

澜沧江上游德钦段大型高位滑坡发育特征与形成演化机制研究

曹世超^{1,2}, 郭长宝^{2,3*}, 杨为民^{2,3}, 董秀军¹, 吴瑞安^{2,3}, 江万^{2,3}, 钟宁^{2,3}

(1. 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室(成都理工大学), 成都, 610059; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081))

摘要: 澜沧江上游德钦段大型高位滑坡发育, 类型多样, 变形明显, 演化过程复杂且易在流域内形成灾害链, 威胁城镇及工程建设。然而, 该区域滑坡孕灾背景、发育规律及地质力学模式仍缺乏系统研究。本文利用 InSAR、无人机、地面调查、钻探和地球物理探测等多技术手段, 查明研究区大型高位滑坡发育分布特征, 揭示典型高位滑坡的形成演化机制。结果表明, 受高陡地形和地层岩性-构造联合作用控制, 佛山-燕门乡段以大型高位滑坡为主, 叶枝镇-燕门乡段多为古堆积体滑坡, 区内倾倒变形体发育; 研究认为地层岩性及其组合特征是滑坡发育的关键因素, 滑坡的形成演化受内外动力耦合作用影响, 地壳隆升和断裂活动提供了滑坡孕育的内动力地质背景, 河流深切与长期卸荷促使岩体倾倒形成高位拉裂缝, 降雨和地下水活动加速滑坡内部岩体弱化。总结归纳了研究区高位滑坡变形破坏的 3 类 8 种地质力学模式, 其中倾倒变形破坏为主要模式。进一步分析表明, 滑坡堆积体在地震、强降雨及人类工程扰动下易复活。研究成果揭示了德钦段大型高位滑坡的成因机制与演化过程, 可为流域滑坡灾害链防控及重大工程选址提供科学依据。

关键词: 澜沧江; 高位滑坡; 发育分布规律; 地质力学模式; 形成演化

中图分类号: P694; P642

收稿日期: 2025-08-30

Development Characteristics and Evolution Mechanisms of Large High-Altitude Landslides along the Deqin Reach of the Upper Lancang River

Shichao Cao^{1,2}, Changbao Guo^{2,3*}, Weimin Yang^{2,3}, Xiujuan Dong¹, Ruian Wu^{2,3}, Wan Jiang^{2,3}, Ning Zhong^{2,3}

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

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

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

Abstract: Large high-altitude landslides are widespread along the Deqin reach of the upper Lancang River, exhibiting diverse types, pronounced deformation, and complex evolutionary pathways that readily cascade into basin-scale hazard chains threatening towns and infrastructure. However, the predisposing settings, developmental patterns, and geomechanical models for this reach remain insufficiently constrained. Here we implement InSAR, UAV, field investigation, borehole drilling, and geophysical surveying to delineate the spatial distribution and structural architecture of large high-altitude landslides and to resolve the formation and evolution mechanisms of representative cases. Results show that, under the combined control of extreme relief and lithology - structure coupling, the Foshan township -Yanmen township reach is dominated by large high-altitude landslides, whereas the Yezhi township -Yanmen township reach is characterized by paleo-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42372339), 中国地质调查局项目 (No. DD20221816)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42372339) and the China Geological Survey Project (DD20221816)

第一作者简介: 曹世超 (1992-), 博士研究生, 从事工程地质与地质灾害机理研究。E-mail: 1074874913@qq.com, ORCID: 0009-0005-6871-2156

通信作者简介: 郭长宝 (1980-), 博士, 研究员, 从事工程地质与地质灾害机理研究。E-mail: guochangbao@cags.ac.cn, ORCID: 0000-0002-1764-9792

landslide deposits; toppling deformation zones are pervasive across the study area. We identify lithology and its assemblage as key factors governing landslide development, and demonstrate that endogenic - exogenic coupling drives formation and evolution: crustal uplift and active faulting provide the tectonic background; deep fluvial incision and long-term unloading promote rock mass toppling and the formation of high-altitude tensile headscarps; rainfall and groundwater processes elevate pore pressure and accelerate internal weakening. On this basis, we synthesize three classes and eight types of geomechanical failure modes, with toppling dominated failure as the principal mode. Further analyses indicate that landslide deposits are prone to reactivation under earthquakes, intense rainfall, and engineering disturbances. The findings clarify the causative mechanisms and evolutionary pathways of large high-altitude landslides in the Deqin reach and provide a scientific basis for hazard chain mitigation and siting of major engineering works.

Keywords: Lancang River; High-altitude landslides; Development and spatial distribution patterns; Geomechanical model; Formation and evolution mechanism

0 引 言

高位滑坡是指滑体从高陡斜坡中上部剪出,其剪出口高差通常大于 100m,甚至达 1000m,具有复杂的动能转化过程,成灾范围广,且易形成破坏力超强的流域性灾害链(殷跃平等,2021;殷跃平和高少华,2024;张永双等,2021;Yin et al.,2021)。该类滑坡在地质构造活跃的高山峡谷地区广泛分布(Hewitt K et al.,2020;Yin et al.,2023;Cao et al.,2025),受复杂的地质背景和气候变化等的影响,近年来大型高位滑坡灾害频发且危害严重。如,2017 年四川茂县新磨村滑坡,启滑高差约为 1200m,运动最远距离达 2800m,掩埋整个新磨村,造成 83 人死亡(许强等,2017;Scaringi et al.,2018;Fan et al.,2019);2018 年西藏白格滑坡,启滑高差约为 1000m,运动距离达 2000m,堵塞金沙江并形成堰塞湖,造成上百亿元的经济损失(许强等,2018;邓建辉等,2019;张永双等,2021;Guo et al.,2021);2019 年贵州鸡场镇滑坡,启滑高差约为 460m,摧毁坡脚的居民区,造成 43 人遇难,9 人失踪(王立朝等,2019;郑光等,2020);类似的高位滑坡还有 2020 年 7 月湖北沙子坝滑坡堵江事件和 2020 年 8 月四川中海村高位滑坡等。由此可见,高位滑坡不仅多发、频发,还具有规模大、运动距离远等特点、可形成滑坡碎屑流、堰塞坝和涌浪等链生地质灾害,对人类生命财产安全和重大工程构成严重威胁,为地质灾害研究的重点领域之一。

高位滑坡形成机制复杂,触发和诱发因素多样,启动和失稳特殊,目前研究认为高位滑坡地质力学模式主要有锁固段控制型,结构面控制型以及岩体结构控制型等(黄润秋等,2008;崔鹏等,2017;彭建兵等,2020;戴福初和邓建辉,2020)。针对“锁固型”滑坡,黄润秋团队(2008;2009;2015;2017)建立了三段式、挡墙式、阻滑块体、线性多级和阶梯状多级型 5 种地质力学模式;秦四清(2018)、薛雷(2019)、CHEN 等(2018)等则构建了锁固段型滑坡演化灾变模式,建立了锁固段型滑坡快解锁突发型和慢解锁渐变型两种灾变模式的临界位移准则。结构面控制型滑坡则主要受到断层、褶皱等构造面的控制,多沿着结构面发生剪切,常见于复杂的高山峡谷地带。对于高山峡谷典型地貌下的结构面控制型滑坡,文宝萍等(2020)总结了青藏高原东南部高速远程滑坡启动地质力学模式,将其划分为 8 类;张永双等(2021)则基于地貌特征、斜坡岩体结构以及河流侵蚀、降雨等促发条件总结归纳了川藏交通廊道高位滑坡的 6 类地质力学模式;殷跃平等(2021)、Yin et al(2023)根据易滑地质结构类型建立了构造结合带内蛇绿软岩形成的“白格型”高位滑坡、花岗岩楔形硬岩形成的“易贡型”高位滑坡和楔形体形成的“查莫利型”高位滑坡等三种模式。

近年来,国家重大工程和城镇建设不断向青藏高原高山峡谷区延伸,在澜沧江上游德钦段规划建设滇藏铁路以及梯级水电站。该地区的高陡地形,复杂的地质构造,强烈的地震活动,加上长期“三江并流”的河流侵蚀以及水电工程建设和运行,均加剧了该区高位滑坡发生的风险,使得查明该区域地质灾害规律刻不容缓。然而,该区域以往研究多集中在单一的、零星的案例滑坡,对于区域上大型高位滑坡群发机制、变形演化规律和地质力学模式研究尚显不足。为了进一步探究内外动力耦合作用下该区大型高位滑坡发育规律、变形机制及地质力学模式等关键科学难点,本文结合国家地质调查项目,采用“空-天-地-深”多技术方法,查明研究区大型高位滑坡发育分布特征,聚焦区域高位滑坡的演化机制和地质力学模式,加强对区域内外动力地质作用规律的认识,为揭示高位滑坡的孕育机理与预测未来变形趋势提供参考,为重大工程规划建设以及防灾减灾提供支撑。

1 地质背景

研究区位于青藏高原横断山西南部深切峡谷地带(图 1a),属“三江并流”构造活跃区,内外动力地质作用十分强烈。该区自然地理环境复杂多样,地形起伏大,海拔高度从 2000 米到 6000 米不等,澜沧江自北向南纵贯全域,河谷狭窄且河床切割强烈(图 1b),塑造了典型的高山峡谷地貌。该区属于三江弧形构造带,受强烈的板块运动影响,具有较强活动性,发育一系列近西北-东南走向的隆起和拗陷、深大断裂带、岩浆岩带及变质岩带,断裂褶皱、糜棱岩化现象严重,岩体结构极为破碎。自第四纪以来,地壳平均隆升速率为 7.67mm/a(乔鹏,2016),澜沧江的平均切割速率约 1-3mm/a(Wang et al., 1999, 2000; Tu et al., 2020),峡谷持续深切与坡面高陡化。研究区内阶地发育(图 1c),局部可识别四级阶地,层状地貌特征显著(宁奕冰等 2021)。复杂的地质构造格局、快速的地壳隆升与河流深切作用共同塑造了该区滑坡的孕灾环境。

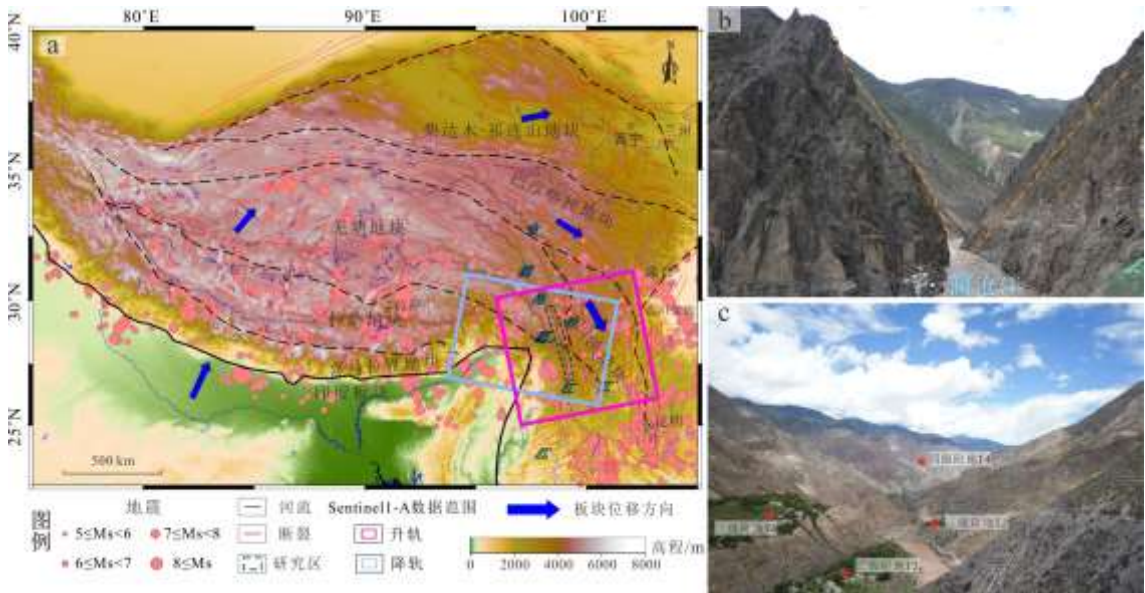


图 1 区域构造图 (a 研究区地形和历史地震; b 澜沧江 V 形深切河谷地貌; c 研究区河流阶地地貌)

2 研究方法

本文采用高分辨率遥感解译、滑坡现场调查、SBAS-InSAR 形变分析、无人机、地球物理勘探与钻探等“空-天-地-深”多技术手段对查明研究区大型滑坡的发育分布规律,揭示滑坡的孕灾背景和变形破坏机制(图 2)。

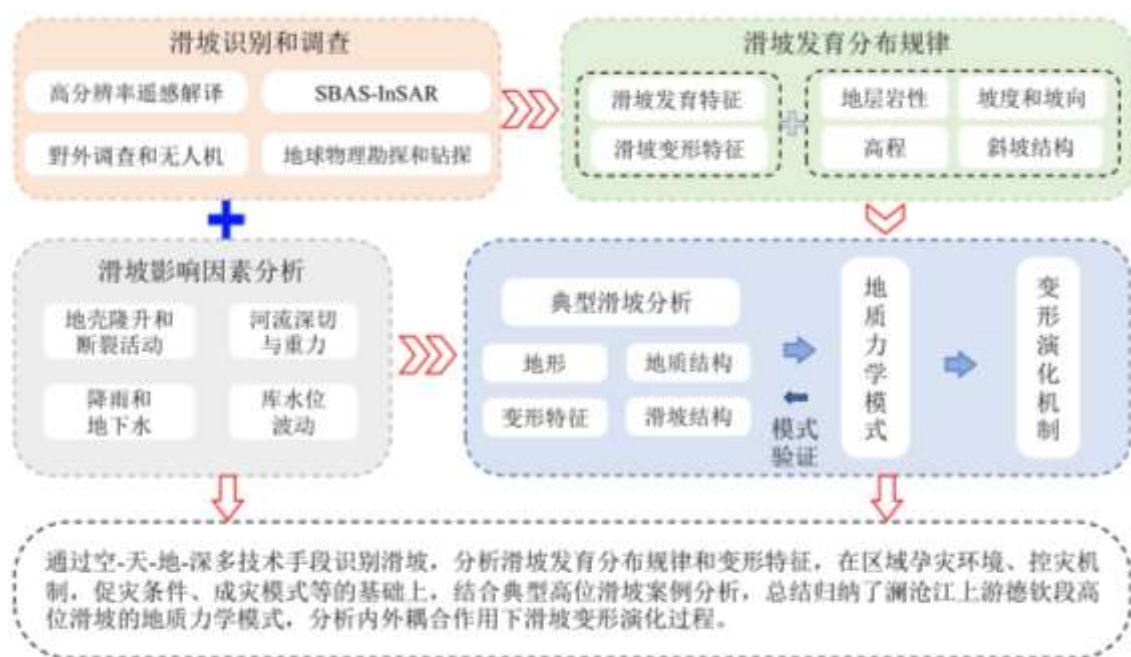


图 2 技术路线图

2.1 地质地质灾害调查

遥感解译基于 Google Earth 高分辨率影像，时间介于 2017 年 11 月到 2023 年 12 月之间，该软件平台提供遥感影像的三维视角，可清晰反映滑坡的地形地貌特征。在遥感解译的基础上开展地质灾害野外调查，基于 1:200000 区域地质图，参考《滑坡崩塌泥石流灾害调查规范（1:50000）》（DZ/T0261-2014），进一步确定了滑坡边界范围、滑坡发育特征，并编绘了滑坡平剖面图，编制了区域滑坡分布图，针对典型滑坡的变形和破坏特征进行详细调查。

2.2 基于升降轨联合的 SBAS-InSAR 形变监测

合成孔径雷达干涉测量技术（InSAR）具有全天时、全天候、高分辨率的特点（Fruneau et al. 1996; Wasowski and Bovenga, 2014），可以高精度地监测大面积微小地面形变，实现对地表形变毫米级的几何测量，已广泛应用于滑坡形变监测（Hilley et al., 2004; Xu et al., 2023）。本次收集了欧洲航天局（简称欧空局，ESA）Sentinel-1 升轨和降轨共 293 景数据，时间范围为 2016 年 1 月 11 日~2022 年 2 月 20 日（表 1）。

本次采用 Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar（简称 SBAS-InSAR）技术进行研究区滑坡形变分析。SBAS-InSAR 是一种基于小基线集的合成孔径雷达干涉技术（Berardino et al., 2002），利用多时相的雷达数据进行地表形变监测，具有较高的空间分辨率和较低的噪声水平（Berardino et al., 2002; Yan et al., 2023）。通过获取研究区升轨 146 景、降轨 147 景单视复数影像，确定合适的主副影像进行配准，其中时间基线设置为 48 天，空间基线设置为 300m，获得干涉对后通过最小二乘法得出形变时间序列，当最小二乘法得到的结果不唯一时，使用奇异值分解法（SVD）联合求解多个小基线，将解得的各时段相位速率在时间域上积分，即可得到整个观测时段的形变时间序列。

表 1 区域 SAR 影像数据基本参数

SAR 参数	卫星	轨道方向	轨道号	幅号	所 处 波段	雷达波 长/cm	入 射 角 (°)	影像间隔时 间 (天)	影像获取时间 段	影 像 数 量 (景)
Sentinel-1		升轨	99	1280	C 波 段	5.6	33.85	12	2016.1.11-2022.2.20	146
Sentinel-1		降轨	33	497	C 波 段	5.6	40.69	12	2016.1.11-2022.2.15	147

2.3 地球物理勘探与工程地质钻探

地球物理勘探是地质灾害调查与防治工作中常用的手段，可深入揭示地下岩体的物理力学性质、结构特征及其空间分布规律（郭长宝等, 2020; Jin et al., 2024）。其中，高密度电法和可控源音频大地电磁测深等物探方法在地质灾害调查研究中发挥重要作用，高密度电法具有数据采集量大、效率高、反演信息丰富、解译方便等特点，已被广泛应用于大型滑坡空间结构、地下水、裂缝、空洞、断层、滑带推断与稳定性等研究中（LeRoux et al., 2011; Epada et al., 2012; Hussain et al., 2020）。本次采用高密度电法，在典型关键部位布设 2 条高密度电法剖面，有效剖面核心长度分别不少于 2.2km 和 1.6km，电极距离 5m，布设 20 处微动测深数据，深度不小于 200m。

地质钻探作为最直接的方法，能够直接获取岩芯样品，进行岩石力学试验和地质构造分析，为地质灾害成因机制研究提供坚实的数据基础。本次在结合现场调查和高密度电法等手段技术上，选取典型滑坡布设钻孔 4 孔，钻探深度共 368.6m。

3 大型滑坡发育分布规律

3.1 滑坡总体发育分布特征

研究区共识别滑坡 52 处，其中高位滑坡 22 处，库岸滑坡 8 处，河流侵蚀型滑坡 8 处以及堆积体滑坡 23 处（图 3，4）；整体上，滑坡分布与地层岩性、高陡地形及区域构造作用高度相关，佛山-燕门乡段滑坡灾害以高位滑坡为主，滑坡前后缘发育高程集中在 2435m-3224m，该区地形陡峭，构造破碎，二叠系与三叠系的变质板岩广泛出露，呈碎裂状结构，整体性差，抗风化能力弱，易风化破碎，因而成为高位滑坡的高发区；叶枝镇-燕门乡两岸滑坡以古滑坡为主，滑体较厚，人类活动改造明显，部分居民房屋及田地分布于古滑坡堆积体上，虽整体稳定性较好，但受河流侵蚀、水库蓄水调控以及人工切坡等人类工程活动影响，部分滑坡出现复活变形迹象；此外，区内岩体倾倒变形现象遍布，主要发育于薄层板岩、砂板岩、片岩等软弱岩层及软硬互层岩体中，处于变形阶段尚未失稳的坡体。总体上，研究区滑坡可归纳为：高位滑坡主要受岩性与构造控制；库岸滑坡主要与库水位涨落有关；河流侵蚀型滑坡与河谷强烈切割密切相关；而堆积体滑坡则多表现为古滑坡堆积体在外部扰动下的复活，如巴迪滑坡，巴丁滑坡等（图 3，4）。

3.2 大型高位滑坡的发育分布规律

根据统计，研究区共识别高位滑坡 22 处（表 2），其发育特征具有一定的规律性。从高程分布来看，滑坡剪出口多集中于 2400-2600 m 之间，占总数约 75%，表明该高程区间是高位滑坡的主要集中带（图 5c）。从坡度条件看，滑坡最易发生在约 30°的坡度范围内，约占总数的 70%（图 5a），

说明该坡度区间对高位滑坡的形成最为敏感。坡向统计结果显示，SW、NE、E 和 W 为优势坡向（图 5b），与区域构造线及河谷走向密切相关。

在岩性特征上，高位滑坡主要分布于板岩、砂岩、变质砂岩、玄武岩和凝灰岩等地层中，且坡体表层多覆盖第四纪松散堆积物。受区域构造作用影响，这些岩层普遍存在层理、节理和小断层等软弱结构面，整体性较差，易在重力与外界扰动作用下变形或失稳。

从变形模式与坡体结构来看，研究区高位滑坡多为反倾结构，以倾倒变形和蠕滑-拉裂为主，部分为顺向坡滑移-剪断型（表 2）。其中，倾倒变形类滑坡数量最多，多发育于板岩、变质砂岩及玄武岩等岩层中，形变特征明显；蠕滑-拉裂型滑坡则常见于砂岩、页岩互层及局部玄武岩出露区，部分地段已表现出明显的 InSAR 形变迹象。顺向坡型滑坡相对较少，仅见于板岩、砂板岩或砂岩-页岩互层地段，其稳定性受层面产状与坡面关系控制显著。

表 2 研究区大型高位滑坡发育特征统计表

编号	名称	规模等级	前缘高程/m	后缘高程/m	滑坡剪出口高程/m	地层岩性	基本模式	形变特征是否明显	坡体结构
HP01	南任滑坡	大型	3080	3265	3083	P _{ij} 深灰色砂岩、粉砂岩、页岩、灰岩	倾倒变形	否	反倾
HP02	归巴顶滑坡	巨型	2693	3359	3224	P _{ij} 灰岩、页岩	倾倒变形	是	反倾
HP03	争岗滑坡	巨型	2091	2927	2436	P _{ij} 板岩、变质砂岩、玄武岩	倾倒-拉裂和蠕滑-拉裂复合	是	反倾
HP04	梅里石 3 号滑坡	巨型	2104	3460	2685	P _{ij} 变质砂岩、板岩泥岩、变质玄武岩	倾倒变形	是	反倾
HP05	梅里石 4 号滑坡	巨型	2142	3261	2730	P _{ij} 变质砂岩、板岩泥岩、变质玄武岩	锁固段倾倒变形	是	反倾
HP06	根达坎滑坡坝	巨型	2075	3310	2555	P _{ij} 变质砂岩、板岩、变质玄武岩	倾倒-拉裂和蠕滑-拉裂复合	否	反倾
HP07	亚贡倾倒变形体	巨型	2306	3158	2606	P _{ij} 、T _{3hn} 板岩、变质砂岩、玄武岩	锁固段倾倒变形	是	反倾
HP08	纳古滑坡	巨型	2167	3018	2566	J _{2h} 、P _{ij} 板岩、砂岩	倾倒变形	是	反倾
HP09	洒龙滑坡	巨型	2540	3329	2831	P _{ij} 板岩、砂岩、	倾倒变形	是	反倾
HP10	曲弄滑坡	巨型	2177	3210	2586	P _{ij} 板岩、砂岩	滑移拉裂剪断	是	反倾
HP11	达哇滑坡	巨型	2368	3090	2674	P _{ij} 板岩、砂岩	滑移拉裂剪断	否	反倾
HP12	甲卡滑坡	巨型	2222	2950	2624	T/3a 石英砂岩夹炭质页岩	滑移拉裂剪断	是	反倾
HP13	木许乡滑坡	巨型	2234	3004	2355	T/3x 砂岩、板岩	蠕滑弯曲剪断	否	反倾
HP14	学丁滑坡坝	巨型	2076	2760	2606	P _{ij} 变质砂岩、板岩；变质玄武岩	蠕滑弯曲剪断	否	反倾

HP15	义那石倾倒变 形体	巨型	2138	3115	2707	P _{ij} 板岩、砂岩	倾倒变形	否	反倾
HP16	江波村滑坡	大型	2579	3181	2705	P _{ij} 砂岩、页岩	滑移拉裂 剪断	是	反倾
HP17	西当村(尖旺 通)滑坡	巨型	2010	2910	2569	P _{ij} 灰岩、页岩	倾倒变形	是	反倾
HP18	阿东滑坡	巨型	2698	3729	2698	J _{2h} 板岩、砂板岩、 安山岩、凝灰岩	滑移拉裂 剪断	是	反倾
HP19	义那石滑坡	大型	2113	3086	2513	P _{ij} 、T _{3hn} 板岩、变 质砂岩、玄武岩	倾倒变形	否	反倾
HP20	学丁上游滑坡	大型	2070	2795	2473	P _{ij} 板岩、砂岩	倾倒变形	否	反倾
HP21	永支滑坡	巨型	1970	3063	2472	P _{ij} 板岩、砂岩	顺向坡滑 移-剪断	否	顺层
HP22	拉金神谷滑坡	巨型	1885	2289	1920	J _{2h} 、P _{ij} 板岩、砂板 岩	顺向坡滑 移-剪断	是	顺层

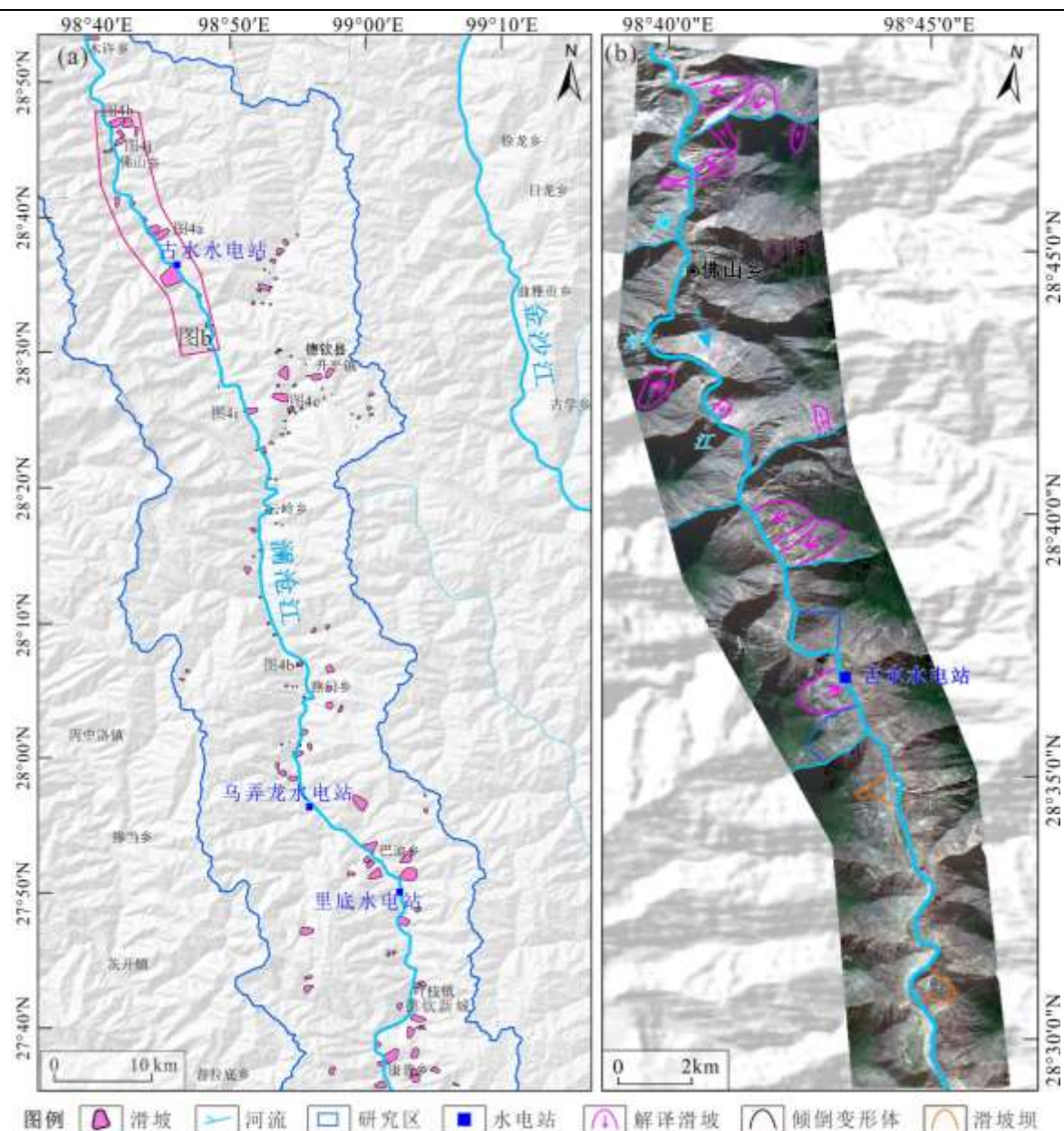


图3 研究区滑坡发育分布图 (a 滑坡分布图 b 基于 spot 高清影像解译图)

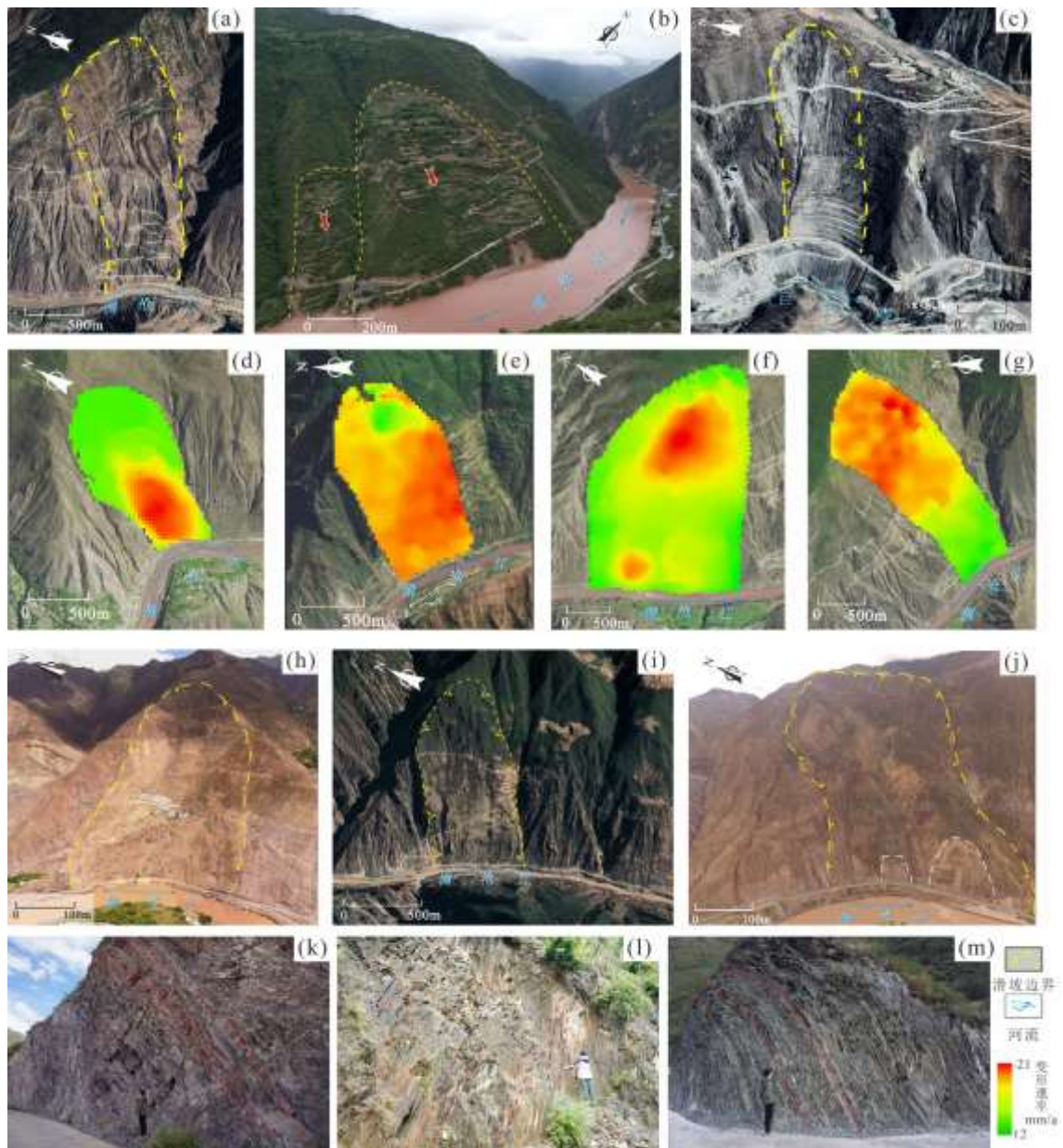


图4 研究区典型滑坡 InSAR 变形与光学遥感影像 (光学遥感影像来源于 Google Earth, 时间为 2017 年 11 月-2023 年 12 月) (a-c, h-j 为研究区典型滑坡; d-g 为典型滑坡 InSAR 形变速率图; k-m 为研究区倾倒变形体)

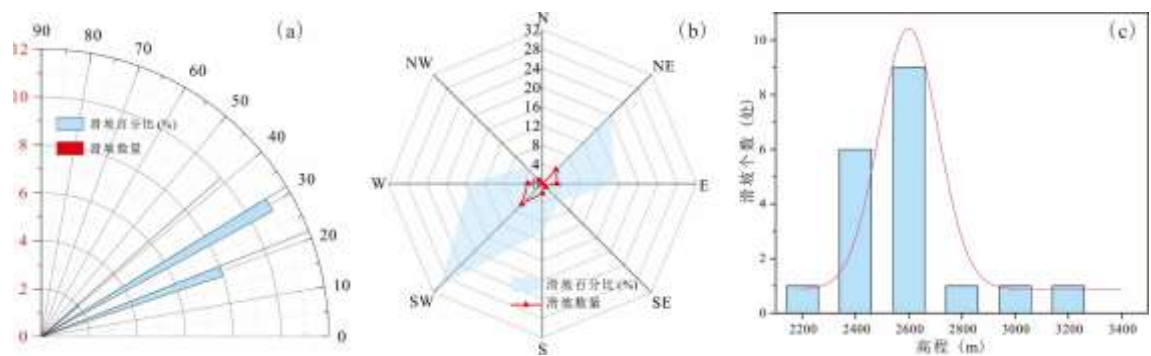


图5 研究区高位滑坡发育分布规律统计图 (a 研究区坡度统计; b 研究区坡向统计; c 滑坡剪出口高程统计)

3.3 典型大型高位滑坡发育特征

3.3.1 梅里石滑坡群

(1) 滑坡发育特征

梅里石滑坡群位于德钦佛山乡梅里石村正对面，澜沧江左岸，其中，梅里石 3 号滑坡平面呈“U”型，后缘呈圈椅状，左右侧边界均以冲沟为界，滑坡前缘高程为 2700m，后缘高程为 3300m，纵向长约 1080m，横向宽约 700m，主滑方向约 230°，滑坡前缘剪出口距离澜沧江水面约 650m，滑坡堆积体平均厚度约 35m，面积约 $100\times10^4\text{m}^2$ ，体积约 $3500\times10^4\text{m}^3$ ，为一巨型滑坡（图 6a）。地层岩性主要为二叠系下统吉东龙组（P_{ij}）的变质砂岩、板岩、玄武岩、变质泥岩、灰岩等，表层覆盖第四系（Q₄）碎石土、冲积层、崩积层等（图 6b）。

梅里石 4 号滑坡呈典型长“U”形圈椅状（图 6a），滑坡后缘高程 3240 米，前缘高程 2550 米，横宽 620~1150 米，纵长约 1130 米，平均厚度 10 米，总体积约 1000 万立方米。滑坡整体坡度 21°，前后缘坡度较陡。地层岩性主要为二叠系下统吉东龙组（P_{ij}）的变质砂岩、板岩、玄武岩、变质泥岩、灰岩等，岩体破碎、节理发育（图 6b）。滑坡堆积体由崩坡积（厚 5~20 米，松散块石和碎石交替分布）、滑体（厚 5~60 米，由变质砂岩、板岩和玄武岩组成）和滑带土（浅层为黏土夹砾石，深层含碎石和岩屑）组成。

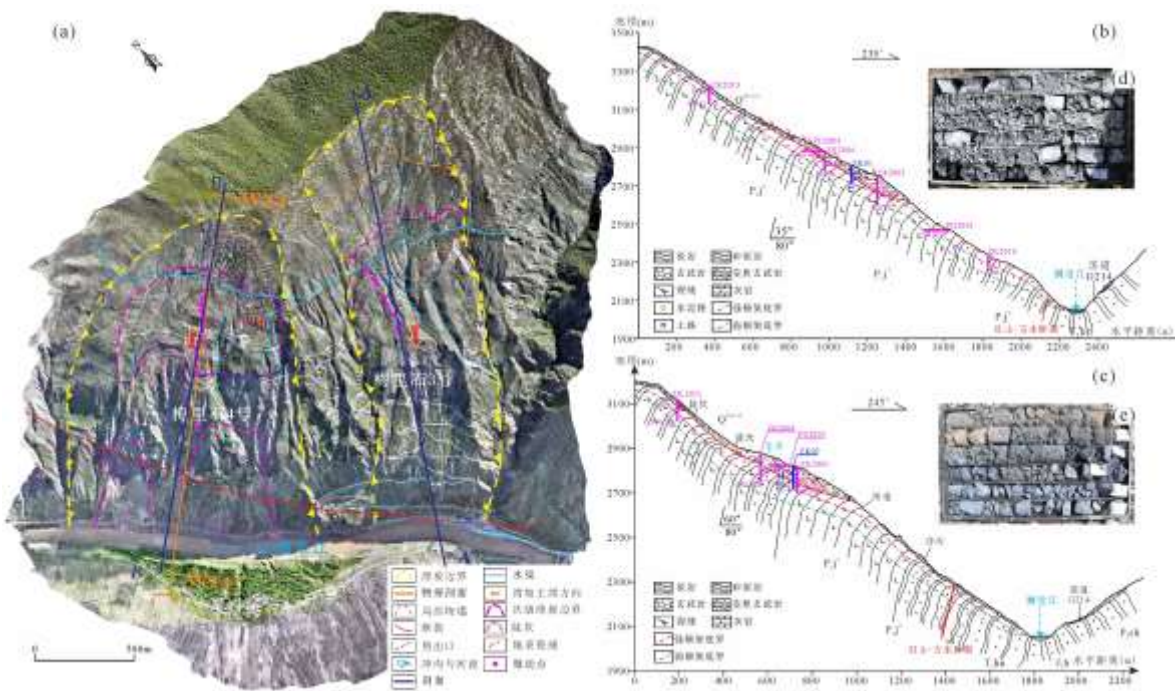


图 6 云南德钦县佛山乡梅里石滑无人机群影像平面图和滑坡剖面图（a 滑坡平面图，b 梅里石 3 号滑坡 A-A’剖面图，c 梅里石 4 号滑坡 B-B’剖面图，d 梅里石 3 号滑坡钻孔岩心，e 梅里石 4 号滑坡钻孔岩心）

(2) 滑坡变形特征

现场调查表明，滑坡体地表拉裂缝遍布，发育多处局部滑塌，堆积体内冲沟发育，变形破坏特征明显。在高程 2700m 滑坡体前缘地段，堆积物松散，逐级垮塌现象明显，发育多级陡坎；高程 2850m 一带形成多处滑坡鼓丘，鼓丘两侧被冲沟分割；在高程 3000m 附近滑坡地形变缓，形成滑坡中后部平台；后缘 2950~3250m 呈“圈椅”形态，且出现多级错台陡坎、数条拉张裂隙及局部滑塌（图 7）。

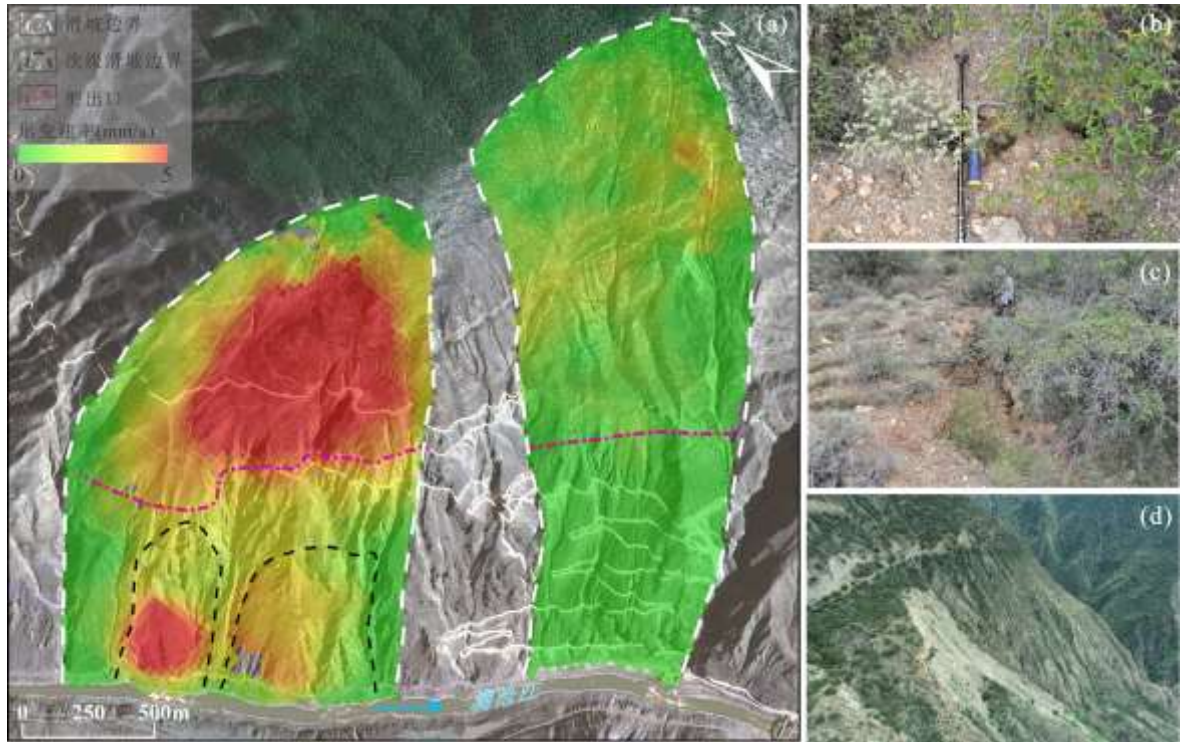


图 7 云南德钦县佛山乡梅里石滑坡群变形破坏特征 (a 滑坡群 InSAR 形变速率, b 滑坡中部拉裂缝, c 滑坡侧边界拉裂缝, d 滑坡局部垮塌变形)

3.3.2 争岗滑坡

(1) 滑坡发育特征

争岗滑坡位于古水水电站坝址下游约 1km 处，澜沧江右岸亚贡沟北侧，平面形态呈舌形，后缘主断壁明显下凹，呈椅状，坡表覆盖松散残坡积物。滑坡坡度在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ，主滑动方向约 89° ，前缘高程 2091m，后缘高程 2927m，纵向长 1676m，横宽约 1248m。滑坡堆积体厚度 15m~50m，平均厚度约 37m，面积约 $128\times 10^4\text{m}^2$ ，体积 $4750\times 10^4\text{m}^3$ ，为一处巨型滑坡。滑坡中后缘高程约 2800m 和 2500m 形成两级相对平缓的平台，宏观表现为横窄纵宽，坡度约 11° 。滑坡出露岩性为三叠系上统红坡组 (T_3hn) 泥质板岩和变质砂岩 (图 8)，节理发育，岩体十分破碎，产状为 $197^{\circ}\angle 34^{\circ}$ 。

(2) 滑坡变形特征

现场调查发现，滑坡地表变形以局部滑塌和拉剪裂缝发育，坡表覆盖层变形破坏较为显著；滑坡中部右边界处发育四条拉裂缝和一条剪切裂缝；后缘左侧局部垮塌，高程 2510m 处沿冲沟向下垮塌。高程 2370m 处，拉张裂缝沿坡向发育，变形迹象较明显，附近发育多条近平行的次级拉张裂缝。后缘发育多条拉张裂缝，其中在高程 2620m 和 2690m 处还发育两处局部垮塌，两处垮塌区变形特征基本相似，总体形态呈倒石堆状，后缘呈弧形。前缘岩体结构松散，发生大量垮塌，主要为坡残积层的变形破坏，属于浅表层破坏 (赵永辉, 2016)。争岗沟两侧变形破坏方式主要为局部垮塌和拉剪破坏，且规模较大。由 InSAR 形变监测结果可知：强变形区位于前缘和中部部位，最大形变速率为 11.2 mm/a (图 9c)。

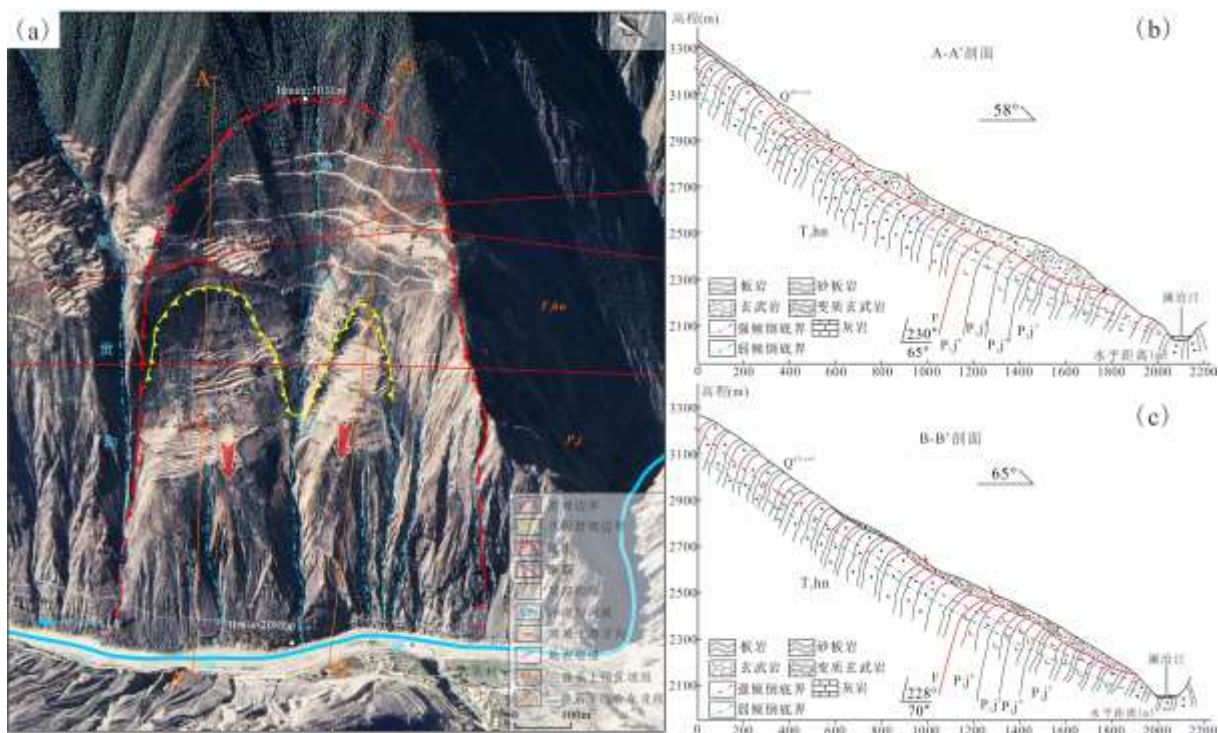


图 8 争岗滑坡平面图和剖面图 (a. 滑坡平面图, b, c 滑坡剖面图)

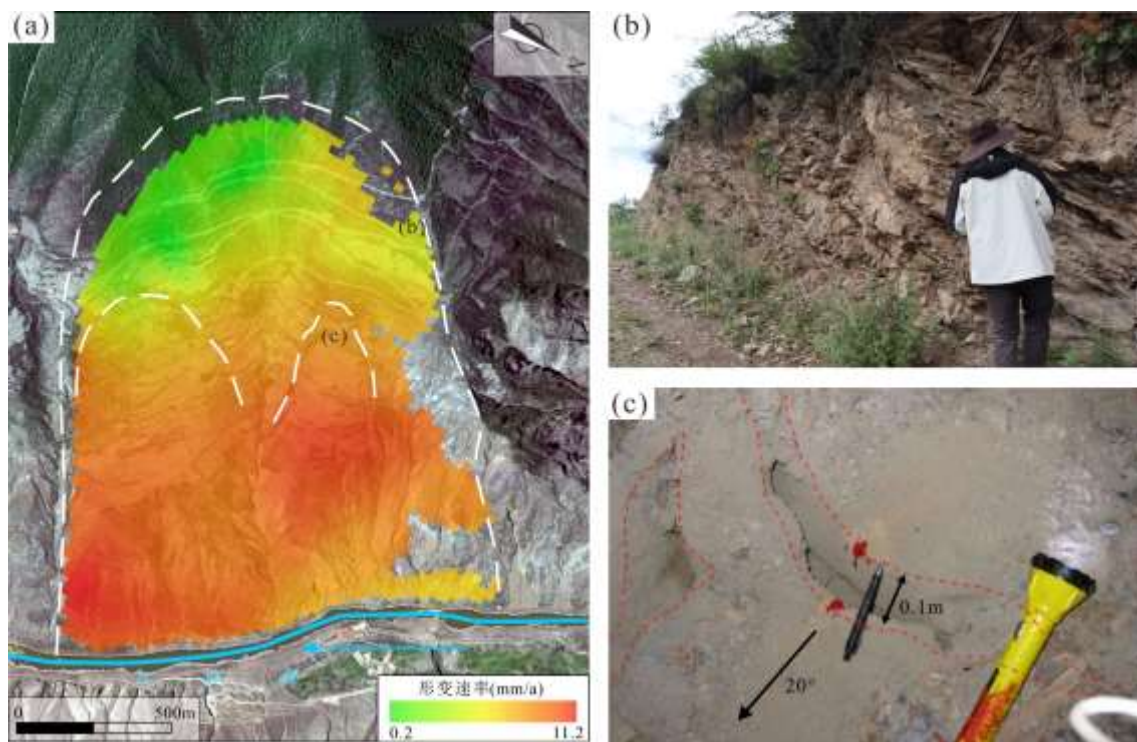


图 9 争岗滑坡变形破坏及 InSAR 变形特征 (a. 滑坡 InSAR 形变速率; b. 滑坡右边界出露基岩; c. 平硐硐底拉剪破坏)

3.3.3 根达坎滑坡坝

(1) 滑坡发育特征

根达坎滑坡位于古水水电站坝址下游直线距离约 4km 处，澜沧江右岸木水沟下游侧（图 10）。滑坡整体呈喇叭形，后缘圈椅状地貌明显，总体呈后薄前厚特征。滑坡坡度在 20°~45°，主滑动方向

约 62°，纵向长约 1469 m，横宽约 669 m，前缘高程为 2075 m，后缘高程为 2874 m，平面面积约为 $8.0 \times 10^5 \text{ m}^2$ ，滑坡推测厚度 25~35 m，滑体体积约 $2100 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，为一巨型滑坡。高程 2500m 以上地表植被发育，地形较完整，地形坡度呈 20°~30°，堆积体上高程 2550m、2400m、2250m 分别发育三级台地，滑坡堆积体河谷岸坡为悬崖陡壁，仅澜沧江边及堆积体上、下游冲沟中出露基岩，两岸支流发育，形成沟梁相间的地貌形态。滑坡体组成物质为松散的砂粉土、碎石及砂土层，含少量孤石，碎石的岩性主要为变质砂岩、板岩及玄武岩（杨啡等, 2017）。

(2) 滑坡变形特征

根达坎滑坡堆积体目前的复活变形迹象主要表现为：前缘局部小规模滑塌、堆积体两侧岩土体向冲沟内的小规模滑塌、以及坡表面的拉张裂缝。拉张裂缝主要集中在堆积体中部平台和缓坡地带，延伸长度数米至百余米不等，张开度一般在 0.2~1 m 左右，延伸方向主要包括纵向和横向两个方向，其中在海拔 2260m 滑坡平台处，发育 3 条拉张裂缝，其中最大长约 7 m，宽约 0.6 m，可见深度约 2.5 m，延伸走向约 30°（图 11），局部有碎石块填充，错台高度约 15~20 cm。大量裂缝的存在，为降雨入渗提供了通道，对滑坡前缘变形失稳具有重要影响，因其产生失稳变形原有村民已全部搬迁。



图 10 根达坎滑坡变形特征图 (a. 滑坡平面图; b. 根达坎滑坡前缘左侧裂缝; c. 滑坡前缘湖相沉积层)

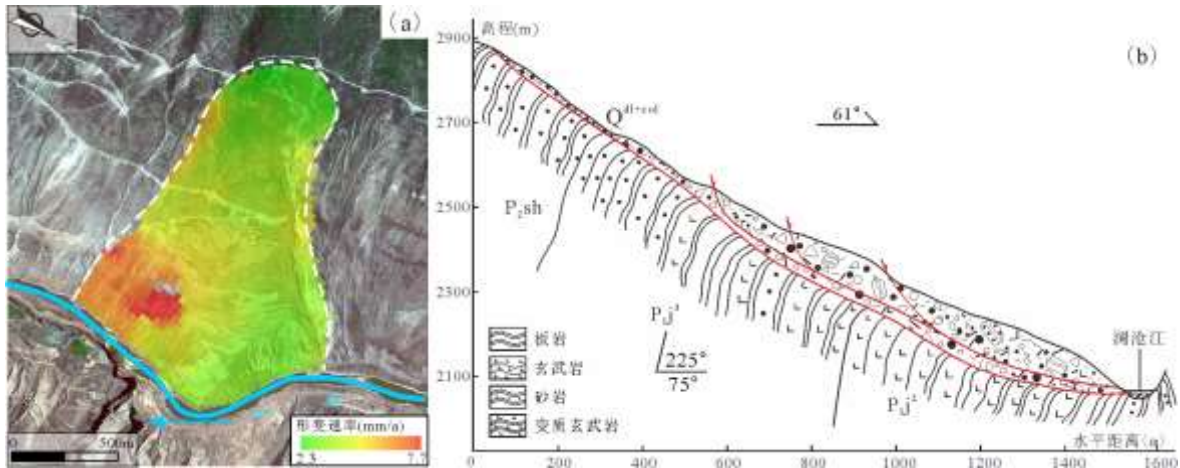


图 11 根达坎滑坡 InSAR 变形特征 (a. 滑坡 InSAR 形变速率; b. 滑坡右剖面图)

4 大型高位滑坡形成演化地质力学模式

受构造背景、地层岩性组合及地貌条件等多重地质因素影响，高位滑坡的变形演化模式与启动机制不同。结合研究区的孕灾背景、滑坡启动过程及典型案例的详细调查，本研究在综合分析成因机制与演化过程的基础上，总结了高位滑坡变形破坏的地质力学模式。

4.1 倾倒变形破坏

倾倒变形是反倾岩质斜坡最主要的失稳模式之一，通常指走向与坡面近于平行的陡倾层状岩体，或被平行坡面的卸荷裂隙分割的岩体，在重力作用下产生向坡外的弯曲倾倒-拉裂或弯折-倾倒变形（郑达等，2021；黄润秋等，2017）。区域高地应力和深切沟谷为倾倒变形提供了有利的外部条件，研究区澜沧江深切峡谷两侧的高陡反倾岩质斜坡和边坡中普遍发育浅层（深度<30m）和深层（深度>30m）倾倒变形，且表现出明显的类型差异。

4.1.1 硬岩浅层倾倒变形-块体倾倒

浅层块体倾倒是硬岩斜坡中最常见的变形破坏模式之一，主要发育于中-厚层状、中-陡倾角反倾坡的脆性坚硬岩层中，岩层倾角大于坡面倾角，岩体完整性较好，边坡坡脚受力较小。其变形过程主要表现为块体的顺坡旋转、顶裂扩展以及局部剥落，一般深度不超过 20-30 m。其变形破坏面常呈折线状或近似直线状，倾倒单体规模较小（图 12），主要表现为硬岩浅层块体倾倒。初期倾倒集中，拉裂逐渐发展，可能诱发局部剥落或小型滑体形成。

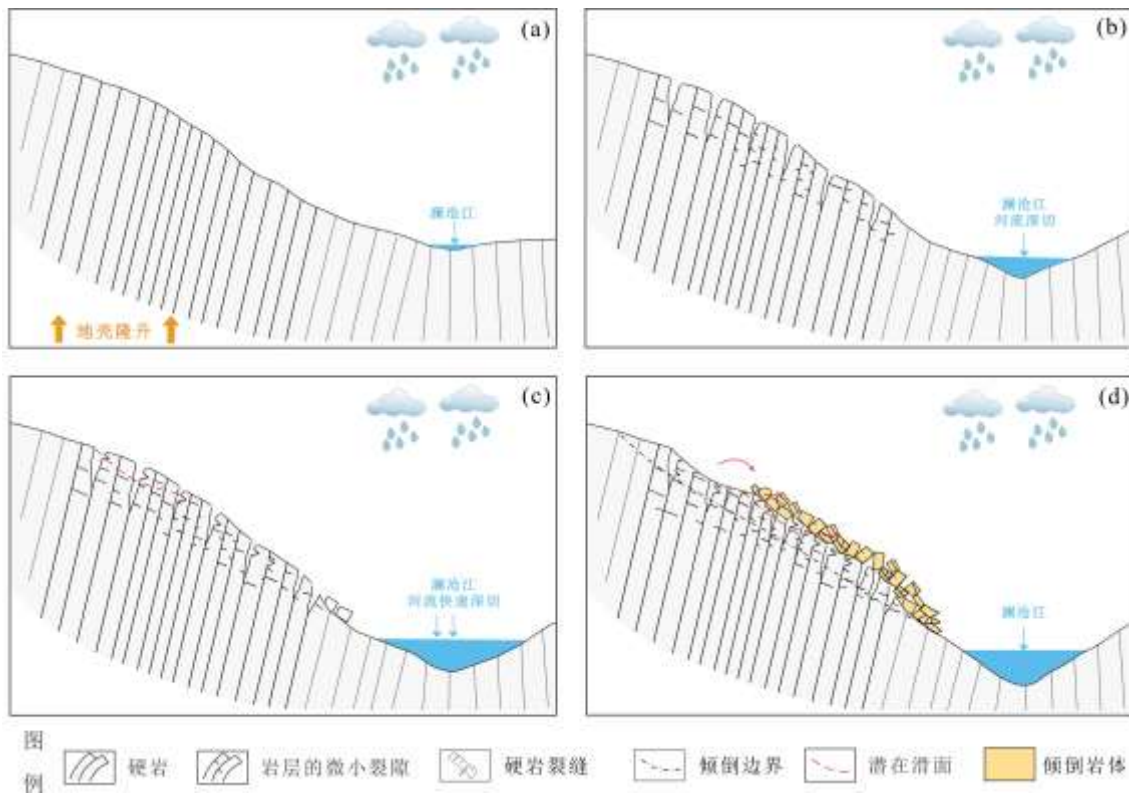


图 12 浅层倾倒变形地质力学模式 (a.滑坡初始阶段; b. 裂隙产生阶段; c. 裂隙扩展阶段; d. 岩体倾倒形成滑坡)

4.1.2 软岩深层倾倒变形-弯曲倾倒

另一类为深层倾倒地形，其通常表现为韧性弯曲，常见于薄层状板岩、砂岩、片岩、千枚岩及泥质灰岩等软弱地层中。软岩或软硬相间岩层组合是陡倾层状岩体发生持续倾地的必要条件。在重力作用下，岩层因韧性变形可产生较大尺度的弯曲，而不发生明显断裂（黄润秋等,2017）。该类既可在浅部发育，也可向深部扩展，最终演化为大型乃至巨型深层滑坡（图 13）（黄润秋等,2008; 2017; Huang et al., 2021）。如，澜沧江义那石倾倒地形，岸坡为近直立层状结构，其岩层总体产状为 $N15^{\circ}\sim 40^{\circ}W$ ， $SW\angle 75^{\circ}\sim 85^{\circ}$ ，据平硐揭露（Tu et al., 2021），岩层倾地变形极为强烈，洞内可见岩层因弯曲而形成的楔形张裂缝，岩层倾角也由硐口至硐底随硐深变化逐渐增大，从岩层倾角尚未变到原始产状的情形来看，该斜坡倾地变形的水平深度范围将远在 150m 以上，显示出深层倾地的演化特征。

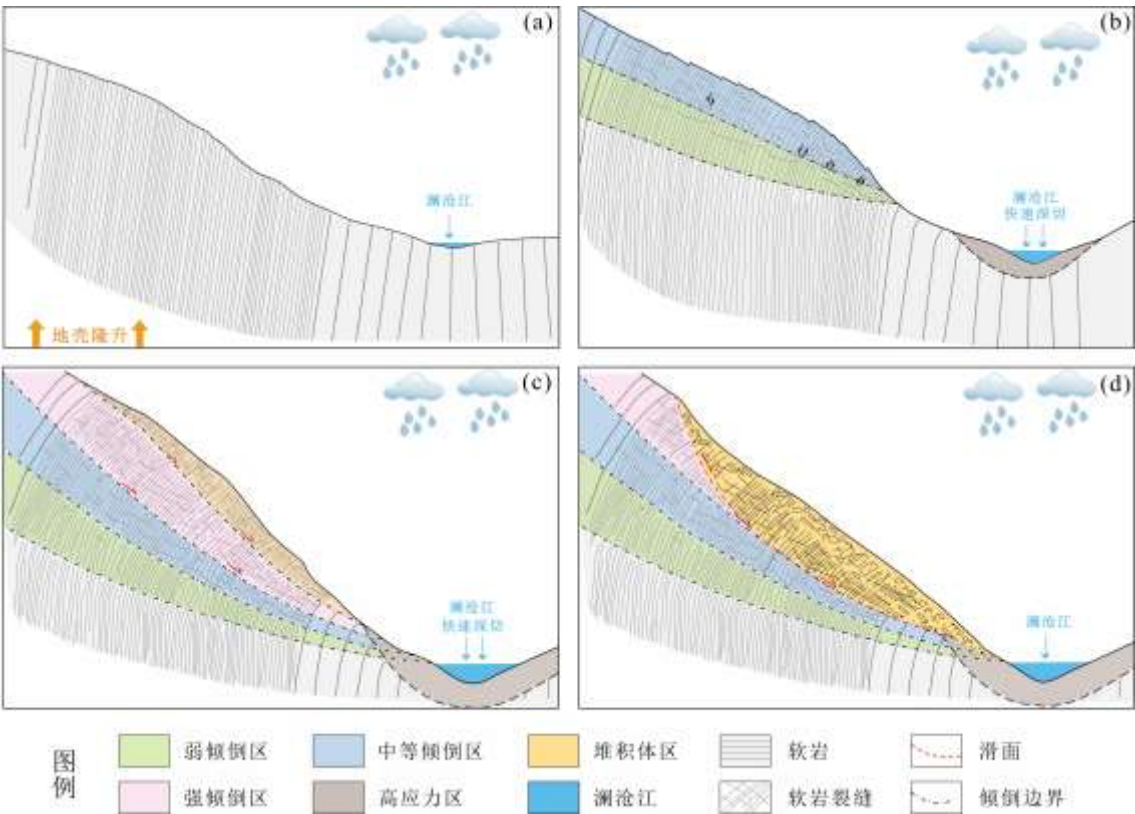


图 13 深层倾地变形地质力学模式（a.滑坡初始阶段；b. 岩体弯曲产生裂隙阶段；c. 深层强烈倾地阶段；d. 倾地形成滑坡）

4.1.3 软硬互层状岩弯曲倾地-拉裂和蠕滑-拉裂复合型

在软硬相间的层状岩体中，常出现弯曲-拉裂与蠕滑-拉裂的复合型倾地变形。其中，坚硬层岩体在坡体重力作用下发生向坡外弯曲与拉裂，而软岩层则因蠕滑与塑性变形而产生剪切带或拉裂区（图 14）。两者的协同作用使得倾地变形能够在更大深度和更宽广范围内持续发展，并表现出比单一模式更复杂的几何形态与演化机制。该类复合型倾地不仅具有浅部的块体倾地特征，还可表现为深部的缓慢蠕变与弯曲，最终可能演化为规模巨大的深层滑坡。

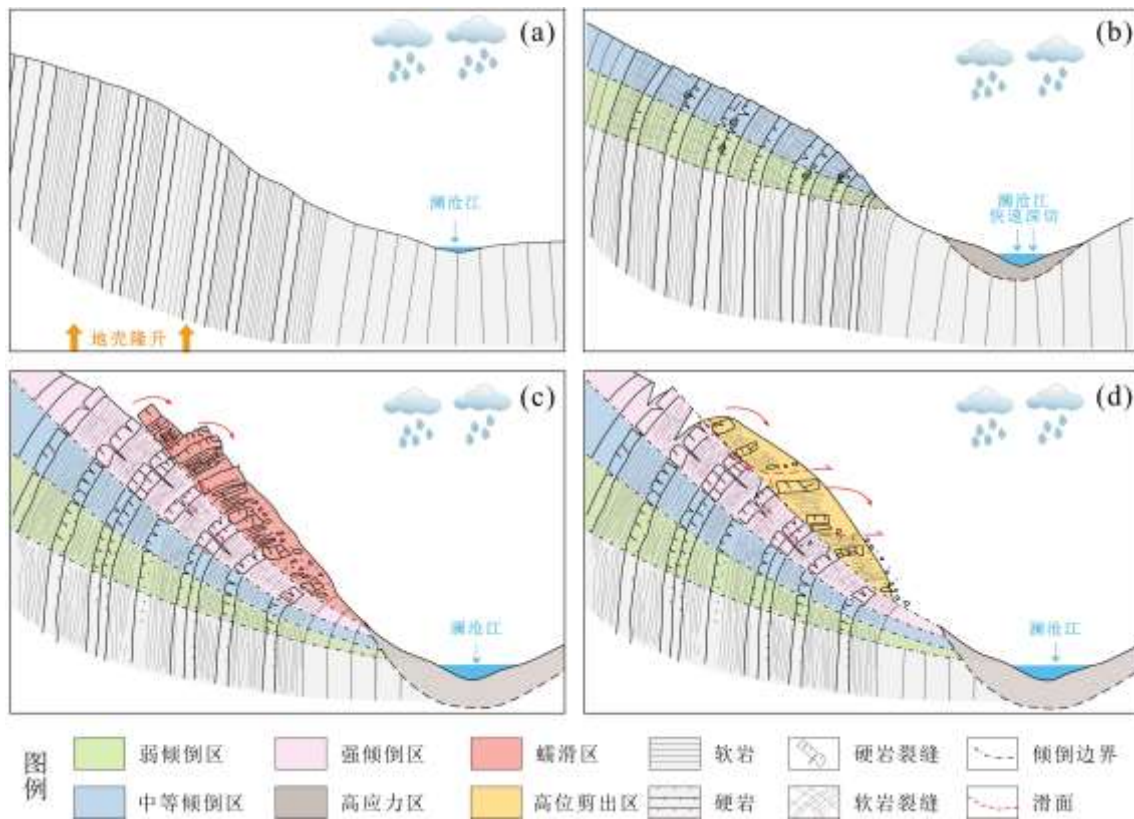


图 14 软硬岩层复合深层倾倒变形地质力学模式 (a. 滑坡初始阶段; b. 岩体弯曲产生裂隙阶段; c. 深层强烈倾倒阶段; d. 多级倾倒形成滑坡)

4.1.4 软硬软岩层状岩锁固型控滑机制

“锁固段”在岩质斜坡的变形控制和稳定性机制中具有重要地位，也是地质灾害评价与控制的关键（黄润秋等, 2007; 2017; 秦四清等, 2018）。锁固段是指承受应力集中的高强度部位，锁固型斜坡稳定性受潜在滑面上的锁固段所控制，完整性强或强度大的岩体会形成关键锁固段，由于长期应力积累，当锁固段的承受能力小于上部压应力和下部拉应力时，锁固段会突然发生剪切破坏，形成具有初速度的岩质滑坡，这种模式常见于中国西部山区（Yin et al., 2017）。研究区地处澜沧江高山峡谷地区，地层岩性复杂，同一坡体其高高程区域与低高程区域岩性差异较大，如亚贡倾倒变形体，高高程区域岩性为软岩，中部为硬岩，低高程区为软岩，在这种岩性分布特征下，软硬岩层的力学差异是滑坡变形演化的关键因素。软岩层由于较低的抗剪强度和较高的塑性，容易发生蠕滑和裂缝扩展，硬岩层的锁固作用最初稳定了斜坡，延缓了整体变形的过程，但随着裂缝的扩展，硬岩锁固作用逐渐失效。从微小裂缝到破坏的过程以硬岩层“锁固”作用的逐渐丧失为标志，长期损伤累积使硬岩锁固段岩体局部损伤（量变）到强度完全丧失（质变），贯通形成滑面，最终导致整体瞬间失稳并开始滑动（图 15）。

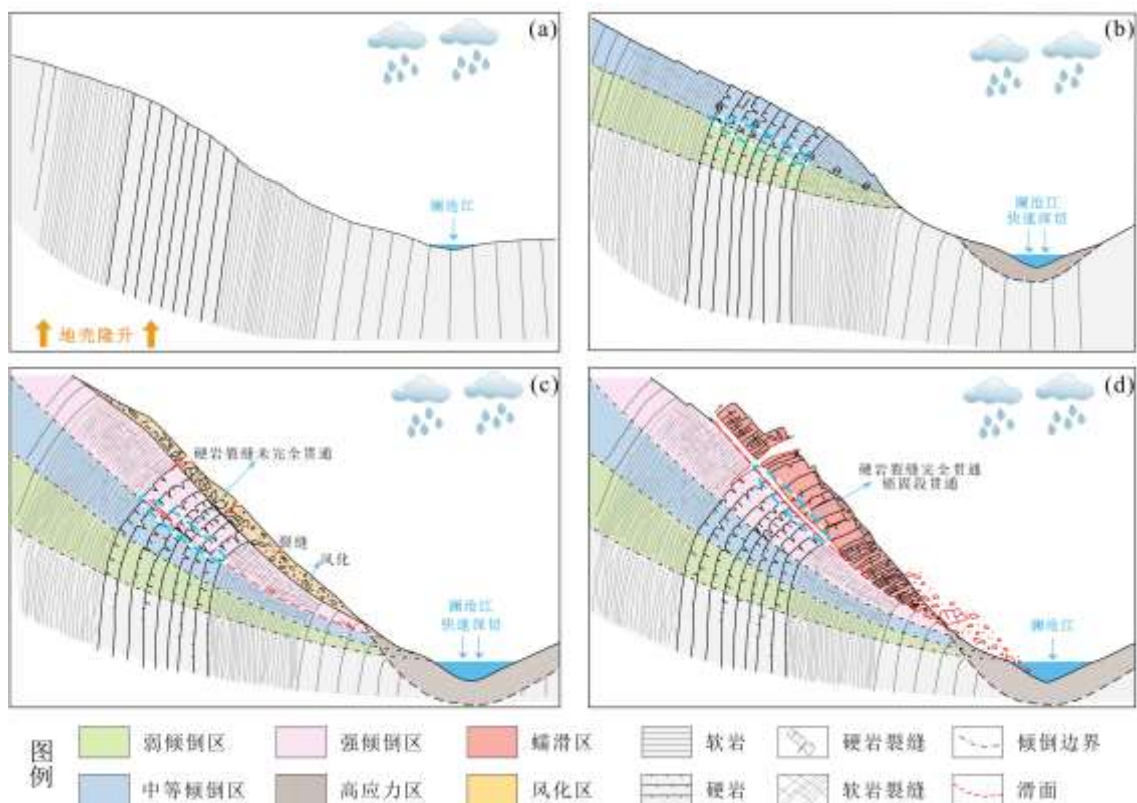


图 15 软硬软岩滑坡变形地质力学模式 (a. 滑坡初始阶段; b. 岩体弯曲产生裂隙阶段; c. 强烈倾倒硬岩锁固段逐渐贯通阶段; d. 硬岩锁固段贯通倾倒形成滑坡)

4.2 蠕滑-拉裂变形破坏

4.2.1 岩体蠕滑-拉裂变形

岩质滑坡的蠕滑-拉裂变形则主要表现为岩体沿软弱面或裂隙贯通面缓慢下滑，初期岩体弯曲顶部和坡面出现拉裂缝，随后在长期重力及降雨渗透作用下，岩体逐渐发生蠕滑，裂隙增大并形成潜在的滑动区（图 16）。此类变形模式多发育于中浅层至深层，虽然演化过程较为缓慢，但长期累积的变形位移可能导致大型乃至特大型滑坡的发生。

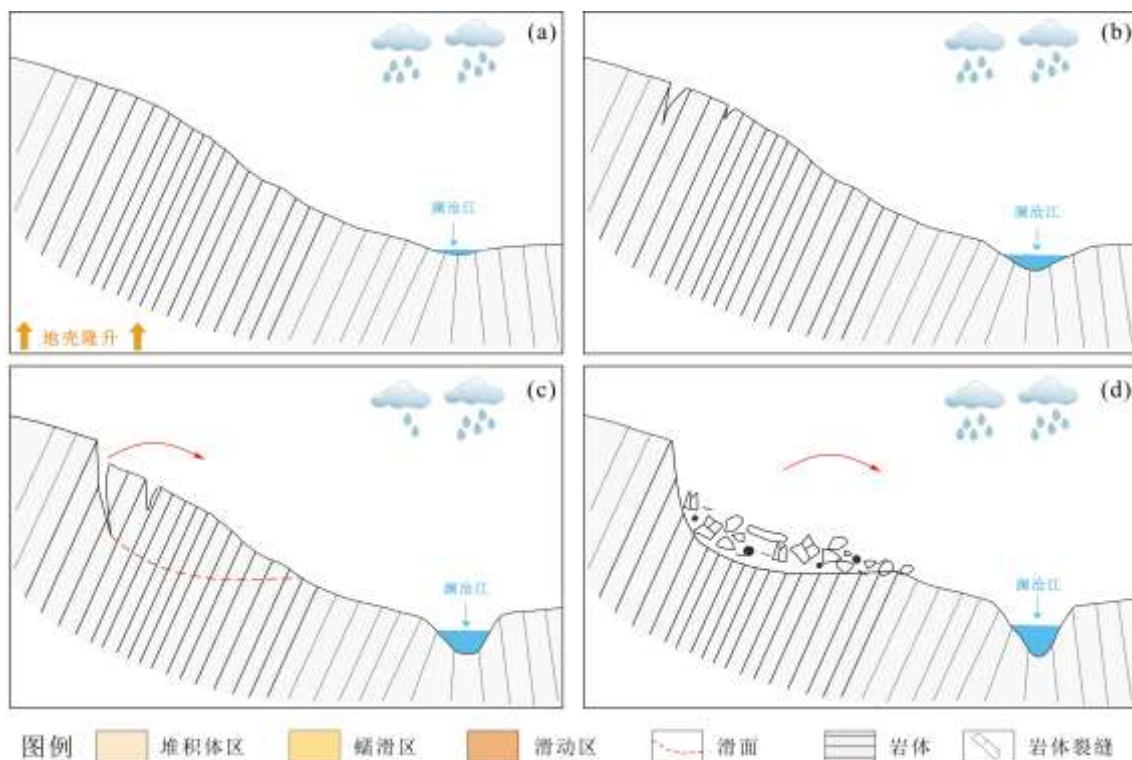


图 16 岩体蠕滑-拉裂变形地质力学模式 (a. 滑坡初始阶段; b. 裂隙形成阶段; c. 裂隙扩展阶段; d. 裂隙贯通倾倒形成滑坡)

4.2.2 土体蠕滑-拉裂变形

蠕滑-拉裂变形常见于土质或土-岩混合斜坡，典型发育于第四纪松散堆积物和残坡积土体中。在长期重力作用及降雨入渗、地下水渗流等外界条件的影响下，坡体逐渐发生缓慢蠕动，后缘及中上部因张应力集中逐渐产生拉裂缝，前缘则出现剪切-拉裂破坏。随着蠕滑变形的不断累积与裂缝的扩展贯通，坡体逐渐被分割为多个次级块体，整体刚度与抗剪强度持续衰减，最终可能会在强降雨或库水位波动等触发因素作用下演化为滑坡（图 17），如研究区江波村滑坡。

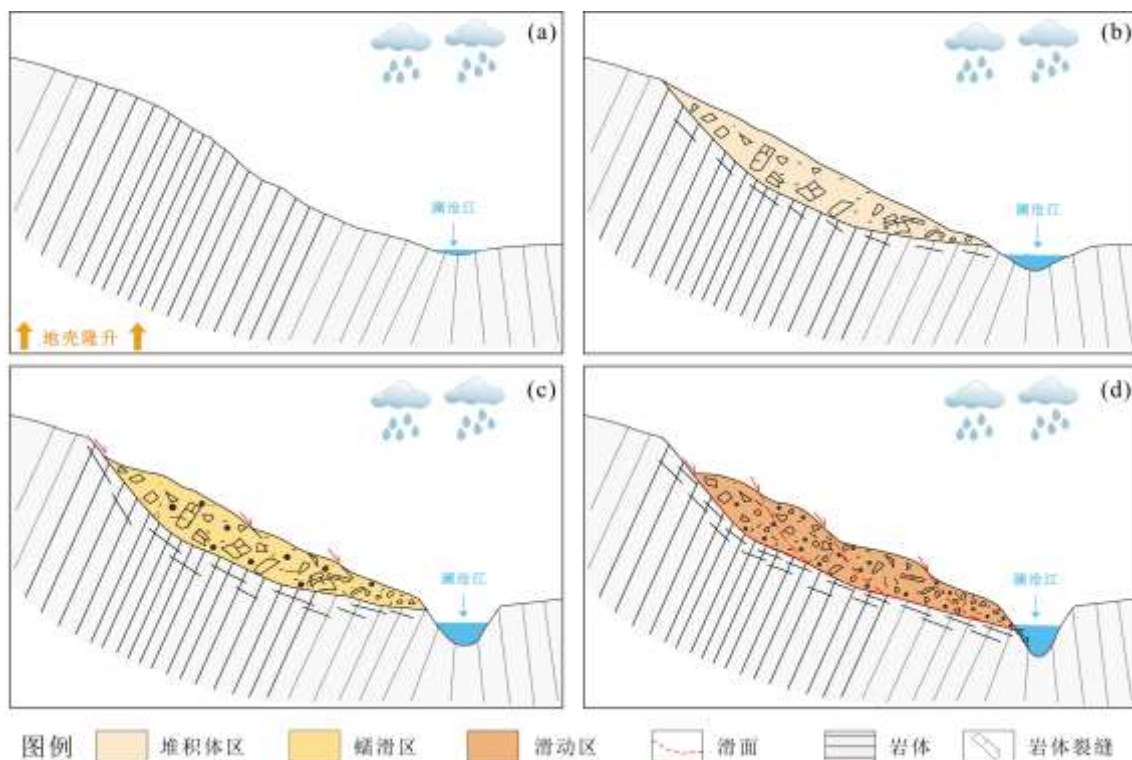


图 17 土体蠕滑-拉裂变形地质力学模式 (a. 滑坡初始阶段; b. 堆积体阶段; c.蠕滑-拉裂贯通阶段; d. 形成多级滑带滑坡)

4.3 顺向坡滑移-剪断机制

顺向坡滑移-剪断机制一般分为两类，一类是层状岩质斜坡以弯折带或沿软弱带的顺层剪切方式破坏为主（邹宗兴等,2012），另一类顺倾向边坡，构成“隐伏型”顺倾坡（黄润秋,2008），由于潜在滑动面不直接在坡面出露，而是向入坡体，因此其滑带的形成和贯穿是一个复杂的地质力学过程，大型滑坡往往发育在这类结构的斜坡中。

4.3.1 顺向坡滑移-剪断

滑坡发生的机制是一个受控于坡体层间裂隙的“滑移（弯曲）-剪断”模式，坡体在河流卸荷和长期自重作用下，产生被动挤压，岩层只能通过产生垂直于层面的变形，即“弯曲-隆起”来协调上部坡体的作用力。这种主传力区的滑移和被动区的挤压隆起构成一个协调的体系，共同控制斜坡变形-破坏的过程，一旦被动挤压区的“弯曲-隆起”加剧，将最终被剪断而导致滑坡的发生(图 18)。

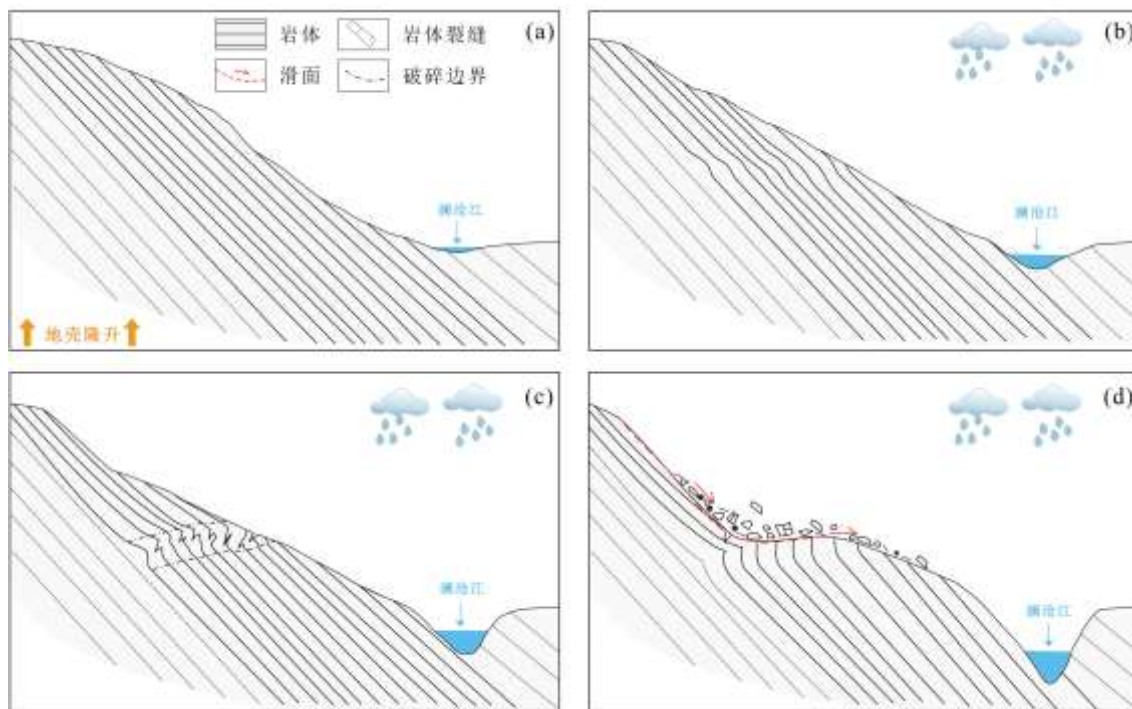


图 18 顺向坡滑移-剪断变形地质力学模式 (a. 滑坡初始阶段; b. 岩体弯曲产生裂隙阶段; c. 逐渐剪断贯通阶段; d. 倾倒形成滑坡)

4.3.2 顺向坡倾倒-拉裂

中陡倾顺层岩质滑坡的形成过程主要为在自重与卸荷应力作用下，中上部沿岩体发生弯曲倾倒-顺层拉裂，坡顶出现贯通性拉张裂缝，并逐步扩展，潜在滑面基本成形，当剪应力超过局部锁固段，顺层滑面贯通，滑体沿层面快速滑移并伴随块体剥落（图 19）。

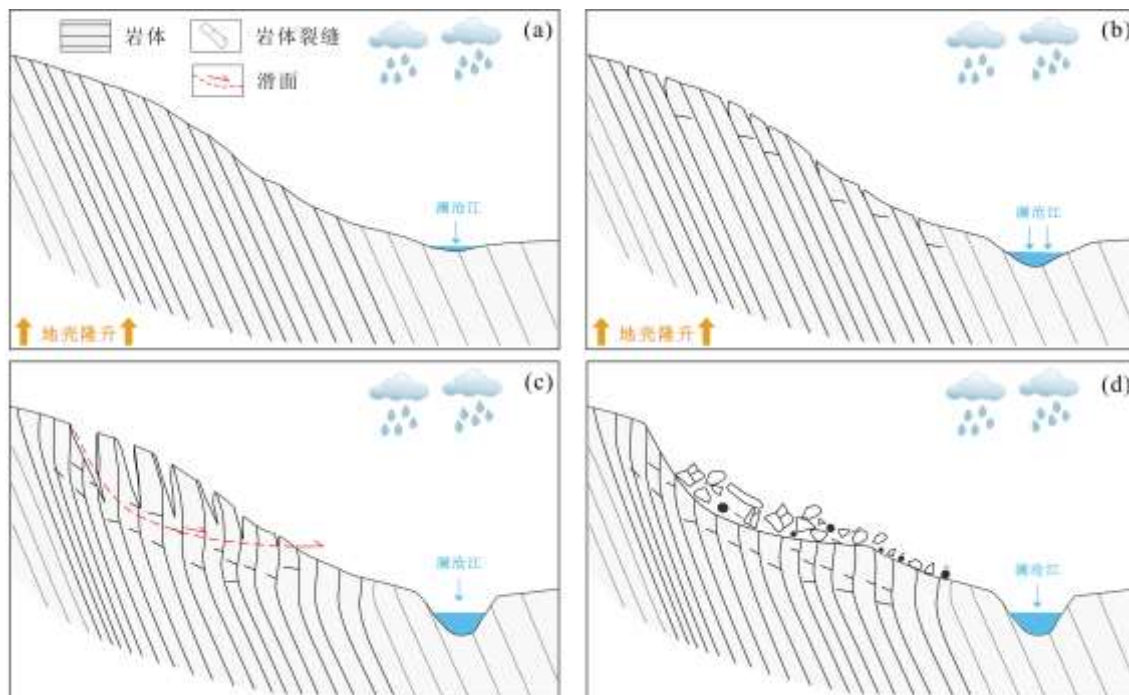


图 19 顺向坡倾倒变形破坏机制的地质力学模式 (a. 滑坡初始阶段; b. 岩体弯曲产生裂隙阶段; c. 裂隙逐渐贯通阶段; d. 倾倒形成滑坡)

5 讨论

5.1 内外动力耦合作用对大型深层高位滑坡形成的影响

青藏高原地壳隆升和断裂活动孕育深层高位滑坡,地质构造对滑坡形成和发展具有区域性控制作用和影响(Martel, 2004; 郭长宝等, 2012; 2024)。断裂活动导致地应力场重新分配,特别是在断裂带附近,会直接诱发大型滑坡形成、促进古滑坡复活。研究区穿越了德钦-中甸-大具断裂带、澜沧江断裂带等多条活动断裂带(张献兵等, 2024),根据中国地震局《中国地震动参数区划图(GB 18306-2015)》,在香格里拉-德钦段的地震动峰值加速度达 0.2 g,历史上多次发生强震并造成重大伤亡,如 1950 年察隅 M_s 8.6 级地震、1996 年丽江 M_s 7.0 级地震等。受近东西向构造应力场的挤压作用导致该区地壳呈整体隆升趋势,对该区的岩体结构和斜坡稳定性造成极大影响。滑坡区内岩体具有多期、多次变形和变质特点,糜棱岩化和蚀变非常严重,导致区域岩体破碎程度高、强度降低,巴丁村-巴迪乡一线,出露早期的蛇绿混杂岩铬云母化的硅质岩以及方辉橄榄岩与灰黑色板岩,形成板岩及强变形砂质板岩中的超基性岩块以及德钦佛山乡段三江构造带区域构造混杂岩带,在断裂持续活动或强震作用下,该区域滑坡可能进一步失稳,发生剧烈大规模滑动。

长期卸荷与重力作用是高位滑坡发生的促发因素,在地壳隆升、断裂活动或地震作用下,研究区斜坡岩体结构破碎,并在澜沧江持续侵蚀作用下,河谷岸坡发生应力场调整 and 变化,形成卸荷裂隙带;在长期重力作用下,该区表部岩体弯折倾倒变形现象发育,坡顶临空方向已发育多条已上下基本贯通的拉裂缝,极有可能由倾倒演化为浅层或深层滑坡。在这一长期渐进变形过程中,坡体深部的锁固段起到决定性作用,它们一方面维持斜坡整体稳定,另一方面在长期重力作用下不断积累高应变能,当剪切应力超过岩体抗剪能力时,锁固段发生脆性破坏,能量瞬间释放,引发滑面快速贯通和整体失稳,从而形成大规模高位滑坡并可能堵塞澜沧江及其支流。

降雨与地下水诱发大型深层高位滑坡变形,极端暴雨和冰雪消融等气候动力因素控制着高位地质灾害的区域与空间分布规律(殷跃平等, 2021; Cui et al., 2022; 杜国梁等, 2024),降雨导致坡体孔隙水压力升高、滑带弱化、岩体结构劣化等一系列力学效应(王力等, 2023; Jayakody et al., 2023)。在滇西北及横断山区一带,构造破碎强烈、岩体多期变质、节理裂隙密集的高位斜坡对降雨-地下水过程响应明显,主要体现在以下几个方面:(1)降雨期间地下水快速下渗,软化岩土体的同时形成静水压力和渗透压力,促进了斜坡深部岩体深层蠕滑变形,导致滑坡体的抗剪强度进一步降低;(2)长期降雨或周期性强降雨还会引发“滞后响应型”变形,即滑体表层出现应力集中与应变累积,表现为加速蠕变、裂缝扩展、剪切带塑化等特征;(3)降雨引起的斜坡沉降和浅层崩积体的快速饱和导致了滑坡逐层浅层溜滑的发生,该种主要以中小型滑坡为主。

5.2 库水位波动促进大型深层高位滑坡变形

库水位变化是大型深层高位滑坡变形的关键外部驱动因素之一。已有研究表明,库区滑坡对库水位的响应具有明显的时空差异性与迟滞性,其变形机制主要通过孔隙水压力调整、滑带软化、水-岩相互作用以及岩土体抗剪强度降低等(唐辉明等, 2022; 袁浩等, 2024; Liao et al., 2025)。在滇西北等高山峡谷型流域,受控于深切地形与陡峭岸坡,大型滑坡常发育于高差较大、岩体节理发育、

地质构造复杂的斜坡系统中，水利水电工程的建设和运行改变了斜坡体内部水力边界条件与地下水流动模式，引发坡体内部水-力耦合失稳过程。

研究区穿越澜沧江流域干热谷段，斜坡岩体多为低渗弱胶结岩及高剪胀性的构造岩，节理裂隙发育，区域构造作用强烈。库水位波动在以下几个方面对滑坡稳定性造成影响：（1）水位上升阶段，库水对坡脚形成“挡水效应”，而降雨和地下水补给使滑体后缘孔隙水压力升高，造成坡体内外水头差增大，形成不稳定水力梯度，引发剪切带软化与变形加剧；（2）水位快速下降阶段，外部水头骤降导致边坡“失去支撑”，而内部孔压滞后释放，形成“滞后卸载”，极易诱发滑体整体失稳或滑动加速；（3）典型库岸高位深层滑坡中，受断裂破碎带控制的滑体结构松散，水-岩相互作用易引发软弱面软化，构造带内的岩体胶结性减弱，加剧滑带蠕变与剪切变形过程。此外，库水位长期周期性变化还可能诱发滑带岩体结构逐步退化，尤其在三江缝合构造混杂岩带区域，糜棱岩化与蚀变作用使软弱带在水化-卸载循环中产生微破裂积累与塑性屈服区扩展，为后续强降雨或地震作用下的高位滑坡启动提供潜在条件。

5.3 大型高位滑坡变形演化过程分析

受澜沧江流域地质演化与岩体结构协同作用，地层岩性及其组合方式则是滑坡发育的物质基础。研究区内广泛分布的板岩、砂岩及局部玄武岩，呈薄层至中厚层状组合，力学性质差异显著。这种岩性组合为滑坡体的形成提供了软弱面与潜在的变形空间，另一方面坚硬岩层则构成了局部抗滑段，对滑体的短期稳定性起到约束作用（马昊，2020；黄达等，2021；Liu et al., 2023）。然而，在地壳持续抬升与河谷深切的长期背景下，坡体经历了强烈卸荷，岩体弯折倾倒现象发育，逐步产生贯通裂隙与潜在滑带，削弱了整体稳定性，逐步演化为滑坡（郑达等，2019；2022）。高位滑坡的演化过程往往伴随古滑坡的形成与复活，研究区内发现多处古河流相沉积，记录了历史时期因特大型滑坡堵江所形成的滑坡坝事件，堆积体埋深大，触发机制复杂（Tu et al., 2020；2021）。区内还保存有大量古滑坡体，其中部分已处于相对稳定状态；另一些则裂隙发育、结构松散，在降雨、地震或水位变动等外部扰动下发生复活，如巴迪滑坡、巴丁滑坡以及拉金神古滑坡（魏云杰等，2022；Jin et al., 2024）。

地壳隆升和澜沧江的快速下切导致岩体强烈卸荷，倾倒变形产生高位拉裂隙并削弱了岩体强度，在长期内外耦合作用下，裂隙逐渐增加增大，最终，在自重、地震及降雨等的共同作用下形成了梅里石3号、4号以及争岗等一系列大型高位深层滑坡群（Cao et al., 2025），这也解释了为何该地区存在多个如此规模的滑坡（图20）。

基于以上分析，再现了研究区滑坡的形成演化过程，受构造运动、河谷深切和气候变化的协同控制，以梅里石滑坡群为例，其变形演化过程可大致概括为以下几个阶段：

（1）孕育阶段：地壳隆升和河谷深切导致坡体前缘临空，上部产生拉裂隙，岩体结构破碎，逐步弯曲倾倒并产生裂隙（图20a,b,c）；

（2）形成阶段（图20c,e）：在长期卸荷与地震扰动下，裂隙进一步扩展并逐渐连通，形成滑坡，其中部分滑坡体堵塞河道，形成滑坡坝；

（3）堆积阶段（图20c,e）：随着滑坡坝的溃决，残留堆积体保存在河谷两侧，成为后续变形的物质基础；

（4）复活阶段（图20f）：在长期蠕变、强降雨及库水位波动等外界因素作用下，部分古滑坡体发生局部复活或次级滑动。

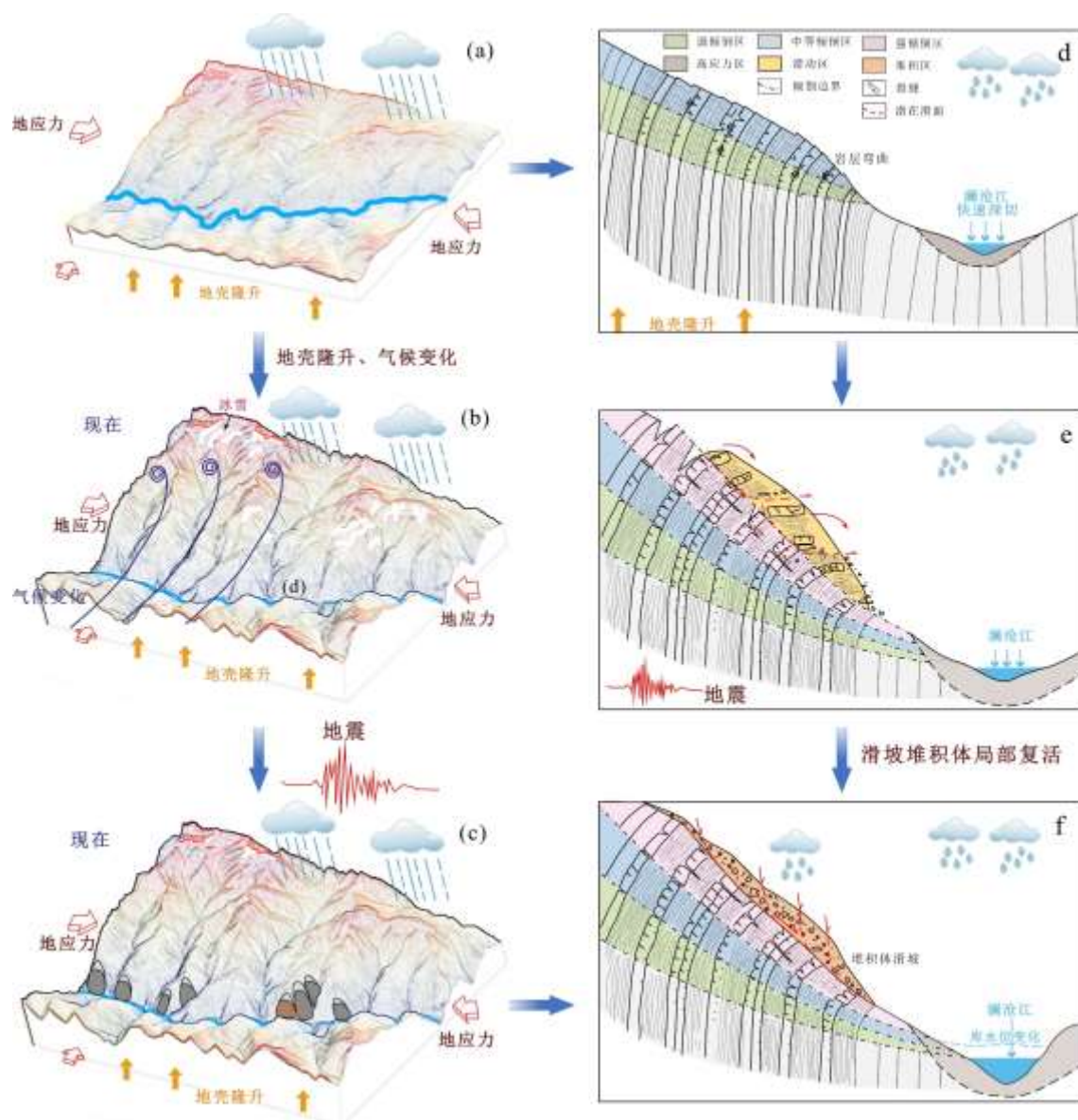


图 20 变形演化过程图 (a 晚中新世以前地貌示意图; b 现代地貌示意图; c 目前地形地貌图; d 斜坡裂缝产生阶段; e 坡体倾倒变形高位剪出失稳; f 坡体局部复活)

6 主要结论

本文基于 InSAR、无人机、LiDAR、地面调查等“空-天-地-深”多技术手段，查明了澜沧江上游德钦段大型高位滑坡发育分布特征与变形机制，在区域孕灾环境、控灾机制，促灾条件、成灾模式等的基础上，结合典型高位滑坡案例分析，总结归纳了澜沧江上游德钦段高位滑坡的地质力学模式。获得以下主要认识：

(1) 受岩性和高陡地形控制，研究区滑坡呈现出不同地段滑坡类型的分异性，佛山-燕门乡段以高位滑坡为主，剪出口高程集中在 2435 - 3224 m，多分布于二叠系、三叠系变质板岩及玄武岩中；叶枝镇-燕门乡段则多以古堆积体滑坡为主要特征。

(2) 通过对典型案例的系统分析，总结归纳出研究区高位滑坡的地质力学模式为倾倒变形、蠕滑-拉裂、顺向坡滑移-剪断等 3 类 8 种，由于滑坡变形演化过程的复杂性，部分滑坡变形破坏是多种模式的组合，其中倾倒变形破坏为主要模式。

(3) 高位滑坡的孕育与演化是一个长期的内外耦合作用下的地质演化过程。高陡地形与地层岩性是滑坡发育和发生的物质基础,地壳隆升和断裂活动提供了滑坡孕灾环境;河流深切与长期卸荷改变了斜坡应力场,使斜坡岩体产生高位拉裂;降雨和地下水渗流加速了岩体弱化;强震与工程扰动促进滑坡失稳与堆积体变形复活。

(4) 澜沧江上游德钦段构造活动强烈,河谷深切,研究区倾倒变形体发育,在内外动力作用持续影响下,演化为滑坡灾害链的风险较大,建议加强对倾倒变形体的动态监测,判断滑坡演化阶段采取对应措施,助力区域防灾减灾。

致谢

本次调查研究过程中,中国地质科学院地质力学研究所靳峰、邹启俊、毕峰研究生参加了部分野外调查和数据处理工作;云南地质工程第二勘察院有限公司完成了钻探测试,宋德光工程师协助完成了部分野外调查工作,四川省华地建设工程有限责任公司物探队完成了地球物理测试,在此一并表示感谢。

References

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., et al., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383. doi: 10.1109/TGRS.2002.803792.
- Cao, S.C., Dong, X.J., Guo, C.B., et al., 2025. Insights into toppling deformation mechanisms of high-altitude landslides through integrated InSAR and centrifuge modeling. *Landslides*, 22(11): 3823-3841. <https://doi.org/10.1007/s10346-025-02560-5>.
- Cao, S.C., Dong, X.J., Guo, C.B., et al., 2025. Research on the deformation mechanism of flexural toppling deep-seated landslides based on large centrifuge physical model testing: A case study of the Genie landslide in the Tibetan Plateau. *Journal of Earth Science*, 1-33. <https://doi.org/10.1007/s12583-024-0153-6>.
- Crosta, G. B., Frattini, P., Agliardi, F., 2013. Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps. *Tectonophysics*, 2013, 605, 13-33. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.028>.
- Cui, P., Ge, Y., Li, S., et al., 2022. Scientific challenges in disaster risk reduction for the Sichuan-Tibet Railway. *Engineering Geology*, 2022, 309: 106837. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106837>.
- Cui, P., Jia, Y., Su, F.H., et al., 2017. Natural Hazards in the Tibetan Plateau and Key Issues for Feature Research. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 32(9), 985-992 (in Chinese with English abstract).
- Dai, F.C., Deng, J.H., 2020. Development characteristics of landslide hazards in the Three-Rivers Basin of SE Tibetan Plateau. *Engineering Science and Technology*, 52(5), 3-15 (in Chinese with English abstract).
- Du, G.L., Zou, L., Yang, Z.H., et al., 2024. Landslide distribution in the Great Bend of the Yarlung Tsangpo River and geomorphic response. *Acta Geologica Sinica*, 1-15 (in Chinese with English abstract).
- Fan, X.M., Scaringi, G., Korup, O. et al., 2019. Earthquake-induced chains of geologic hazards: Patterns, mechanisms, and impacts. *Reviews of Geophysics*, 57, 421-503. <https://doi.org/10.1029/2018RG000626>.
- Gong, Y., Yao, A., Li, Y., et al., 2022. Classification and distribution of large-scale high-position landslides in southeastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 81(11): 311. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10433-6>.
- Guo, C.B., Meng, Q.W., Zhang, Y.S., et al., 2012. Numerical simulation of the influence of fault structures on slope stress field and disaster-causing mechanism. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 32(5), 592-599 (in Chinese with English abstract).

- Guo, C.B., Wu, R.A., Li, X., et al., 2020. Development characteristics and formation mechanism of the potential giant rock landslide at Rizha, Western Sichuan. *Journal of Engineering Geology*, 28(4), 772–783 (in Chinese with English abstract).
- Guo, C.B., Wu, R.A., Zhong, N., et al., 2024. Disaster-forming background and catastrophic mechanism of large landslides in the active tectonic belt of eastern Qinghai–Tibet Plateau. *Earth Science*, 49(12), 4635–4658 (in Chinese with English abstract).
- Hewitt, K., Clague, J. J., Orwin, J. F., 2020. Legacies of catastrophic rock slope failures in mountain landscapes. *Earth-Science Reviews*, 2008, 87(1-2): 1-38. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.10.002>;
- Hilley, G.E., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., Rocca, F. et al., 2004. Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 304(5679): 1952-1955. DOI: 10.1126/science.1098821
- Huang, D., Ma, H., Huang, R.Q., 2022. Deep-seated toppling deformations of rock slopes in western China. *Landslides*, 19(4): 809-827. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01829-9>.
- Huang, D., Xie, Z.Z., Song, Y.X., et al., 2021. Centrifugal model test on the toppling deformation of anacinal rock slopes with soft–hard interbedded layers. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(7), 1357–1368 (in Chinese with English abstract).
- Huang, R.Q., 2004. Mechanism of typical rock landslides in western China. *Advances in Earth Science*, 19(3), 443–450 (in Chinese with English abstract).
- Huang, R.Q., 2007. Large landslides in China since the 20th century and their mechanisms. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3), 433–454 (in Chinese with English abstract).
- Huang, R.Q., 2008. Dynamic processes of high rock slopes and their stability control. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(8), 1525–1544 (in Chinese with English abstract).
- Huang, R.Q., 2009. Some catastrophic landslides since the twentieth century in the southwest of China. *Landslides*, 6(1): 69-81. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0142-y>.
- Huang, R.Q., 2012. Engineering Geological Analysis of High Rock Slopes. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Huang, R.Q., 2015. Understanding the mechanism of large-scale landslides//*Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2: Landslide Processes*, 13-32. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_2.
- Huang, R.Q., Chen, G.Q., Tang, P., et al., 2017. Precursor information of locked-section rock landslides based on dynamic evolution. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(3), 521–533 (in Chinese with English abstract).
- Huang, R.Q., Li, Y.S., Yan, M., et al., 2017. Engineering geological analysis of slope toppling deformation. *Journal of Engineering Geology*, 25(5), 1165–1181.
- Humair, F., Pedrazzini, A., Epard, J.L., et al., 2013. Structural characterization of Turtle Mountain anticline (Alberta, Canada) and impact on rock slope failure. *Tectonophysics*, 605: 133-148. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.04.029>.
- Jayakody, S., H.S., Uzuoka, R., Ueda, K., et al., 2023. Unsaturated slopes behavior under antecedent intermittent rainfall patterns: centrifuge and numerical study. *Acta Geotechnica*, 18(11), 5773-5790. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02017-w>.
- Jin, L.L., Wei, Y., Ye, F., et al., 2024. Large-scale toppling slope under water level fluctuation of reservoir: A case of Yunnan Province, China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(8): 3034-3046. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.09.019>.

- Li, B., Feng, Z., Wang, G., et al., 2016. Processes and behaviors of block topple avalanches resulting from carbonate slope failures due to underground mining. *Environmental Earth Sciences*, 75: 1-26. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5529-1>.
- Liao, K., Miao, F., Wu, Y., et al., 2025. Physical model test on a reservoir landslide with double sliding zones subjected to water level fluctuation and rainfall. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(6), 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10064-025-04320-0>.
- Liu, Y., Huang, D., Peng, J.B., et al., 2023. Analysis of the effect of rock layer structure on the toppling failure evolution of soft-hard interbedded anti-dip slopes. *Engineering Failure Analysis*, 145: 107005. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.107005>.
- Ma, H., 2019. Numerical simulation of centrifugal model tests of toppling in layered anacinal slopes (Dissertation). Chongqing University, Chongqing (in Chinese with English abstract).
- Martel, S J., 2016. Effects of small-amplitude periodic topography on combined stresses due to gravity and tectonics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 89: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.07.026>.
- Massironi, M., Zampieri, D., Superchi, L., et al., 2013. Geological structures of the Vajont landslide. *Italian journal of engineering geology and environment*, 573-582. <https://dx.doi.org/10.4408/IJEGE>.
- Ning, Y.B., Tang, H.M., Zhang, B.C., et al., 2021. Evolution process and failure mechanism of deep-seated toppling bodies in the Lancang River. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(11), 2199–2213 (in Chinese with English abstract).
- Ning, Y.B., Tang, H.M., Zhang, G., et al., 2021. A complex rockslide developed from a deep-seated toppling failure in the upper Lancang River, Southwest China. *Engineering Geology*, 293: 106329. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106329>.
- Ouimet, W.B., Whipple, K.X., & Granger, D. E., 2009. Beyond threshold hillslopes: Channel adjustment to base-level fall in tectonically active mountain ranges. *Geology*, 37(7), 579–582. <https://doi.org/10.1130/G30013A.1>.
- Qiao, P., 2016. Revival mechanism and stability of the Meilishi No. 3 giant ancient landslide at Gushui Hydropower Station of Lancang River (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Stead, D., Wolter, A., 2015. A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology. *Journal of Structural Geology*, 74: 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.02.002>.
- Su, L., Hu, K., Zhang, W., et al., 2017. Characteristics and triggering mechanism of Xinmo landslide on 24 June 2017 in Sichuan, China. *Journal of Mountain Science*, 14(9): 1689-1700. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4609-3>.
- Tang, H.M., Li, C.D., Hu, W., et al., 2022. What is the physical mechanism triggering major landslides? *Earth Science*, 47(10), 3902–3903 (in Chinese with English abstract).
- Tu, G.X, Deng, H., Shang, Q., et al., 2020. Deep-seated large-scale toppling failure: a case study of the Lancang slope in Southwest China. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53: 3417-3432. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02132-0>.
- Tu, G.X., Deng, H., 2020. Characteristics of a deep-seated flexural toppling fracture and its relations with downcutting by the Lancang River: a case study on a steeply dipping layered rock slope, Southwest China. *Engineering Geology*, 275: 105754. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105754>.
- Tu, G.X., Deng, H., 2020. Formation and evolution of a successive landslide dam by the erosion of river: a case study of the Gendakan landslide dam on the Lancang River, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(6): 2747-2761. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01743-9>.

- Tu, G.X., Deng, H., Li, M., et al., 2023. Development and evolution of deep-seated toppling landslide by rapid river downcutting. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 82: 185. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03204-5>.
- Tu, G.X., Deng, H., Shang, Q., et al., 2021. Effect of unloading in two directions on the formation of a deep-seated flexural toppling failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 142: 104790. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104790>.
- Wang, G.Z., Wang, C.S., Liu, D.Z., et al., 1999. Uplift and denudation of the Western Yunnan Plateau since the Quaternary. *Marine Geology & Quaternary Geology*, (4), 67–74 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G.Z., Wang, C.S., Zeng, Y.F., et al., 2000. Uplift of the Western Yunnan Plateau and sedimentary response of the Yinggehai Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, (2), 234–240 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Nan, F.Y., Wang, S.M., et al., 2023. Infiltration characteristics and deformation mechanisms of rainfall-induced landslides in Three Gorges Reservoir area. *Rock and Soil Mechanics*, 44(5), 1363–1374 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S., Xu, W., Liu, J., 2018. Stability and failure mechanism analyses of the Zhenggang landslide in southwestern China. *Advances in Civil Engineering*, (1): 6128401. <https://doi.org/10.1155/2018/6128401>.
- Wang, S.J., 2002. Preliminary discussion on Earth's internal–external dynamic coupling and causes of major geological disasters. *Journal of Engineering Geology*, (2), 115–117 (in Chinese with English abstract).
- Wasowski, J., Bovenga, F., 2014. Investigating landslides and unstable slopes with satellite multi temporal interferometry: current issues and future perspectives. *Engineering Geology*. 174, 103–138. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.003>.
- Wei, Y.J., Wang, J.H., Hu, A.G., et al., 2022. Disaster-causing mechanism analysis of the Lajinsheng landslide in the Lancang River. *China Geological Survey*, 9(4), 19–26 (in Chinese with English abstract).
- Wen, B.P., Zeng, Q.Q., Yan, T.X., et al., 2020. Geomechanical initiation model of large high-speed long-runout rock avalanches in SE Qinghai–Tibet Plateau. *Engineering Science and Technology*, 52(5), 38–49 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Li, W.L., Dong, X.J., et al., 2017. Characteristics and formation mechanism of the Xinmo landslide in Xinmo Village, Diexi Town, Mao County. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(11), 2612–2628 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Zhao, B., Dai, K., et al., 2023. Remote sensing for landslide investigations: A progress report from China. *Engineering Geology*, 321, 107156. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107156>.
- Xu, Q., Zheng, G., Li, W.L., et al., 2018. Analysis of the two Baige landslide–dammed lake events in Oct–Nov 2018. *Journal of Engineering Geology*, 26(6), 1534–1551 (in Chinese with English abstract).
- Yan, M.H., Wei, Y.J., Li, Y.M., et al., 2020. Disaster background and formation mechanism of the Riyinka landslide in Deqin, Yunnan. *Geological Bulletin of China*, 39(12), 1971–1980 (in Chinese with English abstract).
- Yang, F., 2017. Revival mechanism and damming prediction of the Gendakan giant landslide in the upper Lancang River (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y.P., 2010. Directional sliding mechanism of oblique thick-layered mountain landslide: Jiweishan case. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(2), 217–226 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y.P., Gao, S.H., 2024. High-position long-runout geological hazards: review and outlook. *Journal of China Geological Hazards and Prevention*, 35(1), 1–18 (in Chinese with English abstract).

- Yin, Y.P., Li, B., Gao, Y., et al., 2023. Geostructures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(1): 66-101. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.11.001>.
- Yin, Y.P., Zhu, S.H., Li, B.C., et al., 2021. High-Position Long-Runout Geological Hazards on the Qinghai-Tibet Plateau. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Yuan, H., Guo, C.B., Wu, R.A., et al., 2024. Ring shear strength of slip-zone soil and high-position long-runout mechanism of the Luanshibao landslide. *Earth Science*, 49(12), 4659–4672 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.B., Yu, H., Yu, X., et al., 2024. Late Quaternary activity of major active faults along the Yunnan-Tibet Railway. *Advances in Earthquake Science*, 54(1), 94–109 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.Y., Wang, S.T., Wang, L.S., et al., 1994. Principles of Engineering Geological Analysis. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhao, Y.H., 2016. Formation mechanism and evolution of the Zhenggang giant landslide at Gushui Hydropower Station (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Zheng, D., Tang, J.S., 2020. Evolution characteristics of bending zones in slope toppling deformation. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 56(6), 1232–1240 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, D., Wang, Q.Y., Mao, F., et al., 2019. Centrifugal model tests on key factors and failure mode of deep-seated toppling of anti-dip slopes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, (10), 1954–1963 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, G., Xu, Q., Liu, X.W., et al., 2020. Characteristics and mechanism of the 2019 Jichang landslide–debris flow, Guizhou. *Journal of Engineering Geology*, 28(3), 541–556 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, C.B., Li, D.Q., 2009. Research progress on rainfall-induced landslide mechanisms and mitigation. *Advances in Earth Science*, 24(5), 477–487 (in Chinese with English abstract).
- Zou, Z.X., Tang, H.M., Xiong, C.R., et al., 2012. Geomechanical model of progressive failure for large consequent bedding rockslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(11), 2222–2231 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等, 2017. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题. 中国科学院院刊, 32(09):985-992.
- 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(05):3-15.
- 杜国梁, 邹玲, 杨志华, 等, 2024. 雅鲁藏布江大拐弯地区滑坡发育分布特征及其对地貌演化的响应. 地质学报, 1-15.
- 郭长宝, 孟庆伟, 张永双, 等, 2012. 断裂构造对斜坡应力场影响的数值模拟及成灾机理研究. 防灾减灾工程学报, 32(5): 592-599.
- 郭长宝, 吴瑞安, 李雪, 等, 2020. 川西日扎潜在巨型岩质滑坡发育特征与形成机理研究. 工程地质学报, 28(04):772-783.
- 郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 等, 2024. 青藏高原东部活动构造带大型滑坡成灾背景与灾变机制. 地球科学, 49(12):4635-4658.
- 黄达, 谢周州, 宋宜祥, 等, 2021. 软硬互层状反倾岩质边坡倾倒变形离心模型试验研究. 岩石力学与工程学报, 40(7), 1357-1368.
- 黄润秋, 2004. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究. 地球科学进展, 19(3): 443-450.
- 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 (03):433-454.
- 黄润秋, 2008. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制. 岩石力学与工程学报 (08):1525-1544.

- 黄润秋, 2012. 岩石高边坡稳定性工程地质分析. 北京: 科学出版社.
- 黄润秋, 陈国庆, 唐鹏, 2017. 基于动态演化特征的锁固段型岩质滑坡前兆信息研究. 岩石力学与工程学报, 36(03): 521-533.
- 黄润秋, 李渝生, 严明, 2017. 斜坡倾倒变形的工程地质分析. 工程地质学报, 25(05): 1165-1181.
- 马昊, 2019. 层状岩质反倾边坡倾倒变形离心模型试验的数值模拟研究(硕士学位论文). 重庆: 重庆大学.
- 宁奕冰, 唐辉明, 张勃成, 等, 2021. 澜沧江深层倾倒体演化过程及失稳机制研究. 岩石力学与工程学报, 40(11): 2199-2213.
- 乔鹏, 2016. 澜沧江古水水电站梅里石 3 号巨型古滑坡复活机制及稳定性研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 唐辉明, 李长冬, 胡伟, 等, 2022. 重大滑坡启滑的物理机制是什么? 地球科学, 47(10), 3902-3903.
- 王国芝, 王成善, 曾允孚, 等, 2000. 滇西高原的隆升与莺歌海盆地的沉积响应. 沉积学报, (02): 234-240.
- 王国芝, 王成善, 刘登忠, 等, 1999. 滇西高原第四纪以来的隆升和剥蚀. 海洋地质与第四纪地质, (04): 67-74.
- 王力, 南芳芸, 王世梅, 等, 2023. 三峡库区降雨型滑坡入渗特征及变形机制-基于一维和二维模型试验研究. 岩土力学, 44(5), 1363-1374.
- 王思敬, 2002. 地球内外动力耦合作用与重大地质灾害的成因初探. 工程地质学报, (2): 115-117.
- 魏云杰, 王俊豪, 胡爱国, 等, 2022. 澜沧江拉金神谷滑坡成灾机理分析. 中国地质调查, 9(04): 19-26.
- 魏云杰, 王俊豪, 胡爱国, 等, 2022. 澜沧江拉金神谷滑坡成灾机理分析. 中国地质调查, 9(4), 19-26.
- 文宝萍, 曾启强, 闫天玺, 等, 2020. 青藏高原东南部大型岩质高速远程崩滑启动地质力学模式初探. 工程科学与技术, 52(05): 38-49.
- 许强, 李为乐, 董秀军, 等, 2017. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究. 岩石力学与工程学报, 36(11): 2612-2628.
- 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(06): 1534-1551.
- 闫茂华, 魏云杰, 李亚民, 等, 2020. 云南德钦日因卡滑坡孕灾背景及形成机理. 地质通报, 39(12): 1971-1980.
- 杨啡, 2017. 澜沧江上游根达坎巨型滑坡复活演化机理及堵江预测研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 殷跃平, 2010. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例. 岩石力学与工程学报, 29(02): 217-226.
- 殷跃平, 等, 2021. 青藏高原高位远程地质灾害. 北京: 科学出版社.
- 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(01): 1-18.
- 袁浩, 郭长宝, 吴瑞安, 等, 2024. 四川理塘乱石包滑坡滑带土环剪强度特性与高位远程滑动机制. 地球科学, 49(12): 4659-4672.
- 张献兵, 于皓, 余潇, 等, 2024. 滇藏铁路沿线重要活动断裂带晚第四纪活动性初步研究. 地震科学进展, 54(1), 94-109.
- 张倬元, 王士天, 王兰生, 等, 1994. 工程地质分析原理. 北京: 地质出版社.
- 赵永辉, 2016. 澜沧江古水水电站争岗巨型滑坡形成机理及演化过程研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 郑达, 唐劲松, 2020. 基于离心试验的边坡倾倒变形下弯折带演化特征. 西南交通大学学报, 56(6), 1232-1240.

- 郑达, 王沁沅, 毛峰, 等, 2019. 反倾层状岩质边坡深层倾倒变形关键致灾因子及成灾模式的离心试验研究. 岩石力学与工程学报, (10), 1954-1963.
- 郑光, 许强, 刘秀伟, 等, 2020. 2019年7月23日贵州水城县鸡场镇滑坡-碎屑流特征与成因机理研究. 工程地质学报, 28(03):541-556.
- 周创兵, 李典庆., 2009. 暴雨诱发滑坡致灾机理与减灾方法研究进展. 地球科学进展, 24(5):477-487.
- 邹宗兴, 唐辉明, 熊承仁, 等, 2012. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析. 岩石力学与工程学报, 31(11): 2222-2231.