

杨文采, 杨午阳, 程振炎. 中国大陆科学钻探孔区地震反射的标定. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1682 ~ 1692

Yang W C, Yang W Y, Cheng Z Y. Calibration of seismic reflectors at the Chinese Continental Scientific Drilling site. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(6): 1682 ~ 1692

中国大陆科学钻探孔区地震反射的标定

杨文采, 杨午阳, 程振炎

中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室, 北京 100037

摘 要 利用大陆科学钻探取得的岩芯岩性、构造编录和波速、中子密度测井资料, 可以比较准确地标定大陆科学钻探主孔两侧三维地震发现的反射体. 二维地震剖面上的反射体可能与二维测线方向有关, 三维地震提供了与方向无关的反射体信号, 为结晶岩区地壳反射体的标定提供了更加准确可信的基础数据. 只有在建立准确的波速模型、由测井资料合成的地震道与三维地震剖面之间达到完美拟合之后, 反射体标定才有意义. 地震剖面、测井和岩芯资料的柱状对比图由于未考虑非线性时深转换和钻孔的弯曲, 只能供初步分析用; 反射体的详细标定还要考虑到时深转换的非线性及钻孔的弯曲, 逐一制作标定分解图. 引起结晶岩中反射体的机制是多方面的, 文中逐一分析了过主孔的 10 个主要地震反射体的特点及成因, 总结了结晶岩地区反射体分为三大类: () 与韧性剪切作用有关的反射体; () 与侵入岩或正变质岩岩体有关的反射体; () 与围岩岩性构造不均匀性有关的反射体.

关键词 大陆科学钻探, 结晶岩区, 标定反射体, 三维地震调查

文章编号 0001-5733(2006)06-1682-11 **中图分类号** P631.315 **收稿日期** 2005-10-27, 2006-04-05 收修定稿

Calibration of seismic reflectors at the Chinese Continental Scientific Drilling site

YANG Wen-Cai, YANG Wu-Yang, CHENG Zhen-Yan

Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China

Abstract Three-dimensional seismic survey has been carried out for the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) project, showing that many reflectors occur in the upper crust beneath the drilling area. Calibration of the reflectors by using cores and well-logging data can significantly enhance reliability of their interpretation. As 2-D seismic reflectors might be related to direction of the 2-D lines, 3-D surveys present reflectors unrelated to the line direction, therefore provide more reliable reflectors for the calibration. Only after obtaining a correct velocity model that gives perfect fit between the 3-D seismic profile and the synthetic seismic trace derived from well-logging data, the calibration of reflectors can become meaningful. Simple comparison of the core log, well-logging curves and reflection sections is not enough for the calibration, because non-linear time-depth conversion and deviation of the well are not considered in the procedure. The calibration should proceed from one reflector to another considering both the non-linear time-depth conversion and deviation of the well. The calibration at the CCSD site via the main hole finds many causes that can generate reflectors in the crystallized crust. They include mainly three types as follows: (a) ductile-shearing-origin reflectors; (b) intrusion-or-metamorphic-lens origin; and (c) origins related to inhomogeneity of country rocks, such as gneisses.

Key words Chinese Continental Drilling, Crystallized region, calibration of reflectors, 3-D survey

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, 研究员, 博士生导师. 1984 年在加拿大 McGill 大学取得博士学位. 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地幔深处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结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、结构与构造的直接数据.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,对孔区三维地质构造的了解有赖于三维地震资料的推断解释.本文将简要介绍中国大陆科学钻探孔区的三维地震资料,并对结晶岩区地质构造的地震解释方法提出新的看法.

对于岩石圈内部的反射地震结构的来源,科学家们虽然作出了种种解释,但是由于可供直接验证的证据很少,对地壳深部反射体形成的机制很难准确标定.地震学只能取得间接的证据,直接的证据必须来自钻探.由于钻井技术和经费的限制,近期钻入中地壳取芯是不现实的.然而,地壳运动有时也会将深层的岩块带到地壳表层,给人们用不太深的钻孔了解中下地壳岩石的机会.通过研究这些地段地球物理资料和钻孔岩芯等直接证据的相关性,有可能标定反映地壳深部岩层的地球物理异常,了解它们的内部组成与结构.中国大陆科学钻探工程的实施为标定结晶岩区地震反射体提供了机会.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写过两篇论文^[1,2],它们是本文讨论的主要依据,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^[3-7].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^[8].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,约3km长,400m宽,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4GPa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^[8].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.从区域性的郟城—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^[9-11].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.

大陆科学钻探孔区设计在江苏省东海县西南部种马场与毛北村之间.在这里的超高压变质岩片内发现有金刚石、大量的柯石英榴辉岩及橄榄岩体,被认为是超高压变质岩石抬升的最高部位,因此在这里打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大量信息.大陆科学钻探孔区地质情况如图1所示.如图可见,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^[1].1999年在这里完成了地震研究和一口深度为1032m的预先导孔(CCS-D-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^[2].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2000m科学钻探先导孔(CCS-D-P),还完成先导孔VSP测量,广角折射地震十字剖面^[12].2002年夏先导孔完工,随后扩孔并转入主孔(CCS-D)钻进.同年开展了孔区三维地震调查^[3],面积将近20km².2005年3月主孔

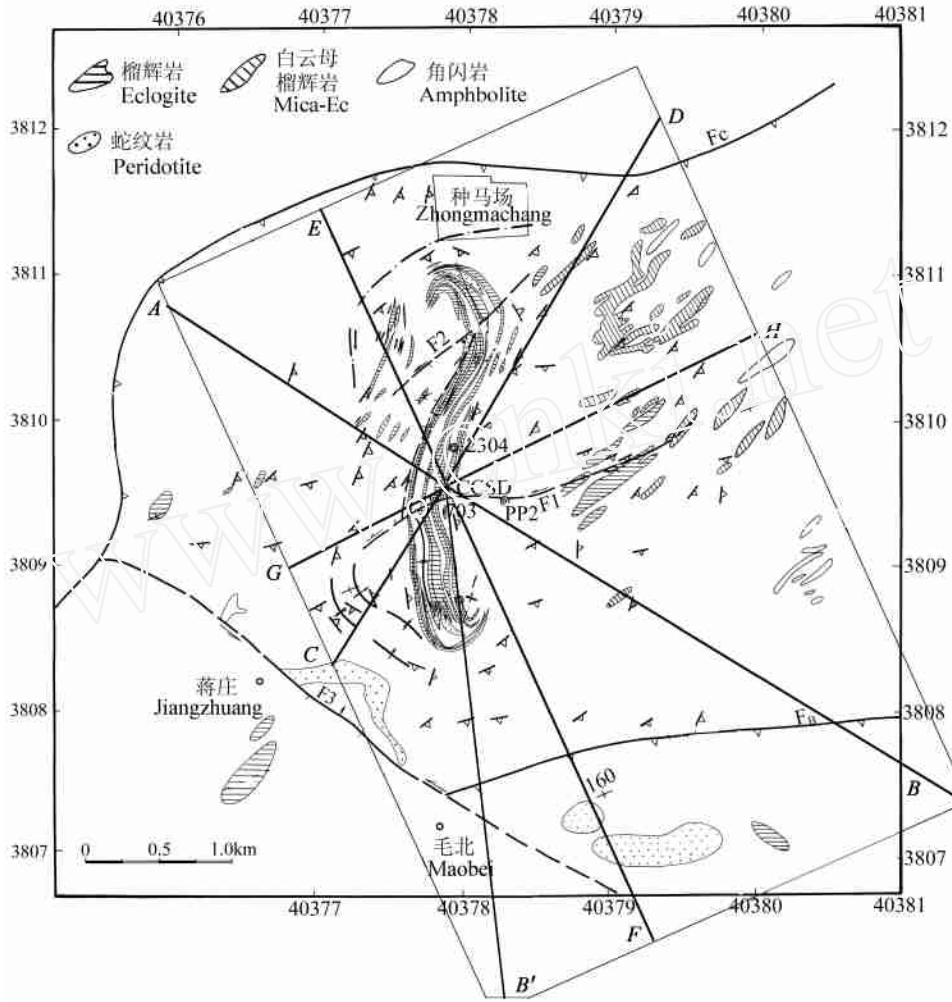


图 1 毛北科学钻探孔区地质图

本图用高斯 6 带座标系,斜框为三维地震调查的区域. 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. AB, CD, EF, GH 为切开三维地震数据体获得的过主孔剖面.

Fig. 1 Map showing 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 the main hole and pre-pilot hole locations; 2304 and 703 are shallow holes; AB, CD, EF and GH are profiles across the main hole from the 3-D seismic data volume.

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。大陆科学钻探孔区以及区域的地壳上地幔调查请参考文献 [13~21]。

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。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 g/cm^3 左右, 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。受风化的片麻岩和角闪岩波速可以降低到 4000 m/s 左右, 破碎带岩石的波阻抗也会明显降低, 以产生极性的地震反射体。常温常压下的测定结果只能说明上地壳岩石折返回地表后物性的情况, 在高温高压下的物性和波速各向异性测定结果表明, 变质岩区波速的各向异性很突出, 不仅片麻岩、角闪岩等片理发育或矿物定向排列的岩石有明显各向异性, 橄榄

岩及榴辉岩也具有(2~6)%左右的各向异性^[13,14], 在地震波传播时可能加大反射波能量. 在刚刚发表的论文中已经讨论了主孔的波速模型和数据采集方法, 本文不再重复这些内容^[22,23], 只讨论过主孔三维

地震反射体的标定.

3 孔区三维地震反射体

图 2 展示了孔区三维地震主剖面(图 1 中的

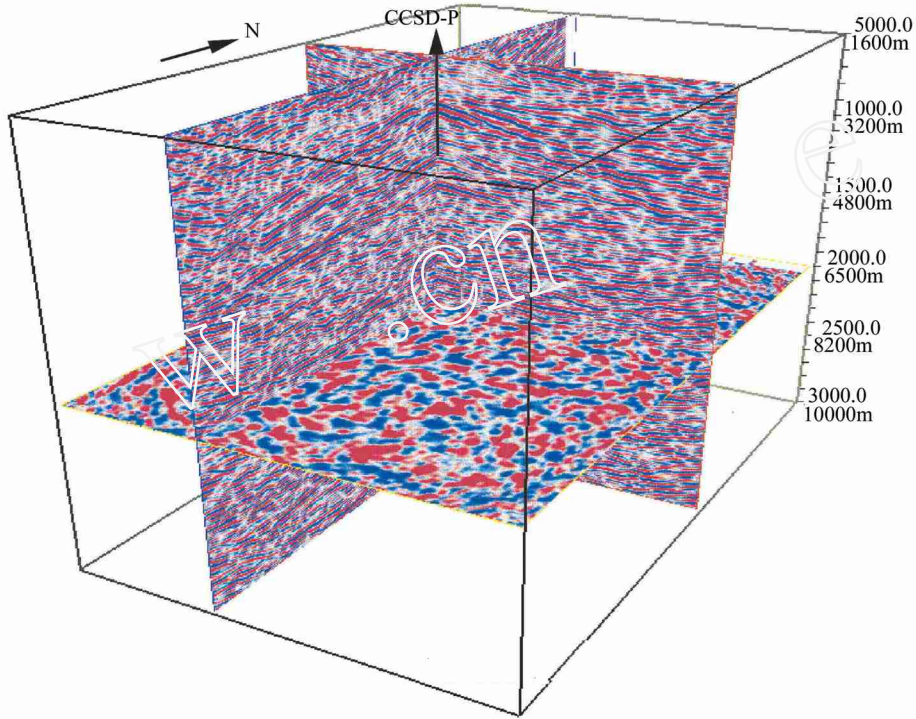


图 2 孔区三维地震主剖面(图 1 中的 EF)、连线线(图 1 中的 GH)和 3s 时间切片立体图

Fig. 2 3-D seismic reflection data displayed along the in-line, X-line and time slice of 3s

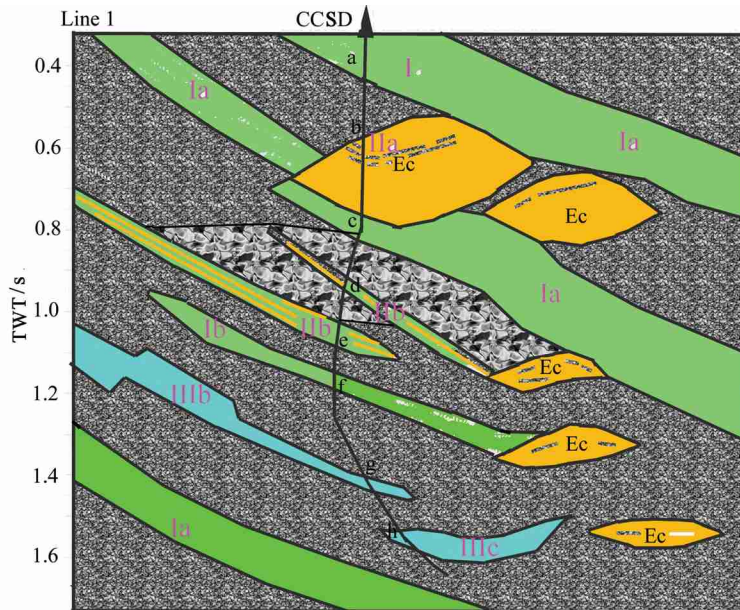


图 7 经过标定的地震反射体推断剖面

绿色示韧性剪切带,深黄色示榴辉岩体,淡蓝色示片麻岩中的非均匀体,灰底示片麻岩,中央淡色加黑洞示含流体裂隙隙层, Ia - IIIc 见表 1.

Fig. 7 Inferred geological and structural profile after the calibration of the seismic reflectors

The green shows ductile shear zone, dark yellow shows eclogites (Ec), the light-blue shows inhomogeneity in gneisses that are fitted by dark grey. The light-grey plus black holes in the middle shows a fracture layer filled with fluid.

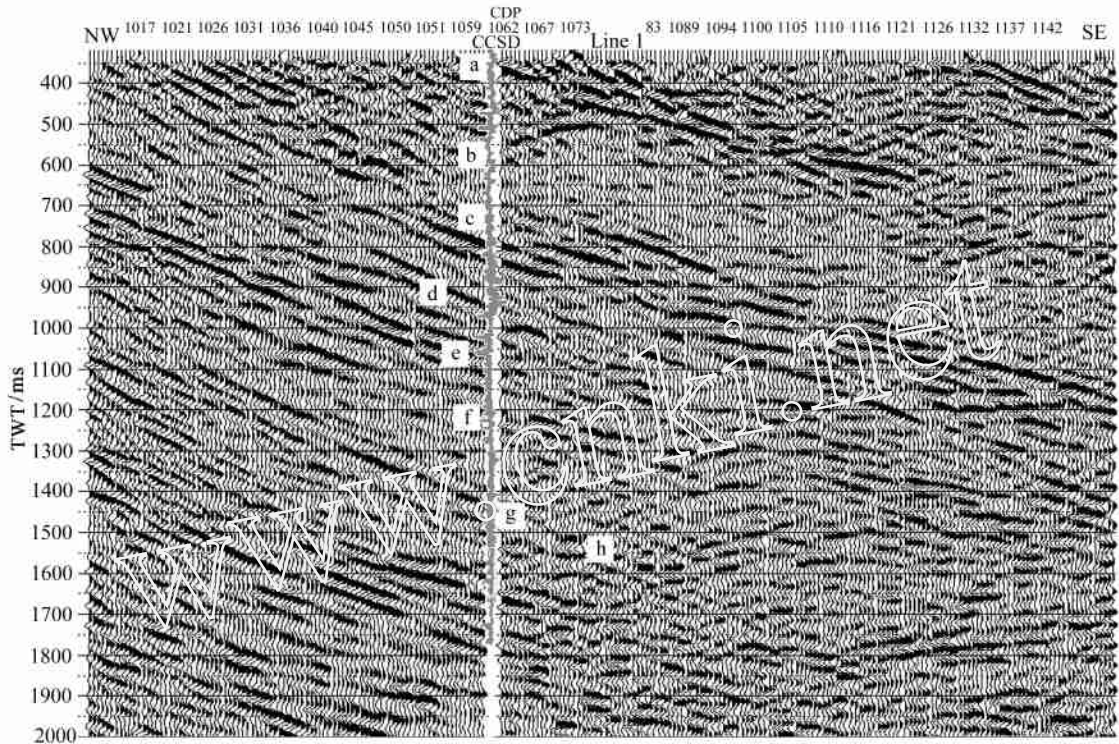


图 3 过 CCSD 主孔并沿构造倾向切开的三维地震叠后时间偏移剖面

纵轴双程走时单位为 ms, 剖面位置示于图 1 中的 AB 线, 字母 a ~ h 为三维地震反射体编号, 字母的轨迹表示钻孔的实际弯曲

Fig. 3 3-D poststack-migration profile along the dipping direction and across the main hole; the location of the profile is indicated by line AB in Fig. 1; letters a ~ h denote the numbers of main reflectors; the trajectory of the letters indicates the hole's deviation

EF)、联络线(图 1 中的 GH)和时间切片立体图,是由叠后深度偏移取得的,可见到以缓倾斜反射占优势的丰富的三维地震反射体.虽然叠前深度偏移在理论上具有优越性,但要求较大的成像孔径;由于孔区面积不大,难以满足深层成像孔径的要求,因此叠前深度偏移只能用于孔区中部深度 2~3km 以内的构造成像.试验表明,用叠前时间偏移修正波速模型之后再作叠后偏移,可以提供 5000m 井孔周围的地震组构图像.当然,由于波速模型存在误差,在时间偏移上定义三维地震反射体更为可取.过 CCSD 主孔并沿构造倾向切开的三维地震叠后时间偏移剖面(图 1 中的 AB 线)示于图 3,除了反射体归位之外,还可以清楚地看出多组倾角较缓的反射,以及反射体为晚近地质时期正断层组所断开的细节,揭示了变质岩中地震反射体的复杂组构.

在图 3 中我们沿钻孔的实际轨迹对钻孔穿过的反射体连行了编号.从上向下划分出 8 个反射体,分别命名为反射体 a,反射体 b, ...,直到反射体 h.要说明的是,这些反射体在二维剖面上不一定都存在,而且不论沿什么方向切开三维数据体,这些反射体都存在.实际上,我们在图 1 所示的所有剖面上,如

AB, CD, EF, GH 甚至 B-CCSD-B 折线剖面上都可以一个不漏地对这类反射体进行相同的编号.例如,在图 4 上展示了联络线上的对应反射剖面,其上沿钻孔的反射体位置和编号与图 3 上完全一致,说明三维地震提供了与方向无关的反射体信号,为结晶岩区地壳反射波的标定提供更加准确可信的基础数据.当然,以前用二维地震剖面和先导孔岩芯标定的反射体也是正确的^[2],但反射体可能与二维测线方向有关,不一定有本文中利用三维地震资料 and 主孔进行的标定全面.

2002 年根据大陆科学钻探先导孔的 2000m 岩芯和测井资料、井旁 VSP 和数值模拟结果证实,高波速的榴辉岩体、破碎断裂带和大型韧性剪切带都可引起倾斜的地震反射,而上拱的弧形反射体则是由近似直立的榴辉岩体和其中的破碎带的综合反映.这次标定的结果,例如图 3 中的倾斜强反射体 a 是由韧性剪切带引起的结论,现在看仍然是正确的.但是先导孔仅 2000m 深,主孔在同一位置向下打孔,直到垂直深度 5000m,必然要发现更多的反射源,以揭示地壳组成结构的复杂性.

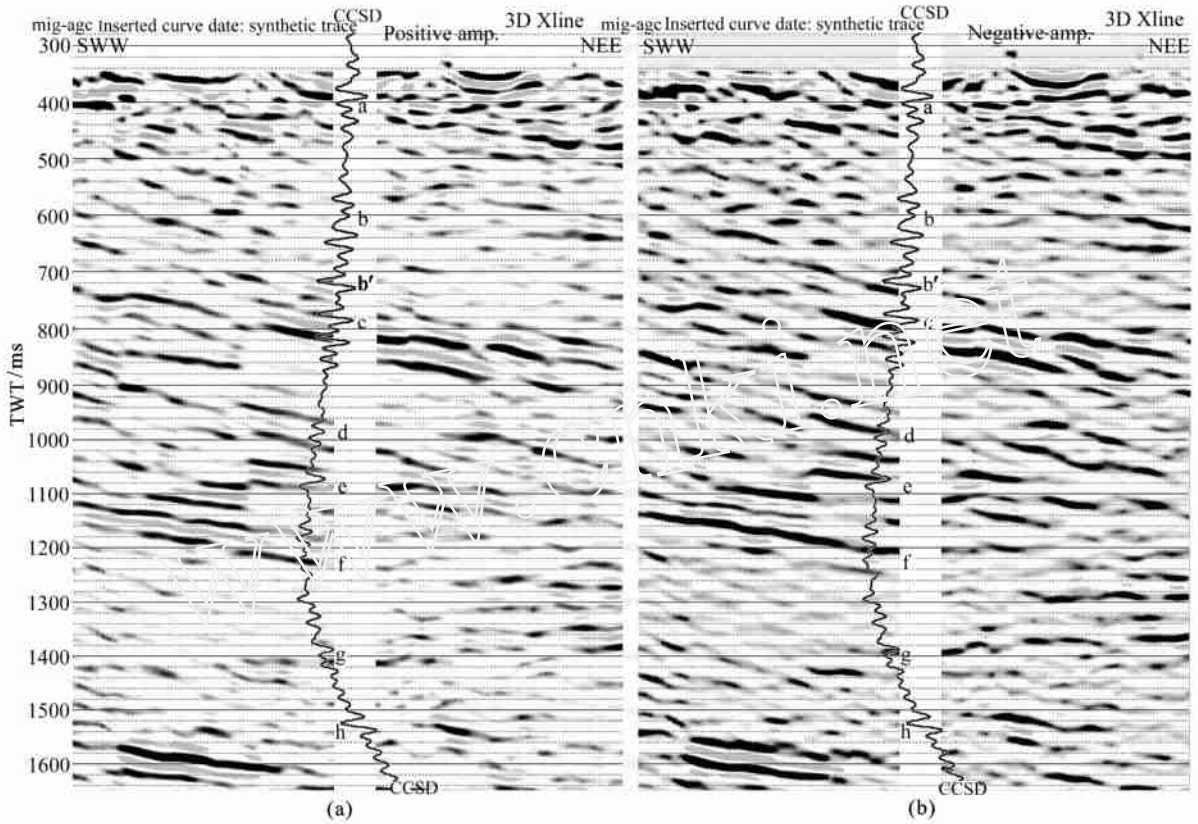


图 4 过 CCS D 主孔沿联络线的三维地震叠后时间偏移剖面 and 主孔测井声阻抗作出的合成地震道曲线

(a) 正波幅剖面, (b) 负波幅剖面. 纵轴双程走时单位为 ms, 剖面位置示于图 1 中的 GH 线, 字母 a~h 为三维地震反射体编号, 地震道曲线的轴表示钻孔的实际弯曲.

Fig. 4 3 - D poststack migration profile along the X-line and the synthetic seismic curve obtained from the acoustic impedance along the main hole ; the left shows the positive wave amplitude , the right negative. The location of the profile is indicated by line GH in Fig. 1 ; letters a~h show the numbers of main reflectors ; the trajectory of the seismic curve indicates the hole's deviation

4 根据钻孔与测井资料标定地震反射

反射体 a 在图 3 中的 300 ~ 350ms 处与主孔交汇, 并表现为由此孔开始向 ES 方缓倾斜的强反射, 已经用先导孔的岩芯和测井资料和 VSP 资料进行过标定^[2], 是由位于深度 900 ~ 1120m 的韧性剪切复合岩套引起的. 大陆科学钻探孔区广泛发育韧性剪切带, 韧性剪切带产生强反射的主要机制是韧性剪切复合岩套, 这由糜棱岩和经剪切错动产生的榴辉岩及表壳岩互层组成, 由于互层岩石波阻抗差异大产生强反射.

标定地震反射体的第一步是对比地震剖面、测井和岩芯资料, 即制作如图 5 所示的柱状对比图. 以便比较三维地震反射体、测井和岩芯岩性构造. 图 5 从左到右分别为 (a) 地震波速分层及层速度模型, 这是进行时深转换的依据, 非常重要^[22]; (b) 要标定

的反射体编号, 即从 a 到 h; (c) CCS D 主孔编录的岩芯岩性柱, 绿色标示榴辉岩, 紫色标示橄榄岩, 粉色标示副片麻岩, 红色标示正片麻岩; (d) 中子密度测井曲线; (e) 深度大致参考标尺, 之所以只是近似参考, 是由于作图时只能进行线性的时深转换, 而波速模型一般是非线性的. 因此, 此图上地震反射体不一定与波阻抗曲线对平; (f) 声速测井曲线; (g) 地质学家编录的主孔岩芯构造图; (h) 三维地震联络剖面段和声阻抗曲线, 声阻抗由密度曲线和声速测井曲线计算得到. 由于未考虑非线性时深转换和钻孔的弯曲, 图 5 只能供初步分析用, 反射体的详细标定还要逐一进行.

标定地震反射体的第二步是制作标定分解图, 如图 6 所示. 图的左边为地震剖面并在钻孔位置嵌入合成地震道, 合成地震道由声阻抗曲线与子波褶积得到. 只有在合成地震道与地震剖面重合 (相关度 > 90 %) 时, 才能证明被标定的反射体是有意义的.

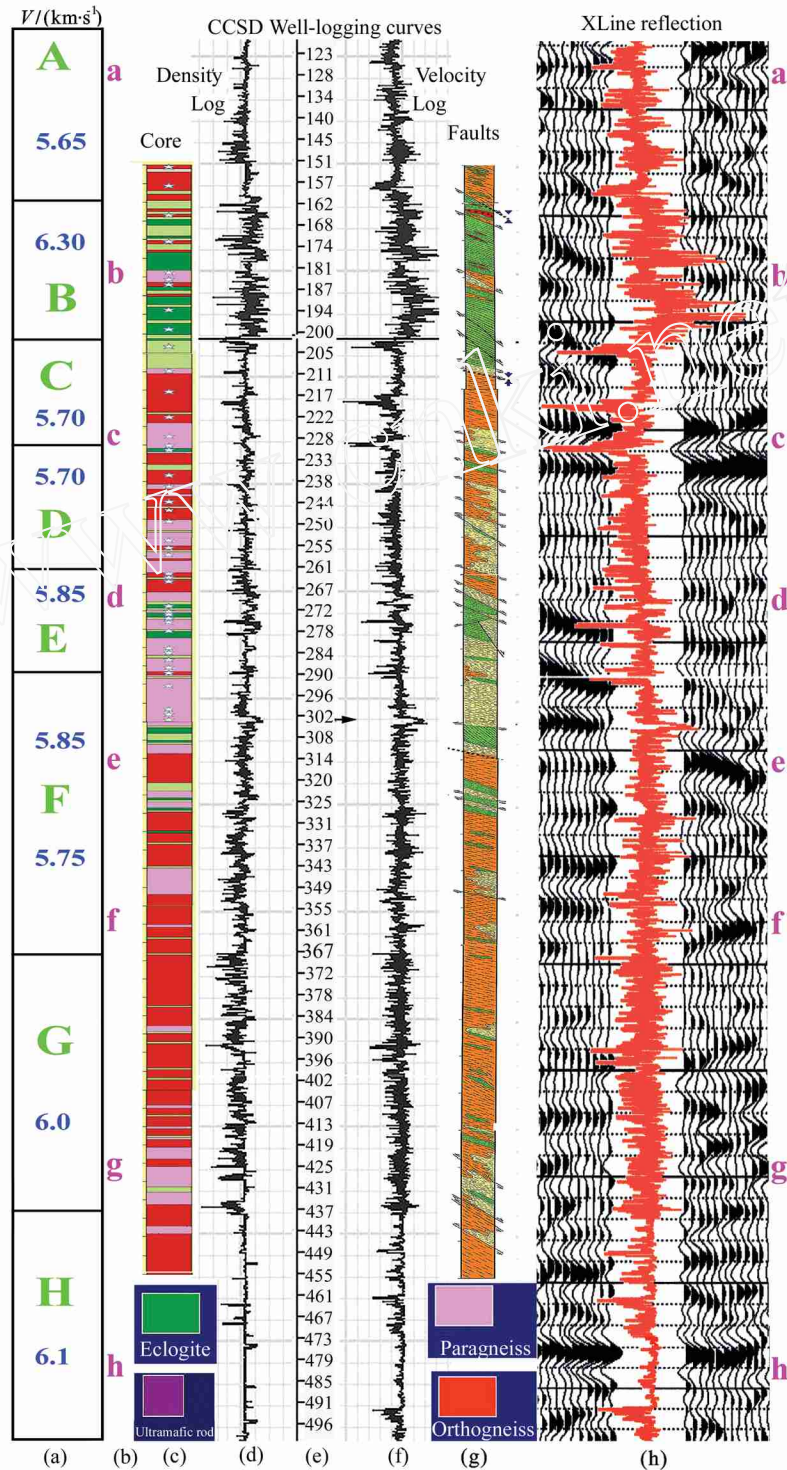


图5 三维地震、测井和岩芯岩性构造的比较

(a) 地震波速分层及层速度,单位 km/s。(b) 反射体编号;(c) 岩芯岩性柱,绿色榴辉岩,紫色橄榄岩,粉色副片麻岩,红色正片麻岩;
(d) 中子密度测井曲线;(e) 深度大致标尺,单位 10 米;(f) 声速测井曲线;(g) 岩芯构造图;(h) 三维地震连接线剖面段和声阻抗曲线。

Fig. 5 Comparison of seismic section, well-logging data and cores

(a) Seismic interval velocity in km/s; (b) Reflector's numbers; (c) Core petrology; (d) Density curve; (e) Approximate depth in 10m
(f) Acoustic velocity curve; (f) Core structure; (g) Seismic reflection with inserted impedance curve from well-logging.

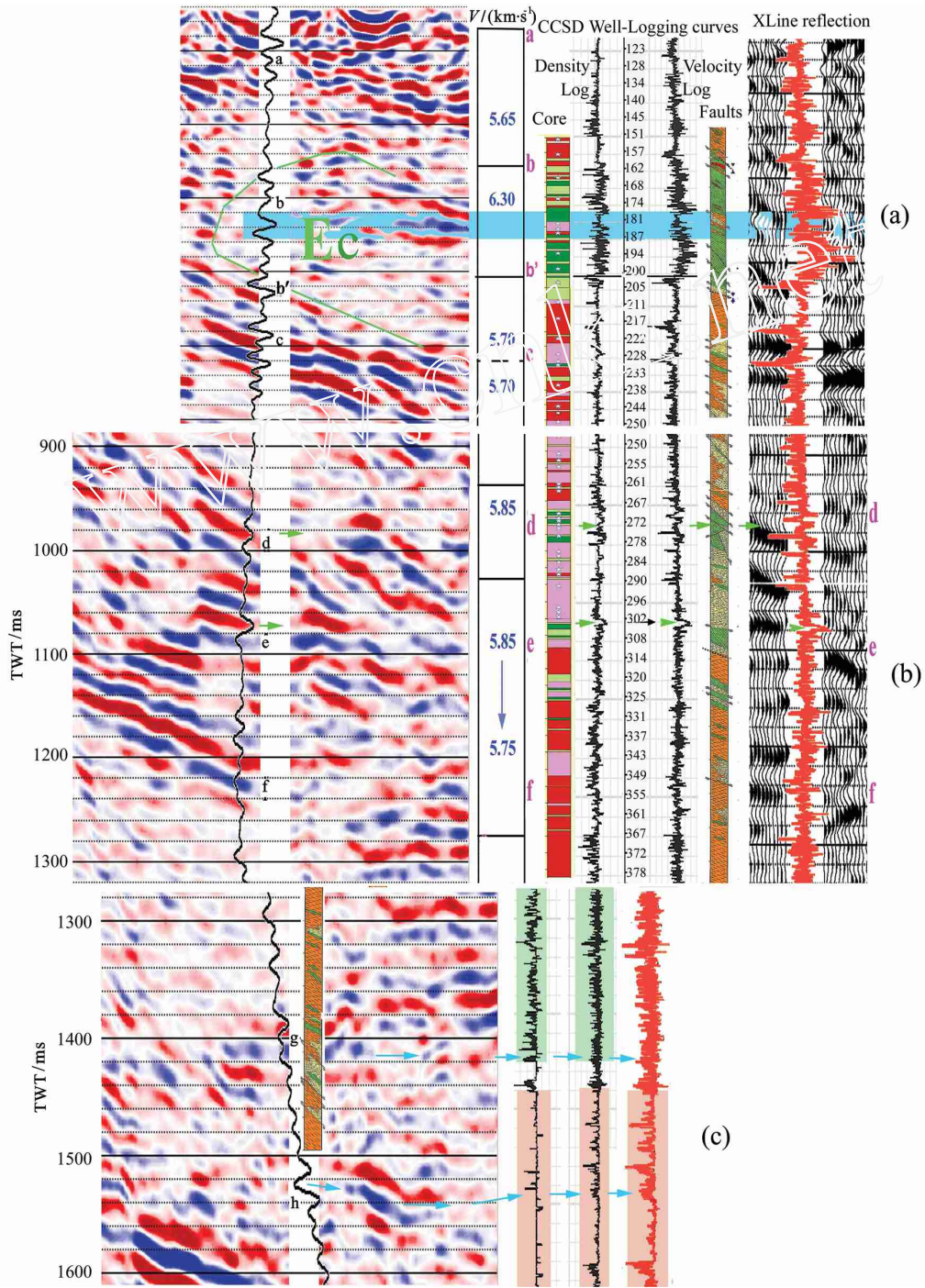


图 6 三维地震反射体标定分解图

左边为地震剖面及合成地震道,右边为测井和岩芯资料,参见图 5。(a)反射体 a,b,c 的标定;(b)反射体 d,e,f 的标定;(c)反射体 g,h 的标定。

Fig. 6 Analytic illustration for calibration of seismic reflectors, the left hand shows the seismic section with inserted synthetic seismic trace at the CCSD hole location, the right side displays the well-logging curves and core information as shown as Fig. 5

(a) Calibration of reflector a,b,c; (b) Calibration of reflector d,e,f; (c) Calibration of reflector g,h.

图的右边为测井和岩芯资料,同图 5 类似,但由于此时反射体是分组标定的,时深转换的非线性及钻孔的弯曲都被考虑到,因此准确的标定可以进行。

图 6a 反映了反射体 b 和 c 的标定。从图 3 可见,反射体 b 是上拱弧形反射,反映了主孔 1600 ~ 2050m 中隐伏榴辉岩体(图 6 中用 Ec 标示)的顶面,此段波速和密度都相对提高。隐伏榴辉岩体的底面对应负极性的反射体(图 6 中用 b 标示),与波阻抗急降对应,并与下方的强反射体 c 毗邻。有意思的是,隐伏榴辉岩体中夹有一层波阻抗较低的副片麻岩,也反映为尺度小的短强反射体(见图 6a 中水平蓝道标志,在表 1 中用 bi 标记)。

反射体 c 是尺度大、连续性好的多位相强反射体,特征与反射体 a 相似,亦为经剪切错动产生的榴辉岩及表壳岩互层引起。与反射体 a 不同的是,这里榴辉岩层少而薄,对应以波阻抗急降为主要特征。

图 6b 反映了反射体 d, e, f 的标定。反射体 d 是连续性差的多位相强反射体,对应三个波速升高的榴辉岩夹层。反射体 e 也是连续性差的多位相强反射体,对应了波阻抗升高的榴辉岩夹层。它们都是片麻岩中的榴辉岩夹层引起的。反射体 f 是连续性中等的反射体,对应片麻岩中波阻抗的抖动。估计反映了片麻岩内的断裂或不均匀性。

图 6c 反映了反射体 g, h 的标定,这两个反射体都是弧形弯曲的局部反射,位于片麻岩内部。在反射体 g 的上、下方虽然都是片麻岩,但上方波速和密度

曲线抖动很大,而下方波速和密度平稳,说明上下方岩性有一些差别。同时,岩芯中发现有剪切断层痕迹。估计反射体 g 反映了不同组构片麻岩的断层界面。反射体 h 是尺度小、连续性不好的局部反射体,对应岩芯有破碎,波阻抗曲线也相应下降(见图 6c 中箭头所示)。因此,可认为反射体 f 为片麻岩中的局部破碎带。

归纳以上标定结果(见表 1),可把引起结晶岩中反射体的机制分为三大类:(I)与韧性剪切作用有关的反射体,包括产生复合岩片互层的亚类(Ia)和同一围岩中剪切的亚类(Ib);(II)与侵入岩或正变质岩岩体有关的反射体,包括岩体顶底面(a)和小岩片(b);(III)与围岩岩性构造不均匀性有关的反射体,如小夹层(a)、相变界面(b)、和破碎带(c)等,详见表 1。

在标定了井孔穿过的地震反射体之后,便可以在三维地震各个方向上追踪反射体。例如,在沿倾向剖面 Line1 上,根据反射的特征和位置,把标定的反射体从钻孔向两侧追踪,从而推测出经标定的反射体在剖面上展布形态,得到经过标定的地震反射体推断剖面(见图 7)。在此图中央有一用淡色加黑洞图案表示的含流体裂隙层,在主孔中位于反射体 c 和 e 之间,它是由三分量数字测量取得的横波剖面推断出来的,以后将专门撰文讨论。在多个方向剖面上按标定结果追踪地震反射体推断剖面,就可以得到孔区立体的岩性构造分布图。

表 1 反射体特征及标定结果一览表
Table 1 Reflectors and the calibration results

反射体编号	尺度	连续性	极性	倾向倾角	岩性部位	构造部位	波速特征	密度特征	标定
a	大	好	+/-	SE25°	Ec 夹层	韧性剪切带	正负相间	正负相间	错岩体剪切带(Ia)
b	中	差	+	拱形	Ec 顶面	剪切断层	低上高下	低上高下	岩体顶面+剪切(a)
bi	小	差	-	SE25°	Gn 夹层		低速层	正中之谷	副片麻岩夹层(a)
b	中	中	-/+	SE30°	Ec 底面	剪切断层	高上低下	高上低下	岩体底面+剪切(a)
c	大	好	+/-	SE30°	Ec 薄层	剪切断层	负波速峰	负抖动	错岩体剪切带(Ia)
d	小	差	+/-	SE30°	Ec 夹层	剪切断层	正负相间	抖动	小 Ec 岩片(b)
e	小	差	+/-	拱形	小 Ec 岩体	剪切断层	正峰突出	正峰	小 Ec 岩片(b)
f	中	中	-/+	SE30°	Gn 内	剪切断层	负峰为主	负抖动	Gn 内剪切带(b)
g	小	小	-	多变	不同组构 Gn 交界处	有剪切断层	波速抖动大/小分界处	负峰	不同组构 Gn 之间的分界线(b)
h	小	小	-	SE30°	片麻岩内	有破碎	负波速峰	尖峰	Gn 内局部破碎带(c)

* Ec—榴辉岩; Gn—片麻岩

5 结 论

(1) 只有在建立准确的波速模型,由测井资料合

成的地震道与三维地震剖面之间达到完美拟合之后,反射体标定才有意义,在拟合时还必须考虑钻孔的弯曲倾斜。

(2) 二维地震剖面上的反射体可能与二维测线

方向有关,三维地震提供了与方向无关的反射体信号,为结晶岩区地壳反射波的标定提供更加准确可信的基础数据。

(3) 地震剖面、测井和岩芯资料的柱状对比图由于未考虑非线性时深转换和钻孔的弯曲,只能供初步分析用;反射体的详细标定还要考虑到时深转换的非线性及钻孔的弯曲,逐一制作标定分解图。

(4) 引起结晶岩中反射体的机制是多方面的,根据本次标定结果可把反射体分为三大类:(I)与韧性剪切作用有关的反射体;(II)与侵入岩或正变质岩岩体有关的反射体;(III)与围岩岩性构造不均匀性有关的反射体等。

(5) 在地震剖面上把标定的反射体从钻孔向两侧追踪,可推测出经标定的反射体在剖面上的展布形态,得到经过标定的地震反射体推断剖面。当然,标定地震反射体时还要进一步兼容 VSP 和三分量地震资料,这是今后要继续进行的工作。

致谢 中国大陆科学钻探中心首席科学家许志琴院士提供了主孔岩性构造柱状图,牛一雄高工提供了测井数据,在此致以衷心感谢。See Table 1 for notations Ia to Ic.

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 3D seismic reflection 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): 16~27
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): 16~27
- [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球探测工作中的应用. 地质学报, 2003, 22(7): 536~539
Jiang M, Wang Y X, Su H P. Wide-frequency teleseis and its application to seismic exploration. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2003, 22(7): 536~539
- [13] 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
- [14] 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
- [15] Yang W C. Crustal structure and development of Dabie UHPM Terrane in East-Central China. *Continental Dynamics*, 1998, 3(1-2): 86~95
- [16] Yang W C. Analysis of deep intracontinental subduction. *Episodes*, 2000, 23(1): 20~24
- [17] Yang W C. Geophysical profiling across the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, Eastern China. *Tectonophysics*, 2002, 354: 277~288
- [18] Yang W C. Flat mantle reflectors in eastern China: possible evidence of lithospheric thinning. *Tectonophysics*, 2003, 369(3-4): 219~230
- [19] 杨文采,杨午阳,金振民等. 苏鲁超高压变质带岩石圈地震组

- 构. 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
- [20] 杨文采, 汪集旻. 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
- [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
- [23] 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 G L, 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

(本文编辑 胡素芳)