

引用本文:张艺凡,杨巍,张煦康,等. 基于知识图谱的国内外建筑生命周期评价研究述评[J]. 建筑节能(中英文),2024,52(4):109-118.
doi:10.3969/j.issn.2096-9422.2024.04.016

基于知识图谱的国内外建筑生命周期评价研究述评*

张艺凡¹, 杨 巍^{1△}, 张煦康², 李奇莞¹

(1. 天津大学 建筑学院,天津 300072;2. 大阪大学 工学研究科,日本 大阪 5650871)

摘要: 建筑生命周期评价作为一种评估资源消耗和环境影响的主流方法,对我国实现碳中和目标具有重要意义。为揭示国内外建筑生命周期评价研究概况,以“Web of Science”和“CNKI”中的建筑生命周期评价期刊文献为对象,利用 CiteSpace 和 VOSviewer 绘制了该领域研究的总体特征和演化进程知识图谱,以期为进一步的研究提供参考。分析表明:在研究内容上,国外生命周期评价研究多学科交叉,涵盖能源利用、环境效益和经济效益等多个方面,已从细分阶段进入到整合阶段;而国内研究更多从建筑和环境学科出发,侧重于建筑节能减排,目前处于多元细分阶段,存在体系发展不平衡的问题。在研究方法上,国内外建筑生命周期评价均以量化清单为基础,但具体的评价指标与技术路径存在差别,国外在 LCA 不确定性分析方面较为领先,而国内在此方面处于起步探索阶段。未来国内建筑 LCA 研究应关注对框架体系的扩展与完善,重视从建筑单体到群体、从单学科到多学科的变化趋势,并加强对建筑 LCA 不确定性的关注。

关键词: 建筑生命周期评价; 文献计量; 知识图谱; 对比研究

中图分类号: TU-023 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-9422(2024)04-0109-10

Review of Domestic and International Research on Building Life Cycle Assessment Based on Knowledge Mapping

ZHANG Yifan¹, YANG Wei^{1△}, ZHANG Xukang², LI Qiyuan¹

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka 5650871, Japan)

Abstract: As a mainstream method for evaluating resource consumption and environmental impact, building Life Cycle Assessment (LCA) is of great significance for China to achieve its carbon neutrality goal. To reveal the research status of building LCA both domestically and internationally, the research systematically maps the general characteristics and evolution of the researches in building LCA field based on related literatures from Web of Science and CNKI databases. The analysis shows that in terms of research content, foreign LCA studies are interdisciplinary, covering multiple aspects such as energy use, environmental benefits, and economic benefits, having entered the integration stage from the subdivision stage. Domestic research starts more from the disciplines of building and environment, focusing on energy conservation and emissions reduction, and is currently in the stage of multiple subdivisions, with the problem of imbalanced system development. In terms of research methods, both domestic and foreign building LCA are based on quantified inventories, however, with differences in specific evaluation indicators and technical paths. Foreign research is more advanced in LCA uncertainty analysis, while domestic research is in the initial exploration stage. In the future, domestic research should focus on the expansion and improvement of the framework system, pay attention to the trend of change from single building to group, and from single

收稿日期:2023-02-19; 修回日期:2024-04-19

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目“生命周期环境影响和成本耦合目标下的参数化建筑设计方法研究”(51878436);国家留学基金资助项目(CSC No. 202306250104)

discipline to multi-discipline, as well as strengthen attention to building LCA uncertainty.

Keywords: building Life Cycle Assessment (LCA); bibliometric; knowledge mapping; comparative study

0 引言

全球气候变暖导致的环境负面影响日益凸显,降低能源消耗及温室气体排放已成为全球关注的重点问题。建筑部门是直接和间接碳排放的主要来源领域。根据中国建筑节能协会发布的《中国建筑能耗研究报告(2021)》数据显示,2019年全国建筑全过程能耗总量为22.33亿tce,碳排放总量为49.97亿tCO₂,分别占全国能耗总量与碳排放总量的45.8%和50.6%。着力减少建筑部门各过程的碳排放及能耗,对推动我国实现双碳目标的进程大有助力^[1]。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的综合量化和评价,自1990年起应用于建筑部门,并且成为了评价建筑资源消耗与环境影响的重要工具之一^[2]。建筑生命周期评价(Building LCA)是对建筑从原材料开采,经过生产、使用、拆除,直到废弃物处理的过程中(从摇篮到坟墓)全部的资源投入及环境负荷评估^[3]。建筑是具有较长寿命的特殊产品,在其全生命周期内对环境造成直接及间接的复杂影响,故使用LCA方法衡量建筑各个阶段内的能源消耗和环境影响是一种更为全面的方法^[4]。

目前国内相关综述多为针对LCA方法的理论分析,缺少聚焦于建筑领域的生命周期评价应用研究,国内建筑LCA研究重点和现状未能厘清,与国外研究也缺少整体脉络的对比^[5-7]。文献计量学能够系统地分析某一研究领域的整体发展,较为全面地呈现该领域的研究热点和趋势。基于此,笔者使用文献计量方法对1988-2022年间国内外建筑生命周期评价领域已发表的期刊论文进行可视化分析,绘制本领域总体情况、演进趋势和研究热点知识图谱,以期对未来建筑LCA领域的深入研究提供参考和支持。

1 数据与方法

1.1 数据检索

在Web of Science核心数据库(WOSCC)和中国知网(CNKI)中,对结合研究主题进行广泛检索,通过查询首篇发表文章确定检索时间起点。在WOSCC中使用检索语句:[(TS = (life cycle assessment OR life - cycle assessment OR LCA)) AND (TS = ("building *"))],检索期限为1998-2022年,检索截止日期为2022年10月15日;在CNKI中使用检索语句:(主题:"生命周期评价" + "LCA")AND(主

题:"建筑"),检索期限为1999-2022年,检索截止日期也为2022年10月15日。经过数据清洗,获取以WOSCC为来源的外文文献6146篇,以CNKI为来源的中文文献808篇。

1.2 分析方法

本文使用文献计量分析软件CiteSpace和VOSviewer,以知识域(knowledge domain)为对象绘制科学知识图谱,揭示国内外建筑生命周期评价发展进程与结构关系。VOSviewer基于概率论使用关联强度算法,对共现数据进行归一化处理,适合对机构、作者等大规模网络数据进行共现可视化分析;CiteSpace基于集合论的思想,主要使用Clustering、LLR、MI聚类算法,擅长以关键词的演化分析和突变分析来展示研究脉络,更适用于领域的未来发展趋势预测。

2 国内外研究总体概况

2.1 文献产出态势对比

文献发表总量可体现该主题或领域科学知识积累水平,历年发文数量直接反映了研究热度的变化。建筑生命周期研究论文发表趋势见图1,分别对1998-2022年间中外文期刊累计发文量分布指数进行拟合,外文文献呈现指数增长趋势,中文文献呈现线性增长趋势。根据不同时期年发表数量变化,可将外文文献发展历程划分为3个阶段:(1)起步阶段(1998-2006年):共有289篇文献被收录,占总收录数量的4.7%,年均发表量29篇;(2)加速阶段(2007-2019年):发表总量占总发文量的59.9%,年均发表量307篇,几乎为上阶段的10倍。(3)成熟阶段(2020年至今):发表总量占总发文量的35.3%,年均发表量724篇,增长速度放缓,文献产出量仍保持较高水平。

在此领域中文研究几乎与国外同时起步,但是发展较为缓慢。在1999-2005年仅发表37篇文章;2006-2016年发文量缓慢增加,小幅回落后目前保持平稳水平,年发文量在40~55篇范围内。国内与国外研究热度态势形成较大差距。

2.2 领域分布对比

从领域分布维度对国内外建筑生命周期评价涉及学科进行比较(见图2)。外文文献发表量排在前列的学科为环境科学(Environmental Sciences, 13.97%)、建筑建造技术(Construction Building Technology, 12.94%)、绿色可持续科学技术(Green Sus-

tainable Science Technology, 12.35%)、土木工程 (Engineering Civil, 11.95%)、工程环境 (Engineering Environmental, 10.94%)，总占比 62.15%。中文文献发表量排在前列的学科为建筑科学与工程 (61.29%)、环境科学与资源利用 (14.42%)、工业经济 (9.49%)、宏观经济管理和可持续发展 (4.65%)、计算机软件及计

算机应用 (2.37%)，共占比 92.22%。国内外建筑生命周期评价相关文献多以建筑工程和资源环境学科为基础，少部分中文文献涉及经济和计算机领域；外文文献多学科交叉现象更加明显，不同学科文献产出更为均衡。

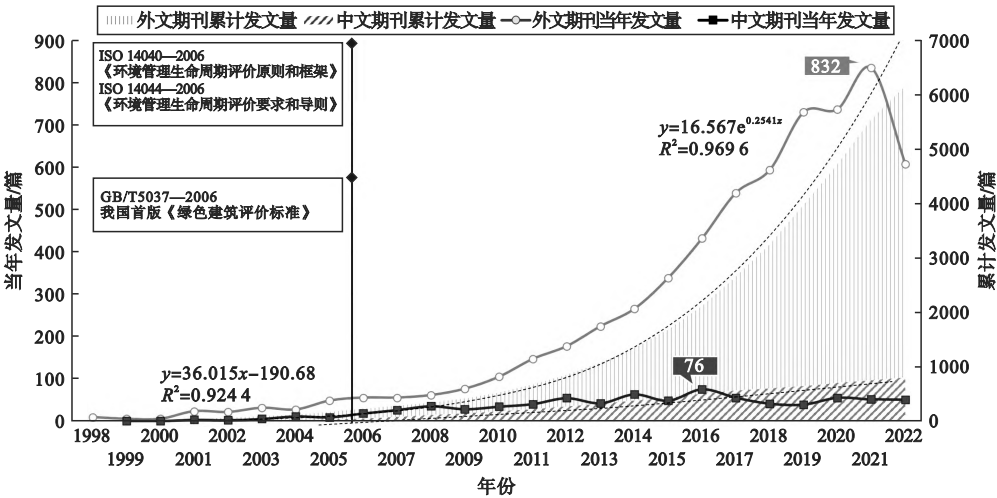


图1 1998 - 2022 年以建筑生命周期评价为主题的期刊论文发表量统计图

Fig. 1 Statistical chart of the number of journal articles on building life cycle assessment published from 1998 to 2022

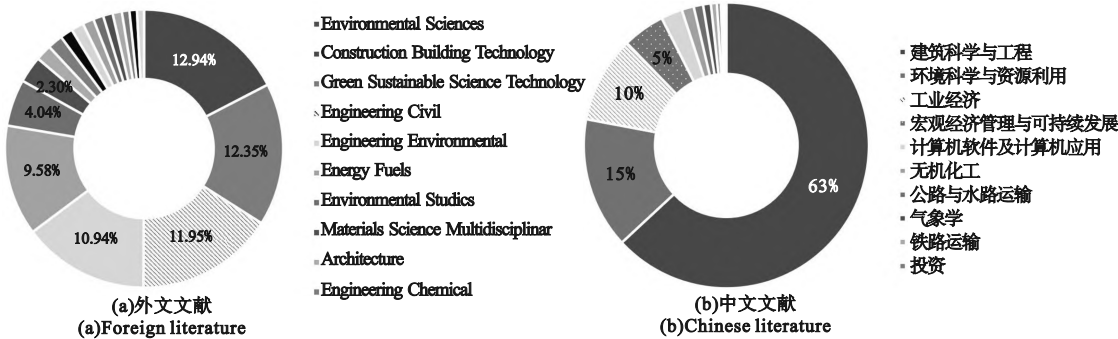


图2 建筑生命周期评价研究领域分布统计图

Fig. 2 Distribution of research fields in building LCA literature

2.3 发文机构与作者共现分析

建筑生命周期评价中英文发文量前 10 名的机构见表 1、表 2。中文文献发文量最高的机构为清华大学 (57 篇)，发文量排名第二和第三的机构为同济大学与西安建筑科技大学 (41 篇与 29 篇)，青海大学文章平均被引次数较高，在建筑材料物化阶段生命周期评价方面具有较强的影响力^[8,9]。外文文献发文量最高的机构为苏黎世联邦理工学院 (93 篇)，发文量排名第二和第三的机构为米兰理工大学 (83 篇)、香港理工大学 (78 篇)。

使用普莱斯定律确定核心作者群发文阈值，见式(1)：

$$N_{min} = 0.749 \sqrt{N_{max}} \tag{1}$$

式中： N_{min} 为核心作者群发文数量最低阈值；

N_{max} 为核心作者群发文数量最高阈值^[10]。

检索文献中，外文期刊中 Habert Guillaume 为本领域发文量最高者，累计发文 45 篇，经计算，外文核心作者群发文最低阈值 N_{min} 为 5 篇，筛选后得到 479 个外文核心作者节点。其中，节点大小代表作者发文数量，节点之间的连线代表作者间的合作关系，整体呈现“外围游离、内部集聚”的特征 (见图 3)。苏黎世联邦理工学院的 Habert Guillaume (45 篇，关注水泥混凝土材料环境影响及建筑数字化生产)、延世大学的 Hong Taehoon (34 篇，关注屋顶光伏系统及可持续运营)、巴勒莫大学的 Maurizio Cellura (31 篇，关注区域层级建筑能源利用) 是外文期刊中的高产作者，外文核心作者共现形成了明显的中心集群现象，形成了良好的合作关系。按照同样方法计算，中文期刊核心作者群发文最低阈值 N_{min} 为 3 篇，筛选后得到 67 个

核心作者节点,中文作者共现关系呈现“整体分散、小组聚团”的现象,核心作者多以所属机构为单位形成相对独立的小组,合作联系较弱(见图4)。国内研究代表性人物有清华大学的张智慧、中国建材检验认证集团股份有限公司的蒋荃、青海大学的龚志起等。张智慧等人对建筑生命周期评价进行了较为系统化的研究,包含不同结构、不同材料、不同阶段等多元视角,具有较高的影响力^[11-15]。蒋荃、龚志起等人较为关注建筑材料、建筑物化阶段生命周期的研究。

表 1 排名前 10 的中文发文机构发文量及被引频次

Table 1 The top 10 institutions in Chinese publications in terms of publication volume and citation frequency

序号	中文期刊来源机构	论文数	总被引数
1	清华大学	57	2933
2	同济大学	41	390
3	西安建筑科技大学	29	271
4	重庆大学	27	337
5	天津大学	24	226
6	北京工业大学	23	275
7	东南大学	16	211
8	青海大学	11	289
9	华侨大学	11	262
10	武汉理工大学	11	162

表2 排名前10的外文发文机构发文量及被引频次

Table 2 The top 10 institutions in foreign publications in terms of publication volume and citation frequency

序号	外文期刊来源机构	发文量	总被引数
1	苏黎世联邦理工学院	93	3046
2	米兰理工大学	83	1585
3	香港理工大学	78	2835
4	里斯本大学	61	1215
5	佩鲁贾大学	61	2054
6	奥尔堡大学	60	1291
7	挪威科技大学	59	2115
8	莱里达大学	59	2407
9	鲁汶大学	58	877
10	丹麦科技大学	57	2924

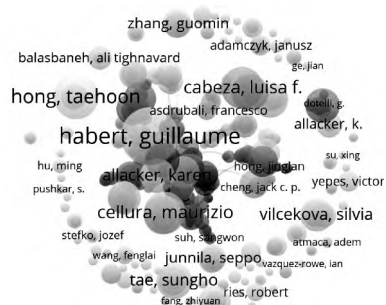


图3 外文文献发文作者共现图谱
Fig.3 Foreign co - authorship network map

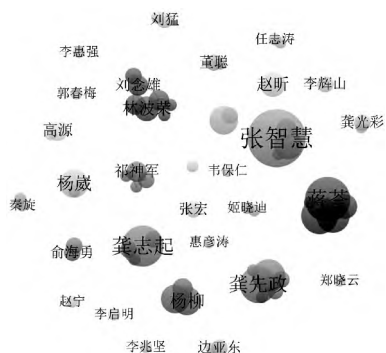


图4 中文文献发文作者共现图谱
Fig.4 Chinese co-authorship network map

3 国内外研究进展

3.1 国外研究进展

3.1.1 研究趋势

关键词是作者对文章核心信息的提炼概括,关键词突现是指短期内出现频次急剧跃迁,可作为研究热点演化分析依据。使用 CiteSpace 进行分析得到外文关键词突现结果(见图 5)。外文文献在 1998-2001 年间未出现突变关键词,此后发展可划分为 3 个阶段:(1)起步阶段(2002-2007 年):主要关注 LCA 在建筑能耗的评估应用;(2)细分阶段(2008-2017 年):建筑生命周期评价出现了建筑类型和评价维度的研究分支;(3)整合阶段(2017-2022 年):主要关

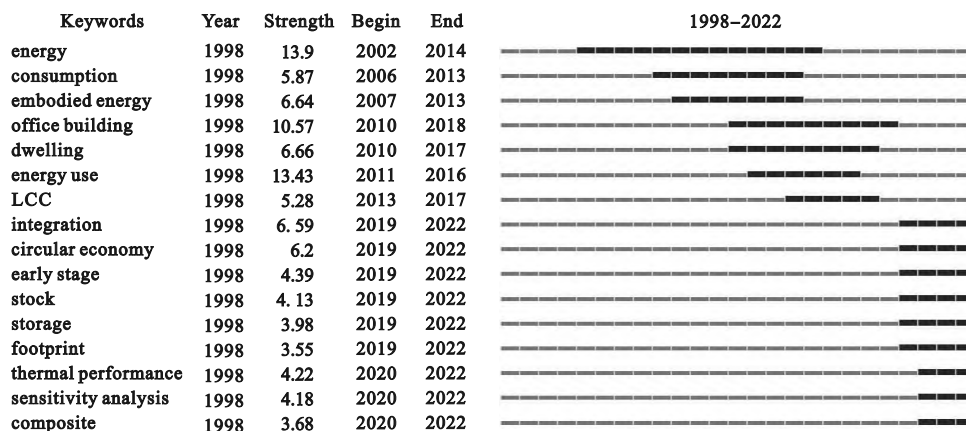


图5 外文文献关键词突现分析

Fig. 5 Keyword Co – occurrence analysis of foreign literature

注建筑生命周期评价与其他宏观理论的整合,以及对不同建筑尺度、技术方法的集成研究。

3.1.2 国外研究热点

对关键词进行聚类分析可以了解国内外研究热点和研究趋势。在 CiteSpace 中通过 LLR 算法对外文关键词进行聚类分析得到关键词知识图谱,聚类模块值 $Q = 0.82 > 0.3$,平均轮廓值 $S = 0.94 > 0.7$,说明聚类结构清晰显著,结果合理可信(见图 6)。聚类图谱共包含 13 个知识域,依据知识域标签与代表关键词整合梳理后将其分为 4 类分析维度:体系框架与应用对象、气候变化与环境影响、能源利用与节能、循环经济。

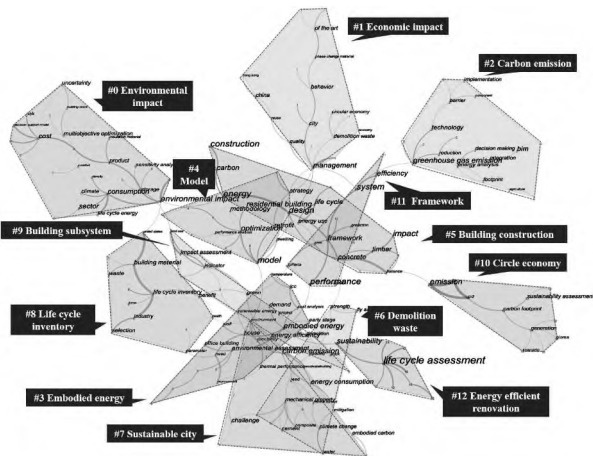


图 6 建筑生命周期评价研究外文文献关键词知识图谱

Fig. 6 Knowledge map of key words in foreign literature on building LCA Research

(1) 体系框架与应用对象

LCA 框架包括 4 个部分:目标和范围定义、生命周期清单分析、生命周期影响评估和结果阐释。自生命周期评价概念引入建筑领域以来,随着研究不断深入,其框架也随之不断丰富整合。在框架拓展方面,LCA 和生命周期成本 LCC 结合,形成了更具有实际指导意义的决策机制工具^[16,17]。Rob Hoogmarten 等人比较不同可持续性评估工具,认为最综合的可持续性方法需要结合 LCA 与 LCC 的评价指标,以实现生命周期可持续性评估(LCSA)^[18]。在框架细分方面,LCA 衍生出生命周期能源评价(LCEA)、生命周期碳排放评价(LCCO2A)等子系统,分别以能源消耗、碳排放量作为归一化指标进行评估^[3]。

作为最广泛使用的可持续评价工具之一,生命周期评价在建筑领域的应用呈现多元化。其特征主要有:①评价类型更加丰富。LCA 起初集中于住宅建筑评估,而后逐渐拓展到公共建筑以及不同建筑类型之间的比较分析^[17-19]。②评价阶段更加细分。针对材料生产运输(product)、建造阶段(construction)、运行

阶段(use stage)、建筑改造(renovation)、废弃阶段(disposal)各子阶段进行了深入的研究^[20,21]。③评价尺度更加拓展。从单体评价拓展到群体评价,在不同规模尺度皆有应用^[22,23]。

(2) 气候变化与环境影响

全球气候变化而引起各国强烈的环境意识,如何从全生命周期视角降低建筑部门的环境负荷成为大家共同的研究焦点。LCA 以温室气体等排放物作为主要指标对建筑进行环境影响评价,识别生命周期中碳排放较高的环节并量化改进策略的减碳效果。如 Azzouz 等人在英国伦敦的一个案例研究中对不同的设计理念的影响进行了量化,综合考虑结构、围护结构、建筑系统和运营设施管理各方面的最有效的措施,节省了生命周期内 16.3%的碳排放,其中,分别减少了 32.3%隐含碳和 8.7%的含能^[24]。

(3) 能源利用与节能

LCA 可对建筑能源使用情况、节能效果进行定量分析,提供决策依据以改进能源资源利用。如 Sharma 等人致力于识别各生命周期阶段能耗使用情况及关键因素,发现运行阶段产生了 80%~85%的能源消耗,其关键影响因素是电力使用、暖通空调、制造和维护、水的使用、废物的产生等^[25]。除聚焦于传统能源模式下建筑能耗研究外,LCA 还可用于评估新能源技术在建筑中的减碳潜力及环境效益,如建筑光伏一体化(BIPV)、太阳能光伏光热一体化(PV/T)、储能技术等^[26-28]。

(4) 循环经济

循环经济概念起源于生态环境经济学和产业生态学,旨在创建一个闭环生产模式,利用重复使用、共享、维修、翻新、再制造和循环再造来实现经济、环境和社会之间更好的平衡^[29]。研究表明,循环经济相较于传统线性经济,具有更为显著的环境效益。例如,使用再生木材制造刨花板最高可降低 95%的生命周期环境负荷^[30]。然而,目前循环经济仍处于起步阶段,因此,LCA 可以为建筑产业转型提供定量评估,推动循环经济在实践中的应用,进一步推动建筑产业的可持续发展。

3.2 国内研究进展

3.2.1 研究趋势

用上文相同的方法针对中文 808 篇文献进行分析,得到关键词突现结果(见图 7)。中文关键词演进过程可分为 3 个阶段:(1)评价体系发展阶段(1999 - 2006 年):该阶段聚焦于 LCA 理论发展,并基于低能耗农宅、3D 打印技术进行了应用尝试;(2)应用阶段(2006 - 2013 年):可持续发展背景下,LCA 在建筑领

域得到了广泛的应用,在建筑能耗、环境影响、成本效益维度进行评估;(3)细分阶段(2014 – 2022 年):在

建筑材料、研究方法、建筑类型不同方面出现突现现象。

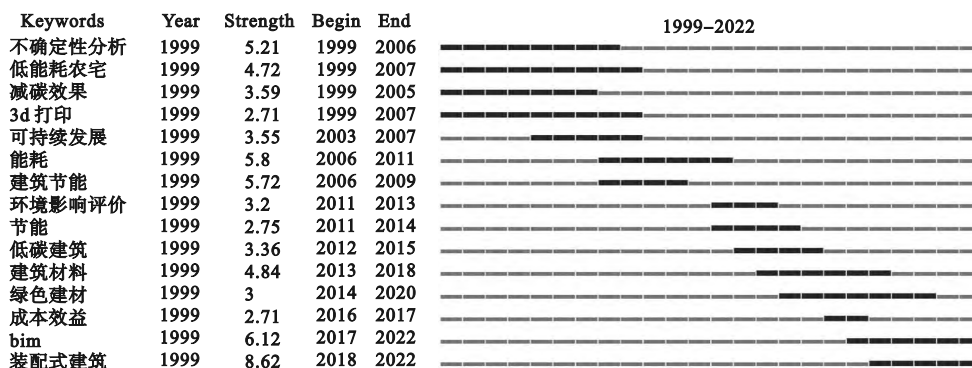


图7 中文文献关键词突现分析

Fig. 7 Keyword Co-occurrence analysis of Chinese literature

3.2.2 国内研究热点

按照同样的方法获得中外文文献关键词共线聚类知识图谱(见图8),聚类模块值 $Q=0.84$,平均轮廓值 $S=0.98>0.7$ 。依据知识域标签与代表关键词将其分为3类:体系框架与应用对象、建筑节能、环境影响。



图8 建筑生命周期评价研究中文文献关键词知识图谱

Fig. 8 Knowledge map of keywords in foreign literature on building

LCA research

(1)体系框架与应用对象

LCA 结合本土情况与实际需求不断拓展更新,形成具有本国特色的绿色建筑评价体系。一些学者针对我国绿色建筑评价体系与国外 BREEAM、LEED、CASBEE 等主流绿色建筑评价体系进行了比较,重点分析了 LCA 评价指标的差异及量化方法,为本土建筑生命周期碳排放基准值的技术路径建立提供借鉴^[31,32]。同时建筑 LCA 应用对象出现多元细分的趋势。在建筑类型上,从居住建筑为主逐渐拓展到办公建筑、校园建筑等公共建筑为主^[33–38];在地域上,除依据建筑热工设计分区外,针对生态脆弱的高原地区的研究也愈发受到关注^[39];同时物质循环研究也愈发完善,对建筑废弃物处理及资源化、建筑水循环的研究热度有所提升^[40,41]。

(2)建筑节能

建筑节能一直是受到高度重视的城市建设目标。

在生命周期评价的视角下,建筑节能主要关注3个方面:一是建筑节能设计,例如窗墙比、朝向、围护结构等因素对建筑能耗的影响规律^[35,36,42];二是建筑材料的能耗影响及经济效益,如张焱等利用 LCA&P1 – P2 经济模型确定了6种常见保温材料在满足节能标准情况下的最优经济厚度^[43];三是节能改造,如杜书波等人分析迪肯大学在适应性改造中的节能改造策略,并通过后期使用过程中的能源检测数据对其改造现状进行后评价^[44]。目前国内建筑节能研究多基于某一单体建筑或单项建筑技术措施进行能耗效益研究。然而,仅限于在建筑尺度的技术难以更进一步形成规模化的节能效益,有必要积极探讨在城区乃至更大的空间尺度的节能减碳手段^[45]。

(3)环境影响

全球暖化背景下,碳排放课题日益受到国内学者的重视,建立碳排放预测模型和评估减碳效益成为研究重点^[46,47]。早前研究主要集中于碳排放核算方法构件及实证分析,2019 年住房和城乡建设部发布 GB/T51366《建筑碳排放计算标准》,界定了碳排放计算边界和方法,为后续建筑碳排放预测计算和核算检验等提供依据^[48]。在此基础上,碳排放预测模型及减碳效益评估呈现多元化发展,多学科趋势逐渐加强。李远钊等人利用机器学习 SVR 算法创建了高层办公建筑全生命周期碳排放计算模型^[49];杨巍等人借助 Grasshopper 参数化平台对标准层面积、窗墙比及朝向等设计参数进行敏感性分析,总结出对 LCA 结果影响较大的设计变量^[42]。计算机技术的结合应用促使 LCA 可以在建筑设计早期阶段介入,对提升建筑性能、预测环境影响具有重要意义。

4 国内外研究对比

4.1 研究基础对比

从研究基础上看,国外的相关研究开展较早,水

平较高、影响力较强的机构多在欧洲和美国。近十几年发文数量呈指数增长、研究热度较高。国内研究相对起步较晚,自 2006 年起发文量呈线性增长趋势,2016 年达到年发文量高峰后逐渐小幅下降,2019 年后恢复增长并趋于平稳(见图 1)。分析发现国内外建筑生命周期研究热度与政策标准制定紧密相关。2006 年国际标准化组织对 ISO 14040 系列标准进行了更新:将原先的 4 个标准整合为现在的 ISO 14040—2006《环境管理生命周期评价原则和框架》和 ISO 14044—2006《环境管理生命周期评价要求和导则》两个标准,这一变化引起国际学者们的广泛关注,发文量迅速增加^[50]。同年,我国发布了首版 GB/T50378《绿色建筑评价标准》,生命周期评价在绿色建筑的应用使得国内相关研究从理论层面逐渐转化为定性定量相结合的操作层面,提升了国内建筑 LCA 的研究热度^[51]。

4.2 研究趋势对比

建筑生命周期评价研究趋势可根据各阶段主要热点分为评价体系发展阶段、应用阶段、细分阶段和整合阶段(见图 9)。LCA 概念最早由欧美国家针对工业产品包装环境影响提出,在 20 世纪 70—80 年代得到快速发展,国外建筑生命周期评价研究在初期阶段已具备一定的理论基础^[7]。因此,直接快速进入到应用起步阶段和细分阶段,目前阶段更加注重尺度规模层面、学科层面、方法层面的整合研究。在 20 世纪 90 年代初期,LCA 概念开始受到国内学者的关注^[52]。前期研究更加注重与本土化理论的融合发展,后期进入广泛应用阶段,当前研究细分多样,在生命周期各阶段类别、地域类别、材料产品类别及建筑类别都衍生了不同的研究热点,但是在各类别中研究发展不均衡,尚未形成全面的研究体系。

4.3 研究内容对比

目前国内外建筑生命周期评价均已形成较成熟的研究体系,其内容可细分为体系框架、应用对象、环境影响、能源节约与利用、经济效益 5 个方面(见图 9)。

(1)在体系框架方面,国内外学者以清单分析为基础,结合 LCC 和层次分析法(AHP)等,探索综合性归一化 LCA 体系框架。国内建筑生命周期评价研究虽相对起步晚,但在绿色建筑、可持续建筑和建筑节能减排等方面已有显著成果,促进了本土绿色建筑评价体系与国际建筑生命周期评价体系的协同联系。

(2)在应用对象方面,国内外已对不同的居住建筑与公共建筑类型开展多元化探索。国外研究在单体、街区、城市、国家等不同规模层级都有所开展,而

国内文献主要集中于微观层面的单体建筑,对于中观及宏观层级讨论较少。

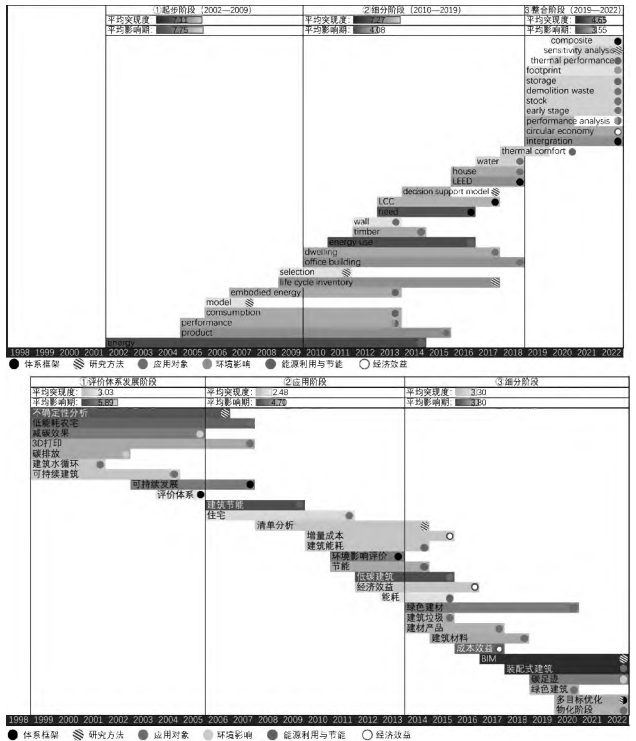


图 9 中外文献研究热点演变对比图
Fig.9 Comparison of evolution of research hotspots in Chinese and foreign literature

(3)在环境影响方面,国内外研究热点具有高度的重合性,“碳排放”“碳足迹”是共同关注的重点课题。国内外建筑生命周期评估通常选择二氧化碳当量作为基本计量单位进行环境影响评估,在环境影响方面的研究热点主要围绕碳排放进行。

(4)在能源节约与利用方面,LCA 为集中于运行阶段的传统建筑能耗研究拓宽了范畴,在全生命周期视角下将建筑含能与运行能耗共同考虑已成为国内外相关学者的研究共识^[53,54]。国内研究主要将 LCA 应用于建筑围护结构方面,集中于材料比选、保温厚度优化以及性能与成本平衡等视角。国外研究在建筑能源方面较国内更为系统,除建筑需求端的节能研究外,对于可再生能源在建筑中的利用也进行了深入探讨。

(5)在经济效益方面,国外学者围绕循环经济课题开展了广泛研究,主要聚焦于建筑废弃物、资源和工业升级,而国内学者将循环经济视为一种对工业化发展伴生的环境挑战的应对策略,其内容观点较为模糊化和概念化^[55]。尽管已经有一些针对节能措施增量成本效益评估的研究成果,但多集中在个案节能初始投资与运营成本优化的比较,建筑生命周期评级维度评价方法仍需进一步完善整合。

4.4 研究方法对比

国内外建筑 LCA 主要使用清单量化的方法依据各评价指标对物质和能量流动信息进行收集整理。建筑 LCA 评价的指标主要包括建筑能耗、温室气体排放、资源消耗、废弃物生成等方面。不同评价体系对这些指标的考虑程度和方法有所不同(见表3)。我国的绿色建筑评价体系主要采用措施清单作为评

价方式,旨在约束建筑全生命周期的能耗和环境影响。然而,该评价体系缺少基于性能的量化评价方法,并且涉及的 LCA 指标较为单一,这导致缺乏全面准确的评估结果。此外,由于缺乏专用的软件工具,评估过程相对困难复杂,给其他评价体系标准的一致性和可比性带来阻碍。

表3 可持续建筑评价体系中涉及的 LCA 指标与计算方法^[31,56]

Table 3 LCA indicators and calculation methods involved in sustainable building assessment systems^[31,56]

评价体系	BREEAME	DGNB	LEED	绿色建筑评价体系 (2019 版)
涉及的生命周期 评价指标	GWP,FW,ODP, AP,EP,RWD, ADP-E,POCP,HWD, ADP-F,NHWD	GWP,ODP,POCP, AP,EP,PEnr, Per	GWP,ODP,POCP, AP,EP,NPED GWP	“提高与创新”加分项; 建筑碳排放量计算 和减碳措施
工具与方法	数据和方法:Green Guide to Specification 工具:Green Guide calculator,IMPACT LCA & LCC tool	数据:Oekobau. dat 工具:LEGEp	工具:LEEDLCA Calculator; Athena Eco-estimator	/

注:缩写分别代表的指标为:GWP 全球变暖潜值;FW 淡水净使用量;ODP 臭氧破坏潜值;AP 酸化潜值;EP 富营养化的潜值;RWD 放射性废物处理;ADP 非生物资源消耗潜值;POCP 对流层臭氧形成潜值;HWD 危险废物处理;NHWD 非危险废物处理;PEnr 不可再生一次能源消耗量;Per 可再生一次能源消耗量。

不确定性分析是 LCA 评价的重要组成部分。国外研究对 LCA 过程中的不确定性变量进行分析,如建筑运营期间的能源价格波动、建筑使用者行为和建筑环境参数等因素,以评估评价结果的准确性和可靠性^[57]。国内研究早期主要对建筑投资决策、施工管理等过程的“不确定性”进行探讨,此类研究侧重风险管理而非对生命周期评价方法的完善,故不在本文讨论范畴中^[58,59]。近几年来,国内有关学者对 HAVC 系统性能差距、建筑能源模型校验和节能改造经济性方面进行不确定性量化分析,但针对建筑全生命周期评价体系的不确定性分析的研究成果相对较少,研究深度和广度有待进一步扩展^[60-62]。

5 结论

基于 1998-2022 年国内外建筑生命周期评价的文献计量与可视化知识图谱分析,从文献产出、领域分布、发文机构与核心作者方面对研究现状进行了概述,以此为基础对研究热点与研究趋势进行了综合分析及对比。总结了目前国内外建筑生命周期评价在研究基础、研究内容、研究方法及研究趋势特点,并提出国内本领域发展存在的问题:

国内建筑生命周期评价研究主要聚焦于单体建筑,针对街区、城市等建筑群体分析仍较为缺乏。且国内大量研究仍停留在建筑领域节能减排策略及评估预测等阶段,鲜有从新能源利用、循环经济等交叉学科视角探讨。此外,建筑生命周期评价主要基于模

型进行清单量化,对模拟过程的不确定性分析缺乏重视,这会造成预测阶段结果与实际差异较大。

基于对建筑 LCA 领域图谱分析与认识,未来研究可从以下 3 个方面做出创新贡献:

(1)探索从建筑单体到群体的生命周期评价。面对日益严峻的气候挑战,相较于建筑单体,对建筑群体层面进行生命周期环境影响及能源消耗的研究将极大助力实现我国的碳中和目标。因此,有必要扩大建筑生命周期研究对象规模,在街区、城市乃至国家等中观、宏观尺度方面探索可持续发展道路。

(2)完善建筑 LCA 的评价框架与方法,关注建筑生命周期中的不确定性分析。建筑的使用寿命明显长于其他产品,针对长时间跨度的模拟,不确定性分析对于模型预测准确度尤为重要。后期研究中应重视建筑生命周期评价模型中的不确定性分析,未来气候变化、能源技术的演变等不确定性因素或成为关注重点。

(3)发展多学科视角下的建筑生命周期评价。建筑不仅是能耗终端和碳排放源,本身也带有技术集成、经济载体等多重属性。未来应重视联合能源、经济学、计算机等多学科视角回应建筑复杂性,整合建筑性能、能源技术、经济效益等多维度指标以发展全方位系统化的建筑生命周期评价体系。

参考文献:

[1]黄贤金,张安录,赵荣钦,等.碳达峰、碳中和与国土空间规划实现

机制[J]. 现代城市研究, 2022(1): 1-5.

[2] Ortiz O, Castells F, Sonnemann G. Sustainability in the Construction Industry: A Review of Recent Developments Based on LCA [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 28-39.

[3] Chau C K, Leung T M, Ng W Y. A Review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on Buildings[J]. Applied Energy, 2015, 143: 395-413.

[4] 仇保兴. 城市碳中和与绿色建筑[J]. 城市发展研究, 2021, 28(7): 1-8.

[5] Chen H, Yang Y, Yang Y, et al. A Bibliometric Investigation of Life Cycle Assessment Research in the Web of Science Databases [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(10): 1674-1685.

[6] Hou Q, Mao G, Zhao L, et al. Mapping the Scientific Research on Life Cycle Assessment: a Bibliometric Analysis [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(4): 541-555.

[7] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(6): 155-160.

[8] 龚志起, 张智慧. 建筑材料物化环境状况的定量评价[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, (9): 1209-1213.

[9] 龚志起, 丁锐, 陈柏昆. 废弃混凝土处理方式的环境影响比较[J]. 工程管理学报, 2011, 25(3): 266-270.

[10] 苏逸轩, 王剑, 刘纯青, 等. 近十年自然保护地国内外研究进展与热点——基于 Citespace 和 VOSviewer 分析[J]. 现代城市研究, 2021, (8): 91-98.

[11] 尚春静, 储成龙, 张智慧. 不同结构建筑生命周期的碳排放比较[J]. 建筑科学, 2011, 27(12): 66-70.

[12] 龚志起, 张智慧. 绿色建筑材料的界定与评价[J]. 建筑管理现代化, 2003, (2): 6-9.

[13] 龚志起, 张智慧. 建筑材料物化环境状况的定量评价[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(9): 1209-1213.

[14] 张智慧, 沈永明, 邹川. 建筑废物再循环利用研究[J]. 环境保护, 2005, (7): 53-56.

[15] 尚春静, 张智慧. 建筑生命周期碳排放核算[J]. 工程管理学报, 2010, 24(1): 7-12.

[16] Cabeza L F, Rincón L, Vilarinho V, 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.

[17] Islam H, Jollands M, Setunge S. Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Implication of Residential Buildings-A Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 129-140.

[18] Hoogmartens R, Van Passel S, Van Acker K, et al. Bridging the Gap between LCA, LCC and CBA as Sustainability Assessment Tools [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2014, 48: 27-33.

[19] Chau C, Hui W, Ng W, et al. Assessment of CO₂ Emissions Reduction in High-Rise Concrete Office Buildings Using Different Material Use Options [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012, 61: 22-34.

[20] Lippke B, Wilson J, Perez-Garcia J, et al. CORRIM: Life-Cycle Environmental Performance of Renewable Building Materials [J]. Forest Products Journal, 2004, 54(6): 8-19.

[21] Gervásio H, Santos P, Martins R, et al. A Macro-Component Approach for the Assessment of Building Sustainability in Early Stages of Design [J]. Building and Environment, 2014, 73: 256-270.

[22] Mastrucci A, Marvuglia A, Leopold U, et al. Life Cycle Assessment of Building Stocks from Urban to Transnational Scales: A Review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 316-332.

[23] Lotteau M, Loubet P, Pousse M, et al. Critical Review of Life Cycle Assessment (LCA) for the Built Environment at the Neighborhood Scale [J]. Building and Environment, 2015, 93: 165-178.

[24] Azzouz A, Borchers M, Moreira J, et al. Life Cycle Assessment of Energy Conservation Measures during early Stage Office Building Design: A Case Study in London, UK [J]. Energy and Buildings, 2017, 139: 547-568.

[25] Sharma A, Saxena A, Sethi M, et al. Life Cycle Assessment of Buildings: A Review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1): 871-875.

[26] Hammond G P, Harajli H A, Jones C I, et al. Whole Systems Appraisal of a UK Building Integrated Photovoltaic (BIPV) System: Energy, Environmental, and Economic Evaluations [J]. Energy Policy, 2012, 40: 219-230.

[27] Souliotis M, Arnaoutakis N, Panaras G, et al. Experimental Study and Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) Solar Systems for Domestic Applications [J]. Renewable Energy, 2018, 126: 708-723.

[28] Zsembinski G, Llantoy N, Palomba V, et al. Life Cycle Assessment (LCA) of an Innovative Compact Hybrid Electrical-Thermal Storage System for Residential Buildings in Mediterranean Climate [J]. Sustainability, 2021, 13(9): 5322.

[29] Ghisellini P, Cialani C, Ulgiati S. A Review on Circular Economy: the Expected Transition to a Balanced Interplay of Environmental and Economic Systems [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 114: 11-32.

[30] Uemura Silva V, Nascimento M F, Resende Oliveira P, et al. Circular vs. Linear Economy of Building Materials: A Case Study for Particleboards made of Recycled Wood and Biopolymer vs. Conventional Particleboards [J]. Construction and Building Materials, 2021, 285: 122906.

[31] 杨巍, 王珊珊. 基于整合 LCA 方法的德国可持续建筑评价体系 [J]. 建筑学报, 2014, (S1): 92-97.

[32] 赵秀秀, 袁永博, 张明媛. 绿色建筑评价体系减碳指标对比研究 [J]. 建筑科学, 2016, 32(10): 136-141.

[33] 龚健冲, 杨雪玲. 基于全生命周期理论的住宅建筑能耗计算与分析 [J]. 四川建筑科学研究, 2011, 37(5): 313-316.

[34] 梁爽, 王亚丽, 刘加平, 等. 基于全生命周期评价(LCA)的居住建筑外墙构造体系优化分析 [J]. 建筑科学, 2010, 26(12): 97-101.

[35] 王松庆, 王威, 张旭. 基于生命周期理论的严寒地区居住建筑能耗计算和分析 [J]. 建筑科学, 2008, 24(4): 58-61.

[36] 苏醒, 张旭. 基于 LCA 的上海典型办公建筑窗墙比及窗户材料优化配置 [J]. 建筑科学, 2008, 24(6): 66-70.

[37] 何东颖, 李翀, 覃福雨, 等. 基于排放系数法的校园碳排放核算 [J]. 西安工程大学学报, 2022, 36(4): 78-83.

[38] 冯恒文, 罗文辉, 王军英, 等. 基于全生命周期的高校减碳效果量化方法与应用 [J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(7): 1-5.

[39] 赵太民, 龚志起. 高原地区建筑物物化阶段环境影响评价 [J]. 青海交通科技, 2021, 33(2): 11-16.

[40] 陈起俊, 张瑞瑞. 基于 LC 的建筑废弃物资源化产业发展研究 [J]. 科技管理研究, 2020, 40(11): 216-225.

[41] 陆瑶, 王宏燕, 李炎锋, 等. 大型体育场馆水-能-碳足迹关联模型与不确定性分析 [J]. 环境工程, 2022, 40(12): 165-172.

[42] 杨巍, 羊思静. 基于 LCA 性能的高层住宅建筑设计参数敏感度研

究[J]. 建筑节能,2020,48(12):15-23.

[43] 张垚,牛建刚. 建筑外墙保温厚度优化及设计参数化关系研究[J]. 建筑科学,2019,35(12):113-125.

[44] 杜书波,杨丽,赵庆双,等. 既有工业建筑适应性再生及节能后评价研究[J]. 建筑节能,2020,48(12):10-14.

[45] 叶祖达. 中国城市迈向近零碳排放与正气候发展模式[J]. 城市发展研究,2017,24(4):22-28.

[46] 李静,刘燕. 基于全生命周期的建筑工程碳排放计算模型[J]. 工程管理学报,2015,29(4):12-16.

[47] 陈莎,崔东阁,张慧娟. 建筑物碳排放计算方法及案例研究[J]. 北京工业大学学报,2016,42(4):594-600.

[48] 中国建筑科学研究院. GB/T51366—2019,建筑碳排放计算标准[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

[49] 李远钊,吴雨婷,于娟,等. 基于 SVR 的高层办公建筑全生命周期碳排放预测模型——以天津地区为例[J]. 建筑节能(中英文),2021,49(9):25-30.

[50] 李媛媛,葛晓华,王文静,等. 技术生命周期评价进展及其在碳中和领域应用趋势分析[J]. 环境工程技术学报,2022,12(4):1048-1057.

[51] 中国建筑科学研究院. GB/T50378—2006,绿色建筑评价标准[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.

[52] 肖定全,廖军. 材料生态循环评估体系(LCA)的应用与展望[J]. 材料导报,1995,(5):9-11.

[53] Röck M, Saade M R M, Balouktsi M, et al. Embodied GHG Emissions of Buildings – The Hidden Challenge for Effective Climate Change Mitigation[J]. Applied Energy, 2020,258:114107.

[54] Cellura M, Guarino F, Longo S, et al. Energy Life-Cycle Approach in Net Zero Energy Buildings Balance: Operation and Embodied Energy of an Italian Case Study[J]. Energy and Buildings, 2014,72:371-381.

[55] McDowall W, Geng Y, Huang B, et al. Circular Economy Policies in China and Europe: Circular Economy Policies in China and Europe[J]. Journal of Industrial Ecology, 2017,21(3):651-661.

[56] 李奇芫,杨威. 建筑生命周期碳排放基准设定技术路径——以寒冷地区学校建筑为例[J]. 城市环境设计,2023,(4):352-360.

[57] Roux C, Schalbart P, Assoumou E, et al. Integrating Climate Change and Energy Mix Scenarios in LCA of Buildings and Districts[J]. Applied Energy, 2016,184:619-629.

[58] 吴彦俊. 不确定条件下基于建筑企业战略的项目实施模式选择[J]. 建筑经济,2009,(4):30-32.

[59] 莫力科,陆绍凯. 工程项目的感知风险测量与管理投入的关系——对建筑企业的实证研究[J]. 土木工程学报,2011,44(11):128-133.

[60] 赵德印,徐强. 基于不确定性量化分析的超低能耗建筑空调系统运行能耗研究[J]. 暖通空调,2021,51(5):67-74.

[61] 李艳,胡志豪,随权,等. 考虑风光热不确定性和相变储能系统的城市建筑微网-热联合调度[J]. 电网技术,2019,43(10):3687-3697.

[62] 黄志辉. 不确定条件下既有建筑节能改造项目投资决策研究[J]. 城市发展研究,2015,22(1):4-8.

作者简介: 张艺凡(1993),女,吉林通化人,毕业于天津大学,建筑学专业,博士研究生,研究方向为基于 LCA 的城市建筑存量模型建构(yifan_zhang@tju.edu.cn)。

△通讯作者: 杨威(1976),女,天津人,毕业于天津大学,建筑学专业,博士,教授,博士生导师,研究方向:建筑生命周期评价与设计、建筑存量可持续更新(walker_yang@tju.edu.cn)。

(上接第 87 页)

定额有所差别;两份规定约束值相差不大,引导值和基准值《南京能耗定额标准》的要求更为严格。

(2)调研 14 个医院建筑的分项能耗数据,研究分项能耗指标定额计算方法,分别计算得到《南京合理用能指南》和《南京能耗定额标准》中三级医院分项能耗指标定额参考值,为医院建筑用能设备分项系统的用能状况深度诊断与分析提供参考。

(3)对南京某三级综合医院分项能耗指标进行计算与对标,发现照明系统、电梯及水泵分项能耗对标与综合单位面积对标结果不一致,高于对应的参考值,建议加强相关用能设备节能潜力的深入分析。

参考文献:

[1] 边富鹏,李燕,焦镇雄,等. 公共机构能耗定额标准编制与实施建议[J]. 中国能源,2021,43(1):47-50.

[2] 袁媛,朱伟峰,杜佳军. 某综合医院建筑能耗诊断及节能改造[J]. 暖通空调,2020,50(12):59-64.

[3] 狄彦强,张振国,张志杰,等. 既有医院建筑空调系统现状[J]. 暖通空调,2018,48(3):35-39.

[4] 杜然,李玉云,马友才. 武汉地区三级综合医院能耗定额的研

究[J]. 建筑热能通风空调,2012,31(1):53-56.

[5] 谭子豪. 医院建筑能耗调查与空调节能分析[D]. 湖南:南华大学,2020.

[6] 郑杨坤. 医院建筑的能耗现状及建筑节能设计[J]. 江西建材,2017,(18):57-58.

[7] 南京市城乡建设委员会. 关于印发南京市公共建筑合理用能指南的通知[EB/OL]. [2020-10-23]. <http://www.njlsjzw.com/tzggk/show-956.html>.

[8] 南京市机关事务管理局. 公共机构能(水)耗定额:DB3201/T 1036-2021[S/OL]. [2021-03-26]. <http://glj.nanjing.gov.cn/njsjgswglj/202104/P020210406573407229700.pdf>.

[9] 尹海培,王智远. 江苏省公共建筑能耗限额对比分析与建议[J]. 江苏建筑,2022,(1):130-133.

[10] 薛俐,胡平放,王凡,等. 无分项计量系统的医院建筑能耗拆分方法分析[J]. 建筑节能,2019,47(12):107-111.

[11] GB/T40498—2021,公共机构能耗定额标准编制通则[S]. 中国标准出版社,2021.

作者简介: 季柳金(1982),女,江苏南京人,硕士,高级工程师,研究方向为绿色建筑与建筑节能(81889196@qq.com)。

△通讯作者: 高兴欢(1986),男,江苏南京人,建筑与土木工程专业,硕士,高级工程师,研究方向为绿色建筑与建筑节能(81889196@qq.com)。