

西藏色东普沟2024年两期冰川泥石流堵江灾害发育特征研究

万佳威, 高浩源, 高 杨, 肖金城, 李 军, 李江山, 李浩文

Research on the characteristics of the Sedongpu glacial debris flow and river-damming hazards, occurred in April 15 and May 14, 2014, in Xizang, China

WAN Jiawei, GAO Haoyuan, GAO Yang, XIAO Jincheng, LI Jun, LI Jiangshan, and LI Haowen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202410027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感解译

Remote sensing interpretation of development characteristics of high-position geological hazards in Sedongpu gully, downstream of Yarlung Zangbo River

李壮, 李滨, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 33-41

四川木里县项脚沟“75”特大型泥石流特征及发展趋势分析

Analysis of the characteristics and development trends of the “75” catastrophic debris flow in Xiangjiao gully, Muli County, Sichuan

杨华铨, 柳金峰, 孙昊, 赵万玉, 张文涛 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 100-107

雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流过程模拟及运动特征分析

Numerical runout modeling and dynamic analysis of the ice avalanche-debris flow in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet

李昆仲, 张明哲, 邢爱国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 18-27

西藏嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害发育特征分析

Characteristics, types, main causes and development of high-position geohazard chains along the Jiali fault zone, Tibet, China

万佳威, 褚宏亮, 李滨, 高杨, 贺凯, 李壮, 李艺豪 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 51-60

四川木里“7·5”黄泥巴沟泥石流灾害过程及防治措施建议

Process and characteristics of “7·5” Huangniba gully debris flow in Muli County of Sichuan Province and prevention suggestions

芦明, 柳金峰, 孙昊, 赵万玉 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(1): 102-109

西藏雅鲁藏布江峡谷特大巨型泥石流活动与泥沙输移特征研究

Study on the activities of the massive debris flows and sediment transport characteristics in the Grand Bend of the Yarlung Zangbo River Gorge, Xizang

赵聪, 梁京涛, 铁永波, 马晓波, 张肃, 龚凌枫 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(4): 45-55



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202410027

万佳威, 高浩源, 高杨, 等. 西藏色东普沟 2024 年两期冰川泥石流堵江灾害发育特征研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(6): 24-32.

WAN Jiawei, GAO Haoyuan, GAO Yang, et al. Research on the characteristics of the Sedongpu glacial debris flow and river-damming hazards, occurred in April 15 and May 14, 2014, in Xizang, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(6): 24-32.

西藏色东普沟 2024 年两期冰川泥石流堵江 灾害发育特征研究

万佳威^{1,2}, 高浩源^{1,2}, 高杨^{1,2}, 肖金城³, 李军^{1,2}, 李江山^{1,2}, 李浩文^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081; 3. 中测新图(北京)遥感技术有限责任公司, 北京 100039)

摘要: 色东普沟位于西藏雅鲁藏布大峡谷, 是特大堵江链式灾害的频发区, 严重威胁着边疆建设的地质安全。文章主要针对 2024 年 4 月 15 日和 5 月 14 日两次堵江灾害事件开展详细研究, 全面分析了灾害形成过程、主要成因和发展趋势。通过水位监测、地震动监测、直升机调查、高原无人机航测等方法, 识别和分析了两次堵江灾害的形成发展过程, 发现灾害运动时间可达 8 min, 堵江成坝时间大于 10 h, 第二次灾害相对更为严重, 形成的堰塞湖未完全溃决, 严重加剧了雅鲁藏布江干流河道的淤堵。从地形和地质条件、地震因素、气候因素等方面对灾害成因进行了分析, 发现色东普沟地形高差大、岩体结构破碎、沟道内巨厚层松散堆积体物源丰富, 为灾害形成提供了有利条件, 而春夏交替过程中的气温上升导致冰川消融加快和水动力作用增强, 触发了堵江灾害链的发生。通过综合遥感数据解译, 发现色东普沟已进入堵江灾害链活跃期, 2018 年特大堵江灾害造成了雅鲁藏布江河流地貌发生巨大改变, 而之后至今的大规模堵江事件导致河道淤积更加严重, 形成巨型堰塞坝体的风险不断增大。最后, 文章针对色东普沟高位远程灾害堵江溃决、监测预警、减灾措施等方面提出了建议。

关键词: 色东普沟; 冰川泥石流; 形成过程; 灾害成因; 发展趋势

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)06-0024-09

Research on the characteristics of the Sedongpu glacial debris flow and river-damming hazards, occurred in April 15 and May 14, 2014, in Xizang, China

WAN Jiawei^{1,2}, GAO Haoyuan^{1,2}, GAO Yang^{1,2}, XIAO Jincheng³, LI Jun^{1,2}, LI Jiangshan^{1,2}, LI Haowen^{1,2}

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;

3. China TopRS Technology Co. Ltd., Beijing 100039, China)

Abstract: Sedongpu gully, situated in the Yarlung Zangbo Grand Canyon in Xizang, is an area of frequent massive river-

收稿日期: 2024-10-22; 修订日期: 2024-11-27

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3004301); 国家自然科学基金项目(U2244226; 42407280; U2244227); 中国地质调查局地质调查项目(DD20230538)

第一作者: 万佳威(1991—), 男, 江西南昌人, 地质工程专业, 博士, 助理研究员, 主要从事工程地质与地质灾害研究。

E-mail: wanjiawei@qq.com

damming landslides that threaten the geological safety of border towns and major engineering projects. This study focused on a detailed analysis of two river-damming events that occurred on April 15 and May 14, 2024. The disaster formation processes, main causes, and developing trends were widely analyzed. From the methods of water level monitoring, ground motion monitoring, investigating by helicopter, and survey by high-altitude and Unmanned Aerial Vehicles, the formation and development processes of these river-damming events were identified and analyzed. It was found that the disaster body slid along the gully reached 8 minutes and the river-damming lasted over 10 hours. The second disaster was relatively more serious because the landslide-dammed lake had not completely burst, which significantly aggravated the damming of the main channel of the Yarlung Zangbo River. Their causes were examined from topographical and geological conditions, seismic factors, and climate factors. It was determined that the Sedongpu gully has large height differences, fractured rock structures, and a rich source of loose deposits, which provides favorable conditions for disaster formation; the temperature rising during the alternation of the spring and summer leads to the acceleration of glacier melting and the enhancement of hydrodynamic effect, triggering the occurrence of river-damming disaster chain. Furthermore, it is believed that Sedongpu gully has entered an active period of river-damming disaster chain, based on the interpretation of the comprehensive remote sensing images. Our findings revealed that the major river-damming hazards that occurred in 2018 had caused significant changes to the river morphology of the Yarlung Zangbo River; subsequent large-scale river-damming events resulted in more and more clogged up with the river channel, which increased the risk of forming a giant landslide dam. Finally, this paper provided some suggestions for addressing the issues related to river damming, rising water, outburst flooding, monitoring, early warning, and disaster reduction measures for the high-altitude and long runout disasters in the Sedongpu gully.

Keywords: Sedongpu gully; glacial debris flow; evolutionary process; causes; developing trend

0 引言

2024 年 4 月 15 日 17 时左右, 西藏雅鲁藏布江下游大峡谷河段色东普沟发生泥石流灾害(以下简称“4·15”灾害), 堵塞雅鲁藏布江干流形成堰塞湖, 上游回水淹没 8 km, 库容约 $0.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2024 年 5 月 14 日 21 时后, 色东普沟再次发生泥石流堵江灾害(以下简称“5·14”灾害), 约 $8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 泥石流冲出沟口, 并堆积在“4·15”灾害残留体之上, 形成高 15 ~ 20 m 的堰塞坝, 堰塞湖回水淹没 20 km, 库容约 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

色东普沟曾多次形成高位远程地质灾害, 堵塞雅鲁藏布江干流河段, 在上下游引发了堰塞湖淹没和溃决洪水风险, 严重危害边疆城镇建设地质安全, 受到了国内外学者广泛关注^[1-5]。2018 年 10 月 17 日和 10 月 29 日, 色东普沟连续两次发生超高位崩滑-碎屑流-堵江-洪水链式灾害, 形成高度近 80m 的巨型堰塞坝, 堰塞湖库容超过 $6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 溃决洪水最大洪峰流量达 $32\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, 这两次灾害导致 33 座村庄被淹没, 5 000 余人被撤离。2021 年 3 月 22 日, 色东普沟再次发生堵江灾害, 新的堆积体覆盖在 2018 年堰塞残体之上, 堵断雅鲁藏布江形成堰塞坝, 次日堰塞湖自然溢流, 溃决洪水最大洪峰流量达 $2\,570 \text{ m}^3/\text{s}$, 冲毁了下游墨脱县施工平台。2023 年 9 月 28 日和 10 月 3 日, 色东普沟连续两次发生冰川

泥石流堵江事件, 坝前水位最高上涨 14 m, 堰塞湖溃决后最大洪峰流量达 $10\,200 \text{ m}^3/\text{s}$ 。2023 年 9 月 28 日堵江灾害导致上游加拉村成为孤岛, 加拉村村民、寺庙僧众等 31 人被困, 当地政府及时出动高原直升机进行救援, 9 月 29 日完成被困群众的转移安置。

刘传正等^[6]分析了 2018 年色东普堵江灾害事件和沟道发育特征, 认为色东普沟高位远程灾害是在特殊的地形地貌、地质结构、气候环境、冰川运动、地震构造活动等因素综合作用形成的, 将会在较长时间内多发频发。Li 等^[7]利用历史卫星影像和数字表面模型分析了色东普沟 1974 年以来的灾害发育特征, 综合分析了灾害影响因素, 认为气候变化、陡峭的地形和近期的强震活动是导致色东普灾害频发的关键原因。Gao 等^[8]利用综合卫星遥感和无人机航测等技术方法, 发现色东普沟高位远程灾害是气候变暖和地震所导致, 特别是 2017 年米林 6.9 级强震影响强烈, 导致色东普沟至少发生了 8 次规模不等的灾害堵江事件, 引发了强烈的固体物质运移和沟道地貌演变。

色东普沟是高位远程地质灾害的频发区, 近年来多次形成特大型流域性地质灾害链, 严重威胁着边疆城镇建设地质安全, 然而其灾害形成过程缺乏详细观测记录, 形成原因和未来发展形势也有待进一步阐明, 因此

亟待开展专门研究。本文以 2024 年“4·15”与“5·14”两次堵江灾害事件为例,通过地震动监测、高原无人机航测、综合遥感解译、水文监测、气象监测、实地调研等技术手段,对灾害过程和成因进行深入分析,综合研判色东普沟堵江发展趋势,并提出相应对策建议。

1 色东普沟发育特征

色东普沟位于西藏雅鲁藏布江大峡谷段左岸、米林市派镇加拉村下游约 7 km 处,流域面积 67 km²,形态

呈“树叶”状,上游地形开阔,下游沟道狭长,总长度约 11 km,地势总体上陡下缓,纵坡降大,主沟两侧发育 6 条支沟,最高点加拉白垒峰海拔 7 294 m,沟口雅鲁藏布江海拔 2 775 m,最大高差 4 519 m(图 1a)。气候垂直分带性强,大气降水充沛,雪线位于 4 800 m 左右,上部海洋性冰川发育,沟内常年有流水。基岩主要为南迦巴瓦岩群(Pt₂₋₃Nj)派乡岩组,岩性主要为片麻岩、片岩、混合岩等。沟内堆积大量冰碛物和松散体,主要由多期次冰川活动和高位崩滑堆积所致。

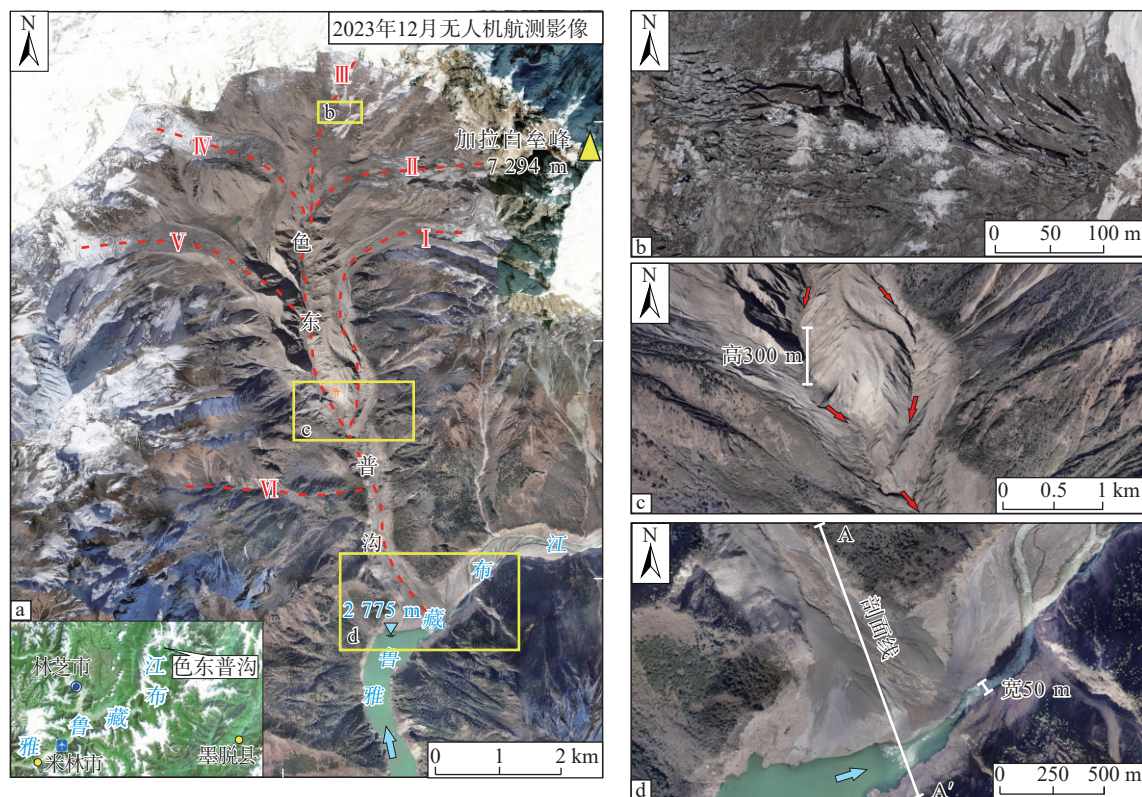


图 1 色东普沟无人机航测影像

Fig. 1 Sedongpu gully images obtained by unmanned aerial vehicles

注: a 为色东普沟全貌; b 为高位碎裂冰岩体; c 为巨厚冰碛物松散体; d 为雅鲁藏布江干流壅塞。

构造上,色东普沟位于喜马拉雅东构造结核心区,是印度板块与欧亚板块碰撞汇聚的前缘,挤压剪切和隆升作用强烈,大型活动断裂发育^[9-11]。东构造结东、西两侧边界分别为 NE-SW 走向的墨脱断裂和米林断裂,北部主要发育 NW-SE 走向的嘉黎断裂和西兴拉断裂;其中,西兴拉断裂是 2017 年米林 6.9 级强震的发震断裂^[12-14]。此次地震发生于 2017 年 11 月 18 日 6 时 34 分,是米林乃至林芝地区继 1950 年察隅 8.6 级大地震后发生的最强烈的一次地震事件,震中距离色东普沟直线距离 10 km,震源深度 10 km,最大烈度Ⅷ度。米林地

震造成了大量高位冰岩体变形失稳,触发了同震滑坡上千处,并促使了色东普沟 2018 年两次特大堵江灾害链的形成^[15-17]。

色东普沟海拔 4 300 m 以上主要为高位冰岩崩区。该区域多被冰雪覆盖,基岩裸露,风化冻融冻胀作用强烈,导致表面冰岩体力学强度低,岩体结构破碎,节理裂隙和冰裂缝极为发育(图 1b)。海拔 3 300~4 300 m 之间为冰碛物松散体区,由冰川消融、搬运沉积和崩滑碎屑流短暂运动堆积而成,厚度超过 300 m(图 1c)。冰碛物松散体不仅容易自身失稳下滑,还存在被高位崩滑

体冲击铲刮的风险,导致冲出物源量成倍增加。碎裂的冰岩体和巨厚的冰碛物松散体在地震、冻融等内外动力作用下具有极高的失稳风险,为高位冰岩崩碎屑流和冰川泥石流灾害的形成提供了充足物源。如图 1d 所示,2023 年 12 月,色东普沟口已形成巨型堰塞区,堰塞体严重挤压雅鲁藏布江干流河道,过流宽度不足 50 m,一旦发生大规模碎屑流或泥石流流入江将引发堵江灾害链,对上下游造成严重危害。

2 色东普沟“4·15”和“5·14”灾害形成过程

2024 年 4 月 15 日 17 时左右和 5 月 14 日 21 时后,色东普沟两次发生泥石流堵江灾害,堵江时间分别达 10 h 和 36 h,研究团队通过水位监测、地震动监测、直升机调查、高原无人机航测等技术方法分析了两次堵江灾害的发展全过程。

(1) 水位监测

色东普沟上游 7 km 处的加拉水文站监测到了 2024 年“4·15”和“5·14”两次灾害发生时的坝前水位变化(图 2)。(1)4 月 15 日 17 时正常水位 2 775.59 m,18 时由于堰塞堵江水位快速升高至 2 776.20 m,此后持续上涨;4 月 16 日 3 时达到最高水位 2 777.61 m(累计上涨 2.02 m),自此水位开始回落,表明色东普沟已发生溃坝,9 时水位回落至 2 776.00 m,此时灾害险情基本解除。(2)5 月 14 日 21 时,正常水位 2 776.27 m,色东普沟堵江后水位持续上涨,5 月 15 日 3 时水位升高至 2 779.23 m;5 月 16 日 9 时达到最高水位 2 793.26 m(累计上涨 16.99 m),自此水位开始回落,表明色东普沟已发生溃坝,22 时水位回落至 2 785.02 m,灾害险情基本解除。

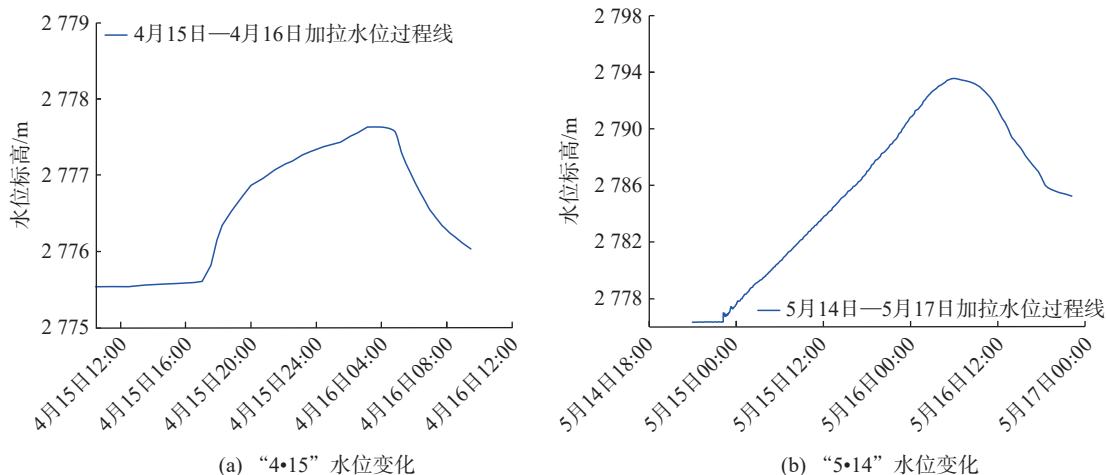


图 2 色东普沟 2024 年“4·15”与“5·14”两次堵江灾害加拉村水位变化

Fig. 2 Water level fluctuations during the two Sedongpu-river damming hazards on April 15 and May 14, 2024, from the Jiala village station

色东普沟“5·14”灾害堵江时间和坝前水位上涨幅度均远大于“4·15”灾害,并且“4·15”灾害险情解除后坝前水位基本恢复至灾害发生前,而“5·14”灾害险情解除后坝前水位仍高出灾害发生前 8.75 m,显示“5·14”灾害堵江体积规模大,溃坝后仍保留大量残留体淤积于雅鲁藏布江干流河道中。

(2) 地震动监测

利用地震动信号对高位远程地质灾害的发生过程进行识别是一种新的有效方法^[18-20]。本次研究利用色东普沟上游达林村建有地震动监测站,距色东普沟沟口直线距离 15.5 km,有 3G/4G 信号,可实现监测数据的实时传输(图 3a、b)。监测站主要包括地震监测系统、太阳能供电系统和云平台,地震仪内置地震计、地震数据

记录器、电子反馈电路等,带宽 0.5 ~ 50 Hz,高位远程地质灾害发生后将触发记录并形成连续波形,在云平台上进行接收、存储、显示和分析。

达林村地震动监测站监测到了色东普沟“5·14”灾害的灾害发生过程。如图 3c 所示,2024 年 5 月 14 日 21 时 36 分至 45 分,监测站接收到强烈的地震动信号,总持续时间达到 9 min。其可分为两次事件,36 分至 37 分为第 1 次事件,持续时间 1 min,最大速度 0.002 004 cm/s;37 分至 45 分为第 2 次事件,持续时间 8 min,最大速度 0.003 354 cm/s,45 分后地震动信号回归噪声水平。因此,推测“5·14”灾害事件主要包括 2 起高位远程灾害,第 1 起大约发生于 21 时 36 分,第 2 起大约发生于 21 时 37 分,第 2 起的灾害规模和持续时间远大于第 1 起,

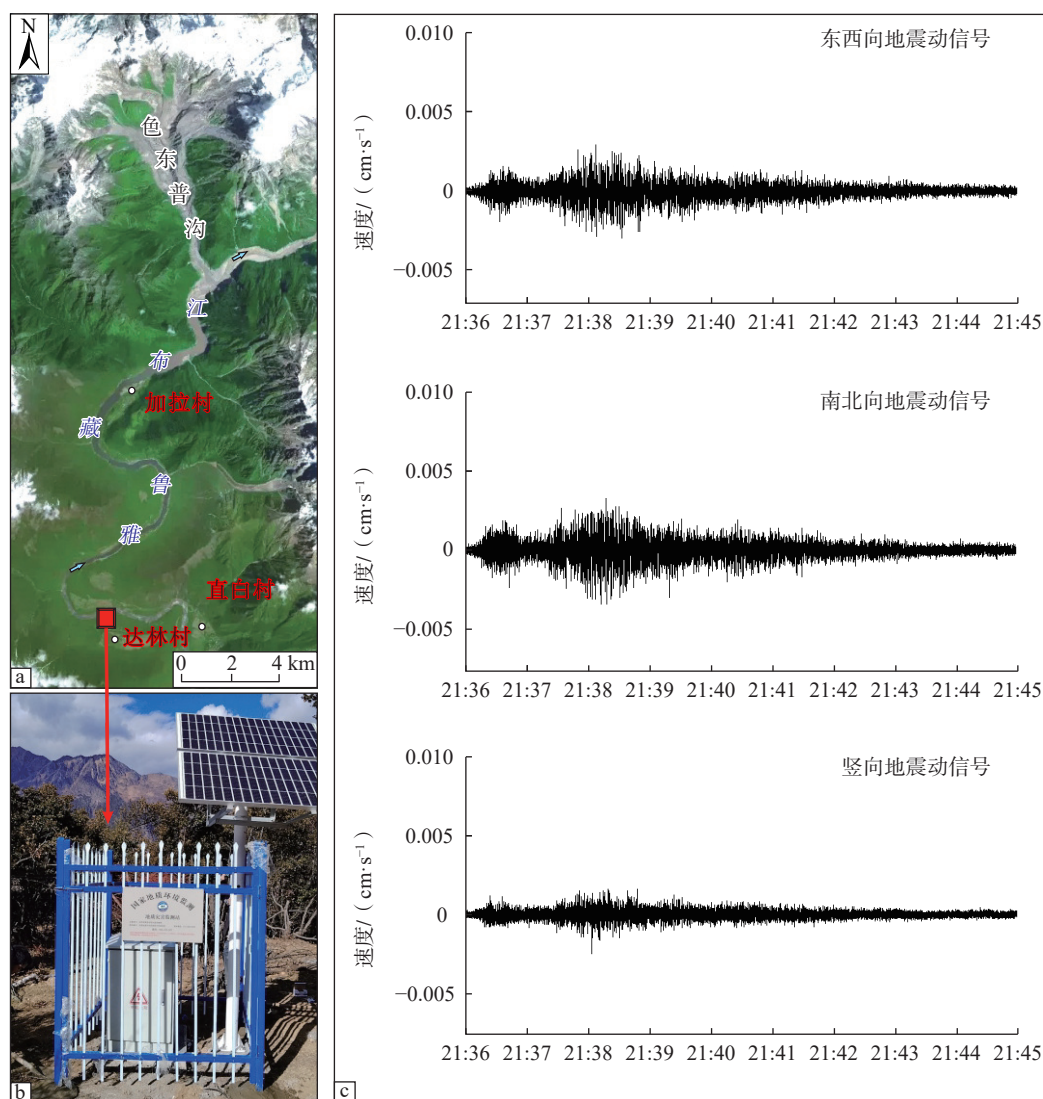


图 3 色东普沟“5·14”堵江灾害达林村地震动监测信号

Fig. 3 Ground motion signals created by the Sedongpu river-damming hazard on May 14 from the Dalin Village Station

注: a 为监测站位置; b 为监测站照片; c 为速度时程图。

为“5·14”灾害长时间堵江提供了主要的物质来源。在灾害发生过程识别中可以取地震波传播速率 3 km/s ^[18], 而监测台站距离色东普沟 15.5 km , 则实际灾害发生时间较地震动信号触发记录时间大约提前约 5.2 s 。该地震动监测结果与灾害水位变化监测情况基本对应。

(3) 直升机调查与高原无人机航测

色东普沟“5·14”灾害发生后, 林芝市政府和研究团队及时响应, 通过载人直升机调查和高原无人机航测等方法, 对灾害形成发育和堵江情况进行了实地调研和分析。调研结果显示(图 4), 此次灾害是由于沟内冰碛物松散体多次发生大规模失稳滑动, 并形成泥石流向沟口运动堆积, 冲入雅鲁藏布江后沿河道向下游扩散, 调查时泥石流堆积体已完全堵江形成堰塞湖, 堰塞坝长度

约 800 m 、宽约 650 m 、高 $15 \sim 20 \text{ m}$, 泥石流总冲出量约 $8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。该结果与灾害坝前水位变化和地震动监测情况基本对应。

如图 4b 所示, “5·14”泥石流冲出沟口后继续沿雅鲁藏布江干流河道向下游发生远程运动堆积, 距离约 1 km , 导致原有的河道被严重淤积堵塞, 加大了江水冲刷和自然泄流的难度。5 月 16 日 9 时, 坝前水位达到峰值后开始回落, 下降至当日 22 时保持基本稳定, 但此时坝前水位仍高出灾害发生前 8.75 m , 表明色东普沟堰塞坝未发生整体溃坝, 仍保留大量残留体堆积于雅鲁藏布江中, 造成河流地貌发生重大改变, 这不仅加剧了色东普沟堵江灾害的易发程度, 还使色东普沟口形成巨型堰塞坝体的风险进一步增大。

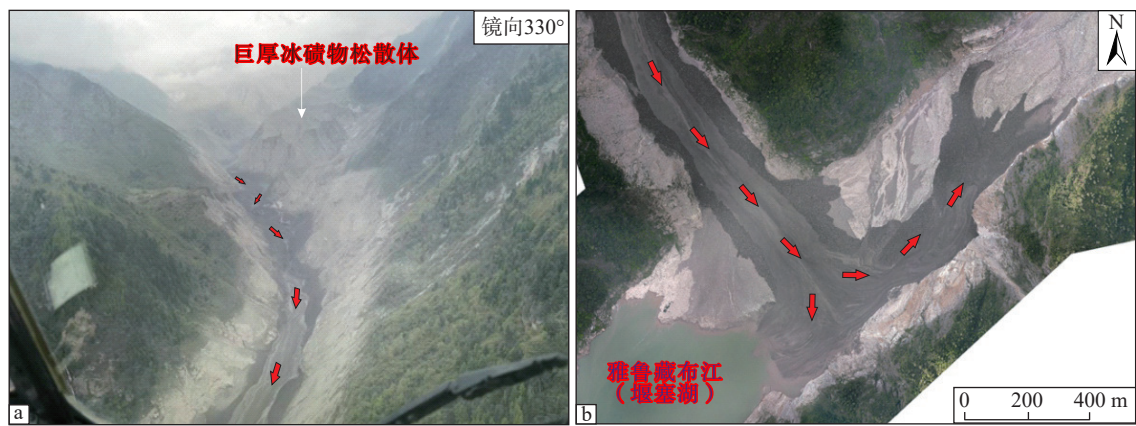


图 4 色东普沟“5·14”灾害情况(5月15日拍摄)

Fig. 4 Scenes of the Sedongpu river-damming hazard since May 14, obtained on May 15

注: a 为直升机调查照片; b 为无人机航空摄影。

(4)两次灾害形成过程综合分析

通过水位监测、地震动监测、直升机调查与高原无人机航测,对色东普沟 2024 年上半年两次堵江灾害发展过程进行了捕捉和观测,发现两次灾害在沟道中的运动时间可达 8 min,堵江成坝时间大于 10 h,加剧了雅鲁藏布江干流河道的淤积。其中“5·14”灾害较“4·15”灾害更为严重,形成的堰塞湖未能完全溃决,仍有大量残留体淤积河道中,导致灾害结束后坝前水位仍高出灾害发生前 8.75 m,这不仅加剧了色东普沟堵江灾害的易发程度,还使色东普沟口形成巨型堰塞坝体的风险进一步增大。

此次实地调研还发现,色东普沟“4·15”和“5·14”灾害发生前均无强降雨和地震事件,亦无人类活动因素干预。

3 色东普沟“4·15”和“5·14”灾害成因分析

(1)地形和地质条件

色东普沟最高点位于加拉白垒峰,海拔 7 294 m,最低点位于沟口处,海拔 2 775 m,最大高差 4 519 m,沟道总长度约 11 km,为高位远程地质灾害的形成孕育提供了有利地形条件。海拔 4 500 m 以上坡度较陡,受强烈的构造运动、冰川侵蚀和冻融风化等作用影响,岩体结构破碎,大型节理裂隙和冰裂缝密集发育,易发生高位失稳滑动,为高位冰岩崩物源区。海拔 3 000 ~ 4 500 m 之间坡度较缓,大量冰川碎屑、冰碛物、崩坡积物堆积于沟内,覆盖面积约 5.26 km²,最大厚度超过 300 m,物源方量极大,存在失稳下滑和被高位崩滑体冲击铲刮滑动的风险,为冰川冰碛物物源区,这为本次泥石流堵江灾害的发生提供了充足物质基础。

(2)地震因素

2017 年米林 6.9 级地震对色东普沟灾害的发生影响显著。该地震发生于 2017 年 11 月 18 日 6 时 34 分,是米林乃至林芝地区 70 年以来最强烈的一次地震事件,震中位于雅鲁藏布大峡谷内,距离色东普沟直线距离 10 km,最大地震烈度达到Ⅷ度,不仅在大峡谷内触发形成了同震滑坡群,还将色东普沟高位冰岩体震裂震碎,最终导致 2018 年两次特大堵江灾害的发生。2018 年色东普沟堵江灾害造成雅鲁藏布江干流河道巨变,残留堆积体严重淤堵了雅鲁藏布江干流河道,导致沿江形成巨型堰塞带,江水自然冲刷泄流的难度增大,堵江灾害也因此日益频繁。

(3)气候因素

色东普沟口建有气象观测站,监测结果显示,色东普沟两次堵江灾害链发生前均未发生强降雨,而 2024 年 4 月以来色东普沟气温波动升高,昼夜温差增大,对灾害发生影响显著。如图 5 所示,色东普沟口 4 月 12 日气温 5 ~ 13 ℃,4 月 13 日攀升至 5 ~ 23 ℃,4 月 15 日达到 9 ~ 25 ℃;而 5 月 10 日气温 6 ~ 10 ℃,5 月 11 日起开始回升,5 月 14 日达到 8 ~ 13 ℃。色东普沟主要发育海洋性冰川,对温度变化敏感,并且“4·15”和“5·14”两次灾害发生前均无其他外力扰动,近期也无降雨和地震作用,因此认为气温升高是两次堵江灾害链的触发因素。2024 年 4 月以来的色东普沟气温升高导致冰川消融加快,为冰碛物松散体的解体滑动提供了良好的外动力条件,导致了泥石流堵江灾害的发生。

4 色东普沟堵江堰塞发展趋势分析

本研究收集了 1961 至 2024 年以来色东普沟综合

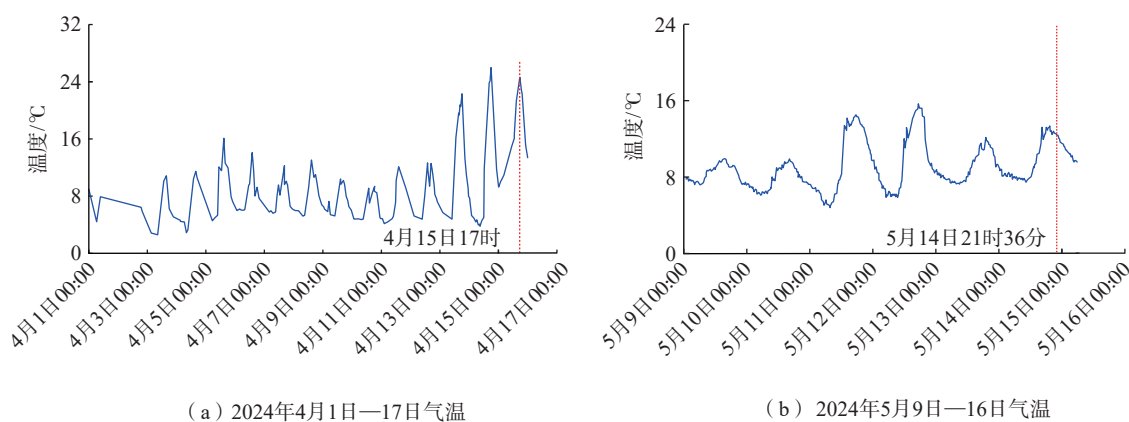


图 5 色东普沟口气温变化

Fig. 5 Temperature variations at the mouth of the Sedongpu gully

遥感数据,来源包括 Keyhole 卫星、Pleadas 卫星、Spot 卫星、高分卫星、Google Earth 影像、无人机航测结果等。综合遥感数据解译结果显示(图 6),1961 年至 2024 年间色东普沟发生过多次堵江事件,导致雅鲁藏布江河道频繁发生改道、收窄、抬升等明显变化。特别是 2018 年 10 月发生的两次冰岩崩碎屑流堵江,显著改变了雅鲁藏布江的河流地貌。此次灾害发生前的近

60 年,雅鲁藏布江均沿沟口堆积体左岸径流通行,灾害发生后色东普沟口和下游形成巨型堰塞体,堵断了原有河道,导致河流改道至江的右岸。2018 年两次特大堵江灾害发生后,2021 年、2023 年、2024 年又多次发生堵江灾害,导致雅鲁藏布江干流河道淤积更加严重,沿江形成了堰塞带,江水自然冲刷侵蚀难度大,加剧了色东普沟灾害堵江的易发性和风险性。

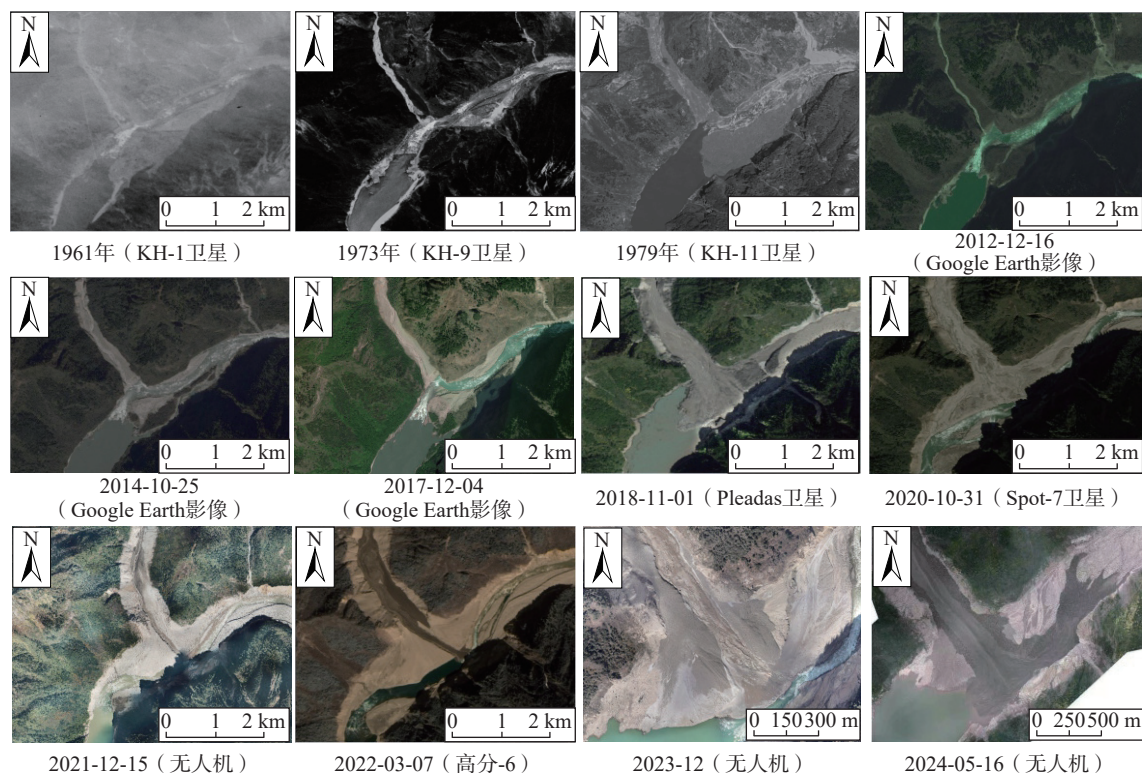


图 6 色东普堰塞堆积区时序变化影像

Fig. 6 Time-series images of the depositional area of the Sedongpu gully

结合无人机航飞高精度数字高程模型,构建了色东普沟 2017 年以来堰塞堆积区变化剖面图见图 7, A-

A'位置见图 1d。如图 7 所示,2017 年至今堰塞体最大抬升高度约 70 m,平均抬升高度约 60 m,向沟外发育扩

展约 650 m, 河床抬升 12 m。其中, 2018 年两次高位冰岩崩灾害形成的堰塞残留体平均高度 45 m, 向沟外发育扩展 350 m, 雅鲁藏布江干流河道由左岸改为右岸, 河床抬升 8 m; 2024 年 5 月冰川泥石流形成堰塞坝高度 15 ~ 20 m, 堰塞体平均高度抬升至 60 m。色东普沟海

拔 3 000 ~ 4 500 m 之间大量冰川碎屑、冰碛物、崩坡积物堆积, 覆盖面积约 5.26 km², 最大厚度超过 300 m, 物源方量极大, 而色东普沟频繁的高位远程地质灾害使堰塞体快速增高扩展, 存在形成大型堰塞湖的风险。因此, 应尽快加强链式灾害风险管控研究。

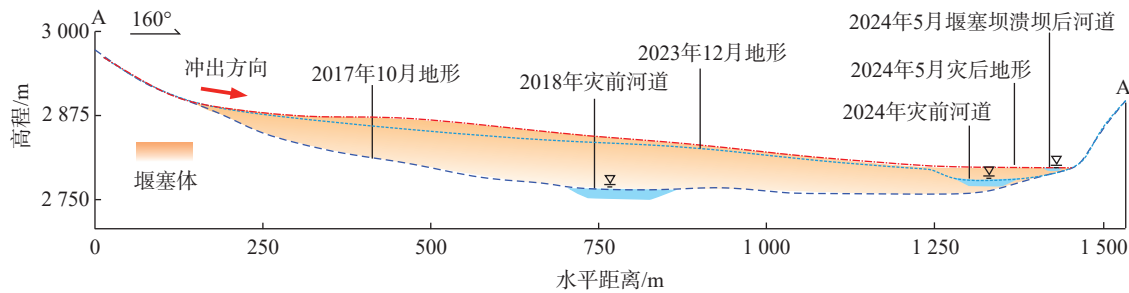


图 7 色东普沟堰塞堆积区地形变化剖面
Fig. 7 Section shows the topographic changes in the depositional area of the Sedongpu gully

5 结论与建议

(1)两次泥石流灾害灾害运动时间均可达 8 min, 堵江成坝时间大于 10 h, 其中“5·14”灾害相对更为严重, 形成的堰塞湖未完全溃决, 严重加剧了雅鲁藏布江干流河道的淤堵。

(2)色东普沟地形高差大、岩体结构破碎、沟道内巨厚层松散堆积体物源丰富, 为本次冰川泥石流堵江灾害的发生提供了有利条件, 而 2024 年春夏交替过程中的气温上升导致冰川消融加快和水动力作用增强, 触发了冰碛物松散体的解体滑动, 导致“4·15”和“5·14”两次堵江灾害链的发生。

(3)色东普沟已进入堵江灾害链活跃期, 特别是 2018 年至今的几次大规模灾害堵江, 造成沟口堰塞残留体规模不断扩大, 河道显著收窄, 沟口堰塞体高度最大抬升 70 米, 在地震、极端气候等特殊工况下容易形成巨型堰塞坝, 具有发生重特大流域性地质灾害链的可能。

(4)为加强色东普沟特大堵江灾害链风险管控, 保障上下游边疆城镇建设地质安全, 本文建议深入开展色东普沟堰塞湖回淹和下游溃决洪水风险研究, 研究色东普沟河滩淤堵高程演化过程与时空发展趋势, 分析极端工况下色东普超高位超远程地质灾害堵江风险, 提出特大堰塞湖淹没风险防控对策, 建立巨型堰塞坝溃决模式和动力学机制, 研究超大溃决洪水对下游的影响, 提出综合风险防控应对措施。同时, 建议尽快构建色东普沟天空地一体化流域性地质灾害实时监测预警网络, 及时开展色东普沟交通基础设施和备灾排水廊道建设, 提升流域性特大地质灾害链避灾及抗灾能力, 有效控制色东

普沟重大地质灾害成灾风险。

致谢: 本文的灾害调查和数据收集得到了林芝市政府和相关部门和企业的大力支持和帮助, 在此表示诚挚感谢!

参考文献 (References):

[1] LARSEN I J, MONTGOMERY D R. Landslide erosion coupled to tectonics and river incision [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 468 – 473.

[2] YIN Yueping, LI Bin, GAO Yang, et al. Geostructures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(1): 66 – 101.

[3] 崔鹏, 郭剑. 沟谷灾害链演化模式与风险防控对策 [J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(3): 5 – 18. [CUI Peng, GUO Jian. Evolution models, risk prevention and control countermeasures of the valley disaster chain [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(3): 5 – 18. (in Chinese with English abstract)]

[4] 李滨, 殷跃平, 谭成轩, 等. 喜马拉雅东构造结工程选址面临的地质安全挑战 [J]. *地质力学学报*, 2022, 28(6): 907 – 918. [LI Bin, YIN Yueping, TAN Chengxuan, et al. Geo-safety challenges against the site selection of engineering projects in the eastern Himalayan syntaxis area [J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(6): 907 – 918. (in Chinese with English abstract)]

[5] 殷跃平, 高少华. 高位远程地质灾害研究: 回顾与展望 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(1): 1 – 18. [YIN Yueping, GAO Shaohua. Research on high-altitude and long-runout rockslides: Review and prospects [J]. *The*

- Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 1–18. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究 [J] . 中国地质, 2019, 46(2): 219–234. [LIU Chuazheng, LYU Jietang, TONG Liqiang, et al. Research on glacial/rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu basin along Yarlung Zangbo River in Tibet [J] . *Geology in China*, 2019, 46(2): 219–234. (in Chinese with English abstract)]
- [7] LI Weile, ZHAO Bo, XU Qiang, et al. More frequent glacier-rock avalanches in Sedongpu gully are blocking the Yarlung Zangbo River in eastern Tibet [J] . *Landslides*, 2022, 19(3): 589–601.
- [8] GAO Haoyuan, YIN Yueping, LI Bin, et al. Geomorphic evolution of the Sedongpu Basin after catastrophic ice and rock avalanches triggered by the 2017 $M_s 6.9$ Milin earthquake in the Yarlung Zangbo River area, China [J] . *Landslides*, 2023, 20(11): 2327–2341.
- [9] 许志琴, 蔡志慧, 张泽明, 等. 喜马拉雅东构造结——南迦巴瓦构造及组构运动学 [J] . 岩石学报, 2008, 24(7): 1463–1476. [XU Zhiqin, CAI Zhihui, ZHANG Zeming, et al. Tectonics and fabric kinematics of the Namche Barwa terrane, Eastern Himalayan Syntaxis [J] . *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(7): 1463–1476. (in Chinese with English abstract)]
- [10] GOVIN G, VAN DER BEEK P, NAJMAN Y, et al. Early onset and late acceleration of rapid exhumation in the Namche Barwa syntaxis, eastern Himalaya [J] . *Geology*, 2020, 48(12): 1139–1143.
- [11] KORUP O, MONTGOMERY D R. Tibetan Plateau river incision inhibited by glacial stabilization of the Tsangpo gorge [J] . *Nature*, 2008, 455(7214): 786–789.
- [12] 白玲, 李国辉, 宋博文. 2017 年西藏米林 6.9 级地震震源参数及其构造意义 [J] . 地球物理学报, 2017, 60(12): 4956–4963. [BAI Ling, LI Guohui, SONG Bowen. The source parameters of the $M 6.9$ Mainling, Tibet earthquake and its tectonic implications [J] . *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(12): 4956–4963. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 韦伟, 谢超, 周本刚, 等. 西藏米林 $M 6.9$ 级地震及其余震序列地震定位 [J] . 科学通报, 2018, 63(15): 1493–1501. [WEI Wei, XIE Chao, ZHOU Bengang, et al. Location of the mainshock and aftershock sequences of the $M 6.9$ Milin earthquake, Tibet [J] . *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(15): 1493–1501. (in Chinese with English abstract)]
- [14] XIE Chao, ZHOU Bengang, WANG Ping, et al. The seismogenic structure of the 2017 $M_w 6.9$ Milin, Tibet, earthquake: A possible newly active fault at the eastern Himalayan syntaxis [J] . *Seismological Research Letters*, 2022, 93(1): 68–75.
- [15] HU Kaiheng, ZHANG Xiaopeng, YOU Yong, et al. Landslides and dammed lakes triggered by the 2017 $M_s 6.9$ Milin earthquake in the Tsangpo gorge [J] . *Landslides*, 2019, 16(5): 993–1001.
- [16] HUANG Yuandong, XU Chong, ZHANG Xiaolong, et al. An updated database and spatial distribution of landslides triggered by the Milin, Tibet $M_w 6.4$ earthquake of 18 November 2017 [J] . *Journal of Earth Science*, 2021, 32(5): 1069–1078.
- [17] ZHAO Bo, LI Weile, WANG Yunsheng, et al. Landslides triggered by the $M_s 6.9$ Nyingchi earthquake, China (18 November 2017): Analysis of the spatial distribution and occurrence factors [J] . *Landslides*, 2019, 16(4): 765–776.
- [18] BAI Ling, JIANG Yong, MORI J. Source processes associated with the 2021 glacier collapse in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon, southeastern Tibetan Plateau [J] . *Landslides*, 2023, 20(2): 421–426.
- [19] ZHANG Tiantian, YIN Yueping, LI Bin, et al. Characteristics and dynamic analysis of the February 2021 long-runout disaster chain triggered by massive rock and ice avalanche at Chamoli, Indian Himalaya [J] . *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(2): 296–308.
- [20] 毕杨杨, 王运生, 苏毅, 等. 近水平岩层阶状斜坡地震响应特征分析 [J] . 工程地质学报, 2022, 30(2): 533–541. [BI Yangyang, WANG Yunsheng, SU Yi, et al. Analysis of seismic response to gentle stepped rock slope [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(2): 533–541. (in Chinese with English abstract)]