



川西山区低频泥石流形成条件分析 ——以九寨沟县香扎沟泥石流为例

王毅¹, 智晶子², 卢鹏飞³

1. 核工业西南勘察设计研究院, 四川 成都 610000;
2. 四川水利职业技术学院, 四川 成都 611231;
3. 重庆市地质环境监测总站, 重庆 400015

摘要: 近年来川西山区屡次暴发低频泥石流灾害, 造成大量生命财产损失, 危害性较大。通过对九寨沟县香扎沟泥石流进行深入调查、访问, 分析了沟域地形地貌特征以及泥石流物质组成和暴发特征, 揭示了泥石流的物质大多源于沟床启动, 且与早年林木采伐、木材腐朽密切相关。另外, 集中强降雨及陡峻的地形也是泥石流形成的有利条件。通过对比中、高频泥石流, 提出低频泥石流具有隐蔽性、突发性、危害大的特点。川西山区有过采伐史且具备相应地形条件的沟域, 应作为低频泥石流灾害的重点调查研究和防治对象。

关键词: 低频泥石流; 地质灾害; 林木腐朽; 降雨; 九寨沟; 四川省

FORMATION CONDITIONS OF LOW FREQUENCY DEBRIS FLOW IN WESTERN SICHUAN MOUNTAINOUS AREA: A Case Study of Xiangzhagou Debris Flow in Jiuzhaigou County

WANG Yi¹, ZHI Jing-zi², LU Peng-fei³

1. Nuclear Industry Southwest Geotechnical Investigation and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610000, China;
2. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611231, China;
3. Chongqing Geological Environment Monitoring Station, Chongqing 400015, China

Abstract: In recent years, low-frequency debris flow disasters often occurred in western Sichuan mountainous area, causing massive loss of life and property with great harm. Through the in-depth investigation and visit to Xiangzhagou debris in Jiuzhaigou County, the authors analyze the topographic and geomorphic features of gully area, as well as material compositions and outbreak characteristics of debris flow. It is concluded that the materials of debris flow are mostly initiated from gully bed and closely related to forest cutting and wood decay in early years. Besides, concentrated heavy rainfall and steep terrain also contribute to the formation of debris flow. Comparing with the medium- and high-frequency debris flows, the low-frequency debris flow has the characteristics of being hidden, sudden and dangerous. The gully areas with a logging history and corresponding topographic conditions in western Sichuan mountainous area should be the focus of investigation and prevention of low-frequency debris flow disasters.

Key words: low-frequency debris flow; geological disaster; wood decay; rainfall; Jiuzhaigou Valley; Sichuan Province

0 引言

低频泥石流主要是指暴发频率 20~50 a/次的泥石

流。与中、高频泥石流相比, 低频泥石流更容易造成灾害, 破坏力更强。近年来川西山区低频泥石流屡有发

收稿日期: 2022-03-29; 修回日期: 2022-05-09. 编辑: 张哲.

基金项目: 四川省九寨沟国家级自然保护区管理局项目“九寨沟景区 89 处地质灾害隐患点治理工程”(PF20180201012).

作者简介: 王毅(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程、地质灾害防治工程勘察设计与工作, 通信地址 四川省成都市成华区华冠路 35 号, E-mail//wwyywangyi@163.com

生。如四川省小金县高碉沟植被茂密,水质清澈,曾作为小金县城水源地,近百年来未暴发过泥石流,但在2011年7月却暴发了较大规模的泥石流,一次泥石流过流总量 $3.76 \times 10^4 \text{ m}^3$,毁坏果树约6000株,耕地约 6.7 hm^2 ,并造成沟道堵塞^[1]。宝兴县冷木沟也是近百年来未暴发过泥石流,但在2012年8月18日暴发了一次泥石流^[2],固体物质总量达 $19 \times 10^4 \text{ m}^3$,对宝兴河造成一定程度的堵塞,造成人员伤亡和财产损失^[3]。九寨沟县香扎沟森林覆盖率达90%,除在1971年暴发过小型泥石流外,其余时间未见泥石流记载。但在2013年8月6日午夜,该沟暴发大规模泥石流,持续时间约60 min,冲出固体物质 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,冲毁便桥12座,受损房屋达30多间,造成巨大经济损失^①。本文通过对香扎沟泥石流进行调查分析,试图对川西山区低频泥石流的特征及形成条件进行探究,为今后此类泥石流的防治和研究工作提供借鉴。

1 研究区概况及泥石流灾害

香扎沟位于四川省九寨沟县大录乡境内,地处黑河右岸,为黑河一级支流,共分8条支沟。沟口与流域最高点相对高差1963 m,流域面积 36.3 km^2 。主沟长约9.95 km,平均沟床纵比降198%。两岸坡角一般 $30^\circ \sim 40^\circ$ (图1)。植被以乔木、灌丛为主,覆盖率在90%以上。该区位于秦岭东西向构造带南缘,松潘-甘孜褶皱系东侧,南与龙门山北东向构造带相邻,地质构造复杂。流域内主要出露三叠系中统扎尕山组(T_{2zg})变质砂岩、钙质板岩、角砾状灰岩,第四系残坡积层(Qh^{cl+dl})、崩坡积层(Qh^{col+dl})、坡洪积层(Qh^{dl+pl})^[4]。香扎沟及部分支沟长年都有地表水自南向北径流,调查期间沟道宽约10 m,水深约1 m,最终汇入黑河,与之呈锐角相交。20世纪60—90年代,香扎沟流域内大量伐木,沟上游海拔3500 m以下的高大树木被砍伐,部分枯枝、残根堆积于沟内。目前已停止了大规模采伐,人类工程活动主要为放牧和居民自建房屋,植被也基本得到恢复。

香扎沟曾于1971年在一条支沟内暴发过小型泥石流,但因时间久远,且无目击者,已难以考究其暴发时的过程。该沟此后40年内再无泥石流暴发的记录。2013年8月6日晚9时30分左右,整个香扎沟流域

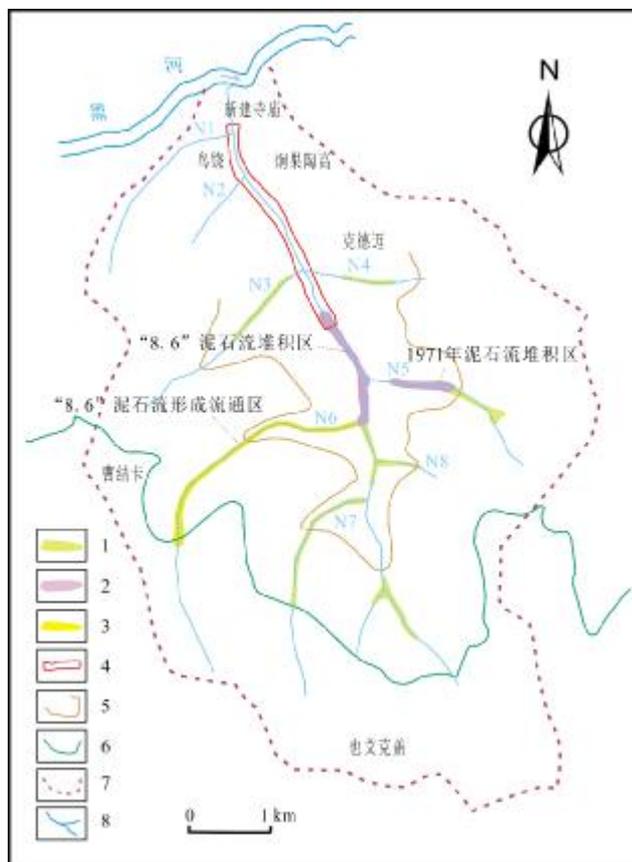


图1 香扎沟流域简图

Fig. 1 Sketch map of Xiangzhagou valley

1—沟床堆积物源 (gully bed deposit); 2—泥石流堆积物 (debris flow deposit); 3—泥石流形成流通区 (formation and transit area of debris flow); 4—泥石流威胁区域 (debris flow threaten area); 5—采伐区下边界 (lower boundary of logging area); 6—草场与乔木界线 (boundary between grassland and trees); 7—流域边界 (boundary of river basin); 8—沟谷 (gully)

内开始强降雨,时间一直持续到7日凌晨,累计降雨量超过90 mm,为该流域近100年以来最大的一次强降雨,终于引发该区域有记录以来最大一次泥石流灾害。

2 香扎沟泥石流的基本特征

2.1 流域地形地貌特征

香扎沟流域属构造剥蚀的高山地貌,地势南高北低,形态上呈树叶形,主要发育8条支沟(N1—N8),地形地貌特征见表1。上游支沟沟道弯曲、狭窄,沟床纵比降较大,沟道平均纵比降达 $300\% \sim 500\%$,沟谷两岸地形基本对称,以“V”字形沟谷为主,坡度一般为 $30^\circ \sim 50^\circ$,局部接近直立,岸坡植被茂盛(海拔3500 m以上

①核工业西南勘察设计研究院. 九寨沟县大录乡香扎沟泥石流治理工程勘查报告. 2014.

表1 香扎沟流域各支沟地形地貌特征

Table 1 Landform characteristics of branch gullies of Xiangzhagou valley

编号	地形地貌特征
N1	位于主沟左岸,距主沟沟口约 450 m,沟长约 2.44 km,纵比降 352‰;左岸坡度 45~60°,局部近直立,基岩出露,为变质砂岩、板岩;右岸坡度 35~50°,崩塌堆积层由含粉质黏土碎块石组成;沟内常年有水,流量 0.025 m ³ /s,在降雨时也为清水,沟床及岸坡植被茂密,植被覆盖率>80%
N2	位于主沟下游鸟饶附近,主沟左岸,沟长约 2.0 km,纵比降 515‰;左岸坡度 30~45°,崩塌堆积层由含粉质黏土碎块石组成,未见明显的裂缝及滑坡、崩塌,整体稳定性较好;右岸坡度 35~50°,为崩塌堆积层,主要由含粉质黏土碎块石组成,整体稳定性较好;沟内常年有水,流量 0.008 m ³ /s,洪水时颜色略深,沟床及岸坡植被茂密,植被覆盖率>90%
N3	位于主沟下游香扎村 2 组居民房附近,源头位于曹结卡,主沟左岸,沟长约 3.64 km,纵比降 385‰,两岸坡度 40~55°;崩塌堆积层由含粉质黏土碎块石组成,未见明显的裂缝及滑坡、崩塌,整体稳定性较好;沟内常年有水,流量 0.3 m ³ /s,洪水时颜色略深,沟床及岸坡植被茂密,植被覆盖率>80%;近年来沟床下切较深,约 0.5~1 m,切深处土体裸露,沟床见伐木残留的枯树枝等
N4	位于主沟下游香扎村 2 组居民房附近,主沟右岸,沟长约 1.58 km,纵比降 323‰,两岸坡度 40~55°;崩塌堆积层由含粉质黏土碎块石组成,未见明显的裂缝及滑坡、崩塌,整体稳定性较好;沟内常年有水,流量 0.2 m ³ /s,洪水时颜色略深,沟床及岸坡植被茂密,植被覆盖率>90%,沟床见枯树枝
N5	位于香扎村 3 组居民房上游,主沟右岸,沟长约 2.42 km,纵比降 236‰,沟床宽缓(5~10 m,局部大于 15 m),呈“U”型,两岸坡度 30~50°;崩塌堆积层由含粉质黏土碎块石组成,未见明显的裂缝及滑坡、崩塌,整体稳定性较好;沟内常年有水,流量 0.12 m ³ /s,洪水时颜色略深;曾进行过伐木,并于 1971 年暴发过小型泥石流,但未进入主沟,目前沟床仍见伐木残留的枯树枝及树桩;岸坡植被茂密,植被覆盖率>80%
N6	位于香扎村 3 组居民房上游,距离 N5 沟口约 500 m,主沟左岸,沟长约 4.75 km,纵比降 291‰,沟床较狭窄(2~5 m),两岸坡度 30~50°;崩塌堆积层由含粉质黏土碎块石组成;曾暴发“8·6”泥石流,下切原始沟床 3~6 m,在两岸形成较陡的土质边坡(50~60°),在水流、降雨等因素作用下,局部出现垮塌;沟床内见伐木残留的枯树枝及树桩,岸坡植被茂密,植被覆盖率>80%;沟口有大量泥石流固体物质堆积,主要为碎块石;沟内水流量 0.5~1 m ³ /s
N7	位于主沟左岸,沟长约 2.89 km,纵比降 329‰;下游沟道宽缓(5~10 m,局部大于 10 m),两岸岸坡基岩出露坡度>50°,局部近直立,为变质砂岩、板岩,整体稳定性较好;中上游主要由崩塌层含粉质黏土碎块石组成,未见明显的裂缝及滑坡、崩塌,整体稳定性较好,两岸坡度 35~50°;沟内常年有水,流量 0.3 m ³ /s,洪水时颜色较深;沟床见大量伐木后形成的原木、枯枝、腐根堆积,岸坡植被茂密,植被覆盖率>90%
N8	位于主沟右岸,沟长约 1.55 km,纵比降 548‰,两岸坡度 30~45°;崩塌堆积层由含粉质黏土碎块石组成,未见明显的裂缝及滑坡、崩塌,整体稳定性较好;沟内常年有水,流量 0.05 m ³ /s,洪水时颜色浅;沟床分布有枯枝、残根,岸坡植被茂密,植被覆盖率>90%

基本为草地,以下为乔木、灌木)。主沟中游沟床纵坡变化不大,沟谷宽缓(50~100 m),多呈“U”字形,两岸坡度一般为 35~45°,平均纵比降 204‰。流域下游沟床平均纵坡 75‰,沟道较顺直,沟谷以“U”字形为主,岸坡坡度一般为 30~40°。

2.2 泥石流暴发特征

“8·6”泥石流是香扎沟迄今为止有记录发生的最大规模泥石流。通过对附近居民进行调查访问,香扎沟曾于 1971 年在 N5 支沟内暴发过小型泥石流,居民们对其暴发时的过程仅存模糊记忆。也有人反映 1998 年 7 月该沟曾发生过较大洪水,当时下山的村民听见石块撞击声,但没有见到泥石流。此外,香扎沟没有泥石流的记录,主沟常年有水,仅在雨季大雨时,可能会发生小规模洪水^[5]。由此看来,该沟泥石流暴发频率为 20~50 a/次,属低频泥石流^[6]。

令人不解的是,香扎沟植被茂密,以灌木、乔木、草甸为主^[7],且“5·12”汶川地震对该区影响也较小,沟域内未见新增崩塌、滑坡灾害^[8]。未有新增物源,泥石流的物质从何而来,又是如何启动的呢?笔者通过深入调

查访问,发现该流域内曾于 20 世纪 60—90 年代大量伐木,沟上游海拔 2900~3500 m 为主要采伐区。限于当时落后的生产条件,高大树木被砍伐后多沿着沟道顺沟而下运送到木材加工场^[9],在此过程中,有些木材或残根就被“遗弃”、“埋藏”于沟内。“8·6”泥石流暴发之前持续了 3 h 强降雨,中上游沟道内固体物质在雨水浸泡下形成饱和土体,抗剪强度降低而失稳运动,在流通过程中,沟床下切、侧蚀沟道两岸崩塌堆积物,两岸固体物质不断被补给,使得泥石流规模加大,破坏力加强^[10]。加之沟道局部弯曲、沟床朽木、残根枯枝等较多,局部形成堵塞和溃决,沟床物质启动,进而形成泥石流^[11]。

沟道下游泥石流堆积物厚度在 0.5~2 m 之间,泥石流堆积固体物质约 2.5×10⁴ m³,大颗粒物质主要集中于上寨上游约 700 m 区域堆积扇内(图 1),少量泥沙堆积于下游居民区。笔者对沟道内的堆积物(包括暴发泥石流的 N6 支沟、泥石流主沟内的堆积区,以及未暴发泥石流的其他支沟)进行了颗粒分析试验,其结果如表 2。

表2 沟床堆积物颗粒分析统计表
Table 2 Grain size analysis statistics of gully bed deposits

取样位置	样品号	粒度组成比例/%						
		>200 mm	200~20 mm	20~2.0 mm	2.0~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	0.075~0.002 mm
N3(QJ14)	RT-2	15.2	48.3	16.5	5.6	3.3	8.5	2.6
N4(海拔 2710 m)	RT-3	12.3	45.5	16.1	8.7	5.3	6.3	5.8
N5(海拔 2770 m)	RT-4	17.8	38.8	20.1	11.4	6.4	4.3	1.2
N6 下游(海拔 2710 m)	RT-5	26	49.1	6.3	5.2	4.1	4.6	4.7
N6 中游(QJ9)	RT-6	23.2	47.1	7.1	6.3	3.2	5.1	8.0
N6 上游(QJ13)	RT-7	19.3	53.3	6.8	3.8	4.8	3.7	8.3
N7(海拔 2930m)	RT-8	12	39.6	18.3	10.4	6.7	5.8	7.2
主沟上游(海拔 3140 m)	RT-9	13.1	37.1	10.3	9.4	7.1	13.8	9.2
主沟中游(海拔 2600 m)	RT-10	13.5	52.5	9.5	7.9	3.5	5	8.1
主沟中游(海拔 2690 m)	RT-11	14.9	54.1	9.1	7.9	3.2	4.5	6.3

由表2可知,“8·6”泥石流固体物质颗粒组成与未暴发泥石流的沟道差异不大,以粒径20~200 mm为主,大于200 mm占比基本小于20%。且从物质组成看,细颗粒以泥沙为主,粗颗粒以棱角一次棱角状碎石为主,风化痕迹明显,并含有大量枯枝。说明泥石流主要源于沟床,两岸岸坡仅受铲刮、裹挟而被带入其中^[12]。

3 香扎沟泥石流的形成条件分析

香扎沟多年来未暴发泥石流灾害,较大规模洪水都鲜有发生。但在2013年8月6日突然暴发泥石流,并造成较大损失,与该沟特殊的物源补给、强降雨和地形条件密不可分^[13]。

3.1 特殊的物源补给

“8·6”泥石流物质主要来源于沟床,其中还含有大量枯枝、朽木。据《南坪县志》^[9](九寨沟县原名“南坪县”)记载,该县于1969年成立羌活国营林场,1978年又新建大录(即香扎沟所在行政区)乡办林场,1983年乡办林场增加至15个,生产原木7000 m³^[9]。研究区砍伐树木以云杉为主^[14](海拔2900~3500 m为主要伐木区),属高大乔木,砍下的木材多沿沟道顺沟而下运送到下游加工场。在此过程中,有些木材或残根就被

遗弃进而埋藏于沟内。这些木材胸径十几至百余厘米不等^[15],散布于沟床内,形成了天然屏障,拦截了上游的泥沙、碎石。

随着时间推移,虽然伐木工作逐渐停止,但埋藏在沟内的木材、残枝却逐渐腐朽,失去了原有的力学强度,降低了对泥沙、碎石的约束。研究表明,木材中的纤维素是微生物的养料,微生物将木材中的纤维素降解,使木材腐朽进而失去强度,只有当木材中存在自由水时微生物(主要是真菌)才会成活,即含水量接近或超过木纤维饱和点时,木材会被真菌攻击^[16]。因此,埋藏于常年有水的沟道内的木材更易腐朽^[17]。衡量木构件腐朽程度的重要指标是腐朽深度,但在实际中腐朽深度无法直接检测获得,研究人员通过大量实验,获得了等效腐朽深度(假设试件的腐朽深度沿试件长度以及截面完全相同,为理想的均匀腐朽)与腐朽时间的关系^[18]:

$$d_{eq1}=0.020 \times t^{0.98} \quad (1)$$

$$d_{eq2}=0.073 \times t^{0.82} \quad (2)$$

式中, d_{eq1} —由抗弯强度退化率推算的等效腐朽深度(mm); d_{eq2} —由顺纹抗压强度退化率推算的等效腐朽深度(mm); t —腐朽时间(d)。

由此推测,木材被砍伐后30 a时间内腐朽深度可

达 15~20 cm,对于胸径十至几十厘米的木材,几乎全部腐朽,这与现场调查也基本吻合。木材腐朽后,其力学强度逐步退化,退化率与时间的关系如下:

$$\alpha_{\text{抗弯}}=0.22\times t^{0.95} \quad (3)$$

$$\alpha_{\sigma}=0.37\times t^{0.82} \quad (4)$$

式中, $\alpha_{\text{抗弯}}$ —抗弯强度退化率(%); α_{σ} —顺纹抗压强度退化率(%); t —腐朽时间(d)。

由上式估算,木材腐朽部分的抗弯强度和顺纹抗压强度将在 3 a 内基本丧失,即退化率达 100%。遗弃在沟内的木材、树根经过几十年的腐朽,力学性质降低甚至完全丧失,沟床内的泥沙、碎石因失去阻碍而变得活跃起来,成为泥石流的物源。“8·6”泥石流将 N6 支沟沟床下切 3~6 m,沟床内见大量伐木残留的枯树枝及树桩。

3.2 强降雨成为泥石流的诱发因素

香扎沟“8·6”泥石流的暴发还与强降雨有关。2013年8月6日晚,整个香扎沟流域累计降雨量达 90 mm,超过了九寨沟县此前观测的最大日降水量(51.3 mm)。历时长、雨量大且集中的高强度降雨导致上游沟床松散物处于饱水状态,抗剪强度急剧降低。加上上游沟谷狭窄,岸坡陡峻,具备较大的势能,松散物启动形成泥石流。泥石流裹挟的固体物质为碎、块石,块径大,冲击力强,下切沟床的能力迅速增大,铲刮沟床及两侧物质,使泥石流的规模增大^[19]。强降雨及上游有利的地形,为泥石流的启动、形成提供了十分有利的条件。

3.3 陡峻的地形地貌

陡峻的地形地貌有利于松散固体物质及地表水流向沟道聚集,同时,较大的沟床纵比降也有利于沟床固体物质的启动。香扎沟流域上游平面形态呈扇叶状,有利于沟道径流的迅速汇集。各条支沟纵比降 236‰~548‰,平均 372‰,十分有利于泥石流的形成、流通。较大的高差使得沟道径流具有较大的流速和动能,对沟道内松散固体物质的冲刷侵蚀及对沟道两岸铲刮作用强度极大,故在短时间内席卷大量的固体物质冲出,形成泥石流。

4 川西山区低频泥石流与中高频泥石流的差异

2008年“5·12”汶川地震、2013年“4·20”芦山地震以及2017年“8·8”九寨沟地震,导致地震灾区山谷堆

积大量松散固体物质,在降雨激发下形成次生泥石流灾害。这些沟道物质储量丰富,激发降雨量低,以中、高频泥石流为主,易于发现,往往能引起人们重视,能及早进行监测或治理,使得泥石流暴发所造成的损失能得到较好的控制。但近年来,川西山区一些受地震影响小、近几十年甚至上百年未暴发泥石流的沟道也发生了泥石流灾害。由于其植被茂盛、风景迷人,有的甚至是当地的水源地,往往被人们忽视,加之泥石流暴发的突然性和强输砂能力,使人们猝不及防,造成重大损失。因此,相对于中、高频泥石流,低频泥石流往往具有隐蔽性、突发性、危害大的特点。

通过探究香扎沟低频泥石流的形成原因,笔者认为,由于特殊的时代背景和资源禀赋,川西山区某些区域在 20 世纪 60—90 年代曾经经历林木开发、木材加工活动,距今已有 30—50 年,被抛弃在沟道内的木材和砍伐后的树桩、残枝基本腐朽,丧失了稳定沟床、拦挡砂石的能力,沟床物质的稳定性降低,在较大纵坡及强水流作用下,则可能启动而形成泥石流。类似的例子,笔者在小金县高碉沟也曾亲历,高碉沟植被茂密、水流清澈,是小金县城水源地之一,近百年未发生过泥石流。但在 2011 年 7 月 6 日暴发了规模较大的泥石流,村民房屋被毁,冲出的固体物质以碎块石土为主,局部砂、粉质黏土富集,亦包含大量残枝、腐殖质等。因此,对于川西山区曾有过采伐史的地区,应给予重视,尤其是沟床纵比降在 200‰~500‰、沟形利于汇水的流域,则更容易暴发低频泥石流。

通常认为,低频泥石流暴发后,下一次也需要较长时间才会再次发生^[20]。但以香扎沟泥石流为例,“8·6”泥石流导致 N6 支沟下切沟道 3~6 m,两岸岸坡临空面增大,稳定性降低。若不及时治理,岸坡将发育滑坡、崩塌等次生灾害,沟内松散固体物质进一步增加,进而低频泥石流可能转化为中、高频泥石流。

5 结论

1) 2013 年 8 月 6 日香扎沟暴发低频泥石流,泥石流自上游支沟沟床启动,历时 60 min,冲出固体物质 $2.5\times 10^4 \text{ m}^3$ 。造成巨大经济损失。

2) 经调查研究,香扎沟泥石流物源来自沟床,早年采伐时遗弃在沟道内的木材、残枝、树桩经过几十年逐渐腐朽,失去了原有的力学强度,降低了对泥沙、碎石

的约束. 在强降雨的激发下,松散物启动形成泥石流.

3)川西山区低频泥石流具有隐蔽性、突发性、危害大的特点. 同时, 考虑该区特殊的时代背景和资源禀赋, 在调查和监测时, 应特别注意曾有过采伐史的地区, 尤其是沟床纵比降较大, 沟形利于汇水的流域, 容易暴发低频泥石流.

4)此类低频泥石流因下切沟床, 两岸岸坡临空面增大, 稳定性降低, 沟内散固体物质将进一步增加, 具备从低频泥石流可能转化为中、高频泥石流的可能. 其形成条件和转化机制值得进一步研究.

参考文献(References):

- [1]王波. 小金县美沃乡高碉沟泥石流发育特征及治理措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
Wang B. Xiaojin Meiwo County Gaodiao gully debris flow study on development characteristics and control measures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [2]铁永波, 周洪福, 倪化勇. 西南山区短时强降雨诱发型低频泥石流成因机制分析——以四川省宝兴县冷木沟泥石流为例[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 110-113, 187.
Tie Y B, Zhou H F, Ni H Y. Formation of low frequency debris flow induced by short-time heavy rainfall in mountain area of Southwest China: Take Lengmu debris flow as an example, Baoxing, Sichuan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(4): 110-113, 187.
- [3]铁永波, 胡凯衡. 基于遥感解译的典型低频泥石流形成机制研究——以四川省宁南县矮子沟泥石流为例[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 77-80.
Tie Y B, Hu K H. Formation of typical low-frequency debris flow process based on remote sensing data: Take Aizi debris flow in Ningnan, Sichuan Province as an example[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 77-80.
- [4]彭东, 谢云喜, 王明光, 等. 四川九寨沟地区泥盆—三叠系多重地层划分对比及沉积环境[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1013-1022.
Peng D, Xie Y X, Wang M G, et al. Multiple stratigraphic classification and correlation of the Devonian-Triassic in the Jiuzhaigou area, Sichuan, and its sedimentary environment[J]. Geology in China, 2006, 33(5): 1013-1022.
- [5]曾宪阳, 张佳佳, 杨东旭, 等. 帕隆藏布流域低频泥石流的成因机制分析——以倾多镇抄布隆巴泥石流为例[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(34): 103-107.
Zeng X Y, Zhang J J, Yang D X, et al. Characteristics and geneses of low frequency debris flow along Parloungzangbo River zone: Take Chaobulongba gully as an example [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(34): 103-107.
- [6]倪化勇. 四川泸定县城后山泥石流灾害及其风险防御[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 229-237.
Ni H Y. Debris flow hazards behind Luding County seat, Sichuan Province, and the corresponding risk countermeasures[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 229-237.
- [7]谢雨, 朱忠福, 肖维阳, 等. 九寨沟核心景区外来植物的分布格局与影响[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(6): 1008-1014.
Xie Y, Zhu Z F, Xiao W Y, et al. Distribution pattern of the alien plants and their impacts on the scenic core-zone of the Jiuzhaigou Nature Reserve [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2016, 22(6): 1008-1014.
- [8]辜寄蓉, 范晓, 彭东. 九寨沟地质灾害预测的空间分析模型[J]. 中国地质, 2002, 29(1): 109-112.
Gu J R, Fan X, Peng D. Spatial analysis model for the forecast of geological disasters in Jiuzhaigou [J]. Geology in China, 2002, 29(1): 109-112.
- [9]四川省阿坝藏族羌族自治州南坪县志编纂委员会. 南坪县志[M]. 北京: 民族出版社, 1994: 499-501.
Annals Compilation Committee of Nanping County, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture, Sichuan Province. Annals of Nanping County[M]. Beijing: Nationalities Publishing House, 1994: 499-501. (in Chinese)
- [10]王毅, 周勇, 余业. 毛家湾隧道口沟泥石流形成机制及发展趋势研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(6): 120-128.
Wang Y, Zhou Y, Yu Y. Study on formation mechanism and development trend of Maojiawan tunnel ditch debris flow [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(6): 120-128.
- [11]杨金川, 王毅, 周勇. G213 都汶路毛家湾隧道口沟泥石流灾害特征分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2013, 24(3): 33-36.
Yang J C, Wang Y, Zhou Y. Hazard characteristics of the debris flows at the Maojiawan tunnel gullies along Duwen Road [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2013, 24(3): 33-36.
- [12]李彩侠, 马煜. 四川都江堰龙溪河流域泥石流成因、特征和危险性评价[J]. 地质与资源, 2019, 28(3): 298-304.
Li C X, Ma Y. Causes, characteristics and hazard assessment of the debris flows in Longxi River Basin, Sichuan Province [J]. Geology and Resources, 2019, 28(3): 298-304.
- [13]付少杰, 张志飞, 李琛曦, 等. 河北太行山区木作沟泥石流形成条件及特征分析[J]. 地质与资源, 2021, 30(5): 595-601.
Fu S J, Zhang Z F, Li C X, et al. Forming conditions and characteristics of Muzuogou debris flow in Taihang Mountain area, Hebei Province [J]. Geology and Resources, 2021, 30(5): 595-601.

- [17]刘强虎,朱红涛,舒誉,等.珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组物源体系及其对滩坝的控制[J].石油学报,2015,36(3):286-299.
Liu Q H, Zhu H T, Shu Y, et al. Provenance systems and their control on the beach-bar of Paleogene Enping Formation, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 286-299.
- [18]葛家旺,朱筱敏,吴陈冰洁,等.辫状河三角洲沉积特征及成因差异——以珠江口盆地陆丰凹陷恩平组为例[J].石油学报,2019,40(S1):139-152.
Ge J W, Zhu X M, Wu C B J, et al. Sedimentary characteristics and genetic difference of braided delta: A case study of Enping Formation in Lufeng Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(S1): 139-152.
- [19]许新明,刘丽华,陈胜红,等.珠江口盆地恩平凹陷新近系油气成藏主控因素分析[J].地质科技情报,2015,34(1):100-106.
Xu X M, Liu L H, Chen S H, et al. Analysis of the main control factors on Neogene hydrocarbon accumulation in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(1): 100-106.
- [20]刘方圆,叶加仁,舒誉,等.恩平凹陷含油气系统划分与评价[J].西安石油大学学报(自然科学版),2014,29(4):37-45.
Liu F Y, Ye J R, Shu Y, et al. Division and evaluation of hydrocarbon-bearing system in Enping Sag [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(4): 37-45.
- [21]于开平,张功成,梁建设,等.珠江口盆地恩平凹陷油气成藏条件研究[J].石油实验地质,2011,33(5):509-512.
Yu K P, Zhang G C, Liang J S, et al. Petroleum accumulation conditions in Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(5): 509-512.
- [22]黄丽芬.层序地层学在陆相沉积凹陷分析中的应用——以珠江口盆地恩平凹陷为例[J].中国海上油气(地质),1999,13(3):159-168.
Huang L F. The application of sequence stratigraphy for analysis in nonmarine depression with example of Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1999, 13(3): 159-168.
- [23]嵯喜准,王琪,李娟,等.早期碳酸盐胶结作用对恩平凹陷珠江组砂岩孔隙演化模式的影响[J].天然气工业,2013,33(4):26-30.
Zhuo X Z, Wang Q, Li J, et al. Influence of early carbonate cementation on porosity evolution of sandstones in the Zhujiang Formation, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(4): 26-30.
- [24]邢作昌,张忠涛,林畅松,等.珠江口盆地荔湾凹陷上新统一早中新统物源特征及其对沉积充填的影响[J].中国地质,2020,47(5):1577-1588.
Xing Z C, Zhang Z T, Lin C S, et al. Provenance feature of Upper Oligocene to Early Miocene in Liwan Sag, Pearl River Mouth Basin and its influence on depositional filling [J]. Geology in China, 2020, 47(5): 1577-1588.

(上接第 365 页/Continued from Page 365)

- [14]蓝振江,蔡红霞,曾涛,等.九寨沟主要植物群落生物量的空间分布[J].应用与环境生物学报,2004,10(3):299-306.
Lan Z J, Cai H X, Zeng T, et al. Biomass distribution of the major plant communities in Jiuzhaigou Valley, Sishuan [J]. Chinese Journal of Applied Environmental Biology, 2004, 10(3): 299-306.
- [15]马丹炜.九寨沟自然保护区次生林物种多样性分析[J].四川师范大学学报(自然科学版),1999,22(1):83-87.
Ma D W. The analysis of community species diversity of secondary forests in Jiuzhaigou Valley Nature Reserve [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 1999, 22(1): 83-87.
- [16]Leicester R H, Wang C H, Nguyen M, et al. Structural durability of exposed timber [C]//Proceedings of 8th World Conference on Timber Engineering. Lahti, 2004: 571-576.
- [17]王小丽,刘昊天,王雪亮.腐朽虫蛀木构件的耐久性预测模型研究进展[J].土木工程,2015,4(5):207-214.
Wang X L, Liu H T, Wang X L. Review of the prediction model for durability of structural wood under decay and termite attack [J]. Hans Journal of Civil Engineering, 2015, 4(5): 207-214.
- [18]赵柔.木构件腐朽程度的试验研究[D].南京:东南大学,2018.
Zhao R. Experimental research on decay of timber component [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [19]杨成林,陈宁生,李战鲁.汶川地震次生泥石流形成模式与机理[J].自然灾害学报,2011,20(3):31-37.
Yang C L, Chen N S, Li Z L. Formation mode and mechanism for debris flow induced by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(3): 31-37.
- [20]朱巍,蔡贺,唐雯,等.长白山天池火山泥石流展布特征及其灾害研究[J].地质与资源,2017,26(6):608-615.
Zhu W, Cai H, Tang W, et al. The Tianchi volcanic mudflow in Changbai Mountains: Its distribution and disaster research [J]. Geology and Resources, 2017, 26(6): 608-615.