

露天矿排土场平台-边坡系统侵蚀形态及径流产沙特征

速欢¹ 王文龙^{1,2*} 康宏亮¹ 白芸³ 郭明明¹ 陈卓鑫¹

(¹西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ³榆林学院陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西榆林 719000)

摘要 露天矿排土场平台径流汇集量大且急促,常导致边坡发生强烈沟蚀。排土场平台-边坡系统集中来水条件下的侵蚀过程研究仍十分薄弱。本研究以平台-边坡系统为对象,采用野外放水冲刷试验方法,研究不同放水流量(48、60、72、84 L·min⁻¹)下系统径流、产沙及侵蚀形态演变规律。结果表明:48 L·min⁻¹流量时,平台-边坡系统以细沟侵蚀为主,60~84 L·min⁻¹流量下系统发育形成切沟。平台、边坡流速随放水历时呈突变-波动-稳定变化趋势,平台流速小于边坡径流流速,减幅为8.3%~67.1%,边坡流速为边坡上/下部最大,较中部增加18.5%~44.6%。平台和边坡产沙率随放水历时呈现突变-波动-稳定3个阶段,边坡产沙率高达平台的17.4倍;平台上细沟侵蚀产沙量占比高达86.6%~95.1%,60~84 L·min⁻¹流量下边坡切沟侵蚀产沙量占比高达69.2%~86.6%。平台侵蚀沟宽深比大于边坡,边坡宽深比为边坡上部最小,边坡中/下部最大,是边坡上部的1.36~1.93倍,侵蚀沟沿平台至坡脚总体上呈“宽浅-窄深-宽浅”式发展;48 L·min⁻¹流量下侵蚀主要集中在平台与边坡中部,侵蚀体积占比分别为29.9%、26.8%;60~84 L·min⁻¹流量时,侵蚀集中在边坡上部,占总侵蚀体积的36.1%~44.7%。结果可为陕北露天矿排土场平台-边坡系统沟蚀防治及侵蚀产沙模型的建立和修正提供参考。

关键词 侵蚀; 形态; 流速; 平台-边坡系统; 放水冲刷试验

Erosion morphology and the characteristics of runoff and sediment yielding in platform-slope system of opencast coal mine. SU Huan¹, WANG Wen-long^{1,2*}, KANG Hong-liang¹, BAI Yun³, GUO Ming-ming¹, CHEN Zhuo-xin¹ (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³Key Laboratory of Ecological Rehabilitation of Northern Shaanxi Mining Area, Yulin University, Yulin 719000, Shaanxi, China).

Abstract: In the open pit, runoff from the platform is large discharge and rapid afflux, which often results in serious gully erosion of dump slope. The study of erosion process under catchment conditions of the platform-slope system is still backward. In this study, field scouring experiments were conducted to investigate runoff characteristics and sediment yield processes of the platform-slope system under different flow discharges (48, 60, 72 and 84 L·min⁻¹). Our results showed that rill erosion dominated the platform-slope system under the flow discharge of 48 L·min⁻¹, and gully was formed under 60-84 L·min⁻¹. The flow velocity of the platform and the slope showed an abrupting-fluctuating-stable trend with the duration of discharge. The flow velocity of the platform was smaller than that of the slope, with the magnitude of reduction at 8.3%-67.1%. The highest flow velocity appeared on the up-slop/down-slope, being 18.5%-44.6% higher than that of the

本文由国家自然科学基金项目(41761062, 41701316)和国家重点研发计划重点专项(2016YFC0501604)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41761062, 41701316) and the National Program on Key Basic Research Project of China (YS2016YFC0501604).

2020-05-20 Received, 2020-07-08 Accepted. Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wlwang@nwsuaf.edu.cn

middle-slope. In general, the sediment yield rate of the platform and the slope varied with the duration of discharge, with the sediment yield rate of the slope being 17.4 times as that of the platform. The ratio of gully width to depth showed substantial difference between the platform and slope. The platform generally had the largest ratio than the slope. For the slope, the largest ratio appeared on the middle-slop/down-slope, being 1.36-1.93 times as that of the up-slope. The morphology of rill and gully along the platform to down-slope presented in the form of "wide and shallow-narrow and deep-wide and shallow". Rill erosion mainly concentrated in the platform and the middle slope under the flow discharge of $48 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, contributed 29.9% and 26.8% of the total erosion volume, respectively. When the flow discharge increased to $60-84 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, the largest average across-section areas ($1083.25-1737.86 \text{ cm}^2$) formed on the up-slope accounted for 36.1%-44.7% of the total erosion volume. Our results provided evidence for modelling soil and water erosion of the platform-slope system in opencast coal mine.

Key words: erosion; morphology; flow velocity; platform-slope system; runoff scouring experiment.

我国矿产资源丰富,煤炭储量位居世界第三。煤炭作为我国的主体能源,在今后的 50 年间,仍将继续成为支持我国工业发展、社会进步的第一能源^[1]。随着国家对煤矿开采的不断深入,开采过程中大量弃土、弃渣堆积体形成了许多巨型排土场,引发强烈的新增水土流失,加剧矿区生态环境恶化^[2-3]。矿区排土场严峻的土壤侵蚀问题越来越受到学者们的高度重视,成为制约我国矿区可持续发展亟待解决的热点问题之一。

平台-边坡系统是露天矿排土场基本地貌单元。平台经机械车辆反复碾压导致土表致密、平坦,产生非均匀沉降,易产流汇流^[4];边坡坡面陡峭,结构松散易蚀,具有水土流失强烈、侵蚀类型多样的特点^[5]。研究表明,排土场边坡水土流失特性与原地貌相比差异巨大^[6],排土场边坡可蚀性达天然坡面的 10~100 倍,侵蚀速率是撂荒地的 43.6~239.2 倍^[7-8]。孙虎等^[9]研究指出,人为弃土斜坡($32^\circ \sim 35^\circ$)侵蚀模数为 $32142.7 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,是裸露自然坡面的 10.76~12.23 倍; Zhang 等^[10]对神府高速公路沿线典型弃渣体边坡侵蚀规律研究得到产沙率与放水流量呈正比,边坡上部侵蚀剧烈;林姿等^[11]研究表明,放水冲刷条件下煤矿工程堆积体边坡产流产沙波动剧烈,相比于径流作用主导了细沟的深度发育,重力作用则作用于细沟的宽度扩张。另外,对于排土场边坡稳定性评估^[12-13]、植被恢复^[14-15]、土壤侵蚀预测模型^[7]等也取得了一定进展。

目前,相关研究多针对排土场堆积体边坡侵蚀,却鲜有研究关注平台与边坡之间的侵蚀连续性,严重限制了对排土场平台-边坡系统侵蚀过程的深入认识。平台汇水及边坡汇流是排土场土壤侵蚀动力

的主要来源^[16],尤其是平台汇水加速了边坡侵蚀方式的演变。平台土体容重大,土壤入渗率仅为原地貌的 $1/20 \sim 1/40$ ^[17],水流经平台汇集沿缓坡地貌的低槽部位向边坡倾泻,使坡面从面蚀状态迅速向细沟侵蚀演变,导致边坡为密集细沟所覆盖,当汇水量足够大时,在局部形成宽而深的切沟侵蚀^[18],切沟侵蚀是造成排土场剧烈水土流失的重要原因。因此,将平台-边坡系统作为一个整体,研究平台汇水条件下径流侵蚀过程及切沟侵蚀特征,对深入认识排土场平台-边坡系统侵蚀规律、指导排土场的水土保持措施设计和土壤侵蚀防治具有重要意义。

鉴于此,本研究在对我国陕北矿区排土场水土流失现状实地调查的基础上,以矿区覆土(20 cm)条件下排土场平台-边坡系统为研究对象,通过野外放水冲刷试验研究不同放水流量条件下露天矿排土场平台-边坡系统侵蚀过程、径流产沙及侵蚀形态特征,以期为矿区露天排土场平台-边坡系统水土流失预测与防治提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

陕西省矿区排土场主要集中在榆林市和延安市($38^\circ 18' - 39^\circ 3' \text{ N}$, $109^\circ 46' 12'' - 109^\circ 4' 12'' \text{ E}$),位于陕西省北部,黄土高原与毛乌素沙漠交界处。该区属于典型温带干旱半干旱大陆季风性气候,年均气温 $7.7 \sim 10.6 \text{ }^\circ\text{C}$,年降雨量为 $398.3 \sim 490.5 \text{ mm}$,70%的降雨集中在 7—9 月,以短历时大雨、暴雨为主,蒸发量大^[19]。地表物质组成复杂,结构松散,易风化,植被覆盖度低,抗蚀能力差。在人类采矿活动扰动下,夏季水蚀剧烈并占主导地位,春季则以风蚀为

表 1 试验土壤颗粒组成

Table 1 Particle mechanical composition for tested soil

土壤类型 Soil type	颗粒机械组成 Particle mechanical composition (%)									
	<0.002 mm	0.002~ 0.005 mm	0.005~ 0.01 mm	0.01~ 0.02 mm	0.02~ 0.05 mm	0.05~ 0.10 mm	0.10~ 0.20 mm	0.20~ 0.25 mm	0.25~ 0.50 mm	0.50~ 1.0 mm
砂黄土 Sandy loess	14.6	3.4	4.0	10.2	40.1	23.7	4.1	0	0	0
红黏土 Red clay	24.2	6.4	8.3	18.4	30.7	10.4	1.1	0.1	0.3	0.1

主,风蚀、水蚀交替进行,使该区水土流失极其严重。

1.2 排土场平台-边坡系统野外模型建立

试验前经过长期野外调查显示,陕北露天矿排土场为多级平台-边坡地貌单元,0°~3°的平台坡度占调查总数的80%,容重一般在1.50~1.79 g·cm⁻³;边坡坡长集中于20~40 m,坡度在30°~42°,占调查总数的72%,边坡容重集中于1.20~1.50 g·cm⁻³。煤层多位于红黏土地层下伏的侏罗纪地层中,露天开采具有土石比大、成本低和难度小的特点,开采后堆积形成的排土场土壤多为红黏土。随着我国对矿山土地复垦以及生态恢复重视程度的日益提高,矿区排土场在生态修复中需要覆盖20~30 cm厚的表层剥离土,从而使植被更好、更快的恢复,因此,大多排土场表土均为剥离表土,即采矿中剥离的该区域原地表20~50 cm的土层,剥离厚度视土壤肥沃程度而定。

野外放水冲刷试验在陕西省陕北矿区生态修复重点实验室水土保持野外观测试验站进行。经现场调查,选择在无细沟分布、无土壤结皮层的平台-边坡地貌单元上布设径流小区,结合野外调查结果,建立1级排土场平台-边坡系统模型:平台坡度2°,坡长2 m、宽1.5 m;边坡坡度35°,边坡长6 m、宽1.5 m。边坡坡长设计原理为:根据排土场野外调查显示,平台汇水产生的侵蚀沟集中在平台与边坡转折处,以距转折处3~8 m侵蚀最为剧烈,因此设计径流小区边坡长6 m。平台上距离稳流槽出水口0.5 m处设置1 m长度的观测断面,边坡上设置0~2 m(边坡上部)、2~4 m(边坡中部)、4~6 m(边坡下部)3个观测断面。设计土层装填厚度为80 cm,下层供试土壤(60 cm)采自榆林市西湾露天煤矿外排土场,为鄂尔多斯盆地吕梁山西部山前拗陷段红黏土^[20](第三纪沉积物,N₂层),填土前去除大于5 cm土块;上层覆土20 cm,采自榆林市西湾露天煤矿外排土场剥离表土弃土堆,为砂黄土,填土前需过2 cm筛。供试土壤理化性质如表1所示,根据国际制土壤质地分级标准,本试验覆土(砂黄土)为粉砂质壤土,下层土壤(红黏土)属于粉砂质黏壤土。

试验模型平台使用机械填挖,从下往上分4层装填土体,每层装填20 cm,装填厚度为80 cm,每装填一层后土壤表面进行打毛处理,使土层之间更易结合,装填后利用机械设备将平台土体反复压实,以模拟大型机械碾压形成的露天排土场平台下垫面;边坡土体在装填平台土体的同时经自然倾倒形成。在每场试验前,用容积为100 cm³的环刀在平台和边坡分别取样(梅花形布点法),烘干后称其质量,上层砂黄土和下层红黏土容重见表2。小区边界用高60 cm、厚3 mm的PVC板插入地面以下40 cm进行围挡,以防止径流渗漏。此外,为便于径流形成集中股流,减少径流对小区边界的冲刷破坏,将小区平台修成微凹形瓦背状。平台顶部安装与小区宽度相等、顶部紧贴地面、紧靠小区顶端嵌入地面以下的稳流槽,稳流槽长1.5 m、宽0.5 m、深0.5 m,在宽度方向上中央位置安装一块铁板,两侧密封,上方与铁槽平齐,下端与槽底留空2 cm过水,用于稳流,通过稳流槽保证水流的分散性和稳定性。平台上方设有9 m³的储水池,试验用水由水泵供应,放水流量由流量计(精度0.005)和供水阀门控制。小区下边界安装集流槽,集流槽出口处放置径流桶,用以收集径流泥沙样。将小区内土体平整后自然沉降2个月,然后开始人工模拟径流冲刷试验。试验小区布设简图见图1。

试验放水流量^[21]的计算公式如下:

$$F_d = \frac{S \cdot i \cdot \alpha}{C} \cdot B = \frac{\pi r^2 \cdot i \cdot \alpha}{2\pi r} \cdot B = \frac{r \cdot i \cdot \alpha}{2} \cdot B \quad (1)$$

表 2 平台-边坡系统试验前土壤容重

Table 2 Antecedent soil bulk density of platform-slope system

土壤类型 Soil type	坡段 Slope segment	土壤容重均值 Mean of soil bulk density (g·cm ⁻³)	变异系数 CV
砂黄土 Sandy loess	PI	1.42±0.01	0.01
红黏土 Red clay	SI	1.23±0.02	0.02
	PI	1.55±0.03	0.01
	SI	1.43±0.02	0.01

PI: 平台 Platform; SI: 边坡 Slope. 下同 The same below.

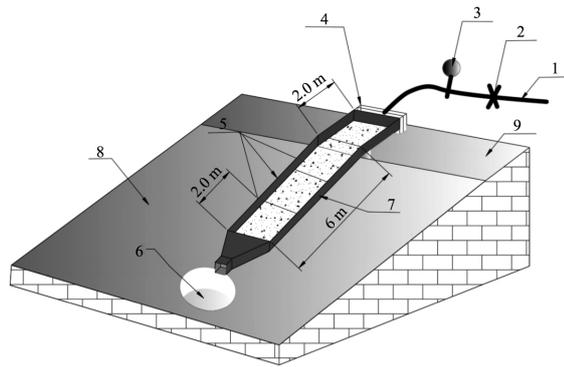


图 1 野外放水冲刷试验系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of the experiment system of field drainage.

1) 输水管 Water supply pipe; 2) 阀门 Constant pressure barrel; 3) 流量计 Flowmeter; 4) 稳流槽 Steady flow groove; 5) 测流速断面 Flow velocity point; 6) 取样池 Sampling pool; 7) PVC 边界 PVC boundary; 8) 边坡 Slope; 9) 平台 Platform.

$$i = A \cdot N^a / t^n \quad (2)$$

$$r = \sqrt{s/\pi} \quad (3)$$

式中: i 为降雨强度 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); A 为雨力参数, 指一年一遇之雨力; N 为某一强度暴雨出现一次的年数, 即重现期 (年); a 为雨力递增指数; t 为降雨历时 (min); n 为暴雨强度衰减指数; S 为平台汇水面积 (m^2); F_d 为放水流量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$); C 为平台周长 (m); r 为平台半径 (m); α 为径流系数; B 为试验平台-边坡系统模型宽度 (m)。陕北榆林市暴雨参数值分别为: $A = 5.600$, $a = 0.385$, $n = 0.705$, $\alpha = 0.74$ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ [21] t 设置为 30~45 min; 对排土场进行大量实地调查及文献资料查阅, 本试验小、中、大排土场平台汇水面积分别为 32000~60000、77800~512000、775000~1250000 m^2 。通过计算得到 F_d 为 46~290 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$, 由于试验条件 (水源、设备等) 的限制, F_d 最大到 90 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$, 难以实现更高流量的放水, 并且经预试验结果显示, 在 90 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 流量时, 模型在短时间内就能形成沟深为 80 cm (达到填土深度) 的切沟。因此, 本试验放水流量设置为 48、60、72、84 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 4 个梯度。其中, 48~72 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 代表陕北地区降雨历时为 30~45 min 5 年一遇暴雨条件 ($i = 0.828 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), 径流系数为 0.74 条件下, 平台汇水面积为 32000~72000 m^2 的小型排土场的产流水平; 84 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 代表平台汇水面积为 77800~512000 m^2 的中型排土场在相同降雨条件下的产流水平。4 个流量的产流历时均为 45 min, 共计 4 场放水冲刷试验。

1.3 试验过程

试验开始前, 在小区坡面铺设防渗布, 率定放水

流量若干次, 控制实际流量与设计值误差在 $\pm 5\%$ 以内, 以保证放水流量的精准性。率定完成后, 将出水管放入稳流槽中进行试验, 待水流缓慢流出溢流槽直至平台时开始计时, 当径流流出小区下边界时记录产流时间。坡面产流后, 前 5 min 每 1 min 用量筒在平台末端侵蚀沟发育处和小区集流槽出口处同时接 1 次径流泥沙样, 并测定每一断面内流速和流宽; 之后每 2 min 接 1 次样, 直至放水冲刷试验结束。为保证测量精度, 当平台细沟长度 $< 50 \text{ cm}$ 时, 测定平台细沟前 1 m 内坡面流流速; 平台细沟长度 $\geq 50 \text{ cm}$ 时, 测定平台细沟内流速。对于边坡, 产流初期测定边坡坡面流流速, 由于坡面呈微凹形瓦背状, 集中径流条件下通常只发育一条侵蚀沟, 则细沟形成后 (跌坎相互连通, 沟深 $\geq 1 \text{ cm}$), 边坡测定侵蚀沟内流速。用烘干法测定含沙量, 精度为 1 mm 的钢尺测定径流宽, 温度计测量水温, 高锰酸钾示踪法测定径流流速, 根据径流流态分别乘以层流、过渡流和紊流的换算系数 0.65、0.75、0.80, 得到断面流速。产流结束后, 用钢尺对侵蚀沟形态 (沟宽、沟深) 进行测量, 从平台出水口处开始顺侵蚀沟方向每隔 10 cm 测量 1 次侵蚀沟宽、深, 共测量 80 个侵蚀沟断面, 每个断面在水平方向上重复测量 2 次沟深。

1.4 数据分析

1) 平台-边坡系统产沙率 ($S_r, \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$), 为平台-边坡系统单位时间径流所能剥蚀土壤的质量, 计算公式如下:

$$S_r = M_d / t \quad (4)$$

式中: M_d 为接样时间 t 内泥沙量 (g), 由径流泥沙样烘干后称重确定。

2) 平台产沙率 ($S_p, \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$), 指平台段单位时间径流所能剥蚀土壤的质量, 计算公式如下:

$$S_c = \frac{M_d}{(M_1 - M_d) / 1000 + M_d / 2.65 / 1000} \quad (5)$$

$$S_p = \frac{2.65 \times 1000 \times S_c \times Q}{2.65 \times 1000 - S_c} \quad (6)$$

式中: S_c 为平台径流含沙量 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); M_1 为接样时间 t 内浑水样品重量 (g); Q 为试验中实际平均流量 (每 5~10 min 记录一次 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)。

3) 边坡产沙率 ($S_{rs}, \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$), 指边坡单位时间径流所能剥蚀土壤的质量, 计算公式如下:

$$S_{rs} = S_r - S_p \quad (7)$$

4) 产沙量 (S_d, g) 计算公式如下:

式中: S_{ri} 为每个接样时间段内的产沙率 ($g \cdot s^{-1}$); t_i 为每一接样时间段 (s), 坡面产流后, 前 5 min 每 1 min 用量筒在小区集流槽出口处同时接 1 次径流泥沙样, 之后每 2 min 接 1 次样; n 为总接样次数, $n = 25$ 。

5) 侵蚀体积, 根据侵蚀沟的长、宽、深, 并按矩形考虑, 近似计算侵蚀体积, 计算公式如下:

$$M_i = B_i \times H_i \times l_i \quad (9)$$

式中: M_i 为任一选定坡段内侵蚀体积 (m^3); B_i 、 H_i 、 l_i 分别为选定坡段内侵蚀沟的平均宽度 (m)、深度 (m) 和长度 (m)。

采用 Excel 2010、SPSS 16.0 软件对数据进行分析, 采用 Origin 8.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 平台-边坡系统侵蚀阶段特征

就平台而言, 48 和 72 $L \cdot min^{-1}$ 流量条件下, 侵蚀初期以面蚀为主, 之后细沟由平台-边坡转折处开始发育, 并不断溯源。细沟快速发育并下切至红黏土层时, 细沟无法继续下切, 因此, 平台以细沟溯源侵蚀为主, 细沟发育稳定后平均沟深为 19.50 ~ 19.80 cm (图 2)。

由图 3 可以看出, 对于边坡, 侵蚀初期在平台-边坡转折处最先形成一系列串珠状小跌坎, 跌坎相互连接在边坡上部 (0~2 m) 形成细沟, 由面状侵蚀转变为细沟侵蚀, 细沟沟尾下切并拓宽, 使细沟沿坡向下延伸, 当达到一定的水流强度时, 细沟下切至红黏土层后形成沟头, 平台汇聚径流以跌水方式进入边坡沟道, 沟底发育多级跌水, 细沟继续发育为临时切沟, 最终形成切沟, 主要侵蚀方式转变为切沟侵蚀。在 48 $L \cdot min^{-1}$ 流量下, 因受水力条件的限制, 边坡细沟发育至红黏土层后也基本停止下切, 平均沟深为 19.7~23.3 cm, 横截面积在 497.7~873.8 cm^2 ,

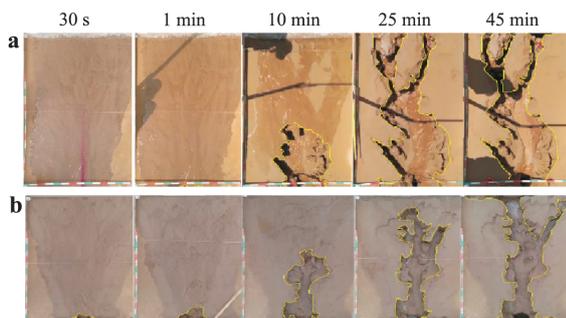


图 2 平台侵蚀地形演化过程
Fig.2 Evolution process of platform erosion topography.
a) 48 $L \cdot min^{-1}$; b) 72 $L \cdot min^{-1}$. 下同 The same below.

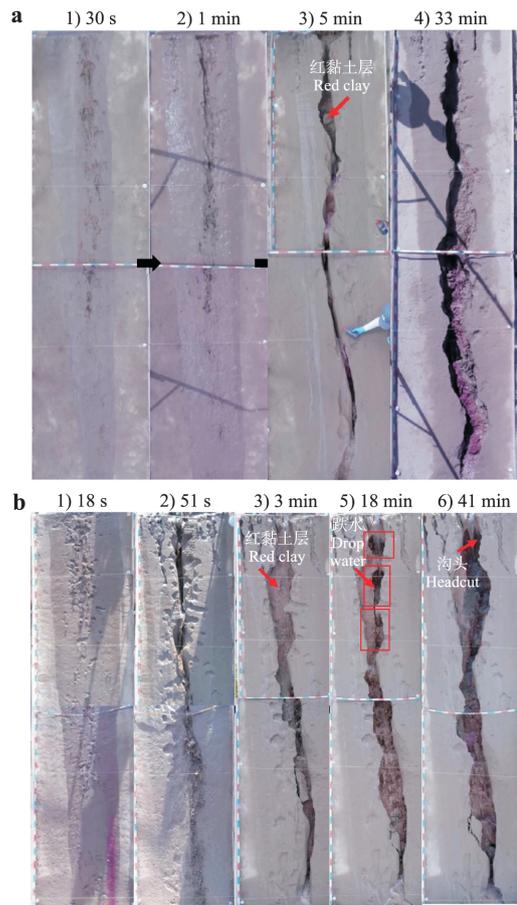


图 3 边坡侵蚀地形演化过程

Fig.3 Evolution process of slope erosion topography.

1) 跌坎出现 Initiation of knickpoint; 2) 细沟形成 Rill formation; 3) 下切至红黏土层 Rill down-cutting to red clay; 4) 细沟稳定阶段 Rill erosion stable stage; 5) 跌水出现 The appearance of hydraulic drop; 6) 切沟稳定阶段 Gully erosion stable stage.

侵蚀沟发育以细沟为主^[22]。而增大流量至 60~84 $L \cdot min^{-1}$ 时, 以 72 $L \cdot min^{-1}$ 放水流量为例, 在细沟发育并切穿红黏土层后, 边坡上、中部 (0~4 m) 沟底在集中径流冲刷作用下发育多级跌水, 跌水高度在 17.20~49.50 cm, 边坡下部无明显跌水出现, 产流结束, 侵蚀沟发育稳定, 边坡最大沟深、平均沟宽分别为 18.50~70.60、25.90~41.90 cm, 横截面积最高在 1083.25~1737.86 cm^2 , 发育形成切沟^[22]。

在各放水流量条件下, 产流前期, 平台-边坡转折处最先侵蚀形成跌坎, 跌水出现, 首先在在边坡上部 (0~2 m) 切割形成细沟、切沟, 同时向平台上方溯源形成细沟。可见, 平台-边坡转折部位在排土平台、边坡沟蚀过程中具有重要促进作用。

根据“平台-边坡”系统侵蚀地形演化过程, 划分“平台-边坡”系统侵蚀阶段: A: 面蚀阶段: 从坡面开始产流至细沟形成 (跌坎相互连通, 沟深 ≥ 1 cm) 之前的侵蚀阶段。B: 细沟侵蚀阶段: 从细沟形成

表 3 平台-边坡系统不同流量下不同侵蚀阶段的起止时间
Table 3 Start and end times of different erosion stages under different flow discharges of platform-slope system

放水流量 Water flow ($L \cdot \text{min}^{-1}$)	侵蚀部位 Erosion area	侵蚀阶段 Erosion stage	产流历时 Duration of runoff
48	Pl	A	0'~3'
		B	3'~45'
	Sl	A	0'~1'
		B	1'~45'
60	Pl	A	0'~3'
		B	3'~45'
		C	4'~45'
	Sl	A	0'~51"
		B	51"~4'
		C	4'~45'
72	Pl	A	0'~2'
		B	2'~45'
		C	3'~45'
	Sl	A	0'~45"
		B	45"~3'
		C	3'~45'
84	Pl	A	0'~1'
		B	1'~45'
		C	2'~45'
	Sl	A	0'~32"
		B	32"~2'
		C	2'~45'

A: 面蚀阶段 Sheet erosion stage; B: 细沟侵蚀阶段 Rill erosion stage; C: 切沟侵蚀阶段 Gully erosion stage.

至细沟下切至红土层时止(沟深 $\leq 20 \text{ cm}^{[23]}$)。C: 切沟(临时性切沟和切沟)侵蚀阶段: 以细沟下切至红土层起至产流结束(沟深 $> 20 \text{ cm}^{[24]}$)。48 $L \cdot \text{min}^{-1}$ 流量下,平台-边坡系统侵蚀过程分为面

蚀、细沟侵蚀阶段,细沟侵蚀为主要侵蚀方式;60~84 $L \cdot \text{min}^{-1}$ 流量时,平台-边坡系统侵蚀过程可分为面蚀、细沟侵蚀和切沟侵蚀3个阶段,切沟侵蚀是该水力区间的主要侵蚀形式。不同侵蚀阶段出现的时间随流量的增大而逐渐提前。对于平台,面蚀阶段历时随放水流量增大而减小,细沟侵蚀阶段历时逐渐增加;对于边坡,随流量的增加,面蚀、细沟侵蚀时间段减少,而切沟侵蚀阶段历时明显增加(表3)。

2.2 平台-边坡系统流速变化特征

2.2.1 流速随放水历时的变化

由图4可以看出,平台流速随产流历时呈现突变-波动增加-稳定的变化趋势,边坡流速随产流历时呈突变-波动减小-稳定的变化。各流量条件下,平台、边坡各部位径流流速在面蚀、细沟侵蚀阶段(0~10 min)迅速增加后快速减小。随径流过程的持续,平台流速呈波动增大的趋势,变异系数为9.3%~27.3%;边坡进入切沟侵蚀阶段后,边坡上、中、下部径流流速呈波动减小的趋势,变异系数分别为17.1%~22.9%、20.4%~51.2%和12.9%~41.7%;径流流速在放水历时20~31 min后逐渐趋于平稳。放水流量为48 $L \cdot \text{min}^{-1}$ 时,平台和边坡径流流速分别为0.23~0.56和0.38~1.29 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,在整个产流过程中,平台径流流速小于边坡径流流速;60~84 $L \cdot \text{min}^{-1}$ 流量条件下,产流后期平台径流流速大于边坡各坡段的径流流速。总体上,增加放水流量,流速增加,径流流速波

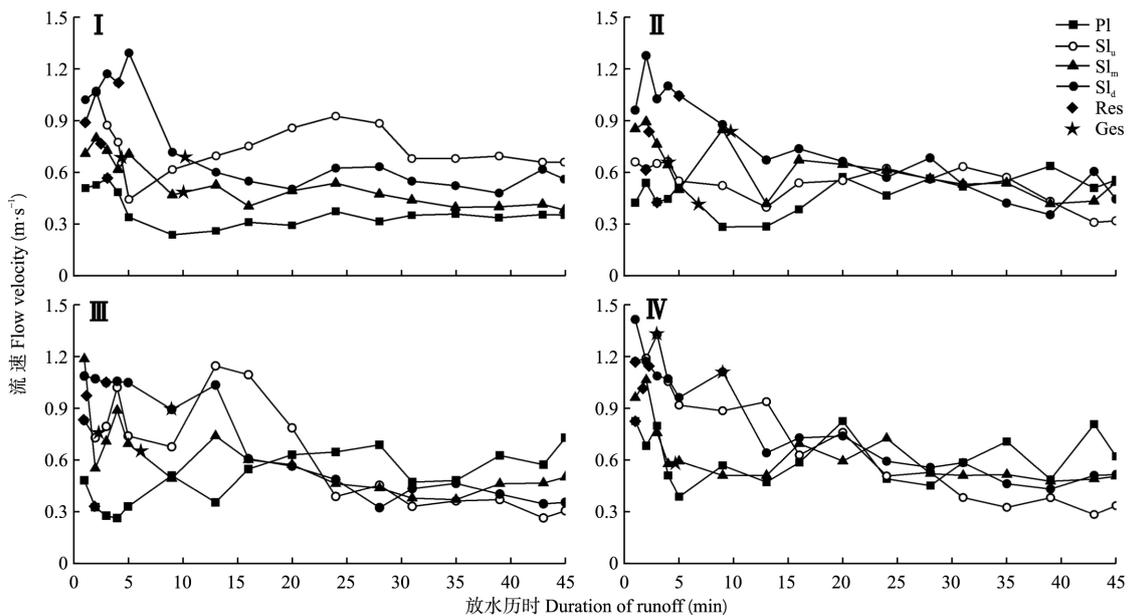


图 4 不同放水流量下平台-边坡系统坡面流速随放水历时的变化

Fig.4 Variation of velocity of platform-slope system with the duration runoff under different flow discharges.

I: (48) $L \cdot \text{min}^{-1}$; II: (60) $L \cdot \text{min}^{-1}$; III: (72) $L \cdot \text{min}^{-1}$; IV: (84) $L \cdot \text{min}^{-1}$. Pl: 平台 Platform; Sl: 边坡 Slope; Sl_上: 上部 Upper; Sl_中: 中部 Middle; Sl_下: 下部 Down. Res: 细沟侵蚀起点 Rill erosion started; Ges: 切沟侵蚀起点 Gully erosion started. 下同 The same below.

动性增强;在相同放水流量下,与边坡相比,平台径流流速较为稳定。

2.2.2 不同坡段下平均流速的变化 由图5可以看出,不同放水流量下,平台和边坡流速分别为 $0.44\sim 0.58$ 和 $0.52\sim 0.83\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。总体来看,平台流速小于边坡径流流速,减幅为 $8.3\%\sim 67.1\%$ 。相同放水流量条件下,边坡上的流速从边坡上部至边坡下部呈现先减小后增大的变化趋势,最小值为边坡中部,最大值在边坡上部($48\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)或边坡下部($60\sim 84\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)较中部增加 $18.5\%\sim 44.6\%$ 。说明径流在平台-边坡地形单元中坡度陡变的特殊位置时,径流流速显著增大。就同一坡段而言,平台流速随放水流量的增大而增大;边坡径流流速随流量增加变化较为复杂,规律性不明显,但 $84\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 流量下,边坡上、中、下部位的平均流速明显大于其余放水流量的平均流速,增幅为 $5.7\%\sim 24.5\%$ 、 $4.9\%\sim 24.7\%$ 和 $14.2\%\sim 17.4\%$ 。

2.3 平台-边坡系统侵蚀产沙变化特征

由图6可以看出,平台上,产沙率随放水历时呈突变-缓慢波动增大-稳定3个阶段;产流前期以面蚀为主,产沙率随产流时间先快速增加,进入细沟侵蚀阶段时,侵蚀速率迅速减小,在产流 $9\sim 15\text{ min}$ 后开始波动变化,最后趋于稳定。 $48\sim 84\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 流量下,平台平均产沙率为 $18.98\sim 58.35\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,变异系数为 $30.2\%\sim 62.6\%$ 。对于边坡,产沙率呈突变-缓慢波动减小-稳定的变化趋势,在产流初期面蚀阶段和细沟发育阶段时产沙率持续增加并达到突变点,随侵蚀沟不断发育,在产流 13 min 后开始波动减小直至稳定,最大波幅在 $128.01\sim 569.70\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,变异系数为 $68.9\%\sim 91.2\%$ 。平台产沙率属于中等变异,边坡产沙率可达到强烈变异程度,平台波动强

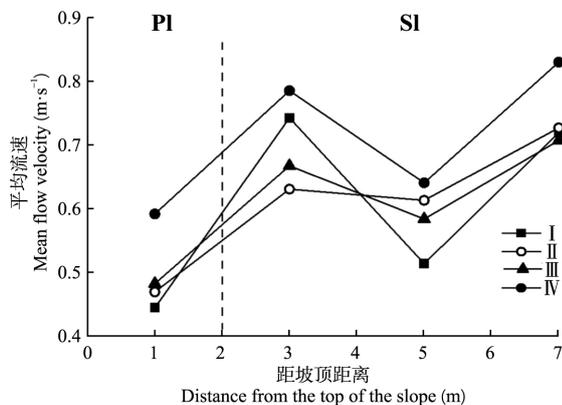


图5 不同放水流量下不同坡段径流平均流速的变化

Fig.5 Variation of evolution with distance of velocity under different flow discharges.

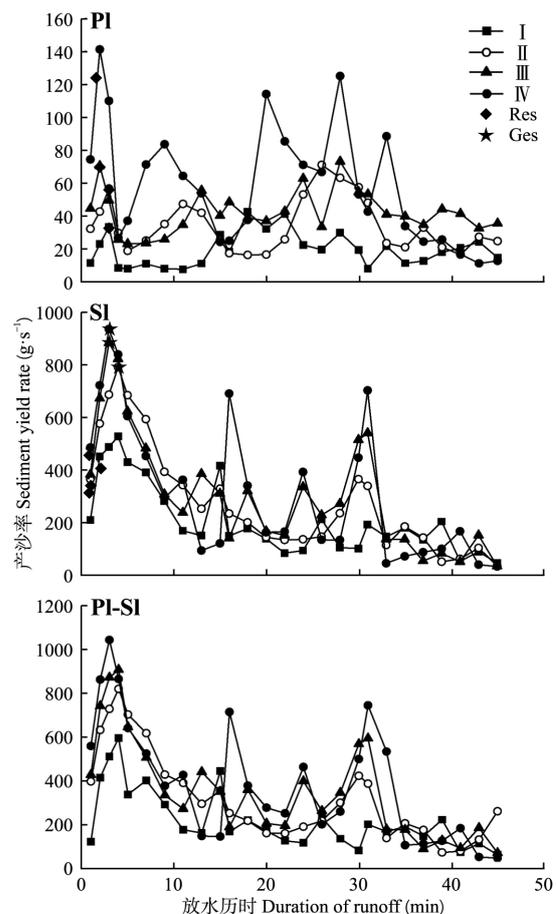


图6 平台-边坡系统产沙率随放水历时的变化

Fig.6 Variation of sediment yield rate of platform-slope system with the duration runoff under different flow discharges.

PI-SI: 平台-边坡系统 Platform-slope system.

度小于边坡,但波动开始时间比边坡早。边坡平均产沙率在 $205.91\sim 331.01\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$,边坡产沙率大于平台,产沙率最高可达平台的17.4倍。

对于平台-边坡系统,其产沙过程与边坡基本一致。随放水流量增加,产沙率的波动性不断增强,各侵蚀阶段出现的时间不断提前。平台-边坡系统产沙率随放水流量增加呈极显著线性递增关系($R^2=0.97$)。

由图7可以看出,在平台上, $48\sim 84\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 流量的面蚀阶段产沙量为 $4.04\sim 7.87\text{ kg}$,细沟侵蚀阶段为 $26.15\sim 86.57\text{ kg}$,细沟侵蚀产沙量远大于面蚀,其产沙量占比高达 $86.6\%\sim 95.1\%$ 。增大流量,平台细沟侵蚀产沙量呈增加趋势, $84\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 流量下产沙量是 $48\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 流量的3.3倍。对于边坡, $48\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 流量时坡面仅发育形成细沟,细沟侵蚀产沙量占比高达 98.0% ,是面蚀的47.9倍。 $60\sim 84\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 流量下,边坡发育形成切沟,各次试验的面蚀、细沟侵蚀和切沟侵蚀阶段产沙量分别为 $15.51\sim$

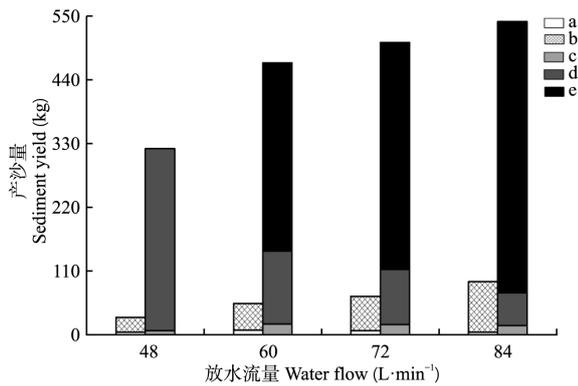


图 7 不同侵蚀阶段下平台、边坡产沙量的变化

Fig.7 Variation of sediment yield of platform and slope under different erosion stages.

a) 平台面蚀阶段 Sheet erosion stage in the platform; b) 平台细沟侵蚀阶段 Rill erosion stage in the platform; c) 边坡面蚀阶段 Sheet erosion stage in the slope; d) 边坡细沟阶段 Rill erosion stage in the slope; e) 边坡切沟阶段 Gully erosion stage in the slope.

18.57、56.85~126.03 和 324.72~468.02 kg,各阶段产沙量为: 切沟侵蚀>细沟侵蚀>面蚀,产沙量占比分别为 69.2%~86.6%、10.5%~26.9%、2.9%~4.0%。边坡面蚀和细沟侵蚀产沙量随流量增加而减小,减幅分别为 7.4%~9.8%、24.3%~49.4%;而切沟侵蚀产沙量随流量增加而增大,60、72、84 L·min⁻¹流量切沟侵蚀产沙量是 48、60 L·min⁻¹流量的 1.21、1.44 倍。总体上 4 个流量下,平台总产沙量为 30.19~91.02 kg,边坡总产沙量较平台增加 493.7%~964.0%,平台、边坡总产沙量随放水流量增大而增加,增幅分别为 224.3%~76.4%、7.1%~46.1%。

2.4 平台-边坡系统侵蚀形态的空间特征

本研究选取平均沟深、最大沟深、平均沟宽、宽深比、横截面积作为描述试验结束后侵蚀沟形态空间特征参数(表 4)。

1) 沟深: 48~84 L·min⁻¹流量时,平台和边坡平均沟深分别为 19.50~19.80、21.48~38.06 cm,边坡沟深大于平台,是平台的 1.10~1.92 倍。平均沟深、最大沟深沿边坡从上至下呈现减小趋势,边坡上部是系统侵蚀沟深最大的坡段。增大流量,平台平均沟深的差异较小;边坡平均沟深随流量的增大而增加,增幅在 15.7%~25.1%。

2) 沟宽: 平台、边坡平均沟宽分别为 34.81~41.00、29.32~31.24 cm,平台沟宽大于边坡。48 L·min⁻¹流量下,平均沟宽沿边坡先增大后减小,在边坡下部最小;60~84 L·min⁻¹流量时,平均沟宽沿边坡先减小后增加,在边坡中部最小。总体上,平台沟宽随流量的增大而增加,增幅为 2.1%~3.4%;而

表 4 平台-边坡系统侵蚀形态的空间特征

Table 4 Spatial characteristics of erosion pattern of platform-slope system

放水流量 Water flow (L·min ⁻¹)	坡段 Slope segment	平均沟深 Average depth (cm)	最大沟深 Maximum depth (cm)	平均沟宽 Average width (cm)	平均宽深比 Average width-depth ratio	平均横截面积 Average cross-section area (cm ²)
48	Pl	19.50	19.80	38.81	1.99	765.81
	Sl _u	23.25	30.00	27.11	1.17	630.24
	Sl _m	21.50	27.00	34.24	1.59	736.11
	Sl _d	19.70	23.20	26.61	1.42	497.67
60	Pl	19.70	20.10	40.14	2.04	790.80
	Sl _u	37.17	48.10	29.15	0.78	1083.25
	Sl _m	23.55	38.70	25.92	1.10	610.33
72	Pl	19.70	20.00	41.00	2.08	807.70
	Sl _u	46.86	68.80	37.09	0.79	1737.86
	Sl _m	25.92	38.80	26.76	1.03	693.50
84	Pl	19.80	19.90	41.88	2.14	789.59
	Sl _u	50.08	70.60	34.27	0.68	1716.51
	Sl _m	39.57	49.60	27.44	0.69	1085.95
	Sl _d	24.54	34.00	32.02	1.31	785.64

u: 上部 Up; m: 中部 Middle; d: 下部 Down.

流量变化对边坡沟宽的影响无明显规律。

3) 宽深比: 各流量下平台宽深比均大于边坡,平台宽深比为 1.99~2.14,是边坡的 1.40~3.12 倍。48 L·min⁻¹流量下,宽深比沿边坡先增大后减小,边坡中部最大;60~84 L·min⁻¹流量时,宽深比沿坡呈增大趋势,边坡上部最小;侵蚀沟沿平台至坡脚呈“宽浅-窄深-宽浅”式发展。平台宽深比随放水流量增加而显著增加($R^2 = 0.99$),边坡宽深比整体呈减小趋势。

4) 横截面积: 48 L·min⁻¹流量条件下,平台横截面积大于边坡,流量增大至 60~84 L·min⁻¹时,平台横截面积小于边坡。在边坡上,48 L·min⁻¹流量时,横截面积沿程先增加再减小;60~84 L·min⁻¹流量时,横截面积沿程减小,边坡上部侵蚀横截面积最大,为 1083.25~1737.86 cm²。平台横截面积随流量变化不明显,边坡横截面积与放水流量呈显著线性关系($R^2 = 0.98$)。

由图 8 可以看出,48 L·min⁻¹流量时,各坡段侵蚀体积大小为: 边坡中部>平台>边坡上部>边坡下部,分别占总侵蚀体积的 29.9%、26.8%、23.0%和 20.3%,侵蚀集中在平台和边坡中部。60~84 L·min⁻¹流量时,侵蚀体积沿程变化为先增大后减小,最大侵蚀体积在边坡上部,最小值出现在边坡下部,各坡段侵蚀体积占比分别为 18.9%~26.3%、

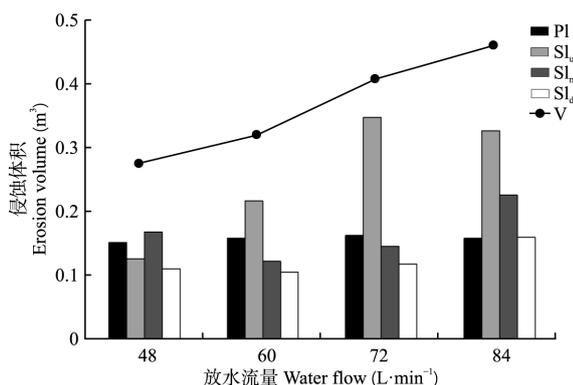


图8 平台-边坡系统侵蚀的空间变化

Fig.8 Spatial variation of erosion of platform-slope system.

V: 平均侵蚀体积 Mean erosion volume.

36.1%~44.7%、18.7%~26.9%和15.8%~18.0%。可见,侵蚀主要集中于边坡上部和平台。48~84 L·min⁻¹流量条件下,平台-边坡系统平均侵蚀体积与放水流量呈显著线性递增关系($R^2 = 0.99$);60、72、84 L·min⁻¹流量时,平均侵蚀体积较48 L·min⁻¹增幅分别达到17.6%、52.0%和72.6%。

3 讨论

3.1 平台-边坡系统径流流速变化特征

平台流速随产流历时呈现突变-波动增加-稳定的变化趋势,边坡流速随产流历时呈突变-波动减小-稳定的变化。产流起始阶段,流速的突变与坡面径流率、径流路径和流宽的迅速变化关系密切。径流率快速增大,径流迅速汇集,使流速出现突增现象。随着短暂面蚀过程的结束,细沟侵蚀占据主导。就平台而言,细沟侵蚀阶段床面不连续跌坎的出现、相互贯通及细沟形成后沟底形态的变化,使流速呈波动减小的变化趋势;当细沟下切至红黏土层,进入

细沟溯源侵蚀阶段后,红黏土构成的平台床面光滑,径流汇集,流速逐渐变大,并随细沟溯源侵蚀发生波动变化,直至细沟发育稳定,流速趋于稳定。平台径流流速随流量的增大而增加,波动性也增强。这与许多学者^[25-26]对堆积体坡面侵蚀的研究结论相似。对于边坡而言,流速持续波动减小的原因主要是:1) 48 L·min⁻¹流量下,细沟侵蚀阶段细沟沟宽极小,产生水跃,径流阻力增大,流速减小;继续产流,细沟的横向发展使黄土层沟壁土体失稳,产生间断性崩塌与部分沉积,进入径流路径阻滞水流运动,使流速发生波动减小(图9)。该流速变化过程与王龙生等^[27]细沟流速随时间呈先增后减变化的结论相似。2) 60~84 L·min⁻¹流量时,边坡径流水动力增强,细沟向切沟发育过程中沟底发育多级跌水,沟床形态变化迅速,水流在沿平台向下的过程中被逐级消能^[28],并且存在高频的崩塌阻碍,流速波动减小,甚至出现产流后期边坡径流流速小于平台的现象(图3)。60~84 L·min⁻¹流量下边坡流速变化过程与许多学者^[29-30]在自然坡面的径流流速随产流历时呈增加趋势的研究结果相反。这与自然坡面和排土场边坡在相似水力条件下的侵蚀形态不同密切相关。相比于一般自然边坡,排土场边坡物质结构性差,强度弱,抗蚀性低,沟蚀发育迅速,重力侵蚀事件频发(图9),从而导致边坡流速在产流过程中持续波动降低。

本研究表明,平台径流平均流速小于边坡,流速从平台至边坡上、中、下部呈增大-减小-增大的变化趋势。这与许多学者^[31-32]研究结论相似。当细沟下切至红黏土层,在边坡出现明显沟头后,平台汇聚径流以跌水方式转向边坡进入沟道,径流势能转换为动能,增大了跌水流速^[28],流速较平台迅速增

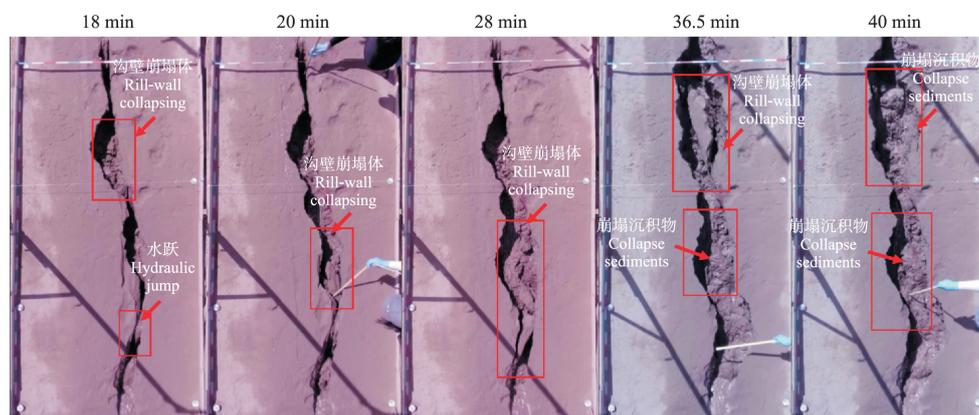


图9 48 L·min⁻¹流量边坡3~6 m处沟壁崩塌与沉积过程

Fig.9 Rill wall collapse and deposition process at slope 3-6 m under 48 L·min⁻¹.

大。集中水流条件下,径流能量增加,促进侵蚀沟下切侵蚀,边坡 0~4 m 处,沟底形成 2~3 级高度不等的跌水,底部坡降变化较大,水流强烈紊动并掺气^[33],径流阻力相应增大,跌坑产生紊动消能,流速沿程减小。边坡 4~6 m 内沟床未有跌坑发育,沿坡向下径流流速在重力作用下再次增加。试验条件下,流速随放水流量变化规律不明显。这与许多学者结论相反^[34-35]。这是由于增大流量,细沟向切沟发育,沟道形态不断变化,导致径流路径不规则变化^[36],流速的变化在切沟侵蚀中更为剧烈;同时,试验土体为复合土层,不同土壤间存在侵蚀差异,故在侵蚀过程中流速复杂多变。

3.2 平台-边坡系统产沙变化特征

平台、边坡产沙率经历突变、波动变化、稳定 3 个阶段。在平台面蚀和边坡面蚀、细沟侵蚀阶段,地面物质组成疏松,土壤入渗速率较大,径流携沙能力快速增强,产沙率均快速增加至最大值;随侵蚀沟的不断发育和床面土壤质地改变,平台和边坡产沙率随床面阻力增大和侵蚀物质的减少而逐渐减小。产沙率随产流时间产生波动变化的原因为: 1) 对于平台,当面蚀转为细沟侵蚀,沟头溯源侵蚀是造成产沙率波动变化的主要原因。这与前人研究结论一致^[37]。2) 在边坡,产沙率的波动变化与细沟向切沟发育过程中沟底跌穴的下切侵蚀、溯源侵蚀、直至各个跌穴发育至连通沟道,以及沟壁土体的间断性崩塌有关^[28]。Burkard 等^[38]研究认为,切沟形态变化快速,切沟长度的 80%、面积的 50%和体积的 35%仅在切沟寿命的 5%的时间内形成。因此,本研究认为,边坡产沙率剧烈波动变化时期是切沟发育的主要时间。试验条件下,系统产沙率随放水流量的增大呈增加趋势。这与 Su 等^[39]的研究结论一致。

本研究中,48~84 L·min⁻¹流量下平台细沟侵蚀阶段的产沙量远大于面蚀阶段,产沙占比高达 86.6%~95.1%,说明在平台上,细沟侵蚀是主要的侵蚀类型。这与陈同德等^[18]对晋陕蒙能源区排土场土壤侵蚀调查结果一致。60~84 L·min⁻¹流量下边坡各阶段产沙量大小为:切沟侵蚀>细沟侵蚀>面蚀,切沟侵蚀阶段产沙占比高达 69.2%~86.6%,且切沟侵蚀阶段产沙贡献率随流量增大而增大。说明当平台汇水达到一定量时,切沟侵蚀阶段成为排土场边坡侵蚀过程中泥沙主要的来源,且随流量增大,切沟发育越快速,土壤侵蚀越剧烈。因此,在矿区坡面防护工程中,对径流的消减和拦蓄是防治排土场

侵蚀的关键,应在平台修建拦水埂和边坡蓄排水措施,以进一步调节径流,降低边坡切沟出现的机率,减少土壤侵蚀^[40-41]。

3.3 平台-边坡系统侵蚀形态的空间特征

各流量下,平台的平均沟深小于边坡,平均沟宽、宽深比大于边坡。这是由于在整个产流过程中,平台以细沟侵蚀为主,而边坡发生切沟侵蚀;平台坡度较小,土壤容重大,细沟发育至红黏土层后停止下切,促进细沟沟头溯源侵蚀,拓宽平台沟宽。总体上,边坡上部沟深、沟宽最大,宽深比最小;当水流沿平台进入边坡,边坡上部流速迅速增加,平台径流含沙量较低,径流下切能力剧增,不断对侵蚀沟沟头和沟壁内部进行掏蚀,导致重力侵蚀增加,边坡上部沟深、沟宽最大;由于边坡上部侵蚀沟下切速度高于拓宽速度,而沿坡向下径流在侵蚀沟拓宽方向上的作用更大,所以,边坡上部侵蚀沟宽深比最小。总体上,侵蚀沟沿平台至坡脚呈“宽浅-窄深-宽浅”式发展。本研究中,平台细沟宽深比为 1.99~2.14,边坡细沟宽深比为 1.17~1.59,切沟宽深比为 0.68~1.41。这与赵春红等^[42]野外调查得到切沟宽深比在 0.4~1.8 的结论相似;但边坡细沟宽深比值略小于崔志强等^[43]对矿区排土场细沟形态的调查结果(2.05~2.59)。这可能是由于土地利用类型、侵蚀动力条件等不同所致。崔志强等^[43]研究的细沟是在有植被恢复的排土场边坡,而本研究径流小区为裸坡,细沟断面参数尺寸和形状受植被因子限制而自发调整^[44]。此外,野外调查的细沟大部分是在降雨+径流冲刷作用下形成的,降雨时雨滴击溅以及在沟道两侧的汇流作用对沟道扩宽具有重要作用,仅在集中流冲刷作用下形成的细沟宽深比较小。

48 L·min⁻¹流量时,侵蚀集中在平台与边坡中部,从平台至坡底侵蚀体积占比分别为 26.8%、23.0%、29.9%和 20.3%。这与覃超等^[37]认为溯源侵蚀是细沟发育过程中最为活跃的侵蚀产沙因素的结论相似;与杨维鸽等^[45]得出坡中侵蚀强烈,坡脚为沉积区的研究结果相同。同时,边坡上部细沟侵蚀体积达到 23.0%,说明边坡上部也存在严重的细沟侵蚀。这与陈同德等^[18]的研究结论一致。60~84 L·min⁻¹流量下,切沟侵蚀主要集中于边坡上部,边坡下部侵蚀体积最小。这与伍咏秋等^[46]认为切沟侵蚀主要发生在高程突变且缺乏植被保护的下垫面的结论相似。径流通过平台汇聚进入边坡,改变了径流水动力条件,加速边坡上部沟蚀发育,促进切沟发育,造成严重的水土流失,说明当达到一定汇

水条件时,平台-边坡转折部位地形的剧变是导致排土场边坡侵蚀产沙的主要原因,也是排土场侵蚀不同于其他下垫面侵蚀的重要因素。试验条件下,平均侵蚀体积与放水流量呈显著线性递增关系,但 $48\sim 60\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时增加幅度不大,说明陕北地区排土场在覆土条件下,径流掏蚀作用促进了沟蚀的横向发展,径流量较小也会引发泄溜、浅层滑坡和崩塌等自然灾害,加速了水土流失。

参考文献

- [1] 何伟民. 宝日希勒露天煤矿矿区水资源处理和优化分配研究. 硕士论文. 徐州: 中国矿业大学, 2018 [He W-M. The Research on Water Resources Processing and Optimized Utilization in Mining Area of Baorixile Surface Coal Mine. Master Thesis. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018]
- [2] Mider AI, Fernández-Santos B, Martínez-Ruiz C. Colonization patterns of woody species on lands mined for coal in Spain: Preliminary insights for forest expansion. *Land Degradation & Development*, 2013, **24**: 39-46
- [3] Hoomehr S, Schwartz JS, Yoder SC, et al. Surface erosion and sediment yields on steep-sloped coal mining reclamation sites in the Appalachian region. *World Environmental Water Resources Congress*, 2010, **16**: 1881-1892
- [4] 吕春娟,白中科. 露天排土场的岩土侵蚀特征及水保效应分析. *水土保持研究*, 2010, **17**(6): 14-19 [Lyu C-J, Bai Z-K. Advances in research of soil erosion and soil and water conservation in mining area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **17**(6): 14-19]
- [5] 白中科,胡振华,王治国. 露天矿排土场人为加速侵蚀及分类研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, **4**(1): 35-41 [Bai Z-K, Hu Z-H, Wang Z-G. Artificial accelerated erosion and classification of the dump in surface mine. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, **4**(1): 35-41]
- [6] 杨波,王文龙,郭明明,等. 矿区排土场边坡不同植被配置模式的控蚀效益研究. *土壤学报*, 2019, **56**(6): 1-15 [Yang B, Wang W-L, Guo M-M, et al. Erosion-controlling effects of revegetation on slope of refuse dump in mining area relative to vegetation pattern. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(6): 1-15]
- [7] Riley SJ. Aspects of the differences in the erodibility of the waste rock dump and natural surfaces, Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia. *Applied Geography*, 1995, **4**: 309-323
- [8] 郭明明,王文龙,李建明,等. 神府煤田土壤颗粒分形及降雨对径流产沙的影响. *土壤学报*, 2014, **51**(5): 983-992 [Guo M-M, Wang W-L, Li J-M, et al. The influence of soil particles fractal and rainfall on runoff and sediment yield in Shenfu coalfield. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51**(5): 983-992]
- [9] 孙虎,唐克丽. 城镇建设中人为弃土降雨侵蚀实验研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, **4**(2): 30-36 [Sun H, Tang K-L. Study on erosion and sediment yield of man-dumped soil by field simulated rainfall in urban construction area. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, **4**(2): 30-36]
- [10] Zhang LT, Gao ZL, Yang SW, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap. *Catena*, 2015, **128**: 108-121
- [11] 林姿,史东梅,姜义宝,等. 岩溶区煤矿工程堆积体边坡细沟发育及其水沙关系研究. *土壤学报*, 2019, **56**(3): 615-626 [Lin Z, Shi D-M, Lou Y-B, et al. Development of rills on slopes of mine-engineering dumps and its relationship with water and sediment in karst area. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(3): 615-626]
- [12] Li L, Wang Y, Cao ZJ. Probabilistic slope stability analysis by risk aggregation. *Engineering Geology*, 2014, **176**: 57-65
- [13] 缪海宾,王建国,费晓欧,等. 基于孔隙水压力消散的排土场边坡动态稳定性研究. *煤炭学报*, 2017, **42**(9): 2302-2306 [Miu H-B, Wang J-G, Fei X-O, et al. Study on dynamic stability of dump slope based on the dissipation of pore pressure. *Journal of China Coal Society*, 2017, **42**(9): 2302-2306]
- [14] 王丽丽,甄庆,王颖,等. 晋陕蒙矿区排土场不同改良模式下土壤养分效应研究. *土壤学报*, 2018, **55**(6): 1525-1533 [Wang L-L, Zhen Q, Wang Y, et al. Effect of soil amelioration on soil nutrients at mining dumps in the Shaanxi-Inner Mongolia region. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(6): 1525-1533]
- [15] Rodríguez-Seijo A, Andrade ML. Characterization of soil physico-chemical parameters and limitations for revegetation in serpentine quarry soils (NW Spain). *Journal of Soils and Sediments*, 2017, **17**: 1321-1330
- [16] 胡兴定,白中科,张灵,等. 黄土区大型露天矿排土场水力侵蚀计算与防治. *水土保持研究*, 2017, **24**(5): 21-26 [Hu X-D, Bai Z-K, Zhang L, et al. Hydraulic erosion calculation and control in dumping site of large opencast coal mine in Loess Area. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24**(5): 21-26]
- [17] 王金满,张萌,白中科,等. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征. *农业工程学报*, 2014, **30**(4): 230-238 [Wang J-M, Zhang M, Bai Z-K, et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in opencast coal mine dump in loess area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(4): 230-238]
- [18] 陈同德,王文龙,董玉锴,等. 露天煤矿排土场不同治理模式边坡细沟侵蚀特征研究. *草地学报*, 2017, **25**(1): 61-68 [Chen T-D, Wang W-L, Dong Y-K, et

- al. The rill erosion characteristics of dump slope managed by different models in opencast mining area. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, **25**(1): 61-68]
- [19] 栾金凯, 刘登峰, 黄强, 等. 近 17 年陕西榆林植被指数的时空变化及影响因素. *生态学报*, 2018, **38**(8): 2780-2790 [Luan J-K, Liu D-F, Huang Q, et al. Analysis of the spatial-temporal change and impact factors of the vegetation index in Yulin, Shaanxi Province, in the last 17 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(8): 2780-2790]
- [20] 李建星. 鄂尔多斯盆地红黏土分布特征与新构造运动研究. 硕士论文. 西安: 西北大学, 2006 [Li J-X. Study on Red Clay Distribution and Neotectonic Movement in Ordos Basin. Master Thesis. Xi'an: Northwest University, 2006]
- [21] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律. *地理学报*, 1983, **50**(4): 416-425 [Zhang H-X. The characteristics of hard rain and its distribution over the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 1983, **50**(4): 416-425]
- [22] Poesen J. Gully typology and gully control measures in the European loess belt// Wicherek S, ed. *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*. Amsterdam: Elsevier, 1993: 221-239
- [23] 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展. *农业机械学报*, 2016, **47**(8): 48-59 [Zheng F-L, Xu T-M, Qin C. A review of gully erosion process research. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2016, **47**(8): 48-59]
- [24] 李斌兵, 黄磊. 坡面切沟入渗——产流及形态发育动态过程研究. *水土保持学报*, 2013, **27**(4): 98-102 [Li B-B, Huang L. Research on the dynamic process of infiltration, runoff and morphological development of slope gully erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(4): 98-102]
- [25] 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. *应用生态学报*, 2015, **26**(9): 86-93 [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. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(9): 86-93]
- [26] 赵满, 王文龙, 郭明明, 等. 含砾石风沙土堆积体坡面径流产沙特征. *土壤学报*, 2019, **56**(4): 847-859 [Zhao M, Wang W-L, Guo M-M, et al. Runoff and sediment yielding characteristics of slopes of stacks of gravels-containing aeolian sandy soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(4): 847-859]
- [27] 王龙生, 蔡强国, 蔡崇法, 等. 黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系. *农业工程学报*, 2014, **30**(11): 110-117 [Wang L-S, Cai Q-G, Cai C-F, et al. Morphological changes of rill on loess slope and its relationship with flow velocity. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(11): 110-117]
- [28] 李文哲, 王兆印, 李志威, 等. 阶梯-深潭系统的水力特性. *水科学进展*, 2014, **25**(3): 374-382 [Li W-Z, Wang Z-Y, Li Z-W, et al. Study on hydraulic characteristics of step-pool system. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(3): 374-382]
- [29] 和继军, 孙莉英, 蔡强国, 等. 坡面细沟发育特征及其对流速分布的影响. *土壤学报*, 2013, **50**(5): 862-870 [He J-J, Sun L-Y, Cai Q-G, et al. Characteristics of rill development on slope and theirs effects on flow velocity distribution. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(5): 862-870]
- [30] 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. *农业工程学报*, 2011, **27**(3): 73-78 [Li J-L, Cai Q-G, Sun L-Y, et al. Relationship between the spatial distribution of flow velocity and sediment concentration. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, **27**(3): 73-78]
- [31] 魏霞, 李勋贵, 李占斌, 等. 黄土高原坡沟系统径流水动力学特性试验. *农业工程学报*, 2009, **25**(10): 19-24 [Wei X, Li X-G, Li Z-B, et al. Experiments on hydraulic characteristics of runoff in slope-gully systems in Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, **25**(10): 19-24]
- [32] 田培, 潘成忠, 许新宜, 等. 坡面流速及侵蚀产沙空间变异性试验. *水科学进展*, 2015, **26**(2): 178-186 [Tian P, Pan C-Z, Xu X-Y, et al. Field experiment investigation into the spatial variability of overland flow velocity and soil erosion. *Advances in Water Science*, 2015, **26**(2): 178-186]
- [33] 赵新凯, 龚家国, 任政, 等. 黑垆土坡面细沟形态演变规律试验研究. *水利水电技术*, 2020, **51**(2): 205-212 [Zhao X-K, Hong J-G, Ren Z, et al. Experimental study on morphological evolution of rills on dark loessial soil slope. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, **51**(2): 205-212]
- [34] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 冲刷条件下黄土丘陵区浅沟侵蚀形态及产流产沙特征. *农业工程学报*, 2016, **32**(20): 161-170 [Kang H-L, Wang W-L, Xue Z-D, et al. Erosion morphology and runoff generation and sediment yield on ephemeral gully in loess hilly region in field scouring experiment. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(20): 161-170]
- [35] 王文鑫, 王文龙, 康宏亮, 等. 黄土丘陵沟壑区自然恢复草被对浅沟侵蚀的影响. *应用生态学报*, 2018, **29**(12): 3891-3899 [Wang W-X, Wang W-L, Kang H-L, et al. Effect of naturally restored grassland on the ephemeral gully erosion in the loess hilly and gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(12): 3891-3899]
- [36] Shi QH, Wang WL, Guo MM, et al. The impact of flow

- discharge on the hydraulic characteristics of headcut erosion processes in the gully region of the Loess Plateau. *Hydrological Processes*, 2019, **34**: 718-729
- [37] 覃超,何超,郑粉莉,等. 黄土坡面细沟沟头溯源侵蚀的量化研究. 农业工程学报, 2018, **34**(6): 160-167 [Qin C, He C, Zheng F-L, et al. Quantitative research of rill head advancing process on loessial hillslope. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(6): 160-167]
- [38] Burkard MB, Kostaschuk RA. Patterns and controls of gully growth along the shoreline of Lake Huron. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, **22**: 901-911
- [39] Su ZG, Xiong DH, Dong YF, et al. Hydraulic properties of concentrated flow of a bank gully in the dry-hot valley region of southwest China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, **40**: 1351-1363
- [40] 张明明,李亚军,刘翔宇,等. 考虑土层边界不确定性的边坡稳定性概率分析. 水利水电技术, 2020, **51**(2): 162-169 [Zhang M-M, Li Y-J, Liu X-Y, et al. Soil layer boundary uncertainty-considered probabilistic analysis on slope stability. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2020, **51**(2): 162-169]
- [41] 张彦召,左双英,李雨霏. 贵阳红黏土介-微观结构对力学特性影响试验研究. 水利水电技术, 2019, **50**(1): 36-42 [Zhang Y-Z, Zuo S-Y, Li Y-F. Experimental study on influence from meso-microstructure of Guiyang red clay on mechanical properties. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, **50**(1): 36-42]
- [42] 赵春红,高建恩. 坡面不同侵蚀沟断面特征及水力几何形态. 水科学进展, 2016, **27**(1): 22-30 [Zhao C-H, Gao J-E. Cross-section characteristics and hydraulic geometry of different erosion gullies on slopes. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(1): 22-30]
- [43] 崔志强,王文龙,郭明明,等. 不同植被措施下排土场边坡细沟发育时空特征. 土壤学报, 2020, **57**(5): DOI: 10.11766/trxb201904240128 [Cui Z-Q, Wang W-L, Guo M-M, et al. Spatial and temporal characteristics of rill development on slopes of waste dump of mining as affected by revegetation measures. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(5): DOI: 10.11766/trxb201904240128]
- [44] Knight J, Spencer J, Brooks A, et al. Large-area, high-resolution remote sensing based mapping of alluvial gully erosion in Australia's tropical rivers. Proceedings of the 5th Australian Stream Management Conference. Australian Rivers: Making a Difference. Charles Sturt University, Thurgoona, New South Wales, 2007: 199-204
- [45] 杨维鸽,郑粉莉,王占礼,等. 地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响. 土壤学报, 2016, **53**(3): 572-581 [Yang W-G, Zheng F-L, Wang Z-L, et al. Effects of topography on spatial distribution of soil erosion and deposition on hillslope in the typical of black soil region. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(3): 572-581]
- [46] 伍永秋,刘宝元. 切沟、切沟侵蚀与预报. 应用基础与工程科学学报, 2000, **8**(2): 134-142 [Wu Y-Q, Liu B-Y. Gully, gully erosion and prediction. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2000, **8**(2): 134-142]

作者简介 速 欢,女,1994年生,硕士研究生。主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 369121375@qq.com

责任编辑 杨 弘

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

