

京津冀地区地壳应力场特征^{*}

王晓山^{1,2}, 冯向东^{1,2}, 赵英萍¹

(1. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021; 2. 河北省地震动力学重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要: 基于标量断层类型值, 对京津冀地区及邻区 2 187 个中小地震震源机制解进行分类, 统计结果显示研究区震源机制类型以走滑断层和正断层为主, P 轴优势方位为 NEE—EW 和 SWW—EW 向; 采用 MSATSI 软件包反演该区 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格的精细地壳应力场, 结果表明: 最大主压应力轴最优解的优势方向为 NEE—EW 向, 与 P 轴优势方位一致; 所有网格的相对应力大小 R 值均小于 0.5, 表明京津冀地区应力状态偏拉张性质, 而且最小主压应力轴的不确定度变化范围相对稳定, 表明现今京津冀地区地壳应力场处于一个相对统一的 NNW—SSE 向的拉张作用控制下。39°N 以北地区最大主压应力轴方位最优解显示一定角度的偏转, 同时最大、中等、最小主压应力轴最优解推断的应力状态由西向东存在一个正断层—走滑断层—正断层的转换过程; 而 39°N 以南地区的现今构造应力场保持稳定, 最优主压应力轴呈 NEE—SWW 向, 大部分网格应力状态显示走滑型。构造应力场的反演结果与活动构造、GPS 主应变方向和剪切波分裂的快波偏振方向等相关研究结果基本一致。

关键词: 京津冀地区; 震源机制; 应力张量阻尼反演; 地壳应力场

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)04-0610-10

0 引言

地壳应力场的时空分布特征, 特别是地壳深部应力状态, 是解决地震发生机理、区域地壳稳定性、震源物理过程等地球动力学有关科学问题的基础。地质调查与大地测量结果表明, 华北平原现今不存在大规模的拉张变形, 区内主要断裂带的滑移速率低 (Shen *et al.*, 1996; 郭良迁等, 2008), 是一个地壳变形相对较弱的地区。在这种缓慢的变形区域中, 沉积盖层或浅部岩石中的直接应力测量通常不能代表深部的应力场, 而震源机制解是可用于估计缓慢变形区域中震源深度处应力场的少数信息之一。

京津冀地区是我国东部强震活动频度和强度最强的地区, 同时也是新构造活动最强烈的地区之一, 区内分布有张家口—渤海地震构造带 (张渤地震带) 和华北平原地震构造带, 中强地震绝大多数都发生在这 2 条构造带或其交会部位。该区是国内使用地震记录开展地壳应力场较早的地区, 李钦祖等 (1973) 利用河北红山台和沙城台记录

的小地震 P 波初动资料确定了台站周边区域的应力场; 许忠淮等 (1979, 1983) 对上述方法进行改进, 形成了“综合震源机制解法”, 求解了京津唐张和华北地区的构造应力场方向。首都圈数字地震台网于 2002 年开始正式运行 (刘瑞丰等, 2008), 为地震精确定位和震源机制解反演提供了有利条件, 研究人员利用 P 波初动极性、振幅比和波形反演求解了大量的中小震震源机制解, 且其质量也更加可靠 (胡新亮等, 2004)。基于此, 不同研究人员使用不同方法开展了包括首都圈在内的京津冀地区的地壳应力场研究 (兰从欣等, 2005; 李瑞莎等, 2008; 张红艳等, 2009; 武敏捷等, 2011, 2012; 胡幸平, 崔效锋, 2013; 黄骥超, 万永革, 2015; 刘静等, 2016; 刘丽等, 2017; 樊文杰等, 2019)。其中大部分研究根据构造特征和地震分布将研究区域分成几个应力小区, 每个应力小区的范围都和许忠淮等 (1983) 对京津冀地区的分区基本一致, 所不同的是张红艳等 (2009) 在此基础上进行了细分, 但是所得的构造应力场方向基本相同; 刘静等 (2016) 和刘丽等 (2017) 对河北地区整体构造应力场的研究结果也

^{*} 收稿日期: 2020-03-17.

基金项目: 河北省技术创新引导计划项目 (19975412D) 和河北省地震局地震科技星火重点项目 (DZ20180319009, DZ20160621078) 联合资助.

验证了该地区处于华北地区统一地壳应力场的控制下(李钦祖, 1980; 魏光兴等, 1982; 许忠淮等, 1983)。

在京津冀地区震源机制解数据日益丰富的当下, 武敏捷等(2011)采用细分网格加滑动步长的方式初步讨论了华北北部地区的构造应力场, 由于每个网格都是独立反演, 分区方式不同和分区大小的变化都可能对反演的应力张量结果产生影响(Maury *et al.*, 2013)。相邻2个网格主应力方向的不同或许反映了应力场真实的变化, 但也可能是震源机制数据的误差或反演的约束较差造成的假象。地壳中的真实应力场是连续分布的, 为了解决应力反演模型依赖于分区的问题, 更准确地反映研究区域的应力场空间变化特征, Hardebeck 和 Michael (2006)构建了一组可调整的阻尼参数, 引入平滑约束来抑制相邻网格应力模型的差异, 提出了区域尺度的应力张量阻尼反演方法。本文基于京津冀地区及邻区的中小地震震源机制解, 将该方法应用于对该区精细地壳应力场特征的研究。

1 数据和方法

1.1 震源机制解数据

本文所用震源机制解共2 187个, 震级区间 $2.0 \leq M_L \leq 5.5$, 覆盖范围包括京津冀地区以及山西、辽宁、内蒙部分地区。数据来源分为2个部分: 第一部分为2002—2008年京津冀地区 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解, 使用梁尚鸿等(1984)提出的利用区域地震台网垂直向 \bar{P} , \bar{S} 最大振幅比资料测定小震震源参数的方法, 该方法反演结果的可靠性在前人的对比论证中得到了证实(胡新亮等, 2004; 付虹等, 2009), 且已经在首都圈的应力场研究中得到应用(李瑞莎等, 2008; 张红艳等, 2009; 武敏捷等, 2011, 2012); 第二部分为2009—2019年10月京津冀地区 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解, 使用格点尝试法(许忠淮等, 1983)利用P波初动极性计算震源机制解, P波初动极性资料主要来自“地震编目系统”下载的震相报告和从事件波形中人工读取的P波初动。为了保证震源机制解的可靠性, 参与计算的P波初动极性数据一般要求10个以上, 且在震中周围均匀分布,

矛盾比小于0.20。胡新亮等(2004)对首都圈数字地震台网内的地震分别使用格点尝试法和垂直向最大振幅比方法测定震源机制, 二者结果基本一致, 表明2种方法计算结果可以联合起来进行京津冀地区地壳应力场特征分析。

1.2 震源机制解分类方法

对震源机制解分类有多种方法, 如使用 P , T 轴参数进行三角形分类(Frohlich, 1992, 2001)、根据震源机制解3个应力轴倾角的世界应力图划分标准(Zoback, 1992)、以3个应力轴的倾角最大值判断震源机制破裂类型(刁桂苓等, 2011)等, 以上都是以应力轴参数对震源机制解分类。本文采用Shearer等(2006)提出的依据节面滑动角 r_i 对震源机制解进行分类的方法。该方法的优势在于提供单个标量断层类型值用于表征震源错动类型, 标量断层类型值 f_{p_type} 为:

$$f_{p_type} = \frac{r}{90} \quad (1)$$

式中: 当 $|r_1| < |r_2|$ 时, $r = r_1$; 当 $|r_1| \geq |r_2|$, $r = r_2$ 。 r_1 或 r_2 表示如下:

$$r_i = \begin{cases} (180 - |r_i|) \times (r_i / |r_i|), & |r_i| > 90 \\ r_i, & |r_i| \leq 90 \end{cases} \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

标量断层类型值从-1(正断层)→0(走滑断层)→1(逆断层)变化。Lin和Okubo(2016)取一个介于0~1的 X_f 值来区分断层类型:

$$\begin{cases} -1 \leq f_{p_type} < -X_f, & \text{正断层} \\ -X_f \leq f_{p_type} \leq X_f, & \text{走滑断层} \\ X_f < f_{p_type} \leq 1, & \text{逆断层} \end{cases} \quad (3)$$

1.3 应力场反演方法

目前, 使用震源机制解进行应力场反演应用最广泛的2种方法为: 震源机制应力反演(FMSI)的网格搜索方法(Gephart, Forsyth, 1984; Gephart, 1990)和自助线性应力反演(LSIB)方法(Michael, 1984, 1987)。Hardebeck和Hauksson(2001)使用含噪声的合成数据对这2种方法进行测试, 2种方法都能精确地确定应力方向; FMSI方法通常对于高质量数据更准确, 而LSIB方法对于离散度大的数据更准确; LSIB方法产生的置信

区间通常较为合理,而 FMSI 方法的置信区间通常过大。合成数据测试结果表明,只要满足应力场均匀和断层的滑动方向与剪应力方向一致的模型假设,由 LSIB 方法产生的置信区间也应适用于真实数据。Hardebeck 和 Michael (2006) 引入阻尼最小二乘反演方法对 LSIB 方法加以改进,提出了区域尺度的应力张量阻尼反演方法 SATSI (Spatial And Temporal Stress Inversion) 算法;Martínez - Garzón 等 (2014) 将 SATSI 算法移植到 Matlab 环境中,形成一款结合可靠经典方法的、新简化用户处理及可视化工具的应力反演 Matlab 软件包。由于本文所用震源机制解数据量较大,且 2 种不同的方法计算得到的数据离散度较大,故选用 MSATSI 软件包反演京津冀地区地壳应力场,以期可以准确地约束应力张量的方向 (Hardebeck, Michael, 2006)。

2 震源机制解统计特征

本文参考 Lin 和 Okubo (2016) 的做法,对京津冀地区中小地震震源机制解的破裂类型比例进行定量估计,取 $X_f = 0.33$,将 $[-1, 1]$ 分成 3 个相等的部分,震源机制解也相应分为走滑断层、正断层和逆断层 (图 1)。对上述地震进行统计后发现,京津冀地区有 1 315 个走滑型震源机制解,占整体数量的 60.1%, 628 个正断型地震,占 28.7%, 244 个逆断型地震,占 11.2%,该区震源错动类型主要以走滑型和正断型地震为主。不同类型的震源机制解空间分布 (图 1) 显示,走滑型地震在整个区域弥散分布,而正断型和逆断型地震基本上沿着张渤地震带和华北平原地震带分布,没有形成明显的单一类型的丛集区。

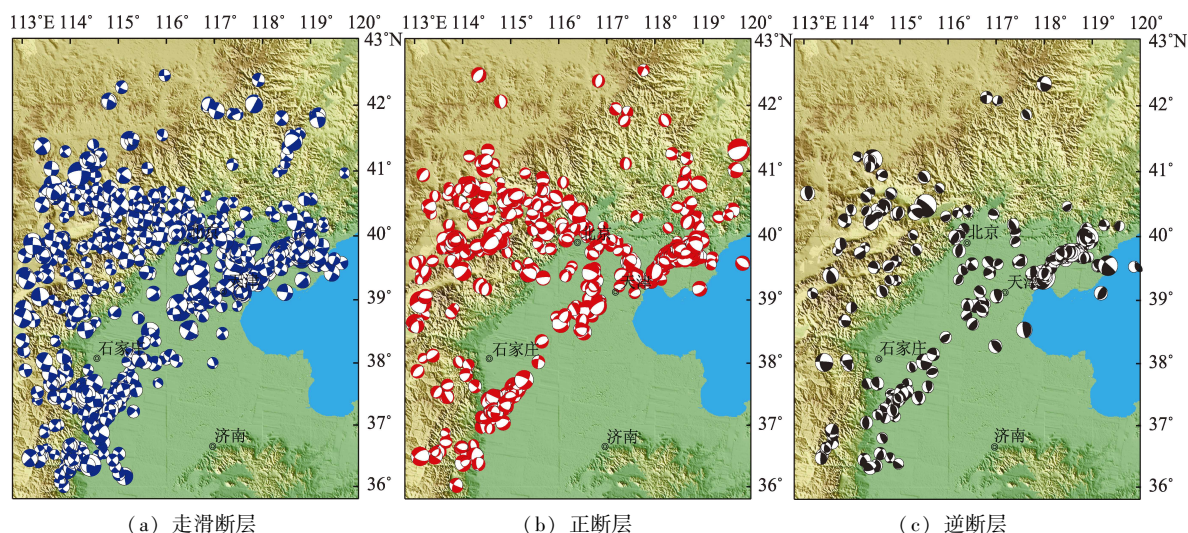


图 1 京津冀地区中小地震震源机制解类型分布

Fig. 1 The spatial distribution of focal mechanism solution types in the Beijing - Tianjin - Hebei region

将震源机制解按节面走向、倾角、滑动角和 P 轴方位角绘制成直方图进行统计 (图 2)。由于绝大多数地震震级太小,无法区分真正的断层面和辅助断层面,故将 2 个节面等同看待,参数合并统计。节面走向大体呈各个方位均匀分布,在 NNE—SSW 和 NW—SEE 向稍显优势 (图 2a);节面倾角以接近直立的高倾角最多,表明以走向滑动为主,几乎没有近水平的节面 (图 2b);节面滑动角以走向滑动为主,左旋、右旋走滑数量相仿,正倾滑明显多于逆倾滑 (图 2c)。 P 轴方位角在 NEE—EW 和 SW—EW 向存在显著优势取向,

可以看作是京津冀地区最大水平压应力方向 (图 2d)。上述震源机制解的统计特征与前人研究结果 (李钦祖, 1980; 许忠淮等, 1983; 武敏捷等, 2012; 刘静等, 2016; 刘丽等, 2017) 基本一致。

3 地壳应力场反演

采用 $1^\circ \times 1^\circ$ 的步长,将京津冀地区 ($36.0^\circ \sim 43.0^\circ \text{N}$, $113^\circ \sim 120^\circ \text{E}$) 划分网格,使用 MSATSI 软件包反演该地区精细的地壳应力场。该方法通过在反演过程中加上一个合理的阻尼,使反演的

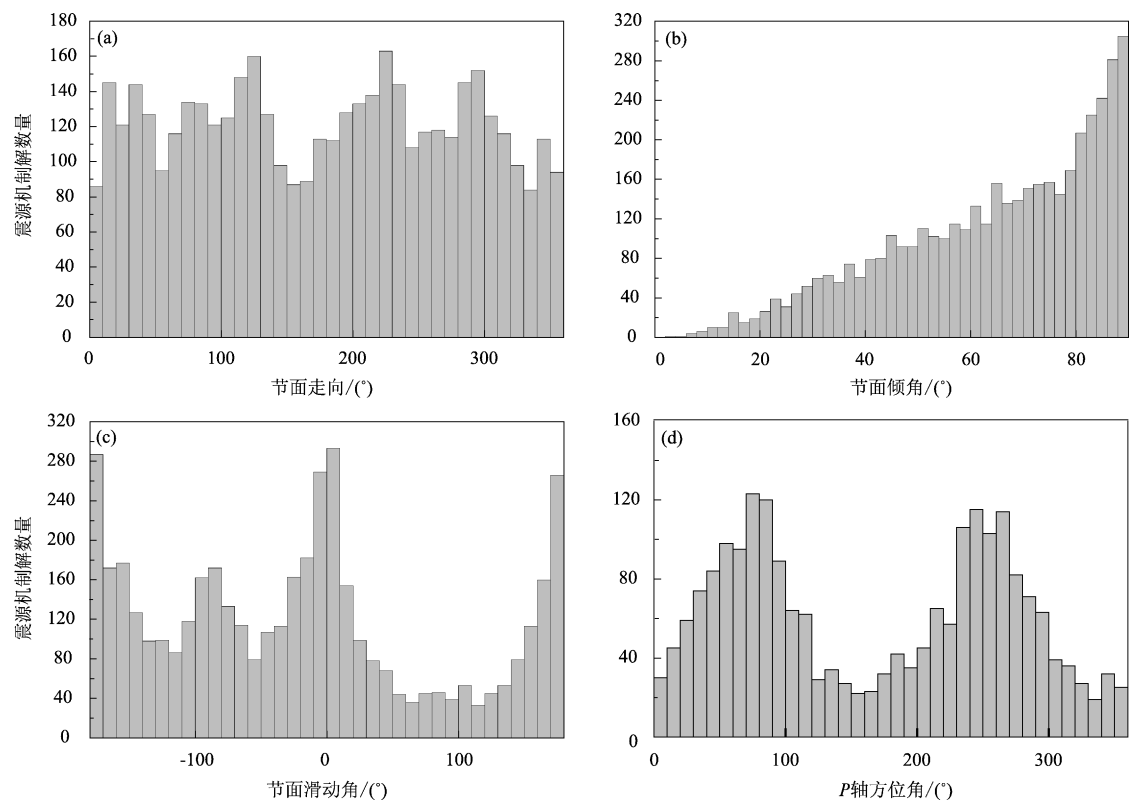


图 2 震源机制解节面参数统计直方图

Fig. 2 Histograms are shown for the nodal plane paremeters of focal mechanism solution

相邻区域的应力张量变化最小，消除人为划分反演区域导致的应力偏转假象，更好地凸显整体应力场特征 (Hardebeck, Michael, 2006)。在反演之前要先确定阻尼系数 e ，它控制着理论值与观测数据之间拟合残差和应力反演模型长度的相对权重，对反演结果起着至关重要的作用。图 3 为模型长度—数据拟合残差的折中曲线，其拐点在 1.2，因此最佳阻尼系数取 $e = 1.2$ 。反演中每个网格采用的震源机制解至少为 6 个，随机选取其中一个节面进行构造应力场反演。反演应力场参数的置信水平的可设定范围为 68% ~ 95%，本文设定为 95%。重采样的迭代次数对于解的不确定度评价很重要，重采样次数过少导致评估结果没有统计意义，过多会导致计算量大，反演中重采样次数的默认范围是 1 000 ~ 5 000 次 (Martínez – Garzón *et al*, 2014)，本文对所有数据进行 2 000 次抽样估计。经过计算得到最优状态下的 3 个应力主轴的方向和相对应力大小 (R 值) (Gephart, Forsyth, 1984) 为：

$$R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1) \quad (4)$$

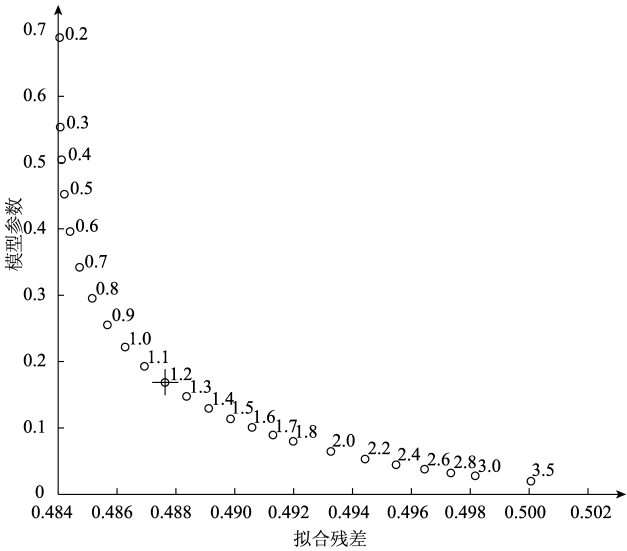


图 3 应力场反演模型长度—数据拟合残差的折中曲线
Fig. 3 Trade – off curve between model length and data fitting misfit in the stress field inversion moddle

式中： σ_1 ， σ_2 ， σ_3 分别表示最大、中间、最小主压应力。

从表 1 和图 4 可以看出，最优主压应力轴 σ_1 的优势方向为 NEE—EW 向，且有大约半数的网格

表 1 京津冀地区应力场反演结果 (只列出有结果的网格)

Tab. 1 Results of stress field inverted in the Beijing – Tianjin – Hebei region (only give the grids with results)

网格编号 (中心点经纬度)	σ_1 轴		σ_2 轴		σ_3 轴		R 值
	方位角/(°)	倾角/(°)	方位角/(°)	倾角/(°)	方位角/(°)	倾角/(°)	
00 (36.5°N, 113.5°E)	-99.72 -113.40 ~ -87.40	7.78 -81.30 ~ 76.20	80.46 -99.50 ~ 260.10	82.22 8.60 ~ 89.50	-9.72 -20.90 ~ 3.00	0.03 -45.00 ~ 14.40	0.24 0.03 ~ 0.61
10 (36.5°N, 114.5°E)	-112.20 -121.30 ~ -102.90	2.23 -29.00 ~ 43.60	19.71 -160.20 ~ 199.00	86.66 46.30 ~ 90.00	157.70 148.80 ~ 168.40	2.48 -9.60 ~ 44.40	0.33 0.03 ~ 0.61
01 (37.5°N, 113.5°E)	53.13 43.50 ~ 62.30	9.50 -65.50 ~ 76.90	-117.85 -297.20 ~ 62.10	80.38 13.10 ~ 90.00	143.38 135.30 ~ 152.90	1.48 -6.30 ~ 41.70	0.18 0.02 ~ 0.47
11 (37.5°N, 114.5°E)	67.27 56.80 ~ 76.10	13.87 -26.70 ~ 37.50	-137.21 -316.40 ~ 42.70	74.82 52.00 ~ 89.90	-24.23 -34.90 ~ -15.80	6.05 -43.70 ~ 16.70	0.44 0.11 ~ 0.68
21 (37.5°N, 115.5°E)	64.26 23.70 ~ 225.70	15.75 -67.30 ~ 86.30	-155.91 -335.10 ~ 22.20	69.74 -8.30 ~ 89.50	-29.29 -49.95 ~ -9.30	12.41 -44.40 ~ 43.10	0.32 0.01 ~ 0.86
02 (38.5°N, 113.5°E)	-10.82 -188.90 ~ 168.70	83.53 -2.40 ~ 89.70	-125.38 -303.20 ~ 11.70	2.70 -85.50 ~ 88.80	144.34 131.40 ~ 157.00	5.88 -8.70 ~ 41.60	0.14 0.01 ~ 0.49
12 (38.5°N, 114.5°E)	58.36 -118.40 ~ 233.70	29.32 -48.70 ~ 86.40	-137.83 -317.80 ~ 41.10	59.68 -25.40 ~ 89.50	-35.62 -53.70 ~ -20.90	7.05 -41.10 ~ 25.50	0.30 0.01 ~ 0.75
22 (38.5°N, 115.5°E)	64.52 -100.20 ~ 241.70	33.69 -52.40 ~ 88.40	-115.14 -295.10 ~ 64.20	56.30 -26.80 ~ 89.50	154.63 135.60 ~ 194.00	0.16 -29.50 ~ 45.00	0.32 0.01 ~ 0.91
32 (38.5°N, 116.5°E)	-112.16 -289.40 ~ 60.20	35.01 -49.00 ~ 87.70	56.93 -122.30 ~ 235.90	54.49 -23.20 ~ 88.70	154.21 137.90 ~ 169.30	5.16 -12.40 ~ 42.20	0.20 0.01 ~ 0.64
03 (39.5°N, 113.5°E)	-58.56 -122.30 ~ 59.70	83.12 -2.80 ~ 89.30	61.07 -57.20 ~ 72.20	3.41 -55.60 ~ 83.30	151.42 140.70 ~ 161.10	5.96 -0.70 ~ 12.80	0.27 0.01 ~ 0.48
13 (39.5°N, 114.5°E)	-118.15 -297.50 ~ 61.80	82.21 -7.20 ~ 89.60	50.86 -122.60 ~ 224.30	7.65 -81.20 ~ 88.70	141.06 130.50 ~ 156.30	1.47 -10.00 ~ 41.80	0.26 0 ~ 0.56
23 (39.5°N, 115.5°E)	73.89 -106.10 ~ 253.80	75.03 -14.80 ~ 89.10	-106.83 -285.90 ~ 73.10	14.97 -74.30 ~ 89.70	-16.79 -29.00 ~ -0.90	0.18 -45.00 ~ 11.40	0.08 0 ~ 0.43
33 (39.5°N, 116.5°E)	-104.32 -283.10 ~ 74.00	48.33 -41.10 ~ 88.90	76.73 -100.70 ~ 255.90	41.67 -34.20 ~ 89.40	-13.73 -29.80 ~ -0.90	0.52 -44.50 ~ 11.70	0.20 0.01 ~ 0.48
43 (39.5°N, 117.5°E)	86.08 -66.80 ~ 257.80	9.68 -76.80 ~ 88.10	-60.74 -239.80 ~ 116.80	78.49 -8.70 ~ 89.90	177.14 163.90 ~ 190.10	6.18 -9.20 ~ 45.00	0.17 0.01 ~ 0.53
53 (39.5°N, 118.5°E)	83.36 -87.30 ~ 97.90	26.81 -62.50 ~ 87.00	-83.40 -100.60 ~ 82.40	62.56 -25.70 ~ 88.30	176.10 170.20 ~ 178.80	5.40 1.10 ~ 9.90	0.03 0 ~ 0.20
63 (39.5°N, 119.5°E)	64.21 -25.30 ~ 139.60	1.99 -87.20 ~ 88.10	-37.95 -217.10 ~ 141.20	80.64 -0.10 ~ 89.70	154.53 138.30 ~ 171.10	9.14 -11.00 ~ 43.00	0.29 0.01 ~ 0.76
04 (40.5°N, 113.5°E)	83.47 -78.10 ~ 256.60	79.26 -9.80 ~ 89.10	-123.76 -302.90 ~ 46.20	9.58 -80.40 ~ 89.80	-32.94 -44.90 ~ -21.80	4.82 -40.90 ~ 15.00	0.13 0 ~ 0.48
14 (40.5°N, 114.5°E)	54.52 -125.40 ~ 234.50	84.97 -5.00 ~ 89.70	-119.30 -295.40 ~ 52.80	5.00 -84.60 ~ 89.40	150.65 140.50 ~ 163.30	0.54 -11.50 ~ 43.60	0.11 0.01 ~ 0.38
24 (40.5°N, 115.5°E)	74.45 -104.80 ~ 254.30	56.83 -32.80 ~ 89.10	-111.93 -291.60 ~ 67.80	33.00 -56.90 ~ 89.50	-20.03 -28.60 ~ -10.30	2.92 -44.20 ~ 11.00	0.07 0 ~ 0.29

续表 1

网格编号 (中心点经纬度)	σ_1 轴		σ_2 轴		σ_3 轴		R 值
	方位角/(°)	倾角/(°)	方位角/(°)	倾角/(°)	方位角/(°)	倾角/(°)	
34 (40.5°N, 116.5°E)	-99.70	49.49	70.70	40.11	164.72	4.75	0.30
	-119.60 ~ 61.70	-18.30 ~ 81.10	-75.80 ~ 92.00	-9.60 ~ 84.90	146.60 ~ 176.00	-7.90 ~ 43.70	0.06 ~ 0.58
44 (40.5°N, 117.5°E)	71.96	13.62	-77.87	74.34	163.81	7.57	0.29
	-98.90 ~ 216.70	-75.90 ~ 87.50	-256.30 ~ 99.90	-9.50 ~ 89.40	146.90 ~ 179.60	-17.10 ~ 44.00	0.01 ~ 0.79
54 (40.5°N, 118.5°E)	-86.21	78.05	73.85	11.25	164.64	3.97	0.14
	-266.20 ~ 93.00	-10.70 ~ 89.30	-105.00 ~ 253.70	-77.00 ~ 88.90	150.70 ~ 178.70	-7.80 ~ 44.60	0 ~ 0.50
64 (40.5°N, 119.5°E)	74.87	25.80	-104.62	64.20	164.96	0.20	0.24
	-102.40 ~ 252.10	-62.00 ~ 88.70	-284.40 ~ 74.60	-23.90 ~ 88.90	148.60 ~ 182.80	-20.30 ~ 45.00	0.01 ~ 0.70
15 (41.5°N, 114.5°E)	-67.94	80.49	75.36	7.65	166.11	5.61	0.25
	-247.80 ~ 107.30	-6.80 ~ 89.50	-80.90 ~ 156.30	-81.00 ~ 87.20	150.80 ~ 184.30	-6.60 ~ 44.90	0.01 ~ 0.58
45 (41.5°N, 117.5°E)	13.74	79.08	-114.15	6.76	154.83	8.54	0.18
	-147.20 ~ 166.70	-8.70 ~ 89.60	-293.30 ~ 48.00	-83.10 ~ 88.80	134.90 ~ 177.90	-7.20 ~ 43.30	0.01 ~ 0.66
55 (41.5°N, 118.5°E)	-99.38	52.99	60.35	35.26	157.36	9.81	0.40
	-121.70 ~ 51.80	-7.00 ~ 86.60	-64.80 ~ 89.60	-47.50 ~ 80.60	136.30 ~ 177.20	-6.90 ~ 41.20	0.01 ~ 0.82
65 (41.5°N, 119.5°E)	-96.41	80.89	61.55	8.45	152.05	3.37	0.29
	-275.00 ~ 82.00	-8.70 ~ 89.60	-116.60 ~ 235.80	-81.00 ~ 89.50	116.20 ~ 181.00	-17.60 ~ 42.90	0.01 ~ 0.86

注：每一组数据中下面的数值范围为各参数 95% 置信区间的确定范围，方位角的负值表示由正北方向逆时针旋转角度。

倾角接近直立，表明应力状态为正断层类型，而网格编号 05，09，23 的最优主压应力轴 σ_1 方向为 NNW—NWW 向，倾角都接近直立，表明最大主应力轴垂直，这与前人用中强震震源机制解和综合震源机制解研究华北地区地壳应力场的结果有所差异（李钦祖，1980，1982；魏光兴等，1982；许忠淮等，1983），主要表现为最优主应力轴的倾角直立或水平，这可能与本文所用的震源机制解多为小震、易受局部构造运动控制、且具有随机性特征有关，反映了整体背景应力场下的非均匀性和复杂性；最优主张应力轴 σ_3 的优势方向为 SSE—NWW 向，且倾角均接近水平。

从图 4 中最大主压应力 σ_1 轴的指示方向可以看出，在 39°N 以北的首都圈地区最大主压应力轴自西向东存在由 NE 向近 EW 向的偏转，这与前人对首都圈构造应力场的研究结果基本一致（张红艳等，2009；武敏捷等，2012；黄骥超，万永革，2015；樊文杰等，2019），而且本文的分区更加精细，应力场的变化连续可靠。由最大、中间、最小主压应力轴最优解推断的张渤地震带陆地段的应力状态表现为，自西向东存在一个正断层—走滑断层—正断层的转换过程，这与张红艳等（2009）、

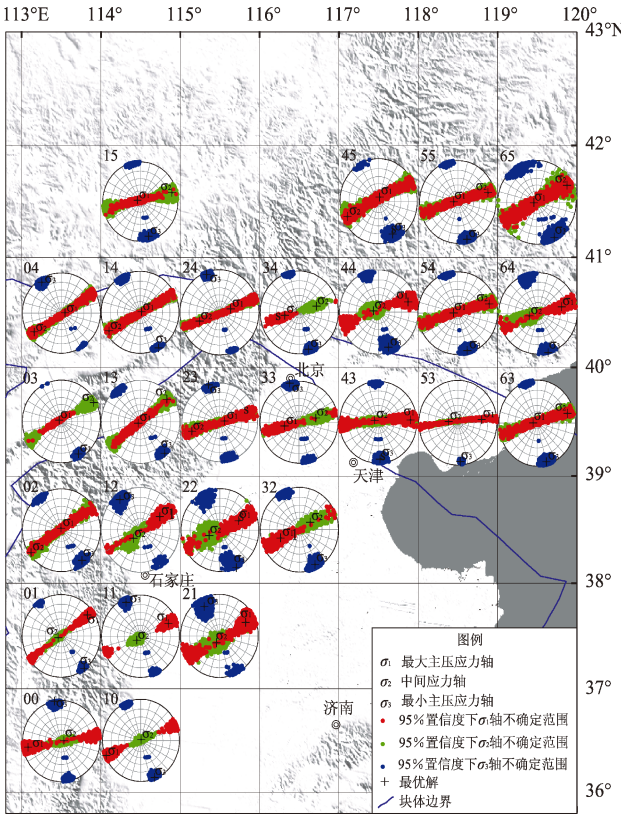


图 4 1°×1°网格划分的应力场反演结果

Fig. 4 Results of stress field inversion on 1°×1° grid

武敏捷等 (2012)、樊文杰等 (2019) 以走滑型为主的应力场特征存在一定差异; 同时, 在黄骠超和万永革 (2015) 对首都圈的构造应力场反演结果中, 北京—张家口—大同地区和唐山及邻区都表现出少量正断层性质。39°N 以南地区现今构造应力场保持稳定, 最优主压应力轴 σ_1 为 NEE—SWW 向, 大部分网格应力状态显示走滑型。

相对应力大小 R 值是中间主应力 σ_2 轴的值, 是更接近于最大主压应力轴 σ_1 还是最小主压应力轴 σ_3 的大小的度量。当 R 值趋于中间值 0.5 时, 表示 3 个应力主轴方位可完全分辨; 而当 R 值趋于取值端点 0 或者 1 时, 表示压缩或拉张应力状态完全不能分辨, 只能确定它在垂直于拉张或压缩应力主轴的平面内。一般认为当 R 值小于 0.5 时, 获得的应力状态偏拉张性质, 反之则为偏压缩性质 (Guiraud *et al.*, 1989)。从表 1 和图 5 可以看出, 所有网格的 R 值均小于 0.5, 表明京津冀地区

的应力状态呈现偏拉张性质。同时从图 4 可知, 最大主应力轴 σ_1 的不确定范围最大, 最大主压应力轴 σ_1 和中间应力轴 σ_2 表现的压应力状态是一致的, 两轴无法区分 (Guiraud *et al.*, 1989; 万永革等, 2011); 而最小主压应力轴 σ_3 的不确定度变化范围相对稳定, 我们可以推断京津冀地区现今地壳应力场处于一个相对统一的 NNW—SSE 向的拉张作用控制下。

4 结论和讨论

基于京津冀地区及邻区 2 187 个中小地震震源机制解, 通过计算标量断层类型值将其划分为 3 种震源错动类型, 采用 MSATSI 软件包反演该地区 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格的精细地壳应力场, 研究结果表明: 研究区震源机制类型以走滑断层和正断层为主, 占比约 90%; 不同类型的震源机制解没有形成明显的单一类型的丛集区, 反映出小地震的发生除了受背景应力场的控制, 还受局部构造条件控制且具有一定的随机性。这为我们利用小地震的震源机制解来推断构造应力主轴的方向提供了更大的优越性, 震源机制解的一对节面解中既含有构造应力场的信息, 也可能含有局部介质不均匀结构的影响 (许忠淮等, 1983)。

地壳应力场反演结果显示, 所有网格的相对应力大小 R 值均小于 0.5, 表明京津冀地区应力状态偏拉张性质, 而且最小主压应力轴 σ_3 的不确定度变化范围相对稳定, 表明现今京津冀地区地壳应力场处于一个相对统一的 NNW—SSE 向的拉张作用控制下。这一结果与前人的研究结果比较一致, 高名修 (1979) 认为华北地区处于引张应力场环境, 有限元模拟显示主张应力大约为主压应力 2~8 倍 (刘峡等, 2010)。利用反演结果中最大、中间、最小主压应力轴最优解推断的应力状态显示, 39°N 以北地区的最大主压应力轴方向存在一定角度的偏转, 同时应力状态由西向东存在一个正断层—走滑断层—正断层的转换过程; 而 39°N 以南地区的现今构造应力场保持稳定, 大部分网格应力状态显示走滑型。

39°N 以北地区与前人研究中的张渤带陆地段和首都圈范围基本一致, 大致分为 3 段: 西段、中段和东段。西段为张家口—大同地区, 应力状态

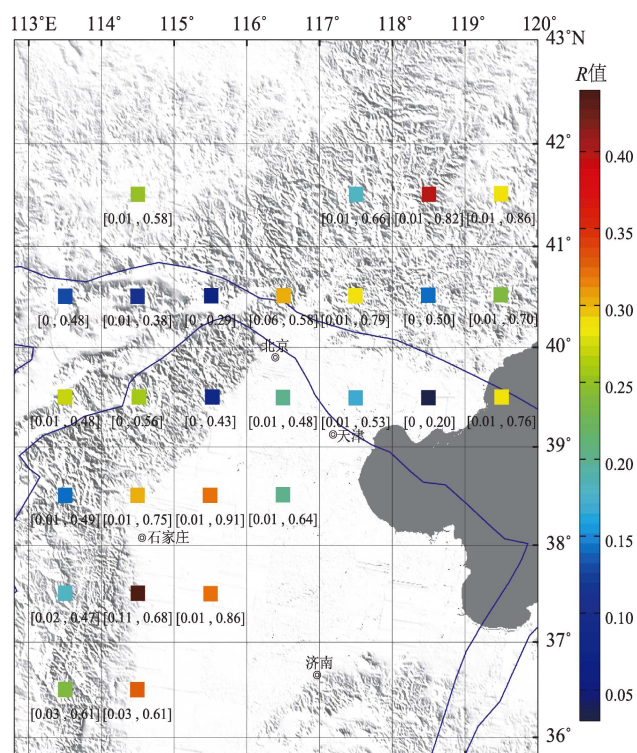


图 5 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格划分的相对应力大小 R 值
(网格中心矩形的颜色表示这个网格的 R 值, 中括号内的数值范围表示 95% 置信度下 R 值的范围)

Fig. 5 The relative stress magnitude R on $1^\circ \times 1^\circ$ grid
(the color-filled squares in each grid represent the corresponding R values, the numbers in the brackets give the 95% confidence intervals of the solutions)

表现为正断层类型,该区为山西断陷带右旋走滑在NE端形成的一个张性构造区(徐锡伟等,2002),活动构造、遥感和垂直形变研究结果都表明山西断陷带中北段至张家口地区总体以张性正断层活动为主(孙启凯等,2018;吴玉涛等,2018;申星等,2019;彭远黔等,2019),该区的中小地震震源机制解以正断型和走滑型为主(孙小入等,2019)。中段为北京—天津地区,应力状态为走滑类型和正断层,该区历史上曾发生过1679年三河—平谷地震,使用现今小震资料推断该地震的错动类型为走滑兼少量正断(王晓山,2017),2018年发生在该区的河北永清地震的震源机制为走滑兼正断类型(王晓山等,2018;李赫等,2020),GPS观测资料亦显示该区存在高剪切变形区(陈长云,2016)。东段为唐山地区,应力状态为走滑类型和正断层,杨雅琼等(2016)对唐山地震序列的现今小震震源机制分段拟合最佳应力张量,得到的结果为正断层和走滑类型兼有。综合前人多种资料的论证表明,本文的研究结果与前人结果具有较好的一致性,但仍存在少许差异,可能由所使用的反演方法、网格划分和数据量等导致,有待进一步研究分析。

GPS主应变率结果显示:京津冀大部分地区地壳变形特征主要受NEE的主压应变控制(陈长云,2016),京津冀地区的剪切波分裂的快波偏振方向为NEE—EW向(吴晶等,2008a, b;赵博等,2011;吴鹏等,2017)。该结果与该区使用中小地震震源机制解反演的构造应力场最优解基本一致,同时也和前人使用中强地震震源机制解和综合震源机制解得到的华北地区一致性良好的应力场吻合,表明中小地震震源机制的结果也可以较好地用于区域构造应力场的研究。京津冀地区是中国大陆较早实现数字化地震观测网络的地区,目前积累了丰富的中小地震波形资料,开展中小地震震源机制解及构造应力场的动态演化研究可以为该区地震动力学研究提供具有物理意义的信息,更好地服务于该地区的防震减灾综合研究。

参考文献:

陈长云. 2016. 张家口—渤海断裂带分段运动变形特征分析[J]. 地震, 36(1): 1–11.
刁桂苓, 徐锡伟, 陈于高, 等. 2011. 汶川 $M_w 7.9$ 和集集 $M_w 7.6$ 地震前应力场转换现象及其可能的前兆意义[J]. 地球物理学报, 54

(1): 128–136, doi:10.3969/j.issn.0001–5733.2011.01.014.
樊文杰, 崔效锋, 胡幸平, 等. 2019. 首都圈地区震源机制解及现今构造应力场时空变化特征研究[J]. 地震学报, 41(1): 33–45, doi: 10.11939/jass.20180064.
付虹, 王绍晋, 龙晓帆, 等. 2009. 利用数字化速度波形和仿真位移波形资料求解震源机制解的比较[J]. 地震研究, 32(1): 18–24.
高名修. 1979. 华北断块构造区的现代引张应力场[J]. 地震地质, 1(2): 1–12.
郭良迁, 马青, 杜雪松, 等. 2008. 华北地区断层形变与地震的关系[J]. 大地测量与地球动力学, 28(3): 14–20.
胡新亮, 刁桂苓, 马瑾, 等. 2004. 利用数字地震记录的 \bar{P} , \bar{S} 振幅比资料测定小震震源机制解的可靠性分析[J]. 地震地质, 26(2): 347–354.
胡幸平, 崔效锋. 2013. 华北地区中部地震精定位与构造应力场研究[J]. 震灾防御技术, 8(4): 351–360.
黄骥超, 万永革. 2015. 利用小震与强震震源机制解反演首都圈现今构造应力场[J]. 地震, 35(1): 17–27.
兰从欣, 邢成起, 苗春兰, 等. 2005. 近年首都圈地区中小地震震源机制解及其特征分析[J]. 华北地震科学, 23(4): 21–25.
李赫, 董一兵, 王熠熙, 等. 2020. 廊固凹陷深部剪切破裂构造的地震学证据[J]. 地球物理学报, 63(2): 492–504, doi: 10.6038/cjg2020N0192.
李钦祖, 靳雅敏, 于新昌. 1982. 华北地区的震源机制与地壳应力场[J]. 地震学报, 4(1): 55–61.
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[J]. 地球物理学报, 16(1): 49–61.
李钦祖. 1980. 华北地壳应力场的基本特征[J]. 地球物理学报, 23(4): 376–388.
李瑞莎, 崔效锋, 刁桂苓, 等. 2008. 华北北部地区现今应力场时空变化特征研究[J]. 地震学报, 30(6): 570–580.
梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镒, 等. 1984. 利用区域地震台网 \bar{P} , \bar{S} 振幅比资料测定小震震源参数[J]. 地球物理学报, 27(3): 247–257.
刘静, 董建辉, 陈婷, 等. 2016. 河北及邻区震源机制与构造应力场[J]. 华北地震科学, 34(3): 42–47.
刘丽, 刘檀, 董一兵, 等. 2017. 由震源机制解分析华北地区构造应力场[J]. 华北地震科学, 35(4): 38–43.
刘瑞丰, 高景春, 陈运泰, 等. 2008. 中国数字地震台网的建设与发展[J]. 地震学报, 30(5): 533–539.
刘峡, 马瑾, 傅容珊, 等. 2010. 华北地区现今地壳运动动力学初步研究[J]. 地球物理学报, 53(6): 1418–1427.
彭远黔, 朱坤静, 冉志杰, 等. 2019. 怀安镇盆地南缘断裂构造地貌特征[J]. 华北地震科学, 37(2): 45–51.
申星, 梁洪宝, 王家庆, 等. 2019. 利用 PS-InSAR 技术监测山西北部地表形变[J]. 华北地震科学, 37(1): 6–11.
孙启凯, 何庆龙, 李腊月. 2018. 华北北部地区地壳垂直形变演化特征及断裂活动性分析[J]. 地震研究, 41(3): 438–445.
孙小入, 岳晓媛, 刘金成, 等. 2019. 涿鹿 4.3 级地震前后应力场变化特征[J]. 华北地震科学, 37(3): 18–24.
万永革, 盛书中, 徐雅儒, 等. 2011. 不同应力状态和摩擦系数对综合 \bar{P} 波辐射花样影响的模拟研究[J]. 地球物理学报, 54(4): 994

- 1001, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.014.
- 王晓山,周月玲,冯向东. 2018. 2018年2月12日河北永清4.3级地震[J]. 华北地震科学, 36(2):18-22, 42.
- 王晓山. 2017. 华北平原块体地壳应力场与强震震源断层参数的研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所.
- 魏光兴,周翠英,赵兴兰. 1982. 华北地区中小地震应力场的优势方向[J]. 地球物理学报, 25(4):333-343.
- 吴晶,高原,陈运泰. 2008a. 首都圈东南部地区地壳介质各向异性[J]. 地震学报, 28(1):1-11, 105.
- 吴晶,高原,石玉涛,等. 2008b. 太行山山前断裂西南段地壳介质各向异性特征浅析[J]. 地震, 28(2):115-122.
- 吴鹏,李相平,高原,等. 2017. 邢台地区地壳各向异性特征初步研究[J]. 地震, 37(1):73-81.
- 吴玉涛,杨为民,谭成轩,等. 2018. 延怀盆地隐伏断裂第四纪活动性研究[J]. 华北地震科学, 36(4):1-9.
- 武敏捷,林向东,徐平. 2011. 华北北部地区震源机制解及构造应力场特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 31(5):39-43.
- 武敏捷,武安绪,徐平等. 2012. 首都圈地区震源机制解综合研究[J]. 中国地震, 28(4):393-401.
- 徐锡伟,吴卫民,张先康. 2002. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震[M]. 北京:科学出版社.
- 许忠淮,刘玉芬,张郢珍. 1979. 京、津、唐、张地区地震应力场的方向特征[J]. 地震学报, 1(2):121-132.
- 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[J]. 地震学报, 5(3):268-279.
- 杨雅琼,王晓山,万永革,等. 2016. 由震源机制解推断唐山地震序列发震断层的分段特征[J]. 地震学报, 38(4):632-643.
- 张红艳,谢富仁,崔效锋,等. 2009. 张渤带陆地段现代构造应力场的非均匀特征[J]. 中国地震, 25(3):314-324.
- 赵博,高原,石玉涛,等. 2011. 张家口—渤海地震带与山西地震带交汇区的地壳剪切波分裂[J]. 地球物理学报, 54(6):1517-1527.
- Frohlich C. 1992. Triangle diagrams; ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms[J]. Phys Earth Planet Inter, 75(1-3):193-198.
- Frohlich C. 2001. Display and quantitative assessment of distributions of earthquake focal mechanisms [J]. Geophys J Int, 144(2):300-308.
- Gephart J W, Forsyth D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando Earthquake sequence [J]. J Geophys Res, 89(B11):9305-9320.
- Gephart J W. 1990. FMSI: A FORTRAN program for inverting fault/slip-ense and earthquake focal mechanism data to obtain the regional stress tensor [J]. Computers and Geosciences, 16(7):953-989.
- Guiraud M, Laborde O, Philip H. 1989. Characterization of various types of deformation and their corresponding deviatoric stress tensors using microfault analysis [J]. Tectonophysics, 170(3-4):289-316.
- Hardebeck J L, Hauksson E. 2001. Stress orientations obtained from earthquake focal mechanisms: what are appropriate uncertainty estimates? [J]. Bull Seis Soc Amer, 91(2):250-262.
- Hardebeck J L, Michael A J. 2006. Damped regional-scale stress inversions: methodology and examples for southern California and the coalina aftershock sequence [J]. J Geophys Res, 111(B11):B11310, doi:10.1029/2005JB004144.
- Lin G, Okubo P G. 2016. A large refined catalog of earthquake relocations and focal mechanisms for the island of Hawai'i and its seismotectonic implications [J]. J Geophys Res, 121(7):5031-5048, doi:10.1002/2016JB013042.
- Martínez-Garzón P, Kwiatek G, Ickrath M, et al. 2014. MSATSI: A MATLAB package for stress inversion combining solid classic methodology, a new simplified user-handling, and a visualization tool [J]. Seismol Res Lett, 85(4):896-904.
- Maury J, Cornet F H, Dorbath L. 2013. A review of methods for determining stress fields from earthquakes focal mechanisms: application to the Sierentz 1980 seismic crisis (upper Rhine graben) [J]. Bull Soc geol, 184(4-5):319-334.
- Michael A J. 1984. Determination of stress from slip data: faults and folds [J]. J Geophys Res, 89(B13):11517-11526.
- Michael A J. 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: a control study [J]. J Geophys Res, 92(B1):357-368.
- Shearer P M, Prieto G A, Hauksson E. 2006. Comprehensive analysis of earthquake source spectra in Southern California [J]. J Geophys Res, 111(B6):303, doi:10.1029/2005JB003979.
- Shen Z K, Jackson D D, Ge B X. 1996. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles Basin from geodetic measurements [J]. J Geophys Res, 101(B12):27957-27980.
- Zoback M L. 1992. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project [J]. J Geophys Res, 97(B8):11703-11728, doi:10.1029/92JB00132.

Characteristics of Crustal Stress Field in Beijing – Tianjin – Hebei Region

WANG Xiaoshan^{1,2}, FENG Xiangdong^{1,2}, ZHAO Yingping¹

(1. *Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, Hebei, China*)

(2. *Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, Hebei, China*)

Abstract

Based on the values of scalar fault types, we classified the focal mechanism solutions of 2 187 small and medium earthquakes in the Beijing – Tianjin – Hebei region and its adjacent areas. The statistical results show that the main types of focal mechanisms are strike – slip and normal faulting, and the dominant direction of P -axis azimuth is NEE – EW and SWW – EW. Then we inverted the fine crustal stress field of $1^\circ \times 1^\circ$ grid in this region by MSATSI software package. The result shows that the dominant direction of the maximum principal compressive stress axis is NEE – EW direction, which is consistent with the dominant direction of the P -axis. The relative stress magnitude R of all grids were all less than 0.5, indicating the tensile property of the stress state in the Beijing – Tianjin – Hebei region. Moreover, the uncertainty range of the minimum principal compressive stress axis was relatively stable, indicating that the crustal stress field in the Beijing – Tianjin – Hebei region was under the control of a relatively unified extensional NNW – SSE direction. The axial direction of the best maximum principal compressive stress in the area in the north of 39°N , rotates at a certain angle from west to east, and the stress state inferred by the best maximum, medium, and minimum principal compressive stress axes had a normal fault – strike fault – normal fault transition process from west to east. The present tectonic stress field in the south area of 39°N remains stable, the optimal principal stress axis was in the NEE – SWW direction, and most of the stress states of the grid showed the strike – slip pattern. The inversion results of tectonic stress field in this paper are basically consistent with the results of active tectonic, GPS principal strain direction and fast wave polarization direction of shear wave splitting.

Keywords: Beijing – Tianjin – Hebei region; focal mechanism solutions; damped inversion of stress tensor; crustal stress field