

# 根据地球物理资料分析大别—苏鲁 超高压变质带演化的运动学与动力学

杨 文 采

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

余 长 青

(中国地质大学研究生院, 北京 100083)

[摘 要] 中国中央造山带东部的大别—苏鲁是全球最大的超高压变质带, 本文基于地球物理资料的分析和综合研究, 进一步指出这一超高压变质带演化的复杂性。在扬子与中朝克拉通碰撞后大别—苏鲁地体的俯冲产生超高压变质作用。之后由于两个克拉通之间的倾斜碰撞, 产生旋转与局部的拉张为岩石折返造成了良好条件。扬子的旋转也形成一对剪切力使俯冲海洋岩石圈断开和陆块反弹。然而由于南北压挤力的继续作用与大别—苏鲁地体的折返, 扬子克拉通继续向大别苏鲁地体下方俯冲。这种陆—陆俯冲携带了大量大陆物质进入上地幔, 诱发部分熔融和后期的地幔上隆。本文给出了大别—苏鲁演化动力学的修正模型。

[关键词] 超高压变质作用, 大别—苏鲁, 地球物理, 演化模型, 动力学分析。

## 1 引 言

自许志琴<sup>[1]</sup>于 1987 年在大别山发现榴辉岩中的柯石英以来, 中国中东部的大别—苏鲁超高压变质带吸引了全球地学家研究并取得了不少成果<sup>[2-45]</sup>, 提出了一些有益的模型来说明这一造山带中超高压变质岩石从地幔折返回地表的动力学过程。其中有代表性折返模型是由美国刘忠光<sup>[7-9]</sup>、Ernst<sup>[4, 9]</sup>和日本的 Maruyama<sup>[10]</sup>提出的, 他们认为折返是由于先俯冲下去的海洋板块的断开, 而诱发低密度的大陆俯冲板块反弹所致。在早三叠纪, 大别—苏鲁地体的大地构造位置为扬子克拉通的北沿, 受正在俯冲的海洋岩石圈(石炭二叠纪位于中朝与扬子之间)的拖曳, 使它们向中朝克拉通下方俯冲。在俯冲到 150km 以下并达到柯石英/金刚石重结晶的稳定地区之后, 超高压变质块体由于海洋岩石圈块体的断开和轻大陆块体的应力反弹作用折返回到上地壳。环绕着冷的超高压块体的地热流可能对海洋岩石圈块体的断开起作用。以上代表性的假说与板块构造学说相符, 但仍有一些问题存在。例如, 地球物理调查表明, 在大别—苏鲁地体折返之后, 扬子克拉通也向北俯冲, 说明南北挤压的环境一直从早三叠纪延伸到早侏罗纪。从物理学上看, 在挤压环境中块体快速折返是难以接受的, 因为在碰撞俯冲过程中的挤压力可能相当强, 以阻挡向

[收稿日期] 2000-11-09 收到, 2001-02-09 收到修定稿。

[基金项目] 国土资源部重点基础研究项目(9501205, 9501206)。

[作者简介] 杨文采, 男, 生于 1942 年, 中国地质科学院研究员, 1984 年在加拿大 McGill 大学取得博士学位, 已发表论文百余篇, 目前负责中国大陆科学钻探地球物理调查。E-mail: Yangwencai@a-1.net.cn

上的反弹力造成折返。又如,为什么超高压变质带只出现在中央造山带的东段(大别—苏鲁),而不出现在秦岭?杨文采<sup>[16]</sup>曾试用中朝克拉通南部的V形碰撞产生巨大的动量来说明这个问题,因为V形楔正好碰在大别山与苏鲁西段。现在看来,这种推测不太对,因为整个大别—苏鲁超高压变质带延长800km以上,并不是聚焦在V形碰撞的尖端。应该指出,已有的大别—苏鲁地体折返模型都是根据地表地质和实验室岩样试验提出的,并没有地球物理依据的支持。其他作者也曾提出过关于超高压变质带折返的动力学模型。例如,Okey<sup>[11]</sup>强调了陆内逆推造楔的作用。但是,缺少地球物理资料的支持。

在中国大陆科学钻探工程计划立项期间(1996—2000年),进行了大量的地球物理调查工作,取得了新的高质量地震数据并揭示了大别—苏鲁地体的岩石圈构造<sup>[16-23]</sup>。本文,作者将根据综合地球物理解释取得的新成果修正以往大别—苏鲁造山带演化的模型,揭示俯冲折返过程与同时发生的块体旋转和局部拉张造成的演化的复杂性。这一旋转拉张事件发生在三叠纪板块会聚的挤压环境和早侏罗纪扬子俯冲之间,持续约10—20Ma。地球物理资料揭示了这一至关重要的旋转拉张事件,并为超高压变质地体折返之后的扬子克拉通的陆—陆深俯冲提供了证据。

陆内俯冲是在陆—陆碰撞期间或之后发生的一种构造作用<sup>[24,25]</sup>。俯冲在造山作用中可分为两种类型:A型为陆间俯冲(陆—陆俯冲);B型为海洋岩石圈俯冲,后者在板块构造中已得到充分研究。然而,陆间俯冲的研究还很不充分,遗留了许多问题。例如,陆间俯冲可达到多深?有多少地壳物质在此期间返回地幔?它对造山作用有什么影响?对大陆形成和演化起到的作用是否重要?由于陆间俯冲属于后碰撞造山作用的一种,且对于山脉隆升有贡献,本文以大别—苏鲁造山带为例,解剖了陆间俯冲带的构造并计算了有关参数,同时分析了陆间俯冲对造山和其他地质作用的影响和重要性。

## 2 地质概况

大别—苏鲁造山带位于中朝与扬子克拉通之间的秦岭—大别—苏鲁造山带的东段,是世界上最大规模的超高压变质带出露区(图1)。这里与中朝和扬子克拉通不同的是古生代地层缺失,由柯石英和金刚石指示的超高压变质带位于苏鲁地体的北部和大别山东段。同时,由蓝晶石和黄玉指示的高压高温变质带位于超高压带的南侧,在南部有一条指示高压低温变质的蓝片岩带<sup>[7-15]</sup>。变质压力和温度向南递减的这种模式暗示着扬子克拉通由南向北俯冲。根据同位素年龄测定<sup>[14,26-28]</sup>,超高压变质的榴辉岩的年龄有多期,多数为232—216Ma,表明中朝与扬子克拉通之间的碰撞和主要的超高压变质岩石的形成约为240—216Ma。在碰撞之前,大别与苏鲁地体同位于扬子克拉通的北部边缘,但后来被郯庐断裂错开,并使苏鲁地体向北走滑。苏鲁地体北部边界为烟台—五莲断裂,南部边界为嘉山—响水断裂。地体本身由断裂分界的超高压变质带及高压变质带组成,并为侏罗纪碎屑岩和白垩纪火山岩不整合覆盖。大别—苏鲁地体内有许多火山岩和花岗岩侵入体分布。

秦岭造山带与大别地体西侧连接,是一个复合造山带,其发展主要有三个阶段<sup>[29]</sup>。和大别—苏鲁地体相比,蛇绿岩和碰撞同期的花岗岩(245—211Ma)在秦岭发育良好,至

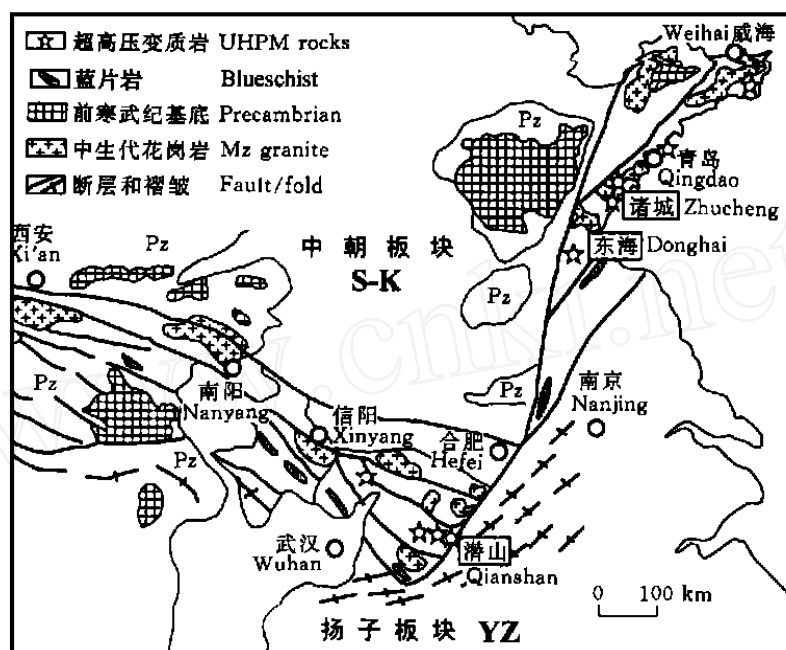


图1 大别—苏鲁高压超高压变质带略图

S-K 中朝克拉通; YZ 扬子克拉通(后同).

Fig.1 A simplified geological map of the eastern part of the central orogenic belts in China. (S-K denotes Sino-Korean craton, YZ denotes Yangtze craton)

少目前尚未发现有超高压变质岩石. 同位素测量表明<sup>[28]</sup>, 中朝与扬子克拉通之间的印支期碰撞先在大别—苏鲁进行, 然后才转向秦岭. 在图1中只显示出秦岭造山带的东部, 这里绿片岩和蓝片岩也有出露, 没有发现含柯石英的榴辉岩.

### 3 快速折返的先决条件

多数作者认为<sup>[3-46]</sup>, 超高压变质块体从上地幔折返回地表的过程是很快的, 其速率大约为8—10mm/a, 约15Ma从120—150km的深度折返回地表. 氮和碳的同位素异常也表明快速的变冷和抬升, 使这些块体在俯冲和折返期间像一个统一的构造单元那样运动<sup>[28, 30]</sup>. 如果岩石圈保持在压挤的环境中, 它就像一扇关着的门一样阻挡住上弹的超高压块体, 那么高速率的折返几乎是不可能的.

图2显示在大别—苏鲁地体从俯冲到折返转化时所处的两种可能的应力状态. 图的基本格架取自文献<sup>[14]</sup>, 增加了P-T-t模式及其他符号. 图2(a)左边表示大别—苏鲁地体在挤压环境中俯冲到上地幔, 其下端的岩石遭受超高压变质作用. 这时右边的P-T-t曲线(线段AB)表示所处压力与温度随俯冲深度增加而增加. 当拖曳的海洋岩石圈断开后, 两种不同的应力状态可各自表示在图2(b, c). 若挤压状态一直继续下去(图2(b)), 由反弹应力或者低密度俯冲大陆地壳产生的浮力将指向上覆中朝克拉通. 然而这种力将

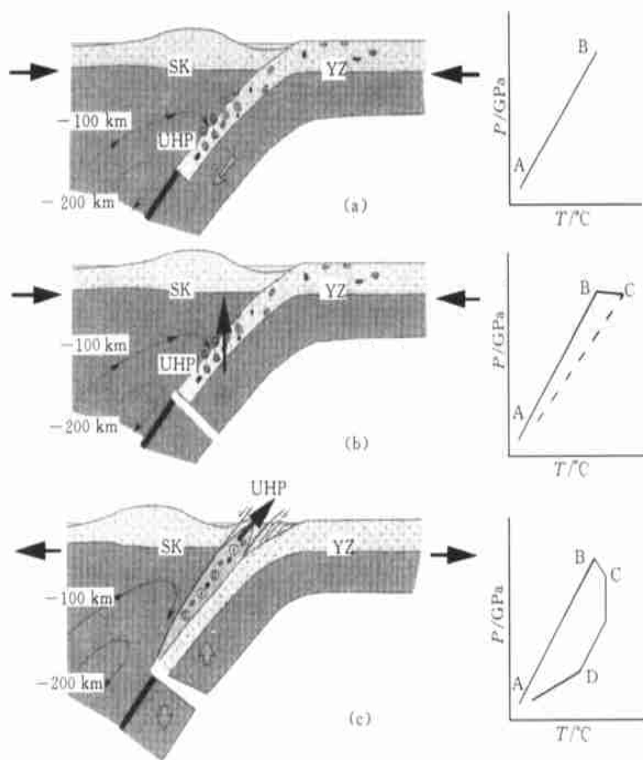


图 2 超高压变质带俯冲折返可能的环境分析

(a) 由于挤压收敛造成向地幔俯冲; (b) 断开后反弹应力为压挤锁闭; (c) 在局部拉张环境中快速折返; UHP 为超高压变质。

Fig. 2 A cartoon showing two possible situations for transfer of the Sulu terrane from subduction to exhumation

为挤压力所阻挡,而引起抬升过程的延迟。即使此力非常强可以把上覆岩石圈冲裂而使压缩转变为拉张,这种转变将需要 10Ma 以上的时间。换句话说,在挤压状态下超高压变质岩块的折返快速不了,而更可能发生的是缓慢上隆。图 2(b) 右边显示对应的 P-T-t 曲线,线段 BC 表示从俯冲转换到断开可能的间隙,这时温度增加而压力不变。如果断开后有快速折返发生的话,压力和温度的递减应与 AB 线段相似(图中线段虚线 CA),因为超高压变质岩块是由原路返回的。但在事实上大多数由柯石英榴辉岩样品实测的 P-T-t 曲线都与这种模式不太相同(图 3)。

反之,如果海洋岩石圈断开时大别—苏鲁地区发生局部拉张,如图 2(c) 所示的快速折返就没有什么障碍。在 P-T-t 曲线上拉张时将有压力的降低及温度升高(图右方线段 BC),紧接着发生快速折返,压力迅速降低而温度基本不变。在岩块上升到地壳深度后温度快速降低(见图 2(c) 的右边线段 CD)。这种 P-T-t 曲线的模式与大多数实测结果一致(见图 3)。

基于上述因素,可推测在大别—苏鲁地体俯冲后期可能有短期的局部拉张事件发生。那么,为什么拉张事件仅发生在大别—苏鲁,而不在秦岭?

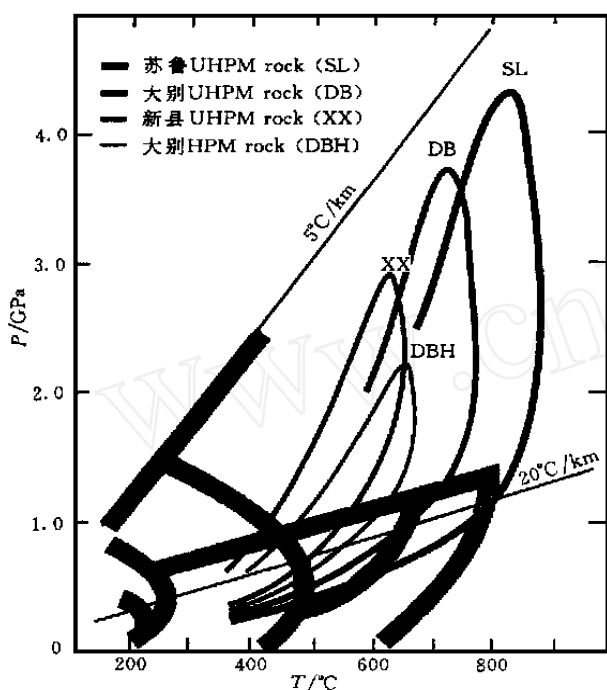


图3 大别—苏鲁 UHP 与 HP 岩石的 P-T-t 曲线  
(引自文献[15])

Fig. 3 The P-T-t curves of Dabie-Sulu UHP and HP rocks, modified from [15]

#### 4 中朝与扬子克拉通的旋转与局部拉张

分析古地磁资料<sup>[31-36]</sup>可知,在表明中朝与扬子克拉通碰撞之后大别—苏鲁地体的确处于局部拉张状态. 80 年代以来,积累了大量古地磁资料,可以重建这两个克拉通古构造位置<sup>[31-36]</sup>. 图4是 Randolph 等恢复中国各块体运动学历史的结果<sup>[30,31]</sup>,表明自早三叠纪这两个克拉通向相同方向运动,然后中朝的南沿与扬子北沿相碰. 这次碰撞首先发生在大别—苏鲁地区,在中三叠纪中朝克拉通的西南方有一个喇叭形的松潘洋,在南部半圆形俯冲带作用下,扬子克拉通应作逆时针旋转. 这次旋转事件使得此两克拉通西部喇叭形的海域在早侏罗纪封闭和在晚三叠纪到早侏罗纪沿秦岭造山带的碰撞. 从物理学上看,这次旋转有两

个后果,既有秦岭造山带发生挤压收敛,同时伴随着大别—苏鲁地区的局部拉张发散. 这一过程可以用图5表示.

图5(a)表示碰撞开始时的情形,中朝与扬子克拉通首先在大别—苏鲁碰撞. 扬子北沿的一部分现在已经看不到了,因为它现已俯冲到中央造山带及中朝克拉通之下. 图5(b)表示这两个克拉通反方向的旋转使碰撞逐渐西移到秦岭,而在东部大别—苏鲁造山带从挤压转变为局部拉张,导致超高压变质岩石快速折返到地表,以填补拉张引起的岩石圈短期开裂. 图5(c)表示在超高压地体折返之后整个造山带又恢复到压挤状态. 这种旋转-拉张模式不仅与古地磁与地球物理资料相符,同时回答了本文提出的动力学问题,即局部拉张的存在满足了快速折返的先决条件,且超高压变质带仅出现在大别—苏鲁,而不出露在秦岭.

什么力量可造成这次碰撞中板块的旋转? 作者认为几何形状的不规则可能起到重要作用. 对扬子克拉通来说,它的质量中心在大别—苏鲁地区的西部. 在近似南北方向的挤压应力作用下,产生相当大的力矩. 由作用在质心的力矩推动扬子必然逐渐顺时针旋转,使碰撞西移. 碰撞后的旋转与调整是经常发生的,不过其规模大小不同而已.

应该指出,局部拉张只是旋转造成的后果之一. 板块旋转还在大别—苏鲁岩石圈底部产生一对剪切力,使深部俯冲的海洋岩石圈断开. 当相对旋转发生时,由于刚性岩石圈

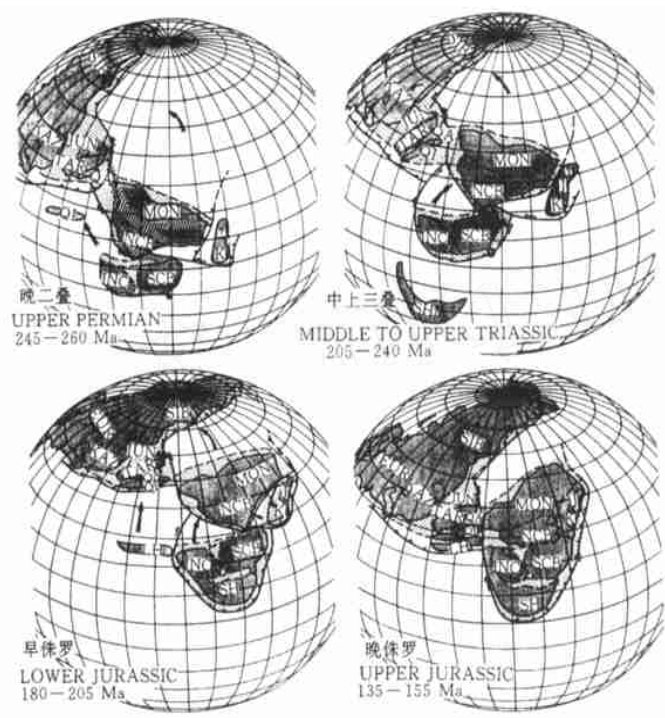


图 4 根据古地磁等资料推测的中国各构造单元位置及扬子克拉通的顺时针旋转<sup>[35]</sup>  
Fig. 4 Paleo-position of the Sino-Korean and Yangtze cratons, showing the Triassic and Jurassic convergence and block rotations (adapted from Randolph, et. al., 1992<sup>[35]</sup>)

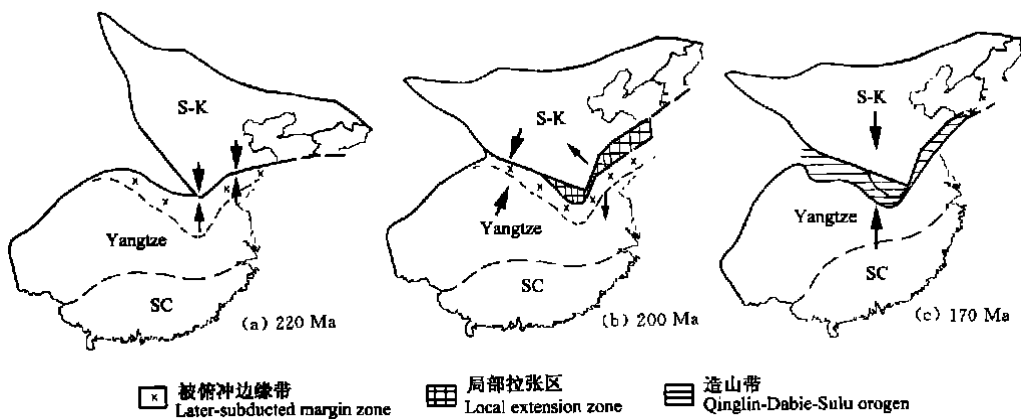


图 5 大别—苏鲁短期的局部拉张示意图  
(主要为扬子相对华北的旋转)

(a) 第一阶段:沿大别苏鲁碰撞;(b) 第二阶段:大别苏鲁拉张与秦岭碰撞;(c) 超高压变质带折返后扬子继续俯冲;SC为华南块体,它在古生代已与扬子联成一体;本图仅表示相对位置而不表示方向.

Fig. 5 A carton illustrates development of a local and short-lived extension and divergence caused by relative rotations of the Sino-Korean and Yangtze cratons

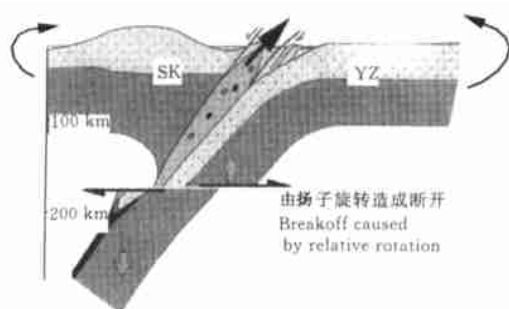


图 6 由扬子旋转造成一对剪切力使下方块体断开的示意图

Fig. 6 A cartoon showing that the rotation of the Yangtze craton relative to the Sino-Korean generated a pair of shear forces which could break off the deeply subducted oceanic slab

的水平运动而软流圈具有可蠕变性,导致剪切应力的产生(图 6)。较重的俯冲海洋岩石圈块体趋向下沉,便容易使它们在剪切应力作用下与上方的岩石圈断开。因此,断开事件可能是旋转产生的另一个后果。在中朝与扬子克拉通之间的旋转同时引起沿大别—苏鲁造山带的局部拉张和深俯冲海洋岩石圈的断开,为大别—苏鲁超高压变质带的折返提供了充分条件。

## 5 扬子克拉通的俯冲

大别—苏鲁地体的地壳构造已由综合地球物理调查揭示<sup>[21,22]</sup>,穿过苏鲁地体的地震剖面( 线与 线部分)示于图 7。由 2 条非

常明显的反射体(在图 8 上标记为 A—A 和 B—B)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。根据所有地质与地球物理资料的综合解释结果,对应这条剖面的地壳构造断面见图 8。在此剖面北段,烟台—五莲断裂(YWF)是向北倾斜的正断层,代表了中朝克拉通与苏鲁地体之间的缝合处;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。在图 7 与图 8 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)。由于地质资料指示扬子克拉通向北俯冲,这一逆断层向北倾斜而且在空间上与扬子克拉通北沿一致,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<sup>[20,22]</sup>也支持这一解释。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,它近似平行于 A—A,很可能是俯冲扬子地壳的底部,即俯冲扬子块体的古莫霍面。在东海地区下方上地壳还有一组逆断层,称为东海逆断层(DHT),位于 MST 上方超高压带之下,他们可能是扬子俯冲的前沿逆断层带。

由此看来,扬子俯冲的全部历史可分为三个子阶段。第一个子阶段(240—215Ma)为苏鲁主逆断层(MST)的生成和北沿大别—苏鲁地体的俯冲(简称为苏鲁俯冲)。第二个子阶段(215—180Ma)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。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(图 8)。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,而在中侏罗纪中国大陆定型时结束(图 4),应该是 180—155Ma。扬子大陆的俯冲发生在其外沿(大别—苏鲁)和内沿之间,因此是 A 型俯冲;而 MST 与今天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<sup>[37]</sup>。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、沿郯庐及嘉山—响水断裂带的陆内裂谷活动,燕山期侵入事件产生了大别山和苏鲁北沿的侵入体,以及在图 7 上 10s 处的反射体指示

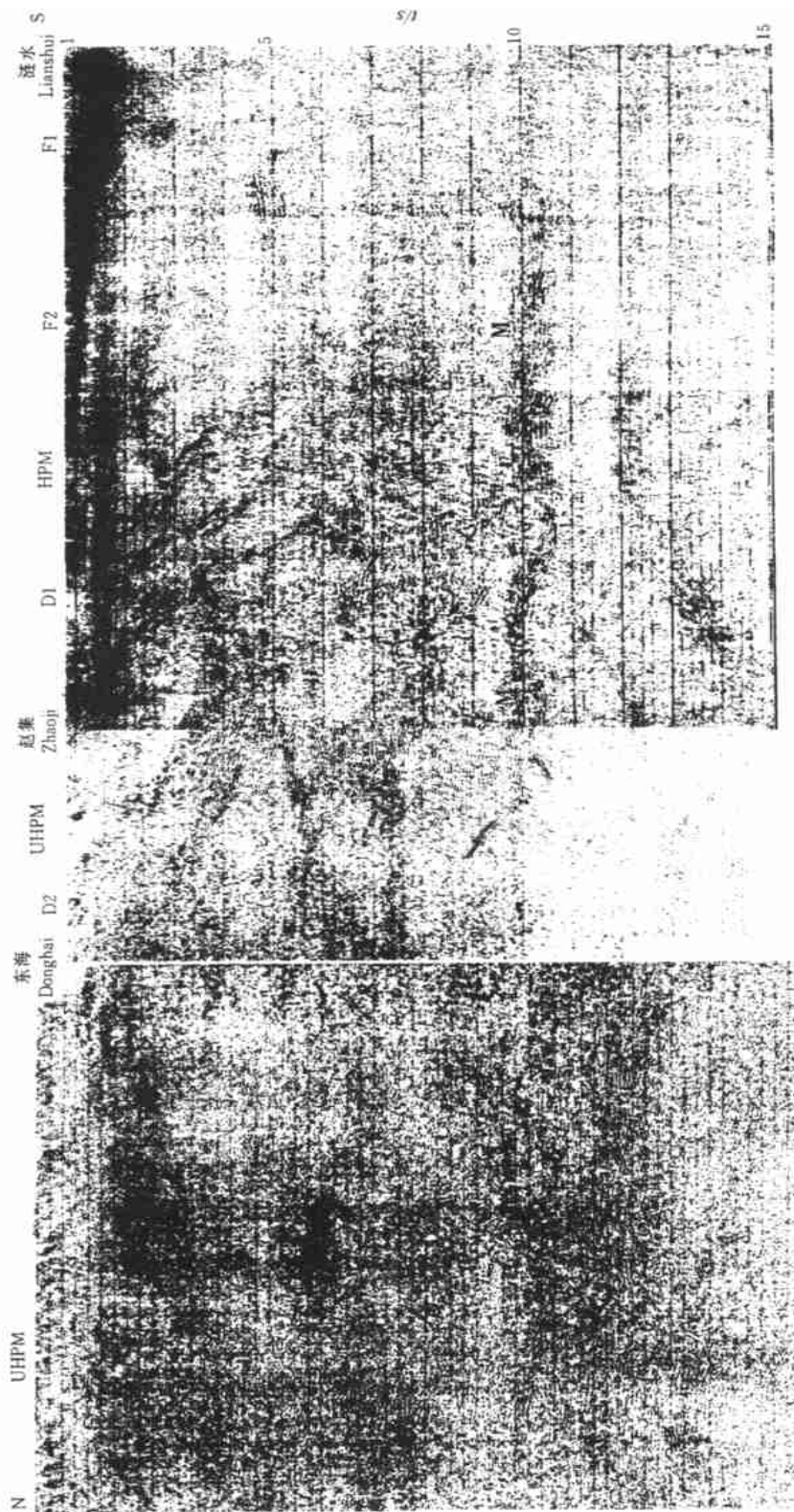


图7 穿过苏鲁地体的深反射地震剖面( I 线与Ⅲ线合并而成)  
Fig.7 Deep seismic reflection profile across Sulu terrane obtained by combination of lines I and III



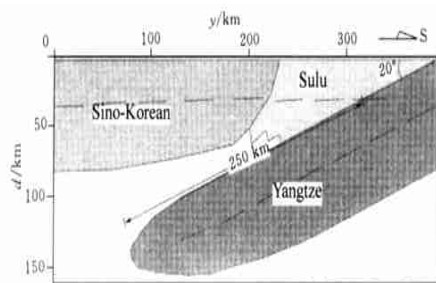


图9 扬子陆对陆俯冲的几何产状

Fig. 9 Geometry of the Yangtze intracontinental subduction

N. 随着静浮力积累并达到与负荷同级次,挤压过程将结束而大别—苏鲁岩石圈将转向拉张状态。白垩纪的拉张和裂谷作用可能就是由于浮力积累的后果之一。

根据图9所示的几何模式,还可以计算有多少地壳中大丰度的元素在扬子陆间俯冲时沉入到上地幔。例如,地壳中硅的平均净重约为26.8%<sup>[39]</sup>,沉入上地幔的硅的总质量约为 $0.268 \times 2.016 \times 10^{16} \text{ t} = 0.54 \times 10^{16} \text{ t}$ 。当然,这么多的硅(或大量石英)为地幔回收会诱发壳幔边界的不稳定,在上地幔引起地球化学反应。考虑到浮力的存在,这些大丰度的元素会重新返回地壳,导致中、晚中生代花岗质岩石侵入和火山爆发。造山带地壳物质为地幔回收并重新返回地壳,表明了造山作用的复杂性。

大陆岩石圈俯冲到上地幔导致地壳与地幔相互作用及上地幔的热力学扰动。冷的俯冲块体插入热的软流圈会改变热对流的模式,引起上地幔的动力学不稳定。再者,许多轻的地壳物质在上地幔的积累增加的静浮力,诱发地幔物质上涌和地壳拉张。所有这些因素都暗示,在陆内深俯冲发生后造山作用将进入一个以上隆和拉张为特征的新阶段。

从地球化学上看,像苏鲁这样达到150km深的陆间俯冲将把地壳物质带向地幔深处。现今地壳厚度约为35km(在图7中10s处的反射体),岩石圈厚度为80km,在岩石圈底部的温度约为1307<sup>[15]</sup>。与图9所示的几何模式比较,可知苏鲁造山带的山根已为陆内俯冲之后的某些地质作用所化解。大陆地壳物质俯冲到上地幔造成它过量含硅、铝、钙、钾、钠;它们的重新平衡和返回导致沿大别—苏鲁带和中朝克拉通南侧的晚中生代火山喷发和岩浆活动。像金、银、铀这样的相容性重元素在侵入时可能从上地幔向上迁移,在中朝克拉通南沿形成大型金、银、铀矿床<sup>[40]</sup>。

## 7 结论:大别—苏鲁超高压变质地体的演化

根据上面的分析,大别—苏鲁地体的全部演化历史要比我们以往了解的更复杂,演化可包含五个主要的阶段。

第一阶段是中朝与扬子之间海洋岩石圈俯冲后两个克拉通的碰撞(见图10(a))。古地磁数据也支持中朝与扬子之间在晚古生代有一个海盆存在,在大别—苏鲁此海盆在三叠纪封闭,而此时在秦岭仍然张开<sup>[31—35]</sup>。

第二阶段是在早、中三叠纪大别—苏鲁地体的向北俯冲(图10(b))。在挤压环境中大

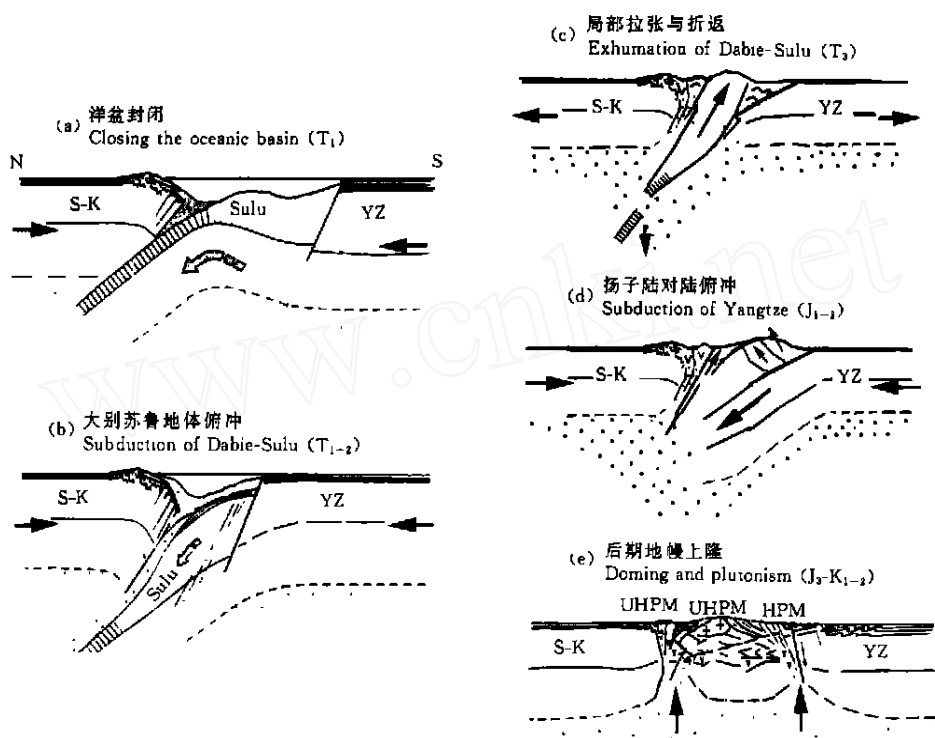


图 10 更新的大别—苏鲁超高压变质带演化动力学模型

Fig. 10 The elaborated model for dynamic evolution of the Dabie-Sulu UHPM terranes (see contents).

别—苏鲁地体从扬子裂开并为下沉的海洋岩石圈拖曳到约 150km 深处,而使岩石发生了超高压变质作用,地幔楔的超基性岩也挤入到俯冲块体中。在某些造山带这一阶段不能为地表地质观察到,因为不存在局部拉张与折返的可能性,因此超高压变质岩石没有出露。

第三阶段是大别—苏鲁地体在晚三叠纪的局部拉张和快速折返(图 10(c))。这个阶段在大别—苏鲁才有这样典型的超高压变质带。如上所述,局部拉张是由于中朝与扬子克拉通之间相向旋转引起的,而折返是在沉入地幔海洋岩石圈断开后俯冲大陆地壳的反弹引起的。与此同时,碰撞转向秦岭造山带,使中朝与扬子之间洋壳全部封闭。虽然还不十分清楚深部海洋岩石圈断开的原因是什么,但是扬子克拉通的顺时针旋转至少局部地造成剪切力,可能促成这一断开事件(图 6)。

第四阶段是扬子克拉通向大别—苏鲁地体及中朝下方的陆间俯冲,这可能发生在早中侏罗纪(见图 7、8)。这次陆间俯冲也达到约 150km 的深度,但并没有岩块快速折返的事件发生,因为俯冲后并没有板块旋转与局部拉张。陆内深俯冲是在中朝与扬子之间继续挤压收敛的结果(图 10(d))。与超高压变质块体折返相反,地壳岩石停留在上地幔并慢慢地局部熔融分异,造成以后地幔上隆和大陆裂谷。

最后阶段是俯冲下去的地壳物质重新回到地壳,晚侏罗纪到早白垩纪的地幔上隆和裂谷化(图 10(e))。大陆岩石圈俯冲到上地幔产生两方面后果:一是壳幔物质的化学作用

和交换;另一方面是上地幔物理状态的扰动。冷的俯冲块体插入热的软流圈可改变热流模式,大量的地壳物质进入地幔引起化学动力学不平衡,使地幔硅、铝、钙、钾、钠等元素过剩。这么多低密度地壳岩石在上地幔的积累增加了静浮力,促成物质从地幔上隆。这些地壳物质为地壳所回收造成强烈的火山活动和大规模的花岗质侵入体,分布在大别—苏鲁和中朝克拉通南沿。

作者感谢所有一起参加中国大陆科学钻探前期研究的同事的帮助和支持,感谢加拿大地质调查所 J. Randolph 博士的宝贵意见。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Xu Zhi-qin. Etude tectonique et microtectinique de la Chaîne paleozoïque de Qinlings. In: Presente a L'Université des Sciences et Techniques du Languedoc Pour obtenir le diplôme de Doctorat. 1987. 93—107.
- [ 2 ] Coleman R G, Wang X. Overview of the geology and tectonics of UHPM, In: Coleman R G, Wang X, ed. Ultra-high-Pressure Metamorphism, Cambridge: Cambridge Univ. Press 1995. 1—32.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] Hacker B R, Sharp T, Zhang R Y, et al. Determining the origin of ultra-high pressure Iherzolites. *Science*, 1997, **278**(10):702—704.
- [ 6 ] Jahn B M. Geochemical and isotopic Characteristics of UHP eclogites and ultramafic rocks of the Dabie orogen: Implications for continental subduction and collisional tectonics. In: Hacker B R, Liou J G ed. When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks. Kluwer Aca., Pub., 1998, 203—240.
- [ 7 ] Liou J G, Zhang R Y, Wang X, et al. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultrahigh pressure belts in the Dabie-Sulu region. In: Yin A, Harrison T M ed. The Tectonic Evolution of Asia, Ruby Volume, Cambridge Univ. Press, 1996. 300—344.
- [ 8 ] Liou J G, Zhang R Y, Wang X, et al. Metamorphism and tectonics of HP and UHP belts in the Dabie-Sulu region, China. In: Yin A, Harrison T M ed. Tectonic Evolution of Asia. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995, 345—370.
- [ 9 ] Liou J G, Maruyama S, Ernst W G. Seeing a mountain in a grain of garnet. *Science*, 1997, **27**(4):48—49.
- [ 10 ] Maruyama S, Liou J G, Terabayashi M. Blueschists/eclogites of the world and their exhumation. *Internal. Geol. Rev.*, 1996, **38**(6):490—596.
- [ 11 ] Okay A I. Petrology of a diamond and coesite-bearing metamorphic terrane: Dabieshan, China. *Eur. J. Mineral.* 1993, **5**:659—673.
- [ 12 ] Opdyke N D, Huang K, Xu G, Zhang W. paleomagnetic results from the Triassic of the Yangtze platform. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**:9553—9568.
- [ 13 ] 金振民,金淑燕,高山等. 大别山超高压岩石形成深度局限于 100—150km 吗?. *科学通报*, 1998, **43**(7):767—770.  
JIN Zhen-Ming, JIN Shu-Yan, et al. Does the UHP rocks of Dabie mountains confine to 100-150km?. *Chinese Science Bulletin*, 1998, **43**(7):767—770.
- [ 14 ] Zhang R Y, Liou J G. Ultrahigh-Pressure metamorphism of Sulu terrane, eastern China: A prospective view. *Continental Dynamics*, 1998, **3**(1—2):32—53.
- [ 15 ] Xu Zhiqin, Yang Wencai, Zhang Zeming, Yang Tiannan. Scientific significance and site-selection of the first Chinese continental scientific deep drillhole. *Continental Dynamics*, 1998, **3**:1—13.
- [ 16 ] Yang Wen-cai, Cheng Zhen-yan. Crustal structure and development of the Dabie UHPM terrane in east-central China.

*Continental Dynamics*, 1998, **3**:86—95.

- [17] Yang Wencai, Unconformity-like reflection pattern under the Moho in Sulu area. *Continental Dynamics*, 1997, **2** (1):22—29.
- [18] Yang Wencai. Seismic Profiling and tectonic evolution of Dabie UHPM terrane in East-Central China. *Continental Dynamics*, 1998, **2** (2):86—95.
- [19] Yang Wencai. Crustal structure and development of Sulu UHPM Terrane in east-central China. *Episodes*, 1997, **20** (2):100—103.
- [20] Yang Wencai. Analysis of Deep Intracontinental Subduction. *Episodes*, 2000, **23** (1):20—25.
- [21] 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(一):深反射地震. 地球物理学报,1999, **42** (1):41—52.  
YANG Wen-Cai, CHEN Zhen-Yan, CHEN Guo-Jiu, et al. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (一):Deep seismic reflection. *Chinese J. Geophysics* (in Chinese), 1999, **42** (1):41—52.
- [22] 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 Wen-Cai, HU Zhen-Yuan, CHEN Zhen-Yan, et al. Long profile of geophysical investigations from Tanchen to Lianzhui, east-central China. *Chinese J. Geophysics* (in Chinese), 1999, **42** (2):206—217.
- [23] 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(二):非地震方法. 地球物理学报,1999, **42** (4):508—519.  
YANG Wen-Cai, FANG Hui, CHEN Zhen-Yan, et al. Geophysical investigations of northern Sulu UHPM belt (二): Non-seismic methods, *Chinese J. Geophysics* (in Chinese), 1999, **42** (4):508—519.
- [24] Oxburgh E R. Flake tectonics and continental collision. *Nature*, 1972, **239**:202—215.
- [25] Platt J P. Dynamics of orogenic wedges and the uplift of high-pressure metamorphic rocks. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1986, **97**:1037—1053.
- [26] Zhai M, Cong B, Guo J, et al. Sm-Nd geochronology and petrography of garnet pyroxene granulites in the northern Sulu of China and their geotectonic implications. *Lithos*, 2000, **52** (1):23—33.
- [27] Zheng Yong-fei. Oxygen and Carbon isotope anomalies in UHPM rocks of Dabie-Sulu terranes. *Episodes*, 1997, **20** (2):104—108.
- [28] Li Shuguang, Xiao Y., et al. collision of the North China and Yangtze block and formation of coesite-bearing eclogites: timing and processes. *Chem. Geol.*, 1993, **109**:89—111.
- [29] Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaiping, et al. Orogenesis and dynamics of the Qinling orogen. *Science in China* (Series D), 1996, **39** (3):225—234.
- [30] Rumble D. Stable isotope geochemistry of ultrahigh-pressure rocks. In: Hacker B R, Liou G J ed. When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks. Kluwer Aca. Pub., 1998, 241—259.
- [31] Randolph J, Yang Zhenyu, Yan Chen et al. Paleomagnetic constraints on the geodynamic history of the major blocks of China from the permian to the present. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97** (B10):13953—13989.
- [32] Lin J L, Fuller M, Zhang W. Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the North and South China blocks. *Nature*, 1985, **313**:444—449.
- [33] Yang Z, Courtillot V, Besse J, Ma X, Xing L, Xu S, Zhang J. Jurassic paleomagnetic constraints on the collision of the North and South China blocks. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**:577—580.
- [34] 马醒华,杨振宇. 中国三大地块的碰撞拼合与欧亚大陆的重建. 地球物理学报,1993, **36** (4):476—481.  
MA Xing-Hua, YANG Zheng-Yu. The collision and suturing of the three major blocks in China and the reconstruction of the Paleoeurasian continent. *Chinese J. Geophys.*, 1993, **36**:476—488.
- [35] Randolph J E, Yan Chen, Courtillot V, et al. A cretaceous pole from south China and the Mesozoic Hairpin turn of the Eurasian apparent polar wander path. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96** (B3):4007—4027.
- [36] 翟永建,周姚秀. 华南和华北陆块显生宙的古地磁及构造演化. 地球物理学报,1989, **32** (3):292—307.  
ZHAI Yong-Jian, ZHOU Yao-Xiu. Paleomagnetism and tectonic evolutions of North and South China blocks since the

- phanerozoic. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1989, **32**:292—307.
- [37] Xiao Xuchang. Tectonic evolution and uplift of the Qinghai-Tibet plateau. *Proc. 30<sup>th</sup> IGC*, 1997, **1**:47—60.
- [38] 徐佩芬. 大别苏鲁碰撞造山带的地震层析成像[博士论文]. 北京:中国科学院地质所, 1998.
- XU Pei-Fen. Seismic Tomography in Dabie-Sulu Orogenic Belt [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 1998.
- [39] Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust. *Review of Geophys.*, 1995, **33**: 241—265.
- [40] 宋叔和主编. 中国矿产资源图. 北京:地质出版社, 1992.
- SONG Shu-He (ed.). Mineral Resource Maps of China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1992.

## KINETICS AND DYNAMICS OF DEVELOPMENT OF THE DABIE-SULU UHPM TERRANES BASED ON GEOPHYSICAL EVIDENCES

YANG WEN-CAI

(*Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China*)

YU CHANG-QING

(*Chinese University of Geosciences, Beijing 100083, China*)

**[Abstract]** The Dabie-Sulu region, located in the east part of the central orogenic belt of China, has the largest ultrahigh pressure metamorphic (UHPM) zone in the world. Based mainly on geophysical data newly obtained in the region, this paper shows the sophistication of the evolution and dynamics of the Dabie—Sulu UHPM belt. The subduction of the Dabie—Sulu terranes after collision between the Sino-Korean and Yangtze cratons induced the ultrahigh pressure metamorphism. A local extension occurred in Dabie—Sulu region after the subduction, yielding good conditions for exhumation of the UHPM rocks. The local extension was the result of Yangtze rotation that was generated by the oblique impact between the two cratons. The Yangtze rotation might also provided a pair of shear forces on bottom of the lithosphere to make a breakoff event that is essential to the exhumation of the UHPM terranes. Owing to continuing convergence between the two cratons after the exhumation of Dabie—Sulu UHPM terranes, Yangtze craton proceeded to subduct beneath the Dabie-Sulu terranes and the Sino-Korean craton. This intracontinental subduction carried tremendous mass of crustal materials into the upper mantle, causing later partial melting, mantle doming and rifting. Based on above-mentioned analysis, the previous models for evolution of the Dabie—Sulu terranes are elaborated.

**[Key words]** Ultrahigh pressure metamorphism, Dabie—Sulu region, Regional geophysics, Evolution model, Dynamic analysis.