

利用小震分布和区域应力场确定临潭—宕昌断裂 断层面参数

曾宪伟¹, 冯建刚², 王晓山³

(1. 宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000; 3. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘要: 首先结合 Hypo2000 单事件绝对定位方法和双差定位方法对临潭—宕昌断裂附近的小震进行精确定位; 然后采用模拟退火全局搜索和高斯牛顿局部搜索相结合的方法分别估算了该断裂不同位置断层面的走向、倾角、位置及相应的误差, 并基于局部应力场参数反演了各断层面的滑动角。反演的断层面走向 NW-NWW, 倾向 NE-NEE, 倾角 $71^{\circ} \sim 86^{\circ}$, 滑动角 $102^{\circ} \sim 132^{\circ}$ 。本文给出的断层面走向、倾向和倾角与已有研究结果相似, 但断层错动类型与已有结果分别为右旋走滑和左旋走滑, 存在区别。初步分析认为, 小震震源机制解给区域应力场参数反演结果带来了误差, 进而影响了断层面上滑动角的反演误差。

关键词: 精确定位; 小震分布; 临潭—宕昌断裂; 区域应力场; 断层拟合

中图分类号: P315.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)04-743-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.743

Determination of Fault Plane Parameter of Lintan-Tanchang Fault Using Distribution of Small Earthquakes and Regional Stress Field

ZENG Xian-wei¹, FENG Jian-gang², WANG Xiao-shan³

(1. Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan Ningxia 750001;

2. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou Gansu 730000; 3. Hebei Seismological Bureau, Shijiazhuang Hebei 050021)

Abstract: First, we precisely relocated small earthquakes near the Lintan-Tanchang fault using a combination of the Hypo2000 single-event absolute positioning method and the double difference location method. The biggest advantage of the first method is that we can use a multi-velocity model, which is in line with complex underground structures and crustal heterogeneity. Relative to using only one velocity model in the traditional positioning method, the use of the multi-velocity model can improve the near-field positioning precision in a large part. Further, the biggest advantage of the second method is that it can eliminate the influence of the underground velocity structure on the relative position of the earthquake; subsequently, we can obtain an accurate relative position between the two earthquakes. Then, we divided the small earthquake distributed in the northern part of the Lintan-Tanchang fault into two segments, which are the east and west segments, respectively, according to the distribution of the relocated small earthquake, location of the fault, and distribution map of a medium-strong earthquake's intensity. Further, in consideration of three similar focal mechanisms of

the Minxian $M5.2$ earthquake on November 13, 2003, Minxian $M5.0$ earthquake on September 7, 2004, and Minxian $M6.6$ earthquake on July 22, 2013, we combined the two segments together into one segment. Then, we separately estimated the strikes, dips, location, and corresponding errors of fault planes at different locations by simulated annealing and Gauss - Newtonian nonlinear inversion algorithms. It can not only search the global optimal solution but also estimate the parameter errors. Further, we can estimate the slip angle on the fault by using the parameters of the regional tectonic stress field after a large earthquake fault plane. Further, we inverted the rakes of the different fault planes by using local stress field parameters. The strike, trend, dip angle, and rake angle of the inverted fault plane were found to be NW-NWW, NE-NEE, $71^{\circ}\sim 86^{\circ}$, and $102^{\circ}\sim 132^{\circ}$, respectively. Because of the small number of earthquakes in the study area, the error values of the strike angle, dip angle, and distance from the origin of coordinates for the inverted fault plane are too large. The error of the inverted dip angle is larger than that of the inverted strike angle owing to greater dispersion of small earthquakes on the fault vertical. Further, the error of the slip angle is much larger. The strike, trend, and dip of the fault plane inverted in this study are similar to those in previous studies and also similar to the fault parameters displayed on focal mechanism of the three medium-strong earthquakes. However, the fault types differ between this study and previous studies, which are separately dextral and sinistral strike slip. Further, the fault-type considered in this study differs from that displayed on the focal mechanism of the three medium-strong earthquakes. It was primarily concluded that an inversion error of the regional stress field parameters exists because of focal-mechanism solutions of small earthquakes, and this error influences the inversion error of the rake angle on the fault plane. However, the inverted slip angle in this study is comparable to that reported in previous studies.

Key words: accurate location; distribution of small earthquakes; Lintan-Tanchang fault; regional stress field; fault fitting

0 引言

地震的发生与活动构造有着密切的关系。大地震一般发生在具有明显活动的断裂带上,而小震分布则相对分散,这与地下复杂的应力状态以及断裂带复杂的结构有关。即便如此,我们仍然可以通过精确定位看出小震沿活动断层分布的特征。尤其是大地震发生后,在相当长的一段时间内大量小震在断层面及其附近发生。那么,我们假定地震发震断层可以用一个平面来模拟,并设大多数小震发生在此断层面附近,则可以通过小震震源位置的空间分布较精确地勾画出断层面的形状和位置,即寻求一个平面,使得所有小震震源位置到这个平面的距离的平方和最小^[1]。

近年来,随着数字地震观测技术的提高和数字地震台站的广泛布设,大量小震被记录到,且越来越精确的震相拾取使得小震定位精度也越来越高。因此基于小震空间分布对地质构造及地球物理相关问题的研究越来越引起地球科学家的关注^[2-3]。1992年,王鸣等^[4]就曾利用小孔

径观测台网记录的小震数据实现了1989年大同一阳高地震断层参数求解;杨智娴等^[5]和朱艾斓等^[6]曾采用小震精确定位的丛集性描述断层的几何形态。但以上方法对断层的定量描述均存在不足。在此基础上,万永革等^[4]发展了模拟退火全局搜索^[5]和高斯牛顿局部搜索^[6]相结合的方法,并成功应用于唐山地震序列研究。该方法不仅能在全局搜索最优解,而且可以估计参数的误差,并且在求得大震断层面后还可以根据区域构造应力场参数得到断层面上滑动角的估计。如此则可以独立于体波、面波和大地测量数据之外给出地震断层参数的另外一种约束^[4]。

本文采用模拟退火全局搜索和高斯牛顿局部搜索相结合的方法,利用小震分布和区域应力场对临潭—宕昌断裂开展断层参数方面的研究。该断裂带历史地震活动性较高,分别于839年、1573年和1873年发生过岷县6~7级、岷县6级和临洮—岷县6级地震^[7];而且该断裂带近些年一直比较活跃,2003年11月13日和2004年9月7日曾发生过岷县5.2级和岷县5.0级地震,尤其是2013年

7月22日岷县、漳县交界6.6级强震的发生使得大家对该断裂的关注骤然提升。

1 研究方法

1.1 精定位方法

地震定位主要包括绝对定位和相对定位,还有基于全局网格搜索的 t - D 地震定位方法^[8]。Hypo2000定位方法^[9]是Fred W. Klein在Geiger定位方法^[10]基础上发展起来的一种单时间绝对定位方法,它是在给定的地下速度模型的基础上,计算假定的地震位置的理论到时和观测到时的偏差,通过迭代等手段搜索偏差最小值来确定地震的位置。该方法最大的优点是可以采用多速度模型,更符合复杂的地下结构和地壳横向不均匀性,相对于传统定位方法中只能使用单一的速度模型,可以在很大程度上提高近场定位精度。已有研究^[11-12]证明了这一点。而近几年发展起来的双差定位法^[13]则是相对定位法中比较有代表性并得到广泛应用^[2]的定位方法,该方法可以在很大程度上消除地下速度结构对地震相对位置的影响,从而获得地震之间准确的相对位置。因此,对于主事件,本文利用Hypo2000单事件定位方法对地震重新定位,然后利用双差定位方法得到精度较高的震源相对位置,二者结合将可以得到较好的定位结果。

2.2 断层面拟合方法

本文首先采用模拟退火全局搜索和高斯牛顿局部搜索相结合的方法,利用临潭—宕昌断裂附近的密集小震求解断层面走向、倾角、位置及其误差估计。然后考虑区域构造应力场参数,计算断面上的滑动角大小。实现将模拟退火算法和高斯牛顿算法相结合计算断层面参数具体步骤和断层面上滑动角的确定方法见文献^[4]

2 资料处理与分析

2.1 精定位结果及分析

数据选取1970—2009年临潭—宕昌断裂两侧的可定位地震震相报告,地壳速度模型选取自天水地区的四条人工地震测深结果^[14-16]。首先利用Hypo2000绝对定位方法对研究区内(图1(a))地震进行单事件重新定位,然后利用双差定位方法再次进行震源位置的精确定位,获得496次地震的定位结果,其中85%以上的地震水平向和垂直向定位误差均小于1km。将其中水平向和垂直向定位误差大于1km的地震删除后,剩余434次地震,计算得到东西向误差均值为203 m,南北向误差均值为222 m,深度误差均值为251 m,显示定位精度较高。434次地震分布于临潭—宕昌断裂两侧(图1(a)),断裂南侧的西段地震分布较分散,东段宕昌县附近出现了小震密集现象,

主要为2005和2006年宕昌两次4级地震及其余震造成;断裂北侧西段出现了NNW向延伸的条带状小震丛集,为2003年岷县5.2级地震和2004年岷县5.0级地震及余震的震中位置,东段小震分布相对分散,但仍可以看出小震大致沿NW向展布。

2.2 断层面拟合结果及分析

依据临潭—宕昌断裂附近的小震精定位结果和2.1中叙述的断裂两侧的小震展布特点,以及断裂位置和走向,断裂北侧的小震分布更适合用于确定断层参数,并可清楚地选取东西两段;其次,1837年岷县北6级地震^[17]、2003年岷县5.2级地震^[18]、2004年岷县5.0级地震^[19]和2013年岷县6.6级地震^[20]的烈度分布图也显示出图1(a)所示选取分段的合理性。图1(b)给出了两个矩形框内小震的深度分布频次,多数地震深度集中于浅部2~8 km的范围内。分别对西段1和东段2矩形框内的小震进行反演,求得断层的走向、倾角、距坐标原点的距离及断层的四个顶点位置(表1)。

西段1的反演结果显示断层走向NW(图2(a)、(b)),倾向NE,倾角较大,近乎直立(图2(c));东段2的反演结果显示断层走向NNW(图3(a)、(b)),倾向NEE,倾角70.8°(图3(c))。根据已有调查研究^[21],临潭—宕昌断裂总体呈NWW-NW向展布,倾向NE,倾角50°~70°,以上两段的断层面反演结果与之基本一致,也与临潭—宕昌断裂上发生的2003年岷县M5.2^[22]、2004年岷县M5.0^[19]和2013年岷县M6.6^[23]地震震源机制(后文简称为三次中强地震震源机制)显示的发震断层走向和倾角结果大体一致。由于两段矩形框内的地震数较少,反演得到的走向、倾角误差以及距坐标原点的距离误差(表1)均偏大^[4],而且倾角标准差均比走向标准差大,这是由小震在断层垂向弥散较大(图2(c)~3(c))造成的。小震距反演断层面距离的分布(图2(d)~3(d))表明大部分小震分布在所求断层面的附近。

由于近些年岷县发生的三次中强地震震源机制非常相似,且图1(a)中西段1和东段2之间为2013年岷县6.6级地震震中区,因此从整体考虑出发,本文将西段1和东段2合并为一段(图4(a)),重新进行断层反演。东西段合并后的反演结果显示断层走向NW(图5(a)、(b)),误差较小,倾向NE,倾角较大,近乎直立(图5(c))。与西段1及东段2各段的断层反演结果接近,也与已有研究结果^[21]和三次中强地震震源机制给出的发震断层结果基本吻合,并且东西段合并后反演的断层参数及相应误差值的大小特征与西段1和东段2的反演结果基本类似。由此说明西段1与东段2的断层以及2013年7月22日岷县6.6级地震震中区的断层为同一条断层,根据以上得到的断层

表1 利用临潭-宕昌断裂附近的精定位小震资料求得的地震断层参数

Table1 Fault plane parameters determined by using precisely located earthquakes near the Lintan–Tanchang fault								
	小震数/个	走向		倾角		距离		断层面顶点位置
		值/°	标准差/°	值/°	标准差/°	值/°	标准差/°	(纬度/°, 经度/°, 深度/km)
西段 1	29	317.9	2.3	85.7	4.5	−0.00	0.37	34.681, 103.957, 1.1
								34.689,103.967,18.2
								34.894,103.742,18.2
								34.887,103.731,1.1
东段 2	38	334.2	3.2	70.8	6.9	−0.00	0.56	34.125,104.438,0.7
								34.148,104.496,16.8
								34.420,104.337,16.8
								34.125,104.438,0.7)
东西段合并	59	316.6	0.67	86.2	4.6	−0.02	0.37	34.261,104.438,0.9
								34.268,104.447,18.2
								34.858,103.770,18.2
								34.851,103.761,0.9

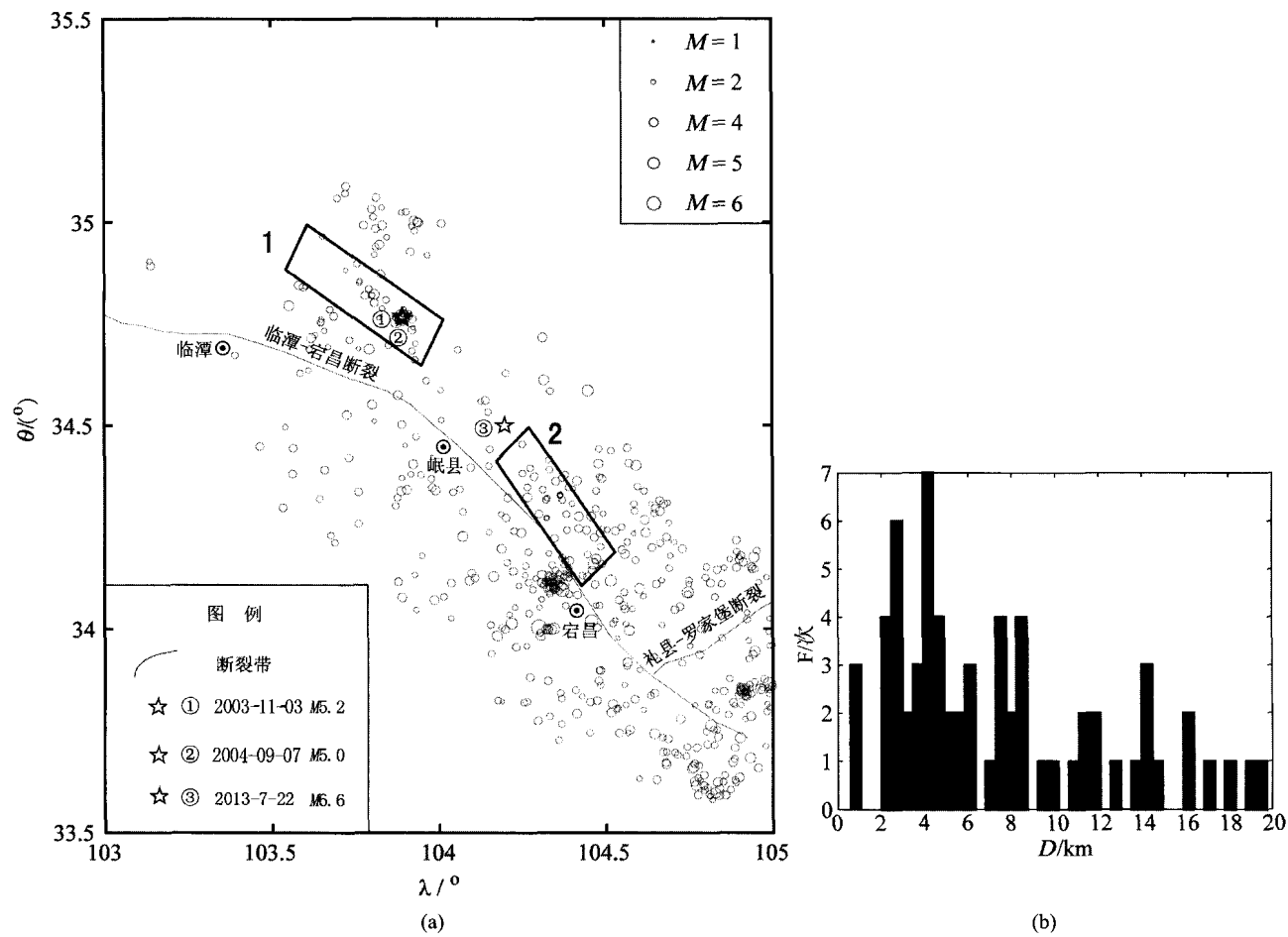


图1 (a) 临潭-宕昌断裂两侧小震分布和反演断层参数所用的小震范围(粗方框)和(b) 矩形框内小震的深度分布
Fig.1 (a) Spatial distribution of small earthquakes and the data selection areas (thick rectangles);
(b) Depth distribution of small earthquakes inside the two thick rectangles

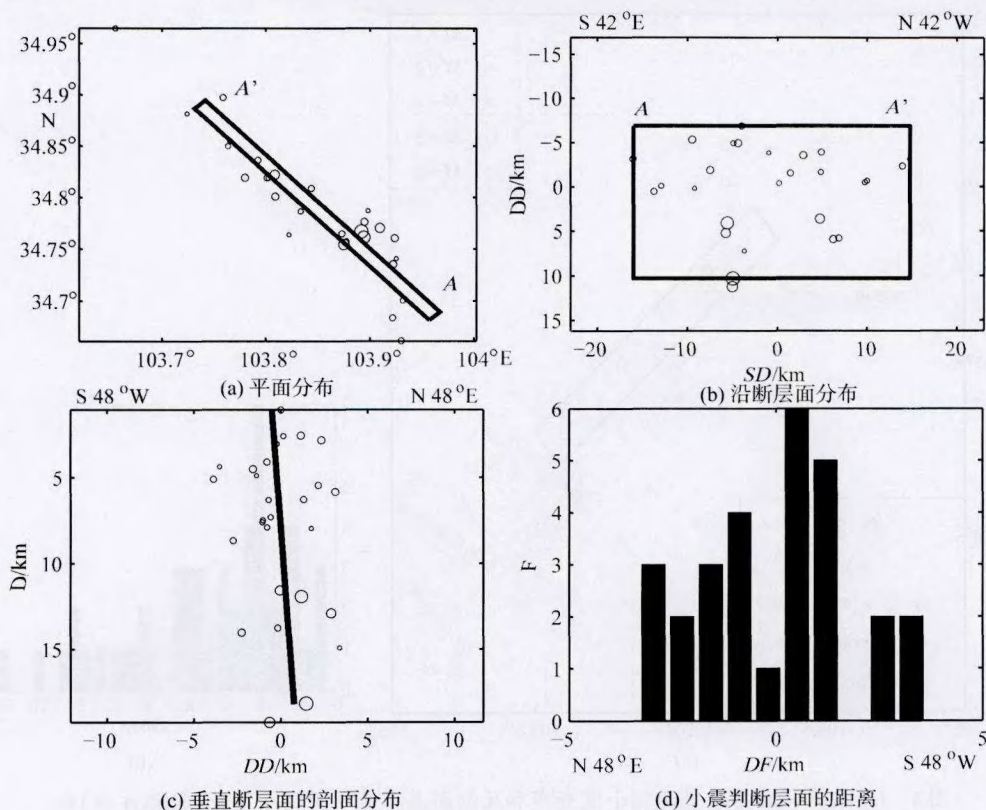


图2 临潭—宕昌断裂西段精确定位后的小震分布(AA'为断层上边界端点,DD为倾向,DF为距断层面的距离,SD为走向)

Fig.2 Distribution of precisely located small earthquakes near the west segment of Lintan-Tanchang fault (AA' is the fault upper boundary. DD is dip. DF is distance epicenter from the fault plane. SD is strike.)

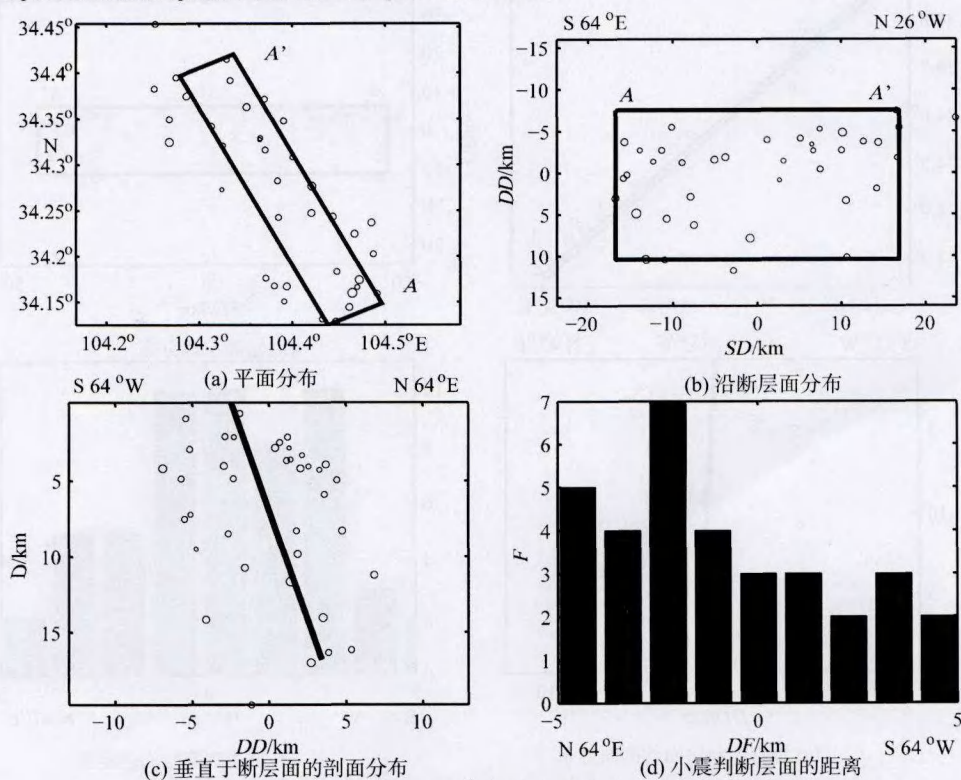


图3 临潭—宕昌断裂东段2精定位小震分布(说明与图2相同)

Fig.3 Distribution of precisely located small earthquakes near the east segment of Lintan-Tanchang fault

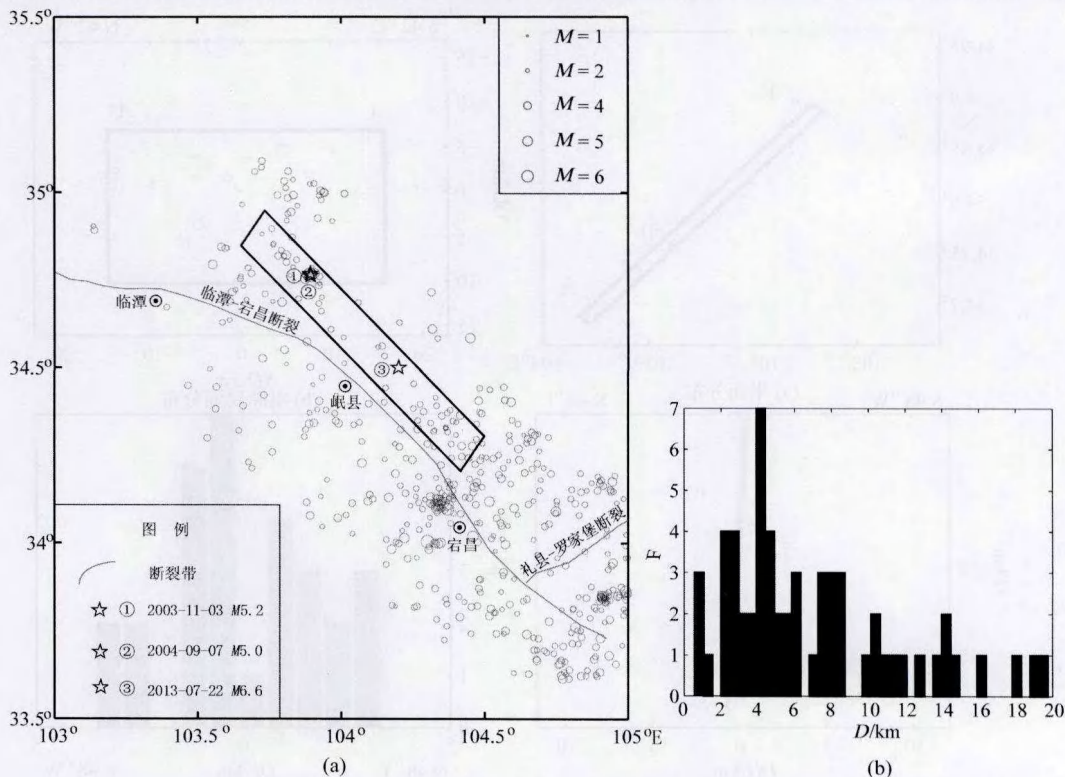


图4 (a) 临潭—宕昌断裂两侧小震分布和反演断层参数所用的小震范围(粗方框)和
(b) 矩形框内小震的深度分布

Fig.4 (a) Spatial distribution of small earthquakes and the data selection areas (thick rectangles);
(b) Depth distribution of small earthquakes inside the thick rectangles

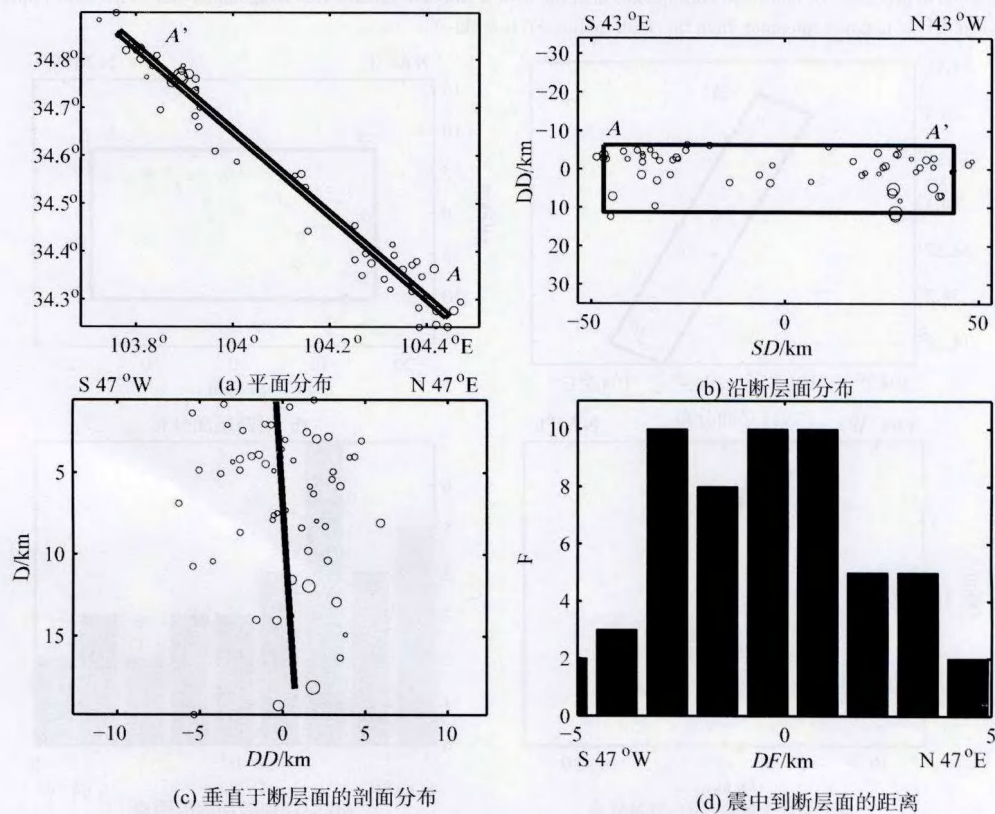


图5 临潭—宕昌断裂东西段合并后精定位小震分布(说明与图2相同)

Fig.5 Distribution of precisely located small earthquakes near the east and west segment of Lintan-Tanchang fault

面走向、倾角及其标准差,采用由南北地震带小震震源机制解和CMT联合反演得到的局部应力场参数及其标准差求解了各段断层面的滑动角及其误差(表2)。其中 R 为主应力的相对大小^[24],并假定 P 、 T 轴走向误差为 5° , P 、 T 轴俯仰角误差为 10° , R 值误差为 $0.1^{[4]}$ 。

西段1、东段2和东西段合并断层面的滑动角结果均显示断层为逆冲兼具右旋走滑。邓起东等^[21]认为临潭—宕昌断裂为左旋逆走滑断层,该断裂上三次中强地震震源机制结果显示发震断层为逆冲错断兼具左旋走滑,均与本文结果在断层的逆冲性质上吻合,而在走滑旋性上

有区别。分析认为,本文计算的各段断层面滑动角误差较大(表2),与参与反演滑动角的局部应力场参数有较大关系。因为小震震源机制解的计算结果稳定性和可靠性较CMT结果要差,而同时CMT数量较少,为了增加参与反演局部应力场参数的震源机制解数量,将小震震源机制解与CMT相结合反演局部应力场参数,因此小震震源机制解参与计算在一定程度上影响了局部应力场参数的反演结果。即便如此,本文反演的滑动角结果与本段叙述的已有结果也存在可比性和一致性。

表2 运用局部应力场参数和地震断层面参数得到的滑动角及其误差

Table 2 The estimate rake angles and their errors of the fault segments by using local stress field and the fault parameters and strike, dip of the fault

断层段	P 轴走向/ $(^{\circ})$	标准差/ $(^{\circ})$	P 轴倾角/ $(^{\circ})$	标准差/ $(^{\circ})$	T 轴走向/ $(^{\circ})$	标准差/ $(^{\circ})$	T 轴倾角/ $(^{\circ})$	标准差/ $(^{\circ})$	R 值	标准差	滑动角/ $(^{\circ})$	标准差/ $(^{\circ})$
西段1											105.9	18.6
东段2	36	5	23	10	139	5	28	10	0.5	0.1	131.7	19.6
东西段合并											101.8	16.4

3 结论与讨论

本文首先结合Hypo2000单事件绝对定位方法和双差定位方法,对临潭—宕昌断裂附近的小震进行精确定位,然后依据精定位后的小震分布、断层位置和中强震烈度分布图,将该断裂北侧的小震分布分成两段—西段1和东段2,采用模拟退火全局搜索和高斯牛顿局部搜索相结合的方法,分别估算了两段断层面的走向、倾角、位置及相应的误差,并基于局部应力场参数反演了各断层面上的滑动角。又考虑到临潭—宕昌断裂北侧三次中强地震的震源机制接近,将西段1和东段2合并为一段并重新反演了合并段的断层面参数及相应误差。结果显示,本文反演的断层面走向NW-NWW,倾向NE-NEE,倾角 $71^{\circ} \sim 86^{\circ}$,滑动角 $102^{\circ} \sim 132^{\circ}$ 。由于研究区内地震数偏少,反演得到的走向、倾角误差以及距坐标原点的距离误差均偏大;小震在断层垂向弥散较大造成了反演的倾角误差较大;同时滑动角误差较大。

通过对比,本文给出的断层面走向、倾向和倾角与已有研究结果^[21]基本一致,也与三次中强地震的震源机制显示的相应断层参数基本吻合;只是反演的滑动角表明断层为逆冲兼具右旋走滑,与临潭—宕昌断裂为左旋逆走滑断层和三次中强地震震源机制显示为逆冲错断兼具左旋走滑断层存在旋性上的区别。初步分析认为,小震震源机制解给区域应力场参数反演结果带来了误差,进而影响了断层面上滑动角的反演误差。即便如此,本文反演的滑动角结果与已有结果也存在可比性和一致性。

本文计算软件为万永革研究员编写,河北省地震局刁桂苓研究员和冯向东高级工程师提供了帮助,在此一

并致谢。

参考文献(Refences)

[1] 王鸣,王培德. 1989年10月18日大同—阳高地震的震源机制和发震构造[J]. 地震学报,1992,14(4): 407-415.
Wang M, Wang P D. The Mechanism and Seismogenic Structure of Datong-Yanggao Earthquake Which Occurred on Oct. 18, 1989[J]. Acta Seismologica Sinica, 1992, 14(4): 407-415. (in Chinese)

[2] 杨智娴,陈运泰,郑月军,等. 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,2003,33(增刊): 129-134.
Yang Z X, Chen Y T, Zheng Y J, et al. Relocation of Earthquake in Central-western China Using the Double Difference Earthquake Location Algorithm[J]. Science in China: Series D, 2003, 33(Suppl.): 129-134. (in Chinese)

[3] 朱艾澜,徐锡伟,周永胜,等. 川西地区小震重新定位及其活动构造意义[J]. 地球物理学报,2005,48(3): 629-636.
Zhu A L, Xu X W, Zhou Y S, et al. Relocation of Small Earthquake in Western Sichuan, China and its Implications for Active Tectonics[J]. Chinese J Geophys. 2005, 48(3): 629-636. (in Chinese)

[4] 万永革,沈正康,刁桂苓,等. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层面参数方法及其在唐山地震序列中的应用[J]. 地球物理学报,2008,51(3): 793-804.
Wan Y G, Shen Z K, Diao G L, et al. An Algorithm of Fault Parameter Determination Using Distribution of Small Earthquakes and Parameters of Regional Stress Field and Its Application to Tangshan Earthquake Sequence[J]. Chinese Geo-

- phys, 2008, 51(3): 793–804.(in Chinese)
- [5] Rothman D H. Nonlinear inversion, statistical mechanics, and statistics estimation[J]. Geophysics, 1985, 50: 2784–2796.
- [6] 文世鹏. 应用数值分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 167–186.
- Wen S P. Numerical Analysis Application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 167–186.(in Chinese)
- [7] 顾功叙. 中国地震目录[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- Gu G X. China Earthquake Catalogue[M]. Beijing: Science Press, 1983.(in Chinese)
- [8] 惠少兴, 张元生, 李顺成. T - D 地震定位方法研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(1): 10–13.
- Hui S X, Zhang Y S, Li S C. Study on the T - D Earthquake Location Method[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1): 10–13.(in Chinese)
- [9] Klein F W. User's Guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes [R]. U. S. Geological Survey Open-File Report. 2007.
- [10] Geiger L. Probability Method for the Determination of Earthquake Epicenters From Arrival Time Only[J]. Bull St Louis Univ, 1912, 8: 60–71.
- [11] 宋美琴, 郑勇, 葛繁, 等. 山西地震带中小震精确位置及其显示的山西地震构造特征[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 513–525.
- SONG Mei-qin, ZHENG Yong, LI Bin, et al. Relocation of Small to Moderate Earthquake in Shanxi Province and its Relation to the Seismogenic Structures[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 513–525.(in Chinese)
- [12] 冯建刚, 蒋长胜, 韩立波, 等. 1970年以来甘肃台网地震观测报告收集整理及其重新定位研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(3): 289–293.
- Feng J G, Jiang C S, Han L B, et al. Collection and Reestablish Work for the Earthquake Observation Reports of the Gansu Seismographic Network since 1970 and Earthquake Relocation[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(3): 289–293.(in Chinese)
- [13] Waldhaue F, Ellsworth W L. A Double Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the North Hayward Fault, California[J]. Bull Seism Soc Amer, 2000, 90(6): 1353–1368.
- [14] 闵祥仪, 周民都, 郭建康, 等. 灵台—阿木去乎剖面地壳速度结构[J]. 西北地震学报, 1991, 13(增刊): 29–36.
- Min X Y, Zhou M D, Gui J K, et al. The Crustal Velocity Structure in Lingtai-Amuquhu Profile[J]. Northwestern Seismological Journal, 1991, 13(Supp.): 29–36.(in Chinese)
- [15] 李清河, 郭建康, 周民都, 等. 成县—西吉剖面地壳速度结构. [J]西北地震学报, 1991, 13(增刊): 37–43.
- Li Q H, Guo J K, Zhou M D, et al. The Velocity Structure of Chengxian-Xiji Profile[J]. Northwestern Seismological Journal, 1991, 13(Supp.): 37–43.(in Chinese)
- [16] 曹令敏, 赖晓玲. 甘肃天水地区地壳上部二维速度结构成像研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(10): 3318–3326.
- Cao L M, Lai X L. 2-D Velocity Images of Upper Crust in Tianshui Area, Gansu Province[J]. Chinese Geophys, 2012, 55(10): 3318–3326.(in Chinese)
- [17] 郑文俊, 雷中生, 袁道阳, 等. 1837年甘肃岷县北6级地震考证与发震构造分析[J]. 地震, 2007, 27(1): 121–130.
- Zheng W J, Lei Z S, Yuan D Y, et al. Structural Research on the 1837 Northern Minxian M_6 Earthquake in Gansu Province and its Causative Structure[J]. Earthquake, 2007, 27(1): 121–130.(in Chinese)
- [18] 郑文俊, 刘小凤, 赵广, 等. 2003年11月13日甘肃岷县 $M_{5.2}$ 地震基本特征[J]. 西北地震学报, 2005, 27(1): 61–65.
- Zheng W J, Liu X F, Zhao G, et al. Principal Features of Minxian $M_{5.2}$ Earthquake in Gansu Province, on Nov. 13, 2003[J]. Northwestern Seismological Journal, 2005, 27(1): 61–65.(in Chinese)
- [19] 何文贵, 周至宇, 马尔曼, 等. 岷县—卓尼5.0级地震的基本特征和地质背景研究[J]. 地震研究, 2006, 29(4): 373–378.
- He W G, Zhou Z Y, Ma E M, et al. Basic Features and Geological Background of the Minxian-Zhuoni $M_{5.0}$ Earthquake on Sep. 7, 2004[J]. Journal of Seismological Research, 2006, 29(4): 373–378.(in Chinese)
- [20] <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/464/478/20130724133721239856586/index.html>
- [21] 邓起东, 张培震, 冉永康, 等. 中国活动构造与地震活动[J]. 地学前缘, 2003, 10(特刊): 66–73.
- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. Active Tectonics and Earthquake Activities in China[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(Special Issue): 66–73.(in Chinese)
- [22] <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
- [23] <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/267408.shtml>
- [24] 许忠淮. 用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场[J]. 地震学报, 1985, 7(4): 349–362
- Xu Z H. Mean Stress Field in Tangshan Aftershock Area Obtained from Focal Mechanism Data by Fitting Slip Directions. Acta Seismologica Sinica, 1985, 7(4): 349–362(in Chinese)