

以双差定位方法对郯城 8 $\frac{1}{2}$ 级地震 震中附近现代小震重新定位

李永红¹, 胡新亮², 许 萍¹, 李亚军¹, 周翠英¹, 刁桂苓²

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250014; 2. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘要:用双差定位方法对 1668 年郯城 8 $\frac{1}{2}$ 级地震震中附近 1974 年以来 400 余个中、小地震重新进行定位。结果显示现代中、小地震震中分布仍集中于地震破裂带上, 带状集中区与地质考察推测得到的发震断层安丘—莒县断裂的走向吻合。

关键词:中小地震; 双差定位法; 郯城 8 $\frac{1}{2}$ 级地震; 安丘—莒县断裂

中图分类号: P315.61

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2011)01-0071-05

Relocation of Modern Small Earthquakes near the Epicenter of Tancheng 8 $\frac{1}{2}$ Earthquake Using the Double Difference Earthquake Location Algorithm

LI Yong-hong¹, HU Xin-liang², XU Ping¹, LI Ya-jun¹, ZHOU Cui-ying¹, DIAO Gui-ling²

(1. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China;

2. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Using the double difference earthquake location algorithm, we relocate more than 400 moderate and small earthquakes near the epicenter of 1668 Tancheng 8 $\frac{1}{2}$ earthquake since 1974. The relocated result shows that the modern moderate and small earthquakes were still concentrated in the Tancheng earthquake rupture zone. The strike of the bandy concentrated zone accords with that of the generating Anqiu—Juxian fault speculated by geological surveying.

Key words: Moderate and small earthquake; Double difference earthquake location algorithm; Tancheng 8 $\frac{1}{2}$ earthquake; Anqiu—Juxian fault

0 引言

郯庐带位于山东地区的区段也称为沂沭断裂带。1668 年 7 月 25 日在沂沭断裂带中南段发生了中国东部迄今为止最大的地震, 即郯城 8 $\frac{1}{2}$ 级地震。震中附近地震台网密集, 自 20 世纪 70 年代以来已积累了丰富的地震资料。由于东部地区为黄海海域, 地震台网分布不均匀, 给东部地震定位造成一定的偏差, 此外, 现山东台网使用的定位程序中采用全国通用的走时模型, 也为定位参数带来较大误差。为此本文采用双差定位法对研究区地震重新进行定位。

1 方法与资料

1.1 地震的双差定位方法

地震定位大致分为相对定位和绝对定位两种。近年来, 相对定位法中发展了一种双重残差定位法, 又称双差地震定位法(DD)^[1], 目前已经被国内外地震学家广泛地应用到实际的地震定位中。该方法是利用信号的走时差反演震源位置, 能够有效地消除震源至台站共同传播路径效应, 受速度模型的影响小。它反演的是一组丛集地震中每个地震相对于该丛集矩心的相对位置, 不需要主事件。它不仅像主事件相对定位方法一样有效地减小由于对地壳结

构了解不够精细而引起的误差,而且即使丛集地震的空间跨度很大也适用,有其独到的优点。尤其是近年来发展的数字地震记录,两地震波形初至信号的时差精度最高可达到采样间隔的十分之一,比拾取初至的精度高出一个数量级,因而双差定位法确定的震源相对位置精度要远远高于常规的绝对定位方法。

1.2 资料的选取

研究区为沂沭带中段($34.1^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $116.4^{\circ}\sim 119.6^{\circ}\text{E}$)。重新定位所用资料为山东台网及邻省台站共44个台所记录到的震相资料,台站分布参见图1。初选有4个台以上记录的近震资料作为研究的基础资料,这些资料中1974年至1999年为模拟记录,2000年以来为数字记录,约有近千条记录。再经计算理论走时、剔除差错数据,对资料震相不清、距离太远的地震进行删除,最后筛选出符合条件的共有410个地震,震级在 $M_L 1.1\sim 5.6$ 之间,其震相包括直达波Pg、Sg、首波Pn、Sn、反射波Pm、Sm到时资料。

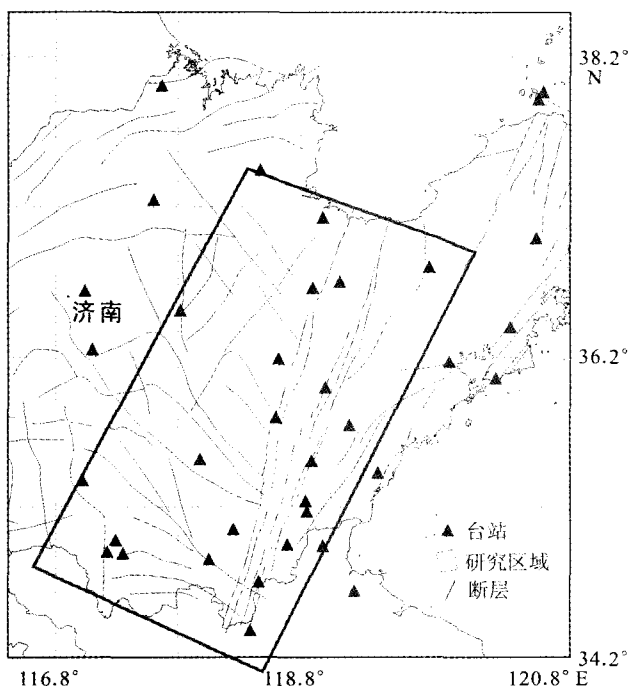


图1 双差定位研究区、主要断裂及台站分布示意图

Fig. 1 The study area, distribution of main faults and seismic stations.

在进行重新定位时,对于1999年以前的模拟记录地震是将记录到的P波到时、S波振幅等资料转换为程序可以识别的数据格式进行计算。1999年之后山东进行了地震台站的数字化改造,部分台站将单纯的模拟记录改为数字和模拟并行记录,但仍

有13个台站为单纯的模拟记录。在对这些地震重新定位时,对于数字和模拟并行记录的台站只使用了其数字化记录资料;同时将13个单纯模拟记录台站的记录波形经以每秒钟100个采样点的形式将其转化为数字记录;对于数字记录资料是直接读取所需数据,然后对所有数字记录进行对比、筛选、双差定位。

相对定位算法很好地克服了速度横向不均匀性的影响^[2],因此对地壳速度模型的依赖性相对较小。由于算法中采用的是水平分层速度模型,对定位结果产生影响的主要是震源所在层速度值,该值虽不影响事件间的方位分布,但会影响事件簇分布图像的尺度,因此仍需要尽可能地选用接近真实的地壳速度模型。本文采用张碧秀^[3]等通过地震探测得到的沂沭断裂带 $8\frac{1}{2}$ 级地震震源区附近地壳速度结构的简化模型(表1)。

表1 郯城 $8\frac{1}{2}$ 级地震震源区附近地壳上地幔速度结构表

H/km	$V_P/[\text{km} \cdot \text{s}^{-1}]$	$V_P/[\text{km} \cdot \text{s}^{-1}]$
0	5.00	
10	6.16	
15	6.20	
20	6.35	$V_S = V_P / 1.73$
30	6.32	
35	6.50	
40	8.18	

表1给出本文地震定位中采用的水平层状地壳S波速度模型。相应的P波速度模型则由 $V_P = 1.73V_S$ 得到。

2 重新定位结果分析

2.1 重新定位后的参数精度分析

共410次地震参加重新定位,最终获得381次地震的精定位基本参数,位于研究区内的为364次。重新定位后,部分地震被舍弃的原因包括以下几种:

- (1) 该地震的可用震相数小于最少震相数参数限制,本研究中该参数取值为8;
- (2) 由于震相读数的误差,导致反演过程中出现深度为负值的现象(airquake);
- (3) 超过事件对之间的最大距离阈值而未能够和其他地震组成事件对等^[4]。

重新定位后均方根残差平均值由原来的3.34 s降为0.24 s,震源位置的估算误差(2倍标准偏差)在EW方向平均为1.2 km,在NS方向平均为0.9 km,在垂直方向平均为2.4 km。

2.2 重新定位后震源深度改善情况

在地震定位问题中震源深度的精确确定最困难。震源深度受地震波走时影响极大,尤其对于震中距超过 30 km 的台站,直达波走时对震源深度变化不敏感。重新定位后可见震源深度有两点改善:

(1) 重新定位前,有 72 个地震震源深度为 1 km,其中有 10 个为 1983 年底至 1986 年初东营附近发生的注水诱发地震,深度在 1~2 km,而其余 62 个地震实际上是无定位深度的地震,为了在三维空间分布图中能够显示,赋值为 1 km。重新定位后,10 个注水诱发地震的深度全部在 1~2 km(图 2 中圈出来的地震),与实际情况完全相符;而其它 62 个地震也全部得到了震源深度,随机分布在 0~33 km 之间,其优势层位在 10~20 km 之间(图 2)。

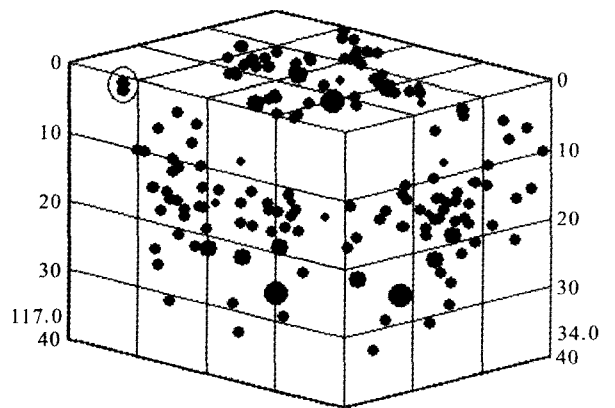


图 2 原台网定位深度 1 km 的地震重新定位结果

Fig. 2 The relocation result for some events within depth of 1 km.

(2) 重新定位地震的深度优势分布层位较重新定位前更加显著。原台网定位地震已给出震源深度的,优势分布层位在 10~30 km,分布范围相对较宽,但在这区间内优势层位不明显(图 3(a))。重新定位后震源深度优势层位在 10~20 km 的占总数的 59.1%,可以明显看出其优势地位(图 3(b)、图 4)。另外,重新定位后的震级较大的地震深度较重新定位前深度加深,这与实际情况更为相符。

图 5 给出精定位后和原台网定位地震空间分布图像的比较。为增强图像之间的可比性,将原定位目录中与在重新定位过程中被舍弃的部分相对应的地震也剔除了,这样图中所示地震事件是一一对应的。可以看出精定位后的地震震中分布更加集中^[5]。

3 现代中小地震与郯城 8½ 级地震震

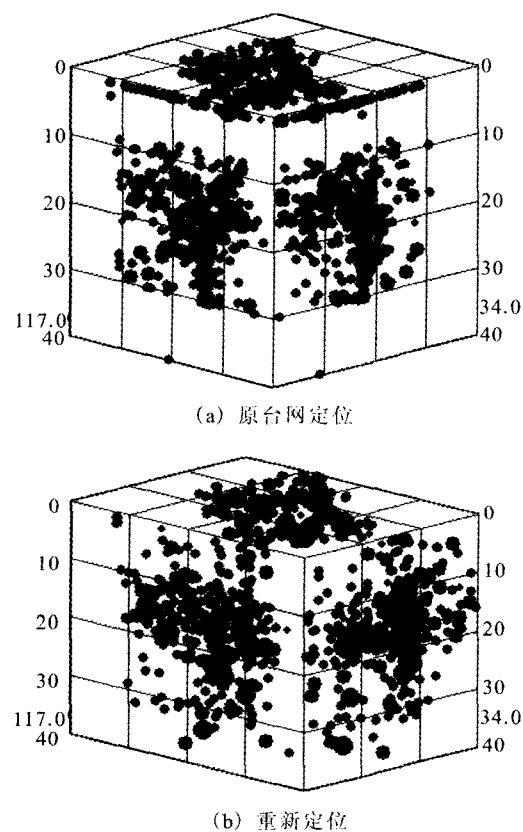


图 3 原台网定位和双差定位深度分布图

Fig. 3 The depth distribution located by original station network (a) and the double difference location algorithm (b).

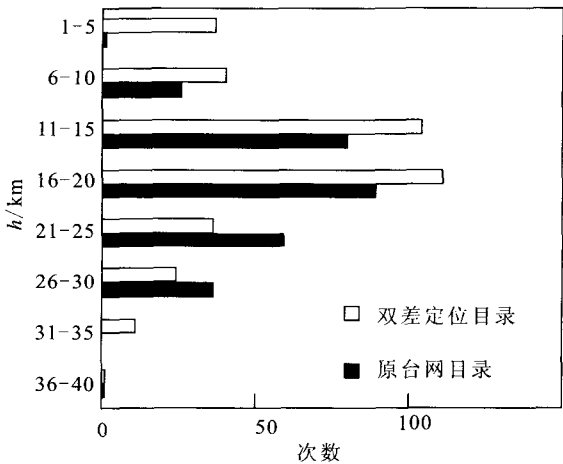


图 4 原台网定位与双差定位结果震源深度的比较

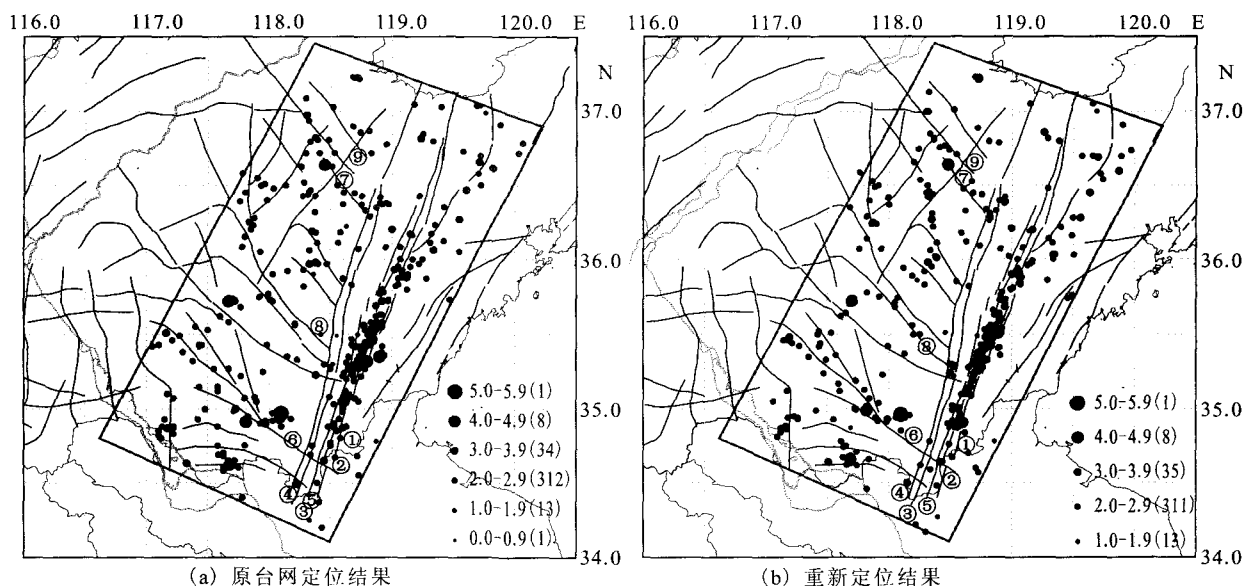
Fig. 4 Comparison of focal depth between located by original station network and by the double difference earthquake location algorithm.

源断层关系的讨论

3.1 二维图像显示地震分布的线性度增强与活动断裂构造关系更为密切

比较图5,重新进行双差定位后的地震平面分布的线性程度明显增强,大多数地震密集地集中在沂沭断裂带5条活动断裂的 F_2 断层上,郯城 $8\frac{1}{2}$ 级地震震中附近尤为突出。断层上分布的地震在总体

沿与断层走向一致的 NNE 向排列的背景上,时有短尺度的间错的 NW 向或 NE 向线状排列,有的与断层错列位置相吻合,勾勒出郯城 $8\frac{1}{2}$ 级地震震源断层在地表的基本展布,一定程度显示出震源区复杂的破碎状态。



① F_1 昌邑-大店断裂; ② F_2 安丘-莒县断裂; ③ F_3 沂水-汤头断裂; ④ F_4 郯部-葛沟断裂; ⑤ F_5 白芥子-浮来山断裂; ⑥ F_6 苍尼断裂; ⑦ F_7 双山-李家庄断裂; ⑧新泰-蒙阴断裂; ⑨益都-无棣断裂

图5 原台网定位与双差定位的震中分布

Fig. 5 Comparison of epicenter distribution between located by original station network (a) and by the double difference earthquake location algorithm (b).

在沂沭带主干断裂其它断层和 F_2 的北段,地震很少,尤其是西部的 F_3 、 F_4 两条断层,上面几乎没有地震。而其它的 NW 向分支断裂上,地震也较为密集,尤其是北部的双山-李家庄断裂、中部的沂水-沂源断裂、新泰-蒙阴断裂和南部的苍尼断裂(图5(b)),显示出这些断层现代活动强、活动新。

对1668年 $8\frac{1}{2}$ 级地震断层的位置和延伸一直存在不同认识:方仲景等(1987)认为该地震断层北起莒县,经莒南、临沭东、郯城、新沂至江苏宿迁,长达230 km;高维明等(1988)在“重新评定鲁南地震区划”项目中,认为该地震断层北起自莒南县佐山,经临沭东、郯城、新沂达宿迁,长为160 km。而晁洪太等通过新的考察发现郯城-新沂段不是1668年地震断层,其最新活动为距今3510~4960年。从而认为1668年地震断层应北起莒县土岭,向南断续延伸,终止于郯城县窑上,全长约130 km,总体走向 $N20^\circ E$ 。并发现该地震断层并非是一条完整的断裂,而是由五条数公里至数十公里长的次级断层呈右阶斜列组成。由图5(b)可见,地震震中密集区的

长度及起止点与晁洪太等给出的地震断层的破裂长度和起止点基本符合。

3.2 震中深度剖面图像勾勒出 $8\frac{1}{2}$ 级地震断层的地下延伸轮廓

图6给出了沿研究区横断剖面的震源深度分布情况,可以看出在郯城 $8\frac{1}{2}$ 级地震的震源断层剖面上,小震几乎是直立分布,微微略显 SE 倾向,由地表一直延伸至30 km。这证实了地质上认为该断层近于直立和切穿地表的推测,也与该区的综合震源机制解的两节面近于直立的结果相吻合,表明该段落中小地震剖面可能真实反映了断层的产状。几个震级较高的中等地震分布在20~25 km之间,位置相对集中,小震密集区在其之上,在10~20 km之间。由王华林等的研究结果,认为郯城 $8\frac{1}{2}$ 级地震为一次“特征地震”,分析特征地震的错动方式,参考华北地区唐山等其它7级以上地震的主余震之间的关系,认为 $8\frac{1}{2}$ 级地震的震源深度应在25 km上下,超过30 km的可能性较小。

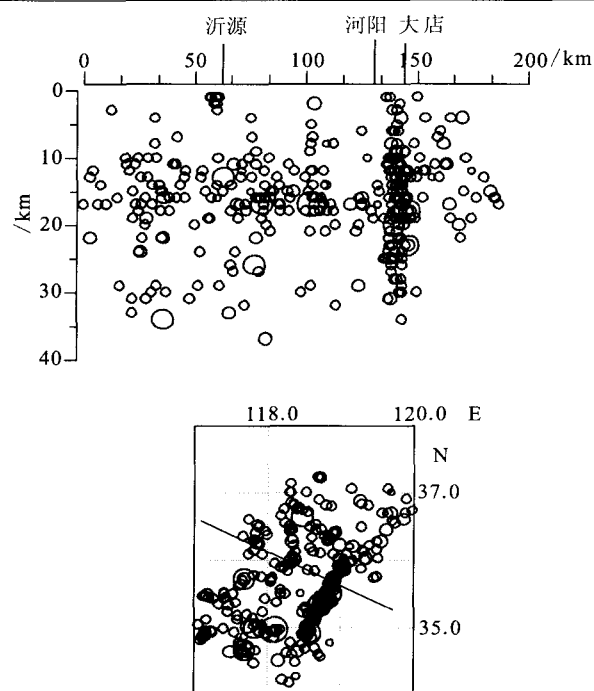


图 6 重新定位后的震源深度二维分布

Fig. 6 The two-dimensional distribution of the focal depth of relocated earthquakes.

3.3 现代中小地震分布与沂沭带其它分支断裂关系的讨论

由图 6 还可以看出,在剖面的北段西侧,还有一条震源不连续的略显 NW 倾向的地震分布区,这个位置正是沂沭带以西的一条规模较大的 NE 向断层——上五井断裂所在区。图中显示震源深度由地表延伸至 30 km 左右,在大约 25 km 左右有一个少震段。地质考察结果推测该断层是一条超壳断裂,这与这些地震的震源深度分布吻合。由张碧秀等^[3]给出的人工地震深部探测结果可知,在泗水与费县间 22 km 附近和 25 km 至 30 km 之间有两个低速层,是地震易于发生的层位,而这里恰在 25 km 上下地震很少,可能属于破裂不充分的地段,应该是未来中强地震预测需要注意的地段。

沂沭带以西的其它区域,地震深度绝大部分分布在 10~20 km,平均 15 km 左右,是沂沭带西侧的 NW 向分支断裂上地震的优势层位。张碧秀等给出的深部探测结果显示在 15 km 左右,由泗水通过费县直到临沂以西有一规模较大的低速层存在。地震相对集中地分布在这一层位的现象与其吻合,说明除上五井断裂的这些 NW 向断层可能均未切穿下地壳。

4 结论与讨论

(1) 以双差定位方法对郯城 8½ 级地震震中附近 1974 年以来 400 余个中小地震重新进行定位,给出了位于研究区的 364 个定位结果,对重新定位地震进行了精度分析。与原台网定位结果进行比较后认为,重新定位后可确定震源深度参数的地震数较大程度增加,震中分布的线性程度增强;重新定位结果较原台网定位结果精度有明显提高^[6]。

(2) 根据误差分析,原台网定位误差在 1 km 左右,平均值 0.914 km,深度定位误差平均值 0.901 km。而双差定位的平面误差平均值在 69.7 m,深度误差平均值在 59.6 m。可以看出双差定位方法重新定位后误差远小于传统方法的定位误差,精度有很大提高。

(3) 重新定位结果显示郯城 8½ 级地震震中附近现代中、小地震震中分布仍集中于地震破裂带上,带状集中区与地质考察推测得到的发震断层安丘—莒县断裂的走向吻合。现代中、小地震的频繁活动说明断层仍未闭锁,而郯城 8½ 级地震震源区以南区段现代中、小地震较少,可能属于闭锁区段。

(4) 震源分布显示的郯城 8½ 级地震的震源断层近于直立,略倾向 SE,由地表向下延伸至 30 km。中、小地震的深度分布最为密集区段在 15~20 km 左右,根据震中深度分布图像及一般强震主余震深度关系分析认为,8½ 级地震的震源深度应在 25 km 上下。

沂沭带以西的分支断裂中,上五井断裂切割深度最深,震源显示由地表向下延伸至 30 km 左右,在 25 km 左右有一个少震段,可能属于破裂不充分的地段,是未来需要注意的地段。其它 NW 向分支断裂上的地震深度绝大多数分布在 20 km 以上,平均 15 km 左右,表明这些断层可能深度在中、上地壳。

(5) 在定位过程中采用了近台记录和区域台网记录相结合的震相数据,并且对近台在双差定位算法中的作用进行了原理及实验分析,结果表明:①近台记录参与联合反演更有利于震源深度的确定;②近台记录的使用更有利于地震序列绝对位置的确定。但这一算法扩充的稳健性还有待于更多实验数据的检验。将近台记录运用到双差定位算法中的这一推广,有益于我国地震监测近几年迅速发展起来的大地震应急流动观测工作,可显著提高应急流动台网的定位精度,能够为大地震后的震情跟踪预测提供更加可靠的基础资料。

(下转 101 页)

$M_s8.0$ 大地震短临震兆[J]. 地球学报, 2008, 29(8): 583-591.

[21] 马晓静, 邓志辉, 陈梅花, 等. 从卫星红外亮温与大地热流的关系看地震前的热红外异常[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 246-275.

[22] 虞震东. 汶川 8.0 级地震的根源和成因[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(增刊): 66-71.

[23] 聂永安, 姚兰予, 赵国敏. 大震前宏观异常的机理研究[J]. 西北地震学报, 2009, 31(2): 196-200.

[24] 林乐志. 邢台地震对策及其社会学研究[M]. 北京: 地震出版社, 1993: 1-484.

[25] Gold T. Terrestrial sources of carbon and earthquake outgassing[J]. Journal of Petroleum Geology, 1979, 1(3): 1-10.

[26] 汪成民. 断层气测量在地震科学中的应用[M]. 北京: 地震出版社, 1991.

[27] 黄学, 牛彦良, 陈树耀, 编译. 地球排气作用, 地球动力学, 地球流体, 石油与天然气[M]. 上海: 上海远东出版社, 2008: 34-35.

[28] 毛桐恩, 刘新美, 姚家榴, 等. 震源层与地震流体[A]// 杨玉荣, 杜乐天等编, 流体地球科学进展[G]. 北京: 地震出版社, 1999: 27-35.

[29] 杜乐天. 地球排气作用——重大自然灾害孕因和地下巨大天然气来源[J]. 中国人口, 资源与环境, 2008, 18(专刊): 584-594.

[30] 杜乐天, 强祖基. 气体致震——一个可能的地震成因[A]// 杨玉荣, 杜乐天等编, 流体地球科学进展[G]. 北京: 地震出版社, 1999: 67-75.

[31] 杜乐天. 地球排气作用——巨大天然气能源和重大自然灾害孕因[J]. 北京: 气象出版社, 2010.

[32] 杜乐天. 从新世纪独联体有关地球排气如油气成因理论进展可得到的启示[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(4): 1-9.

[33] 杜乐天. 对西方当代地球科学理论的怀疑与新见[J]. 地学哲学通讯, 2006(1): 11-18.

[34] 张之一. 石油深部起源研究进展[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(1): 134-138.

[35] 张荣华, 张雪彤, 胡书敏, 等. 中地壳的水—岩作用对相关的地球物理性质影响[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2943-2954.

[36] 胡宝群, 吕古贤, 王方正, 等. 水临界奇异性及其对热流铀成矿作用的意义[J]. 铀矿地质, 2008, 24(3): 129-136.

(上接 75 页)

【参考文献】

[1] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double 2 difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 2000, 90: 1353-1368.

[2] 白玲, 张天中. 多重相对定位法和波形相关校正及其应用[J]. 地震学报, 2003, 25(6): 591-599.

[3] 张碧秀, 汤永安. 沂沭断裂带地壳结构特征[J]. 中国地震, 1988, 4(3): 16-22.

[4] 林能成. 群地震を伴うダイク成長程[D]. 日本东京大学, 2000: 1-147.

[5] 荣代璐, 李亚荣. 基于“双差法”地震精确定位研究 2002 年 12 月 14 日玉门 5.9 级地震的发震断层和发震机制[J]. 西北地震学报, 2004, 26(3): 223-227.

[6] 冯建刚. 利用双差地震定位法对民乐—山丹地震序列重新定位[J]. 西北地震学报, 2008, 30(1): 62-65.