

改性木屑对初期雨水径流污染控制的性能研究

刘茵¹, 张挺², 王旭冕³, 张建锋³

(1. 西安建筑科技大学 建筑设计研究院, 陕西 西安; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010;
3. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 城市绿地系统在储蓄雨水的同时净化水质, 可以达到径流滞纳消峰和面源污染削减的双重功效, 是目前国内海绵城市建设的重要内容之一。本文基于西安市城区屋面和路面降雨径流污染特征监测分析, 利用改性木屑与土壤形成的复合基质来改良绿地系统, 在提升绿地基层持水性能的同时强化其对初期雨水污染物的截留与消减。结果显示, 屋面及道路前 30 min 径流中 COD、SS、TN 浓度的衰减速度最大, 后期污染物浓度稳定; 与屋面比较, 城市道路初期雨水污染物浓度较高, 初期雨水含有污染物浓度占到整场降雨的 65% 以上; 复合基质的持水量比原状土壤提高 50%, 复合基质对径流雨水中主要污染物有较好去除效果, 去除率稳定在 60% 以上。研究表明采用改性木屑构造的复合基质作为绿地基层, 对初期雨水径流有较好蓄存和净化效果。

关键词: 城市绿地系统; 改性木屑; 持水量; 径流污染控制

中图分类号: TU998.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)05-0730-05

Study on pollutants removal in the initial rainwater runoff with modified sawdust

LIU Yin¹, ZHANG Ting², WANG Xumian³, ZHANG Jianfeng³

(1. Architectural Design and Research Institute, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
2. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China;
3. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Urban green space system was promoted to reduce runoff and contaminants widely, and enough attention was paid in Sponge City Strategy Planning which was launched in many Chinese urban city. Based on characteristics of rainfall and runoff pollutants at roofs and pavements in Xi'an a novel lawn treatment system with composite material basement of modified sawdust was designed to improve the capacity of water holding and pollutants removal. Results demonstrated that the rate of reduction of COD_{Cr}, SS, and TN content in the initial 30 min rainwater from roof and road were higher than the subsequent runoff process. Pollution concentrations in the rainwater runoff from road was higher than that from building roof, and concentrations of main pollutants in the initial rainwater account for 65% more than that in the entire rainfall; and the removal efficiency of improved lawn treatment system exceeded 60% for main contaminants and heavy metal pollutants, and the holding water capacity was increased up to 30%. This research indicated that the improved lawn treatment system could be applied successfully for rainwater management and non-point source pollution control in the urban area.

Key words: urban green space; modified sawdust; holding water capacity; runoff pollutants reduction

近年来极端天气条件下超强暴雨诱发的城市内涝危害频发, 传统的城市雨洪快排模式已经无法从根本上解决这一难题。2013 年以来, 各大中城市积极开展以“海绵城市”理念为核心的雨水系统规划与建设, 以期在调控城市径流量的同时实现面源污染的有效削减, 实现雨水的资源化利用^[1]。实践证明, 以绿色屋顶、下凹式绿地、雨水花园等为代表的低影响开发(LID, Low Impact Devel-

opment)雨水设施, 在实现城市景观功能的同时, 可以有效实现雨水量的积蓄、调节和径流污染削减^[2]。这其中, 结合城市降雨及径流污染特征, 通过绿地表层土壤改良, 强化高污染负荷初期雨水截留和污染物去除效果, 是充分发挥绿地雨水系统功能的关键^[3]。

研究表明, 城市绿地对径流污染物的去除机理主要包括绿地表层土壤和植物根系的过滤、截

收稿日期: 2017-08-23

修改稿日期: 2018-09-19

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0403403-3/01)

第一作者: 刘茵(1971—), 女, 高级工程师, 主要研究方向: 水处理与节水技术, 建筑给排水. E-mail: yin_liu@xauat.edu.cn

通讯作者: 张建锋(1970—), 男, 副教授, 主要研究方向为水处理与节水技术. E-mail: zhangjianfeng@xauat.edu.cn

留、吸附等作用^[4]。径流中的氨氮类物质历经吸附和生物代谢得到降解，磷的去除主要是土壤吸附、植物吸收以及与钙、铁形成沉淀^[5-7]。另外，改良土壤渗滤介质可以实现径流中无机磷分层吸附，土壤中加入“砂砾料”和“无砂混凝土”的多层渗滤介质系统可提高对磷去除率^[6-8]。径流中 SS 主要通过土壤的过滤被截留，同时植物的根系作用也会增强过滤效果^[9]。相关研究也揭示了植物根系可以吸收和降解酚、氰、铬、锌等污染物^[10]，植草对重金属、尤其是呈离子状态的重金属有很好的截留效果^[11-12]。作为综合性污染指标的 COD 主要依靠生物和非生物作用降解，其中生物分解作用使截留在土壤的 90% 的有机物得到去除^[13]。

目前，有关绿地系统中污染物处理的研究多集中于植物作用和表层以下土层重建，很少涉及到复合基质改良土壤的技术研究。本文在分析城市屋面及道路雨水径流污染特征的基础上，采用改性木屑与土壤混合组成复合基质的方式提高绿地系统的污染截留效果，在提高绿地系统持水能力的同时强化径流污染物截留效果，提升初期径流高污染负荷的原位控制效果，为目前开展的城市绿地系统建设提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 降雨径流污染特征变化研究

雨水采样点为城市道路旁雨水井和建筑物落水管雨水出口，采样瓶为 300 mL 聚乙烯塑料瓶，在使用之前用自来水涮洗干净，然后再用 10% (v/v) 的 HNO₃ 震荡洗涤一次，再用自来水反复涮洗，最后用超纯水润洗，晾干后盖好备用。降雨时自产流开始采集第一个水样，每 5 分钟采集一个水样，直到采集到 90 min 的径流或者径流结束为止，期间如果 5 min 内无法采集满 300 mL，则直到采集满 300 mL 为止，并做好相关记录。降雨量条件由自动雨量监测站记录，该雨量计每隔 0.2 mm 进行一次记录，可对降雨进行全程监测。

1.2 木屑土壤混合物蓄水性能研究

木屑改良处理。孔径分布分析表明，实验用木屑中微孔比例为 97.7%。木屑经 2 mm 孔径筛去除细小颗粒，用稀盐酸浸泡 2 h 后，用水冲洗三遍，再用 5% 的三氯化铁(FeCl₃)浸泡 24 h，捞出晾干，密封储存。

持水性实验。将木屑、木屑混合物、土壤三种基质放置于对应的塑料培养皿中，用电子天平称量各自样本的质量，记录数据作为吸水前的质量。

分别用水浸没 12 h 后用吸水纸吸培养皿中多余的水分直至吸干，用电子天平量称重，吸水前后两次质量之差则为材料的饱和蓄水量。设立 3 组平行样，样本 1、2 和 3 为木屑，样本 4、5、6 为木屑混合物(所采用的基质符合种植草坪土壤含量要求和复合材料蓄水功能要求^[14]，木屑和土壤的体积比为 95 : 100)，样本 7、8 和 9 为土壤。除样本 8 外其它样本体积相等，样本 8 土壤质量和木屑样本质量基本相等，以确定土壤的体积和密度换算关系。

1.3 改良绿地实验装置对径流污染去除研究

实验装置平面尺寸 30 cm×60 cm，高度 50 cm，由上往下依次为 10 cm 超高、5 cm 土壤、30 cm 复合基质和 3 cm 石英砂层，其中复合基质为改性木屑和土壤按照 95 : 100 体积比例混合物，种植植物为麦冬和果岭草两种常见草坪草。装置底部装有出水管、顶部设进水布水管和流量调节阀门。实验中根据不同降雨量折算装置进水量和取样时间设置。实验水样采用降雨期间收集的 30 min 初期径流，个别实验中采用人工配制水样，人工配置雨水的水质见表 1。

表 1 人工配制雨水水质

Tab. 1 The concentration of main pollutants in artificially prepared rainwater

污染物	COD _{Cr}	TN	TP	NH ₃ -N
浓度/ mg · L ⁻¹	250~400	8~15	1.5~2.1	3.6~6.4

水样监测指标包括 SS、COD_{Cr} (文中均采用 COD)、TN、TP、NH₃-N、NO₃-N、Pb 等 6 个指标，方法采用国家标准方法。

1.4 复合基质中 Fe 的流失性能

复合基质中包含经 FeCl₃ 处理的改性木屑，在实验过程中通过监测装置出水中的总 Fe 浓度变化，评估复合基质中 Fe 的流失情况。Fe 浓度采用邻菲罗啉法测定^[17]。

2 研究结果与分析

2.1 土壤木屑蓄水性能研究

持水量指的是单位质量土壤抵抗重力所能吸持的最大水量，一般用来表示土壤的蓄水性能。原状土壤、复合基质(土壤 : 木屑体积 = 100 : 95)的持水量分别为 0.56 g/g、0.86 g/g(图 1 所示)。与土壤对比，复合基质的持水量提高了约 54%，这对于雨水径流量的滞纳削峰作用显著。从持水时间上看出，复合基质的持水时间可以达到 70 h，而原状土壤的持水时间为 58 h，持水时间的延长对于土壤保墒和植物生长具有积极作用。实验所用木屑的微孔比例

高达 97.7%，因此复合基质的持水性强于土壤。进一步的分析发现，两种材料在自然条件下的含水率下降速率基本相当，因此复合基质在实际中的使用不会明显改变地层的雨水入渗性能。

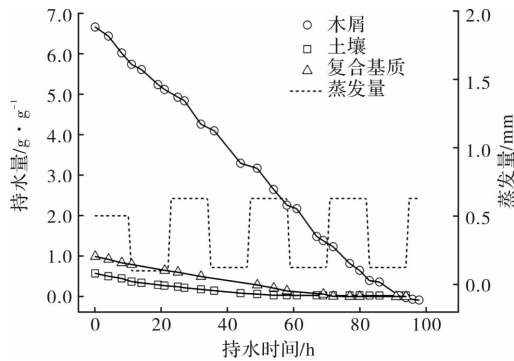


图1 不同基质的持水量随时间变化

Fig. 1 The water holding capacities of various basement materials with time

2.2 降雨径流污染特征

从楼宇落水管连接的第一个雨水口开始出现径流开始计时，屋面雨水多个样品的污染指标监测表明污染负荷在 0~30 min 较高(见图 2)，前 30 min 内 COD、SS、TN 的衰减速度较大，随时间延长各污染指标趋于稳定。降雨初期由于屋面积累降尘物的溶解与分散，初期雨水中 COD 和 SS 的浓度分别达到 403 mg/L、327 mg/L。随降雨时间延长，各项指标值持续下降，约 50 min 后各项指标值趋于稳定，雨水的 COD、SS、TN 和 TP 浓度分

别稳定在 62.76 mg/L、51.53 mg/L、1.71 mg/L 和 1.61 mg/L，pH 在整个降雨过程中基本不改变。

与屋面径流相比较，城市道路径流雨水污染物浓度更高。监测数据表明，降雨初期道路雨水中 COD、SS、TN、NO₃-N 和 TP 浓度分别为 523.2 mg/L、389.4 mg/L、17.1 mg/L、32 mg/L 和 6.96 mg/L。从污染指标变化趋势来看，在前 40 min 路面雨水的 COD、SS、TN、NO₃-N 和 TP 下降比较快，随后各污染指标趋于稳定，其中 COD、SS、TN、NO₃-N 和 TP 稳定在 71.38 mg/L、47.20 mg/L、3.01 mg/L、2.19 mg/L 和 1.91 mg/L，降雨前 40 min 雨水径流中各类污染物含量占整场降雨污染物总量的 50%~80%。屋面及道路两种下垫面条件下径流污染均呈现出初期雨水污染负荷较大的特征，因此在西安地区开展雨水利用时，结合实际情况确定的“径流初期 30 min 内雨水污染控制”是城市面源污染负荷削减的关键。

3 降雨径流中污染物的去除

3.1 降雨径流中常规污染物去除

(1) 屋面降雨径流污染物去除

采用复合基质构建的模拟绿地系统对实际实际屋面径流污染削减效果见图 3。监测显示，屋面径流污染物浓度变化过程中，“初期雨水高污染负荷”的特征明显，在前 30 min，系统对 COD、SS、NH₃-N、TP、NO₃-N、TN 等指标的去除效果分别为 60.7%、68.4%、70.9%、67.4%、66.8%、62.3%，系统出水对应的指标值分别为 12.69 mg/L、9.6 mg/L、0.29 mg/L、0.12 mg/L、0.21 mg/L 和 0.36 mg/L；30~90 min 时段内，系统对上述 6 个指标的去除率分别为 48.3%、62.1%、75.0%、58.2%、70.7%、70.0%。在整个径流期间，对于确定的 6 个污染指标的去除率最小为 48.3% (COD)、最大为 70.9% (NH₃-N)。

收集实际降雨条件下的道路雨水口径流，研究模拟绿地系统对于道路雨水中污染物的去除效果(见图 4)。本场次降雨的历时较短、强度较大且整个过程中降雨强度变化较大，因此，径流雨水中污染物浓度较大，且受到降雨强度突然增强影响径流雨水污染物浓度出现突然升高现象；降雨历时前 10 min 污染物浓度呈现逐渐下降趋势，降雨历时 10 min 以后降雨强度增大，污染物浓度随后也出现上升趋势，但与初期雨水污染物相比则小很多。由于降雨径流中夹杂较多雪松针形落叶，SS 浓度较高。

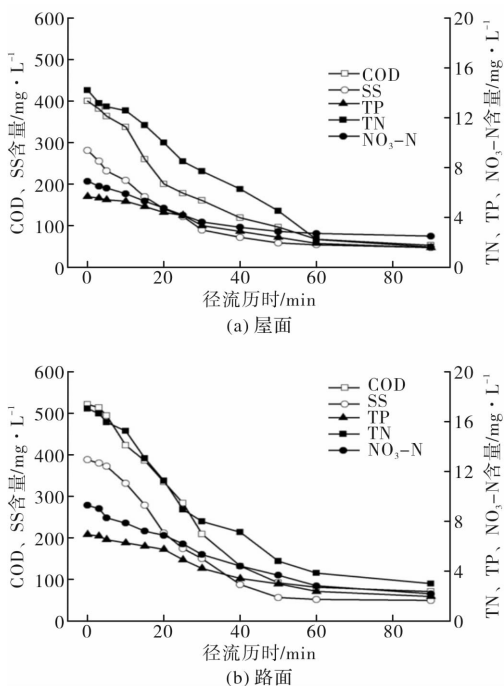


图2 屋面和路面径流水质随时间变化

Fig. 2 Pollutants concentration of rainfall runoff from roof and road with time

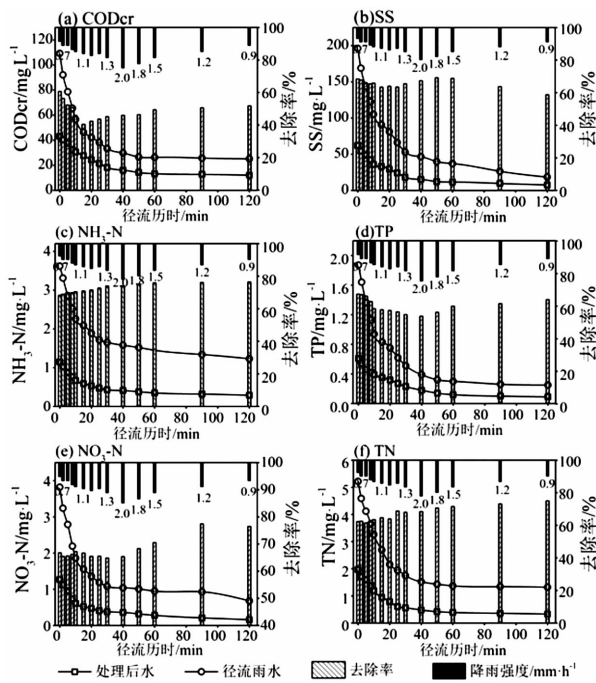


图3 复合基质去除屋面径流雨水污染物效果

Fig. 3 Removal efficiency of composite materials basement for rainwater pollutants in roof rainwater runoff

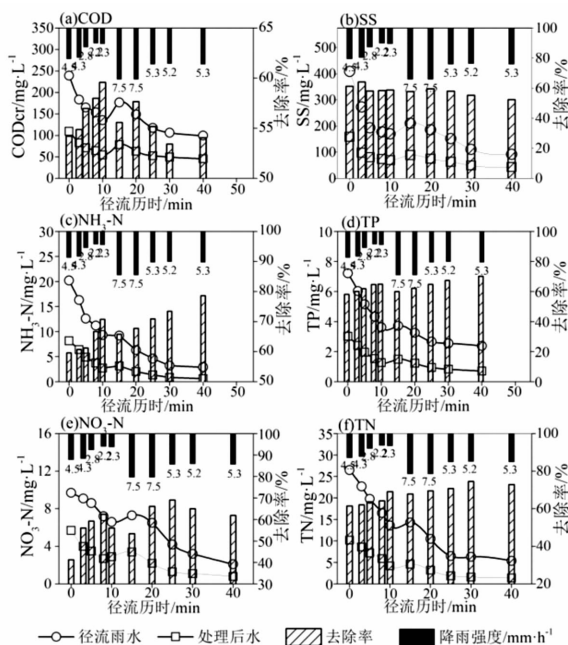


图4 复合基质去除道路径流雨水污染物效果

Fig. 4 Removal efficiency of composite materials basement for rainwater pollutants in road rainwater runoff

降雨径流初期污染物 SS、COD、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN 浓度分别为 409.5 mg/L、239.8 mg/L、13.7 mg/L、20.2 mg/L、7.21 mg/L、26.5 mg/L。从污染指标的去除效果来看,初期雨水 SS 的最高去除率达到 64%,这应该与土壤及植物根系的协同截留作用有关;COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除率较低,10~15 min 时刻随着降雨强度的突

然变大,径流中 SS 和 COD 分别上升了 40.7 mg/L、41.2 mg/L,尽管模拟系统出水污染物浓度略有升高,但上升幅度远小于进水浓度的变化,揭示复合基质材料具有一定的耐污染负荷冲击能力。路面径流历经 15 min 左右后污染物浓度逐渐下降。因降雨历时较短,径流雨水中污染浓度几乎一直呈现下降趋势,而在径流历时 25 min 以后从装置流出的雨水污染物浓度至稳定。

3.2 复合基质的重金属离子截留性能

根据国内外的研究,城市面源污染中重金属离子污染主要源于屋面材料、燃料以及工业排尘。在实验绿地装置进水中人工添加两种 0.10 和 0.20 mg/L 浓度的 Pb^{2+} ,按照两年一遇 30 分钟短历时降雨条件运行,出水中 Pb^{2+} 的浓度均低于 0.05 mg/L (见图 5)。在绿地系统中,由于金属元素在土壤层中会发生一系列复杂的物理化学反应,包括胶体微粒的物理吸附、离子交换或发生化学反应生成螯合物等,因此绿地系统对重金属离子的截留效果良好^[15]。

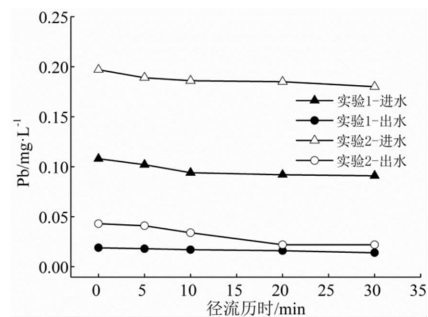


图5 木屑对径流雨水 Pb 的去除

Fig. 5 Removal of Pb in runoff rainwater by modified sawdust

3.3 改良绿地实验装置对径流污染去除稳定性

改良绿地实验装置对 6 场次降雨径流污染物去除率(90 min 时段)见图 6。第 1、2 和 3 场次为屋面降雨径流,第 4、5 和 6 次为道路路面降雨径流,实验装置对各种污染物去除率基本维持稳定水平,未发现去除率随时间延长出现持续降低情况。由于路面径流污染物浓度较大,道路径流污染去除率略低于屋面径流污染的去除率。复合基质在重复使用过程中,第一次使用时铁的泄漏浓度峰值在 2.0 mg/L,后续 5 次使用时出水中铁浓度均维持在 1.0 mg/L 以下。

4 结论

通过实验监测屋面和道路降雨径流水质变化,确定了西安城区屋面及城市道路降雨径流的污染

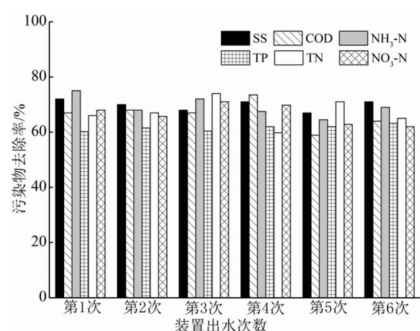


图6 改良绿地实验装置对径流污染去除稳定性

Fig. 6 Stability of removal efficiency of improved lawn system

特征,采用改性木屑与土壤构建了复合基质材料的模拟绿地系统,并对其初期雨水的处理效果进行了比较分析,得到以下结论:

(1)路面降雨径流污染浓度整体高于屋面降雨径流污染浓度,径流初期15~30 min内雨水污染物负荷占整场降雨污染物总负荷65%以上;

(2)采用复合基质材料改良土壤构建的模拟绿地系统,持水量相比较原状土壤提高约54%,对于屋面及路面径流中主要污染指标具有稳定的去除效率,该系统构造简单、维护便利,适用于初期高污染负荷雨水径流的原位分散处理,可为城市景观绿地不断开展的径流控制和污染削减能力提升提供技术参考。

参考文献 References

- [1] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南. 低影响开发雨水系统构建[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development (MHURD). Technical guidance of sponge city construction [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [2] 曾航. 基于SWMM的武汉市东西湖区某工业园雨水排水管网模拟研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
ZENG Hang. SWMM based assessment of the storm system of an industrial park in east-west lake district in Wuhan [D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2016.
- [3] 吴淮, 周琳. 环境影响评价中初期雨水的计算[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(6): 73-75.
WU Huai, ZHOU Lin. Calculation of initial rainwater in environmental impact assessment [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2017, 35(6): 73-75.
- [4] 孟飞琴, 李秀艳, 余瑞彰. 绿地系统对径流污染物净化机理研究[J]. 上海化工, 2009, 34(7): 8-15.
MENG Feiqin, LI Xiuyan. Study on decontaminating mechanism of green system to runoff pollutants [J]. Shanghai Chemical Industry, 2009, 34(7): 8-15.
- [5] 姜凌, 秦耀民. 利用土壤层净化雨水补给地下水的试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 94-96.
JIANG Ling, QIN Yaoming. Research on utilizing soil purifying urban rainwater to recharge groundwater [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19

- (6): 94-96.
- [6] 侯立柱, 冯绍元, 丁跃元, 等. 多层渗滤介质系统对城市雨水径流氮磷污染物的净化作用[J]. 环境科学学报, 2009, 29(5): 960-967.
HOU Lizhu, FENG Shaoyuan, DING Yueyuan, et al. Purification of urban runoff nitrogen and phosphorus pollutants by a multilayer infiltration system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(5): 960-967.
- [7] DAVIS A P, SHOKOUHIAN M, SHARMA H, et al. Water quality improvement through bioretention media: Nitrogen and phosphorus removal [J]. Water Environment Research, 2006, 78(3): 284-293.
- [8] 冯萃敏, 蔡紫鹏, 尹晓星, 等. 土壤渗滤系统中植物对地表雨水径流中磷的控制效果与影响分析[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(3): 25-33.
FENG Cuimin, CAI Zipeng, YIN Xiaoxing, et al. Effect of plants control and transformation in soil infiltration system in rainwater runoff [J]. Environmental Pollution & Control, 2016, 38(3): 25-33.
- [9] BRATIERES K, FLETCHER T D, DELETIC A, et al. Nutrient and sediment removal by stormwater bio-filters: a large-scale design optimisation study [J]. Water Research, 2008, 42(14): 3930-3940.
- [10] 王娟, 蔺银鼎. 城市绿地生态效应[J]. 草原与草坪, 2004(4): 24-27.
WANG Juan, LIN Yinding. Ecological effect of urban green space [J]. Grassland and Turf, 2004(4): 24-27.
- [11] YOUSEF Y A, Hvitved-Jacobsen T, WANIELISTA M P, et al. Removal of contaminants in highway runoff flowing through swales [J]. Science of the Total Environment, 1987, 59: 391-399.
- [12] 许萍, 李俊奇, 郭靖, 等. 北京城区雨水人工土植物系统水质净化研究[J]. 北京建筑工程学院学报, 2005, 21(4): 45-50.
XU Ping, LI Junqi, GUO Jing et al. Research on removal of pollutants from stormwater using artificial soil and plant system by experimentation in Beijing [J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2005, 21(4): 45-50.
- [13] 田光明. 人工土快滤滤床对耗氧有机污染物的去除机制[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 127-134.
TIAN Guangming. Mechanism of COD removal in artificial rapid infiltration system [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 127-134.
- [14] 刘志勇, 王树东, 黄启华, 等. 地下空间顶板浅层海绵式人工下凹绿地设计及对屋面初期雨水的净化[J]. 城市环境与城市生态, 2016(4): 22-27.
LIU Zhiyong, WANG Shudong, HUANG Qihua, et al. Design and purification of initial roof runoff for shallow spongy artificial sunken greenbelt on underground space roof [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2016(4): 22-27.
- [15] 田文龙, 刘瑶环. 下凹式绿地处理城市初期雨水效能的试验研究[J]. 市政技术, 2013, 31(5): 123-126.
TIAN Wenlong, LIU Yaohuan. Experimental investigation of treating efficiency of city initial rainwater by concave greenbelt [J]. Municipal Engineering Technology, 2013, 31(5): 123-126.

(编辑 沈波)