

高寒区不同植被恢复年限矿山排土场边坡产流产沙特征

刘亚斌^{1,2}, 庞景豪¹, 梁 燊¹, 余冬梅³, 史兴萍⁴,
李国荣^{1,2}, 缪晓星⁵, 王延秀⁵, 朱海丽^{1,2}, 胡夏嵩^{1,2}

(1.青海大学 地质工程系, 青海 西宁 810016; 2.青藏高原北缘新生代
资源环境重点实验室, 青海 西宁 810016; 3.中国科学院 青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008;
4.青海威斯特铜业有限责任公司, 青海 果洛 814000; 5.青海省水土保持中心, 青海 西宁 810001)

摘要: [目的] 分析高寒金属矿山不同植被恢复年限排土场边坡坡面产流产沙特征,为排土场人工植被恢复和水土保持工作高效合理地开展提供科学依据。[方法] 以青海省果洛藏族自治州德尔尼铜矿恢复期为2~15 a范围内的7个矿山排土场边坡为研究对象,通过模拟降雨试验获取不同恢复年限排土场坡面产流产沙和径流水动力学特征指标,并进一步分析坡面产流产沙特征和径流水动力学特征的影响因素。[结果] 研究区排土场坡面产流产沙过程相对复杂,随机性强,不同恢复年限排土场坡面单位面积产流率和产沙率随降雨历时的变化规律存在较大的差异。排土场边坡坡面单位面积累积产流量与恢复年限之间不存在显著性关系;单位面积累积产沙量和侵蚀泥沙平均体积直径随着恢复年限的增大均呈逐渐降低趋势,且侵蚀泥沙平均体积直径与恢复年限呈显著性幂函数关系($p < 0.05$);随着恢复年限的增大产流时间呈线性函数增大趋势($p < 0.05$)。各恢复年限排土场边坡径流流态以层流为主,且均属于缓流。随着恢复年限的逐渐增大,坡面径流雷诺数和径流剪切力呈显著性的指数函数降低和线性函数降低趋势($p < 0.05$);而径流流速和弗劳德数与恢复年限未体现出显著性的函数关系。总体而言,随着恢复年限的增长,排土场坡面径流冲刷和挟沙能力降低。不同恢复年限排土场边坡坡面单位面积累积产沙量、径流速度和雷诺数与坡度呈显著性高度正相关关系($p < 0.05$)。[结论] 高寒矿区排土场经人工植被恢复后,坡面抗侵蚀能力随恢复年限的增长呈向好趋势;植被未完全返青的情况下,坡度对坡面产流产沙特征和径流水动力学特征的影响程度高于植被覆盖度。

关键词: 高寒金属矿山; 排土场; 产流产沙特征; 径流水动力学特征; 水土保持

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0001-11

中图分类号: TU43, S157.1

文献参数: 刘亚斌, 庞景豪, 梁燊, 等.高寒区不同植被恢复年限矿山排土场边坡产流产沙特征[J].水土保持通报, 2024, 44(4): 1-11. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.001; Liu Yabin, Pang Jinghao, Liang Shen, et al. Characteristics of runoff and sediment production on mine dump slopes with different recovery periods in alpine regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 1-11.

Characteristics of Runoff and Sediment Production on Mine Dump Slopes with Different Recovery Periods in Alpine Regions

Liu Yabin^{1,2}, Pang Jinghao¹, Liang Shen¹, Yu Dongmei³,

Shi Xingping⁴, Li Guorong^{1,2}, Miao Xiaoxing⁵, Wang Yanxiu⁵, Zhu Haili^{1,2}, Hu Xiasong^{1,2}

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai

810016, China; 2. Key Laboratory of Cenozoic Resources and Environment on the Northern

Edge of the Qinghai-Tibet Plateau, Xining, Qinghai 810016, China; 3. Qinghai Salt Lake Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China; 4. Qinghai West Copper Industry Co., Ltd., Guoluo, Qinghai 814000, China; 5. Qinghai Soil and Water Conservation Research Center, Xining, Qinghai 810001, China)

收稿日期: 2024-01-30

修回日期: 2024-04-03

资助项目: 青海省自然科学基金项目“高寒矿山排土场边坡人工恢复植被演替规律及其护坡效应评价: 以果洛德尔尼铜矿为例”(2021-ZJ-956Q)

第一作者: 刘亚斌(1987—), 男(汉族), 青海省西宁市人, 博士, 副教授, 主要从事生态工程地质等方面的研究。Email: liuyabincug@163.com。

Abstract: [Objective] The characteristics of runoff and sediment production on the slopes of mine dumps with different recovery periods in alpine regions were analyzed in order to provide scientific basis for the efficient and rational restoration of vegetation, as well as for improving the soil and water conservation efforts, on such mine dumps. [Methods] Seven dumps of the Delni copper mine in Machin County, Guoluo Xizang Autonomous Prefecture, Qinghai Province, with recovery periods ranging from 2 to 15 years, were selected as the research subjects. Runoff, sediment, and hydrodynamic characteristics of dump slopes with different recovery periods were determined through simulated rainfall tests, and their influencing factors were analysed. [Results] The runoff and sediment yield of the dump slopes in the study area were relatively complex and random. Large variations were observed in runoff and sediment yield per unit area with rainfall duration in the different recovery years. No significant relationship was observed between the cumulative runoff per unit area of dump slope and recovery period. The cumulative sediment per unit area and average volume diameter of the eroded sediment decreased with increasing recovery period. A significant power function relationship was observed between the average volume diameter of the eroded sediment and recovery period ($p < 0.05$). The runoff generation period increased linearly with the recovery period ($p < 0.05$). Laminar flow was the main runoff flow pattern at the dump slopes each year, and all patterns demonstrated tranquil flow. The Reynolds number and flow shear stress of runoff showed significant exponential and linear decreases, respectively, with an increase in the recovery period ($p < 0.05$). No significant relationship was observed between the velocity and Froude number during the runoff and recovery periods. With increasing recovery period, the erosion and sediment-carrying capacity of runoff on the dump slope decreased. Significant positive correlations ($p < 0.05$) were observed between the slope gradient and cumulative sediment per unit area, runoff velocity, and Reynolds number of the dump slope. [Conclusion] When applied to artificial vegetation restoration, the anti-erosion ability of dump slopes in alpine regions showed a positive trend with increasing recovery years. When vegetation regreening was incomplete, the impact of the slope gradient on runoff and sediment production characteristics, including the hydrodynamic characteristics, outweighed that of vegetation coverage.

Keywords: alpine metal mines; dump; characteristics of runoff and sediment; hydrodynamic characteristics of runoff; soil and water conservation

青藏高原矿产资源丰富,但是在矿产资源开发利用产生经济效益的同时,会产生巨大的环境破坏,严重威胁到了青藏高原地区的生态和经济发展^[1-2]。因此,如何协调好生态环境保护与矿产资源开发之间的矛盾,是区域内矿产开发行业所需面对的重大挑战^[2]。排土场是矿山采矿排弃物集中排放的场所^[3]。随着矿山持续开采,排土场散体岩石物料堆积高度不断增加,排土容积越来越大,在自然条件和外荷载作用下,排土场水土流失、滑坡、泥石流等环境地质问题突出,是矿区自然环境和安全生产的严重威胁^[4-5]。因此,排土场稳定性和生态恢复是国内外学者和矿山工作者关注的重点问题。青藏高原是风力侵蚀、水力侵蚀、冻融侵蚀交替作用最为严重的地区之一^[6],因此排土场生态恢复和水土保持一直以来是区内矿山生态恢复的核心工作。目前,高寒矿山排土场生态恢复有赖于植被措施^[7-8]。由于高寒地区气候恶劣、排

土场表层土壤极度贫瘠,因此通过自然恢复的方法难以在短期内实现排土场生态恢复的目的,故高寒矿区生态恢复工作主要采用人工植被恢复措施^[7]。

在人工植被恢复初期,排土场植被群落格局主要受人工建植的影响^[7,9]。人工植被恢复能够在短期内实现地表植被覆盖^[9],并通过植物地上部分水文效应和根系力学效应两方面作用起到固土护坡的效果,对排土场水土保持具有积极的作用^[10-12]。然而,随着植物演替的进行,伴随着植物的生长和自然侵入,排土场植被群落的物种组成与结构会发生改变^[7,9],并造成排土场边坡坡面产流产沙特征发生动态变化,从而影响排土场水土流失特征^[13]。因此,明确矿山排土场边坡坡面产流产沙动态变化趋势和坡面产流产沙特征影响因素,对于揭示高寒矿区排土场植被恢复过程中的水土流失机制,评价排土场植被恢复措施有效性和合理性至关重要。然而,目前有关高寒区不同

植被恢复年限矿山排土场边坡产流产沙特征及其影响因素方面的研究还鲜有见诸报道,难以为该区域矿山排土场植被恢复和水土保持工作高效合理地开展提供科学依据。基于此,本研究以位于青海省果洛藏族自治州玛沁县的德尔尼铜矿恢复期为 2~15 a 的排土场为研究对象,以空间代替时间的方法开展研究。通过原位人工降雨试验,在明确坡面产流产沙过程的基础上,以坡面单位面积累积产流量、单位面积累积产沙量、产流时间和侵蚀泥沙平均体积直径 4 个产流产沙特征指标,以及径流流速、雷诺数、弗劳德数和径流剪切力 4 个坡面径流水动力学特征指标为定量评价指标,评价和分析了不同恢复年限排土场边坡坡面产流产沙特征和径流水动力学特征,及其与地表覆盖度和坡度的关系。该项研究对揭示高寒矿区排土场植被恢复过程中的水土流失机制,以及对优化矿山排土场植被恢复工艺和可持续经营管理具有重要意义。

1 研究区概况

德尔尼铜矿位于青海省果洛藏族自治州玛沁县大武镇辖区内,地处青藏高原东北部。矿区属于高原大陆性气候,矿区海拔 3783.5~4 783.5 m,年平均气温 $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 733 mm,年平均蒸发量 1 103 mm^[14]。自 2007 年起,矿山逐年开展排土场人工植被恢复,植物种植方式以覆土撒播为主,植物选择为垂穗披碱草和冷地早熟禾^[15]。排土场边坡土体覆土来源主要为矿山开采过程中剥离贮存的原生土壤,覆土厚度设计为 10 cm^[14-15]。截至 2022 年,矿区已连续 15 a 开展排土场人工植被恢复工作。

2 试验设计与方法

该项研究于 2022 年 7 月在德尔尼矿区选取坡度和坡向相近似,且恢复期分别为 2, 3, 5, 6, 10, 13 和 15 a 共 7 个排土场边坡开展了原位模拟降雨试验,不同恢复年限排土场边坡基本信息如表 1 所示。模拟降雨试验径流小区尺寸为 1.4 m×1.0 m(长×宽),长边与边坡倾向平行。径流小区底部为自行加工设计的集流槽,两侧和顶部则由木板圈闭,木板地上高 15 cm,嵌入地下 10 cm。受现场便道布局和供水距离所限,且为了尽可能使试验结果具有代表性,径流小区均设置在每个边坡中上部位置,集流槽下部接水口距坡顶统一为 5.0 m。采用自行设计的试验设备进行模拟降雨试验(图 1)。

原位模拟降雨试验设备由汽油动力自吸水泵、塑料蓄水桶(100 L)、水管(PE 管)、金属降雨管架、压力表和喷头(直径 4 mm,喷射角度 120°)组成,设备对野外条件适应性强,可在 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 斜坡进行原位降雨试验。降雨设备通过管路水压力控制降雨强度,工作压力范围为 0.02~0.16 MPa,理论降雨强度范围为 68.8~311.7 mm/h。根据文献统计^[16],2005 年以来,玛沁县汛期最大小时降雨强度为 83.6 mm/h,降雨量为 45.4 mm,故本研究设定在各模拟降雨试验径流小区,降雨强度统一为 90 mm/h,径流产生后降雨时间为 27 min。根据前期多次预试验,确定管路压力控制在 70 kPa 时,降雨强度可达到 90 mm/h,且对应的降雨半径和均匀系数分别为 2.5 m 和 87%。

表 1 德尔尼矿区不同恢复年限排土场基本信息

Table 1 Basic information of mine dumps with different recovery periods in Delni Copper mine

排土场恢复年份	排土场恢复年限/a	坡度/($^{\circ}$)	坡向/($^{\circ}$)	海拔/m	坐标
2020	2	34.0±2.2	313	4 194.00	34°22'59"N,100°7'15"E
2019	3	36.2±3.4	72	4 238.00	34°23'18"N,100°7'5"E
2017	5	37.8±2.7	30	4 400.00	34°23'19"N,100°7'53"E
2016	6	30.7±4.7	10	4 136.00	34°22'58"N,100°7'42"E
2012	10	29.7±4.6	22	4 050.00	34°22'36"N,100°7'35"E
2009	13	31.3±4.1	33	4 070.00	34°22'38"N,100°7'46"E
2007	15	31.5	301	4 053.00	34°22'31"N,100°7'46"E

该项研究采用单位面积累积产流量、单位面积累积产沙量、产流时间和侵蚀泥沙平均体积直径^[17-21] 4 个参数表征产流产沙特征。坡面径流水动力学特征指标采用雷诺数、弗劳德数、径流流速和径流剪切力^[17]。植被覆盖度采用样方法进行统计(未计入苔

藓面积)。模拟降雨试验过程中,待管路压力稳定时,将降雨管架移入试验小区,同时开始计时,待径流流入集流槽时记录产流时间,并以 3 min 为时间间隔,收集不同降雨时间段的产流产沙量。径流产生后 10 min 时,采用高锰酸钾作为染色剂示踪法进行径

流流速测量。径流流速测量时,染色剂自径流小区上部距离集流槽 1 m 断面位置处释放,且在断面左、中、右位置分别测定一次径流表层流速,修正后的径流表层流速即为径流流速,以断面左、中、右位置测得的 3 个径流流速平均值作为径流小区径流流速。与此同时,测量坡度和水温,采用直尺测量径流深度,待试验完成后计算雷诺数和弗劳德数。模拟降雨结束后将收集到的每个时间段的泥水混合样品带回实验室称重后,将泥水混合物放置到烘箱中在 105 °C 条件下烘干。称量获得泥沙重量后得到单位面积产沙率和单位面积累积产沙量,再进一步获得单位面积产流率和单位面积累积产流量。最后计算出径流剪切力。使用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测定不同时间段侵蚀泥沙粒径分布,以得出侵蚀泥沙平均体积直径。

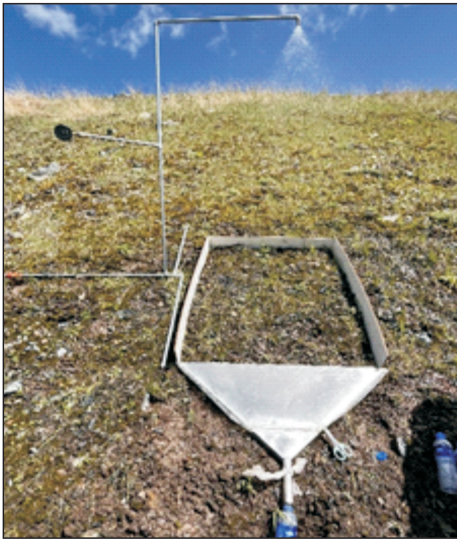


图 1 模拟降雨试验现场示意图

Fig.1 Schematic diagram of simulated rainfall test

地表径流水动力参数计算公式为^[17]。

径流流速 V 计算公式为:

$$V = kV_n \quad (1)$$

式中: V 为径流流速 (m/s); V_n 为径流表层流速 (m/s); k 为修正系数,当流态为层流时, $k = 0.67$,当流态为过渡流时, $k = 0.7$,当流态为紊流时, $k = 0.8$ 。

雷诺数和弗劳德数分别反映了坡面水流型态和水流流态。当坡面雷诺数 < 500 ,弗劳德数 < 1 时,水流型态和水流流态分别为层流和缓流^[18]。

雷诺数 (Re) 计算公式为:

$$Re = \frac{VR}{\nu} \quad (2)$$

式中: $R \approx h$; R 为水力半径 (m); ν 为运动黏滞系数 (m^2/s), $\nu = 1.775 \times 10^{-6} / (1 + 0.0337t + 0.000221t^2)$, t 为水温 ($^{\circ}C$); h 为径流深度 (m)。

弗劳德数 (Fr) 计算公式为:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

径流剪切力 τ 计算公式为:

$$\tau = \gamma RJ \quad (4)$$

式中: γ 为水流重度 (N/m^3); J 为水力坡度 (m/m)。

侵蚀泥沙平均体积直径 (MVD) 计算公式为^[20]:

$$MVD = \frac{\sum \bar{L}_i V_{i1}}{i} \quad (5)$$

式中: n 为粒级划分数量,本文中 $n = 5$; \bar{L}_i 为第 i 粒级的平均直径 (mm); V_{i1} 为第 i 粒级的体积百分比 (%)。

本研究采用 Excel 2016 进行排土场坡面产流产沙特征指标、坡面径流水动力学特征指标和覆盖度与恢复年限之间的回归分析,以及单位面积累积产沙量、径流流速和雷诺数与坡度之间的回归分析。运用 SPSS 27.0 对不同恢复年限排土场产流产沙特征指标和水动力学特征指标与坡度和覆盖度进行相关分析。相关系数和相关性强度划分标准详见表 2^[22]。

表 2 相关系数和相关性强度划分标准

Table 2 Classification of correlation strength during correlation analysis

相关系数取值范围	$ r < 0.3$	$0.3 \leq r \leq 0.5$	$0.5 \leq r \leq 0.8$	$ r \geq 0.8$
相关程度	相关程度弱	低度相关	中等相关	高度相关

3 结果与分析

3.1 不同恢复年限排土场坡面产流产沙过程特征

由图 2 可知,不同恢复年限排土场坡面单位面积产流率和产沙率随降雨历时的变化规律存在较大的差异。同一恢复年限排土场相邻时刻对应的单位面积产流率和产沙率波动较大。由表 3 可知,随着降雨

历时的增加,恢复年限为 2 和 13 a 的排土场坡面单位面积产流率呈线性降低趋势;而恢复年限为 3, 5, 6, 10 和 15 a 的排土场坡面单位面积产流率呈逐渐增大趋势。随着降雨历时的增加,恢复年限 2, 10 和 13 a 的排土场坡面单位面积产沙率呈降低趋势;恢复年限为 3, 5, 6 和 15 a 的排土场坡面单位面积产沙率呈逐渐增大趋势。

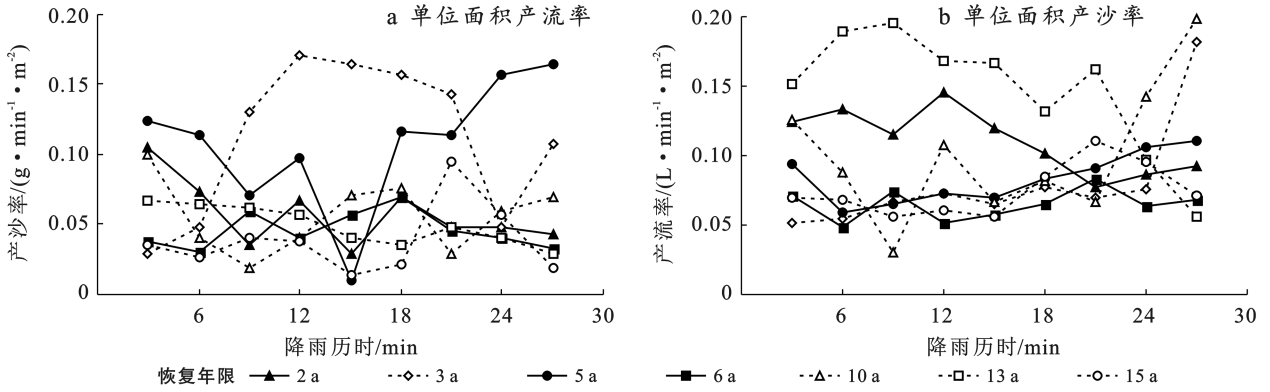


图 2 不同恢复年限排土场坡面单位面积产流产沙率变化特征

Fig.2 Characteristics of production rate per unit area for runoff and sediment of dump slopes with different recovery periods

表 3 不同恢复年限排土场坡面单位面积产流率和单位面积产沙率与降雨历时关系

Table 3 Relationship between production rate per unit area of runoff and sediment, and rainfall duration in dump slopes with different recovery periods

指标	恢复年限/a	回归方程	拟合优度 R^2	显著性 p
单位面积产流率/ ($L \cdot \min^{-1} \cdot m^{-2}$)	2	$y = -0.002 1x + 0.142 6$	0.600	0.014
	3	$y = 0.044 3e^{0.034 1x}$	0.539	0.016
	5	$y = 0.062 8e^{0.017 5x}$	0.487	0.055
	6	$y = 0.058 4e^{0.006 2x}$	0.073	0.451
	10	$y = 0.061 5e^{0.025 2x}$	0.270	0.308
	13	$y = -0.004 2x + 0.210 3$	0.595	0.015
	15	$y = 0.057 3e^{0.016x}$	0.307	0.123
单位面积产沙率/ ($g \cdot \min^{-1} \cdot m^{-2}$)	2	$y = -0.023 \ln(x) + 0.116 2$	0.508	0.031
	3	$y = 0.037 2 \ln(x) + 0.017 1$	0.230	0.191
	5	$y = 0.011 9 \ln(x) + 0.077 8$	0.034	0.635
	6	$y = 0.003 6 \ln(x) + 0.037$	0.039	0.610
	10	$y = -0.007 \ln(x) + 0.074 6$	0.041	0.599
	13	$y = -0.017 \ln(x) + 0.091 5$	0.766	0.002
	15	$y = 0.069 \ln(x) + 0.021 3$	0.039	0.611

3.2 坡面累积产流产沙特征与恢复年限的关系

如图 3 所示,各恢复年限排土场边坡坡面单位面积累积产流量、累积产沙量、产流时间和侵蚀泥沙平均体积直径数值范围分别为 1.75~3.96 L/m², 1.04~2.99 g/m², 47~270 s 和 0.47~2.93 mm。随着恢复年限逐渐增大,排土场边坡单位面积累积产流量未表现出显著性变化趋势;单位面积累积产沙量呈减小趋势,

但与恢复年限不存在显著性函数关系($p > 0.05$)。随着恢复年限逐渐增大,产流时间呈逐渐增大变化趋势,产流时间与恢复年限存在显著性线性函数关系($p < 0.05$)。随着恢复年限的增大,排土场边坡坡面侵蚀泥沙平均体积直径呈显著性幂函数减小趋势($p < 0.05$)。

3.3 坡面水动力学特征与恢复年限的关系

由图 4 可知,各恢复年限排土场边坡坡面径流流速、雷诺数、弗劳德数和径流剪切力数值范围分别为 0.02~0.05 m/s, 32.45~550.12, 0.06~0.38, 0.38~4.16 Pa。随着恢复年限的逐渐增大,坡面径流雷诺数和径流剪切力分别呈显著性指数函数和线性函数降低趋势($p < 0.05$);而径流流速和弗劳德数分别呈逐渐减小和上升趋势,但与恢复年限之间均不存在显著性函数关系($p > 0.05$)。

3.4 坡面累积产流产沙特征与植被覆盖度和坡度的关系

试验开展期间,各恢复年限排土场边坡坡面植被生长情况存在一定的差异。根据现场调查可知,恢复年限 2~6 a 的排土场坡面植被处于部分返青状态,坡面枯枝较多;而恢复年限为 10~15 a 的排土场坡面植被处于全部返青状态,未见或少见有枯枝。各恢复年限排土场坡面植被覆盖度为 31%~100%。此外,恢复年限为 3~13 a 的排土场,植被未覆盖坡面基本由苔藓所覆盖,苔藓覆盖度约为 22%~53%。各恢复年限排土场径流小区植被类型如表 4 所示。

表 4 不同恢复年限排土场径流小区植被类型

Table 4 Plant species of runoff plots in dump slopes with different recovery periods

恢复年限/a	科数	属数	种数	植物名称
2	1	1	1	垂穗披碱草
3	1	2	2	垂穗披碱草、冷地早熟禾
5	2	2	2	垂穗披碱草、蓝翠雀花
6	3	3	3	垂穗披碱草、窄裂委陵菜、弱小火绒草
10	4	4	4	垂穗披碱草、弱小火绒草、甘肃马先蒿、湿生扁蕾
13	5	5	5	蕨麻、垂穗披碱草、蒲公英、甘肃马先蒿、喉毛花
15	4	4	4	垂穗披碱草、高原毛茛、管花秦艽、斜茎黄芪

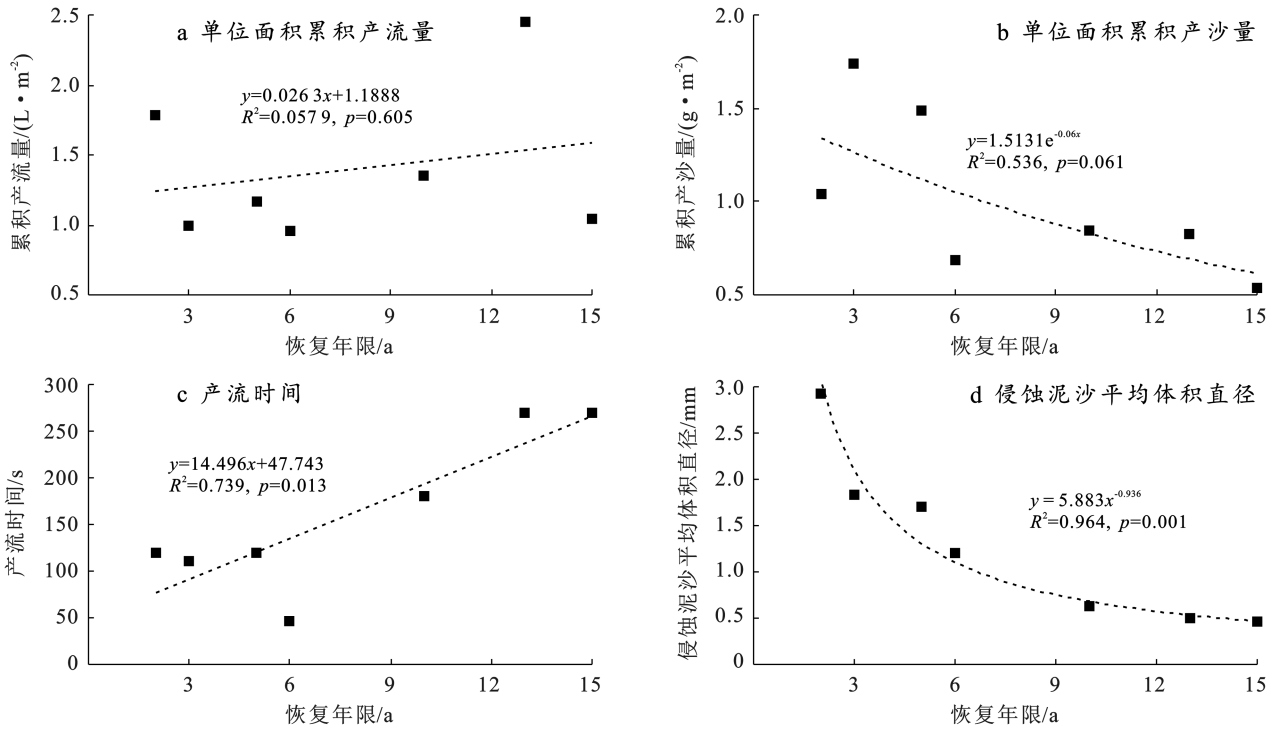


图3 排土场边坡坡面产流产沙特征指标与恢复年限的关系

Fig.3 Relationship between characteristic indexes of runoff and sediment of dump slopes and recovery period

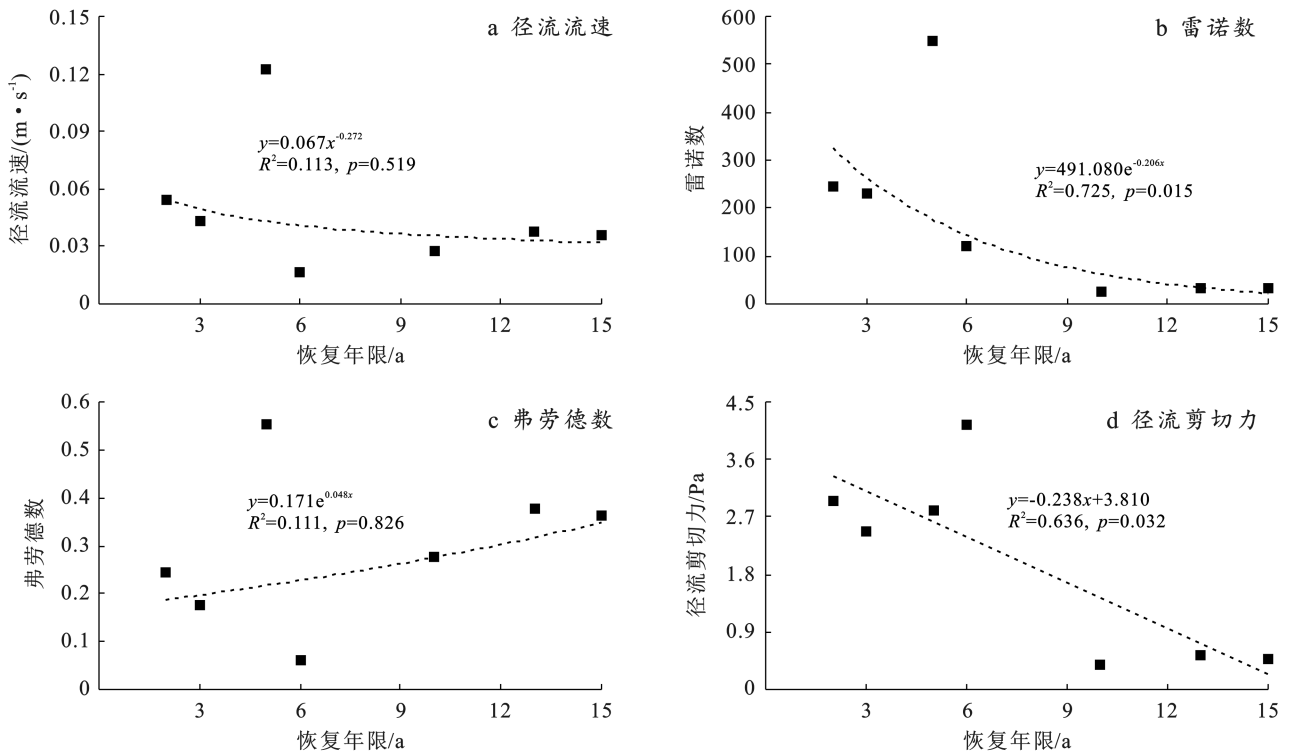


图4 排土场边坡坡面水动力学特征指标与恢复年限关系

Fig.4 Relationship between characteristic indexes of runoff hydrodynamic of dump slopes and recovery period

由表5可知,研究区不同恢复年限排土场边坡单位面积累积产流量与植被覆盖度呈低度正相关关系,与坡度呈弱相关关系。坡面产流时间与植被覆盖度呈中度正相关关系,与坡度呈低度负相关关系。单位面积累积产沙量与坡度呈显著性高度正相关关系($p <$

0.05),相关系数为0.871;与植被覆盖度呈低度负相关关系。侵蚀泥沙平均体积直径与植被覆盖度和坡度分别呈弱负相关和中度正相关关系。进一步由回归分析可知,随着坡度的逐渐增加,单位面积累积产沙量呈显著性线性函数增长趋势($p < 0.05$) (图5)。

表 5 排土场边坡坡面产流产沙特征指标与覆盖度和坡度相关性分析结果

Table 5 Results of correlation analysis between characteristics indexes of runoff and sediment and coverage and slope gradient of dump slopes

指标	覆盖度	坡度
单位面积累积产流量/(g·m ⁻²)	0.343	-0.210
产流时间/s	0.689	-0.356
单位面积累积产沙量/(g·m ⁻²)	-0.327	0.871*
侵蚀泥沙平均体积直径/mm	-0.037	0.625

注: * 表示显著性水平为 0.05。

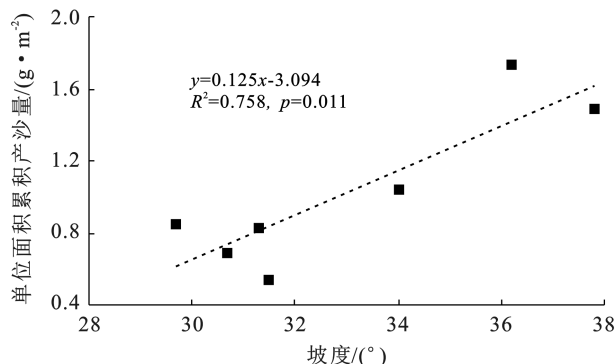
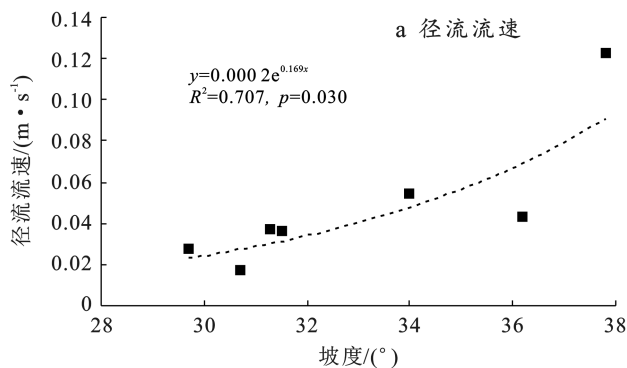


图 5 排土场边坡单位面积累积产沙量与坡度的关系

Fig.5 Relationship between cumulative sediment per unit area and slope gradient of dump slopes



3.5 坡面径流水动力学特征与植被覆盖度和坡度的关系

由表 6 可知,坡面径流流速与坡度呈显著性高度正相关关系,相关系数为 0.823($p < 0.05$);与植被覆盖度呈弱负相关关系。坡面径流雷诺数与坡度呈显著性高度正相关关系,相关系数为 0.904($p < 0.05$);与植被覆盖度呈低度负相关关系。径流弗劳德数与植被覆盖度和坡度分别呈弱正相关和低度正相关关系。径流剪切力与植被覆盖度呈中度负相关关系;与坡度则呈低度正相关关系。由图 6 可知,随着坡度的逐渐增大,坡面径流流速和雷诺数分别呈显著性的指数函数和线性函数增长趋势($p < 0.05$)。

表 6 排土场边坡坡面径流水动力学特征指标与覆盖度和坡度相关性分析结果

Table 6 Results of correlation analysis between characteristics indexes of runoff hydrodynamic and coverage and slope gradient of dump slopes

指标	覆盖度	坡度
径流流速/(m·s ⁻¹)	-0.249	0.823*
雷诺数	-0.463	0.904*
弗劳德数	0.140	0.403
径流剪切力/Pa	-0.634	0.422

注: * 显著性水平为 0.05。

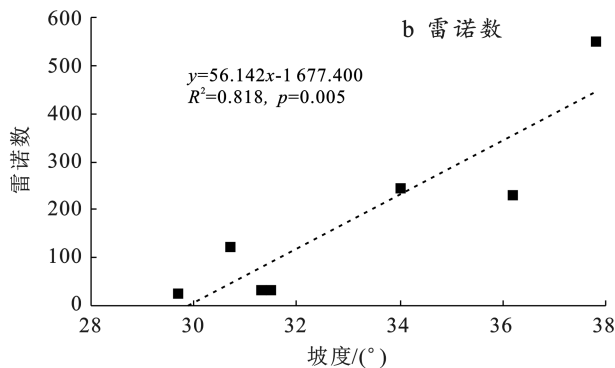


图 6 排土场边坡径流流速和雷诺数与坡度的关系

Fig.6 Relationship between runoff velocity and Reynolds number and slope gradient of dump slopes

4 讨论

4.1 不同恢复年限坡面产流产沙过程特征

该项研究中,不同恢复年限排土场坡面单位面积产流率、单位面积产沙率与降雨历时关系的差异性相对较大。而且在相同恢复年限,相邻降雨历时之间的单位面积产流率和单位面积产沙率差异性亦较大,使单位面积产流率和单位面积产沙率与降雨历时之间的曲线呈锯齿状特征。以上结果与仲亚婷等^[23]的研究结果相类似。究其原因,与不同恢复年限排土场坡

面植被存在差异性和坡面粗糙度的随机性有关。已有的研究表明^[15],德尔尼铜矿排土场在人工植被恢复后,随着恢复年限的增加,天然植被不断侵入,排土场植被的科、属、种数呈现出逐渐增加的趋势,各恢复年限排土场物种组成和群落特征存在一定程度的差异性。由于不同恢复年限侵入排土场的天然植被其科、属、种具有很大的随机性(表 4),相应的植被特征也存在很大差异,从而导致植被水土保持效果存在差异性。此外,排土场由矿山采矿排弃物直接堆砌而成,排弃物土体颗粒级配混杂,且含有较大粒径的块

石,加之排土场边坡坡面一般不进行平整处理,因此原始坡面粗糙度较大。覆土建植以后,受风蚀和水蚀作用,在下伏块石和植被的影响下,坡面产生差异侵蚀,呈现出随机凹凸起伏的特征,使坡面粗糙度增大,并具有明显的随机性。坡面粗糙度会影响坡面径流特征,并进一步影响产沙特征^[24-25]。基于上述原因,导致坡面产流产沙过程随机性强,难以用相统一的数学模型进行预测。此外,该项研究中的野外模拟降雨试验于 2022 年 7 月 18 日开始,历时 5 d 完成。由于研究区属于高海拔地区,夏季气温回升缓慢,因此,在该时间段,海拔相对较高的排土场依然存在部分多年生植物未完全返青的情况,亦有部分一年生植物还未出苗,如甘肃马先蒿等。因此,相比较于庞景豪等^[15]研究中所报道的于 2021 年 8 月调查获得的各恢复年限排土场植被生长情况和坡面植被覆盖度情况而言,该项研究实施期间,部分海拔较高的排土场坡面植被生长情况较差,覆盖度较低,受坡面粗糙度影响更为显著。这也是导致不同恢复年限坡面产流产沙过程差异性较大的原因之一。

4.2 不同恢复年限坡面产流产沙特征及其影响因素分析

人工植被恢复排土场水土流失特征是评价排土场植被恢复措施有效性和合理性的重要内容^[7]。而排土场边坡坡面产流和产沙特征,则是衡量坡面水土流失特征的重要指标^[26]。该项研究结果表明,研究区排土场边坡坡面单位面积累积产流量与恢复年限之间不存在显著性的变化趋势;而单位面积累积产沙量和侵蚀泥沙平均体积直径则呈逐渐降低趋势;产流时间呈先减小后增大的变化趋势。总体而言,随着恢复年限的增加,人工植被恢复排土场边坡坡面抗侵蚀能力呈向好发展趋势。这与李铁等^[27]的研究相类似。已有的研究^[28]表明,植被茎叶能够起到降雨截流、削弱溅蚀和抑制地表径流的作用。随着坡面植被覆盖度、植株高度的增高,对应的水土保持效果越好。然而,该项研究中,植被覆盖度仅与产流时间存在不显著的中度正相关关系($p > 0.05$),而与其他坡面产流产沙特征指标之间均呈低度相关或弱相关关系。说明植被覆盖度并非该时间段控制矿山排土场水土流失的关键因素。究其原因,与排土场坡面植被和苔藓生长情况存在密切关系。前已述及,由于试验实施期间,研究区部分恢复年限排土场植被未完全返青和出苗,故植被覆盖率相对较低。然而,恢复年限为 3~13 a 的排土场,虽然坡面植被覆盖度较低,但是植被未覆盖坡面基本由苔藓所覆盖。已有的研究^[29-30]表明,在黄土高原地区,生物结皮覆盖能够影响坡面

初始产流时间、产流率、产沙率和径流水动力特征(雷诺数、弗劳德数、径流剪切力及阻力系数等)。其中,在模拟降雨条件下,当生物结皮覆盖度从 9.3% 增加至 78.4% 时,坡面产流率和产沙率可分别减少 68.7% 和 98.1%^[30]。因此,当坡面同时覆盖植被和生物结皮时,植被和生物结皮均会对坡面产流产沙过程产生影响^[31]。故单一的植被覆盖度参数无法全面体现植被和苔藓共同作用下的水土保持效果,从而导致此次研究中,植被覆盖度与坡面产流产沙特征相关性较低。同时,也说明植被对高寒矿山排土场水土流失的控制作用受季节和气温的影响较大。该项研究结果仅反映了年内一段时期研究区不同恢复年限排土场坡面的产流产沙特征。与此同时,除了人工恢复所种植的禾本科植物垂穗披碱草具有较为丰茂的地上茎叶以外,大多数自然侵入植物,例如甘肃马先蒿、蕨麻、湿生扁蕾、蒲公英、喉毛花等^[15],其地上部分生物量相对较低,且较为低矮,甚至匍匐生长。这些植物虽然能够提高坡面植被覆盖度,但地面覆盖效果和降雨拦截能力有限。以上实际情况亦为导致出现植被覆盖度与坡面产流产沙特征相关性较低的结果的原因之一。坡度对坡面水土流失过程的影响,主要在于对坡面径流水动力条件存在影响,坡度越大,地表径流动能越大,其侵蚀能力和搬运能力越强,因此单位面积累积产沙量和侵蚀泥沙平均体积直径随之增大。以上结果与宋维峰等^[32]、陈泽勋等^[33]的研究相一致。此外,该项研究中,坡度与单位面积累积产流量和产流时间分别呈弱相关和低度负相关关系,相关程度较低,究其原因,与野外原位试验随机性存在一定的关系。

4.3 坡面水动力学特征与恢复年限的关系及其影响因素

坡面径流是造成坡面土壤及其母质被破坏、剥蚀、搬运和沉积的关键因素^[34]。研究高寒矿山排土场人工植被恢复边坡坡面水动力学特征,对进一步认识排土场边坡坡面水土流失机制有重要意义。该项研究中,各恢复年限排土场边坡坡面径流雷诺数数值范围为 32.45~550.12,除恢复期为 5 a 时对应的坡面径流为紊流以外,其余恢复年限均为层流。各恢复年限边坡坡面径流弗劳德数为 0.06~0.38,均属于缓流。此外,随着恢复年限的逐渐增大,坡面径流雷诺数和径流剪切力随着恢复年限的逐渐增大呈显著性的指数函数降低和线性函数降低趋势($p < 0.05$)。说明随着恢复年限的增长,在相同降雨强度下,坡面径流冲蚀和挟沙能力相应的降低。已有的研究^[34]表明,上述 4 种水动力学特征指标主要与坡面植被覆盖

度、粗糙度和坡度相关。坡面植被覆盖度越高、粗糙度越大、坡度越小,则该4种水动力学特征指标相应降低,反之逐渐增大。然而,由相关分析可知,该项研究中,坡面径流流速、雷诺数、弗劳德数和坡面径流剪切力与地表植被覆盖度均不存在显著性的相关关系。以上结果出现的原因亦可能与排土场边坡坡面植被生长情况和苔藓生长相关。此外,相关分析还表明径流流速和雷诺数与坡度呈显著性正相关关系,说明坡度对研究区排土场侵蚀过程的影响主要体现在提高径流流速和改变流态。这与王鲜等^[35]的研究结果相类似。

5 结论

(1) 研究区排土场坡面产流产沙过程相对复杂,随机性强,不同恢复年限排土场坡面单位面积产流率和单位面积产沙率随降雨历时的变化规律存在较大的差异。

(2) 各恢复年限排土场边坡坡面单位面积累积产流量、累积产沙量、产流时间和侵蚀泥沙平均体积直径数值范围分别为 1.75~3.96 L/m², 1.04~2.99 g/m², 47~270 s 和 0.47~2.93 mm。单位面积累积产沙量和侵蚀泥沙平均体积直径随着恢复年限的增大呈逐渐降低趋势,且侵蚀泥沙平均体积直径与恢复年限呈显著性幂函数关系($p < 0.05$);随着恢复年限的增大,产流时间呈线性增大变化趋势($p < 0.05$)。

(3) 各恢复年限排土场边坡坡面径流流速、雷诺数、弗劳德数和径流剪切力数值范围分别为 0.02~0.05 m/s, 32.45~550.12, 0.06~0.38, 0.38~4.16 Pa;各恢复年限排土场边坡径流流态以层流为主,且均属于缓流;坡面径流雷诺数和径流剪切力随着恢复年限的逐渐增大呈显著性的指数函数降低和线性函数降低趋势($p < 0.05$)。

(4) 不同恢复年限排土场边坡坡面单位面积累积产沙量、径流速度和雷诺数与坡度呈显著的高度正相关关系($p < 0.05$)。

总体而言,高寒矿区排土场经人工植被恢复后,坡面抗侵蚀能力随恢复年限的增长呈向好趋势。植被未完全返青的情况下,坡度对坡面产流产沙特征和径流水动力学特征的影响程度高于植被覆盖度。后期有必要深入研究苔藓发育和坡面粗糙度对高寒矿区排土场水土保持的作用与意义。

参考文献(References)

[1] 王佟,刘峰,赵欣,等.生态地质层理论及其在矿山环境治理修复中的应用[J].煤炭学报,2022,47(10):3759-3773.

Wang Tong, Liu Feng, Zhao Xin, et al. Theory of ecological geological layer and its application in mine environment remediation [J]. Journal of China Coal Society, 2022,47(10):3759-3773.

[2] 徐友宁,乔冈,张江华.基于生态保护优先的青藏高原矿产资源勘查开发的对策[J].地质通报,2018,37(12):2125-2130.

Xu Youning, Qiao Gang, Zhang Jianghua. Countermeasures and suggestions concerning mineral resources exploitation based on the ecological conservation priority in the Tibetan Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2018,37(12):2125-2130.

[3] 赵福刚.金属矿山废弃地综合处置技术研究现状[J].现代矿业,2022,38(1):194-208.

Zhao Fugang. Research status of comprehensive disposal technology of metal mine wasteland [J]. Modern Mining, 2022,38(1):194-208.

[4] 杜岩,白云飞,张晓勇,等.基于多种风险因素的矸石山边坡风险评价[J].工程力学,2022,39(10):249-256.

Du Yan, Bai Yunfei, Zhang Xiaoyong, et al. Risk assessment of coal gangue slope considering multiple risk factors [J]. Engineering Mechanics, 2022,39(10):249-256.

[5] 陈廷方,崔鹏,刘岁海,等.矿产资源开发与泥石流灾害及其防治对策[J].工程地质学报,2005,13(2):179-182.

Chen Tingfang, Cui Peng, Liu Suihai, et al. Anthropogenic debris flow disasters and mitigation countermeasures in mineral resources exploitation in China [J]. Journal of Engineering Geology, 2005,13(2):179-182.

[6] Li Xilai, Gao J, Zhang Jing, et al. Adaptive strategies to overcome challenges in vegetation restoration to coalmine wasteland in a frigid alpine setting [J]. Catena, 2019,182:104142.

[7] 杨鑫光.高寒矿区煤矸石山植被恢复潜力研究[D].青海西宁:青海大学,2019.

Yang Xinguang. Study on vegetation recovery potential of coal mine spoils in an alpine coal mining area [D]. Xining, Qinghai: Qinghai University, 2019.

[8] Miao Z, Marrs R. Ecological restoration and land reclamation in open-cast mines in Shanxi Province, China [J]. Journal of Environmental Management, 2000,59(3):205-215.

[9] 杨鑫光,李希来,金立群,等.不同人工恢复措施下高寒矿区煤矸石山植被和土壤恢复效果研究[J].草业学报,2019,28(3):1-11.

Yang Xinguang, Li Xilai, Jin Liqun, et al. Effectiveness of different artificial restoration measures for soil and vegetation recovery on coal mine tailings in an alpine area [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019,28(3):1-11.

- [10] Ng C W W, Kamchoom V, Leung A K. Centrifuge modelling of the effects of root geometry on transpiration-induced suction and stability of vegetated slopes [J]. *Landslides*, 2016,13(5):925-938.
- [11] Chau N L, Chu L M. Fern cover and the importance of plant traits in reducing erosion on steep soil slopes [J]. *Catena*, 2017,151:98-106.
- [12] 付江涛,李光莹,虎啸天,等.植物固土护坡效应的研究现状及发展趋势[J].*工程地质学报*,2014,22(6):1135-1146.
Fu Jiangtao, Li Guangying, Hu Xiaotian, et al. Research status and development tendency of vegetation effects to soil reinforcement and slope stabilization [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014,22(6):1135-1146.
- [13] 李姜瑶.西宁盆地黄土区植物水文效应及其增强边坡稳定性评价[D].青海 西宁:中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所),2021.
Li Jiangyao. The evaluation of plants hydrological effect and slope stability contribution in the loess area of Xining Basin [D]. Xining, Qinghai: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Science, 2021.
- [14] 史兴萍,缪晓星,王延秀,等.青海德尔尼铜矿矿山地质环境问题及防治[J].*煤炭技术*,2021,40(3):94-97.
Shi Xingping, Miao Xiaoxing, Wang Yanxiu, et al. Geological environment problems and prevention and control of delny copper mine in Qinghai Province [J]. *Coal Technology*, 2021,40(3):94-97.
- [15] 庞景豪,梁桑,刘亚斌,等.恢复年限对高寒金属矿山排土场植物多样性和土壤化学特性的影响[J].*水土保持通报*,2023,43(4):110-120.
Pang Jinghao, Liang Shen, Liu Yabin, et al. Influence of recovery years on plant diversity and soil chemical properties for alpine metal mine dumps [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(4):110-120.
- [16] 王希娟,傅生武,马占良.青海省 2018 年汛期降水特征及气象服务分析[J].*青海农林科技*,2019(1):46-49.
Wang Xijuan, Fu Shengwu, Ma Zhanliang. Precipitation characteristics and meteorological service analysis of 2018 flood season in Qinghai Province [J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2019(1):46-49.
- [17] 孙佳美,余新晓,樊登星,等.模拟降雨下植被盖度对坡面流水动力学特性的影响[J].*生态学报*,2015,35(8):2574-2580.
Sun Jiamei, Yu Xinxiao, Fan Dengxing, et al. Impact of vegetation cover on surface runoff hydraulic characteristics with simulated rainfall [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(8):2574-2580.
- [18] 吴淑芳,吴普特,原立峰.坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J].*农业工程学报*,2010,26(3):14-19.
Wu Shufang, Wu Pute, Yuan Lifeng. Hydraulic characteristics of sheet flow with slope runoff regulation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010,26(3):14-19.
- [19] 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.
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.
- [20] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989,53(4):987-996.
- [21] 王国梁,周生路,赵其国.土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J].*土壤学报*,2005,42(4):545-550.
Wang Guoliang, Zhou Shenglu, Zhao Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005,42(4):545-550.
- [22] 谢蕾蕾,宋志刚,何旭洪.SPSS 统计分析实用教程[M].北京:人民邮电出版社,2013.
Xie Leilei, Song Zhigang, He Xuhong. SPSS Guide to Data Analysis [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2013.
- [23] 仲亚婷,张文太,黄俊华,等.伊犁河谷不同草地类型坡面水土保持效应的模拟降雨试验[J].*水土保持通报*,2016,36(6):21-25.
Zhong Yating, Zhang Wentai, Huang Junhua, et al. Experimental study on soil and water conservation effects of different grasslands with simulated rainfall in Yili River valley [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016,36(6):21-25.
- [24] 李龙,张鹏,郭跃,等.自然降雨条件下砂砒岩坡面细沟微形态及其侵蚀特征[J].*水土保持通报*,2021,41(6):15-22.
Li Long, Zhang Peng, Guo Yue, et al. Micromorphology and erosion characteristics of rills on feldspathic sandstone slopes under natural rainfall conditions [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(6):15-22.
- [25] 王添,任宗萍,李鹏,等.模拟降雨条件下坡度与地表糙度对径流产沙的影响[J].*水土保持学报*,2016,30(6):1-6.
Wang Tian, Ren Zongping, Li Peng, et al. Effect of slope gradient and surface roughness on runoff and sediment yield under simulated rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,30(6):1-6.

- [26] 薛东明,郭小平,张晓霞.干旱矿区排土场不同边坡生态修复模式下减流减沙效益[J].水土保持学报,2021,35(6):15-21.
Xue Dongming, Guo Xiaoping, Zhang Xiaoxia. Runoff and sediment reduction under different slope ecological restoration modes of waste dump in arid mining area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6):15-21.
- [27] 李铁,谌芸,何丙辉,等.天然降雨下川中丘陵区不同年限植物篱水土保持效用[J].水土保持学报,2019,33(3):27-35.
Li Tie, Chen Yun, He Binghui, et al. Study on soil and water conservation effects of vetiveria zizanioides and leucaena leucocephala hedgerows with different planting years in central hill region of Sichuan Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3):27-35.
- [28] 周德培,张俊云.植被护坡工程技术[M].北京:人民交通出版社,2003.
Zhou Depei, Zhang Junyun. The Engineering Technology for Slope Protection by Vegetation [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [29] 黄琬云.土壤侵蚀预报模型中的生物结皮因子研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2023.
Huang Wanyun. A study on biological soil crust factors in soil erosion model [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [30] 杨凯.黄土丘陵区生物结皮盖度影响坡面产流产沙的动力机制[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2022.
Yang Kai. Effect and dynamic mechanism of biocrusts with different coverage on runoff and sediment in the hilly Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [31] 郭雅丽,赵允格,高丽倩,等.黄土丘陵区草本植物覆盖下生物结皮对坡面径流流速的削减作用[J].应用生态学报,2022,33(7):1871-1877.
Guo Yali, Zhao Yunge, Gao Liqian, et al. Reduction of flow velocity by biological soil crust of revegetated grassland in the hilly Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7):1871-1877.
- [32] 宋维峰,余新晓,张颖.坡度和刺槐覆盖对黄土坡面产流产沙影响的模拟降雨研究[J].中国水土保持科学,2008,6(2):15-18.
Song Weifeng, Yu Xinxiao, Zhang Ying. Effects of slope grade and cover of *Robinia pseudoacacia* on runoff and soil loss from loess slopes under simulated rainfall [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(2):15-18.
- [33] 陈泽勋,刘廷玺,王怡璇,等.模拟降雨条件下典型草原坡面初始产流时间及产流产沙量[J].生态学杂志,2022,41(7):1316-1323.
Chen Zexun, Liu Tingxi, Wang Yixuan, et al. Quantitative analysis of the contribution of different rainfall conditions to runoff and sediment yield on typical grassland slope [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(7):1316-1323.
- [34] 施明新,吴发启,田国成,等.地表粗糙度对坡面流水动力学参数的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(7):83-87.
Shi Mingxin, Wu Faqi, Tian Guocheng, et al. Influence of surface roughness on hydrodynamic parameter-sof overland flow [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(7):83-87.
- [35] 王鲜,倪万魁,刘海松,等.黄土边坡坡面降雨冲刷破坏机制模拟试验[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(3):41-45.
Wang Xian, Ni Wankui, Liu Haisong, et al. Simulation experiment on loess slope rainfall erosion mechanism [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(3):41-45.