



移动扫码阅读

李楠,吴超君,郝喆,等.废弃尾矿坡面产流产沙影响因素分析[J].能源环境保护, 2021, 35(2):58-62.

LI Nan, WU Chaojun, HAO Zhe, et al. Analysis of factors influencing runoff and sediment yield of abandoned tailing slopes[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(2):58-62.

# 废弃尾矿坡面产流产沙影响因素分析

李楠<sup>1</sup>, 吴超君<sup>1</sup>, 郝喆<sup>1</sup>, 滕达<sup>2</sup>, 王晓明<sup>2</sup>

(1. 辽宁大学环境学院, 辽宁沈阳 110036; 2. 辽宁有色勘察研究院有限责任公司, 辽宁沈阳 110013)

**摘要:**为明确不同影响因素对产流产沙的作用效果,采用废弃尾矿土进行人工模拟降雨实验,分析了植被覆盖率(0、40%、80%、100%)、雨强(20、60、100、220 mm/h)、坡度(15°、30°)对尾矿坝坡面初始产流时间的作用效果及其与产流产沙的关联度。结果表明:三种因素对产沙率及产流率的关联度规律一致,当三者共同作用时,按影响程度排序依次为雨强、坡度、植被覆盖率;初始产流时间与雨强及坡度表现为负相关关系,与植被覆盖率之间表现为正相关关系;三种因素对初始产流时间的相关性极显著;覆盖率的增加对产流时间的延缓存在积极作用。

**关键词:**产流产沙;初始产流时间;关联度;影响因素

中图分类号:X171.4

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)02-0058-05

## Analysis of factors influencing runoff and sediment yield of abandoned tailing slopes

LI Nan<sup>1</sup>, WU Chaojun<sup>1</sup>, HAO Zhe<sup>1</sup>, TENG Da<sup>2</sup>, WANG Xiaoming<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 2. Liaoning Non-ferrous Geological Exploration and Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110013, China)

**Abstract:** In order to clarify the effect of different influencing factors on runoff and sediment yield, an experiment of artificial rainfall was carried out with waste tailing soil. The effect of vegetation coverage (0, 40%, 80%, 100%), rain intensity (20, 60, 100, 220 mm/h), and slope (15°, 30°) on the initial runoff time of tailing slopes and their correlation with runoff and sediment yield were analyzed. The results show that the correlation degree of these three factors with sediment yield and runoff rate is consistent. When these three factors act together, the order of influence degree is rain intensity, slope and vegetation coverage. The initial runoff time is negatively correlated with rain intensity and slope, and positively correlated with vegetation coverage. The correlation of three factors with the initial runoff time is extremely significant. The increase of vegetation coverage has a positive effect on the delay of runoff time.

**Key Words:** Runoff and sediment yield; Initial runoff time; Correlation degree; Influencing factors

## 0 引言

随着我国经济的发展,每年全国矿山所排弃的尾矿越来越多,这些尾矿仅小部分被利用,剩下

的大部分都存放在尾矿库中,其中很多尾矿库处于无人看管的废弃状况。结构极其不稳定的废弃尾矿库水土流失严重,致使矿区及其附近环境受到污染。明确废弃尾矿坝坡面的产流产沙特征以

收稿日期:2020-12-23;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(20180550192);辽宁省科技计划项目(2019JH8/10300107);辽宁省百千万人才资助项目(辽百千万立项[2015]33号);辽宁省科技计划项目(2020JH2/10300100)

第一作者简介:李楠(1998-),女,吉林长春人,硕士在读,主要从事矿山环境治理领域的研究工作。E-mail:577237813@qq.com

通讯作者简介:郝喆(1972-),男,辽宁沈阳人,教授,主要从事矿山环境治理领域的研究工作。E-mail:626447443@qq.com

及初始产流时间,可为提出合理水土保持措施提供理论依据。

国内外诸多学者通过人工模拟降雨对产流产沙规律进行了探究。Yuli Zhao<sup>[1]</sup>等通过模拟降雨对不同雨强下的植被产流产沙特征进行了研究;Xiang Li<sup>[2]</sup>等利用人工降雨装置研究了森林植被对径流产沙的影响,并表明植被在减少产流量和延缓产流时间方面有显著影响;Changjia Li<sup>[3]</sup>等在模拟降雨条件下对坡地地表径流侵蚀进行了动态研究。把握模拟降雨中的初始产流时间是计算坡面产流产沙量的重要环节,而初始产流时间受到降雨强度、坡度、植被等多种因素的影响<sup>[4]</sup>。蒋秋玲<sup>[5]</sup>等对坡面初始产流时间进行了探究;车明轩<sup>[6]</sup>等在对紫色土坡面产流影响的研究中表明了不同雨强和坡度下产流时间的变化趋势;邓景成<sup>[7]</sup>开展的灌草植被盖度对产流产沙影响的模拟降雨试验中表明增加植被覆盖率可有效延缓初始产流时间。

目前,对产流产沙的研究多为自然形成的土壤基质,而针对废弃多年无人管理的尾矿库开展的研究较少。废弃尾矿库的表层土质疏松孔隙率高,保水、保肥的能力差,且有毒有害物质常存在于废弃尾矿中,植物难以生长,再加上结构稳定性较差,使得废弃尾矿坝坡面极易发生径流及侵蚀产沙。本文采用人工模拟降雨装置,将废弃尾矿土作为研究对象,选择灰色关联度的方法,研究植被覆盖率、雨强、坡度对产流率和产沙率的影响,以及对初始产流时间的影响分析。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验土壤与填土方案

试验模型采用的尾矿土壤取自辽阳县寒岭镇一废弃尾矿库,见图 1。

进行模型填土时,将厚度为 10 cm 的碎石放置在试验槽底部,旨在让底部试验土壤同现场尽可能相仿,以减少误差。填土时,方法为分层填筑,填充和压实两道工序同步进行,使土层从上到下土壤的紧实度增加。在试验槽边壁进行适当压实,以降低边壁效应使水流正常流动。单位容积的土体重量控制在 1.8~1.9 t。

### 1.2 模拟降雨设计

人工降雨试验模型的主体规格为:7.5 m×1.2 m×1.5 m(长×宽×高)。利用设置在装置顶部的降雨架模拟降雨,降雨过程中的有效高度为 6 m,保



图 1 辽阳县寒岭镇一废弃尾矿库  
Fig.1 An abandoned tailing pond in Hanling Town, Liaoyang County

持恒定水压,雨滴大小及到达坡面的速度与天然降雨状态相近。装置底部设防渗系统及排水管,末端出水处设计有 V 型集流槽,径流泥沙样通过放置在集流口处的空桶来收集。导水管上设置瞬时电子流量计和控制阀,降雨装置喷头并联,通过打开不同的阀门,控制雨强。

为使每次试验的初始含水率基本维持在 10% 左右并消除坡体表面的差异性。试验前,在坡面进行预降雨,当径流出现浑浊时停止降雨。试验中开始记录降雨的时间为雨滴落在坡面上的时刻,记录产流的时间以产流出现浑浊的现象为起始,共降雨 30 min。开始记录产流时即进行径流样的收集,每次试验共采集 15 个样品。待样品静置 24 h 径流泥沙样完全澄清后倒掉上层清液,之后将泥沙样自然风干后,取一部分土壤样品烘干称重得到产沙重量并记录。试验实物如下图 2 所示。



图 2 降雨模型实物图  
Fig.2 Rainfall model

### 1.3 坡度及植被覆盖设计

辽宁省雨强空间的分布极不均匀,范围在 21

~212 mm/h 之间,其南部地区中心雨强值达到 100 mm/h,北部地区雨强值在 21~67 mm/h 之间<sup>[8]</sup>,故本试验设置 20、60、100、220 mm/h 四种雨强。坡度因素对产流产沙的作用最主要<sup>[9]</sup>。15° 是尾矿坝的常见坡度,且杨开宝<sup>[10]</sup>等在试验中发现坡度在 10°~24° 时侵蚀量随坡度增加而增加,但当坡度大于 24° 以后侵蚀量同坡度的关系呈负相关。根据尾矿坝的常见坡度以及试验地的条件,设置了两种坡度(15° 和 30°),并将坡长控制在 2 m。植被可有效缓解水土流失现象<sup>[11]</sup>。本试验通过铺设草皮模拟植被覆盖。大部分相关研究认为超过 70% 的覆盖率,可很大程度上控制水土流失。覆盖率在 60%~80% 之间产生的防治效果较在 20%~40% 之间的稳定<sup>[12]</sup>,根据当地情况,采用 0、40%、80%、100% 四种植被覆盖率。

## 2 结果与分析

### 2.1 产沙率与影响因素之间的关系

当坡度和植被覆盖率一定时,产沙率原始数据可分为 8 组。每组数据中随着一定的时间间隔一种雨强对应 15 个产沙率数据,对 8 组数据中每一种雨强对应的 15 个产沙率数据取均值后,共得到 32 个数据作为灰色分析的原始数据。设置影响因素坡度( $X_1$ )、植被覆盖率( $X_2$ )、雨强( $X_3$ )为比较数列,产沙率( $X_0$ )为参考数列。计算灰色关联度具体步骤如下<sup>[13]</sup>:

无量纲化(均值化法)处理原始数据即:

$$x_i(k) = \frac{x_i^*(k)}{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_i^*(k)} \quad (1)$$

逐一计算参考数列(均值化后的第一列)与比较数列的绝对差值即:

$$|x_0(k) - x_i(k)| \quad (2)$$

计算关联系数:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_{i=1}^n \min_{k=1}^m |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i=1}^n \max_{k=1}^m |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i=1}^n \max_{k=1}^m |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

计算关联度:

$$r_{0i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \zeta_i(k) \quad (4)$$

式中: $m$ —指标的个数; $n$ —参考样本的个数; $k=1, 2, \dots, m$ ;  $i=0, 1, 2, \dots, n$ ;  $x_i^*$ —原始数据; $\zeta(k)$ —

关联系数; $\rho$ —为分辨系数,一般  $\rho=0.5$ <sup>[14]</sup>;  $r_{0i}$ —为参考样本的关联度值。

据此,求得影响因素对于产沙率的关联度,详见表 1。

表 1 影响因素与产沙率的关联度

Table 1 Correlation degree between influencing factors and sediment yield ratio

影响因素	坡度	植被覆盖率	雨强
关联度	0.862 22	0.845 46	0.872 48

灰色关联度的数值大小可表明影响因素对参考数列的影响程度,数值越大则影响程度越大。由表 1 可知,各因素对产沙率均有较大的影响,对产沙率的关联度影响最大的因素为雨强,其数值是 0.872 48,雨强的增大致使坡面径流变大,土壤的渗透性由于径流冲刷力的增强而下降,致使侵蚀产沙现象加重。坡度对于产沙率的关联度,为 0.862 22,坡度增大会增加土层被径流冲走的几率。植被覆盖率较另两种因素的数值小,为 0.845 46,但对产沙率同样有较大的影响,地表在植被的阻挡下受到雨水的击溅侵蚀作用减小,另一方面植被可增加土壤的抗蚀能力,两者共同作用使产沙率降低。

### 2.2 产流率与影响因素之间的关系

把参考数列  $Y_0$  设为产流率,比较数列不变,利用公式(1)~(3)对原始数据进行计算,得出关联系数后,利用公式(4)得到影响因素对于产流率的灰色关联度,计算结果见表 2。

表 2 影响因素与产流率的关联度

Table 2 Correlation degree between influencing factors and runoff yield ratio

影响因素	坡度	植被覆盖率	雨强
关联度	0.722 97	0.670 63	0.742 54

对灰色关联度进行排序:雨强>坡度>植被覆盖率,即对坡面产流率影响程度相对较大的首先为雨强,次之是坡度,影响程度相对最弱的为植被覆盖率。雨强对于产流率的关联度为 0.742 54,雨强愈大,动能愈大,落在坡面的雨滴速度愈大,尾矿坝坡面接受单位时间内的雨量愈大,使得坡面产流率增加,该因素对产流率的影响最大。坡度对于产流率的关联度为 0.722 97,产流率受其影响较大,坡面径流沿重力方向移动的分力同坡度呈正相关,所以提高坡度会加快水流汇集速度,产流率随之增大。与坡度因素和雨强因素相比,植被覆盖率对于产流率的影响较小,关联度为 0.670 63。



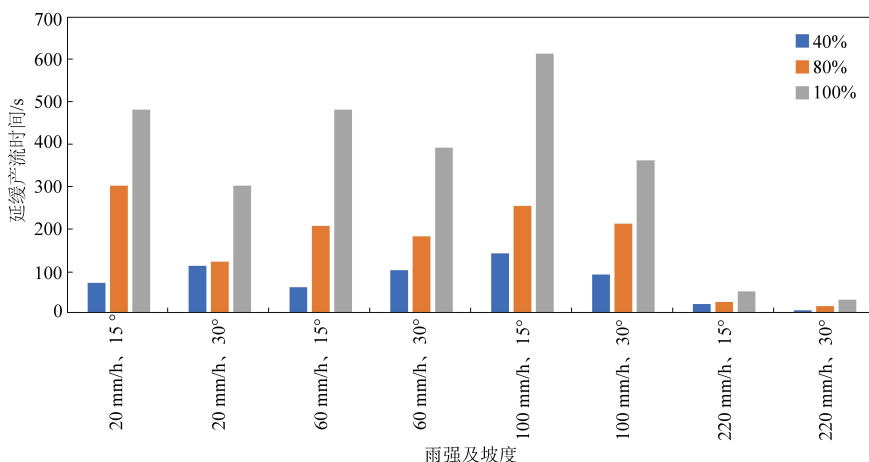


图4 不同试验条件下的延缓产流时间

Fig.4 Delay runoff yield time under different test conditions

### 3 结论

利用人工模型实验装置,研究不同植被覆盖率、雨强和坡度下的废弃尾矿坡面初始产流时间以及与产流产沙的关联度,所得结论如下:

(1) 植被覆盖率、雨强和坡度对于产沙率的关联顺序为:雨强>坡度>植被覆盖率,对产流率的关联顺序为:雨强>坡度>植被覆盖率。当雨强、坡度、植被共同作用时,废弃尾矿坡面产流产沙率受雨强影响最大,坡度次之,植被覆盖的影响相对其他两个影响因素较弱。

(2) 初始产流时间与植被覆盖率、雨强及坡度呈一定的线性关系,与植被覆盖率之间表现为正相关关系,与雨强及坡度之间表现为负相关关系。裸地、雨强为 220 mm/h、坡度为 15°时初始产流时间最早;覆盖率为 100%、雨强为 20 mm/h、坡度为 15°时初始产流时间最晚。

(3) 对初始产流时间产生最主要影响的是雨强和植被覆盖,坡度在试验条件下对初始产流时间的影响较另外两种因素都小,三个因素对初始产流时间的作用效果都较大且均达到极显著。试验条件下设置的三种植被覆盖率均可有效延缓初始产流时间,植被覆盖率的提高对产流时间延缓有积极作用。

### 参考文献

[1] Yuli Zhao, Jianzhi Niu, Jiao Li, et al. Characteristics of flow production and sediment production of *Pinus tabulaeformis* through artificial rainfall simulation [J]. *Open Journal of Ecology*, 2012, 2 (2): 74-78.

[2] Xiang Li, Jianzhi Niu, Jiao Li, et al. Characteristics of runoff and sediment generation of forest vegetation on a hill slope by

use of artificial rainfall apparatus [J]. *Journal of Forestry Research*, 2012, 23 (3): 419-424.

- [3] Changjia Li, Chengzhong Pan. Overland runoff erosion dynamics on steep slopes with forages under field simulated rainfall and inflow [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34 (8): 1794-1809.
- [4] 李小华, 曹月娥, 杨建军. 人工模拟降雨条件下伊犁河流域黄土区土壤侵蚀试验分析 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30 (1): 36-40.
- [5] 蒋秋玲, 信忠保, 余新晓, 等. 北京山区侧柏林地坡面初始产流时间影响因素 [J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17 (4): 1-8.
- [6] 车明轩, 宫渊波, 穆罕默德·纳伊姆·汉, 等. 人工模拟降雨条件下不同雨强、坡度对紫色土坡面产流的影响 [J]. *水土保持通报*, 2016, 36 (4): 164-168.
- [7] 邓景成. 灌草植被盖度对产流产沙影响的模拟降雨实验研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2018: 1-75.
- [8] 杨青, 韩秀君, 高松影, 等. 1960—2011年辽宁省大暴雨时空分布特征 [J]. *气象与环境学报*, 2015, 31 (1): 34-42.
- [9] Q. J. Liu, J. An, L. Z. Wang, et al. Influence of ridge height, row grade, and field slope on soil erosion in contour ridging systems under seepage conditions [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 147: 50-59.
- [10] 杨开宝, 张振中, 吴存良. 不同坡度径流小区产流产沙监测结果初报 [J]. *中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊*, 1990 (12): 59-65.
- [11] Zhou Z C, Shangguan Z P. Effect of ryegrasses on soil runoff and sediment control [J]. *Pedosphere*, 2008, 18 (1): 131-136.
- [12] 曾伯庆, 马文中, 李俊义, 等. 人工草地植被度对产流产沙过程研究 [A]. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集 [C]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 80-85.
- [13] 黄发明, 汪洋, 董志良, 等. 基于灰色关联度模型的区域滑坡敏感性评价 [J]. *地球科学*, 2019, 44 (2): 664-676.
- [14] 张晶晶, 王力. 坡面产流产沙影响因素的灰色关联法分析 [J]. *水土保持通报*, 2011, 31 (2): 159-162.