

# 雨强和坡度对地表冰碛物径流分选特性研究

刘关锋<sup>1</sup>,牛向东<sup>2</sup>,张应平<sup>1</sup>,侯克鹏<sup>2</sup>,李志钧<sup>3</sup>,黄正高<sup>3</sup>

(1. 云南铜业股份有限公司,昆明 530100;

2. 昆明理工大学 国土资源工程学院,昆明 650093;

3. 云南迪庆有色金属有限责任公司,云南 迪庆 674400)

**摘要:**降雨强度和地形坡度是地表冰碛层地区产生径流分选特性的两个重要动力因素。以香格里拉普朗铜矿矿区地表冰碛物颗粒为研究对象,采用室内人工模拟降雨试验方法,开展不同降雨强度(200、400、600 mL/(min·m<sup>2</sup>))和坡度(10°、21°、32°)工况条件下的冰碛物径流分选特性变化规律研究。结果表明:冰碛物颗粒在不同雨强和坡度径流冲刷过程中具有显著的分选效应;不同雨强和坡度工况条件下,冲刷分选的冰碛物颗粒粒径具有选择性,优先分选粒径较小颗粒,且雨强和坡度越小径流分选的颗粒粒径越细;径流分选颗粒质量占比随坡度增加呈现先增大后减小的变化规律,显示径流分选颗粒粒径的变化存在着临界坡度。研究成果可为冰碛物颗粒径流分选的防治制定有效措施,避免径流分选后的细粒冰碛物颗粒进入开采活动范围内,对矿山井下泥石流灾害事故的防控具有重要的意义。

**关键词:**冰碛物颗粒;降雨强度;地形坡度;径流冲刷;分选特性

**中图分类号:**P642.23;TD853.364

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-4172(2023)01-0068-06

## Study on the sorting characteristics of surface moraine runoff by rain intensity and slope

LIU Guanfeng<sup>1</sup>, NIU Xiangdong<sup>2</sup>, ZHANG Yingping<sup>1</sup>, HOU Kepeng<sup>2</sup>, LI Zhijun<sup>3</sup>, HUANG Zhenggao<sup>3</sup>

(1. Yunnan Copper Co., Ltd., Kunming 530100, China;

2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. Yunnan Diqing Nonferrous Metals Co., Ltd., Diqing Yunnan 674400, China)

**Abstract:** Rainfall intensity and terrain slope are two important dynamic factors that produce runoff sorting characteristics in the surface moraine area. This paper takes the surface moraine particles in the Shangri-Lapulung copper mine as the research object. The indoor artificial simulated rainfall test method was used. The variation law of moraine runoff sorting characteristics under different rainfall intensities (200, 400, 600 mL/(min·m<sup>2</sup>)) and slopes (10°, 21°, 32°) was studied. Research indicates: the moraine particles have a significant sorting effect in the process of runoff scouring with different rain intensities and slopes. Under different rain intensities and gradient conditions, the particle size of moraine particles by scouring and sorting is selective, and the particles with smaller particle sizes are preferentially sorted. And the smaller the rain intensity and slope, the finer the particle size of runoff sorting. The mass proportion of particles in the runoff sorting showed a change law of first increasing and then decreasing with the increase of the slope, indicating that there was a critical gradient in the change of the particle size in the runoff sorting. The research results can formulate effective measures for the prevention and control of runoff sorting of moraine particles, to prevent the fine-grained moraine particles after runoff sorting from entering the scope of mining activities. It is of great significance to the prevention and control of underground debris flow disaster accidents in mines.

**Key words:** moraine particles; rainfall intensity; terrain slope; runoff scour; sorting characteristics

收稿日期:2022-06-28

基金项目:云南省基金人培项目(KKSY201521064)

作者简介:刘关锋(1974—),男,采矿高级工程师,采矿工程专业。

通信作者:侯克鹏(1966—),教授,博导,采矿工程专业。

冰碛覆盖层是我国云贵藏高海拔地区特有的冰川沉积地层,冰碛物是指冰川搬运和堆积的石块及碎屑颗粒物,具有物质成分复杂、粒径差异性大、

颗粒排列无序、降雨易径流分选等特性<sup>[1-3]</sup>。普朗铜矿开采区范围内的地表冰碛物因受到采矿活动扰动,冰碛覆盖层颗粒结构松散,使得冰碛物颗粒之间黏聚力减小,导致其抗径流冲刷分选能力减弱<sup>[4-5]</sup>;同时由于矿区开采范围内地表冰碛层平均坡度较大(10°~32°),雨季期间冰碛物细颗粒很容易被降雨溅击和径流冲刷分选,致使大量冰碛物分选细颗粒进入开采活动范围内,严重影响矿山的安全正常生产,易诱发矿山井下泥石流灾害事故。

关于颗粒物质的径流侵蚀分选前后粒径特征变化的研究,一直被国内外学者所关注。MARTINEZ等<sup>[6]</sup>利用团聚率(Aggregation Ratio)概念对泥沙颗粒分析研究,显示降雨动能是决定泥沙颗粒是否能发生径流冲刷侵蚀运移的主要动力;WARRINGTON等<sup>[7]</sup>开展了泥沙颗粒在不同侵蚀程度条件下的颗粒组成变化规律,结果显示泥沙颗粒中黏粒分布主要受降雨作用影响;BERGER等<sup>[8]</sup>通过开展降雨强度和坡度对土壤颗粒径流侵蚀的敏感性分析发现,降雨强度对土壤坡面侵蚀后的颗粒分布影响大于坡度;ASSOULINE等<sup>[9]</sup>通过研究发现一定湿度条件下土层的抗溅蚀能力随着土壤中黏粒含量而增大,土壤颗粒的抗溅蚀能力增大则不易被雨滴打散,难以产生径流搬运分选;BISSONNAIS<sup>[10]</sup>和SHI等<sup>[11]</sup>对颗粒物质的水蚀过程进行研究,研究表明颗粒团聚体破碎机制主要是吸水饱和过程中的消散作用以及雨滴溅击条件下的机械破碎作用。国内在颗粒物质的径流侵蚀分选方面的研究也取得了一定进展,王治国等<sup>[12]</sup>利用室内试验方法研究冲刷坡度与侵蚀量之间的关系,研究成果表明径流冲刷坡度和单位面积细沟侵蚀量间具有正相关变化规律;杨具瑞等<sup>[13]</sup>研究认为黄土坡面细沟侵蚀存在一个临界坡度阈值;李君兰等<sup>[14]</sup>研究认为坡面侵蚀程度与降雨强度之间具有密切关联,降雨强度越大造成坡面侵蚀越严重;汤珊珊等<sup>[15]</sup>通过对坡面覆沙后侵蚀泥

沙颗粒分选特性进行研究,认为侵蚀泥沙颗粒主要以粉粒为主,径流侵蚀优先搬运细小颗粒物质;汤珊珊等<sup>[16]</sup>通过对降雨条件下覆沙坡面侵蚀颗粒特征进行研究,结果表明在不同降雨工况时侵蚀泥沙颗粒中的砂粒和粉粒较多;朱高立等<sup>[17]</sup>对不同雨强和覆盖度条件下崩积体侵蚀泥沙颗粒特征研究,显示崩积体泥沙颗粒坡面冲刷优先运移细小颗粒;蒋芳市等<sup>[18]</sup>对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征研究,结果表明崩积体泥沙颗粒的富集率与降雨强度和坡度之间成正相关变化趋势,同时认为侵蚀泥沙的平均重量直径随坡度变化存在临界坡度。

通过现场踏探,矿区地表冰碛覆盖层坡面降雨径流冲刷沟分布较多,冰碛物颗粒径流分选较严重。目前关于颗粒物质的径流分选方面的相关研究,主要研究对象多为不同地区的土壤颗粒、泥沙颗粒、崩积体物质等,但针对高寒高海拔冰川地区冰碛物颗粒方面的相关研究却鲜有报道,缺乏该方面的相关研究。鉴于此,本文基于室内降雨试验方法,开展不同降雨强度(200、400、600 mL/(min·m<sup>2</sup>))和坡度(10°、21°、32°)工况条件下的冰碛物径流分选特性研究,研究成果可为防止冰碛物颗粒径流分选制定有效的措施,避免径流分选后的细粒冰碛物进行入开采活动范围内,对矿山井下泥石流灾害事故的防控具有重要的意义。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料取自云南香格里拉普朗铜矿矿区范围内具有代表性的冰碛物颗粒,选取表层(0~50 cm)原状冰碛物进行物理性质分析,采用环刀法测定容重(1.4~1.7) g/cm<sup>3</sup>,物质矿物成分组成采用X-衍射方法,级配粒径采用筛分法,普朗矿区冰碛物样品矿物成分见表1,粒径组成见表2。

表1 普朗矿区冰碛物样品的矿物成分

Table 1 Mineral composition of moraine samples from the Plan mine

矿物名称	石英	绿泥石	钾长石	斜长石	云母	闪石
含量占比/%	44.2	20.8	14.2	12.5	5.3	3.0

表2 普朗矿区冰碛物样品的级配粒径组成

Table 2 Gradation size composition of moraine samples from the Plan mining area

粒径/mm	>23	23~20	20~10	10~5	5~2.5	2.5~1.25	1.25~0.63	<0.63
颗粒含量占比/%	12.8	1.5	8.3	8.9	11.8	13.3	12.2	31.2

## 1.2 试验装置

试验在可变坡度的钢槽上进行,试验钢槽尺寸规格为  $160\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 深),该试验系统主要由带刻度储水装置、径流冲刷装置、智能降雨装置、集流装置四部分组成。模拟人工降雨采用下喷式智能降雨系统,降雨均匀度大于 0.85,有效降雨面积可全覆盖试验钢槽范围。

## 1.3 试验设计

根据整个矿区汇水范围内的分水岭标高至开采区地表汇水标高的空间关系,地表冰碛物覆盖层汇水径流平均坡度在  $32^\circ$  内,则试验设计坡度分别为  $10^\circ$ 、 $21^\circ$  和  $32^\circ$ 。研究矿区高海拔区域范围内的降雨气象资料,确定试验设计降雨强度为 200、400、600  $\text{mL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ ,依据《降雨等级标准(GB/T 28592-2012)》规范,本次试验制定的降雨强度范围涉及到大雨~特大暴雨区段,是科学合理的。

## 1.4 试验过程

冰碛物颗粒在装入试验装置钢槽前,先对其进行简单处理,剔除大块砾石及植物根系等杂物。按照原状冰碛层物质容重将冰碛物颗粒以 5 cm 厚度分层装入试验装置中,使试验模型中冰碛物材料与现场实际冰碛层的容重尽可能相近;同时在填装上层冰碛物颗粒之前,抓毛下层冰碛层表面,以防各冰碛层之间出现分层现象。

每次降雨试验过程中,待模型冰碛层坡面开始发生径流,每 10 min 采集一次径流冲刷样品,采用烘干法测定径流冲刷冰碛物量,并将烘干后冰碛物颗粒采用标准筛进行筛分,测定各工况试验条件下的径流分选颗粒粒径组成,试验过程中使用高速摄像机对冰碛层坡面颗粒径流分选过程进行动态监测<sup>[19]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 径流分选颗粒粒径与原始粒径对比分析

径流冲刷坡度  $32^\circ$  条件下,降雨强度分别为 200、400、600  $\text{mL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  时的冰碛物径流分选颗粒级配见图 1。分析可以看出,1)降雨强度为 200  $\text{mL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  时,冰碛物从坡面径流冲刷出的颗粒粒径  $\leq 2.5\text{ mm}$ ,而 400、600  $\text{mL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  降雨强度时由坡面径流冲刷出的颗粒粒径  $\leq 20\text{ mm}$ ,说明冰碛物径流冲刷颗粒粒径随降雨强度增加而增大;2)不同降雨强度工况时径流冲刷出的冰碛物颗粒粒径级配曲线均在原始地表冰碛物级配曲线之上,表示小于某粒径的冰碛物颗粒质量占

比都比原始地表冰碛物大,说明原始地表冰碛物颗粒在径流冲刷作用下具有显著的分选效果,且降雨强度越小,其级配曲线相对其他级配曲线越高,表明径流分选出的冰碛物颗粒粒径越细。这与张辉等<sup>[20]</sup>和 WILSON CODIE 等<sup>[21]</sup>泥沙颗粒的研究成果相一致。

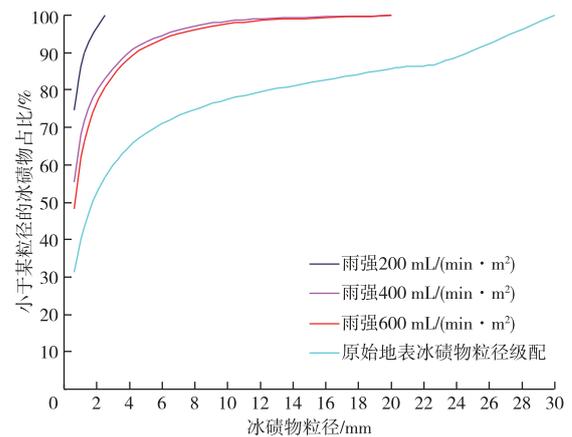


图1 坡度为  $32^\circ$  不同雨强条件下的冰碛物径流分选颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle gradation curves of moraine runoff sorting under different rain intensities with a slope of  $32^\circ$

降雨强度 600  $\text{mL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  条件下,径流冲刷坡度分别为  $10^\circ$ 、 $21^\circ$ 、 $32^\circ$  时的冰碛物径流分选颗粒级配见图 2。分析图 2 可知:1)由不同冲刷坡度坡面径流冲刷出的冰碛物颗粒粒径级配曲线也均在原始地表冰碛物级配曲线之上,表示小于某粒径的冰碛物颗粒占比要比原始地表冰碛物高,说明原始地表冰碛物颗粒在径流冲刷作用下也具有明显的分

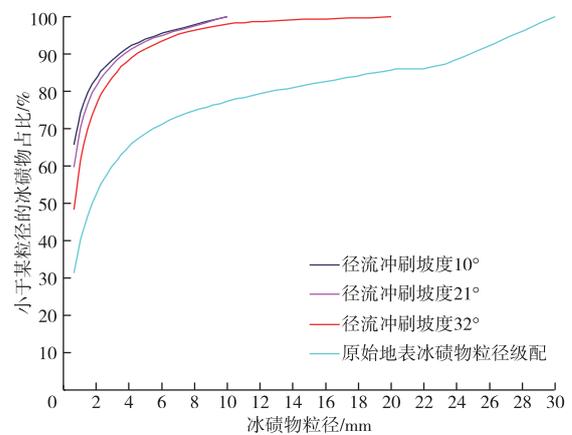


图2 雨强为 600  $\text{mL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$  不同坡度条件下的冰碛物径流分选颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle gradation curve of moraine runoff sorting under different slope conditions with rain intensity of 600  $\text{mL}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$

选效果;2)冲刷坡度为 10°和 21°时从坡面冲刷出的最大冰碛物颗粒粒径是 10 mm,而冲刷坡度为 32°时从坡面冲刷出的最大冰碛物颗粒粒径是 20 mm,表明随着径流冲刷坡度越大,径流分选出的冰碛物颗粒粒径亦越大;3)由于径流冲刷是坡面冰碛物颗粒运动分选的主要动力,冰碛物径流分选过程实际上是径流和坡面颗粒相互作用的过程,在此过程中径流冲刷优先选择性的分选冰碛物细颗粒,因此径流冲刷坡度越小其级配曲线相对其他级配曲线越高,说明径流冲刷坡度越小,径流冲刷分选出的冰碛物颗粒粒径越小,对细颗粒分选效应越显著。这与白浩<sup>[22]</sup>和杨帅<sup>[23]</sup>泥沙颗粒分选的研究成果相吻合。

### 2.2 雨强对冰碛物颗粒径流分选影响

冲刷坡度为 32°条件下,降雨强度分别为 200、400、600 mL/(min·m<sup>2</sup>)时的冰碛物径流分选颗粒质量占比见图 3。分析图 3 可知:1)径流冲刷坡度一定条件下,不同的降雨强度冲刷分选的颗粒差异性较大,当降雨强度为 200 mL/(min·m<sup>2</sup>)时,因径流冲刷作用从坡面冲刷出的冰碛物颗粒粒径都在 2.5 mm 以下,而降雨强度为 200、400 mL/(min·m<sup>2</sup>)时的径流冲刷出的冰碛物颗粒粒径均在 20 mm 以下,且径流冲刷出的冰碛物颗粒粒径都要比原始地表冰碛物粒径小,反映出径流分选颗粒粒径随降雨强度的增加而增大;2)不同降雨强度条件下,冰碛物颗粒径流冲刷分选富集程度基本以细颗粒为主,即径流冲刷出的颗粒粒径≤0.63 mm 冰碛物颗粒质量占比在 48.2%~74.6%,同时降雨强度越小径流分选出的细颗粒质量占比越高,主要是由于降雨强度越小,雨滴动能和径流冲刷力减小,薄层水流的冲刷力无法使粗颗粒启动运移,仅能启动细颗粒参与分选运动。这与王伟<sup>[24]</sup>和刘晓娜<sup>[25]</sup>关于泥沙颗粒的相关研究结论相统一。

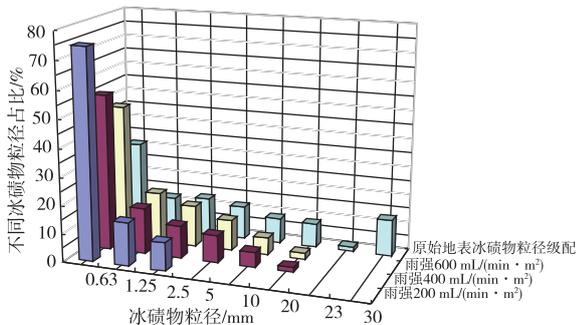


图 3 坡度为 32°不同雨强时的冰碛物径流分选颗粒质量占比

Fig. 3 Mass proportion of moraine runoff sorting particles when the slope is 32° with different rain intensities

### 2.3 坡度对冰碛物颗粒径流分选影响

降雨强度为 600 mL/(min·m<sup>2</sup>)条件下,径流冲刷坡度分别为 10°、21°、32°时的冰碛物径流分选颗粒质量占比见图 4。通过对不同坡度条件下冰碛物径流分选颗粒质量占比分析,1)径流冲刷分选颗粒粒径基本分布于 0~10 mm 区间,但是主要集中在 0.63 mm 粒径,而分布于 1.25~10 mm 区间内的分选颗粒质量占比较小,说明径流冲刷优先分选细颗粒,且冲刷坡度越小径流分选的颗粒粒径越细;2)对径流冲刷分选 10 mm 粒径的冰碛物颗粒质量占比进行分析可以看出,径流冲刷坡度为 21°时冰碛物颗粒质量占比均超过 10°和 32°,则随着坡度的增加径流分选颗粒质量占比呈现出先增大后减小的变化规律,说明径流冲刷分选颗粒粒径的变化存在着临界坡度,出现这一现象的主要原因与坡面实际有效降雨面积有关,一般情况下冲刷坡面的坡度越大,实际有效降雨面积就会减小,使得雨滴溅击和坡面径流冲刷能力减弱,导致对较大粒径颗粒径流分选效应降低,这与蒋芳市等<sup>[18]</sup>关于崩积体侵蚀泥沙颗粒的研究成果相吻合。

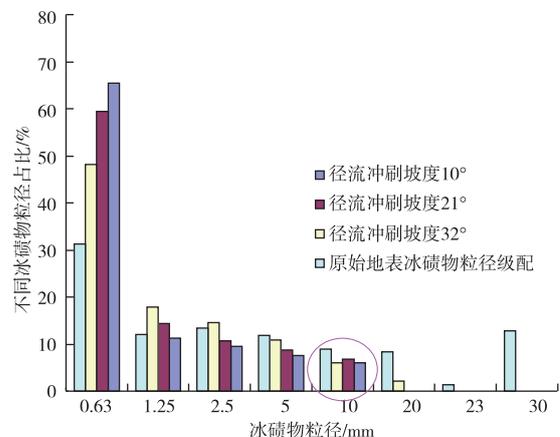


图 4 雨强为 600 mL/(min·m<sup>2</sup>)不同坡度时的冰碛物径流分选颗粒质量占比

Fig. 4 The mass proportion of the moraine runoff sorting particles when the rain intensity is 600 mL/(min·m<sup>2</sup>) at different slopes

## 3 结论

本文基于室内降雨试验方法,研究不同降雨强度(200、400、600 mL/(min·m<sup>2</sup>))和坡度(10°、21°、32°)工况条件下的冰碛物颗粒径流分选特性,得到以下主要结论:

1)冰碛物颗粒在不同雨强和坡度径流冲刷过程中具有显著的分选效应,其分选程度受冰碛层

颗粒自身组成状况和坡面径流冲刷力耦合作用的影响。

2) 径流冲刷是坡面冰碛物颗粒运动分选的主要动力,不同雨强和坡度工况条件下,冲刷分选的冰碛物颗粒粒径具有选择性,优先分选粒径较小颗粒,且雨强和坡度越小径流分选的颗粒粒径越细。

3) 冰碛物径流分选颗粒质量占比随坡度增加呈现出先增大后减小的变化规律,说明径流分选颗粒粒径的变化存在着临界坡度。

#### 参 考 文 献

- [1] 张延广,方小敏,毛子强,等. 青藏高原古里雅冰帽冰碛和冰水沉积物粒度特征及其意义[J]. 冰川冻土, 2021, 43(3): 701-713.  
ZHANG Yanguang, FANG Xiaomin, MAO Ziqiang, et al. Grain-size characteristics of tills and glaciofluvial deposits in the Guliya ice cap, Tibetan Plateau and its implication[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(3): 701-713.
- [2] 史书婷,王金艺,郭芪恒,等. 天津蓟县晚元古代冰碛岩的发现[J]. 沉积学报, 2019, 37(6): 1181-1192.  
SHI Shuting, WANG Jinyi, GUO Qiheng, et al. Discovery of tillite in the late proterozoic at Jixian county of Tianjin, North China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(6): 1181-1192.
- [3] TOMI P L. Liisa nevalainen quantifying climate changes of the common era for Finland[J]. Climate Dynamics, 2017, 49: 7-8.
- [4] 王彦东,梁靖,裴向军. 九寨沟震后核心区崩塌堆积体冲刷启动机制研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1048-1060.  
WANG Yandong, LIANG Jing, PEI Xiangjun. Scour initiation mechanism of deposit in Jiuzhaigou scenic area after earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1048-1060.
- [5] 喻武,任德智,张鹏,等. 藏东南高寒土坡面细沟水流输沙能力变化特征[J]. 岩土力学, 2021, 35(6): 76-82.  
YU Wu, REN Dezhi, ZHANG Peng, et al. Variation characteristics of sediment transport capacity of rill flow in alpine soil in Southeast Tibet[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 35(6): 76-82.
- [6] MARTINEZ M, CASTILLO V, ALBALADEJO J. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain[J]. Geomorphology, 2002, 45(3-4): 261-275.
- [7] WARRINGTON D N, MAMEDOV A I, BHARDWAJ A K, et al. Primary particle size distribution of eroded material affected by degree of aggregate slaking and seal development[J]. European Journal of Soil Science, 2009, 60(1): 84-93.
- [8] BERGER C, SCHULZE M, RIEKE Z D, et al. Rill development and soil erosion; a laboratory study of slope and rainfall intensity[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(12): 1456-1467.
- [9] ASSOULINE S, BEN H M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing[J]. Catena, 2006, 66: 211-220.
- [10] BISSONNAIS Y L. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. theory and methodology [J]. European Journal of Soil Science, 2016, 67(1): 11-21.
- [11] SHI Z H, YAN F L, LI L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China[J]. Catena, 2010, 81(3): 240-248.
- [12] 王治国,肖娟,魏忠义,等. 黄土残塬区人工降雨条件下坡耕地水蚀研究—坡耕地小麦休闲期秸秆覆盖的防蚀效应[J]. 水土保持学报, 1999, 5(2): 13-17.  
WANG Zhiguo, XIAO Juan, WEI Zhongyi, et al. Water erosion on slope farmland in loess broken plateau region by simulated rainfall—effects of straw mulch controlling erosion in the wheat fallow on slopeland[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(2): 13-17.
- [13] 杨具瑞,史正涛,曹叔尤,等. 细沟侵蚀临界坡度研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(5): 64-67.  
YANG Jurui, SHI Zhengtao, CAO Shuyou, et al. Study on the critical erosion gradient by the hydrodynamics[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(5): 64-67.
- [14] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等. 坡面水流速度与坡面含砂量的关系[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 73-78.  
LI Junlan, CAI Qiangguo, SUN Liying, et al. Relationship between the spatial distribution of flow velocity and sediment concentration[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 73-78.
- [15] 汤珊珊,高海东,李占斌,等. 坡面覆沙后侵蚀泥沙颗粒分选特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 125-130.  
TANG Shanshan, GAO Haidong, LI Zhanbin, et al. Characteristics of particle separation of sediment in slop surface covered with sand[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 125-130.
- [16] 汤珊珊,李鹏,任宗萍,等. 模拟降雨下覆沙坡面侵蚀颗粒特征研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 39-47.  
TANG Shanshan, LI Peng, REN Zongping, et al. Particle size composition of sediment from sand-covered slope under simulated rainfall[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 39-47.
- [17] 朱高立,文博,李静,等. 不同雨强和覆盖度条件下崩积体侵蚀泥沙颗粒特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1371-1379.  
ZHU Gaoli, WEN Bo, LI Jing, et al. Particle size composition of erosion sediment from colluvial deposits of collapsing hill as affected by rainfall intensity and coverage[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6): 1371-1379.
- [18] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等. 坡度和雨强对崩岗崩积体侵蚀泥沙颗粒特征的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 974-982.  
JIANG Fangshi, HUANG Yanhe, LIN Jinshi, et al. Effects of slope gradient and rainfall intensity on particle size composition of eroded sediments from colluvial deposits of Benggang[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 974-982.