

DOI: 10.11766/trxb201905220129

赵满, 王文龙, 郭明明, 康宏亮, 杨波, 王文鑫, 陈卓鑫. 不同砾石含量塿土堆积体坡面侵蚀特征研究[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1166–1176.
ZHAO Man, WANG Wenlong, GUO Mingming, KANG Hongliang, YANG Bo, WANG Wenxin, CHEN Zhuoxin. Erosion of Slopes of Lou Soil Stacks Different in Gravel Content[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1166–1176.

不同砾石含量塿土堆积体坡面侵蚀特征研究*

赵满¹, 王文龙^{1, 2†}, 郭明明¹, 康宏亮¹, 杨波¹, 王文鑫¹, 陈卓鑫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, 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)

摘要: 为明确砾石含量对关中塿土堆积体坡面径流和侵蚀特性的影响, 采用室内模拟降雨试验方法, 以土质坡面为对照, 研究了 10%、20%、30% 三种砾石含量堆积体坡面的侵蚀特征。结果表明: (1) 1.0 mm·min⁻¹ 雨强下, 10% 砾石含量时初始产流时间最大, 雨强 > 1.0 mm·min⁻¹ 时, 各坡面初始产流时间在 10% 砾石含量时最小; (2) 各砾石含量坡面平均流速均随雨强增大而增大, 1.0 和 2.5 mm·min⁻¹ 雨强条件下 10% 砾石含量坡面流速最大, 而 1.5 和 2.0 mm·min⁻¹ 雨强下, 含砾石坡面流速较土质坡面分别减少 15.3%~21.2% 和 13.6%~14.1%; (3) 不同雨强条件下各含砾石坡面含沙量在产流前期 (0~6 min) 急剧下降; 产流 6 min 后, 含沙量在 1.0、1.5 mm·min⁻¹ 雨强下逐渐趋于稳定, 在 2.0、2.5 mm·min⁻¹ 雨强下呈多峰多谷的变化, 该时期砾石主导产沙过程; (4) 次降雨侵蚀量随雨强增大呈显著的幂函数关系; 而随雨强的增大各砾石坡面侵蚀量较土质坡面分别减少 22.4%~42.6%、8.2%~66.3%、2.2%~56.5% 和 45.0%~68.3%。该研究可为关中地区堆积体坡面水蚀模型的建立提供理论依据。

关键词: 降雨强度; 砾石含量; 径流产沙; 塿土

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Erosion of Slopes of Lou Soil Stacks Different in Gravel Content

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

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 During the processes of production and construction in Guanzhong Region, a large number of stacks of Lou soil were formed. Gravel in the stack is an important factor affecting soil erosion on stack slopes in characteristic. Therefore, this study was designed to explore impacts of gravel concentration on runoff and sediment yielding processes on slopes of Lou soil stacks different in gravel content. 【Method】 In this paper, artificial rainfalls were simulated indoor, different in intensity (1.0 mm·min⁻¹, 1.5 mm·min⁻¹, 2.0 mm·min⁻¹ and 2.5 mm·min⁻¹), to explore their effects on runoff and sediment yield on slopes of Lou

* 国家重点研发计划项目(2016YFC0501604)和国家自然科学基金项目(40771127, 41761062)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0501604) and National Natural Science Foundation of China (Nos. 40771127, 41761062)

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

作者简介: 赵满(1995—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事生产建设项目土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 1301254459@qq.com

收稿日期: 2019-05-22; 收到修改稿日期: 2019-07-27; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-08-22

soil stacks different in gravel content (0, 10%, 20% and 30%). The experiment had test plots set up, 5 m × 1 m × 0.6 m in area and 25° in slope gradient. The nozzles of the artificial rainfall simulator were 18 m high over the slopes, spraying water evenly (more than 80% in evenness). Rainfall intensity were calibrated before the start of each test to ensure that the deviation of the actual rainfall intensity in the test was kept less than 5% of the designed rain intensity for the test. During the test, flow velocity of the runoff on the slope was measured with the dyeing method, width of the flow with a steel ruler, duration of runoff and sediment collection recorded with a stopwatch, and quantity of the samples weighed on an electronic scale. 【Result】 Results show: (1) runoff lasted the longest on the Lou soil slope 10% in gravel content under rainfall 1.0 mm·min⁻¹ in intensity, and the shortest under rainfall lower than 1.0 mm·min⁻¹ in intensity; (2) mean flow velocity of runoff increased with rising rainfall intensity on all the gravel-containing slopes regardless of gravel content. The flow velocity on the slope 10% in gravel content was the highest under rainfalls 1.0 and 2.5 mm·min⁻¹ in intensity, and 15.3%–21.2% and 13.6%–14.1% lower than that on the slope under rainfall 1.5 and 2.0 mm·min⁻¹ in intensity, respectively; (3) sediment content in runoff dropped drastically during the initial period (0–6 min) of each rainfall, regardless of rainfall intensity on all the gravel-containing slopes, and 6 min later, it gradually leveled off under the rainfalls 1.0 and 1.5 mm·min⁻¹ in intensity, and fluctuated sharply under the rainfalls 2.0 and 2.5 mm·min⁻¹ in intensity. During this period gravels dominated the process of sediment yield; (4) the amount of erosion per rainfall event showed a significant power function relationship with rainfall intensity, and decreased by 22.4%–42.6%, 8.2%–66.3%, 2.2%–56.5% and 45.0%–68.3%, on the gravel containing slopes under rainfall 1.0 mm·min⁻¹, 1.5 mm·min⁻¹, 2.0 mm·min⁻¹ and 2.5 mm·min⁻¹ in intensity, respectively as compared with that on the pure soil slope. 【Conclusion】 This study may serve as a theoretical basis for establishment of a model for research on water erosion on slopes of soil stacks in the Guanzhong Region.

Key words: Rainfall intensity; Gravel content; Runoff and sediment yield; Lou soil

进入 21 世纪以来, 随着我国经济发展, 大批生产建设项目相继建成并投入使用, 爆破、开挖等人为活动对地表及地下岩土层扰动强烈, 并形成了大量土石堆积体^[1], 这种人造地貌单元的侵蚀模数可达原地貌的 70 倍~800 倍, 并伴有面蚀、沟蚀、重力侵蚀等多种土壤侵蚀形式^[2], 严重影响到区域的经济发展和生态文明建设, 因此开展工程堆积体坡面土壤侵蚀研究迫在眉睫。

工程堆积体物质组成复杂、结构松散、黏聚力差, 受暴雨冲刷极易产生水土流失^[3]。砾石 (粒径 > 2 mm) 在堆积体中极为常见, 与土壤颗粒相比, 砾石密度较大、透水性差, 并且其表面结构与土壤颗粒具有很大区别, 与土壤混合后会使得土壤的结构、物理特性等发生一系列变化, 无论是砾石的形状、粒径, 还是混入土体后的空间分布、整体含量, 均会影响到坡面水沙过程。Chow 和 Rees^[4]认为砾石粒径的增加会降低土壤侵蚀速率, 而王雪松等^[5]发现, 小砾石 (2 cm ≤ D ≤ 3 cm) 较大砾石 (6 cm ≤ D ≤ 10 cm) 更易促进坡面产流, 但二者的侵蚀特征 (侵蚀速率和含沙量) 差异并不明显; 分布于土体表层的砾石能够减少承雨面积, 减小径流冲刷^[6], 进而抑制侵蚀, 而土体内部砾石却可以通过增大土壤孔

隙度, 促进入渗使土体易饱和, 造成土壤抗蚀性下降^[7]。砾石含量作为反映堆积体物质组成的重要指标, 对侵蚀特征的影响尤为突出, 学者们对此也进行了较多探索: 吴冰等^[8]研究表明, 总产沙量与砾石含量 (10%、20%、30%和 40%) 呈正相关, 但在产流期间砾石对侵蚀产沙的促进和抑制效应均有出现; 李建明等^[9]发现含砾石坡面 (10%、20%、30%) 的平均侵蚀量均要小于土质坡面 (砾石含量为 0), 砾石含量的增加可以有效减少侵蚀, 这与 Rieke-Zapp 等^[10] (砾石含量 5%、10%、20%、40%) 研究结论相似; 更有学者探索了 66%和 80%两种高砾石含量坡面的侵蚀产沙过程, 发现前者侵蚀发生的临界雨强为 1.5 mm·min⁻¹, 而无论雨强如何变化后者始终未产流产沙^[11]。综上, 学者们的研究多集中反映砾石特性 (形状、粒径和含量等) 对堆积体坡面侵蚀特征的影响, 除砾石外, 土壤也是堆积体的重要组成物质, 同时也是水力侵蚀过程中的主要受体, 土壤类型的不同同样会导致侵蚀规律呈现较大差异, 但目前关于土壤类型的研究多集中于黄土高原区 (黄绵土^[12-13])、北方土石山区 (褐土^[14-15])、和南方山地丘陵区 (红壤^[16]和紫色土^[17]), 壤土作为一种在关中平原地区广泛分布的土壤, 它是由长

期耕作施肥,在原始土层上部堆积形成的^[18],是一种明显区别于黄绵土、红壤等的人为土壤类型^[19],并且与该区长期以来的农业生产活动密切相关。而在该区各种生产建设项目的实施过程中,对地表的开挖、堆垫会形成较多以壤土为基本土壤类型的工程堆积体,降雨过程中其坡面侵蚀特征是否区别于其他类型土壤,尤其是混入砾石后其侵蚀过程如何发生发展,需要进一步明确。

鉴于此,本研究以关中壤土工程堆积体为研究对象,充分结合野外调查结果,采用室内人工模拟降雨试验的方法,研究了0%、10%、20%、30%四种砾石含量壤土堆积体坡面的径流特性和侵蚀产沙规律,以此实现对壤土堆积体坡面水土流失过程的模拟,其研究结果能为该区工程堆积体坡面水土流失量估算模型的建立提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省杨陵区,地处关中平原中部(34°14'~34°20'N、107°59'~108°08'E),南侧为秦岭山脉,北侧为横贯陕西中部的黄土高原,渭河自西向东流经该区南部。距西安市85 km,总面积135 km²,是我国第一个农业高新技术产业示范区。该区属暖温带季风半湿润气候区,年降水量为635.1~663.9 mm,集中在每年7—9月,年均气温12.9℃,无霜期211 d,年均日照时数2 164 h。该区海拔435~563 m,地势南低北高,土壤类型主要为壤土,占土地总面积的71.70%,其次为黄绵土,占总面积的10.80%;耕地面积为4.92×10³ hm²,植被类型以人工繁育的农作物和果树等为主,生态环境良好。

1.2 试验准备

试验开始前对关中地区共计60余处生产建设项目堆积体进行实地调研,测量并统计坡度、坡长、坡面物质组成等指标,在分析调查数据基础上将野外堆积体下垫面进行室内概化处理。调查结果显示,2~8 m坡长占样本总数的79.4%以上,25°~40°坡度占样本数的88.80%,所以设计试验坡长为5 m,坡度定为25°。粒径D<10 mm的砾石和岩屑在上、中、下坡位的质量含量变化较小且无明显规律,可认为该坡面组成物质不受坡位影响,粒径D>10 mm的砾石与坡面土体重力分选作用明显,不同坡位砾石质量含量<40%的堆积体占样本数的90%以上,故试验土石混合体的砾石质量含量分为10%、20%、30%三个等级,并设置砾石含量为0的土质作为对照。

试验采用砾石为关中地区破口石,经机械粉碎分选后获得;以野外调查侵蚀产沙发生过程中能够被搬运的砾石粒径为依据,确定试验砾石粒径范围为D<50 mm,同时按照野外测定堆积体中不同砾石粒径范围所占质量比例,将其分为D<14 mm、14 mm≤D<25 mm、25 mm≤D<50 mm三个级别,按照质量比3:5:2进行配置。试验用土取自杨凌周边农地0~2 m层次土壤,土壤类型为壤土,质地为黏壤土(国际制);装填前,过6 mm筛以去除根系等杂物,控制其含水量在10%左右;土壤颗粒组成及有机质含量见表1。土体与砾石需人工搅拌3~4次,保证混合均匀。

1.3 试验设计与指标测定

试验在中国科学院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅的下喷区域进行,可控雨强变化范围为0.5~5.8 mm·min⁻¹,有效降雨面积为27 m×18 m,

表1 试验土壤颗粒机械组成及有机碳含量

Table 1 Mechanical composition and organic carbon content of the tested soil

土壤类型 Soil type	颗粒机械组成 Particles mechanical composition/%					有机碳含量 Organic carbon/ (g·kg ⁻¹)
	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~0.05 mm	0.05~0.1 mm	0.1~2 mm	
壤土 Lou soil	22.66	44.73	29.13	3.48	0.00	7.90

有效降雨高度为 18 m, 能够满足雨滴下降时达到终点速度, 降雨均匀度高于 80%。根据研究区多年降雨资料, 选取夏秋时节发生暴雨时频率较高的最大 30 min 雨强作为本试验雨强的设计依据, 经取整后最终将雨强定为 1.0、1.5、2.0 和 2.5 mm·min⁻¹; 同时根据研究区暴雨历时较短的特点, 设计总产流时间为 45 min; 试验场次共计 16 场。试验所用径流小区为 5 m(长)×1 m(宽)×0.6 m

(深)的移动式液压升降土槽, 为模拟野外条件下降雨入渗过程, 土槽底部设有渗漏孔, 并垫有 5 cm 厚细沙层, 沙层表面铺设纱布。土石混合物进行人工分层装填, 共分为下(20 cm)、中(15 cm)、上(10 cm)三层, 下、中层土体容重控制在 1.3~1.57 g·cm⁻³, 上层土体表面平整, 容重控制在 1.18±0.10 g·cm⁻³。土石体容重及含水率如表 2 所示。

表 2 试验土石体容重及含水率

Table 2 Bulk density and moisture content of the soil-rock stacks in the experiment

		砾石含量 Gravel concentration/%			
		0	10	20	30
容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	变异系数 Coefficient of variation	0.029	0.030	0.037	0.035
	标准差 Standard deviation	0.036	0.041	0.050	0.049
	均值 Mean	1.258	1.349	1.378	1.409
含水率 Moisture content/%	变异系数 Coefficient of variation	0.103	0.152	0.054	0.131
	标准差 Standard deviation	0.013	0.015	0.005	0.011
	均值 Mean	11.1	10.1	8.8	8.4

试验开始前先将钢槽缓缓升至试验坡度, 用塑料布遮盖, 然后打开降雨器, 在试验场地四周放置雨量筒, 采用“梅花桩”法进行多次雨强率定, 保证试验雨强与设计雨强的误差不高于 5%。待雨强率定合格后, 迅速揭开塑料布, 用精度为 0.01 s 的秒表开始计时, 当坡面有明显股流出现且流出集流槽时, 记录产流时间; 用量筒在集流槽口处收集泥沙样品, 同时用秒表记录接样时间。产流前 3 min 每隔 1 min 取 1 次泥沙样, 产流 3 min 后每隔 3 min 取样一次。在距离坡顶 1.5 m、3.5 m 处设置两个测流断面, 用高锰酸钾染色法测量流速, 用精度为 0.01 cm 钢尺测量流宽, 用精度为 0.01 g 的电子秤称量所接泥沙样品质量, 样品在 105℃烘箱中烘干后再称量泥沙干重。

2 结 果

2.1 不同砾石含量堆积体径流特征

2.1.1 初始产流时间 图 1 为初始产流时间随砾石含量和雨强的变化。各砾石含量坡面初始产流时间均随雨强增大而减小, 变化范围分别为 105~

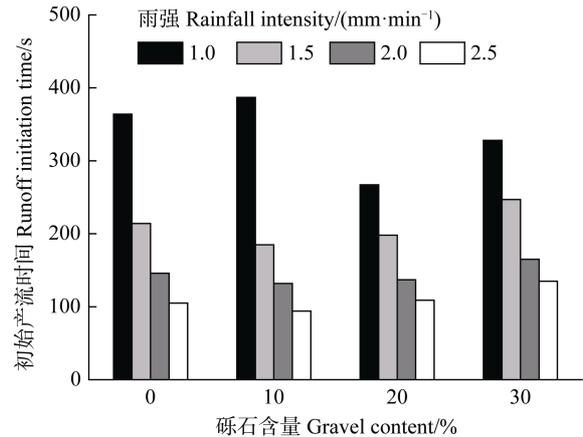


图 1 初始产流时间随砾石含量和雨强的变化

Fig. 1 Variation of the time of the initiation of runoff with gravel content and rainfall intensity

364 s、94~387 s、109~267 s 和 135~328 s, 且回归分析表明, 各砾石含量坡面初始产流时间与雨强均呈显著幂函数关系 ($R^2=0.832\sim0.999$, $P<0.05$)。1.0 mm·min⁻¹ 雨强下, 随砾石含量增加, 初始产流时间呈增加—减少—增加趋势, 在 10%砾石含量时最大 (387 s), 小雨强下砾石含量对堆积体坡面产流快慢的影响较为明显; 在 1.5、2.0、2.5 mm·min⁻¹ 雨强下, 初始产流时间随砾石含量增加整体呈减少

一增加趋势, 均在 10%砾石含量时最小, 分别为 123 s、132 s、94 s。

为进一步明确雨强和砾石含量对初始产流时间的影响, 逐步回归分析初始产流时间与砾石含量和雨强的关系, 结果表明初始产流时间与二者呈极显著线性函数关系。

$$T = 28.250G - 145.550I + 447.413, \quad (1)$$

$$R^2 = 0.778, P < 0.01, N = 16$$

式中, T 为初始产流时间, s; I 为雨强, $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$; G 为砾石含量, %。

2.1.2 流速 图 2 为堆积体坡面流速随产流历时变化。雨强为 $1.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 土质坡面流速变化范围为 $0.02\sim 0.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 含砾石坡面为 $0.03\sim 0.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 砾石含量对流速的影响较小。1.5、

$2.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, 土质坡面流速呈增大—逐渐稳定的趋势, 变化范围分别为 $0.06\sim 0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.08\sim 0.19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 产流过程中分别出现 6 次、5 次波动, 变异系数 CV 分别为 14%、12%; 含砾石坡面波动范围为 $0.05\sim 0.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.05\sim 0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 波动次数仅为 1~3 次, 其流速的变化范围和波动性较土质坡面有明显减小。2.5 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, 产流 30 min 后, 土质坡面流速稳定在 $0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而 30% 砾石含量坡面呈现逐渐减小趋势。对平均流速的分析表明 (图 3): 随雨强增大, 各坡面平均流速整体呈增大趋势; 1.0、2.5 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, 平均流速在 10% 砾石含量时最大, 分别为 $0.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 1.5、2.0 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, 土质坡面平均流速最大, 分别为 $0.092 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.099 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 含砾石坡面平均流速较土质坡面的减幅分别为 15.3%~21.2%、13.6%~14.1%。

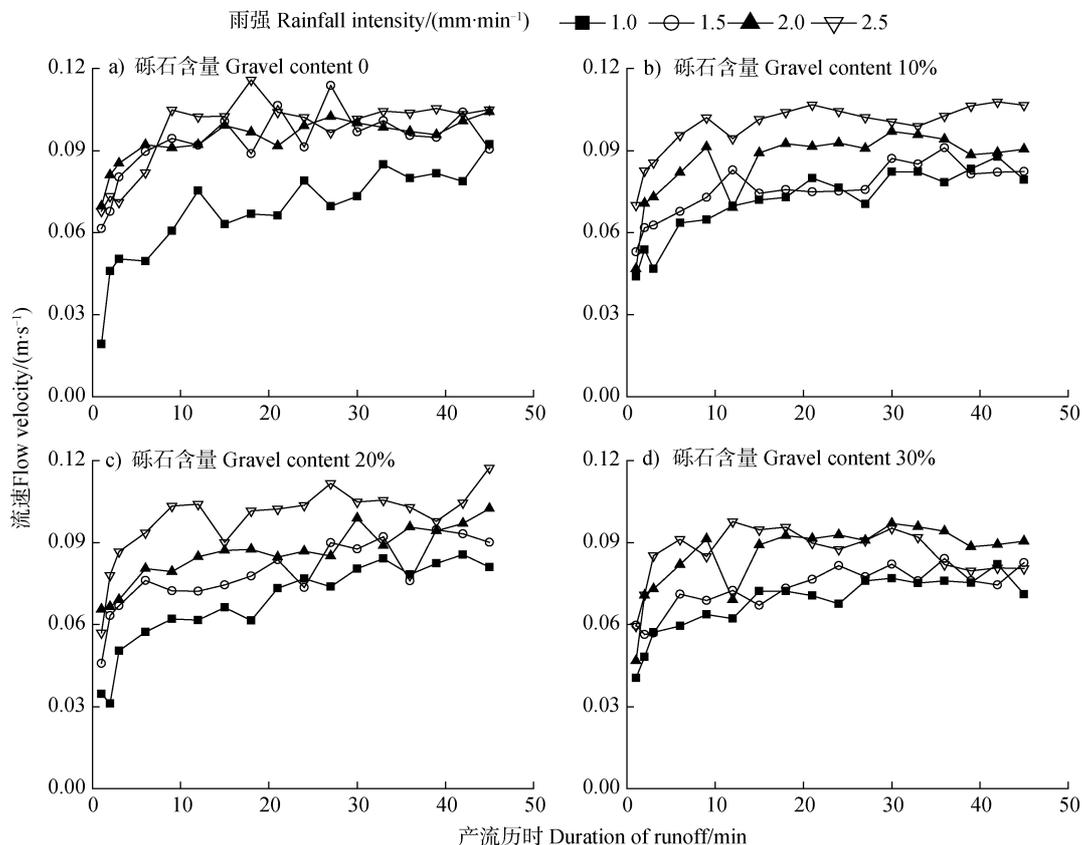


图 2 不同砾石含量和雨强条件下流速随产流历时的变化

Fig. 2 Temporal variation of flow velocity of runoff relative to gravel content and rainfall intensity

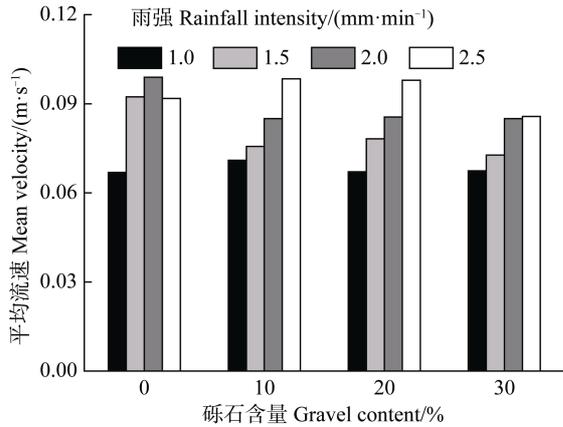


图 3 平均流速随雨强和砾石含量的变化

Fig. 3 Variation of mean velocity with rainfall intensity and gravel content

为明确雨强和砾石含量对流速的影响，逐步回归分析流速和砾石含量与雨强的关系，结果表明流速与二者呈显著线性函数关系。

$$V = 0.017I - 0.03G + 0.058, \quad (2)$$

$$R^2 = 0.819, P < 0.05, N = 16$$

式中， V 为流速， $m \cdot s^{-1}$ ； I 为雨强， $mm \cdot min^{-1}$ ； G 为砾石含量，%。

2.2 不同砾石含量堆积体产沙特征

2.2.1 含沙量 图 4 为不同处理坡面含沙量随产流历时的变化。由图可知，各坡面含沙量在产流 0~6 min 均呈急剧下降趋势。1.0、1.5 $mm \cdot min^{-1}$ 雨强下，土质坡面含沙量在 0~6 min 内减幅分别为 $70 g \cdot L^{-1}$ 、 $171 g \cdot L^{-1}$ ，远高于含砾石坡面 ($35 \sim 40 g \cdot L^{-1}$ 、 $96 \sim 118 g \cdot L^{-1}$)；土质坡面产流 6~45 min 内含沙量变化范围为 $12 \sim 31 g \cdot L^{-1}$ 、 $24 \sim 40 g \cdot L^{-1}$ ，含砾石坡面为 $8 \sim 34 g \cdot L^{-1}$ 、 $10 \sim 42 g \cdot L^{-1}$ ，产流中后期各坡面含沙量变化范围较小且稳定。雨强为 2.0、2.5 $mm \cdot min^{-1}$ 时，各砾石含量坡面含沙量在产流 6~45 min 均呈多峰多谷式波动变化，其中土质坡面在 2.5 $mm \cdot min^{-1}$ 雨强下，产流后期含沙量急剧增加，增幅达 $292 g \cdot L^{-1}$ ，并与产流历时呈极显著线性函数关系 ($R^2 = 0.879, P < 0.01$)。

表 3 为不同雨强下各坡面产流 0~6 min (急剧减少阶段) 和 6~45 min (波动或稳定阶段) 两个时

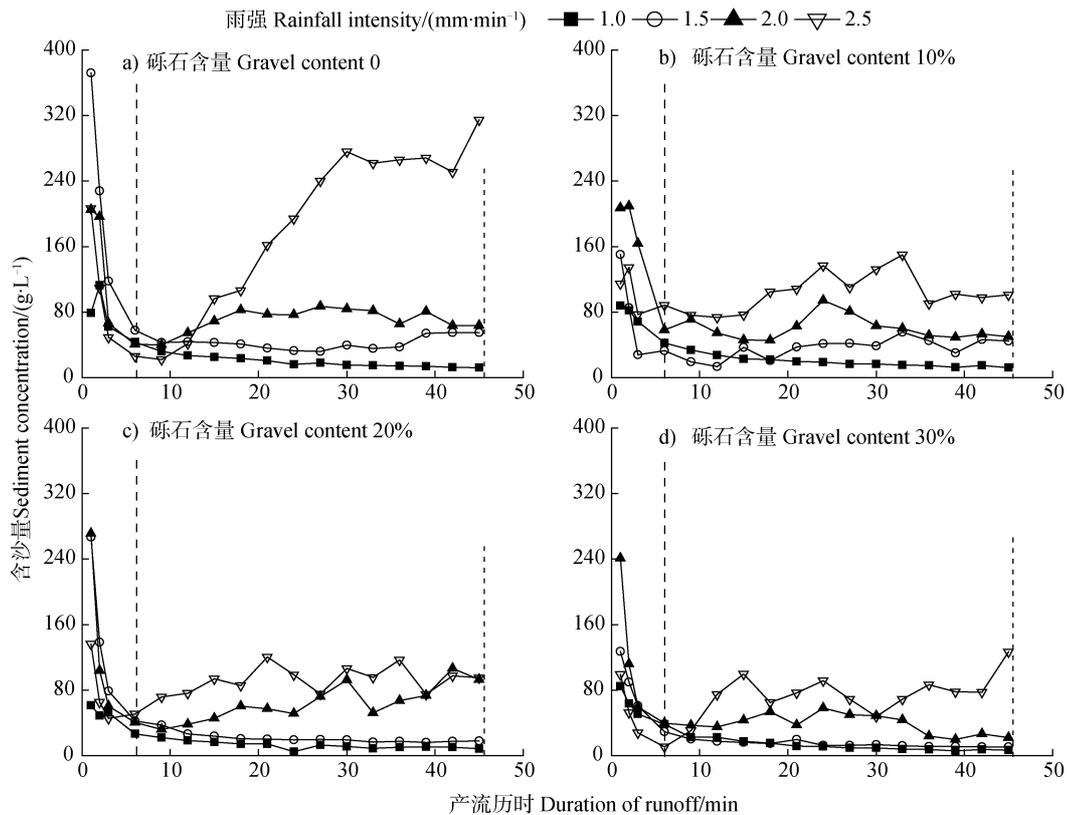


图 4 不同砾石含量和雨强条件下含沙量随产流历时的变化

Fig. 4 Temporal variation of sediment concentration in runoff relative to gravel content and rainfall intensity

表 3 各雨强下不同处理坡面 0~6 min 和 6~45 min 两时段含沙量均值

Table 3 Mean sediment concentration in runoff on slope relative to gravel content and rainfall intensity during the two time periods, 0~6 min and 6~45 min

砾石含量 Gravel content/%	雨强 Rainfall intensity/(mm·min ⁻¹)							
	1.0		1.5		2.0		2.5	
	S _a	S _b	S _a	S _b	S _a	S _b	S _a	S _b
0	74.34	18.89	193.88	42.25	127.09	71.34	97.90	192.34
10	70.25	19.10	74.17	36.39	159.69	66.16	103.68	104.68
20	47.35	12.65	131.83	21.08	119.11	64.86	74.70	93.12
30	59.53	12.02	76.79	14.16	113.10	38.48	47.67	76.47

注: S_a、S_b 分别表示 0~6 min、6~45 min 两时段的含沙量均值, g·L⁻¹。Note: S_a and S_b represents mean sediment concentration in runoff during the 0~6 min and 6~45 min time period, respectively, g·L⁻¹.

段的含沙量均值。1.0 mm·min⁻¹ 雨强下, 土质坡面在 0~6 min 内平均含沙量最高 (74.34 g·L⁻¹), 各坡面含沙量从大到小依次为砾石含量 0>10%>20%>30%; 产流 6~45 min, 含砾石坡面的平均含沙量较土质坡面的减幅范围为 0~36.4%。1.5、2.0、2.5 mm·min⁻¹ 雨强下, 产流 6~45 min 内土质坡面平均含沙量均最大, 分别为 42.25 g·L⁻¹、71.34 g·L⁻¹、192.34 g·L⁻¹, 含砾石坡面较土质坡面的减幅范围分别为 13.9%~66.5%、7.3%~46.1%、45.6%~60.2%。为进一步明确砾石含量和雨强对含沙量的影响, 将 0~6 min 和 6~45 min 两阶段含沙量分别与雨强和砾石含量进行 Spearman 相关性分析, 发现产流 6~45 min 的平均含沙量与砾石含量呈极显著相关 ($P<0.01$), 而与雨强相关性较差, 可见在中后期的产沙过程中, 砾石占据主导地位。

2.2.2 次降雨侵蚀量 图 5 为次降雨侵蚀量随砾石含量和雨强的变化。就雨强对侵蚀的影响而言, 各砾石含量坡面次降雨侵蚀量均随雨强增大而增大; 1.0 mm·min⁻¹ 雨强下, 0~30%各砾石含量坡面侵蚀量为四种雨强下最小, 分别为 5.58 kg、4.43 kg、3.39 kg 和 3.21 kg, 而当雨强增大至 1.5、2.0、2.5 mm·min⁻¹ 时, 其侵蚀量较 1.0 mm·min⁻¹ 雨强分别增大了 0.62 倍~1.77 倍、5.16 倍~9.24 倍、10.65 倍~20.11 倍; 雨强的增大对各坡面侵蚀均有促进作用, 且以对土质坡面的促进效应最为明显; 回归分析表明次降雨侵蚀量与雨强呈显著幂函数关系 ($R^2=0.935\sim0.988$, $P<0.05$)。就砾石对侵蚀的影响而言, 1.0~2.5 mm·min⁻¹ 雨强下, 土质坡面侵蚀量最大, 分别为 5.58 kg、15.47 kg、45.41 kg、117.9 kg,

各雨强下侵蚀量从大到小依次为砾石含量 0>10%>20%>30%, 含砾石坡面侵蚀量较土质坡面的减幅分别为 22.4%~42.6%、8.2%~66.3%、2.2%~56.5%、45.0%~68.3%, 砾石的存在有效减少了侵蚀的发生。

为进一步明确砾石含量和雨强对次降雨侵蚀量的影响, 对次降雨侵蚀量与雨强 (I)、砾石含量特征值 (W , $W=1-G$)、雨强与砾石含量特征值的乘积 (IW) 分别进行 Spearman 相关性分析, 结果表明, 次降雨侵蚀量与组合因子项 (IW) 的关系最为密切, 相关系数为 0.881 ($P<0.01$), 并与雨强 (I) 和砾石含量特征值 (W) 均呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.816 和 0.869 ($P<0.01$), 说明雨强和砾石含量对侵蚀量均具有显著影响。对次降雨侵蚀量与

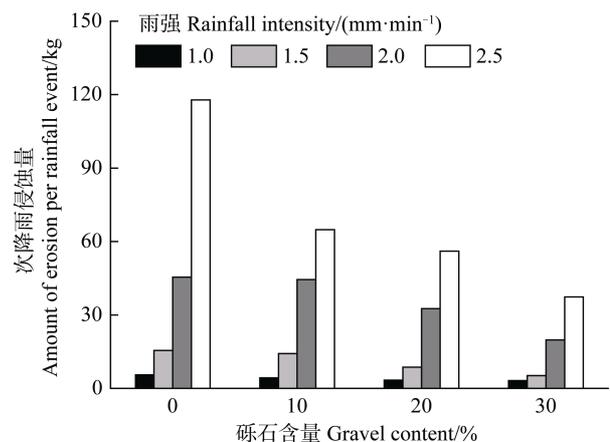


图 5 次降雨侵蚀量随砾石含量、雨强的变化

Fig. 5 Amount of erosion per rainfall event relative to gravel content and rainfall intensity

雨强、砾石含量进行逐步回归分析, 表明次降雨侵蚀量与雨强和砾石含量呈显著线性函数关系。

$$E_a = 43.728I - 93.616G - 32.769, \quad (3)$$

$$R^2 = 0.788, P < 0.05, N = 16$$

式中, E_a 为次降雨侵蚀量, kg; I 为雨强, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; G 为砾石含量, %。

3 讨 论

3.1 含砾石坡面径流特性

雨强和下垫面特征是工程堆积体坡面初始产流时间(以下简称 T_0)的主要影响因素。1.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下, T_0 表现为土质大于 20%、30%砾石含量, 且在 10%砾石含量时最大; 这与部分学者对含砾石黄绵土^[20]、风沙土^[21]的研究结果相似; 砾石破坏了土壤结构, 使土壤大孔隙增多、促进入渗, 同时砾石也会因其不透水性, 延长水分下渗路径, 从而削弱入渗, 二者相互影响, 导致“临界值”出现。壤土堆积体坡面 T_0 变化范围为 1.5 min~6 min, 而王雪松等^[22]却发现红壤堆积体 T_0 为 2.5 min~18 min, 且四种雨强下的 T_0 均高于壤土; 红壤属于重壤质土, 有机质含量低、结构性差, 砾石破坏了原土壤中孔隙的连续性^[23], 并形成较大孔隙, 抑制了表层结皮的形成, 导致入渗量增多, 产流历时被延长; 而壤土作为一种由长期施肥、耕作形成的“人为土”, 其有机质含量较高, 并且具有较好的土壤团粒结构, 受雨滴溅蚀影响易形成结皮, 所以产流时间较短。1.5~2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 三种雨强下, 含砾石坡面 T_0 随砾石含量增加逐渐增大, 砾石延缓了坡面径流的出现, 这与唐盛强和余冬立的^[24]研究结果相似, 主要是由于较高的砾石含量增大了堆积体土体大孔隙比例, 提高了降雨入渗能力, 从而导致产流时间延长, 甚至当砾石含量增大至 80%时, 堆积体坡面不会有产流出现^[11]。

1.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下, 各坡面的平均流速均较小且接近, 这与吴冰等^[8]研究结果相似, 侵蚀沟出现前, 坡面薄层水流的径流深和径流强度均较小, 流速受砾石的影响较小^[25]。1.5、2.0 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下, 土质坡面的平均流速和波动性均大于含砾石坡面; 砾石增加了坡面糙度, 降低了水流动能^[10], 同时水流被砾石约束形成“网状流”(径流深增加、

径流路径延长)^[26], 并且砾石含量的继续增加(达到 40%以上)会使流速进一步下降^[24]。2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下, 产流 20 min 后 30%砾石含量坡面流速呈下降趋势; 究其原因, 可能是因为堆积体质地分布不均匀, 坡面细颗粒大量流失后, 砾石之间出现较多缝隙, 部分坡面流顺裂缝或孔隙进入堆积体内部形成“潜流”, 减小了坡面流量, 导致流速下降。纵观当前诸多研究, 由于受试验条件的限制, 学者们主要集中于探讨堆积体表层的侵蚀规律, 但堆积体作为一种立体结构, 这种“内部潜流”是否会导致“地下水土流失”现象出现, 以及其内部侵蚀规律如何, 笔者认为今后研究中可以加强这方面的探讨。

3.2 含砾石坡面的侵蚀特征

2.5 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下, 壤土坡面在产流中后期含沙量迅速增加, 其侵蚀特征与风沙土^[27]较为相似, 但后者单位时间内含沙量增幅更大(壤土为 7.5 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, 风沙土为 25 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$); 土壤黏粒含量会影响土粒之间的胶结力, 团粒性质较好的土壤抵抗溅蚀、径流冲刷的能力较强^[28], 本试验所用壤土黏粒含量较高(23%, 表 1), 并且在长期耕作的影响下, 其土壤整体团粒性质较好, 而风沙土^[27]粗颗粒多(黏粒含量仅为 5.9%)且团粒结构较差, 所以后者侵蚀更为剧烈。含沙量整体呈减少—稳定—波动的变化趋势, 其变化历程与风沙土^[27]和黄绵土^[29]的较为相似, 但要明显区别于紫色土^[17](增加—减小—稳定), 这与紫色土质地细密、孔隙度小, 易形成结皮有关。0~6 min 各坡面含沙量均较高且呈急剧下降趋势, 这是因为产流前期坡面细颗粒含量较高且侵蚀形式以溅蚀和面蚀为主, 极易形成含沙量较高的浑浊泥流^[30]; 6~45 min 的产沙过程中, 砾石对产沙的影响占据主导地位; 产流中后期, 坡面侵蚀沟开始出现, 对于含砾石坡面而言, 由于水流只会选择阻力较小路径并对坡面薄弱处进行侵蚀^[31], 密度较大的砾石难以被搬运就会在坡面不断积累, 在阻碍径流流动, 降低水流携沙能力的同时, 形成一定面积的砾石覆盖层^[24], 增强了对表层土体的保护, 有效抑制了侵蚀的发生, 所以含砾石坡面的含沙量较土质坡面会大幅下降。试验过程中, 坡面长时间受径流冲刷和浸泡, 极易发生小规模滑塌; 水流对沟壁、沟头的掏蚀也会造成沟槽周边土体失稳崩塌, “崩滑体”中的泥沙经径流冲刷, 沟槽内含沙量急剧增加, 当崩塌泥沙被水流搬运后, 新的临

空面又会在其上部形成, 下个周期的重力侵蚀又会开始^[32], 使含沙量呈“多峰多谷”式波动变化。

本研究表明, 次降雨侵蚀量随雨强的增大而增大, 随砾石含量增加而逐渐减小; 这与景民晓等^[13] (砾石含量为 10%、20%、30%) 室内模拟试验的结果一致, 但也有研究发现砾石的存在 (砾石含量 < 20%) 可显著提高土壤侵蚀量^[33], 主要是因为嵌入土体的砾石改变了土壤结构, 导致其周围土体易发生“涡旋侵蚀 (vertex erosion)”所致; 并且, 砾石对侵蚀的影响存在“临界效应”, 在砾石含量 (盖度) 为 20%~25% 时侵蚀量会出现峰值^[33]。本研究中, 在 $1.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 较小雨强下, 砾石主要通过保护坡面免受雨滴溅蚀, 促进水分入渗、削减地表径流来减少侵蚀的发生; 而在 $1.5\sim 2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 较大雨强下, 随着雨水冲刷和径流搬运, 坡面土体不断流失后砾石大面积裸露, 直接限制到侵蚀沟的形成和一系列发育过程 (拓宽、下切、溯源)^[21], 而沟蚀作为坡面侵蚀产沙的主要来源^[34], 沟道发育受到抑制必然会导致总侵蚀量的下降; 此外, 砾石含量的增大可视作坡面砾石盖度的增加^[15], 大小不一的砾石、岩屑互相堆垫形成保护层, 将降雨、径流与坡面下方土体隔离开来, 砾石含量越高, “armor 效应”^[35]对侵蚀的弱化作用越明显, 所以 20%、30% 砾石含量坡面在 2.0 、 $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 较大雨强下, 侵蚀量较土质坡面会大幅减少。

4 结 论

本文采用室内模拟降雨试验方法, 研究了四种砾石含量 (0、10%、20%、30%) 堆积体坡面的径流产沙特征, 主要结论如下: $1.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, 初始产流时间在 10% 砾石含量时最大, 其余雨强下在 10% 砾石含量时最小。坡面流速整体上呈现出增大—逐渐稳定的趋势; 雨强为 1.0 和 $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 10% 砾石含量坡面平均流速最大; 雨强为 1.5、 $2.0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 含砾石坡面流速变化范围和波动性均小于土质坡面。0~6 min 各坡面含沙量均呈下降趋势; 产流 6~45 min, 1.0 、 $1.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, 土质和含砾石坡面含沙量均趋于稳定, 而在 2.0 、 $2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 雨强下, 则呈多峰多谷式波动。次降雨侵蚀量随雨强增加显著增大; $1.0\sim 2.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

雨强下, 含砾石坡面侵蚀量较土质坡面减少了 2.2%~68.3%。该研究可深入了解短时性暴雨条件下堆积体坡面的侵蚀过程和特征, 为堆积体边坡水土保持措施的布设提供合理依据。鉴于堆积体侵蚀过程的复杂性, 日后的研究应注重模拟试验的重复, 还需在试验的坡度、坡长、砾石占比和分布等方面进一步加强研究。

参考文献 (References)

- [1] Li J M, Wang W L, Li H W, et al. Experimental study of runoff velocity and sediment yield affected by gravels of engineering deposits in loess area[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34 (9): 64—74. [李建明, 王文龙, 李宏伟, 等. 黄土区工程堆积体石砾对流速及产沙影响试验研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34 (9): 64—74.]
- [2] Li J Q, Chen Q B, Wang K Q, et al. Study on rock and soil erosion in dumping pile of hydropower station construction project[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14 (6): 40—42. [黎建强, 陈奇伯, 王克勤, 等. 水电站建设项目弃渣场岩土侵蚀研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14 (6): 40—42.]
- [3] 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. [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.]
- [4] Chow T L, Rees H W. Effects of coarse-fragment content and size on soil erosion under simulated rainfall[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75 (2): 227—232.
- [5] Wang X S, Xie Y S, Jing M X, et al. Effect of the different kinds of gravels on soil erosion of spoilbank[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (5): 21—25. [王雪松, 谢永生, 景民晓, 等. 不同砾石类型对工程堆积体侵蚀规律的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28 (5): 21—25.]
- [6] Martinez M, Lane L J, Fogel M M. Experimental investigation of soil detachment by raindrop impacts[J]. *Agricultural Reviews and Manuals Arm W*, 1979: 153—155.
- [7] 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[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1990, 15 (7): 653—671.
- [8] Wu B, Zhu Y J, Shao M A. Flow velocity and processes of runoff and sediment generation on soils containing gravels[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9 (1): 99—103. [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[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9 (1): 99—103.]
- [9] 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, 2016, 32 (14): 187—194. [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.]
- [10] Rieke-Zapp D, Poesen J, Nearing M A. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32 (7): 1063—1076.
- [11] Gan F L, He B H, Wang T. Sediment characteristic of landslide accumulation body in earthquake zone of Wenchuan under artificial rainfall simulation condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (12): 158—164. [甘凤玲, 何丙辉, 王涛. 人工模拟降雨下汶川震区滑坡堆积体产沙规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32 (12): 158—164.]
- [12] Ding Y D, Xie Y S, Jing M X, et al. Study on sediment erosion law of conical scattered spoilbank of light loam[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (5): 31—36. [丁亚东, 谢永生, 景民晓, 等. 轻壤土散乱锥状堆置体侵蚀产沙规律研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28 (5): 31—36.]
- [13] Jing M X, Xie Y S, Li W H, et al. Runoff and sediment yield modeling of spoilbank with different soil-stone ratio[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (3): 78—82. [景民晓, 谢永生, 李文华, 等. 不同土石比例弃土堆置体产流产沙模拟研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28 (3): 78—82.]
- [14] Liang H R, Yu X X, Fan D X, et al. Effect of gravel-sand muching on slope runoff and sediment yield[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (3): 57—61. [梁洪儒, 余新晓, 樊登星, 等. 砾石覆盖对坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28 (3): 57—61.]
- [15] Fu S H. Effect of soil containing rock fragment on infiltration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19 (1): 171—175. [符素华. 土壤中砾石存在对入渗影响研究进展[J]. 水土保持学报, 2005, 19 (1): 171—175.]
- [16] 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[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26 (9): 2673—2680. [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[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (9): 2673—2680.]
- [17] Wang X Y, Wang T W, Cai C F, et al. Processes of rainfall infiltration, runoff and sediment yield on purple soil slope containing rock fragments[J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (2): 189—195. [王小燕, 王天巍, 蔡崇法, 等. 含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J]. 水科学进展, 2014, 25 (2): 189—195.]
- [18] Du J. Chinese anthrosols research and its agricultural cultural properties[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2017, 16 (5): 124—131. [杜娟. 中国人为土的文化属性及其研究进展[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2017, 16 (5): 124—131.]
- [19] Shi C H, Gong Z T. Research on the classification of artificial soil[J]. Progress in Soil Science, 1999, 19 (4): 24—29. [史成华, 龚子同. 关于人为土壤分类的研究[J]. 土壤学进展, 1991, 19 (4): 24—29.]
- [20] 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, 2006, 22 (2): 64—67. [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.]
- [21] 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[J]. Advances in Water Science, 2016, 27 (2): 256—265. [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[J]. 水科学进展, 2016, 27 (2): 256—265.]
- [22] Wang X S, Xie Y S, Chen X, et al. Effects of rock fragment on soil erosion rule of engineering pyramidal accumulation in Northern Jiangxi[J]. Journal of Sediment Research, 2015 (1): 67—74. [王雪松, 谢永生, 陈曦, 等. 砾石对赣北红土工程锥状堆积体侵蚀规律的影响[J]. 泥沙研究, 2015 (1): 67—74.]
- [23] Cousin I, Nicoulaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil[J]. Catena, 2003, 53 (2): 97—114.
- [24] Tang S Q, She D L. Effect of rock fragment cover on upslope runoff erosion of coastal saline soil slope[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26 (6): 1235—1246. [唐胜强, 余冬立. 砾石覆盖对海涂围垦区盐土坡面上方来水冲刷侵蚀的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26 (6): 1235—1246.]
- [25] 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[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (3): 125—134. [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[J]. 农业工程学报, 2016, 32 (3): 125—134.]
- [26] Poesen J W A, Lavee H. Effects of size and incorporation of synthetic mulch on runoff and sediment yield from interrills in a laboratory study with simulated

- rainfall[J]. *Soil and Tillage Research*, 1991, 21(3/4): 209—223.
- [27] 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. [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.]
- [28] Chen J J, Sun L Y, Cai C F, et al. Rill erosion on different soil slopes and their affecting factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (2): 281—288. [陈俊杰, 孙莉英, 蔡崇法, 等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J]. *土壤学报*, 2013, 50 (2): 281—288.]
- [29] Jing M X, Xie Y S, Zhao X, et al. Runoff and sediment yield modeling on spoilbank with soil-stone mixture[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 (6): 11—15, 20. [景民晓, 谢永生, 赵暄, 等. 土石混合弃土堆置体产流产沙模拟研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27 (6): 11—15, 20.]
- [30] Hu M J, Wang R, Meng Q S, et al. Research on erosion process and features of loose gravelly soil slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26 (11): 1722—1726. [胡明鉴, 汪稔, 孟庆山, 等. 坡面松散砾石土侵蚀过程及其特征研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(11): 1722—1726.]
- [31] Zhang L T, Gao Z L, Li Y H, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (8): 145—153. [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.]
- [32] Xu J X. Erosion and sediment yield of hyperconcentrated flows on Loess Plateau[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5 (1): 27—34, 45. [许炯心. 黄土高原的高含沙水流侵蚀研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5 (1): 27—34, 45.]
- [33] Bunte K, Poesen J. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of noncohesive sediment by shallow overland flow[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29 (5): 1415—1424.
- [34] Auerswald K, Fiener P, Dikau R. Rates of sheet and rill erosion in Germany-A meta-analysis[J]. *Geomorphology*, 2009, 111 (3/4): 182—193.
- [35] Wang X Y, Li Z X, Cai C F, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China[J]. *Geomorphology*, 2012, 151/152 (1): 234—242.

(责任编辑: 檀满枝)