

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.19.016

高吸水性树脂对绿色屋顶性能的强化研究

吴燕国¹, 程瑞瑞², 杨 墨³, 王宏杰^{3,4,5}, 郑宇霄⁶, 董文艺^{3,4,5},
张 凯⁷

(1. 广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510010; 2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518028; 3. 哈尔滨工业大学<深圳> 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055; 4. 深圳市水资源利用与环境污染控制重点实验室, 广东 深圳 518055; 5. 哈尔滨工业大学环境学院 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 6. 龙岗区水务局, 广东 深圳 518172; 7. 宝安区水务局, 广东 深圳 518100)

摘 要: 绿色屋顶是一项重要的海绵城市建设措施,具有能够调控雨水径流、缓解城市热岛效应等功能。由于屋顶的承重能力有限,传统绿色屋顶的基质较薄,保水能力有限,屋顶植物容易因缺水而干枯甚至死亡,极大地影响了其海绵性能,增加了绿色屋顶的运营成本。基于此,选用了一种高吸水性树脂,该树脂吸水性能良好,吸水量可达224 g/g,具有较强的重复利用性和恶劣环境(温度、盐度和pH)抗逆性。在深圳市龙岗区进行的实验表明,将其与绿色屋顶的基质混合使用,能够明显提升绿色屋顶的海绵效能。由于高吸水性树脂的存在,绿色屋顶的成坪速率得以提高,植物的生长状况明显优于无树脂组。在4次降雨中发现,高吸水性树脂能够明显降低绿色屋顶的径流量,最高可降低15.9%。综合其易得性和低价格的优点,高吸水性树脂保水性能良好,能够明显提升绿色屋顶的海绵效能,是一种具有广阔应用推广潜力的绿色屋顶基质改良剂。

关键词: 高吸水性树脂; 绿色屋顶; 保水性能; 径流控制; 海绵城市

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)19-0102-06

Performance of Green Roof Enhanced by Super Absorbent Polymer

WU Yan-guo¹, CHENG Rui-rui², YANG Mo³, WANG Hong-jie^{3,4,5},
ZHENG Yu-xiao⁶, DONG Wen-yi^{3,4,5}, ZHANG Kai⁷

(1. Guangdong Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510010, China; 2. Shenzhen Branch, CSCEC AECOM Consultants Co. Ltd., Shenzhen 518028, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology <Shenzhen>, Shenzhen 518055, China; 4. Shenzhen Key Laboratory of Water Resource Utilization and Environmental Pollution Control, Shenzhen 518055, China; 5. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 6. Longgang District Water Supplies Bureau, Shenzhen 518172, China; 7. Bao'an District

基金项目: 深圳市科技创新委员会——可持续发展专项(KCXFZ202002011006362); 深圳市科技创新委员会——技术创新计划技术攻关项目(JSGG20170824102728529)

通信作者: 王宏杰 E-mail: whj1533@qq.com

Water Supplies Bureau, Shenzhen 518100, China)

Abstract: Green roof is an important sponge city measure, which can regulate rainwater runoff and alleviate urban heat island effect. Due to the limited load-bearing capacity of the roof, the thickness of the matrix of traditional green roof is thin, and the water retention capacity is limited. In addition, roof plants are prone to dry up or even die due to lack of water, which greatly affects the sponge performance and increases the operational cost of the green roof. Based on this, a polymer which had a good water absorption performance was selected. Its water absorption capacity was 224 g/g, and it had strong reusability and resistance in harsh environment (temperature, salinity and pH). The experimental results in Longgang District of Shenzhen showed that the sponge efficiency of green roof was significantly improved when the polymer was mixed with the matrix of green roof. Due to the presence of super absorbent polymer, the formation rate of green roof was improved, and the growth of plants was significantly better than that of the blank group without polymer. The super absorbent polymer significantly reduced the green roof runoff by up to 15.9% in four rainfall events. Considering the advantages of easy availability and low price, the super absorbent polymer has good water retention performance, and significantly improves the sponge efficiency of green roof, indicating that it is a green roof matrix ameliorant with broad application potential.

Key words: super absorbent polymer; green roof; water retention capacity; runoff control; sponge city

绿色屋顶是常用的一种海绵城市措施,主要由排水层、基质层和植被层组成,从广义上讲,在建筑物的顶部栽种植物的措施都可视为绿色屋顶^[1-2]。屋顶属于较为特殊的环境,承载能力有限、日照时间长、蒸腾作用明显,进而导致屋顶的植物极易因缺水而干枯死亡^[3-4]。因此,在建设绿色屋顶时往往要采用自动喷淋、滴灌、加厚基质层和土壤改良的方法来保持绿色屋顶的水分。但人工补水的成本较高且效果并不明显,基质层的厚度也受到屋顶承载力的限制,而利用土壤改良剂提高绿色屋顶基质保水能力的成本较低,且能在最大程度上不额外增加屋顶载荷,是一种极具优势的绿色屋顶水分保持技术^[5]。

目前,绿色屋顶中采用的改良剂主要参照传统农业常用的土壤改良剂,主要包括炭类、凝胶类和树脂类^[6-8]。炭类土壤保水剂通常采用生物质炭,即生物质材料在真空或缺氧条件下低温热解而形成的一种具有多孔结构且比表面积较大的有机材料,其材料特性能够有效提高土壤水分的停留时间。凝胶是一种外观均匀、具有一定弹性的半固体高分子溶液或溶胶,凝胶内部往往含有大量液体,部分凝胶品种具有失水缩小、吸水膨胀的弹性特点。采

用硅酸盐凝胶能够明显提升土壤的含水量,进而促进植物生长。从广义上讲,树脂是以硅、氧、铝等元素为主的塑料基材聚合物,种类多、应用广,而吸水性树脂(SAP)是一种新型具有优良吸释水能力的材料,该材料质量轻、吸水量大、降解物环保无污染,是一种潜在的绿色屋顶基质优良改良剂。但目前大部分关于SAP的研究主要集中于其在农业生产和城市绿化中土壤改良的应用效果,而应用于绿色屋顶这种特殊场景的相关研究较少^[9]。

为了探究SAP应用于绿色屋顶的潜在价值,笔者选取了一种常见易得的SAP,利用烧杯实验对其吸水性、反复利用性和抗逆性等基本性能进行了测试,并将其添加至绿色屋顶模拟装置的基质中,以考察其对绿色屋顶海绵性能的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选用的SAP为国产聚丙烯酸钾盐型,其外观呈白色半透明状,为不规则颗粒,见图1(a),颗粒大小为8目。绿色屋顶模拟装置所用基质为人工调配的改良种植土壤,具体比例为50%泥炭土、15%珍珠岩、15%蛭石和20%腐熟秸秆。屋顶植物为佛甲草^[10],平均高度为5~10 cm,表观形貌见图1(b)。

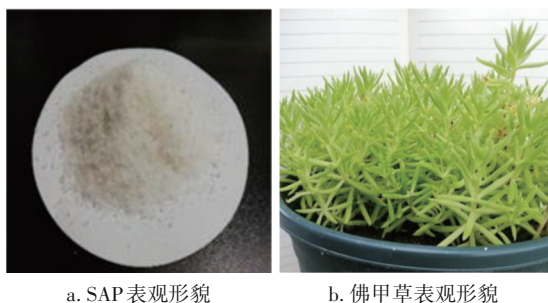


图1 实验材料示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental materials

1.2 实验方法

1.2.1 SAP的基本性能

SAP的吸水性:称量0.5 g SAP加入到1 L去离子水中(26℃),恒温静置,在不同时刻将SAP捞出,用滤纸吸干表面水分后称量SAP的质量,并计算其吸水量。

SAP的反复利用性:称取0.5 g SAP加入到1 L去离子水中(26℃),静置吸水,6 h后将SAP捞出,并用滤纸吸干表面水分后测定吸水量。然后将其置于烘箱中,在50℃下烘干,直至SAP质量恒定。将上述吸水烘干步骤循环若干次,分析SAP的吸水量随循环次数的变化。

SAP的抗逆性:①盐度的影响,将0.5 g SAP加入到1 L浓度分别为0、0.1%、0.5%、1%、2%、4%的NaCl溶液中,在26℃下静置6 h后捞出,用滤纸吸干表面水分后测定SAP的质量,分析盐浓度对SAP吸水量的影响。②pH的影响,将0.5 g SAP加入到1 L pH分别为4、4.5、5、6、7、8、9、9.5、10的去离子水中(利用H₂SO₄和NaOH调节pH),在26℃下静置6 h后捞出,用滤纸吸干表面水分后测定SAP的质量,分析pH对SAP吸水量的影响。③温度的影响,将0.5 g SAP加入到1 L水温分别为8、26、40℃的去离子水中,在26℃下静置6 h后捞出,用滤纸吸干表面水分后测定SAP的质量,分析温度对SAP吸水量的影响。

1.2.2 高吸水性树脂对绿色屋顶性能的影响

① 绿色屋顶的构建

绿色屋顶模拟装置为120 cm×400 cm×20 cm的盆状容器,材质为PVC。该容器不透水,仅在底部安装有一个用于收集径流雨水的排水口。整个绿色屋顶模拟装置由基质层(10 cm种植土)、过滤层(300 g/m²土工布)、排水层(25 mm聚乙烯材质排水

板)和植被层构成,SAP施用量为0.6%。绿色屋顶结构如图2所示。深圳是海绵城市建设示范性城市,其中龙岗区在海绵城市建设方面处于领先地位,该模拟实验选择在龙岗区国际低碳城某小区屋顶进行,对于SAP在南方城市绿色屋顶的实际应用具有重要的借鉴意义^[11]。

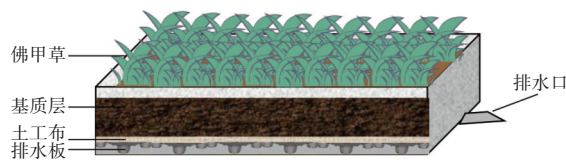


图2 绿色屋顶结构示意

Fig.2 Structure diagram of the green roof

② 绿色屋顶效能测定

盖度:在模拟装置上方,于栽种后的不同时间拍摄照片,按照1:1的比例导入CAD中,利用多线段命令(PL)划定植被的种植范围,然后运行面积命令(AREA)分别测算植被覆盖区域面积A₁和总种植面积A₂,再依据式(1)计算绿色屋顶的盖度A。

$$A = \frac{A_1}{A_2} \times 100\% \quad (1)$$

佛甲草的生理指标:采用随机取样方式选取绿色屋顶的植株来测定植物的生理指标。

将0.2 g叶片剪碎后放入三角瓶中,加入20 mL叶绿素提取液(丙酮:乙醇:水=4.5:4.5:1),在室温暗处条件下提取24 h,直至叶片完全变白。用空白提取液调零,分别在663、645 nm波长下测量上清液的吸光度值,再依据式(2)计算叶绿素含量。

$$C = \frac{(20.77 \times A_{663} + 17.70 \times A_{645}) \times V}{W \times 100} \quad (2)$$

式中:C为提取液中叶绿素含量,mL/g;V为提取液的体积,mL;W为叶片的鲜质量,g;A₆₆₃为提取液在663 nm处的吸光度值;A₆₄₅为提取液在645 nm处的吸光度值。

取生长情况较为一致的、完整的佛甲草叶片,冲洗后吸干叶片表面水分,将佛甲草叶片剪碎后快速称取0.25 g,将剪碎的叶片放置于试管中,加入25 mL去离子水恒温浸泡12 h后采用电导率仪测定上层清液的电导率,然后将试管在沸水浴中加热处理30 min,冷却后再次测量上层清液的电导率,依据式(3)计算佛甲草叶片的相对电导率。

$$R = \frac{R_1}{R_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中: R 为叶片的相对电导率,%; R_1 为沸水浴前浸提液的电导率,mS/cm; R_2 为沸水浴后浸提液的电导率,mS/cm。

将生长情况较为一致的叶片剪碎,并迅速称取0.5 g记为鲜质量,然后于烘箱中在50℃下烘至恒质量,记为干质量,依据式(4)计算叶片的相对含水量。

$$W_c = \frac{W_f - W_d}{W_f} \times 100\% \quad (4)$$

式中: W_c 为叶片的相对含水量,%; W_f 为叶片的鲜质量,g; W_d 为叶片的干质量,g。

径流量监测:在实验装置末端安装出水口,降雨时测量单位时间内排水口流出的雨水体积,并计算径流量。

2 结果与讨论

2.1 SAP基本性能分析

2.1.1 SAP的吸水性

SAP良好的吸水性是其抗旱能力的基础,单位时间内其吸水的速度越快,在灌溉和降雨时所能吸收的水分就越多。实验中,SAP吸水量的变化如图3所示。可以看出,SAP在前90 min的吸水速率较快,90 min后吸水速率变慢,120 min时SAP达到饱和状态,其单位质量吸水速率为1.83 g/(g·min),最高吸水量达到了224 g/g,远远超过同样作为保水剂的生物质炭。

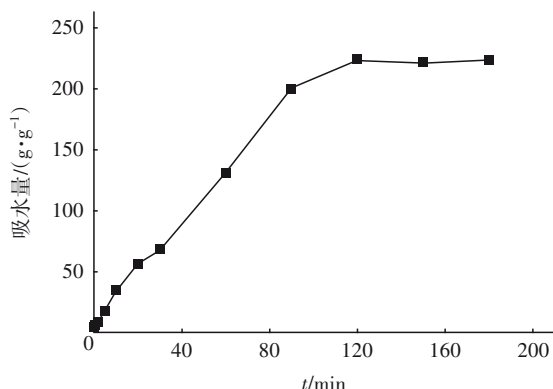


图3 SAP吸水量的变化

Fig.3 Change of water absorption of SAP

2.1.2 SAP的反复利用性

SAP在降雨和灌溉时吸水,干旱时释水,屋顶的特殊环境大大加强了基质的蒸腾作用,并导致这种吸释循环现象更为明显,因此有必要考察SAP在反复吸释水过程中吸水量的变化。本实验中,在进行

高频率的反复吸水烘干以后,SAP吸水量仅下降了19%(见图4),说明SAP具有较强的反复利用性,这在一定程度上能够降低经济成本。

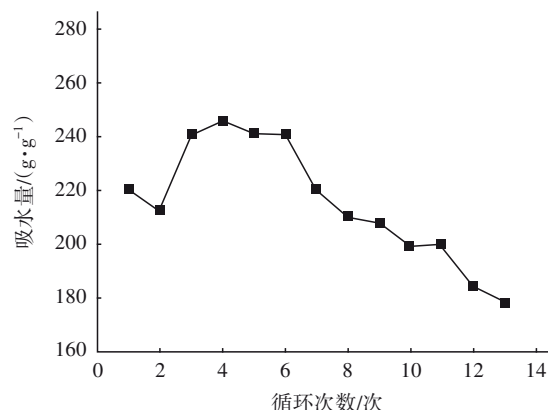


图4 吸水次数对SAP吸水量的影响

Fig.4 Influence of repeated water absorption times on water absorption of SAP

2.1.3 SAP的抗逆性

通过实验发现,随着NaCl浓度的增加,SAP吸水量明显减小。这是由于SAP外部环境中的离子浓度增大,内、外离子浓度差异所导致的渗透压会降低SAP吸水的渗透压力,进而导致SAP的吸水量降低。当NaCl浓度为0.08%时,SAP的吸水性已经小于在去离子水中的50%;当外界环境中NaCl的浓度达到1%时,SAP的单位吸水量仅为其在去离子水中的10%。该现象说明,外界环境中的离子浓度可影响SAP的吸水效能。

温度对SAP吸水量同样有着显著的影响。SAP的单位吸水效能随着温度的升高而先增大后减小,且在26℃时的单位吸水效能最好。虽然高温和低温均会明显抑制SAP的吸水量,但其吸水量仍远远高于其他种类的基质改良剂。

pH影响实验结果表明,当pH>4.5时,SAP均呈现出较高且较为稳定的吸水量;当pH=4时,SAP的吸水量下降超过50%。根据《种植屋面工程技术规程》(JGJ 155—2013),绿色屋顶基质使用的田园土较适宜的pH范围为6.5~8.2。故一般情况下,土壤pH不会对SAP吸水效能产生较大的影响。但常有酸雨的地区可能会造成土壤pH偏低,有可能会对SAP的吸水性能产生一定影响。

2.2 高吸水性树脂对绿色屋顶性能的影响

2.2.1 SAP对绿色屋顶盖度的影响

盖度是考核成坪速率的重要指标,图5为SAP

对绿色屋顶盖度的影响。可知,采用SAP后明显提高了绿色屋顶植物的增长速度,提升了绿色屋顶盖度的形成速率。5月3日对应的培养时间约为40 d,此时基质中含有SAP的盖度明显大于对照组,含有SAP绿色屋顶的盖度达到82%,而对照组仅为63%。7月17日时,含有SAP绿色屋顶的盖度达到了90%,而对照组为86%。

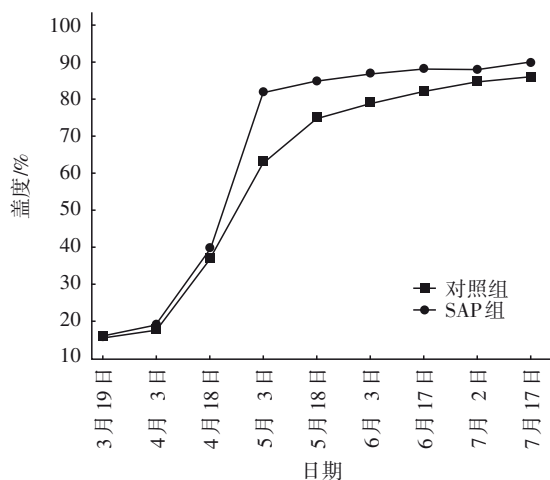


图5 SAP对绿色屋顶盖度的影响

Fig.5 Influence of SAP on the cover degree of green roof

2.2.2 绿色屋顶植物的生长状况

5月3日后,植物盖度的增长率逐渐下降,表明佛甲草的生长已经进入成熟期,因此5月3日后检测了佛甲草叶片的叶绿素含量、含水率和相对电导率,结果如图6所示。

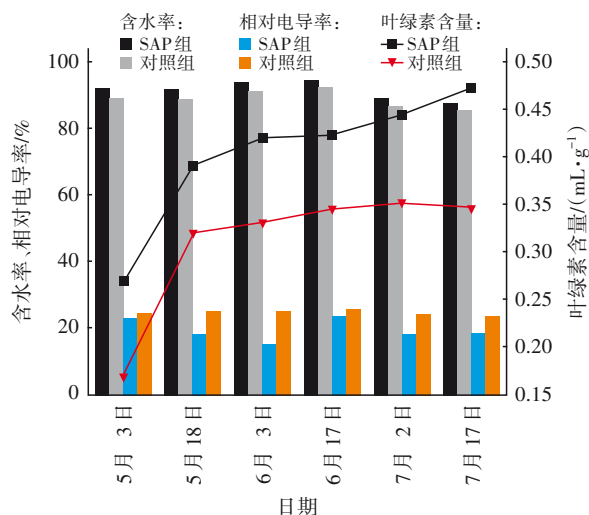


图6 绿色屋顶植物的生长情况

Fig.6 Plant growth of green roof

由图6可知,SAP组和对照组叶片的含水率差异较小,SAP组的相对电导率低于对照组,而叶绿素

含量明显高于对照组。表明SAP组植物的细胞膜透性较小,生长状况较对照组好。综上可知,SAP能促进绿色屋顶植物的生长。

2.2.3 对雨水径流的影响

实验期间共记录了4场有效降雨。依据《降水量等级》(GB/T 28592—2012),该4场降雨中包含中雨、大雨和暴雨3种雨型,具有较强的实际代表性,降雨特征与径流产率见表1。

表1 降雨特征与径流产率

Tab.1 Rainfall characteristics and runoff yield

时间	降雨量/ mm	降雨前干旱 天数/d	径流产率/%	
			对照组	SAP组
5月27日	9.3	1	86.3	72.3
5月31日	9.6	3	61.3	45.4
6月24日	19.8	10	0	0
6月30日	46.0	5	22.5	13.3

从表1可以看出,SAP组的径流产率明显小于对照组,说明SAP的存在明显提高了基质的持水量,减少了径流排放量,在提高了绿色屋顶使用寿命的同时,强化了其海绵效能。

另外,前期干旱的天数明显影响绿色屋顶的径流产率。干旱天数越多,径流产率越低,5月27日与5月31日的降雨量基本相同,但是由于5月31日前期干旱天数更多,其基质更干旱,蓄水能力更强,因此导致了其径流产率明显小于5月27日的径流产率;6月24日降雨量为19.8 mm,达到了大雨水平,但是因为前期干旱天数的时间较长,基质干旱程度大大提高,吸水能力较强,导致绿色屋顶出水口处并无径流产生。而6月30日的降雨虽为暴雨,但由于降雨前干旱天数为5 d,多于5月份降雨前的干旱天数,土壤更为干旱,保水能力更强,进而导致6月30日的径流产率也小于5月份的两场中雨。另外,由于6月份植被生长趋于成熟,较为繁密的植物根系和茎叶对雨水的拦蓄作用也是6月份的径流产率小于5月份的重要原因。

3 结论

高吸水性树脂材料SAP的吸水能力较强,可反复利用,并能抵抗多种不良环境(高盐、高温、酸碱环境)。将该SAP以0.6%的投量添加到绿色屋顶的基质中发现,绿色屋顶植物的生长速率加快,植物生长状态得到了明显改善,雨水径流控制性能得到了有效提升,说明其是一种有效的绿色屋顶基质

改良剂,结合SAP的环境无害化和简单易得等多种优势,该SAP具有较好的可行性和实用性。

参考文献:

- [1] 郑馨竺,周嘉欣,王灿. 绿色屋顶的城市降温与建筑节能效果研究[J]. 生态经济, 2021, 37(42): 222-229.
ZHENG Xinzhu, ZHOU Jiaxin, WANG Can. Research on the urban cooling and energy saving effect of green roofs [J]. Ecological Economy, 2021, 37(42): 222-229 (in Chinese).
- [2] 张贤巍,宫永伟,印定坤,等. 简单式绿色屋顶对雨水径流营养盐的调控效果研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(13): 106-112.
ZHANG Xianwei, GONG Yongwei, YIN Dingkun, et al. Effect of extensive green roof on regulation of nutrients in rainfall runoff [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 106-112 (in Chinese).
- [3] JAMEI E, CHAU W H, SEYEDMAHMOUDIAN M, et al. Review on the cooling potential of green roofs in different climates [J]. Science of the Total Environment, 2021, 791: 148407.
- [4] HEIM A, LUNDHOLM J. Changes in plant community composition and functional plant traits over a four-year period on an extensive green roof [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 304: 114154.
- [5] MAZLOOMI F, JALALI M. Effects of vermiculite, nanoclay and zeolite on ammonium transport through saturated sandy loam soil: column experiments and modeling approaches [J]. Catena, 2019, 176: 170-180.
- [6] 安艳,姬强,赵世翔,等. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 293-300.
AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shixiang, et al. Effect of biochar application on soil aggregates distribution and moisture retention in orchard soil [J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 293-300 (in Chinese).
- [7] FARRELL C, ANG X Q, RAYNER J P. Water-retention additives increase plant available water in green roof substrates [J]. Ecological Engineering, 2013, 52: 112-118.
- [8] LI L B, ZHANG H M, ZHOU X M, et al. Effects of super absorbent polymer on scouring resistance and water retention performance of soil for growing plants in ecological concrete [J]. Ecological Engineering, 2019, 138: 237-247.
- [9] SURESH R, PRASHER S O, PATEL R M, et al. Super absorbent polymer and irrigation regime effects on growth and water use efficiency of container-grown cherry tomatoes [J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2018, 61(2): 523-531.
- [10] 杜超,宋瑞平,陈国芬. 绿色屋顶常用改良土基质初期污染物淋失特性实验研究[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(12): 1526-1531.
DU Chao, SONG Ruiping, CHEN Guofen. Experimental study on the leaching characteristics of pollutants in the early stage of green roofs with commonly used improved soils as matrix [J]. Environmental Pollution & Control, 2021, 43(12): 1526-1531 (in Chinese).
- [11] 刘建,龚小强,任心欣,等. 深圳市海绵城市的建设与创新[J]. 深圳大学学报(理工版), 2020, 37(4): 331-346.
LIU Jian, GONG Xiaoqiang, REN Xinxin, et al. Sponge city construction and innovation in Shenzhen [J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering), 2020, 37(4): 331-346 (in Chinese).

作者简介:吴燕国(1982-),男,山东郓城人,硕士,高级工程师,主要研究方向为建筑及市政给排水设计、绿色建筑、海绵城市。

E-mail:31377932@qq.com

收稿日期:2022-02-27

修回日期:2022-06-17

(编辑:任莹莹)