

刘雷, 朱良玉, 季灵运, 等. 2023. 2022年门源 M_s 6.9 地震前祁连—海原断裂带闭锁程度及地震危险性研究[J]. 地震研究, 46(1): 88–98, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0001.

Liu L, Zhu L Y, Ji L Y, et al. 2023. Study on the locking degree of the Qilian-Haiyuan Fault Zone before the 2022 Menyuan M_s 6.9 Earthquake and its seismic risk[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(1): 88–98, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0001.

2022年门源 M_s 6.9 地震前祁连—海原断裂带 闭锁程度及地震危险性研究*

刘雷, 朱良玉, 季灵运, 庄文泉, 刘传金

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 利用2015—2021年GPS速度场, 采用负位错程序反演祁连—海原断裂带的闭锁程度及滑动亏损速率, 结合断层面小震分布特征研究2022年门源 M_s 6.9地震震前异常特征, 综合分析该断裂带各段的地震危险性, 并根据跨断层GPS剖面获取断裂带滑动速率, 对区域地壳变形特征进行探讨。结果表明: 在2022年门源地震前, 冷龙岭断裂处于强闭锁状态, 并且闭锁深度在15 km, 滑动亏损速率也较大, 小震分布也相对较少, 这些特征与中强地震的发生密切相关。而金强河断裂、冷龙岭断裂西段和托莱山断裂东段现今闭锁程度较高, 闭锁深度深, 滑动亏损速率大, 具有较高的地震危险性。进一步结合小震分布和2022年门源地震前闭锁特征, 认为未来需关注托莱山东段的中强地震危险性。祁连—海原断裂带现今走滑速率为3.9~4.3 mm/a, 说明该断裂带整体运动一致性较好, 挤压速率从西段的2.9 mm/a向东逐渐减小为1 mm/a, 说明青藏高原东北缘现今的地壳形变主要以祁连山上的地壳短缩和祁连—海原断裂带上的左旋走滑运动为主。

关键词: 祁连—海原断裂带; 门源 M_s 6.9地震; 断层闭锁; 地震危险性; 地壳变形

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2023)01-0088-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0001

0 引言

青藏高原东北缘属于柴达木—祁连活动地块(张培震等, 2003), 是青藏高原向大陆内部扩展的前缘部位, 吸收和调节印度板块向欧亚板块NNE向的挤压汇聚作用, 构造活动强烈并且中强地震较为频繁(Dewey, Burke, 1973; Métivier et al., 1998; Zhang et al., 2004; Molnar, Stock, 2009)。祁连—海原断裂带作为青藏高原东北缘边界带的一条大型走滑断裂带, 不仅控制着青藏高原东北缘地区的几何和构造格局, 而且在调节东北缘地壳物质相对于戈壁—阿拉善地块的向东运

动中起到重要作用。该断裂带以左旋走滑为主, 全长约1 000 km, 由西向东主要由托莱山断裂、冷龙岭断裂、金强河断裂、毛毛山断裂、老虎山断裂和海原断裂组成(Tapponnier et al., 1976, 2001; Peltzer, Tapponnier, 1988; Gaudemer et al., 1995; Zheng et al., 2013; Daout et al., 2016; 周琳等, 2022)。断裂带现今地震活动性较强, 据历史资料记载, 自1900年以来曾发生过多起强震和大震, 如1920年海原8.5级地震、1986年门源6.4级地震、1990年天祝—景泰6.2级地震和2016年门源 M_s 6.4地震等。2022年1月8日青海门源 M_s 6.9地震也发生在该断裂带上(李振洪等, 2022), 根据GCMT^①的反演结果, 震中位置为(37.80°N,

* 收稿日期: 2022-03-22.

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JQ-979)资助.

第一作者简介: 刘雷(1990-), 工程师, 主要从事活动构造和GPS形变分析以及地震危险性分析研究.

E-mail: liulei41325@1963.com.

① <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.

101.31°E), 震源深度 14.8 km, 震源机制为高角度左旋走滑断层, 表明祁连—海原断裂带控制了一系列历史地震的发生, 是研究地震孕育发生机制的天然试验场。

断层滑动速率有利于认识地壳形变模式、了解应力加载过程、探索大地震复发周期, 断层深浅部的闭锁程度和滑动亏损分布特征是判断断裂带未来一段时期内地震危险性的重要手段 (McCaffrey *et al*, 2005, 2007; Cavalié *et al*, 2008; Jolivet *et al*, 2013)。关于祁连—海原断裂带的地震危险性研究, 前人已经开展了许多工作, 如 Gaudemer 等 (1995) 根据野外考察和遥感影像发现在祁连—海原断裂带上存在一个长约 220 km 的地震危险区——“天祝地震空区”; 郭鹏 (2019) 根据野外地质调查认为金强河断裂东段、毛毛山断裂和老虎山断裂所在的长约 160 km 的区段未来可能发生大地震; 郝明等 (2017) 和叶茂盛等 (2018) 利用 GPS 资料反演了海原—六盘山断裂的闭锁程度, 分析了断裂未来可能发生强震的地区; 赵静等 (2016) 计算了陇西块体周边断裂的闭锁程度, 认为冷龙岭断裂和金强河断裂为地震危险段; 李强等 (2014) 和 Li 等 (2016) 对祁连—海原—六盘山断裂带的闭锁进行了反演, 认为金强河—毛毛山断裂存在较高的地震危险性。因此, 祁连—海原断裂带现今仍然是强震发生需要关注的重点位置。

综上所述, 本文以祁连—海原断裂带为研究对象, 利用 2015—2021 年的 GPS 速度场结果, 获取了其现今的滑动速率、闭锁程度及滑动亏损速率; 结合 2022 年门源 $M_s6.9$ 地震前小震精定位和震后余震精定位结果, 综合分析了断裂带的现今活动性、断裂的深浅部地壳变形及小震活动特征, 并依据 2022 年门源地震震前特征判定断裂带未来可能发生强震的段落, 探讨了区域现今地壳变形特征, 为区域强震危险地点预测和青藏高原东北缘构造变形模式提供了参考和约束。

1 跨断层 GPS 速率特征

1.1 GPS 数据处理

收集“地壳运动观测网络”“中国大陆构造环境网络”项目 2015—2021 年的 GNSS 观测数

据。采用统一的数据处理方案对所有数据进行处理, 主要方法如下: ①利用 GAMIT, 以单天为 1 个时段, 对 GNSS 观测资料进行基线解算。在允许卫星轨道和地球自转参数有微量调整的同时, 采用重力场模型 EGM08、光压模型 BERNE、地球辐射模型 TUME1、天线推理模型 ANTBK、地磁场模型 IGRF13、高阶电离层改正 GMAP 模型等对相关参数进行估计和改正。海潮和固体潮引发的测站地壳形变改正分别采用 FES2004 和 IERS2003 模型。为避免模型和框架的差异引起计算结果的差异, 采用相同的模型和方法对全球选定的大约 70 个均匀分布的 IGS 站和基准站数据进行处理, 获取单日基线松弛解。②利用 HTOGLB 将单日松弛解文件转换成 GLOBK 认可的单日基线松弛解, 选定 90 多个稳定的 IGS 站和陆态网络一期的连续站作为基准点, 利用 GLRED 计算 ITRF2014 框架下的坐标时间序列, 检查单天坐标的重复性。③利用模型拟合的方法, 对年和半年周期的季节性变化、仪器更换导致的阶跃等非构造因素影响的位移进行剔除。GPS 速度场并没有将 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震扣除, 这是因为该次地震震级相对较小, 同震及震后产生的形变及应力影响也较小 (Wang *et al*, 2017; 刘云华等, 2019; 李振洪等, 2022), 进而从多年干净的时间序列中估算出 ITRF2014 框架下的 GNSS 速度场。然后利用 Altamimi 等 (2016) 提供的欧亚框架和 ITRF2014 框架之间的欧拉旋转矢量, 将 GNSS 水平运动速度场归算到稳定的欧亚参考框架下 (Wang *et al*, 2014; Zhao *et al*, 2015), 同时剔除 GNSS 速度场中方向和大小明显偏离研究区运动趋势的测站 (图 1)。

1.2 跨断层 GPS 速率

断层的 GPS 速度剖面可直观地反映断层两侧块体的差异运动和断层的应变积累状态 (Wang, Shen, 2020), 因此为了研究祁连—海原断裂带现今的水平运动变形特征, 本文构建了从西到东横跨祁连—海原断裂带的 4 个剖面 (图 1 中的剖面 P1、P2、P3、P4), 将 2015—2021 年 GPS 速度场分别沿断层走向和垂直断层走向方向进行投影, 由断层两侧站点速度平均值之差估算断层的滑动或张/压速率, 并利用误差传播定律计算速率误差, 绘制出跨断层 GPS 速率剖面 (图 2)。

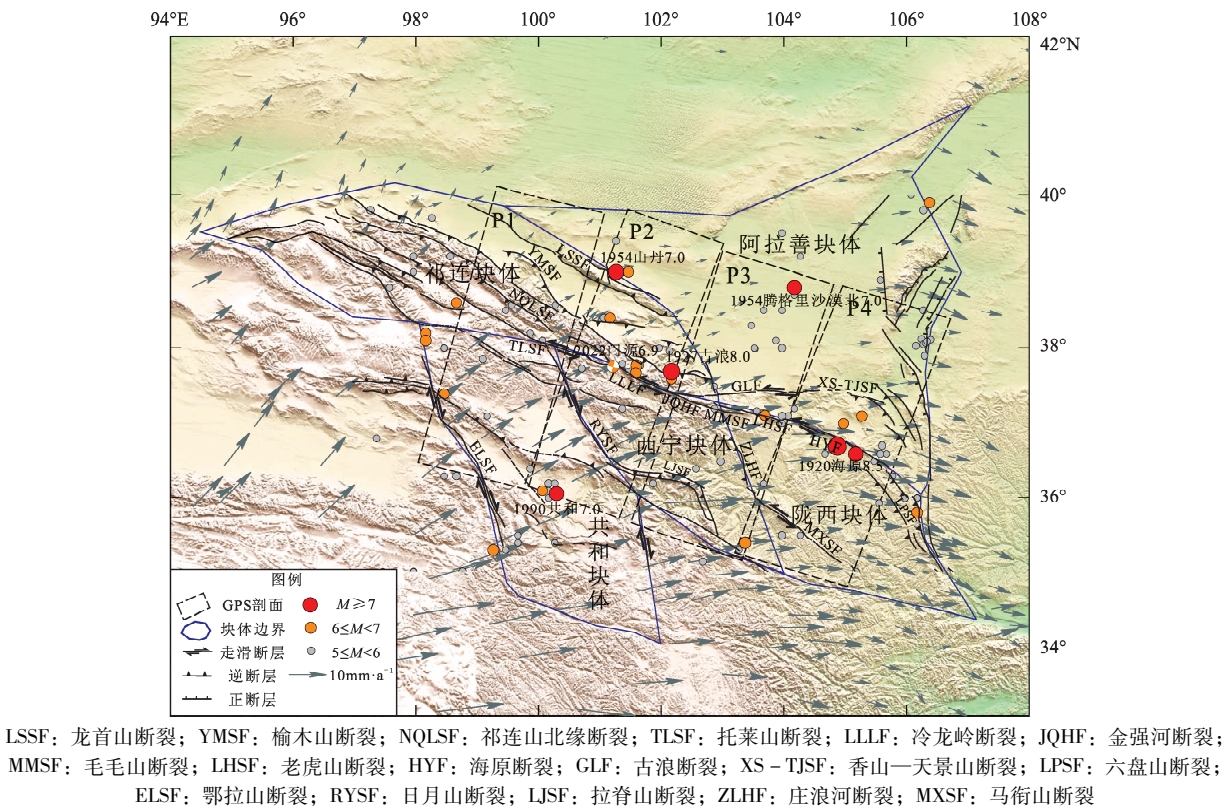


图 1 青藏高原东北缘活动构造与 GPS 速度场

Fig. 1 Active faults and the GPS velocity field in the northeastern margin of the Tibetan Plateau

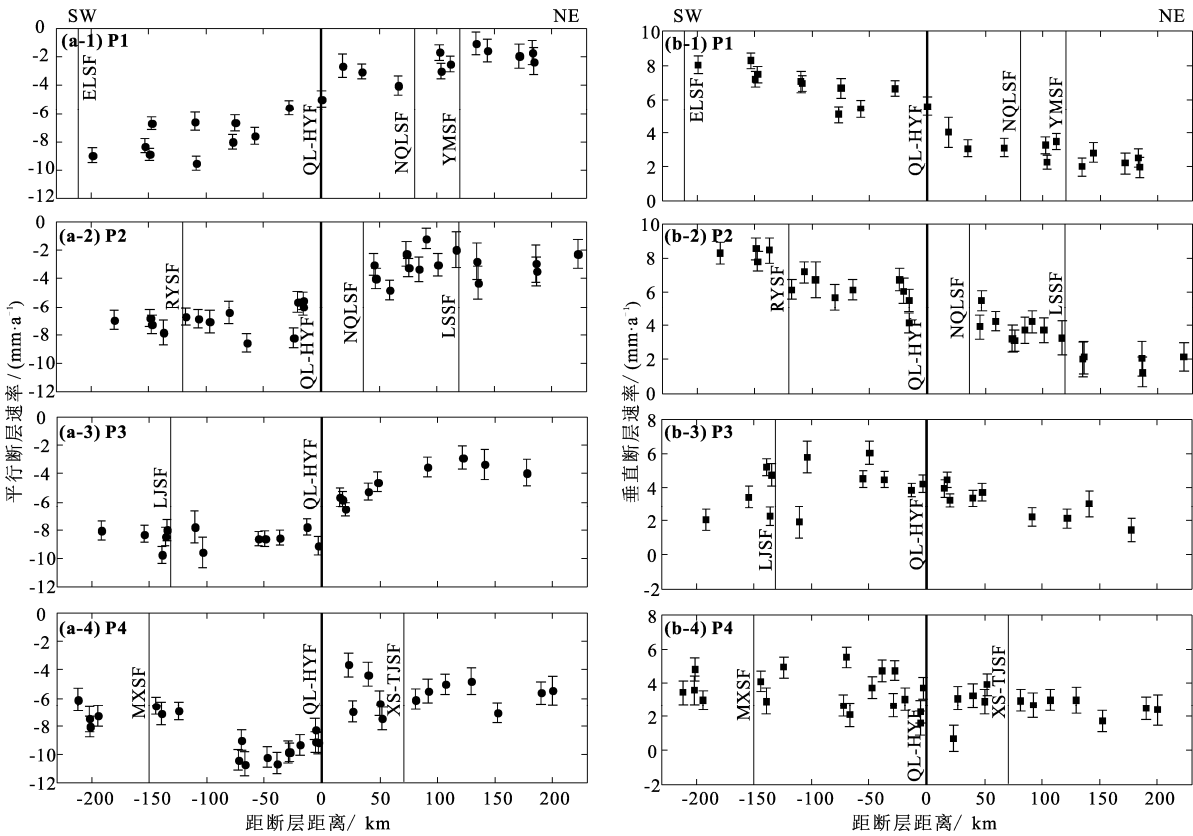


图 2 跨祁连—海原断裂带 GPS 速率剖面图

Fig. 2 GPS velocity profile across the Qilian-Haiyuan Fault Zone

P1 剖面主要包括鄂拉山断裂、托莱山断裂、祁连山北缘断裂以及榆木山断裂, 其中托莱山断裂以左旋走滑为主, 兼有逆冲运动, 走滑速率为 4.0 mm/a , 挤压速率为 2.9 mm/a ; 而祁连山北缘断裂和榆木山断裂也具有左旋走滑和逆冲的性质, 但是断层活动性较弱, 滑动速率基本为 1 mm/a 。P2 剖面主要包括日月山断裂、冷龙岭断裂、祁连山北缘断裂、龙首山断裂, 其中冷龙岭断裂左旋走滑速率为 3.9 mm/a , 挤压速率为 2.2 mm/a ; 日月山断裂走滑性质不明显, 逆冲挤压速率为 2.2 mm/a ; 龙首山断裂以逆冲运动为主, 挤压速率为 1.9 mm/a 。P3 剖面主要包括拉脊山断裂、金强河—毛毛山—老虎山断裂, 金强河—毛毛山—老虎山断裂走滑速率为 3.9 mm/a , 挤压速率约为 1.3 mm/a ; 拉脊山断裂走滑作用不强, 存在微弱的拉张作用。P4 剖面包括马衔山断裂、海原断裂、香山—天景山断裂, 海原断裂的左旋走滑速率为 4.3 mm/a , 挤压速率约为 1 mm/a , 而马衔山断裂和香山—天景山断裂的现今活动性不强, 走滑与挤压作用微弱。

2 断层闭锁程度及滑动亏损速率特征

2.1 模型原理及误差分析

本文使用的 Tdefnode 负位错反演程序主要原理是: 假定块体内部点的运动为块体旋转、块体内部整体均匀应变及块体边界由于断层闭锁产生的滑动亏损而引起的地表弹性变形之和, 可表示为:

$$\bar{V}_{sf} = \bar{V}_{br} + \bar{V}_{is} + \bar{V}_{fs} \quad (1)$$

式中: \bar{V}_{sf} 表示实测地表速度; \bar{V}_{br} 为块体旋转引起的速度; \bar{V}_{is} 为块体内部应变引起的速度; \bar{V}_{fs} 为断层闭锁负位错效应引起的速度。

采用网格搜索和模拟退火法同时反演块体旋转欧拉极、断层滑动速率、块体边界断层闭锁系数 (Φ) 等。模型原理、反演过程及参数控制等可参考 McCaffrey (2009) 研究。模型参数拟合程度的优劣表征如下:

$$\chi_n^2 = \left[\sum_{i=1}^n (r_i / f \sigma_i)^2 \right] / \text{dof} \quad (2)$$

式中: n 为观测数据的数量; dof 为自由度 (所有观测数据数量 - 自由参数数量); r_i 为观测数据残差; σ_i 为数据标准差; f 为数据误差权重因子。

当 χ_n^2 趋近于 1 时, 认为模型为最佳拟合观测数据 (McCaffrey, 2002)。此外, 对模型拟合残差分布及块体内部应变残差的统计分析, 也是判定模型反演好坏的重要标准 (Li *et al.*, 2016)。

对于祁连—海原断裂带的闭锁程度反演, 主要选择了断裂带附近的阿拉善块体、兰州块体、西宁块体、共和块体和祁连块体。将阿拉善块体设置为刚性块体, 其它块体设置为内部均匀应变, 块体的划分参考前人的研究结果 (Zhang *et al.*, 2005; 李煜航等, 2015; Li *et al.*, 2016)。反演断层设置中, 简化祁连—海原断裂带为单一连续断裂, 断层走向为 NWW, 倾向为 SSW, 倾角由西向东分别设为 80° 、 75° 、 70° 。断层面是由水平面和深度上的节点组成的, 沿祁连—海原断裂带走向上节点之间的距离为 30 km 左右, 共有 26 个节点, 在垂直方向上设置了 7 个节点, 距离依次为 0.1 、 5 、 10 、 15 、 20 、 25 及 30 km , 在反演时设置断层在地表为强闭锁状态 ($\Phi = 1$), 在 30 km 深度设置为不闭锁状态 ($\Phi = 0$), 处于 $0 \sim 30 \text{ km}$ 的断层节点设置为沿深度增加闭锁系数逐渐减小 (McCaffrey, 2002; Wang *et al.*, 2003), 进而计算相邻节点之间断层网格区域的闭锁程度。

在反演断裂闭锁程度过程中, 根据 $\chi_n^2 \approx 1$ 为标准寻求最佳模型, 首先删除块体内部与周围测点运动趋势、大小明显不同的点, 删除后最终有 153 个 GPS 测点参与反演, 再经过反复测试, 调整各项参数, 得到最佳模型。当 GPS 速度场误差权重因子 $f = 4.0$ 时, $\chi_n^2 = 1.02$ 。为了更好地说明模型择优和拟合效果, 图 3 给出了最优模型的拟合残差分布。从图中可以看出, 残差分布方向具有随机性, 只有少部分测站的 GPS 速度残差值较大, 大部分块体内部及断裂附近的测站速度残差较小, 在 2 mm/a 之内, 速度残差分布符合高斯正态分布, 说明模型有效并且拟合结果较好。

2.2 断层闭锁程度与滑动亏损速率分析

通过最佳模型拟合结果, 得到祁连—海原断裂带闭锁程度分布图 (图 4a), 图中震源参数来自

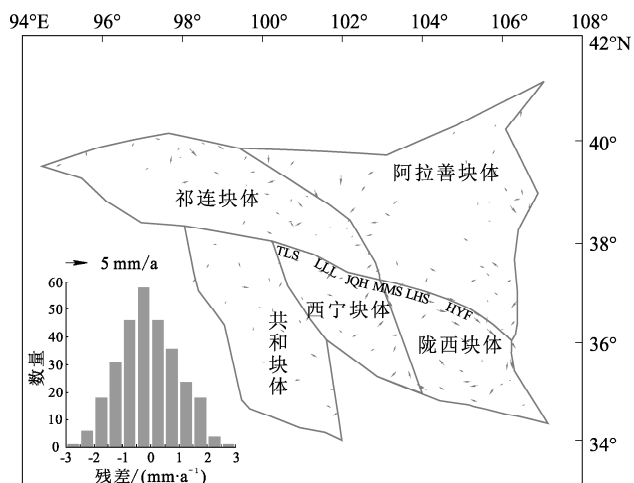


图3 模型 GPS 速度残差分布图

Fig. 3 GPS velocity residual of the model

Global CMT^① 目录。从图 4a 可以看出, 祁连—海原断裂带闭锁程度最高的区域主要集中在金强河断裂、冷龙岭断裂西段和托莱山断裂东段, 其中金强河断裂闭锁深度基本都在 25 km 左右, 冷龙

岭断裂西段闭锁深度为 15 km, 并且 2022 年门源 $M_s 6.9$ 地震就发生在冷龙岭断裂西段强闭锁区域里, 闭锁深度与地震震源深度基本一致。托莱山断裂东段闭锁深度在 12 km, 而在托莱山断裂中段和西段、毛毛山断裂、老虎山断裂和海原断裂上都表现为不闭锁或闭锁程度较低, 从浅部有部分闭锁到深度 5 km 以下变为蠕滑运动。

当断层处于闭锁状态, 滑动速率的亏损会以应变能的方式积累在断层附近 (McCaffrey *et al*, 2007), 而滑动亏损速率大小可以表示断层两盘滑动量转化为应变能的快慢, 这对断层地震危险性的判断具有重要意义 (Jolivet *et al*, 2013)。根据祁连—海原断裂带滑动亏损速率分布图可以看出 (图 4b), 滑动亏损速率分布图与闭锁程度分布图变化基本一致, 在托莱山断裂东段滑动亏损速率最大, 达到 5 mm/a, 深度为 12 km, 向东到冷龙岭断裂附近, 滑动亏损速率减小到 4.5 mm/a, 深度也变为 4 km; 冷龙岭断裂西段的滑动亏损速率

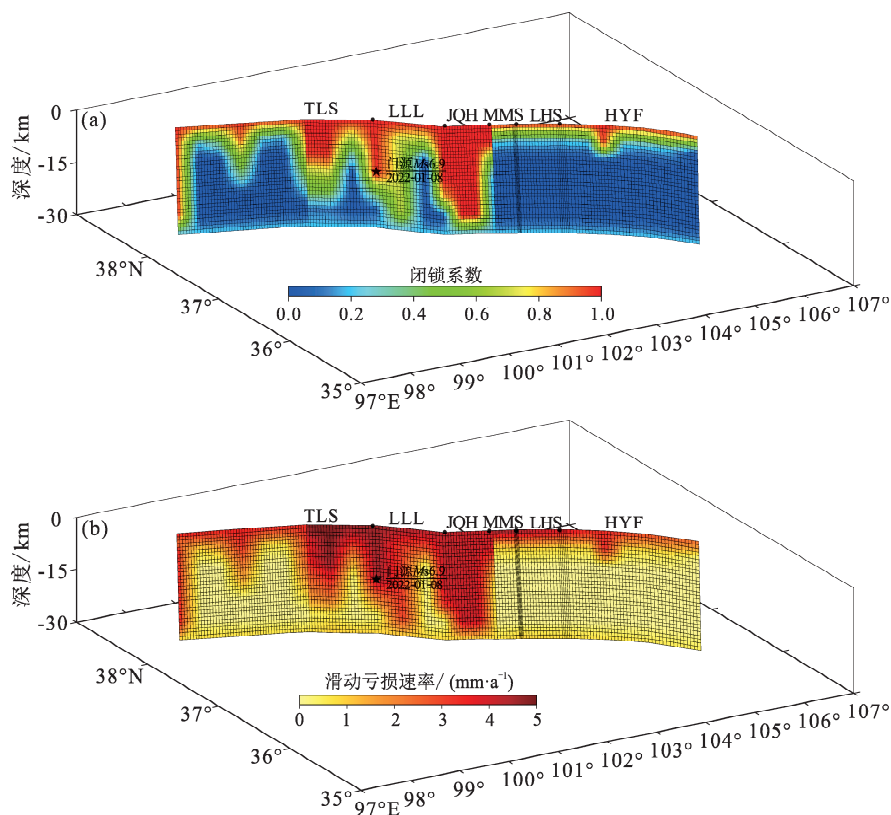


图4 祁连—海原断裂带闭锁程度 (a) 及滑动亏损速率 (b)

Fig. 4 Locking degree (a) and slip rate deficits (b) of the Qilian-Haiyuan Fault Zone

① <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.

为 4.7 mm/a , 深度为 15 km , 东段的滑动亏损速率为 4 mm/a , 深度只有 4 km ; 金强河断裂的滑动亏损速率基本为 $3.7 \sim 4.2 \text{ mm/a}$, 深度为 25 km ; 而在托莱山断裂中段和西段滑动亏损速率主要为 $2.5 \sim 3.5 \text{ mm/a}$, 主要集中在深度 5 km 的浅地表内; 毛毛山断裂、老虎山断裂与海原断裂滑动亏损速率基本为 3 mm/a , 只分布在 4 km 的浅地表内, 向深部逐渐变为 0 。

3 小震分布特征

为了研究祁连—海原断裂带现今构造活动与小震之间关系, 利用四川省地震局提供的 2009—2019 年的 $M_L \geq 1.5$ 小震精定位目录, 挑选出沿断层走向两侧 15 km 范围内的地震, 将小震沿断裂走向投影到断层面上 (图 5)。从图 5 可以看出, 祁连—海原断裂带上地震的分布较为密集, 且在断裂各段表现为不均匀分布, 断裂高闭锁主要分布在断裂的中段, 在东段和西段基本不闭锁, 闭锁深度与小震深度基本一致, 说明断层在 20 km 深度内处于闭锁状态 (Schmittbuhl *et al*, 2015; 李姜一等, 2020)。在托莱山断裂的中段和西段, 断裂闭锁程度较低, 闭锁深度也较浅, 并发生有较多的小震, 而其东段闭锁程度高, 小震分布较少; 在冷龙岭断裂上, 其西段闭锁程度较高, 西段比东段闭锁深度大, 地震呈条带状集中分布在断裂中

西段, 深度在 14 km 以上, 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震就发生在这个位置。小震的密集与 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震能量释放有关, 而震中位置闭锁程度也较高, 为闭锁强弱转换的高梯度带区域, 可能是由于 GPS 数据 (2015—2021) 包含了 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震, 所以也反映出震前闭锁的特征。在冷龙岭断裂和托莱山断裂交汇处地震较少, 2022 年门源 $M_s6.9$ 地震发生在这个区域, 2 次门源地震分别发生于冷龙岭断裂强闭锁段的东、西两侧, 很好地说明了在断裂强闭锁区内容易发生中强地震 (赵静等, 2012, 2019)。

金强河断裂整体闭锁程度高, 闭锁深度较深, 在其东段地震分布较多, 在西段与冷龙岭断裂交汇处地震密集且呈条带状分布, 深度在 18 km 以上, 地震密集可能是由于此处是古浪断裂与祁连—海原断裂带的相交处, 构造活动强烈, 地震更容易集中发生 (郭鹏等, 2017; 高伟, 2018; 刘雷等, 2020); 毛毛山断裂闭锁程度一般, 闭锁系数约为 0.5 , 地震分布稀少; 老虎山断裂闭锁程度低, 闭锁深度浅, 地震分布较多, 深度在 18 km 以上, 地震较多与 Jolivet 等 (2012) 认为老虎山断裂现今存在蠕滑段的结论相对应; 海原断裂闭锁程度低, 闭锁深度浅, 地震在西段分布较少, 在东段分布较多, 由于 1920 年海原 8.5 级地震就发生在海原断裂带的南东段, 所以可能受到震后断层调整运动的影响, 现今小震活动依旧较多。

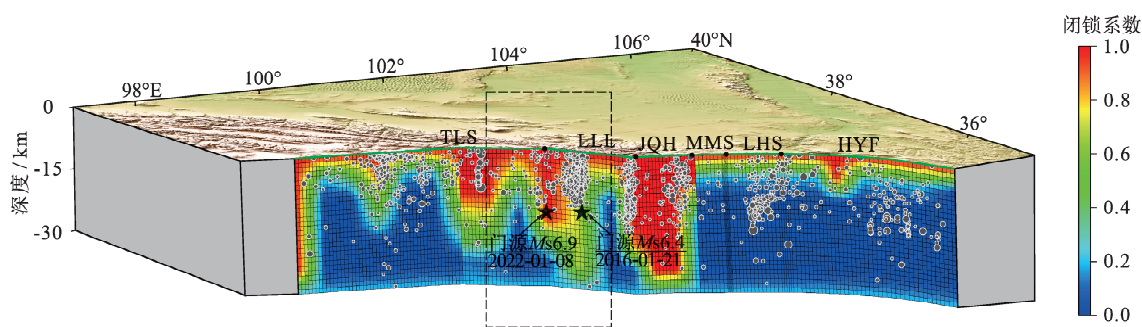


图 5 祁连—海原断裂带闭锁程度与小震分布图

Fig. 5 Locking degree and the distribution of small earthquakes in the Qilian – Haiyuan Fault Zone

4 讨论

4.1 断裂地震危险性分析

活动断裂在闭锁后, 受到应力作用不断积累能

量, 当超过自身稳定极限后, 会发生地震并释放能量, 然后进入下一个地震周期 (张培震等, 2013; Wallace *et al*, 2004)。为了分析祁连—海原断裂带未来的地震危险性, 本文结合断层闭锁和小震活动等资料, 对断裂各段的地震危险性进行研究。

在托莱山断裂东段、冷龙岭断裂西段、金强河断裂中西段闭锁程度高,闭锁程度深,滑动亏损率较大,基本都大于 5 mm/a,并且小震分布较少,说明这些断裂段能量积累较快,未来的地震危险性较高。冷龙岭断裂东段虽然小震分布少,但是闭锁深度较浅,深度只有 4 km,断裂可能正处于闭锁增长中,地震危险性次之。金强河断裂东段闭锁程度高,闭锁深度为 8 km,但是小震分布较多,地震危险性一般。毛毛山断裂和托莱山断裂西段只有浅部闭锁程度低,闭锁深度浅,小震分布稀少,断裂现今能量积累速率较慢,未来地震危险性较弱。托莱山断裂中段、老虎山断裂和海原断裂闭锁程度低,闭锁深度较浅,滑动亏损率也较小,并在断裂上分布较多的地震,说明这些断裂段地震活动频繁,能量积累水平较弱,地震危险性不强。

为了进一步分析 2022 年门源 $M_s6.9$ 地震及余震的分布特征以及对断层地震活动性的影响,本文收集了门源 $M_s6.9$ 地震后 9 天内的余震精定位结果 (Fan *et al.*, 2022), 选择了震中两侧各 60 km 的区域 (图 5 中黑色虚线框), 将 2009—2019 年地震和门源 $M_s6.9$ 地震余震绘制成地震剖面 (图 6)。从图 6 可以看出,余震深度主要分布在 5 ~ 15 km, 在冷龙岭断裂西段和托莱山断裂东段之间,长度约为 40 km,比野外地质考察的地表破裂带长度 (20 km) 长。另外余震分布在冷龙岭断裂上停止于 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震的位置,说明已经发生过地震的冷龙岭断裂中段现今还在震后调整阶段,缺少应力的积累,余震无法继续向前传递。对比 2009—2019 年小震精定位的分布情况,此次地震

的余震很好地填补了这一小震空缺,沿着 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震继续向西迁移,发现在余震分布的西边,托莱山断裂的东段还存在一段长约 50 km 的小震稀疏段,经过 2022 年门源 $M_s6.9$ 地震,下一次地震有可能会从冷龙岭断裂向西迁移到托莱山断裂上,与 2022 年门源地震前的特征较为相似,所以未来需要重点关注托莱山断裂东段。

4.2 区域地壳变形特征分析

断层滑动速率不仅可以表现断层运动的最新行为,同时也可以反映区域构造的主要特征 (Zhang *et al.*, 2004, 2013; Gan *et al.*, 2007)。关于祁连—海原断裂带的走滑速率,前人已经对其进行了大量的研究,地质滑动速率结果差异较大,大多数研究的结果为 4 ~ 6 mm/a (何文贵等, 1994, 2010; 袁道阳等, 1998; Li *et al.*, 2009; Yuan *et al.*, 2008); 利用大地测量资料得到的结果基本在 2 ~ 8 mm/a (Thatcher, 2007; Cavalié *et al.*, 2008; Duvall, Clark, 2010; Loveles, Meade, 2010; Zheng *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2016)。本文得到的断层走滑速率剖面结果主要为 3.9 ~ 4.3 mm/a, 与大部分地质滑动速率和大地测量资料得到的走滑速率基本一致或稍微偏小。综上所述认为祁连—海原断裂带现今运动状态与地质长期运动特征基本一致,断层活动性具有很好的继承,断裂主要段落保持着约 4 mm/a 的走滑速率,说明整体运动一致性较好,与最大剪应变高值区集中在祁连—海原断裂带上相对应 (Wang *et al.*, 2020, 而在断裂两端走滑速率快速变小 (Yuan *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2005), 这种走滑断裂的运动特征与前人的研究结果相似 (Dawers *et al.*, 1993; Harkins *et al.*, 2010; Duvall, Clark, 2010; Zheng *et al.*, 2013)。前人对于平行断层方向速率研究较多,但对其在垂直断层方向上的挤压速率研究的相对较少。根据本文的结果,祁连—海原断裂带的挤压速率从西边的 2.9 mm/a, 到东边减少到约 1 mm/a, 在地形上具有很好的对应关系,西边挤压作用强、地形多以高海拔山脉为主,东边挤压作用弱、地形多以低海拔盆地为主,说明断层挤压速率的变化可能与地壳短缩 (形成盆地和隆起山脉) 有关。

剖面 P1 和 P2 横贯整个祁连山,剖面从 SW

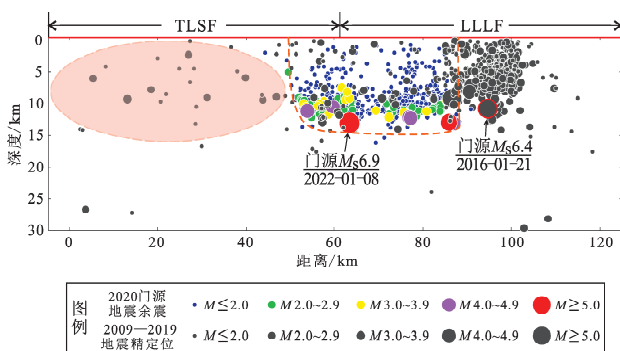


图 6 2022 年门源 $M_s6.9$ 地震余震分布剖面
Fig. 6 Profile of the distribution of the after shocks of the 2022 Menyuan $M_s6.9$ Earthquake

到 NE 表现出左旋走滑及逆冲挤压运动, 平行断层方向上的速率变化主要集中在断裂两侧, 垂直断层方向上的速率呈线性梯度变化, 总的地壳缩短速率为 $6 \sim 7 \text{ mm/a}$, 整个祁连山表现为挤压缩短, 宽度为 $200 \sim 250 \text{ km}$, 说明整个祁连山脉挤压收缩均匀变化, 而不是集中在特定的断层或构造上。在剖面 P3 和 P4 上, 区域整体表现为以左旋走滑为主, 挤压缩短作用不明显, 平行断层方向上的速率阶跃集中在祁连—海原断裂上, 宽度为 50 km , 垂直断层速率在 P3 剖面上有所减弱, 地壳缩短速率减小到 3 mm/a , 宽度也减小到 150 km , 在 P4 剖面上的断裂基本没有挤压作用, 整个剖面的地壳缩短速率只有 $1 \sim 2 \text{ mm/a}$ 。通过 4 个剖面可以看出, 在阿拉善块体内的 GPS 平行和垂直断裂速率基本都没有太大变化, 并且滑动速率都较低。

基于上述特征, 对研究区现今地壳变形特征进行讨论。在受青藏高原 NE 向的推挤和阿拉善块体阻挡的双重作用下, 青藏高原东北缘发生了强烈的构造变形, 地壳运动方向存在顺时针旋转现象 (袁道阳等, 2004)。在祁连山地区主要受强烈的挤压作用, 造成地层的弯曲破裂而形成祁连褶皱系, 从鄂拉山断裂到榆木山断裂之间具有明显的地壳缩短运动, 同时受到区域内块体旋转和不同性质断裂相互作用和转换的影响下 (Duvall, Clark, 2010; 葛伟鹏等, 2013), 从祁连山向东沿着青藏高原东北缘地壳缩短速率逐渐递减, 挤压变形的范围也随着递减, 到海原断裂附近已经没有了明显的地壳缩短, 很好地解释了 NE 向的挤压主要被逆断层、地壳缩短增厚和边界高山隆起所分配和吸收 (Zheng *et al.*, 2013), 而区域的左旋走滑速率主要集中在祁连—海原断裂带上, 并且断裂走滑速率基本一致, 而在其他断裂上走滑运动不强, 大部分都小于 1 mm/a , 说明青藏高原东北缘现今的地壳形变主要以祁连山地区的地壳短缩和祁连—海原断裂带上的左旋走滑运动为主。

5 结论

本文利用 2015—2021 年青藏高原东北缘地区 GPS 速度场结果, 获取祁连—海原断裂带现今滑动速率, 采用负位错方法反演断裂带闭锁程度及滑动亏损速率, 结合小震分布特征研究 2022 年门源

$M_s6.9$ 地震震前特征, 对断裂带各段未来的地震危险性进行分析, 并且对区域地壳变形特征进行探讨, 取得了如下结论:

(1) 在 2022 年门源 $M_s6.9$ 地震前, 冷龙岭断裂的闭锁程度较高, 并且闭锁深度达到 15 km , 与震源深度基本一致, 断裂滑动亏损速率也较大, 小震分布相对较少, 说明断层上累计应变能的速度较快, 而应变能的释放较慢, 这些特征与中强地震的发生密切相关。

(2) 根据反演的结果, 祁连—海原断裂带在金强河断裂、冷龙岭断裂西段和托莱山断裂东段为强闭锁特征, 闭锁深度深, 滑动亏损速率大, 因此这些断层段地震危险性较强, 进一步结合小震分布和 2022 年门源 $M_s6.9$ 地震前闭锁特征, 认为未来需关注托莱山东段的中强地震危险性。

(3) 祁连—海原断裂带现今走滑速率主要为 $3.9 \sim 4.3 \text{ mm/a}$, 说明断裂整体运动一致性较好, 挤压速率从西段的 2.9 mm/a 向东逐渐减小为 1 mm/a , 说明断层挤压速率可能与地壳短缩 (形成盆地和隆起山脉) 有关, 因此认为青藏高原东北缘现今的地壳形变主要以祁连山上的地壳短缩和祁连—海原断裂带上的左旋走滑运动为主。

中国地震局地球物理研究所房立华研究员提供了余震精定位结果, 四川省地震局龙锋高级工程师提供了小震精定位目录, 部分图件使用 GMT 软件绘制, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- 高伟. 2018. 天桥沟—黄羊川断裂晚第四纪活动特征及其构造意义 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 葛伟鹏, 王敏, 沈正康, 等. 2013. 柴达木—祁连山地块内部震间上地壳块体运动特征与变形模式研究 [J]. 地球物理学报, 56(9): 2994–3010.
- 郭鹏, 韩竹军, 姜文亮, 等. 2017. 青藏高原东北缘冷龙岭断裂全新世左旋滑动速率 [J]. 地震地质, 39(2): 323–341.
- 郭鹏. 2019. 北祁连山冷龙岭断裂大震复发行为与危险性研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 郝明, 李煜航, 秦姗姗. 2017. 基于 GPS 数据的海原—六盘山断裂带滑动速率亏损时空分布 [J]. 地震地质, 39(3): 471–484.
- 何文贵, 刘百篪, 吕太乙, 等. 1994. 老虎山断裂带的分段性研究 [J]. 西北地震学报, 16(3): 66–72.
- 何文贵, 袁道阳, 葛伟鹏, 等. 2010. 祁连山活动断裂带中东段冷龙岭断裂滑动速率的精确厘定 [J]. 地震, 30(1): 131–137.
- 李姜一, 周本刚, 李铁明, 等. 2020. 安宁河—则木河断裂带和大凉山

- 断裂带孕震深度研究及其地震危险性[J]. 地球物理学报, 63(10):3669–3682.
- 李强, 江在森, 武艳强, 等. 2014. 利用 GPS 资料反演海原—六盘山断裂带闭锁程度与滑动亏损分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 39(5):575–580.
- 李煜航, 崔笃信, 郝明. 2015. 利用 GPS 数据反演青藏高原东北缘主要活动断裂滑动速率[J]. 中国地质大学学报. 地球科学, 40(10):1767–1780.
- 李振洪, 韩炳权, 刘振江, 等. 2022. InSAR 数据约束下的 2016 年和 2022 年青海门源地震震源参数及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 47(6):887–897.
- 刘雷, 蒋锋云, 朱良玉. 2020. 南北地震带北段现今运动特征及地震活动性分析[J]. 地震研究, 43(4):658–665.
- 刘云华, 张迎峰, 张国宏, 等. 2019. 2016 年 1 月 21 日门源 $M_s 6.4$ 级地震 InSAR 同震形变及发震构造研究[J]. 地球物理学进展, 34(3):896–907.
- 叶茂盛, 孟国杰, 苏小宁. 2018. 青藏高原东北缘主要断裂闭锁特征和滑动亏损研究[J]. 地震, 38(3):1–12.
- 袁道阳, 刘百麓, 吕太乙, 等. 1998. 北祁连山东段活动断裂带的分段性研究[J]. 西北地震学报, 20(4):27–34.
- 袁道阳, 张培震, 刘百麓, 等. 2004. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报, 78(2):270–278.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学:地球科学, 33(增刊1):13–20.
- 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学:地球科学, 43(10):1607–1620.
- 赵静, 江在森, 武艳强, 等. 2012. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究[J]. 地球物理学报, 55(9):2963–2972.
- 赵静, 刘杰, 任金卫, 等. 2019. 汶川、芦山地震前龙门山断裂带地壳形变特征对比分析[J]. 地球学报, 40(1):186–198.
- 赵静, 牛安福, 李强, 等. 2016. 陇西块体周边断层闭锁程度与滑动亏损特征研究[J]. 地震研究, 39(3):351–358.
- 周琳, 季灵运, 李长军, 等. 2022. 利用小震和 GPS 资料分析冷龙岭地区现今变形过程与地震活动[J]. 地震研究, 45(3):416–423.
- Altamimi Z, Rebischung P, Métivier L, *et al.* 2016. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling non-linear station motions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8):6109–6131.
- Cavalié O, Lasserre C, Doin M P, *et al.* 2008. Measurement of interseismic strain across the Haiyuan fault (Gansu, China), by InSAR[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 275(3–4):246–257.
- Daout S, Jolivet R, Lasserre C, *et al.* 2016. Along-strike variations of the partitioning of convergence across the Haiyuan fault system detected by InSAR[J]. *Geophys J Int*, 205(1):536–547.
- Dawers N H, Anders M H, Scholz C H. 1993. Growth of normal faults; displacement length scaling[J]. *Geology*, 21(12):1107–1110.
- Dewey J F, Burke K C A. 1973. Tibetan Variscan and Precambrian reactivation: Products of continental collision[J]. *The J Geol*, 81(6):683–692.
- Duvall A R, Clark M K. 2010. Dissipation of fast strike-slip faulting within and beyond northeastern Tibet[J]. *Geology*, 38(3):223–226.
- Fan L P, Li B R, Liang C, *et al.* 2022. Precise relocation of the 2 after-shock sequences of the 2022 $M_6.9$ Menyuan earthquake[J]. *Earthquake Science*, 35(2):138–145.
- 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*, 112:B08416.
- Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B, *et al.* 1995. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian Shan, and evidence for a major seismic gap, the ‘Tianzhu gap’, on the western Haiyuan fault, Lanzhou (China) [J]. *Geophys J Int*, 120(3):599–645.
- Harkins N, Kirby E, Shi X, *et al.* 2010. Millennial slip rates along the eastern Kunlun fault: implications for the dynamics of intracontinental deformation in Asia[J]. *Lithosphere*, (2):247–266.
- Jolivet R, Lasserre C, Doin M P, *et al.* 2012. Shallow creep on the Haiyuan fault (Lanzhou, China) revealed by SAR interferometry[J]. *J Geophys Res*, 117(B6):137–147.
- Jolivet R, Lasserre C, Doin M P, *et al.* 2013. Spatio-temporal evolution of aseismic slip along the Haiyuan fault, China: implications for fault frictional properties[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 377–378(2013):23–33.
- Li C Y, Zhang P Z, Yin J H, *et al.* 2009. Late Quaternary left-lateral slip rate of the Haiyuan Fault, northeastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Tectonics*, 28(5):TC5010.
- Li Y C, Shan X J, Qu C Y, *et al.* 2016. Fault locking and slip rate deficit of the Haiyuan–Liupanshan fault zone in the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geodynamics*, 102:47–57.
- Loveless J P, Meade B J. 2010. Geodetic imaging of plate motions, slip rates, and partitioning of deformation in Japan[J]. *J Geophys Res*, 115(B2):B02410.
- McCaffrey R, Qamar A I, King R W, *et al.* 2007. Plate locking, block rotation and crustal deformation in the Pacific Northwest[J]. *Geophysical Journal International*, 169:1315–1340.
- McCaffrey R. 2002. Crustal block rotation and plate coupling[C]//Plate Boundary Zones. Washington D C: AGU, 101–122.
- McCaffrey R. 2005. Block kinematics of the Pacific–North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data[J]. *J Geophys Res*, 110(B7):1–25.
- McCaffrey R. 2009. Time-dependent inversion of three-component continuous GPS for steady and transient sources in northern Cascadia[J]. *Geophys Res Lett*, 36:L07304.
- Molnar P, Stock J M. 2009. Slowing of India’s convergence with Eurasia since 20 Ma and its implications for Tibetan mantle dynamics[J]. *Tectonics*, 28(3):TC3001. 1–TC3001. 11.
- Métivier F, Gaudemer Y, Tapponnier P, *et al.* 1998. Northeastward growth of the Tibet plateau deduced from balanced reconstruction of the two

- areas; The Qaidam and Hexi corridor basins, China [J]. *Tectonics*, 17(6):823–842.
- Peltzer G, Tapponnier P. 1988. Formation and evolution of strike slip faults, rifts, and basins during the India–Asia collision: an experimental approach [J]. *Journal of Geophysical Research*, 93 (B12): 15085–15117.
- Schmittbuhl J, Karabulut H, Lengline O, *et al.* 2015. Seismicity distribution and locking depth along the Main Marmara Fault, Turkey [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(3):954–965.
- Tapponnier P, Molnar P. 1976. Slip–line field theory and largescale continental tectonics [J]. *Nature*, 264(5584):319–324.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, *et al.* 2001. Geology–stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 294(5547):1671–1677.
- Thatcher W. 2007. Microplate model for the present–day deformation of Tibet [J]. *J Geophys Res*, 112(B1):B01401.
- Wallace L M, Stevens C, Silver E, *et al.* 2004. GPS and seismological constraints on active tectonics and arc–continent collision in Papua New Guinea; Implications for mechanics of microplate rotations in a plate boundary zone [J]. *J Geology Res*, 109(B5):B05404.
- Wang H, Liu Z J, Ng H M, *et al.* 2017. Sentinel–1 observations of the 2016 Menyuan earthquake: A buried reverse event linked to the left–lateral Haiyuan fault [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 61:14–21.
- Wang K L, Wells R, Mazzotti S, *et al.* 2003. A revised dislocation model of inter seismic deformation of the Cascadia subduction zone [J]. *J Geology Res*, 108(B1):2026.
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present–day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2):e2019JB018774.
- Wang W, Wang D J, Zhao B, *et al.* 2014. Horizontal crustal deformation in Chinese Mainland analyzed by CMONOC GPS data from 2009–2013 [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 5(3):41–45.
- Yuan D Y, Zhang P Z, Ge W P, *et al.* 2008. Late Quaternary strike–slip features along the western segment of Haiyuan–Qilianshan Fault, NE Tibetan plateau [C]//American Geophysical Union, Fall Meeting 2008. San Francisco, CA:AGU.
- Zhang P Z, Gan W J, Shen Z K, *et al.* 2005. A coupling model of rigid–block movement and continuous deformation: Patterns of the present–day deformation of China’s continent and its vicinity [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6):748–756.
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, *et al.* 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data [J]. *Geology*, 32(9):809–812.
- Zhang Z Q, McCaffrey R, Zhang P Z. 2013. Relative motion across the eastern Tibetan plateau: Contributions from faulting, internal strain and rotation rates [J]. *Tectonophysics*, 584:240–256.
- Zhao B, Huang Y, Zhang C H, *et al.* 2015. Crustal deformation on the Chinese mainland during 1998–2014 based on GPS data [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 6(1):7–15.
- Zheng W J, Zhang P Z, He W G, *et al.* 2013. Transformation of displacement between strike–slip and crustal shortening in the northern margin of the Tibetan Plateau: evidence from decadal GPS measurements and late Quaternary slip rates on faults [J]. *Tectonophysics*, 584(1):267–280.

Study on the Locking Degree of the Qilian-Haiyuan Fault Zone before the 2022 Menyuan $M_s6.9$ Earthquake and Its Seismic Risk

LIU Lei, ZHU Liangyu, JI Lingyun, ZHUANG Wenquan, LIU Chuanjin

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

Abstract

By using GPS velocity during 2015 – 2021 and the negative dislocation program, we inverted the locking degree and the slip rate deficit of the Qilian-Haiyuan Fault Zone. Referring to the distribution of small earthquakes in the Fault Zone, we studied the seismic anomalies before the 2022 Menyuan $M_s6.9$ Earthquake, and analyzed the seismic risk of each segment of the Fault Zone. The regional crustal deformation was discussed according to the fault slip rate obtained by the across-fault GPS profile. The results showed that before the Menyuan Earthquake, the seismogenic fault, the Lenglongling Fault, was firmly locked; the locking depth was 15 km, and the slip rate deficit was large, and there were a few small earthquakes. These characteristics were closely related to the medium- and strong-earthquake like the Menyuan Earthquake. The Jinqianghe Fault, the Lenglongling Fault and the eastern segment of the Tuolaishan Fault had deep locking depth, high locking degree, high slip rate deficits, and high seismic risk. Referring to the small-earthquake activity and the locking characteristics of the Lenglongling Fault before the Menyuan Earthquake, we conclude that the medium- and strong-earthquake may occur in the eastern segment of the Tuolaishan Fault in future. In addition, the strike-slip rate of the Qilian-Haiyuan Fault Zone is between 3.9 – 4.3 mm/a, and the overall movement of the Fault is consistent. The compression rate (2.9 mm/a) in the western segment gradually decreased to 1 mm/a in the eastern segment. Therefore, the present crustal deformation in the northeastern margin of the Tibetan Plateau is mainly illustrated by the shortening of the Crust in the Mt. Qilianshan area and by the left-lateral, strike-slip of the Qilian-Haiyuan Fault Zone.

Keywords: the Qilian-Haiyuan Fault Zone; the Menyuan $M_s6.9$ Earthquake; fault locking; seismic risk; crustal deformation