

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.005

海绵设施全生命周期碳排放核算方法研究

朱 雨,邵薇薇,杨志勇

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:运用全生命周期评估方法分析了海绵城市建设中典型措施的碳足迹,考虑材料产出、运输、建设、运营、维修等主要环节,构建了典型海绵设施的碳排放核算体系。以我国第一批海绵城市建设试点河北省迁安市安顺家园小区为例,对典型海绵设施的全生命周期碳排放进行了核算,分析了碳排放的主要影响因素。结果表明:安顺家园小区海绵设施全生命周期内的直接碳排放量为 33.060 t,主要来自降解污染物产生的碳排放;间接碳排放量为 806.056 t,建造施工和拆卸阶段碳排放占比最大;碳汇量为 2 326.338 t,主要来自绿地固碳和雨水再利用;全生命周期 30a 内净碳排放量为 -1 487.220 t,预计该海绵改造方案有望在 6.6 a 实现碳中和;城市海绵建设对碳减排效果显著,可有效推进城市的绿色低碳发展,在未来海绵建设中应尽量选择低碳的建筑材料,同时采取合理的种植模式可以更好地发挥绿地的碳减排功效。

关键词:海绵城市;全生命周期;碳排放;碳足迹;碳减排

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0032-07

Carbon emission accounting for whole life cycle of sponge facilities//ZHU Yu, SHAO Weiwei, YANG Zhiyong (State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The carbon footprint of typical measures in sponge city construction was analyzed using the whole life cycle assessment method, considering the main links of material production, transportation, construction, operation, and maintenance. A carbon emission accounting system for typical sponge facilities was constructed. Taking Anshun Jiayuan Community, Qian'an City, as an example, the first batch of sponge city construction pilot projects in China, the whole life cycle carbon emissions of typical sponge facilities were calculated and the main influencing factors of carbon emissions were analyzed. The results show that the direct carbon emissions of sponge facilities throughout their whole lifecycle are 33.060 t, mainly from carbon emissions generated by the degradation of pollutants. The indirect carbon emissions are 806.056 t, with the highest proportion of carbon emissions during the construction and dismantling stages. The carbon sink amount is 2 326.338 t, mainly from green space carbon sequestration and rainwater reuse. The net carbon emissions within the entire life cycle of 30 years are -1 487.220 t, and it is expected that the sponge renovation plan will achieve carbon neutrality in 6.6 a. The construction of urban sponge has a significant effect on carbon reduction, which can effectively promote the green and low-carbon development of cities. In future sponge construction, low-carbon building materials should be chosen as much as possible, and reasonable planting patterns should be adopted to better leverage the carbon reduction benefits of green spaces.

Key words: sponge cities; whole life cycle; carbon emission; carbon footprint; carbon emission reduction

近年来,温室气体过量排放致使全球气候变暖,造成了气候变化、极端气候事件频发等环境问题,全球碳减排重要性日益凸显。碳减排可以有效减缓温

室效应,减少不可再生资源消耗,促进世界经济向绿色经济和可持续发展的形势转变。欧盟提出 2050 年实现碳中和的目标^[1-2],英国、日本等国计划 2050

基金项目:国家自然科学基金项目(51979285);北京市自然科学基金项目(8222036);水利部重大科技项目(SKS—2022126);中国水利水电科学研究院科研专项(SKI2022TS11,WR110145B0042023)

作者简介:朱雨(2000—),女,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhuy0119@163.com

通信作者:杨志勇(1979—),男,正高级工程师,博士,主要从事城市水文及气候变化对水资源影响研究。E-mail:yangzy@iwhr.com

年实现净零排放^[3],我国把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局,提出“2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”的重要目标。在这一目标的引领下,城市水系统作为重要的公共设施,其温室气体排放也引起了社会的广泛关注。海绵城市是我国新型城市化的主要方向,与绿色低碳城市建设相辅相成,是提升城市韧性、增强气候适应能力的关键措施^[4-5]。海绵设施可通过化石能源降耗减少碳排放,同时绿化系统也将增加碳汇,有效降低城市热岛强度,提升城市环境质量。可见,碳排放核算对于研究海绵城市的生态环境效益具有重要意义。

国内外学者针对城市海绵建设的碳排放问题已开展了部分探索性研究,目前较多集中在设施层面的碳排放,如绿色屋顶、生物滞留池等。例如:Flynn 等^[6]量化研究了生物滞留池的碳汇效益;贾玲玉^[7]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;Getter 等^[8]量化了绿色屋顶的碳汇效益;Kavehei 等^[9]分析了在不同气候情景中使用绿色设施的减排效益;Xu 等^[10]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。总体来看,现有研究普遍认为,绿色设施较灰色设施而言具有较大的碳减排潜力。在设施碳排放基础上,也有部分研究核算了区域尺度的碳排放。例如:李俊奇等^[11-12]以北京某片区为例,重点关注了海绵城市建设和运行过程中的碳排放;郑涛等^[13-14]以某居住社区为例,核算了海绵城市改造所产生的碳排放;Shao 等^[15]以厦门市为例,定量分析了海绵城市建设对碳排放的影响;邹一雄等^[16]对小型水电站生命周期碳足迹进行了量化分析研究。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。

当前,国内外在海绵设施运行和后期处理阶段内的碳排放、雨水利用及径流削减的碳汇等方面研究尚处于起步阶段,对海绵城市全生命周期的碳排放评估还未形成系统的研究成果,难以满足当前海绵城市建设、双碳战略的实践需求。本文基于生命周期评估理论,根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)及联合国气候变化框架公约的认识论与方法论,建立简易的碳排放的核算方法。河北省迁安市作为全国海绵城市建设首批试点,重点推进了小区海绵化改造,其中安顺家园小区有着较好的本底条件和相对完整的海绵建设体系,因此选择该区域作为典型区进行案例分析,量化分析不同阶段的碳排放水平,重点讨论海绵城市建设和运行过程

中碳排放的影响因素,以期海绵城市建设和运行过程中的碳排放核算和减排路径提供参考。

1 海绵设施碳排放核算框架

确定碳排放核算边界、识别碳源与碳汇是构建雨水系统碳排放核算框架的关键。在碳排放计算中,先确定排放源再确定碳排放因子。本文构建的碳排放核算框架参考 IPCC 发布的《IPCC 国家温室气体清单指南》(2019 修订版)^[17],重点对海绵设施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排放因子进行率定,以推求海绵设施生命周期内各环节的碳排放情况。海绵城市全生命周期包括材料产出、运输、建设、运行、维修、拆卸等全过程,全生命周期碳排放核算针对绿色屋顶、透水铺装、生物滞留设施、植草沟等主要设施碳排放和碳汇进行定量核算,从而得出海绵设施的碳排放量和碳汇量。海绵城市全生命周期的碳源包括直接碳源和间接碳源,直接碳源主要包括降解污染物(CO₂、CH₄、N₂O 等)过程中产生的碳排放,间接碳源来自全生命周期各阶段,碳汇来自海绵设施运行阶段。图 1 为海绵城市碳排放核算边界示意图。由图 1 可见,直接碳排放主要在海绵设施污染物降解过程中产生;间接碳排放是指材料生产、运输、施工、运行、维护和拆卸阶段相应的能耗、电耗和材料消耗的碳排放;运行阶段内海绵设施通过绿地固碳、雨水利用、雨水净化、径流削减、建筑节能等过程发挥其碳汇作用。

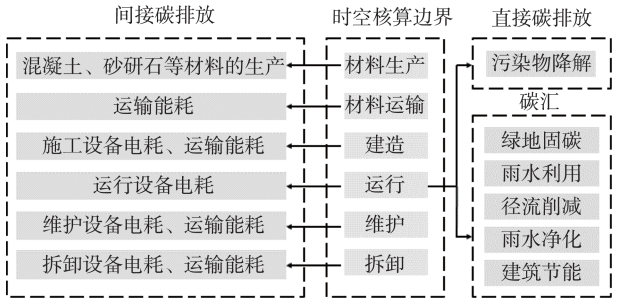


图 1 海绵城市碳排放核算边界示意图
Fig.1 Schematic diagram of carbon emission accounting boundary of sponge city

2 核算方法

2.1 核算思路

海绵设施的净碳排放量为各个阶段各能源所产生的直接碳排放量和间接碳排放量之和减去碳汇量:

$$P = (P_D + P_I) - P_C \quad (1)$$

式中: P 为净碳排放量; P_D 为直接碳排放; P_I 为间接

碳排放,为材料生产、运输和设备电耗所产生的碳排放量之和; P_c 为碳汇量,为绿地固碳、雨水利用、径流削减、建筑节能、雨水净化所产生的碳汇之和。所有碳排放量均以 CO_2 当量计。

2.2 直接碳排放核算

海绵设施的直接碳排放主要来源于运行阶段对污水中 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等污染物的降解及污泥处理过程。在降解污染物环节, CO_2 和 CH_4 来自有机物的降解和转化, N_2O 在脱氮过程产生^[18-20]。由于 IPCC 中只考虑生源性 CO_2 , 所以本文只考虑 CH_4 和 N_2O 作为直接碳排放的主要产物, 采用《IPCC 国家温室气体清单指南》(2019 修订版) 提到的有机物厌氧分解过程中的排放系数计算公式:

$$P_D = \sum_i B_i E_i \quad (2)$$

式中: B_i 为考虑厌氧分解过程中的排放系数、排放修正因子及全球增温趋势得到的第 i 种污染物的综合系数; E_i 为经过海绵设施处理后的第 i 种污染物排放量。

污泥选取填埋方式进行处理。污泥填埋过程中, 有机物在厌氧条件下通过微生物作用转换成 CH_4 , 其温室效应为 CO_2 的 25 倍。据测算, 每吨污泥填埋产生 CH_4 约 19.7 kg, 相当于 492.5 kg CO_2 当量。

2.3 间接碳排放核算

a. 材料生产的碳排放量。原材料生产过程碳排放量计算公式为

$$P_{IP} = \sum_i M_i \tau_{mi} \quad (3)$$

式中: P_{IP} 为材料生产碳排放量; M_i 为第 i 种材料的使用量; τ_{mi} 为第 i 种材料单位质量对应的碳排放因子。

b. 运输过程中的碳排放量。运输能耗取决于运输方式、距离和能源类型^[21], 计算公式为

$$P_{IT} = \sum_i D_i M_i \tau_{ui} \quad (4)$$

式中: P_{IT} 为运输阶段碳排放量; D_i 为第 i 种材料的运输距离; M_i 为第 i 种材料的使用量; τ_{ui} 为第 i 种材料的单位周转量的碳排放因子。

c. 设备电耗的碳排放量。建造、运行、维护阶段都会用到相关电耗设备^[22]。施工阶段各类工程的台班量根据《市政工程消耗量定额》进行估算, 不同能源的碳排放因子来自建筑碳排放计算标准^[23]。计算公式为

$$P_{IE} = \sum_{ijk} T_{ijk} R_{ijk} \tau_k \quad (5)$$

式中: P_{IE} 为设备电耗的碳排放量; T_{ijk} 为第 i 类工程第 j 种施工机械采用第 k 种能源类型的台班数; R_{ijk}

为相应的单位台班的能源消耗量; τ_k 为第 k 种能源的碳排放因子。

2.4 碳汇核算

对海绵设施的绿地固碳、雨水利用、径流削减、建筑节能和雨水净化 5 个方面进行碳汇核算分析。主要海绵设施类型的碳减排定性分析结果见表 1。

表 1 海绵设施碳减排定性分析结果

Table 1 Qualitative analysis result of carbon emission reduction in sponge facilities

项目	绿色屋顶	透水铺装	生物滞留设施	植草沟	调蓄池
绿地固碳	✓	×	✓	✓	×
雨水利用	✓	✓	✓	✓	✓
径流削减	✓	✓	✓	✓	✓
建筑节能	✓	×	×	×	×
雨水净化	✓	✓	✓	✓	✓

注: ✓ 表示海绵设施具备该项碳减排能力, × 表示不具备该项碳减排能力。

a. 绿地固碳碳汇。绿地资源对于调节全球碳循环和气候具有重要的作用^[24]。本文主要对广义上的绿地进行研究, 主要包括普通绿地、集中绿地等。针对绿地植物和土壤, 主要通过面积法来实现固碳碳汇的计算, 计算公式为

$$P_{CG} = \sum_i S_i \tau_{si} \quad (6)$$

式中: P_{CG} 为绿色设施的固碳量; S_i 为第 i 种植被类对应的绿地面积; τ_{si} 为第 i 种植被的固碳因子。

b. 雨水利用碳汇。海绵设施可从收集循环水量中产生碳汇, 计算公式为

$$P_{CR} = W(\tau_w - \tau_a) \quad (7)$$

式中: P_{CR} 为雨水利用产生的碳汇; W 为区域雨水利用量; τ_w 为自来水的碳排放因子; τ_a 为海绵设施处理和再分配单位雨水的碳排放因子。

c. 径流削减碳汇。在海绵设施运行后, 雨水径流将显著减小, 在此过程中市政管网运行负荷将会显著降低从而减少碳排放, 因此在计算时用减少的径流量换算成考虑强排等量雨水产生的碳排放量, 计算公式为

$$P_{CD} = \sum_i R_i \tau_{ri} \quad (8)$$

式中: P_{CD} 为径流量削减产生的碳汇; R_i 为第 i 种海绵设施削减的径流量; τ_{ri} 为城市雨水管网排放的碳排放因子。

d. 建筑节能碳汇。在建设海绵城市的过程中, 绿色屋顶带来了多数碳汇, 其不仅能够吸收 CO_2 , 同时有利于建筑能耗的降低^[25]。节能降耗对应的碳汇计算公式为

$$P_{CB} = \sum_i Q_i \tau_{qi} \quad (9)$$

式中: P_{CB} 为建筑节能对应的碳汇; Q_i 为第 i 种建筑

节省的能源; τ_{qi} 为第 i 种建筑提供相应能量的碳排放因子。

e. 雨水净化碳汇。海绵设施削减雨水中污染物可产生碳汇,计算公式为

$$P_{CP} = \sum_i N_i \tau_{ni} \tag{10}$$

式中: P_{CP} 为雨水净化产生的碳汇; N_i 为第 i 种海绵设施的污染物削减量; τ_{ni} 为第 i 种海绵设施削减等量污染物对应的碳排放因子。

3 案例分析

河北省迁安市坐落于滦河沿岸,2015 年作为县级市纳入全国海绵城市建设首批试点,近年来迁安市海绵建设取得显著成效。研究区概况如图 2 所示,参考《迁安市城市试点区建设系统方案 2020》和《迁安实例》,最终选取迁安市安顺家园小区作为典型区域进行碳排放核算。安顺家园小区建筑面积约为 12.01 万 m^2 ,生物滞留设施、透水铺装、渗水沟、植草沟的建设面积分别为 6 161、92、589、1 756 m^2 ,海绵设施设计参数如表 2 所示。据文献[11,13],假设海绵设施设计使用年限为 30a,结合海绵改造方案设计数据核算海绵城市全生命周期的碳排放量。



图 2 研究区概况

Fig. 2 Overview diagram of study area

3.1 直接碳排放

迁安市年平均降水量为 672.4 mm,雨水中化学需氧量(COD)和总氮(TN)的平均质量浓度分别为 26.0、2.42 mg/L,去除后的质量浓度分别为 10.4、0.97 mg/L,所对应的碳排放因子分别为 0.625、2.341 kg/kg。根据式(2)计算得到安顺家园小区

表 2 安顺家园小区海绵设施设计参数
Table 2 Design parameters of sponge facilities
in Anshun Jiayuan Community

海绵设施	面积/ m^2	参数名称	设计参数取值
生物滞留措施 1	2 464	表层厚度	200 mm
		土壤层厚度	400 mm
		储水层厚度	300 mm
		储水层孔隙率	0.4
		盲管直径	200 mm
生物滞留措施 2	3 697	表层厚度	500 mm
		土壤层厚度	400 mm
		储水层厚度	600 mm
		储水层孔隙率	0.4
		盲管直径	200 mm
渗水沟	589	表层储水深度	700 mm
		储水层厚度	800 mm
		储水层孔隙率	0.3
		盲管直径	0 mm
透水铺装	92	透水铺装厚度	60 mm
		粗砂石层	50 mm
		细砂石层	250 mm
		储水层孔隙率	0.3
		盲管直径	0 mm
植草沟	1 756	表层储水深度	100 mm

COD 和 TN 的碳排放量分别为524.91、183.38 kg/a,在设计使用年限为 30 a 的全生命周期内,该区域内的直接碳排放的总量为21.25 t。根据行业经验,1 万 t 生活污水产生污泥 5~8 t,安顺家园小区污水排放量约 1 230 t/a,污泥排放量约为0.8 t,则安顺家园小区处理污泥的碳排放量为393.75 kg/a。综上,迁安市安顺家园小区直接碳排放量为 1 102.04 kg/a,全生命周期内的碳排放量为 33.06 t。

3.2 间接碳排放

a. 材料生产的碳排放量。建材种类繁多且生产加工工艺差别较大,本文仅将建材大致分为混凝土、砂、砾石等 8 种类别,参考相关文献^[13,26]和标准^[23]确定碳排放因子。材料生产阶段的碳排放量见表 3,8 种建材合计碳排放量为 97 504 kg。

表 3 材料生产过程的碳排放量
Table 3 Carbon emissions during material production

建筑材料	使用量	碳排放因子	碳排放量/kg
混凝土	349 t	104 kg/t	36 296
砂	70.36 t	2.78 kg/t	196
砾石	3 142 t	2.0 kg/t	6 284
砖	103.3 t	0.2 kg/t	21
级配碎石	401 m^3	5.78 kg/ m^3	2 318
土工布	3.8 t	178.4 kg/t	678
盲管	4.3 t	8 677 kg/t	37 311
防渗膜	4.0 t	3 600 kg/t	14 400

b. 材料运输的碳排放量。本文计算时运输工具采用载重 18 t 的重型柴油货车,其碳排放因子为

0.176 kg/(t · km)。运距采用 2015 年全国公路运输的平均运距 184 km,据表 2 的材料和使用量可求得运输阶段碳排放量合计为 139.2 t。

c. 施工阶段的碳排放量。海绵设施建造涉及原煤、原油、天然气、一次电力及其他能源。以标准煤进行折算后可得每 1 MJ 的能耗可产生 0.103 8 kg 的碳排放。根据安顺家园小区海绵设施的建设面积,求得施工阶段碳排放量为 241.442 t。

d. 运行阶段的碳排放量。本阶段主要来自电耗设备产生的碳排放,碳排放因子结合文献和迁安市所属电网区域确定^[26]。运行阶段涉及打药机油耗、修剪油耗、排泥及供水等装置电耗,计算得出安顺家园小区海绵设施在运行阶段的电耗碳排放约为 2 607 kg/a,按 30 a 的使用周期计算为 78.21 t。

e. 维护阶段的碳排放量。海绵设施维护阶段主要包括植物的管理养护和设备的检修等间接产生的碳排放。植物的管理养护工作主要为人工活动,涉及的碳排放项目可忽略不计,故只考虑相关维护设备的电耗产生的碳排放^[14]。设施的老化是一个随时间递增的曲线,但由于其具体情况存在较大的不确定性,因此假设在 30 a 的生命周期内每年的维护措施相同,全生命周期内产生碳排放 32.7 t。各项海绵设施维护阶段的碳排放量见表 4,所有维护项目合计碳排放量为 1 090 kg/a。

表 4 维护阶段的碳排放量

Table 4 Carbon emissions during maintenance

维护项目	面积/ m ²	碳排放因子/ (kg/(a · m ²))	碳排放量/ (kg/a)
生物滞留设施	6 161	0.172	1 060
透水铺装	92	0.017	2
渗水沟	589	0.012	7
植草沟	1 756	0.012	21

f. 拆卸阶段的碳排放量。在对拆卸活动的碳排放量进行确定时,通常情况下主要依据建造施工阶段的 90% 进行核算^[27],该阶段碳排放量的核算结果为 217 t。

综上所述,在 30 a 全生命周期内间接碳排放量为 806.056 t,主要来自建造施工和拆卸阶段的排放量,分别占比 30 % 和 27 %。在安顺家园小区涉及的 4 种海绵设施中,单位面积碳排放量顺序由大到小为:生物滞留设施、透水铺装、渗水沟和植草沟。其中维护生物滞留设施产生的碳排放在整个维护阶段中占比最大,维护阶段碳排放与项目规格和碳排放因子均呈正相关。海绵设施的材料生产、运输、施工和拆卸阶段均为固态碳排放,即一次性碳排放,不会随时间增加而增加;在运行和维护阶段中产生的碳排放为动态碳排放,会随时间增加而增加。经计

算,全生命周期内固态碳排放和动态碳排放比值约为 5:1。在间接碳排放中,建造和拆除阶段产生的碳排放量相对较高。混凝土作为建筑材料的主要原料之一,使用量虽低于砂和砾石,但生产混凝土过程中的碳排放量明显高于其他建筑材料。盲管材料用量较少但碳排放量远高于其他生产材料,在材料生产中碳排放量仅次于混凝土。从材料本身的角度进行分析,可能是由于其涉及的混凝土、盲管等建筑材料本身含碳量较高,如盲管的原料含合成纤维、合成橡胶等碳纤维复合材料,含碳量较高。材料本身含碳量对碳排放存在显著影响,在未来海绵城市建设规划时要尽可能对建筑材料进行选择或优化以减少碳排放。

3.3 碳汇核算

迁安市安顺家园小区海绵城市改造项目中,由于未包含绿色屋顶等可产生建筑节能碳汇的设施,故建筑节能碳汇量为 0。本案例计算绿地固碳、雨水利用、径流削减、雨水净化所产生的碳汇。

a. 绿地固碳碳汇。城市绿地生态系统中,植物是重要碳库,结合安顺家园小区各绿地类型及其所占面积,查询出绿地固碳的碳排放因子为 1.601 8 kg/m²,海绵改造方案中绿地固碳碳汇量为 68.745 t/a。

b. 雨水利用碳汇。试点建设项目中有 8 个涉及雨水资源回用,收集的雨水经净化后用于补给景观水体及绿化灌溉等^[28]。按照迁安多年平均降雨数据计算,考虑降雨频次、蒸发量等主要因素^[29-30],经统计可得雨水回用设施每年可收集雨水约 2.67 万 m³,雨水利用总量约 0.86 万 m³。迁安多年平均降水量为 672.4 mm,试点区雨水回用率为 2.4%,可达到 2% 的回用率目标。安顺家园小区雨水利用的碳排放主要由雨水回用所抵消的碳排放和雨水处理及再分配组成的碳排放,其碳汇量为二者之差。安顺家园小区的雨水利用量和雨水回用量分别为 30 258 m³/a 和 25 719 m³/a,供应自来水和处理再分配雨水的碳排放因子分别为 1.07 kg/m³ 和 0.18 kg/m³。经过核算,碳汇量为 26 702 kg/a。

c. 径流削减碳汇。根据《海绵城市建设技术指南》中我国大陆地区年径流总量控制率分区图,迁安市位于Ⅲ区(75% ≤ α ≤ 85%),根据迁安 1983—2012 年降雨数据,选择年径流总量控制率为 75%。建设海绵设施后将减少下游雨水泵站的强排流量^[31],取水泵效率为 80%,水泵扬程 10 m,单位运行能耗经过核算后的结果为 0.034 kW · h,经计算,径流削减部分碳汇为 2 324 kg/a。

d. 雨水净化碳汇。海绵设施能有效调控雨水,改善雨水径流水质,削减的污染物主要为化学需氧

量及总氮,其碳排放系数为 3.1 kg/kg 和 2.8 kg/kg,可得到本部分碳汇为 13 007 kg/a。

由上可知,迁安安顺家园小区可实现每年 114.884 t 的碳汇,其中绿地固碳占比 59.8%,雨水利用占比 23.2%,径流削减占比 5.6%,雨水净化占比 11.3%。海绵设施中绿地固碳占比相对较高。小区的绿地包括普通绿地、下凹式绿地和生物滞留设施等,海绵绿地设施中由于植物的多样性和良好的配置格局,相较于绿地有更强的固碳释氧能力。在未来城市规划中应合理规划布局,因地制宜,采用低碳的种植模式和合理的植物配置,以更好地发挥海绵设施在城市生态系统中的减碳功效。

3.4 净碳排放量核算

经核算汇总,迁安市安顺家园小区海绵设施全生命周期 30 a 内的直接碳排放量、间接碳排放量及碳汇总量分别为 33.06 t、806.056 t 和 2 326.338 t,净碳排放量为 -1 487.22 t。其中数值的正负是以碳排放为基准的,碳排放为正,而碳汇与碳效益的本质为碳吸收,数值为负。安顺家园小区在此海绵结构下,预计 6.6 a 实现碳中和。

4 结 论

a. 海绵城市建设的净碳排放主要来源于直接碳排放、间接碳排放和碳汇。直接碳排放主要来自海绵设施降解污染物过程,间接碳排放包括材料生产、运输及设备能耗产生的碳排放,碳汇来自海绵设施中绿地固碳、雨水利用、削减径流等过程。

b. 海绵城市建设对碳减排效果显著。迁安市安顺家园小区 30 a 全生命周期内,直接碳排放量为 33.060 t,间接碳排放量为 806.056 t,碳汇总量为 2 326.338 t,其中全生命周期内净碳排放量为 -1 487.22 t,预计该海绵改造方案可在 6.6 a 实现碳中和。

c. 海绵城市建设中,间接碳排放以施工、拆卸阶段的碳排放占主导,其次是材料生产、运输和运行、维护阶段。碳汇环节中绿地固碳产生的效果最明显,其次是雨水利用、雨水净化和径流削减环节。海绵城市建设阶段中生产混凝土和盲管的碳排放明显高于其他建筑材料,未来可优化能源,选用碳含量低的材料,重视建设低碳绿色适应性建筑。绿地固碳是主要的碳汇来源,在未来的规划建设应尽可能保留利用现状绿地,合理规划植物布局,以更好发挥海绵设施的减碳功效。

参考文献:

[1] 田慧芳. 碳中和背景下中欧气候合作的潜力与挑战

[J]. 欧亚经济, 2022 (5): 78-101. (TIAN Huifang. The potential and challenges of China-EU climate cooperation in the context of carbon neutrality [J]. Russian Central Asian and East European, 2022 (5): 78-101. (in Chinese))

[2] ZHANG Y, JACKSON C, ZAHASKY C, et al. European carbon storage resource requirements of climate change mitigation targets [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 114: 103568.

[3] 刘军红, 汤祺. 日本碳中和战略及其前景 [J]. 现代国际关系, 2022 (4): 18-25. (LIU Junhong, TANG Qi. Japan's carbon neutrality strategy and its prospects [J]. Contemporary International Relations, 2022 (4): 18-25. (in Chinese))

[4] 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))

[5] 高玉琴, 陈佳慧, 王冬冬, 等. 海绵城市低影响开发措施综合效益评价体系及应用 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (3): 13-19. (GAO Yubin, CHEN Jiahui, WANG Dongdong, et al. Comprehensive benefits evaluation system and application of low impact development measures in sponge city [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (3): 13-19. (in Chinese))

[6] FLYNN K M, TRAVER R G. Green infrastructure life cycle assessment: a bio-infiltration case study [J]. Ecological Engineering, 2013, 55: 9-22.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] XU C, LIU Z, CHEN Z, 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. .

[11] 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, et al. A case of carbon emissions in the construction and operation of a sponge city in a region of Beijing [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (4): 86-93. (in Chinese))

- [12] 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))
- [13] 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))
- [14] 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))
- [15] SHAO W, LIU J, YANG Z, et al. Carbon reduction effects of sponge city construction: a case study of the city of Xiamen [J]. Energy Procedia, 2018, 152: 1145-1151.
- [16] 邹一雄,刘羽.小型水电站生命周期碳足迹研究[J].水电与新能源,2020,34(2):31-35. (ZOU Yixiong, LIU Yu. Life cycle carbon footprint of small hydropower stations [J]. Hydropower and New Energy, 2020, 34(2): 31-35. (in Chinese))
- [17] 联合国政府间气候变化专门委员会. Climate Change 2019: The Physical Science Basic [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- [18] 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))
- [19] 郝永飞,金光球,唐洪武,等.淮河干流典型污染物时空分布特性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):291-299. (HAO Yongfei, JIN Guangqiu, TANG Hongwu, et al. Spatial and temporal distribution analysis of typical contaminants in mainstream of Huaihe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 291-299. (in Chinese))
- [20] 张婷,高雅,李建柱,等.流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):42-49. (ZHANG Ting, GAO Ya, LI Jianzhu, et al. Distribution simulation of non point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 42-49. (in Chinese))
- [21] SPATARI S, YU Z, MONTALTO F A. Life cycle implications of urban green infrastructure [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(8/9): 2174-2179.
- [22] 高育欣,王军,徐芬莲,等.预拌混凝土绿色生产碳排放评估[J].混凝土,2011(1):110-112. (GAO Yuxin, WANG Jun, XU Fenlian, et al. Carbon emissions assessment of green production for ready-mix concrete [J]. Concrete, 2011(1): 110-112. (in Chinese))
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [24] 武文婷,夏国元,包志毅.杭州市城市绿地固碳释氧价值量评估[J].中国园林,2016,32(3):117-121. (WU Wenting, XIA Guoyuan, BAO Zhiyi. The assessment of the carbon fixation and oxygen release value of the urban green space in Hangzhou [J]. Chinese Landscape Architecture, 2016, 32(3): 117-121. (in Chinese))
- [25] KIM D, PARK T, HYUN K, 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.
- [26] 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.
- [27] 张孝存.绿色建筑结构体系碳排放计量方法与对比研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [28] 沈丹,梁尧钦,王芳,等.既有住区海绵设施与景观系统有机融合技术[J].给水排水,2021,57(8):99-105. (SHEN Dan, LIANG Yaoqin, WANG Fang, et al. Integration technology of sponge facilities and landscape system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(8): 99-105. (in Chinese))
- [29] ALJERF L. Advanced highly polluted rainwater treatment process [J]. Journal of Urban & Environmental Engineering, 2018, 12(1): 50-58.
- [30] 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,2018.
- [31] 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[D].广州:广州大学,2022.

(收稿日期:2023-02-06 编辑:王芳)

