

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.002

# 雨水径流颗粒物对陶瓷透水砖堵塞的影响

成智文<sup>1</sup>, 耿康<sup>2,3</sup>, 陈晓薇<sup>2,3</sup>, 孙昕<sup>2,3</sup>, 刘婷<sup>1</sup>

(1. 咸阳陶瓷研究设计院有限公司, 陕西 咸阳 712000; 2. 西安建筑科技大学陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:**通过雨水径流水质的实地检测,分析了雨水径流中颗粒物粒径分布规律;采用室内试验模拟了雨水径流引起的陶瓷透水砖堵塞过程,系统研究了雨水径流中颗粒物对陶瓷透水砖堵塞的影响。结果表明:雨水径流中的颗粒物绝大部分平均粒径小于 50  $\mu\text{m}$ ;陶瓷透水砖堵塞机制主要是粒径 20 ~ <50  $\mu\text{m}$  的颗粒物引起的表面堵塞,砖表面截留的颗粒物质量约占总截留颗粒物质量的 75%;陶瓷透水砖表面截留颗粒物的粒径范围与砖表面孔径范围并不一致,主要是因为陶瓷透水砖截留的颗粒物在其表面形成的“类滤膜”的筛滤截留作用。建议合理减小陶瓷透水砖小于 50  $\mu\text{m}$  范围的孔径占比,以提高人工清扫恢复陶瓷透水砖透水性能的效率。

**关键词:**陶瓷透水砖;雨水径流;污染物颗粒;粒径;堵塞

中图分类号:TV121<sup>+</sup>.1 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)06-0007-05

**Impacts of rainwater runoff particles on clogging of ceramic permeable brick** // CHENG Zhiwen<sup>1</sup>, GENG Kang<sup>2,3</sup>, CHEN Xiaowei<sup>2,3</sup>, SUN Xin<sup>2,3</sup>, LIU Ting<sup>1</sup> (1. Xianyang Research & Design Institute of Ceramics, Xianyang 712000, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, MOE, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The size distribution laws of particles in rainwater runoff were analyzed through field measurement of rainwater runoff quality. The impacts of rainwater runoff particles on the clogging of ceramic permeable brick were systematically investigated employing laboratory tests where the process of the clogging of permeable brick resulted from rainwater runoff was simulated. The results show that the average sizes of most particles in the rainwater runoff are less than 50  $\mu\text{m}$ . The surface clogging caused by particles with sizes of 20 ~ <50  $\mu\text{m}$  is the main clogging mechanism of ceramic permeable bricks, and the mass of particles intercepted on the surface contributes 75% to the total mass of particles intercepted in the bricks. The size range of intercepted particles on the brick surface isn't consistent with the pore size range of the superficial brick, which is mainly caused by the filtration interception of formed filter membrane on the permeable brick surface by intercepted particles. The proportion of pore size under 50  $\mu\text{m}$  of a permeable brick is suggested to be reasonably reduced to improve the permeability recovery of a permeable brick by manual cleaning.

**Key words:** ceramic permeable brick; rainwater runoff; pollutant particle; particle size; clogging

随着我国城市化进程的不断推进,城市道路的硬化面积比重不断加大,导致城市内涝问题频发<sup>[1]</sup>。使用透水铺装代替传统的硬化路面,可以有效降低城市的雨洪风险,提高雨水资源利用效率<sup>[2-3]</sup>。龚应安等<sup>[4]</sup>研究表明透水铺装可有效增加下渗雨水量,降低下渗雨水中  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、BOD 等水质指标的质量浓度;但透水铺装应用一段时间后会

发生不同程度的堵塞问题。Borgwardt 等<sup>[5]</sup>发现透水混凝土路面砖在使用 10 a 之后,其透水率降为初始的 10% ~ 25%,更有甚者 1 a 后即失效。Kia 等<sup>[6]</sup>的研究表明,雨水径流中携带的颗粒物在透水铺装材料孔隙中的沉积是造成堵塞的主要原因。宋亚霖等<sup>[7]</sup>发现清除透水砖表面沉积物可从一定程度上恢复其透水性能,但效果有限。

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0701001-02)

作者简介:成智文(1969—),男,教授级高级工程师,主要从事建筑卫生陶瓷材料研究。E-mail:xytczw@sina.com

通信作者:孙昕,教授。E-mail:xinsunn@163.com

为了研究透水砖被雨水径流中颗粒物堵塞的机理及控制方法,需要了解不同降雨条件下雨水径流中颗粒物的粒径和浓度的变化特性,但目前多数雨水径流的研究还是围绕其污染特征展开。城市雨水径流污染是仅次于农业污染的第二大面源污染,雨水径流会携带大量污染物,尤其是降雨初期 1 h 内<sup>[8-9]</sup>;雨水径流中污染物以悬浮物(SS)为主,SS 与 COD、TP、NH<sub>3</sub>-N 的相关性较强,控制雨水径流污染的关键是去除其中的 SS<sup>[10]</sup>。雨水径流中颗粒物一般比表面积较大,是污染物的输送载体,而颗粒物粒径直接影响雨水径流中污染物的物理和化学转化过程<sup>[11]</sup>。总体而言,雨水径流中颗粒物粒径介于 1 ~ 100 μm 的颗粒所占比例相对较大,但不同地区的差异性极大<sup>[12-16]</sup>。

针对陶瓷透水砖表面沉积物清理后透水系数恢复效率过低的问题,本文基于 2018 年西安建筑科技大学校园内 4 场雨水径流的样品,分析雨水中颗粒物粒径分布特征及 SS 质量浓度,以此作为模拟陶瓷透水砖堵塞试验的雨水径流配制的依据,并通过室内试验模拟陶瓷透水砖的堵塞过程,分析堵塞颗粒物与陶瓷透水砖孔径大小的关系,以期陶瓷透水砖在海绵城市建设中的应用提供参考。

## 1 雨水径流颗粒分析

### 1.1 水样采集点布设

对 2018 年 5 月 10 日到 10 月 19 日发生的 4 场

降雨进行了采样分析。天然雨水和地面雨水径流采样地点分别设在西安建筑科技大学科技楼旁路面和路边雨水井中,路面汇水面积约为 30 m<sup>2</sup>、坡度 5°。据现场调查统计,车流量为 50 ~ 100 辆/h,路面清扫时间约在早晨 6 点,以人工清扫为主。

### 1.2 采样方法

采用分时采样方法,在地面降雨径流形成后每隔 10 min 收集 1 次雨水径流。天然雨水利用自制的雨水采样装置采集,雨水采样面积约 12 m<sup>2</sup>,在取样前充分清洗收集雨水的塑料布,保证收集的天然雨水水质不受其他因素干扰。

### 1.3 雨水水质污染水平

4 场雨水径流水质检测结果见表 1,其中地面雨水径流的 SS 质量浓度为 10 ~ 232 mg/L,故陶瓷透水砖堵塞试验中雨水径流的 SS 质量浓度取 200 mg/L。

### 1.4 雨水径流中颗粒粒径随时间的变化规律

2018 年 5 月 21 日和 10 月 19 日两场降雨雨水径流中颗粒物粒径的测定结果如表 2 所示。由表 2 可知,2018 年 5 月 21 日雨水径流产生后的前 10 min 内,颗粒物平均粒径为 13.94 μm,到 20 min、30 min、40 min 时平均粒径分别增大为 17.14 μm、22.14 μm 和 26.32 μm,然后逐渐减小。究其原因,起初降水量较小,径流量较小,随着降雨历时的增加,累积的径流量增大,对地面颗粒物的冲刷能力增强,大颗粒物开始迁移,40 min 时达到峰值,而后累积的径流量变小,降雨径流携带大颗粒物的能力减弱。

表 1 样品水质检测结果及与水质标准的对比

Table 1 Analysis results of sampled water quality and comparisons with water quality standard

项 目	pH 值	$\rho(\text{SS})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
天然雨水	6.49 ~ 8.12	8 ~ 84	0.014 ~ 2.238	0.010 ~ 0.288	8 ~ 88
地面雨水径流	7.21 ~ 8.08	10 ~ 232	1.359 ~ 2.850	0.02 ~ 0.347	38 ~ 200
V 类水质标准	6 ~ 9		2.0	0.4	40
Ⅲ类水质标准	6 ~ 9		1.0	0.2	20

表 2 雨水径流中颗粒物粒径随时间的变化

Table 2 Variations of particle size in rainwater during surface runoff

降雨时间	降雨历时/min	颗粒粒径/μm					平均值
		$d_{10}$	$d_{25}$	$d_{50}$	$d_{75}$	$d_{90}$	
2018 年 5 月 21 日	10	3.82	5.62	16.33	27.63	55.15	13.94
	20	5.35	8.15	18.14	30.53	62.07	17.14
	30	5.25	13.43	27.19	44.69	70.06	22.14
	40	6.47	8.26	30.14	47.37	65.15	26.32
	50	4.33	6.22	23.60	42.20	58.40	20.14
	60	4.11	10.06	21.42	39.96	75.48	18.57
2018 年 10 月 19 日	10	2.86	9.48	27.63	82.80	171.20	25.22
	20	2.20	7.27	24.35	68.78	141.30	20.52
	30	3.02	10.58	34.50	147.60	357.90	33.90
	40	1.64	4.87	12.45	27.37	80.05	11.68
	50	3.73	10.29	21.60	50.95	185.40	22.84
	60	4.95	15.26	45.12	155.90	310.40	42.61

2018年10月19日雨水径流产生后10~20 min内,颗粒物平均粒径由25.22  $\mu\text{m}$ 降为20.52  $\mu\text{m}$ ,30 min时平均粒径变为33.90  $\mu\text{m}$ ,之后随着时间的增长略有起伏,60 min时增加到42.61  $\mu\text{m}$ 。由此可见,在降雨初期,雨水径流量较小,较小的颗粒物随雨水径流迁移,颗粒物的平均粒径20~30  $\mu\text{m}$ ;随着降雨历时的延长,雨水径流量逐渐增大,较大的颗粒物开始随雨水径流迁移,30 min时 $d_{50}$ 和 $d_{75}$ 分别增加到34.50  $\mu\text{m}$ 和147.60  $\mu\text{m}$ 。在50 min左右,降雨强度突然增大,雨水径流量增大,对大颗粒物的冲刷加剧,导致60 min时颗粒物的粒径突增。上述结果说明暴雨强度的大小对于雨水径流中颗粒物的迁移有重要影响。

我国还没有雨水径流中颗粒物粒径的划分标准,而国外普遍采用美国水环境研究基金会制定的标准,分为大颗粒(>5000  $\mu\text{m}$ )、粗颗粒(75~5000  $\mu\text{m}$ )、细粉颗粒(2~75  $\mu\text{m}$ )、溶解固体(<2  $\mu\text{m}$ )4种<sup>[17]</sup>。由表2可知,两场雨水径流中颗粒物属于细粉颗粒,其平均粒径绝大部分小于50  $\mu\text{m}$ 。因此,在应用陶瓷透水砖的区域,粒径小于50  $\mu\text{m}$ 的细粉颗粒物将对陶瓷透水砖的堵塞有重要影响,应该重视路面日常清洁工作,尽量去除路面积存的细小颗粒物以延缓陶瓷透水砖堵塞。

## 2 陶瓷透水砖堵塞特性

### 2.1 试验装置与材料

采用自行研发的室内陶瓷透水砖堵塞过程模拟试验装置(图1),实时模拟真实地面雨水径流引起的陶瓷透水砖堵塞过程。采用1台超声波流速剖面仪精准测量陶瓷透水砖表面水流速度。

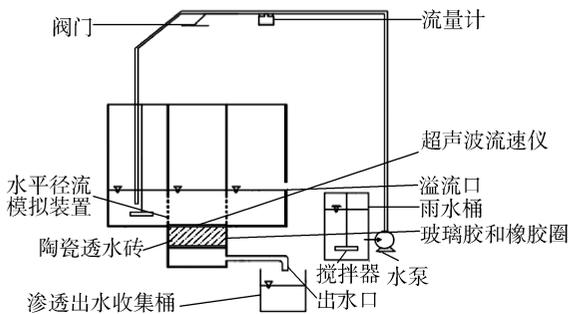


图1 室内陶瓷透水砖堵塞过程模拟试验装置示意图  
Fig.1 Schematic diagram of indoor permeable brick blocking process simulation device

试验用陶瓷透水砖长20 cm、宽10 cm、高5.5 cm,有明显的结构分层:上层厚度约1.1 cm,孔隙较小而紧凑;下层厚度约4.4 cm,孔隙较大且不规则。

### 2.2 试验方法

根据前期雨水径流颗粒物粒径分布的试验结

果,采用粒径较小的细沙和自来水配制模拟的雨水径流,其中SS质量浓度为200 mg/L,粒径10~<20  $\mu\text{m}$ 、20~<50  $\mu\text{m}$ 、50~150  $\mu\text{m}$ 的细颗粒物质量占比分别为50%、45%和5%,采用3块同批次陶瓷透水砖进行对比试验。

试验时先在陶瓷透水砖的4个侧面涂抹中性胶,完全变干称重后放入装置支架部位,并在四周涂抹玻璃胶以保证不漏水。依次打开进水槽内的搅拌器和水泵,缓慢调节进水阀门,使水流均匀喷洒在陶瓷透水砖表面,待水深达到要求后,采用多普勒流速仪测量陶瓷透水砖表面的水流速度,调节进水阀门直至进水速度达到要求后每间隔3 min测量透过陶瓷透水砖的水样体积,计算该陶瓷透水砖的透水系数,当透水系数低于0.01 cm/s时试验结束。取下陶瓷透水砖,测定表面及内部颗粒物质量和粒径分布。

采用高性能全自动压汞仪(AutoPore IV 9500 V1.09型)测定陶瓷透水砖总孔体积、孔径分布等微观参数。

### 2.3 陶瓷透水砖堵塞试验结果与分析

#### 2.3.1 陶瓷透水砖堵塞过程

图2为陶瓷透水砖透水系数变化,可见尽管陶瓷透水砖透水性能存在一定的个体差异性,但3块陶瓷透水砖的透水系数变化趋势相近,即先快速下降,后略有回升,再平稳下降,由此可将陶瓷透水砖堵塞过程分为快速堵塞、堵塞缓解和平稳堵塞3个阶段。在试验开始阶段,粒径较小的颗粒物容易通过陶瓷透水砖的内部孔隙通道而进入砖内部;而粒径较大的颗粒物则容易堵塞在陶瓷透水砖表面的孔隙开口处,并开始在砖表面积累,透水系数快速下降。在约100 min时,水流会对堆积在陶瓷透水砖表面的颗粒物进行一定的冲刷,使得陶瓷透水砖透水系数略有回升,但仍会有部分细颗粒物随水流而继续通过大颗粒物之间的空隙进入陶瓷透水砖内部,导致陶瓷透水砖透水系数产生一定的波动。

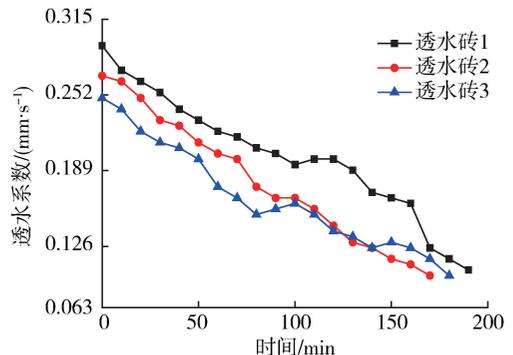


图2 陶瓷透水砖透水系数变化

Fig.2 Change of permeability coefficient of ceramic permeable brick

180 min 之后,陶瓷透水砖透水系数缓慢下降,最终趋稳于 0.01 cm/s,此时透水砖已经堵塞失效。

### 2.3.2 陶瓷透水砖孔径分布规律

将陶瓷透水砖孔径分为小于 50 μm、50 ~ <150 μm、150 ~ <250 μm 和 250 ~ 450 μm 4 个范围,陶瓷透水砖内部和表面不同孔径的体积占比如表 3 所示。

表 3 陶瓷透水砖内部和表面的孔径分布  
Table 3 Size distributions of pores in ceramic permeable bricks %

试样部位	<50 μm	50 ~ <150 μm	150 ~ <250 μm	250 ~ 450 μm
砖内部	19.89	47.62	27.52	4.97
砖表面	23.46	44.01	26.63	5.90

由表 3 可见,陶瓷透水砖表面孔隙和内部孔隙分布中,孔径 150 ~ <250 μm 和 250 ~ 450 μm 的差别不大,而孔径小于 50 μm 和 50 ~ <150 μm 的存在一定的差异,孔径小于 50 μm 的孔隙表面比内部多,孔径 50 ~ <150 μm 的孔隙内部比表面多。这是造成陶瓷透水砖孔隙上下大小分布结构的主要原因。

### 2.3.3 堵塞颗粒物粒径与陶瓷透水砖孔径的关系

由表 4 可知,被堵塞的陶瓷透水砖内部和表面截留最多的颗粒物粒径范围是 20 ~ <50 μm,其次是 50 ~ 100 μm,说明粒径 20 ~ <50 μm 的颗粒物是引起陶瓷透水砖堵塞的主要原因。而陶瓷透水砖表面小于 50 μm、50 ~ <150 μm 孔径的孔隙分别占 23.46%、44.01% (表 3),说明陶瓷透水砖表面截留颗粒物的粒径范围与陶瓷透水砖表面孔径范围并不一致。一方面,模拟的雨水径流中 50 ~ 100 μm 粒径颗粒物的质量占比较小(仅为 5%),远低于 20 ~ <50 μm 粒径颗粒物的质量占比(45%)。另一方面,随着雨水径流不断流经陶瓷透水砖,50 ~ 100 μm 粒径的大颗粒物先被截留在砖表面,20 ~ <50 μm 粒径的小颗粒物开始可以透过大颗粒物之间的缝隙进入砖内部;但后期大、小颗粒物逐渐堆积成一层“类滤膜”,“类滤膜”将截留雨水径流中的大部分颗粒物。

表 4 陶瓷透水砖内部和表面截留颗粒物的粒径分布  
Table 4 Size distributions of sand in blocked ceramic permeable bricks %

陶瓷透水砖编号	截留位置	<10 μm	10 ~ <20 μm	20 ~ <50 μm	50 ~ 100 μm
1	砖表面	13.08	14.43	37.52	34.97
1	砖内部	16.04	15.28	37.59	31.09
2	砖表面	18.17	17.29	35.08	29.46
2	砖内部	22.63	19.21	42.59	15.57
3	砖表面	19.15	19.56	48.28	13.01
3	砖内部	20.18	19.16	43.86	16.80

### 2.3.4 陶瓷透水砖堵塞颗粒物的质量分布

为进一步分析雨水径流中颗粒物在陶瓷透水砖

内的截留特性,对一个过水周期内陶瓷透水砖内外的颗粒物进行了质量守恒分析。在陶瓷透水砖堵塞试验的各阶段,分别测定透过陶瓷透水砖的清水的 SS 质量浓度和水量,得到透过陶瓷透水砖的颗粒物质量;同时测定出水槽中水的 SS 质量浓度和水量,得到其他颗粒物质量。陶瓷透水砖堵塞试验结束后,用毛刷清扫透水砖表面的颗粒物,将扫除的颗粒物进行收集、烘干、称重,得到陶瓷透水砖表面颗粒物截留量。进入陶瓷透水砖系统的总颗粒物质量为进水 SS 质量浓度与进水总量的乘积。根据质量守恒定律,计算陶瓷透水砖内颗粒物截留量。3 块被堵塞的陶瓷透水砖内颗粒物质量分布的计算结果如表 5 所示。

表 5 陶瓷透水砖内外颗粒物质量分布  
Table 5 Mass distributions of sand inside and outside the ceramic permeable bricks g

陶瓷透水砖编号	砖表面截留	砖内部截留	透过沙粒	其他沙粒	总计
1	3.551	1.183	10.200	65.174	80
2	3.654	1.177	10.530	64.731	80
3	3.560	1.164	10.648	64.692	80

根据陶瓷透水砖堵塞试验中颗粒物分布位置的不同,陶瓷透水砖堵塞可以分为表面堵塞和内部堵塞两种类型。结合表 3,砖表面截留颗粒物质量超过砖内部截留颗粒物质量的 2 倍,说明引起表面堵塞的颗粒物明显多于引起内部堵塞的颗粒物。究其原因,粒径较大的颗粒物无法进入砖内部而被截留在表面,其截留量随着过水试验的进行而不断增加。粒径较小的颗粒物部分会被截留在砖表面,部分则会随水流进入砖内部;进入砖内的颗粒物一部分会被截留在砖内的死端孔隙,另一部分则流出陶瓷透水砖。

综合表 4 和表 5,陶瓷透水砖表面截留的颗粒物以粒径 20 ~ <50 μm 和 50 ~ 100 μm 的为主,占比接近 70%,因此粒径 20 ~ 100 μm 的颗粒物是影响表面清扫恢复陶瓷透水砖透水性能的主要因素,其中粒径 20 ~ <50 μm 范围的颗粒物最多。虽然陶瓷透水砖孔隙小于 50 μm 的孔径占比不高(23.46%),但是它极大地影响着陶瓷透水砖透水性能的恢复。在设计陶瓷透水砖的孔隙结构时,建议合理减小小孔径小于 50 μm 的占比,这对于通过人工清扫来恢复陶瓷透水砖的透水性能具有重要的实际意义。

## 3 结论

a. 4 次降雨的地表径流中颗粒物以细粉颗粒为主,粒径小于 50 μm 的细粉颗粒物对陶瓷透水砖的堵塞有重要影响,应重视路面日常清洁工作,以有

效去除粒径小于 50  $\mu\text{m}$  的细粉颗粒物,延缓陶瓷透水砖堵塞。

b. 陶瓷透水砖堵塞可分为内部堵塞和表面堵塞,其中以细粉颗粒物引起的表面堵塞为主。

c. 表面清扫对陶瓷透水砖截留的细粉颗粒物的去除效果有限,在控制地表径流污染物的过程中,应重点关注粒径 20 ~ 50  $\mu\text{m}$  的污染物颗粒。

#### 参考文献:

[ 1 ] 王建富,薛祥山,刘改妮,等. 基于数字模型的西部平原城镇雨水系统规划优化[J]. 中国给水排水,2019,35(7):128-134. (WANG Jianfu, XUE Xiangsheng, LIU Gaini, et al. Optimization of urban rainwater system planning in western plain based on digital model [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(7):128-134. (in Chinese))

[ 2 ] 胡庆芳,王银堂,徐海波,等. 海绵城市建设的 5 点技术思考[J]. 水资源保护,2016,32(5):152-153. (HU Qingfang, WANG Yintang, XU Haibo, et al. Five technical considerations on sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5):152-153. (in Chinese))

[ 3 ] 刘晓晖. 透水砖地面对居住小区热环境影响的研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.

[ 4 ] 龚应安,陈建刚,张书函,等. 透水性铺装在城市雨水下渗收集中的应用[J]. 水资源保护,2009,25(6):65-68. (GONG Yingan, CHEN Jiangan, ZHANG Shuhan, et al. Application of water-permeable pavement in urban rainwater collection [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(6):65-68. (in Chinese))

[ 5 ] BORGWARDT S, 陈义荣. 透水性混凝土路面砖路面现场的长期渗透性能研究[J]. 建筑砌块与砌块建筑,2008,37(2):37-41. (BORGWARDT S, CHEN Yirong. Study on long-term permeability of pervious concrete pavement [J]. Building Blocks and Block Construction, 2008, 37(2):37-41. (in Chinese))

[ 6 ] KIA A, WONG H S, CHEESEMAN C R. Clogging in permeable concrete: a review [J]. Journal of Environment Management, 2017, 193:221-233.

[ 7 ] 宋亚霖,杜新强,刘文娜,等. 海绵城市透水砖堵塞规律试验[J]. 水资源保护,2018,34(6):56-59. (SONG Yalin, DU Xinqiang, LIU Wenna, et al. Experimental research on clogging laws of permeable brick in sponge city [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6):56-59. (in Chinese))

[ 8 ] ZHANG Q Q, WANG X K, HOUP Q, et al. The temporal changes in road stormwater runoff quality, in Chongqing, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(12):9763-9775.

[ 9 ] PENG H Q, LIUY H, WANG W, et al. Event mean

concentration and first flush effect from different drainage systems and functional areas during storms [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(6):5390-5398.

[ 10 ] 李畅,涂晓杰,秦雅琪,等. 南宁市道路初期雨水径流污染物浓度分析[J]. 环境工程,2017,35(7):70-75. (LI Chan, TU Xiaojie, QIN Yaqi, et al. Analysis on pollutants concentration of initial rainwater in Nanning roads [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(7):70-75. (in Chinese))

[ 11 ] FURUMAI H, BALMER H, BOLLER M. Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff [J]. Water Science and Technology, 2002, 46(11/12):413-418.

[ 12 ] 左晓俊,傅大放,李贺. 不同类型降雨公路径流中颗粒粒径及污染物的分布特性[J]. 东南大学学报(自然科学版),2011,41(2):411-415. (ZUO Xiaojun, FU Dafang, LI He. Distribution characteristics of particle size and pollutants in road during different types of rainfall [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(2):411-415. (in Chinese))

[ 13 ] 王建龙,许怀奥,黄涛,等. 北京市道路沉积物的粒径分布及其污染特性研究[J]. 科学技术与工程,2018,18(3):9-14. (WANG Jianlong, XU Huaiao, HUANG Tao, et al. The research of size distribution and pollution characteristics of road sediments in Beijing [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(3):9-14. (in Chinese))

[ 14 ] KIM J Y, SAMALONE J J. Event-based size distributions of particulate matter transported during urban rainfall-runoff events [J]. Water Research, 2008, 42(10/11):2756-2768.

[ 15 ] 朱伟,边博,李磊. 镇江径流颗粒粒径分布及其与污染物的关系[J]. 环境科学学报,2008,28(4):764-771. (ZHU Wei, BIAN Bo, LI Lei. Particle size distribution and associated pollutants in urban runoff in Zhenjiang [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(4):764-771. (in Chinese))

[ 16 ] 王彪,李田,孟莹莹,等. 屋面径流中营养物质的分布形态研究[J]. 环境科学,2008(11):3035-3042. (WANG Biao, LI Tian, MENG Yingying, et al. Distribution form of nutrients in roof runoff [J]. Environmental Science, 2008(11):3035-3042. (in Chinese))

[ 17 ] 程丰,王庆国,刘朝榕,等. 城市路面径流颗粒污染物研究现状分析[J]. 环境工程,2019,37(4):184-188. (CENG Feng, WANG Qingguo, LIU Chaorong, et al. Analysis of the research status of urban road surface runoff particulate pollutants [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(4):184-188. (in Chinese))

(收稿日期:2019-11-28 编辑:熊水斌)