

维西—乔后断裂北段晚第四纪活动的地质地貌表现

李鉴林, 常祖峰*, 阿拉塔

云南省地震局, 云南昆明 650224

摘 要: 维西—乔后断裂位于青藏高原与云贵高原接壤地带, 是青藏高原东南缘一条规模较大的活动断裂。研究其新构造活动特征对认识川滇块体构造格局和运动图像具有重要的科学意义。据野外详细的地质地貌调查结果, 重点阐述断裂北段的运动特征及其滑动速率。研究表明: 白济讯、维西县城及扎你洛等地均发现晚更新世活动的地质证据, 有明显的晚第四纪活动迹象; 该段运动性质以右旋走滑为主, 根据阶地扭曲、陡坎等测得其水平滑动速率为 1.0~1.2 mm/a, 垂直滑动速率为 0.3~0.4 mm/a。

关键词: 维西—乔后断裂; 晚更新世; 滑动速率

中图分类号: P315.2; P534.63 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.112701

Geological and Geomorphological Features of Late Quaternary Activity in the Northern Segment of Weixi–Qiaohou Fault

LI Jianlin, CHANG Zufeng*, Alata

Yunnan Earthquake Agency, Kunming, Yunnan 650224

Abstract: The Weixi–Qiaohou fault located at the borders zone of the Tibetan and Yunnan–Guizhou plateaus is a large-scale active fault on the southeast margin of the Tibetan Plateau. Studying its neotectonic activity has considerable scientific importance for understanding the tectonic framework and movement of the Chuan–Dian block. In this study, the movement and sliding rate of the northern segment of the fault are described mainly based on the results of detailed field geological and geomorphic investigations. The research results have provided geological evidence of Late Pleistocene activity at Baijixun, Weixi County, and Zhaniluo, which is highly indicative of Late Quaternary activity. This segment movement is mainly dominated by dextral slip, with a horizontal slip rate of 1.0–1.2 mm/a and a vertical slip rate of 0.3–0.4 mm/a according to the terrace distortion and scarps.

Key words: Weixi–Qiaohou fault; Late Pleistocene; slip rate

受板块的挤压、旋扭作用, 青藏高原的隆升始终受近南北向的动力学推挤作用, 其地质地貌主要表现为向北推移、缩短加厚和向东挤出三种形式(马宗晋等, 1998)。发生在块体边界和内部的构造变形致使其东缘的侧向挤出导致了川滇菱形块体的形成, 它是中国大陆最强烈的活动块体, 新构造运动强烈, 地震频繁, 沿块体边界是 7 级以上历史强震数量最频繁的地区之一。边界断裂同时是青藏高原物质在巨型走滑剪切带或粘塑性基底向东南移动时的物质传递与能量交换的重要部位, 也是活动构造学术研究和地震工程抗震防范及监测预报关注的重点

(邓起东等, 2002)。川滇菱形块体东边缘主要由鲜水河、安宁河、则木河和小江断裂组成, 构造相对单一, 滑动速率较大, 研究程度较高; 而西边界断裂结构样式复杂, 由多条断续的右旋走滑断裂组成, 地震稀少, 除红河断裂外, 西边界活动构造研究程度相对较低(汪一鹏等, 2003; 常祖峰等, 2022)。因此, 研究块体西边界断裂的晚第四纪活动特征对认识川滇块体活动构造格架及其演化历史具有重要的科学意义。维西—乔后断裂位于块体西缘, 但由于历史地震较少, 加之位于滇西北高山地区, 历史上受关注程度明显不高。

本文由国家自然科学基金项目(编号: U2002211)和云南省地震局科技专项基金项目(编号: 2022ZLZX01)联合资助。

收稿日期: 2023-06-30; 改回日期: 2023-11-07; 网络首发日期: 2023-11-28。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 李鉴林, 男, 1977 年生。硕士, 工程师。主要从事地震地质与活动构造工作。E-mail: lijianlin2077@163.com。

*通信作者: 常祖峰, 男, 1966 年生。硕士, 研究员。主要从事地震地质研究。E-mail: zufch@163.com。

1 区域地震构造背景

川滇活动块体的西侧发育有一系列规模较大的断裂带,如红河断裂、维西—乔后断裂、金沙江断裂等(图 1)。其中红河断裂最为著名,它是一条多期运动的大型走滑剪切断裂,在东南亚大陆地壳演化与陆内块体构造运动中具有显著地位(Tapponnier et al., 1986, 1990, 2001; Leloup et al., 1993, 1995; 陈文寄等, 1996; Wang et al., 1998; 魏顺民等, 2001; 向宏发等, 2004, 2007; 乔学军等, 2004; Socquet et al., 2005; Schoenbohm et al., 2006; 王阎昭等, 2008; 张建国等, 2009; 王绍晋等, 2010)。金沙江断裂是一条多期活动的缝合线,沿断裂带超基性岩成带分布,具有明显的挤压性质,因受到青藏高原侧向挤出运动的影响,又表现出右旋逆走滑运动性质,其中以断裂中北段和中段最为活动,断裂南段则认为晚更新世以来不堪活动,或者认为基本不活动(许志琴等, 1992; 唐荣昌等, 1993; 常祖峰等, 2014, 2016a;

常昊等, 2021)。

维西—乔后断裂展布于金沙江断裂与红河断裂间,是连接金沙江断裂和红河断裂两条活动断裂的枢纽(常祖峰等, 2016a)。断裂北端起于雪龙山东麓白济汛附近,经维西、永春、马登、乔后等地后沿巍山盆地西缘展布,总体走向北西,总长约 280 km。根据断裂的活动时代和运动学特征,以玉狮场、平坡为界可划分为三段,北段,白济汛—青水江段,长约 60 km; 中段,玉狮场—平坡段,长约 180 km; 南段,巍山盆地,长约 40 km。最新研究成果显示,断裂中段为全新世活动段,玉狮场、玉水坪、岩曲、马头水等探槽揭示出全新世活动的地质剖面证据,并揭示出多次 7 级以上古地震事件,断裂以右旋走滑运动为主,晚更新世晚期以来其水平滑动速率为 1.8~2.4 mm/a(任俊杰等, 2007; Chang et al., 2018; 常祖峰等, 2021, 2022; 王光明等, 2021)。断裂南段以正断性质为主,在巍山盆地西缘的箐门口、佛堂村、洗澡塘等探槽均发现该段断错了上更新统地层,

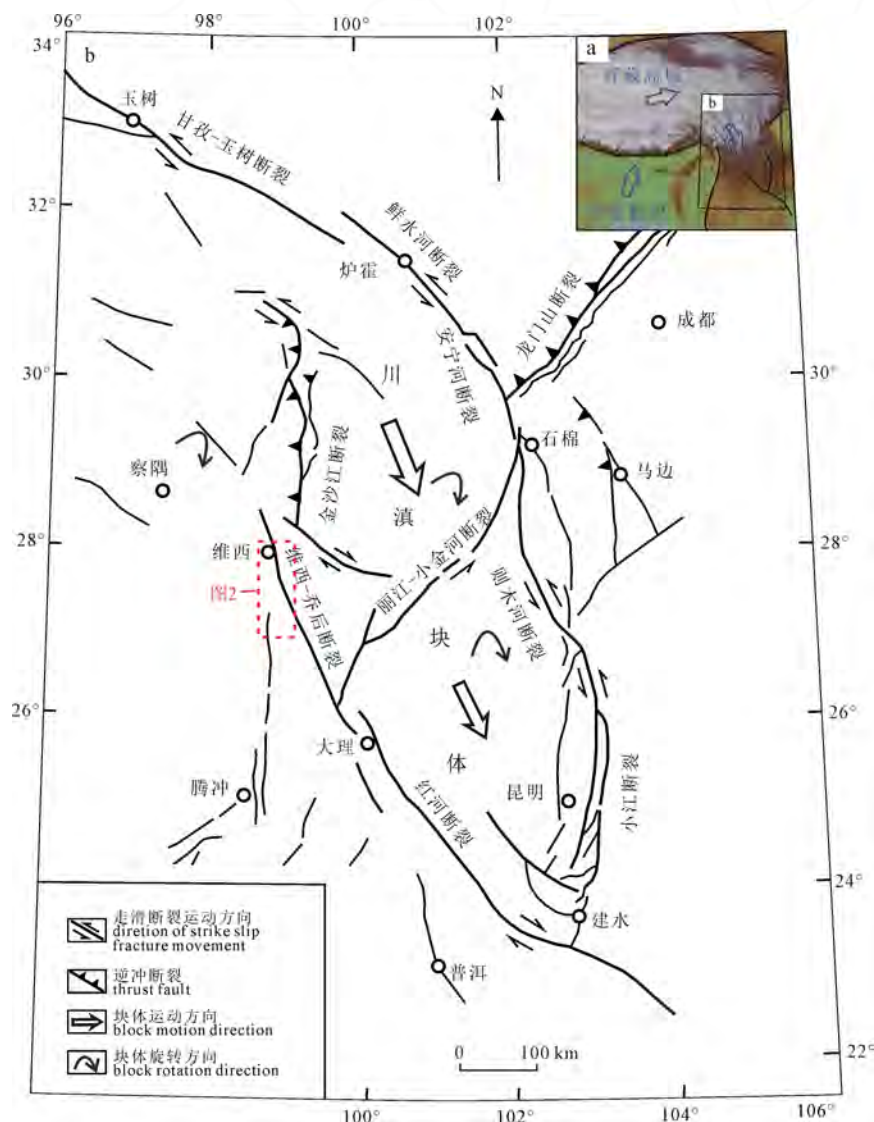


图 1 川滇块体及其周边构造格架

Fig. 1 Sichuan Yunnan block and its surrounding structural framework

其垂直滑动速率为 $0.18\sim 0.32\text{ mm/a}$ (常祖峰等, 2016b, 2021)。断裂北段, 几乎没有研究报道。文中根据在 1:5 万活动断裂填图和国家自然科学基金研究成果, 重点对断裂北段的断层露头、断错地貌现象等进行了研究, 并分析其最新活动时代和运动特征。

2 断裂北段第四纪活动证据

北段主要分为 2~3 支, 一支起于澜沧江边白济讯一带, 向南经营蒲底、塘上村、麻栗坪、兰永、河东、至清水江, 长约 60 km; 另一支主要展布于嘎嘎塘、花园箐、陈新、青松梁子和施角一带, 长约 40 km(图 2)。其间沿嘎嘎塘娥石村一带还发育一支沿古近系东缘的次级断裂。断裂对维西古近系、上新统和更新统地层有明显的控制作用, 断裂沿线地貌上主要表现为断层陡崖、断层三角面和较为平直的断裂槽地。

在白济讯北 2.2 km 见数条断层发育于澜沧江 T_2 阶地上(图 3a), 明显断错河流相砂土层(图 3b)。 T_2 堆积物自上而下分别为: ①层坡积根植土层、②层卵石层、③层砾砂层、④层灰褐色细砂条带和

⑤层细砂层。①层为表层壤土层, 含腐殖质和植物根系, 为全新世堆积物。②层卵石层夹有洪坡积砾石及黏土, 该层理和分选较差, 松散未固结, 其物质成分的颜色与胶结程度均与①层类似, 推测为全新世堆积(图 3c)。③层砾砂层为典型的河流相堆积, 层理清晰, 其间夹有层理清晰的灰褐色细砂条带(④层)。⑤层细砂层, 为灰黄色均质的细砂, 水平层理清晰。剖面上, 可以明显地分辨出断层上盘下错运动, 可清晰地观测到断层断错了③层砾砂层、④层灰褐色细砂条带和⑤层细砂层, 从④层灰褐色层细砂条带很容易测得垂直错距达 10 cm(图 3d)。③层砾砂层光释光(OSL)样品(样品 DQ-3)经山东地震工程研究院测试, 其测年结果为 $(30.5\pm 0.6)\text{ ka}$, 说明该断裂晚更新世以来有过构造运动(图 3e)。

沿上述断层往南追踪不远, 同样可见类似于上述断层断错了澜沧江 T_2 阶地的细砂层和卵石层(图 4a~d)。可以看到, 其河流相的卵石层和砾砂层同步位错, 垂直错距达 80 cm, 唯上覆坡积物未见有构造活动迹象, 地层表现为正断性质(图 4d)。断层剖面反映出了断裂在该地带晚更新世活动特征。



图 2 维西—乔后断裂北段空间展布

Fig. 2 Spatial distribution of the north section of the Weixi-Qiaohou fault

在维西县城西侧公路边坡见一断层剖面。该剖面高度超 10 m, 主要为河流冲积相堆积, 砾砂与细砂相互堆积, 层理清晰。断层剖面位于 T₄ 阶地前缘地貌部位, 自上而下, 剖面发育的地层主要包括(图 5a, b):

地层 U₁: 褐红色全新世壤土;

地层 U₂: 褐黄色砾砂层, 砾石磨圆度中等, 次棱角-次圆状, 固结中等;

地层 U₃: 浅黄色砾石层, 砾石多数磨圆度中等, 少数次棱角-次圆状, 固结中等;

地层 U₃₋₁: 浅黄色粉砂层, 含少量砾石, 固结中等;

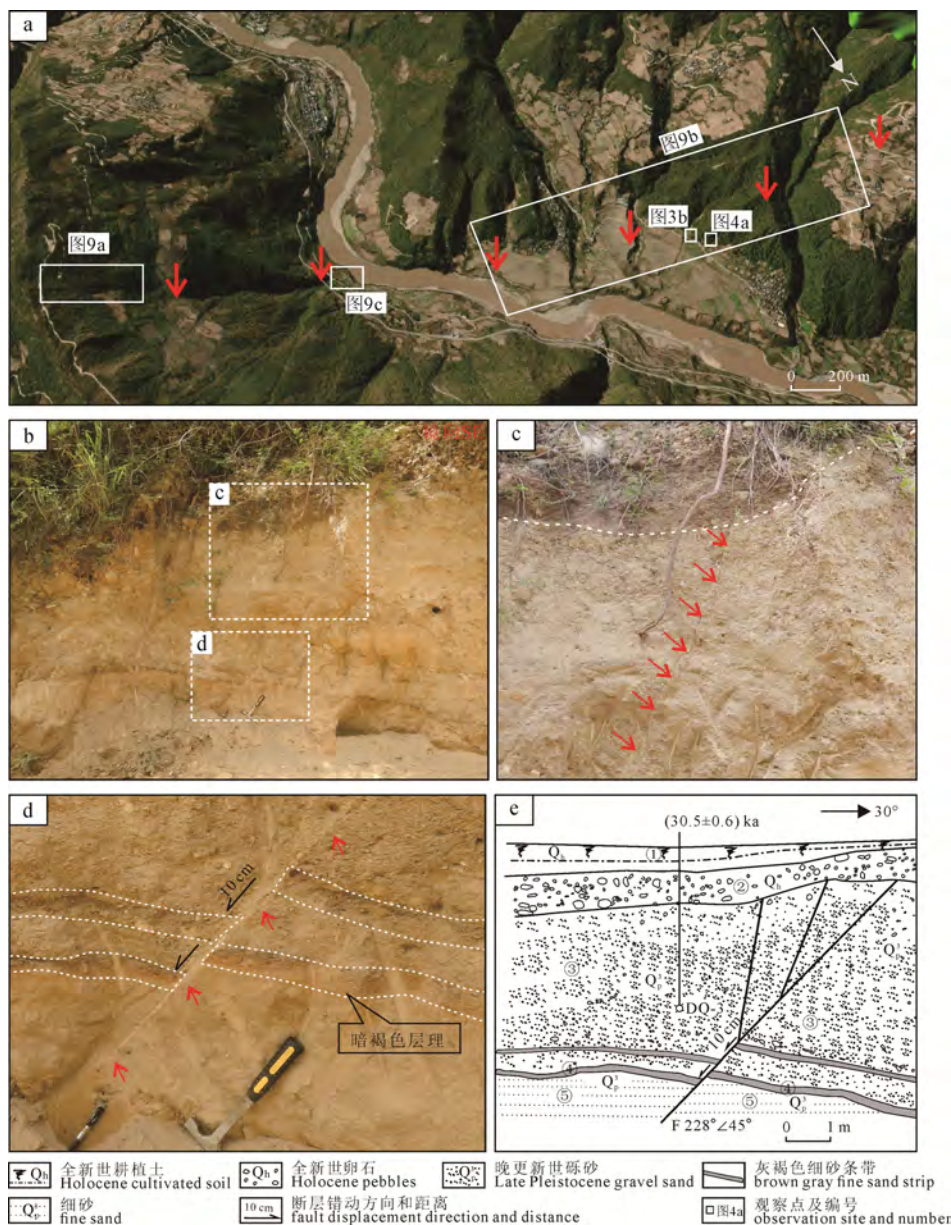
地层 U₃₋₂: 浅黄色粉砂层, 含少量砾石, 局部夹粉质黏土, 固结中等;

地层 U₃₋₃: 浅黄色粉砂层, 含少量砾石, 固结中等;

地层 U₄: 浅黄、浅灰、褐黄色粉砂层, 含少量砾石, 固结良好;

地层 U₅: 紫红色粉土层, 固结良好。

剖面揭示的断层产状为 $228^{\circ} \angle 78^{\circ}$, 边坡开挖地带较为清晰的揭露河流相堆积地层均已被断错。U₂ 层砾砂层和 U₃ 层砾石与粉土互层, 断裂两侧均能找到相应的地层(图 5c), U₄ 和 U₅ 层仅在下盘可见。U₃₋₁ 层和 U₃₋₂ 层为河流相的砂土层, 层理性明显, 断层两侧均有分布, 易分辨, 作为断错标志层可以看出断裂为正断运动, 这两层错距相当, 均断错了约 2.8 m。现场挖掘, U₂ 层与 U₃ 层固结程度相当、颜色和地层物质成分也相同, 分析这



a—白济汛北卫星影像图; b—断错砂土层照片; c, d—局部放大照片; e—断层剖面图。

a—satellite image of the north side of Baijixun; b—photos of staggered sand layers; c, d—partial enlargement of photos; e—fault profile map.

图 3 白济汛北 2.2 km 第四纪断层

Fig. 3 Quaternary fault 2.2 km north of Baijixun

两层堆积时代相同, 根据断错部位 U_2 地层样品 (OSL-3) 经山东地震工程研究院年代测试结果为 (87.9 ± 3.5) ka, 为上更新统, U_4 与 U_5 层为不整合面, 说明该地区活动是分阶段的。从其第四系地层错距达数米, 可以看出断层在晚更新世有过强烈的构造运动。

维西县城北侧冲沟中见断层断错了上更新统晚期玉龙山组冰碛堆积(图 6a), 被错地层 ^{14}C 经美国 BETA 实验室测年结果为 $(18\ 435 \pm 467)$ a.B.P., 断层面上盘下错, 表现为正断性质。

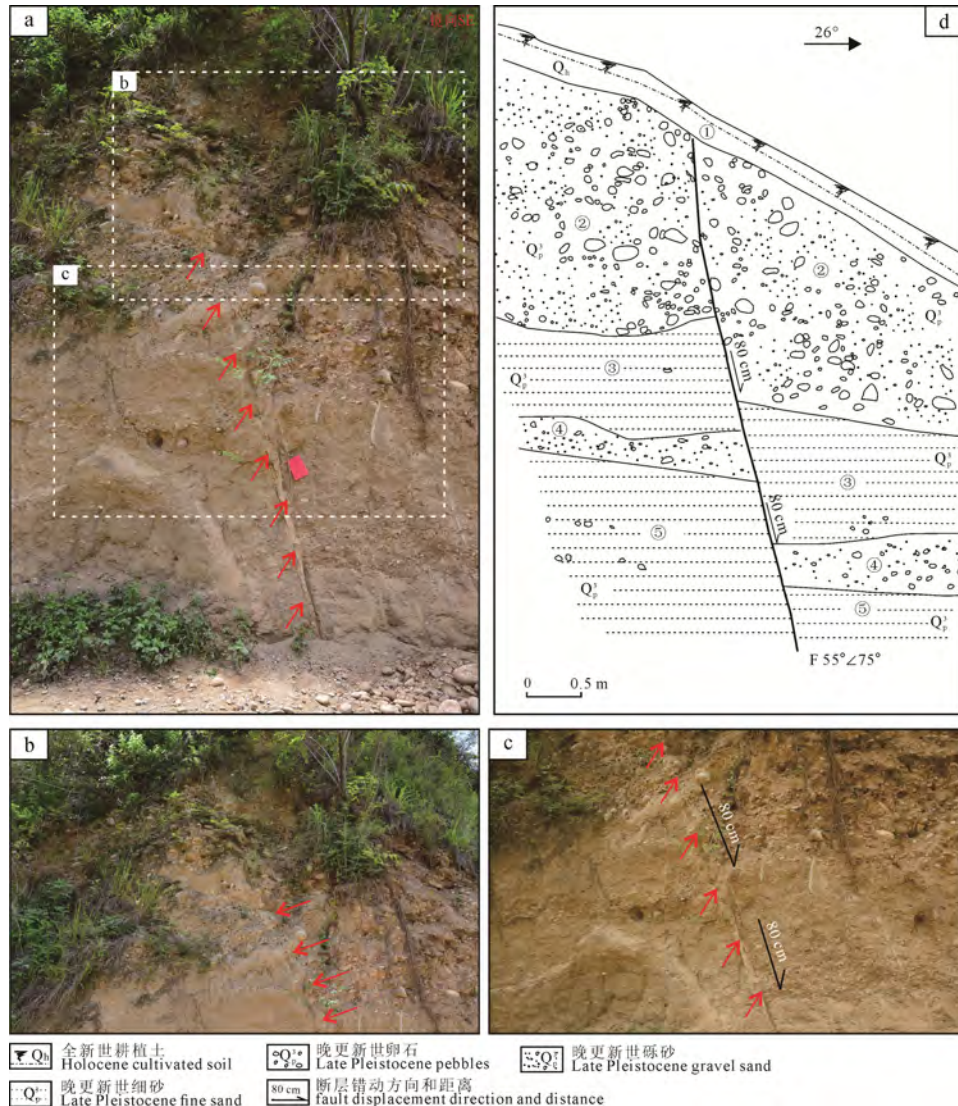
在兰永村 T_3 阶地, 也发现数条断层发育(图 6b), 被错下部地层取得的样品 ^{14}C 经美国 BETA 实验室年代测试, 年龄为 $(33\ 002 \pm 913)$ a.B.P., 表明在晚更新世有过活动。

沿上述剖面向南追踪, 在维西盆地兰永村见河流相和洪积相互层堆积, 河流相和洪积相, 这两种地层在该地区发育普遍(图 6c)。根据该地区的测年

资料(李鼎荣等, 1987), 该地层形成于 3 万年左右, 属晚更新世中期形成。在该村附近洪积扇地层中发现有数条断层发育, 这些断层倾角在 $70^\circ \sim 85^\circ$ 间变化, 但走向基本一致, 均为北西向。断层错断的地层与前述地层物质来源和胶结程度一致, 为上更新统, 表明断层在晚更新世有过新构造活动(图 6d)。

河东村北西 1.5 km 公路旁见断层破碎带发育, 主要表现为断层角砾岩带, 总宽约 120 m。在主干断裂的近邻地段, 见到活动断层发育(图 7a, b), 断层发育于三叠系流纹岩和更新统砾砂层中。 $F_1 \sim F_4$ 表现为正断层性质, 而 F_5 表现为明显的逆断层性质, 浅色的长石矿物条带被明显地错断。被错地层时代经美国 BETA 实验室测年, ^{14}C 年龄为 $(32\ 510 \pm 210)$ a.B.P., 被错地层为上更新统。

从上述野外调查可以看出, 断层沿线有较好的线性影像, 同时断错了多处上更新统, 这些证据均说明维西—乔后断裂北段晚更新世以来有过活动。



a—断错砂土层照片; b, c—局部放大照片; d—断层剖面图。

a—photos of staggered sand layers; b, c—partial enlargement of photos; d—fault profile map.

图 4 白济汛第四纪断层

Fig. 4 Baijixun Quaternary faults

3 晚第四纪活动地貌表现及运动速率

断层的运动必然在其沿线留下地貌痕迹,晚第四纪运动速率作为一个重要的参数用于衡量断裂的运动强度。野外调查可以通过地貌研究的方式,对断裂活动特征及运动强度等进行定性描述。

在獐子口村附近的地貌形成多级阶地,其断层在气象新村通过的T₃阶地上发育明显的断层陡坎,高差10数m,长1~2 km,从断层陡坎和阶地地貌形成时代判断断裂晚更新世中期曾有强烈活动(图8)。

断裂在白济汛附近见清晰的断层陡坎和断层垭口,在澜沧江T₃阶地上发育断层陡坎,对晚更新世地层有明显的控制作用(图9a),断层通过山脊处,形成一台地,在断层通过处的台地与山脊断错有明显的断层陡坎(图9b)。断层在T₂阶地断层两侧形成明显右旋扭曲变形,水平位错量为22 m(图9c),在该阶地取炭样品(DQ-5),经年代测年,¹⁴C年龄为(22 980±100) a.B.P.,由此估算该断裂晚更新世以来水平滑动速率为1.0 mm/a。扎你洛附近永春河支流也可看到河道被连续的右旋扭曲并在阶地上发育

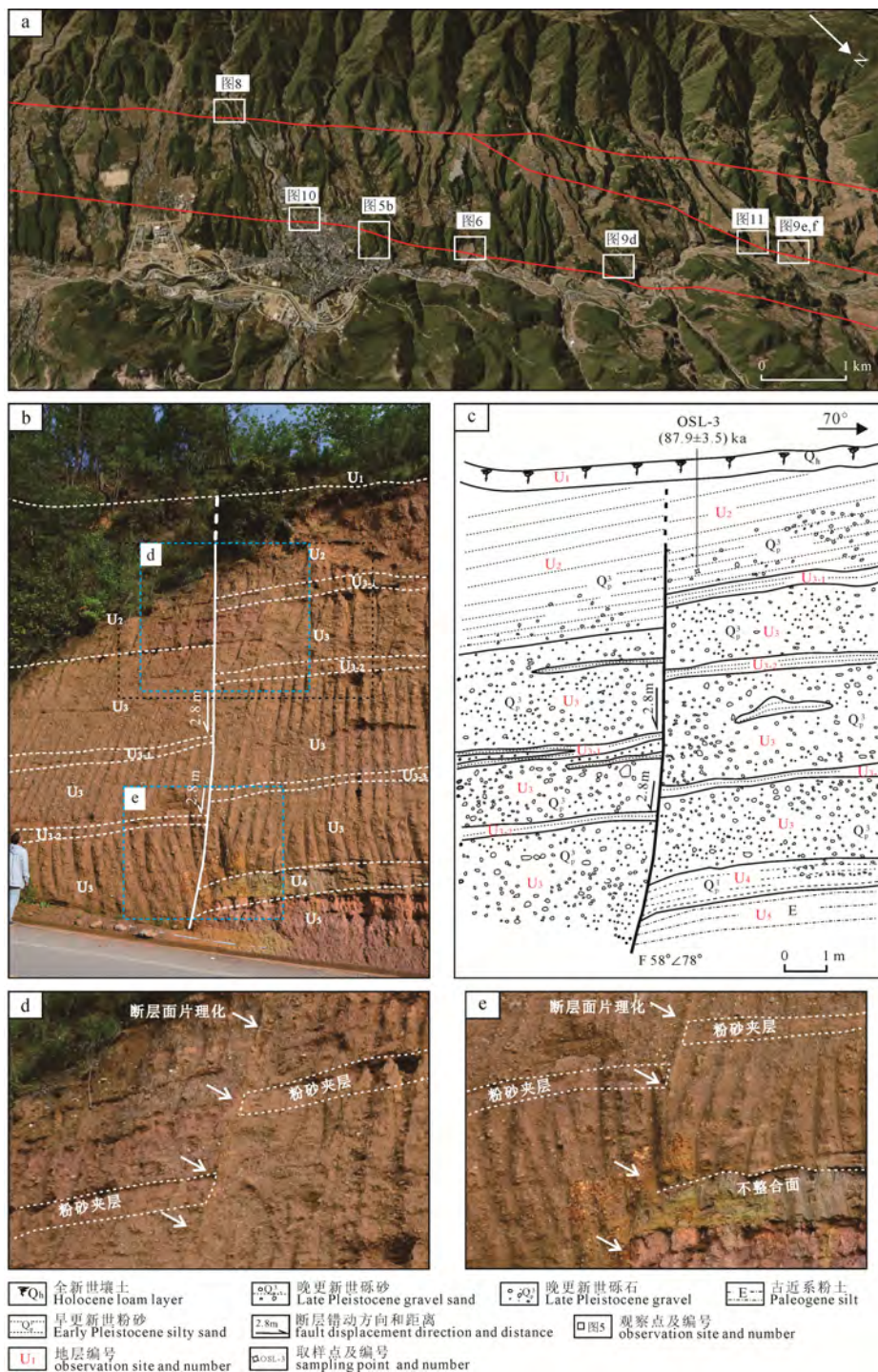
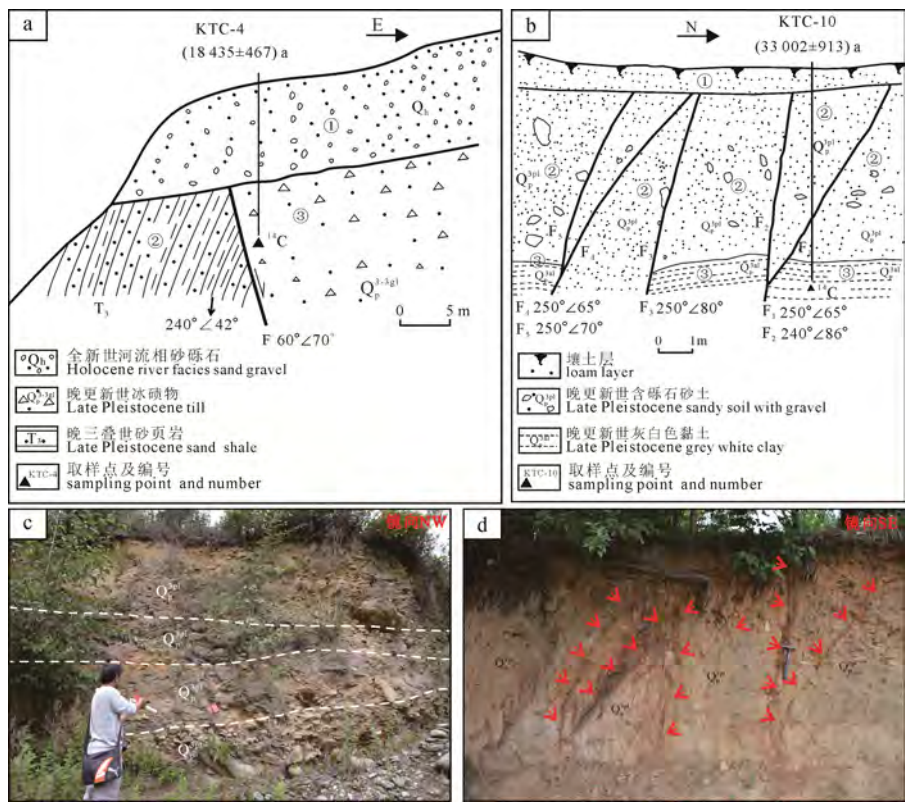


图5 维西县城西侧公路边坡第四纪断层
Fig. 5 Quaternary faults on the highway slope on the west side of Weixi County

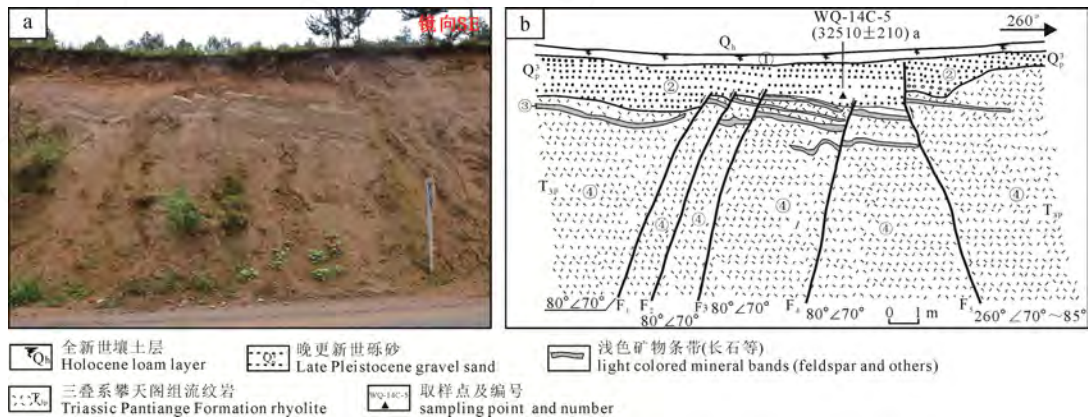


a—维西县城北断层剖面图; b—兰永村断层剖面图; c—兰永村地层照片; d—兰永村断层照片。

a—fault profile of north Weixi county; b—Lanyong village fault profile; c—picture of Lanyong stratum; d—picture of Lanyong village fault.

图 6 维西城北和兰永村第四纪断层

Fig. 6 Quaternary faults in the north of Weixi County and Lanyong village



a—河东村断层照片; b—河东村断层剖面图。

a—picture of Hedong village fault; b—Hedong village fault profile.

图 7 河东断层剖面

Fig. 7 Hedong fault profile

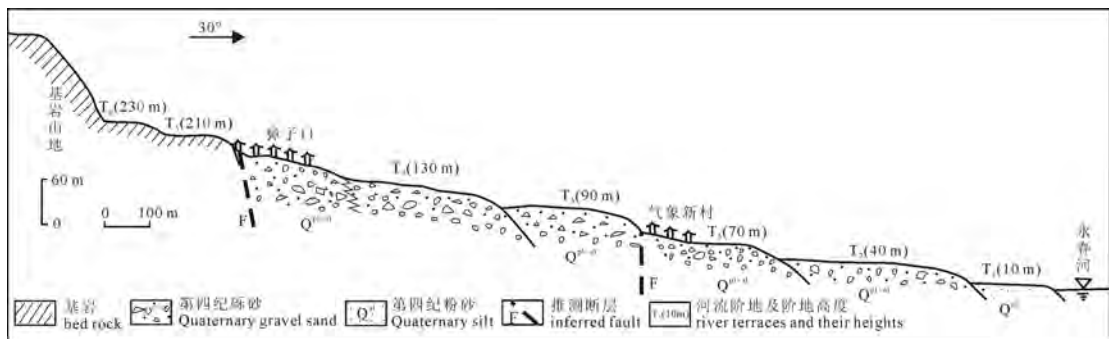
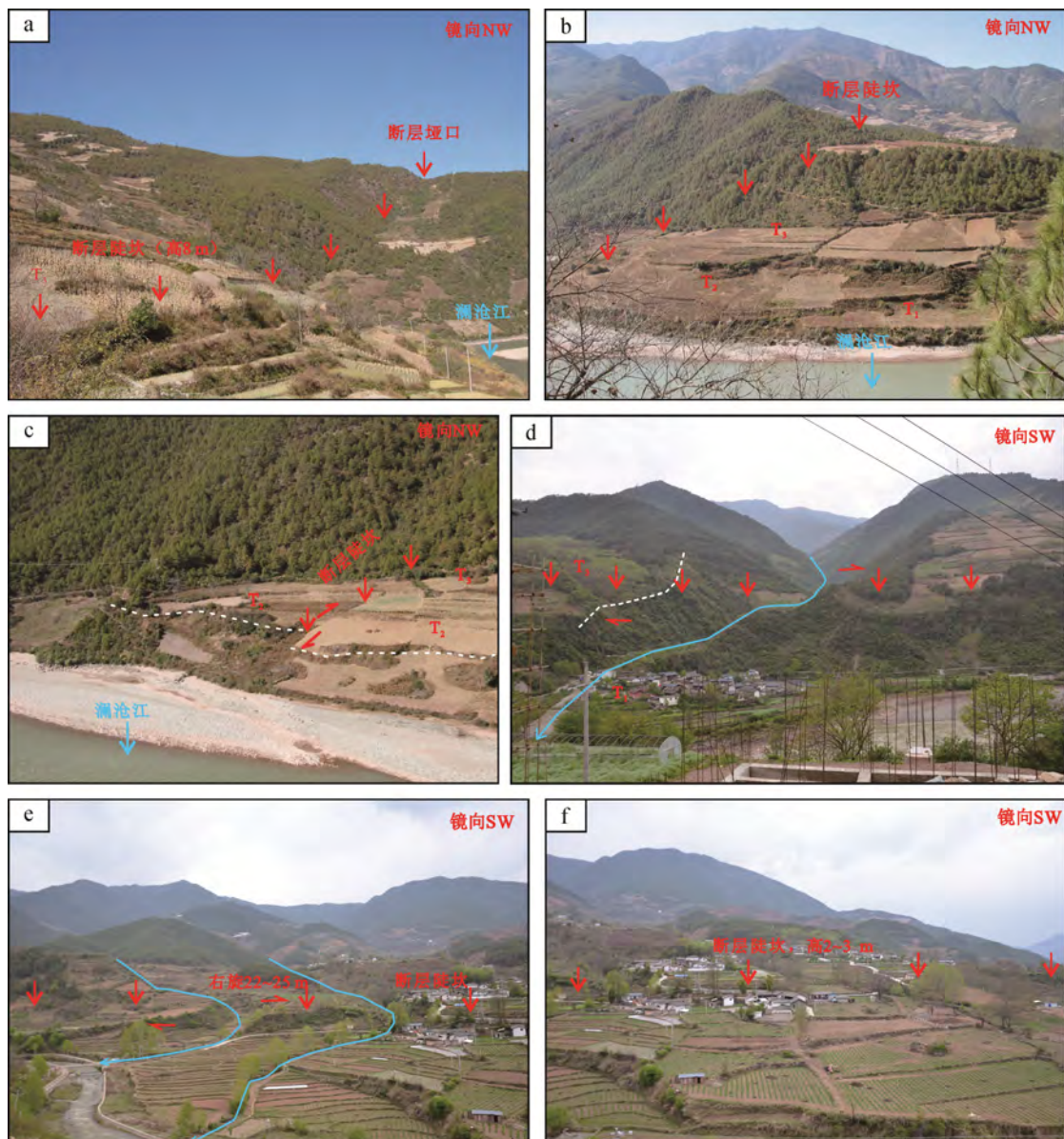


图 8 獐子口河流阶地剖面图

Fig. 8 Profile of Zhangzikou river terrace



a—白济汛断层陡坎和垭口照片; b—澜沧江阶地断层陡坎照片; c—澜沧江 T_2 阶地扭曲照片; d, e, f—扎你洛河流扭曲照片。

a—picture of Baijixun fault scarp and pass; b—picture of Lancang River terrace fault scarp; c—picture of Lancang River secondary terrace distortion; d, e, f—picture of Zhaniluo River flow distortion.

图9 白济汛和扎你洛地貌

Fig. 9 Baijixun and Zhaniluo landforms

断层陡坎(图 9d~f)。其在永春河 T_3 阶地右旋位错了 22~25 m, 根据该冲沟取得的年代测试样品 (DQ-7) ^{14}C 经美国 BETA 实验室年代测试, 其年龄为 $(21\,340 \pm 90)$ a.B.P., 因此可求得右旋水平滑动速率为 $1.0 \sim 1.2$ mm/a。

腊普湾—大拉日段永春河 T_3 阶地上, 发育高 8~10 m 的断层陡坎(图 10a), 长 3 km。沿河谷切面追踪, 在陡坎发育地带可见河流相和洪积相互层地层被断错(图 10b, c)。该剖面河流相地层处于下盘, 而洪积物为上盘, 上盘夹有灰色河流相团块, 应该是地震断错时下盘物质揉杂形成, 很容易可以知道上盘物质较新, 断层表现为正断。从而也可以判断该阶地上形成的陡坎为断层陡坎, 根据通甸等地 T_3

阶地年龄, 其形成时代为 22 760~23 100 a(计凤桔等, 2000), 可以看出其断层陡坎同样对晚更新世形成的地貌有明显的控制作用, 估算晚更新世以来垂直运动速率为 $0.3 \sim 0.4$ mm/a。

对断裂北段区域地貌年代测试采集和文献收集资料(表 1)可以看出该地区的河流阶地 T_2 和 T_3 阶地均形成于晚更新世, 这两个阶地均发现断裂活动的证据, 说明了断裂北段在晚更新世有明显的活动, 上述的地貌特征可以看出, 维西—乔后断裂北段与中段运动具有相似性, 表现为强烈的右旋走滑运动, 根据位错距离及年代测试, 其水平滑动速率为 $1.0 \sim 1.4$ mm/a, 垂直滑动速率为 $0.3 \sim 0.4$ mm/a。

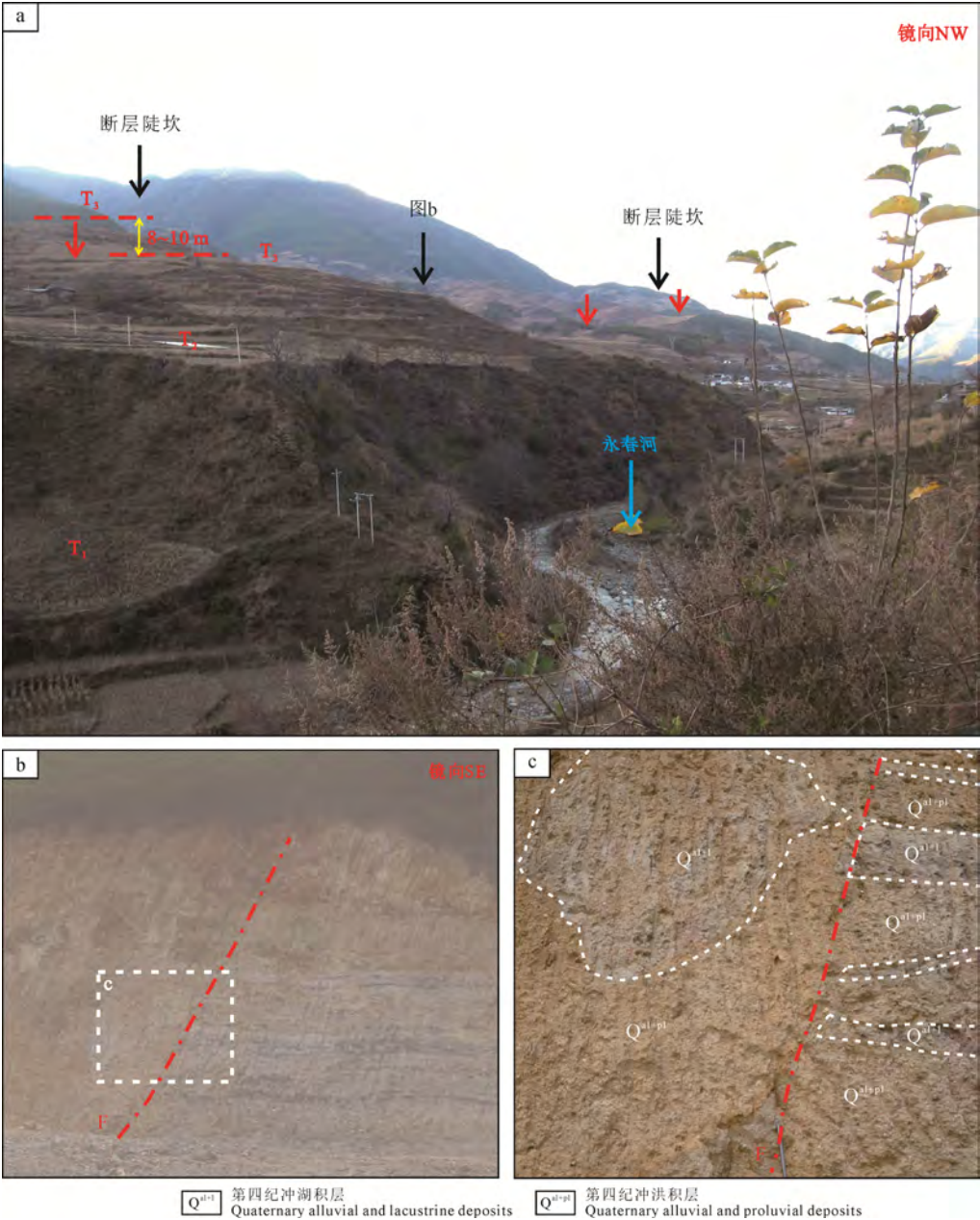


图 10 腊普湾—大拉日段 T₃ 阶地断层陡坎
Fig. 10 Fault scarp of third terrace in Lapuwan–Dalari

表 1 维西—乔后断裂北段地质样品年龄一览表
Tabel 1 Summary of geological sample ages in the northern section of the Weixi–Qiaohou Fault

序号	实验室编号	野外编号	采样地点	样品物质	经纬坐标	海拔 高度/m	拔河 高度/m	地貌 部位	测年方法	样品年龄 /ka	数据 来源
1	Beta-345316	DQ-3	白济汛	砾砂	99.074 2°N; 27.384 2°E	1 705.8	43.3	T ₂ 阶地	光释光(OSL)	30.5±0.6	采集
2	Beta-345318	DQ-5	白济汛	粉砂	99.092 3°N; 27.376 3°E	1 700.9	37.8	T ₂ 阶地	炭样测试 (¹⁴ C)	22.98±0.1	采集
3	13-54	OSL-3	维西县城	砾砂	99.272 9°N; 27.190 5°E	2 232.7	73.4	T ₃ 阶地	光释光(OSL)	87.9±3.5	采集
4	Beta-349562	KTC-4	维西县城北	冰碛物	99.272 9°N; 27.190 5°E	2 158.5	43.6	冲沟	炭样测试 (¹⁴ C)	18.43±0.46	采集
5	Beta-349568	KTC-10	兰永村	黏土	99.295 0°N; 27.1574 5°E	2 255.8	55.1	T ₂ 阶地	炭样测试 (¹⁴ C)	18.43±0.46	采集
6			维西县城南	泥炭				冲沟	炭样测试 (¹⁴ C)	33.00±0.91	李鼎荣等, 1987
7	Beta-355225	WQ-14C-5	河东村	砾砂	99.355 9°N; 27.065 6°E	2 579.3	48.6	T ₂ 阶地	炭样测试 (¹⁴ C)	32.51±0.21	采集
8	Beta-355226	WQ-14C-7	扎你洛村	粉砂	99.232 3°N; 27.234 1°E			T ₂ 阶地	炭样测试 (¹⁴ C)	21.34±0.09	采集

4 结论与讨论

(1)维西—乔后断裂北段主要由两支近平行断裂组成,断裂断错了澜沧江 T_2 阶地河流堆积层,在永春河 T_3 阶地及高级阶地第四系中也同样发现断裂对阶地堆积物的断错证据,断裂在晚第四纪有明显的活动地质、地貌证据。

(2)维西—乔后断裂北段的运动性质右旋走滑运动明显,其水平滑动速率为 $1.0\sim 1.2\text{ mm/a}$,垂直滑动速率为 $0.3\sim 0.4\text{ mm/a}$,断裂以水平运动为主。

(3)维西—乔后断裂北段,在运动性质上与中段的运动性质具有相似性,均表现为右旋走滑兼具拉张性质。其之所以主要表现为右旋走滑运动性质,分析认为与块体运动方式和 NNW 向现代区域构造场作用密切相关。随着青藏高原的持续隆升,高原东南缘的印支、滇西诸块体均向 SE 逃逸,受此影响,断裂运动性质无论是逆冲抑或是正断性质普遍转变为以水平走滑为主,最为典型的是块体西边界的红河断裂和金沙江断裂。作为二者之间的维西—乔后断裂,在 NNW 向构造应力场的作用下,自上新世以来同样地由原来的逆冲性质转变为右旋走滑运动。

(4)维西—乔后断裂各段运动特性又有明显的差异性,中段表现为较为强烈全新世活动,南段以正断作用为主,北段表现为右旋走滑兼正断性质,北段与中段运动性质一致但活动强度相对较弱。分析认为可能与川滇块体运动强度的不均匀性有关也可能与断裂的几何结构有关,如断裂北段由数条断裂组成,结构复杂,近平行展布的多条断裂分解、消散了整条断裂的活动强度。小江断裂带南段,有着类似的几何结构和活动特征。至于断裂南段的正断性质,常祖峰等认为可能与 5 Ma 来点苍山—哀牢山的快速隆起有关。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. U202211), and Yunnan Earthquake Agency (No. 2022ZLZX01).

参考文献:

- 陈文寄,李齐,汪一鹏,1996. 哀牢山-红河左旋走滑剪切带中新世抬升的时间序列[J]. 地质评论,42(5): 385-390.
- 常祖峰,张艳凤,李鉴林,等,2014. 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,37(1): 46-52.
- 常祖峰,常昊,臧阳,等,2016a. 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,22(3): 517-530.
- 常祖峰,常昊,李鉴林,等,2016b. 维西—乔后断裂南段正断层活动特征[J]. 地震研究,39(4): 579-586, 717.
- 常祖峰,常昊,李鉴林,等,2021. 维西—乔后断裂全新世活动与古地震[J]. 地震地质,43(4): 881-898.

- 常祖峰,李鉴林,常昊,等,2022. 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),58(5): 875-887.
- 常昊,常祖峰,刘昌伟,2021. 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—绒雪段为例[J]. 地震地质,43(6): 1435-1458.
- 邓超东,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),32(12): 1020-1030.
- 魏顺民,计凤桔,向宏发,等,2001. 红河活动断裂带[M]. 北京:海洋出版社: 68-71.
- 计凤桔,郑荣章,李建平,等,2000. 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,22(3): 265-276.
- 李鼎荣,黄兴根,王安德,等,1987. 滇西北第四系的划分[J]. 地质评论,33(2): 105-114, 203.
- 唐荣昌,韩渭宾,1993. 四川活动断裂与地震[M]. 北京:地震出版社.
- 马宗晋,张家声,王一鹏,1998. 青藏高原三维变形运动学的时段划分和新构造分区[J]. 地质学报,72(3): 211-227.
- 乔学军,王琪,杜瑞林,2004. 川滇地区活动地块现今地壳形变特征[J]. 地球物理学报,47(5): 806-812.
- 任俊杰,张世民,侯治华,等,2007. 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,29(4): 756-764.
- 王阎昭,王恩宁,沈正康,等,2008. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J]. 中国科学:地球科学,38(5): 582-597.
- 王绍晋,张建国,余庆坤,等,2010. 红河断裂带的震源机制与现代构造应力场[J]. 地震地质,33(2): 200-207.
- 汪一鹏,沈军,王琪,等,2003. 川滇块体的侧向挤出问题[J]. 地质前缘,10(S1): 188-192.
- 王光明,吴中海,彭关灵,等,2021. 2021年5月21日漾濞 Ms6.4 地震的发震断层及其破裂特征:地震序列的重定位分析结果[J]. 地质力学学报,27(4): 662-678.
- 向宏发,韩竹军,魏顺民,等,2004. 红河断裂带大型右旋走滑运动与伴生构造地貌变形[J]. 地震地质,26(4): 597-610.
- 向宏发,魏顺民,张晚霞,等,2007. 红河断裂带南段中新世以来大型右旋位错量的定量研究[J]. 地震地质,29(1): 34-50.
- 许志琴,侯立玮,王宗秀,等,1992. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京:地质出版社.
- 张建国,黄甫岗,谢英情,2009. 越南红河断裂活动性研究[J]. 地震地质,31(3): 389-400.

References:

- CHANG Hao, CHANG Zufeng, LIU Changwei, 2022. 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, 43(6): 1435-1458(in Chinese with English abstract).
- CHANG Zufeng, CHANG Hao, LI Jianlin, et al., 2016b. The characteristic of active normal faulting of the southern segment of Weixi-Qiaohou Fault[J]. Journal of Seismological Research, 39(4): 579-586, 717(in Chinese with English abstract).
- CHANG Zufeng, CHANG Hao, LI Jianlin, et al., 2021. Holocene activity and paleoearthquakes of the WeiXi-Qiaohou Fault[J]. Seismology and Geology, 43(4): 881-898(in Chinese with English abstract).
- CHANG Zufeng, CHANG Hao, ZANG Yang, et al., 2016a. Recent active features of Weixi-Qiaohou Fault and its relationship with the Honghe Fault[J]. Journal of Geomechanics, 22(3):

- 517-530(in Chinese with English abstract).
- CHANG Zufeng, LI Jianlin, CHANG Hao, et al., 2022. Late-Quaternary activity of Tongdian-Madeng Basin segment of Weixi-Qiaohou Fault[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 58(5): 875-887(in Chinese with English abstract).
- CHANG Zufeng, ZANG Yang, CHANG Hao, 2018. New discovery of Holocene activity along the Weixi-Qiaohou Fault in southeastern margin of the Tibetan Plateau and its neotectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 2464-2465.
- CHANG Zufeng, ZHANG Yanfeng, LI Jianlin, et al., 2014. The geological and geomorphic characteristic of Late Quaternary activity of the Deqin-Zhongdian-Daju Fault[J]. *Journal of Seismological Research*, 37(1): 46-52(in Chinese with English abstract).
- CHEN Wenji, LI Qi, WANG Yipeng, 1996. Miocene diachronic uplift along the Ailao Mountains-Red River left-lateral strike-slip shear zone[J]. *Geological Review*, 42(5): 385-390(in Chinese with English abstract).
- DENG Qidong, ZHANG Peizhen, RAN Yongkang, et al., 2002. Basic features of active tectonics in China[J]. *Science in China (Series D)*, 32(12): 1020-1030(in Chinese).
- GUO Shunmin, JI Fengju, XIANG Hongfa, et al., 2001. The Honghe Active Fault Zone[M]. Beijing: China Ocean Press: 68-71(in Chinese).
- JI Fengju, ZHENG Rongzhang, LI Jianping, et al., 2000. Chronological research of geomorphic surface of lower terraces along several major rivers in the east and west of Yunnan Province[J]. *Seismology and Geology*, 22(3): 265-276(in Chinese with English abstract).
- LELOUP P H, KIENAST J R, 1993. High-temperature metamorphism in a major strike-slip shear zone: the Ailao Shan—Red River, People's Republic of China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 118(1-4): 213-234.
- LELOUP P H, LACASSIN R, TAPPONNIER P, et al., 1995. The Ailao Shan—Red River shear zone(Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 251: 3-84.
- LI Dingrong, HUANG Xinggen, WANG Ande, et al., 1987. Stratigraphic division of the Quaternary in northwestern Yunnan[J]. *Geological Review*, 33(2): 105-144, 203(in Chinese with English abstract).
- MA Zongjin, ZHANG Jiasheng, WANG Yipeng, 1998. The 3-d deformational movement episodes and Neotectonic domains in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 72(3): 211-227(in Chinese with English abstract).
- QIAO Xuejun, WANG Qi, DU Ruilin, 2004. Characteristics of current crustal deformation of active blocks in the Sichuan-Yunnan Region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(5): 806-812(in Chinese with English abstract).
- REN Junjie, ZHANG Shimin, HOU Zhihua, et al., 2007. Study of Late Quaternary slip rate in the mid-segment of the Tongdian-Weishan Fault[J]. *Seismology and Geology*, 29(4): 756-764(in Chinese with English abstract).
- SCHOENBOHM L M, BURCHFIEL B C, CHEN Liangzhong, et al., 2006. Miocene to present activity along the Red River fault, China, in the context of continental extrusion, upper-crustal rotation and lower-crustal flow[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 118(5-6): 672-688.
- SOCQUET A, PUBELLIER M, 2005. Cenozoic deformation in western Yunnan(China-Myanmar border)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(4): 495-515.
- TANG Rongchang, HAN Weibin, 1993. Active faults and earthquakes in Sichuan[M]. Beijing: Seismological Publishing House(in Chinese).
- TAPPONNIER P, LACASSIN R, LELOUP P H, et al., 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. *Nature*, 343: 431-437.
- TAPPONNIER P, PELTZER G, ARMIJO R, 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. *Geological Society London Special Publication*, 19(1): 113-157.
- TAPPONNIER P, XU Zhiqin, ROGER F, et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- WANG Eechie, BURCHFIEL B C, ROYDEN L H, et al., 1998. Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang, Red River, and Dali fault systems of southwestern Sichuan and Central Yunnan, China[M]. *Geological Society of America Special Papers*, 327: 1-108.
- WANG Guangming, WU Zhonghai, PENG Guanling, et al., 2021. Seismogenic fault and its rupture characteristics of the 21 May, 2021 Yangbi Ms 6.4 earthquake: Analysis results from relocation of the earthquake sequence[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(4): 662-678(in Chinese with English abstract).
- WANG Shaojin, ZHANG Jianguo, YU Qingkun, et al., 2010. Focal mechanism of strong and medium-small earthquakes and modern tectonic stress-field of the Red-River fault zone[J]. *Journal of Seismological Research*, 33(2): 200-207(in Chinese with English abstract).
- WANG Yanzhao, WANG Enning, SHEN Zhengkang, et al., 2008. Retrieving current activity rate of main faults in Sichuan Yunnan area based on GPS data constraints[J]. *Science in China*, 38(5): 582-597(in Chinese).
- WANG Yipeng, SHEN Jun, WANG Qi, et al., 2003. On the lateral extrusion of SiChuan-YunNan Block(ChuanDian Block)[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(S1): 188-192(in Chinese with English abstract).
- XIANG Hongfa, GUO Shunmin, ZHANG Wanxia, et al., 2007. Quantitative study on the large scale dextral strike-slip offset in the southern segment of the Red River Fault since Miocene[J]. *Seismology and Geology*, 29(1): 34-50(in Chinese with English abstract).
- XIANG Hongfa, HAN Zhujun, GUO Shunmin, et al., 2004. Large-scale dextral strike-slip movement and associated tectonic deformation along the Red River Fault Zone[J]. *Seismology and Geology*, 26(4): 597-610(in Chinese with English abstract).
- XU Zhiqin, HOU Liwei, WANG Zongxiu, et al., 1992. The Songpan-Ganzi orogeny process in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHANG Jianguo, HUANGFU Gang, XIE Yingqing, 2009. Study on the activity of Red River Fault in Vietnam[J]. *Seismology and Geology*, 31(3): 389-400(in Chinese with English abstract).