

基于GNSS的宁夏地震危险性研究

王 静, 任雪梅, 李国斌

宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川

收稿日期: 2025年6月4日; 录用日期: 2025年7月21日; 发布日期: 2025年7月30日

摘 要

宁夏及周边地区构造活动复杂, 是地震多发地区。GNSS资料在地震危险性分析方面能发挥一定的作用, 本文基于GNSS资料, 获取速度场、应变率场、断层闭锁和跨断层速度剖面等, 对宁夏地区地震危险性进行分析, 结果表明: 三关口断裂南端、罗山断裂北端及南端、烟筒山断裂北端、黄河断裂中北部、贺兰山西麓断裂、六盘山断裂北端存在闭锁, 具备中长期发震背景。区域应变率场近年与长期应变率场无显著变化, 未来1~3年宁夏及邻区发生大震的可能性较小。

关键词

GNSS, 宁夏, 地震危险性

Seismic Hazard Assessment in Ningxia Based on GNSS Data

Jing Wang, Xuemei Ren, Guobin Li

Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan Ningxia

Received: Jun. 4th, 2025; accepted: Jul. 21st, 2025; published: Jul. 30th, 2025

Abstract

The Ningxia region and its surrounding areas are characterized by complex tectonic activity and are prone to frequent earthquakes. GNSS (Global Navigation Satellite System) data can play a significant role in seismic hazard analysis. This study utilizes GNSS observations to derive velocity fields, strain rate fields, fault locking, and cross-fault velocity profiles to assess seismic hazards in the Ningxia region. The results indicate that locked segments exist at the southern end of the Sangankou Fault, the northern and southern ends of the Luoshan Fault, the northern end of the Yantongshan Fault, the central-northern section of the Yellow River Fault, the western piedmont fault of the Helan Mountains, and the northern end of the Liupanshan Fault, suggesting a medium- to long-

term seismic potential. The recent strain rate field shows no significant deviation from the long-term strain rate pattern, implying a relatively low probability of major earthquakes occurring in Ningxia and adjacent areas within the next 1 - 3 years.

Keywords

GNSS, Ningxia, Seismic Hazard

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

宁夏地处南北地震带北段，是青藏块体、阿拉善块体、鄂尔多斯块体的交汇地区。该地区构造活动强烈，历史上曾经发生过 1739 年平罗 8.0 级和 1920 年海原 8.5 级等多次强震，目前宁夏境内 5 级以上地震已持续平静 37.4 年。

地震是地壳运动的产物。GNSS 可提供高精度、大范围和准实时的地壳运动定量数据[1]，使得我们能够探索地壳运动的演化过程及其与地震的关系，从而为地震形势判定提供依据。基于 GNSS 资料，学者们已在中国大陆开展了大量研究[1]-[5]，但有关宁夏的专门研究较少。许文俊[6]首次在宁夏地区开展了 GNSS 研究，结果表明在宁夏中部地区 GNSS 测区附近中强地震前约年，可观测到该区 GNSS 测站的形变异常及主应力方向发生转变异常；测区附近中强地震前及周边地区强震前，该区 GNSS 形变模拟矢量场能够预示未来地震的大体方位。这些结果可作为地震预测的特征值加以考虑。基于 GNSS 资料，开展宁夏地区地震危险性研究具有重要意义。

2. GNSS 数据与数据处理

本文使用了 1998~2018 长时间尺度和 1998~2007、2009~2013、2015~2020 三期短时间尺度 GPS 速度场结果(鉴于 2021、2022 年宁夏北部 GNSS 流动观测站未测量，速度场未使用 2021、2022 年数据)，数据来源于中国地震局地震研究所。

3. 结果与分析

3.1. 区域地壳运动与变形分析

3.1.1. 区域速度场分析

如图 1 所示，在欧亚框架下，南北地震带北段内部各点呈 NE 向运动，揭示了印度板块对欧亚板块的俯冲作用；速度矢量自东南向西北递减，反映了印度板块楔入欧亚大陆的地壳缩短作用；青藏高原东北缘由北部的 NNE 向运动，转向 NEE 向，呈顺时针旋转，揭示了坚硬的鄂尔多斯块体对欧亚板块 NEE 向运动的阻挡作用。

三期速度场存在一些微小变化，主要表现在阿拉善地块和六盘山断裂附近 2015~2020 期速度场较前两期速率值有小幅增加，但增加幅度小误差范围内，可忽略不计。

为了反映区域内部地壳运动的差异，本文进一步获取了宁夏及邻区相对于鄂尔多斯块体速度场。图 2 给出了宁夏及邻区相对于鄂尔多斯块体速度场，海原 - 六盘山断裂以南，即青藏高原东北缘地区呈逆时针旋转，其余区域均呈 NW 向拉张运动；三期速度场对比显示，2009~2013 年、2015~2020 年，六盘山

断裂附近速度场有所减小,表明六盘山断裂附近区域远离鄂尔多斯块体的速度减小。

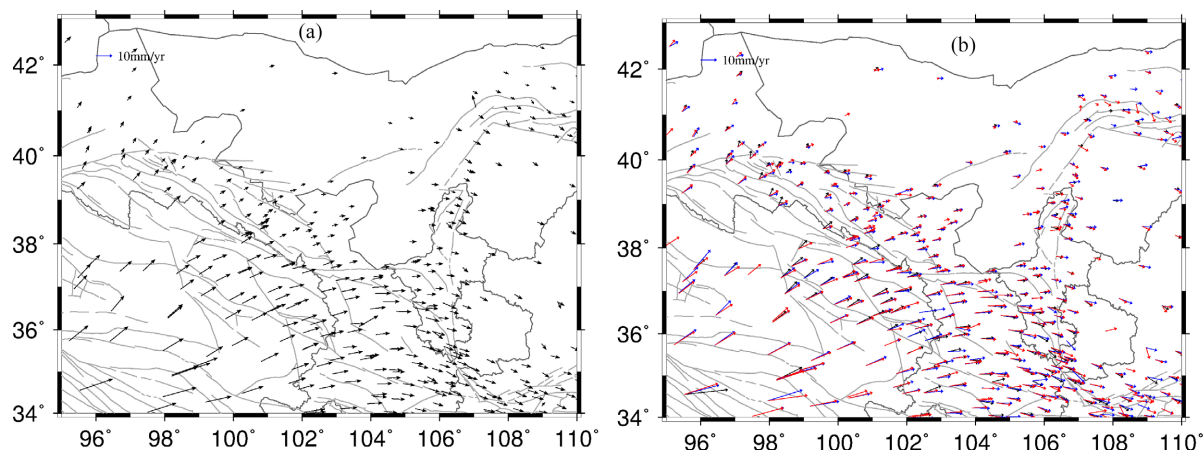


Figure 1. Velocity field of the northern section of the north-south seismic belt (Figures (a) and (b) show the velocity field of the Eurasian frame from 1998 to 2018 and the comparative velocity field of the Eurasian frame in three periods from 1998 to 2007, 2009 to 2013, and 2015 to 2020 respectively; the black, blue and red arrows in Figure (b) represent the comparative velocity fields of the three periods from 1998 to 2007, 2009 to 2013 and 2015 to 2020 respectively)

图 1. 南北地震带北段速度场(图(a)、(b)分别为 1998~2018 年欧亚框架速度场和 1998~2007、2009~2013、2015~2020 三期欧亚框架的对比速度场、图(b)中黑色、蓝色、红色箭头分别为 1998~2007 年、2009~2013、2015~2020 年三期速度场对比)

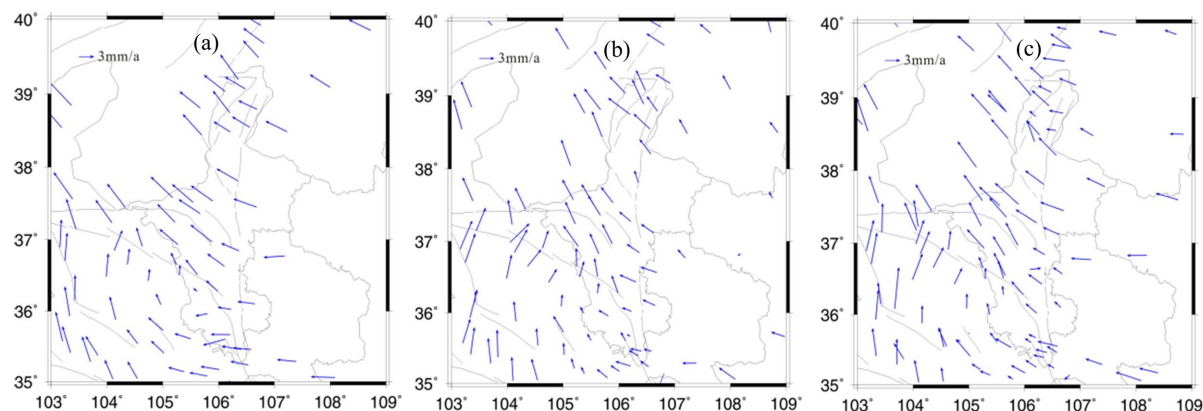


Figure 2. Velocity fields of Ningxia and its adjacent areas relative to the Ordos block ((a) (b) and (c) represent the velocity fields from 1998 to 2007, 2009 to 2013, and 2015 to 2020, respectively)

图 2. 宁夏及邻区相对于鄂尔多斯块体速度场((a) (b) (c)分别为 1998~2007 年、2009~2013 年、2015~2020 年速度场)

3.1.2. 区域应变率场分析

本文利用最小二乘配置法[7]计算了南北地震带北段应变率场。图 3 给出了南北地震带北段 1998~2018 年的长期应变率场,从图中可知,除南北地震带北段除西南部外,其余区域均以以主压应变为主,主压应变较小;西南部主压应变和主压应变。主应变率呈现出自西南向东北逐渐减小的特征,西北部的阿拉善地块和东部的鄂尔多斯地块主应变率较小,而西南部的青藏高原东北缘弧形构造区主应变率较大,与该区域的地块分区特征一致(图 3(a))。最大剪应变率的结果显示,剪应变率高率亦呈现由西南向东北逐渐减小的趋势,与主应变率空间分布较一致(图 3(b))。面应变率结果显示:南北地震带北段面应变率变化不大,低值区位于祁连断裂中部(图 3(c))。

图 4 给出了不同时期应变率场对比图,结果显示:1998~2007、2007~2013 年两期主应变率场与长期

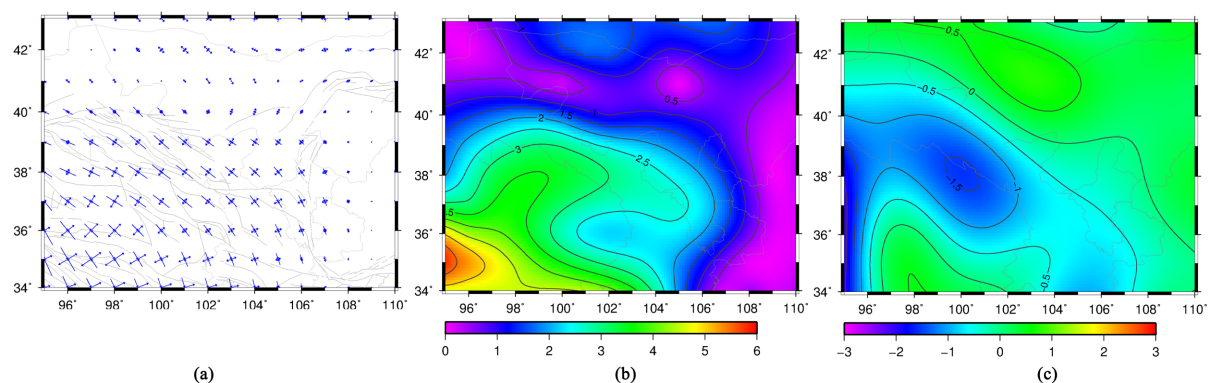


Figure 3. Long-term strain rate fields of the north-south seismic belt from 1998 to 2018 ((a) (b) and (c) represent the principal strain rate field, the maximum shear strain rate field, and the volumetric strain rate field, respectively)

图 3. 南北地震带 1998~2018 长期应变率场((a) (b) (c)分别为主应变率场、最大剪应变率场、面应变率场)

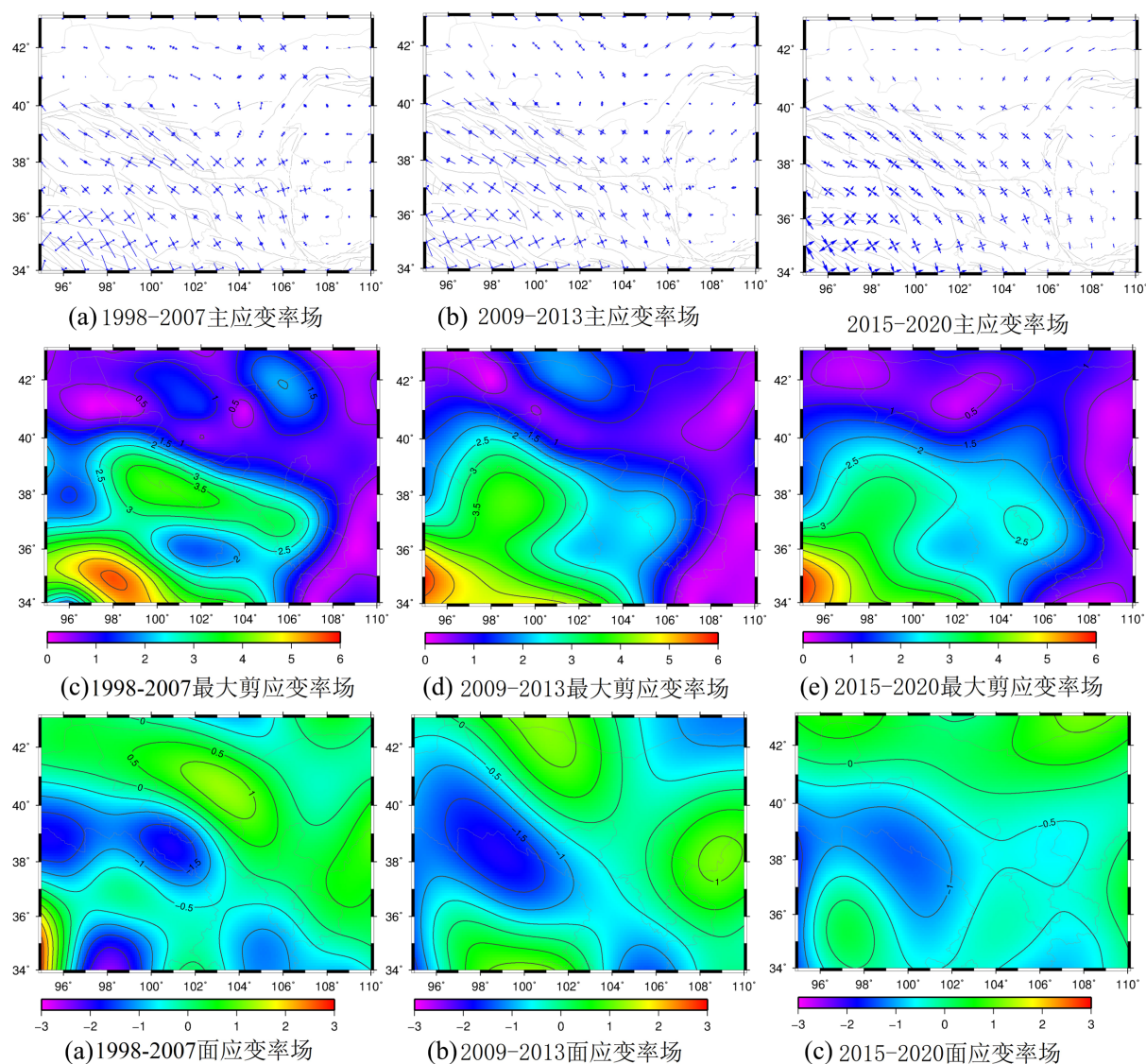


Figure 4. Phased strain rate field of the northern section of the north-south seismic belt

图 4. 南北地震带北段分期应变率场

应变率场基本一致, 2015~2020 年主应变率场较前两期及长期应变率场略有减小。2007~2013、2015~2020 两期最大剪应变率场与 1998~2018 年长期应变率场较一致, 1998~2007 年最大剪应变率场与前两期及 1998~2018 长期应变率场存在一定差异, 主要表现在 1997~2007 年最大剪应变率场西南部变化较大, 存在高低值转换区域。1998~2007、2009~2013 年、2015~2020 年三期面应变率场与长期应变率场均存在一定差异, 随着时间的推移, 面应变率梯度逐渐减小。相关震例研究表明, 应变率高值区和高值区边缘为地震高发区, 从主应变率场、最大剪应变率场、面应变率场结果来看, 宁夏及邻区短期震震可能性较低。

3.2. 主要活动断裂地壳变形分析

3.2.1. 断层闭锁与滑动亏损分布分析

本文利用 defnode 程序[8]-[10], 采用 1998~2018 年的 GPS 速度场数据, 反演确定了研究区一些活动断裂—贺兰山西麓断裂、贺兰山东麓断裂、黄河断裂、三关口—牛首山—罗山断裂、烟筒山断裂、六盘山东麓断裂的断层闭锁与滑动亏损分布。Defnode 程序基于断裂位错模型, 假设块体内部点的运动由块体旋转、块体内部均匀应变与块体边界断层闭锁产生的位移亏损引起的地表变形之和, 使用网格搜索和模拟退火算法反演获得断层闭锁深度、闭锁系数、滑动亏损速率等参数。在实际反演中, 本报告利用《鄂尔多斯块体西缘断裂带基本活动特征和孕震分析》的最新研究成果, 进行次级块体和断层倾角划分, 块体划分如下: 阿拉斯地块、鄂尔多斯地块、青藏高原东北缘和银川—吉兰泰盆地四个次级块体划, 断层结构设置。断层结构设置如下: 贺兰山西麓断裂、黄河断裂、三关口断裂、罗山断裂、牛首山断裂、均设置 3 条等深线, 每条等深线上 4 个节点, 断层倾角依次为 60° 、 60° 、 60° 、 60° 、 70° 。六盘山断裂设置 6 条等深线, 每条等深线 8 个节点, 断层倾角为 45° 。反演过程中, 设置断层闭锁程度随深度单调递减, 并通过调整 GPS 速度场误差权重因子获得最佳 χ^2 , 最终误差权重因子为 1.121。

反演结果如图 5、图 6 所示, 北部断裂闭锁与滑动亏损分布整体一致, 表明断层的应变积累程度和应变积累速率整体分布一致。贺兰山西麓断裂闭锁系数由北向南递减, 北段闭锁程度较高, 闭锁系数在 0.833~0.945 之间, 闭锁深度达到 25~28 km; 黄河断裂中北部闭锁, 闭锁系数在 0.814~0.956 之间, 闭锁深度达到 22~26 km, 断层滑动亏损速率在 2.312~3.778 mm/a 之间, 应变积累范围、应变积累程度和应变积累速率均较大, 具有较大的地震危险性; $N38^\circ\sim39^\circ$ 之间的区域在地表 3 km 之内存在强闭锁, 闭锁系数在 0.798~0.854 之间, 滑动亏损速率较大, 达到 7 mm/a 以上, 表明该区域存在较快的应变积累, 未来可

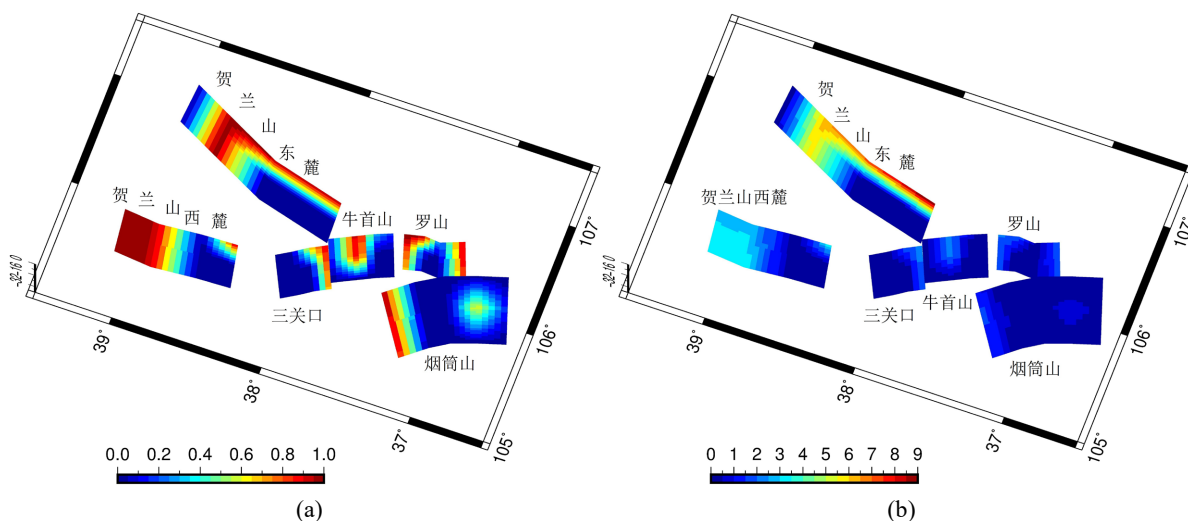


Figure 5. Distribution of fault locking and sliding deficit in northern ningxia fault zone

图 5. 宁夏北部断裂断层闭锁与滑动亏损分布

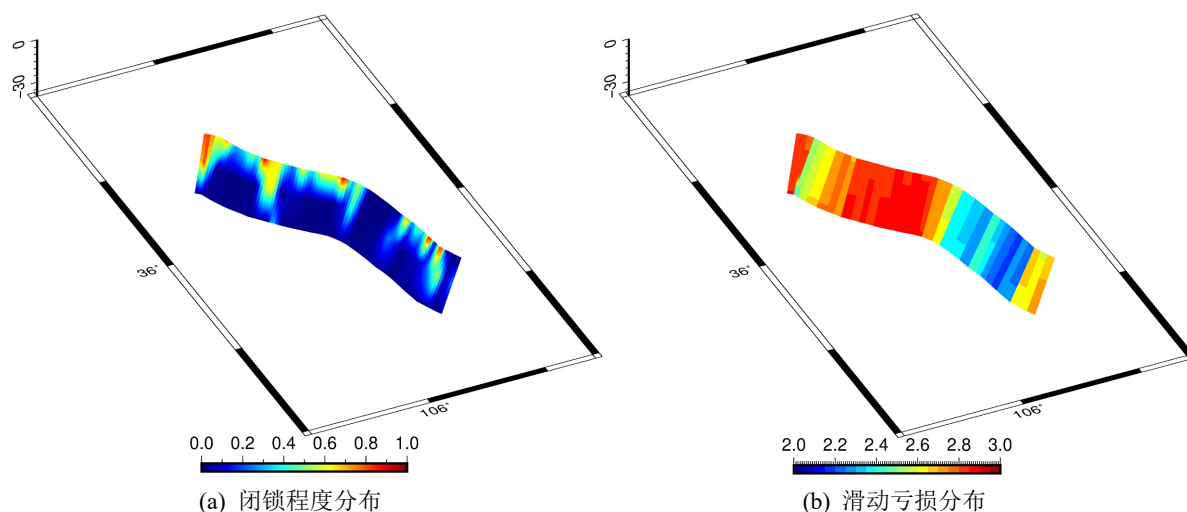


Figure 6. Distribution of fault locking and sliding deficit in the southern ningxia fault zone

图 6. 宁夏南部断裂断层闭锁与滑动亏损分布

能获得高于周边区域断层的应变积累量,潜在发震能力较大。三关口断裂南端闭锁,闭锁系数在 0.787~0.864 之间,闭锁深度在 15 km 左右,滑动亏损速率在 2.223~2.432 mm/a 之间。牛首山断裂中部强闭锁,闭锁系数由中部向两端递减,中部强闭锁系数在 0.765~0.876 之间,滑动亏损速率在 2.433~2.453 之间,闭锁深度在 10 km 左右。罗山断裂北端、南端闭锁,闭锁系数在 0.723~0.867 之间,滑动亏损速率在 2.243~2.256 mm/a 之间。烟筒山断裂北端闭锁,闭锁系数在 0.789~0.865 之间,闭锁深度在 20 km 左右,滑动亏损速率在 1.156~2.232 mm/a 之间。六盘山断裂闭锁程度在 0.001~0.884 之间,存在 5 个闭锁区域,其中北端的闭锁区域闭锁范围最大、闭锁深度最深,达 14 km (图 6);六盘山断裂的滑动亏损速率在 0.004~2.519 mm/a 之间,其中北部和中部滑动亏损分布速率较大。

反演过程中,断层模型的不同参数化对结果有一定影响,因此对于断层模型参数的设置需要尽可能接近断层实际情况[11]。由于《鄂尔多斯块体西缘断裂带基本活动特征和孕震分析》的断层参数来源于详细的野外调查结果,因此本文采用其断层模型参数进行负位错反演应当是一个合理的选择。

3.2.2. 跨断层速度剖面分析

为了进一步分析主要活动断裂断层运动情况,本文选取了 4 个跨断层速度剖面剖面(图 7),将 4 个剖面内断层两侧站点速度矢量分解为平行于断层的运动速率和垂直于断层的速率(图 8)。

图 8(a)~(b)分别给出了正谊关断裂平行于断层方向运动速率和垂直于断层方向运动速率。平行于断层方向,断层两侧均呈 E 向运动,断层以南运动速率大于断层北侧,相对运动速率在 2~3 mm/a 之间,显示断层呈左旋走滑运动(图 8(a))。垂直于断层方向,断层南侧呈 N 向运动,断层北侧呈 S 向运动,相对运动速率在 1~2 mm/a 之间,显示断层呈挤压运动;这与地质结果给出的正谊关断裂走滑兼逆冲的运动性质一致(图 8(b))。

图 8(c)~(d)给出了银川盆地主要活动断裂跨断层速度剖面结果,平行于断层方向,银川盆地站点均呈 N 向运动;贺兰山东麓断裂两侧,西侧运动速率略大于东侧,相对运动速率在 0.5~1 mm/a,显示贺兰山东麓断裂以微弱的速率呈右旋走滑运动;银川-平罗断裂两侧,西侧运动速率大于东侧,相对运动速率在 2~4 mm/a 之间,显示断层呈右旋走滑运动;黄河断裂两侧,西侧运动速率小于东侧,相对运动速率再 1~2 mm/a 之间,显示断层呈左旋走滑运动(图 8(c))。垂直于断层方向,银川盆地站点均呈 E 向运动;贺兰山东麓断裂两侧,东侧运动速率大于西侧,相对运动速率在 2~3 mm/a,断层呈拉张运动;银川-平罗断裂两

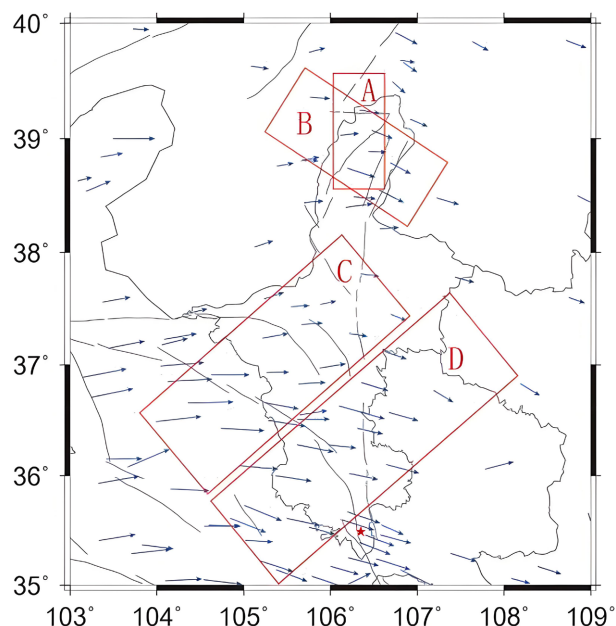


Figure 7. Distribution map of fault locking and slip deficit in Ningxia and its adjacent areas (Figure A and Figure B show the distribution of fault locking and fault slip deficit respectively)

图 7. 宁夏及邻区断层闭锁与滑动亏损分布图(图 A、图 B 分别为断层闭锁、断层滑动亏损分布图)

侧, 东侧运动速率大于西侧, 相对运动速率在 1~2 mm/a 之间, 断层呈拉张运动; 西侧运动速率大于东侧, 相对运动速率在 2~3 mm/a 之间, 断层呈挤压运动(图 8(d))。

图 8(e)~(f)为青藏高原东北缘弧形构造区的跨断层速度剖面结果, 平行于断层方向, 剖面内站点均呈 S 向运动; 海原断裂两侧, 西侧运动速率大于东侧, 相对运动速率在 2~6 mm/a 之间, 断层呈左旋走滑运动; 香山 - 天井山断裂两侧, 西侧运动速率小于东侧, 相对运动速率在 2~4 mm/a 之间, 断层呈左旋走滑运动; 烟筒山断裂两侧, 西侧运动速率小于东西, 相对运动速率在 1~2 mm/a 之间, 断层亦呈左旋走滑运动(图 8(e))。垂直于断层方向, 剖面内站点均呈 E 向运动; 海原断裂两侧, 断层西侧运动速率大于东侧, 相对运动速率为 2~4 mm/a, 断层呈挤压运动; 香山 - 天景山断裂两侧, 西侧运动速率大于东侧, 相对运动速率为 2~3 mm/a, 断层呈挤压运动; 烟筒山断裂两侧, 西侧运动速率大于东侧, 相对运动速率为 1~2 mm/a, 断层呈挤压运动(图 8(f))。综合来看, 青藏高原东北缘弧形构造区的断层均呈左旋走滑挤压运动, 且自西向东, 随着越来越接近青藏高原边缘, 相对运动速率逐渐减小。

六盘山断裂两侧, 断层均呈 S 向运动, 西侧运动速率略大于东侧, 相对运动速率在 1~2 mm/a 之间, 呈左旋走滑运动(图 8(g))。垂直于断层方向, 西侧运动速率大于东侧, 呈挤压运动(图 8(h))。

3.3. 结论与讨论

地震是地壳运动过程中产生应力应变集中、积累导致地壳局部发生脆性破裂错动并释放弹性应变能的过程[10]。因此, 获取地壳弹性应变积累, 特别是发震断裂带应变积累状态, 对地震预测具有重要意义。相关研究表明, 汶川 8.0 级地震[8]、芦山 7.0 级地震[9]、尼泊尔 Mw7.9 级[12]地震均发生在断层闭锁区域; 昆仑山口西 8.1 级地震[10]、汶川 8.0 级地震[11]前均存在应变率场异常。根据以往震例总结, 断层闭锁反映的往往是长期尺度的背景性异常, 应变率场、速度场和应变率场异常可以在一定程度上揭示中短期异常, 但应变率场往往对 7 级以上大震敏感, 对 5~6 级地震往往反映较小, 速度场对 5~6 级地震有

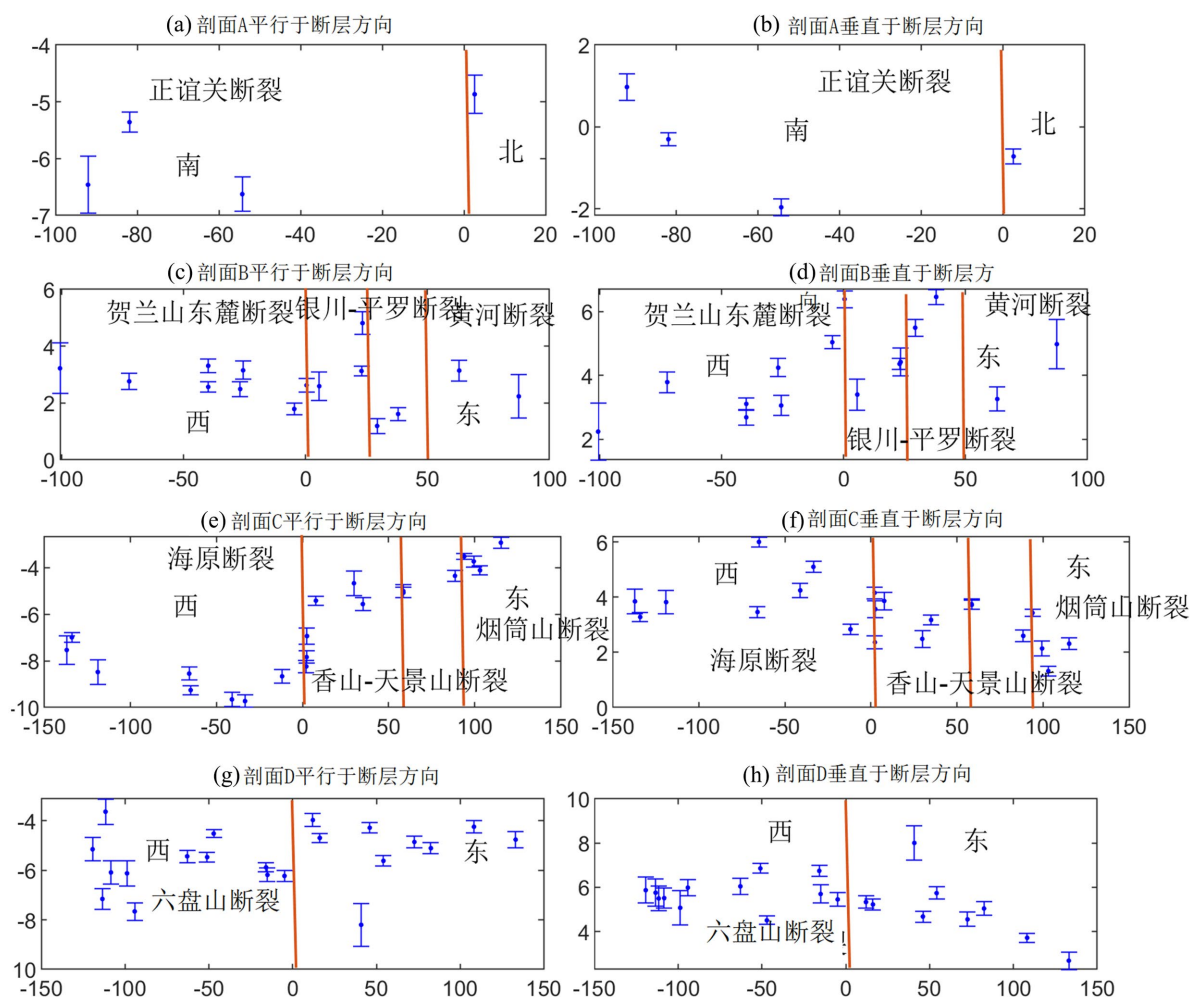


Figure 8. Results of cross-fault velocity profiles of major active faults

图 8. 主要活动断裂跨断层速度剖面结果

一定反映。从以上分析来看，三关口断裂南端、罗山断裂北端及南端、烟筒山断裂北端、黄河断裂中北部、贺兰山西麓断裂、六盘山断裂北端存在闭锁，具备中长期发震背景。区域应变率场近年与长期应变率场无显著变化，未来 1~3 年宁夏及邻区发生 7.0 级以上大震的可能性较小。

基金项目

宁夏自然科学基金(2023AAC03806)。

参考文献

- [1] Wang, Q., Zhang, P., Freymueller, J.T., Bilham, R., Larson, K.M., Lai, X., *et al.* (2001) Present-Day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements. *Science*, **294**, 574-577. <https://doi.org/10.1126/science.1063647>
- [2] Gan, W., Zhang, P., Shen, Z., Niu, Z., Wang, M., Wan, Y., *et al.* (2007) Present-Day Crustal Motion within the Tibetan Plateau Inferred from GPS Measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **112**. <https://doi.org/10.1029/2005jb004120>
- [3] Liang, S., Gan, W., Shen, C., Xiao, G., Liu, J., Chen, W., *et al.* (2013) Three-Dimensional Velocity Field of Present-day Crustal Motion of the Tibetan Plateau Derived from GPS Measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**, 5722-5732. <https://doi.org/10.1002/2013jb010503>

-
- [4] Wang, M. and Shen, Z. (2020) Present-day Crustal Deformation of Continental China Derived from GPS and Its Tectonic Implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **125**, e2019JB018774.
<https://doi.org/10.1029/2019jb018774>
- [5] Li, L., Wu, Y., Li, Y., Zhan, W. and Liu, X. (2022) Dynamic Deformation and Fault Locking of the Xianshuihe Fault Zone, Southeastern Tibetan Plateau: Implications for Seismic Hazards. *Earth, Planets and Space*, **74**, Article No. 35.
<https://doi.org/10.1186/s40623-022-01591-9>
- [6] 许文俊, 赵卫明, 柴炽章. 宁夏地区 GPS 监测网建设、近期地壳运动特征及应力场与地震活动关系初探[J]. 中国地震, 2001(1): 44-55.
- [7] Wu, Y., Jiang, Z., Zhao, J., Liu, X., Wei, W., Liu, Q., *et al.* (2015) Crustal Deformation before the 2008 Wenchuan MS8.0 Earthquake Studied Using GPS Data. *Journal of Geodynamics*, **85**, 11-23.
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.12.002>
- [8] 赵静, 江在森, 武艳强, 等. 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, 2012, 55(9): 2963-2972.
- [9] 赵静, 牛安福, 李强, 等. 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, 2016, 39(3): 351-358.
- [10] 江在森, 杨国华, 王敏, 等. 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, 2006, 26(3): 1-9.
- [11] 赵静. 块体模型与负位错模型分析川滇地区块体应变与断裂带变形特征[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2012.
- [12] 江在森, 武艳强. 地壳形变与强震地点预测问题与认识[J]. 地震, 2012, 32(2): 8-21.