

郝美仙,陈立峰,张帆,等. 2024. 蒙冀辽交界地区地壳应力场研究. 中国地震, 40(3): 700~708.

蒙冀辽交界地区地壳应力场研究

郝美仙 陈立峰 张帆 张珂 尹战军 王禄军

内蒙古自治区地震局, 内蒙古 010010

摘要 利用2008年1月1日—2021年12月31日发生在蒙冀辽交界地区的472个地震的P波初动符号资料,应用综合震源机制解法获得了蒙冀辽交界地区 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 精细应力场,所得应力场结果基本覆盖整个蒙冀辽交界地区。应力场反演结果显示:①蒙冀地区受拉张应力体系作用,主压应力场为东向,源自青藏高原东北边缘的强烈挤压作用。综合震源机制解类型主要为正断层和走滑型,P轴整体呈NE、NNE向,T轴整体呈NW或NNW方向,与前人研究该区域活动构造运动和地块受拉张和裂陷作用相符合。②蒙辽交界地区P波矛盾比较大,震源机制界面较为散乱,蒙辽或冀辽交界地区辽宁一侧震源机制解以逆断层为主,辽南地区震源机制以正断性质为主。

关键词: 地壳应力场 P波初动 综合震源机制解 蒙冀辽交界地区

[文章编号] 1001-4683(2024)03-0700-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

构造应力场作为构造地质学、地震学和地球物理学等学科的重要研究内容,对于解释板块运动、造山带成因的地震活动分布方面具有重要意义。应力场的求解目前有多种方法,Aki(1966)首先提出求解应力场的综合震源机制解法,即采用大量小震P波初动推断应力场方向,其优势是可以利用大量不能单独确定震源机制的小地震的P波初动来求解应力场方向,结果可覆盖更为广泛的地区,因此得到了广泛的应用(李钦祖等,1973;许忠淮等,1983、1989;盛书中等,2015;万永革等,2011;Wan,2010)。李钦祖等(1973)基于该方法推测了红山台和沙城台两个区域的地壳应力场。许忠淮等(1983)进一步提出采用研究区域多个地震和多个台站求解区域应力场的方法,并采用合成数据对该方法进行了严格测试,验证了该方法可以获得精确的地壳应力场,总结该方法得到的中国大陆应力场方向和动力学模型,与多年后通过GPS精确观测分析得到的中国大陆形变模式(Wang et al,2020)基本一致,表明该方法的正确性。盛书中等(2015)应用综合震源机制解法推断了鄂尔多斯块体周缘现今地壳应力场特征。万永革等(2011)利用P波初动资料求解中国台湾地区地下三维应力场方向,为该地区地球动力学过程提供新的约束,该方法采用P波初动求解应力场方法,省去了

[收稿日期] 2023-05-15 [修定日期] 2023-10-16

[项目类别] 内蒙古自治区地震局局长基金(2022(ZD)TM02、2023MS09)、内蒙古自治区自然科学基金(2023LHMS04006)共同资助

[作者简介] 郝美仙,女,1980年生,高级工程师,主要从事地震监测工作研究。E-mail:1153404095@qq.com

陈立峰,通讯作者,男,1984年生,高级工程师,主要从事地震预测和活动构造研究。E-mail:lfcchen@zju.edu.cn

求解单个地震的震源机制的中间步骤,且对于大量无法计算震源机制的小地震来说,可以充分用来覆盖整个研究区域。

蒙冀辽交界地区处于华北和东北块体交汇部位,地质构造发育,基本构造格架由阴山—燕山隆起、松辽盆地、大兴安岭隆起区构成,赤峰—开源断裂、八里罕断裂、朱碌科刀尔登断裂、北票—朝阳断裂、锦州—阜新断裂等多条断裂带纵横交汇,形成了蒙冀辽交界地区特有的“枝干型”断裂系,为蒙冀辽交界地区中强地震的发生提供了有利的地质构造条件。很多研究采用震源机制求解分析应力场(李泉等,2022;万永革等,2023),但该方法需要大量震源机制资料,通常地震活动性高,且存在数量足够的中强地震或较为密集的台站分布才可满足这种条件。蒙冀辽交界区域近年来发生中强地震较少,不适合用震源机制求解应力场的方法,而采用小震综合震源机制解法求解非均匀应力场的方向,弥补了震源机制资料少的缺陷。针对该研究区域,盛书中等(2015)利用该方法求得了鄂尔多斯块体东侧—山西断陷带内地壳应力场的初步结果,卜玉菲等(2011)运用该方法求解了河北地区区域应力场。但这些工作只包含本研究区域的一部分,且由于所用资料所限,给出的应力场特征大多数是较大区域的平均结果,并不能精确反映该区域与地质构造相关的应力场变化特征。

本文将整个蒙冀辽交界地区作为整体进行研究,利用2008年1月1日—2021年12月31日发生在蒙冀辽交界地区地震的P波数据,首次对该区域地壳应力场和动力学特征进行研究,为其地震孕育机理、地壳形变的动力学特征等研究提供基础资料,以更好地服务于当地民生和经济建设。

1 研究方法、资料和地壳速度模型

本研究中应力场计算采用综合震源机制解法。该方法是利用地震P波初动符号求解应力场的方向,实际计算时不受限于震级的大小,大量的小震资料也能够得到很好的利用。万永革等(2011)对该方法进行了优化,对网格内的P波初动赋予了不同的权重,使得计算结果更为精确。综合震源机制解求解应力场方法具体分为以下几步:①根据地震距网格点的距离给予不同地震P波初动不同的权重;②根据地震位置和台站位置求解每个台站相对于地震的走向和离源角;③根据本网格点的所有地震的P波初动符号计算综合震源机制,寻找合适震源机制的两个节面,使得P波矛盾比最小。

该方法得到了国内外众多学者的广泛应用,如闫睿等(2022)将该方法用于求解晋陕豫交界地区的地壳应力特征分析;田优平等(2020)利用该方法反演得到湖南地区构造应力场的初步结果。近年来,随着国家地震烈度速报与预警工程项目的实施,地震观测台站密度加大,监测能力得到进一步提升,综合震源机制解求解应力场方法具有较好的应用前景。

本文研究范围为2008年1月以来蒙冀辽交界地区($114^{\circ}\text{E} \sim 124^{\circ}\text{E}$, $40^{\circ}\text{N} \sim 42.5^{\circ}\text{N}$)地震事件,共收集到该区域内 $M_L \geq 2.0$ 的472个天然地震事件的13364个P波初动符号,P波初动极性资料由中国地震台网中心震相报告中读取,本文研究中所使用的地震分布见图1,其中 $2.0 \leq M_L \leq 2.9$ 地震事件264次, $3.0 \leq M_L \leq 3.9$ 地震事件183次, $4.0 \leq M_L \leq 4.9$ 地震事件25次。由统计可知(图2),该地区 M_L 3.0以下地震占56%,且多分布于上中地壳,对于这些小地震无法给出准确震源机制解,而利用综合震源机制解法求解应力场无疑是最好的选择。

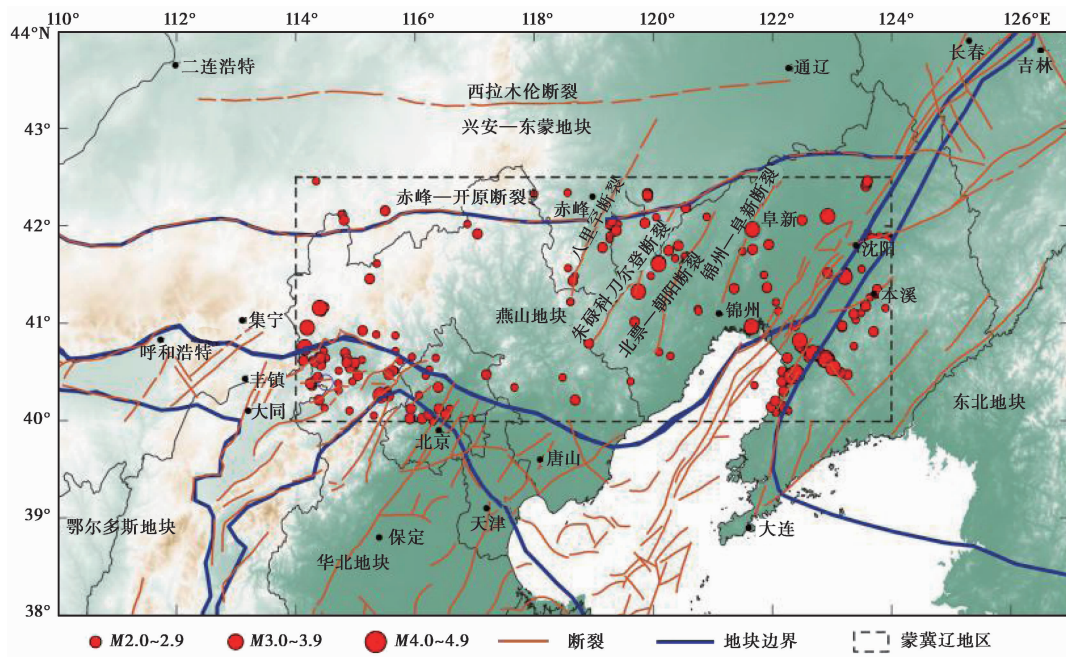


图1 地震震中分布

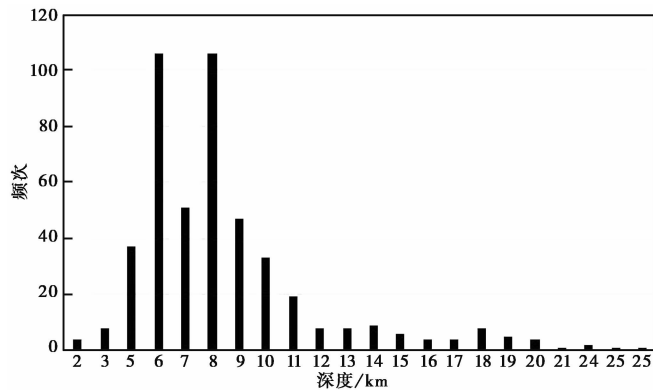


图2 所选地震深度分布统计

将研究区域划分为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的二维网格,据万永革等(2011)应力场计算方法,根据网格点选取附近地震台站记录到的P波初动符号,因每个地震距离网格点的距离不同,而赋予其P波初动不同的权重。每个地震的P波初动权重为 w ,计算公式为

$$w = e^{-r^2/D^2} \tag{1}$$

其中, D 为距离衰减常数, r 为折合距离,计算公式为

$$r = \sqrt{[111.199 \times (\varphi - \varphi^0) \cos((\theta + \theta^0)/2)]^2 + [111.199 \times (\theta - \theta^0)]^2 + (z - z^0)^2} \tag{2}$$

其中, φ, θ, z 分别为地震的经度、纬度和深度, φ^0, θ^0, z^0 为网格处的经度、纬度和深度。距离衰减常数 D 的选取直接影响P波初动符号的权重,从而影响各网格点应力场计算结果。因此,在计算应力场时,通过采用较大 r 值的数据使得网格点之间有一定的数据重迭,从而进

行一定的平滑,同时对地震资料较少的网格点加以约束。反演结果中每个网格点得到最小矛盾比所对应的综合震源机制解是求得的最优解。本文在研究中考考虑两个因素,一是对网格点应力场计算结果给予一定的平滑;二是部分区域地震资料较少时,充分利用其周边网格点内的地震 P 波资料予以约束,本文将 D 值取为 50km。由式(1)可知,当折合距离 r 为 41.6km 时, P 波初动资料权重 w 为 50%,当折合距离 r 为 75.9km 时, P 波初动资料权重 w 为 10%,而当折合距离 r 为 100km 时, P 波初动资料权重 w 为 2%。因此,为保证应力场的反演精度,震中距选取 P 波初动符号个数大于等于 100 个的网格点进行反演。

本文通过 $1^\circ \times 1^\circ \times 1^\circ$ 间隔的网格搜索来确定 P 、 T 轴平均方向,并将每次搜索不符合综合震源机制模型的 P 波初动符号个数(考虑权重 w)与总 P 波初动符号(考虑权重 w)之比,称之为矛盾比。选择矛盾比最小的一组所对应的 P 、 B 、 T 轴作为所研究区域的主应力方向(李钦祖等,1973;许忠淮等;1983、1989;李泉等,2022)。当 P 波数量足够多且方位覆盖好时,可以获得网格点处最优震源机制解,即可靠的应力场方向。

通过分析区域内平均 P 、 T 轴方向,可以确定该区域由 P 波数据得到的最佳震源机制解,本研究中计算 P 波射线离源角和方位角使用的地壳速度模型参数见表 1,模型参数依据 Crust2.0(Bassin et al,2000)获得。

表 1 蒙冀辽交界地壳速度模型

层顶埋深/km	P 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
0	2.5
1	4.0
2	6.2
15	6.4
28	6.8
31	8.2

2 应力场计算结果及分析

应用上述资料和方法,对研究区域进行经纬度网格为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的空间扫描,获得了每个网格点内的最优综合震源机制解,所得的综合震源机制解的 P 轴方位和矛盾比分布情况见图 3, T 轴方位角和 P 波初动数分布情况见图 4,图中方位角箭头的长短表示其倾伏角的大小,箭头越长表示压力主轴的倾伏角越缓,反之箭头越短。

由图 3 可见,在整个研究区域,各个网格点的矛盾比较高,中部地区和北缘地区矛盾比最高,一定程度上反映了该区域应力场的复杂性。由图 4 可见,各个网格点内 P 波初动符号数量较为充足,为应力场反演的准确性提供了基础。受地震活动影响,在研究区域东部地区参与反演的 P 波数量最多,西南部次之,中部地区和北缘地区 P 波初动数量最少。

参照世界应力图的划分表(表 2),图 5 用不同颜色给出了综合震源机制解的分布情况。根据综合震源机制解结果和 P 轴、 T 轴方位分布图,由西向东分别对研究区域讨论其应力场计算结果。

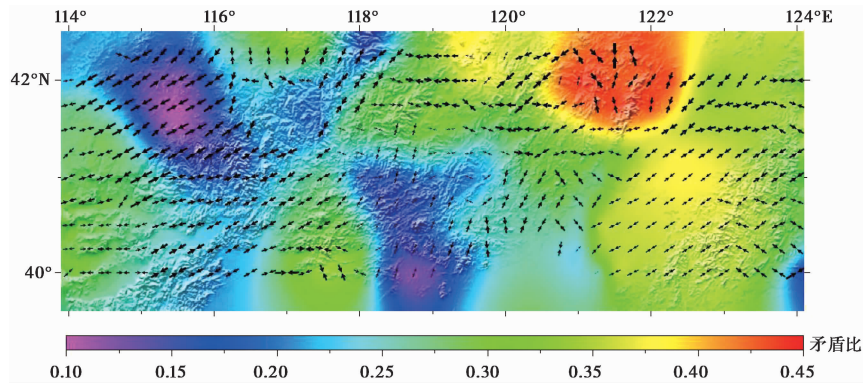


图3 P轴方位和矛盾比分布

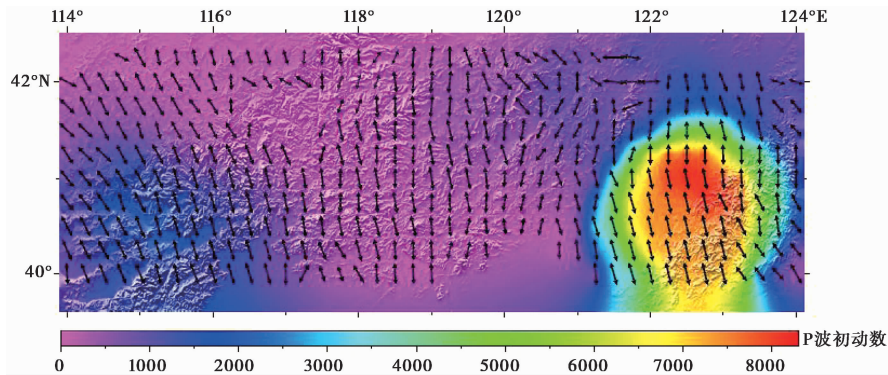


图4 T轴方位角和P波初动数分布

表 2 震源机制解分类依据表(据 Zoback(1992))

类型	P轴倾伏角	B轴倾伏角	T轴倾伏角
正断型(NF)	$\geq 52^\circ$		$\leq 35^\circ$
正走滑型(NS)	$40^\circ \leq \text{倾伏角} \leq 52^\circ$		$\leq 20^\circ$
走滑型(SS)	$\leq 20^\circ$	$\geq 45^\circ$	$< 40^\circ$
	$< 40^\circ$	$\geq 45^\circ$	$\leq 20^\circ$
逆走滑型(TS)	$\leq 20^\circ$		$40^\circ \leq \text{倾伏角} \leq 52^\circ$
逆断型(TF)	$\leq 35^\circ$		$\geq 52^\circ$
不确定型(U)	上述类型之外的震源机制解		

2.1 蒙冀交界地区应力场结果及分析

蒙冀交界地区在研究区西段,属于张渤地震带范围内,断裂带整体区内新构造运动较为频繁,新时代早期受到强烈的拉张和裂隙作用,形成了 NNE 向的正断裂,20 世纪以来该区域地块开始整体下降,在原有正断层基础上形成了走滑断裂,地块整体向东运动(张培震等, 2002、2003)。P 轴的方位大多呈现 NEE-EW 向特点,T 轴方位呈现 NNW-NS 向为主的应力信息,且 P 轴倾伏角较大,T 轴倾伏角较小。从图 5 可以看出,该区域综合震源机制解类型

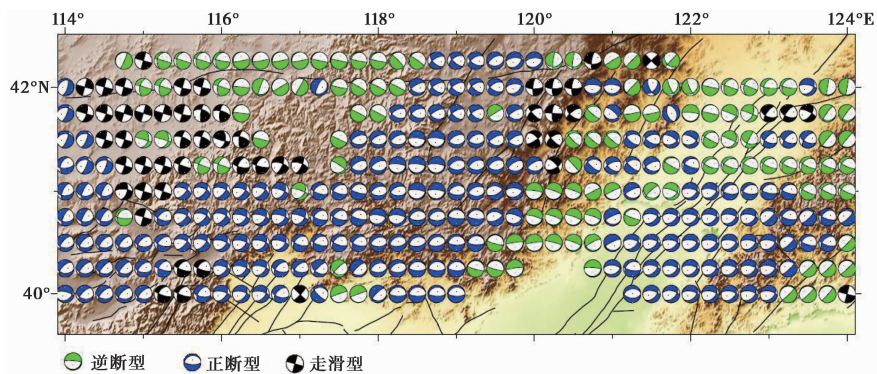


图5 综合震源机制解分布

以走滑和正断层类型为主,地壳应力场张轴近似水平方向,符合华北平原块体周缘及内部现今的剪切拉张状态,与前人研究结果(徐纪人等,2008;李丽等,2022;谢富仁等,2004)大体一致。

2.2 赤峰及以南地区应力场结果及分析

赤峰及以南地区处在 NE 向大兴安岭断块隆起带与 EW 向燕山断块隆起带相交汇的部位,其东侧有松辽断块拗陷。在隆起带及边缘有 EW 向的赤峰—开原断裂以及 NE 向的八里罕断裂和朝阳—北票断裂等并行断裂,由图 4 可见, T 轴的方位与该区域内主要断裂近垂直,倾角较小,而 P 轴(图 3)倾角较大,走向与断裂带分布基本一致。图 5 中震源机制解的结果为正断层,反映了该区应力为拉张型,与前人研究结果(韩晓明等,2009;张珂等,2022)一致。

2.3 蒙辽交界地区应力场结果及分析

蒙辽交界地区主要分布有锦州—阜新断裂带和北票—朝阳断裂带,从图 3 和图 4 可见,该区 P 轴方位走向主要为 NEE 向,在北侧边缘存在 NS 向和 EW 向的 P 轴分布特征,区域内 T 轴走向为近 SN 向,总体应力场方向符合华北北部至东北地区的应力场背景(周惠兰等,1996;张帆等,2017;李娟等,2023)。从图 5 可以看出,该区域综合震源机制解较为复杂,大多为正断型,北缘地区存在逆断型,与苏培臻等(2020)关于该区域的震源机制解存在差异,原因可能是复杂的构造和应力分布所导致,其结果有待进一步探讨。

3 结论与讨论

本文使用了 2008 年 1 月 1 日—2021 年 10 月 31 日蒙冀辽交界地区发生的 472 个地震事件的 13364 个 P 波初动资料,将所研究的蒙冀辽交界地区划分为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 空间网格,利用综合震源机制解法求解了该区域地壳应力场结果。通过计算得到的 P 、 T 轴,分别代表地震释放时应力张量的主压应力轴和主张应力轴,因此由 P 、 T 轴优势分布,可得所研究区域的构造应力场的分布特征(万永革等,2011)。本文利用近年来的数据对该地区应力场的精细特征首次做了研究,并查阅研究区相关地质构造资料,得到如下认识:

(1) 本文研究区域 P 轴方位在局部变化较大,但绝大部分平行于主要断裂带的走向,呈水平轨迹,与 Wan(2010)、许忠淮等(1989)的研究结果基本一致; P 轴整体呈 NE、NNE 向, T

轴整体呈 NW 或者 NNW 方向。

(2) 蒙冀交界地区属于张渤地震带范围内,新构造运动较为频繁,主压应力轴方位为 NEE-EW 向,主张应力轴方位以 NNW-NS 向为主,交界区北部沿赤峰开源断裂方向,综合震源机制解类型以逆断型为主,在康保—张北地区综合震源机制解由逆断型转变为以正断型为主。综合震源机制解节面走向与主要断裂走向基本一致,近似水平方向,反映了本区域处于张应力场环境,与该地区受青藏高原东北边缘强烈挤压后的运动方向一致。盛书中等(2015)、郭祥云等(2017)指出该区域受山西断陷盆地影响,主要断裂沿 NEE 向展布,综合震源机制解的节面大体呈 NEE 向展布,与本文研究结果基本一致。

(3) 蒙辽交界地区主压应力轴方位为 NEE 向,主张应力轴方位以 NW 方向为主,与戴盈磊等(2020)对辽宁地区的震源机制研究结果比较接近。朝阳—北漂—凌源地区和鞍山—本溪地区综合震源机制解类型为逆断型,廊坊—涿州地区、阜新一锦州地区和盖州—庄河地区综合震源机制解类型为正断型,台安—灯塔地区综合震源机制解类型为走滑型,这一结果与郯庐断裂带辽宁段完美符合,在 NNE 向挤压的现代构造应力场影响下,以逆冲兼具右旋走滑的运动方式所形成的现今构造格局,与丰成君等(2017)对于郯庐断裂带地壳浅层现代构造应力场的研究结果一致。该区域北缘地区出现了矛盾比最大值,可能是由复杂的地质构造和应力分布所致。

(4) 利用综合震源机制解反演应力场,依赖于台站密度和地震参数的准确性,如本研究中蒙辽交界地区所用 P 波初动符号较多,反演得到的 P 轴方位矛盾比较小,表明计算结果的可靠。本文选取的是内蒙古地区监测能力较强的区域,但是部分地区也存在台站分布较为稀疏、地震事件个数有限的问题。随着国家烈度速报预警工程项目的实施,区域地震监测能力明显提升,利用此方法对于研究该地区地质背景和断层形成具有很好的意义。

致谢: 感谢防灾科技学院万永革教授在程序和绘图上的帮助,感谢审稿专家对本文提出的意见和建议。

参考文献

- 卜玉菲,万永革,盛书中. 2011. 运用河北地区地震波资料求解区域应力场. 见:中国地球物理学会. 中国地球物理学会第二十七届年会论文集. 北京:中国科学技术大学出版社,389.
- 戴盈磊,万永革,梁永朵,等. 2020. 基于震源机制解资料的辽宁地区现今构造应力场. 地震,40(3):112~130.
- 丰成君,张鹏,戚帮申,等. 2017. 郯庐断裂带附近地壳浅层现今构造应力场. 现代地质,31(1):46~70.
- 郭祥云,韩立波. 2017. 晋冀蒙交界地区构造应力场特征. 国际地震动态,(8):129~130.
- 韩晓明,王鑫,郝美仙. 2009. 赤峰—辽蒙交界地区地震活动性及平均波速比分析. 高原地震,21(3):11~16.
- 李娟,张帆,魏建民,等. 2023. 2021年10月15日内蒙古阿鲁科尔沁旗4.7级地震发震构造研究. 中国地震,39(1):178~188.
- 李丽,孟令媛,吴昊昱,等. 2022. 晋冀蒙交界地区中强地震前地震活动图像异常特征. 地震研究,45(4):581~591.
- 李钦祖,王泽皋,贾云年,等. 1973. 由单台小地震资料所得两个区域的应力场. 地球物理学报,16(1):49~61.
- 李泉,万永革,许鑫,等. 2022. 地震断层带破碎非均匀程度研究——以新马德里地震带 Reelfoot 断层为例. 地球物理学报,65(8):2970~2983.
- 盛书中,万永革,黄骥超,等. 2015. 应用综合震源机制解法推断鄂尔多斯块体周缘现今地壳应力场的初步结果. 地球物理学报,58(2):436~452.
- 苏培臻,安祥宇,李恩来,等. 2020. 辽宁地区近期中小地震震源机制研究. 地球物理学报,63(11):4023~4036.

- 田优平,唐红亮,康承旭,等. 2020. 综合震源机制解法反演湖南地区构造应力场的初步结果. 地球物理学报, **63**(11): 4080~4096.
- 王永革,黄少华,王福昌,等. 2023. 2022 年门源地震序列揭示的断层几何形状及滑动特性. 地球物理学报, **66**(7): 2796~2810.
- 王永革,吴逸民,盛书中,等. 2011. P 波极性数据所揭示的台湾地区三维应力结构的初步结果. 地球物理学报, **54**(11): 2809~2818.
- 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等. 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区. 地球物理学报, **47**(4): 654~662.
- 徐纪人,赵志新,石川有三. 2008. 中国大陆地壳应力场与构造运动区域特征研究. 地球物理学报, **51**(3): 770~781.
- 许忠淮,阎明,赵仲和. 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向. 地震学报, **5**(3): 268~279.
- 许忠淮,汪素云,黄雨蕊,等. 1989. 由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场. 地球物理学报, **32**(6): 636~647.
- 闫睿,王永革,崔华伟,等. 2022. 晋陕豫交界地壳应力场特征分析. 地震工程学报, **44**(4): 953~961.
- 张帆,韩晓明,郝美仙,等. 2017. 2016 年 5 月 22 日辽宁朝阳 4.6 级地震震源机制和震源深度研究. 中国地震, **33**(1): 141~153.
- 张珂,张帆,张晖,等. 2022. 内蒙古敖汉旗震群的微震匹配定位及其发震断层研究. 地震学报, **44**(4): 594~607.
- 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. 中国科学:(D 辑), **33**(增刊 I): 12~20.
- 张培震,王琪,马宗晋. 2002. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块. 地学前缘, **9**(2): 430~441.
- 周蕙兰,丁如钢,吕春来. 1996. 通过反演节面数据研究中国东部地壳应力场的特征. 世界地震译丛, (4): 56~61.
- Aki K. 1966. Earthquake generating stress in japan for the years 1961 to 1963 obtained by smoothing the first motion radiation patterns. Bull Earthq Res Inst, **44**(2): 447~471.
- Bassin, C., Laske, G, and Masters, G, 2000. The current limits of resolution for surface Wave Tomography in North America. EOS Trans AGU, **81**: F897.
- Wan Y G. 2010. Contemporary tectonic stress field in China. Earthquake Sci, **23**(4): 377~386.
- 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.
- Zoback M L. 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project. J Geophys Res: Solid Earth, **97**(B8): 11703~11728.

Study of Crustal Stress Field in Inner Mongolia-Hebei-Liaoning Border Area

Hao Meixian, Chen Lifeng, Zhang Fan, Zhang Ke, Yin Zhanjun, Wang Lujun

Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, China

Abstract Based on the initial P-wave signal data from 472 earthquakes occurring in the Inner Mongolia-Hebei-Liaoning border region between January 1, 2008, and December 31, 2021, a fine-grained stress field with a resolution of $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ was constructed using the comprehensive focal mechanism method. This stress field effectively covers the entire Inner Mongolia-Hebei-Liaoning border area. The results of the stress field inversion reveal the following: ① The main compressive stress field in the Inner Mongolia-Hebei region trends eastward, driven by a tensile stress system resulting from the intense compression along the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. The dominant focal mechanism solutions are normal faulting and strike-slip faulting, with the P-axis generally oriented northeast to east-northeast, and the T-axis oriented northwest to west-northwest. These findings are consistent with previous studies on active tectonic movements and block tension and rifting in the area. ② In the Inner Mongolia-Liaoning border area, there is greater variability in the P-wave data, and the focal mechanisms are more dispersed. In the Inner Mongolia-Liaoning or Hebei-Liaoning border regions, the seismic source mechanisms are predominantly reverse faults, while in southern Liaoning, normal faulting is more prevalent.

Keywords: Crustal stress field; P wave initial motion; Comprehensive source mechanism solution; The border area of Inner Mongolia, Hebei and Liaoning