

四川木里县项脚沟“7·5”特大型泥石流特征及发展趋势分析

杨华铨, 柳金峰, 孙昊, 赵万玉, 张文涛

Analysis of the characteristics and development trends of the “7·5” catastrophic debris flow in Xiangjiao gully, Muli County, Sichuan

YANG Huaquan, LIU Jinfeng, SUN Hao, ZHAO Wanyu, and ZHANG Wentao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202208011>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

泥石流致灾因子敏感性分析——以四川都江堰龙溪河流域为例

Sensitivity analysis of debris flow to environmental factors: a case of Longxi River basin in Dujiangyan, Sichuan Province

李彩侠, 马煜, 何元勋 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 32-39

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

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

青海某沟谷“8·21”泥石流发育特征及危险性评价

常文娟, 任光明, 李畅, 刘腾 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(6): 33-39



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202208011

杨华铨, 柳金峰, 孙昊, 等. 四川木里县项脚沟“7·5”特大型泥石流特征及发展趋势分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 100-107.

YANG Huaquan, LIU Jinfeng, SUN Hao, et al. Analysis of the characteristics and development trends of the “7·5” catastrophic debris flow in Xiangjiao gully, Muli County, Sichuan[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 100-107.

四川木里县项脚沟“7·5”特大型泥石流特征及发展趋势分析

杨华铨^{1,2,3}, 柳金峰^{1,2}, 孙昊^{1,2}, 赵万玉^{1,2,3}, 张文涛^{1,2,3}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 2021 年 7 月 5 日, 凉山州木里县项脚沟暴发特大型泥石流灾害。文章通过野外调查和特征参数计算, 研究了本次泥石流的形成条件、暴发过程和暴发特征。根据实地考察判断, 泥石流主要在森林火灾、短时强降雨和沟道地形条件等因素共同作用下暴发, 为暴雨径流冲刷引发的火后泥石流。暴雨形成的洪水冲刷坡面、侵蚀沟道, 导致沟道两岸坍塌滑坡, 堵溃效应明显, 泥石流规模扩大。项脚沟过火面积达 74.61%, 高烈度火烧区面积达 57.98%, 泥石流临界降雨强度为 77.84 mm/h, 累计降雨达 141.60 mm。根据泥石流特征参数计算结果, 此次泥石流密度范围为 1.83 ~ 1.93 g/cm³, 属黏性泥石流, 主沟下游出口流速为 7.22 m/s, 峰值流量 759.08 m³/s。结合雨洪法和形态调查法结果分析, 此次泥石流重现周期为百年一遇。结合泥石流发育趋势, 文章认为流域仍有可能暴发大型泥石流, 提出了上游固坡、中游调控、下游排导的防治建议。

关键词: 泥石流; 项脚沟; 形成条件; 特征分析; 防治建议; 四川木里县

中图分类号: P642.23; X43

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)01-0100-08

Analysis of the characteristics and development trends of the “7·5” catastrophic debris flow in Xiangjiao gully, Muli County, Sichuan

YANG Huaquan^{1,2,3}, LIU Jinfeng^{1,2}, SUN Hao^{1,2}, ZHAO Wanyu^{1,2,3}, ZHANG Wentao^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: On July 5, 2021, a catastrophic debris flow disaster occurred in Xiangjiao gully, Muli County, Sichuan Province. This study analyzed the formation conditions, eruption process and eruption characteristics of the debris flow through field investigation and characteristic parameter calculation. Based on the results of on-site inspection, this debris flow was mainly caused by the combined effects of forest fires, short-term heavy rainfall, and channel topography. It was a post-fire debris flow

收稿日期: 2022-08-05; 修订日期: 2023-04-17

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA23090403); 第二次青藏高原综合科学考察项目“重大泥石流灾害及风险”(2019QZKK0902)

第一作者: 杨华铨(1997—), 男, 广东湛江人, 岩土工程专业, 博士研究生, 主要从事山地灾害实验与防治工程研究。

E-mail: yanghq2019@qq.com

通讯作者: 柳金峰(1979—), 男, 安徽泾县人, 自然地理学专业, 博士, 研究员, 博导, 主要从事山地灾害实验与防治工程研究。

E-mail: liujf@imde.ac.cn

caused by rainfall runoff erosion. The heavy rain caused powerful flood erosion on the slope surface, eroded the channel, led to collapse and landslides on both sides of the channel, and resulted in significant damming effects, which enlarged the scale of the debris flow. The forest fire area in Xiangjiao gully reached 74.61%, and the high-intensity burned area was 57.98%. The critical rainfall intensity for this debris flow was 77.84 mm/h, and the cumulative rainfall was 141.60 mm. According to the calculation results of characteristic parameters, the density of this debris flow was in the range of 1.83 ~ 1.93 g/cm³, indicating it was a viscous debris flow. The flow velocity at the downstream outlet of the main channel was 7.22 m/s, and the peak flow rate was 759.08 m³/s. Combined with the results of the rainfall-runoff method and the morphology investigation method, the recurrence interval of this debris flow was estimated to be once in a hundred years. Considering the development trend of debris flow, it is believed that there is still a possibility of large-scale debris flow in the basin. Therefore, prevention and control suggestions including slope reinforcement in the upstream, regulation in the middle reach, and drainage in the downstream are proposed.

Keywords: debris flow; Xiangjiao gully; formation conditions; characteristics analysis; mitigation suggestions; Muli County, Sichuan

0 引言

森林火灾过后,植被焚毁、土壤结构破坏,火烧迹地出现松散物源增多、土壤渗透系数下降、易蚀性增大等特征,泥石流暴发频率激增,即使是非泥石流地区也容易暴发泥石流灾害^[1-3]。此类泥石流具有降雨阈值降低、暴发频率高、细颗粒含量增多等特征^[4-5]。凉山地区地形条件复杂,森林覆盖率高,气候条件特殊,森林火灾频发,而后在降雨作用下,泥石流次生灾害屡次暴发,严重威胁下游居民生命财产安全。

2020年3月28日,凉山州木里县项脚乡暴发森林火灾,严重破坏项脚沟流域中、上游植被,受森林火灾及山地地区短时强降雨共同激发作用,2020年6—7月,项脚沟各支沟多次暴发泥石流^[6]。2021年7月5日,凉山州木里县项脚乡遭受暴雨袭击,导致项脚沟再次暴发大规模泥石流,泥石流固体冲出物规模达 $162 \times 10^4 \text{ m}^3$,造成186间房屋不同程度受损,173头牲畜死亡,毁损通乡路2 km。

本文以“7·5”项脚沟特大型泥石流灾害为研究对象,通过野外调查、取样分析、参数计算等手段,分析本次泥石流形成条件、形成过程及运动特征,并提出了相应防灾减灾建议。

1 研究区域概况

项脚沟位于四川省木里县东南边缘,地处青藏高原东南缘,为小金河一级支流。流域类似“脚掌”形状,面积约为78.11 km²,主沟长约14 km,主沟纵长约7.85 km,平均纵坡降112‰,流域海拔1 880~4 180 m(图1)。项脚沟流域地势北高南低,属高山深切峡谷地貌。流域自上而下共发育10余条支沟,其中李子坪沟、甲尔沟

等支沟较发育,断面呈“U”字型;宋家沟、香樟湾沟等支沟,沟道狭窄陡峭,为典型的“V”字型沟道。

项脚乡位于流域下游,该乡共有居民约3 600人,主要沿主沟中下游分布,两岸居民的生产活动受泥石流灾害影响严重,主要通过沟道两侧防洪堤缓解泥石流灾害(图2)。

项脚沟流域属典型亚热带西南季风 and 高原气候,呈现出冷热两季交替、干湿两季分明,年温差小、日温差大、辐射强烈、无四季区分等气候特征,多年平均气温14.0℃,年均降雨量800~1 000 mm,集中在7—9月。地层以三叠系西康群及二叠系中统地层为主,石炭系、志留系亦有分布,岩性主要为变质砂岩、砂板岩、硅质板岩、大理岩及结晶灰岩夹层、碳质板岩、碳板岩、变质玄武岩及少量千枚岩^[5]。

2 泥石流形成条件

通过对项脚沟泥石流形成条件的研究分析,发现本次泥石流灾害主要受森林火灾所控制,即在森林火灾作用的基础上,受陡峭地形及短时强降雨共同作用而导致了这场特大型泥石流的暴发。

2.1 降雨条件

为研究本次降雨的降雨特征,本研究从中国气象数据网国家气象科学数据中心收集了相关降雨数据。图3为本次泥石流暴发前后最大降雨点的雨量统计图,从图3可见:影响本次泥石流的降雨是从7月4日19:00开始,到5日23:00结束;整个降雨过程可分为前后两场:第一场从4日19:00—5日06:00,共持续12 h,峰值降雨量为17.78 mm/h,累计降雨量达43.14 mm;第二场从5日16:00—23:00,共持续8 h,降雨峰值出现在19:00左右,峰值降雨量达77.84 mm/h,累计降雨量

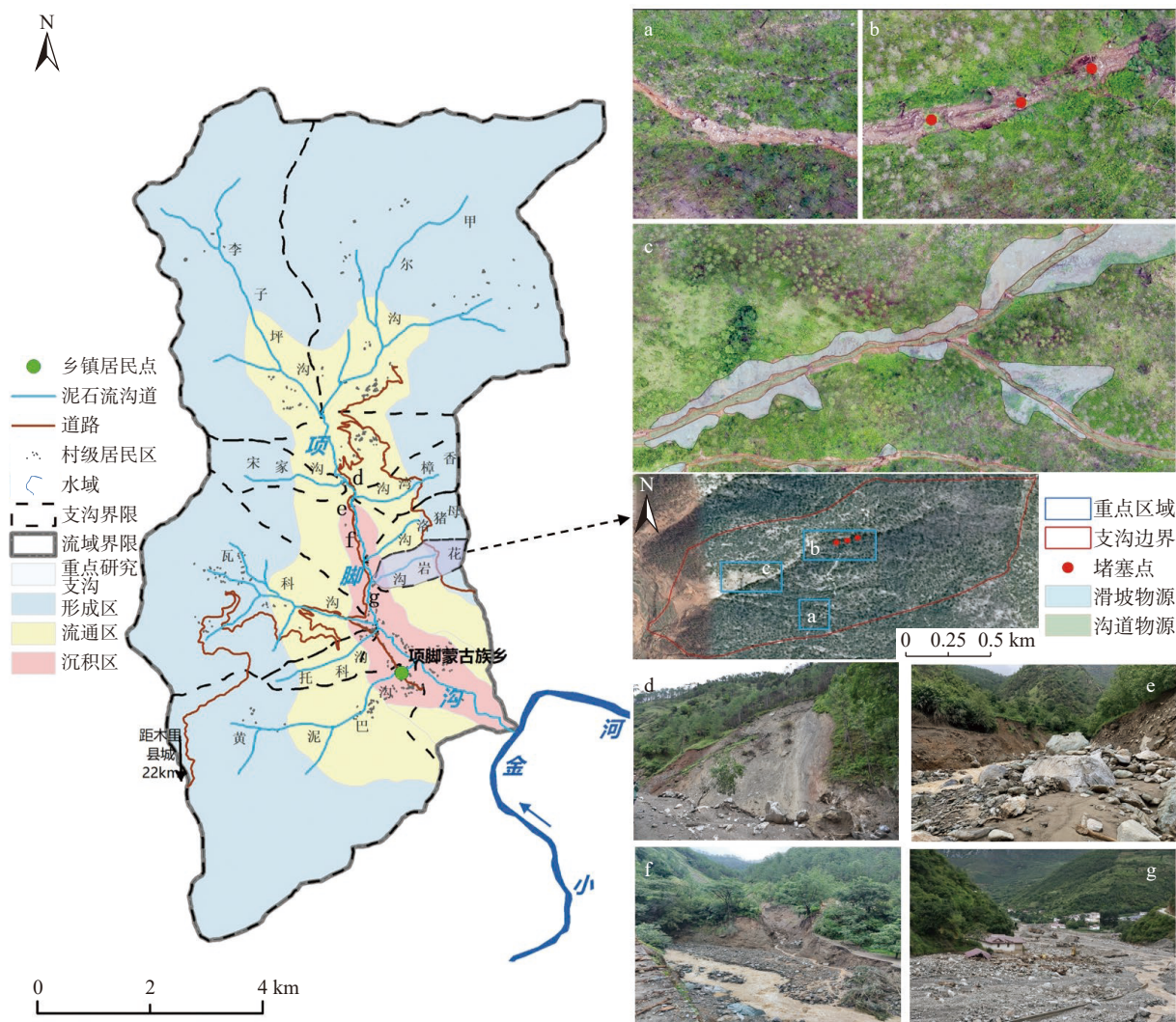


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

达 141.60 mm。从降雨强度分析,前场降雨强度小持续时间长,后场降雨强度大持续时间短,临界降雨强度达 77.84 mm/h,因此,本次泥石流由前期降雨和短时强降雨共同作用下暴发。

2.2 火灾作用

为探究此次森林火灾对项脚沟流域的破坏情况,文中选取了日期分别为 2020-03-20 和 2020-05-07 的两期 Landsat8 多光谱遥感影像进行解译,通过计算火烧前后植被差异归一化燃烧指数(NBR),并通过现场调查校核植被燃烧情况,将研究区火烧烈度划分未过火、轻度过火、中度过火和重度过火 4 个等级^[7-9],计算公式为:

$$NBR = \frac{(nir - swir)}{(nir + swir)} \quad (1)$$

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post} \quad (2)$$

式中: nir ——近红外光波段所占面积/ km^2 ;

$swir$ ——短波红外光波段所占面积/ km^2 ;

NBR_{pre} ——火灾前的归一化燃烧指数;

NBR_{post} ——火灾后的归一化燃烧指数。

遥感解译结果如图 4 所示,项脚沟流域受火灾破坏严重,过火面积达 74.61%,其中轻度过火区面积占比约 16.64%,中度过火区面积占比为 27.63%,重度过火区面积占比为 30.34%,即高烈度火烧区(中度过火区+重度过火区)面积达 57.98%。从分布情况上看,流域未过火和轻度过火区域主要分布于沟道下游、流域沟道地带及流域边缘的高海拔区域,对泥石流的暴发影响轻微;高烈度过火区主要分布于流域上游汇水区,地表草本、灌木皆被焚毁,大片乔木被焚毁倒伏,仅少量残留。由于土壤结构遭到破坏,坡面表层出现明显裸露灰烬泥沙松散层,因而高烈度过火区通常是火后泥石流坡面侵蚀



图 2 项脚沟下游区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the downstream area of Xiangjiao gully

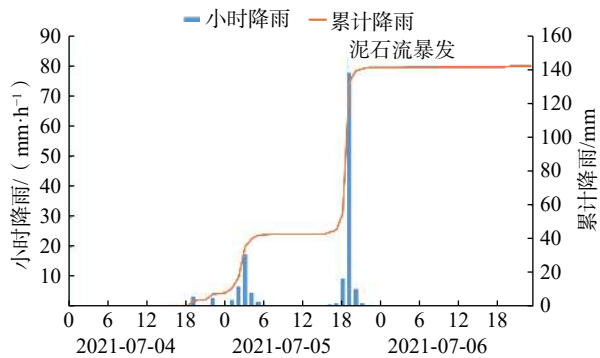


图 3 项脚沟泥石流累计降雨数据

Fig. 3 The accumulated rainfall data of debris flow in Xiangjiao gully

物源的主要供给区域^[10-11]。此外,高烈度火烧区内残留大量烧毁树干,这些枯枝的增加导致泥石流堵溃效应明显,泥石流流量激增,侵蚀作用强烈。因此,森林火灾导致植被缺失、枯枝数量增加,为本次特大型泥石流奠定了物质基础。

2.3 地形条件

项脚沟地形复杂,具有上陡下缓的特点。流域平均

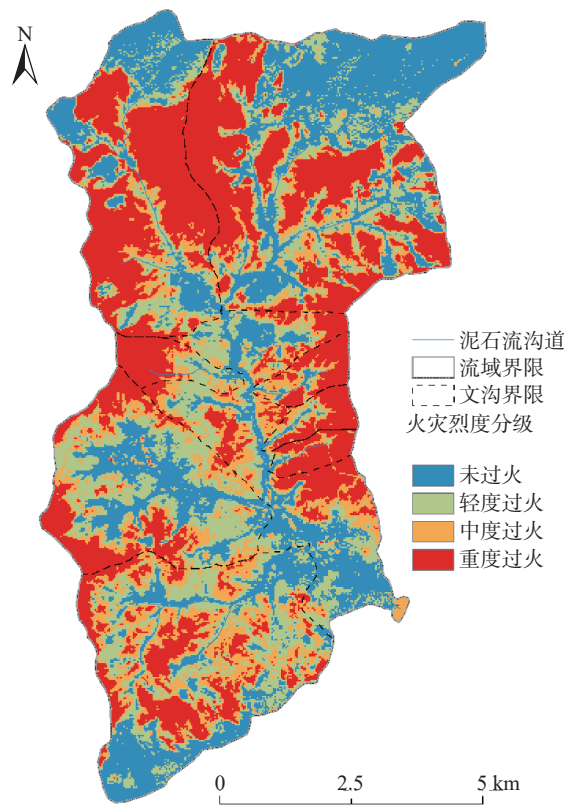


图 4 项脚沟流域火烧烈度分布情况

Fig. 4 Fire intensity distribution map of debris flow at Xiangjiao gully

坡度为 25.67°,陡峭坡面(15°~30°)占总面积 57.69%,极陡坡面(>30°)占总面积的 30.05%,主要分布各支沟上游形成一流通区,与高烈度火烧区基本重合。在耦合作用下,形成区坡面松散物质及烧毁倒伏树干极易在暴雨径流的冲刷下进入沟道,从而导致堵溃,扩大泥石流规模;同时,流通区沟床纵比降大、沟道狭窄,导致泥石流流速加快,侵蚀作用强烈,造成两岸失稳坍塌,进一步扩大泥石流规模。因此,流域陡峭地形为此次泥石流汇流、冲刷和侵蚀奠定了有利的动能基础。

2.4 物源条件

根据遥感解译和野外调查,本次泥石流的物源主要来自高烈度火烧区的灰烬泥沙松散层物质、早期崩滑堆积物源、历史泥石流沟道堆积物源及沟道侵蚀引发的岸坡崩滑物源等,物源类型:坡面侵蚀物源、崩滑型物源及沟道堆积型物源。如表 1 所示,项脚沟松散固体物质储量约为 $1\,351.39\times10^4\text{ m}^3$,其中可直接参与泥石流活动的动储量约为 $349.58\times10^4\text{ m}^3$,占总物源储量 25.9%,坡面侵蚀型物源动储量约为 $146.68\times10^4\text{ m}^3$,占总物源动储量 42%,崩滑型物源动储量约为 $113.88\times10^4\text{ m}^3$,占总物源动储量 32.6%。因此,坡面侵蚀型物源、崩滑型物源是本次项脚沟泥石流的主要物源补给来源。

表 1 项脚沟泥石流物源统计

Table 1 Statistical table of physical sources of debris flow in Xiangjiao gully

物源类型	总量/(10 ⁴ m ³)	动储量/(10 ⁴ m ³)
坡面侵蚀型物源	520.92	146.68
崩滑型物源	440.22	113.88
沟道堆积型物源	390.24	89.02
合计	1 351.39	349.58

3 泥石流暴发特征

3.1 泥石流形成过程及危害特征

雨后泥石流主要有两种启动方式:坡面径流冲刷和降雨入渗引起的浅层滑坡^[2-4]。通过野外实地调查,本次泥石流具有坡面径流冲刷引发的雨后泥石流特征,结合降雨过程,本次泥石流形成过程可以分为:雨水入渗阶段、坡面冲刷阶段、沟道侵蚀阶段和滑坡堵溃阶段。

雨水入渗阶段:此阶段降雨强度小,持续时间长,雨水下渗,坡面土体趋于饱和,孔隙水压增大,土颗粒摩擦剪力降低,土体强度降低。

坡面冲刷阶段:由于形成区地形陡峭,大量灰烬及松散物质分布,且前期降雨入渗导致土体结构性减弱,因此,此阶段暴雨径流冲刷坡面,裹挟坡面松散物质,并在低洼区域汇聚,侵蚀沟道,形成小冲沟(图 1a)。

沟道侵蚀阶段:此阶段暴雨径流继续冲刷下切,裹挟冲沟两岸物质,逐渐形成泥石流。冲沟物质在主沟上游汇聚后,流量与侵蚀能力激增,沟道下切严重,造成岸坡坍塌,大量崩滑物源与烧毁树干进入沟道,引起沟道堵塞,在沟内形成多处不稳定堰塞体(图 1b)。

滑坡堵溃阶段:在强降雨作用下,沟内多处堵塞体溃决,泥石流流量激增,岸坡侵蚀效应加剧,更大规模的岸坡坍塌导致大量滑坡物源进入泥石流中,扩大泥石流规模(图 1c)。

本次泥石流灾害对下游村寨破坏严重,泥石流沟床侵蚀强烈,导致沟道两岸形成大量坍塌滑坡,冲毁公路桥梁,导致交通中断(图 1d),主沟中下游沟道宽阔,坡度平缓,大量巨石、漂木散落分布(图 1e)。造成沟道下切、河道拓宽(图 1f)。泥石流堵塞中下游沟道,导致大量泥石流冲刷沟道两岸,冲毁下游大量房屋、农田(图 1g)。

3.2 泥石流堆积特征

在实地调查过程中发现,泥石流沉积区碎石块石含量较高(图 1e),最大块石长 3.5 m,宽 2.7 m,高 1.9 m,且大量烧焦树干、树枝散落分布,受火灾影响明显。从泥

石流沉积区(S1—S6)采集了 6 个泥石流样品(图 2),土样经过烘干、称重后,在室内实验室进行筛分,这些样品中的粗颗粒(>2 mm)含量比较高,占 65.3%~75.3%;细颗粒(<0.05 mm)占 1.3%~4.2%(表 2)。根据泥石流沉积样品的筛分试验结果,采用余斌^[12]公式计算本次泥石流容重(γ_d),公式如下:

$$\gamma_d = \gamma_0 + \gamma_v P_2 (P_{0.05})^{0.35} \quad (3)$$

式中: γ_d ——黏性泥石流的最小容重, 2.0 g/cm³;

γ_0 ——泥石流的最小容重, 1.5 g/cm³;

P_2 ——>2 mm 的粗颗粒的质量占比/%;

$P_{0.05}$ ——<0.05 mm 的细颗粒质量占比/%。

表 2 泥石流颗粒分布及容重计算表

Table 2 Summary of particle distribution and bulk density of debris flow at Xiangjiao gully

编号	P_2 /%	$P_{0.05}$ /%	γ_d /(g·cm ⁻³)
S1	75.3	1.3	1.831
S2	68.4	2.3	1.864
S3	70.5	1.8	1.848
S4	75.0	2.0	1.880
S5	65.3	4.2	1.930
S6	73.8	2.6	1.913

结果表明,泥石流容重范围为 1.831~1.930 g/cm³,属黏性泥石流。

3.3 泥石流运动特征计算

利用形态调查法实地调查中在下游沉积区测量了 5 个泥痕断面(图 2),这些断面分布代表了主沟及下游 4 条主要支沟出口处的泥石流运动特征。采用黏性泥石流公式计算流速(V_c),形态调查法计算本次泥石流流量(Q_c)^[12-16]:

$$V_c = \frac{1}{n} R_c^{2/3} I_c^{1/2} \quad (4)$$

$$Q_c = V_c S_c \quad (5)$$

式中: V_c ——泥石流断面平均流速/(m·s⁻¹);

$1/n$ ——粗糙度系数;

R_c ——计算断面水力半径/m;

I_c ——水力坡降;

Q_c ——断面泥石流峰值流量/(m³·s⁻¹);

S_c ——泥石流实测断面面积/m²。

利用雨洪法主要计算主沟下游出口处流量(断面 D1),通常假定某一重现周期的泥石流洪峰流量(Q_c)与暴雨洪水的重现周期一致,从而计算出相应的泥石流洪峰流量^[17],相关公式如下:

$$Q_w = 0.278\psi iF = 0.278\psi \frac{S}{t^n} F \tag{6}$$

$$Q_{cc} = (1 + \varphi)Q_w D_w \tag{7}$$

式中, Q_w ——清水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);
 ψ ——洪峰径流系数;
 i ——最大平均暴雨强度/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$);
 F ——集水面积, 取 54.7 km^2 ;
 s ——暴雨雨力/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$);
 n ——暴雨公式指数;
 t ——流域汇水历时/h;
 D_w ——堵塞系数, 考虑到火灾扰动作用及岸坡崩塌滑坡对沟道的堵塞情况, 堵塞系数取值在 $2.1 \sim 2.5$ 。
 φ ——泥石流泥沙修正系数, 公式如下:

$$\varphi = (\gamma'_c - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma'_c) \tag{8}$$

式中: γ'_c ——不同重现周期下的泥石流重度/($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$);
 γ_w ——清水容重, 取 1.0 t/m^3 ;
 γ_H ——泥石流固体物质容重/($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)。

计算结果如表 3、表 4 所示, 根据形态调查法结果, 各断面流速(V_c)较高, 介于 $7.22 \sim 8.44 \text{ m/s}$, 说明沟道上游地形为泥石流的暴发提供充足动能; 峰值流量(Q_c)为 $110.28 \sim 759.08 \text{ m}^3/\text{s}$, 说明在充足水动力作用下, 泥石

流侵蚀作用强烈, 侵蚀坡面物质、造成沟岸坍塌, 进而裹挟大量物质形成大型泥石流。结合形态调查法和雨洪法计算结果, 主沟下游出口处流量(断面 D1)的峰值流量对应重现周期为百年一遇。

4 泥石流发展趋势及防治对策建议

本次泥石流为火后由暴雨径流侵蚀沟道所引发的泥石流, 此类泥石流常常在火灾过后 $2 \sim 3 \text{ a}$ 内, 植被及土壤疏水性恢复到原来水平前暴发^[18-22]。在野外调查中发现, 目前流域内地表植被正逐步恢复, 考虑到地表植物对土壤具有固结能力, 且火灾后暴发的多次泥石流灾害对灰烬层松散物质的消耗, 可以推测未来流域土体结构将逐渐变强, 坡面侵蚀效应逐渐减弱。此外, 由于各次泥石流对沟道的强烈侵蚀作用, 造成主沟上游及支沟沟道内出现大量崩滑型物源, 同时为后续沟道两侧松散物源失稳滑坡提供了有利的临空条件。因此, 结合项脚沟泥石流的发展趋势及发育特征, 可以推测流域未来的主要物源补给方式将会从坡面侵蚀物源转化为崩滑型物源。考虑到主沟上游及支沟沟道内仍存在大量坡面侵蚀物源和沟岸崩滑物源残留, 流域内物源动储量达 $349.58 \times 10^4 \text{ m}^3$, 在一定的降水条件下, 项脚沟仍有再次暴发大型泥石流的可能, 对沟道下游居民的生命财产安全造成威胁。

因此, 为保证项脚乡下游居民生命财产安全, 缓解项脚沟泥石流危害, 结合项脚沟泥石流的发展趋势, 建议采用综合减灾措施, 在上游形成区通过撒播草种、修建生物谷坊工程等措施, 控制坡面侵蚀、抑制泥石流启动; 在主沟流通区通过修建透过型拦砂坝、挡土墙等工程措施, 稳定河道和边坡, 控制流水侵蚀, 减少泥石流流量; 在下游防护堤的基础上修建排导槽, 提高下游沟道泥石流泄洪能力。

5 结论

- (1)基于对此次泥石流形成条件的调查研究, 此次泥石流的临界降雨强度为 77.84 mm/h , 森林火灾过火面积达 74.61% , 高烈度火烧区面积达 57.98% , 且与陡峭坡面相重合, 因此本次泥石流主要由森林火灾、陡峭地形及强降雨共同作用下暴发。
- (2)结合降雨特征和野外调查结果, 可判断此次泥石流为暴雨径流冲刷引发的火后泥石流, 其形成过程可分为雨水入渗阶段、坡面冲刷阶段、沟道侵蚀阶段和滑坡堵溃阶段。
- (3)由于森林火灾的扰动, 项脚沟泥石流发育, 流域

表 3 泥石流运动特征参数
Table 3 Summary of the movement characteristics parameters of debris flow

名称	$V_c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$1/n$	R_c/m	I_c	S_c/m^2	$Q_c/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
D1	7.22	13	2.10	0.115	105.10	759.08
D2	8.17	13	1.51	0.229	13.50	110.28
D3	8.44	13	1.53	0.239	13.93	117.64
D4	7.34	13	1.72	0.155	22.02	161.64
D5	7.32	13	1.70	0.156	28.16	206.09

表 4 不同重现周期下断面 1 流量
Table 4 Flow rate at cross-section #1 under different recurrence frequencies

参数	频率/%			
	0.5	1	2	5
t/h	4.21	4.33	4.48	4.72
n	0.79	0.79	0.79	0.78
$s/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	52.36	48.18	43.78	37.62
ψ	0.90	0.89	0.87	0.85
D_w	2.50	2.30	2.20	2.10
$\gamma'_c/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	1.95	1.86	1.78	1.67
φ	1.35	1.10	0.90	0.68
$Q_w/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	176.49	157.42	137.72	112.06
$Q_c/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	1 037.90	760.07	574.25	395.28

内存有大量松散物质,松散固体物质储量约为 $1\,351.39 \times 10^4 \text{ m}^3$,动储量约为 $349.58 \times 10^4 \text{ m}^3$,坡面侵蚀型物源动储量约为 $146.68 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总物源动储量 42%;说明森林火灾对泥石流的物源供给条件影响显著。

(4)本次泥石流容重范围为 $1.831 \sim 1.930 \text{ g/cm}^3$,为黏性泥石流,各断面流速在 $7.22 \sim 8.44 \text{ m/s}$,峰值流量在 $110.28 \sim 759.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 。结合雨洪法和形态调查法结果分析,本次泥石流重现周期为百年一遇。

(5)基于对项脚沟泥石流的发展趋势及发育特征的研究,认为流域未来的主要物源补给方式将会从坡面侵蚀物源转化为崩滑型物源,且仍有可能暴发大型泥石流,结合流域现状,提出了上游固坡、中游调控、下游疏导的防治建议。

参考文献(References):

- [1] STOOFF C R, VERVOORT R W, IWEMA J, et al. Hydrological response of a small catchment burned by experimental fire [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(2): 267–285.
- [2] CANNON S, GARTNER J E, RUPERT M, et al. Emergency assessment of debris-flow hazards from basins burned by the grand prix and old fires of 2003, southern California [J]. U. S. Geological Survey, 2003.
- [3] WALL S A, ROERING J J, RENGERS F K. Runoff-initiated post-fire debris flow western Cascades, Oregon [J]. *Landslides*, 2020, 17(7): 1649–1661.
- [4] 张绍科, 胡卸文, 王严, 等. 四川省冕宁县华岩子沟火后泥石流成灾机理 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 79–85. [ZHANG Shaoke, HU Xiewen, WANG Yan, et al. Disaster mechanism of post-fire debris flow in Huayanzi gully, Mianning County, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 79–85. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 胡卸文, 王严, 杨瀛. 火后泥石流成灾特点及研究现状 [J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6): 1562–1573. [HU Xiewen, WANG Yan, YANG Ying. Research actuality and evolution mechanism of post-fire debris flow [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1562–1573. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 殷万清, 曹希超, 胡卸文, 等. 木里县项脚沟火后泥石流发育特征及应急处置对策 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2021, 32(1): 12–17. [YIN Wanqing, CAO Xichao, HU Xiewen, et al. Development characteristics of post-fire debris flow and emergency response measures in Xiangjiao township, Muli [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2021, 32(1): 12–17. (in Chinese with English abstract)]
- [7] KEY C H, BENSON N C. Landscape Assessment (LA) Sampling and Analysis Methods [M]. Washington, D.C: USDA Forest Service, 2005.
- [8] 王晓莉, 王文娟, 常禹, 等. 基于NBR指数分析大兴安岭呼中森林过火区的林火烈度 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 967–974. [WANG Xiaoli, WANG Wenjuan, CHANG Yu, et al. Fire severity of burnt area in Huzhong forest region of Great Xing'an Mountains, northeast China based on normalized burn ratio analysis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4): 967–974. (in Chinese with English abstract)]
- [9] MILLER J D, THODE A E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(1): 66–80.
- [10] 王严, 胡卸文, 金涛, 等. 火后泥石流形成过程的物源启动模式研究 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(6): 1415–1423. [WANG Yan, HU Xiewen, JIN Tao, et al. Material initiation of debris flow generation processes after hillside fires [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(6): 1415–1423. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 黄健, 胡卸文, 金涛, 等. 四川西昌“3·30”火烧区响水沟火后泥石流成灾机理 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(3): 15–22. [HUANG Jian, HU Xiewen, JIN Tao, et al. Mechanism of the post-fire debris flow of the Xiangshui gully in “3·30” fire area of Xichang, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 15–22. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究 [J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 789–796. [YU Bin. Research on the calculating density by the deposit of debris flows [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 789–796. (in Chinese)]
- [13] 周必凡. 泥石流防治指南 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. [ZHOU Bifan. Guide to debris flow prevention and control [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)]
- [14] 中华人民共和国国土资源部. 泥石流灾害防治工程勘察规范: DZ/T 0220—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of geological investigation for debris flow stabilization: DZ/T 0220—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)]
- [15] 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 Xingchang, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 丰强, 唐川, 陈明, 等. 汶川震区绵虬镇“8·20”登溪沟

- 泥石流灾害调查与分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 51–59. [FENG Qiang, TANG Chuan, CHEN Ming, et al. Field investigation and research on debris flow on August 20, 2019 in Mianshi town, epicenter of Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(1): 51–59. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王东伟, 游勇, 李道凌, 等. 汶川县绵虬镇板子沟“8·20”大型泥石流堵河特征及危害性预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 58–66. [WANG Dongwei, YOU Yong, LI Daoling, et al. The river blockage characteristics of “8·20” large-scale debris flow and the hazard prediction in Banzi gully in Miansi Town, Wenchuan County [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 58–66. (in Chinese with English abstract)]
- [18] DOERR S H, SHAKESBY R A, WALSH PD R, et al. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance [J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 51(1/2/3/4): 33–65.
- [19] KEAN J W, STALEY D M, CANNON S H. In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(F4): F04019.
- [20] SANTI P M, MORANDI L. Comparison of debris-flow volumes from burned and unburned areas [J]. *Landslides*, 2013, 10(6): 757–769.
- [21] 铁永波, 张宪政, 卢佳燕, 等. 四川省泸定县Ms6.8级地震地质灾害发育规律与减灾对策[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 1–12. [TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, LU Jiayan, et al. Characteristics of geological hazards and it's mitigations of the Ms6.8 earthquake in Luding County, Sichuan Province [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 1–12. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 朱渊, 余斌, 亓星, 等. 地形条件对泥石流发育的影响: 以岷江流域上游为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(1): 268–277. [ZHU Yuan, YU Bin, QI Xing, et al. Topographical factors in the formation of gully type debris flows in the upper reaches of Minjiang River [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(1): 268–277. (in Chinese with English abstract)]