

王艺晨,郝明,余中元,等. 2025. GNSS 约束下的甘孜—玉树—鲜水河断裂带滑动速率研究[J]. 地震研究, 48(3): 382–390, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0040.

Wang Y C, Hao M, Yu Z Y, et al. 2025. A review on slip rate of the Ganzi – Yushu – Xianshuihe Fault Zone by GNSS constraints[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(3): 382–390, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0040.

GNSS 约束下的甘孜—玉树—鲜水河断裂带 滑动速率研究*

王艺晨¹, 郝明², 余中元¹, 陈柏旭¹

(1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 2. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 甘孜—玉树—鲜水河断裂带是青藏高原重要的大型边界走滑断裂, 基于 GNSS 数据约束该断裂带的现今滑动速率有助于认识其活动习性, 便于探讨其现今变形特征与模式。利用 GNSS 速度场横跨甘孜—玉树—鲜水河断裂带构建了 7 个速率剖面, 获取该断裂带滑动速率变化。结果表明: 该断裂带现今左旋滑动速率由 NW 向 SE 逐渐增大, 其中, 甘孜—玉树断裂走滑速率为 4.9 mm/a, 鲜水河断裂北西段走滑速率为 9.5 mm/a, 其东段的康定—石棉段滑动速率增加至 10 mm/a, 再向南至安宁河—则木河和大凉山断裂, 剪切速率基本保持在 10 mm/a 左右。甘孜—玉树断裂水平缩短速率为 2~4 mm/a, 向东至鲜水河断裂和安宁河断裂水平缩短较弱, 而大凉山断裂具有约为 2 mm/a 的地壳缩短变形, 则木河断裂有约为 1 mm/a 的拉张速率。这一结果表明: 甘孜—玉树—鲜水河断裂带的现今滑动速率远低于此前的认识, “连续变形”理论模型可能更适用于大陆内部的构造变形。

关键词: 甘孜—玉树—鲜水河断裂带; GNSS 数据; 滑动速率; 青藏高原

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2025)03-0382-09

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0040

0 引言

青藏高原是在印度板块和欧亚板块的碰撞以及持续的向北推挤作用下形成的, 其东缘及邻区是调节高原内部物质向东挤出的构造转换带, 发育了非常复杂的活动断裂体系, 是我国陆内强震活动最为频繁且遭受地震灾害影响最严重的区域之一。因此, 深入研究青藏高原东缘及邻区的最新地壳变形及其孕震特征, 既有助于认识该区的强震构造与机理, 也有助于在城镇规划和重大工程建设中科学防范或规避相关的强震灾害风险。

一直以来, 青藏高原的构造变形模式及动力

学机制都是地学界争论的焦点之一, 其中“非连续变形”和“连续变形”两大端元模型, 反映了对大陆内部构造变形及其动力学认识的根本差异。“非连续变形”从理论上可归结为大陆逃逸理论, 认为绝大部分变形局限在边界断裂带上, 这些断裂应该具有很大的滑动速率 (Tapponnier *et al*, 2001; Replumaz, Tapponnier, 2003), 变形以沿巨大断裂的走滑运动和块体的横向滑移为主, 青藏高原东部和华南地块相对于稳定西伯利亚向东的挤出运动应占印度和欧亚板块汇聚速率的 50% 以上 (张培震等, 2003a)。有学者基于地质学方法得出青藏高原向东挤出或逃逸的南边界喀喇昆仑—嘉黎断裂右旋走滑速率约为 30 mm/a, 北边界阿尔金断裂左旋走滑速率为 20~30 mm/a, 还导致其

* 收稿日期: 2024-10-31.

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究子专题 (2019QZKK0901); 中国地震局地质研究所国家野外科学观测研究站 (NORSLS23-05).

第一作者简介: 王艺晨 (1999-), 硕士研究生在读, 主要从事区域 GNSS 变形与断裂活动特征研究.

E-mail: 1170605298@qq.com.

东边界的龙门山断裂的缩短速率大于 20 mm/a (Tapponnier *et al*, 2001; Replumaz, Tapponnier, 2003)。“连续变形”理论认为大陆岩石圈不是刚性的,连续变形发生在整个岩石圈或至少是中下地壳的尺度上,大陆变形以大范围的分布式变形为特征,变形的的方式多种多样,不存在“大陆逃逸”理论所预测的大幅度、局部化的变形 (England, Molnar, 1997; Flesch *et al*, 2001)。这 2 种理论一直存在争议,其本质是对大陆内部构造变形及其动力学机制认识的根本差异。

构造运动速度场是认识青藏高原现今变形特征及其动力学驱动机制的重要依据。基于活断层的形貌勘察、测年和区域强震震源机制解获取的断裂滑动速率反映了构造变形的长期和平均活动水平 (Song *et al*, 2022),但其存在结果准确度不足且时空界限模糊 (王敏, 沈正康, 2020) 的缺点,而现代空间大地测量 GNSS (全球导航卫星系统) 观测技术则能捕捉到构造变形的现今和暂态活动水平。基于此,本文利用 GNSS 速度场成果,针对青藏高原东南缘甘孜—玉树—鲜水河断裂带构建了 7 个跨断裂速率剖面,获得了该断裂带的滑动速率变化,从而有助于对有关大陆动力学理论进行更深层次的理解。

1 区域地质概况

1.1 地震地质背景

印度板块和欧亚板块的相互作用,以及欧亚板块内部深部动力的联合作用,造就了中国大陆内部活动构造和现代构造的复杂性及地震活动的弥散性 (邓起东等, 2003)。位于青藏高原的甘孜—玉树—鲜水河断裂带是一条斜列状排列的 NW—NWW 走向的大型走滑断裂,构成了川滇地块的北边界 (张培震等, 2003b)。

甘孜—玉树断裂北西方向起自青海治多以西多彩地附近,南东方向经过玉树结隆盆地后伸延至甘孜县城南附近,整体断裂全长约 500 km。前人根据甘孜—玉树断裂的破裂分段活动特征与历史地震事件将其自西向东依次划分为当江段、玉树段、邓柯段、马尼干戈段以及甘孜段 5 个段落 (周荣军等, 1996)。鲜水河断裂西起四川甘孜,经炉霍、道孚、康定至石棉,然后在此处分叉为

两段,其中一支朝南北向与安宁河断裂带相连,另一支沿走向继续向 SEE 延伸与大凉山断裂带交会,断裂全长约 400 km。

甘孜—玉树—鲜水河断裂带晚第四纪以来以强烈的左旋走滑运动为主,并且这种差异运动直接控制了断裂带上强震的孕育与发生,沿线分布着一系列全新世的强震活动 (徐锡伟等, 2003)。自 1700 年有地震记载以来,甘孜—玉树—鲜水河断裂带共发生 7 级以上地震 8 次,6.5 级以上地震 15 次,约占整个川西地区中强地震总数的一半,地震地表破裂带几乎覆盖了整条断裂的各个段落 (闻学泽等, 1989)。近十多年来,该断裂带发生了 2010 年青海玉树 7.1 级地震和 2022 年四川泸定 6.8 级地震,进一步说明该断裂带现今仍处于构造活动强烈的阶段。甘孜—玉树—鲜水河断裂带被认为是地震预测和地震灾害研究的最理想的对象之一,也是目前中国地震科学实验场建设项目重要的研究对象之一 (图 1)。

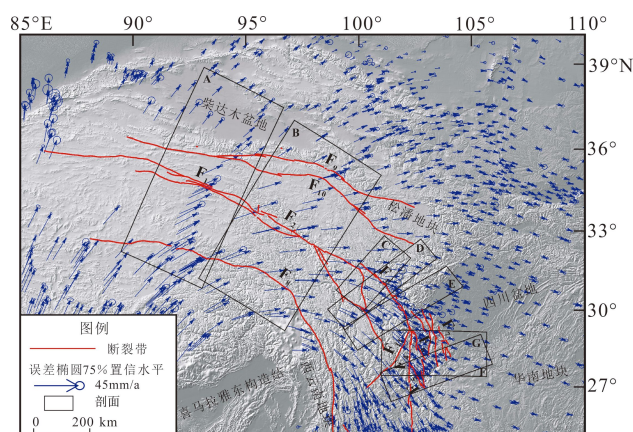


图 1 甘孜—玉树—鲜水河断裂带地区主要活动断裂分布以及 GNSS 速率剖面位置

Fig. 1 Major active faults in the Ganzi-Yushu-Xianshuihe fault zone area and the location of the GNSS velocity profiles

1.2 已有滑动速率结果

周荣军等 (1996) 研究获得的甘孜—玉树断裂滑动速率为 3 ~ 14 mm/a, 晚第四纪平均滑动速率为 7 mm/a, 50 ka 以来平均滑动速率为 12 mm/a

(闻学泽等, 2003)。王阎昭等 (2008) 建立连接断层元模型, 使用最小二乘法反演得到该断裂现今错动速率为 $0.3 \sim 14.7 \text{ mm/a}$ 。甘孜—玉树断裂当江段晚更新世晚期以来的左旋滑动速率约为 $(6.7 \pm 0.7) \text{ mm/a}$, 全新世以来的左旋滑动速率约为 $(7.7 \pm 1.1) \text{ mm/a}$ (肖鹏, 2022)。

有学者使用地质学方法得出鲜水河断裂具有较高的左旋走滑速率, 如 Allen 等 (1991) 研究估计鲜水河断裂的全新世滑动速率约为 15 mm/a , 但由于其年龄样品的不足而具有较大的不确定性。在鲜水河断裂西段, 徐锡伟等 (2003, 2005) 和陈桂华等 (2008) 发现一系列河流阶地被断裂错断, 获得的滑动速率为 $14 \sim 17 \text{ mm/a}$ 。Zhang 等 (2007) 通过对河流阶地演化与断层位错关系进行分析, 得到鲜水河断裂西段的全新世滑动速率为 $8.4 \sim 10.5 \text{ mm/a}$ 。在鲜水河断裂东段的磨西一带, 闻学泽等 (2003) 发现在冲洪积台地面上有一条已废弃的冲沟被左旋错断 (28 ± 5) m, 台地的废弃年龄为 $(2\ 965 \pm 100) \text{ a}$, 相应的走滑速率为 $(9.4 \pm 1.7) \text{ mm/a}$; 王敏等 (2008) 将 2 条基线水平矢量的平均年变化率分别投影到平行和垂直于鲜水河断裂的方向上, 从而得到鲜水河断裂在道孚处平均左旋走滑速率为 $(6.3 \pm 0.3) \text{ mm/a}$, 垂向拉张速率为 $(1.0 \pm 0.3) \text{ mm/a}$; 王阎昭等 (2008) 使用最小二乘法反演得到鲜水河断裂的左旋走滑速率为 $8.9 \sim 17.1 \text{ mm/a}$; Gan 等 (2007) 与 Jiang 等 (2015) 通过 GPS 解算得到的鲜水河断裂的走滑速率为 $10 \sim 15 \text{ mm/a}$; Xu 和 Stamps (2016) 利用 GNSS 观测估算出鲜水河断裂的左旋走滑速率为 $(11 \pm 1) \text{ mm/a}$, 安宁河—则木河断裂走滑速率为 $(10.5 \pm 0.5) \text{ mm/a}$ 。这些结果表明对于鲜水河断裂的滑动速率研究, 不同研究者使用不同时间尺度、不同研究方法得到的结果有很大差异。

2 数据与方法

地震地质学研究能够得到断裂的长期滑动速率, 横跨断裂的 GNSS 观测能够提供断裂的现今滑动速率。GNSS 观测结果能够提供高精度、大范围 and 准实时的地壳运动定量数据, 可反映现今构造水平。中国大陆地壳运动与变形监测经历了监测区域由小到大、站点由稀疏到相对密集的一个发

展过程, 与之相对应的是地壳运动速度场的不断完善和精细化 (王敏, 沈正康, 2020)。本文利用 Wang 和 Shen (2020) 提供的迄今为止最密集的中国大陆及周边地区地壳运动速度场结果, 结合甘孜—玉树—鲜水河断裂带展布, 估算该断裂带现今构造变形速率, 为断裂活动强度和地震平均复发间隔估算提供重要依据。

青藏高原东南缘 GNSS 速度场资料表明 (图 1), 青藏高原物质在向东挤出的过程中被稳定且刚性的华南块体拦截和阻挡后, 向南转向运动, 这种推动力同时带动川滇块体围绕喜马拉雅东部做顺时针转动以及巴颜喀拉块体部分边界带转向运动, 导致川滇块体的北边界和东部断裂, 以及巴颜喀拉块体的东南边界带断裂性质以左旋走滑为主, 而其西侧断裂以右旋走滑为主。

单条断层的形变分析方法主要是 GPS 站点速度或位移的剖面分析方法, 剖面分析是利用 GPS 速度场研究断裂带形变简捷、直观的手段之一 (邹镇宇等, 2018)。Savage 和 Burford (1973) 利用位错理论得到的走滑断层震间形变曲线符合反正切函数的特性, 所以在剖面分析中针对断层走滑分量使用反正切函数拟合, 可以得到块体的相对运动速率拟合值以及断层的闭锁深度。

本文基于青藏高原最密集的 GNSS 数据, 横跨甘孜—玉树—鲜水河断裂带构建了 7 个 GNSS 速率剖面 (图 1), 由于靠近断层会存在闭锁运动以及非线性变形, 所以选取断层两侧远场的速率分量。利用螺旋位错模型 (Savage, Burford, 1973) 估算断层滑动速率。

3 结果分析

本文所选剖面是在参考前人研究的基础上根据断裂的活动构造以及站点分布最密集的区域划分的。根据跨断层垂直和平行的运动分量来确定断层两侧块体的差异性运动, 平行于断层走向的速率分量代表走滑速率, 垂直于断层走向的速率分量代表水平缩短或拉张速率, 用蓝色阴影框代表平均速率的上下限 (图 2~4)。首先构建 3 条横跨风火山断裂和甘孜—玉树—鲜水河断裂带的 GNSS 速率剖面 (剖面位置如图 1 中 A、B、C 所示), 从西向东分别对应风火山断裂、甘孜—玉树断裂和鲜水河断裂的 NW 段。由图 2 可见, 风火山

断裂块体差异运动速率为 (1.9 ± 0.8) mm/a, 水平缩短速率为 (3.7 ± 0.7) mm/a; 甘孜—玉树断裂块体差异运动速率为 (5.3 ± 0.5) mm/a, 水平

缩短速率为 (2.2 ± 0.4) mm/a; 鲜水河断裂 NW 段块体差异运动速率为 (7.5 ± 0.7) mm/a, 垂直滑动速率为 (2.2 ± 0.6) mm/a。

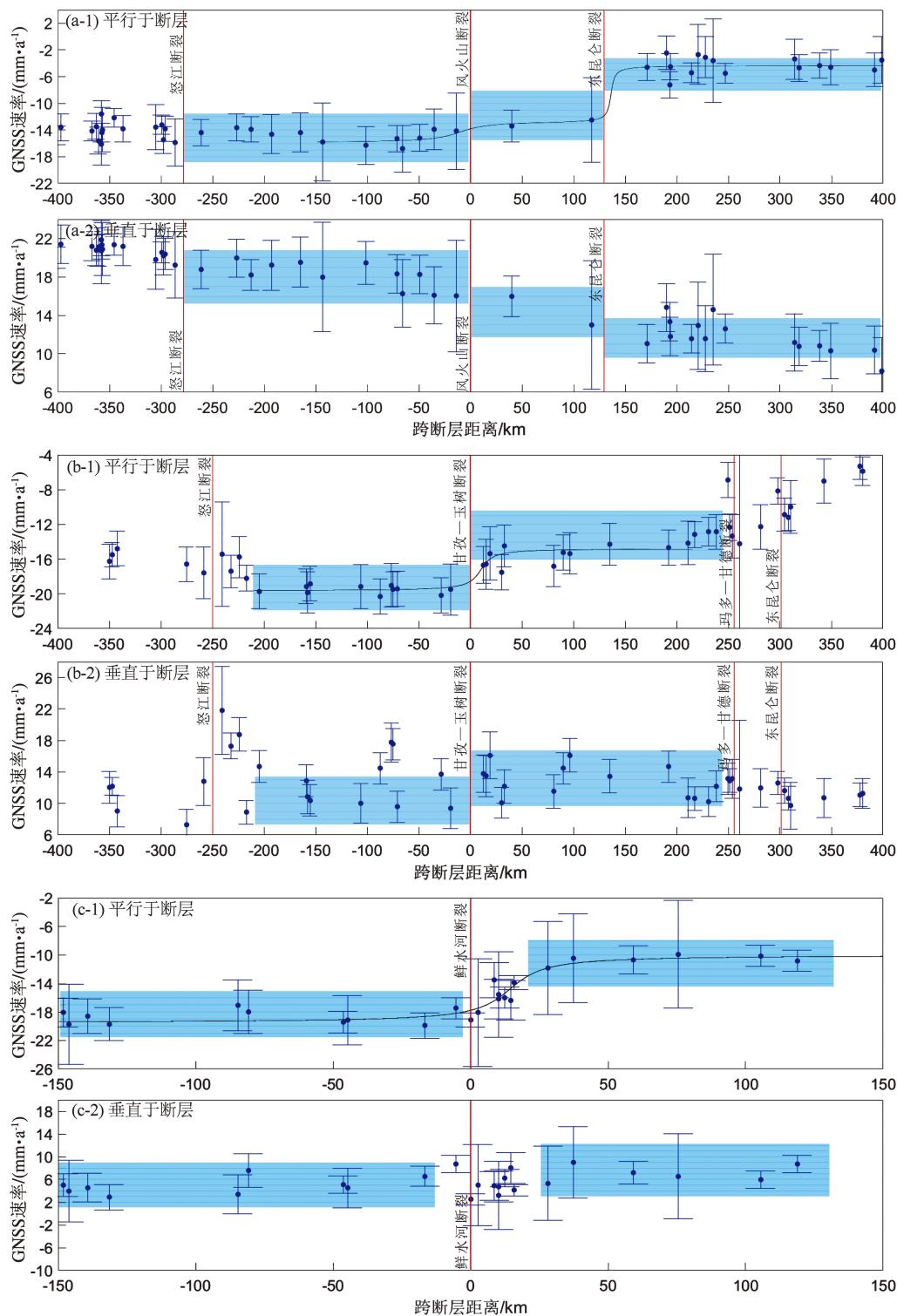


图2 横跨风火山断裂 (a)、甘孜—玉树断裂 (b) 及鲜水河断裂 (c) 的速率剖面以及平行于和垂直于断层的 GNSS 速率分量

Fig. 2 The profiles across the Fenghuoshan Fault (a), the Ganzi-Yushu Fault (b) and the Xianshuihe Fault (c), and the GNSS velocity components parallel and perpendicular to the faults

利用 Savage 和 Burford (1973) 给出的反正切函数公式分析各断裂的走滑速率和闭锁深度。由图 2 中的拟合曲线可得风火山断裂走滑速率为 (3.2 ± 1.8) mm/a, 闭锁深度为 (20 ± 39.3) km; 甘孜—玉树断裂走滑速率为 (4.9 ± 0.5) mm/a, 闭锁深度为 (8.8 ± 8.4) km; 鲜水河断裂 NW 段走滑速率为 (9.5 ± 0.7) mm/a, 闭锁深度为 (9.5 ± 3.5) km。本文得到的风火山断裂的走滑速率远小于王阎昭等 (2011) 结果 (6.1 ± 1.9) mm/a, 甘孜—玉树断裂以及鲜水河断裂 NW 段的左旋走滑速率则与其得到的速率 (6.6 ± 1.5) mm/a 和 (10.2 ± 0.7) mm/a 相近。

沿北东方向且垂直于鲜水河断裂构建了 2 条 GNSS 速率剖面 (剖面位置如图 1 中 D、E 所示),

西部剖面穿过道孚—炉霍一带, 东部剖面跨过康定—石棉一带。跨道孚—炉霍段的 GNSS 速率剖面 (图 3a) 显示, 该断裂块体差异运动速率为 (8.7 ± 0.7) mm/a, 垂直滑动速率为 (0.8 ± 0.6) mm/a。跨康定—石棉段的 GNSS 速率剖面 (图 3b) 显示, 该断裂块体差异运动速率为 (9.4 ± 0.5) mm/a, 垂直滑动速率为 (0.5 ± 0.4) mm/a。

从图 3 中的拟合曲线可得鲜水河断裂道孚—炉霍段的走滑速率为 (10.3 ± 0.6) mm/a, 闭锁深度为 (8.7 ± 2.5) km; 鲜水河断裂康定—石棉段的走滑速率为 (10 ± 0.7) mm/a, 闭锁深度为 (4.5 ± 3.3) km。

Zhang (2013) 研究得到跨鲜水河断裂道孚—炉霍段和康定—石棉段的滑动速率分别为 $(9.0 \pm$

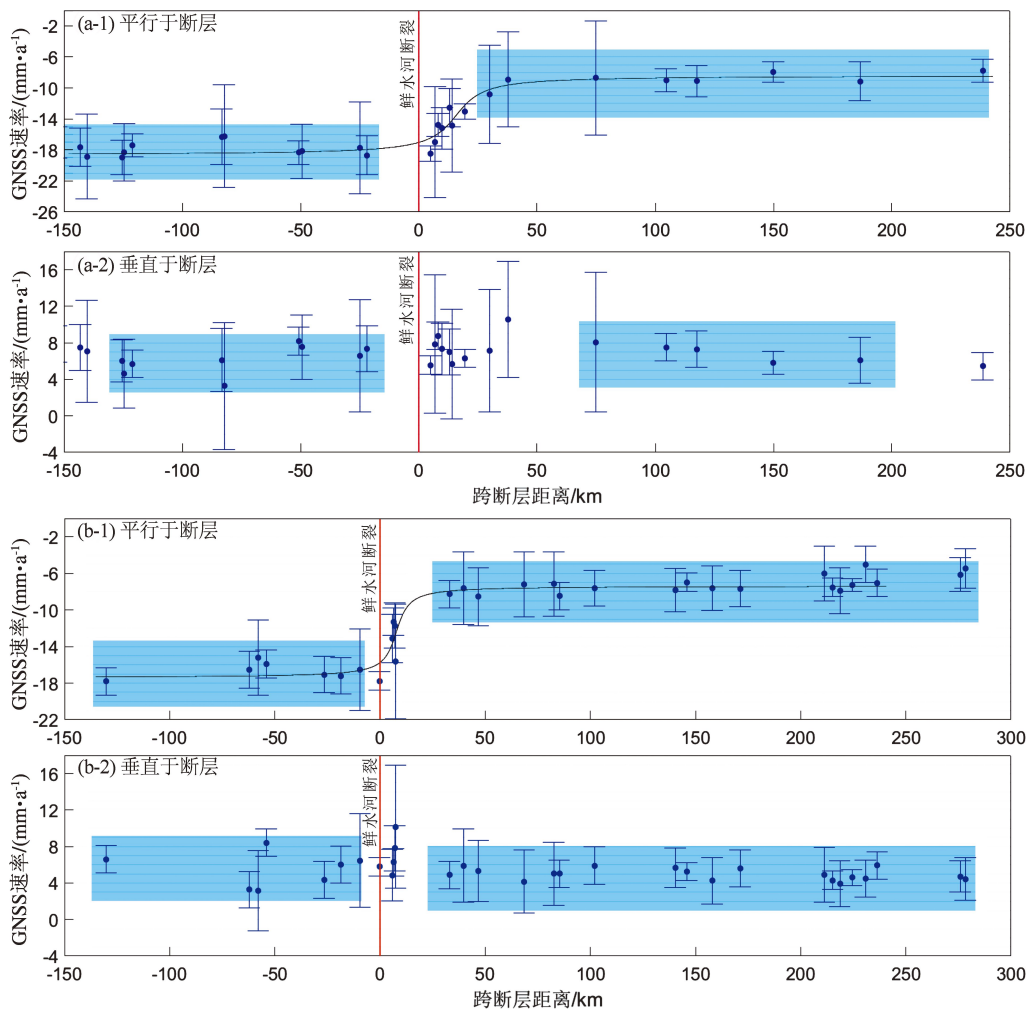


图 3 横跨鲜水河断裂道孚—炉霍段 (a)、康定—石棉段 (b) 的速率剖面以及平行于和垂直于断层的 GNSS 速率分量

Fig. 3 The profiles across the Daofu – Luhuo (a) and Kangding-Shimian (b) sections of the Xianshuihe Fault, and the GNSS velocity components parallel and perpendicular to the faults

1.5) mm/a、 (10 ± 1.5) mm/a; Wang 和 Shen (2020) 得到的鲜水河断裂 ES 段的左旋剪切速率约为 $9 \sim 10$ mm/a。可见本文得到的结果与 Zhang (2013) 以及 Wang 和 Shen (2020) 的结果相近。

本文构建一条横跨小金河、安宁河、大凉山和马边断裂的东西方向的 GNSS 速率剖面 (剖面位置如图 1 中 F 所示), 该剖面近东西走向, 垂直于主要断裂和构造。图 4a 中 GNSS 速率剖面显示上述几条断裂和整个大凉山地区以左旋走滑剪切为主, 小金河至大凉山断裂之间区域块体差异运动速率为 (9.8 ± 0.5) mm/a, 其中小金河断裂在这一方向上的左旋走滑分量不明显, 安宁河断裂、大凉山断裂及马边断裂块体差异运动速

率分别约为 5、3.5 和 1 mm/a, 安宁河断裂处于剪切变形的梯度带内。跨断裂的垂直速率剖面表明: 小金河至大凉山断裂之间的水平缩短速率为 (2.3 ± 0.5) mm/a, 小金河断裂和安宁河断裂之间水平缩短速率小于 1 mm/a, 大凉山断裂水平缩短速率约为 2 mm/a, 马边断裂水平缩短速率小于 1 mm/a, 逆冲倾滑主要被大凉山断裂所吸收。

由图 4a 中的拟合曲线可知, 安宁河断裂走滑速率为 (6.7 ± 0.9) mm/a, 闭锁深度为 (12.5 ± 3.8) km; 大凉山断裂走滑速率为 (4.1 ± 0.8) mm/a, 闭锁深度为 (11.6 ± 7.4) km。

Zhang (2013) 对横跨约 200 km 的大凉山地区作剖面, 得到该区域总左旋走滑速率为 $(10.0 \pm$

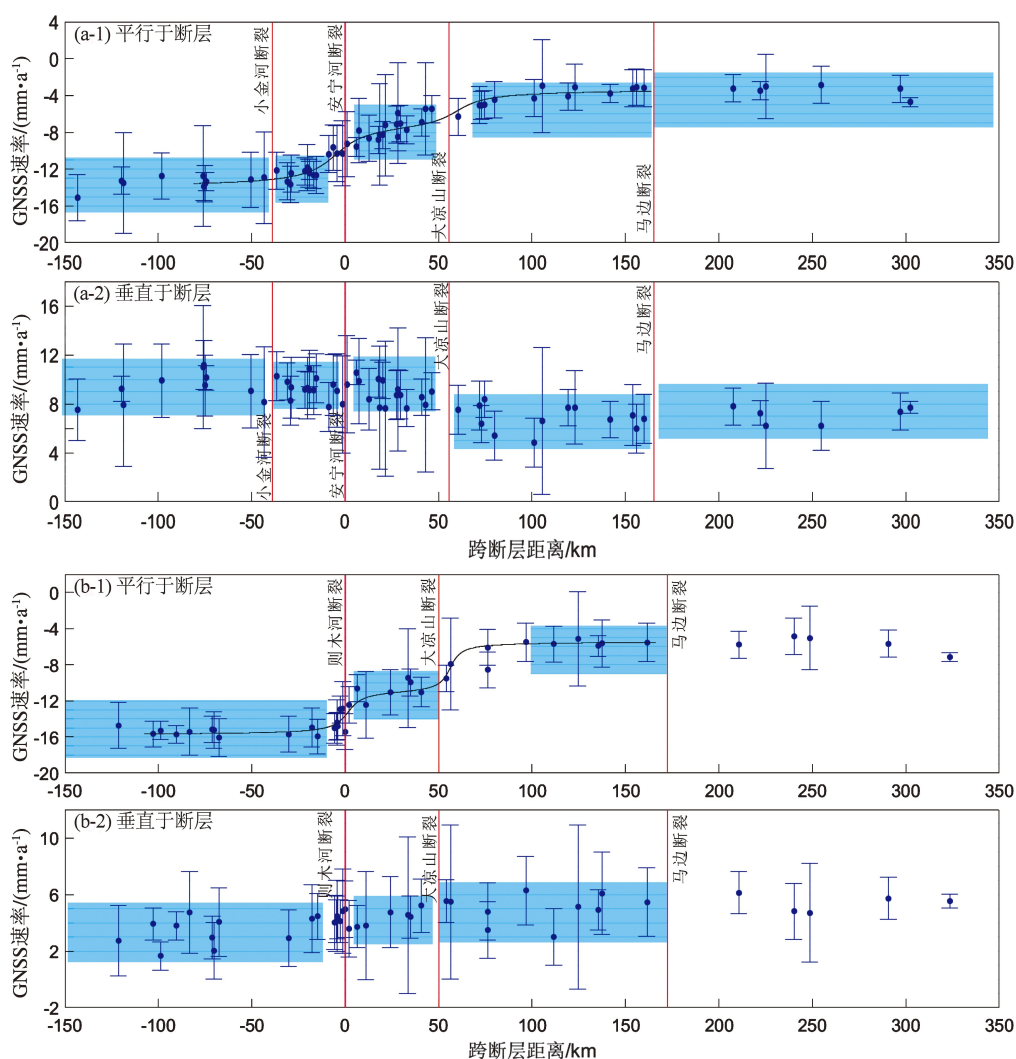


图 4 横跨安宁河—大凉山—马边断裂 (a) 及则木河—大凉山断裂 (b) 的速率剖面以及平行于和垂直于断层的 GNSS 速率分量

Fig. 4 The profiles across the Anninghe - Daliangshan - Mabian Fault (a) and the Zemuhe-Daliangshan Fault (b), and the GNSS velocity components parallel and perpendicular to the faults

0.8) mm/a, 总缩短速率为 (4.5 ± 1.0) mm/a, 安宁河断裂左旋走滑速率为 5 mm/a, 缩短速率小于 2 mm/a; 大凉山断裂左旋走滑速率约为 2 ~ 3 mm/a, 缩短速率小于 2 mm/a。本文得到的结果与 Zhang (2013) 的结果相近。

跨则木河断裂的 GNSS 速率剖面如图 4b 所示 (剖面位置如图 1 中 G 所示), 该剖面与大凉山断裂和马边断裂斜交, 表明则木河至马边断裂之间的区域处于显著的左旋剪切变形。该区域断裂块体差异运动速率为 (9.8 ± 0.4) mm/a, 其中则木河断裂、大凉山断裂块体差异运动速率分别约为 5 mm/a、4.7 mm/a, 马边断裂在这一方向上的左旋走滑分量不明显。跨断裂的垂直速率剖面 (图 4b) 表明, 则木河至大凉山断裂之间的区域处于较弱的水平伸展变形, 总拉张速率约为 (1.6 ± 0.4) mm/a, 则木河断裂拉张速率约为 1 mm/a。

由图 4b 拟合曲线可得, 则木河断裂走滑速率为 (4.8 ± 0.8) mm/a, 闭锁深度为 (5.9 ± 3.2) km; 大凉山断裂走滑速率为 (5.6 ± 0.9) mm/a, 闭锁深度为 (4.3 ± 4.8) km。

Zhang (2013) 得到该区域总左旋走滑速率为 (9.0 ± 1.5) mm/a, 总伸展速率约为 2.5 mm/a, 则木河断裂左旋走滑速率为 (5.5 ± 1.5) mm/a, 伸展速率小于 2 mm/a。Wang 和 Shen (2020) 得到在安宁河和则木河段断裂周边 100 ~ 150 km 范围内, 分别有约 10 mm/a 和 9 mm/a 的左旋剪切速率。可见, 本文的结果与 Zhang (2013) 以及 Wang 和 Shen (2020) 的结果相近。

4 结论

本文基于高分辨率的 GNSS 速度场厘定了甘孜—玉树—鲜水河断裂带的分段滑动速率, 7 个 GNSS 速率剖面结果揭示, 甘孜—玉树—鲜水河断裂的现今左旋滑动速率沿 NW 向 SE 逐渐增大, 其中风火山断裂走滑速率为 3.2 mm/a, 甘孜—玉树断裂滑动速率为 4.9 mm/a, 鲜水河断裂 NW 段走滑速率为 9.5 mm/a, 其西段道孚—炉霍段左旋走滑速率为 10.3 mm/a, 其东段的康定—石棉段滑动速率增加至 10 mm/a。再向南至安宁河—则木河和大凉山断裂带, 剪切速率基本保持在 10 mm/a 左右, 滑动速率被安宁河断裂、大凉山断裂、则木

河断裂以及马边断裂分解, 其中安宁河断裂、大凉山断裂、则木河断裂滑动速率分别约为 6.7、5.6、4.8 mm/a, 马边断裂滑动速率小于 1 mm/a。同时, 甘孜—玉树断裂水平缩短速率为 2 ~ 4 mm/a, 向东至鲜水河断裂和安宁河断裂水平缩短较弱, 而大凉山断裂具有约 2 mm/a 的地壳缩短变形, 则木河断裂拉张速率约为 1 mm/a。

“大陆逃逸”模型强调块体边界断裂具有较高的滑动速率, 而本文估算得出的甘孜—玉树—鲜水河断裂带滑动速率小于或保持在 10 mm/a 左右, 远低于“大陆逃逸”假说推测的高滑动速率。青藏高原的构造变形主要由内部地壳缩短、物质流动、顺时针旋转等地质、地球物理和地球化学等过程所调节吸收, 这种现象意味着整个中国大陆的构造变形可能是连续分布式的, 沿主要活动断裂的刚性块体滑移可能不是主要的构造变形方式, “连续变形”理论模型能够更好地描述大陆内部的构造变形。

参考文献:

- 陈桂华, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008. 川滇块体北—东边界活动构造带运动学转换与变形分解作用[J]. 地震地质, 30(1): 58–85.
- Chen G H, Xu X W, Wen X Z, et al. 2008. Kinematical transformation and slip partitioning of northern to eastern active boundary belt of Sichuan-Yunnan block [J]. Seismology and Geology, 30(1): 58–85. (in Chinese)
- 邓超东, 张培震, 冉勇康, 等. 2003. 中国活动构造与地震活动[J]. 地学前缘, 10(S1): 66–73.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. 2003. Active tectonics and earthquake activities in China[J]. Earth Science Frontiers, 10(S1): 66–73. (in Chinese)
- 王敏, 沈正康, 甘卫军, 等. 2008. GPS 连续监测鲜水河断裂形变场动态演化[J]. 中国科学: 地球科学, 38(5): 575–581.
- Wang M, Shen Z K, Gan W J, et al. 2008. GPS continuously monitored the dynamic evolution of deformation field of the Xianshuihe fault [J]. Scientia Sinica Terrae, 38(5): 575–581. (in Chinese)
- 王敏, 沈正康. 2020. 中国大陆现今构造变形: 三十年的 GPS 观测与研究[J]. 中国地震, 36(4): 660–683.
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day tectonic deformation in continental China: Thirty years of GPS observation and research [J]. Earthquake Research in China, 36(4): 660–683. (in Chinese)
- 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.
- Wang Y Z, Wang E N, Shen Z K, et al. 2008. Constrained inversion of present-day activity rates of major faults in the Sichuan-Yunnan region from GPS data [J]. Scientia Sinica Terrae, 38(5): 582–597.

- (in Chinese)
- 王闯昭,王敏,沈正康,等. 2011. 2010年玉树地震震前甘孜—玉树断裂形变场分析[J]. 地震地质, 33(3): 525–532.
- Wang Y Z, Wang M, Shen Z K, *et al.* 2011. Inter-seismic deformation field of the Ganzi-Yushu fault before the 2010 Yushu earthquake [J]. Seismology and Geology, 33(3): 525–532. (in Chinese)
- 闻学泽, Allen C R, 罗灼礼, 等. 1989. 鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及其地震构造意义[J]. 地震学报, 11(4): 362–372.
- Wen X Z, Allen C R, Luo Z L, *et al.* 1989. Segmentation, geometric features, and their seismotectonic implications for the Holocene Xianshuihe fault zone [J]. Acta Seismologica Sinica, 11(4): 362–372. (in Chinese)
- 闻学泽, 徐锡伟, 郑荣章, 等. 2003. 甘孜—玉树断裂带平均滑动速率与近代大地震破裂 [J]. 中国科学: 地球科学, 33(S1): 199–208.
- Wen X Z, Xu X W, Zheng R Z, *et al.* 2003. Average slip-rate and recent large earthquake ruptures along the Ganzi-Yushu fault [J]. Scientia Sinica Terrae, 33(S1): 199–208. (in Chinese)
- 肖鹏. 2022. 甘孜—玉树断裂带当江段晚第四纪构造变形与地貌响应研究[D]. 三河: 防灾科技学院.
- Xiao P. 2022. Study on late Quaternary tectonic deformation and geomorphic response of Dangjiang segment of Ganzi-Yushu fault zone in central Tibetan Plateau [D]. Sanhe: Institute of Disaster Prevention. (in Chinese)
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 2003. 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: 地球科学, 33(S1): 151–162.
- Xu X W, Wen X Z, Zheng R Z, *et al.* 2003. The latest tectonic change pattern of the active block in Sichuan-Yunnan area and its power source [J]. Scientia Sinica Terrae, 33(S1): 151–162. (in Chinese)
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 等. 2005. 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, 27(3): 446–461.
- Xu X W, Zhang P Z, Wen X Z, *et al.* 2005. Features of active tectonics and recurrence behaviors of strong earthquakes in the Western Sichuan Province and its adjacent regions [J]. Seismology and Geology, 27(3): 446–461. (in Chinese)
- 张培震, 王敏, 甘卫军, 等. 2003a. 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.
- Zhang P Z, Wang M, Gan W J, *et al.* 2003a. Slip rates along major active faults from GPS measurements and constraints on contemporary continental tectonics [J]. Earth Science Frontiers, 10(S1): 81–92. (in Chinese)
- 张培震, 邓超, 张国民, 等. 2003b. 中国大陆强震活动与活动块体 [J]. 中国科学: 地球科学, 33(S1): 12–20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, *et al.* 2003b. Seismic activity of strong earthquakes and active blocks in mainland China [J]. Scientia Sinica Terrae, 33(S1): 12–20. (in Chinese)
- 周荣军, 马声浩, 蔡长星. 1996. 甘孜—玉树断裂带的晚第四纪活动特征 [J]. 中国地震, 12(4): 250–260.
- Zhou R J, Ma S H, Cai C X. 1996. Late Quaternary active features of the Ganzi–Yushu fault zone [J]. Earthquake Research in China, 12(4): 250–260. (in Chinese)
- 邹镇宇, 江在森, 武艳强, 等. 2018. 走滑断层震间形变 GPS 观测站点布设的合理性分析 [J]. 地震, 38(1): 26–34.
- Zou Z Y, Jang Z S, Wu Y Q, *et al.* 2018. GPS observation station layout for the analysis of interseismic deformation of strike–slip fault [J]. Earthquake, 38(1): 26–34. (in Chinese)
- Allen C R, Luo Z, Qian H, *et al.* 1991. Field study of a highly active zone: The Xianshuihe fault of southwestern China [J]. Geol Soc Am Bull, 103(9): 1178–1199.
- England P, Molnar P. 1997. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults [J]. Geophys J Int, 130(3): 551–582.
- Flesch L M, Haines A J, Holt W E. 2001. Dynamics of the India–Eurasia collision zone [J]. J Geophys Res, 106(B8): 16435–16460.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, *et al.* 2007. Present–day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 112(B8): 1–14.
- Jiang G Y, Xu X W, Chen G H, *et al.* 2015. Geodetic imaging of potential seismogenic asperities on the Xianshuihe–Anninghe–Zemuhe fault system, Southwest China, with a new 3–D viscoelastic interseismic coupling model [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 120(3): 1855–1873.
- Replumaz A, Tapponnier P. 2003. Reconstruction of the deformed collision zone between India and Asia by backward motion of lithospheric blocks [J]. J Geophys Res, 108(B6): 2285.
- Savage J C, Burford R O. 1973. Geodetic determination of relative plate motion in central California [J]. J Geophys Res, 78(5): 832–845.
- Song S, Li Y, Hao M. 2022. Active crustal deformation model of the Fen–Wei rift zone, North China: Integration of geologic, geodetic, and stress direction datasets [J]. Frontiers in Earth Science, 10: 964800.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, *et al.* 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. Science, 294(23): 1671–1677.
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications [J]. Geophys Res: Solid Earth, 125(2): e2019JB018774.
- Xu R, Stamps D S. 2016. Present–day kinematics of the Eastern Tibetan Plateau and Sichuan Basin: Implications for lower crustal rheology [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(5): 3846–3866.
- Zhang P Z, Peter M, Xu X W. 2007. Late Quaternary and present-day rates of slip along the Altyn Tagh fault, northern margin of the Tibetan Plateau [J]. Tectonics, 26: TC5010.
- Zhang P Z. 2013. A review on active tectonics and deep crustal processes of the Western Sichuan region, eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Tectonophysics, 584: 7–22.

A Review on Slip Rate of the Ganzi – Yushu – Xianshuihe Fault Zone by GNSS Constraints

WANG Yichen¹, HAO Ming², YU Zhongyuan¹, CHEN Baixu¹

(1. *Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China*)

(2. *The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shaanxi, China*)

Abstract

The Ganzi-Yushu-Xianshuihe Fault Zone is an important large-scale boundary slip fault on the Tibetan Plateau. The present-day slip rate constraining this fault zone calculated according to GNSS data can help understand the fault zone's activity behaviour and explore the fault zone's present-day deformation characteristics and deformation patterns. On the basis of the GNSS velocity field, seven rate profiles across the Ganzi-Yushu-Xianshuihe Fault Zone are constructed, and main conclusions are as follows: The present-day, left-lateral, strike-slip rate of the Ganzi-Yushu-Xianshuihe Fault Zone gradually increases from Northwest direction towards Southeast direction. The Ganzi-Yushu Fault slips at the rate of 4.9 mm/a. The Northwest segment of the Xianshuihe Fault slips at the rate of 9.5 mm/a. The eastern segment of the Xianshuihe Fault, namely the Kangding-Shimian Fault, slips at a rate of 10 mm/a. In the Anninghe-Zemuhe Fault and the Daliangshan Fault, the shear rate is about 10 mm/a. Meanwhile, in the Ganzi-Yushu Fault, the Crust's shrinking rate is 2 – 4 mm/a. The Daliangshan Fault Zone undergoes crustal shrinking at the rate of about 2 mm/a, and the Zemuhe Fault has a tensile rate of about 1 mm/a. This reveals that the present-day slip rate of the Ganzi-Yushu-Xianshuihe Fault is much lower than the previous research results, and the theoretical model of “continuous deformation” may be more suitable for researching the tectonic deformation of the interior continent.

Keywords: the Ganzi-Yushu-Xianshuihe Fault Zone; GNSS data; slip rate; the Qinghai-Tibet plateau