

李志雄, 雷建设, 赵大鹏, 武巴特尔, 沈繁鑫, 丘学林. 2008. 海南岛及邻区地壳三维P波速度结构. 地震学报, 30(5): 441-448.

Li Zhixiong, Lei Jianshe, Zhao Dapeng, Wu Bateer, Shen Fanluan, Qiu Xuelin. 2008. 3-D P-wave velocity structure of the crust beneath Hainan Island and adjacent regions. *Acta Seismologica Sinica*, 30(5): 441-448.

海南岛及邻区地壳三维P波速度结构^{*}

李志雄¹⁾ 雷建设^{2),*} 赵大鹏³⁾ 武巴特尔⁴⁾
沈繁鑫¹⁾ 丘学林⁵⁾

1) 中国海口 570203 海南省地震局

2) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

3) 日本仙台 980-8578 日本东北大学地球物理系

4) 中国北京东燕郊 101601 防灾科技学院

5) 中国广州 510301 中国科学院南海海洋研究所

摘要 利用海南岛及邻区1999—2005年9个地震数字化台站记录到的3500余条区域初至波到时资料, 确定了海南岛及邻区地壳三维P波速度结构. 结果表明, 该区域浅部上地壳的波速异常与地表地质构造有一定的相关性, 即王五一文教断裂带以北地区波速较低, 而以南地区为相对高的波速异常区. 这与琼北地区为凹陷, 并伴有多期火山活动和较高的地热背景, 而琼中南地区为较稳定的隆起等构造特征相一致. 在其中下地壳, 琼东地区相对琼西地区波速较低, 可能暗示了地幔热物质上涌等动力学过程. 波速异常分布模式还暗示出北西向断裂带(如铺前一清澜断裂带)较浅, 而近东西向的王五一文教断裂带较深, 有可能延伸至莫霍面或更深.

关键词 三维速度 P波 地壳结构 海南岛

文章编号: 0253-3782(2008)05-0441-08

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

3-D P-wave velocity structure of the crust beneath Hainan Island and adjacent regions

Li Zhixiong¹⁾ Lei Jianshe^{2),*} Zhao Dapeng³⁾
Wu Bateer⁴⁾ Shen Fanluan¹⁾ Qiu Xuelin⁵⁾

1) Earthquake Administration of Hainan Province, Haikou 570203, China

2) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

3) Department of Geophysics, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan

4) College of Prevention Disaster Technology, East Yanjiao, Beijing 101601, China

5) South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences,
Guangzhou 510301, China

* 基金项目 中国地震局“十五”规划海口市地震活断层探测子专题(0106512)、地震科学联合基金(105086)和中国科学院边缘海地质重点实验室课题(MSGLO503)联合资助.

收稿日期 2008-03-20 收到初稿, 2008-07-10 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: leijs@hotmail.com

Abstract: Using over 3 500 first P arrival times recorded by 9 digital seismic stations of the Hainan Digital Seismic Network during 1999—2005, a 3-D P-wave velocity model of the crust beneath Hainan Island and adjacent regions was determined. Our result shows that in shallow upper crust the spatial distribution of velocity anomalies is somewhat associated with surface geological structure in the region. A relatively low velocity anomaly appears north of Wangwu-Wenjiao fault, while a relatively high anomaly is found south of that fault. This spatial velocity variation is consistent with the following regional tectonic feature: northern Hainan Island is a depressional region with many active volcanoes and high geothermal activity, while central-southern Hainan is an uplifted and stable region. In middle and lower crust the velocity is lower in eastern Hainan than that in western region, possibly suggesting the existence of hot materials upwelling from the mantle in eastern Hainan. The pattern of velocity anomaly also indicates that the NW-SE trending faults, *e. g.*, the Puqian-Qinglan fault, may be shallow, while the W-E trending Wangwu-Wenjiao fault may be deep, perhaps extending down to the Moho discontinuity.

Key words: 3-D velocity model; P-wave; crustal structure; Hainan Island

引言

海南岛及其邻区处于欧亚板块的东南缘,受菲律宾板块、印度板块运动和南海海盆扩张的联合作用与影响,该区域构造运动、火山作用和地震活动强烈,其中海盆扩张对本区的影响最大.南海属扩张后的弧后盆地,扩张轴呈近东西向展布,南海扩张使海区形成一系列走向东西—北东东向的隆起、拗陷及其右旋扭动断裂,并逐渐波及北侧的大陆.在雷琼地区形成一系列近东西向的深大断裂,并使雷琼断陷成为巨大的裂谷断裂带(李建生,1991;姜效典,李巍然,1994).

海南岛内的活动断裂主要有两组:一组是近东西向;另一组为北西向(图1).另外,还散布着一些北东向及其它方向的断裂.近东西向断裂是一组张性的深大断裂(如王五一文教、尖峰—吊罗和九所—陵水断裂),控制着海南岛的断陷、隆起以及火山岩分布.东西向的王五一文教断裂是琼雷断陷带和琼中南拱断隆起区的分界线.在其北面的琼北及雷州地区,第四纪火山发育,地震活动强烈;往南直至东西向的尖峰—吊罗断裂带,是地震相对平静地区.尖峰—吊罗断裂以南,地震又活跃起来,曾发生多次中强地震并形成一些震群(胡久常等,1997;陈运平等,2002).

在王五一文教断裂带以北地区,北西向断裂带具有新生性和强烈的活动性,控制着最新的火山活动和新生代地层的分布,并以30—40 km等间距出现.例如,琼东北地区的铺前一清澜断裂、长流—仙沟断裂、海口—云龙断裂等.北西向断裂是一组发震断裂,它参与了大地震(如1605年琼山7.5级地震和北部湾1994年6.1级、1995年6.2级地震)的孕育过程,北西向活动构造与东西向构造交汇处是大震孕育的主要场所.丁原章等(1988)开展了琼东北地区的构造及地震活动性等方面研究工作,出版了一部具有一定深度、较为全面和系统的论著.本研究是在前人工作的基础上,利用地震层析成像技术,探测海南地区的深部精细结构,以进一步分析断层、地震与波速结构之间的关系,为了解该地区现今深

部动力学过程提供地震学基础资料,特别是为海口及邻区在防御强震发生和火山喷发、减轻灾害等方面提供科学依据。

1 资料和方法

图 1 给出了 9 个地震台站在海南岛及邻区的分布. 这些台站多数分布在琼北地区,南部和西部地区只布设有三亚台和东方台,较为稀疏. 我们从 1999 年 5 月—2005 年 10 月发生在海南岛及其周边地区的地震事件中,选取 464 个区域地震(图 1)作为我们的研究资料,这些地震至少被上述 5 个台站所记录. 因此,总共收集到 3500 余条高质量的初至到时资料,这些资料追踪后的走时残差均在 5.0 s 以内,其中有 80% 小于 2.0 s. 采用双差法(Waldhauser, Ellsworth, 2000)对这些事件进行了重新定位,结果表明震中经度、纬度和深度的标准差在 2.5 km 以内的地震数达 90% 以上. 其中,在琼东北和琼东南地区的定位标准差多在 2.0 km 以内,而在琼西北的北部湾地区定位精度略低些,但最大标准差也不超过 5.0 km. 从海南岛及邻区的地震空间分布(图 1)来看,地震主要发生在海南岛的周边地区,海南岛中部地区少有地震发生。

本研究采用赵大鹏等人发展的一种地震层析成像方法(Zhao *et al.*, 1992). 为更精确地计算走时和射线路径,本研究采用了适合研究区的一维初始速度模型和起伏的莫霍面埋深,这些模型综合了前人的研究成果(丁志峰等, 2004; 嘉世旭等, 2006; 李志雄等, 2006). 莫霍面埋深的起伏变化明显,在海南岛中南部较深,约 30 km,但往北逐渐变浅,到了琼北、琼州海峡为 23—24 km. 关于莫霍面形态的细节,详见李志雄等(2006)文章. 大量检测板实验结果表明,初始三维模型水平方向上以 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 为间距,垂直方向上以 1, 5, 10, 15, 25 km 和 35 km 为深度层是研究区最适合的参数化模型(图 2). 模型空间中任意一点的速度可由周围 8 个节点内插所得(Zhao *et al.*, 1992; Zhao, Lei, 2004). 节点上的速度扰动量为未知参数. 反演时采用有光滑(Zhao, 2001; Lei, Zhao, 2006)和阻尼的最小二乘法(Paige, Saunders, 1982).

图 2a—f 给出了反演获得的层析成像结果平面图. 可以看出,浅部的速度图象与地质构造有一定相关性. 例如,在 1 km 深度的剖面上,尽管高、低速异常东西分界线很明显,

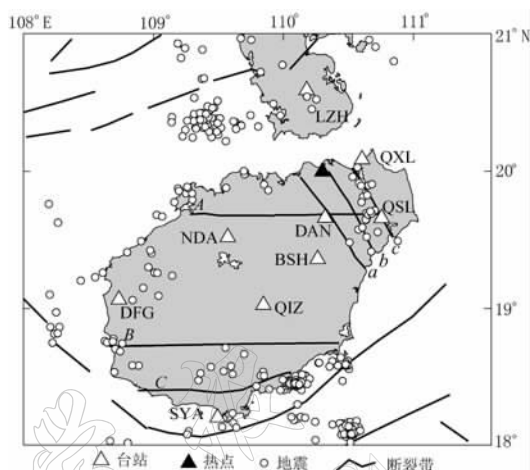


图 1 本研究所用的地震台站、地震震中和主要断层分布示意图

A: 王五一文教断裂带; B: 尖峰—吊罗断裂带;
C: 九所—陵水断裂带; a: 长流—仙沟断裂带;
b: 海口—云龙断裂带; c: 铺前—清澜断裂带

Fig. 1 Distribution of seismic stations and earthquakes used in this study and major fault zones

A: Wangwu-Wenjiao fault; B: Jianfeng-Diaoluo fault; C: Jiusuo-Lingshui fault; a: Changliu-Xiangou fault; b: Haikou-Yunlong fault; c: Puqian-Qingnan fault

2 计算结果和分辨率分析

图 2a—f 给出了反演获得的层析成像结果平面图. 可以看出,浅部的速度图象与地质构造有一定相关性. 例如,在 1 km 深度的剖面上,尽管高、低速异常东西分界线很明显,

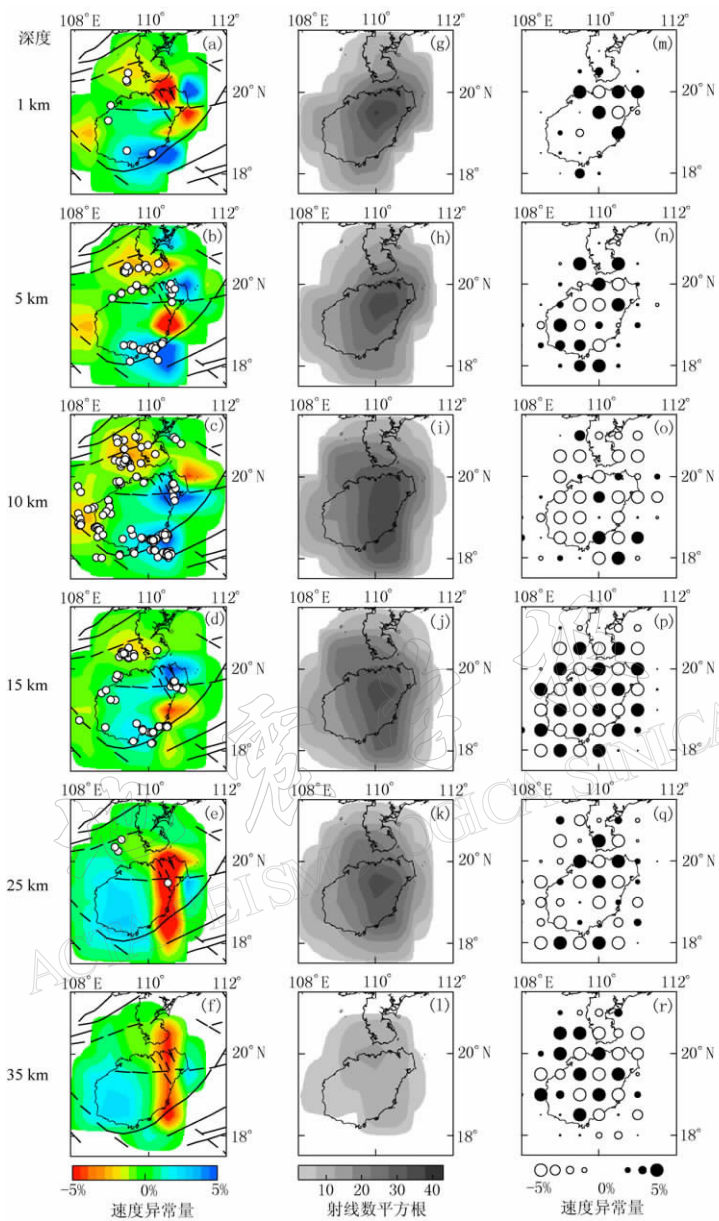


图 2 (a) — (f) 用层析成像技术反演获得的海南岛及邻区三维 P 波速度结构平面图;
(g) — (l) 射线数分布; (m) — (r) 检测板实验结果

在图(a) — (f)中, 红、蓝颜色分别代表低、高波速异常, 黑线为断裂带; 在(g) — (l)中, 灰度分别代表射线数开二次方(SQRT)后的数值; 在(m) — (r)中, 黑、白圆圈分别代表高、低速异常

Fig. 2 P-wave velocity anomalies (a) — (f), ray numbers (g) — (l), and checkerboard resolution tests (m) — (r) at different depths in the crustal model. The checkerboard resolution test is done with horizontal grid interval of $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

In (a) — (f), red and blue color denote slow and fast velocity anomaly, respectively, and black lines denote major faults. In (g) — (l) white and black color denote the root square of the ray numbers with the ray number scale bar at the bottom. In (m) — (r) solid and open circle denote fast and slow velocity anomaly, respectively

但以东西走向的王五—文教断裂带为界的波速异常也显示出明显的结构特征,即琼北地区和琼州海峡地区为明显的低波速异常,可能与火山喷发物的分布有关(图 2a);在 10 km 深度的剖面上,整个海南岛均呈现为高波速异常(图 2c);在 25 km 深度的剖面上,海南岛的中北部为明显的低波速异常,而其周边海域为明显的高波速异常,这可能反映了陆区与海域构造上的差异(图 2e);在上地幔顶部(35 km 深度),海南岛东部地区为明显的低波速异常,而其西部为明显的高波速异常,可能反映出东西部构造上的差别(图 2f)。另外,低波速异常与断层展布也存在一定的相关性,这可能反映出地壳或岩石圈中存在破碎带。

地球上有很多热点,这些热点地区有明显的特征,如地形上隆、相对高温和有区别于洋中脊或安山石玄武岩同位素信息的火山活动(Davies, 1988; Sleep, 1990; Courtillot *et al.*, 2003)。本研究区的琼北地区也称为热点(Lebedev *et al.*, 2000)。由纵剖面图(图 3)可以清楚地看到,在海南热点下方深至 5 km 的浅部、下地壳深至上地幔顶部都有明显的低波速异常。这些低波速异常的形态与莫霍面的上隆形态相一致,可能反映出上地幔热物质上涌的情况。

检测板实验是检测研究区内地震射线交叉性覆盖好坏的一种有效手段,判定已有的射线到时资料是否足以求解研究区模型空间节点上的未知参量。具体操作过程是:首先构造一个正负相间的速度扰动模型,根据实际的震源和台站位置计算走时和射线路径;其次在无正负相间的速度扰动模型下计算走时;然后根据两种模型的走时残差,采用上述相同反演方法,反演还原正负相间的速度扰动模型;最后根据对该正负相间速度扰动模型的还原程度来判断分辨效果。本研究中,速度扰动量为 5%。由检测板实验结果平面图可知,在琼东北地区,除 10 km 深度(图 2o)上的异常幅度没有完全恢复外,正负相间的异常模式都被还原(图 2m—o, q)。特别是在 15 km 和 35 km 深度的平面图上,检测板无论是在幅度上还是正负相间上,均还原得较好。由垂直纵剖面图(图 3e, f)可以看到,除 WE 剖面上的 110° E 附近有部分节点的正负还原相反外,其它部分节点的正负相间样式均还原正确,尤其是沿 SN 剖面异常幅度也基本还原。图 2g—l 和图 3c—d 分别给出了相应剖面的射线数分布。由上述分辨率分析可知,本研究获得的一些主要速度结构特征都是可信的。

3 讨论

将这些精确定位后的地震震中投影到速度剖面上,可以看到这些地震多数发生在高、低波速过渡带上(图 2a—d),而且在北部湾和琼西地区地震多偏向低波速异常区,而在琼东北和琼东南地区则偏向高波速异常区。在琼东北地区小震的震中分布与北西向的铺前一清澜断层和近东西向的王五—文教断裂带的展布形态相一致,表明这些地震的发生可能与这些断层的活动相关。另外,还发现沿王五—文教断裂带发生的地震震源较深,以其为界的高低波速异常分布模式也延伸到较大深度(图 2、图 3),而沿铺前一清澜断裂带的地震和低波速异常都较浅(图 2a, b),说明铺前一清澜断裂带可能较浅,而王五—文教断裂带则较深,可能延深至莫霍面深度。

由图 2a—c 的波速结构可以清楚地看到,在地壳浅部,琼北地区的波速与琼中南部相比要低许多,这不仅与琼北凹陷、琼中南隆起的地质构造格局(图 1)相一致,而且与分别使用三维重力反演和远震接收函数技术获得的琼中南部的地壳比琼北厚的结果也相吻合(李志雄等, 2006; Qiu *et al.*, 2002)。雷州半岛南部以至整个雷琼盆地表现为低波速异常

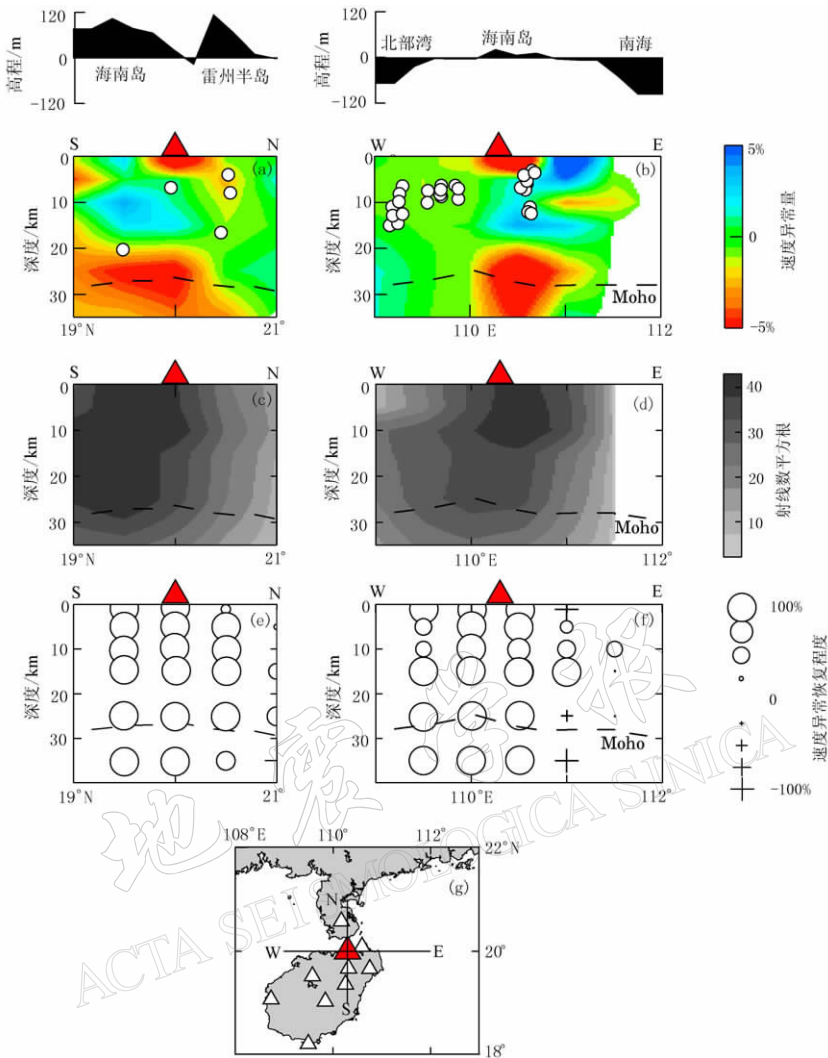


图 3 (a)、(b) 用层析成像技术反演获得的海南岛及邻区三维 P 波速度结构纵剖面图；(c)、(d) 沿纵剖面的射线数分布图；(e)、(f) 沿纵剖面的检测板实验结果；(g) 纵剖面的位置。在图(a)和(b)中，红、蓝色分别为低、高波速异常，白色圆圈为地震震中，图上方的多边形表示沿纵剖面的起伏地形；沿(c)和(d)纵剖面射线数的色标位于(d)右侧；在图(e)和(f)中，圆圈和叉号分别代表检测板实验相应节点上的速度异常值还原正确与错误，其大小代表量值。检测板的这种表达方式，易于表达剖面不在节点上的情形，详见雷建设和周惠兰(2002)以及 Lei 和 Zhao (2005; 2007a, b) 文章。图中，虚曲线表示 Moho 面深度，红三角代表海南热点，白三角为海南岛的 9 个地震台站

Fig. 3 Cross-sections of velocity anomaly (a) and (b), ray numbers (c) and (d), and checkerboard resolution tests (e) and (f) in the model with horizontal grid spacing of $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ and vertical spacing of 4—10 km
In (a) and (b), red and blue denote slow and fast velocity anomaly, respectively, and circles represent earthquakes. Two top plots stand for topography along the cross-sections. Ray numbers are shown in (c) and (d). In (e) and (f), crosses and stars denote the velocity anomalies being inverted wrongly and correctly, respectively, with their sizes being proportional to the recovery degree as illustrated on the right of (f). For such expression of checkerboard resolution test the readers may refer to Lei and Zhou (2002) and Lei and Zhao (2005; 2007a, b) articles. In (a)—(f) dashed curve denotes the Moho discontinuity along the profile. Red triangles denote the hotspot. Positions of the profiles are shown in (g), where white triangles denote 9 seismic stations on Hainan Island and red triangle denotes the hotspot

(图 2、图 3), 与该区第四纪火山活动甚为活跃、伴随多期多次喷发并具有较高地热背景的研究结果(陈墨香等, 1991)相一致。

雷建设和周惠兰(2002)利用中国地震台网(1985—1997 年)和 ISC 报告(国际地震中心报告, 1964—1997 年)的初至 P 波到时资料, 获得了中国西南及邻区深至 400 km 的波速结构。海南岛位于其研究区的边缘, 资料虽覆盖不甚充分, 但仍可看出该区呈现出低波速异常。Liang 等(2004)利用中国地震台网资料(1985—1997 年)、川滇地区(1980—1997 年)和 ISC(国际地震中心, 1964—1997 年)的 Pn 到时资料, 反演了中国及邻区上地幔顶部的速度结构。结果表明, 海南岛北部地区为一明显的低波速异常。丁志峰等(2004)于 2001 年 9 月—2002 年 5 月在琼北火山区布设 14 个临时地震台站, 进行为期半年的观测, 利用接收函数和层析成像技术获得了该区的深部结构。结果表明, 琼北火山区的中下地壳波速偏低, 至上地幔顶部的低波速异常则聚集到琼州海峡。这些结果与位于雷琼拗陷更新世玄武岩覆盖区的白延—江洪人工爆破剖面探测结果(嘉世旭等, 2006)相类似。由此认为地壳厚度的减薄以及低波速异常可能与该区域自新生代以来一直延续至第四系晚期的多期火山岩浆喷发、地幔对地壳底部的底浸、拆沉和地壳仍处于相对温热状态相关(孙建忠等, 1988; 嘉世旭等, 2006)。本研究利用布设在海南岛及邻区的 9 个地震台站, 记录到 1999 年以来发生在海南岛及周边地区的区域地震到时资料, 获得了该区高分辨率的深部结构。结果表明, 琼北及雷州半岛包括琼州海峡在地壳深度范围均为明显的低波速异常, 而且这个低波速异常与地幔深度的低波速异常相连(图 3)。这一结果也为嘉世旭等(2006)的“地幔对地壳底部的底浸”假说提供了可靠的地震学证据。

4 小结

由海南测震台网 9 个数字化地震台站记录到的大量高质量的区域地震初至到时资料, 获得了该区高分辨率的地壳速度模型。结果表明, 海南岛的波速结构与地质构造有着一定的相关性。以近东西向展布的王五一文教断裂为界, 主要表现为以断陷构造为主的北部地区波速较低, 而以隆起构造为主的中南部地区则呈现为高波速异常。这种构造形态往下延伸至莫霍面上下。琼东北的北西向断裂带(如铺前—清澜断裂带)仅在深至 5 km 左右的深度范围呈现为明显的低波速异常, 表明尽管这些北西向断裂带较为活跃, 但活动的深度范围可能较浅。

琼北地区往北经琼州海峡到雷州半岛下方均呈低波速异常, 与该区域第四纪火山活动甚为活跃, 曾有过多次的喷发活动以及具有较高的地热背景相吻合。该区域下方的低波速异常, 从浅部往下延伸, 经琼州海峡下方穿过莫霍面至地幔深度。这一地壳结构特征也为嘉世旭等(2006)的“地幔对地壳底部的底浸”的假说提供了可靠的地震学证据。

本研究所有图件由 GMT 软件(Wessel, Smith, 1995)绘制, 海南地震科学数据共享项目提供资料, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 陈墨香, 夏斯高, 杨淑贞. 1991. 雷州半岛局部地热异常及其形成机制[J]. 地质科学, (4): 369—383.
陈运平, 席道瑛, 樊星. 2002. 用分形理论研究海南岛的活动断裂[J]. 地震研究, 25(4): 351—355.

- 丁原章, 李坪, 时振梁, 林季曾, 朱振宇. 1988. 海南岛北部地震研究文集[M]. 北京: 地震出版社: 1-299.
- 丁志峰, 李卫平, 吴庆举, 胡久长, 何正勤, 张炼. 2004. 琼北火山区的地震观测与壳幔结构的研究[G]//张中杰, 高锐, 吕庆田, 刘振宽主编. 中国大陆地球深部结构与动力学研究: 庆贺滕吉文院士从事地球物理研究 50 周年. 北京: 科学出版社: 846-857.
- 胡久常, 陈金燕, 黄妙影. 1997. 1995 年海南东方近海 5.2 级地震特征分析[J]. 华南地震, **17**(1): 39-45.
- 嘉世旭, 李志雄, 徐朝繁, 沈繁奎, 赵文俊, 杨卓欣, 杨键, 雷宛. 2006. 雷琼拗陷地壳结构特征[J]. 地球物理学报, **49**(5): 1385-1394.
- 姜效典, 李巍然. 1994. 海南岛潜在震源区的研究[J]. 自然灾害学报, **3**(1): 104-109.
- 雷建设, 周蕙兰. 2002. 中国西南及邻区上地幔三维速度结构研究[J]. 地震学报, **15**(2): 134-142.
- 李建生. 1991. 海南岛地区断裂构造体系与区域稳定性[J]. 海洋科学, (3): 19-21.
- 李志雄, 赵文俊, 刘光夏. 2006. 1605 年琼州大地震深部构造和应力状态[J]. 华南地震, **26**(1): 28-36.
- 孙建忠, 樊祺诚, 陈文寄. 1988. 琼北地区第四纪火山活动的研究[G]//丁原章, 李坪, 时振梁, 林季曾, 朱振宇编. 海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社: 26-33.
- Courtillot V, Davaille A, Besse J, Stock J. 2003. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **205**: 295-308.
- Davies G. 1988. Ocean bathymetry and mantle convection 1: Large-scale flow and hotspot[J]. *J Geophys Res*, **93**: 10467-10480.
- Lebedev S, Chevrot S, Nolet G, van der Hilst R. 2000. New seismic evidence for a deep mantle origin of the S. China basalts (the Hainan plume?) and other observations in SE Asia[J]. *EOS Trans AGU*, **81**: 48.
- Lei J, Zhao D. 2005. P-wave tomography and origin of the Changbai intraplate volcano in Northeast Asia[J]. *Tectonophysics*, **397**: 281-295.
- Lei J, Zhao D. 2006. Global P-wave tomography: On the effect of various mantle and core phases[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **154**: 44-69.
- Lei J, Zhao D. 2007a. Teleseismic evidence for a break-off subducting slab under Eastern Turkey[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **257**: 14-28.
- Lei J, Zhao D. 2007b. Teleseismic P-wave tomography and the upper mantle structure of the central Tien Shan orogenic belt[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **162**: 165-185.
- Liang C, Song X, Hunag J. 2004. Tomographic inversion of Pn travel times in China[J]. *J Geophys Res*, **109**, doi:10.1029/2003JB002789.
- Paige C C, Saunders M A. 1982. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares[J]. *ACM Trans Math Software*, **8**: 43-71.
- Qiu X, Priestley K, Mckenzie D. 2002. Teleseismic P-waveform receiver function analysis and its application to qiongzong station(QIZ) of Hainan Island, NW south Chian sea[J]. *J Geosci China*, **4**(1): 1-8.
- Sleep N. 1990. Hotspots and mantle plumes: Some phenomenology[J]. *J Geophys Res*, **95**: 6715-6736.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **90**(6): 1353-1368.
- Wessel P, Smith W. 1995. New version of the Generic Mapping Tools (GMT) version 3.0 released[J]. *EOS Trans AGU*, **76**: 329-329.
- Zhao D, Hasegawa A, Horiuchi S. 1992. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan[J]. *J Geophys Res*, **97**: 19909-19928.
- Zhao D. 2001. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **192**: 251-265.
- Zhao D, Lei J. 2004. Seismic ray path variations in a 3-D global velocity model[J]. *Phys Earth Planet Interi*, **141**: 153-166.