

上海及其邻近地区三维地壳结构层析成像

王小平, 朱元清, 李惠民, 王燕纹

(上海市地震局, 上海 200062)

摘要:利用上海及其邻近地区地震台网的地震记录及人工爆破资料,采用地震层析成像方法反演研究区地壳三维P波、S波速度结构模型。成像结果表明:不同深度的P波、S波速度扰动呈北西向展布特征;地震大多数分布在低速区的块体内,说明地震不仅与断裂活动有关,有可能还与物质结构和性质有关;上海及其邻近地区上地壳速度结构,断裂活动和物质性质三者之间存在密切关系。

关键词: 三维速度结构; 上海及其邻近地区; 低速区; 地震层析成像

中图分类号: P315.3⁺1; P313.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2006)04-0341-07

Seismic Tomography Inversion of 3-D Crust Structure in Shanghai and Adjacent Areas

WANG Xiao-ping, ZHU Yuan-qing, LI Hui-min, WANG Yan-wen

(Earthquake Administration of Shanghai, Shanghai 200062, China)

Abstract: Using the local seismic events which were recorded by seismic networks of Shanghai and its adjacent areas and some artificial blasting events, adopting seismic tomography method, the 3-D P, S wave crust velocity structure of this region is inverted. The tomographic images in different depths show that the P, S wave velocity perturbation orientates NW direction. Most of local earthquakes occurred in low velocity zones, it indicates that earthquake activity is not only related to active faults and maybe linked to crustal structure and its material property. There is a close relationship among velocity structure, active faults and upper crustal materials in Shanghai and its adjacent areas.

Key words: 3-D velocity structure; Shanghai and adjacent area; Low velocity area; Seismic tomography

0 引言

上海及其邻近地区位于长江三角洲前缘河口和杭州湾之间。大地构造位置处在扬子准地台浙西—皖南台褶带和下扬子台褶带的北东延伸部分,其主体部分也称之为下扬子—南黄海断块。扬子准地台是一个相对稳定的地块,新构造分区属苏北—南黄海沉降区的苏锡沪缓慢下降区。已有地质和地球物理资料表明:上海地区是一个周边湖州—苏州断裂、南通—新余断裂、苏州—嘉善断裂及滨海断裂所围

限的区域,区内构造变动以断裂为主。

上海及其邻近地区是我国经济发展战略要地之一,城市高度集中,人口十分稠密。目前华东地区处于地震活动的第二轮应变释放阶段的后期,这一活跃期还将可能持续一段时间,地震形势是严峻的。作为一个中强地震多发的地区,并包含几个特殊结构如郯庐断裂、茅山断裂、萧山—球川断裂等,研究其地壳结构的基本特征,查明其深部构造的背景在地震监测、地震预报和工程地震等具有理论意义和

收稿日期:2006-02-13

基金项目:地震科学联合基金(606039)

作者简介:王小平(1970—),女(汉族),江苏姜堰人,工程师,硕士,从事台阵地震分析及研究工作。

实际应用价值^[1]。

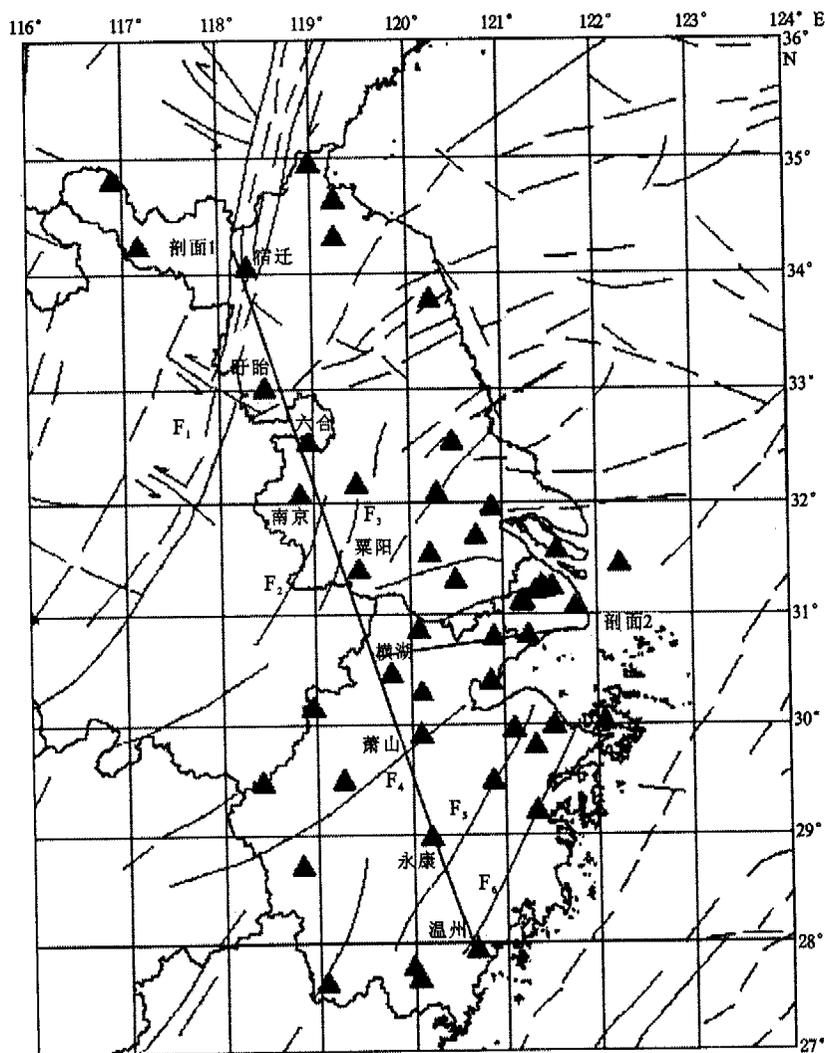
目前国内已做了大量的地震层析成像研究工作,但是针对上海及其邻近地区详细的地壳三维速度结构的研究甚少。本文利用江苏、浙江及上海地震台网的 77 个台站所记录到的区域地震数据,采用地震层析成像方法^[2],反演该地区三维 P 波、S 波地壳速度结构模型,从而更详细的探讨该地区强震发生的深部构造环境,分析三维速度图像、区域地质结构及强震活动的关系,为该地区强震机理的研究提供深部构造背景和信息^[3-5]。

1 资料和方法

用天然地震研究地壳的三维速度结构是一种有效的办法,地方震和近震数据对震源以上的浅部速度结构有很好的控制作用,其震源和台站都位于模型内,走时残差可以直接求取。但对震源以下的速

度结构无能为力;同时天然地震震源位置是人们无法控制的,从而导致射线的几何展布不够理想。为了得到足够数量并合理分布的地震射线,我们充分利用了人工地震资料。人工地震的 Pg 波资料反演时,由于震源位置精确知道,可以用来确定基底的速度结构;同时由于人工地震的可控性,可达到射线几何展布理想的效果。

本文采用资料包括上海及其邻近地区的天然近震资料、2 条测深剖面资料及 118 个人工爆破资料。其中天然近震资料包括 77 个台站记录的 1990—2005 年的天然近震 1 186 个,P 波震相 11 328 个,S 波震相 6 725 个,平均每个地震事件有 5 个地震台有 P 波记录数据。从图 1 中可以看出,这一地区的地震台站是不均匀的,有些地区比较稠密,而江苏北部、浙江南部地区台站分布比较稀疏。



▲: 台站; F₁: 郟庐断裂; F₂: 芜湖—南京断裂; F₃: 茅山断裂; F₄: 萧山—球川断裂; F₅: 上虞—丽水断裂; F₆: 镇海—温州断裂

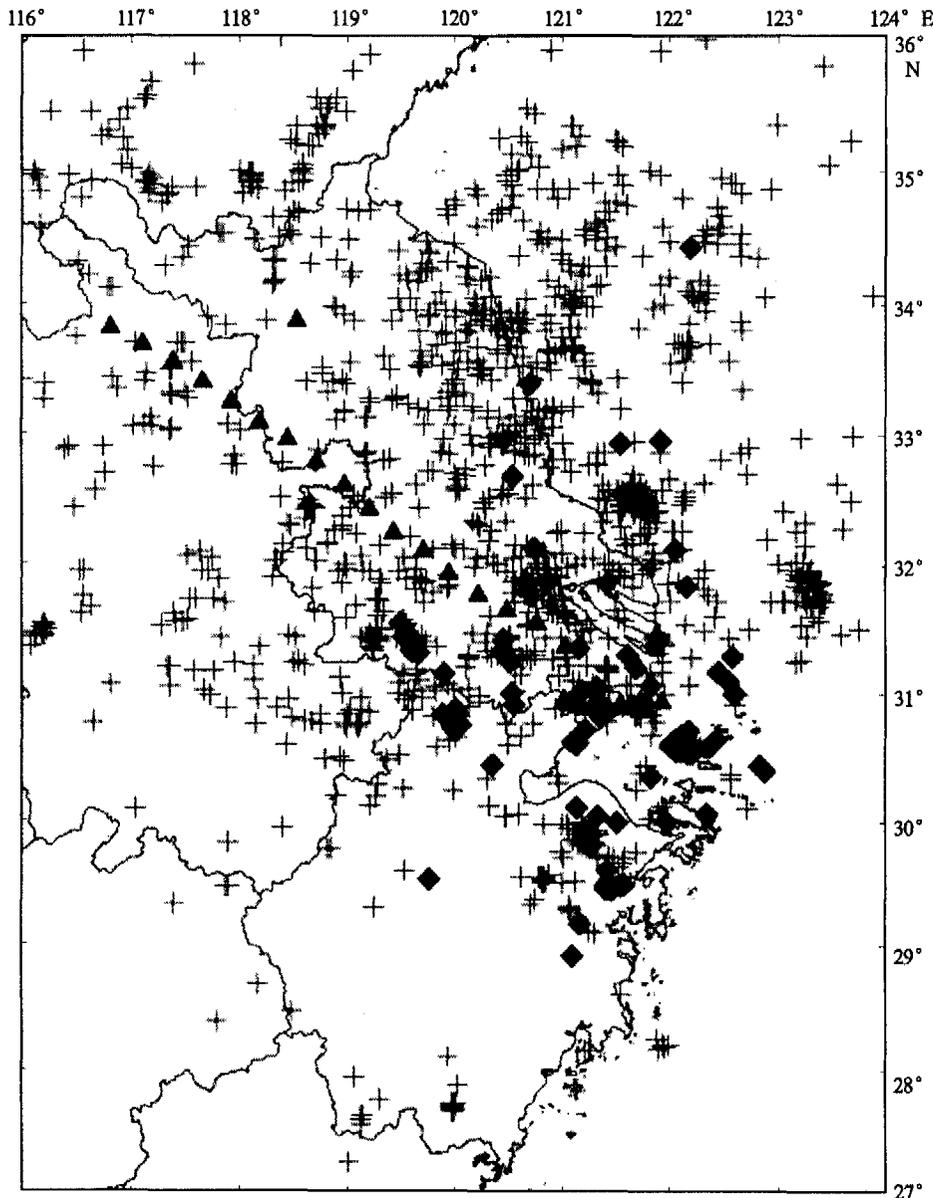
图 1 上海及其邻近地区地震台站与断裂构造分布图

Fig. 1 Distribution of seismic stations and faults in Shanghai and adjacent areas.

所采用的人工地震资料包括江苏8401工程,上海2004地震测深工程及118个上海及其邻近地区人工爆破资料,其分布是不太均匀的(图2),主要分布在上海及其邻近地区、江苏及黄海等地区。

应用赵大鹏等人^[2-3]提出的地震层析成像反演方法分析地震到时数据。该方法允许模型空间内存在几个复杂形状的间断面,且地震波速度可以在三维空间中变化。在模型空间中设置一系列的三维网格节点,节点处的速度扰动作为反演中的未知数被

求解,其它任意点的速度扰动可由与之相邻的8个节点的速度扰动通过线性插值得到。为了快速、精确地计算理论走时和地震射线路径,迭代地应用伪弯曲技术^[6]和斯奈尔定律进行三维射线跟踪^[2]。采用带阻尼因子的LSQR方法^[7]求解大型稀疏的观测方程组,非线性层析成像问题通过迭代的线性反演求解。在每一次迭代中震源参数和速度结构可同时反演。



十字表示天然地方震; 三角形表示两条地震测深剖面; 菱形表示人工爆破点

图 2 研究区地震、爆破点分布图

Fig. 2 Distribution of earthquake epicentres and the artificial blasting sites.

使用赵大鹏^[2-3]反演程序,利用本地区地震资料,经过多次检测板的试验和分析,建立了如下的初始模型:研究区边缘为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的网格,其内部为 0.4°

$\times 0.4^{\circ}$ 的网格,沿深度方向为:2 km、5 km、8 km、12 km、18 km、22 km、33 km。初始速度模型主要参考2004年上海人工地震测深工程结果,研究区的

Moho面深度一般都在30~34 km之间。总体看Moho面、基底和康拉德界面都没有巨大变化,因此在反演模型中设计了基底界面深度为2 km,上地壳界面深度为12 km,中地壳深度为22 km及莫霍界面深度33 km的四个界面。研究区地震数据有限,因此反演过程中4个界面保持不变。

表1 各层反演参考速度

深度 /km	反演参考速度 $V_s/[km \cdot s^{-1}]$	反演参考速度 $V_p/[km \cdot s^{-1}]$
2	2.5	4.325
8	3.5	6.055
12	3.5	6.055
18	3.8	6.574
22	3.8	6.574
33	4.0	6.92

2 三维速度结构反演结果

图3、4中采用检测板对反演结果的分辨率进行检测的结果,可以看出在各深度层上海及其邻近地区(即研究区域中间部分)基本能恢复正负速度的相

对变化,因此反演结果在该范围内可信。图5为不同深度上的P、S波速度扰动图(其中P波、S波扰动图中颜色比例尺单位均为%)。

不同深度的P波、S波速度扰动图显示,地壳浅部呈北西向展布特征比较明显;随着深度增加分布分散,速度差异不大;下地壳仍呈现北西方向展布,但西北、东南速度比较低。

利用近震层析成像计算图1中剖面1、2的P波速度随深度的等值线分布(图6、7)。从图6可以看出在深度16~20 km处宿迁到溧阳之间存在低速层。从图7中可以看出地壳深度约15~25 km之间出现下地壳界面存在局部隆起,这与该地区复杂的地质构造现象可能存在着一定的关系。

3 结论

从地质构造上说,江苏北部属于苏北—胶南地体,往南经过苏北断拗,进入扬子地台,浙江江—绍断裂以南属于华南地台^[9]。所研究的剖面主要经过

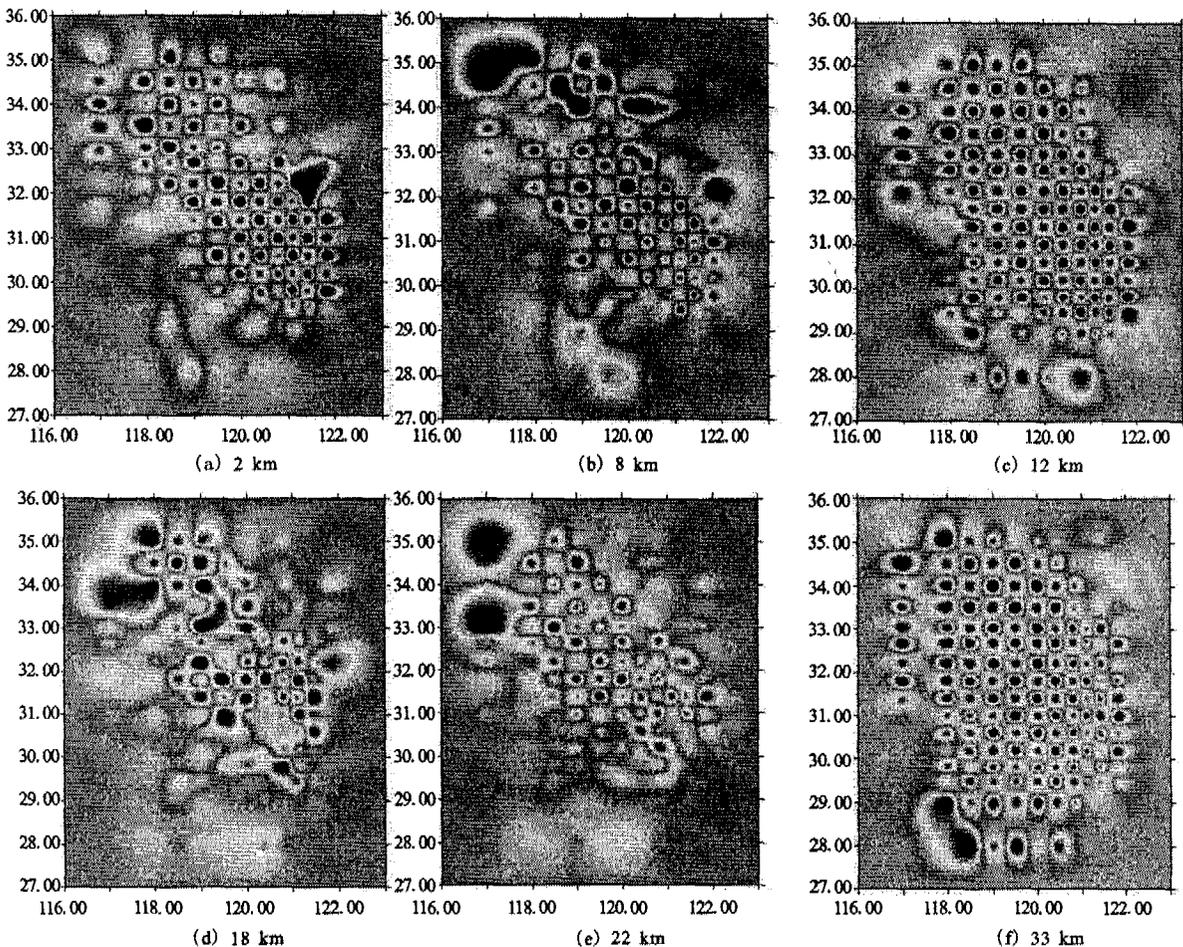


图3 不同深度上的P波检测板测试结果

Fig. 3 Test results of P wave checkboard in different depths.

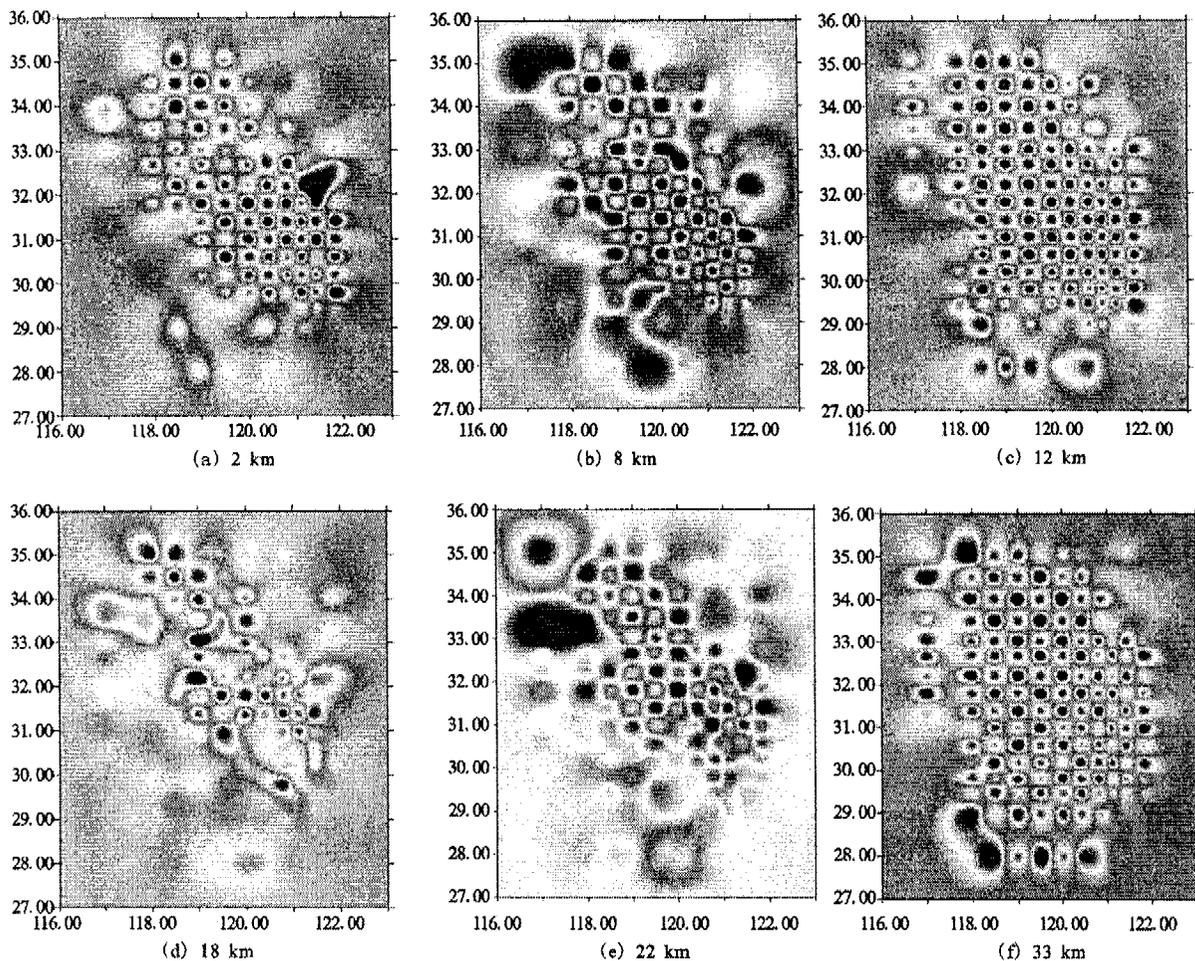


图 4 不同深度上的 S 波检测板测试结果

Fig. 4 Test results of S wave checkboard in different depths.

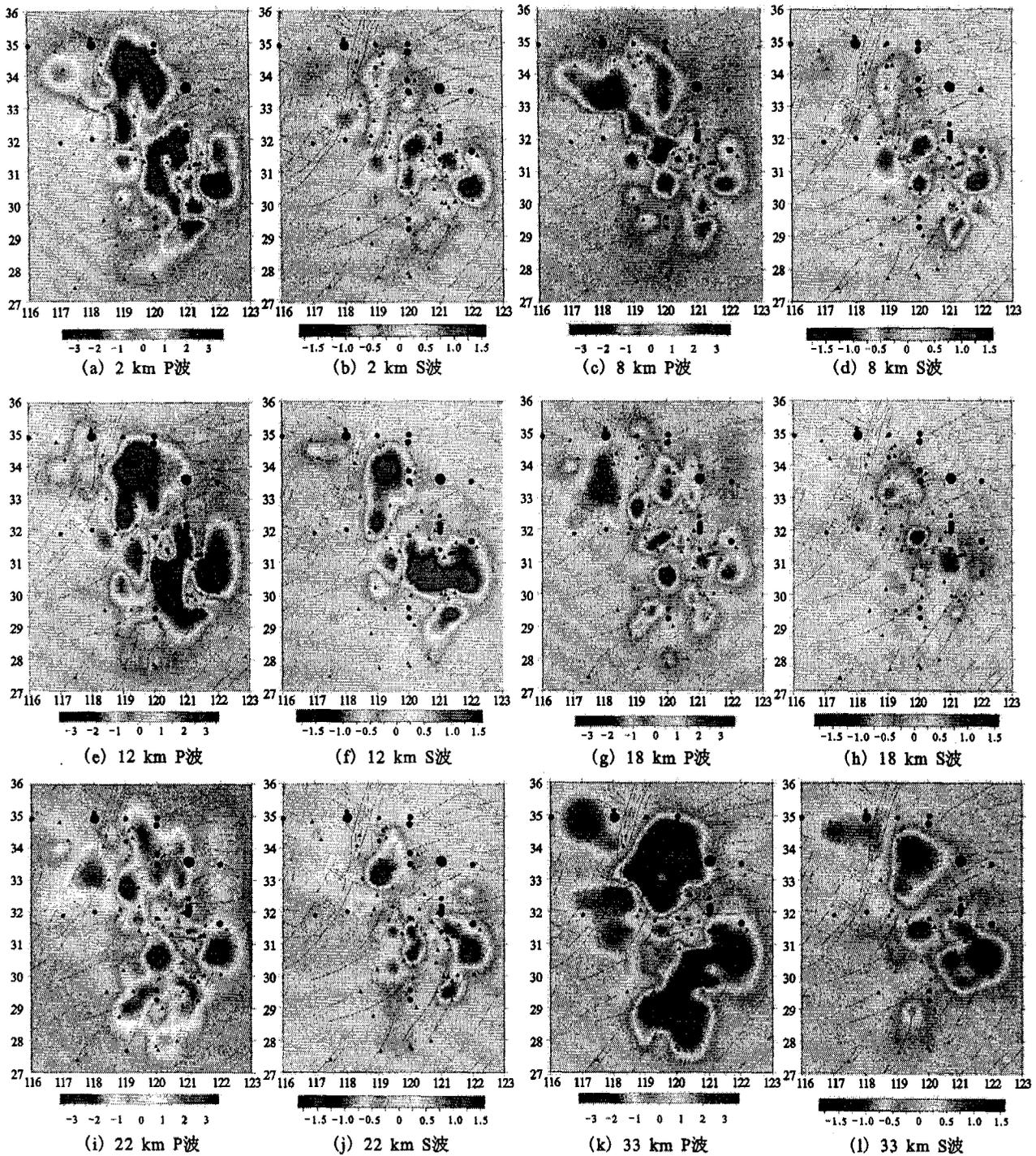
郟庐断裂、芜湖—南京断裂、茅山断裂、萧山—球川断裂、上虞—丽水断裂、镇海—温州断裂等几大断裂^[9]。其中郟庐断裂作为我国东部规模巨大的深大断裂,历史上多次发生强震。根据前人研究结果^[10-13],发现该断裂带两侧中、下部地壳结构差异十分明显。应用上海及其邻近地区地震台网所记录的大量高精度区域地震到时数据反演该地区详细的地壳三维 P、S 波速度结构模型,由该模型得到以下有关地壳结构和地震孕育的主要特征:

(1) 层析成像结果表明,上海及其邻近地区地壳呈不均一层状结构,莫霍面深度变化平缓,上地壳 P 波平均速度为 5.7~5.9 km/s,中地壳 P 波平均速度为 5.9~6.2 km/s,下地壳 P 波平均速度为 6.2~7.5 km/s,属大陆型结构。

(2) 上海及其邻近地区 NW 向断裂的活动性要强于其它方向的断裂,沿 NNW 向断裂地震较为丰富。NW 向断裂形成时间较晚,在追踪、改造、利用先前各构造体系张扭或扭裂结构面基础上,与喜山

期逐渐自成一體,具较强的新生特点,其中以太仓—奉贤断裂和南通—上海断裂稍具规模。前者斜贯上海,是上海地区活动时代最新的一条断裂,沿断裂发生有 1990 年的 4.9 级太仓地震;后者在研究区表现为复式地堑构成的断裂带,且东侧 2 条断层较西侧 2 条更为活动,最新活动时期为中更新世,沿断裂于 1615 年及 1624 年发生两次有弱破坏的 VI 度地震,2001 年还于南通东南长江边发生有 3.6 级地震^[14]。不同深度的 P 波、S 波速度扰动图显示,地壳速度结构呈现北西向展布,速度较低,说明该断裂带比较活跃。

(3) 层析成像结果发现,宿迁地区中下部地壳低速层比其他研究台站下方低速层较厚;中间由溧阳附近的茅山断裂分开;江苏地区地壳构造复杂^[15-16],特别是地壳内存在低速层,该地区的地震可能与深部构造背景有关,也可能与地壳构造的复杂程度有密切关系^[17],特别是地壳中的低速层及高导层的存在关系密切^[18]。



三角形为台站；圆圈为1990年至今的4级以上的地震；黑线为断层

图5 不同深度P、S波速度扰动分布图

Fig. 5 Tomographic images of P and S waves velocity perturbation in different depths.

[参考文献]

[1] 周国藩. 中下扬子地区的壳幔结构及其与地震相关性的研究[J]. 地壳变形与地震, 1994, 14(4): 75-79.
 [2] Zhao D, Hasegawa A, Horiuchi S. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan[J]. J. Geophys. Res., 1992, 97, 19909-19928.
 [3] Zhao D, Kanamori H, Wiens D. State of stress before and af-

ter the 1994 Northridge earthquakes [J]. Geophys. Res. Lett., 1997, 24, 519-522.
 [4] 黄金莉, 赵大鹏. 美国南加州地壳、上地幔三维P波速度成像—莫霍面起伏的影响[J]. 地震学报, 2003, 25(6): 563-573.
 [5] 黄金莉, 赵大鹏. 首都圈地区地壳三维P波速度细结构与强震孕育的深部构造环境[J]. 科学通报, 2005, 50(4): 348-355.
 [6] Um J, Thurber C. A fast algorithm for two-point seismic ray

[7] Paige C, Saunders M. LSQR: An Algorithm for sparse linear equations and sparse least squares[J]. ACM Trans. Math. Software, 1982, 8: 43-71.

[8] 姚虹, 滕吉文, 孙克忠, 等. 苏浙皖地区地壳结构的初步研究[J]. 西北地震学报, 1984, 6(2): 60-68.

[9] 陈胜早. 对中国东部苏、浙、皖区壳-幔结构的新认识[J]. 科学通报, 1987, 32: 1016-1020.

[10] 滕吉文, 姚虹, 孙克忠, 等. 中国东部马鞍山一带熟-启东地带地壳与上地幔结构和速度分布的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, 1985, 28(2): 156-168.

[11] 孙克忠, 滕吉文, 姚虹, 等. 江苏地区地壳结构的广义线性反演[J]. 地震研究, 1985, 8(2): 159-167.

[12] 郦逸根. 浙江深部构造地球物理表征[J]. 浙江地质, 2001, 17(1): 34-44.

[13] 彭聪, 高锐. 中国大陆及邻近海域岩石圈/软流圈结构横向变化研究[M]. 北京: 地震出版社, 2000. 97-98.

[14] 章振铨, 刘昌森, 王锋. 上海地区断裂活动性与地震关系初析[J]. 中国地震, 2004, 20(2): 143-151.

[15] 国家地震局《深部物探成果》编写组. 中国地壳上地幔地球物理探测成果[M]. 北京: 地震出版社, 1986. 328-361

[16] 田建明, 谢华章, 等. 江苏地区地震活动性图像的构造解释[J]. 地震地质, 1996, 18(3): 251-257.

[17] 江苏省地震局. 江苏地震志[M]. 北京: 地震出版社, 1987. 5-12

[18] 王大运, 张先康, 陈祺福, 等. 北京地区上地壳三维细结构层析成像[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 359-366.

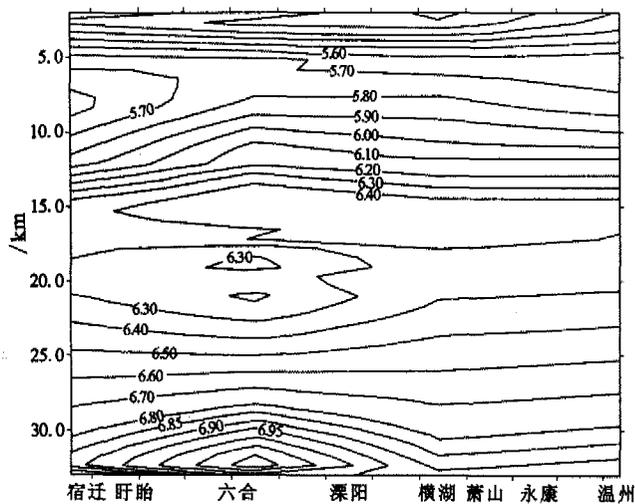


图6 剖面1的P波速度随深度的等值线分布图

Fig. 6 Distribution of P wave velocity contours with depth along the profile 1.

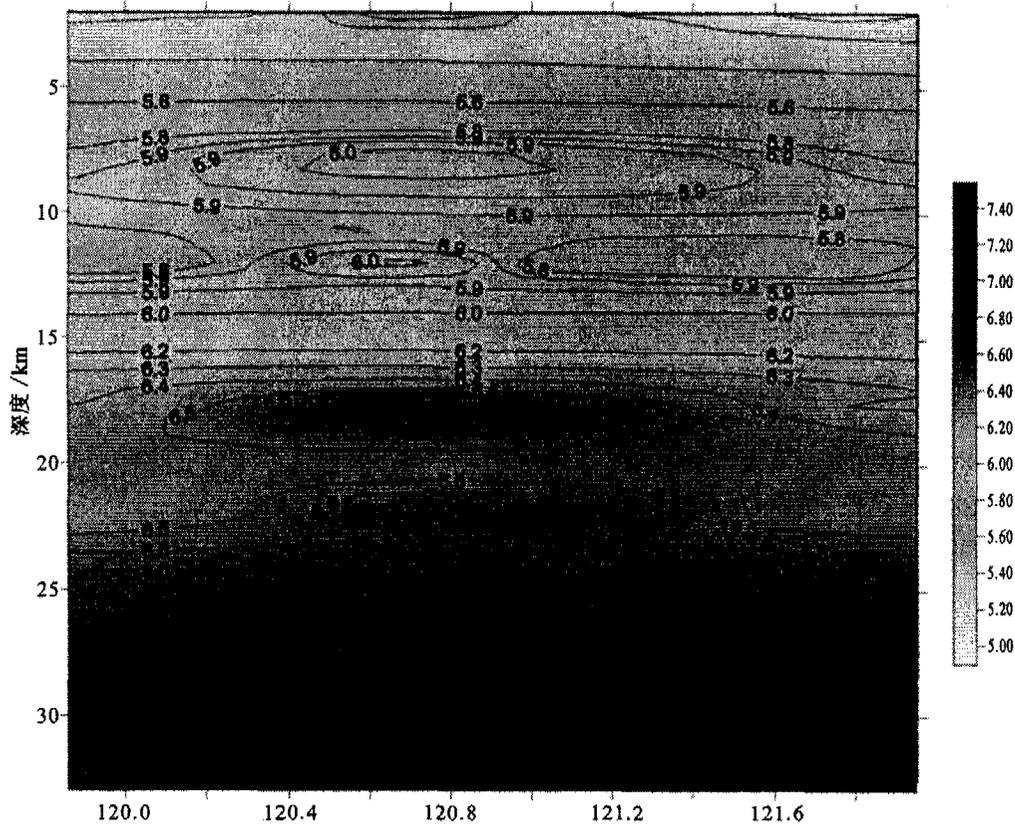


图7 剖面2的P波速度随深度的等值线分布图

Fig. 7 Distribution of P wave velocity contours with depth along the profile 2.