

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2018.0047

崇佳文, 徐乐中, 李翠梅, 等. 渗透铺装对降雨径流水文水质调控效果分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 115-121.
CHONG J W, XU L Z, LI C M, et al. Simulation of regulation effect of permeable pavement on hydrology and water quality of rainfall runoff[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 115-121. (in Chinese)

渗透铺装对降雨径流水文水质调控效果分析

崇佳文¹, 徐乐中¹, 李翠梅¹, 程桂², 张竞文¹

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 安庆城乡规划设计院, 安徽 安庆 246003)

摘要: 以宜兴市海绵城市示范区域为研究对象, 通过 SWMM 软件对研究区域概化、建模, 根据实际监测数据对模型真实度进行验证。模拟了重现期分别为 3 a、5 a、10 a、15 a、50 a、100 a 暴雨强度下渗透铺装对降雨地表径流产生的水文、水质效果, 并分析渗透铺装对城市雨水系统生态性的影响。结果表明: 采用渗透铺装对降雨径流量的削减可达 19.74%, 径流系数平均降低 21.93%, 径流削减作用总体随降雨强度增大而增大, 但增幅较小, 调控效果较为显著且稳定。对常规污染物负荷(SS、COD、TN、TP)可分别减少 24.12%、23.79%、22.81%、21.90%, 削减作用明显, 且对径流量及负荷浓度峰现时间产生一定迟滞效果。研究对渗透铺装的效果进行科学评价, 可对工程设计提供一定参考意见。

关键词: 渗透性铺装; SWMM 模型; 水文; 水质; 实例验证

中图分类号: TU992, S152 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0115-07

Simulation of regulation effect of permeable pavement on hydrology and water quality of rainfall runoff

CHONG Jiawen¹, XU Lezhong¹, LI Cuimei¹, CHENG Gui², ZHANG Jingwen¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Anqing Urban and Rural Planning and Design Institute, Anqing 246003, China)

Abstract: Taking the sponge city demonstration project in Yixing city as the research object, we used SWMM software to generalize and model the study area and validated the fidelities of the model with actual monitoring data. The model was used to simulate the hydrology and water quality changes in the area at the rainfall intensity of the return period of 3, 5, 10, 15, 50, 100 years, and to analyze the regulation effect of permeable pavement on the ecosystem of city rainwater. The results showed the permeable pavement could reduce rainfall runoff by up to 19.74% and the runoff coefficient decreased by 21.93%. The overall runoff reduction effect increased along with the rainfall intensity, but the increase was small. As to conventional pollutants of SS, COD, TN, and TP, the reduction was up to 24.12%, 23.79%, 22.81%, and 21.90%, respectively. The permeable pavement could also delay the peak time of runoff volume and pollutant load concentration. This study presents a scientific evaluation on the effect of permeable pavement and provides reference for engineering design.

Key words: permeable pavement; SWMM model; hydrology; water quality; instance verification

快速的城市化致使城市可渗透下垫面面积比例减小, 破坏了原有的自然水文循环机制^[1], 给城市排

收稿日期: 2017-08-13 修回日期: 2017-12-23 网络出版时间: 2018-02-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180206.0845.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51109153); 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(201510332028Y); 2017年苏州市水利科技项目

Funds: National Natural Science Foundation of China (51109153); Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students in Jiangsu (201510332028Y); Suzhou Water Conservancy Science and Technology Project in 2017

作者简介: 崇佳文(1993-), 男, 山东人, 主要从事给水处理与安全供水保障技术研究。E-mail: 522466737@qq.com

通讯作者: 李翠梅(1974-), 女, 安徽定远人, 教授, 博士(后), 主要从事水资源与饮用水安全保障研究。E-mail: cuimeili@163.com

水防涝系统巨大的压力^[2], 洪涝灾害时有发生^[3]。海绵城市是基于低影响开发(Low Impact Development, LID) 理念^[4], 综合利用各类海绵体对雨水“渗、滞、蓄、净”的功能, 构建起新型的城市雨水系统, 可减少城市内涝积水的深度与范围。根据水量不可压缩和消亡原则, 在遇到降雨时能够最大限度地留住雨水; 非降雨时, 被充分吸收的雨水可被再次利用于生态补水, 如道路冲洗、绿化、景观用水等, 在一定程度上减轻目前城市水资源的供给压力, 提高雨水资源利用率。

渗透铺装是一种典型的通过降低城市不透水面积对城市雨水径流进行调控的 LID 措施^[5]。它不仅可以有效地削减雨水径流量, 减缓径流速度, 还可以有效地减缓城市非点源污染^[6,7], 改善径流水质。龚应安等^[1]研究表明渗透铺装下渗的雨水水质完全可以满足景观环境补水的水质要求; 解晓光等^[8]对几种不同结构材料渗透铺装的研究, 发现渗透铺装各结构层均对 COD 有一定去除效果, 但 SS 的去除效果会因不同的材料结构而异; 李卓熹等^[2]研究表明渗透铺装较绿色屋顶和下凹式绿地对洪峰削减效果最稳定, 对降雨历时变化最敏感。

本文运用 SWMM 中的 LID 模块, 模拟了采用渗透铺装前后的水文、水质变化过程, 分析了渗透铺装对雨水径流水文、水质调控效果, 为渗透铺装的设计和应用提供科学、有效的支持和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概化

宜兴市位于太湖西岸, 属亚热带季风气候, 雨量充沛, 河流密布, 年平均降雨量约为 1 301.53 mm; 市内地形为平原为主, 地面标高 3~5 m 不等; 地层分区属江南地层区, 从奥陶系至第四系, 发育较齐全; 表土以黄色黏土、粉质黏土、粉质砂土为主, 渗透系数约 5.86×10^{-6} cm/s, 渗透性较小。研究区域位于中心城区, 地势较低、开发密度高, 且受下游太湖水位顶托和上游客水共同影响, 洪涝问题和面源污染问题较为突出。研究区域总面积 4.46 hm², 共划分为 32 个子汇水区域。根据区域雨水系统平面图及勘察资料, 概化雨水管道 25 条, 汇水节点 25 个及末端雨水排放口 1 个。并结合土地利用情况, 确定各子汇水区的不透水面积比例, 利用加权法确定研究区不透水面积约为 66.7%, 主要由屋顶、道路和停车场组成。研究区域内概化结果见图 1。

渗透性铺装采用无砂多孔混凝土铺装, 共布设面积 1.04 hm², 约占不透水面积的 33%, 渗透铺装

率大于 20%。基层铺设厚度为 150 mm, 粗糙系数为 0.014, 孔隙比为 0.17, 渗透率为 254 mm/h; 土壤层厚度为 200 mm, 储水层厚度为 300 mm, 孔隙比为 0.43, 导水率为 500 mm/h。

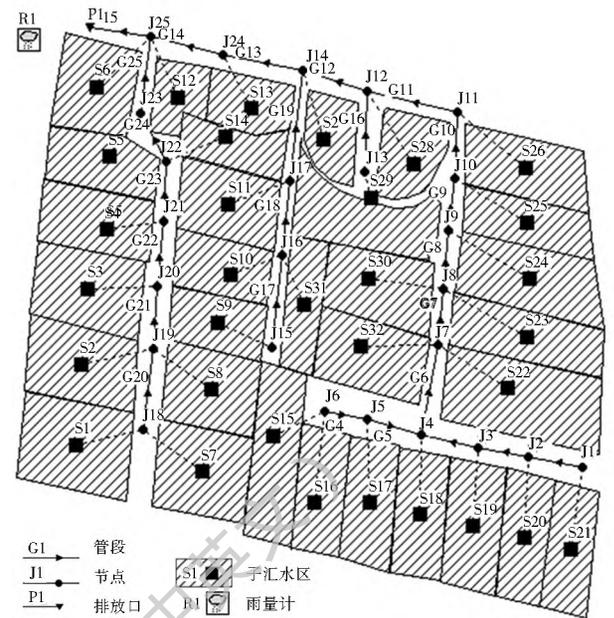


图 1 研究区域概化示意图

Fig. 1 Generalized model diagram of study area

1.2 参数设置

水文参数根据 SWMM 用户手册及相关文献^[9-10] 选取, 见表 1。结合研究区域特点, 径流渗透过程采用 Horton 入渗模型^[11], 汇流过程采用非线性水库模型, 模拟过程采用动力波模型^[12-13]。

表 1 水文参数取值^[17-19]

Tab. 1 Parameters for hydrology^[17-19]

| 参 数 | 取值 |
|-----------------------------|-------|
| 最大入渗率/(mm·h ⁻¹) | 76 |
| 最小入渗率/(mm·h ⁻¹) | 3.5 |
| 衰减常数/h ⁻¹ | 4 |
| 不透水区曼宁系数 | 0.013 |
| 透水区曼宁系数 | 0.15 |
| 管道曼宁系数 | 0.014 |
| 地表坡度(‰) | 3 |
| 透水区注蓄量/mm | 6 |
| 不透水区注蓄量/mm | 1.5 |

水质参数根据《海绵城市建设技术指南》选取 4 种常规污染物 SS、COD、TN、TP, 起始增长值分别为 10 mg/L、20 mg/L、1.0 mg/L、0.02 mg/L^[14-16]。模拟过程考虑污染物累积和冲刷效应, 分别采用指数函数累积模型和指数冲刷模型。各下垫面水质模拟参数见表 2。

1.3 降雨模型

研究采用芝加哥雨型在无锡市已有暴雨强度公

表 2 不同土地利用类型参数值^[2021]

Tab. 2 Parameter values for different land use types^[2021]

| 下垫面类型 | 参数 | SS | COD | TN | TP |
|--------|-----------------------------|-------|--------|-------|-------|
| 屋面及非道路 | 最大累积量/(kg·hm ²) | 50 | 40 | 4 | 0.6 |
| | 累积速率常数 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 半饱和和累计时间/d | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | 冲刷系数 | 0.007 | 0.006 | 0.004 | 0.002 |
| | 冲刷指数 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.8 |
| 绿地 | 最大累积量/(kg·hm ²) | 30 | 20 | 10 | 1.8 |
| | 累积速率常数 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 半饱和和累计时间/d | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | 冲刷系数 | 0.004 | 0.0035 | 0.002 | 0.001 |
| | 冲刷指数 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| 道路及广场 | 最大累积量/(kg·hm ²) | 125 | 90 | 6 | 0.6 |
| | 累积速率常数 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 半饱和和累计时间/d | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | 冲刷系数 | 0.008 | 0.007 | 0.004 | 0.002 |
| | 冲刷指数 | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 1.7 |

式基础上进行雨量时程分配,选取重现期为 3 a、5 a、10 a、15 a、50 a、100 a,设计降雨历时 120 min,模拟步长 1 min,取雨峰系数 $r = 0.4$ 。暴雨强度公式如下:

$$i = \frac{10579 \times (1 + 0.828 \times \lg P)}{167 \times (t + 46.4)^{0.99}} \quad (1)$$

式中: i 为降雨强度(mm/min); t 为降雨历时(min); P 为重现期(a)。

1.4 模型校核

根据 2016 年 7 月监测数据,选取 7 月 4 日与 13 日的两场降雨数据对模型进行参数验证。根据实测降雨强度峰值,选取 7 月 4 日监测数据与重现期为 50 a 的模拟数据比较,7 月 13 日监测数据与重现期为 3 a 的模拟数据比较,实测降雨数据值与模拟结果值见图 2。

由图 2 中数据比较可知:实测的降雨量分布与模拟降雨流量过程一致性较高,平均真实度可达 92%,重现期越大真实度越高;SS、COD、TN 的平均模拟真实度分别为 90%、93%、86%;两次 TP 模拟真实度分别为 95% 和 80.1%,分析第一次模拟未考虑前期连续降雨且下垫面磷初始增长浓度设置较低,导致模拟效果不好,修改初始增长浓度为 0.4 mg/L,获得修正后真实度为 81%。经比较,所选用的参数基于 SWMM 软件构建的模型比较可靠,因此本文建立的模型能够较为真实地模拟研究区域内渗透铺装对雨水水文、水质的调控情况。

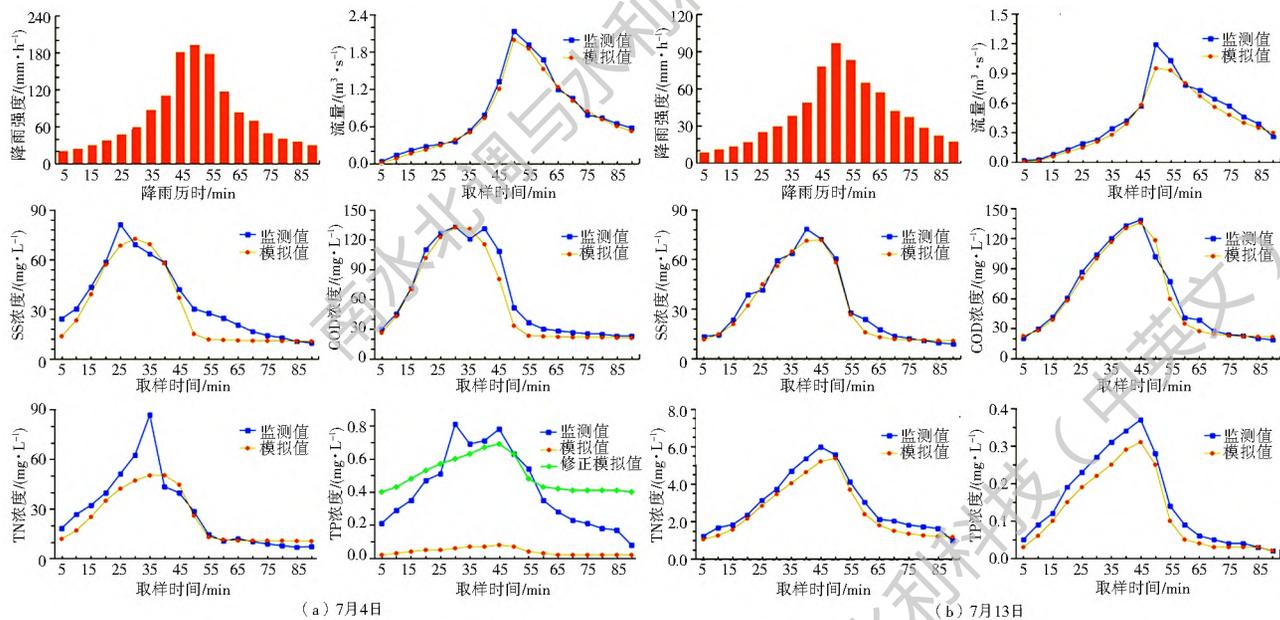


图 2 降雨量分布及水文、水质参数验证

Fig. 2 Rainfall process and verification of hydrological parameters and water quality parameters

2 模拟结果与分析

2.1 水文调控效果分析

通过 SWMM 模拟在不同重现期下渗透铺装前后径流过程,模拟总时长为降雨过程 2 h,时间步长为 1 min,得到水文模拟结果见表 3,管道溢流情况

见图 3。

由表 3 可知,在 3 a 到 100 a 的重现期下,渗透铺装前后的平均入渗量分别增加 20.84%、19.69%、18.66%、18.60%、18.53%、18.53%;峰值流量降低 19.39%、18.97%、18.44%、19.11%、19.31%、19.74%;平均径流系数降低 0.178、0.183、0.188、

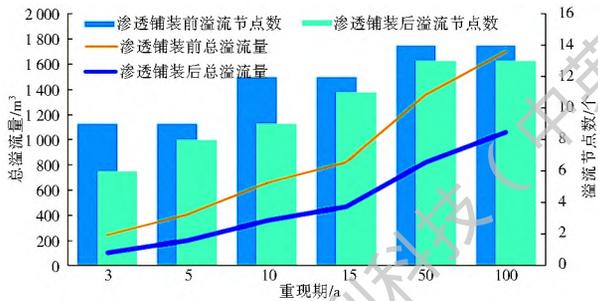


图 3 管道溢流总量与溢流节点数模拟结果

Fig. 3 Simulation results on flow in piping and number of overflow points

0.19、0.196、0.198, 峰现时间滞后 1~3 min。模拟结果与相关研究^[22-23]结论一致, 低于刘文等^[5]研究中提到径流削减量, 分析是由于渗透铺装的结构设

表 3 不同重现期下降雨径流文模拟结果

Tab. 3 Hydrological simulation results

| 模式 | 项目 | 设计重现期 P/a | | | | | |
|----------|---------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 3 | 5 | 10 | 15 | 50 | 100 |
| 未采用渗透铺装前 | 平均入渗量/mm | 11.687 | 11.771 | 11.866 | 11.914 | 12.033 | 12.089 |
| | 峰值流量/(m³·s⁻¹) | 0.980 | 1.160 | 1.410 | 1.570 | 2.020 | 2.280 |
| | 平均径流系数 | 0.815 | 0.836 | 0.857 | 0.867 | 0.890 | 0.900 |
| | 峰现时刻 | 0:51 | 0:50 | 0:50 | 0:50 | 0:49 | 0:49 |
| 采用渗透铺装后 | 平均入渗量/mm | 14.122 | 14.089 | 14.080 | 14.130 | 14.263 | 14.329 |
| | 峰值流量/(m³·s⁻¹) | 0.790 | 0.940 | 1.150 | 1.270 | 1.630 | 1.830 |
| | 平均径流系数 | 0.637 | 0.653 | 0.669 | 0.677 | 0.694 | 0.702 |
| | 峰现时刻 | 0:54 | 0:52 | 0:52 | 0:52 | 0:50 | 0:50 |

根据图 3 所示, 渗透铺装对于径流的调控作用能有效减少雨水检查井溢流个数, 但总溢流量的削减趋势随暴雨强度的增加而变缓, 对应了渗透铺装的径流调控效果较为稳定且渗蓄能力有限的分析结论。

根据 SWMM 动态模拟结果, 选取重现期为 3 a、15 a 下, 降雨历时 35 min、55 min 时刻的地表径流效果, 见图 4、图 5。模拟中重现期为 3 a, 降雨历时 55 min 时刻, 共 15 个子汇水区径流情况得到改善; 重现期为 15 a, 降雨历时 35 min 时刻, 所有子汇水区均明显减少了径流量, 重现期越小时, 降雨历时越长, 渗透铺装对地表径流的影响越显著, 反之当暴雨强度增大时, 越早能观察到渗透铺装对径流的调控作用。降雨历时 35 min 径流效果中, 重现期 15 a 下采用渗透铺装后与重现期 3 a 未采用渗透铺装效果相似, 证明渗透铺装对径流情况有良好的调控效果。

2.2 水质调控效果分析

图 6 为不同重现期排放口 P1 出水水质模拟结果, 各重现期下 SS、COD、TN、TP 负荷在采用渗透

计材料与布设位置不同会影响对水文控制效果。

平均入渗量的增长比例由重现期从 3 a 增长至 100 a 期间出现逐渐减小并趋于平缓的现象, 可能是由于设置渗透铺装面层孔隙比较小, 在渗透铺装排水方式一定时, 对径流入渗量的增加浮动较稳定并且透水性能有限; 从峰值流量的削减比例趋势中也出现减小的情况, 但在重现期为 50 a 和 100 a 时的峰值流量削减比出现上升, 可知渗透铺装在极端暴雨情况下的洪峰削减能力较为可靠。平均径流系数削减量分布在 0.18~0.20 之间, 总体随暴雨强度的增加而略有增加, 表明在渗透铺装结构一定的情况下, 对平均径流系数的影响基本稳定。从峰现滞后时间来看, 迟滞效果不太明显。

铺装前后削减比例趋势平缓, 分别平均减少峰值 24.12%、23.79%、22.81%、21.90%, 在各重现期下产生了 3~6 min 不等的峰现时间迟滞作用。其中 TN 的负荷峰值出现了随重现期增大而减小的问题, 根据相关研究^[24-25], 分析可能是由于氮的转化机理原因, 较大的透水流量缩短了渗透铺装系统中的反硝化作用, 从而加快了氮的去除作用。

由图中重现期为 3 a 的污染物浓度曲线分析可知, 各污染物均出现短时间内出现峰值又迅速下降的情况, 证明径流污染主要是由于初期雨水对地面的冲刷效果造成; 其次, 污染物浓度峰值随重现期增大而增加, 峰现时间又随重现期增大而提前, 降雨冲刷效果越明显, 短时污染物累积量越大, 对周边环境的影响和污染就越严重。采用渗透铺装能够明显削减径流污染负荷峰值, 并推迟峰现时间, 因而低影响开发作为城市径流污染的源头控制手段, 其效果是海绵城市建设过程中一个重要的研究方向。

渗透铺装对径流污染物浓度的削减作用, 不仅能够改善城市径流面源污染问题, 通过其基层、蓄水层对氮、磷营养物的暂存并缓排作用, 间接地改善了

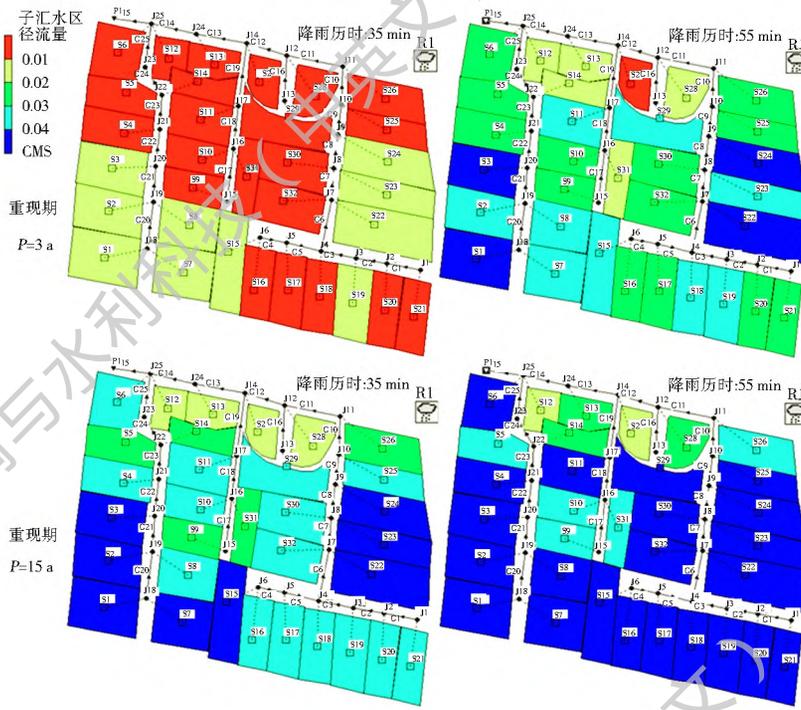


图 4 渗透铺装前降雨地表径流效果

Fig. 4 Surface runoff simulation before permeable pavement

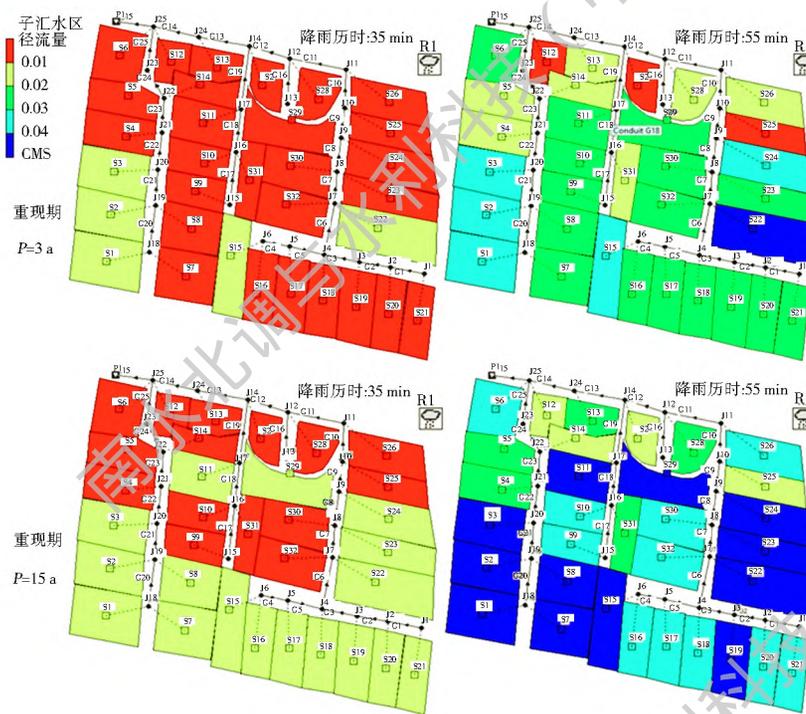


图 5 渗透铺装后降雨地表径流效果

Fig. 5 Surface runoff simulation after permeable pavement

出水水质, 可用于绿化、景观用水, 也可自下渗补充地下水, 将自然雨水变为城市水环境生态补水的宝贵资源。

3 结论

渗透铺装作为一种低影响开发措施, 对径流总量、平均径流系数、污染物负荷浓度有明显的削减作

用, 并对峰现时间均有一定迟滞作用, 对径流的水文、水质调控效果明显。在结构一定的情况下, 渗透铺装的渗蓄量有限, 在大于 3 a 重现期的暴雨强度下的径流调控效果基本稳定, 随着重现期增大略有增加。

在设计过程中, 渗透铺装的设置应当权衡其位置和应用的关系, 在保证铺装路用功能的同时, 选用

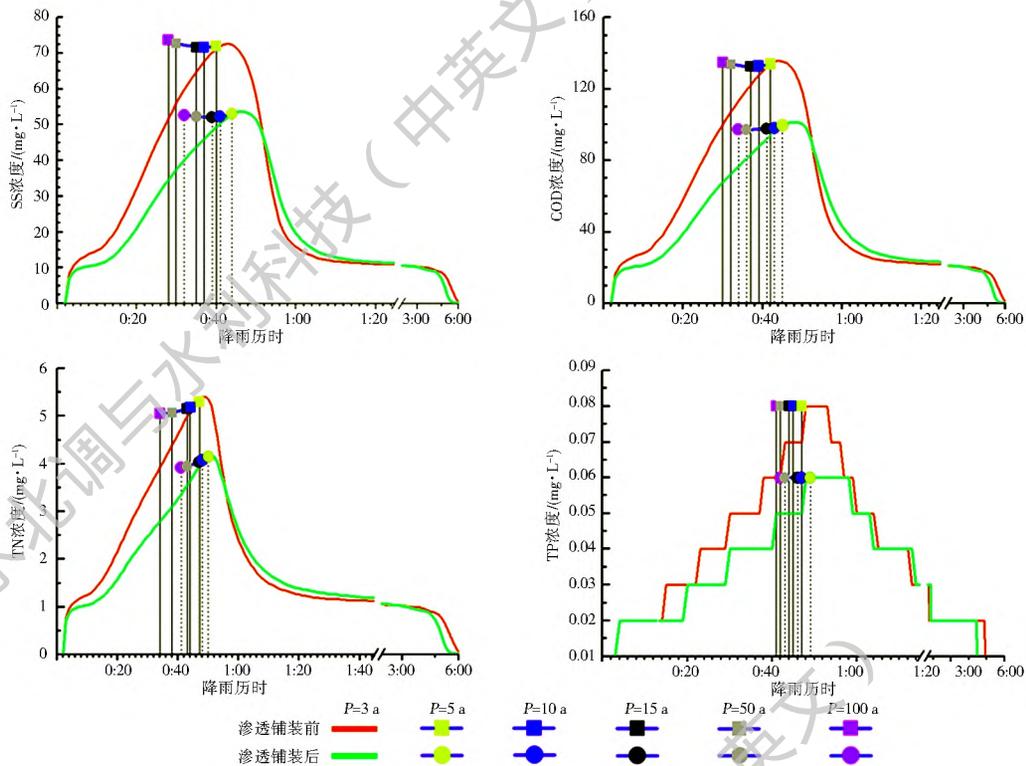


图 6 排放口 P1 的污染物浓度模拟结果

Fig. 6 Simulation results of pollutant concentration at the discharge port P1

合适孔隙结构的材料,使其拥有高渗透性能,更好达到透水快,蓄水多,去污能力好的效果。在实际使用中,透水铺装的效果会受到堵塞和污染物影响下渗能力,应当定期维护和清扫,去除表面和孔隙中的细小颗粒物和杂质,保持其原有设计调控能力。

参考文献(References):

- [1] 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 Y A, CHEN J G, ZHANG S H, et al. Study on rain runoff infiltration and collecting efficiency by permeable pavements of urban zone[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(6): 65-68. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2009.06.018.
- [2] 李卓熹, 秦华鹏, 谢坤. 不同降雨条件下低冲击开发的水文效应分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(21): 37-41. (LI Z X, QIN H P, XIE K. Hydrological effect analysis of low impact development under different rainfall conditions[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(21): 37-41. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-4602.2012.21.011.
- [3] 程涛, 苏洪涛. 海绵城市建设及 LID 理念下雨水资源化技术分析[J]. 华中建筑, 2016, 34(12): 72-75. (CHENG T, SU H T. Construction of sponge city and the LID-based analysis on the technology of rainwater resource utilization[J]. Huazhong Architecture, 2016, 34(12): 72-75. (in Chinese))
- [4] 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 Q N, CHEN Z H, CHEN X, 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)) DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2017.02.006.
- [5] 刘文, 陈卫平, 彭驰. 城市雨洪管理低影响开发技术与利用进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1901-1912. (LIU W, CHEN W P, PENG C. Advances in low impact development technology for urban stormwater management. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1901-1912. (in Chinese)) DOI: 10.13287/j.1001-9332.20150331.009.
- [6] 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 R N, GONG Y W, LI J Q, et al. Progress in controlling urban nonpoint source pollution by permeable pavement[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(5): 57-63. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2014.05.012.
- [7] 马箐, 沙晓军, 徐向阳, 等. 基于 SWMM 模型的低影响开发对城市住宅区非点源污染负荷的控制效果模拟[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9): 53-57. (MA Q, SHI Xi J, XU X Y. Control effect simulation of low impact development on nonpoint source pollution load in urban residential area based on SWMM Model[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2015, 33(9): 53-57. (in Chinese))
- [8] 解晓光, 徐勇鹏, 崔福义. 透水路面对路表径流污染的控制效能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(9): 65-69. (XIE X G, XU Y P, CUI F Y. Controlling efficiency of permeable pavement to runoff pollutant[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(9): 65-69. (in Chinese))
- [9] 暴雨洪水管理模型——EPA SWMM 用户教程[M]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2011. (Storm water management model EPA SWMM user's manual[M]. Beijing: China Institute

- te of Water Resources and Hydropower Research, 2011. (in Chinese)
- [10] ROSA D J, CLAUSEN J C, DIETZ M E. Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2015, 51(3): 746-757. DOI: 10.1111/jawr.12272.
- [11] 王海潮, 陈建刚, 张书函, 等. 城市雨洪模型应用现状及对比分析[J]. *水利水电技术*, 2011, 42(11): 16-13. (WANG H C, CHEN J G, ZHANG S H, et al. Application status and comparative analysis of urban storm water models[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2011, 42(11): 10-13. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2011.11.003.
- [12] 邹霞, 刘佳明, 张艳军, 等. 城市地表雨水汇流运动波计算方法研究[J]. *水文*, 2015, 35(2): 12-16. (ZOU X, LIU J M, ZHANG Y J, et al. Calculation of kinematic wave for urban surface rainfall runoff[J]. *Hydrology*, 2015, 35(2): 12-16. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2015.02.003.
- [13] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证[J]. *环境科学*, 2008, 29(6): 1495-1501. (DONG X, DU P F, LI Z Y, et al. Parameter identification and validation of SWMM in simulation of impervious urban land surface runoff[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2008, 29(6): 1495-1501. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0250-3301.2008.06.007.
- [14] MYERS B, BEECHAM S, LEEUWEN J A V. Water quality with storage in permeable pavement basecourse[J]. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers Water Management*, 2011, 164(7): 361-372. DOI: 10.1680/wama.2011.164.7.361.
- [15] STEVEN, KHIRLUDDIN, ABDULLAH. Infiltration study for urban soil: case study of sungai kedah ungauged catchment[J]. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2014, 3(6): 291-299. DOI: 10.17265/2162-5263/2014.06.001.
- [16] 熊赞, 李子富, 胡爱兵, 等. 某低影响开发居住小区水量水质的 SWMM 模拟[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(17): 100-103. (XIONG Y, LI Z F, HU A B, et al. Simulation of effect of LID facilities on water quantity and quality in residential area based on SWMM[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(17): 100-103. (in Chinese))
- [17] 蒋元勇, 丰锴斌, 刘学文, 等. 城市雨洪 SWMM 模型的敏感参数研究综述[J]. *生态科学*, 2015, 34(2): 194-200. (JIANG Y Y, FENG K B, LIU X W, et al. Summary of sensitive parameters SWMM model of urban stormwater[J]. *Ecologic Science*, 2015, 34(2): 194-200. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-8873.2015.02.029.
- [18] 陈晓燕, 张娜, 吴芳芳, 等. 雨洪管理模型 SWMM 的原理、参数和应用[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(4): 4-7. (CHEN X Y, ZHANG N, WU F F, et al. Stormwater management model (SWMM): Principles, parameters and applications[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(4): 4-7. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-4602.2013.04.002.
- [19] 李春林, 胡远满, 刘淼, 等. SWMM 模型参数局部灵敏度分析[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(4): 1076-1081. (LI C L, HU Y M, LIU M, et al. Local sensitivity analysis of parameters in Storm Water Management Model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(4): 1076-1081. (in Chinese))
- [20] 李海燕, 岳利涛, 黄延. SWMM 中典型水质参数值确定方法的研究[J]. *给水排水*, 2011, 47(S1): 159-162. (LI H Y, YUE L T, HUANG Y. Method of determining typical water quality parameters in SWMM[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, 47(S1): 159-162. (in Chinese)) DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2011.s1.031.
- [21] 陈韬, 李研, 李业伟, 等. 城市雨水水质模拟研究进展[J]. *市政技术*, 2014, 32(3): 115-121. (CHEN T, LI Y, LI Y W, et al. Simulation study advances of city rainwater quality[J]. *Municipal Engineering Technology*, 2014, 32(3): 115-121. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-7767.2014.03.037.
- [22] GILBERT J K, CLAUSEN J C. Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed tone driveways in Connecticut[J]. *Water Research*, 2006, 40(4): 826-832. DOI: 10.1016/j.watres.2005.12.006.
- [23] GUAN M, SILLANPÄÄ N, KOIVUSALO H. Assessment of LID practices for restoring pre-development runoff regime in an urbanized catchment in southern Finland[J]. *Water Science & Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2015, 71(10): 1485-91. DOI: 10.2166/wst.2015.129.
- [24] 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 L Z, FENG S Y, DING Y Y, et al. Purification of urban runoff nitrogen and phosphorus pollutants by a multilayer infiltration system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(5): 960-967. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0253-2468.2009.05.012.
- [25] 冯绍元, 侯立柱, 丁跃元, 等. 多层渗滤介质系统去除城市雨水径流有机污染物[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(6): 1123-1130. (FENG S Y, HOU L Z, DING Y Y, et al. Removal of organic pollutants from urban runoff by a multilayer infiltration system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(6): 1123-1130. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0253-2468.2008.06.015.