

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-08

喜德县中坝村火后泥石流发育特征及预警避险

殷万清¹, 金涛², 胡卸文², 曹希超², 杨相斌², 黄健²

(1. 凉山州地质环境监测站, 四川西昌 615000; 2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 610031)

摘要:2020年5月7日四川省凉山彝族自治州喜德县鲁基乡中坝村发生森林火灾,过火面积约6.7 km²。林火后火烧迹地坡面灰烬厚约2~6 cm,同时表层土壤结构被扰动,在6月4日傍晚20 min左右的强降雨下,中坝村后山4条沟道同时暴发了火后泥石流灾害,对沟口的41户164名居民构成严重威胁。通过遥感解译、野外调查,查明了火烧区4条沟道的火烈度及物源分布特征,分析了火后泥石流的发育特征,并进行了危险度评估。基于火后泥石流暴发降雨阈值、实时雨量监测数据与群测群防于一体,提出了一套适用于山区火后泥石流的预警避险方案,在该沟得到成功应用,并确保了沟口居民安全。

关键词:喜德县;火后泥石流;发育特征;预警避险

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)03-0061-09

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

YIN Wanqing¹, JIN Tao², HU Xiewen², CAO Xichao², YANG Xiangbin², HUANG Jian²

(1. Geological Environment Monitoring Station, Liangshan Autonomous Prefecture, Xichang, Sichuan 615000, China;

2. Faculty of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: On May 7, 2020, a forest fire broke out in Zhongba Village, Luji Township, Xide County, Liangshan Yi Autonomous Prefecture, Sichuan Province, covering an area of about 6.7 km². After the forest fire, the ash on the slope was about 2~6 cm thick, and the surface soil structure was disturbed. Under the heavy rainfall of about 20 min in the evening of June 4, the post-fire debris flow disaster broke out in the four gullies at the back mountain of Zhongba Village, which is a great threat to the 164 residents of 41 households in the gully mouth. Through remote sensing interpretation and field investigation, the fire intensity and deposit distribution characteristics of four gullies in the burned area are identified, the development characteristics of post-fire debris flow in Zhongba Village, Xide County are analyzed, and the risk assessment is carried out. Based on the real-time rainfall data obtained from group survey and group prevention, a set of early-warning and risk avoidance scheme for debris flow in mountain areas after fire is proposed, which has been verified by this example.

Keywords: forest fire; post-fire debris flow; developmental characteristics; early-warning and risk avoidance

收稿日期: 2020-06-22; 修订日期: 2020-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助(41731285; 41672283)

第一作者: 殷万清(1964-),男,矿产系矿山地质专业,高级工程师,主要从事地质灾害、环境地质方面的技术管理与研究工作。E-mail: 371113039@qq.com

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

0 引言

森林火灾是林区常见自然灾害,其不仅对生态环境质量和人类健康安全构成严重威胁,且火烧迹地在降雨条件下,极易发生泥石流灾害,这种与林火密切相关的泥石流通常被称为“火后泥石流”(post-fire debris flow)^[1-3]。火烧迹地发生泥石流的概率会大幅度提高,CANNON等^[4]2000年对加利福尼亚南部86个火烧迹地调查发现,约35%的火烧迹地会发生火后泥石流灾害,CANNON等^[5]2001年得出约40%(37/95)的火烧迹地发生了泥石流灾害。与常规泥石流相比,火后泥石流呈现集中高频暴发^[6]、降雨阈值极低^[7-8]、受到火烧严重程度^[9]的影响等特点^[10],且起动机理也有显著区别,SANTI等^[11]2008年发现火后泥石流主要由地表径流引发,GABET等^[12]2008年也指出森林植物灰烬具有提高地表径流容积和运输能力的作用,任云^[13]2018年基于Fuzzy-AHP建立了适用于火后泥石流的危险性评价模型。由于火后泥石流独特的发育特征与成灾机理,常规泥石流的危险性评价模型和预警避险方案适用性较差,因此建立针对火烧区火后泥石流的降雨阈值,在此基础上形成基于火后泥石流暴发降雨阈值、实时雨量监测数据与群测群防于一体的预警避险方案,对火后泥石流科学防灾具有重要意义。

1 喜德县中坝村火烧区概况

1.1 地质环境特征

喜德县地处川西高原南段,属典型亚热带西南季风和高原气候,呈现出既有高原干燥气候、又有充沛降雨的特点。区内年平均气温约14.1℃,多年平均降雨量1000mm,日最大降雨量164.3mm。5—10月为雨季,降水过程多为强降雨、连阴雨、多夜雨,雨季降雨量占全年总降雨量的93%左右,且山区气候垂直分带十分明显,海拔每增高100m,降雨量增加约30mm。

发生于2020年5月7日森林火灾区位于凉山州喜德县鲁基乡中坝村一组(图1),地势北高南低,山岭海拔2050~3505m,山区地形切割深度较浅,属构造侵蚀低中山地貌区。岩性主要为花岗岩为主,第四系全新统残坡积层主要为含块(碎石)的粉质黏土。区内因白昼以及垂直高度不同气温变化较大,地表风蚀作用强烈,岩石风化十分严重。

1.2 火烈度特征及空间分布

火烧区植被类型以云南松和常绿阔叶林为主,火灾后火烧迹地植被遭受严重破坏,覆盖率明显降低,采用多光谱遥感数据中两个波段所构建的监测指数如dNBR(the delta Normalized Burn Ratio)可以准确核算森

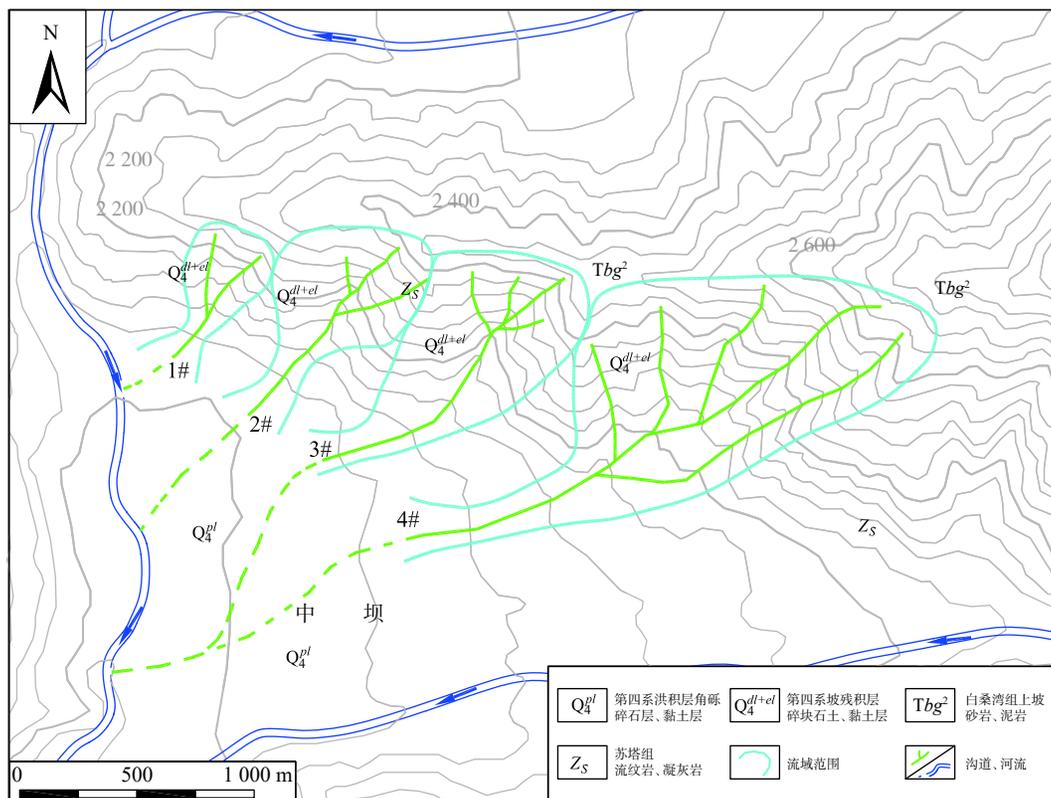


图1 2020年5月7日喜德森林火灾火烧区平面示意图

Fig. 1 Plane diagram of forest fire and fire area in Xide County on May 7, 2020

林火烧地区的过火面积、边界及火烧程度^[14-16]。本文通过 Envi 软件对事发地火烧前后(分别是 2020 年 4 月 1 日及 2020 年 5 月 12 日)多光谱卫星遥感图像(20 m 精度)进行解译,并结合现场调查情况判断火烧面积、边界及不同区域的火烧强烈程度。火烈度遥感解译后的图像通过软件处理,可统计出火烧迹地范围内不同火烈度区面积占比,以及每条沟道流域内高烈度火烧区(中度及重度火烈度区)的面积占比。

基于 PERSON 等^[17]提出的不同强度火烧判别特征表 1,对中坝村后山火烧迹地不同火烈度区域通过遥感图像解译并结合现场实地调查,根据火烧迹地植被被毁程度、灰烬层厚度等特征,将火烧迹地的林火烈度分为重度、中度、轻度与未火烧四个等级。

表 1 中坝村后山火烧迹地不同强度火烈度判别特征
Table 1 Distinguishing characteristics of fire intensity of different intensity in Zhongba Village burned area

火强度	特点
未火烧	火烧前后地表覆盖物无变化
轻度火烧	超过50%的枯枝落叶未完全燃烧
中度火烧	大部分枯枝落叶被烧毁,但是大部分粗可燃物未完全燃烧
严重火烧	枯枝落叶和粗可燃物均被完全烧毁,地表为灰烬覆盖

根据火烈度判别标准,中坝村后山火烧迹地不同火烈度分区及相应重度、中度、轻度与未火烧区,各分区见图 2、图 3。

结果表明,中坝村后山森林火灾总过火面积约 6.7 km²,其中重度火烧区占比 65.93%、中度火烧区占比 19.76%、轻度火烧区占比 14.31%,中坝村后山 1#~4#沟流域内中度及重度火烧区面积占比均超过 90%(表 2)。

2 火后泥石流发育特征

2.1 2020 年“6·4”火后泥石流致灾情况

2020 年 6 月 4 日下午,四川省凉山州喜德县鲁基乡突降暴雨,十分钟最大降雨量 11.7 mm,小时最大降雨量 15.4 mm,日降雨量 26.3 mm,短时强降雨导致中坝村后山季节性冲沟沟道水位暴涨,暴发山洪,进而引发泥石流灾害。泥石流沿着沟谷冲出,冲毁农田并淤埋沟口房屋。此次中坝村共 4 条沟道暴发火后泥石流,自西向东分别为 1#、2#、3#、4#泥石流沟,冲出总规模 3.26×10⁴ m³,造成直接经济损失 70 万元,土地受损 4.99×10⁴ m²,房屋受损 4 户 12 间,其中 1 户受损严重(图 4),受灾人口 41 户 164 人。由于驻村第一书记及时预警,泥石流发生

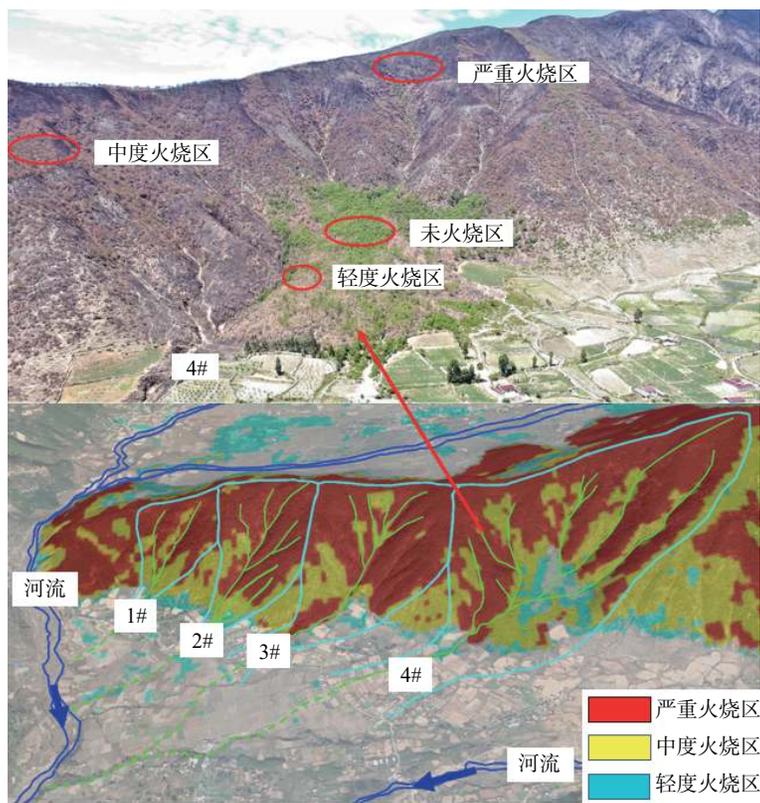


图 2 中坝村后山森林火灾火烧区不同火烈度分区图

Fig. 2 Zonal chart of different fire intensity in Zhongba Village forest fire area

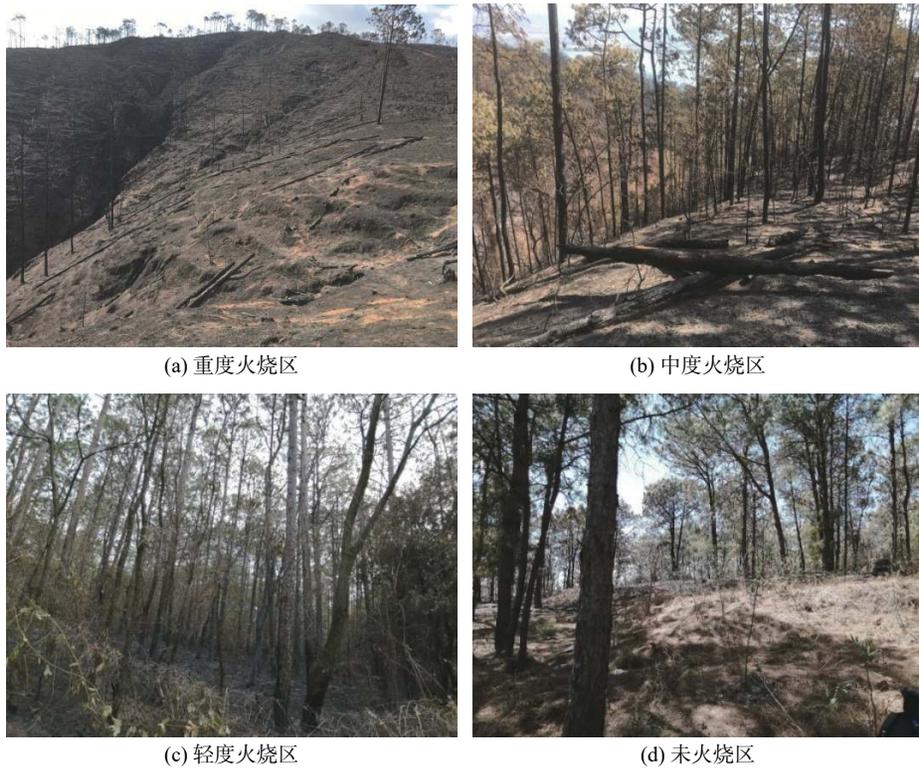


图 3 中坝村后山森林火烧区不同火烈度部位典型照片

Fig. 3 Typical photos of different fire parts in the forest fire area of Zhongba Village

表 2 中坝村森林火烧区不同火烈度面积占比数据统计

Table 2 Statistics on the proportion of different fire intensity areas in the forest fire area of Zhongba Village

/%

火烧区	轻度火烈度区面积占比	中度火烈度区面积占比	重度火烈度区面积占比	中度及重度火烈度区面积占比
整个火烧迹地	14.31	19.76	65.93	85.69
1#沟	2.11	26.56	69.41	95.97
2#沟	3.69	16.94	78.37	95.32
3#沟	3.18	18.51	74.78	93.28
4#沟	7.36	26.52	63.82	90.33



图 4 中坝村火后泥石流冲毁沟口民房

Fig. 4 Post-fire debris flow in Zhongba Village destroyed the dwelling houses

2.2 火后泥石流形成条件

2.2.1 地形特征

中坝村 4 条火后泥石流沟道均为窄陡型, 沟底平均宽度 2.5 ~ 3.0 m, 两侧岸坡较陡多为 35° ~ 50°, 沟谷形态呈“V”字型, 沟道平均纵坡降较大, 且沟域中上游区段地势较陡, 跌水陡坎发育, 下游区段地势较缓。清水区汇水区面积约占整个沟域的 80%, 下游段汇水区域较小, 整体流域形态呈“叶片状”(表 3)。上宽下窄、上陡下缓的沟道特征, 使得降雨过程中极易呈现“漏斗状”汇流, 以极快的速度席卷沟道内丰富的物源形成泥石流灾害。

2.2.2 物源特征

现场调查显示, 中坝村后山 1# ~ 4#流域内物源主要分为三类: 坡面侵蚀物源、崩滑物源、沟道堆积物

前 10 分钟, 受威胁农户在帮扶队员和乡、村、组干部的组织下迅速疏散转移, 得以成功避险, 未造成人员伤亡。

表 3 火烧区 4 条泥石流沟形态特征统计

Table 3 Morphological characteristics statistics of 4 debris flow ditches in burned area

沟道编号	流域面积/km ²	主沟长/km	主沟纵坡比降/‰	相对高差/m	岸坡坡度/(°)	沟谷形状
1#	0.13	0.652	450	244	40 ~ 50	“V”形
2#	0.23	0.893	429	317	40 ~ 50	“V”形
3#	0.36	1.040	360	326	35 ~ 45	“V”形
4#	0.73	2.090	311	395	35 ~ 45	“V”形

源。坡面侵蚀物源主要分布于沟道中上游, 其中因植被烧毁堆积于坡面的灰烬层是火后泥石流的标志性物源之一, 见图 5(a), 也是构成首次火后泥石流的主要补给物源, 由于坡面汇流条件及火烧迹地土体性质的改变, 大量坡面侵蚀物源在坡面径流作用下运移堆积, 则成为第二次、第三次火后泥石流的主要启动物源。沟道物源主要分布于流域中上游区段, 以碎块石、残枝树干以及灰烬松散物为主, 见图 5(b), 块石粒径一般 10 ~ 30 cm, 较大者粒径达 1.0 ~ 1.5 m, 巨石堆积于沟道中, 造成过流断面减小, 易堵塞沟道, 堵塞溃决后放大泥石流规模。崩滑物源主要分布在沟道中下游两岸, 由于沟道下切作用, 水流冲刷坡脚, 造成两侧岸坡失稳, 形成小范围滑塌堆积于沟道。统计显示(表 4), 1#沟物源静储量约 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 动储量约 $0.71 \times 10^4 \text{ m}^3$; 2#沟物源静储量约 $10.23 \times 10^4 \text{ m}^3$, 动储量约 $1.65 \times 10^4 \text{ m}^3$; 3#沟物源静储量约 $15.57 \times 10^4 \text{ m}^3$, 动储量约 $2.47 \times 10^4 \text{ m}^3$; 4#沟物源静储量约 $35.95 \times 10^4 \text{ m}^3$, 动储量约 $5.08 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

表 4 火烧区各泥石流沟动、静储量统计

Table 4 Statistics of dynamic and static reserves of debris flow gully in burned area

沟号	物源储量				总计
	崩滑物源	沟道物源	坡面侵蚀物源	静储量	
1#沟	1.10	0.20	3.20	4.50	
	0.33	0.06	0.32	0.71	
2#沟	1.60	0.23	8.40	10.23	
	0.48	0.07	1.10	1.65	
3#沟	1.32	0.25	14.00	15.57	
	0.39	0.08	2.00	2.47	
4#沟	0.75	0.20	35.00	35.95	
	0.22	0.06	4.80	5.08	

从物源分布看, 各物源无明显集中分布的趋势。从物源数量看(图 6), 4 条沟道坡面侵蚀物源均为主要物源, 1# ~ 4#沟坡面侵蚀物源占各沟总物源比例分别为 71.1%、82.1%、89.9%、97.4%。森林过火后坡面侵蚀物源的急剧增加, 残枝树干及巨石等沟道堆积物造成的堵塞溃决, 沟道侧蚀导致岸坡失稳提供物源补给, 都为中坝村“6·4”泥石流的孕育和发生提供了有利条件。

2.2.3 水源条件

根据《中国暴雨参数统计图集》(2006 年版), 中坝村区域 10 min、60 min、6 h、24 h 年最大暴雨量平均值 \bar{H} 分别为 15.0 mm、35.0 mm、66.0 mm、70.0 mm, 变差系数 C_v 分别为 0.40、0.45、0.47、0.42。通过计算中坝村区域不同频率降雨强度见表 5。

对照中坝村附近所设自动监测雨量计数据(表 6), 实测 10 分钟降雨量为 11.7 mm, 1 小时降雨量为 15.4 mm, 结合表 3 可知, 此次激发泥石流的降雨强度远小于该区域 5 年一遇降雨强度。对照喜德县附近的冕宁县彝海镇盐井村泥石流(2020 年 6 月 12 日)暴发时, 其小时降雨量达 36.6 mm, 且据调查中坝村区域近 20 年内未发生泥石流, 由此可以推测相对于火烧前, 火后泥石流暴



(a) 坡面灰烬堆积



(b) 沟道内残枝树干及灰烬堆积

图 5 火烧区泥石流沟域内物源特征

Fig. 5 Provenance characteristics of debris flow gully in burned area

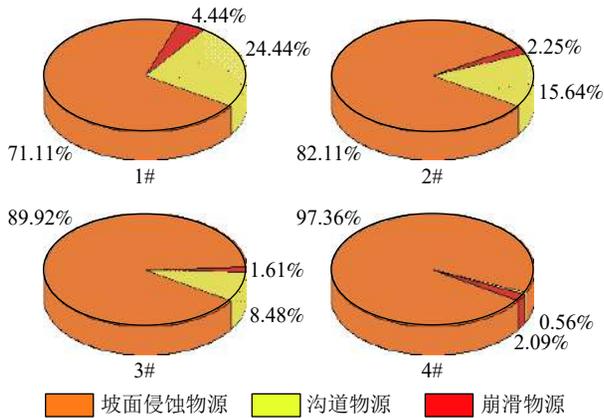


图 6 火烧区各泥石流沟不同物源占比图

Fig. 6 Proportion map of different sources of debris flow ditches in burned area

表 5 中坝村不同频率降雨强度值

Table 5 Rainfall intensity values of different design frequencies in Zhongba Village

降雨时段/h	设计频率/%					
	20	10	5	3.33	2	1
H _{1/6P}	19.23	23.02	26.63	28.69	31.23	34.63
H _{1P}	45.70	55.95	65.86	71.55	78.64	88.14
H _{6P}	86.73	107.16	127.01	138.45	152.72	171.89
H _{24P}	90.43	109.23	127.25	137.54	150.32	167.40

表 6 中坝村 2020 年“6·4”泥石流暴发实时降雨量监测数据

Table 6 Real-time rainfall monitoring data of 6·4 debris flow outbreak in Zhongba Village in 2020

雨量站位置	距中坝村距离/km	10 min雨量/mm	1 h雨量/mm
漫水湾镇松林村1-4组	4.5	11.7	15.4

发所需的降雨阈值急剧降低, 10 min 及 1 h 激发降雨阈值分别至少降低了 55.62% 与 76.62%。

3 火后泥石流运动学特征

迄今为止尚未建立一套适用于火后泥石流特征参数的计算模型, 本文参照常规泥石流特征参数计算模型对该区火后泥石流流速、流量等进行计算^[18-21]。

采用现场配浆法, 得出中坝村火后泥石流容重平均值为 1.98 t/m³, 属于黏性泥石流。

中坝村火后泥石流为黏性, 根据规范, 流速计算可采用通用公式计算。基于 1#~4#沟沟床粗糙, 凹凸不平, 沟道中块碎石较多, 部分区段沟道弯曲且发育有跌水现象, 沟床纵坡降较陡, 根据规范, 沟床糙率系数取 10, 选取各沟道沟口断面进行计算, 计算结果见表 7。

本次泥石流峰值流量采用形态调查法计算, 经现场踏勘, 选取沟口附近、沟道相对顺直、断面变化不大、无阻塞回流、上下沟槽无明显冲淤变化且具有清晰泥痕的沟段, 经实地测量确定泥位及过流断面面积等参数, 计算结果见表 8。

表 7 中坝村火后泥石流各沟道沟口平均流速计算结果

Table 7 Calculation results of the average flow velocity of each channel gully of post-fire debris flow in Zhongba Village

沟道编号	1#	2#	3#	4#
泥深/m	1.3	1.4	1.6	1.0
主沟纵坡降/%	450	429	360	311
平均流速/(m·s ⁻¹)	7.85	7.28	8.04	7.03

表 8 中坝村 2020 年 6·4 火后泥石流峰值流量计算结果

Table 8 Calculation results of peak flow of 6·4 post-fire debris flow in Zhongba Village in 2020

沟道编号	1#	2#	3#	4#
平均流速/(m·s ⁻¹)	7.85	7.28	8.04	7.03
计算断面面积/m ²	5.88	11.56	11.31	2.75
峰值流量/(m ³ ·s ⁻¹)	46.17	74.19	90.92	19.33

4 火后泥石流危险性评价及预警避险方案

4.1 中坝村火后泥石流危险性评价

本文采用常规泥石流危险度评价模型对中坝村泥石流危险度进行相应评价, 为沟口居民安全的预警避险提供参考。采用刘希林、唐川提出的单沟泥石流危险性评价模型^[19]对中坝村泥石流沟进行危险度评价:

$$H_{\text{单}} = 0.29M + 0.29F + 0.14S_1 + 0.09S_2 + 0.06S_3 + 0.11S_6 + 0.03S_9 \quad (1)$$

该方法一共包含 7 个评价因子, 即泥石流规模 M (10³ m³)、暴发频率 F (次/100 年)、流域面积 S_1 (km²)、主沟长度 S_2 (km)、流域相对高差 S_3 (km)、流域切割密度 S_6 (km⁻¹)、不稳定沟床比例 S_9 (%)。其中, 泥石流规模及发生频率为主要因子, 泥石流规模 M 通常根据史料记载, 取历史上已暴发泥石流一次堆积量的最大值即可, 对于无相关记录的泥石流, 可根据式(2)计算其规模, 泥石流暴发频率 f 可根据史料记载获取, 也可采用式(3)计算。除泥石流规模与暴发频率外, 其余 5 个因子均为次要因子, 其中流域切割密度一般取泥石流流域范围内冲沟长度之和与流域面积比值(式(4)), 不稳定沟床比例即泥沙沿程补给的沟道长度占比, 可结合野外考察和航拍分析确定。

$$m = -2 + 0.26s_1 + 0.41s_6 + 0.0021w \quad (2)$$

式中: w ——松散固体物储量/(10⁴ m³)。

$$f = -80.6596 - 2.8302s_1 + 12.13s_6 + 0.0209w \quad (3)$$

$$s_6 = l_i/s_1 \quad (4)$$

式中: l_i ——流域内冲沟总长度/m, $l_i = l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n$ 。

上述计算公式中, M 、 F 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_6 、 S_9 使用的数值均为基础数据 m 、 f 、 s_1 、 s_2 、 s_6 、 s_9 的转换值, 使各个因子数值无量纲化^[22]。各沟道基础数据见表 9, 将 7 个评价指标进行转换加权后可得各沟道危险度评价结果。

表 9 中坝村 1#~4#沟道沟域基础数据

Table 9 Basic data of 1#~4# trench trench area in Zhongba Village

沟道编号	泥石流规模 $m/(10^3 \text{ m}^3)$	暴发频率 $f/(\text{次} \cdot 100\text{年}^{-1})$	流域面积 s_1/km^2	主沟长度 s_2/km	流域相对高差 s_3/km	流域切割密度 s_6/km	不稳定沟床比例 $s_9/\%$
1#	6.30	32.43	0.130	0.652	0.244	9.33	76
2#	11.40	28.73	0.230	0.893	0.317	9.04	85
3#	12.30	27.98	0.360	1.040	0.326	9.00	80
4#	2.60	56.15	0.730	2.090	0.395	11.40	65

由表 10 计算结果可知, 中坝村 1#沟道危险度为 0.42, 2#沟道危险度为 0.45, 3#沟道危险度为 0.46, 4#沟道危险度为 0.48, 将其与单沟泥石流危险度分级标准对照(表 11), 4 条沟道均属于中度危险。

表 10 中坝村泥石流 1#~4#沟危险度评价

Table 10 Evaluation of dangerous degree of ditch 1#~4# in Zhongba Village

沟道编号	1#	2#	3#	4#
泥石流规模 $M/10^3 \text{ m}^3$	0.266	0.352	0.363	0.138
暴发频率 $F/(\text{次} \cdot 100\text{年}^{-1})$	0.756	0.729	0.723	0.875
流域面积 S_1/km^2	0.085	0.130	0.160	0.225
主沟长度 S_2/km	0.175	0.285	0.296	0.416
流域相对高差 S_3/km	0.163	0.211	0.217	0.379
流域切割密度 S_6/km	0.466	0.452	0.450	0.570
不稳定沟床比例 $S_9/\%$	1	1	1	1
评价结果	0.42	0.45	0.46	0.48

表 11 单沟泥石流危险度分级标准

Table 11 Classification standard of danger degree of single ditch debris flow

单沟泥石流危险度	0.0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
危险度分级	极低危险	低危险度	中危险度	高危险度	极高危险

4.2 中坝村火后泥石流预警避险方案及体会

上述分析结果显示, 中坝村后山沟 4 条冲沟流域面积较小(均小于 1 km^2)、主沟平均纵坡降大、中度及重度火烧区面积占比高(均大于 90%)、沟域内物源丰富, 火后泥石流启动降雨阈值低, 流速快、暴发迅猛且一次冲出规模较大, 且均属于中度危险。尽管如此, 由于基于已有火后泥石流暴发降雨量阈值研究成果对当地基层人员的普及, 以及火烧区周边可以实时提供雨量监测数据, 当地村干部(第一书记)工作到位, 及时预警提醒沟口居民尽早做好避险避让准备工作, 因此未造成人员

伤亡, 避灾效果极为显著。总结喜德县基鲁乡中坝村成功避让泥石流灾害主要得益于以下三个方面工作的落实(图 7)。

(1)省、州、县、乡党委政府高度重视, 责任落实; 自然资源等部门履职尽责, 工作到位, 措施得当。森林火灾后及时组织专业技术队伍对过火区域及其周边开展次生地质灾害隐患排查, 对火烧迹地植被烧毁情况及物源条件进行详细调查, 通过泥石流危险度计算, 确定中坝村后山所有潜在泥石流沟道发生火后泥石流的危险性等级, 锁定危险区域保护对象, 并加强对居民关于火后泥石流危险性的宣传教育。

(2)准确划定危险区域范围, 设置警戒标志, 安排监测人员在降雨时段进行实时监测巡查预警。同时预先选择安全地段, 规划好紧急撤离路线, 组织居民反复进行避险演练, 并实现各村民小组之间、村民之间信息互通、信息共享, 在最短时间内将预警信息快速传递, 最大限度缩短撤离避让时间。

(3)实时获取火烧区附近雨量监测站的降雨监测资料(间隔 5 min 传送一次雨量数据), 一旦发生强降雨, 立即启动泥石流预警, 并迅速组织居民撤离至安全地段。

5 结论

(1)发生于 2020 年 5 月 7 的凉山喜德县森林火灾, 总过火面积约 6.73 km^2 , 其中重度、中度和轻度火烧区占比分别为 65.93%、19.76% 和 14.31%, 中坝村后山 1#~4#沟流域内中度及重度火烧区面积占比分别为 95.97%、95.32%、93.28%、90.33%。

(2)中坝村后山沟火后泥石流激发降雨强度远小于该区域 5 年一遇降雨强度, 相对于火烧前, 火后泥石流 10 min 及 1 h 激发降雨阈值分别至少降低了 55.62% 与 76.62%。

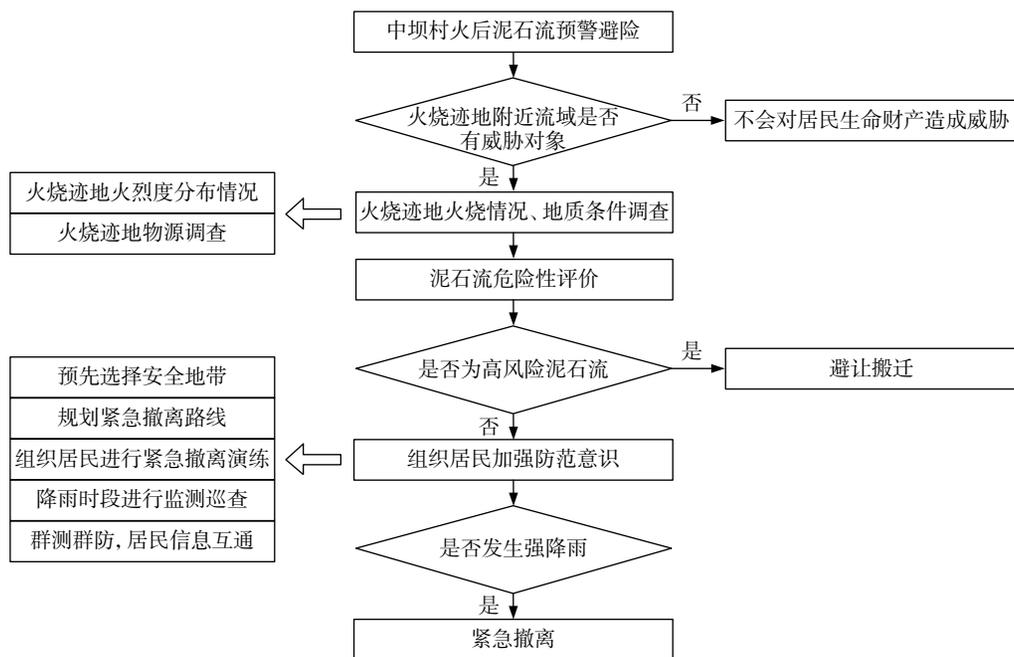


图 7 中坝村火后泥石流预警避险实施流程

Fig. 7 Implementation process of early warning and risk avoidance of post-fire debris flow in Zhongba Village

(3) 中坝村后山 1#沟与 4#沟冲出固体物质小于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属小型泥石流, 而 2#沟与 3#沟泥石流冲出固体物质均大于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属于中等规模泥石流。

(4) 火后泥石流危险度评价结果显示, 中坝村 1#、2#、3#和 4#和沟道危险度分别为 0.42, 0.45, 0.46, 0.48, 均属于中度危险。

(5) 林火发生后立即制定科学预警避险方案, 并得到有效落实, 泥石流暴发前 10 分钟紧急预警, 居民迅速、有序、安全撤离, 未造成人员伤亡, 避灾效果显著。

参考文献 (References) :

- [1] 邸雪颖, 陶玉柱. 火后泥石流研究进展 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2383 - 2392. [DI Xueying, TAO Yuzhu. Research progress in post-fire debris flow [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8): 2383 - 2392. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 任云, 胡卸文, 王严, 等. 四川省九龙县色脚沟火后泥石流成灾机理 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 150 - 156. [REN Yun, HU Xiewen, WANG Yan, et al. Disaster mechanism of the Sejiu post-fire debris flow in Jiulong County of Sichuan [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 150 - 156. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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)]
- [4] CANNON S H, RENEAU S L. Conditions for generation of fire - related debris flows, Capulin Canyon, New Mexico [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(10): 1103 - 1121.
- [5] CANNON S H, GARTNER J E. Wildfire-related debris flow from a hazards perspective [J]. *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, 2005: 363 - 385.
- [6] 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)]
- [7] STALEY D M, NEGRI J A, KEAN J W, et al. Prediction of spatially explicit rainfall intensity-duration thresholds for post-fire debris-flow generation in the western United States [J]. *Geomorphology*, 2017, 278(FEB. 1): 149 - 162.
- [8] 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.
- [9] NYMAN P, SMITH H G, SHERWIN C B, et al. Predicting sediment delivery from debris flows after wildfire [J]. *Geomorphology*, 2015, 250: 173 - 186.
- [10] PARISE M, CANNON S H. Wildfire impacts on the processes that generate debris flows in burned watersheds [J]. *Natural Hazards*, 2012, 61(1): 217 - 227.
- [11] SANTI P M, DEWOLFE V G, HIGGINS J D. Sources of debris

- flow material in burned areas [J] . *Geomorphology*, 2008, 96(3/4): 310 – 321.
- [12] GABET E J, STERNBERG P. The effects of vegetative ash on infiltration capacity, sediment transport, and the generation of progressively bulked debris flows [J] . *Geomorphology*, 2008, 101(4): 666 – 673.
- [13] 任云. 四川九龙县色脚沟火后泥石流成灾机理及危险性评价 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018. [REN yun. The disaster mechanism and risk assessment of sejiào post-fire debris flow in jiulong, sichuan[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 孙佳佳, 于东升, 史学正, 等. 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究 [J] . *土壤学报*, 2010, 47(6): 1060 – 1066. [SUN Jiajia, YU Dongsheng, SHI Xuezheng, et al. Comparison of between Lai and vfc in relationship with soil erosion in the red soil hilly region of South China [J] . *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1060 – 1066. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 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.
- [16] 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)]
- [17] PARSONS A, ROBICHAUD P, LEWIS S A, et al. Field guide for mapping post-fire soil burn severity[R]. General Technical Report RMRS-GTR-243. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station: Fort Collins, CO, USA, 2010.
- [18] 陈子龙. 仁额拥沟火后泥石流发育特征及成因机制研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2016. [CHEN Zilong. Research on development characteristics and genetic mechanism of the post-fire debris flow in Reneyong ravine[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李明威, 唐川, 陈明, 等. 汶川震区北川县泥石流流域崩滑体时空演变特征 [J] . *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 182 – 190. [LI Mingwei, TANG Chuan, CHEN Ming, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of landslides in debris flow catchment in Beichuan County in the Wenchuan earthquake zone [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 182 – 190. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 刘佳, 赵海军, 马凤山, 等. 基于改进变异系数法的G109拉萨—那曲段泥石流危险性评价 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(4): 63 – 70. [LIU Jia, ZHAO Haijun, MA Fengshan, et al. Risk assessment of G109 Lhasa-Naqu Debris flow based on improved coefficient of variation [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 63 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 翟淑花, 冒建, 南赞, 等. 基于遗传规划的泥石流多因子融合预测方法 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(6): 111 – 115. [ZHAI Shuhua, MAO Jian, NAN Yun, et al. Multi-factors fusion method of debris flow prediction based on genetic programming [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(6): 111 – 115. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 刘希林. 沟谷泥石流危险度计算公式的由来及其应用实例 [J] . *防灾减灾工程学报*, 2010, 30(3): 241 – 245. [LIU Xilin. Quantitative assessment on site-specific debris flow hazard and application [J] . *Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering*, 2010, 30(3): 241 – 245. (in Chinese with English abstract)]