

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2025.0400

陈宗基讲座

# 1950年西藏自治区墨脱—察隅8.6级地震触发特大滑坡研究

殷跃平<sup>1\*</sup>, 高少华<sup>1</sup>, 王文沛<sup>1</sup>, 李滨<sup>2</sup>, 高杨<sup>2</sup>

(1. 中国地质环境监测院 自然资源部地质灾害防治技术指导中心, 北京 100081;

2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)



**摘要:** 1950年8月15日, 喜马拉雅东构造结地区墨脱—察隅一带发生 $M_s8.6$ 级大地震, 极震区烈度达XII度, 其中VIII区及以上总面积达21.9万 $\text{km}^2$ , 诱发大面积、大规模的滑坡等地质灾害, 为典型的主震型能量集中释放事件。为系统揭示此次极端地震触发滑坡的空间分布规律及堵江模式, 利用1961年以来多期珍贵历史影像、历史文献资料及野外现场调查, 分析了烈度分布特征, 并首次在地震高烈度区(X~XII度)南迦巴瓦地区米林卧龙至墨脱都登下游段构建地震滑坡数据库, 共编录滑坡920处。通过对滑坡空间分布控制因子的定量分析, 表明滑坡主要分布于海拔2000~4000m、坡度 $20^\circ\sim50^\circ$ 、距断层4km范围内, 受主中央逆冲断裂、墨脱断裂和阿帕龙断裂控制显著。根据滑坡统计结果及其发育特征, 提出坐落型滑坡、超高位超远程型滑坡、整沟域崩滑型和群发型滑坡4种典型地震滑坡堵江模式, 分别以更邦拉山、则隆弄沟、加玛其名沟和扎曲—希让段滑坡群为代表, 最长堵江时间达15~16h。东构造结地区独特的孕灾环境为高位远程地质灾害的发生与演化提供有利条件。目前该地区正处于孕震阶段, 未来应加强极端地震条件下高位远程地质灾害的成灾机制与监测预警研究, 提升地震地质灾害防灾减灾能力。

**关键词:** 边坡工程; 墨脱—察隅8.6级地震; 极端地震; 地震滑坡; 高位远程地质灾害; 喜马拉雅东构造结

**中图分类号:** P 642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2026)02-0321-21

\*通信作者: 殷跃平(1960-), 现任研究员, 主要从事地质灾害防治方面的研究工作。E-mail: yinypcgs@hotmail.com

## Catastrophic landslides triggered by the 1950 Medog—Zayu $M_s8.6$ earthquake in Xizang Autonomous Region, China

YIN Yueping<sup>1\*</sup>, GAO Shaohua<sup>1</sup>, WANG Wenpei<sup>1</sup>, LI Bin<sup>2</sup>, GAO Yang<sup>2</sup>

(1. Guide Center of Prevention Technology for Geo-Hazard, MNR, China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081,

China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** On 15 August 1950, an  $M_s8.6$  earthquake struck the Medog—Zayu region in the Eastern Himalayan syntaxis, with a maximum intensity of XII and an area with intensity  $\geq$  VIII of about  $2.19 \times 10^5 \text{ km}^2$ . This mainshock-dominated event released seismic energy in a highly concentrated manner and triggered extensive landslides and related geological hazards. To systematically reveal the spatial distribution and the river-blocking patterns of coseismic landslides, we integrate multi-temporal historical imagery since 1961, archival records and field investigations to analyse the intensity distribution. For the high-intensity zone (X - XII) from Milin Wolong to downstream of Duden in the Namcha Barwa region, a coseismic landslide inventory is constructed for the first time,

收稿日期: 2025-06-11; 修回日期: 2025-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2244227, U2244226)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U2244227 and U2244226)

resulting in a dataset of 920 landslides. Quantitative analysis reveals that landslides predominantly occurred at 2 000 – 4 000 m elevation, on 20° – 50° slopes, and within 4 km of active faults. The landslide distribution is strongly controlled by the main central thrust fault, the Motuo fault, and the Apalong fault. Based on statistical analysis and morphological characteristics, we delineate four types of earthquake-induced landslide-damming patterns: seated landslides, high-altitude remote hazards, whole gully-scale landslides and multi-landslide clusters, typified by the Gengbangla, Zelongnong Gully, the Jamaqiming Gully, and Zhaqu—Xirang landslide groups, respectively. The maximum duration of river blockage reached 15 – 16 hours. The unique geomorphic and tectonic environment of the Eastern Himalayan Syntaxis provides favorable conditions for the occurrence and evolution of high-altitude remote geological hazards. As the region is currently in a seismically active phase, it is critical to enhance research on the failure mechanisms and early warning of under extreme earthquake conditions, thereby improving disaster preparedness, resilience, and emergency response capabilities in the region.

**Key words:** slope engineering; Medog—Zayu  $M_s$ 8.6 earthquake; extreme earthquake; earthquake-induced landslides; high-altitude remote geological hazards; Eastern Himalayan Syntaxis

\***Corresponding author:** YIN Yueping (1960 – ), research fellow, is engaged in geological hazard prevention and mitigation. E-mail: yinypcgs@hotmail.com

## 1 引言

1950 年 8 月 15 日, 西藏自治区察隅县西南地区发生  $M_s$  8.6 级大地震, 为有仪器记录以来震级最高的内陆型地震。仪器测定震中位置为北纬 28.4°、东经 96.7°, 宏观震中位于北纬 28.9°、东经 95.2°, 最高烈度达 XII 度<sup>[1]</sup>。震后余震活动频繁, 自 1950 年 8 月 15 日~1951 年 2 月 21 日期间,  $M_s \geq 5.0$  级余震共记录到 92 次, 余震序列中应变释放过程呈现 3 个线性阶段<sup>[2-3]</sup>。此次地震造成中国藏南地区以及印度阿萨姆地区遭受巨大灾难, 超 300 万  $\text{km}^2$  地区有震感, 数千人死亡<sup>[4]</sup>。地震引发严重的滑坡、泥石流等次生灾害, 导致雅鲁藏布江被截成多段, 喜马拉雅山 40 余万  $\text{km}^2$  大范围内地形地貌面目全非<sup>[5-8]</sup>。

E. Tillotson<sup>[5]</sup>早在 1951 年对墨脱—察隅地震的震源参数、远场地震波特征、余震活动、破坏范围及其在喜马拉雅—缅甸构造体系中的构造位置开展了研究, 为最早对这一事件地震学与震害研究之一。国内中国科学院地震工作委员会历史组于 1956 年在《中国地震资料年表》中对这次地震予以记载。此后, 1985~1986 年在西藏自治区科委和中国地震局主持下, 组织开展了宏观震害、烈度评定、地震地质与发震构造等方面的系统调查研究。近年来, A. Ben-Menahem 等<sup>[4, 9]</sup>建立了此次地震的震源机制模型。詹慧丽等<sup>[10-12]</sup>对发震构造及周边地震活动性进行了综合讨论。目前研究主要集中在震源机制、发震构造及地面宏观调查等方面, 长期以来缺乏这

次地震触发高位滑坡灾害的全面总结研究, 而厘清地形、地质条件及其耦合关系对滑坡的控制机制, 有助于提升滑坡灾害的预测能力与风险识别水平<sup>[13]</sup>。随着遥感影像与地理信息系统(geographic information system, GIS)技术的发展与应用, 通过遥感解译可高效构建地震滑坡数据库, 进而开展影响因子敏感性分析、滑坡发育特征、空间分布规律和危险性评价等系统研究, 为地震滑坡震害评价与区域地质灾害风险识别提供了关键技术支撑<sup>[14-18]</sup>。针对地震诱发的单体滑坡, Y. P. Yin 等<sup>[19-25]</sup>学者开展了地震滑坡概念模型构建、滑坡体动力响应机制、稳定性分析及失稳模式等方面的研究, 加深了对地震滑坡失稳破坏的认识。

青藏高原在印度板块持续向北推挤作用下整体隆升, 喜马拉雅东构造结位于高原东缘, 构造变形强烈, 发育大量近 SN 向和 NE 向断层, 是高原内地震活动最为密集的区域之一。在国家重大工程持续向青藏高原纵深推进、“治边稳藏”加快实施的背景下, 极端地震条件下高山—极高山区高位远程灾害的研究极为关键<sup>[26]</sup>。墨脱—察隅地震作为发生于东构造结地区的极端强震事件, 是研究极高山区复杂地质背景下地震滑坡的宝贵案例。本研究基于遥感、历史记载以及地面调查, 在前人工作的基础上, 重点对墨脱—察隅地震高烈度区(X~XII 度)内南迦巴瓦构造结米林卧龙至墨脱都登下游区域地震滑坡进行识别编录, 首次从遥感定量滑坡识别与类型划分角度, 重建了 1950 年滑坡分布和堵江模式。研究结果为东构造结地区极端地震条件下滑坡控制作用

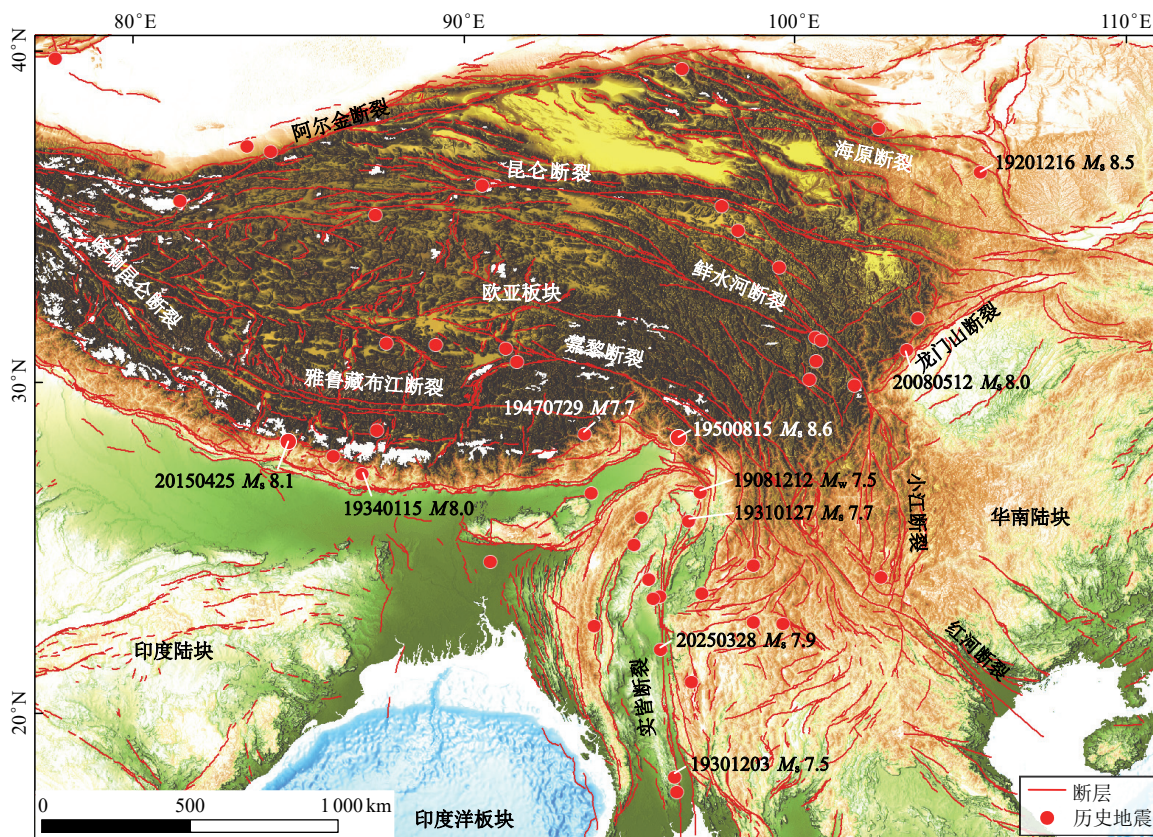
及高位陡峻山体的地震响应机制研究提供了基础数据与案例支撑。

## 2 区域地震地质背景

东南亚地区地处欧亚板块、印度洋板块及菲律宾海板块的构造交汇区，属于新特提斯构造域东延构造体系，是全球构造活动最活跃的板缘变形带之一<sup>[27-30]</sup>。板块间的相互作用导致了剧烈的构造变形，形成了大规模的造山带、活动断裂、岩浆岛弧及边缘海盆等构造单元，孕育了频繁的地震等地质灾害<sup>[31-33]</sup>。其中，印度洋板块以约 40 mm/a 速率向欧亚板块俯冲，引发喜马拉雅造山带的持续隆升<sup>[34]</sup>，沿主边界逆冲断裂形成强震孕育环境，如 2015 年尼泊尔发生  $M_s$  8.1 级地震。苏门答腊—爪哇俯冲带作为印度洋板块向巽他陆块俯冲的前缘部位，其强震活动具有典型的海沟型地震特征，如 2004 年  $M_w$  9.1 级大地震引发环印度洋海啸，导致逾 23 万人罹难。向东至马尼拉海沟、琉球海沟等处，菲律宾海板块向欧亚板块俯冲，形成高地震活动带，该复合俯冲体系控制着吕宋岛弧的地震活动格局，如 1990 年

发生  $M_w$  7.7 级碧瑶地震。这种多板块汇聚的动力学背景，使东南亚成为全球地震灾害风险等级最高的区域之一。

喜马拉雅造山带和青藏高原形成与演化是印度板块与欧亚板块持续碰撞和挤压的结果，由于持续的构造应力作用，高原内部及周缘地区发育大量强活动性断裂构造(见图 1)，形成了复杂的构造格局<sup>[35-37]</sup>。主要的活动断裂包括：喜马拉雅主逆冲断裂带、雅鲁藏布缝合带、昆仑断裂带、嘉黎断裂带、龙门山断裂带、鲜水河断裂带和实皆断裂带等。这些断裂带不仅控制着区域的地壳变形模式和块体运动边界，也主导了强震的孕育与发生。文章梳理了 1900 年 1 月 1 日~2025 年 4 月 1 日期间青藏高原及邻区 7 级以上强震事件，搜索范围为北纬 14.77°~40.31°，东经 75.41°~112.93°，区内共发生  $\geq 7.0$  级强震 49 次、 $\geq 8.0$  级强震 2 次，分别为 1950 年墨脱—察隅  $M_s$  8.6 地震和 2015 年尼泊尔  $M_s$  8.1 地震。地震集中在块体边界和断裂带附近，具有明显的构造控制特征。地震不仅造成了严重的人员和财产损失，也深刻影响了区域构造应力场的重新分布与地貌演化。



注：本图基于公开 DEM 数据制作(<https://www.gscloud.cn>)，底图无修改。

图 1 青藏高原及邻区活动断裂与 20 世纪以来 7 级以上强震分布图

Fig.1 Distribution of active faults and earthquakes( $M \geq 7$ ) since the 20th century in the Qinghai—Xizang Plateau and adjacent regions

### 3 1950 年墨脱—察隅 8.6 级地震烈度及滑坡分布特征

西藏自治区墨脱—察隅地震由于发震年代较早, 受限于观测手段匮乏以及震区地形地貌复杂、交通不便, 该地震滑坡灾害系统研究处于空白。然而, 极端地震次生灾害的深入认识对于区域抗震设防、工程安全设计以及防灾减灾工作具有重要意义。

#### 3.1 烈度分布特征

地震等烈度图(见图 2)据西藏自治区科学技术厅和中国地震局科技监测司资料<sup>[1]</sup>修改, 红圈为 20 世纪以来 5 级以上地震震中位置。由于震源破裂扩展方向、复杂地形的放大效应以及多条活动断裂的叠加影响, 导致宏观震中与微观震中在空间位置上存在偏移。

墨脱—察隅地震等烈度线分布特征具有一定的规律性(见图 2)。X 度以上烈度区呈近圆形或长短轴

差异不大的椭圆形。IX 与 VIII 度区则呈不规则椭圆形分布, 长轴方向为 NE 向, 短轴方向趋近于 NW 向。整体而言, 等烈度线在北半部分布较为紧密, 南半部则相对舒缓。等烈度线长轴的延伸方向, 其东段与区内 NE 向的墨脱断裂走向基本一致, WS 段则与主中央逆冲断裂带方向近似。短轴方向则与区域内的阿帕龙逆冲断层走向一致。整体来看, 等烈度线呈向 NE 凸出的不规则椭圆形, 显示出震中区烈度衰减受控于多条活动断裂构造的复合作用, 特别是墨脱断裂、主中央逆冲断裂和阿帕龙逆冲断裂的构造控制作用显著。此外, “阿萨姆突刺” 东北密集的弧形构造带可能对地震波的传播起到了屏蔽作用, 使等烈度线向北衰减速度加快。

地震造成了极其严重的地表破坏, 诱发了大量山体滑坡、泥石流、崩塌、地裂缝和堰塞湖, 对察隅、墨脱及其周边地区造成严重破坏。烈度区划参数及典型次生灾害如表 1 所示。

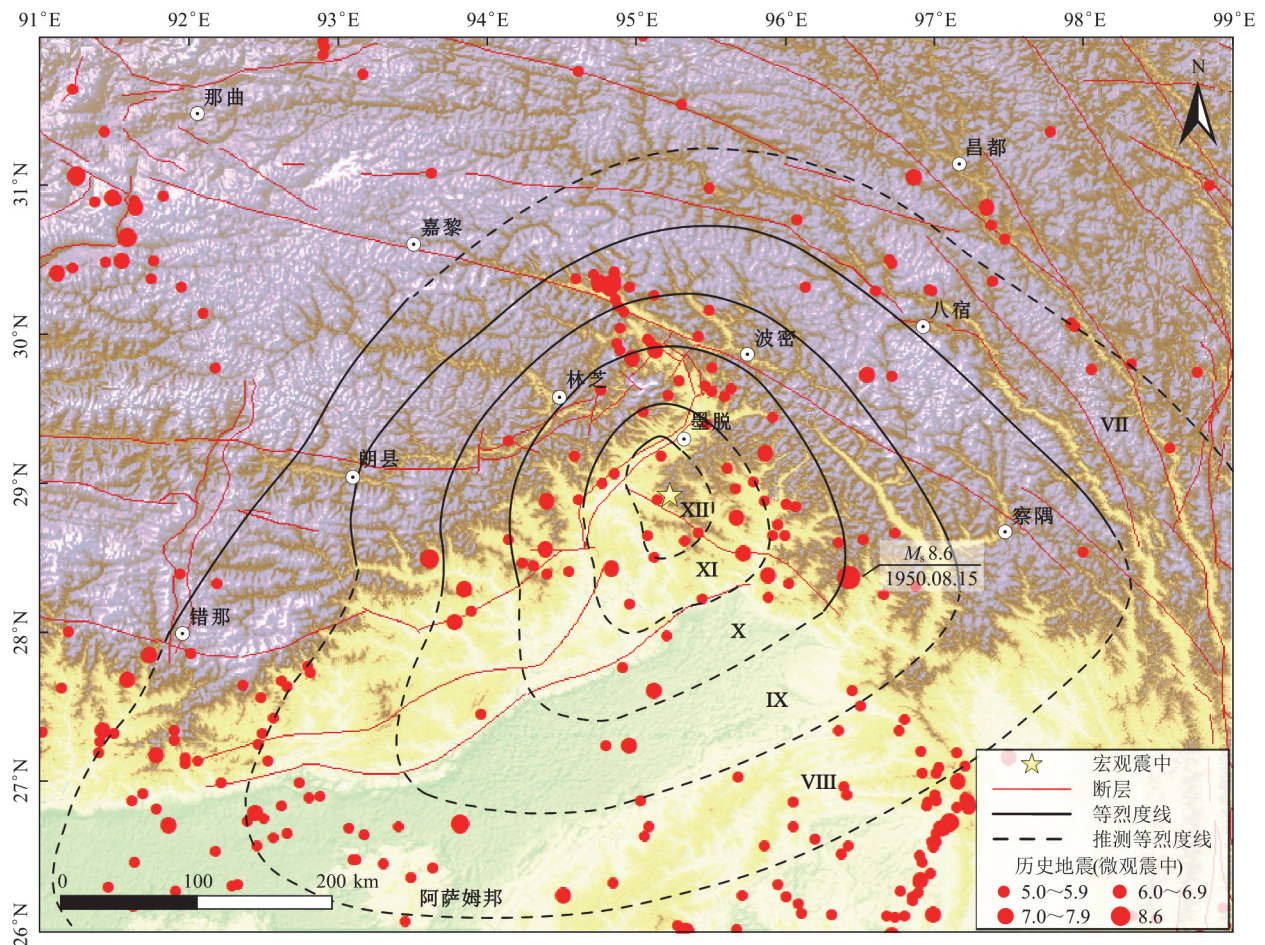


图2 1950年8月15日西藏自治区墨脱—察隅8.6级地震等烈度图(修改自西藏自治区科学技术厅和中国地震局科技监测司<sup>[1]</sup>)  
Fig.2 Isoseismal map of the 15 August 1950  $M_s$ 8.6 Medog—Zayu earthquake, Xizang Autonomous Region(Modified from Department of Science and Technology of Xizang Autonomous Region and Department of Science and Technology Monitoring, China Earthquake Administration<sup>[1]</sup>)

表 1 1950 年墨脱—察隅地震烈度区划参数、分布范围和典型灾害(≥VIII 度)

Table 1 Intensity zoning parameters, affected areas, and typical hazards (intensity ≥ VIII) of the 1950 *M*<sub>s</sub> 8.6 Medog—Zayu earthquake

烈度 (intensity)	长轴(major axis)/km	短轴(minor axis)/km	面积 (area)/km <sup>2</sup>	分布范围 (spatial extent)	典型灾害 (representative hazards)
XII	90	54	3 800	北面到阿尼桥；西边界达更邦拉山与都登之间；西南抵里夏，东面为推测界线	更邦拉山高位滑坡；江额阿曲滑坡、泥石流；耶东村、毕波村滑坡
XI	170	130	17 000	东北界到达木；西北界抵多雄拉山口；西界达马尼岗和南英以东；南界至巴昔卡；东界推测到阿帕龙	亚让村滑坡；荷惹村滑坡；白马拉滑坡；阿尼桥至多雄拉山沿途高位滑坡
X	280	240	53 000	南界抵迪布鲁格尔和萨地亚一线，西界达米林一带，北至扎曲等地，东到达宗普以西	则隆弄高位滑坡；兴开村泥石流；扎曲高位滑坡
IX	420	340	112 000	西至米林卧龙和林芝久巴，北到波密玉仁，东达八宿然乌和察隅巴嘎；南面包括布拉马普特拉河流域和察隅河下游广大地区	扎雄村滑坡；拉日贡山雪崩
VIII	620	450	219 000	西至琼结、朗县直到汀当东，北抵洛隆县南，东达八宿、察瓦龙，南面包括缅甸的北部山区，印度布拉马普特拉河平原的南面的丘陵	小规模垮山、滑坡、落石

据《西藏察隅当雄大地震》<sup>[1]</sup>中航空摄影普查结果的统计，在 46 000 km<sup>2</sup> 的区域内，滑坡灾害覆盖了 15 000 km<sup>2</sup> 的地表，并估算至少有 5 × 10<sup>10</sup> m<sup>3</sup> 的物质参与滑坡，地震引发的大量次生灾害显著改变了区域地貌格局。灾后空中航拍照片显示(见图 3)，

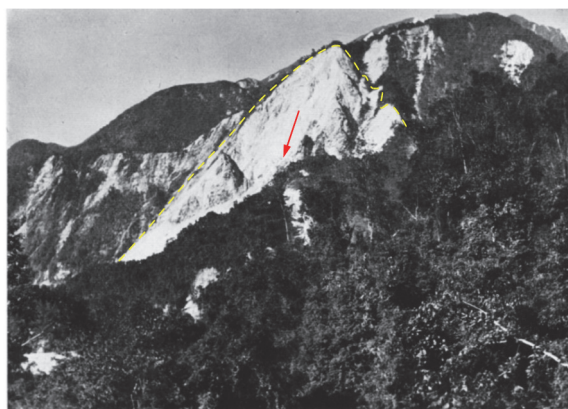
滑坡广泛分布于沿沟两侧山体，规模密集，滑带清晰，部分高位山体出现整体垮落，形成典型的高陡坡面失稳现象<sup>[38-39]</sup>。同时，在墨脱、察隅等区域，山坡中段因滑移或张裂形成槽状凹陷结构，反映出深层地质结构对滑坡发育的控制作用。



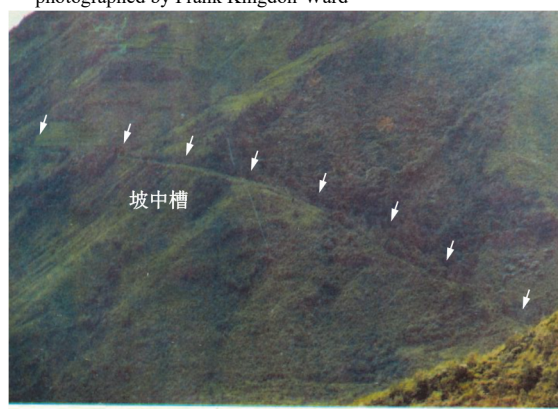
(a) N.A.B. Warner 震后航拍的察隅地区大范围滑坡现象，位于丹巴曲河谷<sup>[39]</sup>  
(a) Extensive landslides in the Zayu region captured by N.A.B. Warner<sup>[39]</sup>



(b) Frank Kingdon-Ward 拍摄的海拔约 7 000 英尺高山山顶大规模崩塌现象，位于察隅河下游<sup>[39]</sup>  
(b) Large-scale collapse at an elevation of approximately 7 000 feet, photographed by Frank Kingdon-Ward<sup>[39]</sup>



(c) 地震造成山体劈裂，岩体结构遭受严重破坏<sup>[38]</sup>  
(c) Deep fissuring and severe structural damage of rock caused by the earthquake<sup>[38]</sup>



(d) 墨脱县背崩乡阿降村坡面中段形成的槽状地貌<sup>[1]</sup>  
(d) Trough-shaped landform developed on the mid-slope of Ajiang Village, Beibeng, Medog<sup>[1]</sup>

图 3 1950 年墨脱—察隅地震诱发滑坡形成的典型灾后地貌特征

Fig.3 Typical post-earthquake geomorphological features triggered by the 1950 Medog—Zayu earthquake

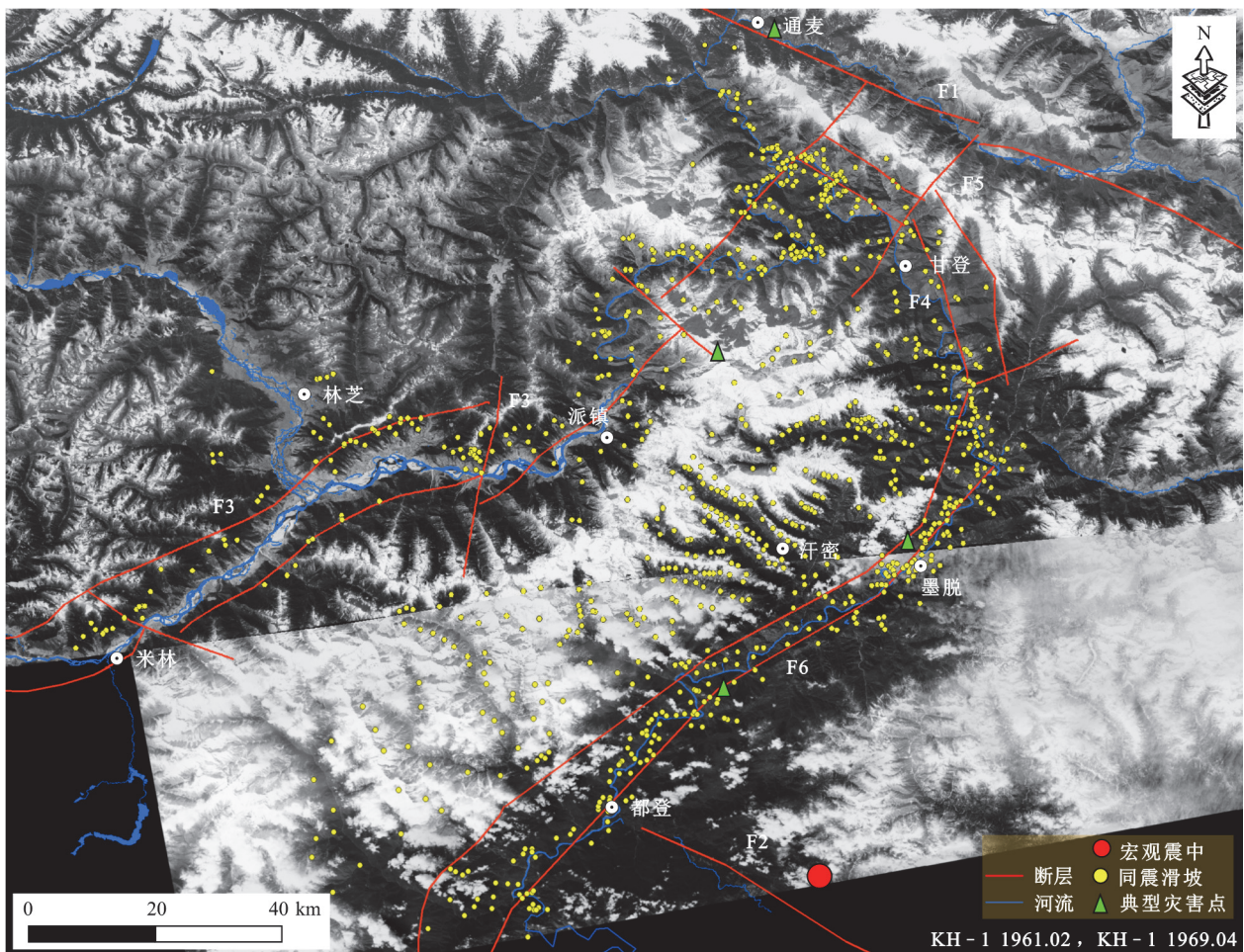
### 3.2 滑坡空间分布规律

1950 年墨脱—察隅地震致灾范围极广，VIII(8 度)区及以上总面积达 219 000 km<sup>2</sup>。本次地震地面破坏最大特点是大规模的崩塌、滑坡、次生地裂缝的广泛分布。其范围西从隆子加玉到东部怒江上的察瓦龙，北至波密县的玉仁，南到巴昔卡和布拉马普特拉河平原，尤以 X 度以上地区更为集中。因此，本文以 1961, 1968, 1969, 1973, 1979 年等多期锁眼(Keyhole, KH)遥感影像为基础，结合大地震科考记录，重点针对受灾影响严重的 XII, XI, X 烈度区，南迦巴瓦构造结区域(米林卧龙至墨脱都登下游区段)滑坡进行解译识别与统计分析，对 1950 年 8.6 级地震触发滑坡进行重构(见图 4)。

鉴于 1950 年墨脱—察隅地震震级极高、能量释放巨大，可合理推断，该次地震在研究区内诱发了现存滑坡中的绝大多数，本文以滑动迹象清晰可辨的滑坡体作为统计对象。考虑到地震灾害波及范

围广泛、区域地形急剧变化及部分地区冰雪常年覆盖，滑坡面积的精确统计存在较大难度，因此本文聚焦于滑坡数量分布的统计分析。该方法与 D. K. Keefner<sup>[40]</sup>早期提出的通过滑坡数量衡量地震滑坡事件规模的研究方式相一致。卫星影像解译结果显示 1950 年墨脱—察隅地震共诱发米林卧龙至墨脱都登下游区段同震滑坡 920 处，地震诱发地质灾害密度较高，主要分布于雅鲁藏布江两岸陡峭坡体及 WN-ES 走向的平行河谷区域内，扎曲—都登下游区段滑坡密度明显较米林—扎曲密集，从更邦拉山沿雅鲁藏布江向 NE 至金珠藏布河口的达木，从达木向北至甘代，地震时造成了一系列大规模的地面破坏。根据西藏自治区科考记录与遥感解译结果发现，本次特大型堵江/河灾害共计 8 处，并进一步明确了灾害发生位置及堵江原因，如表 2 所示，堵塞时间最长达 7 d，雅鲁藏布江被截成多段。

基于墨脱—察隅地震诱发的 920 处滑坡数据



注：F1—嘉黎断裂带；F2—阿帕龙断裂带；F3—东久—米林断裂带；F4—西兴拉断裂；F5—甘代—旧当卡断裂；F6—墨脱断裂带。

图 4 1950 年墨脱—察隅地震诱发南迦巴瓦地区滑坡分布图(据 1961 年、1969 年 Keyhole - 1 遥感影像解译)

Fig.4 Landslides distribution in the Namcha Barwa region triggered by the 1950 M<sub>s</sub> 8.6 Medog—Zayu earthquake(interpreted from Keyhole - 1 satellite imagery acquired in 1961 and 1969)

表 2 1950 西藏自治区墨脱—察隅地震诱发典型滑坡堵江/河灾害

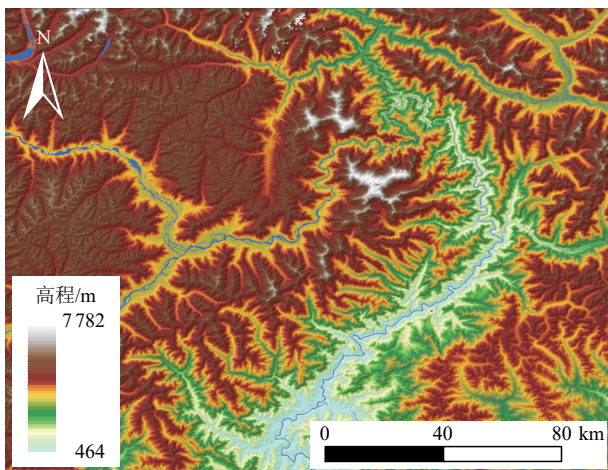
Table 2 Typical river blockages triggered by the 1950  $M_s$  8.6 Medog—Zayu earthquake, Xizang Autonomous Region

地震烈度 (earthquake intensity)	堵塞位置 (blockage location)	坐标 (coordinates)/(° )	堵江/河名称 (name of the dammed river)	堵江/河时间 (blockage time)	堵江原因 (cause of blockage)
XII	墨脱县希让村南 5 km	95.025, 29.139	雅鲁藏布江	15~16 h	更邦拉山高位滑坡
XII	墨脱县背崩乡东北 2.5 km	95.199, 29.249	雅鲁藏布江	2~3 h	高位泥石流/高位滑坡
X	米林市派镇则隆弄沟	94.995, 29.616	雅鲁藏布江	6 h	则隆弄高位岩崩/高位冰川泥石流
X	帕隆藏布与雅鲁藏布江汇合处	95.130, 29.905	帕隆藏布	24 h	高位滑坡/高位崩塌
X	墨脱县格当乡	-	金珠藏布	24 h	高位泥石流
X	墨脱县马尼岗与卡绕之间	-	永木河	72 h	垮山滑坡
IX	察隅县上察隅扎雄附近	-	杜莱河	7 d	垮山滑坡
IX	波密县加玛其名沟	95.129, 30.079	帕隆藏布	-	加玛其名沟崩滑流

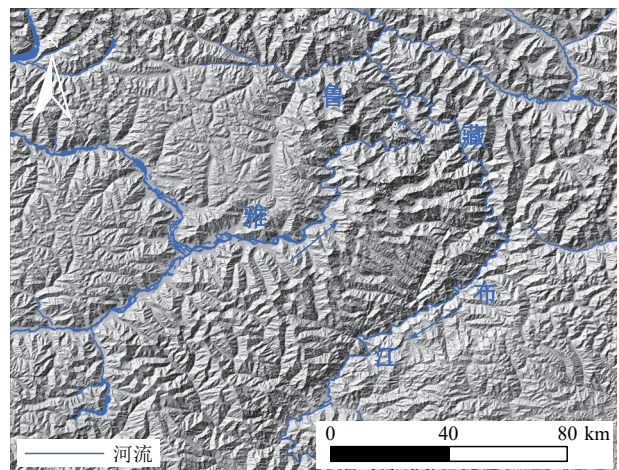
库，结合研究区成灾环境和影响因素，对地质灾害点与高程、距雅江距离、距断层距离、坡度、坡向、曲率 6 个因子的关系(见图 5)进行统计分析。

不同高程对应的松散物体赋存条件、植被类型、地形地貌差异，均会影响岩土体稳定性。该地区地形起伏较大，地震滑坡集中分布在 500~4 000 m 范围，有 56.63%的灾害点分布在 2 000~4 000 m 高程

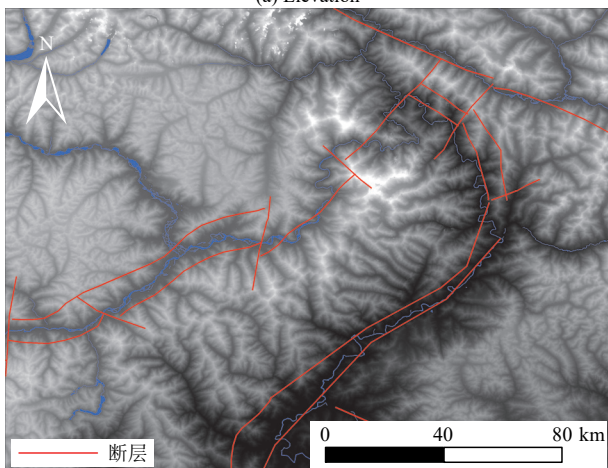
范围，其中又以高程 3 000~3 500 m 范围密度最高(见图 6(a))。雅鲁藏布江对山体的切割为崩塌滑坡提供了临空面，河流的侵蚀作用极大地改变了地形地貌特征，根据灾害点到雅江距离统计显示，距河流越近，灾害点分布越密集，灾害点大多分布在距雅江流域 2 km 范围内，占比 44.24%，其中 1 km 范围内最为集中，占比 27.06%(见图 6(b))。曲率分布



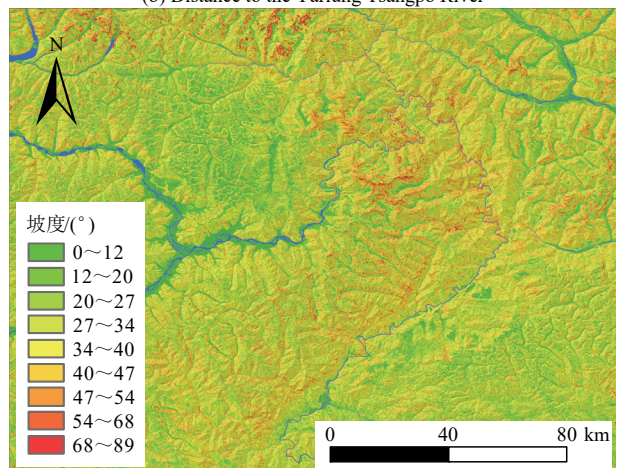
(a) 高程  
(a) Elevation



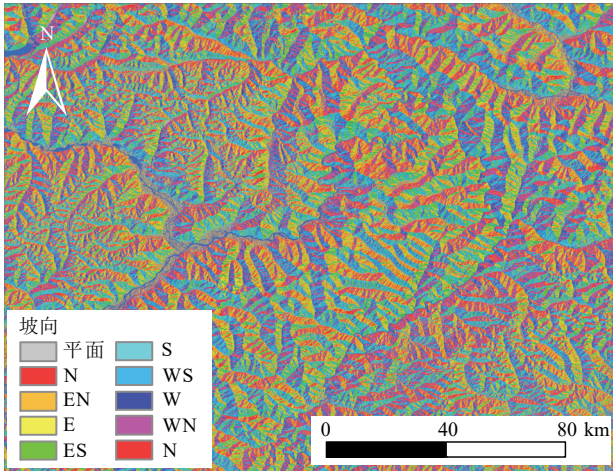
(b) 距雅江距离  
(b) Distance to the Yarlung Tsangpo River



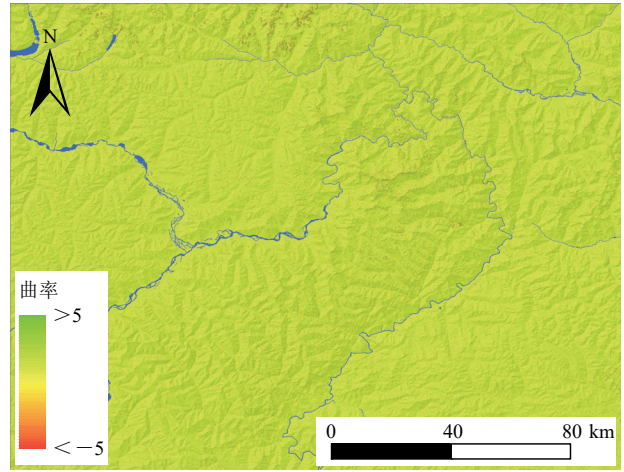
(c) 距断层距离  
(c) Distance to active faults



(d) 坡度  
(d) Slope angle



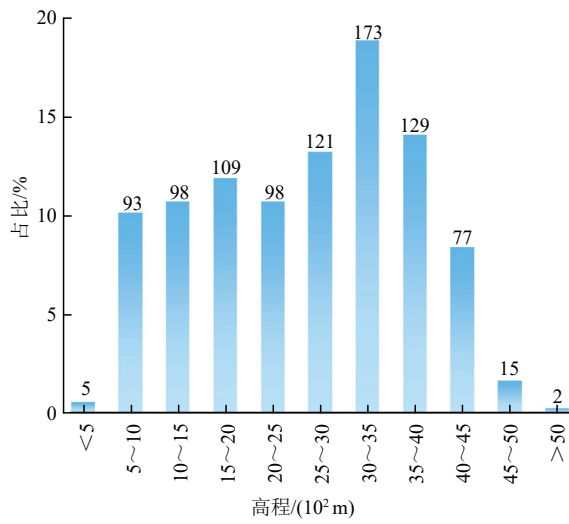
(e) 坡向  
(e) Aspect



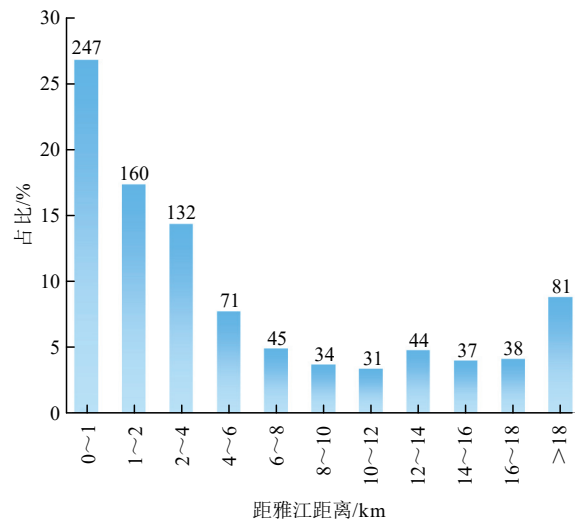
(f) 曲率  
(f) Curvature

图 5 1950 年墨脱—察隅地震诱发南迦巴瓦地区滑坡空间分布规律研究因子

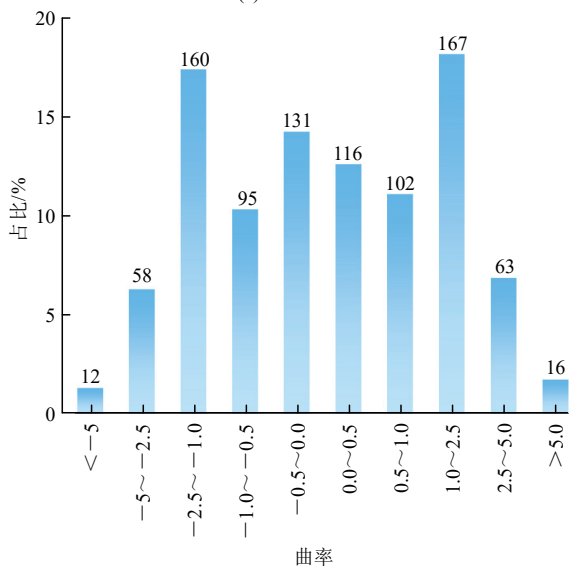
Fig.5 Contributing factors for analyzing the spatial distribution of landslides triggered by the 1950  $M_s$  8.6 Medog—Zayu earthquake in the Namcha Barwa region



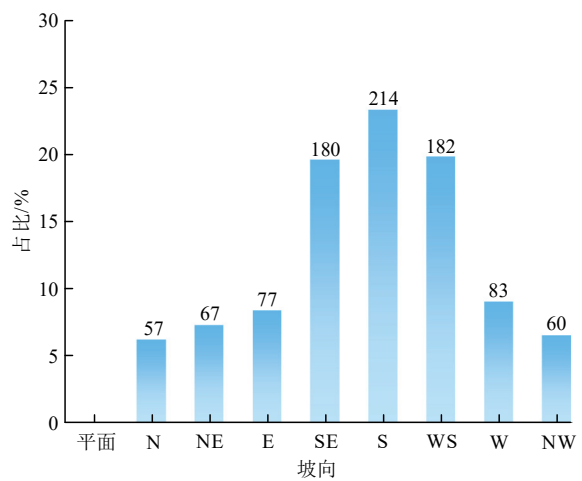
(a) 高程  
(a) Elevation



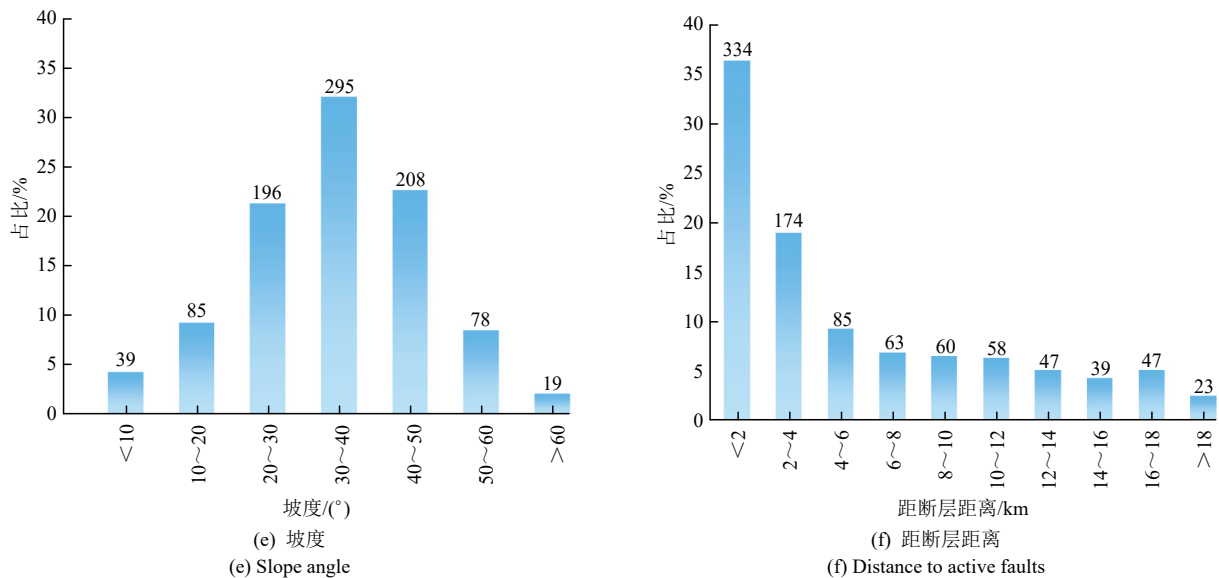
(b) 距雅江距离  
(b) Distance to the Yarlung Tsangpo River



(c) 曲率  
(c) Curvature



(d) 坡向  
(d) Aspect



注: 柱顶数字为相应滑坡数量。

图 6 1950 年墨脱—察隅地震诱发南迦巴瓦地区地震滑坡与影响因子关系统计图

Fig.6 Statistical relationships between earthquake-induced landslides and controlling factors in the Namcha Barwa region triggered by the 1950  $M_s$  8.6 Medog—Zayu earthquake

上(见图 6(c)), 在  $-5 \sim 5$  范围滑坡均分布较多, 其中在  $-2.5 \sim -1$  和  $1 \sim 2.5$  范围分布最广, 表明在地形较凸或较凹处及剖面凹凸转折处, 滑坡较为发育。坡向通过影响坡面水分分布及地震波传播特性, 进而影响岩土体稳定性和地质灾害的空间分布, 62.61% 的地质灾害发生在 SE 向、S 向和 WS 向, 其中 S 方向分布最为集中(见图 6(d))。坡度不仅控制斜坡应力分布和松散物堆积厚度, 还反映岩体物理性质的差异。研究区内最大坡度为  $89^\circ$ , 最小坡度为  $0^\circ$ , 该地区存在着极陡峭的山体, 也存在较平坦的河谷区域, 通过对地质灾害在不同坡度上的空间分布统计结果显示, 75.98% 的地质灾害发生在  $20^\circ \sim 50^\circ$  范围(见图 6(e)), 符合灾害容易发生在高坡度范围的普遍规律。

此外, 地震滑坡的分布受到断层控制作用的影响(见图 6(f)), 36.3% 的滑坡灾害分布在距断层 2 km 范围内。目前关于发震断裂带仍存在不同认识, 本文采用综合研究的结果<sup>[1-12]</sup>, 讨论滑坡对区域主要活动断裂的响应, 而非针对单一发震断层的精确归属, 距断层距离指滑坡点到区域主要活动断层的最近距离。如更邦拉山的基岩崩塌, 耶东、毕波的大滑坡, 背崩的江额阿曲滑坡、泥石流, 墨脱白马拉大滑坡等大型滑坡灾害都发生在墨脱断裂破碎带上。帮辛—扎曲的滑坡则发生在西兴拉断裂两盘。从雅鲁藏布江大拐弯向西至米林县卧龙的滑坡是受雅鲁藏布江断裂的影响。此外, 波密县索通、易贡湖一带的垮山和滑坡是沿嘉黎—波密断裂分布。察隅西南、墨脱县背崩东南, 则恰好位于阿帕龙断裂

带上。隆子县的山崩、滑坡, 明显受变形复理石构造带中的冲断层的影响。从更邦拉山向南西至西巴霞曲一带的崩塌、滑坡, 则与同展布在该区的主中央、主边界等逆冲断裂带密切相关<sup>[1]</sup>。本次地震的地面破坏受震区内的地表断裂带控制, 其中主中央逆冲断裂、墨脱断裂和阿帕龙断裂等对地面破坏的控制更为突出。此外, 从地层岩性角度分析, 滑坡灾害主要集中分布于构造混杂岩及南迦巴瓦片麻岩岩组区域。在地震动参数(PGA)方面, 本次统计滑坡点均位于峰值加速度  $\geq 0.3 g$  的高烈度区域。

## 4 典型地震滑坡分析

根据地震滑坡的发育特征, 本次地震共诱发 4 种主要类型的滑坡—堵江模式: (1) 坐落型高位滑坡堵江(见图 7(a))。该类型滑坡通常由大规模物源在震动作用下发生短距离运动, 直接堆积于河谷中并形成堵江现象, 反映了强震诱发下物源重力主导的短程滑移特征, 如更邦拉山滑坡。(2) 超高位超远程型滑坡—泥石流堵江(见图 7(b))。指相对高差显著、运动距离超过 5 km 的大规模远程滑坡, 典型案例如则隆弄沟滑坡, 表现为滑坡物质在地震力、重力、冰雪共同作用下发生远程运移与堆积; (3) 整沟域崩滑型堵江(见图 7(c))。受地震影响, 沟域内发育多处崩塌滑坡灾害, 物质汇流共同进入河道, 形成堵塞, 典型灾害如加玛其名沟。(4) 群发型滑坡堵江(见图 7(d))。中小规模滑坡沿江高密度集中分布, 入江形成局部淤塞带, 如扎曲—希让段滑坡群。

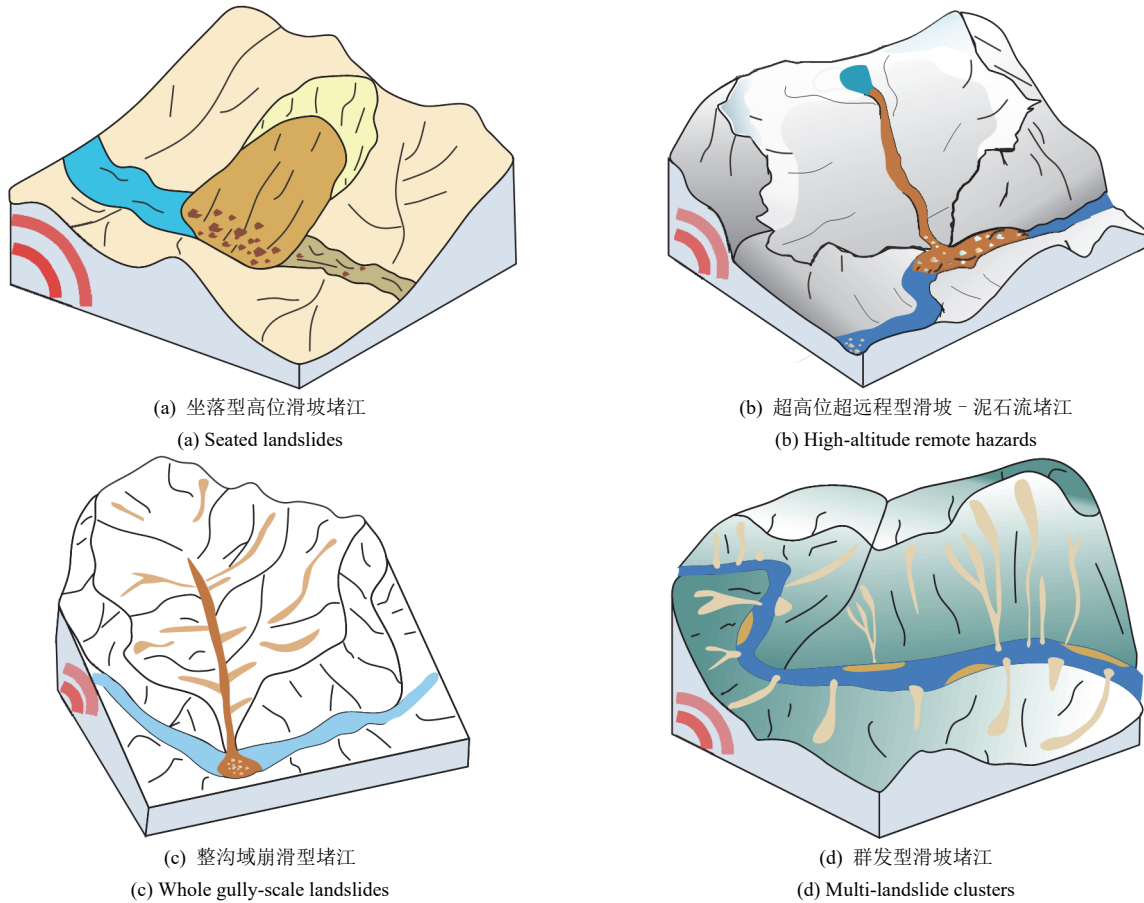


图 7 1950 年墨脱—察隅地震诱发南迦巴瓦地区地震滑坡 - 堵江成灾模式

Fig.7 Seismic landslide damming modes triggered by the 1950  $M_s8.6$  Medog—Zayu earthquake in the Namcha Barwa Region

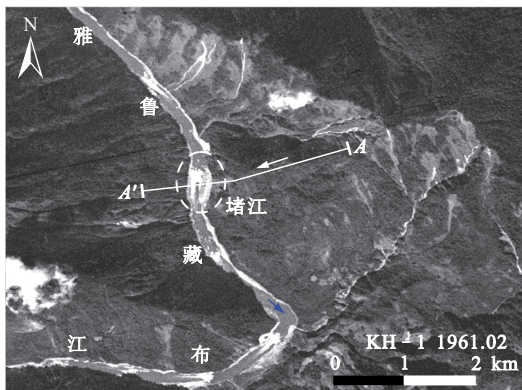
### 4.1 更邦拉山高位滑坡

更邦拉山滑坡位于西藏自治区墨脱县希让村以南约 5 km，是强震作用下由构造破碎带控制的坐落型滑坡典型事件，滑体由破碎岩体与松散土体混合组成。坡顶高程约 2 030 m，坡脚位于雅鲁藏布江谷底，约 570 m，相对高差达 1 460 m，具有高位高势能特征(见图 8)。滑坡形成受控于墨脱断裂带，母岩以混合岩、构造岩及糜棱岩为主。1950 年墨脱—察隅  $M_s8.6$  地震所产生的强震动触发坡体整体失

稳，岩体与覆盖层沿破裂面崩滑，形成巨型滑坡堵江灾害。滑坡运动距离约 1 100 m，堆积体面积约 1.78 km<sup>2</sup>，经三维地形模型还原与估算，总体积约  $6.53 \times 10^7$  m<sup>3</sup>，属典型高位震源型滑坡，典型坡面如图 8(c)所示。滑体快速堆积于雅鲁藏布江主河道，造成雅鲁藏布江阻断，堰塞时长达 15~16 h。

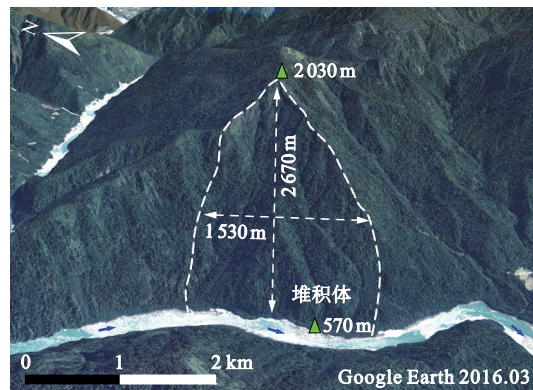
### 4.2 则隆弄超高位超远程滑坡泥石流

则隆弄沟位于西藏自治区林芝市米林县派镇，雅鲁藏布江右岸，地处南迦巴瓦峰西北坡区域。南



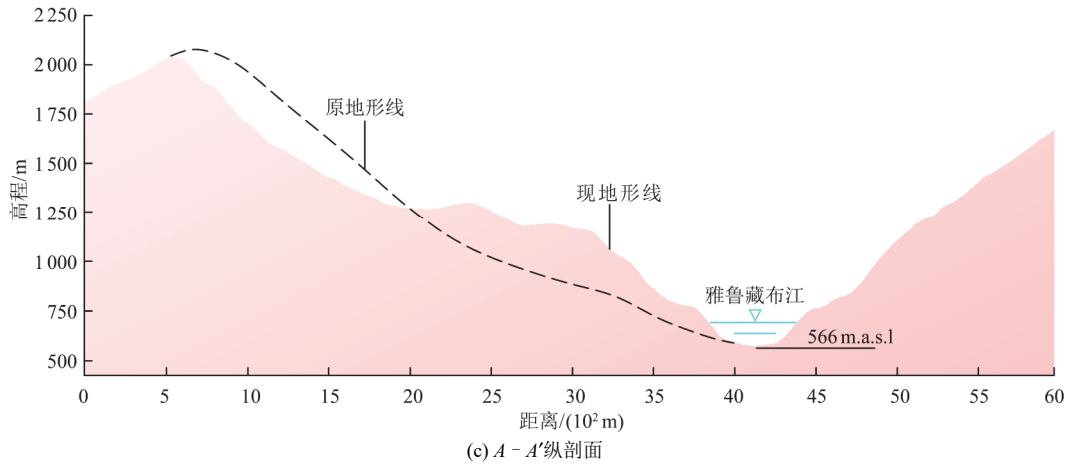
(a) 1961 年 Keyhole - 1 遥感影像显示的堆积堵江痕迹

(a) Depositional damming traces shown in the 1961 Keyhole-1 satellite imagery



(b) 三维地形地貌特征

(b) 3D topographic and geomorphological features



(c) Longitudinal profile along section A - A'  
 图 8 更邦拉山高位滑坡历史影像与纵剖面

Fig.8 Historical imagery and longitudinal profile of the Genbangla Mountain high-altitude rockslide

迦巴瓦峰为多雄拉背斜向北延伸的一个大型向斜构造，主峰由向斜轴部的褶皱岩系构成，形成强烈抬升的褶皱峰体。沟域形状为不规则“沙漏”状，面积约为 53.62 km<sup>2</sup>。沟域内最高处为南迦巴瓦峰 (7 782 m)，最低处为则隆弄沟口(2 847 m)。1950 年墨脱—察隅 M<sub>s</sub> 8.6 级地震期间，当地群众曾目睹南迦巴瓦峰发生大规模雪崩与冰岩崩(见图 9(a))。

通过综合现场调查、遥感影像解译，还原了 1950 年地震诱发直白村掩埋与雅鲁藏布江堵江事件，地震造成 2 种典型链式灾害：(1) 高位滑坡 - 碎屑流 - 村庄掩埋灾害链。海拔 3 500~4 400 m 处(见图 9(b), (c))存在有明显被侵蚀铲刮的痕迹，表明该区域上方岩体在地震作用下失稳下滑并进入沟道 2，形成高速碎屑流，沿沟道 2 向下摧毁直白村。(2)

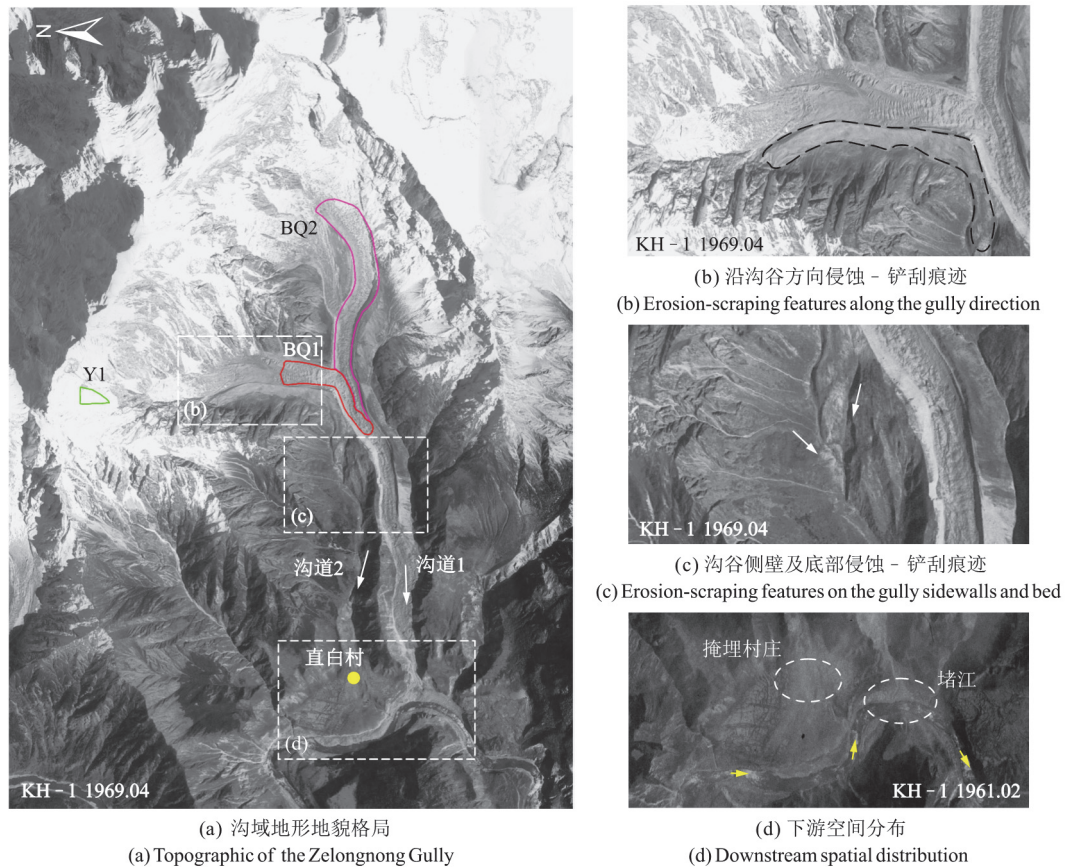


图 9 1950 年墨脱—察隅地震诱发则隆弄沟高位灾害

Fig.9 High-altitude remote geological hazards in the Zelongnong Gully triggered by the 1950 M<sub>s</sub> 8.6 Medog—Zayu earthquake

冰川泥石流 - 堵江 - 堰塞湖溃决灾害链。则隆弄冰川在地震动下发生跃动, 导致大规模冰雪岩混合物由沟道 1 进入雅鲁藏布江主河道, 堵江持续时间长达 6 h(见图 9(d))。

为进一步精确识别灾害物源分布及估算物源方量, 采用双参数 Voellmy 摩擦模型对 1950 年墨脱

一察隅地震诱发的则隆弄沟灾害事件进行了动力学反演模拟(见图 10(a), (b))。通过多轮模拟与参数敏感性分析, 最终确定主要滑移物源包括高位岩体(Y1)及两段冰碛物堆积区(BQ1 与 BQ2), 其分布位置与体积如表 3 所示。基于计算结果, 构建了震前与震后典型坡面地形(见图 10(c))。

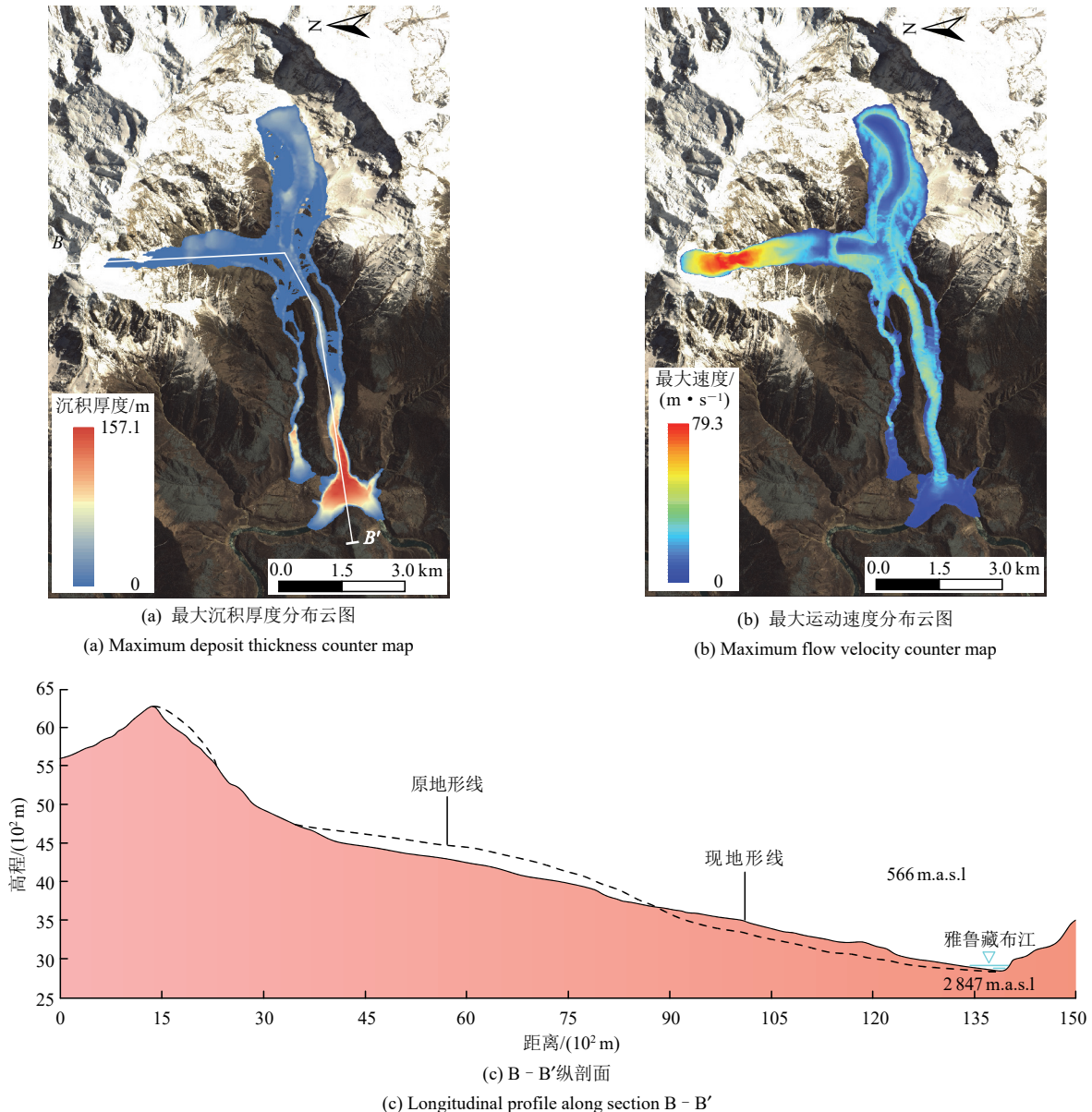


图 10 则隆弄沟高位滑坡灾害动力反演与纵剖面

Fig.10 The dynamic analysis and longitudinal profile of the Zelongnong disaster event in 1950

表 3 墨脱一察隅地震诱发则隆弄沟启动物源类型及参数

Table 3 Source material types and parameters of the Zelongnong gully triggered by the 1950 Medog—Zayu earthquake

物源类型及编号 (source type and ID)	分布位置 (distribution location)	物源分布高程范围 (distribution of material sources in elevation range)/m	体积(volume)/ (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )
岩体(Y1)	则隆弄沟北沟后缘侧壁	5 740~6 230	15 682.43
冰碛物(BQ1)	则隆弄沟北沟沟道内	3 790~4 300	63 110.03
冰碛物(BQ2)	则隆弄沟南沟沟道内	3 790~4 690	158 690.64

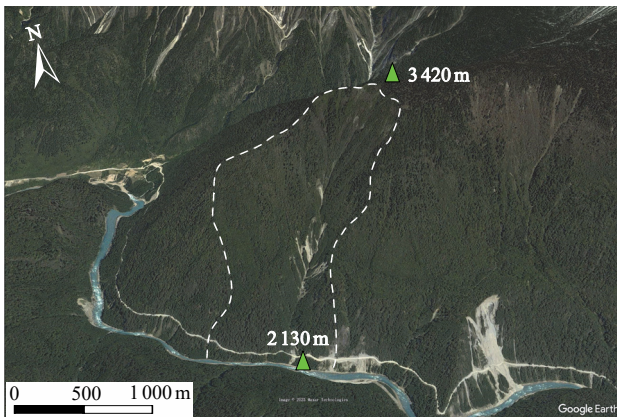
### 4.3 加玛其名沟崩滑型堵江

加玛其名沟位于西藏自治区林芝市波密县境内，地处索通至通麦之间，距通麦直线距离约 5 km。该沟为帕隆藏布右岸典型山地沟谷，沟长约 2.3 km，垂直高差约 1 300 m，地形起伏剧烈。纵剖面坡度大、沟道陡峻，横剖面整体呈典型的“V”型结构，显示出强烈的侵蚀下切作用。沟后缘呈扇形展开(见图 11(a))，为高位滑坡与崩塌的主要启动区，具备典型的高山峡谷崩滑地貌特征。1950 年 8 月 15 日墨脱—察隅地震诱发了加玛其名沟内多处中小型崩塌与滑坡灾害(见图 11(b), (c))，滑体自沟谷两侧高陡坡面发育并沿沟道纵向汇集，形成典型的“多源—汇流—入江”滑坡物质运移模式。崩滑体最终在沟口区域大规模堆积，进入帕隆藏布主河道，造成河道短时堵塞，对下游通麦地区构成威胁。地震后，加玛其名沟区域呈现出滑坡灾害活动持续性强、频率高的特征<sup>[1]</sup>。遥感影

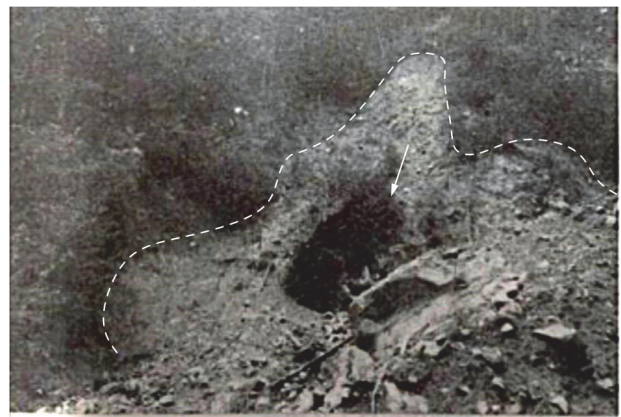
像(见图 11(c), (d))显示，地震后沟域内坡面多处持续演化，滑坡遗迹清晰可辨，坡面物质频繁向下运移进入河道。

### 4.4 扎曲—希让段滑坡群

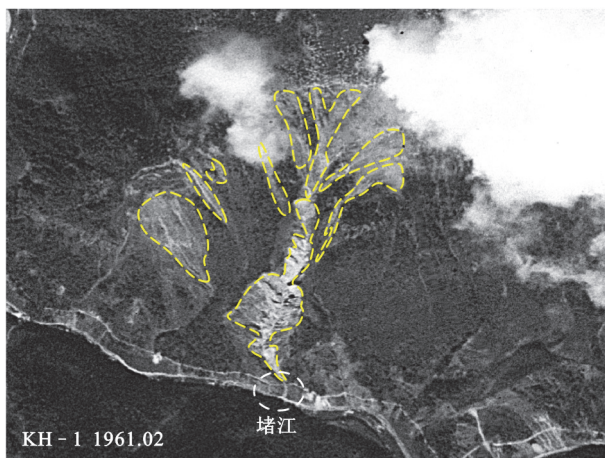
在扎曲—希让段，除特大型滑坡外，沿雅鲁藏布江及其主要支流两岸，广泛发育有规模不一、形态各异的滑坡，空间上呈明显的聚集分布(见图 12)。这类滑坡集中出现在河谷陡峭边坡、急转弯部位及断裂构造活跃带，受控于强烈水动力侵蚀、地形坡度突变及深切割地貌特征，表现出强烈的空间聚集性和构造地貌耦合特征。遥感影像显示，即便在震后十多年，部分滑坡迹象仍然清晰可辨，滑带边界、堆积前缘、沟蚀纹理等保留完好，表现出典型的强震滑坡遗迹特征。滑坡体虽未引发堰塞湖等次生灾害，但其物质大量进入江中，形成跌水坎与局部淤塞带，改变了原有河道地貌结构和水动力条件，具有明显的震后地貌演化特征。



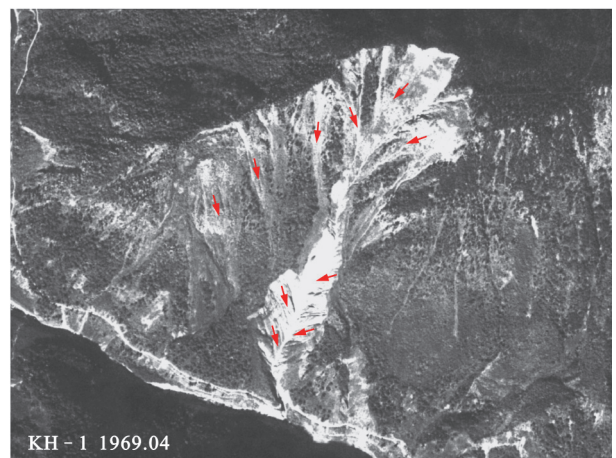
(a) 现今沟域灾害发育特征  
(a) Current geomorphic features



(b) 1950 年地震时沟域内滑坡照片<sup>[1]</sup>  
(b) Photograph of earthquake-induced landslides within the gully taken in 1950<sup>[1]</sup>



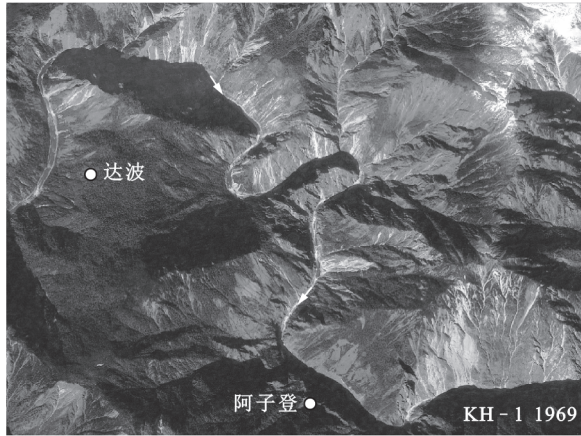
(c) 1961 年加玛其名沟遥感影像  
(c) 1961 satellite imagery of the Jiamaqiming Gully



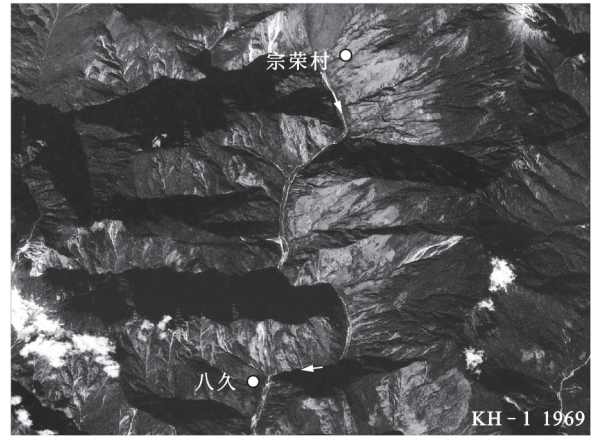
(d) 1969 年加玛其名沟遥感影像  
(d) 1969 satellite imagery of the Jiamaqiming Gully

图 11 1950 年墨脱—察隅地震诱发加玛其名沟整沟域崩滑型堵江灾害

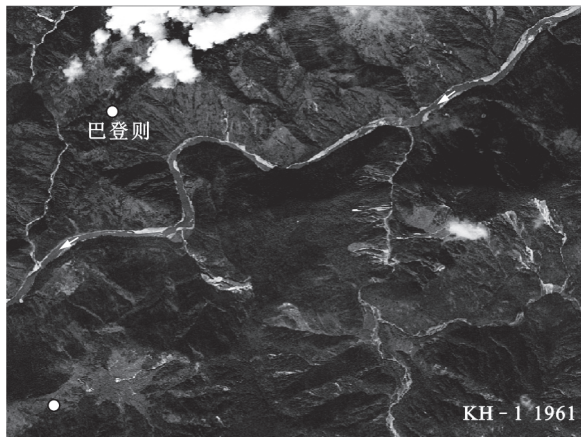
Fig.11 Entire gully-scale landslide damming event in the Jiamaqiming Gully triggered by the 1950  $M_s$  8.6 Medog—Zayu earthquake



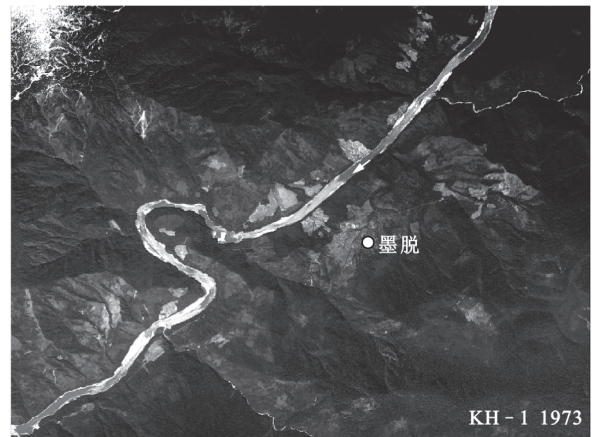
(a) 达波—阿子登段  
(a) Dabo—Azideng section



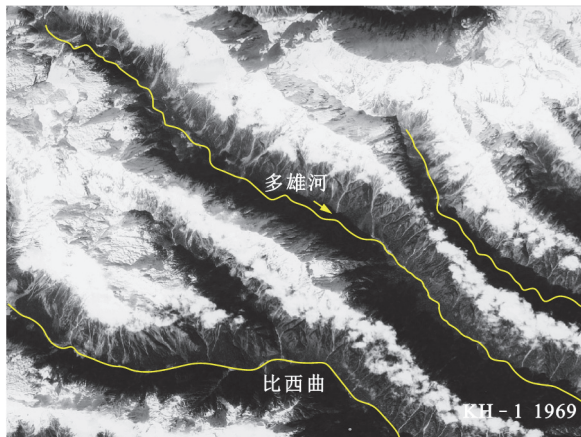
(b) 宗荣村—八久段  
(b) Zongrong—Bajiu section



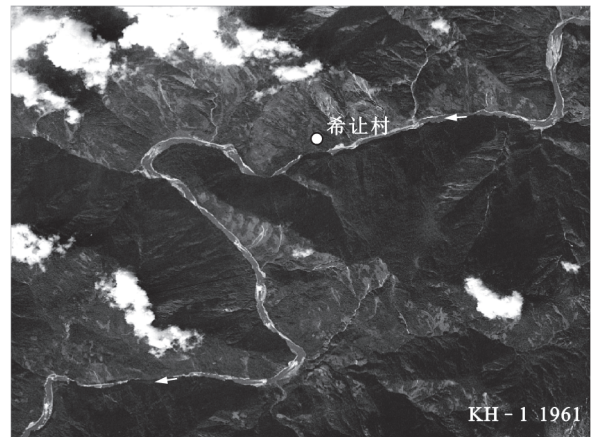
(c) 巴登则段  
(c) Badengze section



(d) 墨脱段  
(d) Medog section



(e) 比西曲和多雄河谷段  
(e) Bixi and Duoxiong river section



(f) 希让村段  
(f) Xirang section

图 12 1950 年墨脱—察隅地震诱发带状滑坡群

Fig.12 Belt-like distribution of landslide clusters triggered by the 1950  $M_s$  8.6 Medog—Zayu earthquake

## 5 问题讨论

### 5.1 墨脱—察隅地震波

墨脱—察隅地震是仪器确定震级为 8.6 级的少数地震之一<sup>[41-42]</sup>。世界各地的长、短周期地震仪都

记录到了这次地震，由于地壳中的 Love 波和/或 Rayleigh 波引起实际地面运动，在日本东京(TOK)、瑞士伯尔尼(BER)、德国斯图加特(STU)、英国基尤(KEW)和法国斯特拉斯堡(STR)台站振幅达到约 10 mm 的量级。在帕萨迪纳  $R_3$  的 Airy 波段地面运动达到 2 mm。挪威和英国出现了地震引发的地荡

(seismic seiches), 是由周期范围在 60~180 s 的 Love 波震动湖泊和峡湾引起的, 水波振幅最大达到 100 cm<sup>[43]</sup>。历史地震图是开展地震学研究和地震预测工作的宝贵资料, 但研究集中在中国境外台站波形的分析<sup>[44-48]</sup>。本文收集并整理了 1950 年墨脱—察隅  $M_s$  8.6 级大地震期间, 在中国南京水晶台地震台记录的原始地震波形图像。南京水晶台地震台位于南京市中山陵园南麓东新村(32° 02.8'N, 118° 47.9'E), 海拔 607 m, 地基岩性为坚硬的石英砂岩。该台站早期配备有 200 kg(H 分量)和 80 kg(Z 分量)维歇尔式地震仪, 以及一台伽魏式三分量地震仪。南京地震观测的历史可追溯至 1931 年 3 月, 在竺可桢倡导和金咏深主持下, 原北极阁地震台建于南京钦天山山顶。抗战期间地震台迁至重庆北碚, 抗战胜利后于 1946 年秋迁回南京并重新设台, 命名为“中国南京水晶台地震台”, 隶属于当时的经济部中央地质调查所<sup>[49]</sup>。这次地震是我国有仪器记录以来震级最

高的地震之一, 其纸质地震图完整记录了远震波传播过程中的动态特征(见图 13)。

震中地区冲积层加速度估计为 0.5 g<sup>[4]</sup>, S. T. G. Raghukanth<sup>[50]</sup>利用 D. Motazedian 和 G. M. Atkinson<sup>[51]</sup>提出的一维随机有限断层模拟方法绘制 1950 年事件的  $PGA$  等值线图, 结果显示最大  $PGA$  超过 0.9 g, 反映出地面振幅显著。尽管原始地震图存在图像模糊和纸张老化等问题, 但仍保留了丰富的震相信息和长距离传播特征。此次墨脱—察隅地震震中与南京台站相距约 2 160 km, 尽管地震波在传播过程中不断衰减, 但波形记录中仍表现出高幅度、长周期的震动特征, 部分波段“出格”, 即超出纸袋范围(见图 13)。波形图记录了地面在 NS, EW 及垂直(Z)3 个方向的地面位移波形及关键震相特征。每行对应时间约 28 min, 记录方向为从右向左、从下到上推进。图中明显可见的高振幅、低频面波是远震波动的典型特征, 震相初至清晰, 波形

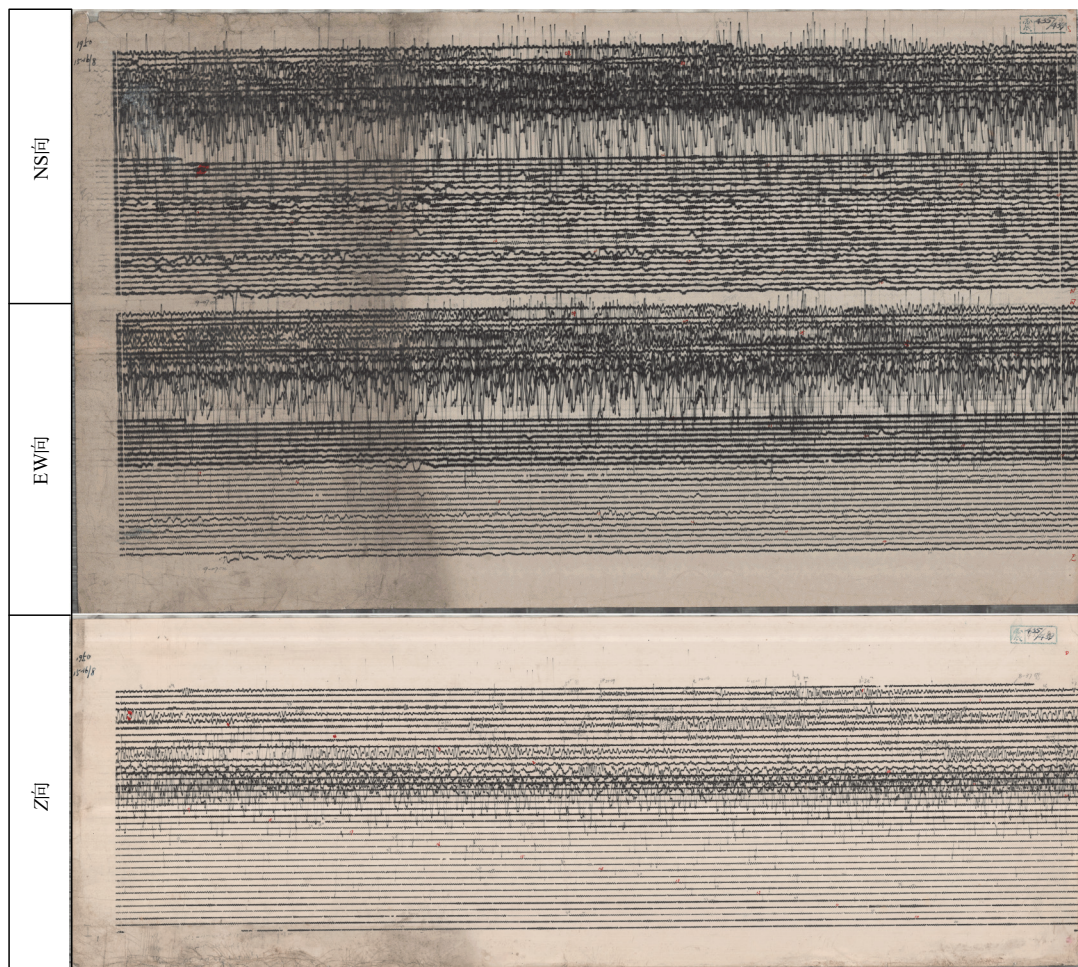


图 13 南京水晶台记录的 1950 年墨脱—察隅地震三向波形图(来源中国地震局地球物理研究所)

Fig. 13 Three-component seismograms of the 1950  $M_s$  8.6 Medog—Zayu earthquake recorded at Nanjing Seismic Station(Source: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration)

持续时间长。分析波形显示, NS 和 EW 方向的地震响应远大于 Z 方向, 表明水平向产生了更显著的地面扰动。

### 5.2 东构造结地区地震活动性研究

喜马拉雅造山带在过去一个世纪已发生多起特大强震, 例如 1897 年阿萨姆邦什隆地震、1934 年尼泊尔一比哈尔地震、1950 年墨脱—察隅地震以及 2015 年尼泊尔地震。地震及次生灾害对喜马拉雅及其邻区造成严重破坏<sup>[52]</sup>。统计 27° N~32° N、92° E~99° E 范围, 1900~2024 年震级  $M \geq 5.0$  地震共计 286 次, 其中  $M \geq 6.0$  地震 29 次, 地震活动呈现出显著的中强震、强震高频, 大地震、特大地震低频并存的特征。基于  $M \geq 5.0$  和  $M \geq 6.0$  地震频次, 采用古登堡 - 里克特关系式  $\lg N = a - bM$ (式中,  $N$  为特定震级范围内的地震次数,  $a$  和  $b$  为常数)估算得到区域  $b$  值约为 0.99, 反映该区地震活动具有典型的震级-频次分布特征。震源深度主要集中于 0~40 km 范围, 地震多属浅源事件。震级以  $M_{5.0} \sim 6.0$  为主, 表征该区域构造活动以中等能量释放为主。

基于 1900 年以来地震目录, 从时间演化来看,  $M \geq 6.0$  地震共 29 次, 平均重现期约为 4.3 a;  $M \geq 7.0$  地震 3 次, 平均重现期约为 41 a, 但均集中发生于 1950 年之前;  $M \geq 8.0$  地震仅 1950 年墨脱—察隅  $M_{8.6}$  级特大地震一例, 推测其重现期超过百年。整体地震活动可划分为 3 个阶段: (1) 1900~1945 年为低活动阶段, 地震事件稀少, 推测区域构造应力处于积累期; (2) 1945~1970 年为快速释放阶段, 地震活动显著增强, 1950 年  $M_{8.6}$  级地震释放能量达

$4.207 \times 10^{17} \text{ J}$ , 为典型的主震型能量释放事件, 构成能量 - 时间曲线的跃变拐点(见图 14); (3) 1970 年至今虽中强震活动频繁, 但缺乏  $M \geq 7.0$  地震, 表明该区处于持续构造活动但尚未达到临界破裂条件的孕震阶段。综上, 东构造结地区具有强烈的构造活动性及显著的阶段性地震分布特征, 当前震级分布与能量释放模式提示未来发生强震的潜在风险, 应加强该区域的地震及次生灾害危险性评估。

### 5.3 极端地震下高位滑坡挑战与风险减缓

A. Ari Ben-Menahem 等<sup>[4]</sup>根据航空侦察表明, 大约 1 万  $\text{km}^2$  的山区遭遇了滑坡灾害, 许多河道大量淤积, 部分河流永久性地改道。M. B. Ramachandra Rao<sup>[44]</sup>在其著作第 8 页中写道: “根据航空侦察的结果显示, 一个长约 200 英里、宽约 60 英里的区域中约有 6 000 平方英里的土地发生了严重滑坡。”此外, 1950 年墨脱—察隅地震造成沿雅鲁藏布江、尼洋河、察隅河两岸一些河漫滩、河流阶地边沿、河谷两侧坡积物中, 出现规模不等的地裂缝、液化、喷沙和冒水泡等现象, 个别地方出现马背状隆起<sup>[53-55]</sup>, 深厚覆盖层也遭受了严重的震害破坏。目前, 沿雅鲁藏布江、帕隆藏布、易贡藏布分布有大量潜在高位地质灾害隐患点, 如色东普沟(94.93 E, 29.77 N)、易贡(94.96 E, 30.20 N)、然乌冰川(96.66 E, 29.48 N)、勒白沟(94.94 E, 29.70 N)和白马狗熊沟(95.06 E, 29.71 N)等。结合 InSAR 技术, 发现大量隐患点每年均在持续变形(见图 15)。利用 2016 年 6 月 15 日与 2018 年 3 月 7 日两景降轨 ALOS/PALSAR - 2 影像计算获得了勒白沟二维地表形变,

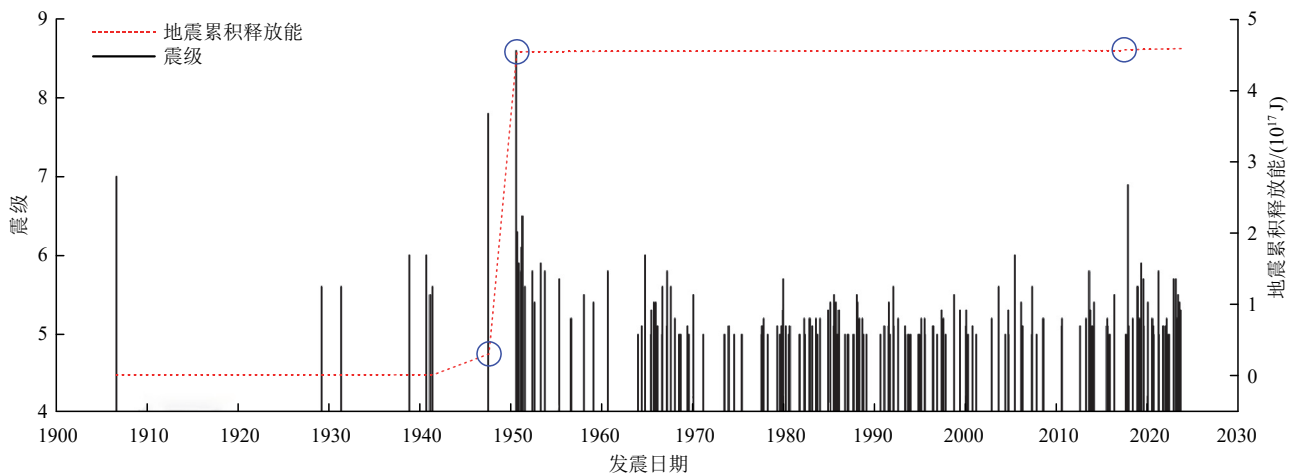


图 14 20 世纪以来东构造结地区震级 - 时间(M-T)分布与地震累积释能曲线

Fig.14 Magnitude - time(M-T) distribution and cumulative seismic energy release curve in the Eastern Himalayan Syntaxis since the 20th century

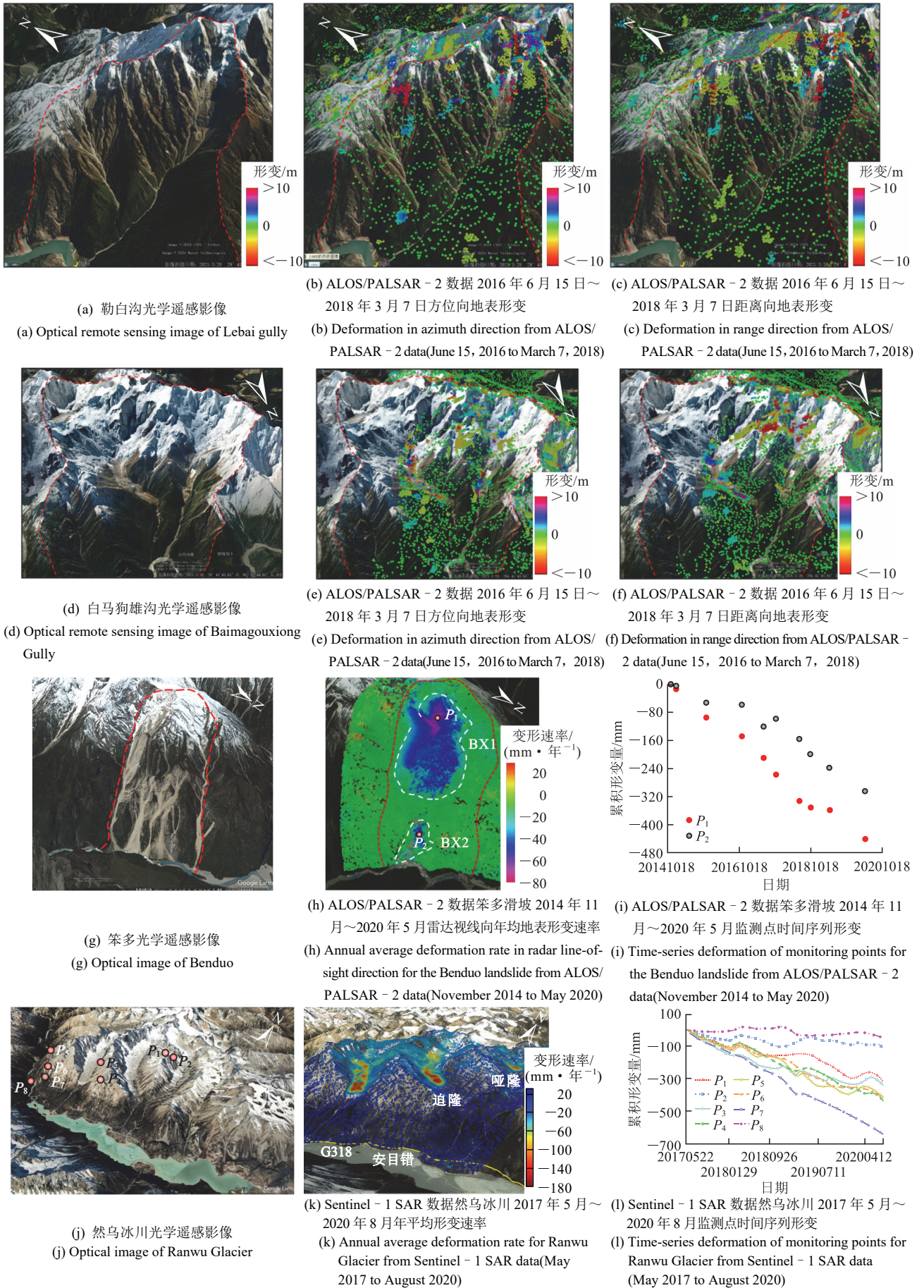


图 15 高位地质灾害隐患点变形监测

Fig.15 Deformation monitoring of high-altitude remote geological hazards

最大变形量为-27.4 m。然乌湖冰川群共有 3 处主要风险区域，其年均形变速率均已达每年 160 mm 以上，且最大值达每年 180 mm。未来，在极端地震作用下，极易触发震裂山体失稳以及冰川运动，形成堵江灾害，应该防范。

地震滑坡及其后效应研究一直受到国内外学者广泛关注，但过去主要聚焦于中低海拔区域的传统滑坡，对于高位陡峻山体的地震动响应缺乏认识。近年来，高位远程地质灾害频繁发生，如 1950 年则隆弄沟滑坡、2000 年易贡滑坡及 2018 年色东普沟滑坡等事件(见图 16(a)~(d))，尽管触发机制存在差异(地震、气候变化、降雨等)，但在远程运动、强动

力剪切及链式成灾等方面与 1950 年地震滑坡具有相似的动力学特征，致灾性极强。高位滑体进入河道后形成大型堰塞坝(见图 16(e), (g))，导致回水淹没道路、桥梁等基础设施，溃坝后又形成灾难性洪水，给人类工程活动带来极大挑战(见图 16(f), (h), (i))。1950 年墨脱—察隅 8.6 级地震对高位滑坡风险防控具有重要警示意义。随着重大工程的持续推进，未来亟需开展复杂地形条件下高位陡峻山体地震动放大效应与深厚覆盖层的动力响应定量研究，建立适用于高山、极高山区的地震加速度空间分布模型及响应系数体系，为高海拔地区地震滑坡的风险识别与灾害预测提供理论支撑与技术基础。

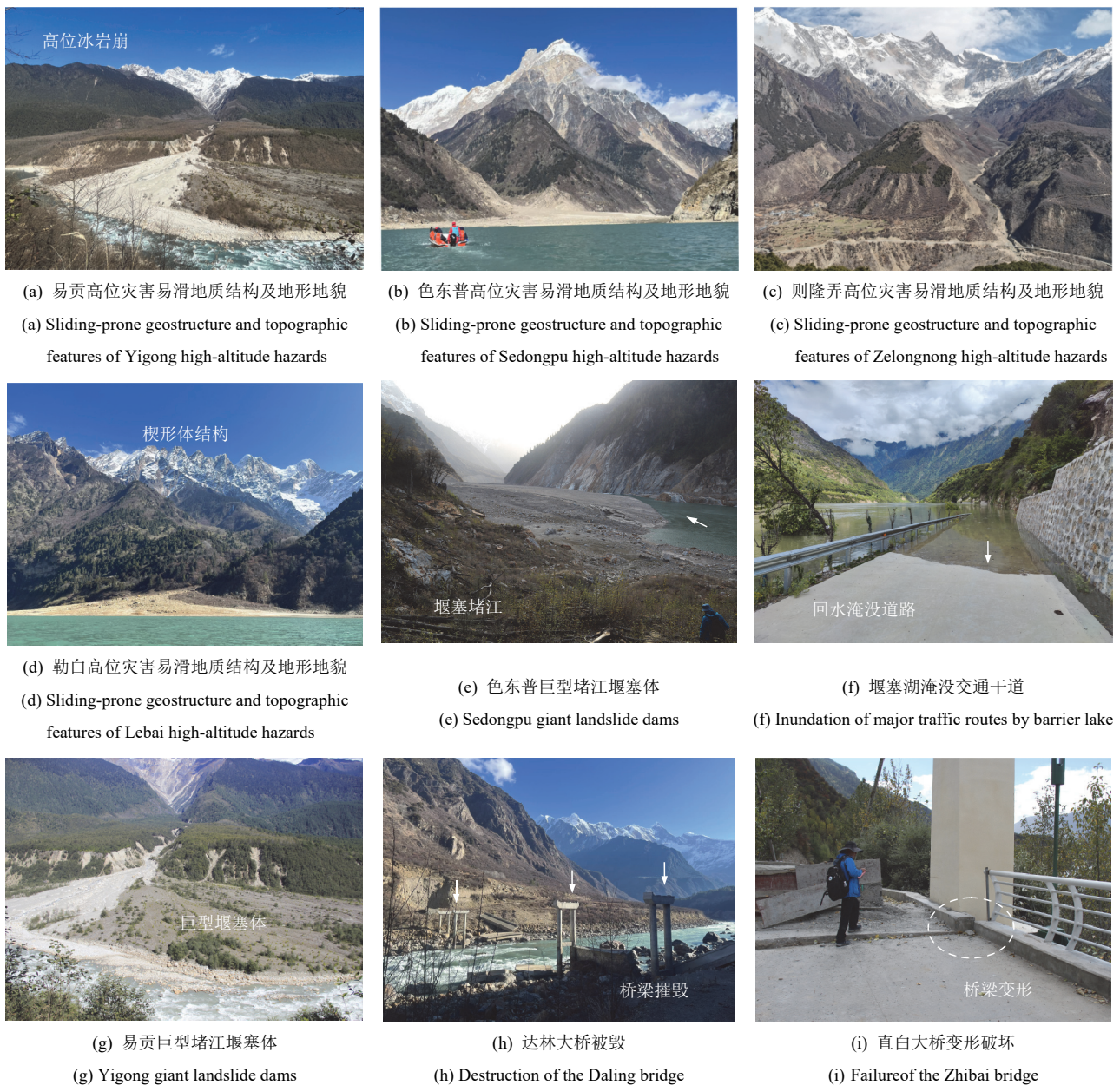


图 16 典型高位远程地质灾害及其工程致灾效应

Fig.16 Typical high-altitude remote geological hazards and engineering disaster effects

## 6 结 论

墨脱—察隅 8.6 级地震为有仪器记录以来震级最高的内陆型地震。本文首次对墨脱—察隅 8.6 级地震在南迦巴瓦地区诱发的滑坡分布规律及模式进行研究, 主要结论如下:

(1) 识别编录南迦巴瓦构造结区域(米林卧龙至墨脱都登下游区段)地震滑坡 920 处, 滑坡集中分布于海拔 2 000~4 000 m、坡向 SE 向、S 向和 WS 向、坡度 20°~50° 范围、曲率 -2.5~-1 和 1~2.5 范围以及距雅江 4 km 内。滑坡受断层控制明显, 其中主中央逆冲断裂、墨脱断裂和阿帕龙断裂影响显著。

(2) 墨脱—察隅地震诱发南迦巴瓦地区滑坡—堵江灾害可归纳为 4 种典型模式: 坐落型高位滑坡、超高位超远程型滑坡泥石流、整沟域崩滑型与群发型滑坡。分别以更邦拉山特大型滑坡、则隆弄沟特大型滑坡、加玛其名沟崩滑及扎曲—希让段滑坡群为代表, 进行了灾害事件分析和地形重建。其中, 更邦拉山启动物源体积约  $6.53 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 运动约 1 100 m 后堵江, 堵塞时间达 15~16 h。则隆弄启动物源体积约  $2.37 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 远距离运动后堵江形成上百米高冰碛坝。

(3) 墨脱—察隅  $M_s$  8.6 级地震释放能量达  $4.207 \times 10^{17} \text{ J}$ 。在距震中约 2 160 km 的南京水晶台记录的震相图中, 地震波振幅明显, 部分波段超出图纸范围, 地震释放能量极高。东构造结地区地震活动呈现出显著的中强震、强震高频, 大地震、特大地震低频并存的特征。20 世纪以来地震活动演化可划分为低活动、快速释放与孕震 3 个阶段, 当前震级分布与能量释放模式表征出未来发生强震的潜在风险。

(4) 该区域强震触发的地质灾害具有高位启动、远程运动和链式成灾等特征, InSAR 监测显示研究区多个隐患点每年均在持续大变形, 极易在极端地震下形成高位滑坡堵江灾害, 危及工程安全。

1950 年墨脱—察隅 8.6 级地震触发大规模高位滑坡灾害, 对区域工程在高位滑坡风险识别与防控方面具有重要警示意义。研究结果可为南迦巴瓦地区高位滑坡隐患排查、防灾减灾规划和重大工程布局提供基础依据, 未来应加强强震尤其是极端地震下高位陡峻山体动力响应及失稳破坏模式研究, 建立极端地震条件下高位滑坡—堵江链式灾害的预警

体系与应急处置方法。

**致谢:** 感谢在野外地质调查、资料收集与学术讨论过程中对本文研究提供帮助的地质工作者。感谢中国地震局地球物理研究所提供的南京台站墨脱—察隅地震原始记录图。

## 参考文献(References):

- [1] 西藏自治区科学技术委员会, 国家地震局科技监测司. 西藏察隅当雄大地震[M]. 拉萨: 西藏人民出版社, 1988: 1 - 166.(Xizang Autonomous Region Science and Technology Committee, Department of Science and Technology Monitoring, China Earthquake Administration. The great earthquake in Zayu and Dangxiong, Xizang[M]. Lhasa: Xizang People's Publishing House, 1988: 1 - 166.(in Chinese))
- [2] CHOUHAN R K S, GAUR V K, SINGH J. Investigations on the aftershock sequence of the great Assam earthquake of August 15, 1950[J]. *Annals of Geophysics*, 1974, 27(1/2): 245 - 266.
- [3] BÄTH M, BENIOFF H. The aftershock sequence of the Kamchatka earthquake of November 4, 1952[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1958, 48(1): 1 - 15.
- [4] BEN-MENAHEM A, ABOODI E, SCHILDR R. The source of the great Assam earthquake—an interplate wedge motion[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1974, 9(4): 265 - 289.
- [5] TILLOTSON E. The great Assam earthquake of august 15, 1950[J]. *Nature*, 1951, 167: 128 - 130.
- [6] 中国科学院地震工作委员会历史组. 中国地震资料年表(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 1956: 1 370 - 1 376.(Committee for Historical Seismic Data, Chinese Academy of Sciences. China earthquake historical data chronology(Vol. 2)[M]. Beijing: Science Press, 1956: 1 370 - 1 376. (in Chinese))
- [7] 顾功叙, 林庭煌, 时振梁. 中国地震目录(公元前 1831 年公元—1969 年)[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 1 - 862.(GU Gongxu, LIN Tinghuang, SHI Zhenliang. Catalogue of Chinese earthquakes(1831 BC-1969 AD)[M]. Beijing: Science Press, 1983: 1 - 862.(in Chinese))
- [8] 西藏自治区科学技术委员会, 西藏自治区档案馆. 西藏地震史料汇编[M]. 拉萨: 西藏人民出版社, 1982: 1 - 586.(Xizang Autonomous Region Science and Technology Committee, Xizang Autonomous Region Archives. Compilation of historical earthquake data in Xizang[M]. Lhasa: Xizang People's Publishing House, 1982: 1 - 586.(in Chinese))
- [9] CHEN W P, MOLNAR P. Seismic moments of major earthquakes and the average rate of slip in central Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(20): 2 945 - 2 969.
- [10] 詹慧丽, 白 玲, 陈治文. 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[J]. 地球与行星物理理论评: 中英文, 2023, 54(1): 44 - 55.(HAN Huili, BAI Lin, CHEN Zhiwen. Source parameters, seismogenic structures of the 1950 Medog-Zayu  $M_s$ 8.6 earthquake and seismicity in the surrounding areas[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2023, 54(1): 44 - 55.(in Chinese))
- [11] COUDURIER-CURVEUR A, TAPPONNIER P, OKAL E, et al. A composite rupture model for the great 1950 Assam earthquake across the cusp of the East Himalayan Syntaxis[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 531: 115928.
- [12] 李保昆, 刁桂苓, 徐锡伟, 等. 1950年西藏察隅 M8.6 强震序列震源参数复核[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 4 254 - 4 265.(LI Baokun, DIAO Guiling, XU Xiwei, et al. Redetermination of the source parameters of the Zayü, Tibet M8.6 earthquake sequence in 1950[J]. Chinese Journal of Geophysics(in Chinese), 2015, 58(11): 4 254 - 4 265.(in Chinese))
- [13] LOMBARDO L, OPITZ T, ARDIZZONE F, et al. Space-time landslide predictive modelling[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 209: 103318.
- [14] 殷跃平, 张永双. 汶川地震工程地质与地质灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1 - 545.(YIN Yueping, ZHANG Yongshuang. Engineering geology and geological disasters of Wenchuan earthquake[M]. Beijing: Science Press, 2013: 1 - 545.(in Chinese))
- [15] 许冲. 汶川地震滑坡分布规律与危险性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 432.(XU Chong. Distribution law and risk assessment for Wenchuan earthquake-triggered landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 432.(in Chinese))
- [16] 范宣梅, 王欣, 戴岚欣, 等. 2022年  $M_s$ 6.8 级泸定地震诱发地质灾害特征与空间分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1 504 - 1 516.(FAN Xuanmei, WANG Xin, DAI Lanxin, et al. Characteristics and spatial distribution pattern of  $M_s$ 6.8 Luding Earthquake occurred on September 5, 2022[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1 504 - 1 516.(in Chinese))
- [17] KARGEL J S, LEONARD G J, SHUGAR D H, et al. Geomorphic and geologic controls of geohazards induced by Nepal's 2015 Gorkha earthquake[J]. Science, 2016, 351(6269): aac8353.
- [18] POKHAREL B, ALVIOLI M, LIM S. Assessment of earthquake-induced landslide inventories and susceptibility maps using slope unit-based logistic regression and geospatial statistics[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 21 333.
- [19] YIN Y P, LI B, WANG W P. Dynamic analysis of the stabilized Wangjiayan landslide in the Wenchuan  $M_s$  8.0 earthquake and aftershocks[J]. Landslides, 2015, 12: 537 - 547.
- [20] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩塌滑坡灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1 239 - 1 249.(HUANG Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1 239 - 1 249.(in Chinese))
- [21] SHIN A, TAKASHI K, HIROYUKI F. Trampoline effect in extreme ground motion[J]. Science, 2008, 322(5902): 727 - 730.
- [22] 殷跃平, 成余粮, 王军, 等. 汶川地震触发大光包巨型滑坡遥感研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(5): 674 - 684.(YIN Yueping, CHEN Yuliang, WANG Jun, et al. Remote sensing research on Daguangbao gigantic rockslide triggered by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(5): 674 - 684.(in Chinese))
- [23] QI S W, HE J X, ZHAN Z F. A single surface slope effects on seismic response based on shaking table test and numerical simulation[J]. Engineering Geology, 2022, 306: 106762.
- [24] 殷跃平, 王猛, 李滨, 等. 汶川地震大光包滑坡动力响应特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1 969 - 1 982.(YIN Yueping, WANG Meng, LI Bin, et al. Dynamic response characteristics of Daguangbao landslide triggered by Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1 969 - 1 982.(in Chinese))
- [25] YIN Y P, ZHENG W M, LI X C, et al. Catastrophic landslides associated with the M8.0 Wenchuan earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011, 70(1): 15 - 32.
- [26] 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))
- [27] 朱日祥, 赵盼, 赵亮. 新特提斯洋演化与动力过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(1): 1 - 25.(ZHU Rixiang, ZHAO Pan, ZHAO Liang. Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(1): 1 - 25.(in Chinese))
- [28] SIMONS W J F, SOCQUET A, VIGNY C, et al. A decade of GPS in Southeast Asia: Resolving Sundaland motion and boundaries[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2007, 112(B6): B06420.
- [29] LI J B, DING W W, LIN J, et al. Dynamic processes of the curved subduction system in Southeast Asia: A review and future perspective[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 217: 103647.
- [30] TIMSINAP, HEARN T M, NI J F. Crust and mantle flow from central Tibetan Plateau to the Indo-Burma subduction zone[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2024, 129(10): e2023JB027540.
- [31] 殷跃平, 李滨, 张田田, 等. 印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 1 - 8.(YIN Yueping, LI Bin, ZHANG Tiantian, et al. The February 7

- of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 1 - 8.(in Chinese)
- [32] YIN Y P, LI B, GAO Y, et al. Geostrutures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(1): 66 - 101.
- [33] 白 玲, 宋博文, 李国辉, 等. 喜马拉雅造山带地震活动及其相关地质灾害[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(6): 629 - 639.(BAI Ling, SONG Bowen, LI Guohui, et al. Seismic activity in the Himalayan orogenic belt and its related geohazards[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(6): 629 - 639.(in Chinese))
- [34] DEMETS C, MERKOURIEV S, JADES. High-resolution reconstructions and GPS estimates of India-Eurasia and India-Somalia plate motions: 20 Ma to the present[J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 220(2): 1 149 - 1 171.
- [35] 吴中海. 青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造体系控震作用: 以 1990 年以来强震活动为例[J]. *地质力学学报*, 2024, 30(2): 189 - 205. (WU Zhonghai. The earthquake-controlling process of continental collision-extrusion active tectonic system around the Qinghai-Tibet Plateau: A case study of strong earthquakes since 1990[J]. *Journal of Geomechanics*, 2024, 30(2): 189 - 205.(in Chinese))
- [36] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 印度-亚洲碰撞大地构造[J]. *地质学报*, 2011, 85(1): 1 - 33.(XU Zhiqin, YANG Jingsui, LI Haibing, et al. On the Tectonics of the India-Asia Collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(1): 1 - 33.(in Chinese))
- [37] 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1 607 - 1 620. (ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Zhuqi, et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China(in Chinese)[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2013, 43(10): 1 607 - 1 620.(in Chinese))
- [38] KINGDON-WARD F. The Assam Earthquake of 1950[J]. *The Geographical Journal*, 1953, 119(2): 169 - 182.
- [39] KINGDON-WARD F. Aftermath of the great Assam earthquake of 1950[J]. *The Geographical Journal*, 1955, 121(3): 290 - 303.
- [40] KEEFER D K. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution—the 1989 Loma Prieta, California event[J]. *Engineering geology*, 2000, 58(3/4): 231 - 249.
- [41] RICHTER C F. *Elementary seismology*[M]. San Francisco: W H Freeman, 1958: 3 - 739.
- [42] BRUNE J N, KING C Y. Excitation of mantle Rayleigh waves of period 100 seconds as a function of magnitude[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1967, 57(6): 1 355 - 1 365.
- [43] KVALE A. Seismic seiches in Norway and England during the Assam earthquake of August 15, 1950[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1955, 45(2): 93 - 113.
- [44] RAMACHANDRA RAO M B. A compilation of papers on the Assam earthquake of August 15, 1950[M]. Calcutta: The Central Board of Geophysics, 1953: 1 - 112.
- [45] AKIMA T. On dispersion curves of surface waves from the great Assam earthquake of August 15, 1950[J]. *Bulletin of Earthquake Research Institute*, 1952, 29: 237 - 257.
- [46] EWING M, PRESS F. An investigation of mantle Rayleigh waves[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1954, 44(2A): 127 - 147.
- [47] TOKSÖZ M N, BEN-MENAHEN A. Velocities of mantle Love and Rayleigh waves over multiple paths[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1963, 53(4): 741 - 764.
- [48] BEN-MENAHEN A. Observed attenuation and Q values of seismic surface waves in the upper mantle[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, 70(18): 4 641 - 4 651.
- [49] 中国地震局监测预报司. 中国早期地震台历史地震图鉴(第 3 卷)[M]. 北京: 地震出版社, 2005: 1 - 228.(Department of Earthquake Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration. *Historical seismograms atlas of early seismic stations in China*(Vol. 3)[M]. Beijing: Seismological Press, 2005: 1 - 228.(in Chinese))
- [50] RAGHUKANTH S T G. Simulation of strong ground motion during the 1950 Great Assam earthquake[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2008, 165: 1 761 - 1 787.
- [51] MOTAZEDIAN D, ATKINSON G M. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(3): 995 - 1 010.
- [52] BILHAM R, GAUR V K, MOLNAR P. Himalayan seismic hazard[J]. *Science*, 2001, 293(5534): 1 442 - 1 444.
- [53] 西藏察隅、当雄地震考察队. 当雄地震、察隅地震考察概况[J]. *四川地震*, 1986, (1): 39 - 41.(Chayu-Dangxiong Earthquake Investigation Team. Overview of the Investigation on Dangxiong and Chayu Earthquakes[J]. *Sichuan Earthquake*, 1986, (1): 39 - 41.(in Chinese))
- [54] PODDAR M C. Preliminary report of the Assam earthquake of 15th August, 1950[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 1952, (2): 11 - 13.
- [55] REDDY D V, NAGABHUSHANAM P, KUMAR D, et al. The great 1950 Assam Earthquake revisited: field evidences of liquefaction and search for paleoseismic events[J]. *Tectonophysics*, 2009, 474(3/4): 463 - 472.