

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.043.

芮茂刚, 周彦辰. 红壤工程堆积体坡面径流水动力特性研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 143-152, 159.

Rui Maogang, Zhou Yanchen. Study on the Dynamic Hydrodynamic Characteristics of Runoff on the Slope of Red Soil Engineering Accumulation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 143-152, 159.

红壤工程堆积体坡面径流水动力特性研究

芮茂刚¹, 周彦辰^{1,2}

(1. 云南省水利水电科学研究院, 昆明 650228; 2. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010)

摘要: [目的] 揭示裸坡和土石混合 2 种典型人为扰动工程堆积体在降雨条件下的坡面径流水动力参数特征, 量化堆积体侵蚀动力临界条件, 进而为阐明堆积体侵蚀动力机制奠定基础。[方法] 以红壤工程堆积体为研究对象, 通过模拟降雨试验, 开展裸坡和土石混合 (20% 砾石含量) 堆积体在不同降雨强度条件下的径流水动力特性分析, 进一步量化不同堆积体侵蚀临界动力条件, 开展堆积体侵蚀内在机制研究。[结果] 随降雨强度 1.0 mm/min 递增至 2.0 mm/min, 堆积体的径流由层流缓流过渡为层流急流, 砾石使平均阻力系数增大 1.40~3.54 倍。径流剪切力和径流功率随降雨强度增大呈递增趋势, 1.0 mm/min 雨强时砾石作用使径流剪切力均值较裸坡下降 44.99%, 但 ≥ 1.5 mm/min 时增大 2.90%~18.50%, 然而 3 种降雨强度下砾石均使径流功率均值较裸坡减少 10.38%~68.13%, 同时单位径流功率及过水断面单位能分别减少 20.11%~40.45% 和 21.06%~37.57%。径流功率是表征堆积体侵蚀动态变化的最优参数, ≤ 1.5 mm/min 雨强时砾石抑制堆积体侵蚀, 临界径流功率提高 19.38%~138.12%, 土体可蚀性降低 79.87%~83.51%, 雨强达到 2.0 mm/min 时, 临界径流功率减小 97.87%, 土体可蚀性增大 347.43%。[结论] 降雨强度对裸坡和土石混合堆积体水动力参数均有显著影响, 但随降雨强度增大砾石对堆积体侵蚀调控作用会发生改变, 存在临界降雨强度。

关键词: 水土保持; 红壤堆积体; 降雨; 水动力参数; 侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0143-10

Study on the Dynamic Hydrodynamic Characteristics of Runoff on the Slope of Red Soil Engineering Accumulation

Rui Maogang¹, Zhou Yanchen^{1,2}

(1. Yunnan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Kunming 650228, China;

2. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study are to explore the characteristics of hydrodynamic parameters on the slope runoff of two typical artificial disturbance engineering accumulations, bare slope and soil rock mixture under rainfall conditions, to quantify the critical conditions for erosion dynamics of accumulations, and to lie the foundation for elucidating the erosion dynamics mechanism of accumulations. [Methods] This study focused on the loose red soil engineering accumulation as the research object. The runoff dynamic hydrodynamic characteristics of bare slope and mixed soil and rock accumulation (20% gravel content) under different rainfall intensity conditions through simulated rainfall experiments were analyzed. The critical dynamic conditions for erosion of different accumulations were quantified. The research on the internal mechanisms of accumulation erosion was conducted. [Results] The runoff of accumulations changed from laminar slow flow to laminar jet flow, and Darcy-Weisbach increased by 1.40~3.54 times, with the increase of rainfall intensity from 1.0 mm/min to 2.0 mm/min. The runoff shear stress and runoff power of the accumu-

收稿日期: 2023-07-15

修回日期: 2023-07-27

资助项目: 云南省水利厅科技计划项目“红壤土壤侵蚀规律研究”(YNSL2022-06)

第一作者: 芮茂刚 (1973—), 男, 云南丽江人, 高级工程师, 硕士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 13888997248@163.com

通信作者: 周彦辰 (1988—), 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为水资源综合管理。E-mail: zhouyc_omg@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

lation showed an overall increasing trend with the increase of rainfall intensity. When the rainfall intensity was 1.0 mm/min, the average runoff shear stress of the soil rock mixed accumulation decreased by 44.99% compared to the bare slope. However, when the rainfall intensity was more than 1.5 mm/min, it increased by 2.90%~18.50%. The gravel action reduced the average runoff power by 10.38%~68.13% compared to bare slopes under three rainfall intensities. The gravel action also reduced the unit runoff power and the unit energy of the water flow section by 20.11%~40.45% and 21.06%~37.57%, respectively. The runoff power parameter was used to characterize the dynamic changes of slope erosion in accumulations. When the rainfall intensity was less than 1.5 mm/min, gravel could inhibit accumulation erosion, and the critical runoff power increased by 19.38%~138.12%, resulting in a decrease of 79.87%~83.51% in soil erodibility. When the rainfall intensity reached up to 2.0 mm/min, the critical runoff power decreased by 97.87%, and the soil erodibility increased by 347.43%. [Conclusion] Rainfall intensity has a significant impact on the hydrodynamic parameters of both bare slopes and mixed soil and rock accumulations. However, as rainfall intensity increases, the role of gravel in regulating erosion of the accumulations will change, a critical rainfall intensity can be indentified.

Keywords: soil and water conservation; red soil accumulation; rainfall test; dynamic hydrodynamic; erosion

随着经济社会的快速发展,工程建设造成地表扰动愈加剧烈,导致的强烈侵蚀逐步加剧^[1]。据统计,2003—2020年由发改部门审批立项的项目显著递增^[2],扰动地表范围扩大,开挖土石活动更加频繁^[3-4]。由于土石方挖填总量不平衡,形成了大量的堆积体与开挖面,是现阶段新增水土流失的主要策源地^[5],同时也是威胁区域生态环境的风险区与敏感点^[6]。随着极端气候的多发频发,由工程建设尤其是堆积体造成的滑坡、崩塌甚至泥石流等灾害时有发生,严重威胁生命财产安全,引起了广泛关注^[7-8]。

21世纪以来,生产建设项目工程堆积体导致的水土流失、诱发地质灾害等问题更加突出^[9-10]。针对工程堆积体土壤侵蚀机制已有相关研究:赵暄等^[11]通过实地调查全国6大水蚀类型区共计300余座堆积体,将其划分为散乱锥状堆置、依坡倾倒堆置、分层碾压坡顶散乱堆置、线型垅岗式堆置、坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置5类微地貌;实地测量了堆积体的坡度、坡长、物质组成等特性,明确了堆积体概化特征^[12]。目前为止,已有团队对工程堆积体侵蚀与预测等方面进行了较深入研究:王文龙团队^[13-14]基于室内模拟试验开展了不同条件下(降雨强度、坡长、坡度、砾石含量等)堆积体坡面径流产沙特性;高照良团队^[15]开展野外模拟试验研究不同放水流量条件下陡坡工程堆积体细沟发育动态变化特征,同时阐明工程措施(鱼鳞坑)和植物措施(植物篱)在一定条件下可以防护侵蚀,但在极端降雨条件下工程措施可能失去其防护效益^[16];而谢永生团队^[17]从堆积形态出发,将传统二维坡面拓展为三维立体,分析了不同降雨强度、砾石特性(含量、类型)等条件下堆积体侵蚀动态变化特征。除上述团队以外,针对西南土石山区工程

堆积体也有学者开展了相关研究^[18]。对于堆积体的水动力特性目前也有一定研究,并指明用于表征生产建设项目工程堆积体坡面侵蚀动力过程的主要参数包括雷诺数、弗劳德数、径流阻力系数、水流剪切力和径流功率等^[19],并提出径流剪切力、径流功率或单位径流功率可较好描述或者表征侵蚀,但受试验对象、条件差异,研究结论尚未形成统一共识^[20]。

然而,针对红壤特殊质地类型(质地差、粗颗粒多、黏结性强、易分散等)的工程堆积体侵蚀研究较少^[17,21],且已有研究针对的红壤较完整,但受极端天气影响,堆积体一般经过多场次冲刷,黏结性减弱、渗透性增强、细颗粒减少、团聚体破坏,在不同降雨试验下尤其是有砾石混合作用条件下的侵蚀规律是否发生改变仍未可知。其水力特性是否发生改变,进而影响径流产沙特性,目前研究较少。因此,以红壤堆积体为研究对象,重点开展不同降雨强度条件下裸坡和土石混合堆积体水力水动力参数特性分析,揭示堆积体侵蚀动力机制,也为工程堆积体土壤侵蚀预测模型构建奠定基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与设计

研究共设计红壤纯土堆积体和含20%砾石的土石混合堆积体2种下垫面。为模拟真实堆积体,选用的红壤为经过2a自然降雨冲刷的弃渣场边坡原状土(云南省昆明市嵩明县凤凰山的弃渣场边坡,经纬度:103°3'50"E,25°22'55"N)。将土体运至云南省水科院实验室进行模拟试验。采用人工筛分(10mm网筛)剔除原状土中的砾石、根系等杂质,随后与粒径为10~35mm的机械碎石混合,多次搅拌至其均匀

混合。经测定,红壤的颗粒机械组成中砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)的占比分别为28.2%,55.6%,16.2%。

将纯土或混合均匀的土石介质装填至试验槽,试验槽规格为长×宽×深为2 m×1 m×0.6 m,使用薄钢板将试验槽均分为两个0.5 m宽的小区,单个试验槽规格为2 m×0.5 m×0.6 m,两个小区在同场次降雨下互为重复。在试验槽底部预留了4排直径为0.5 cm的小孔同时填5 cm的细沙保证雨水可顺利排出,填土高度与试验槽出水口平齐,离试验槽顶部5 cm,因此,实际填土(土石)的深度为50 cm。根据野外实际调查并参考已有研究成果,分3层装填,并通过控制容重确定各层填土(土体)总量,装填上一层前打毛确保上下层粘合良好^[10,14]。其中下边2层容重为1.35 g/cm³,填土深度各20 cm,表层10 cm容重1.30 g/cm³。模拟堆积体的坡度采用25°。经测定,裸坡和土石混合堆积体的容重分别是1.26 g/cm³和1.35 g/cm³,含水率分别是9.42%和9.20%。各场次降雨试验开始前一天,用喷壶撒水,保证初始含水率的一致性。

1.2 模拟降雨试验

根据研究区侵蚀性降雨特征,以及相关学者开展模拟降雨试验(降雨强度主要在60~150 mm/h)^[13,15,17],进一步参考国家防汛抗旱总指挥部编制的《防汛手册》中对降雨强度等级划分标准(其中12 h降水总量超过140 mm划分为特大暴雨),试验降雨强度设置为1.0,1.5,2.0 mm/min共3个级别。在降雨试验开始前,采用彩条布遮盖试验槽,通过多次率定至误差在5%内开始正式试验。

降雨装置采用SR型侧喷式降雨器,包括两个移动式可形成对喷的降雨模拟器,由一个三通分出两个出水管。通过进水口阀门、流量计及降雨器喷头垫片尺寸综合调节降雨强度及均匀度,降雨器由不同的钢管组合最高可以达到6 m高,降雨均匀系数可以达到85%以上^[22]。各场次降雨历时为60 min(从径流小区出口出现径流开始计时)。期间每隔2 min分别用量筒接混合样用于径流测定,同时用接样桶接一个泥沙混合样,用于测定泥沙含量。其中量筒接的混合样分别记录接样时间、体积和质量(含量筒质量),接样桶同样记录接样时间静置10 h后倒去上清液,转移至铝盒在105℃烘箱烘干24 h后称重。由于每个小区分割成2个,因此,每场次降雨接样个数为120个,取均值作为最终试验结果,如两组数据差异较大,则舍弃并重新试验。本试验共计完成模拟降雨6场,完成12组小区试验数据收集。在接径流泥沙混合样的同时,在试验槽中部选取1个1 m长的断面用于测

定流速、流深、流宽等参数,其中流速采用高锰酸钾溶液测定,通过乘以系数0.75得到表层水流平均流速,流深和流宽采用薄钢尺测定并进一步通过径流量率定,水温采用温度计记录^[23]。

1.3 指标计算分析

(1) 雷诺数(Re)。Re是表征水流流型的参数,是判断水流紊动强度的指标,指水流惯性力与黏滞力的比值,无量纲;当Re<500时,水流为层流,500≤Re≤2 000时,水流为过渡流,Re>2 000时,水流为紊流,计算如下^[19]:

$$Re = \frac{V \times R}{\nu}, \nu = \frac{1.775 \times 10^{-6}}{1 + 0.03377 + 0.0002217^2} \quad (1)$$

式中: ν 为水流粘滞性系数(m²/s); T 为水温(°C); V 为过水断面径流流速(m/s); R 为水力半径(m); $R = A/\chi$; A 为过水断面面积(m²); χ 为湿周(m)。

(2) 弗劳德数(Fr)。Fr是表征水流流态的参数,无量纲参数,为水流惯性力和重力的比值。其计算式如下^[19]:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (2)$$

式中: h 为径流深(m); g 为重力加速度(m/s²)。当Fr>1,惯性力大于重力,水流为急流;Fr=1时,惯性力与重力相等,水流为临界流;Fr<1,重力作用大于惯性力,水流为缓流。

(3) 阻力系数(f)。Darcy-weisbach阻力系数 f 是指径流在向下流动过程中所受到的来自水土界面的阻滞水流的摩擦力以及水流内部质点混掺和携带泥沙产生的阻滞水流运动阻力的总称,计算如下^[19]:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (3)$$

式中: J 为水力坡度(m/m),可用坡度的正弦值近似代替。

(4) 径流剪切力(τ)。 τ 是在降雨过程中坡面有径流形成时,在沿坡面方向上产生一个对坡面的冲刷力,计算如下^[20]:

$$\tau = \rho_w GRJ \quad (4)$$

式中: τ 为径流剪切力(N/m²); ρ_w 为浑水密度(kg/m³); g 为重力加速度,9.8 m/s²; R 为水力半径(m),近似用水深代替; J 为水力坡度(m/m),可用坡度的正弦值近似代替。

(5) 径流功率(ω)。 ω (单位W/m²)为单位面上水体势能随时间的变化率,计算如下^[20]:

$$\omega = \tau V \quad (5)$$

(6) 单位径流功率(U)。 U (单位m/s)为作用于侵蚀下垫面的单位重量水体所消耗的功率,计算如下^[20]:

$$U=VJ \quad (6)$$

(7) 过水断面单位能(E)。 E 为以过水断面最低点做基准面的单位水重的动能与势能之和,计算如下^[20]:

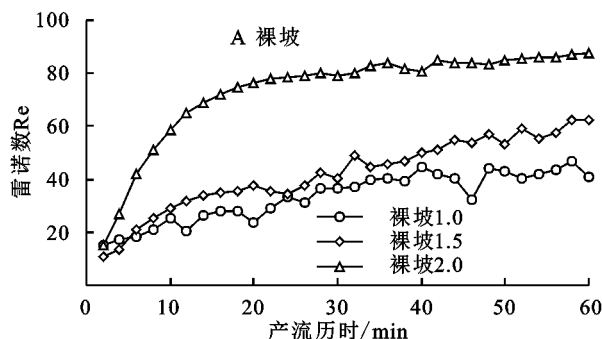
$$\omega = \frac{aV^2}{2g} + h \quad (7)$$

式中: E 为过水断面单位能(m); a 为校正系数,取1.0。

2 结果与分析

2.1 流型流态

2.1.1 径流流型 图1为裸坡和土石混合堆积体在3种降雨强度条件下雷诺数(Re)在降雨过程中的动态变化。结果表明,降雨强度对裸坡和土石混合堆积体 Re 的动态变化具有显著影响:在 ≤ 1.5 mm/min雨强时,2种堆积体的 Re 随产流历时始终呈递变增



化,其中裸坡 Re 的变化范围和幅度分别是10.67~62.53,14.03%~486.02%,土石混合堆积体 Re 的变化范围和幅度分别是7.10~35.86,17.85%~405.18%;但在2.0 mm/min雨强时, Re 呈快速增大后趋于相对稳定,裸坡 Re 的突变在产流20 min左右,而土石混合堆积体的突变在产流30 min左右,2种堆积体 Re 变化范围分别是14.84~87.84,13.13~82.99,变化幅度分别是81.19%~225.06%和41.69%~531.96%。总体来看,2种堆积体在3种降雨强度下的径流流型均处于层流态($Re < 100$)。降雨强度1.0 mm/min,1.5 mm/min和2.0 mm/min条件下土石混合堆积体的 Re 比裸坡分别降低32.38%~54.74%,33.41%~56.69%和4.61%~47.56%,下降的均值分别为47.33%,46.59%和21.69%。

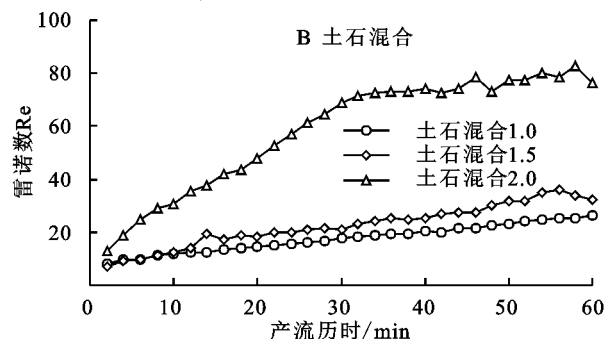


图1 不同堆积体径流雷诺数随产流历时动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of Reynolds number with time in different spoil heaps

2.1.2 径流流态 图2为不同降雨强度下2种堆积体径流弗劳德数(Fr)随产流历时的动态变化。结果表明,裸坡在产流10 min以后总体平稳,在降雨强度 ≥ 1.5 mm/min时产流前10 min呈快速递减,而1.0 mm/min时呈递增变化;而对于土石混合堆积体,在降雨强度 ≤ 1.5 mm/min时 Fr 全过程总体平稳,在2.0 mm/min时初期波动递减后递增随后趋于相对稳定。然而,在降雨强度1.0 mm/min时,裸坡和土石混合堆积体的 Fr 总体小于1.0,变化范围分别是0.48~1.54,0.36~0.82,均值分别是0.81,0.47,即径流处于缓流态;但在降雨强度为1.5 mm/min和2.0 mm/min时,裸坡和土石混合堆积体的 Fr 均处于急流态,表现为 $Fr > 1.0$,变化范围分别是0.90~3.94,0.65~1.62,2种降雨强度下裸坡 Fr 均值分别是1.39,1.63,土石混合堆积体为1.29,1.21。总体来看,在降雨强度1.0 mm/min和2.0 mm/min时,土石混合堆积体的 Fr 比裸坡分别降低8.55%~70.29%和3.52%~58.84%,平均下降36.85%和22.70%,但降雨强度为1.5 mm/min时,土石混合堆积体的 Fr 既可能低于裸坡(0.18%~64.26%)也可能高于裸坡(0.26%~45.13%),但总体上差异不大(差异均值为0.62%)。随

降雨强度增大,裸坡和土石混合堆积体的 Fr 均呈递增趋势,由1.0 mm/min增大至1.5 mm/min的递增幅度大于由1.5 mm/min递增至2.0 mm/min的幅度。

2.2 阻力系数

对于阻力系数(f)动态变化的分析可以直观地反映堆积体下垫面对径流阻滞作用的影响(图3)。降雨强度对裸坡和土石混合堆积体的 f 均有显著影响:在1.0 mm/min时,裸坡和土石混合堆积体的 f 均明显波动,变化范围分别是2.85~29.62,10.10~53.14,变化幅度分别是30.79%~940.44%和51.84%~426.12%;但在降雨强度 ≥ 1.5 mm/min时,2种堆积体的 f 在降雨全过程总体平稳,变化范围分别是0.44~8.32,2.56~7.67(出现极端值15.82),变化幅度分别是38.15%~1257.74%和0.64%~199.50%(出现极端值518.08%)。总体来看,裸坡的 f 随降雨强度增大呈较明显的递减趋势,土石混合堆积体的 f 在降雨强度1.5 mm/min和2.0 mm/min时相近,但均显著小于1.0 mm/min时的 f 。降雨强度1.0 mm/min和2.0 mm/min下土石混合堆积体的 f 分别是纯土的0.93~11.32倍和0.97~5.90倍,均值分别为3.54倍和1.94倍;但在降雨强度1.5 mm/min

时,土石混合堆积体的 f 既可能小于裸坡(0.48~0.99倍)也可能大于裸坡(1.00~7.83 倍),均值为1.40

倍。总体来看,砾石在堆积体中的分布,可以增强下垫面对径流的阻滞作用,进而降低侵蚀。

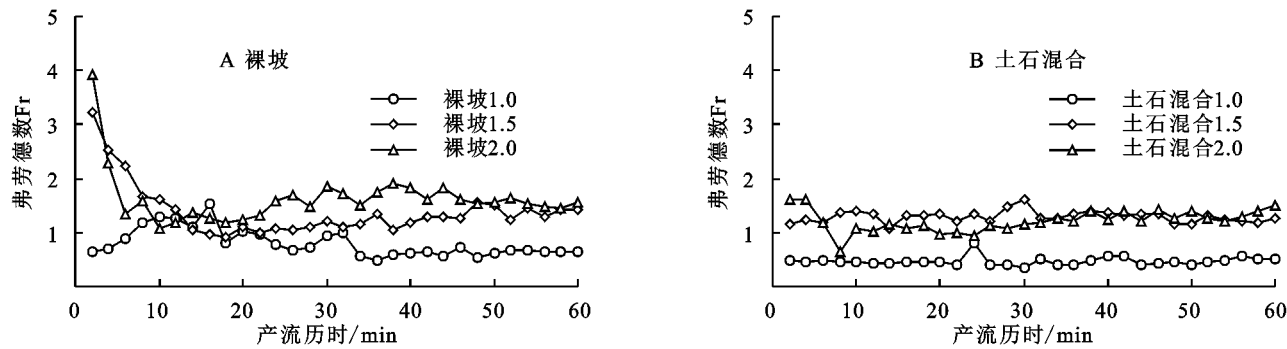


图 2 不同堆积体径流弗劳德数随产流历时动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of Froude number with time in different spoil heaps

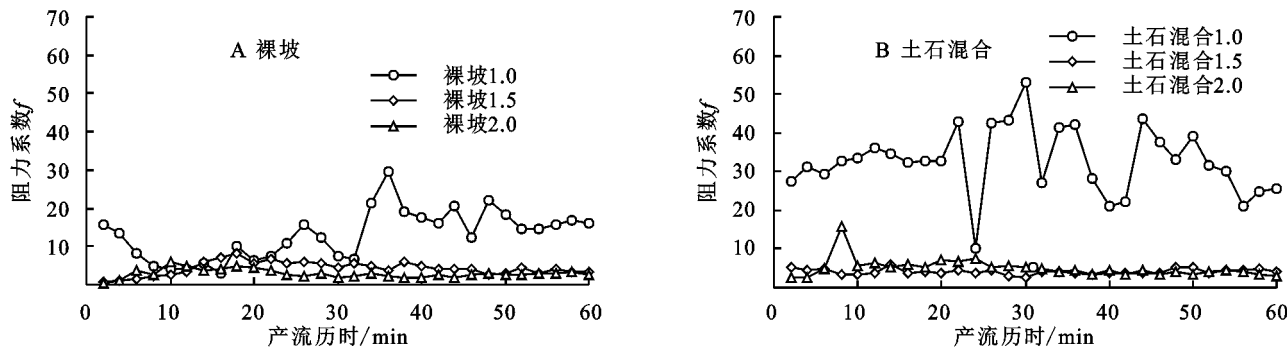


图 3 不同堆积体径流阻力系数随产流历时动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of runoff resistance coefficient with time in different spoil heaps

2.3 径流剪切力及径流功率

2.3.1 径流剪切力 径流剪切力(τ)反映的是坡面径流对侵蚀下垫面形成的作用力,与下垫面侵蚀状况密切相关,直观反映坡面侵蚀动态变化(图 4)。对于裸坡堆积体,在产流 30 min 前, τ 总体呈现为随降雨强度增大呈递增趋势,但在产流 30 min 后,出现较明显的 1.0 mm/min>2.0 mm/min>1.5 mm/min,而土石混合堆积体总体上仍呈现出随降雨强度增大

而增大的变化趋势。3 种降雨强度下裸坡的 τ 变化范围分别是 1.44~4.37 N/m²,0.49~3.29 N/m²,0.57~3.57 N/m²,土石混合堆积体的 τ 变化范围为 0.72~2.19 N/m²,1.38~3.38 N/m²,0.73~3.77 N/m²。土石混合堆积体的 τ 仅在降雨强度 1.0 mm/min 时小于裸坡(下降均值为 44.99%),而在 1.5 mm/min 和 2.0 mm/min 时均大于裸坡(递增均值为 18.50%和 2.90%)。

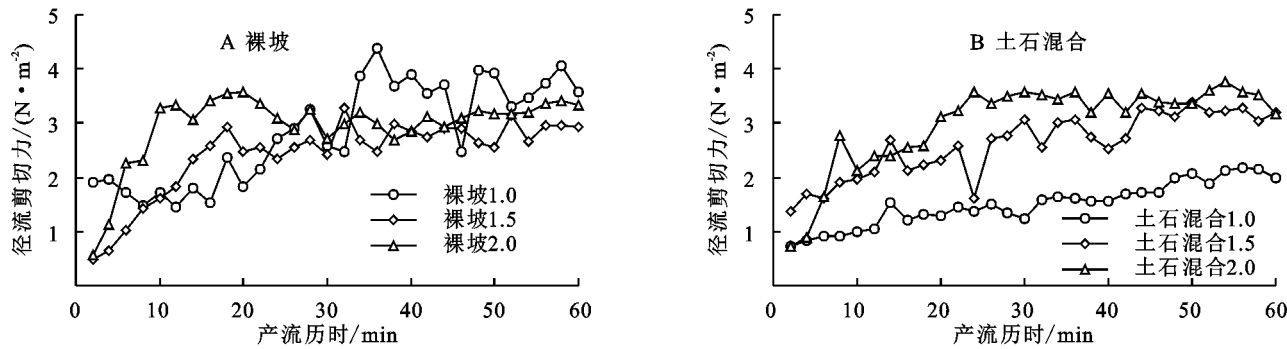


图 4 不同堆积体坡面径流剪切力随产流历时变化

Fig. 4 Dynamic changes of runoff shear stress with time in different spoil heaps

2.3.2 径流功率 相比于径流剪切力,3 种降雨强度下裸坡和土石混合堆积体的径流功率(ω)随产流历时的变化呈较明显规律(图 5)。在降雨强度 ≤ 1.5 mm/min 时,2 种堆积体的 ω 随产流历时总体呈小幅

递增变化,1.0 mm/min 时裸坡和土石混合堆积体的径流功率变化范围分别是 0.06~0.17 W/m²,0.01~0.07 W/m²,1.5 mm/min 雨强时分别为 0.04~0.24 W/m²,0.05~0.20 W/m²,砾石作用使 ω 均值分别比

裸坡下降 68.13% 和 10.38%; 在降雨强度达到 2.0 mm/min 时, 径流功率均呈现出先快速递增后趋于稳定的趋势, 其中裸坡和土石混合堆积体的径流功率

发生转折分别在产流 15 min 和 30 min 左右, 变化范围分别在 $0.05 \sim 0.32 \text{ W/m}^2$, $0.04 \sim 0.31 \text{ W/m}^2$, 土石混合堆积体的 ω 相较于裸坡减少均值为 20.41%。

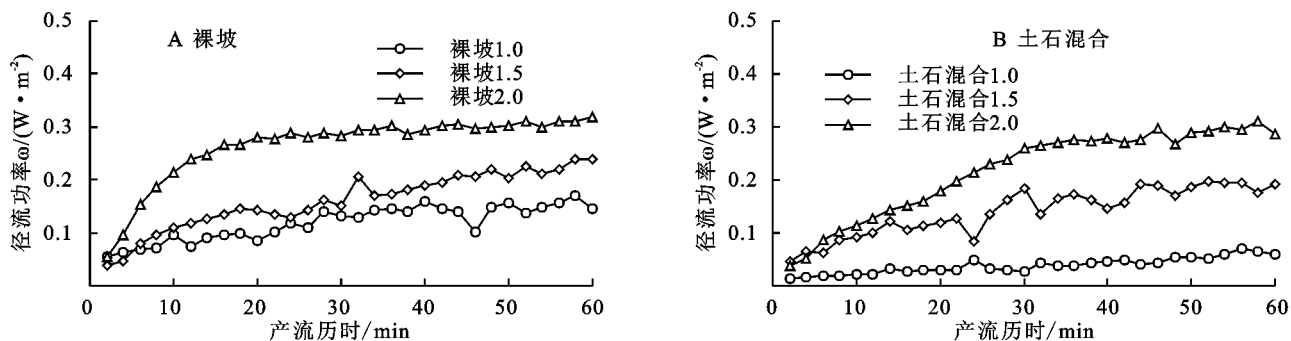


图5 不同堆积体坡面径流功率随产流历时变化

Fig. 5 Dynamic changes of runoff stream power with time in different spoil heaps

2.4 单位径流功率及过水断面单位能

单位径流功率(U)和过水断面单位能(E)也是用于反映坡面径流动力的常见参数, 其动态变化特征见图6和图7。对于 U , 裸坡呈现为波动变化后总体趋于相对稳定, 而土石混合堆积体总体呈相对稳定变

化。但2种堆积体的 U 均随降雨强度增大呈递增变化。3种降雨条件下裸坡和土石混合堆积体的 U 变化范围分别是 $0.01 \sim 0.05 \text{ m/s}$ 和 $0.01 \sim 0.04 \text{ m/s}$, 土石混合堆积体的 U 相较于裸坡减少均值分别为 40.45%, 20.11% 和 22.22%。

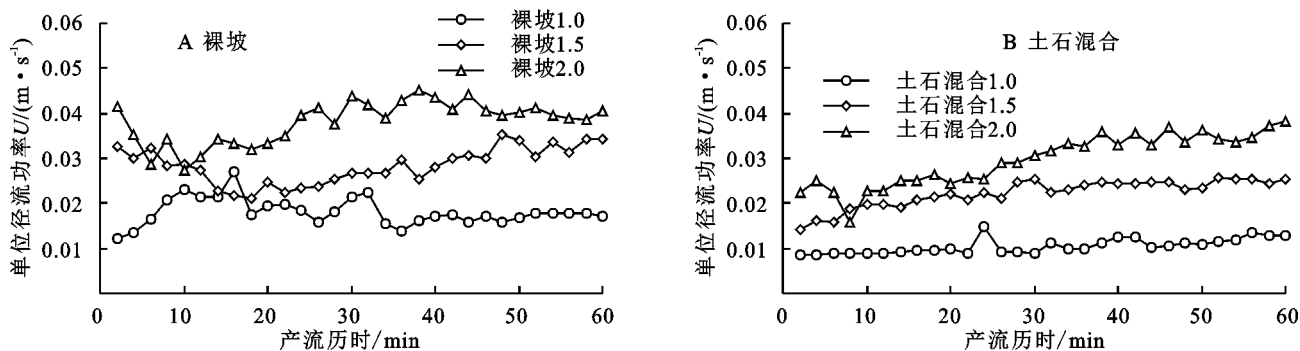


图6 不同堆积体坡面单位径流功率随产流历时变化

Fig. 6 Dynamic changes of unit runoff stream power with time in different spoil heaps

对于 E , 反映的是单位径流的动能与势能之和, 与水流对坡面造成的剥蚀及搬运等相关。总体来看, 裸坡和土石混合堆积体的 E 随产流历时总体均呈缓慢递增趋势, 且降雨强度 2.0 mm/min 的递增幅度显著大于 1.0 mm/min 和 1.5 mm/min。降雨强度 1.0 mm/min 和 1.5 mm/min 时, 裸坡 E 的变化范围分别是 $0.0002 \sim$

0.0005 m 和 $0.0003 \sim 0.0007 \text{ m}$, 土石混合堆积体分别为 $0.0002 \sim 0.0004 \text{ m}$ 和 $0.0001 \sim 0.0004 \text{ m}$; 在降雨强度 2.0 mm/min 时, 裸坡和土石混合堆积体的 E 变化范围分别是 $0.0005 \sim 0.0009 \text{ m}$ 和 $0.0003 \sim 0.0008 \text{ m}$ 。相较于裸坡, 3种降雨条件下土石混合堆积体的 E 减少均值分别为 21.44%, 37.57% 和 21.06%。

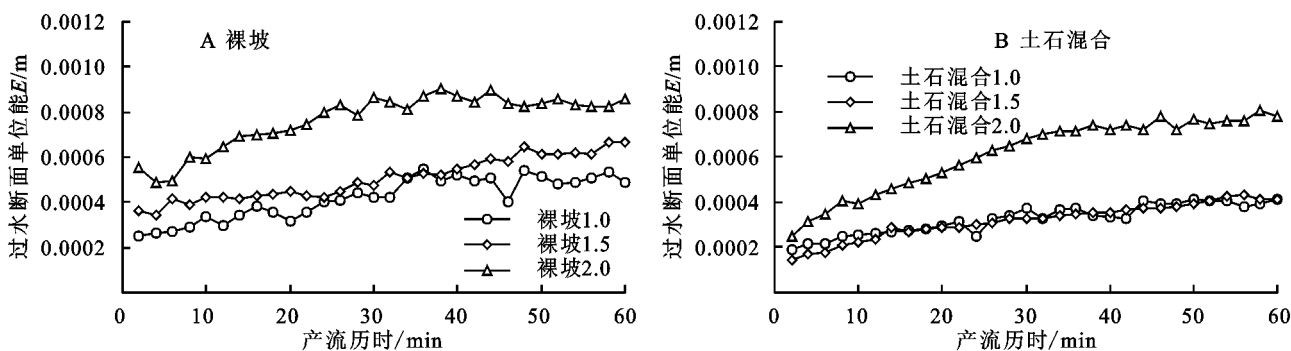


图7 不同堆积体坡面径流过水断面单位能随产流历时变化

Fig. 7 Dynamic changes of unit energy of runoff water section with time in different spoil heaps

2.5 侵蚀速率及其与水力水动力相关性

2.5.1 稳定阶段的侵蚀与水动力参数分析 根据前述对各水力水动力参数的动态变化过程分析可知,在产流 40~60 min 期间各参数总体变化幅度较小,趋向稳定。因此,研究将产流 40~60 min 的各参数均值作为总体平均值,同时分析了 2 种堆积体在不同降雨强度条件下,以及相同降雨条件下裸坡和土石混合堆积体之间的差异性(表 1)。结果表明,对于裸坡,平均侵蚀速率、雷诺数、弗劳德数、径流功率、单位径流功率和过水断面单位能随降雨强度增大 1.5~2.0 倍,分别增大 1.58~3.77 倍、1.34~2.04 倍、2.13~2.50 倍、1.47~2.08 倍、1.86~2.37 倍和 1.20~1.60 倍,相同条件下土石混合堆积体增大的倍数分别为 2.06~30.09 倍、1.32~3.32 倍、2.63~2.77 倍、1.28~3.29 倍、2.08~2.95 倍和 1.00~2.00 倍。对于阻力系数,随降雨强度增大,裸坡和土石混合堆积体分别降低 77.69%~84.12%和 85.66%~86.99%;同时裸坡堆积体的径流剪切力随降雨强度增大下降 12.19%~21.33%,土石混合堆积体的径流剪切力随雨强增大至 1.5 mm/min 下降了 38.26%,但在降雨强度达到 2.0 mm/min 时增大 11.25%。

表 1 堆积体稳定阶段的侵蚀速率与水力水动力参数特征

Table 1 Characteristics of erosion rate, hydraulics, and hydrodynamics parameters during the stable stage of spoil heaps									
降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	下垫面	平均侵蚀速率/ (g·m ⁻² ·s ⁻¹)	径流水力参数			径流水动力参数			
			Re	Fr	f	$\tau/(N\cdot m^{-2})$	$\omega/(W\cdot m^{-2})$	$U/(m\cdot s^{-1})$	E/m
1.0	裸坡	5.58±0.26Ac	41.75±1.11Ac	0.64±0.02Ac	16.81±0.84Aa	3.61±0.13Aa	0.1464±0.0053Ac	0.0172±0.0002Ac	0.0005±0.00001Ac
	土石混合	0.84±0.03Bb	23.18±0.65Bc	0.48±0.02Bb	29.98±2.35Ba	3.11±0.08Bb	0.0873±0.0027Bc	0.0119±0.0003Bc	0.0004±0.00001Bb
1.5	裸坡	8.82±0.20Ab	56.04±1.24Ab	1.36±0.04Ab	3.75±0.20Ab	2.84±0.05Ac	0.2146±0.0049Ab	0.0320±0.0007Ab	0.0006±0.00002Ab
	土石混合	1.73±0.08Bb	30.62±1.06Bb	1.26±0.03Ba	4.30±0.18Bb	1.92±0.07Bc	0.1119±0.0039Bb	0.0247±0.0003Bb	0.0004±0.00001Bb
2.0	裸坡	21.06±0.69Aa	84.99±0.58Aa	1.60±0.04Aa	2.67±0.11Ab	3.17±0.05Ab	0.3047±0.0022Aa	0.0407±0.0005Aa	0.0008±0.00002Aa
	土石混合	25.28±1.67Ba	76.88±0.97Ba	1.33±0.03Ba	3.90±0.17Bb	3.46±0.05Ba	0.2870±0.0040Ba	0.0351±0.0006Ba	0.0008±0.00002Ba

注:表中小写字母代表相同下垫面在 3 种不同降雨强度下的差异性分析;大写字母代表相同降雨强度下纯土和土石混合堆积体之间的差异性分析;其中不同字母代表显著差异($p<0.05$),相同字母代表差异性不显著($p\geq 0.05$)。

2.5.2 相关性及耦合性分析 基于相关性分析,可直观反映侵蚀速率与径流水力及水动力参数的定量关系(表 2)。综合分析 3 种降雨强度条件下的结果表明:对于裸坡,侵蚀速率与雷诺数和阻力系数分别呈极显著正相关和负相关关系($p<0.01$),与弗劳德数呈显著正相关关系($p<0.05$),与水动力参数(剪切力、径流功率、单位径流功率和过水断面单位能)均呈极显著正相关关系($p<0.01$),且侵蚀速率与径流功率的相关性最高(相关系数为 0.773),其次为过水断面单位能(相关系数为 0.745),即径流功率和过水断面单位能可作为表征侵蚀的最佳水动力参数;对于土石混合介质,侵蚀速率与水力参数(雷诺数、弗劳德数、阻力系数)和水动力参数(剪切力、径流功率、单位径流功率和过水断面单位能)均呈

对比砾石作用对堆积体坡面侵蚀过程各参数的影响表明:在降雨强度 ≤ 1.5 mm/min 时土石混合堆积体的平均侵蚀速率和径流剪切力比裸坡分别降低 80.39%~84.95%和 13.85%~32.39%,但在 2.0 mm/min 条件下砾石作用会导致侵蚀和剪切力分别增大 20.04%和 9.15%;3 种降雨强度下土石混合堆积体的雷诺数、弗劳德数、径流功率、单位径流功率和过水断面单位能分别比裸坡减少 9.54%~45.36%,7.35%~25.00%,5.81%~47.86%,13.76%~30.81%和 0~33.33%,而阻力系数提高 14.67%~78.35%。

差异性分析结果表明,3 种降雨强度下土石混合堆积体的各参数均与裸坡呈显著差异($p<0.05$),进一步证实了砾石对堆积体坡面侵蚀及水力水动力参数具有显著影响。但相同下垫面对降雨强度的响应,各参数反应有差异,其中裸坡和土石混合堆积体的雷诺数、径流功率和单位径流功率在 3 种降雨强度下互呈显著差异,其他参数(侵蚀速率、弗劳德数、阻力系数、径流剪切力和过水断面单位能)在 3 种降雨条件下有差异,总体上看,降雨强度 1.0 mm/min 与 2.0 mm/min 条件下总体会导致各参数差异性显著($p<0.05$)。

极显著相关关系($p<0.01$),且仅与阻力系数呈负相关关系,雷诺数、过水断面单位能和径流功率对侵蚀速率的影响较大(相关系数分别为 0.954,0.919,0.829)。总体来看,采用径流功率可较好地刻画堆积体坡面侵蚀动态变化。同时,相关性分析进一步表明,砾石作用下改善了堆积体侵蚀、水力参数和水动力参数的相关性,呈现为土石混合介质各参数均呈极显著相关($p<0.01$),而裸坡中仍存在部分参数相关性不显著($p>0.05$)。

相关性分析表明径流功率可作为堆积体侵蚀速率的表征参数,二者的耦合关系见图 8。对于裸坡,在降雨强度 ≤ 1.5 mm/min 时,侵蚀速率与径流功率之间呈极显著的线性关系($R^2=0.75\sim 0.92$),但在降雨强度达到 2.0 mm/min 时,由于侵蚀速率的变化幅

度大且零散,导致侵蚀速率与径流功率之间拟合关系较弱($R^2=0.03$);但对于土石混合堆积体,3 种降雨条件下的侵蚀速率与径流功率之间均呈极显著的线性关系($R^2=0.46\sim0.87$)。

表 2 堆积体侵蚀速率、水力和水动力相关性分析

Table 2 Correlation analysis of erosion rate, hydraulics, and hydrodynamics of spoil heaps

下垫面	参数	雷诺数	弗劳德数	阻力系数	剪切力	径流功率	单位径流功率	过水断面单位能
裸坡	侵蚀速率	0.783**	0.220*	-0.376**	0.362**	0.773**	0.648**	0.745**
	雷诺数	—	0.144	-0.332**	0.587**	0.996**	0.745**	0.949**
	弗劳德数	—	—	-0.743**	-0.585**	0.147	0.742**	0.349**
	阻力系数	—	—	—	0.501**	-0.355**	-0.787**	-0.380**
	剪切力	—	—	—	—	0.584**	-0.058	0.459**
	径流功率	—	—	—	—	—	0.751**	0.943**
	单位径流功率	—	—	—	—	—	—	0.834**
土石混合介质	侵蚀速率	0.954**	0.404**	-0.424**	0.668**	0.829**	0.799**	0.919**
	雷诺数	—	0.426**	-0.452**	0.802**	0.911**	0.850**	0.972**
	弗劳德数	—	—	-0.938**	0.604**	0.690**	0.832**	0.328**
	阻力系数	—	—	—	-0.655**	-0.701**	-0.818**	-0.325**
	剪切力	—	—	—	—	0.940**	0.849**	0.760**
	径流功率	—	—	—	—	—	0.957**	0.854**
	单位径流功率	—	—	—	—	—	—	0.780**

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

经计算,在降雨强度 $\leq 1.5\text{ mm/min}$ 时,裸坡和土石混合堆积体的临界径流功率分别是 $0.028\text{ }3\sim 0.029\text{ }7\text{ W/m}^2$, $0.035\text{ }5\sim 0.067\text{ }5\text{ W/m}^2$, 砾石作用可以提高堆积体临界径流功率 $19.38\%\sim 138.12\%$, 降低土体可蚀性 $79.87\%\sim 83.51\%$;但在降雨强度达到 2.0 mm/min 时,砾石作用相反会导致堆积体侵蚀更

加严重,临界径流功率减小 97.87% , 土体可蚀性增大 347.43% 。结果表明,砾石对堆积体坡面侵蚀的调控作用还受降雨强度影响,在降雨强度 $\leq 1.5\text{ mm/min}$ 时砾石可以起到防止侵蚀效果,但在强降雨条件下(降雨强度 2.0 mm/min)砾石作用会加剧坡面侵蚀,对径流剪切力的分析也得出相同的结论(表 1)。

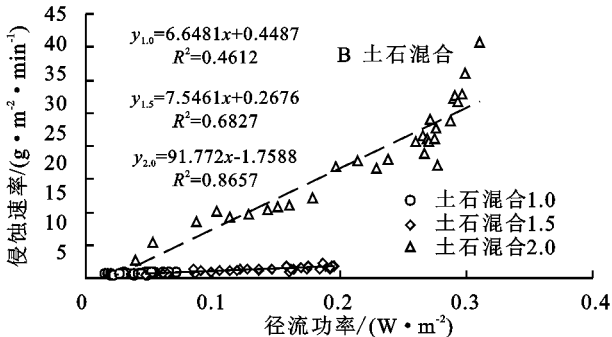
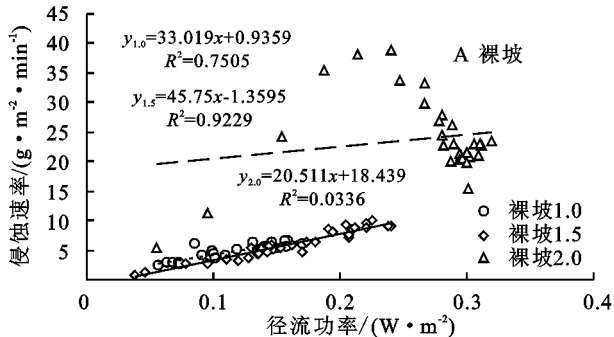


图 8 堆积体侵蚀速率与径流功率耦合关系

Fig. 8 Coupling relationship between erosion rate with runoff stream power in spoil heaps

3 讨论

工程堆积体是在外力作用下重新堆垫形成的下垫面,相对于传统的侵蚀下垫面具有较大差异^[1],其造成的侵蚀也称为“岩土侵蚀”或“工程侵蚀”^[24]。堆积体中的砾石特性、含量及其空间分布特征是造成其侵蚀特异的主要原因^[25]。从研究结果来看,堆积体中的砾石可以有效减少雷诺数、弗劳德数、径流功率、单位径流功率和过水断面单位能,但能显著提高径流

阻力,与聂慧莹等^[26]、戎玉博等^[27]研究结果相近,即砾石主要起到保护侵蚀下垫面减少侵蚀的作用。同时,在风蚀地区,砾石压盖也常作为一种常见的水土保持措施^[1]。然而,砾石对坡面侵蚀的作用,还受砾石自身及降雨特性等影响;已有研究认为,随着砾石含量增大侵蚀总体递减^[14,27],但也有研究表明砾石含量对侵蚀或入渗影响还存在临界值^[28],其中砾石改变了侵蚀动力特性是其改变侵蚀的重要内因^[15,19]。本研究提出在降雨强度达到 2.0 mm/min

时,含20%砾石含量堆积体的平均侵蚀速率比裸坡增大20.04%,主要是由于强降雨条件下改变了径流动力特性,且雨滴对下垫面的溅蚀作用等发生较大改变,堆积体表层土壤颗粒与砾石的黏结性被破坏,造成更加严重的侵蚀。在后续研究中,应增加砾石自身特性(含量、类型、空间分布等)在极端降雨条件下对堆积体侵蚀的内在影响,为陡坡堆积体侵蚀机理及防治措施布置研究奠定基础。

4 结论

针对松散红壤工程堆积体人为加速侵蚀地貌单元,通过模拟降雨试验研究不同降雨强度下裸坡和土石混合堆积体侵蚀过程中各水力和水动力参数的动态变化特征,探索适用于侵蚀特征表征的最优动力参数。主要结果如下:

(1) 裸坡和土石混合堆积体雷诺数、径流剪切力、径流功率、单位径流功率和过水断面单位能总体随产流历时呈递增变化,而弗劳德数、阻力系数呈波动或者趋于稳定变化;

(2) 在降雨强度1.0 mm/min时,堆积体径流处于层流缓流范畴,但降雨强度 ≥ 1.5 mm/min过渡为层流急流;砾石作用使雷诺数和弗劳德数均值分别下降21.69%~47.33%和0.62%~36.85%,但提高阻力系数1.40~3.54倍;

(3) 砾石对堆积体径流剪切力作用受降雨强度影响,降雨强度1.0 mm/min时砾石能够降低堆积体径流剪切力44.99%,但降雨强度 ≥ 1.5 mm/min时砾石使得径流剪切力增大2.90%~18.50%,但均能降低径流功率(10.38%~68.13%)。同时砾石作用也使得单位径流功率及过水断面单位能分别减少20.11%~40.45%和21.06%~37.57%;

(4) 径流功率是预测堆积体侵蚀的最优参数,在降雨强度 ≤ 1.5 mm/min时砾石抑制堆积体侵蚀,临界径流功率提高19.38%~138.12%,可蚀性降低79.87%~83.51%,降雨强度达到2.0 mm/min时,临界径流功率减小97.87%,土体可蚀性增大347.43%。差异性分析结果表明,降雨强度和砾石总体均能改变堆积体各水力水动力参数。

参考文献(References):

- [1] 高儒学,戴全厚,甘艺贤,等.土石混合堆积体坡面土壤侵蚀研究进展[J].水土保持学报,2018,32(6):1-8,39.
Gao R X, Dai Q H, Gan Y X, et al. Research progress on soil erosion on the slope surface of soil-rock mixed engineering accumulation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 1-8, 39.
- [2] 王一峰,屈丽琴,李建明,等.基于近二十年中国水土保持公报的水土流失治理分析[J].长江科学院院报,2023,40(7):59-65.
Wang Y F, Qu L Q, Li J M, et al. Analysis of soil erosion control based on china soil and water conservation bulletin in the past two decades [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(7): 59-65.
- [3] 李镇,张文博,吕佼容,等.含结构体工程堆积体土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2022,36(4):53-62.
Li Z, Zhang W B, Lv J R, et al. Study on soil erosion of engineering accumulation with structure[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 53-62.
- [4] Ramos-Scharrón C E, Alicea-Díaz E E, Figueroa-Sánchez Y A, et al. Road cutslope erosion and control treatments in an actively-cultivated tropical montane setting[J]. Catena, 2022, 209(2): 105814.
- [5] 杨健,高照良,李永红.国内外开展开发建设项目研究进展的初步分析[J].中外企业家,2010(7):6-9.
Yang J, Gao Z L, Li Y H. Preliminary analysis of research progress on development and construction projects at home and abroad [J]. Chinese and Foreign Entrepreneurs, 2010(7): 6-9.
- [6] Gao Y, Yin Y P, Li B, et al. Post-failure behavior analysis of the Shenzhen '12.20' CDW landfill landslide[J]. Waste Management, 2019, 83: 171-183.
- [7] 许阳光,郭文召,王文龙,等.极端降雨下黄土高原草被沟坡浅层滑坡特征及其对产流产沙的影响[J].生态学报,2022,42(19):7898-7909.
Xu Y G, Guo W Z, Wang W L, et al. Characteristics of shallow landslides under extreme rainfall and their effects on runoff and sediment on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7898-7909.
- [8] 吕刚,李叶鑫,宁宝宽,等.暴雨作用下排土场平台一边坡系统土壤侵蚀过程模拟研究[J].煤炭学报,2021,46(5):1463-1476.
Lv G, Li Y X, Ning B K, et al. Soil erosion process of platform-slope system of dump under heavy rain[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1463-1476.
- [9] 李天阳,何丙辉,雷廷武,等.汶川震区滑坡堆积体土石混合坡面细沟水动力学特征室内试验[J].水利学报,2014,45(8):892-902.
Li T Y, He B H, He T W, et al. Indoor experiments on eroding rills hydrodynamics characteristics of earth-rock mixed landslide slope in Wenchuan Earthquake area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8): 892-902.
- [10] 李建明,牛俊,孙蓓,等.两种驱动力作用下植被调控堆积体坡面减水减沙效益[J].农业工程学报,2021,37(11):76-84.

- Li J M, Niu J, Sun B, et al. Benefits of soil and water reduction on spoil heaps by vegetation under two driving forces[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(11): 76-84.
- [11] 赵暄, 谢永生, 景民晓, 等. 生产建设项目弃土堆置体的类型与特征[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(1): 88-94.
Zhao X, Xie Y S, Jing M X, et al. Types and characteristics of spoilbank in development construction project[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(1): 88-94.
- [12] 马洪超, 谢永生, 赵暄, 等. 工程堆积体标准小区界定与可蚀性因子改进[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 59-64.
Ma H C, Xie Y S, Zhao X, et al. Defining of engineering accumulations unit plot and improvement of engineering accumulations erodibility factor[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 59-64.
- [13] 赵满, 王文龙, 郭明明, 等. 含砾石风沙土堆积体坡面径流产沙特征[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 847-859.
Zhao M, Wang W L, Guo M M, et al. Runoff and Sediment Yielding Characteristics of Slopes of Stacks of Gravels-Containing Aeolian Sandy Soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(4): 847-859.
- [14] 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.
Li J M, Niu J, Wang W L, et al. Differences in characteristics of runoff and sediment yielding from engineering accumulations with different soil textures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(14): 187-194.
- [15] 牛耀彬, 高照良, 李永红, 等. 工程堆积体坡面细沟形态发育及其与产流产沙量的关系[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 154-161.
Niu Y B, Gao Z L, Li Y H, et al. Rill morphology development of engineering accumulation and its relationship with runoff and sediment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(19): 154-161.
- [16] 牛耀彬, 高照良, 齐星圆, 等. 不同工程堆积体坡面治理措施对土壤抗冲刷侵蚀能力的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 134-143.
Niu Y B, Gao Z L, Qi X Y, et al. Effects of treatment measures on soil anti-scour erodibility in engineering accumulation slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 134-143.
- [17] 王雪松, 谢永生. 模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水动力特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 117-124.
- Wang X S, Xie Y S. Hydrodynamic characteristics of tapered spoilbank under simulated rainfall condition [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(1): 117-124.
- [18] 丁文斌, 李叶鑫, 史东梅, 等. 两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.
Ding W B, Li Y X, Shi D M, et al. Contrast study on simulated runoff erosion of two engineering accumulation slopes [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(3): 558-569.
- [19] 李永红, 牛耀彬, 王正中, 等. 工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 83-88.
Li Y H, Niu Y B, Wang Z Z, et al. Hydrodynamic parameters and their relationships of runoff over engineering accumulation slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(22): 83-88.
- [20] 王仁新, 何丙辉, 李天阳, 等. 汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 375-387.
Wang R X, He B H, Li T Y, et al. Research on soil erosion rate and hydrodynamic parameters of landslide accumulation slope in wenchuan earthquake area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(2): 375-387.
- [21] 陈卓鑫, 王文龙, 康宏亮, 等. 砾石对红壤工程堆积体边坡径流产沙的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6545-6556.
Chen Z X, Wang W L, Kang H L, et al. Effects of gravel on runoff and sediment yield of red soil engineering accumulation slopes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6545-6556.
- [22] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩. 不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2492-2500.
He X L, Zheng Z C, Li T X. Effects of tillage practices on soil erosion and phosphorus loss in sloping cropland of purple soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(12): 2492-2500.
- [23] 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 117-129.
Lei T W, Zhang Q W, Yan L J. Physical model of rill erosion [M]. Beijing: Science Press, 2009: 117-129.
- [24] 蒲玉宏, 王伟. 煤矿废弃堆积物坡面侵蚀研究初报[J]. 中国水土保持, 1995(10): 11-15.
Pu Y H, Wang W. Preliminary report on slope erosion of coal mine waste deposits [J]. Soil and Water Conservation in China, 1995(10): 11-15.

- [9] 杨亚川,莫永京,王芝芳,等.土壤—草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J].中国农业大学学报,1996,1(2):31-38.
Yang Y C, Mo Y J, Wang Z F, et al. Experimental study on anti-water erosion and shear strength of soil-root composite[J]. Journal of China Agricultural University, 1996,1(2):31-38.
- [10] 郑子成,张锡洲,李廷轩,等.玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J].农业机械学报,2014,45(5):125-130.
Zheng Z C, Zhang X Z, Li T X, et al. Change Characteristics and Influencing Factors of Soil Shear Strength during Maize Growing Period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(5):125-130.
- [11] 陈晓安,杨洁,熊永,等.红壤区崩岗侵蚀的土壤特性与影响因素研究[J].水利学报,2013,44(10):1175-1181.
Chen X A, Yang J, Xiong Y, et al. Research on the soil characteristics and factors of collapsing erosion in the red soil zone[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(10):1175-1181.
- [12] 格日乐,张成福,蒙仲举,等.3种植物根—土复合体抗剪特性对比分析[J].水土保持学报,2014,28(2):85-90.
Ge R L, Zhang C F, Meng Z J, et al. The shear property comparison of three roots-soil composites[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(2):85-90.
- [13] 邓佳.南方红壤区常见草本根土复合体生物力学抗蚀机理研究[D].武汉:华中农业大学,2015.
Deng J. The research of biomechanical erosion resistance mechanism for the common herbal roots-soil composite in southern red soil region[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [14] 张立芸,段青松,范茂攀,等.玉米和大豆根系对滇中地区坡耕地红黏土抗剪强度的影响[J].土壤学报,2022,59(6):1527-1539.
Zhang L Y, Duan Q S, Fan M P, et al. Effects of maize and soybean roots on topsoil shear strength of red clay on sloping farmland in central Yunnan[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022,59(6):1527-1539.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理实验室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.
Institute of Soil Physics, Nanjing Soil Research Institute, Chinese Academy of Sciences. Physical properties of soil[M]. Beijing: Beijing Science Press, 1978.
- [16] Martel S J. Mechanics of landslide initiation as a shear fracture phenomenon[J]. Marine Geology, 2004,203(3):319-339.
- [17] Wei J, Shi B, Li J, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities: A case study in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Catena, 2018,166:124-133.
- [18] 唐菡,湛芸,刘泉宏,等.喀斯特坡地拉巴豆地埂篱根及根—土复合体力学特性[J].生态学报,2019,39(16):6114-6125.
Tang H, Chen Y, Liu X H, et al. Study on the mechanic features of root and root-soil matrix of Dolichos lablab L. hedgerows on the slopes of the karst area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(16):6114-6125.
- [19] Tsige D, Senadheera S, Talema A. Stability analysis of plant-root-reinforced shallow slopes along mountainous road corridors based on numerical modeling[J]. Geosciences, 2019,10(1):19.

~~~~~  
(上接第152页)

- [25] Lv J R, Luo H, Xie Y S, et al. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil heaps through multiple rainfall events [J]. Catena, 2019,172:179-189.
- [26] 聂慧莹,王文龙,郭明明,等.降雨条件下两种土壤类型工程堆积体坡面水沙关系与侵蚀动力特征[J].应用生态学报,2020,31(9):3141-3153.  
Nie H Y, Wang W L, Guo M M, et al. Runoff-sediment relationship and erosion dynamic characteristics for two types of engineering deposits under rainfall condition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(9):3141-3153.
- [27] 戎玉博,王森,白玉洁,等.含砾石锥状工程堆积体侵蚀水动力学特性和细沟形态特征[J].水土保持学报,2018,32(2):134-141.  
Rong Y B, Wang S, Bai Y J, et al. Characteristics of hydrodynamics and rill morphology of tapered engineering piles with gravel[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(2):134-141.
- [28] 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[J].农业工程学报,2006,22(2):64-67.  
Zhu Y J, Shao M A. Processes of rainfall infiltration and sediment yield in soils containing different rock fragment contents[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006,22(2):64-67.