

洪德全、王行舟、韩立波等 2011 用 CAP 方法研究安庆 4.8 级地震震源机制,中国地震 27(2) 207 ~ 214。

用 CAP 方法研究安庆 4.8 级地震震源机制

洪德全^{1 2)} 王行舟^{1 2)} 韩立波³⁾ 戚浩¹⁾ 张炳¹⁾

1) 安徽省地震局,合肥市长江西路 558 号 230031

2) 蒙城国家野外观测研究站,合肥市金寨路 96 号 230026

3) 中国地震局地球物理研究所,北京 100081

摘要 利用 CAP 方法反演了 2011 年 1 月 19 日安庆 M_s 4.8 地震震源机制解。反演得到震级 $M_w = 4.1$, 节面 I 走向角 16° 、倾角 74° 、滑移角 120° ; 节面 II 走向 131° 、倾角 33° 、滑移角 30° ; 震源深度为 3km。两个节面的走向与震中附近的宿松-枞阳断裂的走向相差较大,加之前人的地质考察结果显示,该断裂晚第四纪以来地震活动性较弱,故认为宿松-枞阳断裂是安庆 M_s 4.8 地震发震构造的可能性较小,本次地震很可能是北北东向的隐伏断层活动的结果。

关键词: 安庆地震 CAP 方法 震源机制解

[文章编号] 1001-4683(2011)02-0207-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2011 年 1 月 19 日,在距离合肥 140km 左右的安庆地区,发生了 M_s 4.8 地震,导致安庆地区大量房屋开裂,合肥地区有明显震感。这次地震是安徽省 1979 年固镇地震至今 32 年以来最大的一次地震,引起了广泛的关注。刘东旺等(2009)通过南北带历史地震对华东地区的应力影响的统计,认为 2008 年汶川地震后,郟庐断裂段中南段未来 1~3 年内发生 5 级地震的可能性较大。然而安庆地震发生在宿松-枞阳断裂的北侧,而不是在郟庐断裂带上。这次地震发生的地区在历史上也发生过几次 M_s 4 以上地震,比较近的一次是 1963 年怀宁山口附近发生的 M_s 4.5 地震。姚大全等(1997)认为该次地震是宿松-枞阳断裂的运动引起的。此次安庆地震同样发生在宿松-枞阳断裂附近,是否也是该断层的运动造成的,需要进一步研究此次地震的震源机制解。本文的主要目的是用 CAP 方法研究安庆 M_s 4.8 地震震源机制解,并结合安徽省地质构造特征分析本次地震是否与宿松-枞阳断裂运动有关。

地震震源机制的确定,对于地震本身的研究、地震的孕震机理的解释及震后应力的分布,具有十分重要的意义。因此,对于震源机制理论和方法的研究,一直是地震学研究的热点,而且目前已经取得了大量重要成果。Helmberger 等(1980)利用地震 P 波(P&Pn1)模拟,通过理论和实际波形的对比,采用格点搜索的方法,来研究地震的震源机制。随后 Wallace

[收稿日期] 2011-03-10

[项目类别] 中国地震局地震预报司震情跟踪工作任务(2011020104)资助

[作者简介] 洪德全,男,1982 年生,工程师,主要从事数字地震学和地震精定位工作。

Email:dequanh@mail.ustc.edu.cn

等(1981、1982)通过对震源机制进行方位角、倾角、滑移角的参数化,并利用最小二乘反演结合互相关的方法,得到了地震的震源机制。随着矩张量方法的出现,长周期地震矩张量反演的方法得到广泛的应用(Dreger et al, 1993; Walter, 1993; Ritsema et al, 1995; Ichinose et al, 1997、1998、1999)。而其他一些反演方法,主要针对近震波形的直达波和 Moho 面的多次反射波(Chandan et al, 2006; Doser et al, 1988; Dreger et al, 1990、2000; Pasyanos et al, 1996; Thio et al, 1995; Du et al, 2003)。近年来,随着计算机性能提高及大量高质量宽频地震数据的获取,利用地震波形反演震源机制成为可能。Zhao 等(1994)通过分割波形记录为 Pnl 和 Snl 部分,分别赋予不同的权重,利用格点搜索的方法进行地震震源机制的反演。Zhu 等(1996)进一步改进了该方法,通过去除归一化振幅并使用距离比例系数使得反演结果更加稳定。CAP 方法目前已得到广泛的应用(赵凌云等, 2010; 张辉等, 2010; 黄建平等, 2009; 吕坚等, 2008; Zheng et al, 2009、2010)。

1 方法和原理

Zhao 等(1994)提出用近震宽频带地震波形反演震源机制解,反演原理为:设 $u(t)$ 是台站记录到的去除仪器响应后的地震波形, $S(t)$ 是相应的理论计算出的波形,则有如下等式

$$S_j(t) = M_0 \sum_{i=1}^3 A_{ij}(\phi - \theta, \delta, \lambda) G_{ij}(h, \Delta, t) \quad (1)$$

其中 $j=1, 2, 3$ 对应垂向、径向和切向分量, G_{ij} 是对应各个方向的格林函数, A_{ij} 是辐射的衰减系数, M_0 是地震的矩张量, ϕ 和 Δ 是地震的方位角和震中距。需要反演得到的地震深度 h 、方位角 θ 、滑移角 λ 可以通过解下式得到

$$u(t) = s(t) \quad (2)$$

其中 $u(t)$ 和 $s(t)$ 分别为实际地震记录和理论地震图。为此,我们可以使用格点搜索法,同时搜索可能的震源深度、方位角、倾角、滑移角,同时给出误差函数作为测量标准,从而得到最佳的震源机制解。

由于在反演的时候使用的波形都是近震波形,而近震波形受地壳横向各向异性的影响比较明显。因此,我们采用频率-波数方法($F-K$) (Zhu et al, 2002) 来计算台站各处的格林函数。另外,在波形反演过程中,反演结果容易受到波形中较强部分的影响。如果采用全波形反演,长周期的面波将对反演结果起主导地位。为了克服这一反演中存在的困难,在进行反演的时候, Zhao 等(1994)提出了 CAP 方法。该方法把整个波形分为 P 波部分(Pnl)和面波部分(Sur),对两部分的 3 分量共 5 部分(Pnl 不存在切向分量)给定不同的权重进行反演,这样可以充分考虑各部分波形对反演结果的贡献。我们选择格点搜索的方法,并选取下式所示的误差测量函数

$$e = \|u(t) - s(t)\| \quad (3)$$

考虑到不同震中距的台站记录的波形存在数量级的差别,故采用归一化的误差测量函数,如公式(4)所示。通过格点搜索方法在适当范围内循环震源深度、方位角、倾角、滑移角,得到相对误差最小时的震源机制解和震源深度

$$e = \frac{\|u(t) - s(t)\|}{\|u(t)\| \cdot \|s(t)\|} \quad (4)$$

2 数据分析和反演结果

2.1 数据基本情况

考虑安庆地震震级较小,本研究所用的数据主要选择震中距小于 200km,信噪比较高的台站记录,共 9 个台站,其分布情况如图 1 所示。其中 6 个台属于安徽台网,2 个台属于江西台网,1 个台属于湖北台网。研究中用到的 9 个台站分布在安庆地震的周围,分布较合理,避免了台站分布局限性造成的反演结果的不稳定。

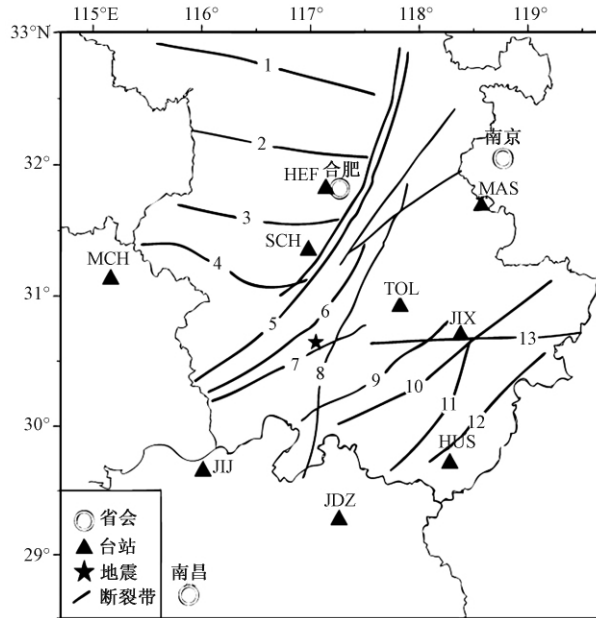


图 1 研究中用到台站分布情况

1. 刘府断裂;2. 肥中断裂;3. 六安断裂;4. 磨子谭断裂;5. 郟庐断裂带;6. 罗河断裂;7. 头坡断裂;
8. 姥山逆掩断裂;9. 高但断裂;10. 江南断裂;11. 汤口断裂;12. 虎月断裂;13. 周王断裂

2.2 速度模型的选取

CAP 方法反演震源机制解主要是通过计算给定震源机制解的理论波形与实际观测波形进行对比,不断改变震源参数,拟合最好的机制解为最终的反演结果。在计算理论波形时先用 $F-K$ (Zhu et al 2002) 方法在给定速度模型下,计算各个台站位置的格林函数,然后由震源函数和格林函数合成理论波形。在反演过程中,越可靠的速度模型得到的反演结果越可靠。本次安庆 $M_s 4.8$ 地震发生在秦岭大别造山带和郟庐断裂带的交汇部位,是地质学和地震学研究的重点地区。李华等(2008)利用大别山西段宽频带数字地震台阵,使用接收函数方法反演了该地区的速度结构;徐纪人等(2003)用地学断面、地震测深、体波和面波层析成像方法得到了苏鲁大别造山带及附近地震三维速度结构。本研究使用的模型是史大年等(1999)使用层析成像方法获得的大别造山带东段桐城-岳西地区地壳速度模型,如表 1 所示。

2.3 反演结果

利用近震 CAP 反演得到的地震震源机制解、理论波形和实际观测对比、误差值、台站投

影到震源球上的位置如图2所示。图2中基于表1中的地壳速度模型,利用F-K方法计算得到的理论波形,在不同方位角 stations 上都能较好地与实际记录到的波形匹配,且其绝对振幅大小也较为相似。45个震相中理论地震图与观测地震图的相关系数大于90%的有15个,占1/3;相关系数大于80%的有24个,占53%;相关系数大于60%的有33个,占73%,拟合方差为 2.755×10^{-4} ,理论地震图较好地拟合了观测地震图,反演结果是可靠的。由CAP方法反演得到的震源机制为的

表1 研究中用到的速度模型

| 层号 | 层厚 (km) | v_s (km/s) | v_p (km/s) | 密度 (g/cm^{-3}) | Q_p | Q_s |
|----|---------|--------------|--------------|--------------------|-------|-------|
| 1 | 2.00 | 2.10 | 4.00 | 2.40 | 800 | 600 |
| 2 | 10.00 | 3.50 | 6.10 | 2.75 | 1000 | 600 |
| 3 | 10.00 | 3.60 | 6.30 | 2.80 | 800 | 500 |
| 4 | 8.00 | 4.00 | 7.20 | 3.10 | 1000 | 600 |
| 5 | 80.00 | 4.80 | 8.10 | 3.31 | 970 | 400 |

两个界面。节面1的参数为:走向角 16° 、倾角 74° 、滑移角 120° ;节面2的参数为:走向角 131° 、倾角 33° 、滑移角 30° 。地震震源是倾滑型。反演震级为 $M_w 4.1$ 。本文同时对不同深度

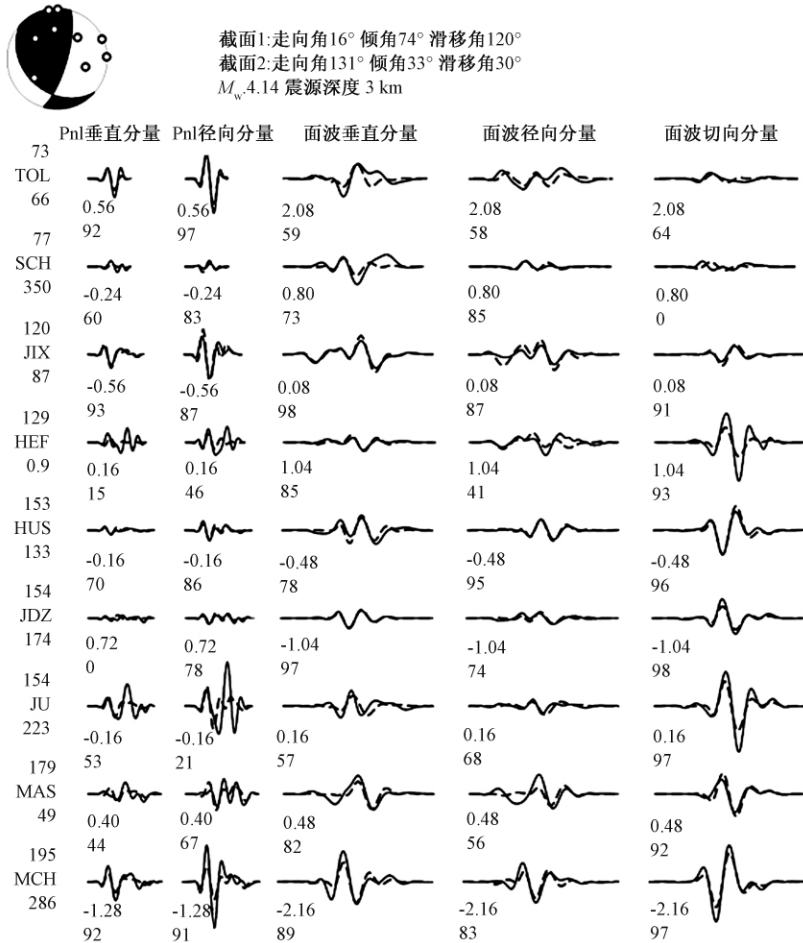


图2 近震CAP方法反演的震源机制解、台站分布、反演误差、互相关系数数据结果示意图
 虚线波形是计算出的理论波形,实线波形是实际观测的波形,波形左侧为台站名,震中距(km)和方位角,波形下面的数字依次为反演误差及互相关系数。滤波范围:P波部分为0.05~0.2Hz,面波部分为0.03~0.1Hz

的反演结果做了对比,并给出拟合误差随不同深度变化的关系,如图 3。图中横坐标是震源深度,纵坐标是拟合误差。可以看出最佳的震源深度出现在 3km。而当深度增加或者减小的时候,拟合误差会相应的变大,由此可以判定安庆 $M_s4.8$ 地震震源深度为 3km 左右。

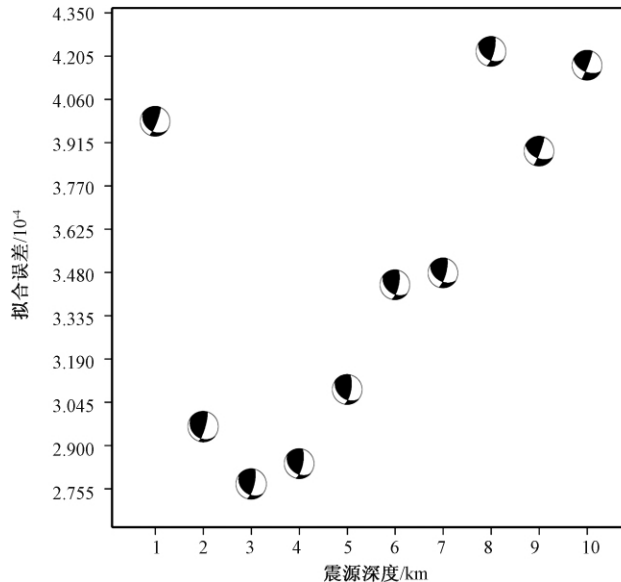


图 3 不同深度误差和震源机制随不同震源深度的变化图

3 讨论与结论

CAP 方法通过近震波形拟合反演中小地震 ($M_L > 4.0$) 的震源机制解,为得到中小地震的震源机制解提供了准确有效的方法。其优点之一就是速度模型的依赖程度不高,而且对震源深度反演可以给出相对较可靠的结果。本文用 CAP 方法反演了安庆 $M_s4.8$ 地震震源机制解,选用的 9 个台站在方位角上具有较好的分布。从上述的统计分析可以看出,拟合效果比较理想。反演结果与用 FOCMEC 方法得到的结果基本一致(陈安国等 2011)。震源深度的拟合反演结果显示,最佳震源深度是 3km,与中国地震台网中心给出的震源深度 9km 差别较大。但本文在深度反演时 9km 的拟合误差明显大于 3km。从拟合效果看,我们认为 3km 是比较可靠的。

安庆 $M_s4.8$ 地震发生在宿松-枞阳断裂和严家桥-枫沙湖断裂的交汇处,如图 1。震中位置离宿松-枞阳断裂 4km 左右,而离严家桥-枫沙湖断裂较远,约 50km。在震中附近目前没有其它已知断层。安庆 $M_s4.8$ 地震发生后,其发震构造问题成为了重点关注问题。离震中最近的宿松-枞阳断裂是否为安庆 $M_s4.8$ 地震的发震构造,值得探讨。宿松-枞阳断裂在新构造上地处长江下游安庆弱上升区,断层总体走向 NEE,倾向 SE。自宿松经石碑、头坡、安庆北、枞阳城南向 NE 延伸,全长约 130km,又称头坡断裂。地质考察认为,该断裂在第四纪早期有过活动,但构造运动相对较弱,皖第四纪以来活动迹象不明显(翟洪涛等 2010)。本文用 CAP 方法获得的震源机制解的两个节面的参数都与宿松-枞阳断裂相差较大。所以,

我们认为宿松-枞阳断裂是安庆地震的发震构造的可能性较小。

离安庆地震 50km 左右的严家桥-枫沙湖断裂是一条 NNE 走向的断裂,该断裂距离安庆地震较远,是其发震构造的可能性不大。历史地震资料显示,严家桥-枫沙湖断裂曾发生 1585 年巢县南 5 级地震及 1654 年庐江东南 5 级地震等 4 次中强地震(翟洪涛等,2009)。说明该地区 NNE 向断裂具有一定的地震活动性。安庆地震的震源机制解的一个节面的走向 16° ,是否在震中附近存在一条 NNE 向的隐伏断层,其近期的运动导致了安庆 $M_s 4.8$ 地震的发生?邓起东等(2007)指出在中国东部的一些中等的和弱的地震活动区,一般只发生 5~6 级地震,地震时地表并无地震破裂带发育,在震区除发现早、中更新世断层外,地表未发现晚更新世以来的活动断层。但在这些地震区,一般都发育控制晚第四纪沉积和现代地貌的线性地貌变异带。研究表明,它们可能是地表尚未显露断层的隐伏断层或深部断层活动的结果,及这些中等强度地震的发震构造。因此,我们认为安庆地震有可能是 NNE 向的隐伏断层运动的结果。

致谢:感谢中国地震局地球物理研究所蒋长胜博士参与本文讨论,并给出许多宝贵意见。

参考文献

- 陈安国、倪红玉、刘东旺等 2011, 2011 年 1 月安徽安庆 $M_s 4.8$ 地震震源区三维速度结构与发震构造讨论,中国地震,待发表。
- 邓起东、卢造勋、杨主恩,城市活断层探测和断层活动性评价问题,地震地质,29(2),189~200。
- 黄建平、倪四道、傅容珊等,2009,综合近震及远震波形反演 2006 文安地震($M_w 5.1$)的震源机制解,地球物理学报,52(1),120~130。
- 李华、王良书、李成等,2008,大别造山带西段宽频带数字地震台阵观测与地壳上地幔结构,地球科学,38(7),862~871。
- 刘东旺、刘泽民、沈小七等,2009,汶川 8.0 级地震后庐断裂带中南段地震危险性研究,国际地震动态,(4) 85~85。
- 吕坚、郑勇、倪四道等,2008,2005 年 11 月 26 日九江-瑞昌 $M_s 5.7$ 、 $M_s 4.8$ 地震的震源机制解与发震构造研究,地球物理学报,51(1),158~164。
- 史大年、姜枚、彭聪等,1999,大别造山带东部地壳结构的层析成像及广角反射的地震学研究,地震学报,21(4),403~410。
- 徐纪人、杨文采、赵志新等,2003,苏鲁大别造山带岩石圈三维 P 波速度结构特征,地质学报,77(4),577~582。
- 姚大全、汤有标、刘加灿等,1997,安徽西南宿松-枞阳断裂中段活动性的综合评价,地震地质,3(11),295~300。
- 翟洪涛、郑颖平、李光等,2010,宿松-枞阳断裂最新活动时代及未来地震危险性研究,防震减灾工程学报,30(5),567~571。
- 翟洪涛、邓志辉、周本刚等,2009,1585 年安徽巢县南地震核查与发震构造讨论,地震地质,31(2),295~304。
- 张辉、徐辉、姚军等,2010,祁连山中东段基于 CAP 方法的中小地震震源机制研究,山西地震,(1) 25~29。
- 赵凌云、邓津、陈俊华等,2010,基于 CAP 方法的震源机制研究,长江科学院院报,27(5),81~84。
- Du W X, Kim W Y, Sykes L R, 2003, Earthquake source parameters and state of stress for the northeastern united states and southeastern Canada from analysis of regional seismograms. Bull Seism Soc Am, 93(4), 1633~1648.
- Doser D I, 1988, Ource parameters of earthquakes in the Nevada seismic zone, 1915~1943, J Geophys Res, 93(B12), 15001~15015.
- Dreger D S, Helmberger D V, 1990, Broadband modeling of local earthquakes, Bull Seis Soc Am, 80, 62~1179.
- Dreger D S, Tkalcic H, Johnston M, 2000, Dilational processes accompanying earthquakes in the Long Valley Caldera, Scienc, 288, 122~125.
- Dreger D S, Helmberger D V, 1993, Determination of source parameters at regional distances with three-component sparse network data, J Geophys Res, 98, 8107~8125.

- Helmberger D V ,Engen G R ,1980 ,Modeling the long-period body waves from shallow earthquakes at regional ranges ,Bull Seism Soc Am **70** ,1699 ~ 1714.
- Ichinose G A ,Smith K D ,Anderson J G ,1997 ,Source parameters of the 15 November Border Town ,Nevada ,earthquake sequence , Bull Seism Soc Am **87** 652 ~ 667.
- Ichinose G A ,Smith K D ,Anderson J G ,1998 ,Moment tensor inversion of the 1994 to 1996 Double Spring Flat , Nevada , earthquake sequence and implications for local tectonics models ,Bull Seism Soc Am **88** ,1363 ~ 1378.
- Ichinose G A ,Smith K D ,Anderson J G ,1999 ,Seismic analysis of the 7 January 1998 chemical plant explosion at Kean Canyon , Nevada ,Bull Seism Soc Am **89** 938 ~ 945.
- Pasyanos M E ,Dreger D S ,Romanowicz B ,1996 ,Toward realtime estimation of regional moment tensors ,Bull Seism Soc Am **86** , 1255 ~ 1269.
- Ritsema J ,Lay T ,1995 ,Long period regional wave moment tensor inversion for earthquakes in the western United States ,J Geophys Res **100** 9853 ~ 9864.
- Saikia C K ,2006 ,Modeling of the 21 May 1997 Jabalpur earthquake in central India: source parameters and regional path calibration. Bull Seism Soc Am **96** (4) ,1396 ~ 1421.
- Thio H K ,Kanamori H ,1995 ,Moment-tensor inversion for local earthquakes using surface waves recorded at TERRAScope ,Bull Seism Soc Am **85** ,1021 ~ 1038.
- Wallace T C ,1981 ,A technique for the inversion of regional data in source parameter studies ,J Geophys Res **86** 679 ~ 1685.
- Wallace T C ,Helmberger D V ,1982 ,Determining source parameters of moderate-size earthquakes from regional waveforms ,Phys Earth Planet Interiors **30** ,185 ~ 196
- Walter W R ,1993 ,Source parameters of the June 29 ,1992 Little Skull Mountain earthquake from complete regional waveform sat a single station ,Geophys Res Lett **20** 403 ~ 406.
- Zhao L S ,Helmberger D V ,1994 ,Source estimation from broadband regional seismograms ,Bull Seis Soc Amer ,**84**(1) 91 ~ 104.
- Zheng Y ,Ma H S ,Lv J ,et al , 2009 , Source mechanism of strong aftershocks ($M_s \geq 5.6$) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics , Science in China (Series D: Earth Sciences) ,**52**(6) 739 ~ 753.
- Zheng Y ,Ni S D ,Xie Z J ,et al , 2010 , Strong aftershocks in the northern segment of the Wenchuan earthquake rupture zone and their seismotectonic implications , Earth Planets Space ,**62** (11) 881 ~ 886.
- Zhu L P ,Helmberger D V ,1996 ,Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms ,Bull Seis Soc Amer ,**86**(5) ,1634 ~ 1641.
- Zhu L P ,Rivera L A , 2002 ,A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media ,Geophys J Int **148** 619 ~ 627.

Source mechanism of the 2011 $M_s4.8$ Anqing earthquake determined from CAP method

Hong Dequan^{1 2)} *Wang Xingzhou*^{1 2)} *Han Libo*³⁾ *Qi Hao*¹⁾ *Zhang Bing*¹⁾

1) Earthquake Administration of Anhui Province ,Hefei 230031 ,China

2) National Geophysical Observatory at Mengcheng , Hefei 230026 , China

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

Abstract In this article ,we have inverted local broadband waveform data to determine the focal mechanism of 2011 Anqing $M_s4.8$ earthquake. Our result shows that the best double couple solution of the $M_s4.8$ event is 16° , 74° and 120° for strike ,dip and rake angles respectively. The other nodal plane is 131° , 33° , 30° ;the estimated focal depth is about 3km. The both strikes of the two nodal plane are significantly different with the strike of the Susong-Zongyang fault , which has a low level of seismic activity since Late Quaternary. This implies that this earthquake may not occur on the Susong-Zongyang fault , and we infer that a buried fault with strike of NNE may be the seismogenic structure of this event.

Key words: Anqing earthquake Cut and paste method Source mechanism