

# 不同近地表水文条件下矿山弃土对土壤细沟可蚀性的影响 ——以攀枝花盐边县龙麟矿山为例

杨超<sup>1,2</sup>, 苏正安<sup>2</sup>, 马菁<sup>3</sup>, 熊东红<sup>2</sup>, 董一帆<sup>2</sup>, 张丹<sup>4</sup>, 徐霞<sup>1</sup>

(1. 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610101; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041; 3. 四川农业大学水利水电学院, 雅安 625014; 4. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

**摘要:** 以攀枝花市盐边县红格龙麟矿山李家河排土场、未被开采过的矿区灌草地和耕地 3 种土壤为研究对象, 基于土壤水蚀预报模型(WEPP)中的细沟侵蚀模型, 采用 100, 200, 300, 400, 500, 600 ml/min 的流量对灌草地、耕地和矿山排土场土壤分别进行排水、饱和以及渗流状态下的冲刷试验, 查明其可蚀性( $K_r$ )的变化。结果表明: (1) 径流剪切力与土壤剥蚀率之间存在较显著的指数关系( $P < 0.01$ ); (2) 流量与土壤剥蚀率之间存在较为显著的指数关系( $P < 0.01$ ), 土壤剥蚀率随流量的增加呈指数形式增加; (3) 在排水、饱和及渗流 3 种水文条件下, 灌草地土壤  $K_r$  值分别为 0.000 2, 0.000 5, 0.000 9 m/s, 耕地土壤  $K_r$  值分别为 0.000 3, 0.000 9, 0.001 8 m/s, 排土场土壤  $K_r$  值分别为 0.002 3, 0.066 9, 0.094 6 m/s。可见, 在同一水文条件下, 土壤  $K_r$  值均表现为排土场 > 耕地 > 灌草地; (4) 在同一土地利用类型下, 土壤  $K_r$  值均表现为渗流状态 > 饱和状态 > 排水状态, 这是由于渗流状态下土壤同时受到垂直方向和地表径流的双重作用, 导致土壤可蚀性最差, 在饱和状态下, 土壤抗蚀性也相应地变差, 在排水状态下, 由于地表径流可以自由下渗, 土壤抗蚀性相对较好。综上所述, 土壤中垂直水力梯度的变化会显著影响土壤可蚀性, 矿山土壤经过人为扰动之后抗蚀性也会呈显著降低趋势, 在未来土壤侵蚀研究中亟需进一步开展深入研究。

**关键词:** 矿山排土场; 水文条件; 土壤可蚀性; 土地利用类型; 细沟侵蚀

**中图分类号:** S157.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2016)06-0067-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.012

## Effects of Discard Soil in Mine on Soil Erodibility Under Different Hydrological States

—An Example of Longmang Mine of Yanbian County, Panzhihua City

YANG Chao<sup>1,2</sup>, SU Zhengnan<sup>2</sup>, MA Jing<sup>3</sup>,

XIONG Donghong<sup>2</sup>, DONG Yifan<sup>2</sup>, ZHANG Dan<sup>4</sup>, XU Xia<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014; 4. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201)

**Abstract:** To explore the changes in rill erodibility ( $K_r$  value) among soils in waste dump land, shrub grassland and cultivated land, soil samples were collected in the shrub grassland and cultivated land without mining, and waste dump land of Hongge Longmang Mine of Yanbian County, Panzhihua City. A series of scour experiments were carried out to simulate rill erosion process under water discharge rates ranging from 100 ml/min to 600 ml/min in the study area. Changes in soil detachment rate under drainage, saturated and seepage conditions were also measured. Results showed that a significant exponential relationship between flow shear stress and soil detachment rate appeared ( $P < 0.01$ ). Meanwhile, a significant exponential relationship between flow discharges and soil detachment rates was also observed ( $P < 0.01$ ). For the soil of shrub grassland,  $K_r$  values were estimated at 0.000 2 m/s, 0.000 5 m/s, and 0.000 9 m/s under drainage state, saturated state and seepage state, respectively, while the  $K_r$  values for soil of cultivated land were estimated at 0.000 3 m/s, 0.000 9 m/s, and 0.001 8 m/s, respectively. Meanwhile, for the soil of waste dump land,  $K_r$  values were estimated at 0.002 3 m/s, 0.066 9 m/s, and 0.094 6 m/s under drainage state,

收稿日期: 2016-07-22

资助项目: 四川省科技厅应用基础项目(2014JY0067); 国家自然科学基金项目(41401313); 国家“973”项目(2015CB452704)

第一作者: 杨超(1992—), 男, 陕西商洛人, 硕士研究生, 主要从事遥感技术在土壤侵蚀中的应用研究。E-mail: fqschaazi@gmail.com

通信作者: 苏正安(1980—), 男, 四川江油人, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: suzhengan@imde.ac.cn

saturated state and seepage state, respectively. Those results indicated that  $K_r$  values for the soil of waste dump land were higher than those for the cultivated land and shrub grassland. Significant differences in the rill erodibility were observed among soils in the three land use types due to different soil particle sizes. For all soils, soil  $K_r$  values were the highest under seepage condition due to high vertical hydraulic pressure, while soil  $K_r$  values were the lowest under drainage condition due to low vertical hydraulic pressure. At the same time,  $K_r$  values for soil under saturated condition were higher than that under drainage condition, which may be because higher vertical hydraulic pressure appeared under saturated condition than under drainage condition. These results indicated that  $K_r$  values of rill erosion varied among different vertical hydraulic conditions and impacts of hydraulic gradient of groundwater on soil erosion process should be paid more attention in further studies.

**Keywords:** waste dump in mine; hydraulic conditions; soil erodibility; land use types; rill erosion

矿山开发堆置废弃物形成的排土场是工程堆积体的一种典型类型,成为土壤侵蚀研究关注的焦点之一,其侵蚀过程复杂,侵蚀机理尚不清楚。矿山排土场土壤经过人为剧烈扰动混合,造成土体表面植被破坏,土壤养分流失和质量下降,易发生土壤加速侵蚀,甚至发生滑坡、泥石流等地质灾害<sup>[1]</sup>,严重威胁下游人民生命财产安全。排土场土壤侵蚀过程复杂,主要表现在土壤侵蚀部位集中、类型多样、强度剧烈<sup>[2]</sup>。目前,国内学者主要采用野外降雨试验<sup>[3]</sup>和野外冲刷试验<sup>[4]</sup>研究弃土弃渣体的径流水动力学特性,并分析土壤剥蚀率与各水动力学参数之间的关系;Nouwakpo 等<sup>[5]</sup>采用冲刷试验的方法定量研究了地下水水力梯度对细沟侵蚀和临界剪切力的影响,同时确定了无垂直水力梯度影响下的土壤临界剪切力。目前,矿山排土场土壤侵蚀研究常常忽略了地下水的影响。

土壤可蚀性是表征土壤性质对侵蚀敏感程度的指标,是进行土壤侵蚀和水土流失定量评价的重要依据<sup>[6]</sup>,也是土地利用规划、水土保持规划、土地利用评价和土壤环境潜在危险性评价的重要基础<sup>[7]</sup>。土壤侵蚀程度的大小不仅取决于引起土壤侵蚀的外部动力(降雨、地形等),而且也取决于土壤的可蚀性参数( $K_r$ )值和临界抗剪切力( $\tau_c$ )值,这 2 个参数分别反映了土壤可蚀性的大小和抵抗径流剥蚀作用的能力,是定量计算土壤流失的重要指标,也是土壤侵蚀预报模型中的必要参数<sup>[8]</sup>。Li 等<sup>[9]</sup>在黄土高原小流域估算了不同土地利用方式对土壤可蚀性  $K$  值的影响,量化了潜在影响因素,建立了回归模型;王志刚等<sup>[10]</sup>采用降雨试验研究了紫色土在 3 种近地表水文条件下土壤侵蚀过程;Wang 等<sup>[11]</sup>研究了不同土壤可蚀性与模拟入渗率之间的关系;Ahirwal 等<sup>[12]</sup>研究了矿山周边 5 种土地利用方式下,不同地表深度土壤理化性质的变化情况。目前,针对矿山排土场土壤可蚀性的研究还较少。

综上所述,目前矿山土壤侵蚀研究多集中于排土场土壤侵蚀过程和侵蚀动力学特性研究<sup>[13]</sup>,而针对矿山土壤在不同近地表水文条件下土壤可蚀性变化的研究还较少。本文以攀枝花市盐边县红格龙鳞矿山排土场土壤、未被开采过的矿区灌草地和耕地土壤为研究对象,采用放水冲刷试验,对比分析矿山土壤

在开采前后受垂直水力梯度影响下土壤可蚀性的变化规律,为该区域土壤侵蚀预报以及水土保持规划等提供科学依据。

## 1 研究区概况

本研究区位于四川省攀枝花市盐边县(100°42′—102°03′E,27°06′—28°16′N)。盐边县地处青藏高原东南边缘,雅砻江与金沙江交汇处攀西裂谷中南段,属中山丘陵、山原峡谷地貌,地势由西北向东南倾斜,山脉走向近于南北,海拔高度在 1 000~3 000 m 之间,相对高差 700~1 500 m。气候类型属于典型的南亚热带半干旱季风气候。区域内年平均气温 19.2℃,多年平均降雨量为 1 062.9 mm,年蒸发量为 1 936.6 mm。土壤类型主要为红壤和黄红壤,土壤质地多为砂土和壤土,含沙量较多,土壤抗蚀能力较弱。土壤侵蚀类型主要以水力侵蚀为主。研究区内矿产资源丰富,已探明矿种 40 余种,包括煤、钒钛磁铁矿、赤铁矿等。自然植被中乔木有云南松、攀枝花,灌木树种有青枫、山茶树、水红、粗糠叶、水麻等,优势草种主要有白茅、扭黄茅、批碱草、野古草、鹅冠草等。人工植被主要有桑树、桂圆、李子、香椿、桃树、芒果、芭蕉等树种。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集与处理

试验样品的采集时间为 2015 年 8 月份,矿山排土场采样区位于盐边县新九乡攀枝花龙鳞矿产品有限公司的矿山,该矿山排土场占地面积 62.82 hm<sup>2</sup>,最低堆置标高 1 670 m 水平,最高堆置标高 1 880 m 水平,排土场堆置段高 40 m,分为 4 个阶段排弃(1 760,1 800,1 840,1 880 m),容积 1 216 万 m<sup>3</sup>,实际堆排 833 万 m<sup>3</sup>(实方)的弃土(石)。同时,选择矿山上耕地、灌草地 2 种土地利用方式下的土壤为研究对象。灌草地、耕地和排土场的土壤质地分别为壤质黏土、粉砂质黏壤土和砂质壤土。耕地土壤有机质含量最高,为 16.33 g/kg;灌草地与耕地较为接近,为 15.21 g/kg;排土场最低,为 2.86 g/kg,各种土壤机械组成见表 1。分别取原状土,将采集到的土样剔除可见动、植物残体和石块,经过自然风干,过 2 mm 筛,将粒径<2 mm 的土壤用于冲刷试验。

表 1 不同土地利用类型土壤理化性质

| 土地利用类型 | 土壤有机质/<br>(g · kg <sup>-1</sup> ) | 土壤质地   | 土壤机械组成/% |       |       |
|--------|-----------------------------------|--------|----------|-------|-------|
|        |                                   |        | 砂粒       | 粉粒    | 黏粒    |
| 灌草地    | 15.21                             | 壤质黏土   | 35.60    | 37.37 | 27.03 |
| 耕地     | 16.33                             | 粉砂质黏壤土 | 37.11    | 46.61 | 16.28 |
| 排土场    | 2.86                              | 砂质壤土   | 65.20    | 26.58 | 8.23  |

2.2 试验方法

室内控制试验于 2015 年 10 月份在中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所和云南省农科院共建的元谋干热河谷沟蚀崩塌观测研究站内进行。试验装置为自制“V”型冲刷槽,冲刷槽采用不锈钢钢板焊接而成,冲刷槽长×宽×高尺寸为 50 cm×5 cm×15 cm,底部带有圆形排水孔洞,本次试验中冲刷槽的坡度为 5°。填土之前,在冲刷槽底部排水孔内填充海绵等易透水物,然后再填充砾石,深度为 5 cm,并在砾石之上覆盖一层纱布,防止土壤堵塞排水孔,最后填充土壤,填充土壤量依据自然状态下的土壤容重,分层将土填入冲刷槽,并压实为“V”型,模拟自然细沟的形态和容重。本研究采用放水冲刷试验测定土壤可蚀性。冲刷试验的流量分别为 100,200,300,400,500,600 ml/min,试验用水为蒸馏水,主要为了排除水中盐分对土壤可蚀性的影响。在冲刷过程中,待产沙率稳定后,每种流量采集 3 个径流泥沙样,采样时间为 1 min,每种土地利用类型的土壤均进行 3 次重复试验。将收集到的泥沙样静置后加入明矾,加速泥沙沉淀,待泥沙完全沉淀后,烘干并称重。

本试验的土壤分别为矿山排土场土壤和矿山上未开发矿区的耕地、灌草地的土壤,分别按照排水、饱和、渗流 3 种近地表水文状态进行冲刷试验,从而分别模拟土体分别处于地表径流自由下渗、土体水分饱和以及土体中壤中流转化为地表径流的状态。排水状态为风干土壤直接填充入冲刷槽后进行冲刷试验,冲刷槽内径流可以自由下渗,并通过底部排水孔排出下渗流;饱和状态需要在填土前将冲刷槽底部的排水孔与放置于升降机上的马氏瓶相连,填土之后通过调节升降机的高度,使马氏瓶中的蒸馏水从冲刷槽下部逐渐浸润土壤直到饱和,保持马氏瓶中水压不变,静置 24 h 后开始放水冲刷试验;排水状态与饱和状态步骤相似,只需要进一步抬高马氏瓶的高度,使冲刷槽中的土处于饱和状态,而且形成地表漫流。

2.3 数据处理

采用水蚀预报模型(Water Erosion Prediction Project, WEPP)研究径流剪切力和土壤剥蚀率之间的相关关系及土体细沟可蚀性。该模型中主要采用细沟可蚀性参数( $K_r$ )和临界剪切力( $\tau_c$ )来衡量土体对地表径流的抵抗程度,模型为<sup>[14]</sup>:

$$D_r = K_r(\tau - \tau_c)(1 - \frac{qc}{T_c}) \tag{1}$$

式中: $D_r$  为土壤剥蚀率(kg/(m<sup>2</sup> · s)); $K_r$  为单位宽度上细沟可蚀性参数(m/s); $\tau$  为径流剪切力(Pa); $\tau_c$  为土壤临界剪切力(Pa); $q$  为流量(m<sup>2</sup>/s); $c$  为泥沙含量(kg/m<sup>3</sup>); $T_c$  为水流的输沙能力(kg/(m · s))。

当水流中含沙量  $c=0$  时,细沟侵蚀过程具有最大的剥蚀分散率——最大可能分散剥蚀率(Potential detachment)。此时,(1)式可简化为:

$$D_{r,max} = K_r(\tau - \tau_c)^n \tag{2}$$

式中: $D_{r,max}$  表示为最大可能剥蚀率(kg/(m<sup>2</sup> · s))。

径流量与土壤剥蚀率的相关关系,以及径流剪切力与土壤剥蚀率之间的相关关系均采用 Origin Pro 2016 软件进行拟合。

3 结果与分析

3.1 流量对土壤剥蚀率的影响

在不同近地表水文状态下(排水状态、饱和状态及渗流状态),径流量与土壤剥蚀速率的关系见图 1。在排水状态(a)、饱和状态(b)和渗流状态(c)下,流量与土壤剥蚀率之间存在较为显著的指数关系( $P<0.01$ ),即随着流量的不断增加,土壤剥蚀率呈指数增加形式。流量与土壤剥蚀率拟合方程见表 2。

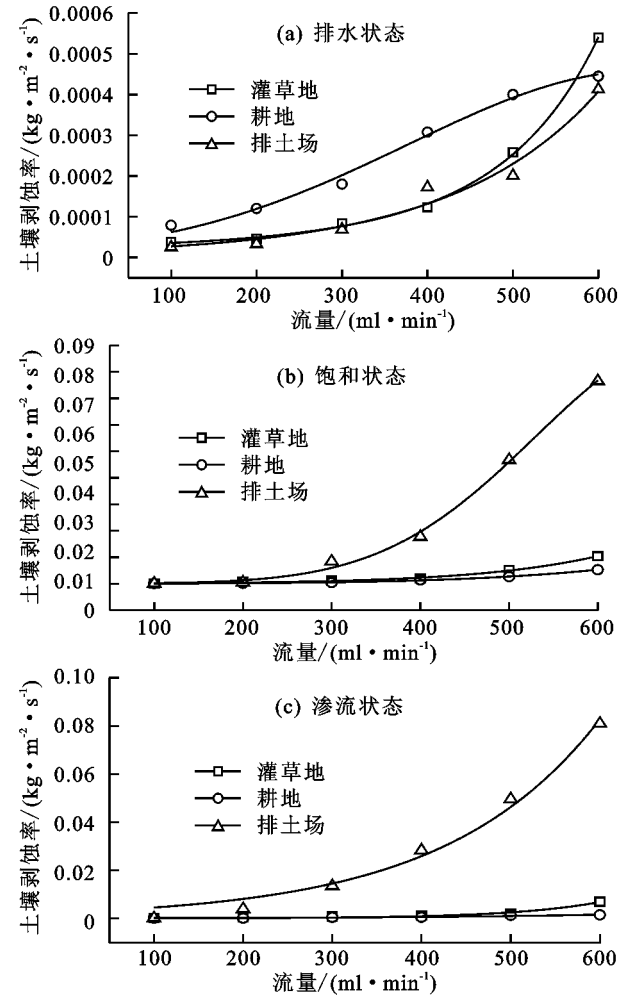


图 1 不同水文状态不同土地利用方式下流量与土壤剥蚀率之间的关系

表 2 流量与土壤剥蚀率关系

| 水文条件 | 土地利用方式 | 拟合方程                                           | <i>F</i> 值 | <i>R</i> <sup>2</sup> |
|------|--------|------------------------------------------------|------------|-----------------------|
| 排水状态 | 灌草地    | $D_r = e^{(-10.4659 + 0.0017q)}$               | 2367.19    | 0.99 **               |
|      | 耕地     | $D_r = e^{(-10.4747 + 0.0085q - 0.00001q^2)}$  | 553.47     | 0.99 **               |
|      | 排土场    | $D_r = e^{(-11.0167 + 0.0049q)}$               | 90.35      | 0.96 **               |
| 饱和状态 | 灌草地    | $D_r = e^{(-9.5402 + 0.0093q)}$                | 527.92     | 0.99 **               |
|      | 耕地     | $D_r = e^{(-10.7982 + 0.0124q - 0.000001q^2)}$ | 740.76     | 0.99 **               |
|      | 排土场    | $D_r = e^{(-10.7241 + 0.0238q - 0.00002q^2)}$  | 774.99     | 0.99 **               |
| 渗流状态 | 灌草地    | $D_r = 0.00002 \times (1.0099)^q$              | 145.62     | 0.97 **               |
|      | 耕地     | $D_r = 0.0001 \times (1.0046)^q$               | 73.87      | 0.91 **               |
|      | 排土场    | $D_r = 0.0025 \times (1.0058)^q$               | 344.86     | 0.98 **               |

注:样本数 *N*=6; \*\* 表示 *P*<0.01。

在排水状态下,当初始流量为 100 ml/min 时,耕地土壤剥蚀率略高于灌草地土壤和排土场土壤。随着流量的不断增加,灌草地土壤剥蚀率的变化较大,而耕地土壤和排土场土壤变化缓慢,当流量达到 600 ml/min 时,土壤剥蚀率差异并不显著。

在饱和与渗流状态下,当初始流量为 100 ml/min 时,3 种土壤的剥蚀率相当。随着流量的增加,排土场土壤剥蚀率显著地增加,变化最剧烈,灌草地土壤和耕地土壤剥蚀速率变化较为平缓,当流量达到 400 ml/min 时,灌草地土壤剥蚀率逐渐大于耕地土壤剥蚀速率,当流量达到 600 ml/min 时,土壤剥蚀率表现为排土场>灌草地>耕地。

3.2 土地利用方式对土壤可蚀性的影响

土壤剥蚀率与径流剪切力之间存在线性关系或指数关系,学术界一直存在争议<sup>[8]</sup>。Silva 等<sup>[15]</sup>的研究结果表明两者之间有线性关系。本研究中,通过对径流剪切力  $\tau$  值和土壤剥蚀率  $D_r$  值进行非线性拟合分析,获取了排水状态、饱和状态以及渗流状态下灌草地(a)、耕地(b)和排土场(c)径流剪切力  $\tau$  值与土壤剥蚀率  $D_r$  值的回归曲线,见图 2~图 4。

由图 2~图 4 可知,在不同水文条件和不同土地利用方式下,径流剪切力与土壤剥蚀率之间均具有显著的指数相关关系(*P*<0.01),这表明随着径流剪切力的不断增大,土壤剥蚀率呈指数形式增长。在排水、饱和及渗流 3 种水文条件下,灌草地土壤  $K_r$  值分别为 0.000 2,0.000 5,0.000 9 m/s,耕地土壤  $K_r$  值分别为 0.000 3,0.000 9,0.001 8 m/s,排土场土壤  $K_r$  值分别为 0.002 3,0.066 9,0.094 6 m/s。

3.2.1 排水状态 从图 2 可以看出,排水状态下土壤的细沟可蚀性值表现为排土场>耕地>灌草地,排土场土壤可蚀性值分别是耕地和灌草地的 7.7 倍和 11.5 倍,而灌草地土壤可蚀性值与耕地土壤相差不大,这表明排土场土壤抗侵蚀能力明显弱于有植被覆盖的灌草地土壤和耕地土壤。

3.2.2 饱和状态 从图 3 可以看出,饱和状态下土壤的细沟可蚀性值表现为排土场>耕地>灌草地,排土场土壤可蚀性值分别是耕地和灌草地的 74.3 倍和 133.8 倍,而灌草地土壤可蚀性值小于耕地土壤,这

表明灌草地土壤抗侵蚀能力最强。

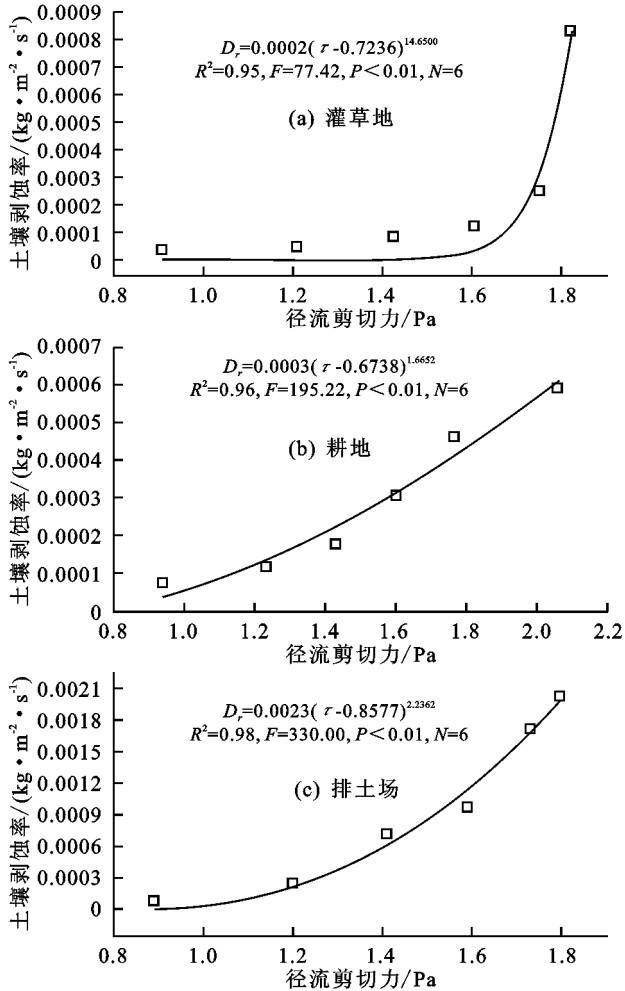


图 2 排水状态不同土地利用方式下径流剪切力和土壤剥蚀率之间的关系

3.2.3 渗流状态 从图 4 可以看出,渗流状态下土壤的细沟可蚀性值表现为排土场>耕地>灌草地,排土场土壤可蚀性值分别是耕地和灌草地的 52.5 倍和 105.1 倍,耕地土壤可蚀性值是灌草地土壤的 2 倍,这表明灌草地土壤抗蚀性最强,耕地土壤抗蚀性次之,排土场土壤抗蚀性最差。

在不同近地表水文状态下,土壤可蚀性  $K_r$  值均表现为排土场>耕地>灌草地,这表明排土场土壤抗蚀性最差,而灌草地土壤抗蚀性最强。以往研究表明,土壤可蚀性的强弱本质上取决于土壤机械组成和有机

质,以及土壤结构的稳定性<sup>[16]</sup>,而植被能够有效增加土壤有机质,增强土壤物理特性和抗蚀性<sup>[17]</sup>。由表 1 可知矿山排土场土壤属于砂质壤土,砂粒含量较多,有机质含量低,土粒间黏结性差,加之矿山排土场土壤经过人为剧烈扰动,土壤物理性质发生变化<sup>[18]</sup>,植被遭到严重破坏,土壤结构发生变化,盐分、有机质等大量流失,侵蚀营力分离和搬运作用敏感性增强,导致土壤抗蚀性最差,更易产沙;耕地土壤属于粉砂质黏壤土,粉砂含量高,经过人为耕种,有机质含量高,但耕地受人为耕作扰动,土壤结构较差,其抗侵蚀能力次之;灌草地土壤属于壤质黏土,有机质含量与耕地土壤相当,但土壤机械组成较好,且无人为扰动,植被覆盖度高,土壤质量较好,其抗侵蚀能力最强。

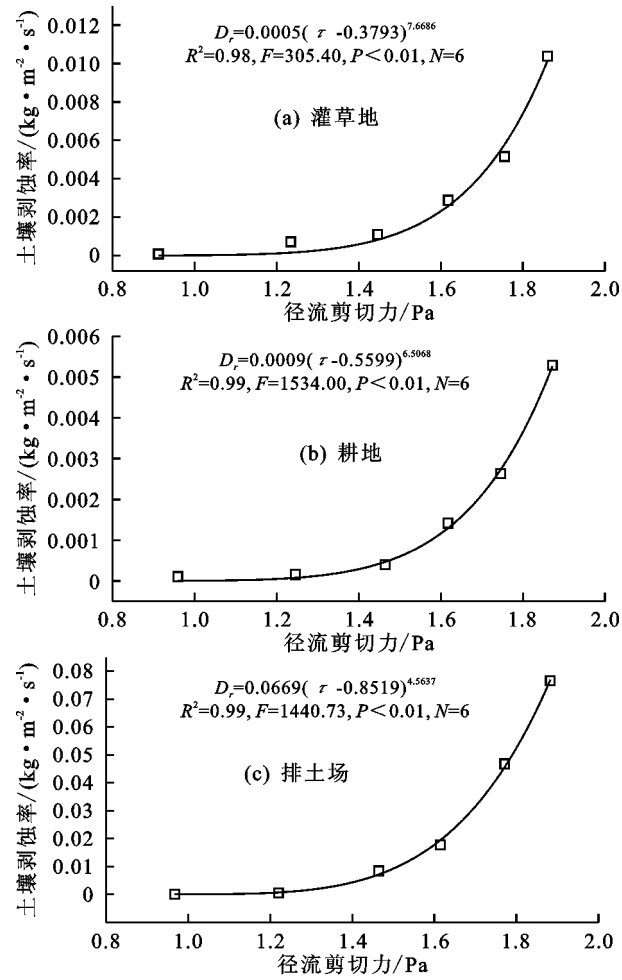


图 3 饱和状态不同土地利用方式下径流剪切力和土壤剥蚀率之间的关系

3.3 不同水文条件对土壤可蚀性的影响

3.3.1 灌草地 从图 5 可以看出,灌草地土壤在 3 种水文条件下土壤的细沟可蚀性表现为渗流状态>饱和状态>排水状态,渗流状态下土壤可蚀性值分别是饱和状态和排水状态的 1.8 倍和 4.5 倍,饱和状态土壤可蚀性值是排水状态的 2.5 倍。这表明,随着地下水动力作用的不断增强,灌草地土壤可蚀性  $K_r$  值

逐渐增大,土壤抗蚀性逐渐减弱。

3.3.2 耕地 从图 5 可知,耕地土壤在 3 种水文条件下土壤的细沟可蚀性表现为渗流状态>饱和状态>排水状态,渗流状态下土壤可蚀性值分别是饱和状态和排水状态的 2 倍和 6 倍,饱和状态土壤可蚀性值是排水状态的 3 倍,这表明地下水的垂直水力梯度会显著影响土壤可蚀性,耕地土壤从排水状态转变为饱和、渗流状态时,土壤可蚀性  $K_r$  值逐渐增大,土壤抗蚀性逐渐减弱。

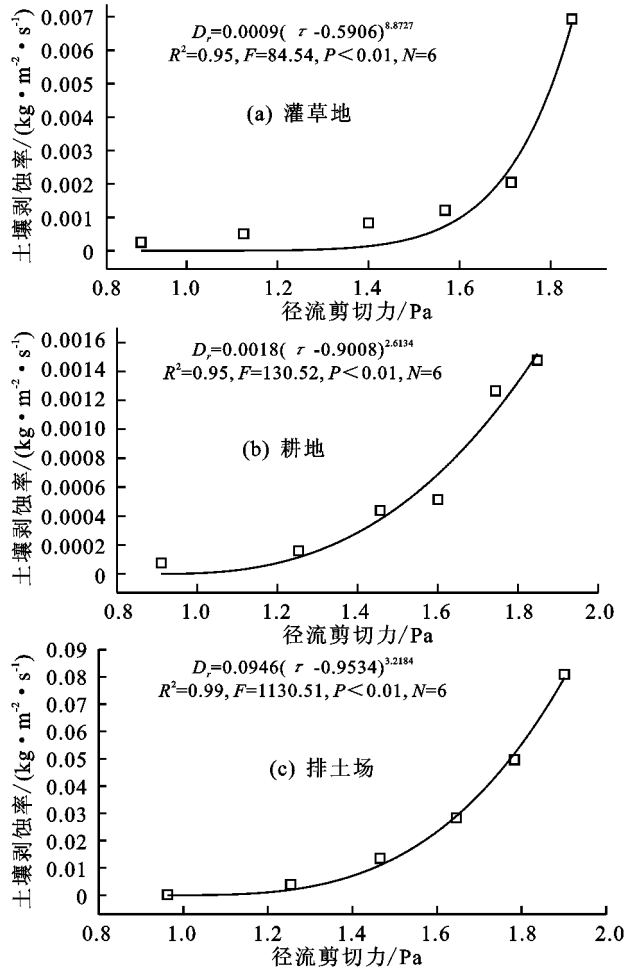


图 4 渗流状态不同土地利用方式下径流剪切力和土壤剥蚀率之间的关系

3.3.3 排土场 从图 5 可知,排土场土壤在 3 种水文条件下土壤的细沟可蚀性表现为渗流状态>饱和状态>排水状态,渗流状态下土壤可蚀性值分别是饱和状态和排水状态的 1.4 倍和 41.1 倍,饱和状态土壤可蚀性值是排水状态的 29.1 倍。这表明水动力在土壤中的垂直梯度分布,导致了土壤可蚀性的相应变化,具体表现为垂直水动力越大,土壤可蚀性值越大。

在影响土壤侵蚀过程的土壤性质中,地下水的垂直水力梯度是一个重要因素。通过分析可知,3 种土地利用方式下的土壤在不同近地表水文条件下,随着垂直方向的水力梯度增加,土壤可蚀性  $K_r$  值逐渐增大,土壤抗蚀性逐渐减弱。这主要是由于渗流状态下饱和土壤同时受到垂直方向和地表径流的双重作用,

导致土壤可蚀性最差,同时,由于土壤前期处于饱和状态,土壤可蚀性也相应的变差,在排水状态下,由于地表径流可以自由下渗,土壤抗蚀性相对较强,表明地下水对土壤可蚀性有较为显著的影响。上述研究结果与刘振波等<sup>[19]</sup>在模拟降雨条件下的试验结果相似。

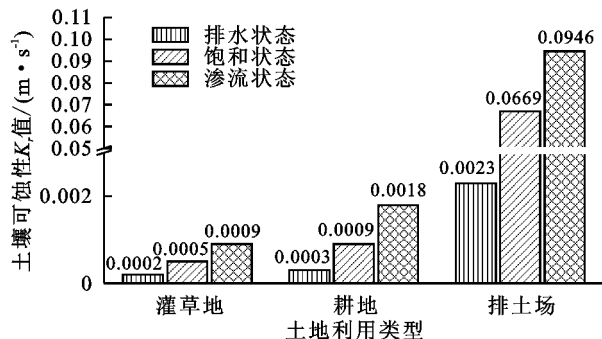


图 5 不同水文条件对土壤可蚀性的影响

## 4 结论

通过对不同水文条件不同土地利用方式的土壤进行冲刷试验,利用 OriginPro 2016 软件对土壤剥蚀率与流量和土壤径流剪切力进行回归分析,得到结论为:

(1)土壤径流剪切力与土壤剥蚀率之间存在较好的指数关系。

(2)流量与土壤剥蚀率之间存在较为显著的指数关系,土壤剥蚀率随流量的增大呈指数形式增大。在排水、饱和及渗流 3 种水文条件下,灌草地土壤  $K_r$  值分别为 0.000 2,0.000 5,0.000 9 m/s,耕地土壤  $K_r$  值分别为 0.000 3,0.000 9,0.001 8 m/s,排土场土壤  $K_r$  值分别为 0.002 3,0.066 9,0.094 6 m/s。

(3)在 3 种土地利用方式下,土壤  $K_r$  值表现为排土场>耕地>灌草地,这是由于排土场土壤受人为活动剧烈扰动,土壤有机质含量低,结构性差,土壤抗蚀性最差,耕地土壤次之,灌草地土壤结构最好,土壤抗蚀性最好;

(4)在 3 种近地表水文条件下,土壤  $K_r$  值表现为渗流状态>饱和状态>排水状态,这是由于渗流状态下饱和土壤同时受到垂直方向地下水和地表径流的双重作用,导致土壤可蚀性最差,同时,土壤处于饱和状态时地下水也有一定的垂直水力梯度,土壤抗蚀性也相应地变差,在排水状态下,由于地表径流可以自由下渗,土壤抗蚀性最好。

### 参考文献:

- [1] Bian Z F, Inyang H I, Daniels J L, et al. Environmental issues from coal mining and their solutions[J]. 矿业科学技术(英文版), 2010, 20(2): 215-223.
- [2] 吕钊,王冬梅,徐志友,等. 生产建设项目弃渣(土)场水土流失特征与防治措施[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(3): 118-126.
- [3] 张孝中,王文龙,李建明. 神府东胜煤田弃土弃渣体径流水动力学特性研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 76-81.

- [4] Zhang L T, Gao Z L, Yang S W, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap[J]. Catena, 2015, 128(5): 108-121.
- [5] Nouwakpo S K, Huang C H, Bowling L, et al. Impact of vertical hydraulic gradient on rill erodibility and critical shear stress[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(6): 1914-1921.
- [6] 张科利,彭文英,杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
- [7] 梁音,刘宪春,曹龙熹,等. 中国水蚀区土壤可蚀性 K 值计算与宏观分布[J]. 中国水土保持, 2013(10): 35-40.
- [8] 张晴雯,雷廷武,潘英华,等. 细沟侵蚀可蚀性参数及土壤临界抗剪应力的有理(实验)求解方法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21(4): 468-475.
- [9] Li Z W, Zhang G H, Ren G, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China [J]. Biosystems Engineering, 2015, 129(1): 248-257.
- [10] 王志刚,郑粉莉,李靖. 不同近地表水文条件下紫色土坡面土壤侵蚀过程研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 9-11.
- [11] Wang G Q, Fang Q Q, Wu B B, et al. Relationship between soil erodibility and modeled infiltration rate in different soils[J]. Journal of Hydrology, 2015, 528(9): 408-418.
- [12] Ahirwal J, Maiti S K. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India [J]. Catena, 2016, 140(5): 155-163.
- [13] 牛耀彬,高照良,刘子壮,等. 工程措施条件下堆积体坡面土壤侵蚀水动力学特性[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 105-111.
- [14] 张乐涛,高照良,田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 94-102.
- [15] Silva L F D, Cassol E A, Murliki J D, et al. Susceptibility to rill erosion of a 12-year-old soil reconstructed after coal mining[J]. International Journal of River Basin Management, 2016, 14(4): 1-15.
- [16] 李鹏,李占斌,郑郁. 不同土地利用方式对干热河谷地区土壤可蚀性的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 31(4): 16-19.
- [17] Zhang L, Wang J M, Bai Z K, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area[J]. Catena, 2015, 128(5): 44-53.
- [18] Yang D J, Bian Z F, Lei S G. Impact on soil physical qualities by the subsidence of coal mining: A case study in Western China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 1-14.
- [19] 刘振波,史学正,于东升,等. 模拟降雨下土壤前期含水量对土壤可蚀性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 397-402.