

文章编号: 0253-3782(2004)02-0115-06

用双差地震定位法再次精确测定 1998 年 张北—尚义地震序列的震源参数^{*}

杨智娴 陈运泰

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 1998 年 1 月 10 日北京时间 11 时 50 分(03 时 50 分 UTC), 在北京西北约 180 km 的河北省张北县与尚义县交界地区发生的 $M_L = 6.2$ 地震。该地震是近年华北地区的重要地震事件。由于地表未见明显的活动断裂展布, 震后的野外考察未给出任何优势走向的地表破裂资料, 余震分布也没有显示出优势的展布方向, 因此发震构造不清楚。笔者曾应用主事件相对定位方法, 对张北—尚义地震序列的主震和 $M_L \geq 3.0$ 余震重新精确定位, 得出结论: 张北—尚义地震序列的主震震中位置为 $41.145^\circ\text{N}, 114.462^\circ\text{E}$, 位于宏观震中的北东方向约 4 km 处, 震源深度 15 km; 余震震源分布在走向 $180^\circ \sim 200^\circ$ 、接近于竖直的平面内及其附近。这一重新精确定位的结果表明, 张北—尚义地震的发震构造是一北北东向的断层。文中作者应用另一相对定位方法——双差地震定位法, 对张北—尚义地震序列的主震和 $M_L \geq 3.0$ 余震再度进行精确定位。双差地震定位法重新定位后, 得出结论: 张北—尚义地震序列的主震震中位置为 $41.131^\circ\text{N}, 114.456^\circ\text{E}$, 位于宏观震中的北东方向约 2.5 km 处, 震源深度 12.8 km; 余震震源也分布在走向 $N10^\circ\text{E}$ 的接近于竖直的平面内及其附近。这一重新精确定位的结果, 再次表明张北—尚义地震的发震构造是一北北东向的断层。

关键词 张北—尚义地震 双差地震定位法 地震重新定位 发震构造 震源过程

中图分类号: P315.6 **文献标识码:** A

引言

1998 年 1 月 10 日北京时间 11 时 50 分(03 时 50 分 UTC), 在北京西北约 180 km 的河北省张北县与尚义县交界地区发生了一次 $M_L = 6.2$ 的地震。截至 1999 年 3 月底, 华北地震台网联网中心共记录到 $M_L \geq 3.0$ 余震 87 次。北京遥测地震台网的初步测定结果表明, 这些余震震中分布在南北向和东西向均约 25 km 的范围内, 与烈度为Ⅷ度的区域大体重合, 其分布没有明显的优势展布方向。

张北—尚义地区的历史地震活动水平不高。在距此次地震的宏观震中约 100 km 范围内, 仅有的几次破坏性地震记载, 因年代久远, 记录不详细, 因此历史地震的等震线未显示任何优势走向(杨智娴等, 2002)。而区域构造研究也未揭示震区内清晰的活动构造格局(徐锡伟等, 1998)。

* 国家科技部国际科技合作重点项目“地质过程与灾害发生机理与预测”(2001CB711005-1-3)和国家重点基础研究发展计划项目“大陆强震机理与预测”(G1998040702)共同资助。中国地震局地球物理研究所论著 02AC1008。2002-12-24 收到初稿, 2003-04-09 收到修改稿, 2003-05-03 决定采用。

张北—尚义地震发生在地震台网稀疏的地区，既缺乏近台约束，台站的方位覆盖也差。这使得常规方法定位的余震震中分布没有显示出优势取向。一些研究者（高景春等，1999，2002；郑秀芬等，1998；杨智娴等，1999，2002）采用相对定位或绝对定位方法，对张北—尚义地震序列的主震、余震重新做了定位，但由于所用事件所跨越的时间和所覆盖的空间范围不同，特别是采用了不同地震台网的记录，其结果很不一致。为了研究张北—尚义地震的发震构造和震源过程，笔者曾采用主事件相对定位方法，对张北—尚义地震序列的主震和截至1999年3月31日的全部 $M_L \geq 3.0$ 余震重新进行了精确定位，得到了张北—尚义地震的发震构造是一北北东向的断层的结论（杨智娴等，2002）。本文中，作者采用双差地震定位法（Waldhauser, Ellsworth, 2000），对上文所述的主震及余震再次进行精确定位，结果表明，主震参数及余震震中分布的尺度和取向与主事件定位法得到的结果是一致的。

1 双差地震定位法

双差地震定位算法（双差法）由 Waldhauser 和 Ellsworth(2000)提出。在双差法中，由每两个相邻地震的观测走时差减去理论计算值的走时差得到的残差（双差）构成一个观测方程。对于 N 个待定事件和 K 个观测台站，如果每个台站都记录到每次地震，就有 $N(N-1)K/2$ 个观测方程。但是，通常的情况并不是这样。假如取得双差观测的数据数目为 M ，那么，反演方程 $\mathbf{WGm} = \mathbf{Wd}$ 中的系数矩阵 \mathbf{G} 就是一个 $M \times 4N$ 的偏微商矩阵， M 是双差观测的数目， N 是地震数； \mathbf{d} 是双差资料矢量； \mathbf{m} 是由待定的震源参数改变量 $(\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)^T$, $i = 1, 2, \dots, N$ 构成的维数为 $4N$ 的矢量； \mathbf{W} 是一用以对每个方程加权的对角线矩阵。

在实际计算中，我们采用共轭梯度法求解上述方程，得到阻尼最小二乘解。同时将奇异值分解法应用于部分资料，以获得有关模型参数的误差、分辨率等信息。

双差地震定位法是一种比绝对定位方法精度高的相对定位方法，适用于比主事件法空间跨度大的地震事件群体。笔者已将其成功地运用于我国中西部地区地震的精确定位，得到了比常规定位精度高的新结果（杨智娴等，2003）。

2 双差地震定位法与主事件相对定位法之异同

主事件法和双差法都是地震的相对定位方法，但它们的成立条件和应用范围是有区别的。主事件法要求一个预先定位良好的事件作为主事件，其它待定事件则相对于这一主事件来定位，因此主事件法定位结果依赖于主事件的位置；双差法不要求主事件，所有待定事件都相对于这些事件的质心来定位，因此双差法定位结果不依赖于初始的震源位置。主事件法要求主事件与待定事件间的距离足够小，因此它只适用于较小空间范围的地震精确定位；双差法要求每两个待定事件间的距离足够小，因而它可用于大空间范围的地震精确定位。

3 双差法确定的张北—尚义地震序列主震及其余震的震源参数

1998年1月10日张北—尚义地震发生在台网稀疏、台站方位覆盖差（台网分布偏在地震东南一方）的不利于定位的地点。这一情况导致不同的机构使用不同的数据得到的定位

结果差别较大。已有的用相对定位方法得到的重新定位结果(图 1, 表 1)表明, 主震的震源位置很接近。

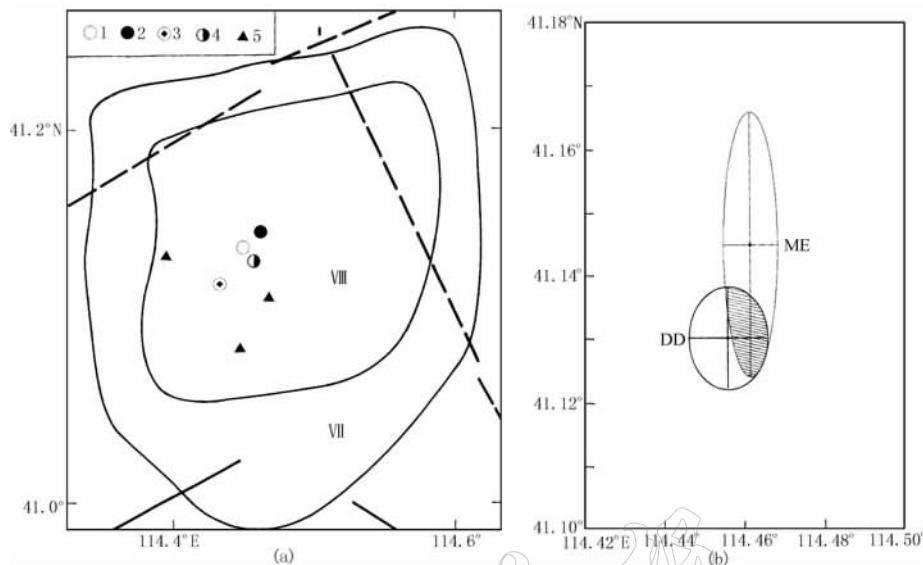


图 1 不同作者用相对定位法测定的张北—尚义地震的震中位置

(a) 双差法和主事件法测定的主震震中位置. 1. 高景春等(1999, 2002)测定; 2. 杨智娴等(1999, 2002)用主事件法测定; 3. 主震的宏观震中(鄂家全, 1998); 4. 本文用双差法测定; 5. 中国地震局地球物理所临时台站; (b) 双差法(DD)和主事件法(ME)测定的主震震中位置误差

表 1 相对定位法得出的张北—尚义地震震源参数

文献	发震日期		震源位置		震源深度 /km	M_L	图 1 中所 用的符号
	年-月-日	时:分:秒 (北京时间)	φ_N	λ_E			
高景春等(1999)	1998-01-10	11:50:36.92	41.137°	114.451°	7.78	6.2	○
杨智娴等(2002)	1998-01-10	11:50:38.1	41.145°	114.462°	15.0	6.2	●
鄂家全(1998)			41°07'	114°26'			◎
			(宏观震中)				
本 文	1998-01-10	11:50:39.2	41.131°	114.456°	12.8	6.2	▲○

由图 1 可以看出, 这些采用相对定位方法得到的震中位置彼此相距不大于 2 km, 而这些震中距宏观震中的距离均小于 3 km。

主震后, 截至 1999 年 3 月底, 北京遥测地震台网共记录到 $M_L \geq 3.0$ 余震 87 次。北京遥测地震台网初定的余震震中分布在南北向和东西向均大约 25 km 的范围内, 与烈度为 VII 度的区域大体重合, 其分布没有明显的优势展布方向。笔者曾采用主事件相对定位法, 用北京遥测地震台网 66 个台站的直达 P 波和 Pn 波, 对张北—尚义地震的主震和余震进行重新精确定位, 所用的最近台站距离这次地震的宏观震中约 20 km, 最远的台站约 700 km。主事件相对定位得到的余震震中分布(杨智娴等, 2002)显示 N20°E 方向, 长约 15 km, 宽约 6 km 的线性展布图象。仍然应用与上述数据相同的震相数据, 本文用双差地震定位法得到的余震震中分布与主事件法的结果相一致, 重新定位的余震震中显示出 N10°E 方向,

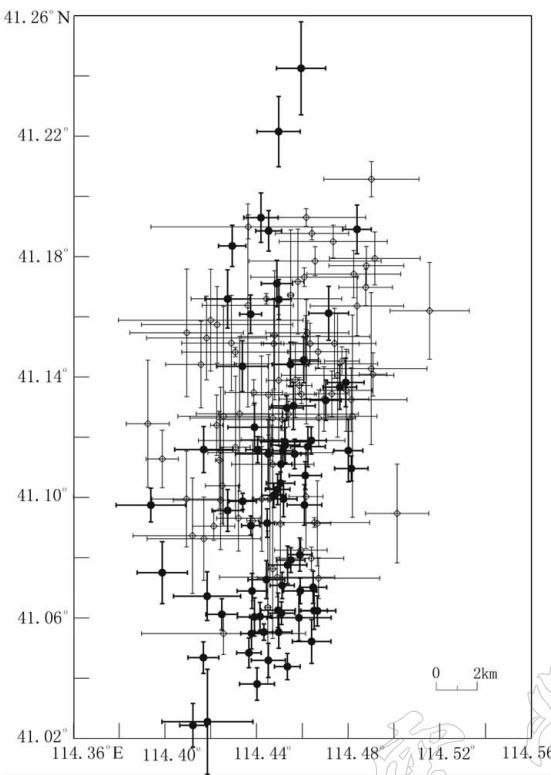


图 2 双差法和主事件法重新定位得到的主震
和余震震中及其测定误差

图中深色圆点和粗误差棒表示双差法测定的结果，
空心菱形和浅色误差棒表示主事件法测定的结果

层，这次地震是沿着这一北北东向断层发生的右旋-逆断层错动(杨智娴等, 2002)。

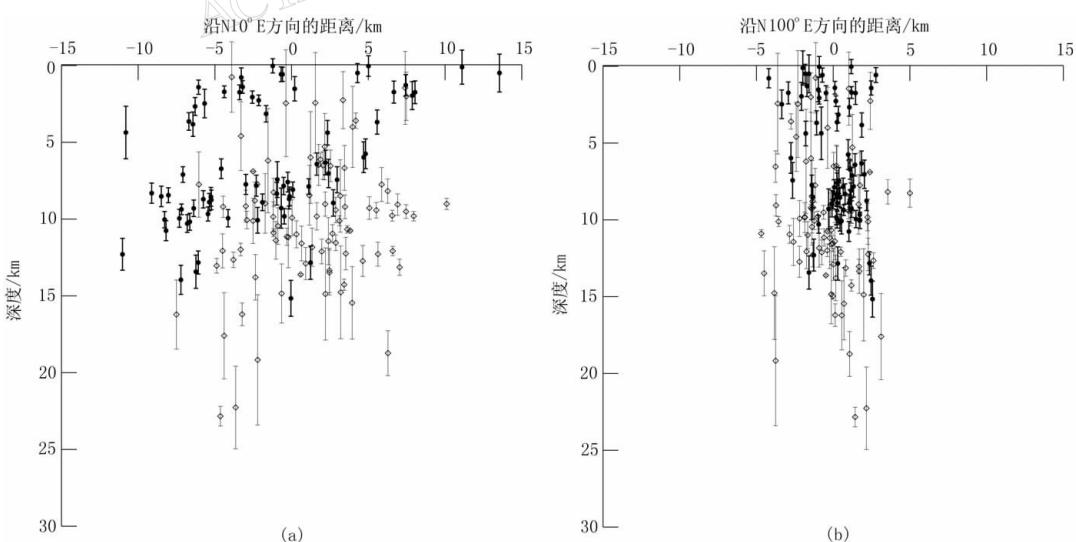


图 3 用双差法和主事件法重新定位的张北—尚义 $M_L = 6.2$ 地震及其 $M_L \geq 3.0$ 余震震源深度分布

图中深色圆点和粗误差棒表示双差法测定的结果，空心菱形和浅色误差棒表示主事件法测定的结果

(a) 沿 N10°E 方向剖面；(b) 沿 N100°E 方向剖面

长约 20 km, 宽约 6 km 的线性展布图象(图 2)。

由图 2 可以看出, 双差法和主事件法重新定位得到的主震及余震震中分布图象在误差范围内是一致的, 而双差定位法得到的结果定位误差则更小。

4 余震序列的震源深度

双差地震定位法得到的主震及余震震源深度总体上分布在 0~15 km 范围内, 平均深度为 6.4 km, 略浅于主事件相对定位法得到的平均深度 10.3 km 的结果。沿 N10°E 方向的余震震源剖面显示地震断层长约 20 km (图 3a), 仍为近乎竖直的分布。沿 N100°E 方向的余震震源剖面显示地震断层宽约 6 km(图 3b), 也为近乎竖直的分布, 这与主事件相对定位法给出的图象一致。

这一结果清楚地表明, 张北—尚义地震的发震构造是一北北东向的断

5 讨论和结论

1998年1月10日河北省张北县与尚义县交界地区的 $M_L=6.2$ 地震,发生在历史地震活动背景很弱,地表亦无活动构造明显展布的地区。本文继2002年“张北—尚义地震序列的重新定位和发震构造”(杨智娴等,2002)一文后,又运用双差地震定位法对该地震序列的主震及 $M_L \geq 3.0$ 余震再次精确定位。结果表明,主震位于宏观震中北东方向约2.4 km处。其参数是:发震时刻为北京时间11时50分39.2秒;震中位置:41.131°N, 114.456°E;震源深度12.8 km。本文再次重新确定了截至1999年3月的87次 $M_L \geq 3.0$ 余震中的72次事件的震源参数。结果表明,余震震中十分清晰地沿N10°E方向线性展布,余震区长约20 km,宽约6 km;余震震源则分布在走向N10°E的近乎竖直的平面内及其附近,其深度在0~15 km间。

主事件相对定位法得到的1998年1月10日张北—尚义 $M_L=6.2$ 地震序列的主震的震源参数是:主震位于宏观震中北东方向约4 km处,发震时刻为北京时间11时50分38.1秒,震中位置为41.145°N、114.462°E,震源深度15 km。重新定位的83次 $M_L \geq 3.0$ 余震的震源分布表明,余震震中十分清晰地沿N20°E方向线性展布,余震区长约15 km,宽约6 km;余震震源则分布在走向N20°E的近乎竖直的平面内及其附近,深度在0~20 km间。双差法和主事件法对主震及余震的重新精确定位结果均清楚地表明,张北—尚义地震的发震构造是一北北东向的断层。这次地震是在华北地区构造应力场近水平的、北东东向主压应力(许忠淮等,1979,1983;杨理华,李钦祖,1980)作用下发生的右旋逆断层错动。

两种不同方法得到的1998年张北—尚义 $M_L=6.2$ 地震及其 $M_L \geq 3.0$ 余震震源分布,无论是震中还是震源深度,在误差范围内都是一致的。

参 考 文 献

- 高景春,胡斌,张从珍.1999.用相对定位法精细测定张北地震序列的时空参数[J].华北地震科学,17(1):42~46
 高景春,刁桂苓,张四昌,等.2002.以震源精确定位结果分析张北地震序列的破裂特征[J].地震地质,24(1):81~90
 徐锡伟,冉永康,周本刚,等.1998.张北—尚义地震的地震构造环境与宏观破坏特征[J].地震地质,20(2):134~144
 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.由多个小地震推断华北地区构造应力场的方向[J].地震学报,5(3):268~279
 鄢家全.1998.关于张北—尚义6.2级地震的思考[J].城市防震减灾,(1):16~21
 杨理华,李钦祖.1980.华北地区地壳应力场[M].北京:地震出版社,132
 杨智娴,陈运泰,张宏志.1999.张北—尚义地震序列的重新定位[J].地震地磁观测与研究,20(6):6~9
 杨智娴,陈运泰,张宏志,2002.张北—尚义地震序列的重新定位和发震构造[J].地震学报,24(4):366~377
 杨智娴,陈运泰,郑月军,等.2003.双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用[J].中国科学,33(增刊):129~134
 郑秀芬,丁哈,张宏志,等.1998.张北—尚义地震序列的空间分布,构造活动性初探[J].地震地磁观测与研究,19(6):24~27
 Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California[J]. Bull Seism Soc Amer, 90(6): 1 353~1 368

RELOCATION OF THE 1998 ZHANGBEI-SHANGYI EARTHQUAKE SEQUENCE USING THE DOUBLE DIFFERENCE EARTHQUAKE LOCATION ALGORITHM

Yang Zhixian Chen Yuntai

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: On January 10, 1998, at 11h50min Beijing Time (03h50min UTC), an earthquake of $M_L = 6.2$ occurred in the border region between the Zhangbei County and Shangyi County of Hebei Province. This earthquake is the most significant event to have occurred in northern China in the recent years. The earthquake-generating structure of this event was not clear due to no active fault capable of generating a moderate earthquake was found in the epicentral area, nor surface ruptures with any predominate orientation were observed, no distinct orientation of its aftershock distribution given by routine earthquake location was shown. To study the seismogenic structure of the Zhangbei-Shangyi earthquake, the main shock and its aftershocks with $M_L \geq 3.0$ of the Zhangbei-Shangyi earthquake sequence were relocated by the authors of this paper in 2002 using the master event relative relocation technique. The relocated epicenter of the main shock was located at 41.145°N , 114.462°E , which was located 4 km to the NE of the macro-epicenter of this event. The relocated focal depth of the main shock was 15 km. Hypocenters of the aftershocks distributed in a nearly vertical plane striking $180^\circ \sim 200^\circ$ and its vicinity. The relocated results of the Zhangbei-Shangyi earthquake sequence clearly indicated that the seismogenic structure of this event was a NNE-SSW-striking fault with right-lateral and reverse slip. In this paper, a relocation of the Zhangbei-Shangyi earthquake sequence has been done using the double difference earthquake location algorithm (DD algorithm), and consistent results with that obtained by the master event technique were obtained. The relocated hypocenters of the main shock are located at 41.131°N , 114.456°E , which was located 2.5 km to the NE of the macro-epicenter of the main shock. The relocated focal depth of the main shock was 12.8 km. Hypocenters of the aftershocks also distributed in a nearly vertical $N10^\circ\text{E}$ -striking plane and its vicinity. The relocated results using DD algorithm clearly indicated that the seismogenic structure of this event was a NNE-striking fault again.

Key words: Zhangbei-Shangyi earthquake; double difference earthquake location algorithm; earthquake relocation; seismogenic structure; earthquake source process