

黄土区土质与土石质壤土堆积体水力侵蚀过程差异

纪丽静¹ 王文龙^{1,2*} 康宏亮¹ 赵满¹ 郭明明¹ 白芸³ 速欢¹ 聂慧莹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试验室, 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榆林学院陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西榆林 719000)

摘要 利用室内模拟降雨试验,研究了不同雨强及坡度条件下黄土区土质(不含砾石)与土石质(砾石质量分数30%)壤土堆积体的水动力学特征、侵蚀特征及侵蚀动力机制的差异。结果表明:砾石存在改变了堆积体坡面的水动力学特性,与土质坡面相比,土石质坡面的流速、弗汝德数、单位径流功率和过水断面单位能分别减少1.7%~49.7%、6.7%~60.6%、2.0%~44.6%和1.0%~26.7%;曼宁糙率系数、径流剪切力分别增加6.2%~169.4%、5.7%~79.3%。2.0、2.5 mm·min⁻¹雨强下,土石质坡面侵蚀速率较土质坡面降低26.2%~89.9%,砾石的减沙效益显著。2种堆积体的侵蚀速率与水动力学参数间均可用线性函数拟合,与土质坡面相比,土石质坡面的可蚀性参数均降低,降幅为56.1%~73.3%;而临界水动力学参数中径流剪切力增加11.1%,径流功率、单位径流功率和过水断面单位能分别减少25.4%、64.0%和5.0%。砾石的存在一定程度上控制了工程堆积体坡面降雨侵蚀过程。

关键词 壤土堆积体; 水动力学特性; 产沙特征; 侵蚀动力机制

Differences in hydraulic erosion processes of the earth and earth-rock Lou soil engineering accumulation in the Loess Region. JI Li-jing¹, WANG Wen-long^{1,2*}, KANG Hong-liang¹, ZHAO Man¹, GUO Ming-ming¹, BAI Yun³, SU Huan¹, NIE Hui-ying¹ (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateaus, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³Key Laboratory of Ecological Rehabilitation of Northern Shaanxi Mining Area, Yulin University, Yulin 719000, Shaanxi, China).

Abstract: An indoor rainfall simulation experiment was conducted to examine the hydrodynamic characteristics, erosion characteristics, and erosion dynamics mechanisms of earth (excluding gravel) and earth-rock (gravel mass fraction 30%) Lou soil engineering accumulation in the Loess area across different rainfall intensities and slope gradients. Results showed that the presence of gravel changed the hydrodynamic characteristics of the engineering accumulation slope. The flow velocity, froude number, unit stream power, and unit energy of water-carrying section of the earth-rock slope were 1.7%–49.7%, 6.7%–60.6%, 2.0%–44.6% and 1.0%–26.7% lower than those of the earth slope, while the Manning roughness coefficient and runoff shear stress of the earth-rock slope were 6.2%–169.4% and 5.7%–79.3% higher than those of the earth slope respectively. Under the intensity of 2.0 and 2.5 mm·min⁻¹, erosion rate of the earth-rock slope was 26.2%–89.9% lower than that of earth slope. The gravel significantly reduced slope erosion of the Lou soil engineering accumulation. Erosion rate and hydrodynamic parameters of the two accumulations were linearly related. The erodibility parameters of earth-rock slope were 56.1%–73.3% lower than that of earth slope. In the critical hydrodynamic parameters, runoff shear stress of earth-rock slope was 11.1% higher, while the stream power, unit stream power and unit energy of water-carrying section were 25.4%, 64.0% and 5.0% lower than those of the earth slope, respectively. The existence of gravel controlled

本文由国家重点研发计划项目(2016YFC0501604)和国家自然科学基金项目(41701316, 41761062, 40771127)资助 This work was supported by the National Key Research & Development Program of China (2016YFC0501604) and the National Natural Science Foundation of China (41701316, 41761062, 40771127).

2020-01-17 Received, 2020-03-03 Accepted.

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

rainfall erosion process on the slope of the engineering accumulation to some extent.

Key words: Lou soil engineering accumulation; hydrodynamic characteristics; sediment characteristics; erosion dynamic mechanism.

工程堆积体即建设项目施工运行过程中产生的弃土弃渣体,其下垫面物质组成复杂、土质松散、有机质缺乏、抗蚀性差^[1],暴雨发生时侵蚀速率可达原生地面的630倍之多^[2],极易引发崩塌、滑坡、泥石流等灾害^[3-4],已成为当前新增水土流失的主要来源地之一^[5-6]。

工程堆积体是一种典型的由土壤、不同粒径碎石以不同比例组成的松散土石混合物^[7],根据含石量的不同,可将其划分为土质^[8](0)、偏土质^[7](20%左右)、土石质^[9](40%左右)、偏石质^[10](67%左右)4类。前人针对以上不同类别的工程堆积体侵蚀进行了大量研究。就径流特征而言,部分学者对25°堆积体坡面水力参数进行研究,发现土质边坡流速^[11]和弗汝德数^[12]大于含砾石边坡,而阻力系数明显小于含砾石边坡^[12];李宏伟等^[13]发现,35°堆积体中土质坡面径流紊动性最强;而李建明等^[14]则认为,同一坡度下,沙多石少弃渣体紊动性最强。就产沙而言,赵满等^[15]认为,25°坡面含砾石边坡侵蚀量较土质边坡整体降低,康宏亮等^[16]在同一坡度及 $1.5 \sim 2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下得出相同结论。就侵蚀动力机制而言,陈卓鑫等^[17]在25°坡面降雨和Niu等^[18]在28°坡面冲刷试验中均认为,产沙率与径流功率呈极显著线性函数关系,且土质坡面可蚀性参数高于偏土质坡面,不同的是前者土质坡面发生侵蚀的临界径流功率更高。堆积体土壤侵蚀类型以水力侵蚀为主^[19],从水动力学角度研究堆积体坡面侵蚀发生、发展过程对分析坡面侵蚀机理及水沙过程有重要意义。上述成果为研究堆积体水力侵蚀特征提供了很好的借鉴,然而大部分研究多围绕单一坡度展开讨论,水力条件不够充分,不能较好地反映不同类型堆积体坡面在不同雨强与坡度交互影响下的水力学特性及其侵蚀特征的变化情况;并且野外条件下,堆积体坡度主要集中在 $15^\circ \sim 40^\circ$ ^[17,19-20],坡度变化范围较广,当前关于多个坡度与雨强的组合性研究相对较少,亟待加强。

本研究利用室内人工模拟降雨试验,研究了雨强($1.0、1.5、2.0、2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)和坡度($15^\circ、25^\circ、30^\circ、35^\circ$)组合水力条件下黄土区土质与土石质工程堆积体水动力学特性及产沙特征,揭示其水动力侵蚀规律,以期为该区域生产建设项目新增水土流失

防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计及材料配置

试验前对西北黄土高原区40余处工程堆积体样点的坡度、坡长及理化性质等数据进行实地调研和统计分析,结合野外调查数据及室内模拟实际条件进行试验设计,具有较好的典型性和代表性。该地区90%以上样点坡度在 $15^\circ \sim 36^\circ$,80%样点坡长集中在 $2 \sim 8 \text{ m}$,由此通过抽象概化设计试验坡度为 $15^\circ、25^\circ、30^\circ$ 和 35° ,坡长为 5 m ;样点 $2 \sim 14、14 \sim 25$ 和 $25 \sim 50 \text{ mm}$ 粒径砾石含量占比分别为30%、48%、22%,故将试验所用砾石机械粉碎后过 $14、25$ 和 50 mm 筛,按 $2 \sim 14、14 \sim 25、25 \sim 50 \text{ mm}$ 粒径砾石质量为 $3:5:2$ 的比例进行配置;超过90%样点砾石质量含量 $<40\%$,故设计砾石质量分数为0%(土质)和30%(土石质),已有研究将40%砾石含量堆积体划分至土石混合质类型^[7,9],结合野外调查,本研究将30%砾石含量堆积体界定为土石质。

试验壤土取自陕西杨凌周边农地,该土壤是黄土高原关中地区主要的耕作土壤,具有代表性和适用性,按国际制土壤质地划分为黏壤土(颗粒组成见图1)。将所取土壤过筛剔除根系、石块杂质,分别按壤土与砾石质量为 $10:0$ 和 $7:3$ 比例进行调配,人工搅拌 $3 \sim 4$ 次,使二者充分混合,通过洒水或阴干法控制供试材料质量含水率在 $9\% \sim 12\%$ 。

试验于中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心的降雨大厅下喷区进行,可模拟真实的

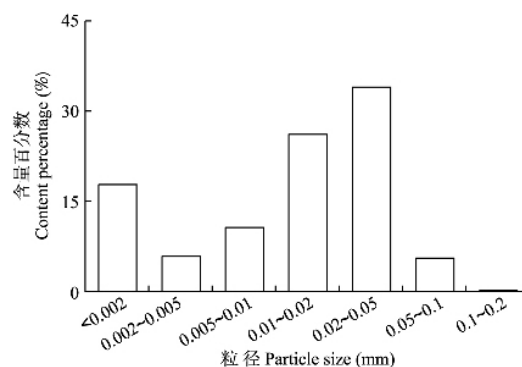


图1 试验土样颗粒粒径组成

Fig.1 Particle size composition of the test soil sample.

降雨情况。该设备的雨强可控范围为 $0.50 \sim 5.83 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,降雨高度 18 m ,雨滴终点速度基本接近自然降雨 ,降雨均匀度 $>90\%$,均匀程度满足天然降雨的特性^[21]。结合坡长调查数据及前人研究黄土堆积体所用的小区尺寸^[13,15,20] ,试验采用长 5 m、宽 1 m、高 0.6 m 的可升降变坡钢槽 ,在距集流槽 1.5、3、4 m 处各设置 1 个观测面(图 2)。对西北黄土高原区 40 余处工程堆积体容重调查结果显示 ,90% 以上的样点容重集中在 $1.10 \sim 1.57 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,受自然沉降或车辆碾压的影响 ,堆积体容重从表到里逐渐增大 ,中下层为 $1.30 \sim 1.57 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,表层为 $1.10 \sim 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。装土前在试验槽底部平铺 5 cm 砂石并用透水纱布遮覆 ,确保水分顺利入渗。用传送带将试验材料自由落入钢槽 ,确保材料自然堆积;试验材料分 3 层装填 ,下层(20 cm) 和中层(15 cm) 均夯实 ,控制容重在 $(1.40 \pm 0.10) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,上层(15 cm) 整平 ,控制容重在 $(1.17 \pm 0.10) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,确保室内堆积与野外实际相似;为防止出现滑塌现象 ,土层之间施行打毛操作 ,之后放置 24 h 自然沉降。根据黄土高原地区短历时强暴雨特点 ,设置产流历时为 45 min;选择暴雨事件中常见的最大 30 min 降雨强度 ,设计雨强为 1.0、1.5、2.0 和 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,试验共计 32 场。

1.2 试验过程及数据采集

每次试验前 ,使用 100 cm^3 容积的环刀在堆积体坡面上、中、下 3 个部位取样 ,以烘干法测定其容重和含水率 ,其变异系数分别为 $5.7\% \sim 8.1\%$ 和 $9.5\% \sim 13.3\%$,属弱变异(表 1)。降雨前将钢槽以油布覆盖 ,利用梅花桩法布设的雨量筒反复率定雨强 ,直至达到设计值 $\pm 5\%$ 。快速掀开钢槽上的油布同时秒表计时 ,观察产流过程 ,记录集流槽出流股流流出的时间。产流开始后 ,在集流槽出流处用径流桶接取泥沙

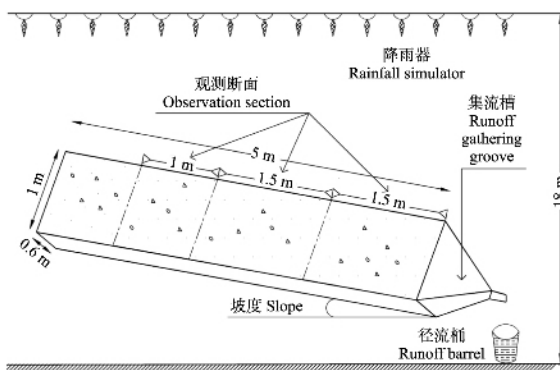


图 2 试验装置图

Fig.2 Experimental equipment diagram.

表 1 试验材料容重及含水率

Table 1 Bulk density and water content of test materials

指标 Indicator	雨强 Rainfall intensity ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV (%)
容重 Bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.0	1.22 ± 0.07	5.7
	1.5	1.25 ± 0.09	7.2
	2.0	1.24 ± 0.09	7.3
	2.5	1.23 ± 0.10	8.1
质量含水率 Mass moisture content (%)	1.0	10.44 ± 1.17	11.2
	1.5	10.42 ± 1.39	13.3
	2.0	10.96 ± 1.04	9.5
	2.5	10.47 ± 1.23	11.7

样(精度 10 mL) ,前 3 min 内每 1 min 接 1 次样 ,3 min 后每 3 min 接 1 次样 ,并用电子秒表计时(精度 0.01 s) ,用电子秤称重(精度 0.01 g) ,记录接样时间、样沙质量和体积 ,之后置于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘至恒重。同时 ,测量各观测断面的流宽和流速 ,流宽以薄钢尺测定(精度 1 mm) ,流速以高锰酸钾染色法测定(精度 $0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。试验材料装填、接样和量测人员应固定 ,以降低人为误差。

1.3 数据处理

1) 流宽、流速和流深。流宽(L) 取 3 个观测断面的均值(m) ;流速($V, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 由 3 个观测断面的均值与换算系数 0.75 相乘得到;流深(h, m) 按下式计算:

$$h = q / (V \cdot b \cdot t) \quad (1)$$

式中: q 为接样时间 t (s) 内的径流量(m^3) ; b 为过水断面宽(m)。

2) 雷诺数。雷诺数(R_e) 为判定径流流态(层、紊流)的标准 ,按下式计算:

$$R_e = V \cdot R / \nu \quad (2)$$

式中: R 为水力半径(m) ,水流截面积与湿周的比值; ν 为水流运动黏滞系数($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) ,是水温的函数。

3) 弗汝德数。弗汝德数(F_r) 为判别径流流态(缓、急流)的参数 ,按下式计算:

$$F_r = V / (gh)^{1/2} \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度 ,值为 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

4) 曼宁糙率系数。曼宁糙率系数(n) 可反映径流在流动过程中所受的阻力大小 ,按下式计算:

$$n = (R^{2/3} \cdot J^{1/2}) / V \quad (4)$$

式中: J 为水力坡度 ,与坡度正弦值相当。

5) 径流剪切力。径流剪切力($\tau, \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$) 为坡面土壤颗粒发生分离和输移的径流冲刷动力 ,按下式计算:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot J \quad (5)$$

式中: ρ 为径流密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

6) 径流功率。径流功率 ($\omega, \text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 为单位面积水体的水流功率,按下式计算:

$$\omega = \tau \cdot V \quad (6)$$

7) 单位径流功率。单位径流功率 ($U, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 为单位质量水体势能随时间的变化率,按下式计算:

$$U = V \cdot J \quad (7)$$

8) 过水断面单位能。过水断面单位能 (E, m) 指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,按下式计算:

$$E = a \cdot V^2 / 2g + h \quad (8)$$

式中: a 为校正系数,取值 1。

9) 侵蚀速率。侵蚀速率 ($E_r, \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 指单位时间和面积上径流所搬运土壤颗粒的质量,按下式计算:

$$E_r = M / (t \cdot l \cdot w) \quad (9)$$

式中: M 为观测时段 t (s) 内的产沙量 (g); l 为坡长 (m); w 为试验槽宽度 (m)。

2 结果与分析

2.1 工程堆积体径流水动力参数特征

2.1.1 流速随产流历时变化过程 流速 (V) 是获取坡面水动力学参数的关键指标。由图 3 可以看出,

1.0~1.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下,各坡度坡面 V 均在 0~3 min 快速增大,3 min 后缓慢增加;坡度较小时 ($15^\circ \sim 25^\circ$) 土质坡面 V 大于土石质坡面,坡度较大时 ($30^\circ \sim 35^\circ$) 出现相反情况。2.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强及 15° 、 25° 、 35° 坡度下,细沟的出现加速汇流,且随着侵蚀加剧,入渗土层变薄,入渗量减少,径流量增大,土质坡面 V 呈 0~3 min 递增、3~45 min 持续缓慢增长的趋势;而在土石质坡面,径流先带走土粒,砾石堆积于沟道,滞缓径流流动, V 在 3~45 min 稳定于 $0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。2.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强及 30° 坡度下,产流 36 min 后土质坡面 V 发生突增,增幅达 106.7%,而土石质坡面 V 稳定变化,变异系数为 1.3%。2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下,试验坡度范围内土质坡面 V 先快速上升后缓慢波动增长,而土石质坡面内部大孔隙利于水分渗透,产流减少, V 缓慢下降。砾石会改变径流的入渗和再分布过程,进而对 V 产生影响。

2.1.2 水力学参数变化特征 由图 4 可以看出,在试验雨强和坡度范围内(除 1.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强和 35° 坡度处理),土质坡面 V 高出土石质 1.7%~98.8%;与土质坡面相比,土石质坡面弗汝德数 (F_r) 整体减少 6.7%~60.6%,而曼宁糙率系数 (n) 整体增加 6.2%~169.4%;砾石存在使土石质坡面粗糙

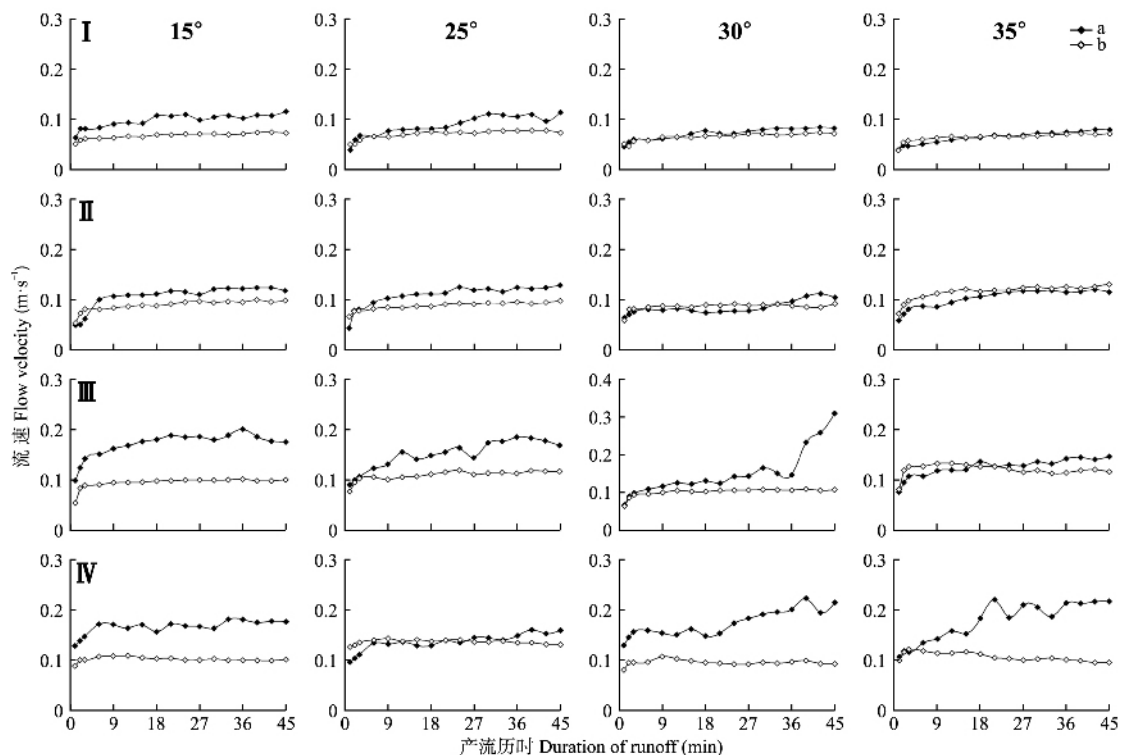


图 3 流速随产流历时的变化

Fig.3 Changes of flow velocity with duration of runoff.

I: 1.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; II: 1.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; III: 2.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; IV: 2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$. a) 土质 Earth; b) 土石质 Earth-rock. 下同 The same below.

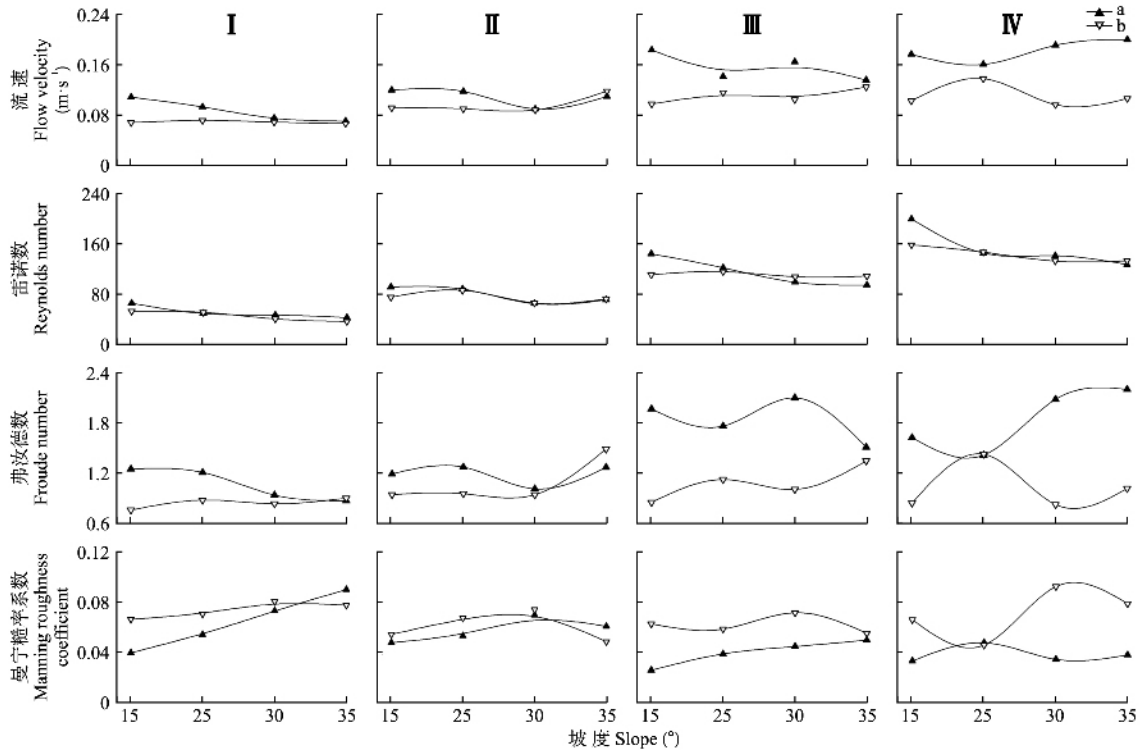


图 4 水力学参数特征值汇总
 Fig.4 Summary of characteristic values of hydraulic parameters.

度增大, 径流能量被削弱, 径流动能降低、流态趋缓、侵蚀作用减弱。由表 2 可以看出, 2 种堆积体的 V 和雷诺数 (R_e) 与雨强均呈极显著线性关系, 增加相同单位的雨强时, 土质坡面 V 和 R_e 增量分别为 0.07 和 68.11, 较土石质坡面分别增大 1.39 和 0.05 倍; 这是由于径流对细颗粒的选择性搬运, 使土石质坡面粗化, 径流流动减缓, 径流紊动性减弱。雨强对水力学参数的影响较坡度和交互项对其影响更大, 土质

坡面 n 与雨强和坡度有较好的二元线性关系; 土石质坡面 R_e 与雨强和交互项有较好的二元线性关系。
 2.1.3 水动力学参数变化特征 由图 5 可以看出, 试验条件下, 除个别场次外, 单位径流功率 (U)、过水断面单位能 (E) 均以土质坡面居高, 分别高出土石质坡面 2.0%~80.6%、1.0%~36.5%; 而径流剪切力 (τ) 以土石质坡面居高, 高出土质坡面 5.7%~79.3%。试验雨强范围内, 15°和 25°坡度下, 土质坡

表 2 水力学参数与其影响因子的相关性及其拟合方程
 Table 2 Correlation of hydraulic parameters and their influencing factors and the regression equations ($N=16$)

项目 Item	参数 Parameter	土质 Earth			土石质 Earth-rock		
		雨强 Rainfall intensity (I)	坡度 Slope (S)	雨强×坡度 Rainfall intensity×slope (IS)	雨强 Rainfall intensity (I)	坡度 Slope (S)	雨强×坡度 Rainfall intensity×slope (IS)
相关系数 Correlation coefficient	流速 Flow velocity	0.916**	-0.166	0.601*	0.758**	0.173	0.667**
	雷诺数 Reynolds number	0.897**	-0.377	0.379	0.979**	-0.136	0.624**
	弗汝德数 Froude number	0.787**	-0.015	0.626**	0.286	0.443	0.488
	曼宁糙率系数 Manning roughness coefficient	-0.661**	0.538*	-0.208	-0.067	0.253	0.130
拟合方程 Regression equation	流速 Flow velocity (V)	$V = 0.066I + 0.017$ ($R^2 = 0.84, F = 72.57^{**}$)			$V = 0.028I + 0.048$ ($R^2 = 0.58, F = 18.92^{**}$)		
	雷诺数 Reynolds number (R_e)	$R_e = 68.112I - 19.78$ ($R^2 = 0.81, F = 57.96^{**}$)			$R_e = 75.147I - 0.381IS - 20.706$ ($R^2 = 0.98, F = 284.14^{**}$)		
	弗汝德数 Froude number (F_r)	$F_r = 0.59I + 0.447$ ($R^2 = 0.62, F = 22.75^{**}$)			-		
	曼宁糙率系数 Manning roughness coefficient (n)	$n = -0.019I + 0.001S + 0.052$ ($R^2 = 0.85, F = 21.94^{**}$)			-		

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 下同 The same below.

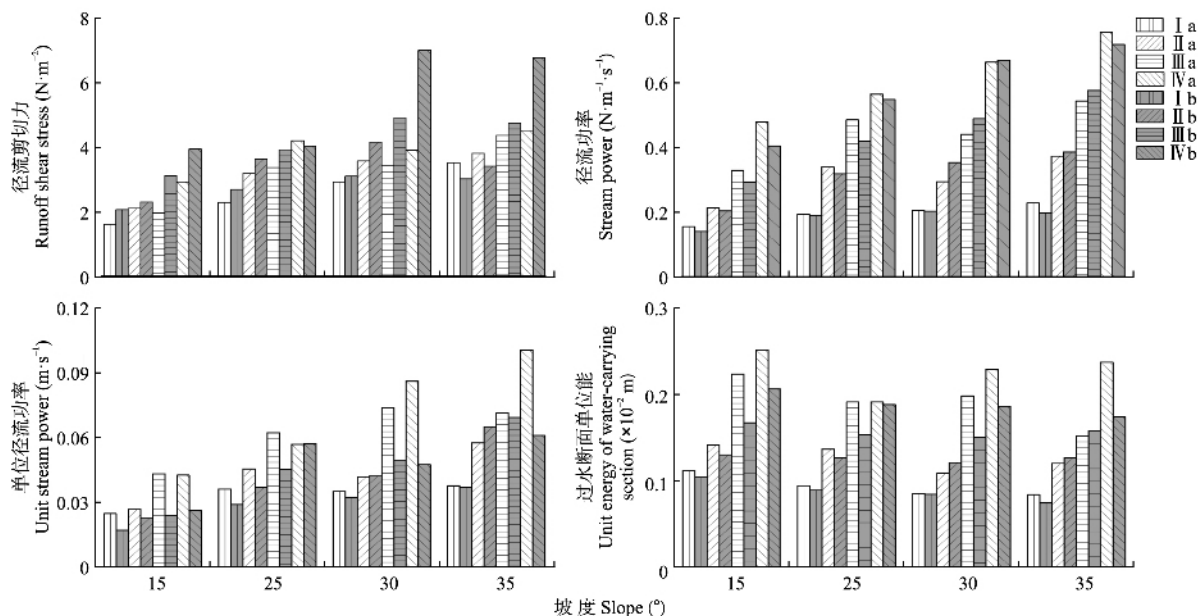


图 5 水动力学参数特征值汇总

Fig.5 Summary of characteristic values of hydrodynamic parameters.

面径流功率(ω)较土石质坡面增加 2.5%~18.7%，随着坡度增大，砾石发挥的作用机制发生变化，有相反情况出现；坡度较大时细颗粒在输移过程中对砾石周围的大孔隙进行填充^[22]，土体孔隙度及孔隙连通性变差，入渗减少，产流增大，侵蚀作用增强。由表 3 可以看出 2 种堆积体的 τ 、 ω 、 E 与雨强的关系均可用线性函数描述 ($R^2 = 0.28 \sim 0.95$)，对于 τ ，土质坡面拟合斜率远小于土石质坡面，这是由于砾石改变堆积体土壤物理性质^[23-24]，破坏土壤结构，造成土壤颗粒间黏结性降低，抗蚀性下降；对于 ω 和 E ，土质坡面拟合斜率分别为 0.28 和 0.09，分别高出

土石质坡面 7.7% 和 28.6%，砾石的约束使坡面流呈网状分布^[25]，径流路径延长，流速减小，径流能量降低，当增加相同单位的雨强时土石质坡面水动力参数增量偏小。土质坡面 τ 与雨强、坡度和交互项间呈极显著线性相关，而土石质坡面 τ 仅与交互项呈极显著线性相关；土质坡面 ω 与雨强和交互项呈极显著线性关系，土石质坡面 ω 与交互项呈极显著线性关系；交互项是影响土质坡面 U 的重要因素，坡度和交互项共同影响土石质坡面 U 。

2.2 工程堆积体产沙特征

2.2.1 侵蚀速率随产流历时的变化过程 由图6可

表 3 水动力学参数与其影响因子的相关性及其拟合方程

Table 3 Correlation of hydrodynamic parameters and their influencing factors and the regression equations ($N=16$)

项目 Item	参数 Parameter	土质 Earth			土石质 Earth-rock		
		雨强 Rainfall intensity (I)	坡度 Slope (S)	雨强×坡度 Rainfall intensity×slope (IS)	雨强 Rainfall intensity (I)	坡度 Slope (S)	雨强×坡度 Rainfall intensity×slope (IS)
相关系数 Correlation coefficient	径流剪切力 Runoff shear stress	0.528*	0.805**	0.900**	0.738**	0.514*	0.920**
	径流功率 Stream power	0.903**	0.362	0.930**	0.862**	0.454	0.970**
	单位径流功率 Unit stream power	0.719**	0.579*	0.962**	0.454	0.792**	0.868**
	过水断面单位能 Unit energy of water-carrying section	0.932**	-0.219	0.545*	0.973**	-0.186	0.591*
拟合方程 Regression equation	径流剪切力 Runoff shear stress (τ)	$\tau = 1.001I + 0.106S - 0.008IS - 0.96$ ($R^2 = 0.93, F = 50.88^{**}$)			$\tau = 0.062IS + 1.05$ ($R^2 = 0.85, F = 77.06^{**}$)		
	径流功率 Stream power (ω)	$\omega = 0.149I + 0.005IS - 0.102$ ($R^2 = 0.97, F = 214.39^{**}$)			$\omega = 0.008IS - 0.005$ ($R^2 = 0.94, F = 222.99^{**}$)		
	单位径流功率 Unit stream power (U)	$U = 0.001IS + 0.007$ ($R^2 = 0.93, F = 172.70^{**}$)			$U = 0.001S + 0.001IS - 0.002$ ($R^2 = 0.84, F = 35.28^{**}$)		
	过水断面单位能 Unit energy of water-carrying section (E)	$E = 0.093I - 0.002S + 0.04$ ($R^2 = 0.92, F = 71.44^{**}$)			$E = 0.067I - 0.001S + 0.048$ ($R^2 = 0.98, F = 340.90^{**}$)		

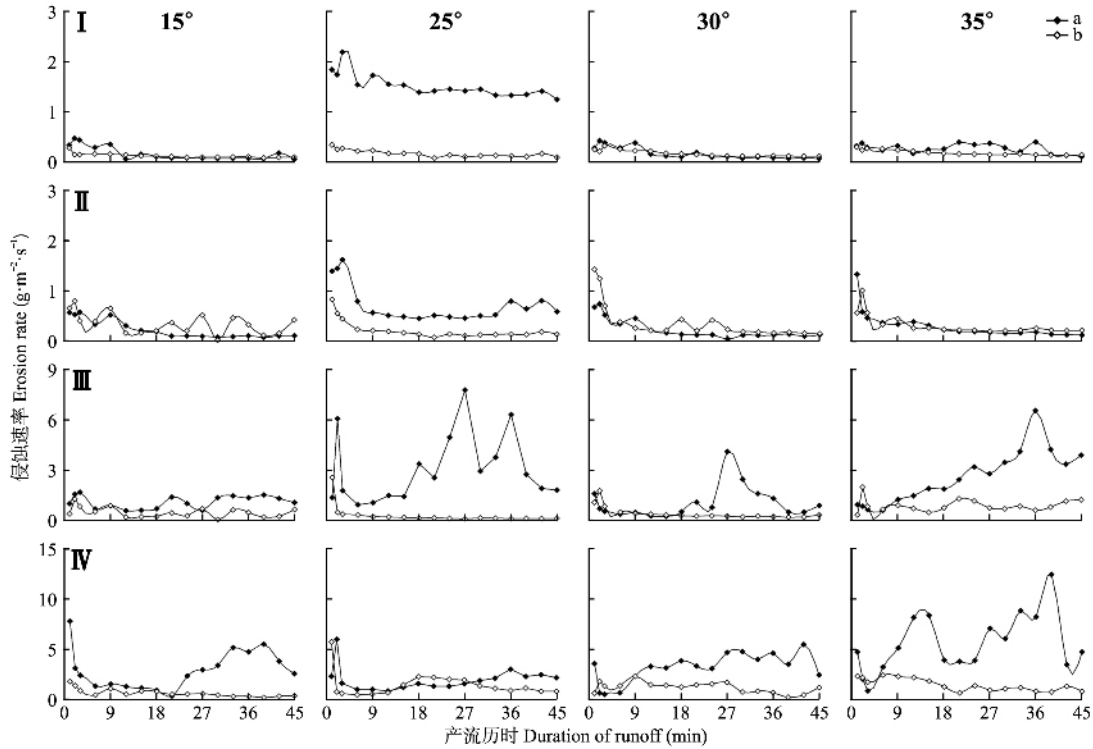


图 6 侵蚀速率随产流历时的变化
Fig.6 Changes of erosion rate with duration of runoff.

以看出, $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下, 侵蚀速率 (E_r) 多呈波动递减趋势, 坡度 15° 、 30° 和 35° 时 2 种堆积体产沙过程基本相似, 而在 25° 时, 土质坡面 E_r 远大于土石质坡面。 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强、 25° 坡度条件下, 土石质坡面 E_r 先快速下降, 后趋于稳定; 而土质坡面 E_r 在产流 $0 \sim 3 \text{ min}$ 小幅递增, 则是由于溅蚀引起土壤表层结皮发育^[26], 促进产流, 径流携沙能力增强, 其后变化过程与土石质坡面相似; 其他坡度条件下, 土质与土石质坡面 E_r 的变化趋势基本一致。 $2.0 \sim 2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下, 细沟发育和沟壁崩塌活动使土质坡面 E_r 波动增加或起伏变化, 呈“多峰多谷”特点; 而土石质坡面砾石拦截减缓跌坑和侵蚀沟的发育, E_r 持续缓慢下降或在 $0.01 \sim 2.47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围波动变化; 土质坡面 E_r 波动幅度更高、次数更多, 变异系数最高达 92.7% , 远高于土石质坡面 ($8.3\% \sim 31.5\%$), 可见砾石的存在减弱了土壤侵蚀。

2.2.2 侵蚀速率变化特征 结合图 7 和表 4 可以看出, 雨强较交互项较坡度对 E_r 影响更大, 1.0 、 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强 25° 坡度条件下, 土质坡面 E_r 较土石质坡面分别增大 8.5 、 2.3 倍; 其他坡度条件下, 2 种堆积体 E_r 差异较小, 土质坡面 E_r 或略高于土石质坡面, 或略低于土石质坡面。 2.0 、 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下, 各场次均表现为土质坡面产沙较高, 较土石

质坡面增大 $0.4 \sim 8.9$ 倍。说明中小雨强下砾石对产沙的影响较小, 大雨强下砾石的减沙效益显著。逐步回归分析显示, 土质坡面 E_r 仅与雨强具有较好的线性关系, 而土石质坡面 E_r 与雨强和交互项具有较好的线性关系。

2.3 工程堆积体侵蚀动力机制

2.3.1 侵蚀速率与水力学参数的关系 由图 8 可以看出, E_r - V 拟合关系中, 土质坡面直线斜率为 $27.45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 较土石质坡面增大 95.1% ; 砾石增大坡面粗糙度, 径流克服阻力所需的能耗增加, 相应分离土壤的能量减少, 因此同一 V 条件下, 土质坡面的侵蚀更

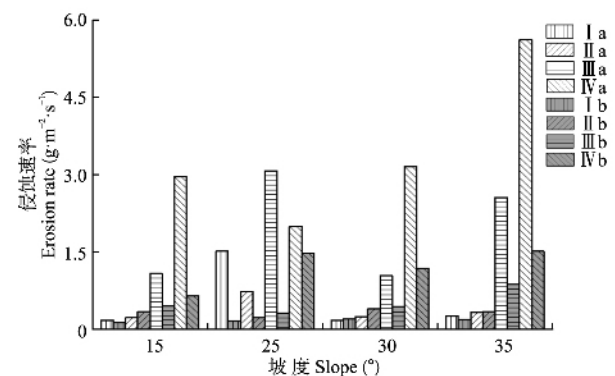


图 7 侵蚀速率随雨强和坡度的变化特征
Fig.7 Characteristics of erosion rate with rain intensity and slope.

表 4 侵蚀速率与其影响因子的相关性及其拟合方程

Table 4 Correlation of erosion rate and influencing factors and the regression equations (N=16)

项目 Item	土质 Earth			土石质 Earth+rock		
	雨强 Rainfall intensity (I)	坡度 Slope (S)	雨强×坡度 Rainfall intensity× slope (IS)	雨强 Rainfall intensity (I)	坡度 Slope (S)	雨强×坡度 Rainfall intensity× slope (IS)
相关系数 Correlation coefficient	0.762**	0.196	0.732**	0.831**	0.251	0.756**
拟合方程 Regression equation	$E_r = 2.045I - 2.009$ ($R^2 = 0.58, F = 19.44^{**}$)			$E_r = 0.396I + 0.01IS - 0.607$ ($R^2 = 0.79, F = 23.93^{**}$)		

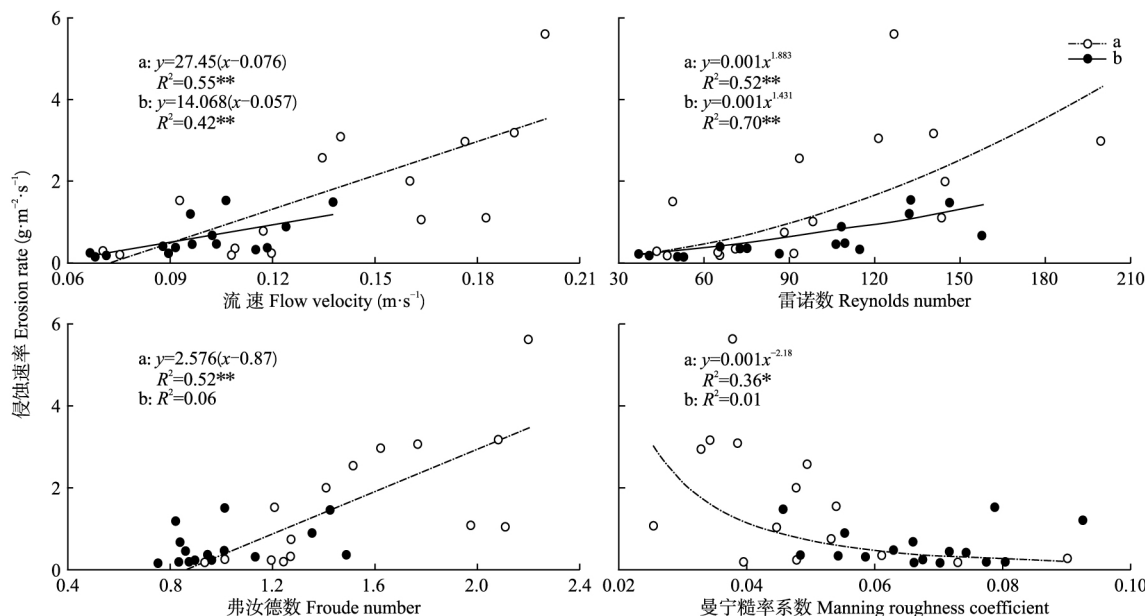


图 8 侵蚀速率与水力学参数的关系

Fig.8 Relationships between erosion rates and hydraulic parameters.

为剧烈。 E_r-R_e 拟合关系中, 幂指数大于 1, 说明随 R_e 增大 E_r 增加的幅度越大, 侵蚀发生的频率越强烈, 且土质坡面幂指数高出土石质坡面 31.6%, 随着试验的进行, 侵蚀不断发生, 土石质坡面砾石裸露度逐渐增大, 砾石既承担一部分雨滴击溅侵蚀作用 [27-28], 又对上方来水形成阻力, 消能作用明显。 E_r-F_r 、 E_r-n 拟合关系中, 土石质坡面拟合方程的相关性较弱 ($P > 0.05$); 而土质坡面, 径流由缓流向急流转变时 E_r 呈线性增长趋势, 坡面阻力逐渐增大时 E_r 呈幂函数减小趋势。

2.3.2 侵蚀速率与水动力学参数的关系 由图 9 可以看出, 2 种堆积体的 E_r 与水动力学参数间均可用线性函数描述, 且其可蚀性参数(斜率)与侵蚀临界值(横截距)存在明显差异。 $E_r-\tau$ 、 $E_r-\omega$ 、 E_r-U 、 E_r-E 方程中, 土石质坡面的可蚀性参数分别为 $2.51 \times 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $2.25 \times 10^{-3} \text{ s}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $16.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $8.68 \times 10^2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 较土质坡面分别减少 73.3%、70.1%、

70.0%、56.1%; 土石质坡面搬运边坡泥沙的临界 τ 为 $1.72 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 较土质坡面增加 11.1%, 临界 ω 、 U 、 E 为 $0.14 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.90 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.76 \times 10^{-3} \text{ m}$, 较土质坡面减少 25.4%、64.0%、5.0%。说明砾石存在时坡面侵蚀动力机制虽然没有变化, 但土壤可蚀性参数降低, 临界动力参数也发生改变(或增或减)。结合各关系式决定系数的大小可知 ω 均是描述 2 种堆积体侵蚀速率的最优参数。

3 讨论

3.1 工程堆积体水动力学特性

研究区土质坡面的流速、弗汝德数、单位径流功率、过水断面单位能整体高于土石质坡面, 与其他学者对壤土 [29]、风沙土堆积体 [8, 12] 的研究结论相似, 一是砾石存在使土体内孔隙比例增大 [14-15], 水流通道增多, 降雨形成壤中流和入渗流的部分增多 [22], 产流减少; 二是砾石绕流作用明显, 径流路径延长,

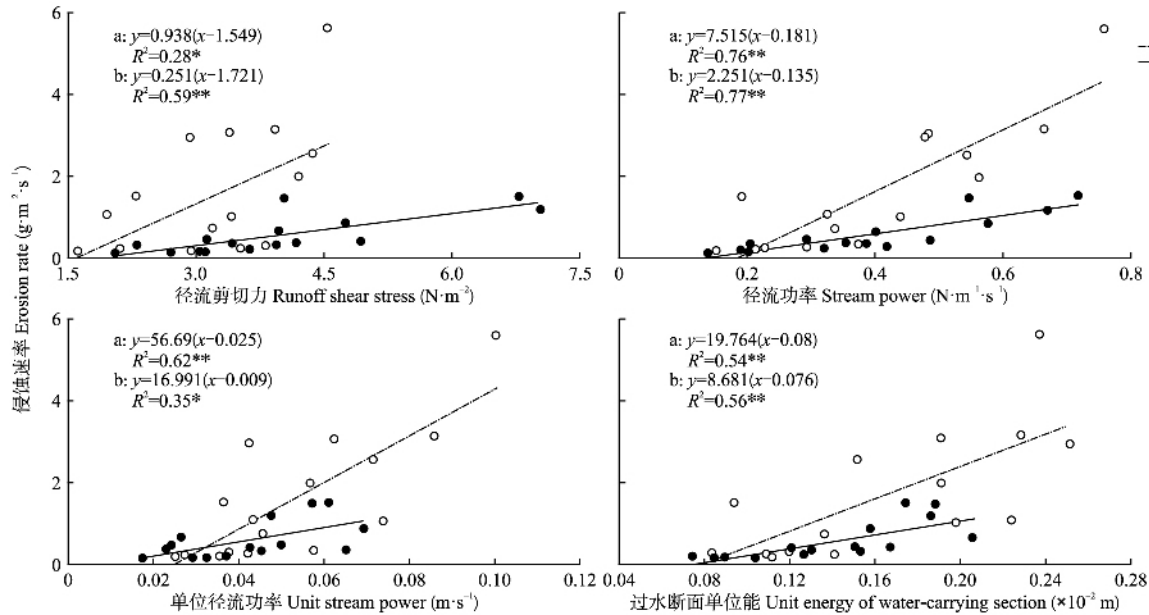


图9 侵蚀速率与水动力参数的关系

Fig.9 Relationships between erosion rates and hydrodynamic parameters.

二者共同作用造成土石质坡面流速偏小; 弗汝德数、单位径流功率、过水断面单位能与流速成正比, 其在土质与土石质堆积体之间的变化规律与流速相同。但也有研究表明, 红壤堆积体^[17]中雨强大于 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时砾石的存在降低边坡径流的流速、弗汝德数, 雨强小于 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时与之相反, 说明砾石对水力学参数的影响因土壤类型和雨强因素的不同而异, 且在试验容重相似的情况下, 造成此现象的原因是试验土壤和砾石分布不同, 坡面降雨的形态特征及砾石对径流特性的作用也有所差别。工程堆积体坡面阻力主要来自砾石、土颗粒及沟槽形态 3 方面^[13], 砾石对堆积体坡面的粗糙度有较大贡献, 造成土质坡面曼宁糙率系数远低于土石质坡面。本试验土质坡面径流剪切力整体低于土石质坡面, 与砾石覆盖盐碱土坡面^[30]的结论相似, 究其原因, 一是坡面大粒径砾石对水流有合并-汇聚作用^[8]; 二是砾石增加入渗路径弯曲度^[16], 减弱径流入渗; 三是砾石增加坡面粗糙度, 三者共同作用导致径流增多、流速减小, 径流深变大, 水力能增大, 径流剪切力偏大。砾石对水动力学特性的影响表现为: 1) 改变土壤的孔隙状况、入渗性能等理化性质, 进而影响坡面产流状况; 2) 改变径流的运动路径, 进而影响径流的分散与汇集作用; 3) 改变下垫面的粗糙程度, 直接影响径流水力学参数。

3.2 工程堆积体侵蚀产沙特性

2.0、2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下坡面细沟发育迅速,

土质坡面细沟沟头、沟壁土体垮塌聚集一方面对径流产生阻力^[9], 另一方面长时间受水流浸透最终以脉冲泥流形式冲出坡面, 使侵蚀速率呈“多峰多谷”的特点, 这与 Peng 等^[5]和 Auerswald 等^[31]的研究结果相似; 土石质坡面砾石间的固结作用使床面更加稳定, 径流侵蚀与坡面抗蚀的能力相当^[2], 侵蚀速率缓慢下降或在小范围波动, 且砾石拦截使得沟头前进和沟壁崩塌的速度减缓, 侵蚀速率波动次数和幅度减少。该雨强条件下, 土石质坡面的侵蚀速率较土质坡面减少, 砾石抑制坡面产沙, 结合水动力学特性可知, 土质坡面径流流动较快、流态偏急, 对表层土壤的破坏作用较强, 产沙增多, 而土石质坡面尽管剪切力较大, 但粗糙度高, 径流携沙力大大降低。

不同土壤类型堆积体砾石对产沙的影响既有相似性又有差异性, 相关研究表明, 紫色土^[9]、壤土^[32]堆积体中砾石降低坡面产沙率; 红壤堆积体^[33]中土壤剥蚀率与砾石含量呈正相关; 红壤^[17, 34]、风沙土^[12, 16]堆积体中砾石对产沙的影响存在临界雨强, 在 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时砾石促进产沙, 大于 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时砾石抑制产沙, 与本试验结果有较大差异。本研究 1.0 和 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强条件下也存在土石质坡面产沙大于土质坡面的情况。可以发现, 砾石对堆积体产沙有正负两方面影响: 一方面, 土质坡面不存在砾石占据空间, 土壤颗粒较多, 且砾石四周易形成涡流, 产生“涡旋侵蚀”^[17], 使土壤剥蚀能力增强; 另一方面, 砾石对堆积体内部应力

场及变形破坏形式产生影响^[7],其形成的固相骨架^[2]有减弱径流输沙力的作用,且砾石在失去土体支撑跌落细沟时^[11],会增大坡面阻力,阻碍径流流动,降低侵蚀能力。虽然在特定试验条件下砾石对产沙的作用有一定规律,但不同土壤类型工程堆积体砾石对产沙影响的差异是否因土壤类型和质地、砾石位置与分布及试验设计的不同而异,需要进一步研究。

3.3 工程堆积体侵蚀动力机制

相较于土质坡面,土石质坡面土壤可蚀性参数降低、抗蚀能力增强,与风沙土^[8]堆积体侵蚀过程相似,这是由于土石质坡面提供的可蚀性颗粒物较少,加之砾石的消能作用使坡面产生侵蚀所需的能量较高。本研究的可蚀性参数与风沙土相比明显降低,其中,土质坡面较低砾石含量(0、10%)坡面减小1.9%~77.1%,土石质坡面较高砾石含量(20%、30%)坡面减小53.2%~89.6%。差异在于试验壤土为农业土壤,粒间结合力大,抗蚀性强^[15],而风沙土颗粒间黏结力弱,结构性差,更易发生侵蚀^[16](本试验壤土黏粒含量占17.8%,为风沙土的3.0倍)。相较于土质坡面,土石质坡面启动侵蚀的临界径流剪切力增加,原因在于土质坡面曼宁糙率系数偏小,流速偏大(图4),径流能量较高,更容易使土粒发生分离和输移,因此土质坡面启动侵蚀所需的径流剪切力更小;而临界径流功率、单位径流功率、过水断面单位能减少,原因在于砾石形状不规则,土石难以均匀混合^[35],且砾石破坏土体连接性,使坡面土粒更分散,导致土石质坡面更易发生侵蚀。径流功率可以在不同的试验条件下对堆积体坡面剥蚀率进行预测^[17, 36-37],与本试验结果一致,其综合了流速、水深和坡度因素,具有更广的水动力特性;但也有研究表明,描述风沙土堆积体0、10%以及20%、30%砾石含量坡面侵蚀产沙的最优因子分别为单位径流功率和径流功率^[8]。因此,利用何种参数来分析和解释不同砾石含量堆积体坡面侵蚀过程仍待进一步研究。

参考文献

- [1] 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. 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. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(22): 83-88]
- [2] 李建明,王文龙,王贞,等. 神府煤田废弃堆积体新增水土流失研究. 自然灾害学报, 2014, 23(2):

- 239-249 [Li J-M, Wang W-L, Wang Z, et al. Study on newly increased soil and water loss from waste accumulation in Shenfu coal-field. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(2): 239-249]
- [3] Zhang LT, Gao ZL, Li ZB, et al. Downslope runoff and erosion response of typical engineered landform to variable inflow rate patterns from upslope. *Natural Hazards*, 2016, 80: 775-796
- [4] Bian ZF, Inyang HI, Daniels JL, et al. Environmental issues from coal mining and their solutions. *Mining Science and Technology*, 2010, 20: 215-223
- [5] Peng XD, Shi DM, Jiang D, et al. Runoff erosion process on different underlying surfaces from disturbed soils in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Catena*, 2014, 123: 215-224
- [6] Lv JR, Luo H, Xie YS. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil heaps through multiple rainfall events. *Catena*, 2019, 172: 179-189
- [7] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等. 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 [Shi D-M, Jiang G-Y, Peng X-D, et al. Runoff erosion process on slope of engineering accumulation with different soil-rock ratio. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(17): 152-161]
- [8] 康宏亮,王文龙,薛智德,等. 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 [Kang H-L, Wang W-L, Xue Z-D, et al. Effect of gravel on runoff and erosion characteristics on engineering accumulation slope in windy and sandy area, northern China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(3): 125-134]
- [9] 彭旭东,江东,史东梅,等. 紫色丘陵区不同弃土弃渣下垫面产流产沙试验研究. 水土保持学报, 2013, 27(3): 9-13 [Peng X-D, Jiang D, Shi D-M, et al. Experimental study on water runoff and sediment yield of different underlying surfaces of waste soil and residue in purple hilly area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 9-13]
- [10] 杨波,王文龙,郭明明,等. 模拟降雨条件下弃渣体边坡不同防护措施的减水减沙效益. 土壤学报, 2017, 54(6): 1357-1368 [Yang B, Wang W-L, Guo M-M, et al. Study on runoff and sediment reducing effects of erosion control measures on slopes of slag dumps with simulated rainfall. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1357-1368]
- [11] 张孝中,袁瀛,王文龙. 工程堆积体土石质边坡径流特征及其产沙效应. 水利水电技术, 2018, 49(9): 133-141 [Zhang X-Z, Yuan Y, Wang W-L. Runoff characteristics of earth-rock slope of engineering deposit and its sediment yielding effect. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(9): 133-141]
- [12] 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. 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. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(4): 847-859]
- [13] 李宏伟, 牛俊文, 宋立旺, 等. 工程堆积体水动力学参数及其产沙效应. *水土保持学报*, 2013, **27**(5): 63-67 [Li H-W, Niu J-W, Song L-W, et al. Study on characteristic of hydrodynamic parameters and its sediment yield for engineering accumulation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(5): 63-67]
- [14] 李建明, 孙蓓, 王一峰, 等. 矿区 3 种弃土弃渣体侵蚀及水动力学差异研究. *长江科学院院报*, 2017, **34**(10): 24-30 [Li J-M, Sun B, Wang Y-F, et al. Differences in erosion and hydrodynamic characteristics of three kinds of residues in mining area. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, **34**(10): 24-30]
- [15] 赵满, 王文龙, 郭明明, 等. 不同砾石含量壤土堆积体坡面侵蚀特征研究 [EB/OL]. (2019-08-22) [2019-12-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20190822.1655.002.html> [Zhao M, Wang W-L, Guo M-M, et al. Erosion of Slopes of Lou Soil Stacks Different in Gravel Content [EB/OL]. (2019-08-22) [2019-12-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20190822.1655.002.html>]
- [16] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 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 [Kang H-L, Wang W-L, Xue Z-D, et al. Experimental study on runoff and sediment yield from engineering deposition with gravel in the northern windy-sandy region, Shaanxi. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(2): 256-265]
- [17] 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. *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. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(17): 6545-6556]
- [18] Niu YB, Gao ZL, Li YH, et al. Effect of rock fragment content on erosion processes of disturbed soil accumulation under field scouring conditions. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**: 1708-1723
- [19] 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. *水土保持学报*, 2018, **32**(6): 1-8 [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. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(6): 1-8]
- [20] 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. *泥沙研究*, 2015(5): 57-62 [Huang P-F, Wang W-L, Jiang Z-S, et al. Study on slope factor of water erosion model for engineering piles in the Loess Area. *Journal of Sediment Research*, 2015(5): 57-62]
- [21] 王洁, 胡少伟, 周跃. 人工模拟降雨装置在水土保持方面的应用. *水土保持研究*, 2005, **12**(4): 188-190 [Wang J, Hu S-W, Zhou Y. Application of artificial simulation of rainfall devices to soil and water conservation. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, **12**(4): 188-190]
- [22] 甘凤玲, 何丙辉, 王涛. 汶川震区滑坡堆积体降雨入渗产流特征人工模拟实验研究. *水利学报*, 2016, **47**(6): 780-788 [Gan F-L, He B-H, Wang T. Study on the characteristics of rainfall infiltration runoff using artificial simulation experiment in Wenchuan Earthquake Area. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(6): 780-788]
- [23] Wang XY, Li ZX, Cai CF, et al. 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
- [24] Kateb HE, Zhang HF, Zhang PC, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China. *Catena*, 2013, **105**: 1-10
- [25] 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**: 451-474
- [26] Assouline S, Ben-Hur M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena*, 2006, **66**: 211-220
- [27] Jomaa S, Barry DA, Heng BCP, et al. Effect of antecedent conditions and fixed rock fragment coverage on soil erosion dynamics through multiple rainfall events. *Journal of Hydrology*, 2013, **484**: 115-127
- [28] Jomaa S, Barry DA, Heng BCP, et al. Influence of rock fragment coverage on soil erosion and hydrological response: Laboratory flume experiments and modeling. *Water Resources Research*, 2012, **48**: 213-223
- [29] 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. *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. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(2): 134-141]
- [30] 陈心逸, 李丽, 余冬立. 砾石覆盖条件下盐碱土边坡降雨侵蚀水动力学特征. *水土保持学报*, 2018, **32**(1): 116-120 [Chen X-Y, Li L, She D-L. Hydrodynamic characteristics of rainfall runoff on saline-alkali slope covered by gravel. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(1): 116-120]
- [31] Auerswald K, Fiener P, Dikau R. Rates of sheet and rill erosion in Germany: A meta-analysis. *Geomorphology*, 2009, **111**: 182-193
- [32] 李建明, 王文龙, 黄鹏飞, 等. 黄土区生产建设工程堆积体石砾对侵蚀产沙影响. *泥沙研究*, 2014(4): 10-17 [Li J-M, Wang W-L, Huang P-F, et al. Impact on erosion and sediment yield by gravel in pile body of development construction in Loess Area. *Journal of Sediment Research*, 2014(4): 10-17]
- [33] 王雪松, 申卫博, 谢永生, 等. 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 [Wang X-S, Shen W-B, Xie Y-S, et al.

- Hydrodynamic mechanism of engineering deposit erosion in Northern Jiangxi Province. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, **34**(11): 59-68]
- [34] 史倩华,王文龙,郭明明,等. 模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程. *应用生态学报*, 2015, **26**(9): 2673-2680 [Shi Q-H, Wang W-L, Guo M-M, *et al.* Runoff and sediment yielding processes on red soil engineering accumulation containing gravels by a simulated rainfall experiment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(9): 2673-2680]
- [35] 王仁新,何丙辉,李天阳,等. 汶川震区滑坡堆积体土石混合坡面土壤侵蚀率与水力学参数关系室内模拟. *水土保持学报*, 2015, **29**(1): 7-11 [Wang R-X, He B-H, Li T-Y, *et al.* Indoor experiments on the relationship between soil erosion rate and hydraulics parameters of earth-rock mixed landslide slope in Wenchuan earthquake area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(1): 7-11]
- [36] 丁文斌,史东梅,何文健,等. 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 [Ding W-B, Shi D-M, He W-J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of engineering accumulation erosion under side slope runoff erosion process in field scouring experiment. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(18): 153-161]
- [37] 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 [Zhang L-T, Gao Z-L, Tian H-W. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(24): 94-102]

作者简介 纪丽静,女,1995年生,硕士研究生。主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 1471462633@qq.com

责任编辑 杨弘

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



纪丽静,王文龙,康宏亮,等. 黄土区土质与土石质壤土堆积体水力侵蚀过程差异. *应用生态学报*, 2020, **31**(5): 1587-1598
Ji L-J, Wang W-L, Kang H-L, *et al.* Differences in hydraulic erosion processes of the earth and earth-rock Lou soil engineering accumulation in the Loess Region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(5): 1587-1598