

肖孟仁, 许志山, 陈浩, 等. 闽粤赣交界区地震震源位置及速度结构研究[J]. 华南地震, 2014, 34(2): 64-72. [XIAO Mengren, XU Zhishan, CHEN Hao, et al. The Study of Hypocenter Location and Velocity Structure in Fujian, Guangdong and Jiangxi Focal Region [J]. South china journal of seismology, 2014, 34(2): 64-72.]

闽粤赣交界区地震震源位置及速度结构研究

肖孟仁, 许志山, 陈浩, 罗丽, 曾文敬, 汤兰荣, 操红

(江西省地震局, 南昌 330039)

摘要: 采用震源位置及速度结果的联合反演方法确定闽粤赣交界区 ($24^{\circ}\sim 26.5^{\circ}\text{N}$, $114^{\circ}\sim 117.8^{\circ}\text{E}$) 地震的震源位置以及震源区速度结构。结果显示: ① 闽粤赣交界区地震震源平均深度随震级增大而加深的特征明显, 即地震震级越大, 震源深度越深, 但平均深度不超过 15 km; 越靠近沿海, 地震震源深度有加深的趋势。② 通过对河源地区、邵武-河源断裂带中段(寻乌-瑞金)区域、政和-大浦断裂带中段(漳平附近)区域以及闽粤近海区域地震剖面研究, 发现地震多发生于高低速异常结合部位。

关键词: 地震定位; 闽粤赣交界区; 联合反演; 速度结构

中图分类号: P315.75 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2014) 02-0064-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.02.009

The Study of Hypocenter Location and Velocity Structure in Fujian, Guangdong and Jiangxi Focal Region

XIAO Mengren, XU Zhishan, CHEN Hao, LUO li,

ZENG Wenjing, TANG Lanrong, CAO Hong

(Earthquake Administration of Jiangxi Province, Nanchang, 330039, China)

Abstract: The paper uses the joint inversion method to determine the hypocenter location and velocity structure of Fujian, Guangdong and Jiangxi border zone ($24^{\circ}\sim 26.5^{\circ}\text{N}$, $114^{\circ}\sim 117.8^{\circ}\text{E}$). The results show that: ① the characteristics of the average depth of hypocenter in Fujian, Guangdong and Jiangxi border zone deepened with magnitude increases with the average depth not more than 15km, that is to say, the larger the earthquake magnitude, the deeper the focal depth, meanwhile, closer to the coast, earthquake focal depth deepen; ② based on the studying of the seismic profile of Heyuan area, the middle (Xunwu- Ruijin) region of Shaowu- Heyuan fault zone, the middle region of Zhenghe- Dafu fault (Zhangping nearby) and the offshore areas of Fujian and Guangdong, the author finds that the earthquakes often occurred in the binding site of the high and low speed anomaly

Keywords: Earthquake location; Fujian; Guangdong and Jiangxi focal region; Joint inversion; Velocity structure

收稿日期: 2013-06-08

基金项目: 中国地震局 2010 年度三结合课题“闽粤赣交界区地震震源位置及速度结构研究”

作者简介: 肖孟仁 (1984-), 男, 助理工程师, 主要从事数字地震学研究。

E-mail: xiaomr0791@qq.com.

0 引言

地震定位是地震学中最经典、最基本的问题之一,对于诸如地震活动性构造、地球内部构造、地震预报等的研究具有重要意义。震源位置的精度主要受到地震台网的布局、可用定位的震相、地震波到时读数的精度以及所取的地壳速度结构模型等因素的影响^[2-3]。目前常规的地震定位方法大多源于 Geiger^[4]提出的一种线性的绝对定位方法,该方法对初始值的依赖性较大。相对地震定位方法主要有主事件定位法和双差定位法,其可以有效减小速度结构误差的影响^[5-6]。在主事件定位方法中^[7-9],每个事件仅相对于一个事件,即主事件重新定位。由于定位过程中所有事件必须和主事件相关,因此该方法限制了可重新定位地震丛的最大空间范围。为了克服主事件定位方法的缺陷,Waldhauser^[10]等提出了双差定位方法,其可以对很多较大空间范围内发生的地震同时进行重新定位。

提高地震定位精度是地震学应用研究的重要课题之一,在现有的地震定位方法和地震监

测条件下,采用高精度地壳速度结构模型对地震定位精度的提高将是至关重要的。随着地震层析成像技术的发展^[11-14],大量三维地壳速度结构模型的建立,将为地震定位提供极好的研究基础。Smith et al^[15]对已知的 26 个核爆事件和 83 个有良好定位结果的地震事件,对比分析了全球三维 P 波速度 SP12/WM13 模型和一维的 J-B、PREM、IASP91 模型对全球远震定位精度的影响,结果表明三维模型的定位结果明显好于一维模型的结果,定位偏差可减少 40% 左右。此外,可以在地震层析成像过程中加入震源项,同时确定三维速度结构和地震震源参数,即震源和速度结构的联合反演^[7,12,14,16-19],该方法在提高定位精度的同时得到速度结构,这有助于对地震的孕震环境提供物理解释。

闽粤赣交界地区地处我国大陆华南地块东南边缘,毗邻地震活动剧烈的台湾地震区,该区域一直是全国地震重点监视防御区,地震活动一直较为频繁,已经多次发生 5 级以上中强地震,造成一定的人员伤亡和较大的经济损失。福建、广东、江西三个区域地震台网积累了大量观测资料,本文收集了 1900—2007 年三个区域台网的地震资料(表 1),通过采用震源位置及速度结果的联合反

表 1 选取资料台站列表

Table 1 Stations list with data selected

序号	台站缩写	台站代码	台站名称	起止时间/年	所属台网	序号	台站缩写	台站代码	台站名称	起止时间/年	所属台网
1	JXHUC	36092	会昌	1990—2011	江西	25	FJYOA	35000	永安	2008—2011	福建
2	JXXUW	36000	寻乌	1995—2011		26	FJLOY	35003	龙岩	2008—2011	
3	JXANY	36001	安远	1995—2011		27	FJDOS	35007	东山	2008—2011	
4	JXDAY	36002	大余	2001—2011		28	FJCHT	35010	长汀	2008—2011	
5	JXLON	36003	龙南	2001—2011		29	FJYOD	35011	永定	2008—2011	
6	JXGAZ	36004	赣州	2001—2011		30	FJZHZ	35012	漳州	2008—2011	
7	JXSHC	36005	石城	2008—2011		31	FJHUA	35013	华安	2008—2011	
8	JXWAA	36006	万安	2008—2011		32	FJXIT	35018	小陶	1999—2011	
9	GDSHT	44003	汕头	2008—2011	广东	33	FJPIH	35021	平和	1999—2011	
10	GDXFJ	44032	新丰江	2008—2011		34	FJSHH	35023	上杭	2000—2011	
11	GDMEZ	44022	梅州	2008—2011		35	FJYAHN	35030	永安槐南	2007—2011	
12	GDNAP	44024	南澎岛	2008—2011		36	FJSHXD	35032	上杭下都	2007—2011	
13	GDLCH	44018	龙川	2008—2011		37	FJSHLX	35033	上杭兰溪	2007—2011	
14	GDHUZ	44015	惠州	2008—2011		38	FJCTTZ	35010	长汀汀州	2007—2011	
15	GDLIP	44019	连平	2008—2011		39	FJDSXP	35007	东山西埔	2007—2011	
16	GDJIX	44017	揭西	2008—2011		40	FJHAHF	35013	华安华丰	2007—2011	
17	GDZIJ	44044	紫金	2008—2011		41	FJLYXP	35003	龙岩西陂	2008—2011	
18	GDPUN	44025	普宁	2008—2011		42	FJMXXF	35114	明溪雪峰	2008—2011	
19	GDFES	44010	丰顺	2008—2011		43	FJPHSG	35117	平和山格	2008—2011	
20	GDXIG	44033	新港	2008—2011		44	FJSHLC	35121	上杭临城	2008—2011	
21	GDLTK	44021	龙潭口	2008—2011		45	FJYAXT	35127	永安小陶	2008—2011	
22	GDHYJ	44016	湖羊角	2008—2011		46	FJYAYX	35000	永安燕西	2008—2011	
23	GDCHZ	44006	潮州	2008—2011		47	FJYDXS	35011	永定仙师	2008—2011	
24	GDNAO	44023	南澳	1990—2011		48	FJZZJH	35012	漳州九湖	2008—2011	

演方法确定闽粤赣交界区 (24°~26.5°N, 114°~117.8°E) 地震的震源位置以及震源区速度结构, 通过研究地震震源位置以及其震源区速度结构特点, 来探讨该区域地震的孕震特点以及孕震环境。

1 联合反演方法简介

在震源位置和速度结构的联合反演过程中, 走时残差 t 是由于震源参数的扰动和速度的扰动引起的。根据研究结果^[11-14], 该问题可以用以下线性化方程表示:

$$\delta t = \Delta t + \frac{\partial t}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial t}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial t}{\partial z} \Delta z + \sum_{n=1}^N \frac{\partial t}{\partial v_n} \Delta v_n \quad (1)$$

式(1)中 Δt 、 Δx 、 Δy 、 Δz 和 Δv_n 分别表示震源的发震时刻、经度、纬度、深度的扰动以及速度的扰动, N 为速度参数的总个数。对于 l 个地震和 j 个台站, 可以将(1)式写成如下的紧凑形式:

$$\delta t = A \delta v + B \delta x \quad (2)$$

式(2)中 δt 是 m 维走时残差向量, δv 是 n 维节点速度扰动向量, δx 是 $4l$ 维震源参数扰动向量, A 是 $m \times n$ 维走时对速度的偏导数矩阵, B 是 $m \times 4l$ 维走时对震源参数的偏导数矩阵。

根据联合反演的基本公式(2), 速度参数和震源参数是相互耦合着的。要在同一个方程中同时反演两种不同量纲的参数, 除了会增加算法的数值不稳定性外, 在实用上需要大量的计算机内存和机时, 因此必须进行参数分离^[7,13,17]。本文采用刘福田提出的正交投影算子, 将式(2)分解为以下两个分别求解速度参数和震源参数的方程组:

$$(I - P_B) A \delta v = (I - P_B) \delta t \quad (3)$$

$$B \delta x = P_B (\delta t - A \delta v) \quad (4)$$

式(4)中 P_B 为与震源参数有关的从 R^m 到 B 的像空间 $R(B)$ 上的正交投影算子。速度参数和震源参数解耦后的分析表明, 速度扰动量的确定与震源位置扰动量无直接关系, 仅与它的初值有关, 而震源位置扰动量则与速度扰动量明显有关。我们知道地震定位精度除了受地震台网的布局、可用定位的震相和地震波到时读数的精度的影响外, 还主要受到速度结构的影响。根据公式(3)和(4), 联合反演过程中先确定研究区的速度结构参数, 再确定震源参数, 从而消除了速度结构的不确定性对定位精度的影响。因此, 通过震源位置和速度结构的联合反演可以有效提高地震定位的质量。

2 资料选取与计算求解过程

2.1 资料选取

研究范围为 24°~26.5°N, 114°~117.8°E, 资料采用了福建、广东、江西三个区域台网 1990—2011 年的资料, 选取观测数据的起止时间见表 1。采用震源位置和速度结构联合反演的方法对这一区域的地震进行了重新定位和速度结构的反演。为了减小误差对数据进行了筛选, 在对三个台网记录到同一地震时间的情况下, 以距离震中最近台站所在台网的到时为准, 对其他两个台网的数据进行到时校正, 由于该区域地震个数较少, 尽可能扩大样本范围, 选取所有有记录地震参与计算。研究范围内共有 50 个观测台站, 经过合并筛选, 共找出 6 321 个地震 34 508 条 P 波射线数据。台站位置和地震分布见图 1。

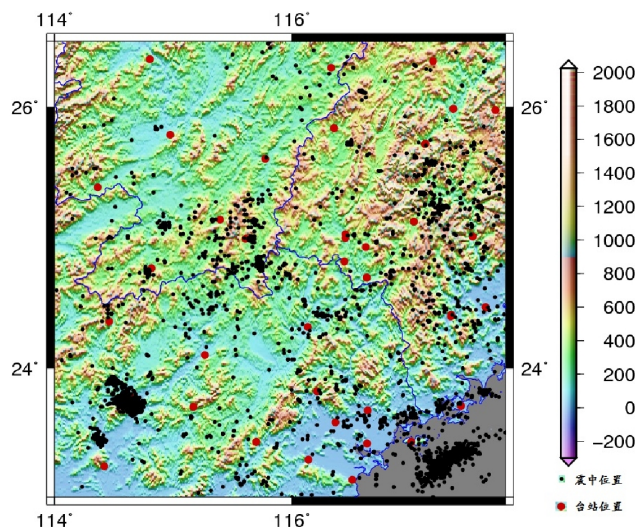


图 1 台站位置和震中分布图

Fig.1 Distribution map of station and epicenter

2.2 网格划分和初始速度模型

用网格方法^[16]对速度模型参数化, 由于本次研究的地震事件与研究区域相对分散, 所以在网格化处理时将平面方向上的研究区域按照地震事件的疏密程度划分成不均匀网格, 即台站和事件相对集中的地区网格较密, 反之网格较疏, 保证每个网格有足够的射线穿过^[16]。在模型中速度结构用连续函数表示, 网格内任意一点的速度用内插方式计算。考虑到研究区地震个数偏少, 在水平向采用 0.25°~0.25°划分, 垂直向采用华夏地块速度模型地震速度结构研究成果^[22], 选定本区成像的一维参考速度模型如表 2 所示。

表 2 闽粤赣交界区初始纵波速度
Table 2 The initialization P-wave velocity of Fujian, Guangdong and Jiangxi focal region

深度/km	速度/(km/s)
0	5.43
2	5.89
6	6.02
10	6.09
15	6.21
20	6.32
25	6.60
30	7.01
33	7.92

2.3 求解过程

本文在速度结构反演中, 采用逐步迭代反演方式, 并且为了降低解的不稳定性, 每次迭代反

演后的参数调整都控制在模型参数的 10% 以内^[1]。首先利用闽粤赣台网记录的到时数据, 以初始速度模型(表 2)为基础, 采用 LSQR 方法^[20]确定赣粤闽交界区地震震源区的速度结构及其震源的位置。相关计算程序由中国地震台网中心周龙泉研究员提供^[1]。

3 定位结果和分析

闽粤赣交界地区参与计算的地震共 6 321 次, 其中震源深度大于 0 km(给出震源深度)的有 5 840 次。经过重新定位, 有 4 729 次地震得到了新的震源参数。采用地震震源位置和地壳 P 波速度联合反演方法得到初始 RMS 残差为 0.7 s, 经过 4 次迭代后, RMS 残差减为 0.5 s。定位偏差在水平方向上为 0.2 km, 垂直方向上为 1.2 km。

图 2 为重新定位前后相同数量地震(6 321 次)震中分布图。由图可见, 重新定位后震中分布呈现一定程度的线性集中。重新定位前 6 321 次地震有 481 次数据没有给出定位深度, 震源深度在 10 km 以内的约占 91%; 重新定位后的 6 321 次地震, 平均震源深度为 6.86 km, 震源深度在 10 km 以内的约占 89%, 只有 3% 的地震震源深度在 15 km 以上。图 3 为地震重新定位前后震源深度分布图。

张国民^[21]等曾研究给出了中国大陆地区和各分区震源深度分布图像及其多种统计结果。其研究结果认为, 震源的平均深度随震级增大而加深。在重新定位获得了相对精确的震源深度数据后, 本文统计了各震级档的平均震源深度与震源下界深度(表

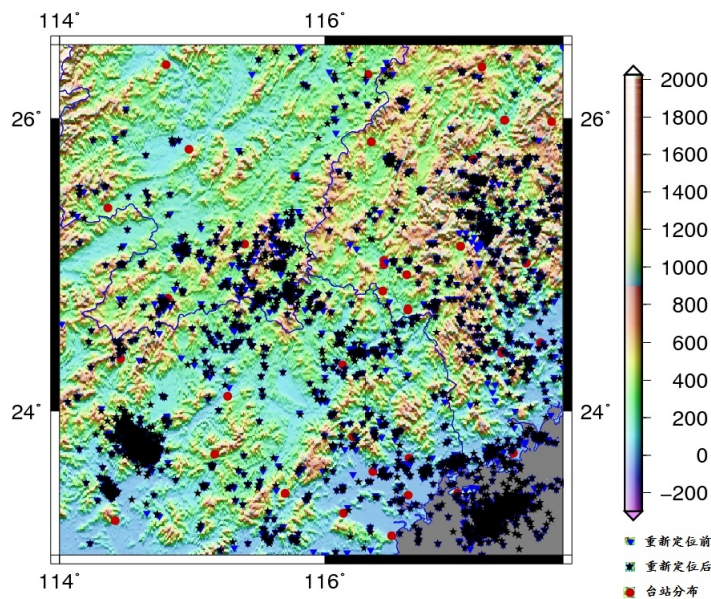


图 2 震源位置和速度结构联合反演定位结果

Fig.2 Joint inversion position results of hypocenters location and velocity structure

3)。其中,地震数为各震级档震源深度大于 0 的地震个数;震源深度下界定义为该深度至地表发生地震占总数 95%以上的特定深度。由此可见,闽粤赣交界区地震震源平均深度随震级增大而加深的特征明显,即地震震级越大,震源深度越深,但平均深度不超过 15 km;各震级档地震的震源下界则在 15 km 以上,意味着这一区域的脆韧性转换带深度大致位于 15 km 深度附近。从图 3 可以看出,越靠近

沿海,地震震源深度有加深的趋势。

4 速度结构特征及分析

本文采用检测板方法给出了不同深度上解的分辨率,由于 95%的小震震源深度都在 15 km 以上,图 4 给出了 2 km、6 km、10 km、15 km、20 km 和 25 km 不同深度上解的分辨率。从图 3 上可以看

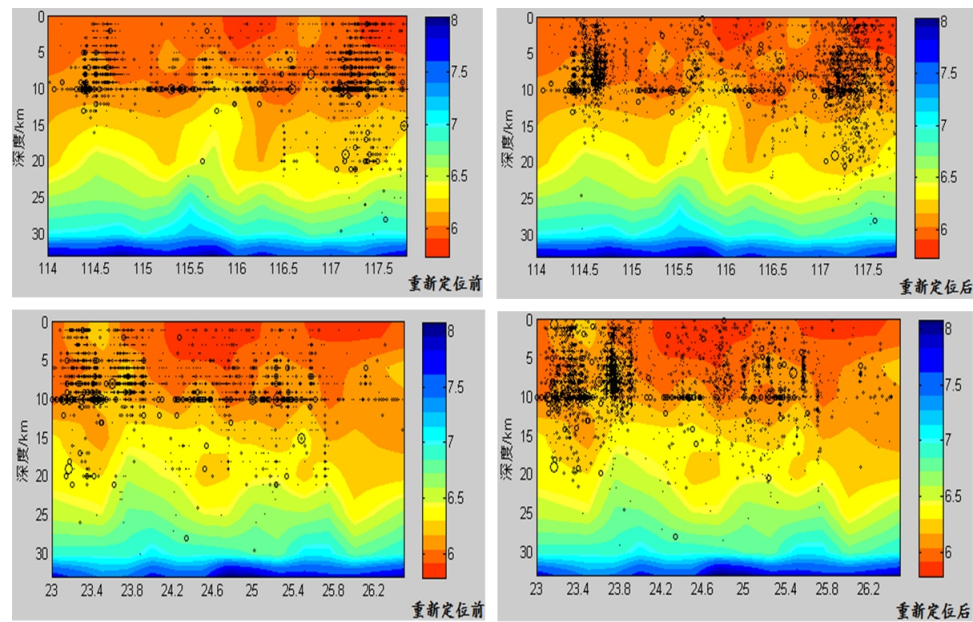


图 3 闽粤赣交界区地震重新定位前后震源深度分布图(不展示速度只给地震分布)

Fig.3 Distribution map of focal depth before and after earthquake reposition in Fujian, Guangdong and Jiangxi focal region

表 3 闽粤赣交界区震源深度与震级分布统计

Table 3 Statistics table of focal depth and magnitude distribution in Fujian, Guangdong and Jiangxi focal region					
震级	地震数量/个	平均深度/km	统计均方差	统计中位数	震源下界/km
1~1.9	2 286	7.3	4.4	7.1	15
2~2.9	1 008	8.0	4.0	8.2	15
3~3.9	159	9.4	3.5	10	14
4~5.0	12	10.1	3.6	10	10

出,在 2 km、6 km、10 km、15 km 深度上分辨率还是令人满意的,20 km、25 km 解的分辨率要稍差一些。考虑到震源样本缺乏 15 km 下的地震,本文只讨论 15 km 以上震源区的速度结构特征。
图 5 分布给出了 2 km、6 km、10 km、15 km 层位上的 P 波速度分布以及重新定位后所有地震的震中分布。从图 5 上可以看到,重新定位后的地震分布相对较广,但主要集中于龙川-河源南端、瑞金-寻乌断裂、政和-海丰断裂带永安至龙岩段以及闽粤近海。从图 5 中可以,地震多发生在波速异常区。

龙川-河源段历史上一直比较平静,只在 1953 年 1 月 1 日河源发生过 4.5 级地震,此后在 1959 年底,由于新丰江水库蓄水,导致库区出现大量微震,自 1962 年 3 月 19 日发生 6.1 级主震以后,地震活动就一直不断,该段地震主要集中在新丰江库区附近,没有明显的迁移迹象。图 6 给出了河源地区 P 波速度及小震分布图。河源地区 0~5 km 范围内 P 波表现为低速异常区,5~15 km 表现为高速异常。从图 6 可以看出,该区域地震多发生在 5~10 km 高低速异常交会部位,由此推断,新丰江库区的中小地震可能主要是由于流体活动引起孕震区弱化而发生的。

邵武-河源断裂带中段(寻乌-瑞金)属中等活动频度的地震带。据历史记载,该段发生最大地震为 1806 年 1 月 11 日会昌县南部的 6 级地震。刘大任

等认为瑞金-寻乌断裂带的地震活动,是在区域构造应力场的作用下,受局部地质条件和邻区构造运动残留的影响,在某些特殊的构造部位产生的应力

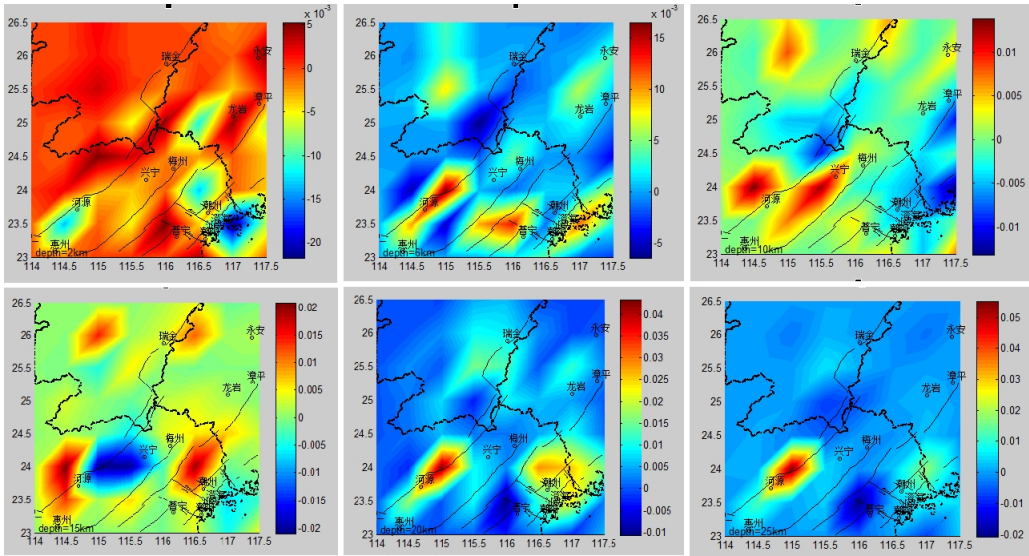


图 4 不同深度 P 波检测板分辨率检测结果

Fig.4 The resolution test results of different depth of the P-wave detection board

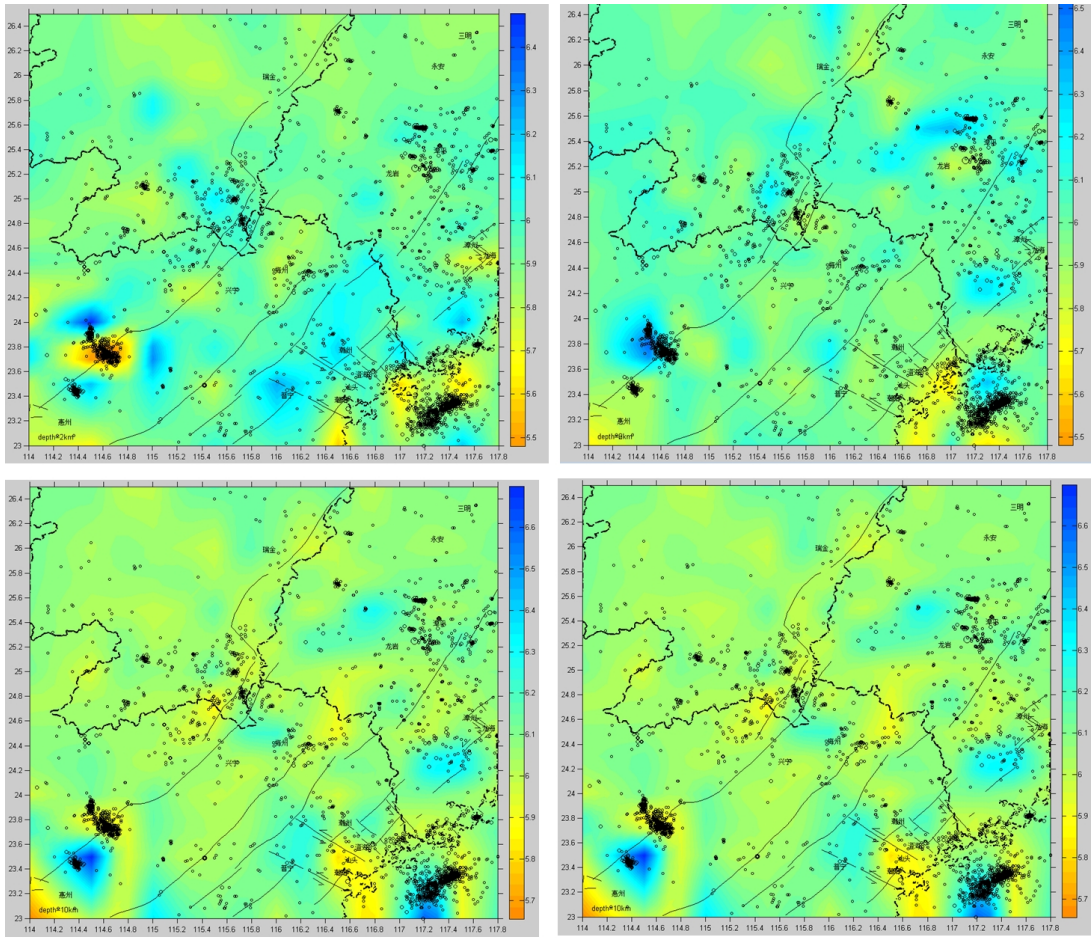


图 5 不同深度 P 波速度及重新定位的震中分布

Fig.5 The epicenter distribution after the reposition of the P wave with different velocity and different depth

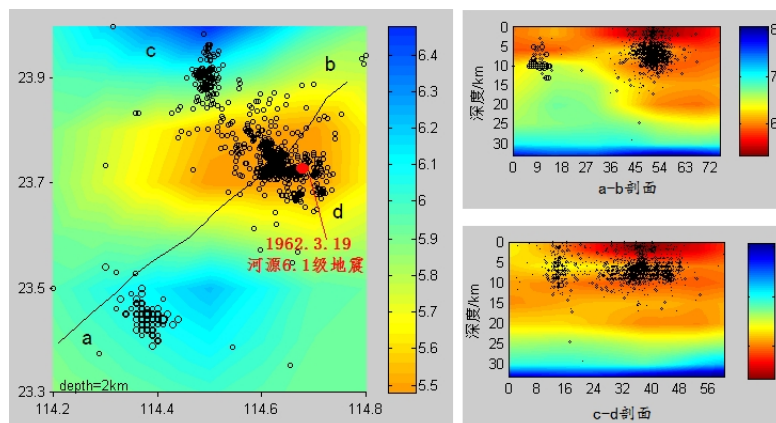


图 6 河源地区重新定位地震分布与剖面 P 波速度及小震分布

Fig.6 Earthquake distribution after repositioning in Heyuan area and distribution of P wave velocity and small earthquakes of the profile

调整, 活动强度不可能很高。寻乌震区处在 NNE 向邵武-河源活动性深大断裂带与 EW 向三南-漳平-仙游断裂带的交汇部位。NNE 向珊贝-丘坊断裂是寻乌震区强震的主要发震断裂构造。从图 7 中可以看出, 在 6 km 层位上, 寻乌-会昌区域有个高速异常区, 该区域地震多发生在高低速异常结合部偏向低速层一侧, 该区地震主要分布在 6~12 km 层位, 在 15 km 层位上, 寻乌地区有个比较明显的分

界面, 在这一分界面上发生过多地震, 1987 年的寻乌地震可能与这一层面的地壳活动有关。

图 8 给出了政和-大浦断裂带中段(漳平附近)重新定位地震分布与垂直剖面 P 波速度及小震分布, 该区地震分布相对分散, 比较集中的有两处, 分别位于漳平两侧的 5~10 km 层位的高低速异常区和位于 20 km 层位的高低速异常区。由图 8 可以看出, 该区地震多发生在 5~10 km 的高低速异常结合部位。

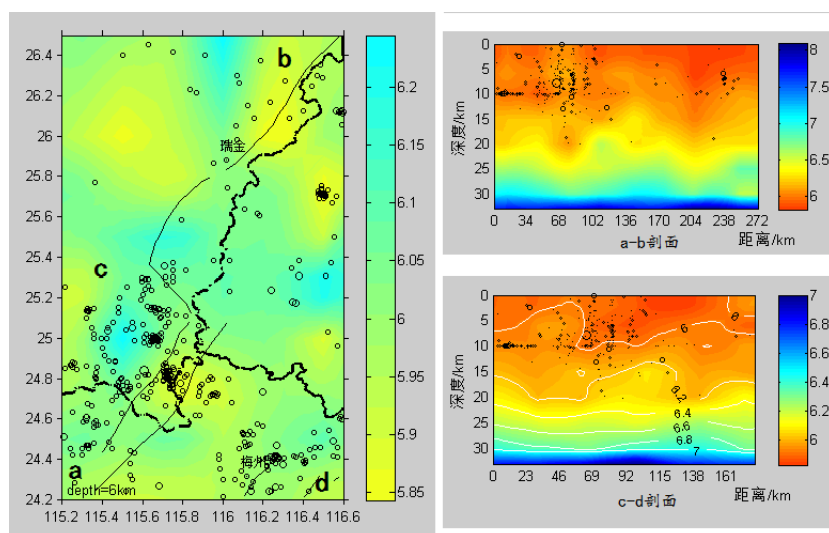


图 7 邵武-河源断裂带中段(寻乌-瑞金)重新定位地震分布与垂直剖面 P 波速度及小震分布

Fig.7 Earthquake distribution after repositioning in the middle (Xunwu- ruijin) region of Shaowu-heyuan fault zone and distribution of P wave velocity and small earthquakes of the profile

2007 年 8 月 29 日福建永春 M_s 4.5 级地震, 中国地震台网中心正式地震目录给定的震源深度为 10 km, 经过联合反演给出的震源深度为 6.9 km, 发震位置正好处于 5~10 km 高低速异常偏低速一侧的位置。

图 9 给出了闽粤近海区域重新定位地震分布与

垂直剖面 P 波速度及小震分布。从图 9 中可以看出, 在 10 km 层位上有较明显的高低速分界线, 地震多发生这一分界面两侧, 意味着该区脆韧性转换带深度大致位于 10 km 深度附近。从图 9 中可以看出, 越靠近沿海, 地震震源深度有加深的趋势。

5 结论与讨论

采用震源位置及速度结果的联合反演方法对

闽粤赣交界区 ($24^{\circ}\sim 26.5^{\circ}\text{N}$, $114^{\circ}\sim 117.8^{\circ}\text{E}$) 地震的震源位置以及震源区速度结构研究显示:

(1) 重新定位后震中分布呈现一定程度的线

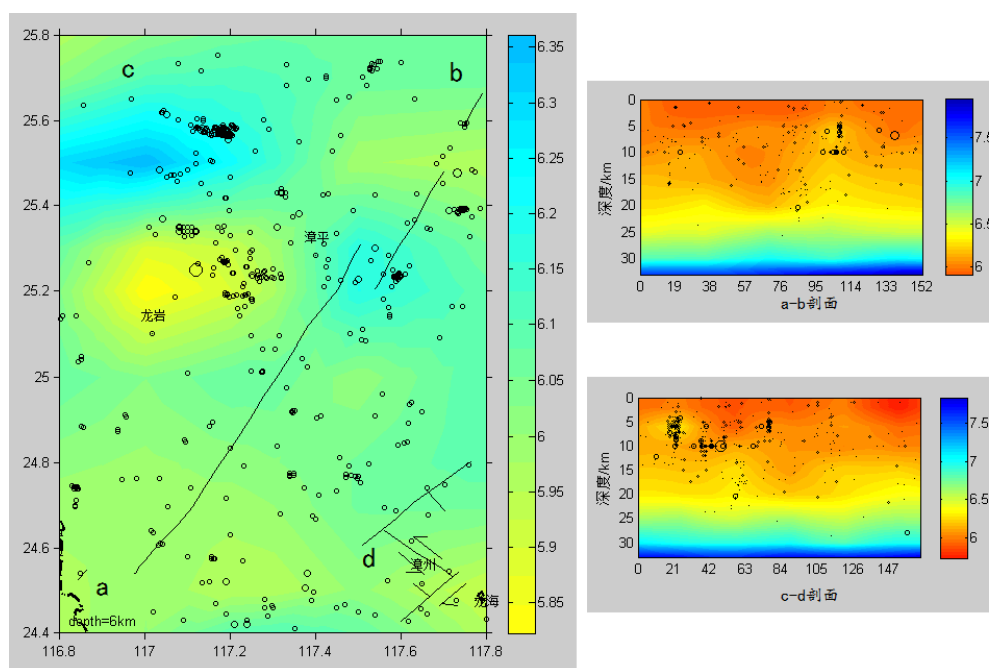


图8 政和-大浦断裂带中段重新定位地震分布与垂直剖面P波速度及小震分布

Fig.8 Earthquake after repositioning in the middle region of Zhenghe-dafu fault (Zhangping nearby) distribution and distribution of P wave velocity and small earthquakes of the profile

性集中。重新定位后的6321次地震,平均震源深度为6.86 km,震源深度在10 km以内的约占89%,只有3%的地震震源深度在15 km以上。

(2) 闽粤赣交界区地震震源平均深度随震级增大而加深的特征明显,即地震震级越大,震源深度越深,但震源深度一般不超过15 km;越靠近

沿海,地震震源深度有加深的趋势。

(3) 河源地区0~5 km范围内P波表现为低速异常区;5~15 km表现为高速异常;河源区域地震多发生在5~8 km高低速异常交会部位,新丰江库区的中小地震主要是由于流体活动引起孕震区弱化而发生的。

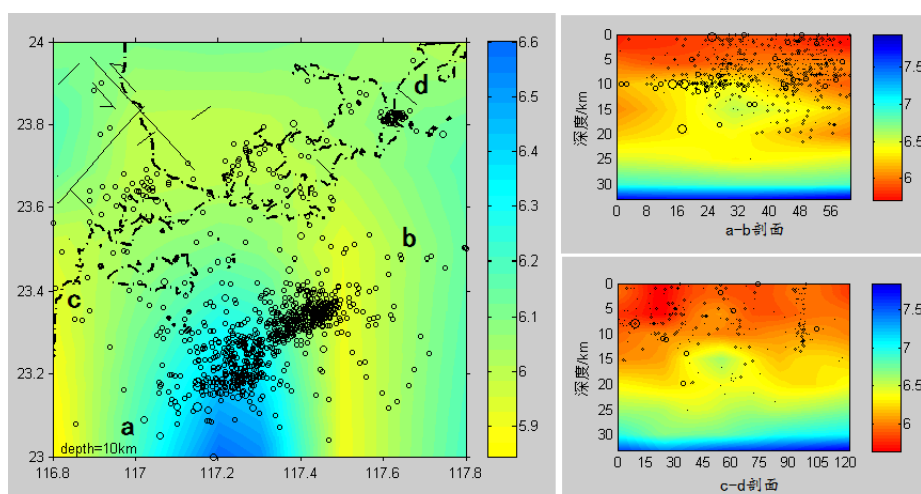


图9 闽粤近海区域重新定位地震分布与垂直剖面P波速度及小震分布

Fig.9 Earthquake distribution after repositioning on the offshore area of Fujian and Guangdong Provinces and distribution of P wave velocity and small earthquakes of the profile

(4) 邵武-河源断裂带中段(寻乌-瑞金)区域,该区强震主要受 NNE 向珊贝-丘坊断裂影响,强震多发生在该断裂两侧。在 6 km 层位上,寻乌-会昌区域有个高速异常区,该区域地震多发生在高低速异常结合部偏向低速层一侧,该区地震主要分布在 6~10 km 层位,在 15 km 层位上,寻乌地区有个比较明显的分界面,在这一分界面上发生过多次地震,1987 年的寻乌地震可能与 15 km 层位上的地壳运动有关。

(5) 政和-大浦断裂带中段(漳平附近)区域地震分布相对分散,比较集中的有两处,分别位于漳平两侧的 5~10 km 层位的高速异常区。该区域地震多发生在高速异常区偏向低速区一侧。

(6) 闽粤近海区域在 10 km 层位上有较明显的高低速分界线,地震多发生这一分界面两侧,意味着该区脆韧性转换带深度大致位于 10 km 深度附近。

由于闽粤赣交界区缺乏大震震例,尤其缺少震源深度在 20 km 以下的地震数据,本文缺乏对 20 km 以下深度地震震源位置及速度结构的研究与讨论。

致谢:感谢中国地震台网中心周龙泉老师提供的计算程序以及江西局吕坚、曾文敬的指导和帮助!

参考文献:

- [1] 周龙泉,刘杰,陈晓非,等. 2003 年大姚 6.2、6.1 级地震前三维波速结构的演化[J]. 地震学报, 2007, 29 (1): 20-30.
- [2] Pavlis G L. 1986. Appraising earthquake hypocenter location errors: a complete, practical approach for single-event locations[J]. Bull. Seism. Soc. Am. 76 : 1699-171.
- [3] Gombert J S, Shedlock K M, Roecker S W. 1990. The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation [J]. Bull. Seism. Soc. Am. 80: 1 605-1 628.
- [4] Geiger L. 1912. Probability method for the determination of earthquake epicenters from arrival time only [J]. Bull. St. Louis. Univ., 8: 60-71.
- [5] Poupinet G, Ellsworth W L, Fréchet J. 1984. Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: an application to the Calaveras fault, California [J]. J. Geophys. Res. 89: 5719-5731.
- [6] Got J L, Fréchet J, Klein F W. 1994. Deep fault plane geometry inferred from multiplet relative relocation beneath the south flank of Kilauea[J]. J. Geophys. Res. 99: 15 375-15, 386.
- [7] Spencer C, Gubbins D. 1980. Travel time inversion for simultaneous earthquake location and velocity structure determination in laterally varying media [J]. Geophys. J. R. Astron. Soc., 63 (1): 95-116
- [8] Frémont M J, Malone S D. 1987. High precision Relative locations of earthquakes at Mount St. Helens, Washington [J]. J. Geophys. Res. 92: 10 223-10, 236
- [9] 周仕勇, 许忠淮, 韩京, 等. 1999. 主地震定位方法分析及 1997 年新疆伽师震群高精度定位[J]. 地震学报, 21 (3): 258-265.
- [10] Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and Application to the Northern Hayward fault[J]. Bull. Seis. Soc. Amer., 90 (6): 1 353-1 368.
- [11] Aki K, Lee W H K. 1976. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using P arrival times from local earthquakes. 1. A homogeneous initial model [J]. J. Geophys. Res., 81: 4 381-4 399.
- [12] Thurber C H. 1983. Earthquake locations and three-dimensional crustal structure in the Coyote late area, Central California [J]. J. Geophys. Res., 88: 8 226-8 236.
- [13] 刘福田. 1984. 震源位置和速度结构的联合反演 (I) ——理论和方法[J]. 地球物理学报, 27 (2): 167-175.
- [14] 刘福田, 李强, 吴华, 等. 1989. 用于速度图像重建的层析成像法[J]. 地球物理学报, 32 (1): 46-61.
- [15] Smith G P, Ekstrom G. 1996. Improve teleseismic event location using a three-dimensional earth model[J]. Bull. Seism. Soc. Am. 86: 788-796.
- [16] Crosson RS. 1976. Crustal structure modeling of earthquake data, I. Simultaneous least squares estimation of hypocenter and velocity parameters [J]. J. Geophys. Res., 81: 3 036-3 046.
- [17] Pavlis L G, Booker J R. 1980. The mixed discrete-continuous inverse problem: application to the simultaneous determination of earthquake hypocenters and velocity structure[J]. J. Geophys. Res., 85: 4 801-4 810.
- [18] Michael A J. 1988. Effects of three-dimensional velocity structure on the seismicity of the 1984 Morgan Hill, California, aftershock sequence[J]. Bull. Seism. Soc. Am. 78: 1 199-1 221.
- [19] Kissling E, Ellsworth W L, Eberhard-Phillips D, et al. 1994. Initial reference models in local earthquake tomography [J]. J. Geophys. Res. 99: 19 635-19 646.
- [20] Paige C C, Saunders M A. 1982. LSQR: Sparse linear equations and least squares problems [J]. ACM Transactions on Mathematical Software 8 (2): 195-209.
- [21] 张国民, 汪素云, 李丽, 等. 中国大陆地震震源深度及其构造含义[J]. 科学通报, 2002, 47 (9): 663-668.
- [22] 朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 等. 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化[M]. 北京: 地震出版社, 2005: 57-67.