

藏东南八宿县林卡乡高位古滑坡群的孕灾条件与形成机制

马昊¹, 汪发武^{1*}, 胡明鉴², 莫洵懿², 付子进¹, 张耀祖², 尤琪¹, 曹生喆¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 藏东南地处青藏高原东南缘, 板块构造活跃、地形起伏剧烈, 大型高位古滑坡密集分布。为进一步揭示藏东南大型高位古滑坡的孕灾机制, 以八宿县林卡乡为研究区, 通过高分辨率遥感影像解译, 识别和厘定古滑坡边界, 建立林卡乡古滑坡编目数据集; 基于 GIS 空间分析和数据统计, 查明林卡乡古滑坡群的空间分布特征与主控孕灾因子; 通过现场调查、无人机航拍和地球物理勘探, 揭示典型大型高位古滑坡的形成机制。结果表明, 八宿县林卡乡境内共发育 51 处高位古滑坡, 其中 50 处为大型滑坡, 古滑坡聚集分布于深切河谷的谷坡之上。岩性和地形起伏度是控制该区域古滑坡分布的关键因素, 砂板岩地层和起伏度介于 1000~1600 m 之间的陡峻地形对古滑坡的发育最有利。对林卡乡孜嘎村附近 4 处大型高位古滑坡的调查分析表明, 其均为弯曲倾倒-拉裂滑移型破坏。由于林卡乡境内砂板岩地层普遍具有中-陡倾的薄-中厚层状结构, 为典型的易倾倒岩体, 且已探明古滑坡的主滑方向多与区域地层的优势倾向一致或相反, 符合弯曲倾倒所致滑坡的典型运动特征, 推测岩层长期的弯曲倾倒变形是造成林卡乡古滑坡群聚发育的重要因素, 倾倒岩体的拉裂滑移是区域内古滑坡的主要破坏机制。

关键词: 青藏高原; 高位滑坡; 弯曲倾倒; 地质灾害; 滑坡演化机制

中图分类号: P642 **收稿日期:** 2025-06-24

Forming Conditions and Failure Mechanism of Clustered High-Position Ancient Landslides in Linka Township, Basu County, Tibet Autonomous Region, China

MA Hao¹, WANG Fawu^{1*}, HU Mingjian², MO Xunyi², FU Zijin¹, ZHANG Yaozu², YOU Qi¹, CAO Shengzhe¹

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

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Southeastern Tibet, located at the southeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, is characterized by active plate tectonics and intense topographic relief, making it a high-incidence area for large high-position landslides. To investigate the forming mechanisms of large high-position landslides in southeastern Tibet, ancient landslides in Linka Township, Basu County, were identified through remote sensing interpretation to establish a landslide inventory. GIS-based spatial analysis and statistical methods were then applied to characterize their spatial distribution and determine the dominant controlling factors. Finally, four representative high-position ancient landslides near Ziga Village were selected for field investigation to further examine their forming mechanisms. Remote sensing interpretation identifies 51 high-position ancient landslides, all located on deeply incised valley flanks, primarily concentrated along the slopes of the Nujiang and Waqu Rivers. Statistical analysis reveals that lithology and topographic relief are the primary environmental controls on their distribution. Ancient landslides are most likely to develop in sandstone-slate strata and in areas with relief between 1,000 and 1,600 m. Field investigations of four typical ancient landslides near Ziga Village in Linka Township reveal that they all

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 42230715)

第一作者简介: 马昊 (1993-), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害机理研究, ORCID: 0000-0001-9685-4809, E-mail: mah@tongji.edu.cn.

通讯作者简介: 汪发武 (1965-), 男, 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.

developed in fragmented rock masses induced by long-term flexural toppling. The widespread occurrence of moderately to steeply dipping, layered, weakly metamorphosed sandstone and slate—typical topple-prone rock masses—in the landslide areas of Linka Township, combined with the sliding directions of ancient landslides generally aligning with or opposing the dominant bedding orientation, suggests that toppling was likely a widespread pre-existing failure mechanism prior to the formation of these ancient landslides.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; High-position landslides; Flexural toppling; Geological hazards; Landslide evolution mechanism

引言

高位滑坡指灾害源区位于高陡斜坡上部,启动位置高于承灾对象的滑坡,其剪出口与坡底间高差通常大于 100 m,甚至可达数千米(殷跃平和高少华, 2024)。高位滑坡常具有复杂的势动能转化过程,易导致成灾范围数百米,甚至数千米的远程复合型链式地质灾害(殷跃平等, 2017; 殷跃平和高少华, 2024)。青藏高原东南缘地带山高谷深,板块构造运动活跃,是高位滑坡灾害的高发区。近年来,该地区已发生多起影响极为巨大的大型高位滑坡,如: 2000 年易贡滑坡由海拔 5520 m 高程的雪山向下高速滑动,落差约 3330 m,滑程达 8 km,堆积体截断易贡藏布江,形成库容可达 $288 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的滑坡堰塞湖(殷跃平, 2000); 2018 年 10 月 10 日和 11 月 3 日,西藏自治区江达县白格村金沙江右岸先后两次发生大规模高位滑坡,堵塞金沙江,形成堰塞湖,造成 3400 余间房屋倒塌,10.2 万人受灾(许强等, 2018); 2021 年印度 Chamoli 高位冰岩崩于海拔约 5500m 处高位坠落,高速撞击约 1800 m 下的谷底,并转化为泥石流,最终导致下由两座水电站被毁,超过 200 人死亡或失踪(Shugar et al., 2021)。高位滑坡极为显著的致灾效应严重制约了重大工程的规划和当地经济社会的发展。

随着近年来大型高位滑坡呈多发频发趋势,较多学者从形成机制(张永双等, 2023; 刘俊辰等, 2024)、运动过程(王玉峰等, 2022; 林棋文等, 2023)、致灾效应(殷跃平等, 2017; 史安文等, 2024)等不同角度对高位滑坡开展了研究,并着重于对滑坡的铲刮裹挟机制和远距离流态化致灾机制等的研究(王玉峰等, 2022; 何可等, 2024)。高位滑坡大多形成于高陡斜坡上部,人力常难以到达,特别是在青藏高原周缘,滑坡的源区常形成于

海拔大于 4000 m 的高山无人区,因此,极难采用常规的地面调查方法对高位滑坡的形成机制进行实地调查研究。目前的对高位滑坡起滑机制的研究多基于遥感技术展开,且主要聚焦于单体滑坡案例的研究,如许强等(2018)通过对历史遥感影像的分析得出白格滑坡区岩土体至少经历了长达 50 年的变形过程,部分区域的地表位移量接近 50 m。青藏高原周缘板块构造活跃(邢珂等, 2025; Dou et al., 2025),地震、断层活动、河流侵蚀、雪线变化等内外动力作用强烈,识别域内易灾地质结构并揭示其高位失稳破坏和冲击启动机理已成为亟待加强的重要研究方向(殷跃平和高少华, 2024)。

基于数据驱动的地质灾害孕灾因子分析是识别区域性滑坡优势孕灾条件的有效手段(窦杰等, 2023; 郭衍昊等, 2023)。Pánek 等(2024)通过对阿塞拜疆与格鲁吉亚 Kura 褶皱带的约 1600 处滑坡的统计分析,揭示了滑坡分布与褶皱生长的关系; Ma et al. (2024) 等对 2022 年四川泸定地震触发的超过 5000 处同震滑坡分析表明,滑坡的分布除受地震烈度的控制外还主要分布在具有较高地形起伏度的河谷陡坡上。样本数量是影响区域性的滑坡孕灾条件分析结果精度的关键(窦杰等, 2023)。然而对于青藏高原周缘地区而言,虽然近年来高位地质灾害呈多发频发趋势,但仍以零散的单体滑坡事件为主,新近发生的滑坡的数量仍难以支撑区域性的孕灾条件分析。

古滑坡是在地质历史时期形成的滑坡,研究其形成条件和机制有助于加强对潜在滑坡破坏机制的认识,从而指导当前的防灾减灾。在青藏高原地区,已有部分研究在古滑坡的识别和分析方面取得了卓有成效的进展,如: Wang et al. (2025) 对喜马拉雅山脉复杂的滑坡分布模式进行了分析,揭示了特殊岩性单元、距断层和水系的距离、坡度等对滑坡分布的主要贡献,并讨论了冰川对滑坡面积的影响; 戴福初和邓建辉(2020)则研究了青藏高原

东缘泛三江并流区的滑坡分布规律,强调了地形坡度、高程、相对高差、地层岩组及大地构造单元对滑坡分布的显著影响。识别区域内大型高位古滑坡并建立样本库,有助于克服新近滑坡样本不足的制约,为揭示高位滑坡孕灾条件提供有益见解。

八宿县位于西藏自治区东南部,地理区位重要,交通便利,县境内地质地貌多元,是青藏高原周缘复杂地质地貌环境的典型代表。为进一步深化对藏东南高位滑坡孕灾机制的认识,本研究以八宿县林卡乡为研究区,通过遥感解译、统计分析、现场调查等方法,对区内古滑坡的分布规律和孕灾机制进行了系统分析。研究成果有望为当地及具有邻近地区的高位滑坡防灾减灾提供理论支撑。

1 区域地质地貌背景

藏东南地处西藏自治区东南部(图 1a),区内发育著名的喜马拉雅东构造结,是印度大陆板块楔入欧亚大陆板块最强烈的部位之一。藏东南地区地质构造极为复杂,嘉黎断裂带、怒江断裂带等大型断裂带穿越该区。受印度板块俯冲挤压的影响,藏东南地区板块位移强烈,位移速率可达约 20 mm/yr,方向在藏东南地区逐渐由 NE 向 SW 向过渡(张培震等, 2003)。强烈的构造挤压造成区域内地壳隆升强烈,挤压变形显著,区内地应力水平较高(Huang et al., 2011)。藏东南地区地震活动频繁,如著名的 1950 年西藏墨脱 8.6 级地震,是我国有记录以来的最大地震(图 1a)。八宿县位于喜马拉雅东构造结东部,怒江断裂带呈 NW-SE 向贯穿县

境(图 1b)。受到板块挤压的强烈影响,区域内构造活动强烈,地层挤压变质作用强烈,板岩、千枚岩等浅变质岩系广泛分布。

地貌方面,藏东南地区地貌类型多样,山高谷深,高山、峡谷、冰川等地貌单元广泛分布。高山区海拔多在 4000m 以上,山峰常年积雪,冰蚀地貌发育。区内河流侵蚀强烈,著名的雅鲁藏布江“大拐弯”位于该区,怒江、澜沧江等大型河流也穿越该区,造成区内 V 型河谷发育,切割深度可达 3000 m。八宿县地处雅鲁藏布江流域与三江(怒江-澜沧江-金沙江)流域的过渡地带,念青唐古拉山余脉和横断山脉在此交汇。县境内地形起伏强烈,海拔介于 2600~6780 m 之间。地貌类型以高山峡谷、高原宽谷和冰川地貌为主,垂直分带现象显著(图 1b)。高山峡谷相间分布是八宿县最主要的地貌特征(图 1c),怒江干流以 SE 向穿越县域(图 1b)。高原宽谷主要分布在海拔较高的残存高原夷平面以上,海拔常在 4000 m 以上,以邦达北部地区较为典型。八宿县高山雪线普遍位于海拔 4500 m 以上(图 1c),冰蚀地貌发育,冰川、冰斗、冰湖、刀锋、刃脊、U 型冰川谷等大量存在(图 1b)。

本研究主要研究区林卡乡位于八宿县东南部,怒江干流右侧,区域面积约 1207 km²。林卡乡政府驻地孜嘎村,位于八宿县城以东约 25 km 处。林卡乡境内地质构造与地貌条件整体上与八宿县基本地质地貌格局相近,多条断层以 NW-SE 向穿越,地貌类型涵盖高山峡谷、冰川等八宿县典型地貌单元,是八宿县地质地貌条件的典型代表区。

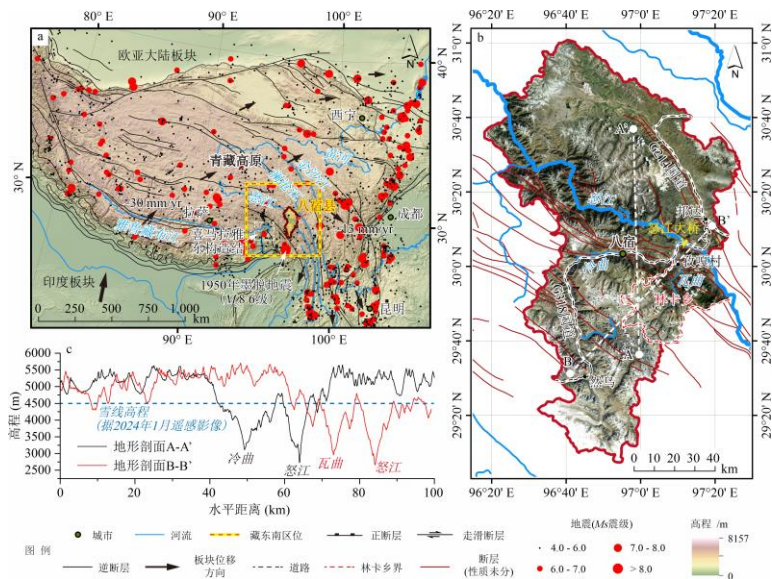


图1 研究区地质与地貌条件概况

Fig.1 Overview of geological and geomorphic conditions of the study area

a. 八宿县区域地质背景（修改自 Wang et al., 2023; 张培震等, 2003）; b. 八宿县遥感影像（修改自二十一世纪空间技术应用股份有限公司, 2024）; c. 八宿县典型地形剖面（基于 ALOS 12.5m 数字高程模型）

2 数据与方法

为揭示林卡乡古滑坡的孕灾条件与机制，首先基于目视遥感解译建立古滑坡编目数据集，之后通过 GIS 空间分析提取关键地质地貌因子数据，进而通过统计分析定量评价各影响因子对滑坡分布的影响，最后通过对典型古滑坡的现场调查分析，揭示主控因子影响古滑坡形成和分布的物理机制。

2.1 古滑坡遥感解译与特征统计

遥感解译基于世纪空间卫星影像图 2024 版（二十一世纪空间技术应用股份有限公司, 2024）高分辨率光学遥感影像，分辨率介于 0.5 m 到 2.0 m 之间，拍摄时间介于 2023 年 5 月到 2024 年 12 月之间。古滑坡边界的识别和矢量化均基于奥维互动地图平台（北京元生华网公司, 2025）完成。该软件平台提供遥感影像的三维视角，可清晰反映古滑坡的地形地貌特征（图 2）。林卡乡目标区域内的古滑坡影像特征多呈圈椅状、斗状、簸箕状等，滑坡后壁多位于山脊或斜坡上部，一般残留有较平整的滑面，堆积区多呈扇形，且常超覆于坡前沟谷的对岸（图 2）。经现场调查验证，共有 12 处滑坡在野外工作中被现场确定，其均已在遥感解译中被识别，表明本次古滑坡遥感解译的识别准确率较高。

为详细了解研究区内古滑坡的形态特征与空间分布规律，对古滑坡的面积（ A_L ）、水平运动长度（ L ）、垂直落差（ H ）、落差-长度比（ H/L ）等形态特征指标进行了统计分析（图 3）。 H/L 反映了滑坡的垂直落距与水平运动距离的关系，常被用做反映滑体运动能力的指标（Hsü, 1975）。滑坡分布方面，通过核密度分析探究了研究区内不同位置处的滑坡分布密度（图 3a）。核密度计算使用“Silverman 经验规则”的空间变量为输入数据集计算默认搜索半径（带宽），该变量可有效避免空间异常值。计算后的搜索半径为 5 km。

2.2 古滑坡孕灾条件分析

为确定林卡乡古滑坡群的主控孕灾条件，包括地形因素（高程、坡度、坡向、地形起伏度、地表粗糙度、地形位置指数、平面曲率、剖面曲率）和地质因素（岩性、距断层距离）两大类共 10 个条件

因子被纳入统计，作为潜在的影响因素。其中，地形因子均基于 ALOS 12.5 m 分辨率数字高程模型（JAXA/METI, 2015）提取。地形起伏度为 2 km×2 km 正方形区域内的高程极差。地表粗糙度（Topographic Roughness Index, TRI）定义为地表单元曲面的面积与它在平面上的投影面积之比。地形位置指数（Topographic Position Index, TPI）是一种量化地表某点相对于周围地形高低位置的空间分析指标，用于刻画地形的局部起伏特征。其通过计算目标点与邻域平均高程的差值，判断该点处于高地（如山脊、山顶）、平地或低地（如山谷、洼地）。考虑到研究区内较大的地形起伏，计算 TPI 时，邻域半径设置为 1 km。平面曲率和剖面曲率则反映了坡面某位置在剖面方向和水平面方向的弯曲程度。地质因子基于 1:100 万地质图（庞健峰等, 2017）提取，其中对岩性根据各自的成因类型等进行了概化。研究区内复杂的岩性种类被简化归类为砂板岩、砂泥岩、灰岩/白云岩、基性/超基性岩、花岗岩 5 大类。

相关性分析被用于定量评价各环境因子对滑坡分布的贡献度的相对大小。通过计算预测变量（各环境因子）与响应变量（滑坡分布密度）之间的 Pearson 相关性系数（ r ），各因子的重要性可被定量比较。Pearson 相关性系数 r 值为介于 -1 到 1 之间的数值，其绝对值越大，说明两变量之间的相关性越强。相关系数的符号为正时，说明该预测变量与响应变量之间存在正相关关系，反之为负相关。根据相关系数绝对值的大小，变量之间的相关性可被经验性地划分为：（1）不相关， $|r| < 0.2$ ；（2）弱相关， $0.2 \leq |r| < 0.4$ ；（3）中等相关， $0.4 \leq |r| < 0.6$ ；（4）强相关， $0.6 \leq |r| < 0.8$ ；（5）极强相关， $0.8 \leq |r| \leq 1$ （Evans, 1996）。此外，相关系数还被用于评价各影响因子之间的共线性，如果两个预测变量之间的相关性系数绝对值 $|r|$ 大于 0.7（Zheng et al., 2025），相应的一对预测变量之间被认为相关性较强，二者对响应变量的影响可能具有共线性。此时应该结合变量的物理意义对变量进行取舍，并慎重解释其对响应变量的影响。

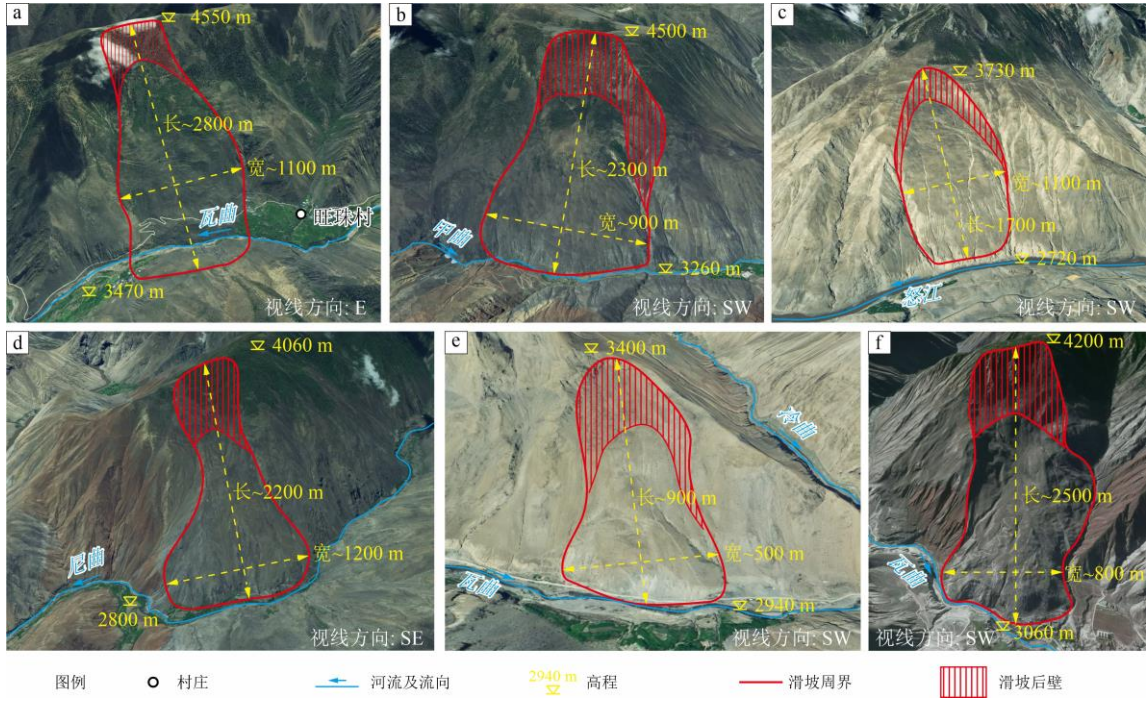


图 2 典型古滑坡几何形态特征

Fig.2 Morphological characteristics of typical ancient landslides

(遥感影像来源：二十一世纪空间技术应用股份有限公司，2024)

由于 Pearson 相关系数基于协方差矩阵，主要应用于连续型变量的数据统计。考虑到岩性因素为分类型变量，无法直接应用相关系数计算。为了使岩性因素可以与连续型变量一同进行分析，本研究参考 Pánek 等（2024）的处理方法，采用格网密度统计法。将研究区划分为若干等面积的正方形区域，而后计算每个正方形区域内每种岩性的丰度，即该岩性的面积占比，从而将分类变量处理为数值型连续变量。而对于连续型变量，则计算每个正方形区域内所包含的栅格像元数据的平均值。统计分析时，响应变量为每个正方形区域内的滑坡面积占比，用 F_L 表示。考虑研究区的面积大小，单个正方形统计区的尺寸划设为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ ，研究区共被划分为 296 个正方形区块。

在确定各环境因子与响应变量的相关性排序后，进一步对与响应变量具有较高相关性的因子进行了单因素统计，以直观判别各环境因子对古滑坡分布的具体影响。首先将环境因子数据进行细分，对于分类变量直接使用其自然分类，对于连续变量则等间距地划分为若干区间。然后，计算并统计每

个子类或区间内发育的滑坡的数量、数量密度（Landslide number density, LND ）和面积密度（Landslide area density, LAD ）。 LND 和 LAD 可分别按以下公式（1）和公式（2）计算，其可直观反映某因子内部区间或子类对滑坡发生的贡献的相对大小。此外，为了展示研究区内地质地貌环境条件的相对比例，定义景观面积比（Landscape area ratio, LAR ），按公式（3）计算。

$$LND = \frac{N_S}{A_S} \quad (1)$$

$$LAD = \frac{\sum A_L}{A_S} \quad (2)$$

$$LAR = \frac{A_S}{A} \quad (3)$$

其中， N_S 为具有某因子的某个区间（子类）特征的滑坡的数量， A_S 为研究区内具有某因子的某个区间（子类）特征的区域面积， $\sum A_L$ 为具有某因子的某个区间（子类）特征的滑坡的总面积， A 为研究区总面积。

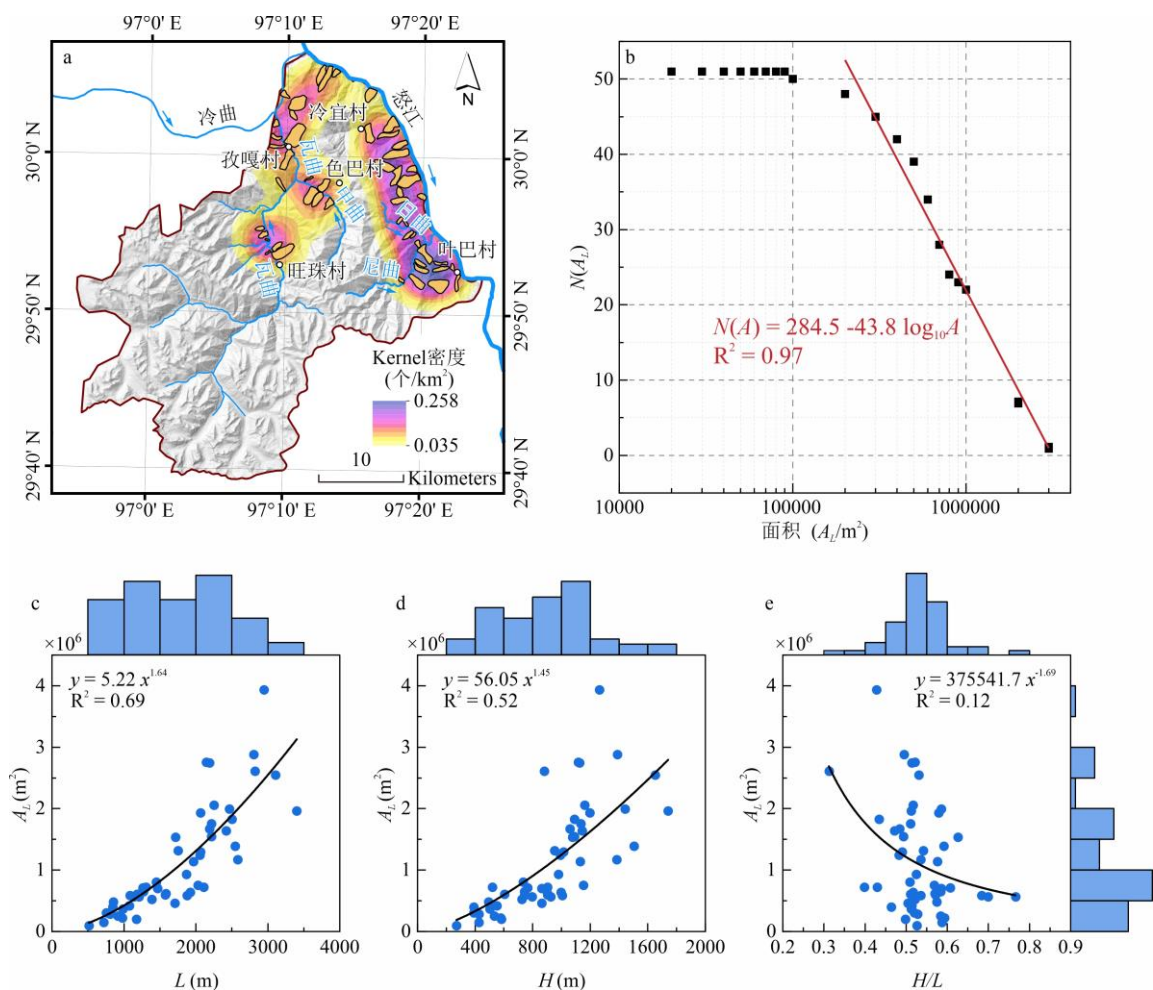


图3 林卡乡古滑坡空间分布特征与几何特征统计

Fig.3 Spatial distribution and geometric characteristics statistics of ancient landslides in Linka Township

a. 古滑坡分布与 Kernel 密度统计图; b. 古滑坡数量-面积统计; c. 古滑坡面积-长度关系统计; d. 古滑坡面积-高度统计; e. 古滑坡面积-高长比 H/L 统计

2.3 典型古滑坡工程地质调查

选取林卡乡孜嘎村附近 4 处典型古滑坡进行现场工程地质调查,以确定古滑坡的形成机制,进而对主控环境因子控制滑坡分布的物理机制进行推断。工程地质调查通过现场踏勘,查明滑坡所在场区地层岩性、构造、微地貌类型、成因等工程地质条件;通过露头观测,查明基岩的产状、接触关系、厚度、结构面分布等岩体结构特征,以及滑坡堆积体的物质结构、成分、物源等特征;通过地球物理勘探,了解滑坡堆积体结构特征;通过无人机航拍、长焦相机多角度摄影等方法,获取滑坡场区高精度地形地貌信息,并对高位岩体结构等进行观测。最终通过对滑坡堆积体性质、基岩结构、滑坡形成机制等的调查研判,全面地揭示古滑坡的形成和演化机制。地球物理勘探采用湖南五维地质科技有限公司与中南大学研制出的便携式 HPTEM-18 等值反磁通瞬变电磁系统。无人机航拍采用大疆

M300-RTK 型小型无人机。

3 林卡乡古滑坡形态与分布特征

3.1 几何形貌特征

林卡乡境内共发育古滑坡 51 处(图 3a),古滑坡最小面积约 $2 \times 10^4 \text{ m}^2$,最大面积近 $4 \times 10^6 \text{ m}^2$,面积大于 10 万平方米的有 50 处,占比约 98%。图 3b 表明,林卡乡区域内面积大于 $2 \times 10^5 \text{ m}^2$ 的滑坡的累积数量随滑坡面积的增大而近似幂律减小。根据 Larsen et al. (2010) 的滑坡体积估算公式(4)估算,面积大于 10 万平方米的滑坡的体积均超过 100 万立方米,属于大型滑坡范畴,最大滑坡体积估算可达 1.6 亿立方米。

$$V = 0.26 \times A_L^{1.36} \quad (4)$$

其中, V 为滑坡体积, A_L 为滑坡面积。

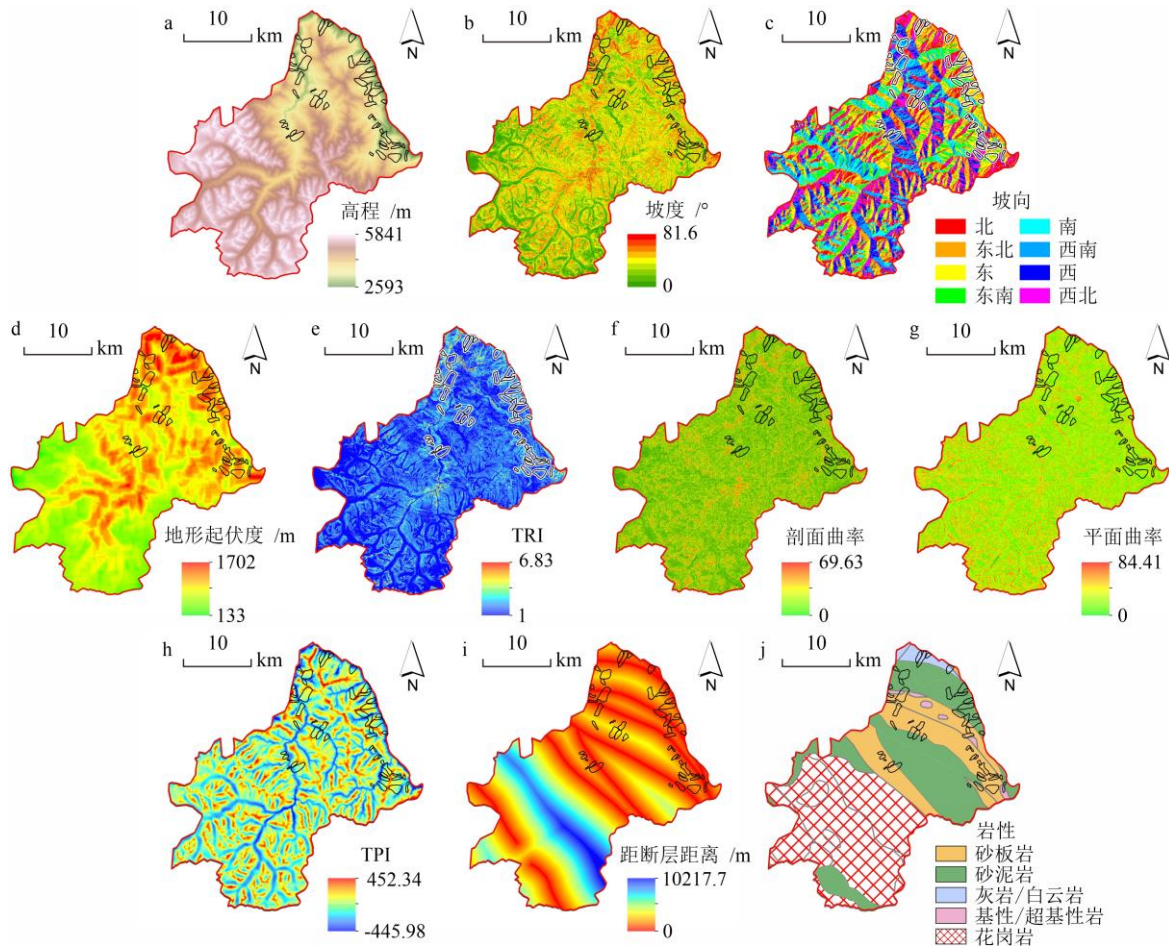


图4 环境因子空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution of environmental factors

a. 高程; b. 坡度; c. 坡向; d. 地形起伏度; e. 地表粗糙度 TRI; f. 剖面曲率; g. 平面曲率; h. 地形位置指数 TPI; i. 距断层距离; j. 岩性

林卡乡古滑坡的平面几何形态多呈椭圆形、簸箕型、斗型等,长轴长度一般明显大于短轴(图 3a)。大多数滑坡长度较大,明显大于其宽度。图 3c-e 分别统计了滑坡面积与滑坡长度 (L)、垂直落距 (H) 和 H/L 的关系,可见滑坡面积与 L 和 H 均呈现较好的幂律正相关,而与 H/L 近似呈幂律负相关。此外,图 3c、图 3d 中对 L 和 H 的统计直方图表明,古滑坡的长度普遍大于 500 m,最大可达约 3500 m,而垂直落距普遍大于 200 m,最大可达约 1800 m。 L 和 H 的优势区间分别为 1000~2500 m 和 800~1200 m。这些统计数据表明,林卡乡古滑坡普遍具有较高的落差和较长的运动距离。而对 H/L 的统计则表明,49 处古滑坡的 H/L 值小于 0.7,占比约 96%,表明其视摩擦角小于 35° ,滑坡物质发生了一定程度的远程运动。从三维遥感影像中看,大多数滑坡起滑于高陡山脊部位,发生滑动后,滑体直达坡前河谷底部(图 2),甚至超覆于对岸一定高度,如旺珠村滑坡(图 2a)。根据这些特征不难推断,林卡乡大多数古滑坡在形成初期存在形成堰塞坝,从而

导致坡前河流断流或改道的可能。

3.2 空间分布特征

林卡乡境内 51 处古滑坡的分布具有明显的空间变异性,滑坡主要聚集分布于林卡乡东北部的孜嘎村、色巴村、冷宜村、叶巴村和旺珠村附近区域,而林卡乡西南部的广大区域内未见古滑坡分布(图 3a)。沿河谷分布是古滑坡群的重要分布特征,根据古滑坡的核密度分布图,地处怒江右岸的冷宜村—叶巴村一线古滑坡分布最为密集,其中位于研究区内怒江干流下游的叶巴村附近滑坡分布核密度最大(图 3a)。除此之外,瓦曲河、尼曲河、日曲河等怒江流域支流的岸坡上也有较多古滑坡分布,但古滑坡主要集中在这些河流的下游。

古滑坡分布的空间差异与当地的地质地貌条件的差异密切相关,图 4 将古滑坡边界轮廓叠合至关键地质地貌因子图层上,有助于直观分析古滑坡分布与环境因子的关系。由图 4 可见,林卡乡境内古滑坡分布区与无滑坡分布区在高程(图 4a)、地形起伏度(图 4d)、距断层距离(图 4i)和岩性(图

4j)等4个因素上表现出明显的差异,说明此四因素最可能对古滑坡的分布具有重要影响。从地势和地形起伏度因素上看,滑坡分布区主要为海拔4500 m以下的大起伏峡谷地貌(图4a和图4d),受河流下切侵蚀影响显著,而无滑坡分布区海拔普遍较高,多在4500 m以上(图4a),但地形起伏程度明显小于滑坡分布区(图4d),地貌类型以冰蚀地貌为主,河流侵蚀较弱。而从距断层距离和岩性角度看,古滑坡分布区断层分布密集(图4i),岩性以砂板岩和砂泥岩为主(图4j),而无滑坡分布区则主要为花岗岩,且断层分布稀疏。根据对滑坡分布与环境因子的视觉对比可初步得出,林卡乡古滑坡的形成和分布主要与岩性、断裂活动、河流侵蚀等因素有关。

4 影响古滑坡分布的主控因素

为进一步揭示影响林卡乡古滑坡分布的主控因素,采用相关性分析对各影响因子与滑坡分布密度的相关性进行量化评价,而后对关键影响因素与滑坡分布数量与密度之间的关系进行了单因素统计分析。

4.1 环境因子与滑坡分布密度的相关性

图5列举了所有参与统计的影响因子与响应变量滑坡面积占比(F_L)的相关系数。根据双尾显著性检验结果,高程、坡度、坡向、地形起伏度、TRI、平面曲率、距断层距离,以及花岗岩、砂板岩和灰岩/白云岩的丰度等10个因子对 F_L 具有显著影响,而剖面曲率、TPI、基性/超基性岩丰度和砂泥岩丰度对 F_L 的影响不显著。对比各自变量之间的相关系数可见,坡度与地形起伏度、TRI, TRI与剖面曲率之间具有较高的相关性($|r|>0.7$),因此有必要对其进行筛选。与坡度相比(图4b),地形起伏度(图4d)能更好地区分滑坡区与无滑坡区,因此地形起伏度保留,而坡度因素不再考虑。而对于TRI和剖面曲率,由于剖面曲率与响应变量 F_L 之间的相关性

未通过显著性检验,因而保留TRI,而剔除剖面曲率。

从相关系数的大小上看,各保留因子对 F_L 的影响的相对大小依次为:高程($|r|=0.52$)>花岗岩丰度($|r|=0.34$)>地形起伏度($|r|=0.33$)>平面曲率($|r|=0.32$)>砂板岩丰度($|r|=0.29$)>距断层距离($|r|=0.26$)>坡向($|r|=0.16$)>TRI($|r|=0.12$)>灰岩/白云岩丰度($|r|=0.10$)。其中高程、花岗岩丰度、平面曲率、距断层距离、坡向与因变量 F_L 负相关,地形起伏度、砂板岩丰度、坡度、TRI、灰岩/白云岩丰度与 F_L 正相关。根据 $|r|$ 值判断和Evans(1996)经验分类标准,高程与 F_L 中等相关,花岗岩丰度、地形起伏度、平面曲率、砂板岩丰度、距断层距离与 F_L 弱相关,坡向、TRI、灰岩/白云岩丰度与 F_L 不相关。

高程、地形起伏度、平面曲率、坡向和TRI与地形地貌有关。高程与 F_L 的较高的负相关性,以及地形起伏度与 F_L 较高的正相关性验证了根据图4进行的视觉直观分析的结果。虽然高程与 F_L 的相关系数数值最高,但由于地形起伏度可反映区域地形侵蚀切割的程度,并指示了河流下切对滑坡形成的促进作用,因而地形起伏度对滑坡形成的促进作用可能更具有物理意义。平面曲率与 F_L 较高的负相关性说明林卡乡古滑坡多形成于水平向弯曲程度较小的斜坡中。坡向和TRI与 F_L 之间极低的相关系数值进一步说明二者对滑坡分布的影响较小。

距断层距离和各岩性丰度与地质条件有关。距断层距离与 F_L 较高的负相关性进一步说明断层分布与滑坡分布的关联。而砂板岩丰度与 F_L 较高的正相关性和花岗岩丰度与 F_L 较高的负相关性进一步证实了岩性对林卡乡古滑坡分布的控制作用,砂板岩地层是区域内最主要的易滑地层。

综合上述分析,高程、地形起伏、岩性、距断层距离可能是控制林卡乡古滑坡分布的主要因素。

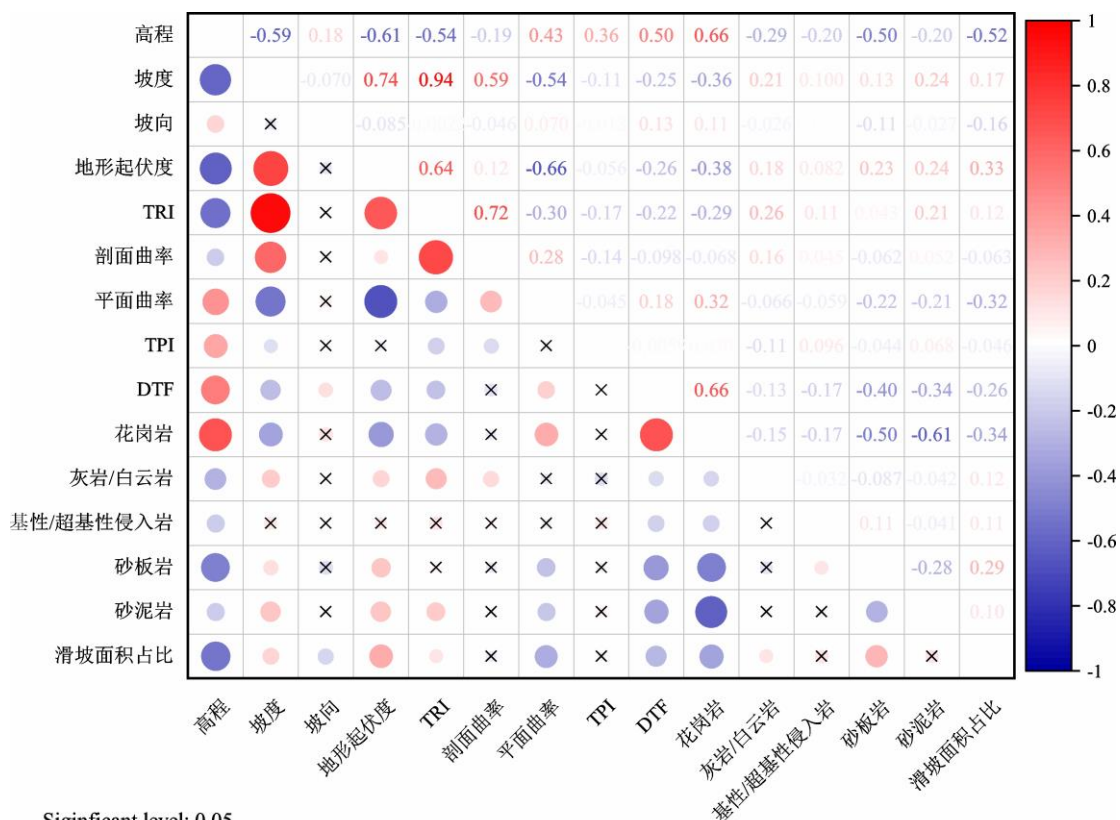


图5 皮尔逊相关系数矩阵

Fig.5 Heatmap of Pearson correlation coefficient

4.2 关键因素的单因素统计

为了进一步揭示各主控因子的优势孕灾区间（子类），图6对高程、地形起伏度、岩性和距断层距离四个主控因子进行了单因素统计。

高程上看（图6a），海拔3800 m到4000 m区域内滑坡数量和滑坡数量密度（LND）最大，而海拔4000 m到4200 m区域内滑坡面积密度（LAD）最大。因此，海拔3800 m到4200 m区间是林卡乡最容易发生滑坡的高程区间。

从地形起伏上看（图6b），地形起伏度介于1000 m到1200 m之间的地区贡献了最多数量的滑坡，而地形起伏度介于1200 m到1400 m之间的地区的LND和LAD均最大，因而对林卡乡而言，地形起伏度介于1000 m到1400 m之间的地区最容易发生滑坡。而与区域景观的数据相比，林卡乡区域内具有优势易滑地形起伏度区间的区域明显较小，仅占区域总面积的约30%，且地形起伏度小于600 m的地区未见滑坡分布。

岩性上看（图6c），砂板岩地层内发生的滑坡无论从数量还是密度上均最高。砂泥岩地层区内也

发育了较多数量的滑坡，但该区内滑坡密度最低。而灰岩/白云岩区和基性/超基性岩地区的滑坡数量虽少，但滑坡密度相对较高。而花岗岩地层在研究区内占据最大面积，但没有古滑坡发育。因此，砂板岩地层是林卡乡最主要孕灾地层。研究区内砂板岩多属石炭系（邦达组和错绒沟口组）、侏罗系（马里组和瓦达组）、白垩系（多尼组）等地层，多为变质砂岩和板岩交替出现的互层结构，层厚多为薄-中厚，夹有少量的千枚岩、页岩等（据1:200000地质图，李晨阳等,2019）。特殊的地层岩性可能是促进古滑坡形成的关键因素之一。

从据断层的距离上看（图6d），所有滑坡均位于距断层2.5 km以内的区域，其中距断层1.5~2.0 km的区域内的滑坡数量最多，LND和LAD密度值也最大。距断层0~0.5 km的区域和距断层1.0~1.5 km的区域内的滑坡数量相同，但滑坡密度差异较大。距离断层0~0.5 km的地区的滑坡数量密度小于距断层1.0~1.5 km的区域，但距断层0~0.5 km的地区的滑坡的LAD明显大于距断层1.0~1.5 km的区域，说明该地区的滑坡的单体面积更大。

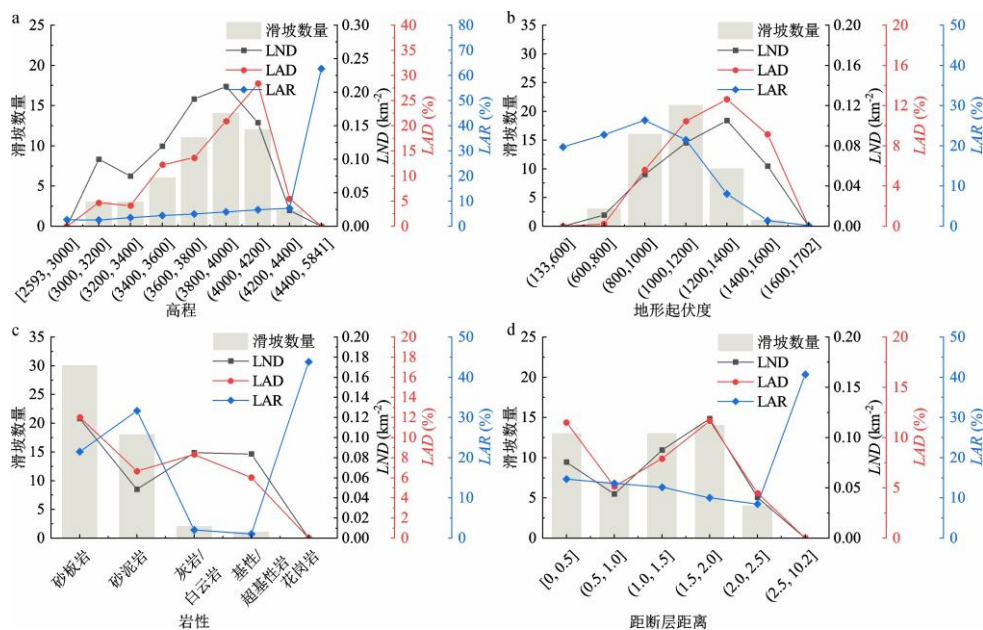


图 6 古滑坡分布主控条件因子统计

Fig.6 Statistics on primary controlling factors of ancient landslide distribution

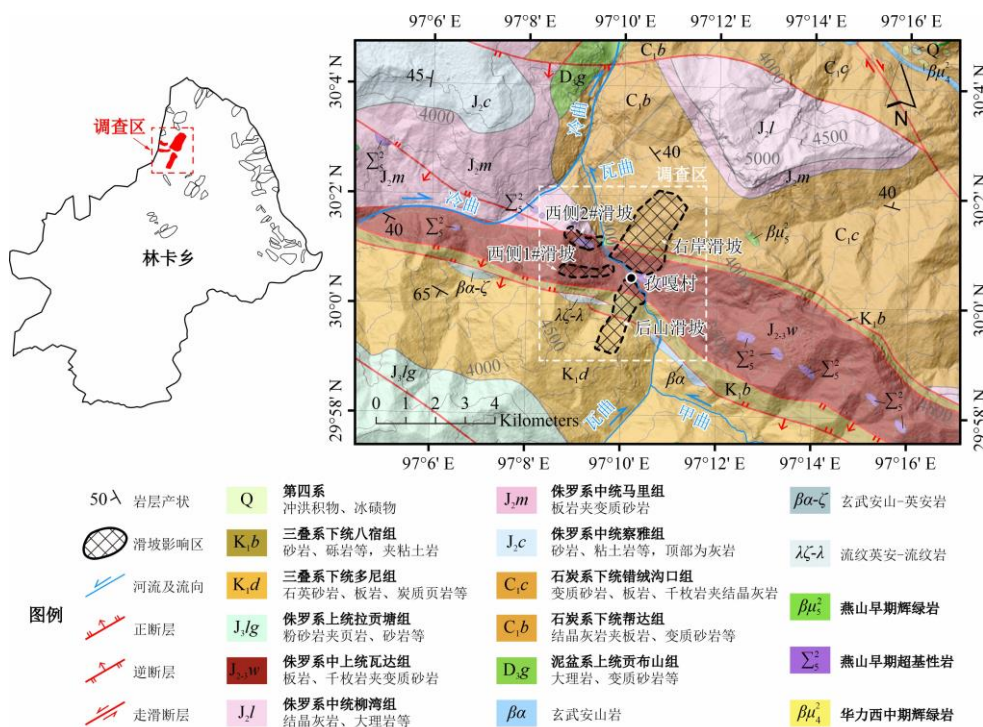


图 7 林卡乡孜嘎村及邻区地质地貌条件 (修改自李晨阳等, 2019)

Fig.7 Geological and geomorphic conditions of Ziga village in Linka township and adjacent areas

坡, 瓦曲河右岸滑坡, 西侧 1#和西侧 2#滑坡 (图 7)。四处大型滑坡形成于相近的地质地貌条件下 (图 7), 均位于瓦曲河深切河谷岸坡, 形成于具有薄-中厚层状结构的砂板岩地层中, 且其破坏形态特征在林卡乡古滑坡群中具有代表性 (图 3a)。为深入了解林卡乡古滑坡的形成机制, 以孜嘎村附近 4 处古滑坡为重点进行了现场调查。

5 孜嘎村古滑坡的破坏特征与机制

孜嘎村为林卡乡政府驻地, 地处林卡乡北部, 瓦曲河自东向西流经该村, 孜嘎村主要居民点位于瓦曲河左岸 (南侧)。孜嘎村附近方圆 5 km 范围内共发现 4 处大型古滑坡, 分别命名为孜嘎村后山滑

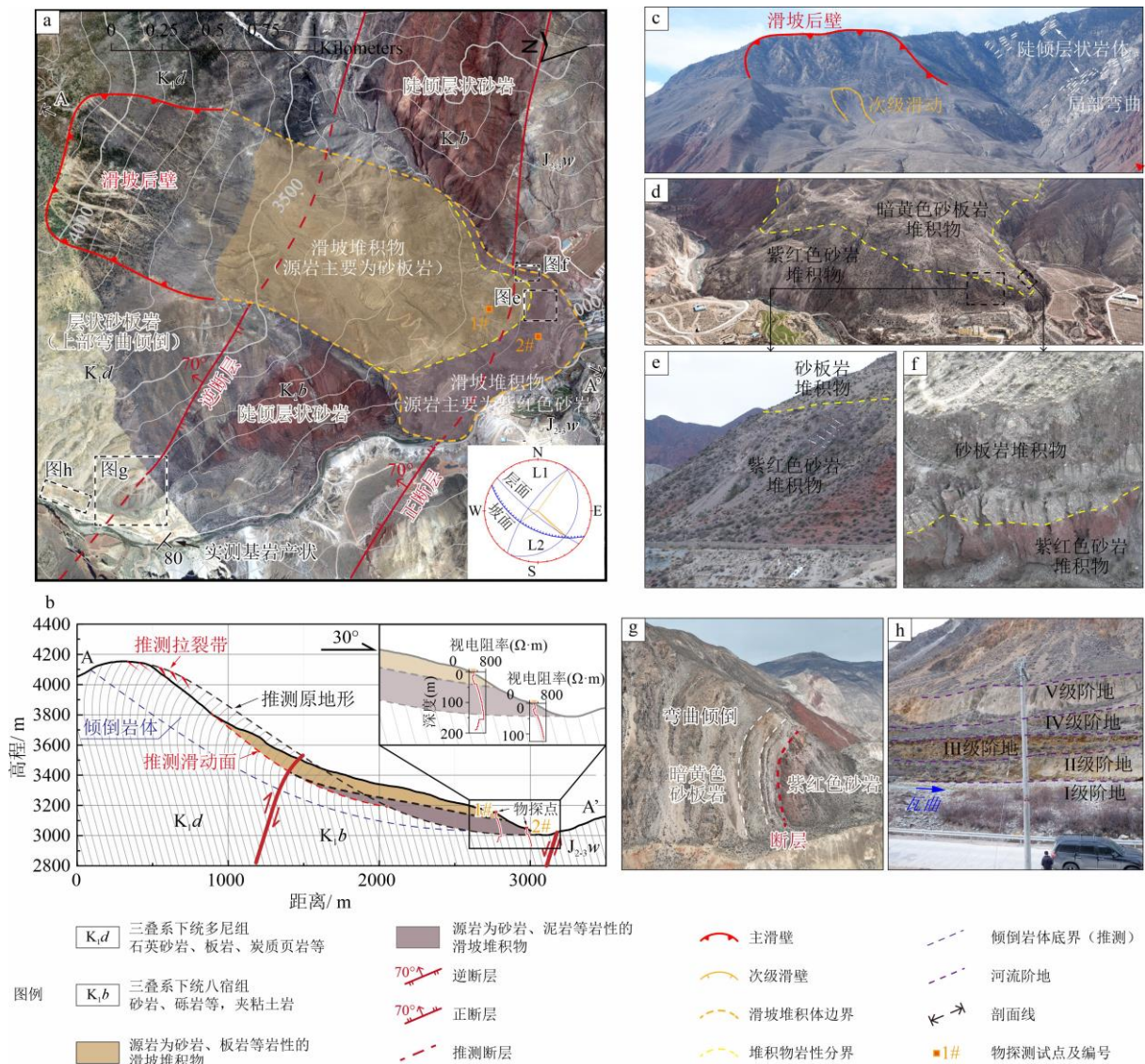


图8 孜嘎村后山滑坡剖面图与典型变形破坏特征

Fig.8 Plan view and longitudinal section of Ziga Village Backhill landslide with typical failure characteristics

a. 平面图; b. 剖面图; c. 滑坡后壁特征; d. 滑坡堆积体前缘特征; e. 堆积体前缘岩性分界; f. 堆积体侧壁岩性分界;
g. 滑坡右侧岩体弯曲倾倒特征; h. 滑坡右侧河谷河流阶地特征

5.1 孜嘎村后山滑坡

后山滑坡后壁位于海拔高度约 4200 m 的山脊部位, 前缘直达河谷, 高程约 3060 m, 滑坡总落差达 1140 m (图 8a)。滑坡运动距离约 2.5 km, 高长比 H/L 约 0.45。滑坡面积约 1.8 km², 估算总体积约 8000 万方, 属特大型滑坡。基岩产状为 40°∠80°, 基岩倾向与斜坡坡向相同, 且倾角较大, 赤平投影分析该滑坡所在斜坡为陡倾顺向层状结构斜坡 (图 8a)。据 1: 20 万地质图和现场调查, 斜坡地层存在明显的二元结构, 中上部白垩系下统多尼组 (K_1d) 变质石英砂岩、板岩等层状结构岩体为主, 局部含少量炭质页岩、千枚状板岩、千枚岩等, 颜色以土黄色为主; 下部则为白垩系下统八宿组紫红色砂岩。

多尼组岩层与八宿组岩层间存在一逆断层 (图 8b)。主滑壁以下可见多处次级滑壁, 说明主滑坡形成后出现过局部次生垮塌 (图 8c)。

滑坡堆积体普遍存在双层结构 (图 8d), 表层主要为土黄色、灰白色砂质板岩碎屑物质, 呈散体状结构, 块石含量丰富, 块径多 0.2~0.5 m (图 8e、图 8f)。根据于堆积体前缘和侧壁露头采用激光测距仪现场测算所得, 上层土黄色堆积物的厚度约 50 m。根据堆积物颜色及块石岩性可判断该部分滑体来自原始斜坡中上部的多尼组砂板岩。砂板岩沉积物以下则为砖红色砂岩碎屑物质, 同样呈散体状结构。现场调查露头中该部分堆积碎屑物质未见底图 8e、图 8f)。通过瞬变电磁法地球物理勘探, 在 1#

测点距地表约 150 m 深度处和 2#测点距地表约 50 m 深度处均存在明显的视电阻率阶跃, 且两处阶跃位置位于相近的绝对高程, 说明该高程处很可能存

在明显的地层分层。结合滑坡体地形地貌特征, 推测紫红色砂岩堆积物的厚度约 100m。紫红色砂岩堆积体主要来自原始斜坡中下部的八宿组砂岩。

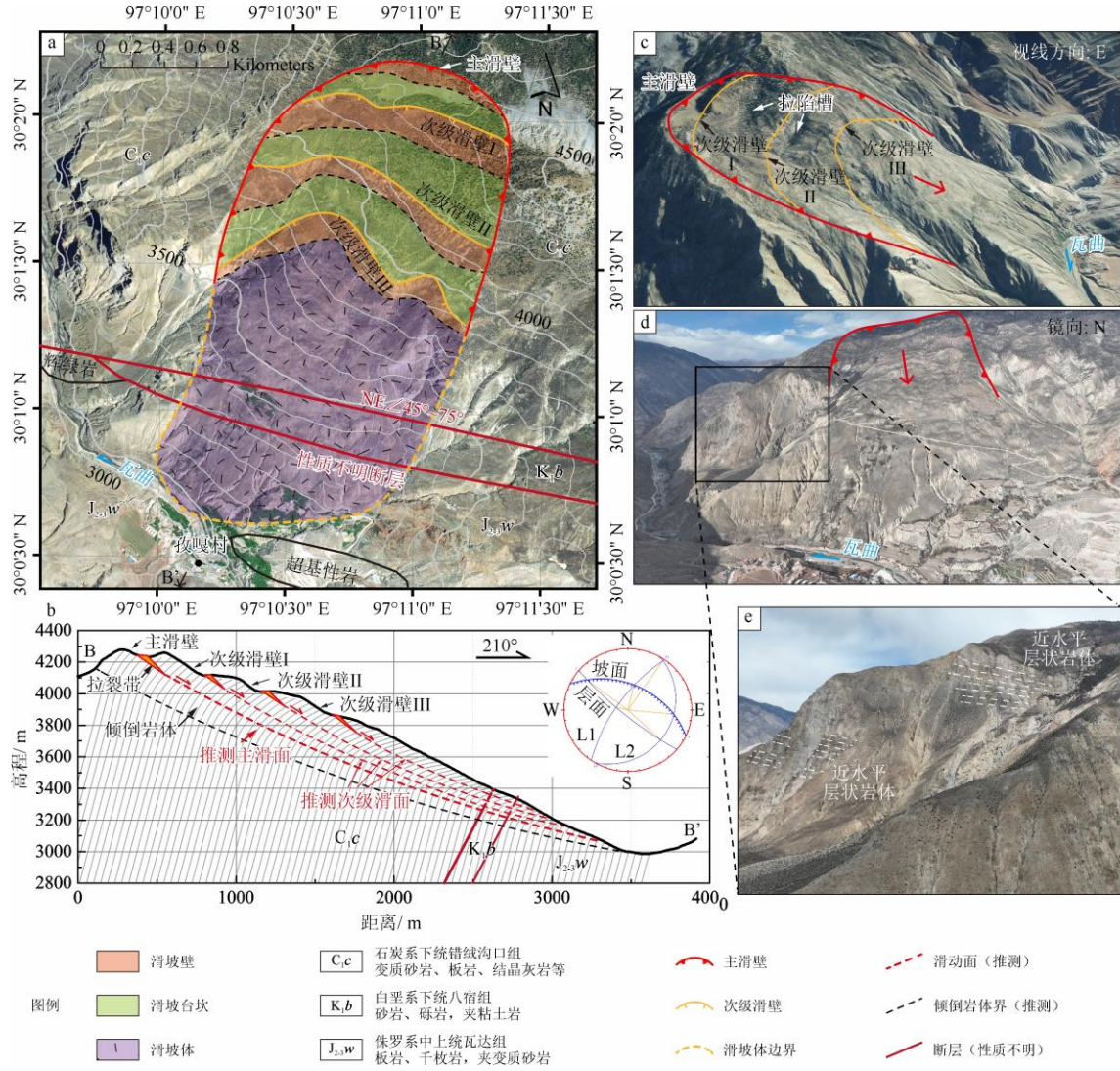


图9 孜嘎村瓦曲河右岸滑坡平面图与典型变形破坏特征

Fig.9 Plan view and longitudinal section of Ziga Village North-bank landslide with typical failure characteristics

a. 平面图; b. 剖面图; c. 滑坡后壁特征; d. 滑坡堆积体特征; e. 堆积体右侧岩体露头特征

如图 8g 所示, 后山滑坡右侧瓦曲河上游约 1.5 km 处坡面所显示的典型的岩体弯曲变形现象为揭示该滑坡的形成机制提供了有力判据。该处坡面的走向与后山滑坡的主滑方向一致, 根据此处斜坡岩体结构和保存的变形特征推断, 后山滑坡为一处典型的弯曲倾倒-拉裂滑移型滑坡。除此之外, 后山滑坡主滑坡左侧的山体中也可观察到倾角降低的层状结构岩体(图 8c)。由于图 8g 处坡面显示断层上下岩体均发生类似的弯曲倾倒, 且滑坡堆积体前缘可见大量的紫红色砂岩堆积物, 因此推断后山滑坡的剪出口位于断层以下(图 8b)。滑坡发生后, 中上部的多尼组砂板岩与中下部八宿组紫红色砂岩首先

一致向前运动, 由于紫红色砂岩初始位置位于下部, 初始势能较小, 其运动一定距离后首先停积于下部, 而滑体中上部的砂板岩初始势能较大, 运动过程中可运动更远距离, 最终停积于紫红色砂岩堆积体上方, 导致如今滑坡堆积体所呈现的上部砂板岩、下部紫红色砂岩的二元伪地层结构。

由于该滑坡前缘已被河流侵蚀改造, 调查过程中未发现原始滑坡前缘的准确位置, 推测该滑坡形成初期形成了堵江堰塞坝。滑坡堆积体前缘可见多处次级滑动破坏, 且居民点附近可观察到大量的马刀树、醉汉林等, 推测目前该滑坡堆积体中前部处于缓慢活动变形状态。

5.2 孜嘎村瓦曲河右岸滑坡

瓦曲河右岸滑坡位于孜嘎村对岸，主滑方向约210°，与孜嘎村后山滑坡相反（图9a）。滑坡长度约3.0 km，宽度约1.5 km，滑坡总面积达3.9 km²，估算滑坡体体积约2.4亿立方米。该滑坡顶高程约4290 m，滑坡后缘呈现多级台阶状下错变形特征，单级滑壁高差50~150 m，最下级滑壁底部高程约3850 m（图9b、图9c）。由于该区域基岩优势产状为40°∠80°，基岩倾向与坡向相反，赤平投影分析表明该滑坡形成于陡倾反倾层状结构斜坡中（图9b）。滑坡堆积体表面次生改造强烈，调查期间未发

现明确的滑坡剪出口位置，根据滑坡后缘多级滑壁特征推断，该滑坡存在多级次级滑动面（图9b），为特大型圆弧状切层岩质滑坡。滑坡主体位于石炭系下统错绒沟口组（C_{1c}）地层中，岩性以变质砂岩、板岩、千枚岩夹结晶灰岩为主。由滑坡右侧山脊处出露的基岩可见，其层面产状已接近水平（图9d、图9e），相对于沟谷底部测得的原始基岩已发生明显的倾角降低，表明该处斜坡在滑动破坏发生前也已经历长期的弯曲倾倒。据此推断，右岸滑坡的形成机制与孜嘎村后山滑坡一致，为弯曲倾倒-拉裂滑移型滑坡。

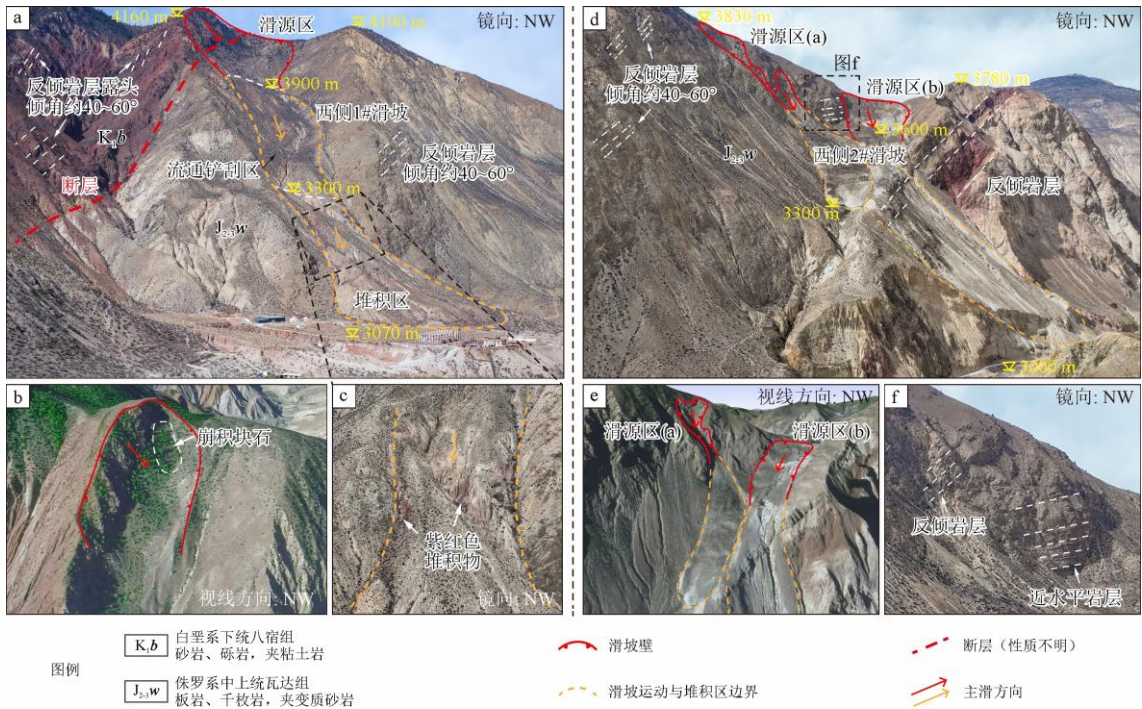


图10 孜嘎村西侧滑坡典型特征

Fig.10 Typical failure characteristics of landslides on the west side of Ziga Village

a. 西侧1#滑坡全貌；b. 西侧1#滑坡滑源区遥感影像；c. 西侧1#滑坡堆积区沉积的紫红色砂岩块体；d. 西侧2#滑坡全貌；e. 西侧2#滑坡滑源区遥感影像；f. 西侧2#滑坡源区岩体露头特征

5.3 孜嘎村西侧1#和2#滑坡

孜嘎村西侧两处古滑坡的规模明显小于后山滑坡和右岸滑坡（图7），西侧1#滑坡的总面积约59万平方米，西侧2#滑坡的总面积约52万平方米。西侧两处滑坡的运动模式与后山和右岸滑坡相比有明显区别（图10）。西侧两处滑坡均形成于高陡斜坡的顶部，破坏后滑体物质沿坡面沟谷长距离运动，最终堆积于坡体下部平缓地带（图10a、图10d、图10e）。西侧1#滑坡堆积区更加典型，堆积物呈扇形堆积于沟口，具有明显的流化运动迹象。两处滑坡起滑破坏后的流通运动距离均超过500 m。

形成机制方面，孜嘎村西侧两处滑坡的初始破坏模式仍为反倾岩层倾倒式破坏。如图10a、图10b

所示，西侧1#滑坡源区位于顶部，呈圈椅状，源区斜坡中上部主要为八宿组紫红色砂岩，下部涉及少量侏罗系瓦达组砂板岩。堆积区出露的大量紫红色砂岩碎屑物质可证该滑坡物源主要为上部的八宿组紫红色砂岩（图10c）。该滑坡右侧坡面出露的紫红色岩层仍可观察到明显的陡倾层状结构，因此，推测该滑坡最初起滑机制为倾倒式破坏。西侧2#滑坡可细分为两处主要的斜坡破坏（图10d、图10e）。滑源区（a）位于高陡的坡面上部山脊处，由于从该处滑壁及右侧坡面可观察到明显的陡反倾岩层，该处破坏为典型倾倒式崩滑破坏。滑源区（b）的破坏机制更加复杂，其滑壁呈较典型的圆弧状，从航拍影像上看，滑壁处主要为松散碎屑物质，推测该处

破坏主要为发生在坡前堆积物质中的圆弧型滑动破坏。然而，由于与该处滑壁紧邻的坡面存在明显的倾角降低至近水平的层状岩体（图 10f），该处松散物质的最初来源推测仍为反倾岩层倾倒式破坏所成。

6 讨 论

八宿县林卡乡境内密集分布的大型高位古滑坡表明该地区存在典型的易滑地质地貌结构，经遥感解译、统计分析和现场调研，林卡乡古滑坡的孕灾条件与形成机制得到了初步揭示。本节从滑坡的形成演化角度，对内外动力条件下林卡乡古滑坡群的演化过程进行探讨，以期对当地及邻区现今的防灾减灾提供有益指导。

6.1 古滑坡形成演化机制

对林卡乡境内 51 处古滑坡的孕灾条件统计分析已得出岩性、地形起伏、距断层距离是该地区古滑坡最重要的孕灾环境因素，这些统计规律背后所蕴含的物理机制与该地区常见的层状岩体弯曲倾倒密不可分。对孜嘎村附近 4 处典型大型古滑坡的现场调查已得出砂板岩地层的弯曲倾倒是孜嘎村古滑坡滑床岩体普遍存在的变形现象。统计得出的林卡乡古滑坡群的优势孕灾条件为浅变质的砂板岩地层和深切河谷地貌，这也与深层弯曲倾倒变形体的优势孕灾岩性和地貌条件一致（Huang et al., 2022）。高山峡谷地带已被证实是大型深层弯曲倾倒的高发区，已有统计表明，我国境内已被报道的大型深层弯曲倾倒变形体超过 90% 以上发育于青藏高原东南缘的深切河谷中。另一方面，深层弯曲倾倒主要形成于岩层倾向与斜坡坡向相同（夹角 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ）或相反（夹角 $120^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ）的陡倾岩层中（Huang et al., 2022）。图 11 统计了林卡乡所有古滑坡的主滑方向与滑坡所在区域地层的倾向，结果表明，滑坡主滑向的优势方向（ $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$, $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$, $210^{\circ}\sim 240^{\circ}$ ）均与地层倾向的优势方向（ $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$, $210^{\circ}\sim 240^{\circ}$ ）相同或相反。倾角方面，据 1: 20 万地质图（李晨阳等, 2019），区域内岩层的倾角普遍大于 50° ，为易倾倒的中-陡倾岩层。因此，林卡乡古滑坡群极有可能主要有弯曲倾倒进一步演化而成。

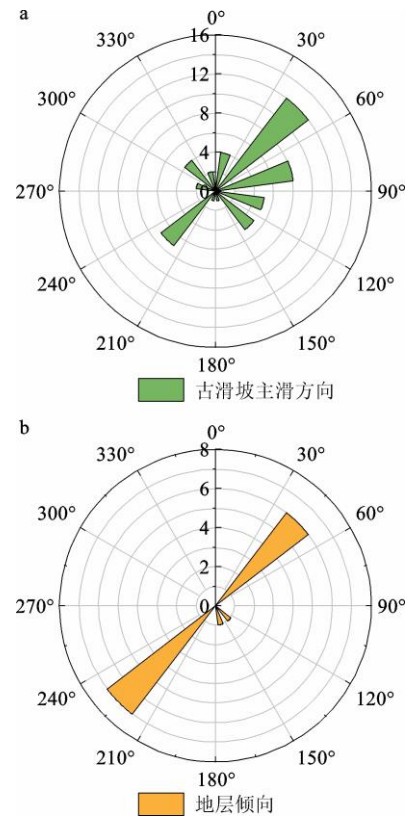


图 11 林卡乡古滑坡主滑方向与域内岩层倾向关系统计
Fig.11 Relationship between main slip directions of ancient landslides and bedding dip directions in Linka Township

a. 古滑坡主滑方向玫瑰花图；b. 古滑坡分布区岩层倾向玫瑰花图（数据来自 1: 200,000 地质图）

弯曲倾倒在岩层变形到一定程度后可转化为大型滑移式破坏已有较多报道。Huang et al. (2022)对我国西南地区 49 处大型弯曲倾倒变形体实例的统计表明，33%的案例已转化为大型滑坡。在这些已转化为滑坡的案例的堆积体的下方和滑坡后壁处残余大量的弯曲倾倒变形岩体。因此，岩层弯曲到一定程度后产生的拉裂-滑移是弯曲倾倒变形向滑坡转化的典型机制。宁奕冰等（2021）开展的底摩擦物理模型试验较好地揭示了这一破坏过程（图 12）。岩层在倾倒弯曲发展的一定程度后，弯折岩层内部首先产生局部的拉裂，并伴随轻微的剪切错动（图 12a）。之后拉裂进一步发展，倾倒岩体内逐渐形成多条长大的连续拉裂，构成潜在的滑动面（图 12b）。最终倾倒岩体形成自下而上的渐进式滑移破坏（图 12c、d）。在破坏过程中，坡表附近变形岩体的位移量最大，由坡表向内部位移逐渐减小（图 12e）。随着变形的持续，变形岩体的各部位的位移呈逐渐增大的趋势（图 12f-h）。

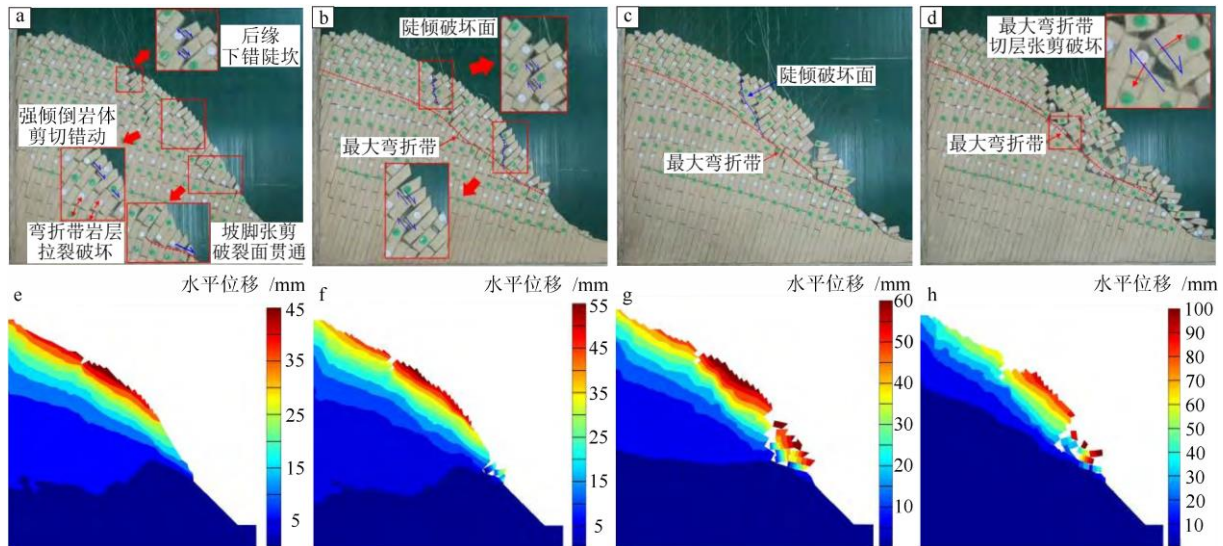


图 12 倾倒岩体的拉裂-滑移破坏过程物理模拟 (修改自宁奕冰等, 2021)

Fig.12 Physical simulation of the toppling failure process

高山峡谷区常见的弯曲倾倒是与河流下切过程密切相关的斜坡重力变形过程(宁奕冰等, 2021; Huang et al., 2022; Zhang et al., 2023)。在林卡乡孜嘎村附近瓦曲河上游地带的弯曲倾倒岩体下方, 可观察到清晰的多级河流阶地(图 8h), 进一步证明了孜嘎村附近弯曲倾倒与河流下切的密切关联。河谷多期快速下切的过程, 也是坡面临空面逐步扩张的过程(图 13)。随着临空面的逐步扩大, 斜坡中更大范围的岩体达到弯曲倾倒的临界条件, 弯曲倾倒逐步向斜坡深处发育(图 13)。在此过程中, 岩层发生长期的时效弯曲变形, 倾角逐步减小, 同时岩层中的拉裂隙逐渐增多(图 13a、b)。经长期变形演化后, 最终拉裂隙逐渐延长、贯通, 导致斜坡中产生对坡体稳定性极为不利的长大外倾结构面, 进而促进滑坡的形成(图 13c)。苗尾水电站坝址区对深层弯曲倾倒变形体进行的平硐勘探所揭露的变形岩体内部分区断裂破坏特征均支持这一演化过程(Huang et al., 2022)。

在深层弯曲倾倒形成演化过程中, 区域高构造应力背景可能显著地促进了岩体弯曲变形的形成。林卡乡地处青藏高原东南缘, 该区域受印度洋板块对欧亚大陆板块的俯冲碰撞作用影响, 地壳物质的挤压变形强烈, 区域水平地应力普遍处于较高水平。地应力实测结果表明, 区域水平构造应力普遍介于 10~30 MPa (Huang et al., 2011; 丰成君等, 2014)。对于弯曲倾倒而言, 水平构造应力的存在为岩层的弯曲倾倒提供了一个除重力分力外的额外的推动岩层弯曲的水平力, 促进弯曲倾倒的发育。此外, 高地应力环境下的快速河流下切所导致的应力释放、

卸荷效应等也有利于岩层的弯曲倾倒。

弯曲倾倒在发展到一定程度后常趋于自稳 (Smith, 2015)。这是由于岩层倾角的变化, 使得岩层的受力状态发生变化而致 (Hungr et al., 2014)。因此, 林卡乡如此密集的倾倒成因型古滑坡的形成很可能在弯曲倾倒演化到一定程度后受到强烈的内外动力作用影响而致。藏东南地区, 山高谷深, 构造活动和气候变化均十分强烈, 因此, 地震、断层活动等内动力作用, 冰雪融水、极端降雨、河流进一步侵蚀等外动力作用均可能触发滑坡的形成(图 13d)。然而, 经遥感解译和现场调查, 我们认为林卡乡古滑坡群由融水、冻融作用、降雨等气候因素触发的可能性较小。一方面, 遥感解译过程中, 未发现古滑坡滑源区位于高山冰线之上; 另一方面, 现场调查区所在瓦曲河河谷及邻近的怒江干流河谷等均为典型的干热河谷地貌, 地表裸露, 降雨稀少。地震和断层活动可能是造成林卡乡古滑坡集群式分布的主要触发因素。有地震记录以来, 八宿县邻近区域已发生上千次震级大于 4.0 级的地震(图 1a), 且 1950 年曾发生的 M_s 8.6 级的墨脱特大地震, 其震中距离林卡乡直线距离仅约 170 km。近现代以来的频繁且强烈的地震记录表明该区域属于典型的地震活跃区。此外, 林卡乡古滑坡大多起滑于高陡斜坡的坡肩处, 距离河谷底部动辄数百米、上千米的高差, 地震波到达后坡肩后极易产生强烈的高程放大作用, 放大地震波对岩体的破坏作用。因此, 林卡乡古滑坡群极可能由弯曲倾倒长期演化而成的高位松散岩体受到某次史前强震的影响而最终演化为的大型滑坡。这可能也是古滑坡群的起滑高程高度

集中于相近区间的原因（图 6a）。

断层活动也可能触发滑坡。以孜嘎村附近 4 处滑坡为例（图 7），其斜坡中下部均存在断层分布。特别是后山滑坡右侧斜坡上保留的岩体变形现象可见（图 8g），断层面上下的岩层发生了基本一致的

弯曲倾倒。这种情况下，断层活动可能导致断层附近岩体垮落，造成斜坡中下部产生空洞，使上部已弯曲倾倒岩体悬空，进而造成斜坡整体的渐进后退式破坏。

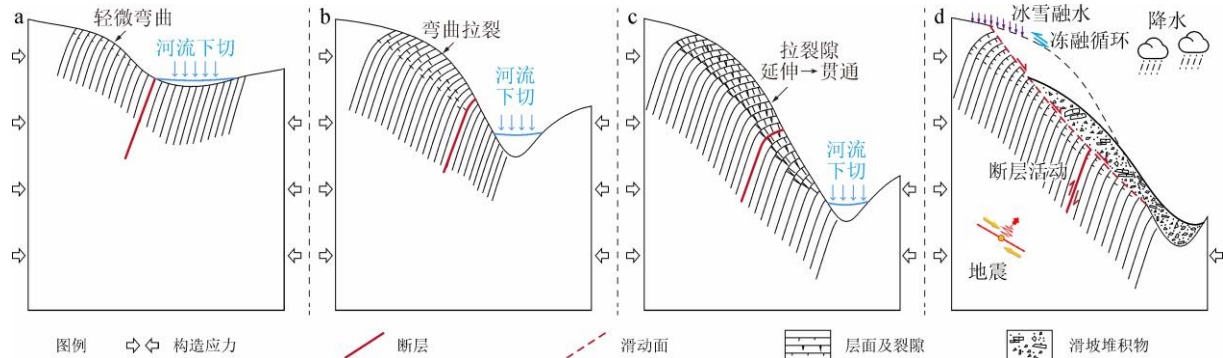


图 13 林卡乡典型倾倒-滑移型古滑坡孕灾机制示意图

Fig.13 Schematic of failure mechanism for typical toppling-sliding ancient landslides in Linka Township

6.2 对区域防灾减灾的启示

近年来，在我国西南山区，特别是青藏高原东南缘的三江并流地区是水电开发的活跃区，雅鲁藏布江下游的水电开发也已取得实质性进展，峡谷斜坡的深层弯曲倾倒及其演化而成的大型高位滑坡已严重影响了水电开发等大型工程的建设。林卡乡古滑坡群的发现，为进一步理解高位滑坡的孕灾条件和形成机制，加深对倾倒成因型古滑坡演化过程的认识提供了珍贵样本。根据本研究所得，以下认识和建议有望对区域高位滑坡防灾减灾提供有益启示：

(1) 深切河谷和砂板岩地层是大型高位滑坡的优势发育条件，兼具二者特征的地区应进行岩体失稳隐患详查，以进一步厘清大型滑坡致灾风险；

(2) 识别弯曲倾倒岩体的变形特征，判断其演化阶段，是衡量和研判岩体潜在致灾风险的关键；

(3) 加强对具有活动变形迹象的弯曲倾倒岩体的动态监测，进一步研究倾倒岩体的破坏机制，建立倾倒岩体滑坡位移预警阈值模型；

(4) 进一步划示区域地震致灾风险，揭示高位倾倒岩体的地震致灾模式，有望进一步助力倾倒成因型高位滑坡的防灾减灾；

(5) 进一步研究倾倒型高位滑坡的致灾机制，建立倾倒岩体高位滑坡致灾范围预测模型，有望高效降低致灾效应，助力韧性防灾。

针对藏东南八宿县林卡乡高位古滑坡群，基于古滑坡遥感解译、孕灾因子统计分析、典型滑坡现场调研，得出如下主要结论：

(1) 林卡乡古滑坡呈群发性分布，且空间分布异质性明显，沿怒江及瓦曲河等河流谷坡聚集性分布是显著特征；

(2) 地形起伏度和岩性是最关键孕灾因子，大起伏地貌条件下的陡倾砂板岩地层是促进林卡乡古滑坡分布的最有利条件；

(3) 层状岩体的深层弯曲倾倒是林卡乡古滑坡群发的重要前序变形，为滑坡的形成提供了松散物源和易滑结构；

(4) 林卡乡古滑坡的形成受气候等外动力因素影响较小，史前强震和断层活动是古滑坡群最可能的触发因素。

作者贡献度：1. 马昊：数据收集、分析，论文撰写，图件绘制，现场调查；2. 汪发武、胡明鉴：基金获取，论文审阅，现场调查；3. 莫洵懿、付子进、张耀祖、尤琪、曹生喆：现场调查

参考文献(References):

Beijing Ovital Software Co., Ltd., 2025. OvitalMap (V10.3.0.33606) [Software]. <https://www.ovital.com>.
Dai, F.C., Deng, J.H., 2020. Development Characteristics of Landslide Hazards in Three-Rivers Basin of Southeast Tibetan Plateau. *Advanced*

7 结 论

- Engineering Sciences*, 52(5):3–15 (in Chinese with English abstract).
- Dou, J., Xiang, Z.L., Xu, Q., et al., 2023. Application and Development Trend of Machine Learning in Landslide Intelligent Disaster Prevention and Mitigation. *Earth Science*, 48(5): 1657–1674 (in Chinese with English abstract).
- Dou, J., Xing, K., Wang, L.Z., et al., 2025. Air-space-ground Synergistic Observations for Rapid Post-seismic Disaster Assessment of 2025 Ms6.8 Xigazê Earthquake, Xizang. *Journal of Earth Science*. <https://doi.org/10.1007/s12583-025-0160-2>
- Evans, J.D., 1996. Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences. Brooks/Cole Publishing, Pacific Grove.
- Feng, C.J., Chen, Q.C., Li, G.Q., et al., 2014. In-situ Stress Measurement in Lijiang-Jianchuan Area and Tentative Discussion on the Seismic Hazards on the Southeastern Margin of the Tibetan Plateau. *Geol. Bull. China*, 33 (4), 524–553 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Y.H., Dou, J., Xiang, Z.L., et al., 2024. Susceptibility evaluation of Wenchuan coseismic landslides by gradient boosting decision tree and random forest based on optimal negative sample sampling strategies. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 43(3), 251–265 (in Chinese with English abstract).
- He, K., Wang, Y.F., Cheng, Q.G., et al., 2024. Research on the Substrate Entrainment Dynamics of Rock Avalanches: State-of-the-art. *Journal of Engineering Geology*, 32(3):904–917 (in Chinese with English abstract).
- Hsü, K.J., 1975. Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) Generated by Rockfalls. *Geological Society of America Bulletin*, 86, 129–140.
- Huang, D., Ma, H., Huang, R.Q., 2022. Deep-seated Toppling Deformations of Rock Slopes in Western China. *Landslides*, 19:809–827.
- Huang, R.Q., Wang, Y.S., Wang, S.T., et al., 2011. High Geo-stress Distribution and High Geo-stress Concentration Area Models for Eastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau. *SCIENCE CHINA Technol. Sci.* 54 (S1), 154–166.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes Classification of Landslide Types, An Update. *Landslides*, 11 (2):167–194.
- JAXA/METI, 2015. ALOS PALSAR Radiometric_Terrain_Corrected_high_res. Accessed through ASF DAAC 20 March 2025. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>.
- Larsen, I.J., Montgomery, D.R., Korup, O., 2010. Landslide Erosion Controlled by Hillslope Material. *Nature Geoscience*, 3:247–251.
- Li, C.Y., Wang, X.C., He, C.Z., et al., 2019. China National Digital Geological Map (Public Version at 1 : 200 000 Scale) Spatial Database (V1). Development and Research Center of China Geological Survey; China Geological Survey[producer], 1957. National Geological Archives of China [Distributor], 2019-06-30.
- <http://dcc.ngac.org.cn/geologicalData/rest/geologicalData/geologicalDataDetail/7d7ac63df9805f39a92591d105b7b0f2>.
- Lin, Q.W., Cheng, Q.G., Li, K., et al. 2023. Review on Fragmentation-Related Dynamics of Rock Avalanches. *Journal of Engineering Geology*, 31 (3):815–829 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J.C., Wang, W.P., Gao, Y., et al., 2024. Study on the Unstable Characteristics of High-Level Landslide in Zelongnong Gou, Xizang under Severe Earthquakes. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 35(6): 15–23 (in Chinese with English abstract).
- Ma, S.Y., Shao, X.Y., Xu, C., et al., 2024. Distribution Pattern, Geometric Characteristics and Tectonic Significance of Landslides Triggered by the Strike-slip Faulting 2022 Ms 6.8 Luding Earthquake. *Geomorphology*, 453:109138.
- Ning, Y.B., Tang, H.M., Zhang, B.C., et al., 2021. Evolution Process and Failure Mechanism of a Deep-seated Toppling Slope in the Lancang River Basin. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(11): 2199–2213 (in Chinese with English abstract).
- Pánek, T., Břežný, M., Havenith, H., et al., 2024. Landslides and Growing Folds: A Lesson from the Kura Fold-And-Thrust Belt (Azerbaijan, Georgia). *Geomorphology*, 449:109059.
- Pang, J.F., Ding, X.Z., Han, K.Y., et al., 2017. The National 1:1000000 Geological Map Spatial Database. Global Geology Data, DOI:10.23650/data.H.2017.NGA105570.T1.64.1.
- Shi, A.W., Cheng, Q.G., Wang, Y.F., et al., 2024. State of the Art on Fluidized Geomorphology of Rock Avalanche. *Journal of Engineering Geology*, 32(3): 978–995 (in Chinese with English abstract).
- Shugar, D.H., Jacquemart, M., Shean, D., et al., 2021. A Massive Rock and Ice Avalanche Caused the 2021 Disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science*, 373, 300–306.
- Smith, J.V., 2015. Self-stabilization of Toppling and Hillside Creep in Layered Rocks. *Engineering Geology*, 196, 139–149.
- Twenty First Century Aerospace Technology Co.,Ltd., 2024. Twenty First Century Aerospace satellite imagery map (2024 Edition), GS (2024) 1614. <https://www.21at.com.cn>.
- Wang, Y.F., Chen, P.H., Qian, J.Z., et al., 2025. Geomorphologic and Geologic Controls on Large-scale Landslides in the Himalayan Region of China. *Landslides*, 22, 1725–1741.
- Wang, Y., Cheng, Q., Lin, Q., et al., 2023. Rock Avalanches in the Tibetan Plateau of China. In: Alcántara-Ayala, I., et al. Progress in Landslide Research and Technology, Volume 2 Issue 2, 2023. Progress in Landslide Research and Technology. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44296-4_2
- Wang, Y.F., Ming, J., Feng, Z.Y., et al., 2022. Research on the Fluidized

- Propagation and Frictional Heating Effect of the Luanshibao Rock Avalanche. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(S2):3174–3188 (in Chinese with English abstract).
- Xing, K., Li, H., Zhang, L.L., et al., 2025. Analysis of Surface Rupture and Seismic Damage Characteristics of 2025 Dingri Ms6. 8 Earthquake in Xizang. *Safety and Environmental Engineering*, 32(2): 20–30 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Zheng, G., Li, W.L., et al., 2018. Study on Successive Landslide Damming Events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018. *Journal of Engineering Geology*, 26(6): 1534–1551 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y.P., 2000. Study on the Characteristics and Disaster Mitigation of the Gigantic Landslide on the Yigong Expressway in Bomi, Tibet. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (04):8–11 (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., Wang W.P., Zhang, N., et al., 2017. Long Runout Geological Disaster Initiated by the Ridge-Top Rockslide in A Strong Earthquake Area: A Case Study of the Xinmo Landslide in Maoxian County, Sichuan Province. *Geology in China*, 44(5): 827–841 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B.C., Ning, Y.B., Tang, H.M., et al., 2023. Study on the Evolutionary Process of Interbedded Anti-Inclined Slope Block-Flexure Toppling in the Upper Yalong River. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82: 240.
- Zhang, P.Z., Deng, Q.D., Zhang, G.M., et al., 2003. Active Tectonic Blocks and Strong Earthquakes in the Continent of China. *Science in China (Series D)*, 46(Suppl.), 13–24 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.S., Ren, S.S., Li, J.Q., et al., 2023. Prone Sliding Geo-Structure and High-Position Initiating Mechanism of Duolasi Landslide in Nu River Tectonic Mélange Belt. *Earth Science*, 48(12):4668–4679 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, D.F., Li, Y.Y., Yan, C.L., et al., 2025. Landslide Susceptibility Assessment Using Automl-SHAP Method in The Southern Foothills of Changbai Mountain, China. *Landslides*, 22, 1855–1875. <https://doi.org/10.1007/s10346-025-02462-6>
- 附：中文参考文献
- 北京元生华网公司，2025.奥维互动地图（V10.3.0.33606）[软件]. <https://www.ovital.com>.
- 戴福初,邓建辉, 2020. 青藏高原东南三江流域滑坡灾害发育特征. *工程科学与技术*, 52(5):3–15.
- 窦杰, 向子林, 许强, 等, 2023. 机器学习在滑坡智能防灾减灾中的应用与发展趋势. *地球科学*, 48(5): 1657–1674.
- 二十一世纪空间技术应用股份有限公司, 2024. 世纪空间卫星影像图（2024版）, GS（2024）1614号. <https://www.21at.com.cn>.
- 丰成君, 陈群策, 李国歧, 等, 2014.青藏高原东南缘丽江—剑川地区地应力测量与地震危险性. *地质通报*, 33(04):524–534.
- 郭衍昊, 窦杰, 向子林, 等, 2024. 基于优化负样本采样策略的梯度提升决策树与随机森林的汶川同震滑坡易发性评价. *地质科技通报*, 43(3):251–265.
- 何可, 王玉峰, 程谦恭, 等, 2024.高速远程滑坡底部裹挟机理研究现状及展望. *工程地质学报*, 32(3):904–917.
- 李晨阳, 王新春, 何春珍, 等, 2019. 全国 1:200 000 数字地质图（公开版）空间数据库(V1).中国地质调查局发展研究中心; 中国地质调查局[创建机构], 1957. 全国地质资料馆 [传播机构], 2019-06-30. <http://dcc.ngac.org.cn/geologicalData/rest/geologicalData/geologicalDataDetail/7d7ac63df9805f39a92591d105b7b0f2>.
- 林棋文, 程谦恭, 李坤, 等, 2023. 高速远程滑坡碎屑化运动机理研究综述. *工程地质学报*, 31(03):815–829.
- 刘俊辰, 王文沛, 高杨, 等, 2024. 强震条件下西藏则隆弄沟高位滑坡失稳特征研究. *中国地质灾害与防治学报*, 35(6): 15–23.
- 宁奕冰,唐辉明,张勃成,等, 2021. 澜沧江深层倾倒地演化过程及失稳机制研究. *岩石力学与工程学报*, 40(11): 2199–2213.
- 庞健峰, 丁孝忠, 韩坤英, 等, 2017. 1 : 100 万中华人民共和国地质图空间数据库. 全球地质数据, DOI: 10.23650/data.H.2017.NGA105570.T1.64.1.
- 史安文,程谦恭,王玉峰,等, 2024.高速远程滑坡流态化地貌研究综述. *工程地质学报*, 32(3):978–995.
- 王玉峰, 明杰, 冯止依, 等, 2022. 乱石包高速远程滑坡流态化运动模式及摩擦热效应研究. *岩石力学与工程学报*, 41(S2):3174–3188.
- 邢珂, 黎昊, 张乐乐, 等, 2025. 2025年西藏定日 MS6. 8 地震地表破裂与震害特征分析. *安全与环境工程*, 32(2): 20–30.
- 许强, 郑光, 李为乐, 等, 2018. 2018 年 10 月和 11 月金沙江白格两次滑坡—堰塞堵江事件分析研究. *工程地质学报*, 26(6):1534–1551.
- 殷跃平, 2000. 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*, (04):8–11.
- 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, 王文沛, 张楠, 等, 2017. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究——以四川茂县新磨滑坡为例. *中国地质*, 44(5):827–841.
- 张培震,邓起东,张国民,等., 2003.中国大陆的强震活动与活动地块. *中国科学(D辑:地球科学)*, (S1):12–20.
- 张永双, 任三绍, 李金秋, 等, 2023. 怒江构造混杂岩带多拉寺滑坡的易滑地质结构及高位启滑运动机制. *地球科学*, 48(12):4668–4679.