

华北地区中部地震精定位与构造应力场研究¹

胡幸平 崔效锋

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要 选取华北地区中部 2008 年 1 月至 2012 年 12 月 741 次地震事件的波形文件, 读取 P 波初动极性以及 P、S 波震相到时。利用波形互相关技术, 精确计算地震到对时差, 结合读取出的震相到时数据, 采用双差定位法, 对这些地震进行了重新定位, 获得了 468 个地震的精确重定位结果。相比于初始结果, 精定位结果在平面分布上更为集中, 沿断裂带分布特征更明显; 深度也更为合理。在新河断裂附近, 存在明显的地震集中条带, 整体走向约为北偏东 35°, 通过剖面分析, 发现该断裂倾角很高。依据地震精定位获取 P 波射线参数, 利用 P 波初动极性, 采用改进的格点尝试法, 计算了区内单个地震震源机制解及小震综合断层面解, 并结合已有的应力数据, 综合分析了区内构造应力环境。结果表明, 华北地区中部现今构造应力场保持稳定, 为最大主应力轴北东东—南西西向, 最小主应力轴北北西—南南东向的走滑型应力状态。

关键词: 华北地区中部 波形互相关 双差定位 震源机制解 构造应力场

引言

本文的研究区域为北纬 36°—39.5°, 东经 114°—117.5°, 位于华北地区中部的平原区。区内构造复杂, 发育了一定规模的活动断层, 主要有北北东—北东和北北向两组, 其中又以北北东—北东向为主。区内小震活动比较丰富, 其中, 邢台至衡水之间的新河断裂地震活动相当频繁, 在 1966 年曾发生过 6.8 级和 7.2 级的大地震。地震定位是地震活动性以及活动构造等方面研究的重要基础资料, 构造应力场是地震孕育发生的力学背景, 是地震动力学的重要研究内容。对研究区开展地震定位和构造应力场研究, 对于认识区内地震活动、断层构造以及地震孕育发生力学环境具有十分重要的研究意义。

速度结构和震相到时的拾取精度是影响地震震源位置精度的重要因素。双差法 (Double Difference Algorithm) (Waldhauser 等, 2000) 是一种适用于大范围地震的同时相对定位方法, 能够有效减小速度模型引起的定位误差。另外, 采用波形互相关技术读取相对到时可以有效地减小人工拾取震相到时的误差。当两个地震震源位置相近且震源机制解相似时, 同一台站记录到的波形也相似, 利用波形的相似性可以获得精确的震相到时差, 从而提高双差定位结果的精度。因此, 波形互相关技术也被越来越多的学者应用到双差法地震定位的研究中 (Schaff 等, 2004; 2005; Hauksson 等, 2005; Shearer 等, 2005; Cai 等, 2011)。震源机制

1 基金项目 国家科技支撑计划: 地震应力环境探测技术与方法研究 (2012BAK19B03)、深部探测技术与实验研究专项构造应力分析方法研究与应力探测数据集成 (SinoProbe-06-04) 共同资助

[收稿日期] 2013-08-18

[作者简介] 胡幸平, 男, 生于 1987 年。助理研究员。主要从事构造应力场研究。E-mail: huxp1987@163.com

通讯作者 崔效锋, 男, 生于 1963 年。研究员。主要从事地球动力学、构造应力场研究。E-mail: cuixifeng@sina.com

解分析是研究构造应力场,尤其是地壳深部应力状态的重要手段。在求解震源机制解的各种方法中,利用P波初动极性数据的格点尝试法(许忠淮等,1983;俞春泉等,2009)是比较成熟和可靠的方法,得到了很多学者的应用(许忠淮等,1989;胡幸平等,2008;崔效锋等,2011)。

对于本文研究的华北地区中部,很多学者采用双差法开展过小震精定位研究(于湘伟等,2010;张广伟等,2011),也有一些学者利用震源机制资料分析了区内的构造应力场(许忠淮等,1983;崔效锋等,2001;周翠英等,2001;李瑞莎等,2008),取得了丰富的研究成果。然而,在以往的定位中很多都没有考虑利用波形互相关获取到时差来提高定位精度;在前人的构造应力场研究中,与小震精定位相结合的比较少;而这二者的结合,可以提高利用震源机制资料研究构造应力场的可靠性。为此,本文利用波形互相关获取震相到时差,采用双差定位法,对研究区内小震进行精确重定位,并结合精定位结果利用区内地震资料,对华北地区中部的构造应力环境进行分析。

1 小震精定位

1.1 地震资料及定位参数

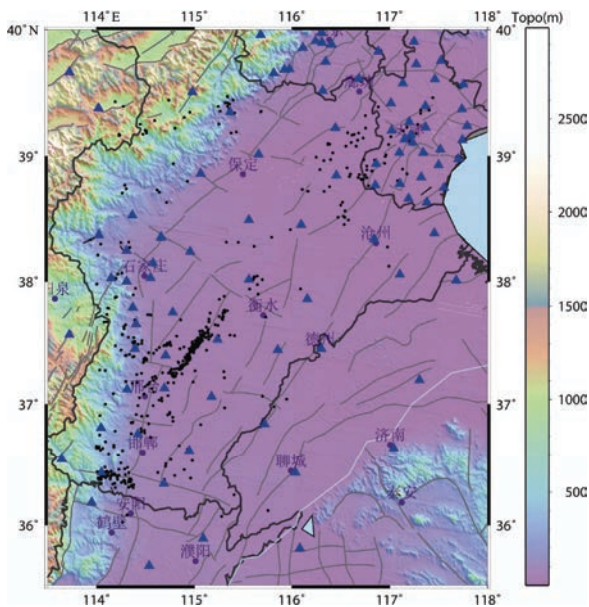
本文搜集了2008年1月至2012年12月河北测震台网记录截取的地震事件波形,并根据河北地震局提供的地震目录,选取了研究区内741次地震事件的波形文件。图1展示了所选取的地震初始震中分布以及所用的台站位置。首先对这些地震事件波形的P波及S波到时进行人工读取,挑选出可靠的到时数据,初步读取P波及S波到时数据共计18764条。然后,依据人工读取的到时数据,利用编写的互相关到时计算程序,计算了地震事件对之间的精确到时差。重定位所采用的一维速度模型是Lei等(2008)综合前人的研究成果给出的。

双差定位法程序提供了两种求解方法:奇异值分解法(SVD)以及共轭梯度法(LSQR)。奇异值分解法(SVD)能够有效地反映出求解结果的误差以及结果的可靠性,对于地震数目较少的(大约为100)小规模地震系统求解运算,具有一定的优势;然而如果要求解的地震系统较大,即地震数据较多,奇异值分解法(SVD)的效率就比较低,应当采用共轭梯度法(LSQR)。本文对地震数目超过100的地震簇采用共轭梯度法(LSQR)进行计算,而对于其余地震簇,采用奇异值分解法(SVD),并在求解运算中,根据程序运行反馈的信息,调整求解参数,保证求解结果的可靠性。

1.2 地震重定位结果

本文结合读取的震相到时数据和互相关到时差数据,采用Lei等(2008)给出的一维速度模型,利用双差定位法,对研究区内地震进行精确重定位,得到了468个地震事件的精确重定位结果(图2)。其中,地震数目最多(254个)的地震簇,采用共轭梯度法(LSQR)求解,得到重定位结果239个,平均均方根残差约为0.12s,最大均方根残差约为0.40s,其余数量较少的地震簇,采用奇异值分解法(SVD)求解,其均方根残差普遍更小,有些地震簇的残差在1ms的量级。此外,互相关到时差数据的走时残差明显比震相到时数据的走时残差小。

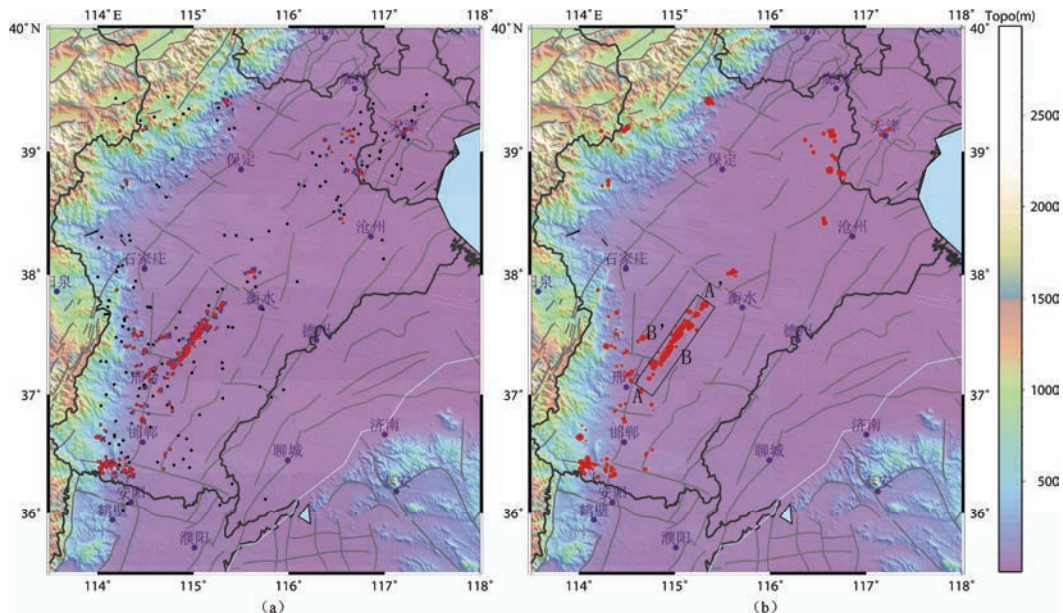
图2展示了重定位前后地震事件震中的平面分布,可以看出,相对于分布宽泛的初始定位,重定位之后的结果总体上更为集中,线性分布更好。邢台市至衡水市存在一条明显的地震密集条带,与新河断裂(邓起东,2007)展布相一致,因此可以推断这些地震应为新河断裂控制发生的地震。除此之外,其余地震分布较多的区域还有研究区的西南角和东北角。



黑色圆点：地震初始震中；蓝色三角：台站

图 1 地震初始震中及附近台站分布图

Fig. 1 Initial epicenters (black dot) and seismic stations (blue triangle)



(a) 红点：重定位结果；蓝点：与重定位结果对应的初始定位；黑点：无重定位结果的初始定位；(b) 仅重定位结果，红点尺寸正比于震级

图 2 初始定位与重定位结果

Fig. 2 Initial epicenters and relocation epicenters (red dot)

另外,从深度分布(图3)上看,重定位使震源位置得到了一定程度的改善。重定位后地震多分布在5—15km深度范围内,深度在8—10km的地震数目较多,而且分布形态更接近于正态分布,结果更为合理。

如上文所述,研究区最密集的地震条带对应着新河断裂,为了进一步分析该地震带,本文通过AA'和BB'两个剖面对该地震条带进行了剖面投影,两个剖面的位置见图2(b)。

从两个剖面上的投影(图4)可以看出,该地震条带内的地震震源主要分布于5—15km深度范围内;地震线性集中度较高,地震带分布宽度在10km以内。

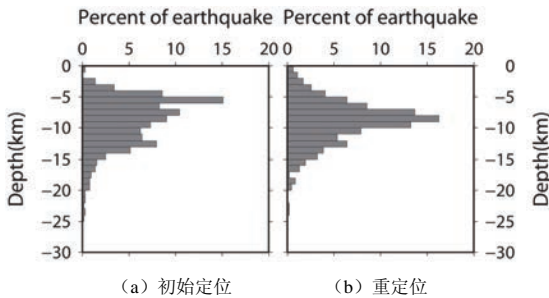


图3 重定位前后深度分布比例图

Fig. 3 Depth distribution of initial location (a) and after relocation (b)

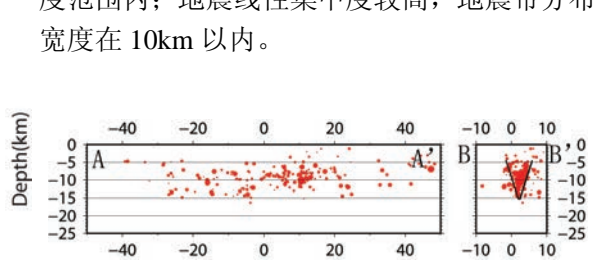


图4 AA'及BB'剖面投影图及推断断层构造

Fig. 4 Profile projection of AA' and BB'

如果认为该地震条带受新河断裂控制,则可以根据精定位后地震分布推测新河断裂的空间取向:从平面分布(图2b)可以得出,新河断裂整体沿北东—南西向,走向为北偏东 35° ;由图2(b)和图4中跨断层剖面投影(BB'向)可以看出,地震存在上宽下窄的楔形分布特征,存在倾向东南和倾向西北的两个线性条带,这可能对应着两条高角度断层组成的地堑(Wang等,1997),其中,倾向东南线性条带的地震更多、线性特征更明显些,可能对应着该处的主要断层构造。另外,大部分地震分布在很窄的条带内(5km左右),而深度跨度为15km,因此,断层的倾角很大,在 70° 以上。

2 震源机制解及构造应力场分析

本文在人工读取震相到时的同时,还逐一判读了P波初动极性,再根据双差定位的结果,剔除到时残差较大的P波数据,最终筛选出射线参数较好、走时残差较小的高质量P波初动极性数据2205条。

同时还采用改进的格点尝试法(俞春泉等,2009),依据筛选出的2205条P波初动极性数据,对研究区的单个地震震源机制解和综合断层面解进行了求解。在具体计算过程中,无论是求解单个地震的震源机制解,还是求解综合断层面解,均对所有可能解的三维参数空间以步长 $5^\circ \times 5^\circ \times 5^\circ$ 进行扫描,选取加权矛盾比 ψ 介于极小值 ψ_{\min} 和 $\psi_{\min}+5\%$ 之间的解作为可选解(解的离散区),然后通过聚类分析和解的稳定性检验,确定最终单个地震震源机制解和综合断层面解。

2.1 单个地震震源机制解

研究区内重定位得到的468个地震中,仅有6个地震事件P波初动极性资料充足,可以通过聚类分析和稳定性检验得出稳定可靠的震源机制解(图5,表1)。

从图 5 及表 1 可以看出，能够计算出可靠震源机制解的 5 个地震中，有 3 个分布在新河断裂附近，震级分别为 3.9、3.7、2.3 级，震源机制均为走滑型，其 P 轴为北东东—南西西向，T 轴为北北西—南南东向；2 个位于保定市以北，震级分别为 3.9、3.3 级，二者发震时间比较接近，震源机制十分相似，可以视为 1 次双震事件，其震源机制解为正断型，P 轴为北东东—南西西向，B 轴为北西西—南东东向，T 轴为北北东—南南西向；1 个位于邯郸市以西，震级为 2.8 级，震源机制解为 P 轴近东西向、B 轴北东东—南西西向、T 轴北北西—南南东向的正走滑型。

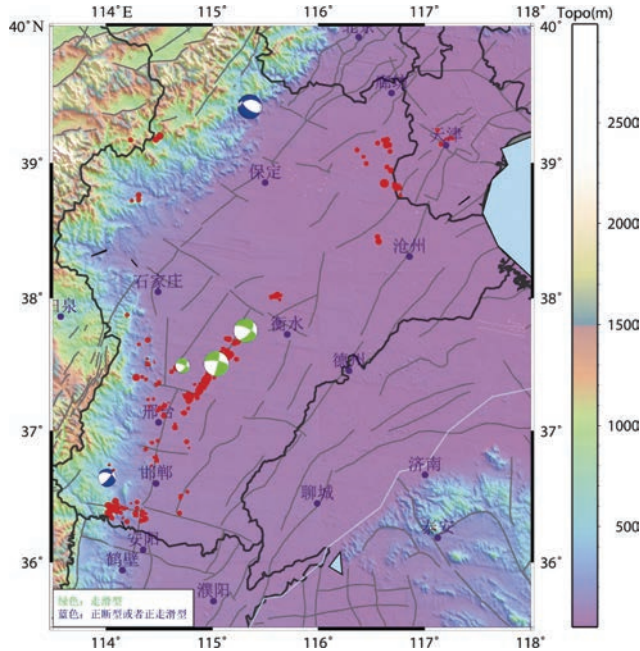


图 5 单个地震震源机制解

Fig. 5 Focal mechanism solution of single earthquake

表 1 单个地震震源机制解

Table 1 Focal mechanism solution of single earthquake

序号	年/月/日	时:分:秒	东经 (°)	北纬 (°)	深度 (km)	震级	P 轴		B 轴		T 轴		节面一			节面二			矛盾比
							走向	倾角	走向	倾角	走向	倾角	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	
1	2010/4/30	2:36:31	115.040	37.507	10.3	3.9	238	21	35	67	145	8	13	81	-159	280	69	-10	0.04
2	2010/7/30	22:21:13	115.354	39.414	7.9	3.8	72	69	286	18	192	11	261	37	-120	117	59	-69	0.17
3	2010/7/30	22:42:48	115.354	39.417	7.9	3.3	82	62	295	24	199	14	128	63	-63	260	38	-132	0.24
4	2010/11/30	1:41:34	114.723	37.492	8.5	2.3	246	32	95	55	345	14	292	78	-34	30	57	-166	0.16
5	2011/1/9	13:23:23	114.010	36.643	7.6	2.8	271	45	53	38	159	20	293	42	-23	40	75	-129	0.05
6	2011/9/1	16:41:41	115.316	37.755	7.0	3.7	253	38	87	52	348	7	38	59	-156	295	70	-33	0.09

2.2 综合断层面解

由于研究区内大部分地震震级较小, P 波初动极性数据不足以计算可靠的单个地震震源机制解, 而这些地震的震源信息对于全面认识研究区内地震机制和构造应力场也具有重要的意义。这是因为, 单个地震震源机制解的 P、B、T 轴反映的是地震前后震源区应力状态的变化, 不是震源区实际构造应力的主方向, 而小震综合断层面解是依据大量的小震观测资料给出的多个地震平均节面解, 其 P、B、T 轴可以看成多个小震的平均结果, 可以用来推断构造应力主方向。为此, 本文采用两种方式, 计算了研究区的综合断层面解。

(1) 整体综合断层面解

首先, 采用改进的格点尝试法(俞春泉等, 2009), 对读取的研究区 2205 条质量可靠的 P 波初动极性数据进行了计算, 求取了研究区整体综合断层面解, 计算结果见表 2 及图 6。

表 2 整体综合断层面解

Table 2 Compositive fault plane solution using all data in the region

P 轴		B 轴		T 轴		节面一			节面二			矛盾比
走向	倾角	走向	倾角	走向	倾角	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	
71	5	210	84	341	4	206	90	-174	116	84	0	0.33

从研究区内整体综合断层面解可以看出, 研究区整体的构造应力场为最大主应力轴北东东—南西西向(71°), 最小主应力轴北北西—南南东向(341°)的走滑型应力状态。该结果矛盾比达到 0.33, 相对较大, 因此, 应该对区内地震进行分组, 分别计算综合断层面解。

(2) 按重定位分簇计算综合断层面解

在地震定位时, 定位程序根据地震之间的距离, 对地震进行了分簇。根据该分簇结果, 求解了 6 个分簇的综合断层面解(图 7, 表 3)。

由图 7 和表 3 可以看出, 6 个分簇的综合断层面解的 P 轴基本上都在北东东—南西西向, 除了保定以北的地震簇(序号 5)之外, 其它分簇的综合断层面解差别都较小, 并且与区内整体综合断层面解(图 6, 表 2)较为一致, 这进一步表明研究区为最大主应力轴北东东—南西西向, 最小主应力轴北北西—南南东向的走滑型应力状态。保定以北的综合解(序号 5)与其它地区以及整体综合断层面解差别较大, 有可能是由于该处地震数量较少, 综合断层面解更多地反映的是个别地震的震源机制特征, 不能很好地反映区域构造应力场特征。

表 3 分簇综合断层面解

Table 3 Compositive fault plane solution of each cluster according to relocation result

序号	东经(°)	北纬(°)	P 轴		B 轴		T 轴		节面一			节面二			矛盾比
			走向	倾角	走向	倾角	走向	倾角	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	
1	114.968	37.426	76	10	209	75	344	11	30	90	165	120	75	0	0.29
2	114.155	36.394	244	10	57	80	154	1	19	84	-172	289	82	-6	0.33
3	114.013	36.647	272	22	79	67	181	5	49	78	-161	314	71	-13	0.29
4	116.664	38.862	230	13	95	73	323	12	6	73	-179	276	90	-17	0.26
5	115.353	39.416	73	69	289	17	196	12	265	37	-120	120	59	-70	0.21
6	114.436	36.828	75	3	170	53	343	37	23	67	150	126	63	26	0.21

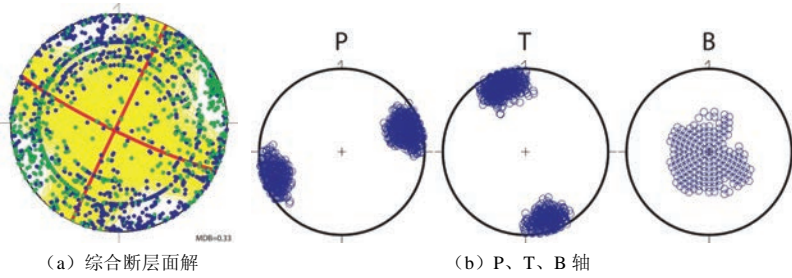


图 6 整体综合断层面解

Fig. 6 Compositive fault plane solution using all data in the region

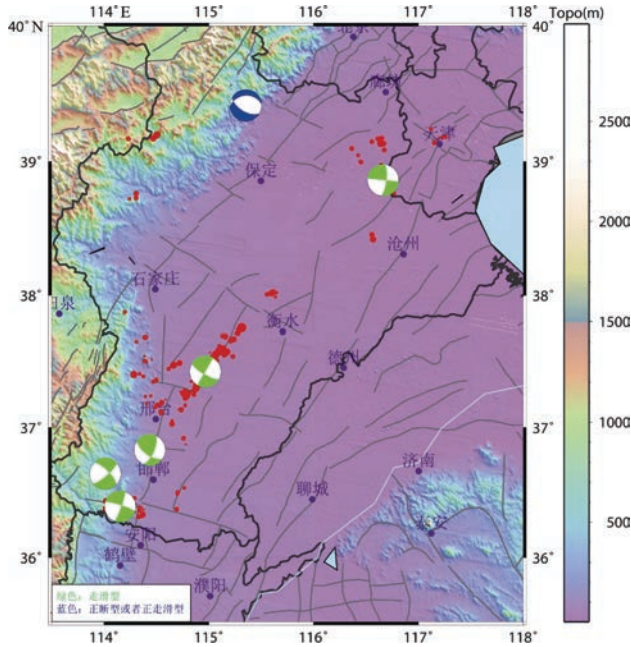


图 7 重定位分簇综合断层面解

Fig. 7 Compositive fault plane solution of each cluster according to relocation result

2.3 研究区内已有应力资料分析

“中国大陆地壳应力环境基础数据库”集成了遍布中国大陆及周边地区的六大类应力数据，包括震源机制解、断层滑动应力数据、原地应力测量结果等（谢富仁等，2007）。结合对研究区及周边已有应力资料的综合分析，能够更全面地研究该地区的构造应力环境。

通过查询，发现研究区内共有应力数据 93 条（图 8），其中断层滑动数据 2 条，水压致裂数据 5 条，应力解除数据 18 条，钻孔崩落数据 34 条，以及震源机制数据 34 条。本文对这些应力数据的水平最大主应力方向进行了统计，统计结果（图 9）显示，各类应力数据给出的水平最大主应力方向一致性较好，为北东东—南西西向，优势方位为 70°—80°。新河断裂附近应力数据比较密集，以震源机制解数据为主，各类应力数据显示的构造应力场水平最大

主应力方位基本都沿着北东东—南西西向，一致性比整个区域好。

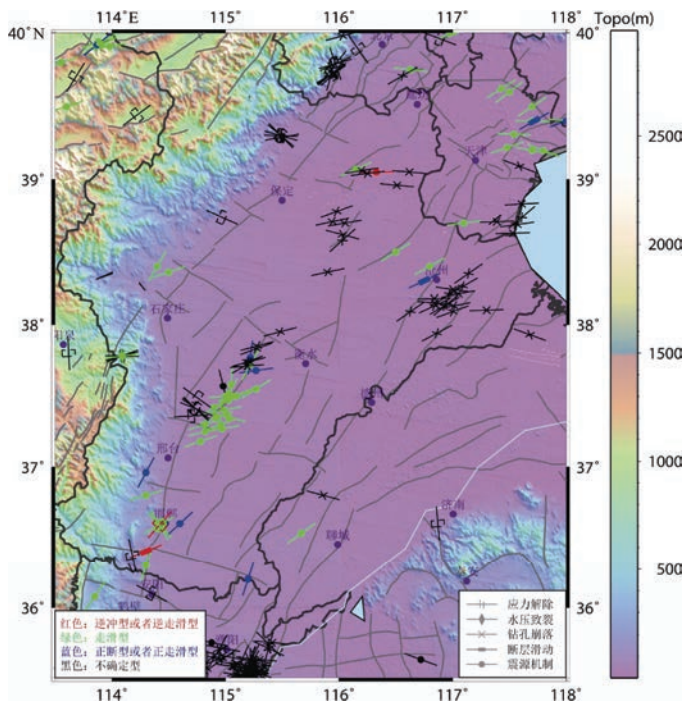


图 8 研究区及周边各类应力数据

Fig. 8 Previous stress data in central North China and adjacent areas

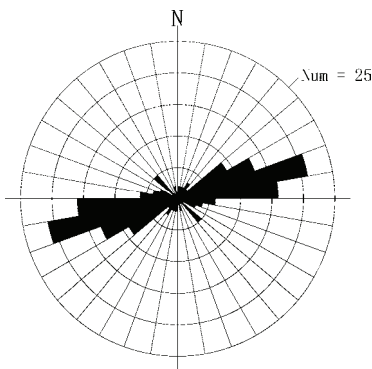


图 9 研究区应力数据水平最大主应力方位统计图

Fig. 9 Statistical graph of azimuth of maximum principle stress of previous stress data in central North China and adjacent areas

3 结论

(1) 采用双差法对华北地区中部 2008 年 1 月至 2012 年 12 月期间发生的 741 次地震进行了重定位，获得了 468 个地震的精确重定位结果。相比于初始结果，精定位结果在平面分布上更为集中，线性分布更好；在深度上，多分布于 5—15km 范围内，更接近于正态分布，

结果更为合理。邢台至衡水之间，存在明显的地震集中分布带，对应着新河断裂。根据重定位地震分布，推断新河断裂整体走向约为北偏东 35° ，倾角很高。

(2) 结合地震精定位结果，利用 P 波初动极性，采用改进的格点尝试法，计算了研究区内单个地震震源机制解，并采用两种方式计算了研究区小震综合断层面解。结果显示，除保定以北的单个地震震源机制解和小震综合断层面解外，研究区的单个地震震源机制解和小震综合断层面解均比较一致，表明研究区构造应力场为最大主应力轴北东东—南西西向，最小主应力轴北北西—南南东向的走滑型应力状态。这与“中国大陆地壳应力环境基础数据库”中已有的历史应力数据分析得出的认识相一致，说明华北地区中部现今构造应力场保持稳定。本文的研究结果与以往学者对华北地区构造应力场的认识(许忠淮等, 1983; 崔效锋等, 2001; 李瑞莎等, 2008)也是一致的。

致谢：在收集地震目录和地震数字波形文件过程中，河北省地震局的张从珍和张子广高级工程师提供了大量帮助，在此表示衷心感谢！

参考文献

- 崔效锋, 谢富仁, 2001. 1976 年唐山地震前后华北地区现代构造应力场的时空变化特征. 中国地震, **17** (3): 280—288.
- 崔效锋, 胡幸平, 俞春泉等, 2011. 汶川地震序列震源机制解研究. 北京大学学报, **47** (6): 1063—1072.
- 邓起东, 2007. 中国活动构造图. 北京: 地震出版社.
- 胡幸平, 俞春泉, 陶开等, 2008. 利用 P 波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解. 地球物理学报, **51** (6): 1711—1718.
- 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. 地震学报, **30** (6): 570—580.
- 谢富仁, 陈群策, 崔效锋等, 2007. 中国大陆地壳应力环境基础数据库. 地球物理学进展, **22** (1): 131—136.
- 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.
- 俞春泉, 陶开, 崔效锋等, 2009. 用格点尝试法求解 P 波初动震源机制解及解的质量评价. 地球物理学报, **52** (5): 1402—1411.
- 于湘伟, 张怀, 陈运泰, 2010. 华北地区地震重新定位结果分析. 大地测量与地球动力学, **30** (2): 29—33.
- 张广伟, 雷建设, 谢富仁等, 2011. 华北地区小震精定位及构造意义. 地震学报, **33** (6): 699—714.
- 周翠英, 王华林, 王红卫等, 2001. 华北 4 次中、强地震前震源区及其附近应力场的变化. 地震地质, **23** (1): 98—110.
- Cai Chen, Yu Chunquan et al., 2011. Spatial distribution and focal mechanism solutions of the Wenchuan earthquake series: Results and implications. Earthq. Sci., **24**: 115—125.
- Hauksson E., Shearer P., 2005. Southern California hypocenter relocation with waveform cross-correlation, part 1: Results using the double-difference method. Bull. Seism. Soc. Am., **95**: 896—903.
- Lei J.S., Xie F.R., Lan C.X. et al., 2008. Seismic images under the Beijing region inferred from P and PmP data. Phys. Earth Planet. Inter., **168**: 134—146.
- Schaff D.P., Bokelmann G.H.R., Ellsworth W.L. et al., 2004. Optimizing correlation techniques for improved earthquake location. Bull. Seism. Soc. Am., **94**: 705—721.

- Schaff D.P., Waldhauser F., 2005. Waveform Cross-Correlation-Based Differential Travel-Time Measurements at the Northern California Seismic Network. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**: 2446—2461.
- Shearer P.M., Hauksson E. and Lin G.Q., 2005. Southern California hypocenter relocation with waveform cross-correlation, part 2: Results using source-specific station terms and cluster analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**: 904—915.
- Wang Chunyong, Zhang Xiankang, Lin Zhongyang et al., 1997. Crustal structure beneath the Xingtai earthquake area in North China and its tectonic implications. *Tectonophysics*, **274**: 307—319.
- Waldhauser F., Ellsworth W.L., 2000. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward Fault, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**: 1353—1368.

Study on Earthquake Relocation and Tectonic Stress Field in Central North China

Hu Xingping and Cui Xiaofeng

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract The initial P-wave polarities, as well as the arrival times of P-wave and S-wave, were picked out from seismic waveform data of 741 earthquakes occurred in Central North China, from January, 2008 to December, 2012. Adopting double-difference location algorithm and waveform correlation rectification technique, these earthquakes were relocated, and 468 relocation results were obtained. Compared with the initial locations, the results of precise relocation are more concentrated around the fault planes, and more reasonable in depth distribution. There is a remarkable earthquake belt with the strike about N35°E along Xinhe fault. Through earthquakes profile projection, it can be inferred that Xinhe fault has a quite high dip angle. According to the precise relocation results, parameters of P wave ray were determined and used to calculate the focal mechanism solutions and fault plane solutions with the improved grid point test method. Combining with the previous stress data in this region, the tectonic stress environment of central North China were analyzed. The result shows that the tectonic stress field in central North China is quite stable, with maximum principle stress in direction of NEE-SWW and minimum principle stress in direction of NNW-SSE.

Key words: Central North China; Waveform correlation rectification; Double-difference location algorithm; Focal mechanism solution; Tectonic stress field