

基于 CiteSpace 的建筑碳排放研究热点及趋势的可视化分析

徐新涛 丁正泽 申卓 刘运生^{通讯作者} 张宇航

1. 青岛理工大学(临沂), 山东 临沂 27600
2. 青岛科技大学, 山东 青岛 266000
3. 青岛理工大学(临沂), 山东 临沂 27600
4. 青岛理工大学(临沂), 山东 临沂 27600
5. 黑龙江大学, 黑龙江 哈尔滨 150006

摘要: 在全球日益严峻的气候变化背景下, 建筑部门是节能减排的关键部门, 被认为具有显著的减排潜力。为了加快推动建筑领域节能降碳, 实现碳达峰碳中和, 本文基于 2013-2023 年 Web of Science 核心合集数据源, 采用 CiteSpace 软件的文献计量分析方法, 对建筑碳排放领域相关论文的发表数量, 主要发文机构、国家、学科和合作作者, 关键词共现, 文献共被引进行了可视化分析, 基于此总结出建筑碳排放领域的研究热点, 并提出研究趋势。结果表明: 2013-2023 年, 建筑碳排放领域的年发表论文数量和被引频次总体均呈现逐渐上升的趋势: 中国、美国 and 英国等国家发表论文数量最多; 中国科学院、清华大学和美国能源部等是主要的研究机构; 蔡伟光是该领域发表论文数量最多的作者, 其次是潘巍和冯伟; 大多数研究集中在建筑碳排放影响因素研究、低碳建筑材料研究及应用、建筑设计与碳减排策略的研究等方面。未来几年, 可以从预制构件装配式建筑、CCUS 技术在建筑材料的生产中的应用, 系统化的全生命周期分析并更多地考虑区域性因素等进行深入探索。

关键词: 建筑碳排放; 碳减排; 文献计量分析; CiteSpace; 可视化分析

建筑碳排放是指在建筑物的整个生命周期中, 从原材料提取、运输、施工、使用、拆除等各个环节产生的二氧化碳等温室气体的总量。随着建筑行业的快速发展, 其带来的高能耗和环境污染问题也日益突出, 建筑业的扩展与生态环境保护之间出现了严重冲突。

《2022 年全球建筑建造业现状报告》显示, 建筑的运营能源需求已增长到 135 EJ 左右, 全球建筑行业的二氧化碳排放量达到约 100 亿 t^[1]。《2022 年世界能源展望》中指出, 国际能源署预计到 2030 年前全球能源需求每年将增长约 0.2%, 碳排放量将在本世纪 20 年代中期达到峰值^[2]。

国外关于建筑碳排放领域的研究较早, 在

20 世纪初期, 有关学者们已经开始关注建筑在生命周期中的碳排放问题, 并进行建筑材料的碳足迹、建筑设计对碳排放的影响、能源使用效率、以及建筑生命周期评估方法等方面的研究。

进入 21 世纪后, 随着全球气候变化议题的推进, 欧盟制定了一系列关于建筑节能减排的标准, 要求新建建筑达到零碳排放的目标, 美国也在推广绿色建筑标准和建筑碳排放控制方法, 推动建筑行业减少碳足迹。相比之下, 我国建筑碳排放研究起步较晚, 正处于探索阶段。近年来, 国内学者的研究集中在建筑能耗与碳排放的关系、碳排放的计量与评估方法、绿色建筑技术以及政策与标准的制定上。通过

对国外研究的借鉴和创新,国内研究逐渐形成了具有中国特色的建筑碳排放控制体系,推动了低碳建筑和可持续发展理念的普及。

本文运用 CiteSpace 软件的文献计量分析方法,对 2013-2023 年间发表的建筑碳排放相关文献进行整理。通过可视化分析,揭示了该领域的研究热点,并预测该领域的研究趋势,为建筑行业的节能减碳提供了参考依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文使用 Web of Science (WoS) 核心合集作为数据源。通过主题检索设置 Topic= (carbon emission) And Topic= (building), 时间范围限定为 2013 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 30 日,文献类型选择为 Article。

1.2 研究方法

使用 CiteSpace 软件进行回顾性计量分析,英文文献导入 CiteSpace 软件,设定时间范围为 2013 年 1 月至 2023 年 12 月,时间切片为 1 年,节点类型分别选择国家、机构、合作作者、关键词、学科和被引文献,默认 Cosine 算法,调整每个时间切片内节点的筛选条件并通过增减比例参数 k 调节网络的大小,网络裁剪 Pruning 参数设置为 None。

2 结果与分析

2.1 年发表论文数量

2013 年 1 月 1 日至 2023 年 12 月 30 日共检索出 9607 篇文献。每年发表的文献数量及被引频次如图 1 所示。

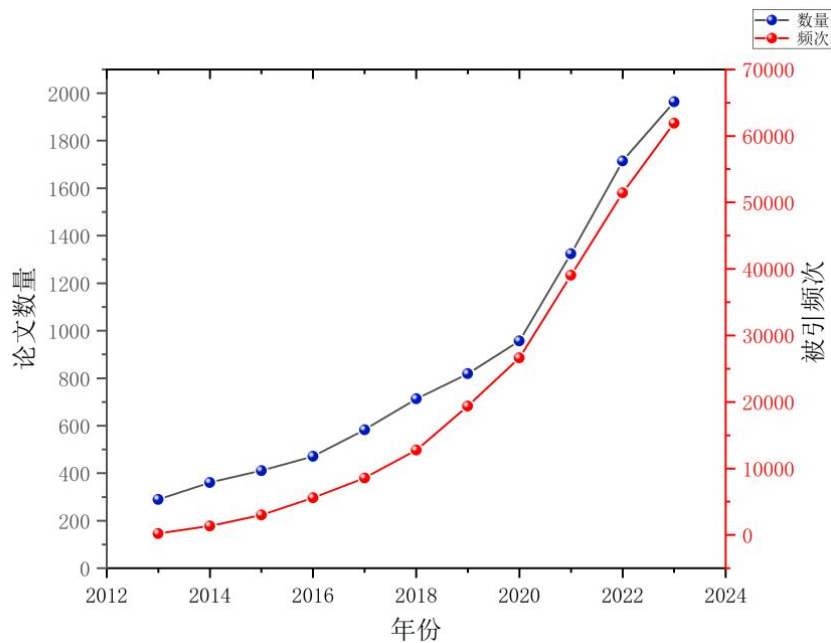


图 1 建筑碳排放领域年发表论文数量及被引频次

由图 1 可知,建筑碳排放研究领域的年发表论文数量和被引频次呈现逐年上升的趋势,其中,从 2013 年至 2023 年论文数量由 290 篇达到 1964 篇,在 2023 年论文被引频次达 61925 次,10 年内,篇均被引频次为 29.96 次,造成这种现象的原因可能是在全球气候变化的背景下,建筑领域的碳排放已成为一个新的增

长点,国内外学术界对于建筑业碳排放领域展开了多视角的研究。

2.2 国家合作网络

以国家为节点,利用 CiteSpace 软件,对与建筑碳排放领域相关的 9607 篇文献进行分析,结果见图 2。

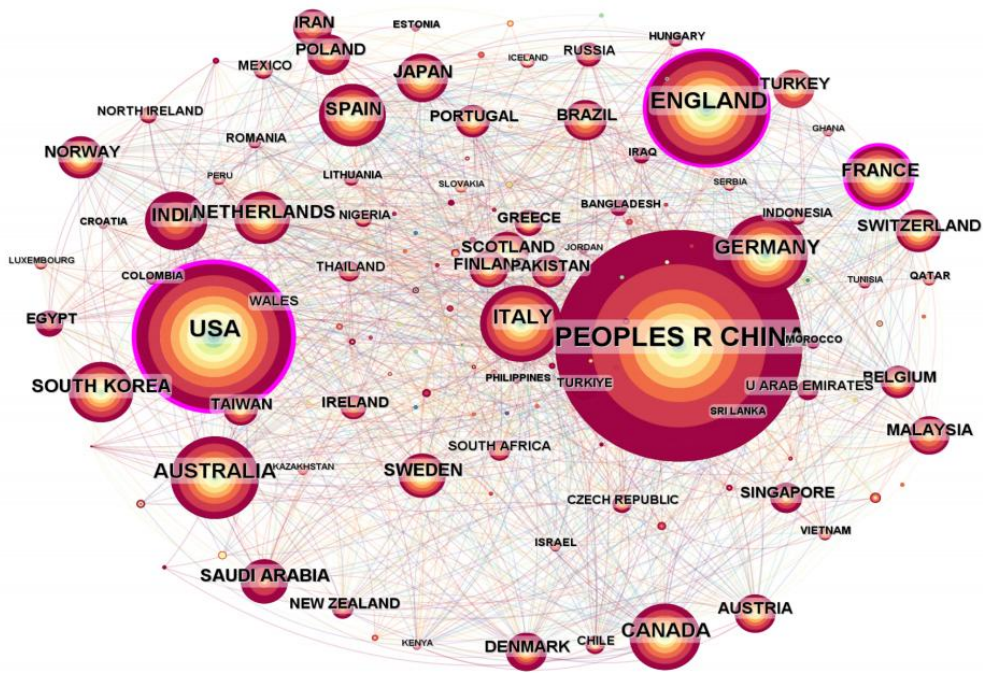


图 2 建筑碳排放领域研究国家合作网络

注：节点代表国家，节点的大小表示发表论文的数量，连接线段表示合作关系

图 2 中显示了 135 个网络节点和 1452 条连线，表明在建筑碳排放领域共有 135 个国家开展了研究，不同国家间有 1452 种合作关系，网络密度为 0.1605。表 1 列出了建筑碳排放领域论文发表最高的前 10 个国家、研究机构及合作作者。根据数据分析发现，在建筑碳排放领域，中国在全球研究中占据主导地位，其

发表的论文数量远超其他国家。这表明中国在该领域投入了大量的研究资源，且在应对建筑碳排放问题方面表现出较高的关注度。总体来看，建筑碳排放研究领域的合作网络具有较高的密度，全球各国已经认识到国际合作在应对建筑碳排放问题中的重要性

表 1 建筑碳排放领域论文产量最高的 10 个国家、机构和作者

国家	数量	机构	数量	作者	数量
CHINA 中国	3624	Chinese Academy of Sciences 中国科学院	351	Cai Weiguang	47
USA 美国	1536	Tsinghua University 清华大学	224	Pan Wei	25
ENGLAND 英国	957	United States Department of Energy (DOE) 美国能源部 (DOE)	207	Feng Wei	23
AUSTRALIA 澳大利亚	528	Chongqing University 重庆大学	165	Ma Minda	23
GERMANY 德国	465	University of California System 加利福尼亚大学	163	Yang Hongxing	16
ITALY 意大利	441	Hong Kong Polytechnic University	141	Chen Xi	15

国家	数量	机构	数量	作者	数量
		香港理工大学			
CANADA 加拿大	393	University of Chinese Academy of Sciences 中国科学院大学	127	Huo Tengfei	15
SPAIN 西班牙	324	Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) 法国国家科学研究中心 (CNRS)	124	Liu Yang	14
INDIA 印度	307	University of London 伦敦大学	124	Zhang Xiaocun	13
FRANCE 法国	305	Swiss Federal Institutes of Technology Domain 苏黎世联邦理工学院	117	Xiang Xiwang	13

2.3 机构合作网络

图 3 为建筑碳排放领域国际机构合作网络。分析发现，共有 501 个网络节点和 3744 条连线线段，这表明共有 501 家机构发表了建筑碳排放相关研究论文，机构之间共有 3744

种合作关系。根据发文量，发表文章最多的是中国科学院（351 篇），其次是清华大学（224 篇）、美国能源部（207 篇）（见表 1）。分析发现，国际机构之间的连线较为密集，这表明近年来建筑碳排放领域的研究高度互联，全球各地的机构之间频繁开展合作。

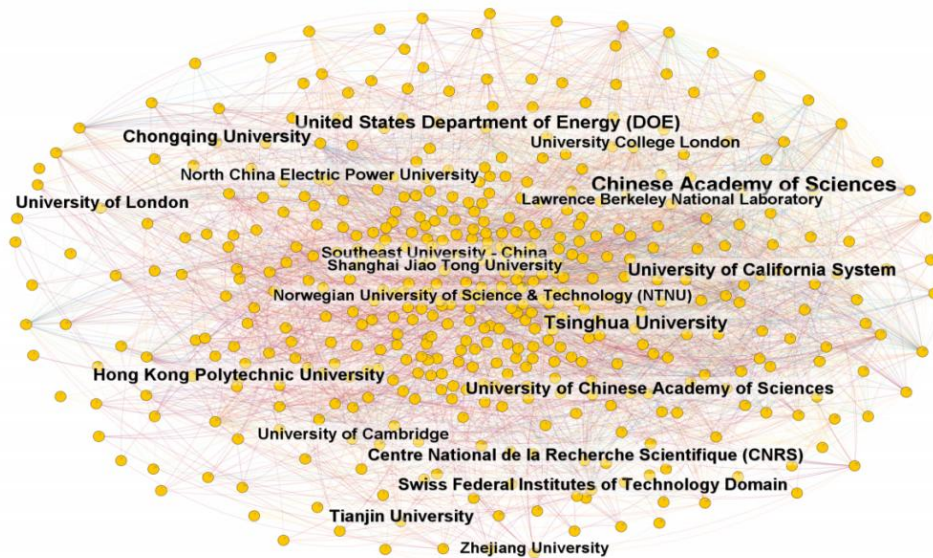


图 3 建筑碳排放领域国际机构合作网络

2.4 作者合作网络

对建筑碳排放领域发表论文的作者统计发现，蔡伟光（47 篇）是该领域发表论文数量最多的作者，其次是潘巍（25 篇）、冯伟和马敏达（23 篇）（见表 1）。图 4 为建筑碳排放领域研究作者合作网络。图 4 展示了该领域的

作者合作网络，其中包含 609 个网络节点和 593 条连线。网络图中部的合作网络较为密集，形成了几个主要的研究团队或合作圈，推动了该领域的研究发展。同时，网络外围存在较多小节点和独立作者，说明部分研究者的合作关系较少。

表 2 关键词共现分析中计数最高的前 20 个关键词

排名	计数	关键词	排名	计数	关键词
1	1083	performance	11	597	climate change
2	957	life cycle assessment	12	585	consumption
3	881	emissions	13	584	design
4	868	energy	14	576	buildings
5	850	co2 emissions	15	508	optimization
6	654	carbon emissions	16	476	system
7	629	greenhouse gas emissions	17	428	efficiency
8	628	energy consumption	18	427	carbon
9	616	impact	19	422	energy efficiency
10	611	model	20	398	carbon dioxide

2.6 文献共被引分析

文献共被引指两篇（或多篇论文）同时被后来一篇或多篇论文所引证，则称这两篇论文构成共被引关系。当两篇或多篇文献被同一篇论文引用时，这些文献在某种程度上具有相关性，共被引强度越高，表明两者内容越相似、联系越紧密。利用 CiteSpace 的聚类功能对共

被引文献进行聚类分析，可以挖掘出相似文献的共同主题。对 2013-2023 年该领域所有文献按聚类网络的层次顺序进行分类，节点类型选择被引文献，结果见图 6。聚类网络的模块化值（Q 值）为 0.6963，大于 0.3，说明聚类划分具有显著性；平均轮廓值（S 值）为 0.8923，大于 0.7，表明聚类非常成功，具有较高的效率和可信度。

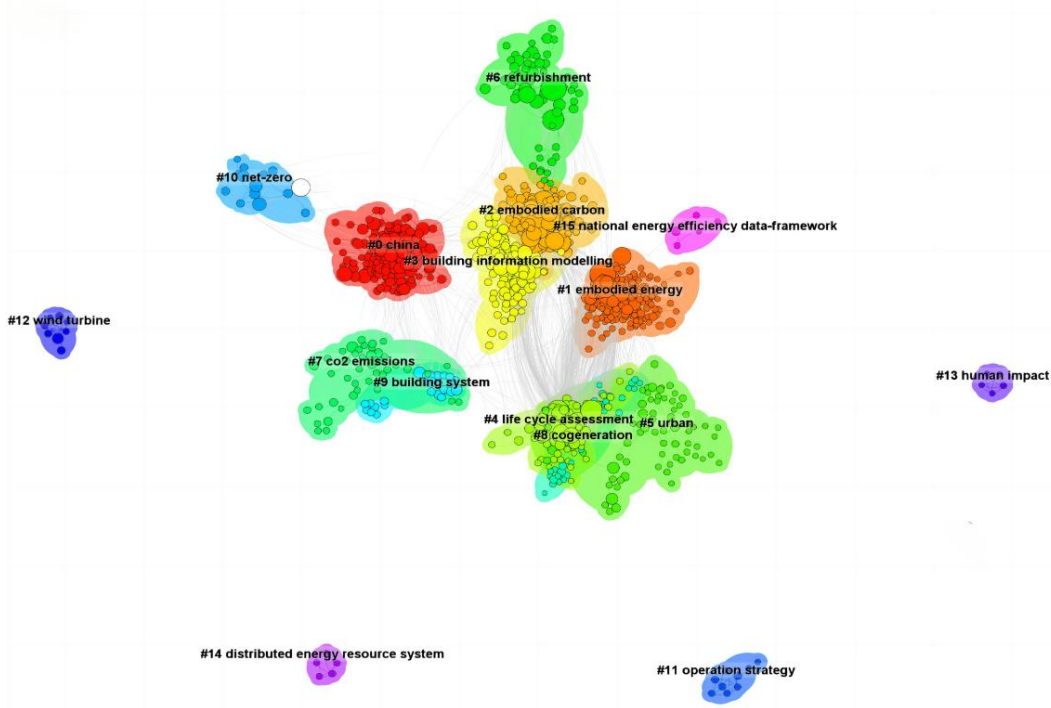


图 6 文献共被引聚类网络

聚类结果显示了建筑碳排放领域的研究方向和发展趋势，对这 16 个聚类的研究方向进行归纳总结，可以分为 5 个方面：建筑

生命周期中的碳排放（#1，#3，#6）、建筑技术和方法的应用（#2，#8，#10）、国家、城市层面的能源管理和减排措施（#0，#4，#7，#14）、

既有建筑的改造与翻新(#5)、零碳建筑目标实现路径(#9, #11)。这些聚类表明建筑碳排放研究在不同层面展开,包括从宏观的政策和管理到微观的技术方法,涵盖了生命周期评估、能源管理、低碳技术以及零碳目标的实现路径。

3 讨论

3.1 研究热点

通过对知识图谱进行解析,并对建筑碳排放的研究现状进行梳理和总结,将建筑碳排放的研究热点归纳为以下 3 个方面。

(1) 建筑碳排放影响因素研究

近年来,随着建筑业的发展,碳排放研究已引起国内外学者的广泛重视。当前,国际上对碳排放因子的研究主要采用 IPAT 模型、对数平均权重 Divisia 指数法(LMDI)、耦合结构分解分析(SDA)等方法。罗浩基于拓展的 Kaya 恒等式,利用 LMDI 分解对 2005 年至 2019 年福建省能源消费碳排放的影响因素进行了分解,探究了碳排放主要驱动因素^[3]。马敏达运用 Kaya 恒等式构建了未来建筑碳排放的静态情景模型,并进一步提出了一种基于蒙特卡洛模拟的动态情景分析方法,用于评估建筑碳排放的未来变化^[4]。颜伟等学者使用 STIRPAT 模型,并结合岭回归方法,对山东半岛蓝色经济区的人口数量、人均 GDP、能源强度、城镇化水平与碳排放量之间的关系进行了定量分析,进一步研究了该地区碳排放量的发展趋势^[5]。Li 等通过 STIRPAT 模型和 GA-BP (BP) 方法,利用 1990-2015 年的历史数据,对比预测了中国河北省在 2016-2030 年间的碳排放峰值^[6]。Feng 等采用排放因子法和 LMDI-LEAP 模型,分析了我国南方某典型村庄农村建筑的碳排放现状、影响因素及其变化趋势,并最终提出了针对农村建筑节能减排的策略建议^[7]。Song 等采用 LMDI 分解法,分析了内涵强度、贸易规模、产业结构、经济发展和消费水平以及人口因素对中国 ACE 的影响^[8]。兰国辉等学者采用 Tapio 脱钩模型评估了中部六省碳排

放与经济增长之间的脱钩关系^[9]。张小平等基于 IPCC 碳排放计算指南,基于生命周期理论,将间接碳排放纳入建筑业碳排放测算框架,计算了 2000—2013 年甘肃省建筑业的碳排放量^[10]。

(2) 低碳建筑材料研究及应用

低碳建筑材料是国内外发展低碳经济的必然选择,在国外,美国某公司采用以 CS 和硅钙石为主要胶凝成分的混凝土,使碳排放量减少了 30%。龙惟定和白玮等人综述了中国在温室气体减排方面所面临的挑战,指出建筑节能是实现碳减排的基础^[11]。聂松等学者强调低碳胶凝材料将在水泥行业二氧化碳减排中起重要作用^[12]。Kwon 等研究者发现采用废弃混凝土粉替代石灰石,不仅可以减少熟料生产过程 53%的 CO₂ 排放量,还促进了废弃建筑材料的再利用^[13]。

许多学者研究将农业废弃物,如椰壳、油棕壳、玉米芯等作为建筑材料应用于建筑材料中^[14]。Manjunath B 等探讨了经过处理的咖啡果废料(T-CCW)作为砂浆中水泥的部分替代品的巨大潜力^[15]。邵科认为玉米芯颗粒在建筑材料中的应用具有广阔的前景^[16]。杜文清将癸酸-硬脂酸(CA-SA)分别与棕榈酸(PA)、十八醇(OD)、石蜡(PW)混合制备三种三元 PCM,分析发现三种材料表现出良好的蓄放热性能以及热、化学稳定性,应用于建筑领域可发挥较大节能潜力^[17]。

(3) 建筑设计与碳减排策略研究

Ding 提出了一种多准则方法用于衡量建筑项目和设施的可持续性,强调了被动式设计(如自然通风、隔热和采光优化)在减少建筑能耗和碳排放中的作用^[18]。Grynning 等人研究了窗户设计对建筑能效的影响,指出高效窗户设计(如隔热玻璃、低辐射涂层等)是被动式设计策略中的重要环节,可以显著减少建筑的能源消耗和碳排放^[19]。Chastas 等人综述了住宅建筑中的隐含能量,提出在建筑设计阶段

优化隐含能量可以减少整体碳排放^[20]。Liu 等利用 DeST 模型,对深圳市典型民用建筑类型的能耗进行模拟,并总结出各类型建筑能耗的时空特征^[21]。陈良把新能源光伏开发运用于建筑电气施工当中,以达到节能减排的施工目标^[22]。

3.2 研究趋势

①预制构件装配式建筑在减少碳排放方面展现出巨大潜力。与传统建筑相比,预制装配式建筑通过工厂化生产和现场装配的方式,能够显著降低施工过程中的能源消耗和废弃物产生,降低整体能耗。因此,预制构件装配式建筑未来有望在一定程度上替代传统建筑模式。②近年来,许多研究指出,传统的建筑碳排放研究多集中在运营阶段,而忽视了从材料制造到拆除阶段的全生命周期碳排放问题。全生命周期评估(LCA)可以量化建筑各阶段的碳排放贡献,通过识别不同阶段的碳排放特征,设计有效的减排措施。未来,国内外学者将通过系统化的全生命周期分析,实现更加精细化的碳足迹控制。③不同气候条件下的建筑能耗和碳排放特征不同,未来,建筑碳排放研究会更多地考虑区域性因素,通过针对性设计和材料选择来适应气候特点,优化建筑的能源使用和碳排放。④碳捕集利用与封存(CCUS)技术已经被应用于一些工业领域,并逐渐扩展到建筑材料领域。张贤等指出,CCUS 技术不仅可以实现化石能源利用近零排放,抵消难减排的CO₂和非二氧化碳温室气体排放、最终实现碳中和目标^[23]。随着CCUS技术的成熟,未

来将在建筑材料的生产中得到更广泛应用,尤其是碳捕集水泥和低碳砖块等。这些新材料有望在保证材料性能的同时显著降低碳足迹,从而为建筑行业提供更环保的材料选择。

结语

有关建筑碳排放研究的文献主要发表在中国、美国、英国、澳大利亚和德国,发表论文数量最多的研究机构是中国科学院、清华大学和美国能源部。在建筑碳排放领域,不同国家及研究机构之间的合作比较紧密,而国内外研究者之间的协作仍有待加强。结合关键词和共被引文献分析,该领域的研究主要在建筑碳排放影响因素研究、低碳建筑材料研究及应用、建筑设计与碳减排策略的研究等方面。建筑碳排放的研究仍存在很大的空间,未来几年,预制构件装配式建筑将在一定程度上替代传统建筑模式,国内外学者将通过系统化的全生命周期分析并更多地考虑区域性因素,实现更加精细化的碳足迹控制建筑碳排放,此外,随着CCUS技术的成熟,未来将在建筑材料的生产中得到更广泛应用和推广。

本研究也存在一定的局限性。首先,本文只检索了Web of Science中的参考文献,且时间跨度仅选择2013年1月至2023年12月,因此无法覆盖所有相关出版物。其次,CiteSpace只分析了相关文献的主要结论和关键词,忽略了来自全文的信息。尽管如此,本研究仍为国内外学者了解建筑碳排放领域的研究进展、热点及未来趋势提供了新的思路。

参考文献

- [1]章昱斌. 基于 STIRPAT 模型安徽省民用建筑终端能耗及碳排放达峰研究[D]. 安徽建筑大学, 2024. DOI:10.27784/d.cnki.gahjz.2024.000316.
- [2]李晨曦, 伍浩松. 国际能源署发布新版能源展望报告[J]. 国外核新闻, 2022, (11):28-31.
- [3]罗浩. 基于 Kaya 拓展模型的福建省能源消费碳排放驱动因素分析[J]. 化学工程装

备, 2024, (08): 149-152.

- [4] 马敏达. 中国建筑运行碳排放的影响因素与达峰模拟研究[D]. 重庆大学, 2020.
- [5] 颜伟, 黄亚茹, 张晓莹, 等. 基于 STIRPAT 模型的山东半岛蓝色经济区碳排放预测[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(02): 125-131.
- [6] Li W, Du L. Assessment Framework of Provincial Carbon Emission Peak Prediction in China: An Empirical Analysis of Hebei Province. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2019;28(5):3753-3765.
- [7] Feng, H.; Wang, R.; Zhang, H. Research on Carbon Emission Characteristics of Rural Buildings Based on LMDI-LEAP Model. *Energies* 2022, 15, 9269.
- [8] Song, R.; Liu, J.; Niu, K. Agricultural Carbon Emissions Embodied in China's Foreign Trade and Its Driving Factors. *Sustainability* 2023, 15, 787.
- [9] 兰国辉, 谢麟泽. 中部六省碳排放 LMDI 分解与脱钩效应研究[J]. 晋中学院学报, 2024, 41(4): 27-33.
- [10] 张小平, 高苏凡, 傅晨玲. 基于 STIRPAT 模型的甘肃省建筑业碳排放及其影响因素[J]. 开发研究, 2016(6): 6. DOI:CNKI:SUN:KFYJ.0.2016-06-031.
- [11] 龙惟定, 白玮, 梁浩, 等. 建筑节能与低碳建筑[J]. 建筑经济, 2010, 2(2): 38-40.
- [12] 聂松, 周健, 徐名凤, 等. 低碳胶凝材料的研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(2): 22050304-9.
- [13] KWON E, AHN J, CHO B, et al. A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 83: 174-180.
- [14] Prusty J K, Patro S K. Properties of fresh and hardened concrete using agro-waste as partial replacement of coarse aggregate – A review. *Construction and Building Materials*, 2015, 82: 101-113
- [15] Manjunath B, Plamondon O M C, Ganesh A, et al. Valorization of coffee cherry waste ash as a sustainable construction material[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 110-116.
- [16] 邵科. 玉米芯颗粒处理技术研究及其在建筑材料中的应用[D]. 湖南大学, 2023. DOI:10.27135/d.cnki.gghudu.2023.000047.
- [17] 杜文清. 癸酸-硬脂酸基定形复合相变材料的性能及其建筑节能应用研究[D]. 江西理工大学, 2022.
- [18] Ding G K. The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities. *Ecological Indicators*, 2004, 4(2): 103-117.
- [19] Grynning S, Gustavsen A, Arasteh D, Goudey H. Energy efficiency of windows in buildings: Save energy with better windows. *Energy and Buildings*, 2013, 58: 263-271.
- [20] Chastas P, Theodosiou T, Bikas D. Embodied energy in residential buildings—towards the nearly zero energy building: A literature review. *Building and Environment*, 2016, 105: 267-282.
- [21] Liu S, Wang J, Xu Y, et al. 基于建筑能耗特征的城市建筑碳减排研究——以深圳市为例[J]. *Beijing Da Xue Xue Bao*, 2018, 54(1): 125-136.
- [22] 陈良. 新能源光伏发电助力建筑电气节能减排[J]. 现代工程项目管理, 2024, 3(20): 181-183.
- [23] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 70-80.