DOI: 10.5846/stxb201805301191

陈卓鑫,王文龙,康宏亮,郭明明,杨波,王文鑫,赵满.砾石对红壤工程堆积体边坡径流产沙的影响.生态学报,2019,39(17): - . Chen Z X, Wang W L, Kang H L, Guo M M, Yang B, Wang W X, Zhao M.Effects of gravel on runoff and sediment yield of red soil engineering accumulation slopes.Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

砾石对红壤工程堆积体边坡径流产沙的影响

陈卓鑫1,王文龙1,2,*,康宏亮1,郭明明1,杨 波1,王文鑫1,赵 满1

1 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,杨凌 712100
2 中国科学院水利部水土保持研究所,杨凌 712100

摘要:为探究砾石对红壤工程堆积体边坡降雨侵蚀的影响,基于室内模拟降雨试验,在1.0、1.5、2.0和2.5 mm/min 雨强条件下, 以土质边坡为对照,研究了10%、20%和30%的砾石质量分数红壤工程堆积体边坡的径流特征、产沙过程及侵蚀动力机制。结 果表明:1)砾石质量分数对稳定径流强度的影响存在阈值,在雨强>1.0 mm/min 时稳定径流强度随砾石质量分数的增加先减小 后增大,在1.0 mm/min 雨强时则表现为先增大后减小,且均在10%砾石质量分数下达到极值;2)雨强1.0 mm/min 时,径流为缓 流,砾石促进径流流动,使弗汝德数增大24.5%—87.8%,雨强2.0、2.5 mm/min 时,径流为急流,砾石延缓径流流动,使弗汝德数 降低4.2%—13.0%;3)侵蚀速率随产流历时变化过程受砾石质量分数和雨强的影响,雨强越大,砾石质量分数越低,边坡越易 发生细沟侵蚀且伴随重力崩塌现象,侵蚀速率呈多峰多谷变化趋势;4)1.0 mm/min 雨强时,砾石存在加剧了土壤侵蚀,产沙增 幅达28.7%—50.5%;雨强>1.0 mm/min 时,砾石减沙效益为5.0%—64.4%;5)径流功率是描述红壤工程堆积体侵蚀动力机制最 优参数,其可蚀性参数及发生侵蚀临界径流功率从大到小对应的砾石质量分数均为10%、0%、20%和30%。研究成果可为红壤 区开发建设项目水土流失治理及侵蚀预测模型提供科学依据。

关键词:工程堆积体;砾石质量分数;径流;侵蚀;红壤

Effects of gravel on runoff and sediment yield of red soil engineering accumulation slopes

CHEN Zhuoxin¹, WANG Wenlong^{1,2,*}, KANG Hongliang¹, GUO Mingming¹, YANG Bo¹, WANG Wenxin¹, ZHAO Man¹

1 State Key Laboratory of Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateaus, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: Engineering accumulation slopes, a special geomorphological unit resulting from human disturbances, are characterized by a large slope gradient, lacking soil organic matter, and loose surface structure, which drives the engineering accumulation body to be prone to intensive soil erosion under heavy rainfall. To explore the effect of gravel on rainfall erosion occurring on red soil engineering accumulation slopes, a series of indoor simulated rainfall experiments were conducted to investigate the runoff characteristics, sediment yielding processes, and erosion dynamic mechanisms of red soil engineering accumulation slopes with different gravel mass fractions (0%, 10%, 20%, and 30%) under different rainfall intensities (1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 mm/min). The results showed that: 1) the stable runoff intensity varied as a decreased –increased tendency with gravel mass fraction increasing under the rainfall intensity higher than 1.0 mm/min, whereas it

基金项目:国家重点研发计划项目资助(2016YFC0501604);国家自然科学基金项目(40771127,41761062);科技基础性工作专项 (2014FY210100)

收稿日期:2018-05-30; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wlwang@ nwsuaf.edu.cn

http://www.ecologica.cn

varied as an increased-decreased tendency under 1.0 mm/min rainfall intensity, and both reached extreme values at 10% gravel mass fraction (maximal value or minimal value). 2) Under 1.0 mm/min rainfall intensity, runoff flowed in the regime of subcritical flow during the whole test. The Freund number increased by 24.5%—87.8% because of the existence of gravel, and the gravel promoted the runoff to flow. However, under 2.0 and 2.5 mm/min rainfall intensity, runoff flowed in the regime of supercritical flow. The Freund number was reduced by 4.2%—13.0% because of the existence of gravel, and the gravel slowed down the runoff flow. 3) The erosion rate variation during the rainfall test was affected by the gravel mass fraction and rain intensity. Red soil engineering accumulation slopes became more vulnerable to rill erosion and gravity collapse under higher rainfall intensities and lower gravel mass fractions, resulting in multi-peaks and multi-valleys in the erosion rates.4) Under 1.0 mm/min rainfall intensity, the gravel exacerbated soil erosion with the erosion rate increasing by 28.7%—50.5%. On the contrary, the gravel retarded soil erosion with the erosion rate decreasing by 5.0%—64.4% under rainfall intensity higher than 1.0 mm/min. 5) The stream power could serve as the optimal parameter for describing the hydrodynamic process of the red soil engineering accumulation slopes. The values of erodibility-related parameters and the critical stream power values ranged from large to the small corresponding with the gravel mass fraction being 10%, 0%, 20%, and 30%, respectively. The results may provide a scientific basis for soil erosion control and erosion modelling for the red soil engineering accumulation slopes.

Key Words: engineering deposition; gravel mass fraction; runoff; erosion; red soil

伴随着生产建设活动引起的生态环境问题以及水土保持工作的迫切需求,工程堆积体边坡侵蚀已成为水 土保持研究的热点之一^[1]。人类通过挖方、埋压以及爆破等不同的扰动方式对生产建设项目区的地貌进行 了重塑,产生大量含粒径不一砾石的工程堆积体地貌单元,其边坡具有坡度大、结构疏松及土壤有机质缺乏等 特点^[2]。在暴雨作用下,工程堆积体水土流失形式常以"点状"或"线型"、单一或综合出现^[3],造成局部水土 流失剧增^[4],使其成为新增水土流失的重要的物源地之一^[5]。

砾石的存在改变了下垫面的土壤理化性质及地表形态特征,影响边坡的水文特性和侵蚀过程^[6]。对于 传统含砾石坡面,众多的国内外学者对含砾石土壤的入渗过程^[78]、水动力学特性^[9-10]以及产流产沙特征^[11] 等方面已开展了大量的试验研究。然而,对于人为扰动形成的含砾石工程堆积体边坡,其径流产沙过程及侵 蚀动力机制则更为特殊和复杂。史东梅等^[12]比较含砾石紫色土和黄沙壤堆积体边坡径流产沙过程,表明偏 土质(土石比4:1)边坡累计产流量和产沙量均高于土石质混合边坡(土石比3:2),且产沙率呈连续性多峰多 谷变化;李建明等^[13]通过室内模拟降雨试验发现,坡度在25°左右时砾石对塿土堆积体边坡产沙的促进作用 最大;丁亚东等^[14]研究黄绵土散乱锥状堆积体表明了砾石对边坡的土壤侵蚀具有抑制作用;康宏亮等^[15]对 北方风沙土堆积体边坡的研究表明,不同雨强下砾石对边坡侵蚀产沙具有完全相反的作用,1.0 mm/min 雨强 时,砾石促进降雨侵蚀,>1.0 mm/min 雨强时,砾石具有显著的减沙效益;以往在工程堆积体水土流失预测模 型(经验模型)方面^[16]上取得了一些成果;对于高速公路弃土堆积体^[11]和碾压型堆积体^[17]边坡土壤侵蚀动力 机制也建立了控制方程,均认为径流功率是描述工程堆积体侵蚀动力机制最合理的参数。然而,这些研究多 集中在黄土高原和西南地区,而对于曾有"红色沙漠"之称的南方红壤区的工程堆积体边坡径流产沙鲜见报 导,且以往针对不同砾石质量分数的土壤侵蚀动力机制的研究较少,对于不同砾石质量分数条件下的径流水 动力学参数特征研究也需进一步加深。

基于众多学者研究的基础上,本试验采取室内人工模拟降雨的方法,对不同降雨强度和不同砾石质量分 数条件下边坡的侵蚀过程进行观测,分析不同降雨强度对含砾石红壤边坡径流特性及侵蚀过程的影响,揭示 不同砾石质量分数条件下红壤边坡的径流水动力参数特性及侵蚀动力机制,以期为红壤区工程堆积体水土流 失预测模型提供理论基础。

1 材料与方法

17 期

1.1 试验设计

通过对东北黑土区、北方石质山区、西北黄土高原区、黄淮海平原区、贵州土石山区和江西红壤区的368 座不同类型工程堆积体的坡长、坡度以及下垫面物质组成等进行实地调查,经统计分析后表明:2-8 m 坡长 的堆积体坡面占调查总数的 78.4%;坡度多集中在 20°—40°;砾石粒径 2 mm—15 mm 占总样本数的 32%,15 mm—25 mm 占总样本数的 46%, 粒径>25 mm 占总样本数的 22%, 各粒径的质量比大约为 3:5:2; 砾石质量分 数<40%的工程堆积体占调查样本数的90%以上。在野外调查数据的分析基础上,结合模拟试验的实际条件 以及调查中边坡砾石可被侵蚀搬运的粒径范围对工程堆积体进行室内概化:将本试验砾石筛分为小(2-15 mm)、中(15-25 mm)、大(25-50 mm)三个粒径等级,分别过 2 mm、15 mm、25 mm 和 50 mm 筛,然后按质量 比 3:5:2 均匀混合后备用;设计砾石质量分数 0%(土质边坡)、10%、20%和 30%,砾石与红壤按质量比 0:10、 1:9、2:8 和 3:7 用搅拌机进行均匀混合,随后用于填装试验槽;根据李宏伟等[18]明确定义的我国工程堆积体 水蚀测算模型标准小区坡度为 25°,以及已有研究表明坡度影响侵蚀产沙突变的临界坡度大约在 25°^[19-20],再 结合野外调查,最终设计试验坡度为25°,试验坡长为5m。

试验土壤采自江西省南昌市新建县撂荒地非耕层土壤。南昌市位于江西省中北部,属于典型的红壤分布 区,土壤类型为第四纪粘土发育的土壤,采集的试验土壤为研究区内典型红壤,具有较好的代表性和适用性。 将所取土壤过6mm筛网剔除土中的树根、砾石等杂物后平铺至室外阴凉处自然风干,测得土样的土壤颗粒 粒径(mm) < 0.002, 0.002—0.02, 0.02—0.05, 0.05—0.1, 0.1—2.0的机械组成分别为 17.87%, 32.84%, 21.24%, 9.71%,18.34%。试验所用砾石采自陕西省商洛市山阳县高速公路旁山体自然滑坡体块石(砾石表面几乎不 下渗水分),据试验粒径要求机械粉碎筛选获取。

试验在中国科学院水利部水土保持研究所模拟降雨大厅进行,降雨系统为下喷式,降雨高度18m,能满 足所有雨滴达到终点速度,且降雨均匀度能达到80%以上,可模拟的降雨强度范围在30 mm/h—350 mm/h之 间,有效降雨面积为27 m×18 m^[21]。试验采用规格为5 m(长)×1 m(宽)×0.5 m(高)的移动式液压可变坡度 钢制土槽,试验装置布设简图如图1所示。为模拟降雨入渗以及重力水的自由流出,土槽底层铺厚度为10 cm的石英砂并在土槽底部开有均匀分布的小孔。试验装土深度为40 cm,装土分为2层,下层和表层装土深 度均为20 cm,下层进行夯实,容重控制在1.40 g/cm³—1.55 g/cm³之间,上层土壤不夯实但对边坡表面进行打 磨平整,对边壁处的边坡尽可能压实以减小边界的影响,容重控制在1.15 g/cm³—1.30 g/cm³之间,土层之间

进行打毛处理以防止滑塌,土石混合体经24h自然沉 降,试验前使用环刀在边坡(上、中、下)分别取样,控制 每场试验土壤质量含水量保持在10%左右。每次试验 的装土人员与试验人员固定,以保证装土工艺一致。

基于对红壤区多年的降雨气象资料的统计分析,选 择暴雨频率较高的 30 min 最大降雨强度作为本模拟降 雨试验降雨强度的设计来源,取整后设计为1.0、1.5、2. 0、2.5 mm/min 共4个降雨强度级别,降雨历时45 min。 试验场次共计16场。

1.2 试验步骤

试验开始前,用遮雨布盖住整个试验土槽,在土槽 的四角分别放置一个雨量筒,打开降雨器开关进行雨强 率定,率定结果与试验设计雨强误差不超过5%,雨强 率定后快速掀开遮雨布,直至边坡出现线状水流流出集





3

流槽出口,开始产流,并从0开始计时直至45 min 整场试验结束。边坡的测流断面选定在距小区顶部1.0 m—2.5 m和2.5 m—4.0 m的位置,产流开始后,前5 min每1 min 在集流槽出口用1000 ml量筒接取径流泥沙样,5 min 后每5 min 接取一个径流泥沙样,并记录接样时间、读取其体积和用电子天平称取质量,接样同时在每个观测断面分别测定同时刻的流速和流宽。接取的径流泥沙样静置后去除上层清液,放入105℃烘箱内烘干至恒重后称取泥沙质量。

1.3 试验数据处理

文中各参数使用 Excel2013 进行数据统计,使用 SPSS20.0 进行数据分析,使用 Origin2018b 进行图表 绘作。

1) 流速(V) 和流宽(L): 流速测定采用 KMnO₄染色示踪法, 秒表精度为 0.01 秒, 测距为 1.5 m, 流速乘以修 正系数 $K^{[22]}$ 得到边坡径流的平均流速; 流宽采用自制的尺片测量, 精度为 0.01 m。

2) 径流强度(R_r): 单位时间通过单位过水断面的的水流流深, 计算公式为:

$$R_r = \frac{1000Q}{b \cdot L} \tag{1}$$

式中 R_r 为径流强度,mm/min;Q为径流率,m³/min;b为过水断面宽,m;L为坡长,m。

3) 径流深(h):测量时段内边坡的平均径流深,由于水流断面的径流深度较小,直接人工测量误差较大,因此采用公式进行计算。计算公式为:

$$h = \frac{q}{V \cdot b \cdot T} \tag{2}$$

式中h为径流深,m;q为测量接样时间T(s)内的径流量,m³。

4) 雷诺数(Re): 判断边坡径流为层流紊流的定量标准, 计算公式为:

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu} \tag{3}$$

式中R为水力半径,m;v为水流黏滞性系数,m²/s。

5) 弗汝德数(Fr): 判别缓急流的定量标准, 表征水流惯性力与重力的比值, 计算公式为:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \tag{4}$$

式中g为重力加速度,m/s²。

6)径流剪切力(τ):反映径流在流动过程中对表层土壤颗粒分离的能力,计算公式为:

$$\tau = \gamma_m \cdot g \cdot R \cdot J \tag{5}$$

式中 τ 为径流剪切力,N/m²或 Pa; γ_m 浑水密度,kg/m³;J为水力坡降,m/m,用坡度的正弦值近似替换。

7)单位径流功率(U):作用于泥沙床面的单位重量水体所消耗的功率,计算公式为:

$$U = V \cdot J \tag{6}$$

式中U为单位径流功率,m/s。

8)径流功率(ω):表示作用于单位面积水流所需要消耗的功率,计算公式为:

$$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\gamma}_m \cdot \boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{J} \cdot \boldsymbol{V} \tag{7}$$

式中 ω 为径流功率,N/(m·s)。

9) 过水断面单位能(E): 以过水断面最低点作基准面的单位水重的动能及势能之和, 计算公式为:

$$E = \frac{a \cdot V^2}{2g} + h \tag{8}$$

式中 E 为过水断面单位能,m;a 为校正系数,取值为1。

10) 侵蚀速率(Er): 边坡径流在单位时间单位面积上所搬运的泥沙质量, 计算公式为:

$$Er = \frac{M}{b \cdot L \cdot T} \tag{9}$$

式中 Er 为侵蚀速率, g m⁻² s⁻¹; M 为测量时段 T(s)内的产沙量, g。

2 结果与分析

2.1 含砾石红壤工程堆积体边坡径流特征

2.1.1 径流强度变化特征

不同试验条件下边坡径流强度随产流历时的变化过程见图 2。各雨强条件下,径流强度可描述为先迅速 增大后保持稳定的变化趋势,1.0 mm/min、1.5 mm/min、2.0 mm/min 和 2.5 mm/min 雨强的径流强度分别在产 流时间 20 min、10 min、5 min 和 5 min 后保持相对稳定,整体上,降雨强度越大,径流强度越快达到稳定状态。 在保持稳定期间径流强度的变化差异较小,其变异系数变化范围在 0.01—0.06 之间,属微弱变异程度。





对稳定径流强度值进行了计算和分析,不同砾石质量分数边坡的次降雨稳定径流强度值如图 3 所示。稳定径流强度随雨强的增大而增大,经分析二者呈极显著线性关系(P<0.01)。1.0 mm/min 雨强时,10%砾石质量分数稳定径流强度较土质边坡稳定径流强度增大 8.4%,砾石质量分数>10%时,稳定径流强度随砾石质量分数的增大而减小,减小幅度在 4.5%—11.8%,且砾石质量分数为 10%时取极大值;雨强>1.0 mm/min 时,10%砾石质量分数稳定径流强度较土质边坡稳定径流强度减小 7.3%—14.2%,砾石质量分数>10%时,稳定径流强度随砾石质量分数的增大而增大,增大幅度在 1.3%—17.0%,且砾石质量分数为 10%时取极小值,说明在砾石质量分数为 10%时,砾石对稳定径流强度的影响最大且存在一个阈值(10%左右)。

http://www.ecologica.cn

5

2.1.2 径流水动力学参数变化特征

不同试验条件下边坡径流水动力学参数见表1。

1)流速。各砾石质量分数条件下,流速随雨强的 增大而增大。1.0 mm/min 雨强条件下,土质边坡流速 最小(0.049 m/s),含砾石边坡较土质边坡的流速增大 23.3%—68.6%;2.0、2.5 mm/min 雨强条件下,土质边坡 流速最大(0.108、0.127 m/s),含砾石边坡较土质边坡 的流速分别减小1.3%—12.1%、0.5%—20.9%;而在1.5 mm/min 雨强条件下,砾石质量分数<10%时,流速随砾 石含量的增大而减小,砾石质量分数<10%时,流速随砾 石含量的增大而增大。由此可知,不同雨强和砾石质量 分数均会对流速产生了重要影响,雨强<1.5 mm/min 时,砾石的存在促进边坡径流的流动,流速随砾石含量 的增大而增大,雨强>1.5 mm/min 时,砾石的存在抑制 边坡径流的流动,流速随砾石含量的增大而减小。



图 3 不同砾石质量分数边坡的次降雨稳定径流强度值变化 Fig.3 Variations of stable runoff intensities with different gravel mass fractions

Table 1 Characteristics of runoff hydrodynamic parameters under different experiment conditions							
砾石质量分数 Gravel mass fraction/%	雨强 Rainfall Intensity/ (mm/min)	流速 Flow velocity/ (m/s)	雷诺数 Reynolds number	弗汝德数 Froude number	径流功率 Runoff power/ (N/(m・s))		
0	1.0	0.049	53.971	0.526	0.223		
	1.5	0.078	84.853	0.855	0.336		
	2.0	0.108	130.758	1.091	0.539		
	2.5	0.127	170.776	1.194	0.723		
10	1.0	0.065	65.463	0.762	0.276		
	1.5	0.066	71.921	0.848	0.319		
	2.0	0.103	109.613	1.045	0.496		
	2.5	0.114	128.787	1.091	0.625		
20	1.0	0.060	58.528	0.655	0.241		
	1.5	0.077	77.251	0.836	0.357		
	2.0	0.095	103.221	1.011	0.465		
	2.5	0.101	122.197	1.039	0.594		
30	1.0	0.082	47.922	0.988	0.213		
	1.5	0.092	79.582	1.004	0.366		
	2.0	0.106	112.069	1.044	0.503		
	2.5	0.127	143.760	1.055	0.649		

表1 不同试验条件下边坡径流水动力学参数特征

2)流型与流态。试验条件下,雷诺数随降雨强度的增大而增大,边坡径流以层流为流动形态。弗汝德数
随随雨强的增大而增大。1.0 mm/min 雨强条件下,弗汝德数变化范围为 0.526—0.988,边坡径流为缓流,此
时,砾石的存在增大了径流的弗汝德数,相比土质边坡增大了 24.5%—87.8%;2.0 mm/min、2.5 mm/min 雨强
下,各砾石质量分数边坡径流以急流为主,土质边坡的弗汝德数达最大,边坡的砾石降低了径流的弗汝德数,
降低幅度为4.2%—13.0%。

3) 径流功率。径流功率随雨强的增大而增大,经分析二者呈极显著幂函数关系(P<0.01)。1.0、1.5 mm/ min 雨强条件下,各边坡径流功率由大到小对应的砾石质量分数依次为 10%、20%、0%、30%和 30%、20%、 0%、10%;2.0、2.5 mm/min 雨强条件下,土质边坡径流功率为最大分别为 0.539、0.723 N/(m・s),含砾石边坡 的径流功率较土质边坡的降低幅度分别为 6.6%—13.6% 和 10.2%—17.9%。

2.2 含砾石红壤工程堆积体边坡侵蚀特征

2.2.1 侵蚀速率随产流历时变化过程

不同试验条件下边坡侵蚀速率随产流历时的变化过程见图 4。1)1.0、1.5 mm/min 雨强下,侵蚀速率先上 升(1—3 min)后下降(4—35 min),最后趋于稳定(40—45 min),各边坡侵蚀速率分别在 3—5 min、1—3 min 达到最大,且含砾石边坡最大侵蚀速率是土质边坡的 1.12—2.59 倍。在下降和稳定阶段,1.0 mm/min 雨强 时,土质边坡相对于含砾石边坡的侵蚀速率低,土质边坡侵蚀速率稳定在 0.19 g m⁻² s⁻¹左右,含砾石边坡稳定 在 0.22 g m⁻² s⁻¹左右;而在 1.5 mm/min 雨强时,土质边坡侵蚀速率整体上较含砾石边坡高,土质边坡侵蚀速 率的稳定值在 1.06 g m⁻² s⁻¹左右,含砾石边坡侵蚀速率稳定在 0.59 g m⁻² s⁻¹左右。2)2.0、2.5 mm/min 雨强条 件下,侵蚀速率先迅速下降(1—5 min)后波动变化(10—45 min)。在波动阶段,2.0 mm/min 雨强时,土质和 10%砾石含量边坡侵蚀速率波动增大,而 20%、30%砾石含量边坡持续下降,且各边坡侵蚀速率由大到小对应 的砾石质量分数为 0%、10%和 20%(30%);2.5 mm/min 雨强时,30%砾石含量边坡侵蚀速率逐渐降低,土质、 10%和 20%砾石含量边坡侵蚀速率波动剧烈,变异系数分别为 0.25—0.27,但其变化趋势并不明显。试验条 件下,雨强越大,砾石质量分数越低的边坡侵蚀速率变化多呈多峰多谷。



图 4 小问试题余计下边极度迅速牵随广流历时的变化 Fig.4 Variations of slope erosion rates with runoff durations under different experiment conditions

2.2.2 次降雨侵蚀速率变化特征

次降雨侵蚀速率随砾石质量分数和雨强的变化见图 5。1.0 mm/min 雨强条件下,各边坡的侵蚀速率由小 到大按砾石质量分数表现为 0% <30% <20% <10%,砾石质量分数为 10%、20% 和 30% 边坡的侵蚀速率分别是 土质边坡的 1.51、1.50 和 1.29 倍;1.5—2.5 mm/min 雨强条件下,土质边坡的侵蚀速率最大,在 0.95—

4.32 g m⁻² s⁻¹之间,3 种雨强条件下 10%、20%、30%砾石质量分数边坡的侵蚀速率较土质边坡的分别降低 21. 2%、13.1%、5.0%和13.1%、44.8%、44.9%和21.1%、40.2%、64.4%。由此可知,1.0 mm/min 雨强时,砾石的存

在砾石质量分数一定的条件下,侵蚀速率随雨强的增大而增大,二者呈显著幂函数关系(P<0.05),但各 砾石质量分数边坡的侵蚀速率随雨强增大的增长幅度存在差异,相比于1.0 mm/min 雨强条件下,其中土质边 坡侵蚀速率可增大 4.35—19.78 倍,砾石质量分数 10%、20% 和 30% 的边坡侵蚀速率分别可增大 2.28—10.37 倍、2.53-7.89倍和3.22-5.47倍,相比于土质边坡,整体上含砾石边坡的侵蚀速率增大倍数较小。通过对侵 蚀速率与砾石质量分数和雨强进行回归分析,结果表明侵蚀速率与砾石质量分数和雨强呈极显著二元线性函 数关系(式 10, P < 0.01, $R^2 = 0.84$, N = 16);

在加剧土壤的侵蚀,1.5—2.5 mm/min 雨强时,砾石的存在降低土壤的侵蚀速率。

$$Er = 1.789I - 3.262G - 1.168 \tag{10}$$

式中I为降雨强度,mm/min;G为砾石质量分数,%。







2.3 含砾石红壤工程堆积体边坡侵蚀动力机制

表2为次降雨侵蚀速率与各水动力学参数之间的相关性分析。结果显示边坡侵蚀速率(Er)与各水动力 学参数之间均有良好的相关关系,相关系数具体表现为: $r(\omega)>r(Re)>r(E)>r(V)>r(Fr)>r(\tau)$ 。

表 2 侵蚀迷率与各水功刀子奓数的相关性							
Table 2 Correlations between erosion rates and hydrodynamic parameters							
	侵蚀速 率(Er) Erosion rate(Er)	流速(V) Flow velocity (V)	雷诺数(Re) Reynolds number (Re)	弗汝德数 (Fr) Froude number (Fr)	径流剪切 力(τ) Flow shear Stress(τ)	径流功率 (ω) Runoff power(ω)	过水断面 单位能(E) Unit energy of water-carrying section (E)
侵蚀速率(Er) Erosion rate(Er)	1						
流速(V) Flow velocity (V)	0.808 **	1					
雷诺数(Re) Reynolds number (Re)	0.903 **	0.920 **	1				
弗汝德数(Fr Froude number (Fr)	0.763 **	0.930 **	0.799 **	1			
径流剪切力($ au$) Flow shear Stress($ au$)	0.717 **	0.576 *	0.739 **	0.473	1		
径流功率(ω) Runoff power(ω)	0.904 **	0.931 **	0.986 **	0.816 **	0.751 **	1	
过水断面单位能(E) Unit energy of water-carrying section (E)	0.897 **	0.891 **	0.986**	0.762 **	0.781 **	0.983 **	1

采用 Pearson 相关性双侧检验; N=16; ** P<0.01; * P<0.05

图 6 描述了次降雨土壤侵蚀速率与侵蚀动力参数的关系。20% 和 30% 砾石质量分数边坡的侵蚀速率

(Er)与剪切力(r)可用幂函数表示;0%和 10%砾石质量分数边坡的侵蚀速率(Er)与单位径流功率(U)存在 线性关系;各砾石质量分数边坡侵蚀速率(Er)与径流功率(ω)、过水断面单位能(E)均呈显著性线性关系 (P<0.05)。由各土壤侵蚀动力机制控制方程分析可知,不同砾石质量分数条件下,侵蚀速率与径流水动力学 参数关系式中的横坐标截距(发生侵蚀临界值)与斜率(可蚀性参数)具有差异性同时也具有规律性,Er 与 ω、 E 之间的关系中发生侵蚀的临界值及可蚀性参数表现出一致性,其大小按砾石质量分数排列均为 10%>0%> 20%>30%,砾石质量分数为 0%、10%、20%、30%的边坡发生侵蚀的临界径流功率分别为 0.213、0.238、0.212、 0.084 N/(m・s),对应的可蚀性参数分别为 8.13、8.60、6.26、2.90 s²/m²;临界过水断面单位能分别为 1.0× 10⁻³、1.1×10⁻³、0.9×10⁻³、0.6×10⁻³ m,对应的可蚀性参数分别为 3726、4481、3017、1224 g m⁻³ s⁻¹。10%的砾石 质量分数边坡发生侵蚀的临界功率及临界过水断面单位能分别为 0%、20%、30%的砾石质量分数边坡的 1.14、1.14、3 倍和 1.10、1.22、1.83 倍,可蚀性参数分别增大 5.8%—196.6%和 20.3%—266.0%。



Fig.6 Relationships between erosion rates and erosion dynamic parameters

3 讨论

3.1 砾石对边坡径流特性的影响

工程堆积体作为一种特殊的地貌单元,其径流动力特征具有特殊性和复杂性。本研究表明,砾石质量分数对稳定径流强度的影响存在一个10%左右的阈值,雨强为1.0 mm/min时,10%的砾石质量分数稳定径流强度最大,当砾石质量分数增至10%时,表层砾石的增加使径流弯曲度对于稳定径流强度的增大作用占据了优势,延长了水分下渗路径,导致稳定径流强度增大,而在砾石质量分数大于10%时,砾石的存在显著增多了土

壤大孔隙通道,促进水分入渗,导致稳定径流强度减小^[23];而雨强大于 1.0 mm/min 时,砾石质量分数为 10% 时径流强度最小,这与边坡形成的细沟有关,当砾石质量分数增至10%时,边坡表层土壤逐渐被剥蚀,凸出表 层土壤的砾石增多,坡面水流沿着凸出表层土壤的砾石下渗,导致稳定径流强度减小,当砾石质量分数继续增 大至20%、30%时,此时,细沟中的砾石较多,在砾石的汇流和入渗面相对减少的共同作用下,使稳定径流强度 增大[24]。土壤入渗特性与径流强度的关系密不可分。朱元骏等[25]通过模拟降雨研究表明,砾石质量分数为 10%时土壤入渗率处于临界状态,当砾石质量分数低于10%时,入渗率与砾石质量分数呈正相关,当碎石含量 超过10%时,入渗率反而降低;时忠杰等^[8]研究指出,在0-40 cm 土层,砾石体积分数与稳渗速率的临界值大 致处于15%—20%,这些研究均与本研究结果具有相似性,但得出的临界值大小具有一定的差异,这可能与土 壤类型有关。边坡径流的流动速度受降雨和砾石的影响。1.0 mm/min 雨强时,降雨动能较小,边坡上只有小 部分的砾石完全凸出,而平滑的小砾石镶嵌在表层土壤促进了径流的流动^[26],这与在 1.0 mm/min 雨强条件 下对含砾石紫色土^[24]、塿土^[27]的研究结果一致;雨强为 1.5 mm/min 时,砾石对径流流速的影响并不明显,原 因是砾石对径流的阻碍和促进作用相互抵消;雨强>1.5 mm/min 时,降雨动能较大,众多的砾石很快地从表层 土壤凸出,增大了表层土壤的粗糙度,消耗了径流的动能,从而延缓径流的流动^[28],这与 Ban 等^[10]在放水条 件下对冻土的研究结果类似。综上,砾石对边坡径流特性的影响主要有以下2个方面:1)土壤表层及以下的 砾石通过改变表层土壤粗糙度和水分的入渗来影响边坡径流^[29];2)土壤表层的砾石或部分嵌入表层土壤的 砾石影响降水拦截、岩石流产生以及表层径流的分散与汇合,从而决定边坡产流情况^[30]。 3.2 砾石对边坡产沙的影响

不同雨强及砾石质量分数条件下边坡的侵蚀过程具有差异性。试验条件下,1.0、1.5 mm/min 雨强时,边 坡前期侵蚀方式主要为层状面蚀,而后期主要受表层结皮的影响,从而导致侵蚀速率随产流历时表现为先迅 速暂上升而后缓慢下降至趋于稳定的变化趋势;雨强增大后(2.0 mm/min, 2.5 mm/min),随降雨侵蚀的进行, 在产流 10 min 左右后,边坡径流侵蚀方式由面蚀逐渐向断续细沟转变,最后伴随着跌坑和侵蚀穴的出现而形 成连续细沟[31],连续细沟的出现直接导致了土壤侵蚀速率成倍速度的增加[32],而细沟的发育过程中同时会 伴随着重力侵蚀的发生,细沟中边壁土体的崩塌是导致侵蚀速率迅速增大和产生波动的重要原因[33]。但雨 强为 2.0 mm/min 时,边坡主要形成短、窄、浅型细沟(长<60 cm,宽<7 cm,深<3 cm),细沟较浅,发生重力崩塌 的几率较低,侵蚀速率发生波动次数少;雨强增大至2.5 mm/min时,径流拥有更大的动能和冲刷力,边坡形成 长、宽、深型细沟(长100-150 cm,宽10-15 cm,深3-5 cm),此时细沟较深,易发生重力崩塌,侵蚀速率发生 多次波动,但砾石质量分数为30%时,细沟内砾石较多,可被输移的土壤颗粒少,从而造成侵蚀速率保持相对 稳定,这也是较其他砾石质量分数条件下侵蚀速率小的重要原因。本研究的侵蚀速率变化过程与塿土堆积体 边坡[34]和黄绵土堆积体边坡[14]侵蚀速率变化过程具有明显差异,由此可见,不同的雨强、土壤类型、边坡形 态均会影响含砾石边坡的侵蚀过程。对于含砾石工程堆积体边坡的侵蚀产沙而言,砾石的存在既可以增加土 壤侵蚀量[35],也能与土壤侵蚀量呈负相关关系[14],在不同雨强条件下,砾石对侵蚀产沙的影响也有所不 同^[26]。本研究表明,1.0 mm/min 雨强时,砾石的存在加快了径流的流动,边坡径流具有更大的动能,且边坡 上凸出的砾石较少、砾石覆盖度较低,此时砾石对边坡的保护作用较弱并且径流对土壤产生"涡旋侵蚀"[36], 进而加剧土壤侵蚀,与含砾石风沙土边坡研究结果一致^[26],而与含砾石紫色土边坡的研究结果存在差异^[24], 试验结果的差异可能与坡度有关;1.5—2.5 mm/min 雨强时,砾石对边坡侵蚀的抑制作用主要有以下两个方 面:1)大量砾石从表层土壤凸出,增大地表粗糙度,削弱了径流冲刷能力;2)径流的集中冲刷,边坡侵蚀方式 以细沟侵蚀为主,造成砾石的大量裸露,使边坡可被侵蚀输移的土壤量减少,从而导致侵蚀量与砾石的关系转 换为负相关关系[15]。细沟侵蚀在工程堆积体边坡的侵蚀中产生了重要作用,随着表层土壤逐渐被剥离,细沟 不断发育,砾石在边坡上的覆盖率也随之增大,在一定程度上,砾石质量分数与砾石覆盖度对边坡土壤侵蚀的 作用具有相似性^[37]。

3.3 砾石对边坡侵蚀动力机制的影响

通过研究含砾石红壤边坡的侵蚀速率与各水动力学参数的关系发现:"能量"参数径流功率(ω)、过水断

面单位能(E)均可用于描述含砾石红壤边坡侵蚀动力机制,但在最优参数选择方面(R²结合相关性分析),径 流功率(ω)是描述红壤区含砾石工程堆积体侵蚀动力机制更为合理的参数,这与诸多学者在放水条件或模拟 降雨条件下对工程堆积体的研究一致^[1, 26, 38]。根据土壤侵蚀速率和径流功率的侵蚀动力机制控制方程得到 的红壤区工程堆积体可蚀性参数介于 2.90—8.13 s²/m²之间,是牛耀彬等^[38]对有工程措施堆积体得到的可蚀 性参数的 1.0—5.8 倍,这说明了工程措施对防治堆积体水土流失的重要性,整体上比张乐涛等^[1]对陡坡堆积 体得到的可蚀性参数小(8.0 s²/m²),这与土壤在较陡边坡上对侵蚀更为敏感有关。同时,在不同条件下运用 不同的控制方程得出的土壤可蚀性参数大小之间并无必然联系,在运用通用土壤流失方程等预测模型时,对 土壤可蚀性参数的选择需要根据实际具体条件而定。本研究中得到的侵蚀临界值和可蚀性参数的大小按砾 石质量分数排列均为 10%>0%>20%>30%,这说明了 10%的砾石质量分数边坡在降雨下难以启动侵蚀,但是 又对侵蚀的敏感性高,这可能与入渗特征有关,整体上 10%砾石质量分数条件下边坡入渗最大,导致坡面径 流强度低,坡面径流要达到启动侵蚀的能力不易,但是一旦坡面侵蚀被启动,最大的入渗作用使边坡含水量增 大,导致抵抗侵蚀的能力减弱^[39]。

4 结论

(1)砾石质量分数对稳定径流强度的影响存在阈值,稳定径流强度在雨强>1.0 mm/min 时随砾石质量分数的增加先减小后增大,在 1.0 mm/min 雨强时则表现为先增大后减小,且均在 10%砾石质量分数下达到极 值。流速随雨强的增大而增大,边坡径流以层流为流动形态;1.0 mm/min 雨强条件下,边坡径流为缓流,砾石 促进了径流的流动,使弗汝德数增大 24.5%—87.8%;2.0、2.5 mm/min 雨强条件下,边坡径流为急流,流速随 砾石含量的增大而减小,弗汝德数降低 4.2%—13.0%。(2)1.0—1.5 mm/min 雨强时,侵蚀速率在产流前期达 到最大,随雨强增大到 2.5 mm/min 且砾石质量分数越低时,边坡越易发生细沟侵蚀并伴随重力崩塌现象,侵 蚀速率呈多峰多谷变化趋势。1.0 mm/min 雨强时,砾石存在加剧了土壤侵蚀,产沙增幅达 28.7%—50.5%;雨 强>1.0 mm/min 时,砾石减沙效益为 5.0%—64.4%;侵蚀速率与雨强、砾石质量分数三者之间可用二元线性函 数表示。(3)土壤侵蚀速率与径流功率及过水断面单位能之间均存在线性函数关系,而径流功率是描述红壤 区含砾石工程堆积体侵蚀动力机制最为合理的参数,其可蚀性参数及发生侵蚀临界径流功率从大到小对应的 砾石质量分数均为 10%、0%、20%和 30%。

参考文献(References):

- [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.农业工程学报,2013,29(24):94-102.
- [2] 李建明,牛俊,王文龙,张平仓,程冬兵,王一峰,张冠华,郭明明.不同土质工程堆积体径流产沙差异.农业工程学报,2016,32(14): 187-194.
- [3] 高旭彪,黄成志,刘朝晖.开发建设项目水土流失防治模式.中国水土保持科学,2007,5(6):93-97.
- [4] 王文龙,李占斌,李鹏,鲁可新,郭彦彪,郑良勇,徐伯荣.神府东胜煤田开发建设弃土弃渣冲刷试验研究.水土保持学报,2004,18 (5):68-71.
- [5] 张乐涛,高照良,李永红,田红卫.模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程.农业工程学报,2013,29(8):145-153.
- [6] Wang X Y, Li Z X, Cai C F, Shi Z F, Xu Q X, Fu Z Y, Guo Z L. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China. Geomorphology, 2012, 151-152: 234-242.
- [7] Brakensiek D L, Rawls W J. Soil containing rock fragments: effects on infiltration. CATENA, 1994, 23(1/2): 99-110.
- [8] 时忠杰,王彦辉,于澎涛,徐丽宏,熊伟,郭浩.六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响.生态学报,2008,28(12):6090-6098.
- [9] Ban Y Y, Lei T W, Gao Y, Qu L Q. Effect of stone content on water flow velocity over Loess slope: non-frozen soil. Journal of Hydrology, 2017, 549: 525-533.
- [10] Ban Y Y, Lei T W, Feng R, Qian D F. Effect of stone content on water flow velocity over Loess slope: frozen soil. Journal of Hydrology, 2017, 554: 792-799.
- [11] 王小燕,李朝霞,蔡崇法. 砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程. 水科学进展, 2012, 23(1): 38-45.
- [12] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,汪三树,李叶鑫,蒋平.不同土石比的工程堆积体边坡径流侵蚀过程.农业工程学报,2015,31(17):152-161.

[13]	李建明,王文龙, 寻	李宏伟, 黄鹏飞,	郭明明,董玉锴	,李艳富	黄土区工程堆积体石砾对流速及	产沙影响试验研究.	水力发电学报,	2015,
	34(9): 64-74.							

- [14] 丁亚东,谢永生,景民晓,田飞,王雪松.轻壤土散乱锥状堆置体侵蚀产沙规律研究.水土保持学报,2014,28(5);31-36.
- [15] 康宏亮,王文龙,薛智德,郭明明,李建明,白芸,邓利强,李艳富.陕北风沙区含砾石工程堆积体坡面产流产沙试验.水科学进展, 2016,27(2):256-265.
- [16] 李宏伟. 黄土区工程堆积体水蚀特征及土质可蚀性 K 因子研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [17] 王雪松,申卫博,谢永生,陈曦,丁亚东,马洪超.赣北地区工程堆积体侵蚀水动力机理研究.水力发电学报,2015,34(11):59-68.
- [18] 李宏伟, 王文龙, 黄鹏飞, 白芸. 土石混合堆积体土质可蚀性 K 因子研究. 泥沙研究, 2014, (2): 49-54.
- [19] 陈法扬. 不同坡度对土壤冲刷量影响试验. 中国水土保持, 1985, (2): 20-21.
- [20] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响.泥沙研究,2010,(6):48-53.
- [21] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,卢嘉,韩勇.黄土坡面细沟侵蚀形态试验.生态学报,2014,34(19):5514-5521.
- [22] Horton R E, Leach H R, Van Vliet R. Laminar sheet-flow. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1934, 15(2): 393-404.
- [23] Poesen J, Ingelmo-sanchez F, Mucher H. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(7): 653-671.
- [24] 王小燕, 王天巍, 蔡崇法, 谢德体. 含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程. 水科学进展, 2014, 25(2): 189-195.
- [25] 朱元骏, 邵明安. 不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究. 农业工程学报, 2006, 22(2): 64-67.
- [26] 康宏亮,王文龙,薛智德,郭明明,李建明,白芸,邓利强,李艳富,李垚林.北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响.农业工程学报,2016,32(3):125-134.
- [27] 吴冰,朱元骏,邵明安.含砾石土壤坡面流速及产流产沙过程研究.中国水土保持科学,2011,9(1):99-103.
- [28] Rieke-zapp D, Poesen J, Nearing M A. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 32(7): 1063-1076.
- [29] Yair A, Lavee H. Runoff generative process and runoff yield from arid talus mantled slopes. Earth Surface Processes, 1976, 1(3): 235-247.
- [30] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: significance and processes. CATENA, 1994, 23(1/2): 1-28.
- [31] 丁文斌, 史东梅, 何文健, 蒋光毅, 蒋平, 李叶鑫. 放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性. 农业工程学报, 2016, 32 (18): 153-161.
- [32] Auerswald K, Fiener P, Dikau R. Rates of sheet and rill erosion in Germany—A meta-analysis. Geomorphology, 2009, 111(3/4): 182-193.
- [33] 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. 水利学报, 2003, 34(1): 51-56, 61-61.
- [34] 景民晓,谢永生,赵暄,索改弟,刘楠,陈磊.土石混合弃土堆置体产流产沙模拟研究.水土保持学报,2013,27(6):11-15,20-20.
- [35] 王雪松,谢永生,陈曦,田飞.砾石对赣北红土工程锥状堆积体侵蚀规律的影响.泥沙研究,2015,(1):67-74.
- [36] 王小燕,李朝霞,徐勤学,蔡崇法.砾石覆盖对土壤水蚀过程影响的研究进展.中国水土保持科学,2011,9(1):115-120.
- [37] Poesen J, Ingelmo-Sanchez F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position. CATENA, 1992, 19(5): 451-474.
- [38] 牛耀彬,高照良,刘子壮,张少佳.工程措施条件下堆积体坡面土壤侵蚀水动力学特性.中国水土保持科学,2015,13(6):105-111.
- [39] 段金晓,李鹏,李占斌,任宗萍,王添,汤珊珊,苏远逸,程圣东.模拟降雨下前期含水量对冻融坡面产流产沙过程的影响.水土保持学报,2017,31(6):73-78,175-175.