

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.038.

魏育超, 陈姿宇, 王子吟, 等. 基于 REE 示踪法的工程堆积体坡面泥沙来源研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 9-17.

Wei Yuchao, Chen Ziyu, Wang Ziyin, et al. A Study on the Sediment Source on Slope of Engineering Deposits by Rare Earth Element Tracer Method[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 9-17.

基于 REE 示踪法的工程堆积体坡面泥沙来源研究

魏育超^{1,2,3}, 陈姿宇⁴, 王子吟⁴, 魏宇航⁴,

张一博⁴, 王达未^{1,2,3}, 谢永生^{2,4}, 骆汉^{2,4}

(1.中国科学院 教育部水土保持与生态环境研究中心, 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.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]探究生产建设项目工程堆积体坡面侵蚀的泥沙来源,更有针对性地布设水土流失防治措施,减少人为扰动造成的水土流失。[方法]结合室内人工模拟降雨试验与 REE(Rare Earth Elements)示踪技术,研究 90 mm/h 雨强下不同砾石含量[0(纯土), 10%, 20%, 30%]工程堆积体坡面不同坡位的侵蚀特征及侵蚀贡献率。[结果](1) 不同砾石含量堆积体各坡位侵蚀量均为下坡位最大,同时下坡位平均侵蚀贡献率(57.40%)大于上坡位和中坡位,表明下坡位是坡面泥沙的主要来源。(2) 含砾石堆积体坡面中坡位和下坡位的侵蚀量显著小于纯土堆积体。含砾石堆积体坡面上坡位和中坡位的侵蚀贡献率显著大于纯土堆积体坡面,下坡位侵蚀贡献率显著小于纯土堆积体坡面。(3) 砾石含量对下坡位侵蚀量和贡献率的影响更显著($p < 0.05$)。含砾石堆积体中,20%砾石含量堆积体坡面上坡位和下坡位的侵蚀量显著大于 10%,30%砾石含量堆积体。10%砾石含量堆积体坡面上坡位侵蚀贡献率显著大于 20%,30%砾石含量堆积体坡面,下坡位侵蚀贡献率显著小于 20%,30%砾石含量堆积体坡面。[结论]各砾石含量工程堆积体坡面中,下坡位侵蚀贡献率均最大,表明下坡位是工程堆积体坡面泥沙的主要来源,要加强工程堆积体下坡位的防护和治理。

关键词: 土壤侵蚀; REE; 砾石含量; 贡献率; 坡位

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0009-09

A Study on the Sediment Source on Slope of Engineering Deposits by Rare Earth Element Tracer Method

Wei Yuchao^{1,2,3}, Chen Ziyu⁴, Wang Ziyin⁴, Wei Yuhang⁴, Zhang Yibo⁴,

Wang Dawei^{1,2,3}, Xie Yongsheng^{2,4}, Luo Han^{2,4}

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese

Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of

Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of

Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the sediment sources of slope erosion in production and construction projects, and to implement the targeted soil and water conservation measures to mitigate soil and water loss caused by human disturbance. [Methods] Indoor simulated rainfall tests combined with REE tracer technique were conducted to examine the erosion characteristics and contributions from different areas of engineering deposits with varying gravel contents [0 (pure soil), 10%, 20%, 30%]

收稿日期: 2023-12-02

修回日期: 2024-01-02

资助项目: 四川省交通运输科技项目(2018-ZL-15); 国家自然科学基金(41601300)

第一作者: 魏育超(1996—), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持工程。E-mail: yue21_pa@163.com

通信作者: 骆汉(1985—), 男, 山东淄博人, 副研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: hanl@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

under the rainfall intensity of 90 mm/h. [Results] (1) The amount of soil erosion of all areas of different gravel-containing engineering deposits was the largest in the down slope area, while the average erosion contribution of the down slope area (57.40%) was larger than that of the upper slope area and the middle slope area, which indicated that the down slope area was the main source of sediment. (2) The erosion contribution of the middle and down slope areas of the gravel-containing engineering deposits was significantly smaller than that of the pure soil deposits. The erosion contribution of the upper and middle slope areas of the gravel-containing engineering deposits was significantly greater than that of the pure soil deposits, and the erosion contribution of the down slope area of the gravel-containing engineering deposits was significantly less than that of the pure soil deposits. (3) The effect of gravel content on the amount and contribution of erosion at the down slope area was more significant ($p < 0.05$). In the gravel-containing engineering deposits, the amount of erosion at the upper and down slope areas of the 20% gravel content engineering deposits was significantly greater than that of engineering deposits with 10% and 30% gravel contents. The contribution of erosion at the upper slope area of the engineering deposit with 10% gravel content was significantly greater than that engineering deposits with 20% and 30% gravel contents, and the contribution of erosion at the down slope area was significantly less than that engineering deposits with 20% and 30% gravel contents. [Conclusion] Among all the engineering deposits with gravel content, the erosion contribution rate of the down slope area is the largest, which indicates that the down slope area is the main source of sediment on the slope of the engineering deposits, and the protection and treatment of the down slope area should be strengthened.

Keywords: soil erosion; rare earth element; gravel content; contribution rate; slope position

随着我国经济的发展,生产建设项目数量迅速增加,在施工过程中产生了大量的弃土弃渣,改变了施工区原有的地表形态,形成了大量的工程堆积体。工程堆积体由于其边坡松散、稳定性差、坡度陡、抗蚀性差等特点,在降雨作用下,极易产生塑性变形和流变变形^[1],具有侵蚀量大、范围广、突发性强、危害性大等特点,严重破坏了生态环境,且容易诱发滑坡、泥石流等地质灾害,是生产建设项目区水土流失最为严重的地貌单元^[2]。工程堆积体常以土石混合体的形式存在于各种工矿区内,砾石是影响坡面侵蚀的重要因子,也是区别于其他土质坡面的重要特征^[3-4]。砾石暴露在土壤表面,导致表土结构和地表糙度发生变化,进而影响侵蚀^[5]。史倩华等^[6]研究红壤堆积体、康宏亮等^[3]研究陕北风沙土堆积体的产流产沙特征,均发现当雨强大于 60 mm/h 时,砾石可以抑制坡面侵蚀,具有显著的减沙效应;吕佼容等^[4]通过连续降雨试验,研究不同砾石含量重壤质堆积体侵蚀过程,发现土壤剥蚀率和产流率均随砾石含量的增加而减小;李瑞栋等^[7]对矮土工程堆积体侵蚀特征进行研究,发现产沙率、平均径流率与砾石含量呈显著负相关;张文博等^[8]通过对比不同形态工程堆积体的产沙特征,发现二维平面堆积体在 30%砾石含量时侵蚀存在阈值,而三维锥状堆积体在 20%砾石含量时存在阈值;红土堆积体^[3]和风沙

土堆积体^[6]的产流量均在 10%砾石含量时最小。不同砾石含量工程堆积体产流产沙特征存在差异,并且以往研究多集中于工程堆积体坡面产流产沙、水动力学特征等侵蚀过程和侵蚀机理方面^[9-12],而对于工程堆积体坡面泥沙来源的相关研究尚未涉及,因此,工程堆积体坡面泥沙来源问题需进一步研究。

REE(Rare Earth Elements),即稀土元素,其示踪原理是将 REE 示踪化合物与土壤均匀混合后布设于研究区的不同部位,使之在侵蚀过程中随泥沙一起搬运、沉积,测定泥沙样中的 REE 含量,进而分析泥沙来源和侵蚀规律^[13]。REE 示踪法是研究泥沙来源的有效方法^[14]。REE 具有植物富集有限、淋溶迁移不明显、与土壤有较高的亲和力、对环境无放射性危害、中子活化对其检测灵敏度高等特点^[13,15],使得土壤侵蚀研究更加简单、快速、精确,并且具有一次施放,多次观测的作用^[16]。近些年来,不少学者通过放水冲刷^[14]、自然降雨^[15,17-18]、模拟降雨试验^[19-21],利用 REE 示踪技术进行土壤侵蚀和泥沙来源方面的研究。田均良等^[17]在陕西安塞进行全坡面径流小区试验研究,发现坡面不同部位泥沙的沉积状况差异明显;武春龙等^[18]利用 REE 示踪技术对点穴法和条带施放法和进行对比试验,发现条带施放法优于点穴法;赵晓光^[19]、刘普灵^[22]等均通过条带法布设 REE,

对坡面不同坡位的侵蚀情况进行分析,确定主要产沙部位;还有学者^[21]对小流域模型侵蚀产沙过程进行了定量研究,发现沟道系统的侵蚀贡献率均大于坡面系统;唐泽军等^[20]基于降雨模拟试验,运用 8 种 REE 定量分析了土壤表面雨水动力特征与土壤侵蚀的动态平衡过程。然而,这些研究多集中在土壤坡面和小流域沟道,对于 REE 示踪生产建设项目工程堆积体侵蚀方面的研究鲜有报道。

鉴于此,本研究以陕西关中地区工程堆积体为研究对象,结合室内人工模拟降雨试验与 REE 示踪技术,研究不同砾石含量[0(纯土),10%,20%,30%]工

程堆积体坡面在 90 mm/h 降雨强度下不同坡位的侵蚀特征及侵蚀贡献率,阐明堆积体坡面主要泥沙来源的位置,更有针对性地布设水土流失防治措施,减少人为扰动造成的水土流失,为生产建设项目工程堆积体水土流失的防治提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验准备

1.1.1 工程堆积体 试验所用土样取自陕西省杨陵区五泉镇茂陵村周边,质地为壤土,装土前过 5 mm 筛,其机械组成见表 1。

表 1 试验土壤机械组成
Table 1 Test soil mechanical composition

粒级/mm	<0.005	0.005~0.01	0.01~0.02	0.02~0.05	0.05~0.1	0.01~0.2	0.2~0.25
占比/%	24.99	8.40	21.88	34.50	8.40	1.58	0.25

试验所用砾石为杨陵区工程建设常用的破口石,主要成分为硅质石灰岩,砾石直径 2~5 cm,呈不规则的多面体形状,硬度大,吸水渗水性小。砾石组成见表 2。

表 2 试验砾石组成
Table 2 Test gravel composition

直径/mm	2~10	10~30	30~50	>50
占比/%	29.00	51.00	18.00	2.00

按照质量分数,将试验所用土壤分别与 10%,20%,30%质量分数的砾石均匀混合,去除植物根系、铁丝等杂质,模拟野外工程堆积体。

1.1.2 REE 布设与施放 采用稀释法少量多次添加的原则^[23],将 REE 添加至工程堆积体中,混合并搅拌均匀,使 REE 与工程堆积体土壤颗粒均匀紧密结合。静置沉降 3 个月后,使用传送带将其传送堆置在侵蚀槽内。从坡顶至坡底布设的 REE 依次为上坡位(即 U 区)的铈(Ce)、中坡位(即 M 区)的镧(La)和下坡位(即 D 区)的钐(Sm)(图 1)。

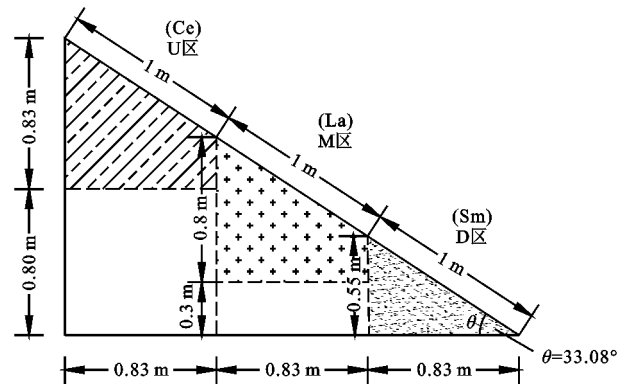


图 1 REE 布设示意图

Fig. 1 Diagram of the application of Rare Earth Elements
REE 的施放浓度如公式(1)所示^[24]:

$$C_j = K \cdot \lambda_j / R_j \tag{1}$$

式中: C_j 为第 j 种示踪元素的施放浓度(mg/kg); B_j 为第 j 种示踪元素的土壤背景值(mg/kg); λ_j 为第 j 种示踪元素施放部位相对侵蚀量的最小期望值; K 为其他因素的综合保证系数。

坡面各部位 REE 施放浓度及氧化物施放量如表 3 所示。

表 3 REE 施放浓度及氧化物施放量

Table 3 Rare earth elements application concentration and oxide application amount

REE 氧化物	元素施放浓度/ (mg · kg ⁻¹)	元素背景值/ (mg · kg ⁻¹)	稀土元素 释放量/g	纯度/%	氧化物调整 系数/%	氧化物 施放量/g
CeO ₂	1422.00	70.80	743.20	99.99	85.38	870.54
La ₂ O ₃	701.34	35.07	385.32	99.90	85.27	452.33
Sm ₂ O ₃	125.74	6.29	69.15	99.99	86.24	80.19

1.2 人工模拟降雨试验

试验于 2023 年 5—6 月在中国科学院水利部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人工模拟降雨大厅进行,降雨高度距地面 18 m,能

够满足雨滴达到终点速度,区域内喷头可调节雨强范围为 30~260 mm/h,降雨均匀度可达 95%以上。依据研究区多年降雨资料,选取关中地区典型降雨强度^[25-26] 90 mm/h,4 个砾石含量[0(纯土),10%,20%,30%],降雨

时间为 45 min。每场试验重复 2 次,共计 12 场试验。

降雨前,用防水篷布遮盖降雨槽,采用“梅花桩法”率定雨强,待降雨稳定后,迅速揭开篷布,开始降雨,从坡面产流时刻开始计时。计时开始后,前 3 min 每 1 min 取一次样,之后每隔 3 min 取一次样,记录每次取样时间和泥沙样品体积。降雨结束后,测定浑水样品质量,后静置 8~12 h,倒掉上层清液,置于烘箱内烘干,最后称量烘干样质量。将每份烘干的样品研磨细碎,过 200 目筛,称取 5~10 g 烘干样以供测试 REE 含量。整个过程严格保证样品的代表性以及相互之间无交叉污染。

1.3 REE 含量测定分析

准确称取 50 mg 烘干后的泥沙样品放入封闭溶样器内罐中,加入 1 ml 氢氟酸和 0.50 ml 硝酸,密封后放入烘箱中加热 24 h,温度控制在 $185^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。加热后进行冷却,取出内罐,置于电热板上在 130°C 的温度下加热蒸发至近干,加入 0.50 ml 硝酸继续蒸发至近干,再重复加酸,蒸干一次,以彻底赶尽氢氟酸。然后往内罐中加入 5 ml 硝酸,再次密封,置于烘箱中,在 130°C 下加热,3 h 后取出。待内罐冷却后,将溶液定量转移至容量瓶中,定容至 50 ml,摇晃均匀后取 10 ml 溶液,进行标准曲线测定后,用 ICP-MS 外标法直接测定。为保证分析精度,在每个样品在测定之前,加入 $10 \mu\text{g/L}$ 的 Rh 和 Re 元素作为内标一同测定。

1.4 数据处理与分析

各坡位示踪区的侵蚀量和相对侵蚀贡献率计算公式^[24]依次为:

$$E_j = \frac{(R_j - B_j) \times E}{C_j} \quad (2)$$

$$r_j = \frac{E_j}{E} \times 100\% \quad (3)$$

$$\sigma = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^n E_j}{E}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中: E_j 为 j 示踪区的侵蚀量(kg); R_j 为侵蚀泥沙中第 j 种 REE 的实测浓度(mg/kg); B_j 为土壤中第 j 种 REE 的背景值(mg/kg); E 表示实测侵蚀泥沙质量(kg); C_j 为第 j 种示踪元素的施放浓度(mg/kg); r_j 为侵蚀中第 j 种 REE 对总侵蚀量的贡献率(%); σ 表示各示踪区侵蚀量之和与实际总侵蚀量之比(%). 使用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析,使用 Origin 2021 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 各坡位侵蚀量

对于纯土堆积体坡面(图 2A),U 区在产流的前

6 min,侵蚀量较稳定,从第 6 分钟至结束,侵蚀量呈增大趋势;M 区侵蚀量随产流历时持续增大,第 33 分钟后增速变快,在第 42 分钟达到最大(1106.21 g);D 区侵蚀量随产流时间先增加后减小,在第 27 分钟达到峰值(1155.91 g)。对于 10%砾石含量的堆积体坡面(图 2B),U 区侵蚀量在产流后的前 3 min 内变化稳定,而后侵蚀量随产流时间呈先增加后减少再增大的变化趋势,在第 21 分钟达到最大(73.98 g);M 区侵蚀量自产流第 3 分钟起逐渐增大,在第 6 分钟达到峰值(36.65 g),之后保持稳定;D 区侵蚀量整体呈现先快速增大后逐渐减小的变化趋势,产流第 6 分钟侵蚀量达到最大(148.28 g)。对于 20%砾石含量的堆积体坡面(图 2C),U 区、M 区侵蚀量变化总体上较 D 区侵蚀量更平稳。在产流初期,U 区侵蚀量变化稳定,之后随产流时间的变化持续增加,平均增幅为 4.77%;M 区侵蚀量变化趋势与 U 区类似,也是随产流时间持续增大,在产流第 30 分钟达到峰值(113.99 g);D 区侵蚀量随产流时间的变化先增加再减小后趋于稳定,在第 27 分钟达到最大(786.32 g)。对于 30%砾石含量的堆积体坡面(图 2D),U 区、M 区、D 区侵蚀量变化一致,均随产流历时的变化持续增加,分别在产流第 45 分钟,39 分钟,39 分钟达到最大,最大侵蚀量分别是 94.05 g , 165.14 g , 352.80 g 。

整体来看,除了 10%砾石含量的堆积体,其他砾石含量的堆积体坡面各坡位侵蚀量均表现为 U 区 < M 区 < D 区。M 区侵蚀量是 U 区的 1.27~5.68 倍,D 区侵蚀量是 U 区的 2.14~8.55 倍。10%砾石含量的堆积体坡面各坡位侵蚀量表现为 M 区 < U 区 < D 区,U 区、D 区侵蚀量分别为 M 区的 2.08 倍、3.99 倍。10%砾石含量堆积体各坡位侵蚀量表现为 M 区 < U 区 < D 区,D 区侵蚀量分别为 U 区、M 区的 1.92 倍、3.99 倍。

2.2 相对贡献率的变化特征

对于纯土堆积体坡面(图 3A),U 区贡献率随产流历时从 17.27%下降至 3.91%后趋于稳定;M 区贡献率随产流历时先增大后减小再增大,自第 36 分钟增幅变大,在第 45 分钟达到最大(29.93%);D 区贡献率呈“增大—减小—增大—减小”的变化趋势,在产流的第 36 分钟达到峰值(89.39%)。对于 10%砾石含量的堆积体坡面(图 3B),U 区贡献率随产流历时逐渐增大,自 39 min 后趋于稳定,在第 42 分钟出现峰值(27.23%);M 区贡献率在 0~18 min 内逐渐减小,随着产流历时的延长,贡献率逐渐增加,30 min 后贡献率又开始减小;D 区贡献率在产流前 3 min 减小,在 6~30 min 逐渐增加,第 30 分钟时达到最大(50.03%)后又逐渐减小。对于 20%砾石含量的堆积体

坡面(图 3C),U区贡献率随产流历时先减小后增大,在第 27 分钟最小(4.86%);M区贡献率的变化趋势总体上与 M区类似,在第 21 分钟的贡献率最小(13.25%);D区贡献率变化与 U区、M区相反,整体呈现先增加后减小的变化趋势,第 21 分钟达到最大(75.29%)。对于

30%砾石含量的堆积体坡面(图 3D),U区、M区和 D区的贡献率随产流历时均呈现先增大后减小的变化趋势,U区在第 18 分钟达到峰值(27.01%),M区在第 21 分钟达到最大(32.29%),D区贡献率在第 6 分钟最大(76.40%),变化趋势比较平稳。

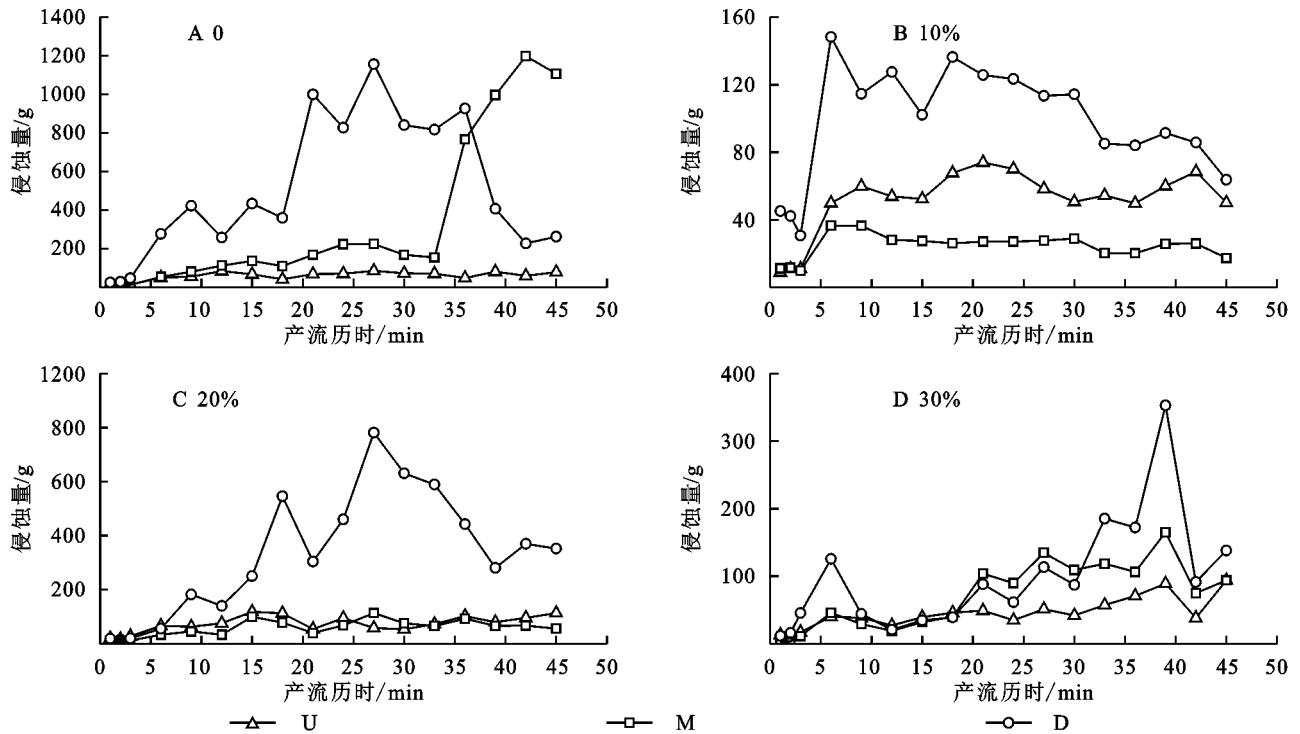


图 2 不同砾石含量条件下各坡位侵蚀量随产流历时的变化

Fig. 2 The variation in erosion magnitude at each slope position with the duration of flow generation under different gravel content conditions

总体而言,各砾石含量的堆积体坡面,D区侵蚀贡献率大于U区和M区,D区为坡面泥沙的主要来源,但U区和M区贡献率变化较D区更稳定。对于纯土堆积体坡面,M区、D区的侵蚀贡献率分别为U区的1.91倍、11.28倍;对于含砾石的堆积体坡面,M区的侵蚀贡献率是U区的1.06~1.35倍,D区的侵蚀贡献率是U区的1.97~3.78倍。纯土堆积体坡面D区的侵蚀贡献率分别为10%、20%、30%砾石含量堆积体的1.66倍、1.27倍、1.20倍。

2.3 砾石含量对各坡位侵蚀量和侵蚀贡献率的影响

就侵蚀量而言(图 4A),U区中,10%砾石含量堆积体坡面的侵蚀量显著大于20%和30%砾石含量堆积体;在M区,纯土堆积体坡面的侵蚀量显著大于含砾石堆积体坡面;D区中,纯土堆积体坡面的侵蚀量显著大于10%、20%、30%砾石含量堆积体坡面。综合来看,在U区,20%砾石含量堆积体坡面侵蚀量最大,而在M区和D区,纯土堆积体坡面的侵蚀量最大。

不同砾石含量堆积体各坡位的平均贡献率存在

差异(图 4B)。在U区,纯土堆积体坡面的平均贡献率显著小于含砾石堆积体坡面,10%砾石含量堆积体坡面的平均贡献率显著大于20%和30%砾石含量堆积体;M区中,纯土堆积体坡面的平均侵蚀贡献率显著小于含砾石堆积体坡面;D区中,纯土堆积体坡面的平均侵蚀贡献率显著大于含砾石堆积体,在含砾石堆积体中,10%砾石含量堆积体坡面的平均贡献率显著小于20%和30%砾石含量堆积体。总体来看,纯土堆积体坡面在U区和D区的平均贡献率表现与10%砾石含量堆积体坡面相反。

综上,含砾石堆积体坡面M区和D区的侵蚀量显著小于纯土堆积体;含砾石堆积体坡面U区和M区的平均侵蚀贡献率显著大于纯土堆积体坡面,D区平均侵蚀贡献率显著小于纯土堆积体坡面。20%砾石含量堆积体坡面U区的侵蚀量显著大于其他砾石含量堆积体,纯土堆积体M区和D区的侵蚀量显著大于含砾石堆积体。砾石含量对D区侵蚀量的影响显著大于U区和M区($p < 0.05$),对U区和D区侵蚀贡献率的影响较M区更显著($p < 0.05$)。

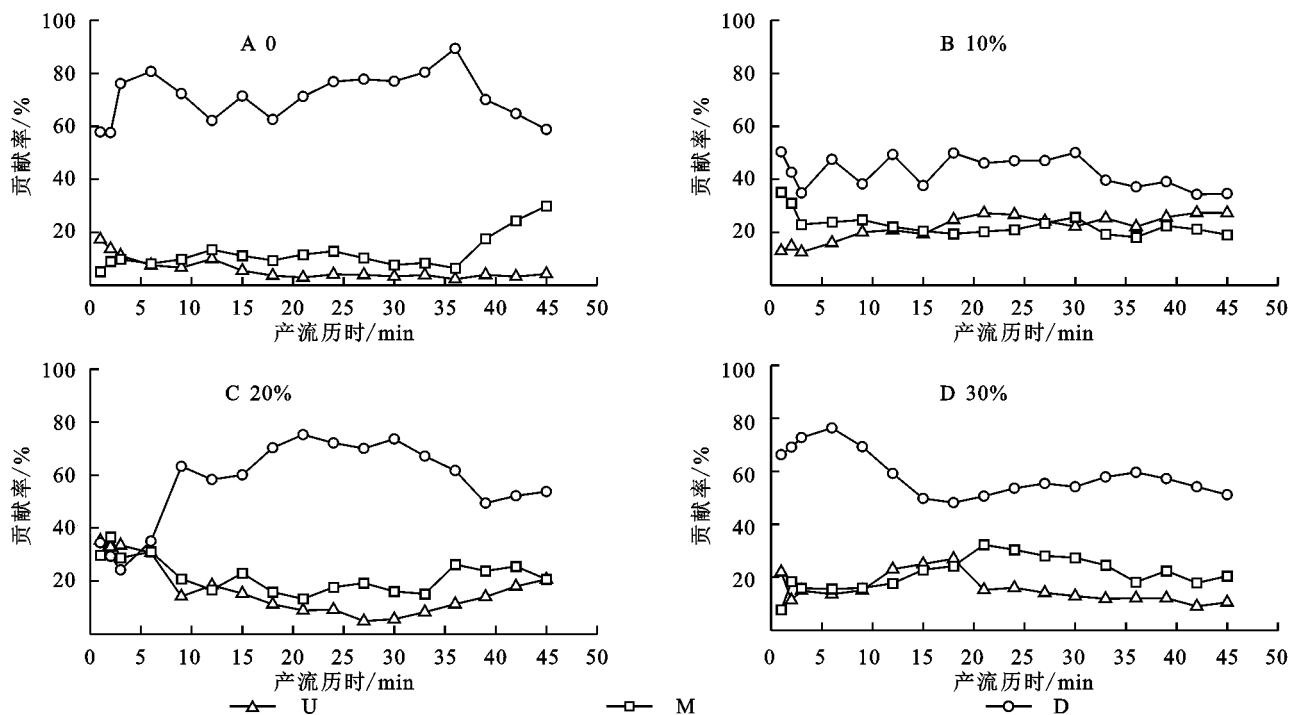


图 3 不同砾石含量条件下各坡位侵蚀贡献率随产流历时的变化

Fig. 3 The variation of the contribution rate of slope erosion with the duration of flow generation under different gravel content conditions

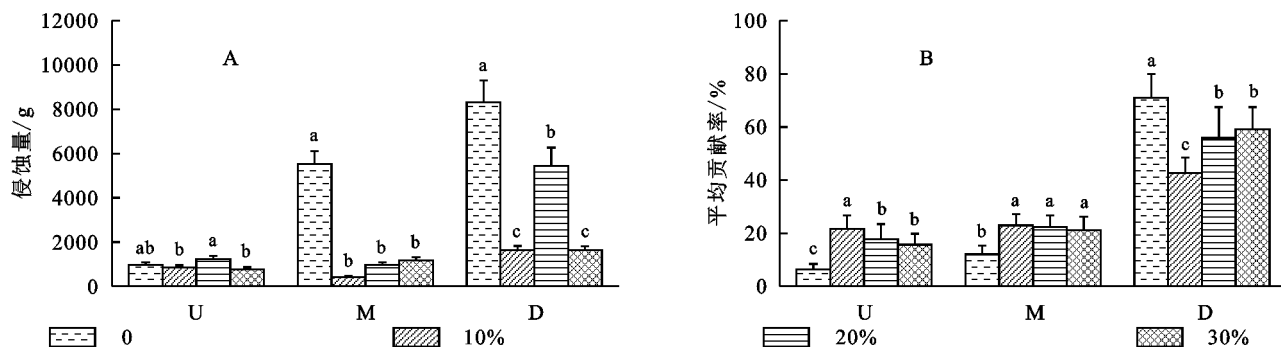


图 4 不同砾石含量条件下各坡位侵蚀量与平均贡献率的差异

Fig. 4 The disparity in erosion magnitude and mean contribution rate of slope position under varying gravel content conditions

3 讨论

3.1 试验精度

通过 REE 示踪法计算得到不同砾石含量[0(纯土), 10%, 20%, 30%]工程堆积体坡面的总侵蚀量, 与实测侵蚀量相比, 误差在 5.26%~27.59% 之间(表 4), 平均误差为 16.06%, 略大于王宁等在荒坡地的研究结果^[27], 小于肖海等在小流域的研究结果^[22]。这是由于不同土壤的细颗粒含量不同, 细颗粒土壤与粗颗粒土壤对于 REE 的吸附能力也存在差异^[28]。此外, 试验误差与坡度、坡长、降雨时间、降雨均匀度等因素也有关^[22, 27]。本研究基于室内模拟降雨试验, 坡长设计较短, 未进行野外试验, 今后应结合野外试验, 改进坡长。本试验中, 含砾石工程堆积体坡面的平均误差为 17.29%, 略大于纯土坡面(12.38%), 说

明砾石会影响 REE 示踪精度, 但影响较小(4.91%)。这是由于砾石覆盖土壤, 增大了土壤的孔隙度, 促进降雨入渗, 减少径流^[29], 少量 REE 附着在砾石表面, 未与土壤充分结合, 影响试验精度。

表 4 不同砾石含量堆积体 REE 示踪误差分析

Table 4 Rare Earth Elements tracer error analysis of deposits with different gravel content

降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	砾石 含量/%	实际 侵蚀量/kg	计算 侵蚀量/kg	误差/%
90	0	17.05±1.38	14.93±1.18	12.38±1.50
	10	3.70±0.16	2.85±0.16	21.76±0.97
	20	9.34±0.30	8.22±0.41	8.72±2.64
	30	5.16±0.18	4.13±0.42	20.20±5.47

3.2 砾石含量对坡面泥沙来源的影响

除了 10% 砾石含量的堆积体, 其他砾石含量堆积体坡面各坡位的侵蚀量和侵蚀贡献率均表现为 U

区<M区<D区,下坡位的侵蚀量和侵蚀贡献率最大,侵蚀最为强烈,下坡位为坡面侵蚀的主要贡献来源。这与薛亚洲等^[29]在黄土坡面的试验结果相似,黄土坡面的坡度一般为 $15^{\circ}\sim 27.8^{\circ}$ ^[30-31]。王宁等^[27]在吉林永吉试验小区的研究结果表明,坡面中部侵蚀量最大,坡中次之,坡下最小,这与本研究结果存在差异。这主要是由于永吉试验小区坡度 10° 以下^[26],而本试验的坡度为 33° ,两者相差甚大。较大的坡度增加了径流与泥沙往坡下输移的速率,从而增加了径流对下坡面的冲刷,而在缓坡中,径流与泥沙往下坡运移的速率变化较小,降雨对各坡位的侵蚀较均匀^[32]。10%砾石含量的堆积体坡面,下坡位侵蚀量最大,中坡位最小。这是由于堆积过程中,砾石覆盖不均匀,中坡位表层砾石覆盖较多,土壤表面表砾石覆盖会减少土壤可蚀性,使得侵蚀减弱^[33],侵蚀量小于上坡位和下坡位。此外,纯土堆积体下坡位的平均贡献率显著大于含砾石的堆积体,这是因为含砾石堆积体表层覆盖砾石,砾石减缓了雨滴的打击作用,降低了径流输移能力^[34-35],而纯土坡面无砾石覆盖,径流输移能力较强,下坡位侵蚀更强烈。10%砾石含量堆积体坡面各坡位的侵蚀贡献率变化较其他砾石含量的堆积体坡面更稳定,这是因为砾石会影响坡面产流产沙^[20],砾石质量分数对径流的影响存在阈值,径流强度在10%砾石含量下最小^[12],使得总侵蚀量最小。

4 结论

(1) 不同砾石含量堆积体各坡位侵蚀量均为下坡位最大,同时下坡位平均侵蚀贡献率(57.40%)大于上坡位和中坡位,表明下坡位是坡面泥沙的主要来源。

(2) 含砾石堆积体坡面中坡位和下坡位的侵蚀量显著小于纯土堆积体。含砾石堆积体坡面上坡位和中坡位的侵蚀贡献率显著大于纯土堆积体坡面,下坡位侵蚀贡献率显著小于纯土堆积体坡面。

(3) 砾石含量对下坡位侵蚀量和贡献率的影响更显著($p<0.05$)。含砾石堆积体中,20%砾石含量堆积体坡面上坡位和下坡位的侵蚀量显著大于10%,30%砾石含量堆积体。10%砾石含量堆积体坡面上坡位侵蚀贡献率显著大于20%,30%砾石含量堆积体坡面,下坡位侵蚀贡献率显著小于20%,30%砾石含量堆积体坡面。

参考文献(References):

- [1] 邹小阳,周旺,孙文俊,等.工程堆积体土壤侵蚀影响因素国内研究进展[J].东北农业科学,2021,46(1):57-61.
Zou X Y, Zhou W, Sun W J, et al. Research progress on influencing factors of soil erosion of engineering accumulation body in China[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2021,46(1):57-61.
- [2] 刘衡秋,胡瑞林.大型复杂松散堆积体形成机制的内外动力耦合作用初探[J].工程地质学报,2008,16(3):291-297.
Liu H Q, Hu R L. Coupling of earth's endogenic and exogenic geological processes on formation mechanism of large-scale loose complex quaternary deposits in western China[J]. Journal of Engineering Geology, 2008,16(3):291-297.
- [3] 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.
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.
- [4] 吕俊容,张文博,胡锦昇,等.连续降雨下不同砾石含量工程堆积体土壤侵蚀[J].水科学进展,2019,30(2):210-219.
Lyu J R, Zhang W B, Hu J S, et al. Effects of rock fragment content on erosion characteristics of spoil heaps under multiple rainfall events[J]. Advances in Water Science, 2019,30(2):210-219.
- [5] 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, 2012,151/152:234-242.
- [6] 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.
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.
- [7] 李瑞栋,王文龙,姜义宝,等.模拟降雨条件下砾石含量对壤土工程堆积体坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2022,33(11):3027-3036.
Li R D, Wang W L, Lou Y B, et al. Effects of gravel content on runoff and sediment yield on Lou soil engineering accumulation slopes under simulated rainfall conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(11):3027-3036.
- [8] 张文博,吕俊容,谢永生,等.不同形态工程堆积体产流产沙对比研究[J].水土保持学报,2020,34(3):49-54.
Zhang W B, Lü J R, Xie Y S, et al. Comparative study on runoff and sediment yielding in different morphological engineering accumulations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(3):49-54.
- [9] 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.

- 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.
- [10] 戎玉博,白玉洁,王森,等.含砾石锥状工程堆积体坡面径流侵蚀特征[J].*水土保持学报*, 2018, 32(1):109-115.
- Rong Y B, Bai Y J, Wang S, et al. Characteristics of slope runoff erosion on the cone shaped engineering accumulation with gravel[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1):109-115.
- [11] 王雪松,谢永生,陈曦,等.模拟降雨条件下工程堆积体产流产沙特征研究[J].*泥沙研究*, 2015(4):74-80.
- Wang X S, Xie Y S, Chen X, et al. Study on runoff and sediment yield of a spoil pile under simulated rainfall condition[J]. *Journal of Sediment Research*, 2015(4):74-80.
- [12] 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.
- [13] 汤振权,刘刚,许文年.稀土元素示踪技术及其在土壤侵蚀研究中的应用[J].*中国稀土学报*, 2011, 29(5):515-522.
- Tang Z Q, Liu G, Xu W N. REE tracing method and application in soil erosion[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2011, 29(5):515-522.
- [14] 王瑄,李占斌,尚佰晓.利用REE示踪法分析坡面放水冲刷的侵蚀过程[J].*沈阳农业大学学报*, 2008, 39(2):218-222.
- Wang X, Li Z B, Shang B X. Soil erosion process of the slope scouring with REE tracer method[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2008, 39(2):218-222.
- [15] Zhu M Y, Tan S D, Dang H S, et al. Rare earth elements tracing the soil erosion processes on slope surface under natural rainfall[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2011, 102(12):1078-1084.
- [16] Zhang X C, Friedrich J M, Nearing M A, et al. Potential use of Rare Earth Oxides as Tracers for Soil Erosion and Aggregation Studies[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(5):1508-1515.
- [17] 田均良.侵蚀泥沙坡面沉积研究初报[J].*水土保持研究*, 1997, 4(2):57-63.
- Tian J L. A primary report for a study on deposition of erosion sediments on slope[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1997, 4(2):57-63.
- [18] 武春龙,刘普灵,郑世清,等.坡面土壤侵蚀垂直分布定量分析研究[J].*水土保持研究*, 1997, 4(2):34-40.
- Wu C L, Liu P L, Zheng S Q, et al. Study on vertical distribution of soil erosion on loess slope[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1997, 4(2):34-40.
- [19] 赵晓光,石辉.用稀土元素示踪方法研究裸露坡面沿程侵蚀与沉积[J].*林业科学*, 2003, 39(2):98-101.
- Zhao X G, Shi H. Study on erosion and sediment along the bare sloping surface with ree method[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(2):98-101.
- [20] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等.稀土元素(REE)示踪土壤侵蚀动态过程的降雨模拟试验研究[J].*农业工程学报*, 2006, 22(3):32-35.
- Tang Z J, Lei T W, Zhang Q W, et al. Rain simulation of dynamic soil erosion processes with rare earth element tracers[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(3):32-35.
- [21] 肖海,刘刚,许文年,等.利用稀土元素示踪三峡库区小流域模型泥沙来源[J].*水土保持学报*, 2014, 28(1):47-52.
- Xiao H, Liu G, Xu W N, et al. Using REE to trace sediment source from simulated watershed in Three Gorges Reservoir region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):47-52.
- [22] 刘普灵,田均良,周佩华,等.土壤侵蚀稀土元素示踪法实验研究[J].*稀土*, 2001, 22(2):37-40.
- Liu P L, Tian J L, Zhou P H, et al. Experimental study on soil erosion by stable rare earth element tracer method[J]. *Chinese Rare Earths*, 2001, 22(2):37-40.
- [23] 董亮.基于REE示踪法的露天煤矿排土场土壤侵蚀过程研究[D].阜新:辽宁工程技术大学, 2020.
- Dong L. A Study on Soil Erosion Process in Open-Pit Coal Mine Dump Based on REE Trace Method[D]. Fuxin, Liaoning: Liaoning Technical University, 2020.
- [24] 李雅琦,吴普特,刘普灵,等.REE示踪法研究土壤侵蚀的室内模拟试验[J].*水土保持研究*, 1997, 4(2):26-33.
- Li Y Q, Wu P T, Liu P L, et al. Simulation experiments to study soil erosion by REE tracer method[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1997, 4(2):26-33.
- [25] Fang H Y, Sun L Y, Tang Z H. Effects of rainfall and slope on runoff, soil erosion and rill development: An experimental study using two loess soils[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(11):2649-2658.
- [26] Lv J R, Luo H, Xie Y S. 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.
- [27] 王宁,杨春雨,张刚,等.黑土区土壤侵蚀的REE示踪法研究[J].*地理科学*, 2008, 28(4):565-570.
- Wang N, Yang C Y, Zhang G, et al. Soil erosion of soil REE tracer study[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(4):565-570.
- [28] Kimoto A, Nearing M A, Zhang X C, et al. Applicability of rare earth element oxides as a sediment tracer for coarse-textured soils[J]. *Catena*, 2006, 65(3):214-221.

- [29] 余海龙,黄菊莹.砂田砾石覆盖对土壤大孔隙特征及其土壤水文过程的影响研究进展[J].水土保持研究,2012,19(4):284-288.
Yu H L, Huang J Y. Research progress on influence of mulching gravel and sand on soil macropore characteristics and soil hydrological process of gravel-sand mulch field[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012,19(4):284-288.
- [30] 薛亚洲,刘普灵,杨明义,等.REE示踪研究坡面侵蚀时空演变过程[J].中国稀土学报,2004,22(5):698-703.
Xue Y Z, Liu P L, Yang M Y, et al. Using rare earth element as tracers for studying spatial and temporal process of soil erosion in sloping land[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2004,22(5):698-703.
- [31] Liu P L, Tian J L, Zhou P H, et al. Stable rare earth element tracers to evaluate soil erosion[J]. Soil and Tillage Research, 2004,76(2):147-155.
- [32] 魏天兴,朱金兆,黄土残塬沟壑区坡度和坡长对土壤侵蚀的影响分析[J].北京林业大学学报,2002,24(1):59-62.
Wei T X, Zhu J Z. Effects of slope length and grade on soil erosion in the Gully Regions in Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002,24(1):59-62.
- [33] 杨苗苗,杨勤科,张科利,等.砾石含量对土壤可蚀性因子估算的影响[J].土壤学报,2021,58(5):1157-1168.
Yang M M, Yang Q K, Zhang K L, et al. Effects of content of soil rock fragments on calculating of soil erodibility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021,58(5):1157-1168.
- [34] 马晨雷,戴翠婷,刘窑军,等.砾石覆盖对紫色土坡面流水动力学参数的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):150-155,161.
Ma C L, Dai C T, Liu Y J, et al. Effects of gravel covering on hydraulic characteristics of slope flow on purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(6):150-155,161.
- [35] 周蓓蓓,邵明安.不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J].土壤学报,2007,44(5):801-807.
Zhou B B, Shao M A. Effect of content and size of rock detritus on infiltration [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007,44(5):801-807.
- ~~~~~
- (上接第8页)
- [15] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等.黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征[J].生态学报,2006,26(3):647-654.
Lian G, Guo X D, Fu B J, et al. Spatial variability of bulk density and soil water in a small catchment of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(3):647-654.
- [16] 李国会.晋西黄土区农田水土流失防治措施水土保持效应研究[D].北京:中国林业科学研究院,2013.
Li G H. Study on soil and water conservation effect of agricultural land soil and water loss prevention measures of Loess Plateau in western Shanxi[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [17] 肖培青,郑粉莉.上方来水来沙对细沟侵蚀产沙过程的影响[J].水土保持通报,2001,21(1):23-25,38.
Xiao P Q, Zheng F L. Effect of run-on water and sediment on rill erosion process at down-slope section[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001,21(1):23-25,38.
- [18] 王颖霖,焦菊英,唐柄哲,等.陕北子洲“7·26”暴雨后坡耕地细沟侵蚀及其影响因素分析[J].农业工程学报,2019,35(11):122-130.
Wang H L, Jiao J Y, Tang B Z, et al. Characteristics of rill erosion and its influencing factors in slope farm-land after“7·26”rainstorm in Zizhou County, Shaanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(11):122-130.
- [19] 王楠,陈一先,白雷超,等.陕北子洲县“7·26”特大暴雨引发的小流域土壤侵蚀调查[J].水土保持通报,2017,37(4):338-344,347-348.
Wang N, Chen Y X, Bai L C, et al. Investigation on soil erosion in small watersheds under “7·26” extreme rainstorm in Zizhou County, northern Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(4):338-344,347-348.
- [20] 王志强,杨萌,张岩,等.暴雨条件下黄土高原长陡坡耕地细沟侵蚀特征[J].农业工程学报,2020,36(12):129-135.
Wang Z Q, Yang M, Zhang Y, et al. Rill erosion of long and steep cropland on the Loess Plateau under heavy rainstorm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(12):129-135.
- [21] 从辰宇,韩剑桥,焦菊英,等.台风“利奇马”暴雨引发的土壤侵蚀调查研究:以山东省临朐县为例[J].水土保持通报,2019,39(5):337-344,349.
Cong C Y, Han J Q, Jiao J Y, et al. Investigation on soil erosion from Typhoon Lekima rainstorm: A case study in Linqu County, Shandong Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(5):337-344,349.