

汉源县工业园区硝厂沟泥石流成灾机理及其堆积范围分析

蓝再成, 胡卸文, 曹希超, 黄光林, 白金钊, 冯 霄

Disaster mechanism and its deposition area of the Xiaochang gully debris flow in Hanyuan County industrial park

LAN Zaicheng, HU Xiewen, CAO Xichao, HUANG Guanglin, BAI Jinzhao, and FENG Xiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202303026>

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

基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价

Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: An example from the Malu River basin in Min County

曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 100-109

基于增量加载法的泥石流拦挡坝抗冲击力数值模拟

Numerical simulation of impact resistance of debris flow dam: A case study of the debris flow dam in Sanyanyu Gully, Zhouqu County, Gansu Province

刘兴荣, 魏新平, 陈豫津, 王翔宇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 78-83

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

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

基于不同评价单元和灾害熵的泥石流危险性分析

Hazard analysis of debris flows based on different evaluation units and disaster entropy: A case study in Wudu section of the Bailong river basin

李小龙, 宋国虎, 向灵芝, 罗亮, 唐良琴, 沈娜, 梁梦辉 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 107-115



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202303026

蓝再成, 胡卸文, 曹希超, 等. 汉源县工业园区硝厂沟泥石流成灾机理及其堆积范围分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 61-69.

LAN Zaicheng, HU Xiewen, CAO Xichao, et al. Disaster mechanism and its deposition area of the Xiaochang gully debris flow in Hanyuan County industrial park[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 61-69.

汉源县工业园区硝厂沟泥石流成灾机理 及其堆积范围分析

蓝再成^{1,2}, 胡卸文^{1,3}, 曹希超¹, 黄光林¹, 白金钊¹, 冯 霄¹

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430061; 3. 西南交通大学高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031)

摘要:受 2013 年“4·20”芦山地震影响, 汉源县白岩河沿岸地质灾害频发。目前硝厂沟流域内存有大量松散物源, 具备暴发较大规模泥石流风险, 严重威胁沟口汉源工业园区厂矿企业, 因此, 查明其成灾机理及危害性对今后泥石流预测预警和防治工程设计具有重要意义。文章结合现场勘察、无人机航拍、遥感解译及 RAMMS 软件, 分析了硝厂沟泥石流发育特征, 模拟了泥石流运动堆积过程, 并在此基础上揭示了其成灾机理。调查研究发现硝厂沟现阶段物源储量达 $37 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中游发育一段宽缓沟道(长 900 m、平均宽度 60 m), 为天然停淤场, 对于小规模泥石流具有拦截作用。数值模拟分析表明在降雨频率小于 20 年一遇时, 泥石流冲出物主要在形成区中游宽缓沟道处停淤堆积, 不会对沟口工业园区产生直接危害; 在降雨频率达到 50 年一遇时, 硝厂沟将暴发大规模泥石流并冲击淤埋沟口工业园区。

关键词:泥石流; 成灾机理; 数值模拟; RAMMS

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)03-0061-09

Disaster mechanism and its deposition area of the Xiaochang gully debris flow in Hanyuan County industrial park

LAN Zaicheng^{1,2}, HU Xiewen^{1,3}, CAO Xichao¹, HUANG Guanglin¹, BAI Jinzhao¹, FENG Xiao¹

(1. Faculty of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430061, China; 3. State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for High-Speed Railway Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Influenced by the 2013 “4·20” Lushan earthquake, geological disasters occurred frequently along the Baiyan River Basin in Hanyuan County. At present, there is a large amount of loose material sources in the Xiaochang gully, posing a significant risk of large-scale debris flows, which severely threaten the factories and mining enterprises in the Hanyuan Industrial Park plant. Therefore, understanding the mechanism of disaster occurrence and its hazard is of great significance for

收稿日期: 2023-03-13; 修订日期: 2023-06-03

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划(2018YCF1505401); 国家自然科学基金项目(41731285)

第一作者: 蓝再成(1998—), 男, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 主要从事工程地质、地质灾害方面的研究。E-mail: lanzc@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 胡卸文(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质、环境地质方面的教学与研究工作。

E-mail: huxiewen@163.com

future debris flow prediction, early warning, and prevention engineering design. Combining field investigation, UAV aerial photography, remote sensing interpretation, and RAMMS, this study analyzes the development characteristics of debris flows in Xiaochang gully, simulates the process of debris flow movement and accumulation, and reveals the disaster mechanism of disaster occurrence. The results show that the current dynamic storage of the source in Xiaochang gully reaches 370,000 m³. A wide and gentle channel (900 m long, and average width of 60 m) has naturally formed in the middle reaches of the basin, acting as a natural sedimentation pond, which intercepts small-scale debris flows. Numerical simulation results show that when the rainfall frequency is less than once every 20 years, the main deposition of debris flows occurs in the middle and upper reaches of the gully, and will not directly threaten the industrial park; when the rainfall frequency reaches once every 50 years, the outbreak of large-scale debris flow will impact the industrial park.

Keywords: debris flow; disaster mechanism; numerical simulation; RAMMS

0 引言

四川省雅安市近 15 年间,发生 M_s 4.0 级以上地震达 30 次(来源:中国地震台网),其中包括 2008 年“5·12”汶川特大地震、2013 年“4·20”芦山强烈地震等,长期多次地震活动的累积效应会造成山体结构损伤、斜坡的渐进性破坏,引发崩塌滑坡及碎屑流堆积^[1-2],为泥石流的形成提供了丰富的固体物质。此外,受地震强烈扰动作用,松散堆积体内部孔隙变大,稳定性大幅下降^[3],进而导致震后泥石流成灾规模和致灾程度显著增强^[4]。2013 年“4·20”芦山地震发生后,雅安市域内地质灾害数量激增至震前 11.6 倍^[5],严重威胁当地居民生命财产安全。

查明泥石流成灾机理并开展科学防治,可以有效降低成灾危害。当前,国内外学者通过理论分析^[6]、实地考察^[7-8]、遥感解译^[9]、物理模型试验^[10]以及数值模拟^[11]等方法,对泥石流起动机制开展了大量研究。胡卸文等^[12]阐述了桃关沟 2013 年“7·10”泥石流的起动及流通堆积过程,认为其成灾机理为崩滑物源、坡面物源和沟道物源三者的起动及互相叠加;廖立业等^[13]通过遥感解译分析了北京怀柔 2018 年“7·16”泥石流起动机制为短历时强降雨引起沟床物源揭底侵蚀;李宁等^[3]将九寨沟 2019 年“6·21”泥石流致灾机归结为两方面:震后松散固体物源激增与原有沟坡堆积物的二次起动、沟道堵塞与级联溃决;冯文凯等^[14]通过野外调查和数值模拟分析,将 2019 年龙川县米贝村 6 号沟发生的滑坡-泥石流灾害成灾机理总结为持续降雨引发斜坡浅表层失稳破坏,漏斗状地形加剧地表汇水最终引发链生灾害;文强等^[15]认为梅龙沟 2020 年“6·17”泥石流在运移中与三处大型滑坡产生级联溃决效应。以上研究表明了泥石流成灾机制与地震历史、降雨条件、沟道特征密切相关,同时当存在大型滑坡点或堵溃点时,泥石流的致灾

能力将进一步增强。

位于雅安市汉源县工业园区的硝厂沟近十年来,仅 2018 年暴发过一次小型泥石流,而相邻且同处白岩河左岸的“小沟”“范家沟”泥石流暴发过数次大规模泥石流,均对其沟口工业园区造成过严重冲击^[16]。参照《泥石流灾害治理工程勘查规范》(DZ/T 0220—2006),硝厂沟泥石流易发性评分为 85 分,属轻度易发。但野外勘察发现,受各次地震及降雨影响,硝厂沟崩滑及沟道物源丰富,中游宽缓沟道处赋存的多期堆积物源厚达数米,且下游弯道存在堵沟隐患,具备暴发较大规模泥石流的风险,直接威胁沟口工业园区多家厂矿企业安全,总财产近 2 亿元。因此,查明硝厂沟泥石流发育特征与成灾机制,对指导此类中游发育有天然停淤场泥石流的预测预警和防治工程设计具有十分重要的现实意义和科研价值。

1 研究区地质环境概况

硝厂沟位于四川省汉源县安乐镇里坪村(图 1),白岩河左岸。研究区地处汉源县地处横断山脉北段东缘,地貌形态主要以构造侵蚀中—低山地貌和河谷地貌为主。区内地质构造背景复杂,处于两大构造带接合部位,因而地震频繁,断层带纵横交错,不良地质灾害极为发育。区内地层主要为震旦系陡山沱组(Z_2d)灰岩,第四系全新统崩坡积层(Qh^{col+dl})、残坡积层(Qh^{el+dl})、泥石流堆积层(Qh^{sef})及冲洪积层(Qh^{al+pl})。

受西风环流和西南季风气流影响,加之大相岭东北亘阻,县内高地寒冷,河谷炎热,雨量不均,气候垂直变化十分显著。根据硝厂沟流域附近农业气象站近 40 年(1982—2021 年)的降雨数据统计,该地多年平均降水量 1 021.5 mm,雨季多集中在 6—9 月,占全年降雨量的 76%。

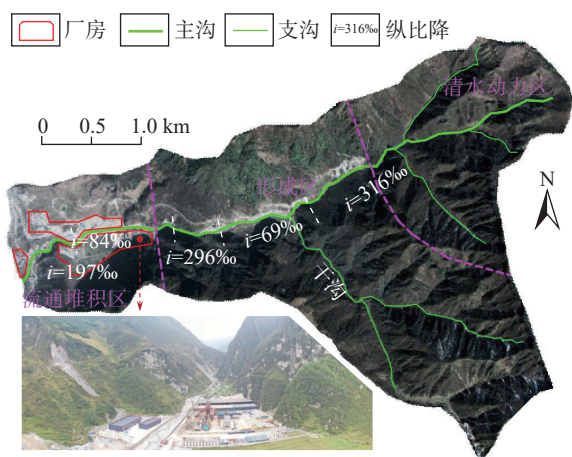


图1 硝厂沟流域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Xiaochang gully

2 泥石流发育特征分析

2.1 地形条件

硝厂沟为白岩河一级支流,流域面积 12.09 km²,主沟长 6.25 km,平均纵比降 169‰。流域内地势呈东高西低,沟谷形态呈“V”型和“U”型交错分布,东侧分水岭最高海拔 3 262 m,沟口堆积扇前缘最低海拔 1 698 m,

主沟纵坡呈“陡-缓-陡-缓-陡”的阶梯状变化(图 2),地形起伏强烈,自上游分水岭至下游沟口划分为清水动力区、形成区以及流通堆积区。中上游发育支沟“干沟”,流域面积 2.97 km²,沟道平均纵比降 221‰。

主沟沟道可根据坡降陡缓变化分为 5 段(图 2)。第一段自流域上游分水岭至主支沟交汇口,主沟高程 2 120 m 至 3 265 m,平均坡降为 316‰,沟谷两岸相对高差较大,沟底下切作用明显,谷坡植被发育,部分基岩出露,残坡积层覆盖厚度约为 0.5~2.0 m;第二段从主支沟交汇口至形成区中下游陡坎处,该段沟道长约 900 m,宽度近 60 m,平均坡降变缓至 69‰,为天然停淤场,沟道两岸高差相对上游有所减小,地形基本对称,“U”型沟谷平均宽度约 60~70 m,岸坡多为 25°~55°;第三段为形成区末端长约 450 m 的“S”型沟道,平均坡降 296‰,该区段植被发育,沟宽迅速变窄且两岸地势陡峭,坡度往往大于 40°;第四段及第五段位于流通堆积区呈长扇形,地势起伏不一,前段较为平缓平均坡降 84‰,后段起伏明显平均坡降 197‰。流通堆积区大部分区域现已被改造为工业园区建筑用地,设有多个厂矿企业,为硝厂沟主要保护对象(图 1、图 3)。

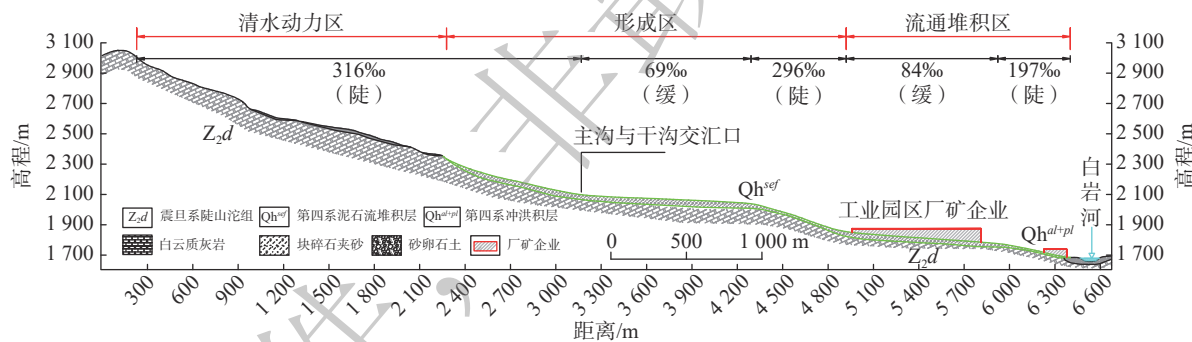


图2 硝厂沟流域纵剖面图

Fig. 2 Cross-sectional profile plan of the Xiaochang gully

2.2 物源条件

研究区位于汉源-昭觉断裂和顺河断裂所围的断块上,受多次地震及降雨影响,流域内临空面广泛分布,崩滑物源较为发育,形成区下游局部窄陡沟道大块石堆积,存在堵沟隐患。同时由于流通堆积区沟道两岸汉源工业园区平整场地建设,沟口堆砌的弃渣体密实度较低,在降雨作用下容易失稳起动参与泥石流补给。

通过对流域内松散物源类型、结构特征、储量以及分布位置野外实地考察,确定了硝厂沟流域物源共 28 处,主要沿形成区沟道及沟道两侧分布(图 3),类型包括沟道物源、崩滑物源、弃渣物源和坡面物源,储量

总计约 $3.94 \times 10^6 \text{ m}^3$,其中能够参与泥石流补给的动储量约 $37 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2.3 降雨条件

根据汉源县农业气象降雨数据统计,汉源县 2018 年 6 月降雨充沛,平均日降雨量 10.61 mm,远超同期平均水平 2.40 mm。持续降雨加剧松散物源的面蚀和侧蚀,使其稳定性进一步降低。同年 6 月 30 日泥石流暴发当天,研究区自凌晨起开始集中降雨,下午四时当日累计降水量超 50 mm(图 4),已达到吴积善等^[17]研究得出的四川省西部山区泥石流沟平均激发雨量 48~50 mm。

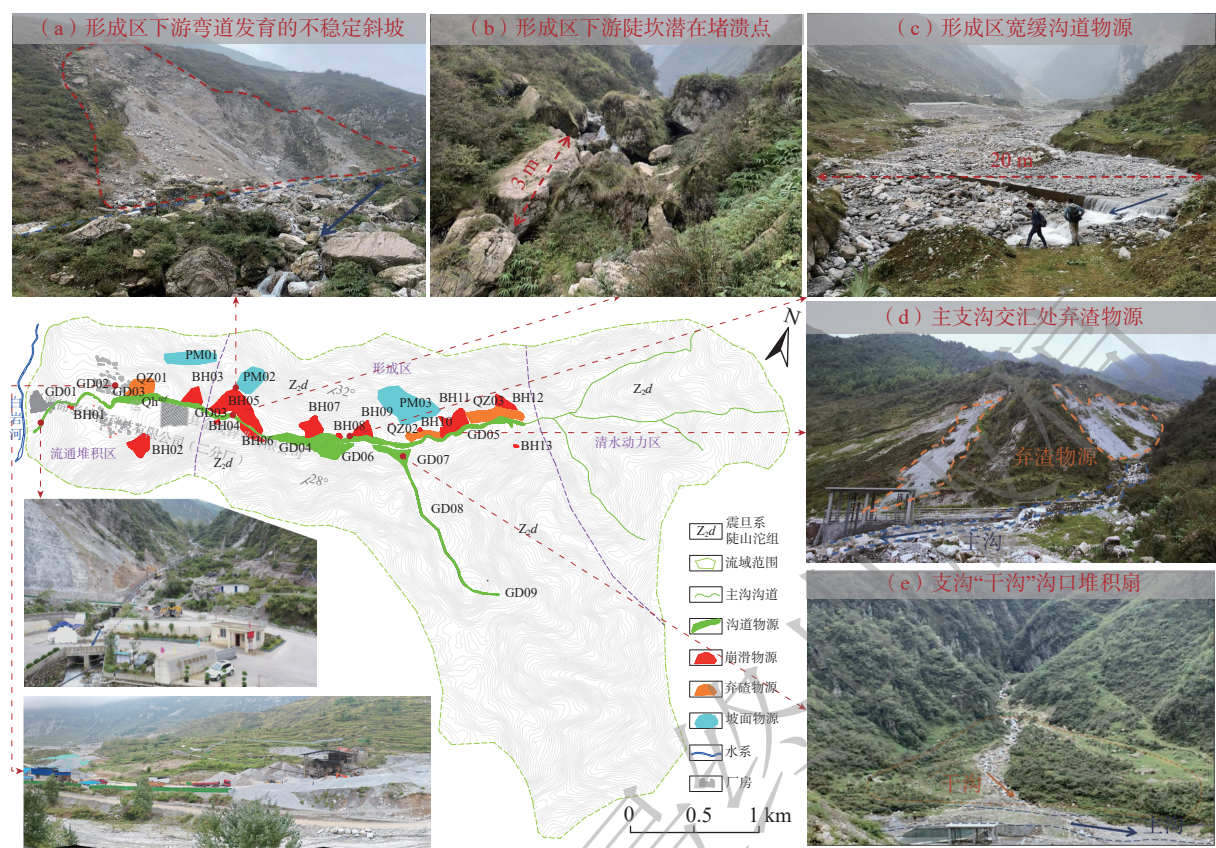


图 3 硝厂沟物源分布
Fig. 3 Distribution of material sources of the Xiaochang gully

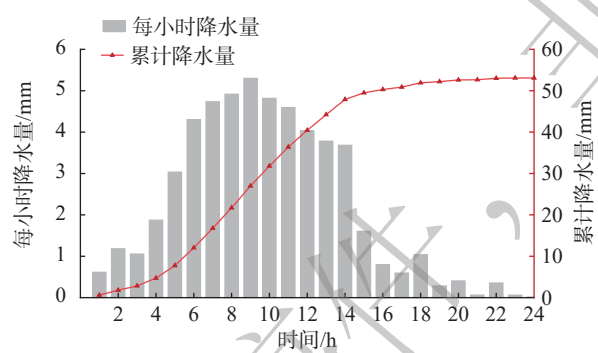


图 4 汉源县 2018 年 6 月 30 日逐时降雨数据
Fig. 4 Hourly rainfall data for Hanyuan County on June 30, 2018

3 泥石流动力学基本特征

对泥石流动力学基本特征的分析,是认识及治理泥石流的基本依据。此次特征参数计算选取硝厂沟主沟与干沟交汇口和主沟沟口两个计算断面,采用规范公式计算分析。

3.1 泥石流流速

硝厂沟泥石流容重通过配浆法和查表法综合确定取值为 1.586 t/m³, 小于 1.6 t/m³, 属于稀性泥石流, 可采用西南地区(铁二院)公式计算两断面平均流速, 计算结果见表 1。

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\gamma_H \varphi + 1}} \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (1)$$

式中: V_c ——泥石流断面平均流速/(m·s⁻¹);
 γ_H ——泥石流固体物质容重/(t·m⁻³), 取 2.65 t/m³;
 φ ——泥石流泥沙修正系数, 取 0.557;
 $\frac{1}{n}$ ——清水河床糙率系数;
 R ——水力半径/m, 一般可用平均水深 H 代替;
 I ——泥石流水力坡度/‰, 一般可用沟床纵坡代替。

表 1 泥石流动力学特征参数

特征参数		设计频率P/%				
		20	10	5	2	1
流速 (m·s ⁻¹)	主支沟 交汇口	4.34	4.94	5.53	6.11	6.53
	主沟沟口	2.95	3.46	3.73	4.06	4.11
流量 (m ³ ·s ⁻¹)	主支沟 交汇口	50.83	70.92	91.17	118.25	138.98
	主沟沟口	108.05	158.96	210.87	280.87	334.77
冲出总量 (10 ⁴ m ³)	主支沟 交汇口	1.21	2.25	3.61	6.56	8.81
	主沟沟口	2.57	4.53	6.68	9.79	18.56

3.2 泥石流洪峰流量

泥石流洪峰流量采用雨洪修正法计算(式 2)。该方法假定暴雨所产生洪水流量全部转变为泥石流流量,计算结果见表 1。

$$Q_C = (1 + \varphi) Q_B D_C \quad (2)$$

式中: Q_C ——泥石流峰值流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

φ ——泥石流泥沙修正系数,取 0.557;

Q_B ——暴雨洪峰流量;

D_C ——泥石流堵塞系数,取 1.5。

3.3 泥石流一次冲出总量

泥石流相比洪水更具暴涨暴落的特点且历时较短,因此其过程线可以概化成五边形,故泥石流一次冲出总量可按下式计算,计算结果见表 1。

$$W_C = 19TQ_C/72 \quad (3)$$

式中: W_C ——泥石流一次冲出总量/ m^3 ;

T ——石流历时/s;

Q_C ——石流的洪峰流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)。

4 数值模拟分析

4.1 RAMMS 基本原理

硝厂沟泥石流成灾过程可利用 RAMMS 进行模拟分析,该软件采用 Voellmy-Fluid 摩擦模型,能够有效反映三维复杂地形下的泥石流运动特点,预测分析泥石流运行路径、流速、泥深等动力学特征^[18]。Voellmy-Fluid 模型中将摩擦阻力(S)分为静摩擦阻力和运动阻力,其中静摩擦阻力与库仑摩擦系数(μ)相关,运动阻力与速度和湍流摩擦系数(ξ)相关,总阻力计算公式为:

$$S = \mu N + \rho g U^2 / \xi \quad (4)$$

其中:

$$N = \rho h g \cos \varphi \quad (5)$$

式中: N ——流体接触面上的正应力/Pa;

ρ ——泥石流密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

g ——重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

U ——泥石流平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

h ——泥石流高度/m;

φ ——内摩擦角/rad。

4.2 模型预处理

首先需获取研究区高精度地形数据。此次模拟采用日本先进陆地观测卫星(ALOS)的 DEM 数据,其分辨率可达 $12.5 \text{ m} \times 12.5 \text{ m}$,满足精度要求,卫星影像通过 Google Earth 获取。

其次要设置泥石流的启动模式。由于硝厂沟泥石流暴发频率较低,因此采用水力启动模拟 20 年和 50 年一遇的泥石流暴发,水力释放点设于形成区上游,采用三点法确定流量曲线,所需动力学数据由经验公式计算所得。

最后需确定模型系数取值。库仑摩擦系数(μ)与湍流摩擦系数(ξ)是影响泥石流运动的关键参数,此次模拟依据现场勘察和遥感解译成果,并参考软件操作手册及前人研究结论^[19], μ 取堆积区斜坡角(纵坡降)为 0.08, ξ 值大小与泥石流黏性有关,硝厂沟为稀性泥石流,因此取值 400 m/s^2 。此外,DEM 分辨率与模拟结果精度往往呈成正相关^[20],因此采用 5m 网格精度。

4.3 模拟结果分析

(一)20 年一遇雨强下流域上游暴发泥石流

在形成区上游水力释放点设置 20 年一遇泥石流流量释放,各时段流通堆积情况和暴发历时沟段各处最大流深见图 5,期间最大泥深达 4.11 m,红色虚线标识为泥石流泛滥边界。

由图 5 可知,泥石流启动后约 500 s,已运动至主支沟交汇处,流体多汇集于泥石流龙头,最大泥深达 3.9 m,此后重力驱动减弱,在通过主支沟汇流口后泥石流开始减速堆积(见图 7 流速曲线)。约 1 000 s 时,超过半数的泥石流浆体进入形成区的缓坡降沟段,由于沟道宽缓,此时最大堆积宽度达 110 m。约 1 500 s 时,除上游沟道残存部分流体外,其余泥石流浆体在形成区缓坡降沟段开始逐渐向下游扩散堆积,直至 2 700 s 时,物源堆积基本完成,平均泥深约 1.5 m(见图 7 堆积深度曲线),整体堆积形态近似椭圆形,长约 550 m,宽约 80 m。模拟结果表明,流域上游暴发 20 年一遇泥石流时,主要堆积于形成区中游宽缓沟段,不会对流通堆积区厂矿企业构成威胁。

(二)50 年一遇雨强下全流域暴发泥石流

在 50 年一遇泥石流暴发模拟中,由于流量及一次固体冲出总量显著增大,泥石流最终运动至流通堆积区完成停淤,各时段流通堆积情况和暴发历时沟段各处最大流深见图 6,期间最大泥深位于中游宽缓沟道处约 7.11 m。

由图 6 可知,泥石流暴发约 1 700 s 后,其主体已全部进入形成区缓坡降沟段,此时浆体最大宽度达 140 m,最大流深为 5.1 m。约 2 000 s 时,泥石流经形成区下游陡坡降弯道短暂加速后进入流通堆积区(图 7),并开始冲击左岸厂区。约 2 500 s 时,左岸已建厂房基本被泥石流淤埋,龙头开始冲击右岸厂房,此时流通堆积区平

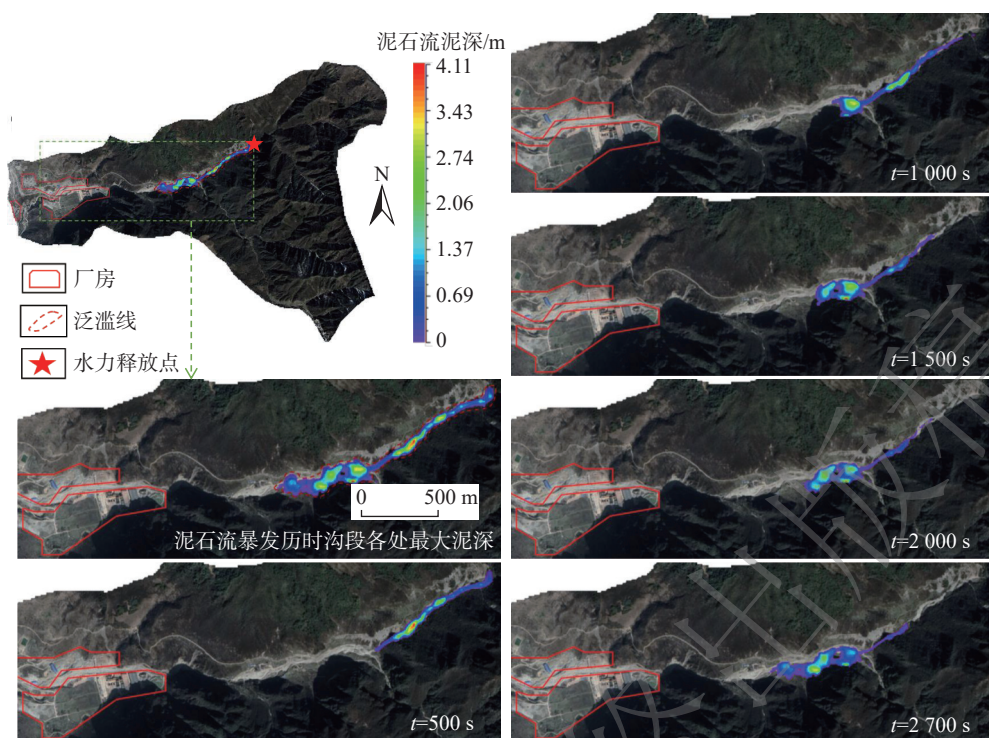


图 5 硝厂沟 20 年一遇泥石流泥深模拟结果

Fig. 5 Simulation results of debris flow depth for 20-year debris flow in Xiaochang gully

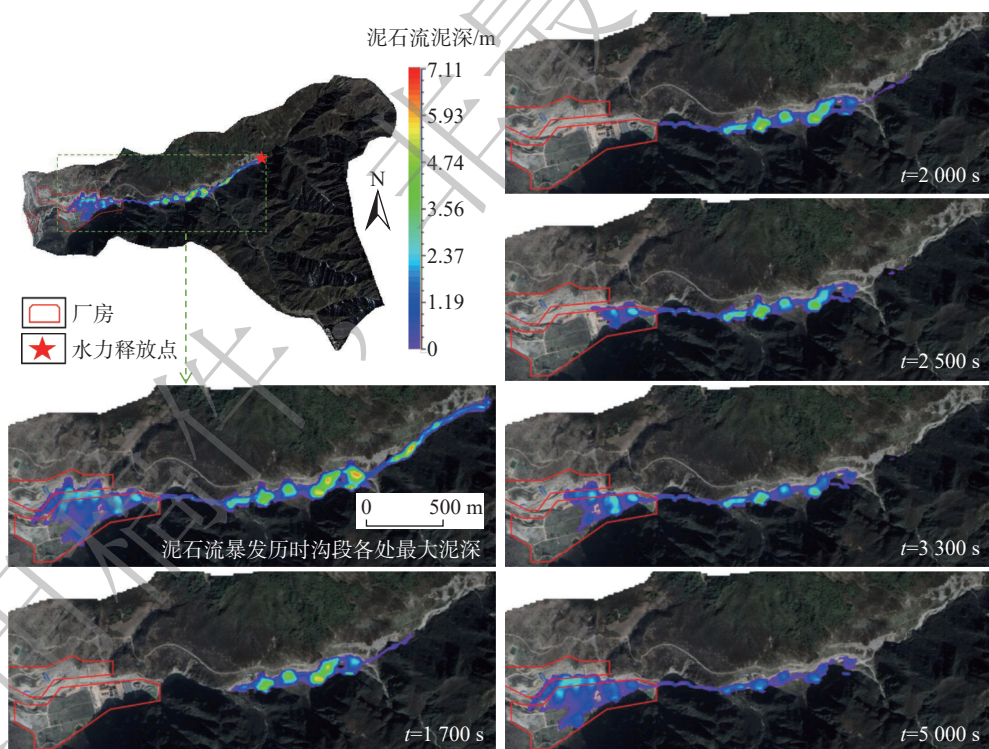


图 6 硝厂沟 50 年一遇泥石流泥深模拟结果

Fig. 6 Simulation results of debris flow depth for 50-year debris flow in Xiaochang gully

均泥深 2.1 m。约 3 300 s 时, 泥石流半数浆体进入流通堆积区, 沟道两岸厂房均已遭受强烈的冲击淤埋, 浆体呈扇形继续向下游缓慢扩散, 此时最大堆积宽度达 280

m。约 5 000 s 时, 泥石流堆积基本完成, 由于形成区中游沟道宽缓, 仍淤积部分固体物质。而流通堆积区的冲出物逐渐固液分离, 堆积体形态整体呈现水滴状, 长约

700 m, 宽约 500 m, 随着堆积面积的进一步扩大, 平均泥深降低至约 1.5 m(图 7)。数值模拟结果表明, 在 50 年一遇降雨强度下暴发的大规模泥石流能够运动至下游流通堆积区, 严重威胁工业园区已建厂房, 但对沟口陡坡降区域及白岩河冲击较小。

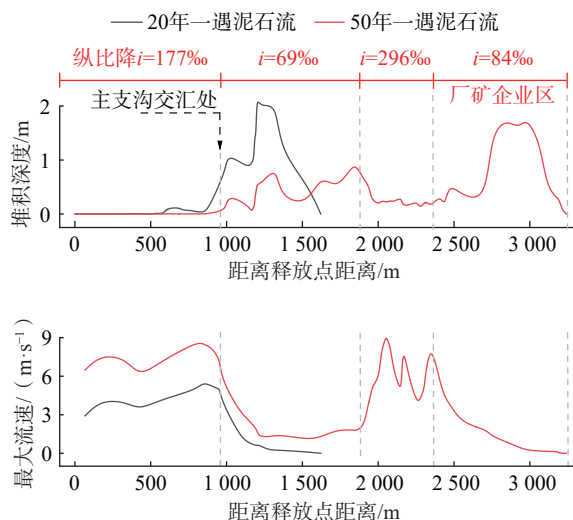


图 7 两次泥石流沿主沟方向的堆积深度和最大流速曲线

Fig. 7 The accumulation depth and maximum velocity of the two debris flows along the main gully direction

5 泥石流成灾机理

根据现场走访调查, 2013 年“4·20”芦山地震后, 硝厂沟流域内崩塌、滑坡等不良地质灾害激增, 可参与泥石流补给的松散物源量大幅增加。其中 2018 年硝厂沟暴发过一次小型泥石流, 冲出沟口规模约 20 000 m³, 根据调查认定此次泥石流诱因为震后物源激增以及人类工程活动。

硝厂沟属于典型暴雨沟谷型泥石流, 流域中游发育一段近 900 m 长的宽缓沟道(图 2), 因此流通堆积区泥石流冲出物极少。但当降雨频率达到 50 年一遇时, 极易诱发大规模泥石流, 严重威胁下游厂区安全。基于现场勘察、遥感解译和数值模拟成果, 现将硝厂沟泥石流在不同雨强下的致灾过程分述如下:

(一) 当降雨频率不高于 20 年一遇时, 硝厂沟上游暴发的泥石流将在形成区中游缓坡降沟段停淤堆积, 不会对沟口工业园区造成直接危害。

硝厂沟上游流域呈漏斗状, 纵坡比大(平均 316‰), 且“V”字型沟谷形态极利于汇水。根据现场调查, 流域内的物源主要分布在高程 2 300 m 以下的沟道区段, 包括震后崩滑物源、沟道物源, 以及修路切坡产生的弃渣

物源, 特别是该沟段因进山道路开挖, 多数工程弃渣直接堆砌在沟道岸坡, 且未施加任何防护措施, 相关块碎石土极易失稳起动, 见图 3(d)。

在汛期持续降雨工况下, 浅表层土体的持水能力在降雨作用下被快速超过, 达到饱和状态形成坡面径流, 进而冲刷裹挟大量松散细颗粒物汇入主沟, 发展成为洪流。随着势能的不断转化, 洪流逐渐集聚规模, 揭底侧蚀能力得到进一步增强, 导致沿途各类松散物源不断失稳补给, 使其流量及规模犹如“滚雪球”般持续增大, 最终发展成泥石流。泥石流沿沟道运移至主支沟交汇口前达到峰值流量, 此后沟道纵坡大幅降低, 重力势能驱动力减弱, 并在进入形成区缓坡降沟段(平均坡降 69‰)后开始堆积, 逐渐固液分离, 液体以泥流形态缓慢扩散。

而重要支沟“干沟”平均坡降 221‰, 与主沟道汇流角度近 90°, 流域内松散物源以沟道物源及崩滑物源为主。若支沟暴发泥石流, 冲出的多数固体物质将停淤在沟口平缓开阔地段, 见图 3(e), 汇入主沟物源量较少, 因此干沟的汇入将进一步稀释主沟泥石流, 使其重度降低。因此, 上游暴发的泥石流多表现为稀性泥石流。

(二) 当降雨频率达到 50 年一遇时, 全流域将暴发大规模泥石流并冲击淤埋沟口工业园区。

随着硝厂沟上游泥石流的多期暴发与堆积, 形成区缓坡降沟段赋存的松散物源量不断增大, 见图 3(c), 一旦降雨频率达到 50 年一遇时, 硝厂沟将暴发大规模泥石流, 并对沟道内赋存的多期堆积物源进行揭底铲刮, 此类物源的补给及失稳模式与 2010 年舟曲泥石流较为相似, 其冲出规模巨大与沟道内赋存的十余次泥石流堆积物密切相关^[21-22]。

强降雨发生后, 上游洪流随着势能转化不断加速, 而沟床内前期堆积物源密实度及固结度往往较低, 在高能洪流持续创底掏蚀下发生强烈的揭底铲刮, 沟床会发生严重下切冲蚀并迅速拉槽, 沟道也将持续加深拓宽。在泥石流运动至下游陡坡降沟段时, 这种由缓变陡的陡坎地形将导致泥石流的规模和冲击力进一步增大^[5]。该段沟道整体呈“S”型, 长约 460 m, 平均坡降 296‰, 沟道深切曲折, 且局部沟道堆积大量崩落巨石, 长为 2~4 m, 具有较强堵沟隐患, 见图 3(b)。该段沟道两岸崩滑物源也极为发育, 特别是下游凹岸处发育着大面积的不稳定斜坡, 见图 3(a), 其坡顶长期发生坍塌溜滑, 坡脚在常年流水的冲刷侧蚀下局部被掏空, 溯源侵蚀效应强烈, 在泥石流冲击下易发生大规模崩塌, 参与泥石流补给。最终泥石流进入流通堆积区后开始堆积, 并对沟道两侧的工业园区构成严重威胁。此外, 若形成区下

游弯道发生堵溃,泥石流将无法在流通堆积区上游完成停淤,极易直接漫出沟道顺坡而下,冲击沟口厂房区,最终汇入白岩河。

由数值模拟和现场勘察结果可知,硝厂沟泥石流暴发频率偏低是由于形成区中游宽缓沟道对小规模泥石流具有拦截作用,但若不采取防治措施,一旦降雨频率达到 50 年一遇时,硝厂沟将具有暴发较大规模泥石流、冲击淤埋沟口工业园区风险。

6 结论

(1)硝厂沟流域现阶段物源丰富,动储量达 $37 \times 10^4 \text{ m}^3$,其主沟长 6.25 km,呈“陡-缓-陡-缓-陡”阶梯状,同时中游发育一段长 900 m、平均宽度近 60 m 的宽缓沟道,对小规模泥石流具有较强的拦截作用。

(2)通过 RAMMS 的数值模拟分析得出,在降雨频率不高于 20 年一遇时,泥石流主要堆积于中游宽缓沟道淤积区,不会对沟口工业园区产生直接危害;在 50 年一遇降雨强度下暴发的泥石流能够运动至下游流通堆积区并冲击淤埋已建厂房。

(3)综合分析现场勘察、遥感解译和数值模拟结果可知,在较高降雨条件下硝厂沟会暴发大规模泥石流,若不采取防治措施,将对沟口工业园区构成严重威胁。

参考文献(References):

- [1] 刘传正,陈春利.中国地质灾害成因分析[J].地质论评,2020,66(5):1334-1348. [LIU Chuanzheng, CHEN Chunli. Research on the origins of geological disasters in China [J]. Geological Review, 2020, 66(5): 1334-1348. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 刘鑫,张文,李根,等.高位远程崩滑碎屑流-泥石流灾害链的演变过程与影响范围预测——以“4·5”四川洪雅县铁匠湾地质灾害链为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(6):1799-1811. [LIU Xin, ZHANG Wen, LI Gen, et al. Research on evolution process and impact range prediction of high level remote collapse and landslide-debris flow disaster chain: Taking the “4·5” tiejiangwan geological disaster chain in Hongya County, Sichuan Province as an example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1799-1811. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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)]

- [4] 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):1233-1245. [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): 1233-1245. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 殷志强,赵无忌,褚宏亮,等.“4·20”芦山地震诱发地质灾害基本特征及与“5·12”汶川地震对比分析[J].地质学报,2014,88(6):1145-1156. [YIN Zhiqiang, ZHAO Wuji, CHU Hongliang, et al. Basic characteristics of geohazards induced by Lushan earthquake and compare to them of Wenchuan earthquake [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(6): 1145-1156. (in Chinese with English abstract)]
- [6] MOSS R E S, LYMAN N. Incorporating shear stiffness into post-fire debris flow statistical triggering models [J]. Natural Hazards, 2022, 113(2): 913-932.
- [7] 杨相斌,胡卸文,曹希超,等.四川西昌电池厂沟火后泥石流成灾特征及防治措施分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(4):1-8. [YANG Xiangbin, HU Xiewen, CAO Xichao, et al. Analysis on disaster characteristics and prevention measures of the post-fire debris flow in Dianchichang gully, Xichang of Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张宪政,铁永波,宁志杰,等.四川汶川县板子沟“6·26”特大型泥石流成因特征与活动性研究[J].水文地质工程地质,2023,50(5):134-145. [ZHANG Xianzheng, TIE Yongbo, NING Zhijie, et al. Characteristics and activity analysis of the catastrophic “6·26” debris flow in the Banzi Catchment, Wenchuan County of Sichuan Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 134-145. (in Chinese with English abstract)]
- [9] CAO Chen, ZHANG Wen, CHEN Jianping, et al. Quantitative estimation of debris flow source materials by integrating multi-source data: A case study [J]. Engineering Geology, 2021, 291: 106222.
- [10] 胡艳香,朱厚影,陈昊,等.贺兰山苏峪口泥石流物源启动模型试验分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(6):44-52. [HU Yanxiang, ZHU Houying, CHEN Hao, et al. Model test of debris flow source initiation mechanism in Suyu valley of Helan Mountain [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 44-52. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘波,胡卸文,何坤,等.西藏洛隆县巴曲冰湖溃决型泥石流演进过程模拟研究[J].水文地质工程地质,2021,48(5):150-160. [LIU Bo, HU Xiewen, HE Kun, et al.

- Characteristics and evolution process simulation of the Baqu gully debris flow triggered by ice-lake outburst in Luolong County of Tibet, China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 150 – 160. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 胡卸文, 韩玫, 梁敬轩, 等. 汶川震区桃关沟 2013-07-10 泥石流成灾机理 [J]. *西南交通大学学报*, 2015, 50(2): 286 – 293. [HU Xiewen, HAN Mei, LIANG Jingxuan, et al. Hazard mechanism analysis of Taoguan giant debris flow in Wenchuan earthquake area on July 10th, 2013 [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, 50(2): 286 – 293. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 廖立业, 曾庆利, 袁广祥. 北京怀柔 7·16 暴雨泥石流发育特征与形成机理 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29(3): 807 – 816. [LIAO Liye, ZENG Qingli, YUAN Guangxiang. Characteristics and mechanism of the rainstorm-induced debris flow on July 16 in Huairou, Beijing [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3): 807 – 816. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 冯文凯, 贾邦中, 吴义鹰, 等. 低山丘陵区典型滑坡-泥石流链生灾害特征与成灾机理 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(1): 35 – 44. [FENG Wenkai, JIA Bangzhong, WU Yiyang, et al. Characteristics and mechanism of landslide-debris flow chain disaster in low mountain and hilly terrain [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 35 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 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)]
- [16] 翟兆斌, 胡卸文, 刘波, 等. 汉源县范家沟泥石流拟设工程治理效果研究 [J]. *四川水力发电*, 2022, 41(5): 117 – 122. [ZHAI Zhaobin, HU Xiewen, LIU Bo, et al. Study on effect of the planned engineering for debris flow control in Fanjia gully, Hanyuan [J]. *Sichuan Water Power*, 2022, 41(5): 117 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流及其综合治理 [M]. 北京: 科学出版社, 1993. [WU Jishan, TIAN Lianquan, KANG Zhicheng, et al. Debris flow and its comprehensive control [M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese)]
- [18] 温丽旺. 云南省云龙县果郎沟泥石流危险性评价研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018. [WEN Liwang. Study on risk assessment of debris flow in Guolanggou, Yunlong County, Yunnan Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 宋兵, 沈军辉, 李金洋, 等. RAMMS 在泥石流运动模拟中的应用——以白沙沟泥石流为例 [J]. *泥沙研究*, 2018, 43(1): 32 – 37. [SONG Bing, SHEN Junhui, LI Jinyang, et al. Application of RAMMS model on simulation of debris flow in the Basha Gully [J]. *Journal of Sediment Research*, 2018, 43(1): 32 – 37. (in Chinese with English abstract)]
- [20] STOLZ A, HUGGEL C. Debris flows in the Swiss National Park: The influence of different flow models and varying DEM grid size on modeling results [J]. *Landslides*, 2008, 5(3): 311 – 319.
- [21] 胡凯衡, 葛永刚, 崔鹏, 等. 对甘肃舟曲特大泥石流灾害的初步认识 [J]. *山地学报*, 2010, 28(5): 628 – 634. [HU Kaiheng, GE Yonggang, CUI Peng, et al. Preliminary analysis of extra-large-scale debris flow disaster in Zhouqu County of Gansu Province [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(5): 628 – 634. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 余斌, 杨永红, 苏永超, 等. 甘肃省舟曲 8·7 特大泥石流调查研究 [J]. *工程地质学报*, 2010, 18(4): 437 – 444. [YU Bin, YANG Yonghong, SU Yongchao, et al. Research on the giant debris flow hazards in Zhouqu County, Gansu Province on August 7, 2010 [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(4): 437 – 444. (in Chinese with English abstract)]