

# CCSD 及青龙山 HP-UHP 变质岩中绿帘石地球化学及其对板块折返过程的示踪\*

梁金龙<sup>1</sup> 孙晓明<sup>1,2\*\*</sup> 徐莉<sup>1</sup> 翟伟<sup>1</sup> 汤倩<sup>1</sup> 梁业恒<sup>1</sup>

LIANG JinLong<sup>1</sup>, SUN XiaoMing<sup>1,2\*\*</sup>, XU Li<sup>1</sup>, ZHAI Wei<sup>1</sup>, TANG Qian<sup>1</sup> and LIANG YeHeng<sup>1</sup>

1. 中山大学地球科学系, 广州 510275

2. 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学实验室, 广州 510640

1. Department of Earth Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

2. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2006-04-10 收稿, 2006-06-20 改回.

Liang JL, Sun XM, Xu L, Zhai W, Tang Q and Liang YH. 2006. Geochemistry of epidotes in HP-UHP metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project and Qinglongshan area: An indicator of partial melting during continental slab exhumation. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7):1845-1854

**Abstract** Epidote is one of the water-bearing minerals which can keep stable during peak ultra-high pressure (UHP) metamorphism. Its compositional variation can be used as indicators of metamorphic conditions and process, because of its wide range of stable conditions of temperature and pressure. In this study, major and trace elements of epidotes in eclogite, paragneiss and orthogneiss from CCSD and Qinglongshan in Sulu UHP terrane are determined by electronic microprobe and LA-ICPMS, and the results indicate that the epidotes possess multiple genesis. They were formed during both prograde and retrograde stages and can be divided into many generations. The variation of major elements can be denoted by  $X_{Fe}$  ( $X_{Fe} = Fe^{3+} / (Al^{3+} + Cr^{3+} + Fe^{3+} + Mn^{3+})$ ) which is the function of metamorphic conditions (P, T,  $f_{O_2}$ ). The  $X_{Fe}$  change from high in the core to low in the margin of porphyroblastic epidotes which formed during prograde stage, but the epidotes formed during retrograde stage just on the contrary. The concentration of LILE (large ion lithophile elements) such as  $\Sigma REE$ , Sr, Ba, Rb, Th and Pb change from high in the core to low in the margin during the retrograde stage. Chondrite-normalized REE patterns of allanites, which were retrograded into epidotes in margin in paragneiss, vary from LREE-enriched type in the core to quite flat one in the margin. The depletion of LILE in the epidotes' margin may not result from metamorphic water/rock interaction during metamorphism, but probably attribute to partial melting during retrograde stage. High REE and Sr contents and wide stable conditions make epidote a suitable carrier of trace elements such as REE and Sr to the deep crust or mantle during subduction.

**Key words** Epidote, Major and trace elements, HP-UHP metamorphic rocks, Partial melting, CCSD

**摘要** 绿帘石是一种能在 UHP 变质峰值期稳定存在的含水矿物。由于其稳定的温-压条件十分宽广,其成分的变化可指示变质过程及条件。对中国大陆科学钻探 (CCSD) 岩芯及青龙山榴辉岩和正、副片麻岩中绿帘石较系统的岩相学观察和主、微量元素研究表明:绿帘石有多种成因,在俯冲进变质和折返退变质过程中都有绿帘石形成,每个阶段又可以划分出多个形成世代。绿帘石中主量元素的变化集中体现在  $X_{Fe}$  ( $X_{Fe} = Fe^{3+} / (Al^{3+} + Cr^{3+} + Fe^{3+} + Mn^{3+})$ ) 的变异,  $X_{Fe}$  值是变质条件(温度、压力、氧逸度)的函数。  $X_{Fe}$  在绿帘石斑晶的核部到边缘由大到小是进变质作用的标志,退变质过程形成的绿帘石则相反。在退变质过程中绿帘石斑晶边缘的  $\Sigma REE$  及 Sr、Ba、Pb 等大离子半径元素比核部有降低的趋势;副片麻岩中的绿帘石核部大都包含褐帘石残余,褐帘石退变为绿帘石时  $\Sigma REE$  急剧减少,球粒陨石配分模式也由 LREE 富集型逐渐过渡为 LREE 和 HREE

\* 本文得到国家自然科学基金重大项目 (No. 40399142)、中国科学院同位素年代学和地球化学实验室合作基金 (GIGIso-0504) 和国家重大基础研究 973 项目 (No. 2003C13716501) 联合资助。

第一作者简介:梁金龙,男,1967 年生,博士研究生,主要从事矿床地球化学研究, E-mail: richardjl@sina.com

\*\* 通讯作者:孙晓明, E-mail: eessxm@mail.sysu.edu.cn

无明显分异的平坦型。这些微量元素的特征不可能起源于变质流体/矿物间的水/岩反应,而极有可能是板块折返过程中发生部分熔融的结果。绿帘石还是 REE、Sr 等大离子半径元素循环至地壳深部和地幔的合适的载体矿物。

**关键词** 绿帘石; 主量和微量元素; HP-UHP 变质岩; 部分熔融; CCSD

**中图分类号** P578.956; P595; P588.348

## 1 引言

绿帘石族矿物是板块俯冲-折返过程中的一种重要见证矿物。一方面,绿帘石族矿物是含水矿物,通过它可以对板块演化过程中的流体活动进行追踪研究;另一方面,与板块俯冲过程伴生的从绿片岩相到蓝片岩相,绿帘-角闪岩相,一直到榴辉岩相的递进变质作用中,以及折返过程中与上述次序相反的退变质作用中的每个变质阶段,都可能有绿帘石存在。十分宽泛的 T-P 稳定条件,使绿帘石成为研究整个板块演化过程的一个很有价值的矿物。在苏鲁 UHP 变质带,绿帘石大量出现在新鲜榴辉岩、退变榴辉岩和正、副片麻岩中,不少学者对含绿帘石的角闪岩和退变榴辉岩进行了岩石学和稳定同位素地球化学研究,并对榴辉岩退变阶段的温-压条件及流体来源进行了探讨(游振东等, 2002; 杨天南等, 2003; Zhang R Y *et al.*, 2003; Mattinson *et al.*, 2004; Zhang Z M *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2006; 翟伟等, 2006), 然而,对其中绿帘石的成因、形成阶段、板块俯冲-折返过程主、微量成份变化规律及指示意义尚缺乏系统的研究,尤其是绿帘石的稀土元素(REE)和 Sr 等微量元素地球化学研究尚不多见。为此,本文选取中国大陆科学钻探(CCSD)主孔岩芯和江苏东海青龙山 HP-UHP 变质岩中的绿帘石为研究对象,在仔细的镜下观察的基础上,采用较先进的测试方法对不同岩石类型及形成阶段的绿帘石主、微量元素进行了原位分析,以期弄清变质过程绿帘石的成份演化特点,进一步阐明其对板块俯冲-折返过程的指示意义。

## 2 样品及测试方法

### 2.1 样品及其绿帘石镜下特征

本文研究样品包括 4 种不同的岩性:

(1) 东海青龙山北坡含绿帘石斑晶的榴辉岩。镜下观察显示这些榴辉岩十分新鲜,主要由石榴石+绿辉石+金红石+蓝晶石+绿帘石+黝帘石+多硅白云母+磷灰石等组成,绿帘石斑晶呈自形柱状,大者长达 10mm,一般 3~10mm,其中含有石榴石、绿辉石、金红石和石英等大量矿物包裹体,并经常见到柯石英假象(图 1-A、B),故推测是 UHP 变质峰期的产物。其中绿帘石大量发育双晶,正交偏光镜下干涉色呈环带结构,显示绿帘石的成分呈环带变化;

(2) CCSD 主孔中的退变榴辉岩。采自 CCSD 971m 和 1082m 深处,镜下可见其中绿帘石有三种类型:(a)在轻微退变的榴辉岩中,与石榴石和绿辉石呈相平衡关系,形态不

规则,推测是 UHP 变质峰期形成;(b)在强退变榴辉岩中由石榴石退变而来,局部尚保留石榴石残余(图 1-D);(c)在强退变榴辉岩中,多出现在褐帘石斑晶的边部,由褐帘石退变而来(图 1-G);

(3) CCSD 主孔中的副片麻岩,采自 CCSD 1205m、2681m 和 2912m 深处,主要组成矿物为正长石+斜长石+石英+黑云母+绿帘石+角闪石,副片麻岩中的绿帘石大都发育成分环带,核部往往保留褐帘石残余,往外为褐帘石退变而来的两个世代的绿帘石(图 1-E);

(4) CCSD 主孔中的正片麻岩,采自 2818m 深处。正片麻岩主要由正长石+石英+少量绿帘石+黑云母组成,绿帘石为形态不规则的斑晶(图 1-H)。

### 2.2 分析方法

微量元素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 Agilent7500a 型激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICPMS)上完成。该仪器配备德国 MicroLas 公司生产的 193nm ArF 准分子(exciter)激光器 GeoLas200M 剥蚀系统。本测试采用激光束斑为 40 $\mu$ m,剥蚀深度为 20~40 $\mu$ m,激光脉冲为 10Hz,能量为 34~40mJ,He 气为载气。以美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 做外标,绿帘石中 CaO 电子探针含量为内标,数据处理采用系统配备的 GLITTER 程序。有关仪器详细情况和分析流程参见柳小明等(2002)。

主量元素分析在中山大学测试中心的电子探针(JXA-8800R)上完成,加速电压 15kv,束流 2 $\times$ 10<sup>-8</sup>A,束斑 10 $\mu$ m,标样:SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O 为硬玉;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MnO 为铁铝榴石;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为铬铁矿;MgO 为透辉石;K<sub>2</sub>O 为钾长石;Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为镁铝榴石;TiO<sub>2</sub> 为钛闪石。

## 3 分析结果

### 3.1 主量元素成分

绿帘石主量元素的电子探针分析结果见表 1。表 1 可见,新鲜榴辉岩、退变榴辉岩和副片麻岩中绿帘石的主要成分 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (全铁)从颗粒中间到边部有规律地变化。青龙山榴辉岩的绿帘石斑晶中 X<sub>Fe</sub> (X<sub>Fe</sub> = Fe<sup>3+</sup> / (Al<sup>3+</sup> + Cr<sup>3+</sup> + Fe<sup>3+</sup> + Mn<sup>3+</sup>))核部和边缘分别为 0.292~0.302 和 0.242~0.266,呈现逐渐变小的变化趋势(图 2-A),在背散射电子像上可以发现斑晶内部包含许多衬度更亮的区域,与衬度较暗的斑晶之间界限截然,电子探针测试表明这部分是 Fe 含量更高的绿帘石包裹体(图 1-C),其 X<sub>Fe</sub> =

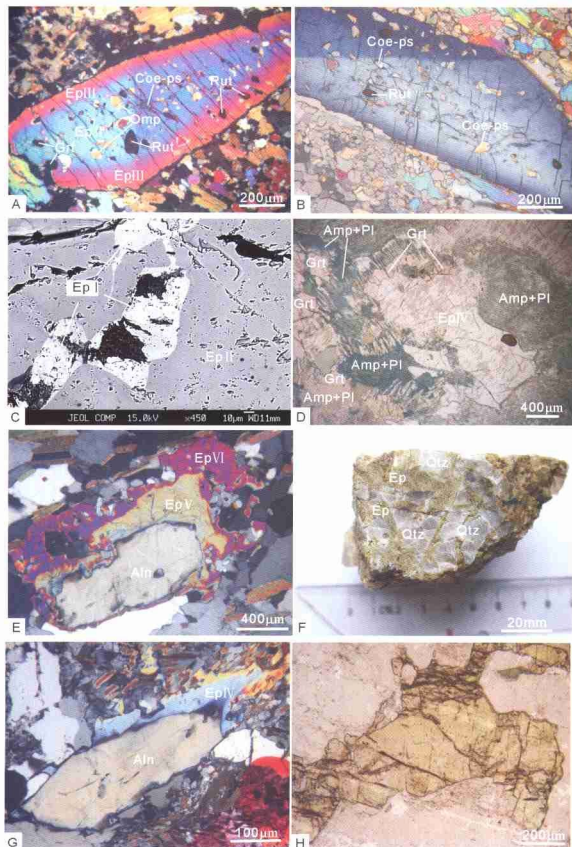


图1 CCSD 和青龙山榴辉岩、正、副片麻岩中的绿帘石

A、B-青龙山榴辉岩中的绿帘石斑晶,内含石榴石、绿辉石、金红石及柯石英假象(周围发育放射状裂纹)(正交偏光); C-绿帘石斑晶中的绿帘石包裹体(亮白色),比斑晶早一期的绿帘石(背散射电子像); D-强退变榴辉岩中石榴石大部分退变为绿帘石,边缘保留石榴石残余(单偏光); E-斜长角闪岩中褐帘石退变为绿帘石,核部为褐帘石残余,往外是两个世代的绿帘石(正交偏光); F-青龙山含绿帘石斑晶的石英脉; G-强退变榴辉岩中的褐帘石边缘退变为绿帘石(正交偏光); H-花岗片麻岩中的绿帘石斑晶(单偏光); Ep I -Ep VI-第一期到第六期绿帘石,Aln-褐帘石,Grt-石榴石,Omp-绿帘石,Rut-金红石,Coe-Ps-柯石英假象,Qtz-石英,Amp-角闪石,Pl-斜长石。

Fig. 1 Photomicrographs of epidotes in eclogite, paragneiss and orthogneiss from CCSD and Qinglongshan

表1 CCSD 和青龙山 HP-UHP 变质岩中绿帘石电子探针分析结果(%)

Table 1 Electronic microprobe analyses of epidotes from CCSD and Qinglongshan HP-UHP metamorphic rocks(%)

样品编号	03537						05018						05023			
	取样地点															
岩性	含绿帘石斑晶榴辉岩						含绿帘石斑晶榴辉岩						含绿帘石斑晶榴辉岩			
测点位置	r	c	r	i(Ep)	i(Ep)	i(Ep)	r	m	c	r	r	m	c	m	r	
Na <sub>2</sub> O	0.012	0.002	0.000	0.012	0.002	0.011	0.012	0.019	0.019	0.029	0.025	0.005	0.026	0.033	0.000	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.000	0.014	0.013	0.027	0.048	0.057	0.002	0.007	0.013	0.030	0.019	0.012	0.009	0.007	0.003	
K <sub>2</sub> O	0.000	0.000	0.005	0.000	0.013	0.011	0.005	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	
MgO	0.266	0.294	0.355	0.001	0.000	0.029	0.258	0.383	0.539	0.414	0.226	0.313	0.438	0.317	0.252	
MnO	0.027	0.047	0.036	0.053	0.096	0.124	0.038	0.035	0.021	0.050	0.058	0.062	0.028	0.023	0.035	
CaO	22.363	21.898	22.520	22.747	23.046	23.120	22.041	21.830	20.584	21.889	22.582	22.162	21.689	22.295	22.882	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.311	25.845	27.173	20.384	20.191	20.561	26.446	25.927	25.168	26.637	27.584	27.766	25.732	27.571	27.498	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	9.201	10.661	9.352	15.620	16.304	15.368	9.593	10.811	10.975	9.595	8.814	8.893	11.164	8.626	9.017	
TiO <sub>2</sub>	0.031	0.046	0.038	0.004	0.061	0.045	0.094	0.044	0.057	0.046	0.067	0.054	0.070	0.079	0.041	
SiO <sub>2</sub>	38.096	37.787	37.925	37.304	37.425	37.454	37.671	37.759	37.376	38.055	38.535	38.444	37.619	38.229	38.166	
Total	97.307	96.594	97.417	96.152	97.186	96.780	96.160	96.815	94.751	96.745	97.910	97.711	96.776	97.180	97.894	
X <sub>Fe</sub> **	0.252	0.292	0.256	0.433	0.445	0.426	0.266	0.294	0.303	0.264	0.242	0.242	0.302	0.238	0.247	

样品号	04314			03574			04328			04332			04348			03580	
取样地点	1082m																
岩性	弱退变榴辉岩			强退变榴辉岩			云母片岩			副片麻岩			副片麻岩			副片麻岩	
测点位置	c	m	r	r	c	r	r	c	r	r	c	r	r	m	c	r	c
Na <sub>2</sub> O	0.005	0.016	0.000	0.002	0.063	0.003	0.028	0.002	0.027	0.000	0.000	0.019	0.000	0.000	0.019	0.000	0.010
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.007	0.029	0.000	0.013	0.011	0.000	0.013	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.013	0.013
K <sub>2</sub> O	0.002	0.001	0.000	0.000	0.018	0.016	0.006	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	0.008	0.000	0.008	0.000	0.000
MgO	0.219	0.306	0.306	0.345	0.201	0.012	0.079	0.020	0.040	0.041	0.033	0.079	0.028	0.049	0.028	0.049	0.049
MnO	0.001	0.051	0.018	0.024	0.041	0.175	0.148	0.279	0.153	0.683	0.291	0.095	0.246	0.133	0.246	0.133	0.133
CaO	23.757	22.833	22.299	22.256	22.969	23.069	23.163	23.097	22.686	21.968	22.293	18.756	22.916	23.290	22.916	23.290	23.290
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.308	25.949	25.088	28.939	30.361	25.867	27.810	25.087	28.488	22.950	24.909	26.879	25.661	27.616	25.661	27.616	27.616
FeO*	8.775	9.235	9.651	6.401	5.203	10.257	8.266	11.308	8.077	13.113	11.231	5.996	10.784	9.037	10.784	9.037	9.037
TiO <sub>2</sub>	0.056	0.009	0.060	0.165	0.101	0.098	0.195	0.173	0.150	0.058	0.093	0.106	0.092	0.165	0.092	0.165	0.165
SiO <sub>2</sub>	38.105	37.976	37.534	38.327	38.865	38.061	38.529	37.899	38.669	37.474	37.848	36.262	38.082	38.295	38.082	38.295	38.295
Total	97.235	96.405	94.956	96.472	97.833	97.558	98.237	97.874	98.290	96.287	96.706	88.192	97.830	98.608	97.830	98.608	98.608
X <sub>Fe</sub>	0.250	0.262	0.278	0.181	0.146	0.283	0.228	0.308	0.220	0.357	0.308	0.182	0.294	0.246	0.294	0.246	0.246

\* r-边部; m-幔部; c-核部; i(Ep)-绿帘石包裹体;  
 \*\* X<sub>Fe</sub> = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MnO)

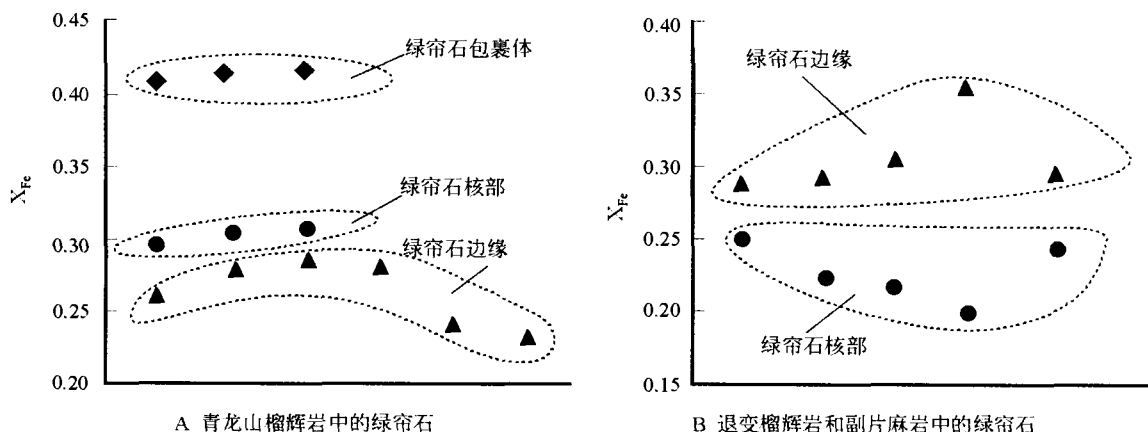


图2 CCSD 和青龙山榴辉岩和副片麻岩中绿帘石 X<sub>Fe</sub> 环带结构

Fig. 2 X<sub>Fe</sub> zonation of epidotes in eclogite and paragneiss from CCSD and Qinglongshan

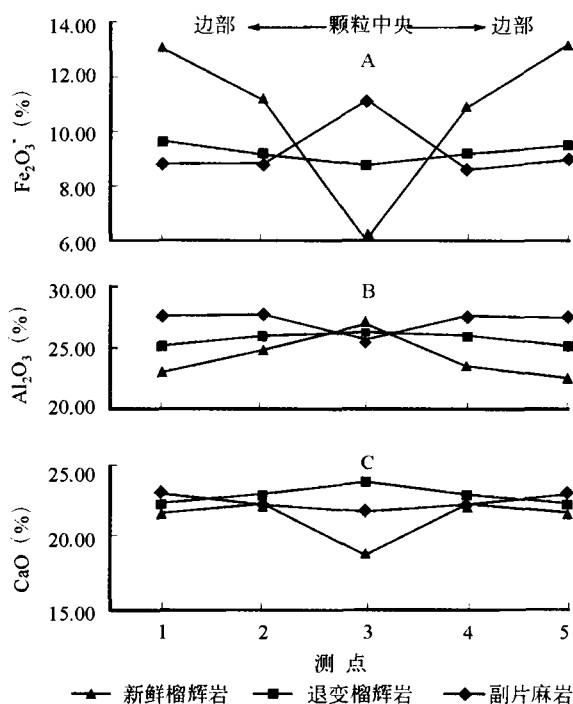


图3 CCSD 和青龙山绿帘石内部 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO 含量变化趋势

Fig. 3 Variation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO content in CCSD and Qinglongshan epidotes

0.426~0.445, 是比斑晶结晶更早的一期绿帘石。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO 呈现大致相同的变化趋势, 从斑晶核部到边缘含量呈增高趋势, 与 X<sub>Fe</sub> 的变化趋势刚好相反(图 3)。由此, 可将青龙山榴辉岩中的绿帘石划分为三期: 高 X<sub>Fe</sub> 的绿帘石包裹体(Ep-I); 斑晶核部 X<sub>Fe</sub> 较高的部分(Ep-II); 斑晶边缘 X<sub>Fe</sub> 较低的部分(Ep-III)。CCSD 主孔中的退变榴辉岩和斜长角闪岩中绿帘石的成份环带结构表现出与青龙山榴辉岩中绿帘石相反的变化特征: X<sub>Fe</sub> 由核部到边缘依次增高(图 2-B),

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 则呈由高到低的变化(图 3-B), 由此可划分出 3 个形成期次: 退变榴辉岩中的绿帘石(Ep-IV); 副片麻岩中残余褐帘石外 X<sub>Fe</sub> 较低的部分(Ep-V); 边缘 X<sub>Fe</sub> 较高部分(Ep-VI); 正片麻岩中绿帘石斑晶偶尔出现, 形态不规则, 成分较均匀。

### 3.2 稀土元素(REE)

绿帘石族矿物中 A 位为 Ca<sup>2+</sup> 占据, 分为九次配位的 A1 和十次配位的 A2 位。Ca<sup>2+</sup> 可以为 TR<sup>3+</sup> (+3 价的 REE) 替代, 成为俯冲带中的主要携带 REE 元素的矿物之一。本次研究的榴辉岩、正、副片麻岩中绿帘石的稀土元素含量见表 2。可以看出, 榴辉岩中绿帘石的 REE 元素含量很不均匀, 稀土元素总量(ΣREE)为 9.42~3179.42×10<sup>-6</sup>。绿帘石颗粒核部的 ΣREE 都大于边缘部位(图 4)。

榴辉岩中绿帘石的 REE 元素球粒陨石配分曲线如图 5A, 可见大部分绿帘石呈 LREE 富集和 HREE 相对亏损的右倾模式, LREE/HREE=8.37~26.17。但其中样品 04336 和 05043(均为强退变榴辉岩)却表现出 HREE 富集的左倾配分模式, LREE/HREE 分别为 0.10~0.27, 且 05043 号样品同时表现出 Ce 和 Eu 的正异常(δEu=14.21, δCe=2.62)。04336 号样品中绿帘石核部 LREE 相对亏损, HREE 相对富集, 边缘部位则反之。所有这些都表明在榴辉岩退变质过程中 REE 是逐渐被排出绿帘石晶格的, 并且 LREE 被排出的比例大于 HREE。榴辉岩中的绿帘石基本都表现 Eu 较低的正异常(δEu=1.06~1.39), 而 Ce 未见明显异常(表 2)。

副片麻岩中绿帘石的 ΣREE 同样表现出由核部到边缘急剧降低的变化趋势(表 2), 04332 号样品中绿帘石颗粒核部为残余的褐帘石, 往外是褐帘石退变产生的两个世代的绿帘石, 其 ΣREE 依次为 11287.74×10<sup>-6</sup>、639.05×10<sup>-6</sup>、49.46×10<sup>-6</sup>。REE 配分曲线则由 LREE 高度富集的右倾型逐渐转变为平坦型, 核部-幔部-边部的 LREE/HREE 分别为 202.63、3.97、2.45(图 5B), 变化趋势与退变榴辉岩中情形相似。退变榴辉岩和副片麻岩中的褐帘石中 REE 元素高度

表2 CCSD和青龙山 HP-UHP 变质岩中绿帘石稀土元素(REE)含量( $\times 10^{-6}$ )

Table 2 REE composition of epidotes from CCSD and Qinglongshan HP-UHP metamorphic rocks ( $\times 10^{-6}$ )

样品编号	03537	03574	04314	04336	05043	04332	04345								
采样位置	青龙山	971m	1082m	2710m	3054m	2681m	2818m								
岩性	榴辉岩	强退变榴辉岩	退变榴辉岩	强退变榴辉岩	强退变榴辉岩	副片麻岩	正片麻岩								
测点位置*	c	r	c	r	c	c	r	c	c(Aln)	r	c(Aln)	r	r	c	r
La	145.98	57.95	256.72	111.27	575.02	0.055	1.77	0.017	24013.84	159.26	37935.85	103.71	4.69	1.172	1.66
Ce	283.48	106.74	455.61	211.24	1183.41	0.286	5.69	0.037	46879.1	502.51	55476.76	226.73	15.47	5.26	3.92
Pr	34.57	13.08	55.5	25.22	158.44	0.208	1.08	0.013	4864.79	82.44	4621.08	24.46	2.08	1.133	0.606
Nd	149.04	58.12	236.51	111.15	706.2	2.96	7.61	0.088	17180.91	466.06	13020.13	107.69	8.29	6.6	3
Sm	30.42	12.63	43.42	21.59	195.04	8.18	7.43	0.12	2087.26	157.73	1077.04	31.72	2.93	4.36	1.38
Eu	12.01	5.66	13.84	6.81	80.01	5.3	3.07	0.55	466.8	57.34	186.58	16.23	1.65	0.655	0.266
Gd	23.31	12.28	25.87	12.87	163.83	28.51	20.6	0.51	520.61	124.13	386.38	34.74	3.53	2.44	2.44
Tb	3.13	1.919	2.33	1.083	21.76	7.38	5.07	0.126	24.28	13.4	32.65	6.59	0.665	3.12	0.816
Dy	14.2	9.99	8.12	3.16	78.33	50.11	31.14	1.25	41.31	43.12	100.04	39.09	3.75	27.3	9.6
Ho	1.94	1.631	1.191	0.375	7.43	11.41	6.63	0.305	2.79	4.53	11.3	8.27	0.741	7.36	4.33
Er	3.22	3.13	1.93	0.785	7.84	30.23	16.48	1.37	3.75	5.91	16.08	20.32	2.11	26.36	21.21
Tm	0.22	0.28	0.182	0.0548	0.495	4.13	2.22	0.331	0.136	0.43	1.283	2.47	0.36	5.17	4.68
Yb	0.772	1.07	0.846	0.308	1.52	32.42	15.37	3.95	0.73	1.61	5.96	15.18	2.63	41.68	45.71
Lu	0.0717	0.0836	0.1013	0.0397	0.093	4.19	2.06	0.75	0.038	0.166	0.608	1.851	0.565	6.36	7.62
$\Sigma$ REE	702.36	284.56	1102.17	505.96	3179.42	185.37	126.22	9.42	96086.34	1618.64	112871.74	639.05	49.46	138.97	107.24
LREE	655.50	254.18	1061.60	487.28	2898.12	16.99	26.65	0.83	95492.70	1425.34	112317.44	510.54	35.11	19.18	10.83
$\Sigma$ HREE	46.86	30.38	40.57	18.68	281.30	168.38	99.57	8.59	593.64	193.30	554.30	128.51	14.35	119.79	96.41
LREE/HREE	13.99	8.37	26.17	26.09	10.30	0.10	0.27	0.10	160.86	7.37	202.63	3.97	2.45	0.16	0.11
$\delta$ Eu	1.38	1.39	1.26	1.25	1.37	1.06	0.76	14.21	1.37	1.25	0.88	1.49	1.57	0.30	0.44
$\delta$ Ce	0.93	0.91	0.89	0.93	0.92	0.62	0.96	2.62	1.02	1.03	0.98	1.05	1.16	1.07	0.92

\* c-核部; r-边部; c(Aln)-核部退变残余的褐帘石。

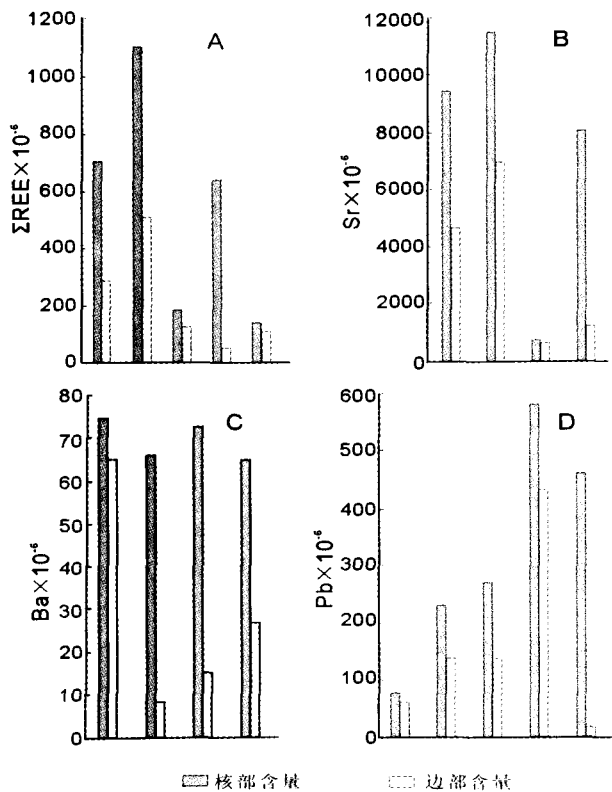


图4 CCSD和青龙山绿帘石内部大离子半径元素含量变化趋势  
Fig. 4 The variation of LILE (large ions lithophile elements) content in CCSD and Qinglongshan epidote

富集,  $\Sigma$ REE 分别达到  $96086.34 \times 10^{-6}$  和  $112871.74 \times 10^{-6}$ , 且轻稀土的富集程度远大于重稀土, LREE/HREE 分别为 160.86 和 202.63。岩相学观察表明,褐帘石形成于 UHP 变质作用峰值期稍后,退变榴辉岩和角闪岩中大部分被绿帘石取代(图 1-E,G)。可见,褐帘石是榴辉岩相向绿帘-角闪岩相退变质过程中的一个过渡矿物。退变榴辉岩和副片麻岩中的褐帘石的 REE 元素含量与配分模式相似,都表现 LREE 高度富集的特点(图 5C)。同时,  $\delta$ Eu、 $\delta$ Ce 特点都表现出相似性,反映了副片麻岩继承于榴辉岩。

正片麻岩中的绿帘石的配分模式则完全不同于榴辉岩和副片麻岩: HREE 富集而 LREE 亏损, LREE/HREE 为 0.11~0.16, Eu 负异常,  $\delta$ Eu 为 0.30~0.44(图 5D), 显示了它与榴辉岩和副片麻岩中绿帘石不同的成因和物质来源。

### 3.3 微量元素

与  $TR^{3+}$  一样,  $Sr^{2+}$  由于取代 A2 位  $Ca^{2+}$  的位置, 可成为绿帘石中高含量的微量元素。  $Sr^{2+}$  离子半径 (1.36Å) 比  $Ca^{2+}$  (1.23Å) 稍大, 电价相同, 易于替代  $Ca^{2+}$  占据十次配位和尺寸稍大的 A2 位。由于绿帘石是 UHP 变质作用峰值期能稳定存在的为数不多的含水矿物之一, 因此, 绿帘石成为携带水和大离子半径元素 ( $REE^{3+}$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  等) 进入下地壳和上地幔的载体矿物。CCSD 和青龙山榴辉岩中绿帘石 Sr 含量为  $(385.18 \sim 17022.27) \times 10^{-6}$ , 分布不均匀; 副片麻岩中 Sr 含量为  $(1268.74 \sim 8098.44) \times 10^{-6}$ ; 正片麻岩中为  $(545.84 \sim 586.92) \times 10^{-6}$ 。绿帘石颗粒核部 Sr 的含量一般高于边缘位置(表 3、图 4), 显示在退变质过程中, Sr 含量降

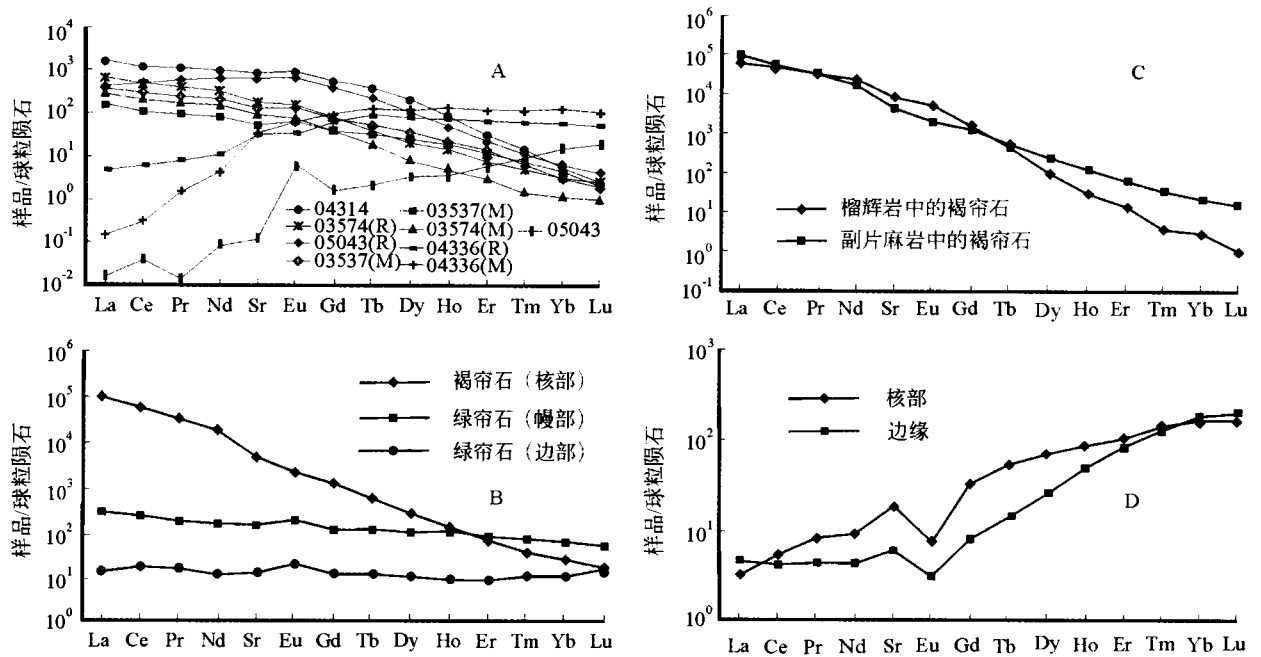


图5 CCSD 和青龙山 HP-UHP 变质岩中绿帘石的稀土元素配分模式.

A 榴辉岩绿帘石 REE 配分模式; B 褐帘石-绿帘石稀土元素配分模式的变化; C 榴辉岩和副片麻岩中褐帘石稀土元素配分模式; D CCSD 正片麻岩中绿帘石的稀土元素配分模式. 用球粒陨石进行标准化, 数据来自 Taylor *et al.*, 1985.

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of epidotes in HP-UHP rocks from CCSD and Qinglongshan.

表3 CCSD 和青龙山 HP-UHP 变质岩中绿帘石微量元素组成 ( $\times 10^{-6}$ )

Table 3 Trace elements contents of epidotes in HP-UHP metamorphic rocks from CCSD and Qinglongshan ( $\times 10^{-6}$ )

样品编号	03537		03574		04314		04336		05043			04332			04345	
采样位置	青龙山		971m		1082m		2710m		3054m			2681m			2818m	
岩性	榴辉岩		强退变榴辉岩		榴辉岩 (退)		强退变榴辉岩		强退变榴辉岩			副片麻岩			正片麻岩	
测点位置	c	r	c	r	c	r	c	r	c	c (Aln)	r	c (Aln)	r	r	c	r
Li	0.07	0.03	1.23	0.16	0.16	0.94	5.08	0.11	1.89	0.20	3.70	0.55	0.05	0.08	0.08	0.04
P	360.49	341.73	413.69	340.15	477.09	999.56	279.87	56.15	271.02	341.76	95.47	170.29	65.11	39.83	36.00	
Sc	22.24	24.04	1.90	16.66	18.36	129.71	98.63	44.72	12.00	23.46	26.32	35.02	60.17	63.61	47.37	
Ti	365.25	420.49	273.86	536.28	307.07	2372.85	1557.82	834.72	520.76	601.97	723.03	846.10	504.35	337.25	312.46	
V	324.86	386.01	252.05	518.92	239.04	185.69	241.22	282.79	319.09	330.65	45.69	73.54	193.73	176.35	173.76	
Cr	130.02	80.45	74.44	92.35	100.36	80.62	145.98	75.44	53.01	56.46	5.40	5.19	8.06	7.82	7.25	
Co	3.80	3.45	1.82	2.48	3.53	1.23	5.20	0.37	25.96	1.38	9.24	0.93	0.29	0.14	0.10	
Ni	2.95	1.94	1.48	1.15	4.34	0.43	3.07	0.48	23.59	0.31	1.01	0.18	0.17	0.24	0.20	
Zn	24.56	21.16	7.73	17.68	33.37	7.66	15.95	2.44	143.99	10.85	150.73	12.47	5.59	9.01	8.93	
Rb	0.18	0.01	0.16	0.06	0.07	0.05	5.39	0.04	0.03	0.04	0.11	0.06	0.04	0.09	6.61	
Sr	9425.11	4704.31	11497.05	6971.88	17022.27	780.34	709.10	385.18	9200.90	10718.49	17032.87	8098.44	1268.74	545.84	586.92	
Y	48.37	43.47	9.89	30.00	171.42	305.51	174.28	9.98	59.22	110.71	273.80	249.01	21.62	233.40	170.88	
Zr	4.35	5.55	1.11	6.65	3.36	34.19	15.58	15.59	2.05	6.52	3.14	10.30	16.06	8.57	8.06	
Ba	74.78	64.99	66.05	8.39	121.30	32.65	205.72	11.43	72.77	15.29	666.82	65.11	27.03	1.81	7.53	
Hf	0.20	0.21	0.04	0.22	0.13	0.95	0.29	0.33	0.07	0.27	0.16	0.42	0.56	0.65	0.50	
Pb	76.87	62.07	230.64	138.55	248.35	272.35	138.03	16.92	582.46	429.73	779.22	464.10	16.99	125.32	120.22	
Th	5.04	1.66	1.14	5.78	12.01	0.02	0.12	0.02	2422.37	3.83	4870.08	6.54	0.54	0.20	0.01	
U	0.80	0.55	0.05	0.52	60.84	0.10	0.12	0.02	481.98	6.01	207.49	3.04	0.83	1.39	1.48	
Y	48.37	43.47	9.89	30.00	171.42	305.51	174.28	9.98	59.22	110.71	273.80	249.01	21.62	233.40	170.88	

c-核部; r-边部; c (Aln)-核部退变残余褐帘石

表4 CCSD和青龙山绿帘石的成因分类及形成期次

Table 4 The types of genesis and genetic epochs of CCSD and Qinglongshan epidotes

成因类型	形成阶段	主要特征	世代划分
UHP 变质形成	进变质-峰值期	以包裹体形式存在, $X_{Fe} = 0.43 - 0.45$	Ep-I
		含柯石英假象的斑晶核部, $X_{Fe} = 0.29 - 0.30$	Ep-II
		含柯石英假象的斑晶边部, $X_{Fe} = 0.24 - 0.27$	Ep-III
石榴石退变形成	折返退变质早期	晶体边缘或局部保留石榴石残余	Ep-IV
褐帘石退变形成	折返退变质晚期	核部保留褐帘石残余, $X_{Fe}$ 较低	Ep-V
		核部保留褐帘石残余, $X_{Fe}$ 较高	Ep-VI
正片麻岩中绿帘石	可能继承自正片麻岩原岩	LREE 亏损, HREE 富集, Eu 负异常	—

低的变化趋势。另外, Ba( $1.81 - 121.30 \times 10^{-6}$ )、Pb( $16.99 - 464.10 \times 10^{-6}$ )大都表现出与  $TR^{3+}$  和  $Sr^{2+}$  大致相同的变化趋势: 颗粒核部含量高于边缘部位(图4)。

V、Cr 在绿帘石中含量较高。榴辉岩中绿帘石的 V 为( $185.69 - 518.92$ )  $\times 10^{-6}$ , 高于副片麻岩( $73.54 - 193.73$ )  $\times 10^{-6}$  和正片麻岩中的绿帘石( $173.76 - 176.35$ )  $\times 10^{-6}$ ; 而 Cr 在榴辉岩、副片麻岩和正片麻岩中绿帘石含量分别为( $53.01 - 145.98$ )  $\times 10^{-6}$ 、( $5.19 - 8.06$ )  $\times 10^{-6}$  和( $7.25 - 7.82$ )  $\times 10^{-6}$ 。这表明榴辉岩和片麻岩原岩的来源深度可能不同, 前者可能来自下地壳或上地幔, 而后者可能来自地壳。另外, V、Cr 在绿帘石内部的含量变化相似, 即核部含量低而边缘含量高(图6), 显然与上述大离子半径元素( $REE^{3+}$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Ba^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$ )的变化趋势相反(图4), 这可能意味着在榴辉岩向副片麻岩退变的减压折返过程中有部分熔融发生, 因为包含绿帘石族矿物、多硅白云母和磷灰石等含水矿物的榴辉岩的形成环境应该是富水的环境, 这为减压过程的部分熔融提供了可能。事实上, 在青龙山已发现有含绿帘石斑晶的石英脉(图1-F)。

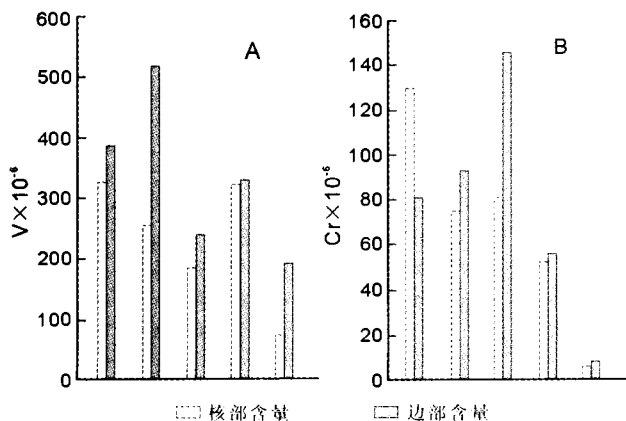


图6 V、Cr 在 CCSD 和青龙山绿帘石核部和边缘含量变化趋势

Fig. 6 The variation of V and Cr content from core to margin in CCSD and Qinglongshan epidotes

## 4 讨论

### 4.1 绿帘石中的 $X_{Fe}$

绿帘石中的 Fe(替代 M1、M3 位  $Al^{3+}$  进入晶格的  $Fe^{3+}$ ) 的含量是变质条件(原岩成分、温度、压力、氧逸度)的函数(Enami M *et al.*, 2004), 也就是说, 绿帘石中  $X_{Fe}$  的变化是变质条件的反映。青龙山榴辉岩绿帘石斑晶中的  $X_{Fe}$  呈核部高, 边缘低的环带结构, 而退变榴辉岩和副片麻岩中绿帘石  $X_{Fe}$  环带结构则恰好与此相反。Nakajima *et al.*, (1977, 1982) 对日本四国 Sanbagawa 高温-高压变质带中的绿帘石以及 Maruyama *et al.*, (1988) 对北加利福尼亚中 Franciscan 变质带中的绿帘石的研究, 都发现随着变质程度的增加, 绿帘石中  $X_{Fe}$  呈现由内而外降低的趋势; Mattinson *et al.*, (2004) 发现进变质形成的绿帘石包裹体  $X_{Fe} = 0.26$ , 而峰值期形成的绿帘石斑晶  $X_{Fe} = 0.15 - 0.18$ ; 片麻岩和石英岩中的绿帘石则是核部低( $X_{Fe} = 0.13$ ), 边缘高( $X_{Fe} = 0.31$ )。以上结果和结论都与本次测试结果完全一致。因此, 绿帘石中的  $X_{Fe}$  环带结构可作为变质阶段的划分标志: 由核部到边缘, 如果  $X_{Fe}$  由高到低变化是进变质作用特征; 反之, 则是退变质作用的结果。据此, 将青龙山新鲜榴辉岩中的绿帘石划分为进变质形成的 Ep-I、Ep-II 和 Ep-III 三期; 而将 CCSD 中的退变榴辉岩和副片麻岩中的绿帘石划分为退变质形成的 Ep-IV、Ep-V 和 Ep-VI 三期。这种划分与绿帘石的镜下观察特征相一致。众所周知, 由于折返过程中多期退变质作用的叠加, 进变质作用的痕迹仅表现为 UHP 峰期矿物(石榴石、绿辉石和金红石)中含有角闪石、绿泥石、钠云母等含水矿物的现象(Zhang *et al.*, 2005; 王汝成等, 2005; 王硕等, 2006), 青龙山榴辉岩基本未遭受退变质影响, 因而保留了进变质作用的信息。

Mattinson *et al.*, (2004) 将东海青龙山榴辉岩中的绿帘石划分为四期: Ep-I: 石榴石或绿帘石斑晶中的绿帘石包裹体; Ep-II: 含有柯石英假象的绿帘石斑晶; Ep-III: 与蠕虫状石英共生, 不包含柯石英假象的绿帘石斑晶; Ep-IV, 广泛角闪岩化的榴辉岩中高  $X_{Fe}$  的绿帘石晶体的边缘。本文在仔细



表 5 CCSD 和青龙山榴辉岩组成矿物中 Sr、REE 平均含量 ( $\times 10^{-6}$ )

Table 5 Average contents of Sr and REE of rock-forming minerals in eclogites

矿物*	Ep(15)	Ap(18)	Grt(17)	Omp(30)	Phe(20)	Rut(15)	Aln(2)
Sr	7309.74	2968.79	0.26	69.39	171.67	2.12	13116.89
$\Sigma$ REE	963.08	1417.78	39.98	4.68	4.21	—	104479.04

\* 矿物名称后括弧内的数字为测点总数,元素含量为各自测点数的平均值;—表示含量在测限以下;Ep-绿帘石;Ap-磷灰石;Grt-石榴石;Omp-绿辉石;Phe-多硅白云母;Rut-金红石;Aln-褐帘石

的岩相学观察和系统的主、微量元素分析的基础上,将东海地区 UHP 变质的榴辉岩、正、副片麻岩中的绿帘石进一步划分为四种成因类型,两个形成阶段和六个形成世代(表 4)。

#### 4.2 板块折返过程中的部分熔融

大别-苏鲁 UHP 变质地体在折返过程中是否发生部分熔融是许多学者十分关注的问题。钟增球等(1999)认为大别山地区面理化或退变质榴辉岩中穿插的花岗质细脉显示了部分熔融的迹象;游振东等(2004, 2005)认为苏鲁地体中部分花岗质片麻岩是折返过程部分熔融的产物;贾望鲁等(2003)从微量元素和铅同位素演化的角度提出大别-苏鲁地体的榴辉岩是板块俯冲进变质过程中岛弧玄武岩脱水部分熔融的产物;Wallis *et al.*, (2005)从野外露头观察、地质年代学和 Sr 同位素等角度论证了苏鲁地体存在 UHP 同变质部分熔融和峰值期后部分熔融的存在,并指出富含钾长石的花岗质岩墙是部分熔融的证据。然而,该地区究竟有无部分熔融发生?若有,发生在变质作用的哪个阶段?仍是一个有争议的问题。

前文可知: 1. CCSD 和青龙山榴辉岩中的绿帘石 REE 元素配分模式大多为 LREE 富集型,  $LREE/HREE = 8.37 \sim 26.17$ ,而在强退变的榴辉岩样品中却出现 LREE 亏损而 HREE 富集的模式; 2. 榴辉岩和副片麻岩的绿帘石中  $\Sigma$ REE 普遍表现为核部高而边缘低的变化趋势(图 4-A),且副片麻岩中从核部的褐帘石残余到外部多个世代的绿帘石其  $\Sigma$ REE 大幅度降低,其 REE 配分模式也由 LREE 高度富集逐渐过渡到 LREE 和 HREE 无明显分异的平缓模式(图 5-B); 3. Sr、Ba、Pb 等大离子半径元素含量变化趋势与 REE 相同,其核部含量高于边缘(图 4-B、C、D),而 V、Cr 等相容元素含量的变化趋势则相反(图 6)。上述微量元素特征表明,在折返退变质过程中包括 REE 在内的大离子亲石元素大量被排出绿帘石晶格, LREE 被排出的程度明显高于 HREE,这正是部分熔融导致的元素迁移特点。显然,REE 在退变质过程的变化特点明显不受控于绿帘石的结构,而是环境因素变化导致。流体活动也可能导致类似的元素迁移特征,但稳定同位素和流体包裹体研究均表明该区板块折返过程中并没有大规模的弥漫式流体活动(郑永飞等, 2004;徐莉等, 2005;翟伟等, 2005),而类似青龙山榴辉岩较高比例的含水矿物却极容易成为在减压过程中导致部分熔融的发生的流体介质的来源。青龙山含绿帘石大斑晶的石英脉便可能是部分熔融的产物。

#### 4.3 REE、Sr 循环至地幔深度的载体

绿帘石族矿物中 REE 和 Sr 的含量常很高,主要是因为 REE、Sr 等可对晶格中 A 位的 Ca 类质同象取代。表 5 所示,在本次测试的所有榴辉岩组成矿物中,绿帘石中 Sr 和 REE 的含量相当高,而褐帘石中 Sr 和 REE 的含量是所有榴辉岩组成矿物中最高的,分别是绿帘石中 Sr 和 REE 含量的 1.8 和 108 倍。青龙山榴辉岩中还含有少量 (<5%) 黝帘石,本次未对其微量元素进行测试,但据 Nagasaki *et al.*, (1998) 对苏鲁 UHP 变质岩中的帘石类矿物的研究表明,正交晶系的黝帘石中 Sr 的含量与绿帘石相当,而 REE 的含量比绿帘石低一个数量级。另外, Nagasaki *et al.*, (1998) 和 Enami (1999) 对苏鲁 UHP 变质岩中绿帘石微量元素的测试表明,退变质作用会导致绿帘石中 Sr 的含量的降低,使得 Sr 在绿帘石颗粒中呈中间高边缘低的环带结构分布,并认为岩石中 >70% 的 Sr 包含于黝帘石和绿帘石中,与本文的测试结果吻合。岩相学研究表明,绿帘石族矿物(包括黝帘石、绿帘石、褐帘石)是苏鲁地区 HP-UHP 变质阶段稳定存在的 Ca-Al 硅酸盐矿物,而钙斜长石和榍石不能稳定存在。因此,绿帘石族矿物是板块俯冲过程中将 REE、Sr 等大离子元素携带至地幔深度的合适载体矿物,对这些元素的壳-幔循环起重要的控制作用。

## 5 结论

(1) CCSD 和青龙山 UHP 变质岩中的绿帘石是多成因、多阶段的产物。依据其岩相学和主、微量元素地球化学特征,可划分为四个成因类型,两个形成阶段和六个形成世代;

(2) 绿帘石中 Fe 的含量变化可指示变质条件(原岩成分、温度、压力、氧逸度)。依据  $X_{Fe}$  可以识别进变质和折返退变质两个阶段形成的绿帘石。绿帘石中的 Fe 主要以  $Fe^{3+}$  存在,  $X_{Fe}$  的大小可直接反映环境氧逸度的高低;

(3) 绿帘石中 REE、Ba、Sr、Pb、V、Cr 等微量元素的组成和含量变化特征显示 CCSD 和青龙山 UHP 变质地体在折返过程中可能发生了部分熔融;

(4) 由于绿帘石族矿物能在 UHP 变质的峰值稳定存在,在板块俯冲过程中可将 REE、Sr 等大离子半径元素和水携带到地壳深处和上地幔,对这些元素的壳-幔循环起控制作用。

**致谢** 感谢 CCSD 基地的蔡慈研究员、陈世忠博士、邹永兴研究员及孙立文工程师在采取岩芯及野外调查过程中给予的支持与帮助。中山大学测试中心电镜室赵文霞老师帮助完成了电子探针分析, 西北大学大陆动力学重点实验室的柳小明老师和林慈銮同学在 LA-ICPMS 原位分析及数据处理过程中提供了许多帮助, 在此一并表示感谢!

## References

- Enami M. 1999. CaAl-silicates: an important Sr container in subducted slab. *J. Geogr.*, 108: 177 - 187
- Enami M, Liou JG, Mattinson CG. 2004. Epidote minerals in high P/T metamorphic terranes: subduction zone and high-to ultrahigh-pressure metamorphism. *Reviews in Mineralogy Geochemistry*, 56: 347 - 389
- Jia WL, Gao S, Wang LS *et al.* 2003. Evidence of Partial melting of eclogites from Dabie-Sulu ultra-high pressure metamorphic belt; trace elements and Pb isotope. *Earth Science — Journal of China University of Geoscience*, 28:121 - 128
- Liu JB, Ye K and Sun M. 2006. Exhumation P T path of UHP eclogites in the Hong'an area, western Dabie Mountains, China. *Lithos* (in press)
- Liu XM, Gao S and Yuan HL. 2002. Analysis of 42 major and trace elements in glass standard reference materials by 193nm LA-ICPMS. *Acta Petrologica Sinica*, 18:408 - 418
- Maruyama S, Liou JG. 1988. Petrology of Franciscan metabasites along the jadeite-glaucophane type facies series, Cazadero, California. *J. Petrol.*, 29:1 - 37
- Mattinson CG, Zhang RY, Tsujimori T *et al.* 2004. Epidote-rich talc-kyanite-phengite eclogites, Sulu terrane, eastern China: P-T- $f_{O_2}$  estimates and the significance of the epidote-talc assemblage in eclogite. *American Mineralogist*, 89: 1772 - 783
- Nagasaki A, Enami M. 1998. Sr-bearing zoisite and epidote in ultra-high pressure (UHP) metamorphic rocks from the Su-Lu province, eastern China: An important Sr reservoir under UHP conditions. *American Mineralogist*, 83:240 - 247
- Nakajima T. 1982. Phase relations of pumpellyite-actinolite facies metabasites in the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. *Lithos*, 15: 267 - 280
- Taylor SR, McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. Oxford: 1 - 325
- Wallis S, Tsuboi M, Suzuki K *et al.* 2005. Role of partial melting in the evolution of the Sulu (eastern China) ultrahigh-pressure terrance. *Geology*, 33: 129 - 132
- Wang RC, Wang S, Qiu JS *et al.* 2005. Rutile in the UHP eclogites from the CCSD main drill hole (Donghai, eastern China): trace-element geochemistry and metalogenetic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21:465 - 474
- Wang S, Wang RC, Qiu JS *et al.* 2006. Mineral inclusions in rutile of Sulu UHP eclogites from the main drill hole of CCSD, Donghai. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25: 61 - 70
- Xu L, Sun XM, Zhai W *et al.* 2005. Preliminary studies of fluid inclusions in quartz veins of HP-UHP metamorphic rocks, CCSD. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 505 - 512 (in Chinese with English abstract)
- You ZD, Su SG, Liang FH *et al.* 2002. The metamorphic evolution of the eclogitic rocks in the main hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project: an elucidation on the uplift processes of the ultrahigh-pressure metamorphic terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 21:381 - 388
- Zhai W, Sun XM, Xu L *et al.* 2005. Fluid inclusions of Qinglongshan ultrahigh pressure metamorphic eclogite and fluid evolution, north Jiangsu province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 482 - 488 (in Chinese with English abstract)
- Zhai W, Sun XM, Liang JL *et al.* 2006. Chemical compositions and fluid inclusions of epidotes in Qinglongshan ultrahigh pressure metamorphic eclogite, North Jiangsu Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7):2029 - 2038 (in Chinese with English abstract)
- Zhang RY, Liou JG, Zheng YF *et al.* 2003. Transition of UHP eclogites to gneissic rocks of low-amphibolite facies during exhumation: evidence from the Dabie terrane, central China. *Lithos*, 70: 269 - 291
- Zhang ZM, Xiao YL, Liu FL *et al.* 2005. Petrogenesis of UHP metamorphic rocks from Qinglongshan, southern Sulu, east-central China. *Lithos*, 81: 189 - 207
- Zheng YF. 2004. Fluid activity during deep subduction and exhumation of continental slab. *Chinese Science Bulletin*, 45:917 - 929 (in Chinese)
- Zhong ZQ, Zhang HF, Suo ST *et al.* 1999. Partial melting in exhumation of ultrahigh pressure metamorphic rocks, Dabie shan Mountains, China. *Earth Science — Journal of China University of Geoscience*, 24: 393 - 399

## 附中文参考文献

- 贾望鲁,高山,王林森等. 2003. 大别-苏鲁超高压变质带榴辉岩部分熔融的证据. *地球科学—中国地质大学学报*, 28: 121 - 128
- 柳小明,高山,袁洪林等. 2002. 193nm LA-ICPMS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析. *岩石学报*, 18:408 - 418
- 王汝成,王硕,邱检生等. 2005. CCSD 主孔揭示的东海超高压榴辉岩中的金红石: 微量元素地球化学及其成矿意义. *岩石学报*, 21: 465 - 74
- 王硕,王汝成,邱检生等. 2006. CCSD 主孔超高压榴辉岩金红石中的矿物包裹体研究. *岩石矿物学杂志*, 25: 61 - 70
- 徐莉,孙晓明,翟伟等. 2005. 中国大陆科学钻探 (CCSD) 高压超高压变质岩中石英脉流体包裹体初步研究. *岩石学报*, 21(2): 505 - 512
- 游振东,苏尚国,梁凤华等. 2005. 中国大陆科学钻探主孔榴辉岩类岩石退变质过程——对超高压变质地体隆升的启示. *岩石学报*, 21:381 - 388
- 翟伟,孙晓明,徐莉等. 2005. 苏北青龙山超高压变质榴辉岩流体包裹体特征与流体演化. *岩石学报*, 21(2): 482 - 488
- 翟伟,孙晓明,梁金龙等. 2006. 青龙山超高压变质榴辉岩绿帘石化学成分与流体包裹体特征. *岩石学报*, 22(7):2029 - 2038
- 郑永飞. 2004. 板块深俯冲和折返过程中的流体活动. *科学通报*. 45: 917 - 929
- 钟增球,张宏飞,索书田等. 1999. 大别超高压变质岩折返过程中的部分熔融作用. *地球科学—中国地质大学学报*, 24:393 - 399