

Effect of Typical Pervious Concrete Pavement on Rainfall Pollution Control

Lin Fu¹, Jiansen Niu², Chen Zhang², Lin Wang³, Yanjie Lv¹, Pengchao Xie², Zongping Wang^{2*}

¹Wuhan New Area Construction, Development & Investment Co., Ltd., Wuhan Hubei

²School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

³Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Corporation, Wuhan Hubei
Email: *zongpingw@hust.edu.cn

Received: Jun. 1st, 2018; accepted: Jun. 22nd, 2018; published: Jun. 29th, 2018

Abstract

Pervious concrete pavement plays an important role in sponge city. Permeable concrete pavement test devices were set up in this study with different surface layer thicknesses. By simulating rainfall, the effects of pervious concrete pavement on the quality of infiltrating rainwater. The results are as follows: the pervious concrete pavement has a good removal effect on TP and SS, with stable removal rate above 90%; the COD increases at the beginning of rainfall, but gradually decreases next; the TN in rainwater is reduced in a certain degree when passing through the devices, but the decreasing amplitude gradually decrease with the extension of the rainfall duration, and the devices have no obvious effect on the removal of NH₄-N. Comprehensively considering interception effect of three kinds of surface layers thickness on each pollution index, it turns out that the permeable concrete pavement with 5 cm surface layer has a good overall removal of pollutants.

Keywords

Pervious Concrete, Sponge City, Rainfall Intensity, Surface Layer Thickness, Water Quality

典型透水混凝土铺装对降雨污染的控制效果研究

傅林¹, 牛建森², 张辰², 汪林³, 吕妍洁¹, 谢鹏超², 王宗平^{2*}

¹武汉新区建设开发投资有限公司, 湖北 武汉

*通讯作者。

文章引用: 傅林, 牛建森, 张辰, 汪林, 吕妍洁, 谢鹏超, 王宗平. 典型透水混凝土铺装对降雨污染的控制效果研究[J]. 水污染及处理, 2018, 6(3): 119-126. DOI: 10.12677/wpt.2018.63015

²华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北 武汉

³武汉市汉阳市政建设集团公司, 湖北 武汉

Email: zongpingw@hust.edu.cn

收稿日期: 2018年6月1日; 录用日期: 2018年6月22日; 发布日期: 2018年6月29日

摘要

透水混凝土铺装是海绵城市建设中的重要组成部分, 本研究搭建了不同面层厚度的透水混凝土铺装试验装置。通过模拟降雨的形式, 考察了透水混凝土铺装对下渗雨水水质的影响。结果表明, 透水混凝土铺装对TP和SS有较好的去除效果, 去除率基本稳定在90%以上; COD在降雨初期会增高, 但随降雨历时的延长又逐渐降低; 雨水中的TN通过透水混凝土铺装后会有一定的降低, 但降低的幅度随降雨历时延长而逐渐减小, 且该装置对NH₄-N无明显去除效果。综合考察三种厚度面层对各污染指标的截留效果, 可得到面层厚度为5 cm的透水混凝土铺装对污染物的总体去除效果较好。

关键词

透水混凝土, 海绵城市, 降雨强度, 面层厚度, 水质

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

伴随着城市硬化面积与比例的不不断提升, 城市本底的自然水文循环被严重干预, 地表径流增大, 城市内涝频发发生[1] [2]。此外, 硬化面日常积累的污染物, 会在暴雨冲刷下融入径流中, 大量污染物进入水体而造成严重的水环境污染, 进而形成了现代城市文明中的“人造沙漠”[3] [4]。上世纪中后期, 西方发达国家逐渐意识到了上述问题, 并开始探索解决方法, 1970年英国曾将无砂透水混凝土用于常规道路建设[5]。1979年佛罗利达州首次尝试将无砂透水混凝土用于停车场的建设, 并在获取专利后将其推广至路面工程[6]。1988年以后, 美国陆军工程部队及十三个州开始大范围使用透水混凝土铺装, 并制定了相关的标准规范。使透水铺装走向常规化、正规化[7]。我国引进透水铺装的时间较晚, 21世纪初才开始进行少量的实践与研究, 一直到2014年“海绵城市”的概念提出后, 相关的研究才多了起来, 但主要集中在透水混凝土自身性能方面, 包括、物理性能、透水性、结构、生命周期及堵塞等方面[8] [9]。

在降雨污染研究方面, Kuang等人发现透水混凝土铺装平均能去除地表径流中80%的SS [10]。秦新发现透水混凝土对径流中TSS、TOC、TP的去除率分别为24%~37%、6%~16%、9%~68% [11], 王俊玲则发现在堵塞前透水混凝土面层对COD、TN、SS、TP的去除率分别为40%、37%、47%、43%, 当堵塞率达到70%后分别为27%、33%、33%、34% [12]。由此可见透水混凝土对降雨中的SS、COD、TP和TN等均具有一定的去除效果, 但在不同研究中差异较大。此外透水混凝土铺装对污染物的去除作用与降雨条件、地域环境和铺装材料自身特性息息相关, 而武汉拥有两个国家级海绵城市建设示范区, 目前尚未有透水混凝土铺装控污方面的相关报道。因此本研究结合武汉地区的降雨特点, 考察不同面层厚度的透水混凝土铺装对降雨污染的控制效果。

2. 材料与方法

2.1. 实验装置

本研究实验装置如图 1 所示，装置主体采用有机玻璃制作，内置材料取自武汉市四新区连通港路透水混凝土路面施工现场，由专业施工人员按道路施工标准完成实验装置的填装。透水混凝土铺装的结构组成从上至下依次为：透水混凝土细料层、透水混凝土粗料层、砂层、碎石垫层。其中透水混凝土细料层(面层)厚度分别为 5 cm、7.5 cm、10 cm，C20 大孔无砂混凝土(粗料层)厚度为 17 cm，中粗砂层厚度为 3 cm，碎石垫层厚度为 30 cm。模拟降雨装置由水箱、搅拌机、蠕动泵、软管、支架和喷头等设备组成。

2.2. 检测指标与方法

试验中所测量的指标包括水量和水质两个方面，其中水量指标采取计量泵测定，水质检测指标包括 SS、COD、TN、TP 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 等，均采用国家标准方法进行测定。

2.3. 实验步骤

通过对装置进行模拟降雨来确保研究的顺利进行，通过在选定的时间节点进行取样，分析检测水样的 SS、COD、TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 等水质指标，来完成污染控制相关研究。最后通过各个指标的分析测试初步确定适合武汉地区的铺装方案。该部分具体执行方案如下：

1) 模拟降雨强度及水质的确定

降雨强度取武汉地区 1、2、5、10 年一遇，根据武汉市暴雨强度公式及装置面积来确定每分钟的降雨量，武汉地区暴雨强度公式如下：

$$q = \frac{885[1 + 1.58 \lg(P + 0.66)]}{(t + 6.37)^{0.604}} \quad (1)$$

式中： q ——设计暴雨强度 $[\text{L}/\text{s}\cdot\text{hm}^2]$ ；

P ——重现期，0.5~10(a)；

T ——降雨历时(min)。

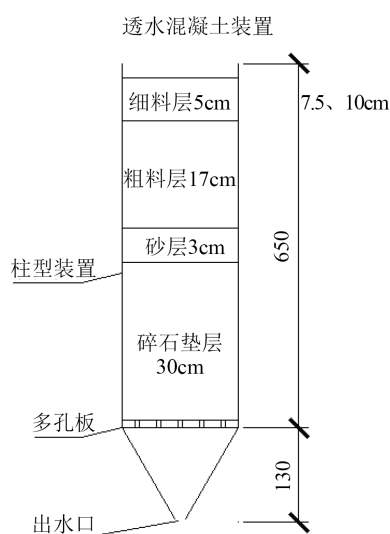


Figure 1. Design drawing of pervious concrete pavement (unit: mm)

图 1. 透水混凝土铺装实验装置设计图(单位: mm)

根据多次测量所得华中科技大学、连通港路和墨水湖公园实际降雨水质配置模拟雨水, 相应的模拟水质指标为: TP 为 0.5 mg/L, COD 为 32 mg/L, TN 为 3 mg/L, $\text{NH}_4\text{-N}$ 为 1.5 mg/L, SS 为 150 mg/L。其中 SS 为道路浮土经研磨、筛分(0.07 mm 孔径)并烘干后加入水中配置。

2) 选取武汉地区暴雨重现期为 10 年一遇的降雨强度, 对所有透水混凝土铺装装置进行 120 min 的模拟降雨。取样时间节点选取产流后 0、5、10、15、30、45、60、90、120 min, 通过对水样进行水质检测检测, 来对其控制效果进行对比分析。

3) 根据上一节研究结果, 分别选取一种透水混凝土铺装形式, 进行武汉地区暴雨重现期为 1、2、5、10 年一遇降雨强度的 120 min 模拟降雨。取样时间节点选取产流后 0、5、10、15、30、45、60、90、120 min, 通过对水样中进行水质检测, 来对其控制效果进行对比分析。

3. 结果与分析

3.1. 不同面层厚度透水混凝土铺装对污染物的控制效果

选取降雨重现期为十年一遇, 保持进水水质统一进行模拟降雨, 各装置出水水质特性见图 2~6。图 2 表明了不同厚度透水混凝土对初期雨水中 SS 的截留去除效能。如图所示各装置对雨水中 SS 的去除率均随降雨历时的延长而逐渐升高, 且当面层混凝土厚度为 10 cm 时对 SS 的去除效果最优, 在降雨进行到 15 min 时的去除率即接近 100%。

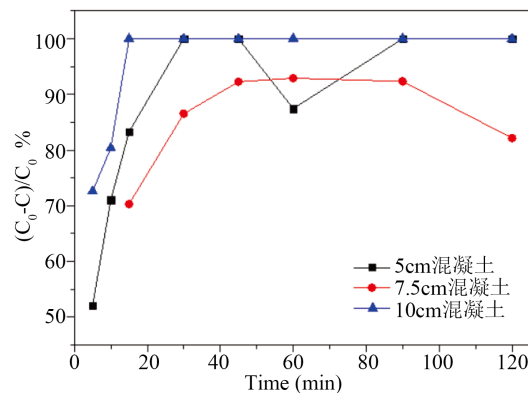


Figure 2. Effects of different surface layer thickness on SS content in yielding water
图 2. 不同面层厚度对出水中 SS 含量的影响

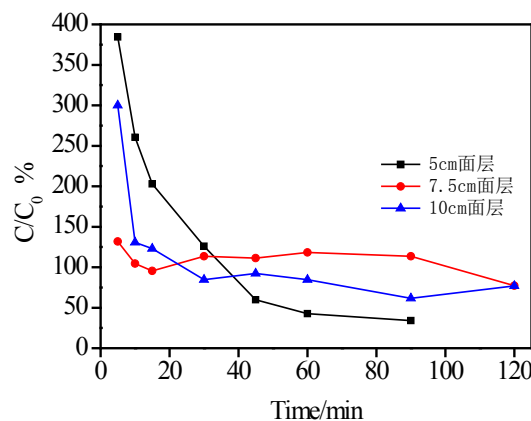


Figure 3. Effects of different surface layer thickness on COD content in yielding water
图 3. 不同面层厚度对出水中 COD 含量的影响

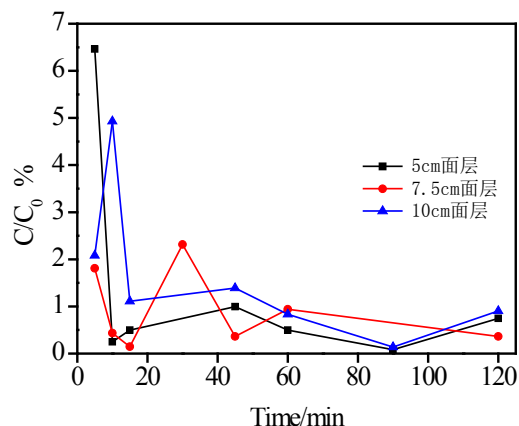


Figure 4. Effects of different surface layer thickness on TP content in yielding water
图 4. 不同面层厚度对出水中 TP 含量的影响

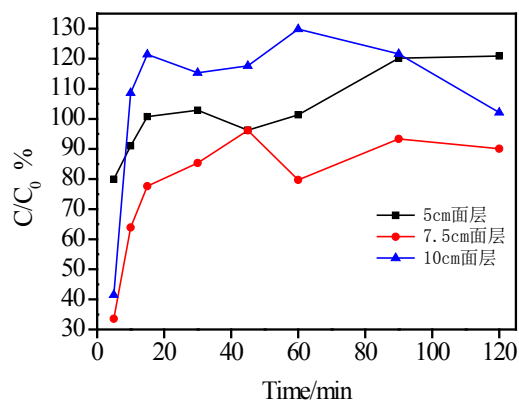


Figure 5. Effects of different surface layer thickness on NH₄-N content in yielding water
图 5. 不同面层厚度对出水中 NH₄-N 含量的影响

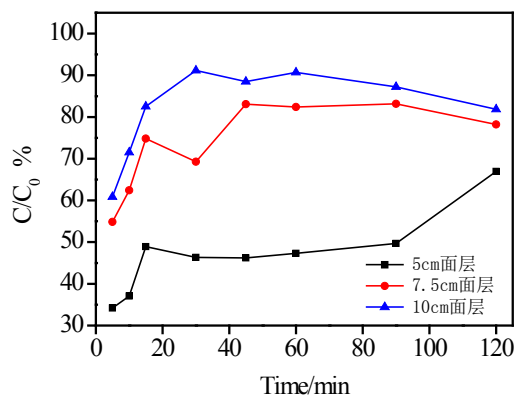


Figure 6. Effects of different surface layer thickness on TN content in yielding water
图 6. 不同面层厚度对出水中 TN 含量的影响

如图 3 所示, 三种面层厚度的透水混凝土铺装 在降雨初期会导致出水 COD 显著增加, 但随着降雨历时延长出水 COD 又逐渐降低, 并在降雨后期出水 COD 低于雨水浓度。如: 降雨历时为 90 min 时, COD 在经过 5 cm 面层和 10 cm 面层的透水混凝土铺装后的去除率分别达到了 66% 和 38%。这种现象的出现可能是由于透水混凝土的缝隙会在平时积累部分有机物, 这些有机物在降雨初期会被冲刷出来, 进而导致

出水 COD 的增高；但随着降雨历时的延长，从透水混凝土中冲刷出来的有机物逐渐降低，从而低于从雨水中截留的有机物，因此后期 COD 的快速降低。该结果表明透水混凝土对 COD 具有一定的截留效果。

图 4 表明三种面层厚度的透水混凝土铺装均可显著去除雨水中的 TP，去除率稳定在 90%以上，并且在降雨历时超过 10 分钟可稳定在 98%以上。该现象是由于透水混凝土铺装材料中含有大量的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ，这些金属离子可与水中的 P 元素发生化学反应生成沉淀物，进而被透水混凝土铺装截留。如： Ca^{2+} 可与水体中的磷酸根反应生成不溶物——羟基磷灰石 $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ [13]。

如图 5 可知，三种不同面层厚度透水混凝土铺装降雨初期均对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 有一定的去除效果，但随降雨历时的进行出水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的浓度均逐渐增加，且面层厚度为 10 cm 时出水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 增加最显著，相对于降雨水质而言，最高可增加约 30% (60 min)。出现这种现象可能是在降雨初期，材料表面对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸附能力比较强，随着降雨历时的延长，吸附能力趋近饱和，造成去除率降低甚至发生污染物溶出现象。

三种不同面层厚度透水混凝土对下渗出水 TN 的影响见图 6。当面层厚度为 5 cm、7.5 cm、10 cm 时，透水混凝土对 TN 均有一定的去除率，且 TN 去除率随着面层厚度的增加和降雨历时的延长而逐渐降低其中 5 cm 面层铺装在 5 min 降雨历时对 TN 的去除率为 66%而 120 min 降雨历时对 TN 的去除率为 33%；10 cm 面层铺装在 5 min 降雨历时对 TN 的去除率 39%，而 120 min 降雨历时对 TN 的去除率为 18%。造成这种现象的原因可能是，透水混凝土面层会析出部分含氮污染物，其厚度越大析出量也越大，而基层和垫层材料对含氮污染物总吸附能力有限，随降雨历时的延长，吸附量逐渐趋近饱和，所以使得 TN 去除率逐渐降低。

3.2. 不同降雨强度条件下对污染物的控制效果

选取面层厚度为 5 cm 的典型透水混凝土铺装形式，考察暴雨重现期为 1、2、5、10 年的降雨条件渗透出流的水质特性，在实验过程中未观测到装置表面积水或产流。

不同降雨强度下，透水混凝土铺装对 COD 的影响如图 7 所示。结果表明降雨强度越小出水 COD 浓度越高。降雨强度为十年一遇时，降雨初期、出水 COD 浓度增高为雨水的 3.9 倍，其他降雨强度下达到 10 倍左右，之后出水 COD 浓度随降雨时间的延长逐渐降低。且当降雨强度为一年一遇或两年一遇时基本不能去除 COD，当降雨强度为五年一遇、十年一遇时，降雨进行到 45 min 以后对 COD 的去除率分别为 8%~30%、40%~66%。这种现象的出现可能是由于透水混凝土的缝隙在平时积累的有机物，会在降雨初期被冲刷出来导致出水 COD 的增高；暴雨重现期越大，降雨前期冲刷出可供吸附 COD 的位置越多，在降雨后期对 COD 的截留效果越好。

不同的降雨强度下，透水混凝土铺装对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的影响如图 8 所示。在降雨前期对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 存在一定的去除效果，在降雨进行到 30 min 以后，除暴雨重现期为五年一遇时仍具有不超过 20% 的去除率外，其他降雨场次下透水混凝土铺装对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 基本丧失截留能力，有时出水的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度反而会增高。这种表现与 3.1 节研究结果一致。

不同的降雨强度下，透水混凝土铺装对 TN 的影响如图 9 所示。在降雨前期对 TN 有着较好的去除效果，随降雨时间的延长截留效果逐渐减弱。在两年一遇、五年一遇和十年一遇的降雨强度下，选定的透水混凝土铺装对 TN 的去除率分别稳定在 21%~47%、16%~60%和 33%~66%。总体表现为降雨强度越高，降雨后期对 TN 的截留效果越好。

不同的降雨强度下，透水混凝土铺装对 TP 的影响如图 10 所示。透水混凝土铺装对 TP 的去除率基本稳定在 86%以上，且随着降雨时间的延长而逐渐提高，降雨进行到 10 min 以后可达 90%以上。此外降雨强度越大对 TP 的去除率越高，当降雨强度达到五年一遇或十年一遇时，降雨进行到 20 min 以后，对 TP 的去除率可达 98%以上。

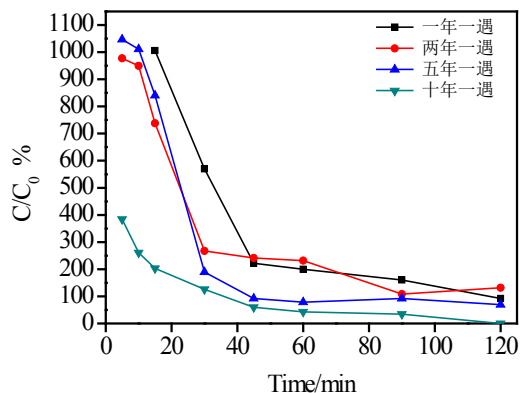


Figure 7. Effects of different rainfall intensity on COD content in yielding water

图 7. 不同降雨强度对出水中 COD 含量的影响

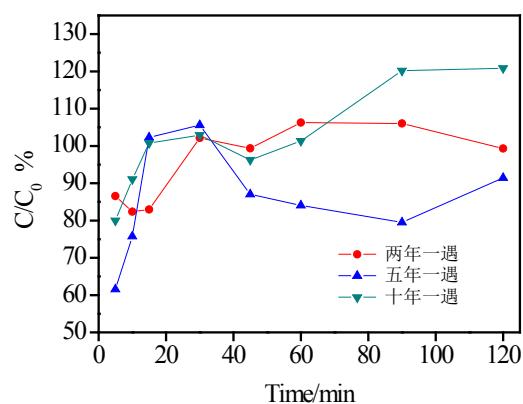


Figure 8. Effects of different rainfall intensity on NH₄-N content in yielding water

图 8. 不同降雨强度对出水中 NH₄-N 含量的影响

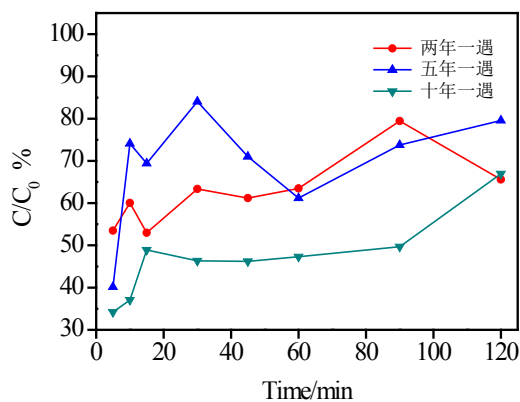


Figure 9. Effects of different rainfall intensity on TN content in yielding water

图 9. 不同降雨强度对出水中 TN 含量的影响

4. 结论与建议

透水混凝土铺装对 TP 和 SS 均具有良好的截留效果, 对 TP 去除率基本能达 90% 以上; 透水混凝土铺装 in 降雨初期会造成出水 COD 浓度大幅增高, 之后出水 COD 浓度随降雨时间的延长逐渐降低, 降雨强度越大出水 COD 浓度越低, 其中面层厚度为 5 cm 的透水混凝土铺装对 COD 的去除率最高可达 66%;

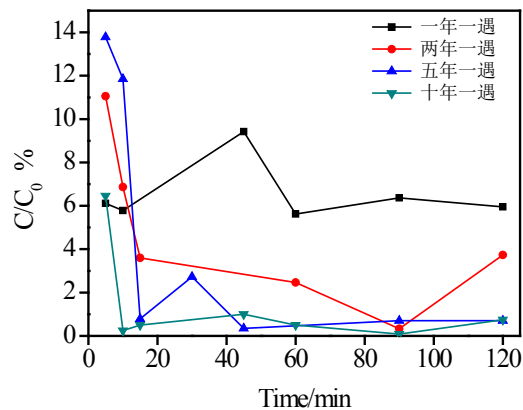


Figure 10. Effects of different rainfall intensity on TP content in yielding water
图 10. 不同降雨强度对出水中 TP 含量的影响

透水混凝土铺装对 TN 的截留效果随降雨时间的延长逐渐减弱, 面层厚度为 5 cm 的透水混凝土铺装 in 降雨强度大时对 TN 的截留效果相对较好可达 33%~66%; 透水混凝土铺装对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 基本无截留效果。

建议武汉地区在需要进行透水混凝土铺装的非机动车道, 可选用面层厚度为 5 cm 的结构形式。

参考文献

- [1] 刘耀斌. 高性能合理透水铺面结构之探讨[R]. 国立中央大学土木工程研究所, 2007.
- [2] 赵亮. 城市透水铺装材料与结构设计研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [3] 秦余朝. 城市典型透水铺装地面径流减控与污染物削减效果研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [4] 关彦斌. 大孔隙沥青路面的透水机理及结构设计研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [5] Maynard, D.P. (1970) A No-Fines Road. *Concrete Construction*, **15**, 116-117.
- [6] Medico Jr., J.J. Porous Concrete Paving Specification and Uses. *Porous Concrete*, 197.
- [7] Ghafoori, N. and Dutta, S. (1995) Development of No-Fines Concrete Pavement Applications. *Journal of Transportation Engineering*, **6**, 283-288. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1995\)121:3\(283\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1995)121:3(283))
- [8] 解伟, 范程程, 陈爱玖, 王静, 郭祥程, 郭文成, 蔡晓龙, 乔国勇. 再生骨料和橡胶颗粒对透水混凝土性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(5): 1492-1498.
- [9] 孙铂. 新型透水混凝土路面铺装材料的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 吉林大学, 2017.
- [10] Kuang, X., Sansalone, J. and Gnecco, I. (2007) Cementitious Permeable Pavement as an LID Practice for Hydrologic and Particle In-Situ Control. *Proceedings of the 2007 World Environmental and Water Resources Congress*. [https://doi.org/10.1061/40927\(243\)37](https://doi.org/10.1061/40927(243)37)
- [11] 秦新. 基于海绵城市的透水混凝土面层及水泥稳定碎石基层的路用性能和净水特性研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [12] 王俊岭, 刘栓, 宋健, 等. 透水混凝土路面堵塞对径流水质控制影响试验研究[J]. *混凝土*, 2017(6): 140-143.
- [13] 胡春明, 刘平. 赤泥对生态混凝土的磷净化效果改善研究[J]. *混凝土*, 2014(3): 151-153, 156.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2332-8010，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：wpt@hanspub.org