

朱光明, 杨文采, 杨正华等. 中国大陆科学钻探孔区的垂直地震剖面调查. 地球物理学报, 2008, 51(2): 479 ~ 490

Zhu G M, Yang W C, Yang Z H, et al. Vertical seismic profiling at the Chinese Continental Scientific Drilling site. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(2): 479 ~ 490

中国大陆科学钻探孔区的垂直地震剖面调查

朱光明¹, 杨文采², 杨正华¹, 杜有成¹, 杨贵明³, 姚 虹³, 杨占江³, 程振炎²

1 长安大学应用地球物理研究所, 西安 710054

2 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

3 中石油东方地球物理勘探公司开发地震工程中心, 河北涿州 072751

摘 要 苏鲁超高压变质带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, 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. 根据大陆科学钻探工程的安排, 在钻探取心、测井和地面三维地震观测的同时, 还在 5000 m 的钻孔中用三分量数字检波器, 对地表激发传播到井中的地震波场作垂直地震剖面(VSP)观测, 目的是将传感器放在钻孔内, 近距离、高精度和高分辨率地观测井周围由于超高压变质带的构造特征和岩石岩性特征引起的波场变化. 通过零偏移距和非零偏移距 VSP 调查, 我们首次在超高压变质带取得了深度达 5000 m 的精细的横波速度和泊松比等地球物理属性数据, 作出了钻井岩心柱、测井、VSP 纵波速度、横波速度和纵横波速度比、VSP 上行波和地面地震资料的桥式综合对比图, 使不同尺度的地质和地球物理调查资料互相连接在一起. 零偏和非零偏 VSP 观测可以标定主孔地质剖面各深度地质体的地震反射特性、井旁地震剖面上各个同相轴的地质属性, 并对井旁局部地质构造作精细成像. 由此观测取得的横波速度资料, 成为建立孔区横波速度模型主要的资料来源, 这种模型也是地面多波观测数据处理不可缺少的. 因此, 建议在进行大陆科学钻探时尽可能安排 VSP 地震调查.

关键词 大陆科学钻探, 结晶岩区, 垂直地震剖面, 横波速度

文章编号 0001-5733(2008)02-0479-12 **中图分类号** P315, P631 **收稿日期** 2007-06-25, 2007-12-07 收修定稿

Vertical seismic profiling at the Chinese Continental Scientific Drilling site

ZHU Guang-Ming¹, YANG Wei-Cai², YANG Zheng-Hua¹, DU You-Cheng¹,
YANG Gui-Ming³, YAO Hong³, YANG Zhan-Jiang³, CHENG Zhen-Yan²

1 Institute of Applied Geophysics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China

3 Seismic Engineering Development Center, BGP, CNPC, Zhuozhou 072751, China

Abstract The research on the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt has great significance for understanding the continental geodynamic processes that occurred in the deep mantle. In recent years, Chinese Continental Scientific Drilling and detailed comprehensive geophysical investigation including deep seismic reflection have been carried out. These offered rare basic data for the research of ultrahigh-pressure metamorphic belt, the earth's crust and upper mantle fabrics. The drill-hole cores offered the direct data of composition, structure and construction of deep rocks, in which feature scale is merely a few centimeters. However, drill-hole and well-logging can only survey in one dimension. Therefore three dimensional seismic data should be calibrated with both spatial and time sampling scales for comparing drill-core and well-logging data. The survey of offset and non-offset vertical seismic profile serves to provide good links between the cores and

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 朱光明, 男, 1935 年生, 江苏南京人, 长安大学教授, 主要从事地震波理论和地震勘探方面的研究. E-mail: dczhugm@chd.edu.cn

well-logging data with seismic reflection events, show their geological attributes, and imaging structural details of around-hole rocks. In addition, the VSP data provide S-wave velocity profile along the hole that is the primary source for building the S-wave velocity. Besides, as a result of using digital three-component geophones, various information of structure and rock properties in drilling area was obtained, such as shear wave velocity model in the scientific drilling area, which is pre-required in the data processing of multi-wave exploration. In conclusion, this work suggests VSP investigation be carried out in continental scientific drilling project in crystalline rock areas, it seems possible and feasible.

Keywords Chinese Continental Drilling, Crystalline rock region, Vertical seismic profile, S-wave velocity

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, 钻探取心提供了地下深处岩石的物质成分、结构与构造的直接数据. 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. 然而, 岩心与地球物理测井的特征尺度仅为几厘米, 而反射地震波长约为十几米, 尺度上明显的差别造成了地震反射解释的一些问题, 对此垂直地震剖面测量可起到桥梁作用. 垂直地震剖面资料采用数字三分量接收, 还可以提供孔区构造岩性的多种信息, 这些信息也是反射地震资料不能代替的. 本文将简要介绍中国大陆科学钻探孔区的垂直地震剖面的数据采集和资料处理, 并对结晶岩区科学钻探是否应开展和如何开展垂直地震剖面调查提出一些看法.

对于岩石圈内部的反射地震组构的来源, 科学家们虽然做出了种种解释, 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. 垂直地震剖面调查是联系岩心剖面和地震剖面的桥梁, 对标定地震反射体可起到独特的作用. 通过研究垂直地震剖面资料和钻孔岩心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. 对于结晶岩区的垂直地震剖面调查, 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地标定. 中国大陆科学钻探工程的实施为进行结

晶岩区垂直地震剖面实验提供了机会. 根据大陆科学钻探的岩心和测井资料对地震反射体的标定已发表过多篇论文^[1~26], 也请有兴趣的读者们同时参阅.

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^[4~7]. 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 3 km 长, 400 m 宽, 产状很陡, 延深可达 800 m 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^[8], 即图 1 中的 、 、 和 . 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^[9,10,11]. 岩片 往北中生代花岗岩体逐渐增多, 但

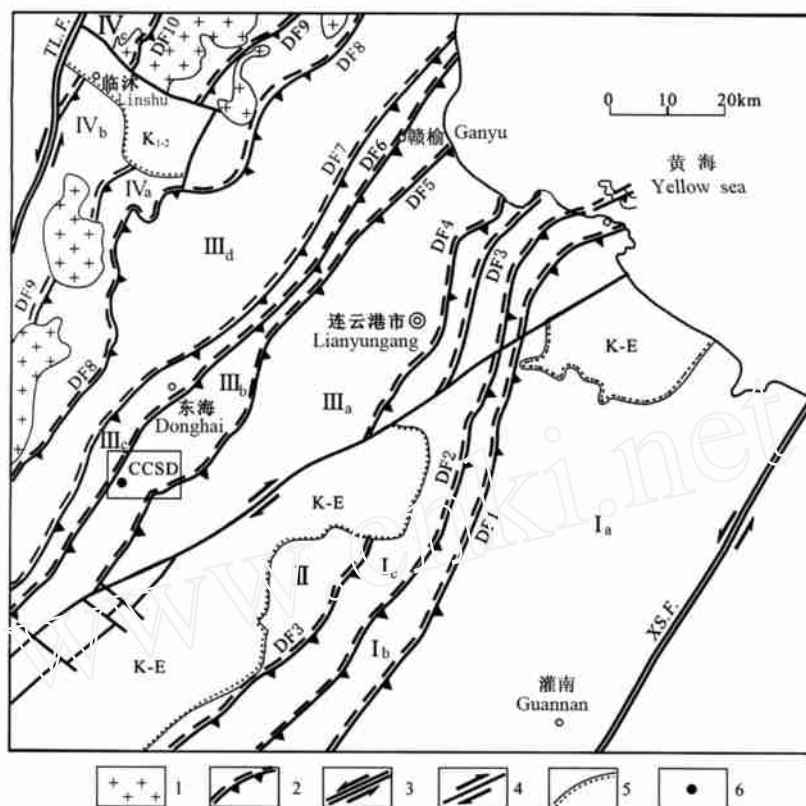


图1 苏鲁连云港地区的构造与大陆科学钻探孔区位置图(据文献[8]简化)

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. - 郯庐断裂带);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: a 灌南剪切构造岩片,
b 连云港剪切构造岩片, 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: a 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 The structural map 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.

~ :UHP rock slices; DF1 ~ DF10 :Ductile shear zones.

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b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5000 m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.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年在这里完成了一口深度为1032 m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(0~1000 m)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月实施科学钻探先导孔(CCS DP),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20 km².2005年3月主孔钻入5158 m后终孔,取心率达85%,孔底井斜已超过26°.主孔岩心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

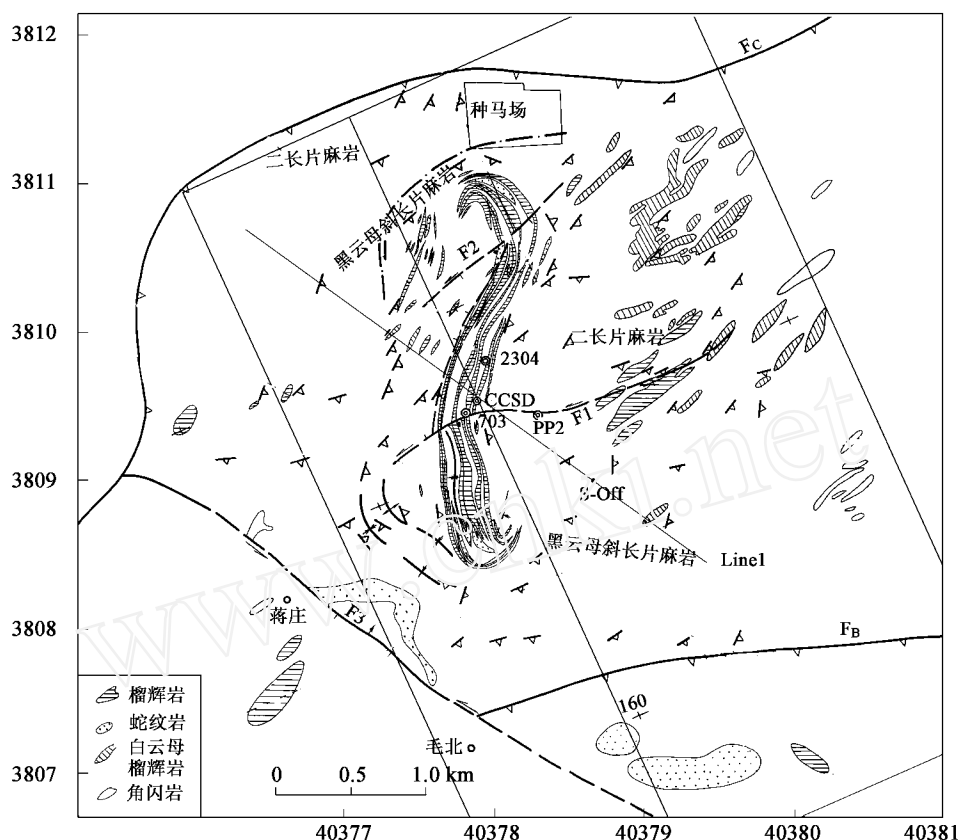


图2 毛北科学钻探孔区地质图

斜框为三维地震调查的区域,用高斯6带座标系。CCSD为主孔及零偏炮点位置,S-OFF为非零偏炮点位置,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. 1 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; S-OFF denotes the offset shot position; 2304 and 703 are shallow holes; DH2, DH4 and DH99 are 2D seismic lines.

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[13~18]。

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。从多种参数测定结果可知,榴辉岩 $V_p = 7.0 \sim 8.4$ km/s,密度比片麻岩高出 0.7 g/cm^3 左右,波速高 $600 \sim 1600$ 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 m/s 左右,破碎带岩石的波阻抗也会明显降低,产生负极性的地震反射体。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 $2\% \sim 6\%$ 左右的各向异性^[19,20],在地震波传播时可能加大反射波能量。

3 垂直地震剖面数据采集与处理概况

3.1 数据采集

选用两种观测系统进行 VSP 数据采集:一种是零偏移距;另一种是非零偏移距。

零偏移距震点选在井场北偏东方向 130 m 处。震点桩号 1146,高程为 31.84 m。炸药震源,单井深井激发,药量 $0.5 \sim 1$ kg,井深 25 m,炸药包位于坚硬的新鲜基岩中。观测井段分两段:第 1 段, 5000 m 到 1980 m 井段,观测点距(深度间隔) 10 m,观测点数 303 点;第 2 段, $1980 \sim 320$ m 井段,观测点距 20 m,观测点数 83 点。用多级三分量检波器接收,检波器型号为 Geochain, $5000 \sim 1200$ m 井段,采用 3 级, $1200 \sim 320$ m 井段,采用 5 级。时间采样间隔为 1 ms;记录

长度 10 s;仪器固定增益 42 dB;记录格式 MIRF.

为了监控震源子波的变化,零偏移距时还设计了一口子波井,子波井位于沿震点到科钻 1 井连线方向,子波井距离震源井 10 m,子波井井深 15 m.

非零偏移距震点选在地层的下倾方向沿 Line-1 线南东方向距离主孔 1100 m 处.震点桩号 1183,高程为 26.6 m.炸药震源,单井深井激发,药量 1 kg,井深 25 m,炸药包位于坚硬的新鲜基岩中.观测井段分三段:第 1 段,3600~2400 m 井段,观测点距 10 m,观测点数 120 点;第 2 段,2400~2120 m 井段,观测点距 20 m,观测点数 20 点;第 3 段,2100~320 m 井段,观测点距 20 m,观测点数 90 点.用多级三分量检波器接收,检波器型号为 Geochain,5000~1200 m 井段,采用 3 级,1200~320 m 井段,采用 5 级.时间采样间隔为 1 ms;记录长度 10 s;固定增益 42 dB;记录格式 MIRF.

采集结果,各段拼在一起,组成零偏移距 VSP 三分量 Z、X、Y 三张记录,每张记录 386 道,每道 10 s 长,1 ms 采样,10000 个样点.非零偏移距 VSP 三分量 Z、X、Y 三张记录,每张记录 230 道,每道 10 s 长,1 ms 采样,10000 个样点.图 3 和 4 分别是零偏移距原始 Z 分量和 X、Y 分量偏振合成后旋转到一致坐标系的 HP 分量剖面,原始记录面貌较好,信噪比较高,能看到丰富的上行反射.表明用单井深井小药量激发,用高灵敏度的多级检波器在井下接收是有效的.

3.2 数据处理

零偏移距 VSP 资料处理流程,包括:预处理、震源能量一致性校正、子波整形反褶积、初至拾取、静校正、井斜校正和方位校正、时深关系和速度分析、三分量偏振合成、波场分离、横波波至拾取,横波速度分析、走廊叠加、反射波成像和综合对比等内容.其中最主要的几项处理是:(1)确定 0~5000 m 地质剖面的可靠的时间-深度关系.这里的时间是地震波的双程时间.为此,要拾取初至波的初至时间,提高读取初至的精度,而为了有可靠的初至波形,要作震源能量一致性校正和子波整形反褶积等处理.另外,为了使波的传播路径换算为沿垂直深度传播的路径,要做井斜等校正;(2)地震剖面的纵波速度分析,估算每个深度的纵波均方根速度和层速度;(3)地震剖面的横波速度分析.首先要作三分量偏振合成,将水平分量旋转到一致的坐标系,使横波同相轴能清楚地看到,而后作横波波至拾取,根据这里变质岩地区的特点,只拾取一个相位横波同相轴的波至

不能延续到整个剖面,所以先分段拾取,每段选取最清楚的同相轴,然后再将各段拾取的时间值统一衔接起来,得到可靠的横波波至时间,随后再估算横波的均方根速度和层速度;(4)对于各个深度的纵波和横波速度进一步计算同深度的纵横波速度比;(5)标定地质剖面各深度地质体的地震反射特性或标定井旁地震剖面上同相轴的地质属性.常规处理中通过作走廊叠加可达到这一目标,但这里反射地质体的倾角较大,地震波射线到达地质体不能近似为垂直入射,因此按初至时间两倍不可能将上行反射波排齐到双程时间(T_0 时间或自激自收时间),为此,我们对零偏移距上行反射直接作共反射点成像,得到叠加次数很高、成像范围很窄(就在井旁)的成像剖面;(6)作 VSP、测井、岩心和地面观测资料综合对比图.

非零偏移距 VSP 数据处理流程,包括:预处理、震源能量一致性校正、初至拾取、静校正、井斜校正和方位校正、速度分析、三分量偏振合成、上行波和下行波波场分离、纵波和转换横波波场分离、横波波至拾取,横波速度分析、反射纵波成像、反射转换横波成像和综合对比等内容.其中最主要的几项处理是:(1)纵波速度分析和横波速度分析.其目的是为后面的纵波成像和转换横波成像提供速度模型;另外,比较非零偏移距与零偏移距速度计算结果之间的差异,还可以帮助分析地层的各向异性.速度分析的方法采用走时反演方法.主要步骤是先由垂直分量 Z 拾取纵波初至或者由水平分量 HP 拾取转换横波波至,再作反演计算.拾取的精度直接影响速度计算的结果.所以和零偏移距一样,也要作各种校正和一致性处理;(2)三分量偏振合成.三分量偏振合成分两步进行,第一步做水平分量合成,由 X 分量和 Y 分量经偏振合成后得到 SH 分量和 HP 分量.水平分量合成的目的是校正因为井中三分量检波器围绕井轴在平面内的随机转动,引起各个深度水平分量的坐标系不一致的问题,通过偏振合成处理使不一致的坐标系旋转到统一坐标系.三分量合成第二步是水平分量 HP 和垂直分量 Z 合成,目的是将初至下行 P 波的水平分量和垂直分量合成到初至下行 P 波偏振的方向,也即初至下行 P 波的总能量偏振方向,因为 SV 波和 P 波的偏振方向是正交的,所以这时直达下行 SV 波的水平分量和垂直分量将合成到与 P 波偏振方向垂直的方向.上行反射 P 波和 SV 波的偏振方向与震源位置、界面速度、界面倾角等因素有关.但粗略地说,上行 P 波大致与下行 SV 波偏振方

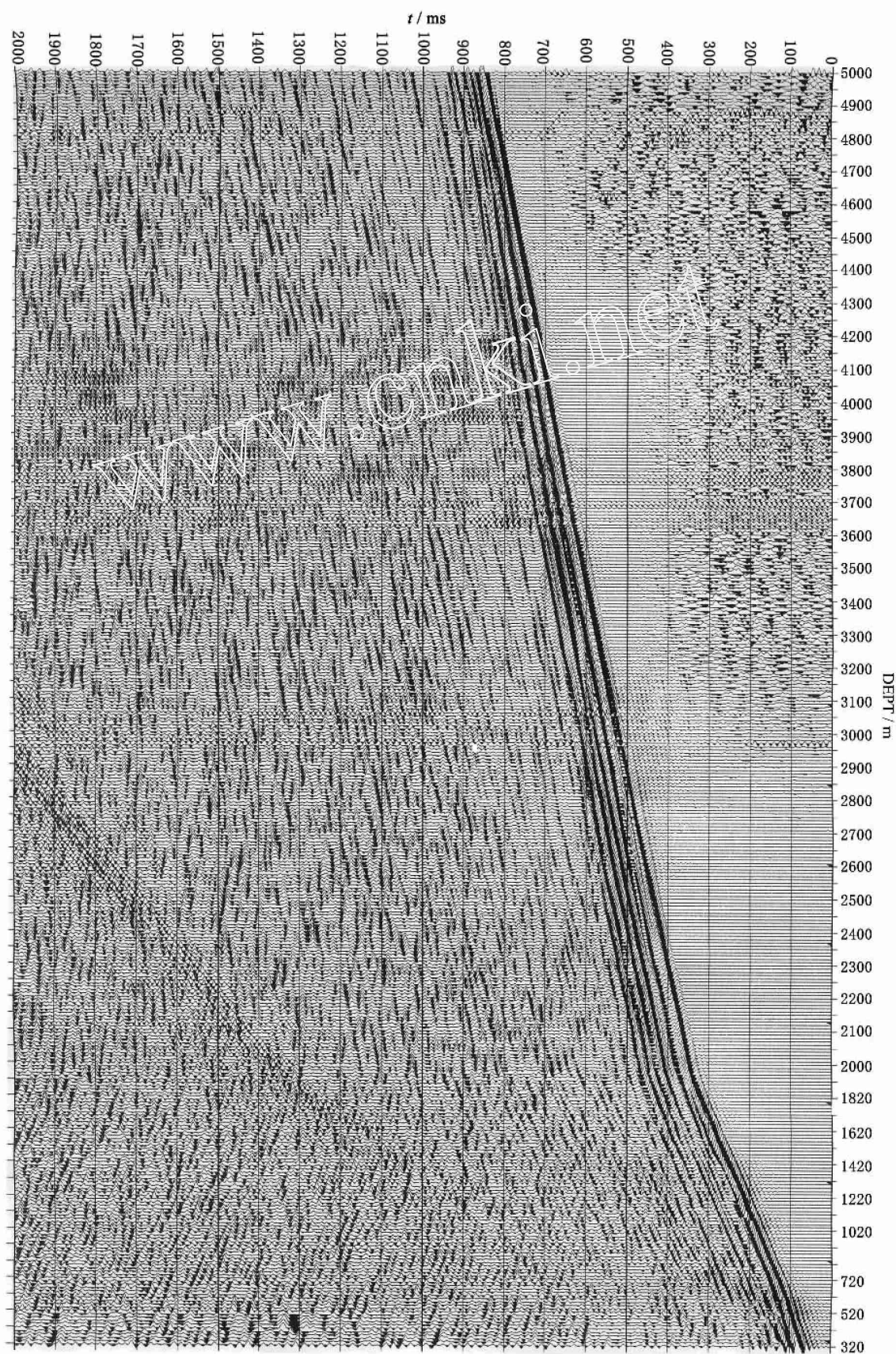


图 3 零偏移距 VSP 原始 Z 分量剖面, 386 道, 每道 10 s 长, 10000 个样点
Fig. 3 Z-component for zero-offset VSP. 386 traces each profile; 10 s length and 10000 sample points each trace

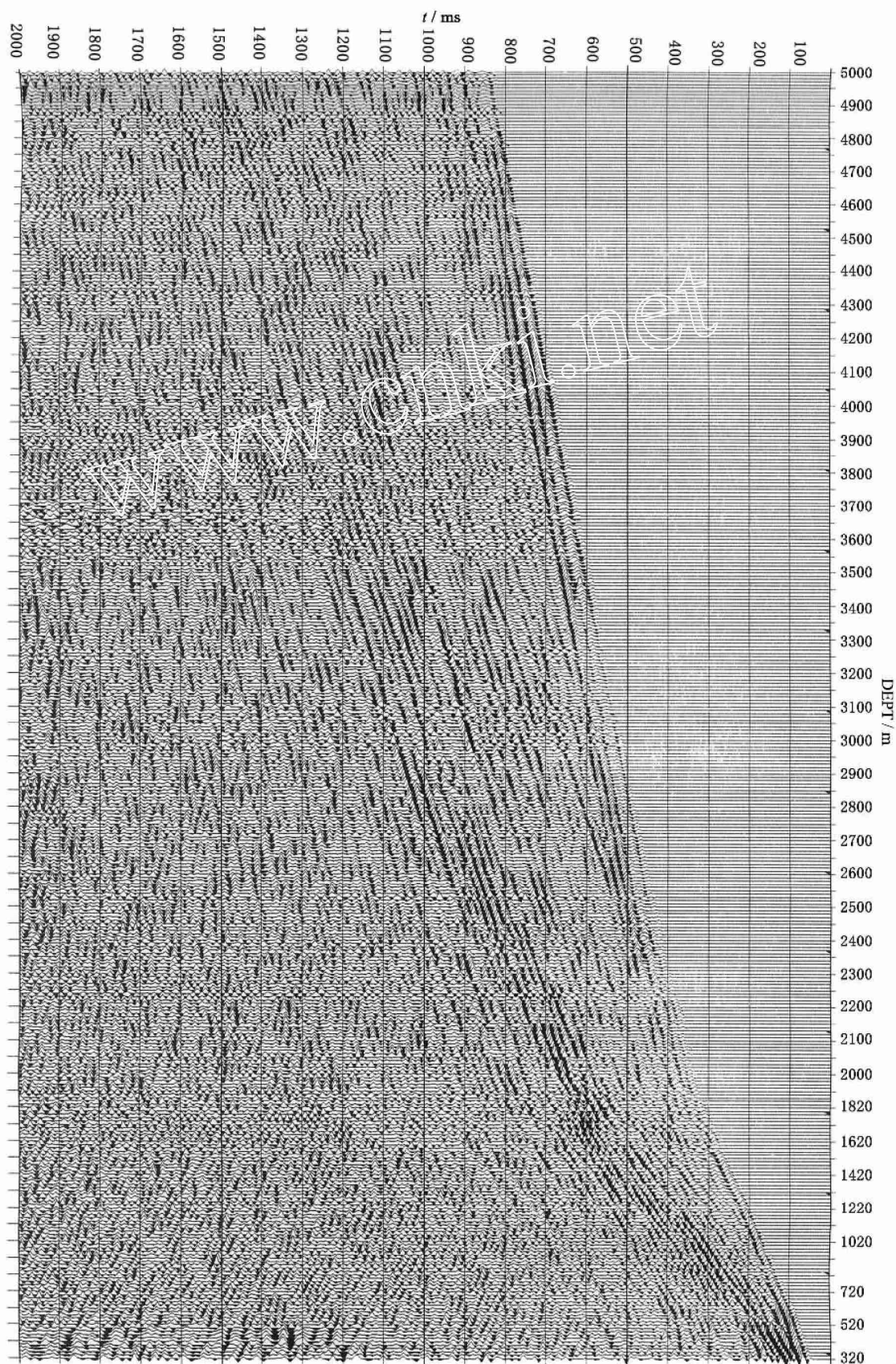


图 4 零偏移距 VSP 原始 X 和 Y 分量偏振合成后旋转到一致坐标系的 HP 分量剖面, 386 道, 每道 10 s 长, 10000 个样点

Fig. 4 HP-component after rotated to consistent coordinate system by X, Y-component for zero-offset VSP. 386 traces each profile, 10 s length, 10000 sample points each trace

向接近,上行 SV 波大致与下行 P 波接近.我们对三分量合成后的各个分量进行分析,认为 Z 分量剖面纵波直达及反射都比较清晰,而且受转换波影响较小,便于提取纵波反射波场;HP 剖面转换横波比较发育且受纵波影响较小,比较方便提取横波反射波场.SH 剖面无明显纵、横波反射信号;PP 和 PS 剖面中波场信息很丰富,但不利于波场分离;(3) 波场分离.非零偏移距 VSP 波场较零偏移距 VSP 波场复杂,因为偏移距大,影响波场的因素多.波场分离一般通过多道滤波实现.其中,FK 滤波多采用带阻方式,滤波器的选择通过人机交互确定;中值滤波应先将要滤除的波场的同相轴排齐,再选择合适的跨度参数和中值滤波方式;SVD 方法往往用来提取信号相关性比较强的波场;(4) 叠加成像.VSP-CDP 叠加成像的基本原理是:首先由非零偏移距速度分析得到的层速度 V_p 或 V_s 给出 VSP-CDP 叠加的初始速度模型;而后用任意界面的突变点加插值射线追踪方法算出射线经过各个界面反射的反射点位置以及射线到达井中接收点的波至时间和出射角,并将各接收点的波至时间序列与提取的地震子波褶积生成各道的合成地震记录;再将合成地震记录与实际地震资料比较,如果达不到精度要求,则修正速度模型;如此循环迭代,直到合成记录与实际地震记录达到足够精确的一致;最后取迭代得到的效果最佳的速度模型及其相应的不同深度接收点的波至时间和反射点坐标,将记录上的反射能量归位到反射点位置处;落在同一 CDP 网格(Bin)内的各反射点能量相加,最终得出 VSP-CDP 成像结果.此次处理中纵波和转换波 CDP 叠加的面元宽度(Bin)均取 15 m(与地面地震剖面的 CDP 间距相一致),纵波和转换波的正演模型为同一模型,模型的初始纵波和横波速度参考非零偏移距速度分析计算的结果;(5) 作 VSP 成像剖面 and 井旁地面地震剖面综合对比图.

4 零偏移距 VSP 的主要成果

图 5 是零偏移距 VSP 资料综合解释剖面,图上从左到右依次为纵横波速度比 V_p/V_s 、密度(根据密度测井数据整理)^[26]、声波速度(根据声波测井数据整理)^[26]、纵波波速、横波波速、岩心柱^[26]、零偏移距成像剖面、零偏移距 VSP 上行波按双程时排齐剖面 and 走廊叠加剖面.从图中可看出以下一些零偏移距 VSP 得到的主要成果:(1) 算出了 0~5000 m 深度主孔地震剖面的时间-深度关系.一方面,零偏移距 VSP 上行波按双程时排齐剖面的纵坐标刻度为深度,这与其左面的各个曲线的纵坐标刻度相一致,因而这些同深度的各个物理量之间可以互相对比和标定;另一方面,零偏移距 VSP 上行波按双程时排齐剖面的横坐标刻度是双程时间,这与其上方的走廊叠加剖面的横坐标刻度相一致,因而可与地面地震剖面相对比,并直接给出地面地震剖面的时间深度关系;(2) 给出了主孔地震剖面各个深度地质体的纵波速度、横波速度和纵横波速度比等地球物理属性(表 1),这些数据表明,主孔地震剖面整体速度值高,大约在 5500~6600 m/s 之间,没有像沉积岩地区那样的速度随深度增加的规律,反映出超高压变质带岩层的速度主要受岩性控制的特征;在各类岩石中,榴辉岩速度高,速度值约 6600 m/s,有的甚至达 7300 m/s,副片麻岩速度较低,速度值 6100~6300 m/s,正片麻岩更低些,速度约 5500~5700 m/s;纵横波速度比 V_p/V_s ,榴辉岩最低,副片麻岩稍高,正片麻岩最高,在破碎带上明显增高,VSP 测定的 V_p 和 V_s 与测井测量的 V_p 和 V_s 以及钻井岩心测量的 V_p 和 V_s 相比,它们随深度的变化趋势是一致的;(3) 标定了主孔地震剖面各深度地质体的地震反射特性或井旁地震剖面上各个同相轴的地质属性,由于变质

表 1 各个深度段的主要岩石类型和纵波速度、横波速度和纵横波速度比

Table 1 The type of rock, velocity of P and S wave, and the rate of velocity of P and S wave on difference depth

井段	深度范围(m)	主要岩石类型	纵波速度(km/s)	横波速度(km/s)	纵横波速度比
1	0~750	超镁铁质岩和榴辉岩	6.60	3.70	1.78
2	750~1120	副片麻岩(黑云母斜长片麻岩)和榴辉岩	5.90	3.43	1.72
3	1120~1600	正片麻岩(长英质片麻岩)	5.58	3.70	1.51
4	1600~2030	白云母榴辉岩	6.33	4.22	1.50
5	2030~2630	正片麻岩和副片麻岩	5.74	3.68	1.56
6	2630~3080	副片麻岩和榴辉岩	6.00	3.69	1.63
7	3080~3470	正片麻岩、副片麻岩和少量榴辉岩	6.16	4.06	1.52
8	3470~4160	正片麻岩和少量副片麻岩	6.01	3.72	1.62
9	4160~5000	正、副片麻岩和少量榴辉岩	5.69	3.87	1.47

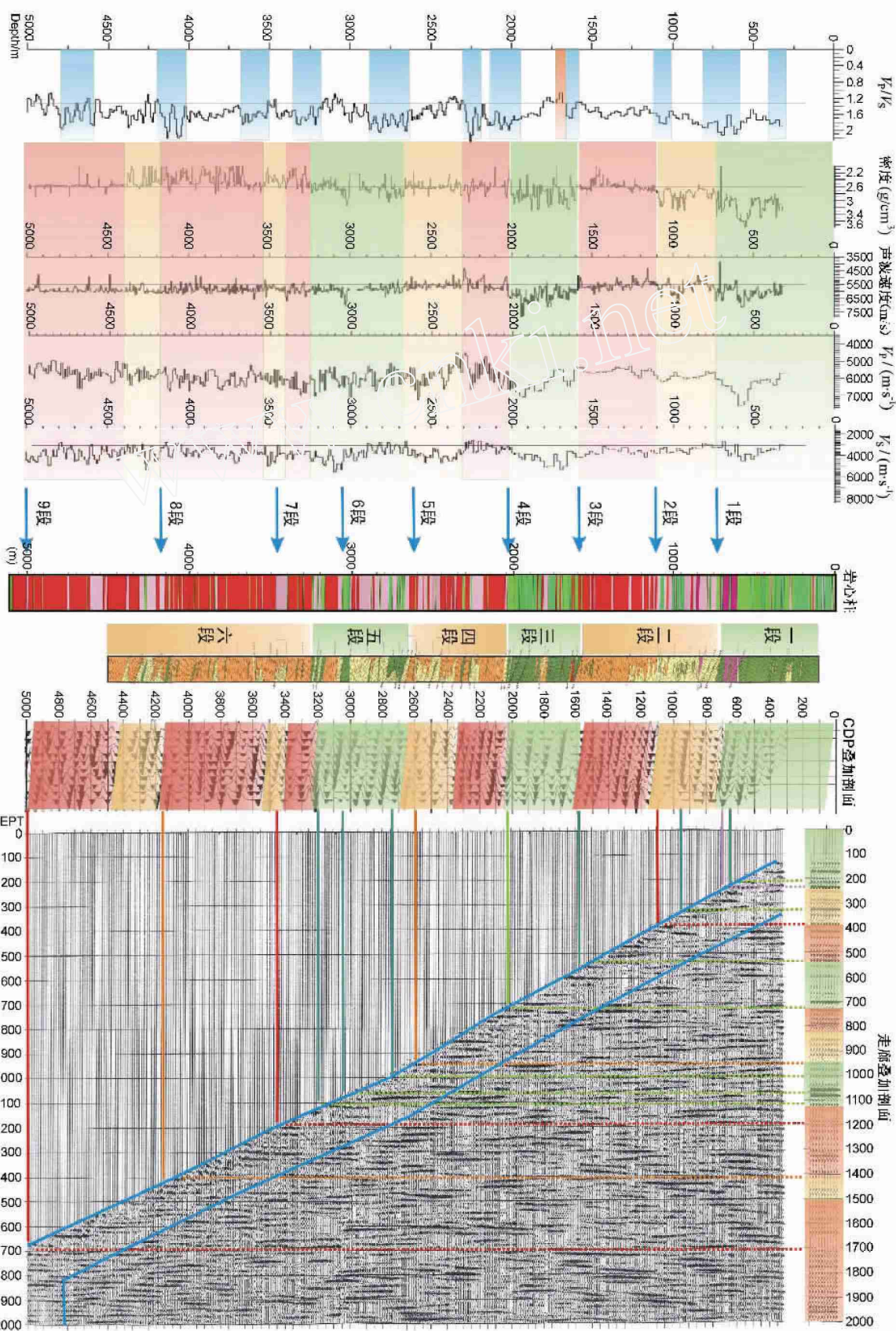


图 5 零偏移距 VSP 资料综合解释剖面
Fig. 5 Comprehensive interpretation profile for zero offset VSP data

岩组合中含榴辉岩的不同,榴辉岩为主的井段,反射能量强、反射同相轴较稀疏,副片麻岩(黑云母斜长片麻岩)表现出反射波组不密集,反射能量较强的特点,正片麻岩(长英质片麻岩)表现出反射波组密集,反射能量不强的特点,根据各井段岩石的组构特点,试着将剖面分为9段或6段(两者分法基本一致,后者更多地依据榴辉岩的发育情况对前者作了少数合并),通过这种标定和分析对比,将井中钻探的结果以VSP为桥梁通过地面地震扩展到井周围的空间。

5 非零偏移距 VSP 的主要成果

非零偏移距 VSP 的主要成果是:(1)根据上行反射纵波做出纵波 VSP-CDP 井旁成像剖面 and (2)根据上行反射转换横波做出转换横波 VSP-CDP 井旁成像剖面。这些剖面对井旁地质构造比较精细地成像,并通过与井中观测结果的对比,将井中观测

的结果向井旁外推数百米。图6是在地面地震剖面上将非零偏移距 VSP(成像剖面深度3700 m,长度720 m)、零偏移距 VSP(成像剖面深度5000 m,长度50 m)和岩心柱(深度5000 m)按同等比例嵌在一起的对比图,非零偏移距 VSP 剖面采用半透明显示方式叠于地面地震剖面之上。从图中这些资料的对比可以看出,4种资料具有很好的一致性,而且波组特征也有很好的相似性,在榴辉岩相对集中的深度段反射波稀疏而强(图中标记绿色),尤其在榴辉岩的顶底界面反射最强,在片麻岩段波组相对较为密集(图中标记粉红色)。按 VSP 资料的波组特征可将这些波组在地面地震剖面上作适当的延伸和扩展,证明这些引起反射的地质对象的条带状和分带性特征。另外,利用转换横波 VSP-CDP 井旁成像剖面还可作出2600~3400 m区段变质岩破碎带中赋存的流体含量升高的推断(后文中将详细说明)。

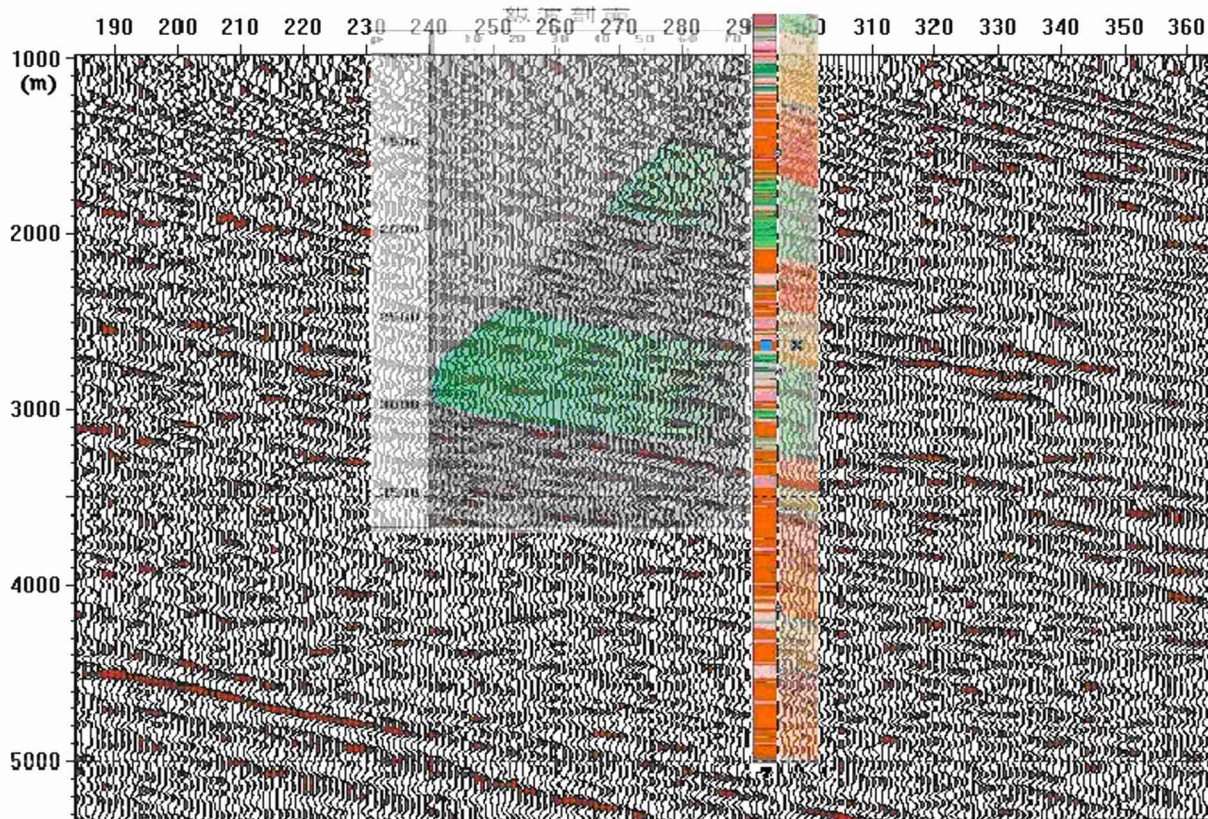


图6 非零偏移距 VSP 纵波成像剖面镶嵌在井旁地面地震剖面中的综合对比解释剖面

Fig. 6 Comprehensive interpretation profile for offset VSP data embed in surface seismic profile

6 结 论

(1) 在结晶岩出露地表地区,用单井深井小药量在新鲜基岩中激发,用高灵敏度的多级三分量数字检波器小深度间隔地推靠到井壁上接收,首次在超高压变质带采集到深度达 5000 m 的高质量的三分量 VSP 资料。

(2) 根据结晶岩区的特点,采用震源子波校正,偏振、视速度和相干性结合的波场分离以及基于模型的大倾角成像等不同的处理方法,除提取出深度达 5000 m 的纵波速度外,还首次提取出超高压变质带深度达 5000 m 的横波速度,估算出深度达 5000 m 的纵横波速度比等地球物理属性参数,同时做出了井旁高精度的纵波和横波成像剖面。

(3) 以 VSP 资料作桥梁,用井中资料对地面地震同相轴标定和分析对比表明,本区岩层速度主要受岩石岩性、矿物成分和裂缝破碎带控制。地震反射同相轴主要受岩体边界和破碎面位置控制,在破碎带位置上 V_p/V_s 值明显增高。

(4) 零偏移距和非零偏移距 VSP 观测可以标定主孔地质剖面各深度地质体的地震反射特性,或井旁地震剖面上各个同相轴的地质属性,并对井旁局部地质构造作精细成像。由此观测取得的横波速度资料,成为建立孔区横波速度模型主要的资料来源,这种模型也是地面多波观测数据处理不可缺少的^[27]。因此,建议在大陆科学钻探时尽可能安排 VSP 地震调查。如果能定期作重复观测,还能动态监测井孔周围地球物理场的变化。

(5) 大陆科学钻探 VSP 地震调查要求井孔比较直,井内的套管层数少,固井质量好,以及裸眼井段井壁光滑不坍塌。另外要有能承受高温高压的井下多级三分量检波器。这些是在设计时就要考察并作相应工程安排的问题。

感谢 感谢大陆科钻中心测井子工程负责人牛一雄高工提供有关测井资料。

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): 370~384
- [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. Interpretation of 3D seismic reflection data in the Chinese Continental Scientific Drilling site. *Acta Petrologica Sinica*, 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 0~1200 m 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()—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 (): 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()—非地震方法. 地球物理学报, 1999, 42(2): 508~519
Yang W C, Fang H, Cheng Z Y, et al. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (): Non-seismic methods. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, 42(3): 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 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*, 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* (in Chinese), 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, 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 of the Chinese continental scientific drilling site. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(2): 477 ~ 489
- [22] 杨文采, 刘光林, 胡立新等. 中国大陆科学钻探孔区全观式地震采集三维技术. *地球物理学报*, 2006, **49**(3): 735 ~ 744
- Yang W C, Liu G L, Hu L X, 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
- [23] 何丽娟, 胡圣标, 杨文采等. 中国大陆科学钻探主孔动态地温测量. *地球物理学报*, 2006, **49**(3): 745 ~ 752
- He L J, Hu S B, Yang W C, et al. Temperature measurement in the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling site. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(2): 477 ~ 489
- [24] 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
- [25] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法. 北京: 地质出版社, 1997. 1 ~ 246
- Yang W C. Theory and Methods in Geophysical Inversion. Beijing: Geological Publishing House, 1997. 1 ~ 246
- [26] 牛一雄, 潘和平, 王文先等. 中国大陆科学钻探主孔 (0 ~ 2000 m) 地球物理测井. *岩石学报*, 2003, **20**(1): 165 ~ 178
- Niu Y X, Pan H P, Wang W X, et al. Geophysical well logging in main hole (0 ~ 2000 m) of Chinese Continental Scientific Drilling. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, **20**(1): 165 ~ 178
- [27] 杨文采, 朱光明, 杨振华等. 中国大陆科学钻探孔区数字三分量反射地震调查. *地球物理学报*, 2007, **50**(3): 780 ~ 790
- Yang W C, Zhu G M, Yang Z H, et al. Three-component seismic profiling at the Chinese Continental Scientific Drilling site. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(3): 780 ~ 790

(本文编辑 胡素芳)