

DOI: 10.11766/trxb201604240209

# 跌水高度对元谋干热河谷冲沟沟头侵蚀产沙特征的影响初探\*

张宝军<sup>1, 2, 3</sup> 熊东红<sup>1, 2†</sup> 杨丹<sup>1, 2, 3</sup> 张素<sup>1, 2, 3</sup> 校亮<sup>1, 2, 3</sup>  
苏正安<sup>1, 2</sup> 董一帆<sup>1, 2</sup>

(1 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041)

(2 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 元谋干热河谷冲沟侵蚀强烈, 以沟头溯源侵蚀过程为主, 陡立沟壁跌坎是活跃沟头的重要形态特征之一。采用野外原位放水冲刷试验, 研究了 25 和 50 cm 两种不同跌水高度对侵蚀产沙过程的影响。结果表明: 2 种跌水高度下, (1) 径流跌水冲刷力差异显著。跌水势能转化量平均值分别为 4.89 和 9.78 J s<sup>-1</sup>, 跌水剪切力平均值分别为 25.9 和 53.5 Pa, 均呈现倍数关系。(2) 跌穴发育形态特征及下游侵蚀量差异大。2 个小区跌水最大下切深度分别为 7.38 和 7.50 cm, 平均下切深度分别为 3.87 和 5.16 cm; 沟头沟壁及下游沟床部位侵蚀量累积贡献平均为 41% 和 54%。(3) 径流含沙量差异显著 ( $p < 0.1$ )。整个试验中 2 个小区径流平均含沙量分别为 7.51 和 18.76 g L<sup>-1</sup>, 且径流经过沟壁跌坎后, 含沙量分别平均增大 6.25 和 25.49 g L<sup>-1</sup>。初步认为沟壁跌坎高度差异影响径流冲刷力及其侵蚀产沙特征, 但仍需进一步开展更多跌坎高度下的相关研究, 为干热河谷区冲沟沟头溯源侵蚀动力学机制研究提供补充。

**关键词** 径流冲刷力; 侵蚀产沙特征; 跌水高度; 冲沟沟头; 元谋干热河谷

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

土壤侵蚀是当今世界普遍关注的重大环境问题之一, 由于土壤侵蚀导致的严重水土流失制约着区域农业经济发展<sup>[1]</sup>。冲沟侵蚀作为一种重要的土壤侵蚀方式, 受到国内外学者的广泛关注<sup>[2]</sup>, 已有学者针对沟头溯源侵蚀过程展开了较多研究<sup>[3-4]</sup>, 并认为这一过程对冲沟发生发展极为重要。在沟头溯源侵蚀发育过程中, 常由于土壤异质性和径流不均一、不稳定等原因, 导致沟头形态变化不平衡, 逐渐产生跌水落差<sup>[5]</sup>。当坡面集中流到达跌

坎时, 由于地形突变转变为跌水 (Jet flow), 伴随着径流势能向动能转化, 对跌坎底部土体直接冲刷, 导致沟头形态变化剧烈<sup>[6]</sup>。Dey 等<sup>[7]</sup> 研究认为, 在某种程度上跌水高度和径流量可以决定沟头溯源侵蚀过程。Bennett 和 Casali<sup>[8]</sup> 采用模拟水槽冲刷试验, 研究了不同跌水高度下 (5 ~ 50 mm) 的沟头溯源侵蚀过程, 发现随着跌水高度增加, 溯源侵蚀速率、最大下切深度和产沙量均逐渐增大。

金沙江干热河谷区是我国西南特殊的脆弱生态

\* 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2015CB452704)、国家自然科学基金项目 (41571277) 和中国科学院“西部之光”重点项目 (Y4R2060060) 共同资助 Supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2015CB452704), the National Natural Science Foundation of China (No. 41571277) and the Key Programme of the “Western Light” Talents Cultivation programme of the Chinese Academy of Sciences (No. Y4R2060060)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: dhxiong@imde.ac.cn

作者简介: 张宝军 (1990—), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 主要从事冲沟侵蚀机理研究。E-mail: zhangbaojunaixiao@163.com

收稿日期: 2016-04-24; 收到修改稿日期: 2016-07-18; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-08-29

环境类型区，该区域冲沟侵蚀问题突出，水土流失强烈，严重威胁着区域经济发展和下游水利工程安全<sup>[9]</sup>。由于该区域岩层特性复杂、降雨季节性差异等原因，导致冲沟沟头具有形态复杂多样、沟壁跌坎陡立、溯源侵蚀速率快等特征<sup>[10-11]</sup>。目前，已有学者针对该区域冲沟侵蚀过程中的水动力条件及其侵蚀产沙效应展开了较多研究<sup>[12-14]</sup>。Su等<sup>[15-16]</sup>研究认为干热河谷冲沟形态变化及侵蚀产沙，主要集中在一条沟上若干个活跃的沟头部位，沟头溯源侵蚀产沙约占整个冲沟活跃区产沙的62%~75%。沟壁跌坎作为沟头重要形态特征参数，在沟头不同发育阶段表现出不同高度大小<sup>[17]</sup>，而不同跌坎高度发育直接影响径流冲刷特性，导致沟头侵蚀产沙过程差异，但其具体如何影响沟头径流冲刷力及其侵蚀产沙效应尚不得而知，需开展深入研究。本研究采用野外原位放水冲刷试验，结合近景摄影测量技术，初步研究了跌水高度差异对沟头溯源侵蚀过程中的径流水动力条件、形态变化及侵蚀产沙特征的影响，旨在为冲沟溯源侵蚀动力学机制研究提供补充，同时为该区域进行植被恢复实践控制沟头溯源侵蚀提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南元谋干热河谷（25°23′~26°06′N，101°35′~102°06′E），该区属南亚热带季风气候，具有炎热干燥、降水集中、干湿季分明的气候特征：年均气温21.9℃，年均降水量615 mm，主要集中于6—10月的雨季，约占年降水量的90%，年均蒸发量高达3 911 mm，约为年均降水量的6.4倍，年均干燥度为2.8<sup>[18]</sup>。土壤类型以燥红土和变性土为主，植被以稀树灌木草丛为主，森林覆盖率仅为3.4%~6.3%<sup>[19]</sup>。该区冲沟极为发育，水土流失严重，土壤侵蚀模数高达 $1.64 \times 10^4 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ，沟壑密度 $3.0 \sim 5.0 \text{ km km}^{-2}$ ，最大达 $7.4 \text{ km km}^{-2}$ <sup>[10]</sup>（图1a）。冲沟发育的元谋组地层为第四纪河湖相沉积物，厚达695 m，具有结构松散、胶结度差、黏砂互层等特征<sup>[20]</sup>。特殊的岩土性质和气候条件，决定该区域冲沟发育主要以沟头溯源侵蚀过程为主，年均溯源侵蚀速率为 $50 \text{ cm a}^{-1}$ 左右，最大达 $200 \text{ cm a}^{-1}$ 。此外，由于溯源侵蚀

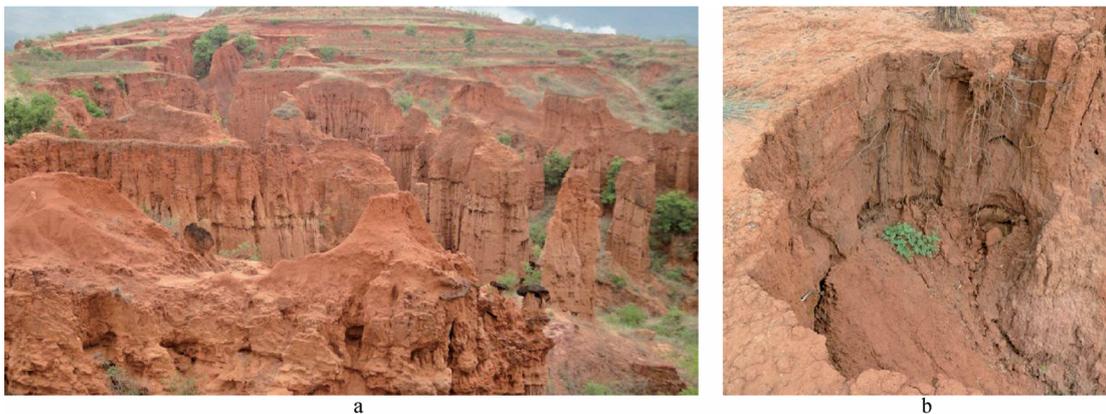


图1 元谋干热河谷冲沟侵蚀强烈（a）及沟头陡立跌坎发育（b）

Fig. 1 Intensive gully erosion (a) and development of steep gully headcut (b) in Yuanmou dry-hot valley region

过程中土体崩塌发生频繁，沟头常发育有陡立跌坎<sup>[21]</sup>（图1b），其高度大小往往可以表征沟头的不同活跃程度<sup>[17]</sup>。

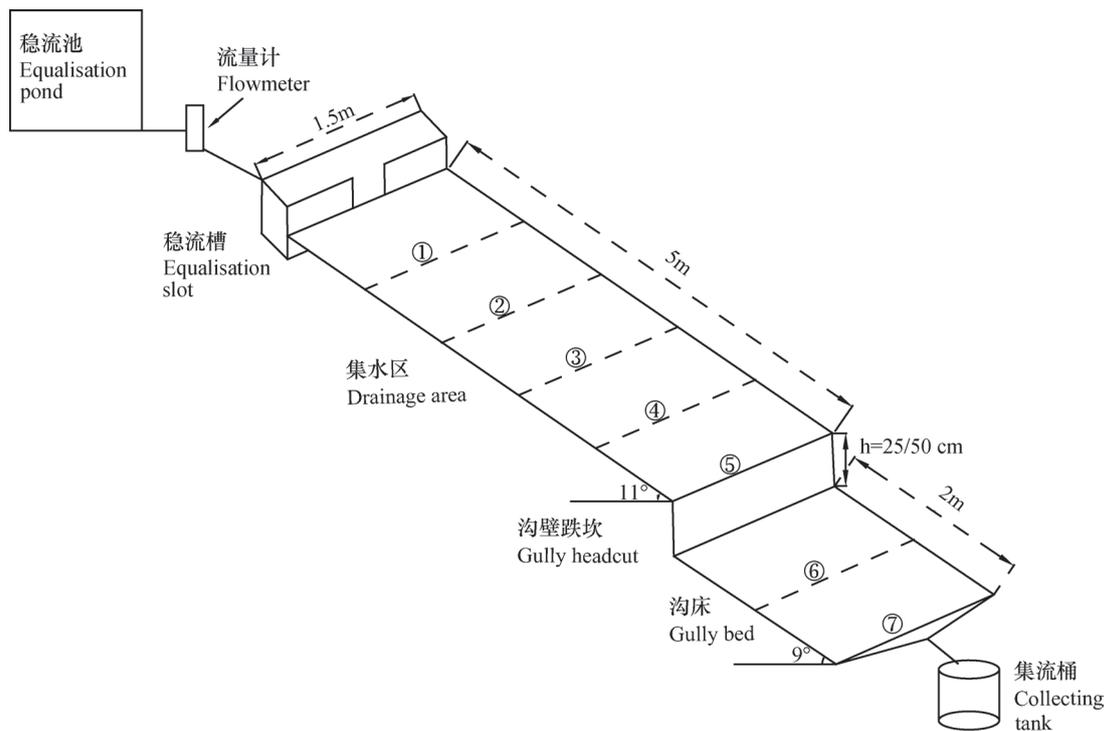
### 1.2 试验小区

本研究选择在中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所与云南省农业科学院热区生态农业研究所合建的元谋干热河谷沟蚀崩塌观测研究站（以下简称“元谋站”）内进行。2015年7月，在

元谋站内选取了一个雨季常有崩塌发生、裸露的原位活跃沟头，基于原始跌坎形态，修建了跌坎高度分别为25 cm和50 cm的两个模拟试验小区，其中沟壁人工一致修整为“平整、陡立、无内凹洞”的初始侵蚀形态。模拟试验小区还包括稳流槽、上游集水区和下游沟床，其中集水区为裸露光板地，长度为5 m、宽度为1.5 m、坡度为11°；沟床长度为2 m、宽度为1.5 m、坡度为9°。稳流槽采用半开

表1 试验小区土壤基本理化性质

小区部位 Plot position	土壤机械组成 Soil mechanical composition (%)			容重 Bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	总孔隙度 Total porosity (%)
	黏粒Clay ( $< 0.002 \text{ mm}$ )	粉粒Silt ( $0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$ )	砂粒Sand ( $0.02 \sim 2 \text{ mm}$ )		
	集水区Drainage area	32.16	6.04	61.80	1.73
沟床 Gully bed	29.24	7.90	62.86	1.67	36.89



注：①~⑦为观测断面Note: ①~⑦ are observation cross-sections

图2 试验小区及放水冲刷试验示意图

Fig. 2 Sketch of the simulated scouring experiment with two plots

口设计，集水区和沟床部位采用浅V型设计，以模拟集中径流冲刷过程。为了监测冲刷试验过程中的水动力参数，集水区从稳流槽开口处，以1 m为间隔，设置0~1、1~2、2~3、3~4和4~5共计5个观测断面；沟床从沟壁跌坎底部开始，以1 m为间隔，设置0~1和1~2共计2个观测断面（如图2所示）。野外试验之前，在试验小区集水区和沟床部位分别随机采集表层土壤混合样（0~5 cm），带回实验室采用常规方法分析土壤理化性质，包括土壤机械组成、容重和总孔隙度，具体见表1。

### 1.3 试验设计

本试验采用野外模拟放水冲刷方法研究沟头

溯源侵蚀过程特征，属连续观测试验，但需要说明的是，由于试验小区构建困难及原位控制试验难度大，未进行重复试验。参照该研究区典型暴雨强度 $60 \text{ mm h}^{-1}$ （据元谋站气象数据），及活跃沟头发育的上游平均汇水面积 $120 \text{ m}^2$ 计算<sup>[21]</sup>，设置放水流量为 $120 \text{ L min}^{-1}$ ，流量通过试验小区上方设计的稳流池和流量计控制（图2）。径流进入试验小区前先通过稳流槽，可以保证径流进入小区时的初始流速基本一致。整个试验过程持续140 min，其中为监测沟头地形变化将试验分5次进行，第1次冲刷时间为20 min，之后4次分别为30 min。试验开始前，在小区内预先均匀撒水，直至表面充分湿润但

又无地表径流产生。

试验中观测径流水动力参数和产沙特征，试验之后监测小区地形变化。各断面径流水动力参数（径流深、径流宽和流速）的变化，按照一定时间间隔每次分别在断面上、中、下部位测量3次取平均值<sup>[16]</sup>。考虑到试验初期，小区表面地形变化明显，可能导致径流水动力特性变化大，因此在前20 min试验中设置5 min的监测间隔，之后试验设置10 min的监测间隔。水动力参数测定方法与参考文献[16]一致，径流宽采用精度1 mm薄钢尺测定，径流深采用精度1 mm直尺测定，流速采用KMnO<sub>4</sub>染色法测定。文中在分析径流水动力特性时为单次试验数据均值。试验过程中的径流产沙特征，采用500 ml集流瓶收集跌水和小区集流槽内径流泥沙样进行观测，分别表征集水区和整个试验小区的径流含沙量。在每次冲刷试验中，自产流开始至10 min内每2 min采集1次，之后每5 min采集1次，试验结束后带回实验室采用烘干法测定，并换算为1 L的泥沙含量。

#### 1.4 径流水动力特性

坡面径流到达跌坎后转变为跌水，从能量角度出发，径流跌水的冲刷能力可以采用势能、动能和剪切力表示<sup>[22]</sup>。径流转变为跌水时，大量势能向动能转化，径流势能转化量（ $\Delta E_p$ ）可以采用公式计算：

$$\Delta E_p = \rho q g H \quad (1)$$

式中， $\rho$ 为水的容重（ $\text{kg m}^{-3}$ ）， $q$ 为径流量（ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ）， $H$ 为跌水落差（m）， $g$ 为重力加速度（ $\text{m s}^{-2}$ ）。坡面径流到达跌坎上沿转变为射流时的水平出射动能可以表述为：

$$E_k = \rho q V_{\text{brink}}^2 / 2 \quad (2)$$

式中， $V_{\text{brink}}$ 为射流水平出射流速<sup>[23]</sup>（ $\text{m s}^{-1}$ ），与坡面径流流速和流态有关。坡面径流流态采用弗罗德数（ $Fr$ ）参数表征，它表示过水断面上径流的动能和势能的对比关系，计算公式为：

$$Fr = V / \sqrt{gh} \quad (3)$$

式中， $V$ 为坡面径流到达跌坎前的平均流速（ $\text{m s}^{-1}$ ）， $h$ 为平均径流深（m）；当 $Fr > 1$ 时为急流，当 $Fr \leq 1$ 时为缓流<sup>[24]</sup>。 $V_{\text{brink}}$ 可以采用下式计算<sup>[25]</sup>：

$$V_{\text{brink}} = \begin{cases} \sqrt[3]{qg}, Fr < 1 \\ V \frac{Fr^2 + 0.4}{Fr^2}, Fr > 1 \end{cases} \quad (4)$$

径流跌水侵蚀能力也可以采用最大剪切力表示<sup>[26]</sup>，采用公式计算：

$$\tau = C_f \rho (2Hg + V_{\text{brink}}^2) \quad (5)$$

式中， $C_f$ 为摩擦系数：

$$C_f = 0.025 (v / q')^{0.2} \quad (6)$$

式中， $v$ 为径流运动粘滞系数（ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ），主要与径流温度有关； $q'$ 为单宽径流量（ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ）。

#### 1.5 地形变化

冲刷试验过程中试验小区的地形及侵蚀量变化，采用高精度近景摄影测量技术获取。近景摄影测量技术是一种基于运动结构（Structure from Motion, SfM）和多视角立体成像技术（MultiView-Stereo, MVS）发展形成的三维影像重建技术，它可以生成高质量、高分辨率的三维点云数据，最高精度可达毫米级<sup>[27]</sup>。冲刷试验之前，在试验小区边界以1 m左右间隔设置约15个控制点，各控制点坐标（ $x, y, z$ ）借助RTK-GPS测定（Trimble R8，美国，水平精度 $1 \text{ cm} \pm 1 \text{ ppm}$ ，垂直精度 $2 \text{ cm} \pm 1 \text{ ppm}$ ）<sup>[21]</sup>。在冲刷试验之前和5次冲刷试验后，分别采用Nikon D610相机从不同角度定焦（50 mm）采集小区地形照片。地形数据处理借助Agisoft PhotoScan 1.1.6专业版软件进行，该软件可以实现三维模型重建过程的完全自动化。每次选取约30张采集照片导入软件（足以覆盖整个试验小区），并添加控制点坐标进行对齐、优化，最后自动生成真实坐标的3D点云模型。在12次点云数据建立中，软件模型依据控制点高程计算的均方根误差（RMSE）介于0.002 ~ 0.009 m，精度较高（图3）。最后将生成的点云数据导入ArcGIS 10.1软件，利用3D分析工具中的TIN模型插值方法，生成数字高程模型（DEM），通过对比不同阶段DEM分析小区地形变化量。

## 2 结果

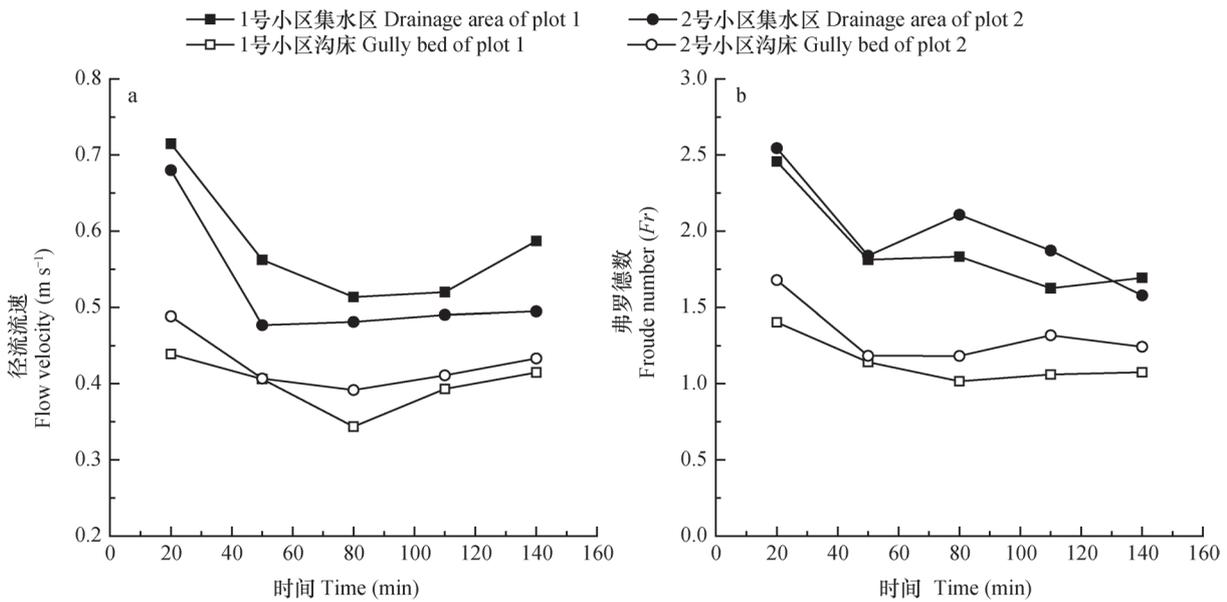
### 2.1 径流水动力学特性

图4a、图4b分别为试验小区集水区和沟床径流流速和弗罗德数随时间的变化规律。可以看出，整个冲刷试验过程，径流流速和弗罗德数随时间均呈现先减小后趋于稳定的趋势，且这两个参数均表现为集水区部位显著高于沟床部位（ $p < 0.05$ ）。其中，2个小区集水区平均流速分别为0.58和0.53  $\text{m s}^{-1}$ ，沟床平均流速分别为0.40和0.43  $\text{m s}^{-1}$ 。径流 $Fr$ 变



图3 2号小区第2次试验后的3D点云模型

Fig. 3 3D point cloud model of Plot 2 after the second test



注：图中数据均为单次冲刷试验测量参数均值。下同 Note: All the data are the mean value of measured parameters of a single test. The same below

图4 试验小区坡面径流流速 (a) 和弗罗德数 (b)

Fig. 4 Runoff flow velocity (a) and Froude number (b) of the two plots

化范围在1.02 ~ 2.54之间，均大于1，属于急流状态。径流流速和Fr随时间的变化趋势与侵蚀发育过程有关。在试验初始阶段，小区坡面平整，径流流速大、流路宽、流深浅，弗罗德数大；之后随着冲刷进行，表层松散土体被迅速侵蚀，并形成明显沟道，径流深度增加，加之径流侵蚀不断消耗能量，导致径流流速变小；最后，小区坡面形态趋于稳定，径流流速和弗罗德数也趋于稳定状态。

由于试验采用固定放水流量 $0.002 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ，所以径流在沟头跌坎部位的势能转化量主要与跌水高度有关，动能主要与流速有关。考虑到径流流速和流

态在上游集水区的沿程变化，采用集水区最下游断面流速和弗罗德数，模拟计算径流到达跌坎上沿的出射流速，并基于此分析径流由坡面流转换为跌水时的出射动能（图5）。2个小区径流到达跌坎上沿的水平方向出射流速和动能，与坡面流速和弗罗德数的变化规律一致，同样表现为先减小后趋于稳定的趋势，且2个小区之间无显著差异 ( $p > 0.1$ )。

图6a、图6b分别表示坡面径流转变为跌水时的势能转化量及其剪切力变化。由于试验小区集水区为裸露光板地，表层有铁锰结膜覆盖，质地坚硬，导致径流下切侵蚀困难。冲刷试验过程中，2个小

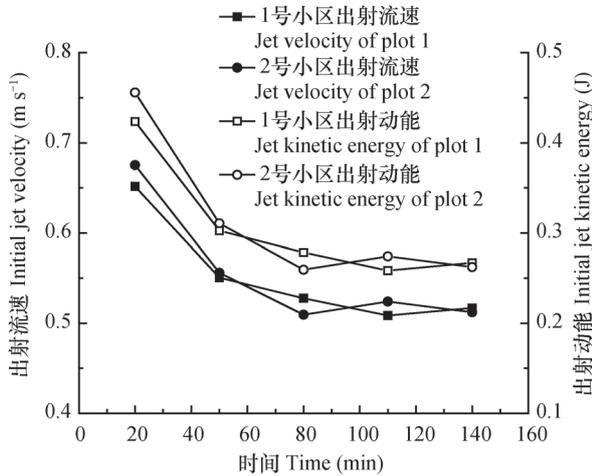


图5 径流转变为跌水的初始流速和动能

Fig. 5 Initial flow velocity and kinetic energy while surface turning into jet

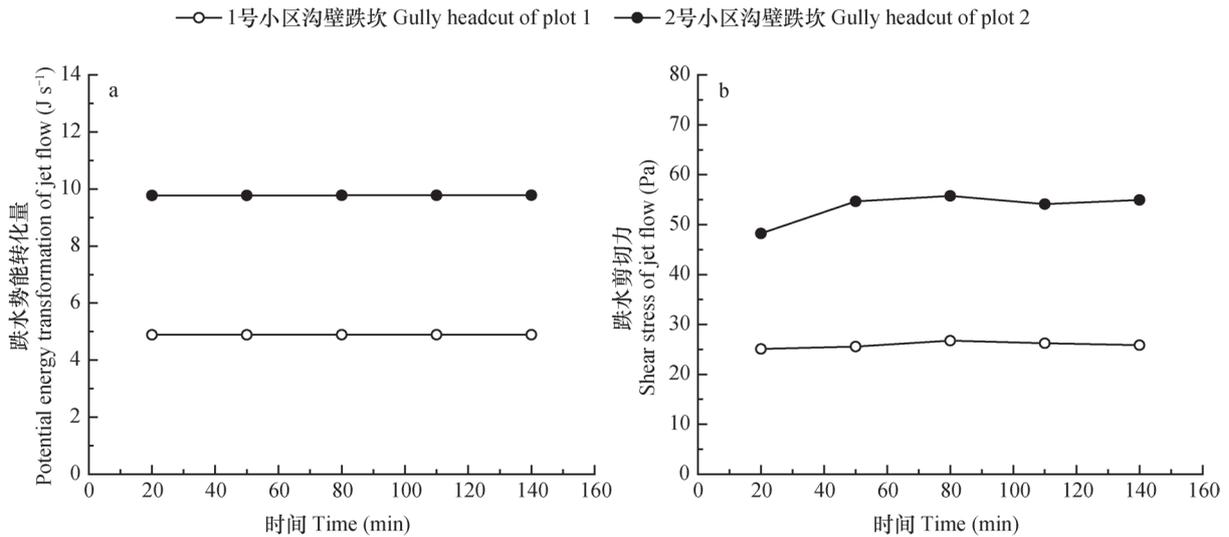


图6 径流跌水势能转化量 (a) 和剪切力 (b)

Fig. 6 Potential energy transformation (a) and shear stress (b) of jet flow

增加，径流势能转化量和跌水剪切力大小也将呈现倍数增大。

### 2.2 地形及侵蚀量变化特征

径流跌水对沟壁跌坎底部土体的直接冲蚀，导致跌水坑 (Plunge pool) 发育。随着冲刷进行，跌水坑宽度和深度逐渐增大，最终促进溯源侵蚀的发生。此次冲刷试验过程中，由于2个小区集水区径流流路偏向右侧，导致跌水侵蚀主要发生在沟壁底部靠右1 m范围内。根据试验之前和每次冲刷试验后的6次DEM数据，提取了2个小区每次试验后跌穴形态发育特征 (表2)，并选取了冲刷试验前、80 min和140 min试验后地形数据，绘制了2个

区跌坎上沿径流最大下切深度不足2 cm，对跌水高度变化影响较小，因此在计算跌水势能转化量时统一采用初始跌水高度。从图6a可以看出，跌水高度50 cm的2号小区，其势能转化量显著高于1号小区，两者平均值分别为9.78和4.89 J s<sup>-1</sup>。基于能量守恒定律，并忽略径流跌落过程中的能量耗散，径流势能将主要转化为动能，增大跌水流速，经计算，2个小区跌水到达底部时的瞬时流速达到2.28和3.18 m s<sup>-1</sup>，分别为出射流速的4.1倍和5.6倍。此外，分析2个小区跌水剪切力，平均值分别为25.9和53.5 Pa，2号小区同样显著高于1号小区 (图6b)。以上结果说明，坡面径流到达沟壁跌坎这一地形陡变的特殊部位时，径流势能向动能转化，导致径流冲刷力显著增大，并且随着跌水高度的成倍

小区距离沟壁底部5cm处的沟床横向剖面线，以直观描述跌水坑的形态发育特征 (图7)。从图7中看出，2个小区在试验中发生跌水的明显下切，导致跌穴发育，且1号小区更接近V型发育，2号小区更接近U型发育。而从表2中可以看出，随着冲刷试验进行，2个小区跌水最大和平均下切深度均逐渐增大，且2号小区平均下切深度显著大于1号小区。其中1、2号小区在140 min试验后跌穴最大下切深度分别为7.38 cm和7.50 cm，差异不显著，但中间变化过程却表现出极大差异。2号小区前20 min试验后最大下切深度达5.81 cm，之后的120 min试验仅增大了1.69 cm，而1号小区前20 min试验后最大

表2 跌水下切深度随冲刷时间的变化

**Table 2** Variation of incision depth of the jet flow with the scouring going on (cm)

试验小区 Experimental plot	下切深度 Incised depth	累计冲刷时间Cumulative scouring time				
		20 min	50 min	80 min	110 min	140 min
1号小区 Plot 1 (25 cm)	最大值 Maximum	1.65	4.12	5.27	7.10	7.38
	平均值 Mean	0.70	1.66	2.49	3.52	3.87
2号小区 Plot 2 (50 cm)	最大值 Maximum	5.81	6.33	6.32	6.71	7.50
	平均值 Mean	3.69	4.01	4.17	4.60	5.16

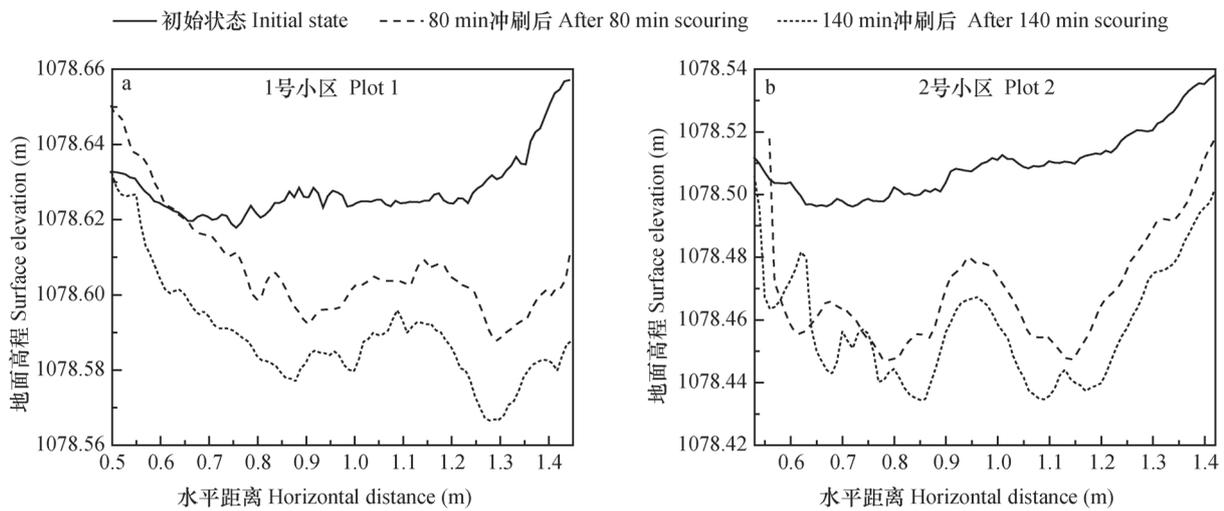


图7 跌穴形态发育特征

Fig. 7 Morphological characteristics of plunge pools

下切深度仅为1.65 cm，之后的120 min试验逐渐增大至7.38 cm。2个小区平均下切深度随时间也表现为相似的增长特征，在前20min试验后平均下切深度分别为0.70 cm和3.69 cm，相差4倍左右，而在140 min试验后分别为3.87 cm和5.16 cm，约为1.3倍。以上结果说明径流经过不同的跌水高度后，产生不同的冲刷能力，导致沟壁跌坎底部土体冲刷侵蚀特征差异明显。

此外，通过分析沟壁跌坎及下游沟床地形侵蚀量，发现2个小区之间差异显著（图8）。在初始20 min冲刷后，1号小区侵蚀量仅为0.003 m<sup>3</sup>，但2号小区高达0.067 m<sup>3</sup>；最后经过140 min冲刷，1号小区侵蚀量增加至0.072 m<sup>3</sup>，2号小区达到0.115 m<sup>3</sup>，约为1号小区的1.6倍。分析每次冲刷试验后，沟壁跌坎及下游沟床侵蚀量对总侵蚀量的累积贡献，发现1号小区在20 min时为34%，之后逐渐增长至45%左右，总体平均为41%，而2号小区在20 min时达到65%，之后降低至50%左右，平均

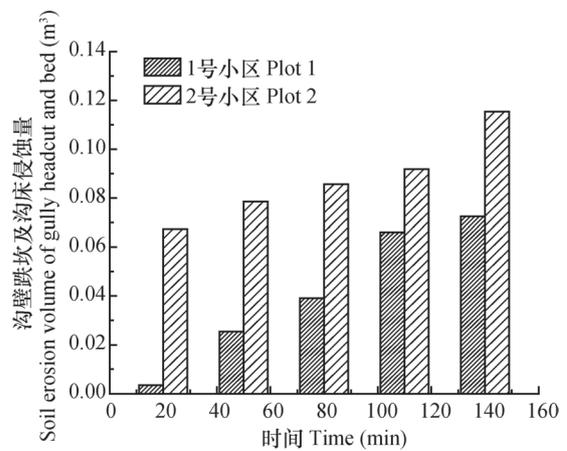


图8 跌坎上沿以下部位侵蚀量的变化

Fig. 8 Soil erosion volume in sections below the border-top of headcut

为54%（表3）。据此可以推测，跌坎高度对沟头沟壁及下游侵蚀产沙具有一定影响，但是否可以说明跌水高度越高，沟壁跌坎及下游沟床侵蚀量越

表3 沟壁跌坎及沟床侵蚀量占小区总侵蚀量的比例

试验小区 Experimental plot	累计冲刷时间Cumulative scouring time					均值 Mean
	20 min	50 min	80 min	110 min	140 min	
1号小区 Plot 1 (25 cm)	34.2	39.6	43.6	45.1	44.2	41.3
2号小区 Plot 2 (50 cm)	64.9	53.2	51.2	50.5	50.3	54.0

大，对总侵蚀量的贡献也越大，这一结论还需要在以后设置其他跌坎高度进行补充验证。

### 2.3 径流输沙特征

对于整个冲刷过程，2个小区径流泥沙含量总体上随时间呈现幂函数减小的趋势，拟合曲线分别为：① $y=53.39 x^{-0.48}$ ， $N=49$ ， $R^2=0.86$ ；② $y=93.09 x^{-0.36}$ ， $N=49$ ， $R^2=0.71$ 。在整个冲刷试验产流开始，2个小区径流泥沙含量分别达到了最大值229.1 g L<sup>-1</sup>和259.8 g L<sup>-1</sup>，但经过10 min后分别急剧下降至8.5 g L<sup>-1</sup>和34.6 g L<sup>-1</sup>，并最终呈现趋于稳定的趋势（图9a）。但从图9a又可以明显看出，之后试验过程中出现明显的4次含沙量极大值点，但其大小随冲刷次数呈现逐渐减小的趋势。这是由于2次试验间隔内小区表面受到干湿交替影响，导致表面土体松散，下次试验产流开始时表土在集中径流作用下极易被带走。之后随着表面浮土被冲刷，径流泥沙含量又逐渐降低至稳定。

采用单因素方差分析进行均值比较，发现径流到达沟头跌坎时2个小区之间含沙量无显著差异，但小区末端2个小区径流含沙量却在0.1水平上差异显著，说明经过不同跌水高度后，径流泥沙含量变

化较大。从图9a可以看出，在5次冲刷试验产流开始时，2号小区径流泥沙含量均显著高于1号小区，特别是第2次和第3次试验，1号小区泥沙含量分别为57.34 g L<sup>-1</sup>和31.80 g L<sup>-1</sup>，而2号小区高达126.02 g L<sup>-1</sup>和78.12 g L<sup>-1</sup>，均为1号小区的2倍多。除去首次试验产流开始时的含沙量最大值及之后4次试验的极大值，整个冲刷试验过程中，2个小区径流平均含沙量分别为7.51 g L<sup>-1</sup>和18.76 g L<sup>-1</sup>，相差约1.5倍。通过计算小区出口和集水区末端径流含沙量差值，表示径流经过沟壁跌坎后的泥沙变化量（图9b）。可以看出，前80 min冲刷试验中，2号小区径流泥沙增量明显高于1号小区，最高增大了108.8 g L<sup>-1</sup>，平均增大25.49 g L<sup>-1</sup>，而1号小区最高仅增大了25.28 g L<sup>-1</sup>，平均增大6.25 g L<sup>-1</sup>，这说明径流经过更高的跌水落差后，径流冲刷力增大，导致下游更多泥沙被径流带走。

## 3 讨论

陡立跌坎是干热河谷冲沟沟头的重要形态特征，其高度大小常被用作沟头活跃程度的野外定性

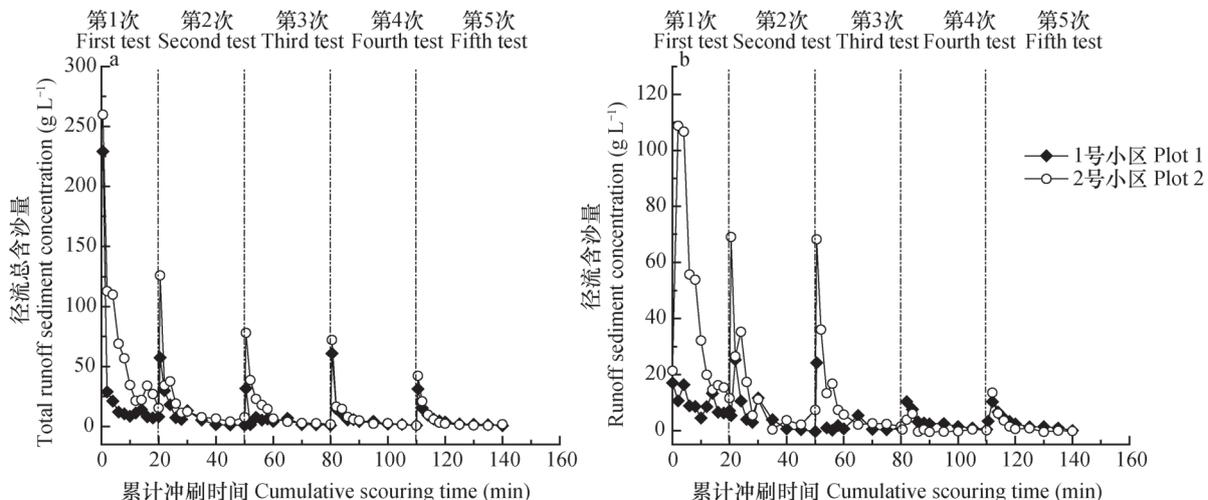


图9 径流总含沙量 (a) 和跌坎上沿以下径流含沙量变化量 (b)

Fig. 9 Total runoff sediment concentration (a) and change of sediment concentration along the headcut (b)

判定标准之一<sup>[17]</sup>。当坡面汇流到达跌坎时,会由于地形的突然转折转变为喷射流,伴随着势能向动能的快速转化,对沟壁底部土体产生严重冲刷,促进沟头溯源侵蚀发生发展。野外多年地形监测数据也表明,跌坎高度大的沟头,年均溯源侵蚀速率越大,形态变化越明显。本文研究了2种跌水高度下的沟头侵蚀产沙过程特征,发现更高跌水高度下的径流冲刷力、跌水下切深度和径流含沙量均表现为更大,说明跌坎高度对沟头溯源侵蚀特征会有影响,这一初步认识对于干热河谷沟头溯源侵蚀过程研究具有重要的补充意义。同时本文试验结果与Bennett和Casali<sup>[8]</sup>研究基本一致,他们认为溯源侵蚀速率、最大下切深度和产沙量均随跌水高度增加而逐渐增大,这一结论是基于室内水槽模拟冲刷试验,研究了5~50 mm内10种跌水高度下沟头溯源侵蚀过程得出的。与之相比,本研究不足之处在于跌水高度设置过少,但优势在于采用的是野外原位控制实验,更接近和反映自然真实情况,且跌水高度尺度更大,为其最大跌水高度的5倍和10倍。

尽管本研究初步查明了跌水高度会影响干热河谷沟头溯源侵蚀过程特征,但试验设计上还存在一些不足,需要进一步改进和完善。首先,本研究选择基于原位沟头构建试验小区,由于沟头宽度和集水区面积限制,仅允许设置2个小区,如果增加小区设计就需要另外选择沟头。最终为保证试验一致性,在沟头原始跌坎基础上暂时只设计了25 cm和50 cm两种跌水高度。但两种跌坎高度处理不足以得出非常确定的趋势性结论,特别是更大跌水高度下,径流冲刷力和侵蚀产沙特征呈现何种变化规律?是否存在影响的临界跌坎高度?这些均需要在以后设置其他跌坎高度进行补充验证。其次,本试验是基于原位沟头开展的野外控制试验,其试验难度远大于室内水槽试验,未能有效地进行重复试验,以后试验需考虑设计多组试验模拟重复。最后,本试验实际为沟头溯源侵蚀过程的连续观测试验,但为了监测试验过程中的地形变化,按照经验将试验分5次进行,其中会涉及干湿交替问题,对沟头溯源侵蚀过程可能产生影响,本文对此暂未考虑。

基于以上分析,研究者将于后续研究中不断完善本试验中的不足,特别是增加其他跌坎高度设置,以期获得更好、更完善的理论数据,旨在查明跌坎高度对沟头溯源侵蚀过程的影响机理,为干热

河谷沟头溯源侵蚀研究做出更有意义的补充。

## 4 结 论

本文采用野外放水冲刷试验方法,初步研究了沟头沟壁不同跌水高度对侵蚀产沙过程的影响。对比25 cm和50 cm跌坎高度,发现径流跌水冲刷能力差异显著,2种跌水高度下径流平均势能转化量分别为4.89和9.78 J s<sup>-1</sup>,跌水平均剪切力分别为25.9和53.5 Pa,均呈现倍数增大。径流跌水冲刷力差异,导致沟壁底部跌穴发育形态特征及下游侵蚀量贡献显著不同。冲刷试验中,2个小区跌水下切深度变化过程差异极大,试验结束后最大下切深度分别为7.38和7.50 cm,平均为3.87和5.16 cm;2个小区沟壁跌坎及沟床对总侵蚀量的平均贡献为41%和54%。此外,2个小区径流含沙量在试验中同样差异显著,除去试验中含沙量最大值和极大值,平均含沙量分别为7.51和18.76 g L<sup>-1</sup>;特别地,在试验前80 min,径流经过沟壁跌坎后,2个小区径流含沙量分别平均增大6.25和25.49 g L<sup>-1</sup>。以上研究结果说明,跌坎高度影响沟头溯源侵蚀过程中的径流冲刷力及其侵蚀产沙特征,但其中内在影响机理及更大跌坎高度下的沟头溯源侵蚀特征还需进一步深入研究。

## 参 考 文 献

- [1] Guo Q K, Hao Y F, Liu B Y. Rates of soil erosion in China: A study based on runoff plot data. *Catena*, 2015, 124: 68—76
- [2] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. *Catena*, 2003, 50: 91—133
- [3] Frankl A, Poesen J, Deckers J, et al. Gully head retreat rates in the semi-arid highlands of Northern Ethiopia. *Geomorphology*, 2012, 173/174: 185—195
- [4] Francis K R, Greg E T. The evolution of gully headcut morphology: A case study using terrestrial laser scanning and hydrological monitoring. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40: 1304—1317
- [5] Prasad S N, Römken M J M. Energy formulations of head cut dynamics. *Catena*, 2003, 50 (2/4): 469—487
- [6] Flores-Cervantes J, Istanbuluoglu E, Bras R. Development of gullies on the landscape: A model of headcut retreat resulting from plunge pool erosion.

- Journal of Geophysical Research, 2006, 111 (F1): 1—14
- [ 7 ] Dey A K, Tsujimoto T, Kitamura T. Experimental investigations on different modes of headcut migration. Journal of Hydraulic Research, 2007, 45: 333—346
- [ 8 ] Bennett S J, Casali J. Effect of initial step height on headcut development in upland concentrated flows. Water Resources Research, 2001, 37 (5): 1475—1484
- [ 9 ] Xiong D H, Yan D, Long Y, et al. Simulation of morphological development of soil cracks in Yuanmou Dry-hot Valley Region, Southwest China. Chinese Geographical Science, 2010, 20 (2): 112—122
- [ 10 ] 柴宗新, 范建容, 刘淑珍. 金沙江下游元谋盆地冲沟发育特征和过程分析. 地理科学, 2001, 21 (4): 339—343
- Chai Z X, Fan J R, Liu S Z. Analysis on development characteristics and process of gully in Yuanmou Basin on lower reaches of Jinsha River (In Chinese). Scientia Geographica Sinica, 2001, 21 (4): 339—343
- [ 11 ] 王小丹, 钟祥浩, 范建容, 等. 金沙江干热河谷元谋盆地冲沟沟头形态学特征研究. 地理科学, 2005, 25 (1): 63—67
- Wang X D, Zhong X H, Fan J R, et al. Study on the morphological characteristics of the gully heads in Yuanmou Basin, Arid River Valley of Jinsha River, China (In Chinese). Scientia Geographica Sinica, 2005, 25 (1): 63—67
- [ 12 ] 熊东红, 杨丹, 翟娟, 等. 元谋干热河谷冲沟沟头径流水动力学特性及产沙效应初探. 水土保持学报, 2012, 26 (6): 52—56
- Xiong D H, Yang D, Zhai J, et al. Preliminary study on hydrodynamic characteristics of overland flow and sediment yields of gully heads in Yuanmou Hot-dry Valley (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26 (6): 52—56
- [ 13 ] 杨丹, 熊东红, 张宝军, 等. 沟床草被对干热河谷冲沟产沙特性影响的野外模拟试验. 农业工程学报, 2015, 31 (15): 124—132
- Yang D, Xiong D H, Zhang B J, et al. Field experiment on impacts of grass belt length on characteristics of sediment yields and transport rates for gullies in Jinsha dry-hot valley region (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (15): 124—132
- [ 14 ] 杨丹, 熊东红, 张素, 等. 金沙江干热河谷冲沟沟床草被对径流水动力特性的影响. 水土保持学报, 2014, 28 (6): 77—81
- Yang D, Xiong D H, Zhang S, et al. Effects of grass belt length to runoff hydrodynamic properties in gully beds in Jinsha River Dry-hot Valley Region (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (6): 77—81
- [ 15 ] Su Z A, Xiong D H, Dong Y F, et al. Simulated headward erosion of bank gullies in the dry-hot valley region of southwest China. Geomorphology, 2014, 204: 532—541
- [ 16 ] Su Z A, Xiong D H, Dong Y F, 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
- [ 17 ] 李佳佳, 熊东红, 卢晓宁, 等. 基于RTK—GPS技术的干热河谷冲沟沟头形态特征. 山地学报, 2014, 32 (6): 706—716
- Li J J, Xiong D H, Lu X N, et al. Morphological characteristics of the Gully Head in Dry-hot Valley based on the RTK-GPS technology (In Chinese). Journal of Mountain Science, 2014, 32 (6): 706—716
- [ 18 ] 刘刚才, 邓伟, 文安邦, 等. 试论金沙江河谷建立沟蚀崩塌科学观测研究站的重要性及学科方向. 山地学报, 2010, 28 (3): 333—340
- Liu G C, Deng W, Wen A B, et al. A review on the essentiality and subject orientation of establishing gully erosion and collapse experimental station in Jinsha River Valley (In Chinese). Journal of Mountain Science, 2010, 28 (3): 333—340
- [ 19 ] 杨艳鲜, 纪中华, 方海东, 等. 元谋干热河谷旱坡地复合生态农业模式效益研究初评. 水土保持研究, 2005, 12 (4): 88—89, 99
- Yang Y X, Ji Z H, Fang H D, et al. Study and preliminary evaluation on the benefit of models of compound eco-agriculture on dry slope land in Yuanmou Dry Hot Valley (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12 (4): 88—89, 99
- [ 20 ] 钱方, 凌小惠. 元谋土林成因及类型的初步研究. 中国科学: B辑, 1989 (4): 412—418, 449—450
- Qian F, Ling X H. Preliminary study on the types and causes of Tulin in Yuanmou (In Chinese). Science in China: Series B, 1989 (4): 412—418, 449—450
- [ 21 ] Dong Y F, Xiong D H, Su Z A, et al. Critical topographic threshold of gully erosion in Yuanmou dry-hot valley in southwestern China. Physical Geography, 2013, 34 (1): 50—59
- [ 22 ] 王民, 崔灵周, 李占斌, 等. 模拟降雨条件下径流侵蚀力与地貌特征的动态响应关系. 水利学报, 2008, 39 (9): 1105—1110
- Wang M, Cui L Z, Li Z B, et al. Dynamic response

- relationship between runoff erosivity and topographic feature under the condition of artificial simulated rainfall (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39 (9): 1105—1110
- [23] 王海云, 戴光清, 张建民, 等. 高水头泄水建筑物掺气设施研究综述. *水利水电科技进展*, 2004, 24 (4): 46—48, 56  
Wang H Y, Dai G Q, Zhang J M, et al. Review of the study of aeration facilities for high water head discharge structures (In Chinese). *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2004, 24 (4): 46—48, 56
- [24] 龚家国, 王文龙, 郭军权. 黄土丘陵沟壑区浅沟水流水动力学参数实验研究. *中国水土保持科学*, 2008, 6 (1): 93—100  
Gong J G, Wang W L, Guo J Q. Ephemeral gully erosion experiment on hydrodynamics parameter of concentrated flow in hilly area of Loess Plateau (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6 (1): 93—100
- [25] Hager W H. Hydraulics of plane free overfall. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1983, 109 (12): 1683—1697
- [26] Stein O, Julien P, Alonso C. Mechanics of jet scour downstream of a headcut. *Journal of Hydraulic Research*, 1993, 31 (6): 723—738
- [27] Frankl A, Stala C, Abrahám A, et al. Detailed recording of gully morphology in 3D through image-based modelling. *Catena*, 2015, 127: 92—101

## Preliminary Study on Effects of Headcut Height on Soil Erosion and Sediment Yield at Gully Heads in Yuanmou Dry-hot Valley Region

ZHANG Baojun<sup>1, 2, 3</sup> XIONG Donghong<sup>1, 2†</sup> YANG Dan<sup>1, 2, 3</sup> ZHANG Su<sup>1, 2, 3</sup> XIAO Liang<sup>1, 2, 3</sup>  
SU Zheng'an<sup>1, 2</sup> DONG Yifan<sup>1, 2</sup>

(1 Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

(2 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** 【Objective】 Gully erosion is very severe in the Yuanmou Dry-hot Valley Region, dominated with headward erosion, which is characterized by steep gully headcuts. During the field investigations, headcut height is often regarded as one of the main indices of distinguishing the type of gully head activity. The abrupt drop of concentrated flow at headcut would cause a sudden change of the runoff in hydrodynamics, thus accelerating the headward erosion processes. It is, therefore, of great significance to carry out the preliminary study on effects of headcut height on characteristics of soil erosion and sediment yield in the gully headward processes, to the gully erosion research in this region as scientific supplement. 【Method】 To simulate different step heights, based on an in-situ active bank gully head, two experimental plots were constructed with the headcut height of 25 cm and 50 cm, separately. And in November 2015 a series of in-situ scouring experiments were carried out with the flow set at 120 L min<sup>-1</sup>. The entire scouring test lasted 140 min, consisting of 5 test runs. During the scouring tests, cross-sections were set in the drainage area and along the gully bed at 1 m intervals, for observation of changes of runoff in width, depth and velocity at regular intervals. Meanwhile, sediment samples were also collected at regular time intervals at the outlet of the drainage area and the plots, separately, for analysis of sediment content with the oven drying method. Besides, before and after the experiment, topographic data of the two plots were collected with the high-resolution close range digital photogrammetry measurements, for analysis of changes in landform, morphological parameters and net soil loss. 【Result】 Results showed that: (1) The scouring power of jet flow differed significantly between the two plots. When surface runoff turned into impinging jets, the mean potential energy transformation in the two plots was about 4.89 and 9.78 J s<sup>-1</sup>, separately with shear

stress reaching 25.9 and 53.5 Pa, on average respectively, both in multiple relations. And the velocity at the instance when the flow touched the bottom of the headcut reached as high as 2.28 and 3.18 m s<sup>-1</sup>, separately, which was 4.1 and 5.6 times larger than that at the brink point respectively. (2) The two plots also differed significantly in morphological characteristics of plunge pools and soil erosion volume at lower end. At the end of the experiment, the incision depth of jet flow reached 7.38 and 7.50 cm in maximum, and was 3.87 and 5.16 cm on average, separately, in the two plots. Especially, the growth of incision depth with the experiment going on varied sharply between the two plots. Furthermore, during the scouring tests, the soil erosion cumulative contribution rate at the gully headwall and in the bed at the lower end reached as high as 45.1% and 64.9%, and was 41% and 54% on average. (3) The two plots also differed sharply in runoff sediment concentration ( $p < 0.1$ ). Excluding the maximum concentration at the beginning of each test, the mean sediment concentration was 7.51 and 18.76 g L<sup>-1</sup>, separately, about 1.5 times in difference. Especially, during the first previous 80 min of the scouring tests, when runoff flew over the headcut, the runoff sediment concentration increased by 25.28 and 108.78 g L<sup>-1</sup> in maximum and by 6.25 and 25.49 g L<sup>-1</sup> on average, separately, in the two plots. 【Conclusion】 This study has tentatively concluded that the effect of gully headcut height affecting runoff scouring force and characteristics of soil erosion and sediment yield is probably the key factor influencing the headward erosion process. However, it is still not very clear about how the effect would vary in the case of higher headcuts. More experiments with a variety of headcut heights should be conducted, in an attempt to supplement more complete meaningful theories to the study on dynamics and mechanisms of gully headward erosion in dry-hot valley regions.

**Key words** Runoff erosivity; Characteristics of soil erosion and sediment yield; Headcut height; Gully head; Yuanmou Dry-hot Valley Region

(责任编辑：檀满枝)