

基于全生命周期的深圳市海绵示范区碳排放核算

肖湘乾^{1,2}, 余敦先^{1,2}, 夏 军^{1,2}, 张 翔^{1,2}, 徐宗学^{3,4}

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 4. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要:基于 IPCC 排放因子核算理论,运用全生命周期评价方法,考虑海绵城市建设不同尺度不同点位的碳排放来源,构建了海绵城市碳排放核算框架。以深圳市国家海绵城市试点区域为例,核算了典型海绵设施以及典型海绵城市建设项目的全生命周期碳排放,分析了影响碳排放水平的主要因素。研究表明:绿色屋顶、雨水花园等海绵设施全生命周期净碳排放为负值,其碳减排效益大于 40 kg/m²,透水铺装和透水道路碳排放大于碳汇,其净碳排放为正值;海绵设施碳排放主要来源于间接碳排放,规划建设阶段贡献了绝大部分的碳排放,绿地固碳是碳汇的主要来源,其次是雨水利用、建筑节能等;建筑小区类海绵城市项目平均运行约 12.4 a 后实现碳中和,全生命周期 30 a 内产生的碳减排效益约 183.61 t/hm²,道路广场类项目在一定的海绵设施布局下有望实现碳中和。海绵城市能够发挥显著的碳减排作用,有效推进绿色城市低碳发展,在未来海绵城市建设过程中应注重低碳材料的使用,并合理规划海绵设施建设布局,通过多种碳减排方式提高海绵城市的碳汇功效。

关键词:海绵城市;碳排放;碳减排;全生命周期;深圳市

中图分类号:X322 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)03-0222-10

Carbon emission accounting of sponge city demonstration area in Shenzhen City based on full life cycle//XIAO Xiangqian^{1,2}, SHE Dunxian^{1,2}, XIA Jun^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}, XU Zongxue^{3,4}(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan 430072, China; 3. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on the IPCC emission factor accounting theory and employing the life cycle assessment (LCA) method, a carbon emission accounting framework for sponge cities was constructed by considering the carbon emission sources at different scales and locations in sponge city construction. Taking the national sponge city pilot area in Shenzhen as a case study, the full life cycle carbon emissions of typical sponge facilities and sponge city construction projects were calculated, and the key factors affecting carbon emission levels were analyzed. The results indicate that sponge facilities such as green roofs and rain gardens exhibit negative net carbon emissions over their life cycle, with carbon reduction benefits exceeding 40 kg/m². However, permeable pavements and roads have positive net carbon emissions, as their carbon emissions outweigh carbon sequestration. Indirect carbon emissions dominate the carbon footprint of sponge facilities, with the planning and construction phases contributing to majority of emissions. Carbon sequestration primarily comes from green space carbon absorption, followed by rainwater utilization and building energy savings. Residential sponge projects achieve carbon neutrality after approximately 12.4 year of operation, generating a total carbon reduction benefit of about 183.61 t/hm², over a 30-year life cycle. Road and square projects may also achieve carbon neutrality under optimized sponge facility layouts. This study demonstrates that sponge cities can play a significant role in carbon reduction, effectively promoting low-carbon urban development. Future sponge city construction should prioritize the use of low-carbon materials, optimize facility layouts, and enhance carbon sequestration through diversified emission reduction strategies.

Key words: sponge cities; carbon emission; carbon reduction; full life cycle; Shenzhen City

基金项目:水利部重大科技项目 (SKS—2022014); 长江生态环保集团有限公司科研项目 (HBZB2024032); 国家自然科学基金重大项目 (41890823)

作者简介:肖湘乾 (2002—),男,硕士研究生,主要从事城市水文研究。E-mail:xiaoxiangqian@whu.edu.cn

通信作者:余敦先 (1986—),男,教授,博士,主要从事全球变化与极端事件研究。E-mail:hedunxian@whu.edu.cn

人为温室气体的过量排放导致全球气候变暖,引发了气候变化、极端气候事件频发等问题^[1-3]。中国是世界上最大的一次能源消费国和碳排放国家之一,在碳减排方面进行了一系列努力,并明确提出“2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和”的目标^[4-7]。为应对气候变化及城市化发展带来的城市洪涝问题,海绵城市作为一种雨洪管理新模式,以改善城市水循环为核心、为保障城市水安全起到了积极作用^[8-12]。在海绵城市建设及运行中践行低碳发展理念,不仅能够有效提升城市防洪排涝韧性,还能够推进城市绿色转型进程,有助于增强城市极端气候适应能力^[13-14]。因此,核算海绵城市建设和运行过程中产生的碳排放,评估其全生命周期碳减排效益,对于正确认识海绵城市的生态环境效益、探索绿色低碳城市减排路径、服务“双碳”目标有着十分重要的现实意义。

当前,针对海绵城市在建设和运行过程中碳排放的研究已有较为丰富的成果。一些研究从全生命周期角度核算了单项海绵设施的碳排放及碳减排效益,如马洁等^[15-17]核算了绿色屋顶、雨水花园、透水铺装、植草沟等典型海绵措施的全生命周期碳排放量,并量化了设施在运行过程中通过绿色固碳、径流调节等方式产生的碳汇作用。在此基础上,一些学者关注区域尺度的海绵城市项目碳排放研究,如 Lin 等^[18]以上海市某实际住宅小区为案例,核算了海绵城市项目在 30 a 生命周期内的碳排放及碳汇,并预计该项目运行约 19 a 达到碳中和;郑涛^[19]核算了居住社区在海绵改造前后产生的碳排放量,并从绿化固碳、雨水利用等方面计算了海绵改造的碳汇效益,预期该项目运行 6.5 a 后达到碳中和;李俊奇等^[20]以北京某 100 km² 片区为研究区,估算了海绵城市建设和运行过程中的碳排放,并分析了影响海绵城市建设碳排放的关键因素;朱雨等^[21]以某小区为例核算了典型海绵设施的全生命周期碳排放,并预计其海绵改造方案有望在 6.6 a 实现碳中和。此外,有学者重点关注了海绵城市建设对于城市综合排水系统碳排放的影响,如 Liu 等^[22]计算了传统和基于绿色基础设施的城市排水系统碳排放,评估了绿色基础设施对低碳城市排水系统的减排贡献;Su 等^[23]以厦门市为例,研究了城市综合排水系统的碳排放水平以及海绵城市建设的碳减排效果,并对碳减排量的经济效益进行了估算。

上述研究从海绵设施单元、海绵城市社区项目、海绵城市排水分区 3 种不同尺度研究了海绵城市的碳排放相关问题,构建了不同视角下的碳排放核算框架,逐步完善了海绵城市相关碳排放的量化方法。

但是,当前大部分研究在核算过程中并未完全涵盖研究对象的全生命周期阶段,仅核算了部分阶段的碳排放,造成其考虑的碳排放来源不全面等问题;此外,不同研究建立的碳排放核算框架各有侧重,多关注单一尺度,且应用的实际案例较少。

本文基于全生命周期评价方法,依据 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change,政府间气候变化专门委员会)国家温室气体清单中的碳排放核算理论,建立了综合全面的海绵城市碳排放核算框架。选择深圳市光明区海绵城市建设项目中的两个类别 8 个项目作为典型海绵建设区域进行实际案例分析,核算了海绵城市全生命周期不同阶段的碳排放水平,重点关注了不同设施、不同项目类别之间的碳排放差异及其原因,以期为海绵城市建设及运行过程中的碳排放核算研究和降碳减排路径实施提供参考依据。

1 碳排放核算框架

构建碳排放核算框架,划分研究时空边界,确定碳排放和碳汇来源是研究碳排放问题的关键。本文建立的碳排放核算框架如图 1 所示。图 1 展示了各排放来源及其所属的生命周期阶段,以全生命周期为时间边界,涵盖了核算对象的材料生产、材料运输、建造施工、运行、维护、重置拆除、回收利用等过程;以海绵设施、海绵城市项目、海绵城市为不同核算尺度的空间边界,识别不同阶段、不同点位的碳排放及碳汇来源。框架涵盖的碳排放来源包括直接、间接碳排放来源。直接碳排放主要包括雨水中污染物在绿色基础设施、污水处理厂以及受纳水体等不同点位降解时产生的碳排放;间接碳排放主要包括核算对象在全生命周期阶段中由于物料使用、设备能耗等产生的碳排放,以及海绵城市排水系统中泵站、污水处理厂等由于运行能耗产生的碳排放。框架涵盖的碳汇来源主要包括海绵设施通过绿地固碳发挥的碳汇作用,以及在径流削减、雨水净化、雨水利用、建筑节能等过程中通过减少其他设施系统碳排放所发挥的碳减排作用。

2 碳排放核算方法

依据排放因子法对全生命周期各阶段、各来源的碳排放及碳汇量进行核算。排放因子法是《IPCC 国家温室气体清单指南》中提供的通用方法,通过核算项的活动水平与对应碳排放因子的乘积计算碳排放量。考虑到碳排放与碳汇的实际意义,将碳排放量计算值定义为正值,碳汇量计算值定义为负值,则净碳排放量可定义为碳排放总量与碳汇总量之



图1 海绵城市碳排放核算框架

Fig. 1 Carbon emission accounting framework for sponge cities

和。当净碳排放量计算值为负时说明碳汇量大于碳排放量,核算对象具有碳减排效益,效益值为净碳排放总量的绝对值,反之说明碳排放量大于碳汇量,核算对象不具有碳减排效益。本文碳排放量均为 CO_2 当量。

2.1 规划建设阶段

规划建设阶段即海绵设施或项目正式运行前的全部过程,包括材料生产、材料运输以及建造施工过程,相关计算见文献[18-11,24-25]。

- a. 材料生产:原材料生产过程产生的碳排放。
- b. 材料运输:材料运输过程中产生的碳排放,与运输量、运输距离及运输载具的能源类型有关。
- c. 建造施工:在建造施工过程中,施工设备能耗产生的碳排放。

2.2 运行维护阶段

城市水系统中包含碳、氮等物质的地球化学物质循环过程^[26]。海绵城市运行维护阶段产生的碳排放主要来源于污染物在不同点位发生降解产生的 CH_4 、 N_2O 直接碳排放,以及该阶段由于设备能耗产生的间接碳排放。同时,在运行阶段,部分设施可以通过植物的光合作用从大气中吸收 CO_2 发挥碳汇作用,以及通过径流削减、雨水净化、雨水利用、建筑节能等方式节能减排产生碳减排效益,相关计算见文献[15-19,22,24-25,27-33]。

- a. 海绵设施污染物降解:运行过程中海绵设施通过净化作用,降解雨水中的污染物产生的碳排放。
- b. 管道溢流污染物降解:由于早期城市建设采

用合流制排水管道较多,目前仍有部分城市老城区未进行雨污分流改造,其污水溢流加剧了城市水环境的恶化,是造成地表水污染的主要因素之一^[34]。当溢流污水直接排入受纳水体时发生污染物降解产生碳排放,处理水量为排入受纳水体的管道溢流污水水量。

- c. 污水处理厂污染物降解:城市综合排水系统造成的碳排放量不可忽视。污水处理厂是主要碳排放来源之一,其污染物降解过程中会产生直接碳排放。
- d. 设备能耗:设施在运行或维护过程中由于设备能耗产生的间接碳排放。
- e. 绿地固碳:运行阶段可以通过植被光合作用产生碳汇。
- f. 径流削减:运行过程中海绵设施通过径流削减作用减少进入雨水管道的水量,进而减少下游雨水泵站抽排的运行能耗。
- g. 雨水净化:运行过程中海绵设施通过雨水净化减少污水处理厂的污染物处理量,进而减少污水处理厂运行耗能产生的碳减排量。
- h. 雨水利用:运行过程中通过雨水资源利用产生的碳减排量。
- i. 建筑节能:海绵设施在运行过程中通过建筑节能产生了碳减排量。
- j. 碳中和时间:当运行维护阶段的净碳排放为负时,随运行时间会产生碳减排效益,逐年抵消规划建设阶段的碳排放,当运行年限内规划建设阶段总

碳排放被完全抵消时认为实现了碳中和,对应的时间节点即碳中和时间。

2.3 重置拆除阶段

重置拆除阶段包括设施重置拆除和回收利用两个过程。其碳排放主要包括拆除和回收利用过程中由于设备能耗产生的碳排放以及材料回收利用产生的碳补偿。各来源碳排放核算如下^[16,19,33,35-36]：

- a. 重置拆除:设施到达运行年限后拆除报废,过程中由于设备能耗产生间接碳排放,计算与建造施工过程类似。
- b. 回收利用:设施报废拆除后部分材料进行回收利用,过程中由于运输能耗产生碳排放,材料回收利用会产生碳补偿,抵消一部分碳排放。

3 研究区概况与数据来源

研究区域为深圳市国家海绵城市试点区域,位于光明区东南部,面积 24.6 km²,多年平均降水量 1629.29 mm。该区域近年来海绵城市建设成效显著,其海绵化改造项目具有可操作、可复制、可推广的特点。研究区概况如图 2 所示。

受限于城市尺度海绵城市建设和运行数据的获取难度,从海绵城市典型设施和建设项目两个尺度进行碳排放核算。参考《海绵城市建设技术指南》、深圳市地方标准《海绵城市设计图集》等当地海绵城市规划设计资料,选取并整理绿色屋顶、透水铺装、透水道路、雨水花园、植草沟、下沉式绿地等海绵城市典型设施结构设计参数,见表 1。建筑小区和道路广场类建设项目是海绵城市建设的典型项目类型,建筑小区类基于建筑屋面和绿化空间实施绿色屋顶、雨水花园、透水铺装等提升源头雨水管理能力,道路广场类基于城市道路和绿化带实施透水铺装、下沉式绿地等以缓解内涝风险和面源污染。参

考《深圳市海绵城市建设专项规划及实施方案》以及有关项目资料,选取 4 个建筑小区类和 4 个道路广场类海绵城市项目作为实际项目案例,位置分布如图 2 所示,建设规模、海绵设施实施情况以及设计年径流控制率如表 2 所示。

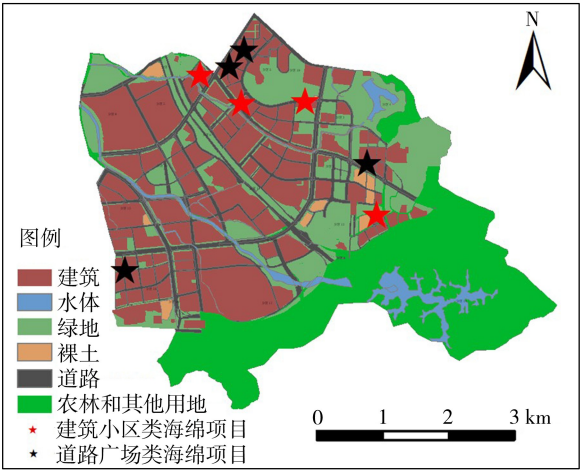


图 2 研究区概况

Fig. 2 Overview of study area

核算碳排放过程中使用的碳排放因子取值及来源见表 3。在计算过程中还参考了《2016 全国统一市政工程预算定额编制说明》,砂质土壤、中粗砂等粒径较小,在运输过程中易损耗的砂土材料,损耗率取为 4%;粒径相对较大的砂石类材料如碎石、砾石等,损耗率取为 2%;布膜板材类型材料如土工布、防渗膜等,损耗率取为 1%;材料运输碳排放计算中土壤、砂石、混凝土等可以就近取材的材料运距取为 40 km^[16],其余如土工布、防渗膜等需加工生产的材料运输距离采用 2015 年全国公路平均运距 (184 km) 作为计算依据^[19,21]。

根据《2019 房屋建筑与装饰工程消耗量定额》中的土石方工程量计算方法,确定设施建造施工过程

表 1 典型海绵设施结构设计参数

Table 1 Structural design parameters of typical sponge facilities

设施类型	分层结构	厚度/mm	分层材料	设施类型	分层结构	厚度/mm	分层材料
绿色屋顶	基质层	100~250	砂质土壤	雨水花园	覆盖层	50~100	树皮
	土工布层	2~4	透水土工布		种植土层	100~1 000	砂质土壤
	排水层	100~150	砾石		土工布层	2~4	透水土工布
	保护层	10~30	PVC 排水板		填料层	200~1 200	碎石
	防渗层	10~60	防渗膜(HDPE)		排水层	200~300	砾石
通水道路	透水砖层	60~80	透水砖	透水铺装	透水砖层	60~80	透水砖
	找平层	20~30	中粗砂		找平层	20~30	中粗砂
	土工布层	2~4	透水土工布		土工布层	2~4	透水土工布
	混凝土层	100~150	透水混凝土		碎石基层	150~200	级配碎石
	碎石基层	150~200	碎石				
植草沟	种植土层	200~300	砂质土壤	下沉式绿地	种植土层	200~300	砂质土壤
	土工布层	2~4	透水土工布		土工布层	2~4	透水土工布
	级配砾石层	200~300	砾石		级配砾石层	50~100	砾石

表 2 研究区海绵城市建设项目情况

Table 2 Overview of sponge city construction projects in study area

海绵城市 项目	面积/hm ²	设计年径流 控制率/%	改造措施							
			绿色屋顶		透水铺装		下沉式绿地		普通绿地	
			面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%
建筑小区 1	2.48	70	0.29	11.50	0.45	18.29	0.43	17.60	0.02	0.96
建筑小区 2	2.60	72	0.34	12.87	0.44	16.87	0	0	0.94	35.98
建筑小区 3	3.78	70	0.36	9.61	0.39	10.23	0	0	0.83	21.82
建筑小区 4	5.33	72	1.95	35.18	0.65	11.80	1.75	31.62	0	0
道路广场 1	0.29	65	0	0	0.09	29.27	0.05	16.29	0	0
道路广场 2	0.33	65	0	0	0.19	57.42	0.03	7.58	0	0
道路广场 3	4.76	70	0	0	2.38	49.93	0.48	9.99	0.04	0.79
道路广场 4	7.13	70	0	0	2.38	33.32	1.08	15.12	0	0

表 3 碳排放因子取值

Table 3 Values of carbon emission factors

碳排放因子	取值	参考来源
砂质土壤	24 kg/t	《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》 ^[24]
砾石	6.05 kg/t	
透水砖	2.21 kg/m ³	
中粗砂	2.51 kg/t	
级配碎石	52.8 kg/m ³	
碎石	2.18 kg/t	GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》
PVC 排蓄水板	1765 kg/m ²	马洁 ^[15]
防渗膜 (HDPE)	1248 kg/t	
透水土工布	0.16 kg/m ²	
透水混凝土	104 kg/t	
柴油	2.171 kg/kg	广东省住房和城乡建设厅《建筑碳排放计算导则》
电力	0.4715 kg/(k·Wh)	生态环境部、国家统计局《2021 年电力二氧化碳排放因子》
重型柴油火车运输 (载质量 18t)	0.129 kg/(t·km)	GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》

中的施工机械规模和台班量;海绵设施运行维护阶段的活动水平参考马洁^[15]的研究;不同下垫面类型的径流水质和污染物降解比例参考《低影响开发雨水综合利用技术规范》;根据 Kavehei 等^[17]的研究,确定各海绵设施的运行年限和固碳速率,绿色屋顶、透水铺装、雨水花园、植草沟、下沉式绿地的运行年限分别取为 40、30、30、25、30 a,其固碳速率分别取为 1.375、0、2.517、1.768、1.473 kg/(m²·a) (以 CO₂ 计);参考深圳市 2022 年水资源公报确定雨水资源利用率为 9.36%;根据《中国建筑垃圾资源化产业发展报告》,将建筑废弃物回收利用率取为 5%^[37];建筑节能减排计算中的建筑物空调能耗参考《深圳市大型公共建筑能耗监测情况报告 (2022 年度)》。

4 结果与分析

4.1 海绵设施碳排放核算结果

核算得到全生命周期海绵设施单位面积碳排放

如图 3 所示(图中行对应设施,列对应排放来源,红色代表碳排放,蓝色代表碳汇,颜色越深代表绝对值越大),统计直接、间接碳排放以及碳汇总量如图 4 所示。各海绵设施类型中,雨水花园的全生命周期碳排放总量最大,为 56.4 kg/m²,其次是透水道路、绿色屋顶、下沉式绿地、植草沟、透水铺装;雨水花园的碳汇总量最多,为-109.6 kg/m²,其次是绿色屋顶、下沉式绿地、植草沟、透水铺装和透水道路。除透水铺装和透水道路外其余设施的净碳排放都为负值,说明这些设施全生命周期碳汇总量大于碳排放总量,能够产生碳减排效益。其中雨水花园的碳减

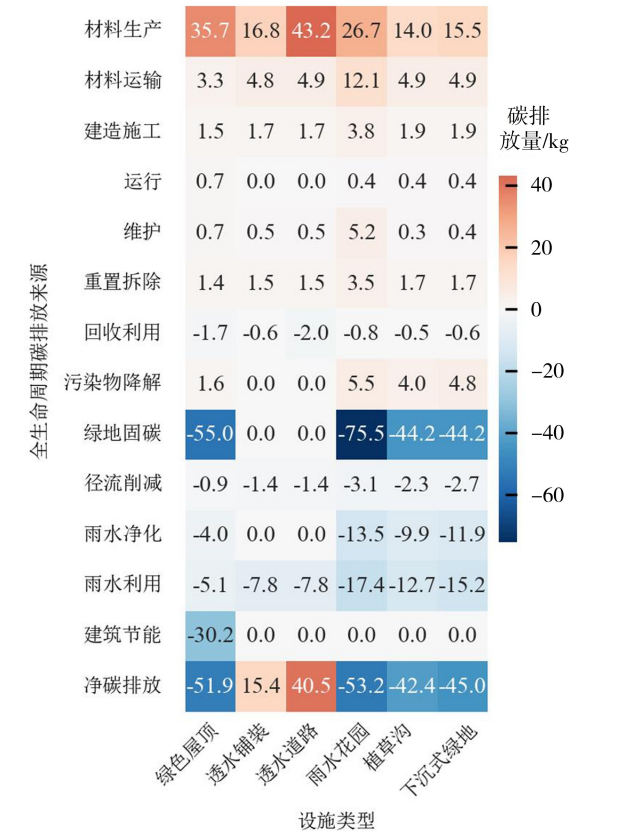


图 3 海绵设施全生命周期碳排放热力图

Fig. 3 Heatmap of carbon emissions across life cycle of sponge facilities

排效益最大,净碳排放量为 -53.2 kg/m^2 ,说明单位面积的雨水花园全生命周期可以吸收或减少碳排放 53.2 kg ,其余设施按照碳减排效益从大到小排列依次为绿色屋顶、下沉式绿地、植草沟。由于透水铺装和透水道路相比于其他海绵设施缺少绿地固碳和雨水净化的碳汇量,所以其碳汇量较小,净碳排放为正。另外,由于透水道路的结构设计中使用了透水混凝土材料,绿色屋顶使用了PVC、HDPE等有机材料,而这些材料的碳排放因子相对其他材料较大,导致这两种设施来源于材料生产的碳排放更大于其他设施,这与有关研究的结果基本一致^[15-16,38]。

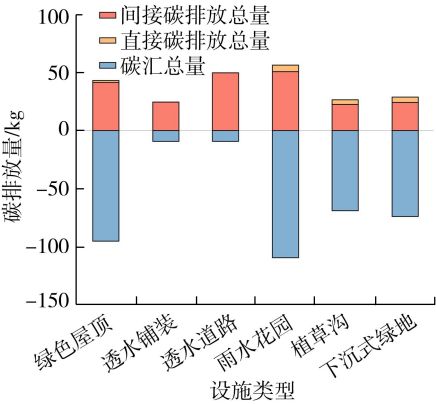
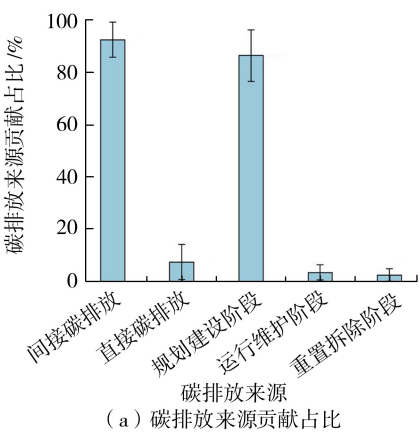


图4 海绵设施碳排放及碳汇总量

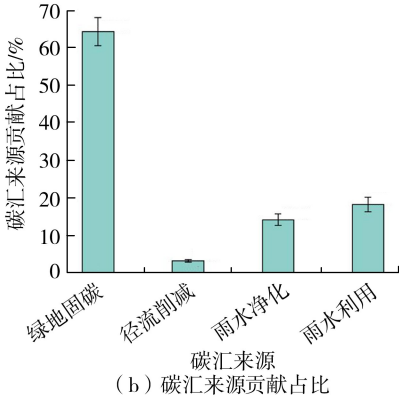
Fig.4 Carbon emissions and carbon sinks of sponge facilities

统计直接、间接碳排放以及生命周期各阶段排放来源对碳排放总量的贡献占比,如图5(a)所示。鉴于各设施的减排路径差异,统计雨水花园、植草沟、下沉式绿地的碳汇来源占碳汇总量的贡献占比,如图5(b)所示。对各设施而言,间接碳排放量远大于直接碳排放量,间接碳排放平均贡献了碳排放总量的92.4%,而直接碳排放仅占7.5%。这与Lin等^[18-19,21]的研究结果较为接近,其研究得到的间接碳排放占比为82.4%~96.1%。

来源于材料生产、材料运输、建造施工的碳排放产生于规划建设阶段,对碳排放总量的平均贡献占比为86.4%,其中来源于材料生产、材料运输、建造施工的碳排放分别占比65.2%、15.6%、5.7%。来源于运行、维护的碳排放产生于运行维护阶段产生,平均仅占总排放量的3.6%;来源于重置拆除和回收利用的碳排放产生于重置拆除阶段产生,平均占比为2.5%。值得注意的是由于材料回收利用产生一定量的碳补偿,各设施的回收利用过程呈现碳减排效果。以上结果说明对于海绵设施的全生命周期碳排放而言,来自规划建设阶段的碳排放占比较大,来自运行维护阶段和重置拆除阶段的碳排放占比较小。



(a) 碳排放来源贡献占比



(b) 碳汇来源贡献占比

图5 海绵设施碳排放来源贡献占比及碳汇来源贡献占比

Fig.5 Contribution proportions of carbon emission sources and carbon sink sources in sponge facilities

由于不同类型海绵设施之间存在功能的差异,其碳减排路径也有所不同。对透水铺装和透水道路而言,仅能通过径流削减和雨水利用的方式产生碳汇,其来自雨水利用的碳汇量较大。绿色屋顶的碳汇作用主要来源于通过绿地固碳产生的碳汇量,与其他设施不同,绿色屋顶还能通过建筑节能的方式节能减排产生碳减排量。雨水花园、植草沟、下沉式绿地的降碳途径类似,主要通过绿地固碳的方式发挥碳减排作用,其平均贡献占比为64.2%,占比最大,其次是雨水利用、雨水净化和径流削减。

4.2 海绵城市项目碳排放核算结果

从全生命周期角度核算两类海绵城市项目的不同来源碳排放,统计净碳排放总量以及规划建设阶段碳排放总量、运行维护阶段年均净碳排放、建筑小区类项目碳中和实现时间,见表4。

4个建筑小区类项目的净碳排放总量均为负值,由于建筑小区4的海绵设施布设面积比例最大,接近于总区域面积的80%,其碳减排效益也最为显著,净碳排放总量达到了 $-1\,323\text{ t}$ 。4个道路广场类项目中仅有道路广场1净碳排放总量为负,具有碳减排效益,这是由于道路广场1布设的海绵设施中

表 4 海绵城市项目碳排放核算结果

Table 4 Carbon emissions accounting results of sponge city projects

海绵城市项目	面积/ hm ²	净碳排放 总量/t	规划建设 阶段碳排 放总量/t	运行维护阶 段年均净碳 排放量/(t/a)	碳中和 实现时 间/a
建筑小区 1	2.5	-235.6	318	-18.7	17.0
建筑小区 2	2.6	-622.3	237.8	-28.8	8.3
建筑小区 3	3.8	-611.3	277.8	-29.6	9.4
建筑小区 4	5.5	-1323.0	1329.4	-89.1	14.9
道路广场 1	0.3	-2.1	30.4	-1.1	27.0
道路广场 2	4.8	26.3	49.6	-0.8	
道路广场 3	7.1	384.9	817.3	-15.0	
道路广场 4	0.3	12.3	791.7	-27.1	

具有碳减排效益的面积占比相对更大,所以其碳汇量较大,碳排放量较小,其总和为负。

统计 4 个建筑小区类型项目规划建设阶段碳排放和运行维护阶段净碳排放可以预计其碳中和实现时间,结果分别为 17.0、8.3、9.4、14.9 a, 平均 12.4 a 实现碳中和。建筑小区 1 和建筑小区 4 的碳中和时间接近建筑小区 2 和建筑小区 3 的 2 倍,这可能是由于前两者布设了更多面积占比的海绵设施,后两者布设了更多面积占比的普通绿地,而普通绿地是排除在规划建设阶段碳排放核算之外的,所以建筑小区 1 和建筑小区 4 在规划建设阶段产生的碳排放相对更多,需要更长的运行时间发挥碳汇效益以抵消建设期的碳排放,因此实现碳中和的时间也预计更长。道路广场类项目中道路广场 1 预计在 27 a 实现碳中和,其余 3 个项目在 30 a 运行期内无法实现碳中和,这是由于在道路广场类项目中具有碳减排效益的设施布设面积占比较小(7.6%~16.3%),而在建筑小区类项目中占比相对较大(包括普通绿地,占比 30.1%~66.8%),并且道路广场类项目中不具有碳减排效益的海绵设施布设面积占比较大(29.3%~57.4%),所以相比于建筑小区类项目,道路广场类项目的碳排放较大,碳汇较小,净碳排放难以达到零值以实现碳中和。

由于碳排放量的绝对值大小会受到面积变量的影响,为了便于比较不同项目之间的碳排放差异,计算各项目的单位面积碳排放结果,如图 6 所示。

不同类型项目的海绵设施建设情况不同,其单位面积碳排放量存在差异。建筑小区类项目平均单位面积碳排放量、碳汇量和净碳排放量分别为 149.1、-332.7、-183.6 t/hm²,道路广场类项目分别为 151.4、-112.6、38.8 t/hm²。总体来说,建筑小区类海绵城市项目的碳排放水平与道路广场类相近,但其碳汇更大,具有较为显著的碳减排效益。并且,当海绵设施布设面积占比较大时,项目单位面积碳

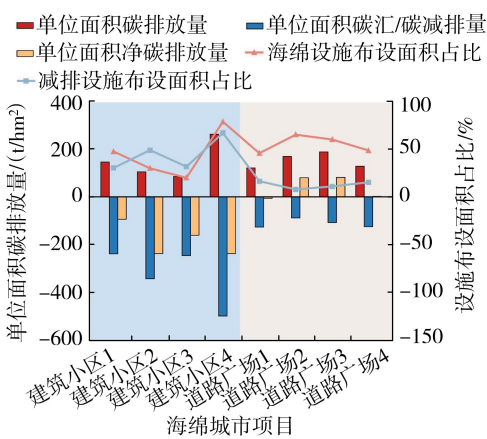


图 6 海绵城市项目单位面积碳排放核算结果

Fig. 6 Carbon emission accounting results per unit area of sponge city projects

排放量较大,反之较小;将具有碳减排效益的设施称作减排设施(包括普通绿地,普通绿地碳汇量计算与海绵设施绿地固碳减排计算方式一致),则海绵城市项目碳汇总量的大小与区域中减排设施布设面积占比的大小基本保持一致,即当具有碳减排效益的设施布设面积占比较大时,其单位面积的碳汇量较大,反之较小。

此外海绵城市项目单位面积净碳排放量与减排设施和非减排设施面积之比有关。例如建筑小区 2 和建筑小区 4 的减排设施和非减排设施面积之比较为接近(2.9、3.1),其单位面积净碳排放量也相近(-23.9、-23.9 t/hm²)。如果以道路广场 1 与道路广场 4 作为排放水平参照,可以计算出项目中绿地类型减排设施与非减排设施布设面积之比为 0.48 时,其净碳排放量约为 0,能够实现碳中和。

4.3 海绵城市项目碳排放核算不确定性分析

参考张希等^[16,18-19,21]的研究,对海绵设施减排效益随运行时间的变化进行简化和假设,一方面考虑当前气候变化加剧,未来降雨等环境条件的预测不确定性难以量化,所以在计算径流削减、雨水净化和雨水利用 3 部分碳汇量时,采用区域多年平均值(如降水量)或固定值(如初雨水质、雨水利用量)进行碳排放核算;另一方面,虽然实际运行过程中设施的物理性能如渗透性等,会因材料老化、植物生长周期变化、固体悬浮物沉积等因素而衰减,但也能通过规范的定期维护手段在一定程度上及时恢复,说明其性能变化并不是随时间的线性衰减过程,因此难以准确估计设施性能在运行期间的动态变化。在计算过程中假设运行期间海绵设施产生的年碳减排效益相同,采用年均水平代表整个运行期,暂不考虑实际运行过程中设施运行效果变化引起的碳减排效益变化。在此简化和假设条件下计算得到的碳中和实

现时间是基于平稳环境条件和规范运行维护下的期望值,可能会与实际情况产生一定程度的偏差,导致碳减排效益的高估或碳中和时间的低估。

根据 Kim 等^[39]的研究中对 LID (low impact development) 设施投资回收期的敏感性分析,净生态系统碳交换量是影响 LID 碳减排效益的最显著性因素,该结论与本文海绵设施的绿地固碳量贡献最大比例碳汇总量的结果保持一致,年均降水量也是较为显著的因素,因为年均降水量显著影响了海绵设施的雨水利用、径流削减等碳汇量进而对海绵城市项目碳中和产生影响。

本文在核算过程中参考 IPCC 指南、地方或行业标准 and 文献研究报告等,选用了材料、能源、设备的碳排放因子取值,但不同来源的碳排放因子会由于地区或生产工艺等因素存在差异,对结果产生潜在的不确定性影响;同时,由于研究区具体数据获取较为困难,部分计算参数如海绵设施的结构设计参数、海绵城市项目年径流控制率等采用了规范或设计文件中的设计值,这可能无法反映实际的建设情况,具有一定的局限性。此外,在碳排放核算过程中还存在环境条件假设的不确定性以及设施老化的不确定性;而假设“海绵设施在全生命周期内的运行环境如降雨等条件保持不变或平稳状态,以碳减排效益的年值作为全生命周期的平均年值参考”也存在不确定性;随着运行时间的推移,海绵设施存在设施老化、性能衰减的现象,但在计算过程中对此进行了简化,并未准确量化其效益的逐年变化过程,这也会带来一部分不确定性。为了应对可能存在的数据不确定性和局限性,本文在收集数据和选用碳排放因子时遵循就近原则,选择尽可能反映研究区实际情况的数据来源和排放因子取值,同时对于存在多个来源的情况,选择更具权威性和可靠性的数据来源,如由当地政府部门发布的规范标准、数据报告等,以增强研究结果的可信度。

统计其他研究中海绵城市建设项目碳排放的计算结果如表 5 所示,其研究对象均为建筑小区类型的海绵城市项目,可以发现随着时间推移,各研究的碳排放核算结果值越大,这可能是由于随着海绵城市碳排放研究的不断深入,核算过程中考虑的碳排放来源愈加全面细致。与这些研究相比,本文在核算过程中考虑的生命周期阶段以及碳排放、碳汇来源相对更为全面,在材料用量、设备能耗等方面的计算相对更为细致,并且在计算实例中,项目区域海绵设施建设面积占比更大,所以计算得到的单位面积碳排放量相对较大。此外,由于在碳排放因子的选择及活动水平的估算上存在不确定性,不同研究的

碳排放核算结果会存在一定的差异,本文在核算过程中着重参考有关领域的技术标准或指南,在参考其他文献研究成果时保持“取大不取小”的原则,旨在突出海绵城市建设的碳排放水平以及城市低碳发展实践的重要性。

表 5 海绵城市建设项目碳排放计算结果
Table 5 Results from carbon emission for sponge city construction project

文献	年份	单位面积 碳排放量/ (t/hm ²)	单位面积 碳汇量/ (t/hm ²)	单位面积 净碳排放 量/(t/hm ²)
本文	2024	149.1	-332.7	-183.6
朱雨等 ^[21]	2023	94.3	-225.2	-130.8
郑涛 ^[19]	2021	69.9	-193.7	-123.8
Lin 等 ^[18]	2018	60.0	-113.5	-53.5

5 结 论

a. 绿色屋顶、雨水花园、植草沟、下沉式绿地全生命周期净碳排放为负值,单位面积碳减排效益均大于 40 kg/m²;透水铺装、透水道路的全生命周期净碳排放为正值。海绵设施碳排放主要来源于间接碳排放,绝大部分在规划建设阶段产生,材料生产是碳排放的主要贡献来源。各设施的降碳减排路径不同,绿地固碳贡献了绿地类型海绵设施约 60% 的碳汇量。

b. 海绵城市建设项目全生命周期碳排放水平与海绵设施的布设面积相关,当海绵设施布设面积占比较大时,项目碳排放水平较大,当具有碳减排效益的设施布设面积较大时,项目碳汇量较大。建筑小区类海绵城市项目具有显著的碳减排效益,全生命周期净碳排放值约为 -183.6 t/hm²,平均运行约 12.4 a 实现碳中和。当道路广场类项目布设具有碳减排效益设施与不具有碳减排效益设施面积之比为 0.48 时,有望在运行期内实现碳中和。

c. 海绵城市建设和运行过程中,间接碳排放以材料生产碳排放为主导,其次是由于设备能耗产生的碳排放;碳汇过程以绿地固碳的碳汇效益最显著,其次是通过雨水利用等方式产生的碳减排作用。未来可通过选用碳排放值相对较小或具有碳储存功效的材料如生物炭等,通过优化结构设计、减少材料使用量的方式,践行海绵城市绿色低碳建设。同时应着重考虑植被的碳汇作用及海绵设施的雨洪管理功能,在规划阶段合理布局绿地设施,在运行维护阶段适时维护,保持海绵设施的渗、滞、蓄、净、用、排功效,以更好发挥其碳减排效益。

参考文献:

[1] FRIEDLINGSTEIN P, O’ SULLIVAN M, JONES M W, et

- al. Global carbon budget 2023[J]. *Earth System Science Data*, 2023, 15(12):5301-5369.
- [2] ALLEN M R, FRAME D J, HUNTINGFORD C, et al. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne[J]. *Nature*, 2009, 458(7242):1163-1166.
- [3] LIU Jian, WANG Bin, CANE M A, et al. Divergent global precipitation changes induced by natural versus anthropogenic forcing[J]. *Nature*, 2013, 493(7434):656-659.
- [4] LIU Zhu. China's carbon emissions report 2016[R]. Cambridge: Harvard Belfer Center for Science and International Affairs, 2016.
- [5] LIU Zhu, GUAN Dabo, CRAWFORD-BROWN D, et al. A low-carbon road map for China[J]. *Nature*, 2013, 500(7461):143-145.
- [6] LIU Zhu, GUAN Dabo, MOORE S, et al. Climate policy: steps to China's carbon peak[J]. *Nature*, 2015, 522(7556):279-281.
- [7] MALLAPATY S. How China could be carbon neutral by mid-century[J]. *Nature*, 2020, 586(7830):482-483.
- [8] 章林伟. 海绵城市建设概论[J]. *给水排水*, 2015, 51(6):1-7. (ZHANG Linwei. Introduction to sponge city construction[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 51(6):1-7. (in Chinese))
- [9] YIN Dingkun, CHEN Ye, JIA Haifeng, et al. Sponge city practice in China: a review of construction, assessment, operational and maintenance[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280:124963.
- [10] 徐宗学, 陈浩, 任梅芳, 等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5):713-724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Research progress on flood disaster mechanism and risk assessment in Chinese cities[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5):713-724. (in Chinese))
- [11] 徐宗学, 程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础: 城市水文学研究进展[J]. *水利学报*, 2019, 50(1):53-61. (XU Zongxue, CHENG Tao. Theoretical foundation of urban water management and sponge city construction: progress in urban hydrology research[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1):53-61. (in Chinese))
- [12] 夏军, 石卫, 王强, 等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. *水资源保护*, 2017, 33(1):1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion on several hydrological issues in sponge city construction[J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(1):1-8. (in Chinese))
- [13] 张伟, 车伍. 海绵城市建设内涵与多视角解析[J]. *水资源保护*, 2016, 32(6):19-26. (ZHANG Wei, CHE Wu. Connotation and multi-perspective analysis of sponge city construction[J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(6):19-26. (in Chinese))
- [14] LIU Huan, JIA Y, NIU C. "Sponge city" concept helps solve China's urban water problems[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(14):473.
- [15] 马洁. 海绵城市建设典型措施的碳源解析和碳排放研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2019.
- [16] 张希. 城市雨水系统全生命周期碳排放核算方法及应用研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2024.
- [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] 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.
- [19] 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))
- [20] 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. Carbon emission accounting in the construction and operation of sponge city in a district of Beijing[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4):86-93. (in Chinese))
- [21] 朱雨, 邵薇薇, 杨志勇. 海绵设施全生命周期碳排放核算方法研究[J]. *水资源保护*, 2023, 39(6):32-38. (ZHU Yu, SHAO Weiwei, YANG Zhiyong. Research on carbon emission accounting methods for the life cycle of sponge facilities[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(6):32-38. (in Chinese))
- [22] 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.
- [23] SU Jinghui, LI Jiake, GAO Xujun, et al. Comprehensive analysis of waterlogging control and carbon emission reduction for optimal LID layout: a case study in campus[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(58):87802-87816.
- [24] 中国城镇供水排水协会组织. 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.
- [25] SPATARI S, YU Ziwen, MINTALTO F A. Life cycle implications of urban green infrastructure[J].

Environmental Pollution, 2011, 159(8):2174-2179.

-