

中国大陆科学钻探场址区的地壳速度结构特征

王有学¹, 姜枚², 韩国华¹

1. 桂林工学院资源与环境工程系, 广西桂林 541004

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘要: 为了深入研究大别—苏鲁超高压变质带的深部结构及空间展布特征, 进一步揭示该超高压变质形成的动力学过程, 在中国大陆科学钻探场址区进行了广角反射/折射地震测深调查。根据广角反射/折射地震测深的资料研究, 建立了中国大陆科学钻探场址区的地壳纵波速度结构。从纵向上来看, 研究区域的地壳结构可划分为上、中、下3层: 上地壳的速度小于6.20 km/s, 厚10余 km; 中地壳的速度为6.40 km/s, 厚亦为10 km左右; 下地壳的速度为6.60 km/s, 地壳厚度为31 km左右, 且其地壳的平均速度为6.30 km/s。上地壳中的速度倒转指示了超高压变质体在地壳内部的空间分布, 且超高压变质体在大陆科学钻探场址及其附近的下部呈现为一隆起形态。

关键词: 中国大陆科学钻探; 地震测深; 地壳速度结构; 超高压变质带。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2004)06-0667-07

收稿日期: 2004-05-12

Crustal Velocity Structure beneath the Site of Chinese Continental Scientific Drilling Site

WANG You-xue¹, JIANG Mei², HAN Guo-hua¹

1. Faculty of Resources and Environment Engineering, Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China

2. Institute of Geological Research, Chinese Academy of Geosciences, Beijing 100037, China

Abstract: In order to study the deep structure, spatial tectonic characteristics and the dynamic process for the Dabie-Sulu ultra-high metamorphic belt, a wide-angle reflection/refraction seismic survey was conducted in the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) site. The crustal velocity structure beneath the CCSD site has been established based on wide-angle seismic reflection/refraction data acquired at the site. According to the results, the crust beneath CCSD is composed of three layers: the upper, middle and lower crust, with velocities of <6.20 km/s, 6.40 km/s, and 6.60 km/s, and a thickness of ~10 km, ~10 km, and ~12 km respectively. The crust thickness is 31 km around with an average velocity of 6.30 km/s. However, the reversed velocity in the upper crust implies an ultrahigh-pressure metamorphic (UHPM) layer (body) with a shape of uplift beneath or near the CCSD site.

Key words: CCSD; deep seismic sounding; crustal velocity structure; UHPM zone.

近些年来,随着苏鲁—大别地区含柯石英榴辉岩及蓝闪石片岩的高压—超高压变质带的发现及其与超基性岩体一起作为古俯冲带的观点(Xu, 1987; 张儒媛等, 1993; 丛柏林等, 1994)的提出, 在中国乃至全球掀起了超高压变质带研究的热潮(杨文采等, 1999; 索书田等, 2003; 欧新功等, 2003)。与此同时,

1997年经国务院批准为“九五”国家重大科学工程项目之一(张永康, 1997)的中国大陆科学钻探工程选取江苏省东海县作为中国第一口科学深钻的钻探场址, 对研究超高压变质带的形成折返、陆—陆碰撞和壳幔作用有着重要的科学意义。该项目的实施, 将全球超高压变质带的研究又推向了一个新的高潮。

基金项目: 国土资源部科技项目(No. 2000452)。

作者简介: 王有学(1961—), 男, 教授, 2002年于中国地质大学获博士学位, 现于桂林工学院资源与环境工程系从事地壳上地幔地球物理及地球动力学教学与研究。Email: youxue_wang@yahoo.com

中国大陆科学钻探场址所在的苏鲁超高压变质岩带属扬子板块与华北板块碰撞带的北东段组成部分(程裕淇, 1994), 是大别山超高压变质岩带的东延, 并被郯庐断裂错断, 向北平移. 变质岩带南界为嘉山—响水断裂, 北界目前尚有争论, 许多学者认为是五莲—烟台断裂. 变质岩带自南至北在碰撞作用所影响的范围内形成了由蓝片岩、白片岩及榴辉岩带构成的一套完整的超高压变质带.

为了配合这一世界级的地学研究, 在中国大陆科学钻探场址及其周围地区进行了一系列与之配套的科学研究(杨文采等, 1999; 杨文采和余长青, 2001; 余钦范等, 2001, 2002; 王有学, 2002), 包括广角反射/折射地震调查. 根据国土资源部科技司的安排, 中国地质科学院地质研究所于 2001 年初在科学钻探场址及其周围地区进行了广角反射/折射地震调查, 其主要目的在于研究苏鲁超高压变质带的深部结构及空间展布特征, 为进一步揭示和研究该超高压变质带形成的动力学过程提供更为详实可靠的深部地球物理证据.

1 观测系统及野外数据采集

中国大陆科学钻探场址区的广角反射/折射地震测深工作由 SW—NE 向(I)及 NW—SE 向(II) 2 条地震测深剖面构成一个十字型测线(图 1).

野外地震数据的采集使用 50 台法国 LEAS 公司生产的 HATHOR 型三分量数字地震仪, 其动态范围为 120 db, 频带范围为 0.01~500 Hz; 采用内置式 GPS 接收器作为时间服务系统; 使用了 150 台检波器, 其固有频率为 10 Hz, 灵敏度为 $300 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. 由于地震仪有限, 仅 50 台, 故将每台地震仪的 3 个分量同 3 个垂直检波器用电缆相连, 等同于 3 个独立的台站使用.

测点按非等间距方式布设, 在主要探测对象(超高压变质岩体)区段采用小点距(0.2~1 km), 而在外围地区则采用 3 km 的大间距, 个别地方为 4 km. 整个野外工作共布设炮位 48 个, 其中大炮 9 个(100~350 kg), 小炮 39 个(24~48 kg); 共用炸药 3 000 kg, 炮点距在超高压变质体地区较密(2 km 左右), 而在外围地区则逐渐增大, 最大为 30 余 km.

野外数据采集所使用的采样率为 0.007 5 s. 整个工程共获得高质量地震记录截面图 38 张, 其中测线 I 上获得 20 张, 测线 II 上获得 48 张.

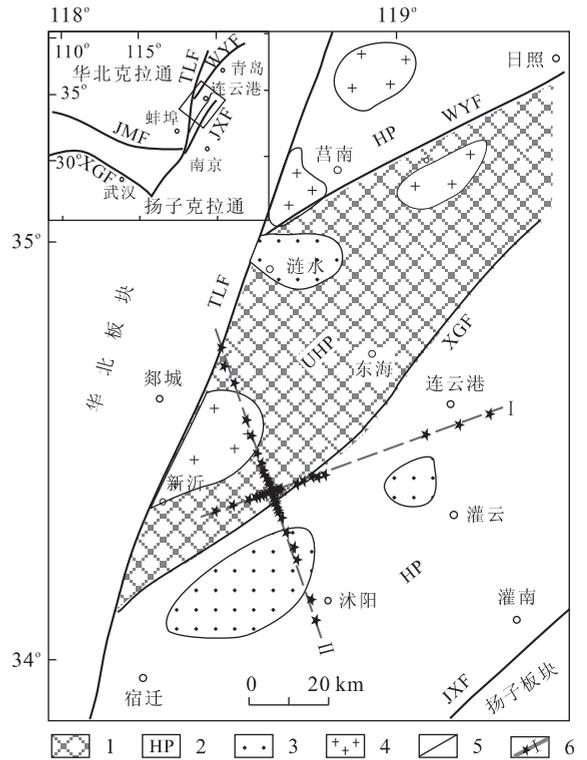


图 1 中国大陆科学钻探场址及其周边地区地质构造略图及地震测线位置

Fig. 1 Tectonic sketch map and seismic profiles in the CCSD site and its adjacent area

1. 超高压变质带; 2. 高压变质带; 3. 中、新生代沉积; 4. 花岗岩; 5. 断裂; 6. 地震剖面及炮点; WYF. 五莲—烟台断裂; JXF. 嘉山—响水断裂; TLF. 郯城—庐江断裂; XGF. 新沂—赣榆断裂

2 地震波场特征分析

在获得的地震记录截面图上, 可以识别出 P_g 、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_m 等 6 组震相, 各个震相以其自身的地震场特征为我们研究中国大陆科学钻探场址区的地壳的精细结构提供了充分的依据.

2.1 测线 I

测线 I 近东西向展布, 并自西向东斜穿苏北超高压变质带与苏北白片岩带的交接部位. P_g 震相呈典型的回折波走时曲线特征, 指示其地壳盖层中速度梯度层的存在(图 2).

反射波 P_1 震相以清晰的波至紧随 P_g 波之后在临界距离 10 km 附近出现, 而且具有很强的能量, 其平均速度为 5.6 km/s, 埋深为 2.4 km(图 2). 如此大的反射能量可能即是疏松的地表盖层与其下伏的超高压变质岩体层之间的明显的波阻抗差异反映. 随着炮点的东移, 其反射面的埋深变浅.

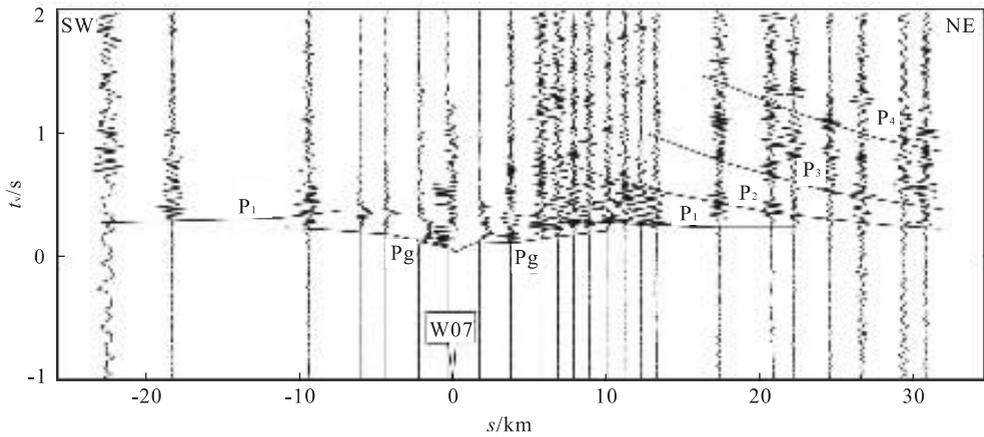


图 2 测线 I 上 W07 炮的 P 波地震记录截面

Fig. 2 Seismic record section from shotpoint W07 in Profile I
综合速度 v_r 为 6.00 km/s, 下同

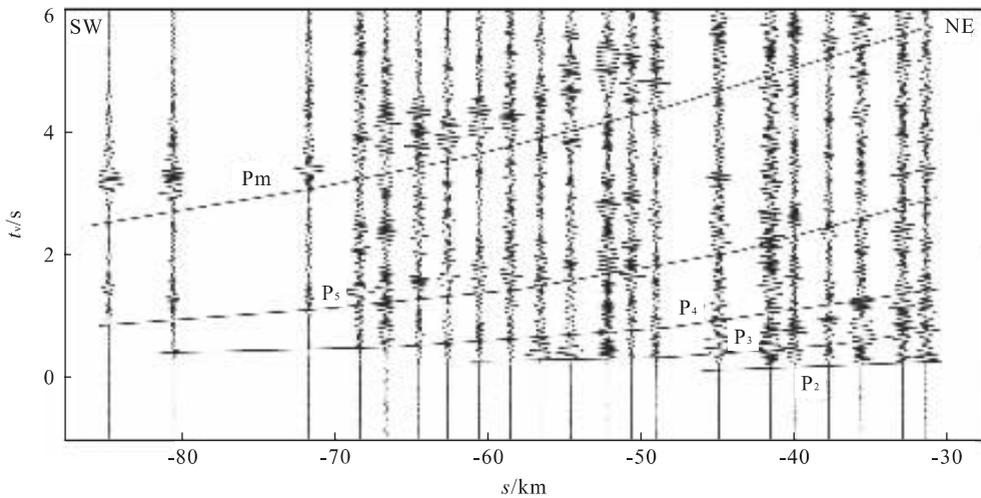


图 3 测线 I 上 E10 炮的 P 波地震记录截面

Fig. 3 Seismic record section from shotpoint E10 in Profile I

反射波 P_2 震相是随 P_1 震相之后的又一个强反射, 临界距离为 20 km 左右, 其平均速度为 5.85 km/s, 埋深为 5 km (图 2)。该强反射可能即是超高压变质岩体层与下伏速度相对较低的地层之间的较高波阻抗差异有关。

震相 P_3 界面埋深为 7 km, 其平均速度与震相 P_2 的平均速度相近, 为 5.86 km/s。这种现象表明在震相 P_2 与 P_3 之间可能存在一个低速层 (图 2)。

P_4 反射波震相为低速层底界面所产生, 在小炮记录中亦可识别 (图 2), 其平均速度为 5.95 km/s, 埋深为 9.7 km, 临界距离在 30 km 甚至更远。该反射界面向东有加深的趋势, 在大炮 E10 的记录截面上 (图 3), 其界面埋深增至 12.3 km, 平均速度也变为 5.98 km/s。 P_3 震相的情况与此相似, 其界面由

西部的 6.6 km 增为东部的 8 km 左右。

P_5 震相仅在大炮记录截面上得以反映 (图 3)。该震相以 50 km 的临界距离出现, 其平均速度及界面埋深分别为 6.15 km/s 及 18.5 km, 为下地壳顶界面的反射。

莫霍面的反射波 P_m 在大炮记录中以很强的能量出现在临界反射段 50~85 km 之间 (图 3), 其平均速度为 6.32 km/s, 埋深为 30.5 km, 且其临界距离为 60 km。

2.2 测线 II

与测线 I 相比, 测线 II 为北北西向展布, 并自南向北穿过苏北蓝片岩带及苏北超高压变质带, 并且在其南部还穿过苏北蓝片岩带中的新生代沉积, 这在 P_g 震相的变化上得到了充分反映。炮点 S09 位

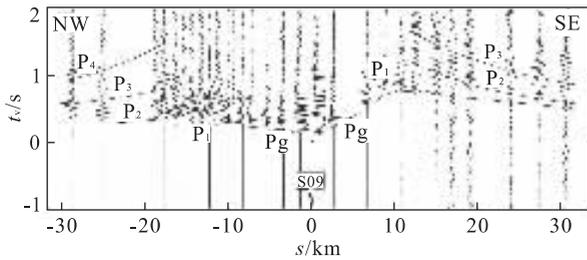


图 4 测线 II 上 S09 炮的 P 波地震记录截面

Fig. 4 Seismic record section from shotpoint S09 in Profile II

于新生代沉积的北部边缘(图 4),其南北两侧的 Pg 震相表现为明显的差异特征:南侧的波至延迟很大,在位于 10 km 的震中距处,其波至到时间为 0.76 s;而在北侧,其波至到时间仅为 0.22 s,走时差高达 0.54 s 之多.这种影响波及到更深层次的反射,图 5 中的 P₄、P₅及 P_m 各震相即是受此影响使得它们均在震中距为 55 km 以远发生走时延迟.

莫霍面反射波震相 P_m 在图 5 中以很强的能量出现在临界反射段 45~70 km 之间(图 5),其平均速度为 6.28 km/s,埋深为 30.3 km,且其临界距离为 60 km.

根据对测区的地震波场特征分析,利用反射率法,对测区的典型记录(图 3)进行了一维模型的波场模拟,其结果如图 6 所示.由图可见,合成理论地震图很好地再现了实际观察记录的主要波场特征.

3 二维地壳速度结构及其特征

根据实测资料的波场特征分析,中国大陆科学

钻探场址下部的地壳内部速度结构已初显轮廓.在此基础上,利用 SEIS83 程序包(Cerveny and Psenick, 1984)对测区的地震波场特征进行模拟计算(图 7),最后建立了测区的二维地壳纵波速度结构,其结果如图 8 所示.其中的地震波速度误差小于 3%,界面埋深的误差小于 10%(Mooney, 1989).

从纵向上来看,中国大陆科学钻探场址下部的地壳速度结构可以 R₄、R₅ 及 R_m 等界面将其划分为上、中、下 3 层;R₄ 以上为上地壳,速度小于 6.20 km/s,厚 10 km 左右;中地壳由位于 R₄ 与 R₅ 界面之间的地层构成,其速度为 6.40 km/s,厚约 10 km;下地壳的速度为 6.60 km/s,厚 10 余 km.地壳厚 31 km 左右,平均速度为 6.30 km/s.在 2 条相互交叉的地震剖面上,上地壳中均存在一个速度倒转.在上地壳顶部存在一纵波速度为 6.05~6.10 km/s 的高层.

在横向上,2 条测线的地壳纵波速度结构则表现为截然不同的特征.在测线 I 下部,总的来说地层变化比较平缓.地表浅部的速度变化较小,速度在

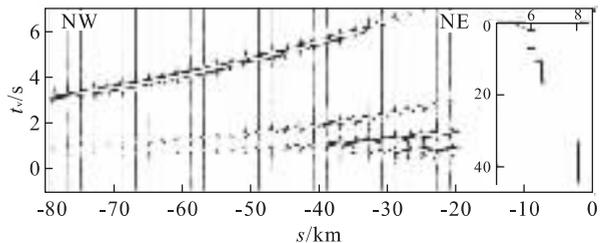


图 6 测线 I 上 E10 炮的 P 波合成地震记录截面

Fig. 6 Synthetic seismic record section from shotpoint E10 in Profile I

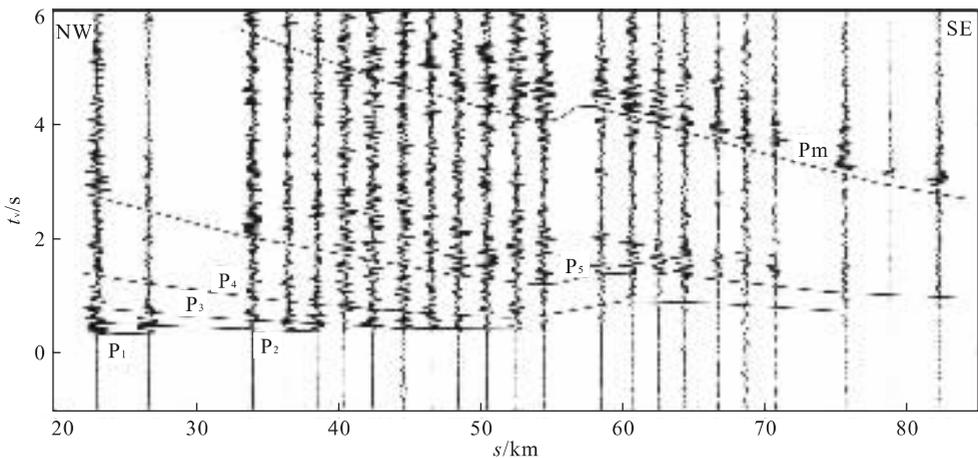


图 5 测线 II 上 N13 炮的 P 波地震记录截面

Fig. 5 Seismic record section from shotpoint N13 in Profile II

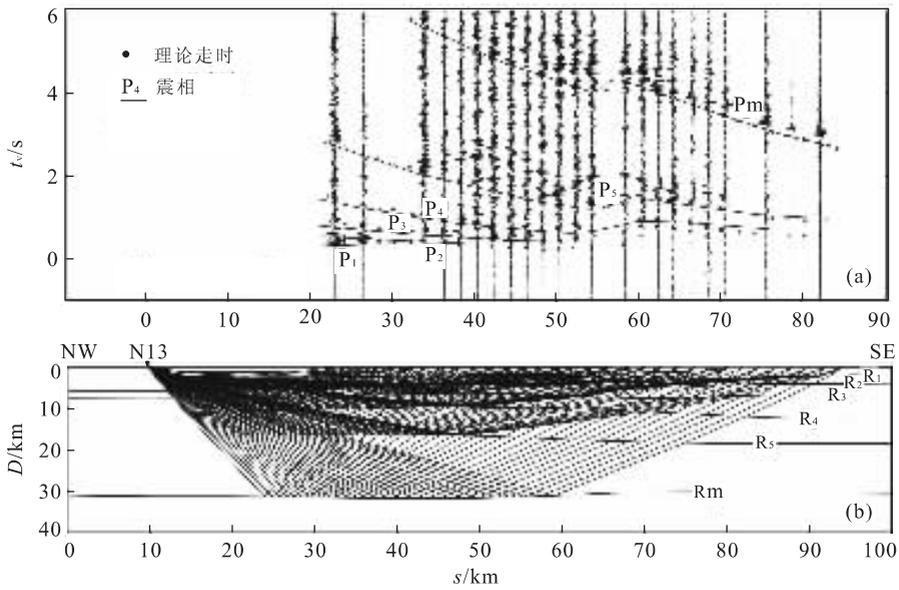


图 7 测线 II 上 N13 炮的 P 波资料的模拟结果

Fig. 7 Modeling results from shotpoint N13 in Profile II

a. 地震记录及理论计算走时; b. 地壳速度模型及其射线路径

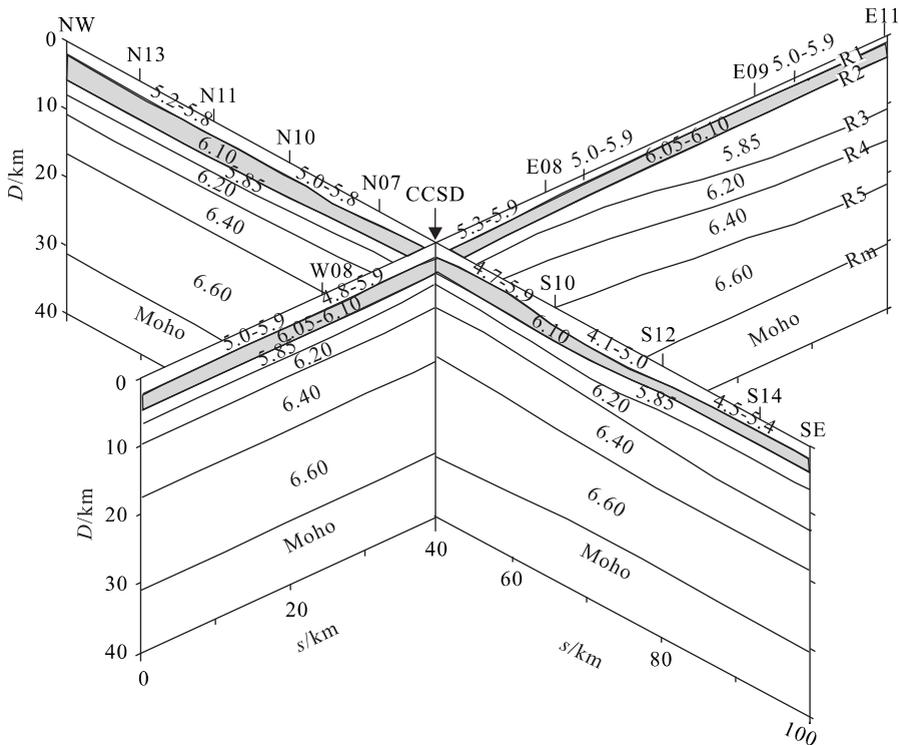


图 8 中国大陆科学钻探场址区的地壳纵波速度结构

Fig. 8 Crustal velocity structure beneath the CCSID site and its adjacent area

4.8~5.9 km/s 之间变化。超高压变质层表现为西深东浅,并在大陆科学钻探场址向东逐渐变浅,其下部的埋深为 2.4 km,厚度约为 2.1 km。超高压变质层下部的上地壳则存在较大的变化,厚度由西部的 2.0 km 向东增至 7.0 km,且中地壳也继承了上地壳

底界面的形态,由西向东加深。然而,在测线 II 上,不仅地表浅部存在明显的变化:在沭阳北侧存在一个低速区,地表部分仅为 2.05 km/s,其下为速度 4.1~5.0 km/s 的梯度层,这与该地段存在的新生代沉积相对应。超高压变质地层在科学钻探场址下

部呈现为一隆起形态,而且除莫霍面以外的所有界面也都具有相似的特征。

4 结论及讨论

根据对广角反射/折射地震测深资料的研究,建立了中国大陆科学钻探场址区的地壳纵波速度结构。研究结果表明:(1)研究区域的地壳结构可以划分为上、中、下 3 层:上地壳的速度小于 6.20 km/s,厚 10 余 km;中地壳的速度为 6.40 km/s,厚亦为 10 km 左右;下地壳的速度为 6.60 km/s。地壳厚度为 31 km 左右,且其地壳的平均速度为 6.30 km/s。这一结果同苏鲁超高压变质带的反射地震调查结果(Yang, 1997)存在较大的差异(图 9),尤其是在地壳浅部,这可能主要由于方法的不同造成的。(2)上地壳中的速度倒转指示了超高压变质体在地壳内部的空间分布,且超高压变质体在大陆科学钻探场址及其附近的下部呈现为一隆起形态(图 8)。地壳浅部存在一速度为 6.05~6.10 km/s 的高速层,我们推测该高速层的底界可能与超高压变质岩体(层)相对应,但其速度为 6.05~6.10 km/s,远远低于榴辉岩(7.42±0.35) km/s 的纵波速度(余钦范等, 2002),仅略高于上覆地层(<5.90 km/s),这可能是由于榴辉岩在超高压变质岩层中只占有较小的规模(高山等, 1997),且以薄层或透镜体形式存在;高速层上覆地层可能是榴辉岩或蓝片岩类同其围岩的混

杂。(3)在超高压变质岩体(层)的底部存在一低速层,它可能对应于一个剪切带或变质的花岗岩侵入体(Yang and Cheng, 1998),这与在该深度范围的花岗片麻岩或酸性麻粒岩花岗岩相对应。(4)中地壳的纵波速度为 6.40 km/s,与中性麻粒岩及闪长岩(6.65±0.43)相近;下地壳 6.6 km/s 左右的速度层,与基性麻粒岩的速度值((6.74±0.12) km/s)相当(余钦范等, 2002)。

苏鲁超高压和高压变质带是大陆地壳深俯冲到地幔深部,经受高温高压作用后折返到地壳浅部形成的,与陆间碰撞的构造演化历史及地壳结构有着密切的关系。作为研究地壳内部结构的有效工具之一,东海超高压变质带的广角反射/折射地震调查,为进一步研究苏鲁超高压变质带的深部结构及空间展布特征,揭示该超高压变质形成的动力学过程提供更为详实有力的地球物理证据,并对大陆科学钻探的深入研究及对陆间碰撞、超高压变质带的形成及其与之相关的地质前沿科学提供丰富的深部地球物理证据。毫无疑问,中国大陆科学钻探场址区的地壳速度结构对科学钻探岩石物性和苏鲁超高压变质带的形成机制及演化模式的研究都有非常重要的意义。

致谢:中国地质科学院薛光琦研究员、宿和平高级工程师、钱辉博士等人参加了野外数据的采集工作;在资料的处理及解释过程中,作者曾得到中国科学院滕吉文院士、中国地质科学院杨文采研究员的热情指导,成文后又得到中国科学院地质地球物理研究所张中杰研究员的宝贵意见与建议,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Cerveny, V., Psencik, I., 1984. SEIS83-numerical modeling of seismic wavefield in 2-D laterally varying layered structures by the ray method. In: Engldahl, E. R., ed., Documentation of Earthquake Algorithms, Rep. SE-35, World Data Center (A) for Solid Earth Geophysics, Boulder, Colo.; 36-40.
- Cheng, Y. Q., 1994. Regional geology in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Cong, B. L., Wang, Q. C., Zhai, M. G., 1994. Ultra-high pressure metamorphism: New challenge in solid earth science. *Progress in Geophysics*, 9(4): 30-38 (in Chinese with English abstract).
- Mooney, W. D., 1989. Seismic methods for determining earthquake source parameters and lithospheric struc-

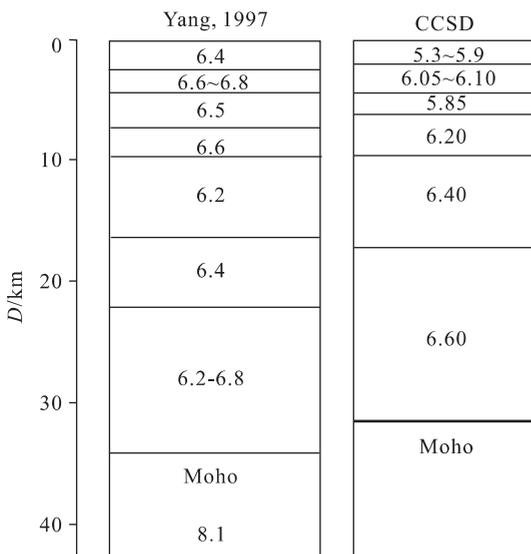


图 9 中国大陆科学钻探场址区的地壳纵波速度柱状图
Fig. 9 Crustal velocity structure beneath the CCSD site

- ture. In: Pakiser, L. C., Mooney, W. D., eds., Geophysical framework of the continental United States, *Mem. Geol. Soc. Am.*, 172: 11—34.
- Ou, X. G., Jin, Z. M., Jin, S. Y., et al., 2003. Thermal conductivity of Donghai UHP eclogite and its significance for studying continental scientific drilling. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(2): 129—136 (in Chinese with English abstract).
- Suo, S. T., Zhong, Z. Q., Zhou, H. W., et al., 2003. Massive eclogites and their significance in Dabie UHP metamorphic belt, East-Central China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(2): 111—120 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. X., 2002. Crustal structure research using wide-angle seismic reflection in Sulu-Dabie ultrahigh pressure metamorphic belts; Ph. D. Thesis, China University of Geosciences, Beijing (in Chinese).
- Xu, Z. Q., 1987. Etude tectonique et microtectonique de la chaîne paléozoïque et triasique des Qinlings (Chine). Academie de Montpellier Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 93—107.
- Yang, W. C., 1997. Crustal structure and development of Sulu UHPM terrane in East-Central China. *Episode*, 20(2): 100—103.
- Yang, W. C., Cheng, Z. Y., 1998. Crustal structure and development of the Dabie UHPM terrane in East-Central China. *Continental Dynamics*, 3: 86—95.
- Yang, W. C., Cheng, Z. Y., Chen, G. J., et al., 1999a. Geophysical investigations in northern Sulu UHPM belt, Part I: Deep seismic reflection. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(1): 41—52 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., Fang, H., Cheng, Z. Y., et al., 1999b. Geophysical investigation in northern Sulu UHPM belt, Part II: Non-seismic methods. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(4): 508—519 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., Hu, Z. Y., Cheng, Z. Y., et al., 1999c. Long profile of geophysical investigation from Tancheng to Lianshui, east-central China. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(2): 206—216 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., Yu, C. Q., 2001. Kinetics and dynamics of development of the Dabie-Sulu UHPM terranes based on geophysical evidences. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(3): 346—359 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Q. F., Guo, Y. Z., Meng, X. H., 2002. Petrophysical parameters at continental scientific drilling site in Subei, China. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(1): 93—100 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Q. F., Yao, C. L., Meng, X. H., et al., 2001. Interpretation of gravity and magnetic anomalies obtained at continental scientific drilling site in Subei. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(6): 825—832 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. Y., Cong, B. L., Liu, Z. G., 1993. Sulu ultra high pressure metamorphic terrane and exploration of its origin. *Acta Petrologica Sinica*, 9(3): 211—226 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. K., 1997. Donghai, North Jiangsu: One of the best site options for the first continental scientific drilling in China. *Jiangsu Geology*, 21(3): 129—137 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程裕淇, 1994. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社.
- 丛柏林, 王清晨, 翟明国, 1994. 超高压变质作用: 固体地球科学领域的新挑战. *地球物理学进展*, 9(4): 30—38.
- 欧新功, 金振民, 金淑燕, 等, 2003. 江苏东海超高压榴辉岩的热导率及对大陆科学钻探研究的意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(2): 129—136.
- 索书田, 钟增球, 周汉文, 等, 2003. 大别—苏鲁超高压变质带内的块状榴辉岩及其构造意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(2): 111—120.
- 王有学, 2002. 苏鲁—大别超高压变质带广角地震测深地壳结构研究. 博士论文, 北京: 中国地质大学.
- 杨文采, 程振炎, 陈国九, 等, 1999a. 苏鲁超高压变质带北部地球物理调查(I)——深反射地震. *地球物理学报*, 42(1): 41—52.
- 杨文采, 胡振远, 程振炎, 等, 1999c. 郯城—涟水综合地球物理剖面. *地球物理学报*, 42(2): 206—216.
- 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的运动学与动力学. *地球物理学报*, 44(3): 346—359.
- 杨文采, 方慧, 程振炎, 等, 1999b. 苏鲁超高压变质带北部地球物理调查(II)——非地震方法. *地球物理学报*, 42(4): 508—519.
- 余钦范, 姚长利, 孟小红, 等, 2001. 苏北大陆科学钻探靶区重磁异常反演解释. *地球物理学报*, 44(6): 825—832.
- 余钦范, 郭友钊, 孟小红, 等, 2002. 苏北大陆科学钻探靶区岩石物理性质. *地球物理学报*, 45(1): 93—100.
- 张儒媛, 丛柏林, 刘忠光, 1993. 苏鲁超高压变质地体及其成因解释. *岩石学报*, 9(3): 211—226.
- 张永康, 1997. 江苏东海——中国大陆科学钻探的最佳选区之一. *江苏地质*, 21(3): 129—137.