

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.15.022

透水砖铺装系统产流特征研究

赵 飞¹, 张书函¹, 桑非凡², 秦余朝³

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 北京分公司, 北京 100044; 3. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250014)

摘 要: 透水砖铺装地面是城市雨水资源综合利用技术中的重要组成部分,硬化地面采用透水砖铺装不仅能够提高下垫面的入渗能力,增加地下水补给量,还可以减少地面积水,改善局部生态环境,在城市雨水控制利用系统中发挥着巨大作用。通过开展人工降雨实验,分析了透水砖铺装的入渗特性和降雨产流规律。结果表明,降雨条件下,透水砖铺装地面入渗过程大致分为3个阶段,其遵循初期雨水全部入渗、铺装结构层饱和后降雨全部产流的规律,铺装结构初期入渗速率与降雨强度有关,稳渗率与土壤、垫层性质及前期含水量有关。同时,进一步提出了基于降雨量、容水量和土壤入渗能力的透水砖铺装地面动态径流系数计算公式。

关键词: 透水砖铺装; 动态径流系数; 降雨产流

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)15-0133-06

Runoff Characteristics of Permeable Brick Pavement System

ZHAO Fei¹, ZHANG Shu-han¹, SANG Fei-fan², QIN Yu-chao³

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. Beijing Branch, North China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Beijing 100044, China; 3. Shuifa Planning and Design Co. Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: Permeable brick pavement is an important part of urban rainwater resources comprehensive utilization technology. Permeable brick paving on hardened ground improves the infiltration capacity of the underlying surface, increases the groundwater recharge, reduces the surface ponding, improves the local ecological environment, and plays a prominent role in urban rainwater control and utilization system. This paper analyzed the infiltration characteristics of permeable brick pavement and the law of rainfall runoff through artificial rainfall experiment. The infiltration process of permeable brick pavement could be generally divided into three stages during the process of rainfall, which followed the law of initial rainwater totally infiltrating and rainfall completely changing into runoff after the saturation of the pavement structure layer. The initial infiltration rate of pavement structure was related to rainfall intensity, while the stable infiltration rate was related to properties of soil and underlayer and preliminary moisture content. In addition, the calculation formula of permeable brick pavement surface dynamic runoff coefficient was further proposed based on rainfall, water storage capacity and soil infiltration capacity.

Key words: permeable brick pavement; dynamic runoff coefficient; rainfall runoff

随着城市雨水资源综合利用研究的不断发展, 作为主要措施的透水铺装技术越来越受到人们的重

视。透水铺装不仅能够提高硬化下垫面的入渗能力、增加地下水补给量,还可以减少地面积水、改善局部生态环境,在城市雨水利用系统中发挥着巨大作用^[1-3]。

透水铺装从20世纪30年代起开始使用,早期应用于改善路面的防滑性。国外透水铺装形式多样,包括透水混凝土、透水沥青、混凝土方格砖、透水砖、互嵌式混凝土砖、塑料方格等多种形式^[4]。20世纪70年代开始,透水性铺装被广泛应用于道路建设中^[5-6]。透水铺装属于多层渗滤介质系统路面,具有较大的糙率和透水性,与传统水泥铺装地面相比,雨水入渗量大、产流少、流速低。因此,透水铺装地面的雨水汇集时间延迟,甚至不产生径流。同时,由于上游不透水面产生的径流能够汇入透水面入渗,事实上改变了汇集面结构,导致区域排水量减少、产流时间延长、峰值出现时间滞后^[7-8]。值得一提的是,美国丹佛市的《城市暴雨排水标准手册》(2016年版)给出了不同重现期降雨的综合流量径流系数,其对城市径流管控具有较大的意义。近几年,我国对透水材料的研究也日益深入,透水性材料已经应用在众多道路中^[9-12]。

虽然透水砖在越来越多的工程应用中得到推广,但作为一种新型下垫面类型,其径流特征及表达方法的研究还需要进一步深入。特别是与规划设计工作直接相关的径流系数选取等问题,一直未得到有效解决。人们逐渐发现对于特定下垫面而言,其径流系数并不是一成不变的。就应用最广的混凝土透水砖而言,在不同结构、不同降雨量等诸多因素影响下,其径流系数的取值也存在差异。总而言之,对透水砖地面径流特征与表达方法的研究具有重要意义。

1 材料与方法

人工模拟降雨系统的组成如图1所示。

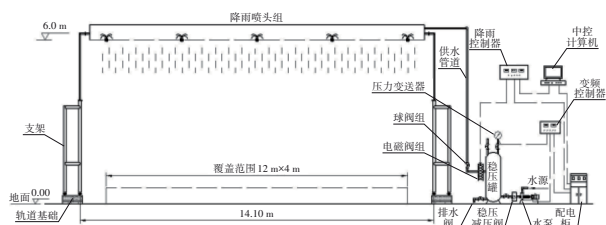


图1 人工模拟降雨系统的组成

Fig.1 Composition of artificial simulated rainfall system

该系统采用叠加喷洒式降雨原理,即在降雨覆盖范围内布置多组降雨喷头,每组喷头单独工作时均可在覆盖范围内形成一场稳定雨强的降雨,各组喷头组合工作就可以形成不同雨强的降雨。实际降雨有效覆盖范围为4 m×12 m,降雨器的支架范围为5 m×14 m,喷头安装高度为6 m。

实验所用材料包括路基土壤、垫层混凝土、垫层砂石等。路基土壤为中粉质壤土(液限为28.8%,塑限为15.5%,塑性指数为13.3%,压缩系数为0.069 MPa⁻¹,压缩模量为23.613 MPa,最大干密度为1.77 g/cm³,饱和含水率为0.399 cm³/cm³,渗透系数为2.28×10⁻⁴ mm/s)。垫层所用材料主要有水泥、中砂碎石、砂砾料、单级配碎石。按相对密度为0.70铺设砂砾料层和中砂层。透水砖铺装地面的面层为混凝土透水砖(80 mm,孔隙率为5%,渗透系数为0.14 cm/s),无砂混凝土作为找平层(30 mm,孔隙率为18%,渗透系数为0.151 cm/s),垫层为无砂混凝土(200 mm,C20透水混凝土,孔隙率为16%,渗透系数为0.394 cm/s)+单级配碎石(200 mm,孔隙率为45%,渗透系数为0.604 cm/s)。铺装层容水量为各层孔隙容水能力之和,按式(1)计算。经计算,铺装层容水量为131 mm。

$$W_p = h_m \delta_m + h_z \delta_z + h_d \delta_d + h_j \delta_j \quad (1)$$

式中: W_p 为透水铺装层容水量, mm; h_m 为面层厚度, mm; δ_m 为面层孔隙率; h_z 为找平层厚度, mm; δ_z 为找平层孔隙率; h_d 为垫层厚度, mm; δ_d 为垫层孔隙率; h_j 为基层厚度, mm; δ_j 为基层孔隙率。

本研究共进行9次不同强度降雨实验,设计降雨为均匀雨型,具体情况见表1。

表1 设计降雨情况

Tab.1 Design rainfall

降雨编号	设计降雨强度/(mm·min ⁻¹)	设计降雨量/mm	实测降雨量/mm	降雨历时/min
1#	0.23	27	26	120
2#	0.43	51	53	120
3#	0.66	79	35	120
4#	0.86	103	77	120
5#	2.28	274	264	120
6#	0.92	110	96	120
7#	1.22	146	138	120
8#	1.73	208	228	120
9#	2.07	248	240	120

通过水管将地表出流管引入监测桶内,采用精度为 0.5 cm 的自记水位计记录桶内水位的变化,并通过水位容积曲线计算产流量。人工降雨过程中,记录透水铺装的地表产流开始时刻、产流量、实测降雨量等数据。

2 透水砖地面降雨产流特征

2.1 入渗产流过程分析

虽然透水砖面层、找平层、透水混凝土垫层、碎石垫层的基本特性存在差别,但结合透水铺装渗透能力和降雨强度可知,实验用透水砖(渗透系数为 0.14 cm/s)在降雨强度为 2.07 mm/min (0.035 mm/s)的条件下亦可完全入渗。根据规范要求,透水砖的渗透系数需不小于 0.1 mm/s,因此对于合格的透水铺装而言,降雨强度不是限制其入渗的影响因素。故而,在分析入渗产流过程时可将各透水铺装层视为一个铺装结构进行整体考量。

对比降雨量和容水量可知,1#~4#的实测降雨量均小于容水量,降雨可以全部入渗透水铺装,故而未发生产流。因此,重点分析 5#~9#的降雨。图 2 为透水砖铺装入渗速率的变化。可知,降雨开始后的较长一段时间内,透水砖铺装保持稳定的入渗速率,基本等于降雨强度。50~70 min 时,铺装结构的表层入渗速率开始下降,并很快降至 0.2~0.3 mm/min,此时透水砖铺装结构基本达到最大含水率,已经有多余的孔隙容纳雨水,故而只能维持基层土壤的入渗能力水平。可以看出,初期降雨可以全部入渗。

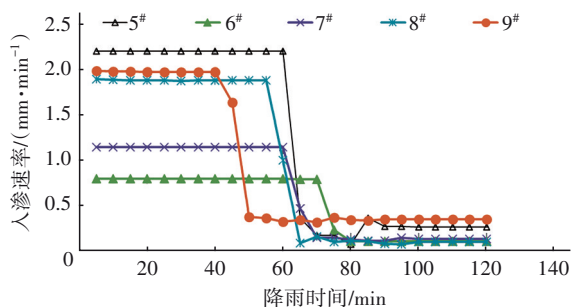


图 2 透水砖铺装入渗速率的变化

Fig.2 Change of infiltration rates of permeable brick pavement

图 3 为透水砖铺装累计降雨量与入渗速率的关系。可以看出,在 5#降雨条件下,当累计降雨量达到 131 mm 左右时,透水砖铺装入渗速率开始下降。相比于容水量,此时铺装层容纳的雨水量与计算容水

量接近,并且略大于容水量。其他降雨情况类似。

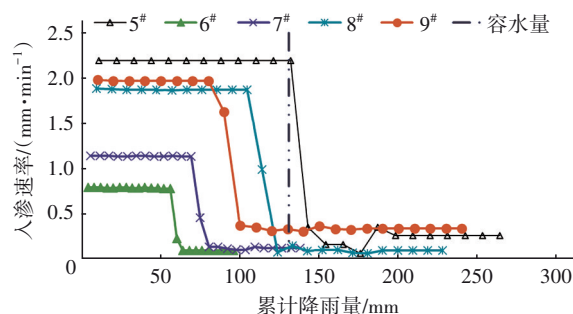


图 3 透水砖铺装累计降雨量与入渗速率的关系

Fig.3 Relationship between cumulative rainfall and infiltration rate of permeable brick pavement

图 4 为透水砖铺装累计降雨量与产流量的关系。可以看出,5#、8#、9#的降雨量较大,其产流量也较大,6#、7#的降雨量较小,产流量也较小。当累计降雨量在容水量附近时,透水砖铺装结构开始产流,之后单位时间的产流量基本与降雨强度相当。需要注意的是,铺装层实际容水量会受到前期降雨的影响,铺装层内的部分孔隙会被前期雨水填充,因此在雨季铺装层的实际容水量会比计算容水量偏小,这也进一步解释了 5#、8#、9#降雨量虽然不同但其产流量却相近的原因,也是各场降雨的实际产流时刻降雨量与计算容水量不完全相等的原因。

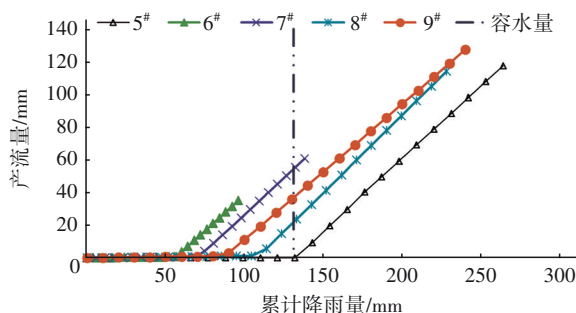


图 4 透水砖铺装累计降雨量与产流量的关系

Fig.4 Relationship between cumulative rainfall and runoff of permeable brick pavement

2.2 场次降雨产流规律分析

分别对透水砖铺装形式的场次径流量、径流系数与降雨量绘制散点图,降雨量与径流量和径流系数的关系如图 5 所示。可以看出,在透水砖铺装产流降雨条件下,径流量与降雨量呈较显著的正相关关系,径流系数与降雨量同样呈现一定的正相关关系。可见,当铺装结构形式确定后,随着降雨量的增大,径流量及径流系数均增加。

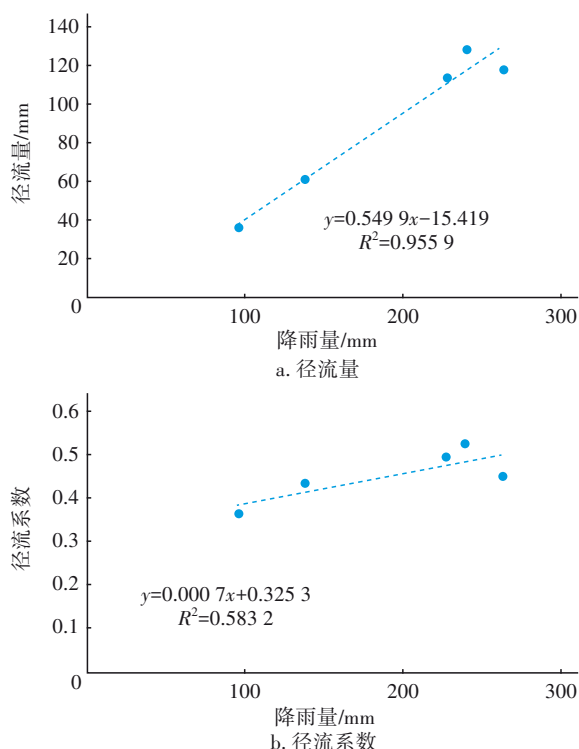


图5 透水砖场次降雨量与径流量和径流系数的关系

Fig.5 Relationship between rainfall and runoff, runoff coefficient in permeable brick pavement

对透水砖铺装形式的场次径流量、径流系数与产流时刻绘制散点图,如图6所示。可见,径流量与产流时刻呈现负相关关系。产流时刻越早,径流量越大;产流时刻越晚,径流量越小。同时,径流系数与产流时刻也呈现负相关关系。产流时刻越早,径流系数越大;产流时刻越晚,径流系数越小。产流时刻是透水铺装开始产生地表径流的时刻,其反映了铺装结构对降雨消纳的能力。由前述分析可知,由于透水铺装的渗透系数体现的渗透雨水能力远大于降雨强度,因此在透水铺装结构孔隙被雨水蓄满之后才会发生地表产流。虽然降雨强度、土壤入渗能力、结构层含水量等因素会影响实际产流时刻发生的早晚,但其最终会反映到雨水对铺装结构孔隙的填充快慢。也就是说,铺装层容水能力的大小将直接体现为产流时刻的早晚。换言之,产流时刻可作为表征透水铺装结构滞蓄能力的指标。若产流时刻较早,说明铺装结构可容纳的雨水较少,降雨后很快就无法入渗过多的雨水,因而较早发生产流;反之,若产流时刻较晚,则说明铺装结构可容纳的雨水较多,降雨后较长时间才会发生产流。可见,产流时刻的早晚与铺装结构的容水量存在一定

的关系。

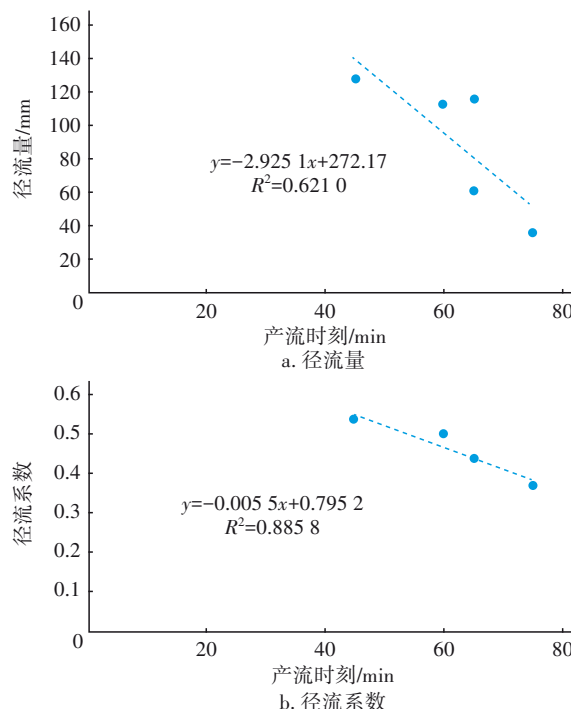


图6 透水砖场次产流时刻与径流量和径流系数的关系

Fig.6 Relationship between runoff time and runoff, runoff coefficient in permeable brick pavement

进一步分析可知,产流时刻之前的所有降雨量应该都经过透水铺装面层进入结构层内,当结构层水量蓄满时才发生产流。因此,若忽略短历时内深层土壤的入渗量,则产流时刻降雨量基本上应该与铺装层的实际容水量相当。

3 透水砖地面动态径流系数

由透水砖地面降雨产流特征可以看出,在不同降雨量情况下,透水砖地面的径流系数也表现出动态变化的趋势,可称之为动态径流系数。透水砖地面动态径流系数受降雨、铺装特性、材料特性等多种因素的影响。根据上述分析,降雨量、容水量是影响径流系数的重要因素,同时基层土壤下渗能力对径流系数产生的影响也不可忽略。为简化透水砖地面动态径流系数的表达形式、方便实际应用,以降雨量、容水量和土壤入渗能力作为主要因素。

3.1 动态径流系数表达形式

透水砖铺装的产流模式为下层土壤超渗产流与上层透水材料蓄满产流的结合体,整体属于混合产流模式。上层透水材料蓄满前不产流,降雨入渗透水铺装结构层内完成吸湿过程,蓄满后降雨全部产流。入渗雨水首先存蓄于透水材料的大孔隙中,

在其内部进行运动,等于土壤稳渗率的部分向下进入土壤,透水材料孔隙被入渗雨水充满后开始产生地表径流,如图 7 所示。由此建立的透水铺装动态径流系数表达式为:

$$\varphi = \frac{P - F - W}{P} = \begin{cases} 0 & P - F - W \leq 0 \\ 1 - S \cdot P^{-1} & P - F - W > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: φ 为径流系数; P 为降雨量,mm; F 为入渗量,mm; W 为容水量,mm; S 为与容水量和土壤入渗相关的物理量, $S=F+W$ 。

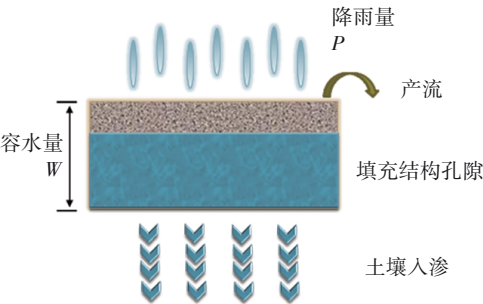


图 7 动态径流系数表达原理示意

Fig.7 Schematic diagram of dynamic runoff coefficient presentation

3.2 公式验证

利用透水砖铺装室内降雨径流实验结果验证公式的实用效果。降雨量采用实验监测数据,具体见表 2。

表 2 透水砖铺装动态径流系数相关实验结果
Tab.2 Relative test results of dynamic runoff coefficient of permeable brick pavement

序号	降雨量/mm	径流量/mm	实测径流系数
1	96	35.02	0.36
2	138	60.39	0.44
3	228	113.98	0.50
4	240	127.33	0.53
5	264	117.36	0.44

利用式(1),代入透水砖铺装的容水量及土壤入渗量计算径流系数,为简化计算,土壤入渗量采用土壤饱和渗透率计算,结果见表 3。可知,在降雨量较小的情况下,通过容水量计算值获得的径流系数误差较大,平均误差绝对值约为 43%,去掉小降雨场次的平均误差绝对值约为 28%。分析原因,在实际应用中,透水铺装材料的检测参数只能反映结构的局部特性,铺装面积越大则各点的差异越明显,因此检测结果无法准确反映结构层的真实容水量状况。

表 3 透水砖铺装动态径流系数计算结果

Tab.3 Calculated results of dynamic runoff coefficient of permeable brick pavement

序号	径流系数实验值	容水量计算值/mm	径流系数计算值 1	误差 1/%	容水量参考值/mm	径流系数计算值 2	误差 2/%	容水量参考平均值/mm	径流系数计算值 3	误差 3/%
1	0.36	131.40	0.00	-100	60.00	0.36	-2	96.35	0.00	-100
2	0.44		0.04	-92	74.75	0.45	2		0.29	-34
3	0.50		0.42	-17	114.00	0.49	-1		0.57	14
4	0.53		0.45	-16	90.00	0.62	16		0.59	11
5	0.44		0.50	12	143.00	0.45	2		0.39	-12

考虑产流时刻之前的所有降雨量应该都经过透水铺装面层进入结构层内,当结构层水量蓄满时才发生产流。若忽略短历时内深层土壤的入渗量,则产流时刻的降雨量应该与容水量相当。因此,采用产流时刻的降雨量作为容水量的实际值(容水量参考值)进行试算,结果表明,径流系数的平均误差绝对值减小到 3%。

由于施工情况、材料差异等多种原因,必将造成实际容水量与计算容水量存在一定的差异,同时每次降雨前铺装结构内会有残余的水量,导致部分孔隙被雨水填充,因此每次降雨时的实际容水量也

会发生较大变化,进一步导致径流系数的变化。这说明实际容水量是影响透水铺装产流的重要因素。但从规划设计角度考虑,需要一个较简便、合理的数值作为设计参考,因此将产流时刻降雨量的均值作为容水量参考值进行试算。可以看出,采用实际容水量参考值计算后,径流系数平均误差的绝对值约为 24%,去掉小降雨场次后平均误差的绝对值约为 5%。可见,采用产流时刻降雨量作为实际容水量时,其值比计算容水量一般偏小,参考值一般为计算值的 46%~87%,平均为 73%。因此在径流系数计算中可采用 W' 代替 W 。 $W' \approx W \times \beta$, β 为调整系数,

其取值在0.5~0.9之间,一般建议取0.73。

4 结论

降雨条件下,透水砖铺装地面遵循初期雨水全部入渗、铺装结构层饱和后降雨全部产流的规律。铺装结构初期入渗速率与降雨强度有关,稳渗率仅与土壤、垫层性质及前期含水量有关。透水砖铺装径流系数不是常数,而是动态变化的。降雨量较小时损失量较大,径流系数较小;随着降雨量的增加,结构层及基层土壤孔隙趋于饱和,径流量开始增大,径流系数也随之增大。这种变化的径流系数可称之为动态径流系数。由此还可以延伸出,在不同降雨量、不同土壤类型、不同铺装结构条件下,径流系数也存在变化。通过建立的动态径流系数计算公式可以方便地估算出透水砖铺装地面在不同结构类型、不同降雨量及不同土壤质地情况下的径流系数,为城市规划和设计阶段的工作提供参考。此外,由于透水砖铺装在实际工程应用中受到污染物堵塞等影响,其渗透性能将随着使用年限逐渐衰减,当铺装层渗透系数小于降雨强度时入渗产流规律也将发生变化。因此,在评估已建成透水铺装地面入渗产流效果时,应注意获取铺装层实际渗透能力及孔隙特性等参数。

参考文献:

- [1] XIE N, AKIN M, SHI X M. Permeable concrete pavements: a review of environmental benefits and durability [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 1605-1621.
- [2] ZHONG R, LENG Z, POON C S. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: a state-of-the-art and state-of-the-practice review [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 183: 544-553.
- [3] VALINSKI N A, CHANDLER D G. Infiltration performance of engineered surfaces commonly used for distributed stormwater management [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 160: 297-305.
- [4] IMRAN H M, AKIB S, KARIM M R. Permeable pavement and stormwater management systems: a review [J]. *Environmental Technology*, 2013, 34: 17-20.
- [5] WATANABE S. Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes [J]. *Water Science and Technology*, 1995, 32(1): 25-32.
- [6] BENEDETTO A. A decision support system for the safety of airport runways: the case of heavy rainstorms [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2002, 36(8): 665-682.
- [7] HARIYADI M, TAMAI H. Enhancing the performance of porous concrete by utilizing the pumice aggregate [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 125: 732-738.
- [8] STØVRING J, DAM T, JENSEN M B. Hydraulic performance of lined permeable pavement systems in the built environment [J]. *Water*, 2018, 10(5): 587.
- [9] 蒋玮, 沙爱民, 肖晶晶, 等. 透水沥青路面的储水-渗透模型与效能 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(1): 72-77.
JIANG Wei, SHA Aimin, XIAO Jingjing, *et al.* Water storage-infiltration model for permeable asphalt pavement and its efficiency [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(1): 72-77 (in Chinese).
- [10] 王哲, 谢杰, 谢强, 等. 透水铺装地面滞蓄净化城镇雨水径流研究进展 [J]. *环境科学与技术*, 2013(S2): 138-143.
WANG Zhe, XIE Jie, XIE Qiang, *et al.* Advances on the research of the detention and purification of urban stormwater runoff by permeable paving [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013(S2): 138-143 (in Chinese).
- [11] YANG J, JIANG G L. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(3): 381-386.
- [12] 王武祥. 透水性路面与透水性混凝土路面砖 [J]. *建筑砌块与砌块建筑*, 2005(2): 35-38.
WANG Wuxiang. Pervious pavement & pervious concrete pavers [J]. *Building Block and Block Building*, 2005(2): 35-38 (in Chinese).

作者简介: 赵飞(1977-), 男, 河北安平人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事城市雨洪资源综合利用及海绵城市相关研究工作。

E-mail: zhaofeihj@126.com

收稿日期: 2019-07-17

修回日期: 2019-09-20

(编辑: 任莹莹)