

建筑碳排放量计算方法发展历程

陈超¹, 薄艾², 刘亚运¹, 吴波玲², 李超², 张利建²

(1.北京市建筑节能与建筑材料管理事务中心, 北京 101160; 2.中国建筑科学研究院有限公司认证中心, 北京 100029)

【摘要】为促进实现“双碳”目标,针对国内外建筑碳排放计算方法做出文献调研,总结了碳排放计算方法的发展历程,针对在建筑碳排放中的阶段划分展开详细说明。结果表明,生命周期评价(LCA)方法是建筑碳排放量计算方法的核心概念,LCA对建筑阶段的划分越来越多,每个阶段的碳排放源越来越详细;我国在建筑碳排放领域的研究起步较晚,更侧重于碳排放源的寻找,对碳汇关注较少;在建筑运行阶段碳排放量计算的研究中,国外构建了较为全面的模型。

【关键词】碳排放;碳排放量计算;建筑全过程;建筑材料;生命周期评价

【中图分类号】 X322

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-3702(2023)05-0060-06

The Calculation Method Development of Building Carbon Emissions

CHEN Chao¹, BO Ai², LIU Yayun¹, WU Boling², LI Chao², ZHANG Lijian²

(1.Beijing Municipal Center for Building Energy-Efficiency and Building Material Management, Beijing 101160, China;

2.China Academy of Building Research Certification Center, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to promote the realization of the “dual carbon” goal, this paper makes a literature survey on the calculation methods of building carbon emissions at home and abroad, summarizes the development history of the calculation methods of carbon emissions, and gives a detailed description of the stage division in building carbon emissions. The results show that the life cycle assessment (LCA) method is the core concept of the calculation method of building carbon emissions. LCA divides more and more construction stages, and the carbon emission sources of each stage are more and more detailed. China’s research in the field of building carbon emissions started late, focusing more on the search of carbon emission sources and paying less attention to carbon sinks. In the research on the calculation of carbon emissions in the construction operation stage, foreign countries have built a more comprehensive model.

Keywords: carbon emission; carbon emission calculation; building progress; building materials; life cycle assessment

0 引言

我国长期处于世界第一大碳排放国位置,如图1所示。2019年我国碳排放总量为98.1亿吨,碳排放总量是第二大碳排放国的1.95倍。图2为2010~2020年全球五大碳排放国碳排放比例图,2020年我国碳排放量约占世界总碳排放量的1/3。为应对气候变化,我国制定了节能减排的目标,即在2030年之前达到碳排放量的最大值、2060年前实现碳的零排放。在碳排放减量

化上,我国实施重点行业领域减污降碳行动,其中建设工程领域碳减排是“双碳”目标背景下的重点工作内容。据中国建筑能耗与碳排放研究报告(2021)数据显示,2019年全国建筑全过程二氧化碳排放49.97亿吨,超过同年我国二氧化碳排放总量的一半,其中建材生产(27.7亿吨)和建筑运行(21.3亿吨)阶段的二氧化碳排放量为主要碳排放来源。

在建筑碳排放量的获得上,并没有严格统一的标准。目前获得建筑碳排放量主要有三种方法:实测法、质量平衡法和碳排放因子法。其中实测法计算相对准

北京市住房和城乡建设委员会项目:建材碳排放信息调查采集
作者简介:陈超,男,工程师,研究方向为建材碳排放信息采集。

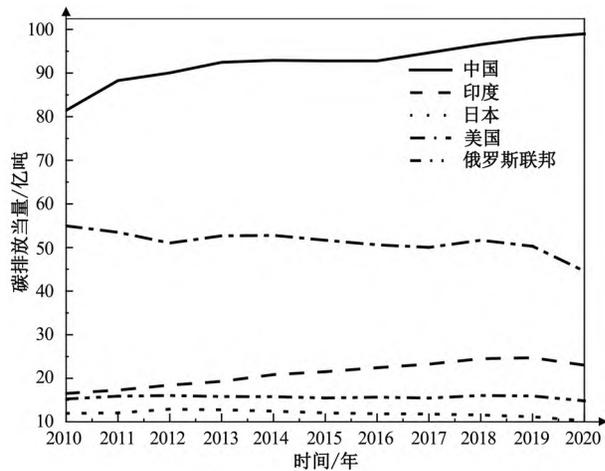


图 1 2010 ~ 2020 年全球五大碳排放国碳排放量图
(数据源于 bp 世界能源统计年鉴 2021)

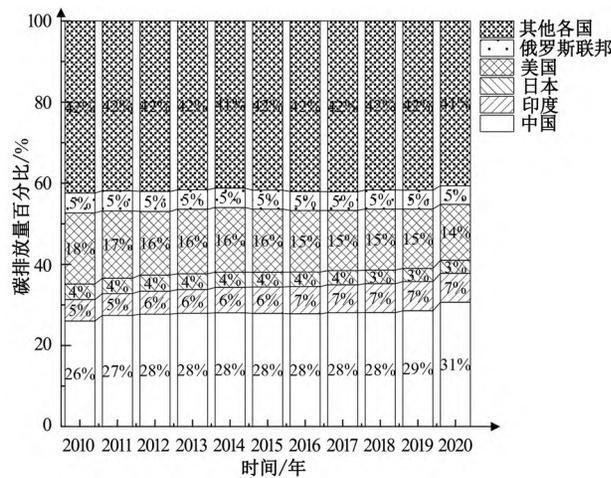


图 2 2010 ~ 2020 年全球五大碳排放国碳排放比例图
(数据源于 bp 世界能源统计年鉴 2021)

确,但对实验条件及数据收集处理与分析方法要求高,受样品的影响大;质量平衡法科学有效,精确度高,但是分类成本过高,操作困难;碳排放因子法被国际社会普遍接受,但需要科学的碳排放因子数据库支撑。论文详细介绍了碳排放系数法计算建筑碳排放量的发展历程,有助于更好地使用和优化该方法。

1 碳排放量概念起源

碳排放量是指产品在生产、运输、使用及回收时产生的温室气体排放量,以二氧化碳当量值表示。二氧化碳吸收地表反射到太空中的长波热辐射,当地球大气中的二氧化碳含量提高时,大气中的热量也会增加,此时地表温度升高。与二氧化碳有着相同作用的被称为温室气体,其中主要有:二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化

亚氮(N₂O)、三氟甲烷(CHF₃)、四氟化碳(CF₄)、六氟化硫(SF₆)和三氟化氮(NF₃)^[1]。为便于统计和计算温室气体排放量,以CO₂作为基准,将其他物质造成的全球变暖影响折算为CO₂当量来衡量,称为二氧化碳当量^[2]。各温室气体与二氧化碳的转换系数被称作温室气体全球变暖潜在值(GWP),该数值由联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估发布,且随评估系统的改善而变化,表 1 为 2021 年的 GWP 值^[3]。

表 1 温室气体全球变暖的潜在值(100 年)

温室气体种类	GWP/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)
CO ₂	1
CH ₄	27.9
N ₂ O	273
CHF ₃	14600
CF ₄	7380
SF ₆	25200
NF ₃	17400

注:数据源于 IPCC 第六次评估报告-2021。

2 建筑碳排放评价

建筑评价体系被用于探究建筑物与其周边环境的关系,其中生命周期评价(LCA)经过不断地发展和完善,演变成了建筑碳排放评价和碳排放量计算的核心理论。1985 年发达国家要求对温室效应形成统一的环境影响评价方法和数据,LCA 方法作为产品环境特征的主要分析方法,被广泛用于温室气体排放量计算中^[4]。此后在建筑行业上也采用 LCA 方法探究建筑物的环境特征。起初 LCA 方法用于探究建筑结构构件的环境影响,但研究发现应扩大生命周期边界,从完整的建筑层面以及建筑全过程上探究更换建筑构件和钢框架结构的环境影响^[5]。而在建筑全过程的单元划分及各单元所含内容上存在分歧,导致研究结果差异较大,同时发现建筑运行阶段对环境有较大的影响^[6]。1998 年 J.A 等^[7]结合 LCA 方法对现浇/预制混凝土和钢筋混凝土结构的环境影响因素进行了比较,结果发现对环境有较大影响的参数是化石燃料、二氧化碳、电力、SO_x、NO_x、合金材料和废物的使用。从上述研究结果可以发现,早期对建筑碳排放的探究主要是以定性评价为主,找到建筑生产运行全过程中对环境影响较大的因素,从而针对性地制定节能减排计划。

表 2 各国建筑评价体系对比表^[8]

国家	评价体系	实施年份/年	评价对象	评价内容
英国	BREEAM	1990	新建建筑、既有建筑	健康与舒适、能源、运输、水、土地使用、地区生态、污染情况、管理等
	CSH	2008	新建建筑	能源和二氧化碳排放、水、材料、地表水径流、废弃物、污染、健康和需求、管理、生态需求九个方面
德国	DGNB	2008	覆盖建筑行业整个产业链	生态质量、经济质量、建筑功能和社会综合质量、技术质量、过程质量、场地质量、其中场地质量单独评估
美国	LEED	1998	新建建筑、既有商业综合建筑	可持续的场地设计、有效利用水资源、能源与环境、材料与资源、室内环境质量、革新设计
日本	CASBEE	2003	新建建筑、既有建筑、短期使用建筑、改建翻新建筑	建筑环境性能与质量（室内环境、服务性能、室外环境）、建筑环境负荷（能源、资源材料、建筑用地外环境）
	《绿色建筑评价标准》	2019	新建建筑、既有建筑	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、室内环境质量、施工与运营、提高与创新
中国	《重庆市低碳建筑评价标准》	2012	公共建筑、住宅建筑	低碳规划、低碳设计、低碳施工、低碳运营、低碳资源化五类
	《香港建筑环境评估标准》	1996	新建建筑、既有建筑	现场因素、材料因素、能源消耗、用水、室内环境质量、革新和加分

随着建筑碳排放评价体系的不断发展，各国相继构建了各自的建筑评价体系，如表 2 所示，其中 2008 年德国推出的 DGNB 可持续建筑评估技术体系，首次对建筑碳排放量提出完整明确的计算方法，得到联合国环境规划署等国际机构的认可。我国香港建筑环境评价标准制定较早，与英美同类型标准的实施年份接近，重庆市率先在大陆地区制定了建筑评价标准，相比于其他各国的建筑评价国家标准，我国的国家标准制定时间较晚，但在评价对象和评价内容上已基本与国际接轨。

3 建筑全过程碳排放量计算

建筑全过程碳排放量的计算以建筑评价体系为基

础，LCA 方法被用于探究建筑全过程生命周期的碳排放量，但由于生命周期的划分没有得到统一，建筑全过程碳排放量计算方法与选用生命周期边界直接相关。

3.1 建筑全过程生命周期划分

S.M 等^[9]对办公楼生命周期中的能源消耗和二氧化碳排放进行了定量计算，基于 LCA 理念，将生命周期划分为施工、运营、维护和改造四个阶段，获得建筑生命周期的能源消耗和二氧化碳排放量。IPCC 提出碳排放当量参数，将包含能源在内的各环境影响因素换算为二氧化碳排放当量，用于比对产品间的环境影响水平。DGNB 可持续建筑评估技术体系将建筑全寿命周期划分为建材生产与建造、使用期间能耗、维护与更新、拆

表 3 国内外部分建筑生命周期阶段划分表^[10, 11]

阶段内容		阶段数量
建造阶段	使用阶段	2
建材生产及运输	使用	3
建材准备	建造施工	4
建设施工	维护	4
建材生产	建材运输	5
建材生产	建材运输	6
原料提取	建材生产	7
建设施工	装修	9
项目论证	规划建设	11
规划设计	勘察测量	
勘察测量	建材生产	
建材生产	建材运输	
建材运输	施工建造	
施工建造	日常使用	
日常使用	维护更新	
维护更新	建筑拆除	
建筑拆除	废弃物处理	
废弃物处理	回收再利用	
回收再利用		

除和重新利用这四大方面^[12]。并给出了这四大方面所涉及碳排放量的计算方法。由表 3 可以看出，对建筑生命周期的阶段划分数量逐渐增多，一方面体现为生命周期边界的扩大：由初始的建造和使用逐步将运输、拆除、废弃处理、原料提取、规划设计等内容纳入建筑生命周期范围内。另一方面为对某一阶段的划分更加详细：将建造阶段拆分为建材生产、运输、施工、装修等；将建筑试用阶段拆分为维护、运行、物业管理等。

2010 年清华大学张智慧等^[13]基于 LCA 评价理论，将建筑生命周期划分为物化阶段、使用阶段和拆除阶段，该建筑生命周期范围和阶段划分在国内应用较广，各阶段对应的碳排放源如图 3 所示，概括了我国建筑全过程的碳排放来源。此后中国建筑科学研究院有限公司主编了 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》，将建筑生命周期边界划分为：建材生产（包含原料提取）及运输阶段、运行阶段和建造及拆除阶段，并根据不同阶段的碳排放源给出了对应碳排放量的计算方法，同时将建筑运行阶段的碳汇考虑在内，形成较为全面的建筑全过程碳排放计算体系，但相比于 2008 年德国提出的 DGNB 体系，并未将建筑回收阶段放入生命周期内，缺少该阶段的碳汇^[14]。我国也有研究把建筑拆除回收利用阶段放入建筑材料碳排放量计算中，赵杨在计算建筑材料碳排放时，将建筑材料的生命周期划分为建材开采、生产、运输、施工、拆除和回收阶段，其中运输阶段包含了原材料运输和建材制品运输两部分。由此可见，建筑拆除后回收也应放于建筑生命周期内。

物化阶段		使用阶段	拆除处置阶段	
建材生产	施工阶段		拆除阶段	处置阶段
碳排放源				
建筑材料及构件在生产、制造、加工、搬运过程中所产生的碳排放	施工机具产生的碳排放；施工辅助材料生产时的碳排放	采暖、通风、空调、照明等建筑设备以及修缮时的碳排放	建筑物陈旧破损需拆除时由于爆破和使用施工机具产生的碳排放	废弃建筑垃圾进行焚烧、掩埋等处置时产生的碳排放

图 3 建筑生命周期阶段划分和碳排放源

3.2 建材生产阶段碳排放研究现状

根据 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》内容，当生命周期只包含原材料获取、建筑材料生产和

建材制品运输三个阶段时，该生命周期计算得到的碳排放量为建筑材料碳排放量。

在建材生产阶段由于每种建筑材料的生产工艺不同，对于不同建筑材料和结构的建筑物，其生命周期模型有所差别。龚志起等主要的建筑材料（水泥、钢材、PVC 管材）构建了生命周期模型，其中水泥生产工艺包括原料运输、原料粉磨均化、熟料煅烧、水泥粉磨和包装过程，针对工艺过程、运输过程直接排放的温室气体和全过程电耗、热耗间接排放的温室气体进行计算，以生产一吨水泥为基础，获得碳排放量即为水泥的碳排放因子。林兴贵等对建筑材料制品做出了生命周期边界内的碳排放源分析，包含了原材料获取、建筑材料加工制造和建筑材料制品运输三个阶段的碳排放源，并使用该模型计算了生产蒸压粉煤灰砖的碳排放量。

建筑材料碳排放因子是碳排放系数法计算建筑碳排放量的关键参数，其计算公式为：建材碳排放因子=建材生产阶段碳排放量/建材产量。由公式可以看出，建筑材料碳排放因子只由建筑材料加工制造过程决定，但随着建材生产工艺的变更，现有的建材碳排放因子不再适用新的生产工艺。装配式建筑生产阶段的碳排放计算可分两部分：第一部分是装配式建筑的主要原材料在开采、加工过程中所产生的碳排放；第二部分是预制构件厂将混凝土、钢筋等原材料加工为预制构件的过程中耗费能源所产生的碳排放^[15]。而现有的碳排放因子只能提供第一部分，如钢筋、混凝土、钢模板等，而剪力墙、叠合梁、叠合板、楼梯等预制构件的碳排放因子则需进行二次计算，徐鹏鹏等人^[16]基于定额碳排放量审定了部分预制构件的碳排放因子，但相关计算受生产原料配比影响较大，不同地区或是不同企业，对同一建筑预制构件的原料种类和用量不尽相同，从而计算得到建筑预制构件的碳排放因子相差较大。

3.3 建筑运行阶段碳排放研究现状

在建筑运行阶段进行碳排放量计算，一方面可对现有建筑的碳排放量进行核算，有助于碳达峰目标的实现；另一方面可对未来建筑碳减排进行情景模拟，促进实现碳中和目标。建筑运行阶段碳排放的计算较为复杂，潘毅群等^[17]汇总了国际上建筑运行阶段碳排放计

表 4 欧美国家建筑运行阶段碳排放模型

模型	应用地区	模型输入	模型输出
Invert/EE-Lab	欧洲多国	建筑参数 (气象信息、建筑形态、功能、地理位置、建造时间、围护结构等); 技术参数 (设备能效、成本、运维费用、使用寿命、用能形式等); 情景设定 (节能政策、用户偏好、能源价格等)	建筑存量; 建筑能耗、碳排放量; 系统配置、投资成本、运维费用; 推荐政策
ECCABS	欧洲多国	建筑参数 (气象信息、建筑面积、围护结构、室内温度等); 技术参数 (设备能效、效率等); 情景设定 (节能措施、改造成本、能源价格等)	典型建筑/区域净能源需求、分项能耗、碳排放量
RE-BUILDS	欧洲多国	人口参数 (人口数据、人均建筑面积); 建筑库存定义 (建筑拆除、翻新概率参数); 能耗参数 (典型建筑能耗强度数据、能源结构等); 碳排放参数 (典型建筑碳排放强度)	建筑库存量 (新建、拆除、翻新建筑量); 建筑净能耗; 建筑碳排放量
CoreBee	德国、希腊	建筑参数 (建造周期、建筑类型、围护结构热工参数等); 技术参数 (供暖和制冷系统形式、设备能效等); 情景设定 (节能措施、能源结构)	一次能源耗量; 建筑碳排放量; 节能措施投资
Scout	美国	建筑参数 (气象参数、建筑功能、建筑面积等); 技术参数 (系统类型、初投资、设备能效、使用寿命、用能形式、燃料类型、能源价格)	一次能源耗量; 碳排放量; 用能费用; 节能措施经济效益 (内部回收率、投资回收期等)
BLUES	巴西	基准年各行业用能需求, 土地利用情况及其成本; 技术参数 (投资成本、运维费用、设备能效、使用寿命、用能形式); 情景设定 (减排政策、森林砍伐率、人口增长、GDP、能源价格)	土地利用; 温室气体排放量
ELENA	厄瓜多尔	基准年的用能形式和技术类型数据库, 基准年各行业用能需求; 基准年粮食生产需求, 土地利用及其成本, 可用资源; 技术参数 (投资成本、运维费用、设备寿命、设备能效、使用率); 情景设定 (减排政策、各类技术市场份额、GDP)	成本最优的节能措施; 温室气体排放量; 能源情况 (能源供应能力、能源结构、能源耗量); 土地利用

算模型, 可根据模型对应的输入参数调节建筑运行阶段的碳排放。我国 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》给出了建筑运行阶段碳排放源: 暖通空调、生活热水、照明及电梯、可再生能源、建筑碳汇系统。郭春梅等针对天津市一、二、三星级绿色居住建筑^[18]和绿色公共建筑^[19], 构建了运行阶段碳排放模型, 包含建筑设备系统、供暖系统、供冷系统、照明系统、电梯系统、热水系统、电器设备、风机和采暖制冷循环水泵 9 种碳排放源。冀媛媛等^[20]分析了景观在日常使用和维护阶段的碳排放源。表 4 为欧美国家建筑施工阶段碳排放计算模型汇总, 从中可以看出, 国外建筑运行阶段碳排放模型输入参数众多, 将模型输入主要分为建筑类参数、技术类参数、情景设定、人口类参数等, 参数模型涵盖范围广, 能获得较全的碳足迹, 情景设定考虑全面, 有助于各领域在实现碳中和方向的工作展开。

4 结语

论文围绕碳排放因子法计算建筑碳排放量的发展历程做出了文献调研, 结果发现: 计算建筑碳排放量需使用生命周期评价方法获得碳排放源, 我国对建筑全过程生命周期主要分为建材生产及运输阶段、运行阶段和

建造及拆除阶段, 其中建材生产及运输和建造拆除阶段研究较为成熟, 并且针对不同的建筑结构形式和建筑材料展开了生命周期上进行拓宽和细分, 但我国在建筑碳排放量计算的研究多侧重于排放源的搜集和计算, 缺少建筑拆除阶段的碳汇, 同时在建筑运行阶段上, 国外构建的模型较为成熟和全面, 有助于建筑运行阶段“双碳”目标的实现。②

参考文献

- [1] 中国标准化研究院. 工业企业温室气体排放核算和报告通则: GB/T 32150—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [2] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [3] 赵扬. 建筑材料生命全周期 CO₂ 排放研究评价 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [4] 孙启宏, 万年青, 范与华. 国外生命周期评价 (LCA) 研究综述 [J]. 世界标准化与质量管理, 2000, 37 (12): 24—25, 31.
- [5] ERLANDSSON M: Environmental Assessment of Building Components [M]. Licentiate of Engineering Thesis, TRITA-BYMA 1995: 1, KTH (Royal Institute of Technology), Stockholm, 1995.

- [6] AMATO A, EATOX K J: A comparative life-cycle assessment of steel and concrete framed office buildings [M]. Proceedings of Second International Conference on Building and the Environment, CIB TGS, June 9-12, Paris, 1997.
- [7] Jonsson A, Bjorklund T, Tillman A M. LCA of concrete and steel building frames [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1998, 3 (4): 216-224.
- [8] 李岳岩, 陈静. 建筑全生命周期的碳足迹 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [9] Suzuki M, Oka T. Estimation of life cycle energy consumption and CO₂ emission of office buildings in Japan [J]. Energy and buildings, 1998, 28 (1): 33-41.
- [10] 肖旭东. 绿色建筑生命周期碳排放及生命周期成本研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [11] 韩楚燕. 全生命周期碳排放导向下的城市住宅长寿化设计策略研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [12] 卢求. DGNB——建筑碳排放量的科学计算方法 [EB/OL]. [2009-12-21]. <https://wenku.baidu.com/view/3562ea3359f5f61fb7360b4c2e3f5727a4e9242d.html>
- [13] 张智慧, 尚春静, 钱坤. 建筑生命周期碳排放评价 [J]. 建筑经济, 2010, 31 (2): 44-46.
- [14] 林兴贵, 周济, 程晶, 等. 建筑材料制品碳排放测算模型研究 [J]. 土木工程信息技术, 2012, 4 (3): 13-18.
- [15] 曹西, 缪昌铅, 潘海涛. 基于碳排放模型的装配式混凝土与现浇建筑碳排放比较分析与研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (增刊2): 1233-1237.
- [16] 徐鹏鹏, 申一村, 傅晏, 等. 基于定额的装配式建筑预制构件碳排放量及分析 [J]. 工程管理学报, 2020, 34 (3): 45-50.
- [17] 潘毅群, 梁育民, 朱明亚. 碳中和目标背景下的建筑碳排放计算模型研究综述 [J]. 暖通空调, 2021, 51 (7): 37-48.
- [18] 郭春梅, 楚尚玲, 由玉文, 等. 绿色居住建筑运营阶段碳排放量化指标计算与分析 [J]. 环境工程, 2017, 35 (11): 168-172.
- [19] 郭春梅, 黄梦娜, 楚尚玲. 绿色公共建筑运营阶段二氧化碳排放量化分析 [J]. 环境工程, 2018, 36 (5): 184-188.
- [20] 冀媛媛, 罗杰威. 景观全生命周期日常使用和维护阶段碳排放影响因素研究 [J]. 风景园林, 2016, 24 (9): 121-126.

(上接第59页)

- 刊1): 88-93.
- [3] 龚先兵. 岩溶区基桩荷载传递机理及其竖向承载力研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [4] 张永杰, 邓俊强, 杨兴山, 等. 考虑溶洞空间形态的岩溶桩基稳定性分析方法 [J]. 中国公路学报, 2019, 32 (1): 37-45.
- [5] 邹新军, 唐国东, 赵明华. 串珠状岩溶区桩基沉降计算与稳定性分析 [J]. 建筑结构, 2013, 43 (13): 95-98.
- [6] 鲁成贤, 陈记, 李云安, 等. 岩溶区大直径嵌岩桩荷载传递特征的数值分析 [J]. 安全与环境工程, 2019, 26 (1): 183-190.
- [7] 夏炼. 岩溶地区桩基承载特性影响因素研究 [J]. 公路, 2018, 63 (11): 168-171.
- [8] 苏冠峰, 贺国京, 易锦, 等. 多层溶洞对桥基竖向承载特性的影响分析 [J]. 公路工程, 2017, 42 (1): 80-84.
- [9] 张冰淇. 串珠状溶洞地层中桥梁桩基承载特性与稳定性研究 [D]. 福州: 福州大学, 2017.
- [10] 张慧乐, 马凇, 张智浩, 等. 岩溶区嵌岩桩承载特性影响因素试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (1): 92-100.
- [11] 雷勇, 尹君凡, 陈秋南, 等. 下伏溶洞嵌岩桩极限承载力试验研究 [J]. 矿冶工程, 2017, 37 (3): 19-22, 26.
- [12] 赵明华, 雷勇, 张锐. 岩溶区桩基冲切破坏模式及安全厚度研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (2): 524-530.
- [13] 郑刚, 王丽. 竖向荷载作用下倾斜桩的荷载传递性状及承载力研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (3): 323-330.
- [14] 吴高桥. 岩溶区嵌岩桩竖向承载机理及其试验方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [15] 林宗元. 岩土工程试验监测手册 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994.