

· 专题一：双清论坛“建筑碳中和的关键前沿基础科学问题” ·

中国建筑“双碳”路径的科学问题与研究建议*

王建国**

东南大学 建筑学院, 南京 210096

[摘要] 中国当下的“生态文明建设”和高质量发展理念对建筑业可持续发展提出了更高要求和挑战, 建筑业作为我国第一碳排放大户, 其碳中和关乎国家“双碳”战略的顺利实施。如何实现传统建筑材料、结构、建造的低碳转型, 如何发展“以人为本”的低碳人居环境的能源环境新技术, 如何平衡人类生产生活与自然环境的关系等, 成为当前亟待解决的问题。本文立足全球视野, 基于国家“双碳”目标达成的战略需求和顶层设计, 阐述建筑学科的发展现状、趋势和挑战, 尝试凝练建筑“双碳”路径相关的关键科学问题, 从全过程、全领域、数字化和工程的视角提出未来中国建筑“双碳”的可能实现路径、战略研判和研究重点, 以期助力我国生态文明高质量建设与中国式现代化进程。

[关键词] 建筑业; 双碳目标; 低碳建筑设计; 可持续发展

1 建筑领域“双碳”的战略意义与最新动向

自第一次工业革命开始至今, 人类社会正在经历一个巨量碳排放的时期^[1], 碳排放导致的全球气候变暖引发一系列自然灾害和生态失衡等环境问题^[2-4]。早在 20 世纪末, 全球社会就意识到了碳排放引发的气候变化对人居环境所造成的巨大影响^[5]。从全球来看, 城市以地球 2% 的表面积容纳了全球约 55% 的人口^[6], 在创造全球 80% 以上 GDP 的同时, 也同时消耗着 GDP 同比例的资源与能源消耗总量^[7]。反观国内, 伴随着我国快速城镇化的发展过程, 城市数量也从 193 个上升至 2021 年底的 685 个(2020 年数据)^[8]。从国内整体来看, 城镇建设面积占全国国土面积约 1.2%, 相当于全部建设用地 28% 的用地, 但其碳排放量约占我国总排放量的近 80%(图 1)。其中, 建筑从设计、材料、运输、建造、运维的全生命周期过程占到了全球碳排放的 50% 以上^[9]。2020 年 9 月 22 日, 习近平主席在第七十五届联合国大会向国际社会郑重承诺: 中国将力争 2030 年前达到二氧化碳排放峰值, 努力争取 2060 年



王建国 东南大学教授, 中国工程院院士。在中国较为系统地构建了现代城市设计理论和方法体系, 率先提出绿色城市设计和城镇建筑遗产多尺度保护的学术概念并开展系统工程实践。曾获国家科技进步奖一等奖、教育部科技进步奖一等奖、教育部自然科学奖一等奖等奖项。

前实现碳中和。党的二十大报告也明确提出, 要站在人与自然和谐共生的高度来谋划发展是实现高质量发展的内在要求, 中国式现代化的一个重要特征是人与自然和谐共生。在“双碳”战略目标时间表的控制下, 建筑领域作为三大能源消费领域(工业、交通、建筑)之一^[10], 尽早实现碳中和对于“双碳”战略路径的整体实现具有重要意义。

建筑从设计、建材、运输、建造、运维全生命周期过程中所涉及的“碳足迹”及其能源消耗是建筑领域碳排放的主要来源, 也是建筑领域碳达峰、碳中和的主要方面^[11]。对此, 有效利用建筑—环境能量转换循环, 研发应用具有低能耗、自供能和固碳、汇碳能力的新一代建筑材料^[12], 采用低能耗、净零碳建筑结构形态设计模式、改进建筑建造工艺^[13], 发展数

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-06-08

* 本文根据第 326 期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: wjgseu@163.com

本文受到中国工程院与国家自然科学基金委员会联合战略研究与咨询项目(2022-ZCQ-08)的资助。

字、智能的建筑建造与运维技术成为当前建筑领域实现碳中和目标的主要方向。例如,英国于2020年发布的《绿色工业革命十项计划》中就明确将绿色建筑技术创新作为十个重点绿色技术研发的重点支持领域^[14]。在此方面,国家自然科学基金委员会设置了极度热湿气候区超低能耗建筑的重大项目,科技部设置了“绿色建筑与工业化”重大专项均对建筑领域降能控碳展开前沿研究。全球建筑领域也从建筑能源、材料、结构技术等方面进行了大量创新突破。

在建筑能源方面,光伏建筑一体化(Building Integrated Photovoltaic, BIPV)、BAPV(Building Attached Photovoltaic)、光伏瓦、碲化镉薄膜光伏发电玻璃、模块化光储直柔综合能源箱、建筑氢能供应系统等新型清洁能源技术逐步改变原有建筑供能体系,减少建筑能耗碳足迹,实现100%或绝大比例建

筑能源自供应^[15,16]。在建筑结构材料方面,美国专家哈坦指出胶合木+正交胶合木(Cross Laminated Timber, CLT)人工合成木和钢木结构最具“双碳”优势,其全球变暖潜值分别为125和170(单位:GWP, kg CO₂/kg)(图2),比较合理的是全钢框架加上预制混凝土板(GWP为210 kg)。全混凝土(框架加无梁楼板)和全钢结构每平米建筑全球变暖潜值最高(分别为390 kg和340 kg)^[16]。如果按照不同建筑材料的全球变暖潜值数值考虑:未来建筑建造中全混凝土以及全钢结构或将逐渐淘汰。在建筑建造技术方面,保温隔热外墙体系、热桥阻断构造技术、建筑生态通风技术与“房屋呼吸”概念等从建筑—环境整体能量转化循环层面降低了建筑能耗^[17,18];利用木材本身“碳池”功能的木制建筑^[19](图3),绿色屋面及虹吸式雨水系统也促进了建筑

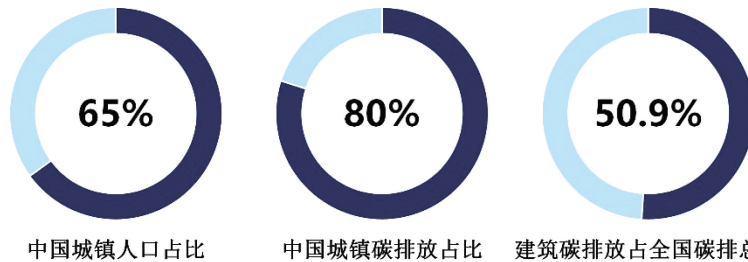


图1 中国城镇及建筑碳排放占比统计(2020数据)(来源:作者根据《2020中国城乡建筑领域研究报告》绘制)

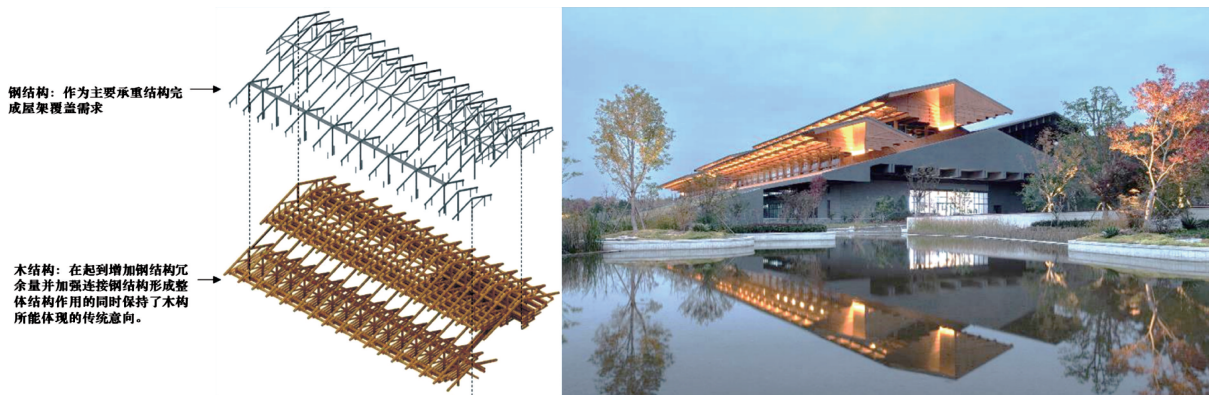


图2 第13届中国徐州国际园艺博览会综合展馆(钢木结构)(来源:作者绘制)



图3 江苏省第十届园艺博览会主展馆(现代木结构)(来源:作者绘制)

从碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术层面实现净零排放目标^[20]。在建筑运维技术方面,集成多源数据的全息 BIM(Building Information Model)技术,以及综合管理建筑多模块运行的 BA(Building Automation System-RTU)系统等数字化和人工智能技术的应用,也将有效提升建筑本体运行效率,降低非必要性能源消耗^[21]。

2 中国建筑业“双碳”现状、机遇与挑战

从当前经济发展和城市建设阶段来看,我国仍处于工业化、城镇化的快速发展阶段^[22]。根据中国建筑节能协会的统计报告,2020 年全国建筑全过程碳排放总量达 50.8 亿吨 CO₂, 占全国碳排放的 50.9%, 其中建材生产阶段碳排放 28.2 亿吨 CO₂, 占全国碳排放的 28.2%, 建筑运行阶段碳排放 21.6 亿吨 CO₂, 占全国碳排放的 21.7%^[4]。其中,在建筑建材生产阶段,钢铁和水泥建材的生产分别排放了 14.7 亿吨 CO₂ 和 12.3 亿吨 CO₂。同时,自 2005 年开始至 2020 年统计止,全国建筑运行碳排放年平均增速保持在 4.7%。虽然,从“十一五”开始到“十三五”建设期结束,全国建筑运行碳排放变化从 7.0%、4.2% 到 2.8% 呈现出显著的增速放缓^[4]。但在短时期内,中国建筑业的“大量建设、大量消耗、大量排放”,以及建筑材料、建造、运行过程中涉及直接、间接碳排放量和碳排放强度的“双高”现象是中国建筑业实现“碳达峰、碳中和”需要直面的现实问题。建筑行业是决定城市碳中和是否成功的关键^[23],包括建材、建材运输、建筑运行等在内的建筑业,则是决定一个城市碳中和是否成功的最重要的关键。

按照当前中国建筑业发展态势,以及“双碳”目标时间表倒推工程技术变革背景下,今后的建筑和土木工程从设计到建造、再到全生命周期的绿色运维将会在整体上发生“双碳”和“人类文明建设时代”的“范型”转移。就中国建筑业而言,如果按照建筑结构材料碳汇标准统计结果的考虑,今后应该大幅度减少建筑混凝土和水泥用量乃至找到低碳替代材料,增加装配化率^[24],与之匹配的建筑设计、建筑结构、建筑施工、建筑管理和建筑运维等都会发生革命性的变化,几乎所有相关的科学理论、技术方法、技术标准、工程规范都会随之改变。同时,基于热舒适建筑物理原理的建筑环境在能源类型和供给方式改变后也将发生巨大变化,建筑性能提升和高效节能

的技术路线也可能改变。同时,在国家重视文化传承的前提下,我们仍然可以运用经过改良,今天仍有重要节能价值的传统建筑设计方法,如细化建筑不同用途的环境需求、“自遮阳”、自然通风采光、体型系数控制、优先采用木结构及钢木结构等^[25,26]进行建筑的设计与建造。另外,以中国当前城市高密度发展的特征态势,如果中国建筑业还需要建设更多的高层、大跨和大空间建筑,除了木质建筑或者钢木建筑外,那我们将对目前最为广泛使用的建筑材料做什么样的改良研发?又可以有什么新的建筑材料、建筑结构形式来替代已经高度成熟的钢铁或混凝土材料和结构?建造方式、方法、技术规程、施工质量管理又将如何?建筑学、土木工程等学科建构的科学基础、理论方法和知识体系又将如何在相关学科建设、人才培养、专业训练、课程体系重新建构,这无疑对当前中国建筑业无论是建筑学理本体,还是建筑设计、建造行业均从理论、技术、材料、工艺等方面构成了一定的挑战。

与此同时,人工智能、云计算、物联网、感知网络等先进技术^[27],以及 BIM、BA 等系统集成方法与平台^[28,29]则为建筑科学研究领域带来了数字化转型的重要契机。越来越精准关联的建筑工程的系统化、组织化和智能化将如何影响或者促进土木建筑业发展的机遇诞生?如果说,自工业革命起人类使用了化学合成方法造就了钢铁和水泥及混凝土、玻璃、铝合金等建筑材料,使得建筑业迎来了第一个春天。那么基于建筑材料的低碳绿色转型及相应的双碳认识进阶,以及针对建筑领域的多样性、多目标需求,将人类所有减碳行为、新能源利用、增加碳汇和综合不同系统的碳汇计算集成为一个智能化的“双碳”建筑管理系统,获得建筑业“双碳”目标的帕累托最优解,是否意味着建筑工程领域“第二个春天”的来临。应该看到,到目前为止,全世界关于碳捕捉、碳消化和碳处理的很多事情都还没有在技术路线、市场化、经济性、可靠性等方面完全解决^[30],解决这个问题需要实事求是。从操作技术层面来讲,能源利用和能耗计算、低碳的建筑材料、建筑建造方式和建筑构造问题在“双碳”目标上扮演着关键角色^[31]。

3 建筑领域“双碳”路径的关键科学问题

“双碳”目标的实现取决于很多方面的变革努力^[32]。“碳中和”不仅是简单的清洁能源取代化石能源的能源变革,其还涉及经济结构的变革、生产技术的变革以及生活方式的变革。党的二十大报告指

出“推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节”。在建筑领域,建筑“双碳”目标的实现及其相关研究实践工作由“2030 碳达峰”和“2060 碳中和”两个时间节点约束而成,并形成由“绿色、节能、环保”和“低碳、近零碳、零碳”相互交织、动态耦合的多途径减碳递进与碳中和递归的建筑科学迭代进阶。在此背景下,由于中国“双碳”目标从碳达峰到碳中和仅有 30 年的时间。同时,在不同的领域、不同的范围、不同的尺度、不同的应用场景存在碳达峰和碳中和快慢的梯度,片区和城市尺度的城市建筑不可能一步迈进碳中和。因此,对于建筑领域 2030 年碳达峰的量纲今天就需要进行研究。另外,在 2060 年实现碳中和的目标引导下,包括建筑学、建筑材料、建筑技术、土木工程、交通运输、工程热物理、城乡规划等专业在内的建筑业的双碳科学问题和技术前沿研究、典型应用场景的科技实验和示范样本同样十分重要^[33,34]。值得注意的是,建筑领域不可能独立完成建筑“双碳”目标任务。从建筑学是“研究建筑及其环境的学科”^[35,36]和能源流动、能效能耗的概念出发,即使主要关注建筑物本身,建筑双碳研究也必须在一个可以相对明确的系统内外的能量(交换)边界尺度内进行,如此才能相对科学地设置研究基准、参数和变量及其计量方法。

因此,中国建筑“双碳”路径科学问题可以从建筑学理本体层面,建筑学与其他学科交叉研究层面

以及重大社会需求推动层面进行凝练(图 4)。一是在建筑学理本体层面,基于当前科学认识,结合“双碳”国际科学前沿与建筑“双碳”发展趋势,建筑的策划、设计、建造、运维、拆除全生命周期,研究低碳、减碳、近零碳和零碳建筑的实现路径和全链技术创新引发的科学问题;二是在建筑学与其他学科交叉研究层面,由建筑“双碳”路径与其他平行学科专业,诸如能源系统、市政、交通系统、数字信息等的“双碳”进程交叉互动、动态耦合所引发的科学问题;三是在重大社会需求推动层面,由城市局部地区、特定建筑类型、极端气候条件等建筑“双碳”典型应用场景的特殊区域和特定场合的情景推演和工程实践所引发的科学问题。由此,在“双碳”目标 2030、2060 两个时间节点约束和引导,以及中国式现代化、学科交叉融通、智能技术发展和数字化转型的整体背景下,中国建筑“双碳”路径的科学问题主要包含以下五点:

- (1) 绿色低碳建筑设计的全过程研究:可研、策划、设计、施工建造和实施运维层面的低碳—减碳—近零碳—零碳建筑的全链实现及其数字化;
- (2) 体现建筑文化和风貌多样性的低碳绿色建筑和土木工程设计理论和方法体系建构、体现双碳要求的国家技术标准的研制;
- (3) “以人为本”低碳人居环境的能源环境支撑技术和政府有限补贴、市场导向及社会经济可承受能力的相关研究;

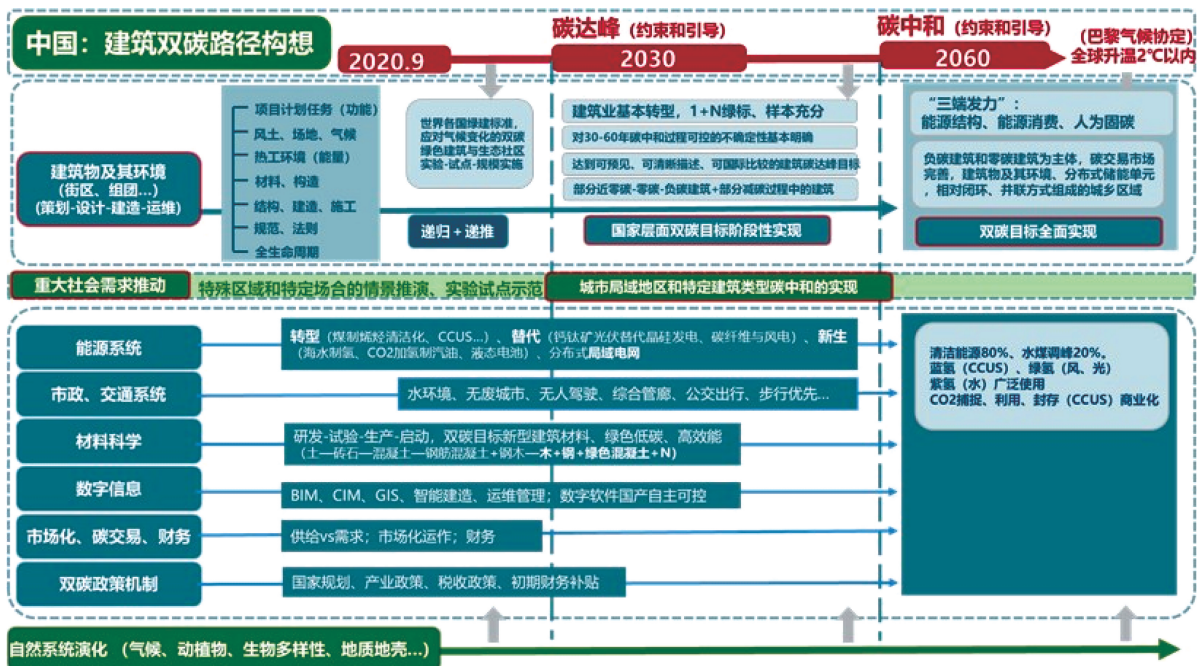


图 4 中国建筑业“双碳”路径构想 (来源:作者绘制)

(4) 城乡—城市—街区—建筑全空间尺度的人居环境在能源变革、工程材料、建构技术、热舒适、人因学和数据环境变化背景下的城乡规划、建筑设计、建构筑物营造、全生命周期运维的建筑工程科学；

(5) 传统建筑材料、结构、建造的低碳转型：木制建筑、钢木结构、高层建筑和高大空间建筑能效提升方式、“负碳排放”、分布式清洁能源在建筑中的应用等。

4 建筑领域“双碳”路径研究的若干建议

鉴于全球“双碳”目标及其实施操作的科学思路、基础理论、技术方法、攻关路线、以及能源供应端、能源消费端和人为固碳端的基础研究目前仍存在相当大的科研“空窗”。因此，对于建筑领域“双碳”路径的研究，应在一定程度上与纯粹的科技研发、政策研究和市场交易等为导向的研究计划相区分，从而分别在能源供应端、能源消费端和人为固碳端各自的顶端方面开展基础及应用基础研究。中国作为世界第二大经济体和正在担当重要国际引领作用的国家，中国建筑“双碳”领域开展交叉研究、建构相关的“双碳”的科学理论和知识体系等工作具有重要科学价值。基于“2030 碳达峰，2060 碳中和”整体战略目标引导和时间约束，我国建筑领域“双碳”路径研究建议分为对应的两个重点展开。

(1) “2030 碳达峰”研究：是当下我国建筑领域“双碳”路径研究的关注重点，中国建筑业至少按照国家的要求在 2030 建筑业达到“碳达峰”。为达到“碳达峰”，并为 2060“碳中和”留下“争取做到”的减碳空间。因此，对于建筑学科的关键研究方向，除了常规自由探索外，需要尽快组织跨学科领域的科学家小组或者群体、针对建、构筑物、土木工程、基础设施能源变革、环境营建方式变革和数字化转型等开展攻关研究。另外，加入信息科学和材料科学内容非常重要，这对于未来建筑低碳绿色发展具有基础性和系统性的重大价值。未来建筑和土木工程使用的绿色材料和结构不仅本身包含可循环、预制装配、智慧建造、全生命周期等思考，而且应该同时考虑其原材料加工、装配、施工、运维过程中的用能和碳排放问题。

(2) “2060 碳中和”研究：应以战略研究为主，在全社会、全行业、全领域的研究范畴，基于 2030 碳达峰的研究成果和相关技术进步进展的碳中和目标达成，研究聚焦中长期研究重点预测和推断，并在日后

验证其在科学导向上的概率准确性。这一阶段的主要内容为研究“2030 碳达峰”后面 30 年建筑业在全行业“科技进步”背景下如何做到碳排不断递减、固碳能力不断增强，直至 2060 实现“碳中和”。这个阶段的建筑土木学科的核心是和社会其他系统协同，形成正向合力，以争取达到“碳中和”的中国承诺。

前已述及，建筑业在“双碳”目标达成过程中并非是先导性行业，而是一个体量很大的耗能载体（能源消耗端），同时也是一个需要在固碳方面做出表率率的行业。建筑业中的绿色建筑材料、绿色建筑结构、及其绿色建造方式等更多取决于能源类型变革，研究内容包含能源利用方式、材料科学进步、相关政策制定、排碳固碳全过程、市场碳汇交易及运维机制、以及作为覆盖上述内容的“数字云”等。在学科研究方面，可以发挥国家自然科学基金委学科门类齐全的优势，组织系列性的新概念探索，并对中长期的研究计划予以关注和重视。对于研究的时间跨度，应适当突破做五年计划的时限，放大到国家“2030/2060”战略的中长期目标愿景的视野。

结合上述两个研究重点，基于建筑以及相关的结构技术、材料科学、能源环境、建造技术及长效管理运维等低碳转型的必然要求，特提出下列五个方面的研究重点：

(1) 绿色低碳建筑设计的全过程研究：策划、可研、设计、施工建造和实施运维层面的低碳—减碳—近零碳—零碳建筑的全链实现；

(2) 兼顾节能减碳与体现建筑市场多样化的绿色低碳建筑设计理论和方法体系建构、体现双碳要求的国家技术标准研制；

(3) “双碳目标”背景下，基于结构机制、材料机理、建造工艺绿色转型的城镇建筑遗产保护和适应性再利用；

(4) 传统建筑材料、建筑结构、建筑施工的低碳转型：木制建筑、钢木结构、高层建筑和高大空间建筑能效提升方式、“负碳排放”、分布式清洁能源在建筑中的应用。

(5) 数字化转型：只有大数据技术运用和数据环境的全新建构，如 AI(Artificial Intelligence)、IoT(Internet of Things)、BIM、CIM(Computer Integrated Manufacturing)等，才有可能将人类所有减碳行为、新能源利用、增加碳汇和综合不同系统的碳汇计算的人类努力集成一个建筑的数字化管理系统，推动城建、民生、交通、办公等场景的节能减碳，

获得多目标最优解。数字平台关联的绿色低碳建筑和绿色城市设计的持续科技进步与双碳目标达成密切相关。

参 考 文 献

- [1] Allen MR, Frame DJ, Huntingford C, et al. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature*, 2009, 458(7242): 1163—1166.
- [2] Chen JT, Montañez IP, Zhang S, et al. Marine anoxia linked to abrupt global warming during Earth's penultimate icehouse. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(19): e2115231119.
- [3] Yang MA, Wang HR, Yu CW, et al. A global challenge of accurately predicting building energy consumption under urban heat island effect. *Indoor and Built Environment*, 2023, 32(3): 455—459.
- [4] Gatti LV, Basso LS, Miller JB, et al. *Amazonia* as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 2021, 595(7867): 388—393.
- [5] Kerr RA. The carbon cycle and climate warming: learning how carbon cycles through the environment, with and without human intervention, is crucial to predicting the greenhouse effect. *Science*, 1983, 222(4628): 1107—1108.
- [6] Wigginton NS, Fahrenkamp-Uppenbrink J, Wible B, et al. Cities are the future. *Science*, 2016, 352(6288): 904—905.
- [7] Zheng S, Huang YK, Sun Y. Effects of urban form on carbon emissions in China: implications for low-carbon urban planning. *Land*, 2022, 11(8): 1343.
- [8] 《中国城市发展报告》编委会. 中国城市发展报告(2020/2021). 北京:中国城市出版社,2021.
- [9] 中国建筑节能协会. 2022年度中国城乡建设领域碳排放系列研究报告. (2023-01-04)/[2023-05-07]. <https://www.cabee.org/site/content/24420.html>.
- [10] 田玮, 魏来, 朱丽, 等. 城市规模的建筑能耗研究综述. *建筑节能*, 2016, 44(2): 59—64.
- [11] 江亿, 胡珊. 中国建筑部门实现碳中和的路径. *暖通空调*, 2021, 51(5): 1—13.
- [12] Chan M, Masrom MAN, Yasin SS. Selection of low-carbon building materials in construction projects: construction professionals' perspectives. *Buildings*, 2022, 12(4): 486.
- [13] Xu JP, Deng YW, Shi Y, et al. A bi-level optimization approach for sustainable development and carbon emissions reduction towards construction materials industry: a case study from China. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 53: 101828.
- [14] HM Government. The ten point plan for a green industrial revolution. (2020-11-18)/[2023-05-07]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/936567/10_POINT_PLAN_BOOKLET.pdf.
- [15] Ghosh A. Potential of building integrated and attached/applied photovoltaic (BIPV/BAPV) for adaptive less energy-hungry building's skin: a comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123343.
- [16] Pillai DS, Shabunko V, Krishna A. A comprehensive review on building integrated photovoltaic systems: emphasis to technological advancements, outdoor testing, and predictive maintenance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 156: 111946.
- [17] Hattan AS. Validating an emerging design area through industry-academia research partnerships. *Technology | Architecture + Design*, 2021, 5(1): 14—18.
- [18] Crawford S. A breathing building skin// *Proceedings of the 30th annual conference of the Association of Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*. New York: Acadia Publishing Company, 2010: 211—217.
- [19] Subramanyam V, Ahiduzzaman M, Kumar A. Greenhouse gas emissions mitigation potential in the commercial and institutional sector. *Energy and Buildings*, 2017, 140: 295—304.
- [20] Churkina G, Organschi A, Reyer CPO, et al. Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 2020, 3(4): 269—276.
- [21] 陈夏, 张怡卓, 蔡晓焯. 欧盟—德国建筑碳中和前沿. *暖通空调*, 2022, 52(3): 25—38.
- [22] Wang JG. Vision of China's future urban construction reform: in the perspective of comprehensive prevention and control for multi disasters. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 64: 102511.
- [23] Yu BB. Ecological effects of new-type urbanization in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135: 110239.
- [24] Huang B, Xing K, Ness D, et al. Rethinking carbon-neutral built environment: urban dynamics and scenario analysis. *Energy and Buildings*, 2022, 255: 111672.
- [25] Hao ZB, Wang YS, Fan ZY, et al. Research on carbon emissions measurement during materialization stage of prefabricated buildings: a case study of urban renewal project in Guangzhou// *Proceedings of International Conference on Construction and Real Estate Management 2022*. Reston: American Society of Civil Engineers, 2022: 156—169.
- [26] 王建国, 葛明, 徐静, 等. 第十三届中国(徐州)国际园林博览会综合馆暨自然馆, 徐州, 中国. *世界建筑*, 2021(10): 46—51, 128.
- [27] 王建国, 葛明, 徐静, 等. 第十届江苏省园艺博览会博览园主展馆, 扬州, 中国. *世界建筑*, 2021(10): 40—45.

- [28] Zhang HT, Park TJ, Islam ANMN, et al. Reconfigurable perovskite nickelate electronics for artificial intelligence. *Science*, 2022, 375(6580): 533—539.
- [29] Olanrewaju OI, Kineber AF, Chileshe N, et al. Modelling the relationship between Building Information Modelling (BIM) implementation barriers, usage and awareness on building project lifecycle. *Building and Environment*, 2022, 207: 108556.
- [30] Ren C, Zhu HC, Wang JQ, et al. Intelligent operation, maintenance, and control system for public building: towards infection risk mitigation and energy efficiency. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 93: 104533.
- [31] Lin JB, Nguyen TTT, Vaidhyanathan R, et al. A scalable metal-organic framework as a durable physisorbent for carbon dioxide capture. *Science*, 2021, 374 (6574): 1464—1469.
- [32] 周奕捷, 鲁月红, 吕涛, 等. 双碳目标下中国零能耗建筑发展及展望. *建筑与文化*, 2023(5): 33—36.
- [33] 刘凤芹. 碳达峰碳中和目标实现的思考与研究. *环境教育*, 2023(5): 34—35.
- [34] 王凯, 刘青权, 于鹏, 等. 建筑行业碳达峰与碳中和路径探讨. *建设科技*, 2023(6): 95—97.
- [35] 徐伟, 倪江波, 孙德宇, 等. 我国建筑碳达峰与碳中和目标分解与路径辨析. *建筑科学*, 2021, 37(10): 1—8, 23.
- [36] 中国大百科全书总编委会. 中国大百科全书: 建筑, 园林, 城市规划. 北京: 中国大百科全书出版社, 2004.

The Scientific Questions and Research Recommendations of Chinese Architecture's “Carbon Peaking and Carbon Neutrality” Route

Jianguo Wang*

School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096

Abstract China's current “ecological civilization construction” and high-quality development concept put forward higher requirements and challenges for the sustainable development of the architecture. Architecture and related building industry as China's first carbon emission, its carbon neutrality is related to the smooth implementation of the national “carbon peaking and carbon neutrality” strategy. How to realize the low-carbon transformation of traditional building materials, structures and construction, how to develop new energy and environmental technologies for “human-oriented” low-carbon living environment, and how to balance the relationship between human production and life and the natural environment have become urgent problems to be solved at present. Based on the global perspective and the strategic needs and top-level design of the national “carbon peaking and carbon neutrality” goal, this paper expounds the development status, trends and challenges of the architectural discipline, and tries to raise key scientific issues related to the “carbon peaking and carbon neutrality” route of architecture. From the perspective of the whole process, the whole field, digitalization and engineering, this paper puts forward the possible realization route, strategic judgment and research focus of China's architecture under the “carbon peaking and carbon neutrality” goal in the future to help China's high-quality ecological civilization construction and Chinese-style modernization process.

Keywords architecture; “Carbon Peaking and Carbon Neutrality” goal; low-carbon architecture design; sustainable development

(责任编辑 崔国增 张强)

* Corresponding Author, Email: wjgseu@163.com