

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.010

透水砖堵塞程度对径流颗粒物冲刷规律的影响

杜晓丽^{1,2}, 郑泽东¹, 尹子杰¹, 杨明哲¹

(1. 北京建筑大学环境与能源工程学院城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044;

2. 北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘要:针对目前透水砖堵塞后引起径流颗粒物输出规律变化不清晰的问题,采用模型模拟、因素分析等方法研究透水砖堵塞对其表面径流颗粒物冲刷规律的影响。结果表明,堵塞程度、降雨重现期是影响透水砖表面径流颗粒物冲刷过程的重要因素,堵塞程度越高、重现期越大,初期冲刷效应越强烈、颗粒物累积冲刷量越大;结合不同降雨重现期下,各堵塞程度透水砖表面径流颗粒物冲刷过程,引入堵塞程度 r 这一动态变化量修正传统指数冲刷模型,建立了适用于不同堵塞程度透水砖的径流颗粒物冲刷模型;透水砖堵塞程度可显著影响径流中颗粒物粒径分布,且与降雨重现期、径流历时存在交互影响作用。

关键词:透水砖堵塞;径流颗粒物;冲刷规律;修正冲刷模型;粒径分布

中图分类号:TV121⁺.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0073-09

Influence of blockage degree of permeable brick on scouring law of runoff particles // DU Xiaoli^{1,2}, ZHENG Zedong¹, YIN Zijie¹, YANG Mingzhe¹ (1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: In view of the unclear change of runoff particle output law caused by permeable brick blockage, the influence of permeable brick blockage on the surface runoff particle scouring law was studied by means of model simulation and factor analysis. The results show that the blocking degree and rainfall return period are important factors affecting the particle scouring process of runoff on the surface of permeable brick. The higher the blocking degree and rainfall return period, the stronger the initial scouring effect and the greater the cumulative scouring amount of particles. Combined with the runoff particle scouring process of permeable bricks with different blocking degrees under different rainfall return periods, the dynamic variation of blocking degree is introduced to modify the traditional exponential scouring model, and the runoff particle scouring model suitable for permeable brick with different blocking degrees is established. The blocking degree of permeable brick can significantly affect the particle size distribution in runoff, and has an interactive effect with rainfall return period and runoff duration.

Key words: permeable brick blockage; runoff particles; scouring law; modified scouring model; particle size distribution

透水铺装是一种常用的径流原位入渗设施,其铺设之初在雨水径流体积削减、径流污染控制等方面发挥显著效能^[1-3]。许多学者对此开展了研究,如赵远玲等^[4]以构造透水砖和普通透水砖为研究对象,在分别模拟不同重现期降雨时发现 2 种透水砖的场次降雨总量控制率均可达到 95% 以上;黄国如等^[5]选取了 20 场实际降雨径流分析透水铺装对

径流量的削减效果,发现透水铺装对径流体积削减率最高可达 86.5%;Zhang 等^[6]发现透水铺装对径流 COD、TN 及 NO₃-N 具有显著净化效果。但是,透水铺装系统在实际应用中面临严重堵塞问题^[7]。地表径流携带的泥沙颗粒、有机物碎屑、油污等路面沉积物会进入透水铺装骨料孔隙,使其渗透性能降低、使用寿命缩短,最终演化成为不透水路面^[8-9]。

Al-Rubaei 等^[10]对瑞典北部两种不同材质透水沥青长期监测发现,运行 18 年和 24 年后,透水沥青渗透系数衰减率均达到 90% 以上;王兴桦等^[11]对西安市多条铺设透水砖道路进行实地调研,发现使用 2 年后的透水砖渗透性能衰减率为 20% ~ 68%。可见,堵塞后的透水铺装系统渗透速率大大降低,对径流体积的削减效果也大打折扣,这必然伴随着对径流污染控制效能降低,使径流污染物输出量增加。

目前,关于透水铺装系统对雨水径流污染控制的研究多集中于其铺设初期对径流中各种污染物的控制效果^[12-13],却鲜有关于其堵塞失效演变而导致径流污染物输出规律变化的相关报道。如 Drake 等^[14]研究了加拿大安大略省某新建停车场内透水沥青对径流水质控制效果,发现其明显削减了 TSS、石油烃及颗粒态重金属浓度;Niu 等^[15]通过搭建实验室透水砖系统模拟装置,发现其对径流中 SS 去除率可达到 79.8% 以上。鉴于径流中多种污染物均附着于颗粒物上同步输出^[16-17],因此本文以典型透水铺装系统——透水砖系统为研究对象,开展透水砖堵塞失效全过程对径流颗粒物冲刷规律影响的研究,并基于传统指数冲刷模型建立与透水砖堵塞程度相适应的径流颗粒物冲刷模型,描述透水砖堵塞动态变化过程对径流颗粒物控制效能的变化趋势,以期为研究透水砖堵塞全过程演化对径流中其他污染物的控制衰减规律影响提供理论支撑,这对衡量评价透水砖在城市排水系统中的作用机制、合理判定其运行维护周期等均具有重要理论意义和实用价值。

1 材料与方法

1.1 试验装置

1.1.1 模拟人行道透水砖系统

模拟人行道透水砖系统为 100 cm × 50 cm × 80 cm (长 × 宽 × 高) 的无盖箱体装置,具体构造如图 1 所示。装置内部由下至上依次装填土基层 20 cm、砾石基层 20 cm 和找平层 4 cm,其中土基层采用素土夯实(夯实度大于 90%)、砾石基层采用级配砾石、找平层和填充砖缝采用级配砂,面层选用普通混凝土透水砖(购于北京爱道爱和科技有限公司),尺寸为 200 mm × 100 mm × 60 mm,此类型透水砖因其优良渗透、抗压性能在步行道、停车场、公园等广泛应用^[4]。铺设所用素土、砾石与砂级配,以及各构造层压实度等要求参照 CJJ/T 188—2012《透水砖路面技术规程》。在装置面层沿长边设置宽 2 cm、坡度 1% 的水泥抹面沟槽,沟槽底距透水砖表面 5 cm,

于沟槽最低处设置取样口 1 用于采集透水砖表面径流;土基层和砾石基层交界处设置取样口 2,用于采集透水砖系统下渗出流。

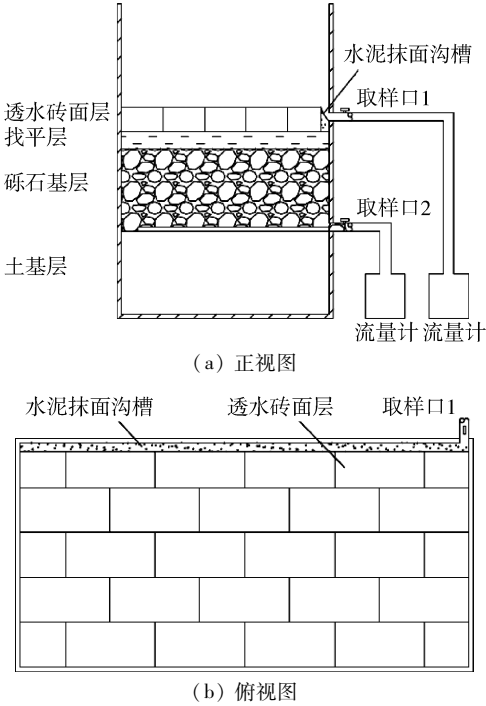


图 1 模拟人行道透水砖系统

Fig. 1 Simulated permeable brick system of sidewalk

1.1.2 模拟降雨装置

自制 100 cm × 100 cm 管道喷淋装置进行模拟降雨,具体构造如图 2 所示。喷淋装置采用 44 根 DN15 PVC 管以平行并排方式连接,单根管每隔 2 cm

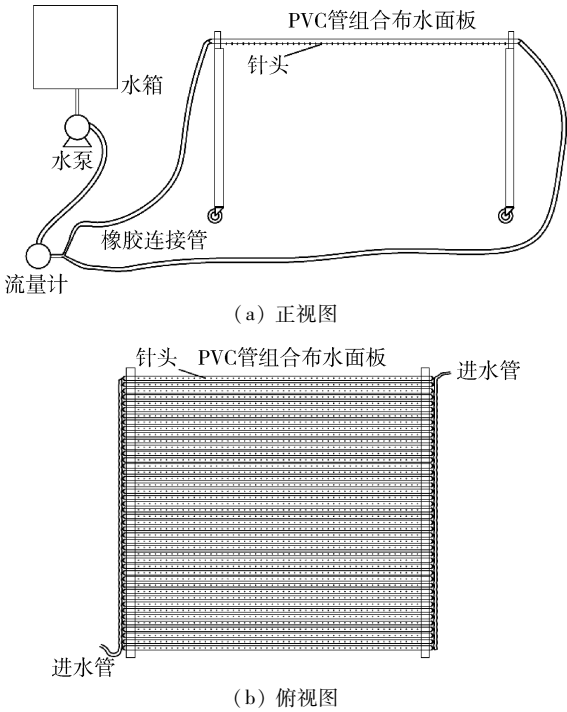


图 2 模拟降雨装置

Fig. 2 Simulated rainfall device

打孔安装针头布水器;根据所需降雨重现期使用水泵出水管端流量计调整模拟降雨量。为确定降雨均匀程度以及实际降雨量和目标降雨量之间的相对误差,在模拟降雨装置下方均匀布置 16 个 1 L 量筒,利用调试好的模拟降雨装置依次模拟北京市重现期为 3 年一遇和 10 年一遇均匀降雨 25 min,随后读取 16 个量筒中体积并换算为降雨强度,采用 Christiansen 均匀系数法评价降雨均匀程度,计算方法见式(1),根据式(2)计算实际降雨量和目标降雨量之间相对误差^[18],结果显示 3 年一遇、10 年一遇情况下 Christiansen 均匀系数分别为 89.61%、85.62%,相对误差分别为 1.25%、2.87%,符合均匀降雨及目标降雨重现期要求。

$$C_{UC} = 100 \left(1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n |D_i - D_{avg}|}{n D_{avg}} \right) \quad (1)$$

式中: C_{UC} 为 Christiansen 均匀系数,%; D_i 为 i 号量筒中的降水量,cm; D_{avg} 为量筒中的平均降水量,cm; n 为量筒数量。

$$I = 60 \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{nt} \quad (2)$$

式中: I 为降雨强度,mm/h; t 为降雨持续时间,min。

1.2 试验设计

根据北京市多年降雨数据确定雨季平均干期时长为 72 h,采用人工清扫和吸尘器清扫(干式吸尘器)并用方式,对北京市大兴区某人行道透水砖干期颗粒沉积物累积质量进行调研监测,获知 0.5 m² 透水砖表面 72 h 干期沉积物累积质量约为 10 g。为保证还原透水砖表面颗粒物实际累积状况,每次降雨前在透水砖装置表面使用多孔筛均匀布撒 10 g 采集的透水砖路面颗粒沉积物。随后,分别模拟北京市重现期为 3 年一遇($I = 49.7$ mm/h)和 10 年一遇($I = 64.8$ mm/h)均匀降雨,以透水砖表面产流时记为 0 时刻,使用 HOB0 RG3-M 型翻斗式雨量计(Onset,美国)实时记录取样口 1 出流量,并使用棕色玻璃瓶收集第 5、10、15、20、25 min 径流水样。场次降雨结束后,读取雨量计示数,得到径流过程逐分钟径流量数据。测定采集径流中的悬浮物(SS)质量浓度,并使用 Mastersizer 3 000 粒度分布仪(Malvern Panalytical,美国)测定其中的颗粒物粒径分布。

1.3 透水砖堵塞程度判定

每次降雨结束后关闭取样口 1 阀门,打开取样口 2 阀门,保持透水砖上方 2 cm 恒水头使用量筒采集取样口 2 入渗出流量,直至取样口 2 出水流量达到稳定后,采用达西定律(式 3)计算渗透系数^[19],

并采用式(4)计算此时透水砖堵塞程度。待透水砖表面干燥、装置内蓄滞雨水排空后,重复上述降雨过程直至透水砖完全堵塞(堵塞程度为 90% 时即认为透水砖系统完全堵塞)。

$$Q = KAJ = KA \frac{H}{L} \quad (3)$$

式中: Q 为透水砖的稳定出流量,m³/s; K 为渗透系数,m/s; H 为常水头高度,m; L 为水流的路径,m; A 为过水断面面积,m²; J 为水力坡度。

$$r = \frac{K_{initial} - K_i}{K_{initial}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: r 为透水砖堵塞程度,%; $K_{initial}$ 为透水砖初始未堵塞时渗透系数,mm/min; K_i 为每次降雨结束后透水砖渗透系数,mm/min。

1.4 指数冲刷模型

采用 Sartor 等^[20]于 1974 年提出的指数冲刷模型定量分析透水砖在不同堵塞程度时的初期冲刷效应,计算公式为

$$W = M_0(1 - e^{-kt}) \quad (5)$$

式中: W 为 t 时刻被冲刷污染物累积质量,g; M_0 为降雨开始时颗粒物累积量,g; k 为冲刷模型系数,与颗粒物粒径、径流量有关,min⁻¹。

2 结果与分析

2.1 透水砖堵塞程度对径流颗粒物冲刷影响

2.1.1 不同堵塞程度透水砖径流中颗粒物初期冲刷效应

当雨水径流污染物初期累积排放速率大于径流累积输送速率时,即认为存在初期冲刷效应。采用无量纲 $M(V)$ 曲线法(曲线全部位于 45° 度对角线以上认为存在初期冲刷现象)、 F_{30} 参数法(F_{30} 是指场次降雨累积径流比为 30% 时,对应的累积污染物负荷比与累积径流比之比, F_{30} 值大于 1.67 时认为存在初期冲刷现象)分别对不同堵塞程度的透水砖径流颗粒物初期冲刷效应进行定性、定量判定^[21-22]。一般而言, $M(V)$ 曲线距对角线离散程度越大、 F_{30} 值越大时,初期冲刷效应越强烈。

选取透水砖堵塞程度 r 为 20%、50%、70% 及 90%,降雨重现期 3 年一遇和 10 年一遇时场次降雨径流过程,绘制径流冲刷颗粒物 $M(V)$ 曲线,并计算 F_{30} 值,结果分别如图 3 和表 1 所示。由图 3 可见,不同降雨重现期条件下,各堵塞程度透水砖的径流颗粒物 $M(V)$ 曲线均位于 45° 度对角线以上,且 F_{30} 值均在 1.67 以上,说明无论透水砖堵塞与否,其表面径流颗粒物均存在初期冲刷效应。但在相同堵塞程度下,10 年一遇降雨条件下 F_{30} 值均高于 3 年一

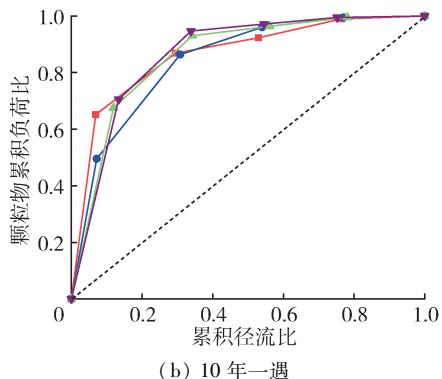
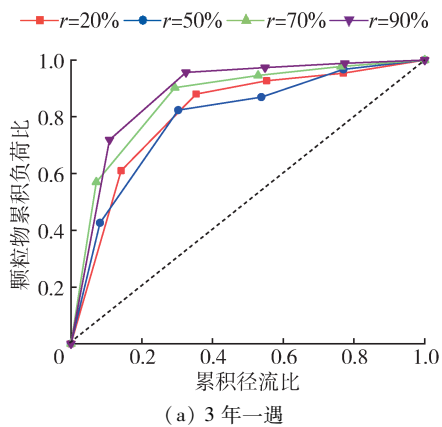


图3 不同降雨重现期时各堵塞程度透水砖径流颗粒物 $M(V)$ 曲线

Fig.3 $M(V)$ curves of runoff particles in permeable brick with different blocking degrees under different rainfall return periods

表1 不同降雨重现期时各堵塞程度透水砖径流颗粒物 F_{30} 值
Table 1 F_{30} values of runoff particles in permeable brick with different blocking degrees under different rainfall return periods

降雨重现期 P/a	F_{30} 值			
	$r=20\%$	$r=50\%$	$r=70\%$	$r=90\%$
10	2.89	2.83	2.93	2.99
3	2.70	2.72	2.92	2.95

遇降雨,说明降雨重现期越大其表面径流颗粒物初期冲刷效应越明显;这是由于降雨强度较大对地表颗粒物的冲击力度较高,易打破干期累积时颗粒物与下垫面表层的平衡稳定附着状态,且径流量增大为颗粒物冲刷提供了水动力条件,导致其迁移输送率更高^[22-25]。由表1可见,在同一降雨重现期下,透水砖堵塞进程后期径流的 F_{30} 值大于堵塞中期和前期,说明透水砖堵塞程度越高,初期冲刷效应越明显;这是因为随着堵塞进程发展,透水砖内部孔隙空间减小,表面颗粒物在透水砖内部向下迁移能力减弱,径流冲刷携带的颗粒物量增加^[26],同时堵塞引起透水砖入渗量减小,间接引起径流量增大对颗粒物冲刷作用加剧。

2.1.2 不同堵塞程度透水砖表面径流颗粒物冲刷模型

应用指数冲刷模型对颗粒物累积冲刷质量随径流历时变化进行模拟,结果如图4所示。

■ $P=3a$ — $P=3a$ 拟合曲线 ▲ $P=10a$ — $P=10a$ 拟合曲线

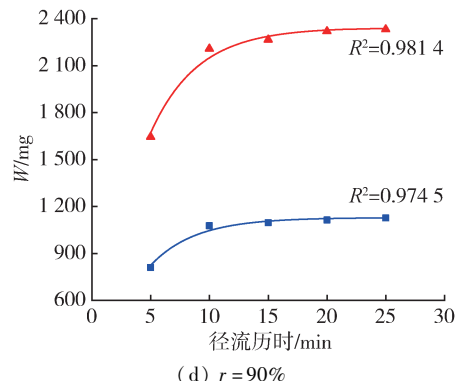
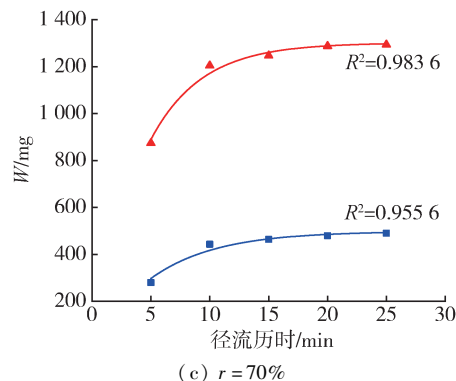
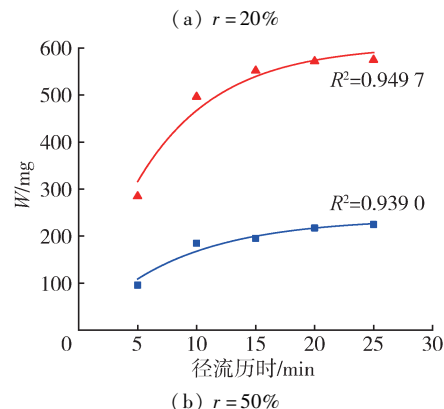
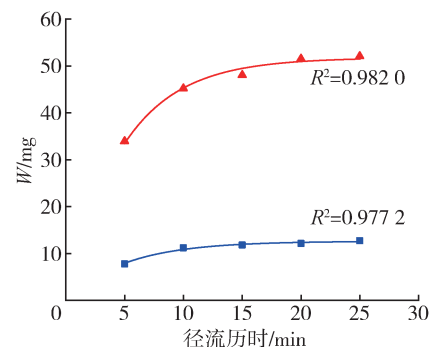


图4 不同降雨重现期下各堵塞程度透水砖径流颗粒物指数冲刷模型模拟结果

Fig.4 Simulation results of exponential scouring model of runoff particles in permeable brick with different blocking degrees under different rainfall return periods

由图 4 可见,指数冲刷模型可较好地描述不同堵塞程度透水砖径流颗粒物冲刷过程 (R^2 均大于 0.84),堵塞程度和降雨重现期均未对拟合曲线趋势产生太大影响。随径流历时增加,虽然径流中颗粒物累积冲刷质量不断增加,但颗粒物冲刷速率不断减小,说明冲刷强度逐渐减弱,20 min 后颗粒物冲刷质量基本达到稳定。此外,发现透水砖堵塞程度越高、降雨重现期越大,径流初期(10 min 以内)颗粒物冲刷速率越大,说明径流初期颗粒物冲刷强度较大、初期冲刷效应更强烈,这与 $M(V)$ 曲线法和 F_{30} 参数法分析结果一致。

相同堵塞程度时,降雨重现期越大,透水砖表面径流颗粒物冲刷质量越多,如堵塞程度为 20% 时,10 年一遇降雨条件下径流颗粒物冲刷质量为 3 年一遇的 4 倍以上。同一降雨重现期下,随堵塞程度增加透水砖表面径流颗粒物冲刷质量逐渐增加;如降雨重现期为 10 年一遇时,堵塞程度为 90% 的场次降雨径流中颗粒物冲刷质量为堵塞程度为 20% 的 10 倍以上。可见,透水砖堵塞程度与降雨重现期不仅影响其表面径流颗粒物初期冲刷效应,同时也会影响累积冲刷质量总体水平。

2.1.3 基于透水砖堵塞程度的表面径流颗粒物冲刷模型

将不同堵塞程度透水砖径流颗粒物冲刷过程应用指数冲刷模型进行拟合,得到的拟合参数及相关系数见表 2,其中 3 年一遇降雨强度较小,堵塞程度为 0%、10% 时未形成径流,因此无拟合数据。由表 2 可见,相同堵塞程度下,降雨重现期越大,拟合得到的 M_0 值越大;在同一降雨重现期时,透水砖堵塞程度越高,拟合得到的 M_0 值越大。这是由于透水砖堵塞颗粒物主要滞留于面层^[8],堵塞程度越高,面层堵塞颗粒物滞留量越大,可供冲刷的颗粒物越多;且降雨强度越大,冲刷作用越明显,致使可供冲刷的 M_0 值越大。

研究表明,系数 k 可表征冲刷效应强弱,受冲刷颗粒物粒径效应与径流水动力条件共同影响,即受颗粒物自身迁移能力与径流冲刷携带能力共同影响,表现为 k 随冲刷颗粒物粒径增大而减小、随径流量增加而增大。

由表 2 可见,相同堵塞程度下,降雨重现期增大引起径流量增加,拟合得到的系数 k 值增大,表明透水砖表面颗粒物冲刷作用较明显,这与 2.1.1 节的结论一致。而在同一降雨重现期时,系数 k 则随透水砖堵塞程度增加呈先减后增趋势;这是由于在

表 2 透水砖径流颗粒物指数冲刷模型拟合参数
Table 2 Fitting parameters of exponential scouring model of runoff particles in permeable brick

$r/\%$	$P = 10 \text{ a}$			$P = 3 \text{ a}$		
	M_0/g	k/min^{-1}	R^2	M_0/g	k/min^{-1}	R^2
0	0.02	0.22	0.99			
10	0.05	0.22	1.00			
20	0.52	0.21	0.98	0.01	0.20	0.98
30	0.13	0.22	1.00	0.03	0.20	0.99
40	0.48	0.20	0.99	0.10	0.13	0.84
50	0.61	0.15	0.95	0.24	0.12	0.94
60	1.20	0.22	0.99	0.35	0.14	0.88
70	1.30	0.23	0.98	0.50	0.18	0.96
80	1.96	0.24	0.97	0.78	0.24	0.97
90	2.34	0.25	0.98	1.13	0.26	0.97

堵塞初期透水砖孔隙较大,入渗性能较强导致径流量较小,同时大粒径颗粒物可进入透水砖内部,径流冲刷携带的多为截留于面层的小粒径颗粒物,使得粒径效应占主导,所以系数 k 较大;堵塞中期透水砖孔隙逐渐减小,径流量虽有所增加,但小粒径颗粒物更易于进入透水砖内部、大粒径颗粒难以进入而被冲刷,粒径效应的影响大于水动力增强作用,所以系数 k 减小;透水砖堵塞末期,孔隙堵塞明显引起表面径流量大幅增加,同时大、小粒径颗粒均难以进入透水砖内部而被冲刷,所以系数 k 较大。

由上可见,透水砖堵塞程度 r 与指数冲刷模型参数 M_0 、 k 存在相关关系,因此将透水砖堵塞程度与模型参数进行拟合,分析指数冲刷模型参数与透水砖堵塞程度之间的定量关系,建立基于透水砖堵塞程度的表面径流颗粒物冲刷模型。透水砖堵塞程度与模型参数拟合曲线、拟合公式分别如图 5 和表 3 所示。

由图 5 可见,径流颗粒物指数冲刷模型参数 M_0 和 k 与透水砖堵塞程度 r 具有显著相关性,相关系数较高;其中 M_0 与透水砖堵塞程度 r 符合指数相关, k 与透水砖堵塞程度 r 呈先降低后增加趋势。由表 3 可见,降雨重现期为 3 年一遇时,两个参数与透水砖堵塞程度 r 的拟合效果均优于降雨重现期为 10 年一遇;说明在降雨强度较小时以透水砖堵塞程度 r 为单一参数可以较好表达不同堵塞程度透水砖表面径流颗粒物冲刷规律。由此,当获知透水砖堵塞程度 r 时,便可快速预测不同堵塞程度透水砖径流颗粒物输出负荷。

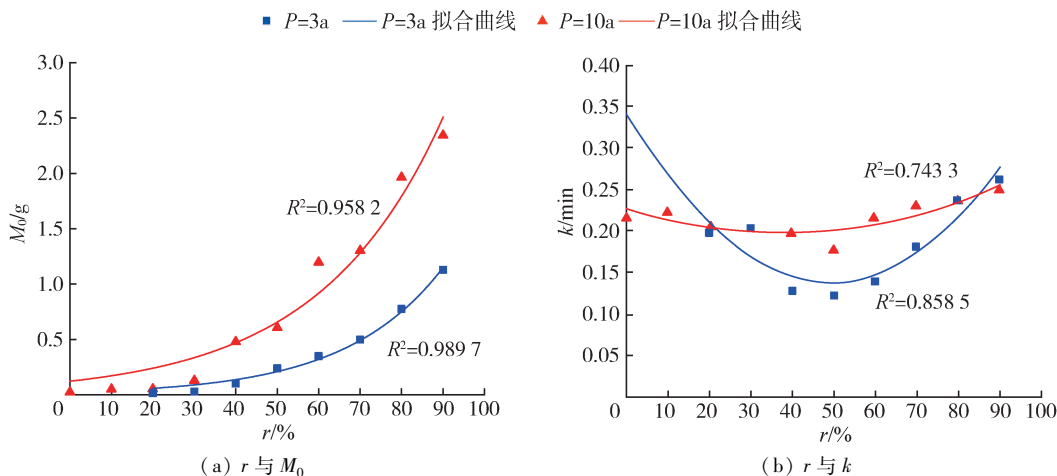


图5 透水砖堵塞程度与径流颗粒物指数冲刷模型参数拟合关系

Fig.5 Fitting relationship between blocking degree of permeable brick and parameters of exponential scouring model

表3 基于透水砖堵塞程度 r 的径流颗粒物指数冲刷修正模型

Table 3 Modified exponential scouring model of runoff particles based on blocking degree of permeable brick

降雨重现期 P/a	模型参数拟合公式	R^2	修正后指数冲刷模型
3	$M_0 = 0.0251e^{4.25r}$	0.9897	$W = 0.0251e^{4.25r}(1 - e^{-kt})$
	$k = 0.8445r^2 - 0.8345r + 0.343$	0.8585	
10	$M_0 = 0.123e^{3.35r}$	0.9582	$W = 0.123e^{3.35r}(1 - e^{-kt})$
	$k = 0.1979r^2 - 0.1468r + 0.226$	0.7433	

2.2 透水砖堵塞程度对径流输出颗粒物粒径分布的影响

2.2.1 不同堵塞程度透水砖径流中颗粒物粒径分布

选取透水砖不同堵塞节点时所采集的各历时径流样品进行粒度分析,结果如图6所示。随径流历时变化,不同降雨重现期时各堵塞程度透水砖表面径流颗粒物粒径分布变化趋势一致:即粒径大于 $500\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比随历时增加逐渐增加,而粒径小于 $150\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比则随历时增加逐渐减少。这是由于透水砖表面初期径流量较小,冲刷携带的主要为小粒径颗粒物,而产流后期透水砖表面径流量增加对大粒径颗粒物冲刷携带能力增强所致。在堵塞中后期,降雨重现期为10年一遇时透水砖径流中,粒径大于 $500\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比比较3年一遇时有所增加,粒径小于 $150\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比有所减少,说明降雨强度增大对大颗粒物冲刷增强作用更明显。在同一降雨重现期时,随堵塞程度增加,径流中粒径小于 $150\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比明显提高。如3年一遇降雨条件时,堵塞程度由20%增加至90%,径流中粒径小于 $150\mu\text{m}$ 颗粒物在径流5min时的体积占比由33%增长至81%,粒径大于 $500\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比由63%减少至16%,说明高堵塞程度下透水砖表面小粒径颗粒物冲刷作用更强。综上,堵塞程度、降雨重现期与径流历时均对透水砖径流中颗粒物粒径分布产生影响;堵塞程度增

加导致透水砖径流中粒径小于 $150\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比增加,而降雨重现期增大、径流历时增加均会引起粒径大于 $500\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比增加。

2.2.2 透水砖堵塞程度与冲刷颗粒物粒径分布相关性

为进一步识别透水砖堵塞程度与径流颗粒物粒径分布相关性,并明确降雨重现期、径流历时的作用,对透水砖堵塞程度与所采集不同历时径流中各粒径颗粒物体积占比进行相关性分析,结果如表4所示。由表4可见,在不考虑其他因素影响时,透水砖堵塞程度与径流中粒径小于 $150\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比呈正相关关系,与径流中粒径大于 $500\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比呈负相关关系。进一步考虑降雨重现期、径流历时因素影响,并进行偏相关分析,发现上述正相关、负相关系数绝对值均增大,表明以上两因素对透水砖堵塞程度与径流中粒径小于 $150\mu\text{m}$ 、大于 $500\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比的相关性均具有增强作用,证明降雨重现期、径流历时确是影响径流颗粒物粒径分布的重要因素。结合2.2.1节来看,降雨重现期、径流历时因素的相关性增强作用效果与堵塞程度对粒径分布的影响效果相反,即降雨重现期越大、径流历时越长,会削弱堵塞程度的影响,导致径流中粒径小于 $150\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比减少趋势更显著,而粒径大于 $500\mu\text{m}$ 颗粒物体积占比增加趋势更显著。由此得出,透水砖堵塞程度对径流中颗粒物粒径分布的影响受降雨重现期、径流历时因素牵

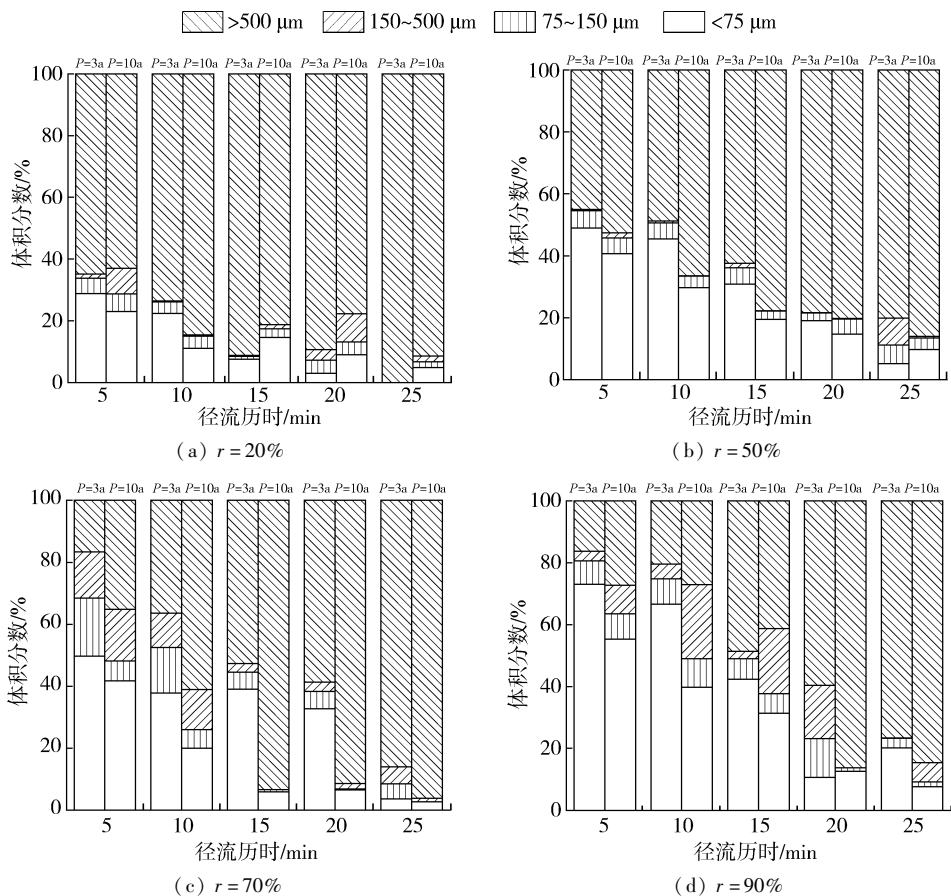


图6 不同降雨重现期时各堵塞程度透水砖径流颗粒物粒径变化

Fig. 6 Change of particle size in permeable brick runoff with different blocking degrees under different rainfall return periods

表4 堵塞程度和不同粒径颗粒物体积占比相关性分析

Table 4 Correlation analysis between blocking degree and volume proportion of particles with different particle sizes

相关分析	控制因素	相关变量	相关系数	显著性
皮尔逊相关		堵塞程度与粒径小于 150 μm 颗粒体积占比	0.414	0.001
		堵塞程度与粒径大于 500 μm 颗粒体积占比	-0.465	0.001
偏相关	降雨重现期	堵塞程度与粒径小于 150 μm 颗粒体积占比	0.432	0.001
		堵塞程度与粒径大于 500 μm 颗粒体积占比	-0.472	0.001
	径流历时	堵塞程度与粒径小于 150 μm 颗粒体积占比	0.619	0.001
		堵塞程度与粒径大于 500 μm 颗粒体积占比	-0.720	0.001

制,存在交互作用,并非简单的同向加和作用。

3 结 论

透水砖系统的“面层累积-垂直堵塞-径流冲刷”颗粒物迁移模式与传统不透水下垫面简单的“表面累积-径流冲刷”模式不同;透水砖堵塞全过程动态变化持续影响表面径流中颗粒物冲刷质量、粒径分布,使其冲刷规律较不透水下垫面存在较大差异。本文主要结论有:

a. 堵塞程度、降雨重现期会影响透水砖表面径流颗粒物初期冲刷效应,透水砖堵塞程度越高、降雨重现期越大,径流颗粒物的初期冲刷效应越明显。

b. 指数冲刷模型可较好地描述各堵塞节点时透水砖径流颗粒物冲刷过程,将堵塞程度这一动态

变化量引入传统指数冲刷模型,建立了基于透水砖堵塞程度的透水砖表面径流颗粒物冲刷模型。

c. 透水砖堵塞程度可显著影响径流中颗粒物粒径分布,且与降雨重现期、径流历时存在交互影响作用;堵塞程度增加导致透水砖径流中粒径小于 150 μm 颗粒物体积占比增加,而降雨重现期增大、径流历时增加则会引起粒径大于 500 μm 颗粒物体积占比增加。

参考文献:

- [1] LI H Y, LI Z F, ZHANG X R, et al. The effect of different surface materials on runoff quality in permeable pavement systems [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(26) : 21103-21110.

- [2] 韦甦,吴力平,李军. 透水砖应用于海绵城市建设的若干问题探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(12): 1-5. (WEI Su, WU Liping, LI Jun. Discussion on the application of water permeable brick in the construction of sponge city[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(12): 1-5. (in Chinese))
- [3] 李永坤,薛联青,邸苏闯,等. 基于 Infoworks ICM 模型的典型海绵措施径流减控效果评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 398-405. (LI Yongkun, XUE Lianqing, DI Suchuang, et al. Evaluation of runoff reduction effect of typical sponge measures based on Infoworks ICM model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 398-405. (in Chinese))
- [4] 赵远玲,王建龙,李璐菡,等. 不同类型透水砖对雨水径流水量的控制效果[J]. 环境工程学报, 2020, 14(3): 835-841. (ZHAO Yuanling, WANG Jianlong, LI Luhan, et al. Effect of different types of permeable brick on the stormwater runoff quantity control[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(3): 835-841. (in Chinese))
- [5] 黄国如,赵晓莺,麦叶鹏. 低影响开发措施对雨水径流的控制效应[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 29-36. (HUANG Guoru, ZHAO Xiaoying, MAI Yepeng. Control effect of low impact development measures on rainwater runoff[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 29-36. (in Chinese))
- [6] ZHANG Z Y, LI Z F, ZHANG X R, et al. Systematically investigated the influences of permeable pavement materials on the water quality of runoff; batch and column experiments[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2018, 229(5): 155-163.
- [7] RAZZAGHMANESH M, BEECHAM S. A review of permeable pavement clogging investigations and recommended maintenance regimes[J]. Water, 2018, 10(3): 337-345.
- [8] ZHANG J, MA G D, DAI Z X, et al. Numerical study on pore clogging mechanism in pervious pavements[J]. Journal of Hydrology, 2018, 565: 589-598.
- [9] KIA A, WONG H S, CHEESEMAN C R. Clogging in permeable concrete; a review[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193: 221-233.
- [10] AL-RUBAEI A M, STENGLEIN A L, VIKLANDER M, et al. Long-term hydraulic performance of porous asphalt pavements in northern Sweden[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(6): 499-505.
- [11] 王兴桦,侯精明,李丙尧,等. 多孔透水砖下渗衰减规律试验研究[J]. 给水排水, 2019, 55(增刊1): 68-71. (WANG Xinghua, HOU Jingming, LI Bingyao, et al. Experimental study on seepage attenuation law of porous permeable brick[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(Sup1): 68-71. (in Chinese))
- [12] OSTROM T K, DAVIS A P. Evaluation of an enhanced treatment media and permeable pavement base to remove stormwater nitrogen, phosphorus, and metals under simulated rainfall[J]. Water Research, 2019, 166: 115071-115082.
- [13] 王俊岭,张智贤,秦全城,等. 改良型透水铺装对弱透水土质地区的水质控制试验[J]. 水资源保护, 2019, 35(3): 63-68. (WANG Junling, ZHANG Zhixian, QIN Quancheng, et al. Water quality control test of modified permeable pavement in weak permeable soil quality area[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 63-68. (in Chinese))
- [14] DRAKE J, BRADFORD A, VAN S T. Stormwater quality of spring-summer-fall effluent from three partial-infiltration permeable pavement systems and conventional asphalt pavement[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 139: 69-79.
- [15] NIU Z G, LV Z W, ZHANG Y, et al. Stormwater infiltration and surface runoff pollution reduction performance of permeable pavement layers[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(3): 2576-2587.
- [16] 武俊良,任玉芬,王雪梅,等. 城市道路径流的排污特征[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3691-3696. (WU Junliang, REN Yufen, WANG Xuemei, et al. Characterization of pollutant wash-off in the urban stormwater[J]. Environmental Science, 2015, 36(10): 3691-3696. (in Chinese))
- [17] 张智贤,王俊岭,秦全城,等. 改良型透水铺装对弱透水土质地区 SS 的去除效果试验[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 76-79. (ZHANG Zhixian, WANG Junling, QIN Quancheng, et al. Experiment on removal effect of improved permeable pavement on SS in weak permeable soil area[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 76-79. (in Chinese))
- [18] RICKS M D, HORNE M A, FAULKNER B, et al. Design of a pressurized rainfall simulator for evaluating performance of erosion control practices[J]. Water, 2019, 11(11): 2386-2403.
- [19] LUCKE T, BOOGAARD F, VEN F. Evaluation of a new experimental test procedure to more accurately determine the surface infiltration rate of permeable pavement systems[J]. Urban, Planning and Transport Research, 2014, 2(1): 22-35.
- [20] SARTOR J D, BOYD G B. Water pollution aspects of street surface contaminants[M]. Washington D. C.: Government Printing Office, 1972.
- [21] KIM L H, KAYHANIAN M, ZOH K D, et al. Modeling of highway stormwater runoff[J]. Science of the Total Environment, 2005, 348(1/2/3): 1-18.
- [22] 陈莹,王昭,吴亚刚,等. 降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(7): 2828-2835. (CHEN Ying, WANG Zhao, WU

- Yagang, et al. Impacts of rainfall characteristics and occurrence of pollutant on effluent characteristics of road runoff pollution[J]. Environmental Science, 2017, 38(7): 2828-2835. (in Chinese))
- [23] 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 等. 不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3328-3337. (SHAN Xihuan, XIE Wenxia, LIAO Yunjie, et al. Influence of impervious surface roughness on accumulation and erosion of urban non-point source particles[J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3328-3337. (in Chinese))
- [24] 李佳, 谢文霞, 姜智绘, 等. 海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4113-4123. (LI Jia, XIE Wenxia, JIANG Zhihui, et al. Transition of particulate pollutant in the parcel-based catchment of sponge city[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4113-4123. (in Chinese))
- [25] EGODAWATTA P, THOMAS E, GOONETILLEKE A. Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall[J]. Water Research, 2007, 41(13): 3025-3031.
- [26] 成智文, 耿康, 陈晓薇, 等. 雨水径流条件对陶瓷透水砖快速堵塞的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(5): 116-120. (CHENG Zhiwen, GENG Kang, CHEN Xiaowei, et al. Effect of stormwater runoff conditions on rapid clogging of ceramic permeable brick[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5): 116-120. (in Chinese))
- (收稿日期: 2021-08-08 编辑: 王芳)
-
- (上接第 66 页)
- [8] 方子杰, 柯胜绍. 对坚持“空间均衡”破解水资源短缺问题的思考[J]. 中国水利, 2015(12): 21-24. (FANG Zijie, KE Shengshao. Highlighting “spatial balance” to solve water shortage problem[J]. China Water Resources, 2015(12): 21-24. (in Chinese))
- [9] 金菊良, 酆建强, 吴成国, 等. 水资源空间均衡研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 47-60. (JIN Juliang, LI Jianqiang, WU Chengguo, et al. Research progress on spatial equilibrium of water resources[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2019, 40(6): 47-60. (in Chinese))
- [10] 杨亚锋, 巩书鑫, 王红瑞, 等. 水资源空间均衡评估模型构建及应用[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 33-44. (YANG Yafeng, GONG Shuxin, WANG Hongrui, et al. New model for water resources spatial equilibrium evaluation and its application[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 33-44. (in Chinese))
- [11] 夏帆, 陈莹, 窦明, 等. 水资源空间均衡系数计算方法及其应用[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 52-57. (XIA Fan, CHEN Ying, DOU Ming, et al. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 52-57. (in Chinese))
- [12] 范嘉伟, 黄锦林, 袁明道, 等. 广州市用水结构空间均衡差异性分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 82-86. (FAN Jiawei, HUANG Jinlin, YUAN Mingdao, et al. Analysis of spatial equilibrium of water consumption structure in Guangzhou City[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 82-86. (in Chinese))
- [13] 金菊良, 徐新光, 周戎星, 等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 1-6. (in Chinese))
- [14] 左其亨, 韩春辉, 马军霞. 水资源空间均衡理论应用规则和量化方法[J]. 水利水运工程学报, 2019(6): 50-58. (ZUO Qiting, HAN Chunhui, MA Junxia. Application rules and quantification methods of water resources spatial equilibrium theory[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 50-58. (in Chinese))
- [15] 左其亨, 韩春辉, 马军霞, 等. 水资源空间均衡理论方法及应用研究框架[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 113-118. (ZUO Qiting, HAN Chunhui, MA Junxia, et al. Theoretical method and applied research framework of water resources spatial equilibrium[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 113-118. (in Chinese))
- [16] 酆建强, 王平, 何君, 等. 水资源空间均衡理论方法与对策措施研究[J]. 中国水利, 2019(23): 23-25. (LI Jianqiang, WANG Ping, HE Jun, et al. Study on theory methodology and countermeasures about water resources spatial equilibrium[J]. China Water Resources, 2019(23): 23-25. (in Chinese))
- [17] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 一体化进程中京津冀水资源利用与城市经济发展关系时空分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 29-39. (YU Haozhe, LI Lijuan, LI Jiuyi. Temporal and spatial relationship between water resources utilization and urban economic development in Beijing-Tianjin-Hebei Region during integration process[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 29-39. (in Chinese))
- [18] 周斌, 桑学锋, 秦天玲, 等. 我国京津冀地区良性水资源调控思路及应对策略[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 6-10. (ZHOU Bin, SANG Xuefeng, QIN Tianling, et al. Regulation ideas and coping strategies of virtuous water resources in Beijing-Tianjin-Hebei Region of China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 6-10. (in Chinese))
- (收稿日期: 2021-02-22 编辑: 熊水斌)