

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.024.

李亚桐, 王冠, 冉心昊, 等. 弃渣扰动对藏东山地草甸坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 105-113.

Li Yatong, Wang Guan, Ran Xinhao, et al. Influence of Slag Disposal Disturbance on Runoff and Sediment Yield in Mountain Meadow of Eastern Xizang[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 105-113.

弃渣扰动对藏东山地草甸坡面产流产沙的影响

李亚桐, 王冠, 冉心昊, 肖辉杰

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的]明晰铁路修建中弃渣工程扰动引起的水土流失响应,揭示弃渣堆积前后及其植被恢复对藏东生态脆弱的山地草甸区坡面尺度水土流失的影响。[方法]选取未扰动、轻度扰动、重度扰动、覆土恢复4个类型的坡面,建立原位径流小区,通过人工模拟降雨试验,开展了坡面产流产沙过程的研究。[结果](1)坡面的溅蚀量随扰动强度的增大而增加,下坡向的溅蚀量为上坡溅蚀量的1.14~2.67倍。(2)轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的初始产流时间分别缩短为未扰动坡面的53.8%~66.7%, 34.6%~46.7%, 86.7%~92.9%。(3)未扰动坡面、轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的产流速率分别为44~86, 104~147, 200~373, 46~95 ml/(min·m²), 产沙速率分别为0.026~0.055, 0.05~0.098, 1.034~2.189, 0.047~0.077 g/(min·m²)。[结论]覆土恢复坡面的水土保持能力较轻度扰动和重度扰动坡面有显著提高,但距未扰动坡面仍有差距,需采取其他植被或工程措施对工程扰动坡面加以恢复。

关键词: 产流产沙过程; 水土流失; 人工模拟降雨; 高山草甸; 弃渣工程

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0105-09

Influence of Slag Disposal Disturbance on Runoff and Sediment Yield in Mountain Meadow of Eastern Xizang

Li Yatong, Wang Guan, Ran Xinhao, Xiao Huijie

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to elucidate the response of soil and water loss resulting from slag dumping engineering disturbances during railway construction, and to unveil the impact of slag accumulation and vegetation restoration on soil and water loss at a slope scale in the ecologically fragile mountain meadow region of eastern Xizang. [Methods] Four slope types such as undisturbed, mildly disturbed, severely disturbed, and disturbed then covered with soil restoration were selected. The in-situ runoff plots were established. The process of sediment production and loss on slope was monitored by artificially simulated rainfall experiment. [Results] (1) The quantity of spattering on the slope increased with the intensity of disturbance, with the amount on the downhill side being approximately 1.14 to 2.67 times greater than that on the uphill side. (2) The initial flow generation time for the lightly disturbed slope, heavily disturbed slope, and covered slope reduced from 53.8% to 66.7%, 34.6% to 46.7%, and 86.7% to 92.9%, respectively. (3) The flow production rates for the undisturbed slope, lightly disturbed slope, heavily disturbed slope, and covered slope ranged from 44 to 86 ml/(min·m²), 104 to 147 ml/(min·m²), 200 to 373 ml/(min·m²), and 46 to 95 ml/(min·m²), respectively. The sediment production rates ranged from 0.026 to 0.055 g/(min·m²), 0.05 to 0.098 g/(min·m²), 1.034 to 2.189 g/(min·m²), and 0.047 to

收稿日期: 2023-09-16

修回日期: 2023-10-12

资助项目: 国家重点研发计划项目“西南高山峡谷区水土流失综合防治技术与示范”(2022YFF1302901)

第一作者: 李亚桐(1999—), 男, 内蒙古突泉人, 硕士生, 研究方向为水土保持研究。E-mail: 1142999188@qq.com

通信作者: 王冠(1990—), 女, 陕西西安人, 博士, 讲师, 主要从事水土保持研究。E-mail: wangbjfu@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

0.077 g/(min · m²), respectively. [Conclusion] The soil and water conservation capacity of the restored slope has been significantly improved in comparison to the lightly disturbed and heavily disturbed slopes. However, there still exists a disparity between the undisturbed slope and the covered slope. Therefore, additional vegetation or engineering measures need to be implemented to restore the disturbed slope effectively.

Keywords: process of runoff and sediment; soil and water loss; artificial rainfall simulation; alpine meadow; spoil disposal engineering

草地是我国陆地上面积最大的生态系统,对于保护生物多样性、涵养水源、维护生态平衡具有重要价值^[1]。西藏的天然草地面积位居全国第一,约为82万km²,具有高海拔、生态脆弱、高敏感性等特点,是当地牧业经济发展的基础,同时也是青藏高原生态安全屏障的重要组成部分^[2-3]。近年来,随着川藏铁路等工程建设的陆续开展,工程沿线建造了大量的弃渣场,具有弃渣量大且永久堆弃、堆渣松散等特点,且产生许多新的人工重塑地形单元,若防护不得力,易造成严重水土流失^[4-6]。明晰青藏高原广泛分布的高山草地在不同扰动及恢复条件下的弃渣场坡面的产流产沙规律,有助于制定合理可行的水土保持和生态修复策略,服务于青藏高原生态安全屏障的修复与保护。

针对生产建设项目产生的弃土弃渣导致的水土流失问题,已有学者进行了大量的研究。张荣华等^[7]对胶东铁路弃土弃渣体区的研究表明,降雨强度和坡度的越大,产流开始时间越早,其中坡度对坡面产流时间的影响大于降雨强度。张乐涛等^[8]研究对黄土高原高速公路堆积体陡坡侵蚀得出,坡面产沙过程存在产沙量突变、波动变化和稳定发展3个阶段,且土壤剥蚀率与单宽流量呈线性关系。Dong等^[9]对高速公路堆积体的模拟降雨研究认为,径流率与土壤容重、降雨强度均呈线正相关关系。随着我国经济高速发展,在藏东地区已经开展大量的公路铁路建设工程,然而针对这一区域的工程弃渣造成的水土流失研究薄弱,无法满足扰动区水土流失防治的需求。例如,川藏铁路雅—林段各类工程弃渣约1.3亿m³,其中约有30%的弃渣在藏东地区且弃渣场普遍具有“高、大、险、难”等特点,多个弃渣场的弃渣量超过100万m³,且超过半数属于沟道型弃渣场,加之沿线降雨充沛、植被稀疏,极易引发次生灾害。因此,亟待对工程扰动引起的水土流失响应进行研究,从而指导国家级重大工程建设背景下的水土流失预防和治理。

本文以西藏东部林芝地区广泛分布的高山草甸为研究对象,通过在典型弃渣场建立径流小区,开展原位人工模拟降雨试验,刻画不同扰动强度下的坡面产流产沙过程,并结合溅蚀试验表征土壤分离的难易

程度,探讨堆渣扰动前后的坡面产流产沙特点,为明确弃渣工程引发的水土流失特征变化,指导弃渣场的水土保持和生态恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于西藏自治区林芝市巴宜区(北纬29°21′—30°15′,东经93°27′—95°17′),气候寒冷,年平均温度7~16℃,年降水量约650mm,且80%集中于6—9月。植被以小蒿草山地草甸为主,草群密集,物种组成较为丰富,主要包括高山蒿草(*Kobresia pygmaea*)、长鞭红景天(*Rhodiola fastigiata*)、红嘴苔草(*Carex haematostome*)等。自然坡度5°~20°。研究渣场堆渣184.2万m³,属于沟道型渣场,堆渣为隧道出渣,主要岩性为混合花岗岩类,粒径大于4mm的颗粒所占比例为48%。

1.2 样地设置

选取4种扰动强度的坡面,分别为:

(1) 未扰动坡面。原状土体,土壤为棕壤,植被盖度为100%,主要优势物种为矮蒿草(*Kobresia humilis*),土壤容重为(1.17±0.07)g/cm³;

(2) 轻度扰动坡面。土壤为棕壤,地表植被破坏,植被盖度为50%,土壤容重为(1.33±0.36)g/cm³;

(3) 重度扰动坡面。首先进行表土剥离,然后覆盖邻近隧道弃渣,主要为花岗岩质、粒径中值4mm,堆渣厚度约2m,土壤容重为(1.73±0.05)g/cm³;

(4) 覆土恢复坡面。土壤为棕壤,采取表土回铺的方式,在堆渣坡面上覆盖0.5m厚的前期剥离的表土,并进行植被自然恢复,植被盖度约50%,土壤容重为(1.25±0.13)g/cm³。

分别选取坡度为10°的原状土体坡面、轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面各修建3个投影面积为2m(长)×1m(宽)的径流小区。径流小区四周用PVC板圈围,埋入地表20cm,出露10cm,并保证4个直角衔接处不漏水。修建完成的径流小区经过3个月沉淀,于2022年8—9月完成野外人工模拟降雨试验。

1.3 试验装置

人工模拟降雨系统采用西安理工大学研制的下喷式人工模拟降雨装置,其由蓄水池、水泵、喷头和计算机控制系统4部分组成(图1)。通过更换不同喷头类型来调节30,60 mm/h的降雨强度,降雨高度为3 m,降雨均匀度 $>90\%$,模拟降雨的雨滴直径分布和雨滴能量接近自然降雨特性。

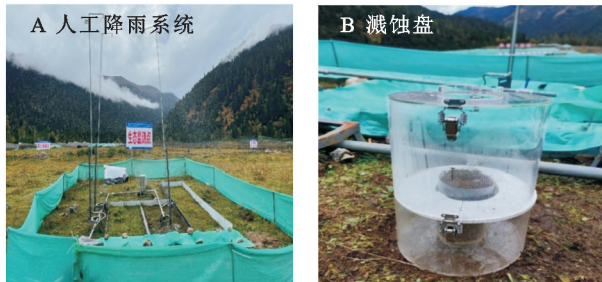


图1 原位人工模拟降雨试验装置

Fig. 1 In-situ artificial rainfall simulation test setup

溅蚀盘采用亚克力材质,溅蚀盘外径50 cm,内径10 cm,土槽直径8 cm^[10]。土槽坡度可根据实际坡度进行调节。沿垂直于土槽的中线,溅蚀盘可分为上下两部分溅蚀收集区域,分为上坡向收集区和下坡向收集区(图1)。

1.4 试验步骤

每场试验前进行降雨强度率定,测试降雨均匀度在90%以上开始降雨试验,以保证降雨均匀度和降雨强度达到试验要求。各次试验中,记录初始产流时间,自产流开始,每隔1 min取1次径流和泥沙样品,每次取样时长1 min,降雨时长设定30 min。每场降雨试验重复3次,且每次重复试验间隔至少2 d。采用秒表测定初始产流时间,采用体积法测定径流量,采用烘干称重法测定泥沙量。

在样地的上坡、中坡、下坡3个坡位分别布设溅蚀盘,土槽内填满对应扰动强度的土体,土槽表面留有植被,将滤纸剪切,放置在溅蚀盘上下收集区域内。雨滴击溅至坡面后,溅起土粒至溅蚀盘的滤纸上,直至降雨结束,溅蚀试验时长与降雨试验一致,均为30 min。降雨结束后立即带回实验室,分别将上下坡的滤纸放入烘箱烘干,采用电子天平称量,得到溅蚀量。每次试验重复进行3次,所得溅蚀量取平均值之后作为该次试验的溅蚀量。

2 结果与分析

2.1 不同扰动强度坡面溅蚀特点

坡面的溅蚀量在两种雨强下均随扰动强度的增大而增加。在30 mm/h雨强下,上坡向溅蚀量为0.28 g,下坡向溅蚀量为0.34 g;60 mm/h雨强下上

坡向溅蚀量为0.89 g,下坡向溅蚀量为1.52 g,上坡向溅蚀量小于下坡向溅蚀量,下坡向溅蚀量为上坡向溅蚀量的1.14~2.67倍(图2)。在30 mm/h雨强下,随着扰动强度的增大,轻度扰动和重度扰动坡面的溅蚀量分别为0.07,0.47 g,是未扰动坡面的2.33倍和15.67倍。在对坡面进行覆土恢复后,覆土恢复坡面溅蚀量为0.05 g,是未扰动坡面的1.67倍,小于轻度扰动和重度扰动坡面的溅蚀量,但仍大于未扰动坡面。60 mm/h雨强下,每种扰动强度坡面的溅蚀量均大于30 mm/h雨强下的溅蚀量。未扰动坡面、轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面在60 mm/h雨强下的溅蚀量是30 mm/h雨强的4.67倍、4.14倍、2.56倍和4.4倍。在60 mm/h雨强下,溅蚀量同样随着扰动强度的增大而增加,轻度扰动坡面和重度扰动坡面的溅蚀量分别为0.29,1.79 g,为未扰动坡面的1.07倍、11.79倍,覆土恢复坡面的溅蚀量为0.22 g,是未扰动坡面的1.57倍,表明仅进行覆土恢复难以恢复至未扰动坡面的状态。

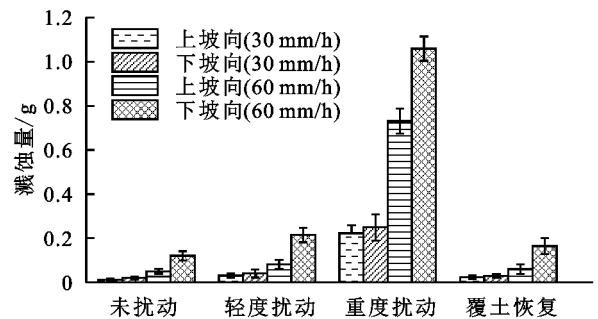


图2 不同扰动强度、降雨强度下的坡面溅蚀量

Fig. 2 Splash erosion volume of slope surface under different disturbance intensity and rainfall intensity

2.2 不同扰动强度坡面产流过程

在30,60 mm/h的雨强下,轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复3种扰动坡面的初始产流时间均小于未扰动坡面。在30 mm/h雨强下,未扰动坡面的初始产流时间为2.8 min,在轻度扰动之后缩减为1.4 min,在重度扰动情况下坡面初始产流时间为0.9 min,覆土恢复后坡面初始产流时间为2.6 min(图3)。与未扰动坡面相比,轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的初始产流时间分别缩减50%,61%,7%。4种扰动强度坡面的初始产流时间均随雨强的增加而缩短。在60 mm/h雨强下,未扰动坡面的初始产流时间为1.5 min,轻度扰动坡面的初始产流时间为1 min,重度扰动坡面的初始产流时间缩减至0.7 min,覆土恢复坡面的初始产流时间为1.3 min。轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的初始产流时间较未扰动坡面的初始产流时间分别缩减33%,53%,

13%,表明不同强度的扰动均会使坡面初始产流时间缩短,且扰动程度越低初始产流时间缩短越少。

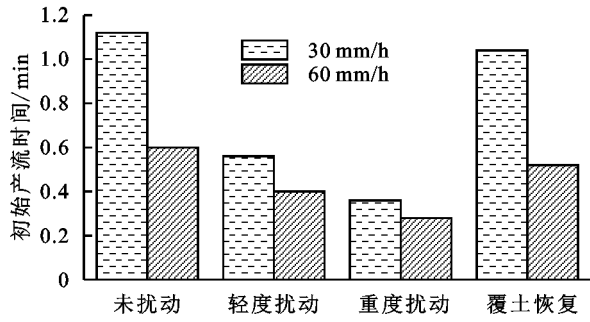
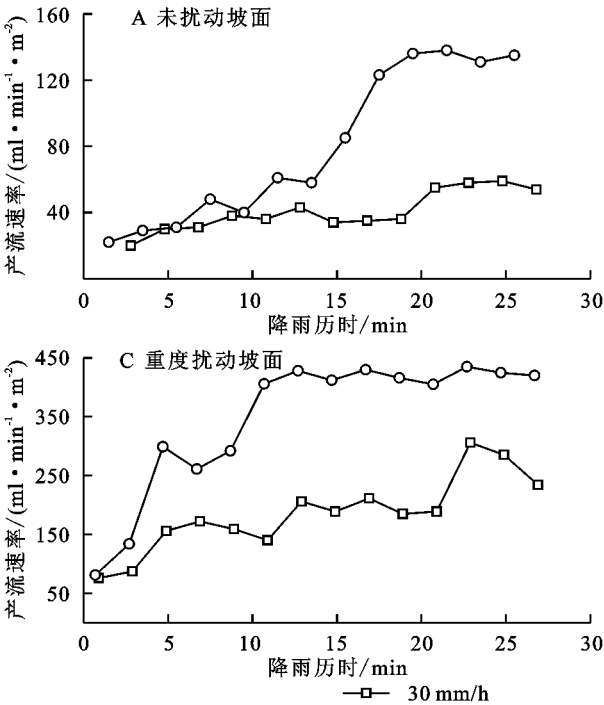


图 3 不同扰动强度坡面初始产流时间

Fig. 3 Initial runoff time of slope surface under different disturbance intensity

当雨强为 30 mm/h 时,未扰动坡面、轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的产流速率随降雨历时的变化呈现先缓慢增加后趋于稳定的趋势。当



雨强提升至 60 mm/h 时,未扰动坡面、轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的产流速率先快速上升至某一速率值附近浮动,并一直持续到降雨结束(图 4)。4 种扰动强度坡面的产流速率均随着雨强的增大而增加。在 30,60 mm/h 雨强下,未扰动坡面、轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的产流速率分别为 44~86,104~147,200~373,46~95 ml/(min·m²),产流速率均表现为重度扰动坡面>轻度扰动坡面>覆土恢复坡面>未扰动坡面,表明扰动强度越大坡面产流速率增加越多。不同扰动强度坡面的径流量随着扰动强度的加大而增加,增幅也随之变大。由表 2 可知,在两种雨强下,相比于未扰动坡面,轻度扰动、重度扰动和覆土恢复坡面的径流量增幅分别为 83.9%~135.7%,367.1%~390.5%,12.7%~18.7%(表 1)。覆土恢复坡面的径流量和增幅最小,但较未扰动坡面的产流状态仍有差距。

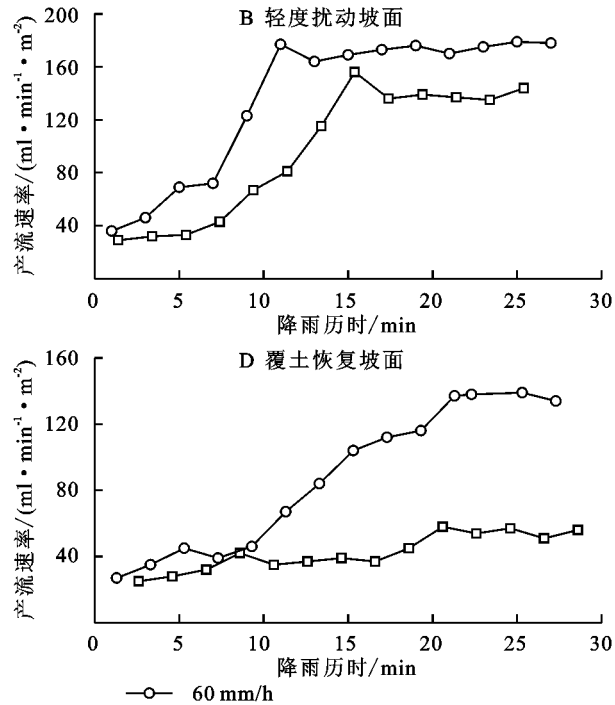


图 4 不同扰动强度坡面产流速率随时间变化

Fig. 4 Variation of runoff production rate with time for different disturbance intensities

表 1 两种雨强下不同扰动强度坡面的径流量及增幅

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	径流量/ml				增幅/%		
	未扰动	轻度扰动	重度扰动	覆土恢复	轻度扰动	重度扰动	覆土恢复
	坡面	坡面	坡面	坡面	坡面	坡面	坡面
30	529	1247	2595	596	135.7	390.5	12.7
60	1037	1907	4844	1231	83.9	367.1	18.7

2.3 不同扰动强度坡面产沙过程

在 30,60 mm/h 雨强下,未扰动坡面、轻度扰动坡面的产沙速率随降雨历时的变化呈现出先增加后趋于稳定的趋势,重度扰动坡面的产沙速率随降雨历

时的变化表现为“多峰多谷”的特点,覆土恢复坡面的产沙速率随降雨历时的变化表现为先增加至峰值而后减小并趋于稳定的特点(图 5)。未扰动坡面、轻度

扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的产沙速率分别为 0.026~0.055,0.05~0.098,1.034~2.189,0.047~0.077 g/(min·m²),4 种扰动强度坡面的产沙速率均随着雨强的增大而增加,产沙速率表现为重度扰动坡面>轻度扰动坡面>覆土恢复坡面>未扰动坡面,表

明扰动强度越低产沙速率也越低,各种扰动强度坡面拦截泥沙的能力都没有原状土体强。轻度扰动坡面和重度扰动坡面的产沙量增幅分别为 94.2%~122.7%和 4 252%~4 867%,覆土恢复坡面产沙量增幅最小,产沙量增幅为 34.5%~73.5%(表 2)。

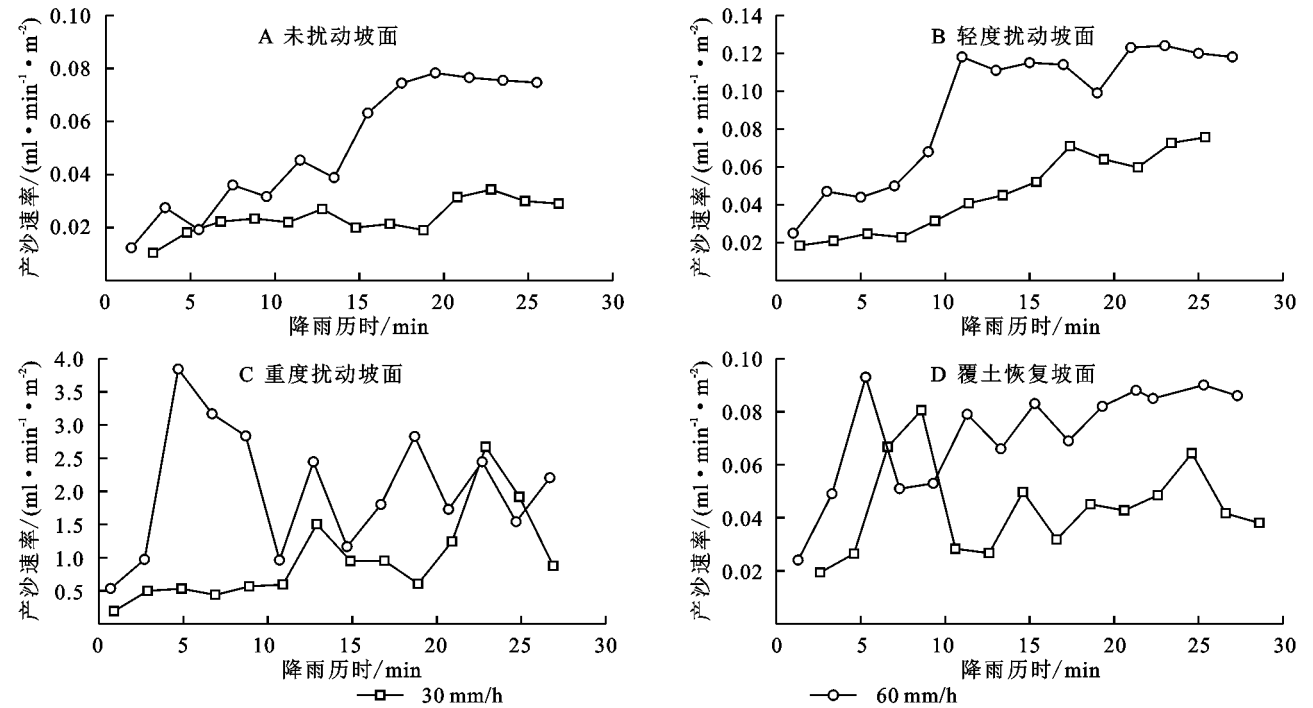


图 5 不同扰动强度坡面产沙速率随时间变化

Fig. 5 Variation of sand production rate with time on slopes with different disturbance intensities

表 2 两种雨强下不同扰动强度坡面的产沙量及增幅

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	产沙量/g				增幅/%		
	未扰动	轻度扰动	重度扰动	覆土恢复	轻度扰动	重度扰动	覆土恢复
	坡面	坡面	坡面	坡面	坡面	坡面	坡面
30	0.309	0.600	13.448	0.536	94.2	4252	73.5
60	0.573	1.276	28.459	0.998	122.7	4867	34.5

2.4 不同扰动强度坡面水沙关系

在 30,60 mm/h 雨强下,未扰动坡面、轻度扰动坡面和覆土恢复坡面的径流含沙率在开始产流时快速上升至峰值后逐步降低(图 6)。重度扰动坡面的径流含沙率随降雨历时的变化呈现出波动的特征(图 6)。在 30,60 mm/h 雨强下,4 种扰动强度坡面的径流含沙率均表现为重度扰动坡面>覆土恢复坡面>轻度扰动坡面>未扰动坡面。这些结果表明施加恢复措施后,坡面径流所携带泥沙的能力仍强于未扰动坡面。未扰动坡面随着雨强的增加,径流含沙量没有显著性差异,而在扰动的坡面,随着雨强的增加径流含沙量显著增加,轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的径流含沙量分别为 6.781~9.612,67.834~89.172,12.860~13.408 g/ml,均随雨强的增大而增加(表 3)。

在 30 mm/h 雨强下,不同扰动强度坡面的产流量与产沙量之间呈现线性关系(图 7)。未扰动坡面、轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的线性方程斜率分别为 0.000 5,0.000 8,0.000 6,0.009 1,线性方程斜率表现为未扰动坡面<覆土恢复坡面<轻度扰动坡面<重度扰动坡面。随着扰动强度的增大,线性方程斜率逐渐增加,表明坡面径流携沙能力随扰动强度的增大而增强,并在覆土恢复之后有明显缓解。在 60 mm/h 雨强下,不同扰动强度坡面的产流量与产沙量之间整体呈现对数关系(图 7)。未扰动坡面、轻度扰动坡面和覆土恢复坡面的方程斜率分别为 0.027,0.060 1,0.684 2,方程斜率表现为未扰动坡面<覆土恢复坡面<轻度扰动坡面。而重度扰动坡面的产流量与产沙量之间的对数关系不明显,产流

量稳定在 400 ml 左右时产沙量在 1~4 g 波动,且产沙量整体大于未扰动、轻度扰动和扰动后恢复的情况。由此可见,随着扰动强度的增大,产流量整体增

加,随着产流量的增加,各扰动坡面径流携带泥沙的能力增长从未扰动到轻度扰动较为缓慢,从轻度扰动到重度扰动径流挟沙能力显著增强。

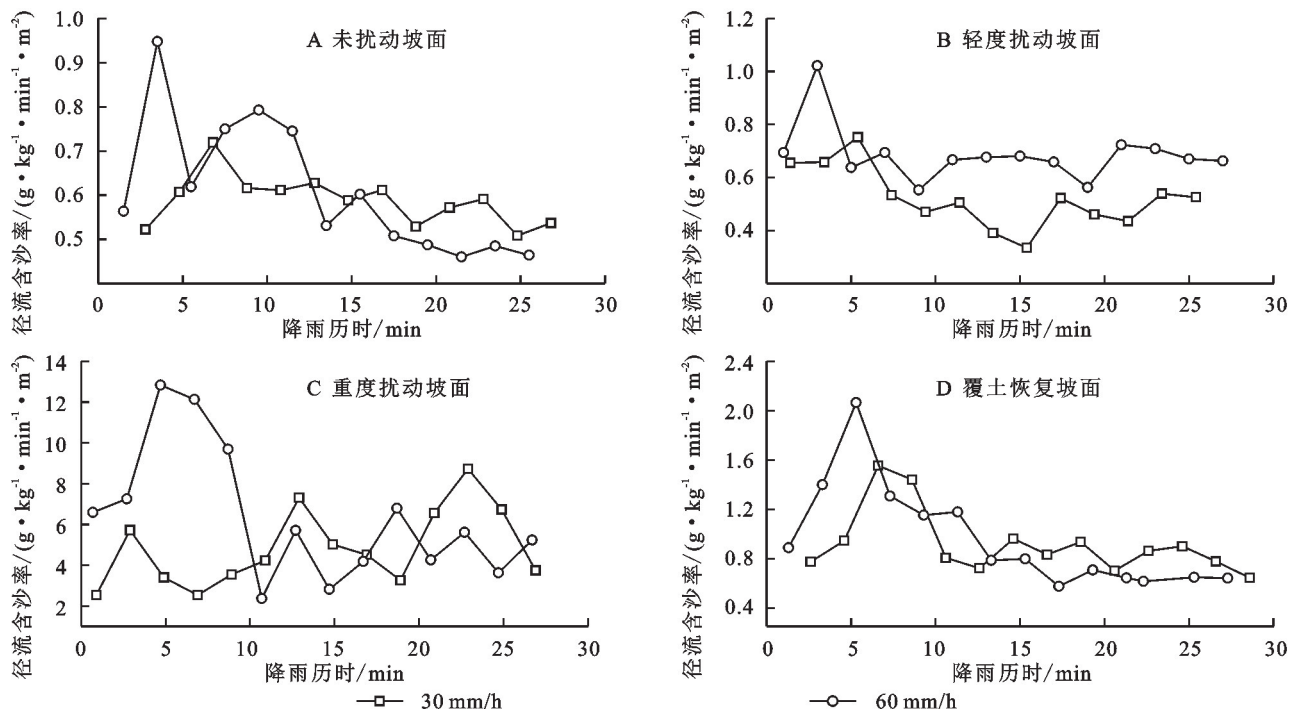


图 6 不同扰动强度坡面径流含沙率随时间变化

Fig. 6 Time variation of sand content in runoff from slopes with different disturbance intensities

表 3 两种雨强下不同扰动强度坡面的径流含沙量

Table 3 Sand content of runoff on slopes with different disturbance intensities under two rainfall intensities

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	径流含沙量/(g·ml ⁻¹)			
	未扰动 坡面	轻度扰动 坡面	重度扰动 坡面	覆土恢复 坡面
30	7.641	6.781	67.834	12.860
60	7.955	9.612	89.172	13.408

3 讨论

在 30, 60 mm/h 雨强下,不同扰动强度坡面溅蚀量随雨强的增大而增加,这是由于随雨强的增大,雨滴尺寸增大,雨滴动能也相应增大,雨滴的打击力增强,其分离土壤颗粒的能力增大,产生更多的松散颗粒供溅蚀搬运^[11]。在 30 mm/h 雨强下,下坡溅蚀量为上坡溅蚀量的 1.33~2 倍。在雨强为 60 mm/h 时,下坡向溅蚀量为上坡向溅蚀量的 1.14~2.67 倍,这主要是由于土壤颗粒飞溅向下坡其受到的重力做正功,向上坡方向的土粒做负功,对土壤颗粒的运移产生阻碍作用,导致下坡向的溅蚀量高于上坡向的溅蚀量^[12]。轻度扰动坡面相较于未扰动坡面的溅蚀量明显增加,这是由于植被对溅蚀有抑制作用,雨滴在植被的缓冲作用下速度减小,动能也随之减小,雨滴对土壤颗粒的击溅能力相应减小^[13-14]。因此,当工程

扰动导致植被盖度降低时,地表失去保护,溅蚀量显著增大。重度扰动坡面由于渣体结构松散,细颗粒物较多,颗粒之间黏聚力较低,雨滴的击溅作用使得渣体颗粒更容易飞溅,导致溅蚀量显著增加,这与李晓丽等^[15]对雨滴的击溅对松散砒砂岩粒径的分选规律中得到的降雨最容易使散土颗粒中细砂发生溅蚀的结论一致。覆土恢复后,植被盖度增加,土壤层的土粒黏聚力更强,加之植物根系在土体中交错、穿插能够固持土壤,共同提升坡面对雨滴的缓冲作用,故溅蚀量较重度扰动显著减少。

在 30, 60 mm/h 雨强下,轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的初始产流时间均较未扰动坡面有所缩短。一方面是与植被对降雨的截流和径流的阻滞有关,降雨过程中,植被将部分降水截留并储存起来,使得坡面受雨量减少,同时地表粗糙度增加,径流速度降低,径流在坡面上流动的时间增加,从而推迟坡面产流时间^[16]。另一方面是由于地上植被群落、地表微生物和地下根系等的存在^[17],导致土壤渗透性能较高,坡面初始产流时间缩短。相反,扰动强度大、植被盖度小的坡面初始产流时间较未扰动坡面有所缩短。

未扰动坡面、轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的产流过程均随降雨历时呈现先增加后稳定的趋势,各扰动强度坡面的产流过程均属于超渗

产流。降雨开始时,坡面表层土壤处于非饱和状态,降水被表层土壤所吸收,坡面未出现产流。随着降雨的进行,表层土壤的水分逐渐趋于饱和,水分开始下渗至下层土壤中^[18-19],水分下渗的速度小于降雨强度,导致坡面开始产流。下层土壤的含水率快速增加,水分入渗率快速减小,坡面径流量开始增加,坡面产流速率也随之增加^[20-21]。当下层土壤的水分逐渐

趋于饱和后,水分的入渗率也逐渐趋于稳定,产流速率也因此达到稳定的状态。所以呈现出先上升后稳定的径流曲线特征,且由于扰动强度增大、植被盖度减小,土壤容重减小,土壤持水量下降,下层土壤水分达到饱和的时间缩短,导致覆土恢复坡面、轻度扰动坡面和重度扰动坡面产流速率达到稳定的时间相较于未扰动坡面依次提前。

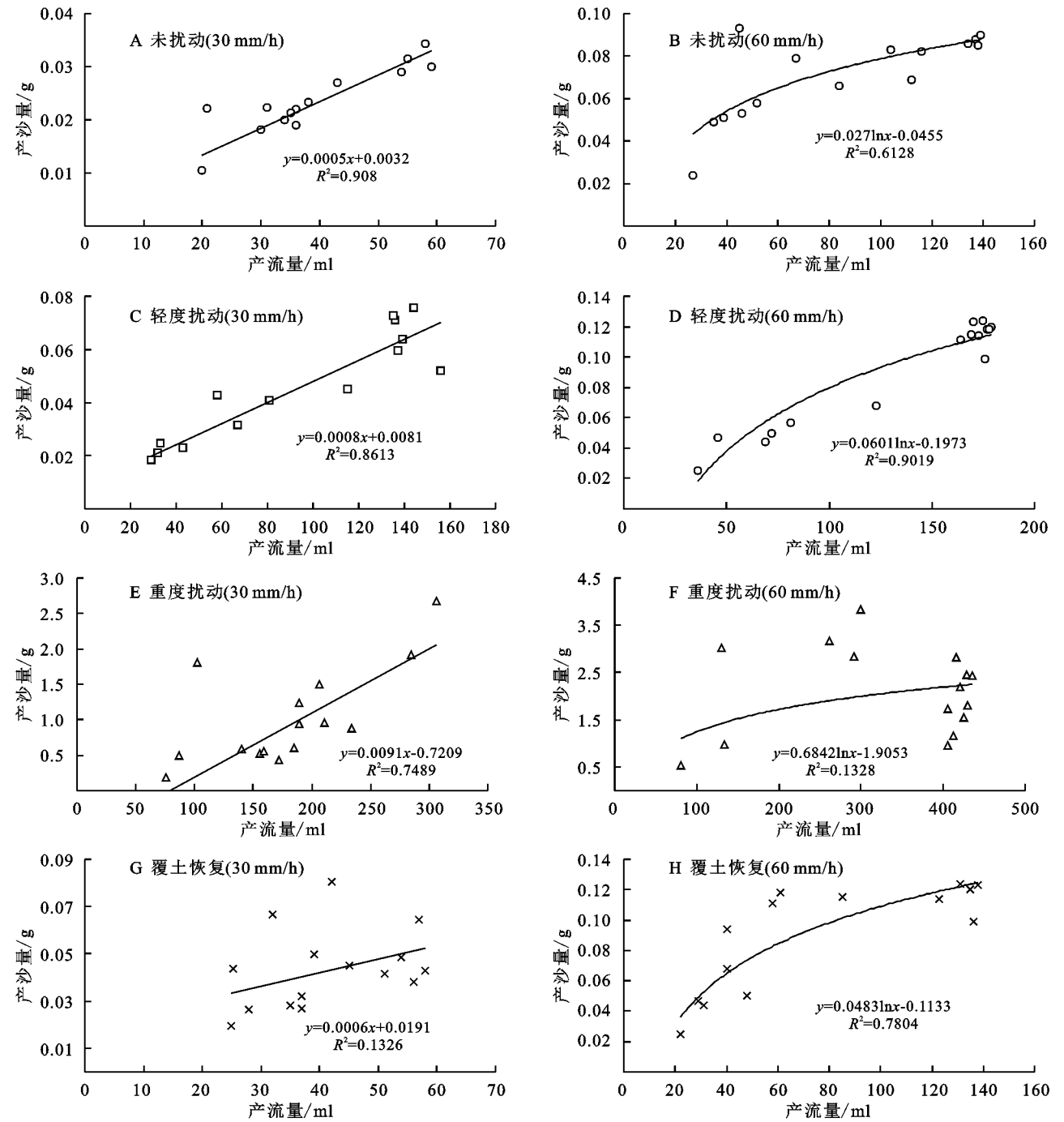


图 7 不同扰动强度坡面产流量与产沙量关系

Fig. 7 Relationship between runoff yield and sediment yield on slope with different disturbance intensity

未扰动坡面和轻度扰动坡面的植被盖度大、土壤颗粒黏聚力强、松散颗粒物较少,径流携带泥沙能力弱。因此,在径流冲刷和降雨打击下坡面的产沙速率

维持在一个较低的水平。重度扰动坡面的产沙过程随降雨历时剧烈波动,这是由于重度扰动坡面由结构松散的渣体组成,渣体之间的黏聚力等力学性质不稳

定,导致土体抗蚀性差,坡面受到径流的冲刷形成跌坎^[22],容易引发溯源侵蚀较快发育,使得产沙速率变化剧烈。而覆土恢复后坡面表层土壤相比于原状土体较为松散,且缺乏植被阻挡产流后坡面表层松散的颗粒物容易被冲刷,使得产沙速率快速达到峰值,而后表层松散颗粒物减少,产沙速率也逐渐下降并趋于稳定^[23-25]。未扰动坡面、轻度扰动坡面和覆土恢复坡面的径流含沙率随降雨历时的变化表现为先快速升高后逐渐降低的趋势,这可能是因为降雨初期产流速率先增加后趋于稳定,而产沙速率维持在较低的水平,当产流速率升至稳定值后,产沙速率较低,导致径流含沙率低。重度扰动坡面由于产沙过程不稳定,因此径流含沙率的跳跃幅度也较大。

总体而言,随着扰动强度的加剧,弃渣工程扰动坡面的初始产流时间显著减少,产流速率和产沙速率逐渐增加,覆土恢复坡面能够增加土壤入渗性能,提升土壤抗击溅的能力,但尚未到达原状土体的状态,因此后续还需要施加其他的水土保持措施,如坡面防护工程等工程措施和种植格桑花等植物措施,来进行弃渣工程扰动区水土保持和生态恢复。

4 结论

(1) 弃渣工程扰动区坡面溅蚀量随扰动强度的增加而增加,但在植被恢复之后有一定的降低,且下坡向的溅蚀量是上坡向溅蚀量的1.45~2.67倍。

(2) 初始产流时间随扰动强度的增大而显著缩短。轻度扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的初始产流时间分别缩短为未扰动坡面的53.8%~66.7%,34.6%~46.7%,86.7%~92.9%。

(3) 相比未扰动坡面,轻度扰动坡面和重度扰动坡面产流速率和产沙速率加快,覆土恢复有助于降低工程扰动坡面产流、产沙速率。未扰动坡面轻度、扰动坡面、重度扰动坡面和覆土恢复坡面的产流速率分别为44~86,104~147,200~373,46~95 ml/(min·m²),产沙速率分别为0.026~0.055,0.05~0.098,1.034~2.189,0.047~0.077 g/(min·m²)。

(4) 弃渣工程扰动导致藏东高山草甸地区的水土流失风险显著增加,覆土及植被恢复能够降低扰动坡面的产流产沙速率,然而覆土恢复坡面的水土保持能力距未扰动坡面尚有差距,仍需采取其他措施对工程扰动坡面加以恢复。

参考文献(References):

- [1] 谢高地,张钰铨,鲁春霞,等.中国自然草地生态系统服务价值[J].自然资源学报,2001,16(1):47-53.
Xie G D, Zhang Y L, Lu C X, et al. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China[J]. Journal of Natural Resources, 2001,16(1):47-53.
- [2] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].地理学报,2012,67(1):3-12.
Sun H L, Zheng D, Yao T D, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67(1):3-12.
- [3] 田悦,赵正武,刘艳.西藏东部高寒草甸苔藓植物群落数量分类与排序[J].生态学报,2022,42(2):755-765.
Tian Y, Zhao Z W, Liu Y. Classification and ordination of bryophyte communities in alpine meadow of eastern Tibet[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(2):755-765.
- [4] Yuan Y, Zhao Z Q, Niu S Y, et al. The reclaimed coal mine ecosystem diverges from the surrounding ecosystem and reaches a new self-sustaining state after 20~23 years of succession in the Loess Plateau area, China[J]. The Science of the Total Environment, 2020,727:138739.
- [5] 魏远,顾红波,薛亮,等.矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(2):107-114.
Wei Y, Gu H B, Xue L, et al. Review of studies on reclamation and ecological restoration of abandoned land of mine[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012,10(2):107-114.
- [6] 陈奇伯,黎建强,王克勤,等.水电站弃渣场岩土侵蚀人工模拟降雨试验研究[J].水土保持学报,2008,22(5):1-4,10.
Chen Q B, Li J Q, Wang K Q, et al. Artificial rainfall research of rock and soil erosion on dumping pile in the hydropower station[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008,22(5):1-4,10.
- [7] 张荣华,荆莎莎,张洪达,等.胶东铁路弃土弃渣体产流产沙特征[J].水土保持学报,2018,32(3):80-85.
Zhang R H, Jing S S, Zhang H D, et al. Runoff and sediment yield characteristics on waste soil and slag formed from railway construction in Jiaodong peninsula region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(3):80-85.
- [8] 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.
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.
- [9] Dong J Z, Zhang K L, Guo Z L. Runoff and soil erosion from highway construction spoil deposits: A rainfall simulation study[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2012,17(1):8-14.
- [10] 郭维敏,李晓丽,王文,等.坡度对紫红色砂岩击溅侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(1):1-9.

- Guo L M, Li X L, Wang W, et al. Influence of slope on the splash erosion of mauve Pisha-sandstone in bare areas[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019,17(1):1-9.
- [11] 王葆,马俊明,程金花,等.华北土石山区砾石覆盖对土壤溅蚀的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(5):93-98.
- Wang B, Ma J M, Cheng J H, et al. Effects of gravel coverage on splash erosion in the mountainous region of Northern China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015,13(5):93-98.
- [12] 程金花,秦越,张洪江,等.华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究[J].农业机械学报,2015,46(2):153-161.
- Cheng J H, Qin Y, Zhang H J, et al. Splash erosion under artificial rainfall in rocky mountain area of northern China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(2):153-161.
- [13] 相莹敏,张洪江,程金花,等.华北土石山区土壤溅蚀影响因素分析[J].中国水土保持科学,2016,14(2):120-126.
- Xiang Y M, Zhang H J, Cheng J H, et al. Factors influencing soil splash erosion in rocky mountain area of Northern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016,14(2):120-126.
- [14] 丛月,张洪江,程金花,等.草本植物对雨滴动能的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):114-118.
- Cong Y, Zhang H J, Cheng J H, et al. Effect of herbaceous plant effects on raindrop kinetic energy[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(3):114-118.
- [15] 李晓丽,郭维敏.降雨击溅下鄂尔多斯松散砂岩粒径分选特性及其敏感性分析[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(6):25-33.
- Li X L, Guo L M. Grain size sorting characteristics of loose Pisha-sandstone in Ordos under rainfall splash and its sensitivity analysis [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(6):25-33.
- [16] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):58-63.
- Chang S T, Huang S Y, Zha X, et al. Effects of rainfall intensity and vegetation coverage on runoff and sediment yield on red soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):58-63.
- [17] 白永会,查轩,吴伟成,等.不同植被恢复模式对退化花岗岩红壤渗透性和持水量的影响[J].水土保持通报,2023,43(2):9-15.
- Bai Y H, Zha X, Wu W C, et al. Effects of different vegetation restoration types on permeability and water holding capacity of degraded granite red soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(2):9-15.
- [18] 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.
- [19] 奚成刚,杨成永,许兆义.铁路工程施工期路堑边坡面产流产沙规律研究[J].中国环境科学,2002,22(2):174-178.
- Xi C G, Yang C Y, Xu Z Y. Studies on rules of runoff and sediment yield on the road cutting slope during construction of the railway[J]. China Environmental Science, 2002,22(2):174-178.
- [20] 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.
- [21] Wang G Y, Innes J, Yang Y S, et al. Extent of soil erosion and surface runoff associated with large-scale infrastructure development in Fujian Province, China[J]. Catena, 2012,89(1):22-30.
- [22] 陈卓,高照良,李永红,等.2种扰动土壤工程堆积体坡面泥沙运移特征对比研究[J].水土保持学报,2020,34(1):34-40.
- Chen Z, Gao Z L, Li Y H, et al. Comparative study of sediment particle transport on slopes of two disturbed soil engineering accumulations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(1):34-40.
- [23] 王保一,张荣华,荆莎莎,等.降雨和坡度对路基边坡产流产沙的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2019,43(2):114-120.
- Wang B Y, Zhang R H, Jing S S, et al. Effects of rainfall and slope gradient on runoff and sediment yield of subgrade slope[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2019,43(2):114-120.
- [24] 魏小燕,毕华兴,霍云梅.不同土壤坡面产流产沙特征对比分析[J].水土保持学报,2016,30(4):44-48.
- Wei X Y, Bi H X, Huo Y M. Comparative analysis of the features of runoff and sediment yield on the different soil slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(4):44-48.
- [25] 李建明,王文龙,王贞,等.神府东胜煤田弃土弃渣体径流产沙过程的野外试验[J].应用生态学报,2013,24(12):3537-3545.
- Li J M, Wang W L, Wang Z, et al. A field experiment of runoff and sediment yielding processes from residues in Shenfu-Dong-sheng Coalfield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013,24(12):3537-3545.