

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.03.020

典型老城区海绵城市建设碳减排效益评估

胡方旭^{1,2}, 卢亚静¹, 周星¹, 李永坤¹, 于磊¹, 张书函¹

(1. 北京市水科学技术研究院 防灾减灾研究所, 北京 100048; 2. 淮河水利委员会水文局
<信息中心>, 安徽 蚌埠 233001)

摘要: 通过分析海绵城市从建设到运行维护的全生命周期过程,分别从碳排放和碳减排两部分考虑,构建海绵城市碳减排效益评估体系,并以北京市西城区为研究区域建立数值模型,对城区尺度的海绵城市碳减排效益进行评估,分析其影响因素。结果表明:北京市西城区海绵城市在运行8~17年后实现碳中和;在30年的全生命周期内,西城区海绵城市产生的总碳减排效益为16 064~31 814 t;海绵城市碳减排量与年降水量呈正相关关系;随着西城区海绵设施的总规模增加,其单位面积(容积)的碳减排效益也不断提升。

关键词: 海绵城市; 碳减排; 碳排放; 效益评估; 老城区; 全生命周期; 数值模拟
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)03-0130-07

Assessment of Carbon Emission Reduction Benefits of Sponge City Construction in Typical Old District

HU Fang-xu^{1,2}, LU Ya-jing¹, ZHOU Xing¹, LI Yong-kun¹, YU Lei¹,
ZHANG Shu-han¹

(1. Department for Disaster Prevention and Mitigation, Beijing Water Science & Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. Hydrology Bureau <Information> of the Huaihe River Commission, Bengbu 233001, China)

Abstract: This paper constructed the carbon emission reduction benefit assessment system of sponge city construction in Xicheng District of Beijing from the aspects of carbon emission and carbon emission reduction, established a numerical model to evaluate the carbon emission reduction benefit, and discussed the factors affecting the carbon emission reduction by analyzing the life cycle process of sponge city from construction to operation and maintenance. The carbon neutrality of sponge city construction in Xicheng District of Beijing would be achieved after 8 to 17 years of operation, and the total carbon emission reduction benefit was 16 064~31 814 t in the life cycle of 30 years. There was a positive correlation between carbon emission reduction and annual precipitation in sponge city construction. With the increase of the total scale of sponge facilities in Xicheng District, the carbon emission reduction benefit per unit area (volume) of sponge facilities also increased.

Key words: sponge city; carbon emission reduction; carbon emission; benefit assessment;

基金项目: 北京市科技计划课题(Z201100008220005); 水利部重大科技项目(SKR-2022031); 国家“十三五”水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002)

通信作者: 卢亚静 E-mail: lyj@bwsti.com

old district; life cycle; numerical modeling

作为一种新型城市建设模式,海绵城市为降低碳排放做出了一定贡献,推进了城市可持续发展的进程^[1]。海绵城市通过广泛分布的海绵设施,从源头、过程和末端对径流进行调蓄,减小了城市径流总量,对地表径流中的污染物起到一定截留、削减作用,可以大幅降低城市内涝灾害防治过程产生的能源消耗^[2]。准确评估海绵城市的碳减排效益,有助于我国城市碳排放减控工作的进行,也能为海绵城市低碳建设工作的进一步开展提供依据。

当前国内外学者对海绵设施的全生命周期碳减排效益进行了广泛探究,但通常只关注单一类型的温室气体排放量,且主要在站点尺度上进行^[3];也有学者研究了较小尺度海绵城市建成区的碳排放量,但往往只考虑海绵设施带来的一部分影响,缺少从全区域、长时间跨度进行的综合效益评估,没有形成完整的计算体系^[4]。笔者以城区尺度的海绵城市为研究对象,按照全生命周期过程分别计算碳排放量和碳减排量,再综合评估碳减排效益。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

西城区位于北京市中心,为首都功能核心区,属于典型的暖温带半湿润半干旱季风气候^[5],全区多年平均降水量为575.0 mm,降水年际变化较大,年内分配不均,汛期降水量约占全年的80%左右。

对高分遥感卫星数据进行预处理后,经自动解译和人工判读,并抽取图斑进行现场复核,最终得到西城区下垫面土地利用情况如表1所示。

表1 西城区下垫面土地利用情况

Tab.1 Land use of underlying surface in Xicheng District km ²					
序号	细类指标	面积	序号	细类指标	面积
1	公共绿地	1.08	10	普通房屋	17.35
2	公园绿地	2.00	11	广场	0.31
3	小区绿地	6.86	12	建设用地	0.50
4	小区下凹绿地	0	13	停车场	0.05
5	道路两侧植被	0.17	14	市政道路	6.21
6	坑塘	0.15	15	内部道路	0.06
7	水池	0.02	16	硬化路面	14.70
8	湖泊	1.09	17	裸土	0.01
9	河道	0.28	合计		50.84

由表1可知,共识别出公共绿地、公园绿地、小区绿地等17种用地类型。

1.2 碳减排效益评估体系构建

1.2.1 评估范围和边界

本研究中的温室气体主要包括CO₂、CH₄、N₂O这3种,并通过全球变暖潜能值(GWP)转化,统一以CO₂排放当量表示。基于各类海绵设施的运行年限,本研究选取30年作为评价周期。确定海绵设施碳核算的边界,可以避免重复计算或漏算。根据国际地方环境理事会(ICLEI)的分类标准,对海绵城市碳排放过程进行分类计算。

为明确海绵城市建设给城市带来的影响,将海绵城市碳减排效益分为海绵城市碳排放量和海绵城市碳减排量两个部分,分别进行计算,如下所示^[2-3]:

$$J_p = \sum_{i=1}^m J_i - \sum_{k=1}^n (E_k - CE_k) \tag{1}$$

式中: J_p 为海绵城市碳减排效益,kg; J_i 为第*i*项海绵城市碳减排效益产生的碳减排量($i=1, \dots, m$),kg; E_k 为加海绵设施城市第*k*项碳排放量($k=1, \dots, n$),kg; CE_k 为无海绵设施城市第*k*项碳排放量($k=1, \dots, n$),kg。

1.2.2 海绵城市碳排放量计算

城市设施的全生命周期碳排放过程可以分为4部分,即建筑材料、运输过程、施工过程以及设施运行维护过程。在加海绵设施城市中,考虑4种海绵设施的碳排放过程;在无海绵设施城市中,仅考虑与海绵城市透水铺装相对应的城市道路产生的碳排放,同样按全生命周期碳排放过程进行计算。部分材料的碳排放因子可参考文献[6]~[11]。

1.2.3 海绵城市碳减排量计算

① 植物固碳效益:下凹绿地和绿色屋顶种植了大量草本植物,不同植被的固碳效益不同,海绵城市植被固碳产生的碳减排量计算方法见文献[6]。

② 径流削减节能减排:使用数值模型针对不同的降水情况进行模拟计算,可以得到更加准确的径流削减效果,其计算方法见文献[12]。

③ 雨水回收利用节能减排:雨水收集利用设施通过对降水的收集利用,减少城市供水系统处理

和输送自来水的碳排放,其计算方法见文献[12]。

④ 污染物削减节能减排:绿色屋顶、下凹绿地、透水铺装能够去除径流中的污染物,从而减少污染物在污水厂处理过程中产生的碳排放,其计算方法见文献[3]和[12]。

⑤ 建筑节能减排:绿色屋顶对建筑环境的改善作用较为明显,周范文^[13]的研究表明,种植型和蓄水型绿色屋顶有良好的建筑保温效果,建筑节能减排效益计算方法见文献[3]、[11]、[14]。

2 西城区城市排水模型构建

2.1 基础数据处理

收集不同雨量站点的降水数据作为模型输入事件,收集护城河排水口水质数据作为水质模拟计算的依据。根据产汇流模型参数构建需求,将主要下垫面在模型中概化为屋面、道路、绿地、水域、其他共5类。

2.2 产汇流模型构建

在InfoWorks ICM中构建西城区城市排水模型,下垫面类型中屋面、道路属于不透水表面,绿地、水域与其他属于透水表面。针对这两种表面分别构建不同的产流模型,汇流计算采用非线性水库法。

2.2.1 不透水表面产流模型

不透水表面产流模型采用固定径流系数法,不同下垫面的径流系数选取参考北京市地方标准《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB 11/T 969—2016)的推荐值。考虑北京市夏季多发短时强降雨等不利情况^[15],不透水沥青路面、不透水沥青屋面径流系数取0.9,广场、停车场等混凝土路面径流系数取0.85。

2.2.2 透水表面产流模型

本研究采用Horton公式计算项目区的入渗过程:

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (2)$$

$$F = \int_0^t f = f_c t + \frac{f_0 - f_c}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

式中: f 为入渗率,mm/h; f_c 为稳定入渗率,mm/h; f_0 为初始入渗率,mm/h; t 为时间,h; k 为与土壤有关的衰减系数, h^{-1} ; F 为累计渗透量,mm。

根据DB 11/T 969—2016以及ICM模型推荐值确定模型参数(见表2)。其中,绿地取美国农业部土地保护局(SCS)土壤分组B的参数,其他取土壤分组C的参数。

表2 研究区典型参数

Tab.2 Typical parameters in the study area

土壤分组	$f_0/(mm \cdot h^{-1})$	$f_c/(mm \cdot h^{-1})$	k/h^{-1}
A	250	25.4	2
B	200	12.7	2
C	125	6.3	2
D	76	2.5	2

2.3 海绵设施参数设定

ICM软件通过水文学模拟方法,在模型中输入低影响开发(LID)设施的结构参数来反映不同海绵设施的种类。通过设定设施的地表糙率、坡度、透水层厚度、下渗率、饱和含水量等参数,使海绵设施在模型产流以及汇流计算中发挥作用。

2.4 模型参数率定与验证

2.4.1 产汇流参数率定

依据实测2021年7月3日场次的降雨-流量数据率定参数,采用纳什效率系数(NSE)评价模拟效果。7月3日场次降雨调参后的NSE为0.615,相关系数 R^2 为0.593,模型参数最终取值见表3。

表3 产汇流模型率定结果

Tab.3 Calibration results of output-conflux model

产流表面	初期损失值/mm	固定径流系数	$f_0/(mm \cdot h^{-1})$	$f_c/(mm \cdot h^{-1})$	k/h^{-1}	汇流参数
屋面	0.002	0.90	—	—	—	0.015
道路	0.002	0.85	—	—	—	0.012
绿地	0.006	—	200	12.7	2	0.12
其他	0.006	—	125	6.3	2	0.08
水域	—	0	—	—	—	0.6

2.4.2 产汇流模型验证

分别选取2021年7月5日和12日的两场降雨进行验证,二者的NSE分别为0.509和0.491, R^2 分别为0.682和0.744。

三场模拟结果的NSE均在0.5左右, R^2 在0.59~0.74之间。模拟洪水总量与实测洪水总量的误差为0.3%~5.6%,模拟洪峰流量与实测洪峰流量的误差为1.92%~5.06%。结果表明,模型产汇流参数设置合理,模拟结果可信度较高,可用于后续研究。

2.5 污染物削减率计算方法

海绵城市污染物削减比例与区域海绵设施的面积有关,肖志明^[16]在海绵城市污染减控效果研究中构建了海绵城市径流污染物削减率与海绵城市下垫面参数之间的多元非线性回归计算模型,该模型在北京市东城区的模拟精度较高,模型计算误差

为0.5%~2.73%。

北京市西城区与东城区相邻,水文气象条件相同,水文地质、下垫面用地类型条件相似,因此本研究选取肖志明构建的回归模型进行海绵城市水质变化计算^[16]。该回归模型将海绵设施对污染物的削减率(θ)与排水分区不同下垫面用地比例联系起来,最终选取透水铺装比例(X_1)、下凹绿地比例(X_2)、普通绿地比例(X_3)、不透水表面比例(X_4)、调蓄容积控制比例(X_5)5个特征参数进行表征。其

$$\begin{aligned} \theta = & 0.704X_1 + \ln(0.1 - 0.005X_2) + \ln(0.015X_3 + 0.1) - 1.802X_4^3 - 4.421X_4^2 + \\ & 7.011X_4 - 4.333X_5^3 + 3.788X_5^2 + 0.27X_5 - 2.105X_1X_2 - 1.35X_1X_3 + \\ & 0.185X_1X_5 - 1.914X_2X_4 - 1.337X_3X_5 - 11.734X_4X_5 + 4.905 \end{aligned} \quad (5)$$

3 西城区已建成海绵设施碳减排效益分析

3.1 典型年降水过程选取

分析具有长系列观测数据的站点延庆站、北京站和密云站共70年的日降雨数据,年降水量频率分布与皮尔逊Ⅲ(P-Ⅲ)型曲线拟合较好,北京市年降水量的均值为566.52 mm。根据拟合所得曲线反查,选取2017年为典型丰水年($P=30\%$, P 为事件发生频率,下同)、2015年为典型平水年($P=50\%$)、2003年为典型枯水年($P=70\%$)。

3.2 已建成海绵设施碳排放量与碳减排量计算

3.2.1 碳排放量计算结果

西城区各类海绵设施的建设规模、使用寿命不同,总碳排放量对比无法体现不同海绵设施全生命周期碳排放量的差异。计算单位面积(容积)海绵设施全生命周期的碳排放量,见图1。

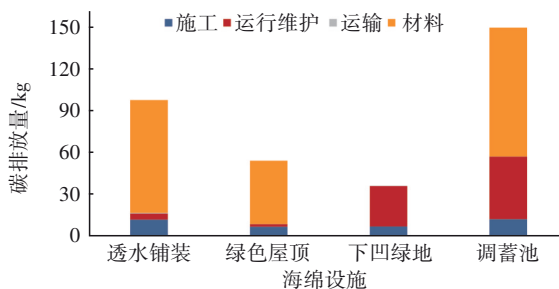


图1 单位面积(容积)海绵设施全生命周期碳排放量对比

Fig.1 Comparison of life cycle carbon emissions per unit area (volume) of sponge facilities

本研究中下凹绿地和调蓄池的使用寿命取30年,绿色屋顶的使用寿命取15年,透水铺装的使用寿命取10年。北京市西城区已建成海绵设施在其全生命周期内的碳排放量如图2所示。

结合设施使用寿命,计算得到30年全生命周期

中, $X_1 \sim X_4$ 指排水分区内相应设施(区域)的面积占排水分区总面积的比例。《雨水控制与利用工程设计规范》(DB 11/685—2013)中规定每1 000 m²硬化面积配建调蓄容积不小于30 m³。 X_5 指排水分区内调蓄设施所控制的总调蓄容积 V 与不透水表面面积 S_4 比值相对于规范的比例,如下所示:

$$X_5 = 1\,000 \times \frac{V}{30} / S_4 = \frac{100V}{3S_4} \quad (4)$$

θ 的回归模型计算方式如下:

内,海绵设施的碳排放总量为254 437 t,无海绵设施西城区模型相应的碳排放总量为200 901 t,海绵城市建设产生的碳排放总量为53 536 t。

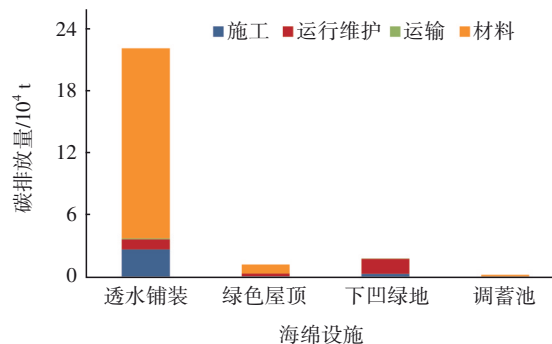


图2 海绵设施全生命周期碳排放量对比

Fig.2 Comparison of life cycle carbon emissions of sponge facilities

3.2.2 不同典型年碳减排量计算结果

① 丰水年海绵设施碳减排量计算

根据丰水年逐小时降雨数据模拟计算结果,得到海绵设施的径流削减量、雨水回收利用量、污染物削减量等数据,碳减排量计算见表4。

表4 碳减排量计算

Tab.4 Calculation of carbon emission reduction

碳减排项	数量	减排系数	碳减排量/kg
植被固碳 ^[6]	494 432 m ²	0.642 kg/m ²	317 425.3
雨水回收利用 ^[12]	91 700 m ³	0.866 kg/m ³	79 412.2
径流削减 ^[12]	103 737 m ³	0.5 kg/m ³	51 868.5
污染物削减 ^[3,12]	1 018 982 kg	1.3 kg/kg	1 324 676.6
建筑节能 ^[3,11,14]	95 095 m ²	11.25 kg/m ²	1 069 818.8

丰水年海绵设施的年碳减排量为2 845 t,其中污染物削减碳减排量最大,占比46.6%;其次为建筑节能碳减排量,占比37.6%。

② 平水年、枯水年海绵设施碳减排量计算

平水年海绵设施的年碳减排量为2 508 t,主要由污染物削减碳减排和建筑节能碳减排构成,分别占比34.7%和36.3%。由于北京市西城区具有自流排水能力,径流削减碳减排只计算积水量减少的部分,带来的碳减排量很少,占比13.0%。

枯水年海绵设施的年碳减排量为2 320 t,主要由污染物削减碳减排和建筑节能碳减排构成,分别占比32.7%和40.8%。

③ 年降水量对海绵城市碳减排量的影响

对比丰、平、枯典型的年碳减排量,可知年降水量与海绵城市碳减排量有一定的相关性。随着年降水量的增加,碳减排量也在增大,由枯水年到丰水年,年降水量增加了147 mm,海绵城市碳减排量增加了525 t,如图3所示。

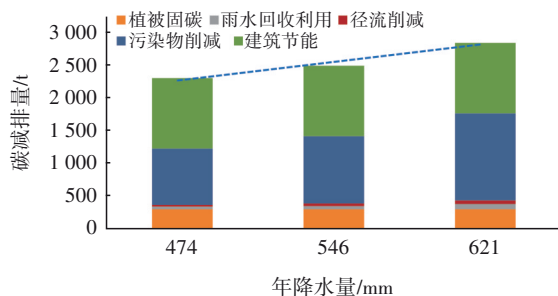


图3 碳减排量与典型年降水量的关系

Fig.3 Relationship between carbon emission reduction and typical annual precipitation

3.3 西城区海绵城市碳减排效益分析

为体现建设海绵设施对城市碳排放带来的影响,将海绵设施在30年周期内的碳排放以及碳减排过程进行对比,分别以丰、平、枯水平年的碳减排量计算结果为基准,如图4所示。

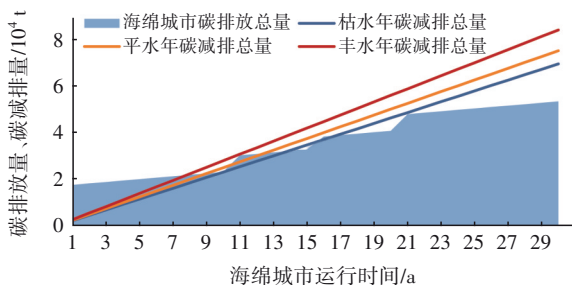


图4 海绵城市全生命周期碳排放量与碳减排量对比

Fig.4 Comparison of carbon emission and carbon emission reduction in the life cycle of sponge cities

由图4可知,丰、平、枯典型年海绵城市全生命周期的碳减排量均大于碳排放量,说明实现了碳中

和,且产生了碳减排效益。丰、平、枯典型年海绵城市30年全生命周期内扣除碳排放量后产生的总碳减排效益分别为31 814、21 704和16 064 t,海绵城市实现碳中和的时间为8~17年。

4 海绵设施碳减排效益影响因素分析

4.1 碳减排效益与年降水量相关性分析

将北京市1951年—2020年共70年的逐日年降水量数据作为输入降水事件,分别在无海绵设施西城区模型和加海绵设施西城区模型中进行产流过程模拟,得到不同年降水量条件下的海绵城市碳减排量,对二者进行相关性分析。结果表明,海绵城市碳减排量与年降水量之间存在显著的正相关关系($R^2=0.95$),海绵城市碳减排量随年降水量的增加而增加,当年降水量超过1 000 mm时,碳减排量增加幅度变缓。为探究碳减排量频率分布的特征,按照不同年份的碳减排量进行排序,以P-Ⅲ型曲线进行拟合,结果显示,海绵城市碳减排量频率分布符合P-Ⅲ型曲线的分布规律,拟合度为0.994。海绵城市碳减排量的均值为2 564 t, P-Ⅲ型分布的变差系数为0.13,偏态系数为0.39。频率分布曲线的变差系数较小,说明其密度离散性较小,频率分布较为集中。频率分析曲线的偏态系数大于0,且均值对应的出现频率为47.5%,说明分布曲线为正偏态分布。这与西城区年降水量集中在400~700 mm,且年降水量与碳减排量呈正相关的结果一致。根据曲线进行反查, $P=50\%$ 对应的碳减排量为2 537 t,与平水年的碳减排量2 508 t较为接近。

4.2 碳减排效益与海绵设施建设规模相关性分析

通过在模型中增加海绵设施面积(容积)以模拟不同的海绵城市建设规模,按一定梯度分别提高绿地比例、绿色屋顶比例、透水铺装比例和调蓄容积控制比例,生成模拟方案1、2、3、4。由于单位面积(容积)调蓄池和透水铺装的全生命周期碳排放量较高,为使模拟方案的碳排放量相对较小,在保持方案4中透水铺装比例和调蓄容积控制比例不变的情况下,提高下凹绿地比例和绿色屋顶比例,生成模拟方案5和模拟方案6,如表5所示。

平水年模拟结果表明,随着海绵设施总规模的不断扩大,西城区径流系数逐渐降低,污染物总量削减率也不断提高,从方案4后,污染物总量削减率大于0.7,达到海绵城市建设评价标准。以平水年

海绵城市碳减排量为基准,分别计算6种方案的全生命周期碳减排效益,如图5所示。

表5 海绵城市建设规模模拟方案
Tab.5 Simulation schemes for sponge city construction scale

模拟方案	透水铺装比例	下凹绿地比例	绿色屋顶比例	调蓄容积控制比例
1	2.09	0.99	1.76	5
2	4.19	1.99	3.52	10
3	8.37	3.98	7.04	20
4	12.56	5.97	10.57	30
5	12.56	7.95	14.09	30
6	12.56	9.94	17.61	30

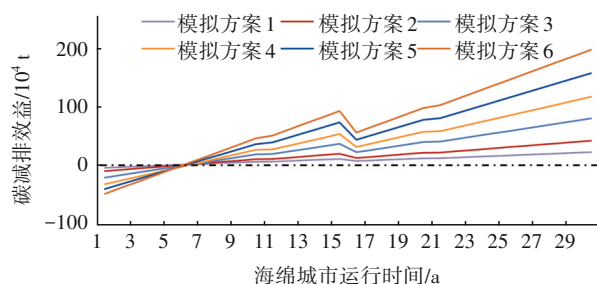


图5 不同建设规模的海绵城市碳减排效益对比

Fig.5 Comparison of carbon emission reduction benefits of sponge cities with different construction scales

由图5可知,6种方案中海绵设施运行7年后均实现了碳中和;运行16年后,海绵城市碳减排效益开始大幅增长。在30年周期内,方案1~方案6的碳减排效益总量分别为209 522、403 520、781 161、1 146 790、1 547 250、1 944 937 t。为更好地比较各方案碳减排效益的关系,分别计算其单位面积(容积)海绵设施产生的碳减排效益,如图6所示。

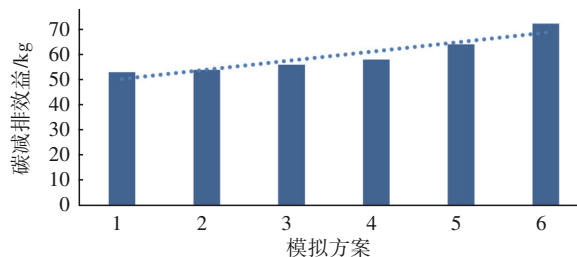


图6 不同方案单位面积(容积)海绵设施碳减排效益对比
Fig.6 Comparison of carbon emission reduction benefits per unit area (volume) of sponge facilities in different schemes

由图6可知,随着海绵设施建设规模的扩大,其产生碳减排效益的能力呈增强趋势,由方案1到方

案6共提高了36.2%。

5 结论

① 在典型年降水条件下,北京市西城区海绵设施每年产生的碳减排量为2 320~2 845 t,海绵城市碳减排量与年降水量呈显著正相关关系,不同年份的海绵城市碳减排量呈P-Ⅲ型分布。

② 北京市西城区海绵城市碳排放的主要来源为透水铺装材料的碳排放。海绵城市在建成初期增加了城市的碳排放,碳减排效益为负值;海绵城市建成8~17年后,碳减排量开始超过碳排放量,实现碳中和;海绵城市运行30年后,产生的总碳减排效益在16 064~31 814 t之间。

③ 海绵设施建设规模越大,海绵城市碳减排效益越高,且单位面积(容积)海绵设施产生的碳减排效益也越高。在4种海绵设施类型中,绿色屋顶单位面积的碳减排量最高,对海绵城市碳减排效益的贡献最大,在北京市西城区海绵城市建设规划中,可以通过增加绿色屋顶比例来提高海绵城市的碳减排效益。

参考文献:

- [1] 廖朝轩,高爱国,黄恩浩. 国外雨水管理对我国海绵城市建设的启示[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 42-45, 50.
LIAO Chaoxuan, GAO Aiguo, HUANG Enhao. Enlightenment of rainwater management in foreign countries to sponge city construction in China[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 42-45, 50 (in Chinese).
- [2] 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, 2016.
JIA Lingyu. Study on the Configuration Optimization and Carbon Emission Reduction of Low Impact Development in Sponge City [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016 (in Chinese).
- [3] 林晓虎,任婕,乔俊莲,等. 海绵城市建设中碳排放核算研究进展及探析[J]. 资源节约与环保, 2018 (3): 42-44.
LIN Xiaohu, REN Jie, QIAO Junlian, et al. Research progress and analysis of carbon emission accounting in sponge city construction [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2018 (3): 42-44 (in Chinese).

- [4] 王丹, 杨超, 郑永宏, 等. 海绵城市改造对热岛效应减缓效果的估算[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(4): 968-975.
WANG Dan, YANG Chao, ZHENG Yonghong, *et al.* Estimation of mitigation effect of sponge city reconstruction on heat island effect [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(4): 968-975 (in Chinese).
- [5] 李书严, 陈洪滨, 李伟. 城市化对北京地区气候的影响[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1102-1110.
LI Shuyan, CHEN Hongbin, LI Wei. The impact of urbanization on city climate of Beijing region [J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(5): 1102-1110 (in Chinese).
- [6] KAVEHEI E, JENKINS G A, ADAME M F, *et al.* Carbon sequestration potential for mitigating the carbon footprint of green rainwater infrastructure [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94: 1179-1191.
- [7] 阴世超. 建筑全生命周期碳排放核算分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
YIN Shichao. Study of Life-cycle Carbon Emission in Buildings [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese).
- [8] 燕艳. 浙江省建筑全生命周期能耗和CO₂排放评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
YAN Yan. Research of Energy Consumption and CO₂ Emission of Buildings in Zhejiang Province Based on Life Cycle Assessment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011 (in Chinese).
- [9] 董蕾. 集成建筑全生命周期能耗及CO₂排放研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
DONG Lei. Life Cycle Assessment for Energy Consumption and Carbon Emission of Integrated Building [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011 (in Chinese).
- [10] 王婧, 张旭, 黄志甲. 基于LCA的建材生产能耗及污染物排放清单分析[J]. 环境科学研究, 2007(6): 149-153.
WANG Jing, ZHANG Xu, HUANG Zhijia. Life cycle assessment energy consumption and pollutant emission inventory analysis of construction materials production [J]. Research of Environmental Sciences, 2007(6): 149-153 (in Chinese).
- [11] 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).
- [12] LIU J H, WANG J, DING Y X, *et al.* Assessing the mitigation of greenhouse gas emissions from a green infrastructure-based urban drainage system [J]. Applied Energy, 2020, 278: 115686.
- [13] 周范文. 绿色建筑屋顶结构的节能优化分析[J]. 建筑节能, 2019, 47(10): 67-70.
ZHOU Fanwen. Energy saving optimization of green building roof structure [J]. Journal of Building Energy Efficiency, 2019, 47(10): 67-70 (in Chinese).
- [14] 何云菲, 彭立华, 杨小山, 等. 夏热冬冷地区屋顶绿化全年能耗削减及成本效益[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(9): 2253-2263.
HE Yunfei, PENG Lihua, YANG Xiaoshan, *et al.* Annual energy effects and cost-benefit analysis of green roofs in a hot-summer-cold-winter climate [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(9): 2253-2263 (in Chinese).
- [15] 王姝. 基于海绵城市理念的城镇雨水系统规划方案模拟与评价[D]. 天津: 天津大学, 2015.
WANG Shu. Simulation and Evaluation of Plan on Urban Storm Water Drainage System Based on Sponge City Concept [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015 (in Chinese).
- [16] 肖志明. 无监测资料海绵城市建设区径流及污染减控效果[D]. 南京: 河海大学, 2020.
XIAO Zhiming. Study on the Evaluation Method of Runoff and Pollution Control in Sponge City Construction Area without Monitoring Data [D]. Nanjing: Hohai University, 2020 (in Chinese).

作者简介: 胡方旭(1997-), 男, 江苏徐州人, 硕士, 主要从事海绵城市、城市水文研究。

E-mail: hufx@hrc.gov.cn

收稿日期: 2023-03-14

修回日期: 2023-07-15

(编辑: 沈靖怡)