

基于内容分析法的城镇雨水系统碳排放核算研究进展

李俊奇^{1,2}, 王泓洁¹, 李惠民^{2,3}

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044; 3. 北京应对气候变化研究和人才培养基地, 北京 100044)

摘要:采用内容分析法,从核算对象、核算范围、核算方法及排放因子等方面,对现有城镇雨水系统碳排放核算研究情况进行了系统回顾。结果表明:现有研究基本明确了雨水系统碳排放核算公式,为开展多尺度雨水系统碳排放核算奠定了方法基础;现有研究核算了部分雨水设施部分阶段的碳排放因子,但存在核算范围不一致、方法不统一、排放因子不透明等问题,不同研究结果之间可比性较差,核算结果具有很大不确定性;雨水设施碳排放因子完整性较差,与形成统一规范的雨水系统碳排放核算体系存在一定的差距。为规范雨水系统碳排放核算体系,未来研究应重点关注截留式排水体制下雨水系统核算边界划分、直接碳排放精准测度和水能利用的碳抵消效应,逐步构建适用于雨水系统碳排放核算的综合因子数据库。

关键词:城镇雨水系统;碳排放核算;碳抵消效应;碳排放因子法;内容分析法

中图分类号: TU992; TU984.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2024)01-0033-11

Research progress of carbon emission accounting for urban stormwater systems based on content analysis method// LI Junqi^{1,2}, WANG Hongjie¹, LI Huimin^{2,3} (1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing 100044, China; 3. Beijing Climate Change Response Research and Education Center, Beijing 100044, China)

Abstract: Using the content analysis method, a systematic review of existing research on carbon emission accounting for urban stormwater systems was conducted in terms of accounting objects, accounting scope, accounting methods, and emission factors. The results show that existing studies have basically clarified the carbon emission accounting formula and laid the methodological foundation for conducting multi-scale carbon emission accounting for stormwater systems; existing studies have accounted for the carbon emission factors of some stormwater facilities at some stages, but there are problems such as inconsistent accounting scope, non-uniform methodology, non-transparent emission factors; the results of different studies are poorly comparable, and the accounting results have very large uncertainty; the completeness of carbon emission factors of stormwater facilities is poor, which have a certain gap to form a unified and standardized carbon emission accounting system of stormwater systems. In order to standardize the carbon emission accounting system of stormwater systems, future research should focus on several aspects, including the accounting boundary division of stormwater systems in the intercepting drainage system, the accurate measurement of direct carbon emission, and the carbon offset effect of water energy utilization, so as to gradually build a comprehensive factor database applicable to carbon emission accounting for stormwater systems.

Key words: urban stormwater system; carbon emission accounting; carbon offset effect; carbon emission factor method; content analysis method

力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和是我国重大战略决策。为保障双碳目标顺利实现,国家发展改革委、国家统计局、生态环境部印发了《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》,将建立统一规范的碳排放统计核算体

系作为一项重要任务^[1]。雨水系统是城镇水务系统的重要组成部分,是维持城镇运行的生命线。21 世纪以来,强降水事件频率和强度不断增加^[2],城镇化进程日益加快,与老旧雨水系统相叠加,城市内涝问题日益严峻。为有效应对内涝风险,城镇雨

水系统提标改造升级进程明显加快,已成为城乡建设领域不可忽视的碳排放来源。

雨水系统是下渗、蓄滞、收集、输送、处理和利用雨水的设施以一定方式组合成的总体,涵盖了从雨水径流的产生到末端排放的全过程管理及预警和应急措施等。雨水系统碳排放核算是指对雨水系统全生命周期碳排放的核算。城镇雨水系统设施类型多样,在建设运行过程中与污水、建筑、园林风景等诸多领域存在交叉,碳排放活动复杂,水-碳系统间存在着复杂的相互作用^[3-5]。

早期雨水系统碳排放核算研究从核算雨水设施的碳汇、碳抵消量展开。张书函等^[6]分析了3种雨水利用形式,即雨水入渗地下、雨水收集回用及雨水调控排放的碳抵消机理,并估算了下沉式绿地的碳汇量及雨水回用节约自来水的碳抵消量;户园凌等^[7-9]从植被固碳、协同建筑节能、雨水综合利用等方面,较为全面地对多种典型低影响开发(low impact development, LID)设施的碳抵消进行定性与定量分析;刘阳等^[4,10-11]则量化了雨水收集系统在雨水综合利用方面的碳抵消量。随后部分学者开始采用生命周期评价软件核算雨水系统温室气体排放,如芦琳^[12]量化了雨水花园、渗透铺装+渗透管/井系统的温室气体排放,研究结果表明,雨水花园的碳排放量低于渗透铺装+渗透管/井系统。早期碳排放核算研究多关注透水铺装、生物滞留设施、绿色屋顶等单一雨水设施的碳排放量^[13-14],核算阶段主要集中在建设阶段,仅有少部分研究兼顾了运行阶段^[15-16],并且大多忽略了碳抵消量核算。为明确雨水设施净碳排放量,Kavehei 等^[17]基于前期研究成果,系统梳理了一般寿命周期下绿色屋顶、雨水花园、生物滞留设施、植草沟及雨水池全生命周期碳排放总量与碳汇量。

随着研究进程加快,核算对象从单一设施向片区或城市尺度雨水系统过渡^[18-19]。建娜^[20]以1 a内1 hm²服务面积所需要的城镇排水系统为功能单元评估了不同排水系统的温室气体排放,结果表明,LID 设施与完全分流制排水系统运行阶段碳抵消量超过碳排放量;刘秋虹^[21]评估了3种初雨污染控制排水系统的温室气体排放,研究发现 LID 设施与完全分流制排水系统的碳排放量最少;Lin 等^[22-25]的研究及《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》系统提出并梳理了雨水系统碳排放及碳抵消量核算公式,有助于核算结果追溯。

以上研究均采用碳排放因子法,还有部分学者采用实测法研究了人工湿地、雨水池、生物滞留设施及绿色屋顶的碳汇量或生化反应直接温室气体排放

量,监测时长从10 d到5 a不等,如 Bledsoe 等^[26]实测了格林维尔市一个占地526 m²人工湿地的温室气体通量,1 a期间该湿地永久性淹没区和浅水区分别产生7 161.27和93.20 kg 碳排放量(以CO₂当量计)。另外一个为期5 a的实测研究发现,以建筑废弃材料为基质的绿色屋顶固碳量(以碳元素质量计)为12.8 kg/(m²·a),高于以自然土壤为基质的绿色屋顶固碳量11.4 kg/(m²·a)^[27]。

当前雨水系统碳排放核算主要采用了碳排放因子法与实测法,此外还有质量平衡法等应用于水务系统碳排放核算。郭恰等^[28]根据质量守恒原理,构建了减排量计算公式,以污泥脱水-卫生填埋工艺为基准,核算了污泥臭氧微气泡减量稳定处理工艺的减排量;张程^[29]利用碳元素质量平衡关系,构建了不同生物处理工艺碳元素转化方程,用于污水处理碳排放核算。此外,模型法与投入产出法也是探讨水-能-碳系统间关联关系的重要研究方法。冯梦雨^[30]绘制了水-能-碳系统的因果循环图与系统流程图,通过构建系统动力学模型实现不同情景下碳排放量的预测;郑靖伟等^[31]采用多区域投入产出模型,从3个尺度研究中国水-能-碳系统关联关系。与其他城镇水务系统碳排放核算研究相比,当前雨水系统碳排放核算研究数量较少,核算方法相对单一。

综上,我国关于雨水系统碳排放核算的相关研究仍不充分,存在核算边界不统一、排放位点不清晰、排放因子不透明等问题,远未形成统一规范的碳排放统计核算体系,这也是导致大尺度雨水系统碳排放量化研究进程缓慢且核算结果具有一定滞后性的重要原因。为分析讨论城镇雨水系统碳排放核算研究进展,最大限度地凝聚共识,采用内容分析法,从核算框架、核算方法、排放因子等方面对现有文献进行了量化比较,在此基础上讨论了雨水系统碳排放核算中的一些关键问题,旨在为形成统一规范的雨水系统碳排放核算体系提供参考。

1 研究方法

内容分析法是一种针对文献内容特征进行定量、定性客观分析的研究方法,在分析文献内容隐性特征信息等方面具有重要作用^[32-33]。采用内容分析法对文献内容进行回顾,主要步骤如图1所示。

从2010—2022年CNKI数据库及2017—2022年Web of Science(WOS)核心数据库中择文献样本,以雨水系统、海绵城市、LID、可持续排水系统、温室气体、碳排放、生命周期评价等关键词进行文献检索。经初步评估,去除部分不相关文献,共得到87篇文献,包括53篇英文和34篇中文文献。

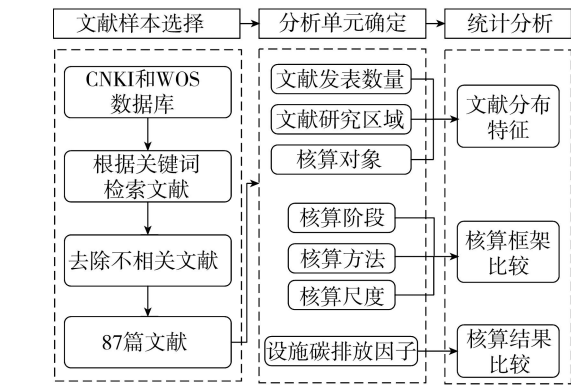


图1 研究步骤
Fig.1 Steps in research

除明确文献发表数量趋势与研究区域外,根据碳排放核算的基本框架,以核算对象、核算阶段、核算方法、核算尺度及碳排放因子作为分析单元,对相关文献进行内容采集与编码,并将其汇总至 Excel 表格。通过频次与均值相关统计,讨论现有文献在发表数量及研究区域的特点,并量化分析文献在核算对象、核算阶段、核算方法、核算尺度及碳排放因子等方面的一致性和主要差别,在此基础上,讨论分析了雨水系统碳排放核算的几个关键问题。

2 结果与分析

从文献分布特征、核算框架比较及核算结果比较 3 个方面解析雨水系统碳排放核算研究进展。

2.1 文献分布特征

2.1.1 时间和国别分布

城镇雨水系统碳排放相关文献总量较少,但 2017 年以来呈现出快速增长趋势(图 2)。从文献的区域分布来看,主要集中在中国、美国、加拿大及澳大利亚等国家(表 1),中国相关的研究占文献总数的 58%,中国学者占全部研究人员的 50%。

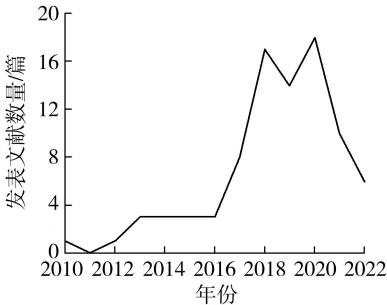


图2 城镇雨水系统碳排放核算文献的时间分布
Fig.2 Temporal distribution of literature on carbon emission accounting for urban stormwater systems

2.1.2 设施类型分布

根据 GB/T 38906—2020《低影响开发雨水控制利用 设施分类》中的雨水设施分类,对现有文献

表1 文献和研究人员国别分布

国家	文献篇数	研究人员总数	国家	文献篇数	研究人员总数
中国	47	153	墨尔本	1	0
美国	12	37	墨西哥	1	2
加拿大	4	16	新加坡	1	0
澳大利亚	2	16	孟加拉国	1	4
巴西	2	17	黎巴嫩	1	4
英国	2	7	马来西亚	0	5
丹麦	2	12	日本	0	3
芬兰	1	8	巴基斯坦	0	2
瑞典	1	5	西班牙	0	1
爱沙尼亚	1	8	智利	0	1
德国	1	2	法国	0	1
比利时	1	0	荷兰	0	1

的研究对象进行了分类统计(表 2)。总体来看,现有文献主要聚焦在绿色设施,而与灰色设施相关的研究较少。绿色设施指采用自然或人工模拟自然生态系统控制城市降雨径流的设施,灰色设施是指传统的较高能耗的工程化排水设施^[34]。在绿色设施中,对生物滞留设施、绿色屋顶、透水铺装及植草沟核算频次较高^[22,35-46],而对下沉式绿地、植被缓冲带、湿塘等设施少有涉及^[47-48]。在灰色设施中,现有文献关注了蓄水池、管渠等设施^[49-54],而对雨水泵站等设施的核算相对较少^[55-56]。

表2 核算设施类型分布

设施类型	文献中核算次数	设施类型	文献中核算次数
生物滞留设施*	35	下沉式绿地*	9
绿色屋顶*	33	人工湿地*	9
透水铺装*	33	渗管/井*	6
植草沟*	19	雨水桶*	4
蓄水池**	14	植被缓冲带*	2
管渠**	13	雨水调蓄池**	2
雨水泵站**	10	湿塘*	1

注: * 指绿色设施, ** 指灰色设施。

2.2 核算框架比较

2.2.1 核算阶段

从全生命周期的角度,将雨水系统碳排放分为建设、运行维护、资产重置与拆除 3 个阶段,对现有文献进行了统计分析(表 3)。总体来看,现有研究主要聚焦在运行维护阶段和建设阶段,分别占文献总数的 63.2% 和 50.6%;仅有 25.3% 的研究进行了资产重置与拆除阶段碳排放核算。从核算阶段的完整性来看,仅有少量文献,如 Lin 等^[22]核算上海市某海绵城市项目碳排放及 Jato-Espino 等^[57]比较传统排水系统与可持续排水系统碳排放时考虑了全生命周期的 3 个阶段,多数文献仅涉及了其中的一个或两个阶段。

表 3 城镇雨水系统碳排放核算阶段、碳排放位点及其核算情况

Table 3 Stages of carbon emission accounting, carbon emission sites, and their accounting results of urban stormwater systems

核算阶段	碳排放位点	碳排放位点核算次数	排放位点核算次数占阶段核算次数的比例/%	阶段核算次数	占文献总数的比例/%
建设阶段	材料生产	44	100	44	50.6
	材料运输化石燃料消耗	37	84.1		
	使用施工设备化石燃料和电能消耗	34	77.3		
运行维护阶段	维护材料、药剂消耗	17	30.9	55	63.2
	雨水设施运行与维护能源消耗	34	61.8		
	生化反应直接温室气体排放	14	25.5		
资产重置与拆除阶段	使用拆除设备能源消耗	16	72.7	22	25.3
	废弃物运输化石燃料消耗	11	50.0		
	废弃物填埋处理直接温室气体排放	11	50.0		

2.2.2 碳排放位点

碳排放源一般指固定燃烧源、移动燃烧源、过程排放源及逸散排放源等。雨水系统不同阶段有相同的碳排放源,阶段划分使碳排放源具有位置特征,将具有位置特征的碳排放源统称为雨水系统碳排放位点。参照联合国政府间气候变化专门委员会《国家温室气体排放清单指南》和《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》,对雨水系统生命周期各阶段中的碳排放位点进行了划分,在此基础上对现有文献进行了统计分析,结果见表3。

总体来看,现有文献普遍存在核算位点不完整的问题。比较3个阶段核算位点的完整性,结果表明,建设阶段核算位点的完整性最优,而运行维护阶段较差,具体表现为建设阶段3个排放位点核算次数占阶段核算次数的比例均达到或超过77.3%。尽管运行维护阶段核算频次最多,但多数研究只关注了雨水设施运行与维护能源消耗相关的碳排放,仅有25.5%的研究涉及生化反应直接温室气体排放。

各阶段核算位点的完整性也与雨水系统各阶段碳排放特征密切相关。建设阶段碳排放属于一次性排放,随着建设阶段活动结束而停止排放。此外,不同类型设施建设阶段碳排放位点类型基本一致,核算位点认知较成熟,故该阶段核算位点完整性较好。而运行维护阶段碳排放属于持续性排放,碳排放量、碳排放强度受降水量等因素影响动态变化,呈现出不稳定的特点。不同类型设施运行维护阶段的碳排放位点也有所不同,如能源消耗碳排放是雨水泵站的重要核算位点,但不是绿色屋顶的重要核算位点。碳排放位点的复杂性与碳排放量的不稳定性是导致该阶段碳排放位点完整性较差的重要原因。资产重置与拆除阶段碳排放与建设阶段碳排放类似,属于一次性排放,但同时也是一种预期碳排放,主要通过假定拆除与回收活动来估算碳排放量。当前,雨水

系统拆除与回收活动并不清晰,核算位点认知不足,该阶段核算位点完整性一般。

2.2.3 核算方法

根据排放因子来源的不同,将雨水系统碳排放核算方法分为碳排放因子法和实测法两类,对现有文献的核算方法进行了统计分析,结果见图3。碳排放因子法的基本思路是构建碳排放清单,估算每个碳排放位点的活动数据,查找适当的排放因子,根据活动水平和排放因子估计碳排放量^[58]。采用碳排放因子法核算时,活动数据来源于各地区排水设计规范或手册、标准图集、规划设计资料、统计年鉴、行业报告、统计机构数据及相关工程人员访谈内容等^[59],根据核算需求还需收集不同精度的降雨资料及其他气象资料^[60]。由于尚未形成城镇雨水系统碳排放因子数据库,当前碳排放因子主要来源于其他行业碳排放核算标准、生命周期评价软件数据库(Ecoinvent、China LCI、CLCD 和 ELCD 等)及相关文献等^[10,61]。实测法的实质则是通过采样和仪器测量,明确每个碳排放位点的温室气体排放量,实测法的结果可以转换为碳排放因子,用于丰富排放因子数据库。

从图3可以看出,现有文献主要采用碳排放因子法进行碳排放核算,只有较少的文献采用了实测法。碳排放因子法适用于不同尺度、多阶段的雨水系统碳排放核算,核算结果通常以年为单位,具有简单明确、方法论认识统一等优点,核算结果的准确性依赖于高质量的碳排放因子和活动数据的支撑。碳排放因子主要通过长期监测、研究和数据累积得到,该方法也是一种经验方法。与碳排放因子法不同,实测法更适用于设施尺度运行维护阶段单一位点的核算。该方法是获取温室气体排放量最直接的方法,核算结果通常为温室气体通量,数据单位为mg/(m²·s),获取设施年温室气体排放量需要长期监测来实现。由于该方法时间成本高、数据获取难

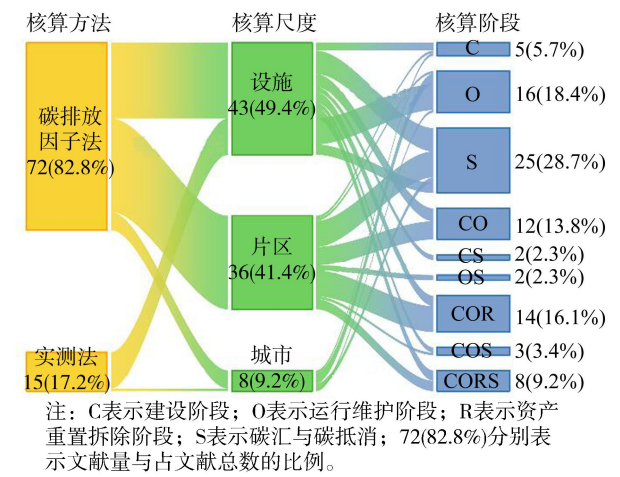


图3 核算方法、核算尺度及核算阶段分布

Fig.3 Distributions of accounting methods, accounting scales, and accounting stages

度大,数据精确度受监测时长及操作规范性等因素影响,目前应用较少。但长期实测研究有助于获取本地化碳排放因子,故实测法可与碳排放因子法互补,组合应用于雨水系统碳排放核算。

2.3 核算结果比较

鉴于多数研究采用了碳排放因子法,且实测法核算结果可以转换为排放因子,故从排放因子这一

维度比较不同研究的核算结果(下文碳排放核算结果均以CO₂当量计)。雨水设施碳排放因子是片区及城市尺度雨水系统碳排放核算的基础,基于雨水设施碳排放因子可估算出不同尺度雨水系统碳排放量,因此明确雨水设施碳排放因子有助于简化核算流程、减少初期数据收集工作。根据表2中设施类型分布,对现有文献中主要讨论的6种设施碳排放因子进行了统计分析。不同研究在核算设施类型、数据统计基础单元、设施寿命(范围为15~75 a,多假定设施寿命为30 a)及核算阶段等方面存在差异,为了更好地进行结果比较,对相关研究结果进行单位换算,结果见表4。

总体来看,设施碳排放结果具有较大的不确定性。不同寿命设施全生命周期碳排放因子数值差异显著。以人工湿地为例,60 a寿命人工湿地的全生命周期碳排放因子约是30 a寿命人工湿地的2.9倍。且运行维护阶段设施碳排放因子占全生命周期碳排放因子比例越大,核算结果对设施寿命的敏感性越高。为建立统一规范的碳排放核算体系,可以从统一假定的设施寿命入手,减少核算结果的不确定性。此外,建设阶段设施碳排放因子极差较

表4 典型雨水设施碳排放因子

Table 4 Carbon emission factors for typical stormwater facilities

设施类型	数值类型	碳排放因子					参考文献
		建设阶段	运行维护阶段		资产重置与拆除阶段	全生命周期	
			间接碳排放	生化反应直接温室气体排放			
生物滞留设施	范围	5.34 ~ 229.61	0.17 ~ 2.17			54.90 ~ 98.40 (30 a) 21.10 ~ 80.00 (50 a)	[12, 15, 17, 22-23, 25, 48, 62-65]
	均值	82.38	0.80		18.12	71.95 (30a) , 51.37 (50 a)	
绿色屋顶	范围	简单式: 8.98 ~ 85.59 密集式: 197.41 ~ 271.14	简单式: 0.23 ~ 9.70		11.66		[17, 23, 65-69]
	均值	简单式: 59.97 花园式: 234.27	简单式: 4.97 密集式: 213.18			85.60 (40 a)	
透水铺装	范围	31.48 ~ 150.14	0.01 ~ 0.69			107.64 ~ 111.75 (15 a) 86.09 ~ 146.20 (30 a) 104.52 ~ 334.10 (36 a) 22.20 ~ 24.30 (50 a) 116.00 ~ 176.00 (60 a)	[13, 16, 23-25, 48, 62, 64-65, 70-73]
	均值	82.21	0.24			109.89 (15 a) , 154.00 (20 a) 107.81 (30 a) , 210.90 (36 a) 23.10 (50 a) , 146.00 (60 a)	
植草沟	范围	8.43 ~ 36.65 *	0.01 ~ 0.25			19.10 ~ 37.54 (30 a)	[16-18, 25, 48, 65]
	均值	29.93 , 21.61 *	0.13			28.32 (30 a) , 13.00 (60 a)	
人工湿地	范围		0.26 ~ 13.79			22.00 ~ 23.00 (60 a)	[16, 26, 48, 65, 74-75]
	均值	6.86 , 8.70 **	0.03		6.41	7.69 (30 a) , 22.50 (60 a)	
蓄水池	范围	50.40 ~ 83.64				24.00 ~ 72.00 (60 a)	[16-17, 23, 62, 64-65]
	均值	67.02 , 525.39 **	0.69			119.30 (30 a) , 127.95 (50 a) 48.00 (60 a)	

注:建设阶段雨水设施碳排放因子单位(无特殊标记的情况下)为kg/m², *表示单位为kg/m, **表示单位为kg/m³;运行维护阶段雨水设施碳排放因子单位为kg/(m²·a),资产重置与拆除阶段、全生命周期雨水设施碳排放因子单位为kg/m²;全生命周期雨水设施碳排放因子不包含直接温室气体排放,全生命周期数据括号内表示设施全生命周期。

大,具有波动性,碳排放因子最高值是最低值的1.7~43.0倍。不同地区设施结构层设计差异、设施材料碳排放因子来源和假定的运输距离不同是导致设施各阶段及全生命周期碳排放因子不确定性较大的原因。

从核算阶段来看,雨水设施碳排放因子缺失,特别是生化反应直接温室气体排放及资产重置与拆除阶段,当前仅获得了绿色屋顶和生物滞留设施资产重置与拆除阶段的碳排放因子,缺少其生化反应直接温室气体排放因子,这表明目前的研究中还未充分认识到各阶段碳排放因子完整性对于核算结果准确性的意义。此外,少有研究讨论除蓄水池外其他灰色设施的碳排放,灰色设施核算研究不充分,而灰色设施能耗高、体量大,是城镇雨水系统的重要碳排放来源,还需加快完善雨水设施全生命周期碳排放因子,并逐步建立灰、绿设施碳排放因子库。

3 讨论

3.1 雨水系统核算边界划分对碳排放核算的影响

城镇雨水、污水系统具有联动性,明确二者衔接部分的核算边界对雨水系统碳排放核算具有重要意义。一些学者对于衔接部分的核算边界持有不同观点,Liu等^[76]将污水处理厂处理雨水及污水泵站提升雨水产生的碳排放纳入核算边界内,而多数研究主要考虑了雨水泵站的碳排放,没有包括以上两部分的碳排放。从这一边界中延伸出一个关键问题,即对于雨水系统,是否应将污水泵站提升雨水、污水处理厂处理雨水产生的碳排放纳入核算边界。

截留式排水体制下,部分雨水被截留进入污水处理厂^[77],在这一过程中,污水泵站提升雨水消耗电力产生间接碳排放,污水处理厂处理雨水产生直接温室气体排放^[19]。从排放区域来看,以上两部分碳排放均属于污水系统,但从水源类型来看,则属于雨水系统。若将该部分碳排放计入雨水系统碳排放量,核算时需明确截留雨水总量、污水泵站提升截留雨水电耗、污水处理厂处理雨水的综合碳排放因子,而截流量动态变化、污水处理碳排放因子与处理工艺密切相关等因素使相关数据收集难度较大。若不计入,意味着截留式排水体制区域扩大,截留雨水量增多,而该区域雨水系统碳排放减少。事实上,截留量增多加重了污水处理负荷,导致污水系统碳排放量增加,属于碳排放的转移,没有实现真正意义上的减排,因此建议在雨水系统碳排放核算中计入该部分碳排放,参考污水处理碳排放核算公式与排放因子进行核算,并在污水处理碳排放核算中避免重复核算。

3.2 雨水系统直接碳排放的不确定性

现有文献中普遍认为绿色设施具有碳汇潜

力^[78-83],根据现有研究,生物滞留设施碳汇因子的范围与均值分别为1.14~2.52和2.12 kg/(m²·a)^[17,22,79-80];简单式与花园式绿色屋顶碳汇因子的范围分别为0.31~1.75、0.22~46.93 kg/(m²·a),均值分别为0.84、18.64 kg/(m²·a)^[7-8,17,20,27,80-87];植草沟碳汇因子的范围与均值分别为0.10~0.74和0.36 kg/(m²·a)^[7-8,17,80]。

运行期间设施植被固碳的同时也起到控制径流污染的作用。由于径流中TOC、TN等有机物流入及土壤中有机的综合作用,人工湿地、生物滞留设施、雨水塘及管网等设施内部发生生化反应,在有机物厌氧分解过程中产生CH₄,在硝化、反硝化、硝化细菌反硝化及NO₃⁻异化还原成NH₄⁺作用下产生N₂O^[88]。研究表明,人工湿地、绿色屋顶、生物滞留设施、雨水花园及雨水塘等设施运行期间均直接排放CH₄和N₂O,并且受植物、季节、进水负荷和水质、水文状况等环境条件影响^[88-93],设施温室气体排放量动态变化^[94],由此可见,运行期间设施是一种不稳定的碳排放源^[95],雨水系统直接碳排放具有不确定性。

由于人工湿地能有效净化各类污/废水,较多学者关注处理各类污/废水人工湿地的温室气体排放。雨水湿地作为人工湿地的一个分支,多用于径流量、径流峰值及污染控制。与具有稳定持续水质、流量的处理污/废水的人工湿地不同,雨水湿地进水具有非稳态的流量、水质及水文特性,在设计负荷、填料类型、水力停留时间等参数方面两者差异较大^[96]。Li等^[74]以芬兰南部一个7 hm²的雨水湿地为研究对象,经过14月连续监测发现,开阔水域与植被区域均为碳源,综合温室气体排放与碳汇,该湿地的全球增温潜势(global warming potential, GWP)为0.263 kg/(m²·a),在运行期间该湿地是一个小的碳源;而张璐^[97]研究发现,用于污水处理的表流人工湿地则是碳汇;D'Acunha等^[75]监测了温哥华市一个雨水湿地的温室气体排放,仅考虑温室气体排放时湿地的GWP为5.189 kg/(m²·a)。

当前,已分别开展了绿色设施碳汇估算及雨水设施温室气体排放的实测研究,但研究成果较少,还不足以形成统一的排放因子库。从建立统一的碳排放核算体系来看,绿色设施直接温室气体排放这一碳排放位点需单独列出,人工湿地等设施是碳源或碳汇,还需要长期的实测研究来证实。

3.3 水能利用对雨水系统碳抵消的影响

碳抵消是指通过系统外部碳排放补偿或抵消来实现系统的排放总量控制目标。雨水系统碳抵消可通过水能利用实现,即通过雨水系统内部活动减少其他系统水资源消耗与能耗,抵消其他系统温室气

体排放量,进而实现自身碳排放控制。雨水系统碳抵消包括雨水综合利用、协同建筑节能及可再生能源替代等。绿色屋顶减少建筑空调能耗;集蓄利用类设施收集回用雨水,减少供水能耗;雨水设施与光伏发电设施有机结合,代替传统常规能源,为雨水系统提供绿色电能。三者均为从雨水系统边界外的其他系统(建筑、供水及电力系统)获得碳信用,减少雨水系统自身的碳排放量。

现有研究多关注雨水系统在协同建筑节能^[98]、雨水综合利用^[99]等方面的碳抵消量,而对可再生能源替代方面关注较少。研究表明,绿色屋顶协同建筑节能的碳抵消量范围与均值分别为 1.78 ~ 6.118 和 2.87 kg/(m² · a)^[7-9,80],生物滞留设施在雨水综合利用方面的碳抵消量为 3.82 kg/(m² · a)。除以上两种设施,雨水桶、蓄水池等其他雨水设施也可以实现碳抵消,雨水系统水能利用的碳抵消量化研究有待继续深入。

4 结 语

当前,城镇雨水系统碳排放核算研究仍处于起步阶段,现有研究正从单一阶段核算向全生命周期核算、单独核算碳排放或碳抵消向核算净碳排放的研究方向发展。在核算方法方面,逐渐形成以碳排放因子法为主、实测法补充的核算方法体系;研究重心逐步从设施尺度碳排放特征向片区、城市尺度碳排放特征过渡。现有研究基本明确了雨水系统部分阶段的碳排放核算公式、获得了部分雨水设施的碳排放因子和碳抵消量等。从建立统一规范的城镇雨水系统碳排放核算体系角度,现有研究仍存在一定的局限性:①尽管已获得了部分设施的碳排放因子,但核算结果仍具有较大的不确定性,并且缺少灰色设施碳排放因子,设施碳排放因子及碳抵消量均有待进一步细化;②碳排放阶段核算缺失使雨水系统碳排放估值偏低,全生命周期雨水系统碳排放核算需进一步研究;③截留式排水体制下雨水系统碳排放核算边界划分有待分析讨论。

未来雨水系统碳排放核算研究还应从以下几个方面继续深入:

a. 临近“双碳”目标时间节点,加快推动雨水系统向绿色低碳发展模式转变。建议加快建立统一规范的城镇雨水系统碳排放统计核算体系,规范与指导雨水系统碳排放核算的开展,奠定雨水系统碳排放评估与比较基础,助力雨水系统达成“双碳”目标。

b. 持续关注绿色设施碳排放核算,加强灰色设施碳排放核算研究与分析。重视核算阶段完整性,获取雨水设施全生命周期碳排放因子,在此基础上

构建适用于雨水系统碳排放核算的综合因子数据库,并结合实测法与碳排放因子法核算成果,持续完善与细化雨水设施碳排放因子,实现综合因子数据库的动态更新。

c. 形成行业共识,避免排放位点遗漏或重复核算。从水能利用等角度出发,科学评估雨水系统碳抵消量,深挖雨水系统碳减排潜力。综合碳排放与碳抵消量,深入研究雨水系统碳排放规律,为雨水系统碳减排路径规划与实施提供理论支撑。

参考文献:

[1] 李俊奇,张希,李惠民. 北京某片区海绵城市建设和运行中的碳排放核算研究[J]. 水资源保护,2023,39(4):86-93. (LI Junqi, ZHANG Xi, LI Huimin. Study on carbon emission accounting in construction and operation of a sponge city in Beijing [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):86-93. (in Chinese))

[2] 马占云,任佳雪,陈海涛,等. IPCC 第一工作组评估报告分析及建议[J]. 环境科学研究,2022,35(11):2550-2558. (MA Zhanyun, REN Jiaxue, CHEN Haitao, et al. Analysis and recommendations of IPCC Working Group I Assessment Report [J]. Research of Environmental Sciences,2022,35(11):2550-2558. (in Chinese))

[3] 刘琳钰. 高层住宅设计阶段基于建筑碳排放测算的优化策略[D]. 汕头:汕头大学,2020.

[4] 刘阳. 基于低碳理念的居住区水景营造研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.

[5] 左其亭,吴青松,马军霞,等. “双碳”目标下水资源行为调控研究框架及展望[J]. 水资源保护,2023,39(1):8-14. (ZUO Qiting, WU Qingsong, MA Junxia, et al. Research framework and prospect of water resource behavior regulation under carbon peak and carbon neutrality goals[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):8-14(in Chinese))

[6] 张书函,孟莹莹,陈建刚. 城市雨水利用措施的低碳效应[J]. 给水排水动态,2010(5):33-34. (ZHANG Shuhan, MENG Yingying, CHEN Jiangang. Low carbon effect of urban stormwater utilization measures[J]. Water & Wastewater Information, 2010(5):33-34. (in Chinese))

[7] 户园凌. 低影响开发雨水系统综合效益的分析研究[D]. 北京:北京建筑工程学院,2012.

[8] 贾玲玉. 海绵城市建设的低影响开发技术配置优化与碳减排研究[D]. 天津:天津大学,2017.

[9] 罗慧中. 低影响开发设计及综合效益评估研究[D]. 武汉:武汉大学,2017.

[10] 马静. 绿色建筑中给排水系统 CO₂ 排放量的阈值研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.

[11] 王鹏,吴书安,李松良,等. 既有居住建筑节能节水改造与碳

- 减排量研究:以扬州为例[J]. 城市住宅,2015(12): 102-107. (WANG Peng, WU Shuan, LI Songliang, et al. Study on water saving retrofit and carbon emission reduction in existing residential buildings: with Yangzhou as an example[J]. Urban Architecture Space,2015(12): 102-107. (in Chinese))
- [12] 芦琳.两种典型城市雨水LID技术生命周期评价研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013.
- [13] 刘洪涛,李艳芳,石时.透水性路面与普通路面的生命周期评价[J]. 城市问题,2017(5): 52-57. (LIU Hongtao, LI Yanfang, SHI Shi. Evaluation on the life cycle of permeable pavement and common pavement[J]. Urban Problems,2017(5)52-57. (in Chinese))
- [14] XU Changqing, HONG Jinglan, JIA Haifeng, et al. Life cycle environmental and economic assessment of a LID-BMP treatment train system: a case study in China[J]. Journal of Cleaner Production,2017,149:227-237.
- [15] 王墨.应对气候变化和城市发展的城市雨洪管控模式研究[D]. 福州:福建农林大学,2017.
- [16] FATHOLLAHI A, COUPE S J. Life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) of road drainage systems for sustainability evaluation: quantifying the contribution of different life cycle phases[J]. Science of the Total Environment,2021,776:145937.
- [17] KAVEHEI E, JENKINS G A, ADAME M F, et al. Carbon sequestration potential for mitigating the carbon footprint of green stormwater infrastructure[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2018,94:1179-1191.
- [18] LI Yi, HUANG Youyi, YE Quanliang, et al. Multi-objective optimization integrated with life cycle assessment for rainwater harvesting systems[J]. Journal of Hydrology, 2018,558:659-666.
- [19] TAVAKOL-DAVANI H, BURIAN S J, BUTLER D, et al. Combining hydrologic analysis and life cycle assessment approaches to evaluate sustainability of water infrastructure[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2018, 144(11):05018006.
- [20] 建娜.城镇排水系统的生命周期环境影响评价研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [21] 刘秋虹.三种初雨污染控制排水系统的生命周期环境影响评价研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
- [22] LIN Xiaohu, REN Jie, XU Jingcheng, et al. Prediction of life cycle carbon emissions of sponge city projects: a case study in Shanghai, China[J]. Sustainability, 2018, 10(11):3978.
- [23] 马洁.海绵城市建设典型措施的碳源解析和碳排放研究[D]. 晋中:山西农业大学,2018.
- [24] 李晨璐,郑涛,彭开铭,等.基于全生命周期法的海绵城市雨水系统碳排放研究[J]. 环境与可持续发展,2019, 44(1): 132-137. (LI Chenlu, ZHENG Tao, PENG Kaiming, et al. Study on carbon emission of sponge city stormwater system based on life cycle assessment[J]. Environment and Sustainable Development,2019,44(1): 132-137. (in Chinese))
- [25] 郑涛.居住社区海绵改造过程的碳排放核算研究[J]. 中国给水排水,2021,37(19): 112-119. (ZHENG Tao. Estimation of carbon emission during sponge city reconstruction of residential community[J]. China Water & Wastewater,2021,37(19): 112-119. (in Chinese))
- [26] BLEDSOE R B, BEAN E Z, AUSTIN S S, et al. A microbial perspective on balancing trade-offs in ecosystem functions in a constructed stormwater wetland[J]. Ecological Engineering,2020,158:106000.
- [27] FAN Liangqian, WANG Jingting, LIU Xiaoling, et al. Whether the carbon emission from green roofs can be effectively mitigated by recycling waste building material as green roof substrate during five-year operation? [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(32):40893-40906.
- [28] 郭恰,马艳.基于质量平衡法的污泥处理处置工艺碳减排量核算分析[J]. 净水技术,2019,38(10): 107-111. (GUO Qia, MA Yan. Calculation analysis of carbon emission reduction for sludge treatment and disposal processes based on mass balance approach[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(10): 107-111. (in Chinese))
- [29] 张程.污水处理系统碳排放规律研究与量化评价[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [30] 冯梦雨.快速城市化对“水-能-碳”耦合系统的影响:以郑州市为例[D]. 郑州:华北水利水电大学,2023.
- [31] 郑靖伟,孙才志.不同尺度下水-能-碳系统空间关联关系分析[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版) [2023-07-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20230703.1315.002.html>. (ZHENG Jingwei, SUN Caizhi. Spatial correlation analysis of water-energy-carbon systems at different scales[J/OL]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition) [2023-07-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20230703.1315.002.html>. (in Chinese))
- [32] 郑文晖.文献计量法与内容分析法的比较研究[J]. 情报杂志, 2006, 25(5): 31-33. (ZHENG Wenhui. Comparative research on bibliometrics and content analysis[J]. Journal of Intelligence, 2006, 25(5): 31-33. (in Chinese))
- [33] 邱均平,邹菲.关于内容分析法的研究[J]. 中国图书馆学报,2004,30(2): 12-17. (QIU Junping, ZOU Fei. A study on content analysis method[J]. Journal of Library Science in China,2004,30(2): 12-17. (in Chinese))
- [34] 中华人民共和国住房和城乡建设部.海绵城市建设评价标准:GB/T 51345—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

- [35] 马洁,武小钢.海绵城市典型措施碳排放研究[J].中国城市林业,2018,16(2):27-32. (MA Jie,WU Xiaogang. A study of carbon emissions of typical measures adopted in sponge city[J]. Journal of Chinese Urban Forestry,2018,16(2):27-32. (in Chinese))
- [36] XU Changqing, LIU Zijing, CHEN Zhengxia, et al. Environmental and economic benefit comparison between coupled grey-green infrastructure system and traditional grey one through a life cycle perspective[J]. Resources Conservation and Recycling,2021,174:105804.
- [37] SHAFIQUE M,AZAM A,RAFIQ M, et al. An overview of life cycle assessment of green roofs[J]. Journal of Cleaner Production,2020,250:119471.
- [38] XU Changqing, JIA Mingyi, XU Ming, et al. Progress on environmental and economic evaluation of low-impact development type of best management practices through a life cycle perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2019,213:1103-1114.
- [39] 贾璐维,张雷,李文龙. "海绵城市"目标下的公园绿地设计研究:以渭南新城建设项目为例[J]. 土地开发工程研究,2016(6):33-38. (JIA Luwei,ZHANG Lei,LI Wenlong. Research of park green space design based on the target of the sponge city: illustrated by the case of Weinan eastern new city program[J]. Land Development and Engineering Research, 2016(6):33-38. (in Chinese))
- [40] ZHU Yifei, XU Changqing, YIN Dingkun, et al. Environmental and economic cost-benefit comparison of sponge city construction in different urban functional regions[J]. Journal of Environmental Management,2022,304:114230.
- [41] ANTUNES L N, GHISI E, THIVES L P. Permeable pavements life cycle assessment; a literature review[J]. Water,2018,10(11):1575.
- [42] 闫笑.海绵城市绿色基础设施的生命周期评价:深圳市光明区案例研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [43] 芦琳,陈韬,付婉霞,等. LID 措施生命周期评价方法探析:以雨水花园与渗透铺装+渗透管/井系统为例[J]. 绿色科技,2013(5):287-291. (LU Lin, CHEN Tao, FU Wanxia, et al. Exploration of life cycle assessment methods for LID measures: with rain gardens and permeable pavement + infiltration pipe/well systems as an example [J]. Journal of Green Science and Technology,2013(5):287-291. (in Chinese))
- [44] LIANG Changmei, ZHANG Xiang, XU Jin, et al. An integrated framework to select resilient and sustainable sponge city design schemes for robust decision making [J]. Ecological Indicators,2020,119:106810.
- [45] BRUDLER S, ARNBJERG-NIELSEN K, HAUSCHILD M Z, et al. Life cycle assessment of point source emissions and infrastructure impacts of four types of urban stormwater systems[J]. Water Research,2019,156:383-394.
- [46] BYRNE D M, GRABOWSKI M K, BENITEZ A C B, et al. Evaluation of life cycle assessment (LCA) for roadway drainage systems [J]. Environmental Science & Technology,2017,51(16):9261-9270.
- [47] 孙静月.城市低影响开发设施效益量化研究[D]. 武汉:武汉大学,2018.
- [48] BIXLER T S, HOULE J, BALLESTERO T, et al. A dynamic life cycle assessment of green infrastructures[J]. Science of the Total Environment,2019,692:1146-1154.
- [49] GORSKY A L, RACANELLI G A, BELVIN A C, et al. Greenhouse gas flux from stormwater ponds in southeastern Virginia (USA) [J]. Anthropocene,2019,28:100218
- [50] ANTUNES L N, SYDNEY C, GHISI E, et al. Reduction of environmental impacts due to using permeable pavements to harvest stormwater[J]. Water,2020,12(10):2840.
- [51] DEVKOTA J P, BURIAN S J, TAVAKOL-DAVANI H, et al. Introducing demand to supply ratio as a new metric for understanding life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from rainwater harvesting systems [J]. Journal of Cleaner Production,2017,163:274-284.
- [52] TAVAKOL-DAVANI H, RAHIMI R, BURIAN S J, et al. Combining hydrologic analysis and life cycle assessment approaches to evaluate sustainability of water infrastructure: uncertainty analysis [J]. Water, 2019, 11(12):2592.
- [53] ZHANG Qian, LIU Shuming, WANG Tao, et al. Urbanization impacts on greenhouse gas (GHG) emissions of the water infrastructure in China: trade-offs among sustainable development goals (SDGs) [J]. Journal of Cleaner Production,2019,232:474-486.
- [54] 党永锋.基于全寿命周期评价的城市道路建养工程碳排放特征研究:以西安高新区草堂科技产业基地东西八号路为例[D]. 西安:长安大学,2018.
- [55] DE SÁ SILVA A C R, BIMBATO A M, BALESTIERI J A P, et al. Exploring environmental, economic and social aspects of rainwater harvesting systems: a review [J]. Sustainable Cities and Society,2022,76:103475.
- [56] ZABIDI H A, GOH H W, CHANG C K, et al. A review of roof and pond rainwater harvesting systems for water security: the design, performance and way forward [J]. Water,2020,12(11):3163.
- [57] JATO-ESPINO D, TORO-HUERTAS E I, GUERECAL P. Lifecycle sustainability assessment for the comparison of traditional and sustainable drainage systems [J]. Science of the Total Environment,2022,817:152959.
- [58] 林晓虎,任婕,乔俊莲,等.海绵城市建设中碳排放核算研究进展及探析[J]. 资源节约与环保,2018(3):42-44. (LIN Xiaohu, REN Jie, QIAO Junlian, et al. Research progress and analysis of carbon emission accounting in sponge city construction [J]. Resources Economization &

- Environmental Protection,2018(3):42-44. (in Chinese))
- [59] 余娇. 基于“水-能-碳”关联的郑州市水系统碳排放研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2020.
- [60] SAGRELIUS P O, BLECKEN G, HEDSTRÖM A, et al. Environmental impacts of stormwater bioretention systems with various design and construction components [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 359:132091.
- [61] DOS SANTOS M F N, BARBASSA A P, VASCONCELOS A F, et al. Stormwater management for highly urbanized areas in the tropics: life cycle assessment of low impact development practices [J]. Journal of Hydrology, 2021, 598:126409.
- [62] WANG Zhilin, ZHOU Shiqi, WANG Mo, et al. Cost-benefit analysis of low-impact development at hectare scale for urban stormwater source control in response to anticipated climatic change [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 264:110483.
- [63] RASHID A R M, BHUIYAN M A, PRAMANIK B, et al. A comparison of environmental impacts between rainwater harvesting and rain garden scenarios [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 159:198-212.
- [64] BHATT A, BRADFORD A, ABBASSI B E. Cradle-to-grave life cycle assessment (LCA) of low-impact-development (LID) technologies in southern Ontario [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231:98-109.
- [65] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [66] KOURA J, MANNEH R, BELARBI R, et al. Comparative cradle to grave environmental life cycle assessment of traditional and extensive vegetative roofs: an application for the Lebanese context [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2020, 25(3):423-442.
- [67] JAHANFAR A, SLEEP B, DRAKE J. Energy and carbon-emission analysis of integrated green-roof photovoltaic systems: probabilistic approach [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2018, 24(1):04017044.
- [68] YAO Lan, CHINI A, ZENG Ruochen. Integrating cost-benefits analysis and life cycle assessment of green roofs: a case study in Florida [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020, 26(2):443-458.
- [69] RASUL M G, ARUTLA L K R. Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment [J]. Energy Reports, 2020, 6(Sup1):503-508.
- [70] HUNG A, LI L Y, SWEI O. Evaluation of permeable highway pavements via an integrated life-cycle model [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 314:128043.
- [71] LIU Jiawen, LI Hui, WANG Yu, et al. Integrated life cycle assessment of permeable pavement: model development and case study [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 85:102381.
- [72] YUAN Xueliang, TANG Yuzhou, LI Yue, et al. Environmental and economic impacts assessment of concrete pavement brick and permeable brick production process: a case study in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171:198-208.
- [73] 解超, 王思思, 吕彬. 基于 LCA 的北京市透水水泥混凝土路面的环境影响分析 [J]. 环境工程, 2022, 40(9):118-125. (JIE Chao, WANG Sisi, LYU Bin. Environmental impact analysis of permeable cement concrete pavement in Beijing based on life cycle assessment [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(9):118-125. (in Chinese))
- [74] LI Xuefei, WAHLROOS O, HAAPANALA S, et al. Carbon dioxide and methane fluxes from different surface types in a created urban wetland [J]. Biogeosciences, 2020, 17(13):3409-3425.
- [75] D'ACUNHA B, JOHNSON M S. Water quality and greenhouse gas fluxes for stormwater detained in a constructed wetland [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231:1232-1240.
- [76] LIU Jiahong, WANG Jia, DING Xiangyi, et al. Assessing the mitigation of greenhouse gas emissions from a green infrastructure-based urban drainage system [J]. Applied Energy, 2020, 278:115686.
- [77] 赵杨, 车伍, 杨正. 中国城市合流制及相关排水系统的主要特征分析 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(14):18-28. (ZHAO Yang, CHE Wu, YANG Zheng. Analysis of characteristics of china urban combined sewer system and related other sewer systems [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14):18-28. (in Chinese))
- [78] PAN B T C, KAO J J. Comparison of indices for evaluating building green values based on greenhouse gas emission reductions [J]. Ecological Indicators, 2021, 122:107228.
- [79] KAVEHEI E, JENKINS G A, LEMCKERT C, et al. Carbon stocks and sequestration of stormwater bioretention/biofiltration basins [J]. Ecological Engineering, 2019, 138:227-236.
- [80] 朱培元. 基于综合效益的场地绿色雨水系统设计与优选 [D]. 南昌:南昌大学,2018.
- [81] SULTANA R, AHMED Z, HOSSAIN M A, et al. Impact of green roof on human comfort level and carbon sequestration: a microclimatic and comparative assessment in Dhaka City, Bangladesh [J]. Urban Climate, 2021, 38:100878.
- [82] HEUSINGER J, WEBER S. Extensive green roof CO₂ exchange and its seasonal variation quantified by eddy covariance measurements [J]. Science of the Total Environment, 2017, 607-608:623-632.
- [83] SCHARF B, KRAUS F. Green roofs and greenpass [J]. Buildings, 2019, 9(9):205.
- [84] ZHOU Long, SHEN Guoqiang, WOODFIN T, et al. Ecological and economic impacts of green roofs and permeable pavements at the city level: the case of

Corvallis,Oregon[J]. Journal of Environmental Planning and Management,2018,61(3):430-450.

[85] 董楠楠,吴静,石鸿,等. 基于全生命周期成本-效益模型的屋顶绿化综合效益评估:以 Joy Garden 为例[J]. 中国园林,2019,35(12):52-57. (DONG Nannan, WU Jing, SHI Hong, et al. Comprehensive benefits evaluation of green roofs based on cost-benefit model of whole life cycle;a case study of Joy Garden[J]. Chinese Landscape Architecture,2019,35(12):52-57. (in Chinese))

[86] 杨丰潞,杨高升. 海绵城市背景下 LID 措施综合效益量化研究[J]. 资源与产业,2020,22(6):75-81. (YANG Fenglu, YANG Gangsheng. Quantitative study on comprehensive benefits of low influence development (LID) approaches in sponge cities [J]. Resources & Industries,2020,22(6):75-81. (in Chinese))

[87] 陆芸. 绿色屋顶的生态效益研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.

[88] 赵倩. 生物滞留系统对路面雨水氮素去除及 N₂O 与 CO₂排放特征研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.

[89] 殷楠. 人工湿地装置净化景观水体的水力特性及生态效应研究[D]. 上海:上海交通大学,2016.

[90] TEEMUSK A, KULL A, KANAL A, et al. Environmental factors affecting greenhouse gas fluxes of green roofs in temperate zone [J]. Science of the Total Environment, 2019,694:133699.

[91] SHRESTHA P, HURLEY S E, ADAIR E C. Soil media CO₂ and N₂O fluxes dynamics from sand-based roadside bioretention systems[J]. Water,2018,10(2):185.

[92] WANG Huoqing, SUN Yuepeng, ZHANG Lixun, et al. Enhanced nitrogen removal and mitigation of nitrous oxide emission potential in a lab-scale rain garden with internal water storage[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021,42:102147.

[93] AUDET J,CARSTENSEN M V,HOFFMANN C C,et al. Greenhouse gas emissions from urban ponds in Denmark [J]. Inland Waters,2020,10(3):373-385.

[94] 郝晓地,孟祥挺,胡沅胜. 人工湿地温室气体释放、影响及其控制[J]. 中国给水排水,2016,32(22):39-47. (HAO Xiaodi, MENG Xiangting, HU Yuansheng. Emissions, influence and control of greenhouse gases in constructed wetlands [J]. China Water & Wastewater, 2016,32(22):39-47. (in Chinese))

[95] KAVEHEI E,IRAM N,RASHTI M R,et al. Greenhouse gas emissions from stormwater bioretention basins [J]. Ecological Engineering,2021,159:106120.

[96] 贾一非. 海绵城市末端调蓄的雨水湿地设计研究:以西宁湟水河湿地公园为例[D]. 北京:北京林业大学,2020.

[97] 张璐. 表流人工湿地温室气体释放过程解析及调控策略研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.

[98] ENGSTRÖ M R,HOWELLS M,MÖ RTBERG U,et al. Multi-functionality of nature-based and other urban sustainability solutions: New York City study [J]. Land Degradation & Development,2018,29(10):3653-3662.

[99] 贡力,董洲全,贾治元,等. 水利行业低碳技术研究热点与前沿趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):1-9. (GONG Li,DONG Zhouquan,JIA Zhiyuan,et al. Low carbon technology research hotspots and frontier trends in the water conservancy industry [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):1-9. (in Chinese))

(收稿日期:2023-06-27 编辑:施业)

(上接第 32 页)

[32] LI Chenxi,WU Kening,WU Jingyao. Environmental hazard in Shanghai, China: lessons learned from Huangpu River dead pigs incident [J]. Natural Hazards, 2017, 88(2): 1269-1272.

[33] HU Zhibing,YONG Pang,XU Ruichen,et al. Study on the proportion and flow path of Yangtze River water diversion into Taihu Lake[J]. Water Science & Technology: Water Supply,2022,22(2):1820-1834.

[34] 王磊之,胡庆芳,戴晶晶,等. 面向金泽水库取水安全的太浦河多目标联合调度研究[J]. 水资源保护,2017,33(5):61-68. (WANG Leizhi,HU Qingfang,DAI Jingjing, et al. Research on multi-objective joint operation of Taipu River oriented to water supply safety of Jinze Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 61-68. (in Chinese))

[35] 杜德军,王晓俊,成泽霖,等. 长江口白茆沙河段南强北弱格局变化特征研究[J]. 人民长江,2023,54(2):85-90. (DU Dejun, WANG Xiaojun, CHENG Zelin, et al. Study on pattern evolution of strong south and weak north in Baimao shoal reach of Yangtze River [J]. Yangtze River,2023,54(2):85-90. (in Chinese))

[36] 张朝阳,刘桂平,张志林. 典型洪水作用下长江口白茆沙水道演变特性[J]. 水运工程,2018(3):106-111. (ZHANG Chaoyang, LIU Guiping, ZHANG Zhilin. Evolution characteristics of Baimaasha waterway at the Yangtze Estuary under actions of typical floods[J]. Port & Waterway Engineering,2018(3):106-111(in Chinese))

[37] 栾华龙,渠庚,柴朝晖,等. 长江口典型滩槽系统近期演变及河势控制对策探讨[J]. 人民长江,2022,53(1):7-12. (LUANG Hualong, QU Geng, CHAI Zhaohui, et al. Discussion on recent evolution of a typical channel-shoal system in Changjiang Estuary and measures for river regime control[J]. Yangtze River,2022,53(1):7-12. (in Chinese))

(收稿日期:2023-02-18 编辑:施业)