

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

问题
讨论

苏北—鲁东南高压、超高压变质带剥露过程中伸展构造作用

张长厚 柴育成 宋鸿林 吴正文

(中国地质大学, 北京, 100083)

内容提要 尽管许多地质学家提出了不同的超高压变质岩石形成与折返模式, 但高压、超高压变质岩折返与剥露机制仍是大陆造山带动力学研究中的热点和焦点问题。本文明确提出并研究了分布于苏北—胶南变质岩区西北和北部边缘的地壳规模的拆离伸展型韧性剪切带。通过韧性剪切带几何学、运动学、变形环境分析和形成时代的讨论, 认为与高压、超高压变质带展布方向斜交的斜向伸展构造作用, 是苏北—鲁东南高压、超高压变质带从中地壳抬升至地表的主导机制。

关键词 伸展构造 韧性剪切带 高压—超高压变质带 剥露机制

由于以榴辉岩、含柯石英金刚石榴辉岩为代表的高压、超高压变质岩石具有特殊的大地构造和造山带动力学意义, 自 80 年代中期以来受到了国际上众多地质学家的关注。70 年代末特别是 90 年代初以来, 在我国大别山、苏北、胶南、胶东, 以及东秦岭地区先后发现了较多的超高压榴辉岩及其它高压变质岩石^[1,2]。据不完全统计, 到 1995 年底, 在国内外公开发表的有关超高压变质带的学术论文有近百篇。这些研究在榴辉岩岩石学、岩石化学、矿物化学、微量元素和稀土元素地球化学, 形成的温—压条件、同位素地质年代学等方面, 积累了大量资料, 取得了许多重要成果, 并与国际上同时期的研究水平^[3,4]相当。但是, 目前关于榴辉岩原岩属性、形成时代、形成时的温度—压力条件等重要基础问题尚未取得一致的认识^[1,2,5]。尽管在榴辉岩围岩中越来越多地发现了高压变质作用的证据^[6~10], 但榴辉岩是原地变质还是异地变质的争论仍在继续^[1,2,5]。有关高压、超高压变质岩的折返机制, 更是有待深入研究的课题。

1 高压、超高压变质岩的折返模型

高压、超高压变质岩石的形成, 被认为是板块俯冲或碰撞的产物。但在探讨这类岩石从深部折返于地表, 即超高压变质岩石的剥露机制时, 提出了各种各样的模式。如 70 年代 Ernst (1975), England 等 (1979) 提出了浮力、底辟或水动力驱动的回流模型。Seely 等 (1974) 提出了叠瓦状逆冲模式。80 年代 Chopin 发展了叠瓦状逆冲模型^[11], Platt 提出了俯冲增生楔形体底板垫托和顶部伸展联合作用模式^[12]。Cloos 等提出了俯冲隧道模式^[13]。Coney, Butler 等提出了变质核杂岩模式^[14,15], 体现了多机制联合的研究思路。90 年代剥露机制的研究更加深入。Avigad 和 Lallemand 等都特别强调伸展作用的重要性, 但前者强调的是垂直造山带的伸展^[16], 而后者则认为斜向碰撞导致的平行造山带的伸展^[17]。Okay 等和 Michard 等则更强调逆冲作用在整个剥露过程中的重要性^[18,19]。许靖华提出了俯冲带迁移(后退)模式^[20]。Dobretsov 根据

注: 本文得到国家教委博士点基金和地质矿产部重大基础项目(编号 8502207)资助。

本文 1996 年 2 月收到, 1997 年 11 月改回, 王毅编辑。

榴辉岩 P - T 和 P - T - t 轨迹,提出了 4 种不同的剥露机制^[21],王清晨等在总结前人模式基础上提出了剪切回流模型^[22]。Hodges 和 Walker 提出了隐伏楔形体抽拉伸展模型^[23]。现有的关于高压变质岩折返的模型可概括如图 1 所示。

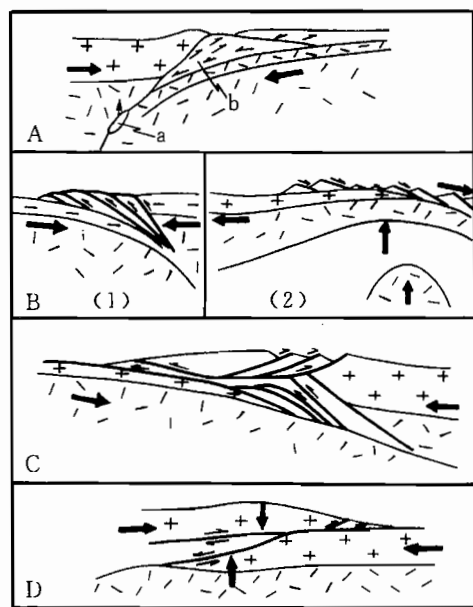


图 1 高压变质岩折返模式图
(据 Dobretsov, 1991^[21])

Fig. 1 The current hypotheses for the exhumation of high-pressure rocks
(after Dobretsov, 1991^[21])

A—(a)俯冲带中俯冲大陆板片的浮力上升和(b)回流模式;B—变质核杂岩模式分两个阶段:(1)俯冲和岩石圈加厚,(2)加厚岩石圈的总体伸展;C—底板垫托、顶部伸展模式;D—隐伏楔形体抽拉伸展模式

A—(a) Buoyancy uplift of subducted continental slices in the subduction zone and (b) corner-flow model; B—metamorphic core complex model, with two stages: (1) subduction and lithospheric thickening, (2) extension of the whole thickened lithosphere; C—underplating—wedge extension model; D—a variant of the wedge extension mechanism, the blind extensional allochthon model

度,最大可达 2.5 km,最窄处亦有百余米。自 SW 向 NE 倾向发生 WNW—NW—NNW 的改变,剪切带内糜棱岩面理倾角 25°~55°。拉伸线理倾伏方向以 NW290°~310°方向为主(图 3)。剪切带内的糜棱岩面理构造比其外围片麻理面理构造倾角陡。在韧性剪切带中的地质体,被显著拉长(图 4),指示了剪切运动的方向。

2.2 运动学性质

上述不同的剥露模式的建立,多依据高压变质岩的 P - T - t 轨迹资料,并利用了部分构造研究成果,解决了各自面临的实际问题,或者解决了整个折返和剥露过程中某阶段的具体机制。总的发展趋势是把高压变质岩石的形成和折返看作是一个同时发生的过程,而不再将它们当作两个独立的事件。到目前为止,为数不多的探讨大别、苏北、鲁东南超高压变质岩折返机制的文章,主要依据的仍是 P - T - t 轨迹资料,而缺少构造资料的验证和支持,而且认为与板块俯冲或碰撞有关的逆冲作用是榴辉岩和其它高压变质岩折返并剥露于地表的主要机制^[18,22,24,25]。陈文奇等^[26]、李齐等^[27]运用多重扩散域理论获得了很好的⁴⁰Ar-³⁹Ar 热年代学演化信息,但仍然用逆冲作用来解释高压变质岩石的折返过程^[26,27]。

近几年我们在胶南隆起北部开展 1:5 万区域地质填图和专题研究过程中,发现了发育于胶南隆起北缘的左行正滑韧性剪切带^[28]。进一步研究表明,伸展构造在苏北—胶南隆起区于超高压变质岩石折返和剥露过程中起了重要的作用。

2 苏北—胶南地区地壳规模的伸展韧性剪切带

2.1 空间展布与宏观变形特征

苏北—胶南地壳伸展韧性剪切带,基本上沿胶南隆起北缘与中生代白垩纪盆地分界部位展布(图 2)。从莒南东北开始,往北东经小卜罗崮、黄敦西北、五莲东南哑巴山、诸城下六谷、桃园,胶南王台到乳山和威海西部一带,向东延伸约 450 km。由于五莲—荣城脆性断裂带的破坏,致使该韧性剪切带保存不完整。目前可以确定的出露宽

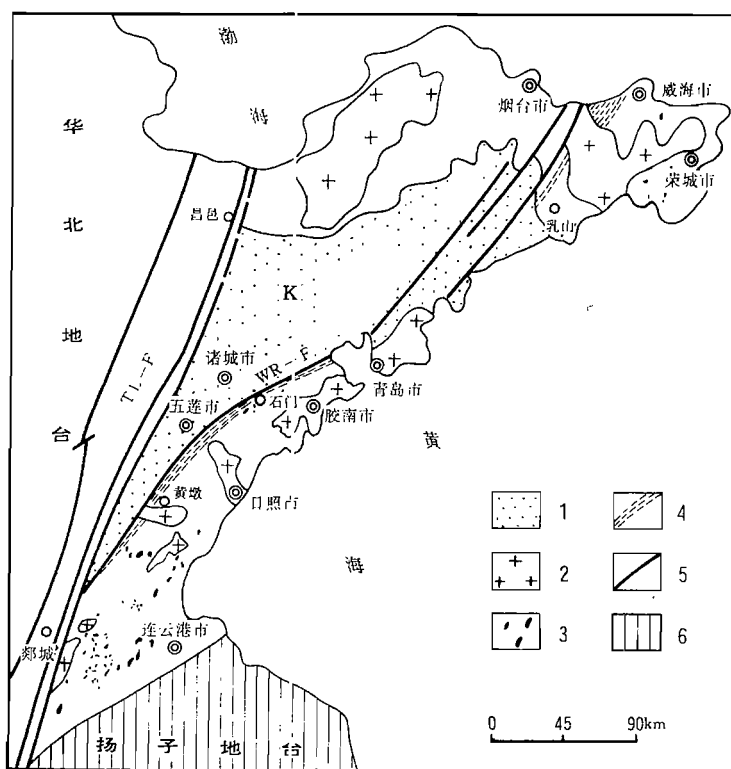


图 2 苏北—鲁东地质构造简图(主要反映高压—超高压变质岩带和大规模伸展韧性剪切带的展布)

Fig. 2 Geological sketch map illustrating the distribution of high-pressure and ultrahigh-pressure rocks and crustal-scale ductile shear zone in North Jiangsu and Eastern Shandong Province

1—白垩纪莱阳盆地;2—中生代晚期花岗岩;3—榴辉岩;4—伸展韧性剪切带;

5—脆性断裂;6—扬子地台;TL-F—郟庐断裂;WR-F—五莲—荣城断裂

1—Laiyang Basin of Cretaceous; 2—Later Mesozoic granite; 3—eclogite; 4—extensional ductile shear zone;

5—brittle fault; 6—Yangtze platform; TL-F—Tancheng—Lujiang faults; WR-F—Wulian—Rongcheng faults

据剪切带内韧性剪切指向标志,宏观地质体的变形特征和展布型式(图 4),糜棱岩面理产状变化趋势(图 3b)及线理空间分布(图 3,4),均表明剪切带具左旋运动性质。沿平行线理、垂直糜棱面理方向,定向薄片揭示出的各种剪切指向标志,如 S-C 组构、旋转碎斑系、云母鱼、动态重结晶石英条带中新生颗粒斜列方向(图 5),均反映上盘向 NW 滑动左行正滑运动方向。

2.3 韧性剪切带变质作用与显微构造特征

剪切带内糜棱岩岩石研究表明,同期变形的稳定共生矿物组合有两类:(1)在长英质岩石(如变粒岩和长石石英岩)为多硅白云母-钠长石-绿泥石-石英;(2)在斜长角闪岩及斜长角闪片岩类岩石中为:阳起石-绿帘石-绿泥石-钠长石。根据变质矿物共生组合特征分析,变形环境为中低温—中高压绿片岩相,即 $T=440^{\circ}\text{C}$, $P=6\times 10^5\text{Pa}$ 。在钾长石碎斑附近有两种显著的矿物化学成分变化。一种是钾长石外围被白云母和细粒石英所围绕,并与钾长石母晶呈过渡关系,而与其它矿物之间界线十分清楚,表明钾长石在水流体的参与下发生了分解反应:

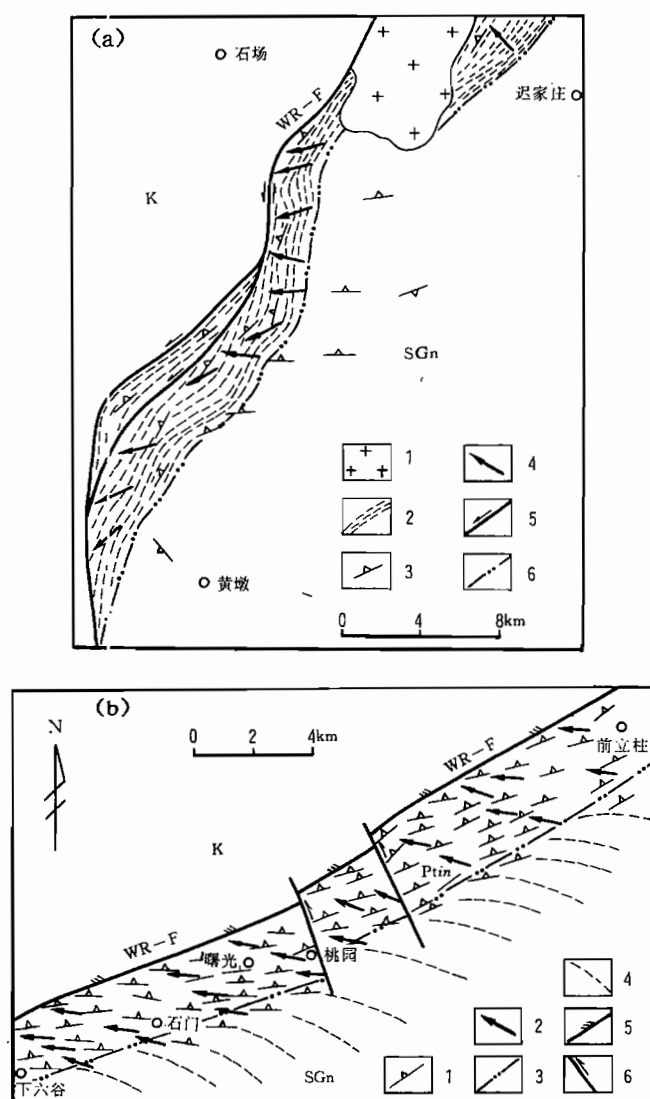


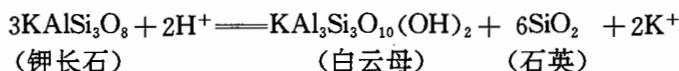
图3 伸展韧性剪切带中的糜棱面理和拉伸线理分布型式

Fig. 3 Distributing pattern of mylonitic foliations and mineral lineations

in the extensional ductile shear zone

K—白垩纪盆地; SGn—元古宙石河头片麻岩; WR-F—五莲—荣城断裂。(a)日照西部黄墩—石场一带: 1—中生代晚期花岗岩; 2—韧性剪切带面理迹线; 3—糜棱面理和片麻理; 4—拉伸线理; 5—脆性断层; 6—伸展韧性剪切带边界。(b)诸城胶南地区下六谷—前立柱一带: 1—糜棱面理; 2—拉伸线理; 3—伸展韧性剪切带边界; 4—剪切带外围片麻理迹线; 5—脆性断裂; 6—走滑断裂

K—Cretaceous basin; SGn—Shihetou gneiss of Proterozoic; WR-F—Wulian—Rongcheng faults. (a) Huangdun and Shichang area, west part of Rizhao city; 1—Later Mesozoic granite; 2—trace of mylonitic foliations; 3—mylonitic foliation and gneissic foliation; 4—stretching lineation; 5—brittle fault; 6—boundary of the extensional ductile shear zone. (b) Xialiugu—Qianlizhu area of Zhucheng and Jiaonan cities; 1—mylonitic foliation; 2—stretching lineation; 3—boundary of the extensional ductile shear zone; 4—trace of gneissic foliation within the country rocks of the ductile shear zone; 5—brittle fault; 6—strike-slip fault



另外一种矿物转变,即是在钾长石周围或裂隙中有钠长石的新晶出现,这与 Pryer 在加拿大格林威尔前锋逆冲韧性剪切带中的研究结果一致。她的研究表明,这种成分变化形成于低角闪岩相到高绿片岩相条件下^[29]。

在该带内石英具有双峰式粒度分布特征,发育多晶石英条带及动态重结晶显微构造,以韧性变形为主。钾长石则以脆性变形为主,核—幔构造发育。角闪石和云母以顺解理的滑动变形为特色。斜长石表现为更低的韧性变形。结合前人实验研究和天然变形岩石的研究结果可知^[29~32],该韧性剪切带形成于高绿片岩相到低角闪岩相的变质环境中,温度 450°~600℃,压力约 $6.0 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

2.4 伸展韧性剪切带与五莲—荣城断裂的关系

近年来,越来越多的学者把五莲—荣城断裂作为郯庐断裂之东的华北与扬子板块分界线,并认为沿此线曾发生过板块俯冲作用^[18,33]。我们研究发现,传统的五莲—荣城断裂,实际上是形成较晚的高角度脆性断裂。该断裂与胶南隆起北缘的伸展韧性剪切带相吻合,运动学性质也基本上相同。在断裂带中,既有韧性剪切带糜棱岩的角砾,也有早白垩世莱阳组地层的角砾。所以,该断裂可能与北美西部变质核杂岩区的脆性剥离断层具有相似的构造意义。是伸展韧性剪切带持续活动并剥露于地表的构造表现。其地表产状较陡,属于后期构造活动改造所致。

3 讨论与结论

3.1 伸展韧性剪切带形成时代问题

据韧性剪切带形成环境分析,其形成深度应达 12 km 以上。前人曾根据岩相古地理和构造分析,推测在胶南隆起区曾有过震旦纪—古生代的沉积物^[34],我们认为这条大规模韧性剪切带形成于古生代以后。我们在胶莱拗陷南缘早白垩世莱阳组下部发现了该韧性剪切带糜棱岩的砾石,说明在早白垩世早期,该韧性剪切带已出露地表并成为剥蚀区的一部分。近年来在苏北—胶南地区获得了大量相当于三叠纪末—侏罗纪时期的同位素年龄,因此我们推测其形成时代在三叠纪末—侏罗纪,并在侏罗纪末已被剥露于地表。

3.2 韧性剪切带形成环境分析

不同的变质环境下,所形成的矿物变

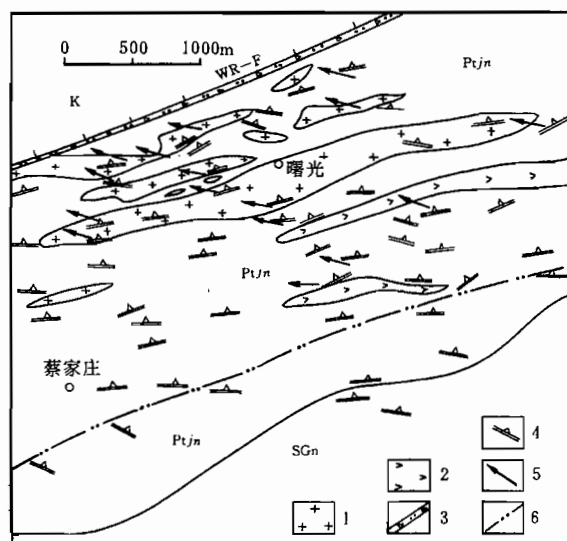


图4 诸城东南桃园曙光一带韧性剪切带中
花岗质侵入体的变形特征

Fig. 4 Deformation and distribution pattern of granitic intrusive rocks in the ductile shear zone around

Shuguang, Taoyuan, Zhucheng

1—糜棱岩化花岗岩; 2—糜棱岩化斜长角闪岩; 3—脆性断裂; 4—糜棱面理; 5—拉伸线理; 6—伸展韧性剪切带边界; K—白垩纪; Ptjn—胶南群; SGn—元古宙石河头片麻岩
1—Mylonitic granite; 2—mylonitic amphibolite; 3—brittle fault; 4—mylonite foliation; 5—stretching lineation; 6—extensional ductile shear zone; K—Cretaceous; Ptjn—Proterozoic Jiaonan Group; SGn—Proterozoic Shihetou gneiss

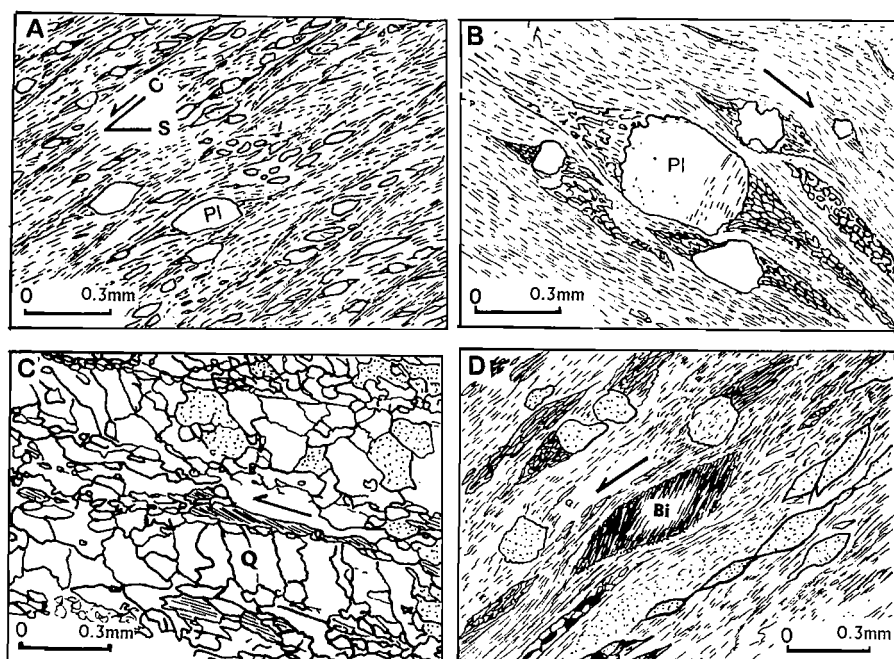


图 5 韧性剪切带中指示剪切方向的显微构造(据照片素描)

Fig. 5 Microstructures in ductile shear zone as shearing sense criteria (after micro-photopictures)

A—S-C 组构(炭井); B— σ 碎斑系(常家庄); C—动态重结晶石英颗粒的斜列(桃园西); D—云母鱼构造(炭井)

A—S-C fabrics(Tanjing village); B— σ shape porphyroclasts(Changjiashuang); C—asymmetric dynamic recrystallizational grains of quartzite(West of Taoyuan town); D—mica-fish(Tanjing village)

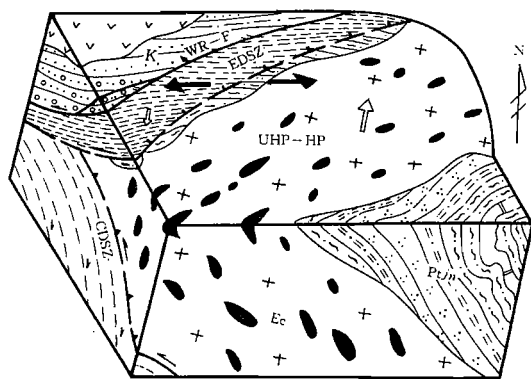


图 6 苏北—胶南高压-超高压变质带
伸展剥露构造模式

Fig. 6 A transtensional tectonic model for the exhumation of high and ultrahigh-pressure rocks from middle crust level

K—白垩纪盆地; UHP-HP—高压、超高压变质带; Ec—榴辉岩; Ptjn—胶南群; EDSZ—伸展韧性剪切带; CDSZ—逆掩韧性剪切带; WR-F—五莲—荣城断裂

K—Cretaceous basin; UHP-HP—high and ultrahigh-pressure rocks; Ec—eclogite; Ptjn—Proterozoic Jiaonan Group; EDSZ—extensional ductile shear zone; CDSZ—thrusting ductile shear zone; WR-F—Wulian—Rongcheng faults

形及矿物共生组合也不同。因此,我们可以从显微构造特征和同变形期间稳定共生矿物组合及矿物成分变化来判断韧性剪切带的形成环境。据同变形期稳定矿物组合的变质相,认为该剪切带形成时的温度不低于 450°C ,且有可能达到 600°C ,压力约为 $6.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。按正常地热增温率计算,该韧性剪切带形成于地壳 $15 \sim 20 \text{ km}$ 深处,相当于中地壳范围。由于具有多重扩散域特征的钾长石所能提供的热—年代学演化史限于 $450 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 的温度范围,因此认为这条伸展韧

性剪切带的确定,能更好地解释苏北—胶南地区于172~196 Ma 以及105~123 Ma 期间存在快速冷却事件(据多重扩散域 ^{40}Ar - ^{39}Ar 热年代学研究)^[26,27]。

3.3 伸展韧性剪切带与高压、超高压变质岩的剥露问题

本带位于高压、超高压变质带西北部,也是胶南隆起变质岩区西部和西北部的边界。就目前研究成果看,该韧性剪切带未与超高压变质带直接接触,中间隔有非高压变质岩。据运动学性质表明,它是胶南变质隆起区抬升过程中形成。其形成深度至少在中地壳以上范围内。高压、超高压变质岩的抬升和剥露,是通过斜向伸展拆离构造作用实现的(图6)。五莲—荣城断裂与该韧性剪切带构造关系表明,苏北—鲁东南地区高压、超高压变质带的后期折返与美国西部科迪勒拉变质核杂岩的剥露十分相似。所不同的是,在苏北—鲁东南地区为斜向伸展,而在科迪勒拉造山带,伸展作用基本上垂直于造山带走向。苏北—鲁东南地区多重扩散域 ^{40}Ar - ^{39}Ar 热年代学研究所揭示的两次快速冷却事件可能反映了两个快速伸展和深部变质地质体的快速剥露阶段。但是,超高压变质岩是否以逆冲为主的方式折返于中、下地壳,需要进一步工作。

参 考 文 献

- 1 从柏林,王清晨. 中国超高压变质岩研究评述. 科学通报,1994,39(24):2214~2218.
- 2 周鼎武,刘良. 造山带高压、超高压变质岩形成和折返的地球动力学研究. 地学前缘,1995,2(1~2):59~66.
- 3 Smith D C. Eclogites and Eclogite-facies rocks. Amsterdam: ELSEVIER,1988. 1~206.
- 4 Carswell D A. Eclogite facies rocks. New York: Chapman & Hall,1990. 1~393.
- 5 游振东. 变质地质学的三大前缘课题. 地学前缘,1995,1(1~2):111~124.
- 6 尹玉军. 苏北、胶南地区榴辉岩的特征及成因探讨. 岩石矿物学杂志,1991,10(1):11~13.
- 7 胡克,张树业. 华中榴辉岩及其成因的若干问题. 长春地质学院学报,1991,21(3):283~290.
- 8 刘晓春,刘先文,胡克. 论大别地块中榴辉岩与围岩的变质关系及区域“递增”变质带的形成. 长春地质学院学报,1992,22(4):366~372.
- 9 苏尚国,陈珍珍,顾德林. 山东诸城地区胶南群高压变质作用特征. 现代地质,1994,8(1):65~72.
- 10 Lai Xingyun, Su Shangguo et al. High-pressure relics in gneisses surrounding the eclogite in Zhucheng area, Shandong, China, Chinese Science Bulletin. 1995, 40(Supplement):83~85.
- 11 Chopin C. Very-high-pressure metamorphism in the western Alps: implications for subduction of continental crust. Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1987, 321A:179~183.
- 12 Platt J P. The uplift of high-pressure low-temperature rocks. Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1987, 321A:87~103.
- 13 Cloos M, Shreve R L. Subduction-channel model of prism accretion, melange formation, sediment subduction, and subduction erosion at convergent plate margins. Pure & Applied geophysics, 1988, 128:449~545.
- 14 Coney P J. The regional tectonic setting and possible causes of Cenozoic extension in the North American Cordillera. Geol. Soc. London Spec. Publ., 1987, 28:177~186.
- 15 Butler R W H. Thrust-tectonics, deep structure and crustal subduction in Alps and Himalayas. J. Geol. Soc. London, 1986, 143:857~873.
- 16 Avigad D. Exhumation of coesite-bearing rocks in the Dora Maira massif (western Alps, Italy). Geology, 1992, 20:947~950.
- 17 Lallemand H G A, Guth L R. Role of extensional tectonics in exhumation of eclogites and blueschists in an oblique subduction setting: Northeastern Venezuela. Geology, 1990, 18:950~953.
- 18 Okay A I, Sengor A M C. Evidence for intracontinental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China. Geology, 1992, 20:411~414.
- 19 Michard A, Chopin C, Henry C. Compression versus extension in the exhumation of the Dora-Maira coesite-bearing Unit, Western Alps, Italy. Tectonophysics. 1993, 221:173~193.
- 20 Hsü K J. Exhumation of high-pressure metamorphic rocks (Alps). Geology, 1991, 19:107~110.
- 21 Dobretsov N L. Blueschists and eclogites: a possible plate tectonic mechanism for their emplacement from the upper mantle. Tectonophysics, 1991, 219:253~268.
- 22 王清晨,张儒媛,从柏林等. 鲁东—苏北榴辉岩的构造特征及其折返机制. 岩石学报,1992,8(2):153~160.

- 23 Hodges K V, Walker J D. Extension in the Cretaceous Sevier orogen. North America Cordillera. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1992, 104:560~569.
- 24 张儒媛, 从柏林, 刘忠光. 苏鲁超高压变质地体及其成因解释. *岩石学报*, 1993, 9(3): 211~226.
- 25 江来利, 徐树桐, 刘贻灿等. 大别山超高压变质带的构造背景. *地质论评*, 1995, 41(3): 229~237.
- 26 陈文奇, Harrison T M, Heizler M T 等. 苏北—胶南构造混杂岩带冷却历史的多重扩散域 ^{40}Ar - ^{39}Ar 热年代学研究. *岩石学报*, 1992, 8(1): 1~17.
- 27 李齐, 陈文奇, 马宝林等. 华北、扬子板块碰撞后热演化史的初步研究. *地震地质*, 1995, 17(3): 193~198.
- 28 张长厚, 顾德林, 宋鸿林等. 胶南隆起北缘中段左行正滑韧性剪切带研究. *现代地质*, 1993, 7(4): 435~443.
- 29 Pryer L L. Microstructures in feldspars from a major crustal thrust zone, the Greenville Front, Ontario, Canada. *J. Struct. Geol.* 1993, 15: 21~36.
- 30 Yund R A, Tullis J. Compositional changes of minerals associated with dynamic recrystallization. *Contrib. Mineral Petrol.* 1991, 108: 346~355.
- 31 Tullis J, Yund R A. Dynamic recrystallization of feldspar: A mechanism for ductile shear zone formation. *Geology*, 1985, 13: 238~241.
- 32 Simpson C. Deformation of granitic rocks across the brittle-ductile transition. *J. Struct. Geol.*, 1985, 7: 503~511.
- 33 郭振一. 胶莱拗陷南缘晚侏罗世鲕状灰岩砾石中有孔虫化石的发现及其大地构造意义. *地质论评*, 1985, 31(2): 179~181.
- 34 李曙光, 葛宁洁. 大别山带扬子陆块北缘边界—几个地质地球化学新证据. *中国东南海陆岩石圈结构与演化研究* (李继亮主编). 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 46~54 页.

The Role of Extensional Tectonics in the Exhumation of High-and Ultrahigh-Pressure Rocks in Northern Jiangsu and Southeastern Shandong

Zhang Changhou, Chai Yucheng, Song Honglin and Wu Zhengwen

(China University of Geosciences, Beijing, 100083)

Abstract

Although several geotectonic models concerning the formation and exhumation of ultrahigh-pressure rocks have been proposed, the mechanism for exhumation of high-and ultrahigh-pressure rocks is still a focus in the investigation of continental orogenic dynamics. The authors have studied a crustal-scale extensional ductile shear zone lying on the northern and northwestern margins of the northern Jiangsu and southeastern Shandong metamorphic terrain. On the basis of studies of the geometry, kinematics, deformational environment and the time of deformation, The authors have found that the extensional tectonic deformation oblique to the trend of the entire high-and ultrahigh-pressure metamorphic belt is responsible for the exhumation of high-and ultrahigh-pressure rocks from the middle crust in northern Jiangsu and southeastern Shandong.

Key words: extensional tectonics; ductile shear zone; high-ultra-high-pressure rocks; mechanism of exhumation

作者简介

张长厚,男,1964年生。1985年毕业于武汉地质学院地质系,1988、1996年分别获中国地质大学(北京)地质矿产系构造地质学专业硕士和博士学位。现任中国地质大学(北京)地质矿产系副教授。通讯地址:100083,北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)构造地质教研室;电话:(010)62341806;E-Mail:changhou@cugb.edu.cn