

文章编号: 1008-2786-(2019)4-622-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000453

九寨沟县西番沟泥石流调查

王凤娘^{1,2}, 贺 拿^{1,2,3}, 陈 容^{1,2}, 陈宁生^{1*}, 安艳东⁴, 高精理⁴

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 4. 四川省华地建设工程有限责任公司, 成都 610081)

摘 要: 针对 2017 年 8 月 8 日九寨沟地震可能引发更多泥石流灾害及其防治的问题, 基于 2018 年 6 月 25 日四川九寨沟县西番沟泥石流灾害的现场调查和物源特征分析获得泥石流的性质及其发育成因, 并提出防治对策。研究发现 2018 年 6 月 25 日西番沟泥石流为 50 年一遇的中等规模低频稀性泥石流, 其流量为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$, 一次泥石流总量约 $1.5 \text{ 万} \sim 2 \text{ 万 m}^3$, 流速约 $5.5 \sim 6 \text{ m/s}$; 其发育的成因之一是 2017 年 8 月 8 日四川省九寨沟县发生 7.0 级地震引发高山区松散固体物质增加所致。调查显示地震引发可能参与泥石流运动的物源数量和动储量分别为 $78.81 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $23.64 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。由于流域内还存在大量的松散物源, 泥石流还可能在进一步的降水作用下发生, 今后的防灾减灾宜采用工程措施和群测群防措施。

关键词: 地震; 泥石流; 九寨沟; 群测群防

中图分类号: P642.23

文献标志码: C

泥石流是广大山区一种常见的山地灾害, 因其暴发突然、迅速, 且流体中含有大量松散堆积体、木头等, 往往具有很强的破坏性。特别是在地震后, 地震引发山体破坏, 造成山体垮塌、树木损毁, 形成的大量崩塌、滑坡为泥石流形成提供丰富的物源, 导致较长一段时间内泥石流活动较震前更为活跃^[1]。震后泥石流灾害造成的人员伤亡及经济损失惨重^[2-7]。目前关于震后泥石流的发育分布规律已有较多研究, 但对流域内泥石流如何形成、发展和演化, 如何提高其防治效果还需深入研究^[8-10]。此外, 震后泥石流特征发生了较大变化, 传统的泥石流规模计算方法计算得出的泥石流规模往往低于实际

灾害规模, 低估了其灾害风险^[11]。震后高发的泥石流灾害对灾害防治工程造成了巨大破坏, 降低了其防灾功效^[12-13]。例如: 北川陈家坝青林沟坝体被泥石流冲毁, 汶川牛圈沟泥石流下游拦挡坝已接近淤满。基于震后泥石流规模及活动特征, 结合群测群防制度提出对应的防治方案, 是提高防灾减灾效果的有效途径。

2017 年 8 月 8 日, 四川省九寨沟县漳扎镇(东经 $103^\circ 52' 30.17''$, 北纬 $33^\circ 17' 22.20''$)发生 7.0 级地震, 其位置见图 1。震后九寨沟区域当年并未发生显著的泥石流灾害。2018 年 6 月 25 日, 该区域普降暴雨, 晚上 20:00 地处九寨沟县白河乡太平村 4

收稿日期 (Received date): 2018-07-28; **改回日期** (Accepted date): 2019-04-09

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金面上项目 (41671112); 国家自然科学基金国际合作与交流项目 (41861134008); 国家自然科学基金 (41601571); 河南理工大学博士基金 (B201558)。[General Program of National Natural Science Foundation of China (41671112); Projects of International Cooperation and Exchanges, NSFC (41861134008); National Nature Science Foundation of China (41601571); Doctoral Fund of Henan Polytechnic University (B2015-58)]

第一作者 (Biography): 王凤娘 (1988-), 女, 福建永春人, 硕士研究生, 主要研究方向为山地灾害形成机理及防治。[WANG Fengniang (1988-), female, born in Yongchun, Fujian province, M. Sc. candidate, research on formation mechanism and prevention of mountain disasters] E-mail: wangfengniang@yeah.net

*** 通讯作者** (Corresponding author): 陈宁生 (1965-), 男, 福建南安人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为山地灾害形成机理与防治。[CHEN Ningsheng (1965-), male, born in Nan'an, Fujian Province. Ph. D., professor, specialized in formation mechanism and prevention of mountain disasters] E-mail: chennsh@imde.ac.cn

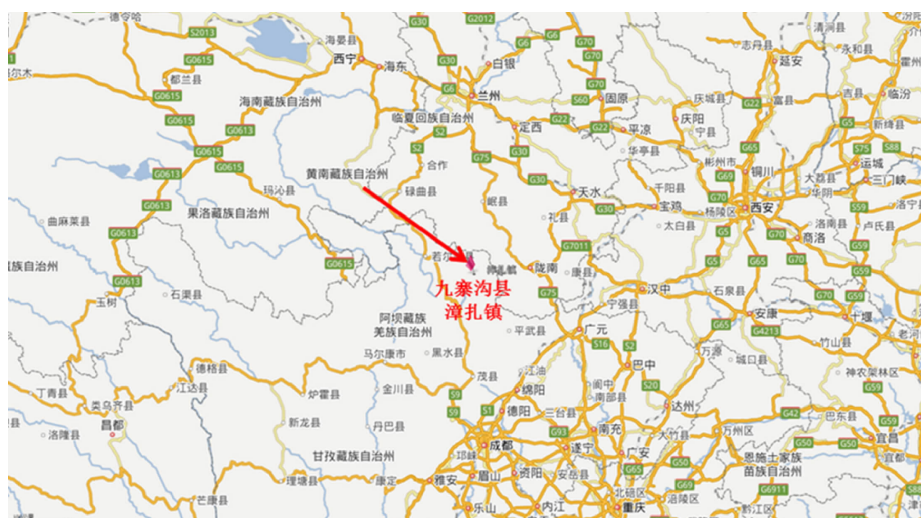


图1 九寨沟县漳扎镇位置图

Fig. 1 Location of Zhang zha township (Jiuzhaigou county)

组的西番沟发生50年一遇的泥石流,泥石流冲毁已有泥石流拦挡坝,并淤积漫过单边排导槽进入村庄,造成居民区大面积被淤埋和进水,29亩农田被冲毁,沟口村道、村道堡坎及通往太平村三组的桥头被毁坏,直接经济损失约200万元(图2)。由于该区群测群防到位,此次泥石流灾害未造成人员伤亡。已有勘察报告显示,流域20年一遇的泥石流设计流量为 $68 \text{ m}^3/\text{s}$,一次泥石流总量 4000 m^3 ,泥石流容重 $14.8 \text{ kN}/\text{m}^3$,此次泥石流峰值流量 $80 \text{ m}^3/\text{s}$,推算泥石流容重为 $16 \text{ kN}/\text{m}^3$,为典型的稀性、低频率、中等规模的泥石流。笔者在对太平村西番沟泥石流特征进行深入调查的基础上,通过模型计算及地震加速度隐性物源分析方法,确定西番沟流域内的总物源量及可能参与泥石流运动的动储量,结合区域的地形地貌及雨量条件分析泥石流成因。根据地震泥石流特征,对西番沟泥石流演化趋势进行预测并估算泥石流规模,在此基础上提出对应的防治方案。通过西番沟泥石流调查,可以揭示地震对高海拔山区泥石流形成的影响。西番沟泥石流群测群防制度及相关防治工程的成功实施,避免了人员伤亡,可为其他地区震后泥石流灾害防治提供一定的参考。

1 流域概况

1.1 研究区位置及地形地貌

九寨沟县位于四川省阿坝藏族羌族自治州东北部(东经 $103^{\circ}27' \sim 104^{\circ}26'$,北纬 $32^{\circ}53' \sim 33^{\circ}43'$),

青藏高原东北缘,岷山山脉的东部、龙门山山脉的西北部。北、东北及东与甘肃省迭部、舟曲和文县交界,南与四川省松潘县、平武县接壤,西与四川省若尔盖县毗邻,东西长 93 km ,南北宽 89.83 km ,总面积 5286 km^2 。

总体来看,西番沟流域(图3)属深切切割构造侵蚀中高山地貌,流域内地形陡峻,临空面多,崩塌、滚石、滑坡较为发育,为泥石流形成提供良好的能量条件。

西番沟流域纵向长度 4.7 km ,平均宽度 1.5 km ,流域面积 7.2 km^2 。主沟源头高程为 3800 m (流域内的最高点),沟谷平均纵坡降 251‰ 。流域内发育1条支沟。西番沟流域内坡度 $\geq 25^{\circ}$ 的坡地面积达 4.8 km^2 ,占流域总面积的 67% ,即流域内主要以陡坡为主,沟谷纵坡较大,特别是主沟上游段纵坡多在 500‰ 以上,为滑坡、崩塌等不良地质现象的发育提供了有利条件,为松散固体物质的搬运和参与泥石流活动提供了有利的地形条件。

1.2 研究区降雨特征

九寨沟县位于四川北部,属暖温带干温河谷气候,年平均降雨量 552.3 mm ,5月—9月降雨量最多,约占全年的 75% ,部分地区常出现局地性暴雨和冰雹。据县气象站25年的观测资料,年最大降水量 750.2 mm (1990年),最小降水量仅 359.2 mm (1996年),七月份降水量最多,为 100.5 mm ,每四年有三次强降雨(日降水量大于 30 mm),特大暴雨较为少见,25年来出现过三次(日降水量大于 50 mm),其中最大值为 $51.3 \text{ mm}^{[14]}$ 。九寨沟县多



图 2 泥石流灾害情况

(a. 冲毁排导槽; b. 泥石流冲毁拦砂坝左坝肩; c. 部分房屋被掩埋;
d. 泥石流侵蚀沟道左岸, 沟道变浅, 阻力增大, 更易淤积形成堰塞坝)

Fig.2 General situation of the debris flow disasters in this region

(a. Drainage channel is destroyed by the debris flow; b. Left abutment of the dam is destroyed by the debris flow; c. Some houses are buried; d. Left bank of the gully is seriously scoured, which resulting in the channel becomes shallow, resistance increases, and more easily to form barrier dams)

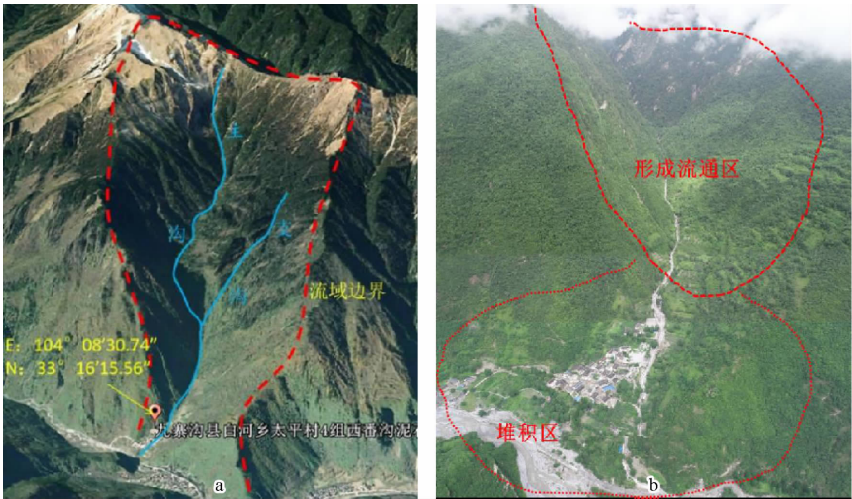


图 3 西番沟流域概况

(a. 西番沟泥石流卫星影像图; b. 西番沟泥石流沟域分区)

Fig.3 General situation of Xifangou catchment

(a. Satellite image of debris flow in Xifangou; b. Partition map of debris flow in Xifangou catchment)

年平均降雨量统计如图 4 所示。

1.3 地震活动情况

第四纪以来,研究区内新构造运动强烈,因其间歇性抬升而形成三~四级夷平面,部分沟谷出现多级跌水和瀑布,沟谷下切掏蚀作用强烈,形成典型的

“V”型沟谷。研究区所在区域内地震活动频繁,历史上著名的强震如 1976 年 8 月 16 日晚 10 时在勿角、马家(松潘、平武交界)发生的 7.2 级地震和 2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分在汶川映秀发生的 8.0 级特大地震,均对九寨沟县产生了重大影响,九寨沟

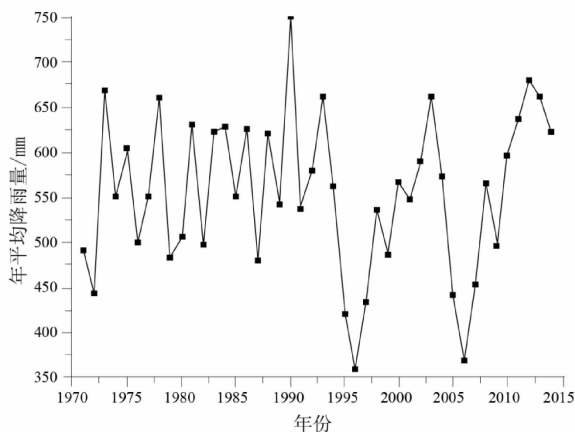


图4 九寨沟县多年降雨量曲线

Fig. 4 Perennial rainfall curve of Jiuzhaigou county

县地质环境遭到不同程度破坏,并造成了一定的灾害。

据 GB18306-2001《中国地震动参数区划图》国家标准第1号修改单,获得研究区地震动反应谱特征周期、峰值加速度、基本烈度分别为 0.45 s、0.20 g 和Ⅷ度。

2 灾害成因分析

2.1 地震产生的物源分析

国内外学者对震后泥石流发育及运动特征做了大量研究^[15],认为强震作用为泥石流流域提供大量松散固体物质是地震对泥石流形成发育最显著和典型的特点。

与传统的物源相比,震后泥石流的物源类型无论在规模、数量方面还是分布方式上均具有显著差异,而准确地计算总物源量及可能参与泥石流的物源量(动储量)是分析泥石流性质、规模及破坏能力的前提。通过对汶川地震灾区44处泥石流样本的分析,总结了震后泥石流的主要物源类型,并采用数学统计方法获得总物源量与动储量基本呈线性关系。分析认为:总物源量为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以内时,动储量可达到15%;总物源量为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以内时,动储量可达到30%;总物源量为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以内时,动储量可达到37%;总物源量超过 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 时,动储量可超过40%^[16]。研究人员^[17,18]分析了震后泥石流物源特征并建立了物源总量及动储量计算模型。震后泥石流物源表现出总储量更为丰富、动储量随时间增多、随发震断裂位置减小而递增等

特点。震后泥石流与普通泥石流相比,震后泥石流表现出物源储量放大、阶段性补给明显、沟道物源淤积-滞留-堵塞作用加强等现象,致使震后泥石流的危险性显著提高。

受2017年8月8日发生的7.0级地震的影响,九寨沟区域内产生大量的不稳定斜坡体,为泥石流的形成提供了丰富的松散固体物质。调查发现,西番沟流域的物源来源主要以崩滑物源、沟道堆积物源以及坡面侵蚀物源为主。

(1) 崩滑物源

崩滑类物源主要分布于沟谷中游地段,该段右侧岸坡较陡,冲沟下切破坏和崩塌发育。左岸中上游斜坡陡峭,为基岩断壁,多形成崩塌;左岸中下游岸坡坡角 $20^\circ \sim 35^\circ$,受沟内水流冲刷,滑坡发育,沟道沟壁滑塌严重。据调查,西番沟主要发育4处灾害点,编号为BH01~BH04(图5)。

现场勘察确定崩滑体位置及范围(面积),依据滑动位置评估潜在的崩滑体厚度,并结合流域内坡面植被覆盖情况及斜坡坡度,确定各崩滑体的方量。经计算,西番沟流域内崩滑类物源总量约 $5.96 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(2) 沟道堆积物

沟道物源是西番沟流域的主要物源。西番沟沟床呈现宽缓交替现象,较窄处沟宽约2~5 m,较宽处可达15 m;沟道堆积层厚度表现为上游薄、下游厚。现场调查发现,沟道切割深度(沟道岸坡高度)不一,中上游切割深度一般0.5~1 m,中游及中下游切割深度2~8 m。受沟内水流冲刷及坡脚掏蚀,岸坡发生滑塌较严重(图6)。

沟道堆积物主要通过揭底冲刷作用参与泥石流活动,参与量主要为沟底下切可能掏蚀的部分及下切后左右岸可能失稳的部分,其决定性参数为沟道冲刷深度、可能冲刷的宽度。其中,冲刷深度又受制于沟道宽度、纵坡降、形态结构特征、水力条件及堆积物颗粒级配等参数。

根据上述土体破坏及泥石流启动模式,建立沟道堆积物源的动储量计算模型^[16]:“V”型沟床堆积体在洪水作用下,从c点开始到o点将逐渐形成沟壑成为泥石流物源,其中直角三角形 Δcod 为泥石流动储量的最大可能物源区(图7),该区的面积为:

$$\Delta cod = \frac{1}{2} co \times cd = \frac{1}{2} h^2 \tan \alpha = \frac{1}{2} h^2 (90^\circ - \theta) \quad (1)$$

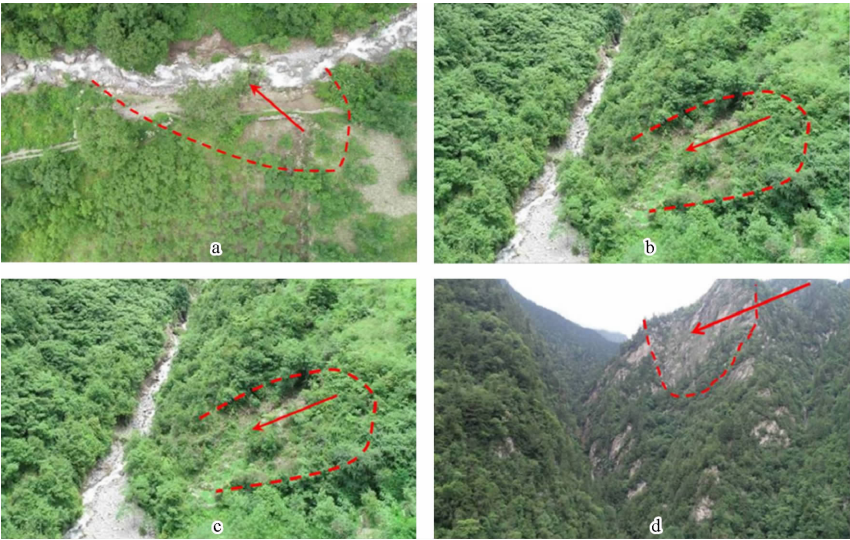


图 5 崩滑物源

(a. BH01 滑坡; b. BH02 滑坡; c. BH03 崩塌; d. BH04 崩塌)

Fig. 5 Loose solid materials induced by former collapse

(a. BH01 Landslide; b. BH02 Landslide; c. BH03 Collapse; d. BH04 Collapse)

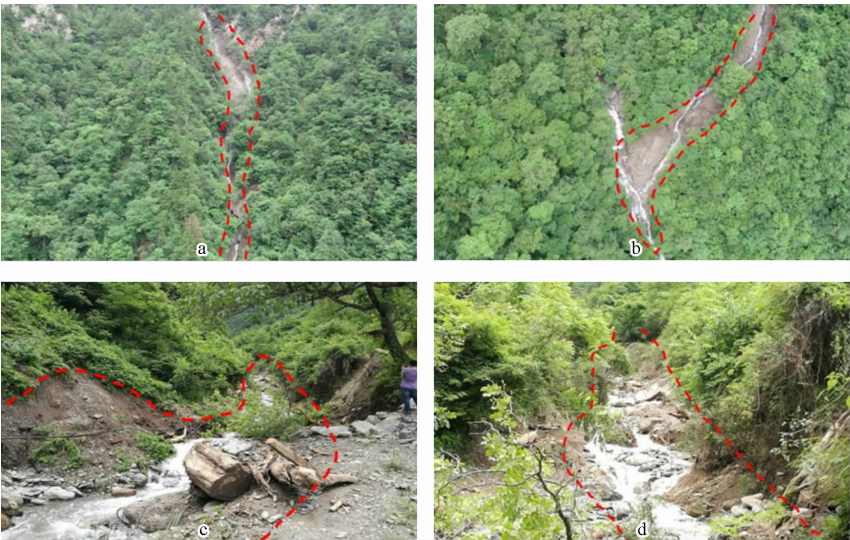


图 6 沟道堆积物

(a. 主沟上游沟道; b. 中上游 1#支沟与主沟交汇处; c. 主沟中游沟道; d. 主沟中下游沟道)

Fig. 6 Loose solid materials deposits in the gully bed

(a. Upstream of the gully bed; b. Intersection between 1# tributary and main gully;
c. Midstream of the gully bed; d. Middle and lower part of the gully bed)

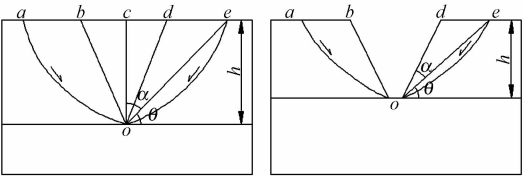


图 7 沟道堆积物源下切动储量计算模型简图

Fig. 7 Schematic diagram of dynamic reserve calculation model

其中, θ 为自然休止角, $^{\circ}$; h 为原沟床深度, m 。动储量体积为:

$$V = \Delta cod \times L \quad (2)$$

其中, V 为下切侵蚀动储量, m^3 ; L 为沟道堆积体长度, m 。

基于此模型计算可得, 西番沟沟道物源总量约

$20.85 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(3) 坡面侵蚀物源

据野外勘察,沟道中游两岸坡体植被稀疏、第四系松散覆盖层较厚,坡体结构松散。因此,在持续暴雨作用下,水土流失可能加剧,为泥石流提供物源。坡面侵蚀物源主要根据该地区的水土流失量进行计算,依据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007)规范要求,结合实地调查,分析自然条件、水土流失状况、土地类型、植被覆盖率、地质地貌等情况,确定该区的侵蚀强度。流域内水土流失主要分布在流通区,面积约 1.3 km^2 ,松散固体物源总量约 $52.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(4) 泥石流物源总量

西番沟流域三种主要物源的方量如 1 所示。经计算可得,西番沟流域物源总量为 $78.81 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。依据文献[16]可知,西番沟流域内可能参与泥石流运动的动储量约 $23.64 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。与文献[19]提出的物源总量及动储量计算方法相比,动储量值略微偏高。文献[20,21]在进行建模计算时,未考虑隐性物源(已发现物源参与泥石流活动后,周边一定范围的岩土体可能随之破坏,参与后续泥石流运动)的情况,物源总量及动储量的计算均有所偏低。本文的物源计算在模型计算基础上,结合现场勘查及隐性物源情况,确定总方量及动储量,计算结果更

接近实际。因此,西番沟流域可能参与泥石流的动储量确定为 $23.64 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2.2 震后临界雨量分析

据统计,震后泥石流起动的临界雨量较震前明显降低^[4]。与震前该区域泥石流发生的前期累积雨量(320~350 mm)与激发小时临界雨量(50~60 mm)相比,震后(2008 年 9 月 23 日~24 日),该区域泥石流发生的累积雨量(272.7 mm)和临界雨量(41.0 mm)较地震前都有所降低^[7]。据北川地区震后泥石流暴发特征,震后泥石流起动的前期累积雨量和小时雨强分别降低了 14.8%~22.1% 和 25.4%~31.6%^[7]。

九寨沟县属川西高原气候中的暖温带干温河谷气候,年最大降水量 750.2 mm,最小降水量仅 359.2 mm,据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》漳扎镇地区多年最大暴雨量、变异系数如表 2 所示。按 $C_s = 3.5C_v$ 得到不同频率下的模比系数及雨强值,统计如表 2 所示。

据吴积善等^[15,22]人的研究成果,四川山区泥石流激发雨量为:场次雨量大于 48 mm,或 10 min 雨量 8~12.2 mm,或 1 min 雨量 0.8~1.2 mm。如表 2 所示,研究区降雨丰沛且集中,10 min 雨量为 14.7 mm,满足了泥石流诱发的条件。

2.3 泥石流成因分析

根据陈宁生等^[23]对西部山区 50 余条沟道的调查统计得到的泥石流沟和粘性泥石流沟的判别指标,西番沟的松散固体物质量具备形成粘性泥石流的条件。西番沟沟道中、上游地形陡峻,沟谷纵坡大,为泥石流的发育提供了有利的地形地貌条件;流域内崩滑堆积体、沟底松散物质为其发生提供了丰富的固体物源条件;且降雨充沛、集中,为其发育提

表 1 西番沟泥石流物源汇总统计表

Tab.1 Summary of debris flow sources in Xifangou catchment

物源类型	方量/(10 ⁴ m ³)
崩滑物源	5.96
沟道堆积物	20.85
坡面侵蚀物源	52.00
合计	78.81

表 2 研究区不同频率下雨强值计算表

Tab.2 Rainfall intensity at different frequencies in the study area

频率 <i>P</i>	1/6 h 雨强				1 h 雨强				6 h 雨强				24 h 雨强			
	平均值 /mm	变异 系数	模比 系数	设计 雨强 /mm	平均值 /mm	变异 系数	模比 系数	设计 雨强 /mm	平均值 /mm	变异 系数	模比 系数	设计 雨强 /mm	平均值 /mm	变异 系数	模比 系数	设计 雨强 /mm
1%	7.8	0.53	2.87	11.86	14.7	0.55	2.96	23.93	23.5	0.5	2.74	32.20	33.5	0.43	2.44	35.15
2%			2.52	10.42			2.59	20.94			2.42	28.44			2.18	31.40
3%			2.05	8.47			2.09	16.90			1.99	23.38			1.84	26.51
4%			1.70	7.03			1.72	13.91			1.66	19.51			1.57	22.62

供了良好的水源和激发条件。综上,西番沟泥石流成因可总结如下:地震影响下,流域内坡体和岩土体结构都遭到破坏,物源显著增加;与震前相比,震后相同的雨量条件下泥石流爆发的可能性显著增大。泥石流发生前,区域普降暴雨,在强降雨过程中,随雨水入渗,岩土体强度大幅下降,且形成区坡度陡峭,松散岩土体在强降雨的激发作用下破坏起动,随着沿途(沟岸及沟道内)固体物质的不断补给,容重及规模不断增大,最终发展为泥石流。

灾害发生后,通过对西番沟流域详细勘察,发现目前沟道内可参与泥石流活动的动储量丰富(流域的地形条件在一定时期内相对较为稳定,沟道坡度大、地形陡峭),流域内固体物质再次累积并遭遇可激发泥石流的暴雨,将再次形成泥石流。在地震和连年降雨影响下,泥石流形成流通区松散固体物质会有所增加,尤其是崩滑体转化形成的沟道物源剧增,使得泥石流发育和发生的周期缩短。因此,应加强防范,降低泥石流造成的影响。

3 对策建议

根据西番沟流域情况及泥石流运动特征参数,对该沟采用工程措施进行治理,建议方案为:中游拦挡坝(2~3座)+已有防护堤加高+新建防护堤+已有防护堤的加固、加高+防冲肋槛。

(1)拦挡坝工程:拟在流通堆积区中下游布设2~3座拦挡坝,总库容满足1~2次50年一遇泥石流固体物源。

(2)已有防护堤加高:目前已建的防护堤被冲毁、淤满,建议充分考虑泥石流的弯道超高及防护安全高度进行加高。

(3)新建防护堤:拟布置于堆积区沟道左岸,目的是保护农田,同时可确保沟道的泥石流过流和泄洪能力。

(4)已有防护堤的加固、加高:对已建的、基础被掏蚀、已遭泥石流淤埋和翻越的防护堤进行加高、加固处理。

(5)防冲肋槛:布置于整个堆积区沟道,因堆积区沟道纵坡降较大,故按不同的坡降设置防冲肋槛,确保沟道两侧防护堤的安全。

(6)对以后工程建设中形成的边坡建议采用挡土墙等拦挡措施进行防护。

(7)加强群测群防建设,调动当地居民主动参与西番沟汛期监测巡查及防治工程维护等。

4 结论

西番沟泥石流流量约 $80\text{ m}^3/\text{s}$,一次泥石流总量约 $1.5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4\text{ m}^3$,流速约 $5.5 \sim 6\text{ m/s}$,为中等规模的低频率泥石流。泥石流成因为:地震作用破坏了流域内岩土体结构,产生了丰富的松散固体物质,震后泥石流启动的临界雨量大幅降低。泥石流发生前,在强降雨的影响下,岩土体强度大幅下降,松散岩土体破坏起动,固体物质不断补给,容重及规模不断增大,最终发展为泥石流。

目前沟道内可参与泥石流活动的动储量丰富,如遭遇可激发泥石流的暴雨,将可能再次形成泥石流。为减小泥石流灾害造成的影响,应加强群测群防建设,同时采取“中游拦挡坝(2~3座)、已有防护堤加高、新建防护堤、已有防护堤的加固、加高+防冲肋槛”的工程措施对该沟进行治理。

参考文献(References)

- [1] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 10-19. [CUI Peng, ZHUANG Jianqi, CHEN Xingchang, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan area after the earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(5): 10-19]
- [2] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. 山地学报, 2010, 28(3): 341-349. [TANG Chuan. Activity tendency prediction of rainfall induced landslides and debris flows in the Wenchuan Earthquake areas [J]. Mountain Research, 2010, 28(3): 341-349]
- [3] 梁京涛, 王军, 宋云, 等. 汶川震区典型泥石流动态演变特征研究——以绵竹市走马岭泥石流为例[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 318-325. [LIANG Jingtiao, WANG Jun, SONG Yun, et al. Temporal evolution of typical debris flows in Wenchuan earthquake areas: case study of Zoumaling—Gully debris flows in Mianzhu County [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(3): 318-325]
- [4] 唐川, 梁京涛. 汶川震区北川9.24暴雨泥石流特征研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(2): 751-758. [TANG Chuan, LIANG Jingtiao. Characteristics of debris flows in Beichuan epicenter of the Wenchuan Earthquake triggered by rain storm on September 24, 2008 [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(2): 751-758]
- [5] 崔鹏, 韦方强, 陈晓清, 等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对

- 策[J]. 中国科学院院刊, 2008, **23**(4): 317 - 323. [CUI Peng, WEI Fangqiang, CHEN Xiaoqing, et al. Geo-hazards in Wenchuan Earthquake area and countermeasures for disaster reduction [J]. Proceedings of the Chinese academy of sciences, 2008, **23**(4): 317 - 323]
- [6] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(12): 2585 - 2592. [HUANG Runqiu, LI Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan Earthquake on 12th May, 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(12): 2585 - 2592]
- [7] 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]
- [8] 游勇, 陈兴长, 柳金峰. 四川绵竹清平乡文家沟“8·13”特大泥石流灾害[J]. 灾害学, 2011, **26**(4): 68 - 72. [YOU Yong, CHEN Xingzhang, LIU Jinfeng. “8·13” extra large debris flow disaster in Wenjia Gully of Qingping township, Mianzhu, Sichuan Province [J]. Journal of Catastrophology, 2011, **26**(4): 68 - 72]
- [9] 魏鹏. 汶川地震石亭江地区地震地质灾害发育规律及成因机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010: 64 - 65. [WEI Peng. Study on regularity and formation mechanism of Wenchuan earthquake Shitingjiang area earthquake geological disasters [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010: 64 - 65]
- [10] Chih Ming Tseng, Ching Wee Lin, Colin P. Stark. Application of a multi-temporal, LiDAR-derived, digital terrain model in a landslide-volume estimation [J]. Earth Surface Process and Landforms, 2013(38): 1587 - 1600.
- [11] 韩用顺, 王晶, 吴森, 等. 汶川县震后潜在泥石流危险性评价研究[J]. 工程科学与技术, 2018, **50**(3): 158 - 168. [HAN Yongshun, WANG Ning, WU Miao, et al. Hazard Assessment on Potential Post-earthquake Debris Flows in Wenchuan County [J]. Engineering Science and Technology, 2018, **50**(3): 158 - 168]
- [12] 杨志华, 兰恒星, 张永双, 等. 强震区震后地质灾害长期活动性研究综述[J]. 地质力学学报, 2017, **23**(5): 743 - 753. [YANG Zhihua, LAN Hengxing, ZHANG Yongshuang, et al. RESEARCH ON PREVIEW LONG-TERM ACTIVITY OF POST-EARTHQUAKE GEOHAZARD IN STRONG SEISMIC-DISTURBED REGIONS [J]. Journal of geomechanics, 2017, **23**(5): 743 - 753]
- [13] 李德华. 汶川极震区 G213 典型泥石流内在因素与运动特征[J]. 四川地质学报, 2019, **39**(2): 319 - 325. [LIDehua. Internal factors and movement characteristics of Typical Debris Flow in the Yingxiu-Wenchuan Section of the G213 Line in the Wenchuan Meizoseismal Area [J]. Sichuan Geological Journal, 2019, **39**(2): 319 - 325]
- [14] 游勇, 欧国强, 吕娟, 等. 四川九寨沟县关庙沟泥石流及其防治对策[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, **23**(4): 50 - 55. [YOU Yong, OU Guoqiang, LV Juan, et al. Debris Flow Disaster and Its Control in Guan miao Gully in Sichuan Province [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, **23**(4): 50 - 55]
- [15] 谢洪, 钟敦伦, 矫震. 2008 年汶川地震重灾区的泥石流[J]. 山地学报, 2009, **27**(4): 501 - 509. [XIE Hong, ZHONG Dunlun, JIAO Zhen. Debris flow in Wenchuan Quake-hit Area in 2008 [J]. Mountain Research, 2009, **27**(4): 501 - 509]
- [16] 乔建平, 黄栋, 杨宗佑, 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 Jianping, HUANG Dong, YANG Zongji, et al. Statistical method on dynamic reserve of debris flow's source materials in meizoseismal area of Wenchuan Earthquake region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, **23**(2): 1 - 6]
- [17] 顾文韬, 裴向军, 裴钻, 等. 极震区震后泥石流物源特征研究[J]. 自然灾害学报, 2015, **24**(2): 107 - 114. [GU Wentao, PEI Xiangjun, PEI Zuan, et al. Research on post-seismic provenance features of debris flows in meizoseismal area [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, **24**(2): 107 - 114]
- [18] 方群生, 唐川, 王毅, 等. 汶川极震区泥石流流动储量与总物源量计算方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, **36**(6): 1008 - 1014. [FANG Qunsheng, TANG Chuan, WANG Yi, et al. A calculation method for predicting dynamic reserve and the total amount of material source of the debris flows in the Wenchuan Meizoseismal Area [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, **36**(6): 1008 - 1014]
- [19] 铁永波. 强震区城镇泥石流灾害风险评价方法与体系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009: 17 - 21. [TIE Yongbo. Study on risk assessment method and system of urban debris flow disaster in strong earthquake area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009: 17 - 21]
- [20] 杜榕恒, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987: 18 - 19. [DU Ronghuan, KANG Zhicheng, CHEN Xunqian, et al. Study on comprehensive investigation and control planning of debris flow in Xiaojiang river, Yunnan Province [M]. Chongqing: Science and Technology Literature Press, Chongqing Branch, 1987: 18 - 19]
- [21] 第宝锋, 陈宁生, 谢万银, 等. 罗坝街沟泥石流特征分析[J]. 山地学报, 2003, **21**(2): 216 - 222. [DI Baofeng, CHEN Ningsheng, XIEWanyin, et al. Character analysis of debris flow in Luobajie Gully [J]. Mountain Research, 2003, **21**(2): 216 - 222]
- [22] 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: 48 - 50. [WU Jishan, TIAN Lianquan, KANG Zhicheng, et al. Debris flow and its comprehensive control [M]. Beijing: Science Press, 1993: 48 - 50]

[23] 陈宁生,黄蓉,李欢,等.汶川5·12地震次生泥石流沟应急判别方法与指标[J].山地学报,2009,27(1):108-114. [CHEN Ningsheng, HUANG Rong, LI Huan, et al. Emergency judge

method and index of debris-flow sites triggered by 5·12 Wenchuan Earthquake [J]. Mountain Research, 2009, 27(1):108-114]

Investigation of Debris Flow in Xifangou, Jiuzhaigou County, China

WANG Fengniang^{1,2}, HE Na^{1,2,3}, CHEN Rong^{1,2}, CHEN Ningsheng^{1*}, AN Yandong⁴, GAO Jingli⁴

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China;

4. Sichuan Huadi Construction Engineering CO., LTD., Chengdu 610081, China)

Abstract: On August 8, 2017, a magnitude 7.0 earthquake happened in Jiuzhaigou county, Sichuan Province, China. This event had the potential to cause debris flows and pose significant challenges for disaster prevention and mitigation. Subsequently, a debris flow event occurred in Xifangou, Jiuzhaigou county on June 25, 2018. The characteristics and causes of this debris flow were investigated in detail, in order to assess the potential hazards created by earthquakes like that of August 8th, 2017 and to develop countermeasures. A thorough analysis of the study area suggested key parameters regarding debris flow movement and frequency. The analysis showed that the 2018 debris flow was a medium-scale, low-frequency, dilute debris flow that occurred only once in 50 years. The discharge volume, total volume and velocity of this debris flow were 80 m³/s, $1.5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4$ m³ and 5.5 ~ 6 m/s, respectively. A comprehensive analysis established the causes of the debris flow. Due to the impact of the 2017 earthquake, the volume of loose solid materials sharply increased, and the critical rainfall amount that can trigger a debris flow was therefore greatly decreased. A calculation model described in this paper was used to compute the total volume of loose solid materials and dynamic reserves in the study area. These were 78.81×10^4 m³ and 23.64×10^4 m³, respectively. Following further investigations we found that abundant loose solid material still existed in Xifangou basin. If heavy rainfall were to occur in this area, more debris flows can be triggered in the future. Given the features of the basin and local meteorological conditions, we have proposed the adoption of engineering and non-engineering (public participatory monitoring and warning system) measures to prevent future disasters and reduce potential negative impacts, and a successful implementation of such measures in the study area can provide a reference for prevention and mitigation of debris flow disasters after earthquake in other regions.

Key words: earthquake; debris flow; Jiuzhaigou; public participatory monitoring and warning system