

中国大陆科学钻探孔区深层含金石榴辉岩矿体

杨文采, 杨午阳, 程振炎

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 利用大陆科学钻探岩心、岩心物性测定结果、测井与 VSP 资料来标定地震反射体, 大大提高了中国大陆科学钻探孔区地质构造解释的可信度。岩石物性测定表明, 金石榴辉岩的纵波速度极高, 会产生明显的反射与重力异常。数值模拟表明, 孔区三维地震拱形反射主要是由榴辉岩及切穿它们的晚期破碎带共同形成的。在 CCSD 主孔东南方深部重力高部位有多个这样的拱形反射, 预示在地表陡倾榴辉岩的延伸方向还有多个一定规模的隐伏榴辉岩体。

关键词: 大陆科学钻探孔区; 反射地震; 金红石矿; 榴辉岩体; 圈定

中图分类号: P315.63; P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)05-0457-07

Deeply buried rutile-bearing eclogite bodies at the site of the Chinese Continental Scientific Drilling Hole

YANG Wen_cai, YANG Wu_yang and CHENG Zhen_yan
(Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: The cores, measurements of physical properties, well logging and VSP data obtained from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) hole can be used to calibrate seismic reflectors and raise the reliability of seismic interpretation. Measurements of physical properties indicate that the rutile-bearing eclogite, due to its very high seismic velocity and density, can produce reflections and gravity anomalies. Numerical modeling demonstrates that the arch reflectors appearing at the CCSD site result jointly from the eclogites and the penetrating late shatter zone. Southeast of the CCSD main hole, there are quite a few such reflectors, implying that eclogite bodies exist in the extension direction of the surface eclogite body.

Key words: Chinese Continental Drilling; seismic reflection; rutile ores; eclogite bodies; location

近年来在苏鲁超高压变质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地震调查, 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。然而, 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, 而结晶岩区常见的陡倾岩体的解释是十分困难的。这些困难主要与结晶岩区的组成结构不符合反射地震的前提条件有关。本文将简要介绍中国大陆科学钻探孔区陡倾榴辉岩体模型的确定过程, 以及根据科学钻探岩心、测井与 VSP 资料对结晶岩区陡倾岩体造成反射地震波场畸变的分析。由于大陆科学钻探孔区的榴辉岩体多含有金红石, 本身就是钛铁矿体, 因此, 圈定这种岩体对扩大矿产储量还具有重要经济意义。

早在 20 年前白文吉研究员就对苏北大陆科学钻探孔区的榴辉岩和超镁铁岩进行了深入的研究(白文吉等, 1993)。

大陆科学钻探孔区的榴辉岩大都具有高密度和高地震波速的特征, 可通过建立精细的地震波速模型来圈定。在沉积盆地进行地震反射法勘探时确定地震波速模型的关键是追踪经钻孔验证了的标准层位。利用钻孔标定的标准层深度和反射地震剖面上该层对应的双程走时确定时深转换的模型, 并利用声测井、中子密度测井和 VSP 资料合成地震图做检验。在结晶岩区没有标准层作为依托, 甚至没有深层钻孔资料作依据, 主要依据露头岩石样品的物性测量、广角折/反射地震剖面 and 地震波场模拟分析反射地震波场的特征。在科学钻探取得岩心和测井资料之后, 就可以对推测的波速模型部分加以检验, 并进一步提出较为准确可靠的波速模型。因为大陆科学钻探孔区的反射体大多经过了标定, 本文将介绍的中国大陆科学钻探孔区的含金石榴辉岩体的圈定, 对今后开展

收稿日期: 2005-07-20; 修订日期: 2005-08-15

基金项目: “九五”国家重点科学工程项目; 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2003CB716505)

作者简介: 杨文采(1942-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事地球物理学研究, E-mail: yangwencai@ a1.net.cn。

结晶岩区反射地震调查是有益的。

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。由于钻井技术和经费的限制,近期钻入中地壳取芯看来是不现实的。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。大陆科学钻探孔区的地质地球物理情况对地震反射体的标定已有多篇论文(杨文采等, 2002b, 2004a), 请有兴趣的读者参阅。

1 实验区地质地球物理概况

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。东海县南部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,三叠纪时扬子和中朝克拉通在该带碰撞,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(Cong *et al.*, 1994; Liou *et al.*, 1997; Ernst *et al.*, 1997; Xu Zhiqin and Yang Wencai, 1998)。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,是在元古宙或更早期形成的,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(许志琴等, 2004)。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,原岩是元古宙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I、II、III和IV4个岩片(许志琴等, 2004)。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,它们可能是扬子克拉通向北俯冲的副产品,即前沿的逆冲断层(杨文采等, 1999a, 1999b, 1999c)。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5 000 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(Xu Zhiqin and Yang Wencai, 1998)。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。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。1999年在这里完成了地震研究,对一口深度为1 032 m的预先导孔(CCSD_PP2孔)进行了测井和VSP测量,并对孔区浅层(0~1 000 m)地震反射体进行了初步的标定(杨文采等, 2002b)。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),并完成先导孔VSP测量和广角折射地震十字剖面(姜枚等, 2003)。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(杨文采等, 2004a),面积将近20 km²。2005年3月主孔钻入5 158 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量反射地震剖面,为大陆科学钻探工程的现场工作画上了句号。大陆科学钻探孔区以及区域的地壳上地幔请参考文献(Yang Wencai, 1998, 2000, 2002, 2003; 杨文采等, 2002a, 2004b)。

2 岩石样品波速测定结果与重力异常特征

自1997年以来,中国大陆科学钻探中心地学部在该区进行了大量物性测定工作,比较全面地掌握了该区常温常压下主要岩石的物理性质。从测定结果可以看出,榴辉岩 $V_p=7.0\sim 8.4$ km/s,密度比片麻岩高出0.7 g/cm³左右,波速高600~1 300 m/s,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4 000 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。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的物性情况,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%的各向异性(Kern *et al.*, 2002; 陈意等, 2004),在地震波传播时可能加大反射波能量。

金振民等(2004)对中国大陆科学钻探主孔100~2 000 m岩石的弹性波速度进行了测定,结果表明,金石榴榴辉岩的纵波速度极高,平均值达7.86 km/s,比非矿化榴辉岩高出0.67 km/s,比片麻岩高出2.1 km/s。因此,孔区的高速体反映了金石榴榴辉岩矿体。同时,主孔岩心测定还发现,孔区所有的

岩石泊松比都很高, 其中最高的是橄榄岩, 达 0.33。高波速的榴辉岩也是高密度体, 密度比片麻岩高出 0.7 g/cm^3 左右, 可以推测, 金红石榴辉岩矿体必定会产生明显的重力异常。

孔区布伽重力异常图(图 1) 显示有一个强度达 27 毫伽的正重力异常, 其尖峰部位与钻孔揭露的浅部金红石榴辉岩矿体对应。但是, 此异常呈葫芦形状, 其南部出现的大葫芦范围比金红石榴辉岩矿体范围大得多。可以推测, 此异常为浅部与深部多个高密度体叠加引起。为此, 笔者进行了正演计算, 结果见图 2。拟合计算表明, 在主孔东南方 700~ 1000 m 范围内存在有隐伏的高密度体, 很可能是金红石榴辉岩矿体, 埋藏深度在 2200 m 以上。由于位场拟合的多解性, 这一推断还必须用地震剖面来验证。

3 根据钻孔资料标定榴辉岩体的反射特征

科学钻探孔区浅部, 有 ZK2304、CCSD 主孔和预先导孔 CCSD_PP2 等 3 个钻孔控制, 地质情况基本查清。ZK2304 和 CCSD 主孔之间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, 延深可达 900 m(杨文采等, 2004b)。图 3 图 4 标出了已由钻孔控制的榴辉岩体在地震剖面中的位置(Ec), 图 4 还标出了建议验证孔位置(optional hole)。令人迷惑不解的是, 对应这个陡倾大榴辉岩

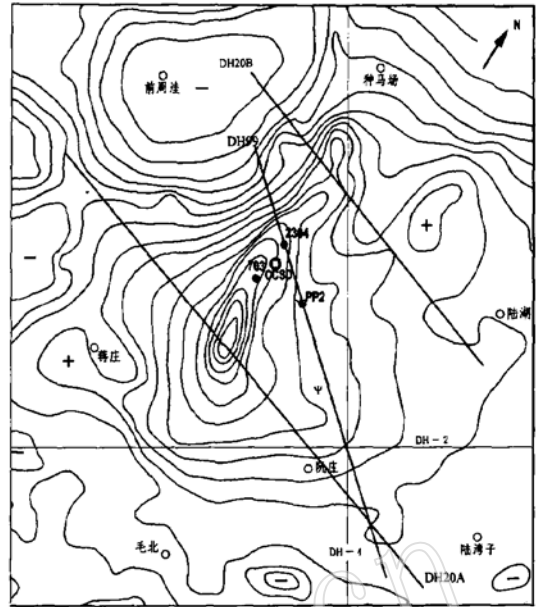


图 1 大陆科学钻孔孔区布伽重力异常及钻孔编号和地震剖面位置图

Fig. 1 Bouguer gravity map around the CCSD site, showing locations of seismic lines and holes

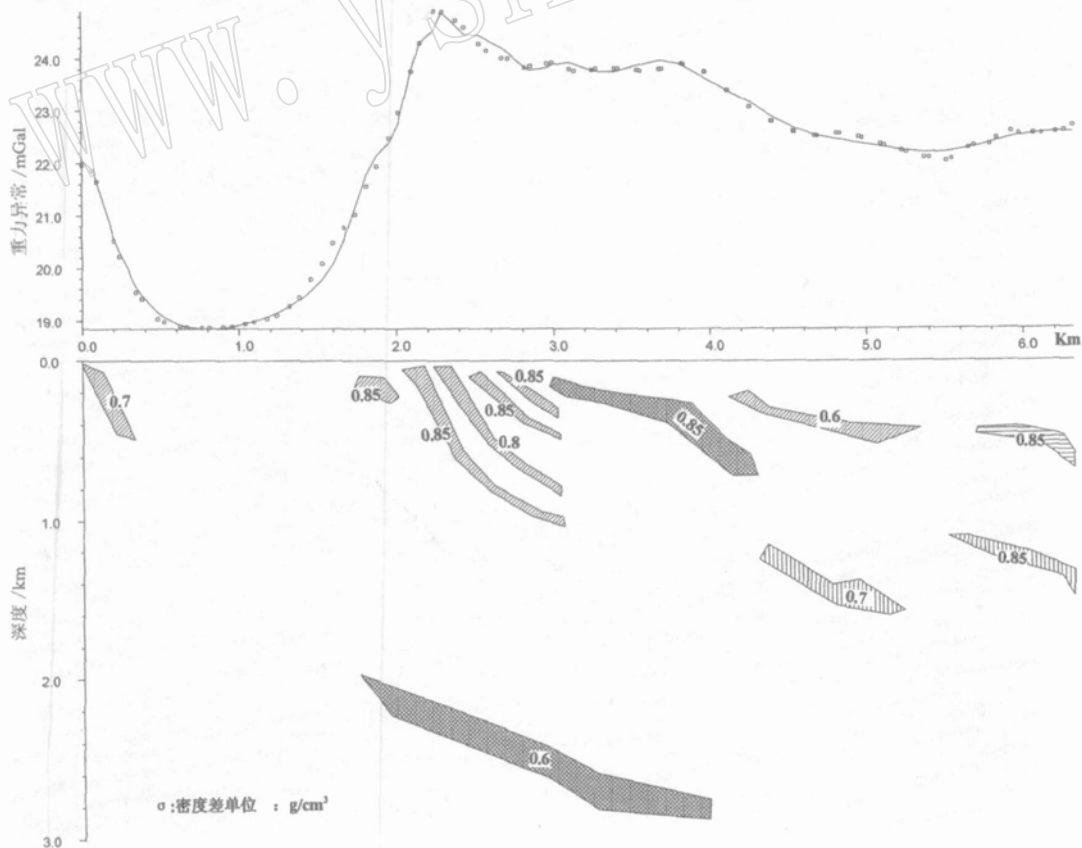


图 2 大陆科学钻孔孔区 DH99 线布伽重力异常和拟合的地下高密度体剖面

Fig. 2 Interpretation of gravity anomalies along Seismic Line DH99 by fitting an underground density model

体的似乎是一组上拱的弧形反射。这种弧形反射在剖面上存在多处(见图3、4)。由地震波的知识可知,陡立的高速体似乎不能产生多组弧形反射,因此有必要先查明榴辉岩体与上拱的弧形反射之间的关系,提供解释这类反射体的可靠依据。

如上述岩石物理性质的讨论可知,断裂破碎带和榴辉岩都可以引起反射。PP2孔和主孔中发现多组破碎带,后期的破碎带发育在榴辉岩体内,推测可能形成弧形绕射;而且由于榴辉岩的波速很高,地震波先到达榴辉岩体内的破碎带,使绕射形成上凸的弧形。虽然这种推测符合地震波理论,但只是一种定性的认识,必须用定量的数值模拟来验证。数值模拟采用变密度的二维声波方程和有限差分原理,结果证实了上述推测(杨文采等,2002b)。数值模拟结果表明,毛北科学钻探孔区的小尺度拱形反射主要是由榴辉岩及切穿它们的晚

期破碎带共同形成的,在PP2孔东南方深部重力高部位有多个这样的拱形反射,它们位于地表陡倾的已知榴辉岩体延伸的方向,指示多个具有一定规模的隐伏榴辉岩体(杨文采等,2004a)。

4 三维地震资料提供的信息

2002年在孔区完成了近20 km²的三维地震调查,由于安峰山水库的限制,测线与区域构造倾向有一定的夹角。通过偏移归位等处理后,三维地震波场可比较准确地反映地下地质构造。沿区域构造倾向方向切开并过主孔的剖面如图5。在CCSD主孔下方,还显示了由测井取得的地层波阻抗曲线,可见波阻抗变化大的地段对应强地震反射体,它们主要是

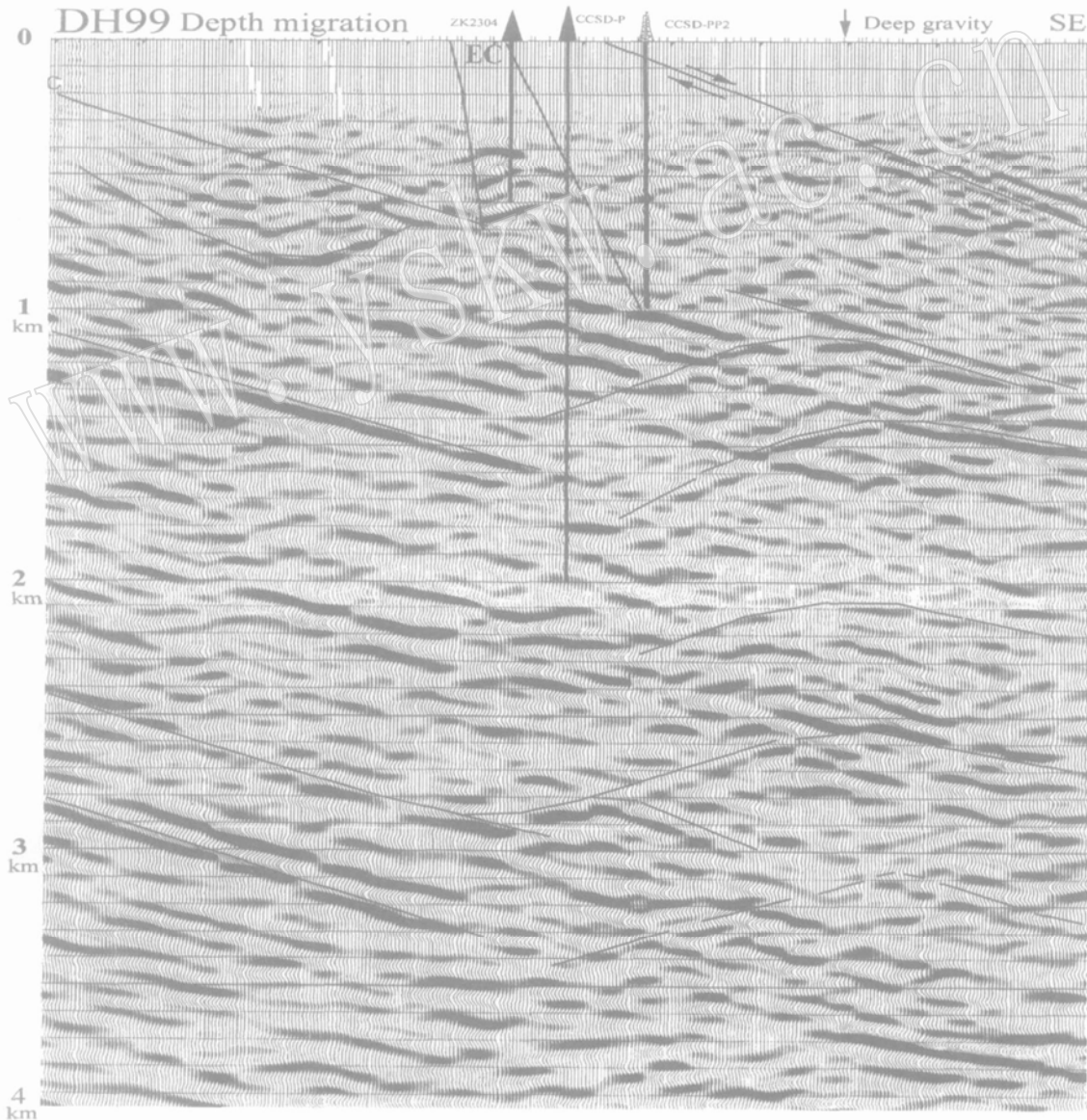


图3 DH99线地震叠后偏移剖面

Fig. 3 Post-stacked and migrated profile of Line DH99

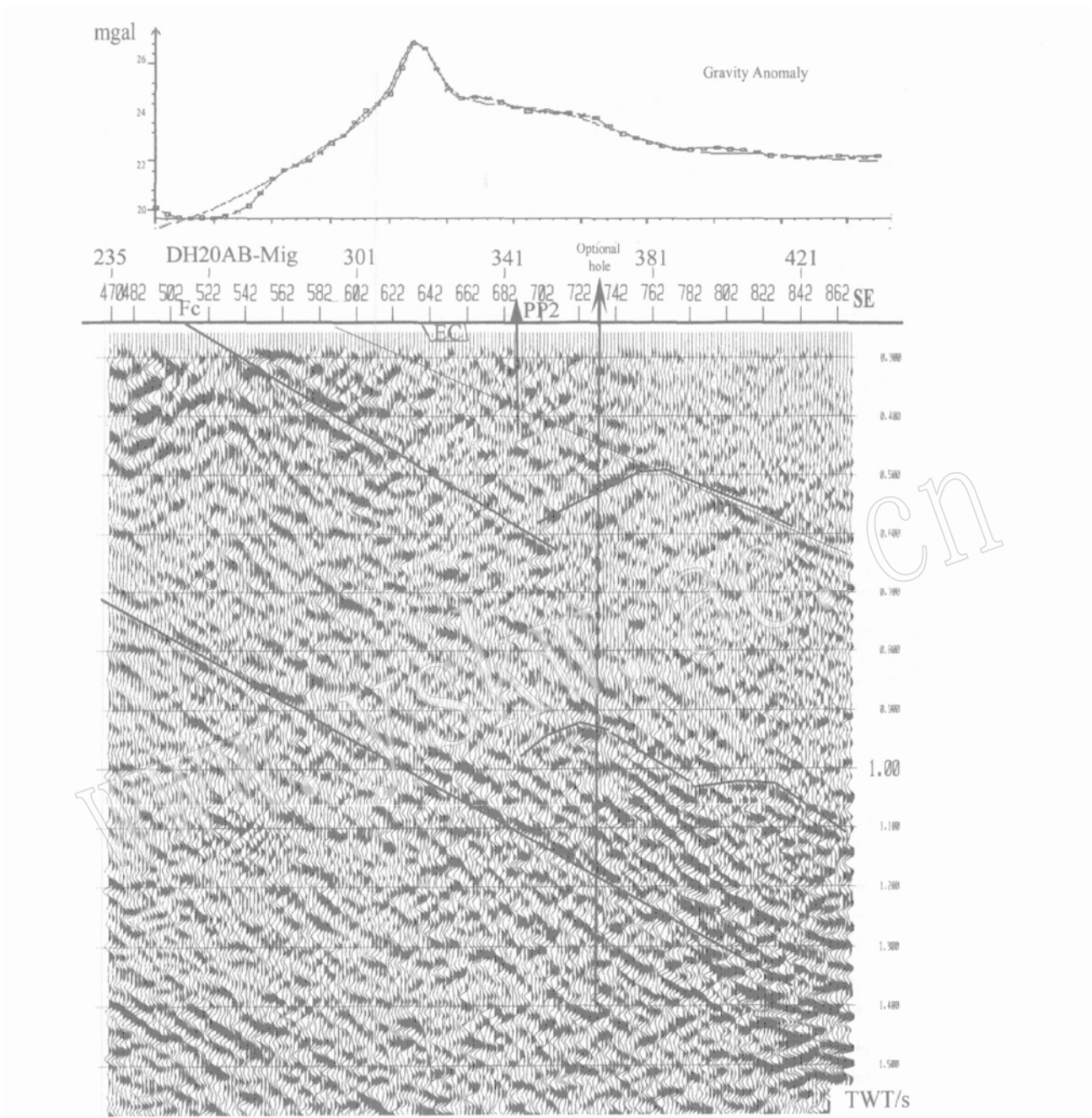


图 4 DH20AB 线地震叠后偏移剖面
 Fig. 4 Post_stacked and migrated profile of Line DH20AB

介于超高压变质岩片之间的韧性剪切带。最重要的是在右下角白框标明的一组拱弧反射体, 它们可能是隐伏榴辉岩体的反映。

三维地震波场的时间切片是揭示隐伏岩体的有效方法。图 6 为三维地震数据体的时间切片, 切片双程走时分别为 800 ms(左)和 1 000 ms(右), 对应深度为 2 400 m 和 2 900 m。两张时间切片的右方都出现环卵形反射(双向箭头所示的卵形反射地震组构范围), 而且这种反射体的范围在 1 000 ms 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是有充分根据的。建议的验证孔位已在图 4 中标明。

5 结 论

(1) 中国大陆科学钻探孔区岩石物性测定表明, 金石榴辉岩的纵波速度极高, 比片麻岩高出 2.1 km/s, 密度比片麻岩高出 0.7 g/cm³ 左右, 可以推测, 金石榴辉岩矿体必定会产生明显的反射与重力异常。

(2) 数值模拟表明, 孔区三维地震拱形反射主要是由榴

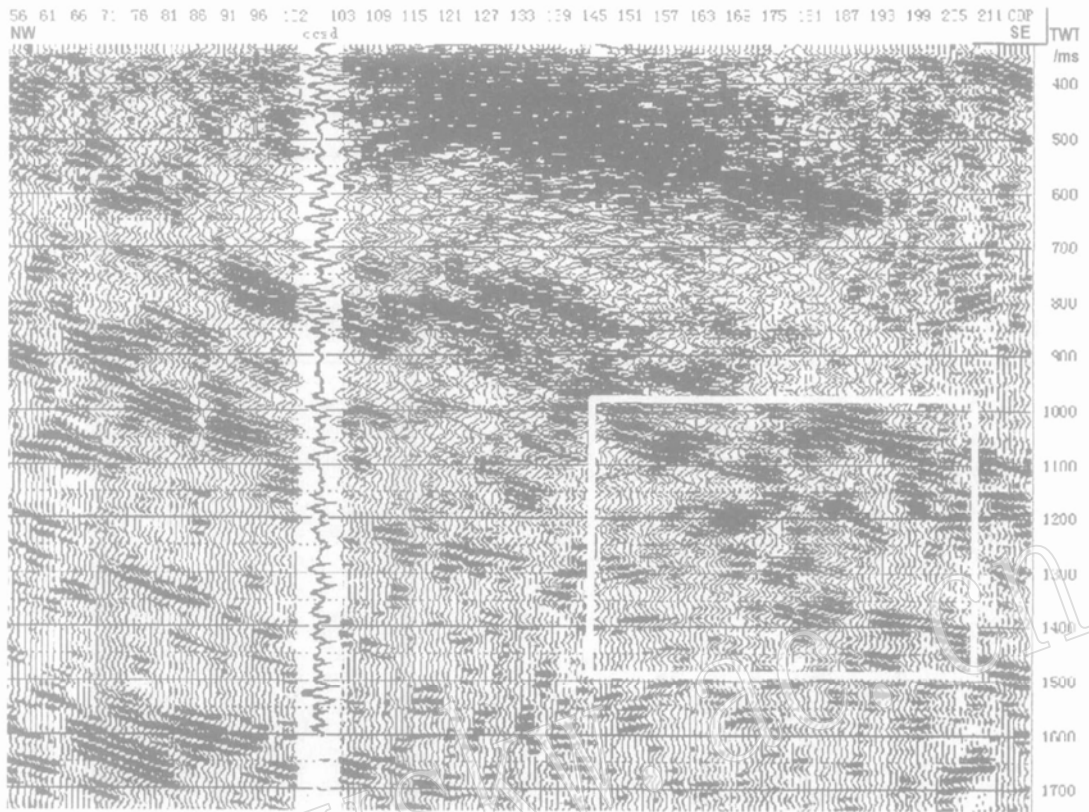


图5 三维地震区域构造倾向测线地震偏移时间剖面
Fig. 5 Migrated seismic section of 3D seismic profile in the dipping direction

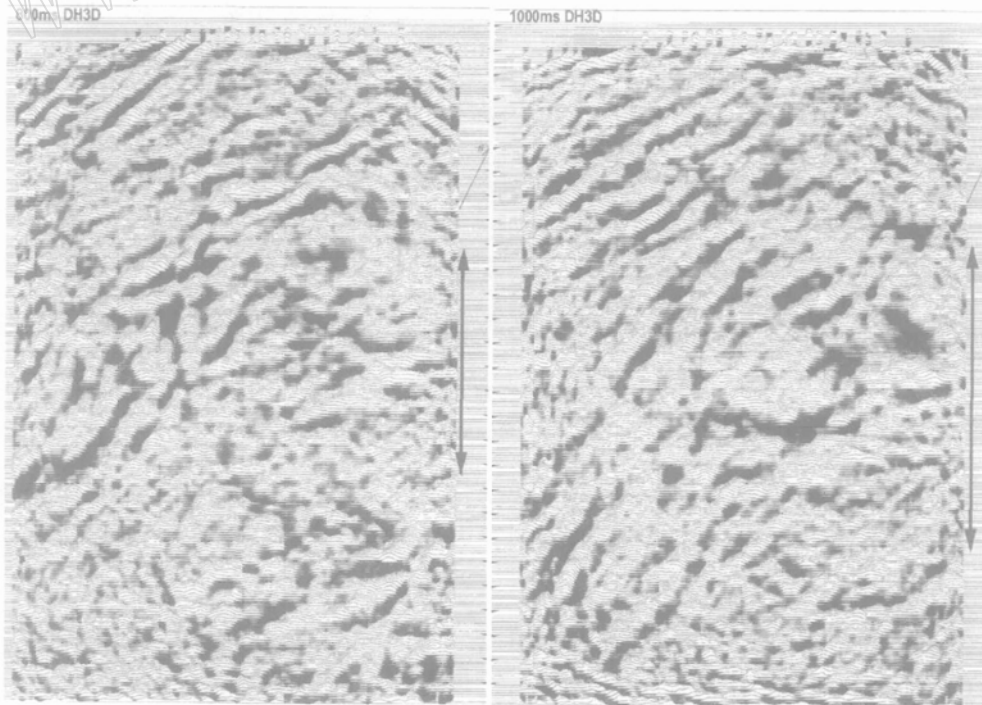


图6 三维地震数据体的时间切片
Fig. 6 Time_slices of 3D seismic data

辉岩及切穿它们的晚期破碎带共同形成的。4 800~ 1 000 ms 三维地震波场的时间切片都出现环卵形反射, 而且这种反射体的范围向下变大, 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是有充分根据的。

感谢: 本所许志琴院士、同济大学马在田院士和王家林教授对大陆科学钻探地球物理调查的指导和帮助。

References

- Bai Wenji, Zhou Meifu, Hu Xufong, *et al.* 1993. Lithospheric Tectonic Evolution of Huabei Block and Mafic-ultramafic Rocks and Its Mineralization Characters[M]. Beijing: Seismological Press, 1~ 294 (in Chinese).
- Chen Yi, Jin Zhenmin, Ou Xingong, *et al.* 2004. 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~ 1200 m of CCSD[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 97~ 108(in Chinese).
- Cong B, Wang Q, Zhai M, *et al.* 1994. UHP metamorphic rocks in the Dabie-Sulu region, China: their formation and exhumation[J]. *Island Arc*, 3: 135~ 150.
- Ernst W G, Maruyama S and Wallis S. 1997. Buoyancy-driven, rapid exhumation of ultrahigh-pressure metamorphosed continental crust[J]. *Proc. National Academy of Sciences*, 94: 9 532~ 9 537.
- Jiang Mei, Wang Youxue and Su Heping. 2003. Wide-frequency teleseism and its application to seismic exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 22(7): 536~ 539 (in Chinese).
- Jin Zhenmin, Ou Xingong, Xu Haijun, *et al.* 2004. Elastic wave velocities of the 2000 m depth at Chinese Continental Scientific Drilling: Constraints on deep seismic reflection[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 81~ 96(in Chinese).
- Kern H, Jin Z, Gao S, *et al.* 2002. Physical properties of UHPM rocks from the Sulu terrain, eastern central China: implications for the seismic structure at Donghai (CCSD) drilling site[J]. *Tectonophysics*, 354: 315~ 330.
- Liou J G, Maruyama S and Ernst W G. 1997. Seeing a mountain in a grain of garnet[J]. *Science*, 27(4): 48~ 49.
- Xu Zhiqin and Yang Wencai. 1998. Scientific significance and site selection researches of the first Chinese Continental Scientific Deep Drilling[J]. *Continental Dynamics*, 3(1~ 2): 1~ 13.
- Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, *et al.* 2004. The structure profile of 0~ 1200 m in the main borehole, Chinese Continental Scientific Drilling and its preliminary deformation analysis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 53~ 72(in Chinese).
- Yang Wencai. 1998. Crustal structure and development of Dabie UHPM Terrane in East-Central China[J]. *Continental Dynamics*, 3(1~ 2): 86~ 95.
- Yang Wencai. 2000. Analysis of deep intracontinental subduction[J]. *Episodes*, 23(1): 20~ 24.
- Yang Wencai. 2002. Geophysical profiling across the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, Eastern China[J]. *Tectonophysics*, 354: 277~ 288.
- Yang Wencai. 2003. Flat mantle reflectors in eastern China: possible evidence of lithospheric thinning[J]. *Tectonophysics*, 369(3~ 4): 219~ 230.
- Yang Wencai, Cheng Zhenyan, Chen Guojun, *et al.* 1999a. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (I): Deep seismic reflection[J]. *Chinese J. Geophysics*, 42(1): 57~ 70(in Chinese).
- Yang Wencai, Fang Hui, Cheng Zhenyan, *et al.* 1999b. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (II): Non-seismic methods[J]. *Chinese J. Geophysics*, 42(3): 387~ 398(in Chinese).
- Yang Wencai, Hu Zhenyuan, Cheng Zhenyan, *et al.* 1999c. Long profile of geophysical investigations from Tancheng to Lianshui, east-central China[J]. *Chinese J. Geophysics*, 42(2): 206~ 217 (in Chinese).
- Yang Wencai and Wang Jiyang. 2002a. Geophysical evidences for crustal magmatic underplating in Sulu area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 173~ 179 (in Chinese).
- Yang Wencai, Yang Wuyang and Cheng Zhenyan. 2004a. Interpretation of 3D seismic reflection data in the Chinese Continental Scientific Drilling site[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 127~ 138 (in Chinese).
- Yang Wencai, Yang Wuyang, Jin Zhenmin, *et al.* 2004b. Lithospheric seismic fabrics of Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt[J]. *Science in China Ser. D*, 48(5): 585~ 600.
- Yang Wencai, Zhang Chunhe and Zhu Guangming. 2002b. Calibration of seismic reflectors inferred from observations at the Chinese continental drilling area[J]. *Chinese J. Geophys.*, 45(3): 386~ 392(in Chinese).

附中文参考文献

- 白文吉, 周美付, 胡旭峰, 等. 1993. 华北地块岩石圈构造演化与镁铁-超镁铁岩及矿化特征[M]. 北京: 地震出版社, 1~ 294.
- 陈意, 金振民, 欧新功, 等. 2004. 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[J]. *岩石学报*, 20(1): 97~ 108.
- 姜枚, 王有学, 宿和平. 2003. 宽频地震方法技术在地震探测工作中的应用[J]. *地质学报*, 22(7): 536~ 539.
- 金振民, 欧新功, 徐海军, 等. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~ 2000 m 岩石弹性波速度: 对地震深反射的约束[J]. *岩石学报*, 20(1): 81~ 96.
- 许志琴, 张泽民, 刘福来, 等. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 1200 米构造柱及变形构造初步解析[J]. *岩石学报*, 20(1): 53~ 72.
- 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[J]. *地球物理学报*, 42(1): 16~ 27.
- 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[J]. *地球物理学报*, 42(4): 508~ 519.
- 杨文采, 胡振远, 程振炎, 等. 1999c. 郯城-涟水综合地球物理剖面[J]. *地球物理学报*, 42(2): 206~ 217.
- 杨文采, 汪集琦. 2002a. 苏鲁地区地壳岩浆底侵的地球物理判识[J]. *地质学报*, 76(2): 173~ 179.
- 杨文采, 杨午阳, 程振炎. 2004a. 中国大陆科学钻探孔区三维地震资料的初步解释[J]. *岩石学报*, 20(1): 127~ 138.
- 杨文采, 杨午阳, 金振民, 等. 2004b. 苏鲁超高压变质带岩石圈地震组构[J]. *中国科学(D)*, 34(4): 307~ 319.
- 杨文采, 张春贺, 朱光明. 2002b. 标定大陆科学钻探孔区地震反射体[J]. *地球物理学报*, 45(3): 370~ 384.