

沥青道路粗糙度对径流颗粒物冲刷输出特性的影响

杜晓丽^{1,2}, 崔瀚武¹, 郑泽东¹, 田殿茜¹

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044;
2. 北京建筑大学北京节能减排与城乡可持续发展省部共建国家协同创新中心, 北京 100044)

摘要:采用粗糙度量化沥青道路的表面特征,通过模型模拟、相关性分析等方法分析了道路表面粗糙度对降雨径流颗粒物冲刷输出特性的影响。结果表明:道路粗糙度、降雨强度是影响道路表面径流颗粒物冲刷输出过程的关键因素,道路粗糙度越低、降雨强度越大,道路表面径流颗粒物冲刷效应越强烈、场次降雨径流颗粒物累积冲刷量越大、径流颗粒物冲刷输出总体水平越高;道路粗糙度与降雨强度、径流历时共同影响径流颗粒物粒径分布,道路粗糙度为影响径流颗粒物粒径分布的主导因素,道路粗糙度越低、径流历时越长、降雨强度越大,径流中粒径不小于150 μm 的颗粒物体积占比越高,粒径小于75 μm 的颗粒物体积占比越低。

关键词:道路粗糙度;降雨强度;径流颗粒物;冲刷规律;粒径分布

中图分类号:TV121⁺.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2024)03-0133-07

Influence of asphalt road roughness on scour output characteristics of runoff particles//DU Xiaoli^{1,2}, CUI Hanwu¹, ZHENG Zedong¹, TIAN Dianxi¹ (1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction National Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The surface characteristics of asphalt roads were quantified by roughness, and the influence of road surface roughness on the scour output characteristics of runoff particles was analyzed by model simulation and correlation analysis. The results indicated that the road roughness and rainfall intensity were the key factors affecting the scour output of road surface runoff particles. The lower the road roughness and the higher the rainfall intensity, the stronger the scour effect of road surface runoff particles, the higher the cumulative scour amount of runoff particles in the rainfall event, and the higher the overall scour level of runoff particles. In addition, road roughness, rainfall intensity, and runoff duration all affected the particle size distribution in runoff, and road roughness was the dominant factor. The lower the road roughness, the longer the runoff duration and the higher the rainfall intensity, the higher the proportion of particles with size not smaller than 150 μm and the lower the proportion of particles with size smaller than 75 μm in road runoff.

Key words: road roughness; rainfall intensity; runoff particles; scouring law; particle size distribution

受机动车尾气排放、燃油滴漏等人类交通活动影响,道路径流污染已成为城市面源污染的主要来源^[1-3]。据报道,由道路径流携带并排入受纳水体的颗粒物达到了城市径流颗粒物的69%以上^[4]。此外,研究发现道路表面沉积颗粒物具有较强的吸附性能,是径流中其他污染物的主要附着载体^[5-7]。因此,研究道路表面颗粒物随径流冲刷的输出规律对城市径流污染的有效控制具有重要意义。

国内外学者已对城市道路表面颗粒物冲刷规律开展了大量研究,发现降水量、降雨强度、颗粒物分

布特征等均会影响道路径流颗粒物输出特性。例如:Pitt等^[8]研究发现降水量越大,径流颗粒物冲刷输出总体水平越高;Ma等^[4]分析了道路径流颗粒物冲刷率与降雨强度之间的关系,发现降雨强度越大,径流冲刷能力越强;Zhao等^[9]研究发现颗粒物干期累积量仅对颗粒物冲刷输出总量造成影响,其粒度分布差异则会影响不同粒径颗粒物的冲刷率,进而影响径流颗粒物冲刷输出特性;朱伟等^[10]研究发现降雨径流对粒径小于150 μm 的颗粒物冲刷作用明显。但目前研究忽视了道路表面特征对径流颗

粒物冲刷输出规律的影响,难以为城市不同特征道路径流颗粒物输出规律提供支撑。道路表面是径流冲刷的直接作用面,其路面纹理以及微形态不仅会影响路面产流量^[11-12],还会影响其表面颗粒物的滞留特性,进而影响其冲刷输出规律。因此,本文以粗糙度量化道路表面特征,模拟不同粗糙度沥青道路,定性定量分析道路粗糙度对径流颗粒物冲刷输出特性的影响,以期为准评估城市道路径流污染输出规律提供参考。

1 材料与方法

1.1 模拟道路装置

在尺寸为1.5 m×0.6 m×0.2 m 无盖PVC长方体底面均匀铺设3 cm 厚度的不透水沥青,并参照JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》进行压实,模拟沥青路面。在模拟道路装置末端设置宽5 cm、深3 cm 的排水沟槽,沟槽末端设置取样口收集路面径流。图1为模拟道路装置与模拟降雨装置示意图,模拟降雨装置由针头式模拟降雨器、可调节水泵和流量计组成。用千斤顶调节模拟道路纵坡为1.5%、横坡为2%。

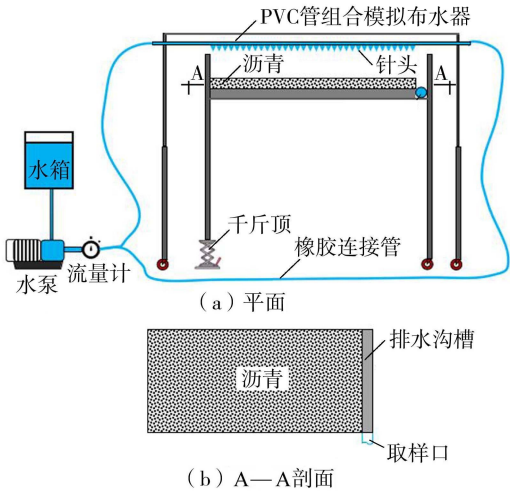


图1 模拟道路装置与模拟降雨装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of simulated road and simulated rainfall device

1.2 模拟降雨

按照北京市暴雨强度公式(式(1))计算降雨重现期分别为0.5、1、3、5 a 的2 h 降水量进行降雨模拟。采用Christiansen 均匀系数法评价降雨均匀程度^[13],并计算实际降雨强度与目标降雨强度的相对误差,计算结果见表1,可见,该模拟降雨装置模拟不同降雨重现期时的降雨均匀程度、相对误差均符合要求。

q = \frac{2001(1 + 0.811lgP)}{(t + 8)^{0.711}} \tag{1}

式中:q 为设计降雨强度;P 为设计降雨重现期;t 为降雨历时。

表1 不同降雨重现期下模拟降雨的降雨均匀程度及误差
Table 1 Rainfall uniformity and error of simulated rainfall under different rainfall return periods

P/a	目标降雨强度/(mm/h)	样本数	标准偏差	Christiansen 均匀系数/%	平均降雨强度/(mm/h)	平均相对误差/%
0.5	17.25	16	1.87	83.32	17.12	2.21
1	22.83	16	1.94	89.10	23.15	1.40
3	31.66	16	1.91	89.61	31.26	1.25
5	35.77	16	1.92	87.23	35.13	1.78

1.3 道路粗糙度测定

道路粗糙度可用道路表面构造深度表示,采用表面铺砂覆盖法测定^[14-15]。沥青道路表面冲刷干净后暴晒至干燥,取25 mL 粒度为0.15~0.30 mm 的砂土倾倒在模拟沥青道路中央,用推板由里至外反复做圆周运动铺平砂土直至其完全进入沥青表面,用深度构造尺在道路横纵方向上测量该圆直径,计算其平均直径(精确至1 mm),按式(2)计算道路粗糙度。同一粗糙度道路重复测量3 次取平均值。

T_D = 4000V/(\pi D^2) \tag{2}

式中:T_D 为模拟沥青道路粗糙度;V 为摊铺砂土体积,本文取25 mL;D 为圆形区域平均直径。

1.4 模拟冲刷试验

称取30 g 采集的某沥青道路沉积颗粒物样品,用六目多孔筛均匀布撒模拟沥青道路表面,并用毛刷铺平。依次模拟降雨重现期分别为0.5、1、3、5 a 条件下2 h 降水量,采用HOBO RG3-M 型翻斗式雨量计(Onset,美国)记录每一时刻的径流量,并在装置取样口用棕色玻璃瓶收集产流第5、10、15、20、30、45、60、75、90、120 min 的径流量。取各径流时刻样品300 mL 测定悬浮物(SS)质量浓度,并使用Mastersizer 3000 粒度分布仪(Malvern Panalytical, US)测定其中颗粒物粒径分布。每次模拟降雨结束后,用高压清水冲刷沥青表面至颗粒物全部排出,待装置表面完全干燥后进行下一场模拟降雨。各试验组布撒的道路沉积颗粒物为同一地点、同一时间采集的混合样品,其粒径分布如图2 所示。完成一种道路粗糙度降雨冲刷试验后,重新铺设沥青构建下一种粗糙度,重复上述步骤。

1.5 冲刷模型

采用Sartor 等^[16]于1974 年提出的S&B 指数冲刷模型描述单场次降雨颗粒物冲刷输出过程:

M_w = M_{max}(1 - e^{-kR}) \tag{3}

式中:M_w 为颗粒物累积冲刷量;M_{max} 为颗粒物场次降雨最大累积冲刷量;k 为冲刷系数,与颗粒物粒径

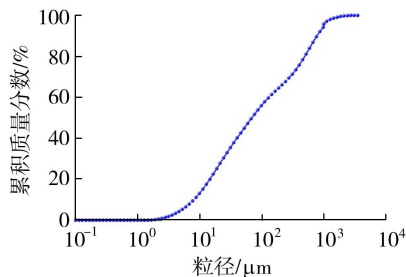


图2 沥青道路表面沉积颗粒物粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of deposited sediments collected from surface of asphalt road

和径流水动力条件有关; R 为累积径流体积。

采用场次降雨颗粒物冲刷率表征场次降雨径流颗粒物冲刷总体水平^[17],计算公式为

$$F_w = \frac{M_{\max}}{M_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: F_w 为场次降雨颗粒物冲刷率; M_0 为道路表面颗粒物初始累积量。

2 结果与分析

2.1 不同粗糙度道路径流中颗粒物初期冲刷效应

本文将 $T_D = 0.95 \text{ mm}$ 定义为低粗糙度、 $T_D = 1.28 \text{ mm}$ 定义为中粗糙度、 $T_D = 1.53 \text{ mm}$ 定义为高粗糙度。采用无量纲 $M(V)$ 曲线法、 F_{30} 参数法对不同粗糙度道路径流颗粒物初期冲刷效应进行定性、定量分析,结果如图3和表2所示。无量纲 $M(V)$ 曲线的横坐标累积径流比表示场次降雨径流过程中累积径流量占径流总量的百分比,纵坐标颗粒物累积

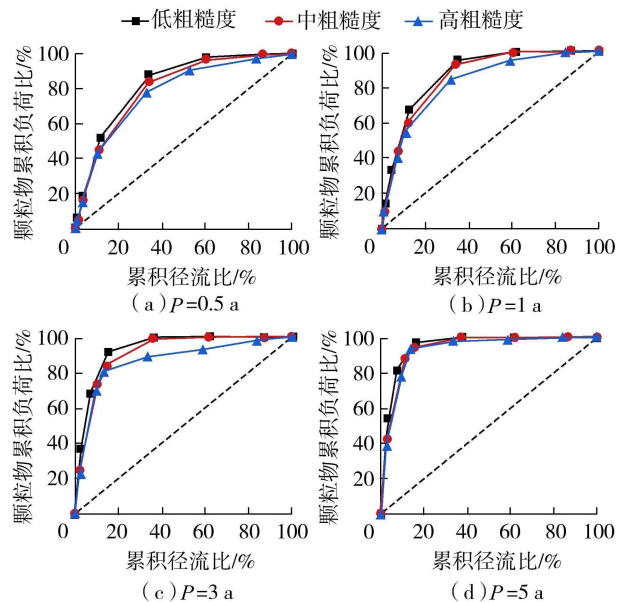


图3 不同降雨重现期下道路径流颗粒物 $M(V)$ 曲线

Fig.3 $M(V)$ curves of particles in road runoff under different rainfall return periods

负荷比表示径流过程中累积颗粒物负荷占颗粒物总负荷的百分比,当整个 $M(V)$ 曲线在 45° 对角线以上时,说明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,则认为存在初期冲刷效应,曲线距对角线离散程度越大,冲刷效应越强烈。 F_{30} 值为场次降雨累积径流比为 30% 时颗粒物累积负荷比与累积径流比的比值。当 F_{30} 值大于 1.67 时,说明降雨径流初期污染负荷输出量明显高于后续时间,则认为存在初期冲刷效应; F_{30} 值越大,初期冲刷效应越强烈^[13,18-19]。由图3和表2可见,不同降雨强度条件下,不同粗糙度道路径流冲刷颗粒物的 $M(V)$ 曲线均在 45° 对角线以上且 F_{30} 值均大于 1.67,说明试验尺度下各粗糙度道路表面径流颗粒物冲刷过程均存在初期冲刷效应。道路粗糙度、降雨强度可对路面径流颗粒物初期冲刷效应强度造成影响。相同道路粗糙度时,降雨重现期越大, $M(V)$ 曲线离散程度、 F_{30} 值越大,说明随着降雨强度增加,道路表面径流颗粒物初期冲刷效应越强烈。这是由于强度较高的降雨径流冲刷地表的能量更大,对颗粒物裹挟能力增强,使稳定附着在道路表面的颗粒物被剥离下来并随径流迁移^[20-21]。在同一降雨重现期条件下,路面粗糙度越大, F_{30} 值、 $M(V)$ 曲线离散程度越小,说明道路表面越粗糙,初期冲刷效应越弱。这是因为粗糙的道路表面径流初始损失量较大,且被坑洼的路面截留的颗粒物较多,从而削弱了其初期冲刷效应^[22]。因粗糙度不同造成的 F_{30} 值及 $M(V)$ 曲线离散程度的差距随降雨强度增大而减小。由图3(a)(d)和表2可见,当降雨重现期为 0.5 a 时,不同道路粗糙度路面径流颗粒物冲刷 F_{30} 值变化在 4.8% 以上,且 $M(V)$ 线具有明显偏差;而降雨重现期为 5 a 时, F_{30} 值变化则小于 2%,3 种道路粗糙度路面径流颗粒物冲刷 $M(V)$ 曲线部分重叠。说明当降雨强度较高时,道路粗糙度对径流颗粒物的初期冲刷效应影响减弱,降雨强度成为主导影响因素。

表2 不同降雨重现期下道路径流颗粒物 F_{30} 值

Table 2 F_{30} values of particles in road runoff under different rainfall return periods

T_D/mm	F_{30} 值			
	$P=0.5 \text{ a}$	$P=1 \text{ a}$	$P=3 \text{ a}$	$P=5 \text{ a}$
0.95	2.73	2.98	3.25	3.30
1.28	2.60	2.89	3.16	3.28
1.53	2.47	2.72	2.93	3.24

2.2 不同粗糙度道路表面径流颗粒物冲刷输出规律

2.2.1 冲刷模型拟合

目前常采用场次降雨平均浓度模型、比例径流曲线和指数冲刷模型研究降雨冲刷规律^[23]。与场

次降雨平均浓度模型和径流曲线模型相比,指数冲刷模型兼顾了径流量和污染物干期累积量对径流污染物冲刷输出全过程的影响,更适宜描述存在初期冲刷效应的冲刷过程^[24]。因此,本文采用 S&B 指数冲刷模型对不同降雨强度、不同粗糙度模拟道路径流颗粒物冲刷过程进行拟合,结果如图 4 所示。由图 4 可见,S&B 指数冲刷模型对不同降雨强度、不同粗糙度模拟道路径流颗粒物冲刷过程拟合曲线趋势大致相同,拟合结果较好(R^2 均大于0.99)。随径流体积增大,颗粒物累积冲刷质量不断增加,但降雨产流后期颗粒物冲刷质量趋于平稳,拟合曲线的斜率(颗粒物冲刷速率)不断减小,说明随着降雨进行,颗粒物冲刷效应减弱。此外,降雨重现期越大、道路粗糙度越低,径流初期颗粒物冲刷速率(拟合曲线初始斜率)越大。说明降雨强度越大、道路粗糙度越低,道路表面径流颗粒物初期冲刷效应越强烈。

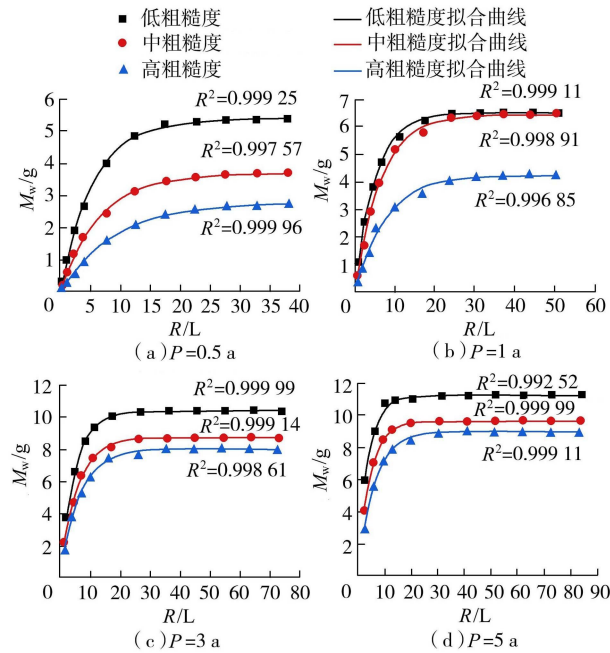


图 4 不同降雨重现期下道路径流颗粒物指数冲刷模型拟合结果

Fig. 4 Fitting results of exponential scour model of road runoff particles under different rainfall return periods

道路粗糙度、降雨强度不仅影响道路表面径流颗粒物的初期冲刷效应,还会影响场次降雨径流颗粒物累积冲刷质量。当降雨重现期相同时,道路粗糙度越低,道路表面场次降雨径流颗粒物累积冲刷质量越大。如降雨重现期为 3 a 时,道路粗糙度为 0.95 mm 时的场次降雨径流颗粒物累积冲刷质量比道路粗糙度为 1.28 mm 时增大了约 20%。这是因为道路粗糙度越小其表面构造深度越小,对径流中颗粒物的阻拦滞留能力较小,致使冲刷输出的颗粒

物较多,从而增加了场次降雨径流颗粒物冲刷质量。反之,当道路粗糙度相同时,降雨重现期越大,道路表面场次降雨径流颗粒物冲刷质量越大。如道路粗糙度为 0.95 mm 时,降雨重现期为 5 a 的场次降雨径流颗粒物累积冲刷质量约为重现期为 1 a 的两倍。

2.2.2 冲刷模型参数评价及影响因素分析

根据 S&B 指数冲刷模型对不同降雨重现期、不同粗糙度道路径流颗粒物的冲刷过程拟合结果,获得场次降雨径流颗粒物最大累积冲刷质量 M_{max} 和冲刷系数 k ,并可计算得出对应冲刷条件下的颗粒物冲刷率 F_w 。冲刷系数和冲刷率随道路粗糙度、降雨重现期的变化趋势及皮尔逊相关性分析结果分别见图 5 和表 3。一般而言,冲刷系数越大,冲刷效应越强烈;冲刷率越高,径流颗粒物冲刷输出总体水平越高^[13,17]。由图 5 可见,降雨重现期、道路粗糙度均会影响路面径流颗粒物冲刷系数和冲刷率。降雨重现期越大、道路粗糙度越低,冲刷系数和冲刷率越大,说明径流颗粒物冲刷效应越强烈、场次降雨径流颗粒物冲刷输出量越高,这与前述结果一致。由表 3 各变量间的皮尔逊相关性分析结果可见,道路粗糙度与径流颗粒物冲刷率、冲刷系数呈负相关,其中道路粗糙度与冲刷系数呈显著负相关关系($r =$

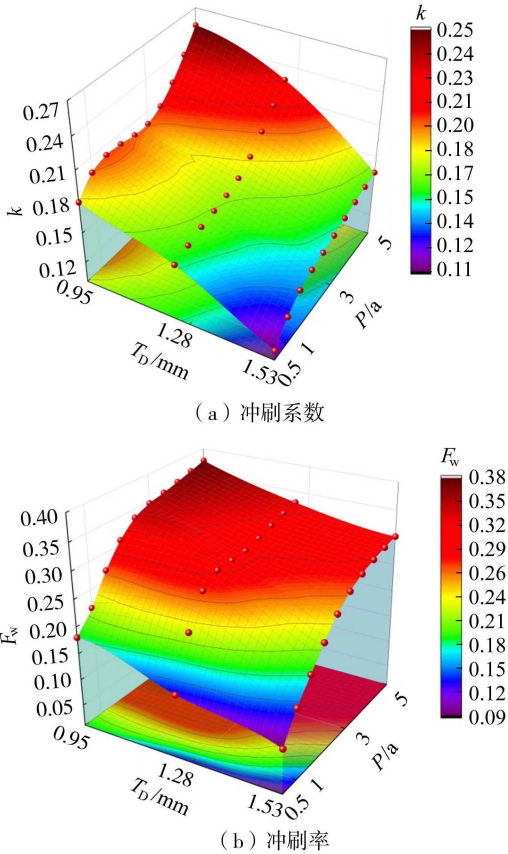


图 5 不同冲刷条件下冲刷系数和冲刷率变化

Fig. 5 Changes of scour coefficient and scour rate under different scour conditions

表 3 不同冲刷条件与冲刷系数、冲刷率的相关性分析结果

Table 3 Correlation analysis results between different scour conditions, scour coefficient and scour rate				
分析方法	控制因素	相关变量	相关系数 r	显著性 p
皮尔逊相关性分析		T_D 与 F_w	-0.362	0.247
		T_D 与 k	-0.752 **	0.005
		P 与 F_w	0.881 **	0.001
		P 与 k	0.610 *	0.035
偏相关分析	P	T_D 与 F_w	-0.766 **	0.006
		T_D 与 k	-0.949 **	0.001
	T_D	P 与 F_w	0.945 **	0.001
		P 与 k	0.925 **	0.001

注: ** 表示 $p \leq 0.01$; * 表示 $p \leq 0.05$, 下同。

-0.752, $p < 0.01$), 这是由于道路表面越粗糙, 其表面的构造深度增大, 径流颗粒物冲刷过程中, 道路表面孔隙对颗粒物尤其是大颗粒物具有更强的拦截滞留能力, 使颗粒物随径流迁移输出能力降低, 径流颗粒物冲刷输出量降低。降雨重现期与径流颗粒物冲刷率($r = 0.881, p < 0.01$)、冲刷系数($r = 0.610, p < 0.05$)呈显著正相关关系, 这是由于随降雨强度增加, 径流量增大, 径流水动力条件增强, 使径流对颗粒物的冲刷携带能力增强, 径流颗粒物冲刷输出量增加。

若仅考虑道路粗糙度或降雨重现期的影响对相

关变量进行偏相关分析, 结果发现, 与皮尔逊相关分析相比, 道路粗糙度、降雨重现期与冲刷率、冲刷系数的相关系数绝对值均增大, 表明道路粗糙度与降雨重现期对冲刷效应、径流颗粒物冲刷输出总体水平的影响是相拮抗的。道路粗糙度与降雨重现期对于冲刷系数的偏相关系数的绝对值均在 0.9 以上, 显著性均小于 0.01, 即道路粗糙度与降雨重现期对径流颗粒物冲刷效应均存在显著影响; 证明冲刷效应的强弱由颗粒物迁移能力与径流冲刷携带能力共同决定。以降雨重现期为控制因素, 道路粗糙度与颗粒物冲刷率偏相关系数的绝对值明显高于其 Pearson 相关系数; 这说明降雨强度增加能明显削弱粗糙度对颗粒物冲刷输出量的影响, 在较大的降雨强度下, 即使较高的粗糙度也很难滞留大量的颗粒物。

2.3 不同粗糙度道路径流中颗粒物粒径分布

对模拟道路路面不同产流时刻径流中颗粒物进行粒径分布分析, 结果如图 6 所示, 图中低、中、高分别代表道路粗糙度为低粗糙度、中粗糙度以及高粗糙度。并将不同冲刷条件与径流中不同粒径颗粒物体积占比进行皮尔逊相关性分析, 结果如表 4 所示。

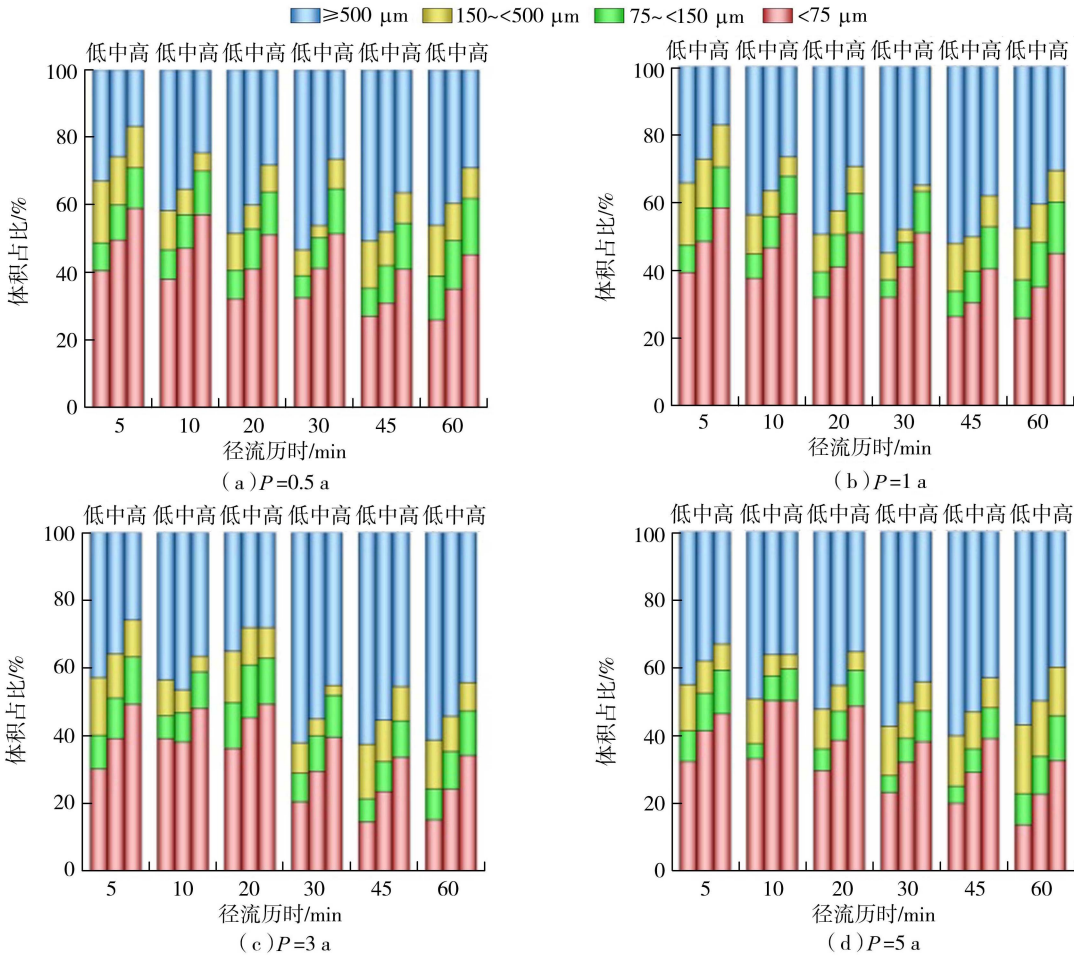


图 6 不同降雨重现期下道路径流颗粒物粒径分布

Fig. 6 Size distribution of particles in road runoff under different rainfall return periods

表 4 不同冲刷条件与径流中不同粒径颗粒物体积占比的相关性分析结果

Table 4 Correlation analysis results between different scouring conditions and volume percentage of particles with different sizes in runoff

变量	T_D	P	径流历时	<75 μm 颗粒物体积占比	75 ~ <150 μm 颗粒物体积占比	150 ~ <500 μm 颗粒物体积占比	$\geq 500 \mu\text{m}$ 颗粒物体积占比
T_D	1						
P	0	1					
径流历时	0	0	1				
<75 μm 颗粒物体积占比	0.669 **	-0.297 *	-0.586 **	1			
75 ~ <150 μm 颗粒物体积占比	0.634 **	-0.275 *	0.191	0.440 **	1		
150 ~ <500 μm 颗粒物体积占比	-0.587 **	0.097	0.172	-0.519 **	-0.167	1	
$\geq 500 \mu\text{m}$ 颗粒物体积占比	-0.611 **	0.330 **	0.472 **	-0.916 **	-0.630 **	0.192	1

由图 6 和表 4 可见,在任一降雨重现期、任一道路粗糙度下,道路径流中颗粒物粒径分布随径流历时增加变化规律基本一致;其中,径流历时与粒径范围为 <75 μm 和 $\geq 500 \mu\text{m}$ 的颗粒物体积占比分别呈显著负相关关系($r = -0.586, p < 0.01$)及显著正相关关系($r = 0.472, p < 0.01$)。即随径流历时增加,道路径流中粒径 $\geq 500 \mu\text{m}$ 的颗粒物占比呈增大趋势,成为体积占比最大的组分,而粒径 <75 μm 的颗粒物占比呈减小趋势。如降雨重现期为 1 a、中粗糙度时,径流历时从 5 min 增加到 60 min,道路径流中粒径 $\geq 500 \mu\text{m}$ 的颗粒物体积占比从 27.34% 增大至 40.65%,粒径 <75 μm 的颗粒物体积占比从 48.36% 减小至 34.88%。这是因为降雨初期道路表面径流量小,对颗粒物的冲刷携带能力弱,冲刷携带的颗粒物粒径普遍偏小;随着径流历时的增加,道路表面径流量增大,凹蓄量降低,水动力条件增强,降雨后期径流冲刷对大粒径颗粒物的携带能力增强。此外,小粒径颗粒物在降雨初期不断被冲刷也可能造成降雨后期大粒径颗粒物体积占比较大。

道路粗糙度对冲刷颗粒物粒径分布变化的影响较明显,道路粗糙度与粒径范围为 <75 μm 、75 ~ <150 μm 的颗粒物体积占比均呈显著正相关关系($r = 0.669, p < 0.01$; $r = 0.634, p < 0.01$);与粒径范围为 150 ~ <500 μm 、 $\geq 500 \mu\text{m}$ 的颗粒物体积占比均呈显著负相关关系($r = -0.587, p < 0.01$; $r = -0.611, p < 0.01$)。即任一降雨重现期下,随道路粗糙度增大,道路径流中粒径范围为 150 ~ <500 μm 、 $\geq 500 \mu\text{m}$ 的颗粒物体积占比逐渐减小,而粒径范围为 75 ~ <150 μm 、<75 μm 的颗粒物体积占比逐渐增大。这是因为道路表面越粗糙,其表面构造深度越大,对大粒径颗粒物具有更强的拦截滞留能力,则径流冲刷输出的颗粒物主要为迁移能力较强的小粒径颗粒物。

相同道路粗糙度条件下,随降雨重现期增大,径流中粒径较大的颗粒物体积占比大致呈增大趋势,

粒径较小的颗粒物体积占比大致呈减小趋势。这是因为降雨强度增大使其冲刷水动力条件增强,径流对道路表面颗粒物冲击力度增大,干期累积时颗粒物与道路表面平衡稳定的附着状态更容易被打破,致使粒径较大的颗粒物迁移输送率提高^[13]。但降雨重现期与径流中不同粒径颗粒物组分的占比相关性不显著,说明与道路粗糙度相比,降雨强度对径流中不同粒径颗粒物组分占比的作用效果不明显。

3 结 论

a. 不同道路粗糙度、降雨强度下,道路表面径流颗粒物冲刷过程均存在初期冲刷效应;道路粗糙度越低、降雨强度越大,初期冲刷效应越强烈;降雨强度是影响初期冲刷效应的首要因素,随降雨重现期增大,由粗糙度导致的初期冲刷效应差异逐渐减弱。

b. S&B 指数冲刷模型能较好地拟合不同道路粗糙度、不同降雨强度下道路表面径流颗粒物冲刷过程,拟合系数 R^2 均在 0.99 以上;道路粗糙度、降雨强度对表面径流颗粒物冲刷系数和冲刷率的影响是相拮抗的,道路粗糙度越低、降雨强度越大,冲刷系数和冲刷率越大,即场次降雨径流颗粒物冲刷效应越强烈、径流颗粒物冲刷输出总体水平越高;但在较大降雨强度时,道路粗糙度对径流颗粒物冲刷输出水平的影响较弱。

c. 道路粗糙度、降雨强度、径流历时共同影响径流颗粒物粒径分布,道路粗糙度是影响径流颗粒物分布的主导因素;道路粗糙度越低、径流历时越长、降雨强度越大,径流颗粒物中粒径不小于 500 μm 的颗粒物体积占比越高,粒径小于 75 μm 的颗粒物体积占比越低。

参考文献:

[1] 沈金星,王沛芳. 高速公路雨水径流污染浓度的系统动力学模拟[J]. 水资源保护,2018,34(4): 1-7. (SHEN

- Jinxing, WANG Peifang. System dynamics simulation of pollution concentration of rainwater runoff on expressway [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (4): 1-7. (in Chinese))
- [2] DU Xiaoli, ZHU Yingjie, HAN Qiang, et al. The influence of traffic density on heavy metals distribution in urban road runoff in Beijing, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26 (1): 886-895.
- [3] ZHAO Xue, ZHENG Yi, QUAN Feng, et al. Road runoff as a significant nonpoint source of parabens and their metabolites in urban rivers [J]. Chemosphere, 2022, 301: 134632.
- [4] MA Yukun, HAO Shaonan, ZHAO Hongtao, et al. Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in separate sewer systems [J]. Chemosphere, 2018, 211: 557-565.
- [5] JEONG H, CHOI J Y, LEE J, et al. Heavy metal pollution by road-deposited sediments and its contribution to total suspended solids in rainfall runoff from intensive industrial areas [J]. Environmental Pollution, 2020, 265: 115028.
- [6] ERMOLIN S, FEDOTOV S, IVANEEVA I, et al. A contribution of nanoscale particles of road-deposited sediments to the pollution of urban runoff by heavy metals [J]. Chemosphere, 2018, 210: 65-75.
- [7] 赵洪涛, 李叙勇, 王为东, 等. 城镇街尘污染与平原河网水体的源-汇效应研究 [J]. 环境科学学报, 2010, 30 (6): 1295-1301. (ZHAO Hongtao, LI Xuyong, WANG Weidong, et al. The source-sink effects of street dust pollution in a stream network [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30 (6): 1295-1301. (in Chinese))
- [8] PITT R E, WILLIAMSON D, VOORHEES J, et al. Review of historical street dust and dirt accumulation and washoff data [J]. Journal of Water Management Modeling, 2005, R223-12: 203-245.
- [9] ZHAO Hongtao, MA Yukun, FANG Jinxiu, et al. Particle size distribution and total suspended solid concentrations in urban surface runoff [J]. Science of the Total Environment, 2022, 815: 152533.
- [10] 朱伟, 边博, 李磊. 镇江城市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 (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 (4): 764-771. (in Chinese))
- [11] MANSELL M, ROLLET F. The effect of surface texture on evaporation, infiltration and storage properties of paved surfaces [J]. Water Science and Technology, 2009, 60 (1): 71-76.
- [12] KOU Changjiang, QI Yanjuan, KANG Aihong, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of runoff-pollutants from three types of urban pavements [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 125885.
- [13] 杜晓丽, 郑泽东, 尹子杰, 等. 透水砖堵塞程度对径流颗粒物冲刷规律的影响 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 73-81. (DU Xiaoli, ZHENG Zedong, YIN Zijie, et al. Influence of blockage degree of permeable brick on scouring law of runoff particles [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 73-81. (in Chinese))
- [14] 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))
- [15] ZHAO Hongtao, JIANG Qian, XIE Wenxia, et al. Role of urban surface roughness in road-deposited sediment build-up and wash-off [J]. Journal of Hydrology, 2018, 560: 75-85.
- [16] SARTOR J D, BOYD G B. Water pollution aspects of street surface contaminants [R]. Washington D. C.: US Government Printing Office, 1972.
- [17] ZHAO Hongtao, LI Xuyong, WANG Xiaomei. Heavy metal contents of road-deposited sediment along the urban-rural gradient around Beijing and its potential contribution to runoff pollution [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45 (17): 7120-7127.
- [18] KIM H, KAYHANIAN M, ZOHK D, et al. Modeling of highway stormwater runoff [J]. Science of the Total Environment, 2005, 348 (1): 1-18.
- [19] 黄国如, 曾家俊, 吴海春, 等. 广州市典型社区单元面源污染初期冲刷效应 [J]. 水资源保护, 2018, 34 (1): 8-15. (HUANG Guoru, ZENG Jiajun, WU Haichun, et al. First flush effect of non-point source pollution in Guangzhou typical community unit [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (1): 8-15. (in Chinese))
- [20] 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))

(下转第 148 页)

[37] BAHREMAND A, SMEDT F D. Distributed hydrological modeling and sensitivity analysis in Torysa Watershed, Slovakia[J]. Water Resources Management, 2008, 22 (3):393-408.

[38] JIANG Sanyuan. Hydrological water quality modelling of nested meso scale catchments [D]. Braunschweig : Technical University Carolo-Wilhelmina,2014.

[39] HAMILTON A, MOORE R. Quantifying uncertainty in streamflow records [J]. Canadian Water Resources Journal,2012,37(1):3-21.

[40] 向鑫,敖天其,肖钦太. 基于 SWAT 模型的小流域非点源污染负荷分布模拟研究[J]. 水电能源科学,2022,40

(6): 41-44. (XIANG Xin, AO Tianqi, XIAO Quintai. Simulation of non-point source pollution load distribution in small watershed based on SWAT model [J]. Water Resources and Power, 2022, 40 (6): 41-44. (in Chinese))

[41] 赵串串,冯倩,侯文涛,等. 基于 AnnAGNPS 模型的澜河流域非点源污染模拟研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41 (3): 317-322. (ZHAO Chuanchuan, FENG Qian,HOU Wentao,et al. Simulation of non-point source pollution based on AnnAGNPS model in Bahe River Basin [J]. Environmental Pollution & Control,2019 41 (3): 317-322). (in Chinese))

(收稿日期:2023 -08 -09 编辑:王芳)

(上接第 97 页)

[21] 王树威,李建林,崔延华,等. 混沌理论与 BPNN 耦合的径流中长期预测模型[J]. 水资源与水工程学报,2021, 32(3):73-79. (WANG Shuwei, LI Jianlin, CUI Yanhua, et al. Medium and long term runoff prediction model coupled with chaos theory and BPNN[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32 (3): 73-79. (in Chinese))

[22] 张相,丁鸣鸣,林杰,等. 水蚀作用下红壤丘陵区土壤特性的空间分异特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47 (6): 77-84. (ZHANG Xiang, DING Mingming, LIN Jie, et al. Spatial differentiation of soil properties in hilly red soil region under water erosion[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition),2023,47(6): 77-84. (in Chinese))

[23] 滕文龙,丛炳虎,商云坤,等. 基于 MEA-BP 神经网络的

建筑能耗预测模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51 (5): 1857-1865. (TENG Wenlong, CONG Binghu, SHANG Yunkun, et al. Modeling of building energy consumption prediction based on MEA-BP neural network[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51 (5): 1857-1865. (in Chinese))

[24] 连运涛,王昱,郑健,等. 黑河流域上游水沙输移趋势及其成因分析[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(3): 98-104. (LIAN Yuntao, WANG Yu, ZHENG Jian, et al. The trend of runoff and sediment transport in the upper reaches of Heihe basin and its cause analysis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(3): 98-104. (in Chinese))

(收稿日期:2023 -08 -07 编辑:王芳)

(上接第 139 页)

[21] 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))

[22] ALMAMOON A, JAHAN S, HE X, et al. First flush analysis using a rainfall simulator on a micro catchment in an arid climate [J]. Science of the Total Environment, Elsevier,2019,693:133552.

[23] 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))

[24] HOSSAIN I, IMTEAZ M, GATO-TRINIDAD S, et al. Development of a catchment water quality model for continuous simulations of pollutants build-up and wash-off [J]. International Journal of Environmental and Ecological Engineering,2010,4(1):11-18.

(收稿日期:2023 -02 -09 编辑:王芳)

