

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202312026



# “双碳”目标下建筑节能减排 研究进展可视化分析

彭一达, 秦旋, 刘志城

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为全面梳理建筑节能减排的研究历程及热点前沿, 基于文献计量软件 CiteSpace, 以中国知网(CNKI)和 Web of Science 核心数据库中选取的与建筑碳减排相关的 1 883 篇中文文献和 1 142 篇外文文献为主体, 结合研究热点知识图谱、关键词突现图谱及时间线图, 对建筑节能减排的研究现状和研究趋势进行定量可视化研究。结果表明: 建筑节能减排领域研究热点聚焦于建筑节能、绿色低碳、零碳排放 3 个方面; 国内学者通过采用可再生材料, 构建节能模型和提高回收利用率等措施降低碳排放; 国外学者从立法政策探寻建筑行业的碳减排潜力, 随后致力于可再生能源以及碳负技术的研究。

**关键词:** 建筑节能; 碳排放; 碳中和; 可视化; CiteSpace; 知识图谱

中图分类号: TU 023

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)02-0283-07

## Visualizaion Analysis of Research and Development of Building Energy Conservation and Emission Reduction Under “Dual Carbon” Goal

PENG Yida, QIN Xuan, LIU Zhicheng

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to comprehensively review the research process and hot frontier of building energy conservation and emission reduction, based on the bibliometric software CiteSpace, selecting the 1 883 Chinese literature and 1 142 foreign literature related to building carbon emission reduction from the core database of China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science as the main body, combining with the research hotspot knowledge graph, keyword burst graph and timeline graph, the research status and trend of building carbon emission reduction are quantitatively visualized. The results show that the research hotspots in the field of building energy conservation and emission reduction focus on three aspects: building energy conservation, green low carbon and zero carbon emission. Domestic scholars reduce carbon emissions by adopting renewable materials, constructing energy-saving models and improving recycling rates; foreign scholars explore the carbon emission reduction potential of the construction industry from legislative policies, and devote to the research of renewable energy and carbon negative technology.

**Keywords:** building energy conservation; carbon emissions; carbon neutralization; visualization; CiteSpace; knowledge graph

收稿日期: 2023-12-14

通信作者: 秦旋(1969-), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事装配式建筑、建筑业可持续发展的研究。E-mail: hd-wq@hqu.edu.cn。

基金项目: 福建省创新战略研究项目(2023R0039)

随着全球气候变化日益严重,碳中和作为减缓气候变化的一项重要战略,已经引起了广泛关注。根据国务院《2030 年前碳达峰行动方案》指示,要把碳达峰、碳中和纳入经济社会发展全局,推动经济社会发展建立在资源高效利用和绿色低碳发展的基础之上。建筑领域是碳排放的主要领域之一,中国建筑节能协会发布的《中国建筑能耗研究报告(2021)》显示,我国建筑全过程碳排放总量占全国碳排放量的 50.6%。因此,进行建筑碳排放领域热点和趋势的研究,对实现我国“双碳”目标具有重要意义。

建筑节能减排一直是学者们关注的话题。叶红等<sup>[1]</sup>基于传统文献综述的方法,从社会经济、建筑体特征、区域气候等视角,对驱动建筑能耗碳排放的复合机理进行综述。然而,传统的文献综述不仅需要消耗大量时间,且在阅读分析过程中由于存在个人认知、主观偏差等影响,难免导致分析结果不具客观性,难以精确把握建筑碳排放领域的前沿问题。崔鹏等<sup>[2]</sup>基于 Web of Science (WoS) 和中国知网 (CNKI) 数据库进行检索分析,综述了国内外大学校园碳排放研究进展及趋势,为建设可持续低碳校园提供决策和建议。该方法在一定程度上减少了传统文献综述方法的主观偏差,提高了分析结果的客观性与精确性,但该研究仅展示了国内外研究热点词汇及频次统计的结果,无法表达该领域研究学科之间的交叉、知识流动和融合,无法呈现出清晰直观的可视化图像。

文献计量法是指用数学和统计学的方法定量地分析一切知识载体的交叉科学。它是集数学、统计学、文献学为一体,注重量化的综合性知识体系,是关于文献及其引用的学科。2004 年,陈超美等<sup>[3]</sup>开发了一款文献定量可视化软件,即引文空间 (CiteSpace),其主要基于共引分析理论对特定领域文献进行计量,从而探寻该学科领域内的关键路径及转折点,并通过可视化图谱的绘制形成对学科演化潜在动力机制的分析和学科发展前沿的探测。CiteSpace 软件可较为直观地呈现相关研究领域的发展全景,提取热点主题,辨析研究趋势,具有强大的可视化功能<sup>[4]</sup>。因此,本文拟用文献计量法,对建筑节能减排领域展开综述研究。

1 数据来源

选取 CNKI 和 WoS 核心数据库为数据来源。CNKI 数据采用主题“建筑”并且主题“碳减排”进行精确检索,时间跨度为 2007—2023,手动剔除部分无效文献,获得中文文献 1 883 篇。外文期刊数据用 Web of Science 核心数据库,采用主题“carbon dioxide emission”和主题“building”或者“Architecture”进行精确检索,时间跨度为 2007—2023,剔除无效文件后,获得外文文献 1 142 篇。

2 研究热点分析

当 2 篇或多篇文献发表后,被后期相关研究的 1 篇或多篇文献所引用,就会构成共被引文献关系<sup>[3]</sup>,分析共被引文献就可以了解该领域的主要研究方向。在 CiteSpace 软件中勾选 Keyword,分析节点选择 Reference,选用 Pathfinder(最短路径)算法,进行关键词共现分析,得出关键词共现知识图谱。

根据 CNKI 数据库的 1 883 篇文献绘制出国内建筑碳减排领域研究热点知识图谱,如图 1 所示。图 1 中共有 587 个节点及 1 050 段连线。根据 WoS 数据库的 1 142 篇文献绘制出国外建筑碳减排领域研究热点知识图谱,共得到 489 个节点和 2 867 条连线,如图 2 所示。

结合国内研究热点知识图谱和高频关键词可以看出:碳排放、低碳建筑、绿色建筑等这几个关键词的节点更大,频次更高,说明目前国内建筑碳减排的研究热点主要集中在这几个领域。从图 2 可以看出,国外高频词出现频次分布比较均匀,研究热点与国内大致相同,但国外研究大多与环境、生态相关联,对政策和能源的研究较多。2007—2023 年建筑碳减排研究领域的热点主要集中在以下 3 个方面。

1) 建筑节能减排的研究。建筑碳排放受到多个因素影响,包括建筑材料的选择、建筑设计和施工过程、能源消耗和运营等。罗晓予等<sup>[5]</sup>研究发现日本的建筑全生命周期碳排放明显低于中国建筑,主要原因为日本建筑利用低碳建材,其生产环节碳排放低、使用寿命长,维护、废弃阶段碳排放低于中国建筑。建筑材料是主要的碳排放来源,在商业办公建筑材料中,混凝土结构比钢结构在能源消耗、碳排放、碳排放成本方面均占优势<sup>[6]</sup>。目前,混凝土结构的减碳技术提出一种新的理念,通过采用新型低碳胶凝材料、提升结构耐久性及退役后建筑固碳循环利用等方式可实现混凝土结构全寿命减碳<sup>[7]</sup>。

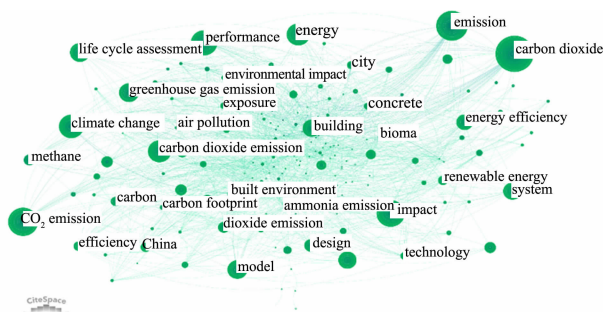


图 2 国外建筑碳减排领域研究热点知识图谱

Fig. 2 Knowledge graph of research hotspots in field of carbon reduction in foreign buildings

3) 零碳排放研究。主要包括碳达峰的预测、零碳建筑和零碳社区的发展。联合国报告指出,2019年,生活和生产中的碳排放创下新的历史记录,许多欠发达国家的建筑业碳排放量上升超过以往。针对联合国报告,国内提出“30·60”的战略目标,零碳建筑的发展开始被重视。建筑行业正逐渐向可再生能源整合转变,如光伏、风力发电等。研究者正在探索将可再生能源与建筑系统集成,以降低对传统能源的依赖并减少碳排放。超低能耗建筑被动式及主动式技术通过选择适宜该项目的遮阳措施、高效新风热回收系统、光伏技术等手段,实现降低建筑自身能耗、提升用能效率,从而达到零碳排放<sup>[10]</sup>。除此之外,建筑领域相关政策变化也影响着实际碳排放,不同减排工作的贡献率不同,其中,建筑节能强规提升、建筑光伏一体化、清洁取暖等工作的有效开展,为零碳城市的发展提供了动力<sup>[11]</sup>。国外学者将能源模拟、空气分析软件、建筑垃圾的再利用和回收分析等建筑信息模型(BIM)技术应用于绿色建筑建设、管理和设计中,管理建筑全生命周期的碳排放及能源消耗,实现更高水平的节约与低碳,实现近零碳排放<sup>[12]</sup>。Kou等<sup>[13]</sup>提出一种与重力热管集成的新型被动式太阳能房屋,实现了具有可变热性能的围护结构,高效利用太阳能达到零碳供暖。在近零碳排放的背景下,可再生能源的开发利用日益受到重视。

### 3 演进趋势分析

### 3.1 国内建筑碳减排领域演进趋势

结合高突现值关键词和时序图,国内对建筑碳排放领域的研究是阶梯型上升的,可以将其划分为萌芽初期、探索时期、逐步成型、深入研究 4 个阶段,如图 4(b)所示。

2) 2009—2010 年,热门关键词增加了低碳城市及低碳产业。该阶段的研究主要从宏观角度出发,提出减少碳排放的政策建议。低碳是这一阶段的主要代名词,学者们从低碳的角度出发,寻找发展低碳城市和构建低碳建筑的技术途径,该阶段处于探寻我国减排潜力的踌躇前行阶段。研究建筑碳排放的同时,也关注城市规划层面,从而优化城市建设和发展的整体碳排放。姜虹等<sup>[15]</sup>得出发展低碳建筑应

Top 22 Keywords with the Strongest Citation Bursts					— 关键词出现频次未显著变化的年份	— 关键词突现时间段
Keywords	Year	Strength	Beging	End	2007—2023	
零碳排放	2007	4.59	2007	2014		
建筑物	2007	4.34	2007	2016		
低碳城市	2007	10.92	2009	2013		
低碳经济	2007	9.84	2009	2015		
气候变化	2007	4.26	2009	2016		
低碳排放	2007	3.40	2009	2015		
低碳建筑	2007	22.63	2010	2013		
节能	2007	6.24	2010	2012		
城市规划	2007	5.69	2010	2014		
世博会	2007	3.49	2010	2011		
建筑节能	2007	8.24	2011	2014		
生命周期	2007	3.30	2012	2015		
减排策略	2007	6.73	2014	2020		
能耗	2007	3.30	2014	2017		
低碳技术	2007	3.13	2014	2016		
低碳理念	2007	2.95	2014	2016		
建筑业	2007	6.39	2015	2017		
碳排放	2007	4.00	2016	2017		
民用建筑	2007	14.45	2018	2020		
物化阶段	2007	3.98	2018	2020		
绿色建筑	2007	3.02	2018	2020		
	2007	4.31	2019	2020		

图 3 CNKI 高突现值关键词

Fig. 3 Keywords of CNKI high burst value

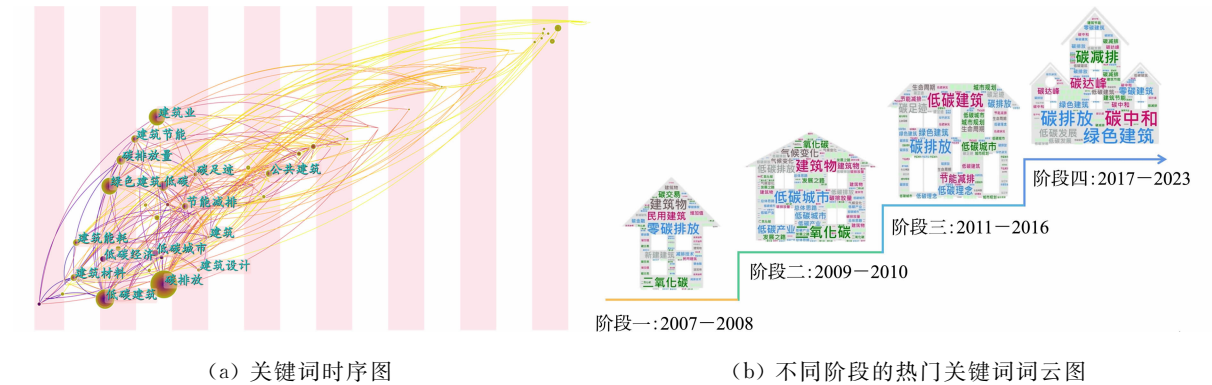


图 4 国内建筑碳减排领域关键词时序图和不同阶段的热门关键词词云图

Fig. 4 Keyword sequence diagram and popular keyword cloud graph in field of carbon reduction in domestic construction at different stages

通过文化理念的回归与进步、依靠技术跨越式发展和制度约束才能实现的结论。同时,低碳试点城市研究开始兴起,崔博等<sup>[16]</sup>从低碳产业布局、低碳公共交通系统、可再生能源利用、碳汇系统布局、低碳城市空间结构、低碳空间管制等 6 个方面出发,对厦门市低碳城市总体规划进行了理论探索和实践尝试。

3) 2011—2016 年,低碳建筑、节能减排、碳排放等词成为研究热点。这一阶段的建筑碳排放领域的研究从宏观逐渐进入到微观,研究构建建筑全生命周期各阶段的碳排放计算模型,并有针对性地提出减排策略。建筑业对其他行业的碳排放拉动作用明显,通过发挥建筑业在建材选择上的引导作用、减少高碳排放建材的使用量,实现降低建筑业的间接碳排放<sup>[17]</sup>。此时,研究方向开始转向微观领域,将 BIM 技术与建筑碳排放结合,计算建筑全生命周期碳排放量<sup>[18-19]</sup>。

4) 2017—2023 年,研究热点为碳达峰与碳中和。“30·60”战略目标提出后,碳排放的突现值达到最高,研究内容比前 3 个阶段更深入,如从建筑到社区再到城市。超低能耗建筑应运而生,超低能耗建筑在建筑建造施工和运行过程中能够减少建筑用能,是实现建筑碳中和目标的重要途径。刘志坚等<sup>[20]</sup>提出一种结合储电和储热的分布式能源系统,促进了能源系统低碳和清洁转型发展。城市发展逐渐形成城市群,区域层面的减碳目标也亟待解决,以长江三角洲城市群为例,各种影响因素在不同城市存在较强的时空异质性,对城市群体的区域性的降碳需采用相应联防联控措施及差异化减排策略<sup>[21]</sup>。

另外,城市建设中的矿物质材料开发利用活动不仅导致大量碳排放,也产生了碳吸收。建筑中的矿物质材料包括水泥、石灰、混凝土和砂浆等,这些矿物质材料对 CO<sub>2</sub> 的吸收量逐年累积,形成的碳汇总量十分可观。因此有学者从城市建设角度对建筑物中矿物质材料的碳汇能力进行研究,结合遥感数据提取技术对城市既有建筑的碳汇量进行核算,结果可直观准确地呈现城市碳汇量分布与城市建设发展的关系,并作为低碳城市发展的指导依据<sup>[22]</sup>。当然,对碳中和的理解是一个不断发展的过程,实现净零排放将引发经济和社会各个方面自上而下的深刻变革,在这过程中碳中和研究将进一步多样化和深刻化。

3.2 国外建筑碳减排领域演进趋势

根据文献数据整理分析,利用 CiteSpace 软件分析获得 Web of Science 高突现值关键词 17 个,如图



5 所示。绘制国外建筑碳减排领域关键词时序图,如图 6(a)所示。根据关键词时序图,绘制国外建筑碳减排领域不同阶段的热门关键词词云图,如图 6(b)所示。

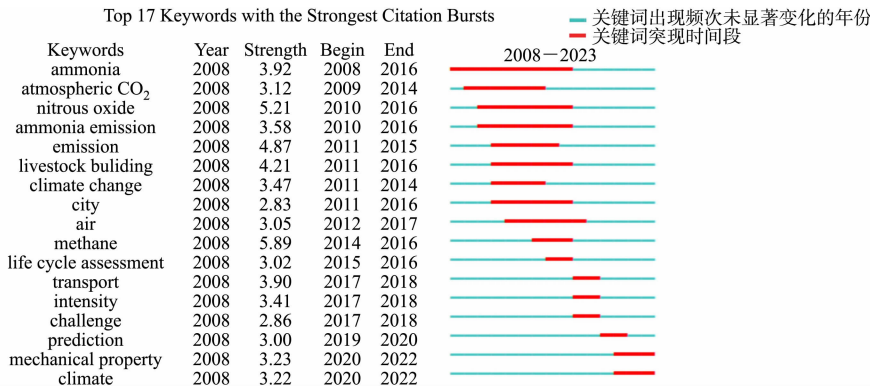


图 5 Web of Science 高突现值关键词

Fig. 5 Keywords of Web of Science high burst value

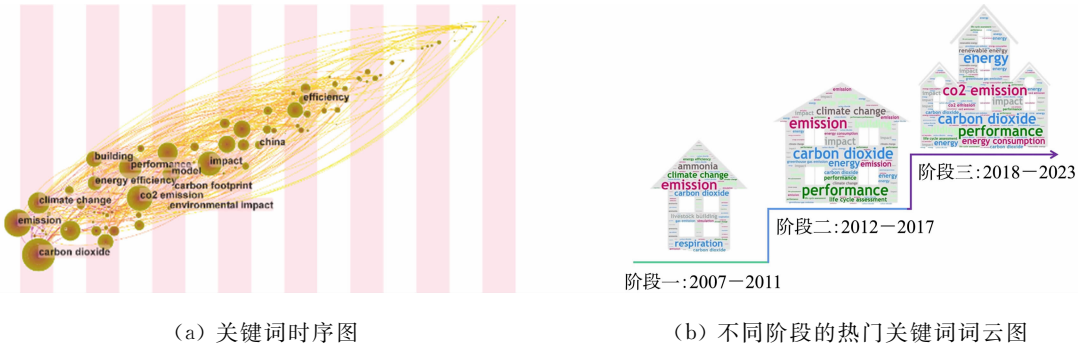


图 6 国外建筑碳减排领域关键词时序图和不同阶段的热门关键词词云图

Fig. 6 Keyword sequence diagram and popular keyword cloud graph in field of carbon reduction in foreign buildings at different stages

根据研究热点时序图,国外建筑碳排放领域演进趋势主要分为 3 个阶段,如图 6(b)所示。

1) 2007—2011 年,气候变化、碳排放为主要研究热点。随着 2008 年《气候变化法案》的颁布,英国成为第 1 个立法减少 GHG 的国家,建筑行业相应的立法推动零碳建筑的实施<sup>[23]</sup>。Ohene 等<sup>[24]</sup>通过最优最劣方法(BWM)研究净零碳建筑行业的障碍,最终落脚于立法政策,指出达到零碳排放政府部门必须成为强有力的伙伴。此阶段主要研究相应立法政策以探寻建筑业碳减排潜力。

2) 2012—2017 年,主要关键词包含碳排放、能源及能源效率等,此阶段能源问题成为焦点。为提高能源强度和能源效率,人们试图调整能源消耗方式,从而引发了低碳目标及可再生能源、可持续发展和循环经济等领域研究的蓬勃发展。为实现设计初期进行节能优化,Baek 等<sup>[25]</sup>构建了 CO<sub>2</sub> 分析系统,可在设计阶段测算能源消耗,从而对建筑的能源消耗进行改进,提高能源效率。在节能改造方面,从全生命周期出发确定建筑的最优节能措施,实现系统观点下的建筑节能<sup>[26]</sup>。

3) 2018—2023 年,世界各国提出了碳中和目标和路线图,分析减排的挑战和驱动因素,预测不同情景下的减排效果。学者们将研究从低碳转向零碳,开始用实测探索零碳污染的最佳途径,并提出了可再生能源、智能建筑和绿色建筑等一系列研究重点。生命周期中运维阶段的碳监测较为复杂,Zhao 等<sup>[27]</sup>提供了一种新型的拟合方法,确保监测数据的准确性,借此方式提出针对性的减排方式。通过使用可再生能源、碳捕获和储存技术、建筑能效的提高等方式,将建筑运营阶段产生的碳排放量降至零或接近零。在全球碳交易市场中,碳排放配额交易价格是最为活跃的元素,实时反映市场的供给与需求。碳交易和碳定价机制可为建筑行业提供激励机制,合理的碳价格将促进创新绿色技术的发展,促使建筑业主和开发商采取更多的碳减排措施,并提高减排效率<sup>[28]</sup>。碳捕集与封存被认为是未来大规模减少温室气体排放、减缓全球变暖最经济、可行的方法。第 13 届温室气体控制技术国际会议上提出了一种太阳能碳捕集技术,英国碳清洁公司研发了一种先进的 CDRMAX 碳捕获溶剂,其二氧化碳捕获率高达

92.5%<sup>[29-30]</sup>。目前,碳中和的研究扩展到多学科领域,从政策、技术、经济等多角度推动碳中和的发展。随着能源的丰富、负排放能力的提高及人类减排意识和意愿的增强,碳中和正逐渐走向可实现的目标。

4 结 论

1) 在研究热点方面,国内外在建筑碳减排领域的高频关键词较为接近,包括建筑节能、绿色低碳、零碳排放和碳中和等研究热点;不同的是国外某些发达国家早已达到碳排放峰值,下一步需完成 2050 年的净零碳排放,而我国作为发展中国家,承诺在 2030 年达到碳排放峰值,2060 年实现碳中和,故“碳中和”“碳达峰”是我国目前的研究热点。

2) 在演进趋势方面,国内对建筑碳减排的研究起步晚于国外,随着我国经济的增长,对建筑碳排放相关的研究越来越重视。国外对碳减排的研究更多集中在政策和技术方面。研究早期的关键词偏向于宏观层面,如气候变化、碳排放、可持续性等,随着研究领域不断扩大,研究发展至微观方面,即促进碳中和的具体方法和技术。碳中和的研究领域包括可再生能源、碳税、低碳试点等。在最后的零碳阶段,政策的主导和技术创新是研究热点,社会、经济、能源、政策和技术等因素都是碳中和发展的重中之重。目前,国内外建筑碳排放发展进程已同步化。

3) 碳中和是未来的研究热点。实现碳中和是一个复杂的多学科过程,建筑碳排放领域不能通过单一视角分析来实现,需要对技术、经济和社会进行全面系统的分析。生态文明建设是人类文明发展和社会进步的必然要求,有必要将碳中和纳入生态文明建设的总体框架,深入研究这一概念的理论内涵,并在生态文明框架内构建碳中和管理理论和方法体系,组织跨学科技术创新团队。未来的研究以开发可再生能源和碳负排放技术创新为主,在技术支撑下逐步提高可再生能源的利用率。

参考文献:

[1] 叶红,严寒,张芮铭,等. 面向低碳城市建设的建筑运行能耗驱动机理研究进展[J]. 应用生态学报,2021,32(7): 2644-2652. DOI:10.13287/j.1001-9332.202107.019.

[2] 崔鹏,周思好. 中国高校碳排放核算与碳中和路径研究: 基于 2008—2021 年数据库的文献分析[J]. 中国高校科技, 2022(10):33-39. DOI:10.16209/j.cnki.cust.2022.10.014.

[3] 陈超美,李杰. CiteSpace 科技文本挖掘及可视化[M]. 北京:首都经济贸易大学出版社,2016.

[4] 陈悦,陈超美,刘则渊,等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究,2015,33(2):242-253. DOI:10.16192/j.cnki.1003-2053.2015.02.009.

[5] 罗晓予,曹星煜,宋志茜. 中日建筑全生命周期碳排放比较[J/OL]. 气候变化研究进展(2024-01-15)[2024-01-20]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5368.P.20240112.1432.004>.

[6] KIM S,MOON J,SHIN Y,*et al.* Life comparative analysis of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions of different building structural frame types[J]. The Scientific World Journal,2013,2013:175702. DOI:10.1155/2013/175702.

[7] 赵羽习,张大伟,夏晋,等. 混凝土结构全寿命减碳技术研究进展[J]. 建筑结构学报,2024,45(3):1-14. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2023.0065.

[8] 赵秀秀. 绿色建筑全生命周期碳排放计算与减碳效益评价[D]. 大连:大连理工大学,2017.

[9] LISITANO I M,BIGLIA A,FABRIZIO E,*et al.* Building for a Zero Carbon future: Trade-off between carbon dioxide emissions and primary energy approaches[J]. Energy Procedia,2018,148:1074-1081. DOI:10.1016/j.egypro.2018.08.052.

[10] 彭翔,刘娣,徐毅敏. 超低能耗建筑助力“双碳”目标实现的路径研究[J]. 建筑经济,2022,43(增刊 1):550-556. DOI:10.14181/j.cnki.1002-851x.2022S10550.

[11] 张时聪,王珂,杨芯岩,等. 建筑部门碳达峰碳中和排放控制目标研究[J]. 建筑科学,2021,37(8):189-198. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2021.08.25.

[12] MIN Ji,YAN Gongxing,ABED A M,*et al.* The effect of carbon dioxide emissions on the building energy efficiency [J]. Fuel,2022,326:124842. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2021.08.25.

[13] KOU Fangcheng,GONG Qipeng,ZOU Yu,*et al.* Solar application potential and thermal property optimization of a novel zero-carbon heating building[J]. Energy and Buildings,2022,279:112688. DOI:10.1016/j.enbuild.2022.112688.

- [14] WIMBADI R W,DJALANTE R. From decarbonization to low carbon development and transition: A systematic literature review of the conceptualization of moving toward net-zero carbon dioxide emission (1995-2019)[J]. Journal of Cleaner Production,2020,256:120307. DOI:10. 1016/j. jclepro. 2020. 120307.
- [15] 姜虹,李俊明. 中国发展低碳建筑的困境与对策[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(12):72-75. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-2104. 2010. 12. 015.
- [16] 崔博,李金卫,郑仰阳,等. 低碳城市理念在城市规划中的应用与实践:以厦门市为例[J]. 城市发展研究,2010,17(11):113-117. DOI:10. 3969/j. issn. 1006-3862. 2010. 11. 019.
- [17] 张智慧,刘睿劼. 基于投入产出分析的建筑业碳排放核算[J]. 清华大学学报(自然科学版),2013,53(1):53-57.
- [18] 李雪梅,姚雨竹. BIM技术在建筑物全生命周期碳排放中的应用[J]. 建筑技术,2016,47(5):407-411. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-4726. 2016. 05. 006.
- [19] 鞠颖,陈易. 建筑运营阶段的碳排放计算:基于碳排放因子的排放系数法研究[J]. 四川建筑科学研究,2015,41(3):175-179. DOI:10. 3969/j. issn. 1008-1933. 2015. 03. 045.
- [20] 刘志坚,范光瑶,张时聪,等. 结合多元储能的分布式能源系统多目标优化:以近零能耗社区为例[J]. 建筑科学,2022,38(8):44-53. DOI:10. 13614/j. cnki. 11-1962/tu. 2022. 08. 07.
- [21] 石振武,毕爱琦. 长江三角洲城市群建筑部门碳排放时空格局及影响因素分析[J/OL]. 西安理工大学学报(2023-11-03)[2024-01-20]. <https://link.cnki.net/urlid/61. 1294. n. 20231102. 1736. 002>.
- [22] 李绥,石铁矛,王梓通,等. 基于建筑容量的城市建设用地碳汇量核算方法[J]. 应用生态学报,2019,30(3):986-994. DOI:10. 13287/j. 1001-9332. 201903. 016.
- [23] OSMANI M,O'REILLY A. Feasibility of zero carbon homes in England by 2016: A house builder's perspective [J]. Building and Environment,2009,44(9):1917-1924. DOI:10. 1016/j. buildenv. 2009. 01. 005.
- [24] OHENE E,CHAN A P C,DARKO A. Prioritizing barriers and developing mitigation strategies toward net-zero carbon building sector[J]. Building and Environment,2022,223:109437. DOI:10. 1016/j. buildenv. 2022. 109437.
- [25] BAEK C,PARK S,SUZUKI M,*et al.* Life cycle carbon dioxide assessment tool for buildings in the schematic design phase[J]. Energy and Buildings,2013,61:275-287. DOI:10. 1016/j. enbuild. 2013. 01. 025.
- [26] KMETKOVÁ J,KRAJČÍK M. Energy efficient retrofit and life cycle assessment of an apartment building[J]. Energy Procedia,2015,78:3186-3191. DOI:10. 1016/j. egyptro. 2015. 11. 778.
- [27] ZHAO Yuhong,LIU Ruirui,LIU Zhansheng,*et al.* Enhancing zero-carbon building operation and maintenance: A correlation-based data mining approach for database analysis[J]. Sustainability,2023,15(18):13671. DOI:10. 3390/SU151813671.
- [28] ZHOU Xinxing,GAO Yan,WANG Ping,*et al.* Examining the overconfidence and overreaction in China's carbon markets[J]. Economic Analysis and Policy,2022,75(1):472-489. DOI:10. 1016/j. eap. 2022. 06. 001.
- [29] BENNETT R,CLIFFORD S,ANDERSON K,*et al.* Carbon capture powered by solar energy[J]. Energy Procedia,2017,114:1-6. DOI:10. 1016/j. egyptro. 2017. 03. 1139.
- [30] BUMB P,PATKAR P E A,MATHER R,*et al.* Field demonstration of advanced CDRMax solvent at the US-DOE's national carbon capture centre and the CO<sub>2</sub> technology centre Mongstad DA, Norway[J]. Energy Procedia,2017,114:1087-1099. DOI:10. 1016/j. egyptro. 2017. 03. 1261.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)