引用格式：朱姝，张全，王彦兵，等，2026. 嘉黎断裂带东南段空间展布、变形特征与工程效应[J]. 地质力学学报，32（3）：603−619. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025170

Citation: ZHU S，ZHANG Q，WANG Y B，et al.，2026. The spatial distribution, deformation characteristics, and engineering effects of the southeastern segment of the Jiali Fault Zone[J]. Journal of Geomechanics，32（3）：603−619. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025170

嘉黎断裂带东南段空间展布、变形特征与工程效应

朱　姝[1]，张　全[1]，王彦兵[1]，李　晋[1]，李仁杰[1]，黄　勇[2]，李本良[3]，刘富财[4]，闫玉平[2]

ZHU Shu[1]，ZHANG Quan[1]，WANG Yanbing[1]，LI Jin[1]，LI Renjie[1]，HUANG Yong[2]，LI Benliang[3]，LIU Fucai[4]，YAN Yuping[2]

1. 国网经济技术研究院有限公司，北京 102209；
2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司，陕西 西安 710043；
3. 国网西南电力研究院有限公司，四川 成都 610000；
4. 中国地质科学院地质研究所，北京 100037

1. *State Grid Economic and Technical Research Institute Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 102209, *China*;
2. *China Railway First Survey & Design Institute Group Co.*, *Ltd.*, *Xi'an* 710043, *Shaanxi*, *China*;
3. *State Grid Southwest Electric Power Research Institute Co.*, *Ltd.*, *Chengdu* 610000, *Sichuan*, *China*;
4. *Institute of Geology*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*

The spatial distribution, deformation characteristics, and engineering effects of the southeastern segment of the Jiali Fault Zone

Abstract: ［**Objective**］The Tibetan Plateau, as the world's largest and most tectonically active continental collision orogenic belt, has long been at the forefront of global geoscience research due to its complex tectonic patterns and ongoing dynamic processes. The Jiali Fault Zone along the southeastern margin of the Tibetan Plateau serves as the key structure for the southeastward extrusion of plateau materials. Its tectonic attributes, geometric distribution, and activity are of great significance for understanding the Cenozoic tectonic evolution of the plateau, the kinematics of southeastward extrusion of plateau materials, the genesis of regional earthquakes and geohazards, and the assessment of regional engineering risks. However, the precise spatial location and Holocene activity of the southeastern segment of this fault zone (from Guxiang to Gongrigabu) have long been subject to controversy due to rugged terrain and dense vegetation cover. ［**Methods**］This study systematically investigated the spatial distribution, structural characteristics, and activity of the Jiali Fault in this critical, disputed segment by integrating multiple techniques, including high-resolution remote sensing image interpretation, field geological and geomorphological surveys, magnetotelluric sounding, and drilling data. Based on these investigations, we further analyzed the potential underground engineering effects triggered by fault activity. ［**Results and Conclusions**］(1) The southeastern segment of the Jiali Fault Zone extends continuously southeastward from south of Guxiang through Galongla and Jinzhunongba to Langqiunongba. Remote sensing interpretation reveales different kinds of structural geomorphologies including fault troughs, sag ponds, and push-up ridges. Field surveys identified bedrock fault planes and horizontal striations, demonstrating predominantly right-lateral strike-slip motion. Geophysical surveys revealed

基金项目：国家电网有限公司科技项目 (52200025000L-268-XN)

This research was financially supported by the Science and Technology Project of the State Grid Corporation of China (Grant No. 52200025000L-268-XN).

第一作者：朱姝（1992—），女，博士，高级工程师，从事输变电工程岩土和地质相关研究。Email：zhushu9293@163.com

通信作者：王彦兵（1987—），男，博士，正高级工程师，从事电力岩土与地质相关研究。Email：wangyanbing@chinasperi.sgcc.com.cn

收稿日期：2025−11−13；**修回日期**：2025−12−04；**录用日期**：2025−12−04；**网络出版日期**：2025−12−23；**责任编辑**：吴芳

Received：2025−11−13；Revised：2025−12−04；Accepted：2025−12−04；Available Online：2025−12−23；Handling Editor：WU Fang

distinct low-resistivity fracture zones (approximately 200–300 m wide) in the Cuokanongba, Galongla, Jinzhunongba, and Langqiunongba areas, indicating that the Jiali Fault dips 60°–80° to the southwest. Drilling cores revealed significant fault fracture zones in the Galongla area. Together, these findings confirm the existence and NW-SE-trending distribution of the Jiali fault. In combination with evidence for Holocene activity in the western segment, offset of late Pleistocene–Holocene sedimentary profiles in the Gongrigabuqu segment, and new survey results, the southeastern segment of the Jiali Fault plausibly exhibits Holocene activity. (2) Activity along the Jiali Fault may trigger the following seven types of underground engineering effects and associated adverse geological issues: co-seismic displacement (with an estimated maximum displacement up to 5–6 meters), rock mass degradation, high stress and rockbursts, ground motion amplification, high-pressure water and mud outbursts, localized geothermal anomalies, and secondary hazards at tunnel entrances. These effects form a complex and intrinsically linked geological risk chain, posing significant challenges for deep, long tunnels crossing fault zones. Therefore, for underground projects crossing potentially active faults where avoidance is impossible or cost-prohibitive, we recommend implementing systematic reinforcement designs and risk control measures corresponding to these effects across the entire project life cycle, starting from the planning and site selection stages. [**Significance**] This study addressed the challenges of applying traditional active detection methods to complex geological environments, such as high topographic relief, deep vegetation cover, and the absence of fine-grained Quaternary deposits, along the southeastern margin of the Tibetan Plateau. This study focused on remote sensing interpretation, high-precision geophysical surveys, and cross-fault drilling, thereby establishing a successful model for future active fault exploration in similar regions. The outcomes not only provide critical geological constraints for refining the tectonic model of the southeastern Tibetan Plateau, but also offer an indispensable scientific basis for planning, seismic design, and risk prevention of major engineering projects crossing active fault zones. Furthermore, the research methodology establishes a successful model for future active fault investigations in comparable regions.

Keywords: Jiali Fault; spatial distribution; deformation characteristics; engineering effects; southeastern Tibetan Plateau

摘　要：青藏高原东南缘的嘉黎断裂带是高原物质向南东向挤出的关键边界构造，其几何展布与活动性对理解高原构造演化及评估区域工程风险至关重要。然而，该断裂带东南段（古乡−贡日嘎布段）因地形险峻、植被覆盖严重，其精确空间位置与全新世活动性长期存在争议。此次研究针对该关键争议区段，综合运用高分辨率遥感影像解译、野外地质地貌调查、大地电磁探测以及钻探揭露等多种手段，系统研究了断裂带的空间展布、结构特征及活动性。结果表明，嘉黎断裂带南东段沿古乡南、嘎隆拉、金珠弄巴至朗秋弄巴一线连续展布，遥感解译与野外调查识别出断层槽谷、断塞塘、挤压鼓包、基岩断层镜面与水平擦痕等断裂活动证据；地球物理探测揭示了清晰的低阻破碎带；钻探岩心揭露了显著的断层破碎带。这些证据共同证实了断裂在该区段的存在与展布。结合区域古地震研究，认为该段具备全新世活动潜力。研究进一步系统分析了断裂活动可能引发的深部工程效应，包括同震错断（估算最大位错量达5～6 m）、围岩劣化、高地应力与岩爆、地震动放大、高压突涌水涌泥、局部地温异常以及洞口次生灾害等。在传统活动断层探测方法难以实施的复杂地质环境下，此次研究针对青藏高原东南缘高地形起伏、厚植被覆盖和缺乏细粒第四纪沉积等问题，重点实施了遥感解译、高精度物探和跨断裂钻探工作，为后续在类似地区开展活动断层探查和研究建立了示范。

关键词：嘉黎断裂带；空间展布；变形特征；工程效应；青藏高原东南缘

中图分类号：P313.2; P546　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)03−0603−17

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025170

0　引言

青藏高原作为全球规模最大、构造活动最强烈的陆−陆碰撞造山带，其复杂的构造格局与持续的动力学过程一直是全球地学研究的前沿与焦点（Tapponnier et al., 2001; 张培震等, 2003; 吴中海, 2024; 赵志丹, 2025）。高原物质在印度板块与欧亚板块持续汇聚的驱动下，发生了大规模的地壳缩短与侧向挤出，形成了现今壮观的地貌与构造体系（Royden et al., 2008; 许志琴 等, 2011）。位于青藏高原东南部的嘉黎断裂带被认为是青藏高原物质向南东挤出的关键构造边界与主要“逃逸”通道的南

界（Tapponnier et al., 1986; Armijo et al., 1986, 1989），其构造属性、几何展布与活动性对于深刻理解高原新生代构造演化模式、块体运动学特征及区域地震与地质灾害成因机制具有至关重要的意义。

目前，对于嘉黎断裂带北西段（嘉黎县城以西段）的展布格局与第四纪晚期活动性，已有较为充分的地质与地球物理证据支持，认识相对统一（Armijo et al., 1989; 任金卫等, 2000; 沈军等, 2001; 宋键等, 2013; Zhang et al., 2021）。

然而，该断裂带向东南延伸至古乡−贡日嘎布段时，由于其穿行于喜马拉雅东构造结侧缘的极高山区，地形陡峻、高差悬殊，且深受密集的滑坡、崩塌、冰川堆积和茂密植被的覆盖，致使地表地质调查极为困难。长期以来，该段一直未能获得全新世活动的确凿证据，导致学术界对于此段断裂是否仍具备全新世活动性存在显著争议（任金卫等, 2000; 沈军等, 2001, 2003; 唐方头等, 2010; 宋键等, 2013; Wang et al., 2020; 赵远方等, 2021; 钟宁等, 2021; Liu et al., 2024; 陆诗铭等, 2025）。已有认知上的分歧，不仅制约了对嘉黎断裂带整体行为与高原东南部构造变形机制的完整理解，更给该区域国家重大工程（如交通廊道、水电设施等）的规划与建设带来了潜在的不确定性风险。

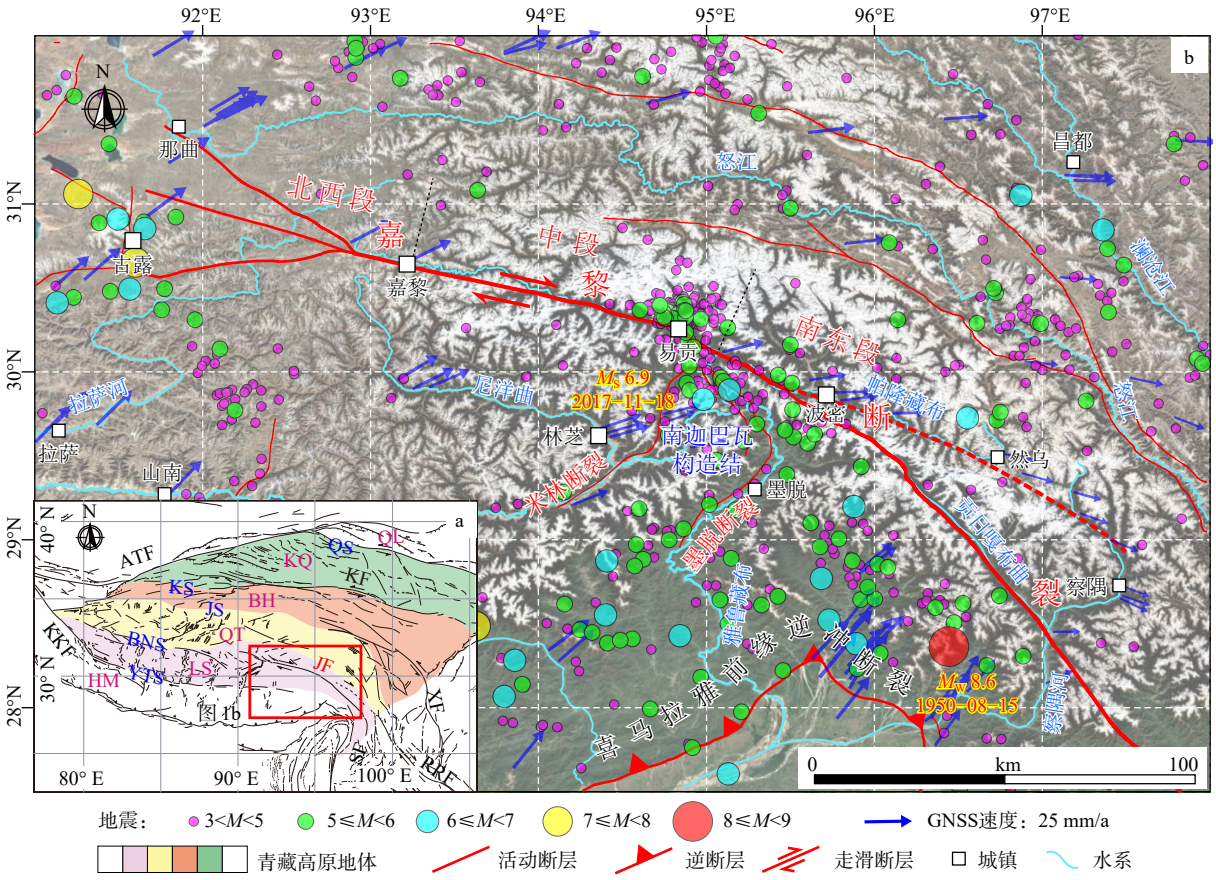
为解决上述难题，此次研究聚焦于嘉黎断裂带这一关键争议区段，综合运用高分辨率遥感影像解译、详细的野外地质地貌调查、钻探揭露，结合大地电磁测深等地球物理探测手段，厘定了嘉黎断裂带在古乡−贡日嘎布段的空间展布、浅部结构特征及其在不同部位的构造表现形式。探讨了该段断裂的活动性，并进一步评估了其潜在的地质安全风险及其可能对穿越其间的地下工程产生的工程效应。这一研究成果可为完善青藏高原东南缘构造模型提供关键的地质约束，同时也可为科学评价区域重大工程安全及活动断裂区地下工程的抗震设计、风险规避与减灾对策制定等提供科学依据。

1　构造背景

嘉黎断裂带位于喜马拉雅东构造结地区（喜马拉雅山脉与念青唐古拉山脉的交汇处），大地构造位置上整体处于拉萨地块的东南部（潘桂棠等, 2009），并被认为是喀喇昆仑−嘉黎断裂带的最东端活动断层（Armijo et al., 1986, 1989）。该断裂带夹持于雅鲁藏布江缝合带、班公湖−怒江缝合带之间，从喜马拉雅东构造结弧顶部位呈北西—南东向延伸，是青藏高原东南缘侧向扩展的南边界（图 1）。$^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学数据显示，嘉黎断裂带的右行走滑起始活动时间为距今约 18～12 Ma 的中新世中期（Lee et al., 2003; Lin et al., 2009）。Zhang et al.（2020）的运动学和年代学研究结果显示，嘉黎断裂带在晚渐新世期间或之前（～24 Ma 或更早）曾发生左行走滑运动，并可能与渐新世活动的哀牢山−红河剪切带相连，共同构成了印度大陆向北推挤的北边界。锆石 U-Pb 年代学结果显示，沿嘉黎断裂发育的一套镁铁质岩结晶年龄为 114～110 Ma，与区域花岗岩岩浆作用晚期阶段年龄（135～110 Ma）相对应，并推测可能是班公湖−怒江缝合带闭合后拉萨地块与羌塘地块碰撞背景下古嘉黎断裂带早期活动的结果（Li et al., 2022）。

受喜马拉雅东构造结新生代挤压抬升（Ding et al., 2001; 丁林和钟大赉, 2013）和高原物质向南东走滑挤出（Tapponnier et al., 1982, 2001; 许志琴等, 2011）的共同影响，嘉黎断裂沿线新生代构造变形强烈（图 1）。据不完全统计，在公元 624 年至 2022 年 1 月期间，东构造结及邻区发生 4.7 级及以上地震 1144 次，其中 6 级以上地震 180 次（陈平光等, 2023）。20 世纪以来，东构造结地区共发生 6 级以上地震 27 次（白玲等, 2017），其中影响较大的包括 1947 年朗县东南 M_S 7.7 地震、1950 年察隅 M_S 8.6 地震和 2017 年米林 M_S 6.9 地震等。

嘉黎断裂带西起青藏高原中部的那曲、谷露附近，并可能包括了 3 条分支断层（图 1），向东南方向延伸逐渐合并为 1 条主断裂，经嘉黎县城、易贡藏布、通麦后继续向南东延伸至波密附近。根据断裂空间展布及活动性的差异，一般将嘉黎断裂分为 3 段：北西段由那曲南东至嘉黎的多条分支组成；中段从嘉黎至通麦地区；南东段过通麦、古乡后沿帕隆藏布江展布，或从帕隆藏布江南岸延伸至下察隅一带（图 1）。针对嘉黎断裂带北西段的几何展布和全新世活动性已开展了较多研究（Armijo et al., 1989; 任金卫等, 2000; 沈军等, 2001; 宋键等, 2013; Zhang et al., 2021; 薛翊国等, 2026），但关于中段和东南段的研究还相对薄弱，尤其是对于东南段的空间展布和活动性争议较大。近年来，随着青藏高原东南缘地区重大工程的规划建设，国内学者沿嘉黎断裂带东南段的帕隆藏布沿线开展了大量调查研究



图中地震数据下载自 USGS; GNSS 数据来源于 Wang and Shen, 2020; ATF—阿尔金断裂带; KF—昆仑断裂带; KKF—喀喇昆仑断裂带; XF—鲜水河断裂带; RRF—红河断裂带; SF—实皆断裂带; JF—嘉黎断裂带; HM—喜马拉雅地体; LS—拉萨地体; QT—羌塘地体; BH—巴颜喀拉地体; KQ—昆仑–柴达木地体; QL—祁连山地体; YTS—雅鲁藏布江缝合带; BNS—班公湖–怒江缝合带; JS—金沙江缝合带; KS—昆仑缝合带; QS—祁连缝合带

a—嘉黎断裂带大地构造背景图; b—青藏高原东南部活动断裂和地震分布图

图 1 青藏高原东南部嘉黎断裂带及其周缘地区活动断裂与地震分布图（据 Armijo et al., 1989; Zhang et al., 2021 修改）

Fig. 1 Map showing the distribution of active faults and earthquakes in the southeastern Tibetan Plateau, centered on the Jiali Fault and its adjacent areas (modified from Armijo et al., 1989; Zhang et al., 2021)

(a) Tectonic background map of the Jiali Fault Zone; (b) Distribution of active faults and earthquakes in the southeastern Tibetan Plateau

Earthquakes are from the USGS; Blue vectors are GNSS velocities relative to stable Eurasia (Wang and Shen, 2020); ATF: Altyn Tagh Fault; KF: Kunlun Fault; KKF: Karakorum Fault; XF: Xianshuihe Fault; RRF: Red River Fault; SF: Sagaing Fault; JF: Jiali Fault; HM: Himalaya Terrane; LS: Lhasa Terrane; QT: Qiangtang Terrane; BH: Bayan Har Terrane; KQ: Kunlun–Qaidam Terrane; QL: Qilian Shan Terrane; YTS: Yarlung Tsangpo Suture; BNS: Bangong–Nujiang Suture; JS: Jinsha Suture; KS: Kunlun Suture; QS: Qilian Suture

工作，发现了一些被认为与断裂全新世活动相关的地层错断现象（Wang et al., 2020; Liu et al., 2024），为进一步认识该断裂活动性提供了新证据。但从古乡以东，由于断裂穿行于喜马拉雅东构造结北东侧的高山峡谷区，地形高差悬殊，且深受密集的滑坡、崩塌、冰川堆积和茂密植被的覆盖，至今仍缺乏可靠的全新世活动证据，并且关于断裂的几何展布也缺少相对精确的定位信息。

文章基于近期在该地区开展的详细遥感解译、地质调查、地球物理探测和钻探等调查研究结果（图 2），从北西向东南，分 4 段对嘉黎断裂带古乡–贡日嘎布段的空间展布与变形特征进行分析。

2 嘉黎断裂古乡–贡日嘎布段空间展布与构造变形特征

2.1 古乡南–错卡弄巴段

高分辨率遥感卫星影像（图 3a）和地形地貌

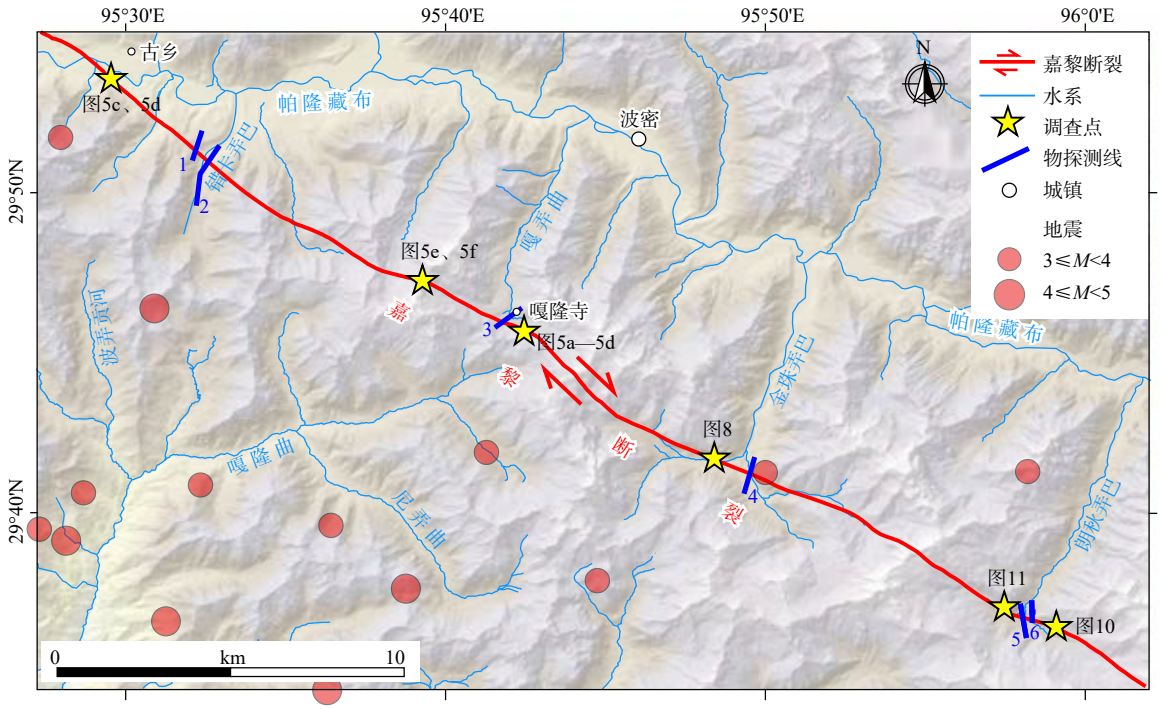


图 2　嘉黎断裂古乡–贡日嘎布段空间展布特征及主要调查研究点分布

Fig. 2　Spatial extent of the Jiali Fault from Guxiang to Gongrigabu and the main investigation sites

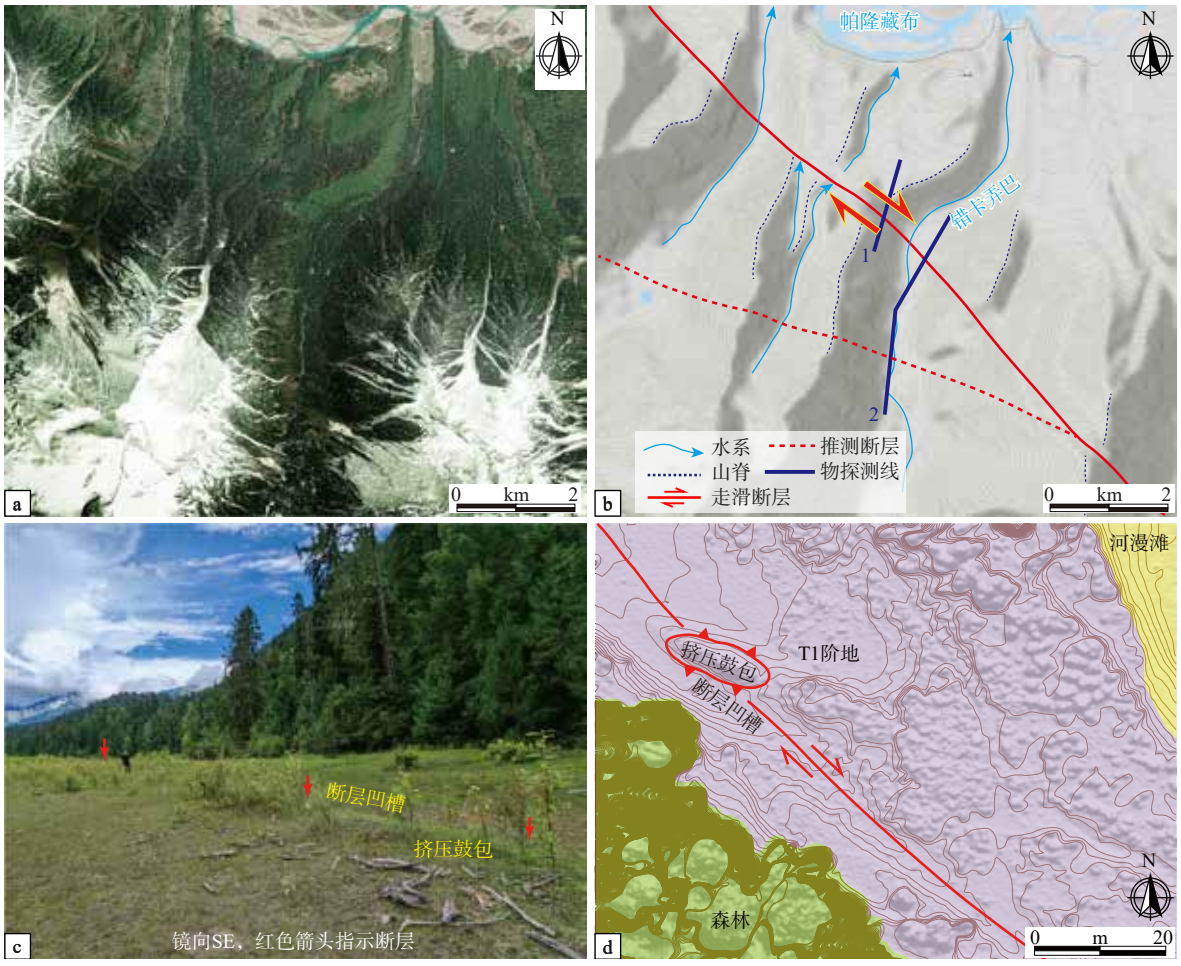
(图 3b)分析发现，帕隆藏布南岸的错卡弄巴下游河道存在较明显的弯曲偏转现象，同时其北西、南东两侧的多条冲沟和山脊线也表现出不同程度的右行弯曲(图 3b)，推测可能为嘉黎断裂右行走滑运动造成。野外调查在古乡南侧巴卡村西约 3 km 处(95.491565°E, 29.893127°N)，帕隆藏布南岸的 T1 阶地上发现线性特征比较显著的疑似断层凹槽，局部伴随有疑似挤压鼓包(图 3c、3d)。小型无人机摄影测量结果给出的此处厘米级分辨率的正射影像及数字高程模型(DEM)显示，此处的疑似断层凹槽整体呈北西—南东走向的负地形，疑似鼓包的走向近东西向，与凹槽呈小角度相交，长宽分别为约 20 m 和 5～6 m(图 3d)。推测该处的线性凹槽和鼓包可能是嘉黎断裂全新世活动结果。

为确认图 3b 中河道右行弯曲处是否存在断层，沿错卡弄巴沟及其北西侧山坡布设了 2 条大地电磁剖面(图 2 和图 3b 中 1、2 号线)。大地电磁探测结果显示，2 条剖面在河道、山脊弯曲处均表现出显著的低电阻率异常(图 4a—4d)，验证了该处断层的存在，根据大地电磁剖面中低阻带的范围，推测断层破碎带宽度约 100～200 m。值得注意的是，在 2 号大地电磁剖面中，除了在遥感解译发现的河道、山脊右行位错处存在电性异常，在河道上游距剖面起点约 900 m 处还存在另外一条宽约 150 m 的低阻异常带(图 4c、4d)，推测可能为嘉黎断裂带的另一条分支断层。

2.2　嘎隆拉段

宋键等(2013)曾在嘉黎断裂带开展过 GNSS 观测和野外调查，并在扎墨公路嘎隆拉附近发现了断层破碎带和基于地貌特征推测的疑似断裂连续错断多期冰碛垄现象，并结合区域冰川退缩速率和疑似的冰碛垄位错量，推测嘎隆拉附近嘉黎断裂的全新世走滑速率可能为 3.8 mm/a。在此工作基础上，进一步对嘎隆拉盆地开展遥感影像解译和野外调查工作发现，该区发育较为典型的与断裂活动相关的线性地貌和基岩断层面、断层泥和疑似山脊水平错断等多种现象(图 5)。

在嘎隆寺南侧，嘎隆拉雪山北坡可见一系列北西—南东向线性展布的坡中平台、断层槽谷(图 5a、5b)，其中沿老扎墨公路可见可能与断裂活动相关的线性槽谷和断陷塘等地貌现象(图 5b)。在老扎墨公路旁，可见侏罗纪花岗岩在断裂作用下发生面理化变形，可能是嘉黎断裂早期活动韧性变形的产物。此外，局部可观察到断裂晚期脆性变形所形成的断层摩擦面(图 5c)，其上可观测到指示断层走滑运动的近水平的擦痕和阶步(图 5d)。而可能与嘉



a—疑似的右行错断河道、山脊卫星影像；b—疑似的右行错断河道、山脊 DEM 图；c—帕隆藏布南岸 T1 阶地上疑似的断层凹槽和挤压鼓包；d—基于小型无人机 DEM 影像的构造地貌解译图

图 3 古乡南–错卡弄巴附近嘉黎断裂卫星影像及野外特征

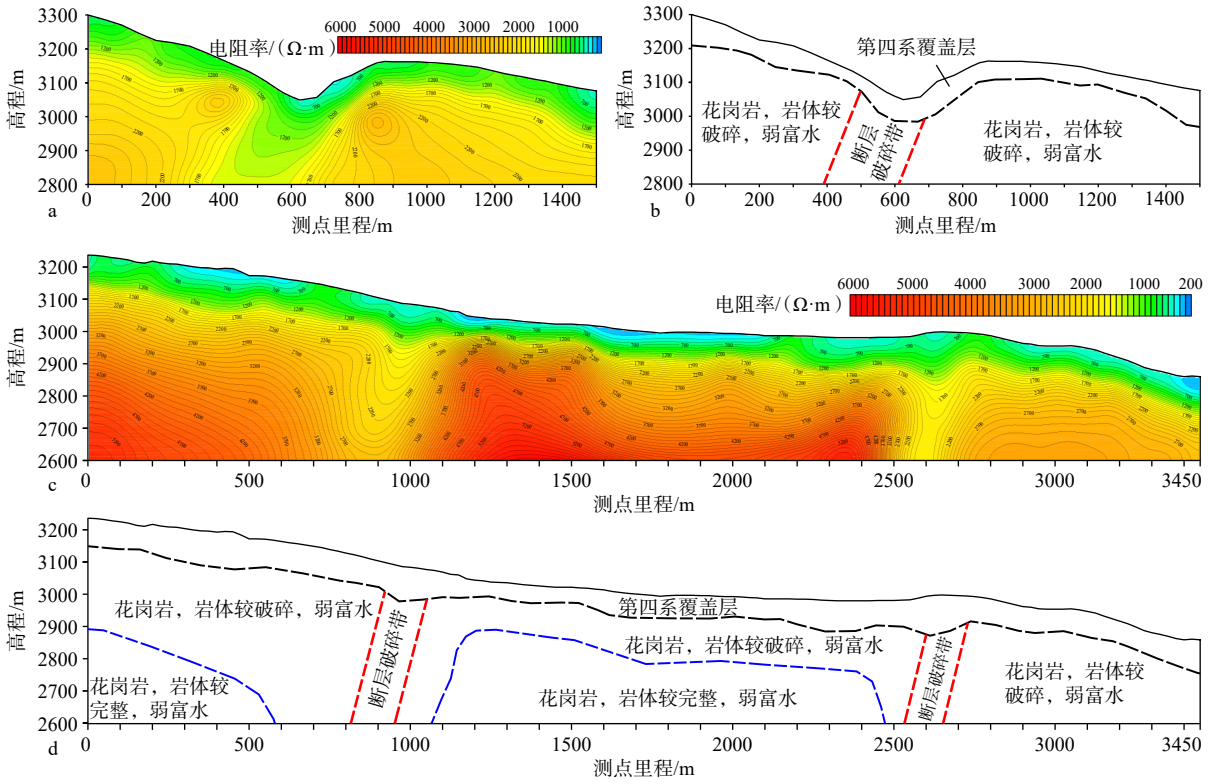
Fig. 3 Satellite images and geomorphological features of the Jiali Fault from south of Guxiang to Cuokanongba

(a) Satellite image showing the possible dextral offset of river courses and mountain ridges; (b) DEM map showing the possible dextral offset of river courses and mountain ridges; (c) Field photo showing a possible fault trough and push-up ridge on the T1 terrace along the southern bank of the Parlung Tsangpo River; (d) Tectonic and geomorphic interpretation of the DEM derived from a small UAV

黎断裂第四纪晚期活动相关的断层凹槽等地貌展布于基岩断层面北侧(图 5a、5b)。这些现象共同指示了该断裂存在长期活动历史。

嘎隆拉盆地西侧冰川顶部的山脊在地形上较其南北两侧低(图 5e),因而该垭口的出现可能与嘉黎断裂的长期活动有关。进一步通过无人机抵近拍摄发现,该处垭口内发育多组断层,断层两侧基岩极其破碎;其中最南侧的断层核部发育黑色的断层泥,两侧为碎裂岩等典型的断裂带岩石组合(图 5e),指示沿断裂具有相对复杂的演化过程。同时无人机俯视照片显示,黑色断层泥附近山脊存在疑似的被嘉黎断裂右行错开的现象,并出露了较为新鲜的红褐色断层滑动面(图 5f),推测可能与断裂最新活动有关。

在嘎隆拉盆地内穿越嘉黎断裂布设的音频大地电磁剖面显示,断裂带与其两侧围岩电阻率差异明显(图 6)。结合区域地质资料的剖面揭示结果为:第四系覆盖层,电阻率值 ρ=500～1200 Ω·m;片麻岩,岩体较破碎,弱富水,ρ=1200～4000 Ω·m;大理岩,岩体较破碎,弱富水,ρ=1200～6000 Ω·m;大理岩,岩体较完整,弱富水,ρ=6000～8000 Ω·m;断层破碎带,岩体破碎,ρ=1000～2000 Ω·m;节理裂隙发育带,岩体破碎,ρ=1200～4000 Ω·m。断层破碎带在电性上一般表现为竖向低阻带状异常,电性相对周边较低。需要说明的是,除了与嘎隆拉山北坡地表调查和构造地貌解译中发现的断层相对应的低阻异常



a—1 号大地电磁剖面反演结果；b—1 号剖面地质解译图；c—2 号大地电磁剖面反演结果；d—2 号剖面地质解译图

图 4　错卡弄巴附近 1 号和 2 号大地电磁剖面揭示的嘉黎断裂特征（剖面位置见图 2）

Fig. 4　Inversion results and geological interpretation of magnetotelluric profiles 1 and 2 across the Jiali Fault near Cuokanongba (Locations of the profiles are shown in Fig. 2)

(a) Inversion result of magnetotelluric profile 1; (b) Geological interpretation of profile 1; (c) Inversion result of magnetotelluric profile 2; (d) Geological interpretation of profile 2

带(倾向南西)，在盆地内部还存在一条近垂直的低阻异常带(图 6)，指示嘉黎断裂在嘎隆拉附近可能存在分支。

为进一步验证嘎隆拉附近嘉黎断裂的存在，并确定断裂带变形特征，在该处布设了一口 250 m 深的竖直钻孔和一口 300 m 深的水平钻孔。两孔均钻遇多处断层破碎带(图 7a—7d)，岩心面理化显著(图 7b)或破碎严重(图 7a、7c)，并可见断层滑动面(图 7d)。综合嘎隆寺一带的遥感解译、野外调查、物探和钻探成果，可揭示嘉黎断裂带由此经过。

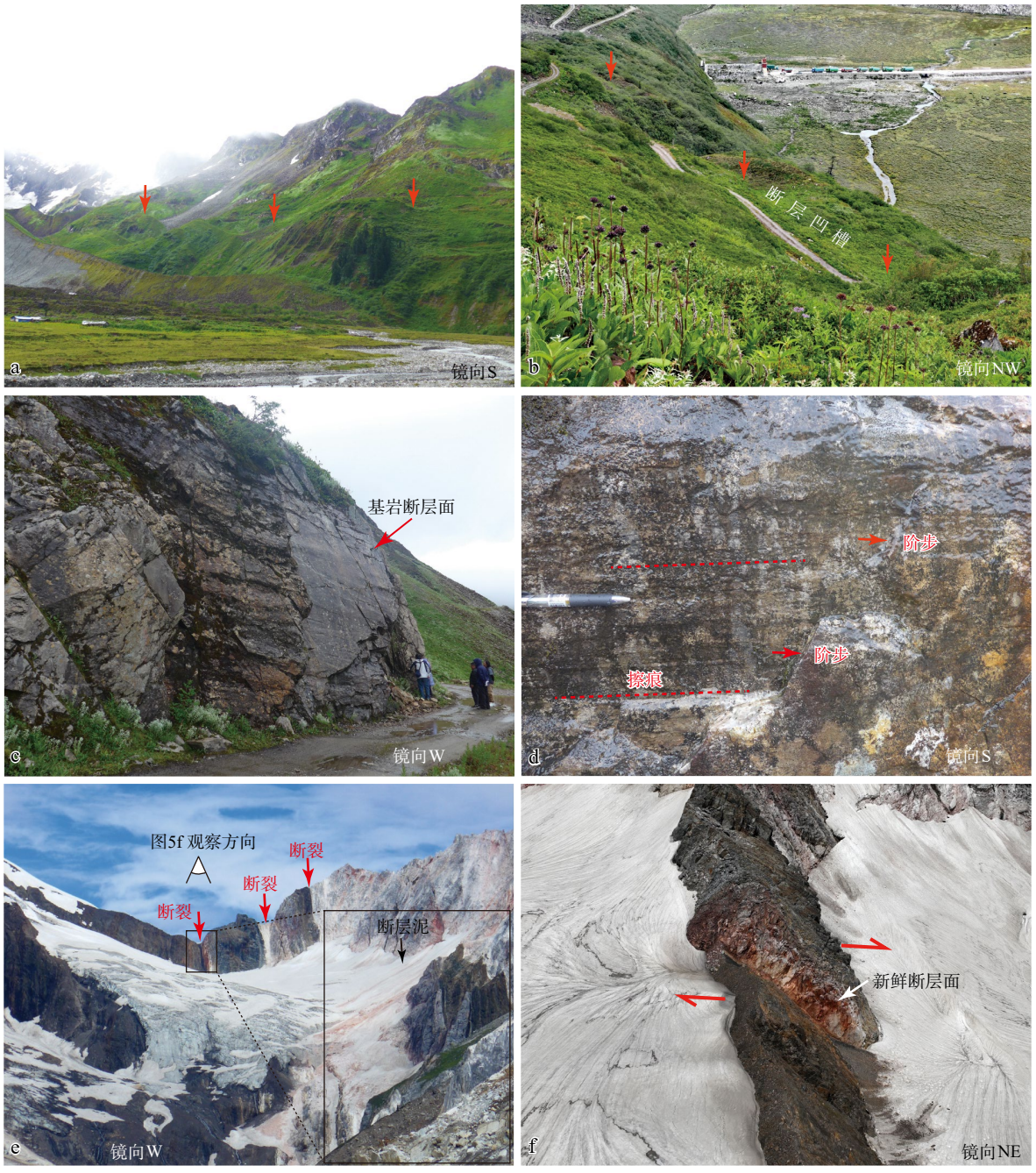
2.3　金珠弄巴段

活动断裂通常情况下具有继承性，大多是先存断裂在特定的构造条件和应力状态下被重新激活而形成。嘉黎断裂因经历了长期复杂的演化历史，其具体展布与先存断裂应该在空间上具有叠置性。但由于强烈的地形切割加上植被覆盖，嘉黎断裂金珠弄巴段的活动踪迹并不明显。无人机航拍显示，河流两侧的基岩面十分陡峭，且基岩疑似发生了面理化变形，可能为断裂带早期活动位置(图 8)。

为进一步确定嘉黎断裂带的具体位置，横穿河谷布设了一条长度为 1.9 km 的大地电磁剖面。结果显示，在距离起点大约 1000～1100 m 的位置，相应地质体的电阻率明显低于两侧的地质单元，其值介于 500～800 Ω·m，推测为节理裂隙发育带或断层破碎带(图 9)。因为断裂带长期活动会导致地层的完整性和均一性变差，沿断裂或节理贯入的地表水或地下水含量增高，从而引起电阻率的降低。这一证据可间接证明嘉黎断裂带可能穿越了金珠弄巴河谷，并继续向东南延伸。

2.4　朗秋弄巴段

在朗秋冰川一带，嘉黎断裂的线性踪迹较为清晰，遥感影像和无人机照片上均可见线性槽谷和疑似冲沟位错等构造地貌特征(图 10)，指示该段在晚更新世—全新世期间可能发生过地表活动。在断层槽谷北西延伸方向约 3 km 处，可见河流北岸发育的陡立基岩面。基岩面上不同高度处均发育有近



a—线性展布的坡中平台；b—嘎隆拉雪山北坡的疑似断层槽谷；c—基岩断层面；d—断层擦痕和阶步；e—嘉黎断裂上的断层垭口地貌及黑色断层泥；f—疑似的山脊右行错断

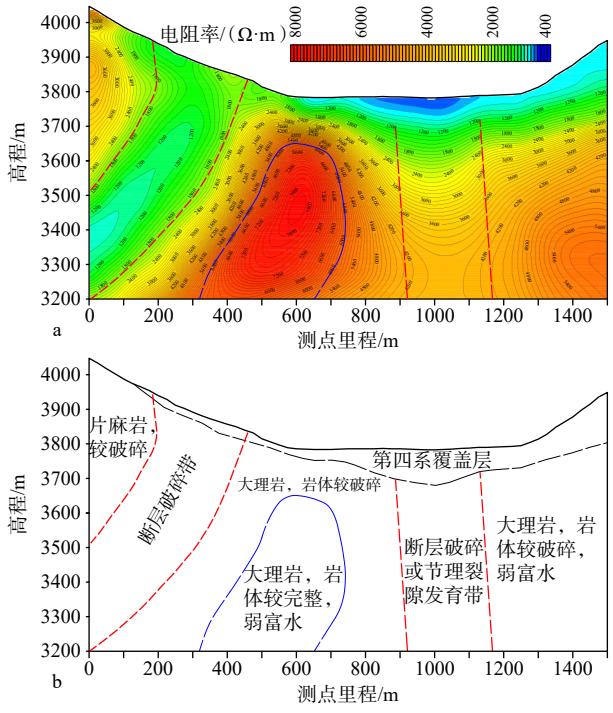
图 5 嘎隆寺附近嘉黎断裂构造地貌和岩石变形特征

Fig. 5 Tectonic geomorphology and deformation of bedrock along the Jiali Fault near Galong Temple

(a) Linearly distributed terraces on the slope; (b) Fault trough on the northern slope of Galongla Range; (c) Fault plane developed in bedrock; (d) Slickensides and fault steps; (e) Mountain pass formed by faulting with black gouge in the fault core; (f) Right-lateral offset ridge

水平方向的擦痕，指示嘉黎断裂以水平走滑运动为主的活动性质（图 11）。

为明确嘉黎断裂带位置，穿过朗秋冰川沟谷布设了 2 条长度分别为 2.6 km 和 1.0 km 的大地电磁剖面（图 2 中的 5 号、6 号剖面），均捕捉到嘉黎断裂带的位置信息。在 5 号大地电磁剖面中，在距离剖面起点大约 800～1000 m 的位置，地质体的电阻率明显低于两侧地质单元，这可能与该处在断裂活动影响下岩石破碎富水有关。该破碎带电阻率值介于 1200～4000 Ω·m 之间，推测是嘉黎断裂位置所在



a—3 号大地电磁剖面反演结果；b—3 号剖面地质解译图

图 6　嘎隆拉盆地内 3 号大地电磁剖面揭示的嘉黎断裂特征（剖面位置见图 2）

Fig. 6　Inversion results and geological interpretation of magnetotelluric profile 3 across the Jiali Fault in Galongla Basin (Location of the profile is shown in Fig. 2)

(a) Inversion result of magnetotelluric profile 3; (b) Geological interpretation of profile 3

(图 12a、12b)。由该断层破碎带向外，岩体或地层的破碎程度逐渐降低，电阻率变大，显示由断层破碎带向未变形围岩变化的空间特征(图 12a、12b)。在 6 号大地电磁剖面中，在距离剖面起点不足 100 m 的位置，捕捉到一个电阻率仅为 600～1600 Ω·m 的地质体单元，与其围岩砂质板岩的高电阻率形成鲜明对比(图 12c、12d)。而且，该剖面揭示的断层面产状较陡，倾角近 80°，与走滑断裂带的陡倾产状特征相吻合，因而推测其也应该代表了嘉黎断裂带位置(图 12c、12d)。因此，综合大地电磁剖面可知，嘉黎断裂带确实穿过了朗秋弄巴区域。

3　嘉黎断裂带的工程效应

嘉黎断裂的深部工程效应主要体现在围岩劣化、断层错断、局部高地应力、地震动放大、高压突涌水涌泥风险、局部地温异常、洞口次生灾害 7 个方面(张永双等，2021)。

3.1　围岩劣化效应

嘉黎断裂带影响范围内，普遍发育断层泥、角砾岩及碎裂岩等松散、软弱物质。这些物质强度低、自稳能力差，导致围岩完整性显著降低。根据西南地区某穿越嘉黎断裂的铁路隧道深孔勘察结果显示(图 13)，隧道围岩质量(Rock Quality Designation，RQD 值)与距嘉黎断裂的距离呈明显相关性：距离断裂带越近或直接穿越其支断裂的地段，围岩极为破碎，RQD 值可低至 24.41%，围岩等级以Ⅳ—Ⅴ级为主，给隧道开挖、支护带来了极大挑战。

3.2　断层错断效应

GNSS 监测结果显示，嘉黎断裂易贡藏−波密段右行走滑速率约为 3.8±0.9 mm/a (Zhang et al., 2021)，InSAR 观测结果同样显示嘉黎断裂现今仍在活动，其中贡日嘎布曲段右行走滑速率为 3.05～5.13 mm/a (Yao et al., 2024)。虽然活动速率在国内外主要活动断裂中属中等偏低水平，但在未来百年运营期内，存在发生地震并引发断裂两盘岩体相对位移(黏滑)或发生缓慢蠕滑的风险。若发生突发性的地震黏滑错动，其对直接穿越断裂带洞段的衬砌结构可能造成直接的剪切破坏。以 2022 年门源 M_S 6.9 地震为例，根据遥感解译和现场调查，沿冷龙岭断裂展布的地表破裂表现为错位、拉张、隆起形式，全长约 21.5 km，最大位错约 3.1 m，向两端逐渐衰减；震后对隧道结构变形及破坏情况排查结果显示，地震导致兰新客运专线大梁隧道全隧和祁连山隧道进口段发生整体偏移，其中冷龙岭断裂带及影响区尤为明显，局部发生显著错断(韩帅等，2022；阎渊，2023；程燕等，2024)。

3.3　局部高地应力效应

在嘉黎断裂带附近，由于构造应力的叠加和释放，容易形成局部应力集中区，为岩爆及在高应力条件下围岩随时间推移发生的时滞性岩爆(应变型岩爆)创造了条件，因此深埋隧道穿越嘉黎活动断裂带时需要高度警惕潜在的岩爆风险。以藏东南嘉黎断裂带附近某高原铁路隧道为例，自施工开挖以来，已发生轻微岩爆 9130.2 m/1790 次，中等岩爆 5309.5 m/700 次，强烈岩爆 1456 m/285 次(中铁第一勘察设计院集团有限公司，2020)。

3.4　地震动放大效应

由于嘉黎断裂破碎带岩体破碎，断裂带与完整围岩之间存在显著的波阻抗差异，当地震波传播至此处时，会在破碎带内产生反射、折射和散射，可能



a—水平钻孔岩心破碎特征；b—水平钻孔岩心面理化特征；c—竖直钻孔岩心破碎特征；d—竖直钻孔中的断层滑动面

图 7 嘎隆拉水平钻孔和竖直钻孔岩心破碎特征

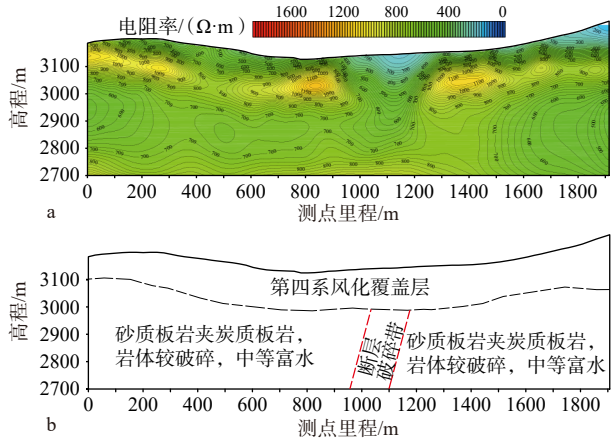
Fig. 7 Fragmentation characteristics of drilling cores from horizontal and vertical boreholes

(a) Fragmentation characteristics of drilling cores from a horizontal borehole; (b) Foliation characteristics of a drilling core from a horizontal borehole; (c) Fragmentation characteristics of drilling cores from a vertical borehole; (d) Fault slip surface in the drilling core from a vertical borehole



图 8 金珠弄巴北岸发育的陡立基岩面

Fig. 8 Steep bedrock surface developed on the northern bank of the Jinzhunongba River



a—4 号大地电磁剖面反演结果；b—4 号剖面地质解译图

图 9 穿过金珠弄巴河谷的 4 号大地电磁剖面（剖面位置见图 2）

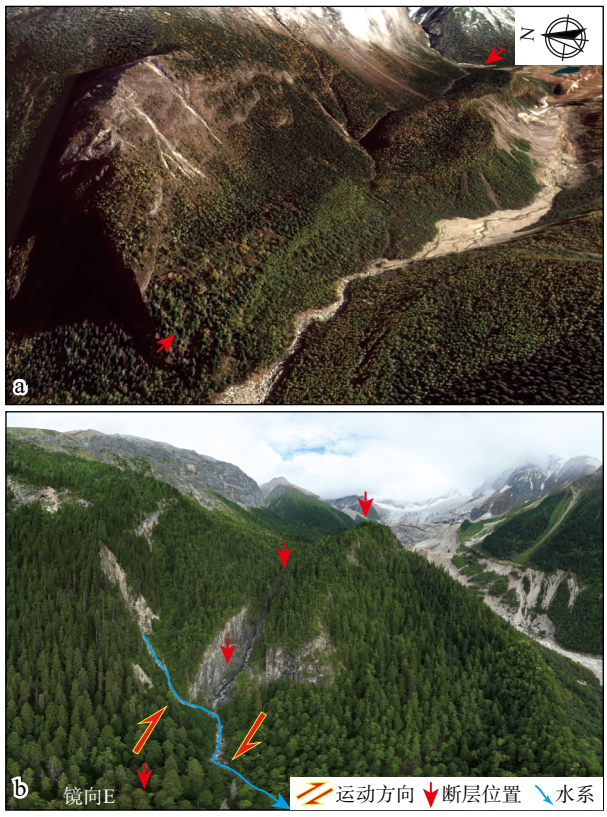
Fig. 9 Inversion result and geological interpretation of magnetotelluric profile 4 across Jinzhunongba Valley (Location of the profile is shown in Fig. 2)

(a) Inversion result of the magnetotelluric profile 4; (b) Geological interpretation of profile 4

导致地震动参数(如加速度、速度)被放大(梁建文和韩红霞, 2013)。这种放大效应会使隧道衬砌结构承受远超其基于均一地层设计的地震惯性力, 从而加剧其震损风险, 尤其是在破碎带与隧道交界的过渡区段。

3.5 高压突涌水涌泥风险效应

嘉黎断裂带及其支断裂是区域内重要的导水通道和富水带。由断裂带控制的裂隙型和断裂型通道是突涌水的主要通道。破碎带内富含的断层泥和软弱物质在高压水流的冲刷下, 极易转化为涌泥, 对施工和运营安全构成极端威胁(刘世杰等, 2022)。藏东南某高原铁路穿越了嘉黎断裂带, 勘察及施工揭示断层破碎带及影响带内以混杂岩、碎裂岩、断层泥砾、蚀变岩等为主。施工到断裂附近



a—谷歌卫星影像图；b—无人机照片

图 10　嘉黎断裂在朗秋冰川附近的构造地貌特征

Fig. 10　Tectonic geomorphic features of the Jiali Fault near the Langqiu Glacier

(a) Google Earth satellite image; (b) UAV photograph

时，采用了地震波反射法及瞬变电磁法超前地质预报技术进行探测，均提示线状或股状出水风险，初始水量约 23 m^3/h，无压自流状态。设计通过采用超前支护+开挖工法+支护措施保证了现场安全。

3.6　局部地温异常问题

深大活动断裂带通常是地壳深部热能向上运移的良好通道。嘉黎断裂作为区域性主干断裂，其破碎带及影响范围内的岩体导热性能与完整围岩存在差异，可能形成局部的热流上涌区（马鑫等，2021）。因此，在隧道穿越或邻近该断裂带的局部段落，存在地温梯度异常偏高的现象，可能引发高地温热害。这类热害主要表现为围岩温度显著高于区域背景值，不仅会恶化洞内作业环境，还可能对支护结构的长期耐久性、施工机械的正常运行构成挑战，并增加工程通风与降温的成本（张宁等，2022）。

3.7　洞口次生灾害效应

类似嘉黎断裂的活动断裂带通过长期的构造作用，强烈改造了其周边区域的地形地貌与岩土体结构，显著加剧了隧道洞口的次生灾害风险（刘世杰等，2022）。这种效应主要体现在 2 个方面：①断裂活动及其伴生的风化卸荷作用，导致洞口边坡的岩土体结构发生劣化，完整性降低，强度衰减，从而诱发边坡失稳，形成滑坡和危岩体；②断裂带控制沟谷发育，为泥石流提供了物源区和流通通道，同时高海拔区断裂活动影响下的冰川冻融作用也加剧了冰岩崩的发生。这些灾害不仅直接威胁洞口结构和施工安全，也严重影响了进场道路和辅助设施的长期稳定，是隧道工程选址、设计和运营期必须重点应对的关键风险（万佳威等，2021）。

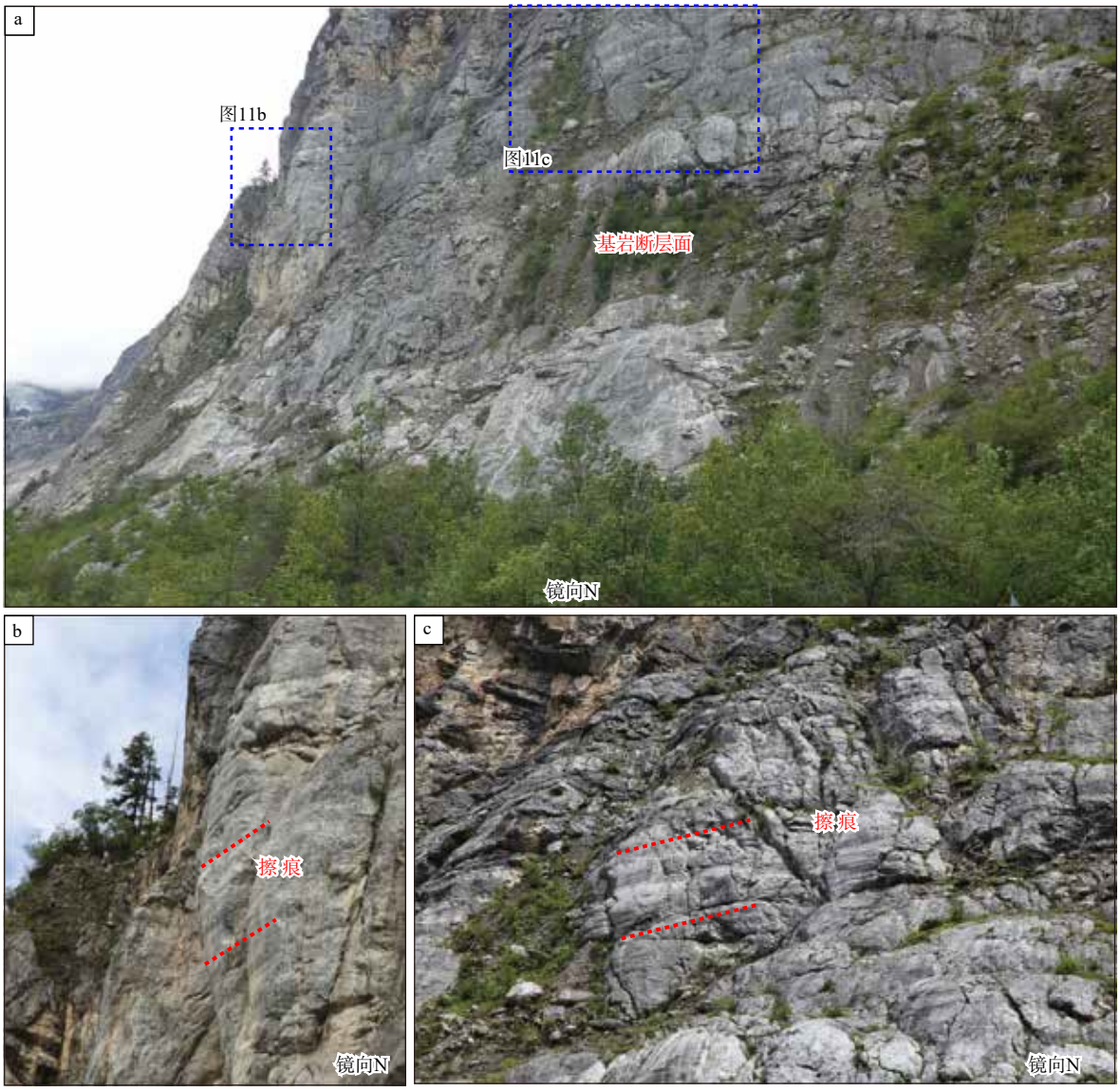
4　讨论

4.1　嘉黎断裂的分段活动性

嘉黎断裂带长期被认为是青藏高原东南缘一条重要边界断裂，在调节高原内部块体运动、协调区域变形上扮演了重要作用（Armijo et al., 1989）。但关于其第四纪晚期，尤其全新世的构造活动一直以来争议颇多。

已有的调查发现，在嘉黎断裂带西段（那曲–嘉黎段），断层地貌特征相对明显，可见断层崖、水系位错和断头沟等地貌标志，并在嘉黎县城以西呈扫帚状归并到嘉黎主断裂上。早期，基于遥感解译和冰碛物的年龄估计，Armijo et al.（1989）认为该段的滑动速率可达 10～20 mm/a。但后来任金卫等（2000）根据该区的第四纪晚期阶地位移和定年结果，估算嘉黎断裂西段晚更新世以来的平均滑动速率仅为 3～4 mm/a，Li et al.（2025）最新的研究结果 3.8±0.9 mm/a 与上述结果基本一致。这些地质速率表明嘉黎断裂带西段的滑动速率整体上介于 3～5 mm/a，与早前估计的高滑动速率（10～20 mm/a; Armijo et al., 1989）差异较大。近年来的 GPS 观测结果也显示，嘉黎断裂带西段的右行滑动速率为 4～6 mm/a（唐方头等，2010）或 3.2～5.8 mm/a（宋键等，2013），进一步证明该段的滑动速率属于中等偏低水平。最近的古地震研究结果显示，沿嘉黎断裂带西段主断裂，全新世期间至少发生过 3 次古地震事件，分别在 8985～8785 cal BP，8255～3625 cal BP 和 3500～495 cal BP（Li et al., 2025），表明嘉黎断裂带西段应该是一条全新世的发震断裂。

沿断裂中段（通麦–波密段），断裂主要沿易贡藏布的河谷展布，主要表现为垭口地貌，但有学者



a—基岩断层面；b—基岩断层面上近水平擦痕；c—近水平擦痕

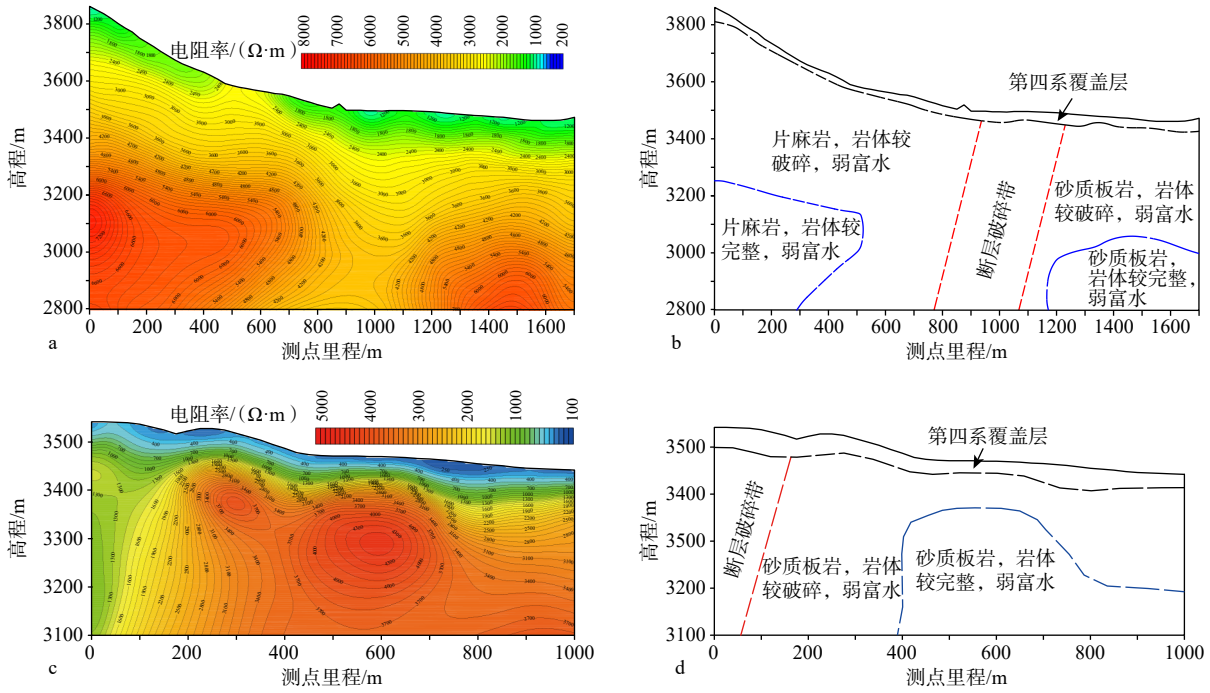
图 11 朗秋冰川附近基岩断层面与水平擦痕

Fig. 11 Fault plane and slickensides developed in bedrock near Langqiu Glacier

(a) Fault plane in bedrock; (b) Horizontal slickensides on the fault plane; (c) Horizontal slickensides

在该段不同位置曾发现了疑似全新世活动的断层露头，而且通过探槽揭露认为，该段可能发生过 2 期古地震事件，年龄依次约 2730 cal BP 和 2160～2680 cal BP（Wang et al., 2020），从而认为嘉黎断裂带通麦–波密段也为全新世发震断裂。

目前，争议最大是嘉黎断裂带南东段的空间展布和全新世活动性。在第五代地震区划图上，嘉黎断裂带东段被分成 2 支，其中北支主要沿帕隆藏布西南侧展布，穿过然乌湖南侧后向东南继续延伸，而南支从波密向东南延伸至下察隅一带（徐锡伟等，2016）。综合前述的遥感解译、地表调查、大地电磁剖面和钻探揭露等资料，可基本明确嘉黎断裂带南支相对准确的空间展布特征。虽然发现了疑似第四纪晚期或全新世活动的构造地貌现象，但可靠性还需进一步验证。而钟宁等（2021）根据断裂沿线湖相沉积物中推测为地震成因的软沉积物变形及其空间分布和发生频率认为，该区可能存在至少 2 次古地震事件，分别发生在 16.13～15.66 ka 和 9561～8630 ka，并推测 2 次地震事件的震级为 7 级。在下察隅镇，内部报告也曾记录贡日嘎布曲支流 T2 阶地上的石垅疑似被右行位错 9 m，根据约 20～30 ka 的阶地时代推测其右行走滑速率约 3～4 mm/a



a—5 号大地电磁剖面反演结果；b—5 号剖面地质解译图；c—6 号大地电磁剖面反演结果；d—6 号剖面地质解译图

图 12　朗秋冰川附近 5 和 6 号大地电磁剖面揭示的嘉黎断裂特征（剖面位置见图 2）

Fig. 12　Inversion results and geological interpretation of magnetotelluric profiles 5 and 6 across the Jiali Fault near Langqiu Glacier (Locations of the profiles are shown in Fig. 2)

(a) Inversion results of magnetotelluric profile 5; (b) Geological interpretation of profile 5; (c) Inversion results of magnetotelluric profile 6; (b) Geological interpretation of profile 6

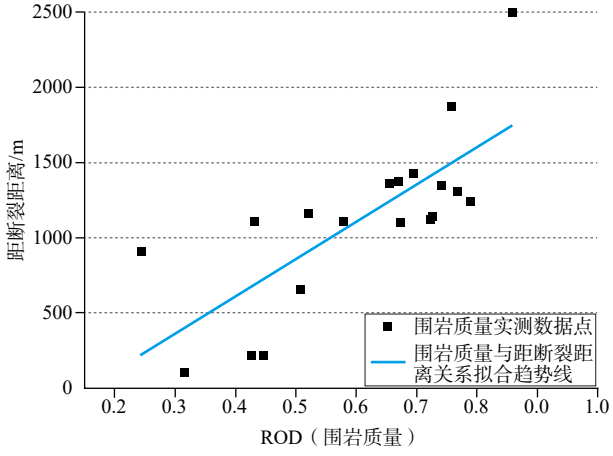


图 13　钻孔岩石质量指标 RQD（Rock Quality Designation）值与嘉黎断裂距离相关性图（中铁第一勘察设计院集团有限公司，2020）

Fig. 13　Correlation between borehole RQD values and the distance from the Jiali Fault (China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 2020)

（中铁第一勘察设计院集团有限公司，2020）。最近，田镇等（2020）根据地壳形变观测结果估算嘉黎断裂通麦段存在地震矩亏损 1.5×10^{20} N·m，并据此推断该区未来具备发生 M_W 7.3 以上地震的可能。

综上，尽管缺乏嘉黎断裂古乡–贡日嘎布段全新世活动的直接证据，但综合已有资料和此次的调查研究结果认为，该段断裂同样具有全新世活动性的可能。

4.2　活动断裂与工程风险

在不排除嘉黎断裂带工程期内存在断裂活动潜在威胁的情况下，需要考虑保守工况下的活动断裂工程风险问题。近年来，青藏高原及其周缘强震频发，这些地震的同震地表破裂特征为分析地震破裂样式、传播机制及工程设防提供了良好的范例。2021 年 5 月 22 日，青海省果洛藏族自治州玛多县发生了 M_S 7.4 地震，形成了 151 km 长的同震地表破裂带，最大左行位错约 2.9 m（潘家伟等，2021）。2022 年 1 月 8 日，青海省海北州门源县发生了 M_S 6.9 地震，形成了总长约 27 km、最大水平位错约 3.7 m 的同震地表破裂带（潘家伟等，2022）。门源地震造成了兰新高铁大梁隧道发生了 2.88 m 的水平位移（韩帅，2022；阎渊，2023；程燕等，2024），是活动断裂直接错断线性工程的典型案例，同时也给铁路工程带来了

惨痛的教训,致使铁路长期停运,损失巨大。

已有的现场调查和GNSS观测资料等都倾向于认为嘉黎断裂带第四纪晚期以来的滑动速率相对较低。根据古地震事件复发间隔的平均值约2500a,如果以现今GNSS和InSAR观测结果为3～5 mm/a的速率(Zhang et al., 2021; Yao et al., 2024)累积,未来可能遭遇的最大突发位错量约在5 m以上(右旋走滑)。根据地震震级与位移量关系的经验公式(Wells and Coppersmith, 1994),嘉黎断裂带未来如果发生*M*7地震,产生的同震位移量将在1 m以上;而如果发生*M*7.5强震,同震位移量将超过3 m。因此,如果嘉黎断裂带古乡–贡日嘎布段属于全新世活动断层,穿越其的地下工程则需要考虑可能存在的活断层断错风险,并采取有效的防范措施。

根据全球地震案例统计拟合的经验公式(Wells and Coppersmith, 1994),地表破裂型强震(一般在7级以上)造成的同震位错量一般都在米级以上。因此,如果线性地下工程穿越活动断裂,需要充分考虑米级的同震位错是否可以被接受,工程能否在震后快速修复等因素。具体到嘉黎断裂本身,依据经验公式(Wells and Coppersmith, 1994),在发生地表破裂型强震的情况下,不排除其潜在的最大同震位错可能达到5 m左右,建议考虑工程抗断措施。

5 结论

(1)针对青藏高原东构造结地区高地形起伏、厚植被覆盖和缺乏细粒第四纪沉积等问题,在传统活动断层探测方法难以实施的复杂地质环境下,通过重点开展遥感解译、高精度物探和跨断裂钻探等工作,相对清晰地厘定了嘉黎断裂带南东段关键区段(古乡–贡日嘎布段)的连续展布轨迹(沿古乡南—嘎隆拉—金珠弄巴—朗秋弄巴一线延伸)。这为后续在类似地区开展活动断层探查和研究起到了参考范例。

(2)调查结果表明,嘉黎断裂南东段整体走向北西,以右行走滑运动为主,主体倾向南西,倾角60°～80°,局部伴随逆冲成分,断层带宽度200～300 m。综合已有资料和新的调查结果推测,不排除嘉黎断裂南东段具有全新世活动的可能性。

(3)系统分析了嘉黎断裂存在全新世活动性情况下可能引发的一系列深部工程效应及相关不良地质问题,包括围岩完整性劣化、潜在的同震错断(估算最大位错量达5～6 m)、局部高地应力与岩爆、地震动放大、高压突涌水涌泥、局部地温异常以及洞口次生灾害。这7类效应构成了一个复杂且内在关联的地质风险链生体系,对穿越断裂带的深长隧道工程构成不容忽视的挑战。据此建议,在工程规划选址阶段,需要穿越具有潜在活动风险的活动断裂的地下工程,如果无法绕避或绕避成本过高,则必须在全寿命周期内采取与上述效应相对应的系统性强化设计与风险管控措施。

作者贡献声明:朱姝、王彦兵负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作;黄勇、刘富财、闫玉平参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图;张全、李晋、李仁杰、李本良参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: ZHU Shu and WANG Yanbing conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; HUANG Yong, LIU Fucai and YAN Yuping participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; ZHANG Quan, LI Jin, LI Renjie and LI Benliang were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明:本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

ARMIJO R, TAPPONNIER P, MERCIER J L, et al., 1986. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 91(B14): 13803-13872.

ARMIJO R, TAPPONNIER P, HAN T L, 1989. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B3): 2787-2838.

BAI L, LI G H, SONG B W, 2017. The source parameters of the *M*6.9 Mainling, Tibet earthquake and its tectonic implications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(12): 4956-4963. (in Chinese with English abstract)

CHEN P G, HE X H, XU S F, et al., 2023. Earthquake relocation and regional stress field around the eastern Himalayan syntaxis[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 54(6): 667-683. (in Chinese with English

abstract)

CHENG Y, JIANG Y N, HOU Z J, et al., 2024. InSAR deformation observation and regional severe earthquake hazard analysis of the 2016 and 2022 strong earthquake activities in Menyuan, Qinghai[J]. Journal of Geomechanics, 30(6): 965-977. (in Chinese with English abstract)

China Railway First Survey & Design Institute Group Co. , 2020. Evaluation report on the impact of the eastern Himalayan syntaxis and the Jiali fault on the construction and operation of the Yigong tunnel project[R]. (in Chinese)

DING L, ZHONG D H, 2013. The tectonic evolution of the eastern Himalaya syntaxis since the collision of the Indian and Eurasian plates[J]. Chinese Journal of Geology, 48(2): 317-333. (in Chinese with English abstract)

DING L, ZHONG D H, YIN A, et al., 2001. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis (Namche Barwa)[J]. Earth and Planetary Science Letters, 192(3): 423-438.

HAN S, WU Z H, GAO Y, et al., 2022. Surface rupture investigation of the 2022 Menyuan M_S 6.9 Earthquake, Qinghai, China: Implications for the fault behavior of the Lenglongling fault and regional intense earthquake risk[J]. Journal of Geomechanics, 28(2): 155-168. (in Chinese with English abstract)

LEE H Y, CHUNG S L, WANG J R, et al., 2003. Miocene Jiali faulting and its implications for Tibetan tectonic evolution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 205(3-4): 185-194.

LI H Q, LI T F, HE Z Y, et al. , 2022. Early Cretaceous hydrous mafic magmatism in the eastern Lhasa terrane, Tibet: Petrogenesis and constraints on the early history of the eastern Jiali (Parlung) fault[J]. Lithos, 418-419: 106686.

LI K J, WANG H, CHEN L C, et al., 2025. Late Quaternary slip rates and paleoseismicity on the western segment of the Jiali fault zone and implications for tectonic deformation and slip partitioning in the central Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 44(7): e2025TC009002.

LIANG J W, HAN H X, 2013. Amplification of ground motion around fault fracture zone (I) basic laws[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 33(5): 9-19. (in Chinese with English abstract)

LIN T H, LO C H, CHUNG S L, et al., 2009. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of the Jiali and Gaoligong shear zones: Implications for crustal deformation around the eastern Himalayan Syntaxis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 34(5): 674-685.

LIU S J, LAN H X, ZHANG N, 2022. Geomechanical analysis of major engineering region in middle segment of Jiali fault[J]. Journal of Engineering Geology, 30(6): 1947-1961. (in Chinese with English abstract)

LIU S J, LAN H X, STROM A, et al., 2024. Spatial segmentation of Jiali Fault's Holocene activity in the southeastern Tibetan Plateau[J]. npj Natural Hazards, 1(1): 42.

LU S M, WU Z H, HAN S, et al., 2025. Quaternary activity characteristics of the Yiong - Zayu segment of the Jiali fault zone[J]. Earth Science, 50(8): 3052-3069. (in Chinese with English abstract)

MA X, FU L, LI T F, et al., 2021. Analysis of geothermal origin in eastern Himalayan Syntaxis[J]. Geoscience, 35(1): 209-219. (in Chinese with English abstract)

PAN G T, HAO G J, FENG Y F, et al., 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 36(1): 1-28. (in Chinese with English abstract)

PAN J W, BAI M K, LI C, et al., 2021. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2021-05-22 Maduo (Qinghai) M_S7.4 earthquake[J]. Acta Geologica Sinica, 95(6): 1655-1670. (in Chinese with English abstract)

PAN J W, LI H B, CHEVALIER M L, et al., 2022. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2022 M_S6.9 Menyuan earthquake, Qinghai Province, China[J]. Acta Geologica Sinica, 96(1): 215-231. (in Chinese with English abstract)

REN J W, SHEN J, CAO Z Q, et al., 2000. Quaternary faulting of Jiali fault, southeast Tibetan Plateau[J]. Seismology and Geology, 22(4): 344-350. (in Chinese with English abstract)

ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, VAN DER HILST R D, 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau[J]. Science, 321(5892): 1054-1058.

SHEN J, REN J W, WANG Y P, et al. , 2001. The Quaternary right lateral strike slipping of the Jiali fault zone in south Tibet [A]. Study of the Recent Deformation and Dynamics of the Lithosphere in Qinghai-Xizang Plateau[C]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese with English abstract)

SHEN J, WANG Y P, REN J W, et al., 2003. Quaternary dextral shearing and crustal movement in Southeast Tibetan Plateau[J]. Xinjiang Geology, 21(1): 120-125. (in Chinese with English abstract)

SONG J, TANG F T, DENG Z H, et al., 2013. Late Quaternary movement characteristic of Jiali fault in Tibetan Plateau[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 49(6): 973-980. (in Chinese with English abstract)

TANG F T, SONG J, CAO Z Q, et al., 2010. The movement characters of main faults around eastern Himalayan Syntaxis revealed by the latest GPS data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(9): 2119-2128. (in Chinese with English abstract)

TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. Geology, 10(12): 611-616.

TAPPONNIER P, PELTZER G, ARMIJO R, 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. Geological Society, London, Special Publications, 19(1): 113-157.

TAPPONNIER P, ZHIQIN X, ROGER F, et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 294(5547): 1671-1677.

TIAN Z, YANG Z Q, WANG S D, 2020. Moment deficits on the major faults and earthquake hazard assessment in the eastern Himalayan syntaxis[J]. Seismology and Geology, 42(1): 33-49. (in Chinese with English abstract)

WAN J W, CHU H L, LI B, et al., 2021. Characteristics, types, main causes and development of high-position geohazard chains along the Jiali fault zone, Tibet, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 32(3): 51-60. (in Chinese with English abstract)

WANG H, LI K J, CHEN L C, et al., 2020. Evidence for Holocene activity on the Jiali fault, an active block boundary in the southeastern Tibetan Plateau[J]. Seismological Research Letters, 91(3): 1776-1780.

WANG M, SHEN Z K, 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(2): e2019JB018774.

WELLS D L, COPPERSMITH K J, 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4): 974-1002.

WU Z H, 2024. The earthquake-controlling process of continental collision-extrusion active tectonic system around the Qinghai-Tibet Plateau: A case study of strong earthquakes since 1990[J]. Journal of Geomechanics, 30(2): 189-205. (in Chinese with English abstract)

XU X W, HAN Z J, YANG X P, et al. , 2016. Seismotectonic Map in China and its Adjacent Regions[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese).

XU Z Q, LI H B, TANG Z M, et al., 2011. The transformation of the terrain structures of the Tibet Plateau through large-scale strike-slip faults[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(11): 3157-3170. (in Chinese with English abstract)

XUE Y G, QU J K, PENG J B, et al., 2026. Main Unfavorable Geological Conditions and Gigantic Engineering Geological Problems of the Lower Reaches of the Yarlung Zangbo River[J]. Geoscience, 40(01): 1-30. (in Chinese with English abstract)

YAN Y, 2023. The tunnel damage effects and implications of the coseismic rupture of the Menyuan M_S 6.9 Earthquake in Qinghai, China[J]. Journal of Geomechanics, 29(6): 869-878. (in Chinese with English abstract)

YAO J M, YAO X, WANG Y B, et al., 2024. Current active fault distribution and slip rate along the middle section of the Jiali-Chayu fault from Sentinel-1 InSAR observations (2017-2022)[J]. Earth, Planets and Space, 76(1): 21.

ZHANG B, CAI F L, CHEN S Y, et al., 2020. Sinistral strike-slip shearing along the Jiali shear zone around the eastern Himalaya syntaxis region: Evidences for Oligocene eastward limited translation of Tibet[J]. Journal of Structural Geology, 139: 104136.

ZHANG L, LIANG S M, YANG X P, et al., 2021. Geometric and kinematic evolution of the Jiali fault, eastern Himalayan Syntaxis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 212: 104722.

ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG G M, et al., 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(24): 13-24.

ZHANG Y S, GUO C B, LI X Q, et al., 2021. Key problems on hydro-engineering-environmental geology along the Sichuan-Tibet Railway corridor: Current status and development direction[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 48(5): 1-12. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Y F, GONG W B, JIANG W, et al., 2021. Multi-stage characteristics and tectonic significance of the Jiali fault in Guxiang-Tongmai section, South Tibet[J]. Geoscience, 35(1): 220-233. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Z D, LEI H S, BAI Z M, et al., 2025. Crustal structure and chemical composition of the Yingpan-Jinding-Beiya-Panlong transect in southeastern Tibetan Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(06): 256-275. (in Chinese with English abstract)

ZHONG N, GUO C B, HUANG X L, et al., 2021. Late Quaternary activity and paleoseismic records of the middle south section of the Jiali- Chayu fault[J]. Acta Geologica Sinica, 95(12): 3642-3659. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

张宁, 张文哲, 李郎平, 等. 青藏高原地温时空分布及某重大线性工程深部高地温风险分析[J]. 工程地质学报, 2022, 30(03): 708-719.

白玲, 李国辉, 宋博文, 2017. 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, 60(12): 4956-4963.

陈平光, 何骁慧, 徐树峰, 等, 2023. 喜马拉雅东构造结地震精定位及其区域应力场研究[J]. 地球与行星物理论评(中英文), 54(6): 667-683.

程燕, 蒋亚楠, 侯中健, 等, 2024. 2016年和2022年青海门源强震活动的InSAR形变观测与区域强震危险性分析[J]. 地质力学学报, 30(6): 965-977,

丁林, 钟大赉, 2013. 印度与欧亚板块碰撞以来东喜马拉雅构造结的演化[J]. 地质科学, 48(2): 317-333.

韩帅, 吴中海, 高扬, 等, 2022. 2022年1月8日青海门源M_S6.9地震地表破裂考察的初步结果及对冷龙岭断裂活动行为和区域强震危险性的启示[J]. 地质力学学报, 28(2): 155-168.

梁建文, 韩红霞, 2013. 断层破碎带对地震动的放大作用: (Ⅰ)基本规律[J]. 地震工程与工程振动, 33(5): 9-19,

刘世杰, 兰恒星, 张宁, 2022. 嘉黎断裂中段重大工程区地质力学分析[J]. 工程地质学报, 30(6): 1947-1961,

陆诗铭, 吴中海, 韩帅, 等, 2025. 嘉黎断裂带易贡-察隅段第四纪活动性特征[J]. 地球科学, 50(8): 3052-3069.

马鑫, 付雷, 李铁锋, 等, 2021. 喜马拉雅东构造结地区地热成因分析[J]. 现代地质, 35(1): 209-219,

潘桂棠, 郝国杰, 冯艳芳, 等, 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1-28.

潘家伟, 白明坤, 李超, 等, 2021. 2021年5月22日青海玛多M_S7.4地震地表破裂带及发震构造[J]. 地质学报, 95(6): 1655-1670.

潘家伟, 李海兵, CHEVALIER M L, 等, 2022. 2022年青海门源M_S6.9地震地表破裂带及发震构造研究[J]. 地质学报, 96(1): 215-231.

任金卫, 沈军, 曹忠权, 等, 2000. 西藏东南部嘉黎断裂新知[J]. 地震地质, 22(4): 344-350.

沈军, 任金卫, 汪一鹏, 等, 2001. 西藏南部嘉黎断裂带第四纪右旋走滑运动研究[A]. 青藏高原岩石圈现今变动与动力学研究论文集[C]. 北京: 地震出版社.

沈军, 汪一鹏, 任金卫, 等, 2003. 青藏高原东南部第四纪右旋剪切运动[J]. 新疆地质, 21(1): 120-125.

宋键, 唐方头, 邓志辉, 等, 2013. 青藏高原嘉黎断裂晚第四纪运动特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 49(6): 973-980.

唐方头, 宋键, 曹忠权, 等, 2010. 最新GPS数据揭示的东构造结周边主要断裂带的运动特征[J]. 地球物理学报, 53(9): 2119-2128.

田镇, 杨志强, 王师迪, 2020. 喜马拉雅东构造结主要断裂的地震矩亏损与危险性评估[J]. 地震地质, 42(1): 33-49.

万佳威，褚宏亮，李滨，等，2021. 西藏嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害发育特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报，32(3)：51-60,

吴中海，2024. 青藏高原陆陆碰撞-挤出活动构造体系控震作用：以1990年以来强震活动为例[J]. 地质力学学报，30(2)：189-205.

徐锡伟，韩竹军，杨晓平，等. 2016. 中国及邻区地震构造图[M]. 北京：地震出版社.

许志琴，李海兵，唐哲民，等，2011. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造[J]. 岩石学报，27(11)：3157-3170.

薛翊国，渠敬凯，彭建兵，等，2026. 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(01)：1-30.

阎渊，2023. 青海门源 M_S 6.9 地震同震破裂的隧道破坏效应与启示[J]. 地质力学学报，29(6)：869-878.

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[J]. 中国科学(D辑)，33(S1)：12-20.

张永双，郭长宝，李向全，等，2021. 川藏铁路廊道关键水工环地质问题：现状与发展方向[J]. 水文地质工程地质，48(5)：1-12,

赵远方，公王斌，江万，等，2021. 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，35(1)：220-233.

赵志丹，雷杭山，白志明，等. 青藏高原东南缘营盘-金顶-北衙-盘龙剖面地壳结构与化学成分[J]. 地学前缘，2025, 32(06)：256-275.

中铁第一勘察设计院集团有限公司，2020. 喜马拉雅东构造结与嘉黎断裂带对易贡隧道工程建设运营的影响评价报告[R].

钟宁，郭长宝，黄小龙，等，2021. 嘉黎-察隅断裂带中南段晚第四纪活动性及其古地震记录[J]. 地质学报，95(12)：3642-3659.