

# 再论“大陆深俯冲和折返动力学”：来自中国大陆科学群钻及苏鲁超高压变质带的制约\*

许志琴 梁凤华 杨经绥 张泽明 唐哲民

XU ZhiQin, LIANG FengHua, YANG JingSui, ZHANG ZeMing and TANG ZheMin

中国地质科学院地质研究所国土资源部大陆动力学重点实验室,北京 100037

Key Laboratory for Continental Dynamics, MLR, Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China

2009-04-01 收稿, 2009-06-01 改回.

**Xu ZQ, Liang FH, Yang JS, Zhang ZM and Tang ZM. 2009. Continental deep subduction and exhumation dynamics: Constraints from holes of the Chinese Continental Scientific Drilling and the Sulu HP-UHP metamorphic terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7):1561–1574**

**Abstract** Detailed reconstruction for plastic deformed, ductile shearing, fluids reaction and metamorphic geochemistry during subduction and exhumation of ultrahigh-pressure (UHP) rocks from petro-tectonic profiles of the main hole and satellites of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD-MH) and the Sulu metamorphic terrane have provided new important constraints for the deep subduction and exhumation dynamics of continents. It is proposed that the Sulu UHP metamorphic terrain is composed of flat subduction-exhumation complex belts which overlap on the Yangtze Block as superimposed slices. Based on the plastic deformation features of eclogites and garnet peridotites during the whole exhumation, the penetrative ductile shear zones formed at the early stage (230 ~ 220Ma) and enhanced at the main stage (220 ~ 200Ma) are thought to be the important extrusion mechanism of subduction slices. Furthermore, it is suggested that TanLu strike slip fault has played an important role on the evolution of the Sulu high/ultrahigh-pressure metamorphic terrain.

**Key words** Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt; Subduction/exhumation complex; Channel flow and multiple extrusion mechanism; Penetrative ductile shearing

**摘要** 通过 CCSD-MH、卫星孔的岩性-构造剖面 and 苏鲁造山带中榴辉岩-超镁铁质岩的产出、深俯冲/折返过程的岩石的塑性流变特征和变形序次的分析、俯冲-折返过程中流体作用及变质化学地球动力学对流变学行为的制约,以及韧性剪切作用形成的折返年代学时限,提出苏鲁超高压变质地体为面型深俯冲/折返杂岩带组成的穹形挤出推覆岩片、叠置在扬子陆块之上;根据岩石变形微构造及组构的分析,重塑超高压变质岩石深俯冲阶段、折返早期、折返主期和折返后期的塑性流变;提出深俯冲的物质沿板块汇聚边界的多层隧道呈多重/分片样式“挤出”的折返模式,并认为在折返初期开始(230 ~ 220Ma)和折返主期(220 ~ 200Ma)形成的透入性韧性剪切是俯冲岩片挤出的重要机制;提出郟庐走滑断裂的形成对苏鲁高压/超高压变质地体演化的影响。

**关键词** 苏鲁超高压变质带;俯冲/折返杂岩带;隧道流与分片折返挤出;透入性韧性剪切

**中图分类号** P588.348

研究表明,在北中国和扬子板块之间的苏鲁印支造山带中,大面积出露的超高压(UHP)变质岩石曾在 230Ma 前经历大陆深俯冲至 100km 以下的地幔深处,而后又经历了折返过程强烈退变质和变形作用的叠置。尽管如此,在折返的岩石中依然保留了大量早期大陆深俯冲的信息:包括超高压矿

物组合、锆石中的柯石英包体、超高压变质岩石的温压条件和  $P/T$  轨迹、超高压变质年代学的记录、大陆深俯冲过程中的塑性变形机制、岩石物性、流变学、流体作用和壳幔反应,以及地震层析的记录等。因此,识别和重塑大陆深俯冲和折返的全过程以及动力学,这是继矿物学、岩石学、地球化学及

\* 本文得到国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB716504)、国家自然科学基金重大项目(40399141)、中国地质调查局地质大调查项目(121201056606)和国土资源部大陆动力学重点实验室的联合资助。

第一作者简介:许志琴,女,研究员,中国科学院院士,构造地质学专业,E-mail: xzq@ccsd.cn

同位素年代学大量研究之后,超高压变质地体研究的新热点。

苏鲁高压/超高压变质地体呈现穹形挤出推覆板片(纳布)的折返构造样式叠置在扬子克拉通之上,中国大陆科学钻探主孔(CCSD-MH)位于穹形挤出推覆板片南部面向 SE 缓倾的构造背景之上(Xu *et al.*, 2009b)。中国大陆科学钻探主孔(CCSD-MH)为我们提供了 5158m 深度的地下系列金柱子(剖面);此外,还实施了数口卫星孔,包括位于东海县芝麻坊的 CCSD-PP1(深度 432m)、位于 CCSD-MH 东南 200m 的 CCSD-PP2(深度 1008m)、位于江苏岗上的 CCSD-PP3(深度 705m)和位于北苏鲁荣成县滕家集的 CCSD-PP6(深度 197.36m),5 口群井的总钻进为 7490m(图 1)。

根据 CCSD-MH 的岩性/构造/地球化学/流变学/年代学

剖面以及区域地质构造调查的综合成果,作者曾发表了“深俯冲和折返动力学:来自中国大陆科学钻探主孔及苏鲁超高压变质带的制约”一文(许志琴,2007),初步阐述了苏鲁高压-超高压变质地体的折返构造格架,超高压变质带岩石的原岩时代和构造属性,巨量物质深俯冲以及地幔深部异常矿物的发现,俯冲-折返过程年代谱的建立,以及岩性/构造剖面对地球物理 VSP 剖面验证,揭示深俯冲和折返过程中的岩石组构特征和流变学状态,流体效应以及壳幔作用,提出新的板块会聚边界大陆地壳分片、多重的深俯冲/折返的新模式(Xu *et al.*, 2006),为超高压变质带的深俯冲和折返动力学研究提供了一个典例。

在上述基础上,作者通过 CCSD-MH、其它卫星孔的岩性-构造剖面和苏鲁造山带中榴辉岩-超镁铁质岩石的产出、深

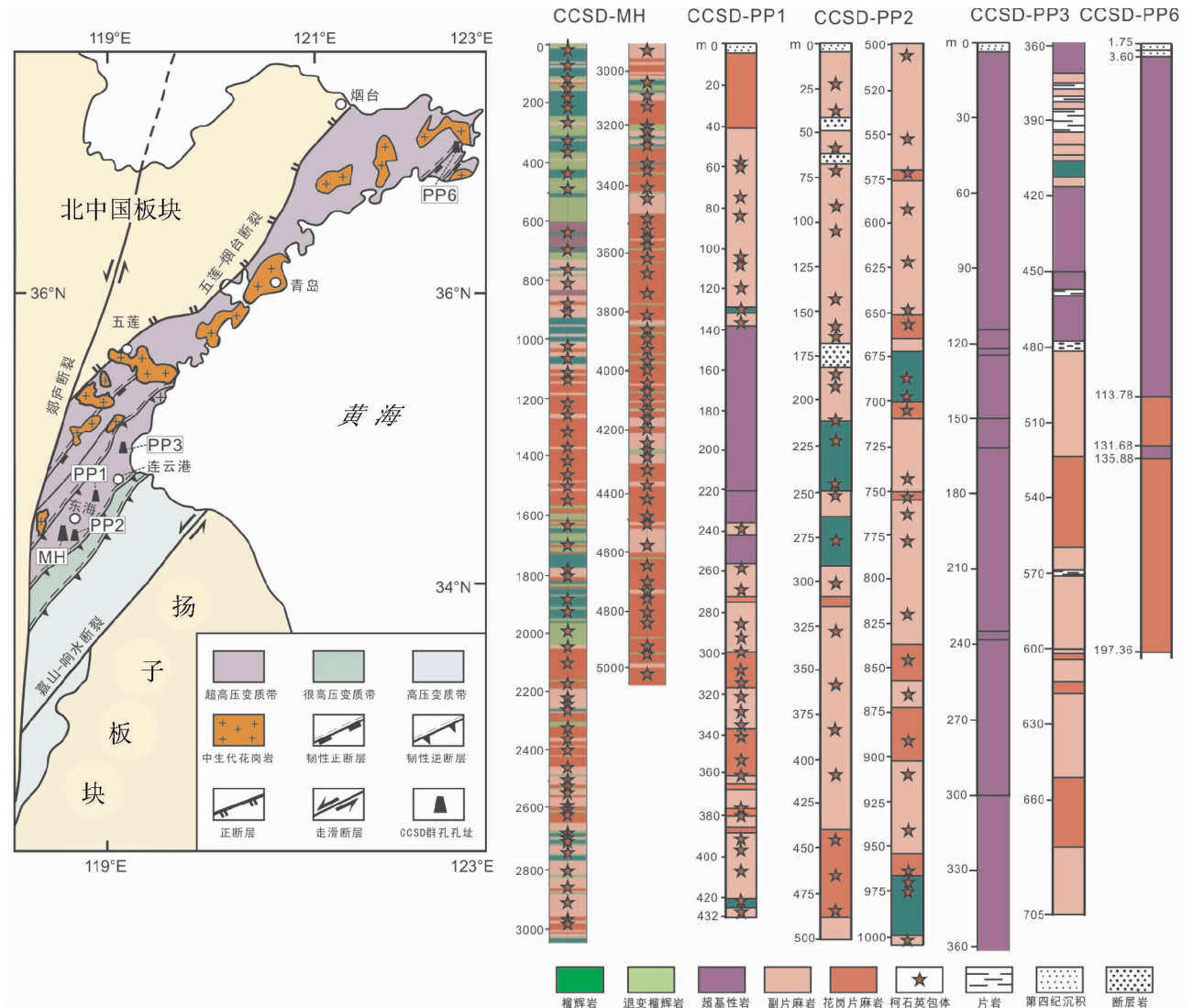


图 1 苏鲁 HP-UHP 变质地体的构造图(左)及中国大陆科学钻探群钻剖面图(右)

CCSD-MH 为主孔;CCSD-PP1、CCSD-PP2、CCSD-PP3、CCSD-PP6 为卫星孔

Fig. 1 The tectonic map of the Sulu HP-UHP metamorphic terrane (left) and petrological profiles of the CCSD-MH and satellite holes (right)

俯冲/折返过程岩石的塑性流变特征和变形序次的分析、俯冲-折返过程中流体作用及变质化学地球动力学对流变学行为的制约,以及韧性剪切作用形成的折返年代学时限,提出超高压变质深俯冲/折返杂岩带、俯冲/折返隧道流与折返挤出机制的新理念,进一步论述超高压变质带的深俯冲和折返动力学,并探讨了郯庐走滑断裂的形成对苏鲁高压/超高压变质地体演化的影响。

## 1 榴辉岩-超镁铁质岩体的构造产出

CCSD-MH (5158m 深度)岩性-构造剖面对 VSP 地震反射剖面的精细地质构造解析(图 2)揭示了在 CCSD 孔区 5000 多米深度范围的构造格架,总体呈现面理向南东缓倾(倾角 20°~25°)的 5 个构造岩片(SA,SB,SC,SD,SE),它们之间的界线为数百米宽的糜棱岩化和高剪切应变的韧性剪切带(DFa,DFb,DFc,DFd,DFe),其中岩心中可见的为 DFa,DFb 和 DFc,呈现面理顶面朝 NW 方向的逆冲推覆性质。揭示了区域超高压变质岩区在主孔下的深部延展情况。根据

榴辉岩-超镁铁质岩在片麻岩中的构造样式以及原岩之间的无继承性关系表明榴辉岩-超镁铁质岩为外来体,苏鲁超高压变质地体是大面积出露的深俯冲/折返杂岩带。

### 1.1 榴辉岩、超镁铁质岩和片麻岩之间的接触关系

CCSD 主孔岩性剖面揭示了 50 多种岩石类型,其中正片麻岩类厚度约 2100m,占 44%;副片麻岩类厚度约 1400m,占 28%;榴辉岩类厚度 1300m,占 26.6%;以及超镁铁质岩类约 80m,占 1.4%。榴辉岩和超镁铁质岩石总体呈布丁、透镜、薄夹层、构造团块和褶皱等样式夹于正、副片麻岩围岩中(图 3),榴辉岩和超基性岩主要产出在 SA 岩片的 0~850m 以及 SB 岩片的 1596~2050m 等深度,在 SC 和 SD 岩片中大量小岩体呈透镜或薄层状产出。SA 岩片由上部榴辉岩夹超基性岩岩性单元和下部副片麻岩夹超基性岩、榴辉岩和正片麻岩透镜体岩性单元组成,底界为韧性逆冲型剪切带(DFa,深度 683~738m)。上部榴辉岩和超基性岩组成的复合岩体(深度 0~738m)为地表毛北榴辉岩/石榴石橄榄岩复合岩体的地下延续部分,总体面理倾向 80°~130°E,平均 108°E;倾角 40°~60°,平均 55°,在区域上构成与片麻岩层同褶的毛北

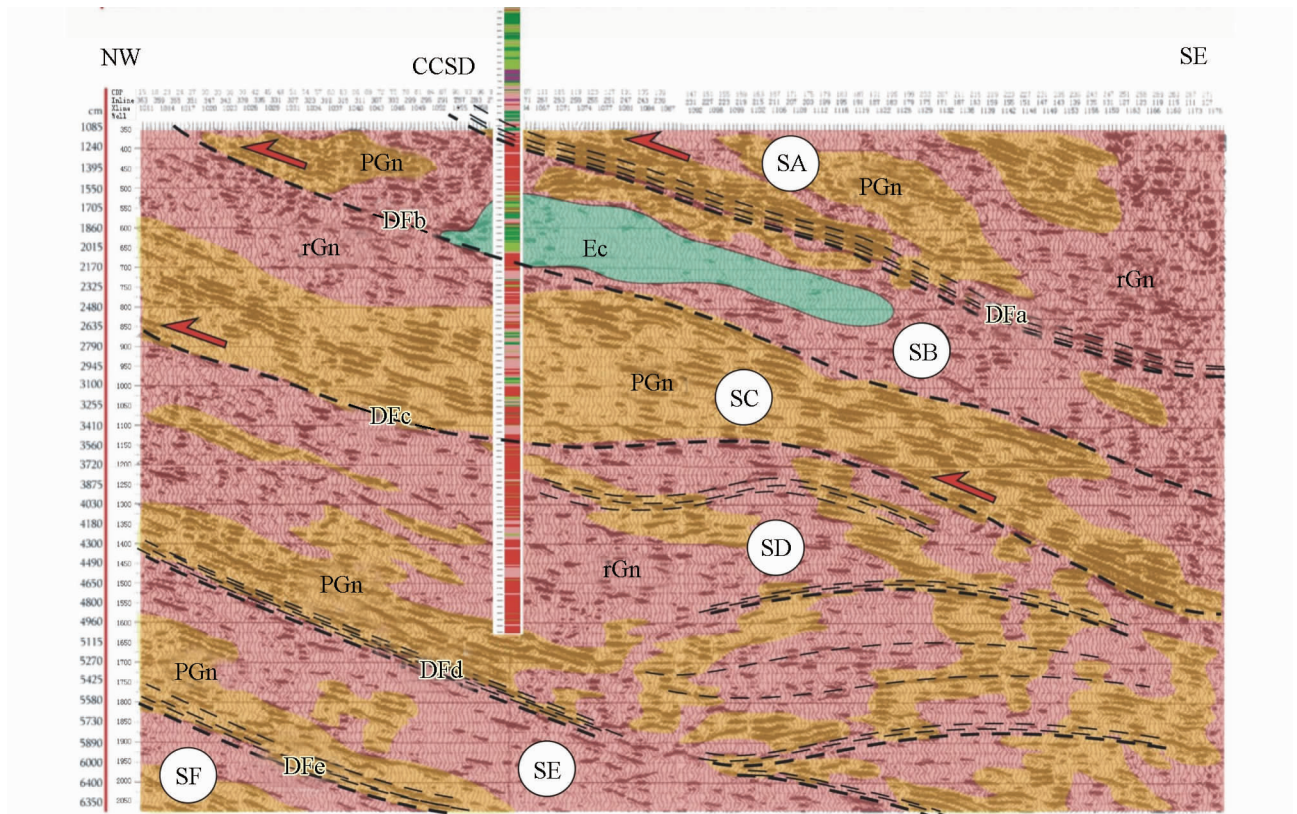


图 2 通过 CCSD-MH 孔区 1300~6000m 深度的地质构造解释图(据 Xu *et al.*, 2009a)

SA,SB,SC,SD - 超高压变质构造岩片;DFa,DFb,DFc,DFd,DFe - 韧性剪切带;PGn-副片麻岩;rGn-花岗片麻岩;Ec-榴辉岩

Fig. 2 Geological structural interpretation of the profile from 1300 to 6000m in depth across the CCSD-MH area (after Xu *et al.*, 2009a)

SA, SB, SC, SD UHP tectonic slices; DFa, DFb, DFc, DFd, DFe - ductile shear zones; PGn- paragneiss; rGn-granitic gneiss; Ec-eclogite

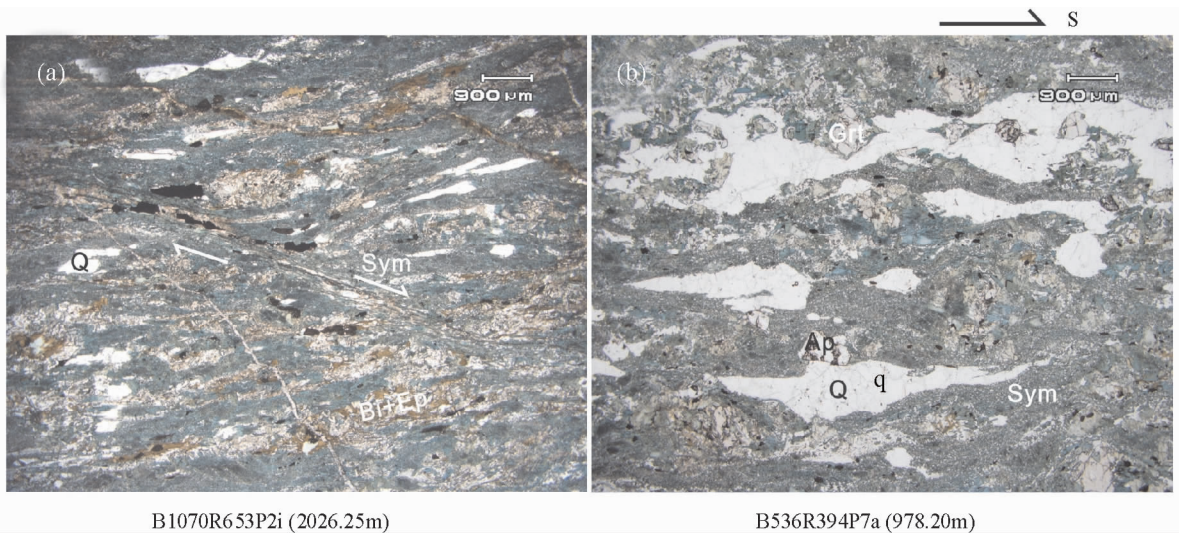


图3 糜棱岩化退变质榴辉岩组成的韧性逆冲型剪切带的显微照片

Grt -石榴子石; Ap-磷灰石; Sym-后合成晶; Bi-Ep-黑云母-绿帘石

Fig. 3 Microphotograph of ductile thrust shear zones composed of mylonitic retrograde metamorphic eclogite

Grt-garnet; Ap- Apatite; Sym-symplektite; Bi-Ep-Biotite-Epidote

“S”型构造样式(Xu *et al.*, 2009a)。

在SA岩片中,超镁铁质岩总体有两种产出:600~680m深度的超镁铁质岩呈条带夹于榴辉岩体中,并与榴辉岩面理一致;843.05~850.72m深度向东陡倾的超镁铁质岩呈构造块体夹在片麻岩中,顶面和底部分别被由糜棱岩化片麻岩组成的韧性逆冲型剪切带所限,上界向SE陡倾(倾向123°,倾角53°)、下界向SE极缓倾(倾向134°,倾角5°),构成折返的构造岩块。

在SB岩片的1596~2050m深处发现新的榴辉岩岩性单元,由多硅白云母榴辉岩夹少量绿帘黑云(角闪)斜长片麻岩组成,上段(1596~1850m)的面理走向平均70°E,倾向160°S,倾角平均57°;下段(1850~2038m)面理倾向60°E~140°S,平均为101°E,面理倾角为40°~60°,平均52°。在该榴辉岩层底部出现15m厚的由糜棱岩化退变质榴辉岩组成的韧性逆冲型剪切带(图3a),面理倾向平均109°E,倾角平均34°。特别需指出的是,根据CCSD-MH的VSP地震解释剖面(图2)中1596~2050m深度的榴辉岩体呈现弱或无反射图像,推测榴辉岩体为向SE方向延伸2km的大型榴辉岩构造透镜体。另外,在退变榴辉岩中普遍发现由糜棱岩化或强剪切变形的岩石组成的微型韧性剪切带(图3b)。

## 1.2 榴辉岩、超镁铁质岩和片麻岩的原岩非继承性关系

通过对各种榴辉岩、斜长角闪岩、副片麻岩和正片麻岩中锆石包体的精细研究发现,斜长角闪岩的锆石中含有与榴辉岩一致的超高压峰期变质矿物组合(Coe + Grt + Omp, Coe + Grt + Phe, Coe + Omp + Rt等),但副片麻岩的锆石中却有

着不同于榴辉岩的超高压峰期变质矿物组合Coe + Jd + Grt + Ap, Coe + Jd + Phe + Ap等,而且副片麻岩类锆石中的辉石类型为硬玉,不含绿辉石,这与榴辉岩和斜长角闪岩的锆石中只含绿辉石不含硬玉是截然不同的,两者虽然都包裹有石榴石,但其矿物成分也有较大差异,而且副片麻岩类与榴辉岩类两者之间多为相对突变的接触,接触边界附近没有反应关系;另外,榴辉岩与正片麻岩之间的关系与副片麻岩相似,除了产出上的突变接触及接触边界附近退变质更强烈之外,正片麻岩的锆石中超高压峰期包体组合为Coe + Ky, Coe + Phe, Coe + Ky + Ap等,并未有石榴石和绿辉石存在,可见它们之间也不是继承性的关系(Liu *et al.*, 2004; 刘福来等, 2005)。

年代学数据表明,CCSD-MH的正片麻岩原岩是新元古代的花岗质岩石,榴辉岩原岩是新元古代的基性岩石,副片麻岩的原岩为新元古-古生代的火山沉积岩。石榴单辉橄榄岩成分和结构特征表明为一超镁铁质堆晶岩,具主要元素接近原始地幔、难熔元素比原始地幔低的特点,原岩为岩浆结晶形成的岩体,低 $\delta^{18}\text{O}$ 值说明俯冲之前经历的地壳混染过程,并在之后的印支期俯冲-折返过程中,发生了与其它岩石之间的构造并置。

位于江苏芝麻坊CCSD-PP1(深度432m)孔中厚度120m的石榴石橄榄岩产于片麻岩中,研究表明其来源于克拉通岩石圈下的富集地幔,为早期大陆地幔产物,在印支期(223.75 ± 7.5Ma)的中国南北板块俯冲-折返过程中作为地幔楔物质被带到地表。CCSD-PP3为江苏岗上超镁铁岩体上的卫星孔(CCSD-PP3),430m厚的石榴石橄榄岩也位于片麻岩中,矿物组合和地球化学特征说明这套岩石属亏损型,研究表明其

为晚元古代(726 ± 56Ma) 侵位到地壳的地幔岩,在印支期(240 ± 2.7Ma) 的中国南北板块俯冲折返过程中经历了超高压变质作用。位于山东荣成滕家集马草沓 CCSD-PP6 的厚度约 110m 的橄榄岩体呈构造岩块出露于新元古代的花岗闪长片麻岩中,劈理发育,地球化学特征指示其为岩石圈内亏损地幔物质,被深俯冲的岩片裹挟到深部,经历超高压变质作用后又折返到地表,并经历角闪岩相退变质作用(Yang *et al.*, 2009)。

结合区域上的情况,可以认为榴辉岩、超镁铁质岩体和片麻岩之间无论在俯冲前还是深俯冲-折返过程中都不存在原位的继承性关系,而是互相以复杂的构造关系接触,是俯冲与折返杂岩带的重要证据。

## 2 超高压变质岩的塑性流变及俯冲/折返变形序次

CCSD-MH 的整个岩性-构造柱(尤其是榴辉岩和石榴橄榄岩)中,保存有丰富的深俯冲-折返过程中的变形和组构动力学信息,为我们提供了研究俯冲-折返极为复杂的变形样式以及各岩石构造单元之间变形叠置关系的窗口。位于石榴橄榄岩中的榴辉岩,以团块、条带、薄层或流动褶皱等样式产出,其中石榴橄榄岩成分相对均匀,主要由橄榄石、石榴石、单斜辉石、钛斜硅镁石及很少量的斜方辉石组成;榴辉岩中除了石榴石和绿辉石之外,副矿物主要为钛铁矿,其中石榴石的含量相差很大,有的几乎为纯的石榴子石岩(Grt 含量 >90%)。位于其它岩心层位的榴辉岩成分多样,以金红石榴辉岩、石英榴辉岩、多硅白云母榴辉岩等为主。无论榴辉岩或石榴橄榄岩都经历了各种退变质作用的改造,仅有少量新鲜样品被保存。

大量岩石学研究已经证明大陆板块的俯冲深度 >150km (Zhang *et al.*, 2003; 许志琴等,2003,2005; 刘祥文等,2005; 杨经绥等,2005; 朱永峰,2005; Liu *et al.*, 2006), 俯冲峰期温度可达 800 ~ 900℃ 或更高,折返初期也经历了等温甚至升温的阶段 (Zhang *et al.*, 2005; 张泽明等,2005; 宗克清等,2006), 这为超高压变质岩石的塑性流变提供了充分的温度条件。通过 CCSD-MH 及苏鲁区域的地表样品中不同类型 UHP 变质岩的 SHRIMP U-Pb, LA-ICP-MS 和 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 多种方法的年代学测定,揭示了苏鲁高压-超高压变质岩的俯冲-折返动态演化全过程的年代谱:俯冲阶段从 260 ~ 254Ma 到 237 ~ 230Ma;折返阶段在 237 ~ 230Ma 到 220 ~ 200Ma (Liu *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2009b), 意旨俯冲深度从 30km 到 150km,俯冲速率为 4.8 ~ 6.1km/Ma,折返深度从 150km 到 15 ~ 20km,折返速率为 5.2 ~ 5.4km /Ma (Xu *et al.*, 2009b)。CCSD-MH 超高压变质岩石岩心的微构造分析表明超高压变质岩经历了深俯冲/折返的强烈塑性流变,根据变形序次可以识别出以下 4 个俯冲/折返变形阶段。

### 2.1 深俯冲阶段的塑性流变及流变机制

在 CCSD-MH 的 SA 岩片中,榴辉岩/超基性岩的面理产状呈南北走向和向东陡倾(50° ~ 60°),并被折返阶段形成的走向 NE-SW 和向 SE 缓倾的韧性逆冲性剪切带 (DFa) 切割。在榴辉岩/超基性岩的面理上普遍存在近 NS 向水平拉伸线理、紧闭的 A 型褶皱以及顶面自北朝南的剪切应变,通过应变测量证明变形机制为简单剪切 (Xu *et al.*, 2006)。经过大陆科学钻探主孔 0 ~ 738m 榴辉岩的绿辉石优选方位的电子背散射 (electron backscatter diffraction, EBSD) 测量,发现绿辉石表现出强烈的优选方位 (LPO),绿辉石的位错蠕变由 [001] (100) 和 1/2 <110 > {1T0} 滑移系控制,其组构的不

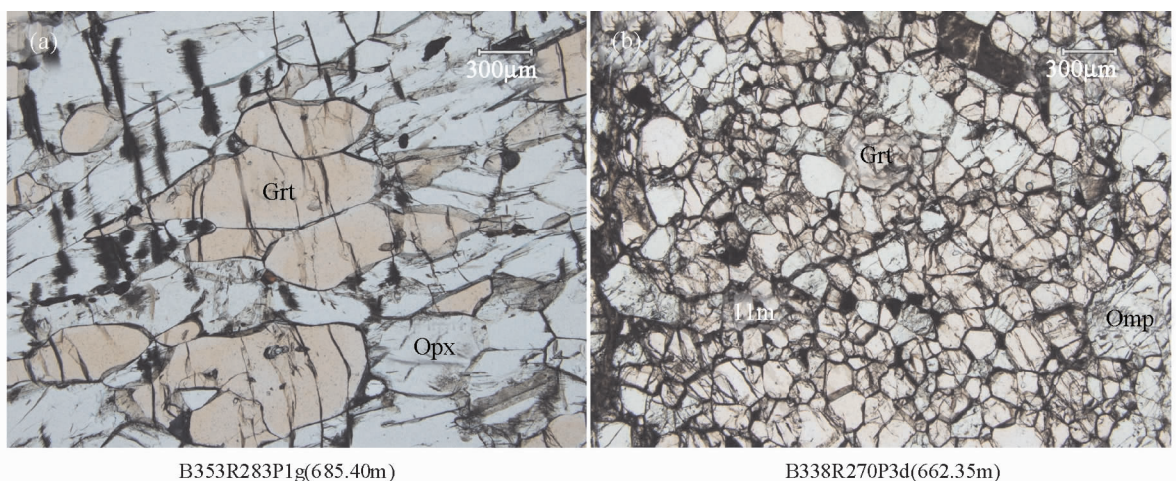


图 4 石榴石晶体的压扁拉伸高温应变(a)及细粒重结晶石榴石(b)

Grt-石榴子石; Opx-斜方辉石; Ilm-钛铁矿; Omp-绿辉石

Fig. 4 Flattened and elongated garnet crystal (a) and fine-grained recrystallization garnet (b) at high temperature strain

Grt-Garnet; Opx-Orthopyroxene; Ilm-Ilmenite; Omp-Omphacite

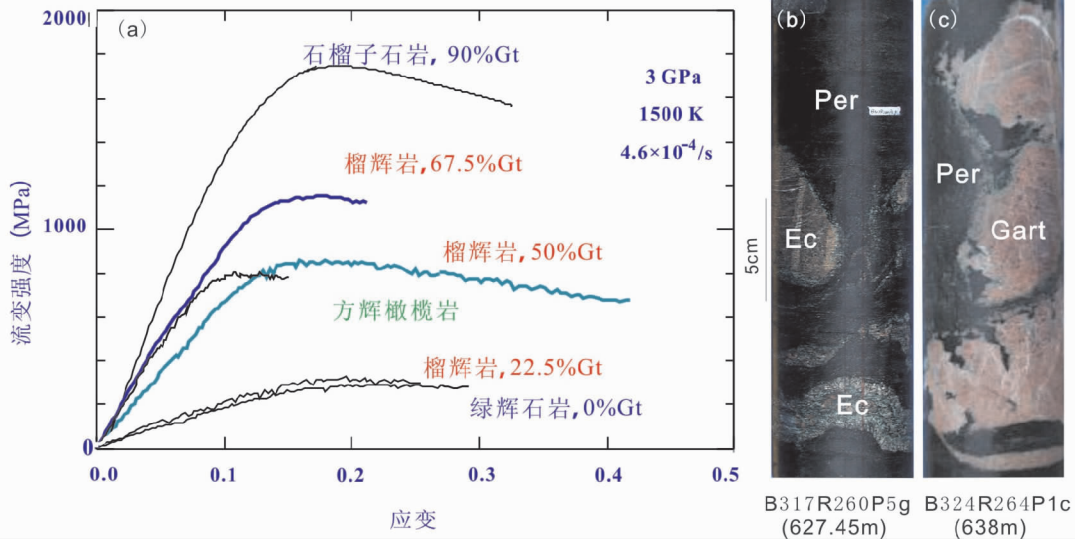


图5 榴辉岩的流变强度(a)以及对超镁铁质岩中榴辉岩塑性流变的制约(b-c)(流变强度图据金振民等,2001)

样品来自 CCSD-MH, (b)-B317R260P5g(627.45m)石榴橄榄岩中的榴辉岩褶皱条带; (c)- B324R261P1c(638m)石榴橄榄岩中的石榴子石岩大团块

Fig. 5 Rheological strength of eclogite (a) and its constraining for plastic deformation of eclogite in ultramafic rock (b-c) (rheological strength map after Jin *et al.*, 2001)

Sample from CCSD-MH, (b)-B317R260P5g (627.45m) eclogite fold belt in garnet peridotite; (c)- B324R261P1c(638m) garnet rock masses in garnet peridotite

对称性指示了由北向南的剪切指向(Xu *et al.*, 2009b)。根据单斜辉石的高温实验结果,毛北榴辉岩经历了 800 ~ 900°C 的超高压变质作用(Xu *et al.*, 2009b),反映深俯冲阶段的强烈塑性流变以及流变学的特征。另外石榴石晶体的压扁拉伸也反映橄榄岩和榴辉岩在深俯冲中经历强烈的高温塑性变形(图 4a),因为高温高压实验证明,石榴石的塑性变形需要在 > 850°C 的条件下才能发生(Ji and Martignole, 1994; Karato *et al.*, 1995; Wang *et al.*, 1999),但是始终没有发现石榴子石的结晶优选方位(Ji *et al.*, 2003; Xu *et al.*, 2009b; 许志琴等, 2007; Wang *et al.*, 2009),这是因为石榴石拥有 5 个以上的独立滑移系,不易在某一固定方向上形成优选方位(Ji and Martignole, 1994)。在橄榄石、辉石、金红石、石榴石等超高压矿物中还普遍发现高密度位错残留(陈晶等, 2005; 刘祥文和金振民, 2006),也反映橄榄岩和榴辉岩在深俯冲中经历强烈的高温条件下的强烈塑性变形(图 4a)。

CCSD 主孔 600 ~ 680m 深度石榴橄榄岩中的大量榴辉岩,由于石榴石的含量达到 50% ~ 90%,所以其流变强度高于橄榄岩(图 5a)(金振民等, 2001),在强烈的塑性流变过程中石榴石的含量明显制约了榴辉岩各种变形样式的形成,如团块、透镜和强烈流动的褶皱细条带等(图 5b)。且在 639.8m 处见鲜红色坚硬的石榴子岩(含 90% 石榴石)在黑色石榴橄榄岩中呈特殊形态的大团块,边部具不规则的港湾结构,在大团块周围散布许多经塑性变形分解而生成的大大

小小的离散团块(图 5c)。

地球物理学家在对地震震源机制的系统研究中发现,沿着俯冲板片存在不同的构造变形域:< 100km 浅部深度为简单剪切,100 ~ 400km 为向下拉伸(即收缩应变域)(Isacks and Molnar, 1971)。因此,CCSD-MH 中出现的两种变形机制:简单剪切和收缩可能是深俯冲阶段不同深度的主要变形机制。

## 2.2 折返早期阶段的塑性流变及流变机制

折返早期的塑性流变表现为三种形式:

(1) 榴辉岩与橄榄岩接触的边界普遍发育一层金云母方辉岩反应带(图 6),宽度可从数毫米变化至十厘米,成分以金云母和斜方辉石为主(> 80%),并含有来自两侧榴辉岩和石榴橄榄岩中的残余相矿物,如石榴石、绿辉石、钛斜硅镁石和少量橄榄石等。反应带中的矿物与两侧相比粒度明显加粗,含水矿物的聚集表明这是流体与两种岩石共同反应的产物。同时还发现其中有石榴石、辉石等旋转错断、金云母扭折等简单剪切变形现象,指示自南向北的剪切方向(图 7)。强烈的剪切作用造成岩石中的水重新分布,向着弱化剪切带内部聚中,在高温高压的共同作用下,流体与橄榄岩和榴辉岩发生反应,并造成两者之间的物质交换,形成金云母、斜方辉石等新矿物和矿物加粗现象。可见反应带的形成是韧性剪切变形与流体参与下的变质反应共同作用的结果。

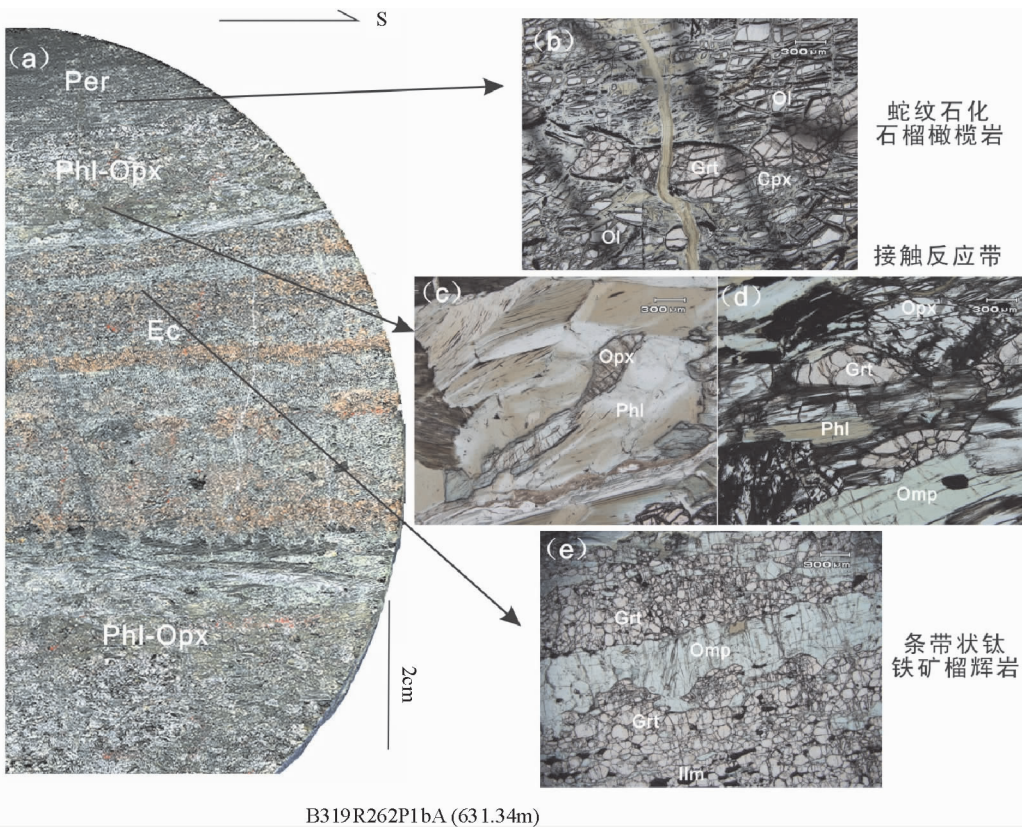


图6 榴辉岩(Ec)与橄榄岩(Per)接触边界发育的金云母方辉岩反应带(E/P)

样品来自 CCSD-MH B319R262P1bA,深度 631.34m,XZ 面。Ol-橄榄石;Phl-金云母;Opx-斜方辉石;Grt-石榴石;Omp-绿帘石

Fig.6 Reaction band of phlogopite-orthopyroxenite on the boundary between eclogite and peridotite (E/P)

Sample from the XZ plan of B319R262P1bA (631.34m), CCSD-MH. Ol-Olivine; Phl- phlogopite; Opx-Orthopyroxene; Grt-Garnet; Omp-Omphacite

(2) 在 CCSD-MH 中大量细粒重结晶石榴石(平均粒度:  $0.14 \times 0.1 \text{ mm}$ ) (图 5b) 的出现与 Wang and Ji (2000) 实验中所反映的特征一致, 指示了以扩散蠕变为主机制的塑性变形, 这与矿物中大部分位错消失的特点(刘祥文和金振民, 2006) 相一致, 对此类细粒矿物晶体的富林指数统计结果显示  $K \approx 1$ , 也指示了简单剪切的应变环境(Ji *et al.*, 2003)。研究表明, 快速折返过程中, 在持续的剪切作用下, 榴辉岩和橄榄岩的接触部位和薄的榴辉岩条带内易成为应变局部集中的剪切带。在强烈应变的同时动态重结晶加剧, 矿物颗粒不断细化, 岩石的变形机制从位错蠕变切换到扩散蠕变, 进一步造成岩石流动强度地大幅度降低(稽少丞等, 2008)。

(3) 在 CCSD-MH 向东陡倾的榴辉岩内部发育一系列向东缓倾的面理(S2), 制约了新鲜榴辉岩和退变榴辉岩的分带, 并在两者之间形成平行面理的微型韧性剪切带, 推测剪切带在折返早期的剪切应变与俯冲峰期相同, 具继承性(图 8)。另外石英榴辉岩中出现的  $\langle C \rangle$  滑移系的高温 ( $> 650^\circ\text{C}$ ) 石英组构也可能为折返早期的产物(许志琴等, 2004)。

### 2.3 折返主期阶段的塑性流变及流变机制

区域和钻孔中大型 NE-SW 走向的宽数百米至 1km 的韧性剪切带 (DFa, DFb, DFc), 构成几大构造岩片 (SA, SB, SC) 之间的边界, 是折返主期阶段塑性流变的产物。例如在 CCSD-MH 第二岩性-构造单元副片麻岩岩系中, 表现了面理具 NE-SW 走向及向 SE 缓倾的韧性剪切带, 递进剪切应变造成起码两期的剪切面理及重褶的剪切褶皱, 但保持拉伸线理的常量 (NW-SE 向), 石英组构指示了  $650 \sim 400^\circ\text{C}$  的韧性剪切温度, 与该阶段角闪岩相-绿帘角闪岩相的退变质作用条件 (最高  $T = 550 \sim 650^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.50 \sim 0.70 \text{ GPa}$ ) 基本一致(许志琴等, 2004)。区域上, 位于南苏鲁的韧性剪切带普遍具有 NW-SE 拉伸线理和顶面向 NW 的逆冲剪切指向; 而北苏鲁的韧性剪切带具有 NW-SE 拉伸线理和顶面向 SE 的正滑剪切指向(许志琴等, 2003)。上述特征均反映了构造线由折返早期的 NS 向转为主期的 NE-SW 方向, 且靠近郯庐走滑断裂东侧的超高压变质岩石的构造线方向呈现 NEN-SWS 的差异转换。该阶段大型韧性剪切带部分继承自早期的微型韧性剪切带, 广泛的流体作用(张泽明

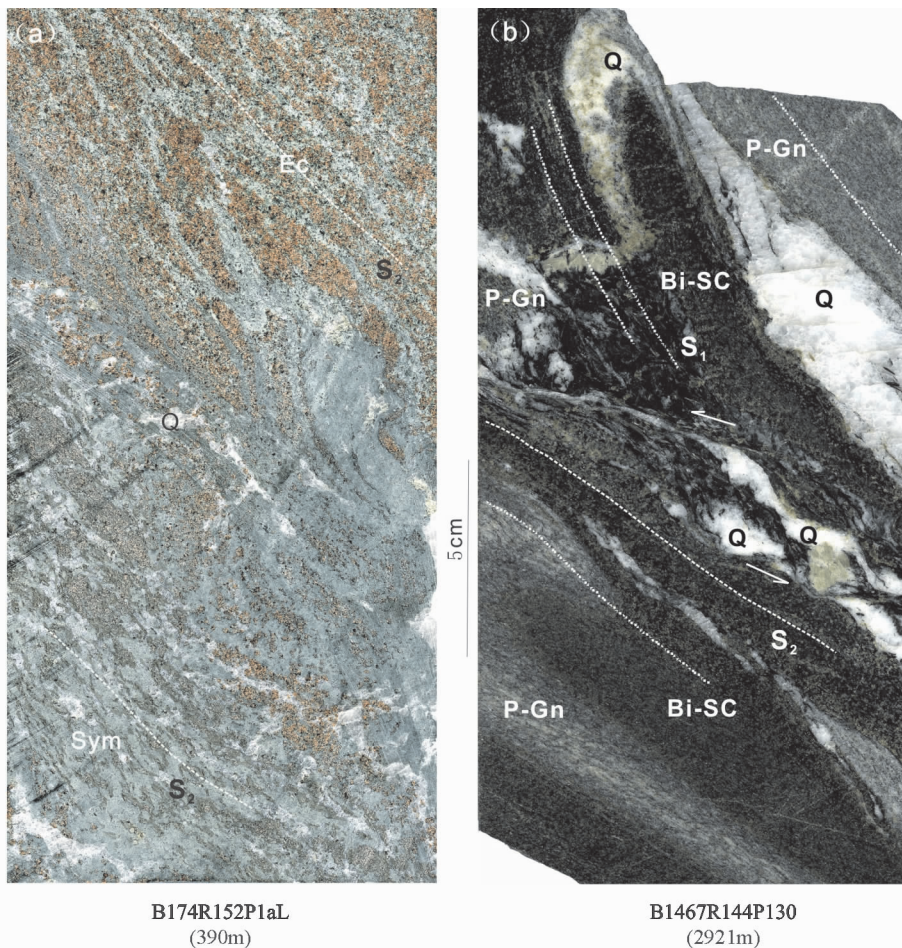


图7 折返早期阶段塑性流变的微构造特征

样品来自 CCSD-MH B174R152P1aL, 深度 390m; B1467R144P130, 深度 2921m。Ec-榴辉岩; Q-石英; P-Gn-副片麻岩; Bi-Sc-黑云母片岩。S1-第一期面理; S2-第二期面理

Fig. 7 Microstructures of plastic deformation at the early exhumation stage

Samples from B174R152P1aL (390m depth) and B1467R144P130 (2921m depth), CCSD-MH. Ec-Eclogite; Q-Quartz; P-Gn-Paragneiss; Bi-Sc-Biotiteschist. S1-the first phase of foliation; S2- the second phase of foliation

等, 2006) 对于微型韧性剪切带的合并增强起到关键的作用。

#### 2.4 折返后期阶段的塑性流变及流变机制

通过南苏鲁野外和 CCSD-MH 岩心的微构造观测表明, 在折返中期形成的 NE-SW 走向韧性逆冲剪切带上叠置的向 SE 剪切的韧-脆性正滑作用为折返后期的产物。其形成是由于折返后期苏鲁超高压变质地体上隆, 形成穹形构造, 致使在穹窿的南翼产生下滑作用。下滑时限估计在 180 ~ 100Ma, 北侧伴随有大量花岗岩侵位以及白垩纪莱阳伸展盆地的形成 (许志琴等, 2003)。CCSD-MH 中第二岩性-构造单元中存在的一系列韧性正剪切带、副片麻岩岩隙中正向滑移的剪切应变特征等即是该阶段正滑伸展应变的产物。石英低温 (< 400°C) 底面 (0001) <a> 组构造模型指示自 NW 向 SE 的剪切方向, 温压条件对

应绿片岩相退变质作用 ( $T = 300 \sim 400^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 0.30 \sim 0.35\text{GPa}$ ) (许志琴等, 2004)。

### 3 超高压变质岩石韧性透人性剪切作用的时限约束

在 CCSD-MH 岩心中记录了不同深度、不同规模的韧性剪切带, 其中普遍可见大量小型韧性剪切带。系列密集的韧性剪切带组成了数百米厚的作为构造岩片边界的大型韧性剪切带: DFa, DFb 和 DFc, 它们均为面理向 SE (或 SEE) 缓倾的逆冲型剪切带 (图 8)。小型韧性剪切带和岩片边界的产出基本一样 (不包括 SA 榴辉岩中小型韧性剪切带的产出)。通过经历强烈剪切应变和糜棱岩化的岩石中黑云母  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄测定表明: CCSD-DFa 的坪年龄为 200.86 ~ 214.12Ma, 等时线年龄 198.22 ~ 214.1Ma; CCSD-DFb 黑云母的坪年龄



CCSD-MH

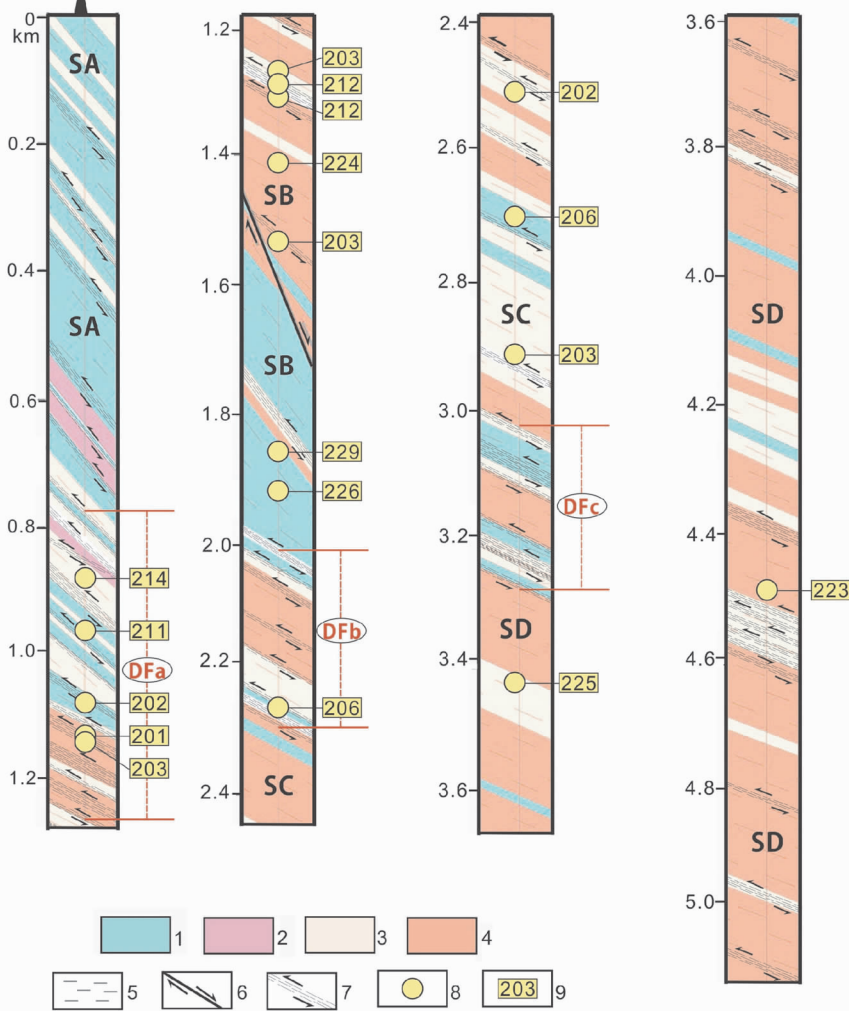


图8 CCSD-MH 构造剖面中的韧性剪切带及<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年代谱

1-榴辉岩类;2-超镁铁质岩类;3-副片麻岩类;4-花岗片麻岩类;5-面理;6-正断裂;7-韧性逆冲性剪切带;8-<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 测年样品位置;9-<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar测年数据

Fig. 8 Ductile shear zones in the structural profile of CCSD-MH and their <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar age spectrum

1-Eclogites category; 2-Ultramafic rocks; 3-Paragneiss category; 4-Granite-gneiss category; 5-Foliation; 6-fault; 7-Ductile thrust shear zones; 8-Sample locations for <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating; 9- <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating data

为 203.26 ~ 224.73Ma;等时线年龄 202.46 ~ 222.29Ma (Xu *et al.*, 2006, 2009a)。

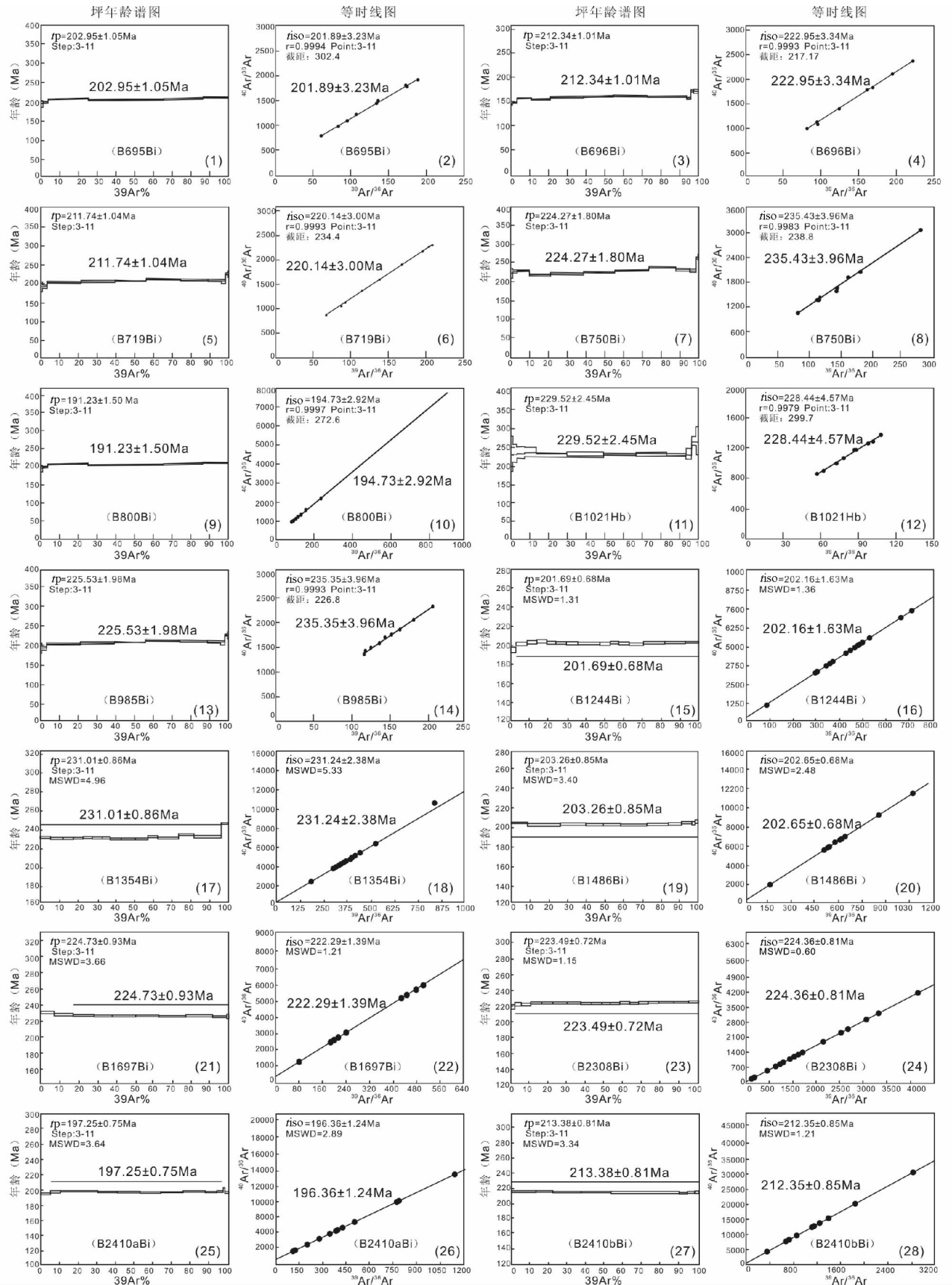
通过对 SB、SC 和 SD 岩片中强变形的小型韧性剪切带和剪切带之间弱变形岩石的黑云母 (及部分角闪石) 进行 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 测年, 获得了新的年龄数据, 进一步提供了对超高压变质岩石韧性透入性剪切作用的时限约束。测年工作均在中国科学院广州地球化学所同位素实验室进行 (图9)。

### 3.1 SB 岩片中的小型韧性剪切带及弱变形岩石测年结果

SB 岩片中的小型韧性剪切带中强烈变形岩石的形成年龄分别为: B695 (1262m) 二云二长片麻岩: 坪年龄为 202.95

± 1.05Ma, 等时线年龄 201.89 ± 3.23Ma; B696 (1264m) 绿帘黑云角闪斜长片麻岩: 坪年龄为 212.34 ± 1.01Ma, 等时线年龄 222.95 ± 3.34Ma; B719 (1302m) 黑云花岗片麻岩: 坪年龄为 211.74 ± 1.04Ma, 等时线年龄 220.14 ± 3.0Ma; B800 (1531m) 磁铁矿花岗片麻岩: 坪年龄为 191.23 ± 1.50Ma, 等时线年龄 194.73 ± 2.92Ma; B1021 (2298m) 绿帘斜长角闪岩: 角闪石坪年龄为 229.52 ± 2.45Ma, 等时线年龄 228.44 ± 4.57Ma。

该岩片中弱变形岩石的黑云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 测年: B750 (1417m) 花岗片麻岩: 坪年龄为 224.27 ± 1.80Ma, 等时线年龄 235.43 ± 3.96Ma; B985 (1888m) 榴辉岩: 角闪石坪年龄为 225.53 ± 1.98Ma, 等时线年龄 235.35 ± 3.96Ma。

图9 CCSD-MH 构造剖面中超高压变质岩石黑云母的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 测年的坪年龄和等时线年龄图

SB 岩片中的小型韧性剪切带的强烈变形岩石样品: B695(1)(2)、B696(3)(4)、B719(5)(6)、B800(9)(10)和 B1021(11)(12);SB 岩片中的弱变形岩石样品: B750(7)(8)和 B985(13)(14);SC 岩片中小型韧性剪切带的强烈变形岩石样品: B1244(15)(16)和 B1486(19)(20);SC 岩片中弱变形岩石样品: B1354(17)(18);SD 岩片中小型剪切带的强烈变形岩石样品: B2414a(25)(26);B2414b(27)(28);SD 岩片中弱变形岩石样品: B1697(21)(22)和 B2308(23)(24)

Fig. 9 Diagrams of plateau age and isochron age for  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  biotite dating of UHP metamorphic rocks from the structural profile of CCSD-MH

Mylonitic deformation samples from small ductile shear zones in the SB slice; B695(1)(2)、B696(3)(4)、B719(5)(6)、B800(9)(10)和 B1021(11)(12); weak deformation samples from the SB slice: B750(7)(8)和 B985(13)(14); Mylonitic deformation samples from small ductile shear zones in the SC slice: B1244(15)(16)和 B1486(19)(20); weak deformation samples in SC slice: B1354(17)(18); Mylonitic deformation rock samples from small ductile shear zones in the SD slice: B2414a(25)(26);B2414b(27)(28); weak deformation samples in the SD slice: B1697(21)(22)和 B2308(23)(24)

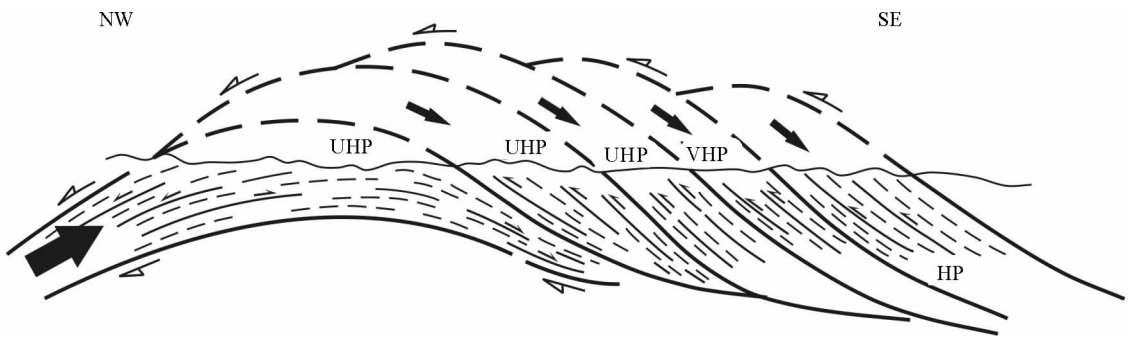


图 10 苏鲁高压/超高压变质地体沿多层折返隧道透入性挤出机制模式图

HP-高压变质构造岩片; VHP-很高压变质构造岩片;UHP-超高压变质构造岩片

Fig. 10 Models showing penetrative extrusion mechanism along multilayer exhumation channels formed during the exhumation of Sulu HP/UHP metamorphic terrain

HP-high-pressure metamorphic tectonic slice; VHP-very high-pressure metamorphic tectonic slice; UHP-ultra-high pressure metamorphic tectonic slice

### 3.2 SC 岩片中小型韧性剪切带及弱变形岩石测年结果

SC 岩片中小型韧性剪切带的形成年龄分别为: B1244 (2500m) 黑云花岗片麻岩: 坪年龄为  $201.69 \pm 0.68\text{Ma}$ , 等时线年龄  $202.16 \pm 1.634\text{Ma}$ ; B1486 (2925m) 绿帘黑云斜长片麻岩: 坪年龄为  $203.26 \pm 0.85\text{Ma}$ , 等时线年龄  $202.65 \pm 0.68\text{Ma}$ 。

弱变形岩石的黑云母  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  测年样品为 B1354 (2700m) 石榴石绿帘黑云斜长片麻岩: 坪年龄为  $231.01 \pm 0.86\text{Ma}$ , 等时线年龄  $231.24 \pm 2.38\text{Ma}$ 。

### 3.3 SD 岩片中小型韧性剪切带及弱变形岩石测年结果

SD 岩片中小型剪切带的黑云母  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  测年: B2410a (4690m) 角闪黑云花岗片麻岩: 坪年龄为  $197.25 \pm 0.75\text{Ma}$ , 等时线年龄  $196.36 \pm 1.24\text{Ma}$ ; B2410b (4691m) 黑云角闪二云片麻岩: 坪年龄为  $213.38 \pm 0.81\text{Ma}$ , 等时线年龄  $212.35 \pm 0.85\text{Ma}$ 。

弱变形岩石的黑云母  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  测年: B1697 (3450m) 角闪斜长片麻岩: 坪年龄为  $224.73 \pm 0.93\text{Ma}$ , 等时线年龄  $222.29 \pm 1.39\text{Ma}$ ; B2308 (4506m) 角闪黑云花岗片麻岩: 坪年龄为  $223.49 \pm 0.72\text{Ma}$ , 等时线年龄  $224.36 \pm 0.81\text{Ma}$ 。

综合上述测年结果可知,构造岩片中的小型韧性剪切带主要形成于 190 ~ 212Ma (SB)、202 ~ 206Ma (SC) 和 197 ~ 213Ma (SD), 与大型韧性剪切带形成年龄 198.22 ~ 214.1Ma (DFa) 和 203.26 ~ 224.73Ma (DFb) 基本一致。而未经强烈变形的剪切带之间的弱变形岩石的变形年龄为 224 ~ 229Ma (SB) 和 223 ~ 225Ma (SD), 说明剪切开始在折返初期 (229 ~ 225Ma), 而强烈韧性剪切作用主要发生在折返主期 (213 ~ 190Ma)。进一步证明,透入性强烈韧性剪切应变是俯冲板片折返的主要机制,并伴随角闪岩相-绿片岩相退变质过程。

## 4 流体作用对超高压变质岩石的流变学行为制约

同位素的研究结果表明,苏鲁超高压板片在俯冲-峰期-折返过程中,板片内部的流体-岩石体系基本保持了相对的封闭,流体作用主要以局部的水岩反应为特征 (Liou *et al.*, 1997; Zheng *et al.*, 2003; Ferrando *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2006), 并制约了超高压变质岩石的流变学行为。

### 4.1 深俯冲阶段的流体作用对超高压变质岩石流变学行为的制约

在深俯冲过程中,陆壳物质发生一系列的进变质脱水反

应,所释放的流体进入高压、超高压含水矿物,对 CCSD 主孔及地表超高压岩石中的名义无水矿物(NAMs)原位分析表明,所有的 NAMs 中都含有一定的结构水。另外,副片麻岩、正片麻岩以及退变榴辉岩的锆石中发现与柯石英共存的原生流体包裹体(张泽明等,2008),在超高压变质极端条件下还出现超临界富硅酸盐的含水熔体,表明苏鲁地体的榴辉岩及其围岩在超高压峰期变质阶段处于有流体参与的相对“湿体系”环境(Ferrando *et al.*, 2005;张泽明等,2008)。

而在湿环境下,作为点缺陷存在于矿物晶格中的水,可以通过加强位错滑移、晶内和晶间扩散及颗粒边界迁移等方式,对矿物塑性变形产生巨大的影响(Paterson,1989)。实验研究表明,湿的橄榄岩比干的橄榄岩流动强度可以低约 500 ± 200 倍(Hirth and Kohlstedt,1996),绿辉石和石榴石中的结构水可以造成榴辉岩流变强度的显著降低(章军峰等,2005)。因此,NAMs 中结构水的广泛存在,为超高压变质岩石的强烈塑性流变提供了更有利的条件。

#### 4.2 折返阶段的流体作用对超高压变质岩石流变学行为的制约

在折返阶段,结构水由于压力的降低而被释放,产生了两方面的效应:一方面强烈的剪切作用造成流体向弱化的剪切带内部集中,导致高度局域化的退变质反应,初始反应的产物往往呈极细小的颗粒,沿晶界分布,使晶界滑移增强(嵇少丞等,2008),有效减低岩石流动强度,增强剪切作用,并导致退变质反应带加宽。折返早期的不同岩性接触界面作为剪切作用局部集中的区域,也是流体的主要活动场所,在两者互相交替增强的过程中,早期系列微型剪切带形成,折返主期大规模流体作用下,微型剪切带被进一步增强或合并,形成大型韧性剪切带。

另一方面,在快速减压和短时增温(Zhang *et al.*, 2005;宗克清等,2006)的共同作用下,流体导致易熔组分发生局部熔融,形成长英质脉或长英质熔体包裹体(Wallis *et al.*, 2005;曾令森,2009)。石榴橄榄岩的石榴石中部分熔融条带的发现,也证明超镁铁质岩石折返早期经历过减压熔融过程(刘祥文和金振民,2006)。熔体的作用在于能湿润其周围的颗粒边界,缩短物质扩散路径,提高扩散蠕变和晶界滑移的速率,产生熔致弱化现象(嵇少丞等,2008)。在持续的剪切作用下,熔体的长轴会逐渐沿着剪切面作优选定向(Zimmerman and Kohlstedt,2004),导致岩石强度进一步的弱化,反过来又强化剪切作用。

因此可知,无论在峰期还是折返的过程中,流体对超高压变质岩石的塑性变形都起到重要的限制作用,结构水的作用对应俯冲峰期阶段,间接的熔体效应可能短暂的作用于折返早期后半段的石英榴辉岩相或麻粒岩相中,而其他的自由流体相则贯穿整个折返过程,并严重影响着各种类型和程度韧性剪切带的形成、发育。

## 5 讨论与结论

### 5.1 面型大陆“深俯冲/折返杂岩带”

通过科学钻探的构造剖面对地球物理地震反射剖面的验证,不仅揭示了北中国和南中国两大板块三叠纪碰撞造山生成的高压-超高压“俯冲深根”一部分折返回地表,一部分拆沉至 300km 之下形成“俯冲化石残片”(Xu *et al.*, 2009a),而且根据超高压变质地体中榴辉岩-超镁铁质岩的产出和他们与片麻岩之间的原岩非继承性关系,证明苏鲁超高压变质带实质上为深俯冲/折返杂岩带。在中国大陆的许多地体之间都发育由蛇绿岩、混杂堆积、高压变质带及弧前增生楔组成的带状延伸的俯冲杂岩带,虽然苏鲁(大别)超高压变质带中至今未发现洋壳残片,但是超高压变质岩石中大量榴辉岩-超镁铁质构造岩块表明,一种特殊的呈面型的大陆“深俯冲/折返杂岩带”的存在。

### 5.2 多层折返隧道流及透入性挤出机制

上述研究表明,苏鲁高压-超高压变质地体的折返方式是通过一系列不同规模韧性剪切带的剪切作用实现的。因为不同岩性接触边界,由于强度差异,成为韧性剪切带初始发育的最佳场所,接触带中稳定同位素、水含量及岩相学的同步变化,也验证了这里是流体活动最强烈的地方,折返初期的大量微型韧性剪切带,随着折返过程中流体-熔体弱化作用的不断加强,逐渐演化成中-大型韧性剪切带,构成苏鲁变质地体中叠置岩片之间的主要界限。折返板片内部无数条规模不等的韧性剪切带的存在,指示了一种透入性的剪切特征。研究已经表明,扬子板片俯冲/折返过程具有分片性、多重性的特征,高压(HP)、很高压(VHP)和超高压(UHP)变质岩片先后俯冲和折返(许志琴,2007),并构成交叉、叠置的多层隧道。因此,综合两方面因素可知高压-超高压物质的折返过程受一系列透入性的韧性剪切制约,显示沿多层折返隧道先后分片向上的挤出机制。

### 5.3 郯庐走滑断裂的起始时限

中国东部最大的走滑断裂-NNE-SSW 向的郯城-庐江断裂(简称郯庐断裂)切割了大别-苏鲁高压-超高压变质带,左行错距达 500km 以上,关于郯庐断裂形成时代一直存在争议。上述研究表明,苏鲁 HP-UHP 变质地体的现今构造格架主要是在折返主期构筑和定型的,俯冲阶段板块之间的 NS 向挤压剪切在折返早期被继承,但在折返主期转换为 SE-NW 向挤压剪切,并且主期大型韧性剪切带的构造线随着靠近郯庐断裂,走向由主要的 NE-SW 向逐渐转为 NNE-SSW,呈现拖曳构造的样式。因而推测,郯庐断裂是在扬子板片由深俯冲向折返的转换过程中形成的(220Ma 以来),而不是更晚。

在上述研究中,有关折返初期塑性变形特征和运动学的

确认以及从深俯冲阶段向折返主期塑性变形的转换是关键,尚需深入研究。

**致谢** 本研究得到国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB716504)、国家自然科学基金重大项目(40399141)和中国地质调查局地质大调查项目(121201056606)的资助,EBSD测试在国土资源部大陆动力学重点实验室进行, $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 测年由中国科学院广州地化所同位素实验室担任,本文曾与嵇少丞教授进行有益讨论,绘图由张森、许翠萍工程师完成,一并致谢。

## References

Chen J, Xu ZQ and Li XP. 2005. The formation of nanometer twins of rutile and its textural characteristics in UHP eclogite. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 399 – 404 (in Chinese with English abstract)

Ferrando S, Frezzotti ML, Dallai L and Compagnoni R. 2005. Fluid-rock interaction in UHP phengite- kyanite- epidote eclogite from the Sulu orogen, eastern China. *Int. Geol. Rev.*, 47: 750 – 774

Hirth G and Kohlstedt DL. 1996. Water in the oceanic upper mantle: Implications for rheology, melt extraction and the evolution of the lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 144: 93 – 108

Isacks B and Molnar P. 1971. Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey of focal mechanism solutions of mantle earthquakes. *Rev. Geophys. Space Physics.*, 9: 103 – 174

Ji SC and Martignole J. 1994. Ductility of garnet as an indicator of extremely high temperature deformation. *Journal of Structural Geology*, 16: 985 – 996

Ji SC, Zhao PL and Xia B. 2003. Flow laws of multiphase materials and rocks from end-member flow laws. *Tectonophysics*, 370: 129 – 145

Ji SC, Zhong DL, Xu ZQ and Xia B. 2008. Rheology: A new departure in structural geology and geodynamics. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(3): 257 – 264 (in Chinese with English abstract)

Jin ZM, Jin SY, Zhang JF and Green HW. 2002. Rheological properties of deep subducted oceanic lithosphere and their geodynamic implications. *Science in China (Ser. D)*, 31(12): 969 – 976 (in Chinese)

Karato S, Wang ZC, Liu B and Fujino K. 1995. Plastic deformation of garnets: Systematics and implications for the rheology of the mantle transition zone. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 130:13 – 30

Liou JG, Zhang RY and Jahn BM. 1997. Petrology, geochemistry and isotope data on a ultrahigh-pressure jadeite quartzite from Shuanghe, Dabie mountains, east-central China. *Lithos*, 41:59 – 78

Liu FL, Gerdes A, Liou JG, Xue HM and Liang FH. 2006. SHRIMP U-Pb zircon dating from Sulu-Dabie dolomitic marble, eastern China: Constraints on prograde, ultrahigh-pressure and retrograde metamorphic ages. *J. Metamorph. Geol.*, 24: 569 – 589

Liu FL, Xu ZQ and Xue HM. 2004. Tracing the protolith, UHP metamorphism, and exhumation ages of orthogneiss from the SW Sulu terrane (eastern China): SHRIMP U-Pb dating of mineral inclusion-bearing zircons. *Lithos*, 78: 411 – 429

Liu FL, Xu ZQ, Yang JS, Zhang ZM, Xue HM, Meng FC, Li TF and Chen SZ. 2005. Geochemical characteristics and genetic mechanism of orthogneiss and paragneiss in the depth intervals of 2000 ~ 3000 m from main drill hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 305 – 324 (in Chinese with English abstract)

Liu XW, Jin ZM, Jin SY, Qu J and Xu W. 2005. Differences of deformation characteristics of garnets from two types of eclogites: Evidence from TEM study. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 411 – 420 (in Chinese with English abstract)

Liu XW and Jin ZM. 2006. Microstructural features of ultrahigh – pressure garnet – peridotite from the Donghai district in the Sulu terrane: New evidence of rapid exhumation. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1810 – 1816 (in Chinese with English abstract)

Paterson MS. 1989. The interaction of water with quartz and its influence in dislocation flow: An overview. In: Karato S and Torium M (eds.). *Rheology of Solids and of the Earth*. New York: Oxford Science Publications, 107 – 142

Wallis S, Tsuboi M, Suzuki K *et al.* 2005. Role of partial melting in the evolution of the Sulu (eastern China) ultrahigh-pressure terrane. *Geology*, 33: 129 – 132

Wang Q, Burlini L, Mainprice D and Xu ZQ. 2009. Geochemistry, petrofabrics and seismic properties of eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling boreholes in the Sulu UHP terrane, eastern China. *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2008.09.027

Wang Z, Ji S and Dresen G. 1999. Hydrogen-enhanced electric conductivity of diopside crystals. *Geophysical Research Letters*, 26: 799 – 802

Wang ZC and Ji S. 2000. Diffusion creep of fine-grained garnetite: Implications for the flow strength of subducting slabs. *Geophysical Research Letters*, 27(15): 2333 – 2336

Xu ZQ, Zhang ZM, Liu FL, Yang JS, Li HB, Yang TN, Qiu HJ, Li TF, Meng FC, Chen SZ, Tang ZM and Chen FY. 2003. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh – pressure metamorphic belt, Central China. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 433 – 451 (in Chinese with English abstract)

Xu ZQ, Zhang ZM, Liu FL, Yang JS, Tang ZM, Chen SZ, Chai YC, Li TF and Chen FY. 2004. The structure profile of 0 ~ 1200m in the main borehole, Chinese Continental Scientific Drilling and its preliminary deformation analysis. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 53 – 72 (in Chinese with English abstract)

Xu ZQ, Chen J, Wang Q, Zeng LS, Yang JS, Chen FY, Li TF and Liang FH. 2005. Type-C olivine fabric in the Zhimafang garnet peridotite of the southern Sulu ultrahigh-pressure metamorphic terrane: Formation conditions and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 389 – 397 (in Chinese with English abstract)

Xu ZQ, Zeng L, Liu F, Yang J, Zhang Z, McWilliams M and Liou JG. 2006. Polyphase subduction and exhumation of the Sulu high-pressure ultrahigh-pressure metamorphic terrane. *Geological Society of America Special Paper*, 403: 93 – 113

Xu ZQ. 2007. Continental deep subduction and exhumation dynamics: Evidence from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling and the Sulu HP-UHP metamorphic terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 23(12): 3041 – 3053 (in Chinese with English abstract)

Xu ZQ, Yang WC, Ji SC, Zhang ZM, Yang JS, Wang Q and Tang ZM. 2009a. Deep root of a continent collision belt: Evidence from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) deep borehole in the Sulu ultrahigh-pressure (HP-UHP) metamorphic terrane, China. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2009.02.029

Xu ZQ, Wang Q, Tang ZM and Chen FY. 2009b. Fabric kinematics of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the main bore hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project: Implications for continental subduction and exhumation. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2009.02.041

Yang JS, Bai WJ, Rong H, Zhang ZM, Xu ZQ, Fang QS, Yan BG, Li TF, Ren YF and Chen SY. 2005. Discovery of Fe2P alloy in garnet peridotite from the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD) main hole. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 271 – 276 (in Chinese with English abstract)

Yang JS, Li TF, Chen SZ, Wu CL, Robinson PT, Liu DY and Wooden JL. 2009. Genesis of garnet peridotites in the Sulu UHP belt: Examples from the Chinese Continental Scientific Drilling Project-Main hole, PP1 and PP3 drillholes. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2009.02.032

Zhang Z, Shen K, Xiao Y, Hoefs J and Liou JG. 2006. Mineral and fluid inclusions in zircon of UHP metamorphic rocks from the CCSD-

- main drill hole: A record of metamorphism and fluid activity. *Lithos*, 92: 278 – 398
- Zhang ZM, Shen K, Xiao YL, van den Kerkhof and Hoefs J. 2005. Fluid composition and evolution attending UHP metamorphism: Study of fluid inclusions from Drill Cores, southern Sulu Belt, eastern China. *International Geology Review*, 47: 97 – 309
- Zhang ZM, Xu ZQ and Xu HF. 2003. Petrology of the non-mafic UHP metamorphic rocks from a drillhole in the southern Sulu orogenic belt, eastern-central China. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 173 – 186
- Zhang ZM, Zhang JF, Xu ZQ, Liu FL, Yang JS, Xiao YL and Shen K. 2005. Petrology of eclogites from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drill Project. *Chinese Geology*, 32: 205 – 217 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Xiao YL, Zhao XD and Shi C. 2006. Fluid – rock interaction during the continental deep subduction: Oxygen isotopic profile of the main hole of the CCSD project. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1941 – 1951 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Wang JL, Zhao GC and Shi C. 2008. Paleozoic circum-Gondwana orogens: Petrology and geochronology of the Namche Barwa Complex in the eastern Himalayan syntaxis, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1627 – 1637 (in Chinese with English abstract)
- Zeng LS, Liang FH, Paul A, Chen FY and Chen J. 2009. Partial melting of deeply subducted continental crust and the formation of quartzo-feldspathic polyphase inclusions in the Sulu UHP eclogites. *Chinese Science Bulletin*, doi: 10.1007/S11434 – 009 – 0426 – 6
- Zheng YF, Fu B, Gong B and Li L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China; Implication for geodynamics and fluid regime. *Earth Science Review*, 62: 105 – 161
- Zhang JF, Jin ZM and Green HW. 2005. Hydroxyl induced eclogite fabric and deformation mechanism. *Chin. Sci. Bull.*, 50(7): 685 – 690 (in Chinese)
- Zimmerman ME and Kohlstedt DL. 2004. Rheological properties of partially molten lherzolite. *Journal of Petrology*, 45: 275 – 298
- Zhu YF. 2005. Dolomite decomposition texture in ultrahigh pressure metamorphic marble: New evidence for the deep recycling of continental materials. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 347 – 354 (in Chinese with English abstract)
- Zong KQ, Liu YS, Liu XM and Zhang BH. 2006. Trace element records of short – lived heating during exhumation of the CCSD eclogites. *Chinese Science Bulletin*, 52(6): 813 – 824 (in Chinese)
- 附中文参考文献**
- 陈晶, 许志琴, 李旭平. 2005. 超高压榴辉岩中金红石的纳米级微构造特征及成因机制探讨. *岩石学报*, 21(2): 399 – 404
- 嵇少丞, 钟大赉, 许志琴, 夏斌. 2008. 流变学: 构造地质学和地球动力学的支柱学科. *大地构造与成矿学*, 32(3): 257 – 264
- 金振民, 章军峰, Green HW II. 2001. 大洋深俯冲带流变性质及其地球动力学意义——来自地幔岩高温高压试验的启示. *中国科学(D辑)*, 31(12): 969 – 976
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 张泽明, 薛怀民, 孟繁聪, 李天福, 陈世忠. 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔 2000 ~ 3000 米正、副片麻岩的地球化学性质及其成因机制. *岩石学报*, 21(2): 305 – 324
- 刘祥文, 金振民, 金淑燕, 曲晶, 徐薇. 2005. 两类榴辉岩的石榴石变形特征差异——来自 TEM 研究的证据. *岩石学报*, 21(2): 411 – 420
- 刘祥文, 金振民. 2006. 东海地区超高压石榴橄榄岩超微构造特征——快速折返的新证据. *岩石学报*, 22(7): 1810 – 1816
- 许志琴, 张泽明, 刘福来, 杨经绥, 李海兵, 杨天南, 邱海峻, 李天福, 孟繁聪, 陈世忠, 唐哲民, 陈方远. 2003. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制. *地质学报*, 77(4): 433 – 451
- 许志琴, 张泽明, 刘福来, 杨经绥, 唐哲民, 陈世忠, 柴耀楚, 李天福, 陈方远. 2004. 中国大陆科学钻探主孔构造柱及变形构造初步解析. *岩石学报*, 20(1): 53 – 72
- 许志琴, 陈晶, 王勤, 曾令森, 杨经绥, 陈方远, 李天福, 梁风华. 2005. 南苏鲁芝麻房石榴石橄榄岩中橄榄石的《C》类组构及其形成条件探讨. *岩石学报*, 21(2): 389 – 397
- 许志琴. 2007. 深俯冲和折返动力学: 来自中国大陆科学钻探主孔及苏鲁超高压变质带的制约. *岩石学报*, 23(12): 3041 – 3053
- 杨经绥, 白文吉, 戎合, 张宗明, 许志琴, 方青松, 颜秉刚, 李天福, 任玉峰, 陈松永, Hu JZ, Su JF, Mao HK. 2005. 中国大陆科学钻探 (CCSD) 主孔石榴石橄榄岩中发现 Fe<sub>2</sub>P 合金矿物. *岩石学报*, 21(2): 271 – 276
- 张泽明, 王金丽, 赵国春, 石超. 2008. 喜马拉雅造山带东构造结南迦巴瓦岩群地质年代学和前寒武纪构造演化. *岩石学报*, 24(7): 1477 – 1487
- 张泽明, 肖益林, 赵旭东, 石超. 2006. 大陆深俯冲过程中的流体-岩石相互作用——中国大陆科学钻探主孔氧同位素剖面. *岩石学报*, 22(7): 1941 – 1951
- 张泽明, 张金凤, 许志琴, 刘福来, 杨经绥, 肖益林, 沈昆. 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔榴辉岩的岩石学研究. *中国地质*, 32: 205 – 217
- 章军峰, 金振民, Harry WG. 2005. 结构水引起的榴辉岩变形结构和变形机制. *科学通报*, 6: 57 – 62
- 曾令森, 梁风华, Asimow PAUL, 陈方远, 陈晶. 2009. 深俯冲陆壳岩石部分熔融与苏鲁超高压榴辉岩中长英质多晶包裹体的形成. *科学通报*, 54(13): 1826 – 1840
- 朱永峰. 2005. 超高压变质大理岩中的白云石分解结构: 大陆地壳物质深循环的新证据. *岩石学报*, 21(2): 347 – 354
- 宗克清, 刘勇胜, 柳小明, 张斌辉. 2006. CCSD 榴辉岩折返过程中短时增温作用的微量元素记录. *科学通报*, 22: 99 – 110