

中央造山带东段岩石圈的构造格架

杨文采

(中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037)

摘要:笔者讨论了大别—苏鲁超高压变质带地球物理调查剖面及相关地球物理成果。分析大别—苏鲁地体的深部地质构造与岩石圈主要特征,并与东秦岭地区前人的探测结果进行对比。结果认为,中央造山带东段的地壳构造反映了扬子克拉通向北的陆内深俯冲作用。陆壳俯冲的角度在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间,由于角度较缓,中央造山带东段发育了开阔的后陆盆地,其下方基底构造仍保留有造山带板块会聚的特征。造山带核部上中地壳存在着规模很大的岩浆岩体的显示,与造山期后的地质作用有关。大别—苏鲁的早中生代超高压变质带在东秦岭可能仍埋藏在地壳深处,不会出露于地表。

关键词:岩石圈结构;超高压变质带;大别—苏鲁;东秦岭;地球物理调查

中图分类号: P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)02-0299-11

1 导 言

由于一个地区岩石圈中保留的演化信息不可能很完全,因此对比相邻甚至类型相似地区的岩石圈结构是有必要的。在大别—苏鲁带的西边是东秦岭与桐柏造山带,它们一起构成了中央造山带的东段,对比这些地区的岩石圈构造格架可以回答许多重要的科学问题,如扬子陆壳在三叠纪是否向北深俯冲?为什么大别—苏鲁出露了大面积超高压变质带,而秦岭没有出露同期的超高压变质带?等等。

大别—苏鲁出露了大面积经超高压变质的岩石,由于地表露头良好,地质学家已进行了大量的研究,取得了丰硕的成果^[1-9]。最新的研究表明,除榴辉岩外超高压变质(UHPM)带内的其他主要岩石,如片麻岩和大理岩,都含有柯石英或柯石英包体,说明它们都经受过超高压变质^[10-13]。洋壳俯冲拉动陆壳俯冲的假设要有洋壳存在的证据,近年来已有在北大别发现古洋壳残片的报道^[14],但还未在大别—苏鲁地区找到典型的蛇绿岩套。经超高压变质的橄榄岩中含有少见的 FeTiO_3 棒状出溶体,说明这种岩石的生成深度 $>185\text{ km}$, $P-T$ 测定证实大别—苏鲁 UHP 岩石经受变质的压力在 $750\sim 950^{\circ}\text{C}$ 时为 $4.0\sim 4.7\text{ GPa}$,

进入了所谓岩石生成的“禁区带”,即 $P-T$ 图中 $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 线以上的区带^[15-17]。所有这些新的证据似乎都接近基于板块构造的这种假说:大洋岩石圈的俯冲拖动陆壳(及部分岩石圈地幔)向地幔俯冲而使表壳岩遭受超高压变质,而俯冲洋壳断开造成反弹或者地幔热对流,使经超高压变质的陆壳整体经原路折返回地表^[7-12]。这个假说成立的条件是:陆壳俯冲与折返的速度必须很快,而使陆壳俯冲到约 200 km 深处时还不至于被加热到熔融发生的温度 (900°C),就被快速折返回来。同时,大陆边缘的俯冲必须很快结束而不能拖延,因为时间长了就会在俯冲前沿发生火山岛弧,而这种共生的岛弧在大别—苏鲁地区还没有发现。

上述关于 UHPM 的假说虽然很流行,但仍有疑点。例如,一些学者认为现今发现的 UHPM 岩块尺度都不大,不应该是俯冲陆壳原路折返的产物,而更可能与逆向流作用有关。因此,查明 UHPM 的地壳构造与 UHPM 岩块的几何形态就有助于 UHPM 作用的深入研究,而地球物理调查是了解地壳构造的基础。要注意的是,地球物理资料反映的是现今的地壳构造,主要是晚近地质作用的产物。要想追索印支期的地质作用就要把印支期以来所有的作用及其产生的

收稿日期:2005-02-16; 改回日期:2005-02-22

基金项目:国家重大基础科研 973 项目(2003CB716505)与国土资源部重点基础项目(20001010203)共同资助。

作者简介:杨文采,男,1942 年生,研究员,从事地球物理与大陆动力学研究;E-mail: yangwencai@ccsd.org.cn。

形变都尽可能查清,才能分辨碰撞造山期地质作用遗留下的痕迹。自1996年以来,笔者为了中国大陆科学钻探选址在东大别与苏鲁地区做了大量的地球物理调查^[18-29]。调查中使用了深反射地震与大地电磁等方法,较好地揭示了大别—苏鲁超高压变质带的地壳结构。本文将总结有关地球物理调查的结果,并与东秦岭地区前人的探测结果进行对比,为解决中央造山带东段关键科学问题提供地球物理依据。

2 苏鲁造山带岩石圈的构造格架

在图1介绍了苏鲁地区的测线位置和长度,主

要有苏鲁北部的I线和郟城—涟水长剖面(III线),沿线都进行了深反射地震和大地电磁测量,采用的测量参数与数据处理流程详见笔者有关论文。

要特别关注的是,由于在结晶岩区反射信号与沉积层序无关,深反射地震的解释方法和油气勘探地质解释几乎完全不同。解释的出发点是基于以下认识:反射地震信号是测区岩石圈时空演化有关地质作用造成的岩石圈变形的间接记录,越晚发生的地质作用的痕迹在 seismic 剖面上反映得越清晰,而早期地质作用的“地震指纹”可能为后期地质作用所改造或淡化。在地球物理资料的解释时,很容易犯的一个错误是简单

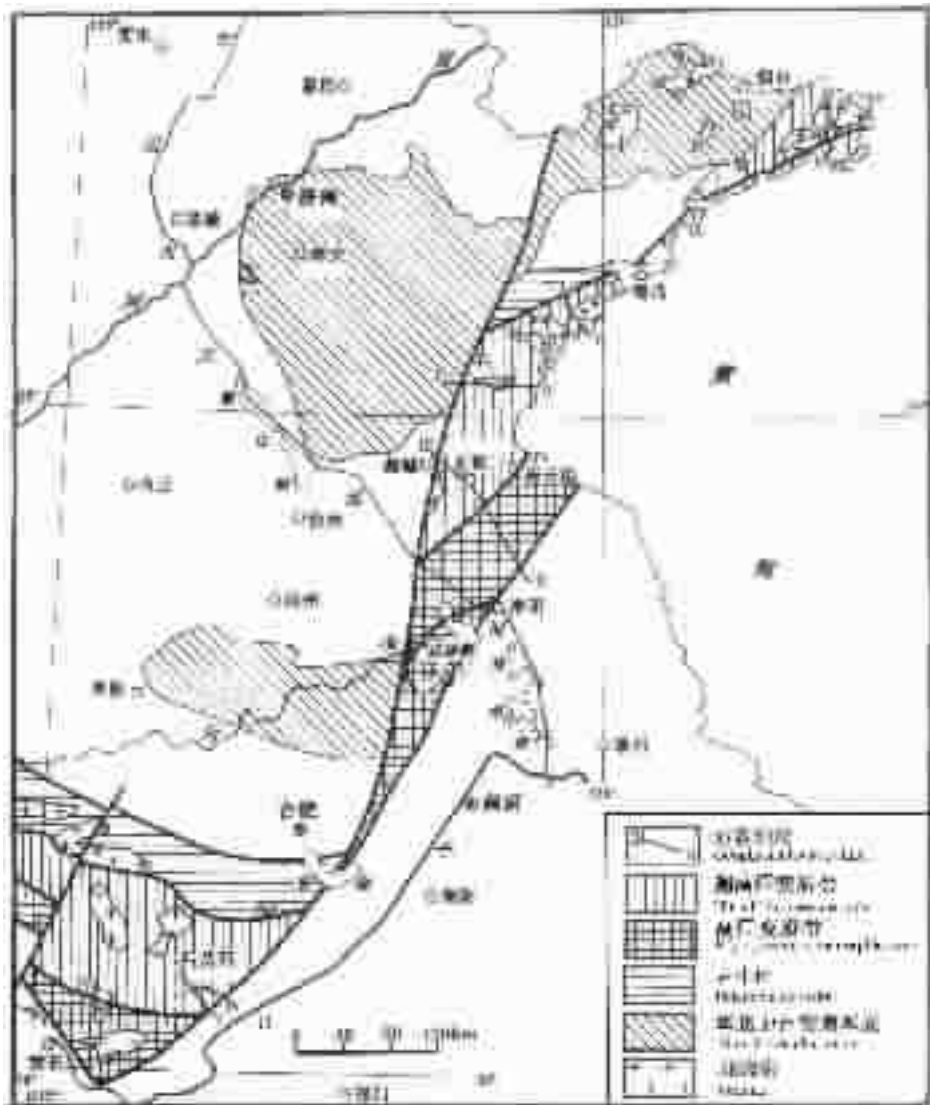


图1 大别—苏鲁超高压变质带的地质构造与测线位置简图

Fig. 1 Simplified map of the geology and geophysical lines in the Dabie-Sulu UHP metamorphic belt

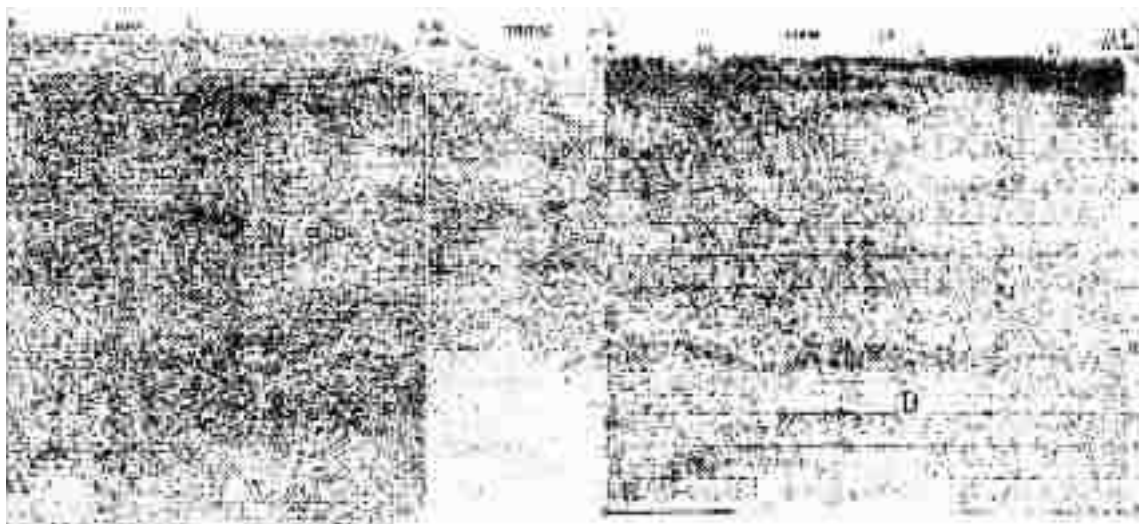


图 2 穿过苏鲁地体的深反射线地震剖面(I—III 线)

Fig. 2 Deep seismic reflection profiles I—III across the Sulu Terrane obtained by combination of lines I and III

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,因此简单的推测会认为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,都知道东西向的天山—阴山造山带和中央造山带比北北东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北北东向为主,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,使地幔内出现新岩石和新构造。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,如高角度断裂(不管新老)都没有清晰的反射体对应,这是反射地震原理上的缺陷。

反射地震 I 线从诸城大寨到胶南泊里南的胃口,是一条垂直地层走向的弯线。沿测线北端为白垩纪火山盆地,桃园—石河头一带为本次调查的重点,即超高压变质带,片麻岩或大理岩中含榴辉岩透镜体,长度几米到几十米不等,其内含有柯石英。UHPM 带南部为一韧性剪切带,向南东倾,其南部重罗山有二长花岗岩出露。在大白马河以南虽然也有高压片麻岩出露,但尚未发现有含柯石英的榴辉岩。I 线地震叠加剖面示于图 2 左边,剖面北部 UHP 岩石下方有多组向北倾斜的反射,最北边的五莲—青岛断裂为缓倾正断层,南边伴随着韧性剪切带。其南边为三叠纪从地幔折返的 UHP 岩片,其中反射较强的 3 个块体呈锯齿状层叠。剖面的南东段,以地壳的弯隆状弧形反射为主要特征,并伴随有近地表的正断层和上地壳的半透明反射体。在其下的 Moho 面附近,也可见到燕山期地壳隆升伸展留下的痕迹。在上地壳弧形反射的核部,半透明体可能反映中地壳二次熔融生成的花岗闪长岩基,它通过断裂穿到地表,显现为重罗山及泊里的岩体。在岩基顶部及侧面有强反射层包围,这种强反射可能是

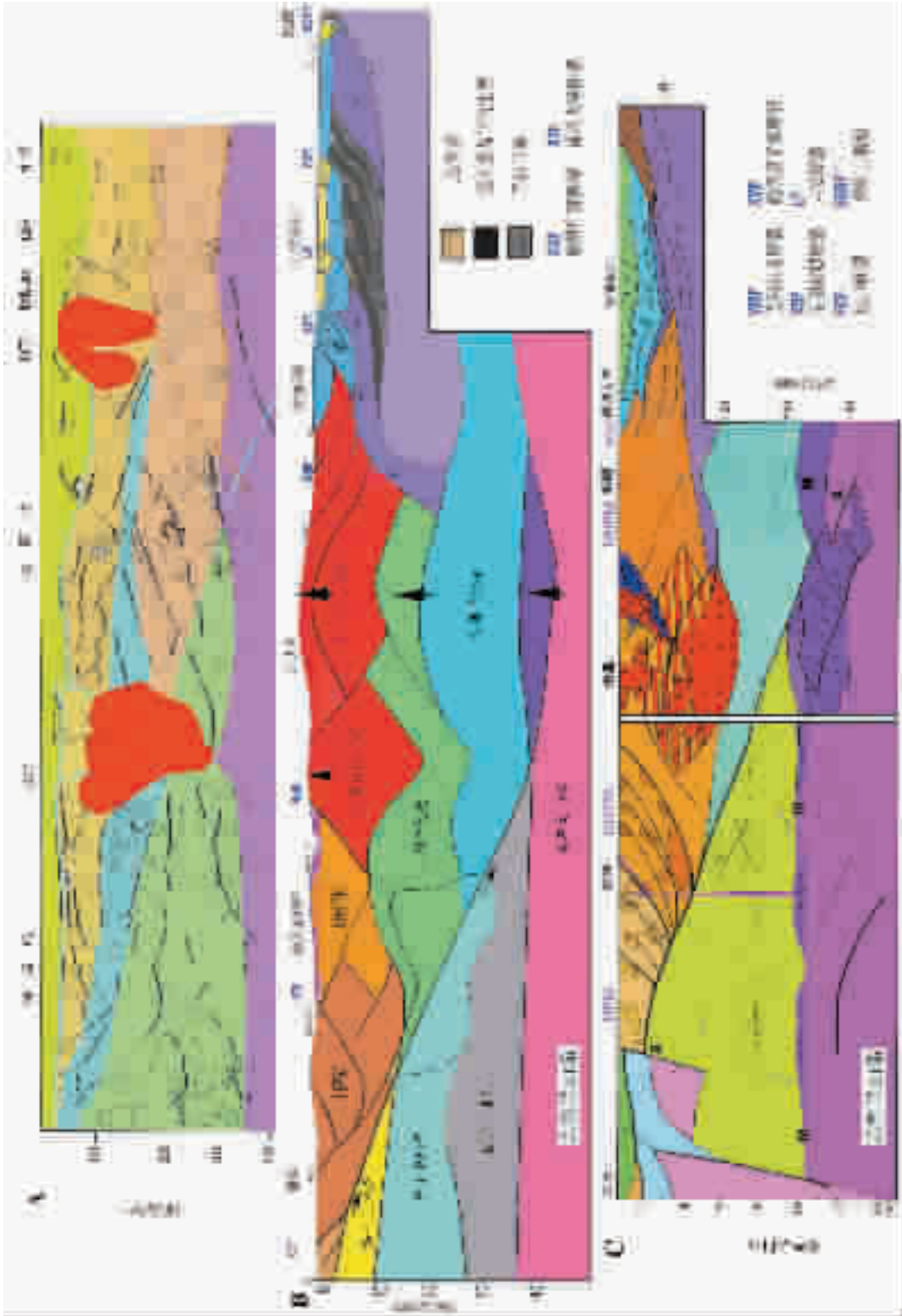


图 3 根据地球物理资料推测的东秦岭、东大别与苏鲁岩圈结构的对比

A—东秦岭的推断地壳剖面; B—东大别的推断地壳剖面; C—苏鲁深部构造剖面(由中国大陆科学钻探地震 I-III 线联合解释)

Comparison of the lithospheric structures of the East Qinling, East Dabie and Sulu terranes inferred on the basis of integrated geophysical interpretations

A—Inferred East Qinling crustal profile; B—Inferred East Dabie crustal profile;

C—Inferred Sulu deep structural profile (based on the integrated geophysical interpretations of seismic lines I-III of the Chinese Continental Scientific Drilling Project)

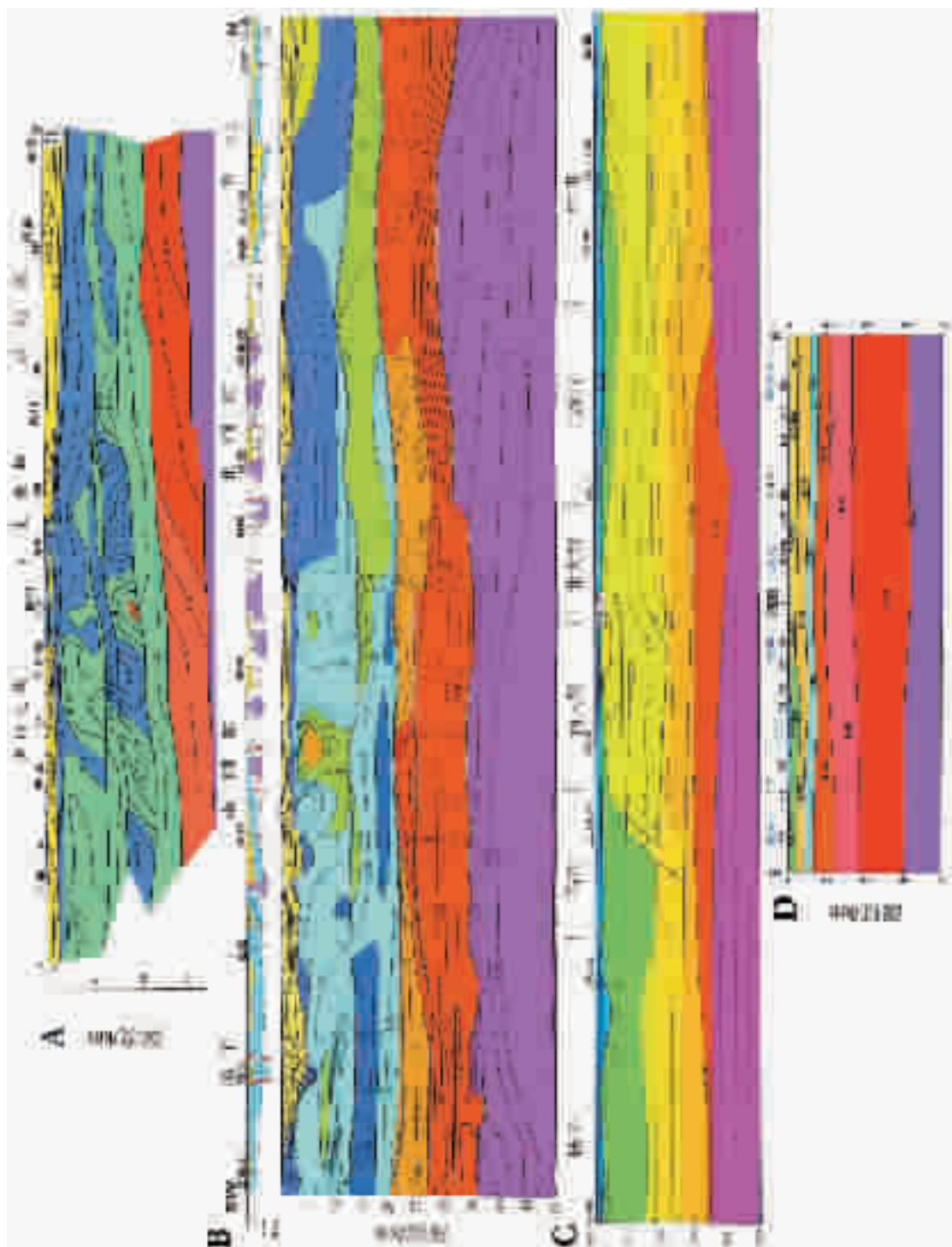


图 4 过中央造山带东段地震 P-波速度剖面对比

A—东秦岭地震 P-波速度剖面;B—桐柏地震 P-波速度剖面;C—东大别地震 P-波速度剖面;D—苏鲁地震 P-波速度剖面

Fig. 4 P-wave velocity profiles across the eastern segment of the Central orogeny

A—Eastern Qinling P-wave velocity profile; B—Tongbai P-wave velocity profile; C—Eastern Dabie P-wave velocity profile; D—Sulu P-wave velocity profile

由花岗闪长岩席的穿插引起。地面上潘家庄一带的南倾韧性剪切带由花岗质糜棱岩组成。

测线 III 地震剖面为弯线,西北起自郟城县的东北部,过马陵山、沭河,然后穿过东海县、过沭阳县赵集韩山地区,然后进入涟水县,止于涟水县东南约 3 km 处,地面 12 次以上叠加剖面长 139.5 km。此线赵集以北主要为超高压带,以南主要为高压变质带。为了更清楚地分析整个苏鲁地体的地质构造,笔者把位于北边的 I 线与南边的 III 线连接起来(去掉北头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 3)。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。在图 2 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 3),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。扬子克拉通的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 2~3)。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见图 3。

由于深反射地震剖面不能直接提供地壳物性分布信息,由大地电磁二维反演取得的电阻率剖面可成为地震解释的理想的约束和补充。图 2 地震资料推测的 AA 线,在电阻率剖面中反映为高阻的苏鲁地体与中低阻的俯冲扬子地壳的分界线,进一步证实了印支期扬子克拉通向北的俯冲。电阻率反演剖面还提供了以下信息:(1)在超高压变质带和高压变质带之间,可能存在直立的断层。这条断层过去被称为邵店—桑墟断层,其北侧发育含柯石英榴辉岩,南侧为蓝晶石片岩(韩山)和蓝闪石片岩。由于断裂近垂直,在反射地震图上没有反映。(2)在嘉山—响水断裂带下方,也存在反映地幔热流体上涌的低阻异常,与地震结果一致,这条断裂带下插到 Moho 面,

它们之间是低阻带,反射体也较少。(3)仔细对比嘉山—响水断裂带的反射地震和地电断面,可以看出它具有不对称的断陷的性质,与沂沭断裂带(即郟庐断裂带中段)有相似之处。杨文采等^[29]、许志琴等^[30]认为郟庐断裂带中段由轴部裂谷带与弯侧向箕状断陷裂谷支组成,主要活动期为白垩纪,深部为地幔隆起带,嘉山—响水断裂带很可能是一条上述白垩纪的断陷裂谷支。(4)沂沭断裂带主体是个低电阻率带,但带内电阻率呈现从下到上逐渐增高的趋势,在上地壳有电阻率较高的岩块,对应沿断裂带内分布的华北基底残块。沂沭断裂带在三叠纪主要是平推断层,到白垩纪由于地幔上隆而转化为裂谷带,嘉山—响水断裂带等断陷裂谷支也在此时活动并达到高潮。

由中国科学院和大陆科学钻探中心合作对 CCSD 先导孔 PP2 和 PP1 孔的地温测量与地热研究^[25,31]。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 mW/m^2 。在大陆地区, 76 mW/m^2 是一个相当高的热流值,标志着它具有活动地质构造单元或构造活动带的基本地热特征。根据放射性生热元素及生热率的分析结果认为,本区地表测得的热流量中,约有 33.4%(即 25.4 mW/m^2)来源于地壳放射性元素的蜕变,其余 66.6%(即 50.6 mW/m^2)来自地幔,后者称为地幔热流。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 地热测定研究得出热岩石圈的厚度为 86 km,比地震岩石圈厚度 76 km 厚 10 km。Moho 面附近的温度 568.2°C ,热岩石圈底部温度为 1307°C 。

3 大别岩石圈的构造格架^[26]

(1)东大别综合地球物理调查取得的资料不仅提供了较精细的地壳结构信息,而且不同方法取得的资料有很好的相关性。根据这些综合资料可以编制出较为可靠而且精细的地壳构造剖面(图 3-B)。在编剖面图时笔者还引用了合肥盆地石油勘探的资料^[32],使造山带北缘的地壳形态更加清晰。

(2)东大别造山带的地壳可分为北淮阳、北大别、南大别与宿松 4 个构造单元。其中宿松高压变质带的中下地壳为扬子俯冲地壳,而北淮阳下方的中下地壳为中朝克拉通的地壳,合肥盆地下方亦为华北准地台的基底(图 3-B)。南、北大别的中下地壳结构具有明显差别,反映了它们曾经有过不同的演化轨迹。

表 1 中央造山带东段波速结构特征对比

Table 1 Comparison of crustal velocity structures in the eastern segment of the Central orogen of China

单元	南秦岭	南桐柏	南大别	苏北	北秦岭	北桐柏	北大别	胶南
上地壳特征(km/s)	5.3 ~ 6.2	夹 6.3 高速团	>6.3 高速体	>6.1 高速层	5.2 ~ 6.0	< 6.1 偏低	含>6.2 高速体	含>6.2 高速体
中地壳特征(km/s)	低: 5.8 含高团	6.0 偏低	6.15 ~ 6.3	6.2 ~ 6.4	5.4 ~ 6.0 极低	6.2 ~ 6.3	6.2 ~ 6.4	6.2 ~ 6.5
下地壳特征(km/s)	6.4 ~ 6.6 偏低	6.6 ~ 6.9 正梯度	6.6 ~ 6.9 正梯度	6.6	6.6 ~ 6.9 正梯度	6.6 ~ 6.9 正梯度	6.6 ~ 7.0 正梯度	6.6 ~ 6.9
Moho 深度(km)	38	35	35	32	33 向北抬	32 向北抬	40 向北降	31
地幔特征(km/s)	<7.9	8.0	8.0	8.1	<7.8	8.1	8.1	8.1

(3) 现今东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抹除了大部分碰撞造山时形成的地壳变形信息, 给大别山构造演化的恢复带来诸多困难。

(4) 晓天—磨子潭断裂带从北倾的上地壳低角度正断层向下转变成向南陡倾的逆冲断裂。北边的六安断裂及肥中断裂等向南逆冲, 倾角逐渐变缓, 最后回到磨子潭断裂带下方, 北淮阳中下地壳与华北南缘相连。这种构造组合反映了后碰撞期板块继续会聚的态势, 而这一会聚事件中心位于晓天—磨子潭断裂带, 向北一直影响到淮南舜耕山断裂。

(5) 东大别的岩石圈地幔含有多组反射体, 反映了其内部高度的不均匀性。在双程走时 22 s 出现反映岩石圈底界的强反射体, 估计岩石圈厚度约 78 km。

(6) 东大别超高压变质岩片的底面可由反射体 R1 顶面、上地壳高阻层和高速层的底面来推测。由此可推断大别 UHPM 岩片的厚度不超过 8 km。这一结果不支持“陆壳整体折返回地壳而形成 UHPM 带”的有关假说。

依照地质、构造与岩石等资料综合分析, 有些地质学家认为^[33]: 大别地块北缘的八里畹—磨子潭—晓天断裂带以及苏鲁地区的五莲—烟台断裂带, 是被强烈改造了的三叠纪碰撞缝合线, 在桐柏山地区, 高压变质岩石分布的北限是娘娘庙剪切带, 它向东与大别地区的八里畹—磨子潭—晓天剪切带相连, 位于八里畹—磨子潭—晓天缝合线以北 20 km 的龟山—梅山断裂带, 是商丹俯冲消减带的东延部分, 主要代表古生代阶段的缝合线。地球物理资料基本上支持这一看法。但是, 还有的认为大别碰撞造山带的

整体结构属于变质核杂岩带, 似乎还值得商榷。

4 大别—苏鲁造山带与东秦岭的构造对比

在大别—苏鲁带的西边是东秦岭与桐柏造山带, 它们一起构成了中央造山带的东段, 那里也已经做过详细的地球物理调查^[34-41]。地壳波速结构的比较有助于了解中央造山带东段地壳结构的宏观特征的变化, 而地壳结构的细节的揭露还得靠深反射地震剖面。由袁学诚等^[34]提供的东秦岭反射地震剖面, 北起河南叶县, 向南西经云城, 南阳到邓州, 又折向南到襄樊, 止于南漳, 全长约 280 km (图 3-A)。清晰地揭示了东秦岭的岩石圈特征与造山期后的动力学作用。

从图 3 显示的 3 条岩石圈地震构造剖面来看, 可见中央造山带东段的地壳结构存在以下 3 点相同的特征:

(1) 与苏鲁剖面类似, 3 条剖面都反映了扬子克拉通向北的陆内深俯冲作用。因此, 地球物理资料不支持认为中央造山带不存在早中生代陆壳深俯冲的观点。

(2) 陆壳俯冲的角度在 20°~ 30°之间, 由于角度较缓, 中央造山带东段发育了开阔的后陆盆地, 其下方基底构造仍保留有造山带板块会聚的特征。

(3) 与苏鲁类似, 3 条剖面上造山带核部上中地壳存在着规模很大的岩浆岩体的显示, 与造山期后的地质作用有关。东秦岭的特点是有两处岩浆岩体的存在, 表明秦岭还可能发生过多期次碰撞。

1995年由原地矿部第二综合物探大队 201 队和成都地质学院协作完成了 QB—1 剖面^[35]。此线北起河南的伊川、经栾川、西峡、浙川向南经十堰到湖北房县, 全长 280 km, 穿过了北秦岭与南秦岭 (图 4-A)^[36], 在此线之东, 有一条近南北向的随县—安阳广角折射剖面 (图 4-B), 上世纪 80 年代中期采集^[37], 以后又进

行了修改补充。此线北起新郑、经长葛、午阳、桐柏、石佛、仙居、远安、宜昌,折向南到新安,穿过华北地台南缘与大别—桐柏带,进入扬子地台北缘。穿过东大别的广角折射剖面^[26](图4-C)。最近大陆科学钻探资助的在苏北进行了一条广角地震折射剖面(图4-D),南起涟水的高沟镇附近,经东海县毛北到山东临沭西南边石门,只通过苏鲁高压变质带(包括沭阳盆地)与超高压变质带^[39]。

通过4条地震P-波速度剖面(图4)对比,可见中央造山带东段的地壳结构存在也反映了扬子克拉通向北的陆内俯冲作用。例如,扬子地台北缘中上地壳的波速较低,而造山带上中地壳波速相对较高。反映了扬子克拉通的北向陆内俯冲。不难看出,Moho面总体呈北高南低趋势,除大别山尚残留3~5 km厚的山根之外,其他地区印支期碰撞造山形成的山根都已为后期动力学作用剥蚀。这种趋势反映出华北中生代岩石圈减薄作用相对较强。除南秦岭外,下地壳波速总体呈正梯度垂向递增,可能与造山期后的地幔底侵作用有关,这一现象在中国东部比较普遍。

中央造山带东段4条剖面波速结构特征见表1。为对比方便,笔者把桐柏带也分为北桐柏与南桐柏,它们以桐柏—定远断裂带为界,使南北桐柏在地质单元上与南北秦岭对应。北桐柏上地壳基底波速为5.8~6.1 km/s,低于南桐柏与杨子的波速,而与北秦岭及华北地台南缘相近;南桐柏上地壳基底波速为6.1~6.3 km/s,在清峰下方含有波速达6.6 km/s的高速岩块,埋深为5~10 km,很可能对应类似于大别—苏鲁的超高压变质岩片。在南秦岭的嘶川下方20~23 km处也有一个小的快速团块,如果它也反映超高压变质岩片,就说明南桐柏地壳比南秦岭抬高了15 km左右,这一推想看来是有道理的,因为整个中央造山带东段,地壳从西向东抬升,以致到大别—苏鲁地区山根部分有部分岩石已出露地表,总体上可抬升30 km。如此看来由对比波速剖面作出南桐柏比南秦岭抬升了15 km左右,而南大别及苏鲁又比南桐柏抬升了约15 km的推想,说明大别—苏鲁的早中生代超高压变质带在东秦岭可能仍埋藏在地壳深处,不会出露于地表。此外,南桐柏中地壳的波速偏低,可能与扬子北缘类似,反映了扬子向南桐柏下方的陆内俯冲。

大别与苏鲁的各层波速除上地壳以外都很正常,只是上地壳出现了相对高速层。在大别山高速

接近地表,位于南大别超高压变质带内,最大波速可大于6.3 km/s,在北大别波速也达到6.2 km/s。在苏鲁高速层位于波速5.0~5.8 km/s的上地壳内,呈夹层状,层深为1~6 km。无论是大陆科学钻探还是VSP和物性测量都证实这些高速体属于印支期超高压变质岩片,内含较多的榴辉岩、橄榄岩等属于下地壳或上地幔生成的岩石。对比还可见到,秦岭造山作用主要体现在构造形变方面,后造山期的动力学作用相对而言不那么强烈,因此在地震剖面上保留了大量碰撞造山期地壳形变的信息。大别山后造山期岩浆侵位及脱顶作用十分强烈,而苏鲁地区造山后的壳幔作用至新生代仍然十分活跃,伴随岩石圈减薄发生了一系列壳幔作用,如底侵,裂谷及火山等。

总之,地球物理调查清晰地揭示了大别与苏鲁岩石圈特征与造山期后的动力学作用^[43]。

(1)中央造山带东段的岩石圈都存在扬子克拉通向北陆内俯冲的痕迹,俯冲的深度在Moho面以下,俯冲面与Moho的交汇处为北秦岭或北大别,或胶南下方,并有继续向华北地台南缘上地幔俯冲的趋势。根据苏鲁反射剖面的显示可知,在后造山期(大约在早侏罗世)扬子克拉通沿襄樊—广济断裂向中央造山带东段下方发生陆内俯冲,造成地壳缩短与壳幔物质相互作用。

(2)剖面上都出现岩体侵位的地震组构。位于商丹缝合带下方的侵入岩似乎与北大别和胶南下方的岩体对应。因此,此缝合带的东延可能对应北大别与胶南地块的北侧。从规模来看,岩浆活动以东大别范围最大,而秦岭最为局部,而且大别苏鲁Moho附近还有反映底侵作用的强反射波组及波速升高,而秦岭底侵作用不大明显。

(3)秦岭与大别剖面北段都出现华南北缘地层向造山带中上地壳挤压的特征,这种挤压作用是许多碰撞造山带岩石圈的特征之一。从作用系列看,可把造山过程分为碰撞前期、碰撞期、后碰撞期和造山期4个阶段。上述秦岭大别的地壳挤压应发生在前三期,而变质核杂岩构造应发生在后造山期或以后。

(4)对比可见,秦岭造山作用主要体现在构造形变方面,后造山期的动力学作用相对而言不那么强烈,因此在地震剖面上保留了大量碰撞造山期地壳形变的信息。大别山后造山期岩浆侵位及脱顶作用十分强烈,而苏鲁地区造山后的壳幔作用至新生代仍然十分活跃,伴随岩石圈减薄发生了一系列壳幔

作用,如底侵、裂谷及火山等。

参考文献 (References):

- [1] Xu Zhiqin. Etude tectonique et micro tectonique de la China paleozoique et triasique des Qinlings (China) (unpubl)[J]. Ph. D. thesis, Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier, 1987.
- [2] 索树田, 桑隆康, 韩郁菁, 等. 大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993. 1~280.
Suo Shutian, Sang Longkang, Han Yujing, et al. Petrology and Tectonics of the Dabie Metamorphic Terrane [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993.1~280 (in Chinese).
- [3] 许树桐, 刘贻灿, 江来利, 等. 大别山的构造格局和演化[M]. 北京: 科学出版社, 1994.1~175
Xu Shutong, Liu Yican, Jiang Laili, et al. Tectonic Structures And Evolution[M]. Beijing: Science Press, 1994.1~175 (in Chinese).
- [4] 杨巍然, 王国灿, 简平. 大别造山带构造年代学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000.1~140.
Yang Weiran, Wang Guocan, Jian Ping. Study on Tectono-Chronology of the Dabie Orogenic Belt [M], Wuhan: China University of Geosciences Press, 2000.1~140 (in Chinese with English abstract).
- [5] Okay A I. Petrology of a diamond and coesite-bearing metamorphic terrane: Dabieshan, China [J]. Eur. J. Mineral, 1993, 5:659~673.
- [6] Platt J P. Dynamics of orogenic wedges and the uplift of high-pressure metamorphic rocks [J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1986, 97: 1037~1053.
- [7] Liou J G, Zhang R Y, Wang X, et al. Metamorphism and tectonics of HP and UHP belts in the Dabie-Sulu region, China [A]. In: Yin A, Harrison T M (eds.). Tectonic Evolution of Asia [C]. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995.345~370.
- [8] Liou J G, Maruyama S, Ernst W G. Seeing a mountain in a grain of garnet [J]. Science, 1997, 27(4): 48~49.
- [9] Maruyama S, Liou J G, Terabayashi M. Blueschists/eclogites of the world and their exhumation [J]. Internal. Geol. Rev., 1996, 38 (6): 490~596.
- [10] 丛柏林, 王清晨. 大别山—苏鲁超高压变质带研究的最新进展 [J]. 科学通报, 1999, 44(11): 1127~1148.
Cong Bolin, Wang Qingchen. New developments on studies of the Dabie-Sulu metamorphic belt [J]. Chinese Sci. Bull., 1999, 44 (11), 1127~1148 (in Chinese).
- [11] Xu Zhiqin, Yang Wencai, Zhang Zeming, et al. Scientific significance and site-selection researches of the first Chinese continental scientific deep drill-hole [J]. Continental Dynamics, 1998, 3 (1): 1~13.
- [12] Liu Fulai, Xu Zhiqin, Xu Huiifen, et al. High- and ultrahigh-pressure metamorphism and retrogressive textures of gneiss in Donghai area—evidence from gneiss in drill-hole ZK2304 [J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73 (3): 300~315.
- [13] Schmid R, Ratschbacher L, Oberhansli R, et al. High-Si phengite, mineral chemistry and P-T evolution of ultra-high-pressure eclogites and calc-silicates from the Dabie Shan, eastern China [J]. Geol. J., 2000, 35:185~207.
- [14] 刘贻灿, 许树桐, 李曙光, 等. 大别山北部榴辉岩的地球化学特征和 Sr, Nd 同位素组成及其大地构造意义 [J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(增刊): 99~107.
Liu Yican, Xu Shutong, Li Shuguang, et al. Geochemical characters and Sr and Nd isotopic compositions of Dabie eclogites and their significance. Science in China (Ser. D), 2000, 30 (supp.): 99~107 (in Chinese).
- [15] Zhang R Y, Liou J G. Dual origin of garnet peridotites of Dabie-Sulu UHP terrane, eastern-central China [J]. Episodes, 1998, 21 (4): 229~234.
- [16] Liou, J G, Hacker B R, Zhang R Y. Into the forbidden zone [J]. Science, 2000, 287: 1215~1216.
- [17] Hacker B R, Sharp T, Zhang R Y, et al. Determining the origin of ultra-high pressure lherzolites [J]. Science, 1997, 278 (10):702~704.
- [18] Yang Wencai. Crustal structure and development of Sulu UHPM Terrane in east-central China [J]. Episodes, 1997, 20 (2): 100~103.
- [19] Yang Wencai. Seismic Profiling and tectonic evolution of Dabie UHPM terrane in East-Central China [J]. Continental Dynamics, 1998, 2 (2): 86~95.
- [20] 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 [J]. 地球物理学报, 1999a, 42(1): 41~52.
Yang Wencai, Cheng Zhenyan, Chen Guojiu, et al. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (I): Deep seismic reflection [J]. Chinese J. Geophysics, 1999a, 42 (1):57~70 (in Chinese with English abstract).
- [21] 杨文采, 方慧, 程振炎, 等. 苏鲁超高压变质北带的地球物理调查(II)—综合地球物理方法 [J]. 地球物理学报, 1999b, 42(4): 508~519.
Yang Wencai, Fang Hui, Cheng Zhenyan, et al. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (II): Non-seismic methods [J]. Chinese J. Geophysics, 1999, 42 (3): 387~398 (in Chinese with English abstract).
- [22] 杨文采, 胡振远, 程振炎, 等. 郯城—涟水综合地球物理长剖面 [J]. 地球物理学报, 1999c, 42(4): 206~217.
Yang Wencai, Hu Zhenyuan, Cheng Zhenyan, et al. Integrated Tancheng-Lianshui geophysical long section [J]. Chinese J. Geophysics, 1999c, 42 (4):206~217 (in Chinese with English abstract).
- [23] Yang Wencai. Analysis of deep intracontinental subduction [J]. Episodes, 2000, 23 (1): 20~25.
- [24] 杨文采, 于长青. 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 [J]. 地球物理学报, 2001, 44(3): 346~359.
Yang Wencai, Yu Changqing. Kinetics and dynamics of development of the Dabie-Sulu UHPM terranes based on geophysical evidence [J]. Chinese J. Geophys., 2001, 44 (3):346~359 (in Chinese with English abstract).
- [25] 杨文采, 汪集隼. 苏鲁地区地壳岩浆底侵的地球物理判识 [J]. 地质学报, 2002, 76(2): 173~179.
Yang Wencai, Wang Jiyang. Geophysical identification of magmatic

- underplating in Sulu area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76 (2): 173~179 (in Chinese with English abstract).
- [26] 杨文采. 东大别超高压变质带的深部构造 [J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(2): 183~192.
Yang Wencai. Deep structures of the east Dabie ultrahigh-pressure metamorphic belt, East China [J]. *Science in China (Ser. D)*, 2003, 46 (6): 612~624 (in Chinese).
- [27] Yang Wencai. Geophysical profiling across the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, Eastern China [J]. *Tectonophysics*, 2002, 354:277~288.
- [28] Yang Wencai. Flat mantle reflectors in eastern China: possible evidence of lithospheric thinning [J]. *Tectonophysics*, 2003, 369 (3-4): 219~230.
- [29] 杨文采, 杨午阳, 金振民, 等. 苏鲁超高压变质带岩石圈的地震组构 [J]. *中国科学(D辑)*, 2004, 34(7):307~319.
Yang Wencai, Yang Wuyang, Jin Zhenmin, et al. Lithospheric seismic fabrics of Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt [J]. *Science in China (Ser. D)*, 48 (1):2005, 1~16 (in Chinese).
- [30] 许志琴, 张巧大, 赵民. 郯庐断裂带中斷大裂谷的基本特征 [J]. *中国地质科学院院报*, 1982, (4):132~148.
Xu Zhiqin, Zhang Qiaoda, Zhao Min. Basic properties of the middle Tanlu fault zone [J]. *Bull. of Chinese Academy of Geological Sciences*, 1982, (4):132~148 (in Chinese with English abstract).
- [31] 汪集旸, 胡圣标, 杨文采, 等. 中国大陆科学钻探先导孔地热测量 [J]. *科学通报*, 2001, 46(10):847~850.
Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Yang Wencai, et al. Geothermal measurements in the pre-pilot hole of the Chinese continental scientific drilling project [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2001, 46 (10):847~850 (in Chinese).
- [32] 赵宗举, 李大成, 朱琰, 等. 合肥盆地构造演化及油气系统分析 [J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(4): 8~13.
Zhao Zongju, Li Dacheng, Zhu Yan, et al. Tectonic evolution and oil/gas in Hefei basin [J]. *Petroleum Exploration and Production*, 2001, 28 (4):8~13 (in Chinese with English abstract).
- [33] 索树田, 钟增球, 游振东. 大别地块超高压变质期后伸展变形及超高压变质岩石折返过程 [J]. *中国科学(D辑)*, 2000, 30(1): 9~17.
Suo Shutian, Zhong Zengqiu, You Zhendong. Extension and exhumation of UHPM rocks in Dabie Terrane [J] *Science in China (Ser. D)*, 2000, 30 (1): 9~17 (in Chinese).
- [34] 袁学诚, 徐明才, 唐文榜, 等. 东秦岭地壳反射地震剖面 [J]. *地球物理学报*, 1994, 37(6): 749~758.
Yuan Xuecheng, Xu Mingcai, Tang Wenbang, et al. Crustal seismic reflection profile of eastern Qinling [J]. *Chinese J. Geophys.*, 1994, 37 (6):749~758 (in Chinese with English abstract).
- [35] 董颐珍. 秦巴地区 QB-1 测线地震测深成果介绍 [A]. 见: 袁学诚主编. 阿尔泰—台湾地学断面论文集 [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.165~175.
Dong Yizhen. Seismic sounding of QB-1 profile in the Qinling area [A]. In: Yuan Xuecheng (ed.). *Contributions to the Altai to Taiwan Geoscience Transect* [C]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997.165~175 (in Chinese).
- [36] 蔡学林, 杜之府, 李树钧, 等. 初论东秦岭推覆成因花岗岩 [A]. 见: 袁学诚主编. 阿尔泰—台湾地学断面论文集 [C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.176~189.
Cai Xuelin, Du Zhifu, Li Shujun, et al. On nappe granite in eastern Qinling [A]. In: Yuan Xuecheng (ed.). *Contributions to the Altai to Taiwan Geoscience Transect* [C]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997.176~189 (in Chinese).
- [37] 胡鸿翔, 陈学波, 张碧秀. 中国中原地区随县—安阳地震测深资料解释 [J]. *地震学报*, 1986, (8):37~49.
Hu Hongxiang, Chen Xuebo, Zhang Bixiu. Seismic sounding from Anyang to Saixuen, Central China [J]. *Acta Siesmologica Sinica*, 1986, (8):37~49 (in Chinese with English abstract).
- [38] 王有学. 苏鲁—大别造山带广角地震测深地壳结构研究 [D]. 北京: 中国地质大学博士学位论文, 2002:1~91.
Wang Youxue. Wide-angle refraction and crustal structures in Sulu area. PH.D. Thesis [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2002. 1~91 (in Chinese with English abstract).
- [39] 王椿庸, 张先康, 陈步云, 等. 大别造山带的地壳结构研究 [J]. *中国科学(D辑)*, 1997, 27(3):221~226.
Wang Chunyong, Zhang Xiankang, Chen Buyun, et al. Crustal structure of the Dabie orogenic belt [J]. *Science in China (Ser. D)*, 1997, 27 (3), 221~226 (in Chinese).
- [40] Wang ChunYong, Zeng RongSheng, Mooney W D, et al. A crustal model of the ultrahigh-pressure Dabie Shan orogenic belt, China, derived from deep seismic refraction profiling [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105 (B5):10857~10869.
- [41] 董树文, 吴宣志, 高锐, 等. 大别造山带地壳速度结构与动力学 [J]. *地球物理学报*, 1998, 41(3):349~361.
Dong Shuwen, Wu Xuanzhi, Guo Rui, et al. Crustal velocity structure and dynamics in Dabieshan [J]. *Chinese J. Geophys.*, 1998, 41 (3):349~361 (in Chinese with English abstract).
- [42] 杨文采, 徐纪人, 程振炎, 等. 苏鲁大别造山带地球物理与壳幔作用 [M]. 北京: 地质出版社, 2004. 1~108.
Yang Wencai, Xu Jiren, Cheng Zhenyan, et al. *Regional Geophysics and Crust-mantle Interaction of the Sulu-Dabie Orogeny* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.1~108 (in Chinese with English abstract).

Tectonic framework of the eastern segment of the Central orogenic belt of China

YANG Wen-cai

(*key laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of Land and Resources of China, Institute of Geology,*

Chinese Academy of Geological Sciences Beijing 100037, China)

Abstract: The author presents the main results of the latest geophysical investigations in the Dabie–Sulu ultrahigh–pressure (UHP) metamorphic belt, analyzes the general characteristics of the lithospheric structures in the Dabie–Sulu terrane, and makes a comparison of these characteristics with those beneath the East Qinling and Tongbai terranes observed by previous workers. The crustal structure in the eastern segment of the Central orogenic belt reflects the northward deep intracontinental subduction of the Yangtze craton. The continental crust was subducted at angles of about 20° – 30° . As the subduction angles were gentle, an open backland basin developed in the eastern segment of the orogenic belt, and the basement structure below the basin still has the characteristics of the plate convergence of the orogenic plate. The manifestations of large–scale magmatic intrusions occurring in the upper–mid crust in the cores of the orogenic belt were related to post–orogenic geological processes. The Early Mesozoic Dabie–Sulu UHP metamorphic belt might still exist at the deep levels of the crust below the East Qinling and will not be exposed on the surface today.

Key words: lithospheric structures; ultrahigh–pressure (UHP) metamorphic belt; Dabie–Sulu; East Qinling; geophysical investigation

About the author: YANG Wen-cai, male, born in 1942, senior researcher, engaged in the study of geophysics and continental dynamics; E-mail: yangwencai@ccsd.org.cn.