

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.011

北京某片区海绵城市建设和运行中的碳排放核算研究

李俊奇^{1,2}, 张希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:为量化海绵城市建设和运行过程中的碳排放,分析碳排放的关键影响因素,以北京某100 km²片区为研究区,对其海绵城市建设和运行过程中的碳排放进行了估算,分析了海绵城市达标面积比例、径流总量控制率、压力流管网比例等控制指标与碳排放量的相关关系。研究结果表明:海绵城市建设阶段的碳排放主要集中在材料生产阶段,多数设施的材料隐含碳占建设阶段总碳排放量的80%以上,施工相关的碳排放相对较少;在相同雨水控制水平下,灰色雨水基础设施的碳排放高于绿色雨水基础设施;研究区在30 a全生命周期内建设阶段和运行阶段碳排放量(以CO₂计)分别为17.36万t和-16.71万t;海绵城市达标面积比例、年径流总量控制率、排水方式是影响海绵城市建设和运行过程中碳排放的关键因素,海绵城市达标面积比例和年径流总量控制率每提高1%,全生命周期碳排放量约分别减少0.19万t和0.25万t,压力流管网比例每减少1%,全生命周期碳排放量平均减少约249 t。

关键词:碳排放; 海绵城市; 雨水基础设施; 全生命周期; 北京

中图分类号: TU984.2; X196 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)04-0086-08

Study on carbon emission accounting in construction and operation of a sponge city in Beijing// LI Junqi^{1,2}, ZHANG Xi¹, 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. Collaborative Innovation Center for Energy Conservation & Emission Reduction and Sustainable Urban-Rural Development, Beijing 100044, China; 3. Research and Talent Training Base on Climate Change, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to quantify the carbon emissions during the construction and operation of sponge cities and analyze the key influencing factors of carbon emissions, a 100 km² area in Beijing was taken as the study area, estimates of carbon emissions from the construction and operation of its sponge city, the relationship between carbon emission and control indexes such as proportion of qualified area, control rate of total runoff and proportion of pressure flow pipe network in sponge city was analyzed. The results show that the carbon emission of sponge city is mainly concentrated in the material production stage, and the hidden carbon in the material of most facilities accounts for more than 80% of the total carbon emission in the construction stage, and the construction-related carbon emission is relatively small. Under the same stormwater control level, the carbon emission of grey stormwater infrastructure is higher than that of green stormwater infrastructure; During the 30-year life cycle of the study area, the carbon emissions during construction and operation stages (in terms of CO₂) were 173 600 t and -167 100 t, respectively. The key factors affecting carbon emission in the construction and operation of sponge cities are the proportion of qualified area, annual total runoff control rate and drainage mode, for every 1% increase in the proportion of the area up to the standard and in the control rate of annual total runoff, the carbon emissions in the whole life of the sponge city will be reduced by 1 900 t and 2 500 t respectively, and the proportion of the pressure flow pipe network will be reduced by 1%, carbon emissions during the whole life cycle were reduced by 249 t on average.

Key words: carbon emission; sponge city; stormwater infrastructure; whole life cycle; Beijing

基金项目:北京市自然科学基金重点项目(8191001)

作者简介:李俊奇(1967—),男,教授,博士,主要从事城市雨水控制与利用研究。E-mail:lijunqi@bucea.edu.cn

城市水系统作为重要的公共设施,其温室气体排放引起了社会的广泛关注,但主要集中在给水和污水系统^[1-7],对雨水系统的碳排放关注较少。海绵城市建设是提升城市韧性、增强气候适应能力的关键措施,在未来相当长一段时间内仍是城市建设的重要内容^[8-10]。研究海绵城市建设和运行过程中的碳排放,对正确认识雨水领域碳排放、探索雨水领域碳减排路径、服务“双碳”目标具有重要的学术价值和现实意义。

对于海绵城市的碳排放学术界已有大量研究,主要包括碳排放核算、碳汇及减排效益方面,但现有研究较多地集中在设施层面,如生物滞留池^[11]、绿色屋顶^[12-13]、雨水花园^[13-15]、透水铺装^[13,16]等。Flynn等^[11]量化了生物滞留池的碳汇效益;Getter等^[12]量化了绿色屋顶的碳汇效益;Kavehei等^[17]量化了绿化屋顶、雨水花园、生物滞留池、植被洼地和雨水塘等设施的碳足迹和固碳潜力;Rodríguez-Sinobas等^[18]分析了在不同气候情景中使用绿色设施的减排效益;贾玲玉^[19]从减污降碳和植物固碳的角度分析了绿色屋顶、渗透铺装等典型绿色措施的碳减排收益;陈碧宜^[13]利用全生命周期评价方法计算了雨水花园、绿色屋顶和透水路面的单位碳排放量;Moore等^[20]对8种常用雨水基础设施和3种雨水输送方式的碳足迹进行了计算和比较;Ian等^[16]比较了透水混凝土路面和传统材料路面的碳足迹;Xu等^[21]采用成本组合生命周期评价方法评价了灰色设施、绿色设施以及灰绿耦合基础设施系统的环境效益和经济效益;Spatari等^[22]以纽约市某社区为例量化分析了绿色设施的减排效益。此外,也有学者针对雨水基础设施在其他领域的碳减排收益进行了研究,如刘慧慧等^[23]研究了雨水回用系统、透水铺装、屋顶绿化等对建筑碳减排的作用,林莉贤等^[24]研究了雨水资源化、中水回用等技术在高速公路建设和运营中的节能减排收益。总体来看,现有研究普遍认为绿色基础设施较灰色设施具有较大的碳减排潜力。

在海绵城市设施碳排放核算的基础上,对区域尺度碳排放核算也有了一定的研究。例如:郑涛^[25]以某居住社区为例,核算了海绵城市改造所产生的碳排放;Lin等^[26]以上海某住宅小区为例,核算了海绵设施30a的碳排放和碳汇情况;Shao等^[27]以厦门市为例,定量分析了海绵城市建设对碳排放的影响。但这些研究侧重于海绵设施建设阶段的碳排放和绿色设施碳汇,对管网建设及雨水系统运行过程中的碳排放考虑不足。

在雨水系统碳排放的影响因素研究方面, Kim

等^[28]分析论证了低影响开发是雨水系统碳减排的关键因素;Liu等^[29]在城市尺度上评估了年降水量与减排收益之间的关系,结果表明,在以绿色基础设施为基础的城市排水系统中,温室气体减排收益随着降水量的增加而增强;李晨璐等^[30]提出了海绵城市雨水系统碳排放量化方法,并通过实例分析了海绵城市规划方案相对传统排水模式的碳减排效果,结果表明,相对于传统排水模式,海绵城市规划方案可使雨水系统碳排放减少3.5%~51.7%。这些研究有助于了解海绵城市建设与碳排放的关系,但对海绵城市建设中的一些关键指标,如海绵城市达标面积比例、年径流总量控制率、雨水输送方式等如何影响碳排放依然缺乏充分的讨论。

总体看来,现有研究已经量化了海绵城市建设中各种雨水基础设施的碳足迹及部分区域海绵城市建设过程中的碳排放,分析了海绵城市规划相对传统规划的减排效益,核算了不同设施组合下的碳排放水平,为海绵城市建设中的碳减排实践提供了重要的理论基础。但现有研究也存在一些不足:一是聚焦于雨水基础设施建设阶段,对海绵城市运行过程中的碳排放考虑不足,缺乏对雨水系统的全面考察;二是聚焦于设施和小区等较小尺度,海绵设施的组合较为单一,对城市等更大区域尺度上碳排放的讨论有待深入;三是与海绵城市建设实践有所脱节,缺乏海绵城市建设关键指标与碳排放的相关讨论。本文以北京市某海绵城市规划片区为研究区,提出了海绵城市建设和运行过程中的碳排放核算方法,量化分析了不同阶段的碳排放水平,并重点讨论了海绵城市建设和运行过程中碳排放的影响因素,对海绵城市规划建设中的海绵城市达标面积比例、年径流总量控制率、压力流管网比例3个关键指标与碳排放的相关关系进行了分析探讨。

1 研究区概况

北京市某海绵城市规划片区总体地势较为平坦,自西北向东南倾斜,面积约为100 km²,主要包括住宅用地、公共建筑用地、道路用地和公共绿地。其中,绿地面积占30%,主要为公共绿地和其他附属绿地;道路面积占25%,主要为居住区道路、地面停车场及交通干道;建筑部分占45%,主要包含住宅建筑和公共建筑两部分。根据片区用地类型和规模,参照《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》^[31]中各种下垫面雨量径流系数参考值,得到开发前的下垫面类型和雨量径流系数如表1所示,可计算得综合雨量径流系数为0.66。

表 1 研究区不同下垫面类型和雨量径流系数

Table 1 Different underlying surface types and rainfall-runoff coefficients in the study area

用地性质	下垫面类型	面积/km ²	雨量径流系数
道路	水泥混凝土或沥青混凝土路面及广场	25	0.90
建筑	硬瓦屋面、沥青屋面	45	0.87
绿地	绿地	30	0.15

研究区 2020 年降水量 560 mm,分流制排水系统约占 80%,压力流排水系统约占 20%,雨水管道总长约 278 km,以钢筋混凝土管道为主,包括小区排水管道和室外排水管道。雨水主干管主要收集其服务范围内各雨水干管和支管收集的雨水,管径范围为 0.8~2.2 m,水泵效率约 0.9,输水起止点高程差约为 8.0 m。研究区年径流总量控制率目标为 85%,对应设计降水量 33.6 mm,目前研究区内的海绵城市达标面积比例为 20%。

为实现源头减排、净化处理等设计目标,设置雨水花园、下沉式绿地、绿色屋顶、透水铺装等主要海绵城市设施,雨水花园和下沉式绿地的设计深度分别为 0.25 m 和 0.1 m,占地面积约分别为 80.64 万 m² 和 241.92 万 m²,达到了最小设计调蓄容积,二者面积占比约为 1:3;同时改造并建设了约 99.76 万 m² 透水铺装、40.03 万 m² 绿色屋顶,分别占海绵城市达标面积的 5% 和 2%。具体的海绵城市设施布设情况见图 1。

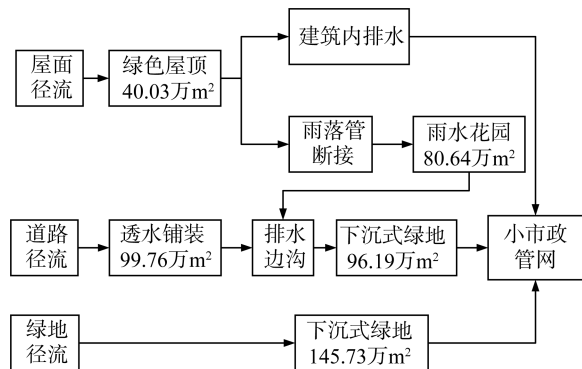


图 1 研究区海绵城市设施布设情况

Fig. 1 The layout of sponge city facilities in the study area

2 研究方法

2.1 碳排放核算边界

确定碳排放核算边界和识别碳源与碳汇是构建雨水系统碳排放核算模型的关键^[32-33],本文碳排放核算边界如图 2 所示。物理边界从雨水源头减排设施开始,经由转输过程设施,再到末端集中控制设施,最后排入自然水体,涵盖从雨水径流的产生到末端排放。时间边界采用全生命周期方法中的“从摇篮到大门”原则,包括建设和运行两个阶段,不包括

废物处置产生的下游排放。建设阶段的碳排放包括材料生产、材料运输和施工建造 3 个过程的碳排放;运行阶段的碳排放包括排水泵站碳排放和绿色设施碳汇。

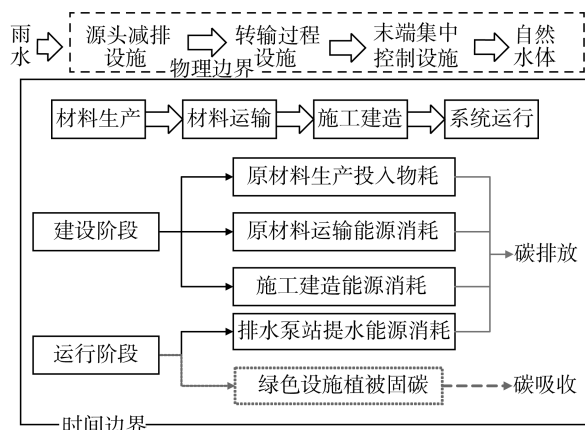


图 2 雨水系统碳排放核算边界

Fig. 2 Carbon emission accounting boundaries of stormwater system

2.2 核算方法与数据来源

碳排放核算框架参考政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel Climate Change, IPCC) 发布的《IPCC2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》。该指南给出了不同活动类型温室气体排放的基本公式,是现行温室气体排放相关研究的主要依据。本文重点对雨水系统全生命周期不同阶段的活动水平进行分析,同时对不同活动类型的碳排放因子进行率定。各阶段碳排放均以 CO₂ 计,碳汇以负数表示。

2.2.1 建设阶段

a. 材料生产隐含碳。材料生产过程中的隐含碳排放通过下式计算:

$$C_m = \sum_i F_i T_i \quad (1)$$

式中: C_m 为材料生产隐含碳排放, kg; T_i 为材料 i 的使用量, t; F_i 为材料 i 的碳排放因子, kg/t。材料使用量根据雨水基础设施的构造和材料规格进行估计,碳排放因子来源于相关文献^[30,34-35] 和 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》。

b. 材料运输碳排放。材料运输过程的碳排放通过下式计算:

$$C_t = \sum_i F_{i,y} M_i D_i \quad (2)$$

式中: C_t 为材料运输碳排放量, kg; $F_{i,y}$ 为材料 i 运输单位周转量的碳排放因子, kg/(t·km); M_i 为材料 i 的质量, t; D_i 为材料 i 从产地到施工现场的运输距离, km。假设采用载质量 18 t 的重型柴油货车进行

运输,其碳排放因子按 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》取为 0.129。混凝土、土壤、砂石等原材料可就近取材,运输距离以 40 km 计算;其他材料运输距离参考 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》中的默认取值,为 500 km。

c. 施工建造碳排放。施工建造过程的碳排放通过下式计算:

$$C_e = \sum_{hjk} T_{hjk} R_{hjk} F_k \tag{3}$$

式中: C_e 为施工建造碳排放量,kg; T_{hjk} 为第 h 种工程、第 j 种施工机械,采用第 k 种能源类型的台班数; R_j 为相应的单位台班的能源消耗量,kg/台班(以标准煤计); F_k 为第 k 种能源的碳排放因子,kg/kg(以标准煤计)。施工阶段各类工程的台班量根据 TY01-31-2015《房屋建筑与装饰工程消耗量定额》进行估算,不同能源的碳排放因子参考 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》选取。

2.2.2 运行阶段

a. 排水泵站碳排放。排水系统运行过程中的碳排放通过下式计算:

$$C_e = E_e F_e \tag{4}$$

式中: C_e 为雨水管网处理单位水量的碳排放,kg/m³; F_e 为电力碳排放因子,取生态环境部发布的《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施》(2021 年修订版)中的碳排放因子,为 0.5839 t/(MW·h); E_e 为使用电泵输送单位水量到自然水体产生的能耗,kW·h/m³。

b. 绿色设施碳汇量。绿色设施的碳汇量通过下式计算:

$$C_s = F_0 S_1 \tag{5}$$

式中: C_s 为绿色设施碳汇量,kg/a; F_0 为植被固碳因子,kg/(m²·a); S_1 为绿色设施占地面积,m²。雨水基础设施中的绿色设施以草本植物为主,本文参照郑涛^[25]的研究,取值为 1.6018。

3 结果与分析

3.1 典型雨水基础设施建设阶段碳排放强度

按照国家建筑标准设计图集《城市道路与开放空间低影响开发雨水设施》^[36],计算了典型雨水基

础设施的碳排放强度,结果见表 2。雨水基础设施建设过程中的碳排放主要集中在材料生产过程,大多数设施的材料生产隐含碳占建设阶段总碳排放量的 80% 以上。

为比较不同典型雨水基础设施在相同雨水控制水平下,即单位调蓄容积下的碳排放强度,雨水花园和下沉式绿地的有效调蓄容积通过式(6)计算,蓄水池、调蓄池等灰色设施的有效调蓄容积视为和其体积相同。透水铺装和绿色屋顶仅参与综合雨量径流系数的计算,其结构内的空隙容积不作为调蓄容积,在此不做比较;管道主要参与雨水的转输及排放,无调蓄容积,故也不进行比较。

$$V = hS_2 \tag{6}$$

式中: V 为雨水花园或下沉式绿地的有效调蓄容积,忽略渗透量,约等同于设施进水量体积; h 为雨水花园或下沉式绿地的调蓄高度,雨水花园取 0.25 m,下沉式绿地取 0.1 m; S_2 为雨水花园或下沉式绿地的占地面积。由此可以得出,建设阶段雨水花园和下沉式绿地单位调蓄容积下的碳排放强度分别为 10.96、1.31 kg/m³。在单位调蓄容积下,灰色设施的碳排放强度远高于绿色设施,调蓄池是雨水花园的 25.13~46.84 倍,是下沉式绿地的 210.29~391.85 倍;混凝土蓄水池是雨水花园的 47.94 倍,是下沉式绿地的 210.29~401.06 倍。

3.2 海绵城市建设阶段的碳排放

研究区海绵城市建设阶段的碳排放量计算结果见表 3。海绵城市建设阶段的总碳排放量为 17.36 万 t,单位面积碳排放量为 1.736 kg/m²。建设阶段碳排放主要集中在材料生产过程,占总碳排放量的 79.55%。建设阶段研究区所有雨水基础设施的碳排放量相差不大,分别占总排放量的 20% 左右。

3.3 海绵城市运行阶段的碳排放

海绵城市达标区域的年径流总量控制率为 85%,其他区域按下式估算其年径流总量控制率:

$$a = (1 - \varphi) \times 100\% \tag{7}$$

式中: a 为年径流总量控制率,%; φ 为综合雨量径流系数,取 0.66。故海绵城市未达标区域年径流总量控制率为 34%。

表 2 典型雨水基础设施建设阶段碳排放强度

Table 2 Carbon emission intensity during the construction stage of typical stormwater infrastructures

过程	混凝土蓄水池/ (kg/m ³)	PP 模块 调蓄池/(kg/m ³)	钢筋混凝土 调蓄池/(kg/m ³)	雨水花园/ (kg/m ²)	下沉式绿地/ (kg/m ²)	透水铺装 ^① / (kg/m ²)	绿色屋顶/ (kg/m ²)	钢筋混凝土 管道 ^② /(kg/m)
材料生产	506.64	261.62	493.94	35.11	10.61	17.68	77.87	126.70
材料运输	16.79	11.53	17.06	8.07	2.28	17.68	3.35	5.17
施工建造	1.97	2.33	2.32	0.66	0.21	0.19	4.37	0.49
合计	525.39	275.48	513.32	43.85	13.10	35.55	85.59	132.36

注:①适用于透水水泥混凝土铺装;②选用 1000 mm 管径。

表3 海绵城市建设阶段碳排放量计算结果

Table 3 Calculation results of carbon emission during the construction of sponge city

设施类型	碳排放量/万 t			
	材料生产	材料运输	施工建造	合计
雨水花园	2.83	0.65	0.05	3.53
下沉式绿地	2.57	0.55	0.05	3.17
透水铺装	1.77	1.77	0.02	3.56
绿色屋顶	3.12	0.13	0.17	3.42
雨水管道	3.52	0.14	0.02	3.68
合计	13.81	3.24	0.31	17.36

在径流总量控制部分,通过绿色设施源头控制的径流总量中的 10% 经设施净化后达标排放进入雨水管网;径流总量未控制的部分,其重力自流及泵站提升的水量根据区域内重力流和压力流管网4:1 的比例分配。

经计算,海绵城市运行阶段泵站运行每年碳排放量为 0.023 万 t,绿色雨水基础设施产生的碳汇量为 -0.58 万 t,故海绵城市运行阶段的年碳排放量为负值,约为 -0.557 万 t,30 a 全生命周期的碳排放量为 -16.71 万 t。由于植物碳汇量高于泵站能耗碳排放量,故运行阶段碳排放整体为负值,即减少了 16.71 万 t 碳排放量,抵消了研究区海绵城市建设阶段绝大部分的碳排放量。该区域径流系数较大,可渗透积蓄的雨水量不多,雨水泵站运行能耗较大。雨水系统要实现低碳减排,应首先增强源头对雨水的渗透、积蓄和调蓄功能,减少区域综合雨量径流系数和雨水径流量。

研究区域海绵城市 30 a 全生命周期中,建设阶段和运行阶段的总碳排放量分别为 17.36 万 t 和 -16.71 万 t,合计 30 a 全生命周期总碳排放量为 0.65 万 t。此碳排放估算结果展示了海绵城市建设和运行过程中建设碳排放量大、植物固碳作用显著的基本特征,然而核算结果仍具有一定的不确定性。一是由于资料的限制,相关雨水基础设施主要参照《城市道路与开放空间低影响开发雨水设施》^[36]等标准图集中的参数进行核算,与实际工程有一定的出入;二是碳排放因子主要来自相关文献,尽管对文献来源进行了筛选以及对文献中数据进行了率定,但与研究区实际情况相比仍有一定的误差。对雨水基础设施建设和运行数据进行跟踪监测、建立区域化的碳排放因子数据库,是未来提高碳排放核算精度的重要方向。

3.4 海绵城市达标面积比例对碳排放的影响

假设研究区 85% 的年径流总量控制率和 20% 的区域压力流管网比例不变,海绵城市建设过程中所选用的雨水基础设施种类及面积占比不变,计算得到海绵城市达标面积比例分别为 0%、20%、

50%、80%、100% 下的碳排放量如表 4 所示。

表4 不同海绵城市达标面积比例下的碳排放量

Table 4 Carbon emissions for different proportions that meet the sponge cities standards

海绵城市达标面积比例/%	碳排放量/万 t		
	建设阶段	运行阶段	全生命周期
0	3.68	0.94	4.62
20	17.36	-16.71	0.65
50	37.89	-42.98	-5.09
80	58.41	-69.22	-10.81
100	72.10	-86.71	-14.61

建设阶段的碳排放与海绵城市达标面积比例呈正相关关系,海绵城市达标面积比例从目前的 20% 提高至 100% 时,碳排放量从 17.36 万 t 提高至 72.10 万 t,增加了 3.15 倍。建设阶段碳排放量增加的主要原因是海绵城市达标面积的增加使得雨水基础设施规划面积更大,消耗建材更多。运行阶段的碳吸收量随海绵城市达标面积比例增大而增大,海绵城市达标面积比例从目前的 20% 提高至 100% 时,碳吸收量从 16.71 万 t 增加至 86.71 万 t,增加了 4.19 倍。运行阶段碳吸收量增大的主要原因一是绿色设施面积扩大导致的碳汇增加,二是雨水源头控制设施导致的雨水处理量减小。总体来看,海绵城市达标面积比例与碳排放量呈负相关关系。海绵城市达标面积比例每提高 1%,全生命周期碳排放量平均减少约 0.19 万 t。

海绵城市达标面积比例为 0 时即传统排水模式,该模式下全生命周期碳排放量为 4.62 万 t,而目前海绵城市全生命周期碳排放量为 0.65 万 t,降低了 85.93%。

3.5 年径流总量控制率对碳排放的影响

假设研究区 20% 的海绵城市达标面积比例、20% 的区域压力流管网比例、雨水管道长度等条件不变,计算得到研究区雨水年径流总量控制率分别为 70%、75%、80%、85% 下的碳排放量如表 5 所示。

表5 不同年径流总量控制率下的碳排放量

Table 5 Carbon emissions for different annual total runoff control rates

年径流总量控制率/%	碳排放量/万 t		
	建设阶段	运行阶段	全生命周期
70	14.53	-10.16	4.37
75	15.21	-11.74	3.47
80	16.11	-13.82	2.29
85	17.36	-16.71	0.65

建设阶段碳排放量与年径流总量控制率呈正相关关系,年径流总量控制率从 70% 提高至 85% 时,碳排放量从 14.53 万 t 提高至 17.36 万 t,增加了

19.48%。运行阶段的碳吸收量随年径流总量控制率增大而增大,年径流总量控制率从70%提高至85%时,碳吸收量从10.16万t增加至16.71万t。总体来看,年径流总量控制率与全生命周期碳排放量呈负相关关系。年径流总量控制率每提高1%,全生命周期碳排放量平均减少约0.25万t。

3.6 压力流管网比例对碳排放的影响

压力流管网比例的变化直接影响泵站提升的水量,从而直接影响运行阶段的泵站能耗,但不影响建设阶段的碳排放量。假设研究区年径流总量控制率85%不变,计算得到压力流管网比例分别为0%、20%、40%、60%、80%、100%时的碳排放量如表6所示。

表6 不同压力流管网比例下的碳排放量
Table 6 Carbon emissions for different pressure flow pipe network proportions

压力流管网比例/%	碳排放量/万t	
	泵站运行	全生命周期
0	0.20	0.14
20	0.69	0.65
40	1.19	1.14
60	1.69	1.63
80	2.19	2.13
100	2.69	2.63

注:泵站隐含碳未计算在内。

由表7可见,压力流管网比例对运行阶段碳排放量影响较大,压力流管网比例从目前的20%降低至0%时,泵站运行碳排放量从0.69万t降低至0.20万t,降低了71.01%。压力流管网比例每减少1%,全生命周期碳排放量平均减少约249t。

本文对影响海绵城市碳排放的关键性指标进行了初步讨论,由于海绵城市建设是一项系统工程,影响其碳排放的因素极其复杂,不同雨水基础设施间的耦合关系如何影响碳排放、雨水系统如何进行控涝减污降碳多目标协同、雨水系统如何进行减碳增汇等问题仍需要进一步深入研究。

4 结 论

a. 提出了海绵城市建设和运行过程中的碳排放核算方法,研究区不同阶段的碳排放水平计算结果表明,海绵城市建设过程中的碳排放主要集中在材料生产阶段,多数设施的材料隐含碳占比80%以上;灰色雨水基础设施碳排放水平远高于绿色雨水基础设施。研究区100km²面积在20%的海绵城市达标面积比例、85%的年径流总量控制率和20%的压力流管网比例条件下,30a全生命周期内海绵城市建设阶段碳排放量为17.36万t,运行阶段碳排放量为-16.71万t。

b. 海绵城市达标面积比例、年径流总量控制率、排水方式是影响海绵城市建设和运行过程中碳排放的关键因素。海绵城市达标面积比例、年径流总量控制率和压力流管网比例每提高1%,全生命周期碳排放量约分别平均减少0.19万t、0.25万t和增加249t。总体来看,年径流总量控制率对海绵城市碳排放影响最大,海绵城市达标面积比例次之,压力流管网比例最小。

c. 年径流总量控制率与海绵城市碳排放负相关,总体影响最大,应结合不同区域的雨水控制目标,制定适宜的年径流总量控制率目标。海绵城市达标面积比例与海绵城市碳排放负相关,影响较为显著,提高海绵城市达标面积比例有助于海绵城市碳减排,绿色雨水基础设施具有碳排放量小、碳汇功能显著、截留雨水多等多重功能,未来应加强海绵城市改造、提高海绵城市达标面积比例。压力流管网比例对海绵城市碳排放影响较小,但不容忽略,海绵城市建设应因地制宜,优先采用重力流排水模式,减少泵站运行相关排放。

参考文献:

[1] 郝晓地,赵梓丞,李季,等. 污水处理厂的能源与资源回收方式及其碳排放核算:以芬兰Kakolanmäki污水处理厂为例[J]. 环境工程学报,2021,15(9):2849-2857. (HAO Xiaodi, ZHAO Zicheng, LI Ji, et al. Analysis of energy recovery and carbon neutrality for the Kakolanmäki WWTP in Finland[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(9): 2849-2857. (in Chinese))

[2] 余娇,赵荣钦,肖连刚,等. 基于“水-能-碳”关联的城市污水处理系统碳排放研究[J]. 资源科学,2020,42(6):1052-1062. (YU Jiao, ZHAO Rongqin, XIAO Lian'gang, et al. Carbon emissions of urban wastewater treatment system based on the “water-energy-carbon” nexus[J]. Resources Science, 2020, 42(6): 1052-1062. (in Chinese))

[3] 宋宝木,秦华鹏,马共强. 污水处理厂运行阶段碳排放动态变化分析:以深圳某污水处理厂为例[J]. 环境科学与技术,2015,38(10):204-209. (SONG Baomu, QIN Huapeng, MA Gongqiang. Analysis for dynamic changes of wastewater treatment plant carbon emissions in operation phase: with a wastewater treatment plant in Shenzhen as an example[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(10): 204-209. (in Chinese))

[4] 张岳,葛铜岗,孙永利,等. 基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究[J]. 中国给水排水,2021,37(9):65-74. (ZHANG Yue, GE Tonggang, SUN Yongli, et al. Research on carbon emission model based on the whole process of urban sewage treatment[J]. China Water &

- Wastewater,2021,37(9):65-74. (in Chinese))
- [5] ZHANG Qunli, YANG Yixiong, ZHANG Xinchao, et al. Carbon neutral and techno-economic analysis for sewage treatment plants [J]. Environmental Technology & Innovation,2022,26:102302.
- [6] 赵联芳,谭少文,张鹏英,等. 人工湿地处理四环素类抗生素废水时有机碳源的影响[J]. 水资源保护,2016,32(6):70-74. (ZHAO Lianfang, TAN Shaowen, ZHANG Pengying, et al. Effects of different organic carbon sources on removal efficiency of tetracyclines from wastewater in constructed wetlands [J]. Water Resources Protection, 2016,32(6):70-74. (in Chinese))
- [7] 陈文龙,罗欢,吴琼,等. 基于“先泥后水”模式的重污染河道底泥碳氮硫同步去除技术研究[J]. 水资源保护,2023,39(3):16-23. (CHEN Wenlong, LUO Huan, WU Qiong, et al. A synchronous removal technology of carbon, nitrogen and sulfur pollutants from sediment in heavily polluted rivers based on “treating sediment before water” model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3):16-23. (in Chinese))
- [8] 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-angle analysis of sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6):19-26. (in Chinese))
- [9] 李俊奇,孙梦琪,李小静,等. 生物滞留设施对雨水径流热污染控制效果试验[J]. 水资源保护,2022,38(4):6-12. (LI Junqi, SUN Mengqi, LI Xiaojing, et al. Experimental study on thermal pollution control of stormwater runoff by bioretention [J]. Water Resources Protection,2022,38(4):6-12. (in Chinese))
- [10] 李俊奇,周金成,杨正,等. 合流制溢流控制指标与标准制定研究[J]. 水资源保护,2021,37(1):124-131. (LI Junqi, ZHOU Jincheng, YANG Zheng, et al. Study on control indicators and standard formulation of combined sewer overflow [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):124-131. (in Chinese))
- [11] FLYNN K M, TRAVER R G. Green infrastructure life cycle assessment: a bio-infiltration case study [J]. Ecological Engineering,2013,55:9-22.
- [12] GETTER K L, ROWE D B, ROBERTSON G P, et al. Carbon sequestration potential of extensive green roofs [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(19):7564-7570.
- [13] 陈碧宜. 基于气候变化的低影响开发设施径流量和碳排放控制研究:以广州市天河智慧城为例[D]. 广州:广州大学,2022.
- [14] CHARLESWORTH S M, BOOTH C A. Carbon sequestration and storage [M]. Hoboken: John Wiley & Sons,2016:193-204.
- [15] O’SULLIVAN A D, WICKE D, HENGEN T J, et al. Life cycle assessment modelling of stormwater treatment systems [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 149:236-244.
- [16] IAN C, JOHN K, 崔玉忠. 传统路面与透水混凝土路面砖路面隐含碳量的评价 [J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2012 (3): 32-35. (IAN C, JOHN K, CUI Yuzhong. Evaluation of the embodied carbon content of traditional pavement and permeable concrete pavement brick pavement [J]. Building Block and Block Building, 2012 (3): 32-35. (in Chinese))
- [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] RODRÍGUEZ-SINOBAS L, ZUBELZU S, PERALES-MOMPARLER S, et al. Techniques and criteria for sustainable urban stormwater management: the case study of Valdebebas (Madrid, Spain) [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172:402-416.
- [19] 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.
- [20] MOORE T L C, HUNT W F. Predicting the carbon footprint of urban stormwater infrastructure [J]. Ecological Engineering, 2013, 58:44-51.
- [21] 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.
- [22] SPATARI S, YU Ziwen, MONTALTO F A. Life cycle implications of urban green infrastructure [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(8/9):2174-2179.
- [23] 刘慧慧,陈启新,张高锋,等. 碳中和视角下绿色建筑关键性技术应用与研究 [J]. 绿色建筑, 2022, 14(2):28-31. (LIU Huihui, CHEN Qixin, ZHANG Gaofeng, et al. Green building challenging technology research and development under carbon neutralization policy [J]. Green Building, 2022, 14(2):28-31. (in Chinese))
- [24] 林莉贤,石凌. 低碳技术在杭新景高速公路(建德至白沙关段)建设和运营中的应用 [J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(3):349-352. (LIN Lixian, SHI Ling. Application of low-carbon technology in the construction and operation of Hangxinjing Expressway (Jiande to Baishaguan Section) [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2020, 16(3):349-352. (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] 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): su10113978
- [27] SHAO Weiwei, LIU Jiahong, YANG Zhiyong, et al. Carbon reduction effects of sponge city construction: a case study of the city of Xiamen [J]. Energy Procedia, 2018, 152: 1145-1151.
- [28] KIM D, PARK T, HYUNK, et al. Life cycle greenhouse-gas emissions from urban area with low impact development (LID) [J]. Advances in Environmental Research, 2013, 2(4): 279-290.
- [29] 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.
- [30] 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))
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南: 低影响开发雨水系统构建(试行) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [32] 尚海洋, 宋妮妮. 碳足迹与水足迹的概念、研究方法和应对政策比较[J]. 水资源保护, 2018, 34 (2): 15-21. (SHANG Haiyang, SONG Nini. Carbon footprint and water footprint: comparison of concepts, methods, and policy responses [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (2): 15-21. (in Chinese))
- [33] 黄显峰, 石志康, 金国裕, 等. 基于碳足迹的区域水资源优化配置模型[J]. 水资源保护, 2020, 36 (4): 47-51. (HUANG Xianfeng, SHI Zhikang, JIN Guoyu, et al. Optimal regional water resources allocation model based on carbon footprint [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (4): 47-51. (in Chinese))
- [34] 崔鹏. 建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [35] 李卓熹. 基于低冲击开发的暴雨径流控制及其碳排放: 以深圳光明新区为例 [D]. 北京: 北京大学, 2013.
- [36] 中国建筑标准设计研究院. 城市道路与开放空间低影响开发雨水基础设施 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2006.

(收稿日期: 2022-07-08 编辑: 熊水斌)

(上接第 85 页)

- [27] 徐建华, 岳文泽. 近 20 年来中国人口重心与经济重心的演变及其对比分析[J]. 地理科学, 2001, 21 (5): 385-389. (XU Jianhua, YUE Wenzhe. Evolvement and comparative analysis of the population center gravity and the economy gravity center in recent twenty years in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21 (5): 385-389. (in Chinese))
- [28] WONG D W S. Several fundamentals in implementing spatial statistics in GIS: using centrophagic measures as examples [J]. Geographic Information Sciences, 1999, 5 (2): 163-174.
- [29] 张凤林. 河北省地下水超采状况堪忧南水北调势在必行[J]. 中国水利, 2001 (10): 53-55. (ZHANG Fenglin. Serious over-abstraction of groundwater in Hebei Province calls on immediate action of south to north water transfer [J]. China Water Resources, 2001 (10): 53-55. (in Chinese))
- [30] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(2011) [R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2012.
- [31] 杨迪. 中国超 50 个城市发生地面沉降尚无统一监测网 [EB/OL]. (2011-11-16) [2022-06-12]. <https://www.chinanews.com.cn/gn/2011/11-16/3465178.shtml>.
- [32] 邓铭江. 新疆地下水资源开发利用现状及潜力分析[J]. 干旱区地理, 2009, 32 (5): 647-654. (DENG Mingjiang. Current situation and its potential analysis of exploration and utilization of groundwater resources of Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2009, 32 (5): 647-654. (in Chinese))
- [33] 郑昊安, 吴彬, 李绅. 近 20a 来哈密盆地地下水埋深变化趋势[J]. 人民黄河, 2013, 35 (12): 73-76. (ZHENG Haoan, WU Bin, LI Shen. Groundwater change tendency in Hami Basin in the past 20 years [J]. Yellow River, 2013, 35 (12): 73-76. (in Chinese))
- [34] 束龙仓, 徐丽丽, 袁亚杰, 等. 三江平原典型区地下水场变化及主要影响因素分析[J]. 水利学报, 2022, 53 (6): 644-654. (SHU Longcang, XU Lili, YUAN Yajie, et al. Analysis on variation of groundwater flow field and its main influencing factors in the typical district of Sanjiang Plain [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (6): 644-654. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-09-06 编辑: 施业)