

城镇水系统研究与应用

刘建, 张诗旋, 吴凌壹, 等. 海绵城市设施减碳模型构建及效益分析[J]. 净水技术, 2025, 44(10): 144–158.

LIU J, ZHANG S X, WU L Y, et al. Modeling of carbon reduction for sponge city facilities and analysis of the benefits[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(10): 144–158.

海绵城市设施减碳模型构建及效益分析

刘 建¹, 张诗旋², 吴凌壹^{1,*}, 陈卓婷²

(1. 深圳大学建设工程生态技术研究所, 广东深圳 518060; 2. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060)

摘 要 【目的】为了明确海绵城市设施的碳排放量及其减碳能力, 文章选择雨水花园、下沉式绿地、绿色屋顶、透水铺装作为研究对象, 构建了海绵城市设施减碳模型。【方法】文章采用精简型生命周期评价法(streamlined life cycle assessment, SLCA), 基于海绵城市设施的材料生产阶段、材料运输阶段、现场施工阶段和运营维护阶段的碳排放分析, 构建了海绵城市设施碳排放模型; 通过将海绵城市设施碳排放与传统设施的碳排放进行对比, 构建海绵城市设施减碳模型, 并根据该模型计算了海绵城市设施的减碳量。【结果】雨水花园、下沉式绿地、绿色屋顶、透水铺装在建设阶段和运营阶段产生的碳排放被运营维护阶段的雨水净化、植物碳汇及减少空调运行所产生的碳减排效益所抵消, 最终单位面积的碳排放量均为负值, 这表明 4 种海绵城市设施均具有减碳效益; 4 种海绵设施的单位面积碳排放量顺序为透水铺装>绿色屋顶>下沉式绿地>雨水花园, 单位面积减碳能力顺序为雨水花园>下沉式绿地>绿色屋顶>透水铺装。【结论】基于 SLCA 构建的海绵城市设施减碳模型能够计算海绵城市设施的碳排放量和减碳效益, 为优化海绵城市设施布置提供了有效的手段。

关键词 海绵城市 精简型生命周期评价(SLCA) 碳排放模型 减碳模型 减碳能力

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)10-0144-15

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.10.016

Modeling of Carbon Reduction for Sponge City Facilities and Analysis of the Benefits

LIU Jian¹, ZHANG Shixuan², WU Lingyi^{1,*}, CHEN Zhuoting²

(1. Ecological Technology Institute of Construction Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Department of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract [Objective] To clarify the carbon emissions of sponge city facilities and their carbon reduction capabilities, raingarden, sunken green space, green roof, and permeable pavement are selected as research objects, and a carbon reduction model for sponge city facilities is constructed. [Methods] This paper adopted the streamlined life cycle assessment (SLCA) method. Based on the carbon emission analysis of the material production, material transport, on site construction, and operation & maintenance stages of sponge city facilities, a sponge city facility was constructed using a carbon emission model. By comparing the carbon emissions of sponge city facilities with those of traditional facilities, a sponge city facility carbon reduction model was constructed. The carbon reduction benefits of sponge city facilities were calculated by the constructed model. [Results] The carbon emissions generated during the construction and operation stages of rain garden, sunken green space, green roof, and permeable pavement were offset by the carbon reduction benefits generated by rainwater purification, plant carbon sinks, and reduced air conditioning operation during the operation and maintenance stage. The final carbon emissions per unit area were all negative, indicating that all four sponge city facilities had carbon reduction benefits; The order of carbon emissions per unit area for the four sponge facilities was permeable

[收稿日期] 2023-11-01

[基金项目] 国家重点研发计划(2022YFE0105800)

[作者简介] 刘建(1965—), 男, 教授, 主要从事技术与创新管理、绿色建筑、无废城市、海绵城市等工作, E-mail: liujian@szu.edu.cn。

[通信作者] 吴凌壹, 男, 主要从事 BIM、海绵城市、智慧建造等工作, E-mail: szuly@szu.edu.cn。

pavement>green roof>sunken green space>raingarden. The order of carbon reduction capacity per unit area for sponge city facilities was raingarden>sunken green space>green roof>permeable pavement. [**Conclusion**] The carbon reduction model for sponge city facilities, constructed on the basis of SLCA, is capable of calculating the carbon emissions and carbon reduction benefits of sponge city facilities, providing an effective means for optimizing the layout of sponge city facilities.

Keywords sponge city streamlined life cycle assessment (SLCA) carbon emission model carbon reduction model carbon reduction capacity

近年来,随着碳排放量的不断增加,全球气候变暖愈演愈烈,极端天气频繁发生,城市洪涝灾害显现出日趋增多和严重的态势。据全球灾害数据平台统计,在 2011 年—2020 年,世界共发生了 1 416 次洪涝灾害事件。仅在 2021 年 8 月,中国就出现了 7 次大范围强降雨过程,并且与常年相比,降水量同期偏多 14%^[1]。为了减少洪涝灾害所产生的经济损失和人民的生命损失,2015 年 4 月以来,我国开始大力建设海绵城市,改善了城市环境。但海绵城市建设包含大量的基础设施和房屋建筑,建设过程中也会产生碳排放,因此,了解不同海绵城市设施的碳排放情况及其减碳效益成为海绵城市管理的重要一步。

2018 年以来,部分学者^[2]开始考虑将碳排放与海绵城市建设相结合进行研究。解超^[3]对透水铺装碳排放情况进行了计算分析,发现材料生产对环境影响最大,且雨水渗透和雨水净化所产生的减碳效益最为明显。刘洪涛等^[4]计算了透水路面与普通路面生命周期的碳排放情况,发现与普通路面相比,透水性路面会多产生一定的能耗和温室气体排放。黎小廷^[5]计算了绿色屋顶碳排放情况,研究包括绿色屋顶固碳、CO₂ 减排效益及建筑节能等方面,发现绿色屋顶的植物和基质有可观的固碳能力,是一个理想的碳汇系统,同时绿色屋顶通过植物与基质对大气中 CO₂ 进行吸收,每年减少 CO₂ 排放量为 17.25 kg/m²。Cai 等^[6]对生态屋顶的碳排放和固碳能力进行研究,研究发现,绿色屋顶每年可节省电量 11.53 kW·h/m²。通过对国内外相关研究发现,过往研究对象仅为单一的海绵城市设施且缺少对不同海绵城市设施减碳能力的系统性研究,甚至是区域性研究。

陈卓婷^[7]研究粤港澳大湾区 9 个不同城市建设海绵城市产生的减碳效果,其中,深圳市作为粤港澳大湾区海绵城市建设的典型案例,具有普遍适用性和较好的示范作用。因此,本文选择深圳市为研

究区域。海绵城市设施类型多样,但根据过往研究和项目使用海绵城市设施情况发现,绿色屋顶、下沉式绿地、雨水花园和透水铺装这 4 种海绵城市设施应用多,且调节塘、渗透塘等海绵城市设施与下沉式绿地建设情况和效果相似,雨水湿地的情况与雨水花园相似,故本文以常用的海绵城市设施绿色屋顶、雨水花园、透水铺装和下沉式绿地为研究对象,探讨海绵城市设施寿命周期内的碳排放情况及减碳效益,构建海绵城市设施碳排放模型和减碳模型,并利用 2020 年的数据资料,计算深圳市海绵城市设施的减碳规模和效益,为优化海绵城市建设提供理论支撑。

1 海绵城市设施碳排放模型构建

利用生命周期评价理论分析绿色屋顶、雨水花园、透水铺装和下沉式绿地的碳足迹和碳减排效益,构建海绵城市设施减碳模型。传统生命周期理论需对整个生命周期的所有输入和输出信息进行完整的时间和空间评估,但工程实践中往往因缺乏相关信息或者需要大量的工作及费用而难以实现。环境毒理学和化学学会(Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC)北美简化生命周期评估工作组在 1994 年研究采用了一种简化的生命周期评价法——精简型生命周期评价(SLCA)法,通过简化相关研究边界和数据需求等,提高研究效率。因此,本文采用 SLCA 法,主要涉及各类典型设施的建设施工和运营维护 2 个阶段,以构建海绵城市设施碳排放计算模型。根据其他研究者^[8]研究海绵城市设施碳排放考虑时间为 30 年,且根据相关规划,2060 年我国将实现碳中和,由于研究对象为深圳市,其应在全国范围内实现带头引领作用,故研究时间设定为 2020 年—2050 年,共 30 年时间。其中,施工阶段包括建造材料生产、建造材料运输和现场施工的 3 个部分。运营维护阶段的碳排放源主要包括植物灌溉、施肥、施药、修剪和清理运输过程中产生的碳排放。海绵城市设施碳排放模

型如式(1)。

$$E_{\text{海}} = E_{\text{生产}} + E_{\text{运输}} + E_{\text{施工}} + E_{\text{运营}} - E_{\text{雨水}} - E_{\text{植物}} - E_{\text{温度}} \quad (1)$$

其中: $E_{\text{海}}$ ——海绵城市设施单位面积的碳排放,kg;

$E_{\text{生产}}$ ——材料生产过程中产生的碳排放,kg;

$E_{\text{运输}}$ ——运输阶段产生的碳排放,kg;

$E_{\text{施工}}$ ——施工阶段产生的碳排放,kg;

$E_{\text{运营}}$ ——运营维护阶段产生的碳排放,kg;

$E_{\text{雨水}}$ ——减少雨水净化量所减少的碳排放,kg;

$E_{\text{植物}}$ ——植物固碳释氧量,kg;

$E_{\text{温度}}$ ——减少室内温度产生的减碳效果,kg。

1.1 材料生产阶段

对绿色屋顶、雨水花园、透水铺装和下沉式绿地分别所使用的建筑材料进行汇总,用排放因子法得出该阶段的碳排放量,其碳排放的来源共有3个部

分,分别是建筑材料开采和生产过程中所产生的碳排放、建筑材料开采和生产时所消耗的能源在能源生产阶段所产生的能耗与碳排放、建筑材料生产过程中原材料生命周期能耗与碳排放。每平米海绵城市设施材料生产阶段产生的碳排放可按式(2)进行计算。

$$E_{\text{生产}} = \sum_{i=1}^n h_i \times E_{\text{EF},i} \quad (2)$$

其中: $E_{\text{EF},i}$ ——生产单位深度的不同材料的碳排放,kg/m;

h_i ——海绵城市设施构造中的深度,m。

各类设施中管道布置、溢流口、排水沟等无法估计,且对碳排放量计算结果的影响有限,故本文不考虑此部分碳排放量产生的影响。

其中,绿色屋顶结构及用量指标采用我国深圳地区图集《海绵城市设计图集》(DB4403/T 24—2019)^[9]中相关标准计算,其建筑材料的排放因子和密度参考田彬彬等^[10]的研究结果和《建筑材料碳排放因子查询表》等数据资料。绿色屋顶材料生产阶段的碳排放量如表1所示。

表1 绿色屋顶材料生产的单位面积碳排放量
Tab. 1 Carbon Emissions per Unit Area of Green Roof Materials Production

类型	材料	用量 ^[9]	密度 ^[10]	排放因子	碳排放/kg
种植层	种植土(简单式)	0.9 m> $h_{\text{种}}$ >0.1 m	2.4 t/m ³	/	0
	种植土(花园式)	$h_{\text{种}}$ >0.9 m	2.4 t/m ³	/	0
过滤层	长纤维聚酯过滤布	1 m ²	0.2 kg/m ²	0.16 kg/m ²	0.16
排水层	聚氯乙烯(PVC)排蓄水板	0.025 m ³	1.45 t/m ³	1 765 kg/t	63.981
隔根层	高密度聚苯乙烯膜	0.001 m ²	0.03 t/m ³	1 248.29 kg/t	0.037
防水层	苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(SBS)	0.004 m ³	0.83 t/m ³	2.37 kg/m ²	0.009
	改性沥青防水卷材				
保温(隔热)层	聚苯乙烯泡沫板(EPS板)	0.15 m ³	0.025 t/m ³	7 860 kg/t	29.475
找坡(找平)层	水泥砂浆	0.02 m ³	1.221 t/m ³	740.6 kg/t	18.085

注: $h_{\text{种}}$ ——种植土的厚度,m。

下沉式绿地根据种植植物的不同,种植层的厚度有所改变,由于我国深圳地区没有此相关图集,其建造结构及用量采用《海绵城市建设技术指南(试行)》中的相关要求,其建筑材料的排放因子和密度参考顾道金等^[11]的研究结果。下沉式绿地种植层的材料与雨水花园的材料相同,均为种植土,材料生产阶段的碳排放为0。同样的雨水花园

和透水铺装结构及用量分别采用我国深圳地区图集《海绵城市设计图集》(DB4403/T 24—2019)相关标准计算,其建筑材料的排放因子和密度参考顾道金等^[11]的研究结果。雨水花园的碳排放量如表2所示。

透水铺装主要分为人行道透水铺装和停车场透水路面2种,二者的碳排放量分别如表3和表4所示。

表 2 单位面积雨水花园材料生产碳排放
Tab. 2 Carbon Emission per Unit Area of Rain Garden Materials Production

类型	材料	用量 ^[12]	密度 ^[11]	排放因子 ^[11]	碳排放/kg
覆盖层	树皮	0.10 m> $h_{\text{树}}$ >0.05 m	0.2 t/m ³	/	0
种植层	种植土(草本)	0.30 m> $h_{\text{种}}$ >0.10 m	2.4 t/m ³	/	0
	种植土(灌木)	0.60 m> $h_{\text{种}}$ >0.30 m	2.4 t/m ³	/	0
	种植土(乔木)	1 m> $h_{\text{种}}$ >0.60 m	2.4 t/m ³	/	0
过滤层	土工布	1 m ²	0.15 kg/m ²	0.16 kg/m ²	0.16
填料层	砂	1.20 m> $h_{\text{砂}}$ >0.2 m	1.6 t/m ³	15 kg/m ³	15 $h_{\text{砂}}$
排水层	砾石	0.30 m> $h_{\text{砾}}$ >0.20 m	2.66 t/m ³	6.05 kg/t	16.093 $h_{\text{砾}}$

注: $h_{\text{树}}$ ——树皮的厚度,m; $h_{\text{砂}}$ ——砂的厚度,m; $h_{\text{砾}}$ ——砾石的厚度,m。

表 3 单位面积人行道透水铺装材料生产碳排放
Tab. 3 Carbon Emission per Unit Area of Permeable Pavement Materials Production

类型	材料	用量 ^[9]	密度 ^[13]	排放因子 ^[13]	碳排放/kg
面层	生态砂基透水砖	0.06 m> $h_{\text{砖}}$ >0.08 m	5 t/m ³	320 kg/m ³	320 $h_{\text{砖}}$
找平层	砂	0.02 m> $h_{\text{砂}}$ >0.03 m	1.6 t/m ³	15 kg/m ³	15 $h_{\text{砂}}$
过滤层	土工布	1 m ²	0.15 kg/m ²	0.16 kg/m ²	0.16
承载层	透水水泥混凝土	0.15 m> $h_{\text{混}}$ >0.10 m	2.5 t/m ³	360 kg/m ³	360 $h_{\text{混}}$
砾石层	级配碎石	0.20 m> $h_{\text{碎}}$ >0.15 m	1.55 t/m ³	8.76 kg/m ³	8.760 $h_{\text{碎}}$

注: $h_{\text{砖}}$ ——生态砂基透水砖的厚度,m; $h_{\text{混}}$ ——透水水泥混凝土的厚度,m; $h_{\text{碎}}$ ——级配碎石的厚度,m。

表 4 单位面积停车场透水路面材料生产碳排放
Tab. 4 Carbon Emission per Unit Area of Permeable Parking Lot Materials Production

类型	材料	用量 ^[9]	密度 ^[13]	排放因子 ^[13]	碳排放/kg
面层	透水水泥混凝土	0.15 m> $h_{\text{混}}$ >0.08 m	2.5 t/m ³	360 kg/m ³	360 $h_{\text{混}}$
承载层	孔隙型水泥稳定碎石	0.15 m ³	2.5 t/m ³	360 kg/m ³	54
过滤层	土工布	1 m ²	0.15 kg/m ²	0.16 kg/m ²	0.16
砾石层	级配碎石	0.20 m> $h_{\text{碎}}$ >0.15 m	1.55 t/m ³	8.76 kg/m ³	8.760 $h_{\text{碎}}$

1.2 建造材料运输阶段

我国建造材料的运输工具已由燃油卡车逐渐向新能源货车转变,新能源货车已使用电力。根据本文对该地区调研结果,运输 20 t 货物 330 km 需耗电 200 kW·h。根据我国生命周期基础数据库的 (Chinese life cycle database, CLCD, <https://www.efootprint.net/login>) 数据结果;中国电网电力 1 kW·h 的 CO₂排放是 960 g 左右,百公里电耗 120 kW·h 的纯电驱动公交车的 CO₂排放为 943 g/km。本文假设所使用的种植土使用均为当地土壤,可视为不需要进行运输。根据计算,运输 1 t 货物的耗电量为 0.03 kW·h/km。建造材料运输过程中产生的碳排放可按式(3)计算。

$$E_{\text{运输}} = \frac{\sum k_i \times p_i}{20} \times 2l \times E_{\text{EF,运}} + Q_{\text{电}} \times E_{\text{EF,电}} \times 2l \tag{3}$$

其中: $E_{\text{EF,运}}$ ——运输过程的碳排放因子, kg/km,本文取值为 0.943 kg/km;
 $E_{\text{EF,电}}$ ——电力生产碳排放因子, kg/(kW·h),本文取值为 0.960 kg/(kW·h);
 $Q_{\text{电}}$ ——单位距离运输材料消耗的电量, kW·h;
 l ——运输距离,km;
 k_i ——海绵城市设施材料用量,m³;
 p_i ——使用材料的密度,kg/m³。

本文假设所有材料供应地相同。绿色屋顶建造材料运输过程中产生的碳排放量为 $[(0.010 + 0.364h_{\text{种}})l]\text{kg}$;下沉式绿地建造材料运输过程中产生的碳排放量为 $(0.364h_{\text{种}})l\text{kg}$;雨水花园建造材料运输过程中产生的碳排放量为 $[(0.243h_{\text{砂}} + 0.404h_{\text{砾}} + 0.364h_{\text{种}} + 0.03h_{\text{树}})l]\text{kg}$;人行道透水铺装建造材料运输过程中产生的碳排放量为 $[(0.759h_{\text{砖}} + 0.243h_{\text{砂}} + 0.380h_{\text{混}} + 0.235h_{\text{碎}})l]\text{kg}$ 。停车场透水路面建造材料运输过程中产生的碳排放量为 $[(0.380h_{\text{混}} + 0.057 + 0.235h_{\text{碎}})l]\text{kg}$ 。

1.3 现场施工阶段

海绵城市各类设施施工现场的机械设备的碳排放量,可以用机械设备各自的台班量乘以每台班的燃料使用量,再根据能源的碳排放因子计算出海绵城市设施的碳排放量,具体计算如式(4)。

$$E_{\text{施工}} = \sum_{i=1}^n E_{\text{RF},i} \times C_i \times N_i \quad (4)$$

其中: $E_{\text{RF},i}$ ——第*i*类能源的碳排放因子,
 $\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$;

C_i ——第*i*类设备的单耗情况, $\text{kW}\cdot\text{h}$;

N_i ——第*i*类设备的数量。

本文构建模型没有确切的工程预算资料和工程定额信息,假设建造现场施工所产生的碳排放与海绵城市设施深度有关,此次参考马洁^[12]对此方面的研究和阐述,并对数据进行处理,作为不同海绵城市设施建造现场施工产生的碳排放量。

(1) 绿色屋顶

0.38 m 厚的绿色屋顶建造现场施工过程产生的碳排放为 $6.993 \text{ kg}/\text{m}^2$,绿色屋顶的厚度为 $(h_{\text{种}} + 0.2)\text{m}$,则绿色屋顶建造现场施工产生的碳排放量为 $[18.403(h_{\text{种}} + 0.2)]\text{kg}$ 。

(2) 下沉式绿地

施工厚度约为2 m 的雨水花园,基础开挖产生的碳排放量为 $0.799 \text{ kg}/\text{m}^2$,则下沉式绿地基础开挖产生的碳排放量为 $[0.400(h_{\text{种}} + h_{\text{下凹}})]\text{kg}/\text{m}^2$,其中 $h_{\text{下凹}}$ 为下沉式绿地的下凹深度,单位为m。下沉式绿地建造现场施工产生的碳排放量为 $[(0.400h_{\text{种}} + 0.400h_{\text{下凹}} + 4.689)]\text{kg}$ 。

(3) 雨水花园

施工厚度约为2 m 的雨水花园产生的碳排放为 $7.498 \text{ kg}/\text{m}^2$,雨水花园深度为 $(h_{\text{下凹}} + h_{\text{树}} + h_{\text{种}} + h_{\text{砂}} +$

$h_{\text{砾}})\text{m}$,则对于深度不同的雨水花园,其在建造现场施工过程中产生的碳排放为 $[3.749(h_{\text{下凹}} + h_{\text{树}} + h_{\text{种}} + h_{\text{砂}} + h_{\text{砾}})]\text{kg}$ 。

(4) 透水铺装

结构深度为0.54 m 的透水铺装建造现场施工过程中产生的碳排放为 $9.319 \text{ kg}/\text{m}^2$,人行道透水铺装的开挖深度为 $(h_{\text{砖}} + h_{\text{砂}} + h_{\text{混}} + h_{\text{碎}})\text{m}$,停车场透水路面的开挖深度为 $(h_{\text{混}} + 0.15 + h_{\text{碎}})\text{m}$,故人行道透水铺装施工阶段产生的碳排放为 $[17.257(h_{\text{砖}} + h_{\text{砂}} + h_{\text{混}} + h_{\text{碎}})]\text{kg}/\text{m}^2$,停车场透水路面施工阶段产生的碳排放为 $[17.257(h_{\text{混}} + 0.15 + h_{\text{碎}})]\text{kg}/\text{m}^2$ 。

1.4 运营维护阶段

海绵城市设施的运营过程中所种植的植物会产生固碳释氧的作用,其对于雨水的滞留、下渗和净化作用会减少雨水净化产生的碳排放量,且对于空气温度的影响会减少空调的使用,从而降低能耗,故运营维护阶段产生的碳排放总量计算如式(5)。

$$E_{\text{运营}} = \sum_{i=1}^n Q_i \times E_{\text{EF},u} - E_{i,\text{植物}} - E_{i,\text{雨水}} - E_{i,\text{空调}} \quad (5)$$

其中: Q_i ——海绵城市设施*i*在运营维护过程中材料*u*或能源*u*的消耗量, m^3 ;

$E_{\text{EF},u}$ ——材料*u*或能源*u*的碳排放因子, $\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$;

$E_{i,\text{植物}}$ ——海绵城市设施*i*在运营过程中植物碳汇量, kg ;

$E_{i,\text{雨水}}$ ——海绵城市设施*i*减少雨水净化产生的碳排放量, kg ;

$E_{i,\text{空调}}$ ——海绵城市设施*i*减少空调使用的碳排放量, kg 。

本文对于绿色屋顶、雨水花园、下沉式绿地运营维护阶段的碳排放计算参数按马洁^[12]的研究确定。其中,绿色屋顶的碳排放量为 $0.085 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$;雨水花园的碳排放量为 $0.170 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$;下沉式绿地的碳排放量为 $0.170 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。透水铺装运营维护过程中仅需要进行一定的清扫,以保证其透水性能良好。在清扫过程中仅消耗人力,人力产生的碳排放量少,本文不进行考虑,故透水铺装运营维护阶段产生的碳排放量可视为0。

1.5 减碳效益

1.5.1 植物固碳释氧

由于绿色屋顶、雨水花园和下沉式绿地种植植物,而植物具有一定的吸收 CO_2 的作用。假设植物全年一半时间产生固碳效果。种植不同植物的碳汇为 a_i ,在无法确定所种植植物碳汇的具体情况时,可根据种植植物所属的类型来确定种植植物碳汇的值,或是寻找类似植物数值, a_i 取值参考文献^[13-17]数据。

根据规范中要求,绿色屋顶荷载有限,应种植生长高度不超过 50 cm 的植物。过去的研究^[13]表明,2 年后绿色屋顶的净固碳率几乎为 0,故绿色屋顶仅在前 2 年具有固碳能力。

1.5.2 减少雨水净化

本文计算选取 COD 含量为计算指标,COD 去除过程产生的碳排放来源主要为电力的消耗,根据相关研究,降低 10 mg/L 的 COD 浓度,其耗电量为 0.01 kW·h/kg^[18]。滞留在海绵城市设施内的 COD 将会进行生物反应,COD 氧化产生不可避免的 CO_2 排放到空气流出物中^[19]。海绵城市设施结构内部具有一定的孔隙率,可以为生物反应提供充足的氧气,由于缺乏 COD 在海绵城市设施中生物反应碳排放的具体数据,参考污水处理厂好氧处理的相关内容,就温室气体生产而言,完全好氧处理的碳排放为 2.4 kg CO_2 /(kg COD),高达 1.4 kg CO_2 /(kg COD),来自完全好氧过程的发电。故 COD 在海绵城市设施内发生生物反应将会产生 1.0 kg CO_2 /(kg COD)^[20]。

每平米流经绿色屋顶的雨水量如式(6)。

$$Q_{\text{绿色屋顶}} = S_{\text{屋顶}} \times q / (A_{\text{绿色屋顶}} \times a) \quad (6)$$

其中: $Q_{\text{绿色屋顶}}$ ——每平米流经绿色屋顶的雨水量, m^3 ;

$S_{\text{屋顶}}$ ——研究区域屋顶总面积, m^2 ;

q ——研究区域降雨量, m ;

a ——建筑类型系数,取 1~1.15;

$A_{\text{绿色屋顶}}$ ——研究区域绿色屋顶的总面积, m^2 。

每平米流经下沉式绿地、雨水花园的雨水量为式(7)。

$$Q_{\text{雨}} = (S_{\text{总}} \times q - Q_{\text{透水}} \times i_{\text{透水}} - Q_{\text{绿屋}} \times i_{\text{绿屋}}) /$$

$$(A_{\text{绿地}} + A_{\text{海绵}}) \quad (7)$$

其中: $Q_{\text{雨}}$ ——每平米流经下沉式绿地、雨水花园的雨水量, m^3 ;

$S_{\text{总}}$ ——研究区域面积, m^2 ;

$A_{\text{绿地}}$ ——研究区域地面传统绿地占地总面积, m^2 ;

$A_{\text{海绵}}$ ——研究区域地面下沉式绿地及雨水花园占地面积, m^2 ;

$Q_{\text{透水}}$ ——研究区域流经透水铺装雨水量, m^3 ;

$Q_{\text{绿屋}}$ ——研究区域流经绿色屋顶雨水量, m^3 ;

$i_{\text{绿屋}}$ ——绿色屋顶径流削减率;

$i_{\text{透水}}$ ——透水铺装径流削减率。

不同的海绵城市设施其雨水净化量不同。由于绿色屋顶地势高,地面雨水不会流入绿色屋顶,但流入普通屋顶的雨水再次流入绿色屋顶的情况受屋顶实际情况影响。本文假设绿色屋顶集雨面积为屋顶总面积的 $1/a$, $1 < \frac{S_{\text{屋顶}}}{a \times A_{\text{绿色屋顶}}} \leq 1.5$,一般

坡度的屋面雨水的汇水面积按屋面水平投影面积计算, a 一般为 1~1.15。雨水花园、下沉式绿地的集雨面积为整个海绵城市建设项目的占地面积。由于流经透水铺装的雨水仅为路面上的降雨,超出透水铺装雨水处理能力的雨水将会流入其余海绵城市设施中进行处理,透水铺装的集雨面积仅为透水铺装的面。

(1) 绿色屋顶

绿色屋顶对于雨水具有一定的滞留作用和净化作用,根据段晓涵^[21]的研究,绿色屋顶可减少 54% 的雨水径流和 36% 的 COD。故可视为简单式绿色屋顶可减少 54% 的雨水径流,花园式绿色屋顶每年可以减少屋顶径流 65%~85%,这里计算时取雨水径流中间值 70%^[20]。流经绿色屋顶的雨水可视为全部经绿色屋顶净化。普通屋顶经过废水弃流后,收集雨水的 COD 质量浓度基本可以控制在 100 mg/L 以内,雨水经处理后 COD 指标达到 30 mg/L 才可再利用^[21]。则简单式绿色屋顶减少 COD 处理产生的电量情况为 $[54 \times S_{\text{屋顶}} \times q / (A_{\text{绿色屋顶}} \times \alpha)] \text{ kW} \cdot \text{h} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$, COD 生物反应产生的 CO_2 量为 $[S_{\text{屋顶}} \times q / (A_{\text{绿色屋顶}} \times \alpha) \times 0.036] \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$,花园式绿色屋顶减少 COD

处理产生的电量情况为 $[59.8 \times S_{\text{屋顶}} \times q / (A_{\text{绿色屋顶}} \times \alpha)] \text{ kW} \cdot \text{h} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$, COD 生物反应产生的 CO_2 量为 $[S_{\text{屋顶}} \times q / (A_{\text{绿色屋顶}} \times \alpha) \times 0.036] \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

(2) 下沉式绿地

下沉式绿地对于雨水具有一定的滞留作用和净化作用,根据王国庆等^[22]的研究,下沉式绿地结构使用材料和种植的植被种类不同,其对于 COD 去除能力也不同,在不同建筑材料,下沉式绿地 COD 去除率为 32.00%~55.61%,取其中值 43.81%作为下沉式绿地 COD 去除率,在种植不同植物情况下, COD 去除率为 55.51%~66.78%,取其中值 61.14%为 COD 去除率。本文取 $(43.81\% + 61.14\%) / 2 = 52.48\%$ 为下沉式绿地的 COD 去除率。由于流入下沉式绿地的雨水包括海绵城市区域内其他部分的雨水和直接降雨,其他区域流入的雨水 COD 质量浓度情况难以统计,本文选取直接降雨和道路雨水中 COD 平均值作为流经下沉式绿地雨水的 COD 质量浓度。根据《建筑与小区雨水利用工程技术规范》(GB 50400—2006)^[23],天然雨水 COD 平均值为 43 mg/L,我国道路雨水径流中 COD 的平均质量浓度为 221.85 mg/L^[24],故流经下沉式绿地雨水中 COD 质量浓度为 132.425 mg/L。叶水根等^[25]研究表明,对于不同降雨强度的降雨,当下凹式绿地的汇水面积是其本身面积的 1 倍的时候其滞蓄率最高,约为 87.15%。根据赵庆俊等^[26]的研究,普通下沉绿地系统径流削减率为 23.14%~67.04%,本文取其中值 45.09%作为下沉绿地系统径流削减率。根据计算,下沉式绿地减少污染物去除所产生碳排放量为 $[(S_{\text{总}} \times q - Q_{\text{透水}} \times i_{\text{透水}} - Q_{\text{绿屋}} \times i_{\text{绿屋}}) / (A_{\text{绿地}} + A_{\text{海绵}}) \times 81.141] \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

(3) 雨水花园

雨水花园对于雨水具有一定的滞留作用和净化作用,根据相关研究,雨水花园对径流体积的削减率为 50%~97%^[27],本文取其中值 73.5%作为雨水花园径流削减率。具体 COD 削减率和径流削减率如表 5^[22-24,26-32]所示。根据夏先旭^[33]的研究,雨水花园的植物种类和种植基质等对 COD 的去除率都会有影响,且雨水花园的 COD 去除率为 79%~90%,由于种植不同种类的植物,雨水花园 COD 去除率缺乏相关数据,取其中值 84.5%作为种植不同植物雨水花园的 COD 去除率。与下沉式绿地相同,流入雨

水花园的雨水包括海绵城市区域内其他部分的雨水和直接降雨,其他区域流入的雨水 COD 质量浓度情况难以统计,故本文选取流经下沉式绿地雨水的 COD 作为流经雨水花园雨水的 COD 质量浓度为 132.425 mg/L。根据计算,流经雨水花园的雨水 COD 质量浓度均小于 30 mg/L,全部满足再利用的要求,故雨水花园减少污染物去除所产生碳排放量为 $[(S_{\text{总}} \times q - Q_{\text{透水}} \times i_{\text{透水}} - Q_{\text{绿屋}} \times i_{\text{绿屋}}) / (A_{\text{绿地}} + A_{\text{海绵}}) \times 98.226] \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

表 5 不同海绵城市设施 COD 削减率和径流削减率
Tab. 5 COD and Runoff Reduction Rates of Different Sponge City Facilities

设施	COD 削减率	径流削减率
雨水花园	84.5% ^[28]	73.5% ^[29]
下沉式绿地	52.48% ^[26]	45.09% ^[23-24]
花园式绿色屋顶	36% ^[23]	70% ^[22]
简单式绿色屋顶	36% ^[23]	54% ^[23]
人行道透水铺装	35.02% ^[27]	43% ^[30]
停车场透水路面	54.08% ^[32]	51.67% ^[31]

(4) 透水铺装

人行道透水铺装和停车场透水路面对于雨水具有一定的渗透能力,雨水进行渗透后不再需要净化,且透水铺装均具有 COD 去除能力,减少了雨水净化所需 COD 去除量。人行道透水铺装使用的为透水砖,停车场透水路面使用的材质为传统的透水混凝土。王俊岭等^[29]对 3 种不同的透水路面进行研究,结果显示不同材料的透水路面均能产生径流削减的效果,平均约减少 43% 的出流,本文计算时采用 43% 作为人行道透水铺装的径流削减率。Pratt 等^[31]的研究显示,透水砖的有效使用年限为 15~20 年,但杨海^[24]的研究显示,透水砖的使用年限更短,故本文选取 15 年为透水砖和透水混凝土的使用年限,在使用过程中透水性能均呈均匀下降。停车场透水路面使用的材质为传统的透水混凝土,不同的降雨情况,透水混凝土的径流削减率不同。对于降雨历时在 30、60、120 min 时,透水混凝土路面对径流总量的削减率分别达到了 60%、55%、40%^[29],本文取其平均值 51.67%,为停车场透水路面的径流削减率。使用透水砖进行透水铺装的路面, COD 去除能力较弱。根据 Drake 等^[28]的研究,使用碎石情况下,透水砖铺装 COD 去除率为 35.02%,且透水铺装使用时间越长,其透水性能越差。人行道透水铺

装使用的为透水砖,故可将 35.02%作为其 COD 去除率。根据刘蕊^[30]对透水混凝土 COD 去除率的研究结果,普通透水混凝土铺装系统对于 COD 的去除率在不同进水 COD 浓度下分别为 54.3%、54.45%、53.9%、53.96%和 53.8%,本文取其结果的平均值 54.08%作为停车场透水路面的 COD 去除率。具体 COD 削减率和径流削减率如表 5 所示。由于透水铺装的高程往往高于其他地面海绵城市设施,流入透水铺装的雨水为道路雨水。我国道路雨水径流中 COD 的平均质量浓度为 221.85 mg/L^[24]。由于流经透水铺装不具有蓄水功能,其在减少 COD 去除用电量部分仅包括其减少下渗雨水 COD 去除用电量。人行道透水铺装减少 COD 去除所减少的电量使用量为 $[q \times (94.275 - 5.890n)] \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,其中 n 为年份且 $n \leq 16$ 。停车场透水路面减少 COD 去除

所减少的电量使用量为 $[q \times (113.290 - 7.079n)] \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,其中 n 为年份且 $n \leq 16$ 。由于透水铺装中不含植物,不考虑 COD 发生生物反应产生的 CO_2 量。

1.5.3 减少空调运行

虽然下沉式绿地、雨水花园等海绵城市设施也具有降低空气温度的能力,但其能力远小于绿色屋顶,且影响不明显,故仅考虑绿色屋顶对于减少空调运行的能力。吴金顺^[32]关于绿色屋顶节能的相关研究表明,绿色屋顶可节省空调降温能耗约为 $6.307 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

1.6 海绵城市设施碳排放计算模型

对前文海绵城市设施各阶段计算结果进行汇总,得出海绵城市设施各阶段的碳排放计算情况如表 6 所示。

表 6 单位面积海绵城市设施碳排放
Tab. 6 Carbon Emission per Unit Area of Sponge City Facilities

类型	建设施工阶段			运营维护阶段			
	材料生产阶段/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	建造材料运输/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	建造现场施工/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	碳排放/ [$\text{kg} \cdot$ ($\text{m}^2 \cdot \text{a}$) $^{-1}$]	植物碳汇/ [$\text{kg} \cdot$ ($\text{m}^2 \cdot \text{a}$) $^{-1}$]	雨水净化/ [$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]	空调运行/ [$\text{kg} \cdot$ ($\text{m}^2 \cdot \text{a}$) $^{-1}$]
简单式绿色屋顶(0.9 m > $h_{\text{种}} > 0.1 \text{ m}$)	111.747	0.01 <i>l</i> + 0.364 <i>h</i> _种 <i>l</i>	18.403(<i>h</i> _种 + 0.2)	0.085	<i>a_i</i>	$S_{\text{屋顶}} \times q / (A_{\text{绿色屋顶}} \times a) \times 51.804$	6.054
花园式绿色屋顶(<i>h</i> _种 > 0.9 m)	111.747	0.01 <i>l</i> + 0.364 <i>h</i> _种 <i>l</i>	18.403(<i>h</i> _种 + 0.2)	0.085	<i>a_i</i>	$S_{\text{屋顶}} \times q / (A_{\text{绿色屋顶}} \times a) \times 57.302$	6.054
下沉式绿地	0	0.364 <i>h</i> _种 <i>l</i>	0.400 <i>h</i> _种 + 0.400 <i>h</i> _{下凹} + 4.689	0.170	<i>a_i</i>	$(S_{\text{总}} \times q - Q_{\text{透水}} \times i_{\text{透水}} - Q_{\text{绿屋}} \times i_{\text{绿屋}}) / (A_{\text{绿地}} + A_{\text{海绵}}) \times 81.141$	0
雨水花园	0.16 + 15 <i>h</i> _砂 + 16.093 <i>h</i> _砾	(0.243 <i>h</i> _砂 + 0.404 <i>h</i> _砾 + 0.364 <i>h</i> _种 + 0.03 <i>h</i> _树) <i>l</i>	3.749(<i>h</i> _{下凹} + <i>h</i> _种 + <i>h</i> _树 + <i>h</i> _砂 + <i>h</i> _砾)	0.170	<i>a_i</i>	$(S_{\text{总}} \times q - Q_{\text{透水}} \times i_{\text{透水}} - Q_{\text{绿屋}} \times i_{\text{绿屋}}) / (A_{\text{绿地}} + A_{\text{海绵}}) \times 98.226$	0
人行道透水铺装	320 <i>h</i> _砖 + 15 <i>h</i> _砂 + 0.16 + 360 <i>h</i> _混 + 8.76 <i>h</i> _碎	(0.759 <i>h</i> _砖 + 0.243 <i>h</i> _砂 + 0.380 <i>h</i> _混 + 0.235 <i>h</i> _碎) <i>l</i>	17.257(<i>h</i> _砖 + <i>h</i> _砂 + <i>h</i> _混 + <i>h</i> _碎)	0	0	$q \times (90.504 - 5.654n)$ ($n \leq 16$)	0
停车场透水路面	360 <i>h</i> _混 + 54.16 + 8.76 <i>h</i> _碎	(0.380 <i>h</i> _混 + 0.057 + 0.235 <i>h</i> _碎) <i>l</i>	17.257(<i>h</i> _混 + 0.15 + <i>h</i> _碎)	0	0	$q \times (108.758 - 6.796n)$ ($n \leq 16$)	0

虽然 $i_{\text{透水}}$ 随着透水铺装使用年限的增加,其值在不断下降,为简化碳排放计算模型,假设在计算下沉式绿地和雨水花园的时候, $i_{\text{透水}}$ 为同一值。本文计算 30 年运营维护时长的海绵城市设施碳排放情况,构建单位面积绿色屋顶、下沉式绿地、雨水花园和透水铺装的碳排放计算模型如图 1 所示。

为直观了解海绵城市设施的碳排放,对不同海绵城市设施处理每立方米雨水所产生的碳排放量进行计算,各设施结构均参考《海绵城市设计图集》(DB4403/T 24—2019)^[9]进行计算,结构厚度为取范围的中值,运输距离取 10 km。情况如表 7 所示。

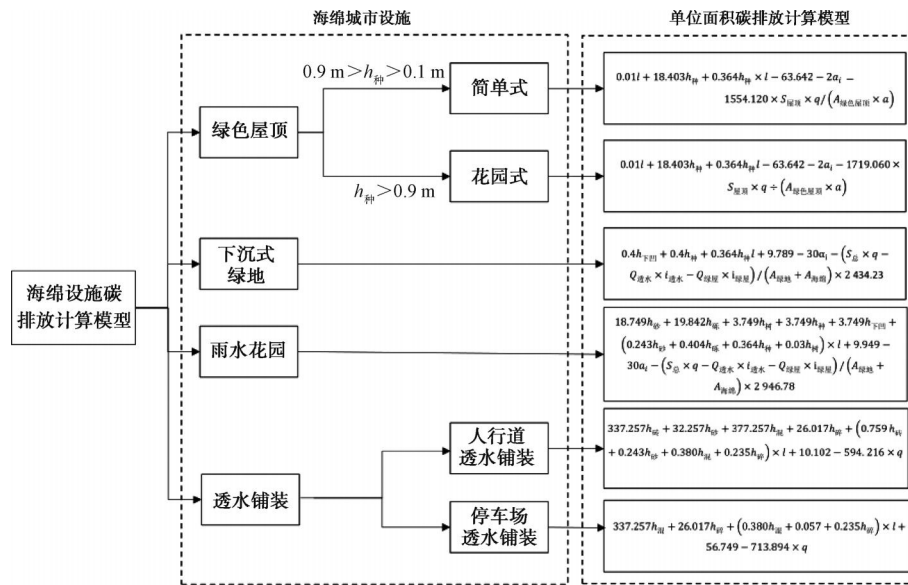


图1 单位面积海绵城市设施碳排放计算模型

Fig. 1 Carbon Emission Calculation Model of Sponge City Facilities per Unit Area

表7 海绵城市设施构造

Tab. 7 Structures of Sponge City Facilities

海绵城市设施		$h_{\text{下凹}}/\text{m}$	$h_{\text{种}}/\text{m}$	$h_{\text{树}}/\text{m}$	$h_{\text{砂}}/\text{m}$	$h_{\text{砾}}/\text{m}$	$h_{\text{砖}}/\text{m}$	$h_{\text{混}}/\text{m}$	$h_{\text{碎}}/\text{m}$
绿色屋顶	简单式	/	0.50	/	/	/	/	/	/
	花园式	/	1.00	/	/	/	/	/	/
下沉式绿地		0.15	0.25	/	/	/	/	/	/
雨水花园	草本	0.25	0.20	0.075	0.70	0.23	/	/	/
	灌木	0.25	0.45	0.075	0.70	0.23	/	/	/
	乔木	0.25	0.80	0.075	0.70	0.23	/	/	/
透水铺装	人行道	/	/	/	0.03	/	0.07	0.125	0.175
	停车场	/	/	/	/	/	/	0.115	0.150

根据模型构建情况可知,雨水处理量影响雨水净化产生的碳排放量,若雨水处理量为 1 m^3 ,则对于绿色屋顶,模型中 $S_{\text{屋顶}} \times q / (A_{\text{绿色屋顶}} \times a)$ 为1,对于雨水花园和下沉式绿地, $(S_{\text{总}} \times q - Q_{\text{透水}} \times i_{\text{透水}} - Q_{\text{绿屋}} \times i_{\text{绿屋}}) / (A_{\text{绿地}} + A_{\text{海绵}})$ 为1,停车场透水路面则要求 q 为1。

据计算,当单位面积海绵城市设施流经雨水 1 m^3 时,其碳排放情况如表8所示。

2 海绵城市设施减碳模型构建

海绵城市减碳模型的构建是通过传统设施碳排放计算模型与海绵城市设施碳排放计算模型相比进行构建,可参考式(8)。

$$E_{\text{单减}} = E_{\text{传统}} - E_{\text{海}} \quad (8)$$

表8 单位面积海绵城市设施碳排放

Tab. 8 Carbon Emission per Unit Area of Sponge City Facilities

海绵城市设施	碳排放量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
绿色屋顶	简单式 -1 610.777
	花园式 -1 785.209
下沉式绿地	-2 512.711
雨水花园	草本 -3 003.134
	灌木 -3 281.697
	乔木 -3 541.851
透水铺装	人行道 -506.338
	停车场 -608.498

其中: $E_{\text{单减}}$ ——单位面积海绵城市设施减碳量,kg;

$E_{\text{传统}}$ ——传统设施生命周期碳排放量,kg;

$E_{海}$ ——单位面积海绵城市设施生命周期碳排放量, kg。

2.1 传统设施生命周期碳排放量计算及碳排放模型构建

2.1.1 传统绿地碳排放

在材料生产阶段,传统绿地可视为在原土上种植植被即可,仅仅消耗人力,产生的碳排放过小不进行考虑。故在材料生产阶段不会产生碳排放。

在材料运输阶段,种植土可视为在海绵城市设施周边所取,不需要进行运输,故建造材料运输阶段产生的碳排放量为 0。

在现场施工阶段,传统绿地和下沉式绿地的施工过程相似,结构也相似,故参考下沉式绿地建造现场施工的数据,可知传统绿地建造现场施工产生的碳排放量为 4.689 kg。

在运营维护阶段,参考马洁^[12]的研究和阐述,传统绿地运营维护阶段产生的碳排放量为 1.451 kg。

传统绿地种植的植物具有固碳释氧的能力,其碳汇的大小与种植植物的种类有关,假设传统绿地种植的均为草本植物,则碳汇为 2.978 kg^[13-17]。传统绿地集水区域可视为海绵城市建设项目占地面积,但由于传统项目雨水往往主要通过集水管网排出,绿地高程与路面高程一致,故路面雨水不会向绿地流动,流经每平方米绿地雨水量仅为降雨量, COD 含量为绿地降雨 COD 含量。传统绿地 COD 去除率为 41.3%^[34],流经传统绿地后的雨水已经满足了其回水使用的标准。60%盖度的草坪绿地径流削减率为 13.4%~31.05%^[35],本文取其中值 22.22%作为传统绿地的径流削减率。传统绿地减少雨水净化产生的碳排放量为 (12.48q) kg/(m²·a)。

2.1.2 不透水路面碳排放

在材料生产阶段,不透水路面使用的材料为混凝土,普通硅酸盐水泥和碎石等材料,这些材料碳排放因子普遍偏高。其建造材料种类及用量参考我国

《国家建筑标准设计图集城市道路——水泥混凝土路面》(15MR202)中的相关内容确定,水泥稳定碎石水泥含量一般为 3%~6%,假设其水泥含量为 5%。不透水路面在材料生产阶段所产生的碳排放情况如表 9 所示。

表 9 单位面积不透水路面材料生产碳排放
Tab. 9 Carbon Emission per Unit Area of Impermeable Pavement Materials Production

材料	厚度/m	密度/ (t·m ⁻³) ^[14]	排放 因子 ^[14]	碳排放/kg
C30 混凝土	0.22	2.36	321.3 kg/m ³	321.3 h _{普混}
普通硅酸盐水泥	0.001	1.221	740.6 kg/t	0.904
级配碎石	0.359	1.55	8.76 kg/m ³	3.145

注: h_{普混}——C30 混凝土的厚度, m。

在材料运输阶段,与海绵城市设施建造材料运输情况一致,运输距离为 1 km,使用新能源货车进行运输,则不透水路面建造材料运输阶段产生的碳排放量为 [(0.358 4h_{普混} + 0.085)l] kg。

参考透水铺装在现场施工的数据估算不透水路面建造现场施工的碳排放。0.54 m 的透水铺装建造现场施工过程产生的碳排放为 9.319 kg/m²^[12]。不透水路面的构造深度为 (h_{普混} + 0.360) m,则不透水路面在建造现场施工过程中产生的碳排放为 (17.257h_{普混} + 6.213) kg。

在运营维护阶段,不透水路面在运营维护过程中仅需人工进行清扫,不需额外的程序,故在运营维护阶段不透水路面的碳排放为 0。

由于不透水铺装未种植植物,不具有植物碳汇的能力,且不透水铺装对雨水没有储存、净化和下渗的能力。不透水铺装也不具有减碳能力。

2.1.3 传统设施碳排放计算模型构建

通过对单位面积传统设施各阶段碳排放计算结果进行汇总,得出传统设施各阶段的碳排放计算情况如表 10 所示,其碳排放计算模型如图 2 所示。

表 10 单位面积传统设施碳排放
Tab. 10 Carbon Emission per Unit Area of Traditional Facilities

类型	建设施工阶段			运营维护阶段			
	材料生产阶段/ (kg·m ⁻²)	建造材料运输/ (kg·m ⁻²)	建造现场施工/ (kg·m ⁻²)	碳排放/ [kg·(m ² ·a) ⁻¹]	植物碳汇/ [kg·(m ² ·a) ⁻¹]	雨水净化/ [kg·(m ² ·a) ⁻¹]	空调运行/ [kg·(m ² ·a) ⁻¹]
传统绿地	0	0	4.689	1.451	2.978	12.48q	0
不透水路面	4.049+ 321.3 h _{普混}	(0.3584 h _{普混} + 0.085)l	17.257 h _{普混} + 6.213	0	0	0	0

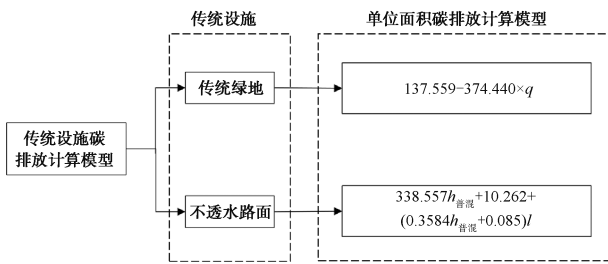


图2 单位面积传统设施碳排放计算模型

Fig. 2 Carbon Emission Calculation Model of Traditional Facilities per Unit Area

表11 单位面积绿色屋顶增加材料及其碳排放

Tab. 11 Green Roofs Increase Materials and Carbon Emission per Unit Area

类型	材料	用量	密度	排放因子	碳排放/kg
种植层	种植土(简单式)	$0.9\text{ m}>h_{\text{种}}>0.1\text{ m}$	2.4 t/m^3	/	/
	种植土(花园式)	$h_{\text{种}}>0.9\text{ m}$	2.4 t/m^3	/	/
过滤层	长纤维聚酯过滤布	1 m^2	0.2 kg/m^2	0.16 kg/m^2	0.16
排水层	PVC 排蓄水板	0.025 m^3	1.45 t/m^3	1 765 kg/t	63.981

注:表中碳排放因子和密度数据参考田彬彬等^[10]、顾道金等^[11]的研究结果。

在建设施工阶段,绿色屋顶可视在普通屋顶上再次进行施工,由于缺乏准确的相关数据,本文将绿色屋顶施工过程产生的碳排放视为绿色屋顶所增加结构施工过程中产生的碳排放。在运营维护阶段绿色屋顶减碳能力计算中,和普通屋顶相比,绿色屋

2.2 单位面积海绵城市设施减碳模型构建及生命周期减碳量计算

2.2.1 绿色屋顶

在建设材料生产阶段和建造材料运输阶段,将绿色屋顶构造和普通屋顶构造进行对比,绿色屋顶比普通屋顶多了种植层、过滤层和排水层,故在上述2个阶段的绿色屋顶减碳情况计算时,仅考虑与普通屋顶相比所增加材料的生产和运输,绿色屋顶比普通屋顶多使用的材料及其生产过程中产生碳排放的情况如表11所示。

顶需要定期检查,普通屋顶不需要运营维护,也不会产生减碳效果,故运营维护阶段绿色屋顶的减碳能力可直接视为绿色屋顶运营维护阶段碳排放情况。综上所述,单位面积绿色屋顶减碳情况如表12所示。

表12 单位面积绿色屋顶减碳

Tab. 12 Carbon Emission Reduction per Unit Area of Green Roof

类型	建设施工阶段			运营维护阶段			
	材料生产阶段/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	建造材料运输/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	建造现场施工/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	碳排放/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	植物碳汇/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	雨水净化/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	空调运行/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]
简单式 绿色屋顶	-64.141	-0.006l- 0.364 $h_{\text{种}}l$	-18.403 ($h_{\text{种}}+0.2$)	-0.085	a_i	$S_{\text{屋顶}}\times q/(A_{\text{绿色屋顶}}\times a)\times$ 51.804	6.054
花园式 绿色屋顶	-64.141	-0.006l- 0.364 $h_{\text{种}}l$	-18.403 ($h_{\text{种}}+0.2$)	-0.085	a_i	$S_{\text{屋顶}}\times q/(A_{\text{绿色屋顶}}\times a)\times$ 57.302	6.054

2.2.2 下沉式绿地

在运营维护阶段,下沉式绿地比传统绿地下凹具有更好的蓄水能力,且植物种植种类多,对雨水的

净化能力更佳,结合上述海绵设施碳排放模型和传统设施减碳模型计算结果,单位面积下沉式绿地减碳情况如表13所示。

表13 单位面积下沉式绿地减碳

Tab. 13 Carbon Emission Reduction per Unit Area of Subsided Green Space

建设施工阶段				运营维护阶段			
材料生产阶段/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	建造材料运输/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	建造现场施工/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	碳排放/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	植物碳汇/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	雨水净化/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	空调运行/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	
0	-0.364 $h_{\text{种}}l$	-0.400 $h_{\text{下凹}}-$ 0.400 $h_{\text{种}}$	1.281	$a_i-2.978$	$(S_{\text{总}}\times q-Q_{\text{透水}}\times i_{\text{透水}}-Q_{\text{绿屋}}\times i_{\text{绿屋}})/$ $(A_{\text{绿地}}+A_{\text{海绵}})\times 81.141-12.48q$	0	

2.2.3 雨水花园

在进行海绵城市规划前,雨水花园所在区域原本设计的内容为传统绿地,所以雨水花园应和传统绿地相比计算其减碳情况。雨水花园的构造可以滞留一部分雨水,并对流经雨水花园的雨水进行净化,

虽然这些能力传统绿地也具有,但是由于其种植植物类型不同,且结构比雨水花园简单,减少地表径流和净化雨水的能力远不如雨水花园。结合上述海绵设施碳排放模型和传统设施减碳模型计算结果,单位面积雨水花园减碳情况如表 14 所示。

表 14 单位面积雨水花园减碳
Tab. 14 Carbon Emission Reduction per Unit Area of Rain Garden

建设施工阶段			运营维护阶段			
材料生产阶段/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	建造材料运输/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	建造现场施工/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	碳排放/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	植物碳汇/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	雨水净化/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	空调运行/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]
$-0.16-15h_{\text{砂}}-16.093h_{\text{砾}}$	$-(0.243h_{\text{砂}}+0.404h_{\text{砾}}+0.364h_{\text{种}}+0.03h_{\text{树}})l$	$4.689-3.749(h_{\text{下凹}}+h_{\text{树}}+h_{\text{种}}+h_{\text{砂}}+h_{\text{砾}})$	1.281	$a_i-2.978$	$(S_{\text{总}}\times q-Q_{\text{透水}}\times i_{\text{透水}}-Q_{\text{绿屋}}\times i_{\text{绿屋}})/(A_{\text{绿地}}+A_{\text{海绵}})\times 98.226-12.48q$	0

2.2.4 透水铺装

透水铺装减少碳排放的能力是与不透水路面进行比较。结合上述海绵设施碳排放模型和传统设施

减碳模型计算结果,单位面积透水铺装减碳情况如表 15 所示。

表 15 单位面积透水铺装减碳
Tab. 15 Carbon Emission Reduction per Unit Area of Permeable Pavement

类型	建设施工阶段			运营维护阶段			
	材料生产阶段/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	建造材料运输/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	建造现场施工/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	碳排放/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	植物碳汇/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	雨水净化/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]	空调运行/ [$\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]
人行道	$3.889+321.3h_{\text{普混}}$	$-(0.3584h_{\text{普混}}+0.085-$	$17.257h_{\text{普混}}+6.213-$	0	0	$q\times(90.504-$	0
透水铺装	$320h_{\text{砖}}-15h_{\text{砂}}-360h_{\text{混}}-8.76h_{\text{碎}}$	$0.759h_{\text{砖}}-0.243h_{\text{砂}}-0.380h_{\text{混}}-0.235h_{\text{碎}})l$	$17.257(h_{\text{砖}}+h_{\text{砂}}+h_{\text{混}}+h_{\text{碎}})$			$5.654n)(n\leq 16)$	
停车场	$321.3h_{\text{普混}}-360h_{\text{混}}$	$-(0.3584h_{\text{普混}}+0.085-$	$17.257h_{\text{普混}}+6.213-$	0	0	$q\times(108.758-$	0
透水路面	$50.111-8.76h_{\text{碎}}$	$0.380h_{\text{混}}-0.057-0.235h_{\text{碎}})l$	$17.257(h_{\text{混}}+0.15+h_{\text{碎}})$			$6.796n)(n\leq 16)$	

2.3 海绵设施减碳模型构建

结合上述传统设施碳排放计算模型和海绵城市设施碳排放计算模型,单位面积海绵城市设施减碳模型如图 3 所示。

2.4 海绵城市设施生命周期减碳量计算汇总

对不同海绵城市设施处理 1 m^3 雨水所产生的减碳量进行计算,海绵城市设施结构参考《海绵城市设计图集》(DB4403/T 24—2019)^[9] 相关标准进行计算。运输距离取 10 km。经计算得出不同海绵城市设施减碳量如表 16 所示。

3 结果与讨论

3.1 海绵城市设施碳排放

结合排放因子法,运用 SLCA 方法,选取海绵城市 4 个设施:绿色屋顶、雨水花园、透水铺装和下沉式绿地,从各类设施的建设施工阶段和运营维护阶

段分析计算,建立海绵城市设施碳排放计算模型。其中建设施工阶段包括材料生产,建造材料运输和现场施工 3 个方面,运营维护阶段主要考虑其维护过程产生的碳排放情况。根据模型构建情况分析得出 4 个设施碳排放量均为负值,均具有减碳效益,其在建设和运营阶段产生的碳排放将被后续减少雨水净化、植物碳汇及减少空调运行所产生的碳减排效益所抵消,具有良好的减碳效果。海绵设施的碳排放量为透水铺装(人行道)>透水铺装(停车场)>绿色屋顶(简单式)>绿色屋顶(花园式)>下沉式绿地>雨水花园(草木)>雨水花园(灌木)>雨水花园(乔木)。

3.2 海绵城市设施减碳模型

本研究构建了传统设施碳排放计算模型,与海绵城市设施碳排放计算模型进行进一步比较计

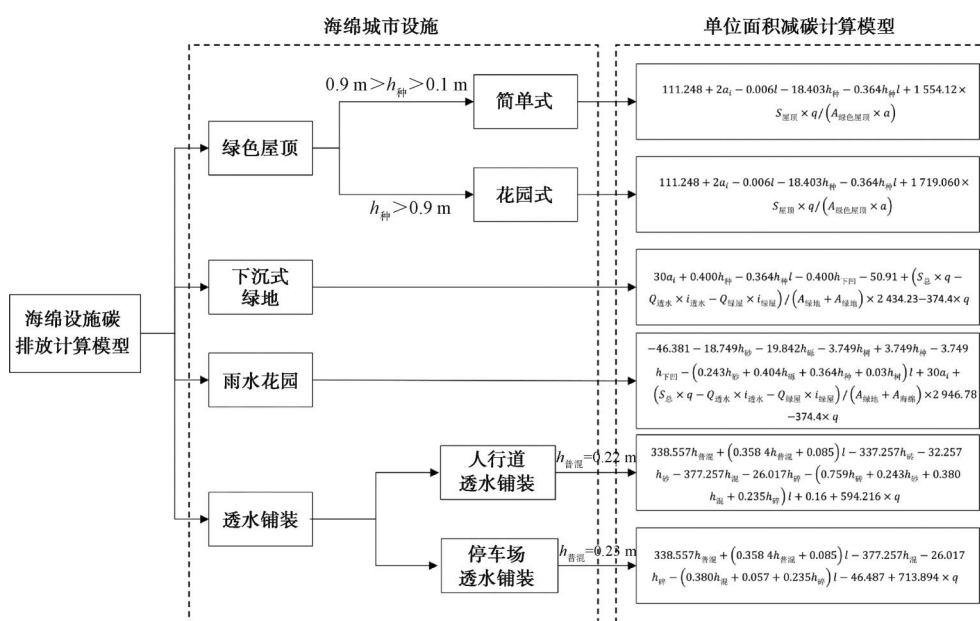


图3 单位面积海绵城市设施减碳模型

Fig. 3 Carbon Emission Reduction Model of Sponge City Facilities per Unit Area

表 16 单位面积海绵城市设施减碳情况

Tab. 16 Carbon Emission Reduction per Unit Area of Sponge City Facilities

海绵城市设施		减碳量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
绿色屋顶	简单式	1 660. 243
	花园式	1 840. 159
下沉式绿地		2 097. 190
雨水花园	草本	2 592. 311
	灌木	2 870. 874
	乔木	3 131. 028
透水铺装	人行道	592. 501
	停车场	698. 303

算,构建了海绵城市设施减碳模型。由表 16 可知,人行道透水铺装和停车场透水路面的减碳量相差仅为 105.802 kg/m^2 ,且透水铺装的减碳量最少。减碳量分析:绿色屋顶(花园式)>绿色屋顶(简单式);不同种类雨水花园的减碳量不同,雨水花园(乔木)>雨水花园(灌木)>雨水花园(草本)减碳量;总体情况为雨水花园减碳量>下沉式绿地减碳量>绿色屋顶减碳量>透水铺装减碳量,此结果与海绵城市各类设施碳排放量的结果是一致的。

4 结论

(1)根据海绵城市设施的构造和所用材料,研究了不同海绵城市设施的减碳能力。根据国家和地

方相关规范、中国生命周期基础数据库和文献分析,采用 SLCA,计算了海绵城市设施的材料生产阶段、材料运输阶段、现场施工阶段和运营维护阶段的碳排放量,建立了海绵城市设施碳排放计算模型。通过与传统设施碳排放计算模型对比分析,构建了海绵城市设施减碳模型。

(2)利用构建的海绵城市设施碳排放计算模型计算的 4 种海绵城市设施单位面积的碳排放量依次为透水铺装>绿色屋顶>下沉式绿地>雨水花园,这可能与这些设施的蓄水层厚度及滞蓄时间相关,与工程实践是一致的。

(3)利用构建的海绵城市设施减碳模型计算的 4 种海绵城市设施单位面积的减碳能力为雨水花园>下沉式绿地>绿色屋顶>透水铺装。

(4)由于雨水花园和下沉式绿地具有较大的减碳能力,在海绵城市规划和设计时,宜优先考虑这 2 种设施,并在能源使用、运输过程、材料使用、海绵城市设施结构等方面进行优化,减少海绵城市建设过程中碳排放规模。

参考文献

- [1] 张强. 我国水治理现状分析、规律认识及对策建议[J]. 国家治理, 2021(37):11-16.
ZHANG Q. Current situation analysis, law understanding and countermeasures of water management in China [J].

- Governance, 2021(37): 11-16.
- [2] LIN X, REN J, XU J C, et al. Prediction of life cycle carbon emissions of sponge city projects: A case study in Shanghai, China[J]. Sustainability, 2018, 10(11): 3978.
- [3] 解超. 基于生命周期方法的透水铺装资源环境影响评价[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022.
- XIE C. Resource and environmental impact assessment of permeable pavement based on life cycle method [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022.
- [4] 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 H T, LI Y F, SHI S. Evaluation on the life cycle of permeable pavement and common pavement [J]. Urban Problems, 2017(5): 52-57.
- [5] 黎小廷. 现代田园城市低碳绿色屋顶固碳、节能与二氧化碳减排研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014.
- LI X T. green roof benefits for carbon sequestration, energy saving and carbon dioxide emission reduction in a modern garden city[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2014.
- [6] CAI L, FENG X P, YU J Y, et al. Reduction in carbon dioxide emission and energy savings obtained by using a green roof[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2019, 19(11): 2432-2445.
- [7] 陈卓婷. 海绵城市典型设施减碳模型构建及减碳效益研究——以粤港澳大湾区为例[D]. 深圳: 深圳大学, 2023.
- CHEN Z T. Study on carbon reduction model and benefits of typical sponge city facilities——A case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2023.
- [8] FLYNN K M, TRAVER R G. Green infrastructure life cycle assessment: A bio-infiltration case study [J]. Ecological Engineering, 2013, 55: 9-22. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.01.004.
- [9] 深圳市市场监督管理局. 海绵城市设计图集: DB4403/T 24—2019[S/OL]. (2019-07-12) [2023-11-01]. <https://amr.sz.gov.cn/attachment/1/1195/1195699/9772236.pdf>. Shenzhen Administration for Market Regulation. Design drawings for sponge city facilities: DB4403/T 24—2019[S/OL]. (2019-07-12) [2023-11-01]. <https://amr.sz.gov.cn/attachment/1/1195/1195699/9772236.pdf>.
- [10] 田彬彬, 徐向阳, 付鸿娟, 等. 基于生命周期的产品碳足迹评价与核算分析[J]. 中国环境管理, 2012(1): 21-26.
- TIAN B B, XU X Y, FU H J, et al. Assessment and accounting the product carbon footprint based on the life cycle[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2012(1): 21-26.
- [11] 顾道金, 朱颖心, 谷立静. 中国建筑环境影响的生命周期评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006(12): 1953-1956.
- GU D J, ZHU Y X, GU L J. Life cycle assessment for China building environment impacts [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2006(12): 1953-1956.
- [12] 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 J. Carbon source analysis and carbon emission study of typical measures for sponge city construction [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2018.
- [13] 王永华, 高含笑. 城市绿地碳汇研究进展[J]. 湖北林业科技, 2020, 49(4): 69-76.
- WANG Y H, GAO H X. Research progress of urban green space carbon sink[J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2020, 49(4): 69-76.
- [14] 赵莹, 李海梅. 11 种地被植物固碳释氧与降温增湿效益研究[J]. 江西农业学报, 2009, 21(1): 44-47.
- ZHAO X, LI H M. Study on carbon-fixing, oxygen-releasing, temperature-reducing and humidity-increasing effects of 11 ground cover plants[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2009, 21(1): 44-47.
- [15] 陈月华, 廖建华, 覃事妮. 长沙地区 19 种园林植物光合特性及固碳释氧测定[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(10): 116-120.
- CHEN Y H, LIAO J H, QIN S N. Studies on photosynthetic characteristics and carbon fixation and oxygen release capabilities of 19 garden plants in Changsha area[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(10): 116-120.
- [16] 吴婕, 李楠, 陈智, 等. 深圳特区城市植被的固碳释氧效应[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, 49(4): 86-92.
- WU J, LI N, CHEN Z, et al. The effect of CO₂ sequestration and O₂ release of urban vegetation in Shenzhen Special Zone[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2010, 49(4): 86-92.
- [17] 姚侠妹, 偶春, 夏璐, 等. 安徽沿淮地区小城镇主要景观树种固碳释氧和降温增湿效益评估[J]. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1293-1304.
- YAO X M, OU C, XIA L, et al. Benefit evaluation of carbon sequestration, oxygen release, cooling and humidifying of the main landscape tree species in small towns along Huaihe River in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(5): 1293-1304.
- [18] 黄洁. 污水处理厂 COD 和氨氮总量削减的成本模型[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(11): 207-207.
- HUANG J. Cost model of COD and NH₃-N reduction in sewage treatment plant [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2018, 44(11): 207-207.
- [19] POBLETE I B S, ARAÚJO O D Q F, MEDEIROS J L. Sewage-water treatment with bio-energy production and carbon capture and storage[J]. Chemosphere, 2022, 286: 131763. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131763.
- [20] KELLER J, HARTLEY K. Greenhouse gas production in

- wastewater treatment; Process selection is the major factor[J]. Water Science and Technology, 2003, 47(12): 43-48.
- [21] 段晓涵. 基于海绵城市的工程建设模式及雨水净化回用研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- DUAN X H. The Research of engineering construction mode and rainwater recycling based on the sponge city[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.
- [22] 王国庆, 王洪. 下凹式绿地对降雨径流及其污染物削减作用[J]. 黑龙江农业科学, 2019(8): 101-106.
- WANG Q G, WANG H. Reducing effect of rainfall runoff and pollutant for concave green space[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019(8): 101-106.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑与小区雨水利用工程技术规范: GB 50400—2006[S]. 北京: 中国建筑设计研究院, 2006.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Engineering specification for stormwater control and utilization in buildings and communities: GB 50400—2006[S]. Beijing: China Architectural Design and Research Institute, 2006.
- [24] 杨海. 透水砖铺装雨水净化效果的系统性研究——以道路雨水径流为例[D]. 南京: 南京林业大学, 2020.
- YANG H. Systematic study on the rainwater purification effect of permeable brick paving—a case study of road rainwater runoff[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020.
- [25] 叶水根, 刘红, 孟光辉. 设计暴雨条件下下凹式绿地的雨水蓄渗效果[J]. 中国农业大学学报, 2001(6): 53-58.
- YE S G, LIU H, MENG G H. Analysis of rain storage and infiltration in sunken-lawn under the condition of designed storm[J]. Journal of China Agricultural University, 2001(6): 53-58.
- [26] 赵庆俊, 丛海兵, 汪智霞, 等. 高渗透下凹绿地对城市降雨径流的削减作用研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(9): 41-48.
- ZHAO Q J, CONG H B, WANG Z X, et al. Study on urban rainfall runoff reduction effect of high permeable concave-down green space[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(9): 41-48.
- [27] 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.
- JIA L Y. Study on the configuration optimization and carbon emission reduction of low impact development in sponge city[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [28] DRAKE J, BRADFORD A, VAN S T. Hydrologic performance of three partial-infiltration permeable pavements in a cold climate over low permeability soil[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(9): 04014016.
- [29] 王俊岭, 宋健, 魏胜, 等. 透水混凝土路面径流量削减试验[J]. 环境工程, 2016, 34(3): 22-26.
- WANG J L, SONG J, WEI S, et al. Experimental study on the runoff reduction by the pervious concrete pavement[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(3): 22-26.
- [30] 刘蕊. 改良型透水混凝土铺装去除径流污染物效能研究[D]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2021.
- LIU R. Research on the effectiveness of modified permeable concrete pavement in removing runoff pollutants[D]. Shaoxing: Shaoxing University, 2021.
- [31] PRATT C J. Permeable pavements for stormwater quality enhancement, in urban stormwater quality enhancement: Source control, retrofitting, and combined sewer technology[J]. ASCE, 1990.
- [32] 吴金顺. 屋顶绿化对建筑节能及城市生态环境影响的研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2007.
- WU J S. The research of planting roof on energy saving of building and effect of city ecological environment[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2007.
- [33] 夏先旭. 模拟城市雨水花园对雨水污染物的去除效果研究[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2019.
- XIA X X. Study on removal of rainwater pollutants by simulated urban rainwater garden[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2019.
- [34] 杨清海, 吕淑华, 李秀艳, 等. 城市绿地对雨水径流污染物的削减作用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2008(2): 41-47.
- YANG Q H, LÜ S H, LI X Y, et al. Reduction functions of runoff contaminants by the urban greenbelt[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science Edition), 2008(2): 41-47.
- [35] 魏小燕. 人工模拟降雨条件下典型城市绿地对地表径流影响的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- WEI X Y. Study on the effect of urban green space on surface runoff under simulated rainfall condition[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.