

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.05.006

海绵城市透水铺装对地表径流控制效果研究

朱润田¹, 张小明¹, 陈旺², 万正武¹, 郑木莲²

(1. 珠海鹤港高速公路有限公司, 广东 珠海 519000;
2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 透水铺装作为海绵城市的重要措施, 可降低城市地表径流和径流峰值。为了明确我国城市道路典型透水铺装结构对雨水径流的综合控制效果, 通过搜集我国典型地区海绵城市道路透水铺装结构地图集, 总结推荐出3种透水铺装典型结构, 包括表层排水型、基层储排水型和全透型。在此基础上, 选取西安市某双向双车道道路为研究对象, 确定暴雨强度设计参数, 建立了暴雨洪水管理模型(SWMM), 模拟分析了3种透水铺装结构在不同降雨重现期下对总径流深度、径流峰值、峰值时刻、径流系数、产流时刻、产流时长的削减效果。结果表明: 降雨重现期、透水路结构组合和透水路厚度是影响透水铺装径流削减的主要因素; 表层排水型铺装结构可使径流总深度和径流系数降低超过14%, 并使径流时间和产流时长延迟40 min以上; 在相同重现期下, 加铺沥青层的透水泥混凝土表层铺装结构对各种径流指标产生最大的削减效果; 基层储排水型铺装结构只有在重现期为50 a时才产生地表径流; 全透型铺装结构在所有的降雨重现期内均不产生径流。最后, 根据SWMM模拟结果, 为典型透水铺装结构推荐了径流系数取值范围, 可为海绵城市透水铺装设计和实施提供技术支持。

关键词: 道路工程; 海绵城市; 透水铺装; SWMM; 径流削减

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 05-041-09

Study on Surface Runoff Control Effect in Sponge City Using Permeable Pavement

ZHU Run-tian¹, ZHANG Xiao-ming¹, CHEN Wang², WAN Zheng-wu¹, ZHENG Mu-lian²

(1. Zhuhai-Hegang Expressway Co., Ltd., Zhuhai Guangdong 519000, China;
2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: Permeable pavement is an important measure for sponge cities, which can reduce urban surface runoff and peak runoff. To clarify the comprehensive control effect of typical permeable pavement structures on rain runoff in China's urban roads, 3 typical structures of permeable pavements (surface drainage, base course storage and drainage, and fully permeable) are summarized and recommended by collecting an atlas of permeable pavement structures in typical areas of sponge cities in China. On this basis, selecting a 2-way 2-lane road in Xi'an as the research object, the design parameters of stormwater intensity are determined, a stormwater management model (SWMM) is established, and the reduction effects of the 3 permeable pavement structures on the total runoff depth, runoff peak flow, peak time, runoff coefficient, runoff time, and runoff duration under different rainfall recurrence periods are simulated and analyzed. The result shows that (1) the rainfall recurrence period, permeable layer structure combination and permeable layer thickness are the main factors affecting the reduction of runoff from the permeable pavement; (2) the surface drainage

收稿日期: 2021-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078051); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(310821163502); 陕西省西咸新区管委会科技项目(2017 44); 平顶山市科技项目(2018610002000604); 珠海市交通集团有限公司科技项目(JT-HG-2020-21)

作者简介: 朱润田(1981-), 男, 陕西西安人, 硕士, 高级工程师。(zhuruntian_hggs@outlook.com)

structure pavement could reduce the total runoff depth and runoff coefficient by more than 14%, and delay the runoff time and runoff duration by more than 40 min; (3) under the same recurrence period, the permeable cement concrete surface pavement structure with the asphalt layer has the greatest effect on the reduction of various runoff indicators; (4) base course storage and drainage pavement structure produces surface runoff only for a recurrence period of 50 years; (5) fully permeable pavement structure does not produce runoff for all rainfall recurrence periods. Finally, based on the SWMM simulation result, a range of runoff coefficients is recommended for typical permeable pavement structures, which can provide technical support for the design and implementation of permeable pavements in sponge cities.

Key words: road engineering; sponge city; permeable pavement; SWMM; runoff reduction

0 引言

随着城市化的快速发展,繁重的交通加大了对道路基础设施的需求。而城市道路普遍采用不透水路面,使得在暴雨发生时城市可能因排水不畅产生内涝^[1]。鉴于此,有关专家学者提出建设“海绵城市”,重点体现“自然”的建设理念。透水路面作为一种低影响开发技术(LID),已成为实现“海绵城市”的重要手段之一^[2]。通常,透水路面结构体系包含表面层和基层,表面层可由孔隙率大、高渗透性的透水沥青混合料(PAM)或透水水泥混凝土(PCC)组成,采用粗骨料形成的基层结构,具有临时储存功能,减少径流的优点^[3]。鉴于这些优点,透水路面已经成为一种用于径流雨水控制的广泛使用的技术,因其不同的结构类型对径流雨水不同的控制指标作用效果(如径流深度,径流峰值,产流时长等)存在差异而受到了广泛的研究。

通常,主要采用两种方法开展径流削减研究,包括径流模型的建立和现场试验监测^[4]。李阳等^[5]基于SWMM模型分析了绿化屋顶、透水路面和下凹式绿地共3种措施对城市径流量的减少效果,结果表明透水路面对径流量有显著的削减效果。Xie等^[6]采用SWMM模拟了江苏一个村落的地表径流,并分析不同降雨重现期下透水路面的作用效果,结果表明组合系统(透水路面+植草)在削减径流方面比单一系统更加有效。Jose等^[7]发现全透型路面对地表径流以及径流峰值的减少影响很大,但对补充地下水的作用小。赵沛等^[8]在居民区中铺设透水铺装后对雨水径流效果模拟,发现透水路面对该区域产流时间、径流总量削减以及推迟径流峰值时刻具有重要作用。夏远芬等^[9]对南京某小区进行透水铺装径流削减效果研究,该小区为新建小区,其中路面有25%的面积采用透水铺装。通过对其进行长期监测,发现采用透水铺装后,该小区在降雨时雨水径流深度每年减少了108.44 mm。

综上所述,当前研究人员侧重于慢行系统的透水路面,且常把透水路面和各类低影响开发设施(如植草沟、生物滞留池、绿色屋顶等)组合,并研究整套低影响开发设施对雨水径流控制效果。单独针对城市道路车行道典型透水路面结构的径流控制效果未见系统研究。为此,本研究通过广泛调研总结出我国典型海绵城市的透水铺装结构,以西安市为例,采用SWMM建立模型,根据西安地区降雨条件,改变降雨重现期,模拟不同典型透水铺装结构对道路径流总量、径流峰值、峰值时刻、产流时刻、径流时长以及径流系数的控制效果,为海绵城市透水铺装的设计和实施提供依据。

1 SWMM 模型构建

1.1 研究区域概况

采用SWMM建立径流模型,研究区域为西安市西咸新区的一条双向两车道的支路,道路长度为146 m,宽为20 m,道路横坡为1.5%。该区域由车道、自行车道、绿化带和人行道组成,总面积为2 920 m²(图1和图2),行车道为本次研究的研究对象,面积为1 752 m²,占总面积的60%。整个研究区域被划分为14个汇水区,包含14个节点和1个排水管出口。分别在SWMM中设定表层排水型、基层储排水型以及全透型等不同铺装结构,随后进行径流控制效果模拟,并与未进行透水铺装改造的道路进行对比。

1.2 模型参数的选择

SWMM中提供了3种模型计算径流渗入能力,包括霍顿(Horton)模型、格林-安普特(Green-Ampt)模型、径流曲线数值(SCS)模型。其中,Horton模型积累了比较多的可靠性参数,同时适用于地质参数较少及各种地面下渗情况;Green-Ampt模型参数的物理意义明确,但适用于能够提供经验性参数的地区;SCS模型假设透水层的总下渗能力可从透水层数值曲线获得,适用于土壤入渗计

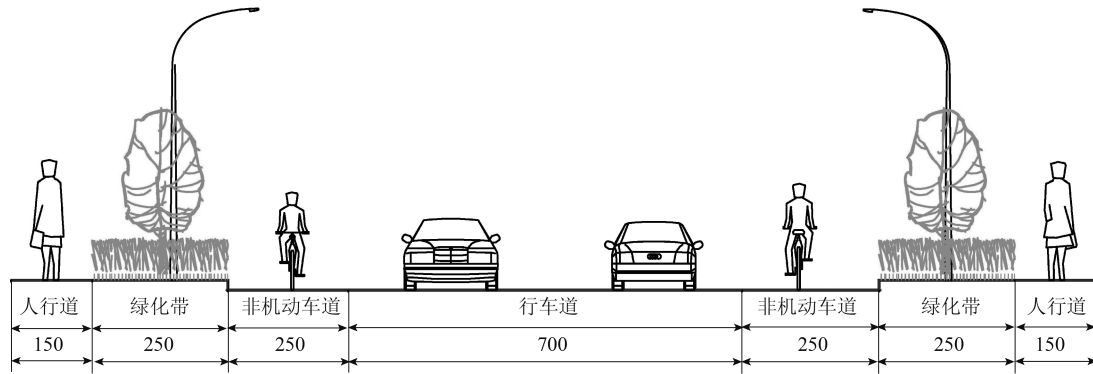


图1 研究区域道路横断面图(单位: cm)

Fig.1 Road cross-section in study area (unit: cm)

算^[11]。上述 SWMM 的下渗模型用于透水路面的径流模拟已得到众多学者的校正和检验,模型中使用的各类参数应用较为成熟,且得到了广泛的应用^[10-11]。考虑多种国外模型的适用性,鉴于本研究选取西咸新区数据六路其中一段,属于新建地区路段,地质资料较少,因此本研究选择霍顿方程进行下渗水量的计算分析。此外,本研究在计算降雨过程中,考虑到降雨变化规律,选择分钟为时间步长来进行计算,因此选取运动波法进行计算。采用非线性水库法用于地表径流的计算,即联合求解 SWMM 中的连续性方程和曼宁公式。

在 SWMM 模型的水文模块中,相应的参数包括雨量计和 LID 控制设置。首先,选择 Horton 渗透模型,并选择运动波来描述径流模型。其次,添加雨量计,时间序列是基于芝加哥降雨模型计所得。最后,在 LID 设施子模块中输入透水铺装各层的参数。每一种透水铺装都需要输入面层、透水铺装、储存 3 层参数。相关参数取值范围见表 1^[12]。

表1 水文参数的取值范围

Tab.1 Value ranges of hydrological parameters

参数	范围
渗透性洼地蓄水深度/mm	2~7
不渗透性洼地蓄水深度/mm	0~3
渗透性曼宁系数	0.05~0.8
不渗透性曼宁系数	0.01~0.05
无洼地蓄水不渗透百分比/%	0~100
最大渗透速率/(mm·h ⁻¹)	25~254
最小渗透速率/(mm·h ⁻¹)	0.25~120.4
渗透速率衰减系数/(1·h ⁻¹)	2~7
饱和土完全干燥时间/d	2~14

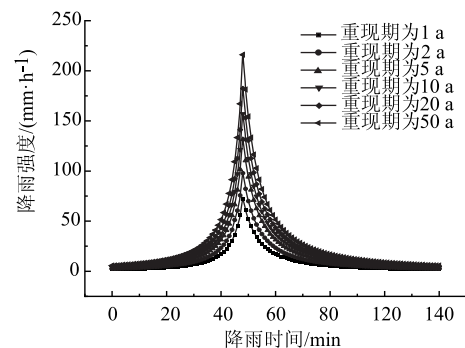
1.3 暴雨强度设计

本研究使用 SWMM 时,输入的降雨数据是基于西安市最新的暴雨强度公式(公式 1)计算产生。

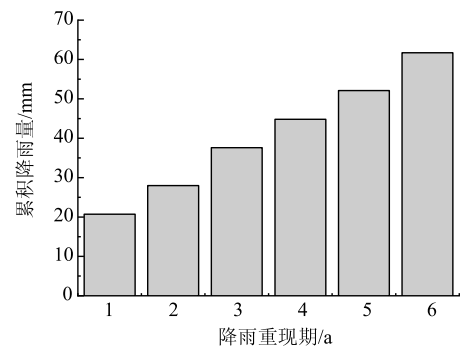
$$q = 16.71(1 + 1.16581gP)/(t + 16.813)^{0.9302}, \quad (1)$$

式中, q 为降雨强度; P 为降雨复发期; t 为降雨时长; 这些各项参数是基于西安暴雨的原始数据,通过比较不同频率分布得到^[13-14]。

根据西安市实际降雨量,选取降雨重现期为 1, 2, 3, 5, 10, 20 和 50 a。降雨持续时间为 120 min, 时间步长为 1 min。由于芝加哥降雨模型对基础数据要求低,易于模拟降雨强度过程,利用方便,故采用峰值比为 0.4。不同重现期降雨强度序列如图 2(a)所示,累积降雨量如图 2(b)所示。



(a) 动态雨量历时分布图



(b) 累积雨量图

图2 降雨模拟结果

Fig.2 Rainfall simulation result

由图 2 可知,重现期 1, 2, 10, 20 和 50 a 均在 48 min 达到了最大降雨强度,雨峰强度分别为 72.5, 97.9, 131.6, 157, 182.4 和 216.1 mm/min,总降雨量分别为 20.7, 28, 37.6, 44.8, 52.1 和 61.7 mm。

1.4 不同透水铺装结构参数的设定

LID 的参数应根据不同结构的透水铺装选择,所选取的各个结构层厚度均为代表值^[15-16]。通过对典型地区的表层排水型透水铺装结构进行调研和总结,提出了 3 种典型结构:表层排水型、基层储排水型和全透水型铺装。

表层排水铺装包括 4 种结构,分别为单层排水

型透水沥青结构 (SPAP-I)、双层排水型透水沥青结构 (SPAP-II)、透水水泥混凝土结构 (SPCC)、透水水泥混凝土面层加铺透水沥青功能层结构 (SPCC-PA),SWMM 中 LID 参数见表 2^[17],其中部分结构如图 3 所示。表层排水铺装结构采用边缘排水系统,渗入面层的雨水通过路拱横坡排入路边部的排水系统,最后汇入城市排水管网。在 SWMM 中,表层排水型透水铺装只有上面层或者整个面层采用透水材料,基层采用密实型材料,因此蓄水层在表层排水型透水铺装中参数值为 0。此外,为比较透水铺装的径流削减效果,本研究还构建了普通沥青铺装模型。

表 2 表层排水型透水铺装模拟参数

Tab. 2 Simulation parameters of surface drainage permeable pavement

LID 参数	SPAP- I	SPAP- II	SPCC	SPCC-PA	对照组
蓄水深度/mm	2	2	1.5	2	0.8
表层					
表面粗糙度	0.1	0.1	0.13	0.1	0.012
表面坡度 /%	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
厚度/mm	UL: 40	UL: 40, LL: 60	UL: 80	FL: 40, UL: 80	0
透水层					
孔隙比	UL: 0.25	UL: 0.25, LL: 0.27	UL: 0.3	FL: 0.25, UL: 0.3	0
渗透系数/(mm · h ⁻¹)	3 736	3 736	60 104	3 736	0

注: UL 为上面层, LL 为下面层, FL 为功能层。

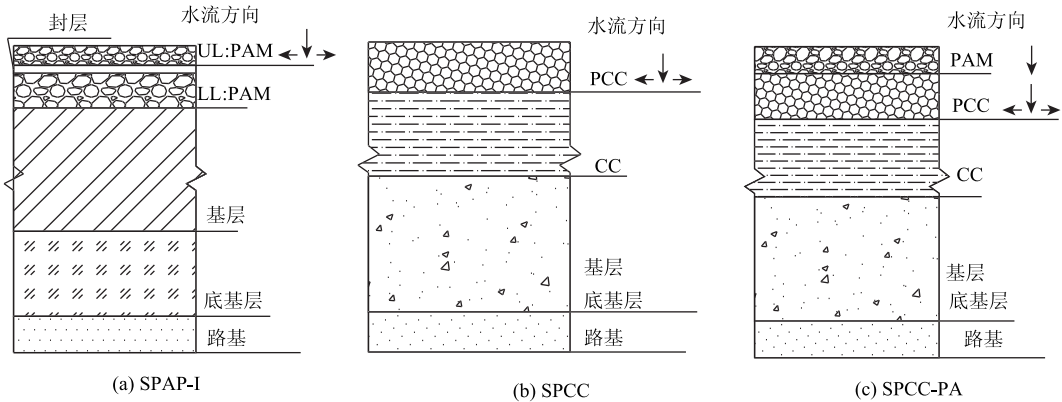


图 3 表层排水型透水铺装结构

Fig. 3 Surface drainage permeable pavement structure

基层储排水型铺装包括两种透水沥青铺装结构和 3 种透水水泥混凝土结构,分别为基层储排水型沥青结构 (单层 BPAP-I, 双层 BPAP-II), 基层储排水型水泥混凝土结构 (单层 BPCC-I, 双层 BPCC-II), 基层储排水型水泥混凝土面层加铺透水沥青面层结构 (单层 BPCC-PA-I, 双层 BPCC-PA-II), SWMM 中 LID 参数见表 3^[17],部分结构如图 4 所示。将图 4 (a) 中的整个基层用

透水材料替换可形成另一种透水沥青铺装结构,类似于另一种透水水泥混凝土结构。在 SWMM 中,相比于表层排水型透水铺装,基层储排水型透水铺装多了蓄水层 (相当于透水铺装的基层,采用骨架空隙型稳定类材料或多孔混凝土 B 类),在降雨发生时会有短暂的蓄水作用,用来缓解较大的降雨和排水设施容积较小的关系。此外还在基层下方创建了封层。

表 3 透水铺装模拟参数
Tab. 3 Simulation parameters of permeable pavement

LID 参数		BPAP- I	BPAP- II	BPCC- I	BPCC-PA- I	BPCC- II	BPCC-PA- II
表层	蓄水深度/mm	2	1.5	1.5	1.5	2	2
	表面粗糙度	0.1	0.13	0.1	0.13	0.1	0.1
	表面坡度 /%	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
透水层	厚度/mm	UL: 40 LL: 60	SL: 80	FL: 40 SL: 80	SL: 80	FL: 40, SL: 80	UL: 40 LL: 60
	孔隙比	UL: 0.25 LL: 0.27	SL: 0.3	FL: 0.25 SL: 0.30	SL: 0.3	FL: 0.25 SL: 0.30	UL: 0.25 LL: 0.27
	渗透系数/(mm·h ⁻¹)	3 736	60 104	3 736	60 104	3 736	3 736
储水层	厚度/mm	300~800	220~340	220~340	220~340 150	220~340 150	150~600
	孔隙比	0.28	0.33	0.33	0.33, 0.28	0.33, 0.28	0.28

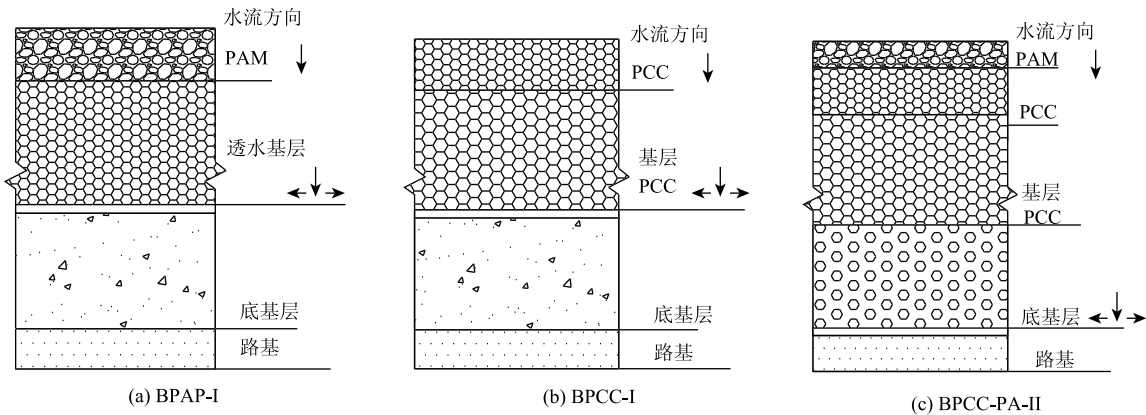


图 4 基层储排水型透水铺装结构

Fig. 4 Base course storage and drainage permeable pavement structure

全透型铺装包括一个透水沥青铺装结构和两个透水水泥混凝土结构,分别为全透型沥青结构(FPAP),全透型透水水泥混凝土结构(FPCC),全透型水泥混凝土上铺沥青层结构(FPCC-PA),SWMM 中 LID 参数见表 4^[18],结构形式如图 5 所示。与基层储排水透水铺装相比,全透水铺装的路基也具有透水性。因此,水力传导率的取值不为 0。

表 4 全透型铺装模拟参数
Tab. 4 Simulation parameters of full permeable pavement

LID 参数		FPAP	FPCC	FPCC-PA
表层	蓄水深度/mm	1.5	2	2
	表面粗糙度	0.13	0.1	0.1
	表面坡度/%	1.5	1.5	1.5
透水层	厚度/mm	SL: 80	FL: 40 UL: 80	UL: 40, LL: 60
	孔隙比	SL: 0.3	FL: 0.25 UL: 0.30	UL: 0.25, LL: 0.27
	渗透系数/(mm·h ⁻¹)	60 104	3 736	3 736
储水层	厚度/mm	220~340, 150	220~340, 150	150~600
	孔隙比	0.33, 0.28	0.33, 0.28	0.28
	渗透系数	100	100	0

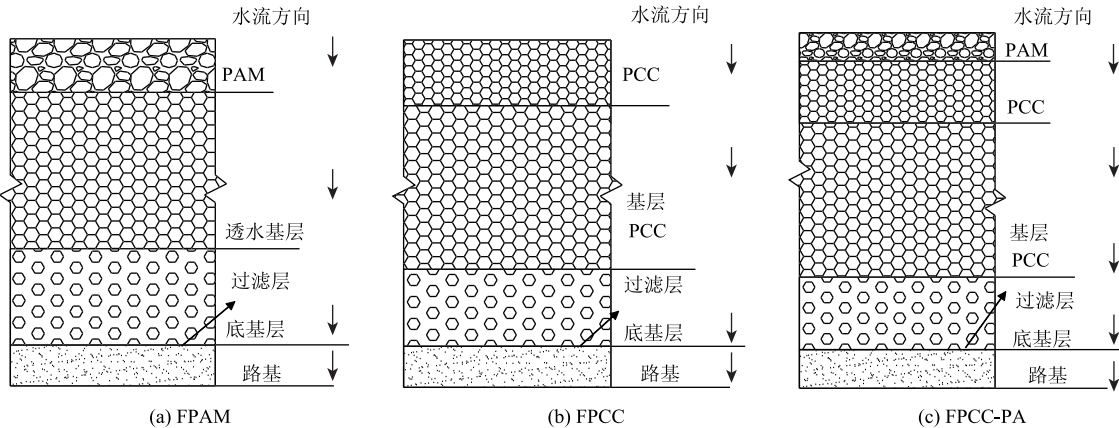


图 5 全透型铺装结构

Fig. 5 Full permeable permeable pavement structure

2 结果与讨论

2.1 表层排水型透水铺装结构对径流削减效果

本节从总径流深度、径流系数、峰值时刻、径流峰值、产流时刻、产流时长共 6 个方面详细介绍了表层排水型透水铺装结构在径流削减方面的模拟结果，如图 6 所示。

2.1.1 总径流深度

不同透水铺装结构径流总深度随重现期的变化如图 6 (a) 所示。结果表明无论在任何降雨强度下，透水铺装的总径流深度均小于普通沥青铺装的总径流深度，其中总径流深度的削减效果由小到大依次为：SPAP- I < SPCC < SPAP- II < SPCC-PA。4 种透水铺装的总径流深度与降雨强度成正相关。在重现期 $P=1$ a 时，SAPC-I 比普通铺装径流深度削减了 9.41 mm。重现期 $P=2$ a 以上时，削减程度均在 8.53 mm 左右，说明降雨强度变大时，铺装排水能力有限，且 SAPC-I 对于较小降雨强度的降雨有更好的径流削减作用。SPCC 总径流深度差值呈现与 SAPC-I 中相似的趋势，最大值出现在 $P=1$ a 时，为 19.37 mm，其余差值均在 18.48 mm 左右。SPCC-II 在重现期 $P=2$ a 时开始产生径流，径流深度与普通铺装差值几乎相同，削减效果不随降雨强度的变化而变化。SPCC-AP 对总径流深度的减少效果最好，平均减少量为 26.98 mm，因为较厚的透水层能吸收更多的雨量，但随着降雨强度的增加，径流趋于饱和。

总体上，从不同表层排水型透水铺装结构对总径流深度的影响而言，双层透水铺装从厚度和容水能力方面都优于单层透水铺装，因此在表层透水铺

装中建议选择双层透水铺装结构。

2.1.2 径流系数

以传统沥青铺装为对照组，设其径流系数为 0，径流系数削减率定义为对照组与各类透水铺装结构径流系数绝对差值，分别计算不同表层排水型铺装结构的径流系数削减率，见表 5。结果表明普通铺装径流系数最大且稳定于某常数，而透水铺装在水文期变大时，径流系数呈现递增趋势。SPAP-I 增势较缓，其余 3 种透水铺装在水文期下增速较快，随着水文期的增大，增速也变缓；SPCC-AP 从 $P=2 \sim 5$ a 时增速最快，说明 SPCC-AP 铺装结构在水文期 $P=2 \sim 5$ a 之间比较敏感，但径流系数仍小于其余透水铺装。

表 5 不同透水铺装结构的径流系数削减率 (单位: %)

Tab. 5 Reduction rate of runoff coefficient for different permeable pavement structures (unit: %)

铺装类型	降雨重现期/a					
	1	2	5	10	20	50
对照组	0	0	0	0	0	0
SPAP- I	46.7	32.1	23.6	19.6	16.9	14.1
SPCC	96.3	69.7	51.2	42.6	36.5	30.7
SPAP- II	100.0	80.3	59.0	49.1	42.0	35.3
SPCC-AP	100.0	100.0	74.8	62.2	53.3	44.8

2.1.3 峰值时刻

不同透水铺装结构径流总深度随重现期的变化如图 6 (b) 所示。发现 SPAP-I 只有在重现期 $P=1$ a 时能延迟峰值时刻，延迟效果近乎于传统沥青铺装重合。总体上，SPCC 可将峰值时刻延迟 55 min，而 SPAP-II 和 SPCC-PA 分别在重现期 $P=2$ a，5 a 时产生径流峰值。SPAP-II，SPCC 在 $P=50$ a 时与普通沥

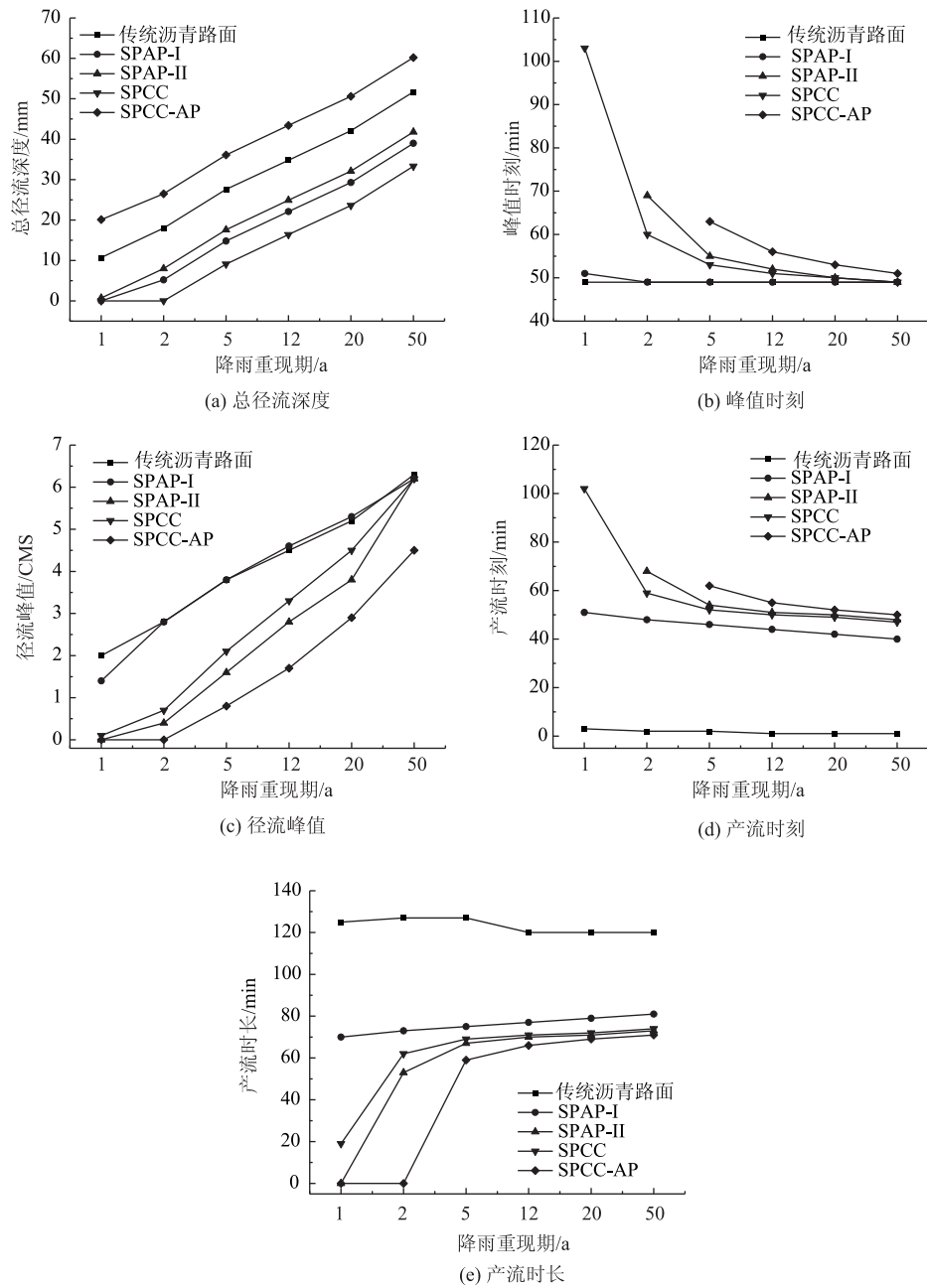


图 6 不同表层排水型透水铺装结构对径流削减的影响结果

Fig. 6 Result of different surface drainage type permeable pavement structures on runoff reduction

青铺装出现的径流量峰值时刻相同, 表明在 $P = 50$ a 时, SPAP-II, SPCC 对于滞后径流峰值时刻没有作用。而当重现期为 $P = 5$ a 或更高时, 随着降雨强度的增加, 这两种结构的产流时间越来越接近。而 SPCC-AP 在 $P = 1 \sim 50$ a 的降雨均有延迟径流峰值的作用, 表明 SPCC-AP 铺装结构有着很好的延迟径流峰值效果, 延迟能力远高于其他表层透水结构。

2.1.4 径流峰值

路面径流峰值指在一场降雨中, 路面径流所能

达到的最大值, 反映了路面上所能产生径流的一个上限, 不同透水铺装结构径流峰值随重现期的变化如图 6 (c) 所示。结果表明随着降雨强度的增强, 同一种铺装结构洪峰流量随之增大。在 $P = 1$ a 时, 透水铺装的径流峰值均小于普通铺装, SPAP-I, SPAP-II, SPCC 和 SPCC-PA 径流峰值削减率分别为 33.82%, 100%, 96.08% 和 100%。当 $P \geq 2$ a 时, SPAP-I 径流峰值与普通沥青铺装相当。当 $P = 2 \sim 20$ a 时, SPAP-II, SPCC 和 SPCC-PA 均能起到较好地削减峰值的作用, 这 3 种结构对峰值径流量的最

大减少率分别达到了 85.97%, 73.38% 和 79.26%。而当 $P=50$ a 时, 只有 SPCC-PA 能降低峰值径流量, 降低率为 27.81%, 而其他透水铺装在此降雨强度下均不能削减径流峰值。

2.1.5 产流时刻

路面产流时刻指在一场降雨中路面产生径流的时间, 反映了路面渗水以及储存水量的能力, 不同透水铺装结构产流时刻随重现期的变化如图 6 (d) 所示。结果表明径流产生的时间均与降雨开始时间有间隔, 相较于普通沥青铺装, 透水铺装可将产流时刻延迟 40~102 min, 原因是降雨刚开始比较小, 落到地面会填补构造深度或渗入透水铺装内部, 而不是立刻产生径流。随着降雨时间的增加, 普通铺装内部空隙被填满, 从而产生径流。因此在较小的降雨强度下, SPAP-I 和 SPCC 对于径流的产生都有很好的滞后作用, 但随着降雨强度的增加, 相对滞后时间也越来越小, 且 4 种透水铺装的产流时间与其他类型透水铺装越来越接近。

相比其余结构, SPCC-AP 铺装结构在降雨强度较小的情况下对于产流时间的滞后作用更加显著。随着降雨强度的增大, 由于其具有两层结构, 且上层为渗透性相对较弱的透水沥青混合料, 对产流时间起到了较大的影响, 产流时间与其他类型透水铺装越来越接近。

2.1.6 产流时长

路面产流时长指在一场降雨中, 路面径流开始产生至径流消失的时间间隔, 反映了路面削弱径流的能力。不同透水铺装结构产流时长随重现期的变化如图 6 (e) 所示。结果表明透水铺装具有减少产流时长的效果, 随着重现期的增大, 产流时长呈现递增的趋势; 同一降雨强度下, 雨水产流时长大小为: SPAP-I>SPCC>SPAP-II>SPCC-PA。且削减总径流深度大的透水铺装, 在削减径流产生时间方面效果也更明显。随着降雨强度的增大, 各类透水铺装产流时间越来越接近, 这表明透水铺装种类, 对于较大的降雨强度影响不大。总体上, SPCC-AP 在径流削减效果最佳。

2.2 基层储排水透水铺装对径流削减效果

SWMM 模拟结果表明对于任一基层储排水型透水铺装结构, 只有 $P=50$ a 时, BPAP-I 才会产生径流, 不同厚度骨架空隙结构对径流的削减结果见表 6。

结果表明 BPAP-I 只要满足透水基层厚度不小于 18 cm, 在 $P \leq 50$ a 的条件下基本不会产生径流。与

表 6 不同基层厚度下 BPAP-I 对径流削减的模拟结果

Tab. 6 Simulation result of BPAP-I on runoff reduction with different subgrade thicknesses

结构类型	总径流 深度/m	径流峰 值/CFS	峰值时 刻/min	产流时 刻/min	产流时 长/min	径流 系数
传统沥青路面	60.24	6.22	49	1	120	0.976
BPAP-I 骨架空隙 结构/cm	15	6.9	0.51	80	79	0.112
	16	4.71	0.36	89	88	0.076
	17	2.52	0.26	101	100	0.041
	18	0.33	0.17	119	118	0.005

普通沥青铺装相比, BPAP-I 的径流系数削减率达 89% 以上, 原因是基层储排水型 BPAP-I 的面层全部为透水层, 保证了透水结构层的厚度, 使得降雨能够及时被吸收排出, 因此在 $P=1 \sim 20$ a 时 BPAP-I 能够完全吸收雨水。而在 $P=50$ a 时, 15 cm 的透水基层厚度无法满足地表不产生径流的要求, 因此需再加厚一部分透水基层厚度才能够保证雨水能够被及时吸收排走。

此外, BPAP-II 由于基层和底基层均为透水层, 较厚的透水层使得径流并未产生。BPCC 渗透系数大, 故透水基层厚度下限值 15 cm 也满足不产生径流的要求。而 BPCC-AP 兼具上述两者优势, 因此透水基层厚度下限值 15 cm 也满足不产生径流的要求。

2.3 全透式排水铺装对径流削减效果

SWMM 模拟结果表明全透型铺装, 在 $P=1 \sim 50$ a 均不产生径流。与基层储排水型透水铺装相比, 全透型铺装的独特之处在于路基具有渗透性 (渗透系数 $\geq 1 \times 10^{-4}$ cm/s), 渗入铺装结构的水不仅可以通过道路边部排水系统排出, 还可通过土基渗入补充地下水, 因此对于雨水径路削减效果更好。在西安地区降雨条件下, 重现期不大于 50 a, 全透型铺装均不会产生路表径流。

2.4 建议

上述 SWMM 模拟结果表明透水铺装对减小径流深度和径流系数, 延缓径流时间有显著作用。目前, 我国海绵城市地区不同铺装类型主要以《室外排水设计规范》(GB50014—2016) 大都基于径流系数设计。规定了各种屋面、混凝土、沥青路面的径流系数为 0.85~0.95, 大块石铺砌铺装或沥青表面各种的碎石铺装径流系数为 0.55~0.65, 级配碎石铺装的径流系数为 0.40~0.50。然而, 对于各种类型的透水铺装, 尤其是表层排水型透水结构, 仍缺乏有效的径流系数推荐值。因此, 基于模拟结果, 为典型透水铺装结构提出了径流系数参考值。考虑到推

荐值的推广性,分析范围集中在5~50 a的降水重现期,结果见表7。

表7 典型透水铺装结构的径流系数

Tab.7 Runoff coefficients of typical permeable pavement structures

透水铺装结构	径流系数
SPAP-I	0.5~0.8
SPAP-II	0.35~0.65
SPCC	0.2~0.45
SPCC-PA	
基层储排水透水铺装	— ≤0.15
全透型透水铺装	— 0

3 结论

本研究选取西安市一条双向双车道道路,采用SWMM模拟不同降雨重现期下不同透水铺装结构对地表径流削减效果,得出如下结论:

(1) 降雨重现期、透水层结构组合、透水层厚度是影响径流削减的主要因素。单层透水沥青铺装(SPAP-I)可使总径流深度降低14%以上,也可使径流时间和持续时间延迟约40 min,并降低径流系数降低14%以上,但对径流峰值的减少及峰值时刻的滞后几乎没有影响。

(2) 双层透水沥青铺装(SPAP-II)在降雨重现期为1 a时也能使峰值径流量减少100%,但随着降雨重现期增加,其减少能力逐渐减弱。单层透水水泥混凝土铺装(SPCC)最大程度上能使径流深度降低96%,峰值时间和径流时间延迟50 min以上,径流系数降低96%。且随着降水重现期的增加,其削减能力与SPAP-II相似。

(3) 同一降雨重现期下,不同表层排水型透水铺装对地表径流的减量效果依次为:SPAP-I<SPCC<SPAP-II<SPCC-PA。

(4) 6种基层储排水型透水铺装中仅有BPAP-I在 $P=50$ a的时才能产生径流,且透水基层厚度 ≥ 18 cm时能实现无径流产生。然而,全透型铺装 $P=1\sim 50$ a降雨强度下均不产生径流。

(5) 为典型透水铺装结构推荐了径流系数取值范围,即针对表层排水透水铺装,SPAP-I为0.5~0.8,SPAP-II和SPCC为0.35~0.65,SPCC-PA为0.2~0.45;基层储排水型透水铺装 ≤ 0.15 ,全透型透水铺装为0,完善了排水设计规范,可为海绵城市透水路面设计提供一定的技术支持。

参考文献:

References:

- [1] LI Q, WANG F, YU Y, et al. Comprehensive Performance Evaluation of LID Practices for the Sponge City Construction: A Case Study in Guangxi, China [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 10-20.
- [2] RANDALL M, SUN F, ZHANG Y, et al. Evaluating Sponge City Volume Capture Ratio at the Catchment Scale Using SWMM [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 745-757.
- [3] 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, 2019, 244 (7): 118938.
- [4] LI Y, HUANG J J, HU M C, et al. Design of Low Impact Development in the Urban Context Considering Hydrological Performance and Life-cycle Cost [J]. Journal of Flood Risk Management, 2020, 26 (5): e12625.
- [5] 李阳, 何俊仕, 董克宝, 等. 低影响开发雨水系统在满融经济开发区径流削减效应分析中的应用 [J]. 水电能源科学, 2017, 35 (8): 23-26.
- LI Yang, HE Jun-shi, DONG Ke-bao, et al. Application of Low Impact Development in Runoff Reduction Effect Analysis Based on SWMM Model [J]. Water Resources and Power, 2017, 35 (8): 23-26.
- [6] XIE J G, WU C C, LI H, et al. Study on Storm-water Management of Grassed Swales and Permeable Pavement Based on SWMM [J]. Water, 2017, 9 (11): 840.
- [7] JOSE R, WADE R, JEFFERIES C. Smart SUDS: Recognising the Multiple-benefit Potential of Sustainable Surface Water Management Systems [J]. Water Science and Technology, 2015, 71 (2): 245-251.
- [8] 赵沛, 程伍群, 庞立军, 等. 基于SWMM的透水铺装系统的水文效应研究 [J]. 水电能源科学, 2019, 37 (1): 29-31.
- ZHAO Pei, CHENG Wu-qun, PANG Li-jun, et al. Study on Hydrological Effect of Permeable Pavement System Based on SWMM [J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (1): 29-31.
- [9] 夏远芬, 万玉秋. 居住小区道路雨水径流消减潜力分析 [J]. 环境保护科学, 2008, 34 (2): 35-37, 126.
- XIA Yuan-feng, WAN Yu-qiu. Analysis on Potential of Decreasing Road Runoff in Residential Areas [J]. Environmental Protection Science, 2008, 34 (2): 35-37, 126.

(下转第73页)

- 版), 2015, 12 (2): 21-28.
- LIU Yang, LI Du-yu, DENG Yang. Analysis and Assessment of the Monitoring Data of Expansion Joints for Long-span Suspension Bridge [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 12 (2): 21-28.
- [14] YANG D, DING Y, LI A. Structural Condition Assessment of Long-span Suspension Bridges Using Long-term Monitoring Data [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 9 (1): 123-131.
- [15] 邓扬, 李爱群, 丁幼亮, 等. 基于长期监测数据的大跨桥梁结构伸缩缝损伤识别 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2011, 41 (2): 336-341.
- DENG Yang, LI Ai-qun, DING You-liang, et al. Damage Identification of Expansion Joints in Long Span Bridge Using Long-term Monitoring Data [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41 (2): 336-341.
- [16] 邓扬, 李爱群, 丁幼亮. 大跨悬索桥梁端位移与温度的相关性研究及其应用 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (5): 54-58.
- DENG Yang, LI Ai-qun, DING You-liang. Research and Application of Correlation between Beam End Displacement and Temperature of Long-span Suspension Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (5): 55-58.
- [17] 张宇峰, 陈雄飞, 张立涛, 等. 大跨悬索桥伸缩缝状态分析与处理措施 [J]. 桥梁建设, 2013, 43 (5): 49-54.
- ZHANG Yu-feng, CHEN Xiong-fei, ZHANG Li-tao, et al. Condition Analysis and Handling Measures for Expansion Joints of Long Span Suspension Bridges [J]. Bridge Construction, 2013, 43 (5): 49-54.
- [18] GUO T, LIU J, PAN S, et al. Displacement Monitoring and Analysis of Expansion Joints of Long-span Steel Bridges with Viscous Damper [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20 (9): 04014099.
- [19] GUO T, LIU J, HUANG L. Investigation and Control of Excessive Cumulative Girder Displacements of Long-span Steel Suspension Bridges [J]. Engineering Structures, 2016, 125 (10): 217-226.
- [20] 黄灵宇. 大跨钢桥伸缩缝的性能评估与病害控制研究 [D]. 南京: 东南大学. 2017.
- HUANG Ling-yu. Performance Evaluation and Damage Control of Expansion Joints in Long-span Bridges [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- ~~~~~
- (上接第49页)
- [10] BAEK S S, LIGARAY M, PYO J, et al. A Novel Water Quality Module of the SWMM Model for Assessing Low Impact Development (LID) in Urban Watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124886.
- [11] ROSA D J, CLAUSEN J C, DIETZ M E. Calibration and Verification of SWMM for Low Impact Development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2015, 51 (3): 746-757.
- [12] ROSSMAN L A. Storm Water Management Model User's Manual [M]. Version 5.0. Cincinnati: US Environmental Protection Agency, 2010.
- [13] 杜锐. 西安市暴雨强度公式的推求研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- DU Rui. A Study on Deriving Storm Intensity Formula in Xi'an [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [14] 马越, 姬国强, 石战航, 等. 西咸新区沣西新城秦皇大道低影响开发雨水系统改造 [J]. 给水排水, 2017, 53 (3): 59-67.
- MA Yue, JI Guo-qiang, SHI Zhan-hang, et al. Renovation of Low-impact Development Rainwater System of Qinhuang Avenue, Fengxi New City, Xixian New District [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53 (3): 59-67.
- [15] LIU T Q, LAWLUVY Y, SHI Y, et al. Low Impact Development (LID) Practices: A Review on Recent Developments, Challenges and Prospects [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2021, 232 (9): 344.
- [16] 刘春春, 刘万青, 张悦, 等. 基于SWMM模型的西安市清河流域暴雨洪峰流量模拟 [J]. 干旱区研究, 2018, 35 (1): 35-42.
- LIU Chun-chun, LIU Wan-qing, ZHANG Yue, et al. Simulation of Rainstorm Flood Peak Discharge in the Qinghe River Basin in Xi'an Based on SWMM Model [J]. Arid Zone Research, 2018, 35 (1): 35-42.
- [17] 胡爱兵, 任心欣, 裴古中. 采用SWMM模拟LID市政道路的雨洪控制效果 [J]. 中国给水排水, 2015, 31 (23): 130-133.
- HU Ai-bing, REN Xin-xin, PEI Gu-zhong. Simulation of Stormwater Control Effect of LID Municipal Road Based on SWMM [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31 (23): 130-133.
- [18] 朱浩然, 于明明, 吴华菓. 基于暴雨洪水管理模型的透水铺装结构对城市雨洪的影响模拟研究 [J]. 公路, 2019, 64 (1): 65-72.
- ZHU Hao-ran, YU Ming-ming, WU Hua-guo. Simulation and Research on Effect of Permeable Pavement Structure on Urban Runoff Based on SWMM [J]. Highway, 2019, 64 (1): 65-72.