

蔡杏辉, 陈惠芳, 段刚, 等. CAP方法反演福建漳浦海域 M_L 4.0 级地震震源机制解[J]. 华南地震, 2018, 38 (4): 17–21. [CAI Xinghui, CHEN Huifan, DUAN Gang, et al. Inversion of the Focal Mechanisms of the M_L 4.0 Earthquake in Zhangpu Sea, Fujian Using the CAP Method[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(4): 17–21]

CAP 方法反演福建漳浦海域 M_L 4.0 级地震 震源机制解

蔡杏辉¹, 陈惠芳¹, 段 刚¹, 游秀珍¹, 许振栋²

(1. 福建省地震局, 福州 350003; 2. 平潭地震台, 福建 平潭 350400)

摘要: 选用福建数字地震台网宽频带记录, 利用 CAP 方法反演福建漳浦海域 2016 年 6 月 18 日 M_L 4.0 级地震震源机制解。反演得到震级 M_W 为 3.7, 节面 I 走向 85° 、倾角 82° 、滑动角 -167° ; 节面 II 走向 353° 、倾角 77° 、滑动角 -8° ; 最佳深度分布于 11 km 附近。分析认为此次地震的发震断层为走滑型断层, 东西向节面为断层面, 节面走向与震中附近的滨海断裂走向存在差异, 滨海断裂是发震构造的可能性较小, 漳浦海域地震可能是横向构造断层活动的结果。

关键词: 漳浦海域 M_L 4.0 地震; CAP 方法; 震源机制解

中图分类号: P315 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2018)04-0017-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.04.003

Inversion of the Focal Mechanisms of the M_L 4.0 Earthquake in Zhangpu Sea Area, Fujian by Using the CAP Method

CAI Xinghui¹, CHEN Huifan¹, DUAN Gang¹, YOU Xiuzhen¹, XU Zhendong²

(1. *Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China*; 2. *Pingtang Seismic Station, Pingtan 350400, China*)

Abstract: Using the broadband records of Fujian Regional Seismic Network, the paper inverts the focal mechanisms of the M_L 4.0 earthquake in Zhangpu sea area on June 18th, 2016 by CAP method. The results show that the best pair of couple solution is 85° , 82° and -167° for strike, dip and rake angles respectively; the strike, dip and rake angles of the other nodal plane are 353° , 77° and -8° respectively; the moment magnitude was M_W 3.7, and the optimum focal depth is on 11 km nearby. The results show that the earthquake mechanism was a strike-slip faulting. East-West nodal plane is the seismogenic fault. The both strikes of the two nodal plane are significantly different with the strike of the Binhai zone fault, the earthquake may not occur on the Binhai zone fault, the Zhangpu Sea earthquake may be the result of lateral tectonic faulting.

Keywords: Zhangpu Sea M_L 4.0 earthquake; CAP method; Focal mechanism

收稿日期: 2018-01-15

作者简介: 蔡杏辉(1976-), 男, 工程师, 主要从事地震监测工作。

E-mail: 13870511@sina.com.

0 引言

2016年6月18日09时38分在福建漳浦海域发生 M_L 4.0级地震,此次地震是近年来福建漳浦地区最大的一次地震,漳州、厦门、泉州等福建南部地区均能感受到明显震感。此次地震发生之后,从2016年6月19日至2017年12月在该区域共发生余震13个(其中与主震同一震中位置余震2个),余震震级范围 M_L 0.6~2.1级,震源深度8~26 km(10个采用Hyposat定位,另外3个采用单纯型定位)。

1 CAP方法原理和反演模型

在地震学研究中,震源机制解是震源重要参数,是理解地震发震构造关键,是研究区域构造应力场最基础的资料和常用的方法^[1]。计算震源机制解的方法很多,早期比较常用的有P波初动符号方向法,目前比较流行的有CAP方法、Snoke方法以及矩张量反演方法等。近年来,随着大量高质量宽频地震数据的积累,国内利用CAP方法对地震的震源机制解的研究逐渐增多,获得了诸多研究成果^[2-5]。本文利用福建数字地震台网宽频带记录,使用CAP方法对此次福建漳浦海域 M_L 4.0级地震震源机制解和震源深度进行反演。

1.1 方法原理简述

CAP方法的主要思想是将近震整个波形分为P波部分(Pn1)和面波部分(Sur),对两部分的3分量共5部分(Pn1不存在切向分量)给定不同的权重进行反演,分别计算实际地震记录和理论地震图的误差函数,在给定参数空间范围内采用格点搜索

法进行网格搜索,并给出误差函数作为测量标准,从而得到相对误差最小的震源机制解和震源深度^[6-7]。

1.2 速度模型的选取

CAP反演运算中,计算理论波形时先用F-K方法在给定速度模型下,计算各个台站位置的格林函数,再由震源函数和格林函数合成理论波形。可以在CAP反演程序设置速度模型,默认使用的是crust2.0速度模型,如果有震中区域的速度模型也可以设置使用。本研究使用的模型是华南地壳速度模型,见表1。

表1 华南地壳速度模型

Table 1 Crustal velocity model of South China area

序号	深度/km	$V_p/(km \cdot s^{-1})$	$V_s/(km \cdot s^{-1})$	密度/($kg \cdot m^{-3}$)
1	0.0~21.0	6.01	3.55	2.75
2	21.0~32.0	6.88	3.93	2.80
3	30.0+	7.98	4.58	3.35

2 反演结果与分析

2.1 数据基本情况及数据处理

考虑到福建台网观测台站相对震中位置偏于一侧,本研究所用数据包括2个台湾台网站的观测数据。去除存在断数、限幅、钟差、零飘的台站,选取台站记录的信噪比大于1.2,震中距包含远台和近台(台站震中距72~309 km范围),最后共选取12个台站记录参与计算,其分布情况如图1所示;此外采用前述选取的本省10个台数据进行计算得出结果,两种计算结果进行比较。

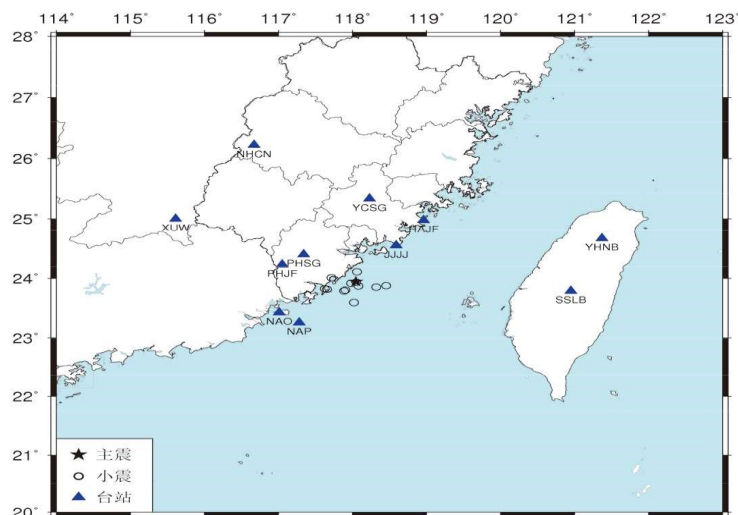


图1 震中位置和研究中用到的台站分布情况

Fig.1 The seismic epicenter and seismic stations used in study

将各个台站宽频带地震记录分解成体波 Pnl 段、SH 和面波，其中 Pnl 段波形是指从 P 波初至到 S 波到达这一时间段的波形。为压制或消除地脉动噪音的影响，将 Pnl 波和面波部分进行 Butterworth 低通滤波器滤波，滤波频带分别设置为 0.02~0.15 Hz、0.02~0.1 Hz^[4]；地震台记录数据是按照 E-W、N-S、U-D 三个分量进行记录的，然而地震波传播是按照传播射线方向前进的，旋转到 $r-t-z$ 方向将 SH 波和 P、SV 分开，得到了每个

台站 Pnl 波段的垂向、径向分量，SH 波、面波的垂向、径向分量，共 5 个部分^[8]。

2.2 反演结果

CAP 程序反演震源机制解计算时，将深度和震源机制解的走向、倾角、滑动角搜索步长分别设定为 2 km 和 5°，得到的漳浦海域地震的震源机制解如表 2 及图 2 所示。

表 2 福建漳浦海域 M_L 4.0 级地震震源机制解
Table 2 Focal mechanism solution results of the M_L 4.0 earthquake of Zhangpu sea area

数据类型	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		N 轴		台站分布参数	反演质量标志
	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	方位角/ (°)	仰角/ (°)	方位角/ (°)	仰角/ (°)	方位角/ (°)	仰角/ (°)		
含台湾台	85	82	-167	353	77	-8	309	15	218	4	115	75	0.30	2
本省台	88	84	-169	357	79	-6	313	12	222	4	116	76	0.42	2

注：台站分布参数 ≤ 0.35 时台站分布质量较好，结果可信；反演质量标志数值越高表示反演的质量越好，通常反演质量必需在“2”以上。

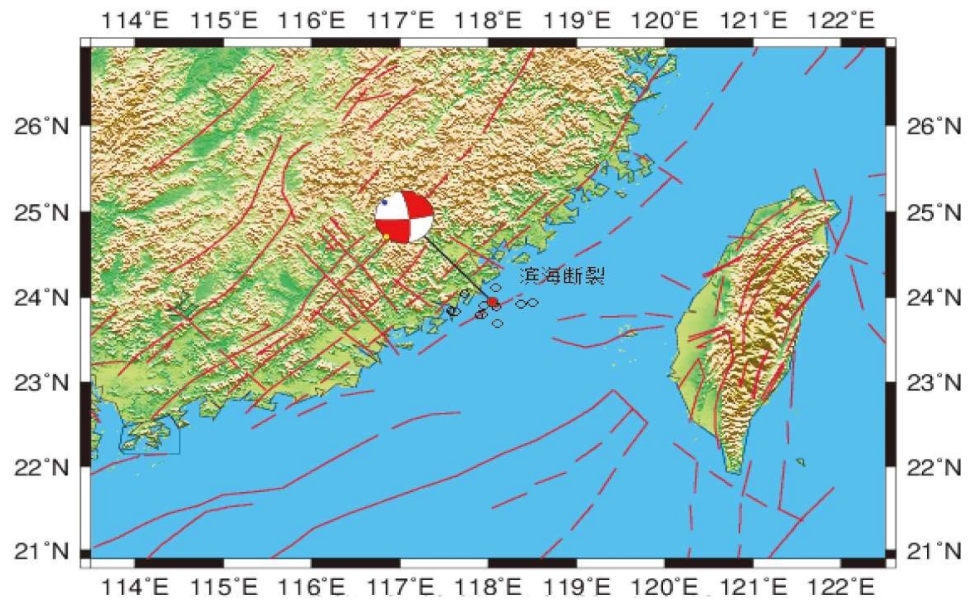


图 2 2016 年 6 月 18 日漳浦海域 M_L 4.0 地震的震源机制解反演结果

Fig. 2 Inversion results of the focal mechanism solution of the M_L 4.0 earthquake in Zhangpu sea area on June 18th, 2016

图 3 显示了福建漳浦海域地震震源机制随不同震源深度的变化，纵轴为该理论模拟波形与实际观测波形的最小二乘拟合残差。各个深度反演得到的震源机制的两个节面参数大致相同，反演结果较为稳定。图 3 中震源矩心深度在 11.1 km 时拟合残差达到极小值，0.3 为深度误差(km)，与台

网地震目录 HypoSAT 定位方法给出的震源深度为 16 km 有一定的差别。对两者深度的差别，有研究者认为一方面，台网目录的定位深度基于震相走时差，反映的是震源起始破裂位置的深度，而 CAP 反演得到的是矩心深度，反映的是能量释放最大值处的深度，两者本身物理意义有差别，但

考虑到 4 级地震震源破裂半径一般较小(约 1 km 左右), 物理意义的不同并不足以解释该差别; 另一方面, 研究表明, 只有当最小震中距小于 1.4 倍震源深度时, 走时方法确定的震源深度才有较高精度。此次 Hyposat 定位最小震中距为 28.5 km, 大于 1.4 倍震源深度。

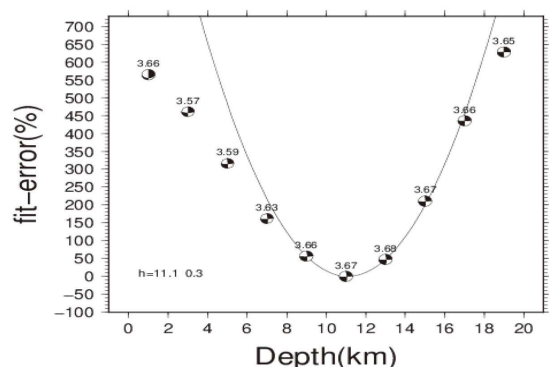


图 3 漳浦海域 M_L 4.0 级地震的深度搜索图

Fig 3 The depth of the search graph of the M_L 4.0 earthquake in Zhangpu sea area

图 4 显示了 11.1 km 处理论模拟波形与实际观测波形拟合情况。图中: 第一行为标题行; 左侧上方为最佳断层面解的下半球投影图; 每个台站三分量 5 个分向的波形参与反演, 黑线为观测波形, 红色为理论地震图; 波形左侧为台站名, 台站名下方为震中距(km)与该台理论 P 波初至与观测 P 波初至的差值; 波形下方的数字, 第一行为拟合时各个部分理论波形相对观测波形移动的时间(s), 第二行为两者的拟合相关系数(%)。11 个台站记录的 55 个震相中相关系数大于 0.6 的震相有 36 个, 占 65%; 台站最大张角 133° , 反演方差 $1.02e^{-5}$, 反演质量标志在“2”以上; 总体上多数台站理论波形与观测波形拟合较好, 2 个台湾台站理论波形与观测波形拟合效果不太理想, 但考虑选用台湾台站在方位角上具有较好的分布, 因此实际反演过程还是使用了这 2 个台站。

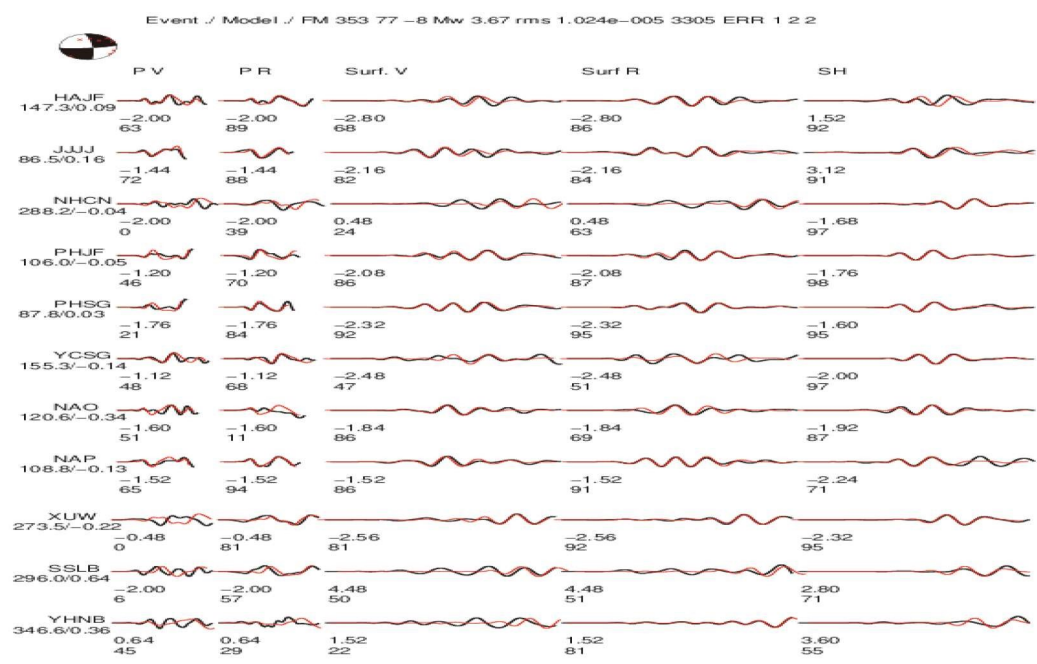


图 4 M_L 4.0 级地震的波形拟合图

Fig 4 Comparison between synthetic and observation seismograms of M_L 4.0 earthquake

2.3 发震断裂探讨

从地震所处的位置看, 漳浦海域 M_L 4.0 级地震位于滨海断裂带南段附近(见图 2)。滨海断裂带是福建近岸海域内最大的一条晚第四纪或全新世活动断裂, 断裂展布始于平潭岛以东的牛山岛附

近海域, 经乌丘岛以东—泉州海外—金门岛东南, 南延至东山岛海外的兄弟岛以东, 走向为 $NE30^\circ \sim 50^\circ$, 全长约 500 km, 该断裂具有右旋走滑运动性质的一条晚第四纪或全新世活动断裂; 滨海断裂以东新生代地层逐渐加厚, 断裂及附近地区地壳速度结构为陆壳结构, 厚度由陆地向海域逐渐变

薄,断裂两侧的动力学环境存在明显差异,是正常型陆壳与海域减薄型地壳的分界断裂^[10-11]。此次地震的余震震中多分布于断裂西侧,基本属于同一个构造单元。本文通过CAP方法得到震源机制解的两个节面参数都与滨海断裂产状存在一定的差异,因此认为滨海断裂带是此次地震的发震构造的可能性较小。漳浦海域小震震中空间分布呈近EW向分布(见图1),因此推断破裂面为EW向节面;高金耀认为台湾海峡地区的断裂构造除北东向以外,还有东西向和北西向的断裂构造存在^[12];马宗晋等从构造分段性、地球物理场、地震特征、地貌地形等研究,提出台湾海峡地区可能存在横向构造,福建沿海连贯的北东向构造内发育有横向的东西向和北西向构造,初步指出东西向和北西向构造在海峡内部都有表现,并可能横过海峡^[13];因此漳浦海域地震可能是横向构造断层活动的结果。

地震应力轴方位角特征反映出漳浦海域震区主要受到NW-SE向水平挤压,符合该区所受的地球动力学环境。有研究表明整个福建地区处在亚欧板块与菲律宾板块碰撞推挤的大动力学背景下,此外空间大地测量GPS、跨断层形变和震源机制解等多种资料已相互印证,其应力场主压方向呈现NW(NWW)-SE(SEE)特点^[14];史舜华等综合地震震源机制解和地壳形变观测资料的研究,认为福建及其沿海地区地震活动主要力源是菲律宾海板块与欧亚板块相互作用力^[15]。本文震源机制解结果显示主压应力P轴均近NW向,两者主压方向较为一致,可能反映了闽、粤交界沿海地震力源主要来自菲律宾海板块向北西挤压的作用。

3 结语

CAP方法独特的波形分离、浮动拟合技术,即使在速度模型不佳、格林函数不理想、甚至是台站分布不均匀的情况下,仍能获得不错的波形拟合效果^[3]。本文用CAP方法反演了漳浦海域 M_L 4.0 级地震震源机制解,选用了2个台湾台站使12个台站在方位角分布上更优。

对福建漳浦海域 M_L 4.0 级地震震源机制解进行研究,得出以下结论:

(1)用CAP方法反演得到漳浦海域 M_L 4.0 级地震的 M_w 为3.7。由余震震中分布为近EW向分布情况来看,地震的断层面为EW向节面,即走向85°、倾角82°、滑动角-167°,属于走滑型断层。

(2)CAP反演和台网目录结果推断本次地震的震源深度为11~16 km之间范围,表明地震的主体破裂发生在上地壳。

(3)CAP反演得到的震源机制节面参数与震中附近的滨海断裂走向存在一定的差异,认为滨海断裂带不是此次地震的发震构造,漳浦海域地震可能是横向构造断层活动的结果。地震应力轴方位角特征反映出漳浦海域震区主要受到NW-SE向水平挤压,符合该区所受的地球动力学环境。

参考文献:

- [1] 康英,杨选,陈杏,等. 广东及邻区的应力场反演[J]. 地震学报. 2008,30(1):59-66.
- [2] 曲均浩,刘瑞峰,李金,等. CAP方法反演2014年山东乳山 $M_{4.2}$ 、 $M_{4.0}$ 地震震源机制解[J]. 地震工程学报. 2014,36(4):1076-1080.
- [3] 段刚. CAP方法反演福建仙游 M_L 5.0、 M_L 4.5 级地震震源机制解[J]. 地球物理学进展. 2016,31(4):1432-1437.
- [4] 洪德全,王行舟,韩立波,等. 用CAP方法研究安庆4.8级地震震源机制[J]. 中国地震,2011,27(2):207-214.
- [5] 彭利娟,魏娅玲. 由 $M_L \geq 4.0$ 地震震源机制解推断四川理县黑水断裂构造特征[J]. 华南地震,2016,36(3):11-16.
- [6] Zhao L S, Helmberger D V. Source Estimation from Broadband Regional Seismograms[J]. Bull Seis Soc Amer, 1994, 84(1): 91-104.
- [7] Zhu L P, Helmberger D V. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismograms[J]. Bull Seis Soc Amer, 1996, 86(5): 1634-1641.
- [8] 郑勇,马宏生,吕坚,等. 汶川地震强余震($M_s \geq 5.6$)的震源机制解及其与发震构造的关系[J]. 中国科学(D辑), 2009,39(4):413-426.
- [9] Mori J. 1991. Estimates of velocity structure and source depth using multiple P waves from after Shocks of the 1987 Elomor Ranch and Superstition Hills, California, earthquakes[J]. Bull Seismol. Soc. Am, 1991, 81(2): 508-523.
- [10] 黄昭,王善雄. 台湾海峡滨海断裂带的构造特征与活动性[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(3):16-22.
- [11] 詹文欢,孙宗勋,唐诚,等. 华南滨海断裂带及其对台湾海峡地震的控制作用[J]. 热带海洋学报,2004,23(4): 19-24.
- [12] 高金耀. 台湾海峡及其两岸地震和地热特征[J]. 东海海洋,1992,10(2):14-28.
- [13] 马宗晋,王乾盈,徐杰. 台湾海峡两岸横向构造的对比研究[J]. 中国科学(D辑), 2002,32(6):441-451.
- [14] 周硕愚,帅平,张跃刚,等. 中国大陆及其东南沿海现时地壳运动[J]. 自然科学进展,2000,10(3):273-277.
- [15] 史舜华,周峥嵘,鲍挺,等. 福建及沿海地区地震活动力源探讨[J]. 地震,2006,26(2):104-113.