

# 榴辉岩退变质过程的地球化学研究

## ——以荣成-威海岩段的榴辉岩体为例

孙景贵 胡受奚

(南京大学地球科学系金属成岩成矿实验室,南京 210093)



**【摘要】** 苏鲁超高压-高压变质岩带为A型俯冲作用的产物。带内的榴辉岩体多发生退变质作用,形成退变榴辉岩、榴闪岩及斜长角闪岩等,与榴辉岩一起记录了高压-超高压进变质峰期经过构造回返减压、降温演化过程所发生物质成分交换的重要信息。本文以荣成-威海岩段具“核-壳”构造的榴辉岩体为例,依据地质、岩相学特征,进行了退变质过程元素地球化学变异的深入研究。该过程中主要元素K,Ba,Rb等大离子亲石元素及 $w(K_2O)/w(Na_2O)$ , $w(Fe_2O_3)/w(FeO)$ , $w(LREE)/w(HREE)$ 的增加,体现壳源物质的加入;成矿元素Zn等明显增加,Ni,Co,Cr,Cu降低并均进入围岩或聚集于外壳斜长角闪岩中。这一规律不仅反映伴随构造折返、环境向相对氧化环境变化,不仅地壳物质及流体成分加入、发生广泛的物质交换,而且揭示了这一过程壳-幔物质交换的成岩成矿规律。

**【关键词】** 榴辉岩;退变质过程;地球化学;荣成-威海

中图法分类号 P586;P588.3;P59 /文献标识码 A

## 0 引言

地壳岩石在A型挤压俯冲进入上地幔形成柯石英、金刚石等超高压特征变质矿物组合的超高压进变质作用过程,伴随矿物相转变发生一系列的物质成分交换,去碱、去硅及去大离子亲石元素(LILE)等作用,导致地幔楔成为富集地幔,并引发不同层位的岩浆深融、分熔作用以及成矿作用,这项研究已成为当前地球科学研究的前沿课题<sup>[1~11]</sup>;而对从地幔折返剥露于地表的减压退变质过程所发生的一系列岩石、矿物、地球化学等变化规律的研究相

对薄弱<sup>[12~13]</sup>,事实上,这一环节亦是A-型挤压俯冲循环过程的重要组成部分,理清与退变质过程有关的问题,对于全面理解A-型俯冲造山作用具有同样重要的地质意义。许多特征表明,苏-鲁超高压变质带的榴辉岩体从上地幔折返于地壳浅部,曾发生各种退变质现象,退变岩石在岩体内呈脉状、网脉状等构造特征,这种现象表明苏-鲁超高压变质带的榴辉岩体从上地幔回返地壳过程曾发生强烈的物质交换、成分分异作用。本文仅依据出露于该带北段(荣成-威海一带)且退变质作用、岩相变化规律较清晰的典型退变榴辉岩体为例,根据岩相、主要元素、微量元素和稀土元素的特征,探讨榴辉岩体在折返、退变质过程元素富集、亏损的地球化学基本规律。

# 1 地质及岩相学

苏鲁陆-陆俯冲超高压榴辉岩带是一个长 350 km、宽 5 km~40 km, 主体呈北东向展布的南窄、北宽规模巨大的构造岩带。荣成-威海岩带为该带的北端, 带内主要由花岗质片麻岩、变质层状岩等组成, 含少量基性-超基性岩体和榴辉岩体。榴辉岩体的形态多呈透镜状、扁豆状、条状或似层状, 一般长数十厘米、几米至数十米以上, 主要分布于二长花岗质片麻岩、荆山岩群大理岩中, 少数榴辉岩与超基性(-基性)岩伴生。

榴辉岩体是一个十分复杂的地质体, 岩石类型复杂, 岩相变化较大, 典型的榴辉岩较少, 多为退变质的榴辉岩质岩石(退变榴辉岩、榴闪岩、斜长角闪岩等)。退变岩石呈网脉状、包壳状(核部一般为榴辉岩)或核-壳状、及细脉状等形态依附于榴辉岩或与榴辉岩伴生。“核-壳”构造的退变榴辉岩体, 可以区分核、内壳、外壳岩相带, 从核部向外壳岩性依次为: 榴辉岩→退变榴辉岩→榴闪岩(内壳)→斜长角闪岩(外壳), 各岩相之间呈渐变过渡关系(图 1)。它们的岩相及矿物学主要特征: ①榴辉岩: 岩石呈粒状变晶结构(绿辉石和石榴石为主, 相当于榴辉岩相), 矿物成分变化较大, 主要为石榴石(40%~50%)、绿辉石(45%~55%), 少量石英、金红石、磷灰石等, 偶见柯石英或其假象, 粒径( $d/mm$ )为 0.10~2.5, 在绿辉石晶体边部或裂理内局部可见蠕虫状单斜辉石、毛

岩: 主要矿物以石榴石、绿辉石为主, 两者含量降为 20%~80%, 在绿辉石的边部及裂理内分布蠕虫状钠质单斜辉石、毛发状斜长石微晶, 局部构成合成微晶( $Om+Q \rightarrow Cpy+Pl$ )结构, 石榴石边部及裂理内出现蠕虫状钠质角闪石、斜长石及微粒状磁铁矿、薄片状黑云母或绢丝状多硅白云母( $Gt+Om+Q+Cpy+H_2O \rightarrow Pl+Hb \pm Bi+Im$ ), 宏观上与榴辉岩难以区别。③榴闪岩: 石榴石+绿辉石降为 20%以下, 岩石由榴辉岩相的残留矿物和新生成的退变质矿物组成, 残留矿物为石榴石、单斜辉石、金红石及绿辉石等(10%~30%), 它们多呈矿物假象残存, 退变质矿物有钠质角闪石、少量斜长石(更长石为主)、石英、黑云母、钛铁矿等; 其中, 退变质矿物重结晶明显, 早期较小的毛发状、羽状合成晶被相对较大的矿物晶体取代。④斜长角闪岩: 主要是普通角闪石、透闪石、斜长石(更长石), 少量黑云母、石英、黝帘石(绿帘石)、榍石、磷灰石等矿物, 其中普通角闪石、斜长石、黑云母、石英可见不均或波状消光现象, 表明退变质过程亦伴随较强的变形作用。综合区域榴辉岩体的岩相学和矿物学资料, 可证实原生榴辉岩均发生不同程度的退变质作用, 其退变相: 早期(榴辉岩和榴闪岩)以  $Cpy+Am+Pl+Hb$  等共生矿物组合为主, 相当于角闪麻粒岩相, 晚期(斜长角闪岩)以  $Pl+Hb+Ep$  等共生矿物组合为主, 变质条件相当于低角闪岩相<sup>[14]</sup>。

## 2 地球化学

为了确保原岩成分的一致性, 选取两个具代表性“核-壳”构造的榴辉岩体(玉皇庙、于家疃), 从核部向外壳系统取样(榴辉岩→退变榴辉岩→榴闪岩→斜长角闪岩), 在岩相学系统研究的基础上, 进行全岩样品的地球化学工作, 主要元素用湿化学法、微量元素采用 X 荧光、稀土元素采用等离子体直读光谱仪(ICP)进行测试, 结果见表 1。

### 2.1 常量元素

表 1 列出了主要元素分析数据, 测试的结果表明, 榴辉岩经退变质作用形成退变榴辉岩、榴闪岩、斜长角闪岩(A-1, C-1→A-4→A-5→A-6, C-2), 伴随矿物相的改变, 主要氧化物也发生明显的变化, 其变化规律表现为: ①  $w(SiO_2)$ : 由榴辉岩到榴闪岩、斜长角闪岩逐渐升高, 其中, A 组外壳斜长角闪岩的  $w(SiO_2)$  略低(47.52%), 可能与该岩石的角闪石含量偏高有关。②  $w(TiO_2)$ : 由榴辉岩到退变榴辉岩升高, 退变榴辉岩再到榴闪岩、斜长角闪岩依次降

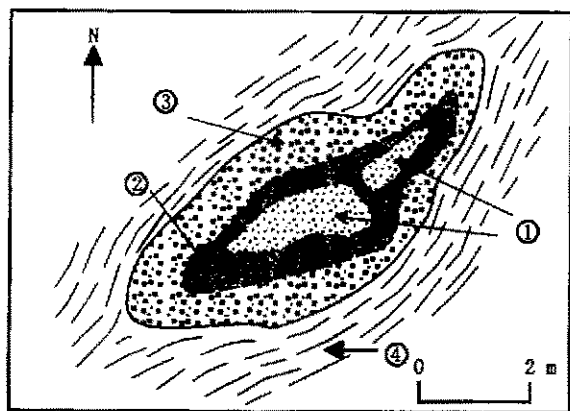


图 1 榴辉岩体的岩相特征简图

①. 榴辉岩-退变榴辉岩; ②. 榴闪岩; ③. 斜长角闪岩; ④. 二长花岗质片麻岩(威海玉皇庙)

Fig. 1 Simplified map showing lithofacies character of eclogite body in Yuhuangmiao of Weihai

①. eclogite-retrograde eclogite; ②. amphibolite eclogite;

③. amphibolite; ④. monzonitic granitic gneiss

发状微晶斜长石、绢丝状多硅白云母等。②退变榴辉

表 1 荣成-威海岩段榴辉岩及其退变岩的主要元素、 $w_B/\%$ 、稀土和微量元素、 $w_n/10^{-6}$ 分析

Table. 1 Bulk composition, REE and trace-element contents of the eclogites and their retrograde products from the rock belt in Rongcheng-Weihai of Shandong

样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	LOI	Total
A-1	47.36	1.95	14.26	2.74	9.92	0.24	6.53	12.03	2.54	0.43	0.12		1.97	100.13
A-4	47.76	2.05	14.15	3.18	10.3	0.23	5.96	11.77	2.69	0.37	0.13		1.54	100.13
A-5	48.28	1.73	14.46	3.22	9.68	0.23	6.36	11.74	2.52	0.49	0.11		1.79	100.61
A-6	47.52	1.24	15.84	2.62	7.25	0.17	6.6	13.1	2.58	0.51	0.14		2.18	99.75
C-1	47.08	1.14	14.92	2.9	9.84	0.16	8.21	12.4	2.14	0.09	0.12	0.73	0.02 <sup>①</sup>	99.75
C-2	48.46	0.71	15.96	3.37	5.82	0.15	8.46	11.85	2.93	0.93	0.12	0.89	0.02 <sup>①</sup>	99.67

样号	Ba	Rb	Sr	Y	Th	Zr	Cr	Ni	Co	Cu	Pb	Zn	$\frac{w(K_2O)}{w(Na_2O)}$	$\frac{w(Fe_2O_3)}{w(FeO)}$	$\frac{w(FeO)}{w(MgO)}$	$\frac{w(Rb)}{w(Sr)}$
A-1	386	7.64	152	7	7.58	132	229	61.6	60.2	59	4.7	125	0.17	0.28	1.9	0.05
A-4	181	5.9	77.8	6.51	7.2	186	188	54.2	53.1	40.8	24.9	113	0.14	0.31	2.21	0.08
A-5	627	7.99	144	3.42	9.35	99.8	224	50.3	44.6	36.9	36.9	551	0.19	0.33	1.98	0.06
A-6	132	56.6	88	6.53	6.69	69.5	222	45.3	41.1	16.3	6.9	797	0.20	0.36	1.46	0.64
C-1	117	7.07	164	6.81			203	52.5	46.7	37.7	15.3	71.4	0.04	0.29	1.52	0.04
C-2	320	16.3	559	6.62			343	60.8	41.5	51.4	15.5	69.4	0.32	0.58	1.05	0.03

样号	$\frac{w(Rb)}{w(Ba)}$	$\frac{w(K)}{w(Rb)}$	$\frac{w(Ti)}{w(Zr)}$	$\frac{w(Cr)}{w(Ni)}$	$\frac{w(Ba)}{w(La)}$	ΣREE	$\frac{w(LREE)}{w(HREE)}$	(La/Yb) <sub>N</sub>	LREE	HREE	(La/Sm) <sub>N</sub>	δEu
A-1	0.02	467.02	88.56	3.72	88.94	21.83	3.13	3.12	16.55	5.28	2.26	0.83
A-4	0.03	520.34	66.08	3.47	39.18	25.23	3.6	4.21	19.74	5.49	2.01	0.71
A-5	0.01	508.89	103.92	4.45	155.97	17.55	6.91	7.14	15.33	2.22	3.2	0.6
A-6	0.43	45.44	106.96	4.9	26.88	24.05	3.43	3.77	18.62	5.43	2.97	1.07
C-1	0.06	105.66		3.87	47.32	16.87	1.47	1.08	10.04	6.82	1.48	1.39
C-2	0.05	481.41		5.64	177.19	25.95	2.79	2.43	19.1	6.85	1.24	1.48

注: (全部样品由长春科技大学测试中心完成, 1995); A-1, C-1: 榴辉岩; A-4: 退变榴辉岩; A-5: 榴闪岩(内壳); A-6, C-2: 斜长角闪岩(外壳); ①: CO<sub>2</sub>

低, 榴辉岩尤其是退变榴辉岩的  $w(TiO_2)$  相对高, 与岩石中的金红石含量较高有关(有的岩体形成具有工业意义的矿床), 而斜长角闪岩阶段金红石已全部退变质形成钛铁矿并析出部分钛, 导致  $TiO_2$  质量分数降低。③  $w(Al_2O_3)$ : 由榴辉岩到退变榴辉岩略降低, 到榴闪岩、斜长角闪岩明显增加, 这一点与斜长石、角闪石、黑云母类矿物的大量形成有关。④  $w(CaO)$ : 由榴辉岩经退变榴辉岩到榴闪岩降低, 至斜长角闪岩趋于升高, 前一个阶段与石榴石和绿辉石逐渐被角闪石等矿物取代有关, 后者与斜长石和绿帘石等矿物相的明显增加有关。⑤  $w(Fe_2O_3)$  和  $w(FeO)$ :  $w(Fe_2O_3)$  由榴辉岩到榴闪岩呈现升高, 至斜长角闪岩降低; 而  $w(FeO)$  则表现由榴辉岩到退变榴辉岩升高, 至榴闪岩、斜长角闪岩相应降低, 两者整体表现为  $w(Fe_2O_3)$  升高,  $w(FeO)$  降低;  $w(Fe_2O_3)/w(FeO)$  由榴辉岩到斜长角闪岩(0.28, 0.29→0.31→0.33→0.36, 0.58) 明显升高, 与绿辉石、石榴石、金红石等矿物相逐渐被角闪石、斜长石、磁铁矿等矿物相取代有关, 并进一步体现  $f_{O_2}$  升高, 退变质环境向氧化程度高的方向发展。⑥  $w(MgO)$ : 榴辉岩到退变榴辉岩降低(绿辉石消失), 至榴闪岩、斜长角闪岩相应地升高(被生成的角

闪石、云母类矿物吸收)。⑦  $w(Na_2O)$  和  $w(K_2O)$ : 前者由榴辉岩到退变榴辉岩略升高(硬玉分子转化成钠闪石分子)、至榴闪岩(2.52%)降低, 与钠闪石转化成普通角闪石相一致, 至斜长角闪岩(2.58%)略升高、与斜长石的大量形成有关;  $w(K_2O)$  从榴辉岩到退变榴辉岩降低、然后明显升高, 至斜长角闪岩略有降低, 主要是转变成斜长角闪岩时, 出现  $Fe_2O_3$  和  $FeO$  的聚集所致。⑧挥发分:  $w(H_2O^+)$  或烧失量由榴辉岩到斜长角闪岩有明显增加。C 组样品亦具有上述类似的变化规律。图 2 排列的主要氧化物变异图, 更清晰反映了退变质过程的氧化物演化规律。即: 退变质过程伴随矿物相的转变,  $SiO_2$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O/K_2O$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_2O_3/FeO$ ,  $H_2O^+$ ,  $CO_2$  均不同程度增高, 而  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$  先降低至斜长角闪岩升高, 相反  $FeO/MgO$ ,  $FeO$  呈升高、降低的波动性变化; 整体表现为活动组分逐渐增加, 惰性组分降低的变异规律。

2.2 微量元素

从表 1 列出的测试数据和图 3 排列的元素变异折线图解分析, 由榴辉岩到斜长角闪岩(A 组)的变化特征与主要氧化物的变化规律基本一致。其表现: ① Rb: 由榴辉岩到退变榴辉岩略呈降低的趋势, 至

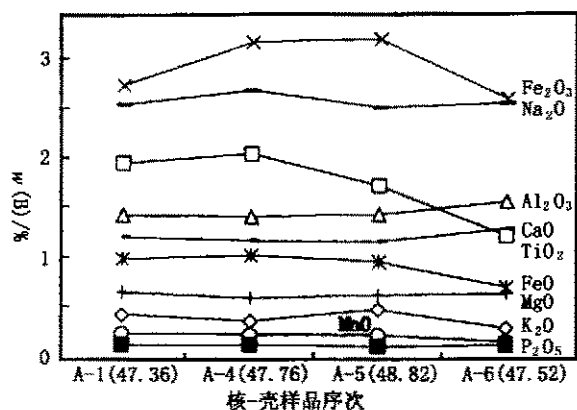


图2 榴辉岩退变质过程的主要元素变化图  
Fig. 2 major element variation during retrograde metamorphic process of the eclogite

榴辉岩、到斜长角闪岩升高,斜长角闪岩高达7倍。  
② Ba:由榴辉岩到退变榴辉岩降低、到榴辉岩升高、到斜长角闪岩降低(斜长角闪岩略低可能是测试的误差)。  
③ Sr:由榴辉岩到退变榴辉岩降低、到榴辉岩升高、到斜长角闪岩又降低,主要是Sr地球化学性质与 $\text{Ca}^{2+}$ 相似,离子半径(1.27)大于钙离子(1.06),属于LILE性质的元素,其化学性质变化不很稳定,因此这一过程表现为降低、升高、降低的变化。  
④ 过渡元素或亲铁元素:Cr, Ni, Co从榴辉岩到斜长角闪岩降低。  
⑤ 高场强元素(HFSE):Zr呈现降低的变化,Y表现为榴辉岩降低、斜长角闪岩偏高。此外,Cu呈降低,Pb呈升高的演化趋势,但斜长角闪岩的Cu, Pb明显低、仅略高于榴辉岩;Zn呈升

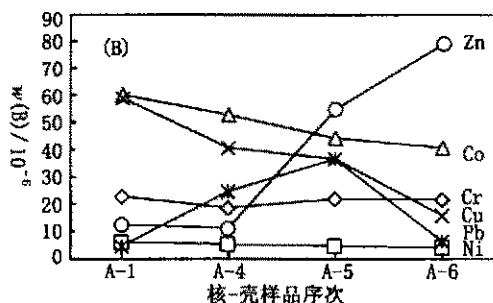
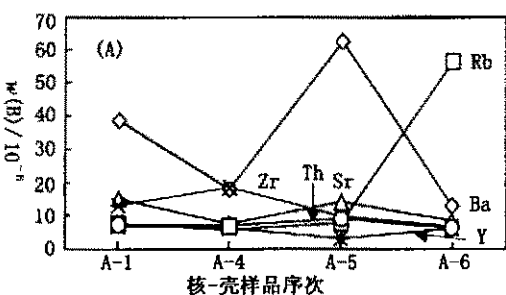


图3 榴辉岩退变质过程微量元素的变化(A,B)图解

Fig. 3 Trace element variation during retrograde metamorphic process of the eclogite

高的趋势(除退变榴辉岩低外)(图4),斜长角闪岩达榴辉岩的六倍以上。

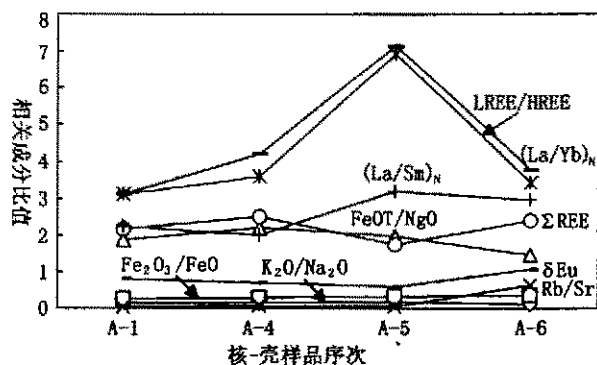


图4 榴辉岩退变质过程的相关比值及常数变化图

Fig. 4 be related ratio and constant variation during retrograde metamorphic process of the eclogite

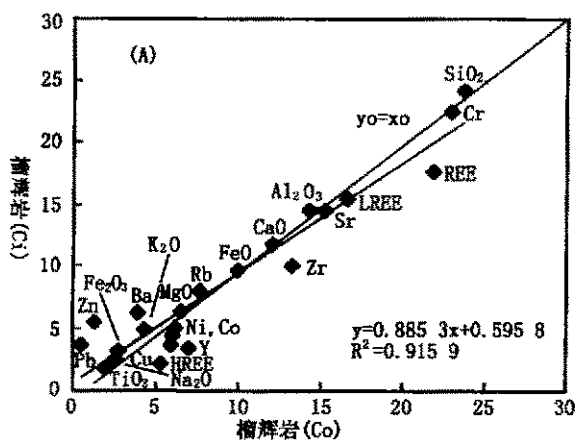
从榴辉岩到斜长角闪岩相关元素比值的变化表现: $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 相对稳定,但斜长角闪岩高达10倍; $w(\text{Rb})/w(\text{Ba})$ 呈降低的趋势、但斜长角闪岩则明显升高, $w(\text{Ba})/w(\text{La})$ (88.94, 48.95→39.18→155.97→206.4)呈现高→降低→升高→降低

变化, $w(\text{K})/w(\text{Rb})$ 呈现低→升高→略低→明显的变化(467.02, 105.66→520.34→508.89→45.44, 481.41),而 $w(\text{Ti})/w(\text{Zr})$ (88.56→66.08→103.92→106.96)的变化规律与 $w(\text{Ba})/w(\text{La})$ 基本相同,与 $w(\text{K})/w(\text{Rb})$ 相反。C组样品与A组样品的变化规律相类似,即:由榴辉岩相至低角闪岩相退变质作用过程,大离子元素(Ba, Rb等)及 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ ,  $w(\text{K})/w(\text{Rb})$ ,  $w(\text{Ti})/w(\text{Zr})$ 相对增加,成矿元素Cr, Ni, Co, Cu等元素明显降低,  $w(\text{Cr})/w(\text{Ni})$ , Pb增加、尤其Zn明显呈升高的演化趋势,这一点与氧化物中的活动组分的相对增加、惰性组分的相对降低是一致的。

### 2.3 稀土元素

从表1稀土元素测试数据的相关值分析,由榴辉岩到斜长角闪岩,稀土元素的成分变化表现:① ΣREE:退变榴辉岩升高、榴辉岩降低、斜长角闪岩升高( $21.83 \times 10^{-6}$ ,  $16.87 \times 10^{-6}$ → $25.23 \times 10^{-6}$ → $17.55 \times 10^{-6}$ → $24.05 \times 10^{-6}$ → $25.95 \times 10^{-6}$ ),整体表现升高的趋势;② LREE:由榴辉岩到斜长角闪岩升高( $16.55 \times 10^{-6}$ ,  $10.04 \times 10^{-6}$ → $19.74 \times 10^{-6}$ → $15.33 \times 10^{-6}$ → $18.62 \times 10^{-6}$ ,  $19.1 \times 10^{-6}$ );③

HREE; 退变榴辉岩和斜长角闪岩偏高、榴闪岩的HREE明显低( $5.28 \times 10^{-6}$ ,  $6.82 \times 10^{-6} \rightarrow 5.49 \times 10^{-6} \rightarrow 2.22 \times 10^{-6}$  ( $5.43 \times 10^{-6}$ ,  $6.85 \times 10^{-6}$ ); ④ 相关比值:  $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$  由榴辉岩到榴闪岩逐渐升高, 斜长角闪岩偏低(3.13, 1.47  $\rightarrow$  3.6  $\rightarrow$  6.91  $\rightarrow$  3.43, 2.79),  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  也具有类似的特点; ⑤  $\delta\text{Eu}$ ; 榴闪岩显示偏低, 斜长角闪岩为明显的高值(0.83, 1.39  $\rightarrow$  0.71  $\rightarrow$  0.6  $\rightarrow$  1.07, 1.48), 由于是变价元素( $+^2\text{Eu}$ ,  $+^3\text{Eu}$ ), 进变质进入还原环境以 $+^2\text{Eu}$ 形式赋存在矿物晶体内部, 氧化环境以 $+^3\text{Eu}$ 的形式进入斜长石晶格中, 因此斜长石的增加必然导致铕的正异常,  $+^2\text{Eu}$ 被氧化的同时, 有壳源铕的加入。因此, 退变质过程稀土元素的地球化学变化规律表现为: 由榴辉岩到斜长角闪岩轻稀土逐渐增加, 重稀土略降低,  $(\text{La}/\text{Sm})_N$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ ,  $\delta\text{Eu}$  逐渐升高, 配分曲线型式由亏损型变为富集型, 体现分馏程度增强, 由弱的负异常变为明显的正异常。



上述变化特征与矿物相、主要元素、微量元素的变化基本一致, 角闪石、斜长石相对于石榴石、绿辉石的稀土配分系数高、尤其是轻稀土配分系数较高, 由于斜长石、角闪石等矿物的不断增加、大离子亲石元素和挥发组分亦逐渐增加, 特别是挥发组分对离子半径相对小的元素具较大转移能力, 从而导致稀土元素发生分馏、转移。

以上论述基本上明确了元素在退变质过程的演化规律。为了更清晰体现它们的变化规律, 进行线性分析。以榴辉岩作为退变质的初始状态(Co), 榴闪岩、斜长角闪岩作为变化状态(Ci), 做榴辉岩-榴闪岩(A)和榴辉岩-斜长角闪岩(B)成分线性关系图(图5), 拟合线性曲线方程分别为:  $y = 0.885 3x + 0.595 8$ ,  $R^2 = 0.915 9$  (图5A),  $y = 1.004x + 2.121 5$ ,  $R^2 = 0.742 8$  (图5B)。拟合曲线与原始曲线(榴辉岩-榴辉岩) $y_o = x_o$ 相比, 由榴辉岩到榴闪岩随曲线斜率降低、则截距升高, 并清晰表现出退变质过程氧

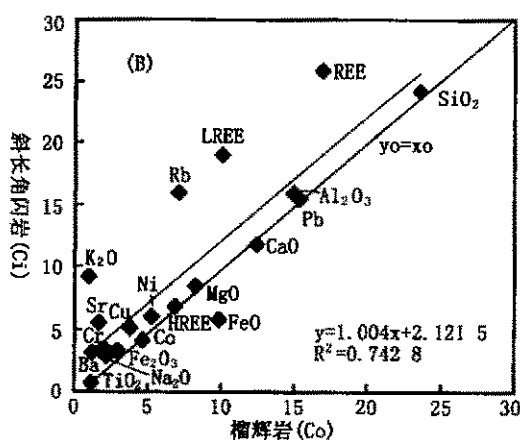


图5 榴辉岩退变质过程元素-元素和氧化物-氧化物的线性方程对比图

(A). A-1, A-5 组样品; (B). C-1, C-2 组样品。其中: 图(A):  $(\text{SiO}_2 - \text{SiO}_2)/2$ ;  $(\text{K}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}) \times 10$ ;  $(\text{Ba} - \text{Ba})/100$ ;  $(\text{Zn} - \text{Zn})/100$ ; (B) 图除  $(\text{Cr} - \text{Cr})/100$  外, 其余同(A); REE 代表稀土总量

Fig. 5 Correlation of the linear equation of element-element and oxide-oxide during retrograde metamorphic process of the eclogite

(A). from sample A-1, A-5; (B). from samples C-1, C-2

化物、元素降低或升高的程度, 即: Pb, Zn, Ba 等升高程度大, 其次是  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Rb 等; 而 HREE, Y, REE 降低幅度大,  $\text{TiO}_2$ , FeO, REE, Ni, Cr, Sr, Cu 次之。榴辉岩退变质最终形成斜长角闪岩, 曲线的截距明显增大, 主要氧化物和元素  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Ni, Cr, Sr, Cu, Zn,  $\text{K}_2\text{O}$ , Rb, LREE, REE 均表现升高, 特别是  $\text{K}_2\text{O}$ , Rb, LREE, REE 增加幅度大; 相反  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ , HREE, Co 降低, FeO 降低尤为明显, 这充分揭示了退变质过程壳源大离子元素明显增加、高场强元素相对降

低, 而斜长角闪岩具明显富集过渡成矿元素的规律; 同时退变榴辉岩、榴闪岩其相关斜率不等于或接近 1, 证明两者为元素的亚稳态岩石, 这一点与岩相中存在不平衡矿物相的特征相一致。

### 3 讨论与结论

岩石成分变化受岩石起源、演化和形成环境控制, 岩石发生变质作用形成各种类型的变质岩, 岩石成分发生规律性变化, 不仅受原岩性质(相当于基性

岩)制约,而且受变质作用过程的温、压条件和形成的矿物相影响。该区榴辉岩体从核部榴辉岩、退变榴辉岩→榴闪岩(内壳)→斜长角闪岩(外壳)矿物组合反映降压、降温退变质作用过程,绿辉石(单斜辉石)、石榴石、金红石等矿物相逐渐消失,斜长石、含水矿物(多硅白云母+黑云母→黑云母+角闪石)等矿物相逐渐增加,体现由岛状结构硅酸盐向层状结构硅酸盐、最终向链状、架状结构硅酸盐变化发展;初期退变质形成多硅白云母可能反映回返初期较强的剪切应力作用,晚期以角闪石、斜长石为主的矿物相体现应力作用不明显的减压过程。其退变过程的地球化学变化主要体现:大离子元素(K, Ba, Rb等元素、亲铜元素Zn等及LREE等)及流体相逐渐介入榴辉岩体系,使榴辉岩相的矿物组合逐渐被交代形成低角闪岩相的矿物组合(角闪石、斜长石、少量绿帘石、黑云母等);过渡元素(Ni, Co, Cr等)、高场强元素(Zr等)和HREE等离子半径小的降低,而进入围岩体系。这种规律一方面说明榴辉岩矿物相富含成矿元素和离子半径小的惰性元素,回返过程使它们活化、转移,进入围岩体系或岩浆体中,另一方面与围岩(下地壳、富集地幔)发生交代,吸收大离子元素、壳源流体组分及部分成矿元素,体系逐渐向氧化环境发展。此外,矿物相发生明显转变,氧化物或元素演化存在不连续的变化特点,如:  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 等和痕量元素Cr, Ni, Co, Sr, Rb/Ba, Ba/La等),其原因可能与回返过程物理化学条件、矿物相的转变有关,即与回返过程的速率有密切的关系。Holness(1989)<sup>[16]</sup>研究太平洋中脊玄武岩的(La/Sm)<sub>N</sub>比值与扩张速度关系后指出:(La/Sm)<sub>N</sub>减少、扩张速率增大。该区榴辉岩退变质过程的 $\Delta(\text{La/Sm})_N$ 分别为:0.25, 1.1, 0.23,可能说明折返过程初期和晚期速率相对小、在岩石圈深部

乃至上地幔停留的时间较长,而后速率大,晚期又减慢、并进入地壳浅部。

通过榴辉岩从地幔回返至地壳浅部这一退变质过程的元素地球化学变化规律的研究,进一步揭示了深部地幔物质向地壳运移过程与壳源成分发生强烈交换的重要地质信息。简单归纳如下:

(1)大离子亲石元素(如:K, Ba, Rb等)和相关的比值( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ , LREE/HREE等)增加,  $\text{H}_2\text{O}^+$ 增加或含水矿物的含量增加,反映地壳物质及流体成分的显著加入。

(2)成矿元素伴随主要元素的变化,由核部向外壳Ni, Co, Cr, Cu降低,表明退变质过程发生明显的迁移,而外壳的斜长角闪岩具明显富集Ni, Co, Cr, Cu, Zn等元素的特征,这不仅反映了这一过程的物质交换成矿迹象,而且进一步揭示幔-壳物质交换成矿规律。

(3)矿物相发生明显转变,氧化物或元素演化以渐变连续为主,并存在不连续的降低、升高或升高、降低变化,(如:  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 等和痕量元素Cr, Ni, Co, Sr, Rb/Ba, Ba/La,等),其原因主要取决于物理化学条件,可能代表回返的地球动力学过程的周期性变动抬升过程。

(4)由核部到外壳退变质过程氧化物、微量元素均发生的变化,显示退变质过程为相对开放体系,且 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比值明显增高,体现从相对还原环境向相对氧化环境变化趋势,也反映了幔-壳演化的总体环境变化规律。

由此可见,荣成-威海岩段的榴辉岩“核壳”结构记录了高压-超高压榴辉岩回返的岩石学、矿物学和地球化学的变化规律,这一过程发生流体和地壳物质的广泛加入,成矿元素有散有聚,这对于深入研究壳-幔成矿作用及其演化具有重要的理论意义。

## 参考文献

- 1 Nelson Eby G. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20: 641~644.
- 2 Ames L, Zhou G Z, Xing B C. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, Central China [J]. *Tectonics*, 1996, 15(2): 472~489.
- 3 胡受奚、赵懿英、徐兵等. 苏鲁超高压变质岩带从上地幔返回地表的证据[J]. *地质学报*, 1998, 71(3): 245~253.
- 4 White W M. Surviving Subduction [J]. *Nature*, 1992, 358: 714~715.
- 5 Menzies Martin, Rama Murthy V. Enriched mantle: Nd and Sr isotopes in diopsides from kimberlite nodules [J]. *Nature*, 1980, 283(14): 634~636.
- 6 Hawkesworth C J, Vollmer R. Crustal contamination versus enriched mantle:  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  evidence from the Italian volcanics [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1997, 69: 151~165.
- 7 McKenzie D, O'Nions R K. Mantle reservoirs and ocean island basalts [J]. *Nature*, 1983, 285: 229~231.
- 8 张理刚. 苏鲁超高压变质岩带地幔-地壳-基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.

- 9 Goldschmidt V M. *Geochemistry*[M]. Oxford:Clarendon Press, 1954. 730.
- 10 Keays R R. Archean gold deposits and their source rocks: the upper connection [C]. The geology, geochemistry and genesis of gold deposits. Proceedings of symposium "gold", 1992.
- 11 周汉文,李献华,刘颖. 南大别花凉亭冷榴辉岩退变质作用过程的元素地球化学变异[J]. *地球化学*, 1997, 26(5): 25~33.
- 12 李曙光,刘德良,葛宁浩等. 青岛榴辉岩相蛇绿混杂岩—俯冲“洋壳”推覆体的发现及其意义[J]. *科学通报*, 1991, 15: 1 161~1 164.
- 13 贺同兴,卢良兆,李树勋等. *变质岩岩石学*[M]. 北京:地质出版社, 1988.
- 14 李昌年. *火成岩微量元素岩石学*[M]. 北京:中国地质大学出版社, 1992.
- 15 Holness M B, Richter F M. Possible effects of spreading rate on MORB isotopic and rare earth composition arising from melting of a heterogeneous source[J]. *J Geology*, 1989, 97: 261~280.

## RESEARCH ON GEOCHEMICAL VARIATION DURING THE RETROGRADE METAMORPHIC PROCESSES OF ECLOGITE

——From the eclogite bodies in the Rongcheng-Weihai rock belt of SU-LU (Jiangsu-Shandong) UHMB

SUN Jing-gui HU Shou-xi

(State Key Laboratory for Research of Mineral Deposits, Nanjing 210093)

**Abstract** Ultra-high-pressure metamorphic belt (UHMB) in east Shandong province is the product of A-type subduction. Many eclogite bodies in the belt experienced retrograde metamorphism stage and recorded important information that reflects the change from the ultra-high-pressure advance metamorphism peak-phase to retrogressive metamorphism evidenced by variation of eclogite to retrograde eclogite, amphibolite eclogite and amphibolite successively. The study of the geochemical variations of “core-shell” structure in eclogite bodies in Rongcheng-Weihai rock belt shows that major and trace elements of from eclogite, retrograde eclogite, amphibolite eclogite and amphibolite change with regularity. LILE such as K, Ba, Rb, and  $K_2O/Na_2O$ ,  $Fe_2O_3/FeO$ , LREE/HREE increase gradually, which reflects the introduction of crustal materials. The increased metallogenic element such as Zn and the decreased, Ni, Co, Cr, Cu entered adjacent rock or agglomerate in shell-amphibolite. The regularity reveals the diagenetic and mineralizing processes under the condition of exchange of mantle and crust materials.

**Key words** eclogite; retrograde metamorphism; element geochemistry; Rongcheng-Weihai