

大别山-苏鲁碰撞造山带构造几何学、运动学和岩石变形分析*

林伟 王清晨 石永红

LIN Wei, WANG QingChen and SHI YongHong

中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈国家重点实验室, 北京 100029

State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2005-04-30 收稿, 2005-06-27 改回.

Lin W, Wang QC and Shi YH. 2005. Architecture, kinematics and deformation analysis in Dabie-Sulu collision zone. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1195–1214

Abstract In Dabieshan-Sulu collision zone, according our field survey, several tectonic units was separated according the architecture, petrology and kinematics. All these units can be recognized in both Dabieshan and Sulu massif: South part, a tectonic stacked units: foreland folded belt-an unmetamorphosed Neoproterozoic to Early Triassic sedimentary sequence unconformable covered by Jurassic-Cretaceous continental terrigenous deposits, HP unit-“Susong” group and “Haizhou” group and UHP unit-eclogite with diamond and coesite; The Central part was a migmatite dome-Luotian dome in Dabieshan and Laixi-Qixia dome in Shandong peninsula; and North part: a tectonic stacked unit consist by Foziling-Luzhenguan group and Penglai group. All these units exhibit a polyphase ductile deformation characterized by i) a NW-SE lineation with a top-to-the-NW shearing, and ii) a southward thrust of early ductile fabrics. Around the boundaries of the Central part-the migmatite dome, gravity collapse folds deformation is observed in both of the massif. Because of the comparable of architecture, kinematics and polyphase deformation, the same geodynamic was suggested in these two massifs.

Key words Dabie-Sulu collision zone, Geometry, Kinematics, Polyphase deformation

摘要 按照构造几何学特点和运动学特征我们把大别山-苏鲁造山带的分为三个构造单元:南部,中部和北部。造山带南部为一套构造堆叠体系;中部为一个混合岩穹窿,浅变质的砂岩、板岩和片岩构成了大别山-苏鲁造山带的北部构造单元。造山带南部的构造堆叠体系主要由前陆褶皱带构成:未变质的新元古代-早三叠世的沉积地层;由“宿松群”北部和苏北地区的“海州群”构成的高压变质岩石单元及含柯石英和金刚石的超高压变质岩石单元。造山带中部的混合岩穹窿由大别山地区的罗田穹窿和苏鲁地区的莱西-栖霞穹窿构成。同样大别山北部的浅变质“佛子岭-卢镇关群”和胶东地区浅变质的“蓬莱群”构成了造山带北部的构造堆叠体系。同时大别山和苏鲁两个构造地体均经历了相似的多期构造变形:沿NW-SE向矿物拉伸线理发育的上部指北的剪切变形代表着造山带主变形期的变形;早期向南逆冲的韧性剪切变形和沿中部混合岩穹窿边缘发育的重力滑脱变形体系,后者代表了混合岩穹窿形成时的垂向缩短作用。正是由于构造几何学和多期变形的可对比性决定了这两个变质地体具有相同的地球动力学背景。

关键词 大别-苏鲁碰撞造山带;构造几何学;运动学;岩石多期变形

中图法分类号 P542.2

* 国家重点基础研究发展规划(G1999075506)国家自然科学基金NSFC(40472116,40202021)的资助。

第一作者简介:林伟,男,1968年生,留法博士,构造地质学专业,E-mail:linwei@mail.igcas.ac.cn

1 引言

近年来的岩石学研究表明:在板块碰撞过程中,俯冲板块的大陆岩石圈可楔入 200~300 km 甚至更深的幔中(Ye *et al.*, 2001)。含柯石英和金刚石榴辉岩在地表岩石中的发现,表明经历了深俯冲的大陆岩板已经折返至地表(Chopin, 1984; Xu *et al.*, 1992)。在诸多造山带中,位于我国东部的秦岭-大别山造山带是晚三叠世华南和华北板块陆-陆碰撞的产物,以其含柯石英石榴辉岩的大量出露而闻名于世(Xu, 1987; Wang *et al.*, 1989)。但在大别山的东部,这个超高压变质带被郯庐断裂截断而突然消失。沿郯庐断裂北延 500 km 的苏鲁地区,超高压变质带又重新出现(图 1)。关于这个超高压变质带的岩石学研究,人们做了大量而翔实的研究工作(参见从柏林和王清晨, 1999 及其相关的参考文献)。但超高压变质带总体的构造学的研究却进展,特别是大别山和苏鲁之间的构造地质学关系一直缺乏共识(Ames *et al.*, 1993, 1996; Wallis *et al.*, 1997, 1999; Faure *et al.*, 1999, 2001, 2003a, 2003b; Hacker *et al.*, 1998, 2000; Ratschbach *et al.*, 2000, 2003)。

由于研究方法和手段的不同,不同的地质学家从各自的研究视角对大别山的大地构造背景和构造演化提出各自不同的看法。Ernst *et al.* (1991) 曾认为,大别山是位于中朝克拉通与扬子克拉通之间的微板块,在晚前寒武纪经历了超高压变质作用;在古生代扬子板块和华北板块的俯冲碰撞和二叠纪至三叠纪的陆-陆碰撞过程中逐渐折返出露地表。徐树桐等(1992, 1994)根据区域岩石学的研究,把大别山划分为五个构造单元,由北向南为:作为弧前复理石推复体的卢镇关群和佛子岭群、晓天磨子潭断裂南部的镁铁-超镁铁质带被看作变质蛇绿混杂岩带、榴辉岩相超高压变质带、扬子俯冲基底(大别群)和扬子俯冲盖层(宿松群),在此基础上又发展成为“南北八带结构”(徐树桐等, 2002)。王清晨等(Wang *et al.*, 1993; Cong *et al.*, 1994)则把大别山划分为四个岩石构造单元,即北淮阳弧后复理石带、北大别弧杂岩带、南大别碰撞杂岩带和宿松变质杂岩带;在进一步工作的基础上又在 1998 年提出了更为具体的划分方案即北淮阳弧后复理石带、北大别弧杂岩带、南大别碰撞杂岩带、宿松变质杂岩带、前陆带(王清晨等, 1998)。Okay *et al.* (1993)认为佛子岭复理石是扬子大陆被动边缘的泥盆-石炭纪沉积物。在早三叠世时,扬子大陆朝北面的中朝大陆之下俯冲,深俯冲部分形成了超高压变质岩,浅俯冲部分则形成麻粒岩。晚三叠世大别山的隆起形成了今天的构造格局,即浅变质的佛子岭复理石在北,榴辉岩带在南,中间出露的北大别为扬子基底。周建波等(2001)发展了 Okay 的看法,把北淮阳构造带作为扬子陆块俯冲过程中被刮削下来的构造加积楔,认为其未卷入大陆深俯冲。

与大别山不同,苏鲁地区超高压变质带和华北陆块基底变质岩系的界限划分及其性质始终存在重大分歧意见(Faure *et al.*, 2001, 2003b; Zhai *et al.*, 2002; 林伟等 2003b)。曹国权(1991)依据地球物理资料认为:五莲-荣成断裂是具有岩石圈深度的深大断裂,可以作为华南和华北的板块边界断裂,这种观点得到了很多学者的认同(Okay *et al.*, 1993; Yin *et al.*, 1993; Li *et al.*, 1994)。但在威海市黄泥沟原来被认为是前寒武纪胶东群的基性麻粒岩的石榴石中,王清晨等发现的柯石英的矿物包体。这个现象指示了这些麻粒岩曾经是经历了超高压变质作用的榴辉岩(Wang *et al.*, 1993)。这一发现似乎指示了板块界限应从荣成向西北继续推移。翟明国等(Zhai, *et al.*, 1998, 2000)通过对比地球化学特征、锆石年龄、Sm-Nd 内部等时线年龄、Rb-Sr 年龄和 U-Th-Pb 化学法年龄推测超高压变质带和华北陆块的界限不是简单的断裂,而是一条复杂的变质-岩浆带。该带以牟平断裂和米山断裂为界(Zhai *et al.*, 1998),由复式花岗岩体和岩脉以及不同尺度的变质岩透镜体和岩片组成,具构造混杂的特点,称之为昆崙山边界杂岩带。Wallis 等(1997, 1999)曾对苏鲁地区进行了构造地质学研究,但并未对胶北地体(莱西和栖霞地区的混合岩地体)进行深入的探讨,只是惊讶于两个地体构造的相似性。由于具有和谐的几何学特征和相同运动学特点, Faure 和林伟等人从构造解析的角度认为莱西-栖霞地区的混合岩同威海-荣成地区的混合岩是一个相同的构造地质单元,从而推断华南与华北的板块缝合界线应该位于蓬莱-威海以北(Faure *et al.*, 2001, 2003b; 林伟等 2003b)。周建波等(2002)通过对五莲群地球化学和年代学的研究认为五莲断裂北部的五莲群具有扬子板块的特点,进一步否认烟台-青岛五莲断裂是板块缝合界限的提法;唐俊等(2004)通过对栖霞和莱西地区的橄榄大理岩的年代学和地球化学的研究认为胶东地体西部(胶北地体)可能属于扬子板块,并认为其对应于扬子板块北缘新元古代裂谷岩浆侵位时裂谷肩部北翼古老围岩。

我们认为造成上述认识差异的原因是对大别山-苏鲁超高压造山带总体构造框架缺乏较为深入的解剖和对比。因此对大别山和苏鲁地区的构造地质学研究,特别是两个超高压变质地体的构造相关性研究,对于深入了解秦岭-大别-苏鲁造山带的结构十分重要。

2 大别山造山带的构造框架

大别山变质地体主体位于郯庐断裂和麻城断裂之间(图 2)。根据对大别山地质考察,按照几何学特点和运动学特征我们把大别山分为三个构造单元:南部,中部和北部。大别山南部为一套构造堆叠系统;中部为一个混合岩穹窿,作为北淮阳构造带东部主体的佛子岭群和卢镇关群构成了大别山的北部构造单元。

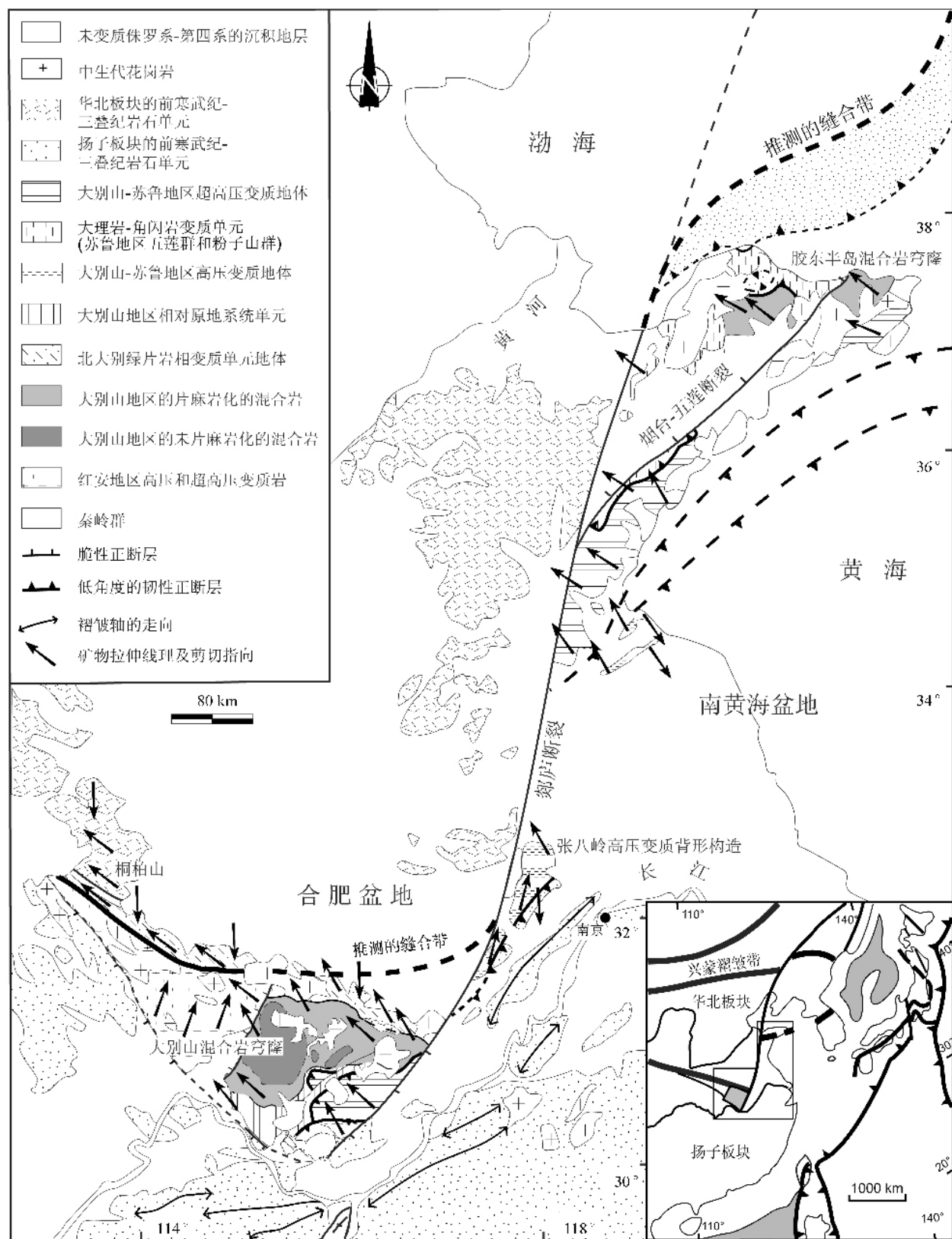


图1 中国东部的构造地质图,图中指示了大别山-苏鲁造山带地理位置

Fig. 1 Correlation map of structures between Dabieshan massif and Sulu massif.

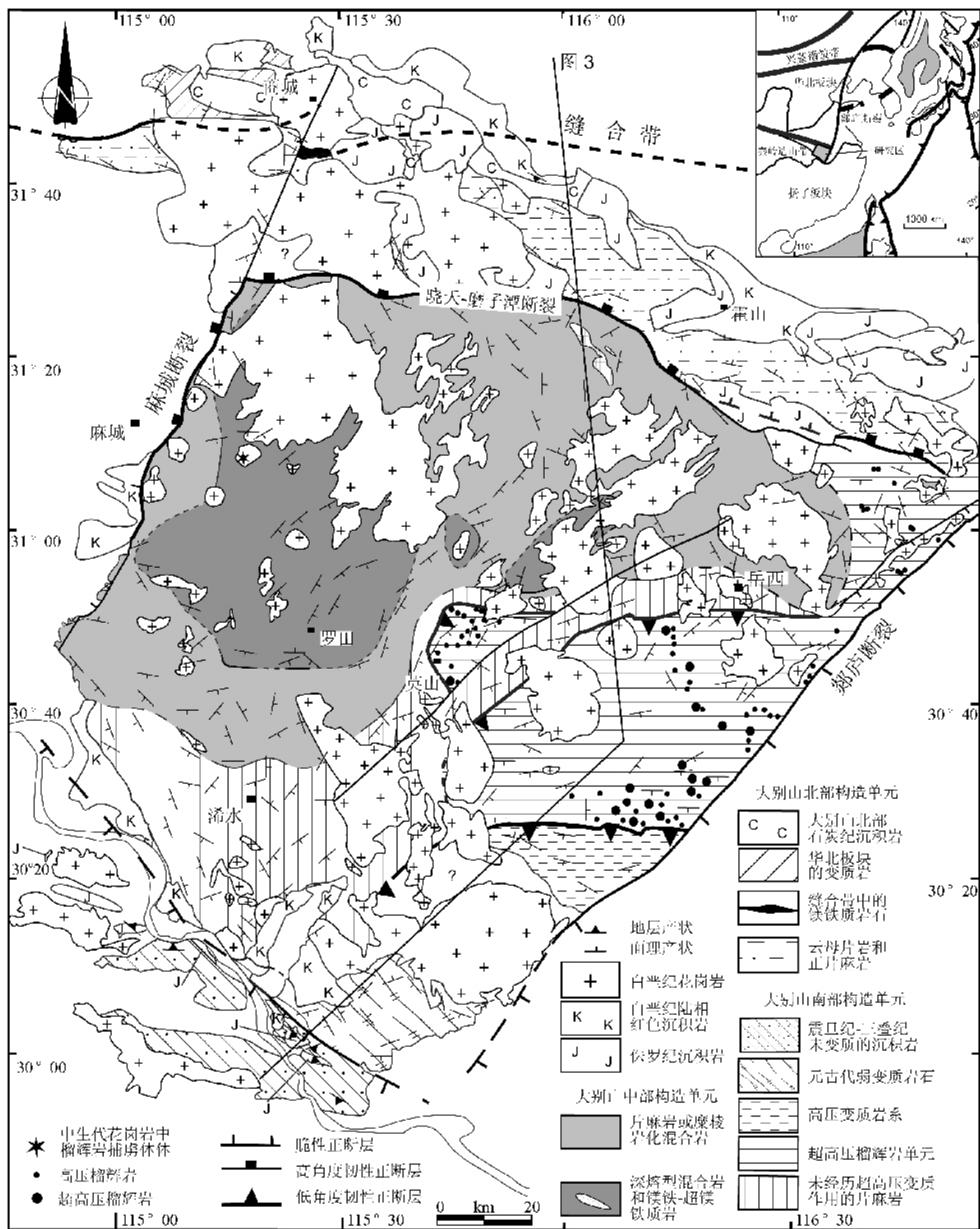


图 2 大别山构造地质图

Fig. 2 Structural map of the Dabieshan massif

2.1 大别山南部的构造堆叠系统:

从几何形态上看大别山的南部构造单元总体构成了一

个向南突出的弧形,由一套向南东-南-南西倾斜的单斜构成的堆叠系统组成(图 2)。从上到下一共由五个次级构造单元组成,它们是:

A. 最上部是由新元古代至早三叠世沉积盖层组成的前陆褶皱带。西部地区褶皱带的轴部延伸方向为北西-南东, 向东, 在黄梅地区转为近东西向, 在宿松地区转向为北东-南西方向。在湖北的南部地区可见这套褶皱岩系被白垩系的陆相沉积盆地不整合地覆盖着。

B. 在前陆褶皱带的下部是一套弱变质新元古代板岩、砂岩和火山岩, 南西倾的脆性正断层将二者分开。

C. 片麻岩、片岩、变质磷块岩及大理岩组成的变质岩系位于弱变质的新元古代岩系之下。这些岩石大多经历了绿片岩-角闪岩相变质作用。它们的原岩为扬子陆块的沉积盖层与结晶基底, 这就是通常称为的“宿松群”。由于部分岩石经历了高压(蓝片岩相)变质作用, 这个带的北带被划归高压变质带(魏春景和单振刚, 1997)。

D. 在高压低温变质岩系之下为一套片麻岩、片岩、榴辉岩、石英岩、大理岩和角闪岩, 此外还有少量超镁铁质岩和硬玉石英岩。大别山区迄今为止所发现的含微粒金刚石和柯石英的超高压变质矿物均产于此带。因此通常认为该带经历了超高压变质作用。Wang *et al.* (1992) 指出榴辉岩的变质压力和温度均有由北向南降低的趋势。榴辉岩本身叠加了退变角闪岩相的变质和变形(Wang and Cong, 1995)。

E. 最下部的构造单元由片麻岩、角闪岩和大理岩组成, 这个构造单元经历了角闪岩相的变质作用, 但其从未经历高压或超高压的变质作用。我们称之为(相对的)原地系统(autochthon unit)。

所有这些构造单元均受到白垩纪花岗岩的侵入, 侏罗纪-白垩纪陆相盆地广泛地分布在大别山南北两侧。

2.2 大别山中部的热穹隆改造系统

这个构造单元通常被认为是一套“弧杂岩带”(Wang *et al.* 1999), 或被称为“北大别正片麻岩单元”(NOU)(Harker *et al.* 1998), 根据野外观察, 这个构造单元主体由混合岩组成, 它构成了大别山中部规模可达 100km² 的混合岩穹隆(图 2, 3)。穹隆大致以罗田为中心, 包裹有一些超镁铁质(镁铁质岩块及麻粒岩岩块)。现今大别山的构造几何形态几乎完全由其所控制。总体上大别山中部的混合岩穹隆还包括一些英云闪长岩和花岗闪长岩。我们曾提出大别山中部的混合岩穹隆是由大别南部的高压-超高压构造单元和“原地系统”单元(autochthon unit)经历了混合岩化作用发展而成的(Faure *et al.*, 1999, 2003a)。近年来在混合岩穹隆中发现的榴辉岩证实了我们的观点(刘贻灿等, 2003; Xiao *et al.* 2001)。

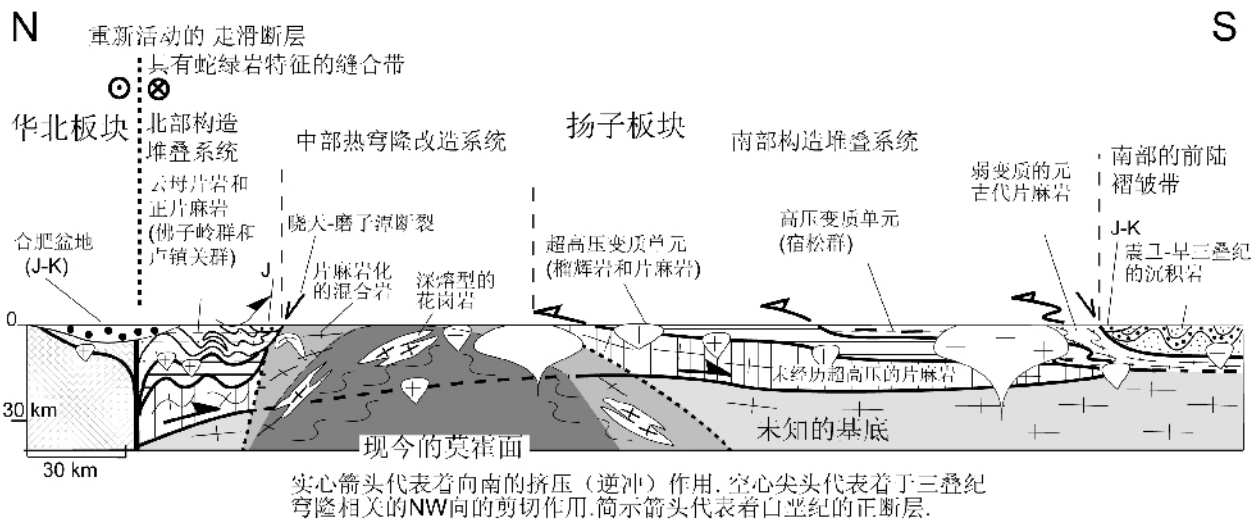


图 3 大别变质地体动力学模式构造剖面示意图(依据 Faure *et al.*, 2003a 修改)

Fig. 3 Crustal scales cross-section of Dabie Shan massif (Modified from Faure *et al.*, 2003a)

依据野外的面理的测量结果, 罗田穹隆实际上是一个不对称的穹隆, 它的东南翼要比西北翼延伸得更广(图 2)。沿着穹隆的边界, 大部分混合岩经历了后期的韧性变形, 具明显的面理和矿物拉伸线理; 但在混合岩核部, 这种面理化的现象并不显著, 所以按照其变形情况进而把混合岩进一步划分为片麻岩化的混合岩(gneissic migmatite)和非片麻岩化的混合岩两个次级单元(图 2)。从核部向边缘, 混合岩的片理

化表现为渐变关系, 从混合岩到面理化的混合岩再到糜棱岩化甚至超糜棱岩化的混合岩; 在穹隆的北、东地区这种梯度变化尤为明显。如果我们从晓天-磨子潭断裂向南, 糜棱岩化的混合岩逐渐被片麻岩化的混合岩所替代, 靠近穹隆的核部地区, 代表区域性的韧性变形在这里消失, 取而代之的是混合岩的淡色体中的并不十分连续的暗色条带或者是一些镁铁质的集合体和深融花岗岩。

2.3 缝合带和大别北部的构造堆叠系统

从区域上看,由于缺少缝合带特征及组成,晓天-磨子潭断裂并不是华南(SCB)和华北(NCB)的缝合线(Hacker et al., 1998; Faure et al., 1999, 2003a)。在晓天-磨子潭断裂的北部,佛子岭群由浅变质的砂岩、泥质岩、云母片岩和千枚岩组成,其中夹石英岩和大理岩。此带岩石大多数经历了绿片岩相变质作用,只有出露于卢镇关附近的一些正片麻岩经历了角闪岩相变质作用,那里从未发现过高压变质作用的痕迹(王清晨等, 1998; 图2)。

在商城南部我们观察到变质的辉长岩、角闪岩、硅质岩、镁铁质的变杂砂岩(硬砂岩)及整体为一套复理石或类复理石沉积的砂岩。这些岩性组合反映了一种活动大陆边缘特征。该带的西延被解释为华南板块同华北板块的缝合界限(Harker et al., 1998, Faure et al., 1999, 2003a),并在桐柏山地区发现有枕状熔岩。该带的近一步西延为东秦岭的二郎坪的蛇绿混杂岩带(张仁杰和陈孝红, 1998)。由于在河南省南召地区该带被晚三叠世的陆相沉积岩不整合所覆盖,所以该带的时代为晚三叠世之前。该带东延部分被中生代

的花岗岩所破坏并向东倾覆于合肥盆地之下(图1)。

我们对大别山构造几何形态的总体认识标识于图4中,从大别山的构造地质图(图2)可以看出:大别山中部的罗田混合岩穹隆形态十分清晰,大别山其他构造单元的几何形态均受其影响(图3)并均围绕罗田穹隆展开。

3 大别山造山带多期变形及其运动学分析

大别造山带经历了复杂的构造作用,具有多期构造变形的特点。

3.1 大别造山带的主变形期

大别山地区最鲜明的构造地质学特征是广泛发育的北西-南东向的矿物拉伸线理,无论是在变质砂岩、板岩、大理岩、千枚岩还是在片麻岩、角闪岩和榴辉岩均可观察到十分清晰而稳定NW-SE走向。因此我们称这期变形为主变形期(图4)。图4R为我们五年来在大别山野外工作时统计的783个测量结果,其最大的延伸方向为144.3°。

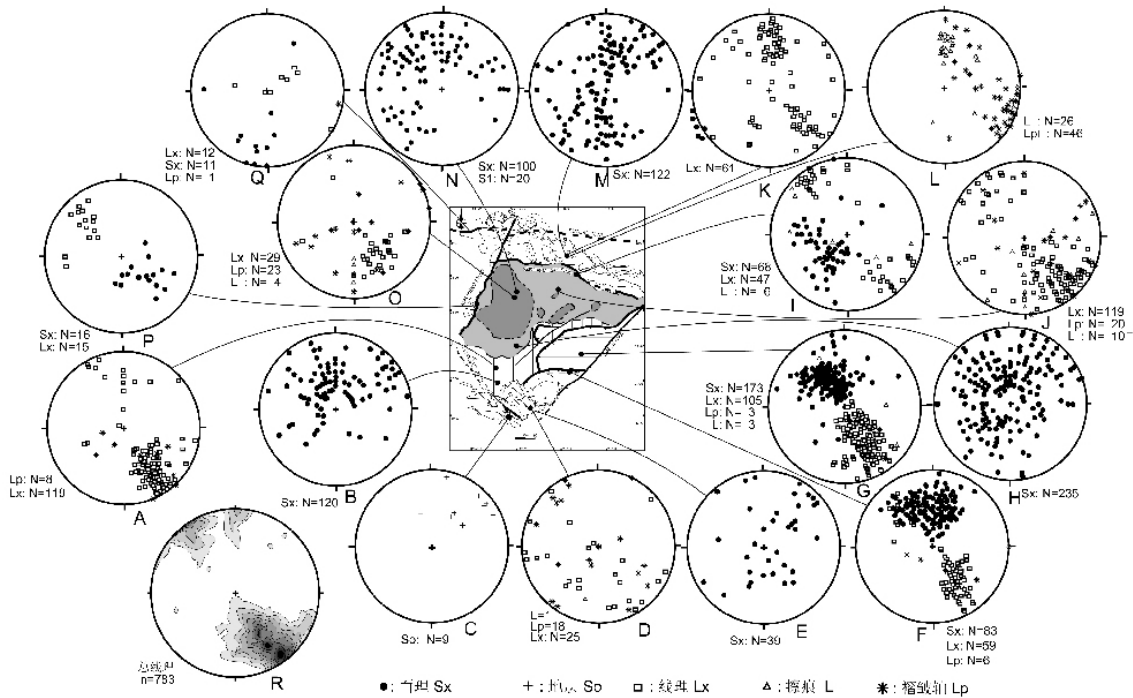


图4 大别山的构造要素图(所有的构造图解均为施密特网下半球投影)

Fig. 4 Structural analysis of the planar and linear elements in the Dabieshan massif

(All diagrams are equiareal Schmidt net, lower hemisphere)

主变形期变形所产生区域性的面理构成了大别山变质地体几何形态的主体。定向的角闪石、帘石、云母构成稳定面理表明了这些同变形期生长的矿物形成于角闪岩相的变质作用。沿矿物拉伸线理,剪切条带(shear band)、石英透镜

体、不对称的压力影、“σ”和“δ”状的旋转残斑系和石英C轴优选定向结果等等(图5),几乎其所有的运动学特征均指示了上部向北西的剪切变形(图6)。结合大别山的构造演化过程,我们认为,这期角闪岩相的变形发生在俯冲板片经

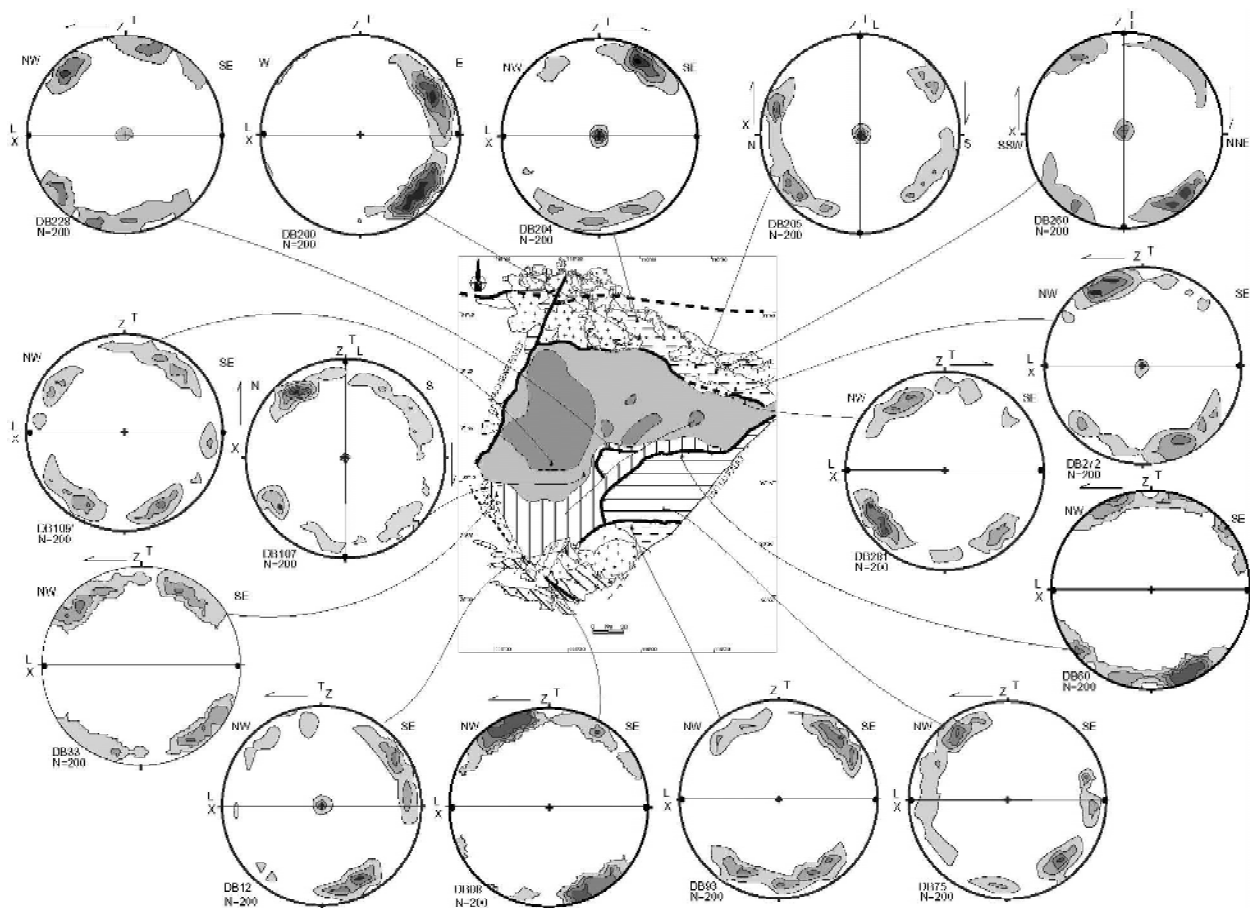


图5 石英C轴的优势定向(施密特网,下半球投影)

Fig.5 Examples of quartz c axis lattice preferred orientation(Schmidt net , lower hemisphere)

历了超高压和混合岩化变质作用之后的变形。剪切作用同样影响到了混合岩穹隆的边缘,并使其片麻岩化。片麻岩化的混合岩是大别山变质地体折返时所形成的,就象所有的不对称的伸展穹隆一样,在从中下地壳折返的过程中,上部的拆离断面发生弯曲从而形成穹隆形状。正如许多变质核杂岩体所描述的一样(Lister and Davis , 1989), 由于断层下盘的折返-隆升作用使拆离正断层的断层面逐渐变得十分平坦, 构成一个完整形态的变质核杂岩体。从运动学上看, 上部向北西的剪切变形指示了变形是由北倾的晓天-磨子潭断裂和北西倾的麻城断裂所控制, 所以在大别山穹隆发育过程中这两个断裂为拆离正断层。前面所提到的大别南部、北部的构造堆叠系统就是由于这种折返-隆升作用所引起重力滑脱造成的(图5)。

对于主变形期的绝对年龄现在存有较大的争议, 一种观点认为其为白垩纪的变形(Hacker *et al.* , 1998 ; Web , *et al.* , 1999) 原因是大别山中部大量的同位素年龄为这一时期, 同时糜棱岩化的白垩纪花岗岩具有同主变形期相似的几何学和运动学特点。基于大别山中部片麻岩同南部榴辉岩带和北部的北淮阳构造带的线理及运动学指向相同, 而后的同

位素年代学所给出的变形年龄为晚三叠世(218.5 ± 1.8 Ma , Hacker *et al.* , 1998 ; Li *et al.* , 2004) , Faure 等人(1999 , 2003a) 认为主变形期发生在晚三叠世。

3.2 与穹隆相关的重力滑落变形

在大别山, 大部分区域分布的面理均发生了褶皱变形, 如果除去与混合岩化作用相关的无根褶皱和与伸展作用相关的同斜褶皱的影响, 我们会发现, 这些褶皱均为垂向压缩的重力滑落褶皱。其特点是在露头尺度上轴面近水平或背向大别山中部穹隆的核部向外倾斜。在大别山南部新元古代的千枚岩和南大别的片麻岩中, 向S或SW倾的重力牵引褶皱使面理和NW-SE相的线理发生变形。同样的现象还可以在HP、UHP和“原地系统”中观察到, 它代表大别山片麻岩上部的新元古代、古生代和中生代的沉积序列向周缘, 由于重力作用滑动时产生的变形。在大别山北部的佛子岭群中同样可以观测到具有上盘向N-NE重力滑落引起的变质期后牵引褶皱。这种由于重力作用所引起的牵引褶皱不仅在大别山地区可以见到, 在大别山南部的前陆地区也可以观察到(Faure *et al.* , 1998 ; Lin *et al.* , 2000 ; Lin *et al.* , 2001)。

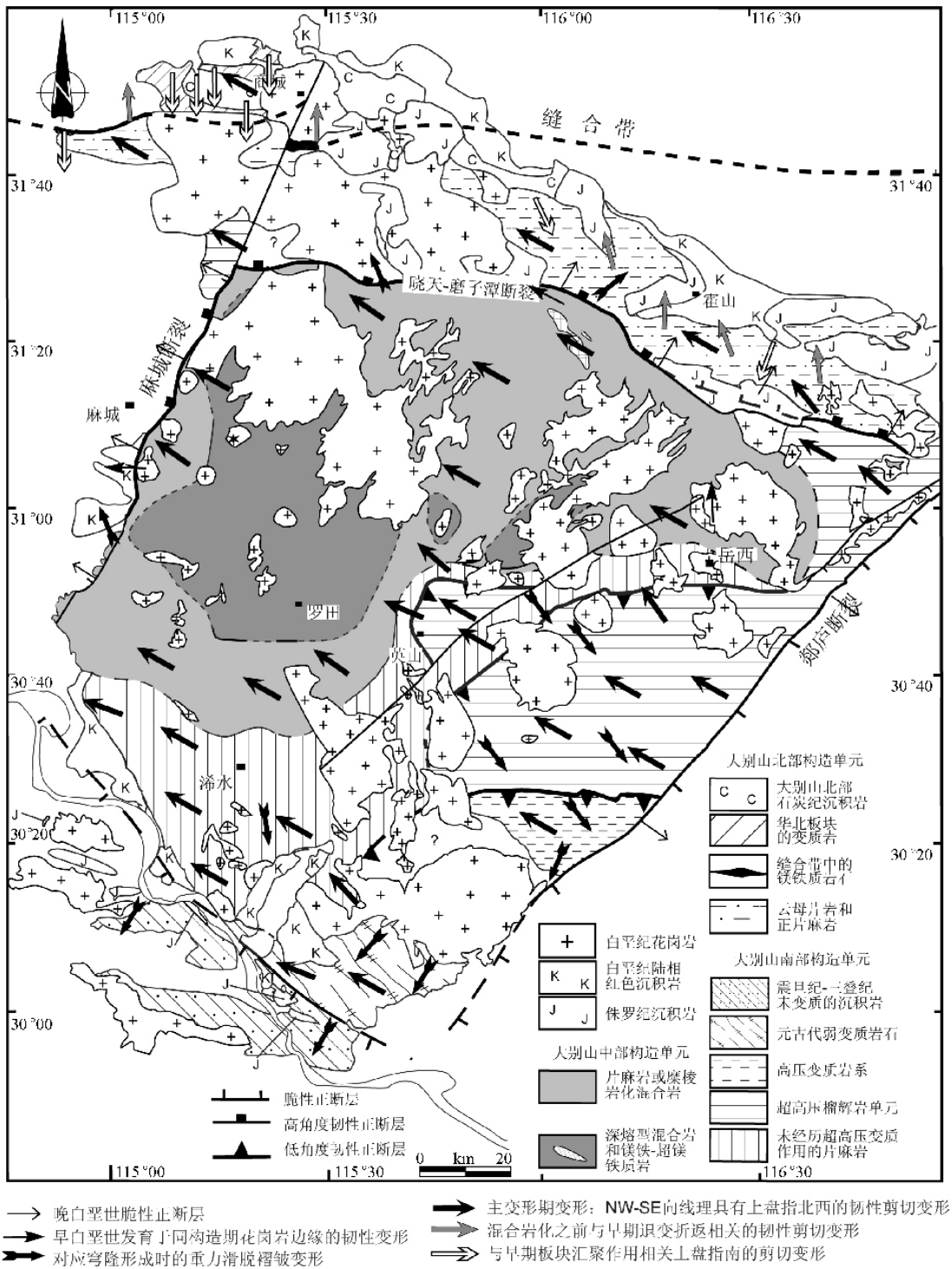


图6 大别山构造事件的运动学图解. 箭头的方向代表着剪切运动的上部指向

Fig. 6 Kinematic map for the different tectonic events in the Dabie Shan massif.

Arrows point to the sense of shear of the upper part.

重力滑脱变形对应于变质穹隆形成时的垂向缩短,其变形时间应在穹隆形成的同期或稍后。

3.3 早期的构造折返

正如我们前面所提到的,在大别山北部卢镇关附近的正

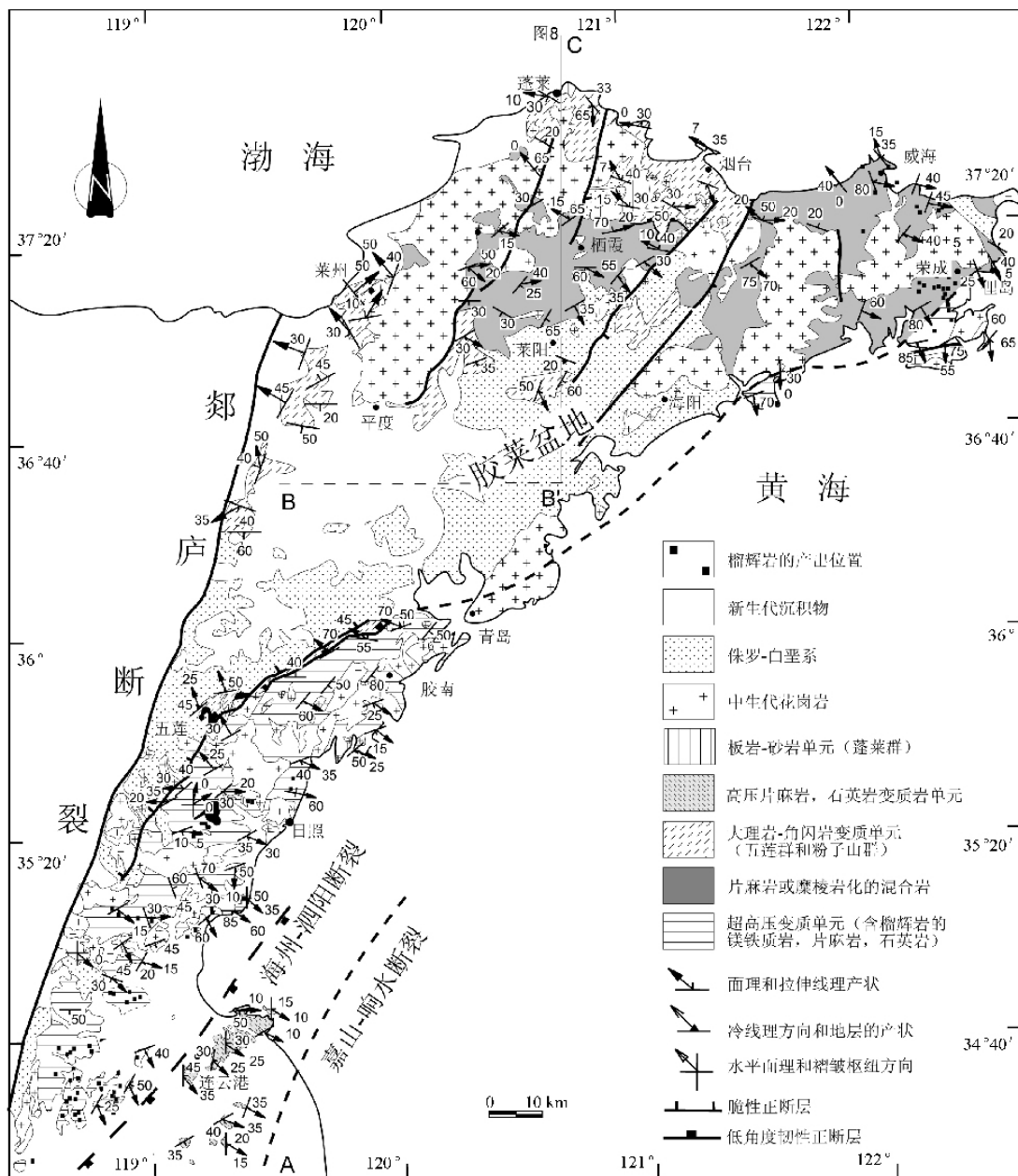


图7 苏鲁变质地体构造地质图

Fig.7 Structural map of the Sulu massif

片麻岩中具有近 N-S 向的矿物拉伸线理(图 2),沿着这些矿物拉伸线理具有上部向北的运动剪切特点(图 6)。这种剪切变形在大别山其他地区并不多见,相近的运动学特征(指上部分别向 N 和 NE)代表了主变形期之前较早一期的伸展变形,即沿 N~S 向构造折返。推测在混合岩化之前大别山造山带就存在一期广泛的角闪岩相的变质作用,代表超高压变质岩石折返至地壳深度。这期折返作用在大别山中部和南部由于混合岩化作用和主变形期折返作用的强烈叠加,使我们很难在这两个地区观察到。在大别山北部构造单元,

由于这两期变形影响较弱使得早期折返证据得以保留下来(林伟等 2005)。我们曾对这期变形进行⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学的测定,但遗憾的是由于后期早白垩世花岗岩侵入体破坏了矿物 K~Ar 的同位素温度的封闭体系,置换了早期的年龄,使角闪石没有给出稳定的年代学结果(林伟等 2005)。

3.4 早期板块会聚的变形痕迹

同样具有 N~S 向矿物拉伸线理,但在大别山北部北淮阳构造带的一些地区,其运动学特征是上部指南剪切变形

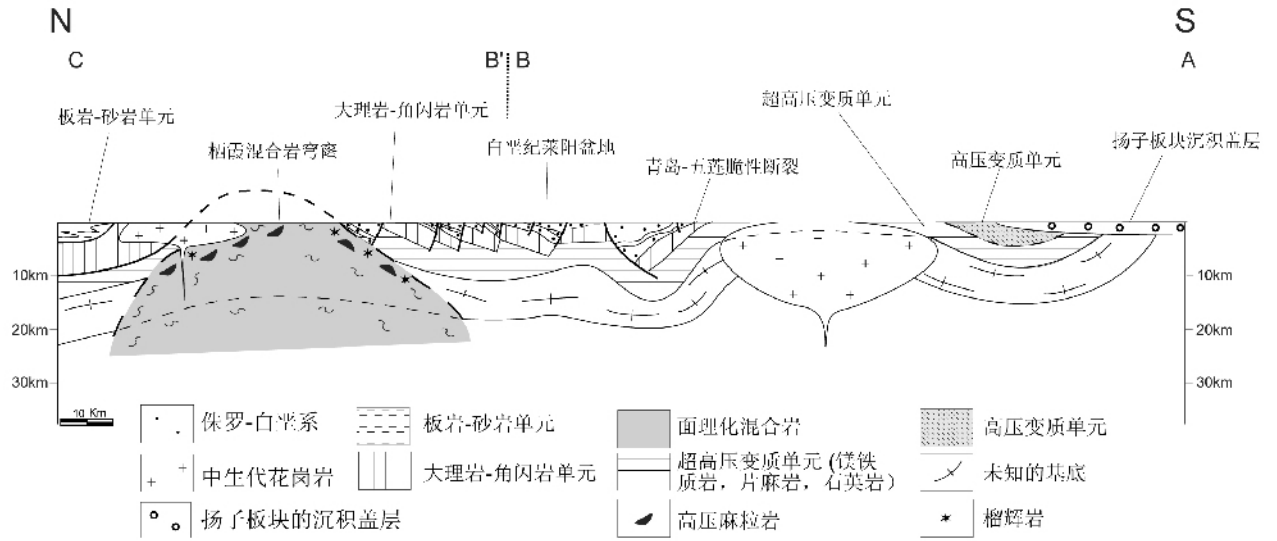


图 8 苏鲁变质地体的超地壳剖面(位置见图 7)(盆地部分构造解释依据地震剖面,详细的正断层在图 7 中被省略)

Fig. 8 Crustal scales schematic cross sections through the Sulu Massif (The part of basin was explained by profile seismic and the normal fault was neglected in the Fig. 7)

(图 6)。截然相反的运动学方向使我们认为其代表早期板块聚合时的挤压变形-即构成北淮阳构造带的变质杂岩体向南逆冲和推覆体的堆叠作用。同样这期变形大部分被后期代表主变形期的折返变形所改造,在野外很难识别。商城北部的石炭系弱变质粉砂岩由于没有卷入主变形期,这期变形表现得相对明显,发育的劈理和砂岩透镜体指示了这期变形作用(图 6)。白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学所给出的(259 ± 5) Ma 和(262 ± 5) Ma 和谐的坪年龄和等时年龄,指示了早期板块聚合的时代(林伟等 2005)。

4 苏鲁造山带的构造框架

4.1 苏鲁变质地体各构造单元的划分及其几何学特征

苏鲁变质地体(Sulu massif)的各个变质岩石单元均被侏罗纪-白垩纪的火山岩和沉积岩所覆盖,并被白垩纪岩浆岩侵入(图 7)。地表构造通常表现为 NE-SW 走向的脆性正断层和晚期左行的脆性断层(山东省地质矿产局,1991)。在这些断裂中,米山断裂和五莲断裂分隔了片麻岩、大理岩、角闪岩和混合岩所构成的胶北地体(block)和具高压-超高压变质岩石出露的苏鲁变质带,因而,通常被认为是华南板块和华北板块的缝合带(曹国权,1990;王清晨等,1992;Okay et al.,1993;Yin and Nie,1993;Li et al.,1994;Cong,1996;Hacker et al.,1998;Gilder et al.,1999;翟明国等,1999;索书田等,2000)。通过对野外的构造学研究并结合前人的研究成果(山东省地质矿产局,1991;王清晨等,1992;翟明国等,1999,2000)并依据岩石的变质相、变形特征,我们将白垩纪沉积前的韧性变形单元从构造层位上所表现的几何关

系,空间几何位置由上至下可以分为以下几个构造单元(图 7,8):

4.1.1 板岩-砂岩单元

从岩石学上,这个构造单元主体由“蓬莱群”组成(山东省地质矿产局,1991),它构成了苏鲁变质地体(Sulu massif)构造堆叠体系的最上部。未变质-弱变质的蓬莱群仅出露于胶东半岛北部的蓬莱市附近及其北部的一系列岛屿中(图 7)。这套经历了一系列褶皱的岩石通常被认为是上元古界和古生代的地层(杨志坚,1989;纪壮义等,1992;朱光,1993),在山东省 1:500,000 地质图上(山东省地质矿产局,1991),这套地层不整合覆盖在下部的变质岩石之上。通过野外冷擦痕和地层的褶皱方式的分析后,我们认为两者之间被向北滑落的拆离正断层(surface of detachment normal fault)所分割(图 7)。

4.1.2 大理岩-角闪岩单元

由“五莲群”和“粉子山群/荆山群”组成。虽然这套变质岩系在中生代的胶莱盆地的南北被山东省地质矿产局(1991)赋予了不同的名称(北部称粉子山群,南部称五莲群),但其均为大理岩、镁铁质岩的侵入体夹少量的片麻岩和变质泥岩构成了这个大理岩-角闪岩单元(图 7)。在胶东半岛的北部,蓬莱群以拆离断层的形式与这套变质岩系(粉子山群)相接触,其上的高压(蓝片岩相)片麻岩-石英岩单元(海州群)由于构造作用而缺失(图 8)。大理岩中广泛发育有白云母、矽线石和橄榄石。尽管这个构造单元做了大量的岩石学工作,但从未见发现榴辉岩相变质作用的报道,我们认为该构造单元可能并未经历过超高压的变质作用。胶南地区发育大规模的糜棱岩和超糜棱岩使我们推测 1~2 km 的糜棱岩化带把它与下伏的超高压变质单元隔离开来

(图8)。

4.1.3 高压(蓝片岩相)片麻岩-石英岩单元

即所谓的“海州群”,作为苏鲁地体构造堆叠体最南部,这套变质岩系分布于江苏的连云港地区,海边出露最好(图7)。岩性为正片麻岩、副片麻岩和石英岩,其中所发现的高压矿物,如蓝闪石、硬玉、蓝晶石和多硅白云母等(Cong *et al.*, 1996)指示了该变质单元经历了高压变质作用。因第四系覆盖,它同其北部的超高压单元的关系很难从地表辨别出来,地球物理数据证实,二者被海州-泗阳断裂所隔断(Cong *et al.*, 1996; 杨文采等, 1999a, 1999b)(图8)。

4.1.4 超高压变质单元

即通常所称之的“胶南群”或“东海群”。该单元位于大理岩-角闪岩单元之下(图7),由正片麻岩、副片麻岩、石英岩、大理岩和大量的镁铁质岩和超镁铁质岩块体组成。由于该单元大规模发育有含柯石英的榴辉岩而被认为经历了超高压的变质作用(Enami and Zang, 1990; Yang *et al.*, 1993)。由五莲到青岛,从该超高压变质单元的面理组合上看,该单元构成一个完整的NE-SW向的背斜(图7)。近期的研究表明榴辉岩的围岩与榴辉岩体一样也经历了超高压的变质作用(Ye *et al.*, 2000)。这些榴辉岩并不代表着大洋板块的深俯冲,而是玄武岩脉和辉绿岩脉即辉长岩、辉石岩的堆晶体侵入到陆壳,并一同俯冲经历了超高压变质作用(王清晨和柏林, 1998)。胶南地区的超镁铁质岩石并不代表着深俯冲的大洋残片,而是像大别山一样,该堆晶体代表着华南板块元古代陆内玄武岩,或至少部分是大陆地壳的橄榄岩构成的堆晶体(Yang and Jahn, 2000)。苏鲁地区的一些橄榄岩岩体,也同样代表了“消减带之上的地幔”(Yang *et al.*, 1993)或“残留的地幔”(Zhang *et al.*, 1994)。Chavagnac & Jahn (1996)认为胶东日照地区的超镁铁质岩是由于构造过程中,侵入地壳的大陆岩石圈地幔俘虏体。

4.1.5 片理化的混合岩单元

该单元主体出露于胶东半岛中生代胶莱盆地的北部莱西-栖霞地区和东部的威海地区(图7),主要由片麻岩构成,它具有典型的混合岩特点,在野外可以很容易地观察到如:雾状结构,淡色体的肠状结构和斑状的钾长石。这种混合岩通常被认为是华南或华北的基底(山东省地质矿产局, 1991; 湖北省地质矿产局, 1990)。在胶东半岛东部的威海地区同样发育有混合岩,正如前面我们所提到的,这些混合岩的角闪岩团块中残存有高压麻粒岩和含柯石英的榴辉岩(Wang *et al.*, 1993)指示了该高压麻粒岩为榴辉岩的退变质产物,所以从逻辑上分析很容易把其认为是华南板块的一部分,但是无论是从岩石学还是构造学(structural geology)它同西部的莱西-栖霞地区(胶北地体)的混合岩很难区分开来,它们一同构成了胶北-苏鲁地体北部的混合岩穹隆(图7)。象大别山中部变质单元一样,我们认为胶北地体东部的超高压变质岩叠加了混合岩化作用的结果,该区大部分混合岩发生了构造变形,表现出明显的面理和线理组构(图7)。

4.2 苏鲁变质地体的构造几何学分析

中生代以来的构造叠加作用使苏鲁变质地体构造复杂化。在胶东半岛,中部的胶莱盆地将混合岩穹隆分成东西两部份,同时造山后和早白垩世花岗岩分别侵入到两侧的混合岩之中(图7)。在胶东半岛的中部,胶莱盆地同样将大理岩-角闪岩单元(五莲群和粉子山群)及北部莱西-栖霞地区的混合岩穹隆和胶南地区的高压-超高压变质单元分隔开。早白垩世花岗岩的侵入使胶南地区高压-超高压变质单元形成一个不对称的背斜构造(图8, 9A)。若剔除侏罗-白垩纪后期影响,则苏鲁变质地体形成一个与大别山地区可以对比的完整的混合岩伸展穹隆构造(图7, 8):以莱西-栖霞为中心的混合岩穹隆周围上覆着大理岩-角闪岩单元(五莲群和粉子山群)和浅变质盖层(蓬莱群);高压-超高压变质单元构成一个不对称的背斜: NW翼狭窄而陡立, SE翼宽缓,含柯石英的榴辉岩作为野外剥露最深的岩性层位于背斜的核部(图8),同时线理的极值方向为NW-SE(图9B)。超高压变质单元南部的高压片麻岩-石英岩单元总体构成一个SE倾的单斜,具有稳定的NW向的矿物拉伸线理(图9C)。在胶东半岛的北部,以莱西-栖霞为中心构成一个片麻岩化的混合岩穹隆,大理岩-角闪岩单元和板岩-砂岩单元构成穹隆的上覆部分;胶东半岛北部片理化的混合岩单元面理的统计结果表明,该构造单元为一个完整的穹隆形态,面理中发育的矿物拉伸线理和同斜褶皱轴的极值方向也为NW-SE(图9J, K)。板岩-砂岩单元构成一个北或北东倾单斜构造,线理指示NW-SE向的运动学方向(图9I)。穹隆的核部为片麻岩化的混合岩,面理的分析可以看出穹隆的SE翼要比NW翼发育的多(图9H),本区线理表现出很好的一致性,褶皱轴的发育也表现出与穹隆形态和谐的特征(图7)。威海-荣成地区经历了麻粒岩相变质作用的退变榴辉岩地区,其面理和线理的表现与莱西-栖霞地区一致(图9D, E)。

5 苏鲁造山带多期构造变形及运动学分析

野外调查使我们认识到在白垩纪花岗岩侵入和早白垩世胶莱盆地形成之前苏鲁变质地体经历了多期的构造变形事件。

5.1 苏鲁变质地体的主变形期

除了白垩纪的花岗岩,苏鲁变质地体由强烈变形的变质岩构成,其显著的特点是强烈定向于NW-SE的矿物拉伸线理和同斜褶皱(图9L)。在一些地区,由于后期褶皱的改造作用,这些线理的方向表现不是十分稳定(图7),而转变成近E-W向或N50E的方向(图9J),但总体上这组线理在各类不同变质相的岩石中均有表现(图9B, C, D, G, I, J)。在超高压变质单元和大理岩-角闪岩单元之间片麻理由于动力变

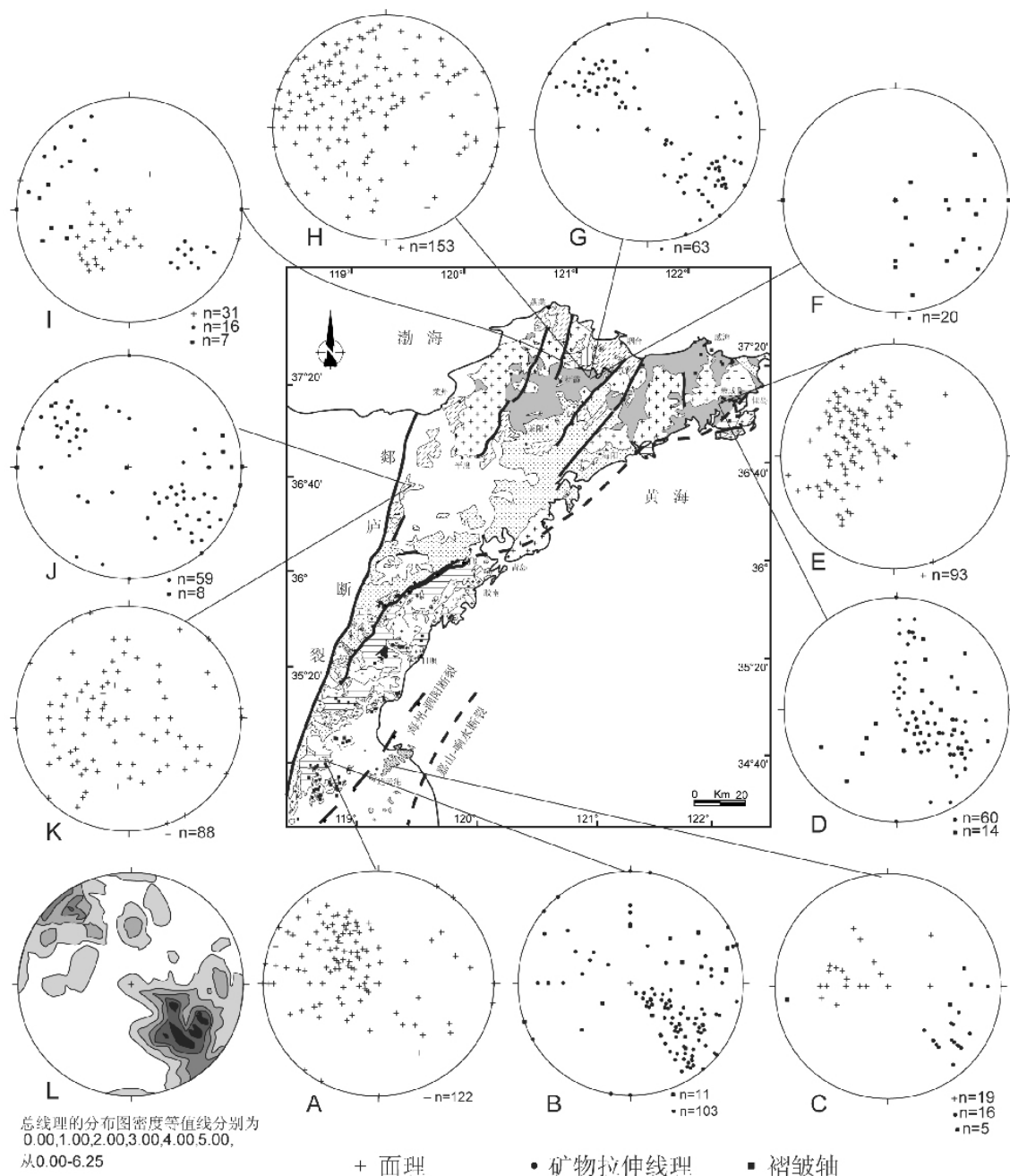


图9 苏鲁变质体各构造要素的赤平投影图(施密特网下半球投影)

Fig.9 Structural analysis of the planar and linear elements in the Sulu massif (All diagrams are equiareal Schmidt net, lower hemisphere)

质作用形成的糜棱岩和超糜棱岩组构,表现出了具有上部向NW的剪切变形特点(图10 SL72)。在长英质的岩石中,矿物线理表现为石英的定向分布和钾长石聚集体的线形分布。在大理岩-角闪岩单元中的大理岩和镁铁质岩石中,线理通常表现为方解石、白云石、透闪石、橄榄石、角闪石和绿帘石晶体的拉伸和定向。

由σ或δ所形成的残斑系、石英和方解石所形成的压力影指示了上盘向NW的剪切变形,这种剪切变形可以在各个

构造单元中见到(图11)。在高应变区,如糜棱岩化带和岩性突变带(如:变基性岩和片麻岩的接触带)还可以见到强烈的剪切褶皱。我们通过X荧光晶体反射测角仪(Goniometer)测得了石英晶格优选定向方向(LPO)。石英组构中<10 14 >轴(近似于C轴,但有17°的差异)和<10 20 >的测量结果与宏观(野外剖面)和微观(显微镜下观察)运动学指向特征相一致(图11)。这些石英晶格优选定向方向为我们提供了非常有效的变形信息:SL70和SL58所显示的

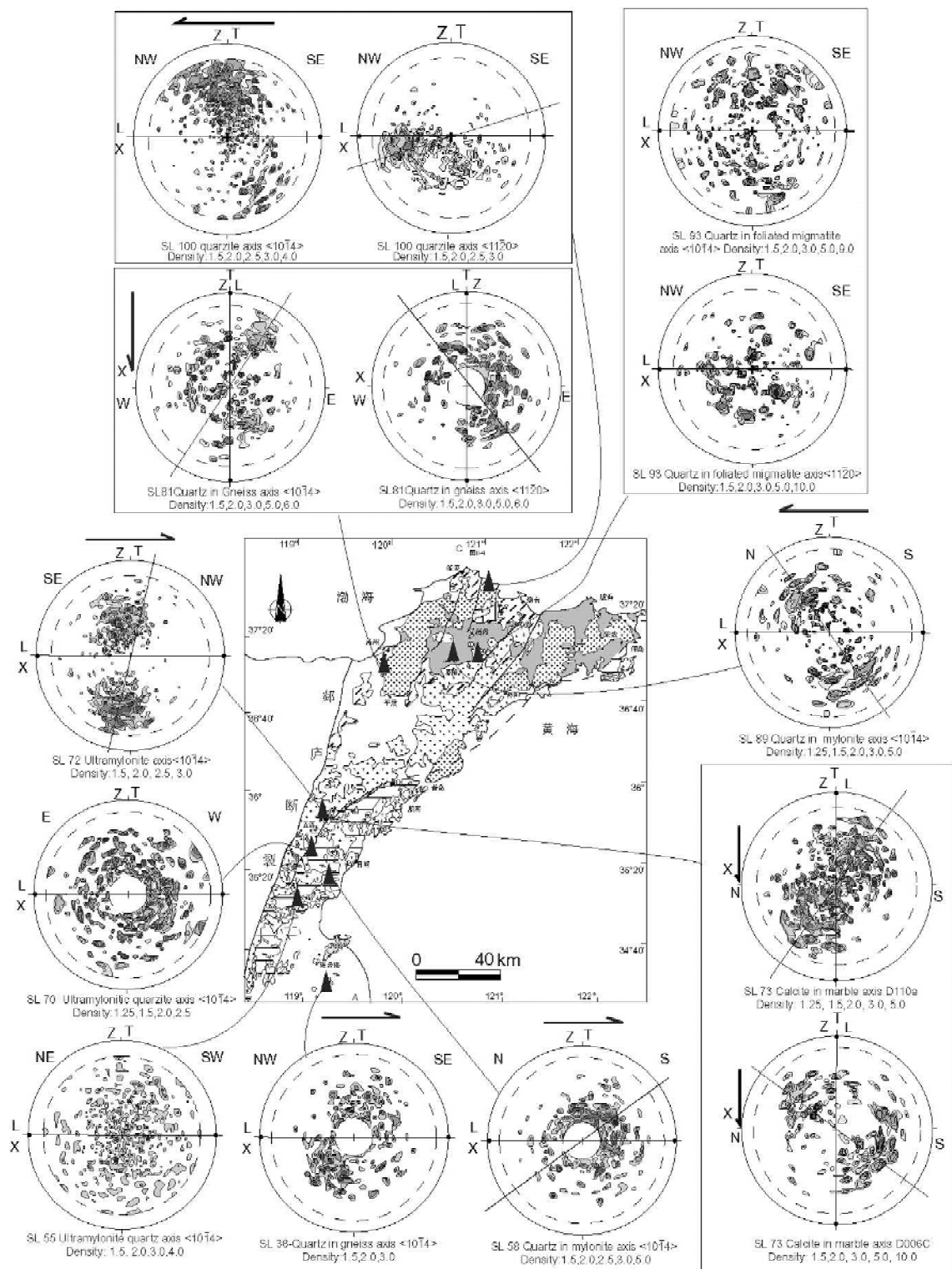


图 10 X 射线晶体衍射石英和方解石的晶格的优势定向(施密特网下半球投影)

Fig. 10 Examples of quartz lattice preferred orientation obtained by texture goniometry (Schmidt net, lower hemisphere)

石英 $\langle c \rangle$ 轴的极值靠近赤平投影图解的中心, SL 100 和 SL 72 所显示的石英 $\langle c \rangle$ 轴的极值靠近赤平投影图解的边缘(图 10), 它们分别代表着底面和柱面滑移系。就象苏鲁超

高压变质体中破碎的石榴子石和布丁状产出的绿辉石所显示的那样, 榴辉岩相矿物的变形是发生在它们结晶之后, 无论是野外露头还是手标本亦或是岩石薄片, 几乎所有的运

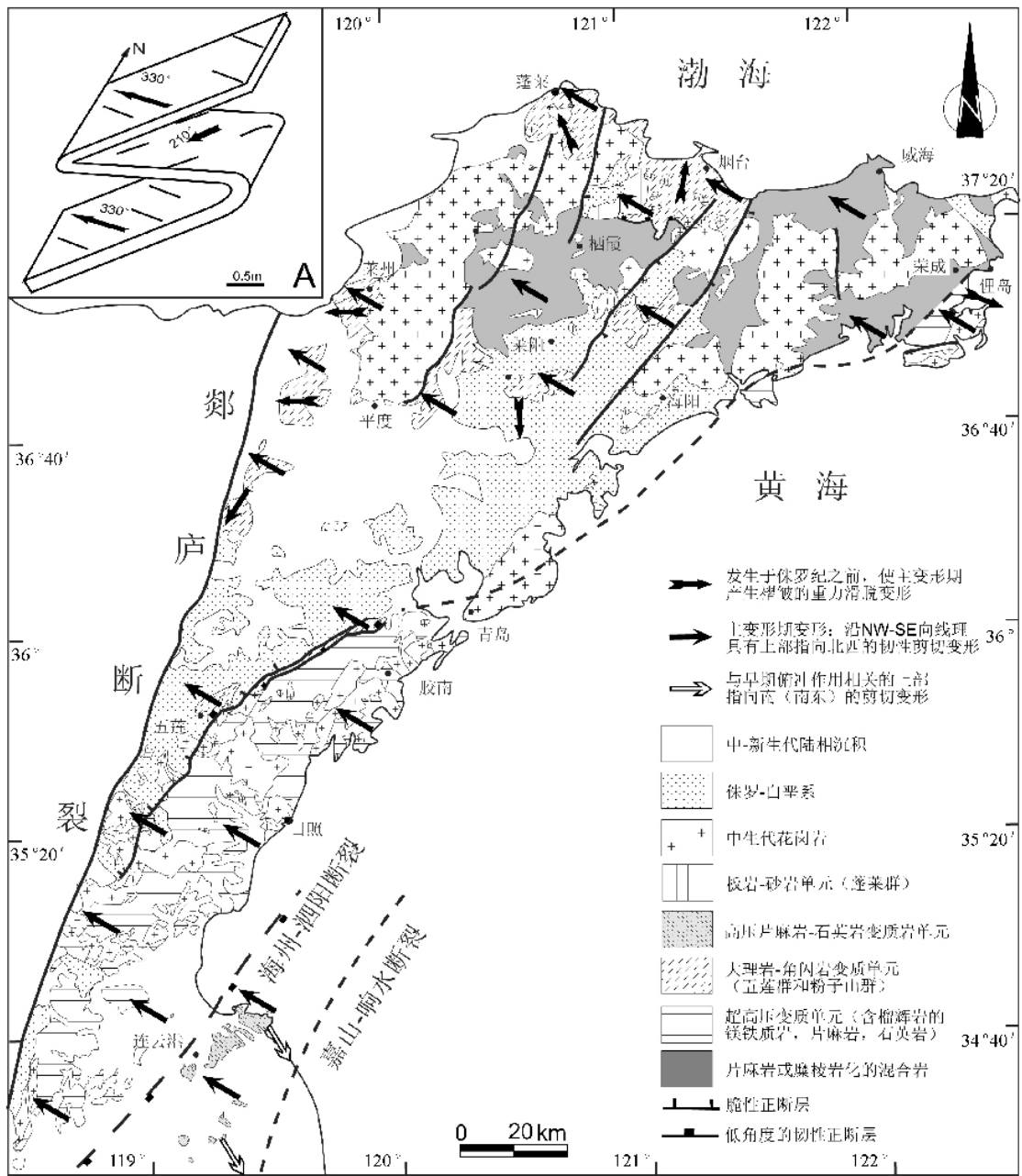


图 11 白垩纪之前发生的不同构造事件的运动学图解(箭头的方向代表着剪切运动的上部指向。图 A: 简示栖霞穹隆的部由于重力引起的牵引褶皱改变了早期线理和运动学方向的几何图解)

Fig. 11 Kinematic map for the different tectonic Pre-Cretaceous events in Sulu-Laixi massif (Arrows point to the sense of shear of the upper part. Fig. A Interpretative diagram showing how secondary folding of the foliation and lineation may produce locally apparent top-to-the-SW shearing)

动力学指示都表明了与超高压相关的岩石组合退变到角闪岩相的变质作用。所以上述的这些变形均为超高压岩板折返时变形的结果。

与大别山变质地体相比, 苏鲁变质地体的主变形期的绝对年龄似乎争议较少。与主变形期相关的榴辉岩岩板退变折返年龄在 240 ~ 200 Ma 之间 (Ames *et al.*, 1993; Li, 1994; Cong *et al.*, 1996; Yang and Jahn, 2000; Liu *et al.*, 2004;

Faure *et al.*, 2003b; Yang *et al.*, 2003), 这同大别山南部高压-超高压变质单元所得到的绝对年龄相吻合。不同之处在于, 苏鲁地区中生代构造热事件的影响较弱, 只有少数造山后期岩体附近的黑云母、白云母、角闪石和钾长石样品给出了中生代的年龄 (陈文寄等, 1992; Faure *et al.*, 2003b; 和本文集中郭敬辉等的文章)。

除了上述变形外, 我们在江苏的连云港地区的高压片麻

岩-石英岩单元中还识别出早期的变形,无论在野外还是在薄片上它都表现出上部指向 SE 的剪切运动学特征(图 10-SL38,图 11)。这些变形和苏鲁南部的张八岭变质地体极为相似,我们推断它代表了早期板块会聚阶段的变形(Lin *et al.*, 2005)。由于缺乏同位素年代学的资料 and 结果,这期变形的时间还未知,通过大别山和张八岭地区的研究结果,它应该在晚二叠世-早三叠世之间(Lin *et al.*, 2005; 林伟等 2005)。

5.2 与穹隆相关的重力滑落变形

在莱西-栖霞混合岩穹隆的西缘发育有 NE-SW 向的线理(图 7),它展示了上部向 SW 的剪切变形,这种不寻常的运动学方式使我们认识到多期变形的存在。在穹隆的西部, N-S 走向的褶皱使面理西倾,早期具有 NW-SE 向拉伸线理的面理被 N-S 向褶皱所改造,早期的运动学特征由 NW 转换到 SW(图 11A)。这种晚期的变形使主变形期的面理、线理和同斜褶皱发生了褶曲,这种现象在穹隆周缘的几个部位均可见到。事实上这种以褶皱为主的变形是以穹隆为中心的离散方式表现的,我们认为其变形的动力学机制为对应穹隆的隆升,穹隆的上覆岩层向四周产生重力滑落作用而形成的牵引褶皱。野外观察,这些牵引褶皱分别向西、北-北东、南东倾,近水平的褶皱轴面指示了这期变形为垂向的缩短作用,为伴随伸展构造的较晚一期的变形结果。由于重力滑脱变形对应于变质穹隆形成时的垂向缩短,因此其变形时间应在穹隆形成的同期或稍后。同时由于未变形的胶莱盆地不整合地盖在混合岩穹隆和褶皱了的变质砂岩和板岩之上,因此我们认为重力滑落变形发生于晚侏罗纪之前。

5.3 混合岩穹隆内部的变形

由于后期 NE-SW 向断层的改造使混合岩单元发育的面理统计结果显得有些分散,但从其结果还是在总体上构成一个穹隆形态(图 9)。我们把烟台-威海地区的混合岩同莱西-栖霞地区的混合岩作对比,它构成了莱西-栖霞穹隆面理东倾的部分,并共同组合成一个完整的穹隆形态(图 9 E, H)。与面理的弯曲构成了穹隆不同,混合岩穹隆单元所发育的线理却相当稳定,保持了 NW-SE 的走向(图 9 D, G),同斜褶皱轴向也具有这样的特点(图 9 D, F);唯一的例外是在穹隆的西缘,在莱阳市的西部,线理的走向为 NE-SW(图 7),野外的分析认为它是后期褶皱改造的结果(图 11A)。

混合岩的构造,如镁铁质矿物,淡色体的褶曲和暗色体的无根褶皱都很好地保持了下来,同时剪切变形后的条带、面理化的片麻岩、同面理期的褶皱等等也在这些混合岩中有所表现。石英、长石和角闪石的重结晶组构表明了混合岩面理化和线理化发生在岩石固态以后的变形。在混合岩穹隆的顶部与大理岩-角闪岩单元接触界线附近,如烟台市的西部,片麻岩化的混合岩转变称为糜棱岩或超糜棱岩。象南部的高压-超高压岩石单元一样,混合岩穹隆单元的剪切特征如由 σ 或 δ 所形成的残斑系、旋转成布丁状的角闪石、石英

和方解石所形成的压力影指示了上部向 NW (top-to-the-NW) 的剪切变形。石英和方解石晶格的优势定向也表现出相同的运动学的特点(图 10 SL73)。此外石英的 $\langle 10\bar{1}4 \rangle$ 轴的极大值靠近图解的中心(如与线理近垂直)指示了石英 $\langle a \rangle$ 柱面的滑移性,因此我们推断混合岩穹隆韧性变形条件为中温(大约 350 ~ 400°C)的角闪岩相的变形。

5.4 大理岩-角闪岩单元和板岩-砂岩单元的变形

大理岩-角闪岩单元围绕片理化的混合岩穹隆分布。由于混合岩化程度不同,该单元在各处分布的情况也不同,在东南部缺失,超高压变质地体直接与混合岩穹隆相接触。板岩-砂岩单元仅分布与栖霞市北部地区和蓬莱北部的岛屿中。象其它构造单元一样大理岩-角闪岩单元和板岩-砂岩单元也经历了多期构造变形,大理岩中镁铁质岩脉被上部向 NW 的剪切作用拉伸成厘米级至数十米级布丁状,在弱变质的板岩-砂岩单元中很难见到矿物拉伸线理,但层间的擦痕指示了相同的运动学特征。此外在两个单元接触部位的下部含阳起石大理岩被剪切正断层拉伸成不对称的大理岩布丁状指示了上盘向北的剪切运动,变砂岩中中长石的多米诺骨牌现象也指示了相同的运动学特点。从运动学图解上可以很清楚地看到各个构造单元的变形情况(图 11)。

6 讨论

6.1 莱西-栖霞混合岩和胶东威海地区混合岩岩石单元的可对比性

对于莱西-栖霞混合岩单元的构造归属及其同苏鲁超高压变质带的关系争议颇多(Faure *et al.*, 2001, 2003b; Zhai *et al.*, 2002)。通常认为,莱西-栖霞地区的混合岩是一套代表古元古代基底的 TTG 片麻岩(陆松年, 1998),以英云闪长岩类为主,其中出露有许多麻粒岩相的变质岩片和透镜体,包括基性和中酸性麻粒岩(胶东群)以及富铝的变质沉积岩(荆山群和粉子山群),原岩的年龄在 18 - 27 亿年,并认为缺少更年轻的年代学记录(Enami *et al.*, 1993; Ishizaka *et al.*, 1994; 张成基和王世进, 1997; 王来明和鄢毅民, 1992)。而东南部的超高压变质地体片麻岩中的基性变质岩透镜体是榴辉岩,普遍含有柯石英或其假象,岩浆锆石普遍给出新元古代(700 ~ 800 Ma)的年龄, Sm-Nd 内部等时线和 Ar-Ar 年龄在 180 ~ 240 Ma 之间,与大别山榴辉岩的变质时代基本相当(李曙光等, 1996; Ames *et al.*, 1996; Liu *et al.*, 2004; Faure *et al.*, 2003b)。但是构造学的研究却揭示了莱西-栖霞地区的混合岩和威海地区混合岩具有相同的几何学和运动学:从图 7 的构造单元分区及图 9 的构造参数的统计结果可以看出:365 个面理测量表明莱西-栖霞和苏鲁地区构成一个完整的穹隆构造(图 8, 9)。同时矿物拉伸线理的统计结果表明,所有的构造单元均具有 N290° ~ 340°W 走向(图 9B, D, G, I, J),其线理的极值方向为 N 317°W(图 9L)。其动

力学表现各个构造单元完全相同：在莱西-栖霞的混合岩中，层状角闪岩被拉成的布丁指示了上部向NW的剪切作用，同样在超高压变质单元也具有一致的矿物拉伸线理和上部向NW的剪切方向。在超高压变质带的上部，正片麻岩和角闪岩体变形强烈，成为眼球状的糜棱岩。再向南，上部指向NW的剪切作用也出现在以片麻岩-石英岩为代表的超高压变质带内。在威海地区的混合岩中，石英和钾长石的重结晶组构说明混合岩的面理和线理代表了岩石固结后的韧性变形作用；在威海市的东南部，混合岩经历了糜棱岩化作用，使其具有近水平面理和NW向的矿物拉伸线理和轴理与线理相平行的同斜褶皱。从图9的统计结果可以看出，莱西-栖霞地区和苏鲁地区的面理及线理发育具有相当的完整性和一致性。我们曾刻意把经历了麻粒岩相变质作用的退变榴辉岩地区（威海-荣成）单独列出进行分析（图9D, E），但其结果的一致性使我们很难将其认为是一个与莱西-栖霞地区（图9F, G, H）截然不同的变质单元。几何学特征的延续性和动力学特征的一致性使我们认为，胶北地体同其东南部的苏鲁地体一同经历了相同的构造演化历史。

事实上，地球化学的研究同样指出了二者之间的一致性：(1) 被认为是过渡带的崑崙山带地球化学特征似乎兼有两侧片麻岩的特点。同位素年龄集中在1900~2000Ma、610~710Ma和124~180Ma（徐洪林等，1997）。带内的变质岩既包括在西侧分布的胶东群、荆山群和粉子山群的岩片，也包括一些基性变质岩透镜体。(2) 同样被认为是胶北地体典型特征的1600~2020Ma和 ϵ_{Nd} 的同位素地球化学特征在威海地区同样存在（Jahn *et al.*, 1996）。最典型的是具有高压变质特征“冷榴辉岩”的海阳所，李曙光等（1994）所报道的2149Ma锆石Pb/Pb年龄和1784±11Ma锆石U/Pb年龄，以前曾被认为是胶北变质单元典型的年龄。周建波等（2002）报道了苏鲁北部的五莲群夹大理石透镜体的斜长角闪岩同样具有全岩Sm-Nd等时线年龄为1663Ma。(3) 最近，胶北地体的年代学和地球化学取得了较为突破性的进展，被认为缺失的600~700Ma的年龄在胶北地体同样有所表现（苗来成等，1998；关康等，1998；罗镇宽等，1999）。唐俊等（2004）通过对栖霞和莱西地区的橄榄大理岩的年代学和地球化学的研究认为莱西-栖霞地区的变质沉积层属于扬子板块，并认为其对应于扬子板块北缘新元古代裂谷岩浆侵位时裂谷肩部北翼古老围岩。而以往均认为莱西地区缺少晚三叠世年龄，近年来通过精确的同位素定年也出现了相关的报道（苗来成等，1998；Faure *et al.*, 2003b）。人们之所以关注上述两个变质单元的异同性，是因为胶北地体的变质岩石单元的构造归属是一个十分敏感和关键的问题，它决定了华北板块和华南板块碰撞的时间、缝合带的位置，典型研究区的构造归属等重要的问题。

6.2 大别山变质地体与苏鲁变质地体的构造对比

苏鲁变质地体中，除了大理岩-角闪岩单元在大别山地

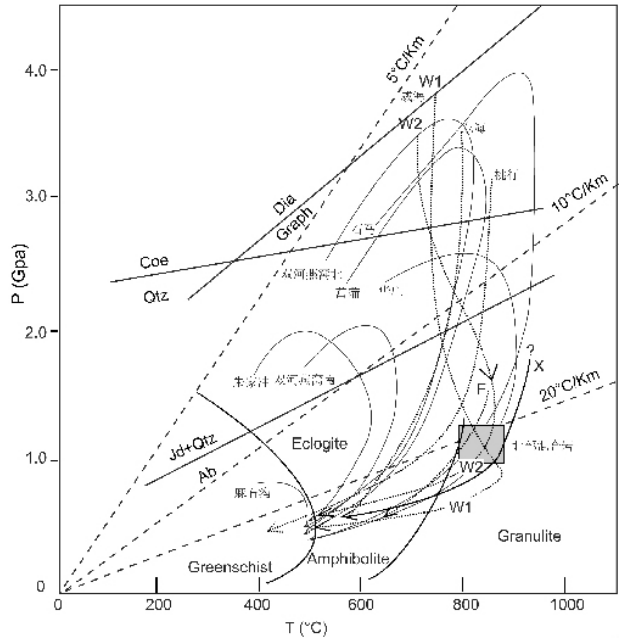


图12 大别-苏鲁造山带变质岩石 P-T 轨迹束

(W₁: Wang *et al.*, 1993; W₂: Zhai *et al.*, 2000; F: Faure *et al.*, 2003; X: Xu *et al.*, 2000)

Fig. 12 P-T paths of metamorphic rocks from Dabie-Sulu orogen (W₁: Wang *et al.*, 1993; W₂: Zhai *et al.*, 2000; F: Faure *et al.*, 2003; X: Xu *et al.*, 2000)

区发育不很明显外，其它的构造几何学特征几乎完全可以同大别山地区相对应（Hacker *et al.*, 1998, 2000; Faure *et al.*, 1999, 2003a; Web *et al.*, 1999）：北部为变质的砂岩板岩单元对应与大别山北部的北淮阳构造带；中部的混合岩穹隆单元同大别山中部一样为高压-超高压变质岩在后期叠加了混合岩化作用的结果；穹隆南部的苏鲁超高压变质地体对应于大别山南部的超高压变质带；高压变质带的“海州群”则对应于大别山南缘高压带的“宿松群”。从多期变形的角度上看，二者均经历了同板块汇聚相关的挤压变形，同造山期折返变形和伸展穹隆的形成及沿穹隆边缘的重力滑脱变形（Faure *et al.*, 1999, 2001, 2003a, 2003b; 林伟等 2003a, 2003b）。当然，两个不同的变质地体之间还是存在差异：大理岩-角闪岩单元大别山地区在不发育，可能是由于大别山地区后期强烈混合岩化作用将其完全改造，使其只作为残余体出露于混合岩穹隆中（如浍水北部和麻城东部）；我们推断正是这个原因使苏鲁地体中的混合岩穹隆能够保持大量的早期构造折返榴辉岩的原因。

6.3 大别-苏鲁地体变质反应的 P-T 轨迹的相似性

图12指示了大别山变质地体与苏鲁变质地体相似的变质反应 P-T 轨迹：从图中可以见到大别山南部和中部榴辉岩具有不同的 P-T 轨迹，南大别的榴辉岩从峰期变质直接退变到角闪岩相，为一降压降温过程，而大别山中部的榴辉岩则

不同,它经历了一个近升温(或等温)降压的过程。苏鲁地体变质反应的 P-T 轨迹同样反映了这个特点:东海和桃行地区的超高压变质地体的 P-T 轨迹同大别山南部的双河、石马和菖蒲地区的一致,威海地区所发现的含柯石英榴辉岩的 P-T 轨迹也同大别山中部的报道可对比,它们都经历了一个减压增温的过程(图 12)。

7 结论

大别山地区同苏鲁地区的构造几何学和运动学及多期变形特征是完全可以对比的,这个特点表明二者具有相同的地球动力学背景。同时,胶北地区和苏鲁地区完整的几何形态和一致性的运动学特征使我们认识到胶北地区和苏鲁地区具有相同的板块动力学机制(至少经历了相同的拆离折返过程);也就是说,烟台-青岛-五莲断裂不可能作为板块缝合带所表现的边界断层。因而,苏鲁地区不存在华南与华北的板块截然的缝合界线。

结合对秦岭-大别山地区的构造学研究成果可以推测,华南和华北板块真正的缝合界线可能要在胶东半岛以北(图 1)。近年来通过对辽东半岛南部的研究,在晚三叠世辉绿岩侵入体中发现了很多新元古代年龄锆石(杨进辉等, 2004),同时辽东半岛旅顺南部的老铁山地区发现的晚三叠世正长岩标志着苏鲁碰撞造山带的影响已经波及到辽东半岛(郝志波和王宗秀, 2004)。

这些认识揭示了扬子板块和华北板块的碰撞缝合带应该在胶东半岛以北,这对我国东部及东亚地区板块拼合造山有着十分重要的意义。

致谢 感谢郭敬辉研究员提供的建设性修改意见。野外工作得到了国家重点基础研究发展规划[G1999075506],国家自然科学基金 NSFC(40472116, 40202021)的资助。日本学术振兴会提供了林伟在日研究费用[JSPS02060]。

References

Ames L, Tilton GR, Zhou G. 1993. Timing of the Sino-Korean and Yangtse cratons: U-Pb zircon of coesite-bearing eclogites. *Geology*, 21: 339-342

Ames L, Zhou G, Xiong B. 1996. Geochronology and isotopic character of ultra high-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtse cratons, central China. *Tectonics*, 15: 472-489

BGMR-Hubei. 1990. Bureau of Geological and Mineral Resources, Hubei Province. Beijing, Geological Publishing House, 1-709

BGMR-Shandong. 1991. Bureau of Geological and Mineral Resources, Shandong Province. Beijing, Geological Publishing House, 1-639

Bing Zh, Wang Z. 2004. Indosinian Orogeny in the Eastern Margin of North China Platform: Tectonic deformation in Dalian area. *Acta Geoscientia Sinica*. 25: 555-560

Cao G. 1990. The Terrane of Jiaonan. *Shandong Geology* 6: 1-10

Chavagnac V, Jahn BM. 1996. Coesite-bearing eclogites from the

Bixiling complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chem. Geol.*, 133: 29-51

Chen WJ, Harrison T, Matthew M, Heizerler T, Liu R, Ma B, Li J. 1992. The Cooling History of Mlange Zone in North Jiangsu-South Shandong Region: Evidence from Multiple diffusion domain, ^{40}Ar - ^{39}Ar Thermal Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 8: 1-17

Chopin C. 1984. Coesite and pure pyrope in high grade pelitic blueschists of the Western Alps: A first record and some consequences. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86: 107-118

Cong B (ed). 1996. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China. Beijing: Science press and Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 224

Cong B, Wang Q. 1999. The New advantage in ultrahigh pressure metamorphic region in Dabie-Sulu Mountains. *Chinese Science Bulletin* 44: 1127-1141

Cong B, Wang Q. 1994. Review of UHP rocks in China. *Chinese Science Bulletin* 39: 2214-2218

Enami M, Suzuki K, Zhai M, et al. 1993. The chemical Th-U-total Pb isochron ages of Jiaodong and Jiaonan metamorphic rocks in the Shandong Peninsula, eastern China. *The Island Arc*, 2: 104-113

Enami M, Zang Q. 1990. Quartz pseudomorph after coesite in eclogite from Shandong province, East China. *Am. Mineralogist*. 75: 381-386

Ernst WG, Zhou G, Liou JG, Eide E, Wang X. 1991. High-pressure and superhigh-pressure metamorphic terranes in the Qinling-Dabie mountain belt, central China: early- to mid-Phanerozoic accretion of the western paleo-Pacific Rim: Pacific Sci. Assoc. Information Bull., 43: 6-15

Faure M, Lin W, Moni P, Le Breton N, Poussineau S, Panis D, Deloule E. 2003b. Exhumation tectonics of the ultra high-pressure metamorphic rocks in the Qinling orogen in E. China: New petrological-structural-radiometric insights from the Shandong peninsula. *Tectonics* 22: 1018-1039

Faure M, Lin W, Sun Y. 1998. Doming in the southern foreland of the Dabieshan (Yangtse block, China). *Terra Nova*, 10: 307-311

Faure M, Lin W, Schärer U, Shu L, Sun Y, Arnaud N. 2003a. Insight into continental subduction and exhumation of UHP rocks from structural and radiometric data of the Dabieshan (E. China). *Lithos* 70: 213-241

Faure M, Lin W, Shu L, Sun Y. 1999. Tectonics of the Dabieshan (eastern China) and possible exhumation mechanism of ultra high-pressure rocks. *Terra Nova* 11: 251-258

Faure M, Lin W, Le Breton N. 2001. Where is the North China-South China Blocks boundary in Eastern China? *Geology*, 29: 119-122

Fukao Y, Widiyantoro S. and Obayashi M. 2001. Stagnant slabs in the upper and lower mantle transition region. *Reviews of Geophysics*, 39: 291-323

Gilder SA, Leloup PH, Courtillot V et al. 1999. Tectonic evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault via Middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data. *Journal of Geophysical research*. 104: 15365-15390

Guan K, Luo Zh, Miao L, et al. 1998. SHRIMP in zircon chronology for Guojialing suite granite in Jiaodong Zhaoye district. *Scientia Geologica Sinica*, 33: 318-328

Hacker BR, Ratsbacher L, Webb L, McWilliams MO, Ireland T, Calvert A., Dong S, Wenk H, Chateigner D. 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. *Journal of Geophysical research*, 105: 13339-13364

Hacker BR, Wang X, Eide EA, et al. 1996. The Qinling-Dabie ultrahigh-pressure collisional orogen. In: *Tectonic Evolution of Asia* (A. Yin and T. M. Harrison, Eds.): 345-370

Hacker BR., Ratsbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D., Suwen

- D. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 161 : 215 – 230
- Ishizaka K, Hirajima T, Zheng XS. 1994. Rb-Sr dating for the Jiaodong gneiss of the Sulu ultrahigh pressure province eastern China. *The Island Arc*, 3 : 232 – 241
- Jahn BM, Cornichet J, Cong B, *et al.* 1996. Ultrahigh ϵ_{Nd} eclogites from an ultrahigh-pressure metamorphic terrane of China. *Chemical Geol.* 127 : 61 – 79
- Ji Z, Zhao H. 1992. The New Evidence of Penglai Group, Eastern Shandong. *Journal of Stratigraphy.* 16 : 236 – 238
- Li S, Chen Y, Zhou H, *et al.* 1994. Excess argon in phengite of eclogite: Evidence for comparing dating of eclogite by Sm-Nd, Rb-Sr, and ^{40}Ar - ^{39}Ar isotope methods: *Chemical Geology.* 22 : 739 – 742
- Li SG, Chen YZ, Song CM, *et al.* 1994. U-Pb zircon ages of amphibolite from the Haiyangsuo area, eastern Shandong province. *Acta Geoscientia Sinica*, 15 : 37 – 42
- Li SG, Jagoutz E, *et al.* 1996. Geochronology of UHP metamorphic massif of Dabieshan and Sulu - I. Sm-Nd system. *Science in China (D)*, 26 : 249 – 257
- Li XP, Zheng YF, Wu YB, Chen FK, Gong B, Li YL. 2004. Low-T eclogite in the Dabie terrane of China: petrological and isotopic constraints on fluid activity and radiometric dating. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148 : 443 – 470
- Li Z. 1994. Collision between the North and South China blocks: a crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault. *Geology*, 22 : 739 – 742
- Lin W, Faure M, Moni P, Scherer U, Zhang L. 2000. Tectonic of SE China, new insights from the Lushan massif (Jiangxi province). *Tectonics*, 19 : 852 – 871
- Lin W, Faure M, Sun Y, Shu L. 2001. Compression to Extension switch during the Triassic Orogeny: the case study of the Julingshan massif in the S. foreland of the Dabieshan (SE China). *Journal of Asia Earth Science*, 20 : 31 – 43
- Lin W, Faure M, Wang Q, 2003b, The Mesozoic Geometry and Kinematic in Jiaodong Peninsula and its tectonic evolution. *Chinese Journal of Geology*, 38(4) : 495 – 505
- Lin W, Faure M, Wang QC, Arnaud N. 2005. Tectonic Evolution of Dabie Orogeny, in the view from Polyphase Deformation of Beihuiyang Metamorphic zone. *Science in China*, 35(2) : 127 – 139
- Lin Wei, Faure M, Wang Q, Moni P, Panis D. 2005. Polyphase deformation in the Feidong-Zhangbaling Massif (Eastern China) and its place in the collision between North China and South China Blocks. *Journal of Asia Earth Science*, 25 : 121 – 136
- Lin, W, Wang Q, Faure M, Sun Y, Shu L, Scherer U. 2003a. Different deformation stages of the Dabieshan Mountains and UHP rocks exhumation mechanism. *Acta Geologica Sinica*, 77 : 44 – 54
- Liu F, Xu Zh, Liou JG, Song B. 2004. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneisses, south-western Sulu terrane, eastern China. *J. metamorphic Geol.* 22 : 315 – 326
- Liu Y, Xu S, Li S, Jiang L., Chen G. Wu W. 2003. Tectonic setting and cooling history of eclogites from Northern Dabie Mountains. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* 28 : 11 – 16
- Lu S. 1998. Geochronology and Sm-Nd isotopic geochemistry of Precambrian crystalline basement in eastern Shandong province. *Earth Science Frontiers*, 15(4) : 275 – 283
- Luo Zh, Guan K, Miao L. 1999. The ages and its significance of inherited zircons in the granitoids in Zhaoyuan- Laizhou area. *Shandong geology*, 15 : 24 – 57
- Miao L, Luo Zh, Guan K. 1998. The implications of the SHRIMP U-Pb age in zircon to the petrogeneses of the Linglong granite, East Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 14 : 198 – 206
- Okay AI, Sengor AMC, Satir M. 1993. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: the Dabie Shan/ Tongbai shan orogen, China. *Tectonics* 12 : 1320 – 1334
- Ratsbacher L, Hacker BR, Calvert A, Webb L, Grimmera JC, McWilliams MO, Ireland T, Dong S, Hu J. 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. *Tectonophysics*, 366 : 1 – 53
- Ratsbacher L, Hacker BR, Webb L, McWilliams MO, Ireland T, Dong S, Calvert A, Chateigner D, Wenk H. 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. *Journal of Geophysical research*, 105 : 13303 – 13338
- Suo S, Zhong Z, You Z, *et al.* 2000. Relic UHP Structures in Dabie-Sulu Region, China: Structural Expression and Geodynamic Significance. *Earth Science- Journal of China University of Geosciences.* 25(6) : 557 – 563
- Tang J, Zheng YF, Wu YB, Zha XP, Zhou JB. 2004. Zircon U-Pb ages and oxygen isotopes of metamorphic rocks in the western part of the Shandong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 20 : 1063 – 1086
- Tsai C, Juhn JG, Liou JG. 2000. Eclogite-facies relics and inferred ultrahigh-pressure metamorphism in the North Dabie Complex, central-eastern China. *Am. Mineral.* 85 : 1 – 8
- Wallis S, Enami M, Banno S. 1999. The Sulu UHP Terrane: A review of the petrology and structural geology. *International Geology Review*, 41 : 906 – 920
- Wallis S, Ishiwatari A, Hirajima T, *et al.* 1997. Occurrence and field relationships of ultrahigh-pressure metagranitoid and coesite eclogite in the Sulu terrane, eastern China. *J. Geol. Society London*, 154 : 45 – 54
- Wang L, Yan Y. 1992. The Archean tonalites in Qixia area, Shandong. *Shandong geology*, 8 : 80 – 87
- Wang Q, Cong B, 1999, Exhumation of UHP Terrances: A Case Study from the Dabie Mountains, Eastern China. *International Geology Review*, 41 : 994 – 1004
- Wang Q, Ishiwatari A, Zhao Z, Hirajima T, Hiramatsu N, Enami M, Zhai M. Cong B. 1993. Coesite bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China. *Eur. J. Mineral.*, 5 : 141 – 152
- Wang Q, Lin W. 2002. Geodynamics of the Dabieshan Collisional Orogenic Belt. *Earth Science Frontiers*, 9(4) : 255 – 265
- Wang Q, Zhang R, Cong B, Zhao Z, Ye K. 1992. Tectonic feature and exhumation of eastern Shandong-northern Jiangsu eclogites. *Acta petrologica Sinica.* 8 : 153 – 159
- Wang Q. Cong B. 1998. Tectonic Framework of the Ultrahigh-pressure metamorphic zone from Dabie Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 14 : 481 – 492
- Wang X, Liou JG, Mao HK. 1989. Coesite-bearing eclogite from the Dabie mountains in central China. *Geology*, 17 : 1085 – 1088
- Wang X, Neubauer F, Genser J, Yang W. 1998. The Dabie UHP unit, Central China: a Cretaceous extensional allochthon superposed on a Triassic orogen. *Terra Nova*, 10 : 260 – 267
- Webb L, Hacker BR, Ratsbacher L, McWilliams MO Dong S. 1999. Thermochronologic Constraints on Deformation and Cooling History of High- and Ultrahigh-Pressure Rocks in The Qinling-Dabie Orogen, Eastern China. *Tectonics*, 18 : 621 – 638
- Wei Ch, Shan Zh. 1997. Metamorphism of the Susong Complex from the Southern Dabie Mountains, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 13 : 356 – 368
- Xiao YL, Hoefs J, Van Den Kerkhof AM, Li SG. 2001. Geochemical constraints of the eclogite and granulite facies metamorphism as recognized in the Raobazhai complex from North Dabieshan, China. *J. Metamorphic Geol.* 18 : 3 – 19
- Xu HL, Zhang DQ, Sun GY. 1997. Characteristics and genesis of Kunyushan granite and its relation with golden deposits in Jiaodong.

- Acta Petrologica et Mineralogica Sinica, 16 : 131 - 143
- Xu ST, Jiang L, Liu Y, *et al.* 1992. Tectonic Framework and Evolution of the Dabie Mountains in Anhui, Eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 66 : 1 - 14
- Xu ST, Okay AJ, Ji S, Sengor AMC, Su W, Liu Y, Jiang L. 1992. Diamond from Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256 : 80 - 82
- Xu ST, Liu Y, Jiang L, *et al.* 1994. Tectonic Regime and Evolution of Dabie Mountains. Beijing, Science Press, 175
- Xu ST, Liu Y, Su W. 2000. Discovery of the eclogite and its petrography in the northern Dabie Mountains. *Chinese Sciences Bulletin*, 45 : 542 - 545
- Xu ST, Liu Y, Jiang L, *et al.* 2002. Architecture and kinematics of the Dabie Mountains orogen. Hefei, University of Science and Technology of China press, 1 - 133
- Xu Z. 1987. Etude tectonique et microtectonique de la chine paleozoique et triasique des Qintings (Chine). Thesis de doctorate Univ Sci Tech Languedoc. Montpellier, 327
- Xue F, Rowley DB, Tucker RD, Peng ZhX. 1997. U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the North Dabie Complex, eastern Dabie Shan, China. *Journal of Geology*, 105 : 744 - 753
- Yang J S, Wooden J, Wu C, Liu F, Xu Z, Shi R, Katayama I., Liou J. Maruyama S. 2003. SHRIMP U-Pb dating of coesite-bearing zircon from the ultrahigh-pressure metamorphic rocks, Sulu terrane, east China. *The Journal of Geophysical Geol.*, 21 : 551 - 560
- Yang J, Jahn BM. 2000. Deep subduction of mantle-derived garnet peridotites from the Su-Lu UHP Terrance in China. *J. Metamorphic Geol.* 18 : 167 - 180
- Yang JJ, Godard G, Kienast JR, Lu Y, Sun J. 1993. Ultrahigh-pressure (60 kbar) magnesite-bearing garnet peridotites from northeastern Jiangsu, China. *Journal of Geology*, 101 : 541 - 554
- Yang W, Cheng Z, Chen G, Hu Z, Bai J. 1999a. Geophysical investigations in Northern Sulu UHPM Belt, Part I: Deep seismic Reflection. *Chinese Journal of Geophysics.* 42 : 41 - 52
- Yang W, Hu Z, Cheng Z, Ni C, Bai J. 1999b. Long Profile of Geophysical Investigation from Tancheng to Lianshui, East-Central China. *Chinese journal of Geophysics.* 42 : 206 - 217
- Yang Z. 1989. Enlightenment from Discovering of strata of upper-Ordovician to Silurian and Devonian, Korea. *Bull. Nanjing Inst. Geol. M. R. Chinese Acad. Geol. Sci.*, 10 : 17 - 26
- Ye K, Cong B, Ye D. 2000. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km. *Nature* 407 : 734 - 736
- Yin A, Nie S, Craig P. Harrison TM. 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tianshan. *Tectonics*, 17 : 1 - 27
- Yin A, Nie S. 1993. An indentation model for the north and south China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern China. *Tectonics*, 12 : 801 - 813
- Zhai M, Cong B, Guo J, *et al.* 2000. Sm-Nd geochronology and petrography of garnet pyroxene granulites in the northern Sulu region of China and their geotectonic interpretation. *Lithos*, 52 : 23 - 33
- Zhai M, Cong B, Guo J, Liu W, Li Y, Wang Q. 1999. Sm-Nd Geochronology and Petrography of Garnet Pyroxene Granulites in the Northern Sulu Region and Their Geotectonic Implication. *Scientia Geologica Sinica.* 40 : 301 - 309
- Zhai M, Guo J, Wang Q, Ye K, Cong B, Liu W. 2000. Division of Petrological-Tectonic Unit in The Northern Sulu Ultra-High Pressure Zone: An Example of Thick-Skin Thrust of Crystalline Units. *Scientia Geologica Sinica.* 35 : 16 - 26
- Zhai MG, Liu W. 1998. The Boundary between Sino-Korea craton and its extension on the Korea Peninsula. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 7 : 16 - 25
- Zhai, MG. 2002. Where is the North China-South China block boundary in eastern China? *Comment geology*, 30 : 667
- Zhang Ch, Wang Sh. 1997. New develop of Jiaonan orogenic research. *Shandong geology*, 13 : 1 - 11
- Zhang R, Chen X. 1998. The Discovery of early Ordovician Microfossiles from the Sujiange group of Tongbai-Dabie Orogenic Belt, and its Significances. *Acta Micro- palaeontologica Sinica*, 15 : 125 - 133
- Zhang RY, Liou JG, Cong B. 1994. Petrogenesis of garnet-bearing ultramafic rocks and associated eclogites in the Su-Lu ultrahigh-P metamorphic terrane, eastern China. *J. Metam. Geol.* 12 : 169 - 186
- Zhao D, Xu Y, Wiens D, *et al.* 1997. Depth extent of the lay back-arc spreading center and its relation to subduction processes. *Science*, 278 : 254 - 257
- Zhou J, Zheng Y, Li L, *et al.* 2001. Accretionary wedge of the subduction of the Yangtze plate. *Acta Geol. Sinica*, 75 : 338 - 352
- Zhou JB, Zheng YF, Li L, Xie Z. 2001. Accretionary wedge of the subduction of Yangtze plate. *Acta Geologica Sinica*, 75 : 338 - 352
- Zhou JB, Zheng YF, Wu YB. 2003. Zircon U-Pb ages for Wulian granites in northwest Sulu and their tectonic implications. *Chinese Sci. Bull.*, 47, 1745 - 1750
- Zhu G. 1993. The Deformation and metamorphism in Penglai Group Jiaobei and its regional tectonic meaning. *Geotectonica et Metallogenia*, 17 : 259 - 270
- ### 附中文参考文献
- 郝志波, 王宗秀. 2004. 华北地台东缘的印支运动烙印——来自大连地区的构造形变信息. *地球学报*, 25(5) : 555 - 560
- 曹国权. 1990. 试论“胶南地体”. *山东地质*, 6(2) : 1 - 10
- 陈文寄, Harrison TM, Heizerler MT. 1992. 苏北-胶南构造混杂岩冷却历史的多重扩散域⁴⁰Ar-³⁹Ar 热年代学研究. *岩石学报*, 8(1) : 1 - 17
- 从柏林, 王清晨. 1999. 大别山-苏鲁超高压变质带研究的最新进展. *科学通报*, 44 : 1127 - 1141
- 关康, 罗镇宽, 苗来成等. 1998. 胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究. *地质科学*, 33(3) : 318 - 328
- 湖北省地质矿产局. 1990. 湖北省区域地质志. 北京, 地质出版社, 1 - 709
- 纪壮义, 赵环金. 1992. 鲁东蓬莱群的时代新证. *地层学杂志*, 16(3) : 236 - 238
- 李曙光, Jagoutz E, 肖益林等. 1996. 大别山-苏鲁地体超高压变质年代学 - I. Sm-Nd 同位素体系. *中国科学(D)*, 26(3) : 249 - 257
- 李曙光, 陈移之, 宋明春等. 1994. 胶东海阳所斜长角闪岩的锆石 U-Pb 年龄. *地球学报*, 15(1-2) : 37 - 42
- 林伟, 王清晨, Faure M, 孙岩, 舒良树, Scharer U. 2003a. 大别山的构造变形期次和超高压变质岩折返的动力学. *地质学报*, 77(1) : 44 - 54
- 林伟, Faure M, 王清晨. 2003b. 胶东半岛中生代构造演变的几何学和运动学. *地质科学*, 38(4) : 495 - 505
- 林伟, 王清晨, Faure M., Arnaud N. 2005. 从北淮阳构造带的多期变形透视大别山构造演化. *中国科学(D)*, 35(2) : 127 - 139
- 刘贻灿, 徐树桐, 李曙光, 江来利, 陈冠宝, 吴维平. 2003. 大别山北部榴辉岩的大地构造属性及冷却史. *地球科学*, 28(1) : 11 - 16
- 陆松年. 1998. 鲁东前寒武纪结晶基底的年代学及 Sm-Nd 同位素地球化学. *地学前缘*, 15(4) : 275 - 283
- 罗镇宽, 关康, 苗来成等. 1999. 招远莱州地区花岗岩类继承锆石年龄及其意义. *山东地质*, 15(3) : 24 - 57
- 苗来成, 罗镇宽, 关康等. 1998. 玲珑花岗岩中锆石的离子质谱 U-Pb

- 年龄及其岩石学意义. 岩石学报, 14(2):198-206
- 山东地质矿产局. 1991. 山东省区域地质志. 北京, 地质出版社, 1-639
- 索书田, 钟增球, 游振东等. 2000. 大别-苏鲁区残余超高压构造及其动力学意义. 地球科学——中国地质大学学报, 25(6):557-563
- 唐俊, 郑永飞, 吴元保, 查向平, 周建波. 2004. 胶东地块西部变质岩锆石 U-Pb 定年和氧同位素研究. 岩石学报, 20(5):1063-1086
- 王来明, 鄢毅民. 1992. 山东栖霞地区太古代英云闪长岩. 山东地质, 8(1):80-87
- 王清晨, 从柏林. 1998. 大别山超高压变质带的大地构造框架. 岩石学报, 14(4):481-492
- 王清晨, 林伟. 2002. 大别山碰撞造山带的地球动力学. 地学前缘, 9(4):255-265
- 王清晨, 张儒媛, 从柏林等. 1992. 鲁东-苏北榴辉岩的构造特征及其折返机制. 岩石学报, 8(2):153-160
- 魏春景, 单振刚. 1997. 安徽省大别山南部宿松杂岩变质作用研究. 岩石学报, 13(3):356-368
- 徐洪林, 张德全, 孙桂英. 1997. 胶东昆崙山花岗岩的特征、成因及其与金矿的关系. 岩石矿物杂志, 16(2):131-143
- 徐树桐, 江来利, 刘贻灿, 张勇. 1992. 大别山区(安徽部分)的构造格局和演化过程. 地质学报, 66(1):1-14
- 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 苏文, 季寿元. 1994. 大别山的构造格局和演化. 北京: 科学出版社, 175
- 徐树桐, 刘贻灿, 江来利等. 2002. 大别山造山带的构造几何学和运动学. 合肥, 中国科学技术大学出版社, 1-133
- 杨进辉, 吴福元, 张艳斌, 张旗, Wilde S. A. 2004. 辽东半岛南部三叠纪辉绿岩中发现新元古代年龄锆石. 科学通报, 49(18):1878-1882
- 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, 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
- 杨志坚. 1989. 朝鲜晚奥陶世-志留纪和泥盆纪地层发现的启示. 中国地质科学院南京地质矿产研究所刊, 10(1):17-26
- 翟明国, 从柏林, 郭敬辉等. 1999. 苏鲁造山带东北端石榴辉石麻粒岩的 Sm-Nd 同位素年代学及其大地构造含义. 地质科学, 40(3):301-309
- 翟明国, 郭敬辉, 王清晨等. 2000. 苏鲁变质带北部的岩石构造单元及结晶块体推覆构造. 地质科学, 35(1):16-26
- 张成基, 王世进. 1997. 胶南造山带研究新进展. 山东地质, 13(1):1-11
- 张仁杰, 陈孝红. 1998. 桐柏-大别造山带苏家河群早奥陶世微体化石及其意义. 微体古生物学报, 15(2):125-133
- 周建波, 郑永飞, 李龙等. 2001. 扬子大陆陆块俯冲的构造加积楔. 地质学报, 75(3):338-352
- 周建波, 郑永飞, 吴元保. 2002. 苏鲁造山带西北缘五莲花花岗岩中锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 科学通报, 47(22):1745-1750
- 朱光. 1993. 胶北蓬莱群的变形与变质及其区域大地构造意义. 大地构造与成矿学, 17(3):259-270