

# 河套地震带中小地震重新定位

张帆, 杨红樱\*, 包金哲, 王鑫

内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2022年11月6日; 录用日期: 2022年12月13日; 发布日期: 2022年12月23日

## 摘要

采用内蒙古地震台网2010年至2022年地震观测报告, 选取河套地震带定位地震的震相数据, 经过数据检验和筛选后, 采用双差定位方法对地震重新定位, 获得343个地震的重新定位结果, 重新定位后地震在空间和深度上的分布更加收敛, 震源深度范围分布在5 km~20 km范围, 优势深度分布10 km, 震源深度在空间上有差异性, 水平方向和垂直方向的定位误差集中分布在0~5 km范围, 优势分布在2 km左右。绘制了5个沿纬度的剖面图, 揭示不同区域地震在深度上的分布特征, 反映了构造的形态, 剖面图显示, 呼包盆地内部地震深度较边界浅, 白彦花盆地剖面图显示多条平行南倾断裂, 达拉特旗存在北倾的断裂, 呼包盆地呈Y形构造。

## 关键词

河套地震带, 重新定位, 呼包盆地, 双差定位

# Relocation of Small and Medium Earthquakes in Hetao Seismic Belt

Fan Zhang, Hongying Yang\*, Jinzhe Bao, Xin Wang

Seismological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot Inner Mongolia Autonomous Region

Received: Nov. 6<sup>th</sup>, 2022; accepted: Dec. 13<sup>th</sup>, 2022; published: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2022

## Abstract

The seismic observation report of Inner Mongolia Seismological Network from 2010 to 2022 was used and the seismic phase data was selected for the relocation of earthquakes in Hetao seismic zone. After data testing and screening, the double difference positioning method was used to relocate earthquakes, and 343 earthquake results were obtained. After repositioning, the distribution of earthquakes in space and depth was more convergent. The focal depth range was 5~20 km, and the dominant depth was 10 km. The focal depth distribution is different in space. The location er-

\*通讯作者。

rors in horizontal and vertical directions are concentrated in the range of 0~5 km, and the dominant distribution is about 2 km. Five profiles along the latitude were drawn to reveal the distribution characteristics of earthquakes in different regions in depth and reflect the shape of the structure. The profile map shows that the seismic depth in the Hubao basin is shallow than the boundary, the profile map of the Baiyanhua basin shows several parallel south dipping faults, the Dalate banner has a north dipping fault, and the Hubao basin is a Y-line structure.

## Keywords

Relocation, Hetao Seismic Belt, Hubao Basin, HypoDD

Copyright © 2022 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

位于鄂尔多斯块体北缘的河套地震带,是华北构造区的一部分[1],这个地区构造活跃。鄂尔多斯地块始于新世开始形成,至今仍在活动,内部变形较小,周缘边界断裂带变形较强烈[2]。鄂尔多斯地块北缘的主要构造有阴山隆起、鄂尔多斯隆起和河套断陷盆地。华北克拉通形成以来,该区域经过多期不同性质的构造活动,内部形成构造特征不同的次级构造单元,新构造运动强烈,中强地震的活动性较显著[3]。河套断陷带受到东西向剪切拉张作用力,包括呼包盆地、白彦花盆地和临河盆地,这些盆地北深南浅、受北侧大青山、乌拉山和色尔腾山山前正断裂所控[4]。河套断陷带南缘受鄂尔多斯北缘断裂控制,是河套不对称断陷盆地带在形成过程中产生的次生断裂,具有左旋正走滑断裂的活动特征。有记录以来,鄂尔多斯块体周缘的多次7级以上地震主要分布在东缘、西缘和南缘,北缘仅发生过一次7级以上地震。1975年之后,鄂尔多斯地块北缘已经成为块体周缘活动最为强烈的区域[6],该区域目前处于应变前兆释放阶段,未来进入应变大释放阶段的可能性较大。徐锡伟等[8]对地震构造模型、断层破裂特性、地震活动特征及应力应变变化总结分析,归纳出五种高震级地震的地震地质学标志,在华北构造区,河套断陷盆地带色尔腾山危险区和河套断陷盆地带大青山危险区划符合高震级地震地质特征。主要判据为:河套地震带是剧烈运动的I级活动块体边界带,曾经发生过多次震级较高的地震,并且河套地震带内多条断裂带均为全新世强烈活动断层;地震层析成像反演结果显示该区域地壳10 km深度存在高速边缘带[8];色尔腾山山前断裂左旋走滑应变速率和拉张运动可能已处于一定的闭锁状态。河套地区的震源机制一致性参数自2003年开始出现趋势下降,震源应力场方向与构造应力场方向逐渐趋于“统一”,逐步进入“协同化”阶段的标志之一,可能是未来应力高度积累和加速释放的优先场所[9]。综上所述,河套地震带未来高震级地震发生的可能性很大,成为地震学研究的热点。

地震精定位技术能够提供地震活动的重要信息,揭示确定断层的深部结构和地震发生的环境,有助于加深对断裂带动力学的认识。基于大震震源区小震活动的长期性和地震发生在震源断层面上及其附近区域的假设,可由精确定位的震源位置确定震源断层的几何形态,再结合区域应力场给出震源断层的运动方式,为强震发震机理、地震危险性分析等研究提供基础信息,为地震数值预报模型的构建提供基础参数。双差定位方法是一种被广泛采用的相对定位方法,Waldhauser和Ellsworth开发了该方法的程序[10],并应用于加州北海沃德断层上,重新定位的地震给出了断层带地震活动的精细结构。双差定位方法广泛应用于我国震群和序列的研究。

本文采用内蒙古地震台观测资料，应用双差定位方法，获得河套地震带中小地震的重新定位结果，对该区域的地震空间和深度分布分析，并震源断层的几何形态。

## 2. 数据和方法

双差定位方法对时间配对，利用震相的相对到时约束局部的相对空间分布，如果两个地震间的距离相对于地震到台站的距离以及介质速度变化的尺度足够小，则两条射线的路径可以近似看成是相同的，在同一台站记录到的两事件的走时之差就可以归结为两事件的空间位置的差异。作为相对定位方法，双差定位方法可有效地减小由于对地壳结构了解不够精细而引起的误差，而且能应用在空间跨度比主事件相对定位法大的地震事件群体，只要从集中每两个相邻的地震事件之间的距离远小于事件到台站间的距离以及在波传播的路径上速度不均匀体的线性尺度这一条件成立即可。

在双差法中，使用两个地震的走时差的观测值与理论计算值的残差确定其相对位置：

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j = dr_k^{ij}, \quad (1)$$

式中  $dr_k^{ij}$  是“双差”：

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (2)$$

即第  $i$  个地震至第  $k$  个地震台的地震波的走时  $t_k^i$  与第  $j$  个地震至第  $k$  个地震台的地震波的走时  $t_k^j$  之差的观测值  $(t_k^i - t_k^j)^{obs}$  与理论计算值  $(t_k^i - t_k^j)^{cal}$  的残差， $\Delta m^i$  是第  $i$  个地震的震源参数的改变量。用矩阵形式表示，便得到下列方程：

$$WGm = Wd \quad (3)$$

式中  $G$  是偏微商矩阵， $M$  是双差观测的数目， $N$  是地震数； $d$  是双差数据矢量； $m$  是由待定的震源参数改变量构成的矢量； $W$  是一用以对每个方程加权的对角线矩阵。反演中，对所有震源参数加上平均移动为零的约束条件：

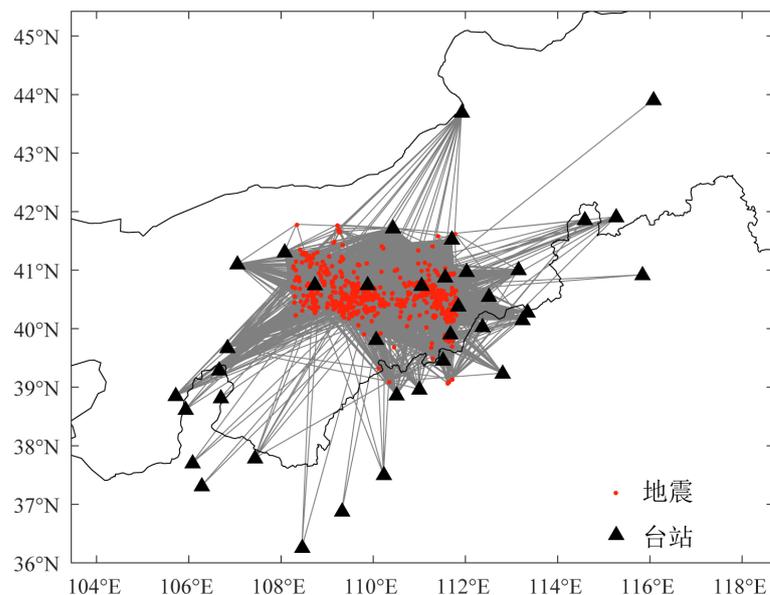


Figure 1. Ray map of stations and earthquake  
图 1. 台站和地震射线图

$$\sum_{i=1}^N \Delta m^i = 0. \quad (4)$$

内蒙古地震台网经历了三个发展阶段，其中：1972年至2011年为模拟记录阶段，地震台站从14个逐渐增加到34个；2002年至2007年为模拟与数字合并阶段，在此阶段完成了15个台站的数字化改造；2008年以来，建成了数字化网络，2010年稳定运行，逐渐并入临省台站数据，台站数大幅增加[11]，在数字化改造完成后，震相拾取精度有明显的提高，为了提升数据的质量，我们选取了内蒙地震台网2010年至2022年7月观测报告，研究区域范围为北纬39°~41.75°，东经108.25°~111.8°，选取定位台站数4个以上的定位地震观测报告457个，图1给出地震和台站射线图，筛选误差的5秒以内的数据，避免错误数据和误差较大数据的影响。

很多因素可以影响地震定位，包括台站布局、震相拾取质量、算法选择、速度模型等，其中，地壳速度模型与地震定位的质量有密切关系。速度模型对地震震源深度影响更加显著。内蒙古东西跨度较大，速度结构在不同有很大测差差异性，空间分布不均匀，为了使速度模型与局部的实际模型更加符合，本文采用的初始模型参考了内蒙古分区模型速度模型中的内蒙古中部速度模型[12]，该模型在内蒙古地区分为三个区域，分别拟合，因此更加符合局部的实际地壳结构(表1)，表1给出模型参数。

**Table 1.** Central Inner Mongolia velocity model  
**表 1.** 内蒙古中部速度模型

深度	P 波速度(km/s)
0~14	6.07
14~27	6.59
>27	8.08

### 3. 程序设置和定位结果

双差定位方法读步骤包括：数据准备、双差生成和重新定位，在数据准备阶段，将原始报告转换为程序的输入格式，在双差生成阶段，程序读取震相到时，并配对生成双差，重新定位阶段，采用数值方法求解方程，得到重新定位结果。双差程序包包括 ph2dt 和 hypoDD 两个主要程序，ph2dt 的功能是将原始报告的走时数据配对成为相对到时数据，hypoDD 程序实现重新定位。ph2dt.inp 文件中包含 MINWGHT、MAXDIST、MAXSEP、MAXNGH、MINLNK、MINOBS、MAXOBS 等 7 个参数[13]，由其确定地震事件对的建立。hypoDD 的参数主要包括权重、算法参数和速度模型等，由于 S 波震相走时读数精度比 P 波低，故 S 波震相权重小于 P 波震相权重。本文中 P 波权重赋值为 1.0，S 波为 0.5。本文采用共轭梯度法(LSQR)求解方程组。

**Table 2.** ph2dt program parameter setting  
**表 2.** ph2dt 程序参数设置

参数	数值	参数	数值
MINWGHT	0	MINLNK	8
MAXDIST	500	MINOBS	3
MAXSEP	10	MAXOBS	100
MAXNGH	10		

原始资料包括 491 个定位地震的 9134 条到时数据, 经过 ph2dt 处理产出 15250 对 P 波和 16592 对 S 波, 删除震中距较大的数据后保留 P 波 12533 对和 S 波 13719 对, 定位过程中被划分为 17 个丛集。图 2 给出重新定位前后震中位置对比, 双差定位后的地震分布更加集中, 河套地震带的地震呈条带状分布, 沿断裂带走向聚集, 基本上与断层走向一致, 研究区内地震活动与活动构造的密切关系。图 3 给出 3 个分向的误差和走时残差, 水平和垂直误差大部分分布在 5 km 以内, 优势分布在 2 km 附近, 走时残差集中分布在 0.2 秒以内。郭伟对采用双差定位方法鄂尔多斯地块缘中小地震研究[14], 并分析了地震的空间分布特征, 本文侧重于河套地震带的呼包盆地和白彦花盆地, 补充了最新的数据资料, 并详细分析重新定位结果所反映的构造信息。

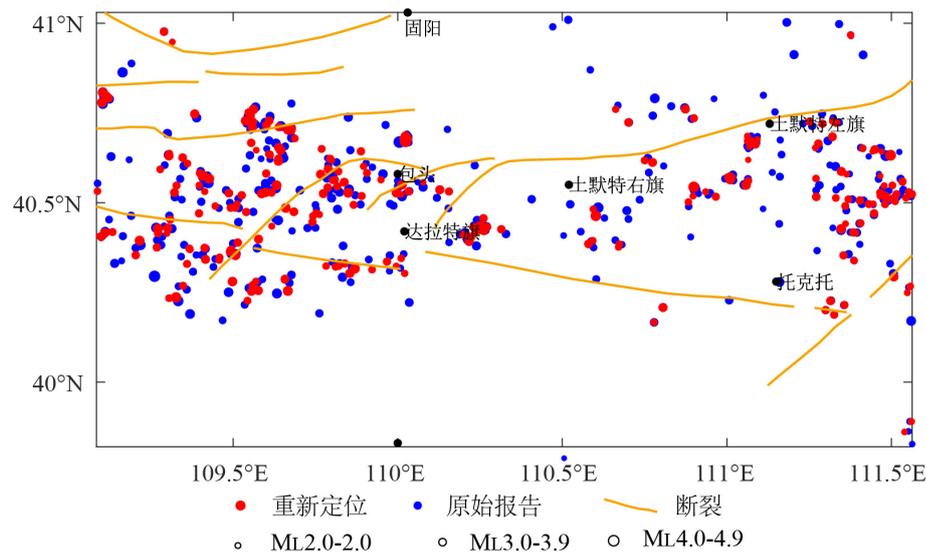


Figure 2. Comparison of epicenter position before and after relocation  
图 2. 重新定位前后震中位置对比

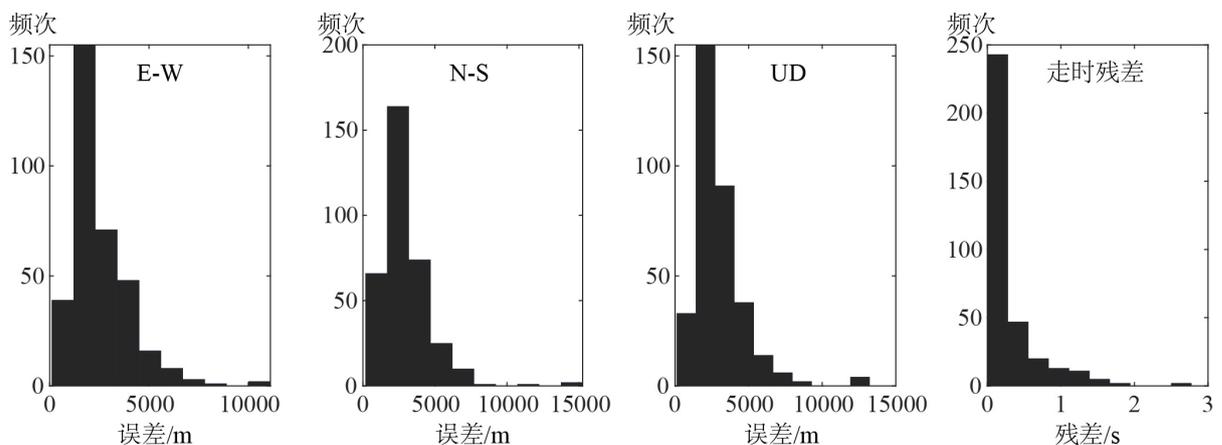


Figure 3. The error and travel residual of the three directions  
图 3. 3 个分向的误差和走时残差

#### 4. 结果分析

为了分析震源深度的分布特征, 绘制了重新定位前后震源深度的频次分布对比, 沿经度方向的剖面图和空间分布图(图 4)。重新定位前, 震源深度分布在 25 km 以内, 分布较离散, 重新定位后震源深度集

中分布在 10 km 附近, 更加收敛, 河套地震带至中部的晋冀蒙交界地区深度较浅, 大部分在 5~10 km 附近(图 4(a)~(b))。剖面图(图 4(c))显示, 不同经度位置重新定位后的震源深度更加收敛, 110°E 和 111.5°E 附近震源深度最大值较深。重新定位后震源深度的空间分布图(图 4(e))显示重新定位后呼包盆地内部地震度较浅, 盆地南北两个边界震源深度较深。

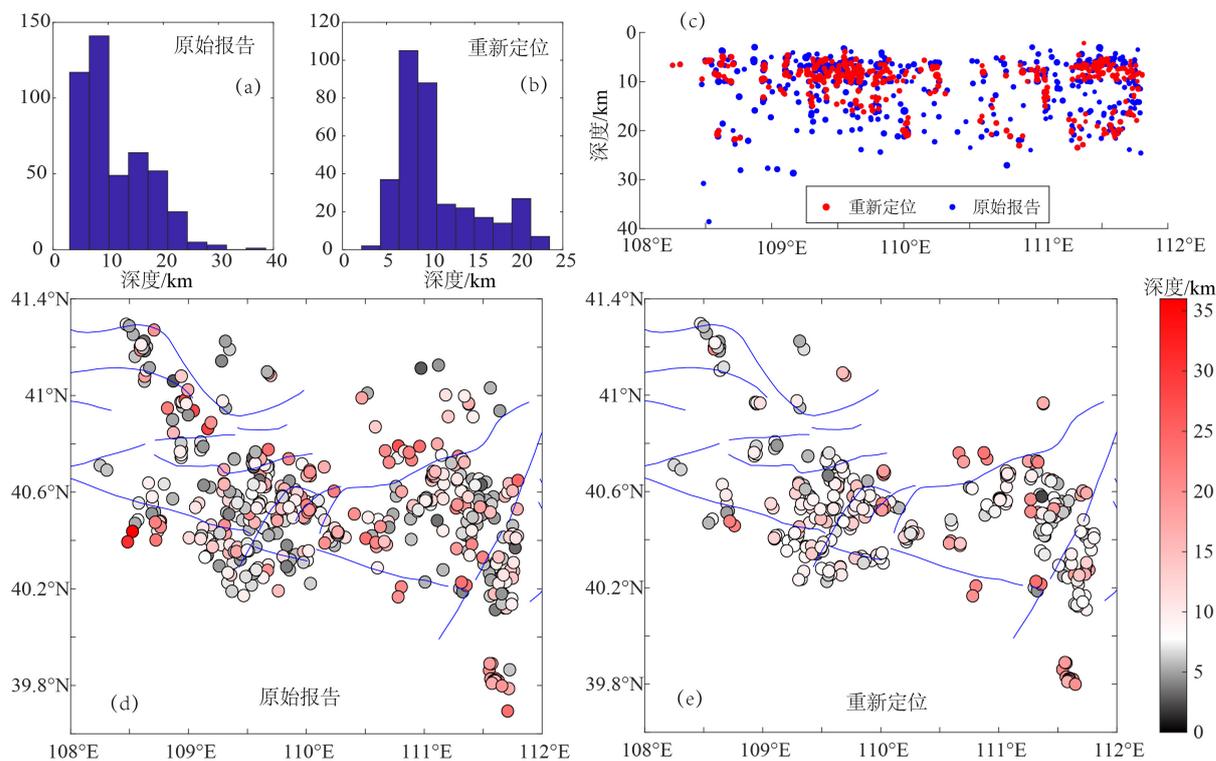


Figure 4. Focal depth comparison before and after relocation

图 4. 重新定位前后震源深度对比

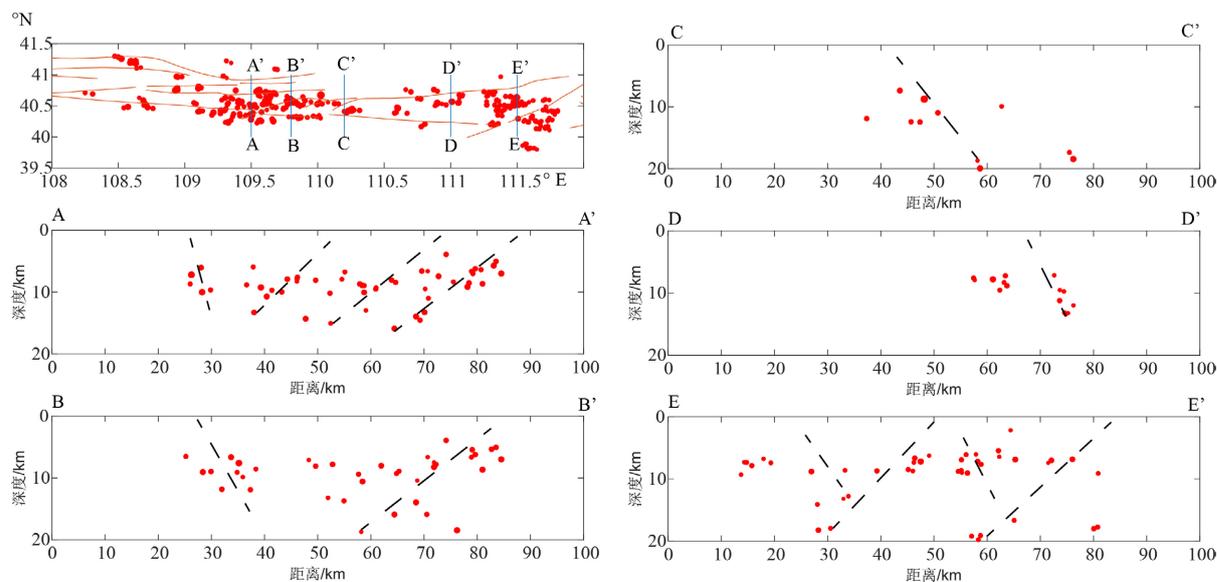


Figure 5. Source depth profile of 5 survey lines

图 5. 5 条测线震源深度剖面

河套断陷带具有左旋剪切拉张性质,呈东西向展布,带内包括三个次级盆地和二个个次级隆起,盆地和隆起相间排列,走向均为北东东,彼此作右行斜列。自西向东依次为临河盆地、西山嘴隆起、白彦花盆地、包头隆起、呼和盆地,三个盆地受到狼山山前断裂带、乌拉山山前断裂和大青山山前断裂共同控制[15]。研究区域的断裂主要沿东西向分布,考察地震在深度反相的分布可以反映断裂的形态,在研究区域设置5个测线,绘制了地震沿纬度分布的剖面图以考察河套地震带不同区域地震在深度的分布特征。

图5给出5条测线地震沿深度的分布。剖面A-A'穿过白彦花凹陷,该区域多条南倾的平行断裂和北倾的鄂尔多斯北缘断裂包围了凹陷区域。面B-B'穿过白彦花凹陷东部和包头地区,地震沿着乌拉山山前断裂和鄂尔多斯北缘断裂展布,地震分布显示出乌拉山山前断裂南倾,上盘地震较多,鄂尔多斯北缘断裂北倾,包头地区可能存在和乌拉山山前断裂平行的隐伏断裂[16]。剖面C-C'穿过达拉特旗,地震在空间上近NE向分布,在深度是沿北倾向分布,可能存在北倾的断裂。剖面D-D'穿过呼包盆地,地震主要分布在大青山断裂,在深度方向北倾。剖面E-E'穿过互呼包盆地东部,地震分布在盆地内部,深度上呈现两个Y形分布。鄂尔多斯北缘断裂和大青山山前断裂作为呼包盆地的南、北边界断裂,在剖面上均表现为Y字形断裂构造形态。深断裂的存在为深部热物质的上涌与能量强烈交换提供了通道,呼包盆地的形成可能与深部物质上涌造成的拉张效应有一定关系[17]。

搜集内蒙古地震台网2010至2022年天然地震观测报告,从中提取定位地震的走时资料,参考了该地区一维速度模型的研究成果作为速度模型,采用双差定位方法,获得343个地震的重新定位结果,获得以下认识:

- 1) 重新定位后地震分布在空间上和深度上更加收敛,在空间上分布不均匀,沿断裂分布,水平和垂直误差优势分布在2 km附近,走时残差集中分布在0.2秒以内,定位精度有所提高。
- 2) 重新定位前后,深度分布特征不同,重新定位后震源深度集中分布在10 km附近,呼包盆地内部地震度较浅,盆地南北两个边界震源深度较深。
- 3) 不同位置地震分布剖面反映了断裂在深部的形态,白彦花盆地被多条南倾的平行断裂和北倾的鄂尔多斯北缘断裂包围,呼包盆地呈现两个Y型断裂形态。
- 4) 断裂在深部的形态可能反映了地壳的动力学因素,河套地震带盆地的地壳活动可能与深部物质上涌造成的拉张有关。

## 5. 结论

搜集内蒙古地震台网2010至2022年天然地震观测报告,从中提取定位地震的走时资料,参考了该地区一维速度模型的研究成果作为速度模型,采用双差定位方法,获得343个地震的重新定位结果,获得以下认识:

- 1) 重新定位后地震分布在空间上和深度上更加收敛,在空间上分布不均匀,沿断裂分布,水平和垂直误差优势分布在2 km附近,走时残差集中分布在0.2秒以内,定位精度有所提高。
- 2) 重新定位前后,深度分布特征不同,重新定位后震源深度集中分布在10 km附近,呼包盆地内部地震深度较浅,盆地南北两个边界震源深度较深。
- 3) 不同位置地震分布剖面反映了断裂在深部的形态,白彦花盆地被多条南倾的平行断裂和北倾的鄂尔多斯北缘断裂包围,呼包盆地呈现两个Y型断裂形态。
- 4) 断裂在深部的形态可能反映了地壳的动力学因素,河套地震带盆地的地壳活动可能与深部物质上涌造成的拉张有关。

## 基金项目

中国地震局地震科技星火计划(XH20014);内蒙古自治区自然科学基金(2020MS04004)。

## 参考文献

- [1] 朱红彬, 邢成起, 李红, 等. 华北构造区主要地震带分段与强震活动[J]. 地震学报, 2010, 32(6): 705-717, 766.
- [2] 徐锡伟, 程国良, 马杏垣, 等. 华北及其邻区地壳转动和动力来源[J]. 地球科学, 1994, 19(2): 129-138.
- [3] 曹刚. 内蒙古地震研究[M]. 北京: 地震出版社, 2001.
- [4] 邓起东, 程绍平, 闵伟, 等. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论[J]. 地质力学学报, 1999, 5(3): 13-21.
- [5] 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32(12): 1020-1030.
- [6] 高立新, 戴勇, 陈立峰, 等. 鄂尔多斯地块北缘动力背景和现今地震活动特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(7): 668-674.
- [7] 徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华, 谭锡斌, 李康. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用[J]. 地震地质, 2017, 39(2): 219-275.
- [8] 王志铄, 王椿镛, 曾融生, 王溪莉. 华北及邻区地壳上地幔三维速度结构的地震走时层析成像[J]. CT 理论与应用研究, 2008(2): 15-27.
- [9] 韩晓明, 刘芳, 胡博, 张帆. 河套地震带的震源机制类型时空分布特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(2): 592-601.
- [10] Waldhauser, F. and Ellsworth, W.L. (2000) A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**, 1353-1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>
- [11] 杨彦明, 张文韬, 张帆, 等. 内蒙古地震监测台网的建设与发展[J]. 高原地震, 2013, 25(2): 22-25.
- [12] 赵艳红, 舒雷, 刘永梅, 等. 内蒙古分区地壳速度模型的建立及应用分析[J]. 中国地震, 2018(4): 731-744.
- [13] 郑钰, 杨建思. 双差算法的剖析及参数对定位的影响[J]. 地震地磁观测与研究, 2008, 29(3): 85-93.
- [14] 郭伟, 刘甜甜, 范玲玲, 等. 基于双差定位方法的内蒙古中西部地区地震精确定位[J]. 地震地磁观测与研究, 2021, 42(1): 21-34.
- [15] 国家地震局鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组. 鄂尔多斯周缘活动断裂系[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [16] 闻学泽. 内蒙古 1979 年五原 6.0 级和 1996 年包头 6.4 级地震的震源区构造[J]. 地震地质, 2014, 36(3): 586-597.
- [17] 酆少英, 刘保金, 姬计法, 等. 呼和浩特-包头盆地岩石圈细结构的深地震反射探测[J]. 地球物理学报, 2015, 58(4): 1158-1168.