法展开研究。首先对比分析国内外常用的绿色建筑评价指标体系,确定评价指标的基本框架,并对可量化的指标及其量化方法进行细化分析。其次,构建BIM模型,然后对模型进行有效处理并导入Ecotect进行绿色建筑分析,得到五个方面的分析结果,研究导致分析结果的原因,得到细化的子项指标。将Ecotect分析结果与绿色建筑评价指标相联系,使用BIM软件进行可持续分析,将分析结果与绿色建筑评价指标相联系,对导致分析结果的原因进行探究,决定以绿色建筑节能评价为例,确定评价指标体系。最后,结合贝叶斯网络确定指标间的关系,构建BIM-Bayes综合评价优化模型;利用贝叶斯网络的推理功能,提出改进绿色建筑设计方案的优化建议。BIM-Bayes综合评价优化模型的突出优点是:可对设计方案进行指导优化,以及利用贝叶斯软件可省去复杂的权重计算过程,简单便捷。其优势体现在以下两点:第一,以设计为导向,设计者可根据分析结果直接在BIM模型中进行修改;第二,贝叶斯网络可直接计算终节点的综合概率值,省去复杂的权重计算过程。同时,选取某建筑来分析验证模型的合理性。通过贝叶斯网络的正向推理、逆向推理和敏感性分析,可对建筑方案提出优化意见,具有现实意义。

此外,在基于全生命周期的建设项目环境影响评价方面,以建筑材料及部件作为建筑的研究对象,其生命周期的各个阶段,从生产、施工到建筑的使用、拆除都与能源和环境有着密

切的关系。目前,国内外建筑节能领域的主要方向之一是从 LCA(全生命周期评估)的角度讨论工程项目的能源消耗及其环境影响程度。本书首先对全生命周期评估方法的发展、定义、框架等内容进行系统阐述。运用 BIM 技术及工具构建建设项目的多维信息模型,并进一步定义 BIM 模型元素和建筑材料的关系,量化建筑物建筑材料的环境影响,对这五个阶段内的资源和能源的消耗进行清单分析,得到资源、能源的消耗清单和污染物的排放清单,运用层次分析法建立建设项目环境影响评价指标库,以期衡量建设项目的可行性。以某大学土木交通教学科研楼的设计方案为例,建模并进行计算,分析该建筑物的楼板对环境影响的重要因素,评价建筑构配件——楼板全生命周期的环境表现,得出建筑构部件生命周期内对环境影响较大的阶段及产生较大环境影响的环境类型,从而有针对性地找出各个阶段改善环境的方法和措施。为建设项目全生命周期环境影响评价提供新思路,为建筑物设计阶段的方案优化提供理论支持,寻找提高建筑物能效的措施和方法,进而为人们创造出环境污染小、资源消耗少的绿色建筑。

本书在写作过程中,参考了许多国内外相关专家学者的论文和著作,已在参考文献中列出,在此向他们表示感谢!同时本书的形成得到了本系几位研究生的帮助,包括陈楠、兰晶晶、陈茜等,在此亦向他们表示感谢!对于可能遗漏的文献,再次向其作者表示感谢及歉意。同时,书中难免有错漏之处,敬请各位读者批评指正,不胜感激!

徐 照

2017 年 6 月于东南大学

# 目 录

## 前言

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第一章 绪论                 | 1  |
| 1.1 研究背景及意义            | 1  |
| 1.1.1 研究背景             | 1  |
| 1.1.2 研究意义与目标          | 2  |
| 1.2 国内外研究现状            | 3  |
| 1.2.1 全生命周期环境影响评价研究    | 3  |
| 1.2.2 绿色建筑能耗分析方法       | 6  |
| 1.2.3 结合信息技术的 LCA 评价方法 | 8  |
| 1.3 研究内容               | 9  |
| 第二章 BIM 技术与全生命周期评价理论   | 11 |
| 2.1 BIM 建筑信息模型技术       | 11 |
| 2.1.1 BIM 相关理论         | 11 |
| 2.1.2 BIM 软件工具         | 13 |
| 2.1.3 BIM 技术应用         | 16 |
| 2.2 绿色建筑与能耗分析          | 18 |
| 2.2.1 绿色建筑的定义          | 18 |
| 2.2.2 建筑节能现状           | 19 |
| 2.2.3 绿色建筑预评估          | 20 |
| 2.2.4 绿色建筑评价体系         | 21 |
| 2.3 环境影响评价中的 BIM 应用    | 26 |
| 2.3.1 BIM 技术特点与应用      | 27 |
| 2.3.2 BIM 技术在环评中的适用性   | 29 |
| 2.3.3 结合 BIM 的环评工具     | 31 |
| 2.4 全生命周期评估与决策分析方法     | 32 |
| 2.4.1 全生命周期评估定义        | 32 |
| 2.4.2 全生命周期评估框架        | 33 |
| 2.4.3 建设项目 LCA 决策分析方法  | 34 |
| 2.4.4 贝叶斯网络            | 35 |

|                                         |           |
|-----------------------------------------|-----------|
| 2.5 BIM 与 LCA 分析方法的结合 .....             | 37        |
| 2.5.1 BIM 与 LCA 结合的优势及应用 .....          | 37        |
| 2.5.2 BIM-LCA 功能分析模块 .....              | 37        |
| 2.5.3 BIM-LCA 环境影响评价分析的意义 .....         | 39        |
| <b>第三章 基于 BIM 技术的绿色建筑评价体系 .....</b>     | <b>40</b> |
| 3.1 分析流程 .....                          | 40        |
| 3.1.1 BIM 模型的构建 .....                   | 41        |
| 3.1.2 Ecotect 模型的构建 .....               | 43        |
| 3.1.3 绿色评价分析结果 .....                    | 45        |
| 3.2 评价指标 .....                          | 53        |
| 3.2.1 指标体系设计 .....                      | 53        |
| 3.2.2 指标量化 .....                        | 54        |
| 3.3 基于 BIM 的评价指标体系 .....                | 57        |
| 3.3.1 BIM 技术与绿色建筑评价 .....               | 57        |
| 3.3.2 评价体系的构建 .....                     | 58        |
| <b>第四章 结合 BIM 的贝叶斯网络评价与优化方法设计 .....</b> | <b>70</b> |
| 4.1 影响因素参数化 .....                       | 70        |
| 4.2 指标优化 .....                          | 70        |
| 4.2.1 遮阳构件优化 .....                      | 71        |
| 4.2.2 自然通风性能优化 .....                    | 72        |
| 4.3 BIM-Bayes 综合评价优化模型 .....            | 73        |
| 4.3.1 贝叶斯网络模型的构建 .....                  | 74        |
| 4.3.2 BIM-Bayes 综合评价模型 .....            | 78        |
| 4.3.3 BIM-Bayes 综合优化模型 .....            | 80        |
| 4.4 评价模型的分析优化 .....                     | 83        |
| 4.4.1 案例概述 .....                        | 83        |
| 4.4.2 评价结果与优化分析 .....                   | 85        |
| <b>第五章 BIM-LCA 环境影响评价分析 .....</b>       | <b>88</b> |
| 5.1 分析框架与步骤 .....                       | 88        |
| 5.1.1 确定研究目的 .....                      | 88        |
| 5.1.2 确定研究范围 .....                      | 88        |
| 5.2 模型构建与计算 .....                       | 89        |
| 5.2.1 BIM 模型构建 .....                    | 90        |
| 5.2.2 属性信息关联与数据库的构建——清单分析 .....         | 94        |
| 5.3 模拟结果分析 .....                        | 98        |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 第六章 BIM-LCA 的环境影响决策方法——AHP 层次分析法 ..... | 100 |
| 6.1 BIM-LCA 的环境影响决策目标 .....            | 100 |
| 6.2 BIM-LCA 的环境影响决策对象 .....            | 100 |
| 6.2.1 设计方案的选择 .....                    | 100 |
| 6.2.2 建设项目子系统环境影响分析决策 .....            | 100 |
| 6.3 决策方法——AHP 层次分析法 .....              | 101 |
| 6.3.1 AHP 层次分析法理念 .....                | 101 |
| 6.3.2 构建层次分析模型 .....                   | 101 |
| 6.3.3 建立判断矩阵 .....                     | 102 |
| 6.3.4 计算相对权重及最大特征根 .....               | 103 |
| 6.3.5 判断矩阵一致性检验 .....                  | 104 |
| 6.4 BIM-LCA 的环境影响决策结论 .....            | 104 |
| 第七章 案例分析一——建筑全生命周期环境影响评价 .....         | 105 |
| 7.1 土木交通教学科研楼概况 .....                  | 105 |
| 7.2 建筑物全生命周期环境影响评价体系的应用 .....          | 106 |
| 7.2.1 研究目的 .....                       | 106 |
| 7.2.2 研究范围 .....                       | 107 |
| 7.2.3 清单分析 .....                       | 109 |
| 7.3 环境影响因素决策分析模型 .....                 | 116 |
| 7.3.1 建立层次结构评价框架 .....                 | 116 |
| 7.3.2 建立判断比较矩阵 $R$ .....               | 117 |
| 7.3.3 相对权重计算 .....                     | 118 |
| 7.3.4 矩阵相对权重及一致性检验 .....               | 119 |
| 7.3.5 综合计算 .....                       | 120 |
| 7.4 减少建筑全生命周期各阶段环境影响的措施 .....          | 121 |
| 7.4.1 建筑材料及构配件生产阶段 .....               | 121 |
| 7.4.2 维护阶段 .....                       | 121 |
| 7.4.3 生命期末端 .....                      | 121 |
| 第八章 案例分析二——建筑日照分析 .....                | 123 |
| 8.1 工程概况 .....                         | 123 |
| 8.2 软件功能介绍 .....                       | 125 |
| 8.2.1 Revit Architecture 2015 .....    | 125 |
| 8.2.2 Ecotect 日照分析软件 .....             | 126 |
| 8.2.3 Green Building Studio 能耗模拟 ..... | 126 |
| 8.3 建筑模型构件 .....                       | 128 |
| 8.3.1 Revit 建模过程 .....                 | 130 |
| 8.3.2 Ecotect 建模过程 .....               | 133 |

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 8.3.3 Revit 日光研究 .....                                 | 134 |
| 8.3.4 Ecotect 节能分析 .....                               | 135 |
| 8.3.5 Green Building Studio 能耗模拟 .....                 | 135 |
| 8.4 节能分析 .....                                         | 136 |
| 8.4.1 Ecotect 节能研究 .....                               | 136 |
| 8.4.2 Green Building Studio 能耗模拟 .....                 | 158 |
| 8.5 节能计算 .....                                         | 162 |
| 8.5.1 材料改进 .....                                       | 163 |
| 8.5.2 被动式优化设计 .....                                    | 164 |
| 8.5.3 添加遮阳构件 .....                                     | 165 |
| 8.5.4 使用地暖设备替换空调 .....                                 | 167 |
| 第九章 结论与展望 .....                                        | 171 |
| 参考文献 .....                                             | 173 |
| 附录 A:关于结合 BIM 技术的建设项目全生命周期环境影响评价与决策分析<br>方法研究的调研 ..... | 179 |
| 附录 B:绿色建筑节能评价指标调查问卷 .....                              | 181 |
| 彩图附录 .....                                             | 185 |

# 第一章 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

### 1.1.1 研究背景

随着我国经济的高速发展,经济发展与能源利用和环境保护的矛盾日益突出。建筑业作为我国的支柱产业,建筑能耗总量逐年上升,其在能源消耗总量的占比已从20世纪70年代末的10%上升至2015年末的33%。根据统计资料显示,2011年,我国现有房屋建筑面积为400亿 $\text{m}^2$ 左右,其中高能耗建筑占95%,而在每年的新建房屋中,高能耗建筑占80%。我国处于建设的鼎盛时期,每年新建的房屋面积近16亿~20亿 $\text{m}^2$ ,据此推算,到2020年,房屋建筑面积约580亿 $\text{m}^2$ ,其中高能耗的建筑的占比约92%,将直接加剧能源危机。同时,建筑业对环境的污染也日益加剧,包括建筑粉尘、建筑垃圾、固体废弃物和建筑噪声等。因此,减轻建筑业对自然资源的负荷和其对自然环境的污染,创造健康、舒适、可持续发展的建筑发展环境是贯彻国家可持续发展战略、实现节能规划目标的重要措施,也符合全球的发展趋势。在这一过程当中,我们注意到:

一方面,我国建筑行业迅猛发展,取得了巨大成就,但建筑市场规模的不断扩大也带来了不可忽视的环境问题。根据世界可持续发展工商理事会(WBCSD)的报告,目前在全世界能源消耗中,建筑能耗占40%,是工业能耗的1.5倍<sup>[1]</sup>。随着环境与资源问题的日益严峻,绿色建筑设计 with 建筑的关注程度得到提高,环境保护已经走上法制化道路。如何分析建筑物在全生命周期过程中对环境产生的负面影响及可能导致的一些环境问题,如何采取措施将建筑业发展对环境的负面影响降到最低水平,是摆在环保者和建设者面前的一项艰巨任务<sup>[2]</sup>。

另一方面,我国高度重视建筑行业的资源和环境问题,制定了一系列的标准和条例,促进绿色建筑的发展。以南京市为例,2013年6月1日起,全市范围内政府投资的新建建筑、新建的保障性生活住房、单位建筑面积超过2万 $\text{m}^2$ 的新建大型公共建筑、八大新城(片)区和四个国家级开发区内以及省级以上建筑节能与绿色建筑示范区内的新建民用建筑,全面推行绿色建筑标准。“十二五”期间,南京市新建绿色建筑1500万 $\text{m}^2$ ,2015年末,40%的城镇新建民用建筑已达到绿色建筑的标准要求。虽然绿色建筑被频繁提及,已引起广泛的关注和重视,但由于我国绿色建筑的发展年限短,绿色建筑的定义、评价和实际应用方面仍较模糊。

建筑材料工业是一个以矿产资源为基本原料、以化石能源为主要燃料、以高耗能窑业为生产作业方式为主体的产业,其能耗向来是能源消耗的重要组成部分<sup>[3]</sup>。目前建筑业每年消耗的钢材和电量所占全国消耗量的比例均已突破了 30%<sup>[4]</sup>,继而这些能源的消耗引起许多环境问题,包括全球气候变暖、酸雨、大气悬浮颗粒、光化学污染、自然生态破坏等,其中,最为显著的环境问题以温室气体的排放引起的全球气候变暖和二氧化硫为主的污染排放导致的酸雨等大气环境问题最为显著。综上,建材产业能够对环境造成巨大的影响,因此建材工业也成为我国节能减排工作的重中之重<sup>[5]</sup>。如何使得建筑和房地产业在发展的过程中减少对材料、土地、淡水的需求,减少对环境的污染和城市热岛效应的产生是重要的问题。

BIM(Building Information Modeling)技术从建筑业起源,通过数字化的方式在项目施工前模拟项目的物理和功能特征,有利于提高项目的经济性和环境友好性。BIM 技术可在项目的完整过程里,通过统一协调各类信息可视化地模拟真实项目的物理构造、性能等,并通过反馈优化项目属性。尽管我国的 BIM 技术还处于初级阶段,但了解、使用和发展 BIM 技术,已经成为建筑行业信息化转型的必然趋势。

在我国,建筑能耗为社会能耗的 30%,随着“绿色建筑”“住宅产业现代化”等概念的提出,资源节约与环境友好是今后建筑业的发展方向,人们对于建筑的能耗与其带来的环境影响越来越关注。规划设计阶段对于环境负担的影响应受到格外的重视,设计思想的超前对于减少环境负担具有重要意义<sup>[6]</sup>。如果在建设的各个阶段将环境保护放在重要的地位可以减少建筑能耗的负面影响。为了优化日常建筑,提高能源效率,让在其中居住和工作的人们生活得更好,就需要在设计阶段选择相对最优、能耗最少、对环境影响小的方案,并将决策基于标准化的定量度量系统,以便于客观地对建筑材料及部件在整个生命周期里的环境影响进行比较,从而提高建筑产品在生命周期内的环境表现,具有重要的现实意义。

### 1.1.2 研究意义与目标

从目前来看,专家学者们对建筑分析与评价方法的研究很多,但是结合 BIM 技术从全生命周期的角度开展的建筑能耗分析与评价方法的研究却较少。我国的 BIM 技术还处在雏形阶段,但是认识并发展 BIM 技术已是实现行业的信息化的趋势。构建基于 BIM 技术的建筑能耗分析评价模型具有较高的理论价值和实际应用价值,此研究方向应该引起学者们的关注,研究空间较大。

从全生命周期的角度探索 BIM 技术与建筑能耗分析方法相结合的研究:①有利于探讨建设项目全生命周期环境影响信息量化分析与评价的新方法。通过运用全生命周期评估的方法研究建筑产品的环境影响,有利于促进全生命周期评估在建筑领域理论研究上的发展与完善,推进建筑项目环境评价工作的开展。②有利于深化对 BIM 模型与模型数据库的深入挖掘与运用,将 BIM 技术与全生命周期环境影响整合,丰富了 BIM 技术的应用研究与理论外延,扩大了模型数据库的使用范围。③有利于促进建设项目的信息管理,全生命周期评价与信息技术的结合为建设项目的全过程管理带来极大的便利,为评价建筑的环境影响提供新的视角。

结合 BIM 信息模型进行绿色建筑能耗影响因素参数化评价:①有利于从建筑性能表现

的分析结果出发进行评价工作实践,利用 BIM 软件信息开放互用的特点,先在 Revit 中构建模型,然后将 Revit 模型导入 Ecotect 软件中进行分析,得到建筑物的热环境、光环境、日照和环境影响等可视化的分析结果,将分析结果进行分类,建立基于 BIM 技术的绿色建筑评价指标体系。②有利于建立综合评级打分体系,即加入各评价标准的权重体系。通过数学分析模型(本研究使用贝叶斯网络模型)确定绿色建筑评价指标的权重,即将概率转化为权重。由于贝叶斯网络推理基于贝叶斯概率理论,其推理过程的实质即是概率计算。因此,通过贝叶斯网络可以判断哪些因素对建筑的绿色度有影响、影响程度的大小及各指标之间的影响关系如何等。③可操作性强,时效性高。在设计阶段分析 BIM 模型,设计师可直接进行操作,并将分析结果反馈到设计方案中,进行方案的修改和优化,提高建筑的绿色化程度。BIM 软件提供的绿色建筑分析评价不仅对未来的项目具有指导意义,对现在正在进行中的项目也有优化引导价值,即评价结果更具现实意义。

建筑物作为一种特殊的产品,决定了它对环境影响的范围更广、时间更长。生命周期评价可对其上游产品或者建筑物的整个生命周期进行跟踪分析,得出建材生产阶段、建筑物施工阶段、建筑物使用阶段、建筑拆除阶段以及建筑废弃物处置阶段五个阶段的消耗清单。根据清单分析结果建立建筑环境影响评价体系,通过对建筑产品整个生命周期的环境影响进行评价,得到总体环境代价和资源代价,进而寻求改进的途径和措施,有利于创建一个资源消耗少、生态影响小、有益健康的绿色建筑模式,有利于建筑设计规划、建筑施工和建筑环境保护措施建设得更加全面、更加科学,对建设资源节约型、环境友好型社会有重大意义。BIM 技术所提供的建设项目全面的信息能够为建筑全生命周期环境影响评价提供先进便捷的信息化技术,进而推动了建筑信息化发展。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 全生命周期环境影响评价研究

#### 1) 国外研究现状

国外对建材和建筑物生命周期评价的研究开展得较早,已取得了一定的研究成果。生命周期评价最早出现在 20 世纪 60 年代末 70 年代初的美国,英国的 BRE 和美国的 BEES 进行了积极的尝试,并开发出了比较全面的评价系统和软件,荷兰的 SIMA 等机构也对建筑物能源利用和其他影响进行研究,并针对特定项目进行实例分析。目前,建筑全生命周期的环境影响在国内外都已经得到了广泛的重视和研究,很多国家已经建立了本国的建筑环境影响评价系统和理论。这些评价系统可分为:一类是条款式的定性评价系统;另一类是依托于全生命周期评估理论建立的定量评价系统。国外对 LCA 的部分研究成果参见表 1-1 和表 1-2。

目前,从全生命周期评估的角度讨论工程建设项目的能源消耗及其环境影响程度并进行跟踪控制是国内外建筑节能领域的主要方向之一,国内外许多学者对建设项目提出了具体的生命周期评价方法。

表 1-1 国外对 LCA 的研究成果

| 年份   | 部门机构/组织             | 研究成果                                                                         |
|------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1989 | 荷兰国家居住、规划与环境部(VROM) | 针对传统的“末端控制”环境政策,首次提出了面向产品的环境政策。这种面向产品的环境政策涉及产品的生产、消费到最终废弃物处理的所有环节,即所谓的产品生命周期 |
| 1990 | 国际环境毒理学与化学学会(SETAC) | 首次主持召开了有关生命周期评价的国际研讨会,在该次会议上首次提出了“生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)”的概念     |
| 1997 | 国际标准化组织(ISO)        | 在总结世界先进环境管理经验的基础上,制定了生命周期评价原则与框架,将产品生命周期中对环境的影响界定为人类健康、资源利用及生态后果三个方面         |

表 1-2 部分发达国家对建筑生命周期评价研究成果

| 国别  | 机构                                    | 研究成果                                                                                                                                                                      |
|-----|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 英国  | BRE (Building Research Establishment) | 1990 年开发的 BREEAM(Building Research Establishment Environment Assessment Method)系统是第一个投入市场的评价系统,其主要目的是对减轻建筑物所造成的环境影响提供权威的指导,同时提高建筑室内环境的健康程度和舒适度                            |
| 美国  | 国家标准与技术研究院(NSIT)联合其他机构                | 开发的 BEES(Building for Environmental and Economic Sustainability)计算机评价软件系统,提供了一个合理选择环境和经济平衡的建筑产品的系统分析工具,其采用 LCA 方法对建筑产品的环境性能进行评估,分析了产品的所有生命周期阶段:原材料开采、制造、运输、安装、使用、再循环和废物管理 |
| 法国  | Ecobilan 集团公司                         | 把生命周期评价方法应用于建筑行业,完成了一些工业实例研究                                                                                                                                              |
| 加拿大 | 安施纳可持续环境材料研究所                         | 设计了一套可以应用于实际的、易于使用的决策工具——Athena 计算模型,通过借助这个计算模型,可对建筑物生命周期的不同阶段各种材料的物流和能流及其环境影响因子进行定量计算                                                                                    |
|     | ATHNEATM 系统                           | 采用生命周期评价方法评价新建、改建、重建等建筑的环境影响                                                                                                                                              |

Harish Kumar Jeswani, Adisa Azapagic 等<sup>[7]</sup>在现有的 ISO 生命周期评价框架的基础上,结合不同的环境、经济和社会评价的方法和理念,拓展和深化了 LCA 评价方法,促进了 LCA 在可持续决策中的应用。Ignacio Zabalza Bribian, Alfonso Aranda Uson 等<sup>[8]</sup>提出了一种简化的生命周期评价方法,并应用于建筑的节能认证,对建筑整个生命周期中的能源消耗进行计算,结果表明:居民住宅中,取暖所消耗的能源所占比重最大,其次为建筑材料。Kanghee Lee 等<sup>[9]</sup>将建筑生命周期划分为建设、运营维护、拆迁及拆除等三个阶段,以能源消耗和二氧化碳排放为主要评价指标,建立了 SUSB-LCA 模型,提出一种建筑生命周期评价方法。Daniel Kenenberger<sup>[10]</sup>对建筑生命周期内的相关建筑构件进行深入研究,并简化建筑构件。Adalberth 等<sup>[11]</sup>对瑞典 4 栋住宅进行了全生命周期评价,发现住宅使用阶段的

环境影响量占全生命期环境影响总量的 70%~90%,运行能耗占生命期总能耗的 85%,建筑材料生产和施工能耗约占 15%。Scheuer 等<sup>[12]</sup>计算了美国一栋新建大学校园建筑的全生命期(75 年)能耗和环境污染量,得出运行能耗占全生命期能耗量的 97.7%,建筑材料与部品生产能耗占 2%,运输、施工和拆除能耗只占 0.1%。在环境影响方面,运行阶段的各种环境污染物在全生命期污染物总量中的比重也十分显著:温室气体排量为 93.4%,酸性物质为 89.5%,臭氧消耗为 82.9%,固体废物为 61.9%。

## 2) 国内研究现状

建筑节能概念在 20 世纪 70 年代能源危机后被正式提出。此后,世界上的发达国家便开始致力于研究与推行建筑节能技术,而我国却一直忽视了这一方面的研究。在建筑生命周期内能耗评价方面,国内的研究工作虽然起步较晚,但发展非常迅速,已成为学术界所关注的焦点和研究热点。生命周期评价应用在我国建筑领域还处于研究初级阶段。1999 年,国家质量技术监督局发布等同于 ISO14040 的《生命周期评价——原则与框架》(GB/T 24041),2000 年发布等同于 ISO14041 的《生命周期评价——目的与范围的确定和清单分析》(GB/T 24041),2002 年又发布了分别等同于 ISO14042 和 ISO14043 的《生命周期评价——生命周期解释》(GB/T 24043),由此建立了一整套生命周期分析的标准体系。

目前,生命周期分析方面的主要研究成果有绿色奥运建筑研究课题组编写的《绿色奥运建筑评价体系》和《绿色建筑评价标准》。前者根据建设项目在规划、设计、施工、验收与运行管理四个阶段不同的特点和要求,分别从环境、能源、材料与资源、室内环境质量等方面阐述了如何全面地提高奥运建筑的生态服务质量并有效地减少资源与环境负荷。《绿色建筑评价标准》的评价体系主要包括六个评价指标:节地与室外环境、节能与能源利用、节水与水资源利用、节材与材料资源利用、室内环境质量以及运营管理(住宅建筑)和全生命周期综合性能(公共建筑)。

全生命周期评估作为建设项目环境影响评价的工具,一般用于已完成的建设项目,无法弥补设计阶段的先天性不足,更无法支持设计方案的选择和评价,因此在支持建设项目方案决策时有一定的局限性,且数据输入量大、容易出错。针对建筑项目生命周期评价方面的研究,国内大部分的文献只是根据 LCA 的概念提出评价的理论框架。陈江红等<sup>[13]</sup>按照生命周期方法建立了整体的评价框架,依据此框架分别计算了住宅建材物化阶段、运输阶段、施工、修复和拆除阶段及使用阶段的环境影响,并对住宅建筑全生命周期整体的环境影响情况进行了分析。张浩等<sup>[14]</sup>采用生命周期评价方法,以初级能源消耗、酸化和富营养化、可吸入无机物和全球暖化为评价指标,建立了浮法玻璃从原料开采到产品出厂的生命周期模型,研究了浮法玻璃生命周期的环境影响,并对浮法玻璃生产过程采用不同燃料的环境影响进行了评价。徐杰峰等<sup>[15]</sup>应用生命周期评价方法,以我国橡胶种植为例,把橡胶种植生命周期划分为原料、农资化、橡胶种植、运输等 4 个阶段,考虑了全球变暖(GWP)、环境酸化(AP)、水体富营养化(EP)、光化学烟雾形成(POCP)、人体健康损害(HTP)、不可更新资源消耗(ADP)等 6 类潜在影响,对得到 1 kg 橡胶(以干胶计)的潜在环境影响进行了分析评价。刘沐宇等<sup>[16]</sup>从酸化、富营养化、全球变暖、固体废弃物等几个方面分析了桥梁原材料的生产加工、现场的施工、桥梁的运营和维护这 3 个阶段带来的综合环境影响。应用该方法对武汉市南太子湖大桥生命周期环境影响进行分析评价。桥梁运营维护阶段主要考虑雨水冲刷桥面产生的污染物,结果表明,固体废弃物在建筑材料生产过程和桥梁施工过程中的环境影响最

大,车辆排放  $\text{CO}_2$  而导致的全球变暖在桥梁运营维护过程中环境影响显著。赵平等<sup>[17]</sup>运用生命周期评价对建筑材料的资源使用、能源消耗和环境影响进行了分析,认为从建筑物化能角度来看,砖混结构建筑的资源使用量最大,钢结构建筑的环境负荷最小。另一方面,对可重复使用材料和生态材料的利用也引起了研究者的注意。燕鹏飞和杨军<sup>[18]</sup>通过评价 3 种木结构材料的物化环境影响,指出深加工的工程木材对于节约资源和减少污染物排放意义重大。刘顺妮<sup>[19]</sup>对水泥进行了全生命周期评价,指出水泥生产和使用的环境影响主要表现为温室效应,通过对水泥煅烧工艺的改进可以提高其环境性能。常远和王要武<sup>[20]</sup>通过运用混合 LCA 模型,测算了 2007 年我国新建城市住宅的全生命期能耗量,发现运行能耗占全生命期总能耗的 70%,全生命期能耗量对于建筑采暖能耗强度和其他生活终端能耗强度较为敏感。

### 3) 面向建设项目的 LCA 评价方法

生命周期评价是对所有输入与输出产品和整个生命阶段产品系统对环境潜在影响的评价。输入的是进入该过程的物质或能量,输出的是离开该系统的物质或能量。生命周期评价能帮助使用者以数量的形式表明对环境的影响,以便于从环境角度出发,对产品做出正确的决策和选择。建筑物生命周期评价的主要目的在于通过对建筑物整个生命周期各个环节环境影响大小的定量分析,找出环境影响较大的因素,寻求变革生产工艺的出发点和实行生态设计的现实依据,从而改善整个建筑产品系统的环境性能<sup>[21]</sup>。Kenenberger 和 Althaus 基于不同程度的简化,针对不同的建筑构件(例如木墙、混凝土顶板)的全生命周期评估提出了详细的分析方法<sup>[22]</sup>。Lee 等通过对比国内外的建筑设计方案,基于能源消耗和二氧化碳的排放水平,为建筑全生命周期评估的发展提供理论基础<sup>[23]</sup>。武慧君<sup>[21]</sup>基于全生命周期评价理论,开发建筑物环境影响评价模型 BEPAS,并分析案例的环境影响水平。李兆坚和江亿<sup>[24]</sup>在分析 1998 年至 2003 年我国建筑总能耗后指出,在建筑运行能耗中暖通空调能耗比重最大(超过 60%),降低运行能耗是建筑节能的关键,但减少建筑材料能耗同样意义重大。

## 1.2.2 绿色建筑能耗分析方法

### 1) 国外研究现状

随着绿色建筑研究的不断深入与拓展,绿色建筑评价在国际上得到广泛的重视。自 20 世纪 90 年代以来,国际上就对绿色建筑评价体系和从一些创新角度出发的绿色建筑评价方法展开了研究,推动了绿色建筑评价的进步。

1996 年, Bossink 和 Brouwers 在《建筑垃圾:量化和来源的评估》中写到垃圾很大比例的组成部分即是建筑垃圾,应引起各界的重视。作者细致地量化分析建设周期内的建筑垃圾的来源等,尤其是原材料的组成,包括使用产品的尺寸、建造者的影响、设计和建造活动的过程等<sup>[25]</sup>。

1999 年, Niklaus Kohler 在《绿色建筑相关挑战:从一个观察者的视角》一文中提到,国际绿色建筑挑战的目标和成就是分析项目,并讨论了评估工具、设计工具、环境管理和大数据问题等。文章提出了全生命周期的概念,并提出绿色建筑应有“可持续发展”这个更大的概念,可持续发展是长期的,包括建筑材料和环境问题等<sup>[26]</sup>。

2004 年, Victor Olgyay 和 Julee Herdt 在《绿色建筑评估的生态服务标准应用》中提到

生态建筑的两个主要评价对象是建筑和环境。理想化的绿色建筑是生态环境的一部分,对环境产生的影响较小。绿色建筑评估标准使用了建筑设计标准的定义,为了实现评价,要量化建筑对环境的影响结果和其关系。文章提出,减少建筑的能耗、使用低能耗的建筑材料是减小建筑对环境影响的重要方法<sup>[27]</sup>。

2005年,Rakesh Kumar 和 S. C. Kanshik 在《屋顶、围护结构等建筑保温隔热层的性能评估》中写到使用 Matlab 中的傅里叶转换(FFT)技术编写建筑屋顶的模拟代码,并通过模拟构件验证建筑构件的准确性。文章的模型模拟结果的精确度误差在 $\pm 3.3\%$ 至 $\pm 6.1\%$ 之间,可用于屋顶和围护结构的热评价,通过修改模型参数可模拟不同绿色建筑的屋顶<sup>[28]</sup>。

2008年,Grace K. C. Ding 在《可持续住宅——环境评估的工具》中提出,建筑在建材的使用、建造和运行过程中对环境的影响较大,已经引起各方高度的重视。仅依靠设计阶段实现可持续发展的目标是不够的,或者采用合适的管理方法也不能解决问题。建筑的可持续评价应该在设计阶段的早期(详细设计阶段)就考虑其重要性和多维评价建筑可持续性的标准、方法<sup>[29]</sup>。

2009年,Oscar Ortiz, Francesc Castells 和 Guido Sonnemann 在《建筑产业的可持续发展:基于 LCA 的近期发展回顾》中提到建造行业与社会、经济和环境的可持续性息息相关。从原材料的使用到建筑物的拆除,通过应用 LCA 的方法可以使这些方面最优化。文章讨论了不同建材和构件的 LCA 方法和框架,并提出 LCA 方法的使用不仅仅是满足消费者对建筑环境友好性的需求,同时是提高建筑产品竞争力的重要手段<sup>[30]</sup>。

2011年,A. J. Marszal 等在《低能耗建筑:定义和计算方法概述》中写到低能耗建筑应作为建筑设计阶段的目标之一。然而现行的国际标准中关于低能耗建筑并没有清晰、可持续发展的定义和普遍认同的能耗计算方法。文章提出了可能的低能耗建筑的定义,包括:指标的平衡、平衡期、内在的能源使用类型平衡、能源平衡的类型、公认的可再生能源供应选择、连接能源的基础设施和能源使用效率的要求等,还提出了粗略的能耗计算方法<sup>[31]</sup>。

2014年,Mario Tarantini, Arianna Dominici Loprieno 和 Pier Luigi Porta 在《建筑原材料和构件的绿色公共采购的全生命周期方法:以窗户案例研究为例》中提出使用全寿命周期的方法展示木窗支持标准定义的过程。文章提出建筑原材料和构件的环境评估框架,使用 LCA 的案例研究方法描述分析的结果并用于定义环境标准<sup>[32]</sup>。

## 2) 国内研究现状

2003年,李路明从研究方法、实例介绍等角度对比了西方国家的绿色建筑评价体系,分析出国外研究对我国绿色建筑体系建立的指导意义,并提出了几点建议和看法<sup>[33]</sup>。文章指出几个可持续发展评价的指导思想,包括费用效益分析法、生态足迹法等。2005年,黄琪英提出“经济性”这一指标,将完整的绿色建筑评价体系分为经济性、绿色性和地域性。文章使用层次分析法构建了模糊综合评价模型,更为科学合理<sup>[34]</sup>。2007年,石超刚提出绿色建筑评价可持续发展的目的是减少资源浪费,改善人居环境。文章通过使用比较法、归类法和实证法等方法建立可持续发展趋势下的绿色建筑评价体系<sup>[35]</sup>。2009年,文艺植提出基于 LEED 的绿色建筑经济评价方法,提出确定绿色建筑经济评价的基本要素即确定建筑的全寿命周期、基准收益率、费用与效益,构建了 LEED-H 的绿色建筑经济评价模型<sup>[36]</sup>。2010年,支家强等<sup>[37]</sup>从评价指标体系、权重设置和评分方式等角度出发,讨论了现有的绿色建筑评价体系,得出现有的评价指标体系基本是基于全生命周期理论设置的。同样的,运用层次