

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.199>



藏东南地质灾害的内外动力影响模式研究进展

张波¹, 汪发武^{1,2*}, 盛鹏¹, 尤琪¹, 冯有千¹, 李森¹, 曹生喆¹

1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092

2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092

摘要: 藏东南活跃的内外动力地质作用, 决定了该区域地质灾害在时间上的多期次特征和在空间上的链式特征, 以及频繁而巨大的致灾效应。聚焦内外动力对藏东南地质灾害发生的影响模式, 针对区域内外力孕灾环境特征, 分别提炼出断裂活动和地震等内动力地质作用、气候和河流等外力地质作用对地质灾害的长期孕育模式和短期诱发模式, 明确了内动力在大时空尺度上的主导作用和外动力在小时空尺度上的诱发作用。提出了藏东南地质灾害时空分析的系统性框架, 从时空两个维度对藏东南地质灾害的特征和内外动力的多尺度综合影响模式进行概括, 构建起区域地质灾害时空特征与内外动力影响的关联。结合研究现状, 对进一步量化藏东南地质灾害内外动力影响的研究方向进行展望, 认为最终必须明确藏东南地质灾害与内外动力环境关联的模式, 以实现藏东南区域更精准的地质灾害防治、更有力的战略工程保障和更有效的气候变化应对。

关键词: 藏东南; 地质灾害; 孕灾模式; 内外动力; 工程地质学。

中图分类号: P694

文章编号: 1000-2383(2026)04-1264-23

收稿日期: 2025-06-27

Research Progress on Influence Patterns of Endogenic and Exogenic Dynamics on Geological Hazards in Southeast Tibet Plateau

Zhang Bo¹, Wang Fawu^{1,2*}, Sheng Peng¹, You Qi¹, Feng Youqian¹, Li Sen¹, Cao Shengzhe¹

1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Southeast Tibet Plateau is characterized by active endogenic and exogenic processes, which result in the temporal multi-phase occurrence and spatially cascading nature of geohazards, leading to frequent and severe disastrous events. Focusing on the influence patterns of endogenic and exogenic forces on the occurrence of geohazards in Southeast Tibet Plateau, in this paper it summarized the hazard-prone environmental characteristics shaped by these dynamics. It identified endogenic processes—such as fault activity and earthquakes—as key drivers of long-term geohazard incubation, while exogenic processes—such as climate and river dynamics—serve as short-term triggering factors. The study highlighted the dominant role of endogenic dynamics at large spatial and temporal scales and the triggering role of exogenic dynamics at small scales. A systematic spatiotemporal analysis framework for geohazards in Southeast Tibet Plateau was proposed, which outlined the characteristics of geohazards across scales and synthesizes the multi-scale influence patterns of endogenic and exogenic dynamics. This framework established the linkage

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 42230715).

作者简介: 张波(2000—), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害机理研究。ORCID: 0009-0000-3089-7873. E-mail: bo_zhang@tongji.edu.cn

* **通讯作者:** 汪发武(1965—), 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害动力学研究。ORCID: 0000-0002-5912-7095. E-mail: wangfw@tongji.edu.cn

引用格式: 张波, 汪发武, 盛鹏, 尤琪, 冯有千, 李森, 曹生喆, 2026. 藏东南地质灾害的内外动力影响模式研究进展. 地球科学, 51(4): 1264–1286.

Citation: Zhang Bo, Wang Fawu, Sheng Peng, You Qi, Feng Youqian, Li Sen, Cao Shengzhe, 2026. Research Progress on Influence Patterns of Endogenic and Exogenic Dynamics on Geological Hazards in Southeast Tibet Plateau. *Earth Science*, 51(4): 1264–1286.

between the spatiotemporal features of regional geohazards and the controlling dynamic processes. Building on the current state of research, the study outlined future scopes for quantitatively assessing the influence of endogenic and exogenic dynamics on geohazards in Southeast Tibet Plateau. Ultimately, it aims to clarify the linkage patterns between geohazards and dynamic factors, thereby contributing to more precise disaster prevention, stronger support for strategic infrastructure, and more effective adaptation to the climate change in the region.

Key words: Southeast Tibet Plateau; geohazard; incubation pattern; endogenic and exogenic factors; engineering geology.

0 引言

作为世界第三极青藏高原的东南部分,藏东南区域以其复杂的地质构造和强烈的水汽交换而备受关注,具有广泛而深刻的地球系统科学价值(Qiu, 2008; Ding *et al.*, 2022).全球独一无二的内外动力地质作用,形成了藏东南区域独特的地质灾害孕育环境,为区域内冰崩、滑坡、泥石流等地质灾害提供了前提条件,其中,又以高位远程滑坡和冰湖溃决洪水等灾害最为典型(黄润秋, 2007; 崔鹏等, 2014; 殷跃平和高少华, 2024).内外动力对地质灾害的影响塑造了藏东南复杂的地形地貌,也形成了区域地质灾害在时空上独特的分布和尺度特征.随着气候变暖以及藏东南重大工程的建设,内外动力对地质灾害的影响模式也将深刻影响区域防灾减灾措施、战略开发推进和气候变化应对.

在构造挤压强烈、地震活动频发、气温梯度巨大、地貌变化显著的藏东南,要将内外动力对地质灾害的影响模式化、甚至量化,存在巨大的挑战.其所受到的客观限制主要在于:(1)地理限制:地震频繁,海拔高差大,地表岩体破碎;(2)气候限制:山谷地形气象条件时空变化大,局地降水系统强(Gou *et al.*, 2018).前者使得常规的监测和考察手段在藏东南难以得到有效的应用,导致了对藏东南地质灾害观测和研究的有限性;后者使得对降雨、气温等气象指标的准确监测不足,难以构建这些参数与地质灾害发生的关联性.尽管如此,近几十年以来对藏东南区域地质灾害的关注和研究仍然不断推进.20世纪50至60年代,西藏自治区波密县古乡发生多次大规模冰川泥石流,成为藏东南地质灾害研究不断推进的重要时期.2000年4月,易贡藏布流域扎木弄沟发生巨型滑坡并堵江形成堰塞湖(殷跃平, 2000a);6月,堰塞湖溃决,给下游造成重大的生命财产损失(Delaney and Evans, 2015).这一事件是藏东南迄今为止影响最为广泛的地质灾害之一,并开启了国内对于高位远程滑坡和地质灾害链的

研究,进一步增加了对藏东南地质灾害的关注.

目前的研究为构建藏东南地质灾害的内外动力影响模式奠定了基础,但也同时存在诸多挑战.一方面,通过聚焦藏东南区域大量的地质灾害案例,扩大了区域内地质灾害研究的空间覆盖范围;另一方面,通过揭示滑坡远程运动和灾害链生机理,加深了对区域典型地质灾害模式的理解.对于内外动力影响的研究,则主要聚焦于单个案例的分析,尚未构建起整个区域内地质灾害的内外动力影响模式.要构建起这些模式,首先要面对藏东南地质灾害本身的复杂性.藏东南地表物质类型多样、地质灾害类型众多、灾害过程错综复杂,要同时考虑地质灾害的全类型和全过程仍然存在巨大困难.其次是如何将内外动力对地质灾害的影响进行界定,将影响模式放在合理的框架之下进行梳理总结.由于内外动力的影响在时间和空间上都是持续的,其中对地质灾害的发生产生影响的因素就更为复杂,因此明确各种因素所起作用的不同是关键.

为了解决这些问题,本文首先构建藏东南地质灾害内外动力影响模式的讨论框架.在对地质灾害的考虑上,不对灾害全过程或者链生灾害进行全部关注,而是关注地质灾害的起始形式,聚焦于最初始失稳事件的时空信息以及内外动力场,并总结出后者对前者的影响模式:聚焦于地质灾害是如何发生,而不考虑地质灾害发生后的运动形式或影响范围等.在对影响模式的界定上,本文将内外动力分别进行分解,在不同的时空尺度下讨论影响模式.将内外动力分解为长期趋势量和短期变化量,前者会在更长的时间尺度内形成地质灾害孕育环境,后者则在短期时间尺度内成为地质灾害的直接诱发因素.因此,内外动力对地质灾害的影响也能分为两个方面,即长期孕育和短期诱发.以气温为例,在此框架下,可以将气温的变化分解为长期的气候变暖趋势和短期的气温波动变化,并将长期气候变暖与藏东南冰川持续融化等相关联,研究孕灾环境的渐进变化;将短期(数小时至数天)的气温急剧变

化与该时间内地质灾害的发生相关联,明确地质灾害的直接诱因。

在区分灾害长期孕育和短期诱发模式之外,本文还依据目前的研究将内外动力所造成的影响区分开来,构建起各自的影响模式。但值得注意的是,内外动力地质作用在时空尺度上是密不可分的,其对地质灾害的影响具有综合性。因此,在进行内外动力影响的分述后,本文将从时空尺度上对内外动力地质作用的影响进行综合讨论,从而形成更加全面的影响模式综述,为更深入的藏东南地质灾害时空规律、孕灾模式研究提供支撑。

1 藏东南地质灾害的内外动力环境

1.1 活跃内动力地质作用

青藏高原的隆升决定了其孕育地质灾害的总体地质背景。作为世界上最大的高原,青藏高原与全球其他由克拉通地壳组成的高原并不相同(潘桂棠等, 2022)。青藏高原包括了多个地体,从北到南分别是昆仑—柴达木地体、松潘—甘孜地体、羌塘地体、拉萨地体和喜马拉雅地体(Yin and Harrison, 2000; 许志琴等, 2011)。在古生代至中生代,大洋岩石圈向北俯冲导致印度板块与欧亚板块汇聚,印度板块最终与欧亚大陆边缘发生碰撞形成了青藏高原(Zheng *et al.*, 2013; Kapp and DeCelles, 2019)。由于周边扬子克拉通、华北克拉通、塔里木克拉通的稳定限制作用,印度板块向欧亚板块俯冲,

使得青藏高原处在复杂的挤压构造应力中(孙鸿烈等, 1986)。经过地体的挤压汇聚,在不同的地体边界形成了多条缝合带,从北至南依次为:昆仑南缘缝合带、金沙江缝合带、班公错—怒江缝合带、印度河—雅鲁藏布江缝合带和主边界逆冲断裂(图 1)。

印度板块和欧亚板块的碰撞挤压过程,在挤压应力最为集中的喜马拉雅造山带东端形成了东构造结(潘桂棠等, 2022)。挤压初期,主要的构造效应表现为大规模的北东—南西向水平缩短和垂直向的增厚(England and Molnar, 1997; 王二七等, 2001);而后又经历了快速的抬升和剥蚀,区域构造和地貌发生了急剧的转折和变化(Ding *et al.*, 2001; 郑来林等, 2004; 许志琴等, 2008; 董汉文等, 2018)。印度板块向东的水平挤出运动以及向缅甸弧的转向使得东构造结深入欧亚大陆内部(邓起东等, 2014),并对相邻地体的地质构造和地形地貌都产生了巨大的影响。在东构造结附近,存在 9 条长度达上千千米的缝合带。强烈的构造应力使得缝合带发生转向,发育出多条超过 100 km 的大型断裂(白永健等, 2019; 王洋等, 2022)。高度的应力集中和板块挤压,使得东构造结成为内动力地质环境中突出且不可忽视的区域。

作为青藏高原隆升与构造演化的前缘地带,藏东南地壳运动活跃、地震活动频繁(侯伟鹏等, 2023),内动力地质作用复杂。喜马拉雅东构造结、嘉黎断裂和印度—雅鲁藏布缝合带是对区域地形

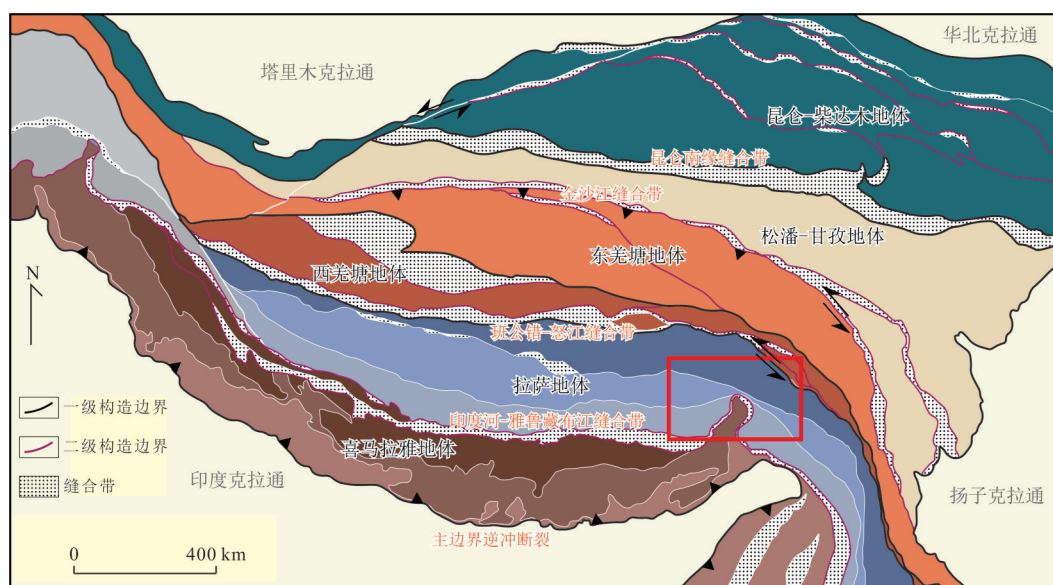


图 1 青藏高原主要地体及缝合带与藏东南所处位置

Fig. 1 Major tectonic blocks and suture zones of the Tibetan Plateau, and the location of the Southeast Tibet Plateau

地貌影响最为显著的地质构造.东构造结在几何上呈现出倒“U”形,纬向宽度约为40 km(董汉文等, 2018).其东西两侧分别为墨脱右行走滑断裂和东久一米林左行走滑断裂.印度-雅鲁藏布缝合带沿着东构造结北侧同样呈现出倒“U”形,岩性以蛇绿混杂岩为主,包括超铁镁岩、铁镁岩、石英岩和白云母等(Geng *et al.*, 2006; 董汉文等, 2018).构造结北侧的嘉黎断裂是喀喇昆仑-嘉黎断裂的东段部分,是构造结东北侧印支地体挤出旋转而形成的北西向走滑断裂(丁林和钟大赉, 2013),年走滑速率为10~15 mm(周荣军等, 1996; 邓起东等, 2014).受活跃的断裂带构造影响,藏东南在历史上曾发生过多次强震(Li *et al.*, 2024),其中震级最大的地震为1950年察隅8.6级地震.此次地震诱发了多次余震,并在藏东南造成严重的滑坡灾害和房屋倒塌(詹慧丽等, 2023).在雅鲁藏布江断裂带上,1900年以来记录Ms5级以上地震109次(刘传正等, 2019).活跃的内动力地质作用,构成了藏东南地质灾害发生的内动力环境基底.

1.2 大梯度外动力地质作用

活跃的内动力地质作用将青藏高原塑造为全球最大、平均海拔最高的高原.与周边地区巨大的海拔差异,塑造了其独特的气候重要性和大梯度的

外动力地质作用.作为南极、北极之外的世界第三极,青藏高原在气候变化背景下所获得的关注越来越多(Qiu, 2008).一方面,青藏高原对局部和全球的大气环流具有重要影响,通过与海洋的远程相互作用,在地球气候演变中发挥了重要作用(Huang *et al.*, 2023);另一方面,高海拔特征引起的气候效应使青藏高原成为“亚洲水塔”,发育了长江、黄河、印度河等亚洲最为重要的河流,为近20亿人提供了可靠的水源(Yao *et al.*, 2022).

青藏高原主要受到夏季印度季风、冬季中纬度西风 and 东亚季风的影响(Yao *et al.*, 2012).从20世纪60年代以来,青藏高原降水总体呈上升趋势,并且空间上呈现由西北向东南递增的趋势(Ma *et al.*, 2018).在时间分布上,降水存在显著的季节性,接近70%的降水发生在夏季(6~8月)(Tong *et al.*, 2014).青藏高原的降水受到了局部水汽循环和大尺度大气环流的影响(图2),其中高原内局部的水汽循环提供了更多降雨需要的水汽,而来自外部的的水汽是造成青藏高原夏季降雨波动的主要原因(Feng and Zhou, 2012; Wang *et al.*, 2017).

藏东南是青藏高原水汽运移的重要通道区域.因受到了强烈的表面辐射加热,青藏高原与周围区域水汽交换剧烈(徐祥德, 2020).在夏季,青藏高原

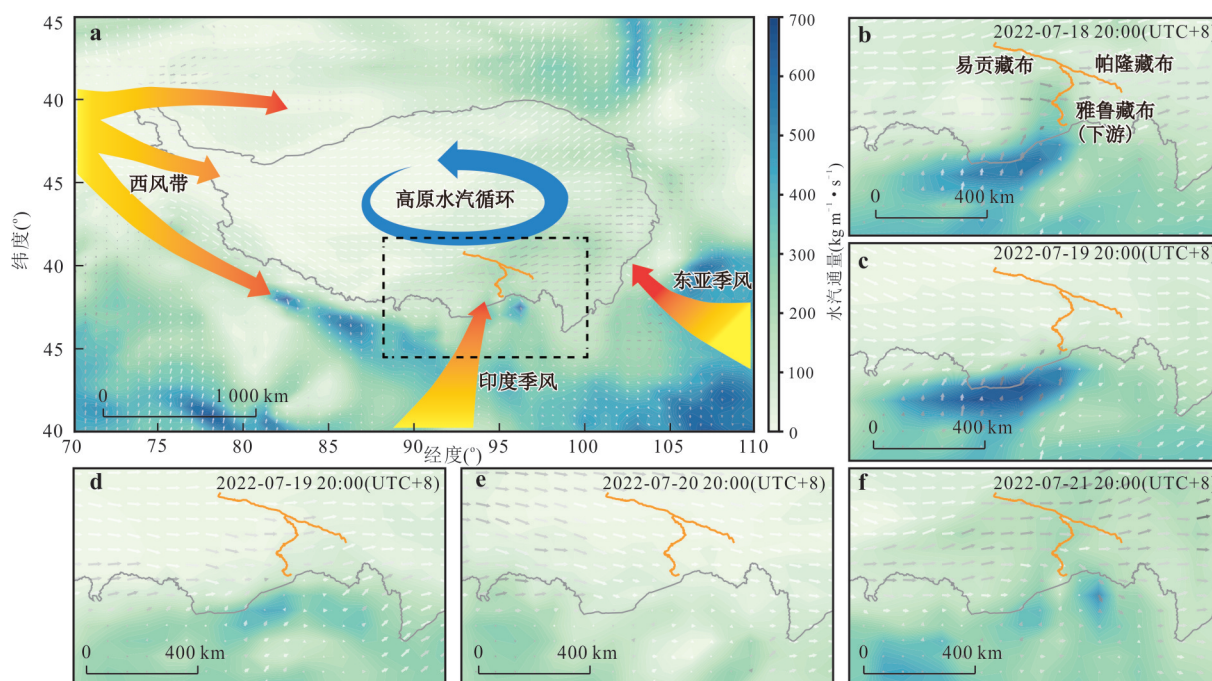


图2 青藏高原水汽来源与藏东南水汽运移过程

Fig. 2 Water vapor sources and transport pathways affecting Tibet Plateau

a. 青藏高原三大外部水汽来源和内部水汽循环(修改自 Cheng *et al.*, 2024); b~f. 水汽通过雅鲁藏布大峡谷进入藏东南的过程

是较强的大气热源,天以下尺度的对流活动频繁,尤其是在下午时段 (Maussion *et al.*, 2014). 这种夏季的降水日循环更多地与高原南部大气系统的日循环相关 (Ueno *et al.*, 2008). 由于雅鲁藏布江河谷地带海拔相对较低,丰富的水汽在雅鲁藏布峡谷爬升的过程为藏东南区域带来了丰富的降雨,使其成为青藏高原一个常年存在的湿中心,对高原东南部的降水特征产生重要影响 (Maussion *et al.*, 2014). 来自印度洋和孟加拉湾的水汽在青藏高原东南部夏季降水中占主导地位. 藏东南沟谷地区白天盛行强风并且伴随着湿度的增加,东南风为午夜和清晨降水提供了有利的水汽条件 (Bhatt and Nakamura, 2006). 在这样的背景之下,藏东南日水汽变化规律显著,午夜是水汽峰值出现的时段,上午则是水汽较少的时段.

显著的外动力变化为藏东南地质灾害的发生和在时间上的集中提供了前提条件. 在全球变暖的大背景之下,藏东南雅鲁藏布江流域的变暖程度较整个青藏高原更为剧烈 (宋敏红等, 2011). 未来,南亚地区的季风降水将整体增加,藏东南所处的喜马拉雅沿线区域强降雨事件增加可能尤其显著. 根据预测,在 2025—2032 年,青藏高原的平均气温还将持续上升,比 1991—2020 年的基准升高 0.98 °C,温度增加速率是 2016—2023 年的 1.75 倍 (Hu *et al.*, 2025). 未来更加强烈的升温和降水,会形成更易于藏东南地质灾害发生的外动力环境,为灾害防治带来更大的挑战.

1.3 区域地貌与地表物质

作为地质灾害发生的基本要素,地貌和地表物质构成了地质灾害发生的静态环境. 这样的静态条件受内外动力地质作用的长期影响而形成. 在青藏高原的新构造运动中,断裂作用是主要的地貌控制形式. 根据内外动力作用的差异,青藏高原的地貌可以分为三大部分,分别是内陆水系区,一般为山原盆地;太平洋水系区,一般为挤压形成的平行岭谷;印度洋水系区,一般为高山深谷 (潘桂棠等, 2022). 藏东南主体位于青藏高原印度洋水系区,属于典型的高山峡谷地貌.

在断裂和构造结的主要影响和水流的长期侵蚀之下,藏东南最终形成了以雅鲁藏布、易贡藏布和帕隆藏布为主的地表河流系统. 雅鲁藏布发育于喜马拉雅山脉中部的杰玛央宗曲,全长 2 104 km,全程落差近 5 500 m,位居中国境内河流落差的前列.

帕隆藏布和易贡藏布受嘉黎断裂控制而形成,分别在东、西两个方向向中间汇流并在通麦汇合,后转向西南在排龙乡与拉月曲汇合,最终转向东南方向汇入雅鲁藏布. 在藏东南所处的下游区域,雅鲁藏布环绕南迦巴瓦峰以马蹄形穿过南迦巴瓦峰和加拉白垒峰之间的峡谷地带,随后向南在孟加拉国境内与恒河交汇,在孟加拉湾形成了世界上最大的冲积三角洲. 在丰富的水力资源之外,青藏高原还是南北极和格陵兰岛之外最大的冰川集中区 (Yao *et al.*, 2012; Pfeffer *et al.*, 2014). 由于季风的显著影响,高原东南部分布有大量的海洋性冰川 (Nunmura *et al.*, 2015). 但近 40 a 以来,藏东南冰川退化明显 (Azam *et al.*, 2018),约为整个青藏高原冰川退化速率的 3 倍 (Brun *et al.*, 2017). 从 20 世纪 70 年代到 2009 年,区域内冰川面积减少了约 12.7% (Wang *et al.*, 2011). 冰川的退化一方面使得足以覆盖整个山顶区域的大冰川分开为多个由山脊线相隔的小冰川 (Zhao *et al.*, 2022),促进了小冰川的消失;另一方面导致了区域内冰湖面积的迅速增加,造成冰湖溃决的可能性上升 (Wang *et al.*, 2020; Veh *et al.*, 2025).

巨大的地形高差和大梯度的外动力环境,使得藏东南的气候和地貌类型沿雅鲁藏布大峡谷向上游呈现出递进变化. 气候类型从墨脱县低海拔区域的热带湿润气候,逐渐转变为亚高山温带湿润气候,最终在高海拔区域形成高山寒带冰雪气候. 地表植被类型从低海拔的阔叶林随着海拔的上升而逐渐转变为针叶林,到帕隆藏布和易贡藏布流域的高海拔区域,植被则以高山植被和草地为主. 与气候、地貌变化相关联的是地表物质在垂直和水平方向上的空间差异性. 在高海拔区域,主要分布着完整性较好、体积巨大的冰岩体. 在更低的区域,则主要是节理发育的岩体或裂隙发育的冰川舌. 冰碛物、坡积物等碎屑物质广泛分布于冰川周围以及沟谷中,其中冰碛物来源于冰川的长期侵蚀作用,而坡积物则来自于表层岩石受风化作用而产生的崩落. 粒径更小的砂土由于河流和风力堆积作用而形成,分布于地形平坦、海拔较低的宽阔谷地.

2 内动力地质作用的地质灾害影响模式

始于白垩纪晚期的印度板块与欧亚板块碰撞以及碰撞后的继承性陆内汇聚作用,是藏东南地质

环境形成的主要内动力作用 (Guo *et al.*, 2016; 刘勇等, 2024). 内动力地质作用在长时间内处于缓变周期中, 如板块挤压错动造成的断层发育. 地震事件则可以认为是长期缓变形之后产生的突变性事件. 缓变性与突变性这两种不同的性质带给地质灾害的影响存在巨大差异.

2.1 断裂活动与斜坡失稳耦合模式

活动断裂是晚更新世以来一直在活动, 并且未来可能重新活动的各类断层 (吴中海等, 2014; 张永双等, 2019). 藏东南活动断裂不论是出露于地表还是蛰伏于地下, 都是现代地壳的差异活动带构成的不稳定区, 是产生各种不良地质现象的主要控制因素 (白永健等, 2019). 断裂活动与斜坡失稳的耦合机制是构造运动与地表灾害相互作用的核心问题, 表现出复杂的耦合模式, 尤其在藏东南这类构造活跃区表现显著 (Fan *et al.*, 2017; Zeng *et al.*, 2020). 两者通过岩体结构破坏、水文条件改变、地应力场调整等途径形成动态关联 (图3), 从而形成了复杂的断裂活动与斜坡失稳耦合模式 (童立强等, 2018).

2.1.1 断裂错动导致坡体结构破坏 断裂错动会在不同的尺度上形成孕灾环境, 包括大尺度的地形地貌和小尺度的岩体裂隙发育. 在区域范围内, 构造断裂作用一方面会对地形产生切割, 另一方面会成为岩浆侵入通道, 形成混杂岩带. 这样的结构会在长期风化作用下形成沟谷等地形, 成为藏东南多个区域最为关键的孕灾基底. 受强烈构造活动的影响, 金沙江沿岸岩体破碎, 上游江达段岩石片理化现象严重, 部分岩体受活动断裂控制而强度减弱,

孕育了江达圭利大型深层滑坡等地质灾害 (刘吉鑫等, 2024). 巴塘断裂自晚第四纪以来一直处于活动中, 断裂带附近岩体节理发育, 结构极度破碎, 力学性能较差. 在片岩组成的逆坡中, 反倾层状结构和金沙江长期强烈底切作用, 导致坡脚坡度不断增大, 孕育了宗绒等古滑坡 (Gong *et al.*, 2022).

各断裂带之间的相互切割贯通会导致山体表面碎裂化, 形成大型的冰岩体裂隙 (年廷凯等, 2024). 近地表断裂发育会导致裂隙的进一步扩展和贯通, 冰岩体结构完整性受到破坏, 从而有利于边坡裂缝的生长, 导致冰碛物、冰水沉积物、岩屑锥、滑坡体等松散物质大量堆积, 为冰岩崩的发生提供了丰富的物源 (翟毅飞, 2022; 张议芳等, 2023). 天摩沟泥石流和卡达沟泥石流等灾害的发生都与断裂主导下区域内大量的碎屑物源相关 (钟鑫等, 2018; 高波等, 2019).

2.1.2 断裂带渗透性增强引发水文条件恶化

断裂带还会导致其渗透性增强, 可以引发的水文条件恶化主要包括加速地下水渗透和活动期抬升边坡孔隙水压力. 断裂活动有利于边坡裂缝的生长, 加速水的渗透和风化, 不利于边坡的稳定 (Li *et al.*, 2024). 开放的裂缝能够构成雨水渗透的优先路径, 加速岩石的物理化学风化过程, 导致其力学强度逐渐降低 (Fan *et al.*, 2017). 在藏东南来古冰川群, 岩石在挤压、切割等构造作用下破碎程度增加, 从而促进地下水的渗透, 对冰川地质灾害的形成起到显著的控制作用 (徐卫平和屈新, 2023). 断裂带常作为地下水运移通道, 在活动期水力连通性增强, 斜坡内孔隙水压力抬升, 造成地表土体有效

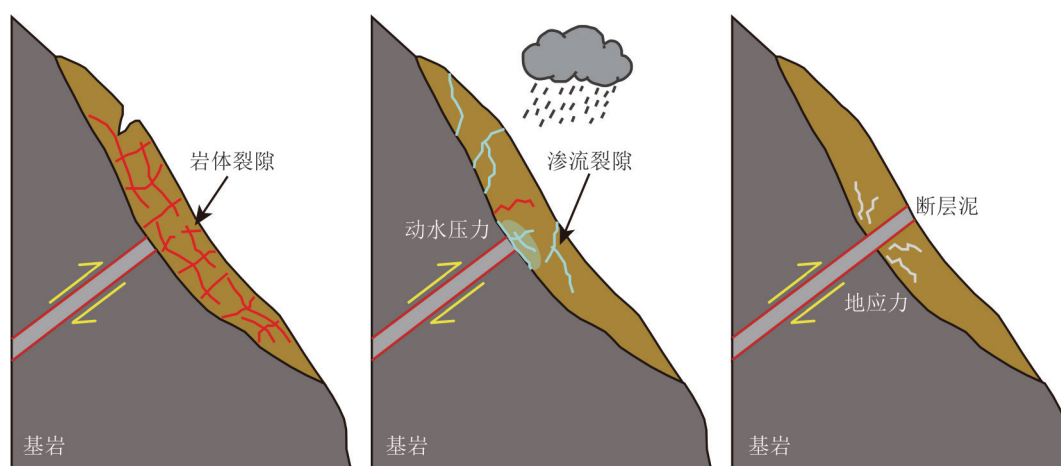


图3 断裂活动与斜坡失稳耦合模式

Fig. 3 Coupling patterns of fault activity and slope instability

底图参考汤明高等(2023)

应力下降从而导致边坡失稳。例如,在帕隆藏布河谷,断层活动导致谷坡地下水渗流加剧,诱发米堆冰川前缘冰碛体滑坡(Liu *et al.*, 2021)。同时,地表水从断裂带裂隙入渗后赋存于相对隔水层中,不仅易形成一定静水压力从而增大下滑力,而且会软化隔水层顶面,使其抗剪强度降低而形成滑动面,导致最终破坏失稳(朱赛楠等, 2021)。

2.1.3 长期构造应力积累导致岩体强度劣化
断层活动可以直接切割坡体产生剪应力,也可以导致局部应力场重新分布,在断层端部或交汇区形成高应力集中,促使岩体结构面切割与贯通。构造应力的长期作用会导致岩体强度的劣化(梁宁等, 2016)。走滑断层对边坡稳定性存在显著的影响,应力非均质性和应力集中是其中的关键因素(Guo *et al.*, 2016)。对色东普高位地质灾害的研究发现,该区域位于青藏高原东南部、喜马拉雅山脉的东端,属于东构造结的一部分,是喜马拉雅山脉中构造应力作用最强的部位,导致岩体非常破碎,力学性能显著降低(李壮等, 2021)。金沙江色拉滑坡同样发育于强大的构造应力挤压区域,剧烈挤压导致局部地段的岸坡结构受到岩层和金沙江河道改变的影响而发生变化(朱赛楠等, 2021)。在嘉黎断裂带,大型结构面密集发育,谷坡岩体完整性和力学性质较低,在外动力作用触发下容易发生失稳破坏(万佳威等, 2021)。例如,扎木弄沟岩体受嘉黎断裂带和易贡—鲁朗断裂的复合控制,被结构面切割成倾向坡外的楔形块体,最终于2000年4月9日失稳形成易贡滑坡灾害链(袁浩等, 2023)。

2.2 地震的地质灾害影响模式

藏东南历史上强震频发,脆弱的地质条件加上频发的重大地震,共同形成了地震对地质灾害的复杂影响模式(赵志男等, 2021)。根据地震对地质灾害影响的直接性/间接性,可以将其影响模式分为两种:一是通过直接造成冰岩体结构破坏,从而诱发地质灾害;二是通过产生更多的物源或使冰岩体更接近临界状态,间接导致地质灾害。

地震扰动会通过促进冰岩体裂隙的完全扩展或使其达到临界几何状态而直接导致失稳。在金沙江断裂带发生的数次强震,诱发了许多由于岩体失稳而产生的大型滑坡—堰塞坝,如曲龙滑坡、苏瓦龙滑坡、雪龙岗滑坡、特米滑坡等(Li *et al.*, 2024)。对于冰川来说,由于其表面存在大量的冰裂缝,地震发生所释放的能量改变了内部应力,使得冰裂缝

进一步扩展、贯穿,成为藏东南诱发冰崩的主要构造运动(张议芳等, 2023)。山体顶部存在的大型冰川裂隙也会在地震作用下进一步扩展贯通,进而诱发频繁的冰岩崩灾害(年廷凯等, 2024)。1950年8月,察隅发生8.6级大地震,造成藏东南南迦巴瓦峰则隆弄冰川发生巨大冰崩,一度造成雅鲁藏布江断流(高少华等, 2024)。2015年4月,尼泊尔中部Gorkha地震在Langtang山谷诱发灾难性冰岩崩,造成超过350人丧生(Gnyawali *et al.*, 2020)。此外,冰川失稳还会促进下游的泥石流灾害。历史上,波密地区每一次强震活动都易引发大规模的冰川泥石流灾害,泥石流的活动周期在年际分布上与地震活跃期相吻合(翟毅飞, 2022)。

地震还会促进长期的地质灾害孕育过程。强烈的地震扰动作用会促使岩体结构面和冰川裂隙发育,使得冰岩体结构破碎,降低其完整性(李军等, 2021; Zhang *et al.*, 2023)。在雅鲁藏布江缝合带上,喜马拉雅地体与拉萨地体挤压形成的强震和活动断裂(图1),构成了角不弄巨型古滑坡的主控因素(杨德宏等, 2021)。通过促进雪崩源上的裂缝不断扩大,地震可以减小失稳所需要的外力影响,从而对雪崩也产生促进作用(文洪等, 2021)。地震作用还会造成大量的山体震裂(崔圣华等, 2019),为崩滑流提供丰富的物源。物源的积累,使得地震之后泥石流的临界降雨量或者累计降雨量降低。在震后5 a内,泥石流活动进入极度活跃期,10 a内处于高度活跃期(梁馨月等, 2020)。由于地震影响,南迦巴瓦峰西侧的直白沟流域内岩体失稳数量与规模不断增大,松散物源增多,导致灾害链的触发点在空间密度上和类型上均呈现增多趋势,在时间上与地震活动同步,表现出显著的地震控制作用(李军等, 2021; 龙飞等, 2022; 黄海和龚诚, 2024)。

3 外动力地质作用的地质灾害影响模式

外动力地质作用对藏东南地质灾害影响模式同样分为两个方面:一是由长期的气候变化趋势和地表变化积累而成的灾害孕育条件,二是在短时间内,由降水、温度波动、冰川融水等突发外动力事件直接诱发地质灾害。两者共同决定了地质灾害在不同尺度下的发展与发生。

3.1 长期孕灾模式

外动力的长期缓慢变化会促进地质灾害孕育

环境的形成.这种影响通常涉及较为缓慢和渐进的地质变化,持续数十年甚至数万年.影响模式是在周期性循环或单向趋势下的岩土体强度持续下降、物质逐渐积累.冻融作用是典型的周期性循环作用过程,而藏东南的冰川作用、河流侵蚀和气候的暖湿化则是主要的趋势性作用过程.

3.1.1 冻融作用 冻融作用的长期影响模式在于降低岩土体强度.当岩体裂隙中存在冻融水时,经过反复的冻融作用,水冰相变会导致裂隙水体积时涨时缩,造成裂隙的扩展和岩体的破碎,为滑坡、崩塌、泥石流的发生提供物源(徐国森和于国庆, 2024; Wang *et al.*, 2025).对于更大尺度的岩体,这种周期性的冻融交替变化会逐渐破坏岩体结构,在岩体中形成损伤积累,导致其致密性逐渐下降(Wang *et al.*, 2019; 张议芳等, 2023; 陈国庆等, 2025).藏东南雅鲁藏布江流域整体冻融侵蚀十分严重,高海拔地区的冻融侵蚀现象更加显著(刘旭平, 2023).在长时间的冻融侵蚀作用下,侵蚀区容易成为高位远程滑坡的物源区,加速高位远程滑坡的发生(Deline *et al.*, 2015).

3.1.2 冰川作用 藏东南地区是我国海洋型冰川的主要分布区,部分山体的高海拔部分会存在永久性和季节性冰川(徐国森和于国庆, 2024).受温度上升的影响,藏东南同时也是青藏高原冰川质量亏损最为严重的区域(Yao *et al.*, 2012).冰川的长期孕灾作用主要体现在对地形的改变上.冰川可以造成地貌和地表物质的变化,其长期侵蚀作用促进了陡峭的坡面和深谷的形成,使得坡体更加接近于临界几何形态,有利于冰崩、冰湖溃决洪水、冰川泥石流等地质灾害的发生(McColl and Davies, 2013; 邬光剑等, 2019; 高少华等, 2024).在地形改变之外,冰川消融产生的融水会侵蚀和冲刷坡体,降低坡体的稳定性.随着冰川的退缩,堆积物在重力作用下的重新分布也可能导致坡体的稳定性逐渐降低,促进岩石节理裂隙的发育(McColl and Davies, 2013),且会在一定程度上提升致灾能力(高杨等, 2020).2018年,色东普沟冰川发生崩塌,从而导致了下游泥石流—堵江—溃决灾害链(刘传正等, 2019; 张太刚等, 2021);2024年,再次发生两期冰川泥石流堵江灾害(万佳威等, 2024).这些灾害的发生及其链生灾害与夏季升温引起的冰川消融相关.从孕灾来看,冰川作用相关的高陡地形、地表破碎岩体和丰富的冰碛碎屑物也与灾害的发生密不

可分.

3.1.3 河流侵蚀 河流的侧向侵蚀对坡脚的切割作用会使得坡体逐渐接近临界坡度,降低了坡体的稳定性.因此在地震、降雨等因素的作用下,更容易达到临界稳定性,从而发生滑坡和崩塌.以金沙江上游白玉县探戈段为例,该区域属于高山峡谷区,河流侵蚀作用强烈,使得地质灾害极为发育(张亚楠等, 2025).河流的侵蚀下切作用为大型滑坡的发生创造了陡峭的山坡等必要条件,进一步加剧了斜坡的失稳(Ouimet *et al.*, 2007).在坡度处于 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围内的中陡斜坡中,滑坡灾害最为发育,而这些坡体主要分布在河流两岸,表明了河流水系的侵蚀与降雨的叠加效应对滑坡孕育具有共同控制作用(王玉峰等, 2024).

3.1.4 气候暖湿化 1980—2018年,青藏高原的变暖速率为 $0.42^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,为全球平均水平的2倍(Yao *et al.*, 2022).其中,变暖最严重的地区是藏东南地区(Yang *et al.*, 2014).暖湿化会影响前述的冰川、冻融和河流作用,从而对地质灾害的孕育产生影响.气温升高导致冰川的大规模消融和融水量的增加(程尊兰等, 2009; 曲伟等, 2023),不仅改变了冰川的形态,还影响了土体的水分状态,使得坡体和岩体更容易失稳(袁广祥等, 2010).长期的气候变暖还会导致冰川退缩,释放出大量堆积在山体上的冰碛物,进一步增加滑坡和泥石流的孕育潜力(Kääb *et al.*, 2018; 李尧等, 2022).

长期降水量的变化,特别是冬季降水的增加,会直接影响积雪的形成与融化过程,进而改变地表的水分条件.以易贡滑坡为例,积雪的融化与孔隙水压力的增加在长时间尺度内逐渐降低了坡体的稳定性(Wen *et al.*, 2004).此外,长时间的降水作用与其他风化作用的叠加,尤其是多次的冻融循环作用,也会使岩体发生长期的弱化和破坏.

在暖湿化趋势下,冰川退缩、冰湖扩张及降雨增多的叠加效应将进一步加剧高位崩滑灾害链的频发性和破坏性(邹强等, 2024).1990—2020年,林芝市冰湖数量从1 076个增至1 340个,增加幅度达24.5%(姚檀栋等, 2025).这造成了藏东南地区较高的冰湖溃决洪水风险,对区域内重大工程建设存在巨大的潜在威胁(程尊兰等, 2009).在未来的气候情景下,持续升高的气温与日益增加的降水将加速冰川退化;随之而来的融水量增长与极端天气事件的频发,将共同显著提升冰湖溃决的风险(曲伟

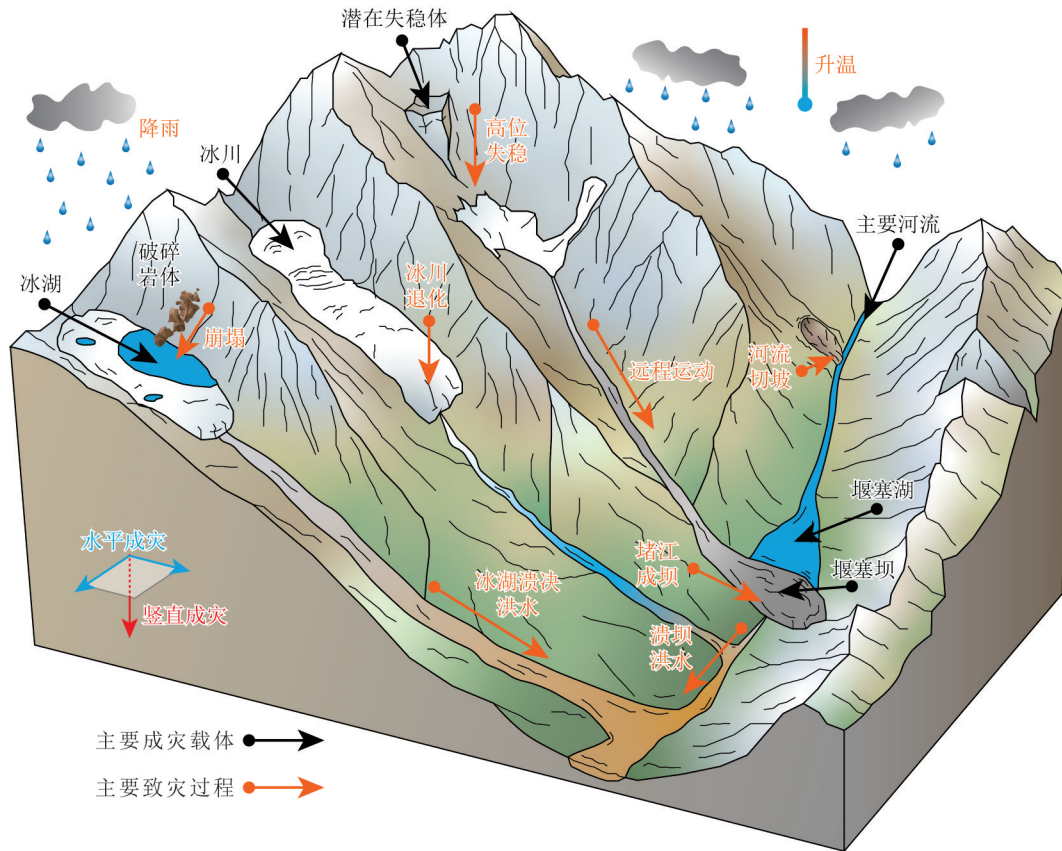


图4 藏东南主要成灾载体和致灾过程

Fig. 4 Main geohazard carriers and motion processes in Southeast Tibet Plateau

等, 2023).

3.2 短期诱发模式

藏东南外动力的短期地质灾害诱发模式主要是短时间内的极端降雨和温度变化造成冰岩体强度下降,从而直接导致地质灾害的发生(图4).这些过程通常具有较短的时间尺度,从数小时至数天不等,但其影响可能是剧烈的,并导致更大规模地质灾害.在短时间内,降雨作用(Fan *et al.*, 2017; 李元灵等, 2018)和升温导致的积雪融化(Wen *et al.*, 2004; Erokhin *et al.*, 2018)是滑坡、泥石流和冰湖溃决等灾害的主要触发因素.对于地质灾害的影响可以分为短期积累和更短时间内的快速激发两阶段.

在短期积累阶段,高温导致的融水增加和降水量的增多会充分补给地表水.一方面,可以直接增加坡体的水分含量,降低其抗剪强度,从而触发滑坡或崩塌.另一方面,降雨和融水的增多使湖水上涨,会导致岸坡发生大规模崩塌或滑坡,甚至引发冰湖溃决(柴波等, 2020; 刘建康等, 2021).2020年6月,由于降雨异常偏多且气温较高,金乌措西侧冰

川侧碛发生滑坡,最终导致了冰湖溃决洪水的发生(Zheng *et al.*, 2021).此外,高温还会导致雪崩(文洪等, 2021)和冰崩(刘传正等, 2019; 刘文等, 2022)的发生.冰崩在失稳后冲入冰湖,是冰湖溃决的重要触发因素(陈兰等, 2023).据统计,在亚洲高山区,有一半的冰湖溃决是由于冰崩或冰川滑坡事件导致的(张太刚等, 2021),而这些事件又与降雨和气温的变化密切相关.在快速激发阶段,强降雨和升温产生的融水,会以极快的速度达到临界状态的阈值,导致滑坡、崩塌和泥石流发生.据统计,藏东南的极端气象事件(极端气温和降雨)发生频率呈上升趋势(余国安等, 2024),极端水热条件的叠加会增加冰川泥石流的发生概率(赵鑫等, 2020; 李豪等, 2023).

4 内外动力综合影响模式与藏东南地质灾害时空特征

在构造活跃的山脉中,受气候变化影响,地貌约束只允许地形起伏存在相对较小的增加(Whip-

ple *et al.*, 1999). 地表代表了山体隆升、岩体强度和侵蚀作用(包括重力作用)之间的平衡(Montgomery, 2001; Willett and Brandon, 2002). 区域尺度上的地貌是内外动力作用和岩土体强度综合表现的结果. 从更大的尺度来看, 地质灾害在藏东南造成的物质运移过程可以视为内外动力地质作用影响下地表要达到均衡而经历的过程. 例如, 在被快速剥蚀的环境下, 滑坡的发生使山体能够有效地调整以适应河流的快速下切(Burbank *et al.*, 1996). 这表明了内外动力地质作用与地表物质的交互, 并最终呈现为地表的均衡状态.

地质灾害的发生与这种时空大尺度的内外动力作用密不可分, 但又存在不同时空尺度上的差异性. 由于地质灾害在时间上是离散的, 在空间上通常以单体的形式发生, 或者由同一事件(如地震、降雨)的诱发而同时发生, 因此不能将其与区域的整体地表演变直接联系起来, 需要考虑到不同的尺度来加以讨论, 从而明确内外动力作用对地质灾害的

综合影响模式.

4.1 空间尺度影响模式

坡面尺度: 坡面是藏东南地质灾害发生的基本单元, 小规模滑坡、崩塌等都发生在此尺度范围内. 从现象的角度来加以描述, “溜砂坡”是坡面失稳最常形成的一种地貌, 通常呈现出锥状(张小刚等, 2014). 冰碛物、坡积物等碎屑物质是主要的失稳物质类型, 来自于冰川侵蚀、岩石节理的扩展等长期风化过程(刘伟, 2006; 张佳佳等, 2018; 李军等, 2021). 在此尺度上无常年性流水, 造成失稳的因素主要是降雨以及升温造成的冰川融水等(Zheng *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2025), 从而形成小规模滑坡和泥石流, 总体危害程度较低.

沟谷尺度: 藏东南区域绝大多数为文献所记载和研究的地质灾害都在此尺度, 比如天摩沟泥石流、嘎龙曲冰川泥石流等. 这类地质灾害同时兼具较高的发生频率和较强的致灾性(表1). 沟谷的发育首先受控于断层等地质构造背景, 并与早期的地

表1 藏东南地区典型多期地质灾害特征及其致灾情况

Table 1 Typical multi-phase geohazards and their disaster impacts in Southeast Tibet Plateau

灾害名称	发生时间	致灾情况	参考文献
天摩沟泥石流	1965年; 1970年; 1976年; 2007年9月; 2010年7月; 2010年9月; 2018年7月	2007—2018年的4次发生均不同程度堵塞帕隆藏布, 掩埋国道318或形成堰塞湖	高波等(2019); 孟哲等(2022)
培龙贡支泥石流	1983年7月; 1984年7~8月; 1984年10月; 1985年5~6月; 1983—1990年累计19次	堵塞帕隆藏布, 1984年造成6人死亡; 1985年造成79辆货车被淹没	杨德宏等(2020)
扎木弄沟滑坡/泥石流	1900年; 2000年4月; 2015年8月(4次); 2020年7月; 2022年; 2024年	2000年堵塞易贡藏布, 两乡三厂(场)4000余人受灾, 雅鲁藏布江下游有5万人无家可归	王伟宇等(2020); 余国安等(2022); 袁浩等(2023)
古乡泥石流	1953年9月; 1954年(37次); 1963年; 1972年, 此后每年频发; 2005年7月; 2005年8月	堵塞帕隆藏布, 1953年造成140多人死亡	施雅风等(1964); 刘建康和程尊兰(2015)
冬茹弄巴泥石流	1961年; 1963年7月; 1965年; 1967年; 1975年6月	1963年冲毁路基长度2 km, 交通受阻20余天; 1975年造成玉璞藏布堵塞, 威胁下游玉普乡、松宗镇10余个村庄	吕儒仁和李德基(1989)
色东普泥石流	2001—2020年共发生5次(2018年10月2次)	堵塞雅鲁藏布江干流, 形成堰塞坝	李壮等(2021)

表水发育路径密切相关 (Whipple *et al.*, 1999; Wolf *et al.*, 2022). 沟谷内地质灾害的物质来源包括了地表松散物、存在失稳可能的岩体和冰川舌 (陈龙等, 2021). 在降雨和融水的影响之外, 地震活动通过造成冰岩体失稳而在沟谷中诱发地质灾害 (Salzmann *et al.*, 2004; Gnyawali *et al.*, 2020; 殷跃平和高少华, 2024). 同时, 冰川受气温影响而产生的裂隙发育也会造成失稳 (Wang *et al.*, 2024). 由于沟谷源区的陡峭地形以及其物质的复杂性, 源区的冰岩体失稳会通过河流和堆积物而形成灾害放大效应, 使得地质灾害的影响范围和规模都扩大 (李尧等, 2022).

流域尺度: 流域尺度以一条河流为主体, 包含了其范围内的沟谷与坡面单元. 易贡藏布流域的形成受到了嘉黎断裂的控制 (李鸿儒等, 2021; 袁浩等, 2023), 外动力作用在此基础上得以发展. 极少数地质灾害的影响可以达到流域尺度, 虽然发生频率低, 但其巨大的致灾性使得此类灾害仍然是藏东南地区最具有挑战的难题之一. 此规模灾害与坡面和沟谷尺度灾害的多期次发生密切相关 (表 1). 以易贡滑坡为例, 1900 年, 易贡藏布扎木弄沟发生巨型冰川泥石流, 其堆积物形成堰塞坝从而使易贡湖形成; 2000 年 (时隔 100 a 后), 扎木弄沟源区岩体再次发生大规模失稳, 物质通过远程运动在易贡藏布形成堰塞坝, 其溃决洪水最终在超远的距离范围内造成灾害影响 (殷跃平, 2000a; 刘伟, 2002; Delaney and Evans, 2015). 在相隔一个世纪的两次巨型灾害之间, 极可能发生过多类似的小尺度灾害, 从而为灾害的长距离运动提供条件 (胡明鉴等, 2009). 相比于更小尺度的地质灾害, 造成流域影响的关键在于地质灾害在经历初期以垂直位移为主的运动之后, 对流域的主要河流系统造成影响, 从而通过河流将影响传导至更远和更下游的区域, 此阶段的灾害影响以水平位移为主 (图 4). 从物源的角度来看, 在冰岩体和碎屑物质之外, 水在此类地质灾害中发挥了至关重要的致灾范围扩大作用, 成为灾害扩展过程的主导因素.

地貌 (亚) 区尺度: 青藏高原作为一个全球独有的地貌区, 其形成是板块挤压和错动的结果 (Pan *et al.*, 2012; Ding *et al.*, 2022). 整体高海拔特征决定了此区域与周边区域的外动力过程的剧烈性, 成为亚洲水塔并对全球的大气循环造成影响 (Yao *et al.*, 2012). 藏东南是青藏高原的地貌亚区

之一, 从地貌的角度来说, 此区域高山沟谷纵横, 展布方向与此区域的构造作用紧密联系. 更为重要的是, 此区域作为青藏高原东南部的常年水汽通道, 是印度季风的主要影响区域 (Maussion *et al.*, 2014; Ma *et al.*, 2018). 因此, 在剧烈的内动力地质作用造成孕灾基底之外, 强烈的水汽交换等外动力过程促进了地质灾害的发生, 并常常是藏东南地质灾害的直接诱发因素.

藏东南地质灾害在空间尺度上呈现出不同规模的关键在于是否会产生链式灾害. 对于小规模的山崩等灾害, 如果可以在崩塌后触发下一阶段的灾害, 如更大规模的滑坡和泥石流等, 则可以将影响扩展到沟谷尺度. 如果沟谷尺度的灾害可以形成堰塞湖, 则可以进一步扩展至流域的尺度. 对链式灾害的特别关注即源自于这种在空间上可能产生的灾害影响突增.

从空间维度可以看出, 不同的空间尺度上地质灾害的诱发、运动形式和致灾性呈现出不同的特征, 其反映的是内外动力地质作用的双重影响: 一是对空间尺度孕灾环境的塑造; 二是与地表的交互. 从最基本的坡面尺度到最大的地貌区尺度, 内外动力发挥作用的主次关系也在逐渐变化. 在小尺度上, 降雨等外动力过程是主要和直接的地质灾害诱发因素, 而内动力地质作用往往不会产生直接作用. 随着尺度的增大, 内动力的主导作用逐渐显著. 地震可以作为内动力作用中的特殊情况来直接诱发地质灾害, 但总体来看, 内动力的影响主要体现在对灾害基底环境的塑造上 (郭长宝等, 2024). 对孕灾环境塑造过程的考虑将指向内外动力地质作用对地质灾害的时间尺度影响上.

4.2 时间尺度影响模式

从时间的角度来说, 内外动力对藏东南地质灾害的影响可以分为 3 种尺度模式: 一是短期尺度, 单一内外动力事件直接诱发地质灾害; 二是中期尺度, 内外动力的波动对地质灾害的发生产生影响; 三是长期尺度, 内外动力的长期趋势形成地表环境的缓慢变化并塑造孕灾环境.

短期尺度 (秒—数天): 短期尺度内造成藏东南地质灾害发生的内外动力因素包括了降雨、气温上升、地震等. 此类事件通常作为地质灾害发生的最后“导火索”, 促使失稳体的稳定性达到临界值并发生失稳. 虽然所有灾害在前期都会受到各方面因素的孕灾影响, 但最终直接触发的都可以与单一事

件相关联.在冰湖溃决前,其可能已经受到了长期冰川退化的影响,这些影响足以降低整体稳定性,而滑坡等单一动力事件能够导致溃决的最终发生(Emmer and Cochachin, 2013; 郭长宝等, 2016).2020年,易贡藏布支流之一尼都藏布的金乌错曾发生冰湖溃决事件,约1 000万 m^3 的水体短时间内倾泻而出.此次事件冲毁了下游的道路、桥梁等基础设施,造成了严重的经济损失(Zheng *et al.*, 2021).

中期尺度(数天—一年):以天或年为尺度的气温和水汽变化是外动力作用波动造成地质灾害的模式之一.青藏高原的降水近70%发生在夏季(6~8月)(Tong *et al.*, 2014).在天的尺度上,受印度洋和孟加拉湾的影响,水汽通过雅鲁藏布峡谷进入高原,从而对高原东南部的降水特征产生重要影响(Maussion *et al.*, 2014),导致南部沟谷地区白天盛行强风并且伴随着湿度的增加(Ueno *et al.*, 2008; Ma *et al.*, 2018).东南风则为午夜和清晨降水提供了有利的水汽条件(Bhatt and Nakamura, 2006).季节性的冻融循环也会造成岩体节理面的发展、冻土的状态变化以及冰川的体积波动.此外,寒冷月份形成的积雪和冰川层可能会增加来年春天的地表径流,从而导致地质灾害(Flageollet *et al.*, 1999).

长期尺度(数年—百万年):将时间尺度拉长,在短期尺度上的单一事件以及中期尺度上的波动影响都不再显著,取而代之的是长期尺度上的整体变化趋势.气候变暖是最为典型的长期尺度影响,气温的上升和冰川的融化会引起地质灾害的发生,如长期冰雪消融导致水压增大,这是冰湖溃决洪水的长期成因之一(Wang *et al.*, 2024).从更长的时间尺度来说,内动力作用主导的板块运动形成了断层以及陡峭的地形,而外动力作用同样参与此过程之中,共同形成中短期尺度上相对稳定的孕灾环境.

内外动力地质作用在时间上的影响模式决定了藏东南地质灾害的多期性.这种多期性还同时伴随着规模上的不确定性,从而给灾害的防治带来挑战.考虑到诱发因素和物源储备等对地质灾害多期性的重要影响(Huang *et al.*, 2025),评估内外动力影响和物质堆积阈值是应对多期性的关键研究方向.在时间尺度上的分析可以建立起同一位置灾害的多期关联性,也可以更好地理解内外动力对地质灾害的影响——即在长期尺度上的孕育和在短期

尺度的诱发.

4.3 藏东南地质灾害时空特征

内外动力地质作用在时空多尺度上的影响模式,决定了藏东南地质灾害在时空两个维度的特点.从空间上来说,内外动力通过直接或者间接的影响过程导致地质灾害的发生,而这种影响主要涉及藏东南地质灾害的3个过程——冰川、滑坡和河流.这3个过程构成了藏东南地质灾害在空间上进行扩展和组合的主体.在时间上,长期和短期的内外动力影响使得失稳体不断达到其临界状态从而产生失稳,达到临界状态所需时间以及失稳后处于何种状态,决定了地质灾害在时间上的发生规律.

4.3.1 空间特征:冰川—滑坡—河流综合作用

对于喜马拉雅造山带来说,山体的剥蚀过程主要包括滑坡、冰川和河流运输3种形式.在最初阶段以滑坡和冰川运移为主导,主要表现为短距离的剥蚀和搬运,而后碎屑物又在河流的作用下被运输到山体之外(Shroder and Bishop, 1998).这3种运动形式广泛地存在于藏东南,并成为区域地质灾害的主要致灾过程,通过不同的主次关系而形成了特征各异的地质灾害模式和地貌.其中,滑坡和冰川主要通过竖向落差形成灾害,河流则主要通过水平向运输形成灾害(图4).在不同的地质灾害类型中,受多种因素主导的复合链式灾害形式往往更复杂,具有显著的致灾性.

冰湖溃决洪水是藏东南以冰川和河流为主导的典型灾害模式.根据冰湖与冰川在空间上的相对位置关系,可以分为冰面湖、冰前湖和冰坝湖(Zhang *et al.*, 2024).在时间上,溃决受到了短期动力成因和长期成因两类作用机制的影响(Emmer and Cochachin, 2013).前者是指滑坡、强降雨等突发性事件引起冰湖水位急剧上涨而导致的溃决,后者则是指长期冰雪消融影响造成水压增大从而引起溃决(Wang *et al.*, 2024).冰湖溃决会使得大量的水在短时间内被释放,从而冲击和携带其运动路径上的物质,诱发洪水、泥石流等灾害,并通过河流对下游的道路、桥梁等基础设施等造成破坏(Zheng *et al.*, 2021).

滑坡—堰塞湖灾害链是以滑坡和河流为主导的典型灾害模式.在规模较大的情况下,这种模式会进一步发展为完整的“高位冰(岩)崩—滑坡—碎屑流—堰塞湖溃决—洪水”的链式致灾过程(殷跃平等, 2021; 蔡耀军等, 2022).当滑坡或泥石流

发生后,可能会在其堆积区阻隔河流、水体而形成堰塞坝.在上游水源不断补充的情况下,堰塞湖水位上升,会增加其溃坝并在下游形成灾难性洪水的风险 (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2017; 彭铭等, 2020),将滑坡影响范围扩展至下游数百千米.在高山河流交错的藏东南区域,滑坡失稳后进入河流是一种常见的灾害过程.由于河流坡降大、流速高,小规模的滑坡并不能有效地阻隔河流,一般只有沟谷尺度及以上的大规模失稳才会堵江形成堰塞湖 (Gao *et al.*, 2025).

冰川泥石流是以冰川和滑坡为主导的典型灾害模式.在阿尔卑斯山的相关研究中,此类地质灾害也被称为“冰缘泥石流 (Periglacial debris flows)” (Stoffel *et al.*, 2014).冰川泥石流是区域内分布较为广泛的复合型灾害.其源区一般位于冰川和积雪边缘,并在洪水影响下造成冰碛物和崩积物失稳 (张佳佳等, 2018),最终形成灾害.在时间分布上,冰川泥石流主要发生于5—9月,与夏季藏东南区域的降雨与冰雪消融相关 (翟毅飞, 2022).古乡泥石流是区域内最为典型和频发的冰川泥石流之一 (表1),其多期性主要与高温引起的高海拔源区冰川崩塌相关 (鲁安新等, 2006).

4.3.2 时间特征:大规模失稳与频繁泥石流 在藏东南多个典型的地质灾害沟谷中,曾多次发生大规模失稳,并在间隔期间发生更为频繁的小规模泥石流.这种“一大多小,多期发生”的规律,是藏东南地质灾害最为突出的时间特征.扎木弄沟是最为典型的案例,其曾在1900年和2000年发生大规模高位远程滑坡 (殷跃平, 2000b),又至少在2015年8月 (王伟宇等, 2020)、2020年7月 (余国安等, 2022)、2022年7月和2024年 (作者现场考察发现) 多次发生泥石流.其中,2015年8月共发生4次泥石流.考虑到扎木弄沟所处的位置,这里实际发生的小规模泥石流次数可能远多于有据可考的次数.此外,根据有文献资料或现场考察记录,天摩沟发生泥石流7次,古乡沟超过42次,培龙贡支19次,色东普5次 (表1).

同一沟谷多期次的地质灾害在物质、时间和规模上都存在相关性.在物质组成上,大规模滑坡的运动物质来自于源区的失稳岩体和运动路径中铲刮携带的碎屑物,颗粒粒径分布范围大、分选差,既包含了磨圆度较好的河流冲积物,也包含了磨圆度较差的近期失稳岩体.小规模泥石流的物质主要来

自于大规模失稳的堆积物,其所携带的主要是粒径较小的砂土.泥石流会改变沟谷形态,在沟谷两侧形成多期冲积序列.不同规模的地质灾害可能有相互促进效应,加剧了区域内的地貌演变和风化过程 (Qiu *et al.*, 2024).目前的研究认为,高位远程滑坡在运动过程中会存在明显的铲刮裹挟效应.这种效应一方面导致大规模滑坡从源区到堆积区会产生体积增长,另一方面会在运动过程中发生滑动带液化,从而促进大规模滑坡的远程运动 (高杨等, 2020; 殷跃平和高少华, 2024).

5 总结与展望

藏东南地质灾害的内外动力影响模式涉及到多个时空层次和尺度.综合来看,内动力地质作用形成了区域地质灾害的基底,对大空间、长时间尺度的地质灾害发生影响起主导作用;外动力地质作用是地质灾害最为主要的触发条件,在小空间、短时间尺度上直接诱发地质灾害.同时,在内外动力的共同作用下,需要地质灾害作为藏东南地貌演化的主要过程来进行调整,从而在地表达达到均衡状态.

由于活跃的内动力地质作用和大梯度的外动力地质作用,藏东南的地表均衡处在极大的动态变化之中,地震活动、升温 and 降雨等事件都会直接或间接地导致地质灾害.在气候变化的背景之下,随着藏东南地区气温上升、降水增多、冰川融水增加等外动力过程的加剧,地质灾害在空间上的链式特征和在时间上的多期性可能会进一步凸显,对区域内的国家重大工程建设和长期运维带来隐患,并且给藏东南及其下游地区的防灾减灾工作带来持续的挑战.根据目前的研究情况,未来需要特别加强的研究方向包括:

(1) 构建详细地质灾害数据库与基础数据.由于地理、气候等限制,藏东南所发生的地质灾害中仅有部分有较为详细的灾害信息记录.在有限的地质灾害信息之上,难以构建起地质灾害的内外动力耦合关系,也难以通过机器学习等手段来进行灾害评估.在基础数据方面,沟谷的物源方量计算对灾害规模的判断至关重要;气象等数据也有助于进一步实现地质灾害的预测.但藏东南的高山峡谷地形所带来的监测挑战,以及较强的局地降水系统为这些工作带来了挑战.

(2) 量化藏东南地质灾害发生的外动力阈值.在藏东南大多数地质灾害发生前,都可以观测到显

著的气温、降雨等外动力因子波动.对1963年古乡沟泥石流的研究表明,泥石流爆发前暖空气进入该区域并且在灾害发生当天最为显著,这可能是在藏东南最早将地质灾害的发生与区域气象背景相结合的案例(施雅风等,1964).对扎木弄沟频繁泥石流的气象分析也表明,灾害的发生与藏东南扮演的水汽通道作用密切相关.外动力因子阈值的量化研究,需要建立在区域地质灾害和基础数据之上,也需要建立在对气象条件的准确监测上.

(3) 藏东南地质灾害的跨时空关联机制.藏东南地质灾害在空间上的链式特征已经成为区域乃至全球范围内的研究重难点,不同地质灾害过程在空间上的转化和传递机制、链式触发的条件等都对致灾范围的预测等至关重要.多期性则让区域内地质灾害在时间上难以预测.虽然小规模地质灾害带来的影响是有限和可控的,但大规模的失稳带来灾害的影响可能呈数量级增长.同时,小规模地质灾害极可能在长时间尺度内为大规模失稳和长距离运动提供了物质等条件.明确这种小灾害累积造成更大灾害的阈值,对大规模地质灾害的预防至关重要.

References

- Azam, M. F., Wagnon, P., Berthier, E., et al., 2018. Review of the Status and Mass Changes of Himalayan-Karakoram Glaciers. *Journal of Glaciology*, 64(243): 61–74. <https://doi.org/10.1017/jog.2017.86>
- Bai, Y. J., Ni, H. Y., Ge, H., 2019. Advances in Research on the Geohazard Effect of Active Faults on the Southeastern Margin of the Tibetan Plateau. *Journal of Geomechanics*, 25(6): 1116–1128 (in Chinese with English abstract).
- Bhatt, B. C., Nakamura, K., 2006. A Climatological-Dynamical Analysis Associated with Precipitation around the Southern Part of the Himalayas. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D2): D02115. <https://doi.org/10.1029/2005JD006197>
- Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., et al., 2017. A Spatially Resolved Estimate of High Mountain Asia Glacier Mass Balances from 2000 to 2016. *Nature Geoscience*, 10(9): 668–673. <https://doi.org/10.1038/ngeo2999>
- Burbank, D. W., Leland, J., Fielding, E., et al., 1996. Bedrock Incision, Rock Uplift and Threshold Hillslopes in the Northwestern Himalayas. *Nature*, 379(6565): 505–510. <https://doi.org/10.1038/379505a0>
- Cai, Y. J., Yang, Q. G., Luan, Y. S., et al., 2022. Breaches of Jiala Barrier Lake in Milin County of Yarlung Zangbo River in 2018. *Journal of Engineering Geology*, 30(3): 784–793 (in Chinese with English abstract).
- Chai, B., Tao, Y. Y., Du, J., et al., 2020. Hazard Assessment of Debris Flow Triggered by Outburst of Jialong Glacial Lake in Nyalam County, Tibet. *Earth Science*, 45(12): 4630–4639 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G. Q., Xu, Q., Yang, X., et al., 2025. Fracture Propagation Characteristics and Catastrophic Modes of Fractured Rock in Alpine Region under Climate Change. *Earth Science*, 50(4): 1585–1598 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L., Fan, X. M., Xiong, J. L., et al., 2023. Hazard Assessment of Glacial Lake Outbursts in the Doyinongba Basin, Southeastern Tibetan Plateau. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(2): 258–266 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L., Yu, B., Huang, H., et al., 2021. Characteristics of Debris Flow Source Evolution in Tianmo Gully, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 40(12): 2089–2097 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, T. F., Chen, D. L., Wang, B., et al., 2024. Human-Induced Warming Accelerates Local Evapotranspiration and Precipitation Recycling over the Tibetan Plateau. *Communications Earth & Environment*, 5: 388. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01563-9>
- Cheng, Z. L., Tian, J. C., Zhang, Z. B., et al., 2009. Debris Flow Induced by Glacial-Lake Break in Southeast Tibet. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 207–214 (in Chinese with English abstract).
- Cui, P., Chen, R., Xiang, L. Z., et al., 2014. Risk Analysis of Mountain Hazards in Tibetan Plateau under Global Warming. *Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatit*, 10(2): 103–109 (in Chinese with English abstract).
- Cui, S. H., Pei, X. J., Huang, R. Q., 2019. An Initiation Model of DGB Landslide: Non-Coordinated Deformation Inducing Rock Damage in Sliding Zone during Strong Seismic Shaking. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(2): 237–253 (in Chinese with English abstract).
- Delaney, K. B., Evans, S. G., 2015. The 2000 Yigong Landslide (Tibetan Plateau), Rockslide-Dammed Lake and Outburst Flood: Review, Remote Sensing Analysis, and Process Modelling. *Geomorphology*, 246: 377–393. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.020>
- Deline, P., Akçar, N., Ivy-Ochs, S., et al., 2015. Repeated Holocene Rock Avalanches onto the Brenva Glacier, Mont Blanc Massif, Italy: A Chronology. *Quaternary*

- Science Reviews*, 126: 186–200. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.09.004>
- Deng, Q. D., Cheng, S. P., Ma, J., et al., 2014. Seismic Activities and Earthquake Potential in the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(7): 2025–2042 (in Chinese with English abstract).
- Ding, L., Kapp, P., Cai, F. L., et al., 2022. Timing and Mechanisms of Tibetan Plateau Uplift. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(10): 652–667. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00318-4>
- Ding, L., Zhong, D.L., 2013. The Tectonic Evolution of the Eastern Himalaya Syntaxis since the Collision of the Indian and Eurasian Plates. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 48(2): 317–333 (in Chinese with English abstract).
- Ding, L., Zhong, D. L., Yin, A., et al., 2001. Cenozoic Structural and Metamorphic Evolution of the Eastern Himalayan Syntaxis (Namche Barwa). *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 423–438. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00463-0](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00463-0)
- Dong, H. W., Xu, Z. Q., Cao, H., et al., 2018. Comparison of Eastern and Western Boundary Faults of Eastern Himalayan Syntaxis, and Its Tectonic Evolution. *Earth Science*, 43(4): 933–951 (in Chinese with English abstract).
- Emmer, A., Cochachin, A., 2013. The Causes and Mechanisms of Moraine-Dammed Lake Failures in the Cordillera Blanca, North American Cordillera, and Himalayas. *Auc Geographica*, 48(2): 5–15. <https://doi.org/10.14712/23361980.2014.23>
- England, P., Molnar, P., 1997. Active Deformation of Asia: From Kinematics to Dynamics. *Science*, 278(5338): 647–650. <https://doi.org/10.1126/science.278.5338.647>
- Erokhin, S. A., Zaginaev, V. V., Meleshko, A. A., et al., 2018. Debris Flows Triggered from Non-Stationary Glacier Lake Outbursts: The Case of the Teztor Lake Complex (Northern Tian Shan, Kyrgyzstan). *Landslides*, 15(1): 83–98. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0862-3>
- Fan, X. M., Xu, Q., Scaringi, G., et al., 2017. Failure Mechanism and Kinematics of the Deadly June 24th 2017 Xinmo Landslide, Maoxian, Sichuan, China. *Landslides*, 14(6): 2129–2146. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0907-7>
- Feng, L., Zhou, T. J., 2012. Water Vapor Transport for Summer Precipitation over the Tibetan Plateau: Multidata Set Analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D20): 85–89. <https://doi.org/10.1029/2011JD017012>
- Flageollet, J. C., Maquaire, O., Martin, B., et al., 1999. Landslides and Climatic Conditions in the Barcelonnette and Vars Basins (Southern French Alps, France). *Geomorphology*, 30(1–2): 65–78. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00045-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00045-8)
- Gao, B., Zhang, J. J., Wang, J. C., et al., 2019. Formation Mechanism and Disaster Characteristics of Debris Flow in the Tianmo Gully in Tibet. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46 (5): 144–153(in Chinese with English abstract).
- Gao, S. H., Gao, Y., Yin, Y. P., et al., 2025. Characteristics of Massive Glacier-Related Watershed Geohazard Chains in the Eastern Himalayan Syntaxis, China. *Journal of Earth Science*, 36(3): 1181–1197. <https://doi.org/10.1007/s12583-024-0116-y>
- Gao, S. H., Yin, Y. P., Li, B., et al., 2024. Dynamic Characteristics of the Rock-Ice Avalanche Disaster Chain in the Zelongnong Basin, Yarlung Zangbo River Canyon Region. *Journal of Engineering Geology*, 32(3): 996–1009(in Chinese with English abstract).
- Gao, Y., Li, B., Gao, H. Y., et al., 2020. Progress and Issues in the Research of Impact and Scraping Effect of High-Elevation and Long-Runout Landslide. *Journal of Geomechanics*, 26(4): 510–519(in Chinese with English abstract).
- Geng, Q. R., Pan, G. T., Zheng, L. L., et al., 2006. The Eastern Himalayan Syntaxis: Major Tectonic Domains, Ophiolitic Mélanges and Geologic Evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(3): 265–285. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2005.03.009>
- Gnyawali, K. R., Xing, A. G., Zhuang, Y., 2020. Dynamic Analysis of the Multi-Stage Ice-Rock Debris Avalanche in the Langtang Valley Triggered by the 2015 Gorkha Earthquake, Nepal. *Engineering Geology*, 265: 105440. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105440>
- Gong, Y. F., Yao, A. J., Li, Y. L., et al., 2022. Classification and Distribution of Large-Scale High-Position Landslides in Southeastern Edge of the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 81(11): 311. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10433-6>
- Gou, Y. B., Ma, Y. Z., Chen, H. N., et al., 2018. Radar-Derived Quantitative Precipitation Estimation in Complex Terrain over the Eastern Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*, 203: 286–297. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.12.017>
- Guo, C. B., Du, Y. B., Tong, Y. Q., et al., 2016. Huge Long-Runout Landslide Characteristics and Formation Mechanism: A Case Study of the Luanshibao Landslide,

- Litang County, Tibetan Plateau. *Geological Bulletin of China*, 35(8): 1332–1345(in Chinese with English abstract).
- Guo, C. B., Wu, R. A., Zhong, N., et al., 2024. Large Landslides along Active Tectonic Zones of Eastern Tibetan Plateau: Background and Mechanism of Landslide Formation. *Earth Science*, 49(12): 4635–4658(in Chinese with English abstract).
- Guo, C. B., Zhang, Y. S., Montgomery, D. R., et al., 2016. How Unusual is the Long-Runout of the Earthquake-Triggered Giant Luanshibao Landslide, Tibetan Plateau, China? *Geomorphology*, 259: 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.013>
- Hou, W. P., Yu, G. A., Yue, P. S., 2023. Development and Geomorphic Characteristics of a Typical Debris Flow Fan in Alpine Valley: A Case Study of the Tianmo Gully in the Parlung Tsangpo Basin, Southeast Tibet, China. *Mountain Research*, 41(4): 532–544 (in Chinese with English abstract).
- Hu, M. J., Cheng, Q. G., Wang, F. W., 2009. Experimental Study on Formation of Yigong Long-Distance High-Speed Landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(1): 138–143 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S., Zhou, T. J., Wu, B., 2025. Accelerated Warming of High Mountain Asia Predicted at Multiple Years Ahead. *Science Bulletin*, 70(3): 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.09.023>
- Huang, H., Fan, X. M., Yang, D. X., et al., 2025. Initiation Mechanism and Dynamic Characteristics of Repeated Debris Flows in the Tianmo Gully, Southeastern Tibetan Plateau. *Landslides*, 22(5): 1609–1622. <https://doi.org/10.1007/s10346-025-02457-3>
- Huang, H., Gong, C., 2024. Spatial-Temporal Evolution of Geohazard Chain Participated by Glacier and Snow in Zhibai Gully, SE Tibetan Plateau. *Earth Science*, 49(10): 3784–3798 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. P., Zhou, X. J., Wu, G. X., et al., 2023. Global Climate Impacts of Land-Surface and Atmospheric Processes over the Tibetan Plateau. *Reviews of Geophysics*, 61(3): e2022RG000771. <https://doi.org/10.1029/2022RG000771>
- Huang, R. Q., 2007. Large-Scale Landslides and Their Sliding Mechanisms in China since the 20th Century. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 433–454 (in Chinese with English abstract).
- Kääb, A., Leinss, S., Gilbert, A., et al., 2018. Massive Collapse of Two Glaciers in Western Tibet in 2016 after Surge-Like Instability. *Nature Geoscience*, 11(2): 114–120. <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0039-7>
- Kapp, P., DeCelles, P. G., 2019. Mesozoic - Cenozoic Geological Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen and Working Tectonic Hypotheses. *American Journal of Science*, 319(3): 159–254. <https://doi.org/10.2475/03.2019.01>
- Li, H., Liu, S., Hu, K. H., 2023. Climate Extremes in a Typical Glacier-Related Debris Flow Watershed of Southeast Tibet during 1979–2018. *Plateau Meteorology*, 42(6): 1518–1528 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. R., Bai, L., Zhan, H. L., 2021. Research Progress of Jiali Fault Activity. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(2): 182–193 (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. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32(3): 42–50 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Cui, Y. F., Li, Z. H., et al., 2022. Evolution of Glacier Debris Flow and Its Monitoring System along Sichuan-Tibet Traffic Corridor. *Earth Science*, 47(6): 1969–1984 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Wang, J. C., Chen, L., et al., 2018. Characteristics and Geneses of the Group-Occurring Debris Flows along Parlung Zangbo River Zone in 2016. *Research of Soil and Water Conservation*, 25(6): 397–402 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. Y., Wang, R., Wei, S. Y., et al., 2024. Potential Failure Mechanism and Movement Process of an Ancient River-Damming Landslide in the SE Qinghai-Tibet Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 83(3): 119. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11426-3>
- Li, Z., Li, B., Gao, Y., et al., 2021. Remote Sensing Interpretation of Development Characteristics of High-Position Geological Hazards in Sedongpu Gully, Downstream of Yarlung Zangbo River. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32(3): 33–41 (in Chinese with English abstract).
- Liang, N., Wu, F. Q., Wang, Y. F., et al., 2016. Analysis of Deformation and Failure of Rock Mass of Deep Guanshan Tunnel under High In Situ Stress. *Rock and Soil Mechanics*, 37(S2): 329–336 (in Chinese with English abstract).
- Liang, X. Y., Xu, M. Z., Lyu, L. Q., et al., 2020. Geomorphological Characteristics of Debris Flow Gullies on the Edge of the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geographica*

- Sinica*, 75(7): 1373–1385 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. Z., Lü, J. T., Tong, L. Q., et al., 2019. Research on Glacial/Rock Fall-Landslide-Debris Flows in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet. *Geology in China*, 46(2): 219–234 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. K., Cheng, Z. L., 2015. Meteorology Conditions for Frequent Debris Flows from Guxiang Valley in Tibet, China. *Science Technology and Engineering*, 15(9): 45–49, 55 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. K., Zhou, L. X., Zhang, J. J., et al., 2021. Characteristics of Jiwengcuo Glacial Lake Outburst Flood (GLOF), Lhari County, Tibet. *Geological Review*, 67(S1): 17–18 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. X., Guo, C. B., Wu, R. A., et al., 2024. Creeping Deformation Characteristics and Stability Analysis of Guilu Large Deep-Seated Landslide in Jiangda, Xizang. *Geological Bulletin of China*, 43(10): 1855–1868 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., 2002. Study on the Characteristics of Huge Scale-Super Highspeed-Long Distance Landslide Chain in Yigong, Tibet. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13(3): 9–18 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., 2006. Preliminary Study on Debris Flow Induced by Glacier Lake Outburst in Tibet. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 33(3): 88–92 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., Wang, M., Song, B., et al., 2021. Optical Remote Sensing Monitoring and Dynamic Analysis of Ice Avalanche Hazards in Midui Glacier of Southeast Tibet. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 861(5): 052028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/861/5/052028>
- Liu, W., Wang, M., Song, B., et al., 2022. Surveys and Chain Structure Study of Potential Hazards of Ice Avalanches Based on Optical Remote Sensing Technology: A Case Study of Southeast Tibet. *Remote Sensing for Natural Resources*, 34(1): 265–276 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.P., 2023. Spatial and Temporal Variation of Freeze-Thaw Erosion in the Yarlung Tsangpo River Basin in the Context of Climate Change (Dissertation). Yunnan University, Kunming (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Zhang, W., Wei, L. S., 2024. Developmental Characteristics and Potential Disaster Mechanism of Rock Glaciers in the Middle Reaches of the Yarlung Zangbo River. *Northwestern Geology*, 57(1): 44–54 (in Chinese with English abstract).
- Long, F., Gong, C., Huang, H., et al., 2022. Formation Conditions and Dynamic Characteristics of Debris Flow Triggered by an Ice Avalanche at Zhibai Gully in Southeast Tibet. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 42(6): 31–38, 46 (in Chinese with English abstract).
- Lu, A. X., Deng, X. F., Zhao, S. X., et al., 2006. Cause of Debris Flow in Guxiang Valley in Bomi, Tibet Autonomous Region, 2005. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(6): 956–960 (in Chinese with English abstract).
- Lü, R. R., Li, D. J., 1989. Ice-Snow-Melt Water Debris Flows in the Dongru Longba (Gully) Bomi County, Xizang (Tibet). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 11(2): 148–160 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. Z., Lu, M. Q., Chen, H. N., et al., 2018. Atmospheric Moisture Transport versus Precipitation across the Tibetan Plateau: A Mini-Review and Current Challenges. *Atmospheric Research*, 209: 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.03.015>
- Maussion, F., Scherer, D., Mölg, T., et al., 2014. Precipitation Seasonality and Variability over the Tibetan Plateau as Resolved by the High Asia Reanalysis. *Journal of Climate*, 27(5): 1910–1927. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00282.1>
- McCull, S. T., Davies, T. R. H., 2013. Large Ice-Contact Slope Movements: Glacial Buttressing, Deformation and Erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(10): 1102–1115. <https://doi.org/10.1002/esp.3346>
- Meng, Z., Lü, L. Q., Yu, G. A., et al., 2022. Reconstruction of Glacial Debris Flow Disaster Based on Dendrochronology: A Case Study on Tianmo Gully, Tibet. *Science Technology and Engineering*, 22(32): 14124–14136 (in Chinese with English abstract).
- Montgomery, D. R., 2001. Slope Distributions, Threshold Hillslopes, and Steady-State Topography. *American Journal of Science*, 301(4–5): 432–454. <https://doi.org/10.2475/ajs.301.4-5.432>
- Nian, T. K., Zhao, R. D., Zheng, D. F., et al., 2024. Advances in the Study of Ice-Rock Avalanche Disaster Chains in Yarlung Zangbo River Basin in Southeast Tibet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 55(10): 1146–1162 (in Chinese with English abstract).
- Nuimura, T., Sakai, A., Taniguchi, K., et al., 2015. The GAMDAM Glacier Inventory: A Quality-Controlled Inventory of Asian Glaciers. *The Cryosphere*, 9(3): 849–864. <https://doi.org/10.5194/tc-9-849-2015> <https://doi.org/10.5194/tcd-8-2799-2014>
- Ouimet, W. B., Whipple, K. X., Royden, L. H., et al.,

2007. The Influence of Large Landslides on River Incision in a Transient Landscape: Eastern Margin of the Tibetan Plateau (Sichuan, China). *Geological Society of America Bulletin*, 119(11–12): 1462–1476. <https://doi.org/10.1130/b26136.1>
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Li, R. S., et al., 2012. Tectonic Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2011.12.018>
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Yin, F. G., et al., 2022. Researches on Geological-Tectonic Evolution of Tibetan Plateau: A Review, Recent Advances, and Directions in the Future. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42(2): 151–175 (in Chinese with English abstract).
- Peng, M., Wang, K. F., Zhang, G. D., et al., 2020. Review of Model Experimental Studies on Break of Landslide Dams. *Journal of Engineering Geology*, 28(5): 1007–1015 (in Chinese with English abstract).
- Pfeffer, W. T., Arendt, A. A., Bliss, A., et al., 2014. The Randolph Glacier Inventory: A Globally Complete Inventory of Glaciers. *Journal of Glaciology*, 60(221): 537–552. <https://doi.org/10.3189/2014jog13j176>
- Qiu, H. J., Liu, Y., Tang, B. Z., et al., 2024. More Catastrophic Flow Events may Follow the Chamoli Rock and Ice Avalanche under Climate Change. *Journal of Earth Science*, 35(4): 1382–1384. <https://doi.org/10.1007/s12583-024-1997-5>
- Qiu, J., 2008. Climate Change is Coming Fast and Furious to the Tibetan Plateau. *Nature*, 454(7203): 393–396.
- Qu, W., Liu, C. J., Lyu, J., et al., 2023. Investigation and Suggestions on Flood Disasters Caused by Glacier Collapse and Glacial Lake Breaking. *China Flood & Drought Management*, 33(1): 27–30 (in Chinese with English abstract).
- Ruiz-Villanueva, V., Allen, S., Arora, M., et al., 2017. Recent Catastrophic Landslide Lake Outburst Floods in the Himalayan Mountain Range. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 41(1): 3–28. <https://doi.org/10.1177/0309133316658614>
- Salzmann, N., Kääb, A., Huggel, C., et al., 2004. Assessment of the Hazard Potential of Ice Avalanches Using Remote Sensing and GIS-Modelling. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 58(2): 74–84. <https://doi.org/10.1080/00291950410006805>
- Shi, Y. F., Yang, Z. H., Xie, Z. C., et al., 1964. Glacial Debris Flows in the Guxiang, Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 9(6): 542–544 (in Chinese).
- Shroder, J. F., Bishop, M. P., 1998. Mass Movement in the Himalaya: New Insights and Research Directions. *Geomorphology*, 26(1–3): 13–35. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00049-X)
- Song, M. H., Ma, Y. M., Zhang, Y., et al., 2011. Analyses of Characteristics and Trend of Air Temperature Variation along the Brahmaputra Valley. *Climatic and Environmental Research*, 16(6): 760–766 (in Chinese with English abstract).
- Stoffel, M., Tiranti, D., Huggel, C., 2014. Climate Change Impacts on Mass Movements—Case Studies from the European Alps. *Science of the Total Environment*, 493: 1255–1266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.102>
- Sun, H. L., Li, W. H., Zhang, M. T., et al., 1986. Comprehensive Scientific Expedition to the Qinghai-Tibet Plateau. *Resources Science*, (3): 22–30 (in Chinese).
- Tang, M. G., Liu, X. X., Li, G., et al., 2023. Mechanism of Ice Avalanche in the Sedongpu Sag, Yarlung Zangbo River Basin—An Experimental Study. *Earth Science Frontiers*, 30(4): 405–417 (in Chinese with English abstract).
- Tong, K., Su, F. G., Yang, D. Q., et al., 2014. Tibetan Plateau Precipitation as Depicted by Gauge Observations, Reanalyses and Satellite Retrievals. *International Journal of Climatology*, 34(2): 265–285. <https://doi.org/10.1002/joc.3682>
- Tong, L. Q., Tu, J. N., Pei, L. X., et al., 2018. Preliminary Discussion of the Frequently Debris Flow Events in Sedongpu Basin at Gyalaperi Peak, Yarlung Zangbo River. *Journal of Engineering Geology*, 26(6): 1552–1561 (in Chinese with English abstract).
- Ueno, K., Toyotsu, K., Bertolani, L., et al., 2008. Stepwise Onset of Monsoon Weather Observed in the Nepal Himalaya. *Monthly Weather Review*, 136(7): 2507–2522. <https://doi.org/10.1175/2007mwr2298.1>
- Veh, G., Wang, B. G., Zirzow, A., et al., 2025. Progressively Smaller Glacier Lake Outburst Floods Despite Worldwide Growth in Lake Area. *Nature Water*, 3(3): 271–283. <https://doi.org/10.1038/s44221-025-00388-w>
- 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. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32(3): 51–60 (in Chinese with English abstract).
- Wan, J. W., Gao, H. Y., Gao, Y., et al., 2024. 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. *The Chinese*

- Journal of Geological Hazard and Control*, 35(6): 24–32 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Li, S. Y., Zhang, T. W., et al., 2019. Experimental Study on Mechanical Characteristics and Fracture Patterns of Unfrozen/Freezing Saturated Coal and Sandstone. *Materials*, 12(6): 992. <https://doi.org/10.3390/ma12060992>
- Wang, E. Q., Burchfiel, B. C., Ji, J. Q., 2001. Estimation of Cenozoic Crustal Shortening in the Eastern Himalayan Syntaxis and Its Geological Basis. *Scientia Sinica (Terrae)*, 31(1): 1–9 (in Chinese).
- Wang, Q. K., Li, B., Xing, A. G., et al., 2025. A 15-Year History of Repeated Ice-Rock Avalanches from a Single Source Area in the Qinghai-Tibet Plateau. *Landslides*, 22(1): 235–253. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02355-0>
- Wang, W. C., Yao, T. D., Yang, X. X., 2011. Variations of Glacial Lakes and Glaciers in the Boshula Mountain Range, Southeast Tibet, from the 1970s to 2009. *Annals of Glaciology*, 52(58): 9–17. <https://doi.org/10.3189/172756411797252347>
- Wang, W. Y., Li, J., Zhao, Y. D., 2020. Study on the Relationship between Rainfall Frequency and Mudslide Outbreak Frequency: Taking the Mudslides in Zhamunonggou, Tibet, on August 2015 as an Example. *Journal of Gansu Sciences*, 32(1): 60–65 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Nie, Y., Zhang, H. Y., et al., 2024. A Generic Framework for Glacial Lake Outburst Flood Investigation: A Case Study of Zalai Tsho, Southeast Tibet. *CATENA*, 234: 107614. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107614>
- Wang, X., Guo, X. Y., Yang, C. D., et al., 2020. Glacial Lake Inventory of High-Mountain Asia in 1990 and 2018 Derived from Landsat Images. *Earth System Science Data*, 12(3): 2169–2182. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2169-2020>
- Wang, Y., Wang, Y. J., Zhang, P. Z., et al., 2022. Cenozoic Tectonic Evolution of Regional Fault Systems in the Southeastern Tibetan Plateau. *Scientia Sinica (Terrae)*, 52(5): 777–802 (in Chinese).
- Wang, Y. F., Qian, J. Z., Cheng, Q. G., et al., 2024. Research on Spatial Distribution Characteristics of Major Landslides Hazards in the Himalayas. *China Railway*, (10): 10–20 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. Q., Duan, A. M., Yang, S., et al., 2017. Atmospheric Moisture Budget and Its Regulation on the Variability of Summer Precipitation over the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(2): 614–630. <https://doi.org/10.1002/2016JD025515>
- Wen, B. P., Wang, S. J., Wang, E. Z., et al., 2004. Characteristics of Rapid Giant Landslides in China. *Landslides*, 1(4): 247–261. <https://doi.org/10.1007/s10346-004-0022-4>
- Wen, H., Wang, D., Wang, S. R., et al., 2021. Key Predisposing Factors and Susceptibility Mapping of Snow Avalanche in Parlung-Tsangpo Catchment, Southeast Tibetan Plateau. *Journal of Engineering Geology*, 29(2): 404–415 (in Chinese with English abstract).
- Whipple, K. X., Kirby, E., Brocklehurst, S. H., 1999. Geomorphic Limits to Climate-Induced Increases in Topographic Relief. *Nature*, 401(6748): 39–43. <https://doi.org/10.1038/43375>
- Willett, S. D., Brandon, M. T., 2002. On Steady States in Mountain Belts. *Geology*, 30(2): 175. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)0300175:ossimb>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)0300175:ossimb>2.0.co;2)
- Wolf, S. G., Huismans, R. S., Braun, J., et al., 2022. Topography of Mountain Belts Controlled by Rheology and Surface Processes. *Nature*, 606(7914): 516–521. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04700-6>
- Wu, G. J., Yao, T. D., Wang, W. C., et al., 2019. Glacial Hazards on Tibetan Plateau and Surrounding Alpines. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34(11): 1285–1292 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. H., Zhang, Y. Q., Hu, D. G., 2014. Neotectonics, Active Tectonics and Earthquake Geology. *Geological Bulletin of China*, 33(4): 391–402 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G. M., Yu, G. Q., 2024. Study on the Developmental Patterns of Glacial Debris Flow Disasters in the Guxiang-Tongmai Section. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 14(7): 308–310 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. P., Qu, X., 2023. Study on Geological Hazards and Development Characteristics of Glaciers in Laigu Glacier Group Area. *Forestry Construction*, (3): 58–63 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. D., 2020. Climate Change and Atmospheric Moisture Circulation over the Tibetan Plateau. China Meteorological Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, Z. Q., Cai, Z. H., Zhang, Z. M., et al., 2008. Tectonics and Fabric Kinematics of the Namche Barwa Terrane, Eastern Himalayan Syntaxis. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1463–1476 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, H. B., et al., 2011. On the Tectonics of the India-Asia Collision. *Acta Geologica Sini-*

- ca, 85(1): 1–33 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. H., Chen, X. Q., Huang, Y., et al., 2021. Study on the Development Characteristics and Formation Mechanism of the Jiao Bunong Giant Ancient Landslide in Yajiang Suture Zone. *Railway Standard Design*, 65(3): 34–40 (in Chinese with English abstract).
- Yang, D. H., Fu, W., Chang, S. P., et al., 2020. Formation Mechanism and Development Trend of Pei-Long-Gong-Zhi Debris Flow in Southeastern Tibet. *Railway Standard Design*, 64(7): 33–38 (in Chinese with English abstract).
- Yang, K., Wu, H., Qin, J., et al., 2014. Recent Climate Changes over the Tibetan Plateau and Their Impacts on Energy and Water Cycle: A Review. *Global and Planetary Change*, 112: 79–91. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.12.001>
- Yao, T. D., Bolch, T., Chen, D. L., et al., 2022. The Imbalance of the Asian Water Tower. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(10): 618–632. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00299-4>
- Yao, T. D., Thompson, L., Yang, W., et al., 2012. Different Glacier Status with Atmospheric Circulations in Tibetan Plateau and Surroundings. *Nature Climate Change*, 2(9): 663–667. <https://doi.org/10.1038/nclimate1580>
- Yao, T. D., Zhang, T. G., Wang, W. C., et al., 2025. Glacial Lake Change and Outburst Risk Assessment on the Asian Water Tower. *Advances in Earth Science*, 40(3): 221–227 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211–280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Yin, Y. P., 2000a. Characteristics and Disaster Mitigation Study of the Yigong Large-Scale Landslide along the Bomi Expressway, Tibet. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 27(4): 8–11 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y. P., 2000b. Overview of the Giant High-Speed Yigong Landslide. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 11(2): 100 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y. P., Gao, S. H., 2024. Research on High-Altitude and Long-Runout Rockslides: Review and Prospects. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 35(1): 1–18 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y. P., Li, B., Zhang, T. T., et al., 2021. The February 7 of 2021 Glacier-Rock Avalanche and the Outburst Flooding Disaster Chain in Chamoli, India. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32(3): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Yu, G. A., Lu, J. Y., Li, Z. W., et al., 2022. Geomorphic Effects of Debris Flows in High Mountain Areas of the Parlung Zangbo Basin, Southeast Tibet under the Influence of Climate Change. *Acta Geographica Sinica*, 77(3): 619–634 (in Chinese with English abstract).
- Yu, G. A., Yue, P. S., Zhang, C. D., et al., 2024. River Hydrology Studies in Southeast Xizang: Progress and Challenges. *Chinese Science Bulletin*, 69(3): 394–413 (in Chinese).
- Yuan, G. X., Shang, Y. J., Yang, Z. F., 2010. Analysis of Rock Weathering Rate and Influencing Factors in Bomi Region, Southeast Tibet. *Journal of Engineering Geology*, 18(2): 191–196 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H., Guo, C. B., Wu, R. A., et al., 2023. Research Progress and Prospects of the Giant Yigong Long Run-out Landslide, Tibetan Plateau, China. *Geological Bulletin of China*, 42(10): 1757–1773 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Q. L., Yuan, G. X., Davies, T., et al., 2020.¹⁰Be Dating and Seismic Origin of Luanshibao Rock Avalanche in SE Tibetan Plateau and Implications on Litang Active Fault. *Landslides*, 17(5): 1091–1104. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01319-z>
- Zhai, Y. F., 2022. The Distribution and Scale and Outbreak Frequency Characteristics of Glacial Debris Flow in Southeast Tibet (Dissertation). Tibet University, Lhasa (in Chinese with English abstract).
- Zhan, H. L., Bai, L., Chen, Z. W., 2023. Source Parameters, Seismogenic Structures of the 1950 Medog-Zayu M_s8.6 Earthquake and Seismicity in the Surrounding Areas. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 54(1): 44–55 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. Q., Carrivick, J. L., Emmer, A., et al., 2024. Characteristics and Changes of Glacial Lakes and Outburst Floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(6): 447–462. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00554-w>
- Zhang, J. J., Liu, J. K., Gao, B., et al., 2018. Characteristics of Material Sources of Galongqu Glacial Debris Flow and the Influence to Zhamo Road. *Journal of Geomechanics*, 24(1): 106–115 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T. G., Wang, W. C., Gao, T. G., et al., 2021. Glacial Lake Outburst Floods on the High Mountain Asia: A Review. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(6): 1673–1692 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T. T., Li, B., Gao, Y., et al., 2023. Massive

- Glacier-Related Geohazard Chains and Dynamics Analysis at the Yarlung Zangbo River Downstream of South-eastern Tibetan Plateau. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(11): 426. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03423-w>
- Zhang, X. G., Yang, T. J., Chen, W., 2014. Development Characteristics and Prevention of the Sand-Sliding Slope in South-East Tibet. *Journal of Catastrophology*, 29(1): 47–51 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Liu, Y., Su, P. C., et al., 2023. Advances in the Study of Glacier Avalanches in Tibet. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 34(2): 132–145 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. N., Guo, C. B., Yang, Z. H., et al., 2025. Analysis of Deformation Characteristics and Influencing Factors of the Tange Ancient Landslide in the Upper Jinsha River Based on SBAS-InSAR Method. *Journal of Engineering Geology*, 33(1): 186–200 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Ren, S. S., Guo, C. B., et al., 2019. Research on Engineering Geology Related with Active Fault Zone. *Acta Geologica Sinica*, 93(4): 763–775 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, F. Y., Long, D., Li, X. D., et al., 2022. Rapid Glacier Mass Loss in the Southeastern Tibetan Plateau since the Year 2000 from Satellite Observations. *Remote Sensing of Environment*, 270: 112853. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112853>
- Zhao, X., Zhang, H. T., Zhao, Z. F., et al., 2020. Study on the Genesis of Rainfall-Glacier Mixed Type Debris Flow of Haibalo Gully in Northwest Yunnan on July 28, 2019. *Journal of Engineering Geology*, 28(6): 1339–1349 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. N., Li, B., Gao, Y., et al., 2021. Analysis on Deformation Characteristics of Geological Hazards in Ranwu Lake Estuary. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32(3): 25–32 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, G. X., Mergili, M., Emmer, A., et al., 2021. The 2020 Glacial Lake Outburst Flood at Jinwuco, Tibet: Causes, Impacts, and Implications for Hazard and Risk Assessment. *The Cryosphere*, 15(7): 3159–3180. <https://doi.org/10.5194/tc-15-3159-2021>
- Zheng, L. L., Jin, Z. M., Pan, G. T., et al., 2004. A Geological Comparison between the Eastern and Western Himalayan Syntaxes. *Earth Science*, 29(3): 269–277 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Xiao, W. J., Zhao, G. C., 2013. Introduction to Tectonics of China. *Gondwana Research*, 23(4): 1189–1206. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.10.001>
- Zhong, X., Zhao, D. J., Li, H. F., 2018. Development Characteristics and Hazard Assessment of Debris Flows in Kada Gully, Bomi County, Tibet. *Yangtze River*, 49(S2): 103–107 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, R. J., Ma, S. H., Cai, C. X., 1996. Late Quaternary Active Features of the Ganzi-Yushu Fault Zone. *Earthquake Research in China*, 12(3): 250–260 (in Chinese).
- Zhu, S. N., Yin, Y. P., Wang, M., et al., 2021. Instability Mechanism and Disaster Mitigation Measures of Long-Distance Landslide at High Location in Jinsha River Junction Zone: Case Study of Sela Landslide in Jinsha River, Tibet. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 43(4): 688–697 (in Chinese with English abstract).
- Zou, Q., Zhou, B., Yang, T., et al., 2024. Spatio-Temporal Differentiation Characteristics of Glacial Lake Outburst in the Himalayas. *Earth Science*, 49(11): 4047–4062 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 白永健, 倪化勇, 葛华, 2019. 青藏高原东南缘活动断裂地质灾害效应研究现状. *地质力学学报*, 25(6): 1116–1128.
- 蔡耀军, 杨启贵, 栾约生, 等, 2022. 2018年雅鲁藏布江米林县加拉堰塞湖考证. *工程地质学报*, 30(3): 784–793.
- 柴波, 陶阳阳, 杜娟, 等, 2020. 西藏聂拉木县嘉龙湖冰湖溃决型泥石流危险性评价. *地球科学*, 45(12): 4630–4639.
- 陈兰, 范宣梅, 熊俊麟, 等, 2023. 藏东南多依弄巴流域冰湖溃决危险性评价. *地质科技通报*, 42(2): 258–266.
- 陈龙, 余斌, 黄海, 等, 2021. 西藏天摩沟泥石流物源演变特征. *地质通报*, 40(12): 2089–2097.
- 陈国庆, 许强, 杨鑫, 等, 2025. 气候变化下高寒区裂隙岩石破裂机制及致灾模式. *地球科学*, 50(4): 1585–1598.
- 程尊兰, 田金昌, 张正波, 等, 2009. 藏东南冰湖溃决泥石流形成的气候因素与发展趋势. *地学前缘*, 16(6): 207–214.
- 崔鹏, 陈容, 向灵芝, 等, 2014. 气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析. *气候变化研究进展*, 10(2): 103–109.
- 崔圣华, 裴向军, 黄润秋, 2019. 大光包滑坡启动机制: 强震过程滑带非协调变形与岩体动力致损. *岩石力学与工程学报*, 38(2): 237–253.
- 邓起东, 程绍平, 马冀, 等, 2014. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势. *地球物理学报*, 57(7): 2025–2042.
- 丁林, 钟大赉, 2013. 印度与欧亚板块碰撞以来东喜马拉雅构造结的演化. *地质科学*, 48(2): 317–333.
- 董汉文, 许志琴, 曹汇, 等, 2018. 东喜马拉雅构造结东、西边界断裂对比及其构造演化过程. *地球科学*, 43(4):

- 933—951.
- 高波, 张佳佳, 王军朝, 等, 2019. 西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征. 水文地质工程地质, 46(5): 144—153.
- 高少华, 殷跃平, 李滨, 等, 2024. 雅鲁藏布江大峡谷则隆弄高位冰岩崩灾害链动力学特征. 工程地质学报, 32(3): 996—1009.
- 高杨, 李滨, 高浩源, 等, 2020. 高位远程滑坡冲击铲刮效应研究进展及问题. 地质力学学报, 26(4): 510—519.
- 郭长宝, 杜宇本, 佟元清, 等, 2016. 青藏高原东缘理塘乱石包高速远程滑坡发育特征与形成机理. 地质通报, 35(8): 1332—1345.
- 郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 等, 2024. 青藏高原东部活动构造带大型滑坡成灾背景与灾变机制. 地球科学, 49(12): 4635—4658.
- 侯伟鹏, 余国安, 岳蓬胜, 2023. 典型高山峡谷泥石流堆积扇发育过程及特征: 以藏东南帕隆藏布流域天摩沟为例. 山地学报, 41(4): 532—544.
- 胡明鉴, 程谦恭, 汪发武, 2009. 易贡远程高速滑坡形成原因试验探索. 岩石力学与工程学报, 28(1): 138—143.
- 黄海, 龚诚, 2024. 藏东南地区直白沟冰雪型地质灾害链时空演化特征. 地球科学, 49(10): 3784—3798.
- 黄润秋, 2007. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. 岩石力学与工程学报, 26(3): 433—454.
- 李豪, 刘双, 胡凯衡, 2023. 1979—2018年藏东南典型冰川泥石流流域极端气候事件分析. 高原气象, 42(6): 1518—1528.
- 李鸿儒, 白玲, 詹慧丽, 2021. 嘉黎断裂带活动性研究进展. 地球与行星物理理论评, 52(2): 182—193.
- 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. 中国地质灾害与防治学报, 32(3): 42—50.
- 李尧, 崔一飞, 李振洪, 等, 2022. 川藏交通廊道林波段冰川泥石流发育动态演化分析及监测预警方案. 地球科学, 47(6): 1969—1984.
- 李元灵, 王军朝, 陈龙, 等, 2018. 2016年帕隆藏布流域群发性泥石流的活动特征及成因分析. 水土保持研究, 25(6): 397—402.
- 李壮, 李滨, 高杨, 等, 2021. 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. 中国地质灾害与防治学报, 32(3): 33—41.
- 梁宁, 伍法权, 王云峰, 等, 2016. 大理深高地应力关山隧道围岩变形破坏分析. 岩土力学, 37(增刊2): 329—336.
- 梁馨月, 徐梦珍, 吕立群, 等, 2020. 基于地貌特征的青藏高原边缘泥石流沟分类. 地理学报, 75(7): 1373—1385.
- 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等, 2019. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑—碎屑流堵江灾害初步研究. 中国地质, 46(2): 219—234.
- 刘吉鑫, 郭长宝, 吴瑞安, 等, 2024. 西藏江达圭利大型深层滑坡蠕滑变形特征与稳定性分析. 地质通报, 43(10): 1855—1868.
- 刘建康, 程尊兰, 2015. 西藏古乡沟泥石流与气象条件的关系. 科学技术与工程, 15(9): 45—49, 55.
- 刘建康, 周路旭, 张佳佳, 等, 2021. 西藏嘉黎吉翁错冰湖溃决机制特征. 地质论评, 67(增刊1): 17—18.
- 刘伟, 2002. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析. 中国地质灾害与防治学报, 13(3): 9—18.
- 刘伟, 2006. 西藏典型冰湖溃决型泥石流的初步研究. 水文地质工程地质, 33(3): 88—92.
- 刘文, 王猛, 宋班, 等, 2022. 基于光学遥感技术的冰崩隐患遥感调查及链式结构研究: 以西藏自治区藏东南地区为例. 自然资源遥感, 34(1): 265—276.
- 刘旭平, 2023. 气候变化背景下雅鲁藏布江流域冻融侵蚀的时空变化研究(硕士学位论文). 昆明: 云南大学.
- 刘勇, 张文, 魏良帅, 2024. 雅鲁藏布江中游石冰川发育特征及潜在成灾机制分析. 西北地质, 57(1): 44—54.
- 龙飞, 龚诚, 黄海, 等, 2022. 藏东南直白沟冰崩型泥石流孕灾条件与动力特征. 水土保持通报, 42(6): 31—38, 46.
- 鲁安新, 邓晓峰, 赵尚学, 等, 2006. 2005年西藏波密古乡沟泥石流暴发成因分析. 冰川冻土, 28(6): 956—960.
- 吕儒仁, 李德基, 1989. 西藏波密冬茹弄巴的冰雪融水泥石流. 冰川冻土, 11(2): 148—160.
- 孟哲, 吕立群, 余国安, 等, 2022. 基于树木年代学的冰川型泥石流灾害历史重建方法: 以西藏天摩沟为例. 科学技术与工程, 22(32): 14124—14136.
- 年廷凯, 赵润东, 郑德凤, 等, 2024. 藏东南雅江流域冰—岩崩灾害链研究进展. 水利学报, 55(10): 1146—1162.
- 潘桂棠, 王立全, 尹福光, 等, 2022. 青藏高原形成演化研究回顾、进展与展望. 沉积与特提斯地质, 42(2): 151—175.
- 彭铭, 王开放, 张公鼎, 等, 2020. 堰塞坝溃坝模型实验研究综述. 工程地质学报, 28(5): 1007—1015.
- 曲伟, 刘昌军, 吕娟, 等, 2023. 冰川崩塌冰湖溃决引发的洪涝灾害调查及应对策略. 中国防汛抗旱, 33(1): 27—30.
- 施雅风, 杨宗辉, 谢自楚, 等, 1964. 西藏古乡地区的冰川泥石流. 科学通报, 9(6): 542—544.
- 宋敏红, 马耀明, 张宇, 等, 2011. 雅鲁藏布江流域气温变化特征及趋势分析. 气候与环境研究, 16(6): 760—766.
- 孙鸿烈, 李文华, 章铭陶, 等, 1986. 青藏高原综合科学考察. 资源科学, (3): 22—30.
- 汤明高, 刘听听, 李广, 等, 2023. 雅鲁藏布江色东普沟冰崩机理试验研究. 地学前缘, 30(4): 405—417.
- 童立强, 涂杰楠, 裴丽鑫, 等, 2018. 雅鲁藏布江加拉白垒峰色东普流域频繁发生碎屑流事件初步探讨. 工程地质学报, 26(6): 1552—1561.
- 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. 中国地质灾害与防治学报, 32(3): 51—60.
- 万佳威, 高浩源, 高杨, 等, 2024. 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. 中国地质灾害与防治学报, 35(6): 24—32.
- 王二七, B. C. Burchfiel, 季建清, 2001. 东喜马拉雅构造结新生代地壳缩短量的估算及其地质依据. 中国科学(D辑: 地球科学), 31(1): 1—9.
- 王伟宇, 李俊, 赵苑迪, 2020. 降雨频率与泥石流暴发频率关系研究: 以 2015 年 8 月西藏扎木弄沟泥石流为例. 甘肃科学学报, 32(1): 60—65.
- 王洋, 王岳军, 张培震, 等, 2022. 青藏高原东南缘断裂体系新生代构造演化. 中国科学: 地球科学, 52(5): 777—802.
- 王玉峰, 钱嘉贞, 程谦恭, 等, 2024. 喜马拉雅山区重大滑坡灾害空间分布特征研究. 中国铁路 (10): 10—20.
- 文洪, 王栋, 王生仁, 等, 2021. 藏东南帕隆藏布流域雪崩关键影响因素与易发性区划研究. 工程地质学报, 29(2): 404—415.
- 郭光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等, 2019. 青藏高原及周边地区的冰川灾害. 中国科学院院刊, 34(11): 1285—1292.
- 吴中海, 张岳桥, 胡道功, 2014. 新构造、活动构造与地震地质. 地质通报, 33(4): 391—402.
- 徐国森, 于国庆, 2024. 古乡—通麦段冰川泥石流灾害发育规律研究. 农业灾害研究, 14(7): 308—310.
- 徐卫平, 屈新, 2023. 来古冰川群地质灾害及发育特征研究. 林业建设, (3): 58—63.
- 徐祥德, 2020. 气候变化与青藏高原大气水分循环. 北京: 气象出版社.
- 许志琴, 蔡志慧, 张泽明, 等, 2008. 喜马拉雅东构造结: 南迦巴瓦构造及组构运动学. 岩石学报, 24(7): 1463—1476.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2011. 印度—亚洲碰撞大地构造. 地质学报, 85(1): 1—33.
- 杨德宏, 陈兴强, 黄勇, 等, 2021. 雅江缝合带角不弄巨型古滑坡发育特征及形成机制研究. 铁道标准设计, 65(3): 34—40.
- 杨德宏, 付伟, 常帅鹏, 等, 2020. 藏东南培龙贡支泥石流形成机理与发展趋势分析. 铁道标准设计, 64(7): 33—38.
- 姚檀栋, 张太刚, 王伟财, 等, 2025. 亚洲水塔冰湖变化与冰湖溃决灾害风险及应对. 地球科学进展, 40(3): 221—227.
- 殷跃平, 2000a. 西藏波密贡高速巨型滑坡特征及减灾研究. 水文地质工程地质, 27(4): 8—11.
- 殷跃平, 2000b. 西藏波密贡高速巨型滑坡概况. 中国地质灾害与防治学报, 11(2): 100.
- 殷跃平, 高少华, 2024. 高位远程地质灾害研究: 回顾与展望. 中国地质灾害与防治学报, 35(1): 1—18.
- 殷跃平, 李滨, 张田田, 等, 2021. 印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究. 中国地质灾害与防治学报, 32(3): 1—8.
- 余国安, 鲁建莹, 李志威, 等, 2022. 气候变化影响下藏东南帕隆藏布流域高山区泥石流的地貌效应. 地理学报, 77(3): 619—634.
- 余国安, 岳蓬胜, 张晨笛, 等, 2024. 藏东南地区的河流水文研究: 进展与挑战. 科学通报, 69(3): 394—413.
- 袁广祥, 尚彦军, 杨志法, 2010. 藏东南波密地区岩石风化速率及其影响因素分析. 工程地质学报, 18(2): 191—196.
- 袁浩, 郭长宝, 吴瑞安, 等, 2023. 西藏易贡高位远程滑坡研究进展与展望. 地质通报, 42(10): 1757—1773.
- 翟毅飞, 2022. 藏东南地区冰川泥石流分布规律与规模频率特征研究(硕士学位论文). 拉萨: 西藏大学.
- 詹慧丽, 白玲, 陈治文, 2023. 1950 年西藏墨脱—察隅 8.6 级地震震源参数、发震构造及周边地震活动性. 地球与行星物理论评(中英文), 54(1): 44—55.
- 张佳佳, 刘建康, 高波, 等, 2018. 藏东南嘎龙曲冰川泥石流的物源特征及其对扎墨公路的影响. 地质力学学报, 24(1): 106—115.
- 张太刚, 王伟财, 高坛光, 等, 2021. 亚洲高山区冰湖溃决洪水事件回顾. 冰川冻土, 43(6): 1673—1692.
- 张小刚, 杨天军, 陈伟, 2014. 藏东南溜砂坡的发育特征与防治. 灾害学, 29(1): 47—51.
- 张亚楠, 郭长宝, 杨志华, 等, 2025. 基于 SBAS-InSAR 的金沙江上游探戈古滑坡变形特征与影响因素分析. 工程地质学报, 33(1): 186—200.
- 张议芳, 刘阳, 苏鹏程, 等, 2023. 西藏地区冰崩灾害研究进展. 中国地质灾害与防治学报, 34(2): 132—145.
- 张永双, 任三绍, 郭长宝, 等, 2019. 活动断裂带工程地质研究. 地质学报, 93(4): 763—775.
- 赵鑫, 张海太, 赵志芳, 等, 2020. 滇西北海巴洛沟“7·28”降雨—冰川融水混合型泥石流成因研究. 工程地质学报, 28(6): 1339—1349.
- 赵志男, 李滨, 高杨, 等, 2021. 西藏然乌湖口高位地质灾害变形特征分析. 中国地质灾害与防治学报, 32(3): 25—32.
- 郑来林, 金振民, 潘桂棠, 等, 2004. 喜马拉雅造山带东、西构造结的地质特征与对比. 地球科学, 29(3): 269—277.
- 钟鑫, 赵德军, 黎厚富, 2018. 西藏波密县卡达沟泥石流发育特征及危险性评价. 人民长江, 49(增刊 2): 103—107.
- 周荣军, 马声浩, 蔡长星, 1996. 甘孜—玉树断裂带的晚第四纪活动特征. 中国地震, 12(3): 250—260.
- 朱赛楠, 殷跃平, 王猛, 等, 2021. 金沙江结合带高位远程滑坡失稳机理及减灾对策研究: 以金沙江色拉滑坡为例. 岩土工程学报, 43(4): 688—697.
- 邹强, 周斌, 杨涛, 等, 2024. 喜马拉雅高海拔山区冰湖溃决时空分异特征. 地球科学, 49(11): 4047—4062.