

苏鲁—大别超高压变质带地壳速度结构 及其俯冲、折返机制

徐纪人 赵志新

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要: 三维 P 波速度解析研究结果表明, 苏鲁—大别超高压变质带岩石圈地壳速度结构均具有上地壳明显高速且上凸、中地壳增厚、下地壳埋藏较深且莫霍面下凹等基本特征。与大别地区相比较, 苏鲁超高压变质带存在着上地壳波速更高, 且地表高速区面积与上地壳高速体体积大于大别; 而莫霍面下凹程度不如大别地区, 地壳山根已逐步趋向消失等独特的区域特征。显示了苏鲁地区曾发生过更激烈的俯冲与折返构造运动, 与大别地区相比, 有更多高速、高密度的超高压变质岩折返到上地壳与地表; 然而在造山运动过程中比大别更早进入了造山运动后期等特征。对比研究结果表明, 苏鲁—大别地段的造山、演化过程中, 在构造运动基本相似的背景下, 存在着区域性特征。苏鲁地区的造山运动以及超高压变质作用, 有起始略晚、发生时期较短但相对激烈、结束早、比大别更早进入了造山运动的后期等特征。笔者分析了苏鲁区域性特征形成的主要构造原因是, 郯庐断裂带的大规模左旋走滑运动以及通过中国华北区域的大范围 NW-SE 向扩张应力场的影响。其中, 中生代以来大华北地区的大区域扩张应力场的影响可能是该区俯冲到地幔内的超高压变质岩能够大量折返回地表或上地壳的重要构造原因。

关键词: 苏鲁—大别超高压变质带; 地壳结构; P 波速度高速异常; 郯庐断裂; 扩张应力场

中图分类号: P542 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)02-0310-10

古老的苏鲁—大别造山带是中国大陆南北两大块体的交界地带, 其形成、演化过程与动力学机制, 特别是超高压变质带(UHPM 带)形成的俯冲、折返机制是中国大陆构造运动研究中的关键课题。地质学研究结果表明, 早在 240~220 Ma 前扬子与华北地块在苏鲁—大别地区相聚, 经历俯冲、折返和上隆 3 个激烈构造运动阶段, 形成了大规模的超高压变质带^[1-3]。随后进入造山运动后期, 逐渐发展至今天的构造状态。

苏鲁—大别造山带被北北东走向的郯庐断裂分成东部苏鲁和西部大别两段, 东西两段同处一条造山带上, 有着相似的但并不完全相同的区域特征。从地质构造上看, 无论苏鲁还是大别, 从南到北都顺序排列着高压变质带和超高压变质带等基本相同的构造单元(图 1)。苏鲁造山带以郯庐断裂为西界, 分布

有嘉山—响水、烟台—五莲断裂等多条北北东向断裂带。而大别造山带不仅有襄樊—广济、晓天—磨子潭、六安断裂等北西西向断裂带, 还有多组北东向的断裂分布, 比苏鲁地区更为复杂。

为了探明苏鲁—大别超高压变质带形成机制及其动力学过程, 需要更多岩石圈深部的详细资料。地球物理方法是洞察地球内部结构与状态, 研究岩石圈形成及演化历史的有力工具。地震波三维速度结构探查与研究具有物理意义明确、精度高、定位准确、可直接判读等优点, 是研究地球内部结构、寻求构造运动历史遗迹、探索其动力学机制的首选方法。苏鲁—大别地区是中国岩石圈地壳地球物理调查工作较为详细的地段之一^[4,5], 1980 年以来开展的地质断面构造探查为研究该区地壳与上地幔三维 P 波速度结构提供了可靠的基础资料^[6,7]。最近, 笔者对苏

收稿日期: 2005-02-28; 改回日期: 2005-03-07

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)项目(2003CB716505)和国家自然科学基金项目(40399141)资助。

作者简介: 徐纪人, 女, 1947 年生, 留日博士, 研究员, 主要从事地球物理与地震学以及地球动力学研究; E-mail: xujiren@ccsd.org.cn。

鲁—大别岩石圈 P 波速度数据体进行了补充修正并详细研究了该数据体后发现,三维波速资料不仅得到了苏鲁—大别造山带岩石圈地壳速度、密度等物性结构特征,同时还清楚地反映出研究区域内发生过的构造运动的深部特征,为探讨研究中国东部中生代以来的构造运动和大陆动力学机制等提供了新科学证据^[9]。

1 三维 P 波速度数据体资料

苏鲁—大别造山带地震波三维 P 波速度数据体包括北纬 28°~40°,东经 105°~125°区域范围的地壳以及上地幔资料。在数据体建立和修正过程中,重点使用了 4 类资料。一是地质断面资料,如青海门源至福建宁德、湖北随州至内蒙古喀喇沁旗、江苏响水至内蒙古满都拉、上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗等资料。二是大别山地区 1994 年和 2001 年两次广角反射/折射地震调查得到的 P 波速度剖面结果。三是中国大陆科学钻探工程 (CCSD) 地球物理选址调查 (人工爆破地震测深以及天然地震层析成像等项观测研究结果)。四是发表的论文、专著中有关本区的地震测深资料与结果。本研究根据岩石圈岩石物性研究以及测井的最新结果,对三维 P 波速度数据体进行了修正,提高了数据体资料的精度。

从地表至 50 km 深的地壳和上地幔部分,三维 P 波速度数据体主要采用了爆破地震测深得到的 P

波速度结果。根据资料精度,划分为不同深度的平面。在同一深度上,以 50 km 间隔取值后经过构造单元移植、插值处理。经验证修正处理后的地壳范围内的三维数据体资料精度最高,除个别点之外误差均小于百分之一。深度 50~100 km 的地幔部分则采用了地震层析成像 P 波速度结果并进行垂直插值。在深度 50 km 的两种资料交接处,采用了平滑插值处理。综合解析处理上述资料后,得到了苏鲁—大别造山带及其周围区域地壳及上地幔 1°×1°的 P 波速度三维数据体。除了山东半岛东部基础资料较少之外,可以认为这是目前最为完整、精度最高的苏鲁—大别地区岩石圈 P 波速度结构的三维数据体。笔者将本文重点讨论从地表至 50 km 深度范围的岩石圈地壳与上地幔 P 波速度结构资料。

2 苏鲁—大别超高压变质带地壳 P 波速度结构的区域特征

苏鲁—大别超高压变质带是世界上最大规模的超高压变质带^[9],该区速度结构特征研究具有广泛的代表意义。三维 P 波速度资料解析研究结果表明,苏鲁—大别超高压变质带岩石圈地壳的速度结构具有相似的基本特征,同时又有各自的区域性特征。反映出在构造运动基本相似的背景下,同一造山带的不同区段在其形成演化过程中存在的区域性差别。

地壳 P 波速度平面与剖面等值分布图均显示,苏

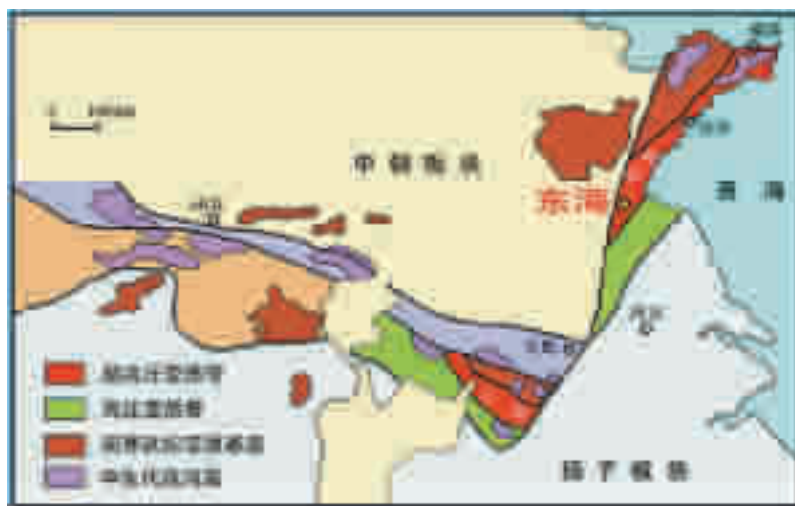


图 1 苏鲁—大别造山带地区构造简图

Fig. 1 Tectonic sketch map of the Sulu-Dabie orogen
The red area denotes the UHP metamorphic belt

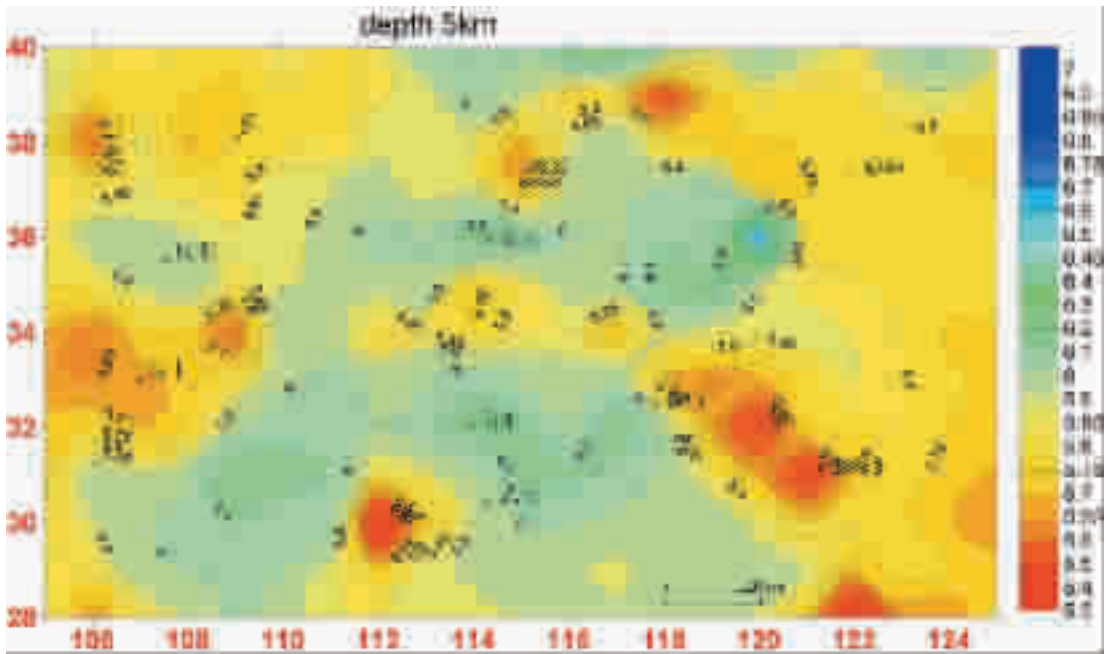


图 2 苏鲁—大别造山带以及周围地区 5km 深 P 波速度 (km/s) 等值分布图
 Fig. 2 5 km contours of P-wave velocity in and around the Sulu-Dabie orogen
 The figures at the contours denote P-wave velocities (km/s)

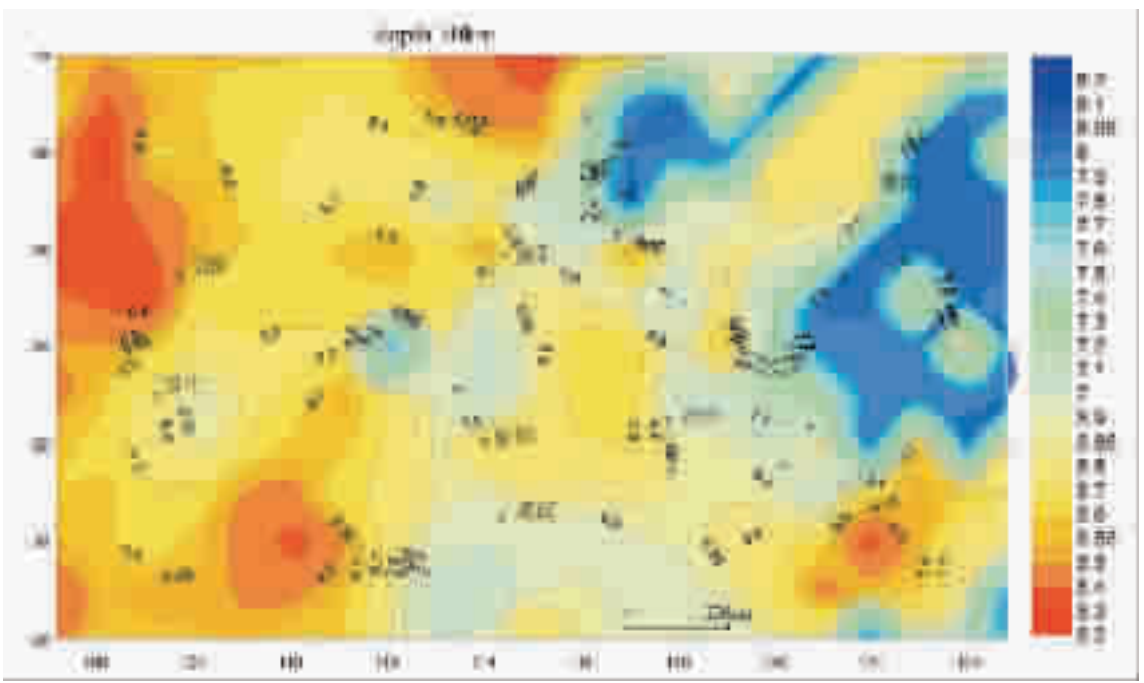


图 3 苏鲁—大别造山带以及周围地区 30km 深 P 波速度 (km/s) 等值分布图
 Fig. 3 30 km contours of P-wave velocity in and around the Sulu-Dabie orogen
 The figures at the contours denote P-wave velocities (km/s)

鲁—大别超高压变质带有着不同于其周围地区的特征。上地壳浅层 2~8km,超高压变质带整体表现出明显的高速异常条带分布。在苏鲁,超高压变质带呈现异常高值分布,2km 深处 P 波速度达到 5.6~6.2km/s,明显高于其周围地区 4.2~5.4km/s 的平均波速。两个波速高值中心集中分布在连云港附近的苏鲁超高压变质带和泰山地区,表明出苏鲁超高压变质带与海拔 1500m 泰山都具有相同的浅层 P 波速度的高速结构。在大别地区,沿着大别超高压变质带,2km 深处波速为 5.9~6.0km/s 的高速条带分布,高于其周围地区 4.8~5.2km/s 的平均波速。其中最大 P 波速度值集中在岳西、红安到桐柏一带,呈串状分布。

其中特别是苏鲁地区,尽管现在从地貌上已看不到高山峻岭,但是超高压变质带上地壳 P 波速度高值异常十分明显,并且异常值高于大别地区。三维波速资料证明,苏鲁超高压变质带高速体不仅在地表出露面积上,而且在上地壳内的总体积均大于大别。中国大陆科学钻探(CCSDB)岩心分析表明,苏鲁—大别地区上地壳高速体主要由超高压变质的榴辉岩、副片麻岩、正片麻岩等岩体组成^[9]。高速异常带和异常体的存在,反映了大量折返到地表和上地壳浅层的高速、高密度超高压变质岩的岩石物性结果^[1]。这表明,与大别地区相比较,苏鲁地区有更多的超高压变质岩折返到超高压变质带的上地壳与地表。经初步计算,折返到上地壳与地表的超高压变质岩的岩体,苏鲁是大别的 1.6~2 倍。因此根据高速构造体的体积可以断定,与大别相比较,苏鲁超高压变质带历史上曾发生过更加剧烈的俯冲、折返运动,致使大量的超高压变质岩从地幔返回上地壳乃至地表。

苏鲁—大别超高压变质带的中地壳明显增厚,最厚处超过 20km。下地壳或壳幔边界的莫霍面埋藏较深且下凹,有较明显的山根结构等基本特征。莫霍面等值分布特征可知,苏鲁—大别超高压变质带下的莫霍面都明显深于其周围地区,表明超高压变质带的地壳厚度比周围地区厚,显示了造山带的山根结构。对比苏鲁与大别两个超高压变质带,大别造山带的莫霍面比苏鲁带深 3~5km。苏鲁带莫霍面下凹程度不如大别,显示山根已逐步趋向消失,在造山运动过程中比大别更早进入了造山运动后期等独特的区域特征。也就是说,随着地表高山地貌的消失,苏鲁地区深部山根已明显表现出典型的古老造山带的山根减弱特性。

大地构造研究结果显示,大别地区的地面构造比苏鲁地区复杂,本文得到的岩石圈 P 波速度结构也表现出大别地区的地壳及上地幔深部结构比较复杂。剖面波速等值分布图显示,大别超高压变质带存在南部的襄樊广济断裂之下的中地壳物质向北部的六安断裂俯冲的迹象,而苏鲁带没有发现类似现象。与大别地区相比,苏鲁超高压变质带地壳波速的层状结构较为均匀。根据地壳断裂运动性质以及地壳三维波速结构可以推断,大别地区历史上可能曾经历过更加复杂的、来自多方向构造力作用下的各种构造运动;而苏鲁地区则相对比较简单,郟庐断裂带的左旋走滑运动以及大华北应力场变化等对该区的构造运动有可能起到重要的控制作用。

三维 P 波速度资料解析研究结果表明,苏鲁—大别超高压变质带岩石圈地壳速度结构均具有上地壳明显高速且上凸、中地壳增厚、下地壳埋藏较深且下凹等相似的基本特征。同时,苏鲁超高压变质带存在着上地壳 P 波速度高于大别,且高速区地表面积和地壳内体积均大于大别,山根减弱等特征。显示了苏鲁地区有更多高速、高密度的超高压变质岩折返到上地壳与地表的岩石物性效果。这些结构特征均表明,尽管苏鲁与大别超高压变质带在形成、演化过程中有着基本相同的大区域构造运动背景,但是受区域构造、应力场等的影响,两段表现有程度、进程不尽相同的特征。下面将重点讨论三维 P 波速度特征反映出的区域构造运动及其动力学机制等问题。

3 苏鲁—大别岩石圈区域划分与构造运动特征

如前所述,苏鲁—大别造山带是中国大陆南北两大块体的交界地带,扬子与华北地块在此相聚,经历俯冲、折返、隆升等激烈的构造运动后,形成大规模的超高压变质带。有关该区的构造运动的详细过程及其动力学机制,科学家们用地球物理、地球化学等手段进行深部结构及其演变的定量化研究、论证。三维地震波速度结构研究是其中最有效的研究方法之一。

解析三维数据体得到的苏鲁—大别地区地壳速度平面等值分布图清晰地显示了构造运动遗留下的地下物性特征。该区上地壳 5km 深的岩石圈地壳地震波 P 波速度等值分布见图 2。根据波速构造分布

的区域特征，苏鲁—大别造山带及其周围地壳可以划分为3个大构造区域：西部为低速异常区，反映鄂尔多斯、四川盆地低速沉积构造；中部是正常波速及高速异常区，反映华北以及扬子克拉通构造；东部为苏北和南黄海低速异常区，反映了新近纪以来的盆地构造。西部与中部之间的分界线为北北东走向，大体与鄂尔多斯地块西缘以及向四川盆地东缘的延伸线相一致。中部与东部之间的分界线也是北北东走向，大体沿郯庐断裂的东缘及其东南延长线。

在中部华北以及扬子克拉通区域内，苏鲁—大别造山带明显表现为高速异常条带分布，反映出印支期造山带的山根出露以及超高压变质带上地壳波

速的典型特征。其中大别造山带东部与苏鲁带西部的连接处，近东西向的波速值为6.1km/s高速异常体明显被左旋走滑的郯庐断裂所错开，东部的苏鲁带从北纬31°~32°移动到35.5°~36°，向北移动了450~500km之遥。特别是大别东端高速异常体的形态显示出被带动北移，最终错断的样子，生动地展现了该区岩石圈地壳中生代发生过的左旋走滑剧烈构造运动的遗迹。因此，上地壳P波速度分布图深刻反映了苏鲁—大别造山带岩石圈地壳构造与郯庐断裂的左旋走滑构造运动关系，为研究苏鲁—大别造山带、超高压变质带与郯庐断裂的构造运动及其动力学机制，提供了最新证据和重要资料。

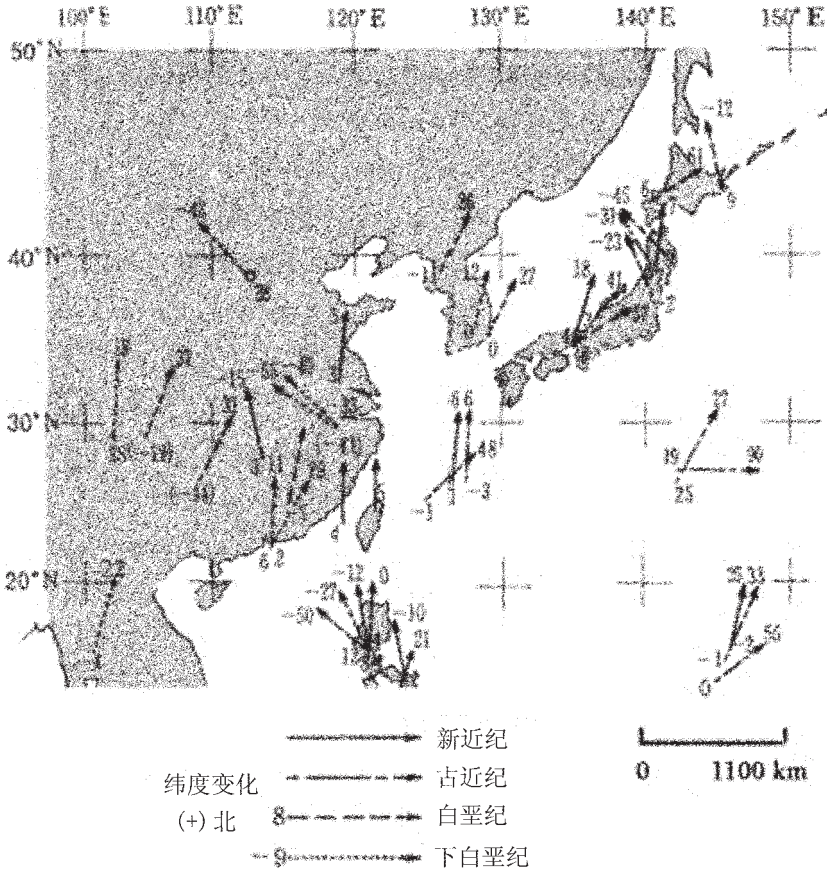


图4 东亚地区各地古地磁方向变化

(古地磁资料从下白垩纪始划分为4个时段,箭头和箭尾的数字各表示磁偏角和纬度变化,正、负值分别表示向北或向南移动;根据参考文献[17]修改)

Fig. 4 Variations in direction of the paleomagnetic field in various areas of East Asia (modified after references [17])

The Cretaceous is divided into four time intervals according to the paleomagnetic data. The figures at the head and end of the arrow display the variations of the geomagnetic declination angles and latitudes respectively. + and - represent the northward and southward movements respectively

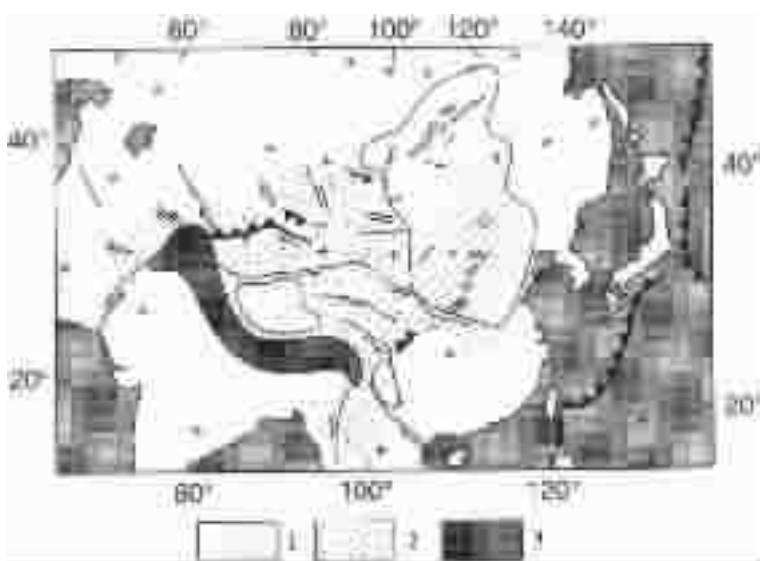


图 5 东亚及其周边地区现代构造运动类型与应力场分布 (根据参考文献[21])

1—优势正断层区;2—优势走滑断层区;3—优势逆断层区

Fig. 5 Distribution of modern tectonic movement types and stress field distribution in and around East Asia (after Tappnner and Morhar, 1976) 1—Region of predominantly normal faults; 2—Region of predominantly strike-slip faults; 3—Region of predominantly thrust faults

从莫霍面深度和 30 km 深的下地壳波速平面分布显示比较相似的结果(图 3),即研究区域下地壳同样可划分为西部、中部和东部 3 部分。但是对比上地壳分区,西部地区下地壳范围向东扩大了 400~600 km,而东部地区向东略有扩展。根据波速划分,以四川盆地东缘及华北平原西缘为界的西部地区下地壳为低速区,P 波速度仅为 6.3 km/s,而其地壳最厚,为 40~50 km,属于青藏高原地壳低速区向东部扩展的过渡地段。显示了青藏高原东缘区域岩石圈构造有随着深度增加,向东扩展的幅度也逐步增加的特征。东部的黄海以及华北裂谷系下地壳的波速值为 8.0 km/s 左右,其地壳厚度为 26~31 km,属于薄壳的大陆边缘及大陆裂谷带地壳构造。中部地区又可以按照地壳厚度分为两种;地壳厚度为 31~32 km 的是减薄大陆地壳,莫霍面埋深为 33~39 km 的属于残留山根地壳。后者主要分布在大别山造山带之下。中部地区无论是苏鲁还是大别造山带,其莫霍面埋深或地壳厚度均明显大于其周围地区。苏鲁造山带夹在黄海以及华北裂谷系之间,莫霍面最深为

33 km。大别造山带更为明显,沿北西西向呈现串状残留山根地壳,最深为 36~38 km 深,约比其周围地区深 3~4 km。因此在下地壳 30 km 深度,东部地区,包括南黄海和渤海湾—濮阳一带已进入上地幔,而其他地区仍处在下地壳范围内。从岩石圈速度结构上看,苏鲁造山带的 P 波速度为下地壳正常波速 6.6~6.7 km/s,夹在其东北的华北裂谷系以及西南的黄海的高速条带之间,十分显著地表现出造山带的存在。华北裂谷系以郯庐断裂为东界,已进入上地幔范围。黄海作为大陆架,地壳深度小于 30 km,也已进入上地幔。其 P 波波速值大体在 7.9~8.0 km/s 范围之内。

4 苏鲁—大别超高压变质构造运动的区域特征及其形成机制探讨

综上所述,苏鲁—大别造山带岩石圈地壳速度结构研究结果表现出,从西向东的大区域构造上,西部克拉通型地壳与东部大陆边缘、大陆裂谷带之间的过渡地带构造特征,同时又有南北扬子块体与中

朝块体(又称华北块体)碰撞挤压古老造山带的特征。相似的大区域构造运动背景使苏鲁、大别高压、超高压变质带有类似的地壳速度结构特征的同时,苏鲁和大别两造山带在莫霍面与地壳速度结构也存在着某些明显的差别,反映出在构造背景与构造运动上的区域特征。

综合研究结果表明,与大别相比较,苏鲁超高压变质带存在着3点不同特征。(1)是上地壳波速高于大别,且高速区体积大于大别;显示了苏鲁地区有更多超高压变质岩折返到上地壳与地表。(2)是莫霍面下凹程度不如大别,地壳山根呈现为典型的古老造山带的山根减弱特征。(3)是苏鲁带地壳波速的层状结构相对简单,而大别地区比较复杂。对比研究结果表明,在苏鲁—大别地段的造山、演化过程中,苏鲁造山带的超高压变质构造运动与大别地区相比,有起始略晚、高潮期间折返运动相对强烈、更早进入了造山运动的后期等特征。

研究分析构造应力场的区域特征,对于研究构造运动成因机制及其相应的构造动力学有着极为重要的意义^[12-13]。研究分析导致上述苏鲁超高压变质带地壳速度构造特征的主要构造原因可能有,郯庐断裂带的左旋走滑运动以及通过中国华北区域的大范围NW-SE向扩张应力场的影响。特别是中生代以来大华北地区的大区域扩张应力场的影响,可能是该区俯冲到地幔内的超高压变质岩能够大量折返回地表或上地壳,并更早进入了造山运动后期的重要原因。

郯庐断裂带是中国东部规模最大的巨型断裂带,也是苏鲁超高压变质带的西缘,苏鲁带直接受到郯庐断裂带的地壳变动及其构造运动的控制。得到的三维速度结构显示,郯庐断裂带是一条深达岩石圈底部的、总体近直立略向东南倾斜的岩石圈断裂带。郯庐断裂带在早中生代以走滑为主,晚中生代及新生代处于拉张环境中^[14-16],局部发育为陆内裂谷。根据朱光等^[15]研究结果,郯庐断裂带上强烈的走滑运动发生于130~110 Ma,即扬子与华北地块相聚、碰撞、俯冲,形成大规模的苏鲁—大别构造带之后。郯庐断裂带强烈的左旋走滑运动,不仅错断地壳特别是上地壳内构造体(图2),而且形成深达地幔的大规模岩石圈断裂和裂隙,使得俯冲到地幔的超高压变质岩可以通过这些断裂和裂隙大量地折返回地表乃至地面。大别地区没有类似郯庐断裂带规模的深大

断裂。根据多学科研究结果,苏鲁—大别带上超高压变质岩石发生折返运动的优势时期是150~100 Ma,与郯庐断裂带强烈的左旋走滑运动的发生时期基本相同。因此可以认为,与大别相比,郯庐断裂带强烈的走滑运动使苏鲁地区具备大量超高压变质岩从深部折返到上地壳与地表的构造运动条件。

古地磁资料(图4)为中生代以来郯庐断裂带强烈的左旋走滑运动提供了有力的证据^[7]。古地磁资料显示,位于苏北地区即郯庐断裂带东缘从新近纪以来,向北移动了纬度3度即300余千米。考虑到郯庐断裂带的左旋走滑运动起始时间早于现有的古地磁资料时段,实际移动距离达500 km是完全有可能的。这与本研究得到的P波速度结构结果相符。同时,古地磁资料表现出的中国东部大部分地区,特别是沿海地区的北向移动,对扬子块体向北移动后与华北块体碰撞挤压的构造运动给出有力的佐证。郯庐断裂带的大规模左旋走滑运动的动力作用及其造成的裂隙,有利于俯冲到地幔之中变质后的原地壳物质上升,大量的折返回地壳乃至地表面。

关于中生代以来大华北地区存在的区域扩张应力场,笔者利用地震资料对东亚现代区域应力场进行了详细研究。结果表明,北西向的扩张应力控制着包括苏鲁地区在内的从贝加尔湖通过中国大华北地区一直到琉球海沟的广阔区域范围^[18-19]。地质资料表明,该区域北西向的现代扩张应力场可以追溯到中生代侏罗纪后期^[20],即扬子块体北移与华北块体强烈碰撞挤压之后。大范围的北西向扩张应力场及其作用下的正断层或走滑正断层型构造运动,造成大量岩石圈深裂谷和深裂隙。俯冲到地幔内密度较小的原地壳物质在浮力作用下上升,通过这些张性裂谷和裂隙比较容易快速返回到上地壳乃至地表,完成其折返构造运动过程,并在特定的温压条件下变质形成榴辉岩等超高压变质岩。大量折返回地面的超高压变质岩形成苏鲁—大别超高压变质带。苏鲁超高压变质岩带面积大于大别,且大别超高压变质带集中于其邻近苏鲁的东部地区(图1)。上地壳P波速度结构也显示了相同的结果,即高速、高密度构造体集中于大别造山带的东部(图2)。根据图5扩张应力场的空间展布及其构造应力作用的方向解析,地处大别造山带东部的超高压变质带有与苏鲁相似的构造应力场背景,无疑有利于原地壳物质快速返回上地壳或地表,即完成超高压变质构造运动

的折返阶段^[9]。因此可以说,中生代以来控制大华北地区的北西向扩张应力场,及其作用下的扩张构造运动是苏鲁和大别东部能够发生激烈的折返运动,致使大量超高压变质岩折返到上地壳或地表的重要构造背景。

此外从图 2 和图 3 对比可知,根据三维 P 波速度资料划分的区域范围,西部地区下地壳与上地壳相比向东扩大了 400~600 km,而东部地区则向东略有扩展。该结果清楚地显示了青藏高原东缘地壳乃至岩石圈深部有着明显的东向扩展运动。这与笔者以及其他研究结果^[4]相符。通过三维 P 波速度结构研究使笔者进一步认识到,青藏高原隆起不仅控制了西部,而且对中国东部地区的构造运动有着十分重要的影响。

5 结 论

笔者利用三维 P 波速度资料,对苏鲁—大别超高压变质带速度结构进行了详细对比研究。研究表明,苏鲁地区的造山运动及其超高压变质运动,有起始略晚,发生时期较短但相对激烈;结束早,比大别更早进入了造山运动的后期等特征。与大别地区相比,苏鲁地区折返回地面或上地壳的超高压变质岩为大别 1.6~2 倍以上。利用三维速度结构、古地磁、应力场等资料,重点分析研究了苏鲁超高压变质带形成与演变过程中,形成上述特征的构造机制与原因。

(1)三维 P 波速度结构研究表明,郯庐断裂带的大规模左旋走滑运动不仅错断地壳内部构造,而且形成深达地幔的大规模岩石圈断裂和裂隙,使得俯冲到地幔的原地壳岩体可以通过这些断裂和裂隙大量地折返回地壳乃至地面,在特定的温压条件下变质成超高压变质岩,形成地面的超高压变质带。岩石学以及古地磁、应力场等研究结果更好地说明了苏鲁超高压变质带的过程与折返的发生时间。

(2)中生代以来大华北地区的扩张应力场的控制影响是苏鲁乃至大别东部地区,大量超高压变质岩能够折返回地表或上地壳的重要构造背景原因。北西向的扩张应力场及其作用下的正断层、走滑正断层型构造运动,造成大量岩石圈深裂谷和深裂隙。俯冲到地幔内密度较小的原地壳物质在浮力作用下上升,通过这些张性裂谷和裂隙比较容易快速返回到上地壳乃至地表,完成其折返构造运动过程。同

时,主控的大华北扩张应力场导致苏鲁带提前结束造山运动过程,更快地进入造山后期,致使地壳山根逐步趋向消失的主要构造原因。

(3)根据上、下地壳波速结构研究结果,苏鲁—大别造山带西部地区下地壳与上地壳相比向东扩大了 400~600 km,而东部地区仅向东略有扩展,清楚地显示了青藏高原东缘深部地壳乃至岩石圈有明显的东向扩展趋势。证明了青藏高原的隆起不仅控制了西部,对中国东部地区的构造运动有着十分重要的影响。

参 考 文 献 (References):

- [1] Haker B R, Ratschitecyur L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161: 215~230.
- [2] 杨经绥, 许志琴, 吴才来, 等. 含柯石英锆石的 SHRIMP U-Pb 定年: 胶东印支期超高压变质作用的证据 [J]. *地质学报*, 2002, 76 (3): 355~372.
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Wu Cailai, et al. SHRIMP U-Pb on coesite-bearing zircon: evidence for Indosinian ultrahigh-pressure metamorphism in Su-Lu, East China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(3): 355~372 (in Chinese with English abstract).
- [3] 许志琴, 张泽明, 刘福来. 苏鲁高压-超高压变质带演化的折返构造及折返机制 [J]. *地质学报*, 2003, 77(4): 433~450.
Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai. Exhumation Structure and mechanism of the Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt, Central China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(4): 433~450 (in Chinese with English abstract).
- [4] 赵志新, 徐纪人, 许志琴. 上地幔三维 S 波速度结构与大别苏鲁超高压变质带俯冲折返机制探讨 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(1): 145~152.
Zhao Zhixin, Xu Jiren, Xu Zhiqin. 3-D S wave velocity structure in the upper mantle and the mechanism investigation for the ultrahigh-pressure metamorphosed belt in the Dabie-Sulu Region [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1): 145~152 (in Chinese with English abstract).
- [5] 刘福田, 徐佩芬, 刘劲松, 等. 大陆深俯冲带的地壳速度结构——东大别造山带深地震宽角反射/折射研究 [J]. *地球物理学报*, 2003, 46(3): 366~372.
Liu Futian, Xu Peifen, Liu Jinsong, et al. The crustal velocity structure of the continental deep subduction belt: Study on the eastern Dabie orogen by seismic wide-angle reflection / refraction [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2003, 46(3): 366~372 (in Chinese with English abstract).
- [6] 徐纪人, 杨文采, 赵志新, 等. 苏鲁大别造山带岩石圈三维 P 波速度结构特征 [J]. *地质学报*, 2003, 77(4): 577~582.
Xu Jiren, Yang Wencai, Zhao Zhixin, et al. Three dimensional velocity structures of the Sulu-Dabie Orogen [J]. *Acta Geologica Sini-*

- ca, 2003, 77: 577~582 (in Chinese with English abstract).
- [7] 钱辉,姜枚,宿和平. 江苏东海大陆钻址区层析成像(博士后论文)[R]. 2002.
- Qian Hui, Jiang Mei, Su Heping. Tomography study on the drilling area of the Chinese Continental Scientific Drilling Project in the Donghai, Jiangsu Province, Institute of Geology, Chinese Academy Geological Sciences [R]. Post-doctoral thesis. 2002.
- [8] 徐纪人,赵志新. 苏鲁造山带区域地壳山根结构特征[J]. 岩石学报, 2004,20(1):137~144.
- Xu Jiren, Zhao Zhixin. Regional structure characteristics of crustal root of mountain beneath the Sulu orogenic belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 149~156 (in Chinese with English abstract).
- [9] Xu Jiren, Zhao Zhixin, Oike Kazuo. Tectonic characteristics of Seismogenic Stress Field in East Asia, Seismotectonics in Convergent Plate Boundary [M]. Tokyo: TERRAPUB, 2002. 481~497.
- [10] 张泽明,许志琴,刘福来,等. 中国大陆科学钻探工程主孔(100~2050m)榴辉岩岩石化学研究 [J]. 岩石学报, 2004,20(1):27~42.
- Zhang Zeming, Xu Zhiqin, Liu Fulai, et al. Geochemistry of eclogites from the main hole (100~2050m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(1): 27~42 (in Chinese with English abstract).
- [11] 许志琴. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果[J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 1~8.
- Xu Zhiqin. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling project [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- [12] 赵志新,徐纪人,杨文采,等. 中国大陆科学钻探孔区反射地震剖面的数值模拟与分析 [J]. 岩石学报, 2004, 20(1): 157~164.
- Zhao Zhixin, Xu Jiren, Yang Wencai, et al. Simulations of reflection seismic profile of borehole area of Chinese Continental Scientific Drilling [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(1): 157~164 (in Chinese with English abstract).
- [13] Xu J R, Yoshiteru K. Geometry of Slab, Intraslab stress field and its tectonic implication in the Nankai Trough [J]. Japan, Earth, Planes and Space, 2002, 54: 733~742.
- [14] 徐纪人,赵志新,河野芳辉,等. 日本南海海槽区域应力场及其板块构造动力学特征[J]. 地球物理学报, 2003, 46: 488~494.
- Xu Jiren, Zhao Zhixin, Kono Y, et al. Regional characteristics of stress field and its dynamics in and around the Nankai Trough, Japan [J]. Chinese J. Geophys., 2003, 46: 488~494 (in Chinese with English abstract).
- [15] 朱光,宋传中,王道轩,等. 郯庐断裂带走滑时代的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究及其构造意义[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(3): 250~256.
- Zhu Guang, Song Chuazhong, Wang Daoxuan, et al. Study on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the Strike-slip in the Tanlu Fold [J]. Science in China (Series D), 2001, 31(3): 250~256 (in Chinese).
- [16] 徐纪人,赵志新,尾池和夫. 东亚地震活动的时空分布及其与区域应力场的关系[J]. 地震学报, 1991, 13(3): 288~294.
- Xu Jiren, Zhao Zhixin, Oike Kazuo. Spatiotemporal distribution of seismic activity in East Asia and its relation to regional stress field [J]. Acta Seismologica Sinica, 1991, 13 (3): 288~294 (in Chinese with English abstract)
- [17] 笹嶋貞雄,古地磁気による東アジア大陸成長論、藤田和夫編著、アジア変動帯—ヒマラヤと日本海溝の間— [M]. 東京:海文堂出版株式会社, 1984. 239~256.
- Sasashim, T., Continental accretion of East Asia based on palaeomagnetic data. In Tectonics in Asia - from Himalaya to Japan-trench [M]. Tokyo: Kaibundo Press, 1984. 239~256 (in Japanese).
- [18] Xu Jiren. Seismogenic Stress field and tectonics in East Asia [J]. Memoirs of the Faculty of Kyoto University, Series of Physics, Astrophysics, Geophysics and Chemistry, 1994, Vol XXXIX, No.1 Article 3.
- [19] Zhao Zhixin, Oike K, Matsumura K, et al. Stress field in the continental part of China derived from temporal variations of Seismic activity [J]. Tectonophysics, 1990, 178: 357~372.
- [20] 邓起东,汪一鹏. 中国的ネオテクトニクス特性、藤田和夫編著、アジア変動帯—ヒマラヤと日本海溝の間— [M]. 東京:海文堂出版株式会社, 1984. 29~65.
- Deng Qidong, Wang Yipeng. Neotectonic characteristics in China, In: Tectonics in Asia - from Himalaya to Japan Trench [M]. Tokyo: Kaibundo Press, 1984. 9~65 (in Japanese).
- [21] Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics [J]. Nature, 1976, 264: 319.

Crustal P-wave velocity structure of the Dabie–Sulu ultrahigh–pressure metamorphic belt and mechanisms of its subduction and exhumation

XU Ji-ren, ZHAO Zhi-xin

(*Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China*)

Abstract: Analysis of 3-D P-wave velocity structure shows that the crustal velocity structure below the Sulu–Dabie ultrahigh–pressure metamorphic belt has the following basic features: the upper crust has a markedly high velocity and is upwarped, the middle crust thickens, the lower crust is deeply buried and the Moho is downwarped. Compared with the Dabie area, the upper crust below the Sulu–Dabie ultrahigh–pressure metamorphic belt has a high P-wave velocity, and the area of the high-velocity region at the surface and volume of the high-velocity body of the upper crust are large. However, the Moho beneath the Dabie orogen is more deeply downwarped than that beneath the Sulu UHPM terrain, and the mountain root of the crust beneath the Sulu region gradually wore away. All these indicate that more intense subduction and exhumation took place in the Sulu terrain, and more UHP metamorphic rocks with higher velocity and density were exhumed to the crust and surface in the Sulu orogen than in the Dabie region. However, in Sulu, orogeny and UHP metamorphism started later but ended earlier. The orogeny in Sulu probably underwent a relatively short but intense evolution process. The formation and evolution of the orogeny and UHP metamorphic belt in Sulu may probably be related to the large-scale sinistral strike-slip motion of the Tanlu fault belt and the effects of the NW–SE extensional stress field in North China. Especially, the effects of the regional-scale extensional stress field in the North China region since the Mesozoic is probably an important tectonic cause for the exhumation of voluminous UHP metamorphic rocks subducted into the mantle to the upper crust or the surface.

Key words: Sulu–Dabie ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt; crustal structure; high P-wave velocity anomaly; Tanlu Fault; extensional stress field

About the first author: XU Ji-ren, female, born in 1947, senior researcher, Sc.D. of geophysics of Kyoto University, Japan, main research interests includes geophysics, seismology and geodynamics; E-mail: xujiren@ccsd.org.cn.