



## 江苏及邻区地壳上地幔结构研究

黄 耘<sup>1,2</sup>, 李清河<sup>2</sup>, 孙业君<sup>2</sup>, 金淑梅<sup>2</sup>

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

**摘要:**根据江苏及邻区大地构造单元和人工地震研究程度的不同,划分为下扬子地区、郟庐断裂带、大别山东段、苏鲁地块等地区,介绍了利用人工地震、天然地震层析成像及其它地球物理探测等方法对这一地区的深部构造研究结果。其中下扬子地区莫霍面的深度为 28~33 km,横向不均匀,由西向东逐渐减薄;大别—苏鲁地区地表超高压变质带地壳波速特征主要表现在上地壳顶部的高速层,其厚度一般小于 10 km;苏鲁地块地壳厚度约在 32~33 km 之间,明显高于周边地区;大别山地区沿造山带方向莫霍面变化平缓,地壳厚度 33 km 左右;横穿造山带方向起伏变化较大,莫霍面最深达 41 km 左右。天然层析成像研究范围大,分辨率较低。大别苏鲁地区人工地震测深工作较深入,但调查范围较小,主要在浅层,认识相对局部,有待于面上的大范围深部结构图像研究。

**关键词:**江苏及邻区;地壳上地幔结构;人工地震;天然地震层析成像

中图分类号: P313.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2006)04-0369-08

## Review of Study on the Crust and Upper Mantle Structure in Jiangsu Province and Its Adjacent Areas

HUANG Yun<sup>1,2</sup>, LI Qing-he<sup>2</sup>, SUN Ye-jun<sup>2</sup>, JIN Shu-mei<sup>2</sup>

(1. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China;

2. Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The research works on the crust and upper mantle structure in Jiangsu province and its adjacent areas, that is divided into the southeastern Yangzi block, the southern segment of Tancheng-Lujiang fault zone, the eastern segment of Dabie orogen and the Sulu UHPM block according to geotectonics and research level, are introduced based on the results of different research methods such as deep seismic sounding, earthquake travel time tomography and other geophysical survey. The main characteristics are summarized as following points. The depths of Moho is various from 28 km to 33 km beneath the southeastern Yangzi block with decreasing from west to east. It exists a high velocity layer in the top of crust of Dabie-Sulu UHPM zone with thickness less than 10 km. The thickness of crust in Sulu block is in 32~33 km, and is thicker than those in the surrounding area. For Dabie orogen, the depth of crust is about 33 km and changes gently along the direction of the orogen belt, but changes greatly across the belt with the greatest 41 km depth of Moho in some areas. The results of earthquake tomography commonly have low-resolution because of large size of research area. Many works of deep seismic sounding in Dabie-Sulu zone have been done but the work range is too small and survey layer is shallow, so

收稿日期: 2006-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(40374033); 地震联合基金(1040029)和江苏省科技发展项目(BS2003053)。

作者简介: 黄 耘(1964-), 女(汉族), 江苏兴化人, 副研究员, 主要从事地震活动性和地震波应用研究。

more works on larger area are needed to the deep structure of crust.

**Key words:** Jiangsu province and its adjacent areas; The crust and upper mantle structure; Deep seismic sounding; Earthquake tomography

## 0 引言

江苏及邻区地处中国东部,在大地构造位置上跨越华北地台、扬子地台和秦岭—大别褶皱带三大一级单元构造,地质构造非常复杂<sup>[1-4]</sup>(图1)。其主体地区位于扬子地台的东南角,故又称下扬子地区;南部的大别—舟山深大断裂将我国分为南北两类不同的构造地貌单元;研究区西部有切割岩石圈级的深大断裂郟庐断裂穿过该区;中东部是大陆边缘地区,发育有裂谷带与大型裂陷盆地苏北—南黄海盆地;西南和西北部为大别—苏鲁造山带,有关研究表明该造山带为扬子—华北陆块之间的陆—陆碰撞造山带<sup>[5-6]</sup>。自许志琴<sup>[7]</sup>于1987年在大别山发现榴辉岩中的柯石英以来,大别—苏鲁超高压变质带吸引了全球地学家的注意。由于该区出露的高压、超高压变质岩分布较广,而且类型齐全,因而成为世界上研究超高压变质岩的热点地区。2001年6月25日中国大陆科学深钻工程科钻一井在江苏省连云港市东海县开钻,2005年3月8日完钻,深达5 158 m。该深井钻探对进一步研究该区超高压变质作用和地球动力学有着十分重要的意义。

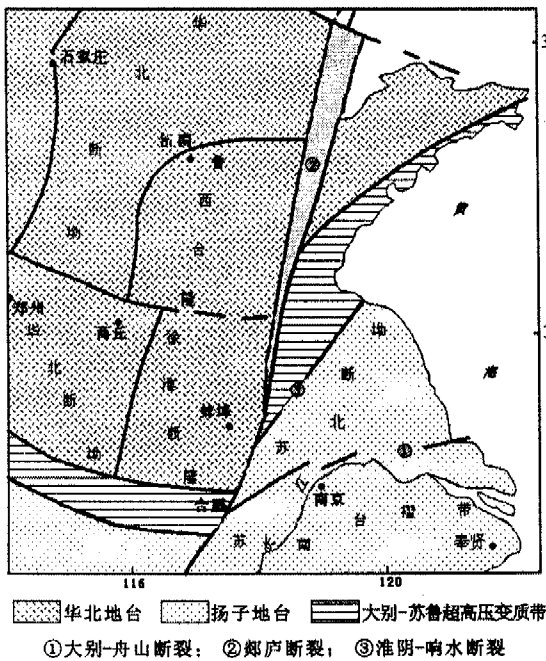


图1 江苏及邻区大地构造简图

Fig. 1 Tectonic map of Jiangsu province and its adjacent areas.

江苏及邻区深部构造研究以人工地震研究为主,研究区域不均匀。天然地震层析成像工作比较缺乏,其他深部地球物理研究程度不高。本文将按不同的研究方法和地区讨论江苏及邻区地壳上地幔结构研究现状。

## 1 江苏及邻区人工地震探测研究概况

### 1.1 下扬子地区地壳结构研究

中国地学断面(CGT)有2条断面经过江苏部分地区,分别是上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地学断面和江苏响水至内蒙古满都拉地学断面。图2为江苏及邻区人工地震测线分布示意图。

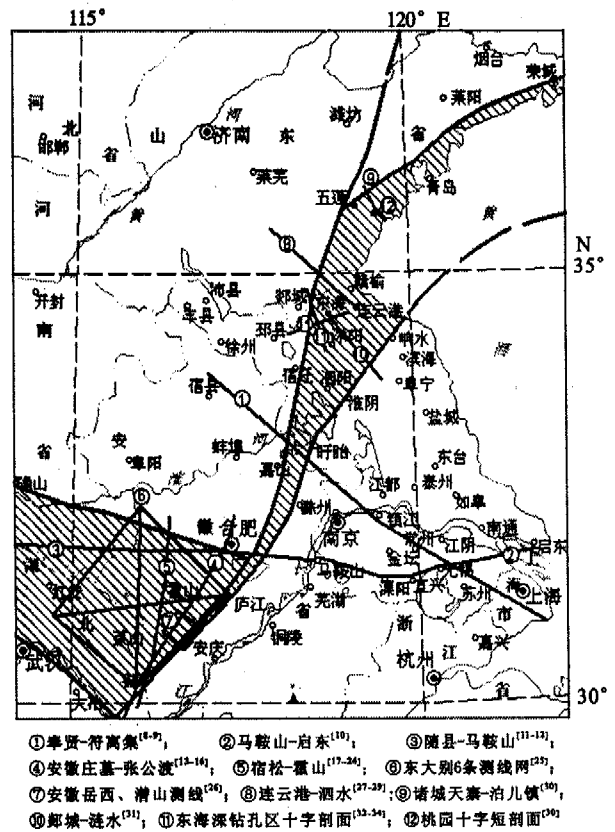


图2 江苏省及邻区大地构造和人工地震测线分布示意图

Fig. 2 Deep seismic sounding profiles in Jiangsu province and its adjacent areas.

上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地学断面的深地震测深中,奉贤—符离集折射剖面(简称HQ-13测线)经江苏地区,穿过郟庐断裂嘉山段进入华北,

全长 570 km<sup>[8-9,35-37]</sup>。江苏响水至内蒙古满都拉地学断面中, a 段由江苏响水至山东泗水<sup>[27]</sup>。刘昌铨等沿连云港—临沂—泗水开展了人工地震综合地球物理探测工作和研究, 获得了该区地壳速度结构<sup>[28-29]</sup>。滕吉文等<sup>[10]</sup>根据马鞍山、常熟两地井中组合爆炸激发地震波, 在马鞍山—常熟—启东一线布置深部探测测线, 进行地下结构研究。郑晔等<sup>[11]</sup>利用随县、马鞍山两处的矿山爆破和六安井中组合爆破, 在随县—马鞍山一线布设深地震测线, 对测线地带的地壳上地幔及郯庐断裂带深部结构进行研究。白志明<sup>[38]</sup>利用 HQ-13 的地震测深资料, 用有限差分法和射线反演方法, 对 HQ-13 线地壳、上地幔结构进行层析成像研究。

根据上述研究结果, 可以将下扬子地台区的地壳上地幔结构特征归纳如下:

(1) 下扬子地区地壳分为上、中、下三层结构, 各层与华北地台均有差异。上地壳底面一般埋深为 10~12 km, 个别地段(上海地区及郯庐断裂带)仅为 3~6 km 左右<sup>[9]</sup>; 上地壳底层速度分布较均匀, 在 5.90~6.00 km/s 左右, 局部高速异常可达 6.20 km/s<sup>[38]</sup>。中地壳底界面深度为 21.5~25 km<sup>[38]</sup>, 平均速度为 6.30 km/s<sup>[9]</sup>。下地壳的平均速度为 6.80 km/s<sup>[9]</sup>, 其厚度变化可分为三个区: 华北地台区厚约 10 km; 苏北凹陷一带为 8.0~8.7 km; 苏南至上海地区又加厚为 10.8~12.5 km。下地壳的厚度差异导致了中、上地壳的巨大变化, 因此形成了不同的大地构造分区<sup>[9]</sup>。

(2) 地壳由西向东逐渐减薄, 莫霍面从东到西逐渐加深。据张四维等<sup>[9]</sup>下扬子地区莫霍面的平均深度为 33 km, 在符离集、灵璧一带深 34 km, 向东逐渐抬升, 到盱眙、天长一带上升到 29.5 km, 镇江一带为 29.8 km, 无锡、苏州附近深达 33~35.5 km; 至昆山又上升为 31.5 km, 向上海又逐渐加深到 33 km。据滕吉文等<sup>[10]</sup>的研究, 马鞍山—启东地带的莫霍面从东到西逐渐加深, 在马鞍山附近地壳厚度为 32 km 左右, 常熟附近为 29 km 左右, 向东到启东附近约为 28 km。

(3) 中地壳中普遍存在明显的低速层, 马鞍山地区深度在 19 km 附近; 常熟附近深度在 16 km 附近; 常熟向东到启东附近变浅为 11 km<sup>[10]</sup>。

(4) 嘉山—响水断裂是一条大断裂。在中地壳, 嘉山—响水断裂两侧的差异已开始表现出来, 断裂切割到中、上地壳, 深成变质岩的结晶基底有断错<sup>[9]</sup>。白志明的成像结果分析认为, 嘉山—响水断

裂在下地壳都没有相应明确的速度或界面形态异常显示, 而盱眙南侧近垂直的洪泽—流均沟断裂切穿一系列反射界面, 延伸到下地壳甚至上地幔<sup>[38]</sup>。

(5) 郑晔等根据随县—启东人工地震测深资料研究结果<sup>[12]</sup>, 上地幔中有 76 km 和 100 km 的两个间断面。76 km 的界面应为地幔软流层的上界, 以下为一低速层, 地震波速度明显低于界面上方的速度值。岩石圈厚度为 76 km, 速度为 8.00 km/s。而 100 km 深度以下介质的层速度为 7.60 km/s, 为速度更低的低速层。地幔软流层及其分层结构与华北地区相似, 具有薄岩石层性质。

## 1.2 郯庐断裂带南段的深部构造认识

对郯庐断裂深部及其两侧的速度结构特征归纳如下:

(1) 郯庐断裂两侧地壳的结构和速度差异很大(图 3)。上地壳埋深为 10~12 km, 速度从地表的 2.30 km/s 渐变至 6.30 km/s。断裂东西两侧(不包括断裂下方)的速度横向变化不大。中地壳厚度大约为 12 km, 断裂带东西两侧深部结构有明显的差异: 断裂以西分三个速度层, 第二层为速度逆转层, 第三层内含有低速层; 断裂带以东的中地壳也分三层, 仅第三层含有低速层。下地壳厚度在断裂带以东明显变薄。在剖面西端为 10 km 左右, 而东端连云港附近为 6 km 左右。断裂西侧下地壳内深度 2.5~2.7 km 左右为低速层, 速度值为 6.50 km/s, 该低速层在断裂东侧的剖面范围内不很明显。下地壳内速度变化范围为 6.40~6.70 km/s。

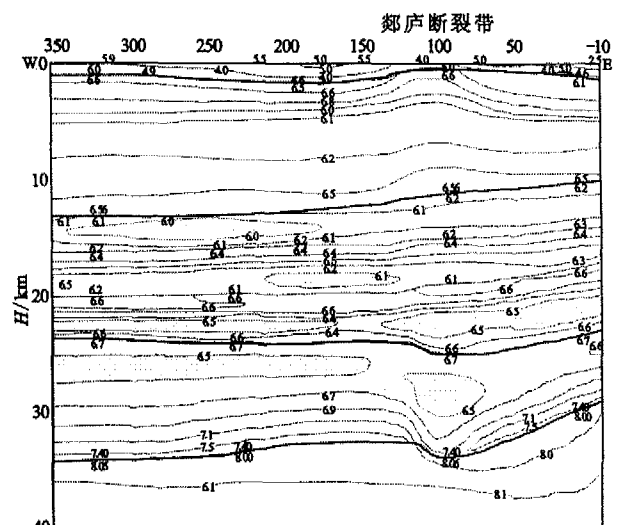


图 3 连云港—临沂—泗水二维地壳速度结构 (据文献<sup>[29]</sup>修改)

Fig. 3 2-D P-wave crustal velocity structure along Lianyungang—Linyi—Sishui.

(2) 郟庐断裂带内速度结构和莫霍面深度变化特征(图3):在深度为10~12 km以上的上地壳中断裂带内的速度值较其两侧高;中地壳断裂下方速度变化不明显;下地壳底部为强速度梯度层(壳幔过渡带),断裂下方的下地壳内存在6.50 km/s的低速异常区。断裂两侧莫霍界面深度有明显差异,西侧莫霍面缓慢西倾,深度逐渐增加为35~36 km。东侧莫霍面迅速向东升起,深度减薄至28~29 km<sup>[28-29]</sup>。张四维等<sup>[9]</sup>认为郟庐断裂在莫霍面上无明显落差。郑晔等认为<sup>[11]</sup>郟庐断裂带并非一条断裂,它应是由两条平行断裂组成的宽达数10 km的构造带。

(3) 郟庐断裂带切割深度:Wong等(1990)研究HQ-13线未偏移的叠加时间剖面,认为郟庐断裂的东断裂和西断裂都是切穿地壳的深断裂,郟西断裂产状近垂直,郟东断裂相对平缓。郟庐断裂的构造历史包括冲断和其后的走滑两个阶段。

### 1.3 大别山—苏鲁超高压变质带的深部构造研究

越来越多的研究显示<sup>[5-6,39-47]</sup>,大别山—苏鲁超高压变质带分隔了华北地台和扬子地台两个陆块,它是两个陆块之间的碰撞造山带。以下按东大别和苏鲁两个地区分别叙述。

#### 1.3.1 东大别超高压变质带

东大别山地区测线密集。王椿镛等1984年完成一条近南北向穿过大别山地区的地震测深剖面,对该区地下深部结构进行研究<sup>[13-16]</sup>;杨文采等为中国大陆科学钻探选址,在苏鲁大别地区进行大规模地球物理调查<sup>[17-24,48-50]</sup>;史大年等1997年作为国际大陆科学钻探计划研究的一部分,对大别山地区的超高压变质带进行人工探测和研究<sup>[26]</sup>。刘福田等2001年作为国家科技部973项目的一部分,在大别山地区进行人工地震研究,获得6条二维地壳速度结构剖面<sup>[25]</sup>。

根据上述研究结果,可以将东大别地区地壳上地幔结构特征归纳如下:

(1) 东大别地区速度结构在纵向和横向上均存在较为强烈的非均匀性。水吼—五河断裂可能是大别山带内部的主要构造分界线,南大别和北大别之间至少在上地壳已有明显差异。在超高压带下方3 km深度以下为6.20~6.30 km/s的相对高速异常区,而北大别仍保持正常的速度。在超高压带下方约7 km深度上存在强速度间断面(图4),而北大别这一间断面不很明显<sup>[13-14]</sup>。

(2) 东大别地区莫霍面形态复杂,沿造山带方

向莫霍面变化平缓,地壳厚度33 km左右<sup>[25]</sup>;横穿造山带方向起伏变化较大。在中心部位(晓天—磨子潭断裂一线下方)莫霍面最深,达41 km左右,并出现垂向错断,断距约4 km。向南、北两侧地壳厚度减薄至32~34 km<sup>[25]</sup>。王椿镛等的结果也表明,地壳厚度从扬子地台下方的35.5 km增加到晓天下方的41.5 km。晓天往北的地壳厚度从37.0 km减少到35.0 km(图4)。莫霍界面下方速度在7.90 km/s和8.10 km/s之间变化<sup>[13]</sup>。莫霍面错断现象及错断的位置刘福田和王椿镛的结果一致。

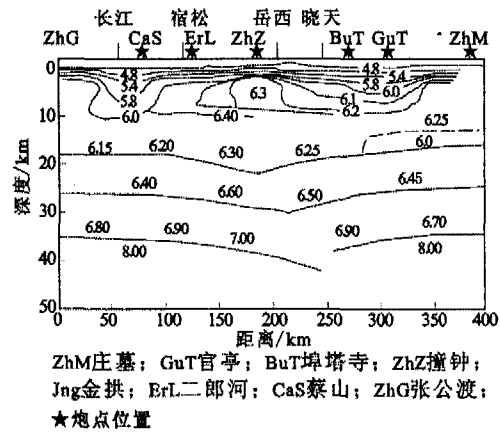


图4 大别造山带二维P波地壳速度结构 (据王椿镛)

Fig. 4 2-D P-wave crustal velocity structure in Dabie Belt.

(3) 扬子地台也是简单的3层地壳模型。长江作为前陆褶皱带与扬子地台的边界在模型中有明显的表现,其中低速沉积层达5 km厚。华北地台为3层地壳模型,合肥盆地具有高速的基底,而且上地壳底部速度为6.00 km/s的低速层。

(4) 杨文采等的深反射剖面显示<sup>[17]</sup>,横中—水吼下方有5个反射体与波速界面有较好的对应关系。在深度7 km左右的反射体为上地壳波速大于6.20 km/s的高速体的底面,也是电阻率大于5 000 Ωm的高阻体的底面,反映了超高压变质岩片的底界。15 km深处是波速小于6.20 km/s的正常波速层的底界,也是电阻率小于300 Ωm的中阻层的底界,反映的是上地壳的底界。在23 km左右为波速由6.20 km/s升到6.55 km/s的界面。在深度30 km左右,为波速从6.55 km/s上升到6.80 km/s的界面,可能是下地壳基性麻粒岩的顶界面,第5个反射体深度在40 km左右,顶部对应折射的Moho面。

#### 1.3.2 苏鲁超高压变质带

近年来的研究发现,苏鲁超高压变质带是世界上研究陆-陆碰撞俯冲和壳幔作用的最佳地质场所之一,是三叠纪中朝与扬子克拉通相互碰撞形成的。为科学深钻工程选址,1998年在江苏省东海县南部的超高压变质带上布置了深反射地震剖面二维测网,进行了地震与大地电磁调查<sup>[30-31]</sup>;1999年在这里完成了一口深度为1 032 m的预先导孔(CCSD-PP2孔)<sup>[20]</sup>;2001年8月实施科学钻探先导孔(CCSDP),同年完成了孔区三维地震与VSP测量,广角折射地震十字剖面<sup>[32-33]</sup>。根据上述研究结果,可以将苏鲁超高压变质带地区地壳上地幔结构特征归纳如下:

(1) 石门地区上地壳波速相对中地壳高,深度为1~5 km,主要为含榴辉岩和大理岩的片麻岩,波速6.40 km/s;5~7 km存在高速层,波速为6.80 km/s,为含大量柯石英榴辉岩的超高压变质岩片;中地壳12~20 km,波速为6.70 km/s;下地壳20~34 km以麻粒岩为主,其底部波速升高为7.60 km/s。在Moho面以下波速由8.20 km/s增至8.40 km/s;在48 km以下波速由8.4 km/s又降到8.00 km/s左右,有可能反映出现代地幔的局部熔融<sup>[30]</sup>。

(2) 东海县南部地区上地壳厚度在超高压变质岩片下方为8~11 km,最大可达13 km左右;中地壳的深度10~22 km之间,波速为6.40 km/s,为正常的中地壳波速;下地壳深度20~32 km之间,波速为6.60 km/s,充满了缓倾斜的强反射体,说明中下地壳属于典型的拉张型地壳波速结构与地震组构<sup>[19]</sup>;底部对应莫霍面,深度为30~33 km。姜枚等采用二维空间变量分离速度成像方法,获得了测区地震浅部的地壳速度精细结构<sup>[32]</sup>,结果和杨文采结果<sup>[19]</sup>一致。钱辉等利用上述十字剖面地震仪连续5个月的记录,对东海大陆钻址区进行层析成像研究结果表明,郯庐断裂和嘉山-响水断裂均为高低速体变化的界线<sup>[34]</sup>。

(3) 徐纪人等利用现有的苏鲁大别造山带及其邻区的三维P波速度资料分析认为:黄海海域及大陆架区域的地壳厚度较薄,大体都在29 km以下;苏鲁地块地壳厚度约在32~33 km之间;大别造山带特别是大别超高压变质带的莫霍面下凹,深度为35~38 km,比其周围地区深3~4 km<sup>[51]</sup>。大别造山带及其高压、超高压变质带的上地壳(约0~10 km)P波速度为明显高速,中地壳明显增厚,最大厚度超过20 km<sup>[51]</sup>。郯庐断裂带上地壳呈现为3.50

~4.50 km/s的明显低速P波速度结构,低速层比其周围厚,深度约达10 km,并呈下凹形态特征。中地壳明显减薄,不到10 km厚;下地壳增厚且向上凸起。沿郯庐断裂带莫霍面之下,上地幔45 km深处,出现一个以7.60 km/s的低速体为中心的构造区域,该低速体向下延伸到约62 km深处,并有继续向下延伸趋势<sup>[51]</sup>。赵志新等结果<sup>[52]</sup>显示6.30 km/s以上的高速异常区集中分布在苏鲁超高压变质带的中部和大别超高压变质带的南部。

## 2 江苏及邻区天然地震层析成像研究概况

江苏及邻区天然地震的层析成像研究相对比较缺乏,除徐佩芬、刘建华的工作区域涉及本研究区较多外,其他的研究对本研究区的工作和研究较少。刘建华等<sup>[53]</sup>利用秦岭-大别山带及邻区1980—1990年间310个地震台站P波到时资料,研究了29°~38.7°N,102°~119°E区域的地壳上地幔三维速度图像;徐佩芬等<sup>[54]</sup>选用1981—1996年间235个台站的P波到时数据和670个远震P波到时数据,对28°~39°N,112°~124°E区域进行地震层析成像研究;彭艳菊等<sup>[55]</sup>收集了33个数字地震台站记录的面波资料,利用多重滤波技术提取了Love波群速度频散曲线,采取Occam反演方法得出中国大陆(5°~55°N,68°~150°E)420 km深度内的地壳上地幔三维速度结构;郑月军等<sup>[56]</sup>利用31个数字地震台记录的面波资料,采用混合路径频散的网格反演方法(Occam方法),对中国东部海域瑞利波群速度横向不均匀分布进行了初步研究。朱介寿等<sup>[57]</sup>根据欧亚大陆及西太平洋地区58个数字地震台站约1 200个长周期波形记录,对东亚及西太平洋边缘海较大地区(20°S~60°N,60°~60°E)的地壳上地幔进行了三维S波速度成像研究;徐果明等<sup>[58]</sup>利用中国大陆东部21个台站的43条瑞利面波记录的双台资料,反演得到地壳上地幔的三维横波波速图像,进而得到中国东部地壳上地幔的S波速度结构;朱良保等<sup>[59]</sup>利用Rayleigh波群速度资料,反演得到中国大陆及其临近海域的(10°~55°N,70°~145°E,)15~120 s周期的群速度分布图像;李红谊等<sup>[60]</sup>利用中国东部35个数字地震台记录的面波资料,对中国大陆东部及海域地壳上地幔结构研究。

利用天然地震层析成像研究江苏及邻区深部结构的主要成果有:

(1) 秦岭-大别造山带及邻区地壳上地幔存在

明显的横向不均匀性,直至 110 km 深度处依然明显,由东往西地壳呈现逐渐加厚的趋势。地壳上部的速度图像与地表地质构造密切相关:造山带隆起区显著高速,盆地及拗陷区明显低速<sup>[53]</sup>。

(2) 大别造山带 15~25 km 深度内出现了速度 5.9~6.0 km/s 左右的低速带,与大地电磁测深结果中的低阻高导层相对应。大致以霍山—岳西—英山—黄石一线为界,其西部莫霍面深于 40 km,其东部则小于或接近 40 km。苏鲁造山带的莫霍面浅于 40 km。南大别和北大别构造单元之下有残留山根,但莫霍面的形态总体起伏不大<sup>[54]</sup>。

(3) 在 40 km 以下的上部地幔中,沿造山带走向发育了高速条带,随深度增加,高速条带的平面展布位置向北平移。华北地块岩石圈厚度小于 120 km;扬子地块岩石圈厚度大于 120 km<sup>[54]</sup>。

(4) 以东经 110°E 为界,以西主要是印度板块与欧亚板块碰撞引起的岩石圈汇聚增厚区,东部则主要是由于软流圈上涌(地幔热物质上升)引起的岩石圈拉张减薄区<sup>[57]</sup>。

### 3 讨论

(1) 江苏及邻区人工地震研究成果十分丰富,但人工地震研究的区域极不均匀。大别—苏鲁地区做了大量的人工地震测深工作,垂直反射、宽角反射和折射深地震测深,分辨率较高,但由于工作仅限于一条剖面的二维结果,调查范围较小,认识仍只能是局部的,对涉及到重大地质构造单元边界的区域,仅从一条剖面是很难认识的。扬子块体内的人工地震研究较少,共有 2 条剖面穿过。江苏中部地区的苏北拗陷地区几乎没有做过深部地震探测研究。可见江苏大部分地区仍没有做过深入的深部工作,需要有面上的大范围深部结构图像研究。

(2) 江苏及邻区的天然地震层析成像工作比较缺乏。除徐佩芬等和刘建华等的工作范围相对较小,研究范围包括了江苏的部分地区,其他的天然地震层析成像的研究范围都非常大。刘建华等研究范围是 102°~118°E, 29°~39°N, 反演网格多为 1°×1°或 1°×0.5°,仅有少量 0.5°×0.5°,其研究范围仅包括江苏的部分地区。徐佩芬的反演采用均匀网格,网格为 0.5°×0.5°,分辨率不够高,其参与反演的地震没有重新定位,对反演结果定会有较大影响。另外有一些层析成像的研究范围相当大,有些研究包括了整个中国和东亚地区,虽然涉及到本研究区,但分辨率受到影响,将这些地震层析成像研究结果

用于实际尚存在很大距离。其结果与人工地震剖面结果相比,两者存在较大差异。

(3) 由于受到地理位置的限制,江苏陆地以东的南黄海海域研究程度很差,深部结构研究基本上是空白。有些面波反演虽然包括了黄海海域,但范围太大且受到方法的限制,分辨率较低。

(4) 嘉山—响水断裂作为中朝断块与扬子断块的分界断裂,其深部地球物理研究程度太低;由于郯庐断裂和超高压变质带仅有局部地区开展了研究,因此对构造带、重大构造单元边界、板块边界的深部结构总体特征缺乏更详细的研究和全面了解。

(5) 江苏陆地及南黄海海域中强震较频繁,但对发震的深部环境与孕震条件研究程度不够,特别是南黄海海域地震的深部研究程度更低。

自 20 世纪 70 年代以来,江苏及邻区建设了密集的地震观测台站,积累了丰富的地震近震和远震震相资料,利用这些资料,在对地震重新精确定位的基础上,选择更合适的方法及方案,对江苏及邻区地壳上地幔三维结构进行研究,获得大范围深部结构图像研究,进而研究该区大地震的深部孕震环境和动力学模型有十分重要的意义。

### [参考文献]

- [1] 张文佑,李阴槐,张弛,等. 中国及邻区海陆大地构造[M]. 北京:科学出版社,1986. 267—278.
- [2] 任纪舜,姜春发,张正坤,等. 中国大地构造及演化(1:400 万中国大地构造图简要说明)[M]. 北京:科学出版社,1980.
- [3] 江苏省地质矿产局. 江苏省大地构造图说明书[M]. 1998.
- [4] 徐嘉炜. 郯庐断裂带的平移运动及其地质意义[A]. 见:国际交流地质学术论文集(为 21 届国际地质大会撰写),第 1 册构造地质、地质力学[C]. 北京:地质出版社,1980.
- [5] 王清晨,孙枢,李继亮,等. 秦岭的大地构造演化[J]. 地质科学, 1989, (2): 129—142.
- [6] Okay A I, Senger A M C, Satn M. Tectonics of an ultrahigh—pressure metamorphic terrane, the Dabie Shan/Tongbai Shan orogen, China[J]. Tectonics, 1993, 12(6): 1320—1334.
- [7] Xu Zhiqin. Etude tectonique et microtectinique de la Chaîne paleozoïque de Qinlings[A]. in: Presente a L' Universite des Sciences et Techninues du Lanauedoc Pour obtenir le dinlome de Doctorat[C]. 1987. 93—107.
- [8] 国家地震局地学断面编委会. 上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地学剖面说明书[M]. 北京:地震出版社,1992.
- [9] 张四维,张锁喜,唐荣余,等. 下扬子地区符离集—奉贤地震测深资料解释[J]. 地球物理学报, 1988, 31(6): 637—648.
- [10] 腾吉文,孙克忠,熊绍柏,等. 中国东部马鞍山—常熟—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—169.
- [11] 郑晔,腾吉文. 随县—马鞍山地带地壳与上地幔结构及郯庐构

- 造带南段的某些特征[J]. 地球物理学报, 1989, 32(6): 648—659.
- [12] 郑晔, 滕吉文. 中国东部随县—启东地带上地幔结构研究[J]. 地球物理学报, 1994, 15(1): 553—558.
- [13] 王椿镛, 张先康, 陈步云, 等. 大别造山带的地壳结构研究[J]. 中国科学(D辑), 1997, 27(3): 221—226.
- [14] 王椿镛, 张先康, 丁志峰, 等. 大别造山带上部地壳结构的有限差分层析成像[J]. 地球物理学报, 1997, 40(4): 495—502.
- [15] 王椿镛, 丁志峰, 宋建立, 等. 大别造山带地壳 S 波速度结构[J]. 地球物理学报, 1997, 40(3): 337—346.
- [16] 王椿镛, 丁志峰, 陈学波, 等. 大别造山带地壳 S 波分裂和介质各向异性[J]. 科学通报, 1997, 42(23): 2539—2542.
- [17] 杨文采. 东大别超高压变质带的深部构造[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(2): 183—192.
- [18] 杨文采, 方慧, 程振炎, 等. 苏鲁超高压变质带北部地球物理调查(2)—非地震方法[J]. 地球物理学报, 1999, 42(4): 508—519.
- [19] 杨文采, 杨午阳, 金振民, 等. 苏鲁超高压变质带岩石圈的地震组构[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(4): 307—319.
- [20] 杨文采, 张春贺, 朱光明, 等. 标定大陆科学钻探孔区地震反射体[J]. 地球物理学报, 2002, 45(3): 370—383.
- [21] 杨文采, 余长青. 根据地球物理资料分析大别山—苏鲁超高压变质带演化的运动学与动力学[J]. 地球物理学报, 2001, 44(3): 346—358.
- [22] 杨文采. 大陆科学钻探与中国科学深钻工程[J]. 石油地球物理物探, 2002, 37(2): 197—200.
- [23] 杨文采, 程振炎, 张春贺, 等. 中国科学深钻选址地球物理调查与大别—苏鲁岩石圈[J]. 地球学报, 2003, 24(5): 391—404.
- [24] 杨文采, 杨午阳, 程振炎, 等. 中国大陆科学钻探孔区三维地震资料的初步解释[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 127—138.
- [25] 刘福田, 徐佩芬, 刘劲松, 等. 大陆深俯冲带的地壳速度结构—东大别造山带深地震宽角反射/折射研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(3): 366—372.
- [26] 史大年, 姜枚, 彭聪, 等. 大别造山带东部地壳结构的层析成像及广角反射的地震学研究[J]. 地震学报, 1998, 21(4): 403—410.
- [27] 国家地震局地学断面编委会. 江苏响水至内蒙古满都拉地学剖面说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [28] 刘昌铨, 祝治平, 李捍东, 等. 连云港—临沂—泗水测深剖面及临沂 8.5 级地震深部构造背景[J]. 地震, 1983, (3): 11—17.
- [29] 刘昌铨, 刘光夏, 杜官恒, 等. 郯庐古断裂中断地壳结构的初步研究——二维力学射线追踪方法的解释结果[J]. 华北地震科学, 1987, 5(2): 1—11.
- [30] 杨文采, 程振炎, 陈国九, 等. 苏鲁超高压变质带北部地球物理调查(1)—深发射地震[J]. 地球物理学报, 1999, 42(1): 41—52.
- [31] 杨文采, 胡振远, 程振炎, 等. 郯城—涟水综合地球物理剖面[J]. 地球物理学报, 1999, 42(2): 206—217.
- [32] 姜枚, 王友学, 宿和平. 宽频地震方法技术在地震探测工作中的应用[J]. 地质通报, 2003, 22(7): 536—539.
- [33] 王有学, 姜枚, 韩国华, 等. 中国大陆科学钻探场址区的地壳速度结构特征[J]. 地球科学, 2004, 29(6): 667—673.
- [34] 钱辉, 宿和平, 姜枚, 等. 江苏东海大陆钻址区层析成像[J]. 地质学报, 2004, 78(1): 139—144.
- [35] 陈沪生, 张永鸿, 徐师文, 等. 下扬子及邻区岩石圈结构构造特征与油气资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [36] 陈沪生. 下扬子地区 HQ—13 线的综合地球物理调查及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 1988, (3): 211—222.
- [37] 陈沪生, 等. 中国东部灵璧—奉贤(HQ—13)地学断面(说明书)[M]. 地质出版社, 1993.
- [38] 白志明. 深地震测深剖面的层析成像研究及其应用[D]. 中国地震局地球物理研究所. 2002.
- [39] Wang X, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogites from the Dabie mountains in central China[J]. *Geology*, 1989, 17: 1085—1088.
- [40] Xu S, Okay A I, et al. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting[J]. *Science*, 1992, 256: 80—82.
- [41] Cong B, Zhai M, Carswell D A, et al. Petrogenesis of the ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabiesshan, central China[J]. *European J. Mineralogy*, 1995, 7: 119—138.
- [42] Ye Kai, Hirajima T, Ishiwatari A, et al. The discovery of intergranular coesite in eclogite of Yangkou, Qingdao and its significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(15): 1407—1408.
- [43] Coleman P G, Wang X. Overview of geology and tectonics of UHPM[A]. in: Coleman R G, Wang X, eds. *Ultrahigh Pressure Metamorphism*[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 1—32.
- [44] 徐树刚, 江利来, 刘贻灿, 等. 大别山区(安徽部分)的构造格局和演化过程[J]. 地质学报, 1992, 66: 1—13.
- [45] 从柏林, 王清晨. 中国超高压变质岩研究评述[J]. 科学通报, 1994, 39(24): 2214—2218.
- [46] Okay A I, Sengor A M C. Evidence for intracontinental thrust-related exhumation of the ultra-high pressure rocks in China[J]. *Geology*, 1992, 20: 411—414.
- [47] Liou J G, Wang Q, Zhang R Y, et al. Ultrahigh-P metamorphic rocks and their associated lithologies from the Dabie Mountains, central China: a field trip guide to the 3rd international eclogite field symposium[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(Sup.): 1—41.
- [48] 杨文采. 大别苏鲁地区层状地幔反射体及解释[J]. 地球物理学报, 2003, 46(2): 191—199.
- [49] Yang Wencai. Crustal structure and development of Sulu UHPM Terrane in East-Central China[J]. *Episodes*, 1997, 20(2): 100—104.
- [50] Yang Wencai. Analysis of deep intracontinental subduction[J]. *Episodes*, 2000, 23(1): 20—24.
- [51] 徐纪人, 赵志新, 等. 苏鲁造山带区域地壳山根结构特征[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 149—156.
- [52] 赵志新, 徐纪人, 许志琴, 等. 上地幔三维 S 波速度结构与大别苏鲁超高压变质带俯冲折返机制探讨[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 157—164.

- [53] 刘建华,刘福田,孙若昧,等. 秦岭—大别山带及其南北缘地震层析成像[J]. 地球物理学报, 1995, 38(1): 46—54.
- [54] 徐佩芬,刘福田,王清晨,等. 大别—苏鲁碰撞造山带地震层析成像研究——岩石圈三维速度结构[J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 377—385.
- [55] 彭艳菊,苏伟,郑月军,等. 中国大陆及海域 Love 波层析成像[J]. 地球物理学报, 2002, 45(6): 792—801.
- [56] 郑月军,黄忠贤,刘福田,等. 中国东部海域地壳—上地幔瑞利波速度结构研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 480—487.
- [57] 朱介寿,曹家敏,蔡学林,等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨面波层析成像[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5): 647—663.
- [58] 徐果明,李光品,王善恩,等. 用瑞利面波资料反演中国大陆东部地壳上地幔横波速度的三维结构[J]. 地球物理学报, 2000, 43(3): 366—376.
- [59] 朱良保,许庆,陈晓非. 中国大陆及邻近海域的 Rayleigh 波群速度分布[J]. 地球物理学报, 2002, 45(4): 475—482.
- [60] 李红谊,刘福田,孙若昧,等. 大陆东部及海域地壳—上地幔结构研究[J]. 地震学报, 2001, 23(5): 472—479.

\*\*\*\*\*  
(上接 368 页)

- [53] J Neev, F R Yeatts. Electrokinetic effects in fluid-saturated poroelastic media[J]. Physical Review B, 1989, 40: 9135—9141.
- [54] M A Biot. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, I Low frequency range[J]. J. Acoust Soc. Am., 1956, 28: 168—178.
- [55] S R Pride. Governing equation for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media[J]. Physical Review(B), 1994, 50: 15678—15696.
- [56] 傅承义. 地表的本质对地震勘测的几种影响[J]. 中国科学. 1951, 2(3): 271—281.
- [57] 韩其玉,刘仲一,王永刚. 孔隙介质震电方程[J]. 石油物探, 1997, 36(增刊): 14—19.
- [58] 胡恒山,刘家琪,王洪滨,等. 对波达波夫和 Pride 震电波方程组的对比分析[J]. 地球物理学报, 2003, 46(1): 107—112.
- [59] 朱涛,赵和云. 孕震过程中冲流点位地电异常的理论研究[J]. 地震学报, 2000, 23(4): 398—406.
- [60] 刘洪. 震电效应研究在资源勘探中的应用前景[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 211—217.