

中国科学深钻选址地球物理调查与大别-苏鲁岩石圈

杨文采 程振炎 张春贺

(中国地质科学院地质研究所,北京,100037)

摘 要 本文简要地讨论了大别-苏鲁超高压变质带大陆科学钻探选址新采集的地球物理调查剖面及相关地球物理成果。这些剖面以深反射地震及大地电磁测量为研究岩石圈构造的主要方法,结合地质资料和区域重磁平面图,分析大别-苏鲁地体的深部地质构造与岩石圈主要特征,以及大陆科学钻探靶区选择的地质地球物理依据。同时讨论了大陆科学钻探的靶区(江苏东海县)的地壳构造与地热研究结果,并将深度偏移地震剖面与先导孔岩心钻探结果进行了对比。

关键词 大陆科学钻探 选址 超高压变质带 大别-苏鲁 地球物理

Geophysical Investigation for Site-Selection of Chinese Continental Scientific Drilling and Dabie-Sulu Lithosphere

YANG Wencai CHENG Zhenyan ZHANG Chunhe

(Institute of Geology, CAGS, Beijing, 100037)

Abstract Geophysical investigations have been carried out since 1996 for site-selection of Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSDP). The surveys mainly include deep seismic reflection and MT together with gravity and magnetic data, and the results are presented in this paper. An integrated interpretation of the geophysical data reveals crustal structures and main characteristics of the Dabie-Sulu lithosphere. Good evidence for selecting the drilling site in Donghai County of southern Sulu is explained. Crustal structures and geothermal measurements around the drilling site are also discussed, with a comparison between the depth-migrated seismic profile and core petrology at the CCSD pilot-hole.

Key words Chinese Continental Scientific Drilling site-selection ultra-high pressure metamorphism Dabie-Sulu geophysics

1 概况

中国第一口科学深钻的目标,是通过钻孔获取的岩心及流体样品和井孔及周围的地球物理数据,校正地球物理对深部构造的遥测结果,重塑超高压变质带形成和折返机制,研究中国南北两大板块会聚边缘的地壳行为与壳幔作用,并建立天然的长期地下观测实验基地(Xu Zhiqin等,1998)。大别-苏鲁超高压变质带,横跨鄂、皖、苏、鲁四省,延绵上千公里。通过详细的地质、地球物理调查取得丰富资料后,1997年8月18~20日在山东青岛召开的“大别-苏鲁超高压变质带大陆科学钻探选址国际研讨会”上,中外学者普遍赞同把苏北东海县南部地区作为第一口中国大陆科学深钻的靶区。

要实现中国大陆科学钻探的科学目标,必须在地球物理调查的基础上搞清大别-苏鲁地区的岩石圈构造以及地质候选区上的地壳构造,逐步优选出科学钻探的孔区。实现中国第一口科学深钻的科学目标,首先要选出最有利于实现科学目标的孔位。整个地球物理调查的过程可分为3个阶段:①区域岩石圈调查及靶区选择;②靶区地球物理调查和孔区选择;③孔区地球物理调查和孔位选择。不管在哪个阶段,中国大陆科学钻探选址都以回答以下3个科学问题为目标:①为什么要打孔;②为什么要在这里打孔;③为什么要打5 000 m?通过地球物理调查以提供充分的科学资料,说明①深部钻探到的岩石将是没有在地表出露的,因此只有通过钻探才能取得其样品;②在选定孔区打钻将能取得研究超

高压变质带形成折返最为丰富的资料;③钻孔将主要穿过有意义的地质体及层位,而不是钻过后期侵入体等与科学目标关系不大的岩石。因此,此次综合地球物理调查以深反射地震调查为主导,并辅助以大地电磁、重力、磁法等综合调查,以求取地壳上地幔的各种信息,达到反射地震勘探的高分辨率(在上地壳高于20 m)。

自从1987年在大别山发现柯石英以来,在大别山地区进行过广角反折射的地震调查,剖面穿过东大别宿松-岳西-六安地区(董树文等,1998;王椿镛等,1997)。但是,在大别-苏鲁造山带以前从未进行过深反射地震调查。虽然前人开创性的工作具有重要意义,但由于网度太稀,且没有投入深反射地震工作,对UHPM带研究来说空间分辨率太低。因此,此次调查采取以深反射地震为主,配合以大地电

磁等非地震方法,尽可能复盖大别-苏鲁UHPM带。尽管如此,由于大别山地形起伏大,地震采集工作极为困难,因此横穿UHPM带的深反射地震剖面还是没有实现(图1)。

此次调查的主要6条剖面从北向南顺序编号。

I线:山东诸城-胶南泊里,长44 km;进行深反射地震、MT、地磁、放射性及卡帕测量;外加石门地区十字地震剖面2条,总长14 km。

II线:山东日照虎山-临沂八湖,长80 km,进行MT、地磁、放射性及卡帕测量。

III线:山东郯城-江苏涟水,长139.5 km,进行深反射地震和MT测量。

IV线:安徽潜山-横中,长26 km(MT延长到50 km),进行深反射地震、MT、地磁和放射性测量。

V线:安徽岳西-潜山姜家寨,长42 km,进行

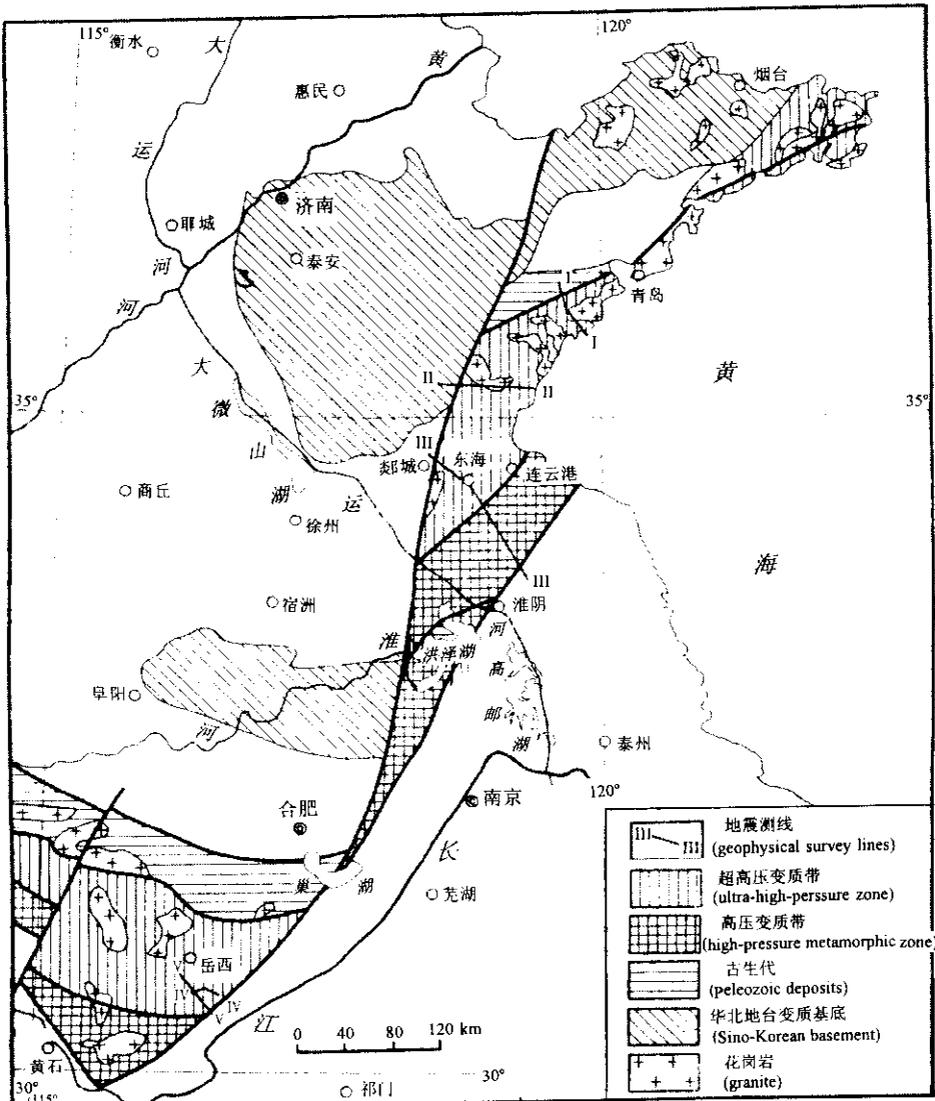


图1 大别-苏鲁超高压变质带与地球物理测线的位置

Fig.1 Location of Dabie-Sulu UHPM belt and geophysical lines

MT、地磁和放射性测量。

VI线:岳西菖蒲短线(6.3 km)。

此次调查还在江苏省东海县南科学钻探靶区进行了二维地球物理调查,用7条剖面复盖靶区,剖面总长123 km,方法包括反射地震、MT和重力观测,同时完成430 m地热孔一口,取得了全部岩心进行了地温测量。由于在山高林密的大别山地区,反射地震采集的困难很大,大别山的3条剖面线比较短。剖面设计除考虑岩石圈调查的目标外,还尽量照顾到地质学家已提出的科学钻探选址,如胶南诸城、潜山牌楼及东海县等。

结晶岩地区深反射地震处理不同于沉积盆地石油勘探的地方(Mooney等,1992;Pakiser等,1989;杨文采,1998)。如反射路径长,讯号能量弱,信噪比低,排列长,表层地质变化大,干扰多,结晶岩内部反射弱,仅为沉积岩层的1/3左右,且没有标准层等。因此,在处理时要采取一些与油气地震勘探不同的方法技术,根据结晶岩中地震波的传播规律,此次调查采取以下技术,保证了高质量反射记录的取得:

(1)震源采用15~25 kg炸药,放入15~20 m深的炮井内,炮井最好用空气潜孔冲击锤钻进,供气压力在2 MPa以上。下药后采取密实填孔以增加激发能量,并减少声波干扰。

(2)观测系统为单边端点激发,长剖面叠加次数15~20次(关键地段增加至20~40次),道间距20~50 m,炮间距100~200 m,偏移距300~9 000 m。在弯线施工时,测线转折角一般在10°以内,并在大拐角附近放加密炮,以提高此处的叠加次数,保证叠加剖面的高质量。

(3)1998年以前用120道DFS-V型地震仪观测,以后用24位地震仪,采样率为1~2 ms,记录长度20~24 s,通频带8~128 Hz,2串18个检波器面积组合,组合行距20 m。

(4)测地工作用经纬仪定向,红外仪测距,测绳定点。检波点高程实测,炮点高程两次实测,并与国家三角点联测闭合,以保证测量精度并为静校正提供准确资料,在动校前后反复进行剩余静校正。

(5)利用炮井资料、微测井和小折射揭露的岩性确定地表低速层性质和深度,为地震处理提供改正数据。

(6)在施工前进行一定的试验工作以选取最佳参数,在施工中现场回放原始记录,使单炮记录的一级品率达到85%以上。

(7)保真振幅处理,是在深反射记录中取得地震

波振幅信号的关键。除球面扩散振幅补偿外,指数增益补偿的时窗与道宽等参数一定要选取适当,才能反射信号能量的空间变化。

(8)速度分析要在充分利用工作站交互处理的优点的同时,以邻区折射地震取得的地壳波速参数作为基准调校。同时要加长排列(偏移距达12 km)的采集处理试验工作,取得该区标准波速柱状图,其中深层的波速主要参考折射地震的资料。

(9)为地质解释的需要,采用特别的信号增强技术,突出反射界面信号并增强反射振幅的对比度。

采取上述措施后地震记录质量明显提高,单炮记录上10~11 s处Moho面的反射一般十分清晰。仅在大别山区,尤其是在山头上放炮时反射记录较差,这是由于山坡两侧的混响造成部分激发能量转化为源区干扰所致。

2 苏鲁地体的深部地质构造

在地球物理资料的解释时,很容易犯的一个错误是简单的逻辑推理。譬如,由于大陆地壳是在地幔形成之后,由地幔物质分异而逐渐形成的,因此简单的推测是大陆地壳岩石比其下方地幔岩石新,然而这个似乎很有道理的推测却是不正确的。在中国,EW向的天山-阴山造山带和中央造山带比NNE向的新华夏构造体系老,这是大量地质年代学和地层学资料所证实的。然而,反映上地幔波速和电阻率结构的地球物理资料却以NNE向为主,主要反映最新一期的构造作用。这些资料暗示着上地幔的构造比上地壳的大多数构造新。事实上,脆性的上地壳处于接近常温常压的环境之中,岩石生成之后不易再次重结晶或局部熔融,所以原始的岩石较容易保存下来。相反,地幔岩石处在高温高压的环境之中,易受重结晶和局部熔融的影响而改变其矿物组成,因此地球早期形成的地幔岩源岩不易保存下来,反映为新岩石和新构造。在地球物理方法之中,用大地电磁反演出来的电阻率对温度升高最为敏感。而地震波速与密度却与压力变化关系更为密切。因此,大地电磁资料反映的地下构造可能比地震波速结构更新一些。在反射地震图上,往往可以根据反射体的倾向和线性特征划分出多期的构造作用。一般来说,越老的构造在地震图上留下的“指纹”越弱、越不清晰;反之最新的构造作用留下最明显的地震“指纹”,有利于判断多期构造作用的次序。但是,也有例外的情况,高角度断裂(不看新或老)都没有清晰的反射体对应,这是反射地震原理上的缺

陷。地球物理资料解释的这种困难,也正是其魅力所在。

深反射地震和 MT 剖面揭示的地壳深部构造给出了重磁异常解释的有力约束,可以减少重磁异常解释的多解性。因此,在分析完地震和 MT 资料后,对区域重磁图进行再认识是极为有益的。总之,综合地球物理解释遵循兼容性原则。

为了更清楚地分析整个苏鲁地体的地质构造,将位于北边的 I 线与南边的 III 线连接起来(去掉北边反映沂沭断裂带的小段),构成一条穿过苏鲁地体南北边界的长剖面(图 2)。虽然这两条线之间有近 100 km 的平移,这种平移沿着地层走向方向,对分析区域构造影响不大。实际上,这两条线对接之后,反射体仍具有一定程度的连续性(图 2),因此对于深部构造的分析非常有益。图 3 上方为大地电磁资料反演取得的对数电阻率等值线图,下方为反射

地震剖面。在图 3 中最为重要的反射体是两组近似平行的倾斜反射体 AA 和 BB(位置标明于图 2),反射体 AA 从江苏涟水县北部高沟镇开始向北西下插,穿过整个苏鲁地体,到山东胶南下方时穿过莫霍面,继续插入上地幔。弯曲反射体 BB 位于南段的新莫霍面之下,很可能是俯冲扬子地壳的底面,即老莫霍面。反射体(AA 和 BB)存在于地壳或上地幔,指明在超高压变质带折返之后发生扬子克拉通的典型的陆内俯冲。扬子克拉通向北俯冲将引起苏鲁地体的褶皱,这可能是苏鲁地体呈现复背斜反射模式的原因(图 2,图 3)。另外,在剖面上苏鲁地体北端的叠置逆冲岩块和南端的嘉山-响水裂谷带的显示也很清楚,根据所有地质与地球物理资料的综合解释结果综合起来推断,对应这条剖面的苏鲁深部地壳构造断面示图 2。

在此断裂北段,烟台-五莲断裂(YWF)是向北

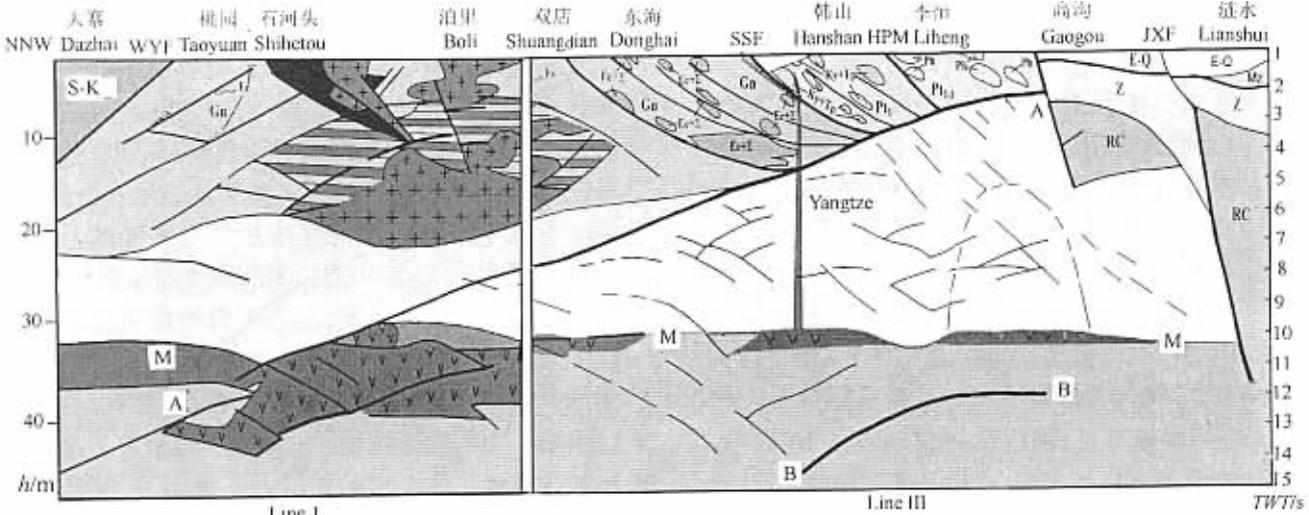


图 2 根据图 3 推断的穿越苏鲁地体南北的岩石圈断面

Fig. 2 The inferred crustal structures of the integrated profile shown in Fig. 3

S-K-中朝克拉通;Yangtze-扬子克拉通;M-莫霍面;A-A 和 B-B-与扬子地壳俯冲有关的反射体;Gn-片麻岩;Ec-榴辉岩;
 Σ-橄榄岩;Ky-蓝片岩;Tp-黄玉;RC-裂谷杂岩体;Pt-元古代地层;Z-震旦纪;Mz-中生代地层;E-Q-新生代沉积
 S-K-Sino-Korean craton;Yangtze-Yangtze craton;M-Moho discontinuity;A-A and B-B-reflectors related to subduction
 of the Yangtze craton;Gn-gneiss;Ec-coesite-bearing eclogite;Σ-peridotite;ky-kyanite;Tp-topaz;
 RC-rift complex;Pt-Proterozoic formations;Z-Sinian formations;Mz-Mesozoic formations;E-Q-Cenozoic sediments

倾斜的正断层,出现在中朝克拉通与苏鲁地体之间的缝合带的南侧,可能是三叠纪苏鲁地体折返时的上边界,或地幔楔的底边界。在图 2 与图 3 中突出的反射体 A-A 出现在地壳与上地幔,为区域性的逆断层,称为苏鲁主逆断层(MST)。这一逆断层向北倾斜,且在空间上与苏鲁地体南沿一致,因此它可能是俯冲扬子块体地壳顶部的标志。此外,大地电磁测量资料显示其北部为高电阻率的地壳,与经超高压变质的苏鲁地体对应(图 3 上)。因此, MST 应为

侏罗纪扬子块体继续向北俯冲到苏鲁地体下方的反映。另一个明显的反射体是位于现实莫霍面下方的弯曲反射体 B-B,近似平行于 A-A,很可能是侏罗纪俯冲扬子地壳的底部,即俯冲扬子块体的古莫霍面。由于剖面依次穿过了中高压变质的蓝片岩带、含有蓝晶石的高压变质带及含金刚石、柯石英的超高压变质带,应该考察这些岩片下方的地壳构造。在东海地区下方上地壳还有一组叠瓦状逆断层,如图 2 的东海-赵集段上地壳所示,下端终止于反射体 AA,

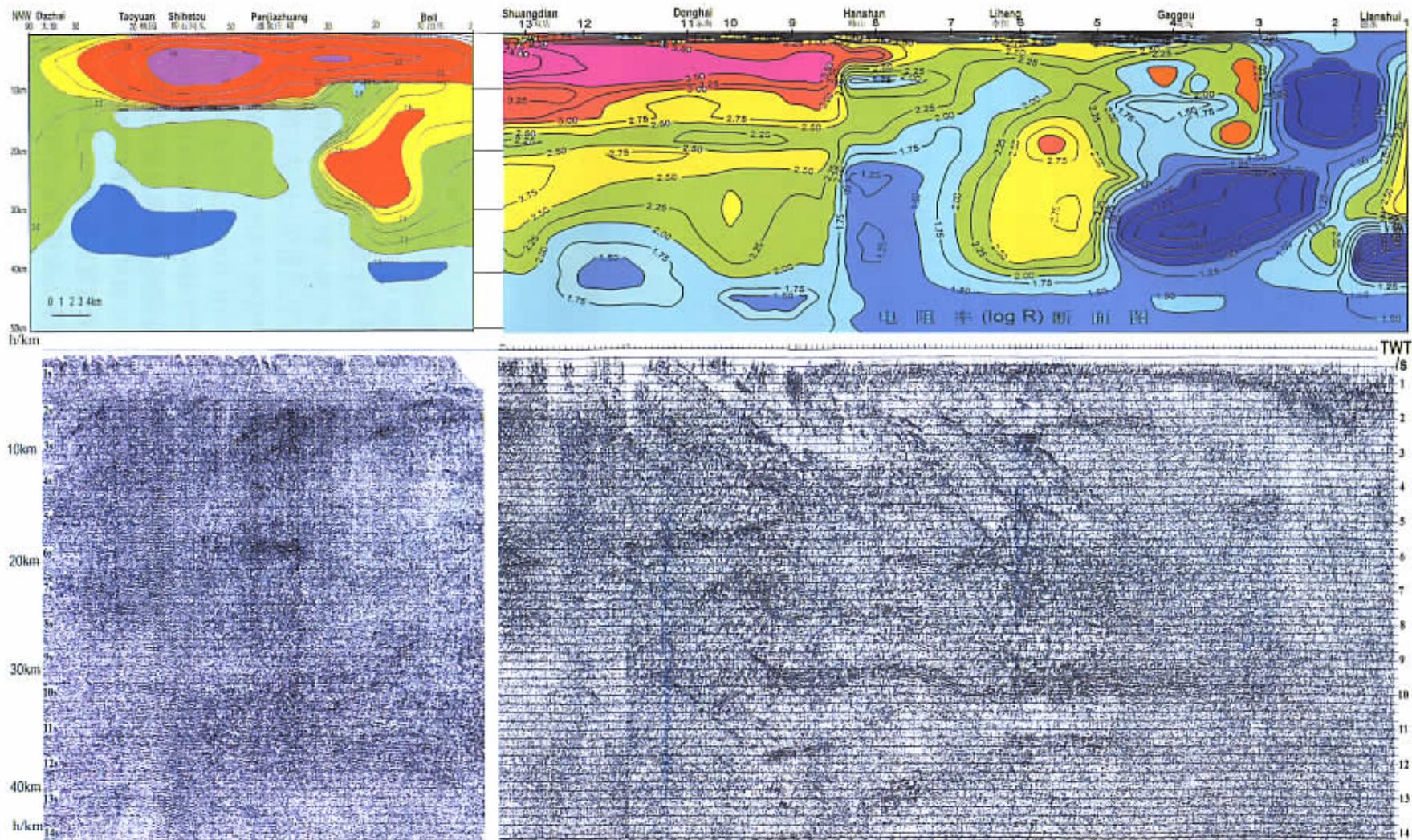


图3 穿越苏鲁地体南北的大地电磁剖在上)与反射地震剖面(下)

Fig. 3 An integrated geophysical profile across the Sulu UHPM and HPM terranes obtained by combining Line I and main part of Line III(See fig. 1). From the top to the MT resistivity in logarithm scale and migrated seismic reflection profile

称为东海逆断层(DHT),位于MST上方高压、超高压岩片之中,推断很可能是由于陆-陆俯冲伴随的剪切应力造成的逆断层。在南边,响水-嘉山断裂带(XJF)包含了若干条正断层,表示在白垩纪发育的陆内裂谷系统。

由此看来,扬子俯冲的全部历史可分为3个子阶段(Coon等,1994;Ernst等,1997;Liou等,1997;Yang Wencai,1997~2000)。第一个子阶段(240~215 Ma)为大别-苏鲁地体向中朝克拉通下方的俯冲(简称为苏鲁俯冲),这是碰撞后洋壳拉动的BA型俯冲。第二个子阶段(215~180 Ma)为扬子的顺时针旋转与大别-苏鲁岩石圈短期的拉张,使超高压变质岩系在大别-苏鲁快速折返。以后松潘洋封闭及秦岭碰撞造山(杨文采等,2001)。第三个子阶段为扬子大陆向大别及苏鲁地体下方的俯冲,形成全面发育的MST和DHT。目前还不能准确认定这一事件的年代,只知道它发生在超高压块体折返与秦岭碰撞之后,而在中侏罗世中国大陆定型时结束,应该是180~150 Ma。扬子大陆的俯冲发生在其外沿(大别-苏鲁岩石圈)和内沿之间,因此是典型的A型俯冲;而MST与现今喜马拉雅山脉的中央主逆断层(MCT)相似,不过后者现在仍在活动之中,而且尚未达到地幔(Yang Wencai,2000)。大别-苏鲁地体的另一次构造事件是晚侏罗纪大规模的火山活动和早白垩纪的花岗岩侵入及沿庐断裂带及嘉山-响水断裂带的陆内裂谷活动。燕山期花岗岩产生了大别山和苏鲁北沿,陆内裂谷活动导致在图3上10 s处的反射体指示了现今的莫霍面,它应是在扬子俯冲之后由地热流上涌和底垫作用形成的新莫霍面(杨文采等,2002)。东海县的地热流密度高达76 mW/m²,这么高的热流值隐含着此区自晚中生代以来经受了强烈的地热活动。这次以拉张为主的构造事件表明,大别-苏鲁岩石圈的挤压阶段在白垩纪以前就已结束了。

从深反射地震剖面上可以计算出主逆断层A-A的平均倾角为20°,而俯冲扬子地壳的厚度约为35 km。由于苏鲁地体的波速比俯冲扬子块体的高,从地震层析成像资料可以看到低速的陆间俯冲块体可达到130~170 km的深度。用俯冲到150 km深度计算,根据各种地球物理资料得出的俯冲扬子块体截面图(图4)。把深反射地震取得的倾角外推到120 km深度,假定苏鲁地体岩石圈厚度大约为80 km。从图4可看到,大约有250 km的扬子地壳被俯冲到苏鲁和中朝克拉通下方的上地幔。即扬子俯

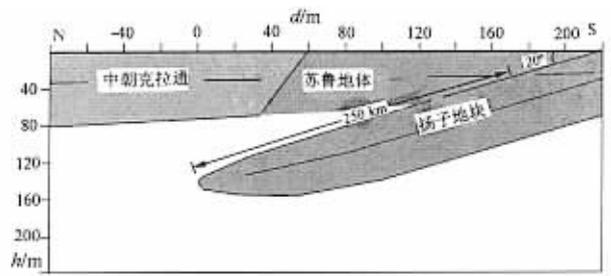


图4 扬子板块侏罗纪陆内俯冲几何模式

Fig. 4 Geometry of the Yangtze intracontinental subduction

冲造山使地壳缩短的水平距离约为250 km。

除正在活动的断层之外,巨型断裂带常有复杂的发生、发展和演化的历史。嘉山-响水断裂带位于苏鲁地体的南沿,在晚三叠纪苏鲁地体折返时它是区域性的逆断层(上盘上升)。侏罗纪扬子块体向苏鲁地体下方俯冲时它仍然是条逆断层(下盘下降)。但到了白垩纪该断裂带转化为拉张裂谷带,在地面原逆断层变形区发育了多条正断层(图3)。由于变质基底直接出露,苏鲁超高压变质地体反映为沿海阳至成山角的区域正磁场区,其北西侧有一条负异常带,可能是古缝合带在侏罗纪晚期火山活动所致。这种情况与北大别-北淮阳带类似。

3 大别超高压变质带岩石圈构造

图5为本次反射地震与大地电磁测量的结果和先前的重力资料及先前广角测量剖面位置图。宿松-霍山的二维电阻率剖面(图5下)与横中-水吼段地震反射剖面(图5上)位置是对应的,只不过反射地震剖面短一些。对比此剖面可见穿过大别山的岩石圈具有以下特点:

(1)南大别反射模式与III线东海以南段相似,因此可类比III线东海-赵集段来解释。4 s以下向NE倾的反射体反映了扬子克拉通向北的俯冲,而4 s以上向SW倾的反射体反映扬子俯冲前沿的逆断层系,逆断层系将南大别超高压变质带进一步推向地表。尤其值得注意的是,在南大别上地壳的超高压变质带岩片中同样含有强反射体,与苏北东海县毛北-芝麻坊一带的高速强反射体物理性质类似。在4 s处的强反射可能反映俯冲扬子克拉通的顶面,因此可认为这里高压变质岩片的厚度大约为12~13 km,其下方为扬子俯冲板块。在10~11 s处的反射体反映莫霍面附近波阻抗的变化,这组反射体总体呈向NE倾斜趋势,尤其是在莫霍面下方

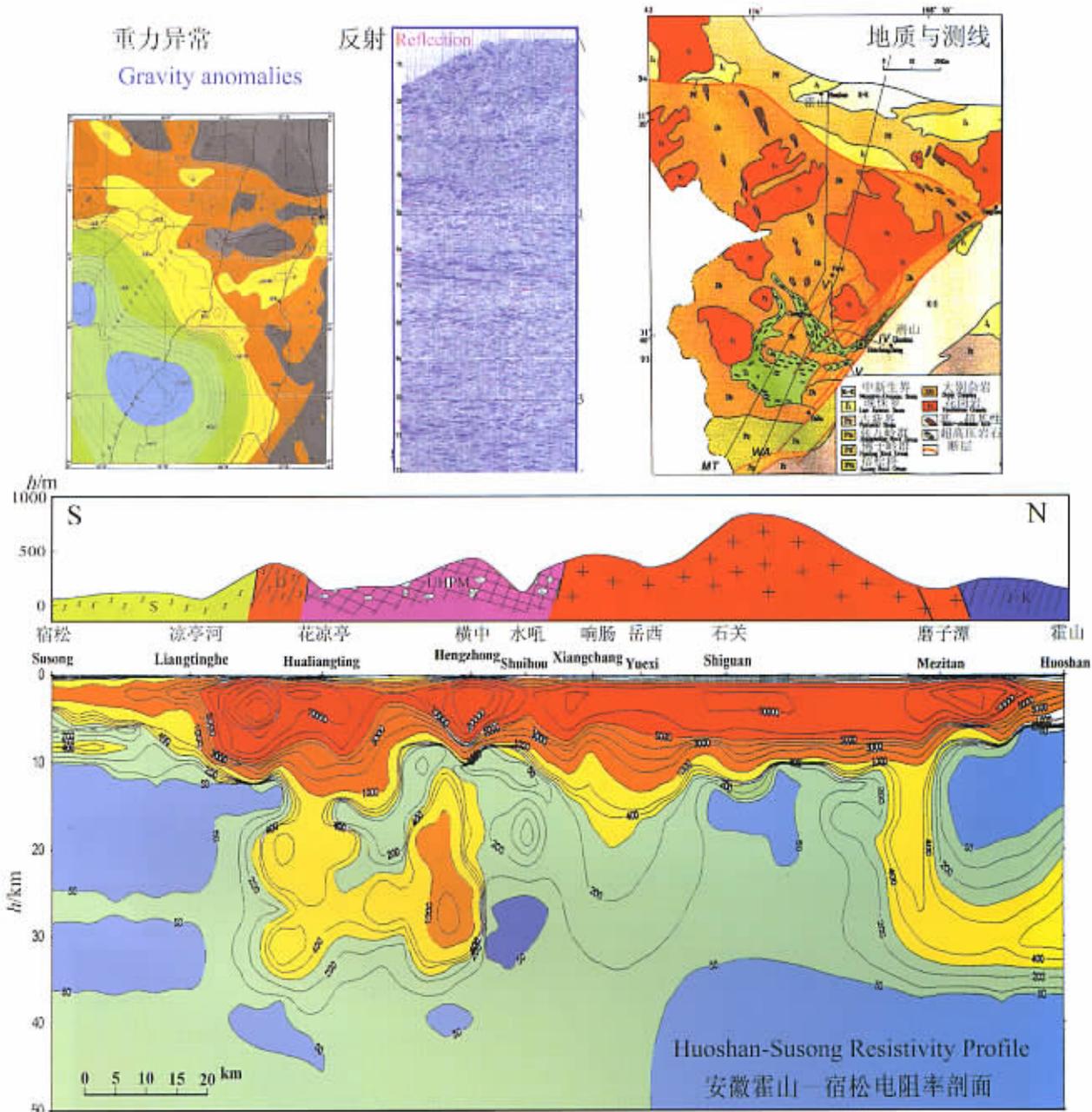


图 5 安徽霍山-宿松综合地球标准剖面

Fig. 5 Integrated geophysical profile from Huoshan to Susong in Anhui province
 从宿松到霍山的二维电阻率剖面(下)与横中-水吼段地震反射(上中间),以及大别山布伽重力异常图(左上)和大别山地质与测线图(右上)所示测线 WA 为 1995 年地震局与地质科学院共同完成的广角地震剖面(王椿镛等,1997;董树文等,1998),MT 为 20 世纪 90 年代第一物探大队做的大地电磁剖面位置,本图测线位置在图 5 左上方用 MT 标明
 An integrated geophysical profile of resistivity (below) and deep reflection (up-middle). Regional Bouguer gravity anomalies are shown in the up-left, geological sketch with old survey lines is shown in the up-right.
 The location of this profile will be shown in figure 5 (up-left) marked by line MT

有一组向 NE 倾伏的强反射体,这种反射模式与许多现代造山带的反射模式类似,可以认为是扬子-中朝克拉通碰撞时留下的“指纹”。

(2)太湖-水吼段南大别超高压变质带,高阻的超高压变质岩片厚度可达 10 km,其中下地壳电阻率相对较高(400~1 100 Ω·m),尤其是在横中新店的下地壳有高阻团块,与北大别中下地壳的低阻状

态不同。宿松-太湖之间的宿松群对应扬子向北俯冲的前沿高压变质带,表层为高阻层,厚度由南向北增加,其下方为向北俯冲的扬子地壳,电阻率很低。

(3)水吼-磨子潭段被称为北大别变质混杂岩带,对应上地壳的高阻层。中下地壳电阻率由 1 000 m 递降到 100 m,中地壳局部出现低阻层,可能反映岩石脱水或地温升高。北大别地壳的主体应反映晚

侏罗世—白垩纪的地壳拉伸与岩浆侵位,以及其后深部的岩浆底垫与浅部的揭顶。这些造山期后的地质作用可能使北大别的边界断裂转化为正断层,如北边的晓天-磨子潭断裂显示的是正断层,但在上侏罗统却有可能是逆断层或缝合带。

(4)在磨子潭-晓天断裂下方中下地壳有一条相对高阻的“烟窗”,与地面上侏罗统的中性火山岩条带对应。此火山岩带对应地面负磁异常带及正负相间的剩余重力异常,推测晓天-磨子潭断裂北侧的这

一中性火山岩带在中下地壳有基性火山岩的根。

(5)从磨子潭至霍山大地构造为弧前复理石推复体(佛子岭群),上地壳8 km以上为高阻体,以下8~20 km为低阻体,可能反映碰撞造山时强烈的构造变形破碎。总之,现今大别造山带的结构主要反映了早-中侏罗世扬子克拉通的向北陆-陆俯冲及同期大别造山带的挤压变形和晚侏罗世以来以北大别为中心的地壳伸展和上隆揭顶。这些造山期后的强烈动力学作用几乎抹除了碰撞造山时形成的地壳变

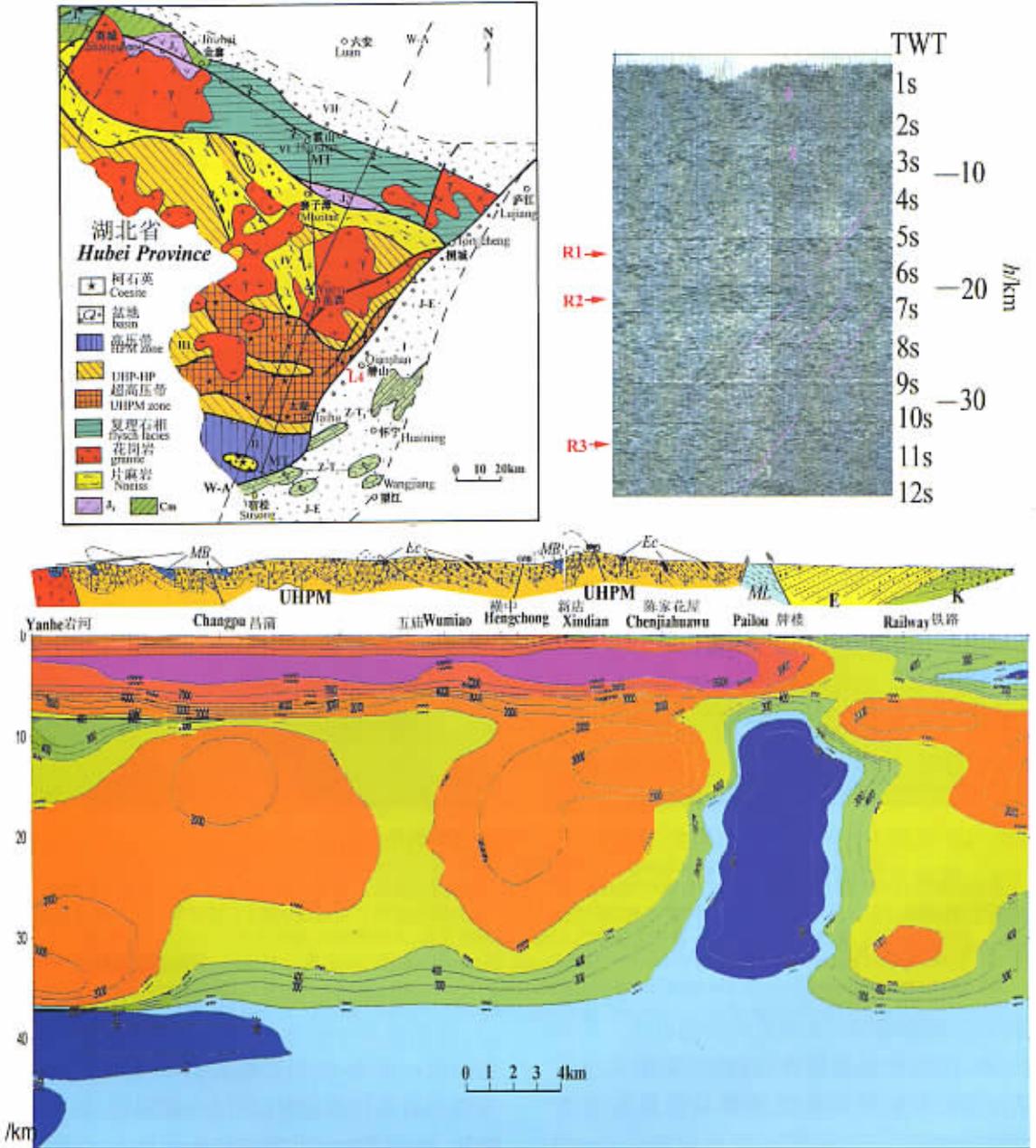


图6 岩河至潜山县南地球物理剖面

Fig. 6 An integrated geophysical profile from Yanhe to Qingshan of resistivity (below) and deep reflection (up-right) 大地电磁剖面(下)与水吼以东地震反射(上右),以及地质剖面(中)和大别山地质与测线图(上左),所示测线WA为1995年 国家地震局与中国地质科学院共同完成的广角地震剖面,MT为图5所示南北剖面,本图剖面位置用红色L4线标明,R₁-R₃为反射体 万方数据 The geological section is illustrated in the middle and regional sketch with survey lines is shown in the up-left. The location of this profile is shown by red line L4. R₁, R₂ and R₃ mark reflectors.

形信息,使大别山构造演化的细节难以恢复。

地质学家们通过大比例尺的地质填图和岩石学研究,早已提出一些大陆科学深钻的候选场地,其中以东大别的菖蒲-新店-牌楼一带,胶南的石门一带和苏北东海县呼声最高,这些地区地壳都有含柯石英的榴辉岩出露,位于典型的超高压变质地段。

从大地电磁 IV 线的情况看(图 6),大别山菖蒲、新店和牌楼三处的上地壳都有高阻层,反映了 3~7 km 处岩性为结晶岩石,如榴辉岩、花岗岩等,也可能反映折返回来的超高压变质岩块,因此靶区的选择还要看地震等其他地球物理资料。牌楼一带处于郯庐断裂影响之下,超高压变质岩片后期被揉成许多碎块,选定在此处打科学钻恐怕比较难重塑其形成及折返的动力学过程。从反射剖面看,牌楼

下方似乎有一串上拱的反射体(如图 6 右上图红箭头所示),与大地电磁剖面上的低阻体对应,可能反映后期沿郯庐断裂带侵入的岩体,与超高压变质岩块折返过程无关。菖蒲-碧溪岭一带,从地震剖面 VI 看地层产状很陡(Yang Wencai, 1998),估计 5 000 m 以上岩性与地表露头差不多,在这里打钻不一定能取得更多的信息。相比之下,已在榴辉岩中发现金刚石的新店一带可能是较好的靶区。

新店一带的上地壳反射地震剖面(图 7)。由以上分析得知 4 s 下方的反射体可能反映扬子俯冲地壳的顶面,其上面有 3 个反射较强的层,总体向 SW 倾,但在最上面的一个反射体呈现背斜产状,其顶部正好在新店,说明新店是个构造高的部位,对实施科学钻探有利。近地表处还有一组浅层的逆断层,倾

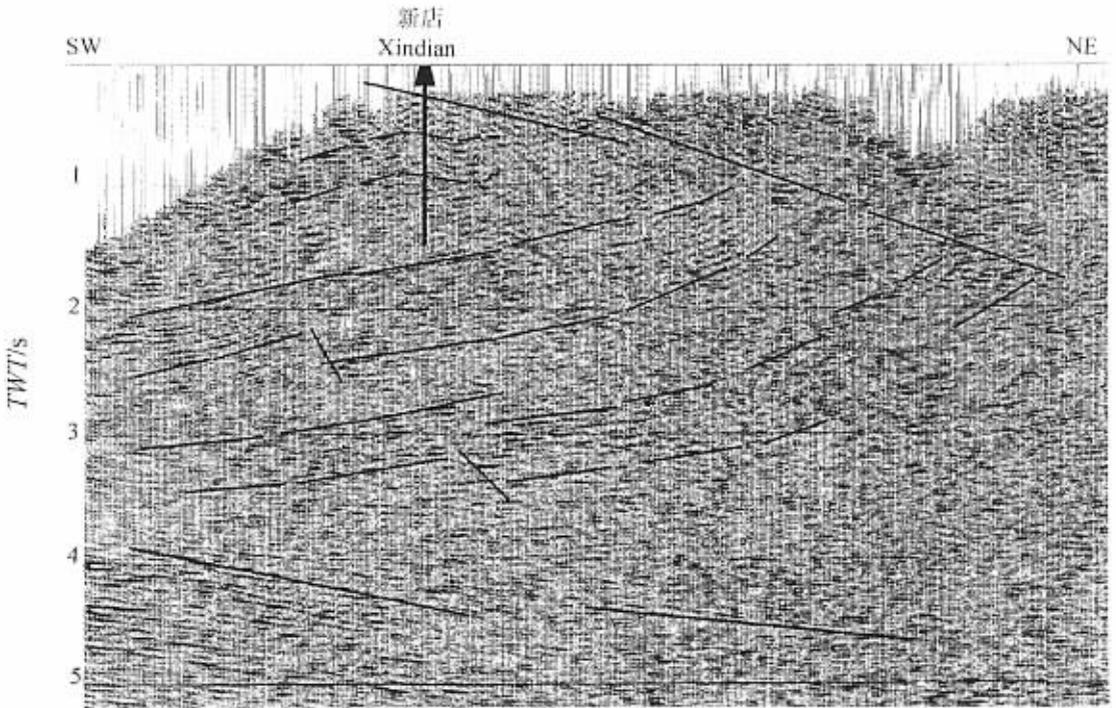


图 7 过新店的上地壳地震叠偏剖面

Fig.7 Stack and migrated reflection profile across Xindian site

向 NE,但延伸不大。如在此处打 5 000 m 科学钻,将可以穿过呈背斜状的第一个反射层,但打不到第二个反射体。沿倾向(V 线)加密到 1 km 点距的大地电磁剖面(图 8),可见新店处于上地壳高阻体的边缘,5 000 m 科学钻区正好打穿这个高阻体。而这个高阻体一直扩展到水吼以北,即地质图上“水吼变质混杂岩”的位置,因此这个高阻体也可能是花岗片麻岩的反映,它的存在对打科学钻是不利的,不利于重塑超高压变质岩石的形成与折返。V 线的航

磁、地磁曲线及反演的磁性体剖面的磁性,与花岗岩相近,分布与上述高阻体一致,说明如在新店打 5 000 m 钻孔,也有可能 2.5~5 km 深度打到这些磁性体。总的看来,新店一带作为科学钻探靶区是有意义的,但比较适合打 2 000~3 000 m 的浅钻。

4 大陆科学钻探靶区地壳构造

由于有的地质学家提议把诸城县东南的石门作

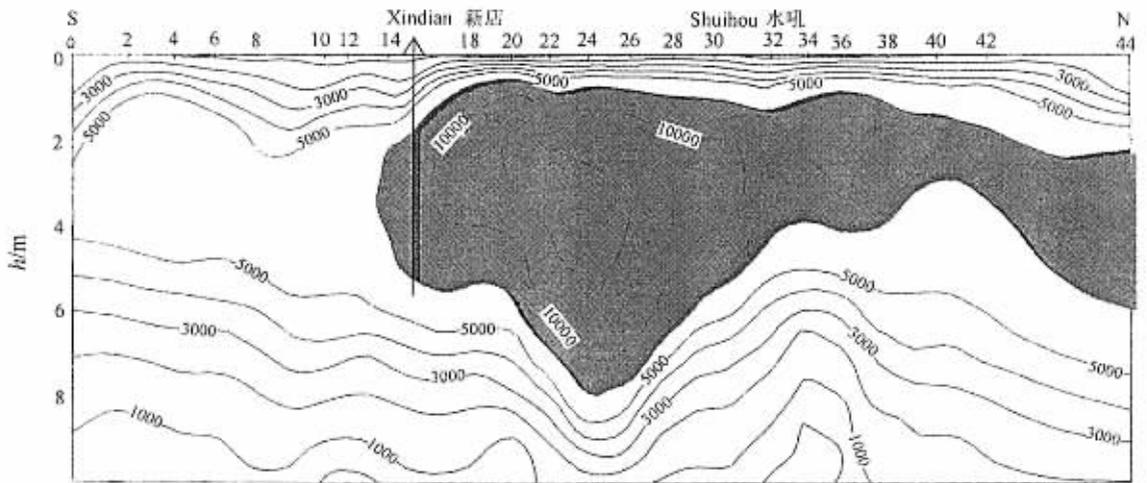


图8 V线大地电磁加密点电阻率剖面

Fig. 8 Resistivity profile of dense MT profile obtained by 2-D inversion

为大陆科学钻探的候选区之一,1997年在I线东做了十字反射剖面。上地壳波速反演表明,强反射透视镜体对应较高的波速(6.8 km/s),很可能是含大量榴辉岩的UHPM岩块的反映。综合反射和折射反演结果可见,诸城石门地区上地壳波速相对中地壳高,在5~7 km深度对应有高速体,但是5 000 m科学钻探打不穿这一目的层(杨文采,1999)。由以上讨论可知,东海榴辉岩所处构造位置与东大别新店-莒蒲一带很相似,含有大量柯石英和三颗金刚石晶体。与新店不同的是,在东海县南地区打了许多浅钻均未见到花岗岩出现。地面与浅孔中见到了新鲜的石榴石二辉橄榄岩,有的经风化后已褪变成蛇纹岩。在芝麻坊发现的石榴石二辉橄榄岩的化学分析表明,它们可能是由在折返期间带到地表的岩石圈底部的岩石,对重塑超高压变质带形成折返过程有一定意义。因此把东海县铁路以南地区作为科学深钻靶区可取得与大别新店同样的地质效果,但不存在新店可能打到厚层花岗质岩石的风险。因此,中外学者赞同把苏北东海县作为中国大陆科学深钻的靶区。

由许志琴等(1998)最新编制的东海靶区构造剖面图(图9)。由图可见,靶区出露及由浅钻控制的岩性主要为片麻岩,含榴辉岩、橄榄岩和石英脉。橄榄岩主要出现在芝麻坊和毛北-蒋庄一带,榴辉岩广泛分布,但以毛北和青龙山出露面积大。构造上靶区可划分为5个构造岩片(图中A、B、C、D、E),宽度为1~2 km,不等,为NEE走向逆冲断层或韧性剪切带所分开。位于中间的岩片C含有芝麻坊及毛北多个巨大的榴辉岩——超基性岩体,其中发现大

量柯石英及三颗金刚石晶体,应是由折返带上的地幔物质。从靶区布格重力异常图上看,毛北及芝麻坊南边为两个强度达 $(26\sim 27)\times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的正异常,反映该处上地壳有高密度体,暗示上地壳有未出露的榴辉岩,即超基性岩块体存在,对它们的钻探揭露有可能进一步了解超高压变质作用的动力学机制。

为在靶区内选出最有利于实现科学目标的钻探孔位,1999年在靶区进行了以二维地震为主干的综合地球物理调查。面积约为500 km²的靶区基本上为测区覆盖。反射地震的结果揭示了靶区地壳高度的不均匀性,基线II(图10),在10 s左右莫霍面的反射很清晰,中地壳的反射体AA可以和III线解释的反射面AA作对比,为俯冲扬子的顶面。在上地壳,SE向倾的反射体L1、L2和K1为NW向正断层所断开,反射体L2的最高顶面在毛北(II-IV线交点)附近,可以为5 000 m的钻孔所打穿。而在芝麻坊(VI线)L2埋深约为8 km,因此毛北相对西边的芝麻坊为构造高部位,实施科学钻探更为有利。从基线II的二维反演电阻率剖面上看(图11),芝麻坊位于上地壳高阻体断开的地方,在这里打钻也比较不利。总之,毛北地区上地壳3.2~4.4 km深处存在高波速、高电阻率、高密度和强反射的目的层,处在构造高的部位,地层倾角不太大,是最好的科学钻探场址。自1999年以来,在毛北地区已做了大量详查,以详细揭示柯石英榴辉岩块的产状与位置。1999年在毛北布置了预先导孔CCSD-PP2、反射地震DH99线和预先导孔CCSD-PP2测量,在2000年又进行了反射地震DH20A-B及两线之间的地震层析成像调查,并在综合研究所有地球物理与地质资

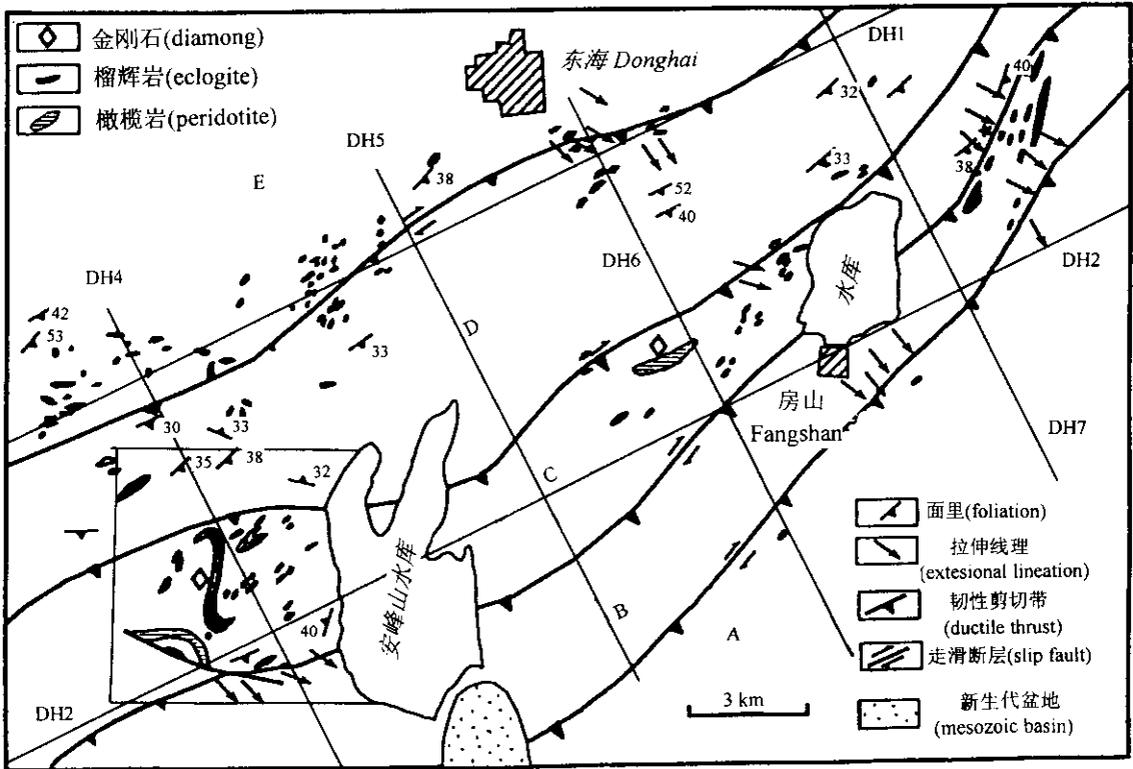


图 9 大陆科学钻探靶区地质构造与二维深反射地震测线位置图
 Fig. 9 Geological and structural sketch with 2-D seismic survey lines

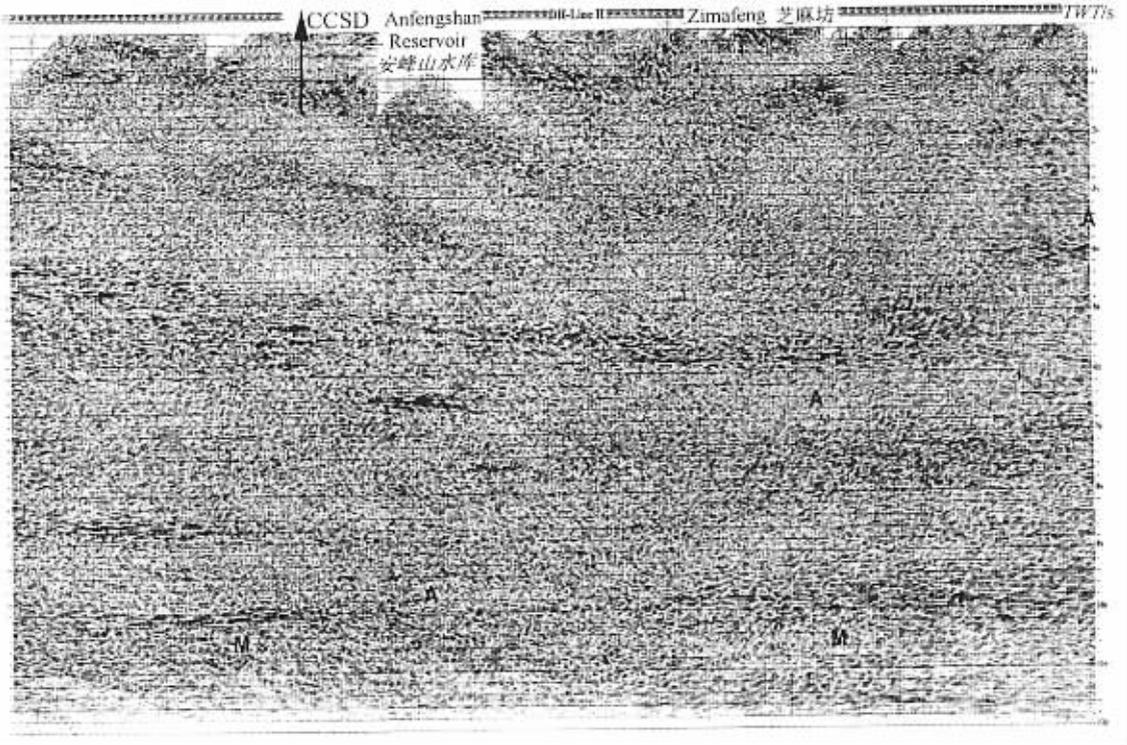


图 10 反射地震 DH2 线叠偏剖面图
 Fig. 10 Stacked and migrated reflection profile of DH2

料的基础上确定了先导孔孔位。

中国大陆科学钻探先导孔已于 2001 年 8 月开工,目前已接近完成 2 000 m 钻探取心工作。现将

反射地震 DH99 线与 CCSD-P 先导孔取心结果示如图 12。钻探取心基本上验证了地球物理预测的结果。例如,0~700 m 深度由拱形反射体揭示的金红

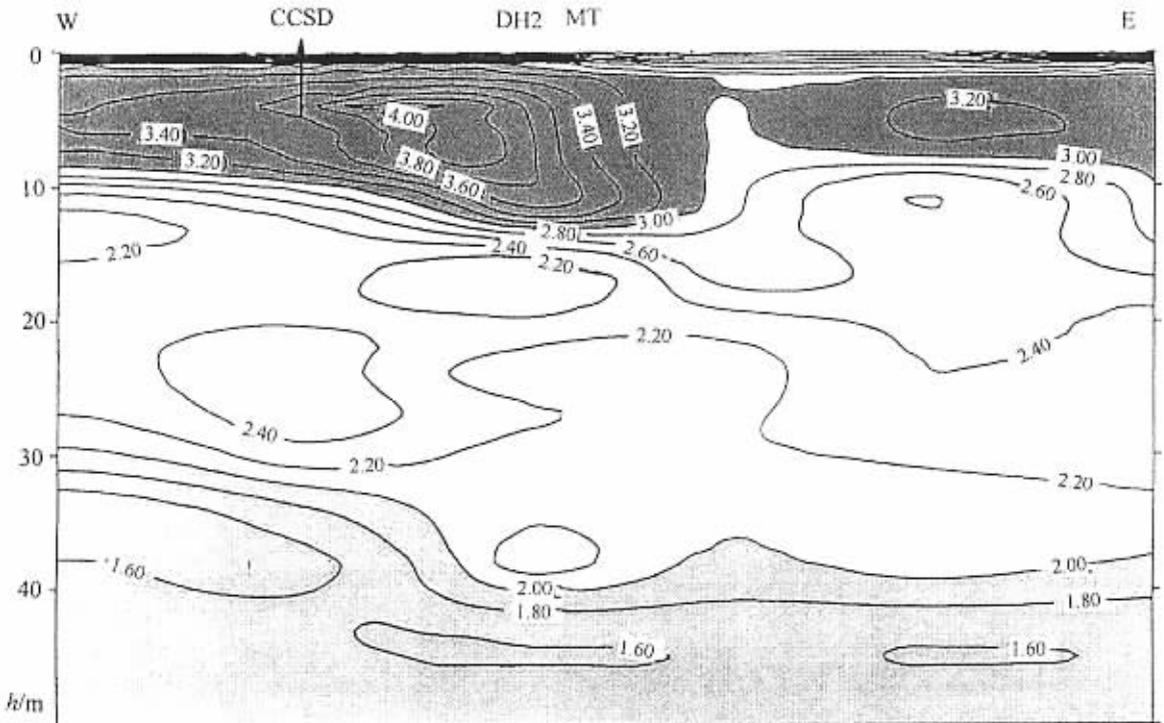


图 11 DH2 线大地电磁法二维反演对数电阻率图

Fig. 11 Logarithm resistivity map of DH2 obtained from 2-D inversion of MT data

石榴辉岩体与 1 000 m 下方的破碎带,与钻探结果相符;1 200 m 推测以下岩性以片麻岩为主,也与取心结果相符。

项目中由中国科学院汪集 院士主持了对 CC-SP-PP1 孔的地温测量与地热研究。此孔位于江苏省东海县南边的芝麻坊附近,此处为超高压变质带的核心部位,地表为片麻岩及表壳岩,发现有柯石英及金刚石,孔深 430 m。地温测量用半导体热敏电阻测温仪,分辨率为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,经 5 次重复测温得出平均地温梯度为 $20.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。经岩石热导率、比热及热扩散率测定和生热率分析,计算出地表热流值为 $76\text{ mW}/\text{m}^2$ 。

在大陆地区, $76\text{ mW}/\text{m}^2$ 是一个相当高的热流值,标志着该地具有活动地质构造单元或构造活动带的基本地热特征。全球大陆平均热流值为 $65 \pm 1.6\text{ mW}/\text{m}^2$ (Pollack 等, 1993)。近地史期的沉积盆地通常是大陆热流相对高的构造单元,中国东部中生代盆地大多在 $65 \sim 70\text{ mW}/\text{m}^2$ 范围内。该区邻近的苏北盆地亦为 $65\text{ mW}/\text{m}^2$ (早期测点较少,曾报道有约 $70\text{ mW}/\text{m}^2$ 的相对高值)。古老基岩(含变质岩)出露区通常是大陆热流相对低的区域,华北燕山-太行山区域的热流值稳定在 $45 \sim 50\text{ mW}/\text{m}^2$ 范围。靠近该区的鲁东南山区以及秦岭-大

别山地区的零星地温资料都表明,从大区域意义看不会有较高的热流。这些有规律的地热分布特点并非偶然,其深层机制是区域地质构造活动性程度及其活动历史的相应反映,对此也都有理论上和实践上的证明。此次开采的地热井位于始终极少接受沉积的古生代陆块,按以上资料分析,测得的高热值不仅意味着在地史相对晚期曾处于重大的深部地质作用的控制或影响之下,而且这种地质作用在某种程度上仍在持续进行之中,地史早期已停止的构造活动几乎不可能再留下如此显著的高热效应痕迹。

根据放射性生热元素及生热率的分析结果认为,该区地表测得的热流量中,约有 33.4% (即 $25.4\text{ mW}/\text{m}^2$) 来源于地壳放射性元素的蜕变,其余 66.6% (即 $50.6\text{ mW}/\text{m}^2$) 来自地幔,后者称为地幔热流。该区地热流值高主要高在地幔热流上,地幔热流值高和相对份额大说明中地壳以下地质运动活跃,可能存在底垫等较强的壳幔作用。高的地幔热流带常有流体活动伴随。因此,在以上讨论中常把地壳中的低阻带作为热流及流体上涌带。总之,从地热角度上看苏鲁地区也是中生代地质作用强烈的活动构造带。

根据 CCSD-PP1 孔地热测定研究得出热岩石圈性状(图 13)。此图表明,该区热岩石圈的厚度为 86

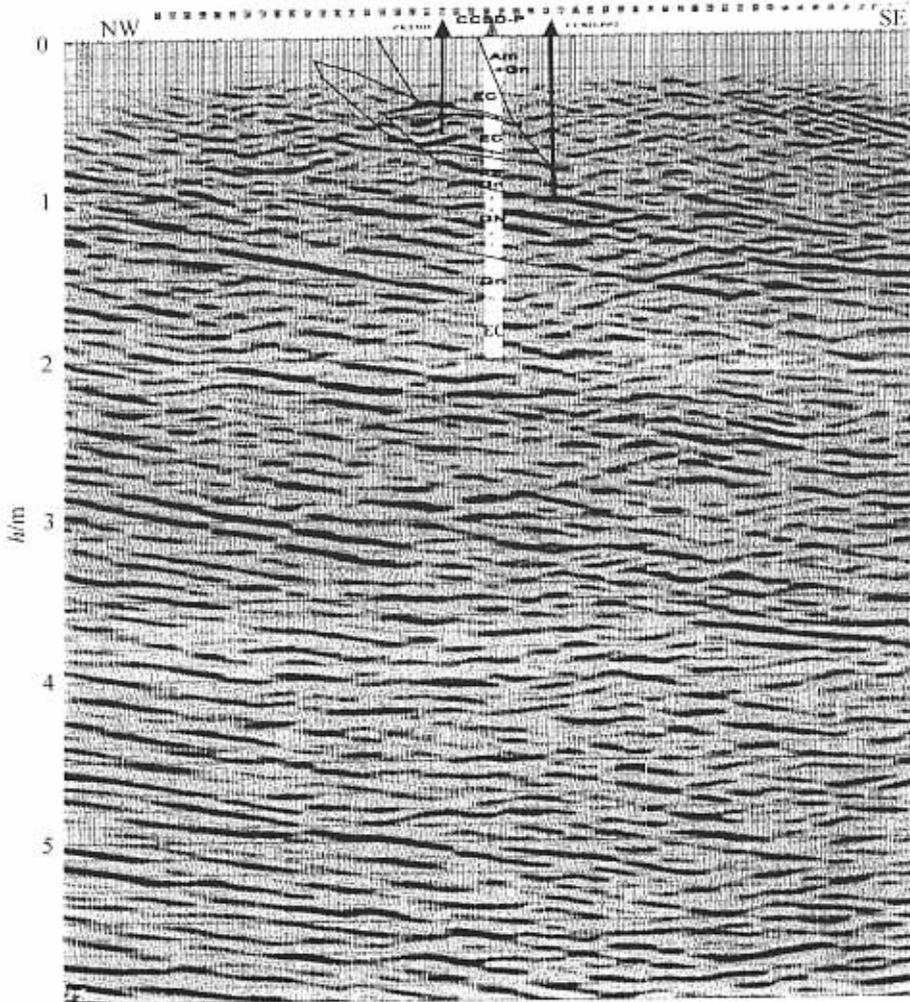


图 12 反射地震 DH99 线深度偏移剖面与 CCSD-P 先导孔取心结果对比图

Fig. 12 Stacked and migrated seismic profile of DH99 compared with brief core petrology at CCSD pilot-hole
Am-角闪岩 ;EC-榴辉岩 ;GN-片麻岩 ;PE-蛇纹岩 ;“.....”破碎带
Am-amphibolite ;Ec-eclogite ;GN-gneiss ;PE-peridotite ;.....-fracture zone

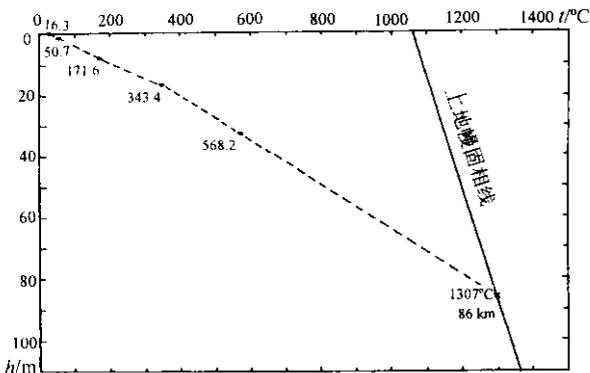


图 13 东海县南地温测量结果和推测热岩石圈深度与温度

Fig. 13 Geothermal measurements and inferred lithospheric depth and temperature

此外,由测得的地温梯度外推计算出该区 5 000 m 处的地温为 115 °C,说明在该区进行 5 000 m 科学深钻在工程上是可行的。

在大别-苏鲁超高压变质带大陆科学钻探选址地球物理调查为研究岩石圈构造的提供了大量的资料,为系统研究大别-苏鲁地体的深部构造取得了新的成果(杨文采等,1997,1998,1999,2000,2001; Yang Wencai,1997~2000)。这些成果包括扬子克拉通的深俯冲,苏北裂谷系统与主要断裂系统,地体的南北边界,大别-苏鲁地体的主要岩石圈特征等,已有多篇文章发表,由于篇幅所限不再详述。

致谢 作者感谢中国地质科学院董树文研究员为图 6 对比提供的地质剖面,同时感谢许志琴、汪集院士和金振民等教授为本项目提供极其有益的意见与建议。

km,与地震岩石圈厚度 80~90 km 相同。Moho 面处的温度 568.2 °C,岩石圈底部温度为 1 307 °C。

参考文献

- 董树文, 吴宣志, 高锐等. 1998. 大别造山带地壳速度结构与动力学. 地球物理学报, 41(3):349~360.
- 索树田, 桑隆康, 韩郁著, 游振东. 1993. 大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 许树桐, 刘始灿, 江来利等. 1994. 大别山的构造格局和演化. 北京: 科学出版社, 1~175.
- 汪集, 胡圣标, 杨文采等. 2001. 中国大陆科学钻探先导孔地壳热测量. 科学通报, 46(10):847~850.
- 王椿镛, 张先康, 陈步云等. 1997. 大别造山带地壳结构研究. 中国科学(D), 27(3):221~229.
- 杨巍然, 王国灿, 简平. 2000. 大别造山带构造年代学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~140.
- 杨文采, 焦富光. 1987. 用于反射地震波速成像的联合反演技术. 地球物理学报, 30(6):617~627.
- 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. 1999b. 郯城-涟水综合地球物理剖面. 地球物理学报, 42(2):206~217.
- 杨文采, 方慧, 程振炎等. 1999c. 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.
- 杨文采, 余长青. 2001. 从地球物理资料看大别-苏鲁超高压变质带演化的运动学与动力学. 地球物理学报, 44(3):61~75.

References

- Cong B, Wang Q, Zhai M et al. 1994. UHP metamorphic rocks in the Dabie-Sulu region, China: their formation and exhumation. Island Arc, 3:135~150.
- Dong Shuwen, Wu Xuenzhi, Gao Rui et al. 1998. On the crustal velocity levels and dynamics of the Dabieshan orogenic belt. Chinese J Geophys. 41(3):349~360 (in Chinese with English abstract).
- Ernst W G, Maruyama S, Wallis S. 1997. Buoyancy-driven, rapid exhumation of ultrahigh-pressure metamorphosed continental crust. Proc. National Academy of Sciences, 94:9532~9537.
- Kern H, Popp T, Gao Shan, Jin Zhenmin. 1998. P and S wave velocity and density of Rocks from Dabie UHPM belt. Continental Dynamics, 3(1~2):96~102.
- Liou J G, Zhang R Y, Wang X, Eide E A, Ernst W G, Maruyama S. 1996. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultrahigh pressure belts in the Dabie-Sulu region. in: Yin A, & Harrison T M eds. The Tectonic Evolution of Asia, Ruby Volume VIII. Cambridge Univ. Press, 300~344.
- Liou J G, Maruyama S, Ernst W G. 1997. Seeing a mountain in a grain of garnet. Science, 274(4):48~49.
- Mooney W D, Meissner R. 1992. Multi-genetic regime of crustal reflectivity: a review of seismic reflection profiling, in: Fountain D M et al, ed. Continental Lower Crust. ELSEVIER, 45~72.
- Pakiser L C, Mooney W D et al. 1989. Geophysical Framework of the Continental United States. Geol. Soc. Am. Memoir, 172.
- Suo Shutong, Sang Longkang, Han Yuzhu, You Zhendong. 1993. The petrology and tectonics in Dabie Precambrian metamorphic terranes, Central China. Wuhan: Press China Univ. Geosciences (in Chinese).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Yang Wencai. 2001. Geothermal measure-

- ments in the pre-pilot holes of the Chinese continental scientific drilling. Chinese Sci. Bull., 46(10):847~850 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunyong, Zhang Xiankang, Chen Puyuen et al. 1997. Crustal structure in Dabieshan orogen. Science in China (Series D) 27(3):221~229 (in Chinese).
- Xu Shutong, Liu Yican, Jiang Laili et al. 1994. Tectonic framework and evolution of the Dabie Mountains. Beijing Science Press, 1~175 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Yang Wencai, Zhang Zeming et al. 1998. Scientific significance and site-selection of the first Chinese continental scientific deep drillhole. Continental Dynamics, 3:1~13.
- Yang Wencai, Jiao Fuguang. 1987. Joint inversion for seismic reflection velocity imaging. Chinese J. Geophys., 30(6):617~627 (in Chinese).
- Yang Wencai, Jiao Fuguang. 1987. Joint inversion techniques for seismic velocity imaging, Chinese J. Geophys., 30(6):617~627.
- Yang Wencai. 1991. Deep seismic reflection for lithospheric investigations. Progress in Geophysics, 6(3):19~28 (in Chinese).
- Yang Wencai. 1997. Crustal structure and development of Sulu UHPM Terrane in East-Central China. Episodes, 20(2):100~104.
- Yang Wencai. 1997. Theory and methods of geophysical inversions. Beijing Geological Publishing House.
- Yang Wencai. 1998. Introduction to earth interior physics of Post-Plate-Tectonics (in Chinese), Beijing Geological Publishing House.
- Yang Wencai. 1998. Crustal structure and development of Dabie UHPM Terrane in East-Central China. Continental Dynamics, 3(1~2):86~95.
- Yang Wenai, Chen Zhenyan, Cheng Guojiu et al. 1999. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (I): Deep seismic reflection. Chinese J. Geophys., 42(1):57~70.
- Yang Wencai, Hu Zhenyuan, Cheng Zhenyan et al. 1999. Long profile of geophysical investigations from Tancheng to Lianshui, east-central China, Chinese J. Geophys., 42(2):311~222.
- Yang Wencai, Chen Zhenyan, Cheng Guojiu et al. 1999. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (I): Deep seismic reflection. Chinese J. Geophys., 42(1):57~70.
- Yang Wencai, Fang Hui, Chen Zhenyan et al. 1999b. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (II): Non-seismic methods. Chinese J. Geophys., 42(2):311~322.
- Yang Wencai, Hu Zhenyuan, Chen Zhenyan et al. 1999c. Long profile of geophysical investigations from Tancheng to Lianshui, east-central China. Chinese J. Geophys., 42(2):206~217 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai, Feng Hui, Cheng Zhenyan et al. 1999. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (II): Non-seismic methods. Chinese J. Geophys., 42(3):387~398.
- Yang Wencai. 2000. Analysis of deep intracontinental subduction. Episodes, 23(1):20~24.
- Yang Weiran, Wang Guocan, Jian Ping. 2000. Study of the Tectonochronology of the Dabie orogenic Belt. Wuhan: China Univ. Geosciences Press, 140 (in Chinese).
- Yang Wencai, Yu Changqing. 2001. Kinetics and dynamics of development of the Dabie-Sulu UHPM terranes based on geophysical evidences. Chinese J. Geophys., 44(3):346~359.