

南北地震带北段现今运动特征及地震活动性分析^{*}

刘雷, 蒋锋云, 朱良玉

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 利用1991—2015年GPS数据, 研究南北地震带北段现今地壳水平速度场特征, 根据区域地壳主应变率、面膨胀率及最大剪应变率的空间变化以及小震分布特征, 对研究区主要断层的活动性及地震危险性进行综合分析。结果表明: ①区域主应变率和最大剪应变率高值区分布在海原断裂弧形构造带附近, 香山—天景山断裂和六盘山断裂中南段应变率较低, 结合历史地震及离逝时间, 认为其可能处于孕震晚期; ②海原断裂现今左旋走滑速率为 (4 ± 0.5) mm/a, 香山—天景山断裂、烟筒山断裂和牛首山断裂活动性较弱, 总体显示为逆冲兼走滑的性质; ③震源深度剖面显示老虎山断裂、海原断裂南段小震分布较密集而均匀, 海原断裂北西段小震较少, 香山—天景山东南段存在一个小震稀疏段, 断层可能已经闭锁, 未来应重点关注。

关键词: 南北地震带北段; 应变率场; GPS速度场; 地震危险性

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)04-0658-08

0 引言

南北地震带是中国东、西部构造域的一条重要分界线, 地处中国大陆中部, 北起鄂尔多斯地块西缘构造带, 经过秦岭构造带、沿着龙门山构造带一直向南延伸, 长达2 000 km (赵晓辰等, 2016)。这条地震带上, 集中了中国有历史记录以来近一半的8级以上大地震, 2008年汶川8.0级地震就发生在这个地震带上。而南北地震带北部位于鄂尔多斯地块、阿拉善地块、秦祁褶皱造山带和兴蒙褶皱带4大构造单元的交会部位, 构造环境复杂、强震多发, 历史上发生过1654年7月21日天水8.0级地震、1739年1月3日平罗8.0级地震、1920年12月6日海原8½级地震和1927年5月23日古浪8.0级地震 (国家地震局震害防御司, 1995; 中国地震局震害防御司, 1999)。邵志刚和张浪平 (2013) 通过对现今5级以上地震活动分布特征的分析, 认为南北地震带北段地震活动水平相对较弱, 并提出了未来需要关注毛毛山断裂、金强河断裂和香山—天景山断裂东段发生7级地震的可能。

目前对南北地震带北段的研究已有一些有价

值的地球动力学和大地构造学的认识和结论。江在森和王双绪 (1997) 研究了南北地震带及青藏块体东部地区20多年来的大地形变场演化特征及其与地震活动的呼应关系; 武艳强等 (2012) 利用1999—2007年和2007—2009年GPS速度场、应变率场、断层滑动速率和GPS速度剖面等数据, 对南北地震带北段主要断层的显著变形差异进行分析, 认为庄浪河以东地区存在较高的应变积累背景; 王静等 (2015) 利用GPS速度场、跨断层速度剖面以及基准站时间序列数据, 分析了南北地震带北段地壳运动的动态特征, 认为祁连山断裂具有较高的应变积累, 六盘山断裂存在闭锁; 邹镇宇等 (2015) 对1999—2013年南北地震带地区多期GPS速度场做了以华南地块为统一参考基准的处理, 获取了网格化结果, 并分析提出汶川地震的影响在震后迅速衰减, 南北地震带中北部地区NE向运动增强的结论。上述成果为研究南北地震带北段地壳运动特征以及该区域的中长期地震预测提供了重要依据, 但仍存在一些不足, 如已有研究多是对2期或多期的GPS速度场进行对比分析, 探讨各期速度场和应变场的变化, 使用的资料最新只到2013年, 并且很少使用长期GPS速度场分析南北地震带北段的长期应变率变化特

^{*} 收稿日期: 2019-07-19.

基金项目: 中国地震局震情跟踪项目 (2020010205, 2020020203) 联合资助.

征, 也较少结合小震活动性进行综合分析。因此, 为了更好地研究南北地震带北段的水平运动特征以及各断裂的现今应变特征, 本文使用 Zheng 等 (2017) 计算的 1991—2015 年长期 GPS 数据, 计算南北地震带北段地区的主应变率、最大剪应变率和面膨胀率, 分析区域现今水平运动的特征; 再根据跨断层 GPS 速率剖面分析南北地震带北段各断层运动状态的差异, 利用小震分布及震源深度剖面, 分析各断裂的地震活动性; 最后, 综合分析区域的地震危险性。

1 应变场特征分析

水平速度场空间分布的不一致性是地壳形变的直接反映, 而应变场是描述区域形变的重要指标。该指标不受参考框架的影响, 并且能从不同分辨率反映区域形变特征。利用 GPS 资料进行应变分析, 可以监测研究区应变场随着时间和空间的变化过程 (孟国杰等, 2009; 杨国华等, 2002; 王岩等, 2018; 蒋锋云等, 2018)。本文利用 Zheng 等 (2017) 计算的 1991—2015 年的 GPS 数据资料, 使用张希等 (1998) 根据最小二乘法计算应变场编制的 h-velo-strain 软件, 选取研究区内 114 个 GPS 站点参与计算, 得到了南北地震带北段相对低频的主应变率、最大剪应变率和面膨胀率。

1.1 主应变率

如图 1a 所示, 区域内主应变沿着青藏高原东北缘发生顺时针旋转。不同地区的主应变率差异较大, 反映出南北地震带北段的运动特征及构造活动比较复杂。在阿拉善地块和鄂尔多斯地块内部变形较小, 以拉张作用为主, 表明地块具有较好的刚性运动特征。主应变率沿着天桥沟—黄羊川断裂附近具有 NE 向的挤压, 向东在香山—天景山断裂上明显减弱, 在毛毛山—老虎山断裂以及海原断裂上较大, 具有 NE, NEE 向的挤压和 NW, NNW 向的拉张作用, 主应变率大有可能是海原 1920 年地震后断裂的震后调整作用。在六盘山断裂、小关山断裂附近主应变率较小, 且由西边的 EW 向挤压到鄂尔多斯内部变为 EW 向的拉张, 在庄浪河断裂和马衔山断裂交汇处较大, 而在银川盆地内主要以近 EW 向主张应变为主。

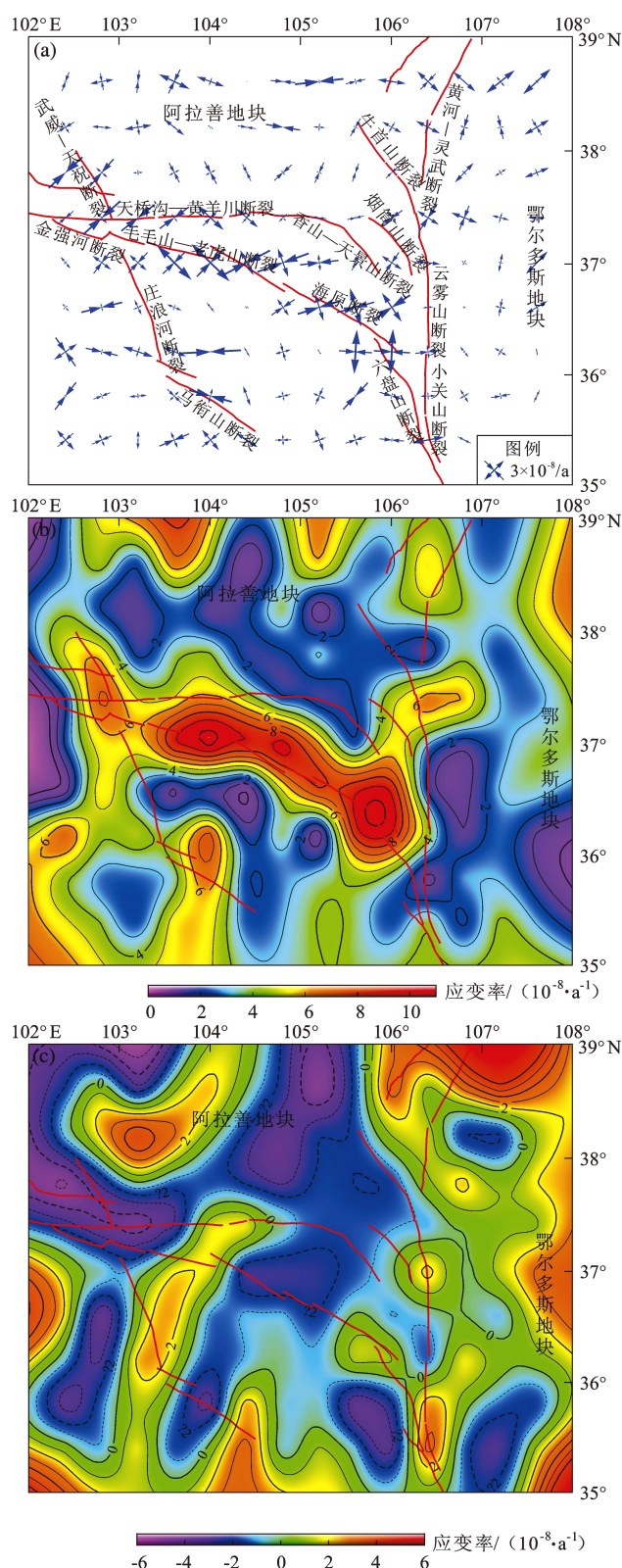


图 1 南北地震带北段主应变率 (a), 最大剪应变率 (b) 及面膨胀率 (c)

Fig. 1 The principal strain rate (a), maximum shear strain rate (b) and surface dilatation strain rate (c) of the north section of the North-South Seismic Belt

1.2 最大剪应变率

如图 1b 所示, 区域内总体剪应变率呈现出中间高、周围低的变化特征。剪应变率的高值区主要分布在毛毛山—老虎山断裂和海原断裂上, 极值为 $10 \times 10^{-8}/a$, 且其展布方向与断裂的走向有很好的—致性, 形成一个 SEE 向长条状的剪应变率高值区, 与现今研究认为海原断裂带以走滑运动为主的结论相对应。香山—天景山断裂与剪应变率值线平行分布, 剪应变率较低, 说明断裂的剪切作用比较弱。六盘山断裂与剪应变率分布正交, 其北段位于高梯度带和高值区, 其南段剪应变作用较弱, 小关山断裂的剪应变率也较低。烟筒山断裂、牛首山断裂、马街山断裂具有较高的剪应变率, 为 $(4 \sim 6) \times 10^{-8}/a$, 而阿拉善地块和鄂尔多斯地块则表现出低的剪应变率。

1.3 面膨胀率

由图 1c 可见, 银川盆地表现为较大的张性作用, 鄂尔多斯地块表现为弱的张性作用, 而阿拉善地块呈现两侧挤压和中间拉张的特征, 两侧的挤压作用可能是受到周边断裂活动的影响。天桥沟—黄羊川断裂主要以挤压作用为主, 香山—天景山断裂表现为西段弱的拉张作用, 向东逐渐变为挤压作用, 但总体的面膨胀率不高。海原断裂总体表现为挤压作用, 在其东段具有弱的拉张作用, 而六盘山断裂以及小关山断裂主要以弱的拉张作用为主, 在断裂两侧区域存在挤压作用。庄浪河断裂变为弱的拉张作用, 马街山断裂以挤压作用为主。

2 GPS 速度场分析

为了进一步研究南北地震带北段的地壳运动特征, 笔者利用 Zheng 等 (2017) 计算的 1991—2015 年 GPS 数据, 绘制了区域的 GPS 速度场 (图 2), 从图 2 可看出: GPS 速率自西向东整体在逐渐变小; GPS 速度场速率在海原断裂的 WS 方向较大, 但经过海原断裂后, 在断裂 NE 方向有明显的减小趋势, 在六盘山断裂的东西两侧自西向东在变小; 在阿拉善地块和鄂尔多斯地块内部的速率都较小, 说明在青藏高原东北缘地区, 受印度—欧亚板块碰撞推挤作用和稳定块体的阻挡作用的

影响, 在海原断裂和六盘山断裂受到的剪切和挤压作用较强, 区域地壳运动和应变变化主要由海原—六盘山断裂组成的弧形构造带来调节。

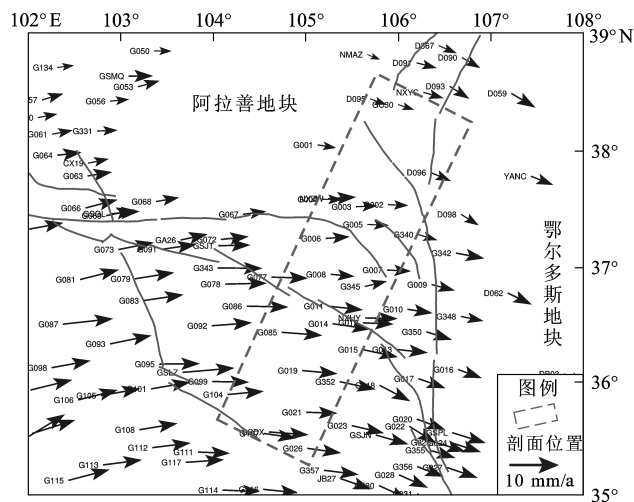


图 2 南北地震带北段 GPS 速度场 (断裂同图 1)

Fig. 2 GPS velocity field of the north section of the North-South Seismic Belt (the faults is same as Fig. 1)

GPS 速度场方向自西向东具有顺时针变化的特征, 在庄浪河断裂和马街山断裂附近为 NEE 向, 到了海原—六盘山断裂和香山—天景山断裂弧形构造区呈近 EW 向, 过了弧形构造区后在鄂尔多斯地块内变为 SE 或 SEE 向。水平运动方向的变化, 可能是弧形构造区的断裂走滑运动以及鄂尔多斯稳定地块阻挡共同作用的结果。

为了得到南北地震带北段主要断裂的滑动速率分布特征 (海原断裂、香山—天景山断裂、烟筒山断裂、牛首山断裂), 笔者在图 2 中选取了一条跨断层 GPS 速率剖面, 将 GPS 速率分解为平行断层和垂直断层 2 个方向的速率, 并绘制剖面图 (图 3)。从图 3a 可以看出: 从 SW ($8 \sim 9 \text{ mm/a}$) 到 NE ($4 \sim 5 \text{ mm/a}$), 平行断层速率一直在减小, 速率变化区域主要在海原断裂附近。在海原断裂两侧 50 km 以外区域, GPS 速率变化不大, 该断裂表现为左旋走滑运动, 走滑速率约为 $(4 \pm 0.5) \text{ mm/a}$; 而在香山—天景山断裂、烟筒山断裂以及牛首山断裂的走滑速率表现不明显。从图 3b 可以看出: 从 SW ($3 \sim 5 \text{ mm/a}$) 到 NE ($1 \sim 2 \text{ mm/a}$), 垂直断层速率也在减小, 在海原断裂的 SW 向, 垂

直断层速率基本保持不变, 而从海原断裂 NE 方向, 经过香山—天景山断裂、烟筒山断裂和牛首山断裂, 垂直断层速率在逐渐减小, 这几条断裂基本都是处于挤压环境中, 具有逆冲断层的性质。所以, 通过跨断层 GPS 速率剖面可以看出, 南北地震带北段的现今地壳运动主要受断裂活动性强弱控制, 海原断裂主要以左旋走滑运动为主, 逆冲挤压作用很弱。而香山—天景山断裂、烟筒山断裂和牛首山断裂表现的左旋走滑运动不明显, 地壳缩短速率为 $1 \sim 2 \text{ mm/a}$, 地壳缩短变形主要被这 3 条断裂所吸收, 具有以逆冲兼有左旋走滑的性质。

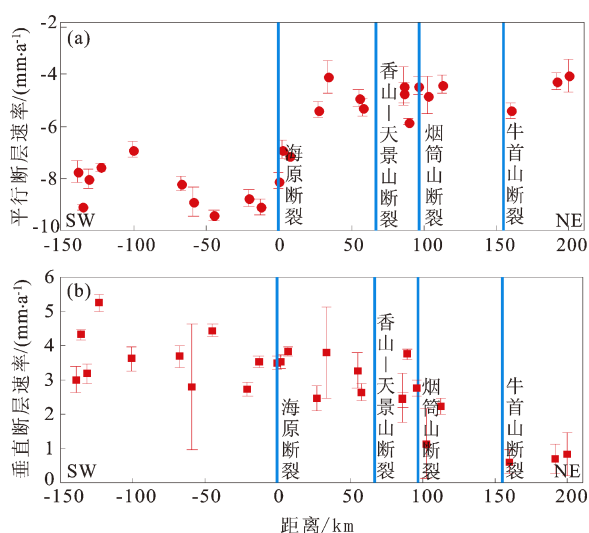


图3 横跨海原断裂的 GPS 速率剖面

Fig. 3 GPS velocity profiles across the Haiyuan fault

3 现今地震活动分布特征

笔者利用中国地震局地球物理研究所房立华提供的小震重新定位目录, 将 1980 年以来发生在研究区内的小震绘制到区域平面图上 (图 4)。从图 4 可以看出, 南北地震带北段的小震密集, 4 级以上地震基本都是沿着断裂走向分布的, 说明活动断裂对大震的发生有很好的控制作用。阿拉善地块内存在一个小震密集带, 其余地区小震较少; 鄂尔多斯地块内部地震稀少, 地震主要集中于其西边界上。

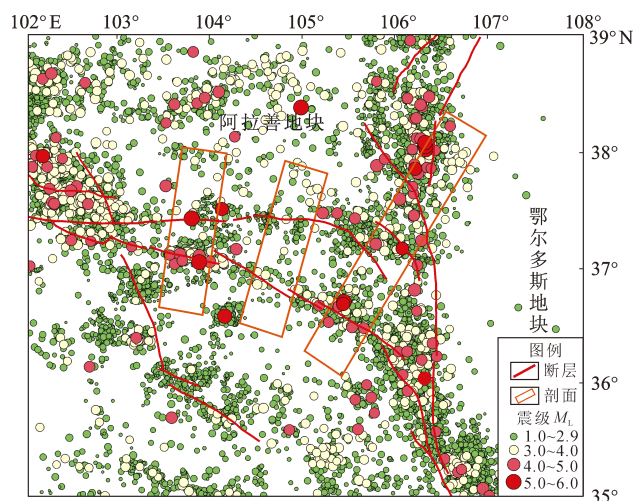


图4 南北地震带北段现今地震分布

Fig. 4 Modern seismicity distribution of the north section of the North-South Seismic Belt

为了进一步分析研究区主要断裂的现今运动状态与小震活动之间的关系, 以及小震活动空间差异的变化, 进而研究不同断裂的现今地震危险性, 笔者选取了 3 个横跨海原断裂及北侧的一些主要断裂的震源深度剖面 (图 4 中橙色方框), 走向为 SW-NE 向, 基本上都是垂直断裂走向, 除了牛首山断裂和黄河—灵武断裂与剖面斜交。小震目录剔除了震级小于 0.5 级、震源深度小于 0.5 km 的地震, 并将结果绘制在震源深度剖面上 (图 5)。

从剖面 1 可以看出 (图 5a), 在老虎山断裂处地震密集分布, 震源深度在 $25 \sim 30 \text{ km}$, 小震在 $0 \sim 5 \text{ km}$ 深度、宽度约 30 km 分布较广, 说明断裂在浅地表活动性强, 这与 Jolivet 等 (2012) 研究认为老虎山断裂现今存在蠕滑段的结论相对应。小震分布沿深度向下逐渐变窄, 集中在宽度约 10 km 范围内, 并向 SW 方向倾斜。4 级以上地震分布与断层倾向具有较好的一致性, 倾向 SW, 与地质资料 (柴焱章等, 1997; 李传友, 2005)、地球物理资料 (Gao *et al*, 2013) 得到的结果一致。在天桥沟—黄羊川断裂上, 小震分布较少, 只在 $0 \sim 5 \text{ km}$ 深度集中分布, 沿深度向下地震变少, 跨断裂向北 20 km 可以看到一个明显的向 SW 倾的小震分界线, 分界线北侧小震震级低且分布稀少, 这可能是香山地块与阿拉善稳定地块的分界处。

从剖面 2 可以看出 (图 5b), 小震分布较少, 震源深度在 25 km 左右, 海原断裂北西段的小震在 0~20 km 深度呈线性分布并向 SW 倾斜, 可能是由于地震的发生受断裂活动控制, 在香山—天景山断裂东段上小震分布较多, 由浅到深小震沿剖面走向分布较宽, 分布形态与 Gao 等 (2013) 利用地震深反射剖面得到的断裂分布形态相似。

剖面 3 长度较长 (图 5c), 共包含了 5 条断裂, 在海原断裂带南东段, 发生过 1920 年海原 8 $\frac{1}{2}$ 级地震, 现今小震分布较密集而均匀, 震源深度约为 30 km, 在 0~5 km 深度范围内, 小震分布

广, 可能是断裂面持续震后调整运动的表现。而在香山—天景山断裂东南段小震分布少, 自 1980 年以来表现为明显的小震稀疏段, 与断裂东段相比, 在浅地表和 15~25 km 深度小震空缺, 反映断裂东南段可能已经处于闭锁的状态。烟筒山断裂小震分布密集, 在 0~30 km 深度均匀分布。牛首山断裂以及黄河—灵武断裂附近的小震分布密集, 也分布有许多 4 级以上的地震, 震源深度在 33 km 附近, 由于断裂与剖面并不是正交, 所以并不能显示横跨断层的震源深度分布具体特征, 只能表明这两条断裂现今地震活动性较强。

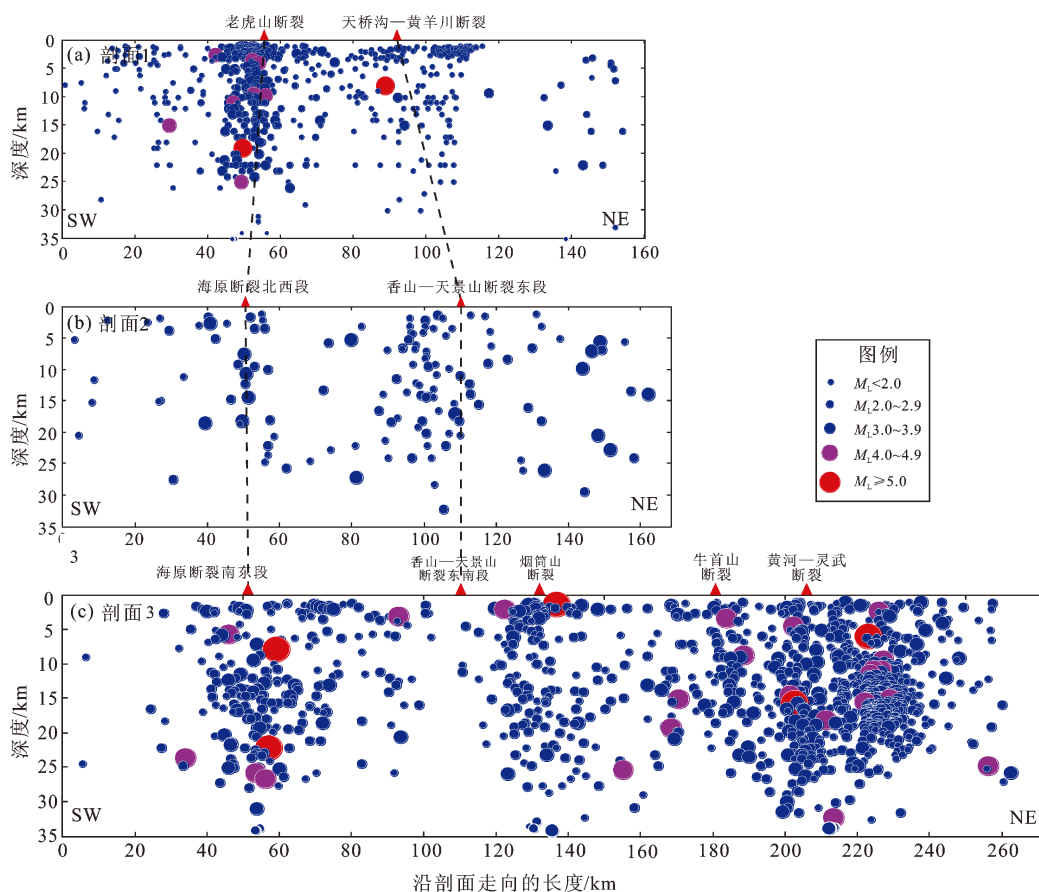


图 5 南北地震带北段震源深度剖面图

Fig. 5 Profiles of hypocenter depth of the north section of the North-South Seismic Belt

4 讨论

4.1 主应变结果可靠性论证

关于模拟值的可信度问题, 武艳强等 (2009a, b) 通过分析对比模拟数据, 发现最小二乘配置解算应变场, 几乎没有边缘效应, 能够很好地反映

大范围应变场的状态, 该方法的稳定性比较好, 对附加的随机误差的反应不明显。本文最大剪应变率结果与武艳强等 (2012) 的结果量值有一定差异, 可能的原因有: ①计算使用的 GPS 速度场不同; ②计算应变率时选取的相关距离不一样。因为江在森等 (2000) 讨论过关于应变率与计算图形尺寸的相关性问题, 认为随着尺度的增大,

应变值的统计平均值和均方差都是呈幂指数衰减的, 本文选取的相关距离为 100 km, 有可能是距离较小引起了应变率偏大, 但是只是量级上的变化, 最大剪应变的高值区和图像分布趋势不会变化太大。所以, 本文利用该方法计算得到的南北地震带北段的应变场结果可信度较高。

4.2 区域断裂地震危险性分析

通过计算应变场的应变分布和变化规律, 结合小震分布特征, 分析其与区域地壳运动的方式、方向及区域构造发育的关系, 对于认识大陆内部构造应变及应力分布, 并进行地震危险性评估具有十分重要的意义 (Abdrakhmatov *et al*, 1996; 杨少敏等, 2008; Zubovich *et al*, 2010)。由研究区的应变场分布特征以及小震分布特征可以看出: ①海原断裂现今的活动性较强, 主应变率较大, 具有以 NEE 向为主的主压应变, 与断裂走向小角度斜交, 同时最大剪应变率分布也显示在海原断裂附近具有 $10 \times 10^{-8}/a$ 的剪应变高值区, 表明该断裂现今以走滑为主, 与前人研究结果 (Thatcher, 2007; 李煜航等, 2015; 李彦川, 2016) 一致。而跨断层 GPS 速率剖面也显示海原断裂具有速率为 $(4 \pm 0.5) \text{ mm}/a$ 的左旋走滑, 速率变化集中在断裂两侧 50 km 范围内, 说明应变集中在断裂附近, 两侧区域无显著应变积累, 震源深度剖面也显示小震分布密集, 可能是 1920 年海原 8.5 级地震震后的调整作用, 与 M7 专项工作组 (2012) 的研究结果一致。②香山—天景山断裂西段以 NW 向的主张应变为主, 向东逐渐变小, 且变为以 NE 向的挤压为主, 与面膨胀率变化相对应, 在断裂西段呈现张性, 而向东则变为压性, 最大剪应变率分布显示在西段和东南段剪应变较大, 而在东段较小。综合应变场特征说明断裂西段具有拉张兼剪切作用、东段为挤压作用、东南段以剪切和弱挤压作用为主, 应变场特征与前人研究认为的香山—天景山断裂西段为正断—走滑性质、东段为逆断—走滑性质、东南段为走滑—逆冲性质的结论基本一致 (柴炽章等, 1997; 李新男, 2014; Li *et al*, 2005)。

小震剖面显示香山—天景山断裂东南段缺少小震活动, 而东段小震分布均匀, 并且东南段的主应变率值低, 为 $(1 \sim 2) \times 10^{-8}/a$ 。跨断层 GPS

速率剖面显示断裂具有逆冲兼左旋走滑的性质, 断裂附近的剪切变形和横向缩短变形都较弱, 断裂现今有可能处于闭锁状态。③六盘山断裂的主应变率低, 但其东、西两侧反向变化, 东侧以 EW 向拉张为主, 西侧以近 EW 向挤压为主。面膨胀率也显示断裂位于正负分界处, 最大剪应变率分布显示断裂走向垂直于剪应变等值线, 断裂北段剪应变较高、中南段较低, 应变场变化较弱。结合历史地震破裂情况、现今小震稀疏段以及大震离逝时间等认为断裂可能已经闭锁 (杜方等, 2018), 可能处于孕震晚期。

5 结论

本文利用 1991—2015 年 GPS 速度场数据, 对南北地震带北段的主应变率、面膨胀率以及最大剪应变率的空间变化进行研究, 结合跨断层 GPS 剖面、小震活动分布特征, 对研究区主要断层的活动性及地震危险性进行综合分析, 取得如下认识:

(1) 研究区应变场特征显示毛毛山—老虎山断裂和海原断裂 NE 向的主压应变率较大, 最大剪应变率较高 ($10 \times 10^{-8}/a$), 以走滑为主兼有弱的挤压作用; 香山—天景山断裂、六盘山断裂中南段和小关山断裂应变率变化弱, 结合历史地震及离逝时间, 认为其可能处于孕震晚期; 银川盆地具有走滑兼拉张的环境, 鄂尔多斯地块和阿拉善地块总体稳定性较好, 应变率较低。

(2) 跨断层 GPS 速率剖面显示海原断裂现今以左旋走滑为主 ($4 \pm 0.5) \text{ mm}/a$, 香山—天景山断裂、烟筒山断裂和牛首山断裂活动性较弱, 总体显示为逆冲兼走滑的性质。

(3) 地震活动主要沿着断裂走向分布, 小震分布密集显示现今小震活动性强。震源深度剖面显示老虎山断裂、海原断裂南东段小震分布较密集而均匀, 海原断裂北西段小震较少, 香山—天景山东南段存在一个小震稀疏段, 这说明断层可能已经闭锁, 未来应重点关注。

感谢中国地震局地球物理研究所房立华研究员提供小震重新定位目录。

参考文献:

- 柴炽章,张维岐,焦德成. 1997. 天景山断裂带晚第四纪水平活动强度的分时、分段研究[J]. 中国地震,13(1):35-42.
- 杜方,闻学泽,冯建刚,等. 2018. 六盘山断裂带的地震构造特征与强震危险背景[J]. 地球物理学报,61(2):545-559.
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年)[M]. 北京:地震出版社.
- 蒋锋云,朱良云,季灵运,等. 2018. 2018 年云南通海 5.0 级地震前区域地壳水平形变特征分析[J]. 地震研究,41(4):511-516.
- 江在森,王双绪. 1997. 南北地震带和青藏块体东部近期大地形变与地震特征[J]. 中国地震,13(2):139-150.
- 江在森,张希,陈文胜,等. 2000. 地形变资料求解应变值的尺度相对性问题研究[J]. 地震学报,22(4):352-359.
- 李传友. 2005. 青藏高原东北部几条主要断裂带的定量研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所,117-192.
- 李新男. 2014. 香山—天景山断裂带西段晚第四纪运动学特征与古地震研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所.
- 李彦川. 2016. 基于 GPS 的海原断裂变形特征及强震危险性分析[D]. 青岛:中国石油大学(华东).
- 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]. 地球科学,40(10):1767-1780.
- 孟国杰,申旭辉,Smirnov V,等. 2009. 堪察加地区现今地壳运动与变形特征研究[J]. 地球物理学报,52(3):720-731.
- 邵志刚,张浪平. 2013. 南北地震带北段近期强震趋势研究[J]. 中国地震,29(1):26-36.
- 王静,柴炽章,马禾青,等. 2015. 近年来南北地震带北段地壳运动特征[J]. 地震地质,37(4):1043-1054.
- 王岩,洪敏,邵德胜,等. 2018. 基于 GPS 资料研究云南地区地壳形变动态特征[J]. 地震研究,41(3):368-374.
- 武艳强,江在森,杨国华,等. 2009a. 利用最小二乘配置在球面上整体解算 GPS 应变场的方法及应用[J]. 地球物理学报,52(7):1707-1714.
- 武艳强,江在森,杨国华,等. 2009b. 用球谐函数整体解算 GPS 应变场方法研究[J]. 大地测量与地球动力学,29(6):68-73.
- 武艳强,江在森,杨国华,等. 2012. 南北地震带北段近期地壳变形特征研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),37(9):1045-1048.
- 杨国华,李延兴,韩月萍,等. 2002. 由 GPS 观测结果推导中国大陆现今水平应变场[J]. 地震学报,24(4):337-347.
- 杨少敏,李杰,王琪. 2008. GPS 研究天山现今变形与断层活动[J]. 中国科学:地球科学,38(7):872-880.
- 张希,江在森,张四新. 1998. 借助最小二乘配置整体解算地壳视应变场[J]. 地壳形变与地震,18(2):57-62.
- 赵晓辰,刘池洋,王建强,等. 2016. 南北构造带北部香山地区中—新生代构造抬升事件[J]. 岩石学报,32(7):2124-2136.
- 中国地震局震害防御司. 1999. 中国近代地震目录[Z]. 北京:中国科学技术出版社.
- 邹镇宇,江在森,武艳强,等. 2015. 基于 GPS 速度场变化结果研究汶川地震前后南北地震带地壳运动动态特征[J]. 地球物理学报,58(5):1597-1609.
- M7 专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中—长期危险性研究[M]. 北京:地震出版社.
- Abdrakhmatov K Y, Aldazhanov S A, Hager B H. 1996. Relatively recent construction of the Tianshan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates[J]. Nature,384(6608):450-453.
- Gao R, Wang H, Yin A, *et al.* 2013. Tectonic development of the north-eastern tibetan plateau as constrained by high-resolution deep seismic-reflection data[J]. Lithosphere,5(6):555-574.
- Jolivet R, Lasserre C, Doin M P, *et al.* 2012. Shallow creep on the haiyuan fault (Gansu, China) revealed by SAR interferometry[J]. J Geophys Res,117(B06):401,doi:10.1029/2011JB008732.
- Li CY, Zhang P, Yin J, *et al.* 2009. Late quaternary left-lateral slip rate of the Haiyuan fault, northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonics,28(5):1-26,TC5010,doi:10.1029/2008TC002302.
- Thatcher W. 2007. Microplate model for the present-day deformation of tibet[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth,112(B1):1-13.
- Zheng G, Wang H, Tim J W, *et al.* 2017. Crustal deformation in the India-Eurasia Collision Zone from 25 years of GPS measurements[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 122(11):9290-9312.
- Zubovich A V, Wang X, Scherba Y G. 2010. GPS velocity field for the Tianshan and surrounding regions[J]. Tectonics,29(6):1-23.

Characteristics of Recent Crustal Movement and Seismicity in the Northern Section of the North-South Seismic Belt

LIU Lei, JIANG Fengyun, ZHU Liangyu

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

Abstract

Using the GPS velocity field during 1991 and 2015, we describe the characteristics of the current crustal horizontal movement of the northern section of the North-South Seismic Belt. We investigated the tectonic dynamics and seismic hazard in the northern section of the North-South Seismic Belt by analyzing the spatial distribution characteristics of the principal strain rate, surface expansion rate, maximum shear strain rate, and small earthquakes. And we also analyzed the activity and seismic risk of main faults in the northern section of the North-South Seismic Belt. The results show that: ①The high main strain rate and the high maximum shear strain rate are distributed near the Haiyuan fault tectonic belt, while the Xiangshan-Tianjingshan fault and the middle-southern segment of the Liupanshan fault have lower strain rate. Combined with the historical earthquake and the elapsed time, we deduced that Xiangshan-Tianjingshan fault and the Liupanshan fault may be in the Late phase of strong earthquake preparation; ②Therecent strike-slip rate of the Haiyuan fault is (4 ± 0.5) mm/a. And the seismic activity of the Xiangshan-Tianjingshan fault, the Yantongshan fault and the Niushoushan fault was weak, these faults are generally characterized by thrust and strike-slip; ③The seismic depth profile shows that the distribution of earthquakes in the Laohushan fault and the south-eastern section of the Haiyuan fault is relatively dense and uniform, while few earthquakes are distributed in the north-western section of the Haiyuan fault. There is a sparse section of earthquakes in the south-eastern section of the Xiangshan-Tianjingshan fault, and the fault may have been locked which should be paid more attention to in the future.

Keywords: the northern section of the North-south Seismic Belt; strain rate field; GPS velocity field; seismic risk