

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.16.008

我国海绵设施中植物的作用与选择研究进展

高铭晨^{1,2,3}, 简美鹏^{1,2,3}, 李海燕^{1,2,3}

(1. 北京建筑大学 环境与能源工程学院, 北京 100044; 2. 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 100044; 3. 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044)

摘要: 海绵城市作为一种新的雨洪管理理念,能够有效控制径流量以及径流污染,其中植物作为海绵设施的主要组成部分,发挥了重要的作用。植物通过地上枝干与茎叶以及地下根系对海绵设施的雨水滞留、渗透与削减能力造成了影响,还可通过自身对污染物的吸收作用以及植物根系与介质和微生物之间的相互作用影响海绵设施的水质净化能力。综述了植物对海绵设施运行效果的影响及作用机制,同时对各类海绵设施中植物的选择与设计进行了归纳总结,从海绵设施种类、海绵设施运行效果、当地环境条件以及景观效益等方面阐述了海绵设施中植物选择配置的原则和意义,最后提出了海绵设施中植物作用与设计存在的挑战以及未来研究方向。

关键词: 海绵城市; 植物; 水文功能; 雨水净化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)16-0048-07

Recent Advances on the Function and Selection of Plants in Sponge Facility in China

GAO Ming-chen^{1,2,3}, JIAN Mei-peng^{1,2,3}, LI Hai-yan^{1,2,3}

(1. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Engineering Research Center for Sustainable Urban Drainage System Construction and Risk Control, Beijing 100044, China; 3. Beijing Provincial and Ministerial Collaborative Innovation Center for Energy Conservation, Emission Reduction and Sustainable Urban and Rural Development, Beijing 100044, China)

Abstract: Sponge city, represent a novel concept in stormwater management, effectively mitigating both runoff flow and pollution. As the main component of sponge facilities, plants play a vital role in sponge city. Plants influence the stormwater retention, infiltration and reduction capacity of the sponge facility through their aboveground branches, stems, leaves and underground root system. In addition, plants contribute to the stormwater purification within sponge facilities by the absorption and the interaction between plant roots, media and microorganisms. This review examines the impact and mechanisms of plants on the operational effectiveness of the sponge facility. Meanwhile, it summarizes the criteria and design considerations for selecting plants across various types of the sponge facility. The

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978032、52270086、52200001); 青年北京学者计划项目(No.024); 北京市教委-市自然科学基金联合项目(21JH0024); 北京建筑大学金字塔人才工程-建大领军培养计划项目(JDLJ20200301)

通信作者: 李海燕 E-mail: lihaiyan@bucea.edu.cn; 简美鹏 E-mail: jianmeipeng@bucea.edu.cn

principle and significance of plant selection and design in sponge facilities were summarized, considering the types of the sponge facility, their operational requirements, local environmental conditions and landscape benefits. Additionally, the challenges and future research directions concerning plant functionality and design in the sponge facility were discussed.

Key words: sponge city; plant; hydrological function; stormwater purification

海绵城市作为一种新的雨洪管理理念,通过构建低影响开发雨水系统,在场地开发过程中采用源头、分散式措施,旨在通过控制雨水径流使城市水文过程尽可能恢复到开发前的状态,从而实现雨水的有效处理和利用^[1]。常见的海绵设施包括透水铺装、生物滞留设施、绿色屋顶、雨水湿地等,其中植物是绿色屋顶、生物滞留设施、雨水湿地以及植草沟等多种海绵设施的主要组成部分,对海绵设施水文功能(雨水径流量控制)以及水质净化功能(径流污染控制)有着显著的影响。虽然海绵设施中的植物受到了广泛的关注,但是目前关于海绵设施中植物的作用与选择配置的综述较少。鉴于此,系统阐述了植物通过自身作用及与介质或微生物的相互作用对海绵设施水文功能与水质净化功能的影响,并从海绵设施种类、运行效果、当地环境条件及其他效益方面阐述了海绵设施中植物选择的原则。

1 海绵设施中植物的水文功能

海绵设施能够有效减少径流量以及控制径流峰值,其中,植物对海绵设施的雨水滞留以及雨水渗透能力均有显著的影响。

1.1 雨水滞留

据报道^[2],部分降雨可以滞留在海绵设施的植被与介质中,有植被覆盖的系统相较于无植被覆盖的系统其雨水滞留能力显著提高。一方面,植物的地上部分可以截留部分降雨^[3](见图1)。Zabret等^[3]的实验测定结果显示,桦树冠层在有叶期能够截留53%左右的降雨,而松树冠层在有叶期则能截留65%左右的降雨。植物的大小、叶片密度以及叶片形态等特征对降雨截留作用的强弱有显著的影响,Nagase等^[4]考察了景天与其他草本植物对雨水的截留能力,认为叶片小而肉质的植物对雨水的截留效果较差,而叶片粗糙且有毛的植物对雨水的截留作用较强,这可能是这类叶片可以使水滴更好地附着在叶面上所致。此外,植物的截留作用随着降雨持续时间的延长而不断减弱,当降雨量超过植物截留

的饱和状态时,植物的截留作用则可以忽略不计^[5]。

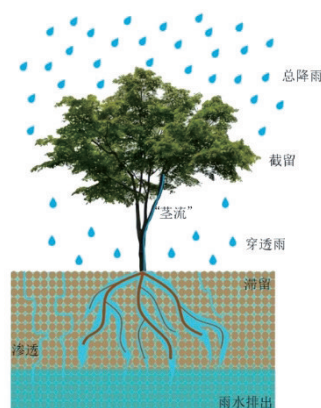


图1 海绵设施雨水滞留与雨水渗透过程示意

Fig.1 Schematic diagram of stormwater retention and infiltration process in the sponge facility

另一方面,除了植物地上部分的截留作用外,植物在介质蓄水过程中也发挥了一定的作用。植物根系可以增强介质的孔隙度与蓄水能力:植物根系的生长与腐烂可以提高介质的孔隙度,从而提高介质的蓄水能力,但是过于密集的纤维根可能会降低介质的孔隙率和蓄水空间^[6];此外,在两次降雨事件发生间隔期,植物的根系吸收与蒸腾作用有助于将上一次降雨事件中吸收水分的介质恢复至干燥状态,以提高介质在下一次降雨事件中对水分的滞留能力^[7]。

1.2 雨水渗透与削减

进入海绵设施的雨水沿着介质孔隙向下渗透,植物地上部分以及根系等与雨水和介质相互作用,从而影响海绵设施中雨水的渗透能力。植物对海绵设施雨水渗透的影响主要体现在两方面:①“茎流”。在降雨过程中,一部分雨水沿树木枝干流向地面,成为“茎流”^[3]。有研究表明,树干“茎流”不仅可以使雨水在树干附近入渗,还可以减缓雨水输送到土壤表面的速度,增强雨水的渗透^[8]。②植物根系对介质渗透能力的影响。植物根系对介质的影

响是多方面的,植物根系可以在介质中创造大孔和根通道,形成优先流,雨水沿着植物根系向下渗透,显著提高了雨水入渗的速率,同时植物根系也可以起到减少堵塞的作用^[6]。Zhang等^[9]的研究表明,具有直根的槐树对介质渗透速率的提升显著强于具有纤维根的山荆子,说明直根植物比纤维根植物更有助于提高介质中雨水的渗透速率。但是,植物根系若侵略性生长,也可能造成堵塞,从而减缓雨水入渗的速率^[10]。

除了促进雨水渗透外,海绵设施还能起到削减径流量的作用,海绵设施削减径流量作用的发挥主要依赖其蒸散作用^[11](见图2)。植物蒸腾作用的强弱受到很多因素的影响,如植物大小、叶片形状、叶片密度以及土壤含水量等。Tirpak等^[12]对比了红枫、火炬树与松树的蒸腾速率,发现在实验中具有更大、更茂密冠层的红枫树展现出更高的蒸腾速率。Wang等^[13]的研究表明,不同种类的桉树其蒸腾效率受到土壤含水量以及植物叶片面积等因素的影响。此外,关于植物对海绵设施削减径流量效果的影响还应考虑系统整体的蒸散作用。研究^[14]表明,种植植物的装置较未种植植物的装置呈现出更高的蒸散效率。但是在Nagase等^[4]的研究中,种植蒸腾作用较弱的景天类植物的绿色屋顶系统,其水量削减的效率弱于未种植植物的绿色屋顶系统,这可能是景天类植物因其地上部分对介质的遮蔽作用减弱了介质的蒸发作用,从而使总体蒸散速率减弱而造成的。

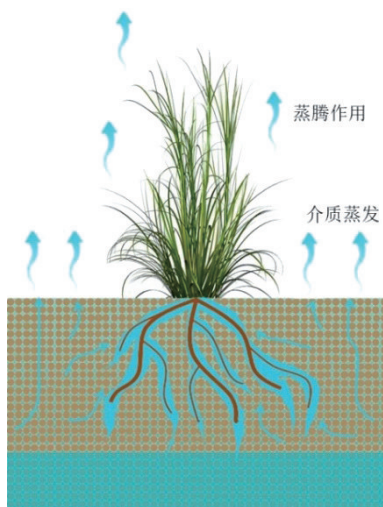


图2 海绵设施水量削减过程示意

Fig.2 Schematic diagram of water reduction process in the sponge facility

2 海绵设施中植物的水质净化功能

海绵设施能够有效去除雨水径流中的多种污染物^[15],植物对于海绵设施去除雨水径流中污染物的效率同样存在显著影响。植物对海绵设施水质净化能力的影响主要来自于两个方面:一是植物本身的吸收作用;二是植物-介质和植物-微生物的协同作用。

2.1 植物本身的吸收作用

植物本身的吸收作用对于海绵设施中污染物的去除十分重要,植物可以通过根系吸收氮磷以及微污染物等,并将其同化或储存在体内。一些具有特定属性的植物,如超积累植物对于重金属具有较高的耐受性,能够吸附并在体内富集重金属。研究^[16]表明,生物滞留设施中对苯的去除有2%~23%来自于植物自身的吸收作用。Chen等^[17]的研究发现,流入生物滞留设施的氮,一部分主要储存于植物的茎组织中,且在生物滞留设施经历22 d的干燥后,有最多23.26%的流入氮可以固定在植物组织中。植物自身对污染物的吸收作用受到植物生长率、根系性状等特征的影响。Read等^[6]认为,对氮、磷等污染物去除贡献较大的植物一般都具有较高的生长率。Mei等^[18]对比了30种生物滞留设施种植植物对铜、镉等重金属的积累能力,其中八宝景天较为适合铜和镉的积累,莴菜和玉簪积累铅的能力则较强。

2.2 植物-介质和植物-微生物的协同作用

除了植物自身的吸附作用外,植物对介质和微生物的污染物去除效率也存在一定的影响。植物与介质的协同作用(见图3)对海绵设施除污效率的影响主要是通过影响污染物暴露于植物根系与介质的时间来实现^[6]。上述研究表明,植物的存在通常可以提高海绵设施的雨水渗透能力:一方面,提高雨水渗透能力可以减少溢流,达到提高去除效率的效果;另一方面,若雨水沿根系形成优先流,可能会导致污染物与植物根系和介质的接触时间减少,从而降低海绵设施对污染物的去除效率^[19]。

植物与微生物之间多为相互影响、相互促进的关系:微生物的淋溶等作用可以加速海绵设施中的养分循环,促进植物生长。Palacios等^[20]的研究表明,接种菌根可以提高结缕草地上部分和根系的生物量,从而提高其对氮、磷以及重金属的去除效率。

植物的根系可以为微生物的生长提供空间,给微生物生长繁殖创造适宜的条件,植物叶片以及根系的腐烂还可以为海绵设施中的微生物群落提供碳源。此外,植物的根系分泌物主要包括氧、糖、氨基酸以及有机酸等,有助于微生物的生长和繁殖,但有时根系分泌物中也可能含有抗菌化合物。

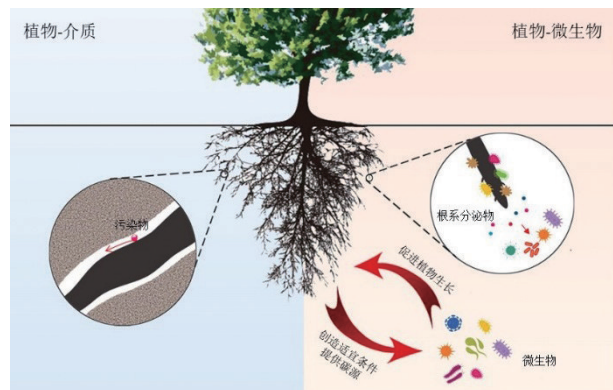


图3 植物-介质和植物-微生物的协同作用示意

Fig.3 Schematic diagram of plant-media and plant-microbial synergistic effect

除了植物与微生物生长之间的相互促进外,植物的种植方式、种类与多样性等特征还能影响海绵设施中微生物群落的组成、物种丰富度和均匀度等。Zuo等^[21]研究发现,植物可以影响生物滞留设施中的脲酶活性以及微生物群落组成,较高的脲酶活性以及脱氮优势菌种的增殖有利于提高生物滞留设施的脱氮效能。Huang等^[22]研究发现,无植物的生物滞留柱中细菌反硝化作用随着深度的增加而显著增强,而在种植植物的生物滞留柱中则没有该现象,这可能是由于植物根系可以为微生物反硝化提供适宜的环境条件,有利于雨水径流中氮素的去除。

3 海绵设施中植物的选择

海绵设施中较为常见的植物包括千屈菜、狼尾草、鸢尾、金鸡菊、芦苇等,这些植物大多具有耐旱、耐涝以及净化能力强等特点,同时其中的很多植物色彩明亮、花朵醒目,可以带来较好的美观效果。不同的植物种类对海绵设施水文功能以及水质净化功能具有不同的影响,综合来说,海绵设施中植物的选择配置主要考虑4个方面:①海绵设施种类;②海绵设施运行效果;③当地环境条件;④植物的其他效益等。

3.1 海绵设施种类对植物选择的影响

植物能够在海绵设施的环境中正常生长,是海绵设施植物选择需要考虑的重要问题。因此,在选择植物时应充分考虑植物是否能够适应海绵设施环境,以及植物对水分限制、极端温度以及污染物等的耐受性^[23]。此外,不同类型的海绵设施,其结构以及主要功能存在一定差异,因此其内部环境也存在一定的差异,对于不同海绵设施中植物的选择应考虑其本身内部的结构。

图4为几种海绵设施的构造示意。

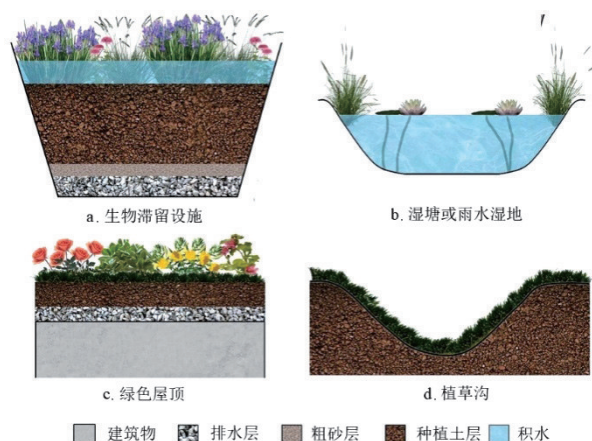


图4 海绵设施典型构造示意

Fig.4 Schematic diagram of typical structures of the sponge facility

如图4(a)所示,降雨后生物滞留设施中通常会有短期的积水(一般不超过48 h),因此,在选择植物时应考虑既对短时间积水有耐受性又对干旱有耐受性的植物^[24]。同时,为了提高介质的渗透性能,生物滞留设施的土壤中会加入砂子,使土壤变得贫瘠,因此,在选择植物时还需要考虑植物对贫瘠土壤的耐受性^[25]。如图4(b)所示,雨水湿地与湿塘中存在常年积水的部分,整体来看可以分为边缘区、缓冲区、浅水区以及深水区,在选择植物时应充分考虑植物对不同程度积水的耐受性^[26]。如图4(c)所示,海绵城市中绝大多数绿色屋顶的土壤层较薄(5~30 cm),因此在选择植物时其根系长度不应超过种植土层的厚度,以免根系破坏建筑物的屋顶结构。其次,绿色屋顶位于高处,处于暴露状态,在选择植物时应注意植物的抗风性^[27]。如图4(d)所示,植草沟主要起到对雨水径流的运输等作用,因此植草沟中一般选择根系发达、低矮、耐旱耐涝、耐雨水冲刷的植物,以草本居多^[26,28]。

3.2 不同植物对海绵设施运行效果的影响

不同种类的植物对海绵设施运行效果存在不同的影响,在选择植物时,需要考虑植物对海绵设施运行效果的影响,选择更有助于发挥海绵设施水文功能与水质净化功能的植物物种。Nagase等^[4]认为草本植物对减少径流最有效,且地上部分和根部生物量较大的植物比地上部分和根部生物量较小的植物在削减径流方面更有效。Thom等^[29]的研究表明,蒸腾速率高、抗旱且恢复性能良好的植物更有利于径流量的削减。此外,相较于单一植物种植系统,多种植物共同种植不仅有利于植物群落的生长和发展,同时对海绵设施的运行效果也有积极影响。Fowdar等^[30]的研究表明,在氮素等污染物控制方面,多种植物混合种植的系统可以在不同温度下保持较高的系统弹性。但是多种植物共同种植时,需注意植物间的相互作用,应选择能够共同生存而互相之间不存在负面影响的植物^[27]。

3.3 当地环境条件对植物选择的影响

在进行植物的选择与配置时,应充分考虑当地的环境条件,一方面,海绵设施中种植的植物应对当地的环境没有负面影响,另一方面,需要充分考虑当地的环境条件是否适宜植物的生长,寒冷地区海绵设施中的植物需有一定的耐寒能力等^[31]。例如,济南处于中纬度地带,属于暖温带半湿润季风性气候,四季分明,夏季温热多雨,春秋气候干燥,冬季寒冷,在海绵设施的植物选择中需考虑植物的耐寒性以及耐旱性等^[32]。

3.4 不同植物对植物其他效益发挥的影响

在选择植物的过程中,除了考虑植物对海绵设施运行效果的影响外,还需要考虑植物的生态效益、经济效益、景观效益以及社会效益等的发挥。海绵设施中的植物可以为一些生物提供栖息地,因此植物的设计对栖息地作用的发挥具有一定的影响^[33]。Perron等^[34]的研究发现,雨水塘中不同种类的植物尤其是湿地植物的种植对其中蜻蜓的物种组成具有显著的影响。

海绵设施除了满足其特有的环境功能外,还需要满足其他城市绿地具有的休闲娱乐、生态防护与环境美化的功能^[35]。植物选择对于海绵设施其他效益的发挥同样至关重要,Rippy等^[36]评估了15种植物,结果显示仅有4种植物能够提供较好的美学服务以及地方感(即为人们将某种特定景观元素与

某一地方联系起来的认同感与依赖感)。对植物进行合理的设计与配置,利于其更好地发挥海绵设施的景观功能。有研究对北京市一些海绵设施中的植物进行了景观效益的评估,认为植物景观设计应该对季相性和层次性给予更多的关注^[37]。

4 结语

随着城市化的不断推进,城市不透水面积不断增加,城市雨洪问题日益严重,雨水径流的管理问题应当得到充分的重视。从目前已建成并应用的海绵试点情况来看,海绵城市概念作为一种环境友好的雨洪管理理念,可以有效地管理城市雨水径流。植物作为海绵设施中的重要组成部分,应受到广泛的重视。

① 虽然目前已有关于植物、植物与介质、植物与微生物共同作用而提高污染物去除效率的研究,但对其中关系的研究仍然比较零散,有研究探索了在不同植物及其不同种植条件下海绵设施中微生物群落丰富度及优势种的差异,但是针对海绵设施微环境条件下植物、介质与微生物之间相互作用的机制和联系,包括植物根系分泌物对介质与微生物的作用机制等方面的研究仍较少。

② 目前已有很多对比种植不同植物海绵设施运行效果的研究,但这类研究通常通过种植单一种类植物的模拟实验来完成,很少研究不同植物之间的相互作用对海绵设施运行效果的影响及影响机制,或实际海绵设施中不同植物间的相互作用及其对海绵设施雨水滞留、渗透、削减以及污染物去除的贡献。

③ 目前对海绵设施中植物选择配置的研究通常仅考虑景观效益、社会效益或者污染物控制效率等单个或几个方面,很少将海绵设施水文、水质净化、景观、社会、生态等功能进行综合考察而提出植物选择配置的建议。因此,应通过多学科联合,加强海绵设施中植物选择配置的研究,以利于海绵设施中植物的科学选择和配置。

参考文献:

- [1] ZHANG K, CHUI T F M. A comprehensive review of spatial allocation of LID-BMP-GI practices: strategies and optimization tools [J]. Science of the Total Environment, 2018, 621: 915-929.
- [2] SOULIS K X, VALIANTZAS J D, NTOULAS N, et al.

- Simulation of green roof runoff under different substrate depths and vegetation covers by coupling a simple conceptual and a physically based hydrological model [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 200: 434–445.
- [3] ZABRET K, ŠRAJ M. Rainfall interception by urban trees and their impact on potential surface runoff [J]. *Clean–Soil, Air, Water*, 2019, 47(8): 1800327.
- [4] NAGASE A, DUNNETT N. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: effects of plant species, diversity and plant structure [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 104(3/4): 356–363.
- [5] SELBIG W R, LOHEIDE II S P, SHUSTER W, *et al.* Quantifying the stormwater runoff volume reduction benefits of urban street tree canopy [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806(Pt3): 151296.
- [6] READ J, FLETCHER T D, WEVILL T, *et al.* Plant traits that enhance pollutant removal from stormwater in biofiltration systems [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2010, 12(1): 34–53.
- [7] SZOTA C, MCCARTHY M J, SANDERS G J, *et al.* Tree water-use strategies to improve stormwater retention performance of biofiltration systems[J]. *Water Research*, 2018, 144: 285–295.
- [8] BERLAND A, SHIFLETT S A, SHUSTER W D, *et al.* The role of trees in urban stormwater management [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 167–177.
- [9] ZHANG D H, WANG Z G, GUO Q Z, *et al.* Increase and spatial variation in soil infiltration rates associated with fibrous and tap tree roots [J]. *Water*, 2019, 11(8): 1700.
- [10] MEHMOOD T, GAURAV G K, CHENG L, *et al.* A review on plant–microbial interactions, functions, mechanisms and emerging trends in bioretention system to improve multi-contaminated stormwater treatment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 294: 113108.
- [11] BERNDTSSON J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 351–360.
- [12] TIRPAK R A, HATHAWAY J M, FRANKLIN J A. Investigating the hydrologic and water quality performance of trees in bioretention mesocosms [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 576: 65–71.
- [13] WANG Z C, LIU S R, XU Y X, *et al.* Differences in transpiration characteristics among eucalyptus plantations of three species on the Leizhou Peninsula, southern China [J]. *Forests*, 2022, 13(10): 1544.
- [14] KEMP S, HADLEY P, BLANUŠA T. The influence of plant type on green roof rainfall retention [J]. *Urban Ecosystems*, 2019, 22(2): 355–366.
- [15] FOWDAR H, PAYNE E, DELETIC A, *et al.* Advancing the sponge city agenda: evaluation of 22 plant species across a broad range of life forms for stormwater management [J]. *Ecological Engineering*, 2022, 175: 106501.
- [16] LEFEVRE G H, NOVAK P J, HOZALSKI R M. Fate of naphthalene in laboratory-scale bioretention cells: implications for sustainable stormwater management [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(2): 995–1002.
- [17] CHEN Y, CHEN R Y, LIU Z, *et al.* Nitrogen process in stormwater bioretention: the impact of alternate drying and rewetting on nitrogen migration and transformation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(32): 43803–43814.
- [18] MEI Y, ZHOU H, GAO L, *et al.* Accumulation of Cu, Cd, Pb, Zn and total P from synthetic stormwater in 30 bioretention plants [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(16): 19888–19900.
- [19] MUERTER C P, WONG C K, LEFEVRE G H. Emerging investigator series: the role of vegetation in bioretention for stormwater treatment in the built environment: pollutant removal, hydrologic function, and ancillary benefits [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2018, 4(5): 592–612.
- [20] PALACIOS Y M, GLEADOW R, DAVIDSON C, *et al.* Do mycorrhizae increase plant growth and pollutant removal in stormwater biofilters? [J]. *Water Research*, 2021, 202: 117381.
- [21] ZUO X J, ZHANG H S, YU J H. Microbial diversity for the improvement of nitrogen removal in stormwater bioretention cells with three aquatic plants [J]. *Chemosphere*, 2020, 244: 125626.
- [22] HUANG L Q, LUO J Y, LI L X, *et al.* Unconventional microbial mechanisms for the key factors influencing inorganic nitrogen removal in stormwater bioretention columns [J]. *Water Research*, 2022, 209: 117895.
- [23] FARRELL C, LIVESLEY S J, ARNDT S K, *et al.* Can we integrate ecological approaches to improve plant

- selection for green infrastructure? [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 76: 127732.
- [24] YANG W C, LIN K H, WU C W, *et al.* Effects of waterlogging with different water resources on plant growth and tolerance capacity of four herbaceous flowers in a bioretention basin[J]. *Water*, 2020, 12(6): 1619.
- [25] 朱木兰, 郭燕萍, 黄晓鸣, 等. 3种水陆两栖植物在LID技术措施中的适宜性研究[J]. *水资源保护*, 2016, 32(1): 46-50.
- ZHU Mulan, GUO Yanping, HUANG Xiaoming, *et al.* Study on suitability of three amphibian plants for LID technical measures [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(1): 46-50 (in Chinese).
- [26] 黄婉梅. 基于LID技术设施的植物选择与配置研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- HUANG Wanmei. Research on Plant Selection and Configuration Based on LID Technical Facilities [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015 (in Chinese).
- [27] 王佳, 王思思, 车伍. 低影响开发与绿色雨水基础设施的植物选择与设计[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(21): 45-47, 50.
- WANG Jia, WANG Sisi, CHE Wu. Plant selection and design of LID and GSI [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(21): 45-47, 50 (in Chinese).
- [28] 范钦栋, 季晋晶. 海绵城市理念下道路植草沟植物的选择: 以西咸新区为例[J]. *环境工程*, 2019, 37(7): 47-51.
- FAN Qindong, JI Jinxiao. Plant selection of grass swales in road greening of sponge city construction: a case study of Xixian new district in China [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(7): 47-51 (in Chinese).
- [29] THOM J K, LIVESLEY S J, FLETCHER T D, *et al.* Selecting tree species with high transpiration and drought avoidance to optimise runoff reduction in passive irrigation systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 812: 151466.
- [30] FOWDAR H, PAYNE E, SCHANG C, *et al.* How well do stormwater green infrastructure respond to changing climatic conditions? [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126887.
- [31] KRATKY H, LI Z, CHEN Y J, *et al.* A critical literature review of bioretention research for stormwater management in cold climate and future research recommendations [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2017, 11(4): 16.
- [32] 陈雷, 赵雪梅, 谭美琴, 等. 雨水花园植物选择与配置——区域差异及济南鲁能领秀城选择建议[J]. *现代园艺*, 2019(23): 120-122.
- CHEN Lei, ZHAO Xuemei, TAN Meiqin, *et al.* Plant selection and configuration in rain garden: regional differences and suggestions on selection of Lingxiu City in Luneng, Jinan[J]. *Contemporary Horticulture*, 2019 (23): 120-122 (in Chinese).
- [33] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Performance and implementation of low impact development—a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 413-432.
- [34] PERRON M A C, PICK F R. Stormwater ponds as habitat for Odonata in urban areas: the importance of obligate wetland plant species [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2020, 29(3): 913-931.
- [35] 梁娟. 基于海绵城市背景的植物景观配置研究[J]. *城市住宅*, 2017, 24(1): 61-64.
- LIANG Juan. Research on plant landscape configuration based on the sponge city background [J]. *City & House*, 2017, 24(1): 61-64 (in Chinese).
- [36] RIPPY M A, KRAUSS L, PIERCE G, *et al.* Plant functional traits and viewer characteristics co-regulate cultural services provisioning by stormwater bioretention [J]. *Ecological Engineering*, 2021, 168: 106284.
- [37] 韩元, 刘玲, 赵利, 等. 建筑与小区生物滞留设施植物群落景观评价与植物配置分析——以北京市通州区海绵城市试点区为例[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(5): 125-133.
- HAN Yuan, LIU Ling, ZHAO Li, *et al.* Plant community landscape evaluation and plant configuration analysis of bioretention facilities in buildings and communities—a case study of sponge city area in Tongzhou District, Beijing City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(5): 125-133 (in Chinese).

作者简介:高铭晨(1998-),女,辽宁锦州人,硕士研究生,主要研究方向为生物滞留设施去除有机污染物。

收稿日期:2022-11-24

修回日期:2023-01-31

(编辑:丁彩娟)