

# 内外动力耦合作用下雅鲁藏布江中游崩滑灾害分布规律

陈梅<sup>1</sup>, 林棋文<sup>1,2\*</sup>, 杨虎锋<sup>1</sup>, 宋章<sup>3</sup>, 罗肖<sup>3</sup>, 崔浩文<sup>3</sup>, 程谦恭<sup>1</sup>, 王玉峰<sup>1</sup>

1. 西南交通大学地质工程系, 四川成都 611756
2. 宜宾西南交通大学研究院, 四川宜宾 644000
3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031

**摘要:** 雅鲁藏布江中游独特的区域地质环境与气候条件孕育了广泛的崩滑灾害, 为研究内外动力耦合作用下地表崩滑响应提供了天然良好的实验室。本研究通过遥感解译和野外调查, 识别贡嘎-林芝雅江河段滑坡 483 处, 近岸重点崩塌 26 处和变形体 18 处, 分析揭示内外动力耦合作用下崩滑灾害分区分带规律: 崩滑灾害沿桑日-朗县段密集发育, 该段与构造活动密切相关; 崩滑灾害主要分布在季节冻土区; 滑坡集中在加查-朗县、贡嘎-桑日的千枚岩等软岩中, 其次是里龙-林芝的片麻岩等地层, 崩塌集中在桑日-里龙的花岗闪长岩类中; 贡嘎-桑日段宽谷地形低缓, 小规模滑坡更为发育。此外, 加查-朗县沿岸连续分布几处大规模滑坡与河流凹岸侵蚀有关。灾害分布体现了构造对灾害密度、气候对灾害孕育、岩性对灾害类型、地形地貌对灾害规模的主控作用。

**关键词:** 崩滑灾害; 雅鲁藏布江中游; 内外动力耦合致灾; 灾害分区分带规律

中图分类号: P642 收稿日期: 2025-09-15

## Distribution of Rockfalls and Rockslides in Middle Zone of Yarlung Zangbo River under the Coupling Effects of Endogenic and Exogenic Geological Processes

Chen Mei<sup>1</sup>, Lin Qiwen<sup>1,2\*</sup>, Yang Hufeng<sup>1</sup>, Song Zhang<sup>3</sup>, Luo Xiao<sup>3</sup>, Cui Haowen<sup>3</sup>,  
Cheng Qiangong<sup>1</sup>, Wang Yufeng<sup>1</sup>

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (42577233; U2244229; 42207203); 宜宾西南交通大学研究院博士后补助经费项目 (42207203); 中央高校基本科研业务经费 (2682024CX076)

**作者简介:** 陈梅 (2000-), 女, 博士研究生, 主要从事地质灾害机理研究. ORCID: 0009-0007-1010-3555. E-mail: chenmei@my.swjtu.edu.cn

**\*通讯作者:** 林棋文 (1992-), 男, 副研究员, 主要从事高速远程滑坡动力学机理研究. ORCID: 0000-0002-4610-3684. E-mail: linqiwen@my.swjtu.edu.cn

1. Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China

2. Yibin Institute of Southwest Jiaotong University, Yibing, 644000, Sichuan, China

3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China

**Abstract:** The unique regional geological environment and climatic conditions of the middle reaches of the Yarlung Zangbo River (YZR) have fostered widespread rockfall and rockslide hazards. This area serves as a natural laboratory for studying land surface response under coupled endogenic and exogenic geological processes. This study identified 483 rockslides, 26 key nearshore rockfalls, and 18 slope deformation masses in the Konggar-Nyingchi segment of YZR through remote sensing interpretation and field surveys. Analysis revealed zonal patterns of disaster distribution influenced by coupled endogenic and exogenic geological processes. Disasters are densely distributed along the Sangri-Nang County segment, and this area is closely related to tectonic activity. Disasters are mainly distributed in seasonal permafrost areas. Rockslides predominantly occur in soft rock formations like phyllite in Gyaca-Nang County and Konggar-Sangri, followed by gneiss strata in Lilong-Nyingchi. Rockfalls mainly occur in hard rock formations of granite-pegmatite in Sangri-Lilong. Small-scale rockslides are more developed in Konggar-Sangri wide valley segment, where the terrain is relatively low and gentle. Additionally, several continuous large-scale rockslides along the Gyaca-Nang County riverbank are associated with concave bank erosion of the river. Disaster distribution patterns reflect the dominant role of tectonic activity over disaster density, lithology over disaster types, climatic conditions over disaster formation processes, and topography-geomorphology over disaster scale.

**Key words:** rockfall and rockslide hazards; Yarlung Zangbo River midstream; disaster driving by the coupling of endogenic and exogenic geological processes; zonal distribution of disasters

## 0 引言

崩塌滑坡（此处统称崩滑）是地表岩石圈常见的物质运移过程，对全球山区居民安全与地区发展构成长期、顽固性威胁（黄润秋，2007；Petley, 2012；Casagli et al., 2023）。崩滑的孕育演化受控于构造-地貌-气候等多因素、多时空尺度耦合作用（Valagussa et al., 2019；高云建等，2020；Chigira et al., 2022；Pánek et al., 2024；唐辉明，2025；王玉峰等，2025），涉及地球内外动力耦合作用、地球系统多圈层（包括岩石圈、水圈、大气圈、生物圈等）之间的复杂互馈过程，表现出强烈的集群、级联特征（彭建兵等，2004，2023；兰恒星等，2022；

王岩等, 2024; 刘静等, 2025; Yanites et al., 2025)。全球变暖背景下, 冰川退缩、冻土退化、极端天气频发, 导致世界范围内山区岩土体稳定性普遍下降, 进而加剧艰险山区崩滑灾害的风险, 这一趋势已引发学界广泛关注(姚檀栋等, 2019; Stoffel et al., 2024; Pfluger et al., 2025)。

雅鲁藏布江(简称雅江)是西藏第一大河, 其中拉萨-林芝的中游地区是西藏经济最繁荣地带, 连接拉萨、山南、米林、林芝等重要城市, 同时作为进藏的重要通道之一, 加之蕴含丰富的水能资源, 雅江中游河段人类活动日益密集。受新生代以来印度-欧亚板块强烈碰撞导致的构造变形和地貌隆升, 以及河流侵蚀、人类工程扰动等内外动力作用, 雅江中游崩滑灾害十分普遍, 成为严重制约当地民生福祉和经济发展的不利因素。近年来, 伴随雅江中游地区重大交通工程和梯级水电开发不断规划施工, 这一区域正在经历前所未有的人类工程扰动。在气候暖湿化进程加速与极端气候事件愈发频繁的背景下, 崩滑灾害对重大工程建设运营和人民生产生活的影 响将越来越严峻(姚檀栋等, 2019; Stoffel et al., 2024)。因此, 对该区域开展深入的崩滑灾害发育分布规律研究将对区域性防灾减灾具有重要意义。

雅江中游崩滑灾害发育特征, 过去几年来前人已开展了部分研究并取得了一定的认识。吴瑞安等(2017)通过遥感解译对加查-朗县段地质灾害进行了识别与发育特征分析, 指出灾害发育受控于活动断裂与区域地貌; 王瑞琪等(2019)基于精细 DEM 建立了加查-朗县段崩滑灾害数据库, 分析了岩性、地形地貌、地质构造和岩体结构对灾害发育的重要影响; 刘勇(2021)针对贡嘎-加查段雅江流域, 分析了内外动力耦合作用下灾害的类型、发育规律与形成机制的研究; Zhao and Su(2025)首次分析了整个雅江流域滑坡灾害空间分布特征, 初步总结出与构造单元、高程高差、岩性、气候等因素直接相关的灾害分布模式。前人研究多局限于雅江局部地区或典型灾害点, 缺乏系统性的灾害评估, 而针对雅江全流域的研究关注于滑坡灾害整体性分布特征, 忽视了不同区域、特殊的地质条件带来的灾害分异特性。在前人研究基础上, 本文针对贡嘎-林芝的雅江中游河段, 开展了差异性内外动力作用下地表崩滑灾害发育分布规律的研究, 揭示了构造活动、气候条件、地层岩性和地形地貌等因素协同控制的灾害分区分带规律。

## 1 区域工程地质概况

研究区地处青藏高原藏南谷地, 包括贡嘎-林芝的雅江主干沿岸 20 km 范围内的区域, 在大地构造上穿越了 3 个构造单元——北侧的拉萨地体、南侧的喜马拉雅构造带和夹持于

二者之间的雅鲁藏布江缝合带（图 1）。雅鲁藏布江缝合带基本沿雅江河谷展布，缝合带及其邻区的构造演化史复杂，以冈瓦纳古陆裂离、亚洲大陆向南增生的多阶段发展为背景。约 40 Ma 前后，随着新特提斯洋消亡，欧亚板块和印度板块碰撞、闭合，雅鲁藏布江缝合带最终形成，也标志着现今青藏高原大体的形成与高原整体性隆升序幕的开始（孙鸿烈，1996）。此后印度板块持续挤压导致高原渐次隆起，雅鲁藏布江缝合带及其周缘也经历了活跃的地壳运动（图 1）。研究区内断裂构造发育，主要包括近东西向、规模宏大的雅鲁藏布江断裂，分隔拉萨地体与雅鲁藏布江缝合带，断裂面总体倾向南，主要表现为逆冲属性，其次为近南北向的桑日-错那断裂带，长约 220 km，东西宽约 30-40 km（图 1）。活跃的地壳运动背景下，研究区内岩浆岩、沉积岩和变质岩均有分布。

高原隆起影响大气环流和太阳辐射，对区域气候格局产生了深远影响。雅江上游深处高原腹地，气候干旱，植被稀疏，寒冻风化显著。下游受印度洋暖湿气流影响，降雨显著增加，植被茂密，冰川发育，形成独特的气候和植被垂向分带特点。板块运动驱动的内动力，与大气、水文等外动力加剧的地表侵蚀过程，耦合塑造了研究区独特的地貌格局，自西向东呈现明显不同的地形地貌单元（图 2），以贡嘎-山南的高原宽谷地貌、桑珠岭-加查的高山峡谷地貌、加查-朗县的山原湖盆地貌、米林-林芝的高山河谷地貌为典型（铁道部第一勘测设计院等，1999）。

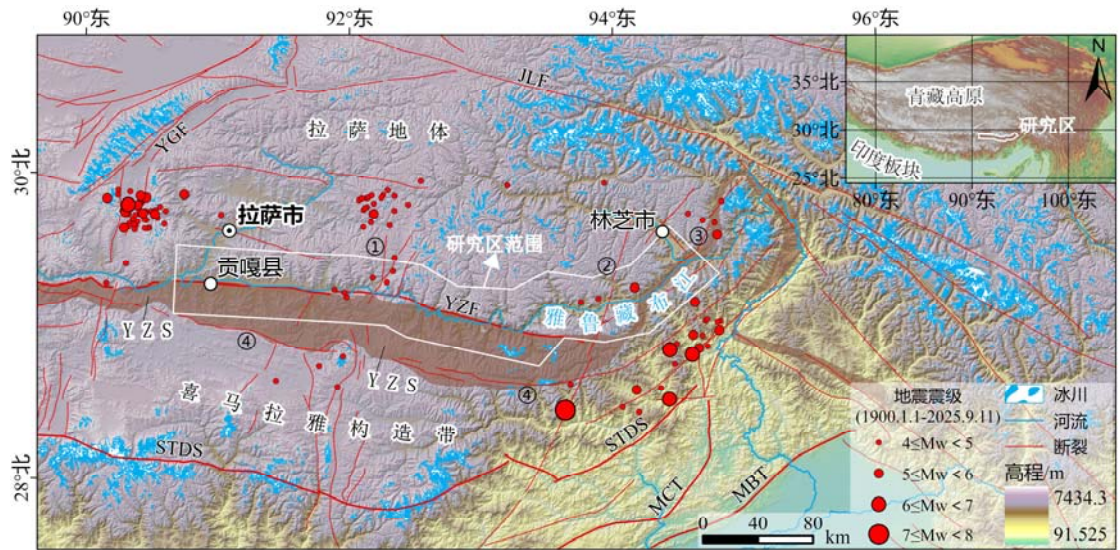


图 1 研究区地质背景（历史地震点数据下载自 USGS，断裂数据源自 Wu et al., 2024）

Fig.1 Geological setting of the study area. The historical earthquake data were from the USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>), and the active fault data were derived from Wu et al. (2024).  
YZS-雅鲁藏布江缝合带; MBT-主边界断裂; MCT-主中央断裂; STDS-藏南拆离系; YZF-雅鲁藏布江断裂; JLF-嘉黎断裂; YGF-亚东-谷露断裂; ①桑日-错那断裂; ②里龙断裂; ③米林断裂; ④札达-拉孜-邦多江断裂

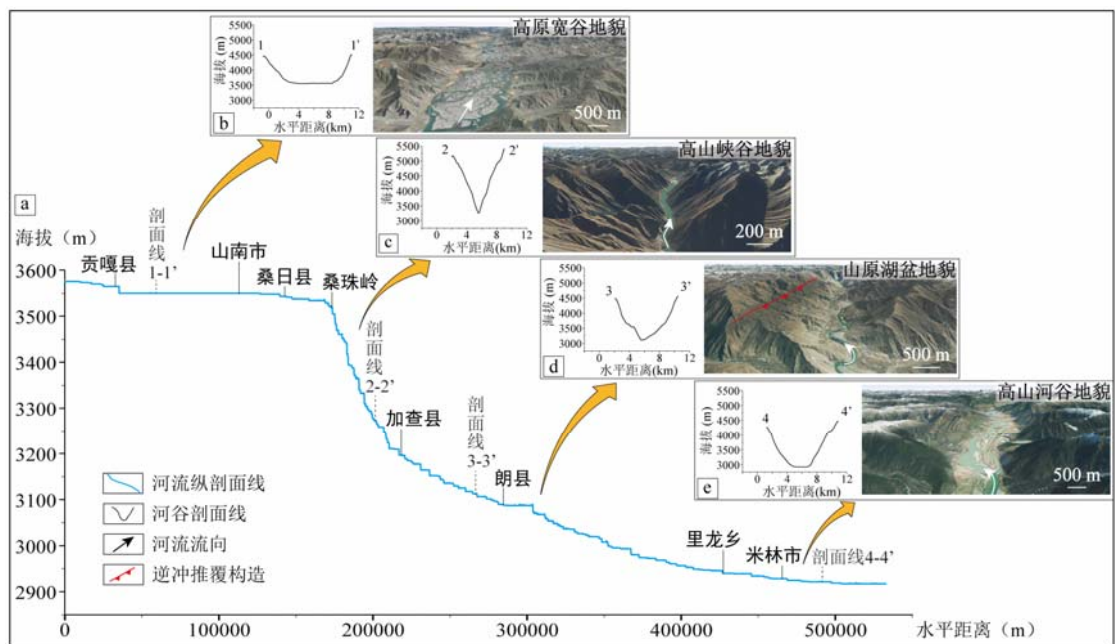


图 2 雅鲁藏布江纵剖面图 (a) 和河谷地貌转变 (b-e)

Fig.2 (a) Vertical profile of the Yalu Zangbo River, and (b-e) river valley geomorphology transformation.

## 2 崩滑灾害识别与类型划分

本研究主要借助多源多期遥感图像解译，结合实地调查和历史资料记载，对贡嘎-林芝的雅江沿岸 20 km 范围内区域进行崩滑灾害的识别与圈定。遥感图像源自“吉林一号”卫星

和北京系列卫星，固有分辨率 0.5-3.2 米，同时结合谷歌地球影像数据。灾害类型以滑坡为主，也包括部分崩塌和斜坡变形体，灾害类型划分主要依据失稳模式和运动特征（Hung et al., 2014）。崩塌为块体自陡倾破裂面突然分离、快速坠落的过程，落至地面伴随跳跃、翻滚运动，最后休止堆积在坡脚附近。崩塌一般发生在硬质岩中，以陡倾的源区结构面和坡脚的倒石堆为标志性特征（图 3a）。考虑到崩塌的普遍性与全区域识别的难度较大，本研究仅圈定了雅江近岸威胁性较大的高位崩塌灾害。滑坡为不稳定岩土体沿滑面整体向下滑移的过程，滑坡形态各异，但一般包括源区后壁、滑动周界、滑带、前缘堆积体等要素（图 3b-f）。本研究重点关注较大型的滑坡，经统计，识别出的滑坡绝大多数面积在 10000 m<sup>2</sup> 以上，多为古滑坡，从浅表层滑移失稳到深层基岩滑坡均有出现。其中不乏高速远程灾害事件（图 3c），方量超过 1×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>，堵塞雅江，对上下游河流地貌演化产生了深远影响。不稳定岩土体在重力作用下累积变形，但并未发生整体性失稳的现象，称为变形体，变形体坡脚仍然可见较完整的基岩出露，暗示滑面尚未完全贯通（图 3g）。本研究重点关注雅江沿岸具有潜在工程影响的重大斜坡变形体灾害。

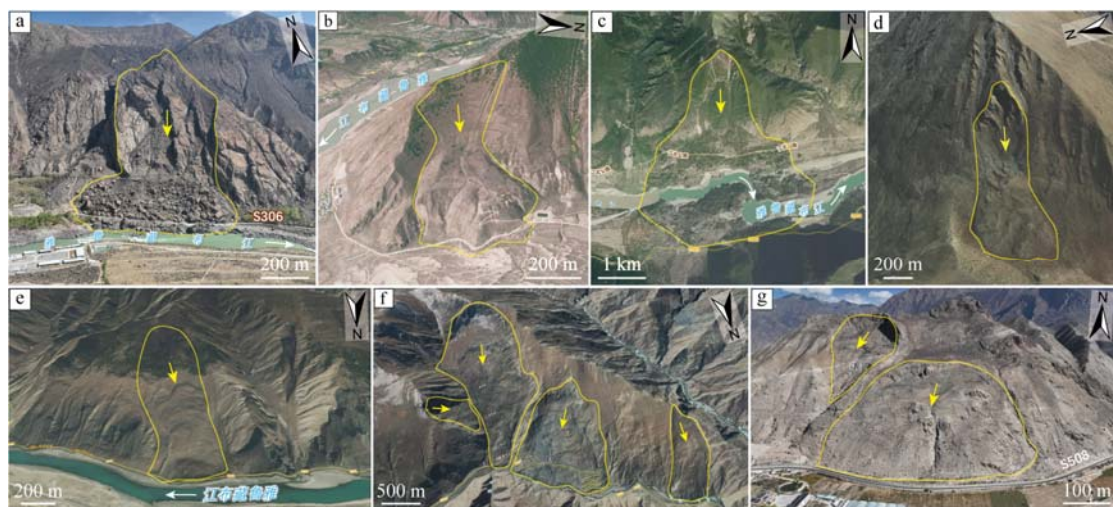


图 3 研究区典型崩塌（a）、滑坡（b-f）和变形体（g）（黄色闭合实线-灾害周界，黄色箭头-失稳方向）  
Fig.3 Typical examples of (a) rockfalls, (b-f) rockslides and (g) slope deformation masses in the study area. Solid yellow closed lines indicate the disaster perimeter, and yellow arrows indicate the instability direction.

### 3 崩滑灾害发育分布规律

贡嘎-林芝的雅江河段全长超过 500 km，沿线穿越 2 种区域气候类别、4 种主要地貌单元、多种地层岩类。经人工圈定与多次校核，共计识别典型滑坡灾害 483 处，雅江沿岸高位崩塌和大型斜坡变形体灾害各 26、18 处（图 4）。在活跃的地壳运动、强烈的河流侵蚀、显

著的气候差异等内外动力耦合作用下，沿线崩滑灾害呈现明显的分区分带特征，反映了多因素复杂控制下的灾害孕育过程。因此，依据岩性、地貌特征，将研究区分为 5 个区段，即贡嘎-桑日段、桑日-加查段、加查-朗县段、朗县-里龙段和里龙-林芝段（图 4），分段论述构造活动、气候条件、地层岩性、地形地貌协同控制下崩滑的发育分布规律。

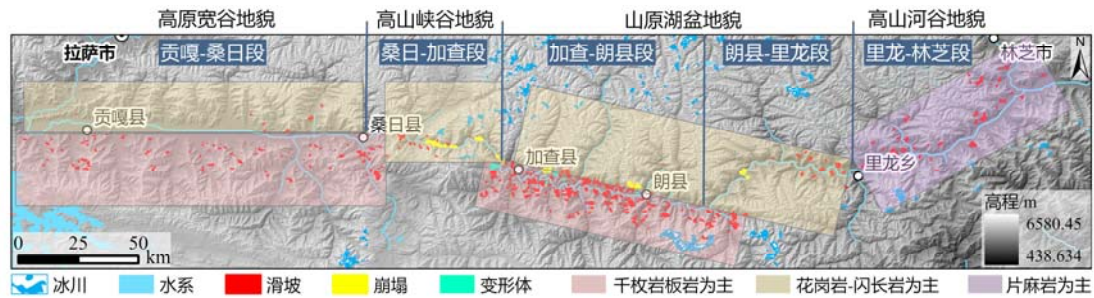


图 4 研究区崩滑灾害分布与分段地貌、岩性特征

Fig.4 Disaster distribution, geomorphology and lithology characteristics in the study area.

### 3.1 构造活动控制

构造活动是崩滑发育的重要内动力驱动，研究区整体活跃的地壳运动奠定了崩滑普遍发育的总基调。构造活动一方面导致岩体破碎变形，降低斜坡自身稳定性，另一方面带来地面振动，是斜坡失稳的重要诱发因素之一。因此，断裂带附近往往可见崩滑灾害密集发育。在构造抬升活跃区域，崩滑作为一种高效的地表侵蚀营力，对山区地貌的塑造和演化起着重要作用（Korup et al., 2007; Lavé et al., 2023）。分析发现，研究区内存在两个主要的崩滑灾害高密度区域，位于桑日县以东和加查-朗县段区域，这两处均为较强的地壳活动区域所在（图 5）。桑日县以东经过桑日-错那断裂带区域，该区段构造抬升作用显著，伴随剧烈的河流下切，形成了山高谷深的“V”型峡谷地貌（图 2），高地应力卸荷作用下两侧高陡岸坡成为崩塌落石的密集成灾区域（图 5），沿岸形成连续的倒石堆裙带。而加查-朗县段正好位于雅鲁藏布江缝合带中心，区域内分布多条与雅鲁藏布江缝合带大致平行的大型伴生断裂，呈 NWW-SEE 走向横贯本段，强烈的构造挤压破坏下，该段滑坡、沿岸崩塌和变形体灾害均相当发育，灾害密集程度为研究区之最（图 4-5）。在加查-朗县段，YZF 南侧的千枚岩地层山体变形特征普遍，大规模变形体发育，北侧花岗岩、砾岩等硬质岩体中崩塌较发育（图 4-5）。

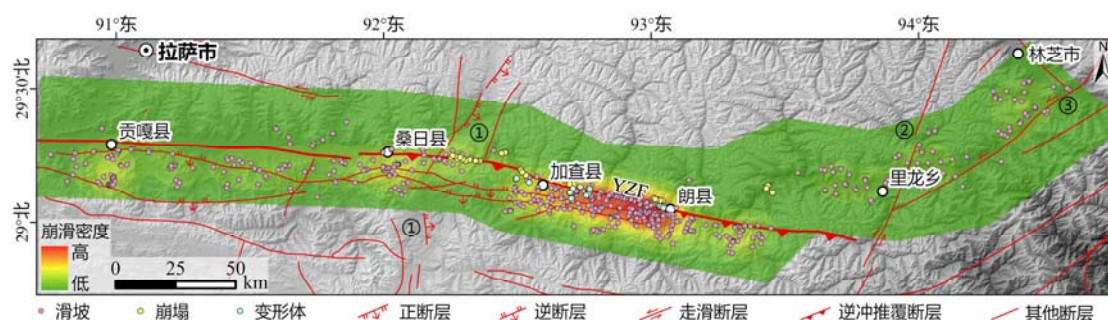


图 5 研究区崩滑灾害密度图与活动断裂分布

Fig.5 Density map of disasters and active fault distribution in the study area.

YZF-雅鲁藏布江断裂；①桑日-错那断裂；②里龙断裂；③米林断裂

### 3.2 气候条件控制

气候条件是控制崩滑发育的重要外动力因素。研究区内自西向东气候由干旱逐渐转向半湿润，气候差异带来地表侵蚀过程的差异。气候通过影响大气降雨、气温、冰川、植被等，控制岩体物理化学风化过程，进而控制斜坡岩体失稳过程。降雨是常见的崩滑诱发因素之一，降雨加强雨水入渗，加速岩体风化，促进斜坡失稳。研究区内降雨集中在东部，尤其是里龙-林芝段，而崩滑集中在中部，因而并未发现崩滑发育与降雨量在空间上的直接关系(图 6a)。这或许是因为高原寒冷环境下风化作用较弱，同时东部区域主要为片麻岩(图 4)，岩体性质较好，加之更高的植被覆盖率加强了表层固着，因此东部区域虽然整体滑坡密度不高，但大规模滑坡事件发育较多(图 6a)。注意到绝大多数崩滑发育在季节性冻土区域(图 6b-c)，在贡嘎-桑日段雅江右岸植被稀疏，斜坡表面可见大量缓慢演化的变形迹象，说明冻融循环劣化对斜坡失稳的重要促进作用。冰川和多年冻土区域崩滑发育较少(图 6c)，表明冰冻封存对岩土的保护作用。全球变暖背景下，冰川和冻土退化或将导致这些区域面临崩滑灾害加剧的风险，伴随冰崩、冰湖溃决，单次崩滑事件致灾能力将显著增强，造成更大范围的破坏和损失(姚檀栋等，2019；Pfluger et al., 2025)。

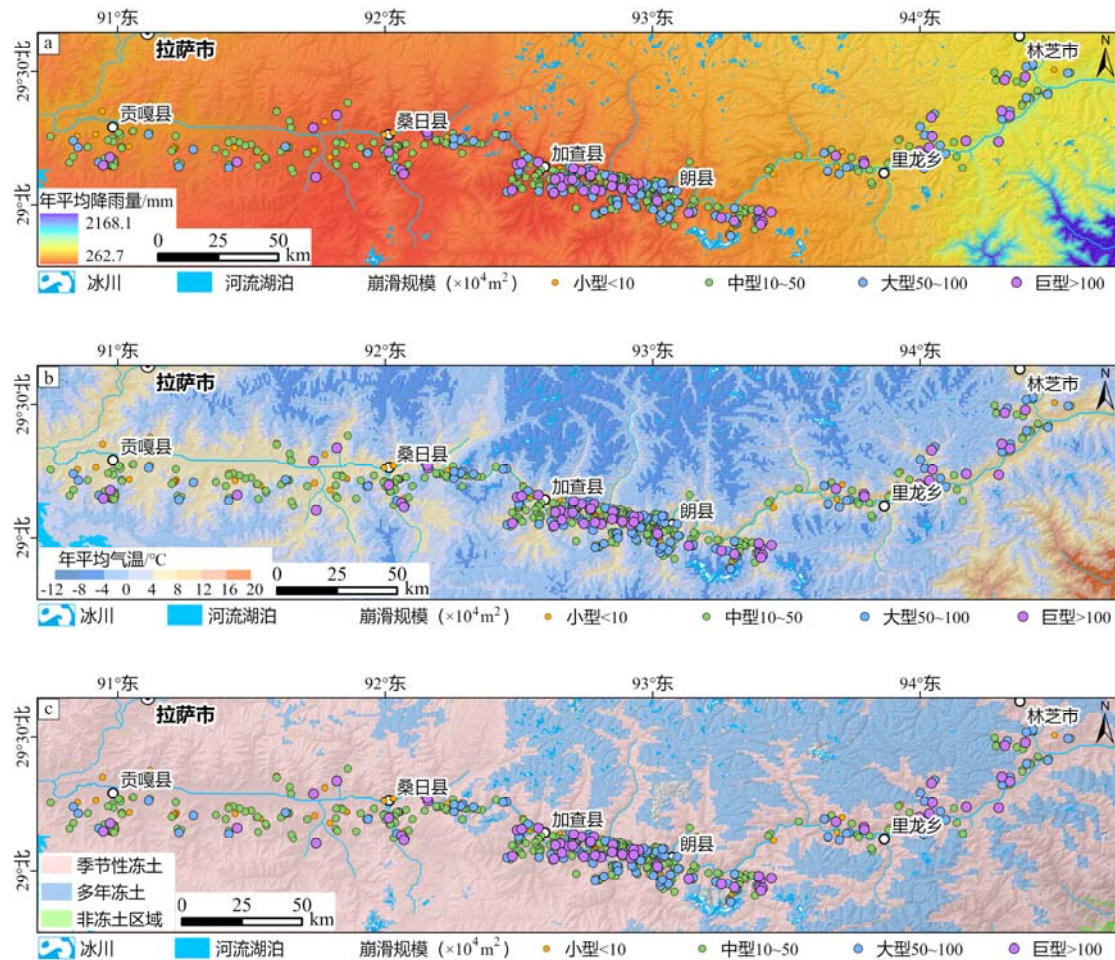


图 6 研究区年平均降雨量 (a)、年平均气温 (b)、冻土 (c) 与崩滑分布 (降雨和气温数据来源于国家青藏高原科学数据中心: <https://data.tpc.ac.cn/>, 冻土数据源自 Zou et al., 2017)

Fig.6 Mean annual precipitation (a), mean annual ground temperature (b), permafrost (c) and disaster distribution of the study area. The precipitation and temperature date were obtained from National Tibetan Plateau/ Third Pole Environment Data Center (<http://data.tpc.ac.cn>), and the permafrost data were derived from Zou et al. (2017).

### 3.3 地层岩性控制

岩性对灾害类型的控制作用显著, 进而控制了崩滑灾害的空间分布特征。调查发现, 研究区内滑坡集中在千枚岩板岩、构造混杂岩等性质较差的软岩地层中, 以加查-朗县段、贡嘎-桑日段的雅江右岸为代表, 其次是里龙-林芝的片麻岩等地层, 在桑日-里龙的花岗岩、闪长岩、砾岩等硬质岩体中也有一定数量的滑坡发育 (图 4 和图 7a)。崩塌则主要分布在桑日-里龙的花岗岩、闪长岩、片麻岩等硬质岩体中 (图 4 和图 7b)。另外, 研究区内发育两处高速远程崩滑事件 (其中一处如图 3c 所示), 均发生于砾岩、片麻岩这类硬质岩体中。岩性条件不仅控制了崩滑灾害的类型, 而且对灾害规模具有重要影响, 体现在软岩地层中小-中型规模 (面积小于  $5 \times 10^5 \text{ m}^2$ ) 的滑坡占比更高, 达 75%, 硬岩中这两类合占 61%, 硬岩中大型和巨型的滑坡 (面积超过  $5 \times 10^5 \text{ m}^2$ ) 占比明显更高, 为 39%, 对比软岩的 25% (图

7c)。相比软岩类，硬岩岩性条件更好，能抵抗一定程度的表层风化侵蚀，因而有更大的概率发生深层、大规模的斜坡失稳。

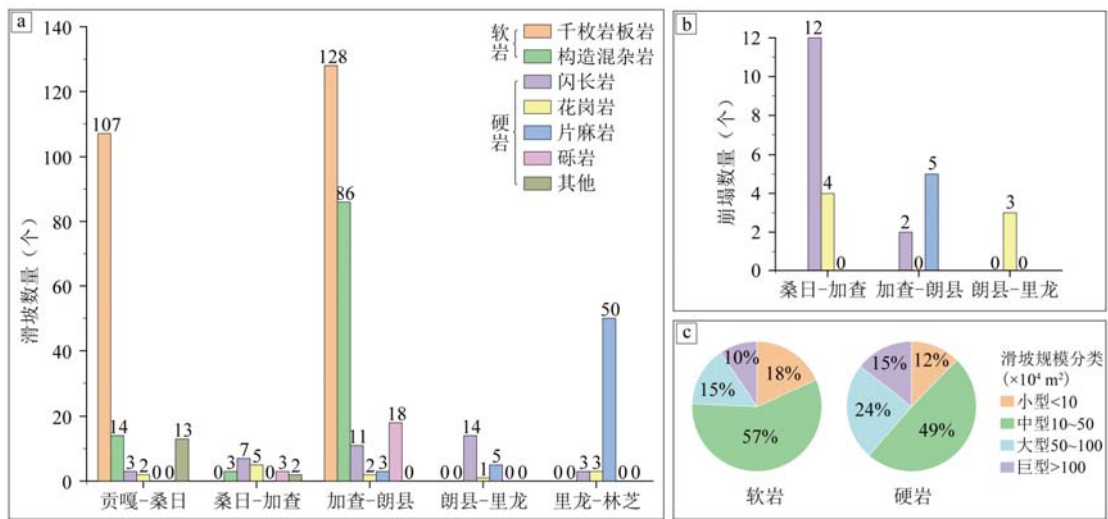


图 7 崩滑分布与岩性的关系

Fig.7 Relationship between disaster distribution and lithology.

### 3.4 地形地貌控制

崩滑发育特征与地形地貌密切相关。整体上，研究区内崩滑灾害分布在海拔 3000~5725 m 范围内，其中崩塌和变形体集中在较低海拔区域（3000~4250 m），这与本文仅识别了沿岸重点的崩塌和变形体灾害有关，滑坡在海拔 3700~4450 m 范围内分布最多，规模不等，但以小规模为主。在低海拔区域（3000~3700 m），崩滑规模较小，随海拔增加，崩滑规模也呈增加趋势，高海拔区域（4450~5250 m）也有大量小规模的灾害发生（图 8a、d）。研究区内崩滑分布的坡度范围较广，在 5~70° 之间，其中崩塌分布在更陡的区域，集中在 35~55° 范围内，滑坡和变形体相似，集中在 15~40° 的较缓区域（图 8b、c）。除个别异常值以外，注意到大规模滑坡往往发育在地形高陡位置（图 8a-d）。

不同区段河谷地形地貌的差异导致滑坡发育特征的局部差异。从贡嘎到林芝，滑坡平均海拔呈现减小趋势（图 8e），对应于河谷海拔的逐渐降低（图 2）。贡嘎-桑日段由于构造抬升作用较弱，河流主要表现出侧蚀作用，河谷整体开阔平缓，呈“U”型谷，河道多分叉，形成辫状河流（图 2b），较低的地形高差和坡度控制下，该段滑坡以小规模为主；桑日-林芝伴随坡度增加，较大规模滑坡占比同样增加（图 8f、g）。研究区内滑坡坡向发育多与雅江流向呈大角度相交或近平行（图 8h），这与滑坡主要发生在雅江两岸，或垂直于雅江主干的支流支沟两侧有关。

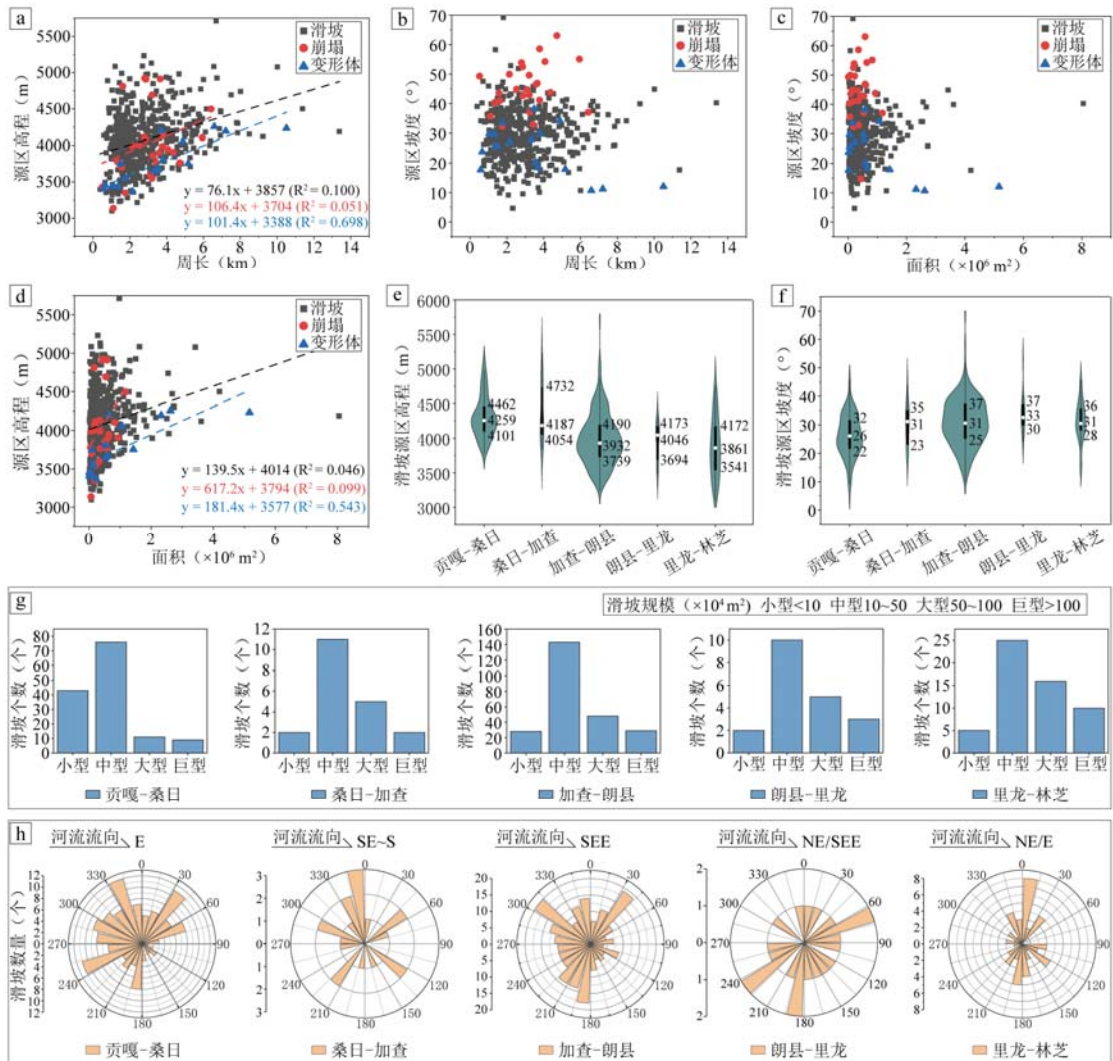


图8 崩滑发育特征与地形地貌的关系

Fig.8 Relationship between disaster development characteristics and landform.

### 3.5 内外动力耦合致灾过程

总的来说，构造活动和气候条件决定灾害的宏观分布格局，地层岩性和地形地貌进一步主导灾害的位置分布差异，各因素耦合作用，控制着灾害发育的空间密度、孕灾过程、类型分化和规模等级，塑造了空间上明显分异的灾害分布特征。多因素协同控灾的本质是内外动力耦合下的地表崩滑响应过程。构造活动是主要的内动力过程，气候影响以水为重要媒介的外动力过程，地层岩性和地形地貌在一定程度上均为前述内、外动力作用的产物。板块运动的内动力驱动断裂带内岩体发生破碎，强度衰减。密集发育的构造节理裂隙，为流水侵蚀和冻融等外动力作用提供运移通道，加速岩体强度弱化。构造应力和流体作用叠加，引起岩体内部应力重构或岩石性质转变，也反过来影响断层活动和岩体进一步变形。由此体现内、外动力的“耦合”效应。地表为适应内、外动力长期耦合作用，持续自我调整，崩滑作为一种突发性强、破坏性大的应力释放过程，随之逐步孕育、发展和演进（张波等，2025）。

以加查-朗县段为典型区域，该段为研究区内灾害最严重的区段之一，崩滑灾害发育尤其凸显了内外动力耦合致灾过程。该段内雅鲁藏布江逆冲主断裂傍江而行，并发育多条近平行的次生断裂（图 9a）。构造挤压使得断裂带内、河谷中下部的千枚岩等岩体普遍破碎，利于地表风化侵蚀过程。加查-朗县段内，河流侵蚀的外动力作用表现突出。雅江自桑日-加查段的高山峡谷流出后进入较平坦宽阔的加查-朗县段，河流主要侵蚀作用由下蚀转为侧蚀，形成宛转的曲流，穿梭于群山之间（图 9a）。在弯道环流作用下，凹岸侵蚀、凸岸堆积作用显著，凹岸在河流强烈侵蚀下，易形成更陡的坡体，应力集中与坡脚侵蚀，促进了千枚岩地层的应力演化与变形加速，为滑坡发育提供了充足的条件。沿岸连续发育几处大规模滑坡，均位于雅江右岸凹侧，滑坡源区高陡，滑动周界清晰，滑坡平台、下错陡坎、前缘鼓胀裂隙明显（图 9a-b）。其中利尼滑坡（图 9c）和古如朗杰滑坡（图 9d）为两处体积均超过  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$  的古滑坡体，滑体前缘在河流掏蚀作用下发生了次级失稳。滑体侵入河道造成挤压变形，甚者改变凹凸岸分布格局（图 9），进而影响河流地貌演化，体现滑坡与河流地貌的相互作用。滑坡源区岩体为千枚岩、板岩，夹变质石英砂岩，结构破碎，裂隙发育，在自重弯矩-临空卸荷-河流冲刷协同下，最终引发弯曲-拉裂变形破坏。此外，雅江右岸主要为阴坡，相比阳坡光照更少，水分蒸发更少，地表和地下水侵蚀也更强。因此，构造驱动的内动力，和河流侵蚀、地表径流和地下渗流等外动力耦合，共同导致了加查-朗县段雅江右岸凹岸大规模崩滑灾害的孕育与发生。

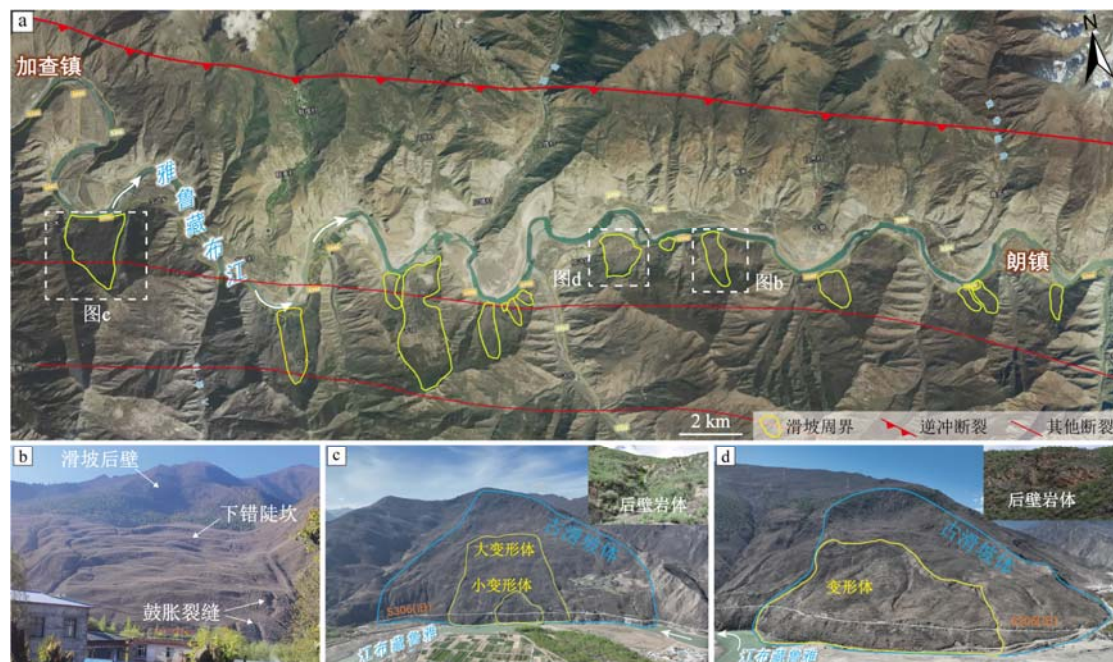


图 9 加查-朗县段沿岸大规模崩滑灾害分布 (a) 与特征 (b-d)

Fig.9 Distribution (a) and characteristics (b-d) of large-scale landslides along the riverbank of Gyaca-Nang County.

## 4 总结

通过历史资料收集, 遥感解译, 结合野外调查, 对贡嘎-林芝的雅江中游河段共计识别崩滑灾害 527 处, 其中滑坡 483 处, 沿岸重点崩塌 26 处和重力变形体 18 处。在活跃的地壳运动、强烈的河流侵蚀、显著的气候差异等内外动力耦合作用下, 贡嘎-林芝的雅江中游河段崩滑灾害呈现明显的分区分带特征, 体现了多因素协同控制的灾害孕育过程:

(1) 构造活动主控崩滑密度。研究区存在两个主要的与构造活动有关的崩滑高密度区域。其一, 桑日-加查段强烈的地壳抬升-河流侵蚀-高地应力卸荷, 导致活跃的崩塌落石, 沿岸形成连续的倒石堆裙带。其二, 加查-朗县段在强烈的构造挤压破坏下, 滑坡、崩塌、变形体灾害沿断裂带密集连片发育, 崩滑密度为研究区之最。

(2) 气候条件主控孕灾过程。绝大多数崩滑灾害发生在季节性冻土区域, 表明冻融循环劣化对诱发斜坡失稳的重要影响。里龙-林芝段还受强烈的降雨入渗和表层植被固着作用。

(3) 地层岩性主控崩滑类型。滑坡集中分布于加查-朗县段和贡嘎-桑日段的千枚岩、板岩、构造混杂岩等软岩地层中, 其次是里龙-林芝的片麻岩等地层。高位崩塌落石集中于桑日-里龙的花岗岩、闪长岩、片麻岩等硬质岩体中, 尤其是桑日-加查的深切峡谷段。

(4) 地形地貌主控崩滑规模。整体上, 小规模崩滑集中在低海拔、缓坡区域, 大规模滑坡往往分布在地形高陡处。分段上, 贡嘎-山南的宽谷段岸坡低缓, 小规模滑坡更为发育。此外, 加查-朗县段沿岸连续分布几处大规模崩滑灾害与河流凹岸侵蚀有关。

致谢: 西南交通大学地质工程系郑涵、周俊好和沈垣伶研究生协助进行了野外地质调查工作, 在此一并致谢。

## References

- Casagli, N., Intrieri, E., Tofani, V., et al., 2023. Landslide Detection, Monitoring and Prediction with Remote-Sensing Techniques. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1): 51-64. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00373-x>
- Chigira, M., Tsou, C. Y., Higaki, D., et al., 2022. A Series of Rockslides and Gravitational Slope Deformations Aligned along the Kali Gandaki across the Nepal Himalaya. *Geomorphology*, 400: 108098. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108098>
- China Railway No.1 Engineering Survey and Design Institute, 1999. Railway Engineering Geology Handbook.

- Beijing: China Railway Publishing House, 93-106 (in Chinese).
- Gao, Y. J., Zhao, S. Y., Deng, J. H., 2020. Developing Law of Damming Landslide and Challenges for Disaster Prevention and Mitigation in the Three - River - Parallel Territory in the Tibetan Plateau. *Advanced Engineering Sciences*, 52(5): 50-61 (in Chinese with English abstract).
- 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(03): 433-454 (in Chinese with English abstract).
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes Classification of Landslide Types, an Update. *Landslides*, 11(2): 167-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Korup, O., Clague, J. J., Hermanns, R. L., et al., 2007. Giant Landslides, Topography, and Erosion. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(3-4): 578-589. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.07.025>
- Lan, H., Peng, J., Zhu, Y., et al., 2022. Research on Geological and Surficial Processes and Major Disaster Effects in the Yellow River Basin. *Science China Earth Sciences*, 65(2): 234 - 256 (in Chinese with English abstract).
- Lavé, J., Guérin, C., Valla, P. G., et al., 2023. Medieval Demise of a Himalayan Giant Summit Induced by Mega-Landslide. *Nature*, 619(7968): 94-101. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06040-5>
- Liu, J., Sun, Z. T., Wang, W. X., et al., 2025. Surface-Earth Response to Deep-Earth Processes and Consequential Natural Disasters. *Earth Science Frontiers*, 32(03): 7-22 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., 2021. The Mechanism of Disasters Induced by Coupling of Endogenic and Exogenic Geological Processes in the Yarlung Zangbo River from Gongga County to Jiacha County. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Pánek, T., Svennevig, K., Břežný, M., et al., 2024. The Occurrence, Mechanisms and Hazards of Large Landslides along Tablelands. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(10): 686-700. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00587-1>
- Peng, J. B., Ma, R. Y., Lu, Q. Z., et al., 2004. Geological Hazards Effects of Uplift of Qinghai-Tibet Plateau. *Advances in Earth Science*, 19(3): 457-466 (in Chinese with English abstract).
- Peng, J. B., Zhang, Y. S., Huang, D., et al., 2023. Interaction Disaster Effects of the Tectonic Deformation Sphere, Rock Mass Loosening Sphere, Surface Freeze-Thaw Sphere and Engineering Disturbance Sphere on the Tibetan Plateau. *Earth Science*, 48(8): 3099-3114 (in Chinese with English abstract).
- Petley, D., 2012. Global Patterns of Loss of Life from Landslides. *Geology*, 40(10): 927-930. <https://doi.org/10.1130/G33217.1>
- Pfluger, F., Weber, S., Steinhäuser, J., et al., 2025. Massive Permafrost Rock Slide under a Warming Polythermal

- Glacier Deciphered through Mechanical Modeling (Bliggspitze, Austria). *Earth Surface Dynamics*, 13(1): 41-70. <https://doi.org/10.5194/esurf-13-41-2025>
- Stoffel, M., Trappmann, D. G., Coullie, M. I., et al., 2024. Rockfall from an Increasingly Unstable Mountain Slope Driven by Climate Warming. *Nature Geoscience*, 17(3): 249-254. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01390-9>
- Sun, H. L., 1996. Formation and Evolution of Qinghai-Xizang Plateau. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press (in Chinese).
- Tang, H., 2025. Mechanism of the Coevolution of Landslides and River Valleys in the Three Gorges Reservoir Area. *Chin Sci Bull*, 70(21): 3505-3515 (in Chinese with English abstract).
- Valagussa, A., Marc, O., Frattini, P., et al., 2019. Seismic and Geological Controls on Earthquake-Induced Landslide Size. *Earth and Planetary Science Letters*, 506: 268-281. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.11.005>
- Wang, R. Q., Wang, X. L., Liu, H. Y., et al., 2019. Identification and Main Controlling Factor Analysis of Collapse and Landslide Based on Fine DEM—Taking Jiacha-Langxian Section of Yarlung Zangbo Suture Zone as an Example. *Journal of Engineering Geology*, 31(05): 956-964 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Wang, H., Cui, P., et al., 2024. Disaster Effects of Climate Change and the Associated Scientific Challenges. *Chin Sci Bull*, 69: 286-300 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. F., Cheng, Q. G., Lin, Q. W., et al., 2025. Research on Rock Avalanches in Tibetan Plateau: From Field Observations to Dynamic Mechanisms. *Earth Science*, 50(10): 4071-4095 (in Chinese with English abstract).
- Wu, R. A., Guo, C. B., Du, Y. B., et al., 2017. Research on Geohazard Developing Characteristics in Jiacha to Langxian Section of Sichuan-Tibet Railway. *Geoscience*, 31(05): 956-964 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X., Xu, X., Yu, G., et al., 2024. The China Active Faults Database (CAFD) and Its Web System. *Earth Syst. Sci. Data*, 16, 3391-3417. <https://doi.org/10.5194/essd-16-3391-2024>
- Yanites, B. J., Clark, M. K., Roering, J. J., et al., 2025. Cascading Land Surface Hazards as a Nexus in the Earth System. *Science*, 388(6754): eadp9559. <https://doi.org/10.1126/science.adp9559>
- Yao, T. D., Wu, G. J., Xu, B. Q., et al., 2019. Asian Water Tower Change and Its Impacts. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34(11): 1203-1209 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B., Wang, F., Sheng, P., et al., 2025. Research Progress on the Influence Patterns of Endogenic and Exogenic Dynamics on Geological Hazards in Southeastern Tibet Plateau. *Earth Science* (in Chinese with English abstract).
- Zhao, B., Su, L., 2025. Complex Spatial and Size Distributions of Landslides in the Yarlung Tsangpo River (YTR) Basin. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(2): 897-914.

<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.01.021>

Zou, D., Zhao, L., Sheng, Y., et al., 2017. A New Map of Permafrost Distribution on the Tibetan Plateau. *The Cryosphere*, 11(6): 2527-2542. <https://doi.org/10.5194/tc-11-2527-2017>

## 中文参考文献

高云建, 赵思远, 邓建辉, 2020. 青藏高原三江并流区重大堵江滑坡孕育规律及其防灾挑战. *工程科学与技术*, 52(5): 50-61.

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(03): 433-454.

兰恒星, 彭建兵, 祝艳波, 等, 2022. 黄河流域地质地表过程与重大灾害效应研究与展望. *中国科学: 地球科学*, 52(2): 199-221.

刘静, 孙照通, 王文鑫, 等, 2025. 表层地球系统的深部过程响应与地表自然灾害. *地学前缘*, 32(03): 7-22.

刘勇, 2021. 内外动力耦合下雅鲁藏布江贡嘎-加查河段的成灾机制研究. 成都: 成都理工大学.

彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等, 2004. 青藏高原隆升的地质灾害效应. *地球科学进展*, 19(3): 457-466.

彭建兵, 张永双, 黄达, 等, 2023. 青藏高原构造变形圈-岩体松动圈-地表冻融圈-工程扰动圈互馈灾害效应. *地球科学*, 48(08): 3099-3114.

孙鸿烈, 1996. 青藏高原的形成演化. 上海: 上海科学技术出版社.

唐辉明, 2025. 三峡库区滑坡与河谷协同演化机制. *科学通报*, 70(21): 3505-3515.

铁道部第一勘测设计院, 1999. 铁路工程地质手册. 北京: 中国铁道出版社, 93-106.

王瑞琪, 王学良, 刘海洋, 等, 2019. 基于精细 DEM 的崩塌滑坡灾害识别及主控因素分析——以雅鲁藏布江缝合带加查—朗县段为例. *工程地质学报*, 31(05): 956-964.

王岩, 王昊, 崔鹏, 等, 2024. 气候变化的灾害效应与科学挑战. *科学通报*, 69: 286 - 300.

王玉峰, 程谦恭, 林棋文, 等, 2025. 青藏高原高速远程滑坡研究: 从地质现象到动力学机理. *地球科学*, 50(10): 4071-4095.

吴瑞安, 郭长宝, 杜宇本, 等, 2017. 川藏铁路加查—朗县段地质灾害发育特征研究. *现代地质*, 31(05): 956-964.

姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等, 2019. “亚洲水塔”变化与影响. *中国科学院院刊*, 34(11): 1203-1209.

张波, 汪发武, 盛鹏, 等, 2025. 藏东南地质灾害的内外动力影响模式研究进展. *地球科学*.