

工程堆积体坡面侵蚀泥沙分选特性与运移机制研究

吴彤^{1,3}, 娄永才², 李永红², 孙贯芳², 齐星圆⁴, 杨树云², 赵莼²,
岑云峰², 周富宇², 艾建卫², 姚怡航^{1,3}, 张洵², 刘文博², 高照良^{1,2,3}

(1.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学水土保持研究所,
陕西 杨凌 712100;3.中国科学院大学,北京 100049;4.中兵勘察设计研究院有限公司,北京 100049)

摘要:为揭示工程堆积体陡坡坡面在径流驱动下侵蚀泥沙颗粒分选特征及搬运机制,设计了3种上方来水流量(10,20,30 L/min)下的野外模拟径流冲刷试验,对杨凌弃土工程堆积体陡坡坡面(32°)侵蚀泥沙的颗粒分布特征进行分析。结果表明:侵蚀泥沙(分散前)中黏粒、细粉粒较原始土壤明显增加,易产生侵蚀;径流对团粒破碎作用影响侵蚀泥沙黏粒含量,当径流功率 $<1.71\text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时,黏粒含量与径流功率呈负相关, $>3.89\text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时则呈正相关;侵蚀泥沙中细粉粒、粗粉粒主要以单粒的形式搬运,而黏粒以及砂粒多以团粒的形式搬运;侵蚀泥沙中黏粒表现为富集,砂粒表现为贫化;泥沙颗粒粒径决定其主要搬运形式, $<0.11\text{ mm}$ 的泥沙颗粒以悬移/跃移搬运为主, $>0.11\text{ mm}$ 的泥沙颗粒以滚动搬运为主;滚动搬运的贡献率随径流搬运能力的增强呈先增大后减小。研究结果将有助于揭示工程堆积体坡面水蚀过程机理,为提高工程堆积体陡坡坡面水蚀模型预测精度提供科学依据。

关键词: 侵蚀; 泥沙颗粒; 富集率; 搬运机制; 工程堆积体

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)06-0001-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.001

Sediment Sorting Characteristics and Transport Mechanism of Slope Erosion of Engineering Deposit

WU Tong^{1,3}, LOU Yongcai², LI Yonghong², SUN Guanfang², QI Xingyuan⁴,

YANG Shuyun², ZHAO Chun², CEN Yunfeng², ZHOU Fuyu²,

AI Jianwei², YAO Yihang^{1,3}, ZHANG Xun², LIU Wenbo², GAO Zhaoliang^{1,2,3}

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of
Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3.University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049; 4.China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing 100049)

Abstract: In order to reveal the sorting characteristics and transportation mechanism of erosion sediment driven by runoff on the steep slope of engineering deposit, the field simulated runoff scouring test under three upper inflows of 10, 20, and 30 L/min were designed, and the particle distribution characteristics of erosion sediment on the steep slope (32°) of the engineering deposit body in Yangling were analyzed. The results showed that the clay and fine silt in the eroded sediment (before dispersion) increased significantly compared with the original soil, which was easy to produce erosion. The fuction of runoff on the fragmentation of aggregates affected the clay content of eroded sediment. The clay content was negatively correlated with the runoff power when the runoff power was less than $1.71\text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$, but it was positively correlated when runoff power was greater than $3.89\text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$. In sediment, fine and coarse silt particles were mainly transported in the form of single grain, while clay and sand particles were mostly transported in the form of aggregates. In eroded sediment, clay particles were enriched and sand particles were depleted. The particle size of sediment determined its main transportation mode, sediment particles less than 0.11 mm were mainly suspension/saltation transport, and sediment particles more than 0.11 mm were mainly rolling transport. The contribution rate of rolling transport increased first and then decreased with the increasing of runoff transport capacity. The conclusion of this study was conducive to reveal the mechanism of slope water

收稿日期: 2022-04-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(41671283, 41807066); 国家重点研发计划项目(2016YFC0501706-02)

第一作者: 吴彤(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程建设区人为侵蚀过程研究。E-mail: wutong19@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 高照良(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程和荒漠化防治研究。E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn

erosion process of engineering deposit body, and could provide scientific basis for improving the prediction accuracy of slope water erosion model on the steep slope of engineering accumulation.

Keywords: erosion; sediment particles; enrichment rate; transport mechanism; engineering deposit

工程堆积体作为生产建设项目水土流失的主要策源地^[1],具有堆置坡度大、植被缺乏、土体结构松散和下垫面组成物质复杂等特性,导致其抗蚀、抗冲性差,在降雨和径流影响下极易造成严重的水土流失,从而对安全生产、区域生态环境产生威胁^[2]。因此,工程堆积体水土流失规律及其相关防治措施的研究备受关注。

侵蚀泥沙颗粒由原始颗粒和团聚体组成,其粒径通常称为有效粒径。不同有效粒级内所含泥沙颗粒的质量或体积分数则被称为侵蚀泥沙颗粒的粒径分布,其不仅可以反映坡面侵蚀泥沙分离、搬运、沉积的动态变化过程,也是构建坡面水蚀模型以及侵蚀物质扩散模型的重要参数^[3-5]。例如,WEPP 模型中采用 Foster 经验方程对侵蚀泥沙颗粒进行分级,从而模拟不同粒级泥沙搬运过程^[6];GUEST 模型利用 Hairsine-Rose 理论,通过不同粒级的侵蚀泥沙颗粒在径流中的沉降速度预测侵蚀过程^[7]。坡面水蚀预报以及面源污染模型的应用是生产建设项目水土流失防治的研究热点。目前,工程堆积体侵蚀预报模型中各因子多采用缓坡地上的经验公式,对于各影响因子需要进一步结合工程堆积体坡面侵蚀特征进一步科学系统地修正^[8]。因此,对工程堆积体坡面水蚀过程以及泥沙颗粒分布特征的探究具有重要意义。

土壤侵蚀是土壤颗粒在降雨及径流的驱动下被分离、搬运、沉积的过程,土壤性质、降雨、径流特性和坡面侵蚀形态的变化影响不同粒级泥沙颗粒被径流侵蚀搬运的方式以及程度,进一步使得坡面侵蚀具有分选性^[9-10]。Shi 等^[11]的研究结果表明,细沟间侵蚀阶段径流主要选择搬运细的土壤颗粒,细沟侵蚀阶段径流主要选择搬运较粗的土壤颗粒。随着侵蚀过程的不断发展,侵蚀泥沙颗粒组成逐渐与原始土壤颗粒组成相近,搬运不再具有分选性^[12]。薛孟君等^[13]研究发现,降雨初期侵蚀泥沙中黏粒和细粉粒先开始发生富集,而粗粉粒和砂粒则不易流失,但随降雨历时增加各级泥沙颗粒富集率趋近 1。然而也有学者^[14-15]研究发现,侵蚀泥沙颗粒呈双峰分布,即粗颗粒和细颗粒发生明显富集,而中间粒级发生贫化。上述研究结果出现差异性的原因主要与侵蚀泥沙颗粒的搬运方式有关,即悬移/跃移和滚动搬运的贡献率不同。泥沙颗粒的搬运方式与颗粒大小及径流特性有关,Moss 等^[16]的研究表明,以悬移质方式被搬运的泥沙颗粒粒径的上限值为 31 μm ,以跃移方式被搬运的泥沙颗粒粒径范围为 31~211 μm ,泥沙颗粒粒

级>211 μm 时一般以接触质的方式被搬运。Asadi 等^[17]的研究结果表明,滚动搬运的贡献率随径流功率的增大而增加,然而 Wang 等^[18]研究发现,滚动搬运的相对贡献率随着径流搬运能力的增大而有减小的趋势。侵蚀泥沙搬运方式的界定仍尚未有定论。目前对侵蚀泥沙颗粒分布特征的研究主要集中在自然缓坡或坡耕地条件下。而工程堆积体土壤性质、堆置条件及径流水力学特性不同于缓坡条件,泥沙颗粒的搬运以及沉积过程也有所不同,因此有必要对工程堆积体坡面侵蚀泥沙颗粒分布规律以及搬运机制进行研究。

本文采用径流冲刷试验模拟工程堆积体坡面水蚀过程,以泥沙颗粒为研究对象,探究工程堆积体陡坡坡面水蚀过程中各粒级泥沙颗粒的分布分选特性,阐明不同粒级泥沙颗粒的搬运方式,为揭示工程堆积体陡坡坡面水蚀过程机理,构建具有高精度、广泛适用性的工程堆积体坡面水蚀模型提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2018 年 7—9 月在中国科学院水利部水土保持研究所杨凌岭后试验站(34°19′24″N,107°59′36″E)进行。试验所用土样来自试验站边坡开挖产生的工程弃土,试验土壤机械组成为:黏粒含量 28.49%,细粉粒含量 31.87%,粗粉粒含量 27.73%,砂粒含量 11.90%,土壤质地为粉砂质黏土(国际制土壤质地分类标准)。为了保证试验土壤的自然状态,不过筛、不研磨仅剔除土样中的枯枝落叶、植被根系和砾石^[19]。

1.2 试验设计

试验采用野外模拟径流冲刷的方法,放水装置及其组成见图 1。根据黄土高原侵蚀性暴雨标准并结合典型工程堆积体上方汇水特征及前期试验的结果^[20],设计 3 种放水流量分别为 10, 20, 30 L/min,分别对应雨强 0.5, 1.0, 1.5 mm/min,放水冲刷时间为 45 min。径流小区设计为 20 m×1 m×0.5 m(长×宽×深)。野外调查结果显示关中平原工程堆积体坡度多集中在 26°~35°^[21],参考该坡度范围,试验径流小区坡度设计为 32°。小区土壤容重 1.25 g/m³,土壤质量含水率为 22%。

1.3 试验过程

为了使每个试验小区土壤含水量基本一致,试验前对坡面进行均匀洒水,直至坡面达到产流临界条件,随后用塑料薄膜覆盖静置 24 h。试验时,对放水

流量进行 3 次率定,流量率定误差为 5%。试验过程中,集流口出现连续水流后 0~6 min 内每隔 2 min 接取 1 次径流泥沙全样,6~45 min 内每隔 3 min 接取 1 次径流泥沙全样,同时采用 200 mL(±1 mL)的量筒收集泥沙全样用于测量泥沙粒径。流速采用高锰酸钾染色剂示踪法测定,将小区以 5 m 间隔自上而下(0~5,5~10,10~15,15~20 m)设置 4 个观测断面,4 个断面流速的平均值乘以修正系数后便是坡面的平均流速^[22],同时各断面利用钢尺测量流宽,4 个断面流宽的平均值作为坡面径流宽。试验结束后,用烘干法测定泥沙量。利用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度仪测量泥沙分散前、后各粒级颗粒含量,每个试验处理重复 2 次。

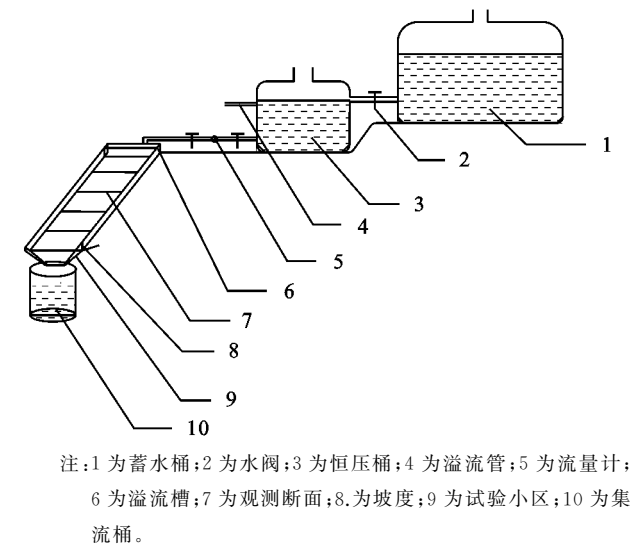


图 1 试验小区与防水装置示意

1.4 数据计算

(1)为了分析径流在泥沙搬运、团粒破碎等过程中的能量变化,采用水流功率(ω)作为侵蚀动力参数,径流功率越大,表明径流对坡面做功的能力越强,计算方式为:

$$\omega = \tau V \tag{1}$$

式中: ω 为水流功率[N/(m·s)]; V 为径流平均流速(m/s),由试验中测定的表层流速乘以校正系数 0.72 得到。 τ 为水流切应力(Pa),计算方法为:

$$\tau = \gamma_m g h J \tag{2}$$

式中: γ_m 为浑水密度(kg/m³); J 为水力坡度(m/m),可用坡度的正弦值近似代替; h 为径流深(m),采用的水深公式^[23]为

$$h = \frac{Q}{VbT} \tag{3}$$

式中: T 为取样时间间隔(s); Q 为 T 时段内流出小区的径流量(m³); b 为过水断面宽(m)。

(2)采用富集率(ER)描述侵蚀泥沙颗粒粒径分选特征。当 $ER > 1$ 时,表明该粒级颗粒在侵蚀过程

中发生富集,若 $ER < 1$,表明该粒级土壤颗粒在侵蚀过程中贫化。计算公式为:

$$ER = \frac{Fs}{Fr} \tag{4}$$

式中: F_s 为侵蚀泥沙分散后某粒级颗粒含量(%); F_r 为原始土壤分散后该粒级颗粒含量(%)。

(3)采用团聚率(AR)表征各粒级侵蚀泥沙颗粒在侵蚀过程中被搬运的形式(团粒/单粒)。当 $AR = 1$ 时,表明该粒级泥沙以单粒的形式被搬运;当 $AR \neq 1$ 时,表示该粒级泥沙以团粒或团粒与单粒混合的形式被搬运。计算公式为:

$$AR = \frac{E}{F} \tag{5}$$

式中: E 为侵蚀泥沙分散前某粒级颗粒含量(%); F 为侵蚀泥沙分散后该粒级颗粒含量(%)。

2 结果与分析

2.1 分散前侵蚀泥沙颗粒各粒级含量变化规律

研究^[24]表明,分散前侵蚀泥沙颗粒的分布状况能更好地反映坡面侵蚀泥沙运移的实际情况,因此,将不同放水流量下侵蚀泥沙分散前各粒级的含量绘成图 2。由图 2 可知,侵蚀泥沙颗粒中均以细粉粒和粗粉粒为主,占比>50%。各流量条件下侵蚀泥沙颗粒中黏粒、细粉粒含量均明显大于原始土壤,表明黏粒和细粉粒易被侵蚀;侵蚀泥沙中粗粉粒、砂粒含量小于原始土壤,表明粗粉粒、砂粒不易被侵蚀。此外,侵蚀泥沙中黏粒、细粉粒含量随着放水流量的增加呈先减小后增加,而砂粒含量则随着放水流量的增加呈先增加后减小。

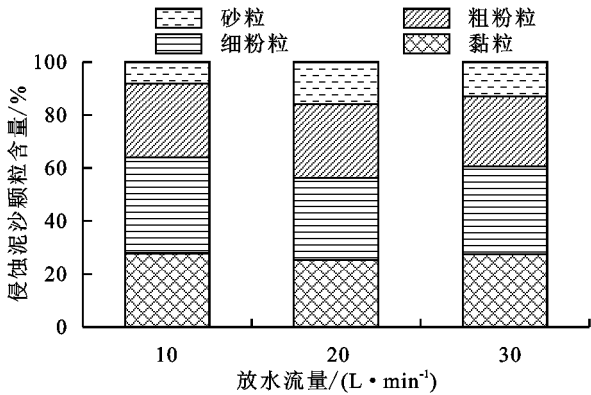


图 2 泥沙颗粒体积百分比

不同放水流量下侵蚀泥沙颗粒各粒级含量随冲刷历时的变化见图 3。随着放水流量的增加,侵蚀泥沙中黏粒含量的变化范围分别为 24%~32%,19%~27%和 23%~31%,变异系数分别为 8.47%,9.04%和 6.44%。细粉粒含量的变化范围分别为 29%~42%,26%~35%,27%~42%,且占比最高,变异系数随放水流量的增加分别为 8.68%,6.38%,11.05%;粗粉粒含量的变化范围分别为 21%~31%,26%~28%,21%~

29%,变异系数分别为 8.45%,2.69%,8.80%;砂粒含量的变化范围分别为 3%~16%,7%~24%,5%~27%,变异系数分别为 41.42%,27.53%,48.69%。由此可见,侵蚀泥沙中砂粒随冲刷历时变化波动剧烈,整体变异系数均大于 10%。

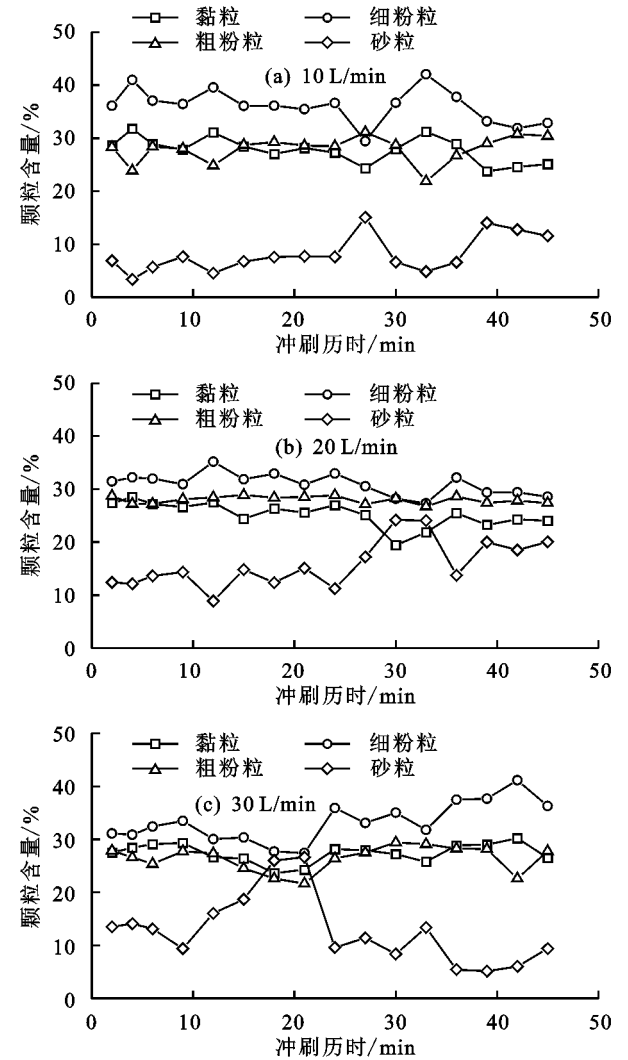


图 3 侵蚀泥沙颗粒含量随冲刷历时变化规律

侵蚀泥沙分散前各粒级颗粒含量随放水流量的增加呈分段变化,且其中大颗粒含量随冲刷历时变化波动剧烈。因此,引入径流功率分析径流对团粒的破碎作用。由图 4 可知,侵蚀泥沙中黏粒含量与径流功率的关系表现为分段函数。当径流功率 $<1.71\text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时,黏粒含量与径流功率呈负相关;径流功率 $>3.89\text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时,黏粒含量与径流功率呈正相关。这表明侵蚀泥沙中团粒在径流的剥离作用下发生破碎,从而释放出小颗粒(如黏粒),这种破碎作用随着径流能量的增加而增强。

2.2 侵蚀泥沙分选特性

富集率(ER)和团聚率(AR)是衡量侵蚀泥沙颗粒分选特性的指标,不同放水流量下侵蚀泥沙各粒级富集率和团聚率见表 1。不同放水流量下侵蚀泥沙中黏粒和细粉粒的 $ER>1$,表明侵蚀泥沙分散后黏

粒和细粉粒的颗粒含量均大于原始土壤中相应粒级的颗粒含量,即黏粒和细粉粒在侵蚀泥沙中产生富集;粗粉粒的 $ER=1$,表明侵蚀泥沙分散后该粒级含量等于原始土壤中该粒级的含量,即粗粉粒在侵蚀泥沙中未产生富集或贫化;砂粒的 $ER<1$,表明侵蚀泥沙分散后该粒级含量远小于原始土壤中该粒级的含量,即砂粒在侵蚀泥沙中表现为贫化。此外,随着放水流量的增加,砂粒的 ER 逐渐增大,而黏粒的 ER 逐渐减小。不同放水流量下侵蚀泥沙中黏粒的 $AR<1$,砂粒的 $AR>1$,细粉粒的 $AR=1$,说明侵蚀泥沙颗粒中黏粒和砂粒以团粒的形式被搬运,而细粉粒主要以单粒形式搬运。此外,当放水流量为 10,20 L/min 时粗粉粒的 $AR>1$,说明粗粉粒以团粒形式被搬运,30 L/min 时粗粉粒的 $AR=1$,此时粗粉粒主要以单粒形式搬运,即随着放水流量的增加,部分以团粒形式搬运的粗砂粒开始以单粒形式搬运。

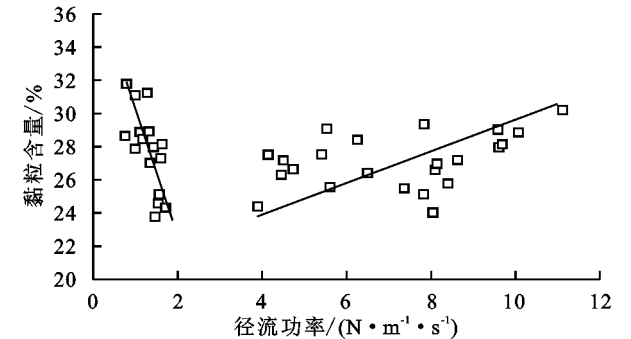


图 4 侵蚀泥沙黏粒含量随径流功率变化

表 1 不同流量下侵蚀泥沙各粒级颗粒富集率和团聚率

指标	放水流量/ (L·min ⁻¹)	黏粒	细粉粒	粗粉粒	砂粒
富集率(ER)	10	1.3	1.2	1.0	0.4
	20	1.2	1.1	1.0	0.5
	30	1.1	1.1	1.0	0.6
团聚率(AR)	10	0.8	1.0	1.2	2.2
	20	0.8	1.0	1.2	3.0
	30	0.7	1.0	1.0	2.0

2.3 侵蚀泥沙搬运机制

为了进一步阐明不同放水流量条件下侵蚀泥沙颗粒各粒级的搬运方式,首先将原始土壤的累积颗粒分布以 10%的含量进行 10 等分,得到 10 个颗粒含量均为 10%的粒级($<0.002,0.002\sim0.008\ 5,0.008\ 5\sim0.016,0.016\sim0.023,0.023\sim0.03,0.03\sim0.039,0.039\sim0.049,0.049\sim0.07,0.07\sim0.11,>0.11\text{ mm}$);其次划分出不同流量下、不同时段内侵蚀泥沙中以上各粒级颗粒分散前含量,当侵蚀泥沙中某粒级含量大于原始土壤中该粒级含量(10%)时,表明该粒级易被搬运,否则易产生沉积。将不同放水流量下 3 个不同时间段(0~6,24~30,39~45 min)各粒级泥沙颗粒含量绘于图 5。由图 5 可知,10 L/min 流量下,各时段内

侵蚀泥沙颗粒呈单峰分布,在 $<0.002\text{ mm}$ 处出现峰值,侵蚀泥沙颗粒以 0.023 mm 为分界线,小于该粒级的颗粒易被搬运,反之则易沉积。当放水流量增大至 20 L/min 时,易搬运粒级分界仍然为 0.023 mm ,在 $0\sim 6\text{ min}$ 时,侵蚀泥沙呈单峰分布,在 $<0.002\text{ mm}$ 处出现峰值,但 $24\sim 30\text{ min}$ 和 $39\sim 45\text{ min}$ 2个时间段内侵蚀泥沙呈双峰分布,在 $>0.11\text{ mm}$ 颗粒含量 $>10\%$,产生第2个易被搬运分界线。 30 L/min 放水流量时,侵蚀泥沙再次呈单峰分布,在 $<0.002\text{ mm}$ 处出现峰值,其在粒级 0.03 mm 处产生分界线,大于该粒级易搬运,小于该粒级易沉积。

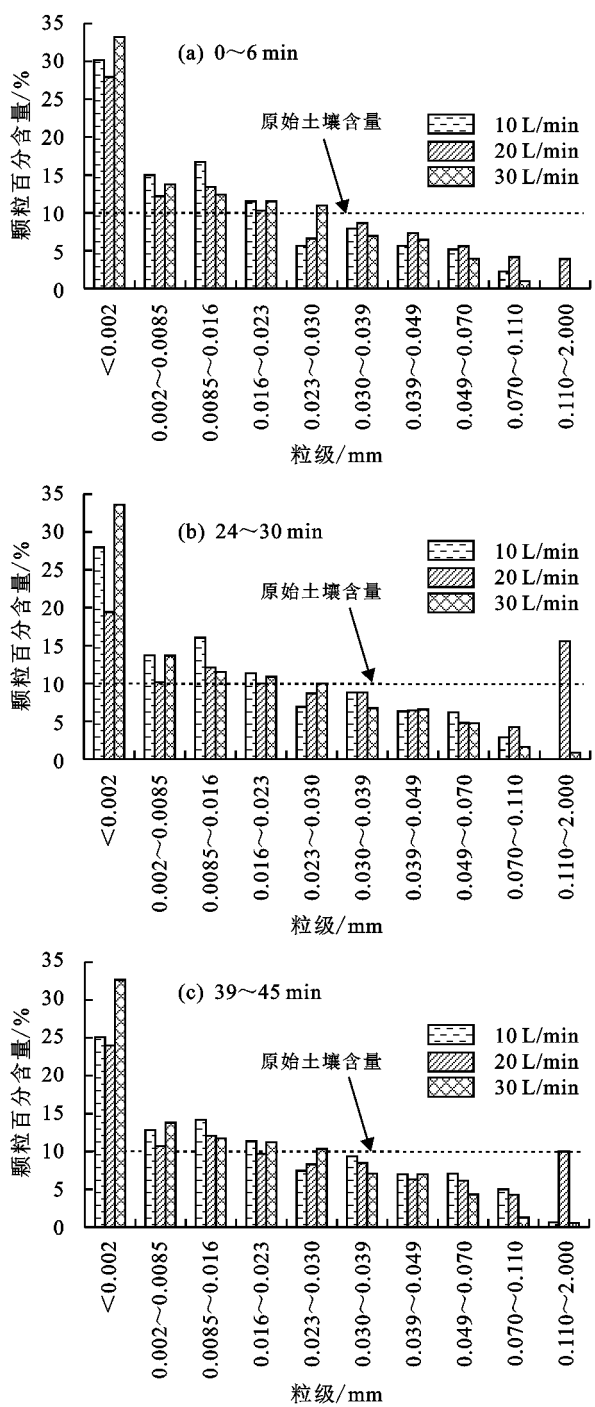


图 5 不同流量、不同时段泥沙粒径分布

坡面侵蚀过程中侵蚀泥沙颗粒通常以悬移/跃移或滚动的方式搬运,双峰分布是2种搬运机制共同作用的结果,当径流能量达到一定值时,大颗粒以滚动方式搬运,导致侵蚀泥沙中大颗粒含量增加。本试验中 10 L/min 放水流量条件下,径流能量不足以搬运大颗粒泥沙,泥沙颗粒呈单峰分布; 20 L/min 放水流量条件下侵蚀泥沙颗粒出现双峰分布。基于Asadi等^[25]提出基于最低效率搬运粒级的划分(LSD)方法, $10, 30\text{ L/min}$ 2种放水流量下,侵蚀泥沙搬运方式主要以悬移/跃移为主;在 20 L/min 时, $0\sim 6\text{ min}$ 侵蚀泥沙搬运方式以悬移/跃移为主, $24\sim 30, 39\sim 45\text{ min}$ 2个时间段内粒径 $<0.11\text{ mm}$ 泥沙颗粒以悬移/跃移的方式搬运,而粒径 $>0.11\text{ mm}$ 泥沙颗粒以滚动方式搬运。悬移/跃移和滚动2种搬运机制的相对贡献率见表2。由表2可知,悬移/跃移搬运是侵蚀泥沙的主要搬运方式,贡献率在80%以上; 10 L/min 放水流量时悬移/跃移搬运的贡献率随着冲刷历时有所减小; 20 L/min 放水流量下,大颗粒的滚动搬运随着径流的搬运能力增强而增加,悬移/跃移搬运的贡献率随冲刷历时呈先增大后减小; 30 L/min 放水流量下径流搬运和破坏能力逐渐增大,颗粒主要以悬移/跃移方式搬运,整个冲刷过程其贡献率 $>99\%$ 。此外,悬移/跃移搬运贡献率随着放水流量增加呈先减小后增大,滚动搬运贡献率随放水流量增加先增大后减小。

3 讨论

3.1 侵蚀泥沙分散前各粒级含量变化规律

采用野外模拟径流冲刷试验探究不同放水流量下工程堆积体坡面侵蚀泥沙颗粒的分布、分选特征和搬运机制,通过分析分散前侵蚀泥沙各粒级颗粒含量以及变化规律发现,与原始土壤相比,侵蚀泥沙中细颗粒(黏粒、细粉粒)含量明显增加,这表明该粒级土壤颗粒易被径流搬运产生侵蚀,这与张颖等^[26]对于侵蚀泥沙的观测结果不同,其原因主要是工程堆积体较传统缓坡有所不同:一方面,人为扰动对土壤具有一定的分散作用,可侵蚀的细颗粒较多;另一方面,工程堆积体由于其坡度及汇水面积较大,坡面形成径流后对团粒的破坏作用相对较强^[27]。侵蚀泥沙中砂粒含量整体小于原土壤,即不易被搬运,原因在于径流对侵蚀泥沙颗粒的搬运能力随着泥沙颗粒粒径的增大而减弱^[28]。侵蚀泥沙中砂粒含量随着放水流量的增大先减小后增大,黏粒、细粉粒则呈相反的变化趋势,这说明侵蚀泥沙各粒级含量变化受到径流搬运以及破碎2种作用的影响^[29]。为了进一步验证这2种作用,本试验分析发现,侵蚀泥沙黏粒含量随径流功率的变化呈分段函数(图4):当径流功率在较小范围内 $[<1.71\text{ N/(m}\cdot\text{s)}]$ 增大时,径

流对于大颗粒的搬运能力增加,导致细颗粒相对含量降低,当径流功率 $>3.89\text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$,径流对于团粒的破碎作用随着径流功率增大明显增强,使得一部分大颗粒破碎并释放细颗粒产生这种分段变化

表 2 各流量下悬移/跃移及滚动搬运相对贡献率

放水流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	悬移/跃移搬运贡献率/%			滚动搬运贡献率/%		
	0~6 min	24~30 min	39~45 min	0~6 min	24~30 min	39~45 min
10	97.77	97.16	94.99	2.23	2.84	5.01
20	96.13	84.43	91.01	3.87	15.57	9.99
30	99.06	99.18	99.45	0.94	0.82	0.55

3.2 侵蚀泥沙颗粒分选特性

在各放水流量条件下,黏粒在侵蚀泥沙中富集($ER>1$),而砂粒贫化($ER<1$),原因在于径流作为泥沙颗粒侵蚀搬运的动力和载体,其在与泥沙颗粒相互作用的过程中会首先选择性搬运土壤中较细的颗粒。因此,侵蚀泥沙中的黏粒相比原状土显著增加,从而导致黏粒的富集。而砂粒由于其质量较大,其启动和搬运所需的径流能量更大,且在径流搬运过程中更易沉积,在侵蚀泥沙中贫化^[31]。团聚率(AR)可以反映侵蚀过程中不同粒级泥沙颗粒被径流搬运的方式,在各放水流量下黏粒的 $AR<1$,砂粒的 $AR>1$,说明部分黏粒互相黏结而成粒径较大的黏粒团,并以此被搬运出坡面,这也证明堆积体坡面土壤在经人为扰动后仍然存在团粒结构。随着放水流量的增大,砂粒的 AR 呈先增大后减小,这主要是由于随放水流量的增大,径流能量的提高对大颗粒的搬运能力增加的同时对于团粒的破碎作用增强,导致被径流搬运移出坡面的团粒减少。

3.3 侵蚀泥沙颗粒搬运机制

泥沙的搬运机制主要划分为悬移/跃移搬运及滚动搬运。本试验中放水流量为 $10\text{ L}/\text{min}$ 时,侵蚀泥沙颗粒呈单峰分布,主要搬运机制为悬移/跃移,贡献率 $>95\%$,这是由于放水流量较小,径流对于大颗粒泥沙基本未产生搬运,侵蚀物质主要以悬移/跃移搬运的细颗粒为主; $20\text{ L}/\text{min}$ 流量下,随着冲刷历时增加,径流的搬运能力增强,较大的颗粒开始以滚动方式搬运,侵蚀泥沙颗粒呈双峰分布;当放水流量增大至 $30\text{ L}/\text{min}$ 时,径流搬运能力进一步增强,使得较小流量下部分以滚动搬运的颗粒转变为悬移/跃移搬运,侵蚀泥沙颗粒呈单峰分布。表明随着径流功率增大,径流对于大颗粒搬运能力增强,以悬移/跃移方式搬运的颗粒粒级上限(LST)增大,与 Asadi 等^[25]的研究结论一致。然而滚动搬运的贡献率随着冲刷历时的增加呈先增大后减小的趋势,与 Wang 等^[18]研究得出其贡献率单向变化的结论有所差异。造成这种差异的原因有:工程堆积体坡面土壤经人为扰动后

的现象,导致黏粒含量随着放水流量梯度增加而增加。另外,侵蚀泥沙砂粒含量随冲刷历时变化波动剧烈,变化范围较大,这是由于随侵蚀形态发育变化径流搬运能力有所不同^[30]。

团粒稳定性与传统缓坡有所不同;降雨对坡面径流具有紊动作用,其对泥沙颗粒的搬运能力与未紊动的径流有所不同^[32];另外,当径流功率大于一定值后,径流的剥离能力导致更多的团粒被破碎,从而使泥沙中的细颗粒增多,悬移/跃移搬运的贡献率增大,即径流功率由于径流的搬运与破碎作用存在 1 个阈值。因而大流量下滚动搬运的贡献率进一步降低,且随冲刷历时也呈降低的趋势。

4 结论

(1)工程堆积体坡面侵蚀过程中,黏粒和细粉粒更易被径流侵蚀搬运,与原状土相比,该粒级含量在侵蚀泥沙中明显增加;砂粒易发生沉积,其含量在侵蚀泥沙中明显减少。

(2)径流对于泥沙颗粒存在搬运、破碎 2 种作用。径流功率越大,团粒破碎越严重:当径流功率 $<1.71\text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时,泥沙黏粒含量与径流功率呈负相关, $>3.89\text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 时呈正相关。

(3)侵蚀泥沙中黏粒($<0.02\text{ mm}$)和砂粒($>0.05\text{ mm}$)的 AR 值都不等于 1,其多以团粒被搬运,分散后团粒破碎,泥沙中黏粒含量增多;黏粒相较砂粒易被径流搬运,因此与原状土壤相比,泥沙颗粒中黏粒产生富集,而砂粒产生贫化。

(4)泥沙颗粒的搬运方式与颗粒大小及径流的搬运能力有关,小颗粒泥沙($<0.11\text{ mm}$)以悬移/跃移搬运为主,大颗粒($>0.11\text{ mm}$)泥沙以滚动搬运为主,以悬移/跃移搬运的颗粒粒级上限随径流搬运能力的增加而有所提高,而滚动搬运的贡献率随径流搬运能力的增强呈先增大后减小的趋势。

参考文献:

[1] 张乐涛,高照良,田红卫.工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J].农业工程学报,2013,29(24):94-102.

[2] Zhang L T, Gao Z L, Yang S W, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap[J].Catena,2015,128:108-121.

[3] Hao H X, Wang J G, Guo Z L, et al. Water erosion

- processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow[J].Catena,2019,173:494-504.
- [4] Saygin S D, Erpul G. Modeling aggregate size distribution of eroded sediment resulting from rain-splash and raindrop impacted flow processes[J].International Journal of Sediment Research,2019,34(2):166-177.
- [5] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology [J]. Transactions of the ASAE,1989,32(5):1587-1593.
- [6] Foster G R. Erosion and sediment transport processes for agricultural watersheds - science direct[J].Developments in Environmental Modelling,1986,10:111-122.
- [7] Hairsine P B, Rose C W. Rainfall detachment and deposition: Sediment transport in the absence of flow-driven processes[J].Soil Science Society of America Journal,1991,55(2):320-324.
- [8] 黄鹏飞,王文龙,江忠善,等.黄土区工程堆积体水蚀测算模型坡度因子研究[J].泥沙研究,2015(5):57-62.
- [9] Proffitt A, Rose C. Soil erosion processes. II. Settling velocity characteristics of eroded sediment[J].Australian Journal of Soil Research,1991,29(5):685-695.
- [10] Wan Y, El-Swaify S A. Characterizing inter rill sediment size by partitioning splash and wash processes [J].Soil Science Society of America Journal,1998,62(2):430-437.
- [11] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J].Journal of Hydrology,2012,454/455:123-130.
- [12] 陈卓,高照良,李永红,等.2种扰动土壤工程堆积体坡面泥沙运移特征比对研究[J].水土保持学报,2020,34(1):34-40.
- [13] 薛孟君,马岚,张栋,等.雨强对华北土石山区坡面侵蚀及其颗粒富集过程的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):11-17.
- [14] Loch R J, Donnollan T E. Field rainfall simulator studies on two clay soils of the Darling Downs, Queensland. I. The effect of plot length and tillage orientation on erosion processes and runoff and erosion rates[J].Soil Research,1983,21(1):1-15.
- [15] Asadi H, Ghadiri H, Rose C W, et al. Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2010,32(5):711-724.
- [16] Moss A J, Walker P H, Hutka J. Raindrop-stimulated transportation in shallow water flows: An experimental study[J].Sedimentary Geology,1979,22(3/4):165-184.
- [17] Asadi H, Ghadiri H, Rose C W, et al. An investigation of flow-driven soil erosion processes at low stream powers [J].Journal of Hydrology,2007,342(1/2):134-142.
- [18] Wang L, Shi Z H. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes[J].Soil Science Society of America Journal,2015,79(3):917-929.
- [19] Niu Y B, Gao Z L, Li Y H, et al. Characteristics of rill erosion in spoil heaps under simulated inflow: A field runoff plot experiment[J].Soil and Tillage Research,2020,202:e104655.
- [20] 周佩华,王占礼,黄土高原土壤侵蚀暴雨标准[J].水土保持通报,1987(1):38-44.
- [21] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体下垫面仿真模拟标准化参数[J].水土保持学报,2012,26(5):229-234.
- [22] 姜永才,高照良,李永红,等.不同上方来水模式下工程堆积体坡面的植被调控[J].农业工程学报,2019,35(24):144-153.
- [23] 刘青泉,安翼.土壤侵蚀的3个基本动力学过程[J].科技导报,2007,25(14):28-37.
- [24] Slattery M C, Burt T P. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow [J].Earth Surface Processes and Landforms,2015,22(8):705-719.
- [25] Asadi H, Moussavi A, Ghadiri H, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment[J].Journal of Hydrology,2011,406(1):73-81.
- [26] 张颖,郑西来,张晓晖,等.黄土高原幼树对坡面流体力学特性及泥沙颗粒组成的影响[J].水土保持通报,2011,31(4):7-11,15.
- [27] 邹小阳,周旺,孙文俊,等.工程堆积体土壤侵蚀影响因素国内研究进展[J].东北农业科学,2021,46(1):57-61.
- [28] Foster G R, Young R A, Neibling W H. Sediment composition for nonpoint source pollution analyses[J]. Transactions of the ASAE,1985,28(1):133-139.
- [29] Kinnell P I A. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review[J].Hydrological Processes,2010,19(14):2815-2844.
- [30] Hairsine P B, Sander G C, Rose C W, et al. Unsteady soil erosion due to rainfall impact: a model of sediment sorting on the hillslope[J].Journal of Hydrology,1999,220(3/4):115-128.
- [31] 吴凤至,史志华,方怒放,等.不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律[J].环境科学,2012,33(7):2497-2502.
- [32] 徐震,高建恩,赵春红,等.雨滴击溅对坡面径流输沙的影响[J].水土保持学报,2010,24(6):20-23.