

透水砖材料和下垫面对城市雨洪的影响

吴耀珊¹, 计波¹, 刘卓成²

(1. 深圳市国艺园林建设有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 北京林业大学 草坪研究所, 北京 100083)

摘要: 随着海绵城市建设的推进,透水砖的运用日趋广泛。为此,选取沙基、水泥、陶瓷3种材料的透水砖和2种常见的下垫面铺装结构(A和B)为研究对象,对透水砖、下垫面铺装结构进行组合并构建物理模型,分别在8、16、25 mm/h的设计降雨强度下,对不同铺装方案的产流、渗排水过程及相关指标进行研究。结果表明,6种铺装方案均表现出优异的削减径流和渗排水性能,其中,陶瓷透水砖的径流削减和下渗雨水性能最优,下垫面B的渗排水性能更强,水泥透水砖+下垫面A组合方案的保水性能最优。

关键词: 海绵城市; 透水砖; 铺装结构; 雨洪管理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0133-06

Influence of Permeable Brick Material and Underlying Surface on Urban Stormwater

WU Yao-shan¹, JI Bo¹, LIU Zhuo-cheng²

(1. Shenzhen Guoyipark Construction Co. Ltd., Shengzhen 518000, China; 2. Institute of Turfgrass Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: With the development of sponge city construction, permeable brick is widely used. Thus, the permeable bricks consisted of sandstone, cement and ceramic and two kinds of common pavement surface structure (A and B) were selected as the object of this study. Permeable bricks and underlying surface structures were combined to build the physical models. Under the designed rainfall intensity of 8, 16 and 25 mm/h respectively, the runoff, seepage and drainage processes and related indicators were studied under different paving schemes. The results showed that the six paving schemes all demonstrated excellent performance in reducing runoff and drainage. Among them, the ceramic permeable bricks had the best performance in reducing runoff and infiltration of the rainwater, the underlying surface B had stronger permeable drainage ability, and the combination of cement permeable bricks and underlying surface A offered the best water retention.

Key words: sponge city; permeable brick; pavement structure; stormwater management

随着社会经济的的发展和城市化进程的不断加快,城市化面积和城区下垫面条件发生了很大变化。

在相同级别的降雨情况下,由于不透水面积增加,径流系数增大,产流量也相应增加,洪峰流量增大,峰

现时间提前,不但给下游的防洪排涝带来很大负担,而且可能导致局部地区排水不畅而出现积水问题,给人们的生活带来很大不便。此外,雨水被直接排放,宝贵的雨水资源未得到充分利用^[1]。针对上述问题,我国提出了海绵城市建设理念,其中,透水性铺装是海绵城市建设中一种重要的源控制技术,对雨水的下渗、净化和储存具有显著的促进作用^[2~4]。

透水砖路(地)面是透水性铺装的一种,可广泛用于居民小区、道路、园林绿化等领域。我国许多学者在透水砖材料强度、透水系数等方面进行了研究^[5,6]。但在实际应用中,透水砖的产地和制作工艺、下垫面配合程度以及降水强度等因素对透水砖减少积水、增加入渗、削减洪峰的真实作用千差万

别。为此,笔者以深圳市常见的3种透水砖材料和2种下垫面铺装结构为研究对象,对透水砖材料和铺装结构的不同组合方案的降雨径流、入渗过程进行研究,旨在为透水砖铺装的推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在深圳市光明新区某苗木基地进行,试验地属亚热带季风气候,年平均气温为22.4℃,降雨量充足,年降雨量为1 935.8 mm,5月—9月的累计降雨量占全年的78.1%。

试验选用3种透水砖,分别为沙基透水砖、水泥透水砖和陶瓷透水砖,其规格均为200 mm×100 mm×60 mm,均由建材市场购入,性能对比见表1。

表1 铺装材料性能对比

Tab. 1 Performance of pavement materials

项 目	强度		透水性/(mm·s ⁻¹)	防滑性 BPN	可循环性	抗风化性
	抗折性/MPa	当量标号				
沙基砖	3.8~4.7	C25~C35	0.035	≥60	≤3	一般
水泥砖	3.0~4.0	C10~C30	0.050	50~60	≤3	弱
陶瓷砖	6.0~9.0	C30~C50	0.300	40~50	无数次	不风化

试验选用2种下垫面结构,均为海绵城市建设中常用的路面铺装结构,均具有原材料易得、铺装成本低的特点。2种下垫面结构如图1所示,分别记作下垫面A和B。其中,缓冲找平层下铺设透水无纺布层,无纺布规格为100 g/m²;分别采用粒径为10和25 mm的碎石进行级配,不同粒径的碎石之间铺设不锈钢隔离网。

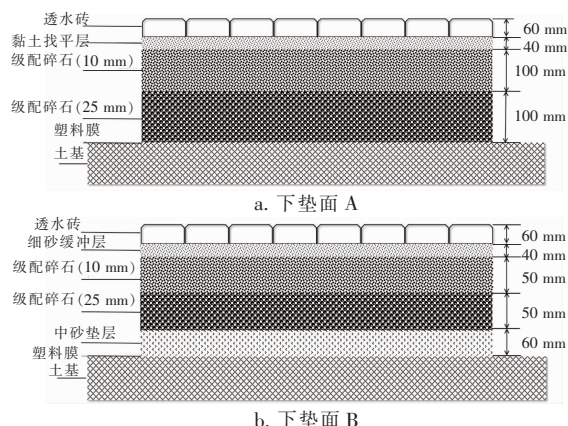


图1 下垫面结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of underlying surfaces

1.2 试验装置

试验槽的尺寸为1.5 m×1.2 m×0.30 m,为模拟坡度较大的路面,并有效收集地表径流,槽底面和

表面的坡度均设计为5%^[5],四周用300 mm×600 mm的大理石路牙石围挡,侧面路牙石间留有一个宽为100 mm的缝隙,通过透明塑料膜可以观察下垫面的湿润情况。试验槽底部设有出水口接直径为100 mm的排水管,收集并监测渗透水量。槽表面靠近出水口一端设置V型水泥堤,用于集中径流于面层出水口,接JZ-NB1700地表径流仪。试验槽底面和四周均采用0.8 mm厚的双层塑料膜包裹以保证下渗雨水全部由底部出水口排出。人工降雨设备置于钢架之上,距试验槽表面垂直距离为2 m,铺盖尺寸为3 m×3 m,最大流量为0.3 m³/h,平均降雨均匀度为0.875。

1.3 试验方法

构建透水砖铺装地面的物理模型,对3种透水砖和2种铺装结构分别进行组合,共得到6组铺装方案:①沙基透水砖+下垫面A;②沙基透水砖+下垫面B;③水泥透水砖+下垫面A;④水泥透水砖+下垫面B;⑤陶瓷透水砖+下垫面A;⑥陶瓷透水砖+下垫面B。设计降雨强度分别设置为8、16、25 mm/h,降雨时间均为30 min。在人工降雨期间和降雨结束后的30 min内,对地表径流量、渗透水量、开始渗水时间、达到最大渗水流量时间、最大渗流速度

等指标进行测定,由此计算渗水率、地表径流系数等。为避免户外环境对人工降雨均匀度和雨量稳定性的影响,每次模拟降雨试验的同时,在试验槽周围设置 3 组 TPJ-32-G 雨量检测仪,对实际降雨强度进行监测,试验重复多次,每组处理选取实测雨强与设计雨强接近且降雨均匀度高的 3 次重复作为最终数据。

地表径流量采用 JZ-NB1700 地表径流仪测定,每次记录 60 min 内的总径流量;下渗雨水由排水管进入集雨装置后由量筒测量,每分钟记录一次,共 60 次;开始渗水时间和达到最大渗水流量时间由秒表测定;最大渗流速度即为监测期间渗水速度的峰值;地表径流率指的是同一时间段内流域面积上的径流量(mL)与降水量(mL)的比值;渗水率指的是同一时间段内流域面积上的渗透水量(mm)与降水量(mm)的比值;雨水体积 Q 的计算方法如下:

$$Q = qF \cos(\tan^{-1}s)t \quad (1)$$

其中, q 为实测雨强,mm/h; F 为试验槽表面积, m^2 ; s 为坡度; t 为降雨时间,h。

试验数据采用 SPSS15.0 进行处理。

2 结果与讨论

2.1 8 mm/h 雨强下不同铺装方案的渗排水变化

在 8 mm/h 的降雨强度条件下,不同铺装方案的径流变化规律见表 2。

表 2 8 mm/h 雨强下不同铺装方案的径流指标

Tab. 2 Runoff index of different schemes under 8 mm/h of rain intensity

方案编号	雨水体积/mL	产流量/mL	地表径流深度/mm	地表径流系数/%
①	6 889.6 ± 152.5 ^a	64.37 ± 4.54 ^{Ab}	0.037 2 ± 0.002 6 ^{Ab}	0.938 ± 0.086 ^{Aa}
②	7 033.7 ± 76.3 ^a	76.90 ± 6.87 ^{aAa}	0.044 5 ± 0.004 0 ^{Aa}	1.095 ± 0.107 ^{Aa}
③	6 860.7 ± 152.5 ^a	4.20 ± 2.15 ^{Bc}	0.002 4 ± 0.001 2 ^{Bc}	0.102 ± 0.012 ^{Bb}
④	6 774.3 ± 76.3 ^a	1.70 ± 1.70 ^{Bc}	0.001 0 ± 0.001 0 ^{Bc}	0.025 ± 0.025 ^{Bb}
⑤	6 889.6 ± 28.8 ^a	0.00 ± 0.00 ^{Bc}	0.000 0 ± 0.000 0 ^{Bc}	0.000 ± 0.000 ^{Bb}
⑥	6 889.6 ± 76.3 ^a	0.00 ± 0.00 ^{Bc}	0.000 0 ± 0.000 0 ^{Bc}	0.000 ± 0.000 ^{Bb}
注: 上标中的小写字母表示显著性水平 $F=0.05$ 的 Duncan 法差异性分析同类子集,大写字母表示显著性水平 $F=0.01$ 的 Duncan 法差异性分析同类子集,下同。				

由表 2 可知,方案③和④、⑤和⑥之间均没有显著差异。方案①和②的地表径流深度在 $F=0.05$ 水平存在差异,而地表径流系数没有显著差异,究其原因此差异可能受实际雨水体积的影响而产生。

以陶瓷透水砖为表面铺装材料的方案均没有发生地表径流,水泥透水砖表面产生了极不明显的径流(径流系数分别为 0.102% 和 0.025%)。以沙基透水砖为表面铺装材料的方案①和②的地表径流深度分别为 0.037 2 和 0.044 5 mm,地表径流系数均接近 1%,二者之间无显著差异,这两项数据均极其显著地高于另两种表面铺装材料。所有方案的地表径流深度均远低于陈晓燕等人^[7]在 2014 年对城市区域不同土地利用类型综合研究中降水量相似条件下的实测和模拟的地表径流深度(3~4 mm),几乎没有径流产生。

因此,在降雨强度为 8 mm/h 的条件下,下垫面结构的差异对地表径流的产生和积累没有显著影响,铺装路面的地表径流在坡度相同的情况下主要与表面铺装材料有关。在此降雨条件下,所有供试铺装方案均没有产生明显的地表径流,其中以陶瓷透水砖为铺装表面的方案对径流的控制效果最好。由此可见,3 种透水砖在 8 mm/h 的降雨条件下,均表现出很好的透水功能,大幅削减了地表径流。

在 8 mm/h 的降雨强度条件下,不同铺装方案的渗排水情况见表 3。可知,方案④和⑥的最大排水速率显著高于其他方案;对于开始出现排水的时间,方案①和②之间差异不显著,但显著迟于其他各组;方案④~⑥均在降雨停止前达到最大排水速率,显著早于其他组;除方案④和⑥的排水率显著高于方案①以外,其余各组的排水率差异不显著。

在 8 mm/h 的降雨强度下,大部分雨水都保留在铺装材料和下垫面中。对于铺装材料相同的方案,下垫面 B 能够在更短的时间开始渗水和排水并达到更大的排水速率,且与下垫面 A 的排水量和排水率差异不显著,说明下垫面 B 的渗水和排水性能略优于下垫面 A。比较 3 种透水砖,水泥砖和陶瓷砖均未产生径流,且陶瓷砖的渗水、排水速率和效率均高于水泥砖,可见在降雨开始阶段水泥砖保留了更多的水分,陶瓷砖有利于雨水较快透过砖体,渗入下垫面进而排出铺装结构。总体来说,在 8 mm/h 的降雨条件下,陶瓷透水砖+下垫面 B 组合方案产生的径流最少,且渗排水速率和效率最高。

表3 8 mm/h 雨强下不同铺装方案的渗排水指标

Tab.3 Drainage index of different schemes under 8 mm/h of rain intensity

方案编号	1 h 排水量/mm	最大排水速率/ (mm · min ⁻¹)	出现排水时间/min	达到最大速率 时间/min	1 h 排水率/%
①	3.193 ± 0.094 ^b	0.106 ± 0.003 ^c	13.3 ± 0.9 ^a	36.3 ± 0.3 ^a	40.12 ± 1.50 ^b
②	3.443 ± 0.088 ^{ab}	0.123 ± 0.004 ^b	13.3 ± 0.3 ^a	34.7 ± 1.4 ^{ab}	42.35 ± 1.33 ^{ab}
③	3.401 ± 0.048 ^{ab}	0.118 ± 0.002 ^b	9.3 ± 0.9 ^b	32.3 ± 1.4 ^b	42.89 ± 0.70 ^{ab}
④	3.534 ± 0.083 ^a	0.133 ± 0.001 ^a	8.7 ± 0.3 ^b	27.7 ± 1.2 ^c	45.16 ± 1.56 ^a
⑤	3.507 ± 0.099 ^a	0.119 ± 0.002 ^b	8.0 ± 0.6 ^b	28.3 ± 0.3 ^c	44.03 ± 1.23 ^{ab}
⑥	3.632 ± 0.049 ^a	0.134 ± 0.001 ^a	7.3 ± 0.3 ^b	28.0 ± 0.6 ^c	45.62 ± 1.02 ^a

2.2 16 mm/h 雨强下不同铺装方案的渗排水变化

在 16 mm/h 的降雨强度条件下,不同铺装方案的径流变化规律见表 4。

表4 16 mm/h 雨强下不同铺装方案的径流指标

Tab.4 Runoff index of different schemes under 16 mm/h of rain intensity

方案编号	雨水体积/mL	产流量/ mL	地表径流 深度/mm	地表径流 系数/%
①	13 923.3 ± 86.5 ^a	352.27 ± 62.69 ^a	0.407 ± 0.072 ^a	2.528 ± 0.438 ^a
②	13 951.8 ± 179.9 ^a	324.13 ± 28.17 ^{ab}	0.375 ± 0.033 ^a	2.325 ± 0.231 ^{ab}
③	13 923.3 ± 229.2 ^a	229.97 ± 38.20 ^b	0.266 ± 0.044 ^b	1.654 ± 0.296 ^b
④	13 951.9 ± 132.3 ^a	230.30 ± 32.29 ^b	0.266 ± 0.037 ^b	1.651 ± 0.230 ^b
⑤	13 923.3 ± 86.5 ^a	6.30 ± 6.62 ^c	0.007 ± 0.008 ^c	0.046 ± 0.049 ^c
⑥	13 894.7 ± 132.3 ^a	8.03 ± 2.45 ^c	0.009 ± 0.003 ^c	0.058 ± 0.018 ^c

由表 4 可知,相同铺装材料的方案之间产流量、径流深度、径流系数均没有显著差异。在下垫面 A 条件下,不同铺装材料的径流指标之间差异显著,即陶瓷砖的径流量最少,水泥砖次之,沙基砖的径流量

最多。下垫面 B 条件下的试验结果相似,唯一不同的是水泥砖和沙基砖之间的差异不显著。值得一提的是,在此降雨条件下,陶瓷透水砖作为铺装材料仍没有产生明显的径流。总体来说,所有供试铺装方案的径流控制率均高于《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2014)中规定的最高等级(70%),且远低于《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)中规定的深圳市综合径流率(0.6~0.8),具有良好的径流削减性能。

在 16 mm/h 的降雨强度条件下,不同铺装方案的渗排水情况如表 5 所示。可以看出,方案⑥的排水量最大,占降雨总量的 56%;方案①的排水量显著低于其他方案。在相同铺装材料条件下,下垫面 B 组的排水效率均显著高于下垫面 A 组。在相同下垫面条件下,排水量和排水率的变化均表现为陶瓷砖 > 水泥砖 > 沙基砖,且差异显著。方案⑥最先出现垫层底部排水,方案⑤次之,二者差异不显著且明显优于其他方案,方案③最后出现底部排水。方案⑥最快达到最大排水速率,方案④次之,二者差异不显著,与 8 mm/h 降雨强度下的规律类似。最大排水速率主要与下垫面有关,下垫面 B 组均显著大于下垫面 A 组。

表5 16 mm/h 雨强下不同铺装方案的渗排水指标

Tab.5 Drainage index of different schemes under 16 mm/h of rain intensity

方案编号	1 h 排水量/mm	最大排水速率/ (mm · min ⁻¹)	出现排水时间/min	达到最大速率 时间/min	1 h 排水率/%
①	7.020 ± 0.100 ^d	0.376 ± 0.006 ^b	7.0 ± 1.0 ^b	35.3 ± 2.6 ^a	43.61 ± 0.90 ^d
②	7.912 ± 0.344 ^c	0.431 ± 0.005 ^a	6.7 ± 0.6 ^b	32.7 ± 0.6 ^{abc}	49.03 ± 1.52 ^c
③	7.627 ± 0.294 ^c	0.397 ± 0.005 ^b	9.2 ± 0.6 ^a	34.3 ± 0.6 ^a	47.36 ± 1.24 ^c
④	8.656 ± 0.239 ^{ab}	0.425 ± 0.012 ^a	6.7 ± 0.6 ^b	31.0 ± 1.0 ^{bc}	53.66 ± 1.87 ^b
⑤	8.542 ± 0.137 ^b	0.393 ± 0.009 ^b	4.3 ± 0.6 ^c	33.3 ± 1.5 ^{ab}	53.05 ± 0.52 ^b
⑥	9.012 ± 0.161 ^a	0.412 ± 0.009 ^a	3.7 ± 0.6 ^c	30.3 ± 1.5 ^c	56.10 ± 1.54 ^a

由此可见,在16 mm/h的降雨强度下,沙基、水泥透水砖表面出现了少量径流,而陶瓷透水砖表面仍未产生明显径流,同时陶瓷透水砖能够在更短时间内开始排水,说明陶瓷砖在促进表面雨水入渗的同时可以让雨水更快向下渗入下垫面中,进一步降低了出现明显径流的可能性。水泥透水砖削减径流的性能略逊于陶瓷透水砖而较为显著地优于沙基透水砖,但其开始向下排水和达到最大排水速率的时间均为最长,说明其能够在降雨初期更多地将雨水保持在砖体中。与8 mm/h的降雨强度相比,16 mm/h降雨强度下下垫面渗排水性能的差异更为显著,下垫面B能够更快、更高效地渗水和排水,这可能是由于其结构中更多地使用了砂代替黏土,孔隙度更大,有利于雨水的快速下渗,而黏土的特点是保水能力强,将雨水保持在下垫面中,渗透较慢。

2.3 25 mm/h 雨强下不同铺装方案的渗排水变化

在25 mm/h的降雨强度下,不同铺装方案的径流变化规律见表6。可知,不同铺装材料表面的径流情况差异显著,径流系数、产流量、径流深度均表现为陶瓷砖<水泥砖<沙基砖。在径流深度方面,方案①和②之间存在显著差异,方案①的径流深度显著低于方案②。对比产流量、径流深度、径流系数

3项指标,均存在下垫面A<下垫面B的现象,可见在雨强较大的条件下,下垫面A组的径流产量普遍低于下垫面B组。总体来看,所有的铺装方案在此降雨条件下均有效地控制了径流的产生,径流系数均远低于刘一瑶等人^[8]的研究结果。

表6 25 mm/h 雨强下不同铺装方案的径流指标

Tab. 6 Runoff index of different schemes under 25 mm/h of rain intensity

方案编号	雨水体积/mL	产流量/mL	地表径流深度/mm	地表径流系数/%
①	21 735.3 ± 303.7 ^a	653.6 ± 39.8 ^a	0.459 ± 0.014 ^b	3.010 ± 0.222 ^a
②	21 764.1 ± 180.0 ^a	716.4 ± 45.0 ^a	0.545 ± 0.026 ^a	3.292 ± 0.211 ^a
③	21 533.5 ± 149.8 ^a	526.4 ± 50.4 ^b	0.390 ± 0.037 ^c	2.446 ± 0.251 ^b
④	21 735.3 ± 217.6 ^a	535.8 ± 37.3 ^b	0.397 ± 0.028 ^c	2.465 ± 0.157 ^b
⑤	21 648.8 ± 49.9 ^a	379.3 ± 22.9 ^c	0.281 ± 0.017 ^d	1.752 ± 0.106 ^c
⑥	21 591.2 ± 132.1 ^a	397.2 ± 33.3 ^c	0.294 ± 0.025 ^d	1.840 ± 0.158 ^c

在25 mm/h的降雨强度条件下,不同铺装方案的渗排水情况见表7。

表7 25 mm/h 雨强下不同铺装方案的渗排水指标

Tab. 7 Drainage index of different schemes under 25 mm/h of rain intensity

方案编号	1 h 排水量/mm	最大排水速率/(mm · min ⁻¹)	出现排水时间/min	达到最大速率时间/min	1 h 排水率/%
①	14.34 ± 0.17 ^c	0.675 ± 0.013 ^c	4.7 ± 0.3 ^a	27.7 ± 1.2 ^a	57.38 ± 0.69 ^c
②	15.43 ± 0.13 ^b	0.693 ± 0.010 ^c	2.7 ± 0.3 ^{cd}	26.7 ± 2.9 ^{ab}	61.73 ± 0.50 ^b
③	17.44 ± 0.19 ^a	0.701 ± 0.020 ^{bc}	3.7 ± 0.3 ^{bc}	26.0 ± 2.6 ^{ab}	69.76 ± 0.75 ^a
④	17.61 ± 0.08 ^a	0.737 ± 0.010 ^{ab}	4.7 ± 0.3 ^a	23.7 ± 0.6 ^b	70.46 ± 0.31 ^a
⑤	17.58 ± 0.25 ^a	0.748 ± 0.007 ^a	2.3 ± 0.3 ^d	26.7 ± 0.6 ^{ab}	70.34 ± 0.99 ^a
⑥	17.64 ± 0.12 ^a	0.771 ± 0.004 ^a	2.3 ± 0.3 ^d	25.7 ± 1.2 ^{ab}	70.57 ± 0.46 ^a

可知,方案③~⑥之间排水量差异不显著,均远高于方案①和②,其中方案②的排水量显著高于方案①。1 h内排水量占总降雨量的比例亦有相同的规律。由此可见,在此降水强度下,水泥透水砖和陶瓷透水砖的排水效果优于沙基透水砖,且相同铺装材料下不同下垫面的方案间排水性能差异不显著,下垫面B组略优于下垫面A组。以沙基砖为铺装材料的方案①和②排水量较小,在此状况下下垫面的差异对排水量产生了显著影响,下垫面B的排水量更大。下垫面的差异对最大排水速率影响不显著,下垫面B组略大于下垫面A组;透水砖的差异

对最大排水速率影响显著,陶瓷砖>水泥砖>沙基砖,相同下垫面情况下水泥砖与其他两种差异不显著。排水现象发生的时间方面,方案⑤和⑥用时最短,方案①和④用时最长。方案④开始出现排水的时间最晚而排水量和最大排水速率仅略低于方案⑥,说明其透水砖体和下垫面中能够保持更多的水分,削减径流的同时也延缓了向下排水的过程。在此降雨条件下,供试方案均较快达到最大排水速率,用时差异不大。

3 结论

① 供试铺装方案在3种模拟降雨条件下均有

良好的削减径流效果,总体比较而言,陶瓷砖+下垫面B的铺装方案在8和16 mm/h降雨强度下均未产生明显径流,在25 mm/h降雨强度下地表径流系数低于2%,为削减径流性能最强的方案;陶瓷砖+下垫面A的铺装方案性能略逊之,差异不显著,亦为控制地表径流的可取方案。

② 在8 mm/h降雨强度下,铺装方案的渗排水性能主要受下垫面结构影响,下垫面B的渗排水性能优于下垫面A。不同铺装材料间渗排水性能表现为陶瓷透水砖>水泥透水砖>沙基透水砖,差异不显著。在16 mm/h降雨强度下,渗排水性能同时受下垫面和铺装材料影响,渗排水性能分别表现为下垫面B>下垫面A,陶瓷透水砖>水泥透水砖>沙基透水砖,差异均显著。在25 mm/h降雨强度下,排水性能主要由铺装材料决定,排水性能表现为陶瓷透水砖>水泥透水砖>沙基透水砖,其中陶瓷和水泥透水砖之间差异不显著;不同下垫面结构对铺装方案的渗排水性能影响不显著。

③ 水泥透水砖比陶瓷透水砖具有更优秀的保水性能,下垫面A相较下垫面B透水慢但保水性能好,因此,针对地下排水系统不完善的区域,可以根据需求选用水泥透水砖+下垫面A的组合方案,将雨水更多地保持在砖体和垫层中,降低地面积水的可能性。

参考文献:

- [1] 晋存田,赵树旗,闫肖丽,等. 透水砖和下凹式绿地对城市雨洪的影响[J]. 中国给水排水,2010,26(1):40-42,46.
Jin Cuntian, Zhao Shuqi, Yan Xiaoli, *et al.* Impacts of permeable brick and sunken lawn on urban stormwater [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(1): 40-42, 46 (in Chinese).
- [2] 王容华,乔朱思远. 海绵城市常用透水铺装材料研究[J]. 建材与装饰,2017,(38):30-31.
Wang Ronghua, Qiao Zhusiyan. Research on permeable pavement materials commonly used in sponge cities [J]. Construction Materials & Decoration, 2017, (38): 30-31 (in Chinese).
- [3] Schluter W, Jefferies C. Modelling the outflow from a porous pavement [J]. Urban Water, 2002, 4(3): 245-253.
- [4] Benedetto A. A decision support system for the safety of airport runways: the case of heavy rainstorms [J]. Transport Res A: Pol, 2002, 36(8): 665-682.
- [5] 侯立柱,冯绍元,韩志文,等. 透水砖铺装地面垫层结构对城市雨水入渗过程的影响[J]. 中国农业大学学报,2006,11(4):83-88.
Hou Lizhu, Feng Shaoyuan, Han Zhiwen, *et al.* Experimental study on impacts of infiltration treated with porous pavement [J]. Journal of China Agricultural University, 2006, 11(4): 83-88 (in Chinese).
- [6] 韩暖. 基于海绵城市理念下的透水砖及铺装设计 [D]. 成都:西南交通大学,2017.
Han Nuan. Design of Permeable Bricks and Pavement Based on the Concept of Sponge City [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 (in Chinese).
- [7] 陈晓燕,张娜,吴芳芳. 降雨和土地利用对地表径流的影响——以北京北护城河周边区域为例[J]. 自然资源学报,2014,29(8):1391-1402.
Chen Xiaoyan, Zhang Na, Wu Fangfang. Impacts of rainfall and land use on urban surface runoff: a case study of area surrounding the north moat in Beijing, China [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(8): 1391-1402 (in Chinese).
- [8] 刘一瑶,郭国文,孟真,等. 基于低影响开发的清华学堂路雨洪管理与景观设计研究[J]. 风景园林,2016,(3):14-20.
Liu Yiyao, Guo Guowen, Meng Zhen, *et al.* Storm-water management and landscape design research on Xue Tang Road of Tsinghua campus based on the low impact development technology [J]. Landscape Architecture, 2016, (3): 14-20 (in Chinese).



作者简介:吴耀珊(1983-),女,广东阳江人,本科,工程师,研究方向为海绵城市建设。

E-mail: 185495838@qq.com

收稿日期:2018-04-02