

四川甘洛县黑西洛沟“8·31”泥石流动力过程

史继帅, 姜 亮, 翟胜强

Dynamic process of the “8·31” debris flow in Luoxi gully of Ganluo County, Sichuan Province

SHI Jishuai, JIANG Liang, and ZHAI Shengqiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202303058>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四川省冕宁县华岩子沟火后泥石流成灾机理

Disaster mechanism of post-fire debris flow in Huayanzi gully, Mianning County, Sichuan Province

张绍科, 胡卸文, 王严, 金涛, 杨瀛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 79-85

北京市密云区典型泥石流侵蚀过程分析

Erosion process on a debris flow in Miyun County, Beijing

马超, 王玉杰, 王彬 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(4): 10-16

喜德县中坝村火后泥石流发育特征及预警避险

Study on the development characteristics of post-fire debris flow and its early warning risk aversion in Zhongba Village, Xide County

殷万清, 金涛, 胡卸文, 曹希超, 杨相斌, 黄健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 61-69

雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流过程模拟及运动特征分析

Numerical runout modeling and dynamic analysis of the ice avalanche-debris flow in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet

李昆仲, 张明哲, 邢爱国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 18-27

基于面积高程和面积坡度积分的泥石流物质供给能力分析

The material supply ability analysis of debris flows based on area-hypsometric integral and area-gradient integral

张静, 田述军, 侯鹏鹏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 9-16

基于水槽试验的冰碛土泥石流启动机理分析

Analysis of the start-up mechanism of moraine debris flow based on flume test: A case study of the Aierkuran Gully along the Sino-Pakistan highway

樊圆圆, 宋玲, 魏学利 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 1-9



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202303058

史继帅, 姜亮, 翟胜强. 四川甘洛县黑西洛沟“8·31”泥石流动力过程[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 52-60.

SHI Jishuai, JIANG Liang, ZHAI Shengqiang. Dynamic process of the “8·31” debris flow in Luoxi gully of Ganluo County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 52-60.

四川甘洛县黑西洛沟“8·31”泥石流动力过程

史继帅^{1,2}, 姜亮^{1,2}, 翟胜强^{1,2}

(1. 四川省地质环境调查研究中心, 四川 成都 610081; 2. 四川省地质灾害防治工程技术研究中心, 四川 成都 610081)

摘要: 黑西洛沟位于四川省甘洛县苏雄镇, 该沟于 2020 年 8 月 31 日上午 8 时暴发特大型泥石流灾害, 对当地居民、成昆铁路桥梁及基础设施等造成了极大的损失。为研究黑西洛沟泥石流的活动特征与动力特征, 综合利用野外实地调查、现场观测及研究区高精度 DEM 数据等, 并利用 Massflow 软件对该次泥石流进行模拟验证, 模拟反演黑西洛沟泥石流的动力演化过程, 定量评价“8·31”泥石流动力特征。研究表明: “8·31”泥石流主要经历了“降雨汇流—下切侧蚀—一级平台淤积分选—平台后下切侵蚀—二级平台进一步淤积分选—平台后进一步下切侧蚀—岸坡崩滑堵溃—堵河形成堰塞湖、溃决泄流”等“滚雪球式”的循环加剧过程。基于 Massflow 的泥石流动力过程分析, 模拟各沟段的洪峰流量、流速、流深、侵蚀沉积深度等均与实测数据相匹配, 证实了该方法的可靠性。通过该手段, 可更加直观地分析泥石流的动力特征, 为后续的防灾减灾工作提供理论依据。

关键词: 泥石流; Massflow; 动力演化过程; 活动特征; 动力特征

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)03-0052-09

Dynamic process of the “8·31” debris flow in Luoxi gully of Ganluo County, Sichuan Province

SHI Jishuai^{1,2}, JIANG Liang^{1,2}, ZHAI Shengqiang^{1,2}

(1. Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Sichuan Province Engineering Technology Research Center of Geohazard Prevention, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: Heixiluo gully, located in Suxiong Town, Ganluo County of Sichuan Province, experienced a catastrophic debris flow disaster at 8:00 a.m. on August 31, 2020, causing significant losses to local residents, as well as to the Chengdu-Kunming railway bridges and infrastructure. To study the activity and dynamic characteristics of the debris flow in Heixiluo gully, a comprehensive analysis was conducted using field investigations, on-site observations, and high-precision DEM data from the study area. The formation conditions and activity characteristics of the “8·31” debris flow were studied, and the Massflow software was utilized to simulate and verify the debris flow, inversely simulating the dynamic evolution process of the debris flow in Heixiluo Gully, and quantitatively evaluating the dynamic characteristics of the “8·31” debris flow. The study indicates that the “8·31” debris flow mainly underwent a “snowballing” cycle of processes, including “rainfall runoff convergence-”,

收稿日期: 2023-03-23; 修订日期: 2023-11-08

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

第一作者: 史继帅(1990—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事工程地质与地质灾害防治工作。

E-mail: 280889804@qq.com

通讯作者: 翟胜强(1979—), 男, 陕西周至人, 本科, 高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质与地质灾害防治等方面的研究与工作。

E-mail: 173552819@qq.com

incision and erosion on the sides, sedimentation and selection on the first-level platform, erosion on the rear side of the platform, further sedimentation and selection on the second-level platform, further incision and erosion on the rear side of the platform, bank slope collapse, blockage and collapse, river blockage, formation of barrier lakes, and dam breach discharge.” Based on the Massflow analysis of the dynamic process of the debris flow, the simulated peak discharge, flow velocity, flow depth, erosion, and sedimentation depths in each gully segment match the measured data, confirming the reliability of this method. Through this method, the dynamic characteristics of debris flow can be more intuitively analyzed, providing a theoretical basis for subsequent disaster prevention and mitigation works.

Keywords: debris flow; Massflow; dynamic evolution process; activity characteristics; dynamic characteristics

0 引言

泥石流具有突发性强、活动速度快、破坏力强、危害范围大、防治难度大等特点。2020 年 8 月 31 日上午 8 时甘洛县黑西洛沟爆发特大型泥石流灾害,造成成昆铁路 K295+375 段铁路桥梁垮塌中断,大量泥石流冲出物沿沟口河床淤积并阻断尼日河主河形成堰塞湖,造成苏雄镇 1 730 名群众受灾,苏雄大桥等 5 座桥梁损毁,冲毁、淤埋房屋 89 间,直接经济损失约 6 860 万元。黑西洛沟在此之前未发生过泥石流灾害,沟口成昆铁路以跨沟桥的形式跨越,沟口堆积扇分布面积较小且尼日河河型向主沟道弯曲,应属不易发泥石流沟。因此,通过调查、模拟本次泥石流的动力过程对认清该类泥石流灾害的成因机制及防治预警工作有着非常重要的意义^[1]。

目前主流的泥石流模拟软件有 MassMov^{2D}、ANSYS-CFX、Massflow、FLO-2D 等,史继帅^[2]曾采用 ANSYS-CFX 软件对中岗沟泥石流进行模拟分析,得到了沟道内压力场与流速场,基于流场数据计算了流体与拦砂坝间的流固耦合动力响应特征。张鹏等^[3]、梁鸿熙等^[4]采用 FLO-2D 软件较好的对泥石流运动的冲淤特征、流动特性及沉积特征进行了模拟分析;MassMov^{2D} 是基于 Savage-Hutter 理论的二维差分法方程对泥石流的平均流深进行模拟分析^[5],赵程等^[6]采用该方法对滑坡碎屑流的运动过程进行了模拟分析,再现了白格滑坡的失稳过程及堆积情况;Massflow 应用在泥石流的研究较多,像田述军等^[7]、刘铁骥等^[8]基于 Massflow 对泥石流治理工程效果进行了模拟评价,段学良等^[9]、熊坤勇等^[10]对泥石流的运动特征进行了分析评价。Massflow 软件建模、编程、操作较为简单,其模拟参数基于地调数据及高精度 DEM 数据可精准模拟泥石流的动力过程,为泥石流灾害定量风险评估、防灾减灾规划提供有效依据。

为此,为研究黑西洛沟“8·31”泥石流的活动特征与

动力特征,本文采用基于深度积分的连续介质力学方法的 Massflow 软件,选用 Voellmy 模型、高精度 DEM 数据及地调数据,再现了“8·31”泥石流的动力演化过程。通过实地调查分析及模拟,得到了较为真实的泥石流运动过程,能够为泥石流的防灾减灾规划及设计提供有效依据。

1 研究区地质环境概况

甘洛县位于四川省西南部,地处横断山脉东缘,即川西高原与四川盆地过渡带,受横断山脉的褶皱、隆起与断裂,加上河流急剧的切割作用等因素的影响,境内山峦起伏、沟壑纵横,极其有利于松散固体物质的堆积、降雨地表径流的汇集。黑西洛沟是尼日河下游右岸一级支流,属于大渡河水系,其大地构造位于扬子准台地、上扬子台坳、凉山陷褶束、美姑凹褶束内,属于川滇南北向构造带北段,为南北向与西北向、北东向等多组构造的交汇复合部位。流域内出露地层主要为前震旦系峨边群组白云质灰岩(Pteb)、下震旦统苏雄组玄武岩(Zas)、下震旦统苏雄组灰岩(Zak)及第四系松散土层等。甘洛县地处于横断山脉东缘,河谷深切、地形多变,致使降雨量、气温等气象因素在不同海拔高程上变化显著,高山区年均降水可达 1 400 mm;盆地或溪沟低地降雨量较少,平均年降雨量不足 1 000 mm,多年平均降雨量 968.3 mm,最多达 1 179.9 mm。

2 形成条件

2.1 地形条件

黑西洛沟地处构造侵蚀中高山地貌,该区地形切割剧烈,山势陡峻,多为陡坡,沟谷狭窄呈“V”型,沟域形态近似树叶形汇水,沟域主沟长 6.93 km,平均宽度 1.9 km,沟域面积 13.4 km²。沟域最高点高程 3 220 m,最低点位高程 760 m,相对高差 2 460 m,平均纵坡降 355‰。其地形特征(图 1)表现为:流域面积较大,沟谷总体狭窄,沟口两岸斜坡陡峻;局部沟段宽缓,沟道中游分为两

级平台,有利于泥石流固体物质在该两处平台停淤;沟床总体纵坡降大。

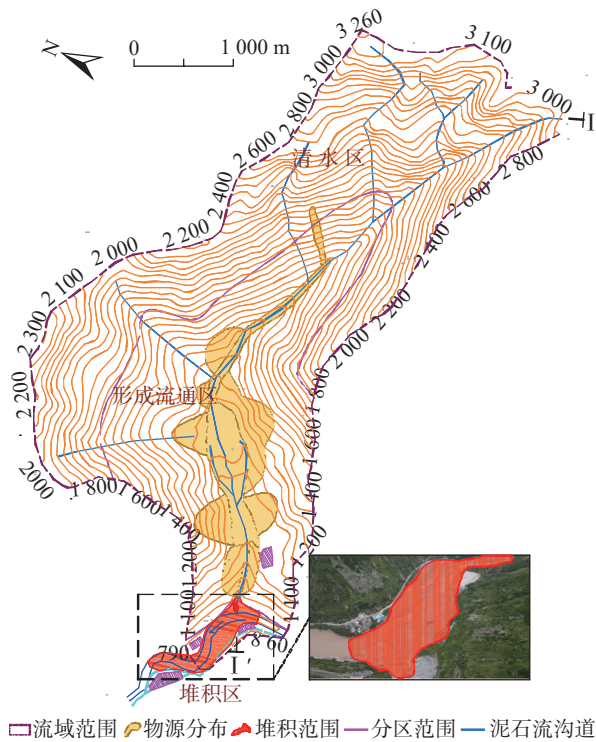


图 1 黑西洛沟泥石流流域及物源分布
Fig. 1 Catchment features and distribution of source materials in Heixiluo gully

2.2 物源条件

黑西洛沟流域赋存大量松散物源,尤其在“8·31”泥石流爆发后主要以沟床堆积物源、沟岸崩滑物源为主^[1],据统计分析(表 1),沟域内物源总储量约 $1\,398.9\times 10^4\text{ m}^3$,可能参与泥石流活动的动储量为 $326.44\times 10^4\text{ m}^3$ 。

表 1 黑西洛沟泥石流物源统计表
Table 1 Statistical table of debris flow Source in Heixiluo gully

物源类型	总储量/ (10^4 m^3)	动储量/ (10^4 m^3)
沟岸崩滑物源	254.41	101.95
坡面侵蚀物源	49.25	18.62
沟床堆积物源	1 095.24	205.87
合计	1 398.9	326.44

2.3 水源条件

根据甘洛县水利局雨量监测资料,2020 年 8 月 30 日 17 时,黑西洛沟流域开始普降暴雨,到 20 时小时雨强达 31 mm,暴雨强度极大,直至 8 月 31 日上午 8 时,流域内累计降雨量达 145 mm,已达到大暴雨等级,暴雨强度属 100 年一遇,根据区域降雨分布特征,其上游汇流区的降雨量可能更大。根据小时雨强及累计降雨曲

线可知(图 2),高强度、局地及持续性降雨是“8·31”泥石流爆发的关键,前期持续性降雨导致沟域内松散固体物源饱水^[12],降低了其启动阈值,地表径流汇流后引发了泥石流。

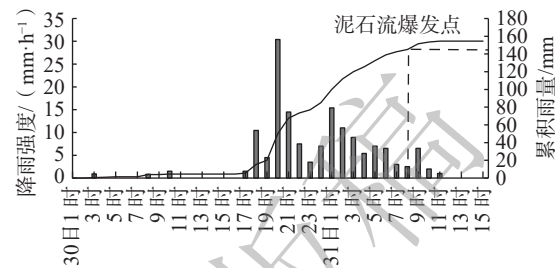


图 2 甘洛县阿兹觉乡 30 日 1 时至 31 日 15 时降雨量统计
Fig. 2 Rainfall statistics from 1:00 on the 30th to 15:00 on the 31st in Azijue Township, Ganluo County

3 泥石流活动特征

据现场调查,2020 年 8 月 31 日泥石流爆发后,沟域内可见明显的冲刷、侵蚀痕迹,启动部位主要位于形成流通区上游段的沟道侵蚀,在整个泥石流启动、形成过程中,呈现出“降雨汇流—下切侧蚀—一级平台淤积分选—平台后下切侵蚀—二级平台进一步淤积分选—平台后进一步下切侵蚀—岸坡崩滑堵溃—堵河形成堰塞湖、溃决泄流”等的运动过程。

降雨汇流—启动:2020 年 8 月 31 日泥石流爆发时,该流域内累计降雨量达 145 mm,相当于该区 100 年一遇降雨,而汇流区面积约 7.24 km^2 ,且沟谷纵坡降较大,为泥石流的形成提供了充足的水动力条件,最终在沟道物源较为丰富的区段启动。

“滚雪球式”循环加剧过程:黑西洛沟内存在两级平台,主要起到淤积、分选、流通的作用,平台下方均存在严重下切侵蚀、揭底等加剧泥石流规模的现象(图 3、图 4、表 2),具体特征如下:

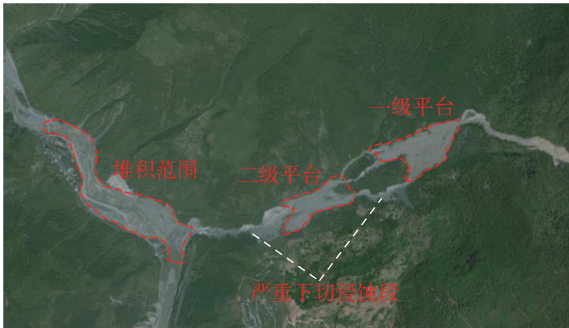


图 3 形成流通区沟道条件
Fig. 3 Formation of channel conditions in circulation area

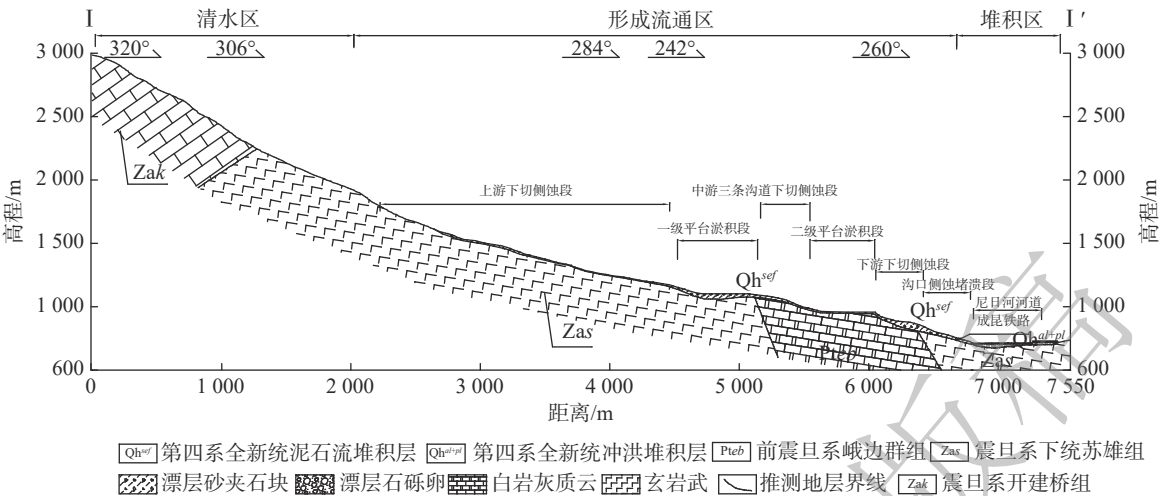


图 4 黑西洛沟泥石流主沟道纵剖面图

Fig. 4 Longitudinal section profile of the main channel of Heixiluo gully debris flow

表 2 黑西洛沟泥石流流域特征参数统计表

Table 2 Statistical table of characteristic parameters of Heixiluo gully

沟域区段	地形地貌特征	流域面积/km ²	沟长/km	最高高程/m	最低高程/m	高差/m	纵坡降/‰
全流域	构造侵蚀中高山地貌	13.4	6.93	3 220	760	2 460	355
清水区	构造侵蚀中高山地貌	7.24	2.05	3 220	1 990	1 230	600
形成流通区	构造侵蚀中高山地貌	5.96	4.65	1 990	820	1 170	252
堆积区	侵蚀堆积沟谷地貌	0.2	0.23	820	760	60	261

①一级平台上游长约 2.45 km, 呈“V”型谷, 两侧斜坡植被发育, 沟底宽 20~30 m, 平均纵坡约 306‰, 该段沟道冲刷特征明显, 表现为泥石流启动后下切侧蚀沟道两岸固体物质向沟道汇集运动。

②一级平台呈宽缓台地地貌, 宽 350 m, 面积约 0.1 km², 平均纵坡约 119‰, 该段沟道两岸植被发育, 未见明显的冲刷、崩滑痕迹, 主要为平台淤积特征, “8·31”泥石流爆发后, 该平台泥石流堆积物厚度一般 2~7 m, 平均厚约 3.0 m, 淤积体积约 30×10⁴ m³, 物质成分主要为块石土, 大块石平均块径 1.5 m, 含量占 50%~60%, 块径较大, 泥石流爆发时沟道内大部分大块石在该平台淤积。

③一级平台后下切侵蚀, 该段长 570 m, 沟道平均纵坡降达 277‰, 局部段达 385‰, 受泥石流冲刷作用, 平台下方被冲出三条沟道, 切割深度达 5~20 m, “8·31”泥石流爆发时在一级平台前缘发生强烈冲刷下切, 三条沟道下切侧蚀严重, 泥石流进入该段后流速增大, 沟床切割较深, 携卷大量沟床、岸坡物源, 增大泥石流规模。

④二级平台进一步分选淤积, 该平台面积约 0.07 km², 平均纵坡降约 75‰, 该段两岸植被覆盖较好, 堆积厚度一般 1~5 m, 平均厚度约 2 m, 淤积体积约 14×10⁴ m³,

物质成分主要为碎石土, 磨圆度差, 块石平均块径 30 cm, 含量约 40%~50%, 比一级平台堆积块石块径明显减小, 主要表现为平台淤积特征。

⑤平台后进一步下切侧蚀, 该段长 370 m, 纵坡约 243‰, 下游段沟道较窄, 平台后下切严重, 泥石流冲刷两岸坡脚导致岸坡垮塌, 泥石流流速、流量急剧增大, 且有向平台中部扩展的趋势。

⑥岸坡崩滑堵溃, 该段为成昆铁路跨线桥段, 沟长 300 m, 沟道束窄, 仅 5~30 m 宽, “8·31”泥石流暴发时沟道两岸岸坡垮塌发生堵溃, 增大了泥石流的规模。

堵河形成堰塞湖及溃决泄流^[13]: 黑西洛沟泥石流规模巨大, 据观测其峰值流量达 1 224 m³/s, 一次冲出固体物质总量达 1.05×10⁶ m³。沟口尼日河河床纵比较低, 平均宽 250 m, “8·31”泥石流沿河床堆积, 阻断主河形成堰塞湖, 河水水位抬升 7~8 m, 堆积扇厚度 5~18 m, 尼日河阻断 30 min 后沿低洼处自然泄流, 河道向西侧偏移。

4 基于 Massflow 的数值模拟

4.1 模型控制方程

将泥石流考虑成不可压缩流体且具有恒定的密度,

满足流体力学中的质量守恒定律以及动量守恒定律^[14]。将控制方程简化处理,设泥石流平均密度 $\bar{\rho}$ 为一恒定值,且忽略动量分布系数所带来的影响,经过深度积分并化简之后将三维的流体质量守恒和动量守恒方程化简得到二维的浅水波方程^[9]如下:

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2 + k_{ap}g_z h^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = g_x h - k_{ap}g_z h \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{(\tau_{zx})_b}{\bar{\rho}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2 + k_{ap}g_z h^2/2)}{\partial y} = g_y h - k_{ap}g_z h \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{(\tau_{zy})_b}{\bar{\rho}} \quad (3)$$

式中: ρ ——流体的密度;

t ——时间;

τ_{ij} ——不同方向上的应力分量;

g_x 、 g_y 、 g_z —— x 、 y 、 z 轴上的重力分量;

u 、 v ——流体速度在 x 、 y 轴上的分量。

4.2 边界条件

根据动力学边界条件^[15],泥石流数值模拟流动属于自由表面流,启动条件为泥石流物源在地形上受重力影响自由运动,由于考虑了基底侵蚀,因此模拟流体流动过程设为开边界条件,流体上部临界面 z_s 和下部临界面 z_b 的物质交换方程^[7]在已有二维浅水波方程的基础上进行二次推导,得到考虑侵蚀作用的控制性方程(4)至(6):

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = \xi E \quad (4)$$

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2 + k_{ap}g_z h^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = g_x h - k_{ap}g_z h \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{(\tau_{zx})_b}{\bar{\rho}} + u_{(z_b)} \xi E \quad (5)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2 + k_{ap}g_z h^2/2)}{\partial y} = g_y h - k_{ap}g_z h \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{(\tau_{zy})_b}{\bar{\rho}} + v_{(z_b)} \xi E \quad (6)$$

式中: E ——侵蚀率;

h ——流体厚度;

ξ ——几何修正系数,

$$\xi = \sqrt{1 + (\partial z_b / \partial x)^2 + (\partial z_b / \partial y)^2}。$$

4.3 摩擦模型及动力学参数选取

本次主要采用的 Voellmy 模型^[16],是基于库伦模型演变发展的一种经验性模型,主要特点是考虑了流体的湍流系数,基底阻力与速度大小成正比,未对泥石流流体性质做出限制,具有较好的操作性和适用性,可以用作泥石流的基底摩擦模型,表达式如下:

$$\tau = \rho g h \tan(\varphi) + \frac{\rho g V^2}{\xi} \quad (7)$$

式中: τ ——基底摩阻力;

φ ——物体基底摩擦角;

V ——物体的运动速度;

ξ ——湍流系数。

泥石流动力学参数的选取主要通过现场调查,对泥石流的形成条件进行分析得到 Voellmy 基底摩擦模型的参数取值范围,再通过反演的确定具体计算参数。Voellmy 模型基底摩擦系数(μ)的参考取值范围为 0.1 ~ 0.3,湍流系数(ζ)参考取值范围为 100 ~ 300 m/s²,泥石流容重的修正系数(φ)为 1.36,堵塞系数(D)为 2.0。基于前两节的实地调查分析,综合确定黑西洛沟泥石流的动力学参数见表 3。

表 3 黑西洛沟动力学参数

Table 3 Dynamic parameters of Heixiluo gully

模型	容重/(kN·m ⁻³)	堵塞系数	摩擦系数	湍流系数
Voellmy	17	2.0	0.15	150

本次模型主要根据实地调查的地质资料、影像数据和 DEM 数据建立三维模型,其中物源分布基于 2.2 节的分析数据,DEM 数据采用日本 ALOS 卫星,精度为 12.5 m,计算模型采用的 12.5 m 的正方形网格。

4.4 模拟验证

本次模拟分析以黑西洛沟“8·31”泥石流发生后的实地调查数据为依据,泥石流在爆发后的演进过程中呈递增趋势,如图 5 模拟洪峰流量与实测流量对比,随着流域内的汇流面积与物源量的增大,泥石流规模逐步增大。泥石流的流深、流速、侵蚀沉积深度主要与沟道的纵坡、沟道宽度有关,根据图 6、图 7 所反映的模拟结果与实测数据对比,误差范围基本在 20% 以内,而图 8 所示的泥石流淤积范围与泥石流发生后的堆积区正射影像图叠加对比,拟合度较好。

5 动力特征分析

泥石流的动力特征主要包括泥石流的泥石流洪峰流量、流速、流深、侵蚀沉积深度及堵江特征等^[17],基

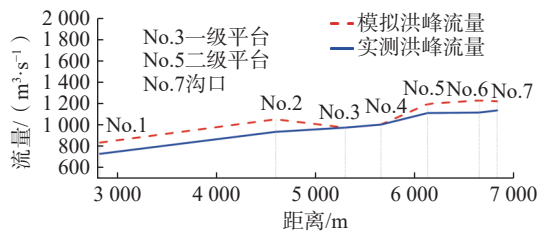


图5 模拟洪峰流量与实测流量对比

Fig. 5 Comparison between simulated peak flow and measured flow

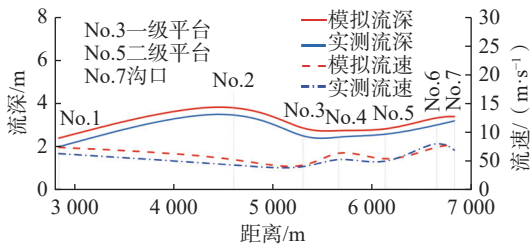


图6 模拟流深、流速与实测结果对比

Fig. 6 Comparison between simulated flow depth and velocity with measured results

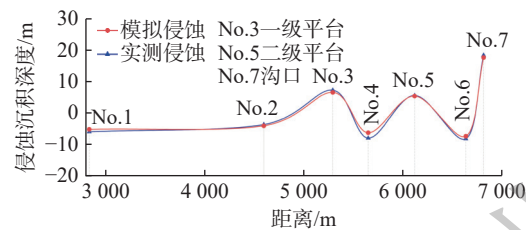


图7 模拟侵蚀沉积深度与实测结果对比

Fig. 7 Comparison between simulated erosion deposition depth and measured results

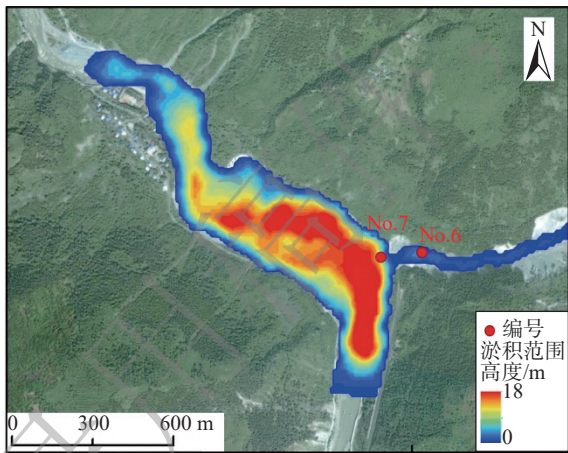


图8 泥石流淤积范围验证

Fig. 8 Verification of sedimentation range of debris flow

于 Massflow 数值模拟结果^[18]并结合第3节泥石流的活动特征分析,下面详细介绍“8·31”泥石流的动力特征分析结果。

5.1 泥石流洪峰流量

“8·31”泥石流洪峰流量在运动过程中总体呈递增趋势,在起点至 No.1 段,主要为“降雨汇流—启动”阶段,泥石流到达 No.1 处洪峰流量为 840 m³/s,在经过一级平台分选、沉积后,洪峰流量由 1 057.5 m³/s 降到了 980 m³/s,淤积量约 30×10⁴ m³,二级平台沉积面积相对较小,约 14×10⁴ m³,泥石流洪峰流量增长相对较缓,最终在出山口 No.7 段,洪峰流量达到了 1 224 m³/s,见图 5。

5.2 流速、流深

泥石流的流速主要受沟床纵坡降、泥深的影响,黑西洛沟泥石流流域内的两级平台(No.3 和 No.5 段)地形相对较为宽缓,其流深最大在 2.8~3.0 m,相对应的流速在 2~4 m/s,其余区段一般沟道束窄,流深一般在 3~4.7 m,流速在 5~7.0 m/s,见图 9、图 10。泥石流冲出沟口后开始出现明显扩散堆积的现象,并与主河交汇,泥石流速度由最大的 7.3 m/s 逐渐降低为 0.2 m/s,趋于静止。

5.3 侵蚀沉积深度

黑西洛沟“8·31”泥石流在 No.1~No.2 段、No.3~No.4 段、No.5~No.6 段主要表现为下切侵蚀效应,侵蚀深度一般在 3~6 m。在一级平台(No.2~No.3 段)、二级平台(No.4~No.5 段)则以分选、沉积为主,一级平台以沉积大块石为主,最大沉积高度达 7 m,二级平台沉积的块石块径明显减小,最大沉积高度在 5 m 左右。

该次泥石流堆积扇投影面积为 0.2 km²,平均沉积深度约 5~6 m,在原主河河道位置沉积最深,最深达 18 m,通过地形叠加计算可知,黑西洛沟“8·31”泥石流冲出规模达 1.05×10⁶ m³(图 11)。

5.4 堵江过程分析

泥石流堵江过程应充分考虑泥石流动力特征与主河道的响应特征,按照入汇口的动力过程,本次黑西洛沟泥石流堵江模式属于推进模式,整体具有快速堵河、整体抬升、胁迫主河改变沟道的特征。据岩润站实测资料分析,尼日河 1983—2015 年多年平均流量为 103.0 m³/s,而“8·31”泥石流沟口峰值流量高达 1 224 m³/s,其流量比达 11.9。黑西洛沟沟口段泥石流流速为 7.3 m/s,而尼日河该河段流速约 3.4 m/s,流速比约 2.15,较高的流速比和流量比是引发黑西洛沟泥石流堵江的主要原因。

在泥石流流入汇主河时,尼日河主要表现为携卷泥石流固体物质向下游疏散,随着后续泥石流到达,随着后续较多的泥石流固体物质不断侵占、挤压河道,由于黑西洛沟泥石流冲出规模总量达 1.05×10⁶ m³,最终泥石流完全占据尼日河河道,形成堰塞坝,上游形成堰塞湖。

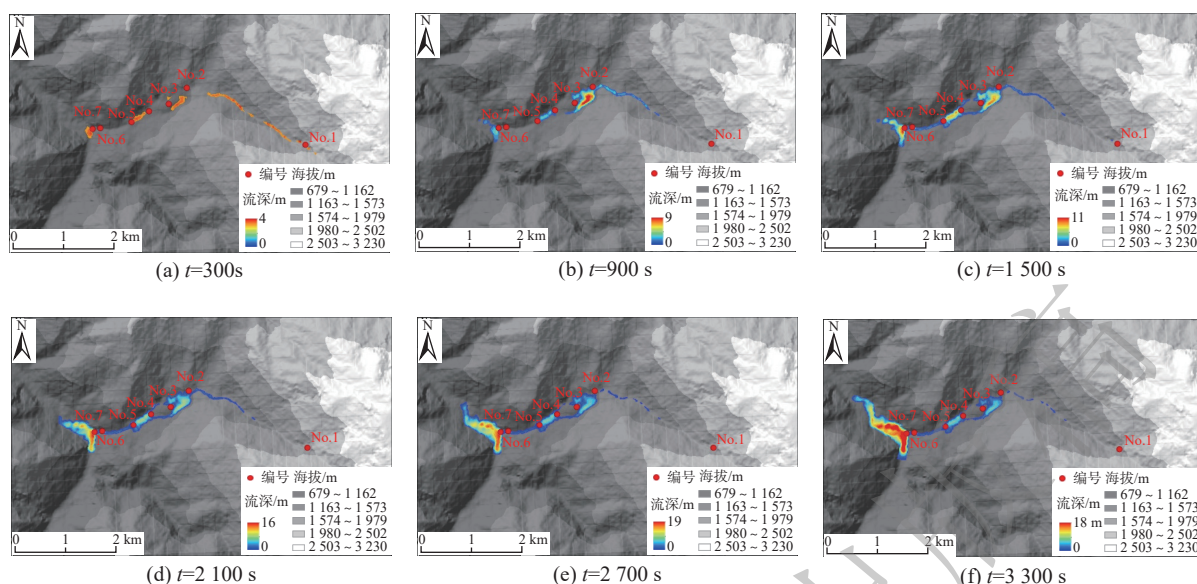


图 9 不同时刻的流深分布

Fig. 9 Mud depth distribution of debris flow at different time intervals

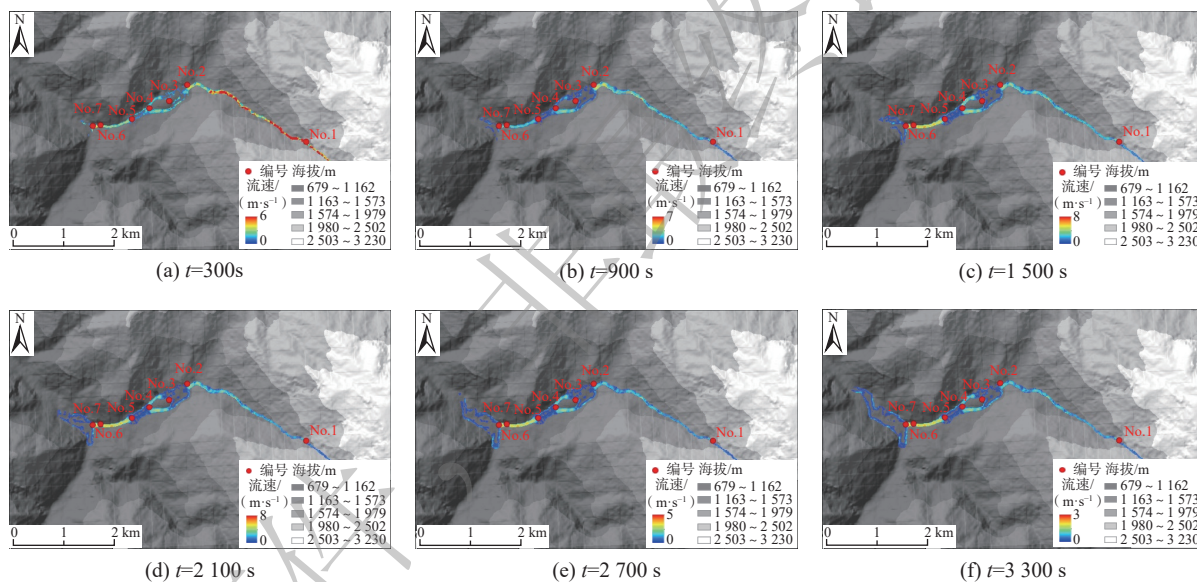


图 10 不同时刻的流速分布

Fig. 10 Distribution of debris flow velocity at different time intervals

6 结论

(1)黑西洛沟“8·31”泥石流是在高强度降雨及局地、持续性降雨条件下爆发的,主要经历了“降雨汇流—下切侧蚀—一级平台淤积分选—平台后下切侵蚀—二级平台进一步淤积分选—平台后进一步下切侧蚀—岸坡崩滑堵溃—堵河形成堰塞湖、溃决泄流”等“滚雪球式”的循环加剧运动过程;

(2)采用 Massflow 软件对“8·31”泥石流进行模拟反演,对比洪峰流量、流速、流深、侵蚀沉积深度等特

征参数,得出的模拟结果与实测数据具有良好的一致性,验证了模型的适用性和可靠性。

(3)基于模拟结果,并结合活动特征,“8·31”泥石流的动力参数受沟道内地形条件影响较大,泥石流入汇尼日河时洪峰流量达 $1\,224\text{ m}^3/\text{s}$,流速约 7.3 m/s ,冲出规模达 $1.05 \times 10^6\text{ m}^3$,这些都是导致泥石流堵河的主要原因。

鉴于目前黑西洛沟流域内仍具备发生大规模泥石流的条件,建议加强对人口密集区泥石流的防控措施,建议沟道内采取拦挡、固源、固床加排导的方式,并结合成昆铁路“明洞+渡槽”工程、水利部门对尼日河河道

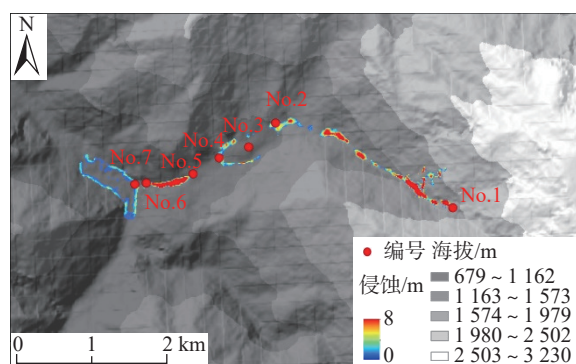


图 11 泥石流侵蚀深度

Fig. 11 Distribution of erosion depth of debris flow

疏浚及堤防工程进行综合治理,最大程度降低泥石流灾害风险。

参考文献(References):

- [1] 文强,胡卸文,刘波,等.四川丹巴梅龙沟“6·17”泥石流成灾机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):23-30. [WEN Qiang, HU Xiewen, LIU Bo, et al. Analysis on the mechanism of debris flow in Meilong valley in Danba County on June 17, 2020 [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 23 - 30. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 史继帅.宝兴县中岗沟泥石流三维流场数值模拟及综合治理模式研究[D].成都:成都理工大学,2016. [SHI Jishuai. Numerical simulation of three-dimensional flow field of debris flow in Zhongganggou, Baoxing County and study on comprehensive control model [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张鹏,马金珠,舒和平,等.基于FLO-2D模型的泥石流运动冲淤数值模拟[J].兰州大学学报(自然科学版),2014,50(3):363-368. [ZHANG Peng, MA Jinzhu, SHU Heping, et al. Numerical simulation of erosion and deposition debris flow based on FLO-2D Model [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(3): 363 - 368. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 梁鸿熙,尚敏,徐鑫.基于FLO-2D数值模拟的泥石流流动与堆积影响因素研究[J].工程地质学报,2016,24(2):228-234. [LIANG Hongxi, SHANG Min, XU Xin. Research on the influence factors of flow and deposition of debris flow based on the FLO-2D simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(2): 228 - 234. (in Chinese with English abstract)]
- [5] MOLINARI M E, CANNATA M, BEGUERIA S, et al. GIS-based calibration of MassMov2D [J]. Transactions in GIS, 2012, 16(2): 215 - 231.
- [6] 赵程,范宣梅,杨帆,等.金沙江白格滑坡运动过程分析及潜在不稳定岩体预测[J].科学技术与工程,2020,20(10):3860-3867. [ZHAO Cheng, FAN Xuanmei, YANG Fan, et al. Movement of Baige landslide in Jinsha River and prediction of potential unstable rock mass [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(10): 3860 - 3867. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 田述军,张静,张珊珊.震后泥石流防治工程减灾效益评价研究[J].灾害学,2020,35(3):102-109. [TIAN Shujun, ZHANG Jing, ZHANG Shanshan. Effectiveness evaluation of disaster reduction for debris flows control engineering after Wenchuan earthquake [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(3): 102 - 109. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘铁骥,孙书勤,赵峥,等.基于Massflow模型的冷渍沟泥石流工程治理效果评价[J].水利水电技术,2020,51(10):195-201. [LIU Tieji, SUN Shuqin, ZHAO Zheng, et al. Massflow model-based evaluation on effect of engineering treatment of debris flow in Lengzigou gully [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(10): 195 - 201. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 段学良,马凤山,郭捷,等.基于Massflow模型的西藏仁布杰仲沟泥石流运动特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(6):25-33. [DUAN Xueliang, MA Fengshan, GUO Jie, et al. Movement characteristics of Jiezhonggou debris flow of Renbu, Tibet based on massflow model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 25 - 33. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 熊坤勇,范宣梅,杨帆,等.九寨沟九寨沟天堂泥石流沟特征分析与模拟预测[J].科学技术与工程,2020,20(27):10989-10995. [XIONG Kunyong, FAN Xuanmei, YANG Fan, et al. Characteristics and numerical simulation of debris flow in Jiuzhai paradise, Jiuzhaigou [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(27): 10989 - 10995. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李宁,唐川,卜祥航,等.“5·12”地震后汶川县泥石流特征与演化分析[J].工程地质学报,2020,28(6):1266-1278. [LI Ning, TANG Chuan, BU Xianghang, et al. Characteristics and evolution of debris flows in Wenchuan County after “5·12” earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(6): 1266 - 1278. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李宁,唐川,史青云,等.九寨沟震区“6·21”泥石流成因与致灾机制研究[J].工程地质学报,2022,30(3):740-750. [LI Ning, TANG Chuan, SHI Qingyun, et al. Investigation and analysis of “6·21” debris flow in Jiuzhaigou County, Sichuan Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 740 - 750. (in Chinese with English abstract)]

- abstract)]
- [13] 许强. 四川省 8·13 特大泥石流灾害特点、成因与启示 [J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596 – 608. [XU Qiang. The 13 August 2010 catastrophic debris flows in Sichuan Province: Characteristics, genetic mechanism and suggestions [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 596 – 608. (in Chinese with English abstract)]
- [14] FAN Xuanmei, XU Qiang, SCARINGI G, et al. Failure mechanism and kinematics of the deadly June 24th 2017 Xinmo landslide, Maoxian, Sichuan, China [J]. [Landslides](#), 2017, 14(6): 2129 – 2146.
- [15] GRAY J M N T. Granular flow in partially filled slowly rotating drums [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 441(1): 1 – 29.
- [16] 张立舟, 王彦琦, 赵文俊, 等. 不同沟底摩阻力工况下泥石流流动力学研究 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(4): 113 – 118. [ZHANG Lizhou, WANG Yanqi, ZHAO Wenjun, et al. Research on the dynamics of debris flow based on different basal resistance conditions [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 113 – 118. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘世康, 范宣梅, 王文松, 等. 降雨模式对震后泥石流起动模式影响的试验研究——以九寨沟为例 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 278 – 286. [LIU Shikang, FAN Xuanmei, WANG Wensong, et al. Experimental study on the effect of rainfall patterns on the failure mode of debris flows after earthquakes: A case study of Tiantanggou, Jiuzhai [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 278 – 286. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王俊豪, 管建军, 魏云杰, 等. 德钦县城直溪河泥石流成灾模式及运动过程模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 187 – 195. [WANG Junhao, GUAN Jianjun, WEI Yunjie, et al. A study of the disaster model and movement process simulation of debris flow in the Zhixi River of Deqin County [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 187 – 195. (in Chinese with English abstract)]