第43卷 第6期	中国	岩 溶	Vol. 43 No. 6
2024年12月	CARSOLOGIC	CA SINICA	Dec. 2024

汤 沛,祝传兵,姜跃斌,等. 滇西洱源县泥石流监测预警的经验与启示——以"9·13"铁甲河大型山洪泥石流灾害为例[J]. 中国岩 溶, 2024, 43(6): 1398-1407. DOI: 10.11932/karst20240616

# 滇西洱源县泥石流监测预警的经验与启示 →→以"9·13"铁甲河大型山洪泥石流灾害为例

汤 沛<sup>1,2,3</sup>,祝传兵<sup>1,2,3</sup>,姜跃斌<sup>4</sup>,周翠琼<sup>1,2,3</sup>,李晓梅<sup>4</sup>, 张令泽<sup>1,2,3</sup>,肖华宗<sup>1,2,3</sup>,张文鋆<sup>1,2,3</sup>

(1.自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室,云南昆明 650216; 2.云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室(筹),云南昆明 650216; 3.云南省地质环境监测院,云南昆明 650216; 4.云南地质工程第二勘察设计研究院有限公司,云南昆明)

摘 要: 洱源县地质环境复杂脆弱, 地貌类型多、地形变化大、生态环境脆弱的特点孕育了区内泥石 流地质灾害规模大、威胁对象多、发灾时间集中的灾害特点。2012年以来洱源县地质灾害所造成的 人员伤亡以暴雨沟谷型泥石流为主。文章对洱源县近年来的暴雨沟谷型泥石流灾害进行统计, 以 2021年"9·13"洱源县凤羽镇铁甲河支流兰林河及黑龙河两条典型泥石流成功避险案例为例, 分析 洱源沟谷型泥石流成灾背景及运动特征, 对暴雨型泥石流监测预警设备选型布设及模型阈值的设置 进行阐述, 总结洱源县监测预警预报经验与启示。

关键词:地质灾害;监测方法;监测预警;云南洱源;泥石流

创新点: 洱源县地质环境复杂, 暴雨沟谷型泥石流灾害频发, 具有规模大、破坏力强等特点。文章通过分析 2021 年 "9·13" 泥石流案例, 总结了监测预警设备选型、阈值设置及 "人防" 工作的重要性, 强调即使工程治理后, 监测预警仍是有效防灾手段, 需提高综合防治能力。

中图分类号: P642.23 文献标识码: A 文章编号: 1001-4810 (2024) 06-1398-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## 0 引 言

洱源县位于云南省大理白族自治州北部,东接 鹤庆县与宾川县,南连大理市和漾濞县,西邻云龙县, 北靠剑川县,由东自西的最大直线距离约 80 km,南 北最大直线距离约 68 km,县境周长约 340 km。全 县处于印度板块与欧亚板块碰撞带上,受喜马拉雅 造山运动的影响程度强烈,中新世以来高原大幅隆 升,新构造运动强烈,地震频繁,地质及地形条件复 杂多变,地形切割强烈,山高谷深,水系发育,区内地 质灾害多发、频发,是云南省地质灾害高易发地区<sup>[1]</sup>。

随着社会经济的发展,人类工程建设活动加剧, 导致洱源县本就十分脆弱的地质生态环境急剧恶化, 加之区域降水时空分布不均,极端天气增多,因短时 强降水引发的地质灾害给洱源县人民生命及财产都 带来了巨大的损失。为了提升全省地质灾害防治水 平,十二五至十四五期间,云南省先后完成地质灾害 调查与区划、地质灾害详细调查及地质灾害精细化 调查与风险普查等专项任务,利用 GIS、大数据信息 化等现代技术手段建立起一套调查评价、应急处置、

收稿日期:2023-11-28

第一作者简介:汤沛(1986-),男,硕士,高级工程师,主要从事地质灾害研究与防治工作。E-mal: 3132665064@qq.com。 通信作者:祝传兵(1978-),男,硕士,正高级工程师,主要从事地质灾害研究与防治工作。E-mal: 28750111@qq.com。

监测预警及治理搬迁的综合防治体系,将灾害类型、 特征规模、形成条件、威胁对象及成灾机理等数据 建立动态数据库,不断提升地质灾害基础数据、质量 控制与管理,为全省地质灾害综合防治体系建设及 灾害研究工作奠定了坚实的基础<sup>[2-5]</sup>。2021年9月 12日晚至13日凌晨,洱源县境内出现极端强降雨, 诱发多起山洪泥石流灾害。结合洱源县地质环境背 景,利用动态数据库中近10年的灾害数据,剖析 "9·13"洱源铁甲河流域支流兰林河、黑龙河两条大 型山洪泥石流成功预警案例,对泥石流地质灾害背 景、发育特征、专业监测预警工程布设、模型阈值设 置进行研究,总结预警预报成功经验,提出后续监测 工作改进建议,为洱源县地质灾害监测预警工作提 供参考<sup>[6-10]</sup>。

## 1 洱源县地质环境背景及灾害特征

### 1.1 洱源县地质环境背景

第43卷 第6期

洱源县位于滇西北横断山脉腹地的点苍山西北 麓,为上新世末--早更新世初,受青藏高原加速隆升 影响发育形成的断陷盆地,属于典型滇中中山-高山 构造侵蚀地貌区。东部有凤羽、三营、洱源、右所4 个高原盆地,分布有凤羽、牛街、三营、茈碧湖、右所、 邓川6个乡镇;西部是高山峡谷,分布有乔后、西山、 炼铁3个乡镇。区内包含3条南北走向的主山脉, 自东向西分别为马鞍山和罗坪山,中南部则为点苍 山北延尾脉的天马山,地势由西北向东南降低。洱 源地形高差起伏大,三大主山脉及其支脉海拔多在 2500~3000 m, 东北部南无山为境内最高点, 海拔 3958.4 m, 坝区海拔多在 2000~2200 m, 黑惠江河谷 区海拔为1700~2100 m, 江水南出县境处的乌乌梢 箐口是县境内最低点,海拔1645m。最高海位于点 苍山位置达 4221 m, 最低海拔位于澜沧江支流漾濞 江1450m处,相对高差约2800m,县域内河流和湖 泊随山势分为澜沧江流域和金沙江流域两大流域, 形成三大水系。东部为落漏河水系,由境内三营、右 所部分位于马鞍山南段分水岭之东的山地和零星河 谷组成, 汇入鹤庆县黄坪落漏河后归入金沙江; 中部 为弥苴河水系,由弥茨河、凤羽河、海尾河、罗时江 和永安江等河流组成,连通海西海、茈碧湖、西湖等 湖泊,向南汇入洱海;西部属黑惠江水系,主干流长 约60 km, 包含支流40余条, 平均坡降6.4%<sup>[10-11]</sup>。

洱源县内地层自前寒武系至第四系均有出露。 第四系为晚更新世-全新世的河湖相、冲洪积相碎屑 沉积物,集中于盆地及河谷底部、下段;第三系以碎 屑岩夹碳酸盐岩为主,小范围分布在盆地周边山区。 中生界白垩系、侏罗系以红色碎屑岩为主,出露于弥 沙河断裂以西;三叠系以碳酸盐岩、碎屑岩为主,出 露于洱源以东;古生界二叠系以玄武岩、碳酸盐岩为 主,出露于罗坪山以东山区;石炭系以碳酸盐岩为主, 分布于盆地北西及北部山区;泥盆系以碳酸盐岩夹 硅质岩为主,出露于盆地北西部、南东部、南西部山 区;志留系以碎屑岩和碳酸盐岩为主,出露于洱源盆 地北部山区;奥陶系主要为碎屑岩,出露于盆地北西 部山区<sup>[12-14]</sup>。

#### 1.2 洱源县地质灾害特征

洱源县复杂脆弱的地质环境条件孕育出分布不均、活动空间不同、发灾时间集中的灾害特征。其中西部以黑惠江流域内地质灾害发育且活动强烈,灾害数量多,灾情、险情等特征较重,而东部地区地质灾害相对较轻,主要集中于弥苴河流域地区。截至2022年洱源县在册隐患点共有218处,其中崩塌14处,地面沉降2处,地面塌陷5处,滑坡114处,泥石流83处,灾害平均密度数为8.21处/100 km<sup>2</sup>,略低于全省地质灾害点密度为8.73 处/100 km<sup>2</sup>,但乡镇间密度数差异较大<sup>[15-18]</sup>(图1)。

大理白族自治州 2018年-2022年近5年间共 发生78起地质灾害, 洱源县发生15起,占19.2%, 灾害损失位列全州第一。2012年-2022年洱源县 共计上报18起灾情, 灾害活动时间集中于每年汛 期6月-9月, 其中14次为泥石流灾害, 4次滑坡灾 害, 洱源县泥石流是全县主要的地质成灾, 无论是 人员伤亡还是财产损失都占据着很高的比例(表1)。 因此研究洱源县泥石流的发生、发展及演化规律, 总结汛期泥石流监测预警技术经验, 是洱源县地质 灾害监测预警工作重点和难点。

#### 1.3 洱源县泥石流特征

洱源县记录在册的泥石流共有83条,泥石流主 要以沟谷型为主,其中乔后镇19条、炼铁乡17条、 茈碧湖镇及右所镇各12条,为全县发生泥石流总数 最多的乡镇,大多数以中小型规模为主,全县发生特 大型和大型泥石流各有1条,分别位于牛街乡和凤 羽镇。从险情等级来看,特大型险情集中在茈碧湖



#### 图 1 洱源县地质灾害分布图

Fig. 1 Distribution of geological disasters in Eryuan

表1 涯	<b>耳源县滑坡及泥石流灾情统计表</b>
------	-----------------------

Table 1	Statistics	of lan	dslides	and	debris	flows	in	Ervuar
1 uoie 1	Statistics	or run	usinues	unu	uc0115	110 11 5		Liyuun

中中米刊	发灾次数/次					人员受伤/人	<b>从</b> 汶时立坦生/万元	
火舌矢型	6月	7月	8月	9月	失踪	死亡	受伤	至价则)顶天/刀几
滑坡	0	0	2	2	0	0	0	2 269.89
泥石流	1	1	2	10	0	6	39	79071.1

镇3处,乔后镇2处,邓川县1处,凤羽镇1处。综 合泥石流规模及险情特点,茈碧湖镇、邓川镇、乔后 镇泥石流虽然险情大,但泥石流无大型和特大型规 模,牛街乡虽然有特大型泥石流,但险情仅为中等。 近十年以来,洱源县还发生过2次大型泥石流。 2012年8月6日凌晨,云南省大理州洱源县的凤羽、 炼铁、乔后等乡镇因突降暴雨引发多起泥石流灾害, 并造成1人遇难,1人失踪,40人受伤。2016年6 月16日凌晨1点,云南大理洱源县乔后镇突发暴雨, 温坡沙坝沟、大树村白沙河等地发生泥石流灾害, 造成交通中断、部分电站被淹,黑惠江形成堰塞湖。 结合 2021 年泥石流灾害情况,洱源县泥石流爆发活 动周期约为 5 年,且为凌晨暴雨诱发的大规模、集中 连片泥石流,灾害威胁大、防范难度高,上游泥石流 物源在强降雨作用下滑落,沿着沟道冲向下游,形成 泥石流地质灾害,是山区典型的强降雨诱发的沟谷 型泥石流。本次铁甲河流域泥石流灾害为凌晨强降 雨诱发,灾害规模大,险情等级高,且为地质灾害监 测预警工程点,获取了灾害发生实时监测数据,宜作 为全县沟谷型泥石流灾害的研究典型对象。

## 2 泥石流监测预警成功案例分析

第43卷 第6期

2021年9月12日20时至13日8时, 洱源县境 内普降大雨, 凤羽镇、茈碧湖镇、乔后镇及炼铁乡境 内爆发了多条不同规模的山洪泥石流灾害, 其中以 凤羽镇铁甲村铁甲河泥石流爆发规模及灾害损失最 大, 由于预警监测设备捕获发灾信息, 提前发出预警, 现场监测员收到信息并及时组织群众撤离避让, 铁 甲河泥石流未造成重大人员伤亡。

## 2.1 凤羽镇铁甲河流域泥石流发育特征

铁甲河发源于罗坪山东坡,自西向东径流,上游 分为兰林河与黑龙河两条泥石流支沟,在铁甲村西 侧交汇,经过铁甲村于村东侧汇入凤羽河,总流域面 积约 31.00 km<sup>2</sup>,兰林河主沟长 8.5 km,黑龙河主沟 长 9.4 km。流域最高点位于罗坪山山顶地带,海拔 3588 m,最低点位于与凤羽河交汇处,海拔 2110 m 左右,相对最大高差 1478 m,主河道平均纵坡降 135‰左右。

兰林河与黑龙河均为云南省地质灾害在册隐患 点,最早于2007年地质灾害调查与区划工作时发现 并纳入隐患点进行常规监测。兰林河与黑龙河有着 沟道上游陡峭、岩层破碎、节理发育、海拔高、生态 脆弱、斜坡稳定性差的地质环境特征,沟道内物源丰 富,但与传统泥石流不同,主沟中游出现平缓堆积区, 下游先陡后缓形成先流通后堆积的情况,使泥石流 呈现出形成-流通-堆积-流通-再堆积的发育特征, 可分为形成流通区、堆积区及流通堆积区三个区域。 (表 2,照片 1,图 2)

#### 2.2 历史灾情及防治措施

在 20 世纪 80 年代铁甲河曾多次爆发泥石流, 2012 年 8 月 6 日凌晨,铁甲河泥石流造成 2 人死亡, 39 人受伤,此后,每年均有少量的泥沙冲出,因此被 判断为一条高频泥石流河流,威胁兰林村、庄上、铁 甲村共 355 户 1 750 人生命财产安全。2012 年泥石 流灾害发生后,省国土资源厅将兰林河及黑龙河泥 石流纳入治理工程,2014 年竣工,为泥石流提供蓄拦、 消减重度和引流排导等减灾措施。然而,由于山区 风电、小水电开发等工程,道路、站场、排水设施开 挖建设,加上高寒山地过度放牧等影响,泥石流物源 每年不断补给,拦挡工程日新满库,下游排导压力逐 年增大,泥石流在连续强降雨或极端强降雨条件下, 仍然具备暴发条件<sup>[19-20]</sup>。2021 年铁甲河支流兰林河 及黑龙河纳入地质灾害专业监测预警工程,安装自

## 表 2 铁甲河泥石流沟系兰林河与黑龙河分区表

Table 2 Zoning of the Lanlin river and the Heilong river in the system of debris flow gullies of the Tiejia river

分区	形成流通区	堆积区	流通堆积区
海拔	3480~2500 m	2500~2300 m	2300~2136.5 m
分区特征	地形以陡坡-缓坡为主,沟谷呈上缓下陡的 "V"形,谷坡坡度多为25°~60°,局部达 60°~90°,沟床宽度多在25~50m,主沟平均 纵坡降约305‰,出露的岩体节理裂隙发育、 破碎,出露的第四系残坡积物厚度一般 1~3m,最大近4m。	地势相对平缓,地形坡度在15°~20°,平均纵坡降约90‰,沟谷呈 "U"字型,沟道宽约15~30 m,沟 内以碎块石、砂砾石为主,形成 堆积扇,中下部自沟口向堆积扇 前缘地形逐渐变缓。	位于铁甲村至花平、小庄村区域, 地形坡度在25°~35°,河段河谷狭 窄,沟宽1~3m,沟内冲洪积堆积 物较少,沟岸稳定,堆积物经流通 堆积致铁甲村周围。



形成流通区

流通堆积区情况

## 照片1 铁甲河泥石流沟系各区典型景观照片

Photo 1 Typical landscape of each zone in the debris flow gullies of the Tiejia river





Fig. 2 Sectional map of longitudinal slope variation of debris flows of the Tiejia river

动化监测预警设备(表 3)。

## 2.3 灾害监测及预警过程分析

#### 2.3.1 监测预警选型及布设

根据铁甲河流域沟谷型泥石流的成灾特点,依 据《地质灾害专群结合监测预警技术规范》、《云南省 地质灾害监测预警技术指南(试行)》,采用雨量站、 泥水位做为主要监测手段,视频监测站作为辅助监 测手段,预警广播站作为现场预警技术手段。

(1)雨量站: 在泥石流沟中上游形成区和流通区 不同海拔高度、沟道两侧位置内进行布设, 确保真实 捕获泥石流形成过程的降雨数据。结合云南省气象 台提供的降雨数据, 洱源县历史单日最大降雨量 83.7 mm, 最大月降雨量 327.2 mm, 以单日降雨值为监 测目标, 预警阈值由蓝至红依次设置为: 35 mm·日<sup>-1</sup>, 50 mm·日<sup>-1</sup>, 75 mm·日<sup>-1</sup>, 90 mm·日<sup>-1</sup>。

(2) 泥水位计: 在流通区沟道中布设泥水位计, 旨在监测沟道中泥石流水位变化。结合泥石流沟道 情况和历史灾情信息, 以泥水位高度为监测目标, 预 警阈值由蓝至红依次设置为: 0.3 m, 0.5 m, 1.5 m, 2.0 m。

(3)视频监测站:布设在形成区沟道开阔位置,

便于对泥石流沟道实际情况实时查看及预警信息的验证。

(4)预警广播:布设中下游受威胁居民区位置, 第一时间通知受到威胁的居民区群众。

2.3.2 兰林河与黑龙河预警模型及预警过程

兰林河与黑龙河两条沟河具备相似的地质环境 及成灾条件,但预警模型选择上略有差异。兰林河 主沟长度较黑龙河短,流域面积小,且沟道更为平直。 为确保响应时间,采用单参数预警模型,暨流域内两 台雨量站(雨量2和雨量3)以及3台泥水位计(泥位 1,泥位2和泥位3)数据独立运算,不进行综合考虑, 其中一个站达到报警阀值即可发出预警;黑龙河主 沟发育更曲折复杂,流域面积更大,为降低误报率, 采用多参数预警模型,暨流域内三台雨量站(雨量1、 雨量2和雨量3)以及3台泥水位计(泥位4,泥位5 和泥位6)进行联合计算,雨量和泥水位至少各有一 站同时达到所设阈值才进行报警。

2021年9月13日,兰林河流域在受到持续降雨 作用,沟道水位增加,下游3号泥位计首先触发了蓝 色预警,接着雨量2连续触发黄色至红色预警:13 日1时整,下游泥水位值达到0.3m触发蓝色预警;

Table 3 Projects established along the Lanlin river and the Heilong river of debris flow gullies of the Tiejia river								
	治理工程			监测预警工程				
沟名	拦渣坝	谷坊坝	V型排导	雨量站	泥位计	视频	广播站	厉治状况
	/座	/座	槽/m	/台	/套	/套	/套	
兰林河	6	9	815	2	3	1	2	拦挡工程均已满库部分拦挡工程、
黑龙河	7	8	1 195	3	5(含恢复 泥水位)	1	2	排导槽、两沟下游2台泥位监测站、 2台预警广播站在2021年泥石流灾 害中被不同程度损坏

表 3 铁甲河泥石流沟系兰林河与黑龙河已建工程表

1 时 40 分, 兰林河雨量站 24 时累计雨量达 50 mm 触 发黄色预警, 2 时 35 分达 77.5 mm 提升至橙色, 3 时 13 分达 90.5 mm 触发红色预警, 监测员接到预警信 息及时开展排查工作, 发现险情立即上报并组织相 关人员撤离, 成功避险。上游流通区内的泥位 1 和 泥位 2 预警器因沟道纵坡大, 水流流速快、掏蚀能力 强, 导致数据变化仅在 0~0.1 m 之间, 未能触发报警。 4 时 10 分左右, 泥位 3 预警器被泥石流洪峰冲毁, 数 据信号中断, 故此判断兰林河泥石流启动时间为 9 月13日4时10分(图3,图4)。

而黑龙河流域三台雨量站均捕获到了强降雨信息,从13日0时开始降雨量持续增加,但雨强数据 及泥水位数据未同时满足模型触发预警条件,固未 发出预警短信。对比兰林河,黑龙河泥位计布设靠 近主沟上游,数据变化较兰林河更为明显,泥位计6 数据反应出主沟的两次洪峰情况,第一次洪峰出现 在2时45分,洪峰高度1.4m,第二次洪峰出在3时 58分,洪峰高度1.2m,而后泥位计6被洪峰冲毁。



图 3 铁甲河泥石流沟系泥石流分区及监测网点布设图





Fig. 4 Comprehensive analysis of monitoring rainfall and water levels of debris flows in the Lanlin river of debris flow gullies of the Tiejia river

泥位计 5 也有 0.9 m 的数据反应,但位于堆积区的泥 位计 4 最高泥水位仅 0.4 m。结合泥位 6 冲毁的时 间推断黑龙河暴发泥石流的时间在 3 时 58 分,并呈 现两次洪峰态势(图 5)。

由于兰林河预警信息及时发出,当地群测群防 员及管理人员及时巡查发现险情,果断采取紧急避 险措施,组织铁甲村群众,约540人,及时转移避险, 后因个别村民私自返回村庄搜寻财物,遭受2次洪 峰,最终导致3人死亡(照片2)。

## 3 经验与启示

本次灾害之所以能成功预警,及时避险,成功经验主要有4条<sup>[21-24]</sup>:

(1)调查踏勘时准确把握灾害基本特征与成灾 模式是准确预警的重要基础。监测预警方案编制, 监测预警设备选型以及布设位置,预警模型及预警 阈值的设置,应急避险处置的合理可行,都是建立在 扎实的基础调查工作上。

(2)结合铁甲河流域本次的成灾特点,应考虑对 雨量数据与沟道水位数据变化的时间差异进行优化, 红色预警信号发出时可以考虑单参数预警,避免泥 水位计遭受破坏无法发出预警,而导致判断失效情 况发生。

(3) 落实防灾工作责任,各级防灾责任人接到预 警信息及时响应,发现险情立即召集可能受灾区域 群众转移,这是监测预警成功避险的最终落脚点,也 是整个防灾预警工作的终级目标。

(4)实施紧急避险后,还需持续强化对危险区的 管控力度。铁甲河泥石流案件中,虽然将受灾区群 众及时转移出危险区,但未能持续强化管控和避灾 警示教育,导致个别群众折返回家因2次洪峰造成 人员死亡。



此外,还可以得出以下启示:

Fig. 5 Comprehensive analysis of monitoring rainfall and water levels of debris flows in the Heilong river of debris flow gullies of the Tiejia river



兰林河和黑龙河交汇后漫流

泥石流漫流至村庄中

照片 2 铁甲河泥石流灾害情况照片 Photo 2 Photo of debris flow in the Tiejia river

(1)洱源县的大型及特大型泥石流属暴雨型沟 谷泥石流,突发强降雨是成灾的主要因素。铁甲河 作为洱源县典型暴雨型沟谷泥石流易发河流,上游 较大的坡降及汇水面积为灾害激发力提供有利条件, 洪流带动物源快速冲下,中游相对平缓的地势为物 质提供了临时堆积区,不断为泥石流成灾积蓄力量, 增加了破坏力。在强降雨作用下,中游物源启动,成 灾。由此可见,防范暴雨型沟谷泥石流的关键因素 就是捕获降雨信息和泥石流物源启动讯息。

(2)云南省立体气候特点往往在高海拔地区的 降雨较大。为更好地捕获降雨信息,设置雨量监测 站时应多布设在高海拔地区。泥水位监测设备应布 设于物源启动处,并结合暴雨型泥石流洪流掏蚀能 力和铲刮作用强的特点,应避开沟道狭窄、纵坡大、 流速高且侵蚀能力强的沟道地段,这样地段不能客 观反应对应的流量递增情况,监测效果不佳。

(3)云南省地质灾害应急预案自 2006 年发布以 来,各州市结合自身地质灾害特征,陆续建立起自己 的地质灾害应急预案,但对于撤离群众的安置和管 控工作还存在一定的盲区和不足,后续应重点加强 对危险区撤离群众的安置和管控。

## 4 结 语

受突发强降雨引起的暴雨沟谷型泥石流往往规 模大、破坏力强、爆发时间短、威胁对象多,是洱源 县地质灾害防范重点和难点。在监测预警工作中, 应重点把握泥石流上游强降雨激发力及泥石流中 下游成灾洪流的监测。在预警叫应响应工作中,明 确成灾后的主要威胁对象,确保布设的预警设备及 预警信息第一时间传达到。预警阈值和模型的设 置过程应结合灾害的成灾特点进行综合设置。在 监测预警工作中,"人防"工作落实至关重要,特别 应加强对于撤离群众的安置和管控。即使实施了 治理工程的泥石流易发河流,在极端强降雨作用下 仍有成灾的可能,特别是像铁甲河这样易发暴雨沟 谷型泥石流的河流,监测预警工作依然是工程治理 后的有效防灾补充手段,提高对泥石流的综合防治 能力。

#### 参考文献

[1] 王梓桐. 云南省大理市地质灾害研究[D]. 北京: 中国地质大

学,2021.

WANG Zitong. Study on geological hazards in Dali City, Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.

- [2] 云南省地质环境监测院.县(市)地质灾害调查综合研究与信息系统建设成果报告[R].2010.
- [3] 刘传正.中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J].地质论评, 2014,60(4):858-868.

LIU Chuanzheng. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China[J]. Geological Review, 2014, 60(4): 858-868.

- [4] 袁道先.西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M].北京:科学出版社, 2014: 3-14.
- [5] 常祖峰,张艳凤,周青云,虎雄林,藏阳.2013年洱源 Ms5.5地 震烈度分布及震区活动构造背景研究[J].中国地震,2014, 30(4):560-570.

CHANG Zufeng, ZHANG Yanfeng, ZHOU Qingyun, HU Xionglin, ZANG Yang.Intensity distribution characteristics and active tectonic background in area of the 2013 Eryuan $M_s$ 5.5 earthquake [J].Earthquake Research in China, 2014, 30(4): 560-570.

 [6] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444.
 YIN Yueping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan [J]. Journal of Engineering Geol-

Wenchuan earthquake, Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433-444.

[7] 王宇. 云南省崩塌滑坡泥石流灾害及防治[J]. 地质灾害与环境保护, 1998, 9(4): 38-47.

WANG Yu. Hazards collapse landslide and debris flow in Yunnan and their control[J]. Geological Hazards and Environment Protection, 1998, 9(4): 38-47.

[8] 王宇. 云南省地质灾害防治与研究历史评述[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 134-139.

WANG Yu. Historical review of geological disaster prevention and research in Yunnan Province, China[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 134-139.

- [9] 王宇, 祝传兵, 张杰, 杨迎冬, 黄成. 云南高原山区地质灾害与 应急地质工作方法[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2020: 37-45.
- [10] 唐川. 云南省地理研究所滑坡泥石流研究 10 年[J]. 云南地理 环境研究, 1998, 10(Suppl.1): 33-40.
- [11] 云南省地质环境监测院.县(市)地质灾害调查综合研究与信息系统建设成果报告[R].2010.
  Yunnan Provincial Institute of Geological Environment Monitoring. Report on Comprehensive Research and Information System Construction Results of County (City) Geological Disaster Investigation [R].2010.
  [12] 赵石锁.云南省洱源县地质灾害成因机制及危险性区划[D].

北京:中国地质大学, 2016. ZHAO Shisuo. Research on formation and division of geological disaster in Eryuan county, Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.

[13] 张小趁,陈红旗.突发地质灾害应急技术过程模式[J].灾害学,

2015, 30(4): 149-155.

ZHANG Xiaochen, CHEN Hongqi. Geological disaster emergency technology: Process model[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 149-155.

[14] 张红兵,金德山.影响云南省滑坡泥石流活动的几个自然因素
 [J].水文地质工程地质,2004(5):38-41.
 ZHANG Hongbing, JIN Deshan. Several natural factors influ-

encing on activity of landslide and debris flow in Yunnan Province[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004(5): 38-41.

- [15] 杨迎冬, 晏祥省, 王宇, 汤沛, 魏蕾, 赵鹏, 黄成. 云南省地质灾 害特征及形成规律研究[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 131-139.
   YANG Yingdong, YAN Xiangsheng, WANG Yu, TANG Pei, WEI Lei, ZHAO Peng, HUANG Cheng. The characteristics and formation of geological hazards in Yunnan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 131-139.
- [16] 何瑞翔,林齐根,王瑛,宋崇振. 云南省地质灾害影响因素及高 危险区分析[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 208-213.
  HE Ruixiang, LIN Qigen, WANG Ying, SONG Chongzhen.
  Factors and high risk area analysis of geological hazards in Yunnan[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 208-213.
- [17] 龚红胜,朱杰勇,陈刚.昆明市活动断裂与地质灾害关系的探 讨[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(3):161-164.
- [18] 云南地质工程第二勘察院大理分院.云南省 2020 年度大理州 地质灾害监测预警体系建设(总承建)A 包实施方案[R]. 2021.
- [19] 地质灾害应急联合调查组. 洱源县 "9·13" 大型山洪泥石流灾

害应急调查报告[R].2021.

- [20] 杨迎冬, 汤沛, 肖华宗, 晏祥省. 云南省地质灾害与水系关系初步分析[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 36-39.
   YANG Yingdong, TANG Pei, XIAO Huazong, YAN Xiangsheng. Preliminary analysis on relationships between geo-hazards and river systems of Yunnan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 36-39.
- [21] 刘传正,温铭生,刘艳辉,刘秋强,顾笑筱. 汶川地震区地质灾 害成生规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 1-16.
  LIU Chuanzheng, WEN Mingsheng, LIU Yanhui, LIU Qiuqiang, GU Xiaoxiao. Regional assessment on geological disasters in "5.12" Wenchuan seismic Area, China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 1-16.
- [22] 王宇,杨迎冬,晏祥省,汤沛,张杰.云南鲁甸 6.5 级地质次生 特大地质灾害的特征及原因[J].灾害学,2016,31(1):83-86.
  WANG Yu, YANG Yingdong, YAN Xiangsheng, TANG Pei, ZHANG Jie. Characteristics and causes of super-huge secondary geological hazards by M6.5 Ludian earthquake in Yunnan[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 83-86.
- [23] 徐继维,张茂省.泥石流风险评估综述[J].灾害学,2016, 31(4):157-161.

XU Jiwei, ZHANG Maosheng. A review of debris flow risk assessment[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(4): 157-161.

[24] 刘传正,刘艳辉,温铭生,唐灿,薛群威.中国地质灾害区域预 警方法与应用[M].北京:地质出版社,2009:148-171.

## Reflection and enlightenment on monitoring and early warning of debris flows in Eryuan: A case study of the "9.13" large-scale freshet-induced debris flow of the Tiejia river

TANG Pei<sup>1,2,3</sup>, ZHU Chuanbing<sup>1,2,3</sup>, JIANG Yuebin<sup>4</sup>, ZHOU Cuiqiong<sup>1,2,3</sup>, LI Xiaomei<sup>4</sup>, ZHANG Lingze<sup>1,2,3</sup>, XIAO Huazong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Wenjun<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China;

3. Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 4. No.2 Yunnan Institute for Geological

Engineering Survey Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650218, China)

**Abstract** Eryuan county is located in the northern part of Dali Bai Autonomous Prefecture, Yunnan Province. It borders Heqing county and Binchuan county to the east, Dali City and Yangbi county to the south, Yunlong county to the west, and Jianchuan county to the north. The maximum straight-line distance from east to west is about 80 km, and the maximum straight-line distance from north to south is about 68 km. The circumference of the county is about 340 km. Eryuan county is located at the collision zone between the Indian Plate and the Eurasian Plate, and is strongly influenced by the Himalayan orogeny. Since the Miocene, the plateau has experienced substantial uplift, accompanied by vigorous neotectonic movements. Earthquakes are common in this area due to its complex and varied geological and topographical conditions. The terrain is characterized by significant cutting, with high mountains and deep valleys. Additionally, this area has well-developed water systems, and geological disasters occur frequently in this area. It is a

1407

high-risk area for geological disasters in Yunnan Province. Since 2012, casualties resulting from geological disasters in Eryuan have primarily been attributed to rainstorm-induced gully-type debris flows. This type of debris flow disaster in the Tiejia river basin is characterized by sudden heavy rainfall occurring in the early morning, leading to large-scale events at a high level of risk. This area also serves as a site for projects of monitoring and early warning geological disasters. It represents a typical case for studies on gully-type debris flow disasters throughout the entire county.

Based on the characteristics of gully-type debris flows in the Tiejia river basin, and in accordance with the Technical Specification for Geological Disasters Monitoring and Early Warning by Combination of Professional and Masses Methods and the Technical Guidelines for Monitoring and Early Warning of Geological Hazards in Yunnan Province (Trial), in this study, we employed rainfall stations and mud water levels as main monitoring sites and data, video monitoring stations as auxiliary monitoring sites, and warning broadcasting stations as sites for on-site warning techniques. We analyzed the background and movement characteristics of debris flow disasters in the Eryuan gully. Additionally, we selected a warning model based on the similarities in geological environment and the differences in disaster conditions between the gullies of the Lanlin river and of the Heilong river. Because the main gully of the Lanlin river is shorter than that of the Heilong river, has a smaller drainage area, and features a flatter gully, we adopted a single-parameter warning model to ensure response time. Besides, the development of the main gully of the Heilong river is more tortuous and complex, and it covers a larger watershed area; therefore, we adopted a multi-parameter warning model to reduce the false alarming rate. Based on the analysis of the early warning results of the two gullies of debris flows, and the selection and layout of monitoring and early warning equipment for rainstorm-induced debris flows, we illuminated the setting of model thresholds, and summarized the experience and enlightenment of monitoring and early warning debris flows in Eryuan.

The gully debris flows triggered by sudden heavy rainfall are often large in scale, possess strong destructive power, have a brief duration of occurrence, and threaten numerous objects. This presents a key challenge in the prevention of geological disasters in Eryuan county. In the work of monitoring and early warning, we should focus on the monitoring of the strong rainfall that triggers debris flows upstream and the flood flows that causes disasters in the middle and downstream areas of the debris flows. In the work of early warning response, we should identify the main threat after the disaster, and ensure that the deployed warning equipment and warning information are transmitted in a timely manner. We should comprehensively set warning thresholds and models, based on the characteristics of disasters. We should also prioritize the resettlement of evacuees and its regulation. Even if we have implemented projects of controlling debris flows, it is likely to occur debris flows under the influence of extremely heavy rainfall, especially the rainstorm-induced gully-type debris flows taking place in the Tiejia river. Projects of monitoring and early warning can still serve as an effective supplementary measure for engineering management after disaster treatment, so as to enhance the capabilities of comprehensive prevention and control of debris flows.

Key words geological hazards, monitoring methods, monitoring and warning, Eryuan, Yunnan, debris flow

(编辑张玲)