

# 中国大陆科学钻探主孔 0~2000 m 榴辉岩的退变质过程

梁凤华<sup>1</sup> 苏尚国<sup>2</sup> 游振东<sup>2</sup> 张泽明<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 中国地质大学, 北京, 100037)

**摘要:** 中国大陆科学钻探主孔位于大别—苏鲁这条典型的超高压变质带上, 孔内 0~2000 m 的岩心中, 各种榴辉岩占到 50% 以上。榴辉岩大多经历了不同程度的退变质。依据榴辉岩中主要矿物绿辉石和石榴石的退变质程度, 0~2000 m 榴辉岩的退变质过程可分为 2 个大阶段, 4 个亚阶段: 第一大阶段(又分为轻微退变质、部分退变质)、第二大阶段(又分为退变质和强退变质)。总的退变质趋势是: 石榴石逐渐被非角闪石或黑云母+绿帘石替代; 绿辉石逐渐被角闪石+钠长石后合成晶替代, 硬玉(Jd)含量逐渐减少, 并部分转化为霓辉石。榴辉岩在退变质过程中所经历的温压条件为: 峰期变质温度为 697~831℃, 压力 3.0 Gpa 左右; 部分退变质阶段温度为 629~776℃, 压力 1.2~1.6 Gpa; 退变质阶段温度为 550~650℃, 压力 0.5~0.7 Gpa; 强退变质阶段温度为 300~400℃, 压力 0.30~0.35 Gpa。综合岩石、矿物及形成温压条件等特征, 推断榴辉岩的折返过程经历了两个大阶段: 第一大阶段是近等温降压的快速折返(榴辉岩在此期间经历了第一大阶段的退变质), 第二大阶段是降温降压的缓慢抬升(榴辉岩继而经历了第二大阶段的退变质)。绿辉石的完全退变质, 既是划分榴辉岩两大退变质阶段的标志, 同时也是区分两大折返阶段的标志。

**关键词:** 榴辉岩; 退变质过程; 折返; 中国大陆科学钻探

中图分类号: P588.34 文献标识码: A 文章编号: 1000-3657(2005)02-0218-12

自从 Chopin<sup>[1]</sup> 和 Smith<sup>[2]</sup> 分别在西阿尔卑斯 Dora Maira 岩块(变质表壳岩)和挪威西部片麻岩区(WGR)内高压榴辉岩的石榴石(+绿辉石)中发现超高压标志性矿物柯石英以来, 榴辉岩一直受到研究者的普遍关注, 因为榴辉岩较多地保存了超高压变质作用峰期的矿物组成, 以及多期退变质过程的岩石学记录<sup>[3]</sup>。榴辉岩这种最具代表性的超高压变质岩石曾经历过由地表俯冲至地幔深处又折返回地表的全过程, 现在保留下来的新鲜的或是退变质的榴辉岩质岩石充分地记录下了发生在板块会聚边界的深部地幔行为及岩石圈板片俯冲与折返的演化历史<sup>[4]</sup>, 因此对榴辉岩的退变质过程的研究对于恢复超高压变质岩石的俯冲折返历史起着至关重要的作用。过去 20 几年对榴辉岩的研究已经大大地提高了人们对俯冲作用过程中俯冲岩片的物理和地球化学

反应, 以及可能的对深部地幔的影响的认识。但这些研究都是以野外地质为基础的, 中国大陆科学钻探工程(CCS D)的实施, 为超高压变质带, 特别是榴辉岩的研究提供了野外地质所不能提供的连续的岩心剖面, 从而可以进一步探讨许多超高压变质岩石学研究中的疑难问题。CCSD 主孔 0~2000 m 的岩心中, 超过 50% 为各种类型的榴辉岩, 详细确立榴辉岩的退变质特征, 对于更加准确的确定榴辉岩的原岩, 揭示榴辉岩内部及其与其围岩之间可能的地球化学反应特征及反应过程都有重要意义。杨天南等<sup>[5]</sup> 对钻孔所在地东海县的榴辉岩向斜长角闪岩的退变质做过详细的研究, 对 CCS D 主孔 0~2000 m 榴辉岩的退变质, 也有很多研究者作过描述<sup>[3,6-7]</sup>, 但尚缺乏孔内榴辉岩详细的退变质过程的划分和研究。笔者针对主孔 0~2000 m 榴辉岩的退变质过程进行了详

收稿日期: 2005-02-25; 改回日期: 2005-03-07

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(403991432)及国家重点基础研究发展规划项目(2003CB716501)资助。

作者简介: 梁凤华, 女, 1978 年生, 博士生, 从事构造地质学专业; E-mail: lfh@ccsd.org.cn。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

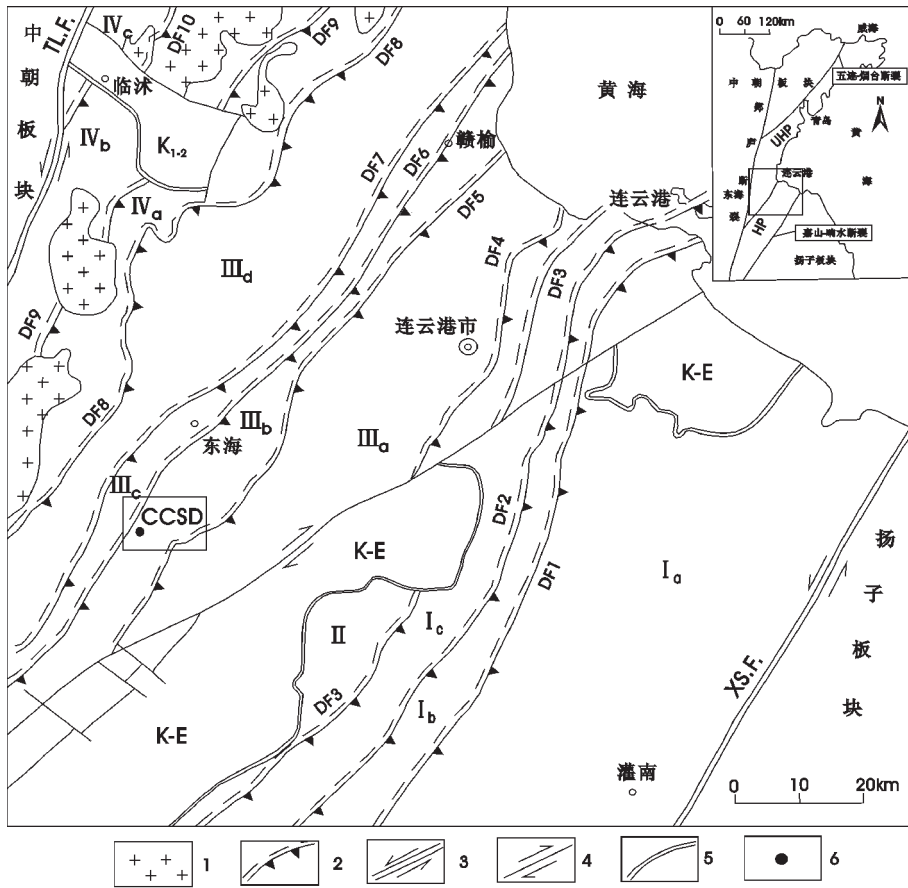


图 1 苏鲁南部高压—超高压变质带构造图(据许志琴等<sup>[8,9]</sup>修改)

1—中生代花岗岩;2—韧性“逆冲”型剪切带(DF<sub>1</sub>~DF<sub>10</sub>);3—岩石圈断裂(TL.F.—郯庐断裂;JX.F.—嘉山—响水断裂);  
4—走滑断裂;5—角度不整合;6—大陆科学钻探孔址(CCSD)

I—南苏鲁高压低温变质岩剪切构造叠覆岩片: I<sub>a</sub>—灌南剪切构造岩片, I<sub>b</sub>—连云港剪切构造岩片, I<sub>c</sub>—云台山剪切构造岩片;  
II—南苏鲁高压中温变质岩剪切构造叠覆岩片; III—北苏鲁超高压变质岩壳岩剪切构造叠覆岩片: III<sub>a</sub>—青龙山—房山剪切构造岩片,  
III<sub>b</sub>—毛北剪切构造岩片, III<sub>c</sub>—石湖镇剪切构造岩片, III<sub>d</sub>—石梁河剪切构造岩片; IV—北苏鲁超高压花岗质变质岩剪切构造叠覆岩片:  
IV<sub>a</sub>—三清阁剪切构造岩片, IV<sub>b</sub>—抗日山剪切构造岩片, IV<sub>c</sub>—苍山剪切构造岩片

Fig. 1 Structural map of a high- and ultrahigh-pressure metamorphic belt in the south Sulu terrane (modified after Xu ZQ et al. <sup>[8,9]</sup>)

1—Mesozoic granite;2—Ductile “thrusting” shear zone (DF<sub>1</sub> - DF<sub>10</sub>);JX.F.—Jiashan—Xiangshan Fault number of ductile shear zone);3—  
Lithosphere fault (TL. F.—Tanlu fault;JX.F.—Jiashan—Xiangshan Fault);  
4—Strike-slip fault; 5—Angular unconformity; 6—Main hole site of CCSD

I—Shear tectonic imbricate slices of high-pressure/low-temperature metamorphic rocks in South Sulu: I<sub>a</sub>—Guannan shear tectonic slice;  
I<sub>b</sub>—Lianyungang shear tectonic slice; I<sub>c</sub>—Yuntaishan shear tectonic slice; II—Shear tectonic imbricate slices of high pressure mid-temperature  
metamorphic rocks in South Sulu; III—Shear tectonic imbricate slices of ultrahigh-pressure metamorphic supracrustal rocks in North Sulu:  
III<sub>a</sub>—Qinglongshan—Fangshan shear tectonic slice; III<sub>b</sub>—Maobei shear tectonic slice; III<sub>c</sub>—Shihuzhen shear tectonic slice; III<sub>d</sub>—Shilianghe shear tectonic  
slice; IV—Shear tectonic imbricate slices of ultrahigh-pressure granitic metamorphic rocks in North Sulu: IV<sub>a</sub>—Sanqingge shear tectonic slice;  
IV<sub>b</sub>—Kangrishan shear tectonic slice; IV<sub>c</sub>—Cangshan shear tectonic slice

细的研究,精确划分了退变质阶段,分析了退变质各阶段的矿物成分、温压条件等特征,并将矿物和岩石的微细结构与区域地质演化过程相结合,探讨了榴辉岩的折返过程。

### 1 区域地质背景

在中国大陆华北板块与华南板块之间存在着一—条中央碰撞造山带,西起昆仑、阿尔金和祁连山,东至大别和苏鲁地区,全长超过 4 000 km,也是世界上最大的一条超高压变质带<sup>[10]</sup>。中国大陆科学钻探工程的钻址就位于该超高压变质带的东段南部苏北地区。与该造山带的其他部位相比,这里是整个造山带中折返抬升的最高部位,具有较典型的造山带根部特征<sup>[11]</sup>。CCSD 主孔位于新太古—古元古代东海杂

岩超高压变质相带<sup>[11]</sup>中的榴辉岩杂岩体上;从构造角度来说,这里属于北苏鲁超高压变质表壳岩剪切构造叠覆岩片<sup>[8,9]</sup>(图 1)。

中国大陆科学钻探工程,于 2001 年 6 月 25 日开始钻进,至 2005 年 1 月底主孔已经钻进 5 100 m。在 0~2 000 m 岩心中,分布有榴辉岩、超基性岩及各种片麻岩,其中榴辉岩厚度累积达 1 000 m 以上,主要分布在 100~600 m、930~1 100 m 及 1 600~2 000 m,其不同退变质程度的分界面与面理产状一致<sup>[9]</sup>。研究表明,2000 m 岩心中除了超镁铁质岩石外的所有类型岩石中均发现了锆石中的柯石英包裹体,结合超高压变质作用的指示矿物柯石英在 3 口卫星孔中(最深 1 008 m)及在苏鲁南部地区大面积分布的榴辉岩围岩中的普遍发现,进一步证明了该地区曾发生过

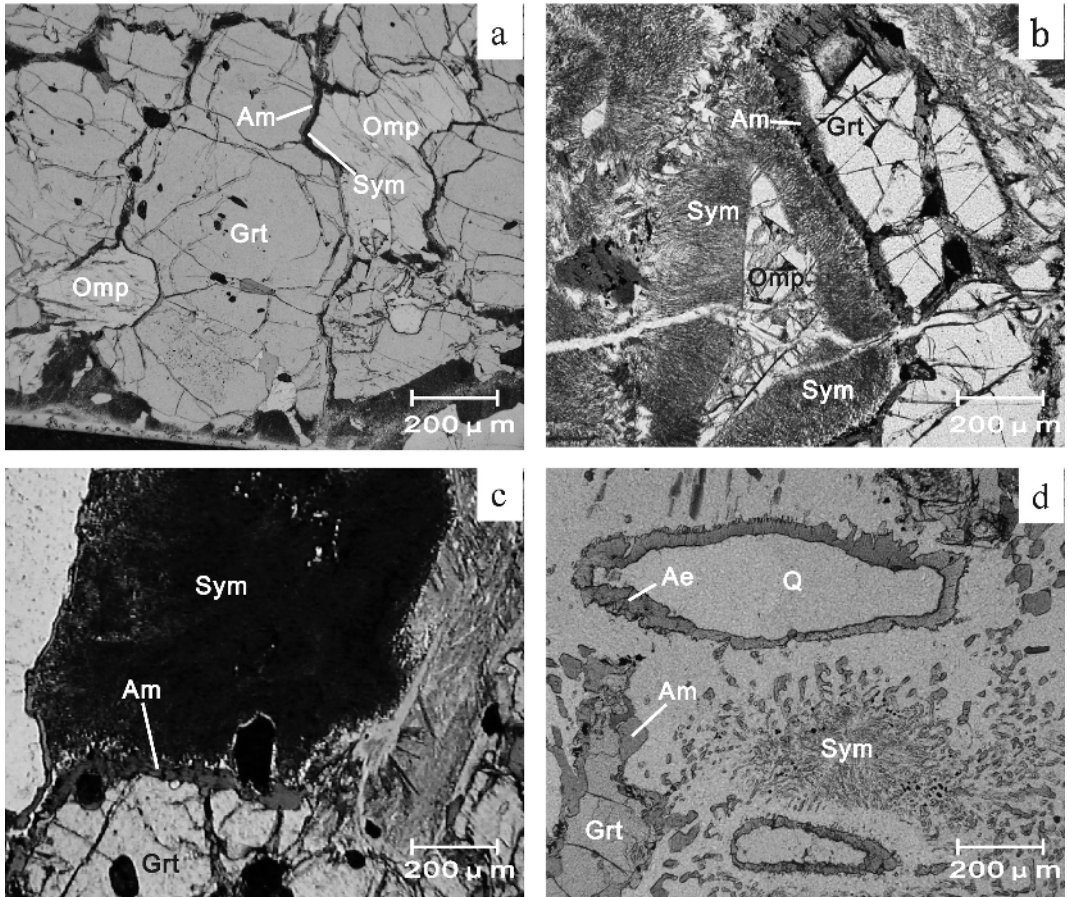


图 2 CCSD 0~2 000 m 榴辉岩退变质的 4 个阶段

a—轻微退变质阶段;b—部分退变质阶段;c—退变质阶段;d—强退变质阶段

Ae—霓辉石;Am—角闪石;Grt—石榴石;Omp—绿辉石;Q—石英;Sym—后成合晶

Fig. 2 Microphotographs showing four stages of retrograde metamorphism of eclogites from 0 - 2000 m of the CCSD main hole  
a—Weak retrograde metamorphism;b—Partial retrograde metamorphism;c—Retrograde metamorphism;d—Strong retrograde metamorphism

Abbreviations: Ae—Aegirine-augite; Am—Amphiboles;Grt—Garnet;Omp—Omphacite;Q—Quartz; Sym—Symplectitic coronas

巨量地壳物质的超深俯冲<sup>[7,12]</sup>。

## 2 榴辉岩的退变质过程

### 2.1 退变质阶段的划分

在大量岩相学观察的基础上,依据榴辉岩的主要矿物(石榴石和绿辉石)的退变质程度,将榴辉岩的退变质过程划分为 4 个阶段:

(1) 轻微退变质:石榴石和绿辉石都刚刚开始退变,退变边很细(退变质程度<5%)(图 2-a)。石榴石退变形成粒度很细的非闪石边;绿辉石则沿晶界转变为角闪石和斜长石组成的后成合晶。

(2) 部分退变质:绿辉石大片地退变为角闪石+斜长石后成合晶,但仍残留有绿辉石;石榴石的非角闪石边加宽(图 2-b)。

(3) 退变质:石榴石的非角闪石边继续加宽,部分受流体交代转变为黑云母+绿帘石;而绿辉石已经完全被角闪石+斜长石后成合晶所替代(图 2-c)。

(4) 强退变质:退变质矿物(角闪石、斜长石、黑云母等)重结晶(图 2-d)。

其中,重要的界点是绿辉石的完全退变质,其重要意义将在后面的讨论中阐述。以绿辉石的完全退变质为分界点可以将上述 4 个退变质阶段归纳为 2 大阶段:绿辉石消失前的第一大阶段和绿辉石消失之后的第二大阶段,即榴辉岩的退变质经历了 2 大阶段,4 个亚阶段。

### 2.2 退变质各阶段矿物成分变化特征

随着退变质程度的加深,石榴石整体上呈现 Mg

含量降低和 Ca 含量稍有增加的趋势(图 3-a),这与石榴石向角闪石退变质的过程是相对应的;

总体上,辉石具有从绿辉石向霓辉石演化的趋势,Al 一直减少,Na 先减少后增加,Mg、Ca、Fe 的变化具有波动性(图 3-b)。其中,绿辉石的变化规律是 Al 和 Na 含量降低,Fe、Mg 和 Ca 含量都有波动;霓辉石的总体变化趋势是:Al 基本上保持恒定,Na、Fe 富集,但 Ca、Mg 亏损。有些部分退变质阶段的绿辉石成分表现为典型的新鲜绿辉石,是因为它们被包裹在石榴石中,未发生退变质。

角闪石受其所替代矿物成分的制约,成分变化较大。但总体上,所有的角闪石都属于钙质角闪石。在钙质角闪石中,替代绿辉石的有阳起石、镁普通角闪石以及浅闪石,而替代石榴石主要是亚铁-铁非闪石(图 4)。

由石榴石退变来的非闪石的变化过程(图 5)表现为:从部分退变质阶段到退变质阶段,Si 的含量相对变化很弱,Mg 含量则明显下降;到强退变质阶段,Si 的含量显著增加,而 Mg 又呈现回升的趋势。由于该图解中角闪石  $T_{Si}$  的变化可以反映温度的变化,所以可看到从石榴石退变为角闪石的过程中,榴辉岩的退变质经历了等温和降温两个阶段:从部分退变质阶段到退变质阶段,保持近等温状态;从退变质阶段再到强退变质阶段,则明显地降温。两种状态的转化发生在部分退变质和退变质(即第一大阶段和第二大阶段)的分界处,而这正是以绿辉石的消失为标志的。因此,可以推断出:绿辉石消失之前的第一大

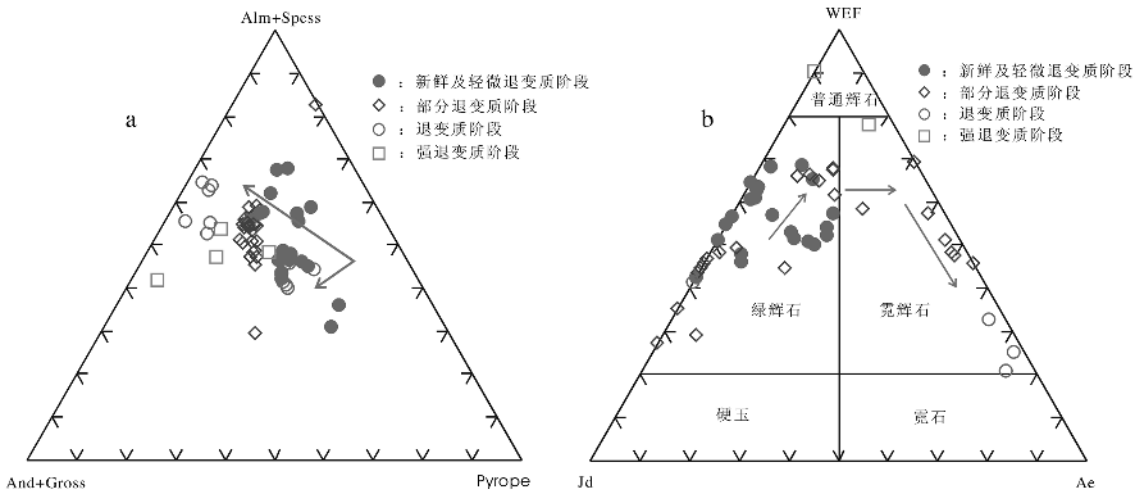


图 3 石榴石(a)和辉石(b)端员组分变化图解

Fig. 3 Diagrams showing the compositional variations of garnets (a) and pyroxenes (b)

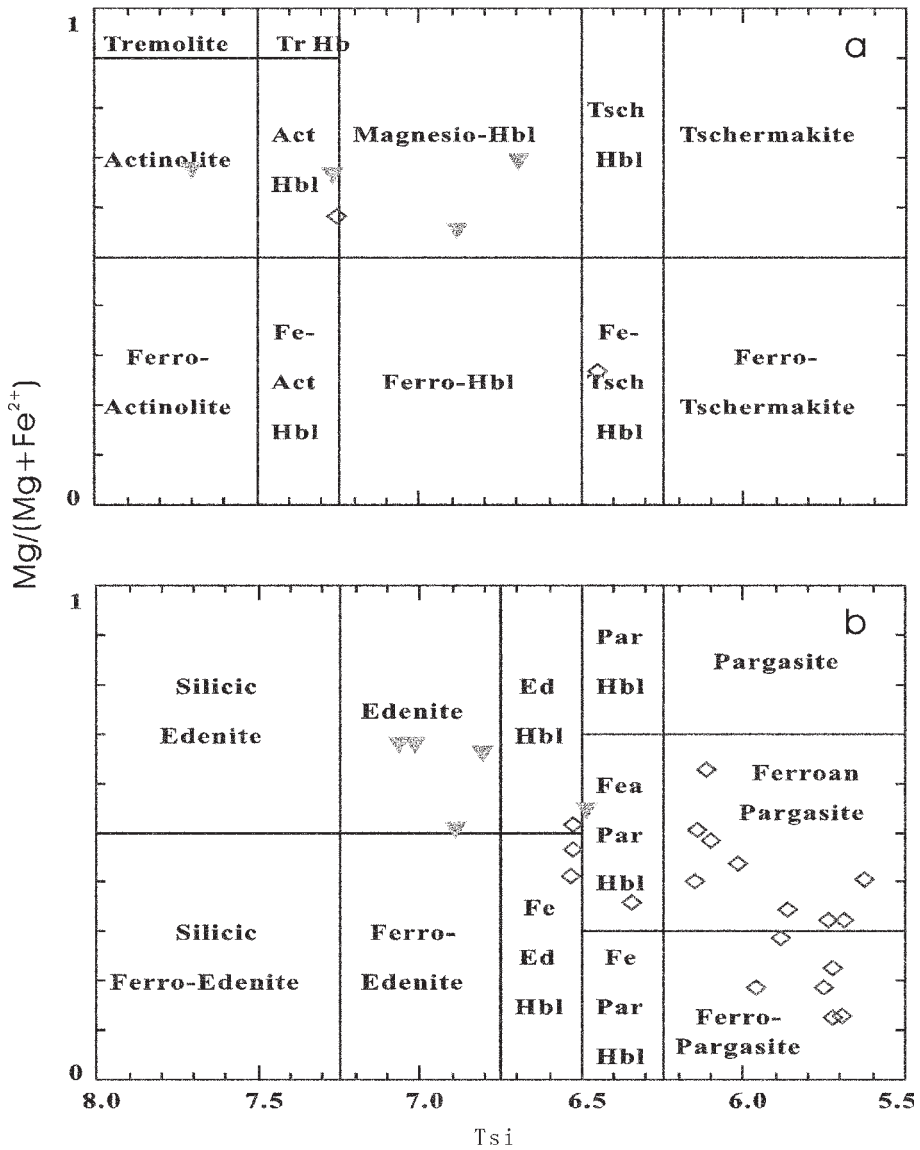


图 4 角闪石分类图解

◇: 替代石榴石的角闪石; ▼: 替代绿辉石的角闪石

Fig. 4 Classification diagram for amphiboles

◇: Amphiboles replacing garnet; ▼: Amphiboles replacing omphacite

a— (Na+K)<sub>A</sub><0.50, Ti<0.50; b— (Na+K)<sub>A</sub>≥0.50, Ti<0.50, Fe<sup>3+</sup>≤Al<sup>VI</sup>

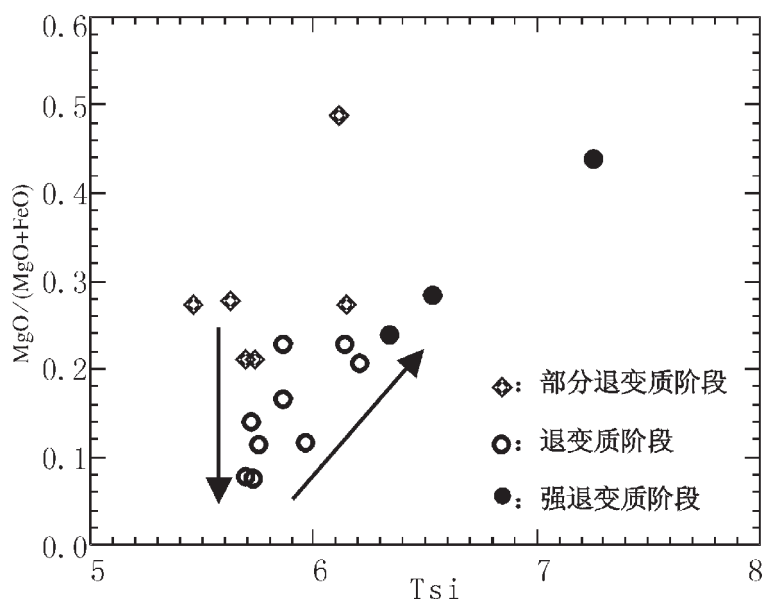


图 5 角闪石 Tsi-MgO/(MgO+FeO)图解

Fig. 5 Tsi-MgO/(MgO+FeO) diagram for amphiboles

阶段,榴辉岩经历了“等温降压”的退变质过程;绿辉石消失之后的第二大阶段,榴辉岩经历了“降温降压”的退变质过程。

### 2.3 退变质各阶段温压条件及 *PT* 轨迹

自 Ellis & Green<sup>[13]</sup>建立起共生的石榴石-单斜辉石地质温度计之后, Powell<sup>[14]</sup>、Krogh<sup>[15]</sup>、Yang Ai<sup>[16]</sup>以及 Ravna<sup>[17]</sup>都分别又对其进行了校正,分别得出不同的地质温度计。笔者分别用了这 5 种温度计,结合 Holland<sup>[18]</sup> 确定的单斜辉石中硬玉分子含量压力计(来自于硬玉+石英=钠长石的相平衡反应),计算了不同退变质程度的榴辉岩的温压条件(表 1)。但是由于这样算出来的温压条件只能是一个下限温度和压力,考虑到榴辉岩及其围岩的锆石中都发现了柯石英<sup>[7,12]</sup>,石英-柯石英相转变的下限压力是 2.8 Gpa,所以又计算了假定压力为 3.0 Gpa 时的温度,该温度可以用来指示榴辉岩变质峰期的温度。从表 1 可以看出, Ellis & Green<sup>[13]</sup> 的温度计算出的结果相对最高, Krogh<sup>[15]</sup> 温度计得出的最低,为减小误差,去掉最低和最高的,取另外 3 个温度计的结果的平均值,得到各种类型榴辉岩的峰期变质温度的范围为 697~805℃。这是设压力为 3.0 Gpa 时,榴辉岩的峰期温

度,由于实际情况中,压力也可能要超过 3.0 Gpa,所以实际温度也可能更高。

用 Holland<sup>[18]</sup> 硬玉分子含量压力计计算得出来的温度是 629~776℃,压力是 1.2~1.6 Gpa。由于这是榴辉岩形成温压的下限,所以可以将其作为轻微退变质和部分退变质了的榴辉岩的温压条件。很容易对比出从峰期到部分退变质阶段的温压条件的变化是明显的近等温降压的过程,这证实了 2.2 中由角闪石成分变化推断出的榴辉岩从新鲜至部分退变质阶段(即绿辉石完全退变质之前的第一大阶段)经历的是近等温降压的退变质过程。

许志琴等<sup>[8,9]</sup>估算了 CCSD 主孔内 738~1050 m 之间的角闪岩相-绿帘角闪岩相和绿片岩相的各种片麻岩的温压条件,获得角闪岩相-绿帘角闪岩相变质作用温度最高为 550~650℃,压力最高为 0.5~0.7 Gpa,而绿片岩相变质作用的相应温度为 300~400℃,压力为 0.30~0.35 Gpa。由于许志琴等<sup>[8,9]</sup>描述的角闪岩相-绿帘角闪岩相和绿片岩相片麻岩的特征分别与笔者划分的榴辉岩的退变质阶段和强退变质阶段的岩相特征相吻合,所以将 550~650℃和 0.5~0.7 Gpa 作为绿辉石完全退变后的退变质阶段的温压;300~400℃和

表 1 CCSD 主孔 0~2000 m 部分榴辉岩温压计算结果  
Table 1 Temperature and pressure calculation of eclogites in the 0 - 2000 m interval of the CCSD main hole

样品深度 (m)	样品特征	样品号	Jd	Kd	$X_{Co}$ (Ellis, Powell, Krogh, Yang)	$X_{Ca}$ (Ravna)	$Mg_{Ca}$ (Yang)	$X_{Mn}$ (Ravna)	$X_{Mg}$ (Ravna)	Ellis D.J. & Green D.H. (1979)		Powell R. (1985)		Eriling J. Krogh (1988)		Yang Ai (1994)		E. Krogh Ravna (2000)						
										P (Gpa)	T (°C)	P (Gpa)	T (°C)	P (Gpa)	T (°C)	P (Gpa)	T (°C)	P (Gpa)	T (°C)					
419	新鲜金红石榴辉岩	B190-1	57.57	6.26	0.27	0.26	23.13	0.01	0.23	1.8	810	846	1.7	791	827	1.7	782	822	1.7	753	834	1.6	748	823
501	新鲜石英榴辉岩	B242	46.28	6.37	0.16	0.15	19.52	0.03	0.20	1.5	706	750	1.4	682	726	1.4	626	677	1.4	625	725	1.4	646	735
567	新鲜金云母榴辉岩	B284	29.40	5.11	0.13	0.13	31.75	0.02	0.32	1.3	738	791	1.3	715	766	1.2	642	702	1.2	624	745	1.2	658	765
601	新鲜金红石榴辉岩	B303	35.27	4.93	0.21	0.21	43.51	0.01	0.44	1.5	826	872	1.5	807	852	1.5	785	837	1.4	713	821	1.4	728	825
690	新鲜金红石榴辉岩(含铁磁铁矿)	B358	37.45	6.45	0.23	0.23	23.67	0.01	0.24	1.5	761	805	1.4	740	784	1.4	719	768	1.3	685	784	1.3	681	772
1936	新鲜蓝晶石榴辉岩	B1016	35.01	7.92	0.23	0.23	60.25	0.01	0.60	1.3	708	753	1.3	687	731	1.3	662	712	1.1	537	643	1.1	551	648
204	部分退变质的多硅白云母榴辉岩	B58	49.67	6.49	0.28	0.28	23.55	0.01	0.24	1.7	811	849	1.6	793	830	1.6	785	827	1.6	750	835	1.6	742	820
419	部分退变质的阶段的金红石榴辉岩	B190-2	55.20	6.38	0.24	0.23	23.85	0.02	0.24	1.7	779	817	1.6	759	796	1.6	741	784	1.6	711	798	1.6	715	793
1992	部分退变质的阶段的石英榴辉岩	B1049	23.18	10.34	0.27	0.27	41.30	0.01	0.41	1.1	670	718	1.1	649	696	1.1	628	680	0.9	535	641	1.0	550	647

注: 峰期温度是在压力为 3.0 Gpa 条件下获得。

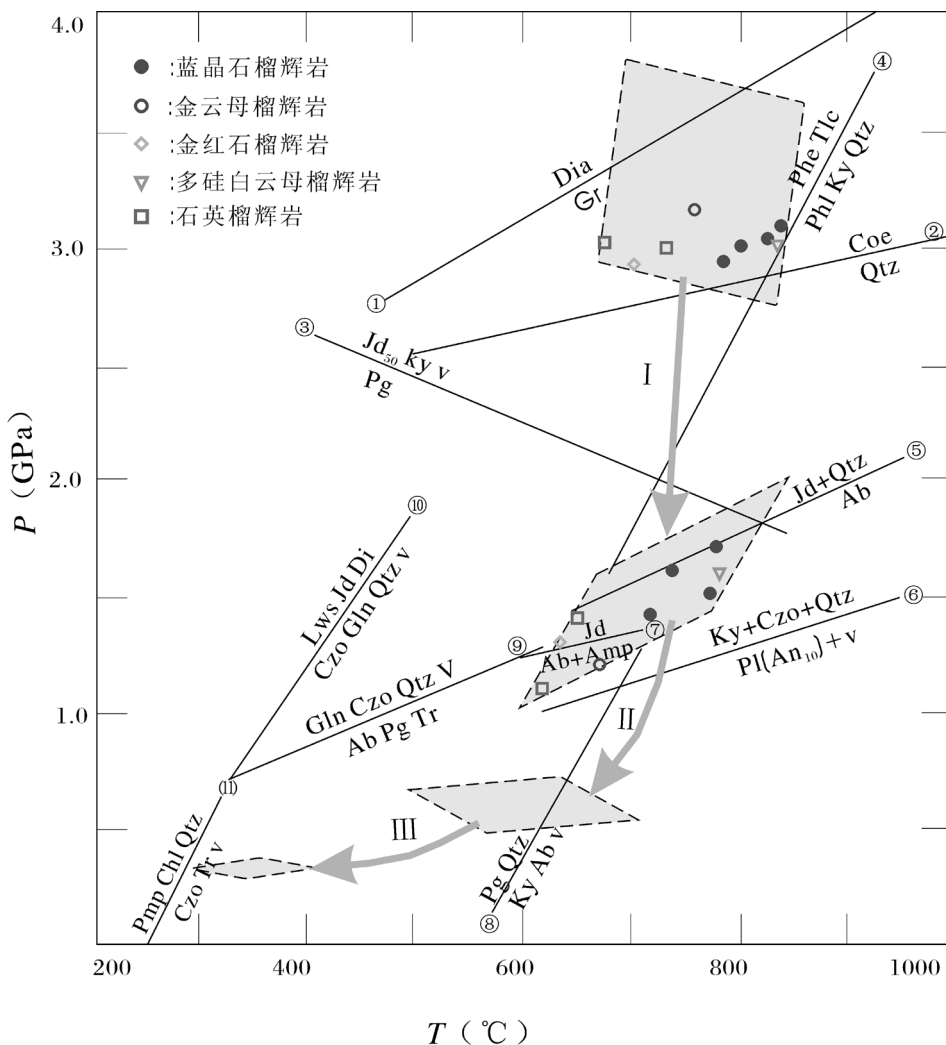


图 6 CCSD 主孔 0~2000 m 榴辉岩退变质的 PT 轨迹

(据游振东等<sup>[21]</sup>,修改)

I—由新鲜榴辉岩退变至部分退变质阶段的过程; II—III—绿辉石完全退变后的退变质过程

变质反应线: ①—Kennedy<sup>[22]</sup>; ②—Bohlen and Boettcher<sup>[23]</sup>; ③—Holland<sup>[24]</sup>; ④—Massonne and Schreyer<sup>[25]</sup>; ⑤—Holland<sup>[18]</sup>;

⑥—Goldsmith<sup>[26]</sup>; ⑦—Holland<sup>[19]</sup>, Waters<sup>[20]</sup>; ⑧—Holland<sup>[24]</sup>; ⑨~⑩&(11)—Evans<sup>[27]</sup>

矿物代号: Ab—钠长石; Amp—角闪石; An—钙长石; Chl—绿泥石; Coe—柯石英; Cpx—单斜辉石; Czo—斜黦帘石; Di—透辉石; Dia—金刚石; Gln—蓝闪石; Gr—石墨; Jd—硬玉; Ky—蓝晶石; Lws—硬柱石; Pg—钠云母; Phe—多硅白云母; Phl—金云母; Pl—斜长石; Pmp—绿纤石; Qtz—石英; Tlc—滑石; Tr—透闪石

Fig. 6. PT path of retrograde metamorphism of eclogites in the 0-2000 m interval of the CCSD main hole

(modified from You Zhendong et al<sup>[21]</sup>)

I—Retrograde process from the fresh eclogite to the partial retrograde eclogite;

II—III—Retrograde process after the complete retrograde metamorphism of omphacites.

Metamorphic reaction lines: ①—Kennedy<sup>[22]</sup>; ②—Bohlen and Boettcher<sup>[23]</sup>; ③—Holland<sup>[24]</sup>;

④—Massonne and Schreyer<sup>[25]</sup>; ⑤—Holland<sup>[18]</sup>; ⑥—Goldsmith<sup>[26]</sup>; ⑦—Holland<sup>[19]</sup> and Waters<sup>[20]</sup>; ⑧—Holland<sup>[24]</sup>; ⑨—⑩ and (11)—Evans<sup>[27]</sup>

Mineral codes: Ab—Albite; Amp—Amphibole; An—Anorthite; Chl—Chlorite; Coe—Coesite; Cpx—Clinopyroxene;

Czo—Clinzoisite; Di—Diopside; Dia—Diamond; Gln—Glaucophane; Gr—Graphite; Jd—Jadeite; Ky—Kyanite; Lws—Lawsonite;

Pg—Paragonite; Phe—Phengite; Phl—Phlogopite; Pl—Plagioclase; Pmp—Pumpellyite; Qtz—Quartz; Tlc—Talc; Tr—Tremolite



0.30~0.35 Gpa 作为强退变质阶段的温压。也很容易对比出在绿辉石消失之后的第二大阶段榴辉岩经历的是降温降压的退变质过程。

另外, 据绿辉石转变为角闪石+斜长石后成合晶的温压条件<sup>[19,20]</sup>, 700 °C、1.4 Gpa 和 600 °C、1.1 Gpa 是绿辉石完全退变温压值的两组端点控制值(图6中反应线⑦), 这正好与第一大阶段近等温降压退变质过程的温压条件以及第二大阶段降温降压退变质过程的温压条件都可以衔接起来, 进一步证明了以绿辉石的完全退变为标志来区分近等温降压和降温降压2个大的退变质阶段是可行的。

将所有的温压数据投于图中(图6), 可以很直观地看出榴辉岩的退变质过程经历了近等温降压和降温降压2个大的阶段, 分别对应于榴辉岩退变质的2大阶段, 都是以绿辉石完全退变为分界标志。变质峰期温度在800 °C左右, 压力2.8 Gpa 以上。

### 3 对榴辉岩折返过程的讨论

大量研究资料表明: 大别—苏鲁造山带的榴辉岩及其围岩都曾是地球表层的岩石, 并一起插入到地幔(100 km 以下)深处又返回到了地表, 并在俯冲折返过程中记录下了发生在板块会聚边界的深部地幔行为及岩石圈板片俯冲与折返的演化历史<sup>[1~2,28~31]</sup>。关于折返模式有很多不同的说法: 如垂向挤出作用<sup>[32~34]</sup>、斜向挤出模式<sup>[11]</sup>、伸展模式<sup>[35~36]</sup>等。

笔者通过综合前面所述的岩相学、矿物学特征, 结合温压条件和 *PT* 轨迹, 对大别—苏鲁超高压变质带榴辉岩的折返过程作了部分的推断:

随着扬子板块向华北板块下俯冲, 洋壳和陆壳的物质在俯冲到一定深度、一定压力下进变质为榴辉岩, 比重增大; 当俯冲板块前端的比重增大到一定程度就会发生崩裂, 导致前端板片的拆离(break off); 剩余的板块由于突然失去了向下拽的力会发生反弹, 而弹到旁边的岩石圈中, 俯冲亦随之停止; 之后原本冷的板块在周围热的围岩的作用下将会升温, 发生部分熔融; 熔融出来的熔浆将裹着尚未熔掉的榴辉岩等, 顺着俯冲产生的脆弱带向上挤出; 首先榴辉岩要经历的是近等温降压的快速折返, 折返过程中榴辉岩随着压力的迅速下降会发生退变质, 退变质出来的物质又会发生部分熔融; 这些小规模的部分熔融将为抬升折返提供进一步的动力; 之后榴辉岩将经历降温降压的缓慢抬升过程, 该过程中退

变质和部分熔融仍在交替发生着, 直至抬升停止。

整个折返过程中, 对于榴辉岩来说, 以绿辉石的完全退变质为标志, 在近等温降压的快速折返阶段, 榴辉岩经历了轻微退变质和部分退变质(即第一大阶段的退变质), 而在降温降压的缓慢抬升阶段, 则经历了退变质和强退变质(即第二大阶段的退变质)。

## 4 结 论

(1) 根据绿辉石和石榴石的退变质程度, 中国大陆科学钻主孔 0~2 000 m 榴辉岩的退变质过程可分为2大阶段: 绿辉石消失之前的第一大阶段和绿辉石消失之后的第二大阶段; 又可细分为4个亚阶段: 轻微退变质、部分退变质、退变质和强退变质。其中, 部分退变质和退变质之间的分界点正是绿辉石的完全退变质。

(2) 退变质过程中, 矿物演化总的趋势是: 石榴石逐渐被非角闪石或黑云母+绿帘石替代, 致使其镁组分减少, 铁含量增加; 绿辉石逐渐被角闪石+钠长石后成合晶替代, 硬玉含量逐渐减少, 并部分转化为霓辉石。

(3) 各种榴辉岩峰期变质温度为697~831 °C, 压力为3.0 Gpa 左右; 部分退变质阶段温度为629~776 °C, 压力为1.2~1.6 Gpa; 退变质阶段温压分别为550~650 °C和0.5~0.7 Gpa, 强退变质阶段的温度为300~400 °C, 压力为0.30~0.35 Gpa。

(4) 榴辉岩的折返过程分为两个大的阶段: 第一阶段是近等温降压的快速折返(榴辉岩在此期间经历了第一大阶段的轻微退变质和部分退变质), 第二阶段是降温降压的缓慢抬升(榴辉岩继而经历了第二大阶段的退变质和强退变质), 划分两大退变质阶段的绿辉石的完全消失, 也正是区分这两个折返阶段的标志。

致谢: 在进行岩心和薄片的鉴定过程中, 得到蔡慈、陈世忠、徐珏和李天福等同志的热情帮助。在室内数据处理和观点提出的过程中得到罗照华教授、赖兴运副教授和曾令森博士的亲切指导。另外, 河北区域地质矿产调查研究所、中国地质大学电子探针室为磨制薄片、探针测试提供了帮助。在此一并致以最真诚的谢意!

### 参考文献(References):

[1] Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the

- western Apls; a first record and some consequences [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, 86(2): 107~118.
- [2] Smith D C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics [J]. *Nature*, 1984, 310: 641~644.
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 杨天南, 许志琴, 陈方远. 江苏东海榴辉岩向斜长角闪岩转化的研究 [J]. *地质学报*, 2003, 77(4): 510~521.  
Yang Tiannan, Xu Zhiqin, Chen Fangyuan. Transformation from the Donghai eclogite to amphibolite in the southern Sulu UHPM terrane [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(4): 510~521 (in Chinese with English abstract).
- [6] 游振东, 苏尚国, 梁凤华, 等. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000 米超高压变质岩岩相学特征与变质变形史 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(1): 43~52.  
You Zhendong, Su Shangguo, Liang Fenghua, et al. Petrography and metamorphic deformational history of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the 100~2000 m core of Chinese Continental Scientific Drilling, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1): 43~52 (in Chinese with English abstract).
- [7] 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(1): 9~26.  
Liu Fulai, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, et al. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1): 9~26 (in Chinese with English abstract).
- [8] 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 苏鲁高压-超高压变质带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, et al. 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).
- [9] 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 中国大陆科学钻探主孔 1200 米构造柱及变形构造初步解析 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(1): 53~72.  
Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, et al. The structure profile of 0~1200m in the main borehole, Chinese Continental Scientific Drilling and its preliminary deformation analysis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(1): 53~72 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杨经绥, 刘福来, 吴才来, 等. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用: 来自含柯石英锆石的定年证据 [J]. *地质学报*, 2003, 77(4): 463~477.  
Yang Jingsui, Liu Fulai, Wu Cailai, et al. Two ultrahigh pressure metamorphic events recognized in the central orogenic belt of China: evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircon [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(4): 463~477 (in Chinese with English abstract).
- [11] 潘明宝, 陈火根, 王浩, 等. 苏鲁造山带南缘基础地质研究进展 [J]. *江苏地质*, 2003, 27(1): 1~11.  
Pan Mingbao, Chen Huogen, Wang Hao, et al. Progresses of fundamental geological research in the south margin of SuLu orogenic belt [J]. *Jiangsu Geology*, 2003, 27(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘福来, 张泽明, 许志琴. 苏鲁地体超高压矿物的三维空间分布 [J]. *地质学报*, 2003a, 77(1): 69~84.  
Liu Fulai, Zhang Zeming, Xu Zhiqin. Three-dimensional distribution of ultrahigh-pressure minerals in Sulu terrane [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(1): 69~84 (in Chinese with English abstract).
- [13] Ellis D J, Green D H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 71: 13~22.
- [14] Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene, geothermometer revisited [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1985, 3: 231~243.
- [15] Krogh E J. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer—a reinterpretation of existing experimental data [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 99: 44~48.
- [16] Yang A. A revision of the garnet-clinopyroxene Fe<sup>2+</sup>-Mg exchange geothermometer [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1994, 115: 467~473.
- [17] Ravna E K. The garnet-clinopyroxene Fe<sup>2+</sup>-Mg geothermometer: an updated calibration [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18: 211~219.
- [18] Holland T J B. The reaction albite = Jadeite + quartz determined experimentally in the range 600~1200°C [J]. *American Mineralogist*, 1980, 65: 129~134.
- [19] Holland T J B. P-T path from Cpx-Hbl-Pl symplectites [R]. A first report was presented at the Mineralogical Society Winter Meeting in Derby, 2002.
- [20] Waters D J. Clinopyroxene-amphibole-plagioclase symplectites in Norwegian eclogites: microstructures, chemistry and the exhumation P-T path [R]. Derby: Mineralogical Society, Winter Conference, 2002.
- [21] 游振东, 韩郁青, 杨巍然, 等. 东秦岭大别高压超高压变质带 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998, 104~114.  
You Zhendong, Han Yuqing, Yang Weiran, et al. The UHP-HP Metamorphic Belt in Eastern Qinling and Dabie [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 104~114 (in Chinese).
- [22] Kennedy C A, Kennedy G C. The equilibrium boundary between

- graphite and diamond [J]. *J. Geophys. Res.*, 1976, 81:2467~2470.
- [23] Bohlen S R, Boettcher A L. The quartz-coesite transformation: a pressure determination and the effects of other composition [J]. *J. Geophysical Research*, 1982, 87:7073~7078.
- [24] Holland T J B. Experimental determination of the reaction paragonite = jadeite + kyanite and internally consistent thermodynamic data for part of the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ , with application to eclogites and blueschists [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 65:293~301.
- [25] Massonne H J, Schreyer W. Stability field of the high pressure assemblage talc + phengite and two new phengite barometers [J]. *European Journal of Mineralogy*, 1989, 1:391~410.
- [26] Goldsmith J R. Plagioclase stability at elevated temperatures and water pressures [J]. *American Mineralogist*, 1982, 67:653~675.
- [27] Evans B W. Phase relations of epidote-blueschist [J]. *Lithos*, 1990, 25:3~23.
- [28] Coleman R G, Wang X M. Ultrahigh-pressure Metamorphism [M]. Cambridge University Press, 1995, 528.
- [29] Cong B L. Ultrahigh-pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China [M]. Beijing: Science Press, 1996, 224.
- [30] Schreyer W, Stockhert B. High pressure metamorphism in nature and experiment [J]. *Lithos*, 1997, 41:1~266.
- [31] Liou J G, Cong B L. Geodynamics for high- and ultrahigh-pressure metamorphism [J]. *The Island Arc*, 1998, 7.
- [32] Chemenda A L, Mattauer M, Malavielle J, et al. A mechanism for Syn-collisional rock exhumation and associated normal faulting: results from physical modeling [J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 1995, 132:225~232.
- [33] Chemenda A L, Mattauer M, Bokun A N. Continental subduction and a mechanism for exhumation of high-pressure metamorphic rocks: New modeling and field data from Oman [J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 1996, 143:173~182.
- [34] Liou J G, Zhang R Y. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks [J]. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third Edition, 2002, 17:1~18.
- [35] Michel F, Wei L, Nicole L B. Where is the North China-South China block boundary in eastern China? [J]. *Geological Society of America*, 2001.
- [36] 索书田, 钟增球, 游振东. 大别苏鲁超高压-高压变质带伸展构造格架及其动力学意义 [J]. *地质学报*, 2001, 75(1):14~24. Suo Shutian, Zhong Zengqiu, You Zhendong. Extensional tectonic framework of the Dabie-Sulu UHP-HP metamorphic belt, Central China, and its geodynamical significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(1):14~24 (in Chinese with English abstract).

## Retrograde metamorphism of eclogites from the main hole (0–2000 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling, Donghai, Jiangsu Province

LIANG Feng-hua<sup>1</sup>, SU Shang-guo<sup>2</sup>, YOU Zhen-dong<sup>2</sup>, ZHANG Ze-ming<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of Land and Resources of China, Institute of Geology,

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project is located in the eastern part of the Dabie–Sulu ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt. In the 0–2000 m long core, all kinds of eclogites account for >50 percent and most of them have experienced different degrees of retrograde metamorphism. According to the retrograde degrees of the dominant minerals garnet and omphacite in the eclogites, the process of the retrograde metamorphism may be divided into two major stages and four substages: the first major stage, which may be further divided into the substages of weak retrograde metamorphism and partial retrograde metamorphism, and the second major stage, which may be further divided into the substages of retrograde metamorphism and strong retrograde metamorphism. The general trend of retrograde process is as follows: garnet was gradually replaced by pargasite or epidote+biotite and omphacite was replaced by symplectitic coronas of amphiboles and plagioclase; the jadeite content of omphacites decreases gradually in the retrogression and part of omphacites are transformed to aegirine–augites. The P–T conditions of eclogites are as follows: the peak stage, 697–831°C and ~3.0 GPa; the substage of partial retrograde metamorphism, 629–776°C and 1.2–1.6 GPa; the substage of retrograde metamorphism, 550–650°C and 0.5–0.7 GPa; the substage of strong retrograde metamorphism, 300–400°C and 0.30–0.35 GPa. According to an integrated study of the petrological and mineralogical characteristics and P–T conditions, it is deduced that eclogites underwent a process of two-stage exhumation: the first major stage witnessed nearly isothermal decompression, suggesting fast exhumation (eclogites experienced retrograde metamorphism of the first major stage during this stage) and the second major stage saw decrease in temperature and pressure due to slow uplift (during this stage, eclogites underwent retrograde metamorphism of the second major stage). The complete retrograde metamorphism of omphacites is not only the marker of distinguishing the two major stages of retrograde metamorphism but also a marker of distinguishing the two major stages of exhumation.

**Key words:** eclogite; retrograde metamorphism; exhumation; Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD)

**About the first author:** LIANG Feng-hua. Female, born in 1978, doctor, engaging in structural geology and tectonics; E-mail: lfh@ccsd.org.cn.