

杨文采, 刘光林, 杨 锴等. 中国大陆科学钻探孔区全观式三维地震采集. 地球物理学报, 2006, 49 (3) : 735 ~ 744

Yang W C, Liu GL, Yang K, et al. All-laid-out three-dimensional seismic survey at the Chinese Continental Scientific Drilling site. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49 (3) : 735 ~ 744

# 中国大陆科学钻探孔区全观式三维地震采集

杨文采<sup>1</sup>, 刘光林<sup>2</sup>, 杨 锴<sup>3</sup>, 程振炎<sup>1</sup>

1 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2 胜利油田地球物理勘探开发公司, 山东东营 257100

3 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

**摘 要** 大陆科学钻探不仅是打一口钻, 而是深部钻探同地球物理遥测结合起来的相互反馈系统, 这里地球物理遥测主要是指三维深反射地震. 中国大陆科学钻探孔区三维地震调查是大陆科学钻探工程的一项重要内容. 在数据采集集中提出了全观式三维地震调查新技术, 它是指排列不滚动的三维地震调查, 即将地震检波器铺满全部测区的一种地震采集方法, 尤其适合于有限面积的三维地震工作. 这种方法的优点是: (1) 快速高效; (2) 叠加次数高; (3) 与常规三维地震相比成本大幅度减少. 在中国大陆科学钻探孔区内进行的全观式三维地震测量, 全面实现了预期目标, 包括: (1) 配合钻探查明孔区地质构造, 将钻探的一孔之见扩展到深 6000m、长宽超过 3000m 的三维岩柱; (2) 提供高精度定位的地壳反射体以供标定; (3) 发现中、下地壳及地幔内的反射体等.

**关键词** 中国大陆科学钻探, 深反射地震, 三维调查, 全观式数据采集

**文章编号** 0001 - 5733(2006)03 - 0735 - 10

**中图分类号** P554

**收稿日期** 2005 - 10 - 11, 2006 - 02 - 28 收修定稿

## All-laid-out three-dimensional seismic survey at the Chinese Continental Scientific Drilling site

YANG Wen-Cai<sup>1</sup>, LIU Guang-Lin<sup>2</sup>, YANG Kai<sup>3</sup>, CHENG Zhen-Yan<sup>1</sup>

1 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2 Shengli Petroleum Geophysical Exploration Cooperation, Shandong Dongyi 257100, China

3 School of Marine and Earth, State Key Laboratory of Marine Geology, Shanghai 200092, China

**Abstract** Continental scientific drilling does not means only making a hole, but means to form a feedback system of deep drilling technology and geophysical telemetry that is mainly 3-D seismic survey. Seismic reflection investigations have been carried out for the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSDP) as an important item. We designed a new method, called all-laid-out three-dimensional survey, for the 3-D seismic investigation at the CCSD drilling site. The new method does not roll shot-geophone configuration during the survey, i. e., lays out geophones all over the survey area, very proper for 3-D seismic survey in small areas. The advantages of the new method include (1) high efficiency and saving time; (2) high stack fold numbers; and (3) greatly reducing the survey cost. The experiment with the method at the CCSD site completes all the aims of the 3-D survey, including (1) locating geological structures around the CCSD main hole of 5000m; (2) providing highly-accurate 3-D reflectors for future calibration, and (3) finding deep reflectors in the lower crust and mantle.

**Key words** Chinese Continental Scientific Drilling, Seismic reflection, 3-D survey, All-laid-out data acquisition

**基金项目** “九五”国家重点科学工程项目“中国大陆科学钻探工程”和国家重点基础研究发展计划(973)项目(2003CB716505)共同资助.

**作者简介** 杨文采, 男, 1942 年 10 月生, 中国科学院院士, 研究员, 博士生导师. 1984 年在加拿大 McGill 大学取得博士学位, 主要从事地球探测与壳幔作用过程方面的研究. E-mail: yangwencai @a-1.net.cn

## 1 引言

苏鲁超高压变质带是三叠纪中朝与扬子克拉通相互碰撞形成的, 它的研究对了解发生在板块会聚边缘的大陆动力学作用具有重要意义. 近年来在此带中进行了大陆科学钻探和以深反射地震为主导的详细的综合地球物理调查, 发现了丰富的反射体, 为研究超高压变质带地壳上地幔组构提供了难得的基础资料. 在大陆科学钻探工程中, 钻探取芯当然是最主要的工作, 因为岩芯提供了地下深处岩石的物质成分与构造的直接数据. 但是, 地球物理资料也是不可缺少的组成部分, 因为钻孔能观测的只是一维的有限空间, 对孔区地质构造的了解有赖于三维地震调查. 本文将简要介绍中国大陆科学钻探孔区的全观式三维地震的数据采集方法和取得的初步结果.

对于结晶岩区的三维地震调查, 过去可供直接借鉴的经验很少, 对结晶岩地壳反射体形成的机制也很少准确的标定. 近垂直的反射地震方法理论上只能取得近水平成层介质的反射, 结晶岩内部不均匀性能否形成清晰的反射图像, 需要什么样的方法技术, 乃是本文讨论的重点. 中国大陆科学钻探工程的实施为进行结晶岩区地震反射实验提供了机会. 根据大陆科学钻探的岩芯和测井资料对地震反射体的标定已发表过多篇论文<sup>[1~3]</sup>, 也请读者们同时参阅.

## 2 地质地球物理概况

以研究超高压变质作用为科学目标的中国大陆科学钻探的钻井都设计在东海县南部. 东海县南的这片超高压变质岩块出露区, 位于秦岭—大别—苏鲁造山带的东段, 中三叠纪时扬子和中朝克拉通在这个带碰撞, 造成大别—苏鲁陆块俯冲入地幔并快速折返回到上地壳, 形成了这一世界上规模最大的超高压变质带<sup>[4~7]</sup>. 东海县南部地区近地表的岩石主要为片麻岩, 包括二长片麻岩、黑云母二长片麻岩与黑云母斜长片麻岩等, 这些片麻岩包括正片麻岩和副片麻岩, 是在元古代或更早期形成的, 在三叠纪又经受了超高压变质, 因此在大陆科学钻探主孔与先导孔中的片麻岩大都含有柯石英<sup>[8]</sup>. 在超高压变质带片麻岩中又含有大量榴辉岩体和蛇纹岩(下部为橄榄岩). 榴辉岩体大都含有柯石英, 原岩是元古代或更早期的基性火山岩, 在三叠纪经过超高压

变质. 石榴石二辉橄榄岩主要是在超高压变质岩块折返同期从上地幔上来的. 最大的榴辉岩体出现在毛北和青龙山, 长约 3km, 宽 400m, 产状很陡, 延深可达 800m 左右. 最大的橄榄岩体出现在蒋庄和芝麻坊, 尺度比榴辉岩体略小. 在毛北和芝麻坊的橄榄岩体上方还发现了两颗金刚石晶体, 说明变质的最大压力在 4 GPa 以上.

连云港地区的主要构造特征为 10 条形态复杂的韧性剪切带, 它们将超高压变质岩块分割成 4 个岩片<sup>[8]</sup>, 即图 1 中的 I、II、III 和 IV. 这些韧性剪切带走向大致为 NNE, 倾向 SSE, 走向线弯曲并不平直. 从区域性的郯城—涟水深反射剖面看来, 它们可能是在扬子克拉通向北俯冲的副产品, 即前沿的逆冲断层<sup>[9~11]</sup>. 岩片 IV 往北中生代花岗岩体逐渐增多, 但仍有含柯石英的榴辉岩出现在片麻岩或大理岩中.

在图 1 的韧性剪切带 DF5 与 DF6 之间的岩片 IIIb 内发现有金刚石、大量的柯石英榴辉岩及橄榄岩体, 被认为是超高压变质岩片抬升的最高部位, 在这里打 5000m 的科学钻可取得超高压变质岩片折返前在地幔深处经受超高压变质的信息. 大陆科学钻探孔区就设计在这里, 即江苏省东海县西南部种马场与毛北村之间. 大陆科学钻探孔区地质情况如图 2 所示. 由图可见, 孔区构造复杂, 出露的岩石主要为超基性岩、榴辉岩、角闪岩与经超高压变质的片麻岩等. 其中有一个规模很大的榴辉岩体, 呈 A 型褶皱, 产状很陡, 倾角大于 60°, 在浮土之下出露.

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>[1]</sup>. 1999 年在这里完成了地震研究和一口深度为 1032m 的预先导孔 (CCSD-PP2 孔), 对钻孔进行了测井和 VSP 测量, 并对孔区浅层 (0 ~ 1000m) 地震反射体进行了初步的标定<sup>[2]</sup>. 2000 年在这里完成了孔区高精度地磁、重力调查, 并进行了主辅线反射地震法试验. 2001 年 8 月实施科学钻探先导孔 (CCSDP), 还完成先导孔 VSP 测量, 广角折射地震十字剖面<sup>[12]</sup>. 2002 年夏先导孔完工, 随后扩孔并转入主孔 (CCSD) 钻进. 同年开展了孔区三维地震调查<sup>[3]</sup>, 面积将近 20 km<sup>2</sup>. 2005 年 3 月主孔钻入 5158m 后终孔, 取芯率达 85%, 孔底井斜已超过 26°. 主孔岩芯与测井等第一手资料为超高压变质区带的反射体解释和地震波速建模打下了良好基础. 同年 3 ~ 4 月在主孔进行了 VSP 和地温测量, 并完成了一条过主孔的数字三分量反射地震剖面, 为大陆科学钻探工程的现场工作划上了句号. 大陆科

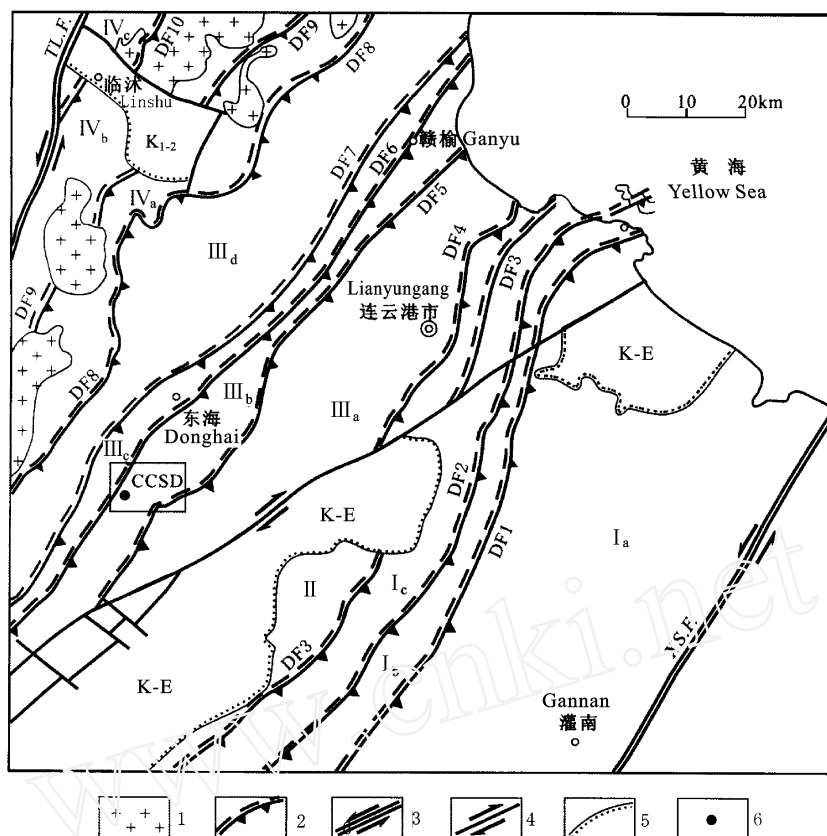


图1 苏鲁连云港地区的构造与大陆科学钻探孔区位置图(据文献[8]简化)

1 中生代花岗岩;2 韧性“逆冲”型剪切带;3 大型走滑断裂带(XS.F. - 响水断裂带,TL.F. - 郅庐断裂带);4 走滑断裂;5 角度不整合;  
6 大陆科学钻探孔址(CCS D). 南苏鲁高压(HP)低温(LT)变质岩剪切构造叠覆岩片; $I_a$ 灌南剪切构造岩片, $I_b$ 连云港剪切构造岩片,  
 $I_c$ 云台山剪切构造岩片; 南苏鲁高压(HP)中温(MT)变质岩剪切构造叠覆岩片; 北苏鲁超高压(UHP)变质表壳岩剪切构造叠覆岩片:  
“青龙山-房山”剪切构造岩片, $b$ 毛北剪切构造岩片, $c$ 石湖镇剪切构造岩片, $d$ 石梁河剪切构造岩片; 北苏鲁超高压(UHP)花岗质  
变质岩剪切构造叠覆岩片: $a$ 三清阁剪切构造岩片, $b$ 抗日山剪切构造岩片, $c$ 苍山剪切构造岩片.DF1~DF10为韧性剪切带编号.

Fig. 1 Map showing structure of Sulu region and the location of the Chinese continental drilling site (modified from reference [8])

1 granite; 2 ductile shear zone; 3 large strike-slip fault; 4 slip fault; 5 angular unconformity; 6 CCS D hole location.

I~IV:UHP rock slices; DF1~DF10:ductile shear zones.

学钻探孔区以及区域的地壳上地幔调查请参考文献[13~18].

在大陆科学钻探主孔开钻之前,中国大陆科学钻探中心地学部在孔区进行了大量物性测定工作,比较全面地掌握了该区出露的岩石在常温常压下的物理性质<sup>[19,20]</sup>.从多种参数测定结果可知,榴辉岩 $V_p = 7.0 \sim 8.4 \text{ km/s}$ ,密度比片麻岩高出 $0.7 \text{ g/cm}^3$ ,波速高 $600 \sim 1600 \text{ m/s}$ 左右,据计算与片麻岩围岩的波阻抗差最大可达0.3,能产生较强的地震反射波.受风化的片麻岩、角闪岩波速可以降低到 $4000 \text{ m/s}$ 左右,破碎带岩石的波阻抗也会明显降低,以产生负极性的地震反射体.

### 3 全观式地震采集三维技术

中国大陆科学钻探孔区三维地震调查是大陆科

学钻探工程的一项重要内容,主要目标包括:(1)配合钻探查明孔区地质构造,将钻探的一孔之见扩展到深6000m、长宽超过3000m的三维岩柱;(2)提供高精度定位的地壳反射体以供标定,而标定地壳反射体是大陆科学钻探的科学目标之一;(3)发现中、下地壳及地幔内的反射体;(4)开拓适应于地学基础研究的三维地震新技术,即成本大大低于石油勘探的三维地震新技术.实际上,在中国大陆科学钻探工程的设计中,三维地震子工程的经费仅为相应石油勘探预算的40%左右,只有依靠科技进步才能开展这项工作.

对于上述的前三项目标的实现,要求增加三维地震采集的叠加次数.尤其在结晶岩区,反射体尺度可能很小,只有通过多次叠加来增强反射信号.但是,叠加次数的增加要求增加成本,与上述第四项目标相矛盾,这就是本项科学工程的难点所在.地

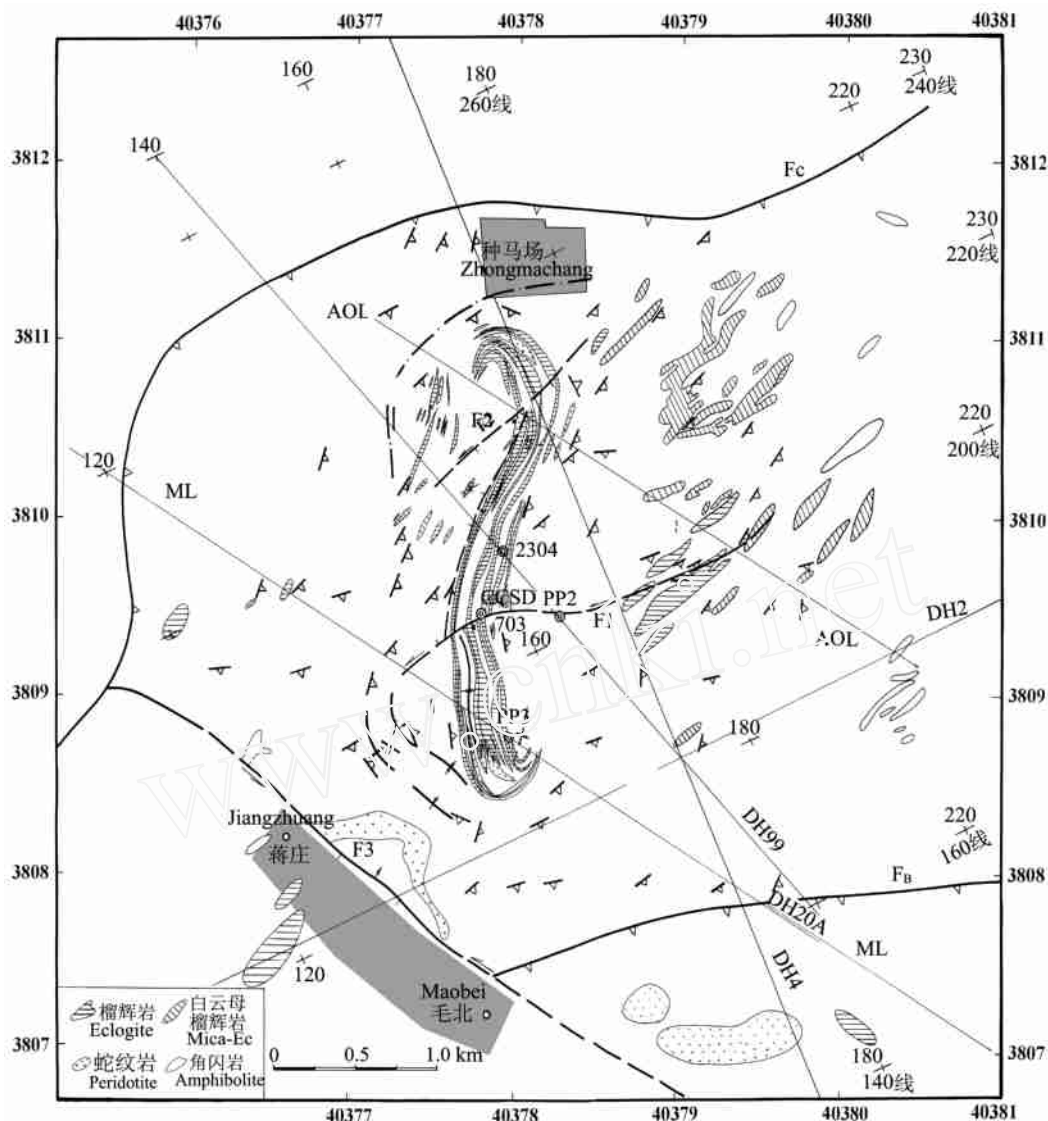


图 2 毛北科学钻探孔区地质图

斜框为三维地震调查的区域,用高斯 6 带座标系。CCSD 为先导孔位及主孔位置, PP2 为预先导孔, 2304 和 703 为早先浅孔位置,过 CCSD 孔的测线为三维地震主测线。DH2, DH4, DH99 为已有二维地震测线。

Fig. 2 Geology and seismic lines in the scientific drilling site

The box denotes the 3-D seismic survey area with 6° bend Gauss coordinates; CCSD and PP2 denote locations the main hole and pre-pilot hole; 2304 and 703 are earlier shallow holes; DH2, DH4 and DH99 are 2-D seismic lines.

球物理学的发展规律之一是:随着数据采集处理技术的不断提高,对地球探测的深度、精度和可靠性也不断提高,而成本却不断降低。到了 21 世纪,地震仪已经完全数字化,道数已经达到几千道,这就为全观式三维地震调查提供了基本条件。

所谓全观式三维地震调查指的是用地震检波器铺满全部测区的一种地震采集方法,“全观”指的是“全面铺设观测”的意思。在三维地震采集中,以打井放炮的成本为最高,只要能减少放炮,成本就可以大幅度地降低。当前,采用可控震源技术可以不放炮,但是要求地表交通通畅。在大陆科学钻探孔区,

地表全部为甲级农田和庄稼地,用可控震源不仅会延长工期,而且农田和庄稼的赔偿费数目很大,不能节约成本。因此,用手扶拖拉机作用动力的打井放炮是地震采集的主要方式,而降低成本的主要途径为大幅度减少炮点。但是,为了保证较高的叠加次数,必须同时大幅度地增加接收点数,全观式三维地震调查就是这样提出来的。

全观式三维地震调查指排列不滚动的三维地震调查,只要有千道数字地震仪就可进行,尤其适合于小面积的三维地震工作。这种方法的优点是:(1)施工程序化,工期短,快速高效。作业的第一阶段为测

地与打炮井同时进行,由于炮点不多,时间不会太长。第二阶段为打井后期进行测线铺设,在最短时间内把全区几千个检波器埋设好。第三阶段为连续放炮观测,同时对哑炮补炮,工作顺利时一夜可放 100 炮。(2) 叠加次数高、记录质量好。(3) 与常规三维地震相比成本大幅度减少。当然,这种方法也有缺点,如工区内叠加次数不均匀,要求加强警戒工作等。

2002 年春在中国大陆科学钻探孔区内进行了全观式三维地震测量,由胜利油田地球物理勘探公司承包地震采集工程,主要地质任务是在毛北主孔地区,以主孔为中心进行约  $20\text{km}^2$  的高分辨率三维地震勘探,取得优质资料。用 14 kg 高效炸药放入 17m 深的炮井中放炮,炮点距 160m,炮线距 200m,炮线数 27 条,总炮数 608 炮。同时,用 1400 道 IMAGE-6000 地震仪在覆盖全部测区的 10 条测线上接收,采样率为 2ms,记录长度为 24s。接收线距 400m,接收道间距 40m。现场处理系统为 LANDMARK 公司的 PROMAX 处理系统,CMP 面元  $20\text{m} \times 40\text{m}$ ,测区总面积为  $20.46\text{km}^2$ ,仅用了大约 17 天就完成了全部采集工作。图 3a 为最早设计的全观式三维地震测量排列,蓝线为铺设检波的测线(In-Line),红色圆圈表示炮点(对应 X-Line)。

通过对工区内的毛北、陆湖等村庄、毛北水库、安峰山水库、鹿场等地表障碍物的实际测量、仔细分析了采集观测系统的属性,同时通过实测地表障碍物平面位置对观测系统的影响,对原设计作了修改,调整后的三维地震排列示于图 3b。相应计算的叠加次数示于图 3c,由图可见,全观式三维地震测量的叠加次数是不均匀的,可在 1~127 之间变化。测区边缘叠加次数最低,但其他部分都在 12 次以上;中心部分最高,达 127 次。通过分析该观测系统的属性,炮检距在 0~1000m 的范围内,其覆盖次数分布图基本上不受障碍物的影响。在更大的炮检距范围内,覆盖次数、炮检距、方位角的分布都是比较均匀的。

为取得静校正的准确数据,设计中包括采用小折射法对全区的低降速带进行调查。小折射采用 24 道相遇观测系统,道距 1~3 道为 1m、3~6 道为 2m、6~9 道为 3m、9~11 道为 5m、11~14 道为 10m、14~16 道为 5m、16~19 道为 3m、19~22 道为 2m、22~24 道为 1m,偏移距为 2m,排列总长度为 87m。通过调查取得的表层波速平面图见图 3d,同时还得到了低速层厚度的准确数据,为高精度三维地震静校正提

供了基础。全区的小折射解释成果表明:低速层速度范围为:325~750m/s;降速层速度范围为:1700~2350m/s;高速层速度范围为:3150~4350m/s。低速层厚度范围为:1.25~4.98m;降速层厚度范围为:6.23~9.78m;低、降速层厚度范围为:8.19~13.48m。

在全观式三维地震施工中还要注意,在高精度三维地震接收激发因素的选择上,始终坚持接收宽频信息。同时,坚持三级检查制,充分排列不滚动的有利条件,确保检波器埋置完全正确。高精度的测量、全方位接收的观测系统、小面元、高覆盖次数、中井深中药量激发、面积组合接收是全观式三维地震采集的有效技术手段,辅以全面的质量监控手段,确保了工程目标的实现。

数据处理包括观测系统定义、去除干扰波、折射静校正、速度分析、动校叠加、真振幅恢复和偏移,包括叠前时间偏移和深度偏移。野外采集观测系统定义的正确与否,直接影响到处理的结果。所以定义观测系统是全观式三维地震关键的处理环节之一。要绘制炮点位置、排列位置图,检查是否与野外提供的观测系统一致。对共炮点记录和共偏移距记录进行线性校正,经过线性校正后的共偏移显示用来检查炮点位置是否准确。还可抽出共反射点道集进行初步叠加,与二维测线对比观察构造的相似性见图 4。通过上述三个环节的质量控制来检查道头定义的正确,保证了观测系统定义的准确性。由于浅部基岩波速不均匀,剩余静校正也是地震处理的一项重要环节,以后将专门撰文讨论。

## 4 三维地震调查的几点结果

三维地震处理结果揭示了变质岩中地震反射体的复杂结构,清楚地看出多组倾向较缓的反射,以及反射体为晚近地质时期正断层组所断开的细节<sup>[1~3]</sup>。由于已有论文阐述,本文只对三维地震资料特殊性 & 新成果作几点补充。

### 4.1 三维地震时间切片的反射特征

分析三维地震波场的时间切片是揭示地下构造的有效方法,这也是二维地震所不具备之处<sup>[21]</sup>。很有意思的是,我们发现某些时间切片与大陆科学钻探孔区的重力异常及地面磁测异常有相关性。例如,在 450ms 的时间切片上(图 5a),地震波振幅图像与地表基岩地质图基本一致,断层线走向也与波场分布基本吻合,反映出由于榴辉岩体产状很陡浅部



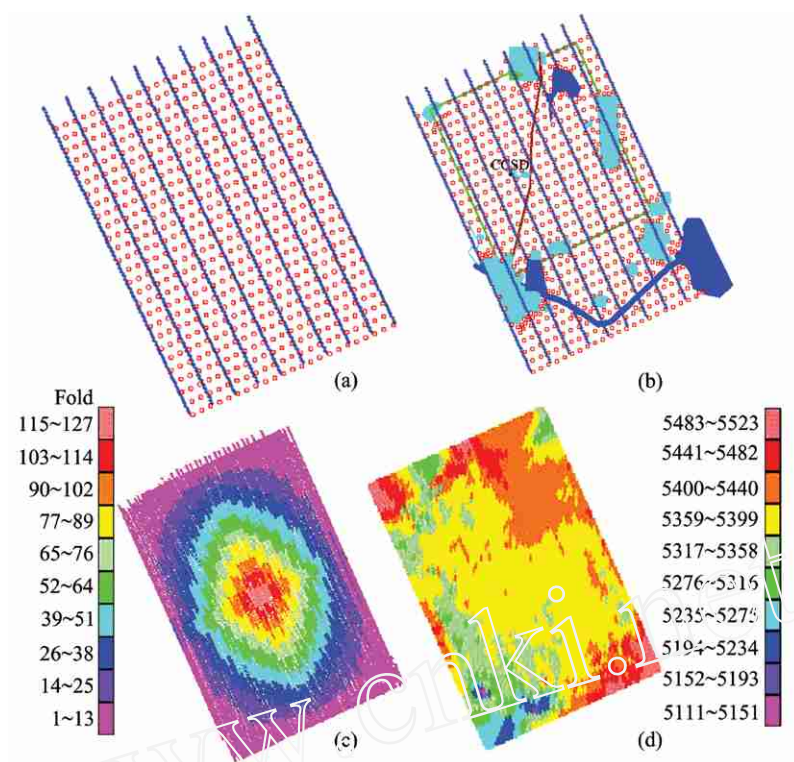


图 3 全观式三维地震测线与炮线设计图及相关图

(a) 原始设计的全观式三维地震测量排列, 蓝线为铺设检波的测线 (In-Line), 红色圆圈表示炮点 (对应 X-Line); (b) 考虑到地表障碍物对观测系统的影响调整后的三维地震排列; (c) 相应计算的叠加次数图; (d) 通过小折射调查取得的表层波速平面图.

Fig. 3 Seismic configuration and related for the CCSD investigation

(a) Original designed seismic configuration, blue lines are geophone lines (In-line), and red spots are shots (in X-Line); (b) real seismic configuration after consideration of obstacles; (c) corresponding fold numbers for the survey; and (d) surface seismic velocity obtained by small-scale refraction observation.

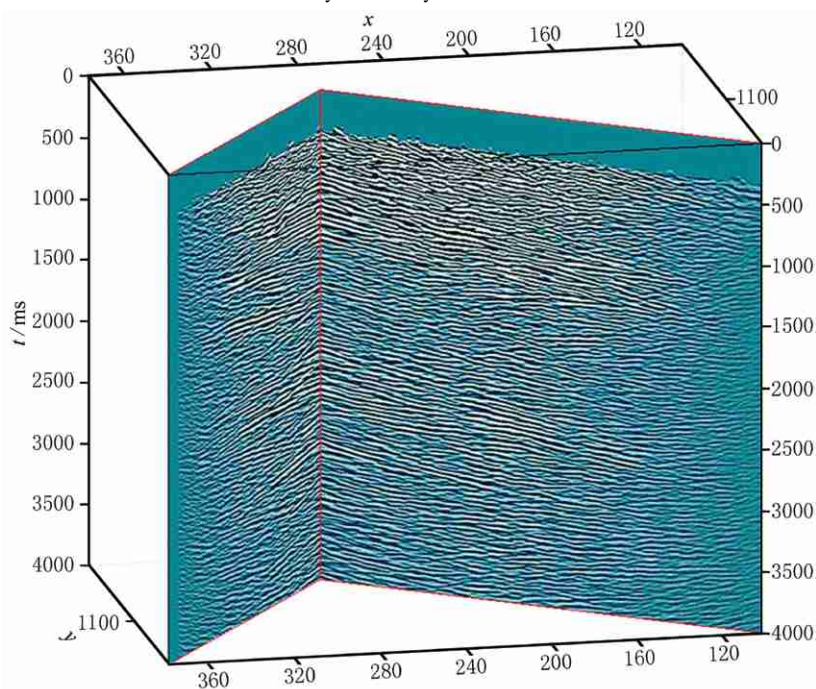


图 4 全观式三维地震数据体垂直切片: 过 CCSD 主孔斜切

Fig. 4 Seismic data processing flow-chart for the CCSD 3-D investigation

1000m 范围内地质构造的变化不大. 1000m 以下情况发生了变化,是由于越过区域性韧性剪切带进入新的岩片引起的. 到了 800ms 以后,地震波振幅图像逐渐与重力异常接近,到 1050ms(深度 3000m 左右)重力异常等值线分布与波场基本吻合(图 5b),说明本区深度 3000m 附近有隐伏的高密度体存在. 从物理性质测定数据看,这种高密度体很可能是含金红石的榴辉岩矿体.

时间切片是三维地震所特有的图像,地震波振幅图像与重力异常的相关性反映了重力异常源与深部地震组结构的同源性,对地球物理资料的综合解释有一定意义.

分析三维地震波场的时间切片也是揭示地下隐伏岩体的有效方法. 图 6 为孔区三维地震数据体的时间切片,切片双程走时分别为 800ms(图 6a)和 1000ms(图 6b),对应深度为 2400m 和 2900m. 两张时间切片的右方都出现环卵形反射,而且这种反射体的范围在 1050ms 的切片上变大,都表明隐伏榴辉岩体的存在. 因此,推断大陆科学钻探孔区东南方存在大的隐伏榴辉岩体.

## 4.2 标定地壳反射体

标定地壳反射体是大陆科学钻探的科学目标之一,而三维地震调查的任务之一乃是提供高精度的三维反射体以供标定<sup>[22]</sup>. 图 7 显示了由三维地震数据体揭示的过主孔的主要地震反射体,编号从 a 到 h.

根据岩芯、岩芯物性测定结果、测井与 VSP 资料,标定这些地震反射体的根据与方法将另文专门讨论. 根据标定结果,强反射体 a, c, e 和 g 主要由韧性剪切带引起,与原先预测的情况相符.

## 4.3 发现地幔内的反射体

大陆科学钻探是由钻孔取芯和地球物理探测相互反馈组成的大型科学工程,其成果可用来探测地壳深部及地幔的结构,这方面笔者已经有所报道<sup>[16]</sup>. 上节提到,本项全观式三维地震调查的一个目的是发现地壳深部及地幔的反射体. 通过调查在毛北科学钻探孔区发现了多层明显的地幔反射波. 例如,双程走时 17.5 ~ 18s 的叠加数据体上,缓倾的强反射在不同方向剖面上都十分突出(图 8). 地幔内多层反射体的发现为中国东部中生代岩石圈减薄提供了地球物理证据<sup>[16]</sup>.

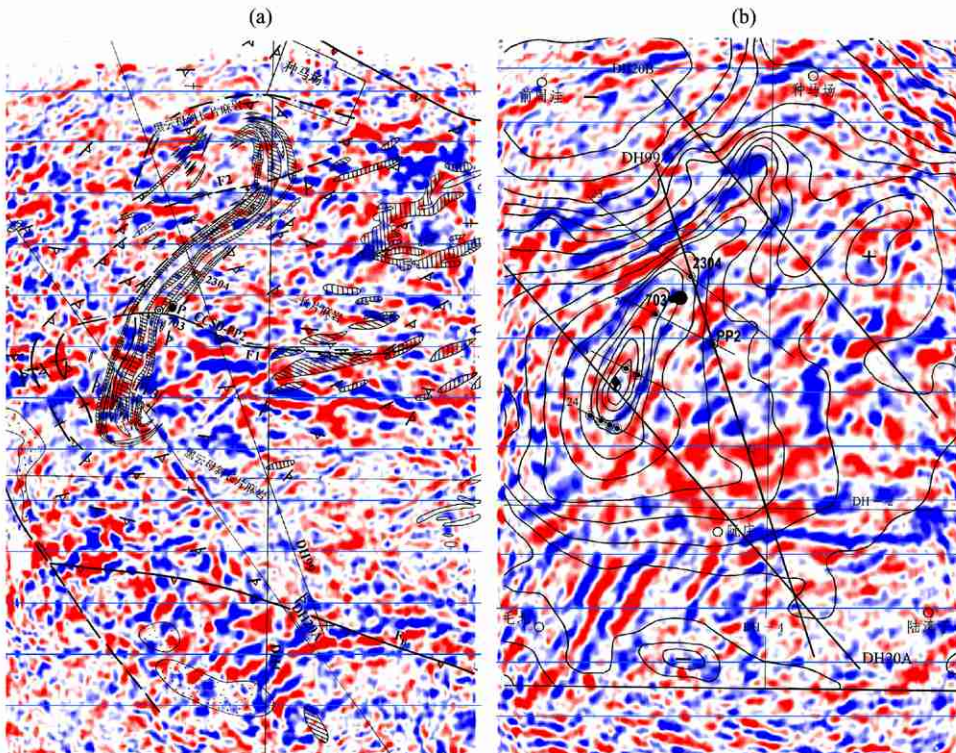


图 5 三维地震数据体的时间切片

(a) 切片双程走时为 450ms 并与地表地质图对比,图例见图 2; (b) 1050ms 时间切片,并与布格重力异常等值线对比.

Fig. 5 Time-slices of 3-D seismic data

(a) Two-way times for 450ms comparing with the surface geology; (b) time slice at 1000ms in comparison with Bouguer gravity anomalies.



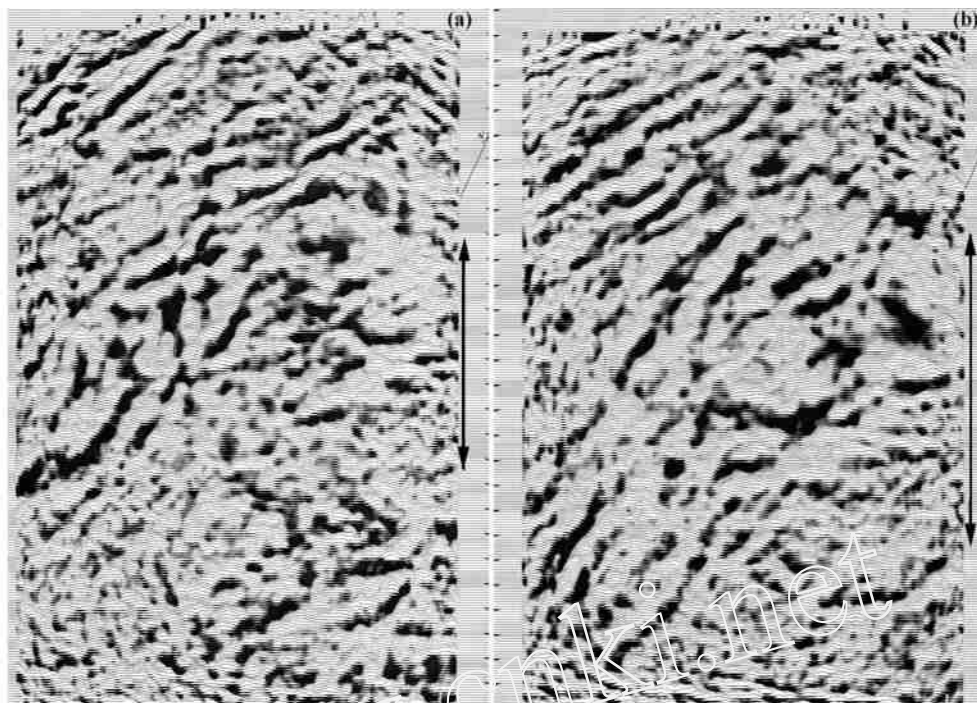


图 6 三维地震数据体的时间切片

切片双程走时分别为 800ms(a) 和 1000ms(b), 右侧双向箭头标出了对应榴辉岩体的卵形反射地震结构的范围. 纵横坐标为距离范围, 见图 2.

Fig. 6 Time-slices of 3-D seismic data

Two-way times are 800ms (a) and 1000ms (b). Arrows indicate the ranges of the oval reflector corresponding to the deep eclogite body.

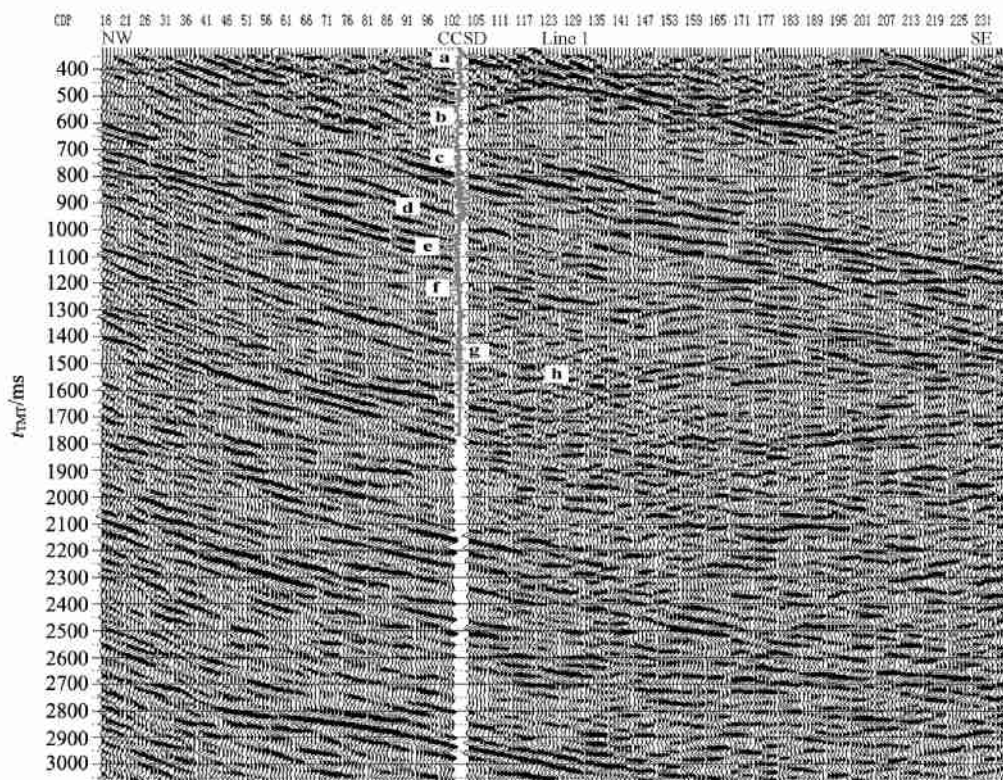


图 7 过主孔三维地震数据体揭示的主要地震反射体

编号从 a 到 h 显示剖面沿地质倾向方向切开 (I 线), 双程走时 0.3 ~ 3s. CCSD 标明钻孔位置及由测井取得的声阻抗曲线.

编号 a ~ h 的轨迹表示钻孔实际弯曲情况.

Fig. 7 Illustration of the main seismic reflectors across the CCSD hole from the 3D survey

Codes from a to h indicate reflectors. The profile is along the dipping of the 3-D data volume with TWT 0.3 ~ 3s. CCSD denotes the hole location with the impedance curve obtained from well logging data. The trajectory with letters from a to h shows the deviation of the hole.



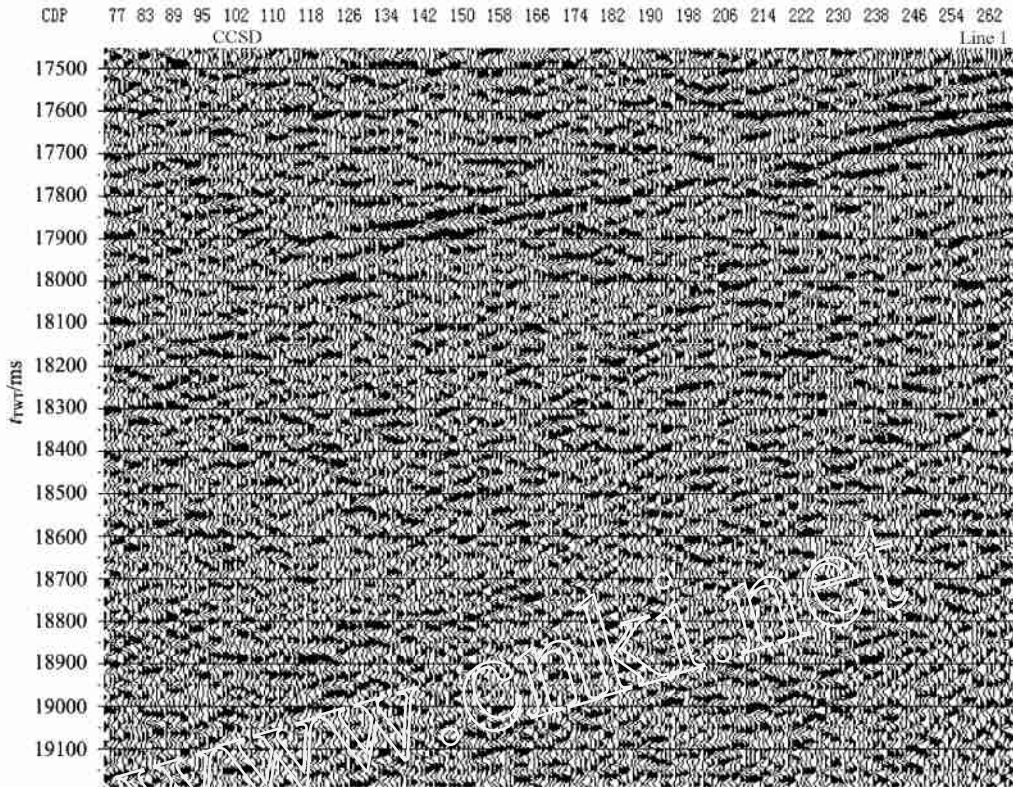


图 8 沿倾向线切开的深反射地震叠加剖面(双程走时 17.4 ~ 19s) 发现地幔内缓倾的强反射

Fig. 8 Stacked deep reflection profile along the dipping direction ( $t_{TWT}$  17.4 ~ 19s), showing a gently dipping reflector within the mantle

## 5 结 论

(1) 全观式三维地震调查是一种三维地震新技术,指的是地震排列不滚动而用检波器铺满全部测区的一种地震采集方法,尤其适合于有限面积的三维深反射地震调查。这种方法的优点是:(1)快速高效;(2)覆盖次数高;(3)与常规三维地震相比成本大幅度减少。

(2) 在中国大陆科学钻探孔区内进行的全观式三维地震测量,全面实现了预期目标,包括:(1)配合钻探查明孔区地质构造,将钻探的一孔之见扩展到深 6000m、长宽超过 3000m 的三维岩柱;(2)提供高精度定位的地壳反射体以供标定;(3)发现中、下地壳及地幔内的反射体等。

(3) 三维深反射地震取得了丰硕成果,如查明大陆科学钻探孔区地壳上地幔结构,发现地壳隐伏的金红石榴辉岩体,预测了主孔岩性构造,指导了钻探工程施工等,说明三维反射地震调查是大陆科学钻探计划的重要组成部分。

致 谢 中国大陆科学钻探中心首席科学家许志琴院士和马在田院士提供宝贵意见,同济大学海洋与

地球科学学院参加了三维地震资料的处理与分析,在此致以衷心感谢。

## 参考文献(References)

- [1] 杨文采,程振炎,张春贺. 中国科学钻探选址地球物理调查与大别—苏鲁岩石圈. 地球学报, 2003, 24(5): 391 ~ 404  
Yang W C, Cheng Z Y, Zhang C H. Geophysical investigation for site-selection of Chinese continental scientific drilling and Dabie-Sulu lithosphere. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 2003, 24(5): 391 ~ 404
- [2] 杨文采,张春贺,朱光明. 标定大陆科学钻探孔区地震反射体. 地球物理学报, 2002, 45(3): 370 ~ 384  
Yang W C, Zhang C H, Zhu G M. Calibration of seismic reflectors inferred from observations at the Chinese continental drilling area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(3): 386 ~ 392
- [3] 杨文采,杨午阳,程振炎. 中国大陆科学钻探孔区三维地震资料的初步解释. 岩石学报, 2004, 20(1): 127 ~ 138  
Yang W C, Yang W Y, Cheng Z Y, et al. Interpretation of 3-D seismic reflectin data in the Chinese Continental Scientific Drilling site. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2004, 20(1): 127 ~ 138
- [4] Cong B, Wang Q, Zhai M, et al. UHP metamorphic rocks in the Dabie-Sulu region, China: their formation and exhumation. *Island Arc*, 1994, 3: 135 ~ 150
- [5] Liou J G, Maruyama S, Ernst W G. Seeing a mountain in a grain of garnet. *Science*, 1997, 27(4): 48 ~ 49
- [6] Ernst W G, Maruyama S, Wallis S. Buoyancy-driven, rapid

- exhumation of ultrahigh-pressure metamorphosed continental crust. *Proc. National Academy of Sciences*, 1997, **94**: 9532 ~ 9537
- [7] Hacker B R, Sharp T, Zhang R Y, et al. Determining the origin of ultra-high pressure Iherzolites. *Science*, 1997, **278**(10): 702 ~ 704
- [8] 许志琴, 张泽民, 刘福来等. 中国大陆科学钻探主孔 1200 米构造柱及变形构造初步解析. *岩石学报*, 2004, **20**(1): 53 ~ 72  
Xu Z Q, Zhang Z M, Liu F L, et al. The structure profile of 0 ~ 1200m in the main borehole, Chinese Continental Scientific Drilling and its preliminary deformation analysis. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2004, **20**(1): 53 ~ 72
- [9] 杨文采, 胡振远, 程振炎等. 郯城—涟水综合地球物理剖面. *地球物理学报*, 1999, **42**(2): 206 ~ 217  
Yang W C, Hu Z Y, Cheng Z Y, et al. Long profile of geophysical investigations from Tancheng to Lianshui, east-central China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, **42**(2): 206 ~ 217
- [10] 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 (I) —深反射地震. *地球物理学报*, 1999, **42**(1): 41 ~ 52  
Yang W C, Cheng Z Y, Chen G J, et al. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (I): Deep seismic reflection. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, **42**(1): 41 ~ 52
- [11] 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 (II) —非地震方法. *地球物理学报*, 1999, **42**(4): 508 ~ 519  
Yang W C, Fang H, Cheng Z Y, et al. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (II): Non-seismic methods. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, **42**(4): 508 ~ 519
- [12] 姜 枚, 王有学, 宿和平. 宽频地震方法技术在地震探测工作中的应用. *地质学报*, 2003, **22**(7): 536 ~ 539  
Jiang M, Wang Y X, Su H P. Wide-frequency teleseism and its application to seismic exploration. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2003, **22**(7): 536 ~ 539
- [13] Yang W C. Crustal structure and development of Dabie UHPM Terrane in East-Central China. *Continental Dynamics*, 1998, **3**(1 ~ 2): 86 ~ 95
- [14] Yang W C. Analysis of deep intracontinental subduction. *Episodes*, 2000, **23**(1): 20 ~ 24
- [15] Yang W C. Geophysical profiling across the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, Eastern China. *Tectonophysics*, 2002, **354**: 277 ~ 288
- [16] Yang W C. Flat mantle reflectors in eastern China: possible evidence of lithospheric thinning. *Tectonophysics*, 2003, **369**(3-4): 219 ~ 230
- [17] 杨文采, 杨午阳, 金振民等. 苏鲁超高压变质带岩石圈地震构造. *中国科学*, 2004, **34**(4): 307 ~ 319  
Yang W C, Yang W Y, Jin Z M, et al. Lithospheric seismic fabrics of Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Science in China*, 2005, **48**(5): 585 ~ 600
- [18] 杨文采, 汪集昀. 苏鲁地区地壳岩浆底侵的地球物理判识. *地质学报*, 2002, **76**(2): 173 ~ 179  
Yang W C, Wang J Y. Geophysical evidences for crustal magmatic underplating in Sulu area. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2002, **76**(2): 173 ~ 179
- [19] Kern H, Jin Z, Gao S, et al. Physical properties of UHPM rocks from the Sulu terrain, eastern central China: implications for the seismic structure at Donghai (CCSD) drilling site. *Tectonophysics*, 2002, **354**: 315 ~ 330
- [20] 陈 意, 金振民, 欧新功等. 韧性剪切带中片麻岩和超高压榴辉岩变形特征及其与地震波速各向异性的关系. *岩石学报*, 2004, **20**(1): 97 ~ 108  
Chen Y, Jin Z M, Ou X G, et al. Deformation features of gneiss and UHP eclogite from ductile shear zone and its relation with seismic velocity anisotropy: Evidences from core samples at depth of 680 ~ 1200m of CCSD. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2004, **20**(1): 97 ~ 108
- [21] 杨文采, 张春贺, 黄秋平等. 线形区域的主辅线反射地震调查方法. *地球物理学报*, 2005, **48**(6): 1325 ~ 1335  
Yang W C, Zhang C H, Huang Q P, et al. Additional-observation seismic reflection method for investigation of linear areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(6): 1325 ~ 1335
- [22] 杨文采, 杨午阳, 程振炎. 中国大陆科学钻探孔区的地震波速模型. *地球物理学报*, 2006, **49**(2): 477 ~ 489  
Yang W C, Yang W Y, Cheng Z Y. Seismic velocity model for the Chinese continental scientific drilling site. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(2): 477 ~ 489

(本文编辑 刘少华)