

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.19.018

# 居住社区海绵改造过程的碳排放核算研究

郑 涛

(同济大学建筑设计研究院<集团>有限公司, 上海 200092)

**摘 要:** 社区海绵化改造是海绵城市建设在流域-城市-社区层级中最基础的环节,其碳排放的核算方法对于节能减排、实现碳中和具有重要的意义。以海绵城市建设过程为研究对象,针对其碳排放量底数不清、核算方法及减排途径有待深入研究的现状,以联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)指南为主要依据,基于生命周期评价法,构建了适用于居住社区海绵改造过程的碳排放核算方法,并以上海浦东新区潍坊街道社区为例,对海绵改造前后的碳排放量进行了具体核算,分析碳减排途径与效果。结果表明,海绵改造中直接碳排放主要来自于海绵设施降解污染物产生的碳排放;间接碳排放包括材料生产碳排放、运输碳排放和设备电耗能耗碳排放;碳汇则来自于海绵设施运行过程中的绿化固碳、雨水利用、径流削减、雨水净化、建筑节能等过程。全生命周期(30年)内的直接碳排放量(以CO<sub>2</sub>计)为152.9 t,间接碳排放量为714.5 t,碳汇总量为2 070 t,预期在6.5年有望达到碳中和。绿化固碳是海绵改造过程中主要的碳汇来源,应尽可能充分利用现状绿地,避免大改大建,以期在实现海绵设施控流减污的同时,综合考虑碳排效应。

**关键词:** 居住社区; 海绵改造; 碳排放; 生命周期评价

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)19-0112-08

## Estimation of Carbon Emission during Sponge City Reconstruction of Residential Community

ZHENG Tao

(Tongji Architectural Design <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Community sponge reconstruction is the most basic part of sponge city construction at the level of river basin, city and community, and its carbon emission estimation method is of great significance for energy conservation and carbon neutralization. During the sponge city construction process, there are problems of unclear carbon emission base and lack of estimation method and emission reduction way. A carbon emission estimation method suitable for sponge reconstruction of residential communities was established based on the guidelines of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) and the life cycle assessment (LCA) method. The carbon emission before and after sponge reconstruction was calculated in Weifang Street Community, Pudong New Area, Shanghai, and the carbon emission reduction effect was analyzed. The direct carbon emission during the sponge reconstruction city was mainly from the degradation process of pollutants in the sponge facilities. The indirect carbon emissions included the material production, transportation and power consumption of the equipments. The carbon sink was from greening carbon sequestration, rainwater utilization, runoff reduction, rainwater purification, building energy conservation and other processes during the operation of sponge facilities. In the whole life cycle (30 years), the direct carbon emission was 152.9 tons, the

indirect carbon emission was 714.5 tons, and the total carbon sink was 2 070 tons. It was expected to reach the carbon neutralization in 6.5 years. The greening carbon sequestration was the main source of carbon sink in the process of sponge reconstruction. Therefore, it is necessary to make full use of the current green space as far as possible to avoid large-scale reconstruction, so as to realize the flow control and pollution reduction of the sponge facilities and comprehensively consider the carbon emission effect.

**Key words:** residential community; sponge reconstruction; carbon emission; life circle assessment

居住用地在我国各城市建设用地中的占比普遍达到30%以上,远高于其他用地的占比,是海绵城市建设的重要载体。海绵城市设施不仅具有降低城市内涝风险、缓解城市热岛效应、提高城市环境质量等作用,还能直接或间接地降低城市能源消耗及材料生产过程中产生的碳排放。社区海绵化改造作为海绵城市建设不同层级中的重要一环,材料和能源的清洁及合理利用,挖掘潜在的碳汇效应,对碳净减排总量有相当大的影响<sup>[1-2]</sup>,而建立其碳排放的核算方法对节能减排、实现碳中和具有重要意义。

当前针对居住社区海绵改造过程的碳排放研究主要集中在海绵设施上。已有学者针对低影响开发(LID)、最佳管理措施(BMPs)和绿色基础设施(GI)等展开了部分碳排放核算的研究。Spatari等人<sup>[3]</sup>采用生命周期评价(LCA)和随机城市流域模型对透水路面的温室气体排放进行了核算;Kim等人<sup>[4]</sup>建立了一个综合模型来估计LID设施和综合管理实践(IMP)的温室气体排放以及5个LID设施(如蓄水池)的碳排放和碳汇;Moore等人<sup>[5]</sup>分析了风暴控制措施(SCMs)中的碳排放途径;O'Sullivan等人<sup>[6]</sup>基

于LCA建模方法研究了雨水花园在材料、建造、运输、运营和维护方面的环境影响。此外,在单个设施上,如绿色屋顶<sup>[7]</sup>、雨水花园<sup>[8]</sup>、植草沟<sup>[9]</sup>、人工湿地<sup>[10]</sup>等对碳汇或隔离CO<sub>2</sub>通量的研究较多。但目前大多数研究关注于单个海绵设施的碳排放,而对居住社区海绵城市建设碳排放全过程的系统性关注不够;大部分海绵设施碳排放核算的研究考虑了间接碳排放,对过程中的直接碳排放测算不够深入,对潜在的碳汇途径发掘可以进一步完善。鉴于此,笔者采用生命周期评价方法,结合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(UNFCCC)的方法学原则与理论,构建适用于居住社区海绵化改造过程的碳排放核算体系,以期为我国海绵城市建设中兼顾碳排效应提供参考。

## 1 居住社区海绵改造碳排放核算体系构建

### 1.1 核算边界

考虑海绵城市建设中的全过程,包括材料生产、材料运输、建造、运行、维护、拆卸和回收阶段(见图1),对海绵设施的直接碳排放、间接碳排放和碳汇进行全面核算。

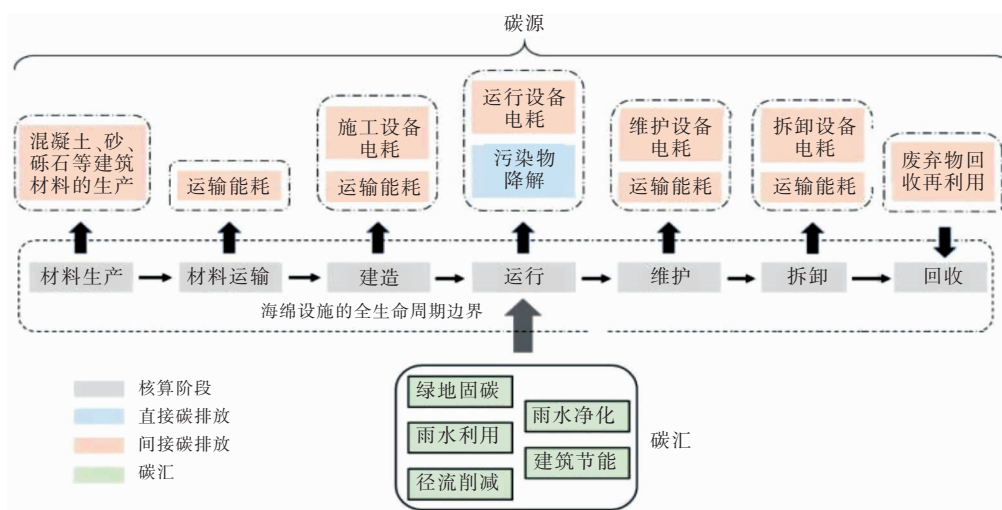


图1 居住社区海绵改造过程中的碳排放核算边界及内容

Fig.1 Boundary and content of carbon emission accounting for sponge reconstruction of residential community

直接碳排放主要是海绵设施降解污染物过程中产生的碳排放。间接碳排放为材料生产碳排放、运输阶段碳排放、建造及运行和拆卸阶段设备电耗碳排放以及回收阶段海绵设施废弃物回收再利用所产生的碳排放。碳汇来自于海绵设施运行过程中的绿地固碳、雨水利用、径流削减、雨水净化、建筑节能等过程。

## 1.2 核算方法选择

基于 IPCC 方法学原则,本研究采用排放因子的核算方法。海绵设施净碳排放为直接碳排放和间接碳排放之和再扣除其可产生的碳汇量,如式(1)所示。

$$TCE = (TCE_D + TCE_{ID}) - TCS \quad (1)$$

式中: TCE 为碳排放总量(净碳排放量), kg; TCE<sub>D</sub> 为直接碳排放总量, kg; TCE<sub>ID</sub> 为间接碳排放总量, kg; TCS 为碳汇总量, kg。以上指标均以 CO<sub>2</sub> 计,下同。

## 1.3 核算模型构建

### 1.3.1 直接碳排放核算

海绵设施的直接碳排放来自于运行阶段污染物降解产生的碳排放,包括 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 等。其中, CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 主要来自于有机物的降解和转化过程,而 N<sub>2</sub>O 则在脱氮环节产生。根据 IPCC 导则,直接排放的 CO<sub>2</sub> 是生源性的,因此直接碳排放的核算中只考虑 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的贡献<sup>[11]</sup>。由于目前对海绵设施运行中 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的实测和计算研究很少,本研究参照污水处理过程中 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的核算方法,对海绵设施运行过程中的直接碳排放进行核算。

根据 IPCC 在 2006 年发布的国家温室气体排放指南 (IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories) 第 5 卷第 6 章污水处理碳排放的计算导则,有机物厌氧分解过程中甲烷的排放系数采用式(2)计算。

$$EF_j = B_0 \times MCF_j \quad (2)$$

式中: B<sub>0</sub> 为有机物厌氧分解甲烷的理论排放系数,指南提出的设定值为 0.6 kgCH<sub>4</sub>/kgBOD<sub>5</sub> 或 0.25 kgCH<sub>4</sub>/kgCOD; MCF<sub>j</sub> 为不同厌氧环境甲烷排放的修正因子,当污水直接排放时, MCF<sub>j</sub> 为 0.1。鉴于海绵设施降解雨水径流中的污染物相当于污水直接排放并经过自然净化,因此上述公式应用于海绵设施的直接碳排放核算时, MCF<sub>j</sub> 取 0.1。考虑到

CH<sub>4</sub> 的全球增温趋势 (GWP<sub>CH<sub>4</sub></sub>) 为 25<sup>[10]</sup>, 则海绵设施中 CH<sub>4</sub> 排放的二氧化碳当量 CE<sub>CH<sub>4</sub></sub> 可以采用式(3)进行计算。

$$CE_{CH_4} = M_{COD} \times B_0 \times MCF_j \times GWP_{CH_4} = 0.625 M_{COD} \quad (3)$$

式中: M<sub>COD</sub> 为经过海绵设施处理后的 COD 排放量, kg/年。

海绵设施的 N<sub>2</sub>O 排放量参照 IPCC 中生活污水排放产生 N<sub>2</sub>O 的排放因子, 取为 0.005 kgN<sub>2</sub>O - N/kgN, 考虑 N<sub>2</sub>O 的全球增温趋势 (GWP<sub>N<sub>2</sub>O</sub>) 为 298<sup>[6]</sup>, 则海绵设施中 N<sub>2</sub>O 排放的 CO<sub>2</sub> 当量 CE<sub>N<sub>2</sub>O</sub> 可采用式(4)计算。

$$CE_{N_2O} = M_N \times EF_{N_2O} \times \frac{44}{28} \times GWP_{N_2O} = 2.341 M_N \quad (4)$$

式中: M<sub>N</sub> 为经过海绵设施净化后雨水径流中的含氮量, kg/年;  $\frac{44}{28}$  是每 kg 的 N<sub>2</sub>O - N 转换为每 kg 的 N 的换算系数。

### 1.3.2 间接碳排放核算

海绵设施的间接碳排放包括材料生产、运输、建造、运行、维护和拆卸全过程中的能耗、电耗和物耗所对应的碳排放, 见式(5)。

$$TCE_{ID} = CE_{MP} + CE_{MT} + CE_{ec} + CE_{ET} \quad (5)$$

式中: TCE<sub>ID</sub> 为间接碳排放总量, kg; CE<sub>MP</sub> 为材料生产的碳排放量, kg; CE<sub>MT</sub> 为运输过程的碳排放量, kg; CE<sub>ec</sub> 为设备电耗对应的碳排放量, kg; CE<sub>ET</sub> 为设备能耗所对应的碳排放量, kg。

#### ① 材料生产的碳排放量

材料生产中的碳排放量主要是海绵设施中所需的各种材料对应的碳排放量, 见式(6)。

$$CE_{MP} = \sum (M_M \times CE_{unit-M})_{i_M} \quad (6)$$

式中: CE<sub>MP</sub> 为材料生产中的碳排放量, kg; i<sub>M</sub> 为材料类别; M<sub>M</sub> 为所需的材料质量, kg; CE<sub>unit-M</sub> 为单位材料对应的碳排放量(碳排放因子), kg/kg。

#### ② 运输过程的碳排放量

运输过程中的运输能耗取决于运输方式、能源类型和运输距离。运输过程中的碳排放量可采用式(7)计算。

$$CE_{MT} = \sum (Dist \times M_{MT} \times CE_{unit-MT})_{i_{MT}} \quad (7)$$

式中: CE<sub>MT</sub> 为运输过程的碳排放量, kg; i<sub>MT</sub> 为某种运输方式; Dist 为运输距离, km; M<sub>MT</sub> 为所需要运

输的物料质量,kg; $CE_{unit-MT}$ 为单位质量物料单位运输距离的碳排放因子,kg/(kg·km)。

### ③ 设备电耗的碳排放量

建造、运行、维护和拆卸阶段中都会用到相关设备,设备电耗所对应的碳排放量可以采用式(8)进行计算。

$$CE_{ec} = \sum (P_i \times T_i \times EF_{ec} \times N)_i \quad (8)$$

式中: $i$ 为设备种类; $CE_{ec}$ 为设备电耗的碳排放量,kg; $P$ 为该设备的功率,kW; $T_i$ 为该设备的使用时长,h; $EF_{ec}$ 为电耗的碳排放因子,kg/(kW·h); $N$ 为该种设备使用的台数。

### ④ 回收阶段废弃物回收利用的碳排放量

海绵设施回收再利用过程中的碳排放量可按式(9)计算。

$$CE_{hs} = \sum (AD_i \times \eta_i \times EF_{hsi})_i \quad (9)$$

式中: $i$ 为材料种类; $AD_i$ 为回收材料的数量,t; $\eta_i$ 为该种回收材料的回收比例,%; $EF_{hsi}$ 为回收材料的碳排放因子,kg/t。

## 1.3.3 碳汇核算

海绵设施产生的碳汇主要来自于运行期间的绿地固碳、雨水利用、径流削减、雨水净化、建筑节能等过程中所产生的碳汇以及废弃物回收利用所产生的碳汇。

### ① 绿地固碳碳汇

本研究中绿地为广义上的绿地,包括雨水花园、下凹式绿地、普通绿地等。绿地中的植物和土壤均有固碳能力,其固碳碳汇参考相关文献采用种植类型-面积法计算,见式(10)。

$$CS_{GA-C} = \sum (S_{GA} \times CS_{unit-GA})_{i_s} \quad (10)$$

式中: $i_s$ 为海绵城市技术设施的类别; $S_{GA}$ 为绿地的面积,m<sup>2</sup>; $CS_{unit-GA}$ 为绿地的单位固碳速率,t/(hm<sup>2</sup>·年)。

### ② 雨水利用碳汇

雨水利用碳汇主要来自于海绵设施收集的可利用水量所带来的碳汇,具体计算见式(11)。

$$CS_{Reuse} = Q_r \times (EF_w - \beta) \quad (11)$$

式中: $CS_{Reuse}$ 为雨水利用过程中的碳汇,kg/年; $Q_r$ 为海绵设施所收集的雨水利用量,m<sup>3</sup>/年; $EF_w$ 为自来水的碳排放因子,kg/m<sup>3</sup>; $\beta$ 为海绵设施处理和再分配单位雨水的碳排放因子,kg/m<sup>3</sup>。

### ③ 径流削减碳汇

径流削减碳汇来源于海绵设施在运行期间削减

的雨水径流量,从而减小市政管网相应的运行负荷对应的碳排放。因此计算径流削减碳汇量时,可以先计算出设施削减的径流量,然后再根据强排等量雨水时排水系统排放的温室气体量反推出径流削减的碳汇量<sup>[3]</sup>,径流削减碳汇计算见式(12)。

$$CS_{Runoff} = \sum (M_{Runoff} \times CE_{Runoff} \times T)_{i_s} \quad (12)$$

式中: $CS_{Runoff}$ 为径流量削减所产生的碳汇,kg/年; $M_{Runoff}$ 为某种海绵设施所削减的径流量,m<sup>3</sup>/年; $CE_{Runoff}$ 为城市雨水管网排放相应雨水所对应的碳排放因子,kg/m<sup>3</sup>。

### ④ 建筑节能碳汇

海绵城市建设所带来的建筑节能碳汇主要来自于绿色屋顶。绿色屋顶中的植物光合作用对CO<sub>2</sub>有吸收固碳作用,且具有保温隔热作用,能有效降低建筑能耗。有研究表明<sup>[3,5]</sup>,绿色屋顶在两年后净固碳率基本为0。本研究对绿色屋顶的节能降耗所产生的碳汇进行计算,具体计算见式(13)。

$$CS_{Building-energy} = \sum (Q_{energy} \times CE_{Building-energy} \times T)_{i_s} \quad (13)$$

式中: $CS_{Building-energy}$ 为绿色屋顶带来的建筑节能对应的碳汇,kg/年; $Q_{energy}$ 为绿色屋顶所节省的能量,kJ; $CE_{Building-energy}$ 为提供相应能量的碳排放因子,kg/(kJ·年)。

### ⑤ 雨水净化碳汇

雨水净化碳汇主要是海绵设施对雨水中污染物的削减而产生的碳汇,具体计算方法见式(14)。

$$CS_{Rain-purify} = \sum (M_{Rain-purify} \times CE_{Rain-purify})_{i_s} \quad (14)$$

式中: $CS_{Rain-purify}$ 为雨水净化产生的碳汇,kg/年; $M_{Rain-purify}$ 为某种海绵设施的污染物削减量,m<sup>3</sup>/年; $CE_{Rain-purify}$ 为削减的等量污染物对应的碳排放因子,kg/(m<sup>3</sup>·年)。

## 2 案例核算

本研究选择上海浦东新区潍坊街道社区海绵改造案例(见图2),以30年为评价周期进行全生命周期碳排放核算。改造区域面积为91 938 m<sup>2</sup>,通过雨水花园、植草沟、透水铺装及PP模块水池等海绵城市建设技术的应用,达到径流总量控制率>75%的建设要求,工程量如下:雨水花园、植草沟、透水铺装、PP模块水池分别为2 449 m<sup>2</sup>、493 m<sup>2</sup>、4 966 m<sup>2</sup>、360 m<sup>3</sup>。



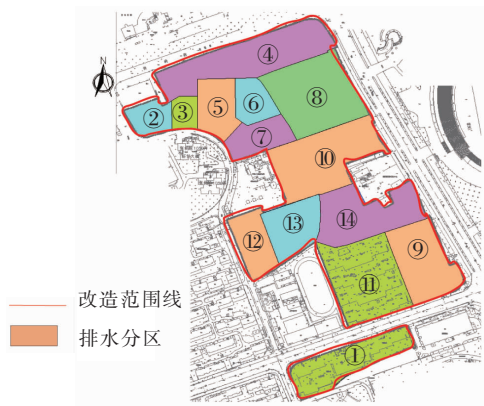


图 2 潍坊街道社区海绵改造分区

Fig. 2 Subcatchment distribution of sponge reconstruction in Weifang Street Community

### 2.1 直接碳排放

上海市年平均降雨量为 1 191 mm, 雨水中 COD 和 TN 的平均浓度分别为 147、12.5 mg/L, 经海绵设施处理后排放雨水的 COD 和 TN 浓度分别为 88.2 和 6.9 mg/L, 碳排放因子分别为 0.625、2.341 kg/kg, 根据式(3)和式(4)计算得到直接碳排放量分别为 3 942、1 154 kg/年。

### 2.2 间接碳排放

本案例暂不考虑回收阶段的废弃物再利用。

#### 2.2.1 材料生产的碳排放量

根据前述的计算方法, 结合该海绵改造方案的设计资料与已有的文献研究<sup>[12-16]</sup>, 核算海绵城市材料生产过程的碳排放量, 结果见表 1。

表 1 材料生产过程的碳排放量

Tab. 1 Carbon emission from material production process

建筑材料	使用量	碳排放因子	碳排放量/kg
混凝土	223.5 t	0.114 kg/kg	25 479
砂	40.2 t	2.796 kg/t	112
砾石	2 683.1 t	2.0 kg/t	5 366
砖	80.5 t	0.2 kg/t	16
级配碎石	134.1 m <sup>3</sup>	3.87 kg/m <sup>3</sup>	519
盲管	2.1 t	8 677 kg/t	18 115
防渗膜	4.4 t	3.6 kg/kg	15 957
土工布	3.3 t	178.4 kg/t	582
合计			66 146

注: 碳排放因子数据主要源于《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)、北京工业大学 Sinocenter database 以及 Huang 等<sup>[12]</sup>、高放<sup>[13]</sup>、王玉<sup>[14]</sup>的研究。

#### 2.2.2 材料运输的碳排放量

本研究考虑运输方式为柴油卡车, 运输能耗为

2.42 MJ/(t·km)。燃烧柴油的碳排放因子为 3.10 t/t, 柴油热值为 42 652 kJ/kg, 则碳排放因子为 0.176 kg/(t·km)。

考虑建筑材料产地与进货单位的不确定性, 本研究采用 2016 年国家统计局年鉴中我国货物平均运送距离 184 km 作为计算依据, 计算得到材料运输阶段的碳排放量见表 2。

表 2 材料运输阶段的碳排放量

Tab. 2 Carbon emission during material transportation

建筑材料	使用量/t	碳排放因子/(kg·t <sup>-1</sup> ·km <sup>-1</sup> )	碳排放量/t
混凝土	223.5	0.176	7.23
砂	40.2	0.176	1.30
砾石	2 683.1	0.176	86.84
砖	80.5	0.176	2.61
级配碎石	207.9	0.176	6.73
盲管	2.1	0.176	0.07
防渗膜	4.4	0.176	0.14
土工布	3.3	0.176	0.11
合计	3 245		105.03

#### 2.2.3 施工阶段的碳排放量

为便于统计和比较不同能源种类之间的能耗和碳排放量情况, 需要将不同能源折算成规定的统一单位, 见表 3。

表 3 不同能源的碳排放折算

Tab. 3 Carbon emission of different energy sources

项 目	原煤	原油	天然气	一次电力及其他能源
单位能耗/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	69.6	8.2	5.3	16.9
标准煤折算系数	—	1.428 6	1.33	0.123 03
1 MJ 折算量/kg	0.023 75	0.001 96	0.000 06	0.046 87
碳排放因子/(kg·kg <sup>-1</sup> )	2.416 8	3.068 1	2.202 7	0.859 2
1 MJ 碳排放量/kg	0.057 4	0.006 0	0.000 1	0.040 3

注: 我国把每 kg 含热量为 29 307 kJ 的煤定为标准煤; 碳排放因子数据源于上海科学技术委员会的《上海地区低碳建筑应用评价标准研究报告》。

在海绵设施建造过程中, 涉及到的机械设施、热量、照明等来自于原煤、原油、天然气、一次电力及其他能源, 由表 3 可得, 每 1 MJ 的能耗可以产生 0.103 8 kg 的碳排放量, 据此核算得到潍坊街道社区海绵改造项目中建造施工过程的总碳排放量, 如表 4 所示。

表 4 施工阶段的碳排放量

Tab. 4 Carbon emission during construction

项 目	面积/m <sup>2</sup>	单位面积施工 能耗/(MJ·m <sup>-2</sup> )	碳排放量/ kg
雨水花园	2 449	273 170	69 454
下凹式绿地	493	273 170	13 981
透水铺装	4 966	273 170	140 836
PP 模块	130	273 170	3 686
合计			227 956

2.2.4 运行阶段的碳排放量

运行阶段的碳排放主要来源于雨水调蓄模块的雨水排泥装置和雨水供水装置的运行电耗所产生的碳排放,见表 5。

表 5 运行阶段的碳排放量

Tab. 5 Carbon emissions during operation phase

项 目	使用功率/kW	使用时长/ (h·年 <sup>-1</sup> )	碳排放因子/ (kg·kW <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> )	碳排放量/ (kg·年 <sup>-1</sup> )
雨水排泥装置	1.1	480	0.811 2	428
雨水供水装置	5.5	480	0.811 2	2 142
合计				2 570

2.2.5 维护阶段的碳排放量

维护阶段需要机械设备,由相应的设备能耗可核算出碳排放量,见表 6。假设每年维护措施相同,则海绵设施全生命周期(30 年)内,维护阶段的碳排放总量为 33.2 t。

表 6 维护阶段的碳排放量

Tab. 6 Carbon emission during maintenance phase

建造项目	规格	碳排放因子 <sup>[15-16]</sup>	碳排放量/ (kg·年 <sup>-1</sup> )
雨水花园	2 449 m <sup>2</sup>	0.171 kg/(年·m <sup>2</sup> )	419
下凹式绿地、植草沟	493 m <sup>2</sup>	0.012 kg/(年·m <sup>2</sup> )	6
普通绿地	33 511 m <sup>2</sup>	0.012 kg/(年·m <sup>2</sup> )	402
透水铺装	4 966 m <sup>2</sup>	0.017 kg/(年·m <sup>2</sup> )	84
埋地调蓄池	360 m <sup>3</sup>	0.54 kg/(年·m <sup>3</sup> )	194
合计			1 105

2.2.6 拆卸阶段的碳排放量

建筑拆除过程的能耗可按施工能耗的 90% 估算<sup>[17]</sup>,相应的碳排放量亦可近似按 90% 估算。因此,假设本项目拆卸活动的碳排放量按照建造施工阶段的 90% 来考虑,则核算得到拆卸阶段的碳排放量为 205.2 t。

综上可知,在海绵设施全生命周期中,建造施工

和拆卸阶段的碳排放量最大,分别为 228.0、205.2 t,其次是材料运输、运行、材料生产阶段,分别为 105.0、77.1、66.1 t,维护阶段的碳排放量最小,为 33.2 t。间接碳排放中的固定碳排放量(即一次性产生的碳排放量)为 604.3 t,而动态排放量(即运行和维护阶段)总计 3 675 kg/年。海绵设施的材料生产、材料运输、建造施工、拆卸阶段的碳排放是一次性产生的,其碳排放总量不随着时间的增加而递增,而运行和维护阶段的碳排放总量会随着年份的增加而递增。

2.3 碳汇核算

潍坊街道社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,因而建筑节能碳汇量计为 0。

2.3.1 绿地固碳碳汇

根据潍坊街道海绵改造方案核算绿地固碳的碳汇量,见表 7。

表 7 绿地固碳碳汇量

Tab. 7 Carbon sequestration of green space

绿地类型	面积/ m <sup>2</sup>	碳排放因子/ (kg·m <sup>-2</sup> ) <sup>[18]</sup>	碳汇量/ (kg·年 <sup>-1</sup> )
雨水花园	2 449	2.225 5	5 450
植草沟	493	1.601 8	703
保留利用绿地	33 511	1.601 8	53 678
合计			59 831

2.3.2 雨水利用碳汇

雨水利用的碳排放主要由两部分组成,一部分为雨水处理和再分配的碳排放;另一部分为雨水回用所抵消的碳排放,其碳汇量等于雨水回用抵消的碳排放量减去雨水处理和再分配的碳排放量。本研究社区的雨水利用量为 17 280 m<sup>3</sup>,供应自来水的碳排放因子为 1.07 kg/m<sup>3</sup>,处理和再分配单位雨水的碳排放因子为 0.18 kg/m<sup>3</sup>,经核算,碳汇量为 15 379 kg/年。

2.3.3 径流削减碳汇

本项目中径流削减主要是由于海绵城市建设导致下游市政管网强排流量减少的碳汇。本项目面积为 91 938 m<sup>2</sup>,年径流总量控制率为 75%,计算得到径流削减量为 82 124 m<sup>3</sup>,区域所处系统为强排系统,海绵城市建设后下游雨水泵站强排流量减少,水泵扬程取 10 m,水泵效率为 80%,则单位运行能耗为 0.034 kW·h/m<sup>3</sup>,计算得到该部分碳汇为 3 150 kg/年。

### 2.3.4 雨水净化碳汇

海绵城市中削减的污染物主要为 COD,碳排放系数为  $3.1 \text{ kg/kg}^{[19]}$ ,可得到污染物削减的碳汇为  $19\,552 \text{ kg/年}$ 。

本项目海绵改造的碳汇总量为  $97\,912 \text{ kg/年}$ ,主要碳汇来源的占比如下:绿地固碳占  $61.1\%$ 、雨水利用占  $15.7\%$ 、径流削减占  $3.2\%$ 、雨水净化占  $20.0\%$ 。

### 2.4 净碳排放量

结合碳排放和碳汇效益,全生命周期内直接碳排放量为  $152.9 \text{ t}$ ,间接碳排放量为  $714.5 \text{ t}$ ,碳汇总量为  $2\,070 \text{ t}$ ,净碳排放量为  $-1\,202.6 \text{ t}$ ,预计该海绵改造方案在  $6.5$  年达到碳中和。

### 2.5 海绵改造前后碳减排总量对比

在潍坊街道社区海绵改造之前,碳核算的主要内容有直接碳排放和碳汇。在海绵改造前,COD 和 TN 的削减率较低,分别为  $28\%$  和  $30\%$ ,因此,海绵改造前的直接碳排放量为  $3\,249 \text{ kg/年}$ ;间接碳排放量主要为绿地养护以及降雨期间下游泵站提升等设备能耗,绿地养护的间接碳排放量为  $287.4 \text{ kg/年}$ ,下游泵站提升产生的间接碳排放量为  $3\,150 \text{ kg/年}$ ;碳汇包括绿地固碳和雨水净化碳汇,由此可得海绵改造前碳汇总量为  $52\,050 \text{ kg/年}$ 。因此,在海绵改造前,每年的碳效益为  $48\,363 \text{ kg}$ ,则在海绵设施的全生命周期内,总碳效益为  $1\,360.9 \text{ t}$ 。在海绵设施的全生命周期(30年)内,潍坊街道社区海绵改造前后对比如图3所示。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都是碳吸收,其数值为负。

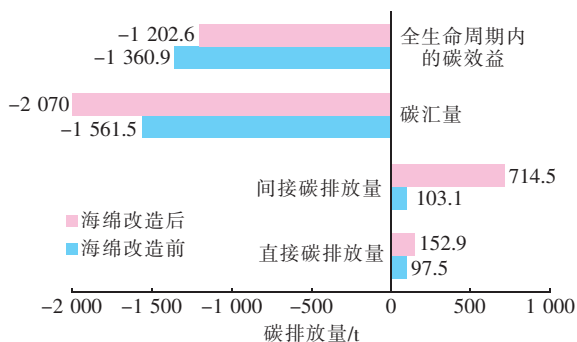


图3 海绵改造前后的全生命周期对比

Fig.3 Comparison of whole life cycle before and after sponge reconstruction

全生命周期内,潍坊街道社区在海绵改造情景下的净碳效益从改造前的  $1\,360.9 \text{ t}$  降低到  $1\,297.1$

$\text{t}$ ,这主要是因为全生命周期内对净碳效益起主导作用的为绿地固碳碳汇,而海绵改造前的材料生产、运输及拆卸等均未计碳排放量。

### 3 结论

① 结合 IPCC 及 UNFCCC 的方法学原则与理论,采用生命周期评价方法,从海绵城市建设全过程对海绵设施的直接碳排放、间接碳排放和碳汇进行全面分析,可以较为系统地构建起社区海绵设施建设过程中碳排放核算体系及具体的核算方法。

② 社区海绵城市建设的直接碳排放主要来自于海绵设施降解污染物产生的碳排放;间接碳排放包括材料生产、运输和设备耗能产生的碳排放;碳汇则来自于海绵设施中的植物固碳、雨水利用、径流削减、雨水净化、建筑节能等过程。

③ 在海绵城市建设中进行碳排放核算,可以综合考虑海绵设施的控流减污效果和碳排效应。某社区的案例分析表明,全生命周期内直接碳排放量为  $152.9 \text{ t}$ ,间接碳排放量为  $714.5 \text{ t}$ ,碳汇总量为  $2\,070 \text{ t}$ ,净碳排放量为  $-1\,202.6 \text{ t}$ ,有望在  $6.5$  年左右达到碳中和,产生较好的碳减排效益。

### 参考文献:

- [1] CHAPMAN A, FUJII H, MANAGI S. Key drivers for cooperation toward sustainable development and the management of  $\text{CO}_2$  emissions: comparative analysis of six Northeast Asian countries [J]. Sustainability, 2018, 10(1): 243–254.
- [2] YAN Q, WANG Y, BALZENTIS T, et al. Energy-related  $\text{CO}_2$  emission in China's provincial thermal electricity generation: driving factors and possibilities for abatement [J]. Energies, 2018, 11(5): 1096–1120.
- [3] SPATARI S, YU Z, MONTALTO F A. Life cycle implications of urban green infrastructure [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(8/9): 2174–2179.
- [4] 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.
- [5] MOORE T L C, HUNT W F. Predicting the carbon footprint of urban stormwater infrastructure [J]. Ecological Engineering, 2013, 58: 44–51.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] ANDREW R M, VESELY E T. Life-cycle energy and CO<sub>2</sub> analysis of stormwater treatment devices[J]. *Water Science and Technology*, 2008, 58(5):985-993.
- [9] BOUCHARD N R, OSMOND D L, WINSTON R J, *et al.* The capacity of roadside vegetated filter strips and swales to sequester carbon[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 54:227-232.
- [10] PICEK T, CIZKOVA H, DUSEK J. Greenhouse gas emissions from a constructed wetland—plants as important sources of carbon [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31(2):98-106.
- [11] SAIZ S, KENNEDY C, BASS B, *et al.* Comparative life cycle assessment of standard and green roofs [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(13):4312-4316.
- [12] HUANG B, ZHAO F, FISHMAN T, *et al.* Building material use and associated environmental impacts in China 2000-2015 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(23):14006-14014.
- [13] 高放. 基于LCA的沥青路面建设期能耗和排放量化分析研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2016.  
GAO Fang. Study on the Quantitative Analysis of Energy Consumption and Emission during the Period of Asphalt Pavement Construction Based on LCA[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016(in Chinese).
- [14] 王玉. 工业化预制装配建筑的全生命周期碳排放研究[D]. 南京:东南大学, 2016.  
WANG Yu. Whole Life Cycle Carbon Emissions Research of Industrialized Precast Construction [D]. Nanjing:Southeast University, 2016(in Chinese).
- [15] 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).
- [16] 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.  
MA Jie. Carbon Source Analysis and Carbon Emission Study of Typical Measures for Sponge City Construction [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2018(in Chinese).
- [17] 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.  
ZHANG Xiaocun. Carbon Emissions Measurement Methods and Comparative Studies on Green Building Structural System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014(in Chinese).
- [18] 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).
- [19] 张成. 重庆市城镇污水处理系统碳排放研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.  
ZHANG Cheng. Study on Carbon Emission of Urban Wastewater Treatment System in Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011(in Chinese).

作者简介:郑涛(1977-),女,四川双流人,博士,高级工程师,研究方向为水污染控制与资源化。

E-mail:taotaozheng@163.com

收稿日期:2021-04-26

修回日期:2021-06-01

(编辑:刘贵春)