

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220616003

四川甘洛自勒沟泥石流运动特征及预测防治效果研究*

邱恩喜^{1,2}, 王彬¹, 孙希望³, 张蕊³, 万旭升¹, 渠孟飞¹, 贺建军³

(1. 西南石油大学土木工程与测绘学院, 四川成都 610500; 2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059; 3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031)

摘要:甘洛县位于四川省西南部, 所处区域高山峡谷地貌特征显著, 地质构造运动强烈且为强震影响区, 泥石流灾害频发。甘洛县自勒沟分别于1987年和2019年发生两次特大泥石流, 大量泥石流堆积物顺沟而下, 堵塞245国道和尼日河, 并对沟口凉红水电站及尼日河岸成昆铁路造成严重威胁。对此, 基于现场调查资料和无人机航拍数据, 利用Massflow数值模拟方法, 对该沟泥石流运动特征进行分析以及治理措施防治效果进行预测。结果表明: 若沟内现有物源再次爆发泥石流, 最大泥深将达到11.9 m, 流速达到11.7 m/s, 流动强度达到123.37 m²/s, 堆积物一次冲出量为11.18×10⁴ m³, 堆积扇面积为6.925×10⁴ m²。根据预测结果, 采用合理的工程措施进行治理后, 最大泥深下降为8.5 m, 流速下降为9.1 m/s, 而流动强度可下降52.7%, 为58.32 m²/s, 堆积扇面积和一次冲出量分别为1.406×10⁴ m²和2.75×10⁴ m³, 分别下降80%和75%。这表明, 采用固源为主, 拦挡、排导为辅的措施对自勒沟泥石流灾害进行治理, 可取得较好治理效果, 对保护沟口建筑及成昆铁路安全运营有重要意义。

关键词: 自勒沟; 泥石流; 数值模拟; 运动特征

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-0934-12

Study on the Movement Characteristics and Predicted Prevention Effect of Debris Flow in Zile Valley, Ganluo, Sichuan

QIU Enxi^{1,2}, WANG Bin¹, SUN Xiwang³, ZHANG Rui³, WAN Xusheng¹,
QU Mengfei¹, HE Jianjun³

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo-environment Protection (SKLGP), Chengdu 610059, China;
3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Ganluo County is located in the southwestern part of Sichuan Province, China. This area exhibits significant geomorphic characteristics of high mountains and valleys, experiences strong geological tectonic movement, strong earthquake affected area and frequent debris flow disasters. The debris flows occur frequently because of the strong geological tectonic movements and earthquakes. Two

* 收稿日期: 2022-06-16; 修回日期: 2022-09-06

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGP2021K017)、岩土力学与工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGME021014)、四川高速公路建设开发集团有限公司科技项目(2022-cg-ky-3)、中国中铁2020-引导-301研究项目(2020)、国家自然科学基金(42071087)资助

作者简介: 邱恩喜(1981—), 男, 副教授, 博士后。主要从事地质灾害方面研究。E-mail: enxiqiu@163.com

通讯作者: 孙希望(1976—), 男, 正高级工程师, 硕士。主要从事路基工程方面研究。E-mail: sxwdhj@163.com

large-scale debris flows occurred in Zile Valley of Ganluo County in 1987 and 2019, a large amount of debris flow deposits flowed down the valley, blocking the G245 national road and the Niri River, posing a serious threat to the Liang Hong hydropower station at the mouth of the valley and the Chengdu-Kunming Railway on the left bank of the Niri River. In response to this, based on field survey data and UAV aerial photography, the Massflow numerical simulation method was used to analyze the movement characteristics and predicted prevention effect of debris flow in Zile Valley. The results show that if the debris flow breaks out in the valley again based on the existing sources, the maximum mud depth will reach to 11.9 m, the maximum mud velocity will reach to 11.7 m/s. The flow intensity will reach to 123.37 m²/s. The total volume of material flushed out is 11.18×10⁴ m³, and the accumulation fan area is 6.925×10⁴ m². According to the prediction, after adopting reasonable engineering measures, the maximum mud depth is reduced to 8.5 m, the flow intensity is reduced by 52.7% to 58.32 m²/s, the accumulation fan area is reduced by 80% to 1.406×10⁴ m², and the total volume of material flushed out is reduced by 75% to 2.75×10⁴ m³. This shows that the measures to manage the debris flow disaster in Zile Valley, which are mainly based on braced source and supplemented by blockage and drainage, can achieve better management effect and have great significance to protect the gully construction and safe operation of Chengdu-Kunming railway.

Keywords: zile valley; debris flow; numerical simulation; movement characteristic

0 引言

山洪泥石流是我国山区常见的自然灾害,是一种饱含大量泥沙石块和巨砾的固液两相流体,呈粘性层流或稀性紊流等运动状态^[1]。由于泥石流周期性地发生在既定沟道路径上,且有特定的沉积区域(“泥石流扇”),因此泥石流危害研究的方法与滑坡等自然灾害略有不同^[2]。泥石流的发生往往伴随着洪水,容易引起沟床两侧发生滑坡、崩坡,且导致沟床极不稳定,这也是泥石流灾害中大部分冲出物都来自于沟道侵蚀,而初始体积则微不足道的原由^[3]。R.A.Bagnold^[4]通过水槽试验证明了这一点,当河道坡度大于10°时,在重力与流体阻力共同作用下,沟床将会变得极不稳定,O.Hungr等^[3]进一步推断若表面流体是饱和的泥石流,则会产生更大的拖力,沟床物质将会大量调动并卷入泥石流之中。

过程分析及危险预测对预防与减轻泥石流灾害至关重要^[5],目前泥石流灾害的过程分析主要有三种方法:经验公式法,实验分析法,数值模拟法。经验公式法简便快捷但需要大量现场数据与已有资料文献,实验分析法可获得大量数据,但尺寸效应的制约会导致实验结果与实际情况不相符。数值模拟方法则是克服两者局限性,通过控制方程再现灾害过程,大量前人研究证明结合现场勘察,无

人机拍摄影像以及合适的物理模型,数值模拟结果更令人信服。且泥石流数值模拟发展多年,其理论研究已经较为完善,1970年A.M.Johnson^[6]选用宾汉粘性流模型,计算出泥石流最大流速。1980年T.Takahashi^[7]提出拜格诺膨胀流模型,求解了泥石流平均流速与流体深度,解释了泥石流运动中流体紊动对流体产生阻力影响等物理现象,此模型在日本与中国台湾得到了广泛应用。C.L.Chen^[8]于1988年结合上述两种模型提出泥石流粘塑流模型,这为泥石流运动机理的研究进一步奠定了理论基础。1993年J.S.O'Brien等^[9]对宾汉模型与拜格诺模型的合并进行新的尝试,提出了膨胀塑流模型,主要适用于细颗粒泥流,而不适用于大颗粒泥石流。R.M.Iverson^[10]于1997年对宾汉模型,拜格诺模型以及含有孔隙水压力的库伦模型进行评价,他分析了泥石流运动过程中的11种物理现象,宾汉模型能够解释其中的3种现象,泥石流拜格诺模型能够解释其中的4种现象,而含有孔隙水压力的库伦模型可以解释其中的9种现象。2013年C.Ouyang等^[11]提出了Massflow的数值分析方法,以深度积分连续介质力学方法为理论基础,采用MacCormack-TVD有限差分计算方法并具有可变计算域为核心的求解方法,此模型利用库伦和Voellmy摩擦定律来模拟泥石流运动过程,考虑了泥石流运动过程中流动物与沉积物之间的相互作用及动量交换,可真实地还原已发

生过的灾害过程。通过数值模拟,国内外专家学者对泥石流灾害展开了更详尽的研究^[12-15],王翔等^[16]通过Flo-2d水文动力学模型对藏西南地区典型冰湖开展溃决泥石流模拟,为下游地区灾害防治提供科学依据。王子亮等^[17]使用Flo-2d对冕宁县冷渍沟泥石流运动特征进行模拟,并得出泥石流危险性分区图,刘铁骥等^[18]则进一步使用Massflow再现冷渍沟泥石流运动特征,得到泥石流工程治理前、后的危险性评价图,通过模拟结果验证,泥石流模拟准确率高达80.01%。随着数值模拟技术的发展,研究重点由灾害发生后的计算分析逐渐转变为对大概率发生泥石流地区的预测模拟分析^[19-20]及拦挡措施的防治效果研究,赵雷等^[21]利用Drucker-Prager模型模拟泥石流的运动,并通过流固耦合算法,建立了考虑泥石流与柔性防护系统相互作用耦合计算方法。周文兵等^[22]结合数值模拟分析了窗口坝对黏性泥石流峰值流量的削减及延时效应。众多学者结合Arcgis将数值模拟结果可视化,并通过分析处理得到泥石流运动特征值,进一步进行泥石流危险区域的划分,为泥石流灾害的防治规划和设计提供了有效的参考依据^[23-25]。

当前通过数值模拟对泥石流的研究,一般在整个流域范围内对泥石流进行了分析或评价,且一般针对单条沟道及单次泥石流进行分析,由于流域面积较大,选取的DEM(Digital Elevation Model)精度较低,对泥石流发展规律及运动特征难以探明细节,且研究目标一般局限于泥石流本身特征值,忽略了泥石流发生时对附近建筑、交通设施的危害。如近日泥石流冲出物导致贵广高铁脱轨事件,更是表明泥石流发生时,对沟口建筑及铁路等重要交通设施的危害性亟待研究。本文研究对象为在32年内发生两次特大泥石流灾害的自勒沟:(1)1987年6月5日4时,自勒沟发生特大泥石流灾害,冲毁凉红道班住房,当夜住宿道班的5名工人全部死亡,造成经济损失约15万元,泥石流冲过尼日河,直抵对岸,堵河成坝,严重淤积直接威胁对岸成昆铁路及凉红车站的安全^[26]。(2)2019年7月29日11时,甘洛县持续遭受强降雨,诱发山体滑坡,导致多起泥石流灾害,其中自勒沟泥石流将凉红水电站厂房直接冲毁,造成1人死亡,严重威胁对岸成昆铁路运营安全,且泥石流发生后河床抬高,沙石化严重,导致水利水电工程难以重建^[27]。经过两次大规模泥石流爆发之后,2021年3月份对自勒沟进行现场调查及

无人机拍摄,发现沟内仍有 $108 \times 10^4 \text{ m}^3$ 松散物源可参与未来泥石流活动。为此,开展自勒沟未来可能再次爆发泥石流的规模及运动特征研究,分析其对沟口建筑、尼日河河道、对岸成昆铁路的危害程度,并提出有效的治理措施。本文利用无人机技术获取研究区的高精度DEM数据与拍摄影像,结合地理信息系统(GIS)技术与Massflow数值分析方法,对自勒沟泥石流进行模拟预测,探明其运动特征,并对治理措施的防治效果进行了验证,同时利用得到模拟参数与模型,提高中国西南山区地形地质及气候与自勒沟相似区域泥石流灾害模拟的准确性。

1 研究区特征

1.1 地理位置

自勒沟位于四川省甘洛县,地处四川省西南部,凉山彝族自治州北部,介于北纬 $28^{\circ}38' \sim 29^{\circ}18'$ 和东经 $102^{\circ}28' \sim 103^{\circ}1'$ 之间。凉红水电站位于沟口左侧泥石流堆积扇之上,G245穿过堆积扇前缘,堆积扇前缘为尼日河,成昆铁路位于尼日河对岸,如图1所示。

1.2 地形特征

自勒沟流域内山高谷深、沟坡陡峻,崩塌、滑坡、不稳定斜坡等不良地质发育,利于水流和松散固体物质的汇聚和能量的转化,为泥石流的爆发提供了条件。图2为自勒沟泥石流平面图,自勒沟平面上呈狭长形,流域面积 7.90 km^2 ,主沟长 6.02 km ,支沟总长 2.65 km ,流域最高点海拔 $3\,221 \text{ m}$,最低点海拔 931 m ,相对高差 $2\,290 \text{ m}$ 。

图3(a)为自勒沟主沟纵剖面图,主沟呈上陡下缓趋势,坡度介于 $8^{\circ} \sim 54^{\circ}$,平均纵坡降 289.78% ;主沟右岸发育两条支沟,如图3(b)所示,1#支沟长度 900 m ,相对高差 500 m ,坡度较缓,介于 $18^{\circ} \sim 37^{\circ}$,平均纵坡降 484.16% ;如图3(c)所示,2#支沟长度 $1\,750 \text{ m}$,相对高差 $1\,150 \text{ m}$,呈陡坡地貌,坡度介于 $26^{\circ} \sim 61^{\circ}$,平均纵坡降 721.47% 。

1.3 物源及分区

自勒沟沟谷深切,岩体破碎,岸坡陡峻,风化强烈,岩土体稳定性差,在沟谷两岸形成一系列崩塌、滑坡、岩堆及支沟洪积扇堆积物,在沟床内形成大量沟床堆积物,局部地段巨石堵塞沟道,导致该沟

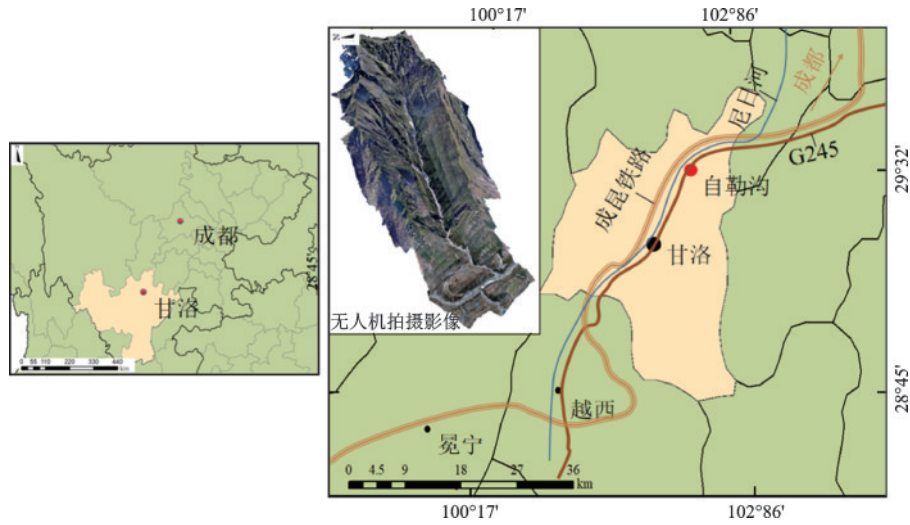


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

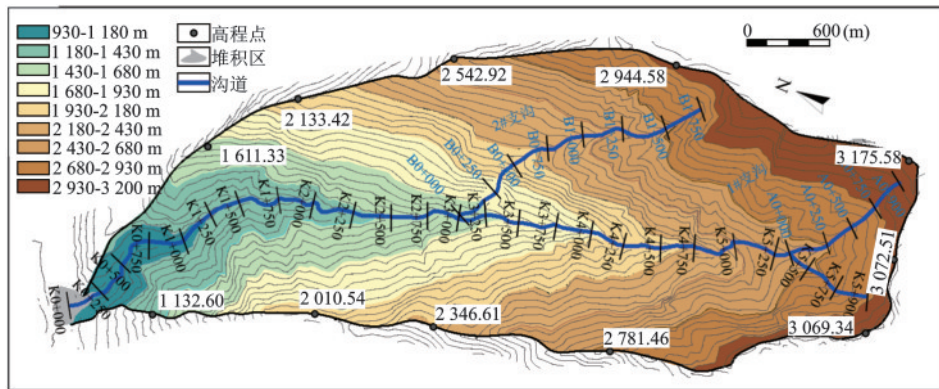


图2 自勒沟平面图

Fig.2 Floor plan of Zile Valley

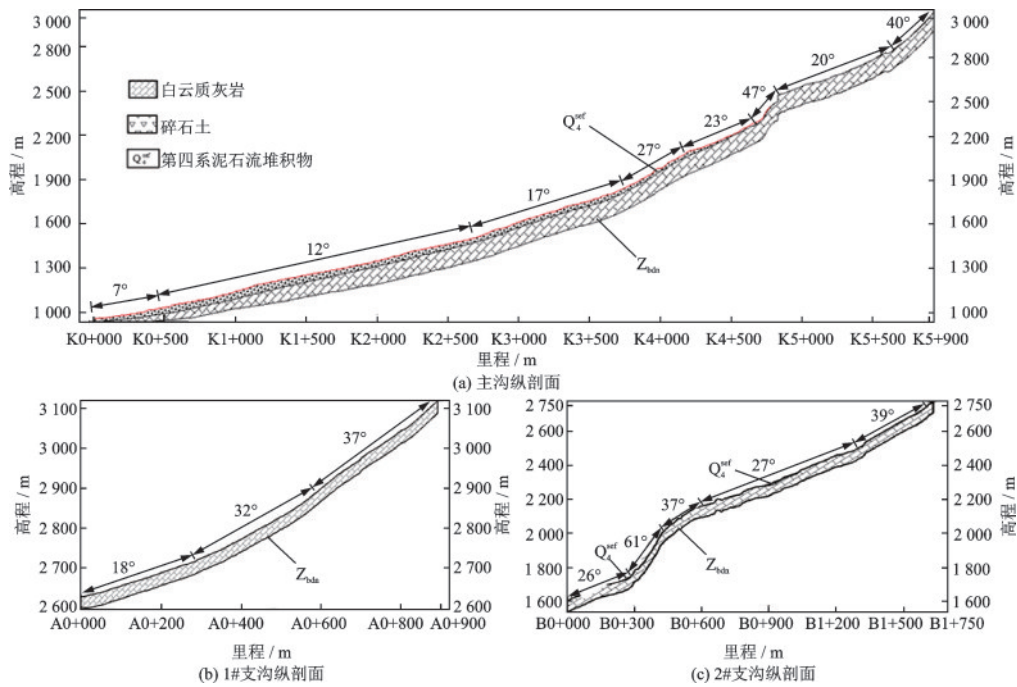


图3 自勒沟主沟及支沟纵剖面图

Fig.3 Longitudinal section of the main and branch ditch of Zile Valley

松散物质非常丰富。如图4(a)所示,沟内物源总体上分为三种:滑坡物源12处、崩坡物源22处以及沟道物源14处。滑坡物源主要分布于主沟中下游(K0+250~K2+900),而崩坡物源主要分布于主沟中上游(K0+900~K4+650),沟道堆积物则均匀分布于整个主沟的中下游(K0+250~K4+800)。根据现场调查统计所有崩、滑坡面积,使用C.Tang等^[28]提出的震区崩、滑坡面积与其厚度关系,推导出所有崩、滑坡区域的平均厚度:

$$t = 1.432 \ln(S_L) - 4.985 \quad (1)$$

式中, t 为崩、滑坡平均厚度(m); S_L 为崩、滑坡面积(m^2)。

根据平均厚度及崩滑坡面积计算物源总储量,进一步结合张友谊等^[29]、乔建平^[30]提出的震区泥石流物源储量评价方法,估计自勒沟流域内可参与未来泥石流运动的松散物质总储量约 $2.97 \times 10^6 m^3$,动储量约 $1.08 \times 10^6 m^3$ 。其中滑坡物源总储量共 $1.45 \times 10^6 m^3$,约占总物源储量的48%;崩坡物源总储量共 $1.37 \times 10^6 m^3$,约占总物源储量的46%;沟道物源总

储量共 $1.4 \times 10^5 m^3$,约占总物源储量的6%。

自勒沟泥石流分区如图4(b)所示,主要分清水区、形成区、沟道流通区及沟口堆积区。泥石流清水区面积为 $295.4 \times 10^4 m^2$,植被覆盖率高,坡面堆积物较少,在泥石流形成过程中,主要起到汇集水源并提供水动力的作用;形成区面积为 $481.2 \times 10^4 m^2$,坡面物源丰富,岩体风化破碎,水土流失严重,崩滑等不良地质现象发育;沟道为整个泥石流流通区面积为 $7.5 \times 10^4 m^2$,沟内地形复杂,跌水发育,部分区段如:K1+000~K1+500、K1+750~K2+250及K3+500~K5+000等,弯道发育的同时坡度陡降,物源间断堆积;堆积区面积为 $4.28 \times 10^4 m^2$,位于沟口地段,尼日河右岸,呈扇形分布。

1.4 降雨条件

自勒沟流域降雨特点主要表现为:(1)局部性降雨频繁,雨量集中,降雨往往始于山头并逐步向山脚转移,沟内容易形成较大洪峰;(2)雨强垂直分布显著,形成区的降雨强度远高于流通区与堆积

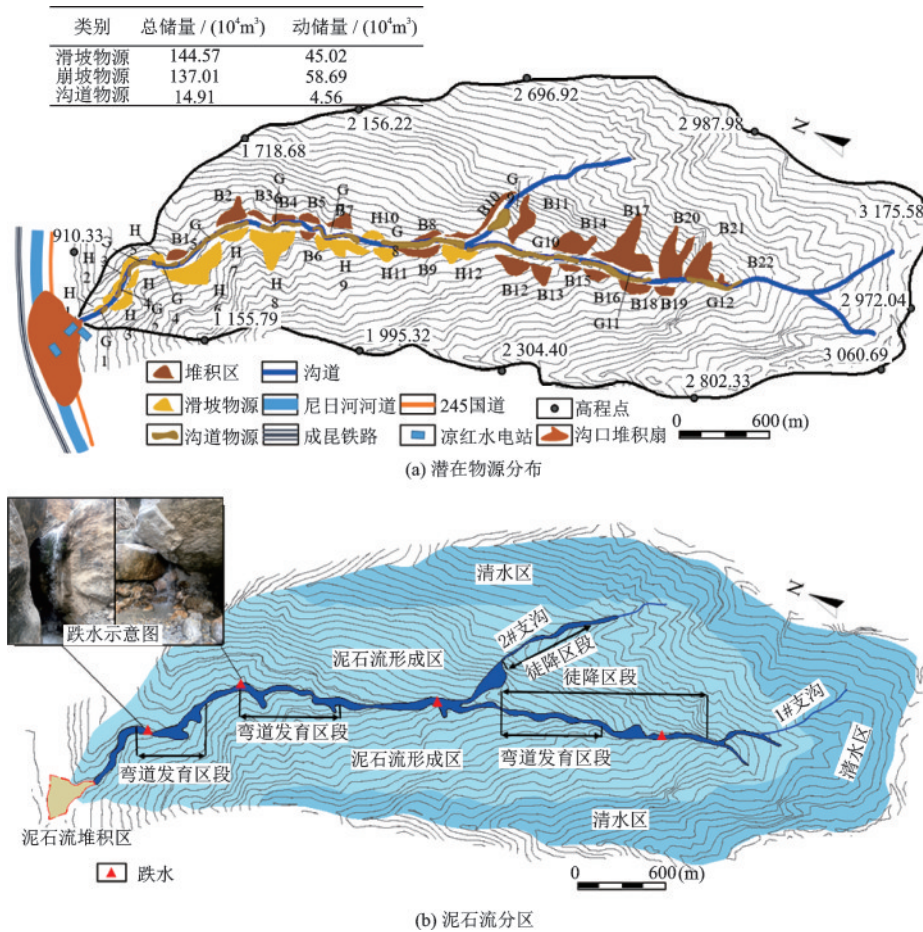


图4 自勒沟潜在物源及分区示意

Fig.4 Schematic diagram of Zilegou potential provenance and zoning

区^[31],且年内的降雨量季节分配极不均匀,形成明显的旱雨两季,如图5(a)所示,2019年总降雨量为1110.8 mm,而6~7月降雨量总量为553.7 mm,降雨量占年总降雨量的49.8%。如图5(b)所示,自勒沟泥石流发生当日(2019年7月29日)降雨量为98.6 mm,达到暴雨~大暴雨级别。自勒沟流域雨季于10月中旬前后结束,11月~次年4月为旱季,泥石流活动进入低潮期。自勒沟流域春冬季节降雨量少,夏季降雨量大,且雨量集中,丰富的降雨为泥石流的形成提供了水源和动力条件。

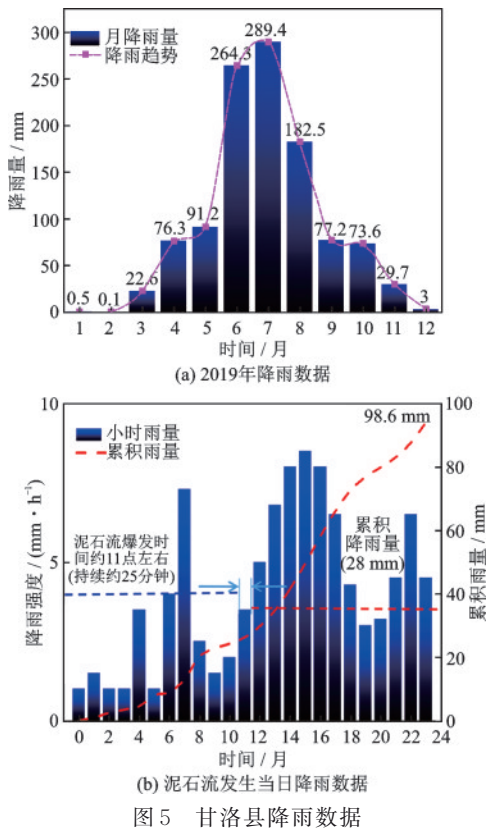


Fig.5 Rainfall data of Ganluo County

1.5 泥石流致灾特征

根据既有资料及现场勘察结果,对自勒沟泥石流致灾特征进行分析,其中2019年泥石流爆发前后沟口变化如图6所示,冲出物冲开沟口附近松散堆积体,沟口面积由 $0.92 \times 10^4 \text{ m}^2$ 增加至 $1.40 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。随后冲毁水电站厂房及工人宿舍,掩埋G245国道,冲入尼日河,挤压河道,抬高河床,导致凉红水电站水电水利工程损毁严重,造成了巨大的经济损失。

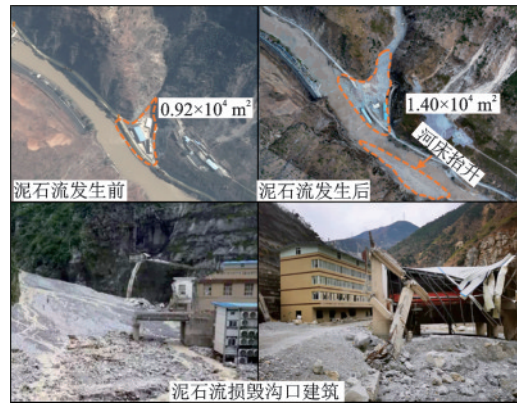


图6 泥石流致灾特征

Fig.6 Characteristics of debris flow disaster

2 泥石流发展趋势及防治方案

2.1 泥石流发展趋势分析

根据现场勘察结果及自勒沟沟道特征,发现当沟道内松散堆积体以及沟道两侧边坡由于崩、滑坡产生的松散土石堆积物累积到一定程度时,易造成沟内堵塞,此时根据川西地区泥石流激发雨强1h为30 mm,10 min雨强则在10 mm以上,当雨季时暴雨来临,在中上游区域易造成堵溃效应,爆发大型泥石流。

2.2 泥石流防治方案

自勒沟泥石流为黏性泥石流,为此提出以固源为主,以拦档、排导为辅的防治原则。由图3(a)自勒沟主沟纵剖面图可知,自勒沟沟道上游纵坡较大,下游逐渐变缓,局部地段陡缓相间;沟道宽度上游狭窄,下游逐渐变宽,局部宽窄相间。结合沟内物源分布特点及沟道弯曲特征,选取4处适宜位置设置拦档坝,各拦档坝剖面如图7所示,拦档坝参数及选取原则见表1。

同时在沟口凉红水电站右侧设置导流墙,对沟口冲出的物源进行导流、归槽,防止泥石流直接冲击凉红水电站建筑、国道G245、尼日河及河对岸成昆铁路。

3 泥石流运动特征数值模拟

3.1 Massflow 模型建立

本文采用Massflow数值模拟软件对自勒沟未来可能爆发的泥石流进行预测模拟,Massflow从流

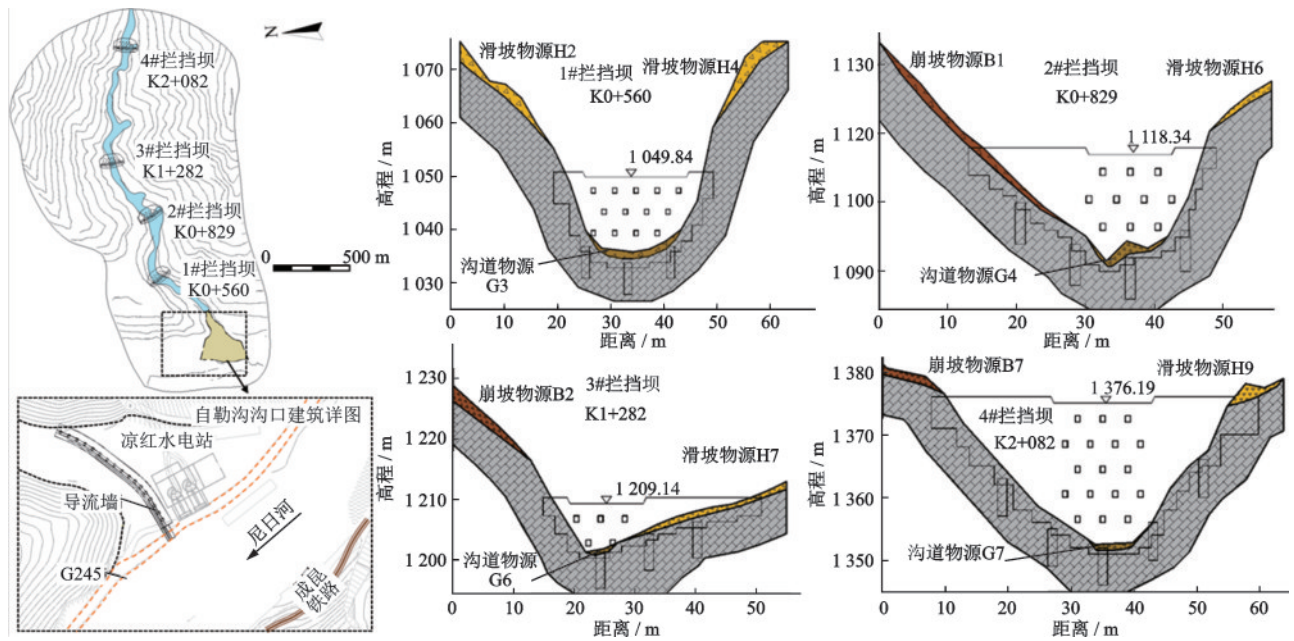


图7 拦挡坝、导流墙平面位置及横断面设计

Fig.7 Design drawing of location and cross section of the dam and diversion wall

表1 拦挡坝设置参数及原则

Table 1 Parameters and setting rules of the dam

位置	坝高/m	坝宽/m	设置原则
K0+532	17	30	位于沟口弯道处,沟道狭窄,结合弯道对冲出物减速效果,拦挡效果更佳
K0+829	17	36	拦挡坝位置沟道狭窄,后方沟道坡降较缓,且沟道较宽,拦挡库容大
K1+282	9	36	拦挡坝位置沟道狭窄,后方为沟内最大滑坡物源H8,起到有效固源作用
K2+082	24	52	拦挡坝位于沟道内弯道发育末端,沟道狭窄,主要起减缓冲出物流速及固源作用

体力学的 Navier-Stokes 方程出发,基于深度积分的连续介质力学方程,推导出质量和动量控制方程, Massflow 能够考虑复杂地形地貌和沟床侵蚀等特征,具有二阶精度和自适应求解功能。其控制方程如下,式(2)为质量守恒方程,式(3)、式(4)为动量守恒方程。

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}^2 + k_{ap}g_z h^2/2)}{\partial y} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} = g_y - k_{ap}g_z h \frac{\partial(z_b)}{\partial y} - \frac{(\tau_{zy})_b}{\rho} \quad (4)$$

式中, ρ 为流体密度(kg/m^3); t 为时间; u, v 为 x 方向和 y 方向上的流体速度(m/s); g_x, g_y, g_z 为各坐标轴上的重力分量; Z_b 为河床标高(m); h 为泥石流体的泥深(m); τ_b 为底部的剪应力(Pa); k_{ap} 为土压力系数。

本文选择流动模型为 Voellmy 模型, Voellmy 模型改进于库伦模型且适用于泥浆和泥石流灾害,且考虑了湍流系数,可以限制流体的较高运动速度,其表达式为:

$$\tau_b = \sigma\mu + \frac{\rho g v^2}{\xi} \quad (5)$$

式中, τ_b 为底部的剪应力(Pa); σ 为正应力(Pa); μ 为摩擦系数; ρ 为泥石流容重(kg/m^3); ξ 为湍流系数(m/s^2)。

3.2 模拟工况及参数

根据相关研究^[28]及现场踏勘结果,结合自勒沟沟道特征,对自勒沟泥石流的数值模拟研究进行参数确定,见表2,对两种工况下的数值模拟进行了参数确定,计算模型均选取 Voellmy 模型,摩擦系数与湍流系数根据自勒沟沟道特征确定为0.2及180 m/s^2 。根据现场踏勘结果,对参与泥石流的物源方量、启动

表2 自勒沟模拟参数

Table 2 Simulation parameters of Zile Valley

计算模型	摩擦系数	湍流系数/ ($m \cdot s^{-2}$)	物源启动点	初始方量/ ($10^4 m^3$)	重度 ($t \cdot m^{-3}$)
Voellmy模型	0.2	180	K4+200~ K5+100	8.4	2.05

点以及容重进行确定,并结合不同工况,确定了对应的模拟时间。

其中泥石流重度计算方法为现场配浆法,计算公式为:

$$\gamma_c = G_c / V \quad (6)$$

式中, γ_c 为泥石流重度(t/m^3); G_c 为配置泥浆重量(t); V 为配置泥浆体积(m^3)。

在自勒沟主流形成区、流通区和沟口进行泥石流重度试验,见表3,得到自勒沟泥石流平均重度 $\gamma_c = 2.05 t/m^3$,确定为黏性泥石流。

表3 自勒沟泥石流流体重度

Table 3 Gravity of debris flow in Zile Valley

位置	G_c/kg	V/L	$\gamma_c/(t \cdot m^{-3})$	平均值/ $(t \cdot m^{-3})$
形成区	15.06	7.34	2.05	
流通区	16.79	8.61	1.95	2.05
沟口	17.19	7.94	2.16	

3.3 模拟结果

3.3.1 未来泥石流预测模拟(治理前)

图8(a)、(b)分别为预测自勒沟未来泥石流泥深分布和泥石流流速分布,模拟时间为1400s。从图8(a)

中可以看出,在沟内泥石流整个运动过程中,沟内主要有3个地方产生了淤积,堆积区a特征为沟道狭窄且弯道居多,泥石流易产生堵塞。堆积区b、c为沟内泥石流主要堆积区,地形较开阔,但沟道纵坡较缓,沟道以冲淤为主,沟道出现了两次较大的弯曲,从而使流体速度减慢并发生堆积,且堆积区一般会出现在弯道之前,物源在流经弯道之时左碰右撞,速度急剧减小,形成阻塞。其中淤积最严重区域为堆积区c与沟口弯道处形成堆积扇之前,最高淤积可达11.9m。在1400s时泥石流大部分物源已流入尼日河,最大泥深减小到7.9m,泥石流运动基本结束。

在本次模拟过程中,泥石流流速基本呈稳定趋势,平均速度约为9~10m/s,且呈现出中间低两侧高的现象,最高流速约为11.7m/s,一般出现在淤积部位之后、弯道之前或坡降较高的沟道狭窄部位,由此可见自勒沟堵塞系数较高,泥石流堵溃效应明显。如图8(b)高速运动区c所示,流速在下游最后一个弯道处又出现整个运动过程中的流速最大值,经过弯道后,流速下降至10.2m/s,之后逐渐减小,流出沟口时,堆积扇平均流速已减小至4.9m/s,但堆积扇两侧流速依然较高,最高约为10.8m/s,呈现流速中间低两侧高的运动规律。

泥石流强度的计算是评价泥石流危险性的前提条件,根据常鸣^[32]提出的泥石流强度影响及危险性分区标准对自勒沟泥石流进行强度分析及危险性评价,评价方法见表4,在Arcgis中使用栅格计算工具,对模拟出的泥深与流速栅格数据进行计算,计算结果如图8(c)所示。

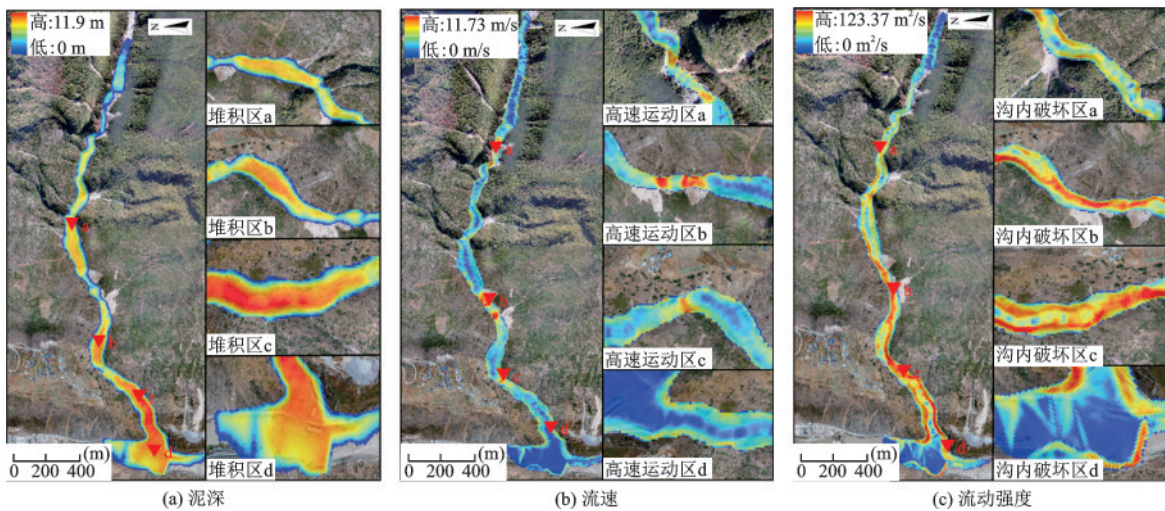


图8 未来可能发生泥石流模拟结果

Fig. 8 Simulation results of possible future debris flow

表4 泥石流强度等级划分

Table 4 Classification of debris flow intensity levels

泥石流强度	泥深/m	关系	泥深 H 与最大流速 V 乘积/($m^2 \cdot s^{-1}$)
高	$H \geq 2.5$	OR	$HV \geq 2.5$
中	$0.5 \leq H < 2.5$	AND	$0.5 \leq HV < 2.5$
低	$0.0 < H < 0.5$	AND	$HV < 0.5$

此次模拟中,泥石流强度呈线性增加趋势,流动强度最大区域集中在沟内中下游,在破坏区c处达到峰值 $123.37 \text{ m}^2/\text{s}$,之后泥石流开始进入堆积区,强度逐渐减小。

堆积扇破坏区流动强度较高值分布于堆积扇边缘位置,虽然泥深较低但流速快,堆积扇平均泥石流强度值约为 $50.22 \text{ m}^2/\text{s}$ 。当泥石流流入尼日河时,堆积扇边缘流速同样较快,因此在冲向对岸成昆铁路时强度依然较高,最大值达到了 $74.45 \text{ m}^2/\text{s}$,所以当自勒沟发生泥石流时,对尼日河左岸的成昆铁路有着较大威胁。

3.3.2 未来泥石流预测模拟(治理后)

为研究治理措施的效果,加入拦挡坝与导流墙进行模拟,模拟时间 $1\ 600 \text{ s}$ 。由图9(a)可知,工程治理后,模拟的泥深变化较大,泥深最深部位在1#拦挡坝和2#拦挡坝处,最大泥深约 8.5 m ,因为泥石流冲出物被拦挡坝拦停后,要越过拦挡坝才能继续向下运动,且拦停的泥石流堆积物能起到加固边坡

坡脚作用。对比图8(a)发现,泥石流冲出量大幅减少,在与尼日河交汇处较为明显,堆积扇面积明显减小,堆积扇最大泥深由原来的 7.9 m 减小至 2.3 m 左右,堆积扇边缘泥深减小至 $0 \sim 0.5 \text{ m}$,拦挡措施对于泥石流冲出物有显著的拦截效果,可见治理措施对附近建筑、G245以及对岸成昆铁路起到有效的防护作用。

由图9(b)可知,增设拦挡坝后,泥石流沟内流速整体降低,最大流速由 11.73 m/s 减小为 9.10 m/s ,且最大流速一般出现在拦挡坝之后,这是因为当泥石流越过拦挡坝之后,泥石流会有一个短暂的加速运动过程。

治理之后的泥石流强度如图9(c)所示,与治理前的泥石流强度图8(c)相比,泥石流流动强度下降明显,拦挡坝的治理效果显著。从图中可以看到,治理前后泥石流强度较高的区域并没有改变,因为该区域设置了两个拦挡坝导致泥深较高,但也由于拦挡坝的存在,该区域流速减小,因此泥石流流动强度得到很大改善。由于沟口导流墙的设置,冲出物避开了凉红水电站建筑,直接进入了尼日河下游,并没有直接冲向河对岸,因此治理后的泥石流对于图8(c)中的破坏区c、d威胁程度降低。在整个运动过程中泥石流强度的最大值出现在2#坝位附近,最大值为 $58.32 \text{ m}^2/\text{s}$,是治理前泥石流强度的 52.7% 。沟口堆积扇的流动强度已降低为 $0 \sim 2.50 \text{ m}^2/\text{s}$,泥石流威胁程度显著降低。

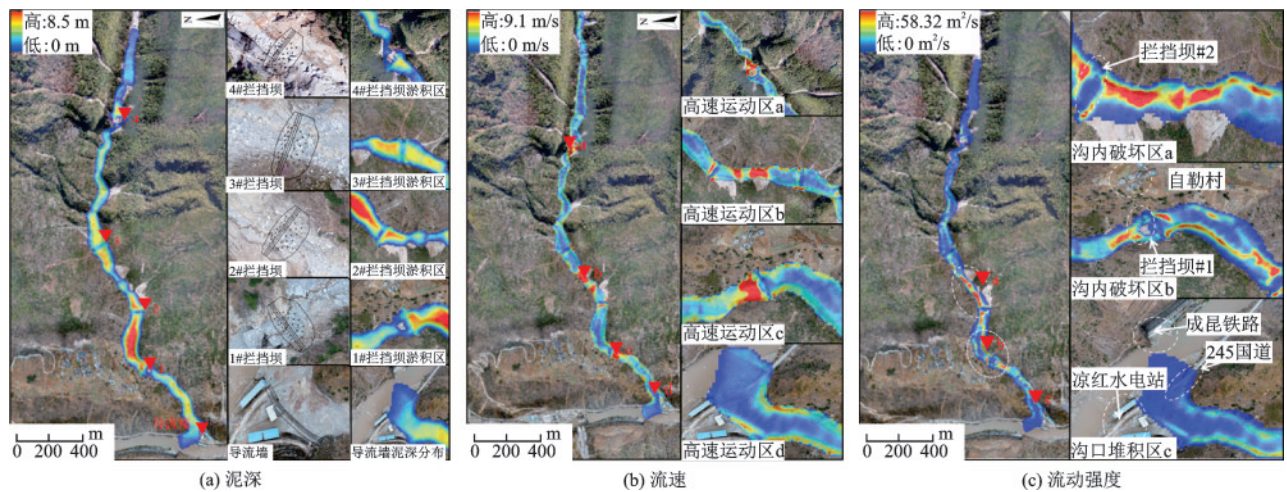


图9 未来可能发生泥石流防治后模拟结果

Fig. 9 Simulation results of possible future debris flow after management

3.3.3 泥石流一次冲出量计算

基于模拟结果对两次预测泥石流一次冲出量

进行计算,使用方法为形态调查法,既有资料表明,对几个断面的峰值流量求平均值,即得出该泥石流

峰值流量,在有比较清晰泥痕和比较好的断面的情况下,按照形态调查法计算的结果是最可靠的^[1]。文章选取4个断面为拦挡坝设置断面,即K0+532、K0+829、K1+282和K2+082断面,计算结果见表5,计算公式为:

$$Q_c = W_c V_c \quad (7)$$

式中, Q_c 为泥石流断面峰值流量(m^3/s); W_c 为泥石流

过流断面面积(m^2); V_c 为泥石流断面平均流速(m/s)。

根据泥石流历时 T 与最大流量 Q_c ,按照泥石流暴涨暴落的特点,将其过程线概化为五角形,则一次过流总量为:

$$Q = 0.264TQ_c \quad (8)$$

式中, Q 为一次泥石流过程总量(m^3); T 为泥石流历时(s); Q_c 为泥石流最大流量(m^3/s)。

表5 一次冲出量计算

Table 5 Calculation of the volume of flushing out materials

断面时间	K0+532宽 (19.4 m)		K0+876宽 (16.5 m)		K1+282宽 (21.3 m)		K2+082宽 (10.5 m)		泥石流最大流量 Q_c / ($m^3 \cdot s^{-1}$)	一次泥石流过流 总量 $Q/(10^4 m^3)$
	泥痕/m	流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	泥痕/m	流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	泥痕/m	流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	泥痕/m	流速/ ($m \cdot s^{-1}$)		
预测泥石流治理前	7.94	3.62	7.52	2.84	6.56	1.76	1.54	2.93	300.82	11.18(1 400 s)
预测泥石流治理后	0.56	9.23	0.75	8.52	1.82	0.56	5.98	0.53	65.17	2.75(1 600 s)

4 结 论

根据现场踏勘对沟内潜在物源进行统计,明确主要物源分布位置,分析了泥石流的物源总量及动储量,对自勒沟未来可能发生的泥石流进行了预测分析,对加入拦挡坝之后的防治效果进行了评价,主要结论如下:

(1)自勒沟流域内松散堆积物主要以沟道物源、沟道两侧滑坡、崩坡物源为主,共48处,物源总储量约 $2.97 \times 10^6 m^3$,动储量约 $1.08 \times 10^6 m^3$ 。根据自勒沟沟谷形态、松散固体物源状态与储量、沟槽变形等特征,认为自勒沟泥石流处于发展期,按照川西地区泥石流激发雨强1h为30 mm,10 min雨强则在10 mm以上,暴雨来临时可能启动泥石流沟道物源及沟道两侧崩滑物源,形成大规模的泥石流灾害。

(2)根据现场踏勘结果与已有相关研究确定合适的计算参数与流动模型,对自勒沟未来可能发生的泥石流进行预测模拟,结果为:未治理状态泥石流最大泥深为11.9 m,最高流速为11.73 m/s,泥石流最大流动强度为 $123.37 m^2/s$,一次冲出量为 $11.18 \times 10^4 m^3$;治理后最大泥深为8.5 m,最高流速为9.1 m/s,最大泥石流流动强度为 $58.32 m^2/s$,一次冲出量为 $2.75 \times 10^4 m^3$,且治理后沟口堆积扇的流动强度已降低为 $0 \sim 2.50 m^2/s$,导流墙的存在避免冲出物直接冲向对岸,泥石流对成昆铁路的危险

程度显著降低。

(3)通过对沟谷型泥石流运动特征的观察,发现堵溃效应是沟谷型泥石流形成的重要原因。高流速的泥石流往往出现在淤积部分之后,当流体流动速度高、冲击力强时,容易形成“龙头”裹挟大颗粒冲向下游,对沟道和两侧边坡有严重的侵蚀作用,使大量的物源参与到泥石流运动中,形成更大规模的泥石流。因此,防治沟谷型泥石流,应致力于疏通沟道,避免降雨形成的径流造成堵溃效应。

(4)针对沟谷型泥石流,对其周期性爆发和沿沟侵蚀的特点,提出了以强源为主、堵排为辅的管理措施。通过数值模拟,发现该防治方案对沟谷型泥石流控制效果显著,为地方行政部门开展此类泥石流控制和防灾减灾研究提供了依据。

参考文献:

- [1] 国家防汛抗旱总指挥部办公室,中国科学院,水利部成都山地灾害与环境研究所.山洪泥石流滑坡灾害及防治[M].北京:科学出版社,1994.
Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources. Mountain flood debris flow landslide disaster and its prevention[M]. Beijing: Science Press, 1994. (in Chinese)
- [2] Hungr O, Leroueil S, Picarelli L. The Varnes classification of landslide types, an update [J]. Landslides, 2014, 11(2): 167-194.
- [3] Hungr O, McDougall S, Bovis M. Entrainment of ma-

- terial by debris flows[M]. Debris-flow hazards and related phenomena. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 135-158.
- [4] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics [M]. US: Government Printing Office, 1966.
- [5] Ouyang C, Zhao W, He S, et al. Numerical modeling and dynamic analysis of the 2017 Xinmo landslide in Maoxian County, China [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(9): 1701-1711.
- [6] Johnson A M. Mobilization of debris flows [J]. Zeitschrift fur Geomorphologie (Annals of Geomorphology), Supplement, 1970, 9: 168-186.
- [7] Takahashi T. Debris flow on prismatic open channel [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1980, 106(3): 381-396.
- [8] Chen C L. Generalized viscoplastic modeling of debris flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(3): 237-258.
- [9] O'Brien J S, Julien P Y, Fullerton W T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 119(2): 244-261.
- [10] Iverson R M. The physics of debris flows [J]. Reviews of Geophysics, 1997, 35(3): 245-296.
- [11] Ouyang C, He S, Xu Q, et al. A MacCormack-TVD finite difference method to simulate the mass flow in mountainous terrain with variable computational domain [J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 1-10.
- [12] Wu Y H, Liu K F, Chen Y C. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(2): 293-304.
- [13] Abraham M T, Satyam N, Reddy S K P, et al. Runout modeling and calibration of friction parameters of Kurichermala debris flow, India [J]. Landslides, 2021, 18(2): 737-754.
- [14] Schraml K, Thomschitz B, Mc Ardell B W, et al. Modeling debris-flow runout patterns on two alpine fans with different dynamic simulation models [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2015, 15(7): 1483-1492.
- [15] Ouyang C, He S, Xu Q. MacCormack-TVD finite difference solution for dam break hydraulics over erodible sediment beds [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141(5): 06014026.
- [16] 王翔,陈果,戴晓爱,等.藏西南典型危险性冰湖监测与泥石流溃决模拟[J].山地学报,2021,39(5):687-700.
- Wang X, Chen G, Dai X A, et al. Monitoring and simulation of debris flow of typical dangerous glacial lake in Southwestern Tibet, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(5): 687-700. (in Chinese)
- [17] 王子亮,常鸣,刘沛源,等.安宁河流域典型沟谷泥石流危险性评价——以冷渍沟为例[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):31-38.
- Wang Z L, Chang M, Liu P Y, et al. Hazard assessment of typical gully debris flow in Anning river: A case study at the Lengzi gully [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 31-38. (in Chinese)
- [18] 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 T J, Sun S Q, Zhao Z, 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)
- [19] Salvatici T, Morelli S, Pazzi V, et al. Debris flow hazard assessment by means of numerical simulations: implications for the Rotolon creek valley (Northern Italy) [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(4): 636-648.
- [20] 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 X L, Ma F S, Guo J, et al. Movement characteristics of Jiezhong gou 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)
- [21] 赵雷,张丽君,余志祥,等.泥石流柔性防护系统耦合作用数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2022,42(3):606-613.
- Zhao L, Zhang L J, Yu Z X, et al. Coupled numerical simulation of flexible debris flow barrier [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 606-613. (in Chinese)
- [22] 周文兵,柳金峰,王栋,等.窗口坝对黏性泥石流的流量调控性能研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(5):1120-1128.
- Zhou W B, Liu J F, Wang D, et al. Study on regulating discharge process of viscous debris flow by window-frame dam [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(5): 1120-1128. (in Chinese)

- [23] Han Z, Chen G, Li Y, et al. Numerical simulation of post-entrainment debris flow at alluvial fan using FLO-2D model [C] // Geotechnical hazards from large earthquakes and heavy rainfalls. Japan: Springer, 2017: 311-321.
- [24] Hsu Y, Yen H, Tseng W, et al. Numerical simulation on a tremendous debris flow caused by Typhoon Morakot in the Jiaopu Stream, Taiwan [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11: 1-18.
- [25] Zhang M, Zhou B, Cheng Q, et al. Investigation of the triggering mechanism and runout characteristics of an earthflow in Zhimei village, Chengduo, Qinghai, China [J]. Natural Hazards, 2021, 109(1): 903-929.
- [26] 谢洪, 钟敦伦. 资勒沟泥石流灾害及特征 [J]. 山地研究, 1990(2): 114-117.
Xie H, Guo D L. Debris flow hazards and characteristics of Zilegou [J]. Mountain Research, 1990 (2) : 114-117. (in Chinese)
- [27] 李钰, 甘滨蕊, 王协康, 等. 四川省甘洛县 2019 年群发性山洪泥石流灾害的形成机理 [J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 281-287.
Li Y, Gan B R, Wang X K, et al. Formation mechanism of group flash flood/debris flow disasters in Ganluo County, Sichuan Province in 2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2020, 40(6) : 281-287. (in Chinese).
- [28] Tang C, Zhu J, Chang M, et al. An empirical-statistical model for predicting debris-flow runout zones in the Wenchuan earthquake area [J]. Quaternary International, 2012, 250: 63-73.
- [29] 张友谊, 袁亚东, 顾成壮. 震区泥石流物源储量评价方法综述 [J]. 山地学报, 2020, 38(3): 394-401.
Zhang Y Y, Yuan Y D, Gu C Z. Review of evaluation methods for debris flow resource reserves in areas affected by earthquakes [J]. Mountain Research, 2020, 38 (3): 394-401. (in Chinese)
- [30] 乔建平, 黄栋, 杨宗估, 等. 汶川地震极震区泥石流物源动储量统计方法讨论 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(2): 1-6.
Qiao J P, Huang D, Yang Z J, et al. Statistical method on dynamic reserve of debris flow's source materials in meizoseismic area of Wenchuan earthquake region. [J] The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(2): 1-6. (in Chinese)
- [31] 高翔. 甘洛县的泥石流类型和防范措施 [J]. 水土保持通报, 1988(4): 35-43.
Gao X. Types of mudslides and precautions in Ganluo County [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1988(4): 35-43. (in Chinese)
- [32] 常鸣. 基于遥感及数值模拟的强震区泥石流定量风险评估研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
Chang M. Quantitative risk assessment of debris flow in coseismic area based on remote sensing and numerical simulation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese)

(本文编辑: 池营营)