DOI:10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 21. 020

透水砖铺装堵塞稳定阶段颗粒物冲刷特征及影响因素

王泽熙[1,2]， 王建龙[1,3]， 吕宗霖[4]， 王雪婷[1]， 孙 铮[1]， 贾高峰[5]

（1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室，北京 100044；2. 民航机场规划设计研究总院有限公司，北京 100029；3. 北京建筑大学 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心，北京 100044；4. 广州市城市排水有限公司，广东广州 510000；5. 北京城市排水集团有限责任公司，北京 100034）

摘 要： 针对透水砖铺装堵塞过程及其雨水径流污染问题，采用人工模拟降雨实验，系统研究了透水砖铺装堵塞过程中渗透系数的变化规律，及其堵塞稳定阶段不同降雨重现期、颗粒物初始负荷、颗粒物粒径条件下雨水径流中颗粒物的冲刷规律。结果表明，随着颗粒物累积负荷的增加，透水砖铺装的渗透系数逐渐降低并趋于稳定，整个过程可分为线性衰减和指数衰减两个阶段。降雨重现期、颗粒物初始负荷、颗粒物粒径对透水砖铺装表面颗粒物的冲刷规律具有重要影响，且随着降雨重现期和颗粒物初始负荷的增加、颗粒物粒径的减小，雨水径流中颗粒物累积总量逐渐增加。不同实验条件下，雨水径流中SS浓度冲刷过程可分为初期快速降低阶段、峰前增加阶段和峰后指数衰减阶段，且初期冲刷现象不明显，控制雨水径流中70%~80%的颗粒物累积总量需要控制40%~60%的雨水径流体积，存在明显的“峰值冲刷”现象。

关键词： 透水砖铺装； 颗粒物； 堵塞； 渗透系数； 峰值冲刷

中图分类号： TU992 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－4602(2023)21－0123－08

Characteristics and Influencing Factors of Particulate Matter Flush in Stable Clogging Stage of Permeable Brick Pavement

WANG Ze-xi[1,2], WANG Jian-long[1,3], LÜ Zong-lin[4], WANG Xue-ting[1], SUN Zheng[1], JIA Gao-feng[5]

(1. *Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>*, *Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, *Beijing* 100044, *China*; 2. *China Airport Planning & Design Institute Co. Ltd.*, *Beijing* 100029, *China*; 3. *Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control*, *Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, *Beijing* 100044, *China*; 4. *Guangzhou Urban Drainage Co. Ltd.*, *Guangzhou* 510000, *China*; 5. *Beijing Drainage Group Co. Ltd.*, *Beijing* 100034, *China*)

Abstract: This paper investigated the change of permeability coefficient during the clogging process of permeable brick pavement (PBP), and the flush characteristics of particulate matter in runoff under different rainfall return periods, initial loads of particulate matter and particle size distribution in the stable clogging stage by artificial rainfall experiment, so as to alleviate the problems of PBP clogging

基金项目：国家“十四五”重点研发计划项目(2021YFC3001400)

通信作者：王建龙 E-mail：wjl_xt@163.com

and runoff pollution. With the increase of particulate matter cumulative load, the permeability coefficient of PBP gradually decreased and tended to be stable. The whole process could be divided into linear decay period and exponential decay period. Rainfall return period, initial load of particulate matter and particle size had important effects on the flush characteristics of particulate matter on the PBP. With the increase of rainfall return period and initial load of particulate matter and the decrease of particle size, the gradual increase of the total accumulation of particulate matters in runoff was observed. Under different experimental conditions, the profile of suspended solids (SS) concentration in runoff during the flush process could be divided into initial rapid reduction stage, pre-peak increase stage and post-peak exponential decay stage, and the initial flush phenomenon was not obvious. To control 70%-80% of the total accumulated particulate matter in runoff needed to control 40%-60% of the runoff volume, and there was an obvious "peak flush" phenomenon.

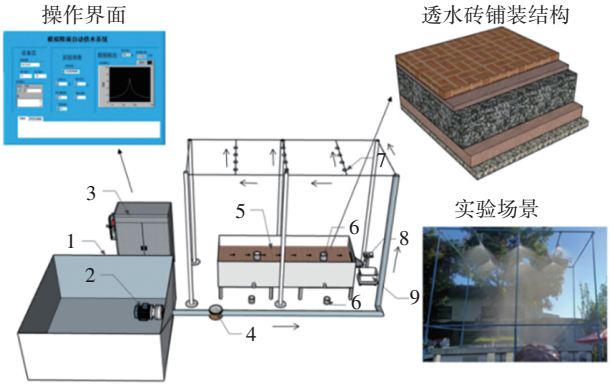
Key words: permeable brick pavement; particulate matter; clogging; permeability coefficient; peak flush

随着海绵城市建设不断推进，透水铺装由于具有促渗减排、缓减城市热岛等水文效应，得到了广泛研究和应用[1-4]。但透水铺装中的孔隙结构会随着大量颗粒物、有机质等的累积而引起堵塞问题[5]。目前关于透水铺装的研究主要聚焦于其对雨水径流水量、水质控制效果，以及围绕上述目标开展的材料和构造优化、维护管理和堵塞过程等方面的研究，而关于不同降雨强度条件下透水铺装的堵塞过程和渗透系数衰减规律，及其堵塞稳定阶段颗粒物的冲刷迁移规律尚缺乏系统研究。为此，笔者采用人工降雨模拟实验方法，研究透水砖铺装渗透系数随颗粒物累积的衰减规律，以及降雨重现期、颗粒物初始负荷、颗粒物粒径对堵塞稳定阶段雨水径流中颗粒物冲刷规律的影响，以期为透水铺装的维护管理及其径流污染控制提供支撑。

1　实验装置与方法

1.1　实验装置

实验装置见图 1，包括进水箱（$L\times B\times H$=2 m×2 m×1.5 m）、进水泵、电磁流量计、透水砖铺装平台、人工模拟降雨装置、集成控制电箱，集成控制电箱控制系统采用自主研发的雨型生成器，通过调节变频泵电压实时控制降雨强度。透水砖铺装平台（$L\times B$=3.3 m×1 m）根据《透水砖路面技术规程》（CJJ/T 188—2012）中的要求铺设，从下至上依次为底基层（夯实素土，h=10 cm）、级配碎石层（砾石，h=25 cm）、找平层（中砂，h=4 cm）、透水砖面层，砖体为水泥砂石透水砖（$L\times B\times H$=200 mm×100 mm×60 mm），砖缝宽为 6 mm，采用中砂灌缝，面层坡度为 1%，路面四周与装置之间的缝隙用玻璃胶密封以避免边界效应。在透水砖铺装表面等间距放置 2 台雨量计，用于校核实际降雨量与预设降雨量的误差，实验期间的误差为 1.4%~3.7%，满足实验要求。径流量采用具有数据存储功能的电子秤测量。



1.水箱 2.水泵 3.集成控制电箱 4.流量计 5.透水砖铺装 6.雨量计 7.降雨喷头 8.径流出口 9.流量监测装置

图 1　实验装置

Fig.1　Experimental device

1.2　实验方法

模拟降雨采用北京市Ⅱ区降雨强度公式：

$$q=\frac{2\,001\left(1+0.811\lg P\right)}{\left(t+8\right)^{0.711}} \tag{1}$$

式中：q 为设计降雨强度，L/(s·hm²)；t 为降雨历时，min；P 为降雨重现期，a。

在透水砖铺装堵塞实验阶段，设置降雨重现期为 3 a、降雨历时为 1 h，雨型采用芝加哥雨型（雨峰

系数为 0.3），每次实验前投加 35 g/m² 的颗粒物负荷，颗粒物粒径≤1 000 μm，实验开始和结束时采用路面渗水测定仪测量渗透系数。在颗粒物冲刷特征实验阶段，分别研究降雨重现期、颗粒物初始负荷、颗粒物粒径对透水砖表层颗粒物冲刷特征的影响，其中降雨重现期分别选择 1、3、5、10 a，颗粒物初始负荷分别取 10、20、50、100 g/m²，颗粒物粒径分别为<75、75~300、300~600、>600 μm。

实验颗粒物采自北京某市政道路，在距离路缘石 0.5 m 范围内沿道路采用清扫和吸尘器抽吸组合采集，采集的颗粒物样品进行过筛预处理，去除直径>1 cm 的颗粒物、烟头和树枝等杂物。实验中径流取样采用 500 mL 聚乙烯塑料瓶，初始产生径流时取第 1 个样，然后每隔 2~5 min 取样，径流峰值之后每隔 10 min 取样。实验结束后将径流样品摇匀，过 0.45 μm 滤膜，放置于烘箱中在 103~105 ℃条件下烘至恒质量，根据重量法计算 SS 浓度。

雨水径流中颗粒物的冲刷曲线有浓度冲刷曲线和质量冲刷曲线，本研究采用质量冲刷曲线，其为雨水径流中颗粒物的累积总量-径流量曲线，即 $M(V)$ 曲线，计算公式如下：

$$M = \int_0^{T_r} C_t Q_t \mathrm{d}t = \sum C_t Q_t \Delta t \approx \sum_{i=1}^{n} B_i V_i \tag{2}$$

$$V = \int_0^{T_r} Q_t \mathrm{d}t = \sum C_t \Delta t \approx \sum_{i=1}^{n} V_i \tag{3}$$

式中：M 为 T_r 时间内的雨水径流颗粒物累积总量，mg；V 为径流体积，L；t 为径流时间，min；C_t 为 t 时刻的污染物浓度，mg/L；Q_t 为 t 时刻的雨水径流流量，L/min；Δt 为采样间隔时间，min；B_i 为第 i 时间段雨水径流中的颗粒物浓度，mg/L；V_i 为第 i 时间段的雨水径流体积，L。

2　结果与讨论

2.1　透水砖铺装的渗透系数衰减过程

颗粒物在透水砖铺装表面累积是导致其堵塞和渗透系数衰减的主要因素之一。已有研究表明，北京市不同类型下垫面单位面积颗粒物沉积质量约为 15.2~65 g/m²[6-7]，本实验取文献中的平均值 35 g/m²，即每次降雨前在透水砖铺装表面均匀布撒 115 g 采集的路面颗粒物，颗粒物布撒采用划分网格（50 cm×50 cm）的方法，以保证颗粒物布撒均匀，然后进行降雨实验。透水砖铺装表面颗粒物累积负荷计算方法如下：假设第 1 次实验随雨水径流流失的颗粒物量为 p_1（单位为 g/m²，下同），第 n 次实验随降雨流失的颗粒物总量为 p_n，则第 1 次实验之后累积在透水砖表面的颗粒物负荷为 $35-p_1$，第 n 次实验后累积在透水砖表面的颗粒物负荷为 $35n-(p_1+\cdots+p_n)$。透水砖铺装渗透系数随颗粒物累积负荷增加的变化过程如图 2 所示。可以看出，随着颗粒物累积负荷的增加，透水砖铺装的渗透系数逐渐降低并最终趋于稳定。根据透水砖铺装渗透系数衰减速率变化特征，可以将其划分为线性衰减和指数衰减两个阶段。

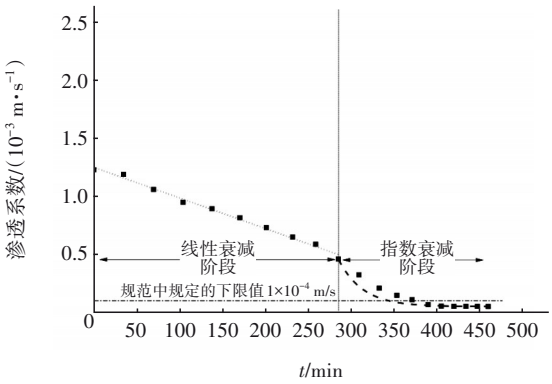


图 2　渗透系数变化曲线

Fig.2　Profile of permeability coefficient variation

①　线性衰减阶段

当颗粒物累积负荷增加至 286 g/m² 时，透水砖铺装的渗透系数从 1.20×10^{-3} m/s 衰减至 4.58×10^{-4} m/s，该阶段随着颗粒物累积负荷的增加，渗透系数快速衰减，通过数据拟合分析发现二者呈线性负相关关系，即线性衰减阶段。该阶段颗粒物累积负荷每增加 100 g 对应的渗透系数衰减为 23.83%，线性拟合关系式如下（R^2=0.991）：

$$y = -2.642 \times 10^{-6} x + 0.001\,25 \tag{4}$$

式中：y 为透水砖铺装的渗透系数，m/s；x 为单位面积透水砖铺装累积的颗粒物负荷，g/m²。

②　指数衰减阶段

当颗粒物累积负荷从 286 g/m² 增至 461 g/m² 时，透水砖铺装的渗透系数从 4.58×10^{-4} m/s 衰减至 4.76×10^{-5} m/s，其中，当颗粒物累积负荷增至 370 g/m² 时，透水砖铺装的渗透系数衰减至 1×10^{-4} m/s，此时渗透系数为《透水砖路面技术规程》（CJJ/T 188—2012）中规定的最小值。但随着颗粒物累积负荷的持续增加，渗透系数仍保持缓慢衰减并趋于某恒定值，通过数据拟合分析发现二者之间满足指数关

系，即指数衰减阶段，拟合公式如下（R^2=0.882）：

$$y = 10.662 \times e^{-x/28.102} + 4.679 \times 10^{-5} \quad (5)$$

导致上述现象的主要原因是，在颗粒物初始累积阶段，透水砖面层和找平层的孔隙率较大，颗粒物快速填充孔隙并得以累积，所以该阶段渗透系数衰减速率较大，颗粒物累积负荷与渗透系数呈线性负相关关系；随着颗粒物的持续累积，透水砖结构层的大孔隙通道逐渐被完全堵塞，此后颗粒物填充的大多是细小孔隙，因此渗透系数衰减速率缓慢降低，直至孔隙完全堵塞，渗透系数降至某恒定值。

2.2　降雨重现期对颗粒物冲刷过程的影响

当透水砖铺装堵塞稳定后，不同降雨重现期条件下雨水径流中SS浓度的变化见图3（颗粒物初始负荷为35 g/m²，颗粒物粒径≤1 000 μm）。

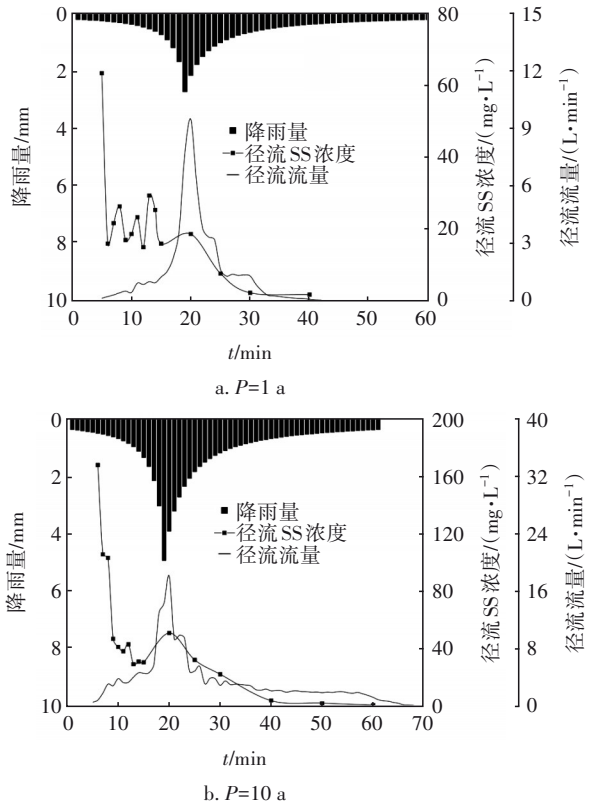


图3　不同降雨重现期条件下雨水径流SS浓度变化

Fig.3　Variation of SS concentration in runoff under different rainfall return periods

由图3可知，随着降雨重现期的增加，初始雨水径流中SS浓度逐渐增大，当降雨重现期从1 a增至10 a时，初始雨水径流SS浓度从63.3 mg/L增至167.1 mg/L。不同降雨重现期条件下，雨水径流SS浓度变化趋势基本一致。以3 a的降雨重现期为例，在产流初始阶段SS浓度从91.5 mg/L迅速降至18.2 mg/L，随着径流量的增加，雨水径流对颗粒物的携带能力增强，SS浓度又从18.2 mg/L增至34.4 mg/L，此后随着径流量的进一步增加，由于稀释作用，SS浓度从34.4 mg/L降至14.3 mg/L，在雨水径流峰值时刻，SS浓度从14.3 mg/L增至18.2 mg/L，主要是由于此时降雨强度和径流流速均较大，大粒径和黏附力较强的颗粒物被冲刷启动。峰值之后由于降雨强度和径流流速均降低，SS浓度从18.2 mg/L逐渐降至0.63 mg/L。综上可知，透水砖铺装堵塞稳定后，颗粒物的冲刷过程受降雨强度和雨水径流共同作用的影响，在峰值流量之前雨水径流SS浓度呈波动变化，在峰值流量之后SS浓度逐渐降低，近似满足指数冲刷方程。目前大多数学者认为不透水铺装表面颗粒物冲刷过程满足指数冲刷方程[8]，因此，透水砖铺装堵塞稳定后颗粒物的冲刷过程与不透水铺装表面颗粒物冲刷过程存在显著区别，在雨水径流污染控制方面应采用不同的控制参数。

不同降雨重现期条件下，雨水径流中颗粒物累积总量随时间的变化见图4。可知，雨水径流中颗粒物累积总量随着降雨重现期的增加而增加。当降雨重现期为1、3、5、10 a时，雨水径流中颗粒物累积总量分别为163.33、424.65、537.44、1 320.93 mg/m²，且均在临近径流峰值时颗粒物累积总量增速较快，其占整场降雨径流中颗粒物累积总量的比例均超过90%，峰值流量时刻之后，雨水径流中颗粒物累积总量的增速减小并趋于稳定。

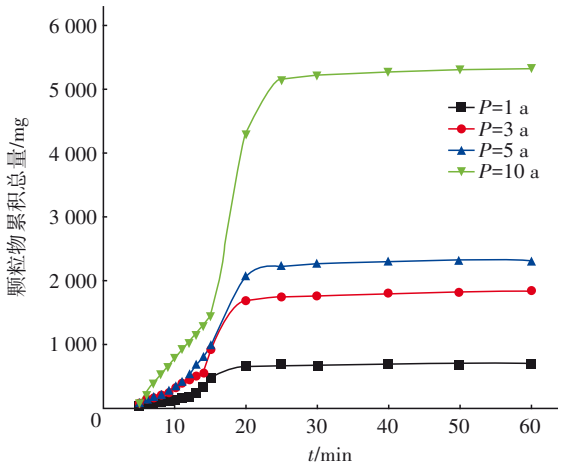


图4　不同降雨重现期下雨水径流中颗粒物累积总量

Fig.4　Accumulation of particulate matters in runoff under different rainfall return periods

不同降雨重现期条件下的 $M(V)$ 曲线如图 5 所示。可知，不同降雨重现期条件下 $M(V)$ 曲线变化趋势相似，以 10 a 降雨重现期为例，$M(V)$ 曲线可分为 4 个阶段：第 1 阶段为产流初始阶段，该阶段径流产流速率较低，SS 输出速率较快，此时 $M(V)$ 曲线斜率>1；第 2 阶段为径流携带初始阶段，该阶段径流产流速率增加，但 SS 输出速率降低，此时 $M(V)$ 曲线斜率<1；第 3 阶段为峰前径流量快速增加阶段，径流产流速率和 SS 输出速率均增加，且 SS 输出速率大于径流产流速率，此时 $M(V)$ 曲线斜率>1，且其值大于第 1 阶段；第 4 阶段为峰后径流量快速降低阶段，该阶段径流产流速率和 SS 输出速率均降低，且 SS 输出速率小于径流产流速率，此时 $M(V)$ 曲线斜率<1。不同降雨重现期条件下控制 80% 的 SS 污染负荷需要控制 40%~60% 的径流量，存在较显著的“峰值冲刷”现象。因此，透水砖铺装堵塞稳定时的雨水径流污染控制，可将峰值时刻作为控制参数，即控制峰值时刻以前的径流量可控制 80% 以上的雨水径流污染。

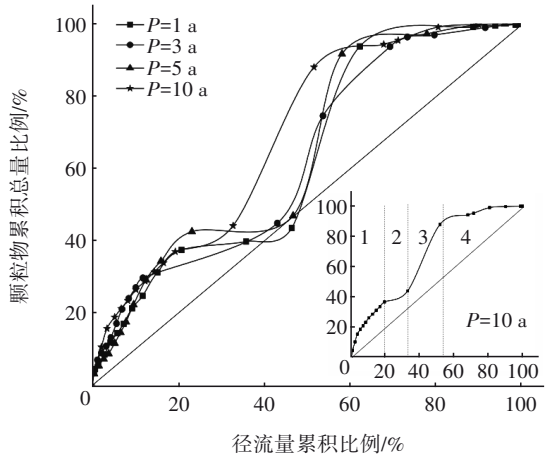


图 5　不同降雨重现期下 $M(V)$ 曲线

Fig.5　Profile of $M(V)$ under different rainfall return periods

2.3　颗粒物初始负荷对其冲刷过程的影响

当透水砖铺装堵塞稳定后，不同颗粒物初始负荷条件下雨水径流中 SS 浓度的变化见图 6（降雨重现期为 3 a，颗粒物粒径≤1 000 μm）。可知，随着颗粒物初始负荷的增加，初始雨水径流中的 SS 浓度也逐渐增大。当颗粒物初始负荷从 10 g/m^2 增加到 100 g/m^2 时，初始雨水径流中的 SS 浓度由 64.1 mg/L 增加到 181.3 mg/L。

当颗粒物初始负荷为 10 和 20 g/m^2 时，二者峰前时刻雨水径流中的 SS 浓度变化趋势相似，即在产流初始阶段 SS 浓度迅速降低，随着径流量的增加，雨水径流对颗粒物的携带能力增强，SS 浓度又逐渐升高，此后随着径流量的进一步增加，由于稀释作用，SS 浓度逐渐降低。在雨水径流的峰值时刻，由于此时降雨强度和径流流速均较大，SS 浓度出现升高趋势。当颗粒物初始负荷为 50 和 100 g/m^2 时，二者峰前时刻雨水径流中的 SS 浓度变化趋势相似，即随着径流量的增加，雨水径流中的 SS 浓度迅速降低，在雨水径流的峰值时刻，SS 浓度又出现增加趋势，之后 SS 浓度逐渐降低。综上可知，不同颗粒物初始负荷条件下，峰值之后随着径流量的降低，雨水径流中的 SS 浓度均逐渐降低，符合指数衰减冲刷模型，但峰值时刻之前雨水径流中的 SS 浓度变化存在显著差异，即当颗粒物初始负荷<50 g/m^2 时，存在波动浓度峰值，当颗粒物初始负荷≥50 g/m^2 时，波动浓度峰值消失，主要是由于随着颗粒物初始负荷的增加，初始阶段雨水径流的相对携带能力变弱。因此，颗粒物初始负荷对雨水径流中 SS 浓度的变化具有重要影响。

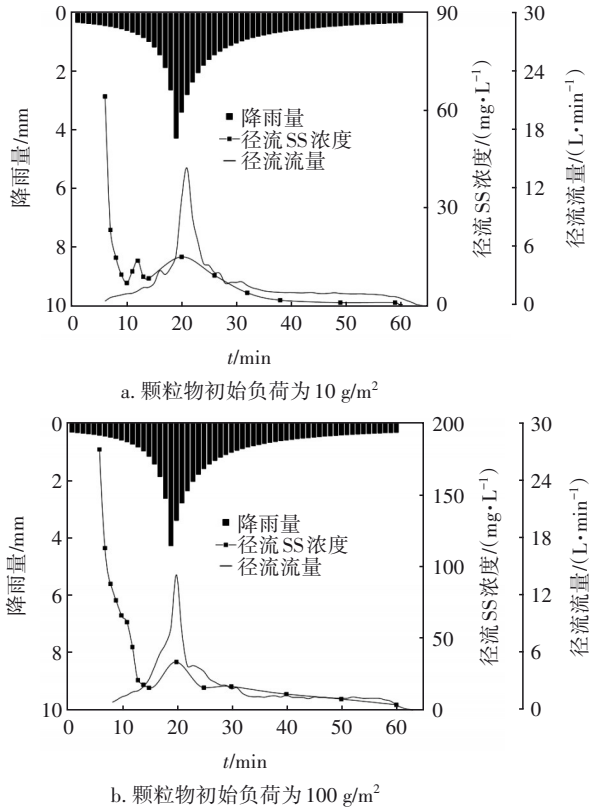


图 6　不同颗粒物初始负荷条件下雨水径流 SS 浓度变化

Fig.6　Variation of SS concentration in runoff under different initial loads of particulate matter

不同颗粒物初始负荷条件下雨水径流中颗粒物累积总量随时间的变化见图7。可知，同一时刻雨水径流中颗粒物累积总量随着颗粒物初始负荷的增加而增加。当颗粒物初始负荷为10、20、50、100 g/m²时，雨水径流中颗粒物累积总量分别为357.65、452.52、648.1、925.53 mg/m²。在径流峰值时刻之前颗粒物累积总量增速较快，不同颗粒物初始负荷条件下，峰值时刻附近雨水径流中颗粒物累积总量占整场降雨径流中颗粒物累积总量的比例均超过70%，但颗粒物初始负荷越高，冲刷率越低。周敬钦等[9]通过模拟排水管道颗粒物沉积冲刷过程也发现，随着管道中初始沉积量的增加，冲刷率呈下降趋势。

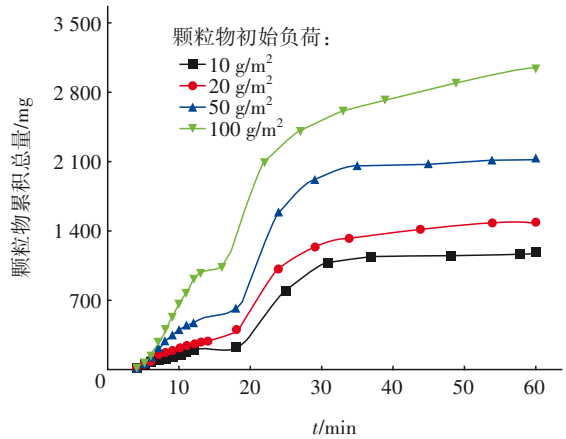


图7　不同颗粒物初始负荷下雨水径流中颗粒物累积总量

Fig.7　Accumulation of particulate matters in runoff under different initial loads of particulate matter

不同颗粒物初始负荷下的$M(V)$曲线见图8。

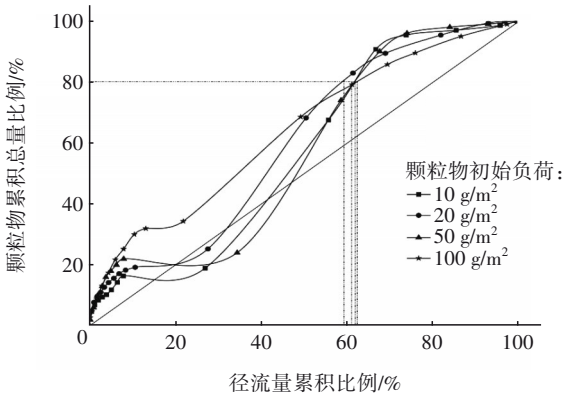


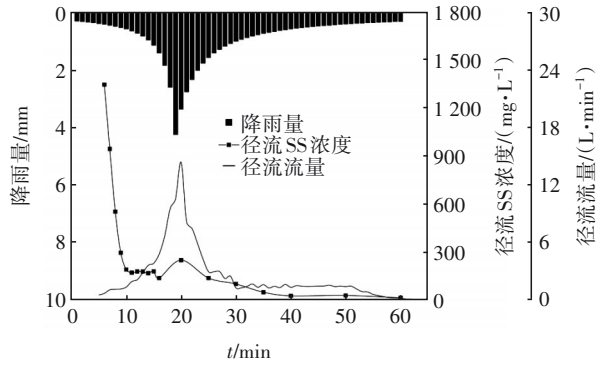
图8　不同颗粒物初始负荷下的$M(V)$曲线

Fig.8　Profile of $M(V)$ under different initial loads of particulate matter

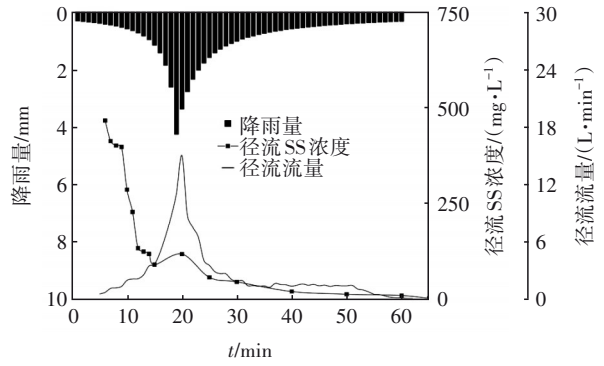
由图8可知，不同颗粒物初始负荷条件下$M(V)$曲线变化趋势相同，且与2.2节不同降雨重现期条件下的$M(V)$曲线形状相似，同样可以将$M(V)$曲线分为4个阶段。当颗粒物初始负荷为100 g/m²时，$M(V)$曲线均位于判别线的上方，即存在较为明显的初期冲刷现象；当颗粒物初始负荷为≤50 g/m²时，峰前时刻部分$M(V)$曲线均位于判别线的下方，即存在SS输出速率小于径流输出速率的时段，初期冲刷现象不明显。不同初始颗粒物负荷条件下，累积冲刷80% SS负荷时的累积径流占比均在60%左右，其位于峰值时刻附近，存在较为显著的“峰值冲刷”现象。

2.4　颗粒物粒径对其冲刷过程的影响

当透水砖铺装堵塞稳定后，不同颗粒物粒径条件下雨水径流中SS浓度的变化情况如图9所示（颗粒物初始负荷为50 g/m²，降雨重现期为3 a）。可以看出，不同颗粒物粒径条件下，雨水径流中SS浓度变化趋势基本一致。以75~300 μm颗粒物粒径为例，产流初始阶段雨水径流中SS浓度从465.67 mg/L迅速下降至89.34 mg/L；此后随着径流量的增加，雨水径流对颗粒物的携带能力增强，SS浓度从89.35 mg/L增加至雨水径流峰值时刻的117.35 mg/L；之后随着降雨强度和径流速率的降低，SS浓度逐渐下降至2.32 mg/L。



a. 颗粒物粒径<75 μm



b. 颗粒物粒径为75~300 μm

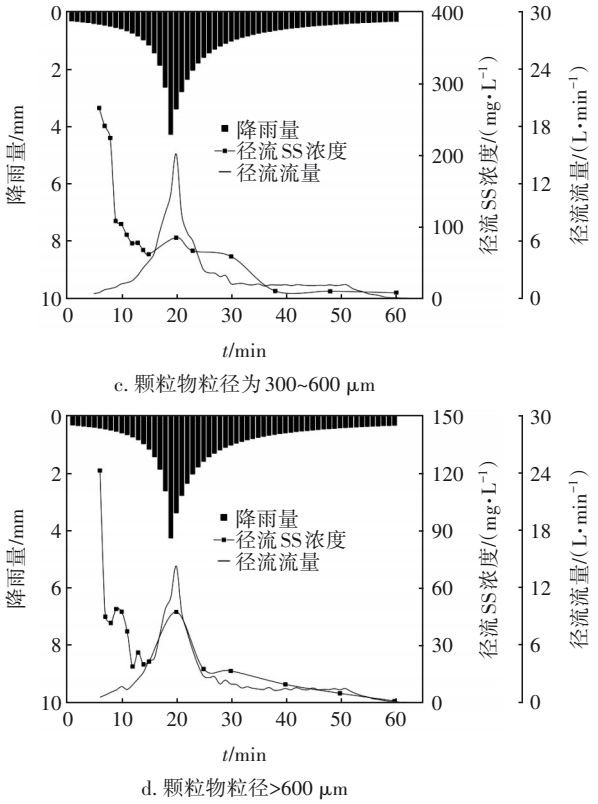


图 9　不同粒径级配时雨水径流 SS 浓度变化

Fig.9　Variation of SS concentration in runoff under different particle sizes

此外，随着颗粒物粒径的增加，初始雨水径流中SS浓度均逐渐降低。当颗粒物粒径由<75 μm增至>600 μm时，初始雨水径流中SS浓度从1 341.8 mg/L降至121.1 mg/L，原因可能是小粒径颗粒物受到冲刷时容易形成“悬浮层”被水流侵蚀剥离[10]。

不同颗粒物粒径条件下雨水径流中颗粒物累积总量随时间的变化见图10。可知，同一时刻雨水径流中颗粒物累积总量随着粒径的增大而减小。当粒径<75、75~300、300~600、>600 μm时，雨水径流中颗粒物累积总量分别为8 187.13、4 932.79、3 102.95、1 312.02 mg/m²。不同颗粒物粒径条件下，峰值时刻附近雨水径流中颗粒物累积总量占整场降雨径流中颗粒物累积总量的比例均超过80%。此外，通过场降雨颗粒物冲刷率计算发现，当颗粒物粒径从<75 μm增加到>600 μm时，场降雨颗粒物冲刷率从16.36%降至2.62%。综上可知，颗粒物粒径对雨水径流中颗粒物冲刷过程具有重要影响，粒径较小的颗粒物应作为透水砖铺装雨水径流污染的主要控制对象。

不同颗粒物粒径条件下的$M(V)$曲线见图11。可知，不同颗粒物粒径范围对应的$M(V)$曲线变化趋势基本相同，且与2.2节和2.3节的$M(V)$曲线形状相似。当颗粒物粒径为75~300 μm时，$M(V)$曲线均位于判别线的上方，即存在较明显的初期冲刷现象；当颗粒物粒径<75、300~600、>600 μm时，峰前时刻部分$M(V)$曲线均位于判别线的下方，即存在SS输出速率小于径流产流速率的时段，初期冲刷现象不明显，且粒径越大则初期冲刷现象越不明显。当颗粒物粒径<75、75~300、300~600、>600 μm所对应场次降雨控制80%的SS污染负荷时，径流量占比分别为56.7%、55.9%、62.5%、52.3%，且均发生在流量峰值时刻附近，即“峰值冲刷”现象均较为显著。

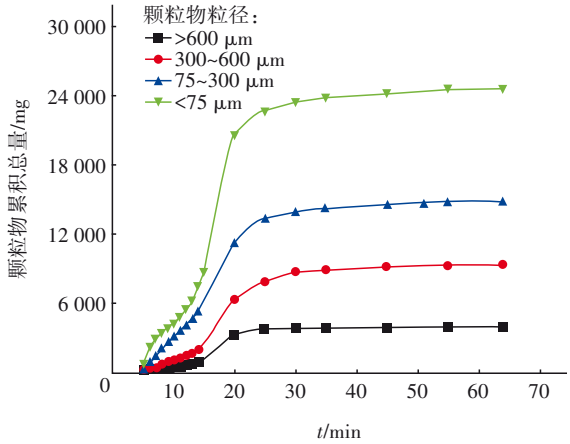


图 10　不同颗粒物粒径下雨水径流中颗粒物累积总量

Fig.10　Accumulation of particulate matters in runoff under different particle sizes

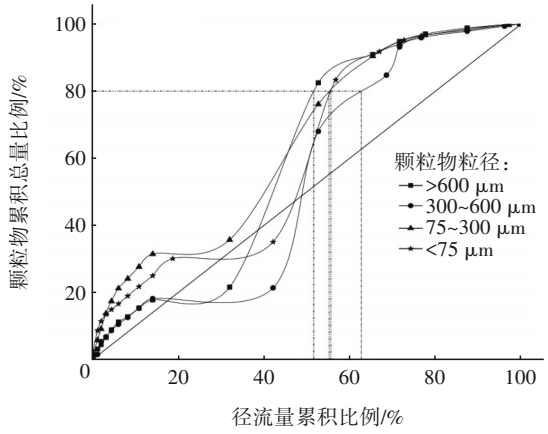


图 11　不同颗粒物粒径下 $M(V)$ 曲线

Fig.11　Profile of $M(V)$ under different particle sizes

3　结论

①　随着颗粒物累积量的增加，透水砖铺装的渗透系数在初期阶段衰减速率较大，随后衰减速率

缓慢降低并最终趋于稳定，整个过程可分为线性衰减和指数衰减两个阶段。

② 在透水砖铺装堵塞稳定阶段，降雨重现期、颗粒物初始负荷、颗粒物粒径均对其表面颗粒物冲刷过程具有重要影响，雨水径流中的颗粒物累积总量随降雨重现期和颗粒物初始负荷的增加而增大，随颗粒物粒径的减小而增大。

③ 不同实验条件下，透水砖铺装均存在较明显的“峰值冲刷”现象，控制雨水径流中70%~80%的SS累积负荷需要控制40%~60%的雨水径流，工程实践中可将径流峰值时刻作为透水砖铺装雨水径流污染控制的重要参数。

参考文献：

[1] 宋剑英，王建龙，任希岩，等．透水铺装渗透性能计算方法探讨[J]．中国给水排水，2022，38(2)：34-40.
SONG Jianying, WANG Jianlong, REN Xiyan, *et al*. Discussion on the permeability calculation method of permeable pavement [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(2): 34-40 (in Chinese).

[2] 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).

[3] 田宇翔．城市道路透水沥青铺装持水行为与降温效果研究[D]．西安：长安大学，2019.
TIAN Yuxiang. Study on the Water-retaining Behavior and Cooling Performance of Urban Permeable Asphalt Pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019 (in Chinese).

[4] 汪俊松．湿热地区透水铺装蒸发降温特性研究[D]．广州：华南理工大学，2019.
WANG Junsong. Study on Evaporative Cooling Characteristics of Pervious Pavements in Hot and Humid Areas [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019 (in Chinese).

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

[6] 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 Huai'ao, 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).

[7] 闫磊．城市地表灰尘和降雨径流中有机污染物的赋存与冲刷释放规律研究[D]．北京：北京建筑大学，2020.
YAN Lei. Study on the Occurrence and Release of Organic Pollutants in Urban Road Dust and Rainfall Runoff [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020 (in Chinese).

[8] 张香丽，赵志杰，秦华鹏，等．常州市不同下垫面污染物冲刷特征[J]．北京大学学报(自然科学版)，2018，54(3)：644-654.
ZHANG Xiangli, ZHAO Zhijie, QIN Huapeng, *et al*. Characteristics of pollutants flush on different types of underlying surface in Changzhou [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, 54(3): 644-654 (in Chinese).

[9] 周敬钦，刘翠云，周俊，等．排水管道内不同粒径沉积颗粒物冲刷率的分析与计算[J]．环境化学，2021，40(3)：896-903.
ZHOU Jingqin, LIU Cuiyun, ZHOU Jun, *et al*. Analysis and calculation on the scouring rate of deposited particles with different sizes in drainage pipe [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(3): 896-903 (in Chinese).

[10] PHILLIPS C B, DALLMANN J D, JEROLMACK D J, *et al*. Fine-particle deposition, retention, and resuspension within a sand-bedded stream are determined by streambed morphodynamics [J]. Water Resources Research, 2019, 55(12): 10303-10318.

作者简介：王泽熙(1996-　)，男，河南商丘人，硕士研究生，研究方向为城市雨水利用。

E-mail：1123386828@qq.com

收稿日期：2022-03-22

修回日期：2022-05-19

(编辑：刘贵春)