

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202512030177

雅鲁藏布江缝合带大峡谷段震裂山体发育特征与失稳机理

万佳威^{1,2}, 李 军^{1,2,*}, 秦雅东³, 张 翔⁴, 高浩源^{1,2}, 张平平^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 4. 中国地质调查局地球物理调查中心, 河北 廊坊 065000)

摘要: 本文基于现场地质工作和国内外已有成果, 系统分析了雅鲁藏布江缝合带大峡谷段震裂山体发育特征, 并以墨脱巴登则山体为典型案例, 从岩性组合、构造活动以及岩体结构等3个方面总结了其孕灾地质条件, 进而开展了强震失稳机理分析。研究发现, 雅鲁藏布江缝合带大峡谷段由阿尼桥岩组、构造混杂岩、冈底斯岩杂岩等组成, 各类岩石空间差异大, 变形程度高, 加之墨脱断裂带等活动的强烈切割, 致使岩体破碎、结构面高度发育; 而1950年察隅8.6级大地震等历史强震, 加剧了岩体结构松弛变形, 导致岩体空腔化, 显著降低了山体稳定性, 在新的地震等强烈扰动下极易发生大规模失稳滑动。据此, 论文提出了针对性的灾害风险防控措施建议。尽管如此, 当前针对缝合带震裂山体的失稳机理研究仍较薄弱, 未来亟待建立精细地质力学模型, 揭示混杂岩体震裂损伤破坏机制, 阐明强震作用下的跨断层山体动力响应规律, 为青藏高原特大地质灾害防控提供重要支撑。

关键词: 雅江缝合带; 震裂山体; 发育特征; 孕灾地质条件; 失稳机理

中图分类号: P642.2; P642.27; P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)04-1210-10

Development Characteristics and Instability Mechanisms of Seismically Fractured Mountains in the Great Canyon Section of Yarlung Zangbo Suture Belt, Tibet, China

WAN Jiawei^{1,2}, LI Jun^{1,2,*}, QIN Yadong³, ZHANG Xiang⁴, GAO Haoyuan^{1,2}, ZHANG Pingping^{1,2}

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. Chengdu Center of Geological Survey, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China; 4. Center for Geophysical Survey, China Geological Survey, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract: Based on field geological investigations and existing research findings, this study systematically analyzes the developmental characteristics of seismically fractured mountains within the Great Canyon Section of Yarlung Zangbo Suture Belt. Taking the Badenze mountain, located in Motuo, as a typical case, it summarizes the disaster-prone geological conditions from three aspects: lithological assemblage, tectonic activity, and rock mass structure. The mechanism of seismically fractured mountain instability under strong seismic activity was further investigated. The results indicate that the Great Canyon segment of the Yarlung Tsangpo Suture Belt is

收稿日期: 2025-12-03; 修回日期: 2026-01-13; 编辑: 李龚健。

基金项目: 国家自然科学基金(42407280, U2244226, U2244227); 中国地质调查局项目(DD20230600602, DD202606201301)。

第一作者: 万佳威, 男, 副研究员, 1991年出生, 地质工程专业, 主要从事地质灾害防治研究。Email: wanjiawei@qq.com。

*通信作者: 李军, 男, 助理研究员, 1990年出生, 地质工程专业, 主要从事地质灾害防治研究。Email: 1985349823@qq.com。

引用格式: 万佳威, 李军, 秦雅东, 等. 雅鲁藏布江缝合带大峡谷段震裂山体发育特征与失稳机理[J]. 现代地质, 2026, 40(4): 1210-1219. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202512030177.

WAN Jiawei, LI Jun, QIN Yadong, et al. Development Characteristics and Instability Mechanisms of Seismically Fractured Mountains in the Great Canyon Section of Yarlung Zangbo Suture Belt, Tibet, China [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40(4): 1210-1219. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202512030177.

predominantly composed of the Aniqiao Formation, tectonic *mélange*, and Gangdese magmatic complex. Significant spatial heterogeneity and intense deformation among these lithologies, coupled with severe dissection by active faults such as the Motuo Fault, have resulted in extensively fractured rock masses with highly developed structural planes. Consequently, historical mega-earthquakes, particularly the 1950 Ms 8.6 Chayu earthquake, exacerbated structural relaxation and triggered widespread rock mass cavitation, thereby significantly compromising slope stability and rendering it highly susceptible to large-scale catastrophic failures under renewed strong seismic disturbances. Based on these findings, targeted strategies for disaster risk mitigation are proposed. Nevertheless, current research on the instability mechanisms of seismically fractured mountains in suture zones remains insufficient. Future studies urgently require the development of refined geomechanical models to elucidate the damage evolution mechanisms of heterogeneous *mélange* and clarify the dynamic response of cross-fault mountain masses under strong seismic shaking. This will provide critical support for the prevention and control of catastrophic geohazards across the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: Yarlung Zangbo Suture Belt; seismically fractured mountain; developmental characteristics; disaster-prone geological condition formation; instability mechanism

0 引言

西藏雅鲁藏布江缝合带是印度—欧亚板块碰撞运动形成的特殊地质体,岩性结构极为复杂,构造作用极为强烈,地震和地质灾害频繁发生^[1-2]。如1950年察隅8.6级地震和2017年米林6.9级地震,均曾引发雅鲁藏布大峡谷地区发生大规模失稳破坏,大型—特大型山体滑坡连片发育,淤积堵塞了雅鲁藏布江多段干流、支流河段,形成了流域性地质灾害链,人员伤亡和经济社会损失十分严重^[3-4]。雅鲁藏布大峡谷是世界最大、切割最深的大峡谷,发育了显著的高山—峡谷、极高山—峡谷地貌,地形变化剧烈,最大垂直高差超过5000 m。在持续强震影响下,该地区形成了多处震裂山体,其具有岩性混杂、跨越多条活动断层、高海拔大高差等特点,自稳能力差,成灾风险高,对边疆建设造成了严重威胁。

板块缝合带和震裂山体均具有特殊的工程地质性质,是特大滑坡灾害的高易发区。例如位于金沙江缝合带的白格滑坡,受构造混杂岩和活动断裂控制,岩体结构混杂破碎,力学性质差,在重力和水的作用下持续蠕滑变形,并于2018年两次发生大规模高位滑动,堵江形成巨型堰塞湖,导致超过10万人受灾^[5]。2008年汶川地震后,震区震裂山体又陆续演化形成多起重大滑坡灾害,造成数百人遇难。如都江堰三溪村滑坡,因地震损伤形成贯通裂缝,在2013年暴雨作用下失稳,滑坡体积150万m³,造成了百余人失踪和死亡^[6-7];又如茂县新磨滑

坡,因地震松动,最终2017年整体滑移并形成远程灾害,规模超千万方,导致村庄被毁,近百人死亡^[8-9]。

总体而言,雅鲁藏布江缝合带大峡谷段震裂山体具有独特的地质地貌条件,失稳成灾风险高,是西藏边疆地区重大地质安全挑战之一,亟待开展深入研究。本文基于前期实地调研和地质勘察工作,并综合国内外已有研究成果,对雅鲁藏布江缝合带大峡谷段震裂山体发育特征、孕灾地质条件与强震失稳机理进行系统梳理和总结。

1 缝合带大峡谷段震裂山体发育特征

雅鲁藏布江缝合带大峡谷段地处喜马拉雅东构造结,是印度板块与欧亚板块碰撞的前锋地带,构造活动极为强烈,活动断裂极为发育。其西侧以东久—米林断裂带为界,东侧以墨脱断裂带为界,北部发育嘉黎断裂带、西兴拉断裂等一系列活动断裂^[10]。在这些断裂的持续活动影响下,区域强震频发,导致该地区形成了广泛分布的震裂山体,成为重大地质灾害的高易发区。

1.1 空间分布特征与形成过程

在1950年察隅Ms 8.6级大地震(或称之为墨脱大地震)、2017年米林Ms 6.9级强震等重大地震事件作用下,雅鲁藏布大峡谷至墨脱一带的沿江两岸山体及极高山冰川沟谷地区形成了上千处密集分布的高位震裂山体,在加拉—西兴拉—奶曲—多卡沿线以及墨脱县沿岸一带极为显著(图1)。其中,1950年察隅形成震裂山体超过920处,在扎曲及其

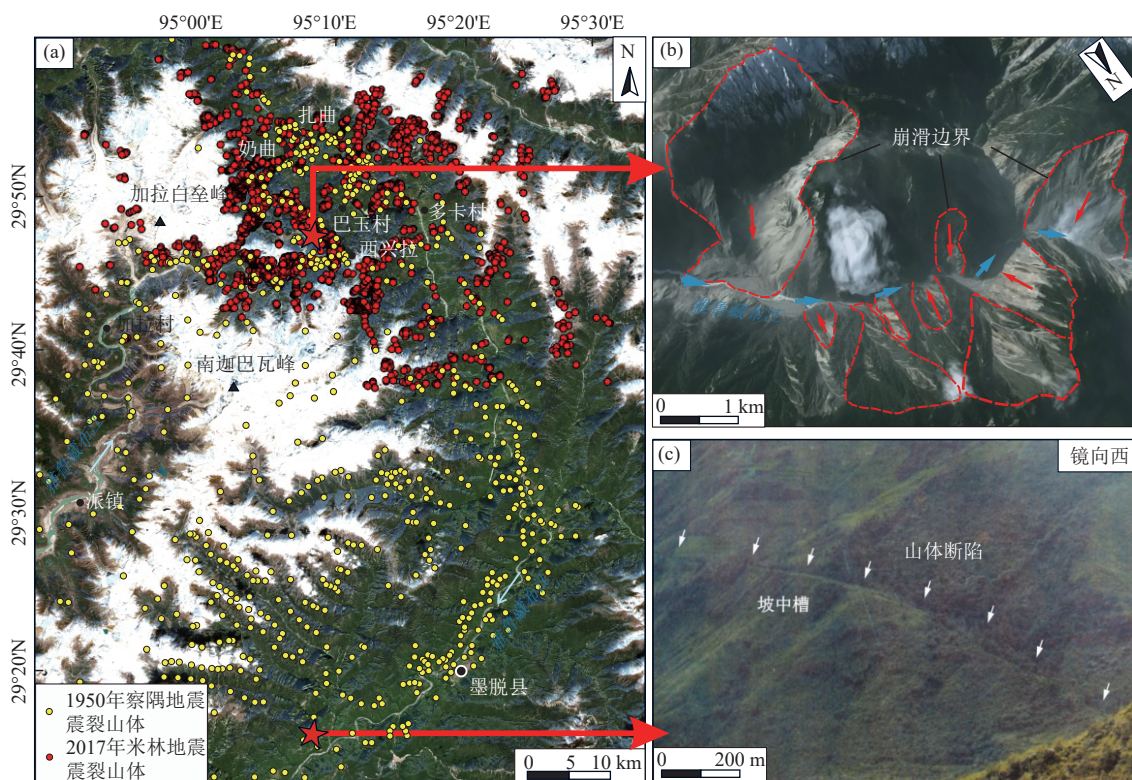


图1 雅鲁藏布江大峡谷至墨脱震裂山体空间分布特征(底图修改自文献[11-14])

Fig. 1 Spatial distribution characteristics of seismically fractured mountains from the Yarlung Zangbo Grand Canyon to the Motuo Area (Base map modified from references [11-14])

(a) 1950年和2017年两次强震形成的震裂山体空间分布位置; (b) 2017年米林地震形成的震裂山体发育特征; (c) 1950年察隅地震形成的震裂山体发育特征

下游地区尤为密集,在高陡地形和凹凸转折处十分发育;2017年米林地震形成震裂山体超过760处,规模以中小型为主,多集中于加拉—多卡一带的中高山峡谷地区,表现出群发性特征。这些震裂山体发生了强烈的变形开裂,并持续演化,成为雅鲁藏布江流域性重大地质灾害的主要风险源。

1950年察隅Ms 8.6级大地震是20世纪中国发生的最强烈地震。震中位于西藏墨脱县、察隅县与印度阿萨姆邦交界地带,极震区最大烈度达Ⅻ度,断层滑移7~8 m,造成大量高陡山体严重震裂,南迦巴瓦峰西坡巨型冰川断裂跃动,山崩、滑坡、泥石流等灾害更是随处可见、密集发生,墨脱县多个村庄被滑坡体推入江中或整体掩埋,导致雅鲁藏布江及其支流多处被堵断,山川地貌发生剧烈变化^[11-12]。中国地震台网中心和美国地质调查局公开数据显示,1950年后大峡谷地区还发生6级以上地震18次。其中,2017年米林6.9级地震造成大峡谷地区强烈破坏,最大烈度Ⅷ度,诱发同震山体滑坡上千处,造成干流河段超过60 km的淤积堵塞,并导致色东普等特大堵江灾

害的频繁发生^[13-15]。此次地震的发震断裂为NE—SW走向的西兴拉断裂,位于大峡谷顶部,与雅鲁藏布江缝合带交汇,是该地区地震发生最频繁的断裂之一^[16]。有学者^[13, 17]通过遥感解译和数值分析指出,因震中距小、地形剧烈变化等因素,大峡谷地区地震响应显著,2017年米林地震后形成了大量震裂山体,高位地质灾害长期活跃,逐渐演变为特大堵江地质灾害的高发区。这些强震事件不仅直接导致岩体破裂,还通过地形响应与累进损伤等作用,促使震裂山体沿大峡谷至墨脱一带在空间上呈密集发育态势。

1.2 地貌岩性特征与成灾模式

雅鲁藏布江缝合带夹于北侧的拉萨地体和南侧的南迦巴瓦变质体之间,在大峡谷地区发生剧烈偏转,形成向北东突出的马蹄形构造。带内物质组成复杂,包括强糜棱岩化变镁铁质岩、石英岩、云母石英片岩、变超镁铁质岩、岛弧物质等,在俯冲—抬升、走滑、伸展—垮塌、变质等多期强烈地质作用下,原岩结构基本被肢解破坏,大量挤压剪切带穿插发育,各类岩石空间变化迅速,岩体结构高度

复杂,物理力学性质差异显著^[18-19]。

在强烈的板块作用下,研究区快速隆升,塑造形成了一系列高山峡谷和极高山峡谷地貌系统。区内最高的两座山峰—南迦巴瓦峰和加拉白垒峰—对峙而立,海拔分别为7782 m和7294 m,雅鲁藏布江穿行其间并沿缝合带急剧转折,形成了世界最大、切割最深的雅鲁藏布大峡谷,垂直高差最大超过5000 m,局部断面接近直立。

受察隅8.6级地震、米林6.9级地震等强震事件触发,震裂山体广泛形成于雅鲁藏布大峡谷至墨脱一带的两岸山体以及极高山冰川沟谷地区。此类震裂山体垂直高差普遍约1000 m,可见圈椅状或阶梯状地貌特征,多数自米林地震以来发生显著的持续变形。在大峡谷入口区域的极高山地带,巨大的地形高差加剧了高位岩体的地震响应与破裂扩展。如色东普沟,其位于加拉白垒峰西坡,距米林地震震中约10 km,地震响应模拟结果显示,海拔5000 m以上的高陡岩体地面峰值加速度响应尤为明显,放大系数最大达到4.69倍,

导致超高位岩体结构强烈松动、强度显著劣化,最终致使2018年两次特大崩滑堵江灾害链的形成,以及之后每年超高位崩滑灾害的持续发生^[13]。

巴登则山体位于缝合带大峡谷段的南东部(图2a),距离墨脱县城约10 km,属于典型的震裂山体。其经历了1950年察隅8.6级大地震等地震作用,地震烈度达12度,山崩、滑坡、崖洞垮塌、地面爆裂等现象十分严重^[12]。巴登则山体总体呈“宽U型”凹腔,开口方向南东,横宽约2.5 km,山脊高程1600~2100 m,山底雅鲁藏布江江面高程660~670 m,山体高差超过1000 m,坡度35°~50°,顶部相对平坦。巴登则震裂山体地质结构复杂,岩性主要为花岗岩、闪长岩等,受巴登则、月尔冬等多条活动断裂切割(图2b和d)。中国科学院地质力学研究所在巴登则山体附近布设了40个地震监测台站,地震记录仪型号为reftek130,地震探头型号为Sercel L-22D,采用短时平均与长时平均之比的地震触发算法,利用线性化定位方法进行地震定位。监测结果显示,该

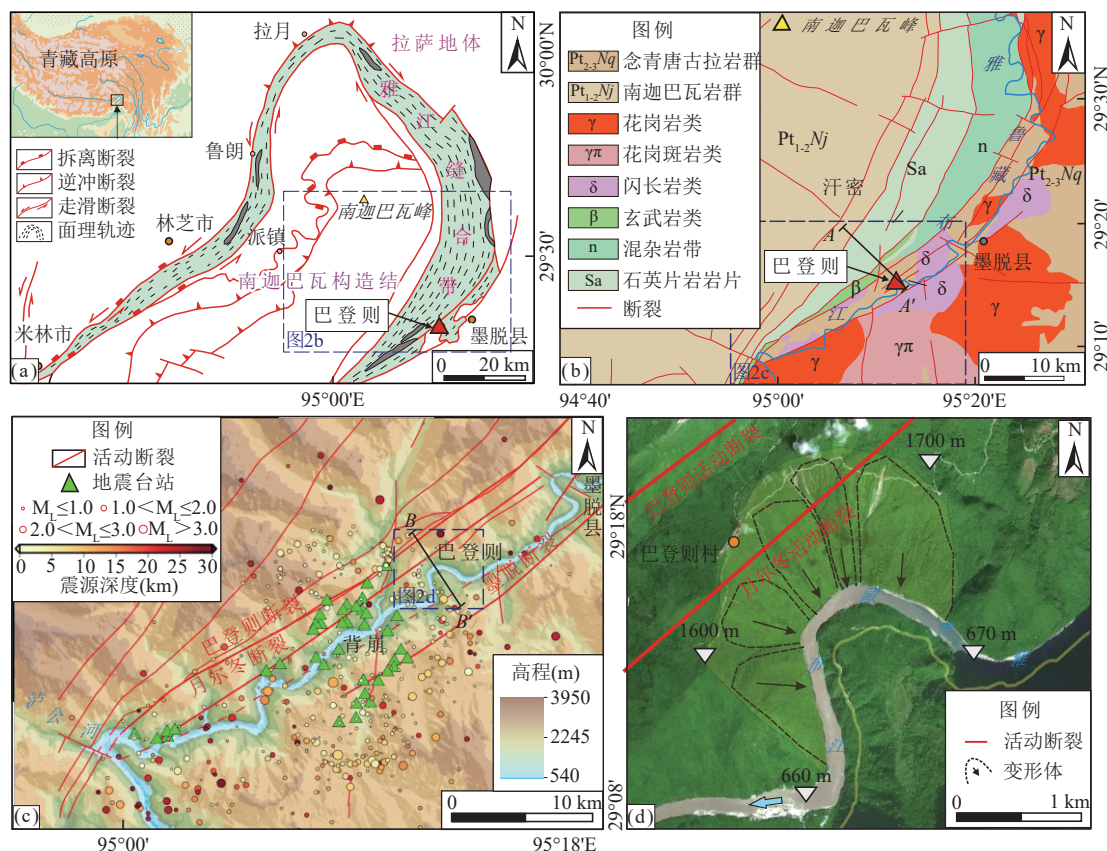


图2 典型雅江缝合带震裂山体地质构造条件与发育特征

Fig. 2 Location, seismic activity, and deformation characteristics of the typical seismically fractured mountain (Badengze) (a)雅江缝合带展布与巴登则山体发育位置;(b)巴登则山体及邻区岩性构造特征;(c)主要活动断裂与地震监测结果;(d)巴登则山体全貌特征

地区构造活动强烈,2022年6月至2024年12月发生地震千余起,最大里式震级3.4级,震源深度主要为10 km以内,最大震源深度32 km,地震活动沿月尔冬、巴登则、墨脱等活动断裂呈条带状密集分布,尤其在巴登则山体下方及后方形成显著的地震丛集区(图2c),进一步加剧了该山体的变形破坏。受活动断裂控制和地震活动影响,巴登则山体已发生大规模松动变形,岩体结构十分破碎,沿坡表形成了5个大型变形区,崩滑碎屑流广泛发育(图2d)。变形区岩体呈碎裂—散体状,可见大量裂缝和松动岩体,风化强烈,岩石强度低,稳定性差,构造面理十分混乱(图3)。

震裂山体形成后,内部发育的大量张性裂隙不仅进一步破坏了岩体结构的完整性与力学强度,也为后期水的入渗、运移提供了优势通道,导致山体稳定性持续降低,部分震裂山体在震后仍长期发生蠕变或断续变形,逐渐从初始损伤向失稳破坏演化。在构造复杂、活动断裂发育的地质背景下,雅江缝合带震裂山体还容易遭受近场强震的作用,极易发生大规模超高位失稳破坏。2017年米林地震已在大峡谷地区造成了广泛强烈破坏,造成色东普沟等震裂山体多次失稳并引发堵江事件,在大峡谷无人区形成了高位崩滑堰塞带密集分布的地貌格局^[13]。若再遭遇同等级或更高震级强震,原有震裂山体将进一步失稳破坏,大量固体物质涌

入峡谷河道,导致堰塞体规模再次显著扩展,加剧大峡谷地区的堵江灾害风险。

2 孕灾地质条件分析

雅鲁藏布江缝合带震裂山体具有特殊的易灾地质结构,其孕灾地质条件主要受特殊的岩性组合、强烈的构造活动以及松散的岩体结构控制,具有岩石组成混杂、跨越多条活动断裂、前期震裂损伤严重等特点,在强震、极端气候等因素作用下容易发生大规模失稳成灾。

2.1 特殊的岩性组合

本研究团队在西藏汗密至墨脱一带开展了缝合带野外实地调研和剖面测量(剖面位置见图2b),发现其岩石物质组成混杂,构造变形强烈,不均一性显著。由北西向南东,主要分为阿尼桥岩组、构造混杂岩带、冈底斯岩浆杂岩(图4)。

(1) 阿尼桥岩组是特提斯喜马拉雅构造单元的残余,分布在老虎咀—根阿日沟一带,与北侧南迦巴瓦岩群呈韧性断层接触,与南侧构造混杂岩带为脆韧性断层接触。主体由石英岩、石英片岩等硬岩为主,夹云母片岩、似纹层状云母石英片岩、阳起石片岩等软岩,局部为软硬岩交替产出。构造片理极为发育,与山体陡坡向一致,紧闭同斜褶皱、劈理化带、脆性破裂与节理带发育,导致了岩体更加破碎。



图3 巴登则震裂山体照片

Fig. 3 Photos of the Badengze shattered mountain

(a)岩体松动破碎;(b)沿月尔东断裂出现陡坎;(c)碎裂—散体状岩体

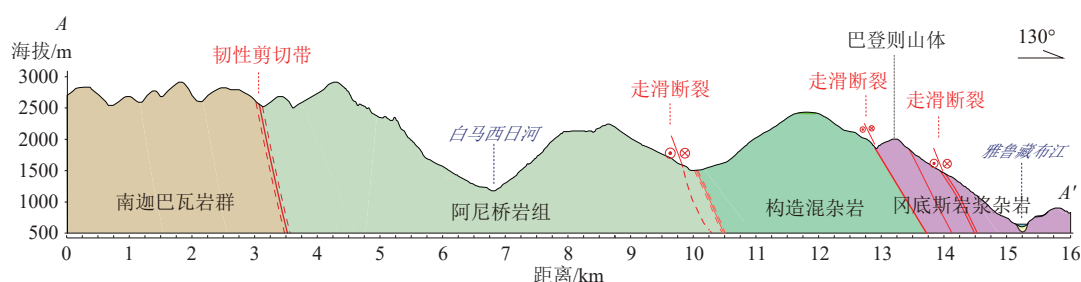


图4 雅鲁藏布江缝合带实测地质剖面

Fig. 4 Geological section of the Yarlung Zangbo suture zone

(2) 构造混杂岩带分布于根阿日、易贡白一带，被根阿日断裂和巴登则断裂围限。由构造岩块和强变形的基质组成，岩块大小十几米至几千米，横纵向岩性变化大，长轴平行于围岩基质的面理，由韧性断层呈网结状连接。岩块岩性复杂，有蛇纹滑石直闪石片岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩、大理岩、绿泥阳起片岩及少量外来岩块（含石榴石角闪斜长片麻岩）等。基质变形强烈，面理发育，见褶皱、无根钩状褶皱、鞘褶皱、糜棱面理等具塑性变形特征，以二云母石英片岩、石英黑云母片岩和少量变粒岩为主。构造混杂岩带砂卡岩化、绿泥石化、粘土化较强，岩性层在纵向上、横向上变化快、变化大。

(3) 冈底斯岩杂岩出露于缝合带东南部边缘，与构造混杂岩带断层接触。主体为古新世—渐新世的中酸性岩体，主要包括似斑状二长花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩和石英闪长岩，沿南东方向从糜棱岩化转变为片麻状构造、条带状构造，面理方向总体与缝合带走向一致，呈NE—SW走向。完整性相对较好，但被NE向展布的巴登则、月尔冬等墨脱断裂带主要分支断裂切割。

总体而言，雅鲁藏布江缝合带大峡谷段具有复杂的岩石组成和不同期次、层次的构造叠加变形，糜棱面理、片理等透入性结构面发育，受活动断裂作用强烈，强应变带与弱变形域紧密伴生。

2.2 强烈的构造活动

雅鲁藏布江缝合带岩石组合复杂，岩石变化较快，属于典型的构造薄弱带，在强烈的板块运动及不同期次的构造应力作用下，形成了不同规模 and 不同运动性质的断层构造。

其中，墨脱断裂带展布于缝合带的南东部，走向呈北东—南西向，由巴登则断裂、月尔冬断裂等分支断裂组成，沿雅鲁藏布江东、西两侧平行延伸。断裂带结构复杂，总体具左行走滑兼逆冲性

质，错断了全新世最新的河流阶地和冲积扇，是全新世活动断裂。揭露的断裂断错的最新地层¹⁴C年代约为 (2780 ± 30) a BP，18.2 ka 以来的垂直滑动速率大于0.05 mm/a，最大潜在震级为8.0^[20]。

沿巴登则山体跨越雅鲁藏布江，本研究团队开展了音频大地电磁测深地球物理探测（剖面位置见图2c）。探测结果显示（图5），墨脱断裂带各分支断裂主要在深部2 km左右汇聚，向下延伸深度超过3 km，向剖面中部断裂产状逐渐变陡，表现出花状构造。其中，巴登则断裂和月尔冬断裂均倾向南东，在1.5~2 km深度汇聚；雅鲁藏布江南东侧的F8断裂近于直立，F9断裂倾向北西，倾角较大，在2 km深度汇聚。巴登则山体被巴登则断裂和月尔冬断裂密集切割，浅部表现为低电阻率特征，而深部电阻率相对较高，浅部低阻区与深部高阻区之间界面清晰，揭示了山体浅表部因构造切割和风化作用已发生显著破碎和松动。本研究团队对月尔冬断裂进行了野外追索调查（图6），发现其切穿地表，发育断层泥、断层角砾和碎裂岩等断层破裂带结构，断层泥厚度约为2~5 cm，沿断裂走向可见线状谷地和断层陡坎，断层陡坎最大高差达2.5 m，显示月尔冬断裂活动性强，历史上曾发生强震活动。

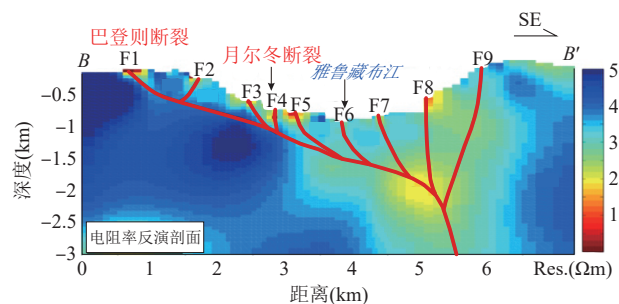


图5 墨脱断裂带地球物理剖面反演结果（反演剖面据文献[21]）

Fig. 5 Inversion results of the geophysical profile of the Motuo fault system (referred to literature [21])

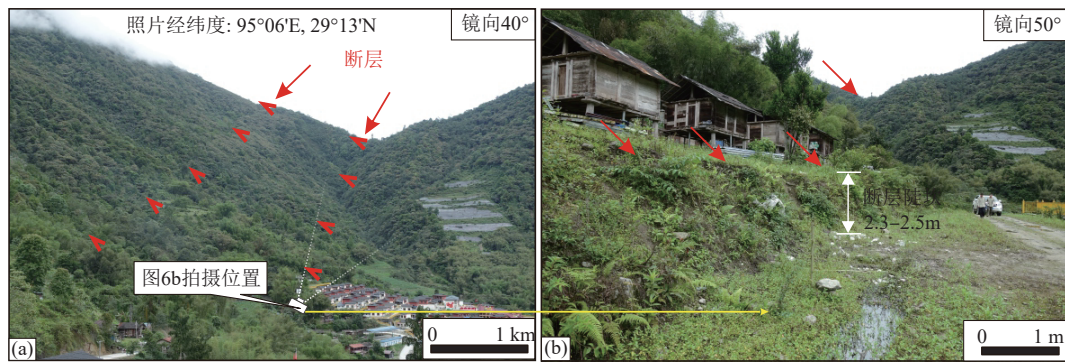


图6 月尔冬断裂地表特征

Fig. 6 Features of the Yueerdong fault

(a)月尔冬断裂地东村地表行迹;(b)靠近山前的断层陡坎

强烈的活动断裂作用进一步导致缝合带岩体破碎、结构面发育,恶化了其工程地质条件,与此同时,该作用也构成了由近场强震错动引发的直接破坏威胁。

2.3 松散的岩体结构

在特殊的岩性组合和强烈的构造活动背景下,岩体结构的完整性遭到显著破坏,成为控制稳定性的关键因素。以典型的震裂山体—巴登则山体为例,该山体位于缝合带南东部边缘,南东方向临空,山脚处即为雅鲁藏布江。其岩性主要为冈底斯岩浆杂岩,包括片麻岩、花岗岩、闪长岩等,岩石坚硬,但受墨脱断裂带主要分支断裂密集切割影响结构面发育。对巴登则山体进行平硐地质勘查,揭露了0~700 m水平深度岩体结构发育特征。勘查结果显示(图7),月尔冬活动断裂影响带超过100 m,强烈切割着巴登则山体,并控制着巴登则山体的整体稳定性。其中,592 m和696 m处发育北东

走向的断层破碎带,宽度1.5~3 m,基岩岩性为花岗岩、二长花岗岩,岩体已形成裂缝空腔并透水严重,结合地球物理探测和地面调查结果,推测此处为月尔冬活动断裂的向下延伸。210~250 m之间也发育两条性质和形态相似的断层,但规模较小,推测为月尔冬活动断裂的次级断裂,此处基岩岩性主要为花岗闪长岩。

平硐勘查还发现,巴登则山体内部30~50 m处张性裂隙发育,普遍张开,扩容错位明显,岩块压碎强烈,结构以碎块、碎裂状为主,局部可见岩体松动架空,结构面较新鲜,充填较少,显示巴登则山体近表层在强震作用已产生严重震裂损伤和较大变形。

总体而言,巴登则山体结构破碎,近表层岩体在多次震裂作用下显著松动,变形错动现象强烈,山体内部被月尔冬活动断裂贯穿切割,大型结构面广泛发育,整体稳定性显著降低,极端力

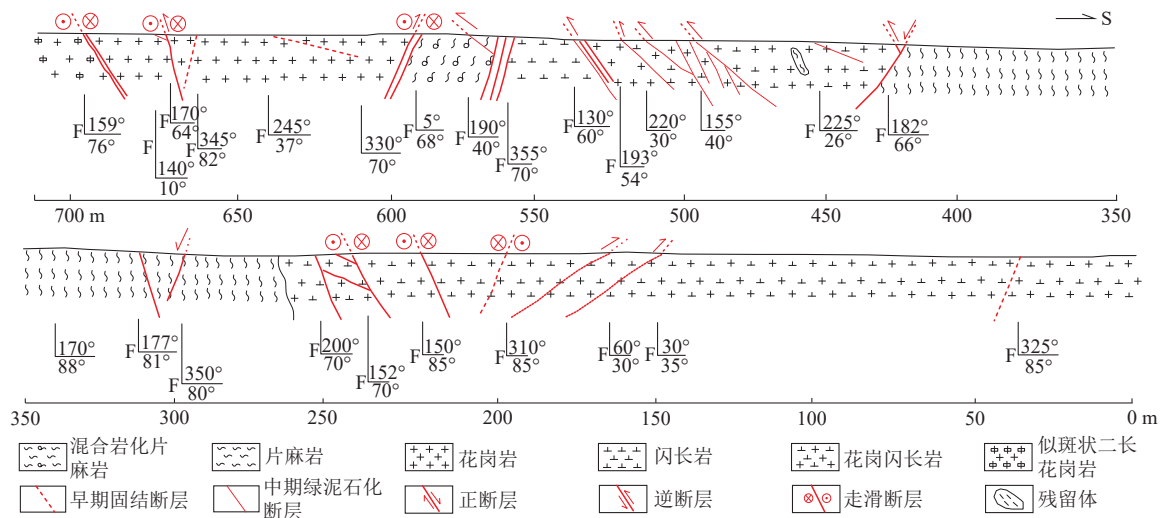


图7 巴登则山体山腰处某平硐内部地质结构

Fig. 7 Geological structure of an adit in the mountainside of the Badengze mountain

学条件下存在大规模失稳成灾的风险。

3 强震失稳机理分析

缝合带震裂山体发育于构造活动强烈、岩体结构复杂的地质环境中,具备特殊的孕灾地质条件,在近场强震作用下易发生大规模超高位失稳破坏,引发一系列堵江灾害链风险。然而,目前针对该类型山体强震失稳机理的研究较为缺乏。因此,在现有相关研究的基础上,从缝合带震裂山体的工程地质性质、地震动力响应及强震破坏机制两方面进行综合梳理分析,为强震作用下的缝合带震裂山体失稳机理研究提供参考和思路。

3.1 缝合带震裂山体工程地质性质

雅江缝合带大峡谷段岩石结构混杂,构造变形强烈,糜棱面理、片理等透入性结构面发育,被多条活动断裂切割,工程地质性质十分特殊。

研究区出露的岩体主要为阿尼桥岩组、构造混杂岩及冈底斯岩浆杂岩。阿尼桥岩组以石英片岩、石英岩为主,节理裂隙发育,岩体不均一性强,各向异性显著。构造混杂岩是板块俯冲碰撞的直接产物,由构造岩块和强变形的基质组成,呈现典型的“岩块-基质”混杂结构,岩块长轴平行于基质面理,被韧性剪切带网络状连接,导致岩体宏观上表现为高度非均质、不连续和各向异性。冈底斯岩浆杂岩包括花岗岩、闪长岩等,同样受多期构造活动改造,具片麻状构造、条带状构造,被活动断裂切割,整体较破碎,强度衰减严重。

现场调查发现,震裂山体多呈现深度碎裂化的复杂结构,岩体被多组节理、裂隙切割成碎裂状至角砾状,原有结构面在地震后又张开松动,形成贯穿性破裂网络,造成物理力学性质显著劣化。此外,密集的震裂缝隙大幅增强了岩体的渗透性和储水能力,使得降水、冰川融水等易于快速下渗,并在相对隔水界面汇聚,从而持续地影响着山体稳定。

尽管针对缝合带震裂山体的系统研究相对较少,但其他构造活跃区的震裂山体研究可为理解其物理力学特性提供重要参考。例如,黄河大柳树坝址的震裂松动岩体影响带水平深度超过200 m,表现出大范围低速、低强度、结构面张开等类似劣化特征^[22-24]。汶川地震区的震裂山体研究表明^[6, 8, 25-26],地震动不仅造成岩体宏观开裂,更

通过累积损伤显著降低了岩体的长期强度,使其在降雨等后续营力作用下易发生高位远程灾害。近年来,相关模型试验和数值模拟研究^[27-31]揭示了砂岩、花岗岩等山体震裂破坏机制,探索了缝合带岩体在动静荷载下的变形破坏机理与失稳模式,为本研究理解缝合带岩体在频繁强震作用下的渐进破坏机制提供了良好参照。

3.2 地震动力响应与强震破坏机制

山体岩性结构对地震动力响应产生重要影响。研究表明^[32-35],软岩的地震放大效应通常较硬岩更显著,层状岩体较均质完整岩体表现出更明显的波动响应,上硬下软的岩体结构相较于上软下硬结构也具有更强的动力放大特性,顺向坡的地震响应普遍高于逆向坡。当地震波传播至含软弱结构面和软弱夹层岩体时,会发生波动能量的反射、折射与局部聚焦,导致振动响应在空间上出现显著差异,并发生衰减吸收和局部放大等复杂作用,从而引起地震响应行为的非协调。缝合带震裂山体岩性结构混杂,工程地质性质特殊,并受活动断裂控制,发育密集的构造裂隙和深大裂缝,地震动力响应因此具有显著的非均匀性和高度非线性,振动能量将在破碎带、松动带、软弱带等薄弱部位集中,引发强烈的局部加速度放大,响应过程表现出显著的非均匀性与高度非线性。

青藏高原缝合带山体失稳破坏机制主要有三种类型^[1]:①构造混杂软岩山体长期蠕滑变形;②跨断层山体锁固段破坏形成“挡墙溃决”;③断裂带震裂山体受强震作用发生振胀和抛掷破坏。汶川地震触发的大型滑坡研究进一步揭示^[36-42],强震作用下岩体发生损伤碎裂化和强度急剧降低,发生强震拉裂、锁固段剪断、振碎解体及抛掷失稳等一系列动力破坏过程,其失稳机制包括软弱夹层在振动中的非协调变形导致的动力损伤、以及滑动面在动力作用下的摩擦强度弱化等。缝合带震裂山体的地震响应与失稳机制更为复杂,在强烈地震动输入下,地形放大效应、岩体结构抗震特性及累积损伤效应相互耦合,极易在破碎带、松动带、软弱带等关键部位引发大型超高位失稳,导致特大崩滑灾害的发生。

4 结论与建议

本文基于实地调研、地质勘查及文献分析,总结了雅鲁藏布江缝合带大峡谷段震裂山体的发

育特征、孕灾地质条件与强震失稳机理。主要结论包括:

(1) 雅江缝合带大峡谷段由岩性及变形差异显著的多个岩组构成,受墨脱断裂带等活动断裂强烈切割,形成宽度超过100 m的断层影响带,平硐勘查揭示山体水平深达700 m处仍发育裂缝空腔,且透水严重;

(2) 在1950年察隅地震、2017年米林地震等历史强震作用下,大峡谷至墨脱一带的沿江及极高山冰川地区形成了1000余处高位震裂山体,其垂直高差超过1000 m,坡表向内30~50 m深度范围内存在裂缝张开和岩体松动现象,成为重大流域性地质灾害的主要风险源;

(3) 强震作用下,缝合带震裂山体地形放大、岩体结构控震与累积损伤效应相互耦合,易在破碎带、松动带、软弱带等关键部位引发超高位崩滑失稳灾害。

鉴于雅江缝合带震裂山体精细地质力学模型有待建立、混杂岩体震裂损伤破坏机制认识不清、强震作用下的缝合带跨断层震裂山体动力响应和失稳机理尚不明确等问题,本文建议选取缝合带大峡谷段巴登则山体等典型震裂山体为重点研究案例,采用精细调查分析、力学试验、数值模拟、模型试验等相结合的方法,围绕“缝合带跨断层震裂山体地质结构与孕灾机制”和“强震作用下缝合带跨断层震裂山体动力响应规律与破坏模式”两个关键科学问题,系统开展雅鲁藏布江缝合带跨断层震裂山体失稳机理研究,进一步阐明震裂山体发育程度分区特征,建立缝合带跨断层震裂山体孕灾地质结构精细模型,明确缝合带各岩组的矿物组成和物理力学性质差异,揭示该地区地震活动的时空分布规律与断裂带强震复发周期,阐明复杂地质结构对放大效应的影响作用,研究山体局部变形破裂—整体失稳启滑—后破坏碎屑堆积的灾害过程,最终有针对性地提出缝合带震裂山体分级分类灾害风险防控措施建议。

致谢:本文的调勘查、台站建设、平硐编录等工作得到了当地政府和有关单位的支持帮助,论文的修改得到了专家和编辑部老师的悉心指导,在此表示诚挚感谢!

参考文献:

- [1] YIN Y P, LI B, GAO Y, et al. Geostructures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(1): 66–101.
- [2] 薛翊国,渠敬凯,彭建兵,等.雅鲁藏布江下游主要不良地质条件与重大工程地质问题[J]. *现代地质*, 2026, 40(1): 1–30.
- [3] 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.
- [4] 李滨,殷跃平,谭成轩,等.喜马拉雅东构造结工程选址面临的地质安全挑战[J]. *地质力学学报*, 2022, 28(6): 907–918.
- [5] 张永双,巴仁基,任三绍,等.中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析[J]. *中国地质*, 2020, 47(6): 1637–1645.
- [6] YIN Y P, CHENG Y L, LIANG J T, et al. Heavy-rainfall-induced catastrophic rockslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. *Landslides*, 2016, 13(1): 9–23.
- [7] GAO Y, YIN Y P, LI B, et al. Characteristics and numerical runout modeling of the heavy rainfall-induced catastrophic landslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, China, following the Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. *Landslides*, 2017, 14(4): 1361–1374.
- [8] 殷跃平,王文沛,张楠,等.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[J]. *中国地质*, 2017, 44(5): 827–841.
- [9] 何思明,白秀强,欧阳朝军,等.四川省茂县叠溪镇新磨村特大滑坡应急科学调查[J]. *山地学报*, 2017, 35(4): 598–603.
- [10] 许志琴,蔡志慧,张泽明,等.喜马拉雅东构造结—南迦巴瓦构造及组构运动学[J]. *岩石学报*, 2008, 24(7): 1463–1476.
- [11] 殷跃平,高少华,王文沛,等.1950年西藏自治区墨脱—察隅8.6级地震触发特大滑坡研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2026, 45(2): 321–341.
- [12] 西藏自治区科学技术委员会.西藏察隅当雄大地震[M].拉萨:西藏人民出版社,1988.
- [13] 李浩文,贺凯,李滨,等.雅鲁藏布大峡谷强震地震动地形放大效应:以2017年米林MS6.9地震为例[J]. *地质学报*, 2026, 100(4): 1506–1518.
- [14] HU K H, ZHANG X P, YOU Y, et al. Landslides and dammed lakes triggered by the 2017 Ms6.9 Milin earthquake in the Tsangpo gorge[J]. *Landslides*, 2019, 16(5): 993–1001.
- [15] 万佳威,高浩源,高杨,等.西藏色东普沟2024年两期冰川泥石流堵江灾害发育特征研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2024, 35(6): 24–32.
- [16] 白玲,李国辉,宋博文.2017年西藏米林6.9级地震震源参数及其构造意义[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(12): 4956–4963.
- [17] ZHAO B, LI W L, WANG Y S, et al. Landslides triggered by the Ms 6.9 Nyingchi earthquake, China (18 November 2017): Analysis of the spatial distribution and occurrence factors [J].

- Landslides, 2019, 16(4): 765 – 776.
- [18] 刘德民, 王杰, 姜淮, 等. 青藏高原形成演化动力机制及其远程效应[J]. 地学前缘, 2024, 31(1): 154 – 169.
- [19] 赵远方, 公王斌, 江万, 等. 藏南嘉黎断裂古乡—通麦段多期活动特征及其构造意义[J]. 现代地质, 2021, 35(1): 220 – 233.
- [20] 谢超. 南迦巴瓦地区构造地貌及断裂活动特征[J]. 国际地震动态, 2019(5): 43 – 46.
- [21] 王刚, 方慧, 裴发根, 等. 墨脱断裂带背崩乡段深部电性结构研究[J]. 地球与行星物理理论评(中英文), 2025, 56(6): 699 – 709.
- [22] 韩文峰. 黄河黑山峡大柳树松动岩体工程地质研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993.
- [23] 谌文武, 梁收运, 刘高, 等. 松动岩体的工程特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 751 – 755.
- [24] 王勇智, 戚炜, 门玉明, 等. 黄河大柳树坝址岩体破坏机制动力模拟试验分析[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(2): 54 – 58.
- [25] YIN Y P, WANG W P, ZHANG N, et al. The June 2017 Maoxian landslide: Geological disaster in an earthquake area after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(11): 1762 – 1766.
- [26] JIN K P, XING A G, BILAL M. Plane morphometric analysis of particles using an automatic image analysis system: A case study of the Xinmo landslide [J]. Granular Matter, 2023, 26(1): 4.
- [27] CLARKE A P, VANNUCCI P. Structural anisotropy: Using image analysis to quantify block-in-matrix fabrics [J]. Journal of Structural Geology, 2020, 131: 103939.
- [28] NAPOLI M L, FESTA A, BARBERO M. Practical classification of geotechnically complex formations with block-in-matrix fabrics[J]. Engineering Geology, 2022, 301: 106595.
- [29] LI T T, PEI X J, GUO J, et al. An energy-based fatigue damage model for sandstone subjected to cyclic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(11): 5069 – 5079.
- [30] 漆苈见, 范宣梅, 夏明垚, 等. 跨逆断层岩质边坡上下盘动力响应和破坏模式振动台试验[J]. 地质科技通报, 2025, 44(1): 138 – 149.
- [31] HE J X, WANG Y S, ZHAO J J, et al. Seismic response of an irregular slope containing surficial weak layer and internal fractures in Dadu River, southwest China [J]. Landslides, 2024, 21(3): 621 – 640.
- [32] ZHU C, XU J J, HE M C, et al. Amplification of ground vibration on a rocky hill and its environs under cylindrical SH waves [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(4): 2727 – 2738.
- [33] 孙东, 杨涛, 曹楠, 等. 泸定MS6.8地震同震地质灾害特点及防控建议[J]. 地学前缘, 2023, 30(3): 476 – 493.
- [34] YANG G X, QI S W, WU F Q, et al. Seismic amplification of the anti-dip rock slope and deformation characteristics: A large-scale shaking table test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 907 – 916.
- [35] 周金禄, 王明, 余长胜, 等. 藏东贡觉地区岩质滑坡多发性研究及其预防建议—以色拉滑坡为例[J]. 地质通报, 2025, 44(10): 1989 – 2002.
- [36] 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): 1969 – 1982.
- [37] 黄润秋, 张伟锋, 裴向军. 大光包滑坡工程地质研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 557 – 585.
- [38] TANG H M, JIA H B, HU X L, et al. Characteristics of landslides induced by the great Wenchuan earthquake [J]. Journal of Earth Science, 2010, 21(1): 104 – 113.
- [39] 杨树新, 姚瑞, 李玉江, 等. 地应力与地震研究进展及展望[J]. 地质力学学报, 2025, 31(6): 1127 – 1145.
- [40] 王德富, 李永鑫, 任娟, 等. 联合无人机光学与机载LiDAR在高位滑坡要素识别中的应用: 以川西汶川龙溪沟滑坡为例[J]. 现代地质, 2024, 38(2): 464 – 476.
- [41] FERNÁNDEZ F, VARGAS E, MULLER A L, et al. Material point method modeling in 3D of the failure and run-out processes of the Daguangbao landslide [J]. Acta Geotechnica, 2024, 19(7): 4277 – 4296.
- [42] 蒋涛, 崔圣华, 许向宁, 等. 基于遥感解译的典型强震区泥石流物源发育及演化—以四川都汶高速沿线为例[J]. 地质通报, 2024, 43(7): 1243 – 1254.