

DOI: 10.13476/j.cnki.nsqdqk.2022.0120

李婷, 宋新山, 丁相毅, 等. 海绵体透水铺装水动力过程初步研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1220-1230. LI T, SONG T S, DING X H, et al. Preliminary research on hydrodynamic process of sponge permeable pavement[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1220-1230. (in Chinese)

海绵体透水铺装水动力过程初步研究

李婷¹, 宋新山¹, 丁相毅², 王宇晖¹

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:为缓解城市内涝, 提高透水铺装渗蓄排功能, 搭建填充多孔纤维棉为铺装基层的海绵体透水铺装系统, 基于室内模拟降雨的物理试验, 构建 Hydrus-1D 数值模拟模型。在不同降雨强度和降雨间隔条件下, 通过产流试验获得透水铺装的产流曲线并利用 Hydrus-1D 软件进行模拟验证, 分析纤维棉透水铺装结构对降雨径流水量的控制特性, 初步探究透水铺装结构的一维水动力过程, 并利用数值模型模拟不同结构层比例下峰值流量削减效果及出流特征。结果表明: 在间隔天数为 1~7 d 时 Hydrus-1D 数值模型对海绵体透水铺装具有较好的拟合度; 纤维棉透水铺装能有效削减峰值流量, 具有较好的出流延迟性能, 对于排水过程有明显滞缓作用, 降雨强度越小, 间隔时间越长, 效果越显著, 在强降雨条件下效果大大减弱。在试验条件下降雨间隔 3 d 能发挥该透水铺装最大蓄水性能, 降雨间隔 9 d 表现出最佳峰值流量削减效果。在降雨间隔 9 d 时, 多孔纤维棉层与碎石层比例为 1:3 时水路畅通效果最佳。

关键词: 透水铺装; 多孔纤维棉; Hydrus-1D; 模拟

中图分类号: TV214 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



城市化过程中, 屋面、道路和地面等不透水设施导致了下垫面硬化, 城市不透水面积比例上升, 造成 70%~80% 的降雨形成径流, 仅有 20%~30% 的雨量能够入渗地下^[1]。雨水下渗的减少和地表径流量增加改变了城市水循环, 加重了城市热岛效应、非点源污染等一系列环境问题。此外, 由于气候变化, 极端气候发生频率增加, 高强度、短历时的强降雨增大了城市管网系统的排水压力^[2], 加重了城市内涝。

透水铺装是海绵城市建设中典型的低影响开发(low impact development, LID)技术之一, 具有粗糙表面及较强的透水性, 其多层孔隙结构能有效消纳雨水、降低峰值流量, 实现对城市水循环的调蓄功能, 同时缓解城市热岛、雨岛效应^[3]。透水铺装结构

一般由可快速入渗的透水面层以及提供储水、下渗能力的粗集料结构层组成^[4], 基层材料对于雨水下渗效果影响明显^[5]。李岩凌等^[6]研究发现建筑垃圾再生骨料蓄水率为天然骨料的 2 倍, 可作为透水铺装基层吸蓄更多雨水、缓解热岛效应、降低环境温度。Nnadi 等^[7]在透水铺装系统中加入了 OASIS® 酚醛泡沫, OASIS® 的多孔结构及其三维结构能有效保留储存雨水, 延迟峰现时间、降低峰值流量。Heweidak 等^[8]通过设计应用程序, 模拟估算 OASIS® 层的最佳厚度, 使其截留 100% 的雨水并持续 15 min。生态多孔纤维棉主要成分为玄武岩纤维, 是由玄武岩在 1 500 °C 左右的高温下熔融制成, 环境危害小, 价格低廉, 比表面积大, 耐久性及稳定性高, 力学性能与玻璃纤维相似, 弹性模量约为 89

收稿日期: 2022-05-30 修回日期: 2022-10-08 网络出版时间: 2022-11-17

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221116.1135.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0408603)

作者简介: 李婷(1998—), 女, 浙江金华人, 主要从事水资源开发利用研究。E-mail: L871525081@163.com

通信作者: 王宇晖(1984—), 男, 上海人, 教授, 博士, 主要从事水生态修复技术研究。E-mail: yhwang@dhu.edu.cn

GPa, 抗拉强度约为 2.8 GPa^[9-10]。同时, 多孔纤维棉表面具有亲水性, 能就近吸收、蓄积、下渗以及净化雨水, 且其具有反向释水能力, 在降雨后可向周围土壤释水^[11], 保持土壤湿度, 供给植物生长, 调节城市水热循环。多孔纤维棉可用作海绵城市建设中的“海绵体”, 增强透水铺装系统的渗蓄排性能。玄武岩纤维材料制成的复合材料现已用于医疗、建筑、汽车部件制造等多个领域, 但是目前尚未有利用生态多孔纤维棉作为透水铺装系统的雨水调控性能的研究, 尤其是其在不同降雨条件下的水文响应过程的相关研究。

透水铺装因具有高入渗率以及各结构层的异质性, 易导致优先流, 故较其他 LID 技术而言水力特性建模较难^[12], 目前常用的 LID 模型主要有 SWMM^[13-15]、SWC^[16]、RECARGA^[17-18]、DRAINMOD^[19-20]、Hydrus^[21] 等, 其中 Hydrus-1D 模型具有广泛的适用性, 能够描述包气带以及饱水带的一维水分运移, 适用于透水铺装水文数值的模拟^[22-23]。

鉴于此, 基于搭建纤维棉透水铺装, 进行室内模拟降雨获得该透水铺装系统重要水文参数及渗蓄排特征, 并构建 Hydrus-1D 模型探究海绵体透水铺

装在不同降雨条件下雨水径流调控效果, 提出海绵体水路畅通技术优化方法, 为建立城市下垫面径流量控制过程数值模拟方法提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置主要由降雨发生装置及海绵体透水铺装设施两部分构成。试验采用的是 LYH-MY2 型便携式人工降雨模拟装置, 由供水单元、泵组及水压传感器、喷雾单元组成。通过喷雾单元中的雨量喷头控制一定的降雨强度, 均匀落至透水铺装表面, 有效降雨面积为 0.93 m²。纤维棉透水铺装床体结构及装置布置见图 1, 床体尺寸为 1.55 m(长)×0.6 m(宽)×0.7 m(高), 从上向下分别填充 5 cm 粗砂, 20 cm 生态多孔纤维棉, 20 cm 级配碎石排水层, 排水层底部垫有一层 150 g 透水土工布。其中: 粗砂粒径为 0.5 ~ 1.0 mm; 生态多孔纤维棉抗压强度为 22.1 kPa, 孔隙度为 95.3%; 级配碎石粒径范围为 8 ~ 16 mm。装置侧边于各结构层底端装有孔径为 20 mm 的出水球阀, 装置底部出水球阀接有流量计, 以监测出流流量过程线。

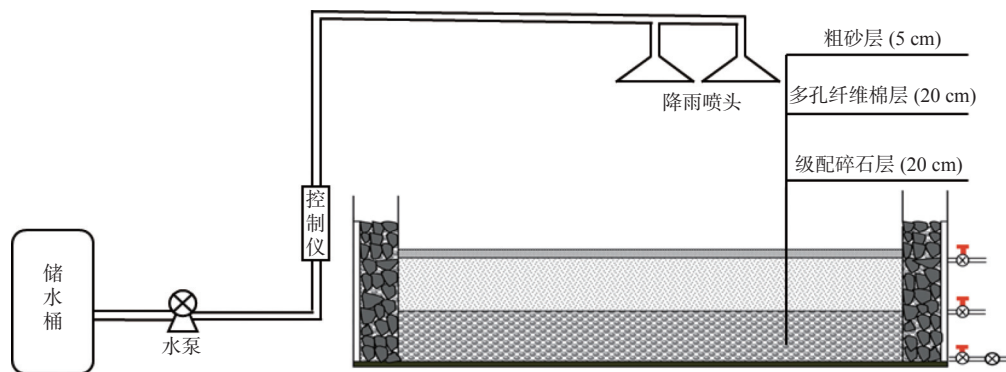


图 1 纤维棉透水铺装床体结构及装置布置

Fig. 1 Bed structure and device layout of fiber cotton permeable pavement

1.2 模拟降雨试验

试验于 2021 年 7 月—2021 年 10 月进行, 气温为 33 ~ 25 °C, 湿度为 96% ~ 58%。试验雨强分别为 6 L/min 和 11 L/min, 降雨历时为 30 min, 参考降雨划分等级标准, 推算出相应降雨等级分别为大暴雨及特大暴雨。

在两种降雨强度下, 分别研究不同间隔天数对于透水铺装水量控制性能的影响, 包括雨水径流的产流时间、峰值流量、累计入渗量等参数, 分析纤维棉透水铺装水量控制规律特征。蓄满试验前, 关闭

阀门并降雨直至装置表面产生积水, 关闭降雨并静置 1 h, 再将阀门打开, 将蓄积雨水排出后, 认为此时为蓄满状态。具体试验条件设计见表 1。试验以降雨开始时间为起始时刻, 观察装置底部出流情况, 记录出流开始时刻。在降雨前 10 min, 每隔 1 min 记录 1 次出流流量, 后续根据具体流量大小, 每隔 2、5、10 min 记录该时刻出流量, 直至底部累计流量计计数停止增加时结束。试验结束后, 开启各阀门开关, 排空装置内蓄水, 以方便下一次试验进行。利用 Origin 软件对测得数据进行分析。

表 1 试验方案设计
Tab. 1 Experiment programme design

试验编号	试验日期	降雨强度/ (L·min ⁻¹)	降雨量/ L	降雨历时/ min	间隔天数/ d
1	2021-07-23	6	180	30	0
2	2021-07-22	6	180	30	1
3	2021-08-23	6	180	30	3
4	2021-08-01	6	180	30	5
5	2021-08-08	6	180	30	7
6	2021-08-17	6	180	30	9
7	2021-09-03	6	180	30	11
8	2021-09-04	11	330	30	0
9	2021-09-05	11	330	30	1
10	2021-09-13	11	330	30	3
11	2021-09-13	11	330	30	5
12	2021-09-20	11	330	30	7
13	2021-09-29	11	330	30	9
14	2021-10-09	11	330	30	11

1.3 数据处理

1.3.1 出流延迟时间及出流过程曲线

以降雨开始时间为起始时间,装置底部开始出流时间即为出流延迟时间^[24]。间隔时间段的平均流量认为是中间时间点的瞬时流量,绘制时间流量过程曲线。流量计算公式为

$$Q_t = (Q_{t+i} - Q_{t-i})/2i \quad (1)$$

式中: i 为间隔时间, min; t 为时间, min; Q_t 、 Q_{t+i} 、 Q_{t-i} 分别为 t 、 $t+i$ 、 $t-i$ 时刻流量计显示累计水量, L。

1.3.2 洪峰及降雨总量削减率

以蓄满状态下的峰值流量为对照,分析不同降雨强度下,不同间隔天数对峰值流量的削减率的影响。洪峰及降雨总量削减率计算公式为

$$q_{\text{峰}} = (Q_0 - Q_n)/Q_0 \quad (2)$$

$$q_{\text{总}} = (Q_{\text{总}} - Q_{\text{出}})/Q_{\text{总}} \quad (3)$$

式中: $q_{\text{峰}}$ 为洪峰削减率; Q_0 为蓄满状态下(间隔 0 天)的峰值流量, L; Q_n 为间隔 n 天的峰值流量, L; $q_{\text{总}}$ 为降雨总量削减率; $Q_{\text{总}}$ 为降雨总量, L; $Q_{\text{出}}$ 为总流出量, L。

2 模型建立

2.1 Hydrus-1D 模型

Hydrus-1D 是由美国盐碱实验室研发的用于模拟计算变饱和多孔介质中包气带水分、盐分运移、根系吸水等一维运动的数值模型,可通过设置不同结构层参数和上下边界条件,灵活处理该条件下均

质或非均质土壤中水盐运移等问题,在农业、环境、工业生产等领域中应用广泛。

Hydrus-1D 中水分运移过程是基于修正的 Richard 方程,忽略水分的水平、侧向流动以及滞后效应,只考虑垂直一维流动。以海绵体透水铺装粗砂层为坐标原点所在水平面, Z 轴向上为正方向,一维变饱和水分运移基本方程为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[K(h, z) \left(\frac{\partial h}{\partial Z} + \cos \phi \right) \right] - S \quad (4)$$

$$K(h, z) = K_s(z) K_r(h, z) \quad (5)$$

式中: h 为压力水头, cm; θ 为体积含水率, cm³/cm³; t 为模拟时间, s; Z 为垂直坐标; K 为非饱和渗透系数函数, cm/d; S 为源汇项, 通常代表根系吸水率, cm³/(cm³·s); ϕ 为水流方向与竖直方向夹角; K_r 为相对导水率, cm/d; K_s 为饱和导水率, cm/d。

常采用 Hydrus-1D 中 Van Genuchten 单孔隙模型进行水分特征曲线与非饱和土壤导水率的拟合,以描述土壤水分运移特征。其具体方程为

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h^n|]^m} h < 0 \\ \theta_s h \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ_r 为残余含水量, cm³/cm³; θ_s 为饱和含水量, cm³/cm³; α 为进气吸力值的倒数, cm⁻¹; n 为孔径分布参数; $m = 1 - 1/n$; h 为压力水头, cm。

2.2 模型参数设置

采用离心法测定多孔纤维棉-水分特征曲线。用环刀取多孔纤维棉块,并测定纤维棉块厚度,将纤维棉块浸水直至饱和,并测定其饱和含水量。使用日式 CR22G-2 型立式高速冷冻离心机,测定时温度恒定为 20 °C,分别在 500、750、1 000、1 500、2 000、2 500 r/min 转速下离心 50 min,每次离心结束记录其质量及厚度^[25]。全部离心结束后,将纤维棉块放入 105 °C 的烘箱中烘干 8 h 直至恒重,并称量其干重。

当孔隙充满水分时,多孔纤维棉为饱和状态,其饱和含水率在数值上等于孔隙度,通过 GB/T 29046—2012 中的检测方法,测得多孔纤维棉孔隙度为 95.3%,即饱和含水率为 0.953。以吸力为横坐标,体积含水率为纵坐标,将测得数据与 VG 方程拟合绘制纤维棉块持水特征曲线,见图 2,可见多孔纤维棉持水曲线与土壤水分特征曲线类似,大体上呈 L 形,随着吸力的增加,含水率下降。表 2 为多孔纤维棉持水曲线的 VG 模型曲线拟合参数值,其 R^2 为 0.999,表明相关性较好。

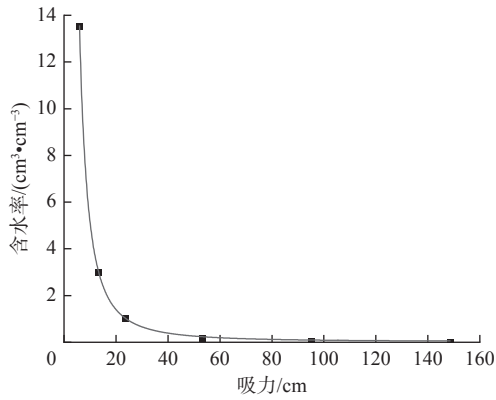


图2 多孔纤维棉持水曲线

Fig. 2 Porous fibre cotton water-holding curve

表2 VG曲线拟合参数值

Tab. 2 VG curve fitting parameter values

参数	$\theta_l / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha / (\text{cm}^{-1})$	n	R^2
参数值	0.025	0.953	0.104 52	2.91	0.999

2.3 边界条件设置

选择 Hydrus-1D 中的水分运移模块,模拟海绵体透水铺装水分运动过程。假设各铺装层填料均匀,且忽略温度影响。海绵体透水铺装剖面共分3层:上层为粗砂层,厚度为5 cm;中间层为多孔纤维棉,厚度为20 cm;下层为碎石层,厚度为20 cm,总厚度为45 cm。在6 L/min的降雨强度下,模拟时间统一设定为180 min。在11 L/min的降雨强度下,模拟时间统一设置为265 min。迭代信息则参照模型的默认值。模型中的水流上边界条件为大气边界条件,下边界条件为自由出流。

2.4 模型参数率定

纳什效率系数(E_{NS})可反映水文模拟过程与实测过程的拟合程度,常用以评价水文模型模拟结果的优劣。采用 E_{NS} 对模型参数进行率定,当 E_{NS} 值越无限趋近于1时,则表示模型拟合程度越高^[26]。

E_{NS} 表达式为

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{av})^2} \quad (7)$$

式中: Q_{sim} 为*i*时刻的模拟值,L/min, Q_{obs} 为*i*时刻的观测值,L/min; Q_{av} 为水文过程平均观测值,L/min。

在 Hydrus-1D 中输入人工降雨数据,多孔纤维棉层水力学参数设置采用离心试验获得的拟合参数值,根据经验值设置粗砂层以及碎石基层水力参数,将实测数据分为率定组和验证组,根据装置底部出流实测数据与模型底部通量数值进行对比验证,调整各层初始含水量,率定纤维棉透水铺装粗

砂层以及碎石基层水力参数以及各层的饱和渗透系数 K_s 。

3 结果与讨论

3.1 模拟结果验证

选取蓄满、间隔1 d、间隔3 d时水文过程率定模型参数,并通过间隔5、7、9及11 d的实测过程验证模型参数准确性。最终海绵体透水铺装各层参数设置见表3。在两种雨强下,不同间隔天数流速过程曲线及总流量过程曲线拟合的 E_{NS} 值与 R^2 见表4。图3为两种降雨强度下底部出流速率与出流总量的模拟与实测曲线,对于蓄满、间隔1、3、5、7、9 d的间隔天数,流速过程曲线及总流量过程曲线的模拟值与实测拟合程度较高,但对于间隔11 d的流速过程曲线,模拟曲线较实测曲线向右偏移的幅度较大,且模型对于降雨阶段,蓄水过程拟合程度较高,当降雨停止后的模拟曲线较实测曲线有一定程度的滞后,这可能是由于纤维棉块铺叠时存在较多缝隙,部分雨水下渗较快。

表3 各层参数设置

Tab. 3 Parameters for each layer

土层	$\theta_l / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha / (\text{cm}^{-1})$	n	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	l
粗砂层	0.045	0.430	0.011 00	5.53	0.021	0.5
多孔纤维棉层	0.025	0.953	0.104 52	2.91	13.700	0.5
碎石层	0.035	0.450	0.065 00	1.70	15.220	0.5

表4 两种降雨强度下不同间隔天数拟合 E_{NS} 值和 R^2 Tab. 4 Fitting E_{NS} values and R^2 at different intervals for two rainfall intensities

降雨强度/ (L·min ⁻¹)	间隔时间/ d	流速过程曲线		总流量过程曲线	
		E_{NS}	R^2	E_{NS}	R^2
6	0	0.565	0.673	0.965	0.984
	1	0.862	0.883	0.945	0.997
	3	0.589	0.822	0.738	0.997
	5	0.713	0.836	0.882	0.995
	7	0.519	0.700	0.919	0.982
	9	0.215	0.454	0.921	0.968
11	11	0.197	0.335	0.842	0.960
	0	0.965	0.976	0.993	0.999
	1	0.814	0.838	0.979	0.997
	3	0.758	0.797	0.995	0.998
	5	0.585	0.654	0.990	0.997
	7	0.438	0.560	0.982	0.993
11	9	0.479	0.598	0.947	0.989
	11	0.158	0.450	0.962	0.989

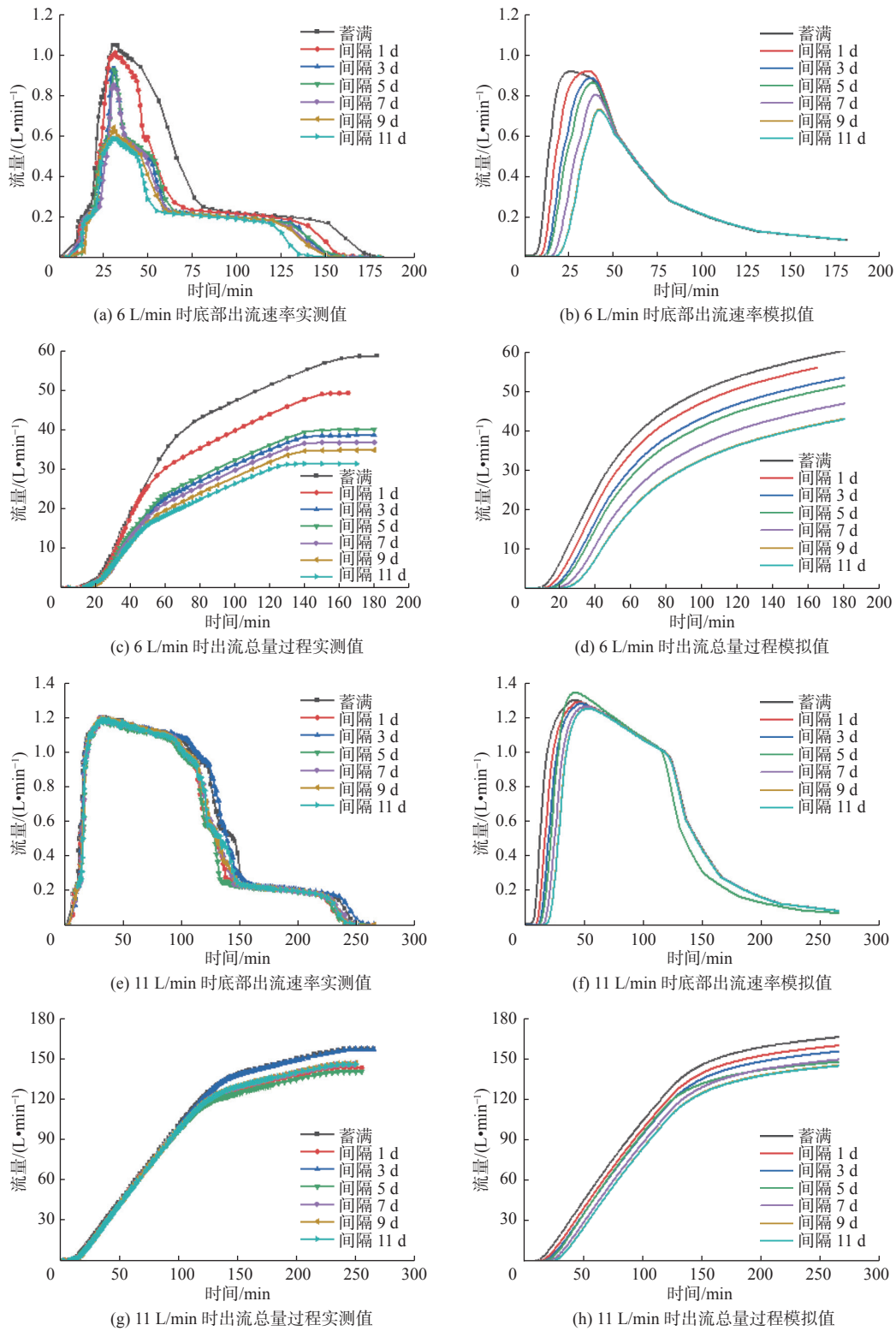


图 3 两种降雨强度下底部出流速率曲线和出流总量过程曲线

Fig. 3 Bottom outflow rate curve and total outflow process curve for two rainfall intensities

3.2 出流延迟时间分析

在 6 L/min 及 11 L/min 两种降雨强度下, 不同间隔天数的出流延迟时间见表 5。随着间隔天数的增加, 延迟时间呈增长趋势, 降雨强度较小则其出流延迟时间越长。间隔降水影响了纤维棉透水铺装各结构层的含水率, 可见海绵体透水铺装出流延

迟时间与其含水率、降雨强度均存在负相关关系。

3.3 渗蓄排特性分析

3.3.1 过程曲线

透水铺装属于非饱和多孔介质结构, 其中水分运移受基质势、重力势以及压力势等势能作用, 下渗主要分浸润与渗流两个过程, 受基质势作用为主,

雨水浸润铺装材料的固相介质颗粒,形成薄膜水和吸湿水,并在小孔隙内形成毛管水^[27-28]。当含水率超过材料吸附与毛细作用储水极限后,雨水沿大孔隙受重力势作用形成竖向大孔隙流,浸润与渗流两个过程交替进行直至湿润锋到达铺装底部^[29]。当土

基入渗速率小于降雨速率时,在铺装基层中产生积水,随着降雨时间增加深度逐渐增加至地表产生径流。当降雨结束后,大孔隙内蓄水量作为土基入渗量逐渐下渗或排出,剩余少部分水分由于吸附或毛管作用吸持于铺装内部。

表 5 出流延迟时间
Tab. 5 Outflow delay time

降雨强度/(L·min ⁻¹)	间隔时间/d						
	0	1	3	5	7	9	11
6	2 min20 s	3 min30 s	4 min8 s	4 min30 s	4 min25 s	4 min40 s	5 min
11	1 min40 s	2 min57 s	3 min5 s	3 min16 s	3 min13 s	3 min18 s	3 min30 s

图 3(a)、3(e)为在 6 L/min 及 11 L/min 的降雨强度下,不同间隔天数条件下透水铺装底部出流过程曲线。前 30 min 为降雨过程,从图 3(a)中可以看出,当装置底部开始出流,装置内部开始积水,并随降雨时间延长积水深度加深,水分势能增加,出流速率随积水深度增加而增大。在此降雨强度下,透水铺装无地表产流,降雨停止时,流速达到最大值。随后装置积水不断排出,深度降低,流量逐渐降低,且降低速率小于降雨时流量增加速率,降低至 0.2~0.3 L/min 左右时,流量几乎恒定。这可能是因为纤维棉层孔隙较小,重力势作用减弱,基质势作用增强,当水位降低至砾石层,主要又以大孔隙流存在。图 3(e)为降雨强度为 11 L/min 的出流过程曲线。在此降雨强度下,均发生地表产流,产生地表积水。产流约发生在 20 min 左右,可见图中此时流量增长放缓,降雨停止后,流量停止增长,此后发生地表积水入渗,流量缓慢下降。地表积水完全入渗后,流量过程曲线与图 3(a)类似。

对比图 3(a)、3(e),可以看出在降雨期间,铺装未发生积水时,入渗速率随降雨强度的增大而增大,认为是雨强增大导致雨滴冲击力增大,孔隙基质对雨水的吸持作用力减弱,同时重力占主导因素造成的。

3.3.2 总流出量

在 6 L/min 的降雨强度下,总流出量总体呈下降趋势,间隔 5 d 流出量稍有增加,这可能是由于试验期间有部分时段空气湿度较高。在 11 L/min 的降雨强度下,除间隔 3 d 外,其余流出总量较蓄满状态降低较多,但彼此间相差不大。间隔 3 d 总流出量较高可能是因为从间隔 11 d 试验后,从 10 月 11 日至 13 日均为阴雨天气,空气湿度较大,且与 7、8、9 三个月相比,降温明显,气温平均为 24℃,透水铺装含水量较高,故总流出量较大,峰值流量较大。

3.3.3 蓄水性能

由图 4(a)可以看出:透水铺装蓄水性能随间隔天数的增加而增大,在降雨阶段,其蓄水性能主要依赖于降雨强度,受降雨间隔影响不明显;在降雨停止后,蓄水量逐渐下降直至稳定,且间隔天数越小,其蓄水量下降越快,这期间下降的蓄水量主要是由海绵体透水铺装中的大孔隙无法吸持雨水,在重力作用下排出;稳定后蓄水量主要是毛管水、薄膜水以及部分孔隙水组成,其稳定蓄水量大小则主要取决于多孔纤维棉层初始含水率。铺装系统在蓄满后降雨,其蓄水量稳定在 116.71 L 左右;间隔 1 d 后降雨,其蓄水量稳定在 130.54 L 左右;间隔 3 d 后降雨,其蓄水量稳定在 140.86 L 左右,占降雨总量的 78.26%;当间隔时间为 5 d 及以上时,蓄水量差距不大。

在大雨强下,装置产生蓄满产流,降雨停止后装置内蓄水较高,积水排出速度较快。由图 4(b)可以看出:在间隔时间为小于 5 d 时,其稳定蓄水量随间隔天数增加而增加;当间隔天数大于 5 d 时,其稳定蓄水量随间隔天数增加变化不大。在大雨强的降雨条件下,间隔天数对于纤维棉透水铺装蓄水性能几乎无影响。在相同间隔天数下,降雨强度越大,其蓄水量也越大;不同降雨强度及间隔天数下,纤维棉透水铺装对降雨总量的削减率见表 6。总体而言,降雨强度越大,降雨总量削减越低,但其随着间隔天数的增加而增加。这可能是由于积水入渗过程比降雨过程入渗缓慢且入渗均匀,海绵体吸蓄时间更长,使其饱和率越高。但降雨强度越大,其出流量也越大,蓄水量占总降雨量百分比也越低。

3.3.4 峰值流量削减率

在 6 L/min 的降雨强度下,峰值流量削减率随间隔天数的增加呈上升趋势。间隔 9 d 时,削减率增

幅最大,达 20%。透水铺装在该降雨强度下,与上一次降雨间隔 9 d 时,性能最优。但对于 11 L/min 的

降雨强度而言,不同间隔天数的峰值流量区别并不明显,对于大雨强降雨峰值流量削减性能并不理想。

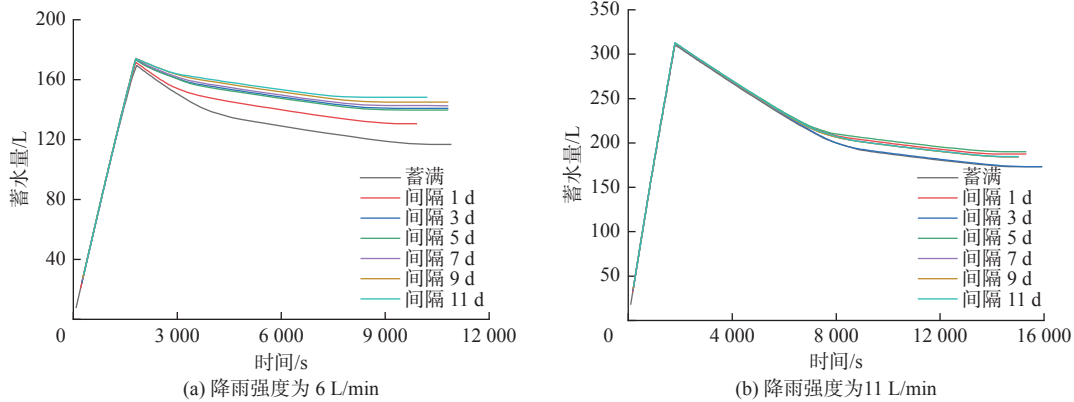


图 4 蓄水过程曲线

Fig. 4 Water storage process curve

表 6 降雨总量削减率

Tab. 6 Total rainfall reduction rate

%

降雨强度/(L·min ⁻¹)	间隔时间/d						
	0	1	3	5	7	9	11
6	64.83	72.52	78.26	77.61	79.25	80.54	82.34
11	52.47	56.75	52.52	57.62	55.84	55.85	55.96

3.4 水路畅通优化

通过 Hydrus-1D 模拟对比不同结构层比例下得到海绵体透水铺装峰值削减效果及出流特征,进一步优化海绵体透水铺装应用中的水路畅通模型。将透水铺装总高度设置为 45 cm,其中粗砂层始终为固定厚度 5 cm,改变多孔纤维棉层以及碎石层比例,分别设置为 1:1、1:3、2:3、3:1、3:2。设计降雨强度分别为 6 L/min(6.45 mm/min)、11 L/min(11.83

mm/min),降雨历时为 30 min。以间隔天数为 9 d 装置含水率设置各结构层初始含水率,分别固定为 28%、29%、9%。在两种降雨强度下,不同比例的多孔纤维棉层与碎石层的海绵体透水铺装底部出流曲线见图 5。由图 5 可以看出,当多孔纤维棉层与碎石基层比例为 1:3 时,海绵体透水铺装性能最佳。

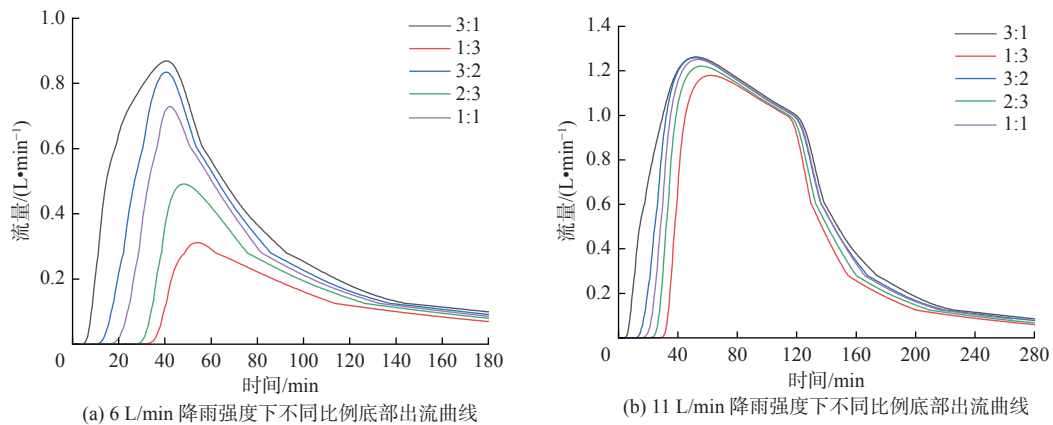


图 5 两种降雨强度下各比例纤维棉透水铺装底部出流曲线

Fig. 5 Flow out curves at the bottom of permeable fibre wool paving at various scales for two rainfall intensities

4 结论

透水铺装对于雨水径流具有明显的渗蓄排作用,可改善城市水文循环,降低城市内涝风险。随着城

市热岛效应及雨岛效应的加重导致短历时、高强度降雨天气逐渐增多,构建具有更佳径流控制性能的透水铺装结构,尤其是其在不同降雨条件下的水文

过程具有重要意义。通过物理试验与数值模型相结合的方法,分析海绵体透水铺装在不同间隔天数及不同降雨强度下的水文过程,并模拟最优结构层比例。

一般透水铺装基层主要为蓄水结构层,利用其较大孔隙积蓄雨水,故其渗蓄排过程中,重力水占据主导地位,毛管作用较弱。在海绵体透水铺装中,多孔纤维棉亲水性强,其结构层吸、蓄水过程占主导地位的为毛管水,而其面层为粗砂,底基层为级配碎石,均以重力水为主导,即可较好消纳雨水作用,也可在重力作用下快速入渗,在一定降雨强度下,避免地表径流产生。

海绵体透水铺装具有较好的出流延迟时间,同等降雨条件下间隔天数越长,则其海绵体对于出流延迟效果越好。降雨强度与出流延迟时间呈负相关。海绵体透水铺装较小降雨强度下的效果优于较大雨强。在较小雨强下,其径流控制能力与间隔天数呈正相关,且其效果受温度、湿度等天气条件影响,从其渗蓄排过程曲线可见,海绵体对于排水过程有明显滞缓作用,减少径流量,削减峰值流量,使排水过程流量保持稳定,在特大暴雨降雨强度下海绵体透水铺装对于峰值流量削减效果不理想。在实际应用中,可在大暴雨及以下降雨强度时减小对城市污水管网的冲击,减缓城市管网压力。对于蓄水效果而言,在试验条件下,与上一次降雨间隔3 d时,海绵体透水铺装能较大发挥其蓄水性能;对于削减峰值流量而言,与上一次降雨间隔9 d时,可较大发挥其峰值削减能力。通过Hydrus-1D对海绵体透水铺装进行模拟,证明数学模型与物理模拟拟合度较高,且当在间隔天数为9 d时,多孔纤维棉层与碎石基层厚度比例为1:3的海绵体透水铺装可发挥其最佳性能。

试验仍具有一定局限性,试验采用的是人工室内模拟降雨,在降雨过程中会存在少部分雨量损失;且多孔纤维棉块层铺装是拼接而成,存在部分缝隙,对于雨水下渗过程存在一定影响。同时,试验时间为夏季,气温普遍较高,环境温度及湿度条件对于试验结果具有一定制约。此外,试验局限于室内小规模试验,对于大尺度场景的应用需要进行进一步研究。

参考文献(References):

[1] 吴丹洁,詹圣泽,李友华,等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. *中国软科学*, 2016(1): 79-97.

(WU D J, ZHAN S Z, LI Y H, et al. New trends and practical research on the sponge cities with Chinese characteristics[J]. *China Soft Science*, 2016(1): 79-97. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-9753.2016.01.008.

[2] BRUNETTI G, SIMUNEK J, PIRO P. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 1146-1161. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.07.030.

[3] 徐玮瞳,王建龙,武彦杰,等. 透水砖铺装对雨水径流热污染控制效果实验[J]. *环境工程*, 2020, 38(6): 143-148,207. (XU W T, WANG J L, WU Y J, et al. Impact of permeable brick pavement on stormwater runoff thermal pollution[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(6): 143-148,207. (in Chinese)) DOI: 10.13205/j.hjgc.202006023.

[4] DRAKE J, BRADFORD A, MARSALEK J. Review of environmental performance of permeable pavement systems: State of the knowledge[J]. *Water Quality Research Journal of Canada*, 2013, 48(3): 203-222. DOI: 10.2166/wqrjc.2013.055.

[5] 胡云进,应鹏,郜会彩. 不同类型透水铺装基层结构对雨水径流量控制效果研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(6): 69-72,77. (HU Y J, YING P, GAO H C. Control effect of different types of permeable pavement base structure on rainwater runoff[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(6): 69-72,77. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.06.012.

[6] 李岩凌,李烁,周少剑,等. 建筑垃圾再生骨料在海绵城市建设中的应用研究[J]. *新型建筑材料*, 2019, 46(10): 170-173. (LI Y L, LI S, ZHOU S J, et al. Study on the application of construction waste recycled aggregates on the sponge city construction[J]. *New Building Material*, 2019, 46(10): 170-173. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-702X.2019.10.039.

[7] NNADI E O, COUPE S J, SANUDO-FONTANEDA L A, et al. An evaluation of enhanced geotextile layer in permeable pavement to improve stormwater infiltration and attenuation[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2014, 15(10): 925-932. DOI: 10.1080/10298436.2014.893325.

[8] HEWEIDAK M, AMIN S. Effects of OASIS® phenolic foam on hydraulic behaviour of permeable pavement systems[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 230: 212-220. DOI: 10.1016/j.jenvman.

- 2018.09.084.
- [9] ZHANG Q, LIANG X, WEI J, et al. Effects of size and spacing of basalt fiber carrier media on performance, extracellular polymeric substances and microbial community of hybrid biological reactors[J]. *Environmental Science:Water Research & Technology*, 2019, 5(7): 1253-1261. DOI: [10.1039/c9ew00194h](https://doi.org/10.1039/c9ew00194h).
- [10] FIORE V, SCALICI T, DI BELLA G, et al. A review on basalt fibre and its composites[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2015, 74B(Jun.): 74-94. DOI: [10.1016/j.compositesb.2014.12.034](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.034).
- [11] 张瑞.生态多孔纤维棉用于海绵城市建设耐侵蚀及服役特性研究[D].西安:长安大学,2020.(ZHANG R. Study on the erosion resistance and service characteristics of ecological porous fiber wool for sponge city construction [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese))
- [12] 陈玉成,李章平,李章成,等.城市地表径流污染及其全过程削减[J].*水土保持学报*,2004,18(3):133-136.(CHENG Y C, LI Z P, LI Z C, et al. Contamination of urban surface runoff and its whole course minimization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 133-136. (in Chinese)) DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2004.03.034](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2004.03.034).
- [13] LIU R F, FASSMAN-BECK E. Hydrologic experiments and modeling of two laboratory bioretention systems under different boundary conditions[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2017, 11(4): 1-10. DOI: [10.1007/s11783-017-0951-5](https://doi.org/10.1007/s11783-017-0951-5).
- [14] ZHANG S H, GUO Y P. SWMM simulation of the storm water volume control performance of permeable pavement systems[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 20(8): 06014010. DOI: [10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001092](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001092).
- [15] 章双双,潘杨,李一平,等.基于SWMM模型的城市化区域LID设施优化配置方案研究[J].*水利水电技术*,2018,49(6):10-15.(ZHANG S S, PAN Y, LI Y P, et al. SWMM model-based study on optimal allocation of LID facilities in urbanized region[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(6): 10-15. (in Chinese)) DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2018.06.002](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2018.06.002).
- [16] 李研.基于SUSTAIN与SWC的城市雨水LID设施评价方法研究[D].北京:北京建筑大学,2015.(LI Y. Research on the evaluation method of urban stormwater LID facilities based on SUSTAIN and SWC [D]. Beijing: Beijing University of Architecture, 2015. (in Chinese))
- [17] 涂安国,李英,莫明浩,等.基于RECARGA模型生物滞留池设计参数的水文效应[J].*水土保持学报*,2020,34(1):149-153.(TU A G, LI Y, MO M H, et al. Hydrological effects of design parameters optimization of bioretention facility based on RECARGA model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 149-153. (in Chinese)) DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2020.01.022](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2020.01.022).
- [18] 李亚娇,徐毓江,李家科.低影响开发单项设施模拟模型研究与应用进展[J].*水资源与水工程学报*,2017,28(5):135-141.(LI Y J, XU Y J, LI J K. Advance in simulation model research and application for single facility of low impact development[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(5): 135-141. (in Chinese)) DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2017.05.23](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2017.05.23).
- [19] 李家科,刘周立,张蓓.DRAINMOD模型研究与应用进展[J].*地球科学进展*,2019,34(7):679-687.(LI J K, LIU Z L, ZHANG B. Research and application progress of DRAINMOD model[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(7): 679-687. (in Chinese)) DOI: [10.11867/j.issn.1001-8166.2019.07.0679](https://doi.org/10.11867/j.issn.1001-8166.2019.07.0679).
- [20] 唐双成,罗纨,许青,等.基于DRAINMOD模型的雨水花园运行效果影响因素[J].*水科学进展*,2018,29(3):407-414.(TANG S C, LUO W, XU Q, et al. Factors affecting rain garden operation based on DRAINMOD simulations[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(3): 407-414. (in Chinese)) DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2018.03.013](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2018.03.013).
- [21] 杨文元,刘昭,张玉雪,等.确定田块尺度土壤水力参数不同方法的比较研究[J].*灌溉排水学报*,2016,35(4):1-7.(YANG W Y, LIU Z, ZHANG Y X, et al. Comparison of methods for estimating soil hydraulic parameters at field scale[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(4): 1-7. (in Chinese)) DOI: [10.13522/j.cnki.ggps.2016.04.001](https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2016.04.001).
- [22] 李家科,赵瑞松,李亚娇.基于HYDRUS-1D模型的不同生物滞留池中水分及溶质运移特征模拟[J].*环境科学学报*,2017,37(11):4150-4159.(LI J K, ZHAO R S, LI Y J. Simulation of water and solute transport characteristics in different bioretention tanks using Hydrus-1D model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(11): 4150-4159. (in Chinese)) DOI: [10.13671/j.hjkxxb.2017.0201](https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2017.0201).
- [23] 卢巧慧,景瑞瑛,杜朋辉,等.基于Hydrus-1D的透水铺装对降雨径流控制模拟研究[J].*人民珠江*,2019,

- 40(12): 77-84. (LU Q H, JING R Y, DU P H, et al. Study on simulation of rainfall runoff control by permeable pavement based on Hydrus-1D[J]. *Pearl River*, 2019, 40(12): 77-84. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1001-9235.2019.12.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9235.2019.12.013).
- [24] 徐晨, 刘早红, 蔡官军, 等. 不同配比基质层的雨水径流滞蓄截污效益研究[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(4): 72-79. (XU C, LIU Z H, CAI G J, et al. Study on the rainfall retention and pollution interception effect of substrate layer with different ratios[J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 44(4): 72-79. (in Chinese)) DOI: [10.19672/j.cnki.1003-6504.2021.04.010](https://doi.org/10.19672/j.cnki.1003-6504.2021.04.010).
- [25] 尚曼廷, 冯杰, 刘佩贵, 等. SWCC测定时吸力计算公式与最佳离心时间的探讨[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(1): 12-15. (SHANG M T, FENG J, LIU P G, et al. On formulas for soil suction and optimum centrifugal time by use of SWCC[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2009, 37(1): 12-15. (in Chinese))
- [26] 萧世婷, 王忠静. 基于水质模拟的水质在线监测站点布设研究[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(11): 39-51. (XIAO S T, WANG Z J. Simulation-based evaluation on layout of online water quality monitoring stations[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(11): 39-51. (in Chinese)) DOI: [10.11660/slfdx.20211104](https://doi.org/10.11660/slfdx.20211104).
- [27] 宋剑英, 王建龙, 任希岩, 等. 透水铺装渗透性能计算方法探讨[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(2): 34-40. (SONG J Y, WANG J L, REN X Y, et al. Discussion on the permeability calculation method of permeable pavement[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(2): 34-40. (in Chinese)) DOI: [10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.02.006](https://doi.org/10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.02.006).
- [28] 李辉, 李昊臻, 王雪峰, 等. 透水铺装雨水入渗模型与影响因素相关性研究[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(4): 148-157. (LI H, LI H Z, WANG X F, et al. Development of rainfall infiltration model for permeable pavement and evaluation on its influencing factors[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(4): 148-157. (in Chinese)) DOI: [10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.012](https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.012).
- [29] 赵飞, 陈建刚, 张书函, 等. 透水铺装地面降雨产流模型研究[J]. *给水排水*, 2010, 46(5): 154-159. (ZHAO F, CHEN J G, ZHANG S H, et al. Study of rainfall-runoff model at permeable pavement[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, 46(5): 154-159. (in Chinese)) DOI: [10.13789/j.cnki.wwe1964.2010.05.022](https://doi.org/10.13789/j.cnki.wwe1964.2010.05.022).

Preliminary research on hydrodynamic process of sponge permeable pavement

LI Ting¹, SONG Xinshan¹, DING Xiangyi², WANG Yuhui¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower, Beijing 100038, China)

Abstract: The rapid development of urbanization has led to a dramatic increase in the proportion of hardened subsurface, which has had a significant impact on urban water generation and concentration, leading to urban flooding, the urban heat island effect, and the rain island effect. The sponge city is a new type of rainwater management measure. Permeable paving, as a multi-layer infiltration media system, is one of the LID technologies commonly used in sponge city construction, which can effectively absorb rainwater, and achieve the urban water cycle of regulation and storage.

To alleviate urban flooding and improve the infiltration, storage, and drainage performance of permeable paving, a sponge permeable paving system filled with porous fibre wool was built as the paving substrate, and a Hydrus-1D numerical simulation model was constructed based on indoor physical experiments to simulate rainfall. Under different rainfall intensities and rainfall intervals, the flow production curves of the permeable pavers were obtained through flow production tests and verified by simulation using Hydrus-1D software. The control characteristics of the fibre wool permeable paving structure on the amount of rainfall runoff were analyzed, the one-dimensional hydrodynamic process of the permeable paving structure was investigated, and the peak flow reduction effect and outflow characteristics under different structural layer ratios were simulated using the numerical model.

The results showed that the Hydrus-1D numerical model can simulate the flow production process of sponge

permeable paving well. The flow rate and total flow rate curves were well-fitted for intervals of 0 d, 1 d, 3 d, 5 d, and 7 d. However, for the flow rate curve at 11 d intervals, the simulated curve was shifted to the right by a larger amount than the measured curve. The model also fitted the storage process well for the rainfall phase, and the simulated curve lagged behind the measured curve to a certain extent when the rainfall stopped. Fibre wool permeable paving could effectively reduce the peak flow rate and had a good outflow delay performance, which had a significant retarding effect on the drainage process. The lower the intensity of rainfall and the longer the interval days, the more significant the effect showed. The maximum water storage performance of the permeable paving was achieved at a rainfall interval of 3 days, and the best peak flow reduction was achieved at a rainfall interval of 9 days. At a rainfall interval of 9 days, the porous fibre wool layer to gravel layer ratio of 1 : 3 showed the best effect in terms of smooth water circulation.

The experiments showed that sponge permeable paving had a more obvious water control effect at rainfall intensities below heavy rainfall, effectively absorbing rainwater and reducing peak flows. However, the effect of water control under extreme rainfall conditions such as very heavy rainstorms is limited. Sponge permeable pavement flow production curve indicated that it had an obvious slowing effect on the drainage process while reducing runoff, and cutting peak flow so that the drainage process flow remained stable. In practice, the sponge-permeable pavement can reduce the impact on the urban sewage network during heavy rainfall and reduce the pressure on the urban network. The experiments also provided data support for the establishment of numerical simulation methods for urban subsurface runoff water control processes.

Key words: permeable pavement; porous fibre cotton; Hydrus-1D; simulation

坚持精准治污、科学治污、依法治污