

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

江苏东海大陆钻址区层析成像

钱辉¹⁾ 宿和平¹⁾ 姜枚¹⁾ 薛光琦¹⁾ 刘文²⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 2) 国土资源部 562 综合研究所, 河北燕郊, 065201

内容提要 苏鲁大别造山带是出露榴辉岩典型的超高压变质带, 大陆科学钻选择东海县榴辉岩大片覆盖区作为址区, 对揭示碰撞造山和后期变形及折返等动力学过程有重要意义。但该地区缺少深部地质资料和数据, 层析成像作为深部速度扰动分析的主要手段之一, 可以作为这个地区的深部探测的先导工作。以钻址为中心布置了 N340W 和 N70E 的十字测线。层析反演结果第 3 层与重力异常变化一致, 和 Moho 面变化有关, 高速体和高重力都在中心出现, 而郯庐断裂和嘉山—响水断裂均为高低速体变化的界线。NS 剖面垂直于构造走向可分为三个部分, 可能分别代表扬子板块、苏鲁地体和华北板块及它们之间界线的特征。南部断裂产状较陡, 在其北侧隐约有不连续倾斜的高速体, 北部断裂的产状比较一致的北倾, 受郯庐断裂控制明显。200 km 深度以上的高速体与低速体发生突变的地带, 分别处于 30 km、80 km、130 km 的深度上, 相当于 Moho 面、岩石圈、软流圈的大致深度。这种格局反映了苏鲁地区在断裂控制下岩石圈活动的特征。

关键词 江苏东海 大陆科学钻 层析成像 超高压变质带

苏鲁造山带作为中国东部两大板块的会聚边缘, 是全球典型的超高压变质带, 同时经历了地壳俯冲到地幔又折返的特殊过程, 引起国内外众多学者的极大关注。大陆科学钻探计划将从钻孔中获取全部岩心及液、气态样品及原位测井数据, 校正地球物理对深部组成与结构的遥测结果, 调查超高压变质带形成和折返机制, 研究中国南、北两大板块会聚边缘的地壳行为、壳幔作用以及有关的成矿作用。这也使中国东海的深部构造研究倍受重视, 而目前深部组成与结构仅有重磁结果和相应的地质推断。尽管已经作过许多地震探测, 但基本是地壳结构的尺度, 关于岩石圈的研究结果尚不多。天然地震探测岩石圈上地幔结构将有助于对超高压变质带的生成和演变的研究, 利用天然地震的走时和震相变化的层析成像方法可以提供大尺度的速度扰动资料, 得到主要构造单元的分布图象, 通过研究与超高压变质带有关的高速体在不同深度上的分布特征来揭示本区的地壳上地幔结构。

1 台站和数据

2000 年 5~10 月, 利用法国生产的 50 余台

Hathor 和 Titan 地震仪, 使用国产的 2Hz 和 1Hz 的三分量检波器, 以江苏东海县大陆科学钻探钻址偏西 1 km 为中心, 布置了方位角 NW340°和 NE70°的十字交叉剖面, 南北线从江苏淮安县大运河经沭阳、东海经山东临沭、临沂至费县方城的沂蒙山脚下; 东西线西起新沂骆马湖经东海至连云港花果山地震台, 同时又在山东日照经五莲至大关布置了一条 NW320°与南北线基本平行的辅助台站。上述剖面经过的主要构造单元有下扬子板块、苏鲁地体和华北板块(杨文采等, 2001)(图 1)。其中研究区的苏鲁地体由南向北有蓝片岩带, 蓝晶石带, 榴辉岩超高压变质带, 中生代前陆盆地和花岗岩带, 西侧受郯庐断裂带控制(张泽明等, 1999; 范桃园等, 2001; 徐惠芬等, 2001; 于津海等, 2001)。

十字剖面台站间距约 10~15 km, 在十字剖面中心地带缩小到 3~5 km。台站记录采用更换硬盘方式, 采样率 16~32 ms, 放大倍数 $16 \times 2 \sim 64 \times 2$, 视噪音情况而定, 采用 GPS 定时系统, 6 h 进行一次时间同步。定期视察台站更换硬盘, 确保台站处于正常工作状态, 及时回放数据, 同时与连云港地震台密切联系, 取得地方震和远震强震的震源参数,

注: 本文为中国地质调查局大陆科学钻探项目所属课题(编号 CCSD2000-02-01)的研究成果。

收稿日期: 2003-01-23; 改回日期: 2003-08-31; 责任编辑: 刘淑春。

作者简介: 钱辉, 1974 年生, 博士后。1997 年研究生毕业于南京大学地球科学系, 2000 年获得中国地质大学应用地球物理专业博士学位, 进入中国地质科学院地质研究所博士后流动站, 参加中法合作和大陆科学钻的天然地震探测工作。现属中国矿业大学资源系博士后, 进行多波多分量的方法研究工作。通讯地址: 100083, 北京海淀区学院路丁 11 号, 中国矿业大学资源系。

对比实际数据,用于调整台站参数。通过 5 个月的连续记录,共刻录数据光盘近 400 张,尽管存在一些难免的失误,损失了少部分台站的记录,个别地段受噪音干扰较大,仍记录到 IRIS 可检索的事件 1844 个,总体数据量和数据质量可以满足天然地震数据处理的各种方法。

2 方法

从美国 IRIS 地震数据中心网站获取 2000 年 5~10 月的地震目录近 5000 条,其中震中处于 P 波接收范围的地震事件 3500 个,PKP 事件 870 个。挑选震级大于 4.5 级的事件,根据 IASP91 地球模型计算各震相的理论到时,从采集的数据中解压相应的数据,转换成通用的 SAC(seismic analysis code)格式并截取理论到时前后各 90 s 的数据段,总长度 180 s,因为时间校正量一般比较小,可确保震相在数据段中,共获可利用的 P 波事件 1780 个,PKP 事件 64 个。拾取并挑选 P 波和 PKP 波的到时,得到有清晰到时的 P 波事件 355 次,其中 6 级以上的 27 次,主要发生在 6~8 月,正是仪器全面正常工作的时期,而有清晰到时的 PKP 事件比较少(表 1,图 2)。

用理论地球模型模拟事件到台站的走时,与拾取的到时比较,同时对同一事件不同台站波形进行对比,保证拾取点与大部分同相轴对齐。采用边拾取边计算平均走时残差的方式,少于 5 个台站接收的事件予以剔除,最后参加层析反演的事件数共 141,参加反演的台站次 41(包括移动后的台站)。使用射线数 1185,沿东南方向入射的较多,西北次之,而北边最少(图 3)。射线在浅层分布不均匀,但达 30 km 左右射线从各个方向覆盖比较全面,中心点下方的射线最密。

根据不同事件的走时分析,可以总结出数据残差的规律。西边、南边事件的在南部台站走时残差较大,在中心变得最小,再往北又逐渐变大;而来自东

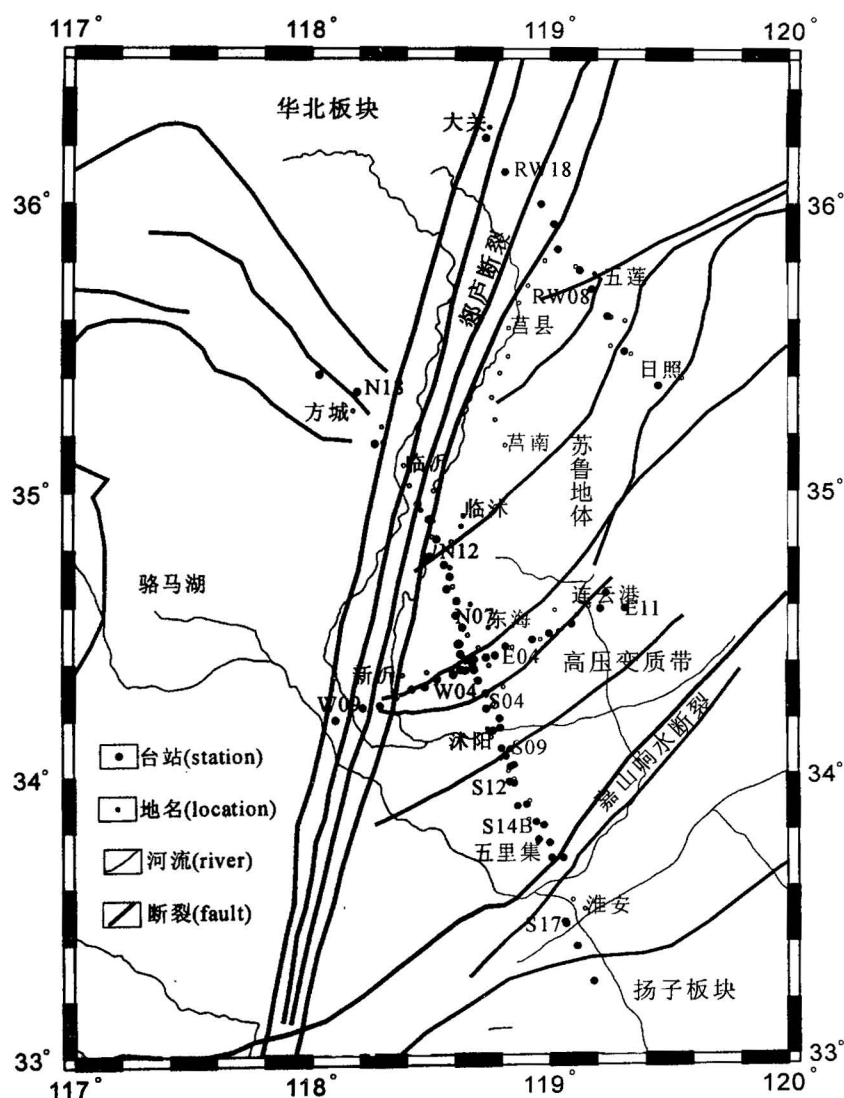


图 1 东海大陆钻址区宽频地震台站位置与区域构造图
(据杨文采等, 2001)

Fig. 1 The local structure and deployed station
in CCSD of Donghai (after Yang et al., 2001)

表 1 事件的震级分布数量表

Table 1 Number of events according to different
magnitude levels

震级	6 级以上	5.5~6.0	5.0~5.5	4.5~5.0	合计
类型					
P 波	27	56	154	118	355
PKP 波	3	3	10		16

边、北边事件的走时残差变化的规律性较差。这预示着构造的走向应为近东西向,东西向平均速度变化规律性小,而南北向呈两边相对低速,中间高速,南边低速更多的趋势。

根据下扬子地壳上地幔已有的工作(杨文采等, 1999, 2001; 胡振远等, 2000; 汪集旻等, 2001; 余钦范等, 2001), 认为 Moho 面在 30 km 上下, 因此模型在此处有一个大的速度跳跃, 而上地幔区域平均速度约 8.2 km/s(徐佩芬等, 2000, 周建波等, 2001)。由

于采用代数重建法 ACH 反演, 它对层的绝对速度并不敏感, 而层间的速度增减对比对反演结果影响较大(Aki et al., 1977, Evens et al., 1993; Eberhart-Phillips, 1993)。考虑到台站分布不均匀, 平均约在 15 km 左右, 兼顾保证块内的射线数, 模型的块大小

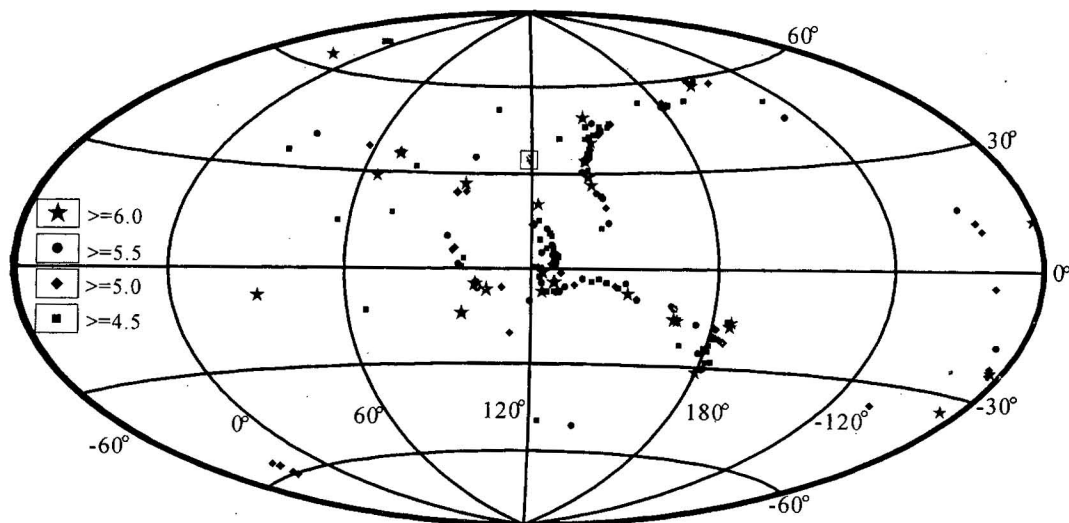


图 2 拾取到时利用的事件分布(包括 P 波和 PKP 波)

Fig. 2 Events distribution of picked and utilized (including P and PKP)

事件按震级大小用不同符号表示; 中央经线为 120°, 中央位置的方框内为台站位置

Events are presented by different symbols according to different magnitude. Center longitude is 120 degree and beside it the rectangle consists the location of stations

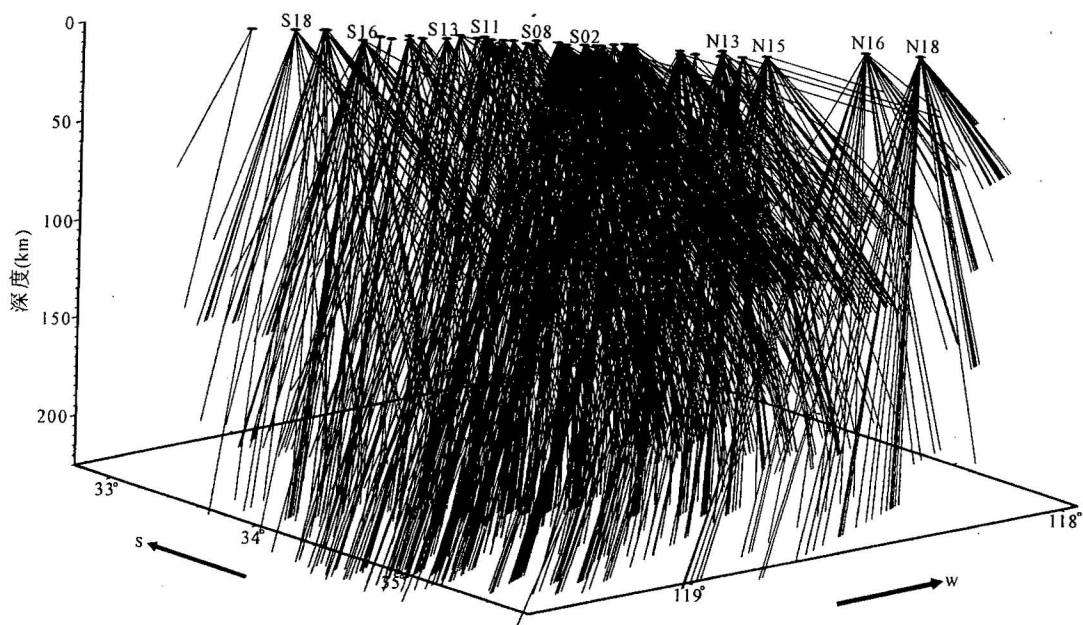


图 3 射线路径覆盖示意图

Fig. 3 The illuminate figure for coverage of ray path

上方圆点为台站位置, 射线从不同方位入射, 考虑的范围为台站展布下沿 250 km 的长方体, 在体外的射线被截去不作显示
The upper ellipses present location of stations, seismic ray incide from different azimuth and dip, considering the range within the depth of 250 km, the outer part of ray paths are omitted

在地壳内为 15 km,逐渐向下增加到 50 km(表 2)。

模型的中心点(118°41′, 34°24′)位于大陆钻附近十字测线的中心,分块的方位为 N20°W 即 NS 测线的方位,这样可以保证相同分块的射线数比较多。进行计算的块都要求有 5 条以上的射线通过,否则不对它反演。这样实际参加反演的块数为 917 块,模型边缘有 100 块的射线数小于 5 条,其他在 5~100 条左右。最后筛选的数据保证数据残差小于 1 s,实际数据方差为 0.64 s²,反演后的残差的方差为 0.3 s²,分辨矩阵的对角元素和为 2000。

表 2 层析反演使用的速度模型

Table 2 The velocity model used for tomography inversion

速度 (km/s)	深度 (km)	NS 块数	NS 块大小 (km)	EW 块数	EW 块大小 (km)
5.8	15.0	61	15.0	3	15.0
6.4	15.0	25	15.0	6	15.0
7.2	20.0	25	15.0	10	15.0
8.1	35.0	25	20.0	20	20.0
8.2	40.0	25	25.0	25	25.0
8.2	50.0	25	30.0	35	30.0
8.3	50.0	25	35.0	45	35.0

3 反演结果

反演结果沿南北剖面的纵切片如图 4 所示,明显可见剖面可分为三大块,中间被低速斜切的北倾台阶状高低相间体,两侧分别代表扬子板块和

华北板块,为垂直分布的变化单一的模型。南部扬子板块主要是高速体,北部华北板块又呈一个阻挡中央低速前进的高速部分。垂直方向上,在 20~40 km 处(图 4 的 A 虚线)存在一个高速和低速扰动互换的过渡,是 Moho 面的显示;在 80 km 以下(图 4 的 B 虚线),低速物质占主导地位,有横向流动的趋势,认为是软流圈;130 km 深度(图 4 的 C 虚线)又是高低速互换的位置,可能是岩石圈的底界。总体构造倾向为从南到北,南部断裂产状较陡,但在其北侧隐约有不连续倾斜的高速体。北部断裂的产状比较一致的北倾,受郯庐断裂控制明显,是苏鲁地体与华北板块的分界。用连续的水平线绘出了 200 km 深度以上的三个速度垂向变化的高梯度带,在这三条线的上下为高速体与低速体发生突变的地带,它们分别处于 30 km、80 km、130 km 的深度上,这相当于 Moho 面、岩石圈、软流圈的大致深度。

由于重力布格异常的长波数变化主要依赖于深部下地壳至软流圈以上的岩石圈平均密度变化,相当于模型中的第 3 层。将这一层的速度扰动与重力布格异常的对比(图 5)发现,重力梯度带和高低速体的界线吻合很好,主要走向都是北东方向,与断裂分布也有一定的一致性,高速体和高重力都在十字剖面中心和石门等地出现,而重力低和低速体均出现在边界断裂附近,蓝晶石带和榴辉岩带之间的界

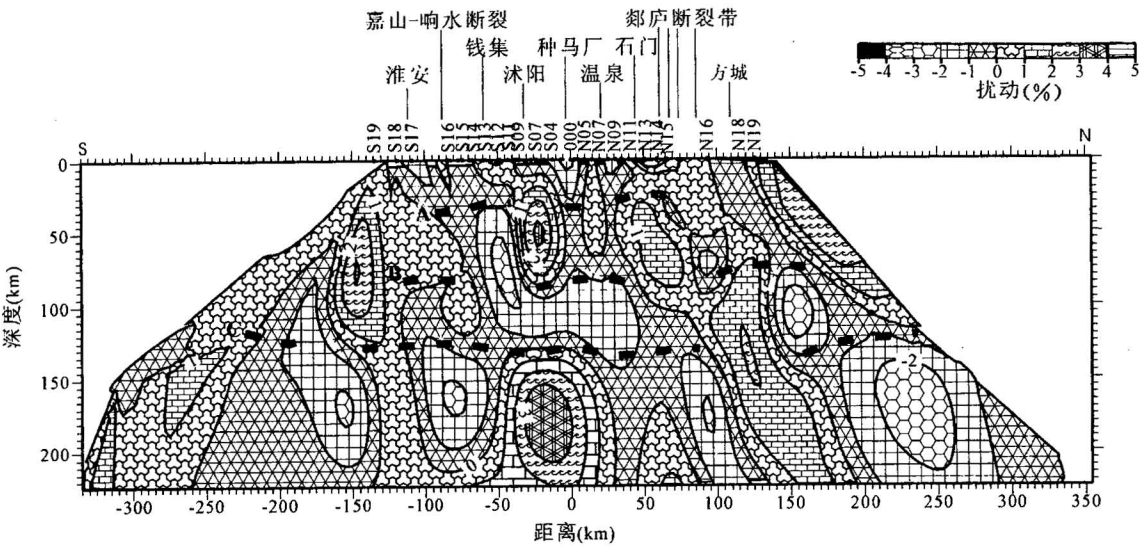


图 4 层析反演的剖面图

Fig. 4 The cross section of tomography inversion

图例中显示的是不同扰动对应的填充花纹。方位为 340°,自南向北台站号在图上方表示

The legend is the fill patterns according to different perturbation. The azimuth is 340 degree and station numbers is flagged on the figure from South to North

限也有低速体的分布。这与 Moho 位置附近的深部构造有关,而图 5 中布格异常变化的总体趋势与深部岩石分布密切相关,表明南北两条界线是超地壳的断裂,而中间的低速体可能是深部物质折返的通道。图 4 中剖面的北端穿过了郯庐断裂带,地表位于 N07 和 N13 台站之间,它在重力图上呈现北东向的强梯度带(图 5),南部的嘉山—响水断裂带同样为重力梯度带。实际上重力高速带主要决定于地壳的密度特征,特别是与 Moho 面的起伏和密度变化

有直接关系,在本区则主要确定于 Moho 面附近超高压变质带与岩性的变化,在第三层的层析结果中可以看出重力高和高速体、超高压变质带的分布相吻合。

4 结论

总体来看,本区各地块是由高速体与低速体相间组成,在不同深度上有明显差异。这种差异显示出 Moho 面、岩石圈和软流圈的存在,高速体与低速体分布格局复杂且有序。垂直走向方向上扬子、苏鲁、华北板块具有不同的速度特征,低速物质代表了广泛的流体和热活动,它反映了各地块间相对运动时被断裂控制时的结果,表现出的复杂动力学过程在地壳、岩石圈和上地幔不同层位深度上存在差异。

致谢:感谢许志琴、肖序常、杨文采、杨经绥诸位研究员在本项研究中提供的帮助和指导;感谢参加野外和室内工作的 562 综合研究所、第四物探大队的领导和同行在工作中给予的支持。

参 考 文 献

- 范桃园,石耀霖. 2001. 大别—苏鲁超高压变质带 $P-T-t$ 轨迹的动力学模拟. 地球物理学报, 44(5): 627~635.
- 胡振远,杨文采,程振炎. 2000. 苏北大科学钻探区深反射地震的叠前深度偏移. 地球物理学报, 43(4): 488~496.
- 汪集旻,胡圣标,程本合,李铁军,杨文采,程振炎. 2001. 中国大陆科学钻探区深部温度预测. 地球物理学报, 44(6): 774~782.
- 徐惠芬,杨天南,刘福来, Liou J G. 2001. 苏鲁高压—超高压变质带南部花岗岩片麻岩—花岗岩的多时代演化. 地质学报, 75(3): 364~369.
- 徐佩芬,刘福田,王清晨,从柏林,陈辉,孙若味. 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.
- 杨文采,胡振远,程振炎,倪诚昌,方慧,白金. 1999. 郯城—涟水综合地球物理剖面. 地球物理学报, 42(2): 206~217.
- 杨文采,余长青. 2001. 根据地球物理资料分析大别—苏鲁超高压变质带演化的运动学与动力学. 地球物理学报, 44(3): 346~357.
- 余钦范,姚长利,孟小红,郭友钊. 2001. 苏北大科学钻探区重磁异常反演解释. 地球物理学报, 44(6): 825~832.
- 于津海,王锡银,林黎明. 2001. 苏北高压变质带及其与北临超高压变质带的关系. 地质学报, 75(1): 82~90.
- 周建波,郑永飞,李龙,谢智. 2001. 扬子板块俯冲的构造加积楔. 地质学报, 75(3): 338~352.
- 张泽明,许志琴,等. 1999. 南苏鲁超高压变质带东海 ZK703 钻孔榴辉岩的变质作用. 地质学报, 73(4): 321~333.

References

- Aki K, Christofferson A, Husebye E S. 1977. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. J. Geophys. Res., 82(2): 277~296.
- Evans J R, Achauer U. 1993. Teleseismic velocity tomography using the ACH method: theory and application to continental-scale

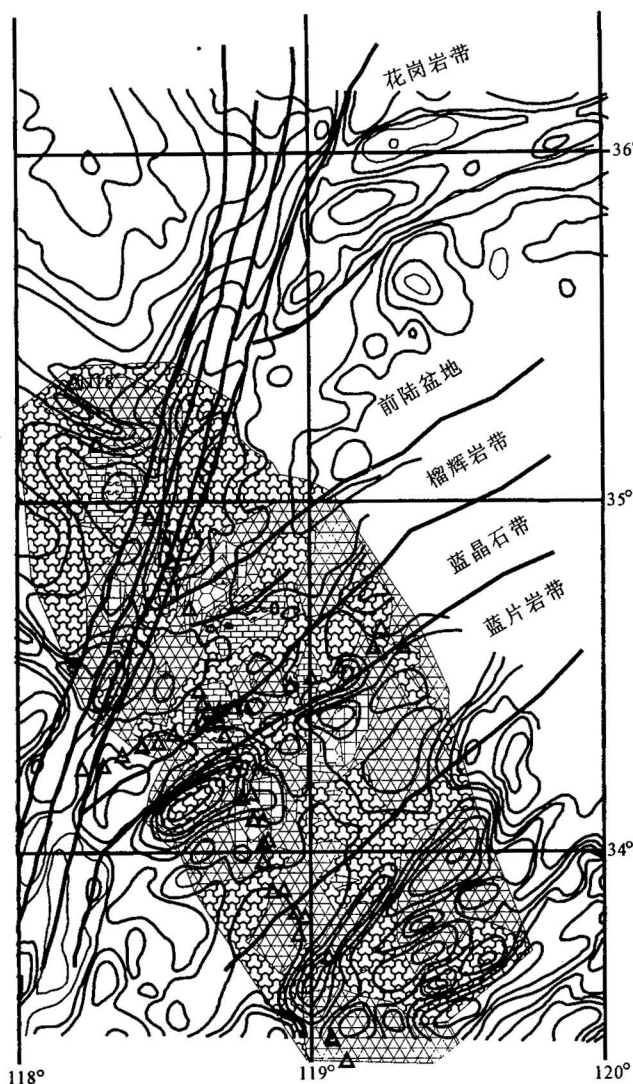


图 5 第三层速度扰动与布格异常的对比

Fig. 5 Comparison between Bouguer anomaly and velocity perturbation of layer 3

图中黑色等值线为重力布格异常;三角形是台站分布;速度扰动填充花纹如图 4;粗线为断裂分布

The bouger gravity anomaly is illustrated as black contours. Triangle symbols represents stations. The fill patterns of perturbation are same as Fig. 4. Crude lines are distribution of fault

- studies. In: Iyer H M, Hirahara K, ed. Seismic tomography: Theory and practice, 309~360.
- Eberhart-Phillips D. 1993. Local earthquake tomography: earthquake source regions, in Seismic tomography: Theory and practice. In: Iyer H M, Hirahara K, ed. London: Chapman and Hall, 613~643.
- Fan Taoyuan, Shi Yaolin. 2001. Geodynamic modeling of P - T - t track for Sulu-Dabie UHPM zones. *Journal of Geophysics*, 44(5): 627~635 (in Chinese with English abstract).
- Hu Zhenyuan, Yang Wencai, Cheng Zhenyan. 2000. Pre-stack migration of deep reflect seismic in the target area of CCSD in northern Jiangsu Province. *Journal of Geophysics*, 43(4): 488~496 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Cheng Benhe, Li Tiejun, Yang Wencai, Cheng Zhenyan. 2001. The prediction of deep temperature under the target area of CCSD. *Journal of Geophysics*, 44(6): 774~782 (in Chinese with English abstract).
- Xu Huifen, Yang Tiannan, Liu Fulai, Liou J G. 2001. The multi-era evolution of granat e-granite HPM zones in the south of Sulu terrane. *Acta Geologica Sinica*, 75(3): 364~369 (in Chinese with English abstract).
- Xu Peifen, Liu Futian, Wang Qingchen, Cong Bolin, Chen Hui, Sun Ruomei. 2000. Tomography Research of Dabie-Sulu orogeny-3-D velocity structure of lithosphere. *Journal of Geophysics*, 43(3): 377~385 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai, Hu Zhenyuan, Cheng Zhenyan, Ni Chengchang, Fang Hui, Bai Jin. 1999. Joint geophysical profile from Tancheng to Lianshui. *Journal of Geophysics*, 42(2): 206~217 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai, Yu Changqing. 2001. The movement and geodynamics of evolution of Sulu-Dabie UHPM zone from geophysical analysis. *Journal of Geophysics*, 44(3): 346~357 (in Chinese with English abstract).
- Yu Qinfan, Yao Changli, Meng Xiaohong, Guo Youzhao. 2001. Inversion and interpretation of gravity and magnetic anomaly in the target area of CCSD of Northern Jiangsu. *Journal of Geophysics*, 44(6): 825~832 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jinghai, Wang Ciyang, Lin Liming. 2001. The relationship between Northern Jiangsu HPM and the UHPM on the north of it. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 82~90 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zeming, Xu Zhiqing, et al. 1999. The metamorphism of eclogite in drilling pore ZK703 of UHPM in the south of Sulu area. *Acta Geologica Sinica*, 73(4): 321~333 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianbo, Zheng Yongfei, Li Long, Xie Zhi. 2001. Tectonic and sedimental mélange by the subduction of Yangtze Plate. *Acta Geologica Sinica*, 75(3): 338~352 (in Chinese with English abstract).

Tomography in the Chinese Continental Scientific Drilling Area of Donghai County, Jiangsu Province, China

QIAN Hui¹⁾, SU Heping¹⁾, JIANG Mei¹⁾, XUE Guangqi¹⁾, LIU Wen²⁾

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

2) *No. 562 Comprehensive Research Institute, Ministry of Land and Resources, Yanjiao, Hebei, 065201*

Abstract

The Sulu-Dabie orogenic belt is a typical UHP zone with outcropping of eclogites. The CCSD (Chinese Continental Scientific Drilling) project chose Donghai County which is covered by widespread eclogites as the first site for deep drilling, because this will be of great significance in disclosing the geodynamic processes of the post-collisional orogeny and later deformation and exhumation. However, the lack in data for the deep geology of this area makes tomography one of the most important methods for velocity perturbation analysis of deep materials, and it may serve as a guide for deep surveys of the area. We arranged a crossed profile at the center of the drilling site at N340°W and N70°E. The results of the tomography show that the 3rd layer is consistent with the variations of the Bouguer anomaly, and related to the Moho. Both the high velocity perturbation and high gravity appear at the center, and the Tanlu and Jiashan-Xiangshui faults both show as boundaries between high and low velocities and gravities. The NS section perpendicular to the structural strike can be divided into three parts, which represent the Yangtze, Sulu and North China plates respectively. The fault in the southern part is steeper with discontinuous dipping high-velocity bodies, while the faults in the northern part are all dipping north, obviously controlled by the Tanlu fault. There are three zones of abrupt changes for high- and low-velocity bodies at depths below 200 km, which are at 30 km, 80 km and 130 km, corresponding to the depths of the Moho, the lithosphere and the asthenosphere, respectively. This framework reflects the features of lithosphere activity controlled by deep faults in the Sulu area.

Key words: tomography; UHP metamorphic zone; Chinese Continental Scientific Drilling; Donghai County; Jiangsu Province