引用格式：强新刚，郭长宝，孙东霞，等，2025. 青藏高原错那−沃卡断裂带活动性与地质安全风险防控对策研究[J]. 地质力学学报，31（2）：301−312. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024093

Citation: QIANG X G，GUO C B，SUN D X，et al.，2025. Study on the activity of the Cuona-Woka Fault Zone, Qinghai-Tibet Plateau, and geological safety risks and prevention methods[J]. Journal of Geomechanics，31（2）：301−312. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024093

青藏高原错那−沃卡断裂带活动性与地质安全风险防控对策研究

强新刚[1]，郭长宝[2,3]，孙东霞[2,3]，韩建恩[2]，张广泽[1]，张 敏[1]，邱振东[2]，何 平[1]
QIANG Xingang[1]，GUO Changbao[2,3]，SUN Dongxia[2,3]，HAN Jian'en[2]，ZHANG Guangze[1]，ZHANG Min[1]，QIU Zhendong[2]，HE Ping[1]

1. 中铁二院工程集团有限责任公司，四川 成都 610031；
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

1. *China Railway Eryuan Engineering Group Co.*, *Ltd.*, *Chengdu* 610031, *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*

Study on the activity of the Cuona-Woka Fault Zone, Qinghai-Tibet Plateau, and geological safety risks and prevention methods

Abstract: ［**Objective**］The Plateau Railway, constructed along the Yarlung Zangbo suture zone on the Qinghai-Tibet Plateau, crosses the active Cuona-Woka Fault Zone. Coseismic surface rupture caused by the active fault leads to engineering breaks, tunnel deformation, and geological disasters; it poses a significant geological safety risk during railway operation. ［**Methods**］Based on remote sensing, field investigation, and published research, this paper analyzes the development characteristics, activity, and impact of the Cuona-Woka Fault Zone on the Plateau Railway that it intersects. ［**Results**］The study shows that the Cuona-Woka Fault Zone consists of five northeast-trending branch faults. The western boundary faults of the Woka Basin ($F_{2\text{-}1}$, $F_{2\text{-}2}$) show Late Pleistocene activity, the eastern boundary faults of the Woka Basin ($F_{2\text{-}4}$, $F_{2\text{-}5}$) have Holocene activity, and the $F_{2\text{-}3}$ fault within the basin is the seismogenic fault of the 1915 M_S 7.0 Sangri earthquake. Based on the deformation signs caused by fault activity and the types of active faults, it is estimated that future coseismic surface ruptures of the branch faults of the Cuona-Woka Fault Zone may cause deformation and damage to the Zangga tunnel and the Sangzhuling tunnel, which cross the fault zone, with an impact width of approximately 16～30 m. ［**Conclusion**］Therefore, it is recommended to strengthen research on geological safety risk prevention measures for strong seismic deformation and engineering breaks in the sections of the Plateau Railway crossing the active fault zone. ［**Significance**］The results of the study provide guidance for safe operation and disaster prevention and mitigation of the Plateau Railway, as well as a reference for the impact assessment of active fault engineering on other railway lines.

Keywords: Plateau Railway; Cuona-Woka; active faults; geological safety; engineering breaks; risk prevention and control

摘 要：沿青藏高原雅鲁藏布江缝合带修建的高原铁路穿越错那−沃卡活动断裂带，而断裂活动引起同震地表错动造成的工程错断、隧道变形、地质灾害等危害，是铁路运营阶段面临的重要地质安全风险。基于遥感解译、野外调查并结合已有研究成果，分析了穿越高原铁路的错那−沃卡断裂带的发育特征、活动

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD20221816）；国家自然科学基金项目（42372339）；中国地质科学院基本科研业务费专项（JKYZD202410）

This research is financially supported by the China Geological Survey Project (Grant No. DD20221816), the National Natural Science Foundation of China（Grant No. 42372339）, and the Chinese Academy of Geological Sciences Basal Research Fund (Grant No. JKYZD202410).

第一作者：强新刚（1980—），男，高级工程师，主要从事铁路工程地质方面研究。Email：24520166@qq.com

通信作者：郭长宝（1980—），男，博士，研究员，主要从事工程地质与地质灾害调查研究。Email：guochangbao@163.com

收稿日期：2024−09−04；**修回日期：**2025−01−23；**录用日期：**2025−02−10；**网络出版日期：**2025−02−27；**责任编辑：**范二平

性及其对铁路工程的影响。研究结果表明，错那−沃卡断裂带由5条北东走向的分支断裂组成，其中沃卡盆地西边界断裂（$F_{2\text{-}1}$、$F_{2\text{-}2}$）为晚更新世活动断裂，沃卡盆地东边界断裂（$F_{2\text{-}4}$、$F_{2\text{-}5}$）为全新世活动断裂，盆地内部断裂$F_{2\text{-}3}$为1915年桑日M_S 7.0地震的发震断裂。根据断裂活动造成的变形迹象考察以及活动断裂类型来估算断裂影响范围，未来错那−沃卡断裂带的分支断裂发生同震地表错动时，可能对穿越断裂带的藏嘎隧道和桑珠岭隧道造成变形破坏，断裂活动影响范围宽度为16～30 m。因此，建议加强对高原铁路穿越活动断裂区段的强震变形、工程错断等地质安全风险防控对策研究。文章研究结果为指导高原铁路安全运营和防灾减灾，以及为其他铁路线的活动断裂工程影响评价提供参考。

关键词：高原铁路；错那−沃卡；活动断裂；地质安全；工程错断；风险防控

中图分类号：P546; U216　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−6616(2025)02−0301−12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2024093

0 引言

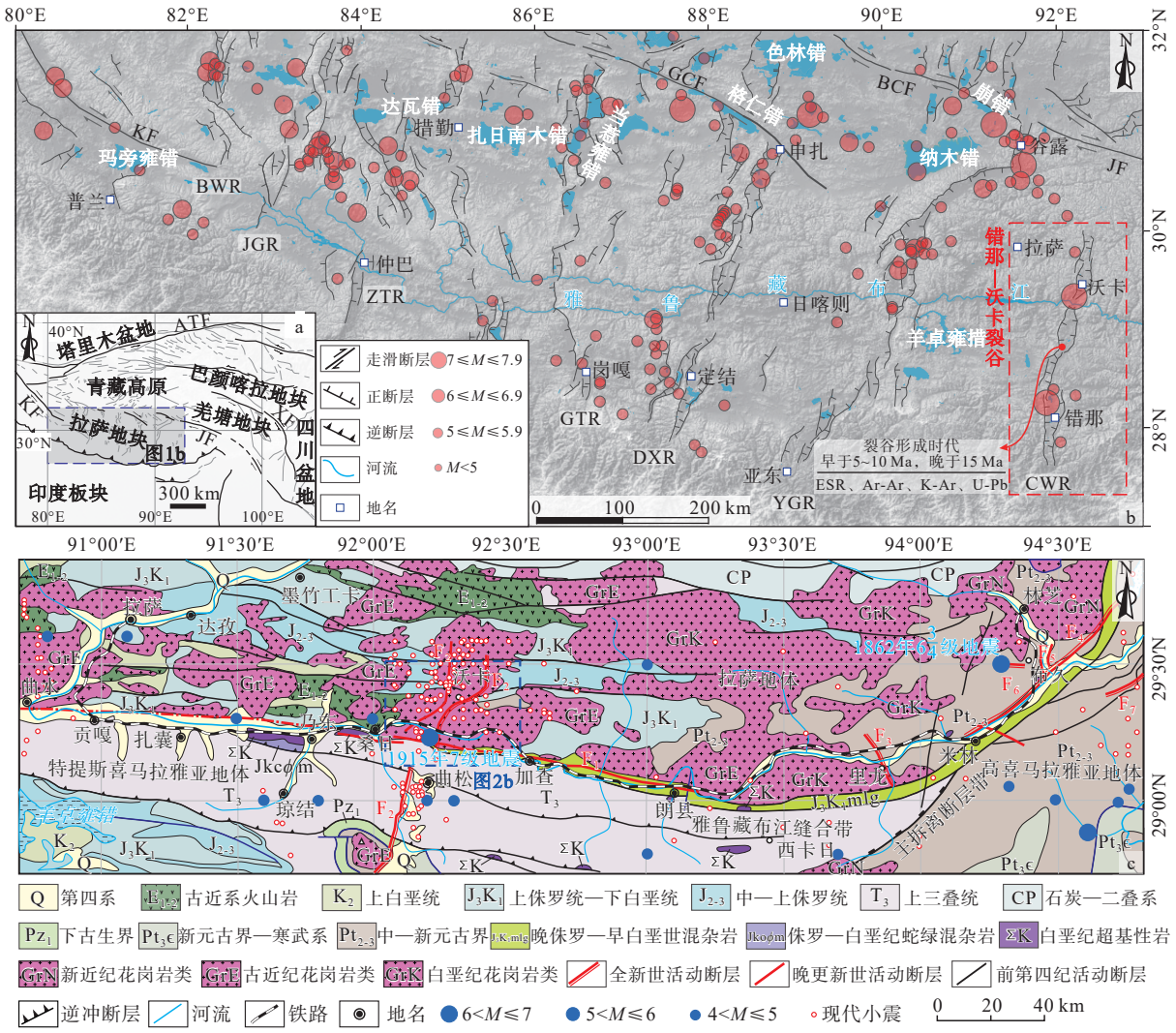
受印度洋板块向欧亚板块持续碰撞挤压的影响，青藏高原东部发生强烈的构造挤压变形和地形陡变，导致该区发育一系列大型断裂带，如雅鲁藏布江断裂带、错那−沃卡断裂带、里龙断裂带等，这些断裂带活动特征复杂，第四纪活动性明显（Tapponnier et al., 2001; 邓起东等, 2002; Taylor and Yin, 2009; 吴中海, 2024），而且区域内地震活动强度大、频点高（张培震等, 2003; 吴中海等, 2007），对区内建设的铁路工程、水电工程等重大工程的安全运营具有一定威胁。

活动断裂带是高原山区铁路建设运营地质安全的关键影响因素（张永双等, 2022），而地震通常沿活动断裂带密集分布且频繁发生（许志琴等, 2006; 张培震等, 2013），强震导致的地表破裂会造成铁路隧道、桥梁、边坡以及临建设施等发生震动破坏（Dowding and Rozan, 1978; Yu et al., 2016; 郭长宝等, 2017）。由活动断裂长期蠕滑引起的深埋隧道应力异常、碎裂岩带大变形等工程地质问题是铁路建设和运营阶段的关键难题（Dalgıç, 2002; 张永双等, 2019），例如2022年青海门源M_S 6.9地震造成兰新铁路大梁隧道最大位错约为1.78 m，竖向抬升约为0.68 m，部分桥梁结构受损，严重影响了铁路的运营安全（张威等, 2022; Chen et al., 2023）。针对断裂活动对铁路工程造成的严重危害，国内外学者从发震断裂类型、地表破裂带宽度、最小避让宽度、避让经验公式适用性、特殊建筑避让距离等方面，围绕着活动断裂的工程避让距离和强震破裂影响范围等问题开展了大量研究（徐锡伟等, 2002; Heermance et al., 2003; Rockwell and Ben-Zion, 2007; 张永双等, 2010; 魏雷鸣等, 2023），例如徐锡伟等（2016）基于历史地震地表破裂资料，定量分析了同震地表破裂的局部化特征、同震地表破裂与建筑物的破坏关系，探究了活动断裂避让对象、活动断裂定位鉴定以及最小避让距离确定等问题。关于铁路工程建设和运营阶段所面临的活动断裂引起的工程断错、强震等地质安全风险，仍是目前关注的热点和难点。

位于青藏高原藏东南地区的高原铁路全线长约435.48 km，已于2021年6月进入运营阶段（宋国壮和张玉芳, 2021）。但在青藏高原构造运动活跃、地震频发等地质背景下，高原铁路运营期间穿越活动断裂带的关键区段仍面临工程错断、隧道变形、地质灾害等地质安全风险问题。因此，文章基于区域地质资料分析、活动断裂遥感解译和现场调查等方法，厘定了高原铁路穿越错那−沃卡断裂带段的断裂空间展布特征和第四纪活动性，预测了未来强震作用下错那−沃卡断裂带对铁路的影响范围，并提出了铁路应对活动断裂风险的防控对策。研究结果可用于指导高原铁路的安全运营和防灾减灾，为其他铁路线的活动断裂工程影响评价提供参考。

1 区域地质背景

藏南裂谷系是青藏高原中南部地区在受到印度板块俯冲形成的一系列近南北走向的伸展构造（Tapponnier et al., 1981; 卞爽等, 2021），自东向西依次为错那−沃卡裂谷、亚东−谷露裂谷、定结−申扎裂谷、岗嘎−当惹雍错裂谷、聂拉木−措勤裂谷、仲巴−改则裂谷和公珠错−亚热裂谷等（哈广浩等, 2018; 高扬等, 2024; 图1a、1b）。藏南裂谷系最东侧的错那−沃卡裂谷南起于错那县南部，向北经拿日雍错和邛多江，一直延伸至沃卡北部，形成时代早于5 Ma、晚于15 Ma（哈广浩等, 2018）。错那−沃卡裂谷主要由错那−拿日雍错地堑、邛多江地堑和沃



ATF—阿尔金断裂；BCF—崩错断裂；BWR—普兰–文布当桑裂谷；CWR—错那–沃卡裂谷；DXR—定结–申扎裂谷；GCF—格仁错断裂；GTR—岗嘎–当惹雍错裂谷；JF—嘉黎断裂；JGR—江曲藏布–改则裂谷；KF—喀喇昆仑断裂；XF—鲜水河断裂；ZTR—仲巴–塔若错裂谷；F_1—雅鲁藏布江断裂带；F_2—错那–沃卡断裂带；F_3—里龙断裂带；F_4—东久–米林断裂带；F_5—尼洋河断裂带；F_6—喇嘛岭断裂带；F_7—派区断裂带

a—青藏高原板块构造示意图；b—藏南主要活动断裂、裂谷、地震分布图（据高扬等，2024 修改）；c—研究区域地质概况及交通位置图

图 1　藏南裂谷系构造特征与研究区域地质概况

Fig. 1　Structural characteristics of the southern Xizang(Tibet) rift system and geological overview of the study area

(a) Schematic plate tectonic diagram of the Qinghai-Tibet Plateau; (b) Distribution map of major active faults, rift valleys, and earthquakes in southern Xizang(Tibet) (modified after Gao et al., 2024); (c) Geological overview and traffic location map of the study area

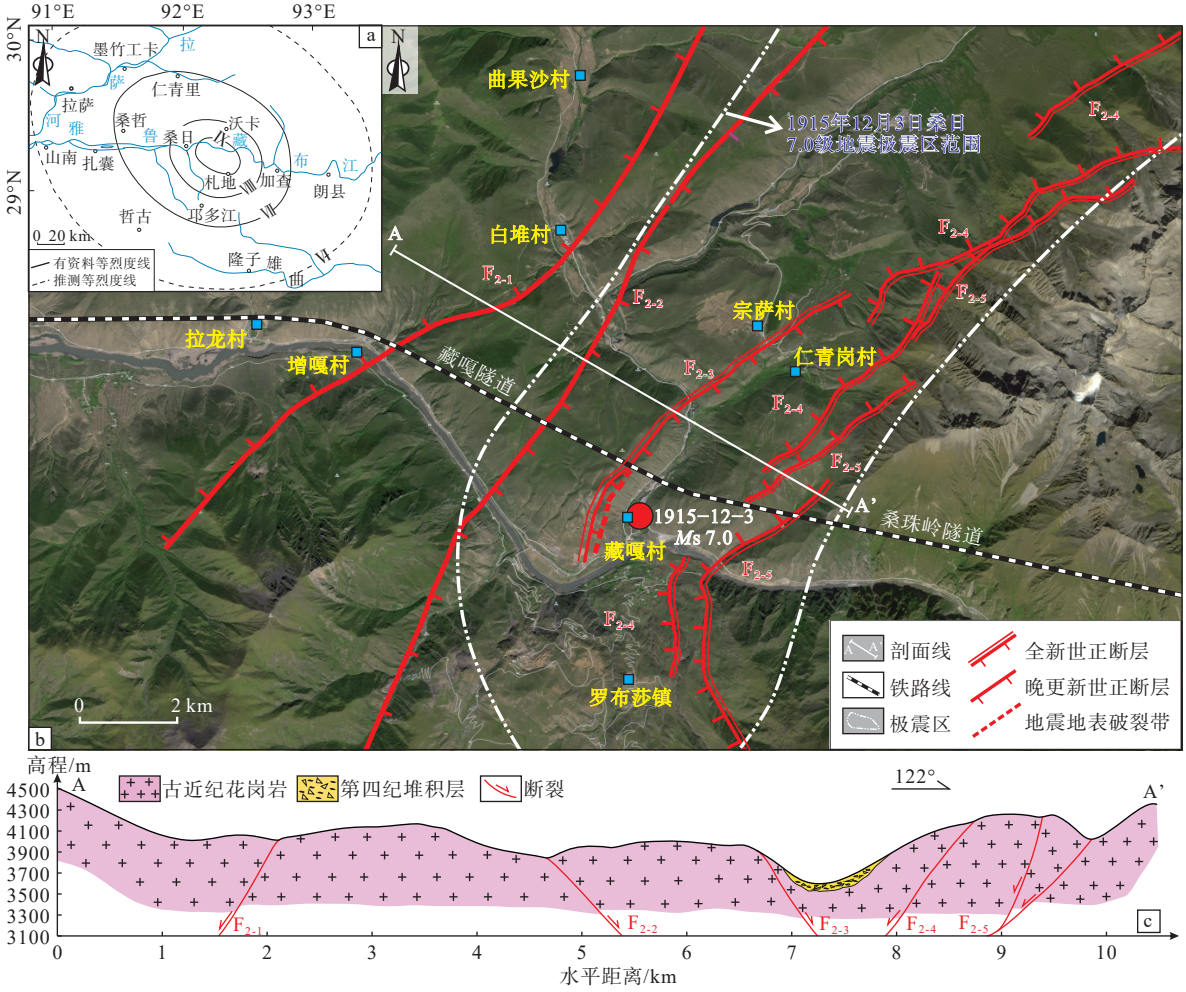
F_1—Yarlung Zangbo Fault Zone; F_2— Cuona-Woka Fault Zone; F_3—Lilong Fault Zone; F_4—Dongjiu-Milin Fault Zone; F_5—Niyang River Fault Zone; F_6—Lamaling Fault Zone; F_7—Paiqu Fault Zone

ATF—Altun Tagh Fault Zone; BCF—Bengcuo Fault Zone; BWR—Pulan-Wenbudangsang Rift; CWR—Cuona-Woka Rift; DXR—Dingjie - Shenzha Rift; GCF—Gyaring Co Fault Zone; GTR—Gangga-Dangreyongcuo Rift; JF—Jiali Fault Zone; JGR—Jiangquzangbo-Gerze Rift; KF—Karakorum Fault Zone; XF—Xianshuihe Fault Zone; ZTR—Zhongba-Taruocuo Rift

卡地堑组成（吴中海等，2007，2008），其中沃卡地堑内发育的错那–沃卡断裂带空间展布特征和第四纪活动特征是文中研究的重点。

高原铁路处于拉萨地体和特提斯喜马拉雅亚地体之间的雅鲁藏布江缝合带内（图 1c），铁路直接穿越了沃卡地堑，且受区域内大型活动断裂带的影响，如雅鲁藏布江断裂带（F_1）、错那–沃卡断裂带（F_2）、里龙断裂带（F_3）、东久–米林断裂带（F_4）、尼洋河断裂带（F_5）、喇嘛岭断裂带（F_6）、派区断裂带（F_7）等（图 1c），这些大型活动断裂带控制着区域地

壳的稳定性(吴中海等, 2008; 哈广浩和吴中海, 2021; 王晟等, 2023)。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015), 铁路沿线地震动峰值加速度均≥0.10 *g*(即抗震设防烈度≥Ⅶ度), 历史上发生 M_S 5.0～5.9 地震 9 次, M_S 6.0～6.9 地震 1 次, 震级≥ M_S 7.0 地震 2 次(吴中海等, 2008), 分别是 1806 年错那县北 M_S 7.5 地震(周荣军等, 1997)和 1915 年桑日 M_S 7.0 地震(张升林和江在雄, 1991; 图 2a)。高原铁路沿线地层从元古界至第四系均有出露, 其中以中生界三叠系及元古界变质岩系分布最广; 新生界主要散布于断陷盆地、河谷及斜坡的中下部; 在雅鲁藏布江宽谷及其主要支流沿岸广泛发育全新世冲积层, 主要为砾石层及砂砾层, 构成河流的多级阶地, 是典型的高原河谷地貌。



a—1915 年西藏桑日地震等烈度线图(据张升林和江在雄, 1991 修改); b—错那–沃卡断裂带空间展布特征(遥感影像和铁路线位置据国家地理信息公共服务平台(天地图)修改); c—错那–沃卡断裂带地质剖面图

图 2 高原铁路穿越错那–沃卡断裂带遥感解译与空间结构特征

Fig. 2 Remote sensing interpretation and spatial structural characteristics of the Plateau Railway crossing the Cuona-Woka Fault Zone

(a) Intensity line diagram of the 1915 Sangri earthquake in Xizang(Tibet) (modified after Zhang and Jiang, 1991); (b) Spatial distribution characteristics of the Cuona-Woka Fault Zone (Remote sensing image and railway location from the National Platform for Common Geo-Spatial Information Services); (c) Geological profile of the Cuona-Woka Fault Zone

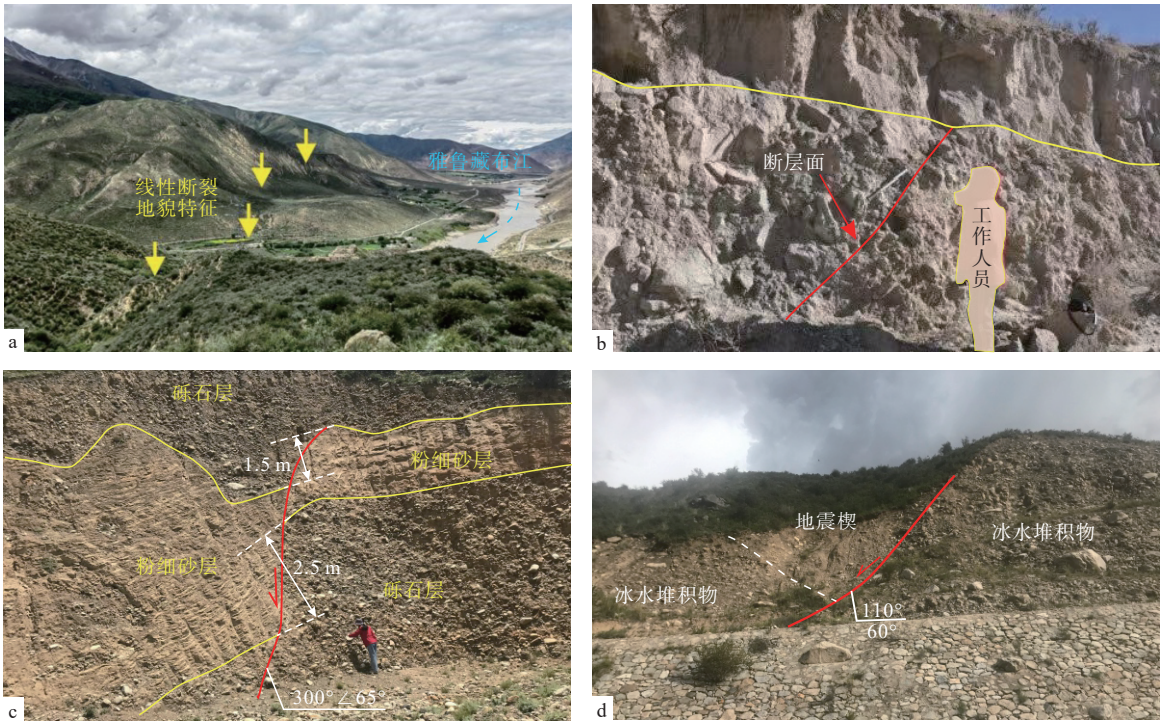
2 错那–沃卡断裂带空间展布特征与第四纪活动特征

沃卡盆地第四纪活动明显, 是典型的地堑式断陷盆地(吴中海等, 2007)。盆地内发育的错那–沃卡断裂带是研究区域内重要的近南北向控震构造带, 由沃卡盆地西边界断裂($F_{2\text{-}1}$、$F_{2\text{-}2}$)、沃卡盆地东边界断裂($F_{2\text{-}4}$、$F_{2\text{-}5}$)以及沃卡盆地盆内断裂($F_{2\text{-}3}$)等一系列北北东向分支断裂组成(图 2b)。文章采用

高分辨率遥感影像对沃卡盆地内的错那–沃卡断裂带空间展布特征进行了解译分析；采用无人机航测以及现场调查的方法，通过对断裂陡坎、地震楔、破裂带等活动断裂地貌特征进行研究分析，确定了断层性质；结合已有地质资料和文献资料，厘定了错那–沃卡断裂的空间展布特征与第四纪活动性。

2.1　沃卡盆地西边界断裂（$F_{2\text{-}1}$、$F_{2\text{-}2}$）

沃卡盆地西边界断裂包括 2 条分支断裂 $F_{2\text{-}1}$、$F_{2\text{-}2}$。$F_{2\text{-}1}$ 为 1 条倾向北西的正断层，南起于增嘎村附近，穿过雅鲁藏布江，经白堆村向北东方向延伸，总体呈北东—北北东向（图 2b）。在增嘎村东部，$F_{2\text{-}1}$ 穿越雅鲁藏布江段，可见明显负地形、线性地貌等特征（图 3a）；雅鲁藏布江南岸可见二级阶地，但未见明显的断层陡坎、破裂面等断错迹象，而北岸多条小型断层发育于洪积物内，断面平直、光滑，错断了洪积砂砾石层，断层产状为 315°∠60°，顶部被厚约 1 m 的风积砂层覆盖，未见断层切割上覆的第四纪坡积物（图 3b）。$F_{2\text{-}1}$ 穿越白堆村东部采石场处，揭露 1 处正断层剖面，断层倾向北西，断层剖面上部与下部倾角变化较大，断层产状变化为 300°∠35°～65°，断层错断细粉砂层最大距离达到 2.5 m，但向上未切穿上覆砾石层（图 3c）。



a—增嘎村东侧 $F_{2\text{-}1}$ 断裂线性地貌特征（镜向北东）；b—增嘎村雅鲁藏布江北岸 $F_{2\text{-}1}$ 断裂剖面（镜向北东）；c—白堆村采石场 $F_{2\text{-}1}$ 断裂剖面（镜向北）；d—增曲水电站引水渠东侧 $F_{2\text{-}2}$ 断裂剖面（镜向南东）

图 3　沃卡盆地西边界断裂（$F_{2\text{-}1}$、$F_{2\text{-}2}$）线性地貌特征与活动表现特征

Fig. 3　Linear geomorphic features and activity characteristics of the western boundary fault ($F_{2\text{-}1}$, $F_{2\text{-}2}$) of the Woka Basin

(a) Linear geomorphic features of $F_{2\text{-}1}$ to the east of Zengga Village (facing NE); (b) Typical profile of $F_{2\text{-}1}$ at the northern bank of the Yarlung Zangbo River in Zengga Village (facing NE); (c) $F_{2\text{-}1}$ fault profile at the Baidui Village quarry (facing N); (d) $F_{2\text{-}2}$ fault profile on the eastern side of the diversion channel of Zengqu hydropower station (facing SE)

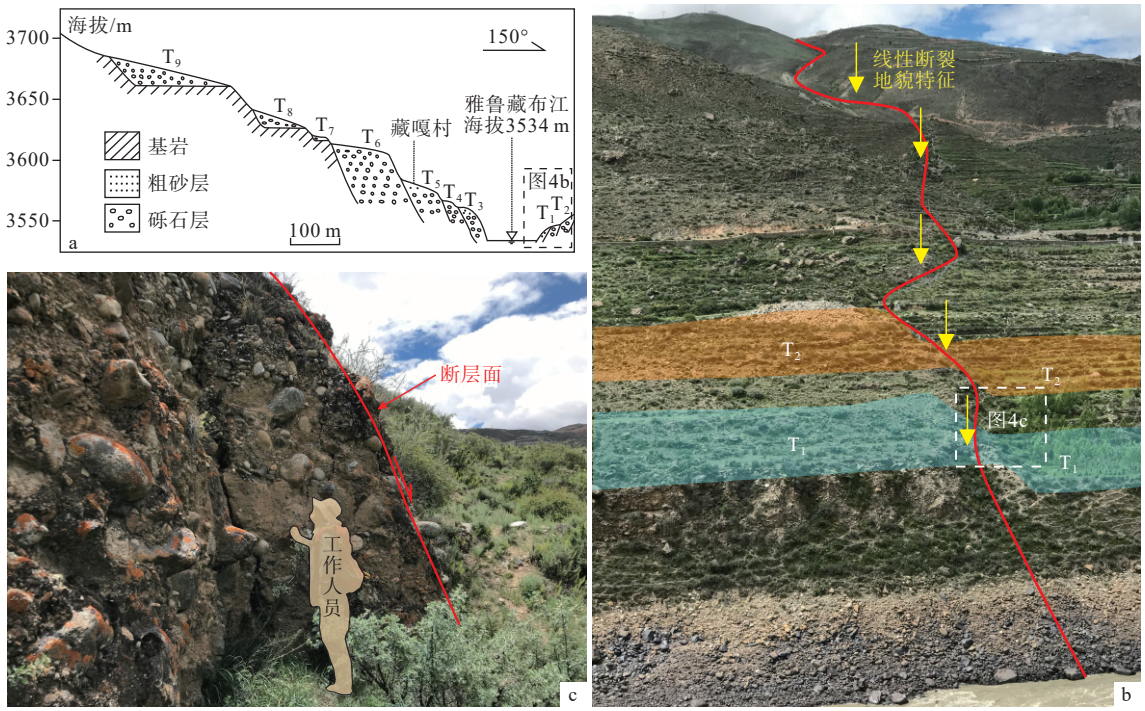
$F_{2\text{-}2}$ 是 1 条倾向南东的正断层，已有调查研究表明该断裂发育基岩陡崖、断层三角面以及沿断层展布的线性沟谷地貌，跨过该断裂的地形相对高差可达 300～600 m，但局部地段的断裂形迹在经历后期的冰川和河流的侵蚀夷平作用后已很难辨认（吴中海等，2007）。$F_{2\text{-}2}$ 穿越增曲水电站引水渠东侧附近，调查发现 1 处正断层剖面，产状为 110°∠60°，该断层剖面堆积物主要为灰白色—灰黑色砂砾石层，砾石大小不一，磨圆分选均较差，为冰水堆积物，断层发育其中并形成地震楔（图 3d）。

综上分析认为，第四纪以来断裂 $F_{2\text{-}1}$ 活动性明显，地貌上呈线性展布，断裂错断雅鲁藏布江北岸

晚更新世洪积物、湖相地层(中国地震局地质研究所, 2013), 但断裂上覆盖的雅鲁藏布江二级阶地和坡积物砾石层未被错断, 综合判定断裂 $F_{2\text{-}1}$ 为晚更新世断裂; 断裂 $F_{2\text{-}2}$ 曾在第四纪活动, 但在第四纪晚期基本不活动或活动不明显(吴中海等, 2007), 属于晚更新世活动断裂。

2.2 沃卡盆地东边界断裂($F_{2\text{-}4}$、$F_{2\text{-}5}$)

沃卡盆地东边界断裂包括 2 条分支断裂 $F_{2\text{-}4}$、$F_{2\text{-}5}$。断裂 $F_{2\text{-}4}$ 南起于罗布莎镇, 向北延伸穿过雅鲁藏布江, 在江北转向北东向, 呈雁列式排列, 是 1 条走向呈北东—南北向展布、倾向北西的正断层(图 2b)。该断裂在雅鲁藏布江南岸的河流阶地上活动特征表现明显, 在桑日县藏嘎村雅鲁藏布江河谷横剖面九级阶地中(图 4a), 断裂错断 T_1 和 T_2 阶地约 5 m, 断裂倾向西, 走向为 230°(图 4b); 断裂陡坎东高西低, 但未发现明显断层擦面, 出露河流相的砾石层磨圆较好, 且胶结较强, 砾石直径为 50～60 cm(图 4c)。关于区域内雅鲁藏布江 T_1 阶地形成时代的研究, 彭补拙和杨逸畴(1996)测定 T_1 阶地内的新石器文化遗迹的 ^{14}C 年龄结果为(3.7±0.095)～(5.27±0.3) ka BP, 推测雅鲁藏布江 T_1 阶地形成于全新世中期; 祝嵩(2012)测得林芝某砖瓦厂 T_1 湖相基座黏土的 ^{14}C 年龄为 10.537±0.268 ka BP, 该样品采样点接近雅鲁藏布江河面海拔高度, 故认为雅鲁藏布江中游 T_1 阶地形成时代为 10 ka BP 以内, 即全新世。因此, 综上分析认为 $F_{2\text{-}4}$ 最新活动时代为全新世。



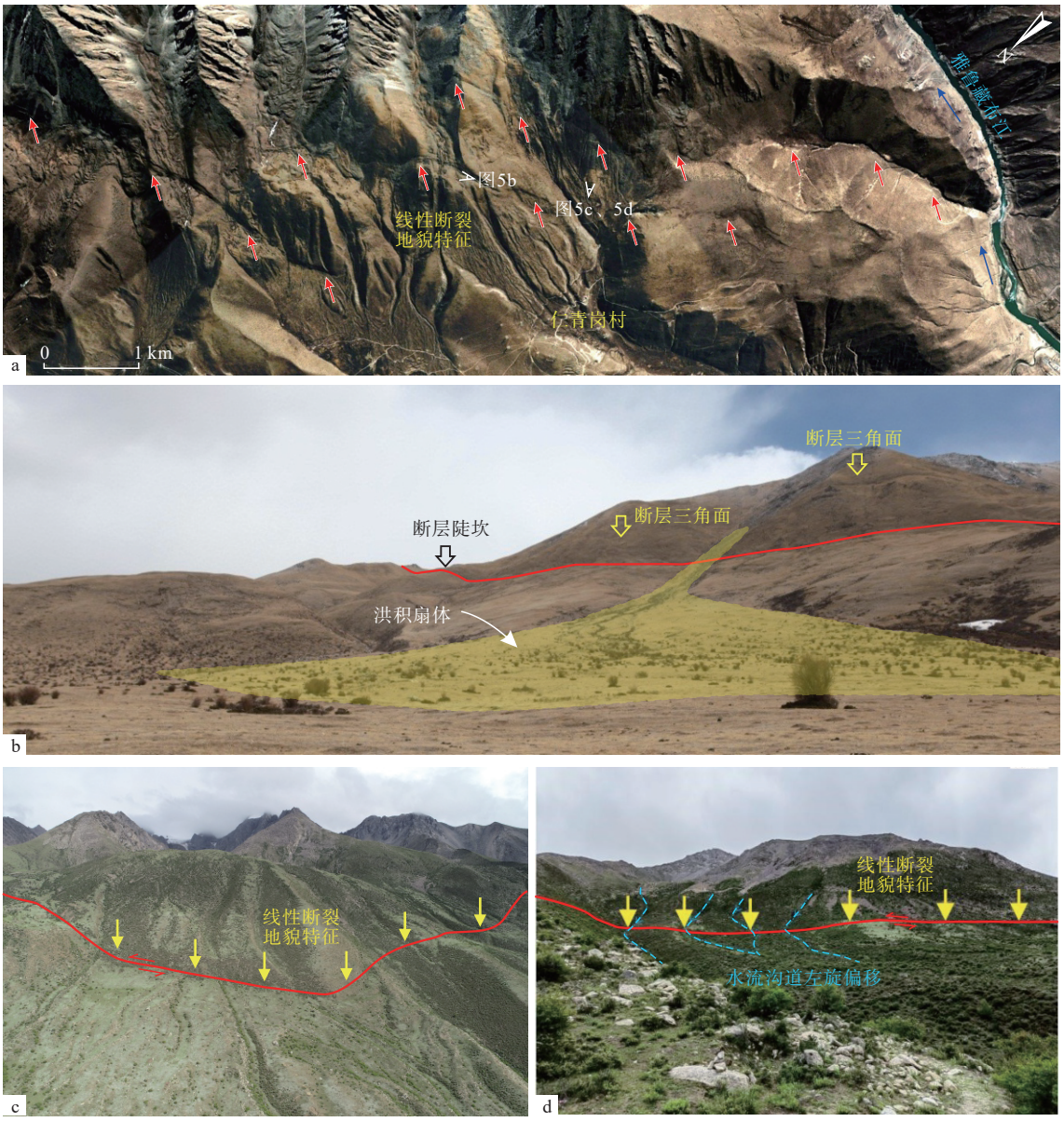
a—藏嘎村雅鲁藏布江横剖面(祝嵩, 2012); b—雅鲁藏布江右岸 T_1、T_2 阶地(镜向南西); c—断裂错断阶地断面(镜向南西)

图 4 藏嘎村雅鲁藏布江右岸河流阶地东边界断裂($F_{2\text{-}4}$)

Fig. 4 The eastern boundary fault ($F_{2\text{-}4}$) on the river terrace on the right bank of the Yarlung Zangbo River in Zangga Village

(a) Cross-section of the Yarlung Zangbo River in Zangga Village (Zhu, 2012); (b) T_1 and T_2 terraces on the right bank of the Yarlung Zangbo River (facing SW); (c) Fault-displaced terrace profile (facing SW)

断裂 $F_{2\text{-}5}$ 展布特征与断裂 $F_{2\text{-}4}$ 基本一致, 也是 1 条走向呈北东—南北向展布、倾向北西向的正断层, 2 条断裂在沃卡盆地东侧交错展布(图 2b), 共同组成了沃卡盆地东边界断裂。从遥感影像中可知, 断裂 $F_{2\text{-}4}$、$F_{2\text{-}5}$ 地表线性特征明显, 沿断裂可见断层三角面以及断层陡坎切过冰川谷和第四纪晚期的地貌现象(图 5a、5b); 在野外调查过程中, 观察到断裂 $F_{2\text{-}5}$ 在仁青岗寺庙东山坡上的植被覆盖差异呈线性迹象(图 5c), 多条水流沟道存在左旋偏移特征(图 5d), 说明该正断层兼有左旋分量。同时, 吴中海等(2008)在沃卡地堑东边界断裂进行采样测年, 得出区域内末次盛冰期时代为 3.2～1.5 ka BP, 由此可知沃卡盆地东边界断裂在全新世时期仍在活动, 估算末次盛冰期以来(全新世以来)其滑动速率为



a—沃卡盆地东边界断裂（$F_{2\text{-}4}$、$F_{2\text{-}5}$）线性地貌特征；b—断裂 $F_{2\text{-}5}$ 沿线断层三角面地貌形态特征（镜向北东）；c—仁青岗寺庙东测断裂 $F_{2\text{-}5}$ 穿越导致植被覆盖呈线性特征（镜向南东）；d—断裂 $F_{2\text{-}5}$ 导致水流沟道左旋偏移特征（镜向南东）

图 5　沃卡盆地东边界断裂断错地貌特征

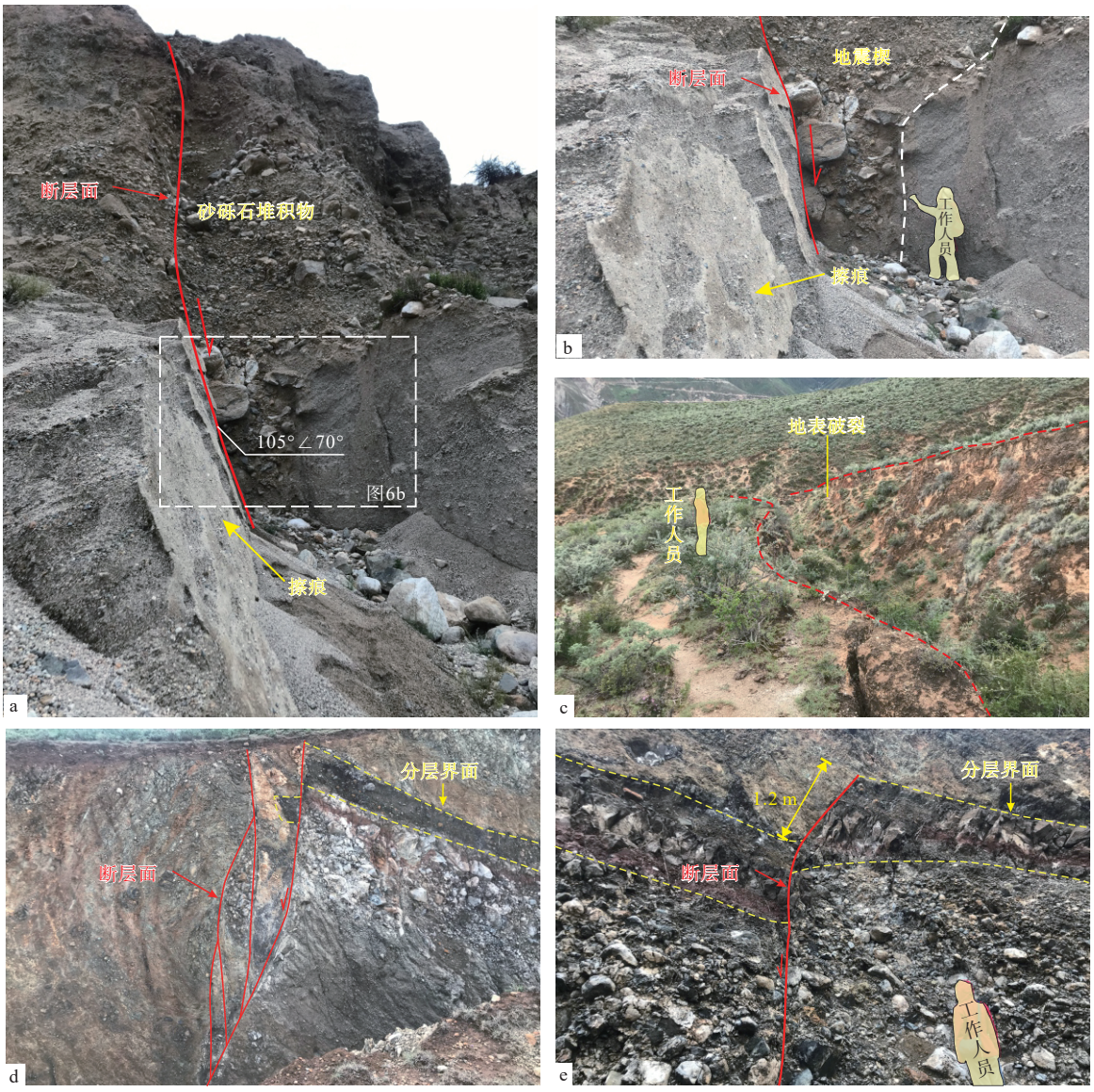
Fig. 5　Geomorphic features of the eastern boundary fault in the Woka Basin

(a) Linear geomorphic features of the eastern boundary faults ($F_{2\text{-}4}$ and $F_{2\text{-}5}$) of the Woka Basin; (b) Geomorphic features of atriangular fault surface along the $F_{2\text{-}5}$ fault (facing NE); (c) Linear features of vegetation coverage caused by the $F_{2\text{-}5}$ fault crossing the east side of the Renqinggang Temple (facing SE); (d) Sinistral deviation of water channels caused by the $F_{2\text{-}5}$ fault (facing SE)

0.9～1.5 mm/a，因此断裂 $F_{2\text{-}5}$ 属于全新世活动断裂。

2.3　沃卡盆地盆内断裂（$F_{2\text{-}3}$）

断裂 $F_{2\text{-}3}$ 是 1 条倾向南东、走向总体呈北东向的正断层，南起于藏嘎村西侧，向北东方向延伸宗萨村。野外调查过程中，在藏嘎村西侧的 1 处粗砂层中发现楔状砂砾石堆积物，为一地震楔（图 6a）；该地震楔高 3 m，上宽 2.9 m，下宽 1.6 m；地震楔内主要是砂砾石，呈次棱角状，砾径最大达 0.8 m（图 6b）。在该地震楔处揭露一断层面，产状为 105°∠70°，断层面上可见明显擦痕，依据擦痕运动方向判断该断层为正断层；且该断层切穿砾石层、粗砂层，但断距不明显，错断上部覆盖的土壤层（图 6a、6b）。由此推测，该地震楔形成时代较新，断裂 $F_{2\text{-}3}$ 为全新世活动断裂。



a、b—断裂 $F_{2\text{-}3}$ 穿越藏嘎村西侧形成的地震楔剖面特征(镜向北东);c—断裂 $F_{2\text{-}3}$ 穿越藏嘎村西侧山坡地表破裂带特征(镜向南);d、e—断裂 $F_{2\text{-}3}$ 穿越藏嘎村西侧断裂断错剖面特征(镜向北东)

图 6 沃卡盆地盆内断裂($F_{2\text{-}3}$)活动表现特征

Fig. 6 Activity characteristics of the $F_{2\text{-}3}$ fault in the interior of the Woka Basin

(a)-(b) Characteristics of seismic wedge profiles formed by the $F_{2\text{-}3}$ fault crossing the western side of Zangga Village (facing NE); (c) Characteristics of the surface rupture zone of the $F_{2\text{-}3}$ fault crossing a hillside west of Zangga Village (facing S); (d)-(e) Characteristics of the $F_{2\text{-}3}$ fault profile on the western side of Zangga Village (facing NE)

3 1915 年桑日 M_S7.0 地震发震断裂厘定

1915 年 12 月 3 日桑日县发生 M_S7.0 地震,宏观震中位于桑日县沃卡区藏嘎村附近,地理坐标为北纬 29°14′、东经 92°13′。宏观震中烈度Ⅸ度,震源深度为 10 km,等震线呈北西—南东向椭圆形展布(唐荣昌等,1980;张升林和江在雄,1991;图 2a)。其中极震区内由于强震作用诱发崩塌、泥石流等灾害,造成人员伤亡、经济损失严重。由于震中位置处于雅鲁藏布江东西向活动性大断裂的东段,唐荣昌等(1980)认为此次地震是雅鲁藏布江大断裂在南北向压应力作用下的结果;张升林和江在雄(1991)认为雅鲁藏布江东西向构造带是此次地震的控震构造,而区域内发育的北西向走滑断裂可能是此次地震的发震断裂;吴中海等(2007)通过对沃卡盆地

区域的调查研究，认为沃卡盆地的东边界断裂是此次地震的主要控震断裂。

野外调查结果发现，在藏嘎村西侧约 500 m 处的山坡上，即断裂 $F_{2\text{-}3}$ 展布位置（图 2b），发现了地震楔、地表破裂带等断裂活动迹象（图 6）。其中，地震楔特征可见上文介绍；地表破裂带长约 500 m，宽度最大达 10 m，深度最大介于 4～5 m，走向为 30°，在地表呈锯齿状（图 6c），自南向北切割第四纪堆积物、蛇绿混杂岩、花岗岩，向北破裂带逐渐尖灭。在蛇绿混杂岩剖面中可见一系列断裂面，其走向为南西 230°，倾角为 65°～70°，层状岩体被断裂错断（图 6d、6e）。根据破裂带沟谷中植被的发育情况推测，植被生长于地表破裂之后，同时此次采集了破裂带内 1 根相对较粗的灌木主干，其年轮有 20 余圈，说明该破裂带最少形成于 20 年前。根综合以上分析认为，1915 年 3 月 12 日桑日 M_S7.0 地震的发震断裂是沃卡盆地盆内 $F_{2\text{-}3}$ 断裂。

4　错那–沃卡断裂带工程错断风险分析与防控对策研究

4.1　高原铁路穿越错那–沃卡断裂带影响因素分析

错那–沃卡断裂带对高原铁路运营阶段的危害主要来源于发震断裂的同震地表破裂、工程错断、隧道变形、地质灾害等地质安全风险问题（徐锡伟等，2002，2007；郭长宝等，2017）。错那–沃卡断裂带内曾发生过 2 次 M_S≥7.0 强震，分别为 1806 年错那北 M_S 7.5 地震和 1915 年桑日 M_S 7.0 地震，2 次地震造成区域内房屋垮塌、地表破裂、断层陡坎等地震迹象（张升林和江在雄，1991；周荣军等，1997），但对于同震地质灾害并没有详细记载，文章主要从断裂带的空间展布与活动性以及工程断错风险影响范围来分析错那–沃卡断裂带对铁路的工程影响。

错那–沃卡断裂带的平均垂直活动速率介于 0.3～1.9 mm/a，并且可能存在断裂活动间歇期与活跃期交替出现的特点，1915 年桑日 M_S 7.0 地震可能是该断裂带丛集期内活动的表现（吴中海等，2008）。在青藏高原板块构造运动持续影响下，铁路穿越错那–沃卡断裂带段，其运营阶段有可能发生 M_S 7.0 甚至更高震级的地震，因此铁路运营期间需要密切关注地震灾害风险。

4.2　高原铁路工程错断风险分析

活动断裂错动及地表破裂的破坏威力巨大，但其影响范围有限。走滑断裂引起的地震地表破裂影响范围平均值≤30 m，集中在走滑断裂附近；而正断层和逆断层引起的地震地表破裂影响范围平均值≤50 m，且具有上盘效应，上盘影响范围是下盘的 2～4 倍（Zhou et al., 2010；徐锡伟等，2016；魏雷鸣等，2023）。根据不同断裂类型来估算未来地震地表破裂带的影响范围，可以指导铁路、城镇等工程建设进行活动断裂避让，有效减轻活动断裂带来的损失。文中采用魏雷鸣等（2023）提出的正断层上、下盘避让距离计算公式，计算错那–沃卡断裂带对铁路的影响。当建筑物位于正断层下盘时，避让距离（D_d）应按公式（1）计算：

$$D_d = D_0 \tag{1}$$

当建筑物位于正断层上盘时，避让距离（D_u）应按公式（2）计算：

$$D_u = \begin{cases} D_0 + H_b \times \cot a & ① \\ D_0 + (H_s + H_b) \times \cot a & ② \end{cases} \tag{2}$$

公式（1）（2）中，D_0—无断层陡坎发育、断层倾角接近 90°时的避让距离，m；D_u—建（构）筑物在断层上盘的避让距离，m；D_d—建（构）筑物在断层下盘的避让距离，m；H_b—建（构）筑物的地基深度，m；H_s—断层带露头宽度，m；a—断层倾角，（°）；公式（2）中①表示地形平坦条件，②表示断层陡坎条件。

断裂现今活动往往表现为断裂两侧的垂直位移和水平位移，因此，在计算未来可能产生的变形带宽度时，若活动断裂是单条断裂，H_s 可取 0 m；若活动断裂由多条断裂组成，H_s 按照最外侧 2 条断裂的距离计算；若野外观测到断裂带的实际宽度，就以野外观测实际宽度为准。当铁路线路平直、且位于地表或以隧道形式穿越，计算其避让距离时可视为无断层陡坎发育即地形平坦，则 H_b=0 m。因此，针对与铁路相交的活动正断层而言，断层活动时的影响范围主要取决于断层的最新活动时代、断层宽度。此时，断层上、下盘变形影响的总宽度（D）可根据公式（3）计算得出：

$$D = 2D_0 + H_s \tag{3}$$

按照全新世正断层 D_0=15 m，晚更新世正断层 D_0=8 m 考虑，穿越铁路或隧道的全新世活动断裂可能产生的影响范围 D=30 m+H_s，而晚更新世活动断裂可能产生的影响范围 D=16 m+H_s。

评价结果表明（表 1），错那–沃卡断裂带（F_2）对铁路运营影响范围较大，且断裂带与铁路隧道近垂

直相交,需要重点关注其强震工程错断风险。错那−沃卡断裂带内断裂活动影响范围宽度为16～30 m,可能对铁路藏嘎隧道和桑珠岭隧道产生影响。该断裂带于1915年发生过M_S 7.0地震(张升林和江在雄,1991),地表可见同震地表破裂带,预测未来该断裂带有可能发生M_S 7.0甚至更高震级的地震,因此建议对藏嘎隧道和桑珠岭隧道断裂通过关键区段进行变形监测。

表1 错那−沃卡断裂带断层活动对高原铁路工程影响评价表

Table 1 Evaluation of the impact of fault activity on the Plateau Railway project in the Cuona-Woka Fault Zone

断裂名称	编号	产状		断裂性质	活动时代	断裂带宽度/m	变形带宽度/m	影响线路位置
		走向	倾向					
沃卡盆地西边界断裂	$F_{2\text{-}1}$	由北东向转北北东向	北西向	正断	晚更新世	0	16	藏嘎隧道
沃卡盆地西边界断裂	$F_{2\text{-}2}$	由北东向转南北走向	南东向	正断	晚更新世	0	16	
沃卡盆地盆内断裂	$F_{2\text{-}3}$	北东向	南东向	正断	全新世	0	30	
沃卡盆地东边界断裂	$F_{2\text{-}4}$	由北东向转南北走向	由北西向转向西	正断	全新世	0	30	桑珠岭隧道
沃卡盆地东边界断裂	$F_{2\text{-}5}$	由北东向转南北走向	由北西向转向西	正断	全新世	0	30	

4.3 高原铁路工程错断风险防控对策

根据上述对高原铁路工程错断风险影响范围分析,针对错那−沃卡断裂带穿越的藏嘎隧道和桑珠岭隧道提出如下防控对策:

(1)考虑到断裂断错作用可能导致断裂两侧岩体发生剪切变形,在断裂穿越段的隧洞衬砌增设多个柔性连接段,从而达到消减断裂位错的影响。例如,美国旧金山San Andreas断裂穿越排水隧洞,采用抗震滑动铰链有效抵御了1989年Loma Prieta M_L7.1地震(Eisenberg and Treadwell, 2015)。

(2)考虑到错那−沃卡断裂带活动对区域内岩体结构可能造成持续影响,建议对藏嘎隧道和桑珠岭隧道的结构受力、变形进行长期监测。在拱顶、拱腰、拱脚及仰拱布设应力传感器,监测围岩压力及衬砌结构内力变化情况;布设变形缝三向位移计及自动化全站仪监测衬砌结构变形情况,断裂穿越关键段布设光纤传感器进行变形监测,加强对藏嘎隧道和桑珠岭隧道基础沉降的持续监测。例如,2022年门源地震造成兰新高铁大梁隧道发生工程错断,震后整治工程中采用隧道基础沉降监测、隧洞结构力学监测等多手段技术进行灾害后防震监测(令永春, 2023)。

5 结论

(1)错那−沃卡断裂带由5条分支断裂构成,分别为沃卡盆地西边界断裂($F_{2\text{-}1}$、$F_{2\text{-}2}$)、沃卡盆地东边界断裂($F_{2\text{-}4}$、$F_{2\text{-}5}$)和沃卡盆地盆内断裂($F_{2\text{-}3}$)。其中,$F_{2\text{-}1}$断裂形成时代为晚更新世;$F_{2\text{-}2}$断裂第四纪活动性不明显,属于晚更新世活动断裂;$F_{2\text{-}3}$断裂为全新世活动断裂;$F_{2\text{-}4}$、$F_{2\text{-}5}$断裂空间展布特征相似,均为正断层,其中$F_{2\text{-}5}$断裂兼有左旋走滑分量,这2条断裂为全新世活动断裂。

(2)地震楔、地表破裂带等野外地貌特征表明,$F_{2\text{-}3}$断裂是1915年桑日M_S 7.0地震的发震断裂;在青藏高原板块构造运动持续影响下,高原铁路沿线中小地震频发,其运营期有可能出现M_S 7.0甚至更高震级的地震,因此铁路运营期间需要密切关注地震灾害风险。

(3)强震背景下错那−沃卡断裂带的破裂影响范围宽度为16～30 m,断裂带与铁路藏嘎隧道、桑珠岭隧道近垂直相交,需要加强铁路线直接穿越断裂区段、强震影响破碎区段的形变监测工作。

致谢: 中国地质大学(北京)张永双教授、中国地质科学院地质力学研究所吴中海研究员为本文提供了部分资料;中国地质科学院地质力学研究所闫怡秋博士研究生、张献兵博士研究生等参加了部分野外地质调查工作;袁浩博士研究生、刘吉鑫博士研究生和谭银龙博士研究生等处理了部分图件;在此一并表示感谢。

References

BIAN S, YU Z Q, GONG J F, et al., 2021. Spatiotemporal distribution and geodynamic mechanism of the nearly NS-trending rifts in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 27(2): 178-194. (in Chinese with English abstract)

CHEN P, GENG P, CHEN J, et al., 2023. The seismic damage mechanism of Daliang tunnel by fault dislocation during the 2022 Menyuan Ms6.9

earthquakes based on unidirectional velocity pulse input[J]. Engineering Failure Analysis, 145: 107047.

DALGIÇ S, 2002. Tunneling in squeezing rock, the Bolu tunnel, Anatolian Motorway, Turkey[J]. Engineering Geology, 67(1-2): 73-96.

DENG Q D, ZHANG P Z, RAN Y K, et al., 2003. Basic characteristics of active tectonics of China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(4): 356-372.

DOWDING C H, ROZAN A, 1978. Damage to rock tunnels from earthquake shaking[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 104(2): 175-191.

EISENBERG Y, TREADWELL D D, 2015. San Francisco's southwest ocean outfall[M]. Coastal Engineering: 1982. 2418-2435.

GAO Y, WU Z H, ZUO J M, et al., 2024. Spatial-temporal activity of quaternary faults at southern end of Nyalam-Coqen rift, southern Tibet[J]. Earth Science, 49(7): 2552-2569. (in Chinese with English abstract)

GUO C B, ZHANG Y S, JIANG L W, et al., 2017. Discussion on the environmental and engineering geological problems along the Sichuan-Tibet railway and its adjacent area[J]. Geoscience, 31(5): 877-889. (in Chinese with English abstract)

HA G H, WU Z H, HE L, 2018. Late Cenozoic sedimentary strata of Qiongduojiang graben, South Tibet: preliminary constraint on the initial rifting age of the SN- trending rift[J]. Acta Geologica Sinica, 92(10): 2051-2067. (in Chinese with English abstract)

HA G H, WU Z H, 2021. Discussion of the seismogenic structure of the 1901 M 6¾ Nyemo earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 27(2): 218-229. (in Chinese with English abstract)

HEERMANCE R, SHIPTON Z K, EVANS J P, 2003. Fault structure control on fault slip and ground motion during the 1999 rupture of the Chelungpu Fault, Taiwan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 93(3): 1034-1050.

LING Y C, 2023. Seismic damage characteristics and repair technology of railway tunnels crossing active fault zone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 19(3): 1027-1037. (in Chinese with English abstract)

PENG B Z, YANG Y C, 1996. Physical geography and natural resources in the Nanga Bawa area[M]. Beijing: Science Press: 1-380. (in Chinese)

ROCKWELL T K, BEN-ZION Y, 2007. High localization of primary slip zones in large earthquakes from paleoseismic trenches: observations and implications for earthquake physics[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112(B10): B10304.

SHAN X J, LIU J H, MA C, 2004. Preliminary analysis on characteristics of coseismic deformation associated with M_S=8.1 western Kunlunshan pass earthquake in 2001[J]. Acta Seismologica Sinica, 26(5): 474-480. (in Chinese with English abstract)

SONG G Z, ZHANG Y H, 2021. Development types and risk assessment of high-steep dangerous rock mass at the entrance of Lhasa-Linzhi railway tunnel[J]. Railway Engineering, 61(1): 88-92. (in Chinese with English abstract)

TANG R C, LI T T, LI J C, 1980. Preliminary understanding of the geological and structural background and causes of the Dangxiong 7.5 earthquake[J]. Journal of Seismological Research(1): 87-96. (in Chinese)

TAPPONNIER P, MERCIER J L, ARMIJO R, et al., 1981. Field evidence for active normal faulting in Tibet[J]. Nature, 294(5840): 410-414.

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

TAYLOR M, YIN A, 2009. Active structures of the Himalayan-Tibetan orogen and their relationships to earthquake distribution, contemporary strain field, and Cenozoic volcanism[J]. Geosphere, 5(3): 199-214.

WANG S, LYU T Y, WU Z H, et al., 2023. Research on the applicability of electron spin resonance dating of the late Quaternary sinter deposits in the rift valley, southern Tibet[J]. Journal of Geomechanics, 29(2): 276-289. (in Chinese with English abstract)

WEI L M, XU X W, LI F, et al., 2023. Theory and application of setback distance from active faults[J]. Coal Geology & Exploration, 51(12): 69-82. (in Chinese with English abstract)

WEN Y L, SONG Z P, YU H Y, et al., 2016. Current large earthquake risk on the eastern Himalayan belt and compared to the seismicities before 1950 Motuo M 8.6 earthquake[J]. Progress in Geophysics, 31(1): 103-109. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, ZHANG Y S, HU D G, et al., 2007. Quaternary normal faulting and its dynamics of the Oiga graben in south-eastern Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 81(10): 1328-1337. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, ZHANG Y S, HU D G, et al., 2008. The quaternary normal faulting of the Cona-Oiga rift[J]. Seismology and Geology, 30(1): 144-160. (in Chinese with English abstract)

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)

XIE P, TANG F T, LIANG X H, et al., 2017. Late quaternary movement characteristics of Lilong fault at the west side of Namcha Barwa syntaxis[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 12(3): 480-490. (in Chinese with English abstract)

XU X W, YU G H, MA W T, et al., 2002. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault[J]. Seismology and Geology, 24(4): 470-483. (in Chinese with English abstract)

XU X W, YU G H, CHEN G H, et al., 2007. Near-surface character of permanent geologic deformation across the mega-strike-slip faults in the northern Tibetan Plateau[J]. Seismology and Geology, 29(2): 201-217. (in Chinese with English abstract)

XU X W, WEN X Z, YE J Q, et al., 2008. The M_s 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure[J]. Seismology and Geology, 30(3): 597-629. (in Chinese with English abstract)

XU X W, GUO T T, LIU S Z, et al., 2016. Discussion on issues associated with setback distance from active fault[J]. Seismology and Geology, 38(3): 477-502. (in Chinese with English abstract)

XU Z Q, LI H B, YANG J S, 2006. An orogenic plateau: the orogenic collage and orogenic types of the Qinghai-Tibet plateau[J]. Earth Science Frontiers, 13(4): 1-17. (in Chinese with English abstract)

YU H T, CHEN J T, BOBET A, et al., 2016. Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan earthquake[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 54: 102-116.

ZHANG P Z, WANG M, GAN W J, et al., 2003. Slip rates along major act-

ive faults from GPS measurements and constraints on contemporary continental tectonics[J]. Earth Science Frontiers, 10(S1): 81-92. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, DENG Q D, ZHANG Z Q, et al., 2013. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China[J]. Scientia Sinica Terrae, 43(10): 1607-1620. (in Chinese with English abstract)

ZHANG S L, JIANG Z X, 1991. The 1915 7.0-magnitude Sangri earthquake in Tibet[J]. Northeastern Seismological Research, 7(1): 131-132. (in Chinese)

ZHANG W, LI M, JI Y P, et al., 2022. Analysis and enlightenment of typical failure characteristics of tunnels caused by the Menyuan M6.9 earthquake in Qinghai Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 44(3): 661-669. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, SUN P, SHI J S, et al., 2010. Investigation of rupture influenced zones and their corresponding safe distances for reconstrution after 5.12 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 18(3): 312-319. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, REN S S, GUO C B, et al., 2019. Research on engineering geology related with active fault zone[J]. Acta Geologica Sinica, 93(4): 763-775. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, WU R A, GUO C B, et al., 2022. Geological safety evaluation of railway engineering construction in plateau mountainous region: ideas and methods[J]. Acta Geologica Sinica, 96(5): 1736-1751. (in Chinese with English abstract)

ZHOU Q, XU X W, YU G H, et al., 2010. Width distribution of the surface ruptures associated with the Wenchuan earthquake: implication for the setback zone of the seismogenic faults in postquake reconstruction[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(5B): 2660-2668

ZHOU R J, MA S H, GONG Y, et al. , 1997. Recent activity of the fault from Cuona to Zegucuo in Tibet and the Cuonai earthquake with magnitude 7½ in A. D. 1806[J]. Earthquake Research in Sichuan(3): 35-39. (in Chinese with English abstract)

ZHU S, 2012. River landform and geology environment evolution in the Yarlung Zangbo River valley[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

卞爽, 于志泉, 龚俊峰, 等, 2021. 青藏高原近南北向裂谷的时空分布特征及动力学机制[J]. 地质力学学报, 27(2): 178-194.

邓起东, 张培震, 冉勇康, 等, 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 32(12): 1020-1030.

高扬, 吴中海, 左嘉梦, 等, 2024. 藏南聂拉木-措勤裂谷南段第四纪正断层作用的时空特征[J]. 地球科学, 49(7): 2552-2569.

郭长宝, 张永双, 蒋良文, 等, 2017. 川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论[J]. 现代地质, 31(5): 877-889.

哈广浩, 吴中海, 何林, 2018. 藏南邛多江地堑的晚新生代沉积地层及对南北向裂谷形成时代的初步限定[J]. 地质学报, 92(10): 2051-2067.

哈广浩, 吴中海, 2021. 西藏尼木1901年M 6¾地震的发震构造探讨[J]. 地质力学学报, 27(2): 218-229.

令永春, 2023. 穿越活动断裂带铁路隧道震害特征及修复技术[J]. 地下空间与工程学报, 19(3): 1027-1037.

彭补拙, 杨逸畴, 1996. 南迦巴瓦峰地区自然地理与自然资源[M]. 北京: 科学出版社: 1-380.

宋国壮, 张玉芳, 2021. 拉林铁路隧道洞口高位高陡危岩体发育类型及风险评估[J]. 铁道建筑, 61(1): 88-92.

唐荣昌, 李天祁, 李介成, 1980. 当雄7.5级地震地质构造背景及其成因的初步认识[J]. 地震研究(1): 87-96.

王晟, 吕同艳, 吴中海, 等, 2023. 藏南裂谷区晚第四纪泉华的ESR测年适用性研究[J]. 地质力学学报, 29(2): 276-289.

魏雷鸣, 徐锡伟, 李峰, 等, 2023. 活动断层避让距离确定的理论基础与应用实例[J]. 煤田地质与勘探, 51(12): 69-82.

吴中海, 张永双, 胡道功, 等, 2007. 西藏桑日县沃卡地堑的第四纪正断层活动及其机制探讨[J]. 地质学报, 81(10): 1328-1337.

吴中海, 张永双, 胡道功, 等, 2008. 藏南错那-沃卡裂谷的第四纪正断层作用及其特征[J]. 地震地质, 30(1): 144-160.

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, 于贵华, 马文涛, 等, 2002. 活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定的依据与方法[J]. 地震地质, 24(4): 470-483.

徐锡伟, 于贵华, 陈桂华, 等, 2007. 青藏高原北部大型走滑断裂带近地表地质变形带特征分析[J]. 地震地质, 29(2): 201-217.

徐锡伟, 郭婷婷, 刘少卓, 等, 2016. 活动断层避让相关问题的讨论[J]. 地震地质, 38(3): 477-502.

许志琴, 李海兵, 杨经绥, 2006. 造山的高原: 青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型[J]. 地学前缘, 13(4): 1-17.

张培震, 王敏, 甘卫军, 等, 2003. GPS观测的活动断裂滑动速率及其对现今大陆动力作用的制约[J]. 地学前缘, 10(S1): 81-92.

张培震, 邓起东, 张竹琪, 等, 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1607-1620.

张升林, 江在雄, 1991. 1915年西藏桑日7.0级地震[J]. 东北地震研究, 7(1): 131-132.

张威, 李明, 姬云平, 等, 2022. 青海门源M6.9地震典型隧道破坏特征分析与启示[J]. 地震工程学报, 44(3): 661-669.

张永双, 孙萍, 石菊松, 等, 2010. 汶川地震地表破裂影响带调查与建筑场地避让宽度探讨[J]. 工程地质学报, 18(3): 312-319.

张永双, 任三绍, 郭长宝, 等, 2019. 活动断裂带工程地质研究[J]. 地质学报, 93(4): 763-775.

张永双, 吴瑞安, 郭长宝, 等, 2022. 高原山区铁路工程建设地质安全评价: 思路与方法[J]. 地质学报, 96(5): 1736-1751.

中国地震局地质研究所, 2013. 川藏铁路拉萨至林芝段工程沿线断裂活动性评价及地震动参数区划报告[R]. 北京: 中国地震局地质研究所.

周荣军, 马声浩, 龚宇, 等, 1997. 西藏错那—哲古错断裂的新活动与1806年错那7½级地震[J]. 四川地震(3): 35-39.

祝嵩, 2012. 雅鲁藏布江河谷地貌与地质环境演化[D]. 北京: 中国地质科学院.