

四川凉山州地质灾害灾情特征与主要致灾类型

徐伟, 郑玄, 欧文, 铁永波, 付小麟, 宋钰朋, 殷万清

Characteristics of losses of geological disasters and major disaster types in Liangshan Prefecture, Sichuan Province

XU Wei, ZHENG Xuan, OU Wen, TIE Yongbo, FU Xiaolin, SONG Yupeng, and YIN Wanqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202305029>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四川长宁“6·17”地震诱发的次生地质灾害类型及其发育特征

Types and their characteristics of geological hazards triggered by “6·17” earthquake in Changning, Sichuan Province

廖勇, 徐闯, 陈军, 周世文 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 77-83

基于自然灾害风险评价框架的省级地质灾害风险区划方法探讨——以吉林省为例

Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: a case study in Jilin Province

张以晨, 郎秋玲, 陈亚南, 张继权, 田书文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 104-110

基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状

Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China

张凯翔 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 1-11

西南红层地区地质灾害发育规律与成灾模式

Developing law and disaster modes of geohazards in red bed region of southwestern China: A case study of Yiliang County of Yunnan Province

徐伟, 冉涛, 田凯 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 127-133

黄河流域甘肃段地质灾害发育特征

The development characteristics of geological hazards in Gansu segment of the Yellow River basin

郭富, 宋晓玲, 刘明霞 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 130-136

自贡市地质灾害专群结合监测预警模式升级与实践

Upgrading and practice of early warning mode of geological disaster special group combination in Zigong City

杨江涛, 李波, 李伯宣, 罗兰 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 130-134



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202305029

徐伟, 郑玄, 欧文, 等. 四川凉山州地质灾害灾情特征与主要致灾类型[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(5): 78-89.

XU Wei, ZHENG Xuan, OU Wen, et al. Characteristics of losses of geological disasters and major disaster types in Liangshan Prefecture, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(5): 78-89.

四川凉山州地质灾害灾情特征与主要致灾类型

徐伟^{1,2,3}, 郑玄⁴, 欧文⁵, 铁永波^{1,2,3}, 付小麟⁴, 宋钰朋⁶, 殷万清⁴

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081; 2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心, 四川成都 611734; 3. 自然资源部成都地质灾害野外科学观测研究站, 四川成都 610000; 4. 凉山州地质环境监测站, 四川西昌 615000; 5. 四川省国土空间生态修复与地质灾害防治研究院, 四川成都 610081; 6. 四川省核工业地质局二八一大队, 四川西昌 615000)

摘要:凉山州受活动构造、地形地貌、河流切割等作用,是四川省地质灾害高风险地区。为系统查明凉山州地质灾害发育特征、灾情特征及主要致灾类型,采用资料收集、数理统计、现场调查等方法,统计分析地质灾害数据、灾情数据和重大突发地质灾害实例。结果表明:凉山州地质灾害以滑坡、泥石流为主,滑坡主要为中小规模土质滑坡,泥石流主要为中小规模沟道型泥石流;有记录以来共计发生 24 起死亡 10 人以上的地质灾害;2006—2020 年,共发生 46 起地质灾害灾情,以泥石流为主。总结提炼了 7 种地质灾害主要致灾类型,红层滑坡是凉山州滑坡主要类型之一,遇水易软化解体,自稳能力差;复活型古滑坡,在凉山州多有分布,由于人类工程活动、河流冲刷等因素,古滑坡易变形和复活;库岸型滑坡,主要发育在木里县、布拖县、宁南县的水电站库区内,受库水位消落带影响斜坡塌岸隐患较多,坡体稳定性降低形成滑坡;含煤层型滑坡,主要发育在凉山州南部的煤系地层区域,斜坡前缘不合理开挖易诱发前缘滑塌并造成整体滑动;矿渣型泥石流是凉山州泥石流主要类型之一,矿渣、废石、尾砂等不合理堆放,为泥石流提供了丰富物源;凉山州常发生森林火灾,火烧迹地遭遇暴雨后易诱发火后泥石流;在构造活动强烈、山势陡峭的沟谷上游发生崩滑灾害后,易沿沟运动冲出,堵塞河道形成链式灾害。研究成果可为凉山州针对性开展防灾减灾工作提供数据支撑和科学参考。

关键词:地质灾害;灾情特征;红层滑坡;古滑坡;库岸型;矿渣型

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)05-0078-12

Characteristics of losses of geological disasters and major disaster types in Liangshan Prefecture, Sichuan Province

XU Wei^{1,2,3}, ZHENG Xuan⁴, OU Wen⁵, TIE Yongbo^{1,2,3}, FU Xiaolin⁴, SONG Yupeng⁶, YIN Wanqing⁴

(1. China Geological Survey of Chengdu Center, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 611734, China; 3. Observation and Research Station of Chengdu Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan 610000, China; 4. Liangshan Prefecture Geological Environment Monitoring Station, Xichang, Sichuan 615000, China; 5. Sichuan Provincial Institute of Territorial Ecological Restoration and Geological Disaster Prevention, Chengdu, Sichuan 610081, China; 6. Sichuan Nuclear Industry Geology Bureau 281st Brigade, Xichang, Sichuan 615000, China)

收稿日期: 2023-05-24; 修订日期: 2023-10-12

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221746)

第一作者: 徐伟(1986—),男,山东淄博人,地质工程专业,博士研究生,高级工程师,主要从事地质灾害调查评价和岩体稳定性方向研究。E-mail: 052054@163.com

通讯作者: 宋钰朋(1991—),男,四川成都人,地下水科学与工程专业,大学本科,工程师,主要从事地质灾害评价与防治工作。

E-mail: 490882449@qq.com

Abstract: Due to active tectonics, topography, and river dynamics, Liangshan Prefecture is highly susceptible to geological disasters in Sichuan Province. In order to find out the developmental patterns, characteristics, and prevalent disaster modes of geological disasters in Liangshan Prefecture, this paper uses data collection, mathematical statistics, field investigation and other methods to conducted a comprehensive analysis of geological disaster data, disaster situations, and major sudden geological disaster cases in Liangshan Prefecture. The results show that the primary geological hazards in Liangshan Prefecture are landslides and mud-rock flows. The landslides are mainly medium and small scale soil landslides, and the mud-rock flows are mainly medium and small scale gully mudflows. Over the recorded period, Liangshan Prefecture experienced 23 geological disasters resulting in more than 10 fatalities. Between 2006 to 2020, 46 geological disasters occurred, mainly in the forms of debris flow. This paper identifies and refines seven typical geological disaster modes in Liangshan Prefecture. Notably, red bed landslides, prone to softening and disintegration in water with poor self-stability, constitute a significant landslide type. Reactivation of ancient landslides, widely distributed in the region, is triggered by human activities, river erosion, and other factors. Reservoir bank landslides are prevalent in the reservoir areas of Muli County, Butuo County, and Ningnan County, posing risks due to fluctuating reservoir water levels. There are many hidden dangers of bank collapse due to the influence of reservoir water level, and the slope Coal-bearing landslides are prominent in the southern coal measure stratum area, induced by unsustainable mining practices. Slag-type debris flow is one of the main types of debris flow in Liangshan Prefecture. The unreasonable stacking of slag, waste rock and tailings provides rich material sources for debris flow disasters. Liangshan Prefecture frequently experiences forest fires, and the burned land is easy to induce post-fire mud-rock flow after heavy rain. When the landslide disasters occurs in the upper reaches of gullies with strong tectonic activity and steep mountain potential, it is easy to rush out along the gully, blocking the river and forming a chain disaster. The research results can provide data support and scientific insights for disaster prevention and mitigation in Liangshan Prefecture.

Keywords: geological disaster; characteristics of casualties and losses; red-bed landslide; ancient landslide; reservoir bank type; slag type

0 引言

凉山州地处横断山系东北缘、川滇构造带南段,受活动构造、地形地貌、河流切割等作用,地质灾害发育且频发,时常造成群死群伤和巨大经济损失,如2003年普格县“6·20”泥石流^[1]、2004年德昌县“8·24”群发泥石流^[2]、2015年雷波县碉楼沟泥石流^[3]、2017年普格县莽窝镇8·8泥石流^[4]、2019年甘洛县群发性山洪泥石流^[5]、2019年甘洛县“8·14”埃岱村滑坡^[6]等。

近年来,许多学者对凉山州突发重大地质灾害的发育特征、成灾机理、破坏模式、防治措施等方面进行了研究:在滑坡灾害研究方面,以会理县老营盘村^[7]、美姑县火洛村滑坡^[8]、美姑县洛渣滑坡^[9]、普格县姚家山滑坡^[10]、宁南县水塘村滑坡^[11]、西昌市太和矿北采场滑坡^[12]为研究对象,开展了滑坡的形成机理和稳定性研究;在古滑坡复活研究方面,以木里县卡基娃滑坡^[13]、雷波县马湖古滑坡群^[14]、美姑县拉马阿觉滑坡^[15]、金阳县城区古滑坡^[16]、盐源县玻璃村滑坡^[17]为研究对象,开展了古滑坡复活特征、成因机制、影响因素研究;在火后泥石流研究方面,以木里县黄泥巴沟泥石流^[18]和项脚

沟泥石流^[19]、西昌市响水沟泥石流^[20]和电池厂沟泥石流^[21]、喜德县中坝村泥石流^[22]为研究对象,开展了火后泥石流发育特征、成灾机理研究;在暴雨诱发泥石流研究方面,以2004年德昌县群发泥石流^[23]、2009年金阳县地洛电站泥石流^[24]等为研究对象,开展了泥石流成灾过程、特征成因、形成机理研究;在链式灾害研究方面,以白沙村滑坡-碎屑流^[25]、埃岱村滑坡-碎屑流^[6]、阿坡洛滑坡-堰塞湖^[26]和采书组滑坡-堰塞湖^[27]为研究对象,开展了滑坡发育特征、成灾机理和运动过程研究。但是,对于凉山州地质灾害的整体发育特征、灾情特征、主要致灾类型等方面缺乏系统性总结与研究。

本文基于凉山州地质灾害数据和资料,分析了凉山州地质灾害整体发育特征和灾情特征,总结提炼了7种主要致灾类型,通过实例逐一分析了灾害发育特征,以期对凉山州地质灾害的防灾减灾工作提供数据支撑和科学参考。

1 地质环境背景

凉山彝族自治州,位于四川省西南部,地势西北高,

东南低,北部高,南部低。地处扬子古陆块西缘,川滇构造带南段,境内构造发育,主要构造体系有:安宁河构造带、小江构造带、青藏川“歹”字形构造带、玉树—甘孜构造带、龙门山构造带、雷波—马边构造带。地处中国南北地震带中段,是构造地震活动强烈地区之一。位于扬子和巴颜喀拉秦岭两大地层区,金矿—木里深大断裂,以东属扬子地层区,以西的木里县和冕宁县西缘属巴颜喀拉秦岭地层区,地层复杂,变化较大。

位于川西南横断山系东北缘,界于四川盆地和云南高原之间,地形地貌复杂,地势西北高、东南低,主要山系有大凉山山系、小相岭—鲁南山山系、大雪山山系。地貌按成因分为河谷堆积地貌、中山地貌和构造剥蚀高山地貌;中山地貌占全州面积的 78%,山势相对陡峭,河谷宽阔,多呈“U”型,岸坡平缓;构造剥蚀高山地貌主要分布在凉山州西北部的木里县,占全域面积的 20%,切割剧烈,山高谷深,呈狭窄“V”型。

属亚热带季风气候,四季不明显,但干湿分明。全州年平均气温 4.6°C , 年均降水量为 995.5 mm, 7 月份的月均降水量最高,达 274.1 mm, 5—9 月份降雨量约占全年总量的 79.24%。金沙江干热河谷年降水量 600 mm 左右,气候炎热少雨,植被稀少,水土流失严重,生态十分脆弱,物理风化作用强烈,干旱易发生森林火灾,自然灾害特别突出,如木里县(2019 年、2020 年)、西昌市(2020 年)、冕宁县(2021 年)都曾发生规模较大的森林火灾,火灾造成植被和土壤不同程度的破坏,为火后泥石流等地质灾害的发生提供了丰富的物源。境内河流众多,由金沙江、雅砻江和大渡河三大水系组成。大于 $1\,000\text{ km}^2$ 的河流 11 条,还有邛海、马湖、泸沽湖等 23 个内陆淡水湖泊。水力资源极为丰富,有溪洛渡($1.26\times 10^6\text{ kW}$)、白鹤滩($1.305\times 10^6\text{ kW}$)等 14 座在建和规划的大型水电站。

人类工程活动对原有地质环境的改造,是诱发凉山州地质灾害的重要因素之一。道路建设、切坡建房等人类活动(图 1—2),对边坡不合理的开挖,破坏斜坡体稳定性,在降雨、地震等诱发因素下更容易发生滑坡灾害。凉山州矿产资源丰富,矿区内废石、弃渣的不合理堆放(图 3),会造成弃渣斜坡的失稳滑动,也为矿渣型泥石流的形成提供丰富物源。

2 凉山州地质灾害发育特征

2.1 地质灾害类型

四川省是西南地区地质灾害点数量最多的省份^[28],数量达 30239 处;凉山州所处的川西地区共发育地质灾



图 1 金阳县新区建设开挖形成的陡坡

Fig. 1 Steep slope formed by construction excavation of Jinyang New District



图 2 切坡建房引发的滑坡

Fig. 2 Landslide triggered by slope cutting for building construction



图 3 雷波县某磷矿形成的矿渣堆

Fig. 3 Phosphorite slag heap formed in a phosphate mine in Leibo County

害 16 411 处^[29]。依据《四川省凉山州(1:100 000)地质灾害风险调查评价成果报告》中数据显示,凉山州地质灾害总数 4 016 处(截至 2021 年底)(图 4、表 1),约占全省灾害总数量的 13.4%,其中滑坡 2 674 处、泥石流

1 087 处、崩塌 249 处、地面塌陷 6 处,分别占全州总数的 66.6%、27.1%、6.2%、0.15%。从灾害类型和规模等级看,滑坡以中小型为主,数量达 2 565 处,占滑坡总数的 95.9%;崩塌以中小型为主,数量达 245 处,占崩塌总数的 98.4%;泥石流以中小型为主,数量达 1 061 处,占

泥石流总数的 97.6%。如表 2 所示,滑坡按物质组成统计,以土质滑坡为主,数量达 2 950 处,占比 98.4%;崩塌按物质组成统计,以岩质崩塌为主,数量达 305 处,占比 95.91%;泥石流按流域形态统计,以沟道型泥石流为主,数量达 1 177 处,占比 96.55%。

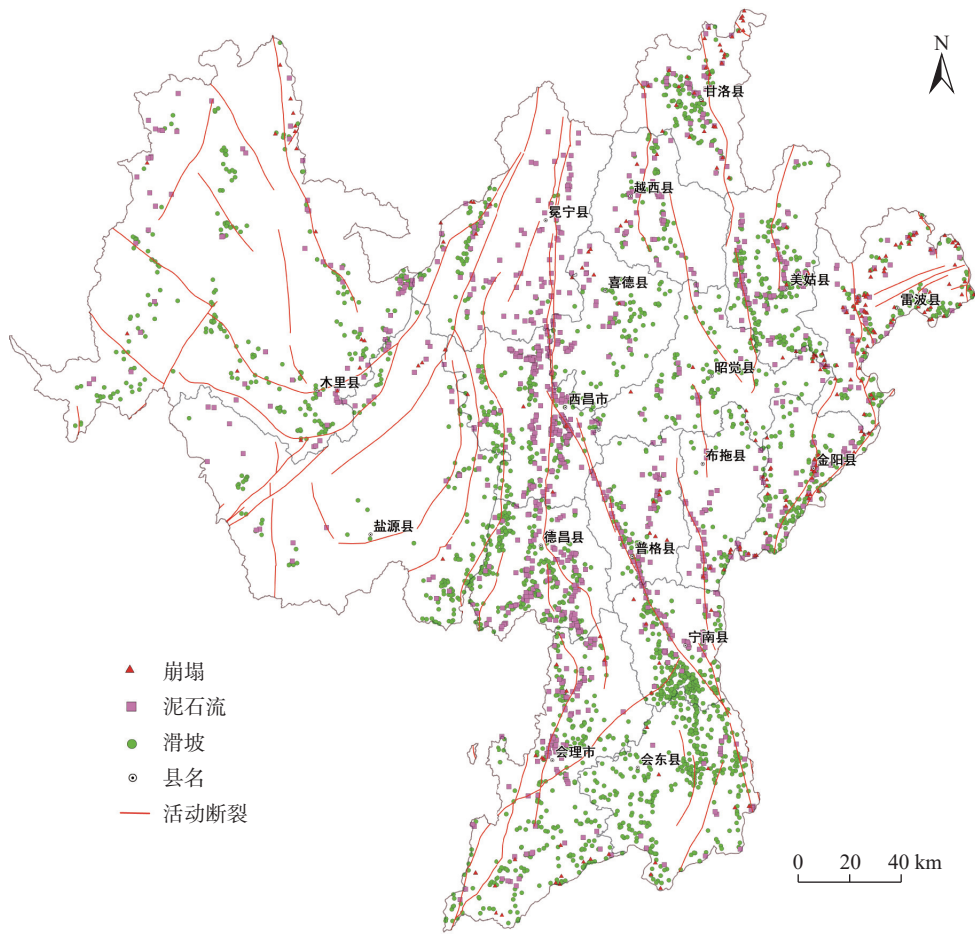


图 4 凉山州地质灾害分布图

Fig. 4 Geological hazard distribution map of Liangshan Prefecture

表 1 凉山州地质灾害发育类型及数量						
Table 1 Development types and quantities of geological hazards in Liangshan Prefecture						
规模	崩塌	滑坡	泥石流	地面塌陷	合计	占比/%
特大型	2	3	4	0	9	0.22
大型	2	106	22	0	130	3.24
中型	76	830	258	0	1 164	28.98
小型	169	1 735	803	6	2 713	67.55
合计	249	2 674	1 087	6	4 016	100
占比/%	6.20	66.58	27.07	0.15	100	

2.2 地质灾害人员伤亡及经济损失

收集和梳理凉山州各县有记录以来的历史重大地质灾害资料得到(表 3),凉山州共计发生 24 起死亡 10

人以上的地质灾害,灾害类型以泥石流为主;造成伤亡最严重的灾害为 1850 年发生在西昌的 7.5 级地震,据记载地震及诱发的地质灾害造成约 2.79 万户人受灾,

表 2 凉山州不同类型地质灾害发育特征统计			
Table 2 Statistical analysis of development characteristics of different types of geological hazards in Liangshan Prefecture			
灾害类型	发育特征	数量/处	占比/%
滑坡	土质	2 950	98.40
	岩质	48	1.60
崩塌	土质	13	4.09
	岩质	305	95.91
泥石流	沟道型	1 177	96.55
	坡面型	42	3.45

表 3 凉山州历史重大地质灾害灾情简表(死亡 10 人以上)

Table 3 Summary of major historical significant geological disasters in Liangshan Prefecture (with 10 or more fatalities)

序号	位置	发生日期	灾害类型	规模 /10 ⁴ m ³	受灾对象	受灾人口/人	死亡/人	直接经济 损失/万元	具体成因
1	西昌城区及周边乡镇	1850-09-12	7.5级地震	不详	居民、房屋、道路等	2.79万户	约27 000	不详	7.5级地震
2	会东县小田坝村下坝老街	1881-02-06	滑坡	不详	人、畜和房屋	不详	约30	不详	不详
3	喜德县东河	1891-07-05	泥石流	不详	居民、房屋、道路等	不详	约1 000	不详	暴雨
4	西昌市东河、西河	1942-06-16	山洪、泥石流	不详	居民、房屋、道路等	不详	约120	不详	暴雨
5	西昌沿安宁河19个乡	1951-08-24	山洪、泥石流	不详	居民、房屋、道路等	不详	15	不详	暴雨
6	西昌市东河	1955-07-14	山洪、泥石流	不详	居民、房屋、道路等	不详	68	不详	暴雨
7	喜德县中沟	1957-06-29	泥石流	不详	居民、房屋、道路等	不详	84	不详	暴雨
8	冕宁县泸沽镇洛瓦村4组	1970-05-26	泥石流	530	原铁道部第二工程处食堂、 仓库和工棚	500	104	不详	矿山开采
9	喜德县红莫镇司金沟3社	1972-08-01	泥石流	不详	村落、房屋	不详	200	3 000	暴雨
10	甘洛县乌史大桥乡利子依达沟	1981-07-09	泥石流	30万	成昆铁路利子依达大桥、 旅客列车	不详	240	2 000余万	暴雨
11	会东县溜姑乡三家村	1988-06-01	泥石流	不详	公路大桥桥墩、工棚	26	13	不详	暴雨及冰雹
12	冕宁县漫水湾镇二村沟1组	1989-09-04	泥石流	不详	居民点、农田	3 000	51	不详	暴雨
13	冕宁县漫水湾镇胜利村	1989-09-04	泥石流	不详	居民点、农田	500	12	不详	暴雨
14	德昌县永郎镇蒲坝村	1995-07-11	泥石流	2.5	聚集区	63	10	800	暴雨
15	普格县五道箐镇采阿咀沟	2003-06-20	泥石流	70	公路、房屋、通信光缆	58	10	100	暴雨
16	盐源县平川镇骡马铺村2组	2006-07-14	泥石流	100	聚集区	168	16	500	暴雨
17	冕宁县彝海乡勒帕村	2011-06-16	泥石流	不详	聚集区	不详	17	不详	暴雨
18	宁南县白鹤滩镇和平村 1组矮子沟	2012-06-27	泥石流	8	分散农户、白鹤滩水 电站施工区	不详	38	530	暴雨
19	雷波县岩脚乡金沙村	2013-07-27	滑坡-涌浪	不详	金沙江航道船只、对岸码头	不详	约20	不详	暴雨
20	普格县莽窝镇耿底村 4、5组桐子林沟	2017-08-08	泥石流	1.03	通村公路、房屋	577	26	16 000	暴雨
21	冕宁县棉沙镇许家坪村 1、2组下草坪子滑坡	2012-07-12	滑坡	不详	公路、房屋	95	13	400	持续降雨
22	德昌县茨达镇新华村	2004-08-23	滑坡、泥石流	不详	聚集区	4 960	17	不详	暴雨
23	德昌县乐跃镇乐跃沟村	2004-09-24	泥石流	不详	聚集区	不详	11	不详	暴雨
24	盐源县洼里乡手爬村二组北沟段	2012-08-30	泥石流、滑坡	不详	聚集区	241	13	520	暴雨

2.7 万人死亡,2.6 万余间房屋倒塌。

根据 2006—2020 年地质灾害灾情资料,凉山州共发生 46 起因灾伤亡的地质灾害(表 4),包括泥石流 30 起、滑坡 9 起、崩塌 7 起,共计死亡 156 人,失踪 66 人,受伤 77 人,直接经济损失 29 200 万元。按照灾情等级划分,特大型 2 起、大型 4 起、中型 17 起、小

型 23 起。其中 2 起特大型灾情分别是:2017 年 8 月 8 日凌晨 4 点至 4 点 30 分,普格县莽窝镇耿底村 4 组和 5 组桐子林沟发生泥石流灾害,导致 25 人死亡,71 间房屋损毁,1.6 亿元经济损失;2012 年 6 月 28 日,宁南县白鹤滩镇矮子沟暴发特大山洪泥石流灾害,造成白鹤滩镇 1 540 户 6 151 人受灾,白鹤滩电站水电

表 4 凉山州各县市灾情统计表(2006—2020 年)

Table 4 Statistical table of disaster situation for each county and city in Liangshan Prefecture (2006—2020)

县/市	灾情数量/起	死亡失踪/人	经济损失/万元	县/市	灾情数量/起	死亡失踪/人	经济损失/万元
德昌县	2	3	410	冕宁县	2	20	520
甘洛县	3	4	111	木里县	3	16	220
会东县	1	2	15	宁南县	8	52	6 850
会理市	2	1	75	普格县	4	31	17 470
金阳县	4	13	170	喜德县	1	6	100
雷波县	7	25	745	盐源县	3	30	1 470
美姑县	2	8	546	越西县	2	1	118
昭觉县	2	10	380	合计	46	222	29 200

四局施工人员 20 人失踪、20 人遇难、13 人受伤的严重后果。

3 主要致灾类型

梳理分析凉山州发生的重大突发地质灾害数据,总结提炼了凉山州 7 种地质灾害主要致灾类型,分别是红层滑坡、复活型古滑坡、库岸型滑坡、含煤层型滑坡、矿渣型泥石流、火后型泥石流、链式灾害。

3.1 红层滑坡

凉山州发育红层滑坡 729 处,占滑坡总数的 27.3% (图 5),红层地层主要发育在凉山州南部的中低山区;统计红层滑坡发育的地层年代(表 5),发育在侏罗系地层的红层滑坡数量最多,占红层滑坡总数的 70.6%,发育在白垩系、三叠系地层的红层滑坡数量占比分别为 26.1%、3.3%。红层边坡自稳能力差,不及时治理会发生变形破坏,进而诱发滑坡、崩塌、落石等地质灾害[30]。

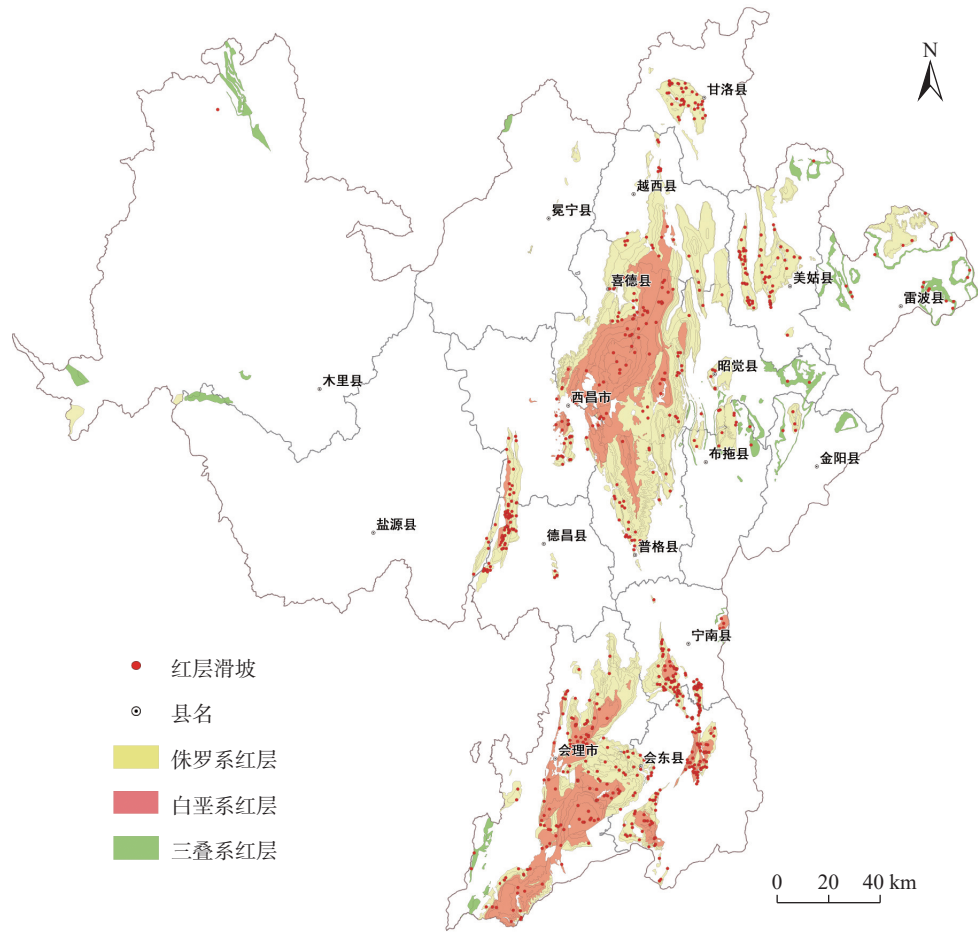


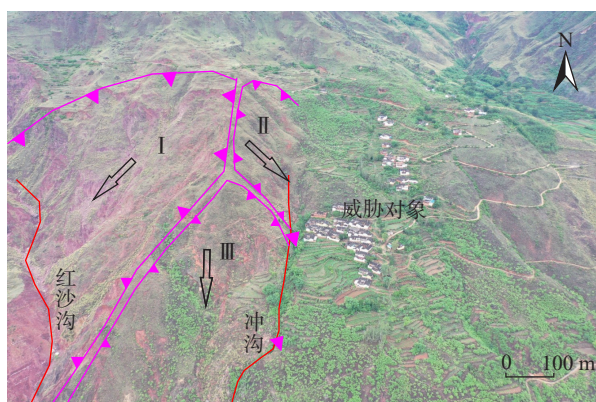
图 5 凉山州红层地层和红层滑坡分布图
Fig. 5 Red-bed strata and red-bed landslide distribution map in Liangshan Prefecture

表 5 凉山州红层红层滑坡统计
Table 5 Statistical analysis of red-bed landslide in Liangshan Prefecture

红层地层	面积/km ²	数量/处	灾害密度/(处·km ⁻²)	占比/%
侏罗系	5 778	515	0.089	70.6
白垩系	3 177	190	0.06	26.1
三叠系	837	24	0.029	3.3

会理市新发镇铜厂村 1 组老包滑坡(图 6),出露岩性为第四系全新统残坡积层(Qh^{el+dl})碎石土,下覆基岩

为下震旦统澄江组(Z_{1c})粗粒长石石英砂岩夹紫红色含砾砂泥岩,岩层产状 185°∠35°,岩体易风化破碎,遇水极易软化解体。滑坡附近有一条近南北走向逆断层通过,大致沿红沙沟延伸。老包滑坡所在红沙沟位置,均为断层破碎带,岩体异常破碎,地质条件脆弱,断层是滑坡形成的主要原因之一。同时,滑坡区地层遇水易软化解体,降雨入渗使岩土体饱水,造成自重加大和软弱结构面润滑,加之良好的临空面,最终在陡坡段形成滑坡。



(a) 滑坡全貌



(b) 断层大致走向

(c) 断层破碎带

图 6 会理市新发镇铜厂村 1 组老包滑坡示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Laobao landslide in Group 1, Tongchang Village, Xinfa Town, Huili City

3.2 复活型古滑坡

古滑坡在凉山州多有分布,如普格县螺髻山镇—扯扯街一线仍保留 10 处大型地震古滑坡,雷波县金沙江两岸古滑坡发育,由于人类工程活动、河流冲刷等因素,易引发古滑坡变形和复活。

金阳县天地坝镇老营盘村城北滑坡,顺层牵引式深层特大型滑坡(图 7)。出露地层为含碎石粉质黏土、碎石土。主滑方向 106° ,平均宽度 570 m,纵向长约 630 m,滑体平均厚度 35 m,总体积约 $1.253 \times 10^6 \text{ m}^3$,滑坡平面形态呈舌型,滑体物质组成主要为碎石土、角砾土,局部夹块石、黏土,由于滑坡年代久远,滑体物质胶结良好。下覆基岩主要为下奥陶统湄潭组(O_1m)页岩、灰岩及上寒武统二道水组(ϵ_3e)白云岩。由于金阳河的不断切割,致使前缘临空面不断加大,最终导致古滑坡的发生,近年来古滑坡未出现整体变形迹象。但由于人类工程活动的加剧,新建房屋大量填方、生活污水排放、降雨入渗等原因,古滑坡体局部区域出现了变形和次级滑动,滑坡左侧中部区域变形破坏较为强烈,地表可见发育有多条明显拉裂缝,房屋变形破坏较严重,形成体积约 $1.368 \times 10^6 \text{ m}^3$ 复活体。

3.3 库岸型滑坡

库岸型滑坡主要发育在凉山州的白鹤滩、溪洛渡、乌东德、官地、锦屏二级、锦屏一级等水电站库区内。



图 7 金阳县天地坝镇老营盘村城北滑坡

Fig. 7 Landslide in the north of Laoyingpan Village, Tiandiba Town, Jinyang County

注: a 为滑坡全貌; b 为滑坡后壁; c、d 为复活体变形特征。

受库水位消落带影响,斜坡坡脚常发生滑塌现象,进而影响坡体稳定性,如木里县锦屏库区尾库段的后所乡、列瓦镇一带,发育有 23 处库岸型滑坡;布拖县金沙江沿岸合并—牛角湾一带,地处溪洛渡库区库尾,受库水位影响发育有大滩滑坡,麻地湾滑坡,贾沙田滑坡等库岸型滑坡;宁南县白鹤滩电站 2021 年水位抬升后,发育有 17 处塌岸隐患,多数为土质边坡(图 8)。



图 8 白鹤滩电站边坡前缘塌岸

Fig. 8 Bank Collapse at the toe of the slope near the Baihetan Hydropower Station

木里县瓦厂镇纳子店村店扎组滑坡位于木里县瓦厂镇纳子店村店扎组(图 9),木里河左岸。平面形态呈舌形,坡面形态呈折线形,相对高差约 120 m,宽 160 m,长 330 m,主滑方向 270° ,平均厚 10.0 m,体积约为 $52.8 \times$

10⁴ m³, 属中型土质滑坡。滑体物质主要为全新统的滑坡堆积(Qh^{del})的碎石土, 下覆基岩为下奥陶统组瓦厂组(O_{1w})青灰色砂岩。受木里河立州水电站蓄水影响, 在水位升降及斜坡土体饱水等作用下滑坡出现变形, 2019、2020 两年变形较剧烈, 后部 G227 国道路面出现拉裂、下错, 房屋墙体出现裂缝。



图 9 木里县瓦厂镇纳子店村店扎组滑坡
Fig. 9 Diancha Formation landslide in Nazidian Village, Wuchang Town, Muli County
注: a 为全貌; b 为滑坡后部裂缝; c 为滑坡后部垮塌猪圈。

3.4 含煤层型滑坡

煤系地层主要发育在凉山州南部的中低山区, 上三叠统白果湾组、须家河组、宝顶组等地层为主要产煤地层。布拖县勒吉村 4 组约坡吉乃滑坡, 位于布拖县北部(图 10), 为一处沿基覆界面滑动的中型土质滑坡。20 世纪 80 年代, 滑坡前缘底部发现褐煤层, 每到冬季当地村民集中开挖褐煤取暖, 到 2004 年形成一高 5~8 m 近垂直人工边坡, 2004 年受强降雨影响, 该人工边坡开始出现滑塌现象, 边坡后缘出现贯通拉裂缝, 2010 年 7 月滑坡前缘整体垮塌, 同年 9 月发生整体滑动。滑坡可分为强变形区、已滑区 I 区、已滑区 II 区。强变形区微地貌主要为陡坡、陡坎, 横宽 95~130 m, 纵长约 270 m, 主滑方向 89°, 面积约 2.45×10⁴ m², 平均厚约 12 m, 总体积约 29.4×10⁴ m³, 坡体基本解体, 剖面形态呈三级平台, 滑坡后壁坡度近垂直, 相对高差约 12 m, 2015—2017 年向右前侧滑动 7~9 m; 已滑区 I 区位于 1 号滑坡体中右侧, 横宽约 60 m, 纵向长约 55 m, 主滑

方向 99°后缘滑壁陡峭, 中前部形成相对较缓的坡体, 形成“上陡下缓”形态, 体积约 1.2×10⁴ m³; 已滑区 II 区位于 1 号滑坡体右后侧, 横向宽 40~50 m, 纵向长 60~70 m, 主滑方向 59°, 滑坡后壁高差约 1.5 m, 体积约 2.57×10⁴ m³。坡体含碎石黏土, 下覆基岩为昔格达组砂质泥岩。

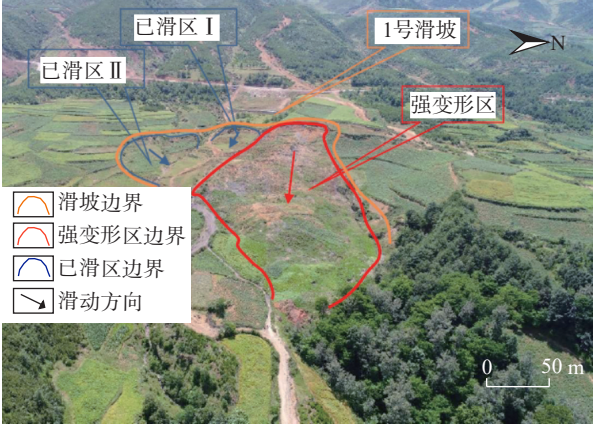


图 10 布拖县勒吉村 4 组约坡吉乃滑坡示意图
Fig. 10 Schematic diagram of Yuepo Jinai landslide in Group 4, Leji Village, Butuo County

3.5 矿渣型泥石流

凉山州矿产资源丰富, 矿山开采的矿渣、剥离废石、尾砂等废物, 不合理的堆放, 为泥石流灾害提供了丰富物源。雷波县西苏角河流域日格尔泥石流, 位于山棱岗乡田坝村 3、6 组, 沟口位于西苏角河(图 11)。在 1972 年、2013 年和 2014 年规模性暴发过, 属于暴雨激发的中—高频中型稀性泥石流。单次冲淤堆积体积约 0.72×10⁴ m³, 现沟内可参与泥石流活动的固体物源储量达 37.13×10⁴ m³, 2016 年对该泥石流进行了排导槽治理。沟域高程差约为 1 800 m, 流域面积 16.39 km², 主沟沟道长 6.92 km, 主沟呈“U”字型。由四条支沟交汇形成, 汇水条件好, 支沟多呈狭窄“V”字型, 暴雨形成的地表径流是引发泥石流的主要水源。在流域的中上部为铅锌矿私挖开采地, 采矿分选后大量的矸石沿沟道、公路堆积, 成为了该沟的重要物源, 现该私挖矿场已经关闭, 其他物源来自于沟床侵蚀物源(沟床内松散堆积体)及坡面侵蚀物源。

3.6 火后型泥石流

森林火灾是凉山州林区常见自然灾害, 林火后根-土复合体的抗剪强度降低, 土壤的黏聚力出现明显下降^[31], 火烧迹地在降雨条件下, 极易发生火后泥石流, 具有发生概率大幅提高、暴发所需降雨阈值明显降低等特点。冕宁县从 2016 年以来, 每年均有火灾发生, 仅

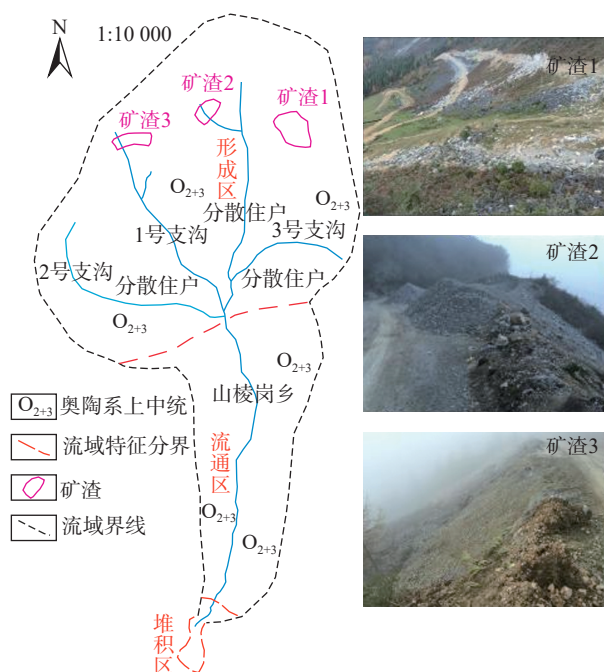


图 11 日格尔泥石流示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the Rigeer debris flow

2021 年就发生了 3 次火灾, 在安宁河流域集中发育有 15 处火后泥石流隐患点; 西昌市经久乡一带 2020 年 3 月发生特大森林火灾, 同年 8 月遭遇多次暴雨, 诱发多条火后泥石流, 经过火后次生灾害排查, 确定了 63 条潜在泥石流沟。

木里县项脚乡项脚沟流域火后泥石流就是此类泥石流的典型(图 12)。2020 年 3 月 28 日, 木里县项脚乡及其毗邻乡镇发生森林火灾, 其中项脚乡项脚沟流域的中、上部火灾导致植被遭受严重破坏, 过火面积约 37.97 km², 中度及重度火烈度区面积占比 65.81%。自 6 月 9 日山顶附近局地短时强降雨激发甲尔沟暴发火后泥石流灾害以来, 项脚沟主沟及宋家沟、香樟湾沟、母猪洛沟、花岩沟、黄泥巴沟等多条支沟于 6 月、7 月先后 7 次发生不等规模火后泥石流, 冲出固体物质 10 余万方, 导致沟口 22 户居民建筑物被淤埋, 直接经济损失超 2 600 万元。2021 年 7 月 5 日, 短时强降雨导致项脚沟流域 7 条支沟再次相继发生泥石流灾害, 携带大量粗大树木, 冲出沟口物源达 1.62×10^6 m³, 沟道内分布有大量漂石, 岩性以灰岩为主, 其中最大颗粒直径为 3.2 m × 3.1 m × 1.9 m。灾害造成 186 间房屋和乡道 2 km 受损, 撤离避险 251 户 1 042 人, 无人员伤亡。

项脚沟流域面积 77.12 km², 主沟长 14.95 km, 平均纵比降为 110‰, 流域最高海拔 4 130 m, 沟口最低海拔 1 820 m, 最大高差 2 310 m, 主沟沟道以宽“U”型谷为

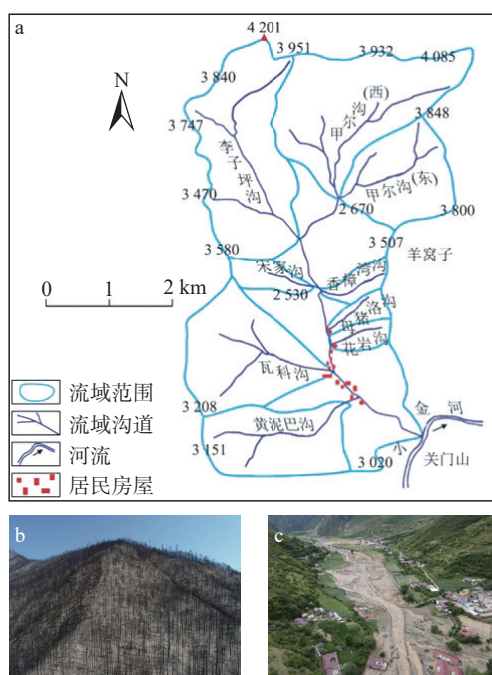


图 12 木里县项脚乡项脚沟泥石流示意图

Fig. 12 Schematic diagram of debris flow in Xiangjiao Ditch, Xiangjiao Township, Muli County

注: a 为流域平面图; b 为过火区坡面侵蚀物源; c 为主沟淤积段。

主。中上游呈“树枝状”水系, 下游呈“掌状”水系, 各级支流共计 30 余条, 其中一级支沟 13 条。支沟多以“V”型谷为主, 山体平均坡度多在 40°以上, 基岩出露较多。地层以三叠系西康群及上二叠统地层为主, 岩性主要为变质砂岩、砂板岩、板岩、大理岩及结晶灰岩夹层、变质玄武岩, 及少量千枚岩。流域内不良地质现象发育, 松散固体物质 2.2164×10^4 m³, 动储量为 2.928×10^6 m³, 主要为早期崩滑堆积物源、坡面侵蚀物源、历史泥石流沟道堆积物源及火灾形成的灰烬及土壤结构扰动层等物源, 火烧区物源主要分布于沟域顶部。

3.7 链式灾害

按照诱发因素划分, 地质灾害链包括内动力地质灾害链、外动力地质灾害链、人为活动地质灾害链和复合型地质灾害链^[32], 在高山峡谷、高地应力场、频繁的地震活动、暴雨及人类活动等复杂的内外动力耦合作用下, 河谷地段往往造成大型的崩滑堵江断流形成堰塞湖的事件, 从而使得灾害范围及灾害种类进一步扩大, 形成灾害链^[33]。

冕宁县照壁山滑坡位于冷渍沟上游(图 13), 滑坡呈“圈椅状”, 主滑方向为 313°, 滑坡区地层主要为早震旦世苏雄组一段(Z₁S₁)变流纹、变英安岩, 三叠系白果湾群(T₃bg)砂岩、页岩, 以及第四系残坡积物。大规模发生于 2000 年 7 月 18 日, 滑坡发生时体积约 337 ×

10⁴ m³,形成的碎屑流冲出冷渍沟口约 30×10⁴ m³,堵塞安宁河河道;剩余滑坡体堆积于冷渍沟中,此后雨季冷渍沟均发生规模不等的泥石流。2003 年 7 月 19 日,冕宁县遭遇 50 年一遇暴雨(日降雨量达 218.6 mm),冷渍沟暴发大规模泥石流,约 30×10⁴ m³ 固体物质冲出沟口,造成堆积扇上 1 人死亡,3 辆汽车被掩埋,同时冲入安宁河造成河道堵塞,河水淤高翻越右岸防护堤,冲毁右岸部分房屋、耕地。2007 年 8 月 7 日,冷渍沟再次暴发泥石流堵塞安宁河河道。2007 年 8 月 7 日,冷渍沟再次暴发泥石流堵塞安宁河河道。

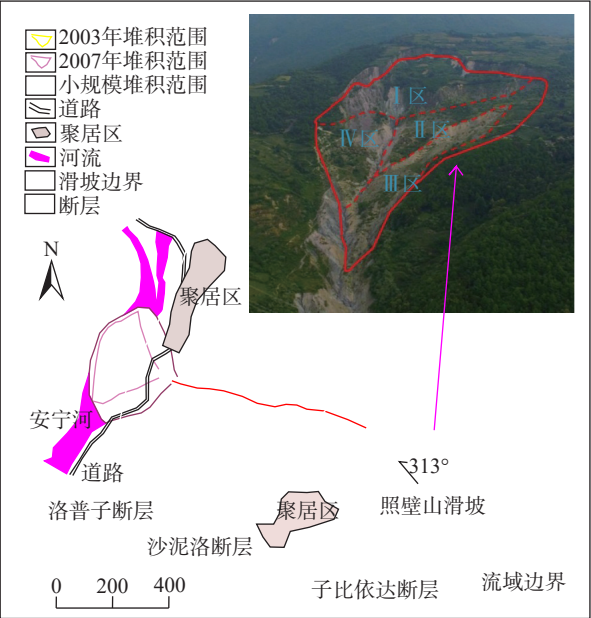


图 13 冕宁县照壁山滑坡-泥石流链式灾害示意图
Fig. 13 Schematic diagram of Zhaobi Mountain landslide-debris flow chain disaster in Mianning County

4 结论

(1)查明了凉山州地质灾害整体发育特征和灾情特征。凉山州地质灾害以滑坡、泥石流为主,分别占全州总数的 66.6%、27.1%;滑坡以中小型土质滑坡为主,泥石流以中小型沟谷泥石流为主。统计分析凉山州有记录以来的灾情发现,凉山州共计发生 24 起死亡 10 人以上的地质灾害。2006—2020 年,凉山州共发生 46 起因灾伤亡的地质灾害,以泥石流为主,数量达 30 起,灾情规模以中小型为主,分别达 17 起、23 起。

(2)通过系统梳理凉山州地质灾害的发育特征,结合实例总结提炼 7 种主要致灾类型:①红层滑坡,是凉山州滑坡主要类型之一,遇水易软化解体,降雨入渗使岩土体饱水,自稳能力差;②复活型古滑坡,在凉山州多

有分布,由于人类工程活动、河流冲刷等因素,易引发古滑坡变形和复活;③库岸型滑坡,主要发育在木里县、布拖县、宁南县的水电站库区内,受库水位消落带影响,斜坡坡脚滑塌,坡体稳定性降低形成滑坡;④含煤层型滑坡,多发育在主要发育在凉山州南部的煤系地层区域,对斜坡前缘不合理的采煤开挖,易诱发前缘滑塌并造成整体滑动;⑤矿渣型泥石流,是凉山州泥石流主要类型之一,矿山开采的矿渣、废石、尾砂等不合理堆放,为泥石流灾害提供了丰富物源,叠加良好汇水条件和暴雨等因素,易引发泥石流;⑥火后型泥石流,凉山州常发生森林火灾,火灾形成的灰烬及土壤结构扰动层等为泥石流提供了物源条件,火烧迹地遭遇暴雨后,易诱发火后泥石流;⑦链式灾害,由于凉山州构造活动强烈,山势陡峭,沟谷发育,在沟谷上游发生崩滑灾害后,易沿沟运动冲出,堵塞河道形成灾害链。

(3)针对凉山州不同致灾类型的地质灾害,在常态防灾减灾过程中应采取针对性防范措施,以达到精准防控的目的,如加强库区地质灾害的排查、监测和防治,特别是加强移民安置区地质灾害的防治,避免库岸型滑坡的产生;规范采煤采矿行为、科学合理的堆放废石弃渣等,避免发生含煤层型滑坡和矿渣型泥石流;严防森林火灾,火烧迹地应采取生物措施及时恢复植被生态并采取必要的治理措施,防止发生群发性火后泥石流;修路建房等工程活动应科学合理切坡,避免诱发崩滑灾害。后续还需深入开展不同致灾类型的地质灾害的形成机理、防治措施、风险管控等方面的研究。

参考文献(References):

[1] 刘希林,王全才,张丹,等.四川凉山州普格县“6·20”泥石流灾害[J].灾害学,2003,18(4):46-50. [LIU Xilin, WANG Quancai, ZHANG Dan, et al. Debris flow disasters occurred on June 20, 2003 in Puge County of Sichuan [J]. Journal of Catastrophology, 2003, 18(4): 46-50. (in Chinese with English abstract)]

[2] 刘希林,李秀珍,苏鹏程.四川德昌县凹米罗沟泥石流成灾过程与危险性评价[J].灾害学,2005,20(3):78-83. [LIU Xilin, LI Xiuzhen, SU Pengcheng. Debris flow process and hazard assessment in Aomiluo gully of Dechang County, Sichuan [J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(3): 78-83. (in Chinese with English abstract)]

[3] 孙瑜,李宏俊,曹树波,等.四川雷波碉楼沟泥石流特征及防治对策[J].地质灾害与环境保护,2017,28(1):1-6. [SUN Yu, LI Hongjun, CAO Shubo, et al. Features and preventive countermeasures of potential debris flow in Diaolou gully, Leibo County, Sichuan Province [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2017,

- 28(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈宁生, 黄娜. 普格县莽窝镇 8·8 泥石流灾害应急调查研究 [J]. 山地学报, 2018, 36(3): 482-487. [CHEN Ningsheng, HUANG Na. Emergency investigation on debris flow 8·8 disaster in Qiaowo Town, Puge County, Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2018, 36(3): 482-487. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李钰, 甘滨蕊, 王协康, 等. 四川省甘洛县 2019 年群发性山洪泥石流灾害的形成机理 [J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 281-287. [LI Yu, GAN Binrui, WANG Xiekang, et al. Formation mechanism of group flash flood/debris flow disasters in Ganluo County, Sichuan Province in 2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 281-287. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 郑琅, 张欣, 王立娟. 四川省甘洛县山体滑坡应急调查与成因机制分析 [J]. 人民长江, 2022, 53(8): 117-122. [ZHENG Lang, ZHANG Xin, WANG Lijuan. Emergency investigation and formation mechanism of landslide in Ganluo County, Sichuan Province [J]. Yangtze River, 2022, 53(8): 117-122. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 廖安杰, 岳世燕. 会理县老营盘村滑坡稳定性评价及数值分析 [J]. 人民珠江, 2018, 39(9): 56-58. [LIAO Anjie, YUE Shiyan. Stability evaluation and numerical analysis of Laoyingpan Village landslide in Huili County [J]. Pearl River, 2018, 39(9): 56-58. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘凯, 李渝生, 易树健, 等. 美姑河火洛村溃散型滑坡的成因动力学机理研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(33): 217-224. [LIU Kai, LI Yusheng, YI Shujian, et al. Study on kinetic characteristics of Huoluo landslide in Meigu River [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(33): 217-224. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 尹洪峰, 冯志仁, 薄景山. 美姑河洛渣滑坡稳定性分析 [J]. 自然灾害学报, 2007, 16(6): 70-73. [YIN Hongfeng, FENG Zhiren, BO Jingshan. Stability analysis of Luozha landslide by Meigu River [J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(6): 70-73. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 郭宁. 普格县姚家山滑坡成因及稳定性分析 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(11): 114-118. [GUO Ning. Analysis of cause and stability on the Yaojiashan landslide in the Puge County [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(11): 114-118. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 高静贤, 戴福初, 朱雨轩, 等. 四川宁南水塘村滑坡形成机理 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 1-9. [GAO Jingxian, DAI Fuchu, ZHU Yuxuan, et al. Failure mechanism of the Shuitang Village landslide in Ningnan County, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 1-9. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 朱涛, 尹翔, 王成汤, 等. 西昌太和矿北采场滑坡变形演化规律及成因机制研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 2): 392-400. [ZHU Tao, YIN Xiang, WANG Chengtang, et al. Study on deformation evolution law and genetic mechanism of landslide in the north slope of Taihe Mine in Xichang [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(Sup 2): 392-400. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 陈敏, 刘良春, 叶胜华. 弯曲-拉裂型滑坡形成机制和稳定性分析——以木里河卡基娃滑坡为例 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 58-64. [CHEN Min, LIU Liangchun, YE Shenghua. The formation mechanism and stability analysis of bend-crack landslide: Taking the Kajiwa landslide of Muli River as an example [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 58-64. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 崔玉龙, 邓建辉, 戴福初, 等. 基于地貌与运动学特征的古滑坡群成因分析 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(1): 68-75. [CUI Yulong, DENG Jianhui, DAI Fuchu, et al. Causes analysis of ancient landslides based on the landscape and kinematical characteristics [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(1): 68-75. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王伟, 王卫, 戴雄辉. 四川美姑拉马阿觉滑坡复活特征与影响因素分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 9-17. [WANG Wei, WANG Wei, DAI Xionghui. Analysis of reactivated characteristics and influencing factors of the Lamajue landslide in Meigu County of Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 9-17. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 邹永才. 四川省金阳县城区古滑坡的新认识 [J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(1): 75-80. [ZOU Yongcai. New understanding of ancient landslides in Jinyang County, Sichuan Province [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2021, 32(1): 75-80. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 伍康林, 陈宁生, 胡桂胜, 等. 四川省盐源县玻璃村“7·19”特大滑坡灾害应急科学调查 [J]. 山地学报, 2018, 36(5): 806-812. [WU Kanglin, CHEN Ningsheng, HU Guisheng, et al. Emergency investigation to 7·19 landslide disaster in Boli Village, Yanyuan County, Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2018, 36(5): 806-812. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 芦明, 柳金峰, 孙昊, 等. 四川木里“7·5”黄泥巴沟泥石流灾害过程及防治措施建议 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 102-109. [LU Ming, LIU Jinfeng, SUN Hao, et al. Disaster process of “7·5” debris flow in Huangnibugou, Muli, Sichuan and suggestions on prevention and control measures [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 102-109. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 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 Xicao, 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)]
- [20] 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)]
- [21] 杨相斌, 胡卸文, 曹希超, 等. 四川西昌电池厂沟火后泥石流成灾特征及防治措施分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 1 – 8. [YANG Xiangbin, HU Xiewen, CAO Xichao, et al. Analysis on disaster characteristics and prevention measures of the post-fire debris flow in Dianchichang gully, Xichang of Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 殷万清, 金涛, 胡卸文, 等. 喜德县中坝村火后泥石流发育特征及预警避险 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 61 – 69. [YIN Wanqing, JIN Tao, HU Xiewen, et al. Development characteristics of debris flow after fire in Zhongba Village of Xide County and its early warning and avoidance [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 61 – 69. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 苏鹏程, 韦方强, 顾林康, 等. 四川省德昌县群发性泥石流的特征和成因 [J]. 山地学报, 2010, 28(5): 593 – 606. [SU Pengcheng, WEI Fangqiang, GU Linkang, et al. Characteristic and causes of group-occurring debris flow in Dechang County, Sichuan Province [J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(5): 593 – 606. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 陈兴长, 崔鹏, 葛永刚, 等. 四川省西溪河地洛水电工程区“7·31”泥石流灾害 [J]. 山地学报, 2010, 28(1): 116 – 122. [CHEN Xingzhang, CUI Peng, GE Yonggang, et al. “7·31” debris flow hazards occurred at Diluo water-power construction areas in Xixi River Basin, Sichuan Province [J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(1): 116 – 122. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 曾琇舒. 雷波县白沙村滑坡—碎屑流发育特征及其成因机理研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [ZENG Xiushu. Study on the development characteristics and genetic mechanism of landslide-debris flow in Baisha Village, Leibo County [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 王德伟, 林启飞, 倪化勇, 等. 孙水河流域阿坡洛洛坡成灾机理分析 [J]. 四川地质学报, 2016, 36(1): 114 – 117. [WANG Dewei, LIN Qifei, NI Huayong, et al. Genetic mechanism of the apoluo landslide in the Sunshui River Basin [J]. Acta Geologica Sichuan, 2016, 36(1): 114 – 117. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 白永健, 倪化勇, 王运生, 等. 喜德采书组“8·31”滑坡工程地质特征及运动过程 [J]. 山地学报, 2014, 32(3): 327 – 335. [BAI Yongjian, NI Huayong, WANG Yusheng, et al. Engineering geological characteristics and motor process of Caishu landslide in Xide of Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2014, 32(3): 327 – 335. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 铁永波, 葛华, 高延超, 等. 二十世纪以来西南地区地质灾害研究历程与展望 [J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(4): 653 – 665. [TIE Yongbo, GE Hua, GAO Yanchao, et al. Research course and prospect of geological disasters in southwest China since the 20th Century [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(4): 653 – 665. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 白永健, 铁永波, 孟铭杰, 等. 川西地区地质灾害发育特征与时空分布规律 [J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(4): 666 – 674. [BAI Yongjian, TIE Yongbo, MENG Mingjie, et al. Development characteristics and temporal and spatial distribution law of geological disasters in western Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(4): 666 – 674. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 徐伟, 冉涛, 田凯. 西南红层地区地质灾害发育规律与成灾模式——以云南彝良县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 127 – 133. [XU Wei, RAN Tao, TIAN Kai. Developing law and disaster modes of geohazards in red bed region of southwestern China: A case study of Yiliang County of Yunnan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 127 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 胡卸文, 侯羿腾, 王严, 等. 火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 106 – 112. [HU Xiewen, HOU Yiteng, WANG Yan, et al. Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 106 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 韩金良, 吴树仁, 汪华斌. 地质灾害链 [J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 11 – 23. [HAN Jinliang, WU Shuren, WANG Huabin. Preliminary study on geological hazard chains [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 11 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 徐文杰, 陈祖煜, 何秉顺, 等. 肖家桥滑坡堵江机制及灾害链效应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 933 – 942. [XU Wenjie, CHEN Zuyu, HE Bingshun, et al. Research on river-blocking mechanism of Xiaojiaqiao landslide and disasters of chain effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 933 – 942. (in Chinese with English abstract)]