



移动阅读

高延超, 龚凌枫, 曹佳文, 等, 2024. 西藏边境地区地质灾害分布规律与危险性分析[J]. 沉积与特提斯地质, 44(3): 467-477. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.09002

GAO Y C, GONG L F, CAO J W, et al., 2024. The distribution and risk assessment of geo-hazards in the border areas of Xizang[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(3): 467-477. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.09002

西藏边境地区地质灾害分布规律与危险性分析

高延超¹, 龚凌枫¹, 曹佳文^{2*}, 铁永波¹, 卢佳燕¹

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218; 2. 中国地质调查局, 北京 100037)

摘要: 西藏边境地区地质灾害高发, 对区内人民生命财产安全和经济建设造成严重威胁。本文搜集西藏 21 个边境县的地质灾害详细调查数据并进行统计分析, 查明该区域共有 3 224 处地质灾害点, 包括崩塌 768 处、滑坡 697 处、泥石流 1 738 处、冰湖溃决型链式灾害 21 处。其中, 大型及以上的崩塌 99 处、滑坡 48 处、泥石流 23 处。综合区域地貌、气候特征, 将西藏边境区域分为东段(南迦巴瓦峰—错那)、中段(错那—普兰)及西段(普兰—日土)。本文系统研究总结各段的地质灾害分布规律与危害特征, 结合地质灾害孕灾背景及诱发因素, 选取高程、坡度、水系密度、工程岩组、断裂密度、年均降雨量及地震动峰值加速度 7 个影响因子, 基于层析分析法和加权信息量法对西藏边境地质灾害进行危险性评价, 识别出察隅县察隅曲、墨脱县雅鲁藏布江段、错那县娘姆江流域、洛扎县洛扎曲、亚东县麻曲、定结县朋曲、定日县绒辖曲、聂拉木县波曲及吉隆县吉隆藏布等 9 个流域为地质灾害高危险区。在此基础上, 本文提出了边境地区建设中需关注建设场地地质安全评价、高陡斜坡蠕滑堵江、冰湖溃决、地震灾害及其长期后效应等四个关键问题, 为西藏边境地区的宏观地质灾害风险管控提供依据。

关键词: 西藏; 边境地区; 地质灾害; 分布规律; 危险性评价

中图分类号: P694

文献标识码: A

The distribution and risk assessment of geo-hazards in the border areas of Xizang

GAO Yanchao¹, GONG Lingfeng¹, CAO Jiawen^{2*}, TIE Yongbo¹, LU Jiayan¹

(1. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: A large number of geo-hazards pose a major threat to the economic growth of Xizang's border areas. This paper collects geo-hazards data from 21 border counties in Xizang, and statistics show that there are 3 239 occurrences of geo-hazards in this area, including 768 collapses, 697 landslides, and 1 738 debris flows, among which there are 99 large or larger collapses, 48 landslides, and 23 debris flows. There are also 21 glacial lake outburst disasters. Based on the characteristics of landforms and climate, the border

收稿日期: 2023-08-31; 改回日期: 2024-08-19; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 白永健

作者简介: 高延超(1981—), 男, 河北保定人, 博士, 教授级工程师, 硕士生导师, 主要从事地质灾害调查与风险评价研究。E-mail: 19574058@qq.com

通讯作者: 曹佳文(1979—), 男, 湖南人, 博士, 高级工程师, 从事地质灾害调查研究工作。E-mail: cjiawen@mail.cgs.gov.cn

资助项目: 四川省自然科学基金面上基金(23NSFSC0297); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221746); 四川省自然资源科研项目(强震区泥石流高拦挡坝的漂木堵塞机制与库损效应研究)

area is divided into the eastern section (Nanjiabawa Peak–Cuona), the middle section (Cuona–Pulan), and the western section (Pulan–Ritu). The researchers systematically studied the distribution patterns and hazard characteristics of geological hazards in these different sections. The chromatographic analysis method and the information quantity method are used to analyze the risk of geo-hazards in combination with the disaster-causing mechanisms and inducing factors of the geo-hazards in this region. The selected factors include altitude, slope, aspect, water system, stratum, annual average precipitation, and peak ground acceleration. Nine watersheds were identified as high-risk areas for geological hazards. Finally, this paper puts forward following suggestions: focusing on the evaluation of geological safety at construction sites, the disaster chain of landslides and blocking rivers, and the long-term effects of earthquakes, in order to provide a basis for the management and control of geo-hazards risk in the border areas of Xizang.

Key words: Xizang; border areas; geo-hazards; distribution; risk assessment

0 引言

西藏边境地区的山南市、林芝市、日喀则市地质灾害高发,成灾快、灾害链长,危害大、险情重、防治难度大,是全国地质灾害最严重的区域之一(彭建兵等,2004),对西藏边境建设工作的顺利开展造成严重威胁。区内工程建设地质条件适宜性较差,冰川碎屑流、冰湖溃决、高陡边坡、强震等引发的地质灾害频发(崔鹏等,2010)。

本文综合西藏自治区边境区域地形地貌、地质构造等资料,系统梳理遥感影像、研究文献、边境县市1:50 000地质灾害详查数据(截至2020年6月30日)等已有成果,综合分析西藏边境地区地质灾害发育特征及控灾规律,评价重点区域地质灾害危险性,为边境宏观地质灾害风险分析提供基础依据。

1 西藏边境地区地质背景

西藏边境地区总面积达 $34.35 \times 10^4 \text{ km}^2$,有长约4 500 km的边境线,边境线上有312条对外通道,其中常年性通道44条,主干交通干线为G219国道(卓拉等,2019)。行政区域包括林芝市、山南市、日喀则市和阿里地区的21个边境县、104个边境乡以及28个边境市场,拥有三个国家一类边境口岸(樟木、吉隆、普兰),两个国家二类边境口岸(亚东、日屋),另有亚东乃堆拉贸易通道及多个边贸市场和边民互市点,具体见图1(何一民等,2018)。第六次人口普查数据显示,西藏边境有33万余人,占西藏总人口的1/10。

西藏边境气候复杂多变,降雨时空差异大,地貌多样,地形高差大,地层岩性复杂,断裂构造发育,新构造运动强烈,地质环境条件复杂脆弱,导致大型高位滑坡、崩塌、泥石流、冰湖溃决链式灾害等

频繁发生(何果佑等,2012;童立强等,2013;铁永波等,2022)。

1.1 气候水文

从气候类型的分布看,藏东南和喜马拉雅山南坡属于热带山地季风湿润气候,年降雨量1 000~4 500 mm,是西藏降雨最多的地区,也是全国多雨地区之一。喜马拉雅山以北,冈底斯山和念青唐古拉山以南的雅鲁藏布江谷地,年降雨量400~800 mm。冈底斯山—念青唐古拉山以北藏北高原南部湖盆地区,属高原亚寒带季风半干旱和干旱气候,年降雨量100~300 mm。藏北高原北部属高原寒带季风干旱气候,年降雨量100~150 mm。年均气温由墨脱县所在区域的 5.9°C ~ 16°C 逐渐降低至日土县的 -2.1°C ~ -1.0°C (莫艳合等,2008)。

金沙江、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江等大河都流经该区域,水源主要由雨水、冰雪融水和地下水三种补给形式组成,流量丰富,径流季节分配不均,形成了藏东南地区深切峡谷地貌。

1.2 地形地貌

西藏边境县域平均海拔4 000 m以上,地貌形态分别为藏北高原、藏南谷地和藏东高山峡谷区。藏北高原位于青藏高原腹地,平均海拔4 500 m以上。藏南谷地指高原南部雅鲁藏布江流域中游谷地,谷底高度自西而东由海拔4 500 m降至2 800 m,谷地两侧山地高度多在海拔5 000 m左右。藏东高山峡谷区西起雅鲁藏布江中下游,东连横断山区中北部,相对高差可达3 000 m,其中,雅鲁藏布江大峡谷最为出名。

1.3 新构造运动

始新世早期以来,随着新特提斯洋的关闭,印度—亚洲大陆碰撞导致青藏高原持续快速隆升(曹华文等,2020;董国臣等,2021)。西藏边境地区是新生代的造山地区,新构造十分发育,属于喜马拉雅



图 1 西藏边境地区村镇密度与地质灾害分布图

Fig. 1 Map of the density of villages and towns and the distribution of geological hazards in border areas of Xizang

雅构造带,与之相随的地震活动非常强烈。其特点表现为频率高、强度大(彭轩明,2006;熊德清等,2021)。所发生的地震以浅源地震为主。公元前193年~1989年间发生 $M \geq 6$ 级地震204次,其中, $M \geq 8$ 级的地震有11次,有10次地震都发生在高原的边缘或附近地区,如1950年8月15日22时在西藏自治区察隅-墨脱发生8.6级大地震,雅鲁藏布江多处堵塞断流(秦四清等,2014);2015年4月25日,尼泊尔发生8.1级大地震,对西藏特别是日喀则地区造成巨大的影响(付广裕等,2015)。多数地区均为抗震烈度Ⅶ—Ⅷ度区域,其中墨脱等地区为Ⅸ度以上。

2 西藏边境地区地质灾害分布规律

2.1 地质灾害概况

根据最新的西藏自治区边境县市1:50000质灾害详查数据,截至2020年6月30日,在边境区域共查明地质灾害点3224处,包括崩塌768处、滑坡697处、泥石流1738处、冰湖溃决型链式灾害21处。其中大型至特大型崩塌99处、滑坡48处、泥石流23处。已查明地质灾害沿河谷及人类聚集区分布的特征较为明显(刘晶晶等,2008;刘建康等,2019)。

综合西藏边境地区地貌、气候特征,将边境区域分为三段:东段(南迦巴瓦峰—错那),包括察隅县、墨脱县、错那县、洛扎县、浪卡子县及康马县;中段(错那—普兰),包括亚东县、定结县、定日县、聂拉木县、萨嘎县、吉隆县及仲巴县;西段(普兰—日土),包括普兰县、札达县、噶尔县及日土县。

2.2 西藏边境地区地质灾害分段发育特征

边境地区各段的崩塌、滑坡、泥石流、冰湖溃决等各种地质灾害的数量及大型以上灾害的统计数据见图2中嵌入的表格及图片。

东段发育各类地质灾害共计1388处,其中泥石流最多,占57.8%。大型及以上规模的地质灾害点总计129处,其中大型崩塌最多,占54%。地质灾害高易发区主要包括藏南谷地以及喜马拉雅山南麓泥石流高易发区,藏东南崩塌、滑坡、泥石流高易发区。海洋性冰川多发育分布在高程3500~5500m区间,冰川泥石流极为发育。7处冰湖溃决灾害主要分布在东段西部,位于喜马拉雅山北坡(图2)。

中段发育各类地质灾害共计1503处,其中泥石流最多,占51.3%。大型及以上规模的地质灾害点总计61处,其中大型崩塌最多,占48%。地质灾害高易发区主要为藏中南崩塌、滑坡、泥石流灾害

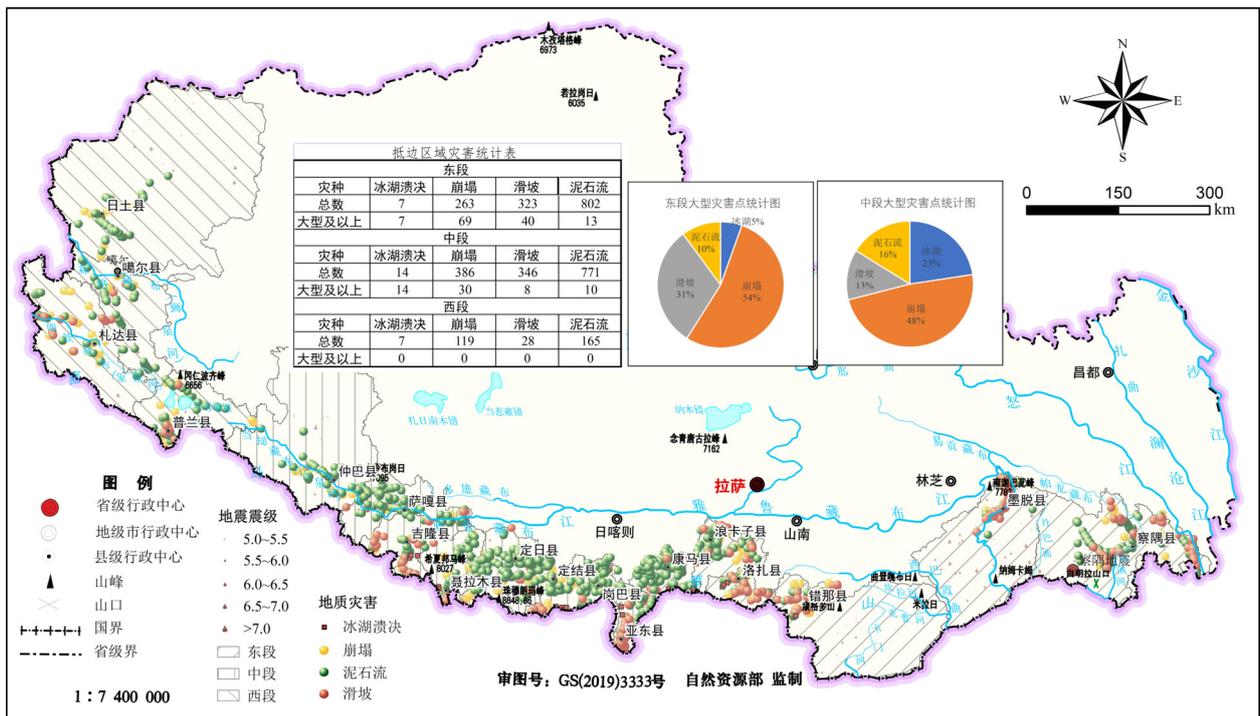


图2 西藏边境地区分段及地质灾害分布特征

Fig. 2 Segmentation and distribution characteristics of geological hazards in border areas of Xizang

区。中段是冰湖溃决灾害最高发的区域,已查明的14处冰湖溃决灾害主要分布在喜马拉雅山北坡,冰川分布的海拔范围为3500~4200 m,该段冰碛湖数量最多。

西段区内发育各类中、小型地质灾害312处,其中泥石流占57.8%,无大型及以上规模地质灾害,小型泥石流最为发育(图2)。区内受地中海型西风的影响,冬春多雪,区内多发育亚大陆冰川及大陆型冰川,冰碛湖数量较中段减少,冰川分布的海拔范围为4500~5500 m。

2.3 西藏边境地区大型地质灾害(链)分布特征

受控于狭窄的地形地貌,西藏边境区域大型崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害极易造成堵江、半堵江,进而引发的溃决型次生灾害,冰湖溃决、冰崩也较发育(殷跃平,2000;刘晶晶等,2011;刘春玲等,2016;贾洋等,2020;李军等,2021;万佳威等,2021)。

根据地质灾害调查数据及历史冰湖溃决等灾害记录(图3),喜马拉雅山附近区域可划分为两个大型地质灾害(链)集中发育区,分别为东段大型崩塌、滑坡灾害区和中段喜马拉雅冰湖溃决、崩塌灾害区。东段墨脱、察隅及米林等地发育31处大型及以上规模地质灾害(其中8处为特大型),以崩塌、滑坡为主,主要分布在雅鲁藏布江中下游、察隅曲

等深切河谷地带,其中以特大型滑坡最为发育;此外,东段西部地区错那县—康马县特大型崩塌及冰湖溃决型泥石流等链式灾害尤为发育。

中段喜马拉雅冰湖溃决、崩塌灾害区共发育142处大型及以上地质灾害(其中19处为特大型),主要为崩塌,其次为滑坡、泥石流。该区域另有21处冰湖溃决灾害,部分冰湖发生多次溃决,包括定日县阿亚措2次、聂拉木县次仁玛措2次,聂拉木县嘉龙措3次(刘健康等,2019)。聂拉木县附近区域冰湖溃决灾害尤为频繁,该区域因冰崩、埋藏冰融化及强降雨诱发的冰湖溃决灾害尤需关注。大型至特大型地质灾害链分布于喜马拉雅山南坡的朋曲、洛扎雄曲、康布麻曲、波曲、吉隆藏布等河谷地区,地质灾害大致呈近SN向河谷展布,沿喜马拉雅山区北坡发育大量冰湖溃决型泥石流等链式灾害。此外,该段地质灾害由东到西主要有亚东口岸大型崩塌、滑坡发育区,聂拉木县大型至特大型泥石流灾害发育区及吉隆口岸大型崩塌灾害发育区。西段无大型地质灾害链。

2.4 西藏边境地区地质灾害控制因素

地质构造、地形和气候是西藏边境地区地质灾害发育的三个控制因素,决定着地质灾害的强度和规模。

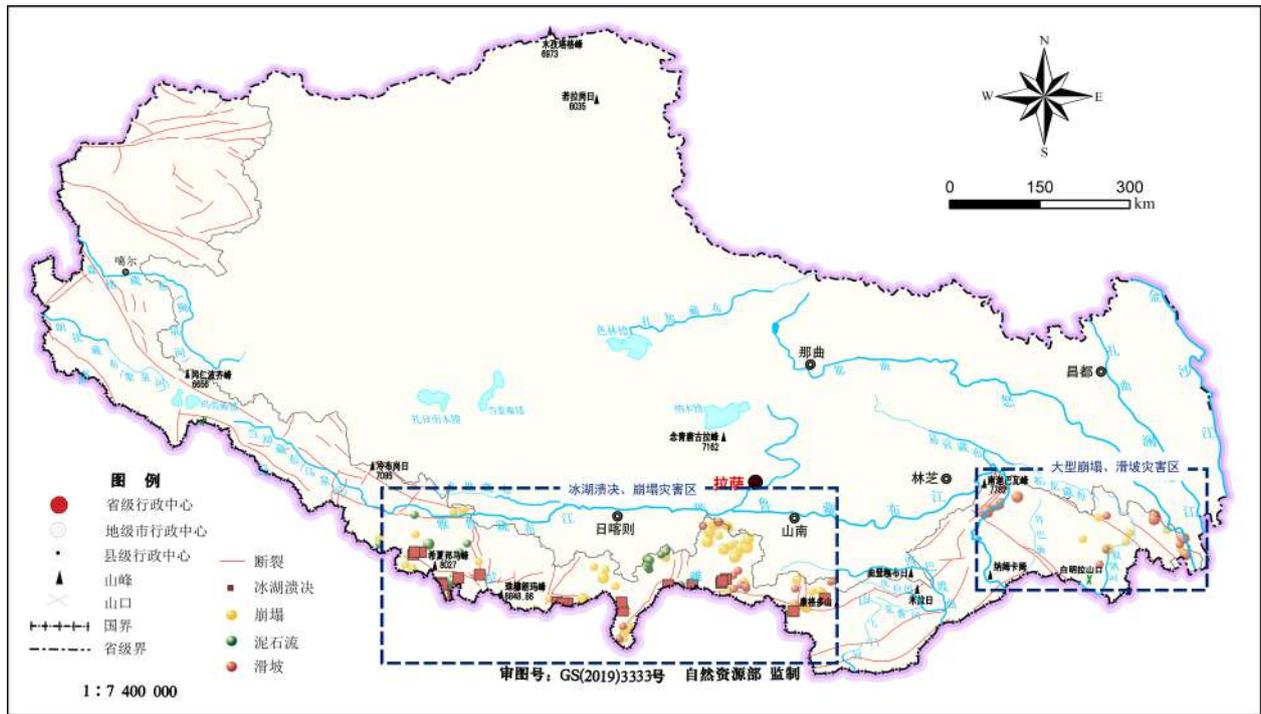


图3 大型地质灾害链及冰湖溃决分布图

Fig. 3 Distribution map of glacial lake outburst and large-scale geo-hazards in border areas of Xizang

东段位于青藏高原东南缘,是欧亚板块与印度洋板块碰撞、汇聚带的东缘地区,构造活动强烈。该段地形沟谷深切,以米林—墨脱段为例,雅鲁藏布江两岸南迦巴瓦峰(7782 m)、加拉白垒峰(7294 m)与下方河谷高差近5000 m,近年来连续形成堵断雅鲁藏布江的色东普崩塌和直白沟泥石流,深切峡谷地貌为地质灾害提供了有利的能量基础。东段临近雅鲁藏布江大拐弯处,主要受孟加拉湾季风湿润气团的影响,年降雨量1000~4500 mm不等,降雨集中在夏季,冰川雪线较低;高山冰川分布广,形成大量的冰雪融水,为诱发地质灾害提供了充足的水源条件。

中段属于构造活动强烈地区,如樟木口岸、亚东口岸等均受地震效应影响,泥石流、滑坡、崩塌等地质灾害受深大断裂带控制,主要分布在深大断裂带及其次级断裂带附近,近年受尼泊尔地震影响地质灾害较活跃。该段处于喜马拉雅山系中段与冈底斯—念青唐古拉山中段之间,地形复杂多样,基本上由高山、宽谷和湖盆组成,平均海拔在4000 m以上,其中位于日喀则与尼泊尔边界上的珠穆朗玛峰是世界第一高峰。区内降雨南坡较充沛、北坡偏少,北坡多发育亚大陆性冰川。喜马拉雅山南坡的亚东、樟木、吉隆、陈塘、绒辖终年温

暖,雨量充沛,年降雨量在1000 mm左右,北坡雪域集中在亚东帕里—聂拉木一定日的南部一带,降雨在200~430 mm之间,降雨年际波动大。该段气温低于东段,降雨量少,仅为藏东的1/4左右,碎屑物以冲积物、坡积物为主,外动力搬运营力小。该区发育的冰川和冰湖较多,随着近年来气温的上升,冰川融化速度加快,冰湖溃决灾害的发生频率和成灾强度呈增加趋势。

西段位于青藏高原腹地,整体地势西北高、东南低,该段主要由低山缓丘与湖盆宽谷组成,起伏和缓,平均海拔4800 m,相对高差一般在200~500 m,为青藏高原内海拔最高、高原形态最典型地域。年均降雨量50~300 mm,其中80%以上集中于6~9月,降雨干湿季分明,但多为雪、霰、雹等固态形式。区内多发育为亚大陆冰川及大陆性冰川,冰碛湖数量较中段有所减少,冰川分布的海拔范围为4500~5500 m。该区气温低,降雨量少,仅为藏东的1/20左右,且坡度平缓,所以发生泥石流、滑坡、崩塌等灾害较东段、中段偏少。

总体而言,地质构造、地形、气候差异控制崩滑流灾害强度与规模、冰川或冰湖分布高程及数量。东段隆升强烈、地形高陡,降雨丰沛,地质灾害高发。中段地震高发、地形复杂,南坡降雨丰沛,

崩塌等地质灾害高发;北坡降雨较少,冰湖溃决灾害链较多。西段地势平缓,年均降雨量低于 300 mm、年均气温低于 3℃,整体气候干旱,冰川、冰湖更加稳定,多以中、小型泥石流、崩塌为主。

3 高危险区地质灾害危险性分析

以西藏自治区地质灾害详查灾害点数据为样本,结合边境区域地质灾害孕灾背景及诱发因素进行分析,选取了高程、坡度、水系密度、工程岩组、

断裂带密度、年降雨量及地震动峰值加速度等 7 个影响因子(图 4),基于层析分析法和加权信息量法对西藏边境地区地质灾害进行危险性评价。本文共识别出东段的察隅县察隅曲、墨脱县雅鲁藏布江段、错那县娘姆江流域、洛扎县洛扎曲和西段的亚东县麻曲、定结县朋曲、定日县绒辖曲、聂拉木县(樟木口岸)波曲及吉隆县吉隆藏布等 9 个重点流域为地质灾害高危险区。结合地质灾害点分布特征及基于因子的统计计算结果。通过接收者操作

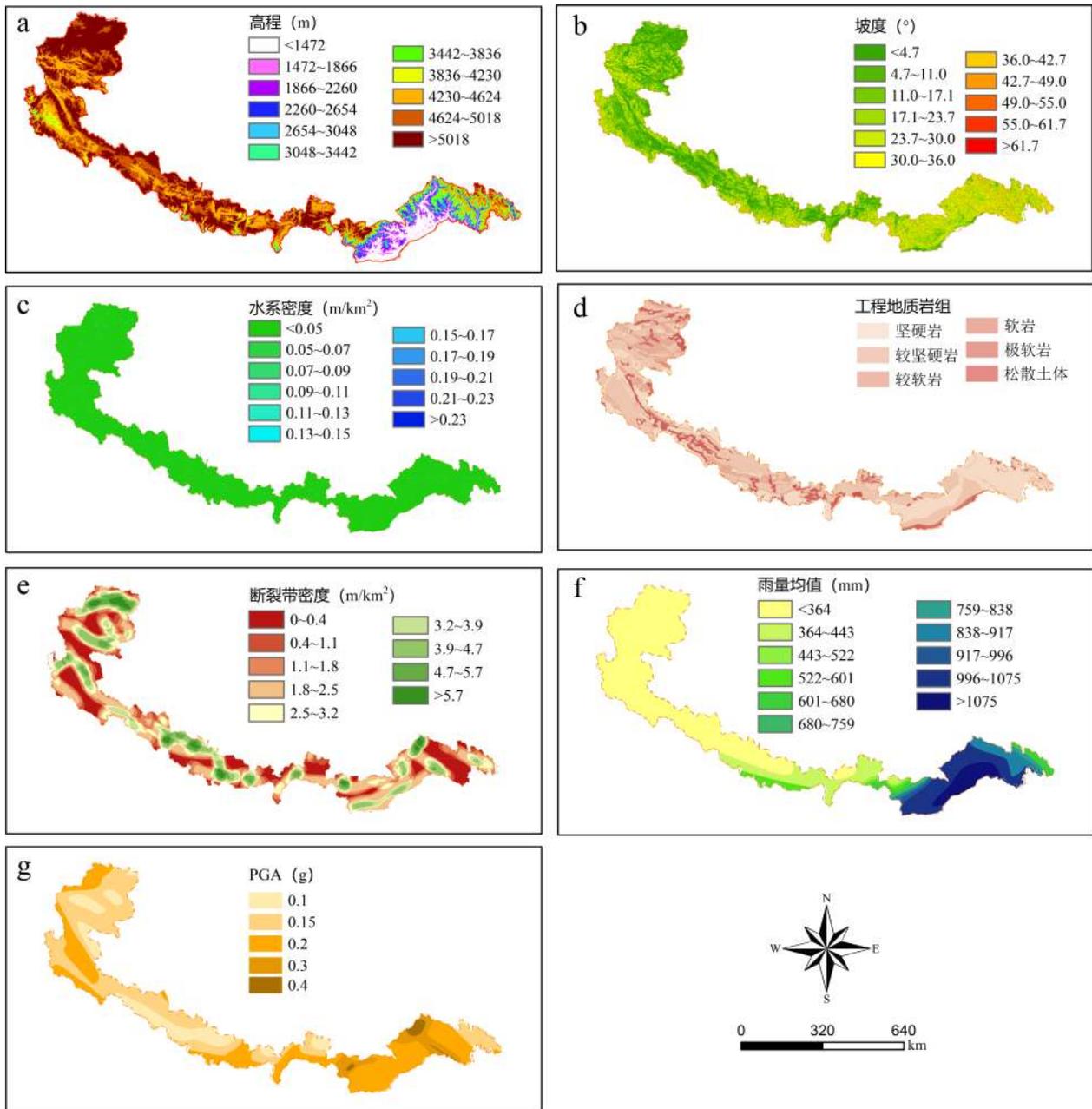


图 4 边境区域地质灾害危险性评价影响因子

Fig. 4 Influence factors for evaluating the risk of geological hazards in border regions of Xizang

特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线法对危险性评价模型进行验证,曲线下面积(S_{AUC})为0.756,说明本次危险性分析模型准确率较高。分别阐明各重点地区地质灾害危险性特征如下(图5)。

3.1 东段地质灾害高危险区

(1)察隅县察隅曲

察隅曲流域主要以崩塌、滑坡为主,地质灾害具有活动频繁和群发性特征。1950年8.6级察隅地震影响持续深远,这是中国有记载以来发生的一次最大的一次地震,震源深度18 km,极震区烈度达12度,此次地震造成大规模的崩塌、滑坡、泥石流,雅鲁藏布江被截成4段。受嘉黎—察隅断裂带控制,地震造成的震裂山体是崩塌滑坡的潜在高发区,而且为泥石流提供了丰富的物源。区内年均降雨量798 mm,泥石流主要为沟谷型泥石流及少量坡面泥石流,由于降雨多表现为连绵阴雨夹杂集中的中到大雨,泥石流发生频率较高,常威胁沿路行人及车辆。

(2)墨脱县雅鲁藏布江段及其支流

墨脱县雅鲁藏布江段及其支流位于喜马拉雅东构造结,地质灾害和灾害链十分发育。雅江在该段地形深切,南迦巴瓦峰与谷底最大相对高差6 009

米,且新构造运动强烈,雅江缝合带内蛇绿混杂岩体较破碎,加之年均降雨量超过2 300 mm,气候、地理、地质环境异常脆弱。受近年极端气候影响,冰岩崩、冰川泥石流灾害频发。区内地质灾害风险较大的地段包括雅江大拐弯段及支流多雄河、白马西日河。多雄拉河受高山积雪和孟加拉暖湿气流的共同作用,春季雪崩多发,河道岸坡和沟床赋存大量冰碛物、冰水堆积及泥石流堆积物,为泥石流提供了丰富的物源。

(3)错那县娘姆江及兰普乡附近流域

娘姆江流域位于错那县境内,受大型地质灾害影响较为明显。其中娘姆江流域规模达大型及以上地质灾害10处(崩塌6处、滑坡4处)、兰普乡附近流域规模达大型及以上地质灾害10处,均为崩塌。此外,该区冰湖溃决型泥石流会诱发链式灾害,如2007年8月10日朗措湖溃决冲毁了边防检查站和一座跨河的钢桥,勒乡到县城的公路被冲毁,河水水位迅速升高约30 m(莫艳合等,2008)。

(4)洛扎县洛扎曲

洛扎曲地质灾害主要包括上游的冰湖溃决型灾害、泥石流灾害及中游的深切河谷区滑坡灾害。其中洛扎曲较大的冰湖溃决灾害发生过3次,崩塌点45处,滑坡105处,泥石流55处。冰湖高溃决



图5 边境区域地质灾害危险性评价图

Fig. 5 Distribution map of geological hazard risk assessment in border areas of Xizang

危险地区主要在中东部和西南部,冰(川)湖溃决主要影响洛扎县城及其附近区域、扎日乡白沙村及其周围区域、色乡处迁村及其周围区域(刘春玲等, 2016)。

3.2 中段地质灾害高危险区

(1) 亚东县麻曲

区内发生较大的冰湖溃决灾害 2 次,发育崩塌 31 处,滑坡 149 处,泥石流 46 处。滑坡以小型堆积层土质滑坡为主,泥石流以亚东县城附近区域中型降雨诱发型泥石流和康布麻曲大型冰湖溃决型泥石流为主,崩塌以中到大型岩质崩塌为主。崩塌灾害多发生在坡度大于 40° ,高差大于 10 m 且坡面凹凸不平的陡峻斜坡上。崩塌区所处岩性多在亚东岩群的片麻岩、混杂岩中,因风化作用致其裂隙较发育(梅乐等, 2018)。岩体被裂隙结构面切割形成块体,在上覆岩体的自重和基座风化的作用下,剪切裂缝不断扩大,逐渐形成贯通性结构面,最终形成崩塌。

(2) 定结县朋曲

朋曲流域发育大量冰湖,如达仓错历史上发生过 3 次冰湖溃决、阿亚错湖 1968 到 1970 连续 3 年均发生了大的冰湖溃决洪水。因冰湖大多分布于流域南部,由此引发的洪水主要威胁尼泊尔的水利水电、桥梁等设施。朋曲中游活动断层聚集,坡度集中于 $20^\circ\sim 35^\circ$ 之间,灾害类型丰富,有滑坡、崩塌等类型。朋曲下游地区灾害类型单一,以冰川融水型泥石流类型为主,坡度多在 35° 以上,植被覆盖度高(李珊等, 2015)。定结县南部边境地区多发育滑坡及崩塌,县城附近区域以泥石流为主。

(3) 定日县绒辖曲

绒辖曲流域现已查明记录在册的地质灾害有 13 处(其中小型崩塌 6 处,中型滑坡 4 处,小型泥石流 3 处),但该区冰川、冰湖密布,且位于喜马拉雅山区南坡,受印度洋暖湿气流及高陡地形控制,遥感影像显示,流域内大型滑坡、崩塌多见。区内发育大型链式灾害的可能性较大,如达仓沟流域现有冰川 8 条,冰湖 11 个,历史上至少爆发过 3 次大型冰湖溃决泥石流,其中最大的 1956 年冰湖溃决泥石流沟口峰值流量 $3\ 862\ \text{m}^3/\text{s}$,流速 $8.06\ \text{m/s}$ 。目前流域内冰川呈现不断缩小的趋势,3 处冰湖存在溃决风险,具备了形成泥石流的陡峻地形和丰富松散固体物质的充分条件,发生冰湖溃决泥石流可能性大(童龙云等, 2019),主要威胁绒辖乡及下游尼

泊尔境内安全。

(4) 聂拉木县(樟木口岸)波曲

聂拉木东北部聂拉木镇和亚来乡交界处冰川分布广泛,水源充分,冰湖密布,尤其是达吉林普和拉不及岗藏布流域,发育有帕曲错、达热错等多个大型冰湖,为冰川湖高溃决危险区。达吉林普位于波曲河上游,其河谷出水口与区内交通要道中尼公路相接,沿波曲主河道分布有较多村庄,若发生冰湖溃决,势必冲毁沟口的中尼公路(裴希琛, 2019)。另外该段大型滑坡发育,樟木口岸滑坡多年持续蠕移变形,历经多次工程治理效果不佳(李云贵等, 1998; 胡桂胜等, 2016)。

(5) 吉隆县吉隆藏布(吉隆口岸)

G216 沿线统计地质灾害直接威胁人员数量较少,但是公路受阻造成的影响较大。境内的岩土体受 2015 年尼泊尔境内博克拉市 $M_s\ 8.1$ 级地震影响,多处岩土体结构破损,泥石流物源量快速增加,加上区内降雨较集中,部分泥石流沟谷岸坡内滑坡、崩塌等不良地质现象发育,泥石流易发性较高。吉隆县南侧地质灾害密度较大,地质灾害主要集中在吉隆镇、宗嘎镇和贡当乡等 3 个乡镇,占到 81.41%,其中吉隆口岸崩塌较为发育。

4 边境地区需关注的地质安全问题

西藏边境地区地质灾害调查研究工作程度总体较低,存在大量尚未登记在册的地质灾害隐患点。随着西藏社会经济的发展,人口、重大工程等可能逐步进入边境地区地质灾害中-高危险区,工程建设可能诱发新的地质灾害,场地安全、高陡边坡、冰川冰湖溃决等引发的地质安全问题仍需持续关注。

4.1 加强边境建设中的场地地质安全评价

原先 1:10 万、1:5 万地质灾害调查评价过程中,已查明地质灾害点分布在居民点、公路附近的现象较为普遍(图 1)。坡度更陡的斜坡、陡崖地带,因为无人居住、无灾情险情而被忽略。随着边境建设工程的开展,新建定居点可能处于地质灾害中-高危险区、工程建设可能诱发新的地质灾害。边境中段、东段新建的村镇及永久定居点在建设过程中需加强场地地质安全评价工作。

4.2 关注高陡斜坡深层蠕变滑动的堵江风险及冰岩山崩等链式灾害

青藏高原东缘部分自然斜坡垂直高差超过

1 000 m, 受构造混杂岩带以及斜坡深部卸荷拉裂、软弱结构面和节理裂隙密集发育的影响, 在斜坡岩体自重应力的长期作用下, 部分高陡斜坡可能存在深层蠕滑变形风险, 如 2018 年白格滑坡两次堵断金沙江。此外, 随着全球气候变化, 近年西藏边境及邻区发生阿鲁错冰崩(2016 年)、色东普冰崩—泥石流堵江(2018 年)及喜马拉雅山南坡的查莫利冰岩山崩—山洪灾害链(2021 年)。建议对人口聚集区、重大工程区的高陡边坡及冰裂缝发育的冰川开展精细化调查及危险性评价, 并监测其稳定性。

4.3 藏东南及喜马拉雅地区冰湖溃决以避让和地质灾害监测为主

藏东南及喜马拉雅地区冰湖规模较大, 冰湖溃决总体频率低, 但分布高程高, 冰湖溃决事件形成的洪水或泥石流毁灭性强, 且治理难度大, 未来建设中应以避让和地质灾害监测为主。涉及冰湖溃决泥石流灾害的有阿里、日喀则、山南 3 个地区 8 个边境县, 包含 12 个小流域, 该区均属边境县。20 世纪以来, 西藏边境地区发生冰湖溃决达 20 余次, 冰湖溃决型洪水(泥石流)主要分布在现代冰川和冰湖的广大地区。进入 21 世纪后, 冰湖溃决发生频次呈加大态势(刘建康等, 2019)。建议加强藏东南及喜马拉雅地区冰湖溃决泥石流地质灾害精细化调查与专业监测, 提升预警预报能力。

4.4 关注边境区域地震灾害及其长期后效应对重大工程建设的影响

1950 年察隅 8.6 级地震、2005 年巴基斯坦克什米尔 7.8 级地震及 2015 年尼泊尔 8.1 级地震在内的历史地震活动过程及空间分布揭示, 喜马拉雅主逆冲断裂带上目前存在兴都库什、尼泊尔西部、锡金—不丹和印缅交界区 4 个地震空区段, 特别是位于尼泊尔地震东部的两个空区, 即锡金—不丹及印缅边界未来强震危险性较显著(吴中海等, 2016)。涉及的边境县市有岗巴县、亚东县、康马县、墨脱县及察隅县, 在后期边境建设工作过程中应高度关注地震灾害及长期后效应对重大工程建设的影响。

5 结论

(1) 根据最新的西藏自治区边境县市 1:5 万地质灾害详查数据, 在 21 个边境县共查明地质灾害点 3 224 处(崩塌 768 处、滑坡 697 处、泥石流 1 738 处以及冰湖溃决型链式灾害 21 处), 包括大型至特大型崩塌 99 处、滑坡 48 处、泥石流 23 处。

(2) 根据西藏边境地区地质构造、地貌和气候特征, 将边境区域分为三段: 东段(南迦巴瓦峰—错那)、中段(错那—普兰)及西段(普兰—日土)。东段发育崩塌 263 处(18.9%)、滑坡 323 处(23.3%)、泥石流 802 处(57.8%); 中段发育崩塌 386 处(25.7%)、滑坡 346 处(23.0%)、泥石流 771 处(51.3%); 西段发育崩塌 119 处(38.1%)、滑坡 28 处(9.0%)、泥石流 165 处(52.9%), 该段地质灾害以中、小型为主。

(3) 地质构造、地形和气候是控制西藏边境地区地质灾害发育的三个控制因素, 决定着地质灾害的强度和规模。东段崩塌、滑坡、泥石流均较为高发, 且地质灾害链事件较多; 中部受近年尼泊尔等邻区强震影响, 地质灾害多发, 且是冰湖溃决灾害链的高发区; 西段地形平坦、降雨稀少, 地质灾害不发育。

(4) 西藏边境地区地质灾害高危险区包括察隅县察隅曲、墨脱县雅鲁藏布江段、错那县娘姆江流域、洛扎县洛扎曲、亚东县麻曲、定结县朋曲、定日县绒辖曲、聂拉木县波曲及吉隆县吉隆藏布等 9 个重点流域。

(5) 西藏边境建设中需重点关注建设场地的地质安全评价、高陡斜坡堵江链式灾害、冰湖溃决、地震灾害及长期后效应等四个关键问题。

References

- Cao H W, Li G M, Zhang L K, et al., 2020. Monazite U-Th-Pb age of Liemai Eocene granites in the southern Tibet and its geological implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (2): 31-42 (in Chinese with English abstract).
- Cui P, Chen X Q, Cheng Z L, et al., 2010. Monitoring and Prevention of Debris-flows and Landslides in Tibet[J]. *Chinese Journal of Nature*, 32 (1): 19-25+66 (in Chinese with English abstract).
- Dong G C, Mo X X, Zhao Z D, et al., 2021. A response of volcanic rocks to the India-Asia continental collision: A case study on Linzong volcanic rocks in Linzhou, Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (2): 332-339 (in Chinese with English abstract).
- Fu G Y, Gao S H, Zhang G Q, et al., 2015. Gravitational isostasy background and surface deformation response characteristics of the 2015 Nepal MS8.1 earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58 (6): 1900-1908 (in Chinese with English abstract).
- He Y M, Li X Y, 2018. Strengthening the Frontier and the Construction of Tibet Border Town System[J]. *Journal of Sichuan Normal University (Social Sciences Edition)*, 45 (6): 163-172 (in Chinese with English abstract).

- He G Y, Bai W J, Xiang T K, et al., 2012. Discussion on Formation Mechanism and Distribution Law of Geological Hazards in the Southeast of Tibet[J]. Resources Environment & Engineering, 26 (5) : 483 – 488 (in Chinese with English abstract).
- Hu G S, Chen N S, Su P C, et al., 2016. Secondary mountain disasters induced by the “4·25” Nepal earthquake in Nyalam County and disaster prevention and mitigation countermeasures[J]. Journal of Natural Disasters, 25 (4) : 70 – 76 (in Chinese with English abstract).
- Jia Y, Cui P, 2020. The extreme climate background for glacial lakes outburst flood events in Tibet[J]. Climate Change Research, 16 (4) : 395 – 404 (in Chinese with English abstract).
- Liu J K, Zhang J J, Gao B, et al., 2019. An overview of glacial lake outburst flood in Tibet, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 41 (6) : 1335 – 1347 (in Chinese with English abstract).
- Liu J J, Cheng Z L, Li Y, et al., 2008. Characteristics of Glacier-Lake Breaks in Tibet[J]. Journal of Catastrophology, 23 (1) : 55 – 60 (in Chinese with English abstract).
- Liu J J, Tang C, Cheng Z L, et al., 2011. Impact of Temperature on Glacier-Lake Outbursts in Tibet[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 41 (4) : 1121 – 1129 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Tong L Q, Qi S W, et al., 2016. Remote sensing investigation and influence factor analysis of glacier lake outburst potential in the Himalayas[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 28 (3) : 110 – 115 (in Chinese with English abstract).
- Li J, Chu H L, Li B, et al., 2021. Analysis of development characteristics of high-elevation chain geological hazard in Zelongnong, Nyingchi, Tibet based on high resolution image and InSAR interpretation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 32 (3) : 42 – 50 (in Chinese with English abstract).
- Li S, Zhai J C, Zhang L H, et al., 2015. Geological Hazards Risk Assessment of Hydropower Program in the Pumqu Basin, Tibet, China[J]. Earth and Environment, 43 (5) : 540 – 546 (in Chinese with English abstract).
- Li Y G, Zhang Z C, 1998. Comprehensive mitigation of Zhangmu Landslide in Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 9 (4) : 20 – 25+32 (in Chinese with English abstract).
- Mei L, Chen L X, Zeng B, et al., 2018. Hazard assessment of rockfall at Yadong border ports in Tibet[J]. Journal of Engineering Geology, 26 (Suppl) : 85 – 91 (in Chinese with English abstract).
- Mo Y H, Xu C, Liu C, 2008. The Causes and Prevention Countermeasures of 2007-08-10 Large-scale Debris Flow Hazard in Cuona County, Tibet[J]. Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology, 10 (3) : 43 – 46 (in Chinese with English abstract).
- Pei X C, 2019. Risk Assessment of Glacier Lake Outburst Disaster Based on GIS[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Peng X M, Yan D P, Huang B L, 2006. Geohazard distributing and trending in Tibet and its vicinity[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 22 (3) : 61 – 69 (in Chinese with English abstract).
- Peng J B, Ma R Y, Lu Q Z, et al., 2004. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Advance in Earth Sciences, 19 (3) : 457 – 466 (in Chinese with English abstract).
- Qin S Q, Li G L, Xue L, et al., 2014. Analysis of the future earthquake situation for some seismic zones in the northwest China and Tibet[J]. Progress in Geophysics, 29 (3) : 1046 – 1067 (in Chinese with English abstract).
- Tie Y B, Ge H, Gao Y C, et al., 2022. The research progress and prospect of geological hazards in Southwest China since the 20th Century[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42 (4) : 653 – 665 (in Chinese with English abstract).
- Tong L Q, Nie H F, Li J C, et al., 2013. Survey of large-scale debris flow and study of its development characteristics using remote sensing technology in the Himalayas[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 25 (4) : 104 – 112 (in Chinese with English abstract).
- Tong L Y, Zhang J, Kong Y D, 2019. Characteristics of the Dacanggou Debris Flow induced by breakout of glacier-lake in the Pengqu Basin Dirin County of Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 30 (6) : 34 – 39, 48 (in Chinese with English abstract).
- Wan J W, Chu H L, Li B, et al., 2021. Characteristics, types, main causes and development of high-position geohazard chains along the Jiali fault zone, Tibet, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 32 (3) : 51 – 60 (in Chinese with English abstract).
- Wu Z H, Zhao G M, Liu J, 2016. Tectonic Genesis of the 2015 Ms8.1 Nepal Great Earthquake and its Influence on Future Strong Earthquake Tendency of Tibetan Plateau and its Adjacent Region[J]. Acta Geologica Sinica, 90 (6) : 1062 – 1085 (in Chinese with English abstract).
- Xiong D Q, Cui X F, 2021. The relationship between main geological hazard and topography in the Himalayan seismic belt: A case study in the Xigaze area, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 40 (11) : 1967 – 1980 (in Chinese with English abstract).
- Yin Y P, 2000. Rapid huge landslide and hazard reduction of Yigong River in the Bomi, Tibet[J]. Hydrogeology Engineering Geology, 27 (4) : 8 – 11 (in Chinese with English abstract).
- Zhuo L, Luo B, 2019. Exploring Social Governance and Harmony and Stability in Tibet's Border Areas[J]. Tibet Development Forum, (5) : 62 – 65 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹华文, 李光明, 张林奎, 等, 2020. 西藏山南列麦始新世花岗岩独居石 U-Th-Pb 年龄及地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 40 (2) : 31 – 42.
- 崔鹏, 陈晓清, 程尊兰, 等, 2010. 西藏泥石流滑坡监测与防治[J]. 自然杂志, 32 (1) : 19 – 25+66.
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等, 2021. 大陆碰撞过程的火山岩响应: 以西藏林周林子宗火山岩为例[J]. 沉积与特提斯地质, 41 (2) : 332 – 339.

- 付广裕, 高尚华, 张国庆, 等, 2015. 2015年尼泊尔 MS8.1 地震的地壳重力均衡背景与地表形变响应特征[J]. *地球物理学报*, 58(6): 1900-1908.
- 何一民, 李馨好, 2018. 新疆固边与西藏边境城镇体系建设[J]. *四川师范大学学报: 社会科学版*, 45(6): 163-172.
- 何果佑, 白武军, 向天葵, 等, 2012. 浅析西藏东南部地区地质灾害的形成机理及分布规律[J]. *资源环境与工程*, 26(5): 483-488.
- 胡桂胜, 陈宁生, 苏鹏程, 等, 2016. 西藏聂拉木县“4-25”尼泊尔地震次生山地灾害与防灾减灾对策[J]. *自然灾害学报*, 25(4): 70-76.
- 贾洋, 崔鹏, 2020. 西藏冰湖溃决灾害事件极端气候特征[J]. *气候变化研究进展*, 16(4): 395-404.
- 刘建康, 张佳佳, 高波, 等, 2019. 我国西藏地区冰湖溃决灾害综述[J]. *冰川冻土*, 41(6): 1335-1347.
- 刘晶晶, 程尊兰, 李泳, 等, 2008. 西藏冰湖溃决主要特征[J]. *灾害学*, 23(1): 55-60.
- 刘晶晶, 唐川, 程尊兰, 等, 2011. 气温对西藏冰湖溃决事件的影响[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 41(4): 1121-1129.
- 刘春玲, 童立强, 祁生文, 等, 2016. 喜马拉雅山地区冰川湖溃决灾害隐患遥感调查及影响因素分析[J]. *国土资源遥感*, 28(3): 110-115.
- 李军, 褚宏亮, 李滨, 等, 2021. 基于高分影像与 InSAR 解译的西藏林芝则隆弄高位链式地质灾害发育特征分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 32(3): 42-50.
- 李珊, 翟靖超, 张利华, 2015. 西藏朋曲流域水电工程地质灾害危险性评价[J]. *地球与环境*, 43(5): 540-546.
- 李云贵, 张作辰, 1998. 西藏樟木滑坡及综合治理[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 9(4): 20-25+32.
- 梅乐, 陈丽霞, 曾斌, 等, 2018. 西藏边境亚东口岸崩塌灾害危险性评估[J]. *工程地质学报*, 26(增刊): 85-91.
- 莫艳合, 许冲, 刘灿, 2008. 西藏错那县“2007-08-10”特大泥石流灾害成因及防治对策[J]. *防灾科技学院学报*, 10(3): 43-46.
- 裴希琛, 2019. 基于 GIS 的冰川湖溃决灾害风险评估[D]. 中国地质大学(北京).
- 彭轩明, 鄢道平, 黄波林, 2006. 西藏及邻区地质灾害分布与发展趋势[J]. *华南地质与矿产*, 22(3): 61-69.
- 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等, 2004. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. *地球科学进展*, 19(3): 457-466.
- 秦四清, 李国梁, 薛雷, 等, 2014. 西北与西藏地区某些地震区地震趋势分析[J]. *地球物理学进展*, 29(3): 1046-1067.
- 铁永波, 葛华, 高延超, 2022. 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*, 42(4): 653-665.
- 童立强, 聂洪峰, 李建存, 等, 2013. 喜马拉雅山地区大型泥石流遥感调查与发育特征研究[J]. *国土资源遥感*, 25(4): 104-112.
- 童龙云, 张继, 孔应德, 2019. 西藏定日朋曲流域达仓沟冰湖溃决泥石流特征[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 30(6): 34-39, 48.
- 万佳威, 褚宏亮, 李滨, 等, 2021. 西藏嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害发育特征分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 32(3): 51-60.
- 吴中海, 赵根模, 刘杰, 2016. 2015年尼泊尔 Ms8.1 地震构造成因及对青藏高原及邻区未来强震趋势的影响[J]. *地质学报*, 90(6): 1062-1085.
- 熊德清, 崔笑烽, 2021. 喜马拉雅山脉地震带主要地质灾害与地形地貌关系——以西藏日喀则地区为例[J]. *地质通报*, 40(11): 1967-1980.
- 殷跃平, 2000. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. *水文地质工程地质*, 27(4): 8-11.
- 卓拉, 罗布, 2019. 西藏边境地区的社会治理与和谐稳定探析[J]. *西藏发展论坛*, (5): 62-65.