

## 滇藏铁路沿线重要活动断裂带晚第四纪活动性初步研究

张献兵, 于皓, 余潇, 郭长宝, 吴瑞安, 王炆, 钟宁

### Preliminary Study on the Late Quaternary Activity of Important Active Fault Zones along the Yunnan-Tibet Railway

Zhang Xianbing, Yu Hao, Yu Xiao, Guo Changbao, Wu Rui'an, Wang Yang, and Zhong Ning

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2023-147>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 滇东北会泽—者海断裂晚第四纪活动特征

The Quaternary activity characteristics of the Huize—Zhehai fault in the Northeast area of Yunnan  
地震科学进展. 2019(7): 17–22

#### 郯庐断裂宿迁段地球化学气体特征分析

Analysis of geochemical gas characteristics in Suqian section of the Tanlu fault zone  
地震科学进展. 2020(3): 30–35

#### 华蓥山断裂带地震活动特征分析

Analysis on seismicity characteristics of Huayingshan fault zone  
地震科学进展. 2021(10): 461–466

#### 吴忠—灵武地区地震活动性与强震危险性分析

The earthquake activity and strong earthquake risk analysis of Wuzhong—Lingwu region  
地震科学进展. 2020(10): 1–12

#### 鄂尔多斯活动地块边界带地震动力学模型与强震危险性研究项目及进展

Project plan and research progress on geodynamic models of earthquakes and strong seismic hazards in boundary zone of the Ordos active block  
地震科学进展. 2020(4): 1–21

#### 郯庐断裂带中南段断层形变累积率长期变化特征

Long-term variation of fault deformation rate in the central–south segment of the Tanlu fracture zone  
地震科学进展. 2018(12): 22–28



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张献兵, 于皓, 余潇, 等. 滇藏铁路沿线重要活动断裂带晚第四纪活动性初步研究 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 94-109. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-147

Zhang X B, Yu H, Yu X, et al. Preliminary study on the Late Quaternary activity of important active fault zones along the Yunnan-Tibet railway[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(1): 94-109. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-147

综述与评述

## 滇藏铁路沿线重要活动断裂带 晚第四纪活动性初步研究

张献兵<sup>1,2,3)</sup> 于皓<sup>1,2,3)</sup> 余潇<sup>1,2,5)</sup> 郭长宝<sup>1,2,4)</sup>  
吴瑞安<sup>1,2,4)</sup> 王炆<sup>1,2,4)</sup> 钟宁<sup>1,2,4)\*</sup>

- 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) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083
- 4) 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081
- 5) 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北武汉 430074

**摘要** 滇藏铁路位于青藏高原东南缘板块碰撞和构造活跃的地形急变带, 沿线活动断裂发育, 地震频发, 地震烈度强, 且地质灾害频繁, 其规划施工建设和长期运营面临的地质安全风险问题严峻。滇藏铁路香格里拉—波密段沿线发育了哈巴—玉龙雪山东麓断裂带、中甸—龙蟠断裂带、德钦—中甸—大具断裂带、维西—乔后断裂带、金沙江断裂带、巴塘断裂带、澜沧江断裂带、怒江断裂带、边坝—洛隆断裂带、嘉黎—察隅断裂带等 10 余条活动断裂带。受断裂黏滑位错、蠕滑变形和引发强震风险的突出影响, 迫切需要厘定区域活动断裂带的几何展布和活动性。基于前人资料、遥感解译和野外调查, 本文总结分析了沿线 10 余条活动断裂带的几何展布、运动性质、滑动速率和古地震历史等, 以期为滇藏铁路等国家重大工程规划建设与安全运营提供基础资料。

**关键词** 滇藏铁路; 活动断裂带; 断裂活动性; 晚第四纪; 青藏高原东南缘

**中图分类号:** P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2024)01-0094-16

**doi:** 10.19987/j.dzcxjz.2023-147

收稿日期: 2023-10-19; 采用日期: 2023-12-01。

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221816), 国家自然科学基金资助项目(42177184)和中国地质科学院地质力学研究所结余项目(所科研 60)联合资助。

第一作者: 张献兵(1996-), 男, 博士研究生, 研究方向为活动构造与灾变沉积学。E-mail: zhangxb321@foxmail.com。

\* 通信作者: 钟宁(1986-), 男, 副研究员, 研究方向为活动构造与灾变沉积学。E-mail: zdn2018@126.com。



## Preliminary study on the Late Quaternary activity of important active fault zones along the Yunnan-Tibet railway

Zhang Xianbing<sup>1,2,3)</sup>, Yu Hao<sup>1,2,3)</sup>, Yu Xiao<sup>1,2,5)</sup>, Guo Changbao<sup>1,2,4)</sup>,  
Wu Rui'an<sup>1,2,4)</sup>, Wang Yang<sup>1,2,4)</sup>, Zhong Ning<sup>1,2,4)</sup>

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) School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

4) Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China

5) School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Hubei Wuhan 430074, China

**Abstract** The Yunnan-Tibet railway is located in the southeastern edge of the Tibetan Plateau, where tectonic plates collide and the terrain rapidly changes. Along the line, active faults develop, earthquakes occur frequently, and the intensity of earthquakes is strong, moreover, geological disasters are frequent. Hence its planning, construction, and long-term operation face severe geological safety risks. More than 10 active fault zones have been developed along the Shangri-La-Bomi section of the Yunnan-Tibet railway, including the Haba-Yulong Snow Mountain east foot fault zone, Zhongdian-Longpan fault zone, Deqin-Zhongdian-Daju fault zone, Weixi-Qiaohou fault zone, Jinsha river fault zone, Batang fault zone, Lancang river fault zone, Nujiang fault zone, Bianba-Luolong fault zone, and Jiali-Chayu fault zone. These active fault zones are highly affected by fault slip dislocations, creep deformation, and the risk of triggering strong earthquakes. There is an urgent need to determine the geometric distribution and activity of regional active fault zones. Based on previous research, remote sensing interpretation, and field investigations, this article summarizes and analyzes the geometric distribution, kinematic properties, slip rate and paleoearthquake sequence of more than 10 active fault zones along the route, providing basic information for the planning, construction and safe operation of major national projects such as the Yunnan-Tibet railway.

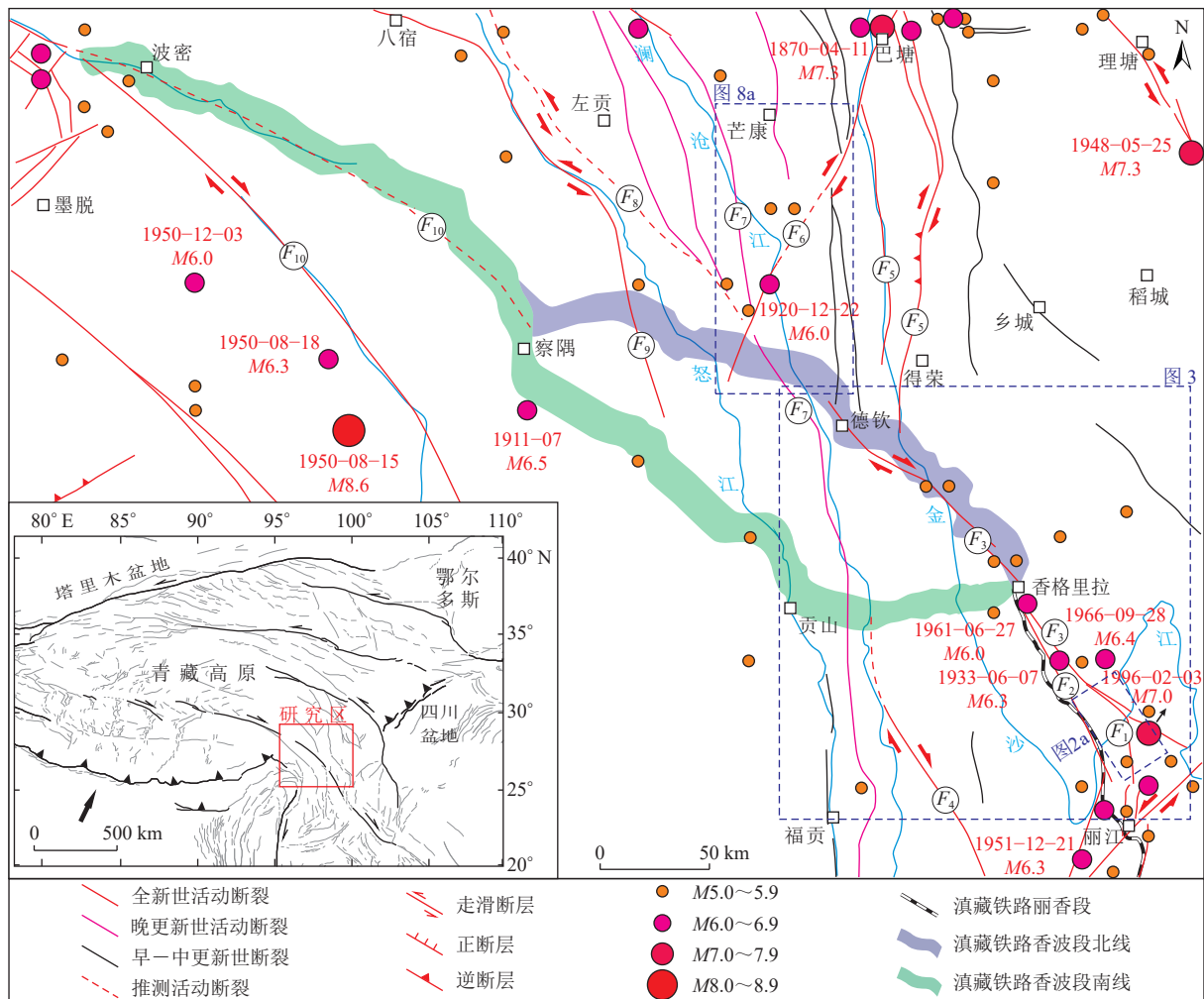
**Keywords** Yunnan-Tibet railway; active fault zone; fault activity; Late Quaternary; southeast edge of the Tibetan Plateau

### 0 引言

滇藏铁路是我国中长期铁路网规划建设中的重要铁路干线, 主要包括昆明—楚雄—大理段、大理—丽江段、丽江—香格里拉段、香格里拉—波密段和林芝—拉萨段, 全长约 1700 km, 其中昆楚大段、大丽段、拉林段及丽香段已建成通车, 香波段尚处于前期研究阶段<sup>[1]</sup>。香波段备选线路分为北线和南线, 北线为香格里拉—升平镇(德钦老县城)—察隅县城北; 南线为香格里拉—叶枝镇(德钦新县城)—贡山县—察隅县城(图 1)。滇藏铁路为 5 条进藏铁路路线之一, 铁路的建设对我国政治、经济、国防、民族团结等方面具有重大意义。滇藏铁路地处青藏高原东南缘地形急变带, 新构造运动强烈, 沿线活动断裂与地震、高地应力、地温(热)、有害气体、崩滑流、冰川、雪崩、岩溶、软土、冻土、膨胀岩(土)、冰碛层、风沙、砂土液化、放射性等工程地质问题突

出, 堪称“世界铁路艰险工程之最”<sup>[2]</sup>。其中, 活动断裂带是影响高原山区铁路工程建设地质安全的重要因素<sup>[3]</sup>, 其工程破坏形式主要包括强震震动破坏、地表破裂工程错断、断裂破碎带透水漏气、诱发崩滑流地质灾害等。滇藏铁路香波段区域内发育了 10 余条活动断裂带(图 1), 严重制约了铁路的规划建设与运营。

基于前人资料、遥感解译和野外调查, 本文总结了滇藏铁路沿线滇西北地区(哈巴—玉龙雪山东麓断裂带、德钦—中甸—大具断裂带、维西—乔后断裂带、中甸—龙蟠断裂带、金沙江断裂带)和藏东南地区(巴塘断裂带南段、澜沧江断裂带、怒江断裂带邦达断裂、边坝—洛隆断裂带、嘉黎—察隅断裂带) 10 余条活动断裂带的几何展布、运动性质、滑动速率和古地震历史等, 以为滇藏铁路等国家重大工程规划建设与安全运营提供基础资料。



$F_1$ : 哈巴—玉龙雪山东麓断裂带;  $F_2$ : 中甸—龙蟠断裂带;  $F_3$ : 德钦—中甸—大具断裂带;  $F_4$ : 维西—乔后断裂带;  $F_5$ : 金沙江断裂带中段;  $F_6$ : 巴塘断裂带;  $F_7$ : 澜沧江断裂带;  $F_8$ : 怒江断裂带邦达断裂;  $F_9$ : 边坝—洛隆断裂带;  $F_{10}$ : 嘉黎—察隅断裂带。断裂展布据文献 [4-5] 修改; 区域位置图据文献 [6] 修改; 地震数据来源于国家地震科学数据中心 (<https://data.earthquake.cn/>)

图 1 滇藏铁路香格里拉—波密段沿线主要活动断裂带

Fig. 1 Main active fault zones along the Shangri La-Bomi section of the Yunnan-Tibet railway

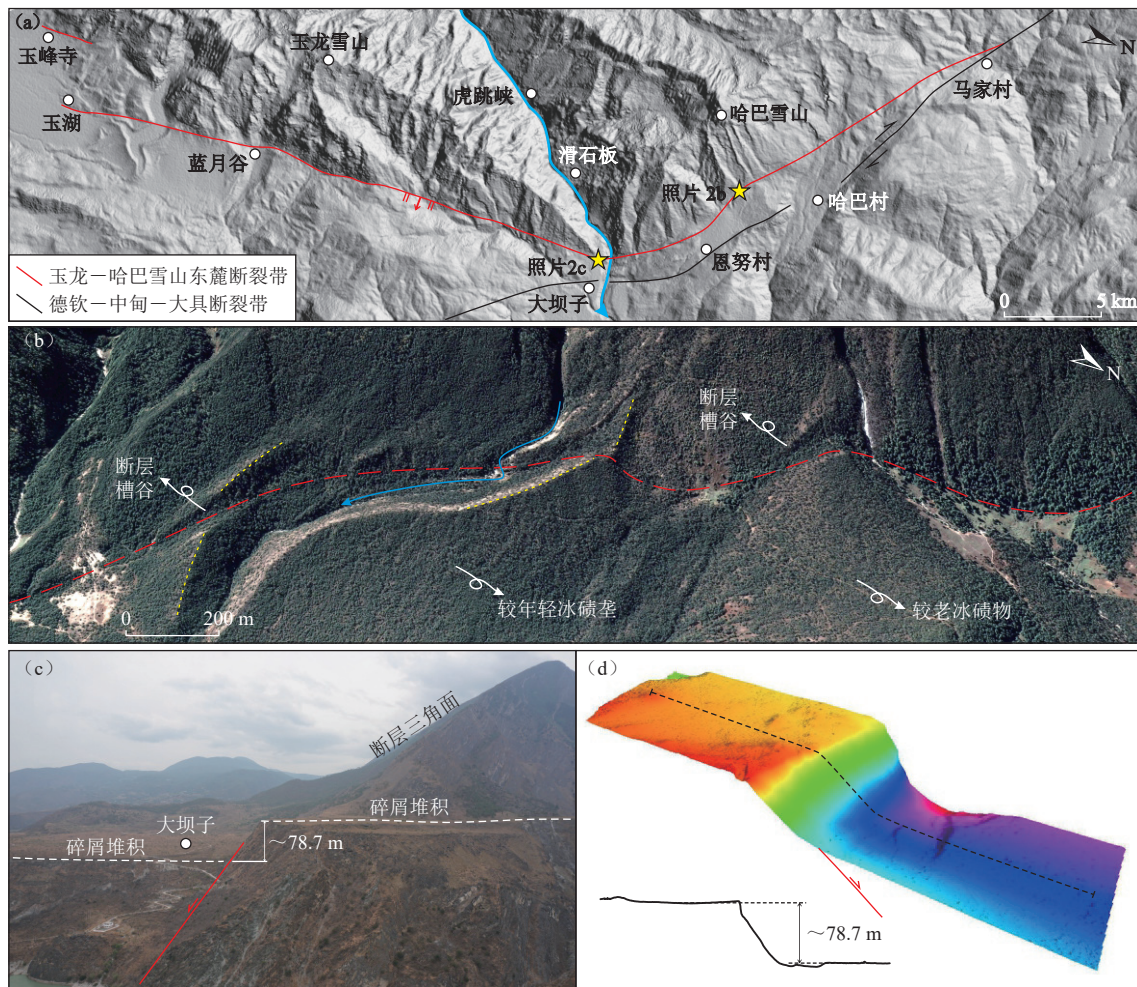
## 1 滇西北地区主要活动断裂带

### 1.1 哈巴—玉龙雪山东麓断裂带( $F_1$ )

哈巴—玉龙雪山东麓断裂带北西起于马家村一带, 向南东经哈巴村、恩努村, 在大具大坝子一带转为正南, 一直延伸至丽江盆地北缘的玉峰寺附近, 全长约 66 km<sup>[7]</sup>。该断裂带曾引发 1996 年丽江  $M7.0$  地震<sup>[8-9]</sup>, 是区域重要的发震构造。关于哈巴—玉龙雪山东麓断裂带运动性质还存在一些不同认识。吴中海等<sup>[7]</sup>认为哈巴—玉龙雪山东麓断裂带以正倾滑运动为主, 几乎不存在走滑分量。李光涛等<sup>[10]</sup>在哈巴雪山山前断层陡坎沿线发现了 3 条右旋偏转的冲沟, 冲沟水平位错量大于陡坎高度, 最大水平位错量可

达 1 km, 指示断裂以右旋走滑运动为主。遥感解译和野外调查发现, 李光涛等<sup>[10]</sup>的“位错量达 1 km 的冲沟”发育在冰碛垄内, 冰碛垄受原始地形影响, 形成了“右旋”偏转的现象。冰碛垄上的槽谷为断裂经过处, 槽谷两侧冰碛垄水平断错迹象并不明显, 位错量远不足 1 km(图 2b), 因此该断裂右旋走滑运动并不显著。尹功名等<sup>[11]</sup>在大具盆地发现了逆冲现象的断层剖面, 认为哈巴—玉龙雪山东麓断裂带垂直运动性质为逆冲, 但是野外调查时发现, 该剖面可能属于德钦—中甸—大具断裂带。

关于哈巴—玉龙雪山东麓断裂带垂直滑动速率的认识也存在差异。前人在大具盆地大坝子断层崖开展了垂直滑动速率研究, 但其结果相差数倍, 分别



(a) 哈巴—玉龙雪山东麓断裂带展布；(b) 哈巴雪山山前冰碛垄错断现象；(c) 大坝子断层崖照片（镜向 SE）；(d) 大坝子断层崖无人机摄影测量 DEM

图 2 哈巴—玉龙雪山东麓断裂带展布及典型断错地貌

Fig. 2 Distribution of the Haba-Yulong Snow Mountain east foot fault zone and typical faulted landform

为 0.30~0.49 mm/a<sup>[7]</sup>和 2.37~3.94 mm/a<sup>[11]</sup>。主要原因在于，已有研究对大具盆地巨厚层堆积体的成因及时代存在不同认识。吴中海等<sup>[7]</sup>认为堆积体为“冰水侵蚀阶地”，在断层崖上下盘埋深 1.5~3 m 处采集了 3 个钙质样品，应用 U 系测年方法，测得碎屑堆积阶地形成时代为 (182.3 ± 17.7)~(107.9 ± 8.3) ka，大致对应深海氧同位素 MIS 6-5 阶段。Kong 等<sup>[12]</sup>认为大具盆地的碎屑堆积是被改造的冰碛坝，地表出露巨砾的 <sup>10</sup>Be/<sup>26</sup>Al 暴露年龄揭示，断层崖上下盘地貌面形成时代为 33.8~20.3 ka。Wang 等<sup>[13]</sup>认为，大具盆地发育 6 级河流阶地，并认为断层崖两盘分别为 T6 和 T5 阶地面。尹功名等<sup>[14]</sup>认为，大具盆地金沙江沿岸的堆积物并不是河流相，而是末次冰期哈巴雪山的冰水堆积物。大坝子断层崖走向与金沙江近乎垂直，断层上下盘发育相互对应的次级切割陡坎<sup>[7]</sup>，

并且断层两盘的暴露年龄也不支持两盘为不同期次地貌面的观点<sup>[12]</sup>，因此断层崖上下盘阶地地面为不同时期地貌面的可能性较小。胡晓等<sup>[15]</sup>系统采集了埋深 1~2 m 的 34 个土壤碳酸盐铀系样品，认为盆地中巨厚的碎屑沉积事件发生于 (16.34 ± 1.22) ka 以来，成因可能为滑坡或洪水堆积。

综上所述，吴中海等<sup>[7]</sup>测得的地貌面年龄明显偏老，这可能与测年手段和采样位置有关，因此其滑动速率偏小。尹功名等<sup>[11]</sup>滑动速率可能更为可靠，但是与该点以北 6 km 处冰水扇所计算结果相比仍较大<sup>[7, 10]</sup>。无人机摄影测量结果显示，大坝子断层崖高约 78.7 m (图 2d)。综合大具盆地碎屑堆积物测年结果来看，碎屑堆积物成因可能较为复杂，大具盆地发育碎屑堆积时断层崖可能已有一定高差，而洪水或冰水未能将高差“抹平”。因此，该点滑动速率的计

算不能简单用累积位移与地貌面形成时代的比值计算,应考虑冰水—冲洪积物堆积之前就已经存在的累积位移。哈巴雪山山前冰水扇陡坎所计算的结果更能代表该断裂晚更新世以来的滑动速率,约为 $0.4\sim 1.4\text{ mm/a}$ <sup>[7,11]</sup>。哈巴—玉龙雪山东麓断裂带曾发生1996年丽江M7.0大地震,该断裂带古地震复发历史尚不清晰,需要开展古地震探槽工作。

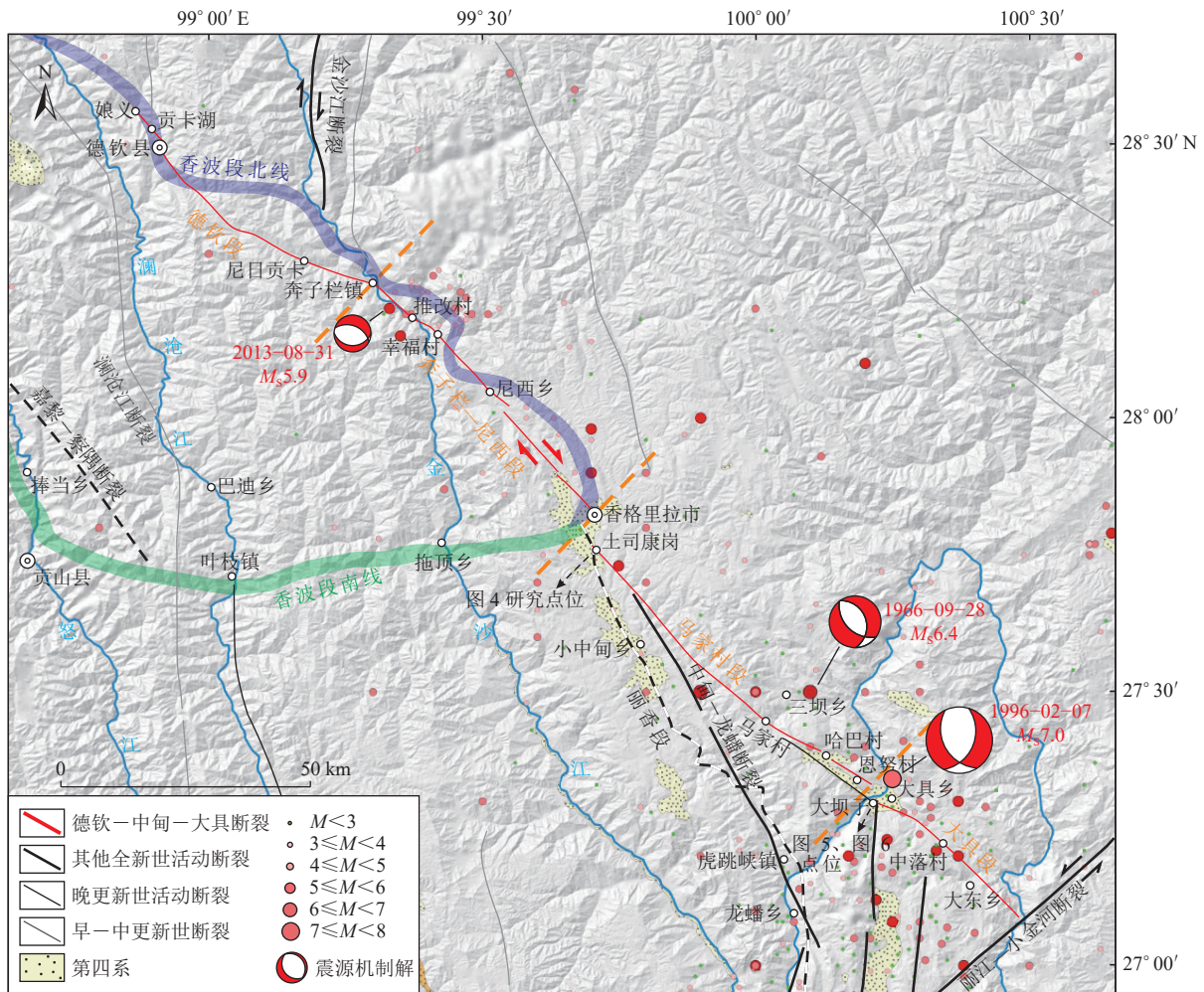
### 1.2 德钦—中甸—大具断裂带( $F_3$ )

德钦—中甸—大具断裂带起于德钦县西北,向南东经奔子栏、尼西、香格里拉、大具,延伸至金沙江畔的大东乡一带,全长约230 km。德钦—中甸—大具断裂带形成于加里东期之后经历多次构造运动,现今以右旋走滑运动为主,是川滇菱形块体西北边缘的一条重要的NW向走滑断裂,起着调节高原物质向南东运动的作用<sup>[16]</sup>。该断裂带由北西至南东

大致可以分为4段,即德钦段、奔子栏—尼西段、马家村段和大具段(图3)。

德钦段位于断裂北西端,由娘义经贡卡湖、德钦县城、尼日贡卡延伸至奔子栏一带,整体呈向南西方向凸出的弧形,全长约57 km(图3),以右旋走滑为主,兼具一定的正断分量。沿线水系同步右旋偏转、断层垭口、线性河谷等地貌现象发育<sup>[16-19]</sup>。德钦段全新世以来有过活动,探槽揭露在 $(1140\pm 30)\sim(1010\pm 30)\text{ aBP}$ 发生过一次古地震事件,在 $(570\pm 30)\sim(410\pm 30)\text{ aBP}$ 也可能发生过一次地震事件<sup>[20]</sup>。

奔子栏—尼西段全长约62 km,该段以近30°的走向变化与德钦段分界(图3)。在奔子栏—幸福村一带沿金沙江展布,主要表现为断层垭口。在幸福村—尼西一带主要表现为线性河谷、呈线性发育的古滑坡群以及冲沟同步右旋偏转等断错地貌现象。在金



地震数据来源于国家地震科学数据中心(<https://data.earthquake.cn/>); 断裂展布据文献 [4, 5, 24] 修改; 震源机制解来源于文献 [7, 22]

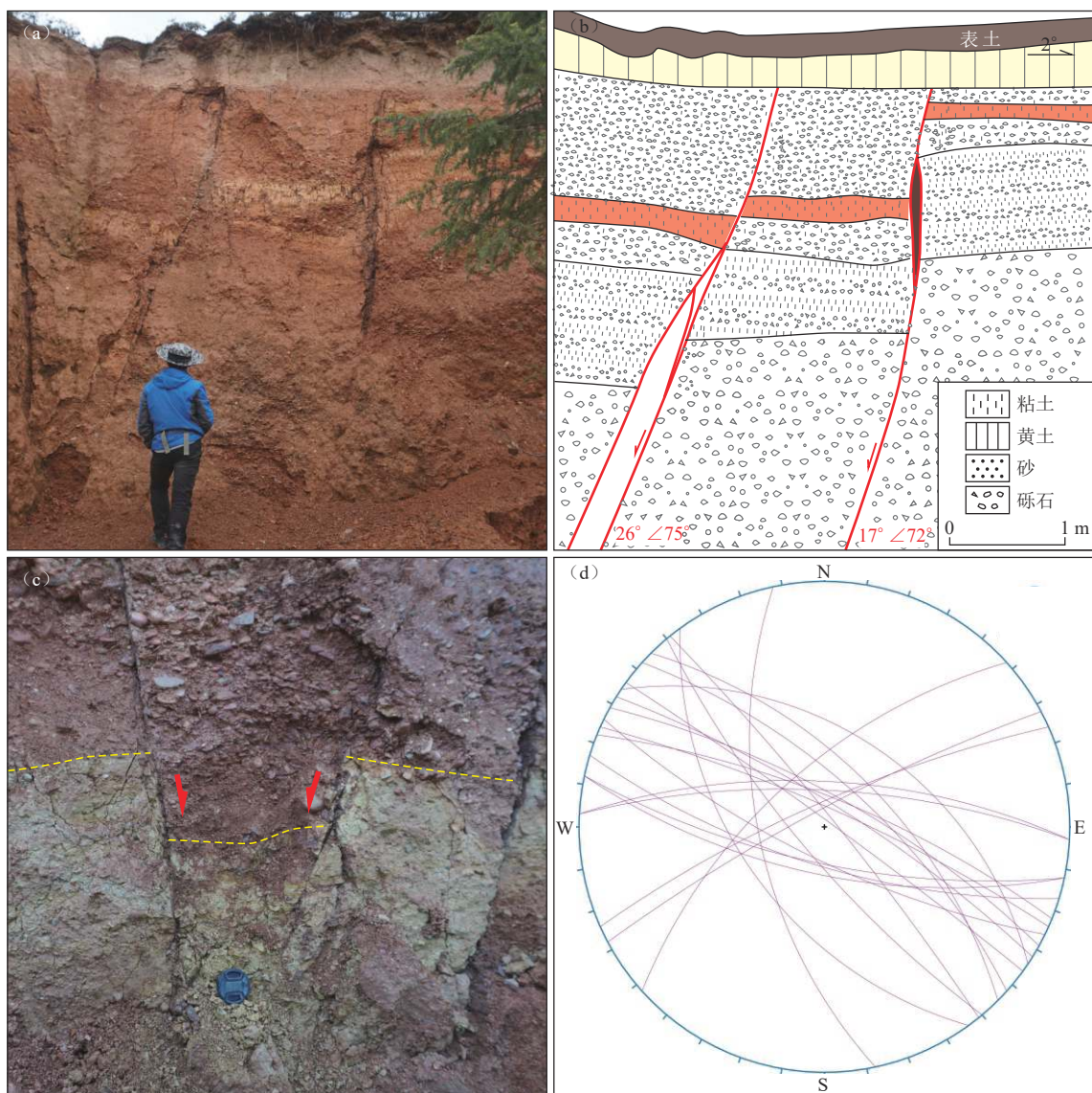
图3 德钦—中甸—大具断裂带展布

Fig. 3 Distribution of Deqin-Zhongdian-Daju fault zone

沙江左岸推改村一带的冲沟内出露一断层剖面，剖面见明显的砾石定向现象，揭示该段具有一定的逆冲分量<sup>[18]</sup>。奔子栏—尼西段曾于 2013 年发生奔子栏 M5.9 地震，地震等烈度线呈北西—南东向展布，震源机制解显示地震以正断运动为主(图 3)。这与推改村断层剖面所揭示的运动性质不一致，表明奔子栏 M5.9 地震可能与局部拉张应力的释放有关<sup>[21]</sup>，也可能与川滇块体西南边界构造应力场的转变有关<sup>[22]</sup>，暗示了该区构造活动的复杂性。

马家村段与奔子栏—尼西段呈右阶斜列，阶区宽度为 6~7 km，由香格里拉盆地南部边缘的土司康岗向南东经马家村、哈巴村延伸至恩努村以南，全

长 70 km 左右(图 3)。断裂在土司康岗一带表现为断层槽谷，在槽谷延伸方向的取土坑内出露多个断裂剖面，断面优势倾向为南南西和北北东方向，倾角集中在 70°~80°(图 4d)。取土坑中一断层剖面揭示断裂垂直运动为正断，且并未错断顶部的黄土层(图 4a—c)。王佳龙等<sup>[23]</sup>测得黄土层底部 OSL 年龄为  $(21.37 \pm 2.3)$  ka，揭示该段最新一次活动发生在全新世之前。在哈巴雪山山前，断裂控制了哈巴盆地的东边界，表现为断层陡崖，推测与哈巴—玉龙雪山东麓断裂在深部相接，构成了负花状构造。马家村段现今地震活动性较德钦段与奔子栏—尼西段强，曾分别于 1933 年、1966 年发生过 M6¼、M6.4 强震，且有



(a) 土司康岗断层(27.7558°N, 99.7090°E)剖面照片(镜向 NE); (b) 土司康岗断层剖面素描图; (c) 土司康岗小型地堑(27.7558°N, 99.7090°E)剖面照片(镜向 NE); (d) 土司康岗 21 条断层极射赤平投影图

图 4 德钦—中甸—大具断裂带土司康岗断层剖面

Fig. 4 Fault profile of Deqin-Zhongdian-Daju fault zone in Tusikang

感地震、微震和中强震的频率也较高(图3),这可能意味着断裂活动性的增强。

大具段位于断裂南东端,整体从大具乡向南东经中落村、大东乡延伸至金沙江畔,全长约38 km(图3)。在大东乡以南,地形起伏度较大,滑坡、崩塌等地质灾害发育,断裂形迹不清晰。大东乡以北断裂表现为北西向线性冲沟、槽谷,以中落村一带显著。大具乡大坝子上发育地表破裂,主要有雁列状的张裂缝、挤压鼓包、凹陷坑、挤压垄脊和断层陡坎等,破裂较为连续,长约600 m,宽120 m左右<sup>[10,24]</sup>。无人机摄影测量显示,该段地表破裂样式整体表现为马尾状构造,为大具段断裂尾端(图5a—b)。结合断层陡坎延伸方向取土坑内断层剖面所揭示断层产状(图5d—e),发现陡坎与断层倾向一致,据此认为断层垂直运动性质仍为正断,“逆冲”现象<sup>[10-11]</sup>可能是重力滑塌作用造成的假象(图5e)。关于大坝子地表破裂形成时代也存在不同认识。李光涛等<sup>[10]</sup>认为可能形成于1996年丽江M7.0地震或者1966年中甸M6.4地震。程理等<sup>[24]</sup>认为可能不是丽江M7.0地震产生的,其发生时代不会超过距今1000 a。基于锁眼卫星影像发现,1967年的历史影像上也存在地表破裂形迹(图6),据此推测该处地表破裂可能并非形成于1996年丽江M7.0地震,并且1966年M6.4地震形成地表破裂的可能性也较低。该处地表破裂应形成于距今1000 a以来1966年之前的一次古地震。

大坝子台地上发育多条侵蚀沟,其中一条侵蚀沟边缘右旋位错量约为7 m(图5b),该区全新世冰水—冲洪积台地的切割主要发生于距今约4~6 ka<sup>[7,25]</sup>。因此,德钦—中甸—大具断裂带中全新世以来右旋走滑速率约为1.2~1.8 mm/a。大坝子台地断层陡坎高约(5.31±0.5) m(图5c),累积位移开始的时间与台地表面碎屑堆积的时间一致,即(16.34±1.22) ka<sup>[15]</sup>,由此估算断裂垂直滑动速率约为0.3~0.4 mm/a。本文结果与程佳<sup>[26]</sup>、常祖峰等<sup>[16-17]</sup>、李光涛等<sup>[10]</sup>、吴富晓等<sup>[18]</sup>分别估算断裂现今(1.5±0.9 mm/a)、中全新世(1.7~2.0 mm/a)、晚更新世(1.5~2.4 mm/a)、中更新世以来(1.3~1.7 mm/a)的滑动速率相当,小于Armijo等<sup>[27]</sup>和沈军等<sup>[28]</sup>所认为的滑动速率(4~6 mm/a)。作为川滇块体西北边界断裂带之一,德钦—中甸—大具断裂带的地震危险性不容忽视,但是该断裂带的古地震研究较为薄弱,其古地震复发周期需要进一步厘定。

### 1.3 维西—乔后断裂带( $F_4$ )

维西—乔后断裂带又称为维西—乔后—巍山断

裂带,断裂北西端大致起于澜沧江畔,向南东经白济汛乡、维西县、乔后镇、漾濞县,延伸至巍山县一带,全长超过280 km。断裂带南与红河断裂带相连,北与金沙江断裂带相接,新生代以来具有与红河断裂和金沙江断裂相似的运动学特征、相同的地质演化历史和构造变形机制,从新生代早期的左旋走滑运动转变成上新世以来的右旋走滑运动<sup>[29-30]</sup>。

维西—乔后断裂带可以划分为玉狮场以北段(北段)、玉狮场—平坡段(中段)、巍山段(南段)3段<sup>[29]</sup>(图7a)。南段沿巍山盆地西缘展布,全长约40 km,最新活动时代在晚更新世末期,以正断为主兼右旋走滑,晚更新世以来垂直滑动速率约为0.18~0.32 mm/a<sup>[29]</sup>。中段沿线通甸、马登、乔后、炼铁等第四纪盆地呈串珠状发育,全长约165 km,为全新世活动断裂,运动性质以右旋走滑为主,兼具正断分量,晚第四纪以来走滑速率为1.25~2.4 mm/a<sup>[29-31]</sup>。玉狮场—平坡段历史中强震多发,尤其是2013年以来先后发生2013年M5.5、2017年M5.1以及2021年漾濞M6.4地震,显示断裂地震活动性增强,并且具有向东南或北迁移的可能性<sup>[32]</sup>。维西—乔后断裂带北段控制了维西盆地的边界,常祖峰等<sup>[29]</sup>认为断裂起于维西盆地北部的白济汛一带。遥感解译发现,在白济汛以北康普乡东发育了长约39 km的近南北向线性地貌(图7b—c),主要为断层槽谷和垭口地貌,初步认为该断裂带仍继续向北延伸。中甸幅1:20万地质图上显示,三叠系上兰组(T2s)高角度逆冲于侏罗系花开左组(J2h)之上,推测维西—乔后断裂带北段运动性质以走滑为主兼具逆冲分量。关于该段活动性及其构造归属仍需进一步研究。

### 1.4 中甸—龙蟠断裂带( $F_2$ )

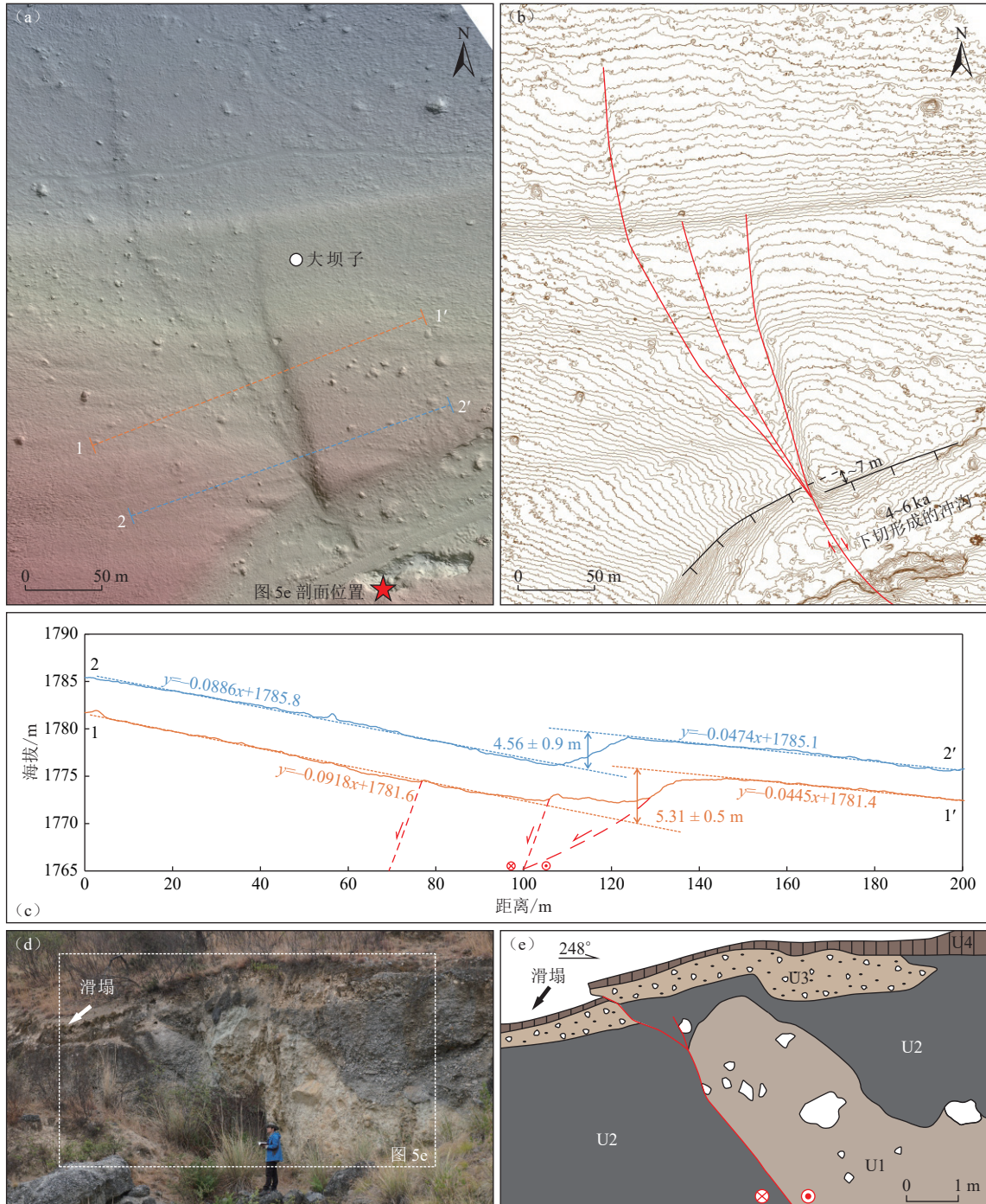
中甸—龙蟠断裂带北起香格里拉盆地南缘,向南东经小中甸盆地东缘延伸至龙蟠乡附近。该断裂带与德钦—中甸—大具断裂带在香格里拉盆地南缘交汇。张永双等<sup>[33]</sup>认为中甸—龙蟠断裂带为德钦—中甸断裂的中段和南东段,为全新世活动断裂。《中国及邻近地区地震构造图(1:400万)》中也将中甸—龙蟠断裂带标注为全新世活动断裂<sup>[4]</sup>。但以往的研究并未给出明确的全新世活动证据,该断裂活动性及其构造意义值得进一步研究。

### 1.5 金沙江断裂带( $F_5$ )

金沙江断裂带是控制新生代康滇陆块西南缘的边界断裂,也是川滇菱形块体的西北边界断裂<sup>[34]</sup>,断裂北起白玉附近,向南经巴塘、德荣、香格里拉,至

剑川以南与红河断裂相交。断裂总体走向呈 SN 向，北段呈 NNW 向延伸，南段呈 NNE 向展布，在平面上呈一略向东凸出的弧形，弧顶在巴塘附近，是由 6~7 条主干断裂组成的一条长约 700 km，EW 宽约 80 km 的复杂构造带<sup>[35]</sup>。金沙江断裂带被 NNE 向巴

塘断裂带和 NWW 向德钦—中甸—大具断裂带截切，据此可分为北、中、南 3 段，其南段无新活动迹象<sup>[17]</sup>，北段局部段落存在晚更新世活动<sup>[36]</sup>，中段晚第四纪活动显著<sup>[17, 35, 37-40]</sup>。金沙江断裂带中段结构复杂，从东至西主要由字嘎寺—德钦断裂、本协—大盖



(a) 大坝子(27.2949°N, 100.2171°E)地表破裂带和断层陡坎 DEM; (b) 大坝子地表破裂带和断层陡坎地形等高线; (c) 大坝子断层陡坎地形剖面线; (d) 大坝子断层(27.2930°N, 100.2181°E)剖面照片(镜向 SE); (e) 大坝子断层剖面素描图(U1: 灰黄色含砾黏土层; U2: 灰色砾石层; U3: 灰黄色砾石层; U4: 表土层)

图 5 德钦—中甸—大具断裂带大坝子断错地貌和断层剖面

Fig. 5 Fault landforms and profiles of the Deqin-Zhongdian-Daju fault zone in Dabazi

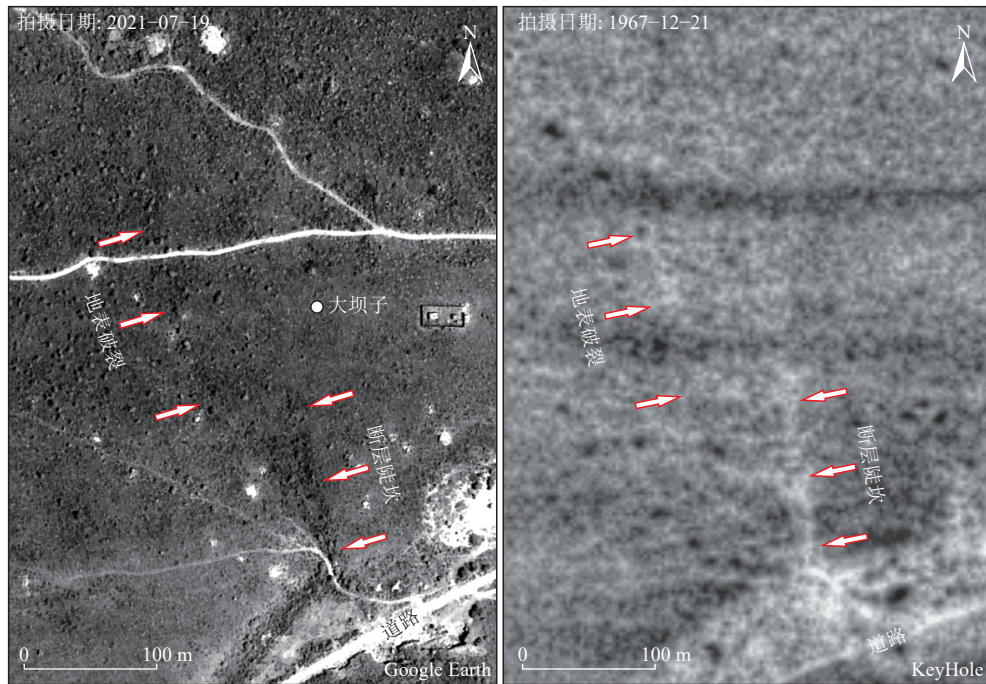


图6 德钦—中甸—大具断裂带大坝子(27.2949°N, 100.2171°E)地表破裂遥感影像

Fig. 6 Remote sensing image of surface rupture in Dabazi (27.2949°N, 100.2171°E) of Deqin-Zhongdian-Daju fault zone

顶断裂(金沙江西界断裂)、曾大同断裂(雄松—苏洼龙断裂、金沙江西支断裂)、金沙江主断裂、岗托—义敦断裂(金沙江东界断裂)等组成。其中,曾大同断裂、金沙江主断裂与香波段北线呈近距离展布,为晚更新世—全新世活动断裂。

曾大同断裂,又被称为雄松—苏洼龙断裂,是金沙江断裂带的西支断裂。该断裂中段北起于巴塘县竹巴龙一带,向南沿金沙江河谷左右岸摆动,延伸至白茫雪山垭口一带,南东端局部分支断裂归并至NWW向的德钦—中甸—大具断裂,断裂整体走向SN—NNE,倾向不定,倾角60°左右<sup>[17]</sup>。该断裂晚第四纪活动性显著,在王大龙村附近发育一组长大于200 m,宽大于100 m,呈近南北向发育、左阶斜列的地裂缝,被认为是1923年10月20日巴塘6.5级地震的同震地表破裂<sup>[37]</sup>。在拿荣北10 km处、尼中村一带均发现了断裂晚第四纪活动的剖面证据,揭示了断裂晚更新世—全新世以来有过活动,主要运动性质表现为右旋走滑<sup>[17,40]</sup>。

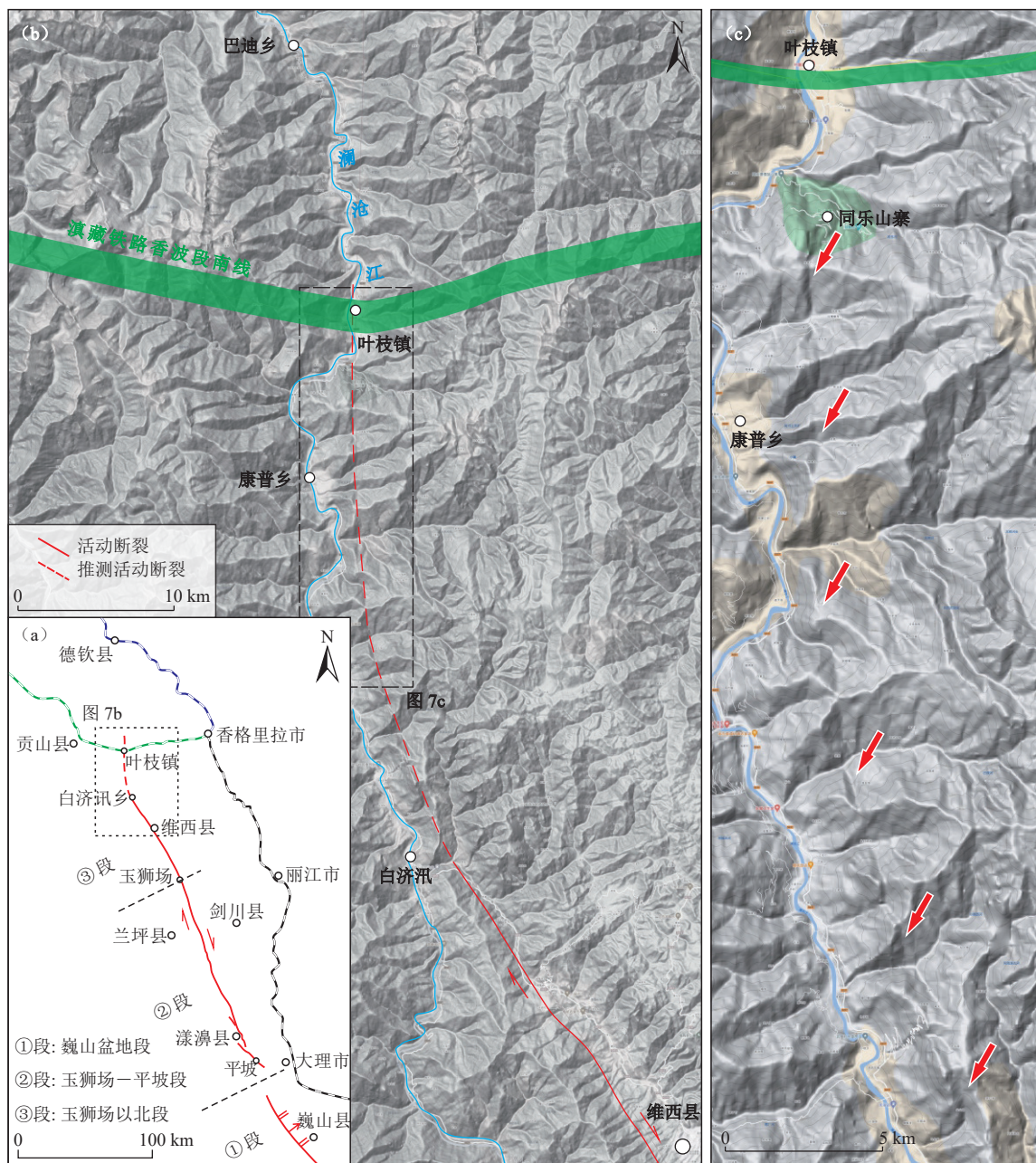
金沙江主断裂,又被称为红军山断裂、核桃坪—将巴顶断裂、朗多—扎萨通断裂等<sup>[37]</sup>,断裂整体呈近SN向展布,北起于巴塘县城东部的红军山一带,向SSE方向经刀许村延伸至红东村附近,随后断裂转为近SN向展布,经亚日贡乡、中咱镇延伸到金沙江畔日雨镇一带,全长约184 km。断裂周边强震多

发,1989年巴塘县城附近发生6.7级强震群,唐荣昌和韩渭宾<sup>[37]</sup>认为,地震与金沙江主断裂北部活动有关。金沙江主断裂中部断错地貌最为显著,遥感解译发现,在亚日贡—中咱一带近SN向断层槽谷、水系同步右旋偏转等地貌现象清晰,冲沟右旋偏转量最大可达800 m左右,显示断裂右旋走滑作用强烈。常玉巧等<sup>[38]</sup>将亚日贡—中咱段最新一次事件限定在(1940±30)~(950±30) a BP之间,为全新世活动断裂。常祖峰等<sup>[17]</sup>在断裂南部的日雨附近发现了全新世活动的地质地貌证据,认为中全新世以来断裂右旋走滑速率、垂直逆冲速率分别为3.5~4.3 mm/a和0.9~1.1 mm/a。

## 2 藏东南地区主要活动断裂带

### 2.1 巴塘断裂带南段( $F_6$ )

巴塘断裂带北东起于莫西一带,向南西沿巴曲河谷经松多、巴塘县城、竹巴龙,延伸至莽岭以南<sup>[35,41-42]</sup>。巴塘断裂带以右旋走滑为主,斜切金沙江构造带主体,右旋错断金沙江断裂一系列分支断裂,断距为15~20 km,其发育时代稍晚于金沙江构造带,系特提斯造山系后期陆内变形作用的产物<sup>[35]</sup>。巴塘断裂带晚第四纪活动强烈,右旋走滑速率约为5.5~8.5 mm/a<sup>[42-43]</sup>,公元元年以来断裂活动加剧,地震活动进入丛集阶段<sup>[41]</sup>,曾于1870年发生 $M7\frac{1}{4}$ 地



(a) 维西—乔后断裂带几何展布及分段特征；(b) 维西—乔后断裂带北段几何展布；  
 (c) 康普乡东断层槽谷、断层垭口线性地貌(影像来源于谷歌地形图)

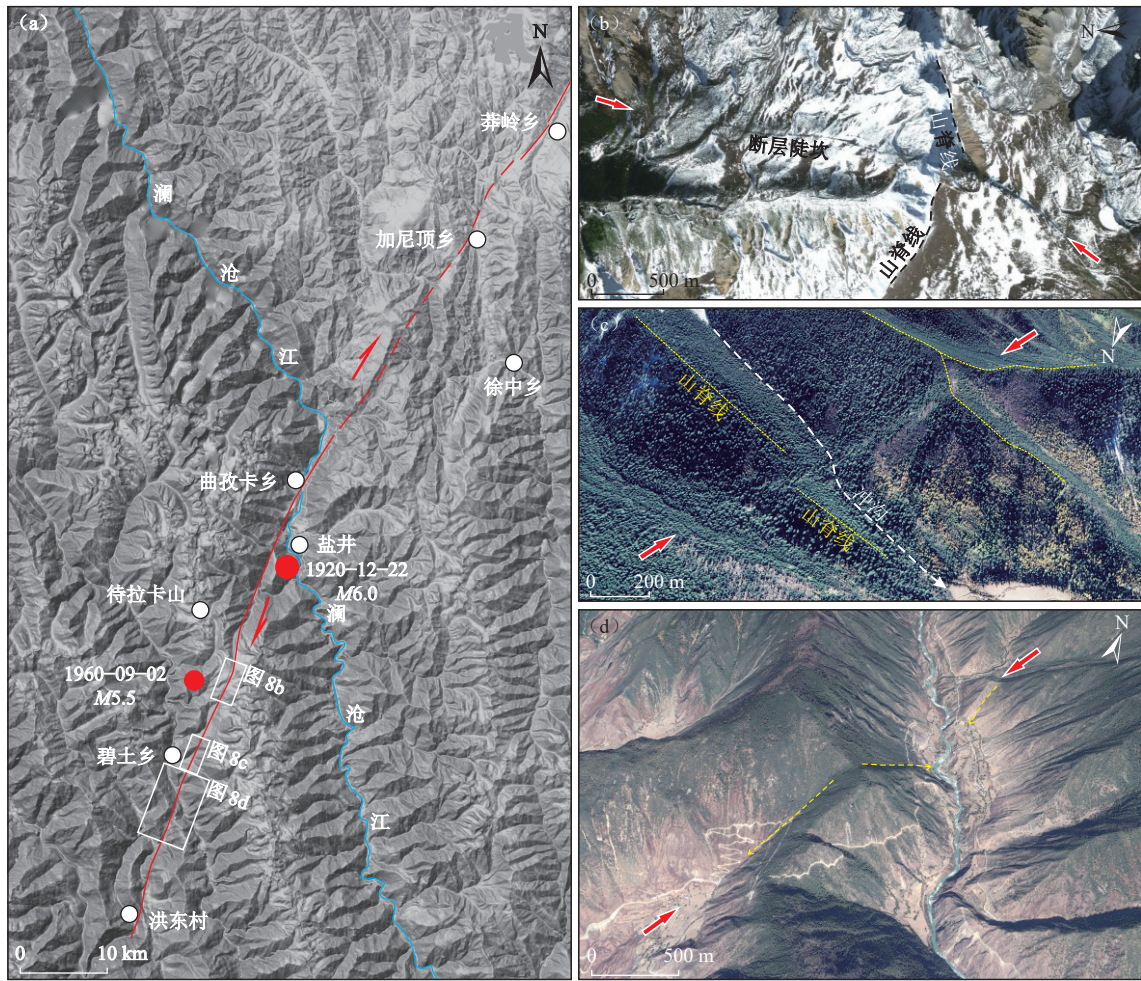
图 7 维西—乔后断裂带展布及康普乡一带断错地貌

Fig. 7 Distribution of the Weixi-Qiaohou fault zone and faulted geomorphology in Kangpu area

震,造成巨大人员伤亡<sup>[43-44]</sup>。

关于巴塘断裂带南段的几何展布尚存在不同认识。周荣军等<sup>[35]</sup>认为巴塘断裂带可以延伸至澜沧江畔,也有研究认为断裂在莽岭一带形迹逐渐消失<sup>[42-43]</sup>。1920年莽岭以南的盐井附近发生M6.0地震<sup>[45]</sup>,极震区发育北北东向地裂缝,西藏察隅、当雄大震考察队<sup>[46]</sup>认为,此次地震的发震断裂可能为巴塘断裂带的南延部分。近年来的研究发现,莽岭以南

发育北东向断续展布的线性地貌,碧土—盐井一带断错地貌现象显著,王格<sup>[47]</sup>、张达等<sup>[48]</sup>称之为闹中断裂(图8a)。遥感解译发现,在曲孜卡/盐井附近,澜沧江右旋偏转约15 km,且北北东向线性冲沟发育。待拉卡雪山垭口附近发育长约5 km的断层陡坎,陡坎沿线冲沟、山脊发生同步右旋偏转(图8b)。沿陡坎向南西追索可以发现,碧土乡东线性沟槽发育,沿线冲沟和山脊亦同步右旋偏转(图8c),线性地貌可



(a) 巴塘断裂带南段闹中断裂展布; (b) 待拉卡雪山断层陡坎及山脊右旋偏转(影像来源于世纪空间);  
(c) 碧土乡东山脊和冲沟同步右旋偏转; (d) 碧土乡南线性冲沟及断层垭口(影像来源于谷歌地球)

图8 巴塘断裂带南段闹中断裂遥感影像特征

Fig. 8 Remote sensing image characteristics of the Naozhong fault in the southern section of the Batang fault zone

以追索至碧土乡南(图8d), 洪东村以南断裂形迹逐渐模糊。碧土乡附近出露多个基岩断层剖面, 揭示闹中断裂具有右旋走滑兼正断的运动性质, 断裂带内物质测年结果显示, 断裂活动时代在18.90~0.61万年之间<sup>[47]</sup>。因此, 巴塘断裂带过莽岭以后可能继续向南西延伸, 以右旋走滑运动为主, 可能为晚更新世—全新世活动断裂, 在历史时期曾发生M6.0强震, 地震危险性不容忽视。但是, 目前尚未见明确的晚第四纪活动剖面证据的报道, 仍需进一步研究。

## 2.2 澜沧江断裂带( $F_7$ )

澜沧江断裂带为一条深大断裂带, 发育于班公湖—丁青—碧土—孟连结合带和金沙江—哀牢山—滕条河结合带之间<sup>[49]</sup>, 大致沿澜沧江展布, 总体走向NNW, 长度约1600 km。按照断裂活动性, 以梅里雪山地区为界, 可以大致将澜沧江断裂带分为南北

两段, 其南段整体为早—中更新世以来的活动断裂<sup>[33, 50]</sup>, 北段为全新世活动断裂<sup>[4]</sup>。石圣<sup>[51]</sup>进一步将北段的昌都—盐井段划分为昌都段和芒康段, 认为昌都段为晚更新世活动断裂。但是, Ren等<sup>[52]</sup>报道了昌都察雅附近澜沧江断裂带巴青—类乌齐断裂全新世的活动证据, 认为该断裂晚第四纪左旋滑动速率约为1.5 mm/a。芒康段整体为早—中更新世断裂, 在曲孜卡附近存在局部全新世活动性<sup>[51]</sup>, 但曲孜卡探槽剖面也可能是北东向巴塘断裂带南段闹中断裂活动所致。澜沧江断裂带整体展布于深切河谷内, 断裂形迹模糊, 未来需要加强其活动性的研究。

## 2.3 怒江断裂带邦达断裂( $F_8$ )

怒江断裂带邦达断裂大致沿玉曲河西岸展布, 为班公湖—怒江缝合带东边界<sup>[53]</sup>。钟宁等<sup>[54]</sup>通过遥感解译、断错地貌、探槽和<sup>14</sup>C测年, 对怒江断裂带

邦达断裂中段的发育特征与活动性进行了调查研究,认为其在 $(1457 \pm 51)$  a BP以来发生过古地震事件,为全新世活动断裂。韩明明<sup>[55]</sup>依据最新事件的水平同震位错量( $\sim 2$  m)和垂直位错量( $\sim 0.3$  m)及其限定年代,估算邦达断裂中段的水平滑动速率 $> 1$  mm/a,垂直滑动速率为 $> 0.15$  mm/a。沿邦达断裂遥感影像线性地貌追索可以发现,邦达镇以南断裂形迹不再清晰,缺少晚第四纪活动的剖面证据,仍需进一步调查研究。

#### 2.4 边坝—洛隆断裂带( $F_9$ )

边坝—洛隆断裂带主要包括十字卡断裂、腊久—八宿断裂、八宿断裂等。该断裂带北西起于边坝以西,向南东经洛隆、腊久,在八宿一带转为正东,过八宿向南东延伸至十字卡以南<sup>[33,56]</sup>。基于遥感解译和野外调查,韩明明等<sup>[56]</sup>在八宿县城和洛隆县城一带获得了多个断错晚更新世—全新世地层的剖面,结合AMS  $^{14}\text{C}$ 测年,揭示边坝—洛隆断裂为一条全新世活动断裂,活动性质以左旋走滑为主,最新一次活动发生在 $(3310 \pm 30)$  a BP之后,可能对应1642—1654年洛隆 $M \geq 7$ 地震事件。边坝—洛隆断裂带为班公湖—怒江缝合带东南段西边界<sup>[56]</sup>,向南延伸可能与滇藏铁路香波段北线相交,但十字卡以南段仍缺少断裂活动的剖面证据,亟待调查研究。

#### 2.5 嘉黎—察隅断裂带中南段( $F_{10}$ )

嘉黎—察隅断裂带为喀喇昆仑—嘉黎断裂带的东段及其东延部分,断裂西北自那曲南延伸,向南东经桑地、麦地藏布、阿扎,沿易贡藏布河到通麦后,沿贡日嘎布曲向南东过察隅后出境,被认为是青藏高原主体大幅度向东挤出的南部边界<sup>[27]</sup>。钟宁等<sup>[57]</sup>对嘉黎—察隅断裂带中南段开展了遥感解译、野外调查及晚第四纪湖相软沉积物变形构造的研究,结合古地震探槽和地质测年等手段,新识别出2次古地震事件,时间限定在 $(16.13 \pm 1.06) \sim (15.66 \pm 0.92)$  ka和 $(8630 \pm 600) \sim (9561 \pm 37)$  a BP。综合宋键等<sup>[58]</sup>、Wang等<sup>[59]</sup>和赵远方等<sup>[60]</sup>资料的分析,嘉黎—察隅断裂带中南段晚第四纪以来可能发生了5次古地震事件,分别为16130~15660 a、 $(11060 \pm 940)$  a、8630~9561 a BP、2780~2160 a BP和650 a BP,地震复发周期约为2000~5000 a。前人对嘉黎—察隅断裂带

晚第四纪滑动速率还存在争议,综合最新的GPS数据表明<sup>[58,61]</sup>,嘉黎—察隅断裂带中段和东南段水平滑动速率为1.3~2.0 mm/a和2~4 mm/a,地壳缩短速率为2.5~2.9 mm/a和5.1~6.2 mm/a<sup>[57]</sup>,为右旋挤压性质。作为重要的边界断裂带<sup>[27]</sup>,嘉黎—察隅断裂带的地震危险性不容忽视。

### 3 结论及建议

滇藏铁路香波段沿线至少发育了德钦—中甸—大具断裂带、维西—乔后断裂带、巴塘断裂带等10余条晚更新世—全新世活动断裂带。研究发现,哈巴—玉龙雪山东麓断裂带以正断运动为主,晚第四纪以来垂直滑动速率约为0.4~1.4 mm/a,为1996年丽江 $M7.0$ 地震的发震断裂。德钦—中甸—大具断裂带以右旋走滑为主,晚第四纪以来右旋走滑速率约为1.2~1.8 mm/a,垂直滑动速率约为0.3~0.4 mm/a,断裂南段强震多发,距今1000 a以来可能发生过地表破裂型地震事件。维西—乔后断裂带北段可能延伸至叶枝镇附近,以走滑运动为主,兼具一定的逆冲分量。巴塘断裂带南段闹中断裂可能为晚更新世—全新世活动断裂,以右旋走滑运动为主,断错地貌清晰,具有发生强震的构造背景。嘉黎—察隅断裂带为右旋挤压性质,晚第四纪以来可能发生了5次古地震事件,地震复发周期约为2000~5000 a,未来地震危险性不容忽视。哈巴—玉龙雪山东麓断裂带、德钦—中甸—大具断裂带、巴塘断裂带和嘉黎—察隅断裂带均发生过强震破裂事件,具备发生大地震的能力,铁路工程需加强抗断和抗震设计研究。但是,滇藏铁路沿线活动断裂的研究普遍存在几何展布不清晰、活动时代及古地震历史不明确等不足,未来需要加强研究,特别需要关注与铁路线交汇或近距离展布的活动断裂带。此外,滇藏铁路香波段穿越了三江深切峡谷区,地质灾害频发,需加强地震—滑坡—堰塞湖溃坝等灾害链风险研究。

#### 致谢

衷心感谢审稿专家和编辑部提出的宝贵意见和建议。

#### 参考文献

[1] 邓军桥. 滇藏铁路总体设计目标及对策研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(6): 18-25

Deng J Q. Research on the overall design goals and countermeasures of the Yunnan-Tibet railway[J]. Journal of Railway Engineering

- Society, 2023, 40(6): 18-25
- [2] 卿三惠, 黄润秋, 杨英, 等. 滇藏铁路重大工程地质问题及线路走向研究[J]. 铁道工程学报, 2007(10): 6-11  
Qing S H, Huang R Q, Yang Y, et al. Research on the major engineering geological problems and route strike scheme of Yunnan-Tibet railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(10): 6-11
- [3] 张永双, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 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, 2022, 96(5): 1736-1751  
Zhang Y S, Wu R A, Guo C B, et al. Geological safety evaluation of railway engineering construction in Plateau mountainous region: Ideas and methods[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(5): 1736-1751
- [4] 徐锡伟, 韩竹军, 杨晓平, 等. 中国及邻近地区地震构造图[M]. 北京: 地震出版社, 2016  
Xu X W, Han Z J, Yang X P, et al. Seismic tectonic map of China and its neighboring areas[M]. Beijing: Seismological Press, 2016
- [5] Zhong N, Zhang X B, Guo C B, et al. Geological risk assessment of traffic engineering construction among 7.0–8.5 magnitude earthquake areas: Practice from the Sichuan-Tibet transported corridor in the eastern Tibetan Plateau[J]. China Geology, 2023, in press, doi: 10.31035/cg2023055
- [6] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 2001, 294(5547): 1671-1678
- [7] 吴中海, 张永双, 胡道功, 等. 滇西北哈巴—玉龙雪山东麓断裂的晚第四纪正断层作用及其动力学机制探讨[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(11): 1361-1375  
Wu Z H, Zhang Y S, Hu D G, et al. Late Quaternary normal faulting and its kinematic mechanism of eastern piedmont fault of the Haba-Yulong Snow Mountains in northwestern Yunnan, China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(10): 1470-1484
- [8] 王绍晋, 龙晓帆, 罗淑进. 丽江地震序列的震源机制、发震应力场和破裂特征[J]. 地震研究, 1997, 20(1): 26-34  
Wang S J, Long X F, Luo S J. The focal mechanism, seismogenic stress field and rupture characteristics of the Lijiang earthquake sequence[J]. Journal of Seismological Research, 1997, 20(1): 26-34
- [9] 王运生, 王士天, 李渝生. 丽江 7.0 级大震发震机制新见[J]. 西北地震学报, 2000, 22(4): 442-446  
Wang Y S, Wang S T, Li Y S. A new idea on the mechanism of Lijiang  $M_s7.0$  earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2000, 22(4): 442-446
- [10] 李光涛, 苏刚, 程理, 等. 中甸—大具断裂南东段晚第四纪活动的地质地貌证据[J]. 地震地质, 2019, 41(3): 545-560  
Li G T, Su G, Cheng L, et al. Late Quaternary activity of the southeastern section of Zhongdian-Daju fault[J]. Seismology and Geology, 2019, 41(3): 545-560
- [11] 尹功明, 苏刚, 丁锐, 等. 云南玉龙雪山东麓断层的运动性质及其地貌意义[J]. 第四纪研究, 2017, 37(2): 250-259  
Yin G M, Su G, Ding R, et al. Kinematic property of the eastern piedmont fault of Yulong Mountains and its implication for geomorphology in Yunnan, southwest of China[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(2): 250-259
- [12] Kong P, Na C, Fink D, et al. Moraine dam related to Late Quaternary glaciation in the Yulong Mountains, southwest China, and impacts on the Jinsha river[J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(27/28): 3224-3235
- [13] Wang H Y, Tong K Y, Hu G, et al. Dam and megafloods at the first bend of the Yangtze river since the Last Glacial Maximum[J]. *Geomorphology*, 2021, 373: 107491
- [14] 尹功明, 魏传义, 王躲, 等. 青藏高原东南缘河谷堆积物的复杂性: 以金沙江中游为例[J]. 第四纪研究, 2022, 42(3): 797-808  
Yin G M, Wei C Y, Wang D, et al. The multiple formation mechanism of the flu-lacustrine sediment in the southeast Tibetan Plateau: An example from the middle Jinsha river[J]. Quaternary Sciences, 2022, 42(3): 797-808
- [15] 胡晓, 游洋, 焦亚诺, 等. 金沙江大具盆地碎屑堆积体的土壤碳酸盐铀系测年[J]. 第四纪研究, 2022, 42(5): 1287-1296  
Hu X, You Y, Jiao Y N, et al. U-series dating of pedogenic carbonates from Daju basin, Jinsha river valley[J]. Quaternary Sciences, 2022, 42(5): 1287-1296
- [16] 常祖峰, 张艳凤, 李鉴林, 等. 德钦—中甸—大具断裂晚第四纪活动的地质与地貌表现[J]. 地震研究, 2014, 37(1): 46-52  
Chang Z F, Zhang Y F, Li J L, et al. The geological and geomorphic characteristic of Late Quaternary activity of the Deqin-Zhongdian-Daju fault[J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(1): 46-52
- [17] 常祖峰. 2013 年云南奔子栏  $M5.9$  地震发生的地震地质背景[J]. 地震地质, 2015, 37(1): 192-207

- Chang Z F. Seismotectonic background of the 2013 Benzilan  $M_{5.9}$  earthquake, Yunnan Province[J]. *Seismology and Geology*, 2015, 37(1): 192-207
- [18] 吴富晓, 蒋良文, 张广泽, 等. 青藏高原东南缘德钦—中甸断裂中北段活动性及地震危险性评估[J]. *地质学报*, 2019, 93(10): 2656-2665
- Wu F Y, Jiang L W, Zhang G Z, et al. The fault activity and seismic hazard assessment of central north segment of the Deqin-Zhongdian fault, southeastern Qinghai-Tibet plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(10): 2656-2665
- [19] 吴富晓, 蒋良文, 张广泽, 等. 德钦—中甸断裂奔子栏段精定位及铁路构造工程效应[J]. *高速铁路技术*, 2019, 10(3): 41-45
- Wu F Y, Jiang L W, Zhang G Z, et al. Precise localization of Benzilan section of Deqin-Zhongdian fault zone and effect of railway structural engineering[J]. *High Speed Railway Technology*, 2019, 10(3): 41-45
- [20] 常玉巧, 李西, 周青云, 等. 德钦—中甸断裂北西段全新世地震活动证据[J]. *地震研究*, 2023, 46(2): 261-270
- Chang Y Q, Li X, Zhou Q Y, et al. The Holocene activity evidence of paleo-earthquakes in the northwestern segment of the Deqin-Zhongdian fault[J]. *Journal of Seismological Research*, 2023, 46(2): 261-270
- [21] 王明明, 刘韶, 史丙新, 等. 2013年香格里拉—得荣  $M_{5.9}$  级地震震中区地质地貌调查[J]. *华南地震*, 2017, 37(1): 80-88
- Wang M M, Liu S, Shi B X, et al. Geological and geomorphic investigation in the epicenter area of the Shangrila-Dêrong  $M_{5.9}$  earthquake in 2013[J]. *South China of Seismology*, 2017, 37(1): 80-88
- [22] 吴微微, 龙锋, 杨建思, 等. 2013年川滇交界香格里拉—得荣震群序列的重新定位、震源机制及发震构造[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(5): 1584-1596
- Wu W W, Long F, Yang J S, et al. Relocation, focal mechanisms and seismogenic structure of the 2013 Shangrila-Dêrong earthquake swarm sequence in the Yunnan-Sichuan border region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(5): 1584-1596
- [23] 王佳龙, 谢富仁, 杨斌, 等. 云南大具断裂北段最新活动研究[J]. *内陆地震*, 2018, 32(4): 309-318
- Wang J L, Xie F R, Yang B, et al. Latest activity of Daju fault northern segment in Yunnan Province[J]. *Inland Earthquake*, 2018, 32(4): 309-318
- [24] 程理, 苏刚, 李光涛, 等. 云南中甸—大具断裂上新发现的地震地表破裂带[J]. *震灾防御技术*, 2019, 14(4): 797-809
- Cheng L, Su G, Li G T, et al. New finding of earthquake surface rupture on Zhongdian-Daju fault[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2019, 14(4): 797-809
- [25] 计凤桔, 郑荣章, 李建平, 等. 滇东、滇西地区主要河流低阶地地貌面的年代学研究[J]. *地震地质*, 2000, 22(3): 265-276
- Ji F J, Zheng R Z, Li J P, et al. Chronological research of geomorphic surface of lower terraces along several major rivers in the east and west of Yunnan Province[J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22(3): 265-276
- [26] 程佳. 川西地区现今地壳运动的大地测量观测研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2008
- Cheng J. Present-day crustal deformation of western Sichuan inferred from geodetic observations[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2008
- [27] Armijo R, Tapponnier P, Han T L. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B3): 2787-2838
- [28] 沈军, 汪一鹏, 任金卫, 等. 青藏高原东南部第四纪右旋剪切运动[J]. *新疆地质*, 2003, 21(1): 120-125
- Shen J, Wang Y P, Ren J W, et al. Quaternary dextral shearing and crustal movement in southeast Tibetan Plateau[J]. *Xinjiang Geology*, 2003, 21(1): 120-125
- [29] 常祖峰, 李鉴林, 常昊, 等. 维西—乔后断裂通甸—马登盆地晚第四纪活动特征[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(5): 875-887
- Chang Z F, Li J L, Chang H, et al. Late-Quaternary activity of Tongdian-Madeng basin segment of Weixi-Qiaohou fault[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2022, 58(5): 875-887
- [30] 常祖峰, 常昊, 臧阳, 等. 维西—乔后断裂新活动特征及其与红河断裂的关系[J]. *地质力学学报*, 2016, 22(3): 517-530
- Chang Z F, Chang H, Zang Y, et al. Recent active features of Weixi-Qiaohou fault and its relationship with the Honghe fault[J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22(3): 517-530
- [31] 任俊杰, 张世民, 侯治华, 等. 滇西北通甸—巍山断裂中段的晚第四纪滑动速率[J]. *地震地质*, 2007, 29(4): 756-764
- Ren J J, Zhang S M, Hou Z H, et al. Study of Late Quaternary slip rate in the mid-segment of the Tongdian-Weishan fault[J].

- Seismology and Geology*, 2007, 29(4): 756-764
- [32] 王光明, 彭关灵, 赵小艳, 等. 基于地震序列时空分布特征分析维西一乔后断裂带地震危险性[J]. 地震研究, 2021, 44(3): 367-379  
Wang G M, Peng G L, Zhao X Y, et al. Seismic risk of the Weixi-Qiaohou fault zone based on temporal-spatial distribution characteristics of earthquake sequences[J]. *Journal of Seismological Research*, 2021, 44(3): 367-379
- [33] 张永双, 胡道功, 吴中海, 等. 滇藏铁路沿线地壳稳定性及重大工程地质问题[M]. 北京: 地质出版社, 2009  
Zhang Y S, Hu D G, Wu Z H, et al. Research on the crustal stability and key engineering geological problems along the Yunnan-Tibet railway[M]. Beijing: Geology Press, 2009
- [34] 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(增刊1): 151-162  
Xu X W, Wen X Z, Zheng R Z, et al. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(S1): 210-226
- [35] 周荣军, 陈国星, 李勇, 等. 四川西部理塘一巴塘地区的活动断裂与1989年巴塘6.7级震群发震构造研究[J]. 地震地质, 2005, 27(1): 31-43  
Zhou R J, Chen G X, Li Y, et al. Research on active faults in Litang-Batang region, western Sichuan Province, and the seismogenic structures of the 1989 Batang  $M_{6.7}$  earthquake swarm[J]. *Seismology and Geology*, 2005, 27(1): 31-43
- [36] 吴富晓, 蒋良文, 张广泽, 等. 川藏铁路金沙江断裂带北段第四纪活动特征探讨[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(4): 23-28, 43  
Wu F Y, Jiang L W, Zhang G Z, et al. Discussion on quaternary activity characteristics of northern section of Jinshajiang fault zone along Sichuan-Tibet railway[J]. *High Speed Railway Technology*, 2019, 10(4): 23-28, 43
- [37] 唐荣昌, 韩渭宾. 四川活动断裂与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1993  
Tang R C, Han W B. Sichuan active fault and earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 1993
- [38] 常玉巧, 陈立春, 张琦. 金沙江断裂带构造地貌与断裂活动特征研究[J]. 国际地震动态, 2019(8): 142-143  
Chang Y Q, Chen L C, Zhang Q. Analysis of tectonic geomorphology and activity characteristics of the Jinsha river fault[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2019(8): 142-143
- [39] 常昊, 常祖峰, 刘昌伟. 金沙江断裂带活动与大型滑坡群的关系研究: 以金沙江拿荣一绒学段为例[J]. 地震地质, 2021, 43(6): 1435-1458  
Chang H, Chang Z F, Liu C W. The relationship between activity of Jinsha River fault zone and large-scale landslides: A case study of the section between Narong and Rongxue along the Jinsha River[J]. *Seismology and Geology*, 2021, 43(6): 1435-1458
- [40] 常祖峰, 常昊, 李鉴林, 等. 维西一乔后断裂全新世活动与古地震[J]. 地震地质, 2021, 43(4): 881-898  
Chang Z F, Chang H, Li J L, et al. Holocene activity and paleoearthquakes of the Weixi-Qiaohou fault[J]. *Seismology and Geology*, 2021, 43(4): 881-898
- [41] 高帅坡. 川西北次级块体内部及其西边界断裂的晚第四纪活动习性[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2021  
Gao S P. Late Quaternary paleoseismology and faulting behavior of the internal and western boundary faults of Northwest Sichuan Subblock[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2021
- [42] 项闻. 巴塘断裂晚第四纪活动特征及地震危险性评价[D]. 西安: 长安大学, 2022  
Xiang W. Activity characteristics and seismic risk assessment of the Batang fault in Late Quaternary[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022
- [43] 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 等. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型[J]. 地震地质, 2005, 27(3): 446-461  
Xu X W, Zhang P Z, Wen X Z, et al. Features of active tectonics and recurrence behaviors of strong earthquakes in the western Sichuan Province and its adjacent regions[J]. *Seismology and Geology*, 2005, 27(3): 446-461
- [44] 孙成民. 四川地震全记录(上卷)[M]. 成都: 四川人民出版社, 2010  
Sun C M. Complete records of Sichuan earthquake (Part 1)[M]. Chengdu: Sichuan People's Publishing House, 2010
- [45] 刘昌森. 1920年12月22日西藏芒康盐井地震探讨[J]. 四川地震, 1991(4): 52-55  
Liu C S. The Yanjing  $M=6$  earthquake on Dec. 22, 1920 in Mongkang county, Tibet[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, 1991(4): 52-55
- [46] 西藏察隅、当雄大震考察队. 1921年芒康县盐井地震考察[J]. 四川地震, 1987(1): 16-17  
Chayu and Dangxiong Earthquake Investigation Teams in Xizang. Investigation of the 1921 Yanjing earthquake in Mangkang

- county[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, 1987(1): 16-17
- [47] 王格. 藏东碧土地区构造变形研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019  
Wang G. Research on tectonic deformation in Bitu area of eastern Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019
- [48] 张达, 胡朝忠, 田勤俭, 等. 基于高分 7 号立体像对和无人机航测影像的闹中断裂几何展布和活动特征研究 [J]. *地震地磁观测与研究*, 2022, 43(增刊 1): 79-82  
Zhang D, Hu C Z, Tian Q J, et al. Study on geometric distribution and activity characteristics of Naozhong fault based on Gaofen-7 stereo pair and UAV aerial survey images[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2022, 43(S1): 79-82
- [49] 王新忠, 强巴扎西, 彭兴阶. 藏东滇西澜沧江断裂带地质属性讨论 [J]. *云南地质*, 2008, 27(3): 362-370  
Wang X Z, Qiangbazaxi, Peng X J. A discussion about the geological nature of Lancangjiang fault zone in East Xizang-West Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2008, 27(3): 362-370
- [50] 安晓文, 常祖峰. 云南第四纪活动断裂暨《云南第四纪活动断裂分布图》[M]. 北京: 地震出版社, 2018  
An X W, Chang Z F. Quaternary active faults in Yunnan and *The distribution map of Quaternary active faults in Yunnan*[M]. Beijing: Seismological Press, 2018
- [51] 石圣. 澜沧江断裂带昌都—盐井段断层活动性研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2021  
Shi S. Study on fault activity of Changdu-Yanjing segment of Lancang river fault zone[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021
- [52] Ren J J, Xu X W, Lü Y W, et al. Late Quaternary slip rate of the northern Lancangjiang fault zone in eastern Tibet: Seismic hazards for the Sichuan-Tibet Railway and regional tectonic implications[J]. *Engineering Geology*, 2022, 306: 106748
- [53] 李萌. 藏东邦达断裂活动性研究及工程意义 [D]. 成都: 成都理工大学, 2019  
Li M. Study on the activity of Bangda fault in eastern Tibet and its engineering significance[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019
- [54] 钟宁, 杨镇, 张献兵, 等. 怒江断裂带邦达断裂中段全新世活动证据及其古地震记录 [J]. *地质论评*, 2022, 68(6): 2021-2032  
Zhong N, Yang Z, Zhang X B, et al. Evidence of Holocene activity and paleoseismic records in the central section of Bangda fault in Nujiang fault zone[J]. *Geological Review*, 2022, 68(6): 2021-2032
- [55] 韩明明. 怒江断裂带邦达段晚第四纪活动性研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2022  
Han M M. Late Quaternary activity of the Bangda segment along the Nujiang fault zone[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2022
- [56] 韩明明, 陈立春, 李彦宝, 等. 班公湖—怒江缝合带西界边坝—洛隆断裂全新世活动的地质地貌证据 [J]. *地球科学*, 2022, 47(3): 757-765  
Han M M, Chen L C, Li Y B, et al. Geological and geomorphic evidence for late quaternary activity of the Bianba-Luolong fault on the western boundary of the Bangong-Nujiang suture[J]. *Earth Science*, 2022, 47(3): 757-765
- [57] 钟宁, 郭长宝, 黄小龙, 等. 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*, 2021, 95(12): 3642-3659  
Zhong N, Guo C B, Huang X L, et al. Late Quaternary activity and paleoseismic records of the middle south section of the Jiali-Chayu fault[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(12): 3642-3659
- [58] 宋键, 唐方头, 邓志辉, 等. 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)*, 2013, 49(6): 973-980  
Song J, Tang F T, Deng Z H, et al. Late Quaternary movement characteristic of Jiali fault in Tibetan Plateau[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(6): 973-980
- [59] Wang H, Li K J, Chen L C, et al. Evidence for Holocene activity on the Jiali fault: An active block boundary in the southeastern Tibetan Plateau[J]. *Seismological Research Letters*, 2020, 91(3): 1776-1780
- [60] 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  
Zhao Y F, Gong W B, Jiang W, et al. Multi-stage characteristics and tectonic significance of the Jiali fault in Guxiang-Tongmai section, South Tibet[J]. *Geoscience*, 2021, 35(1): 220-233
- [61] Wang M, Shen Z K. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(2): e2019JB018774