

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.03.011

改良型透水铺装对弱透水土质地区的水质控制试验

王俊岭¹, 张智贤¹, 秦全城², 冯萃敏¹, 孙丽华¹, 李俊奇¹

(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)

摘要:为改善透水铺装对弱透水土质地区的应用,通过增加渗透导管的方式改良了常规透水铺装的土基层。通过人工降雨试验对改良型透水铺装及其不同结构层对弱透水土质地区典型雨水径流中 COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 等污染物的去除效果进行了分析,并与相同条件下的常规透水铺装进行了对比。结果表明,改良型透水铺装对 4 种污染物的去除效果有明显增强,在 60 min 降雨历时条件下,降雨重现期为 2 a 时改良型透水铺装对 4 种污染物的去除能力分别提升了 11.87%、27.61%、9.17% 和 29.02%,且降雨重现期越短越有利于透水铺装对 COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 的去除。

关键词:透水铺装;弱透水土质;雨水径流;污染物;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)03-0063-06

Water quality control test of modified permeable pavement in weak permeable soil quality area//WANG Junling¹, ZHANG Zhixian¹, QIN Quancheng², FENG Cuimin¹, SUN Lihua¹, LI Junqi¹ (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 Biguiyuan Phoenix Hotel Co., Ltd., Tianjin 300357, China)

Abstract: In order to improve the application effects of permeable pavement in weakly permeable soil areas, the conventional permeable pavement soil base layer has been improved by increasing the permeation tube. The removal efficiency of COD, TN, TP, Cu^{2+} and other pollutants from typical rainwater runoff in weak permeable soil area by improved permeable pavement and its different structural layers were analyzed through artificial rainfall test, and it is compared with conventional pervious paving device under the same conditions. The results show that the removal effect of improved permeable pavement on four pollutants is obviously enhanced. Under the condition of 60 min rainfall duration, the removal capacity of improved permeable pavement for four pollutants increased by 11.87%, 27.61%, 9.17% and 29.02%, respectively, when rainfall recurrence period was 2 years. The shorter the recurrence period of rainfall, the better removal effects of COD, TN, TP and Cu^{2+} by permeable pavement.

Key words: permeable pavement; weak permeable soil quality; typical rainwater runoff; pollutant; removal effects

透水铺装具有促渗、净化、滞留雨水的作用,有助于缓解城市内涝问题,同时还能实现水体净化,降低雨水的径流污染^[1-6]。透水铺装能够有效去除雨水径流中的污染物,是海绵城市的重要组成部分^[7-10]。Fletcher 等^[11]对雨水径流中的污染物进行了分类,并以此评估得到透水铺装对径流污染物(以 SS 为主要表现形式)的去除率在 40%~90% 间;Wilson 等^[12-13]通过试验证明透水铺装可以很好地截留雨水径流中的烃类污染物和溶解性重金属;赵现勇等^[14]也通过试验得出

透水砖、透水草皮砖和透水混凝土 3 种透水铺装形式对 TP、COD、TN 等污染物的削减作用各有所长。然而,常规透水铺装仅适用于渗透能力为 $(0.01 \sim 1) \times 10^{-2}$ cm/s 的土壤,在土壤渗透能力较弱时其效果并不好^[15-17]。本文通过增加渗透导管的方式改良了常规透水铺装的弱透水土基基层,并通过试验深入研究改良型透水铺装在不同降雨重现期条件下对弱透水土质地区的截污与净化能力,可为城市雨水水质控制提供更多的可能方案。

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0704904-03)

作者简介:王俊岭(1973—),男,副教授,博士,主要从事海绵城市研究。E-mail:wangjunling@bucea.edu.cn

1 试验装置与试验方案

试验装置由人工模拟降雨设备、透水铺装试验装置和监测装置等组成。土基土样取自浙江嘉兴,嘉兴地区正常水位以上的土层大多属于淤泥质黏土,其显著特点是土壤渗透能力差,降雨容易形成地面径流。嘉兴是我国典型的弱透水土质地区,其土壤渗透系数仅为 1×10^{-5} cm/s 左右,同时又是我国第一批试点建设的“海绵城市”之一,因此以取自嘉兴的土样作为试验装置的土基部分,研究改良型透水铺装在不透水土质地区对雨水径流污染的水质控制效果,具有很好的代表性。

1.1 人工模拟降雨设备

试验采用人工降雨模拟的方法,通过叠加喷洒式降雨设备,可在设备覆盖范围内模拟一定强度的降雨,通过中央控制系统可以控制降雨历时和不同降雨强度。

1.2 透水铺装试验装置

试验共设3种路面形式,其组成见表1。制作路面试验装置所需材料主要有水泥、骨料、减水剂、孔径为0.15~0.2 mm 土工透水织布、黏土土样、渗透导管(PVC 聚氯乙烯管)等。土工透水织布的孔径选用0.15~0.2 mm 是根据对沉积物样品的粒径分析结果得到的。

表1 试验装置的组成

类型	结构层	厚度/mm	材料
普通路面	面层	200	普通水泥混凝土、粒径5 mm 碎石
	基层	250	透水混凝土、5 mm 碎石
常规透水铺装	基层	250	5~10 mm 级配碎石
	垫层	2	土工透水织布
	土基层	300	淤泥质黏土
改良型透水铺装	面层	200	透水混凝土、粒径5 mm 碎石
	基层	250	5~10 mm 级配碎石
	垫层	2	土工透水织布
	促渗层	300	淤泥质黏土、PVC 渗透导管
	土基层	100	淤泥质黏土

a. 普通路面试验装置。鉴于普通路面的不透水特性,故只设置面层部分,装置尺寸为500 mm × 500 mm × 350 mm,外壳采用钢板制作,在装置顶部设置20 mm 的溢流口并安装直径20 mm 的阀门,如图1所示。

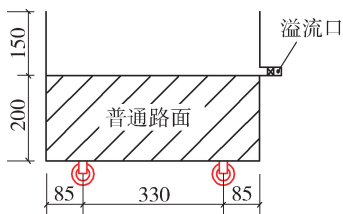


图1 普通路面试验装置(单位:mm)

透水铺装试验装置由面层、基层、垫层和土基层组成,各结构层厚度分别为200 mm、250 mm、2 mm 和300 mm。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,与取样口相连的为直径20 mm 的穿孔钢管。

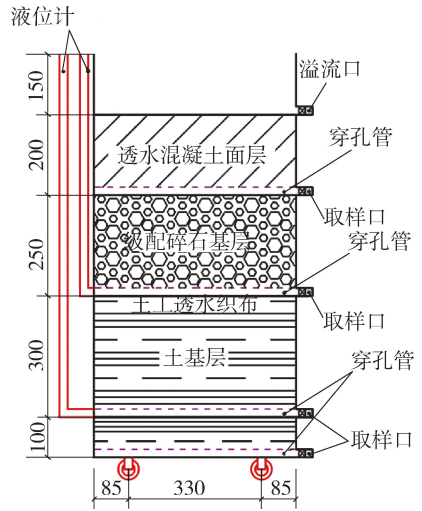


图2 常规透水铺装试验装置(单位:mm)

c. 改良型透水铺装试验装置。改良型透水铺装(图3)通过增加渗透导管的方式改良了常规透水土基层,其中设置4根渗透导管,用土工透水织布包裹,渗透导管间相距150 mm,导管外围为原土基土壤。渗透导管为PVC 聚氯乙烯管,管径100 mm,管壁上每隔25 cm 开孔一圈(8个),开孔直径6 mm,开孔率为31.68%。该试验装置由面层、基层、垫层、含渗透导管的促渗层和土基层组成,各结构层厚度分别为200 mm、250 mm、2 mm、300 mm 和100 mm。各结构层底和路面之上设置直径20 mm 的取样口(溢流口),为方便取样,每个取样口分别设置阀门。改良型透水铺装与常规透水铺装不同之处在于促渗层中安装了4根渗透导管。促渗层是改良型透水土基层

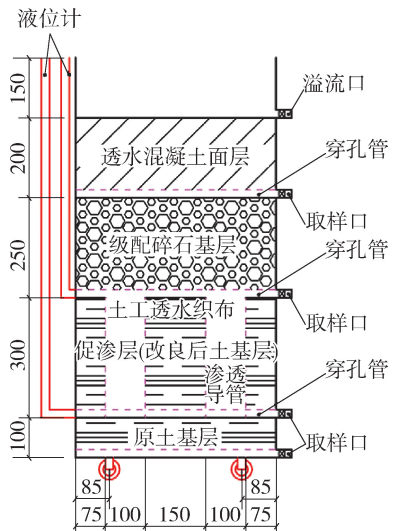


图3 改良型透水铺装试验装置(单位:mm)

装适应弱透水土质地区的关键部分,也可看作是改良后的土基层。

1.3 试验方案

透水铺装能够去除的粒径范围大致在 $(0.01 \sim 1) \times 10^{-2} \text{ cm}$, 为了使试验装置路面径流各污染物浓度接近于嘉兴实际路面, 专门收集嘉兴雨水管道沉积物作为布撒土样, 同时对布撒土样进行粒度测定。将采集自嘉兴市区雨水系统的沉积物样品经过风干、筛分等预处理后, 采用马尔文激光粒度仪 (Malvern-MS2000) 进行粒度分析, 结果表明沉积物样品的粒径主要分布在 $150 \sim 400 \mu\text{m}$ 之间, 中值粒径为 $275 \mu\text{m}$, 基本符合 SS 的粒径范围。

1.3.1 试验步骤

模拟重现期为 2 a、降雨强度为 1.028 mm/min 、降雨历时为 60 min 条件下, 含渗透导管的改良型透水铺装对弱透水土质雨水径流中以 SS 为主要载体的 COD、TP、TN 和以 Cu^{2+} 为代表的重金属离子等典型污染物的去除规律和效果。试验步骤如下:

a. 在试验装置路面上均匀布撒 100 g 采自嘉兴雨水管道的沉积物样品, 用来模拟路面初期雨水径流中的污染物。

b. 将普通路面、常规透水铺装、改良型透水铺装试验装置的所有取样口和溢流口分别连接到 100 mL 取样瓶中, 并对取样瓶进行分类标记。

c. 人工降雨系统开始降雨, 当路面产生径流时开始计时, 分别在 0 min、10 min、20 min、30 min、40 min、50 min、60 min 时刻取样。

d. 对所取样品进行污染物指标检测, 并分析检测数据。

1.3.2 污染物分析方法

为保障试验数据的可靠性, 将获取的水样交由北京市环境保护检测中心测定。基于降雨速率的模糊性, 且无法准确回收装置内去除的悬浮物, 在分析处理 COD、TP、TN 和 Cu^{2+} 等污染物指标的监测成果时, 以进水、出水的污染物质量浓度 $\rho_{\text{进水}}$ 、 $\rho_{\text{出水}}$ 来计算试验装置对各污染物指标的去除率 η , 计算公式为

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

2 试验结果与分析

2.1 径流污染物质量浓度变化

COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 等径流污染物的质量浓度变化如图 4 所示。观察试验现象发现, 普通路面试验装置内产生“内涝”现象, 雨水很快布满整个装置上层并溢出, 而常规透水铺装和改良型透水铺装并没有出现溢流现象。数据显示, 3 种试验装置路面

径流污染物指标均有一定程度的下降。普通路面因其不渗透, 本身对雨水径流并无除污效果, 分析污染物质量浓度下降的原因, 一是随着降雨量增大, 雨水的冲刷效应带走部分粒径较大的污染物颗粒并直接溢出, 稀释了路面的污染物; 二是雨水不会下渗, 装置内雨水排泄不及时产生“内涝”现象, 流态紊乱, 部分较大颗粒沉淀后又被再度冲起, 最终被冲出装置表面。

—■— 普通路面 —●— 常规透水铺装 —▲— 改良型透水铺装

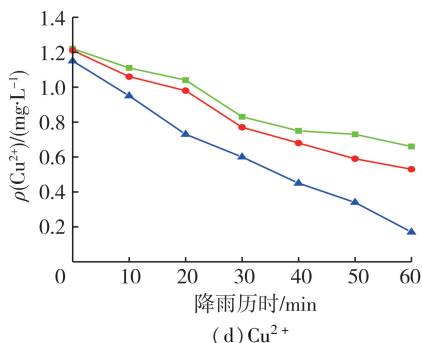
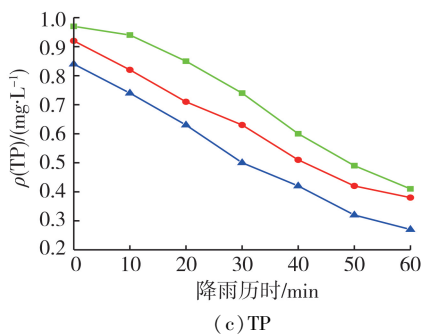
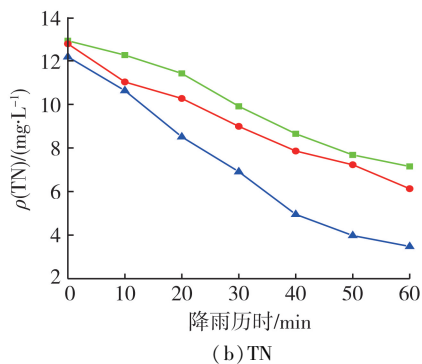
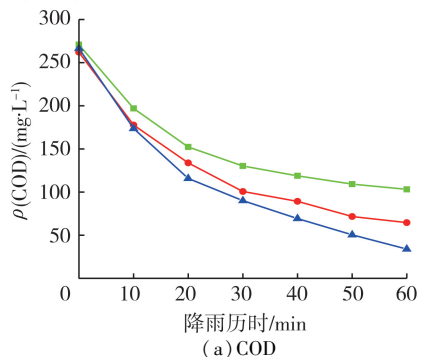


图 4 不同试验装置径流污染物质量浓度变化

弱透水土质条件下 3 种试验装置路面径流中 COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 的质量浓度变化趋势大致相同,

均随降雨历时的增加而减小。其中改良型透水铺装路面径流污染物质量浓度下降最快, COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 分别由降雨初期的 266.52 mg/L、12.18 mg/L、0.84 mg/L 和 1.15 mg/L 下降到降雨末期的 33.91 mg/L、2.48 mg/L、0.27 mg/L 和 0.17 mg/L, 去除率分别为 87.28%、71.43%、67.86% 和 79.13%。可见改良型透水铺装能够有效削减雨水径流中的污染物。相比常规透水铺装路面, 在弱透水土质条件下, 改良型透水铺装路面对 4 种污染物的去除能力分别提升了 11.87%、27.61%、9.17% 和 29.02%, 对 Cu^{2+} 的去除效果提升幅度最大。

2.2 不同结构层对径流污染物的去除效果

2.2.1 对 COD 的去除效果

从图 5 可以看出, 不同铺装的结构层对径流中 COD 均有去除效果, 其中常规透水铺装和改良型透水铺装的面层对 COD 的去除率分别从径流初期的 8.72% 和 11.96% 增大到径流末期的 69.86% 和 71.81%, 基层对 COD 的去除率分别从径流初期的 11.00% 和 16.13% 增大到径流末期的 67.45% 和 71.86%。相比常规透水铺装, 改良型透水铺装的面层和基层对 COD 的去除能力增幅约 2%~4%。由图 5(c) 可见, 弱透水土质条件下, 促渗层对透水铺装面层和基层的 COD 去除效果也有所促进, 其原因可能是含渗透导管的促渗层改善了土壤的渗透能力, 使得改良型透水铺装对 COD 的整体去除能力也得到了加强。可以看到雨水下渗经过改良型透水铺装的促渗层后, 雨水中的 COD 质量浓度由降雨初期的 121.18 mg/L 下降到降雨末期的 33.91 mg/L, 去除率在 72% 左右。

2.2.2 对 TN 和 TP 的去除效果

弱透水土质条件下各装置结构层对 TN 和 TP 的去除规律如图 6、图 7 所示。常规透水铺装面层和基层对 TN 的去除率分别为 34.28% 和 28.96%, 明显弱于对 TP 的去除率(42.67% 和 46.67%)。分析原因, TN 在雨水径流中主要以硝酸盐的形式存

在, 常规透水铺装的面层和基层分别采用透水混凝土和级配碎石材料, 对硝酸盐具有一定的截留作用。由于透水混凝土面层孔隙率较小, 因此在降雨阶段对于 TN 的截留作用将先于基层达到饱和。当两种结构层截留能力均接近饱和后, TN 的去除率就会显著降低, 由图 6 也不难看出 TN 质量浓度曲线在整个降雨过程中波动明显。改良型透水铺装促渗层成为去除 TN 的主要结构层, 对 TN 的去除率约为 46.67%。可能是因为渗透导管在改善弱透土壤渗透和吸附能力的同时也为 TN 在以沙和土壤为渗滤介质的透水铺装中进行的反硝化反应提供了缺氧条件。反硝化细菌以有机碳源为电子供体将更多的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 还原为氮气, 从而使得 TN 总量大幅减少。

两种透水铺装各结构层对 TP 的去除率均在 40%~60% 之间, 其中常规透水铺装中的基层和改良型透水铺装中的促渗层分别为两种装置去除 TP 的主要结构层。同 TN 的去除规律相似, 常规透水铺装面层和基层对于以 SS 为载体的 TP, 多通过截留吸附作用在雨水径流下渗的过程中去除。当截留能力接近饱和后, 对 TP 的去除也受到影响, 因此去除率一直徘徊在 50% 左右。改良型透水铺装促渗层对 TP 的去除率达到了 59%, 其原因可能是渗透导管改善了土壤渗透能力的同时, 也为促渗层中的聚磷菌等去除 TP 的细菌提供了合适的反应条件, 使得 TP 质量浓度大幅降低。

2.2.3 对重金属离子的去除效果

通过试验数据分析发现, 弱透水土质条件下, 常规透水铺装及改良型透水铺装各结构层对 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 等重金属离子的去除规律基本一致。以不同结构层对 Cu^{2+} 的去除效果为例, 去除规律曲线如图 8 所示。

常规透水铺装面层和基层对 Cu^{2+} 的去除率分别为 55.91% 和 70.15%; 而改良型透水铺装面层、基层和含渗透导管的促渗层对 Cu^{2+} 的去除率分别达到了 59.26%、73.58% 和 71.19%。可见基层是

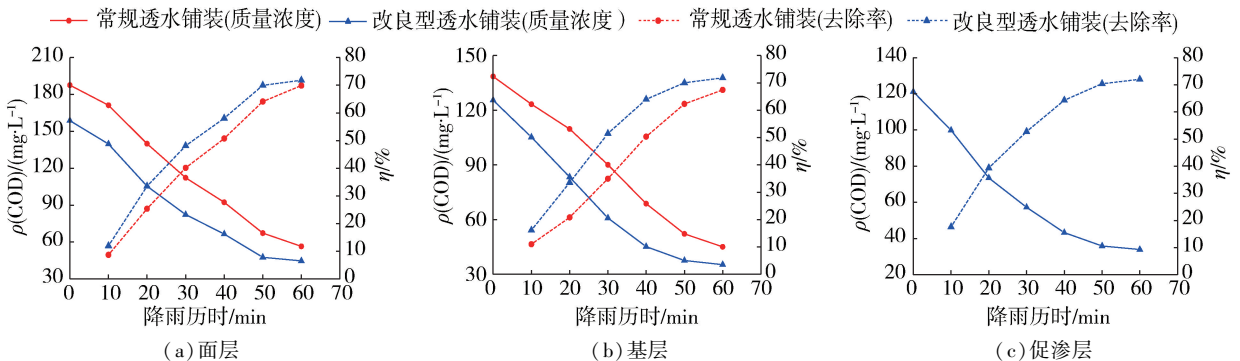


图 5 不同结构层 COD 质量浓度变化

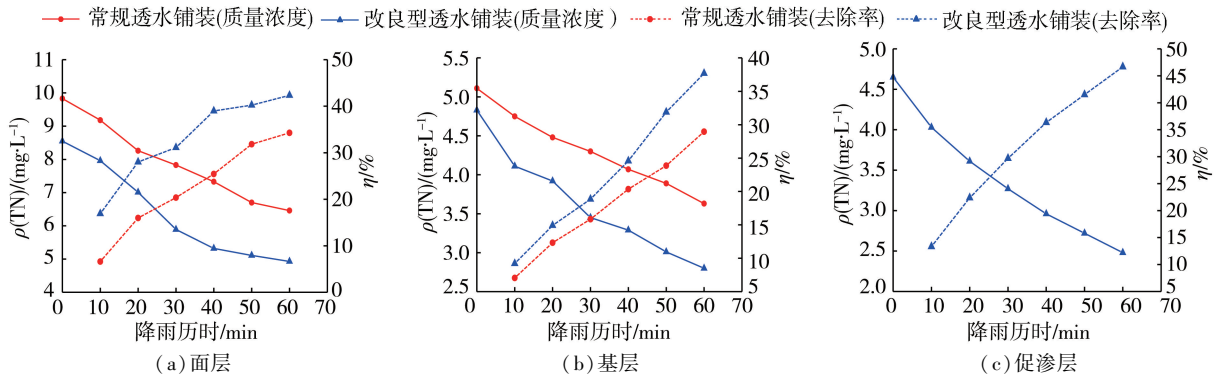


图6 不同结构层 TN 质量浓度变化

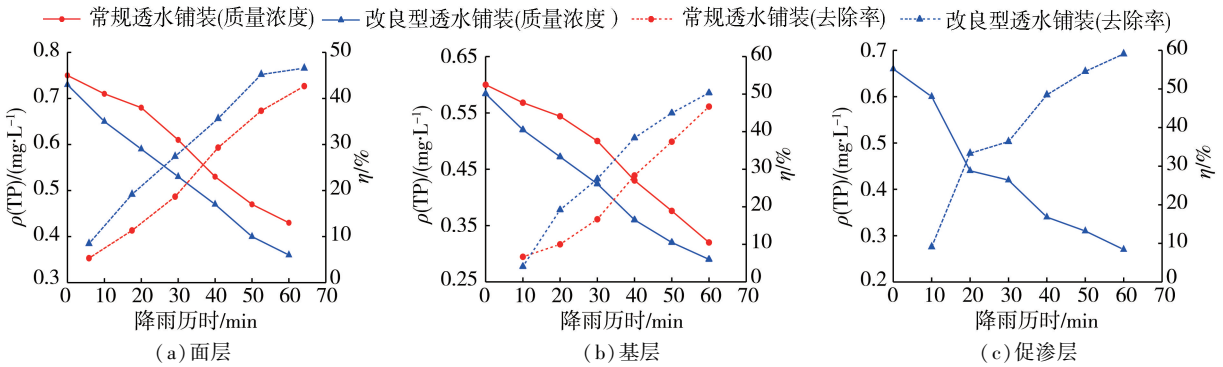


图7 不同结构层 TP 质量浓度变化

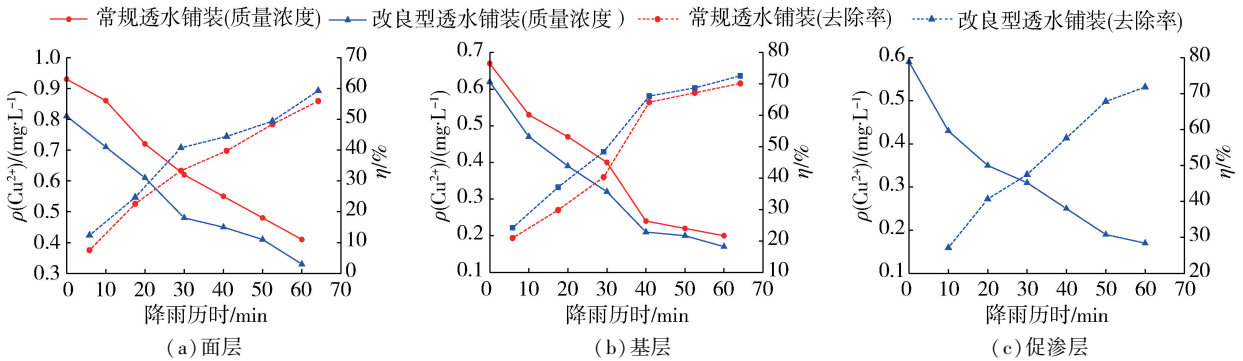


图8 不同结构层 Cu^{2+} 质量浓度变化

两种透水铺装去除 Cu^{2+} 能力最强的结构层。

改良型透水铺装中的促渗层增强了面层和基层两大结构层对 Cu^{2+} 去除效果。相比常规透水铺装的面层和基层,其对 Cu^{2+} 的去除率分别提高了 3.35% 和 3.43%。分析原因,改良型透水铺装中的促渗层改良了弱透水土质的滞蓄能力,同时使得透水铺装对径流污染物的去除作用增强,更多的重金属离子在下渗中得以去除。

2.3 不同降雨重现期条件下的污染物去除规律

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、降雨强度为 0.94 mm/min 和 1.338 mm/min、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改良型透水铺装试验装置对 COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 的去除情况,结果见图 9。

降雨重现期分别为 1 a、2 a 和 5 a 条件下,改良型透水铺装在不同降雨历时 (60 min) 内对 COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 的去除效果随着降雨重现期的增大而减弱,其中以 5 a 重现期降雨强度对径流水质控制的干扰最大。分析其原因,主要是雨水径流系数随着降雨强度的增大而增大,雨水冲刷紊乱影响了透水铺装对小粒径 SS 的截留效果,进而影响到了透水铺装整体对各污染物的截留和吸附。以 1 a 重现期条件下的水质控制效果为最优,降雨末期 COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 的质量浓度分别下降了 88.87%、76.25%、70.88% 和 82.57%。可见较小的降雨强度有利于改良型透水铺装的水质控制效果。

3 结论

a. 面层和基层是去除污染物的主要结构层,其

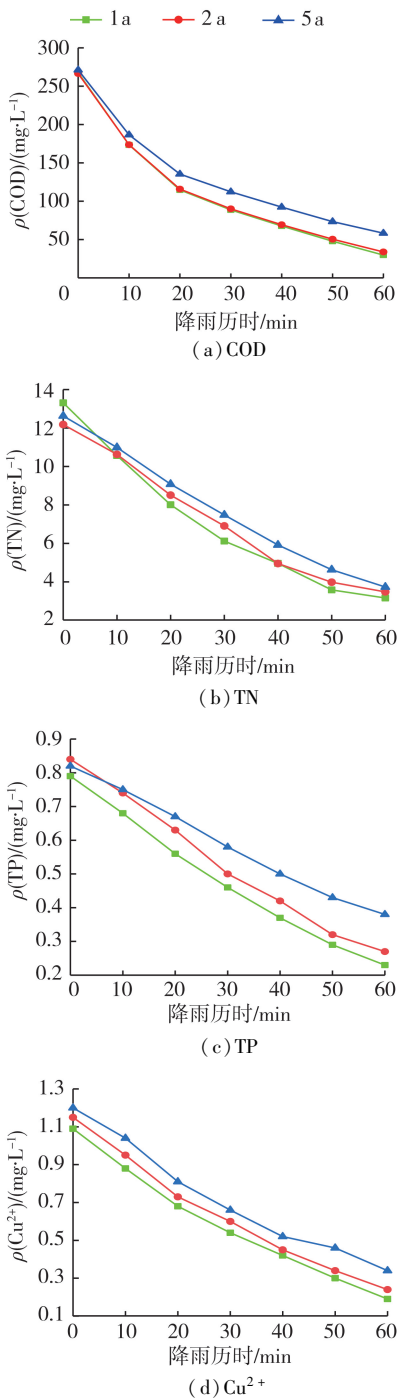


图9 不同降雨重现期条件下改良型透水铺装对各污染物的去除规律

中常规透水铺装的面层和基层对 COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 总的去除率在 28.96% ~ 71.81% 之间,改良型透水铺装的面层和基层对 4 种污染物的去除效果更稳定。降雨末期对 4 种典型污染物的去除率在 42.67% ~ 72% 之间,改良型透水铺装中的促渗层(改良后的土基层)还能够额外吸收一部分污染物。总的来说,弱透水土质条件下,相比常规透水铺装,改良型透水铺装降雨末期对 COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 的去除效果分别提升了 11.87%、27.61%、9.17% 和 29.02%。

b. 受降雨强度的影响,雨水冲刷紊乱影响了透水铺装对小粒径 SS 的截留,透水铺装对 COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 的去除效果也随着降雨重现期的增大而减弱。以 1a 重现期条件下改良型透水铺装的水质控制效果为最优,降雨末期 COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 的质量浓度分别下降了 88.87%、76.25%、70.88% 和 82.57%。较小的降雨强度有利于透水铺装对 COD、TN、TP 和 Cu^{2+} 的去除。

参考文献:

[1] 张书函,陈建刚,赵飞,等.基于入渗产流分析的透水砖地面铺装结构试验[J].水利水电科技进展,2011,31(5):39-42. (ZHANG Shuhan, CHEN Jiangan, ZHAO Fei, et al. Experimental study on pavement structure of permeable brick based on infiltration and runoff analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(5):39-42. (in Chinese))

[2] 龚应安,陈建刚,张书函,等.透水性铺装在城市雨水下渗收集中的应用[J].水资源保护,2009,25(6):65-68. (GONG Yingan, CHEN Jiangan, ZHANG Shuhan, et al. Application of water permeable pavement in urban rainwater seepage collection [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(6):65-68. (in Chinese))

[3] 沈金星,王沛芳.高速公路雨水径流污染质量浓度的系统动力学模拟[J].水资源保护,2018,34(4):1-7. (SHEN Jinxing, WANG Peifang. System dynamics simulation of pollution concentration of rainwater runoff in expressway [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4):1-7. (in Chinese))

[4] LEE M J, LEE M G, HUANG Yishuo, et al. Purification study of pervious concrete pavement [J]. IACSIT International Journal of Engineering and Technology, 2013, 5(5):532-535.

[5] 李俊奇,李小静,王文亮,等.美国雨水径流控制技术导则讨论及其借鉴[J].水资源保护,2017,33(2):6-12. (LI Junqi, LI Xiaojing, WANG Wenliang, et al. Discussion on the technical guidelines for rainwater runoff control in the United States and its reference [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2):6-12. (in Chinese))

[6] 吴海春,胡爱兵,任心欣.基于 SWMM 模型的 LID 措施年 SS 总量去除率计算[J].水资源保护,2018,34(5):9-12. (WU Haichun, HU Aibing, REN Xinxin. Calculation of total removal rate of SS by LID measures based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5):9-12. (in Chinese))

[7] 张杰,王洪禧,刘俊良.雨水污染物相关性研究[J].河北建筑工程学院学报,2006,24(1):23-25. (ZHANG Jie, WANG Hongwei, LIU Junliang. Research on correlation of rainwater pollutants [J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Engineering, 2006, 24(1):23-25. (in Chinese))

(下转第 75 页)

- [16] 樊文杰. 基于多模型的水环境远程模拟仿真技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [17] 张荣保. 典型平原河网地区污染负荷模型研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [18] 宋为威, 逢勇. 秦淮河流域控源截污与生态补水联合效应研究 [J]. 水力发电学报, 2018, 37(1): 31-39. (SONG Weiwei, PANG Yong. Joint effect of pollution source interception and ecological water replenishment in Qinhuai River Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(1): 31-39. (in Chinese))
- [19] 王欢, 逢勇, 卫朴, 等. 不同降雨条件下内秦淮河引水方案优化 [J]. 水电能源科学, 2016, 34(1): 89-93. (WANG Huan, PANG Yong, WEI Pu, et al. Optimization of diversion scheme for the Inner Qinhuai River under different rainfall conditions [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(1): 89-93. (in Chinese))
- [20] 童朝锋, 岳亮亮, 郝嘉凌, 等. 南京市外秦淮河水质模拟及引调水效果 [J]. 水资源保护, 2012, 28(6): 49-54. (TONG Chaofeng, YUE Liangliang, HAO Jialing, et al. Water quality simulation and water diversion effect analysis of external Qinhuai River in Nanjing [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(6): 49-54. (in Chinese))
- [21] 熊鸿斌, 张斯思, 匡武, 等. 基于 MIKE11 模型的引江济淮工程涡河段动态水环境容量研究 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(8): 1422-1432. (XIONG Hongbin, ZHANG Sisi, KUANG Wu, et al. Environment capacity of the Guohe River in the water transfer project from Yangtze River to Huaihe River based on a MIKE 11 model [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(8): 1422-1432. (in Chinese))
- [22] 李梓嘉, 董增川, 樊孔明, 等. MIKE11 模型在泗洪县城城区河网引水冲污工程中的应用 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(8): 100-103. (LI Zijia, DONG Zengchuan, FAN Kongming, et al. Application of MIKE11 model in water diversion and flushing pollutants of urban river network in Sihong City [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(8): 100-103. (in Chinese))
- (收稿日期: 2018-12-11 编辑: 王芳)

(上接第 68 页)

- [8] 宋亚霖, 杜新强, 刘文娜, 等. 海绵城市透水砖堵塞规律试验 [J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 56-59. (SONG Yalin, DU Xinqiang, LIU Wenna, et al. Experimental research on clogging laws of permeable brick in sponge city [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 56-59. (in Chinese))
- [9] 夏军, 石卫, 王强, 等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨 [J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 1-8. (in Chinese))
- [10] 蔡庆拟, 陈志和, 陈星, 等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟 [J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 31-36. (CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 31-36. (in Chinese))
- [11] FLETCHER T, DUNCAN H, POELSMA P. Stormwater flow and quality and the effectiveness of non-proprietary stormwater treatment measures: a review and gap analysis [R]. Canberra: CRC for Catchment Hydrology, 2004.
- [12] WILSON S, NEWMAN A P, PUEHMEIER T, et al. Performance of an oil interceptor incorporated into a pervious pavement [J]. ICE Proceedings: Engineering Sustainability, 2003, 156(1): 51-58.
- [13] DIERKES C, KUHLMANN L, KANDASAMY J. Pollution retention capability and maintenance of permeable pavements [C] // Ninth International Conference on Urban Drainage (9ICUD). Portland: American Society of Civil Engineers, 2002: 1-13.
- [14] 赵现勇, 程方, 张杏娟, 等. 不同结构透水路面对雨水径流污染物的削减作用 [J]. 天津城市建设学院学报, 2012, 16(4): 280-285. (ZHAO Xianyong, CHENG Fang, ZHANG Xingjuan, et al. The effect of different structure permeable pavement on the reduction of rainwater runoff pollutants [J]. Journal of Tianjin Urban Construction College, 2012, 16(4): 280-285. (in Chinese))
- [15] 陈莎, 陈晓宏. 城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟 [J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 13-19. (CHEN Sha, CHEN Xiaohong. Simulation of urban rainfall runoff pollution and control effect by low impact development [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 13-19. (in Chinese))
- [16] 杨秋侠, 晁昕逸. 基于复杂网络方法的既有雨水管段脆弱性判定 [J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 27-33. (YANG Qiuxia, CHAO Xinyi. Vulnerability assessment of existing storm sewer sections based on complex network method [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 27-33. (in Chinese))
- [17] 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: 2018-11-20 编辑: 熊水斌)