

青藏高原中部日干配错断裂第四纪活动特征及 2020 年 7 月 23 日西藏尼玛 $M_w6.4$ 地震发震构造分析

刘富财^{1,2)}, 潘家伟^{1,3)*}, 李海兵^{1,3)}, 孙志明⁴⁾, 刘栋梁^{1,3)}, 卢海建^{1,3)}, 郑勇^{1,3)},
王世广¹⁾, 白明坤¹⁾, Marie-Luce CHEVALIER^{1,3)}, 张蕾^{1,3)}, 曹勇⁴⁾

1) 自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2) 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3) 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东广州 511458;

4) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

摘要: 日干配错断裂位于青藏高原中部, 是“V”型共轭走滑构造中班公湖—怒江缝合带以北的一条 NEE-SWW 走向左行走滑断裂, 在调节青藏高原南北向挤压和东西向伸展过程中起着重要的作用。在 2008 年 1 月 9 日及 2020 年 7 月 23 日, 先后在该断裂南西端和北东支分别发生 6 级以上强震。因此, 查明该断裂的晚第四纪活动性及其与区域强震活动的关系, 有助于更好地认识该地区的活动构造变形样式及其控震特征。本文通过高精度卫星影像解译, 结合野外调查和测量, 研究了日干配错断裂的构造地貌特征和晚第四纪滑动速率, 并分析了 2020 年 7 月 23 日西藏尼玛 $M_w6.4$ 地震的发震构造。结果表明, 日干配错断裂具有显著的线性展布特征, 切割了第四纪地质地貌单元, 形成一系列典型的构造地貌。断裂总体走向 NEE60°~80°, 延伸规模约 360 km, 累积位错量可能达到 14~15 km。该断裂晚更新世以来的平均走滑速率为 0.2~0.3 mm/a, 远小于前人在班公湖—怒江缝合带南侧左行走滑共轭断裂上获得的结果, 指示班怒带南北两侧可能存在不同的构造变形机制和动力学背景。2020 年尼玛 $M_w6.4$ 地震是日干配错断裂北侧依布茶卡地堑活动的结果, 发震断层应为该地堑的东缘边界正断层。上述研究结果可为更深入理解第四纪期间的青藏高原中部近东西向伸展变形过程及强震活动机制提供新的参考。

关键词: 日干配错断裂; 依布茶卡地堑; 断层滑动速率; 2020 年尼玛 $M_w6.4$ 地震; 青藏高原

中图分类号: P315.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.010402

Characteristics of Quaternary Activities along the Riganpei Co Fault and Seismogenic Structure of the July 23, 2020 $M_w6.4$ Nima Earthquake, Central Tibet

LIU Fu-cai^{1,2)}, PAN Jia-wei^{1,3)*}, LI Hai-bing^{1,3)}, SUN Zhi-ming⁴⁾, LIU Dong-liang^{1,3)},
LU Hai-jian^{1,3)}, ZHENG Yong^{1,3)}, WANG Shi-guang¹⁾, BAI Ming-kun¹⁾,
Marie-Luce CHEVALIER^{1,3)}, ZHANG Lei^{1,3)}, CAO Yong⁴⁾

1) Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083;

3) Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou, Guangdong 511458;

4) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081

本文由“第二次青藏高原综合科学考察研究”项目(编号: 2019QZKK0901)、国家自然科学基金项目(编号: 41672211; 41941016)、国家重点研发计划(编号: 2016YFC0600310)、中国地质调查局项目(编号: DD20190059)、中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(编号: JYYWF201810)和南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(编号: GML2019ZD0201)联合资助。

收稿日期: 2020-12-14; 改回日期: 2020-12-30; 网络首发日期: 2021-01-11。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 刘富财, 男, 1995 年生。硕士研究生。构造地质学专业。E-mail: 986626411@qq.com。

*通讯作者: 潘家伟, 男, 1983 年生。副研究员。从事青藏高原活动构造研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。

E-mail: 43469518@qq.com。

Abstract: The Riganpei Co fault (RPCF), located to the north of the Bangong Co–Nujiang suture (BNS), is a ENE–WSW striking left-lateral fault that belongs to the V-shaped conjugate strike-slip fault system of central Tibet. It plays an important role in accommodating coeval east-west extension and NS-trending shortening in the interior of the Tibetan Plateau. Two large earthquakes ($M > 6$) occurred on January 9, 2008 and July 23, 2020 near the southwestern end and northeastern normal splay of the fault, respectively. Therefore, determining the Late Quaternary activity of the fault and its relationship with regional large earthquakes is essential to the better understanding of the active deformation behavior and its influence on regional earthquake nucleation. In this paper, the authors studied the Late Quaternary slip-rate along the RPCF and its tectonic-geomorphologic characteristics based on the interpretation of high-resolution satellite images and field surveys. The seismogenic fault of the $M_w 6.4$ Nima earthquake on July 23, 2020 was also discussed. The results indicate that the RPCF has a significant linear distribution characteristics. It cut through the Quaternary geological and geomorphic units, forming a series of typical fault related tectonic geomorphologic phenomena. The RPCF strikes NEE $60^\circ \sim 80^\circ$ for ~ 360 km, with a long-term cumulative displacement of 14–15 km. The late Pleistocene slip rate of the sinistral RPCF is about 0.2–0.3 mm/a, which is significantly lower than the values along the dextral faults south of the BNS. This implies that the mechanisms and dynamics are most likely different in the north and in the south of the BNS. The 2020 Nima $M_w 6.4$ earthquake resulted from recent activity along the Yibug Caka graben, and the seismogenic fault was most likely the normal fault bounding its eastern side. The results obtained by the authors provide a new reference for the deeper understanding of the EW extensional deformation process and the mechanism of large earthquakes in central Tibet during the Quaternary.

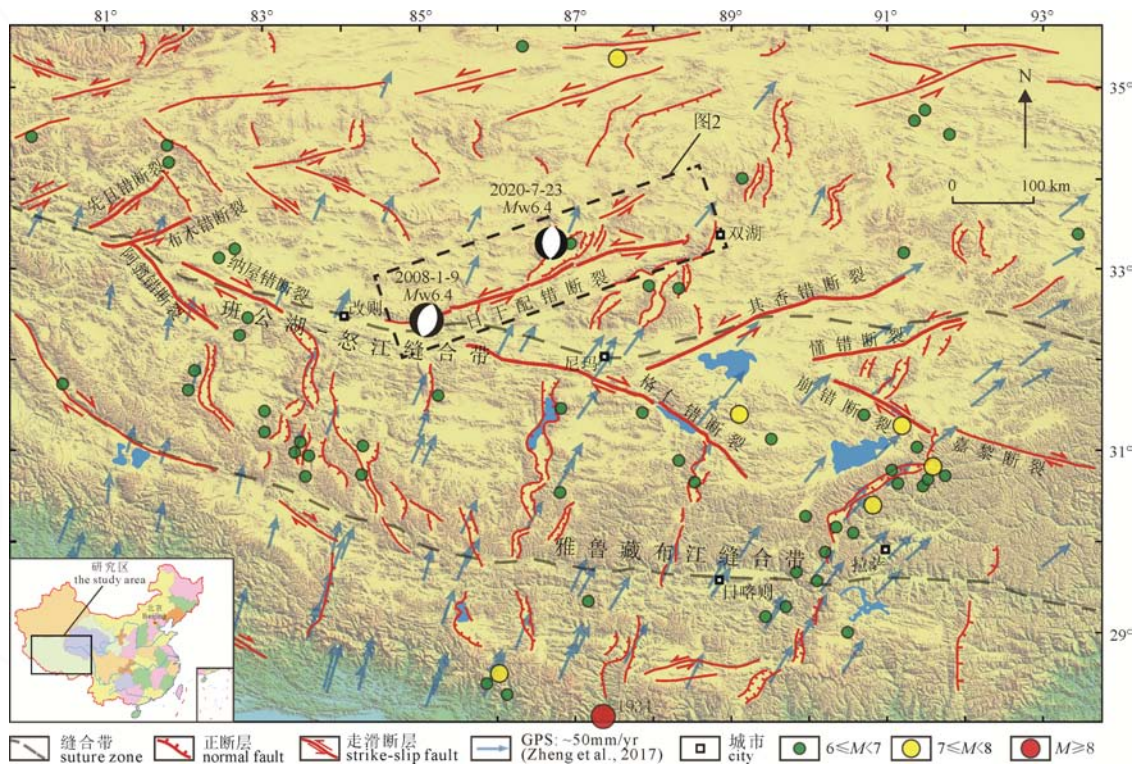
Key words: Riganpei Co fault; Yibug Caka graben; fault slip rate; 2020 Nima $M_w 6.4$ earthquake; Tibetan Plateau

青藏高原在近南北向挤压和近东西向伸展的构造背景下, 周缘发育大型逆冲推覆构造和走滑断裂带, 而在高原内部发育一系列近 SN 走向地堑和 NE/NW 走向共轭走滑断裂(图 1), 这些南北向地堑和走滑断裂被认为是高原内部最年轻的构造变形(Armijo et al., 1986; Taylor et al., 2003; Kapp et al., 2008; Elliott et al., 2010; Ratschbacher et al., 2011; Wang et al., 2014)。在青藏高原南部(班公湖—怒江缝合带以南), 近东西向的伸展作用主要被几条大规模的近 SN 向裂谷吸收(Molnar and Tapponnier, 1978; Armijo et al., 1986; Ha et al., 2019; Chevalier et al., 2020; Wang et al., 2020), 而高原中部(班公湖—怒江缝合带以北)的构造特征表现为发育一系列离散分布的共轭走滑断层以及与之相连接的 SN 走向地堑(Yin et al., 1999; Taylor et al., 2003; Taylor and Yin, 2009; Han et al., 2019)。沿班公湖—怒江缝合带两侧发育的“V”型共轭走滑断裂系以及与之关联的 SN 走向地堑系被认为调节了青藏高原南北向挤压和东西向伸展(Taylor et al., 2003; Taylor and Yin, 2009), 在高原最新构造变形过程中起着重要的作用。

前人对高原内部 SN 走向地堑系开展了大量研究, 通过对地质年代学和低温热年代学手段, 将其起始活动时间限定在 23–8 Ma(Pan and Kidd, 1992; Harrison et al., 1995; Murphy and Harrison, 1999; Blisniuk et al., 2001; Vannay et al., 2004; Mahéo et al., 2007); 断裂活动性方面, 班公湖—怒江缝合带以北的 SN 走向正断层晚第四纪滑动速率多被限定为 0.3–0.7 mm/a(李亚林等, 2001; Blisniuk and Sharp, 2003; 吴中海等, 2004, 2005; Li et al., 2019), 而缝合带以南正断层的活动速率为 1–3 mm/a(Harrison

et al., 1995; 吴中海等, 2015; Ha et al., 2019; Chevalier et al., 2020; Wang et al., 2020)。相比而言, 目前对班公湖—怒江缝合带两侧发育的共轭走滑断裂几何学与运动学特征、活动时代和活动性等的认识仍相对薄弱。Taylor et al.(2003)曾对缝合带两侧多组共轭走滑断层的几何学、运动学特征进行了研究, 并根据单条走滑断裂的平均走滑位移量为 ~ 12 km 和推测走滑断裂与 SN 走向地堑系起始活动时间相同(14–8 Ma), 估算青藏高原中部百万年尺度的南北向缩短速率为 1–2 mm/a, 东西向伸展速率 $> 2 \sim 4$ mm/a。近年来, 国内外学者陆续报道了班公湖—怒江缝合带南侧格仁错右行走滑断裂的晚第四纪滑动速率为 2–5 mm/a(杨攀新等, 2012; Shi et al., 2014; Wang et al., 2016), 但对于缝合带北侧的左行走滑断裂, 因自然环境恶劣且交通不便, 至今仍缺乏晚第四纪活动性定量研究, 这显然制约了对高原中部构造变形特征和过程的全面认识。

日干配错断裂是班公湖—怒江缝合带北侧一系列左行走滑断裂中规模较大的一条(图 1), 遥感解译结果显示其线性特征明显, 晚第四纪左行走滑活动显著(Taylor et al., 2003)。2008 年 1 月 9 日在该断裂南西端曾发生西藏改则 $M_w 6.4$ 地震, 2020 年 7 月 23 日, 与该断裂北东段相连的依布茶卡地堑又发生了西藏尼玛 $M_w 6.4$ 地震(图 1, 2)。为进一步查明日干配错断裂的晚第四纪活动性, 更深入认识该断裂在青藏高原中部构造变形过程中的作用以及其大地震危险性和孕育发生背景, 本文在前人工作基础上进一步通过高分辨率遥感影像解译、大比例尺地表活动断裂填图等手段, 对该断裂的构造地



图中的区域活动断裂资料主要参考和修改自 Molnar et al., 1978; Taylor et al., 2003; Chevalier et al., 2020; 蓝色箭头表示水平 GPS 速度场据 Zheng et al., 2017; 圆圈代表 $M>6$ 级地震(美国地质调查局 1949—2020)。Active faults modified after Molnar et al., 1978; Taylor et al., 2003; Chevalier et al., 2020; blue arrows are horizontal GPS velocities relative to stable Eurasia after Zheng et al., 2017; the circles represent recorded $M>6$ earthquakes (1949—2020, data are from USGS).

图 1 青藏高原中部及南部活动构造分布图
Fig. 1 Active tectonic map of central and southern Tibet

貌特征及晚第四纪滑动速率进行了调查研究, 并对 2020 年 7 月 23 日西藏尼玛 $M_w6.4$ 地震的发震构造进行了分析。希望相关研究成果有助于更深入理解青藏高原中部的近东西向伸展变形特征与机制以及相关的强震活动的地质构造背景。

1 区域地质背景

前人研究发现(Taylor et al., 2003; Taylor and Yin, 2009), 青藏高原中部在最新的近东西向伸展作用下, 主要通过“V”型共轭走滑断裂系来调节伸展变形。该共轭走滑断裂系由班公湖—怒江缝合带以北的 NEE 走向左行走滑断裂和缝合带以南的 NW 走向右行走滑断裂组成, 而且走滑断裂带常与缝合带两侧的 SN 走向地堑系(裂谷)相连, 起着共同吸收和调节高原中部南北向挤压和东西向伸展变形的作用。缝合带以北的左行走滑断裂带主要有先且错断裂、布木错断裂、日干配错断裂、其香错断裂和懂错断裂, 以南的右旋走滑断裂带主要包括阿翁错断裂、纳屋错断裂、格仁错断裂和崩错断裂等(图 1)。

日干配错断裂位于班公湖—怒江缝合带北侧, 主体为左行走滑性质, 局部伴随拉张分量, 与缝合带南侧右行走滑性质的格仁错断裂共组成洞错共轭走滑断裂系(Taylor et al., 2003, 图 1)。沿断裂出露

有石炭—二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系等不同时代地层(图 2), 部分位置可见地层单元或地质界线被左行位错数公里至十多公里不等。近期的研究发现, 日干配错断裂南起洞错盆地, 沿 $N70^\circ E$ 延伸至日干配错盆地后走向变为 NNE 与依布茶卡地堑西侧边界正断裂相连, 并与依布茶卡地堑及其北侧左行走滑性质的江爱藏布断裂共同组成依布茶卡断裂带, 同时推测断裂百万年时间尺度活动速率约为 $1\sim 2$ mm/a(Taylor et al., 2003)。通过 InSAR 测量获得该断裂的现今活动速率为 6.6 mm/a(Taylor and Peltzer, 2006)或 4 mm/a(Wang et al., 2019)。与之共轭的格仁错断裂晚第四纪活动速率为 $2\sim 5$ mm(杨攀新等, 2012; Shi et al., 2014; Wang et al., 2016), 而日干配错断裂的晚第四纪滑动速率仍缺乏定量约束。

近几十年以来, 青藏高原内部地震频繁, 其中 $M>6$ 地震 50 多次(图 1)。2008 年 1 月 9 日, 改则县发生 $M_w6.4$ 地震, 震中在日干配错断裂南端的洞错附近(图 1, 2), 震源机制解显示为正断型地震。该次地震未造成地表破裂, 震后的一系列 InSAR 研究表明该次地震的最大倾滑位移 $1.6\sim 2.4$ m(张桂芳等, 2009; 洪顺英等, 2009; Elliott et al., 2010)。2020 年 7 月 22 日, 尼玛县发生 $M_w6.4$ 地震, 震中

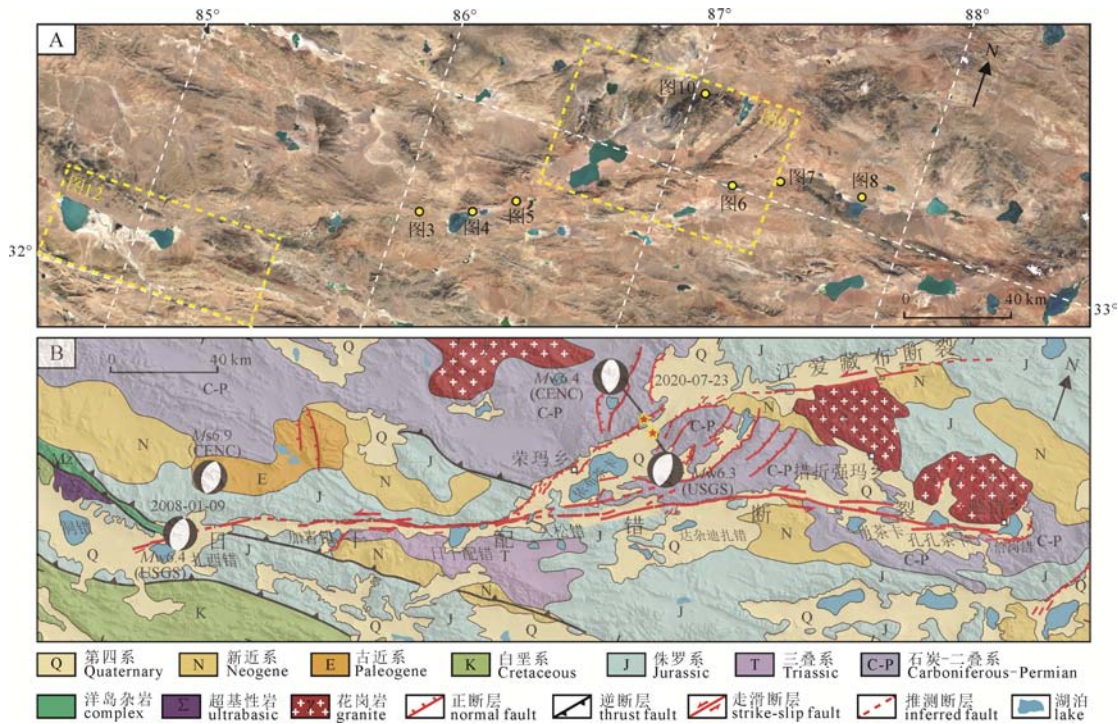


图2 日干配错断裂及其周缘地区遥感影像(A)和地质简图(B)

Fig. 2 Satellite image (A) and simplified geological map (B) of Riganpei Co fault and its adjacent areas

在日干配错断裂北侧依布茶卡地堑北端(图 1, 2, 9), 与 2008 年改则 $M_w6.4$ 地震震中位置相距约 200 km。不同研究机构给出的尼玛 $M_w6.4$ 地震震源机制解均显示为正断型地震, 但此次地震的发震构造和孕震背景尚不明确。

2 日干配错断裂带的第四纪活动特征

2.1 断裂空间展布特征

断裂的延伸可通过断裂的构造变形特征、构造活动年龄(Ratschbacher et al., 2011; 葛成隆等, 2017)或遥感解译、同震地表破裂的分布特征(Han et al., 2019; Li et al., 2012; Pan et al., 2014; 李海兵等, 2014)等进行确定。Taylor et al.(2003)通过遥感解译、野外调查对日干配错断裂、依布茶卡地堑以及其北的江爱藏布断裂的展布形式和运动特征进行了研究, 认为日干配错断裂从洞错地区延伸至依布茶卡地堑南侧后与地堑的边界正断层相连, 且将日干配错和江爱藏布这两条左行走滑断裂与连接二者的伸展正断裂系统定义为依布茶卡断裂带, 在这一背景下, 日干配错断裂的左行走滑段规模为约 180 km。Ratschbacher et al.(2011)通过卫星影像解译发现肖茶卡—恰岗错一线发育拉分盆地、伸展正断层等构造地貌, 认为该区域发育一条左旋走滑断裂, 但未将该断裂继续向西延伸, 其识别出的左行走滑断裂规模约 70 km。

本文通过卫星影像分析和野外调查, 发现日干配错断裂在依布茶卡地堑南侧除转向 NNE 与地堑

边界正断层相连外, 还存在另一支继续向 NEE 延伸, 连接 Ratschbacher et al.(2011)发现的左旋走滑断裂(图 2)。因此我们认为, 日干配错断裂南西起自班公湖—怒江缝合带附近的洞错与扎西措之间, 向 NEE 延伸经日干配错北侧—依布茶卡南侧—肖茶卡北, 直至双湖地堑西侧的恰岗错附近, 总体走向 $NEE60^{\circ}\sim70^{\circ}$, 全长约 360 km(图 2)。断裂南西端洞错附近第四纪活动的地貌表现并不明显, 仅在扎西措北西侧见 NEE 走向线性展布的挤压隆起, 扎西措西侧全新世湖沼相沉积中隐约可见 $NE60^{\circ}\sim65^{\circ}$ 延伸的线性构造(图 12)。断裂向 NE 延伸至加青错附近后日干配错断裂的构造地貌表现逐渐清晰, 可见断裂错断水系、冲沟、湖岸线、冲洪积扇、河流阶地, 以及断层陡坎、断塞塘等特征构造地貌, 局部位置次级断层(地表破裂)组合形成挤压鼓包、拉分凹陷、小型地堑等构造。

以依布茶卡地堑为界, 本文将日干配错断裂分成南西和北东两段, 在卫星影像解译的基础上分别选取了 3 个点开展详细的构造地貌调查和断裂几何学、运动学特征分析。以下对日干配错断裂南西、北东段各点第四纪活动性的构造地貌证据进行描述。

2.2 断裂第四纪活动性的构造地貌证据

2.2.1 日干配错断裂南西段

(1) 日干配错西观察点

该点位于日干配错西约 15 km 处, 周围出露地层主要为三叠系灰岩, 晚更新世冲洪积物在基岩与

河谷之间的斜坡带广泛发育,沿河道可见零星的全新世冲积物、洪积物(图 3B)。从卫星影像上可以看到断层活动形成的地表破裂主要沿河谷北侧展布,形成的断层形迹清晰,线性特征明显,主断裂和次级断裂近平行排列,切割了三叠纪地层和更新世冲洪积物(图 3A, B)。该点最显著的构造地貌特征是山前更新世冲洪积物之上发育的多条北西—南东流向河道、冲沟被日干配错活动断裂系统地左行错动,错断距离从几十米至几百米不等,断层两侧零星出露的三叠纪地层似乎也被左行错开约 800 m(图 3B)。局部可见断裂活动形成闸门脊构造,小山脊沿断裂走向展布阻隔了冲沟,靠近断裂的山脊面线性特征较好,而被闸门脊阻隔的水系在经过断裂处发生左行弯曲并改变流向(图 3B)。

(2) 日干配错东观察点

该点位于日干配错东北角,点北侧主要为三叠纪基岩山体,南侧为更新世湖相沉积,日干配错活动断层从两者之间的更新世冲洪积物中穿过,并切割了日干配错北侧的古湖岸线(图 4B)。该段活动断裂在卫星影像上的线性特征明显,主破裂带总体~N70°E 向延伸,在其两侧还分布多条分支破裂。更新世沉积物主体由 2 个较大的冲洪积扇构成(图 4A, B),洪积扇之上后期季节性洪流河道下切形成 3 级阶地(图 4C, D)。日干配错断裂斜切洪积扇和河流阶

地,阶地陡坎被断裂左行错开。图 4C 所在位置野外测量获得 T₃/T₂ 阶地陡坎和 T₂/T₁ 阶地陡坎的左行位错量分别为~8.5 m 和~7 m。图 4D 位置保留的 T₃/T₂ 阶地陡坎左行位错量为~5 m。在 T₂ 阶地面上可见断层活动形成的断陷凹槽地貌,凹槽南北两端断层陡坎地貌清晰(图 4C, E)。该段断层左行走滑活动过程中伴随垂直分量,野外调查中发现冲洪积扇上地表破裂带形成倾向 NW 的反向陡坎,不同位置测量获得的陡坎高度 4~6 m 不等(图 4F)。

(3) 久松错观察点

该点位于依布茶卡地堑南缘久松错北西侧,周围出露三叠系灰岩和新近系砾岩,山前斜坡上覆盖更新世冲洪积物,久松错周围发育全新世湖相沉积(图 5B)。该点附近分布有多支活动断层,按照断层延伸方向和活动性质的不同可分为两组。一组断层走向~NNE30°~40°,在三叠纪、新近纪地层与第四纪沉积物之间的界线处延伸,向北东与依布茶卡地堑的西边界正断层相连(图 5B)。该组断层在地貌上可见明显 SE 倾向断层陡坎,为正断性质。Taylor et al.(2003)曾对该段陡坎进行了实地测量,获得早更新世洪冲积物的垂直位错为 7.5 m,并认为日干配错断裂从该点附近转向 NNE 延伸与依布茶卡地堑相连。另一组断层走向 NEE60°~65°,左行走滑性质,切割了更新世洪冲积物和全新世湖相沉积,并造成

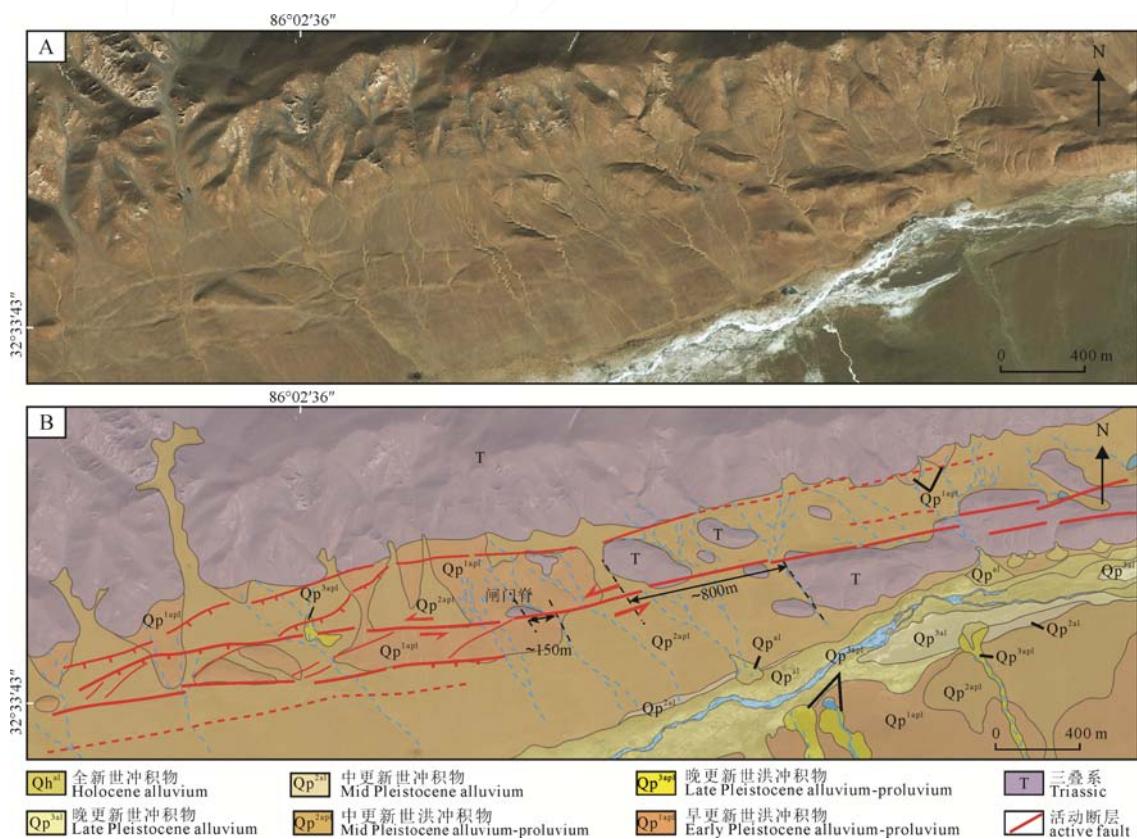
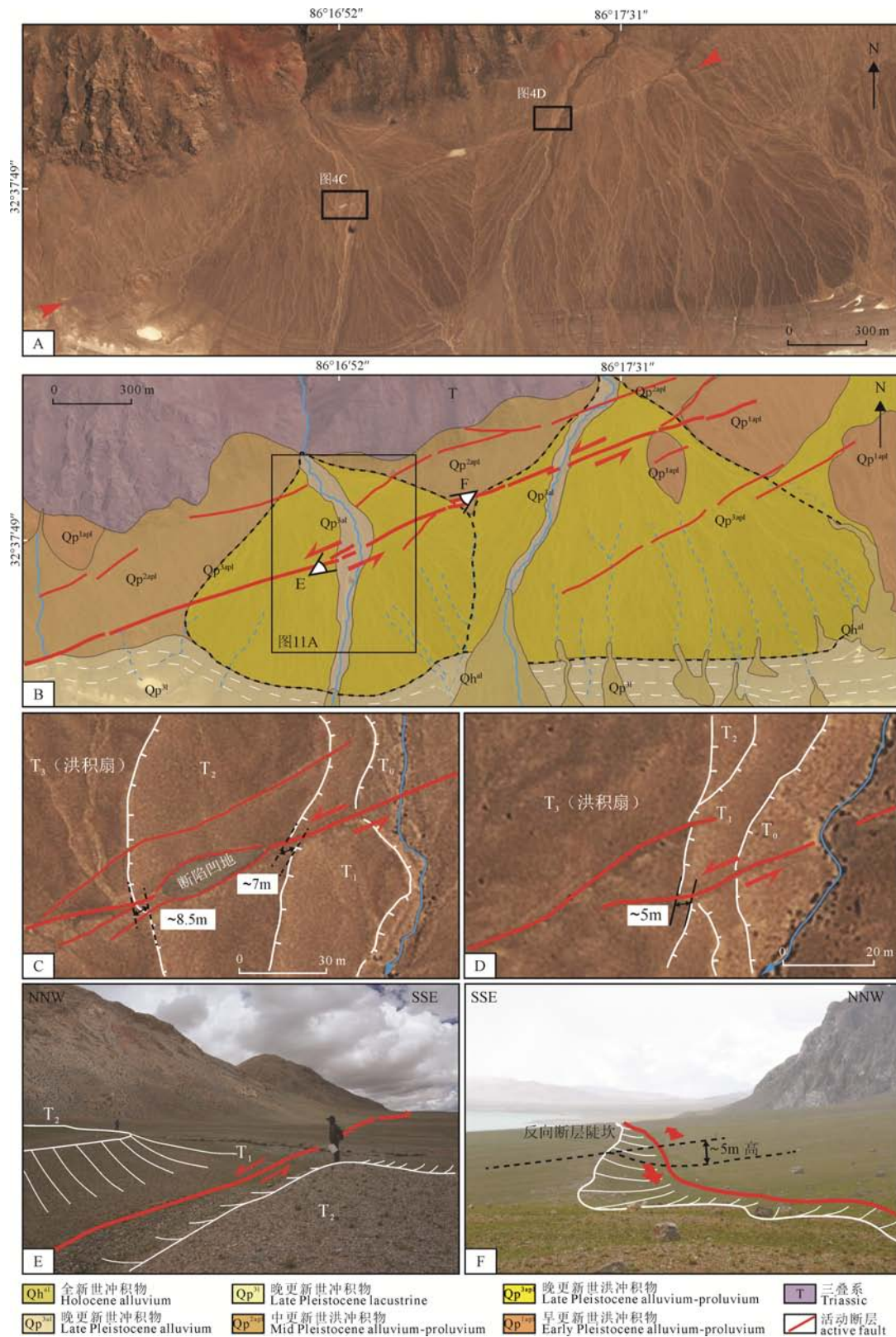


图 3 日干配错西观察点卫星影像(A)及其构造地貌解译(B)

Fig. 3 Satellite image (A) and its tectonic geomorphologic interpretation (B) of West Riganpei Co site



A—观察点卫星影像图; B—卫星影像地质、构造地貌解译图; C, D—活动断裂错断河流阶地和洪积扇构造地貌解译;
E—断裂活动形成的断陷凹地及 T₂ 阶地左行位错野外照片; F—断裂活动形成的反向断层陡坎。
A—satellite image of East Riganpei Co site; B—geology and tectonic geomorphology of East Riganpei Co site (interpreted from the image);
C, D—geomorphic interpretation of the offset terraces and alluvial fan; E—field photo of sag pond and left-laterally offset Terrace T₂;
F—uphill-facing fault scarp.

图 4 日干配错东观察点构造地貌特征
Fig. 4 Tectonic geomorphology of East Riganpei Co site

河流、冲沟的左行错断, 累积位错量从数百米至上千米不等(图 5B)。该组走滑断层过久松错后部分段

落构造地貌表现不清楚, 断续向 NE 延伸至依布茶卡南侧后线性构造特征才逐渐明显。

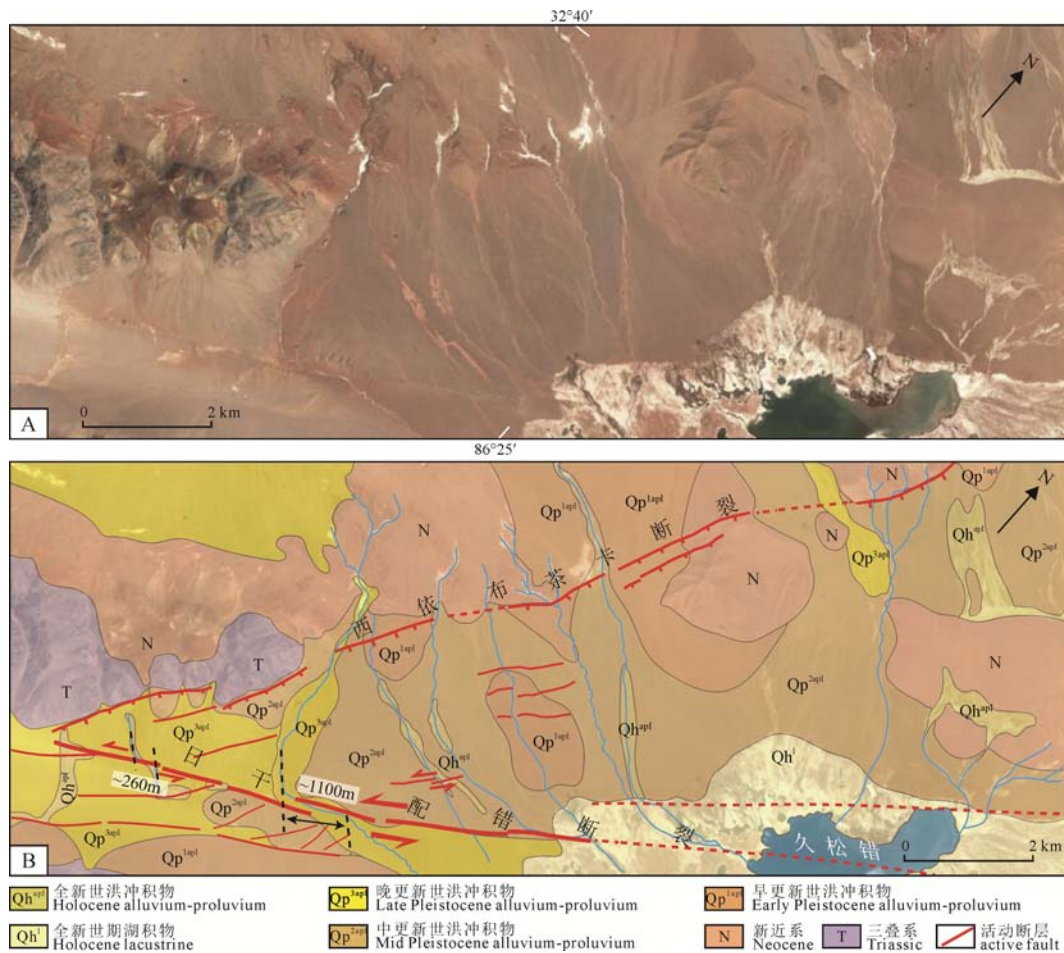


图 5 久松错观察点卫星影像(A)及其构造地貌解译(B)

Fig. 5 Satellite image (A) and its tectonic geomorphologic interpretation (B) of Jiusong Co site

2.2.2 日干配错断裂北东段

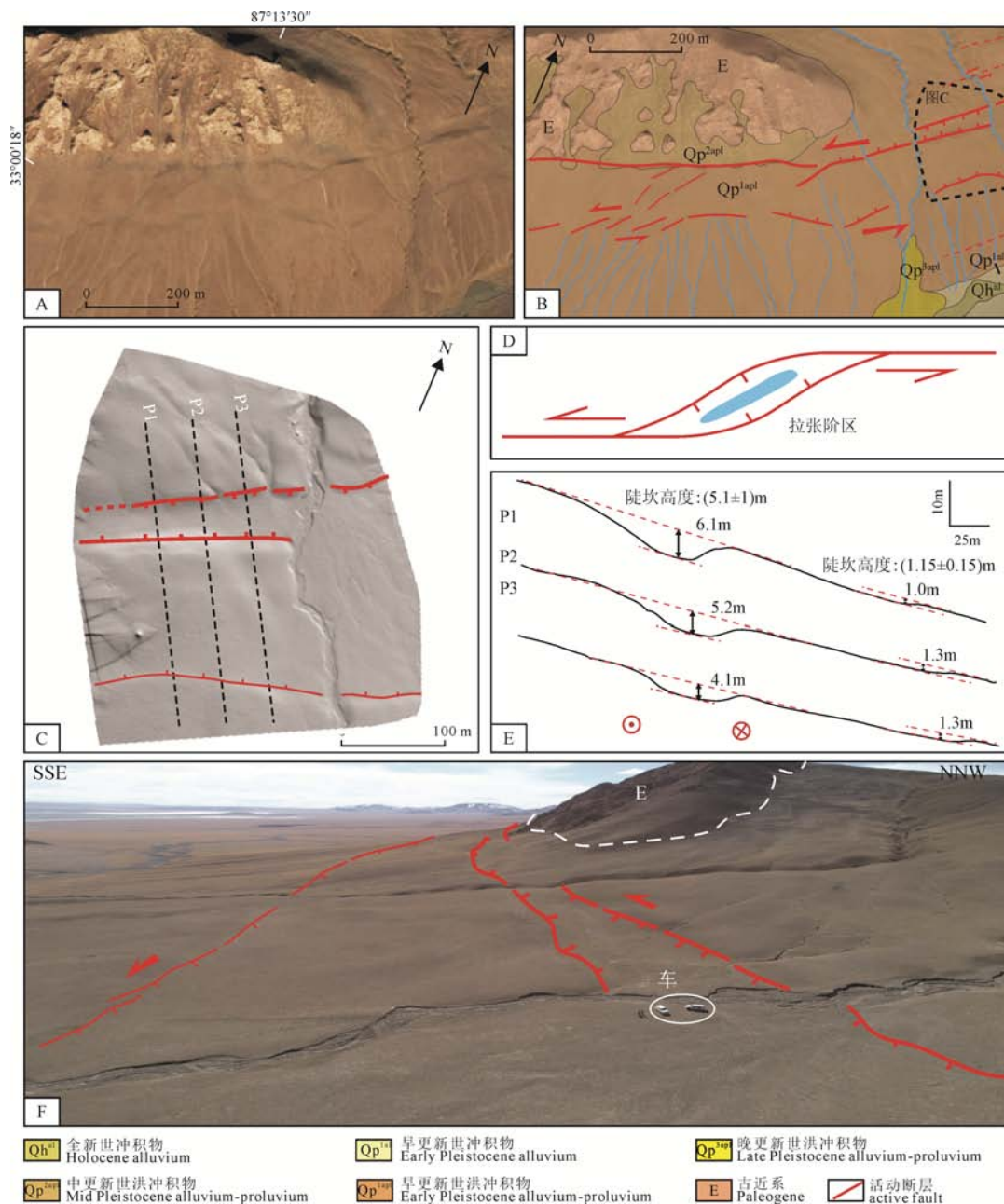
(1) 拉张弯曲观察点

该点位于达杂迪扎错北东方向约 20 km。日干配错断裂北东段在达杂迪扎错北部山前沿 $N60^{\circ}\sim 70^{\circ}E$ 方向延伸, 在第四纪冲洪积物上形成清晰的线性构造地貌, 部分位置还直接切割了侏罗纪地层(图 2)。观察点所在处北侧为古近纪康托组地层, 活动断裂沿山前发育切割了更新世冲洪积物(图 6A, B)。断裂活动在第四纪沉积物上形成了断层陡坎、拉张地堑、错断冲沟等构造地貌(图 6B)。该点在卫星影像上最明显的构造地貌特征表现为活动断裂对冲沟水系的控制作用: 小冲沟基本只发育在断裂的南侧(图 6B), 这可能与该点位于日干配错断裂上的一个拉张弯曲(releasing bend)部位(图 6B, D), 局部拉张形成的反向陡坎和小地堑构造内原始地形被改造造成早期冲沟的上游消失有关。该观察点西端次级断裂呈右阶雁行状展布, 同时也指示了主断裂的左行走滑性质(图 6B)。观察点东端发育长约 200 m, 宽约 50 m 的地堑构造(图 6B, C)。地堑东侧断层走向 $N70^{\circ}E$, 地堑附近的断层走向 $N50^{\circ}\sim 55^{\circ}E$, 向西过地堑后又变为 $N70^{\circ}E$, 断层走向的局部变化形成拉张弯曲是地堑构造发育的原因, 同时地堑的存在

也指示了主断裂的左行走滑性质(图 6D)。我们在野外利用三维激光扫描雷达(LiDAR)对断层活动形成的拉张地堑构造地貌进行了扫描测绘(图 6C)。扫描数据处理结果显示, 地堑北侧断层陡坎倾向南, 南侧断层陡坎倾向北, 不同位置陡坎高 4~6 m 不等(图 6E)。地堑构造南约 100 m 处的次级断裂在地貌上表现为地形反向坎, 坎高约 1.3 m(图 6E)。

(2) 错断冲沟观察点

该点位于上点北东侧约 20 km 处, $E87.460848^{\circ}$, $N33.073314^{\circ}$ 附近。该点附近区域断层形迹在卫星影像上线性特征明显, 走向 $NE79^{\circ}$ (图 7A)。断层南侧为古近纪康托组砾岩, 北侧为第四纪冲洪积物, 地形坡度在断裂经过处突然变陡(图 7B), 形成断层陡坎地貌。断裂切过河流阶地、洪积扇等第四纪地貌单元, 西侧次级断裂雁行展布处可见局部挤压形成的鼓包地貌(图 7B, D)。断裂南侧基岩区高地上发育一系列向北流的冲沟, 这些冲沟在经过断层陡坎的地方发生左行弯曲, 其中有三条冲沟错断地貌保留较完整(图 7C)。这两条冲沟近平行发育, 东侧的冲沟较西侧冲沟宽, 切割较深, 且位错较大, 可能指示东侧冲沟形成的时间早于西侧冲沟。通过手持 GPS 沿两条冲沟最深处点采集 GPS 点对两条冲沟



A—观察点卫星影像图; B—卫星影像地质、构造地貌解译图; C—拉张地堑 LiDAR 影像图及其构造解译; D—拉张地堑成因模式图; E—穿越拉张地堑的地形剖面显示断层陡坎高度 4~6 m; F—无人机拍摄的该点活动断层展布照片。
A—Google Earth image of the study area; B—interpretation of Fig. A; C, E—LiDAR image of extensional graben and its interpretation with profiles across the fault zone showing the height of fault scarp, at 4~6 m; D—formation mode of this graben; F—photo of active fault distribution by unmanned aerial vehicle (UAV).

图 6 拉张弯曲观察点构造地貌特征
Fig. 6 Tectonic geomorphology of the releasing bend site

的水平位错量进行测量, 获得左行位错分别为 (34±2) m 和 (24±1) m (图 7C)。

(3) 拉分盆地观察点

该点位于肖茶卡北约 3 km 的小湖泊附近, 附近活动断层形迹明显, 沿断裂发育两个千米规模的断陷湖(拉分盆地)和一系列挤压鼓包(图 8A, B)。断陷湖形成于断层左行左阶斜列的拉张阶区, 边缘被两条近 EW 走向的左行左阶走滑断裂控制, 并在两条断裂中间形成了长约 3 km, 宽约 1 km 的拉分盆

地。断陷湖南侧的一支断裂继续向西延伸发育多个挤压鼓包(图 4C)。而湖泊北岸的一支断裂向东北延伸, 控制了另一个三角形小湖泊的边界。该点附近拉分盆地和挤压鼓包的出现表明该段活动断裂存在明显的左行走滑运动。

3 依布茶卡地堑与 2020 年尼玛 Mw6.4 地震

3.1 依布茶卡地堑

依布茶卡地堑位于 Taylor et al.(2003)定义的依

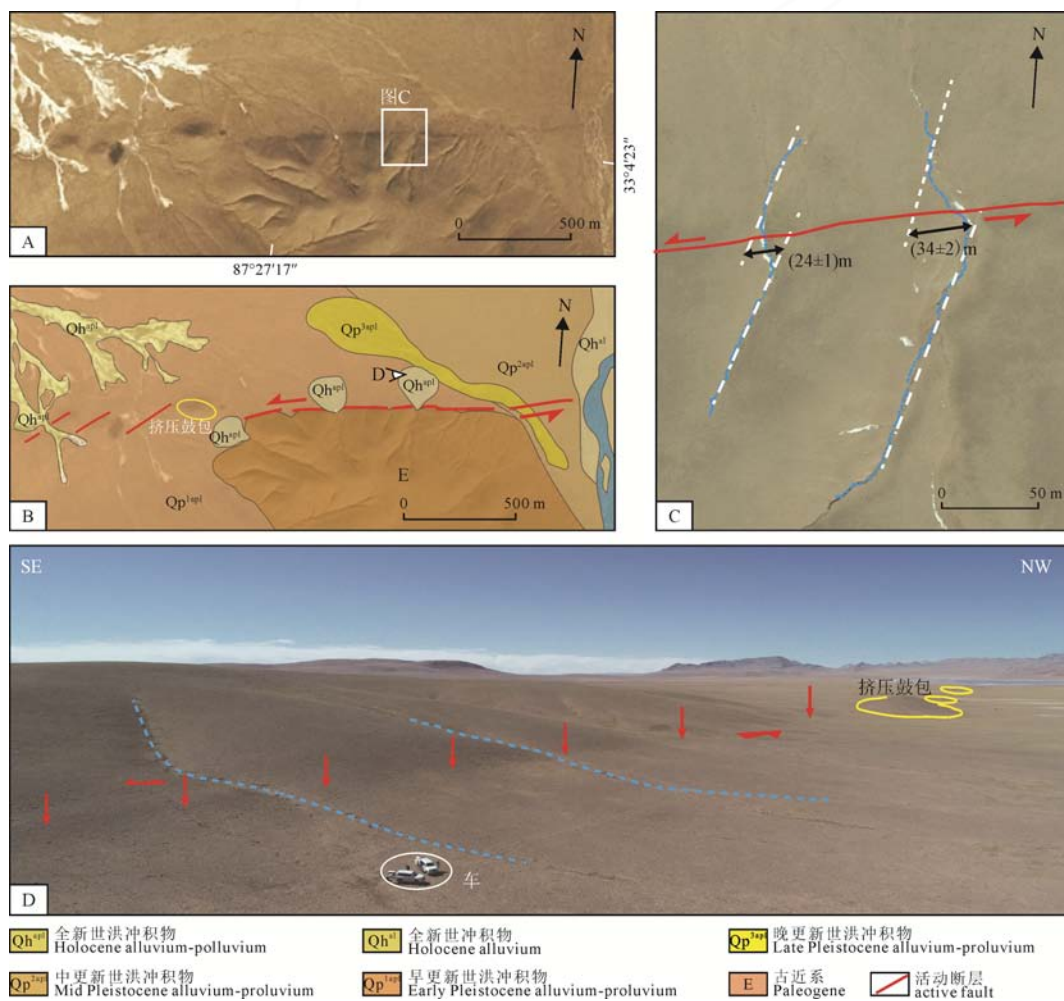
布茶卡断裂带中段, 其南北两端分别与左旋走滑性质的日干配错断裂和江爱藏布断裂相连(图 2)。卫星影像解译结果显示, 依布茶卡地堇整体呈 NNE 向延伸, 内部覆盖第四纪沉积物, 以河流、湖泊沉积物为主。地堇内部发育一系列 N30°~40°E 走向的正断层, 规模较大的主要包括西依布茶卡断裂、东依布茶卡断裂和角木日断裂, 这些正断层切割了基岩与第四纪地质地貌单元(图 9)。地堇西边界正断裂为西依布茶卡断裂, 走向 N40°E, 倾向 SEE, 向南与日干配错断裂连接。地堇东边界断裂为东依布茶卡断裂, 该断裂南段断层形迹不清晰, 北段依角木日山基岩与山前第四系之间界线延伸, 总体走向~N40°E, 倾向 NWW, 局部产状变化较大。断裂北东段走向近东西, 与左旋性质的江爱藏布断裂连接。东边界断裂东侧的角木日断裂沿基岩与第四纪沉积物界线展布, 总体走向 NNE30°, 倾向 NWW, 断裂南北两端走向变化较大, 向南走向变为 NEE, 与日

干配错断裂近平行, 向北走向发生变化与江爱藏布走滑断层相连(图 2, 9)。

3.2 2020 年尼玛 Mw6.4 地震的发震构造

2020 年 7 月 23 日 4 时 7 分, 我国西藏自治区那曲市尼玛县发生 Mw6.4 地震, 震源深度 10 km, 震中位于 N33.19°, E86.81°。地震发生后, 国内外多个地震研究机构采用不同方法和资料快速给出了该次地震的多个震源机制解(表 1)。尽管对本次地震的震中位置、震源深度、震级存在不同的认识, 但不同机构的震源机制解一致显示本次地震为正断型破裂事件(表 1)。地震震中位置位于日干配错断裂北侧的依布茶卡地堇内。很显然, 这次地震是依布茶卡地堇活动的结果, 那么具体的发震断层是地堇东侧边界断裂还是西侧边界断裂呢?

从卫星影像上看依布茶卡地堇东侧发育东依布茶卡断裂、角木日断裂以及其他与之近平行的正断裂, 这些正断裂均倾向 NWW, 线性特征较

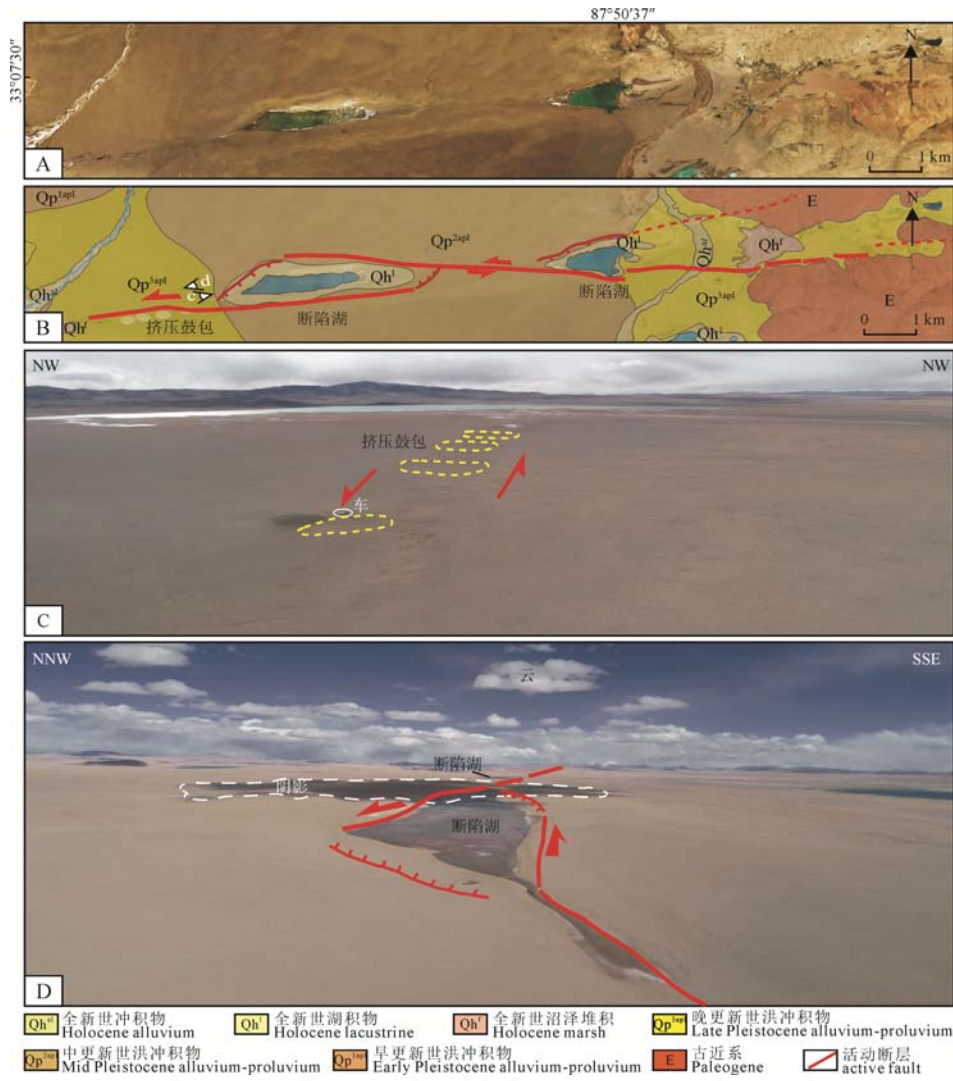


A—观察点卫星影像图; B—卫星影像地质、构造地貌解译图; C—手持 GPS 测量结果显示 2 两条冲沟的左行位错量分别为~34 m 和~24 m; D—无人机拍摄的该点断层陡坎、冲沟位错和挤压鼓包照片。

A, B—Google Earth image of the study area and its interpretation; C—handset GPS measured data showing that left-laterally offset displacements of two gullies are ~34 m and ~24 m, respectively; D—photos of fault scarp, offset gullies, pressure ridge by UAV.

图 7 错断冲沟观察点构造地貌特征

Fig. 7 Tectonic geomorphology of Gully Offset site



A—观察点卫星影像图; B—卫星影像地质、构造地貌解译图; C—线性展布的挤压鼓包野外照片(无人机拍摄); D—无人机拍摄的该点断陷湖(拉分盆地)野外照片。

A, B—Google Earth image of the study area and its interpretation; C, D—Field photos of linearly distributed pressure ridge and sag pond (pull-apart basin) by UAV.

图 8 拉分盆地观察点构造地貌特征

Fig. 8 Tectonic geomorphology at Pull-apart Basin site

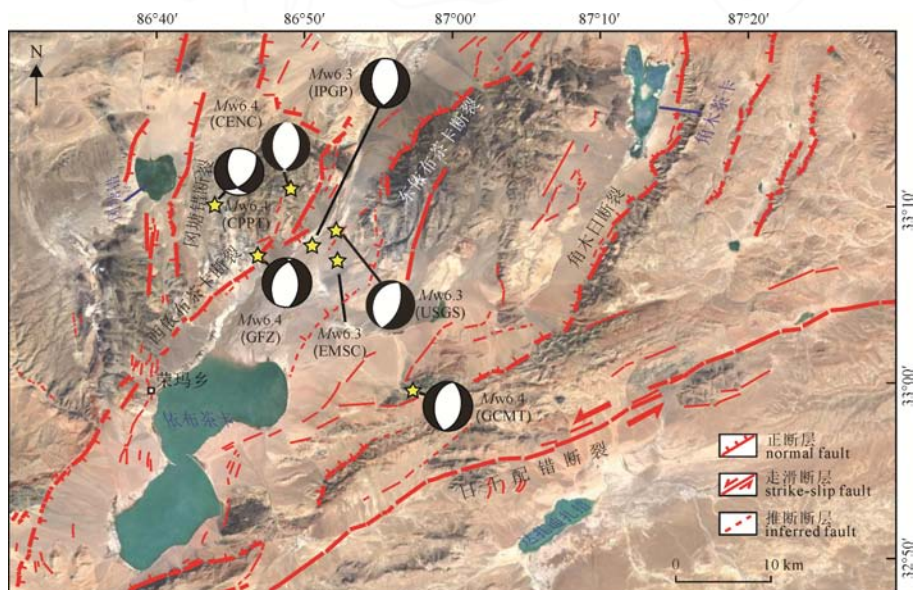


图 9 依布茶卡地堑活动断裂分布图

Fig. 9 Active tectonics in Yibug Caka Graben

表 1 不同研究机构给出的 2020 年 7 月 23 日西藏尼玛 $M_w6.4$ 地震震源机制解
Table 1 Focal mechanism solutions of the Nima $M_w6.4$ earthquake that happened in Tibet on July 23, 2020, given by different research institutions

研究机构	震中位置		震源深度 /km	震级	节面 1			节面 2		
	纬度	经度			走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
CENC	33.19°N	86.81°E	10	$M_w6.4$				10°	50°	-81°
USGS	33.146°N	86.867°E	11.5	$M_w6.3$	203°	29°	-88°	20°	61°	-91°
GCMT	33.09°N	86.86°E	17.3	$M_w6.4$	187°	44°	-94°	12°	46°	-86°
EMSC	33.12°N	86.87°E	10	$M_w6.3$						
GFZ	33.13°N	86.78°E	13	$M_w6.4$	204°	41°	-65°	353°	52°	-109°
IPGP	33.131°N	86.840°E	11	$M_w6.3$	174°	45°	-106°	17°	47°	-74°
CPPT	33.17°N	86.74°E	15	$M_w6.4$	163°	53°	-130°	37°	52°	-49°

注: CENC-中国地震台网中心; USGS-美国地质调查局; GCMT-全球全球矩心矩张量; EMSC-欧洲地中海地震中心; GFZ-德国地球科学研究中心; IPGP-法国巴黎地球物理研究所; CPPT-法国探测与地球物理实验室。

西侧边界断层明显(图 2, 9)。另外, 地堑的形成与发展是其边界断层长期活动的结果, 地堑东侧发育一系列倾向 NWW 的正断裂, 说明该地堑东侧断层活动频繁。我们在野外也观察到依布茶卡地堑东侧边界正断层裂错断了第四纪冲洪积物, 形成高数米的 NW 倾向陡坎, 说明东侧边界断裂第四纪活动性较强, 同时在角木日山前新近系与二叠系的接触界线附近也见到了正断层剖面(图 10)。该剖面上发育 3 条正断层, 产状分别为: $344^\circ \angle 41^\circ$, $348^\circ \angle 51^\circ$, $8^\circ \angle 43^\circ$, 对 F1 断层面上擦痕的产状测量结果显示平均倾向 321° , 倾角 42° (图 10)。在该剖面断层面上我们还发现了假玄武玻璃的存在, 表明该断裂具有长期的地震活动历史。从此次地震震中位置来看, 虽然不同机构给出的结果略有不同, 但均位于依布茶卡地堑东边界正断层以西, 其中中国地震台网中心、德国地球科学研究中心和法国探测与地

球物理实验室给出的震中位置已经到了依布茶卡地堑西边界正断层西侧。由于地堑西侧边界断层倾向东, 若该侧断层发震, 向地下延伸震源位置只可能位于断层东侧, 这与上述研究机构给出的结果不符, 因此该次地震的发震断层应为依布茶卡地堑东侧边界正断层。以中国地震台网中心数据为例, 其给出的震中位置位于依布茶卡西边界断裂西侧, 距地堑东边界断裂~10 km, 震源深度 10 km, 以此推算发震断层倾角约为 45° , 这与震源机制给出的和我们在野外观察到的断层倾角 $40^\circ \sim 50^\circ$ 均十分吻合。综合卫星影像特征和野外观察结果, 我们认为该次地震的发震断层为依布茶卡地堑的东侧边界正断层。青藏高原在南北向挤压环境下, 中部羌塘地块物质沿大型活动断裂带边界向东挤出逃逸, 后缘拉张形成东西向伸展环境是本次地震发生的动力学背景。

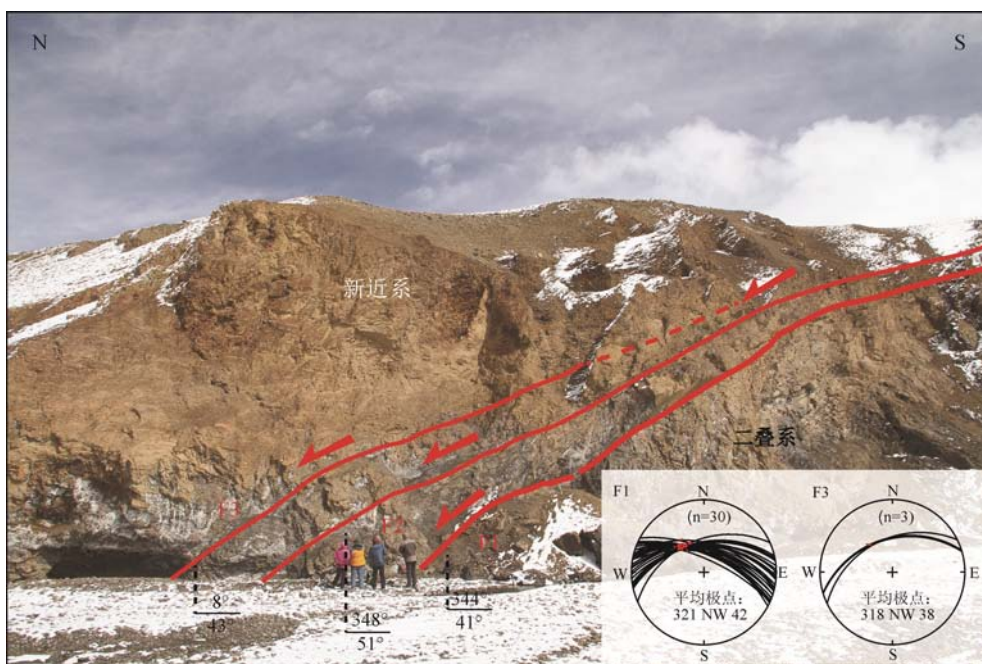


图 10 依布茶卡地堑东边界正断层剖面野外照片及断层面、擦痕产状统计图
Fig. 10 Field photo of the normal fault at the eastern boundary of Yibug Caka Graben (the inset gives lower hemisphere stereographic projections of fault kinematic data)

4 日干配错断裂的左旋走滑速率

滑动速率是评价断裂活动性和地震危险性的重要指标和依据。为准确限定日干配错断裂的晚第四纪滑动速率,我们选择断裂南西段日干配错东观察点被断层左行错断的河流阶地进行了高精度地貌位错测量,并在阶地上采集了灰岩砾石上附着的钙华样品进行U系测年来确定阶地的形成时间。

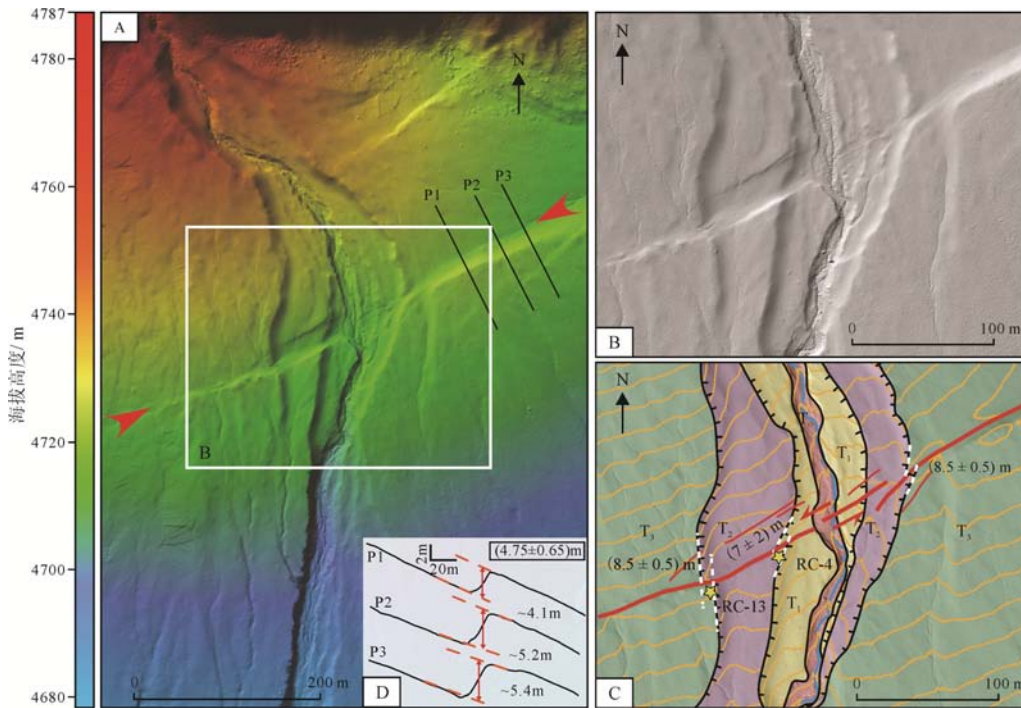
4.1 阶地位错量

我们使用奥地利瑞格(Riegl)公司的VZ-1000型三维激光扫描仪(地基LiDAR)对位错特征明显的河流阶地地貌进行了扫描,利用RISCAN PRO和Global Mapper软件对扫描获得的点云数据进行处理,生成了该点20 cm分辨率的DEM(图11A, B)。通过对DEM影像的解译分析,在该点划分出3级阶地,其中T₂、T₃阶地被明显错断(图11C)。我们以阶地陡坎为水平位移的标志线,使用LaDiCaoz_v2.1软件(Zielke and Arrowsmith, 2012)对阶地位错量

进行测量,获得T₃/T₂阶地陡坎的位错量为(8±0.5) m, T₂/T₁阶地的位错量为(7±2) m。垂直于断层陡坎的地形剖面显示断裂走滑活动的同时存在垂直运动分量,在河流东侧阶地上形成高约5 m的反向陡坎(图11D)。

4.2 阶地年代学和断层滑动速率

野外调查中发现T₃阶地和T₂阶地上堆积的灰岩砾石表面生长着钙华(钙膜),这些钙膜是在阶地抬出水面后淋滤形成的,其年龄可以代表阶地的形成时代,并已被成功应用于活动构造研究(Blisniuk and Sharp, 2003)。因此,我们在T₃和T₂阶地地面地表下约20 cm处采集了灰岩砾石样品,对其表面的新生钙膜进行了U系年龄测试,获得T₃阶地的形成年龄为(61.9±9.0) ka BP(RC-13), T₂阶地的形成年龄为(29.7±2.8) ka BP(表2)。前已述及T₃/T₂和T₂/T₁阶地陡坎的位错量分别为(8±0.5) m和(7±2) m,两者较为接近。若断层晚第四纪滑动速率保持恒定的话,T₃和T₂阶地地面的废弃年龄也应较为接近,但U系



A—日干配错工作点LiDAR DEM阴影地貌图,P1、P2、P3为垂直陡坎地形剖面;B—错断河流阶地LiDAR DEM的地貌解译,图中黄色五角星为U系年龄样品位置;D—垂直活动断层陡坎的地形剖面(剖面位置见图A)。

A, D—LiDAR digital elevation model (DEM) of Riganpei Co site (with relative elevations) with three profiles (P1, P2, P3) across the fault scarp; B, C—LiDAR DEM of offset terraces and its interpretation, yellow stars indicate locations where samples were taken for U-series dating.

图11 日干配错东观察点河流阶地位错LiDAR DEM图像及其地貌解译

Fig. 11 Shaded relief map and its tectonic geomorphology interpretation of the offset terraces at Riganpei Co site

表2 日干配错工作点U系测年结果(误差为2σ)
Table 2 U-series dating results at Riganpei Co site (2σ error)

样品号	²³⁸ U/ 10 ⁻⁹	²³⁴ U/ ²³⁸ U (10 ⁻⁶)	²³² Th/ 10 ⁻¹²	²³⁰ Th/ ²³² Th (atomic×10 ⁻⁶)	δ ²³⁴ U* (measured)	²³⁰ Th/ ²³⁸ U (activity)	²³⁰ Th Age/a (uncorrected)	²³⁰ Th Age/a (corrected)
RC-4	3288±11	63.66±0.144	518 849±10 487	32±0.7	158.0±2.6	0.309 8±0.002 2	33 692±296	29 705±2838
RC-13	2385±9	66.98±0.173	1235 164±25 070	20±0.4	218.5±3.2	0.614 3±0.004 1	74 554±758	61 936±9033

注: 铀衰变常数: λ₂₃₈=1.551 25×10⁻¹⁰(Jaffey et al., 1971); λ₂₃₄=2.822 06×10⁻⁶(Cheng et al., 2013)。钍衰变常数: λ₂₃₀=9.170 5×10⁻⁶(Cheng et al., 2013)。*: δ²³⁴U=[(²³⁴U/²³⁸U)*(λ₂₃₄/λ₂₃₈)-1]×1000。

测年结果显示两级阶地的年龄差别较大。推测 T_3 和 T_2 阶地年龄差别大的原因可能是日干配错断裂在 T_3 阶地废弃后的较长一段时间(61.9~29.7 ka)活动性极弱, 在 T_2 阶地废弃后(29.7 ka 以来)活动性相对增强, 反映了断裂活动在时间上的不均一性。

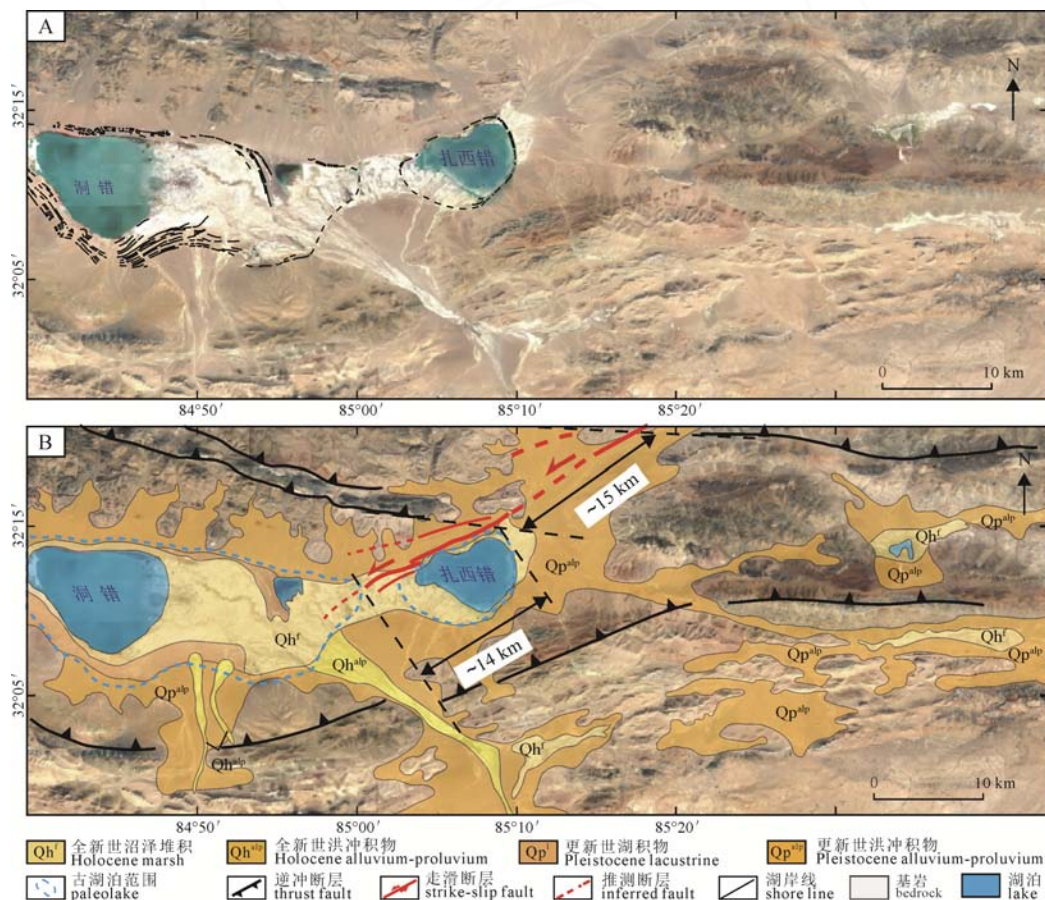
结合 T_3/T_2 阶地陡坎的位错量为(8.5±0.5) m, 计算得出晚更新世以来日干配错断裂的平均滑动速率为 0.1~0.3 mm/a。若以 T_2/T_1 阶地陡坎的位错量(7±2) m 和 T_2 阶地的年龄来计算, 可获得滑动速率的下限为 0.2 mm/a。综合上述结果可推测日干配错晚第四纪滑动速率为 0.2~0.3 mm/a。

5 讨论

5.1 日干配错断裂累积位错量和活动历史

Taylor et al.(2003)通过遥感解译和野外填图, 发现日干配错附近逆冲断层被日干配错断裂左行错断约 7 km, 依布茶卡地堇北部的江爱藏布断裂左行错断了三叠纪地层中的逆冲断层约 14 km, 从而认为依布茶卡断裂带的最大累积位错量为 14 km。在日干配错断裂南段扎西错北西侧, 侏罗纪地层中发育一条 NWW-SEE 走向的逆冲断层, 该逆冲断层过

第四纪盆地后向 SE 未见延伸(图 2B, 12); 沿日干配错断裂继续向北东约 15 km 处, 断裂东侧侏罗系中发育的逆冲断层走向也为 NWW-SEE, 向 NW 过第四系后也未见断层延伸(图 2B, 12)。两条逆冲断层似乎原为同一构造, 后被日干配错断裂左行错断, 以此逆冲断层为标志物可得到日干配错断裂的累积位错量约 15 km(图 12B), 该结果与 Taylor et al.(2003)推测的结果一致。此外, 日干配错断裂南西端在洞错附近的延伸虽然不清楚, 但在扎西错北西岸可见 NEE 走向线性展布的挤压隆起, 挤压隆起南西侧全新世湖沼相沉积中隐约可见 NE60°~65°延伸的线性构造, 将该线性构造继续向南西延伸恰好经过洞错南岸附近, 洞错和扎西错两个湖泊似乎被日干配错断裂左行错开(图 2B, 12)。我们通过卫星影像解译和野外实地调查, 勾绘出洞错和扎西错早期的古湖岸线, 恢复了古洞错和古扎西错的范围(图 12B, 蓝色虚线), 以两个古湖泊北东侧边缘为标志线获得的位错量为~14 km, 与前述逆冲断层的累积位错量十分吻合。由此我们推测, 早期的洞错和扎西错可能为同一个湖泊, 在日干配错断裂和气候的双重作用下, 形成了现在的地貌形态。



A—遥感影像; B—地质解释。

A—remote sensing image; B—geological interpretation.

图 12 日干配错断裂南西端以洞错—扎西错和 NWW-SEE 走向逆冲断层为标志物估测的断裂累积位错量
Fig. 12 Cumulative displacements of Riganpei Co fault using Dong Co-Zhaxi Co and a NWW-SEE striking thrust belt as the markers

关于日干配错断裂的起始活动时间,我们未做具体研究,但根据我们在野外观察到的该断裂与依布茶卡 SN 向地堑直接相连,以及共轭走滑断裂系与 SN 走向正断层共同调节高原中部 EW 向伸展作用的模式,日干配错断裂的起始活动时间应与羌塘地块内 SN 走向地堑一致,而后者被限定在约 13.5 Ma(Blisniuk et al., 2001; Van Buer et al., 2015)。假设我们获得的日干配错断裂晚更新世走滑速率为 0.2~0.3 mm/a 可以代表该断裂百万年尺度的运动速率,要达到 15 km 的位错量至少需要~50 Ma,而野外见到该断裂明显错断了中新世以来的逆冲构造,其起始活动时间显然不可能这么早。一种可能的解释是日干配错断裂的滑动速率在不同的时间尺度上并不一致,其百万年时间尺度的滑动速率相对较大,晚更新世以来活动性变弱,滑动速率降低,而 InSAR 测量获得的 4~6.6 mm/a(Taylor and Peltzer, 2006; Wang et al., 2019)的滑动速率可能反映了该断裂现今活动加速,结合该断裂周边 2008 年改则 Mw6.4 地震和 2020 年尼玛 Mw6.4 地震的发生,其未来的强震危险性可能较大。

5.2 青藏高原中部的近东西向伸展变形特征

本文获得的日干配错断裂晚更新世走滑速率为 0.2~0.3 mm/a,与 Taylor et al.(2003)推测的断裂百万年时间尺度平均滑动速率(1~2 mm/a),以及 InSAR 大地测量获得的断裂现今滑动速率 6.6 mm/a(Taylor and Peltzer, 2006)或 4 mm/a(Wang et al., 2019)相比差别很大,但与我们在双湖地堑获得的正断层晚更新世滑动速率 0.2~0.3 mm/a(Pan et al., 2018)基本一致。Blisniuk and Sharp(2003)研究得到的双湖地堑边界正断裂晚第四纪垂直滑动速率更小,仅为 0.064 mm/a。日干配错断裂大地测量方法获得的断层现今滑动速率与我们得到的晚第四纪平均滑动速率的差别可以用不同时间尺度上断层滑动速率的差异变化来解释(Chevalier et al., 2005),但同在晚更新世时间尺度下,班公湖—怒江缝合带以南的格仁错断裂的平均走滑速率为 2~5 mm/a(Shi et al., 2014; Wang et al., 2016),比我们在班公湖—怒江缝合带以北的日干配错断裂上获得的结果要高出一个数量级(10 倍),这对班怒带两侧共轭走滑的变形模式是一个巨大的疑问。不仅走滑断裂如此,我们在班怒带以北的 SN 走向地堑内获得的正断层垂直滑动速率(0.2~0.3 mm/a, Pan et al., 2018)也与班怒带以南的 SN 走向正断层(1~2 mm/a, Ha et al., 2019; Chevalier et al., 2020; Wang et al., 2020)差别较大,这指示大致以班公湖—怒江缝合带为界,其南北两侧的构造变形机制及动力学背景并不一致。一种可

能的解释是高原中部羌塘地块的东西向伸展是在块体整体向东挤出的背景下(Peltzer and Tapponnier, 1988; Wu et al., 2011; Han et al., 2019),内部不同位置向东运动速度的差异形成了一系列弥散分布的共轭走滑断裂系和 SN 向正断裂,因此单条断裂的活动速率较低;而高原南部拉萨地块东西向伸展作用是印度板块向喜马拉雅弧正交方向俯冲的结果,或与印度板块与欧亚板块的斜向碰撞有关,变形集中在几条规模较大的裂谷内,因此活动速率比羌塘地块内断层高。

6 结论

综合以上研究,可获得以下主要结论和认识:

(1)日干配错断裂从洞错盆地向北东方向延伸,至久松错后发散为三支,其中两支转向 NNE 分别与依布茶卡地堑两侧边界正断裂相连,另一支继续向 NEE 方向延伸直至恰岗错东侧。断裂走滑段总体走向 NEE60°~80°,延伸规模约 360 km,累积位错量 14~15 km。

(2)日干配错断裂晚更新世以来的平均走滑速率为 0.2~0.3 mm/a,远小于前人在班公湖—怒江缝合带南侧与之共轭的格仁错断裂上获得的结果。这一弱的走滑速率指示班怒带南北两侧的伸展变形速率和方式可能存在不同,或受控于不同的构造变形机制和岩石圈动力学背景。

(3)2020 年尼玛 Mw6.4 地震是日干配错断裂北侧依布茶卡地堑活动的结果,发震断层为该地堑东缘的边界正断层,此次地震的发生是青藏高原内部物质向东挤出逃逸造成东西向伸展作用的结果。

致谢: U 系测年在西安交通大学同位素实验室完成,实验过程中得到了宁有丰老师的指导和帮助,审稿人提出了建设性修改意见,中国地质科学院地质研究所葛成隆博士,中国地质科学院地质力学研究所韩帅、叶小舟助理研究员参加了部分野外工作,在此一并感谢。

Acknowledgements:

This study was supported by The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research (No. 2019QZKK0901), National Natural Science Foundation of China (Nos. 41672211 and 41941016), National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0600310), China Geological Survey (No. DD20190059), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. JYYWF201810), and Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (No. GML2019ZD0201).

参考文献:

- 葛成隆, 刘栋梁, 王世广, 韩亮, 潘家伟, 白明坤. 2017. 西昆仑康西瓦断裂带西延特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 33(12): 3942-3956.
- 洪顺英, 申旭辉, 单新建, 刘智荣, 戴娅琼, 荆凤. 2009. 基于 D-InSAR 技术的西藏改则地震同震形变场特征分析[J]. 地震, 29(4): 23-31.
- 李海兵, 孙知明, 潘家伟, 刘栋梁, 张佳佳, 李成龙, 刘亢, 云锐, 龚正. 2014. 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震野外调查——特殊的地表破裂带[J]. 地球学报, 35(3): 391-394.
- 李亚林, 王成善, 伊海生, 邓斌, 刘池洋, 杨兴科, 赖绍聪, 方维萱. 2001. 西藏北部双湖地堑构造与新生代伸展作用[J]. 中国科学(D 辑), 31(S1): 228-233.
- 吴中海, 吴珍汉, 胡道功, 马志邦, 叶培盛, 刘琦胜, 尹功明. 2005. 青藏高原中部温泉盆地西侧晚第四纪正断层作用的地貌标志及断裂活动速率[J]. 地质通报, 24(1): 48-57.
- 吴中海, 叶培盛, 刘琦胜, 吴珍汉, 胡道功, 赵希涛, 周春景. 2004. 青藏高原中部温泉盆地西缘的晚新生代正断层作用[J]. 地震地质, 26(4): 658-675.
- 吴中海, 叶培盛, 王成敏, 张克旗, 赵华, 郑勇刚, 尹金辉, 李虎侯. 2015. 藏南安岗地堑的史前大地震遗迹、年龄及其地质意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 40(10): 1621-1642.
- 杨攀新, 陈正位, 张俊, 任金卫. 2012. 西藏中南部格仁错断裂张剪性质及其区域动力学意义[J]. 地球物理学报, 55(10): 3285-3295.
- 张桂芳, 单新建, 张国宏. 2009. 利用 D-InSAR 技术研究西藏改则地震同震形变场[J]. 地震地质, 31(2): 334-340.
- ARMJO R, TAPPONNIER P, MERCIER J L, HAN T L. 1986. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research, 91(B14): 13803-13872.
- BLISNIUK P M, HACKER B R, GLODNY J, RATSCHBACHER L, BI S W, WU Z H, MCWILLIAMS M O, CALVERT A. 2001. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago[J]. Nature, 412(6847): 628-632.
- BLISNIUK P M, SHARP W D. 2003. Rates of late Quaternary normal faulting in central Tibet from U-series dating of pedogenic carbonate in displaced fluvial gravel deposits[J]. Earth and Planetary Science Letters, 215(1-2): 169-186.
- CHENG H, LAWRENCE E R, SHEN C C J, POLYAK V, ASMEROM Y, WOODHEAD J, HELLSTROM J, WANG Y, KONG X, SPÖTL C, WANG X, ALEXANDER E C. 2013. Improvements in ^{230}Th dating, ^{230}Th and ^{234}U half-life values, and U-Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Earth and Planetary Science Letters, 371-372: 82-91.
- CHEVALIER M L, RYERSON F J, TAPPONNIER P, FINKEL R C, VAN DER WOERD J, LI H B, LIU Q. 2005. Slip-rate measurements on the Karakorum fault may imply secular variations in fault motion[J]. Science, 307(5708): 411-414.
- CHEVALIER M L, TAPPONNIER P, VAN DER WOERD J, LELOUP P H, WANG S, PAN J, BAI M, KALI E, LIU X, LI H. 2020. Late quaternary extension rates across the northern half of the Yadong-Gulu Rift: Implication for East-West Extension in southern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research, 125(7): e2019JB019106.
- ELLIOTT J R, WALTERS R J, ENGLAND P C, JACKSON J A, LI Z, PARSONS B. 2010. Extension on the Tibetan plateau: Recent normal faulting measured by InSAR and body wave seismology[J]. Geophysical Journal International, 183(2): 503-535.
- GE Cheng-long, LIU Dong-liang, WANG Shi-guang, HAN Liang, PAN Jia-wei, BAI Ming-kun. 2017. The characteristics and tectonic implications of the western extension of the Karakax fault, West Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(12): 3942-3956(in Chinese with English abstract).
- HA G H, WU Z H, LIU F. 2019. Late Quaternary vertical slip rates along the Southern Yadong-Gulu Rift, southern Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 755: 75-90.
- HAN S, LI H B, PAN J W, LU H J, ZHENG Y, LIU D L, GE C L. 2019. Co-seismic surface ruptures in Qiangtang Terrane: Insight into Late Cenozoic deformation of central Tibet[J]. Tectonophysics, 750: 359-378.
- HARRISON T M, COPELAND P, KIDD W S F, LOVERA O M. 1995. Activation of the Nyainqentanghla shear zone: Implications for uplift of the southern Tibetan Plateau[J]. Tectonics, 14(3): 658-676.
- HONG Shun-ying, SHEN Xu-hui, SHAN Xin-jian, DAI Ya-qiong, JING Feng. 2009. Characteristics of coseismic deformation of the 2008 Gaize, Tibet earthquake based on D-InSAR technology[J]. Earthquake, 29(4): 23-31(in Chinese with English abstract).
- JAFFEY A H, FLYNN K F, GLENDENIN L E, BENTLEY W C, ESSLING A M. 1971. Precision measurement of half-lives and specific activities of ^{235}U and ^{238}U [J]. Physical Review, 4(5): 1889-1906.
- KAPP P, TAYLOR M, STOCKLI D, DING L. 2008. Development of active low-angle normal fault systems during orogenic collapse: Insight from Tibet[J]. Geology, 36(1): 7-10.
- LACASSIN R, VALLI F, ARNAUD N, LELOUP P H, PAQUETTE J L, LI H, TAPPONNIER P, CHEVALIER M L, GUILLOT S, MAHÉO G, GUILLOT S, MAHEO G, XU Z. 2004. Large-scale geometry, offset and kinematic evolution of the Karakorum fault, Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 219(3-4): 255-269.
- LI H B, VAN DER WOERD J, SUN Z M, SI J L, TAPPONNIER P, PAN J W, LIU D L, CHEVALIER M L. 2012. Co-seismic and cumulative offsets of the recent earthquakes along the Karakax left-lateral strike-slip fault in western Tibet[J]. Gondwana Research, 21(1): 64-87.
- LI Hai-bing, SUN Zhi-ming, PAN Jia-wei, LIU Dong-liang, ZHANG Jia-jia, LI Cheng-long, LIU Kang, YUN Kun, GONG Zheng. 2014. Field Study of the 12 February 2014 Yutian $M_s7.3$ Earthquake: A special surface rupture zone[J]. Acta Geoscientica Sinica, 35(3): 391-394(in Chinese with English abstract).
- LI K, KIRBY E, XU X W, CHEN G H, REN J J, WANG D. 2019. Rates of Holocene normal faulting along the Dong Co fault in central Tibet, based on ^{14}C dating of displaced fluvial terraces[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 183: 103962.
- LI Y L, WANG C S, YI H S, DENG B, LIU C Y, YANG X K, LAI S C, FANG W X. 2001. Characteristics of the Shuanghu graben and Cenozoic extension in northern Tibet[J]. Science in

- China (Series D), 44(S1): 284-291 .
- MAHÉO G, LELOUP P H, VALLI F, LACASSIN R, ARNAUD N, PAQUETTE J L, FERNANDEZ A, HAIBING L, FARLEY K A, TAPPONNIER P. 2007. Post 4 Ma initiation of normal faulting in southern Tibet: Constraints from the Kung Co half graben[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(1-2): 233-243.
- MOLNAR P, TAPPONNIER P. 1978. Active tectonics of Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research*, 83(B11): 5361-5375.
- MURPHY M A, HARRISON T M. 1999. Relationship between leucogranites and the Qomolangma detachment in the Rongbuk Valley, South Tibet[J]. *Geology*, 27(9): 831-834.
- PAN J W, LI H B, SI J L, PEI J L, FU X F, CHEVALIER M L, LIU D L. 2014. Rupture process of the Wenchuan earthquake (Mw 7.9) from surface ruptures and fault striations characteristics[J]. *Tectonophysics*, 619-620: 13-28.
- PAN J W, LI H B, SUN Z M, LIU D L, LU H J, ZHENG Y, ZHANG L, YE X Z, CHEVALIER M L. 2018. Reassessment of the late Quaternary slip rate of the shuanghu graben, central Tibet[R]//AGU Fall Meeting 2018 abstract, EP53A-01 .
- PAN Y, KIDD W S F. 1992. Nyainqentanglha shear zone: A late Miocene extensional detachment in the southern Tibetan Plateau[J]. *Geology*, 20(9): 775-778.
- RATSCHBACHER L, KRUMREI I, BLUMENWITZ M, STAIGER M, GLOAGUEN R, MILLER B V, SAMSON S D, EDWARDS M A, APPEL E. 2011. Rifting and strike-slip shear in central Tibet and the geometry, age and kinematics of upper crustal extension in Tibet[C]//GLOAGUEN R, RATSCHBACHER L (Eds.). *Growth and Collapse of the Tibetan Plateau*. Geological Society, London, Special Publications, 353(1): 127-163.
- SHI X H, KIRBY E, LU H J, ROBINSON R, FURLONG K P, WANG E. 2014. Holocene slip rate along the Gyaring Co Fault, central Tibet[J]. *Geophysical Research Letters*, 41(16): 5829-5837.
- TAYLOR M, PELTZER G. 2006. Current slip rates on conjugate strike-slip faults in central Tibet using synthetic aperture radar interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 111(B12): B12402.
- TAYLOR M, YIN A, RYERSON F J, KAPP P, DING L. 2003. Conjugate strike-slip faulting along the Bangong-Nujiang suture zone accommodates coeval east-west extension and north-south shortening in the interior of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 22(4): 1044.
- 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.
- VAN BUER N J, JAGOUTZ O, UPADHYAY R, GUILLONG M. 2015. Mid-crustal detachment beneath western Tibet exhumed where conjugate Karakoram and Longmu-Gozha Co faults intersect[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 413: 144-157.
- VANNAY J C, GASEMANN B, RAHN M, FRANK W, CARTER A, BAUDRAZ V, COSCA M. 2004. Miocene to Holocene exhumation of metamorphic crustal wedges in the NW Himalaya: Evidence for tectonic extrusion coupled to fluvial erosion[J]. *Tectonics*, 23(1): TC1014.
- WANG C S, DAI J G, ZHAO X X, LI Y L, GRAHAM S A, HE D F, RAN B, MENG J. 2014. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review[J]. *Tectonophysics*, 621: 1-43.
- WANG D, YIN G M, WANG X L, LIU C R, HAN F, DU J H. 2016. OSL dating of the late Quaternary slip rate on the Gyaring co Fault in central Tibet[J]. *Geochronometria*, 43(1): 162-173.
- WANG H, WRIGHT T J, JING L Z, PENG L C. 2019. Strain rate distribution in South-Central Tibet from two decades of InSAR and GPS[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(10): 5170-5179.
- WANG S G, CHEVALIER M L, PAN J W, BAI M K, LI K Y, LI H B, WANG G H. 2020. Quantification of the late Quaternary throw rates along the Yadong rift, southern Tibet[J]. *Tectonophysics*, 790: 228545 .
- WU Z H, YE P S, BAROSH P J, WU Z H. 2010. The October 6, 2008 Mw 6.3 magnitude Damxung earthquake, Yadong-Gulu rift, Tibet, and implications for present-day crustal deformation within Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4): 943-957.
- WU Zhong-hai, WU Zhen-han, HU Dao-gong, MA Zhi-bang, YE Pei-sheng, LIU Qi-sheng, YIN Gong-ming. 2005. Geomorphologic indicators and rates of late Quaternary normal faulting at the west side of the Wenquan graben, central Qinghai-Tibet plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(1): 48-57(in Chinese with English abstract).
- WU Zhong-hai, YE Pei-sheng, LIU Qi-sheng, WU Zhen-han, HU Dao-gong, ZHAO Xi-tao, ZHOU Chun-jing. 2004. Late Cenozoic normal faulting on the western side of Wenquan graben, central Qinghai-Tibet plateau[J]. *Seismology and Geology*, 26(4): 658-675(in Chinese with English abstract).
- WU Zhong-hai, YE Pei-sheng, WANG Cheng-min, ZHANG Ke-qi, ZHAO Hua, ZHENG Yong-gang, YIN Jin-hui, LI Hu-hou. 2015. The relics, ages and significance of prehistoric large earthquakes in the Angang Graben in south Tibet[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(10): 1621-1642(in Chinese with English abstract).
- YANG Pan-xin, CHEN Zheng-wei, ZHANG Jun, REN Jin-wei. 2012. The tension-shear of Gyaring Co Fault and the implication for dynamic model in South-central Tibet[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(10): 3285-3295(in Chinese with English abstract).
- YIN A, KAPP P A, MURPHY M A, MANNING C E, HARRISON T M, GROVE M, DING L, DENG X G, WU C M. 1999. Significant late Neogene East-West extension in northern Tibet[J]. *Geology*, 27(9): 787-790.
- ZHANG Gui-fang, SHAN Xin-jian, ZHANG Guo-hong. 2009. Observing coseismic deformation of the Gaize, Xizang earthquake with Differential Interferometric SAR[J]. *Seismology and Geology*, 31(2): 334-340(in Chinese with English abstract).
- ZHENG G, WANG H, WRIGHT T J, LOU Y, ZHANG R, ZHANG W, SHI C, HUANG J, WEI N. 2017. Crustal deformation in the India-Eurasia collision zone from 25 years of GPS measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 122: 9290-9312.
- ZIELKE O, ARROWSMITH J R. 2012. LaDiCaoz and LiDARImager-MATLAB GUIs for LiDAR data handling and lateral displacement measurement[J]. *Geosphere*, 8(1): 206-221.