

2种扰动土壤工程堆积体坡面泥沙运移特征比对研究

陈卓¹, 高照良^{1,2}, 李永红², 牛耀彬^{1,2}, 赵晶³, 张恒¹, 苏媛²

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.生态环境部环境工程评估中心, 北京 100012)

摘要: 为探究不同土壤类型对工程堆积体坡面侵蚀泥沙搬运的影响, 选取构筑堆积体的2种扰动土壤, 设定4个放水梯度(8, 12, 16, 20 L/min)在32°条件下进行野外冲刷试验。结果表明: 2种坡面产流产沙率均随冲刷延时呈“多峰多谷”变化; 较扰动风沙土堆积体, 扰动红壤堆积体产流产沙率均随流量增加上升速率较缓; 流量20 L/min时, 重力在扰动风沙土堆积体坡面侵蚀中发挥主导作用; 各放水梯度下2种堆积体坡面累积产沙量与累积径流量均呈极显著线性关系($P < 0.01, R^2 > 0.99$); 随流量增大, 搬运泥沙颗粒组成均接近原状土, 扰动风沙土坡面径流搬运泥沙颗粒以砂粒为主($> 60\%$), 扰动红壤坡面径流搬运泥沙颗粒各组分比例相对均匀(各组分含量为24%~41%)。该研究结果可为不同土壤类型堆积体坡面水土流失防控措施科学配置提供理论依据。

关键词: 红壤; 风沙土; 土壤侵蚀; 工程堆积体; 比对研究

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0034-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.005

Comparative Study of Sediment Particle Transport on Slopes of Two Disturbed Soil Engineering Accumulations

CHEN Zhuo¹, GAO Zhaoliang^{1,2}, LI Yonghong²,

NIU Yaobin¹, ZHAO Jing³, ZHANG Heng¹, SU Yuan²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012)

Abstract: In order to study the effects of different soils on sediments particle transport on slopes of engineering accumulation, a field scouring experiment was carried out under two kinds of disturbed soil, red and aeolian sandy soil, four flow gradients 8, 12, 16 and 20 L/min, and under the condition of 32°. The results showed that: (1) The runoff and sediment yield of the two accumulation slopes showed a “multi-peak and multi-valley” change process with time. (2) Compared with the disturbed aeolian sandy soil accumulation, the rate of sediment yield on the slope of disturbed red soil accumulation increased slowly with the increasing discharge flow rates. When the discharge flow rate was 20 L/min, the gravity factor played a leading role in the slope erosion of aeolian sandy soil accumulation. (3) The cumulative sediment yield of the two engineering accumulations was significantly correlated with the cumulative runoff, which could be described by linear function ($P < 0.01, R^2 > 0.99$). (4) With the increase of discharge rates, the proportion of sediment particles transported on the slope of the accumulation was close to the original soil. The main erosion sediment particles of the aeolian sandy soil were sand grains ($> 60\%$), the proportion of transportation of red soil particles was relatively uniform (the sediment transport contents ranged from 24% to 41% for each particle size). The difference in slope erosion of different accumulations was closely related to soil texture. These results could provide theoretical basis for the prevention and control measures for soil erosion on slopes of different soil types.

Keywords: red soil; aeolian sandy soil; soil erosion; engineering accumulation; comparative study

收稿日期: 2019-06-27

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

第一作者: 陈卓(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事工程建设区人为侵蚀过程研究。E-mail: ccc_zzz@nwfufu.edu.cn

通信作者: 高照良(1969—), 男, 博士, 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

工程堆积体作为生产建设过程中形成的具有独特微地貌形态的弃土弃渣体,是由高填深挖、掘进、爆破等行为产生的土、砂、石及土壤母质等组成的混合物^[1]。堆积体表面松散、物质组成不均、土壤结构遭到破坏,且边坡坡度陡、高度大^[2]。独特的形态结构特征决定了工程堆积体极易产生强烈的水土流失。近年来,随生产建设项目数量和规模的大幅度提升,工程堆积体数量也显著上升,由此造成的人为水土流失愈加严重。据调查^[3]，“十一五”期间全国开发建设项目扰动地表面积达 6.16 万 km²,产生弃土弃渣 100 多亿 t,为水土流失储备了大量物质源,使生态环境压力骤升,下游水源和行洪安全遭到威胁。

坡面是土壤侵蚀研究的基本单元,其土壤颗粒的搬运、沉积机制一直是土壤侵蚀研究的前沿^[4],不同土壤颗粒的搬运机制存在较大差异。相关研究^[5]表明,坡面侵蚀以溅蚀为主时,搬运颗粒多为黏粒;以片蚀和细沟侵蚀为主时,搬运颗粒多为粉沙粒;以沟蚀为主时,搬运则多为沙粒。不同土壤类型侵蚀规律间共性与差异并存。孙丽丽等^[6]研究认为,雨强与紫色土坡面产流产沙呈极显著正相关,雨强越大,紫色土坡面土壤侵蚀率越大;王凯等^[7]在黄壤坡面侵蚀中得到土壤分离速率与流量、径流剪切力等多个水动力学参数都呈正相关关系,采用水流功率估算土壤分离速率则更为精确;李桂芳^[8]研究认为,黑土坡面降雨侵蚀动力条件下坡面侵蚀量与径流剪切力、径流功率间无显著的线性关系,而与径流流速呈极显著正相关;Walker 等^[9]研究发现,降雨侵蚀下非黏性砂土坡面的产沙速率是同等径流条件下的 5 倍左右。尽管已有研究在泥沙颗粒运移特点、侵蚀产流产沙规律等方面均做出了极为详细的探究,但其研究多聚焦于自然坡面或坡耕地,而工程堆积体作为生产建设项目扰动土体形成的独特微地貌地形,边坡高陡,侵蚀过程与低缓自然坡面和扰动轻微的坡耕地差异较大。当前对不同土壤类型下工程堆积体坡面侵蚀过程的研究刚刚起步,其侵蚀过程间的异同尚不清楚,亟需开展以阐明不同土壤类型坡面侵蚀的内在机理为核心的有关研究,为合理配置防控措施提供科学指导。

南方红壤在我国农业乃至整个国民经济中发挥着重要作用,风沙土则是干旱与半干旱地区主要受风蚀形成的土壤,对其进行深入研究有利于旱区的植被恢复。故本文选取我国南北方的典型土壤^[10-11]—红壤和风沙土,通过野外模拟径流冲刷试验,探究不同放水流量下扰动红壤和扰动风沙土堆积体坡面的产流产沙过程和侵蚀泥沙搬运之间的规律,揭示土壤类型和堆积体坡面产流产沙的内在联系,阐明土壤类型与堆积体坡面泥沙搬运的关系,以期能揭示工程堆积

体坡面侵蚀机理,为构建坡面侵蚀预报模型、合理配置水土保持措施提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用扰动红壤采自江西省新建县境内“枫生高速”建设形成的工程堆积体(29°24′14″N, 116°25′21″E),容重为 1.30 g/cm³,含水量为 21.03%;扰动风沙土采自陕西省靖边县境内“榆靖高速”建设形成的工程堆积体(37°23′37″N, 109°01′21″E),容重为 1.29 g/cm³,含水量为 10.71%。扰动红壤、扰动风沙土机械组成见表 1。

表 1 试验土壤机械组成 单位:%

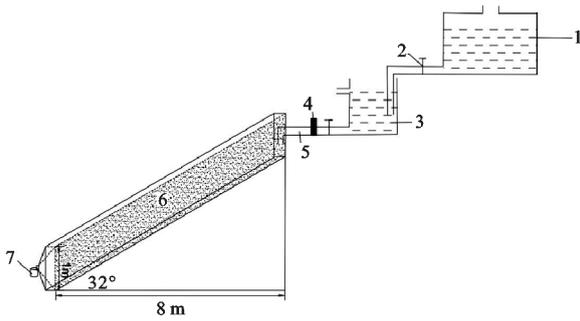
供试土壤	黏粒 (< 0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.02 mm)	砂粒 (0.02~2 mm)
扰动红壤	30.33	29.40	40.27
扰动风沙土	9.94	16.52	73.54

1.2 试验方法

试验与 2017 年 6—9 月在中国科学院水利部水土保持研究所杨凌水土保持野外科学试验站(34°19′24.84″N, 107°59′36.12″E)进行。试验开展前期对陕西境内“十天高速”建设形成的多个工程堆积体实地考察,了解到实际工程建设过程中堆积体的堆土是经过逐层碾压填入的,加之经几年降雨沉降,堆积体边坡多为有一定容重的压实土方,故试验小区土壤采用分层碾压、散乱堆置的方式均匀填入。结合已有研究^[12-13]和野外调查成果,确定试验小区规格为 8 m×1 m,覆土厚度 0.5 m,坡度为 32°。根据试验区暴雨发生频率及试验站径流小区观测资料推算,设定本试验放水流量梯度为 8, 12, 16, 20 L/min,其对应的降雨强度分别为 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm/min,率定误差不超过 5%,设计放水时间为 45 min。试验前 1 天,在土壤表面均匀洒水至水分饱和但不产流,确保每次试验前期土壤含水量基本一致,消除地表处理的差异性^[14]。试验结束后对坡面土壤进行翻晒、填平、压实。放水装置包括储水桶、流量调节阀、恒压桶、稳流槽等,用恒压桶、稳流槽、水阀等保持放水流量恒定。放水装置见图 1。

试验小区按每隔 2 m 分为 4 个断面,试验前用环刀取断面表层土(0—20 cm)测定初始土壤容重和含水率(土壤容重为 1.22~1.48 g/cm³,含水率为 15.20%~17.86%)。自径流小区出口有稳定出流后开始计时,前 3 min 每 1 min 测定 1 次断面稳定流速、水深、接取泥沙样品 1 000 mL,此后每 3 min 测定 1 次,共计 15 次。试验水温由温度计测得;坡面流速水流电解质薄层水流测定仪(JZ-NB1710)结合高锰酸钾染色示踪法^[15]测得。试验中所涉及坡面长度

均为投影长度。



注:1为储水桶;2为流量调节阀;3为恒压桶;4为流量计;5为溢流槽;6为试验小区;7为集流桶。

图1 放水装置示意

1.3 数据分析

(1)产流率(V_q , mL/($m^2 \cdot s$)):单位时间单位面积的产流量,计算公式为:

$$V_q = Q/bLT \quad (1)$$

式中: Q 为 T 时间内的径流量(mL); T 为观测时长(s); b 为过水断面宽度(m); L 为试验小区坡长(m)。

(2)产沙率(S_v , g/($m^2 \cdot s$)):单位时间单位面积的产沙量,计算公式为:

$$S_v = G/bLT \quad (2)$$

式中: G 为 T 时间内的泥沙质量(g)。

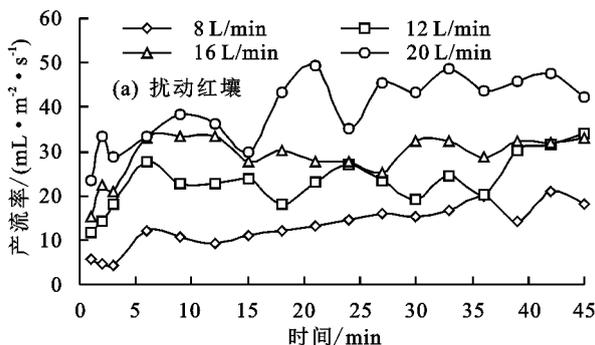
(3)富集率(ER)^[16]:表述土壤流失过程中泥沙颗粒的富集现象。

$$ER = D/N \quad (3)$$

式中: D 为侵蚀泥沙颗粒含量(%); N 为原状土颗粒含量(%)。

泥沙样品采用烘干法处理,颗粒组成利用 Malvern Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪测定。

Michael 等^[17]研究发现,未经分散处理的泥沙样品更能反映泥沙侵蚀的运移过程。故对所得泥沙样品不经分散处理进行土壤机械组成分析,利用 MS-2000



激光粒度仪测定泥沙样品机械组成。采用国际制土壤质地分级标准,划分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒($0.02 \sim 0.002$ mm)和砂粒($2 \sim 0.02$ mm)。

2 结果与分析

2.1 堆积体坡面土壤侵蚀过程

2.1.1 堆积体坡面产流特征 试验自坡面径流收集口有稳定出流时开始计时,由图 2 可知,不同流量下,扰动红壤和扰动风沙土坡面产流率变化趋势整体一致,表现为随时间延续小幅波动增大。坡面产流开始 3 min 后,产流率出现大幅度跳跃式增长,9~45 min 间增长幅度相对稳定。扰动红壤和扰动风沙土坡面产流率基本稳定在 5~20 L/min。放水流量 20 L/min 时产流率的波动性最大,坡面径流随流量增大紊动性增强,产流率波动相应越剧烈。扰动红壤坡面产流率最小为 4.26 mL/($m^2 \cdot s$),最大为 49.32 mL/($m^2 \cdot s$);扰动风沙土坡面产流率最小为 6.27 mL/($m^2 \cdot s$),最大为 56.38 mL/($m^2 \cdot s$)。

对比扰动红壤和扰动风沙土坡面的产流过程,放水流量从 8 L/min 增加至 12,16,20 L/min,每阶段对应的产流率与 8 L/min 相比,红壤平均增加了 101.62%, 157.01%, 249.66%;风沙土平均增加了 74.19%, 33.49%, 200.48%。随放水流量增加,扰动红壤坡面产流率增幅稳定,扰动风沙土坡面产流率相对波动很大,最大增幅达 4.22 倍。流量 20 L/min 时,扰动风沙土坡面细沟侵蚀发育迅速,在水力和重力作用共同影响下局部出现沟头坍塌的现象,产流率明显大于另外 3 种流量。这可能是此时重力作用超过了水力作用,重力对坡面侵蚀产生的影响成为主导因素。一定范围内,扰动风沙土坡面水分入渗率略小于扰动红壤坡面,试验中表现为 8~16 L/min 放水流量时,扰动红壤坡面的产流率都稍大于扰动风沙土。

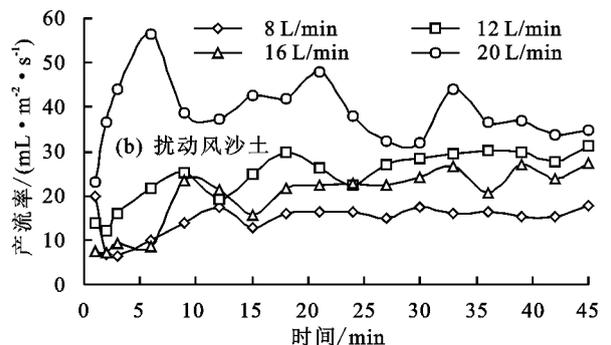


图2 不同流量下扰动红壤、扰动风沙土坡面产流趋势

2.1.2 堆积体坡面产沙特征 径流对坡面泥沙搬运能力的大小可以通过坡面产沙率的量化来反映,不同放水流量下扰动红壤和扰动风沙土堆积体坡面产沙率随时间的变化规律见图 3。结合图 2 可知,扰动红壤和扰动风沙土坡面产沙率的变化特征与产流率关

系密切。试验条件下,随放水时间延续,2 种质地坡面产沙率整体处于一种波动变化状态,表现出“多峰多谷”的特点。径流冲刷是泥沙搬运的动力条件,产沙率与产流率的变化趋势大体一致,呈现为随时间延续波动性减小,随流量增大跳跃点增多。

对比 2 种坡面的产沙过程,放水流量从 8 L/min 增加至 12,16,20 L/min,每阶段对应的产沙率与 8 L/min 相比,红壤平均增加了 186.95%,281.58%,439.39%;风沙土平均增加了 96.57%,72.30%,509.12%。2 种坡面产流率最终稳定值有所不同,扰动风沙土产沙率多集中于 2.66~15.16 g/(m²·s),扰动红壤则

略显分散,多在 4.24~23.30 g/(m²·s) 范围内变化。除重力作用明显的 20 L/min 流量外,2 种坡面产沙率的变化趋势均相对稳定。放水流量 20 L/min 时,扰动风沙土坡面产沙率明显大于扰动红壤,而产流率只是略大于扰动红壤(图 2),表明径流在搬运风沙土颗粒时受到的抵抗力小,风沙土抗蚀性差。

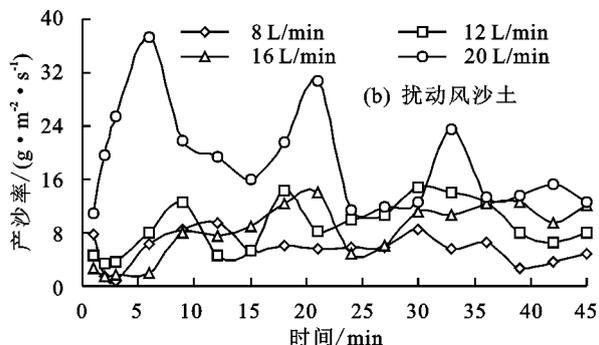
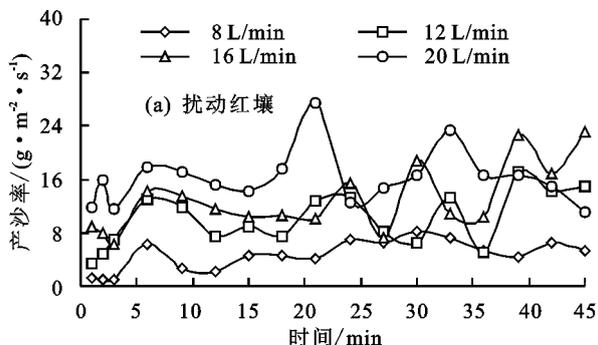


图 3 不同流量下扰动红壤、扰动风沙土坡面产沙趋势

2.1.3 堆积体坡面水沙关系 比较 2 种坡面的产流、产沙曲线(图 2、图 3)可知,产沙率变化趋势与产流率基本一致,且较产流率波动稍剧烈。产流是产沙的前提,坡面径流的产生为土壤侵蚀提供了动力条件,径流量越大,产生的土壤剥蚀力越大,土粒更易被水流搬运,从而造成坡面泥沙的输移。放水流量越大,径流动力越强,产流产沙量越大。

增加,二者表现为极显著的线性关系($P < 0.01, R^2 > 0.99$)。综合比较图 2~图 4 可以看出,流量 20 L/min 时,扰动风沙土的坡面水沙关系差异明显,放水初期风沙土产流产沙率激增,明显大于另外 3 种流量,也大幅度大于扰动红壤坡面。之前分析了这种原因可能是随着放水流量的增加,风沙土对重力因素的敏感程度强于红壤。20 L/min 是否为重力因子起主导作用的临界放水流量还需要后续试验进一步验证。

对 2 种坡面的累积产流量与累积产沙量进行拟合(图 4、表 2),累积产沙量随累积产流量的增加而

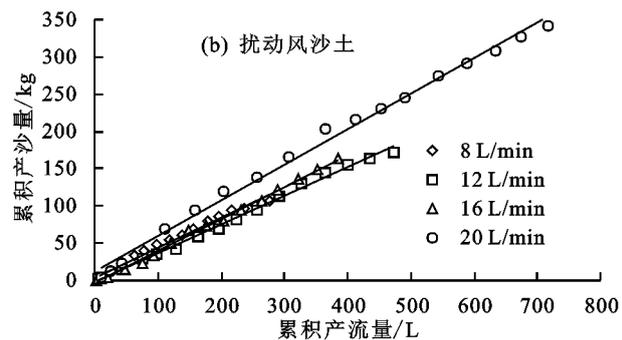
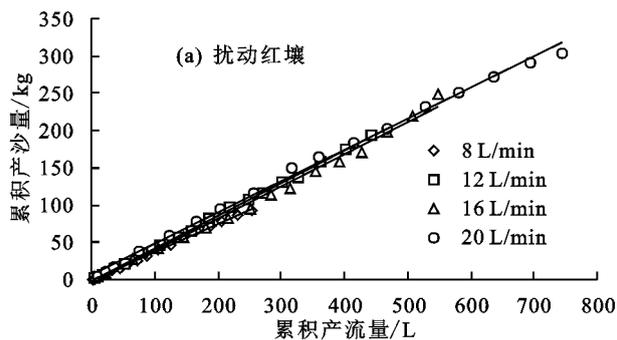


图 4 不同流量下扰动红壤、扰动风沙土累积水沙关系拟合

表 2 不同流量下累积水沙拟合结果

供试土壤	流量/(L·min ⁻¹)	拟合公式	相关系数(R ²)
扰动红壤	8	y=0.38x-0.60	1.00**
扰动红壤	12	y=0.44x-1.23	1.00**
扰动红壤	16	y=0.43x-4.71	1.00**
扰动红壤	20	y=0.42x+7.47	1.00**
扰动风沙土	8	y=0.40x+4.00	0.99**
扰动风沙土	12	y=0.38x-1.80	1.00**
扰动风沙土	16	y=0.43x-3.27	1.00**
扰动风沙土	20	y=0.48x+12.71	1.00**

注:y 为累积产沙量(kg);x 为累积产流量(L);** 表示 0.01 水平显著相关。

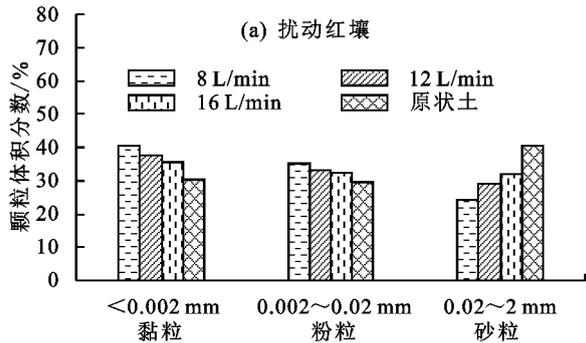
2.2 工程堆积体坡面侵蚀泥沙颗粒特性

坡面侵蚀过程中,泥沙搬运特性不仅与径流水动力学因素有关,还与泥沙自身性质有关^[18]。由于流量 20 L/min 时,重力因子对坡面侵蚀的影响开始显现,为分析影响因素一致时的侵蚀泥沙颗粒组成特性,本文选取重力因子影响还未显现的 8,12,16 L/min 放水流量进行室内粒径分析。

2.2.1 各级泥沙颗粒含量变化规律 由图 5 可知,原状土各粒径含量中<0.002 mm 占 30.33%,0.002~0.02 mm 占 29.40%,0.02~2 mm 占 40.26%。当放水流量从 8 L/min 增加至 12,16 L/min 时,<0.002,0.002~0.02 mm 侵蚀颗粒含量呈梯度减少,0.02~2 mm 则增多。径流冲刷条件下,<0.002 mm 的黏性颗

粒含量最多,冲刷难度小;0.02~2 mm 的砂粒含量最少,冲刷难度最大。各侵蚀泥沙颗粒含量随放水流量增大不断与红壤原状土的颗粒组成相近。

扰动风沙土坡面原状土各粒径含量中<0.002 mm 占 9.94%,0.002~0.02 mm 占 16.52%,0.02~2 mm 占 73.54%。当放水流量从 8 L/min 增加至 12,16 L/min 时,各侵蚀泥沙颗粒含量变化趋势与扰动红壤相似。由于风沙土自身质地的原因,径流冲刷下侵



蚀泥沙不同颗粒百分含量差异很大,0.02~2 mm 的砂粒含量最多,并且随着放水流量的增大各侵蚀泥沙颗粒含量不断向原状土靠拢。

综上,8~16 L/min 放水流量下,黏粒搬运难度小,砂粒搬运难度大。扰动红壤坡面各颗粒搬运含量较风沙土均匀,扰动风沙土坡面颗粒搬运以砂粒为主,随放水流量增大坡面被搬运泥沙颗粒比例不断接近原状土。

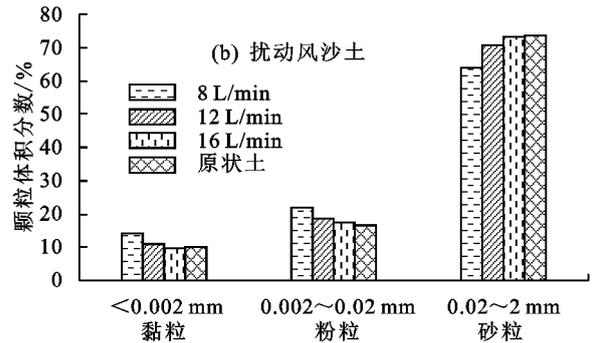


图 5 不同流量下扰动红壤和扰动风沙土坡面各粒径侵蚀泥沙颗粒及原状土含量

2.2.2 各级泥沙颗粒富集率变化规律 泥沙富集率是用来表述土壤流失过程中泥沙颗粒富集现象的一个概念。富集率 $ER > 1$ 时,表示某一粒级侵蚀泥沙颗粒含量大于原状土,发生富集;富集率 $ER < 1$ 时,表示某一粒级侵蚀泥沙颗粒含量小于原状土,发生分散^[19]。由侵蚀泥沙颗粒含量与原状土颗粒含量之比计算得到不同粒径的侵蚀泥沙颗粒富集率(图 6)。

放水流量 8,12,16 L/min 时,扰动红壤坡面泥沙搬运过程中各颗粒富集率分别为黏粒 1.33,1.25,1.17,粉粒 1.20,1.12,1.11,砂粒 0.60,0.72,0.79。黏粒和粉粒富集率 $ER > 1$,砂粒 $ER < 1$,表明红壤侵蚀泥沙颗粒的富集主要以黏粒、粉粒为主,径流冲刷时细颗粒更易被搬运发生富集。扰动风沙土坡面侵蚀过程中各颗粒富集率分别为黏粒 1.43,1.11,0.97,粉粒

1.33,1.12,1.04,砂粒 0.87,0.96,1.00。流量 16 L/min 时扰动风沙土坡面搬运泥沙颗粒含量区别于红壤,黏、粉、砂粒富集率都趋于 1,接近原状土的颗粒组成。不同流量下 2 种扰动土壤搬运泥沙颗粒规律大体上呈现一致,表现为随流量增大侵蚀泥沙含量逐渐与原状土组成相似,这也与 Asadi 等^[20]的研究结果一致。

放水流量较小时黏粒、粉粒易被径流搬运发生富集^[21],流量超出一定界限后黏粒、粉粒开始分散,砂粒发生富集,侵蚀泥沙颗粒有逐渐变粗的趋势,本试验表现为随流量增大(8~16 L/min)黏粒、粉粒富集率递减,砂粒富集率递增。相对于原始土壤颗粒而言,随着径流增大,大粒径的侵蚀泥沙颗粒逐渐增加,小粒径减少,到达稳定状态后侵蚀泥沙颗粒组成则与原始土壤颗粒组成相似。

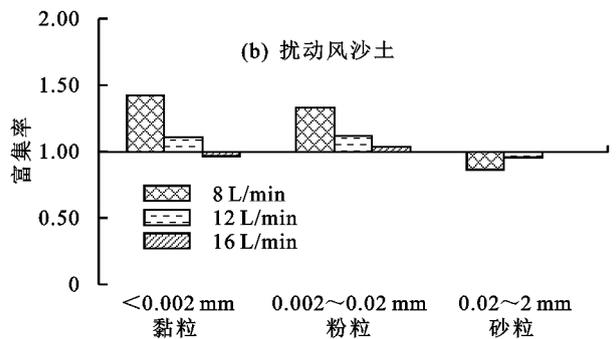
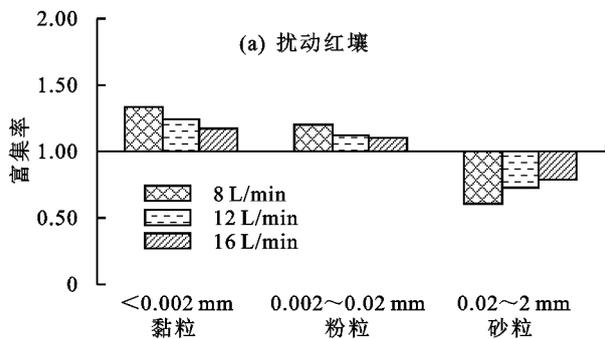


图 6 不同流量下扰动红壤和扰动风沙土富集率的分布

3 讨论

工程堆积体结构松散不稳定,土体抗蚀性差,在降雨或径流作用下会产生严重的水土流失。径流冲刷是泥沙搬运的动力条件,放水初期坡面径流为分散的不稳定细小股流,坡面侵蚀以面蚀为主,搬运的土

壤颗粒为坡面表层松散的浮土,产流产沙率很小;一定时间后细小股流开始汇集形成相对稳定的较大股流,土壤颗粒受到的径流驱动力稳定而持久,细沟不断发育,坡面径流逐渐转变为细沟流,且伴随着跌坎的出现产流率波动增大,进而溯源侵蚀发育,使得产

流产沙率变化剧烈,2 种坡面的产流产沙变化规律与李德利等^[22]在降雨条件下对裸坡侵蚀研究得到的结论相符。除了水力因素外,重力因素也是导致产流产沙量增大的主要因素。本试验条件下,重力因子和水力因子对扰动红壤坡面的产流产沙影响差异性较小,而扰动风沙土坡面重力和水力因子的主导作用不稳定。放水流量达到 20 L/min 时重力因子对风沙土产流产沙起主导作用。对比扰动红壤和扰动风沙土坡面的产流产沙特征,发现二者变化趋势相似,这可能是红壤和风沙土有很大部分风成土的原因^[23],这与韩鹏等^[24]所认为的“侵蚀动力不同是造成径流含沙量差别的主要原因,大流量下坡面径流含沙量主要受重力因子影响”研究结论相似。2 种堆积体坡面累积产沙量与累积径流量存在显著的线性关系,这也张乐涛等^[25]对模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程研究得出的结论一致。

质地是造成土壤侵蚀差异的主要内因^[26]。试验条件下(放水流量 8~16 L/min),搬运泥沙颗粒各粒径含量与原状土颗粒组成关系密切,流量越大侵蚀泥沙颗粒组成越接近原状土,且黏、粉、砂粒富集率越接近 1。红壤质地为黏土或壤黏土,<0.002 mm 的黏粒含量占 21%~42%^[27],渗透性差,容易产生径流。风沙土土壤矿质部分 80%~90%以上由 0.25~0.05 mm 的细砂颗粒组成,黏粒含量很少^[28],土壤入渗率较强,不易被侵蚀。因此,研究坡面侵蚀中被搬运泥沙颗粒的组成状况可以揭示侵蚀泥沙运移机制的内在规律,对生产建设项目中工程堆积体的生态恢复与重建有重要指导意义^[29]。

在坡度、坡长等因素一致的情况下,降雨量增加,扰动红壤和扰动风沙土堆积体坡面侵蚀要注意重力因素对堆积体坡面侵蚀的影响。生产实践中可以通过实施相应的坡面防护措施规避重力因素对坡面的损毁。从构筑堆积体坡面质地的视角出发,开展对于坡面泥沙颗粒的运移机制研究,对于其他质地工程堆积体坡面侵蚀研究有一定的借鉴意义。由于本试验模拟径流冲刷受到野外条件的限制,试验小区坡度单一、土壤质地单一(土石比),下一步将通过改进放水装置、增设不同坡度及土石比坡面,深入探究工程堆积体的侵蚀机理及相应的减流减沙措施,为生产建设项目水土流失防治提供借鉴。

4 结论

(1)扰动红壤和扰动风沙土坡面产流产沙率随时间变化,在相对恒定范围内波动,具有“多峰多谷”的特点。试验开始 3 min 内,二者产流产沙率都出现大幅度增长,3 min 后,波动逐渐减小,产流产沙率趋于稳定。

(2)随放水流量增加,扰动红壤和扰动风沙土产流、产沙率都有所增加,且扰动红壤坡面产流率、产沙率的变化更稳定。当放水流量为 20 L/min 时,重力在扰动风沙土堆积体坡面侵蚀中起主导作用。

(3)扰动红壤和扰动风沙土坡面产沙率的变化趋势与产流率基本一致,产流量越大,土壤剥蚀力越大,坡面土壤颗粒更易被搬运。累积产沙量与累积径流量表现出极显著的线性关系($P < 0.01, R^2 > 0.99$),累积产沙量随着累积径流量的增加而增加。

(4)从土壤质地角度来说,红壤黏粒多易富集,渗透性差,易产生径流;风沙土砂粒含量多,土壤抗蚀性差,更易被侵蚀。放水流量较小时,搬运泥沙颗粒以黏粒为主,且随流量的增大搬运比例减小;搬运泥沙颗粒随放水流量增大逐渐接近其原状土组成,风沙土搬运以砂粒为主(>60%),红壤颗粒搬运比例相对均匀(各组分含量为 24%~41%)。不同堆积体坡面侵蚀差异与组成坡面土壤的质地关系密切。

参考文献:

- [1] 李建明,牛俊,王文龙,等.不同土质工程堆积体径流产沙差异[J].农业工程学报,2016,32(14):187-194.
- [2] 戎玉博,骆汉,谢永生,等.雨强对工程堆积体侵蚀规律和细沟发育的影响[J].泥沙研究,2016(6):12-18.
- [3] 张振超,张琳琳,王冬梅,等.生产建设项目表土保护与利用[J].中国水土保持科学,2015,13(1):127-132.
- [4] 杨帅.不同工程堆积体坡面水蚀过程及泥沙颗粒搬运机制研究[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院教育部水土保持与生态环境研究中心,2018.
- [5] 汪亚峰,李茂松,卢玉东等.试论退耕还林中对坡度标准的界定[J].水土保持科技情报,2004(6):25-27.
- [6] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):18-23.
- [7] 王凯,王玉杰,王彬,等.黄壤坡面土壤分离速率研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(9):2114-2121.
- [8] 李桂芳.典型黑土区坡面土壤侵蚀影响因素与动力学机理研究[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
- [9] Walker P H, Kinnell P I A, Green P. Transport of a noncohesive sandy mixture in rainfall and runoff experiments[J]. Soil Science Society of America Journal, 1978,42(5):793-801.
- [10] 胡传旺,王辉,刘常,等.南方典型土壤水力特征差异性分析[J].水土保持学报,2017,31(2):97-102.
- [11] 李超.土壤根系含量对风蚀影响的风洞模拟研究[D].西安:陕西师范大学,2016.
- [12] 王文龙,李占斌,李鹏,等.神府东胜煤田开发建设弃土弃渣冲刷试验研究[J].水土保持学报,2004,18(5):68-71.
- [13] 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.
- [14] 卞艳丽,曹惠提,张会敏,等.泥沙级配对浑水灌溉下土壤水分增长过程的影响分析[J].节水灌溉,2016(7):23-30,35.
- [15] 罗榕婷,张光辉,沈瑞昌,等.染色法测量坡面流速的最佳测流区长度研[J].水文,2010,30(3):5-9.
- [16] 吴凤至.坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [17] Michael C S, Timothy P B. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997,22(8):705-719.
- [18] 王玲.陡坡地水蚀过程与泥沙搬运机制[D].陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2016.
- [19] Martínez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J, et al. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain[J]. *Geomorphology*, 2002,45(3):261-275.
- [20] Asadi H, Moussavi A, Ghadir H, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment[J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2011, 406(1/2):73-81.
- [21] 王剑.降雨驱动下侵蚀泥沙颗粒分选特征及搬运机制[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [22] 李德利,王瑄,邱野.天然降雨条件下裸坡、植被坡的产流产沙过程分析[J].安徽农业科学,2011,39(35):21971-21974.
- [23] 陈秀玲,李志忠,靳建辉,等.中国南方第四纪红土研究进展[J].福建师范大学学报(自然科学版),2009,25(5):118-124.
- [24] 韩鹏,倪晋仁,王兴奎.黄土坡面细沟发育过程中的重力侵蚀实验研究[J].水利学报,2003(1):51-56,61.
- [25] 张乐涛,高照良,李永红,等.模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J].农业工程学报,2013,29(8):145-153.
- [26] Young R A. Characteristics of eroded sediment[J]. *Transactions of the ASAE*, 1980,23(5):1139-1142,1146.
- [27] 吴发启,张洪江.土壤侵蚀学[M].北京:科学出版社,2012:209-239.
- [28] 赵红梅.采矿塌陷条件下包气带土壤水分布与动态变化特征研究[D].北京:中国地质科学院,2006.
- [29] 丁文斌,李叶鑫,史东梅,等.2种工程堆积体边坡模拟径流侵蚀对比研究[J].土壤学报,2017,54(3):558-569.

(上接第 33 页)

- [16] 宋小帅,康峰峰,韩海荣,等.太岳山不同郁闭度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持通报,2014,34(3):102-108.
- [17] 宋小艳,张丹桔,张健,等.马尾松人工林林窗对土壤团聚体及有机碳分布的影响[J].应用生态学报,2014,25(11):3083-3090.
- [18] 崔宁洁,张丹桔,刘洋,等.马尾松人工林不同大小林窗植物多样性及其季节动态[J].植物生态学报,2014,38(5):477-490.
- [19] 艾宁,魏天兴,朱清科.陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):26-30,35.
- [20] 吴发启,范文波.土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究[J].水土保持学报,2001,15(3):1-3.
- [21] 朱燕琴,赵志斌,齐广平,等.黄土丘陵沟壑区不同植被类型次降雨产流产沙特征[J].草地学报,2019,27(1):28-34.
- [22] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):58-63.
- [23] Wu L, Peng M L, Qiao S S, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield characteristics of bare loess soil [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2018,25(4):3480-3487.
- [24] 甘艺贤,戴全厚,伏文兵,等.基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征[J].应用生态学报,2016,27(9):2754-2760.
- [25] 林锦阔,李子君,许海超,等.降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响[J].水土保持通报,2016,36(5):7-12,19.
- [26] Dijk A I J M V, Gash J H, Gorsel E V, et al. Rainfall interception and the coupled surface water and energy balance [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015,214/215:402-415.
- [27] Huang Z G, Ouyang Z Y, Li F R, et al. Response of runoff and soil loss to reforestation and rainfall type in red soil region of southern China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010,22:1765-1773.
- [28] 寇馨月,姜学兵,黄俊,等.红壤区小流域次降雨产流产沙因素分析及模型构建[J].水土保持通报,2017,37(6):34-42.