

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, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0017.

Zhou L, Ji L Y, Li Z J, et al. 2022. Study on current deformation process and seismicity of Lenglongling area based on small earthquakes and GPS data[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(3):416-423, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0017.

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*

周琳, 季灵运, 李长军, 李君

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 利用小震资料对冷龙岭地区主要断裂的几何结构进行了研究, 结合利用震源机制解反演的区域构造应力场和利用 GPS 资料计算的应变率场, 分析探讨冷龙岭地区的地壳变形特征。结果表明: ①冷龙岭地区的主压应力方向为 NE 向, 与 GPS 主压应变率方向一致。应变率场峰值位于冷龙岭断裂以北的民乐—大马营断裂附近, 然而该区域小震活动弱。②皇城—双塔断裂西段和东段地震基本上发生在 15 km 深度以内, 倾向 SW, 浅部倾角较大, 随着深度增加倾角逐渐变缓; 皇城—双塔断裂中段存在一个近乎垂直的地震条带, 震源深度明显大于其西段和东段。③冷龙岭断裂以左旋走滑运动为主, 断裂南侧存在明显的挤压缩短变形。平行于冷龙岭断裂的 GPS 速度分量减小, 呈现出明显的震间“S”型变形特征。利用反正切法计算得到该断裂的滑动速率和闭锁深度分别为 3.9 mm/a 和 7.9 km, 估算得到该断裂存在 $M_0 = 7.21 \times 10^{19}$ N·m 的地震矩亏损, 表明冷龙岭断裂未来存在发生 $M_w 7.2$ 地震的危险性。

关键词: 地震重定位; GPS; 滑动速率; 冷龙岭地区; 门源地震

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2022)03-0416-08

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0017

0 引言

冷龙岭地区位于青藏高原东北缘的构造转换枢纽部位, 地处高海拔偏远地区, 地质与气候条件恶劣, 同周围具有强震活动背景的古浪断裂、海原断裂、金强河断裂以及老虎山断裂等相比, 目前有关冷龙岭断裂带的研究相对较少, 还不够深入。前人从历史地震、长期滑动速率和地震活动性等方面做了分析和讨论, 结果表明: 该区历史上曾经发生 3 次古地震, 最近的 7.2 级古地震发生于 1540 年 (何文贵等, 2001, 姜文亮, 2018), 但对于冷龙岭断裂带全新世活动性质的认识还存

在不足。前人对冷龙岭断裂带晚第四纪以来滑动速率存在较大争议, 研究结果主要为 2~19 mm/a (Gaudemer *et al.*, 1995; Lasserre *et al.*, 2002; 何文贵等, 2000, 2010; Zheng *et al.*, 2013; 郭鹏等, 2017), 但都认为冷龙岭断裂是祁连—海原断裂带上滑动速率最大的断裂。1986 年和 2016 年在冷龙岭断裂带北侧先后发生 2 次门源 $M_s 6.4$ 地震, 但地震的震源机制解性质与冷龙岭断裂走滑运动性质有所差异, 推断可能是由冷龙岭北侧的弧形次生断裂引起的。未来一段时间该地区仍然会是中强地震孕育的场所 (郭鹏, 2019; 刘云华等, 2019)。

近年来, 小震资料越来越多地被应用到活动断裂空间展布、深浅构造分析及动力学机制研究

* 收稿日期: 2021-09-24.

基金项目: 陕西省自然科学基金计划 (2022JQ-235、2021JM-600), 国家自然科学基金项目 (41874017) 和震情跟踪定向工作任务 (2021010503) 联合资助。

第一作者简介: 周琳 (1987-), 工程师, 主要研究方向为地震定位和形变资料处理与分析. E-mail: 429zl@163.com.

领域(房立华等, 2013a, b)。震源深度剖面的延伸状态和分布状态在一定程度上反映了活动断裂的深部产状。震源机制解是深刻了解震源断层动力学特征、构造应力场状态的有效途径(庄文泉等, 2021)。GPS地表应变率场与强震的发生存在一定关系(江在森等, 2006), 应变可以直接反映地壳的相对运动与变形。

本文通过小震剖面来刻画冷龙岭地区多条断裂的空间展布形态和深部产状, 结合震源机制解信息揭示的区域应力场和GPS资料揭示的应变率场, 分析探讨冷龙岭地区主要断裂的几何结构和现今地壳变形特征, 从而更好地认识冷龙岭地区在青藏高原东北缘构造变形中的转换调节机制和意义, 为研究青藏高原东北缘的构造变形模式、地震破裂行为以及地震危险性提供基础资料。

1 研究方法 with 资料选取

本文使用Waldhauser和Ellsworth(2000)提出的双差定位方法对2009年1月—2019年12月冷龙岭地区 $M \geq 1.0$ 的中小地震进行了重新定位。在双差定位方法中, 使用两个地震的走时差的观测值与理论值的残差(“双差”)确定其相对位置, 可表示为:

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j \quad (1)$$

其中双差 dr_k^{ij} 可表示为

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (2)$$

式中: dr_k^{ij} 代表第 i 个地震至第 k 个地震台的地震波的走时 t_k^i 与第 j 个地震至第 k 个地震台的地震波的走时 t_k^j 之差的观测值与理论计算值的残差; $\Delta m = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta t^i)$ 是当前地震的震源参数的改变量。将所有地震($i, j = 1, 2, \dots, N$), 所有台站($k = 1, 2, \dots$), 用上述定义表述为矩阵形式表示, 得到下列方程式:

$$WGm = Wd \quad (3)$$

式中: G 是一个 $M \times 4N$ 的偏微商矩阵, M 是双差观测的数目, N 是地震数; d 是双差资料矢量; m 是含有待定震源参数的变化量; W 是一个用来对

每个方程加权的对角线矩阵。通过迭代尽量减小残差, 最终得到震源位置参数。本文双差定位使用的速度模型参考了冷龙岭断裂及邻区的人工地震测深和地震层析成像结果(张元生等, 2004; Yang *et al*, 2012; 黄兴富, 2017), 最终获得了冷龙岭地区5450个地震的重新定位结果。

震源机制解含有大量的震源应力场和震源破裂错动信息, 是了解震源断层动力学特征、震源区构造应力场的有效途径。本文收集冷龙岭断裂及邻区的 $3.0 \leq M_s \leq 4.2$ 地震震源机制解结果21个(Pan *et al*, 2020)。由震源机制解可以计算地震的应力张量, 根据滑动拟合基本原理, 假设断层滑动方向与应力场在断层面上的剪切应力方向一致, 由断层滑动数据可以求解应力张量。MSATSI软件包(Patricia *et al*, 2014)采用线性反演技术, 由震源机制数据计算区域应力张量。本文将21个中强地震的震源机制解作为输入数据, 将研究区域划分为2段, 采用MSATSI软件反演了每个网格内的应力张量, 最终得到了冷龙岭地区的震源区应力场。

GPS数据主要来自中国大陆地壳运动观测网络和网络工程项目1999—2019年的观测资料, 此外还有国家GPS大地控制网络和甘肃省测绘局自建站2014—2018年的GPS观测数据。数据解算采用GAMIT/GLOBK软件进行: ①利用GAMIT软件解算获取GPS区域站和70个IGS参考站的点位坐标、卫星轨道等参数的单日松弛解, 处理模型采用双频消电离层线性组合, 并考虑了海洋潮汐负荷及对流层天顶延迟; ②对ITRF2014框架下的GPS速度进行拟合, 利用线性函数和加权最小二乘法得到修正后的GPS位置时间序列; ③利用Kreemer等(2018)提出的基于中位值滤波的应变率稳健估计方法(Median Estimation of Local Deformation, 简称MELD)计算了该区域的应变率场。

2 研究结果

2.1 冷龙岭地区的断裂深部结构

图1为冷龙岭地区重定位后的中小地震震中分布和沿不同投影剖面线的震源深度分布。从图1a可以看出, 经双差定位后的地震集中、紧凑地分布在断裂带两侧区域。民乐—大马营断裂是一条

以挤压逆冲为主的断裂,全新世以来相对稳定(国家地震局地质研究所,1993;陈文彬,2003),近十年来该断裂几乎没有地震发生,地震空区现象明显。

冷龙岭断裂位于北祁连褶皱带内,其北侧为河西走廊过渡带,其南侧为中祁连隆起带,全长127 km,倾向NE向,倾角 50° (何文贵等,2010)。该断裂1540年发生7.2级地震、1986年发生6.4级地震。2016年门源 $M_s6.4$ 地震的余震主要分布于冷龙岭断裂北侧。由图1b可以看出,门源地震余震震源深度呈连续状态展布在5~15 km,倾向SW,这与梁姗姗等(2017)研究结果相近,与大地电磁揭示的冷龙岭断裂系统下方5 km深度开始出现SW向低阻体并向下延伸的结果对应(赵凌强等,2019)。

皇城—双塔断裂是祁连山东段重要的活动断裂之一,全长141 km,倾向SW,在该断裂的东、西两侧,地震活动呈现截然不同的特征。断裂西段以逆冲运动为主,东段以局部拉张运动为

主,中段为高角度运动性质以右旋为主兼具正断性质。断裂东段为逆倾滑性质,属全新世活动段,垂直滑动速率为 $0.54 \sim 0.8 \text{ mm/a}$ (陈文彬,2003),中段全新世以来有过明显活动,西段自晚更新世晚期以来活动已不明显。震中分布显示,重新定位后中小震主要分布在冷龙岭断裂、天桥沟—黄羊川断裂和武威—天祝断裂的包络区内,沿皇城—双塔断裂两侧分布,形成了一个NW走向的地震条带。皇城—双塔断裂西段(图1b)和东段(图1d)地震震源深度基本在15 km以内,倾向SW,浅部倾角较大,倾角随着震源深度增加逐渐变缓。皇城—双塔断裂中段存在一个高角度地震条带(图1c),震源深度明显大于西段和东段。

门源断裂是门源盆地与北侧冷龙岭山地的边界断裂,晚更新世晚期以来该断裂活动性质以左旋走滑为主,垂直活动不明显(马保起,李德文,2008)。本文中小地震重定位结果显示,近十年来门源断裂地震分布较少。

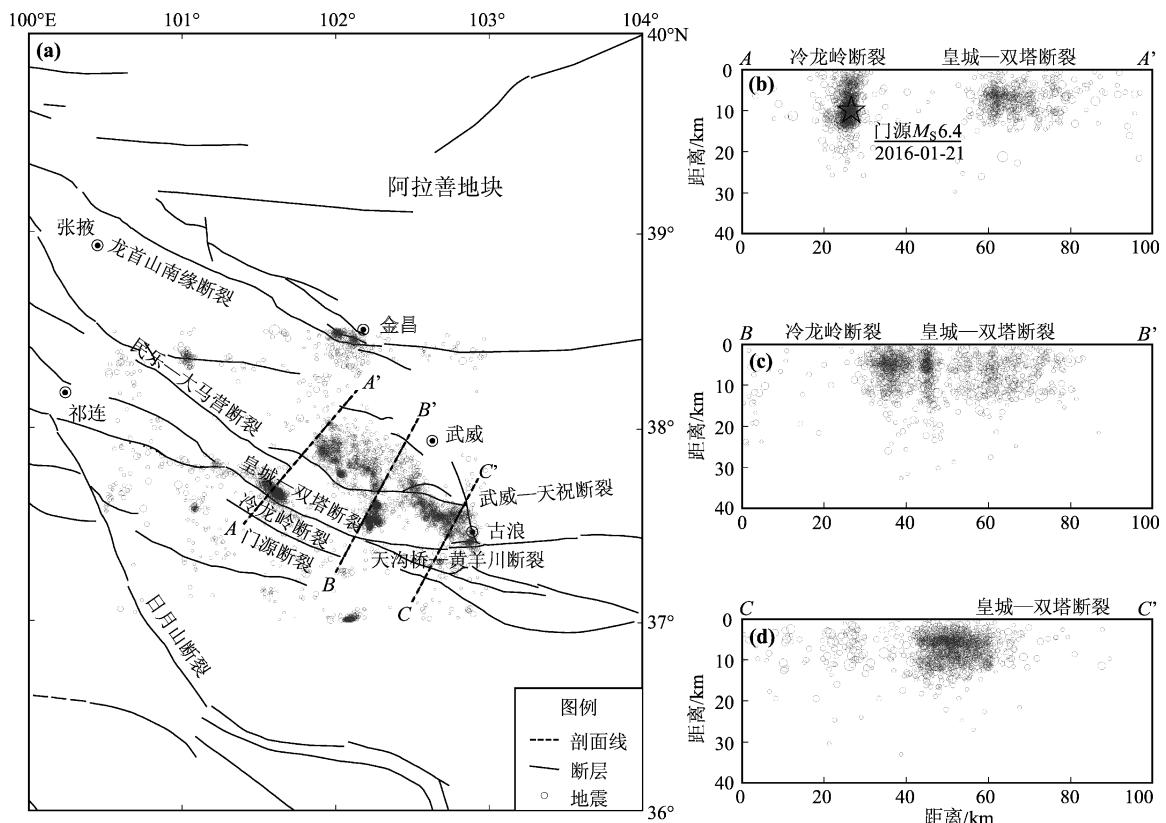


图1 重定位后震中分布 (a) 及沿不同投影剖面线的震源深度分布 (b)、(c)、(d)

Fig. 1 Epicenter distribution after relocation (a) and the focal depth distribution along projection profiles A-A' (b), B-B' (c), and C-C' (d)

2.2 冷龙岭地区的应变率场和构造应力场

图2是冷龙岭地区相对于鄂尔多斯块体的GPS速度场。由图中可以看出,研究区整体相对于鄂尔多斯块体往NE向运动,跨过冷龙岭断裂带向北, GPS速度矢量减小,且运动方向转为NNW向。图3是冷龙岭地区主应变率和剪应变率、

面应变率和主压应力分布图,图3b中背景色负值为挤压,正值为拉张。从图3a可以看出,冷龙岭地区的主应变率为NE向的挤压,与主压应力方向基本一致(图3b),自西向东顺时针旋转。冷龙岭地区剪应变率为 $(18 \sim 22) \times 10^{-9}/a$,峰值处位于冷龙岭断裂北侧、皇城—双塔断裂以西

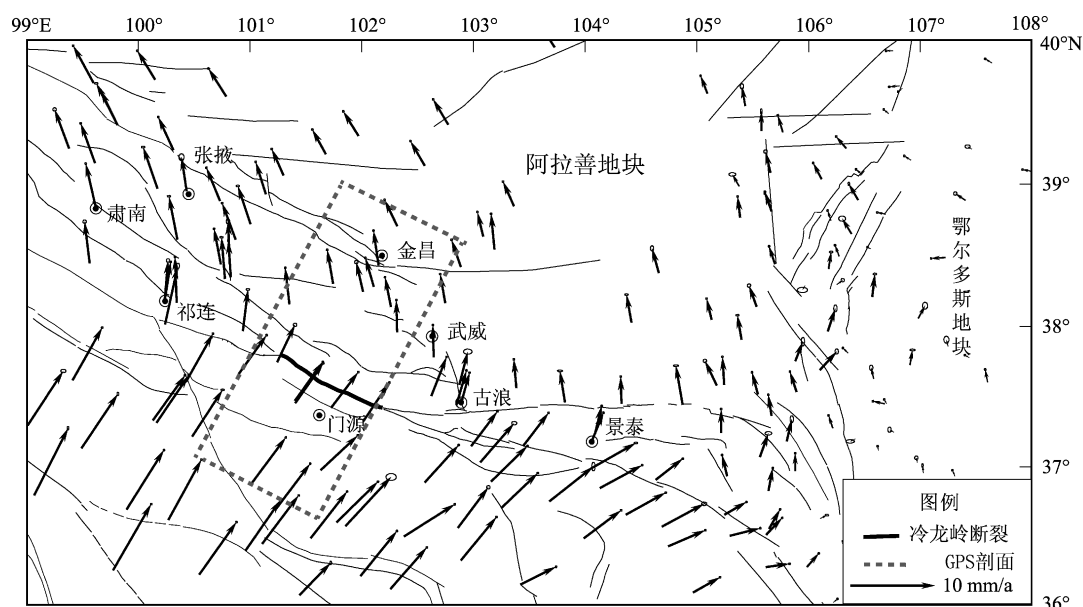


图2 冷龙岭地区GPS速度场

Fig. 2 GPS velocity field in Lenglongling area

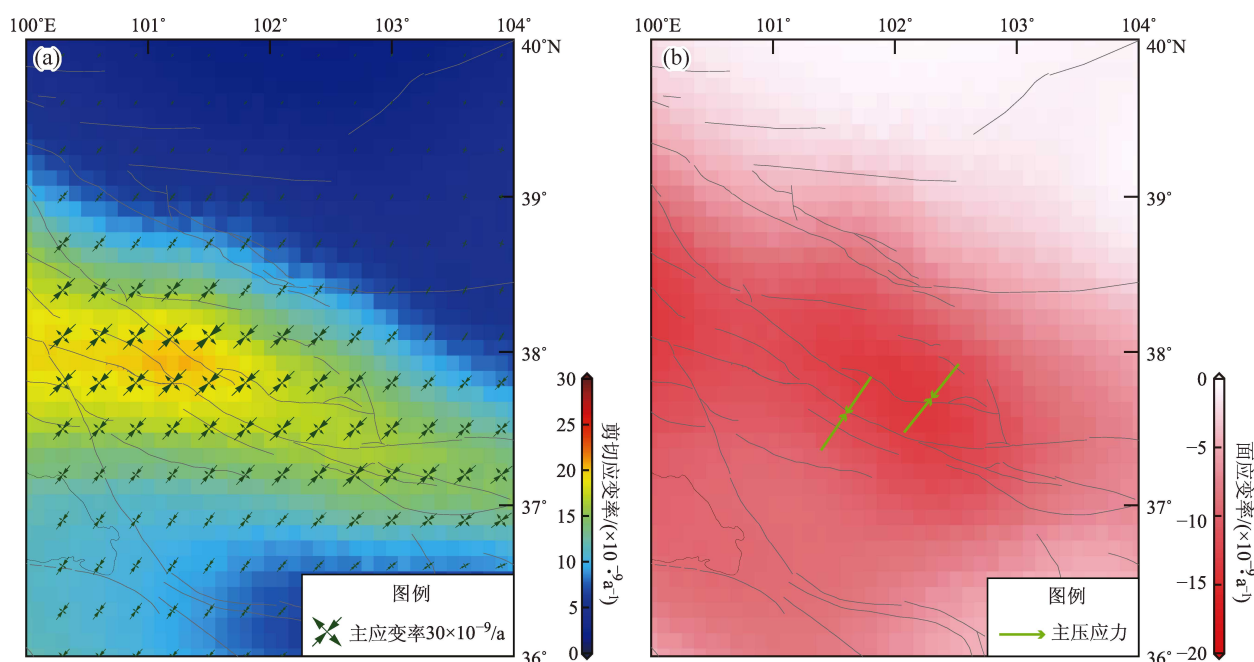


图3 冷龙岭地区主应变率、剪应变率 (a) 以及面应变率、主压应力图 (b)

Fig. 3 Plots of principal strain rate and shear strain rate (a), plane strain rate and principal compressive stress (b)

以及民乐—大马营断裂东段,该区域处于各断裂的交汇区域,断裂活动性强。冷龙岭地区面应变率为 $(-20 \sim -10) \times 10^{-9}/a$,呈现出明显的挤压特征,主应变率表现为 NE—SW 向挤压和 NW—SE 向拉张。

3 讨论

3.1 门源 2 次地震震区构造特征

1986 年 8 月 26 日和 2016 年 1 月 21 日在冷龙岭断裂北侧发生了 2 次 $M_s 6.4$ 门源地震,2 次地震的震中直线距离仅 15 km 左右。1986 年门源 $M_s 6.4$ 地震震源机制解反映出断层具有明显的拉张倾滑分量(徐纪人等,1986),与区域整体近 NE 向的挤压动力环境相悖。由于当时观测条件的限制,这次地震震源机制解的结果不尽相同,兰州地震研究所科考报告给出的震源机制解为 NW 向逆倾滑破裂;而 2016 年门源 $M_s 6.4$ 地震的震源机制解表明发震断层走向为 NW—NNW 向,是纯逆冲型地震。2 次门源地震皆发生在冷龙岭断裂带西北侧的次级断层上:1986 年的地震发生在分支断裂的西段,2016 年的地震发生在分支断裂的中段,破裂逐步向东传播,2 次地震均没有产生大规模的地表破裂。这 2 次地震的发震断层走向与断层破裂所揭示的断层力学特征对比非常明显,且都区别于冷龙岭断裂带的左旋走滑运动性质。

为了更深入了解这 2 次地震发震构造的区别,还需要结合深部地球物理学资料。冷龙岭地区南北两侧存在明显的重力梯度异常现象(姜文亮,2018),北部的阿拉善块体和东部的鄂尔多斯块体表现为大范围重力高异常,这反映了莫霍面埋藏较浅、岩石圈密度较高,这两个地块为相对完整致密的刚性块体。青藏高原东北缘具有大范围重力低异常特征,这反映了莫霍面较深、岩石圈密度较低。冷龙岭地区在青藏高原 NE 向挤压应力下,地壳发生强烈缩短、增厚与褶曲变形。李晓姝(2020)通过多尺度层析成像反演技术获取了祁连山地区地壳及上地幔顶部的速度结构,发现冷龙岭地区中上地壳速度结构存在强烈的不均一性和差异性。在 $102^\circ E$ 附近地区,10 km 深度速度切片显示出明显的东西两侧的速度差异带;20 km 深度速度切片显示,冷龙岭地区

相对于南侧地区存在明显的高速异常。赵凌强等(2019)利用大地电磁技术获取了冷龙岭断裂及邻区的二维电性结构图,显示冷龙岭断裂存在明显的高角度 SW 倾向电性分界带特征。2016 年门源 $M_s 6.4$ 地震震源区下存在较宽的 SW 向低阻体,断裂南部为中低阻混合构造带。冷龙岭断裂带及北部祁连山区域均表现为完整的不易变形的高阻结构。

已有的地质和地球物理研究结果均表明冷龙岭地区南北两侧存在显著的不均一性和差异性。冷龙岭地区多条断裂交汇错杂,在青藏高原东北缘 NE 向挤压作用下,这些断裂同时受到北侧完整的高阻结构的阻挡作用,地表浅层断裂与地下深处的剪切走滑活动断裂之间有密切关系,断层不同构造部位的应力应变也显著不同,再加上该区域南北两侧中下地壳深部构造结构的不均一性和差异性,促使冷龙岭断裂北侧区域中下地壳介质处于一种强烈的挤压变形构造环境中,这种环境促进了冷龙岭断裂北侧区域地震的蠕动、滑移和发生。这种动力学环境可能是门源 $M_s 6.4$ 地震发生的主要原因。

本文中小地震重定位结果显示,近十年来,民乐—大马营断裂几乎没有地震分布(图 1a),地震空区现象明显,而地质研究认为民乐—大马营断裂全新世以来相对稳定(国家地震局地质研究所,1993)。皇城—双塔断裂西段和东段地震基本上发生在地下 15 km 以内,倾向 SW,浅部倾角较大,随着震源深度增加倾角逐渐变缓,而断裂中段存在一个近乎垂直的地震条带,震源深度明显大于西段和东段。皇城—双塔断裂构造位置特殊,断裂交汇错杂,南侧为逆—走滑性质的冷龙岭断裂,东侧为挤压—逆冲兼走滑性质的武威—天祝隐伏断裂。在青藏块体 NE 向推挤的动力作用下,同时受到周围不同构造特征断裂和深部介质结构差异的影响,这可能是皇城—双塔断裂西段、东段和中段地震分布特征不同的原因。

3.2 冷龙岭断裂的滑动速率

冷龙岭断裂位于祁连—海原断裂带中西段,对于其滑动速率一直存在较大的争议,已有研究结果给出的滑动速率为 $2 \sim 19 \text{ mm}/a$ (Gaudemer *et al.*, 1995; Lasserre *et al.*, 2002; 何文贵等, 2000, 2010; Zheng *et al.*, 2013; 郭鹏等,

2017)。本文利用反正切法计算获得冷龙岭断裂现今滑动速率约为 3.9 mm/a (图4), 与 Zheng 等 (2017) 研究结果相近。此外, 冷龙岭断裂的闭锁深度约为 7.9 km (图4), 该断裂的最新一

期事件的离逝时间为 498 a (Guo *et al.*, 2019), 估算得到该断裂存在 $M_0 = 7.21 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ 的地震矩亏损, 表明冷龙岭断裂未来存在发生 $M_w 7.2$ 地震的危险性。

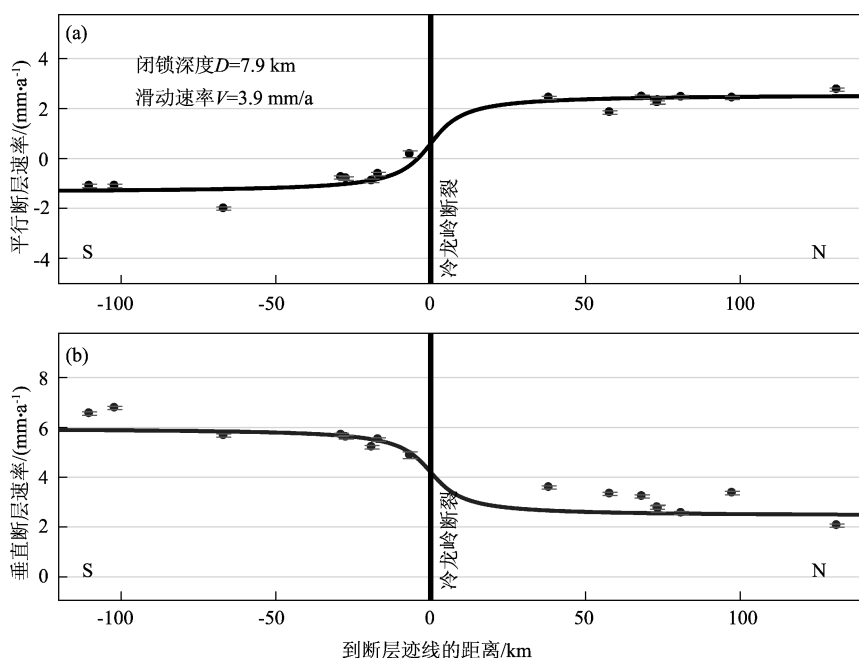


图4 冷龙岭断裂 GPS 速度剖面图

Fig. 4 GPS velocity profiles across the Lenglongling Fault

4 结论

本文通过分析冷龙岭地区的中小地震重定位结果以及区域构造应力场和应变率场等结果, 得到如下结论:

(1) 冷龙岭地区相对于鄂尔多斯块体整体往 NE 向运动, 剪应变率为 $(18 \sim 22) \times 10^{-9}/\text{a}$, 峰值处位于冷龙岭断裂北侧、皇城—双塔断裂以西及民乐—大马营断裂东段, 该区域处于各断裂的交汇部位, 断裂活动性强。然而, 该区域近十年来小震活动弱, 地震空区现象明显。冷龙岭地区的面应变率为 $(-20 \sim -10) \times 10^{-9}/\text{a}$, 呈现出明显的挤压特征, 主应变率表现为 NE—SW 向挤压和 NW—SE 向拉张。冷龙岭地区的主压应力方向为 NE 向, 与主应变率揭示的主压应变率方向一致。

(2) 重定位后皇城—双塔断裂的小震分布自西向东存在明显不同: 西段的小震活动主要集中在断裂北侧, 而中段和东段的小震主要集中在断

裂的南侧。皇城—双塔断裂西段和东段地震基本上发生在 15 km 深度内, 倾向 SW, 浅部倾角较大。随着震源深度增加倾角逐渐变缓, 皇城—双塔断裂中段存在一个近乎垂直的地震条带, 震源深度明显大于西段和东段。受青藏块体 NE 向推挤的动力作用, 同时还受到周围不同构造特征断裂和深部介质结构差异的影响, 这可能是皇城—双塔断裂西段、东段和中段地震分布特征不同的原因。

(3) 冷龙岭断裂主要表现为左旋走滑运动, 断裂南侧存在明显的地壳缩短。平行于断层的 GPS 速度分量呈现出明显的震间“S”型变形特征, 反映了该区域存在明显的应变积累。GPS 速度剖面显示冷龙岭断裂现今的滑动速率约为 3.9 mm/a , 断裂的闭锁深度约为 7.9 km , 估算得到该断裂存在 $M_0 = 7.21 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$ 的地震矩亏损, 表明冷龙岭断裂未来存在发生 $M_w 7.2$ 地震的危险性。

感谢中国地震局地震预测研究所潘正洋博士提供震源机制解数据。

参考文献:

- 陈文彬. 2003. 河西走廊及邻近地区最新构造变形基本特征及构造成因分析[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 房立华, 吴建平, 王长在, 等. 2013a. 2012 年新疆新源 $M_s6.6$ 地震余震序列精定位研究[J]. 中国科学: 地球科学, 43(12): 1929–1933.
- 房立华, 吴建平, 王未来, 等. 2013b. 四川芦山 $M_s7.0$ 级地震及其余震序列重定位[J]. 科学通报, 58(20): 1901–1909.
- 郭鹏, 韩竹军, 安艳芬, 等. 2017. 冷龙岭断裂系活动性与 2016 年门源 6.4 级地震构造研究[J]. 中国科学: 地球科学, 47(5): 113–126.
- 郭鹏. 2019. 北祁连山冷龙岭断裂大震复发行为已危险性研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 国家地震局地质研究所. 1993. 祁连山—河西走廊活动断裂系[M]. 北京: 地震出版社.
- 何文贵, 刘白簃, 葛伟鹏, 等. 2010. 祁连山活动断裂带中段冷龙岭断裂滑动速率的精确厘定[J]. 地震, 30(1): 131–137.
- 何文贵, 刘白簃, 袁道阳, 等. 2000. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究[J]. 西北地震学报, 22(1): 90–97.
- 何文贵, 刘白簃, 袁道阳. 2001. 冷龙岭断裂古地震初步研究[M]//中国地震局科技发展司《活动断裂研究》编委会. 活动断裂研究(8): 理论与应用. 北京: 地震出版社.
- 黄兴富. 2017. 青藏高原北缘构造转换带(祁连山)地壳尺度构造变形研究[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 江在森, 杨国华, 王敏, 等. 2006. 中国大陆地壳运动与强震关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 26(3): 1–9.
- 姜文亮. 2018. 冷龙岭断裂带全新世破裂模式、大震复发特征研究及其区域构造意义[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 李晓姝. 2020. 青藏高原东北缘地壳上地幔 P 波多尺度层析成像研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 梁姗姗, 雷建设, 徐志国, 等. 2017. 2016 年 1 月 21 日青海门源 $M_s6.4$ 余震序列重定位和主震震源机制解[J]. 地球物理学报, 60(6): 2091–2103.
- 刘云华, 张迎峰, 张国宏, 等. 2019. 2016 年 1 月 21 日门源 $M_s6.4$ 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): 50–61.
- 马保起, 李德文. 2008. 祁连山中段门源盆地新构造运动的阶段划分[J]. 地质力学学报, 14(3): 201–211.
- 徐纪人, 姚立珣, 汪进. 1986. 1986 年 8 月 26 日门源 6.4 级地震及其强余震的震源机制解[J]. 西北地震学报, 8(4): 84–86.
- 张元生, 周民都, 荣代璐, 等. 2004. 祁连山中东段地区三维速度结构研究[J]. 地震学报, 26(3): 247–255.
- 赵凌强, 詹艳, 孙翔宇, 等. 2019. 利用大地电磁技术揭示 2016 年 1 月 21 日青海门源 $M_s6.4$ 地震隐伏地震构造和孕震环境[J]. 地球物理学报, 62(6): 2088–2100.
- 庄文泉, 李君, 郝明, 等. 2021. 利用加密 GNSS 数据和震源机制解分析川滇块体南部现今地壳活动特性[J]. 大地测量与地球动力学, 41(7): 732–746.
- 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, Gansu(China) [J]. *Geophysical Journal International*, 120(3): 599–645.
- Guo P, Han Z J, Mao Z B, *et al.* 2019. Paleoearthquakes and rupture behavior of the Lenglongling fault: Implications for seismic hazards of the northeastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, 124(2): 1520–1543.
- Kreemer C, Hammond W C, Blewitt G. 2018. A robust estimation of the 3–D Intraplate deformation of the North American Plate from GPS [J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 123(5): 4388–4412.
- Lasserre C, Gaudemer Y, Tapponnier P, *et al.* 2002. Fast late Pleistocene slip rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai, China [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 107(B11): 2276–2290.
- Pan Z, He J, Shao Z. 2020. Spatial variation in the present – day stress field and tectonic regime of Northeast Tibet from moment tensor solutions of local earthquake data [J]. *Geophysical Journal International*, 221(1): 478–491.
- Patricia M G, Kwiatek G, Sone H, *et al.* 2014. Spatiotemporal changes, faulting regimes, and source parameters of induced seismic activity: A case study from the geysers geothermal field [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 119(11): 8378–8396.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A Double – difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California [J]. *Bull Seism Soc Am*, 90(6): 1353–1368.
- Yang Y, Ritzwoller M H, Zheng Y, *et al.* 2012. A synoptic view of the distribution and connectivity of the mid – crustal low velocity zone beneath Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 117: B04303.
- 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: 267–280.

Study on Current Deformation Process and Seismicity of Lenglongling Area Based on Small Earthquakes and GPS Data

ZHOU Lin, JI Lingyun, LI Zhangjun, LI Jun

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

Abstract

In this paper, the geometric structures of major faults in Lenglongling area are studied by using the data of small earthquakes, and the crustal deformation characteristics of Lenglongling area are analyzed by combining the regional tectonic stress field inverted by using focal mechanism solution with the strain rate field calculated by GPS data. The results show that the main compressive stress in Lenglongling area is in NE direction, which is consistent with the direction of GPS main compressive strain rate. The peak value of strain rate field appears near the Minle-Damaying Fault to the north of the Lenglongling Fault. However, the activity of small earthquakes in this area is weak. The earthquakes in the western and eastern sections of the Huangcheng-Shuangta Fault occurred in the range of 15 km deep, with a tendency of SW and a large dip angle in the shallow part of the Crust, which getting gentler and gentler with the increase of depth. There is a seismic band in the middle section of the Huangcheng-Shuangta Fault, which is nearly perpendicular to this section, and the focal depth in this section is obviously larger than the ones in the western and eastern sections. The Lenglongling Fault is dominated by sinistral strike-slip movement and there is obvious compressional deformation on the south side of the fault. The GPS velocity component parallel to the Lenglongling Fault decreases and displays an obvious S-shaped deformation among the earthquakes. The slip rate 3.9 mm/yr and the latching depth 7.9 km of the Fault are respectively calculated by using the arctangent method. The Fault is estimated to have a seismic moment deficit of $M_0 = 7.21 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$. This indicates that there is a risk of $M_w 7.2$ earthquake in the future.

Keywords: earthquake relocation; GPS; slip rate; Lenglongling area; the Menyuan earthquake