

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.06.024

CSTR:32310.14.stbxb.2025.06.024

侯成宥, 吕立群, 马超, 等. 宽窄相间深切沟谷中泥石流波状运动和流态转化特征[J]. 水土保持学报, 2025, 39(6): 237-246, 255.

HOU Chengyou, LÜ Liqun, MA Chao, et al. Characteristics of wave motion and flow regime transition of debris flows in deeply incised gullies with alternating wide and narrow sections[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6): 237-246, 255.

宽窄相间深切沟谷中泥石流波状运动和流态转化特征

侯成宥, 吕立群, 马超, 陈宇, 张印瑞, 金嘉俊, 黄锋, 朱贵楠

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 同德古盆地由于河流快速下切导致泥石流沟道形成宽窄相间的地形, 研究泥石流在这种不均匀下切地形中的波状运动过程对防灾减灾具有重要意义。[方法] 通过野外布设泥位计和流速计监测泥石流在宽窄相间沟道中的实际运动过程, 并结合水槽试验, 研究不同降雨汇流流量下($Q_1 \sim Q_5$)宽窄相间地形对泥石流的流态变化和动力过程的影响。[结果] 中等规模(Q_3)的泥石流经过峡谷段后, 弗劳德数较峡谷段前提高15.63%, 龙头流态化明显, 峡谷地形对中等规模(Q_3)的泥石流速度起放大作用, 其速度较峡谷段前提高32.21%。峡谷地形对小规模(Q_1, Q_2)或者大规模(Q_4, Q_5)的泥石流速度起抑制作用, 其速度较峡谷段前衰减15.65%~53.44%。[结论] 峡谷地形对龙身、龙头速度和龙头的附加坡降影响较大, 龙身对龙头的推力, 龙头形成的附加坡降及龙头摩擦阻力之间的平衡关系, 导致龙头间歇性的波状运动。中等雨强激发的泥石流经过峡谷段后, 泥石流孔隙水压力波动大, 泥石流剪切稀化, 阻力低, 使得中雨强比高雨强条件下泥石流在沟道出口速度更快。同时, 稀化后的泥石流龙身动水剪切应力加强, 具有溯源侵蚀的趋势, 放大泥石流的规模。

关键词: 泥石流; 河流下切; 峡谷段; 不稳定运动; 卵石夹砂

中图分类号: P532

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0237-10

Characteristics of Wave Motion and Flow Regime Transition of Debris Flows in Deeply Incised Gullies with Alternating Wide and Narrow Sections

HOU Chengyou, LÜ Liqun, MA Chao, CHEN Yu, ZHANG Yinrui, JIN Jiajun, HUANG Feng, ZHU Guinan

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The rapid incision of rivers in the Tongde Ancient Basin has resulted in the formation of debris flow gullies with alternating wide and narrow sections. Investigating the wave motion of debris flows in such unevenly incised terrain is of great significance for disaster prevention and mitigation. [Methods] Field monitoring of debris flow processes in alternating wide and narrow sections was conducted using mud level gauges and velocity meters. Additionally, flume experiments were performed to examine the influence of varying rainfall-runoff discharges ($Q_1 - Q_5$) on the flow regime transitions and dynamic processes of debris flows in such terrain. [Results] For moderate-scale (Q_3) debris flows, the Froude number increased by 15.63% after passing through the canyon section compared to before the canyon section, and the flow head showed significant fluidization. The canyon terrain amplified the velocity of moderate-scale (Q_3) debris flows, increasing the speed by 32.21% compared to before the canyon section. The canyon terrain suppressed the velocity of small-scale (Q_1, Q_2) or large-scale (Q_4, Q_5) debris flows, reducing their speed by 15.65% to 53.44% compared to before the canyon section. [Conclusion] The canyon terrain significantly affects the velocities of the debris flow body and head, as well as the additional slope drop induced by the flow head. The balance between the thrust of the debris flow body on the head, the additional gradient formed by the head, and the frictional resistance of the head leads to the intermittent wave motion of the head. For debris flows triggered by moderate rainfall intensity, the fluctuation of pore water pressure was pronounced after passing through the canyon section. The debris flow experiences shear

收稿日期: 2025-05-16

修回日期: 2025-06-17

录用日期: 2025-06-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-23

资助项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3012704, 2023YFF1305201)

第一作者: 侯成宥(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事山地灾害形成运动过程研究。E-mail: 1513804798@qq.com

通信作者: 吕立群(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事山地灾害研究。E-mail: lvliqunqinghua@126.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

thinning with low resistance, resulting in higher velocities at the gully outlet under medium intensity rainfall conditions compared to high intensity rainfall conditions. Meanwhile, the shear stress of the thinned debris flow body increases, showing a tendency toward headward erosion and amplifying the scale of the debris flow.

Keywords: debris flow; river incision; canyon section; unstable motion; gravel interbedded with sand

Received: 2025-05-16

Revised: 2025-06-17

Accepted: 2025-06-25

Online(www.cnki.net): 2025-09-23

河流下切决定着泥石流的物质来源和能量转化方式,影响着沟床泥沙的补给和泥石流的侵蚀过程^[1-2],进而影响泥石流的规模^[3]。河流下切会提高河床的坡度,使沟道两岸的边坡处于不稳定状态,甚至发生大规模的崩塌、滑坡,为泥石流提供物质和能量^[4],同时改变泥石流沟道河床形态^[5],影响泥石流的形成和动力过程^[6-7]。不同沟道形态影响泥石流运动特点^[8-9],如滑坡导致沟道剧烈变窄,这种变截面沟床影响沟道底床和侧壁粗糙度,最终影响泥石流体的外部阻力和流体性质^[10]。沟道的截面面积与泥石流的发育存在非线性关系^[11],宽窄组合的沟道会导致泥石流产生放大效应^[12]。泥石流在运动过程中对沟道沿程产生不同程度的侵蚀作用,侵蚀能力与水流的流速和流体动能密切相关^[13],降雨频率和降雨强度的变化直接影响集水流量,进而影响泥石流的流量和流速^[14]。目前关于河流下切对泥石流分布发育的研究已经取得一定的进展^[15],但泥石流运动和侵蚀在峡谷地形中的过程和机制还不够清楚。

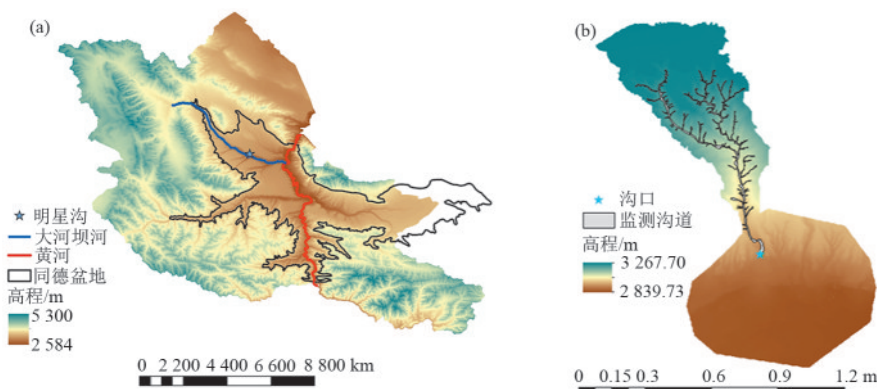
泥石流因其运动的高度不稳定性对现场观测和研究带来挑战。因此,室内水槽试验成为研究泥石

流不稳定运动和侵蚀行为的重要手段^[16-17]。现有的水槽试验多数模拟具有固定河床宽度的泥石流运动过程,没有充分考虑河床宽度变化对泥石流运动和侵蚀过程的影响^[18]。河道截面变化对流速、剪切应力及泥石流的总体侵蚀能力都有显著影响^[18-19]。本研究通过模型试验的方法,探究在不同降雨汇流条件下,泥石流在宽窄相间沟谷中的波状运动特征和侵蚀过程的力学机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

同德盆地位于青藏高原的东北边缘(图 1),受到青藏高原抬升的影响,黄河溯源下切,使得盆地由沉积区变为侵蚀区,泥石流开始频发,降雨阈值较低^[15]。大河坝河属于黄河上游的支流,黄河下切带动大河坝河下切,导致泥石流沟道溯源,促使同德盆地由沉积区转化为侵蚀区,大河坝河出现群发性的泥石流灾害^[20]。盆地累积了以细粒卵石为主的沉积物,夹杂大量砂粒,岩性软,河流下切速度快,导致大量宽窄相间的沟谷存在,对泥石流波状运动,河床侵蚀变化,流态转化都有着重要影响^[15]。



注:图 a 为同德盆地、黄河和大河坝河之间的位置关系;图 b 为泥石流监测沟道。

图 1 研究区域概况

Fig.1 Overview of the study area

针对峡谷地形对泥石流运动过程的影响,在其中一条频发的泥石流沟道(明星沟)峡谷段上下游建立观测站(35°31'40"~35°33'10"N, 99°57'20"~99°58'40"E)。沟道海拔 2 800~3 300 m,沟道平均比降达 278%,沟道宽度变化显著(图 2)。沟道布设 5 个监测断面,峡谷段前后站点为 S1、S3。

站点内布置雨量筒、泥位计、流速仪、土压力计、摄像头、地震数据采集器。2023 年 7 月 12 日和 10 月 5 日爆发了泥石流,监测结果表明,不同降雨条件下泥石流都呈现波状运动过程,且峡谷段地形对泥石流的波状运动过程起到抑制或者放大的作用(图 3),取决于泥石流的流态变化。

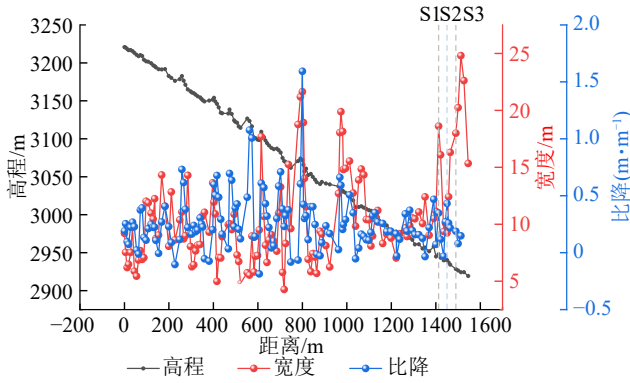


图 2 下切沟道变化特征

Fig.2 Variation characteristics of incised gullies

1.2 试验方法

采用水槽试验的方法模拟峡谷过流对泥石流波状运动和流态变化的影响,根据野外监测沟道和水槽的尺寸,几何比尺设置为1:100。试验设计水槽长12 m,宽0.6 m,高0.7 m,坡降0.32(图4)。水槽上游设置3.94 m×1.25 m×0.98 m的水箱,水箱提供水流,模拟降雨汇流,水箱底部小孔出流形成有压恒定流,通过

调节孔口断面面积实现流量控制。试验共设置5组工况($Q_1 \sim Q_5$),流量分别为6.72、13.38、25.65、36.21、47.36 L/s。水槽0~2 m为定床段,起到稳定水箱小孔出流的作用,2~12 m铺设0.35 m厚的砂石混合物,8.2~9.0 m为峡谷段,宽0.15 m,模拟沟道由于河流不均匀下切形成的峡谷地貌。水槽侧面为透明钢化玻璃,两侧标注刻度线,并布置11台高清摄像机记录流速和泥位,视频经Adobe Premiere Pro软件分析和计算流速分布及高程变化。在水槽的3.8、5.2、6.4、7.0、10.5 m处布设孔压和土压传感器,采集频率设置为10 Hz,实时测量泥石流沿程的孔隙水压力和土压力变化。

沉积盆地的下切沟床由粗卵石夹杂细沙组成,颗粒级配见图5a。试验水槽的沟床泥沙由黑色粗颗粒(粒径5.0~40.0 mm)和白色细颗粒(粒径0.5~2.0 mm)组成,颗粒密度为2.65 g/cm³,粗、细颗粒以9:1比例混合,粗颗粒含有1%的白色示踪粒子,便于观测记录颗粒速度,颗粒级配见图5b。

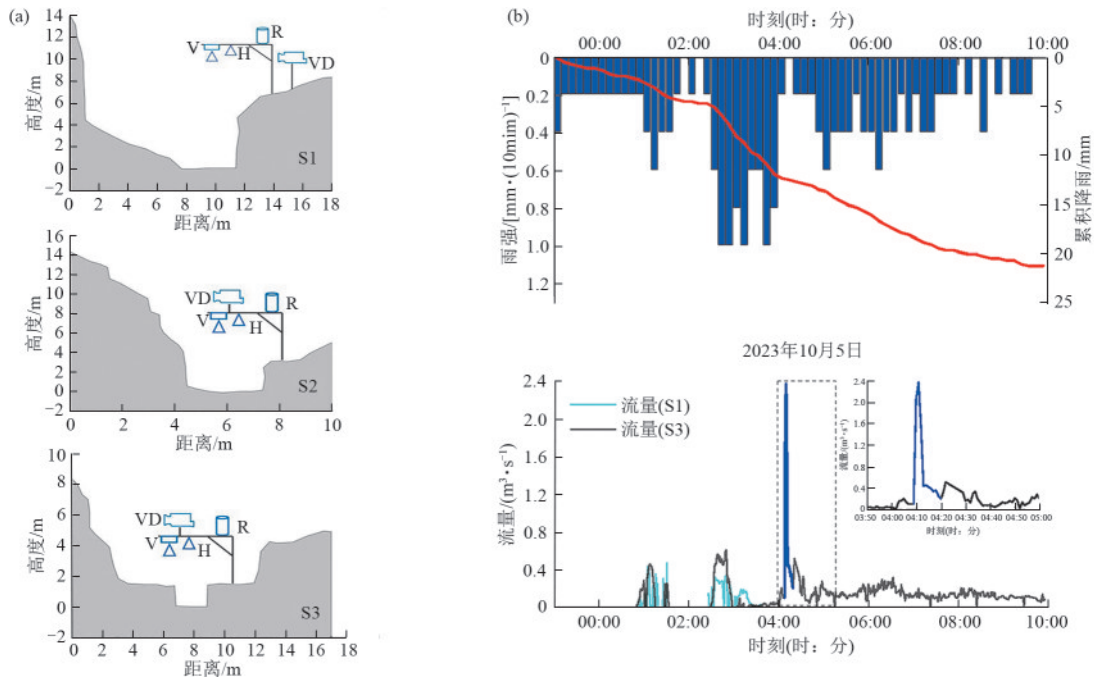


图 3 下切沟道峡谷段对泥石流运动过程的影响

Fig.3 Influence of canyon section in incised gullies on debris flow motion process

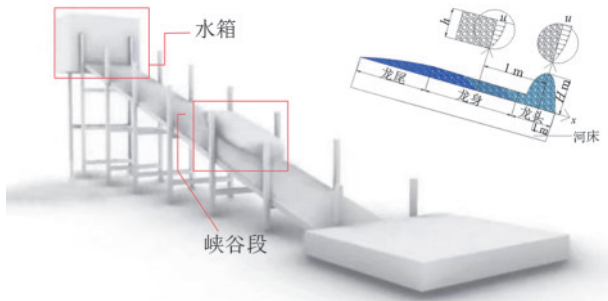


图 4 试验水槽

Fig.4 Experimental flume

2 结果与分析

2.1 峡谷地形对泥石流波状运动过程的影响

水流不断冲刷沟床物质,粗颗粒在前部形成高陡的龙头,龙头后部是含水量相对较高的龙身。泥石流在动床段(3~12 m)反映其波状运动特征(图6),运动过程分为3个阶段:1)在3.0~8.2 m动床段泥石流龙头总体呈先升高后降低反复循环的波状运动过程;2)8.2~9.0 m的峡谷段龙头均有爬升变大的趋势,且 Q_3 工况下龙头爬升的趋势最为显著。 Q_1 、 Q_2 工况下泥石

流在峡谷段的运动有明显的间歇停滞现象,其停滞时间为 Q_3 工况的5倍左右;3)9.0~12.0 m的动床段,龙

头高度降低,运动速度变快,经过一段距离的运动,龙头再次表现出不稳定的波状运动特征。

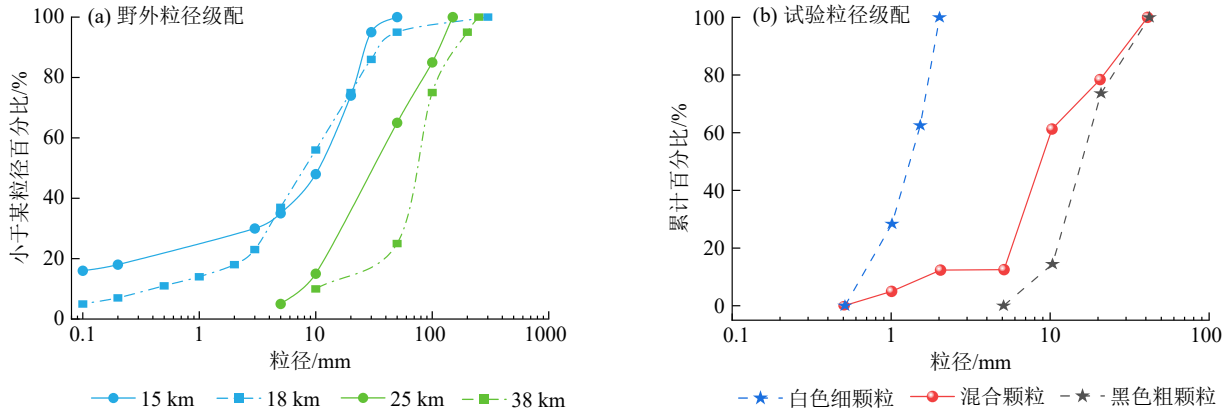
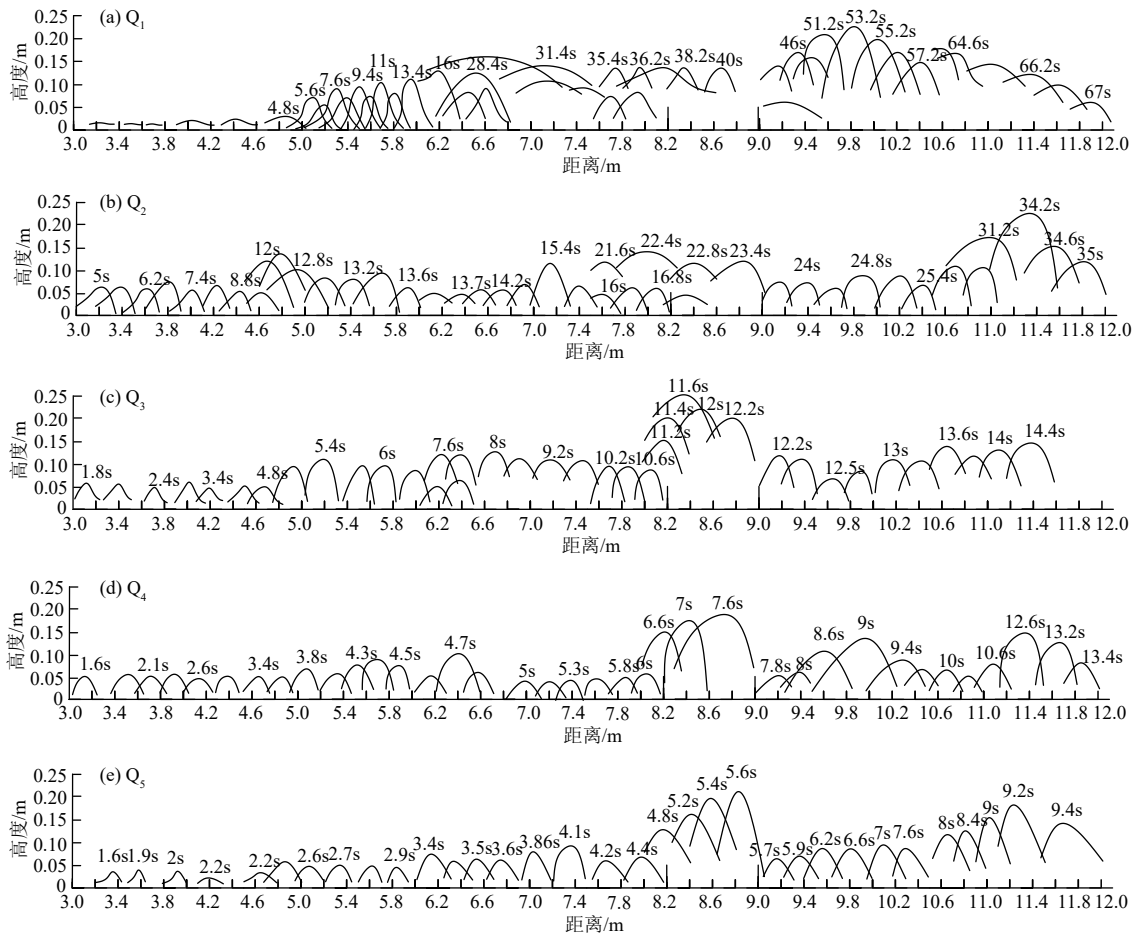


图5 粒径级配

Fig.5 Particle size distribution



注:图中数据为时间,S。

图6 龙头波状运动过程

Fig.6 Wave motion of debris flow head

龙头在峡谷段前由于长时间的停滞堆积作用,龙头体积很大,高度明显提升,当龙头高度增加到足够大时,龙头向前坠滑,龙头高度和坡度减小(图7),龙头的势能转化为动能。从图7可以看出,龙身与龙头均呈现波动趋势,且在峡谷段后由于龙头的溃决,龙身高度普遍比龙头高度大。

在峡谷段前,随着流量增大,龙头高度有降低的趋势,因为流量越大,龙头的含水量越大,阻力较低,龙头不需要较大的附加坡降维持运动。峡谷段后均值高度相对于峡谷段前都有显著提升(图8), Q_3 工况较其他工况下提升比例最低,提高比例为36.47%(表1)。

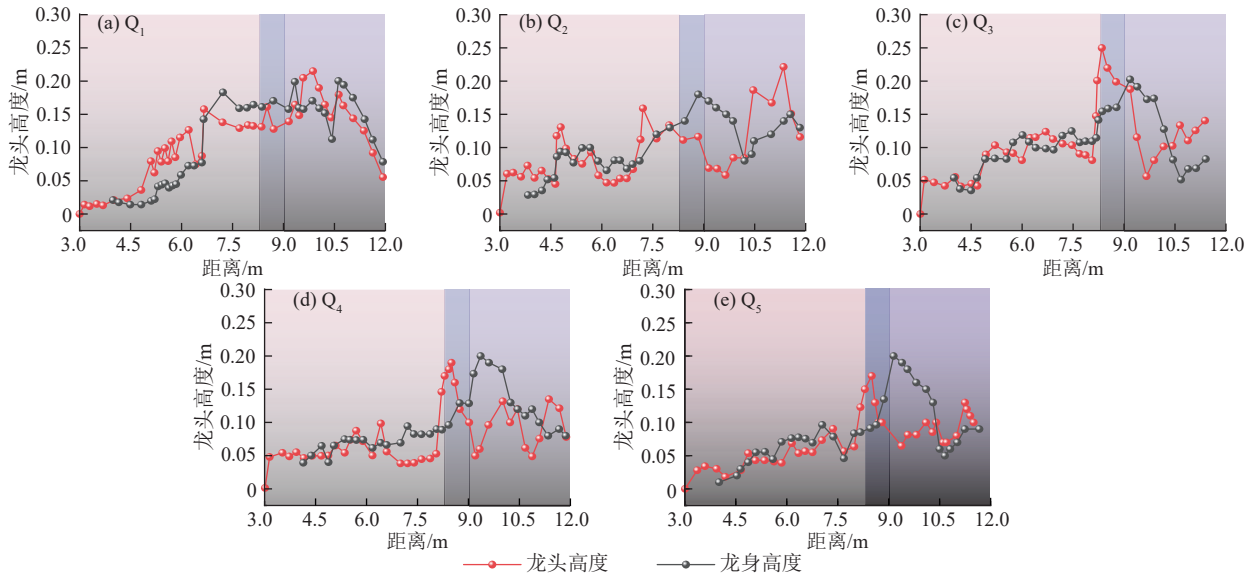


图 7 龙头和龙身沿程的波峰变化

Fig.7 Variations in wave peaks of flow head and body

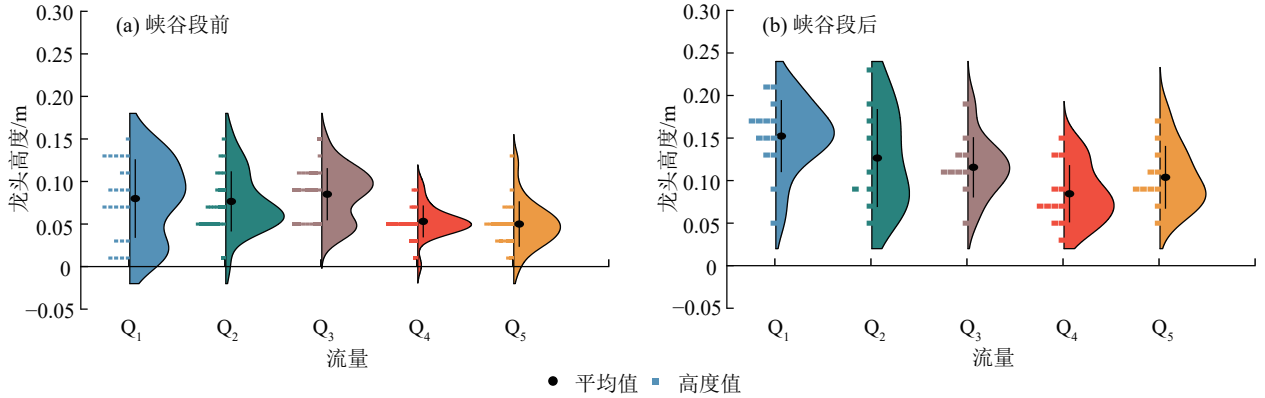


图 8 不同工况下龙头平均高度

Fig.8 Average height of debris flow head under different conditions

表 1 试验结果

Table 1 Experimental results

工况	流量/ (L·S ⁻¹)	峡谷段前龙 头高度/m	峡谷段后龙 头高度/m	增长 率/%
Q ₁	6.72	0.080	0.152	90.00
Q ₂	13.38	0.077	0.126	63.64
Q ₃	25.65	0.085	0.116	36.47
Q ₄	36.21	0.053	0.095	79.25
Q ₅	47.36	0.050	0.104	108.00

泥石流经过峡谷段后速度的波动性明显降低(图 9)。峡谷段对低流量(Q₁、Q₂)和高流量条件下(Q₄、Q₅)的泥石流龙头速度有抑制作用,速度衰减 15.65%~53.44%,Q₃条件下峡谷段对泥石流的速度有放大作用,其速度提高 32.21%(图 9 和图 10)。不同水流激发条件下呈现龙身水流速度>龙身颗粒速度>龙头速度(图 10)。

2.2 峡谷地形对泥石流侵蚀过程的影响

泥位呈先升高后降低、最终低于原始沟床高程的特征(图 11)。由于峡谷段的抑制作用,水流的侵

蚀作用减弱。峡谷段前(3.8、6.4、7.0 m 断面)有长时间的堆积过程,抬高侵蚀基准面,减少水流的下切能力。由于峡谷段并非稳定的堰塞结构,龙身在水流的作用下为峡谷段缓慢运动的龙头提供大量物源,形成体积不断膨胀的龙头,因此在靠近峡谷段的断面(7.0 m)河床淤积抬升的时间跨度更大。

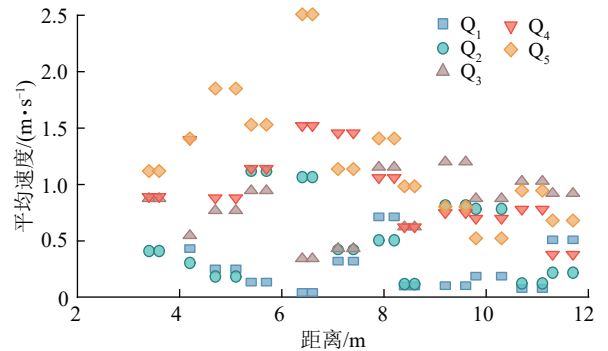
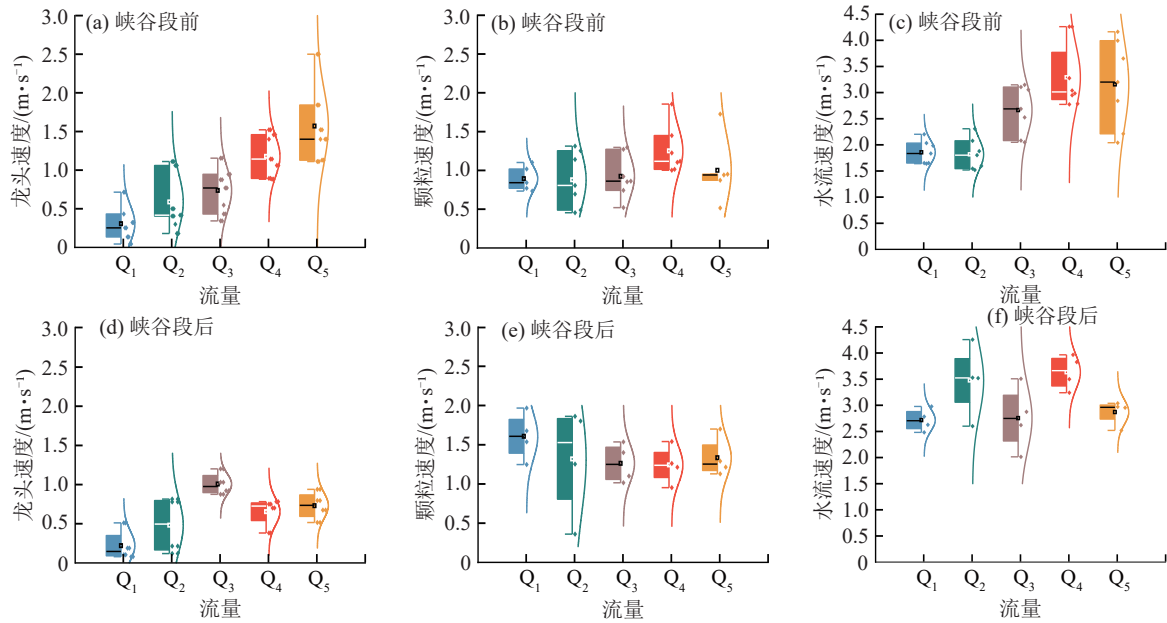


图 9 龙头运动速度沿程变化

Fig.9 Variations in velocity of debris flow head along longitudinal direction



注: □为平均值;—为中位值;▭为25%~75%;I为1.5倍标准差。下同。

图 10 龙头、龙身颗粒和水流平均运动速度

Fig.10 Average motion velocities of debris flow head, body particles, and water flow

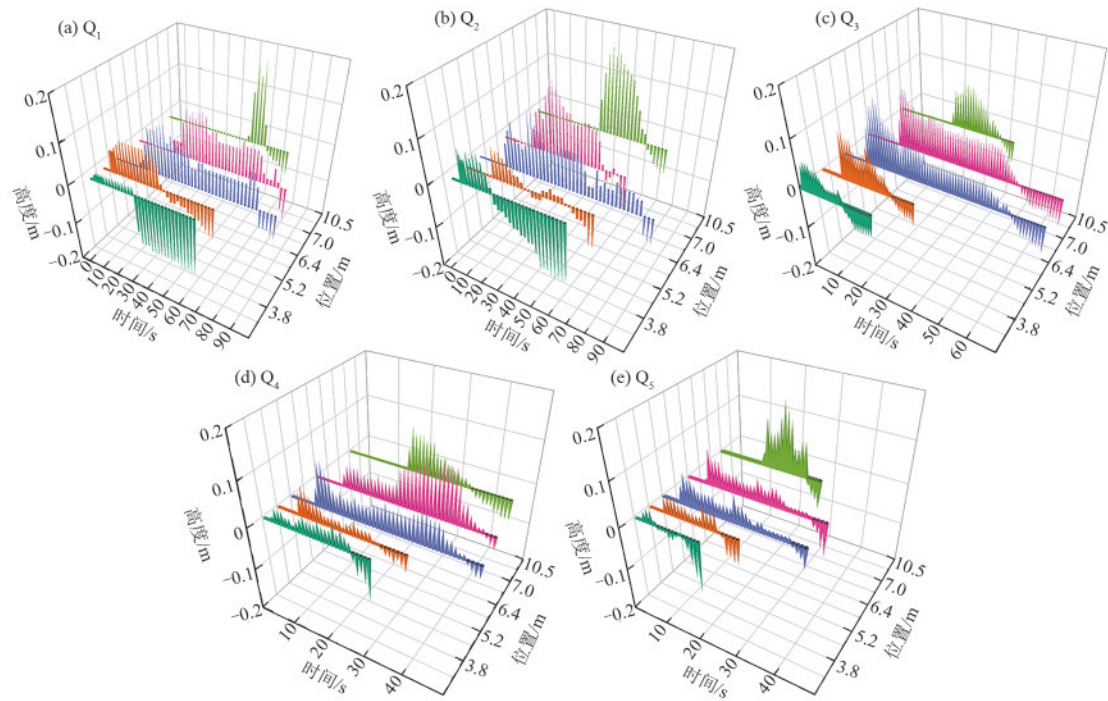


图 11 不同断面沟床高程随时间的变化

Fig.11 Variations in gully bed elevation over time at different cross-sections

2.3 峡谷地形对泥石流流态的影响

弗劳德数($F_r = \sqrt{u_m^2/gH_m}$ 。式中: u_m 为龙头速度; H_m 为龙头高度)。表征流体惯性与重力的相对大小,是描述泥石流流态特征的重要参数^[18,22]。由图 12 可知, Q_1 、 Q_2 工况下峡谷段前泥石流弗劳德数相对较小,泥石流趋于固态,重力在泥石流流动中起主导作用。 Q_4 、 Q_5 工况下泥石流的弗劳德数较大,泥石流趋于流态,动水作用起主导作用, Q_3 工况介于二者之间。峡谷段使得 Q_1 、 Q_2 、 Q_4 、 Q_5 工况下泥石流的流态衰减,向固态转化且

易停滞运动,而峡谷段使得 Q_3 工况下泥石流的弗劳德数较峡谷段前提高 15.63%,流态特征更加明显。

与野外监测的泥石流流态变化特征相似,中等降雨汇流条件下泥石流(2023 年 7 月 12 日降雨量 16.4 mm)在峡谷段后表现出比更大降雨汇流条件下(2023 年 10 月 5 日降雨量 19.4 mm)更为显著的流态化特征,龙头的速度和峰值流量较峡谷段前提高 1.1、5.8 倍(图 13),较高的降雨汇流条件下泥石流在峡谷段后流速和流量反而降低。

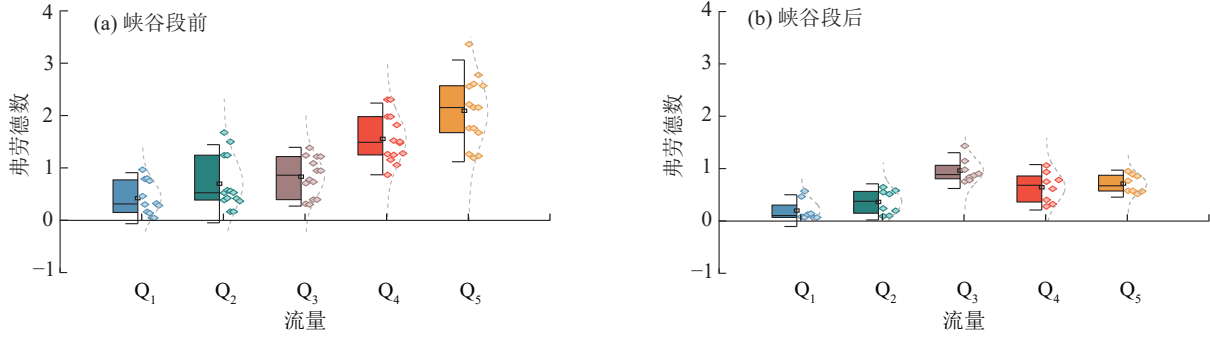


图 12 弗劳德数变化

Fig.12 Variations in Froude number

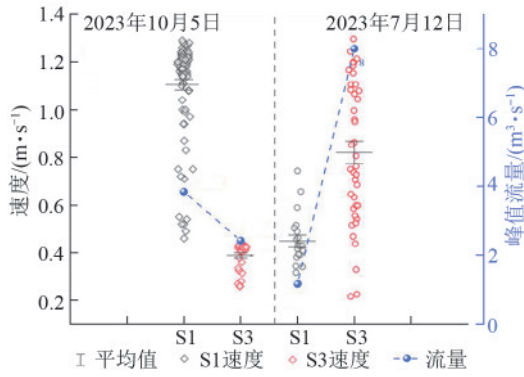


图 13 野外流态化特征

Fig.13 Field fluidization characteristics

3 讨论

3.1 泥石流波状运动和流态变化的力学机理

摩擦阻力对泥石流的流速、流量、侵蚀能力及沉积模式等有显著影响^[21]。泥石流的波状运动特征主要受摩擦阻力(τ)、龙头自身重力($\rho_m g V_m \sin \theta$)、龙头

附加坡降(J')、龙身对龙头推力(F)的影响,龙头的摩擦系数($\tan \varphi$)为^[21]:

$$\tan \varphi = \frac{\rho_m g V_m}{(\sigma - P) L_m} (\sin \theta + J') - \frac{\rho_m V_m}{(\sigma - P) L_m} \frac{du_m}{dt} + \frac{F}{(\sigma - P) L_m} \quad (1)$$

式中: ρ_m 为龙头密度, kg/m^3 ; V_m 为龙头体积, m^3 ; $V_m = 0.5 H_m L_m$; L_m 为龙头长度, m ; θ 为水槽的坡脚, ($^\circ$); u_m 为龙头速度, m/s 。

龙头趋于固态时,阻力较大,会通过增加附加坡降(J')的方式来提供动力^[21], $J'(x) = H_m(x)/L_m(x)$ 。式中: H_m 为龙头的高度, m ; L_m 为龙头前缘的长度, m 。由图 14 可知,在峡谷段前,随着来水流量的逐渐增大,泥石流趋于流态,附加坡降在逐渐降低。峡谷段使 Q_3 工况下的附加坡降达到最大值,为泥石流龙头提供更多的动力,龙头过峡谷段后更加趋于流态化。

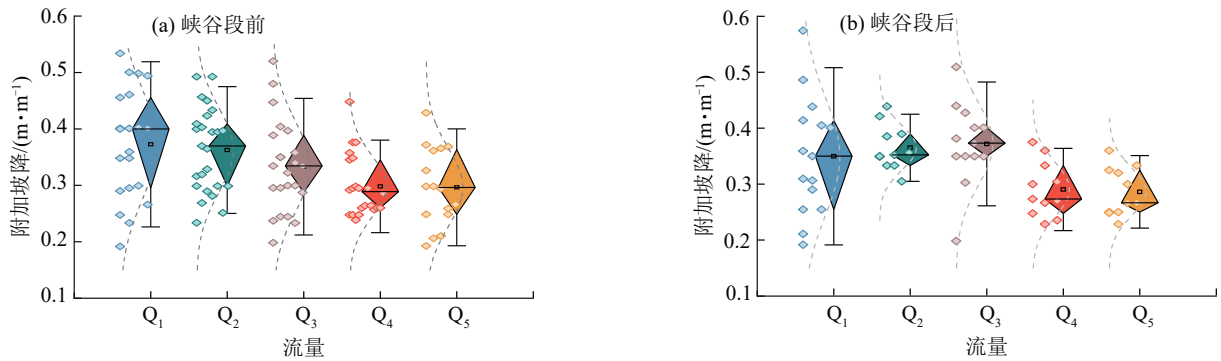


图 14 龙头平均附加坡降

Fig.14 Average additional gradient of debris flow head

泥石流的龙身颗粒流和流速大于龙头速度,龙身对龙头有推力作用。以单位宽度龙头为研究对象,龙身推力(F)取决于龙身颗粒流和流速与龙头的速度差^[21]:

$$F = \rho_s (\bar{u}_s - \bar{u}_m)^2 \bar{h} + \rho_w (\bar{u}_w - \bar{u}_m)^2 \bar{h} \quad (2)$$

本研究表明,受峡谷段地形影响,低流量(Q_1 、 Q_2)和高流量条件下(Q_4 、 Q_5)龙身对龙头的推力作用大,中等流量条件下(Q_3)龙身对龙头推力作用小(图 15)。

由图 16 可知,水槽 3.8、5.2、6.4、7.0、10.5 m 处龙头高度、总应力、孔隙水压力随时间的变化。当龙头经过后,龙身由于含水率较高,总应力和孔隙水压力之间的差值降低,使得龙身颗粒受到的阻力下降。峡谷段后高流量(Q_4 、 Q_5)条件下有效应力变化不明显,低流量(Q_1 、 Q_2)条件下有效应力依旧增加,而中等流量条件下(Q_3)有效应力衰减明显,在峡谷段后所受到的阻力最小。

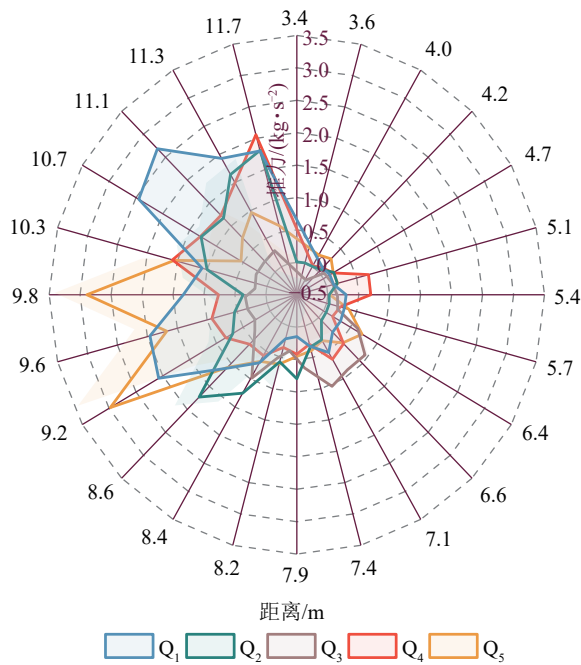


图 15 龙身推力沿程变化

Fig.15 Variations in thrust exerted by debris flow body along longitudinal direction

过峡谷段后,摩擦系数变小,中等流量(Q_3)条件下摩擦系数显著变小(图 17),其在运动过程中受到的阻力最小,导致运动速度放大效果明显。

3.2 峡谷地形影响泥石流侵蚀速率的力学机理

泥石流的流动速度影响着泥石流的侵蚀能力^[23]。流速越高,泥石流的侵蚀能力越强,并在侵蚀的过程中增加泥石流规模^[3],进而增强泥石流的运动范围。试验表明,峡谷地形对龙身的侵蚀影响更大(图 11),龙身含水率较高,适合用水力学的方法分析,龙身摩擦系数 c_f ^[23]:

$$\frac{1}{\sqrt{c_f}} = \frac{0.01}{n} (2.2 \ln Re - 1) \quad (3)$$

式中: n 为 0.018; Re 为雷诺数。

$$Re = \frac{\rho_f \mu h}{v} \quad (4)$$

式中: ρ_f 为流体密度, kg/m^3 ; h 为龙身高度, m ; μ 为流速, m/s ; v 为动力黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$, $v=1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

泥石流沟床受到龙身的动水剪应力(τ_h)^[23]为:

$$\tau_h = c_f \rho_f \mu^2 \quad (5)$$

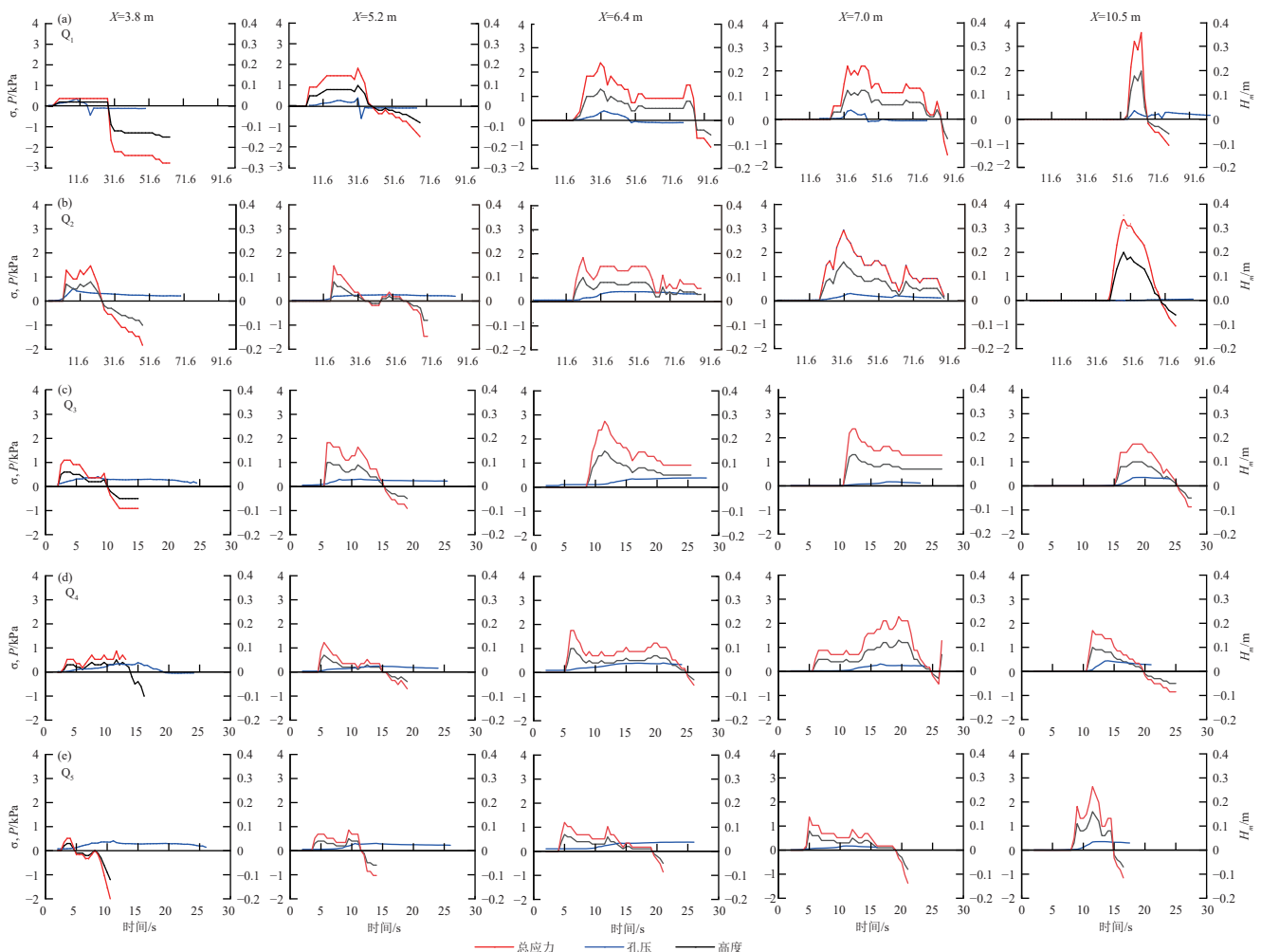


图 16 泥石流龙头高度、孔压和正压力

Fig.16 Height, pore pressure, and normal pressure of debris flow head

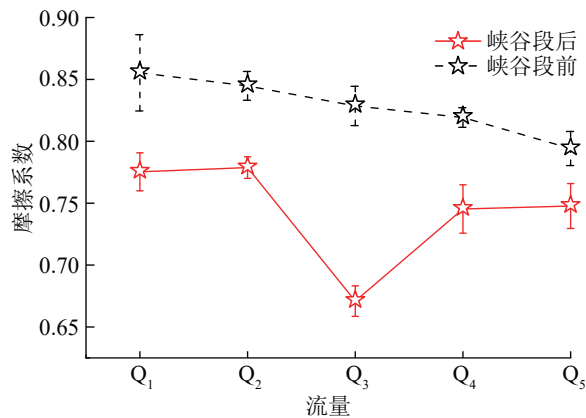


图 17 不同流量下龙头的摩擦系数

Fig.17 Friction coefficient of debris flow head under different flow rates

由于龙身流速较快,处于高水流能态区,不同工况下 ϑ 根据 Froude 与 ϑ 数关系^[25] 确定,沟床的抗侵蚀阻力 (τ_{ch}°) 为:

$$\tau_{ch}^\circ = \vartheta (\rho_s - \rho_f) g D \quad (6)$$

沟床的侵蚀速率受水流施加的剪切应力和河床颗粒的抗侵蚀阻力来控制,侵蚀速率 (\dot{e})^[23] 为:

$$\dot{e} = \frac{c_f \rho_f \mu^2 - \vartheta (\rho_s - \rho_f) g D}{\rho_b \mu} \quad (7)$$

式中: ϑ 为 shields 数(无量纲); g 为重力加速度, m/s^2 ; D 为特征直径, 10 cm ; ρ_b 为沟床泥沙密度, kg/m^3 。

由图 18 可知,侵蚀速率随着流速的增大而增大,低流量 (Q_1, Q_2) 条件下,由于龙身部位的流态特征更趋于固态,根据公式(7)计算得到的侵蚀速率与试验值(图 11)相比偏高。而高流量 (Q_4, Q_5) 条件下,由于峡谷段的抑制作用,峡谷段后龙身的流态化衰减,水流施加的动水剪应力降低,侵蚀率减少;中等流量 (Q_3) 条件下,峡谷段使得侵蚀速率有所上升,有利于泥石流规模的放大。

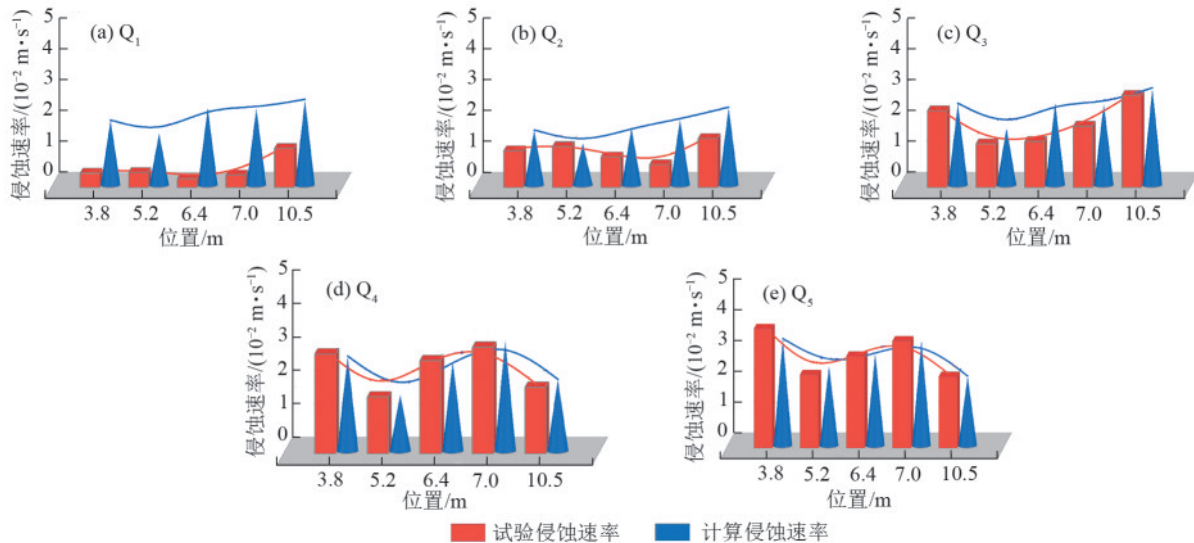


图 18 不同流量下龙身侵蚀速率

Fig.18 Erosion rates of debris flow body under different flow rates

4 结论

卵石夹砂沉积层被河流下切形成宽窄相间的沟床,物源丰富,是降雨控制型泥石流,泥石流在不同降雨条件下均呈波状运动特征。卵石集中在泥石流前部形成阻力较大的龙头,砂粒集中在含水量较高的龙身。龙身阻力低,速度快,源源不断地把物质和能量传递给龙头,使得龙头的附加坡降不断增大。龙头在龙身推力,附加坡降形成的自身重力,以及龙头摩擦阻力之间的平衡和再平衡,导致龙头间歇性的波状运动。泥石流沟道的峡谷段放大中等规模的泥石流速度,抑制低等和高等规模的泥石流速度。中等规模的泥石流,经过峡谷段后,龙身和龙头的速度差最小,龙身对龙头的推力贡献小,但龙头的附加坡降最大,龙头自身的重力为泥

石流的高速运动贡献较大。中等雨强激发的泥石流经过峡谷段后,孔隙水压力的强烈波动导致龙头剪切稀化,阻力低,与峡谷段后野外监测结果一致,揭示中雨强比高雨强条件下泥石流在沟道出口速度更快的机理。峡谷段地形使得泥石流侵蚀过程主要发生在龙身,中等雨强激发的泥石流龙身侵蚀作用更强,尤其在龙头剪切稀化后,龙身动水剪切应力加强,且有溯源侵蚀的趋势,放大泥石流的规模。

参考文献:

[1] 梁馨月,徐梦珍,吕立群,等.基于地貌特征的青藏高原边缘泥石流沟分类[J].地理学报,2020,75(7):1373-1385.
LIANG X Y, XU M Z, LÜ L Q, et al. Classification of debris flow gullies at the edge of the Qinghai-Tibet Plateau based on geomorphic features[J]. Acta Geographica

- Sinica, 2020, 75(7):1373-1385.
- [2] 赵岩, 孟兴民, 郑娇玉, 等. 地貌学在泥石流研究中的应用与理论初探[J]. 灾害学, 2017, 32(1):43-49.
ZHAO Y, MENG X M, ZHENG J Y, et al. Application and theoretical exploration of geomorphology in debris flow research [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(1):43-49.
- [3] GUO X J, LI Y, CUI P, et al. Intermittent viscous debris flow formation in Jiangjia gully from the perspectives of hydrological processes and material supply [J]. Journal of Hydrology, 2020, 589:e125184.
- [4] LIN C W, SHIEH C L, YUAN B D, et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: Example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. Engineering Geology, 2004, 71(1/2):49-61.
- [5] 刘怀湘, 王兆印, 陆永军, 等. 山区下切河流地貌演变机理及其与河床结构的关系 [J]. 水科学进展, 2011, 22(3):367-372.
LIU H X, WANG Z Y, LU Y J, et al. Formation mechanism of mountain river incision and its relationship with bed structures [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3):367-372.
- [6] 蒋先刚. 溃决型泥石流形成过程分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(A01):3613-3622.
JIANG X G. Analysis of formation process of outburst debris flow [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(A01):3613-3622.
- [7] IMAIZUMI F, SIDLE R C, TSUCHIYA S, et al. Hydrogeomorphic processes in a steep debris flow initiation zone [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(10):e10404.
- [8] JAKOB M, HUNGR O, JAKOB D M. Debris-flow hazards and related phenomena [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [9] GLADE T. Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology [J]. Geomorphology, 2005, 66 (1/4) : 189-213.
- [10] 崔鹏, 唐金波, 林鹏智. 泥石流运动阻力特性及其研究进展 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(3):1-11.
CUI P, TANG J B, LIN P Z. Resistance characteristics and research progress of debris flow motion [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(3):1-11.
- [11] 崔鹏, 何易平, 陈杰. 泥石流输沙及其对山区河道的影响 [J]. 山地学报, 2006, 24(5):539-549.
CUI P, HE Y P, CHEN J. Sediment transport by debris flows and its effects on mountain gullies [J]. Mountain Research, 2006, 24(5):539-549.
- [12] 黄杰, 党超. 卡口地形段泥石流堵塞效应分析: 以四川什邡桫头尖泥石流沟域为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3):48-57.
HUANG J, DANG C. Blocking effect of debris flow in bottleneck terrain: A case study of Huatoujian gully in Sichuan [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3):48-57.
- [13] EGASHIRA S, HONDA N, ITOH T. Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial and Planetary Science, 2001, 26(9):645-650.
- [14] 常鸣, 窦向阳, 唐川, 等. 降雨驱动泥石流危险性评价 [J]. 地球科学, 2019, 44(8):2794-2802.
CHANG M, DOU X Y, TANG C, et al. Hazard assessment of rainfall-induced debris flows [J]. Earth Science, 2019, 44(8):2794-2802.
- [15] 吕立群, 周冠宇, 马超, 等. 古沉积盆地地下切引发的泥石流侵蚀和波状流动耦合过程 [J]. 地球科学, 2023, 48(9):3389-3401.
LÜ L Q, ZHOU G Y, MA C, et al. Coupling process of debris flow erosion and wavy flow caused by incision in ancient sedimentary basin [J]. Earth Science, 2023, 48(9):3389-3401.
- [16] LÜ B H, LI Y, HU P. Effects of bed sediment conditions on debris flow propagation from the two-phase flow modelling perspective [J]. Advances in Water Resources, 2024, 183:e104592.
- [17] ZHENG H C, HU X L, SHI Z M, et al. Volumetric growth of debris flow on erodible bed by basal shear and collision: Theory and observations [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2025, 662:e119404.
- [18] NING L, HU K H, LI P, et al. Experimental assessment of gully narrowness effects on debris-flow erosion [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(6):e244.
- [19] WANG X A, CHEN J G, CHEN H Y, et al. Erosion process of multiple debris flow surges caused by check dam removal: An experimental study [J]. Water Resources Research, 2022, 58(3):e2021WR030688.
- [20] 吕立群, 王兆印, 崔鹏, 等. 沟岸侧蚀对泥石流形成和运动过程的影响 [J]. 水科学进展, 2017, 28(4):553-563.
LÜ L Q, WANG Z Y, CUI P, et al. Effects of bank erosion on debris flow initiation and motion [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(4):553-563.
- [21] 吕立群, 王兆印, 崔鹏, 等. 沟岸侧蚀对泥石流不稳定动力过程的影响 [J]. 水科学进展, 2018, 29(2):213-220.
LÜ L Q, WANG Z Y, CUI P, et al. Influence of bank erosion on unstable dynamic processes of debris flow [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2):213-220.

(下转第 255 页)