

陈安国、倪红玉、刘东旺等, 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, 27 (2), 199 ~ 206。

• 2011 年 1 月安庆地震 •

# 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

陈安国 倪红玉 刘东旺 沈小七 刘泽民 郑海刚

安徽省地震局, 合肥市长江西路 558 号 230031

**摘要** 2011 年 1 月 19 日安徽安庆发生  $M_s$ 4.8 地震, 本次地震发生在下扬子地块长江沿线前陆变形带。震后现场工作队调查汇总了建筑物破坏情况, 计算得出较为精确的烈度分布。采用 FOCMEC 方法计算了主震震源机制解, 并利用安徽地震台网对本次地震主余震的定位结果, 结合地震层析成像技术对震源区地壳三维速度结构的成像结果进行分析, 同时参考烈度分布的椭圆长轴优势方向, 得出 NE 向的宿松-枞阳断裂可能是本次地震的发震断层的结论。

**关键词:** 烈度分布 震源机制解 速度结构 宿松-枞阳断裂 安徽安庆

[文章编号] 1001-4683(2011)02-0199-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 前言

2011 年 1 月 19 日 12 时 07 分安徽省安庆市宜秀区发生  $M_s$ 4.8 地震, 据安徽地震台网定位结果, 主震位于:  $30.657^\circ\text{N}$ ,  $117.123^\circ\text{E}$ , 震源深度为 9km。

安庆地震发生后安徽省及相邻省地震部门迅速开展了对震害造成的受损建筑物的排查工作和震后灾害评估工作, 并快速计算得出较为精确的震区烈度图。

本次地震位于下扬子板块, 处于郟庐断裂带东南侧和长江断裂带北侧, 震中附近断裂发育。本文利用安徽地震台网的观测资料, 采用地震层析成像技术对安庆地震震源区及附近的地壳三维波速结构进行了层析成像, 为探讨震源区的构造环境和地震孕育提供了介质物性信息。同时, 应用 FOCMEC 方法计算了本次地震的主震震源机制解, 并结合构造环境和震后烈度快速评估的结果, 分析确定了本次地震的发震断层。

## 1 地震序列与震源机制解

1 月 19 日安庆  $M_s$ 4.8 主震发生后, 安徽地震台网截至 5 月 19 日 12 时, 共记录到余震

[收稿日期] 2011-02-02

[项目类别] 2011 年度全国地震重点危险区强化跟踪研究项目“郟庐断裂带南段及附近地区强震危险性深入研究”(2011013301) 和 2011 年安徽省地震科研基金青年项目(20110403) 共同资助

[作者简介] 陈安国, 男, 1979 年生, 安徽省地震局工程师, 主要从事地震地质和地震层析成像工作。

Email: anguo-chen@163.com

72 次,其中  $M_L \geq 1.0$  地震 24 次,最大余震为 1 月 25 日  $M_L 2.7$  地震,余震震级较小,序列呈现快速衰减趋势(图 1)。

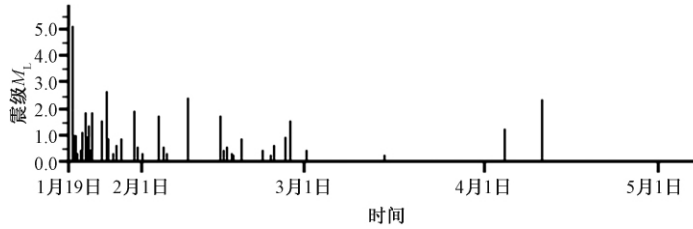


图 1 安庆  $M_S 4.8$  地震序列  $M-T$  图

应用 Snoko 等(1984、1989)提出的利用 P 波、SV 波和 SH 波的初动和振幅比计算震源机制解的方法(简称 FOCMEC 方法),计算安庆  $M_S 4.8$  地震的震源机制解。FOCMEC 计算程序所用参量为 3 个初动(P, SV, SH)和 3 个振幅比(SV/P, SH/P, SV/SH),对震源机制解的约束较好,提高了解的稳定性和准确性。刘杰等(2004)的研究表明,该方法能准确确定中小以上地震的震源机制解。

本研究区的速度结构(表 1)采用区域人工地震测深与重力剖面的综合研究结果(王椿镛等,1997a)。本文收集了安徽、江西、湖北、浙江等 4 个台网的数字化地震波形资料,根据该波形资料,选用 30 个 P 波初动清晰的台站,得到 31 个 P 波初动(包括直达波和首波),28 个直达 SH 波、SV 波与直达 P 波的振幅比资料。

设置 P 波初动的矛盾数为 0,以振幅比取对数的观测值和计算值之差的绝对值超过 0.50 为阈值,设置振幅比的矛盾数为 11,得到 7 组解(表 2、图 2(a))。7 组解中同一节面的倾角为  $40^\circ \sim 45^\circ$ ,走向为  $99^\circ \sim 108^\circ$ ,滑动角为  $-6^\circ \sim 12^\circ$ ,参数相差非常小,但均能反映其震源机制。从表 2 中

选取振幅比矛盾数最小的第 7 组解为最佳解(图 2(b)),其各参数分别为:节面 I 的走向  $101^\circ$ ,倾角  $45^\circ$ ,滑动角  $-5^\circ$ ;节面 II 的走向  $194^\circ$ ,倾角  $86^\circ$ ,滑动角  $-135^\circ$ ;P 轴的方位角、倾角分别为  $68^\circ$ 、 $33^\circ$ ;T 轴的方位角、倾角分别为  $318^\circ$ 、 $27^\circ$ ;N 轴的方位角、倾角分别为  $198^\circ$ 、 $45^\circ$ 。

表 1 安庆地区地壳速度结构模型

地壳厚度(km)	$v_P$ (km/s)	$v_S$ (km/s)	密度( $\text{kg/m}^3$ )
0 ~ 3	4.80	2.80	2.46
3.1 ~ 10	5.80	3.41	2.67
10.1 ~ 18	6.15	3.60	2.78
18.1 ~ 26	6.40	3.62	2.87
26.1 ~ 35	6.80	3.84	2.93
>35.1	8.00	4.42	3.38

表 2 安庆  $M_S 4.8$  地震的震源机制解

序号	震源机制			矛盾个数		均方差	
	倾角( $^\circ$ )	走向( $^\circ$ )	滑动角( $^\circ$ )	P 波初动	振幅比	振幅比均方差	总均方差
1	41	102	12	0	11	0.27	0.54
2	40	108	6	0	11	0.30	0.52
3	40	99	-6	0	11	0.29	0.54
4	45	101	5	0	11	0.27	0.55
5	45	101	0	0	10	0.28	0.52
6	45	108	5	0	11	0.26	0.48
7	45	101	-5	0	8	0.29	0.49

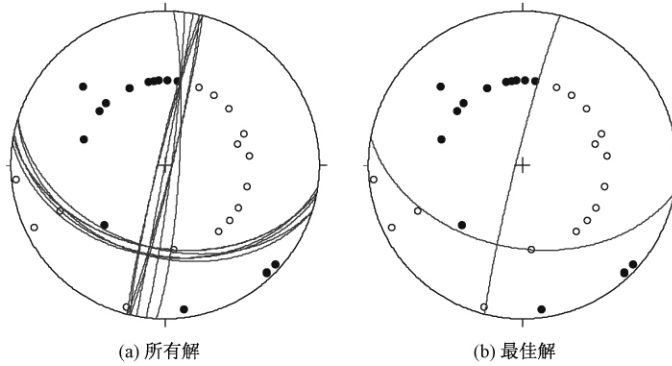


图2 安庆  $M_s4.8$  地震的震源机制解(其中实心圆表示初动为+,空心圆表示初动为-)

## 2 震区主要断裂与烈度分布

震后现场工作队对震区受损建筑物的排查结果、灾害评估结果进行了统计分析,计算出了烈度分布情况,得出了较为精确的震区快速烈度图。结果显示,极震区相对集中,主要分布于杨桥镇周围 8 个行政村,当地民居普遍无抗震设防,造成房屋震害偏重,严重破坏面积约  $57875\text{m}^2$ ,约 2860 人失去住所。本次地震极震区呈 NE 向椭圆形分布,其中 VI 度区约  $30\text{km}^2$ ,V 度区约  $72\text{km}^2$ (图 3)。

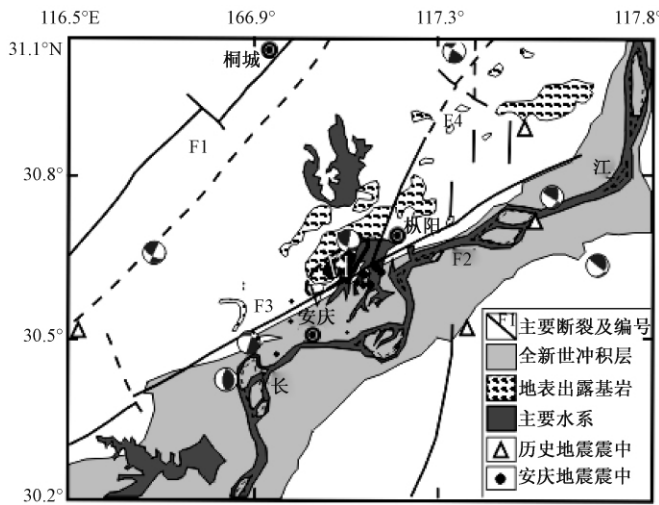


图3 安庆  $M_s4.8$  地震震中、历史地震震中、震区主要断裂及烈度分布图

F1 郟庐断裂带;F2 长江断裂带;F3 宿松-枞阳断裂;F4 严家桥-枫沙湖断裂;虚线表示断裂隐伏段

大地构造研究(车自成等 2002;朱光等,1998)认为,华北板块与扬子板块沿大别山-胶南造山带发生陆-陆碰撞的同时,强大的碰撞力也传递到碰撞带南侧的扬子板块上,使其成为前陆断褶带,造山带南侧的扬子板块成为强烈的前陆变形带。在前陆变形中,区内发生了强烈的褶皱和逆冲、推覆作用。现今的前陆变形构造主要呈 NE 走向,是郟庐断裂系剪切改

造的结果。本次地震即发生在下扬子板块的沿江前陆断褶带的盆地中,处于郟庐断裂带东南侧和长江断裂带北岸。

依据安徽省地质矿产局区域地质调查队编制的《安徽省区域地质志》(安徽省地质矿产局,1987)和《安徽省 1:50 万系列地质图说明书》<sup>①</sup> 本文以震区为中心,使用 Mapinfo 软件进行数字化和经纬度配准,并将烈度分布按经纬度投影到图上。考虑到本次地震余震偏小, $M_L < 1.0$  地震主要由震中附近的安庆地震台单台定位,误差较大。所以,仅将由 3 个以上地震台(含 2 个流动台)参与定位的 29 次地震绘制到图上(图 3)。

从图 3 可知,安庆地震主余震位于长江北岸,震中区西北侧是出露地表的低山基岩,东南侧是长江谷地全新世冲积层。震中区附近主要断裂为宿松-枞阳断裂、长江断裂破碎带和严家桥-枫沙湖断裂。据 1987 年《安徽省区域地质志》(安徽省地质矿产局,1987)和 2005 年《安徽省 1:50 万系列地质图说明书》<sup>①</sup> 等资料介绍:

F2 长江断裂破碎带是在元古代基底拼合带基础上,印支期或燕山期再次强烈活动,对前陆盆地内的岩浆活动、大型矿集区的形成具有重要的控制作用,该断裂带第四纪以来的活动性未见相关报道。F3 宿松-枞阳断裂西南起自宿松,经安庆北到枞阳,呈北东向延伸,主断面向 SE 向陡倾,在重力、地磁异常图上显示为明显的交变带,卫星影像上线性特征清晰。该断裂在地貌上形成低山丘陵与长江谷地的界线。近年核电站选址等野外工作中年代学测试结果显示,最新活动年代为中更新世晚期。F4 严家桥-枫沙湖断裂北起无为县严家桥,经杨家桥至枫沙湖西侧,总体走向 NNE 向,卫星影像上对此反映清楚。据中国地震局地质研究所野外调查和年代学测试结果,其最新活动年代为中更新世。该断裂与郟庐断裂平行,也有学者认为可看作郟庐断裂带的一条分支断裂。

从图 3 可知,安庆地震主、余震主要分布在宿松-枞阳断裂和严家桥-枫沙湖断裂交汇处西南,主震位于宿松-枞阳断裂西北侧,主震震中和宿松-枞阳断裂垂直距离约 4km,余震在主震附近的分布比较集中,主要位于宿松-枞阳断裂的两侧,少数余震位于主震的西南方位,但也是分布在宿松-枞阳断裂的两侧。从烈度分布可知,本次地震 VI 度、V 度烈度区位于宿松-枞阳断裂附近西侧,VI 度区中心与宿松-枞阳断裂、严家桥-枫沙湖断裂和长江断裂带的最短距离分别为 3km、7km 和 11km,烈度分布呈椭圆状,长轴方向与宿松-枞阳断裂较为接近。

在图 3 所示的范围内,有史料记载的历史地震共 4 次,3 次为 4 级,1 次为 5 级,震级和频次均较弱。距离本次安庆  $M_S 4.8$  地震最近的历史地震的震中距大约 33km。自 1976 年有现代测震观测资料以来,在图 3 所示范围内发生的可计算震源机制解的 3 级以上地震共 7 次(含本次安庆地震主震):其中 1 次位于郟庐断裂带,震源机制解为走滑类型;1 次位于严家桥-枫沙湖断裂附近,震源机制解也是走滑类型;另外 5 次位于宿松-枞阳断裂和长江全新世冲积层附近,4 次为逆冲类型,1 次为逆断类型,而这 5 次地震中有 4 次在宿松-枞阳断裂附近。对震源机制解的结果分析认为,本次安庆  $M_S 4.8$  地震震源机制与宿松-枞阳断裂附近地震的震源机制比较接近,都显示逆冲性质。

### 3 震源区地壳的三维波速结构

从 20 世纪 80 年代开始,国内外许多学者利用地震层析成像技术研究强震区的速度结

<sup>①</sup> 安徽省地质调查院,2005. 安徽省 1:50 万系列地质图说明书。

构,并对强震的孕育构造环境进行探讨(Tatham,1982;刘福田,1984;Zhao et al,1992;王椿镛等,1997b;徐佩芬等,2000;周龙泉等,2006)。本文作者在 2010 年使用安徽及周边省份地震台网共 51 个台站记录的区域地震资料(I、II 类精度)整理出 1976~2009 年地震震相报告,从中挑选出参与反演波速结构的 P 波观测数 19938 条,利用同表 1 的一维参考速度模型,反演了安徽及邻近地区的 P 波三维波速结构。图 4 为安徽及邻区 1976~2009 年 3551 个地震(空心圆)分布和 51 个台站(实心三角)分布,图中的网格线为反演计算所用的网格模型参数,在地震多发区网格设置得较为密集。

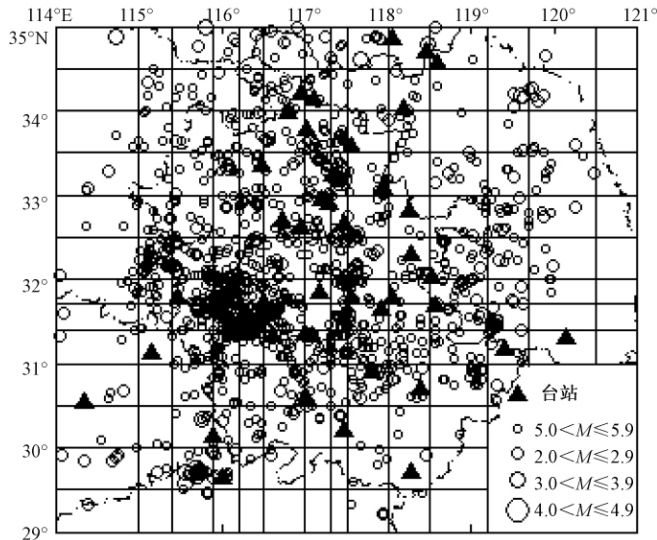


图 4 安徽及邻区 1976~2009 年地震分布与台站分布

本文采用检测板方法来估计解的分辨率(图 5)。其基本原理是在给定速度模型参数的基础上,对各节点正负相间进行扰动,然后根据实际射线分布,通过正演计算得到理论走时数据,再将理论走时数据加上一定随机误差后作为观测数据进行反演,要求反演方法与实际成像过程中的方法一致,最后比较反演结果和检测板的相似程度,作为解的可靠性的估计。文中扰动值取为正常值的  $\pm 3\%$ 。由图 5 可见,在深度 10km、18km 和 26km 的层面上,节点的 P 波速度能较好地恢复。

本文以安庆地震为中心,选取了  $2^\circ \times 2^\circ$  的经纬度范围,绘制了研究区不同深度处的 P 波三维波速结构图(图 6)。图 6 分别给出了震源区及周边深度 6km、9km、13km、18km 处的 P 波速度分布。结果表明,安庆地震震源区西南存在一条 NNE 向-近 NS 向分布的高波速带。安庆地震主余震震源深度为 6~9km,分布在高、低波速交界带,且震源偏于交界带的高波速一侧。这一高波速体在深度 16km 处逐渐收缩,至 18km 处已接近消亡。

图 7 给出了沿宿松-枞阳断裂布设的垂直剖面 AA' 的 P 波速度分布,余震的分布方向与该剖面方向接近。结果显示,AA' 剖面横跨两个波速反向变化区域,主震震源位于高波速体的北东侧的上方,余震主要分布在高波速体的上方。由于安庆地震余震偏小,最大余震仅  $M_L 2.7$ ,多数余震仅被安庆地震台单台记录,因此,目前的余震震源深度仅作为参考。

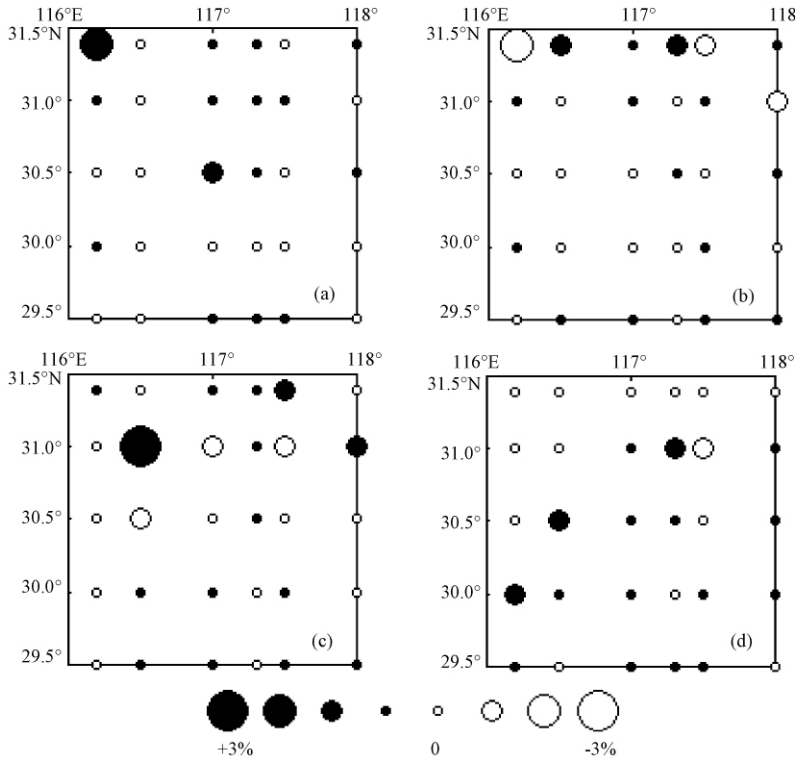


图5 不同深度P波检测板分辨率检测结果 (a) 3km; (b) 10km; (c) 18km; (d) 26km

## 4 结论与讨论

(1) 本次安庆地震发生在下扬子地块的沿江前陆断褶带,受郯庐断裂系剪切改造,现今的前陆变形构造主要呈NE走向。本次地震主震和余震主要分布在NE走向的宿松-枞阳断裂沿线, $M_S 4.8$ 主震和 $M_L \geq 2.0$ 的3次余震都分布在该断裂的西侧。

(2) 由地震现场灾害评估计算绘制的烈度分布图显示,极震区主要位于宿松-枞阳断裂的西侧,极震区中心距宿松-枞阳断裂垂直距离仅3km,V度和VI度区的等震线椭圆长轴方向呈NE向。

(3) 通过分析震源机制解的计算结果,同时考虑震源区主要断裂和烈度的分布,确定震源机制最佳解的节面II为本次地震的发震断层面近似解。震源机制结果认为,发震断层走向NNE14°,倾角86°。结合该区域1976年以来的震源机制解,分析认为,本次安庆地震震源机制与宿松-枞阳断裂附近的地震震源机制比较接近,都显示逆冲性质。

(4) 震源区及周边地壳三维P波速度成像结果显示,在震源区西南侧的中上地壳存在一条NNE向-近NS向分布的高波速体,该高波速体位于宿松-枞阳断裂下方。安庆地震主震分布在高、低波速的交界带,且震源偏于交界带的高波速体一侧。该处高波速体的走向与郯庐断裂带接近,与本次地震主震的震源机制吻合。

(5) 综合上述工作结果,分析认为,NE走向的宿松-枞阳断裂可能是本次安庆地震的发震断层,而处于宿松-枞阳断裂下方的高、低波速的交界带可能是本次地震的孕震空间。

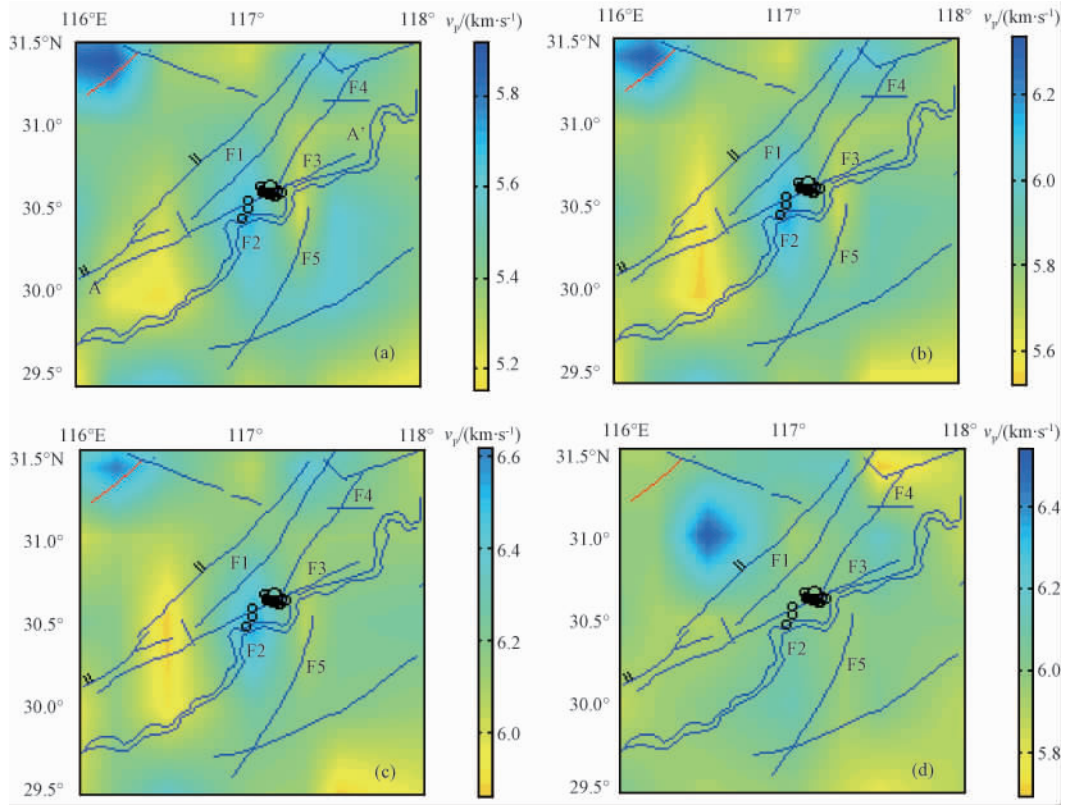


图 6 安庆地震震源区及周边不同深度 P 波波速分布 (a)6km; (b)9km; (c)13km; (d)18km

/断层; ○地震;

F1 庐庐断裂带; F2 长江断裂带; F3 宿松-枞阳断裂; F4 严家桥-枫沙湖断裂; F5 葛公镇断裂

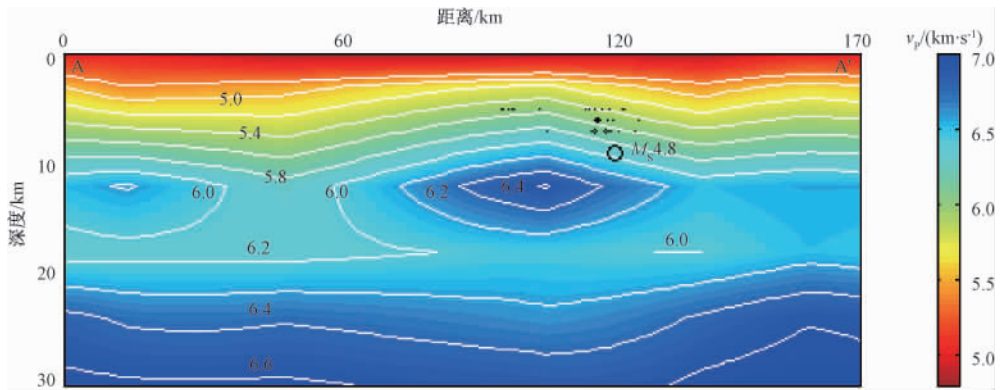


图 7 沿垂直剖面 A-A' 的 P 波速度分布

致谢:感谢中国地震台网中心周龙泉博士提供的层析成像计算程序。

## 参考文献

- 安徽省地质矿产局,1987,安徽省区域地质志,北京:地质出版社。
- 车自成、刘良、罗金海等,2002,中国及其邻区区域大地构造学,395~413,北京:科学出版社。
- 刘福田,1984,震源位置和速度结构的联合反演(1)——理论和方法,地球物理学报,27(2),167~175。
- 刘杰、郑斯华、康英等,2004,利用P波和S波的初动和振幅比计算中小地震的震源机制解,地震,24(1),19~26。
- 王椿镛、张先康、陈步云等,1997a,大别造山带地壳结构研究,中国科学(D辑),27(3),221~226。
- 王椿镛、张先康、丁志峰等,1997b,大别造山带上部地壳结构的有限差分层析成像,地球物理学报,40(4),495~502。
- 徐佩芬、刘福田、王清晨等,2000,大别-苏鲁碰撞造山带的地震层析成像研究:岩石圈三维速度结构,地球物理学报,43(3),377~385。
- 朱光、徐嘉炜、刘国生等,1998,下扬子地区沿江前陆盆地形成的构造控制,地质论评,44(2),120~129。
- 周龙泉、刘福田、陈晓非,2006,三维介质中速度结构和界面的联合成像,地球物理学报,49(4),1062~1067。
- Snoke J A, Munsey J W, Teague A G et al,1984, A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data, Earthquake Notes, 55(3), 15~20。
- Snoke J A,1989, Earthquake mechanism, James D E. Encyclopedia of Geophysics, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 239~245。
- Tatham R H,1982,  $v_p/v_s$  and lithology, Geophysics, 47, 336~344。
- Zhao D P, Hasegawa A, Horiuchi S,1992, Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath Northeastern Japan, J Geophys Res, 97(B3), 19909~19928。

## Study on 3-D velocity structure around the focal region of the Anqing earthquake in January 2011 and its causative fault

Chen Anguo Ni Honyu Liu Dongwang Shen Xiaoqi Liu Zemin Zheng Haigang

Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230031, China

**Abstract** The Anqing  $M_s$ 4.8 earthquake occurred on January 19, 2011, and the epicenter lies in foreland deformation belt along the Yangtze River in Yangtze plate. After the earthquake, the field work team surveyed and summarized the building damage data, calculating intensity distribution, obtaining comparatively reliable intensity distribution graph. The focal mechanisms of main shock are calculated tentatively using digital seismic wave data in some provincial digital seismic networks based on the FOCMEC program, combing the first motion of P, SV and SH waves with their amplitude ratios. The comprehensive analysis of the major aftershock location result of Anhui seismic network, together with the focal region crust three-dimensional velocity structural images by the seismic tomographic technology and the intensity distribution of elliptic long axis advantage direction reveals that NE trend Susong-Zongyang fault may be the causative fault of Anqing earthquake.

**Key words:** Intensity distribution Focal mechanism solution Velocity structure Susong-Zongyang fault Anqing city Anhui Province