

城市雨水管理

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.022

渗排型透水铺装下渗出流控制效能场地试验研究

吴允红¹, 李俊奇^{1,2}, 林 聪³, 郭晓鹏¹, 张兴宇¹

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044; 3. 北京雨人润科生态技术有限公司, 北京 100044)

摘 要: 实地搭建了5种面层结构不同的渗排型透水铺装,监测了每种透水铺装2个雨前干期和7个降雨重现期下模拟降雨的下渗出流,并从有效滞留量的角度分析和量化了透水铺装面层结构、雨前干期、降雨重现期对透水铺装下渗出流控制效能的影响。与透水铺装范围内的降雨相比,在降雨强度为18.0~241.8 mm/h、雨前干燥期为0~2 d条件下,渗透率 ≥ 0.57 mm/s的透水铺装的下渗出流体积削减率、峰值削减率、峰值延时的范围分别为22%~100%、41%~100%、6~44 min。在5种透水铺装中,透水混凝土铺装的下渗出流控制效能最佳。下渗出流控制效能与降雨重现期呈负相关,而与雨前干期呈正相关,下渗出流控制效能随降雨重现期的增加先明显降低而后趋于稳定。

关键词: 渗排型透水铺装; 下渗出流控制; 面层结构; 雨前干期; 降雨重现期

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)11-0126-07

Field Test of Bottom Outflow Control Efficiency in Permeable Pavement with Underdrainage

WU Yun-hong¹, LI Jun-qi^{1,2}, LIN Cong³, GUO Xiao-peng¹, ZHANG Xing-yu¹

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Collaborative Innovation Center for Energy Conservation & Emission Reduction and Sustainable Urban-Rural Development in Beijing, Beijing 100044, China; 3. Beijing Yuren Rainwater Ecotechnology Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Five permeable pavements with different surface structures were built on the spot, the bottom outflow was monitored under rainfall events with two antecedent dry periods and seven rainfall return periods, and the effects of surface structure, antecedent dry period and rainfall return period on bottom outflow control efficiency were analyzed and quantified from the perspective of effective retention volume. Compared with the rainfall within the permeable pavement area, the bottom outflow volume reduction rate, peak reduction rate and peak delay of the permeable pavement with infiltration rate of more than 0.57 mm/s were in the range of 22%~100%, 41%~100% and 6~44 min respectively under the rainfall intensity of 18.0~241.8 mm/h and antecedent drying period of 0~2 days. Among the five kinds of permeable pavement, pervious concrete pavement had the best control efficiency of bottom outflow. The control efficiency of bottom outflow was negatively correlated with the rainfall return period, but positively correlated with the antecedent dry period. The control efficiency of bottom outflow decreased obviously

first and then tended to be stable with the increase of rainfall return period.

Key words: permeable pavement with underdrainage; bottom outflow control; surface structure; antecedent dry period; rainfall return period

渗排型透水铺装具有良好的径流控制效能^[1-2]。前人的研究发现,与入流体积相比,透水铺装的出流体积减少了31%~100%;与不透水铺装的径流峰值相比,透水铺装的径流峰值减少了71%~100%^[3-12]。透水铺装的径流控制效能与其面层结构关系密切。Collins等人研究发现,水泥透水砖、透水混凝土和碎石铺装的出流体积分别平均减少了54%、36%、66%^[3]。Stovring等人发现,水泥透水砖、透水混凝土和透水沥青铺装的出流体积分别平均减少了31%、44%、70%^[7]。透水铺装的径流控制效能不仅与自身结构有关,也与雨前干期(A)、降雨强度(i)等降雨条件密切相关。Braswell等人发现,当 $A=0.3\sim31.3$ d、 $i=0.2\sim55.9$ mm/h时,渗透率为0.12~0.96 mm/s的水泥透水砖铺装的出流体积平均减少了56.3%^[8]。Drake等人发现,当 $A=0.3\sim15.8$ d、 $i=0.2\sim21.8$ mm/h时,渗透率分别为0.01~2.62、0.06~15.93 mm/s的水泥透水砖和透水混凝土铺装的出流体积减少了72%~100%^[5]。虽然目前的研究已经对透水铺装的径流控制效能进行了大量的监测,但是由于透水铺装结构的变化、原位土渗透率的不同、有无汇水区的差异、自然降雨的不确定性导致目前的监测结果差异较大。基于目前的监测数据无法准确量化透水铺装的径流控制效能^[3-12],从而很难指导工程应用。渗排型透水铺装的径流以下渗出流为主^[3-12],下渗出流通过底部穿孔排水管可影响后续设施或管网,因此下渗出流控制效能对渗排型透水铺装十分重要。

1 试验场地搭建与研究方法

1.1 渗排型透水铺装试验场地搭建

透水铺装位于中国北方某市试验基地。在试验基地搭建了2类共5种渗排型透水铺装,分别为结构透水砖铺装(IICP)、水泥透水砖铺装(PICP)、陶瓷透水砖铺装(PIEP)、透水混凝土铺装(PCP)、碎石铺装(GP);前3种为透水砖铺装,后2种为现场碾压整体制作的无缝隙透水铺装。每种类型的透水铺装的场地大小均为 $L\times B=5\text{ m}\times5\text{ m}$,铺装底部和四周采用水泥砂浆抹面密封,在铺装底部设置DN50圆

孔排水管,外包透水土工布,铺装底部横向和纵向坡度均为3%。透水铺装的竖向结构和表面形状见图1,水泥透水砖和陶瓷透水砖交错拼接,结构透水砖的砖缝宽为8 mm。采用50 mm高的变水头和直径300 mm的单环测得IICP、PICP、PIEP、PCP的渗透率(I)分别为0.57、1.16、1.38、2.73 mm/s。根据Lucke等人采用湿润面积来评估渗透性的方法,测得GP的渗透率高于PCP^[13]。

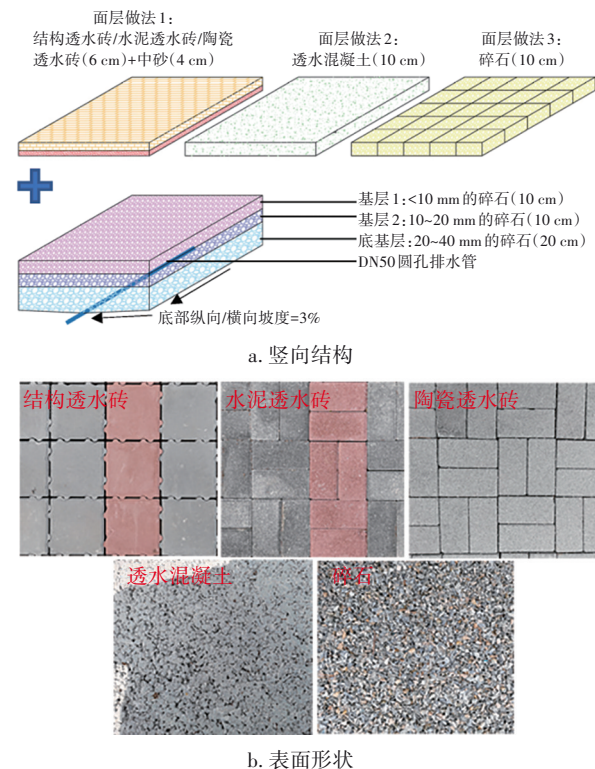


图1 渗排型透水铺装的竖向结构和表面形状

Fig.1 Vertical structure and surface shape of permeable pavement with underdrainage

1.2 研究方法

为了量化不同条件下渗排型透水铺装的下渗出流控制效能,在试验基地采用人工降雨的方式考察不同面层结构、雨前干期($A=0,2$ d)、降雨重现期($P=2,3,5,10,20,30,50$ a)条件下透水铺装的下渗出流情况。基于所有监测数据,研究了单个影响因素对径流控制效能的影响。对透水铺装下渗出流控制的内在机理分析和数据拟合量化了透水铺装

下渗出流控制效能与其影响因素的关系。通过透水铺装底部和四周采用水泥砂浆抹面密封、底部穿孔管紧挨铺装底面等铺装结构细节,使测得的下渗出流控制效能为透水铺装在实际应用中的下限,从而保证下渗出流控制效能的量化结果在实际运用中的可靠性。

1.3 模拟降雨和下渗出流控制效能监测

模拟降雨装置如图2所示,用稳压泵从水池抽水并保证在泵出口有足够的固定水压。通过阀门调节进水流量以模拟不同的降雨强度,保证表面均匀降雨的同时调节喷头数量和开合程度来改变喷洒范围以避免雨水外流,采取喷头距铺装表面高度为1.2 m、模拟降雨中最大风力为2级、喷头向下喷洒等措施可有效防止水量改变导致的喷洒范围变化和风对喷洒的影响。

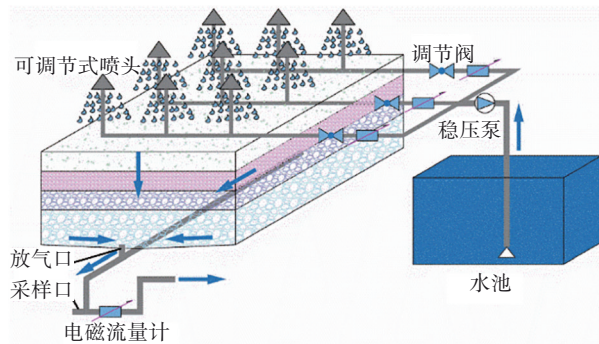


图2 模拟降雨装置

Fig.2 Rainfall simulator

根据《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB 11/T 969—2016),采用北京Ⅱ区的暴雨强度公式[见式(1)]设计降雨强度,采用的模拟降雨重现期为2、3、5、10、20、30、50 a,降雨历时采用72 min,雨型采用芝加哥雨型,雨峰系数取0.4。在降雨强度峰值不变的前提下,为了便于模拟降雨,从降雨开始起将每6 min的平均降雨强度作为对应时间段的降雨强度,根据此方法将连续降雨过程线变换为阶段降雨过程线。模拟降雨过程中每6 min调节1次降雨强度(降雨强度峰值及其前后两个时间段的持续时间为4 min)。

$$q = \frac{1602(1 + 1.037 \lg P)}{(t + 11.293)^{0.681}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; P 为设计降雨重现期,a; t 为降雨历时,min。

模拟降雨中最大降雨强度小于透水铺装的最

低渗透率,在各重现期的模拟降雨下透水铺装无表面径流。下渗出流通过穿孔排水管排出,采样口处下渗出流无明显悬浮固体,采用DN50在线电磁流量计测定下渗出流。为避免气体对流量测定的影响,流量计进口段前设有放气口,采用U型管保证测量段为满流,流量计进出口水平管长为35 cm。

1.4 渗排型透水铺装的水量平衡分析

试验期间场地最高温度为24℃,最低温度高于0℃,平均温度为10℃,降雨历时为72 min,因此在渗排型透水铺装的水量平衡中忽略了蒸发量。试验中渗排型透水铺装的水量平衡如图3所示,降雨量(H)等于有效滞留量(V_E)、表面径流体积(V_2)、下渗出流体积(V_1)三者之和。有效滞留量数值上等于铺装入流体积与出流体积之差,正面反映了透水铺装吸收、储存、下渗雨水的能力。透水铺装的下渗出流控制效能由有效滞留量决定,其与透水铺装自身特性和降雨条件有关。透水铺装自身特性包括铺装表面形状、构造缝隙(包括砖缝)、铺装底部与穿孔排水管底部的高差、骨料表面黏附力和孔隙毛细力、铺装底部和四周的渗透性等,降雨条件包括雨前干期、降雨重现期等。

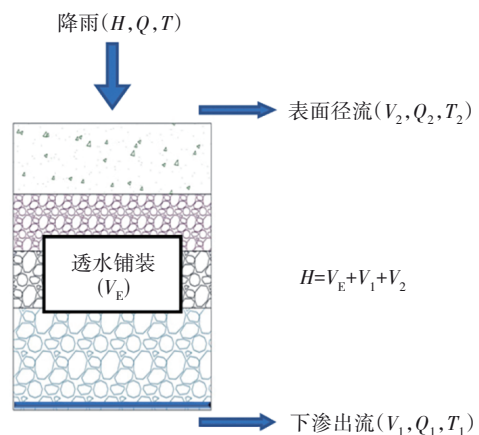


图3 渗排型透水铺装的水量平衡

Fig.3 Water balance for permeable pavement with underdrainage

在无表面径流的情况下($V_2=0$),为了量化透水铺装对降雨的控制效能,将下渗出流的出流体积、出流峰值、出流峰值时间分别与透水铺装范围内降雨的降雨量、降雨峰值、降雨峰值时间进行比较[降雨量和降雨峰值的计算方法分别见式(2)和式(3)],并根据式(2)~(4)分别计算下渗出流的体积削减率、峰值削减率和峰值延时。

$$E_V = \left(1 - \frac{V_1}{H}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{V_1}{\sum \bar{q}_i t_i S_A}\right) \times 100\% = \frac{V_E}{H} \times 100\% \quad (2)$$

式中: E_V 为下渗出流体积削减率, %; V_1 为下渗出流体积, m^3 ; H 为降雨量, $H = \sum \bar{q}_i t_i S_A$, m^3 ; \bar{q}_i 为某降雨时段的平均降雨强度, $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$; t_i 为某降雨时段的降雨历时, min ; S_A 为透水铺装面积, m^2 ; V_E 为有效滞留量, m^3 。

$$E_P = \left(1 - \frac{Q_1}{Q}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{Q_1}{q_{\max} S_A}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: E_P 为下渗出流峰值削减率, %; Q_1 为下渗出流峰值, m^3/min ; Q 为降雨峰值, $Q = q_{\max} S_A$, m^3/min ; q_{\max} 为最大降雨强度, $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。

$$E_T = T_1 - T \quad (4)$$

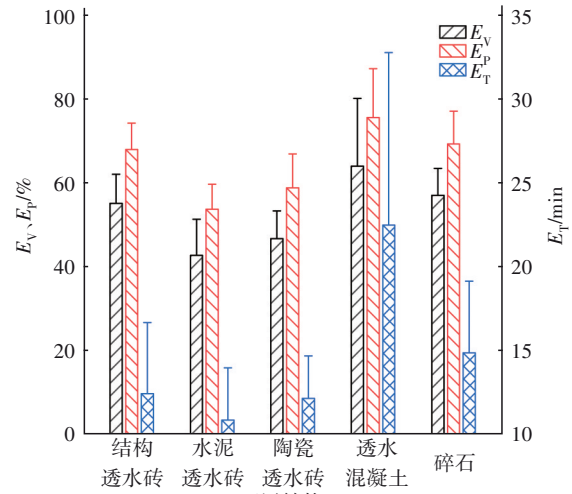
式中: E_T 为下渗出流峰值延时, min ; T_1 为下渗出流峰值时间, min ; T 为降雨峰值时间, min 。

2 结果与分析

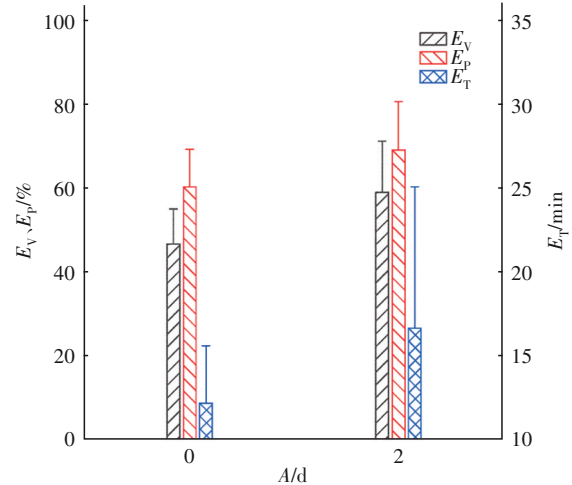
2.1 铺装下渗出流控制效能及其影响因素

试验中, 透水铺装的下渗出流体积削减率、峰值削减率、峰值延时平均值分别为 53%、60%、14 min。Collins 等人的研究结果显示, 透水铺装下渗出流体积削减率、峰值削减率、峰值延时平均值分别为 53%、70%、39 min^[3]; Stovring 等人的研究结果显示, 透水铺装下渗出流体积削减率、峰值延时平均值分别为 44%、100 min^[7]。上述监测结果存在差异是因为, 降雨条件、汇水区、铺装自身特性等影响因素的不同都会导致透水铺装的径流控制效能发生变化。本试验中, 面层结构、降雨重现期、雨前干期对透水铺装下渗出流控制效能的影响见图 4。从图 4(a) 和 (c) 可以看出, 与降雨重现期相比, 面层结构对透水铺装下渗出流控制的影响更为显著, 从面层结构看, 平均下渗出流体积削减率最大值与最小值之差为 21%, 而从降雨重现期看, 平均下渗出流体积削减率最大值与最小值之差为 11%。与其他降雨条件下的透水铺装相比, PCP 在 $P=2$ a 和 $A=2$ d 条件下的下渗出流控制效能最佳, PCP 无下渗出流产生。Wardynski 等人也发现在降雨量和降雨强度较低时透水铺装无下渗出流产生, 尤其是透水铺装存在内部储水空间时^[4]。在 $P=50$ a 和 $A=0$ d 条件下

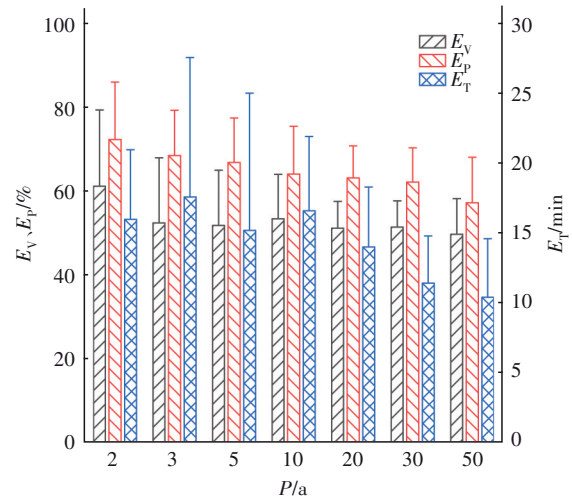
PIEP 的综合性能最差, 下渗出流峰值削减率和峰值延时最少, 分别为 41%、6 min, 下渗出流体积削减率也仅有 34%。PICP 在 $P=50$ a 和 $A=0$ d 条件下的下渗出流体积削减率最低, 为 22%。



a. 不同面层结构下的下渗出流控制效能



b. 不同雨前干期下的下渗出流控制效能



c. 不同降雨重现期下的下渗出流控制效能

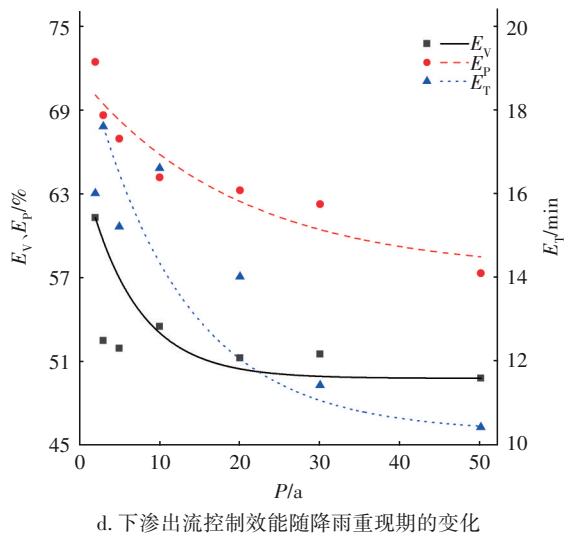


图4 面层结构、降雨重现期、雨前干期对下渗流出控制效能的影响

Fig.4 Effects of surface structure, rainfall return period, and antecedent dry period on bottom outflow control efficiency

从图4(a)可以看出,PCP的下渗流出控制效能最佳,PICP的效能最差。PCP的下渗流出体积削减率、峰值削减率、峰值延时平均值分别可达到64%、75%、22 min,而PICP的相应指标分别仅为43%、54%、11 min。从图4(b)可以看出,雨前干期可提高透水铺装的下渗流出控制效能,为了保证透水铺装的下渗流出控制效能,在连续降雨的极端工况下符合设计要求,透水铺装在设计阶段可选取 $A=0$ d时的下渗流出控制指标。如图4(d)所示,透水铺装的下渗流出控制效能随着降雨重现期的增加先明显减少后趋于稳定,下渗流出体积削减率、峰值削减率、峰值延时平均值分别在 $P=3$ 、10、30 a时开始趋于稳定,分别稳定在50%、60%、10 min左右。当 $P \leq 10$ a时,峰值延时出现波动;当 $10 \text{ a} < P < 30 \text{ a}$ 时,峰值延时变化显著。

2.2 下渗流出控制指标之间的关系

下渗流出控制指标之间的关系如图5所示。由图5(a)可知,下渗流出体积削减率、峰值削减率、峰值延时3个下渗流出控制指标相互呈正相关,这与Drake等人的研究结果一致^[5]。渗透性透水铺装通过滞留空间削减下渗流出体积,从而降低下渗流出峰值和延迟下渗流出峰值时间。如图5(b)所示,通过数据拟合发现下渗流出体积削减率与其峰值削减率、峰值延时成正比。

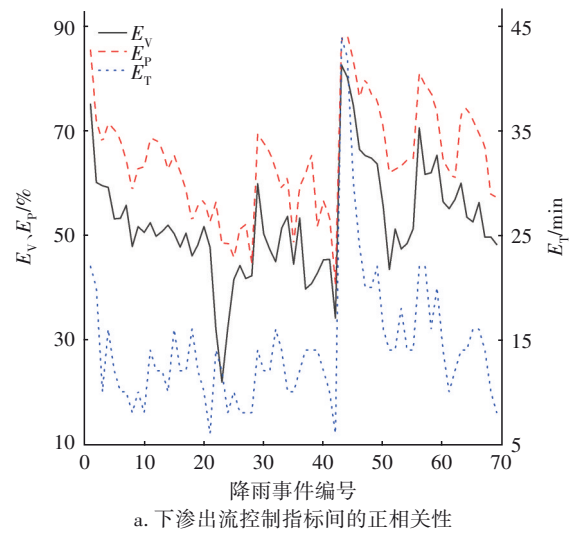


图5 a. 下渗流出控制指标间的正相关性

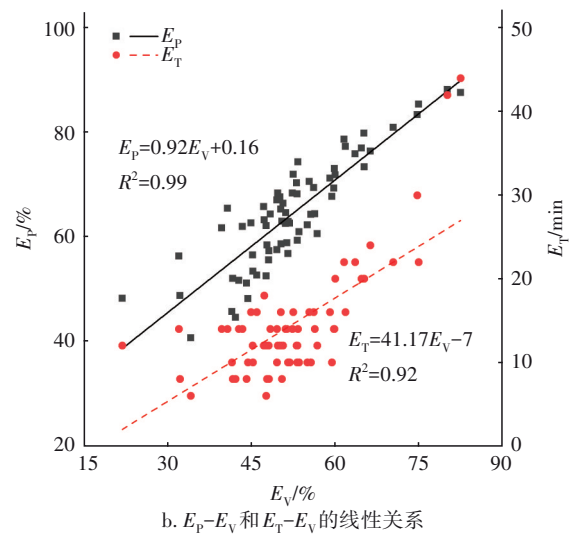


图5 b. $E_P - E_V$ 和 $E_T - E_V$ 的线性关系

图5 下渗流出控制指标之间的关系

Fig.5 Relationship between bottom outflow control indicators

2.3 下渗流出影响因素对有效滞留量的影响

2.3.1 不同因素对有效滞留量的影响

面层结构、降雨重现期、雨前干期对有效滞留量的影响如图6所示。由图6(a)可知,透水铺装有效滞留量不仅与铺装自身的面层结构有关,还与雨前干期和降雨强度等降雨条件有关。不同面层结构透水铺装的径流控制效能随降雨重现期或雨前干期的变化趋势一致,因此单个影响因素对径流控制效能影响的总体趋势不会受到其他两个因素的影响。从图6(b)可以看出,试验中5种类型透水铺装按有效滞留量从大到小排序为PCP、GP、IICP、PIEP、PICP,有效滞留量平均值分别为1.12、1.01、0.98、0.83、0.78 m^3 ,单位面积有效滞留量均值分别

为 44.8、40.4、39.2、33.2、31.2 L/m²;另外可知,透水铺装有效滞留量不随渗透率的增加而增加,两者无必然相关性。无缝隙透水铺装的有效滞留量总体上高于透水砖铺装,无缝隙透水铺装和透水砖铺装的平均有效滞留量分别为 1.07、0.87 m³,单位面积有效滞留量均值分别为 42.8、34.8 L/m²。试验还发现,有效滞留量与雨前干期呈正相关。与 A=0 d 的透水铺装相比,A=2 d 的透水铺装有效滞留量增加了 0.21 m³。由于雨前干期通过水分蒸发影响有效滞留量,因此有效滞留量随雨前干期的变化和蒸发水量随雨前干期的变化一致。试验中有效降雨历时固定,降雨量、降雨强度与降雨重现期呈正相关。

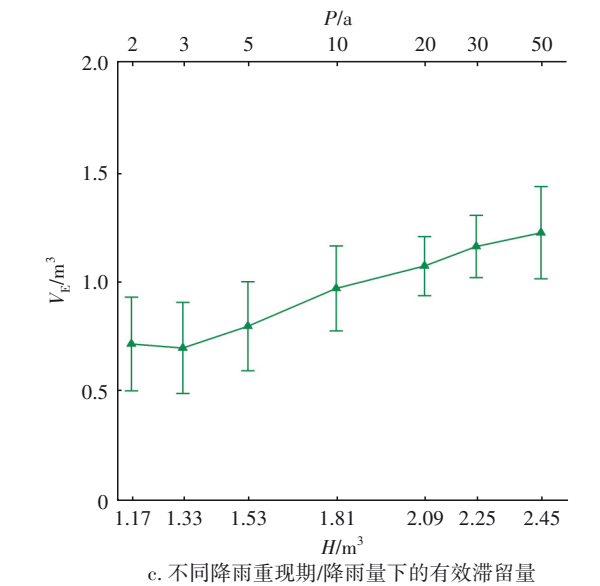
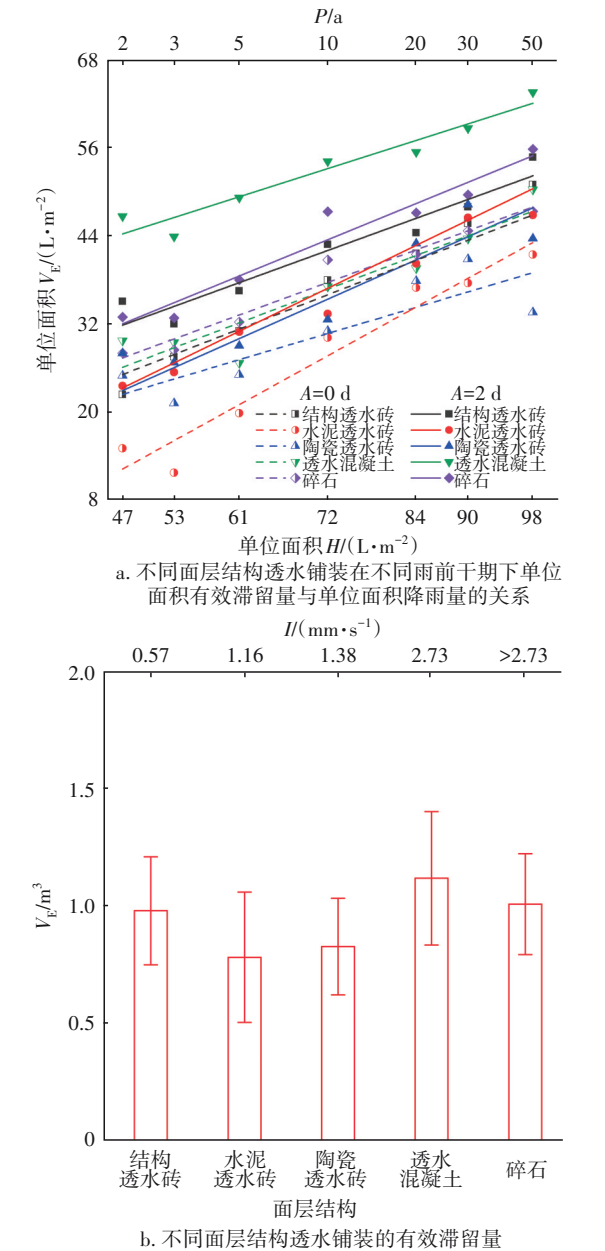


图6 面层结构、降雨重现期、雨前干期对有效滞留量的影响

Fig.6 Effects of surface structure, rainfall return period, and antecedent dry period on effective retention volume

从图6(c)可以看出,有效滞留量与降雨强度呈正相关,而与降雨量呈线性相关。Collins 等人采用 Pearson 相关性检验也发现,出流体积与降雨强度呈正相关,而与雨前干期呈负相关^[3]。因此降雨强度对出流体积的增幅大于对入流体积的增幅,最终使得降雨强度与有效滞留量呈正相关。

2.3.2 有效滞留量的回归分析

对于图6(a),根据式(5)采用单位面积降雨量(H_A , L/m²)对不同条件下的单位面积有效滞留量(V_{EA} , L/m²)进行拟合,拟合参数见表1。

$$V_{EA} = aH_A + b \quad (5)$$

表1 拟合参数
Tab.1 Fitting parameters

面层结构	A/d	a	b	R ²
结构透水砖	0	0.53	-1.46	0.99
	2	0.40	13.29	0.92
水泥透水砖	0	0.60	-15.94	0.95
	2	0.48	0.22	0.97
陶瓷透水砖	0	0.32	7.28	0.74
	2	0.42	5.29	0.86
透水混凝土	0	0.41	6.67	0.87
	2	0.35	28.06	0.94
碎石	0	0.40	8.61	0.96
	2	0.45	11.16	0.95

3 结论

① 与透水铺装范围内的降雨相比,在降雨强度为18.0~241.8 mm/h、雨前干期为0~2 d条件下,渗透率 ≥ 0.57 mm/s的5种渗排型透水铺装的下渗出流体积削减率、峰值削减率、峰值延时的范围分别为22%~100%、41%~100%、6~44 min。与降雨重现期相比,透水铺装面层结构对下渗出流控制效能的影响较大。不同面层结构透水铺装的下渗出流控制效能排序如下:PCP>GP>HCP>PIEP>PICP。

② 透水铺装下渗出流体积削减率 E_v 、峰值削减率 E_p 、峰值延时 E_T 三者之间相互成正比,量化关系如下: $E_p=0.92E_v+0.16$ 、 $E_T=41.17E_v-7$ 。

③ 无缝隙透水铺装的有效滞留量高于透水砖铺装,其中PCP的有效滞留量最大。雨前干期和降雨重现期与有效滞留量正相关。当 $P\geq 3$ a时,试验中5种透水铺装的平均有效滞留量为降雨量的50%即下渗出流体积平均削减率稳定在50%左右。

参考文献:

- [1] 李俊奇,姜昱丞,李小静. 雨水径流污染削减与源头体积控制之间的响应关系[J]. 中国给水排水, 2021, 37(15): 102-109.
LI Junqi, JIANG Yucheng, LI Xiaojing. Response relationship between stormwater runoff pollution reduction and source volume control[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(15): 102-109 (in Chinese).
- [2] 朱晓娟,刘静,吴薇. 缝隙式透水铺装在建镇海绵城市建设中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(20): 1-4.
ZHU Xiaojuan, LIU Jing, WU Wei. Application of slotted permeable pavement in the construction of sponge city: taking Zhenjiang as an example[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(20): 1-4 (in Chinese).
- [3] 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.
- [4] WARDYNSKI B J, WINSTON R J, HUNT W F. Internal water storage enhances exfiltration and thermal load reduction from permeable pavement in the North Carolina Mountains [J]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 139(2): 187-195.
- [5] DRAKE J, BRADFORD A, VAN SETERS T. Hydrologic performance of three partial-infiltration permeable pavements in a cold climate over low permeability soil [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(9): 04014016.
- [6] KNAPPENBERGER T, JAYAKARAN A D, STARK J D, et al. Monitoring porous asphalt stormwater infiltration and outflow [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2017, 143(8): 04017027.
- [7] STOVRING J, DAM T, JENSEN M B. Hydraulic performance of lined permeable pavement systems in the built environment[J]. Water, 2018, 10(5): 587.
- [8] BRASWELL A S, ANDERSON A R, HUNT W F. Hydrologic and water quality evaluation of a permeable pavement and biofiltration device in series [J]. Water, 2018, 10(1): 33.
- [9] BRASWELL A S, WINSTON R J, HUNT W F. Hydrologic and water quality performance of permeable pavement with internal water storage over a clay soil in Durham, North Carolina [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 224: 277-287.
- [10] WINSTON R J, DORSEY J D, SMOLEK A P, et al. Hydrologic performance of four permeable pavement systems constructed over low-permeability soils in Northeast Ohio [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018, 23(4): 13.
- [11] ALAM T, MAHMOUD A, JONES K D, et al. A comparison of three types of permeable pavements for urban runoff mitigation in the semi-arid South Texas, USA [J]. Water, 2019, 11(10): 1992.
- [12] LIU Y, LI T, YU L. Urban heat island mitigation and hydrology performance of innovative permeable pavement: a pilot-scale study [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 118938.
- [13] LUCKE T, WHITE R, NICHOLS P, et al. A simple field test to evaluate the maintenance requirements of permeable interlocking concrete pavements [J]. Water, 2015, 7(6): 2542-2554.

作者简介:吴允红(1995-),男,四川眉山人,硕士研究生,研究方向为城市雨水控制理论与技术。

E-mail:15709939211@163.com

收稿日期:2022-04-05

修回日期:2022-04-22

(编辑:刘贵春)