

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 04. 012

改良型透水铺装对弱透水土质地区 SS 的去除效果试验

张智贤¹, 王俊岭¹, 秦全城², 王 华³, 张鹤林³

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044;
2. 天津碧桂园凤凰酒店有限公司, 天津 300357; 3. 中科院建筑设计研究院有限公司, 北京 00086)

摘要:为研究适用于弱透水土质的改良型透水铺装对典型雨水径流污染物悬浮固体(SS)的去除效果,以嘉兴地区的淤泥质黏土为土基层制作试验装置,以人工模拟降雨的方法模拟并检测不同降雨重现期条件下改良型透水铺装装置削减径流污染物 SS 的效果,并以常规透水铺装和普通路面作为对比。结果表明:较小的降雨重现期更有利于透水铺装对 SS 的去除;弱透水土质条件下改良型透水铺装在对 SS 的去除过程中,不但去除率高于常规透水铺装,去除速率也得到了提高;在降雨重现期 1 a 条件下,改良型透水铺装平均每分钟比常规透水铺装多去除 29.82% 的 SS。

关键词:透水铺装;弱透水土质;雨水径流污染;悬浮固体;去除效果
中图分类号:TV121⁺,1;X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2019)04 - 0076 - 04

Experiment on removal effect of improved permeable pavement on SS in weak permeable soil area // ZHANG Zhixian¹, WANG Junling¹, QIN Quancheng², WANG Hua³, ZHANG Helin³ (1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment(Beijing University of Civil Engineering and Architecture), Ministry of Education, Beijing 100044, China; 2. Tianjin Country Garden Phoenix Hotel Co., Ltd., Tianjin 300357, China; 3. Institute of Architectural Design and Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China)

Abstract: In order to study the removal effect of improved permeable pavement, which is suitable for weak permeable soil quality, on typical rainwater runoff pollutant suspended solids (SS), a test device with silty clay of Jiaxing City as soil base layer was made, and the effect of improved permeable pavement device on reducing SS of runoff pollutants under different rainfall recurrence periods was simulated and tested by a method of artificial simulation of rainfall, and a comparison with conventional permeable paving device and ordinary paving device was made. The results show that smaller rainfall recurrence period is more conducive to SS removal by permeable pavement, and in the process of SS removal by improved permeable pavement under weak permeable soil conditions, not only the removal rate is higher than that of conventional pervious pavement, but also the removal speed is also strengthened. Under the condition of 1 year rainfall recurrence period, on average, the improved permeable pavement removes 29.82% more SS pollutants per minute than the conventional permeable pavement.

Key words: permeable pavement; weak permeable soil; rainwater runoff pollution; suspended solids; removal effect

降雨初期形成的路面径流携带了大量的径流污染物,其质量浓度远高于后期雨水^[1]。悬浮固体(suspended solid, SS)是导致雨水径流污染的主要污染物之一,也是 P、N、油脂类污染物和 Cu 等重金属污染物的载体^[2-3]。SS 作为雨水径流污染的主要污染物,在被去除的同时亦能够有效地降低 COD、TN 等污染物的质量浓度^[4-5]。路面雨水径流中的 SS 主要来源于轮胎磨损、防冻剂的使用、杀虫剂和肥料的使用以及丢弃的废物,污染成分主要包括有机或无机化合物、P、N、金属、油类等^[6-7]。王以尧等^[8]通过相关性分析发现,SS 是降雨径流污染物的重要来源;车伍等^[9]通过实际检测发现,北京市区道路和居民区道路上径流 SS 污染负荷平均值分别达到 7 000 mg/m²和 1 700 mg/m²,为路面雨水径流中各类污染物之最。

透水铺装能够有效地改善路面雨水径流的水质状况。李美玉等^[10]从透水铺装结构与分类、透水铺装径流调控机理、透水铺装水量削减与水质净化效

益等方面综述了国内外透水铺装径流控制研究进展,并详细分析了透水铺装的径流调控效益;张卫^[11]通过人工降雨试验测定了不同配比的结构层对透水铺装渗透率的影响,结果表明透水基层和面层对透水铺装渗透率的影响极为显著。Tota-Maharaj 等^[12]通过试验论证了透水铺装污染物迁移转化规律;Chandrappa 等^[13]综述了透水铺装的修复技术和全生命周期成本,基于透水铺装在低碳环保方面的优势,得出了未来透水铺装将大量应用于道路工程的结论。然而,目前针对弱透水土质地区的透水铺装径流控制效果研究不多,且都侧重于水量控制研究;Drake 等^[14-15]通过试验发现寒冷气候和弱透水条件下透水铺装的径流下渗能力下降了43%;Collins 等^[16]研究了底土性质对于透水铺装的径流削减效益的影响,发现底土渗透性越好,雨水径流的下渗速度越快,地表径流量越少。

为深入研究应用于弱透水土质地区的透水铺装改善雨水径流水质的功能,王俊岭等^[17]对改良型透水铺装去除弱透水土质地区雨水径流中的 COD、TN、TP 和 Cu²⁺ 等污染物的效果进行了试验研究。本文在该试验研究的基础上,进一步试验研究改良型透水铺装对弱透水土质地区典型径流污染物 SS 的去除效果,以期海绵城市的建设提供参考。

1 试验方法

试验在北京建筑大学大兴校区的城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室进行,采用实验室中的人工降雨模拟装置模拟各种降雨条件。试验用黏土土样取自嘉兴地区的淤泥质黏土,属典型的弱透水土质。

1.1 试验装置

试验共设改良型透水铺装、常规透水铺装和普通路面3种路面试验装置(图1,从左到右依次为改良型透水铺装、常规透水铺装和普通路面),设置常规透水铺装和普通路面的目的是用于对比改良型透水铺装对弱透水土质地区雨水径流中SS的去除效果。制作路面试验装置所需试验材料主要有水泥、骨料、减水剂、土工布、渗透导管(PVC 聚氯乙烯管)和黏土土样等。普通路面试验装置因其不透水性只设置面层部分,常规透水铺装试验装置由面层、基层、垫层和土基层组成,改良型透水铺装试验装置由面层、基层、垫层、促渗层和土基层组成。两种透水铺装试验装置各结构层底和装置路面之上分别设置直径20 mm的取样口(溢流口)和阀门,并用直径20 mm穿孔钢管与取样瓶相连。3种路面试验装置外壳采用钢板制作,其具体组成及详细参数可参见文献[17]。



图1 3种路面试验装置

1.2 试验方案

在3种路面试验装置上均匀布撒100 g沉积物样品(采自嘉兴),以此来模拟初期雨水径流污染物质量浓度(基于路面装置面积布撒定量来源于实际道路上的尘土,可以接近真实道路雨水径流水质^[18])。然后通过人工降雨装置模拟重现期为2 a、时长为60 min的降雨。当路面产生径流开始计时,分别在0 min、10 min、20 min、30 min、40 min、50 min、60 min对3种试验装置路面溢流口进行取样并分析SS质量浓度变化。

1.3 去除率计算方法

由于降雨速率不好控制且无法准确回收装置内去除的悬浮物,故以进出水的SS质量浓度计算SS去除率 η :

$$\eta = \frac{\rho_{\text{进水}} - \rho_{\text{出水}}}{\rho_{\text{进水}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中 $\rho_{\text{进水}}$ 、 $\rho_{\text{出水}}$ 分别为进水和出水的SS质量浓度。水样中SS质量浓度测定方法如下:滤膜置于称量盒内,烘干至恒重;再取100 mL样品于称量盒内,再次烘干至恒重;取两次质量之差再除以水的体积即为SS的质量浓度。

2 试验结果与分析

2.1 SS质量浓度变化

图2为不同试验装置路面SS质量浓度变化,可以看出,普通路面、常规透水铺装路面、改良型透水铺装路面上的径流污染物SS质量浓度值分别从降雨初期的235.17 mg/L、226.22 mg/L、233.45 mg/L降到降雨末期的97.62 mg/L、52.03 mg/L、41.22 mg/L。其中普通路面因其不透水性,对SS并无去除作用。结合试验现象发现普通路面径流污染物SS质量浓度之所以降低,是由于雨水径流随着降雨历时的增长而产生内涝,并很快溢出装置上沿,部分SS也随雨水径流被冲出,使得普通路面雨水径流中的SS得到稀释。两种透水铺装路面上并未出现雨水径流溢流的现象,说明两种透水铺装具有较好的下渗功能。分析发现常规透水铺装和改良型透水

铺装路面雨水径流 SS 质量浓度显著减小,去除率分别为 77% 和 82.34%,可见改良型透水铺装的去除效果更好。

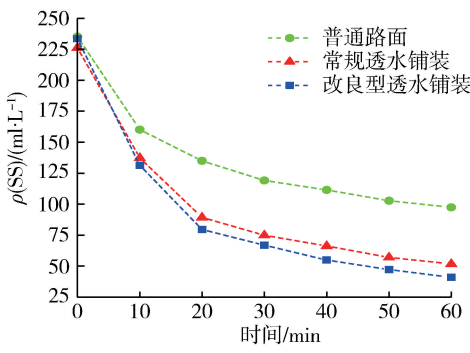


图 2 不同试验装置路面 SS 质量浓度变化

2.2 不同结构层对 SS 的去除效果

对常规透水铺装和改良型透水铺装各结构层对 SS 的去除效果进行试验并取样分析,各层出水 SS 质量浓度及各层去除率如图 3 所示。

由图 3 可见,常规透水铺装面层和基层对 SS 的去除率分别为 76.19% 和 69.96%;而改良型透水铺装面层、基层和含渗透管的促渗层对 SS 的去除率分别达到了 78.37%、73.09% 和 70.21%,可见面层是两种透水铺装装置中去除 SS 能力最强的结构层。相比常规透水铺装,改良型透水铺装的面层和基层对 SS 的去除率均有所提高,分析原因,可能是改良

型透水铺装中的促渗层改良了土基层的滞蓄能力,使得径流的下渗速度增大,更多的 SS 在下渗中得以去除。

由图 3(b)(c)可以看出,基层作为常规透水铺装中最后一个具有去除 SS 功能的结构层,能够去除大部分的 SS,但仍有 30.04% 流经基层的 SS 未被去除;而改良型透水铺装的面层和基层在去除能力强于常规透水铺装的面层与基层的前提下,促渗层还能多去除一部分 SS,进一步削减了下渗雨水对土壤和地下水的污染效应。

2.3 不同降雨重现期对试验装置去除 SS 效果的影响

为使监测结果更具代表性,基于嘉兴市暴雨强度公式并借助人工模拟降雨设备分别补充重现期为 1 a 和 5 a、降雨历时为 60 min 的降雨试验,监测并记录不同降雨重现期条件下各试验装置对 SS 的去除率变化情况,结果如图 4 所示。

总体来看,降雨重现期分别为 1 a、2 a 和 5 a 条件下,两种透水铺装 在 60 min 降雨历时内对 SS 的去除率曲线均呈现先减小后增大的趋势。结合对试验现象的观察,发现 0 ~ 20 min 时间段内 SS 去除率下降的主要原因有二:一是降雨强度超过了透水铺装的下渗强度,这一产流过程对 SS 的质量浓度产生了稀释的作用,使得入渗到装置内的 SS 总量相对减

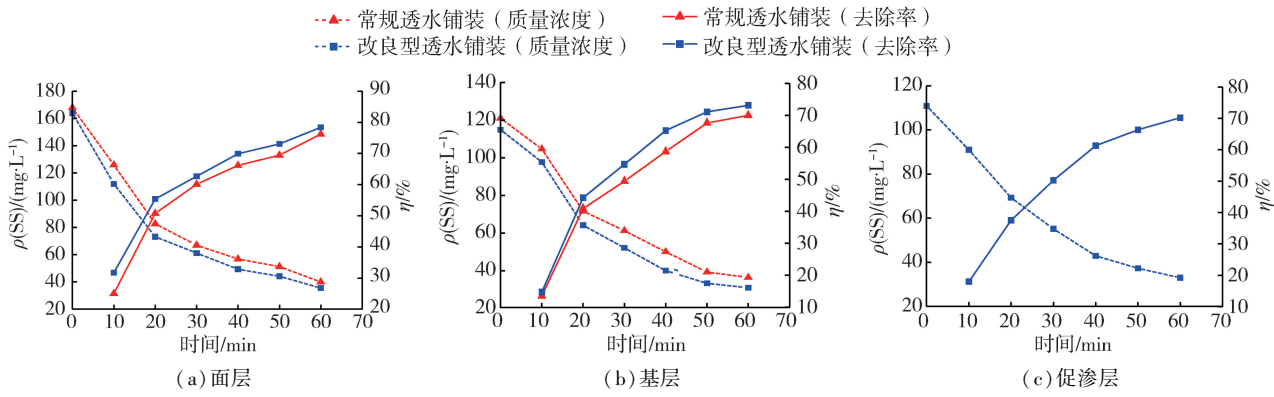


图 3 不同结构层出水 SS 质量浓度及去除率曲线

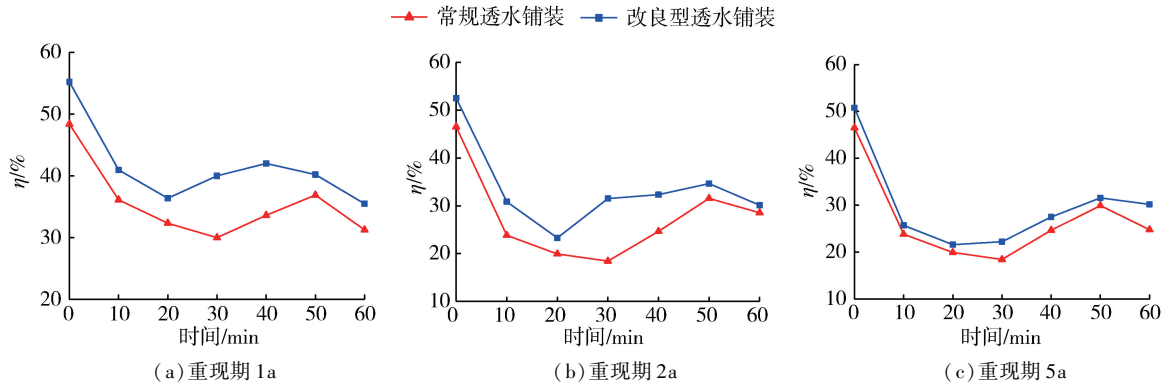


图 4 不同降雨重现期条件下两种透水铺装试验装置对 SS 的去除率

少,装置对 SS 的去除量也随之减少;二是能够被去除的大粒径悬浮固体先行被截留在上部,使得下部雨水径流内 SS 质量浓度大幅度降低;而小粒径污染物被拦截速度还受到了粒径、雨水冲刷的协同影响,截留效果差,从而降低了透水铺装对小粒径 SS 的去除率。20~50 min 时间段内,SS 去除率开始上升,而此时两种装置内出现了少许积水。积聚的雨水在下渗的过程中携带较小粒径的 SS 颗粒分别被不同孔隙率的结构层所截留吸附。

改良型透水铺装在不同降雨重现期条件下对 SS 去除效果均优于常规透水铺装。比较 3 种降雨重现期条件下 SS 去除率曲线可知,两种透水铺装均以 1 a 降雨重现期条件下对 SS 的去除效果为最优,常规透水铺装和改良型透水铺装对 SS 的平均去除速率分别为每分钟 37.26% 和 48.37%。可见改良型透水铺装在不透水土质下对 SS 的去除速率也要快于常规透水铺装,以 1 a 降雨重现期为例,改良型透水铺装平均每分钟要比常规透水铺装多去除 29.82% 的 SS。

综上所述,SS 去除效果主要受降雨过程产流量和降雨强度的影响。两种透水铺装对 SS 去除效果随降雨重现期的增大呈减小趋势,且以 1 a 降雨重现期条件下改良型透水铺装对 SS 的去除效果为最优。原因主要是雨水径流系数随着降雨强度增大而增大,雨水冲刷紊乱影响了透水铺装对小粒径 SS 的截留,可见较小的降雨强度有利于透水铺装对 SS 的去除。

3 结 论

a. 面层和基层是去除 SS 的主要结构层,其中常规透水铺装的面层和基层对 SS 的去除率分别为 76.19% 和 69.96%;含渗透管的改良型透水铺装的面层和基层对 SS 的去除效果更好,在降雨末期对污染物 SS 去除率分别达到了 78.37% 和 73.09%,此外促渗层还能再去除一部分 SS,进一步削减了下渗雨水对土壤和地下水的污染效应。相比常规透水铺装,改良型透水铺装对弱透水土质条件下的径流污染物 SS 去除效果更优且更稳定。

b. 受降雨强度的影响,弱透水土质条件下,两种透水铺装对 SS 的去除效果随着降雨重现期的增大而减弱,以重现期 1 a 降雨条件下的去除效果为最优。在 60 min 降雨历时条件下,两种透水铺装对 SS 去除率呈先减小后增大的趋势。

c. 改良型透水铺装在不透水土质条件下对 SS 的去除速率也要快于常规透水铺装,以 1 a 降雨重现期为例,改良型透水铺装平均每分钟要比常规透水铺装多去除 29.82% 的 SS。

参考文献:

[1] 宋瑞宁,宫永伟,李俊奇,等. 渗透铺装控制城市非点源污染的研究进展[J]. 环境科学与技术,2014,37(5): 57-63. (SONG Ruining, GONG Yongwei, LI Junqi, et al. Progress in controlling urban non-point source pollution by permeable pavement [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37 (5): 57-63. (in Chinese))

[2] BERTRAND-KRAJEWSKI J L, BARDIN J P, GIBELLO C. Long term monitoring of sewer sediment accumulation and flushing experiments in a man-entry sewer[J]. Water Science and Technology, 2006, 54(6/7): 109-117.

[3] PAJE S E, BUENO M, VIUELA U, et al. Influence of sound absorption on close proximity noise of porous pavement[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123(5): 3282-3284.

[4] HASELBACH L. Pervious concrete and mitigation of the urban heat island effect [C]// Transportation Research Board 88th Annual Meeting. Washington D C: Transportation Research Board, 2009: 1-15.

[5] 彭亮. 武汉市白沙洲大道雨水径流水质特征及污染物指标相关性分析[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2013.

[6] 申丽勤,车伍,李海燕,等. 我国城市道路雨水径流污染状况及控制措施[J]. 中国给水排水, 2009, 25(4): 23-28. (SHEN Liqin, CHE Wu, LI Haiyan, et al. The pollution status and control measures of urban road rainwater runoff in China[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(4): 23-28. (in Chinese))

[7] 车伍,刘燕,李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制[J]. 给水排水, 2003(10): 38-42. (CHE Wu, LIU Yan, LI Junqi. Water quality and pollution control of urban and foreign cities[J]. Water Supply and Drainage, 2003(10): 38-42. (in Chinese))

[8] 王以尧,陈新拓,钟科,等. 成都市中心城区非渗透下垫面降雨径流污染物特性研究[J]. 四川环境, 2018, 37(6): 13-20. (WANG Yiyao, CHEN Xintuo, ZHONG Ke, et al. Study on characteristics of rainfall runoff pollutants in non-infiltrated underlying surface in downtown area of Chengdu[J]. Sichuan Environment, 2018, 37(6): 13-20. (in Chinese))

[9] 车伍,欧岚,汪慧贞,等. 北京城区雨水径流水质及其主要影响因素[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002(1): 33-37. (CHE Wu, OU Lan, WANG Huizhen, et al. Water quality of stormwater runoff in Beijing urban area and its main influencing factors [J]. Environmental Pollution Control Technology and Equipment, 2002(1): 33-37. (in Chinese))

[10] 李美玉,张守红,王玉杰,等. 透水铺装径流调控效益研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 105-112. (LI Meiyu, ZHANG Shouhong, WANG Yujie, et al. Advances in research on control efficiency of permeable pavement runoff [J]. Environmental Science and Technology, 2018, 41(12): 105-112. (in Chinese)) .

(下转第 94 页)

- (6):678-684. (in Chinese))
- [7] 蒋艳.淮河流域闸坝运行对河流生态与环境的影响研究[M].北京:中国水利水电出版社,2014.
- [8] 王超,王沛芳.城市水生态系统建设与管理[M].北京:科学出版社,2004.
- [9] 洪思扬,王红瑞,朱中凡,等.基于栖息地指标法的生态流量研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):168-175. (HONG Siyang, WANG Hongrui, ZHU Zhongfan, et al. Ecological flow research based on habitat index method [J]. Resources and Environment in Yangtze Basin, 2018, 27(1):168-175. (in Chinese))
- [10] 江苏省水利厅.洪泽湖水生生物监测报告[R].南京:江苏省水利厅,2014.
- [11] 董哲仁,张晶.洪水脉冲的生态效应[J].水利学报,2009,40(3):281-288. (DONG Zheren, ZHANG Jing. Ecological effects of flood pulse [J]. Journal of Water Resources, 2009, 40(3):281-288. (in Chinese))
- [12] 张媛,许有鹏,于志慧,等.太湖西苕溪流域环境流量评价分析[J].水利学报,2014,45(10):1193-1198. (ZHANG Yuan, XU Youpeng, YU Zhihui, et al. Evaluation and analysis of environmental flow in Xitiaoxi Valley of Taihu Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(10):1193-1198. (in Chinese))
- [13] 叶春,李春华,王博,等.洪泽湖健康水生态系统构建方案探讨[J].湖泊科学,2011,23(5):725-730. (YE Chun, LI Chunhua, WANG Bo, et al. Discussion on the construction scheme of healthy water ecosystem in Hongze Lake [J]. Journal of Lake Science, 2011, 23(5):725-730. (in Chinese))
- [14] 王苓如,薛联青,王思琪,等.气候变化条件下洪泽湖以上流域水资源演变趋势[J].水资源保护,2015,31(3):57-62. (WANG Lingru, XUE Lianqing, WANG Siqi, et al. Evolution of water resources in the basin above Hongze Lake under climate change conditions [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3):57-62. (in Chinese))
- [15] 陈凯麒,陶洁.河流生物栖息地的生态水文学研究[J].水资源保护,2015,31(6):52-56. (CHEN Kaiqi, TAO Jie. Study on ecological hydrology of river biological habitat [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6):52-56. (in Chinese))
- [16] 薛联青,张卉,张洛晨,等.塔里木灌区引水前后环境流特性变化[J].水资源保护,2017,33(3):31-37. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luochen, et al. Change of environmental flow characteristics before and after diversion in Tarim irrigation district [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3):31-37. (in Chinese))
- [17] XUE L, YANG F, YANG C, et al. Identification of potential impacts of climate change and anthropogenic activities on streamflow alterations in the Tarim River Basin, China [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):1-12.
- [18] ZHANG Q, ZHANG Z, SHI P, et al. Evaluation of ecological instream flow considering hydrological alterations in the Yellow River Basin, China [J]. Global & Planetary Change, 2018, 160:61-74.
- [19] 薛联青,张卉,张洛晨,等.基于改进RVA法的水利工程对塔里木河生态水文情势影响评估[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):189-196. (XUE Lianqing, ZHANG Hui, ZHANG Luochen, et al. Impact assessment of ecological and hydrological conditions of Tarim River based on improved RVA method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(3):189-196. (in Chinese))
- [20] 齐亮,杨宇,王悦,等.鱼类对水动力环境变化的行为响应特征[J].河海大学学报(自然科学版),2012,40(4):438-445. (QI Liang, YANG Yu, WANG Yue, et al. Behavioral response characteristics of fish to hydrodynamic environment changes [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(4):438-445. (in Chinese))

(收稿日期:2018-07-21 编辑:熊水斌)

(上接第79页)

- [11] 张卫.海绵绿地透水铺装技术试验[J].中国园艺文摘,2018(1):37-39. (ZHANG Wei. Experimental study on permeable pavement of sponge green land [J]. Chinese Horticultural Digest, 2018(1):37-39. (in Chinese))
- [12] TOTA-MAHARAJ K, SCHOLZ M. Efficiency of permeable pavement systems for the removal of urban runoff pollutants under varying environmental conditions [J]. Environmental Progress Sustainable Energy, 2010, 29(3):358-369.
- [13] CHANDRAPPA A K, BILIGIRI K P. Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: a state-of-the-art review [J]. Construction and Building Materials, 2016, 111:262-274.
- [14] DRAKE J, BRADFORD A, VAN SETERS T. Winter effluent quality from partial-infiltration permeable pavement systems [J]. Journal of Environmental Engineering, 2014, 140(11):1-13.
- [15] DRAKE J, BRADFORD A, VAN SETERS T. Hydrologic performance of three partial-infiltration permeable pavements in cold climate over low permeability soil [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(9):1-9.
- [16] COLLINS K A, HUNT W F, HATHAWAY J M. Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern north Carolina [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(12):1146-1157.
- [17] 王俊岭,张智贤,秦全城,等.改良型透水铺装对弱透水土质地区的水质控制试验[J].水资源保护,2019,35(3):63-68. (WANG Junling, ZHANG Zhixian, QIN Quancheng, et al. Water quality control test of improved permeable pavement under weak permeable soil conditions [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3):63-68. (in Chinese))
- [18] 张玉玉.高效渗透减排透水铺装对径流的控制研究[D].北京:北京建筑大学,2015.

(收稿日期:2018-09-14 编辑:熊水斌)