

# 山东荣成高钙石榴辉石岩的地球化学特征及其成因

曾令森, 杨天南

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

**摘要:** 在苏鲁超高压变质带荣成蓝晶石榴辉岩中, 发现一具有特殊结构和地球化学特征的石榴辉石岩. 该石榴辉石岩以包裹体的形式赋存于强烈退变的蓝晶石榴辉岩中. 岩相学观测表明该岩石的主要结构为石榴石呈薄带、项链状相互连接的网状结构, 分割由辉石和石榴石、钛铁氧化物等出溶片晶组成的区域. 全岩地球化学分析表明, 和邻近的蓝晶石榴辉岩相比, 该岩石具有: (1) 相对低的  $\text{SiO}_2$  (42.5% ~ 43.1%), 异常高的  $\text{CaO}$  (21.4% ~ 21.9%) 和  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值 (1.46 ~ 1.64); (2) 较高的  $\text{TiO}_2$  (1.77% ~ 1.89%),  $\text{V}$  (359 ~ 419  $\mu\text{g/g}$ ),  $\text{Nb}$  (~ 8  $\mu\text{g/g}$ ),  $\text{Y}$  (17.7 ~ 23.1  $\mu\text{g/g}$ ) 和  $\text{Zr}$  (~ 150  $\mu\text{g/g}$ ); (3) LREE 富集和微弱的 Eu 负异常; (4) 较低的 Cr, Ni 和 Co. 上述地球化学特征表明荣成辉石岩的原岩形成于经过橄榄石分离结晶作用的超基性岩浆或经历了 Na 和 K 亏损过程的高钙基性岩浆. 这 2 种过程都要求较高的温压条件, 压力  $> 15 \times 10^5$  kPa, 温度  $> 1300$  °C, 这和荣成辉石岩的原岩的初始稳定条件的温压估算相一致. 该研究结果表明在苏鲁超高压变质带中, 一些超高压变质岩的母岩形成于高温部分熔融或岩浆演化作用, 明显不同于大多数榴辉岩或片麻岩的原岩形成环境.

**关键词:** 石榴辉石岩; 蓝晶石榴辉岩; 稀土元素; 苏鲁超高压变质带.

中图分类号: P578.4

文章编号: 1000-2383(2006)04-0488-09

收稿日期: 2006-04-26

## Rongcheng Ultra Calcic Garnet Pyroxenite: Its Geochemistry, Origin and Implications for Pre UHP Tectonics in the Sulu UHP Metamorphic Belt

ZENG Ling sen, YANG Tian nan

Key Laboratory for Continental Dynamics of MLR, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**Abstract:** We report an unusual garnet pyroxenite, as a nodule enclosed within kyanite eclogites from Rongcheng, northeastern Sulu UHP metamorphic belt. Apart from its unusual texture, high degrees of various minerals (garnet, titanite, and Fe-Ti oxides) and solid exsolution within garnet or clinopyroxene, this nodule has unusual major and trace element geochemistry as shown by (1) low  $\text{SiO}_2$  (42.5% - 43.1%), extremely high  $\text{CaO}$  (21.4% - 21.9%), and high  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  ratio (1.46 - 1.64); (2) high  $\text{TiO}_2$  (1.77% - 1.89%),  $\text{Zr}$  (to 150  $\mu\text{g/g}$ ),  $\text{V}$  (359 - 419  $\mu\text{g/g}$ ),  $\text{Nb}$  (to 8  $\mu\text{g/g}$ ), and  $\text{Y}$  (17.7 - 23.1  $\mu\text{g/g}$ ) contents; (3) LREE enriched, and nepheline normative; and (4) low Cr, Ni, and Co. Previous study on the mineral chemistry and texture relationships between different generations of minerals has suggested that it was formed as a cumulative clinopyroxene magacryst with high Ca tschermakite component (31% - 34%) from a gabbroic magma at  $p = (15 - 22) \times 10^5$  kPa, and  $T > 1100$  °C. Major and trace element geochemistry on this nodule and its host kyanite eclogite suggest that the precursor of the Rongcheng pyroxenite was derived either from an ultramafic magma highly fractionated by accumulation of olivines or from an ultra calcic basic magma that had lost some  $\text{K}_2\text{O}$  and  $\text{Na}_2\text{O}$ . No matter which was responsible for the formation of its precursor, both require a melting event and magma differentiation to occur at a pressure and temperature greater than  $15 \times 10^5$  kPa and 1300 °C, respectively. This contribution suggests that protoliths for some of the eclogites within the Sulu UHP metamorphic belt formed in a tectonic environment distinct from those of Neoproterozoic age.

**Key words:** garnet pyroxenite; kyanite eclogite; REE; Sulu UHP metamorphic belt.

基金项目: 科技部“973”基础研究项目 (No. 2003CB716504); 国土资源部百人计划项目 (A2503).

作者简介: 曾令森 (1970-), 留美博士, 从事大地构造、构造地质和地球化学研究. E-mail: lzeng@ccsdl.org.cn

## 0 引言

在钙碱性玄武岩所携带的幔源包体和高压/超高压变质地体中,石榴辉石岩是常见的而且是重要的组成部分. 它的成因多样,可能是基性下地壳部分熔融的残留体(Ducea and Saleeby, 1996)、辉长岩岩浆堆晶作用的产物(Jahn *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003; Yang, 2006),也可能为地幔深部高硅石榴石岩(majoritic garnetite)(Massonne and Bartsch, 2002). 大小不一的超基性岩体在大别-苏鲁高压-超高压变质带内很常见(杨建军, 1991; Jahn *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2005; Yang, 2006). 详细的岩石学和地球化学研究已部分揭示了它们所含的大地构造意义,如Zhang *et al.* (2000)认为山东日照和江苏东海的超基性岩代表俯冲带上盘地幔楔物质;另一些学者则认为它们代表辉长岩岩浆的堆晶(Jahn *et al.*, 2003; Zhang and Liou, 2003; Yang *et al.*, 2005; Yang, 2006). 在这些超基性岩中,2处发现了高钙石榴辉石岩( $\text{CaO} > 15\%$ ,  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1.0$ ),分别是山东荣成河西(Yang *et al.*, 2005)及山东日照胡家岭(杨建军, 1991; Zhang and Liou, 2003; Yang, 2006). 它们在矿物组成、出溶结构上存在一定的相似性,如辉石中出溶石榴石、钛铁矿(或金红石)等,和石榴石中出溶钛铁矿、金红石等. 但两者的产状不同,日照胡家岭高钙石榴辉石岩产于超基性岩体中,而荣成石榴辉石岩孤立地包裹在蓝晶石榴辉岩中. 下面展示的地球化学数据将表明荣成石榴辉石岩具有和大别-苏鲁所发现的大部分经历了超高压变质作用的超基性岩都不一样的微量元素地球化学特征,如含较高的Zr( $\sim 150 \mu\text{g}/\text{g}$ )、LREE相对于HREE强烈富集等. 最近在荣成地区的地质年代学研究发现荣成榴辉岩的原岩具有2组年龄,分别为800~700 Ma和 $> 1800$  Ma(杨经绥等, 2002; 唐俊等, 2004);在蓝晶石榴辉岩中发现含大量FeS和CuS出溶条带的磷灰石(梁凤华等, 2006);不同的榴辉岩退变质历史(Wang *et al.*, 1994; Nakamura and Hirajima, 2000; Yang *et al.*, 2004)以及异常高的正 $\epsilon_{\text{Nd}}$ ( $> +140$ )的榴辉岩(Jahn *et al.*, 1996)都预示着苏鲁高压-超高压变质带的最东端的榴辉岩及其他超高压岩石的原岩的成因及印支期陆陆碰撞前所经历的地质演化历史的特殊性. 本研究的目的在于:(1)确定石榴辉石岩和相关蓝晶石榴辉岩的

元素地球化学特征;(2)它们之间可能的关系;(3)限定石榴辉石岩的成因;(4)最后探讨在认识苏鲁高压/超高压榴辉岩印支期陆陆碰撞前的地质历史的意义.

## 1 区域地质概况

荣成位于苏鲁超高压变质带的最东端,主要出露片麻岩,片麻岩中包含大小不一的榴辉岩、大理岩和超基性岩块体(Wallis *et al.*, 1997; Yang *et al.*, 2005). 除榴辉岩外,花岗质片麻岩和副片麻岩、石英岩和大理岩经历过超高压变质作用(Kato *et al.*, 1997; Ye *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2001),其中部分榴辉岩记录了麻粒岩相的退变作用(Wang *et al.*, 1993; Nakamura and Hirajima, 2000; Yang *et al.*, 2004). 该地区柯石英榴辉岩的主要矿物组合为富钙石榴石+绿辉石+蓝晶石+柯石英+金红石,并且,在后榴辉岩相的麻粒岩中仍然有残留的柯石英(Wang *et al.*, 1994). Zhang *et al.* (1995)报道威海地区的榴辉岩形成压力高达3.0~3.5 GPa;对荣成超高压大理岩和其中的榴辉岩研究也表明该地区的超高压变质岩形成压力达2.5~3.5 GPa(Kato *et al.*, 1997). 唐俊等(2004)对胶东地块东部变质岩石的锆石U-Pb定年研究发现荣成榴辉岩的原岩年龄为( $1838 \pm 41$ ) Ma,和海阳所的斜长角闪岩的原岩年龄相似. 该结果与杨经绥等(2002)在荣成大屯榴辉岩中所得的结果相似. 到目前为止,SHRIMP锆石U-Pb年代学研究揭示了胶东榴辉岩的原岩有2组:800~700 Ma和 $> 1800$  Ma(杨经绥等, 2002; 唐俊等, 2004). 其中所报道的原岩年龄 $> 1800$  Ma的榴辉岩都来自于荣成,预示着该地区榴辉岩原岩在形成的构造环境上与原岩为新元古代的榴辉岩不一样.

本研究的石榴辉石岩样品,大小为0.4 m $\times$ 0.7 m,采自于荣成-乳山公路的南边的一个采石场中(图1a),位于荣成的杨官屯-河西地区. 该样品被包裹在退变的蓝晶石榴辉岩中,长轴方向平行于区域面理方向,接触带局部见长英质伟晶脉. 笔者先后取了7个样品,LR1+4、LR1+7、RM2+1、RM2+2、RM2+3、RM2+4和RM2+5,其中RM2+1到5为连续取样. 根据野外观测,LR1+7和LR4分别位于该榴辉石岩的幔部和边部,它们和RM2+1到5的关系示意性的展示在图1b中. 其中LR1+4含尖晶石,后成合晶中单斜辉石部分被后期的角闪



图 1 荣成石榴辉石的采样点附近的地质简图 (a) 和分析样品的位置关系图 (b)

Fig. 1 Geological map showing the location of Rongcheng garnet pyroxenite (a) and the sample locations within the pyroxenite (b) (LR11-4, LR11-7, and RM21-1 to 5)

石取代, 离伟晶岩脉最近. 为限定和便于讨论荣成石榴辉石岩的地球化学特征, 笔者同时采集了附近的蓝晶石石榴辉岩样品 R1、R2、R4 和 R5, 其中 R5 和后期的长英质脉接触. 石榴辉石岩主要由单斜辉石、石榴石、钛铁矿及后期退变的角闪石组成. 蓝晶石石榴辉岩由绿辉石、石榴石、蓝晶石及退变的单斜辉石和斜长石组成的后成合晶组成.

## 2 分析方法及结果

为确定该石榴辉石岩的地球化学特征, 笔者对该岩石及其附近的蓝晶石石榴辉岩进行了全岩主量和微量元素成分分析. 主量及微量元素的测试在国土资源部国家地质实验测试中心进行. 主量元素通过 XRF (X 荧光光谱仪 3080E) 方法测试, 分析精度为 5%. 微量元素和稀土元素 (REE) 通过等离子质谱仪 (ICP-MS Ex.cel) 分析, 含量大于  $10 \times 10^{-6}$  的元素

的测试精度为 5%, 而小于  $10 \times 10^{-6}$  的元素精度为 10%. 个别在样品中含量低的元素, 测试误差大于 10%. 分析结果见表 1.

和石榴辉石岩 (下面统称荣成辉石岩) 相比, 蓝晶石石榴辉岩具有较高的  $\text{SiO}_2$  (48.85% ~ 49.52%)、 $\text{MgO}$  (9.0% ~ 11.12%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14.87% ~ 16.64%)、 $\text{Na}_2\text{O}$  (1.67% ~ 1.93%)、 $\text{K}_2\text{O}$  (0.23% ~ 0.37%), 较低的  $\text{TiO}_2$  (0.24% ~ 0.91%) 和  $\text{CaO}$  (11.25% ~ 12.67%) (表 1). 荣成辉石岩具有较低但较均一的  $\text{SiO}_2$  (42.54% ~ 43.12%)、 $\text{MgO}$  (8.13% ~ 8.54%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13.29% ~ 14.83%)、 $\text{Na}_2\text{O}$  (0.52% ~ 0.63%)、 $\text{K}_2\text{O}$  (0.01% ~ 0.05%), 较高的  $\text{TiO}_2$  (1.77% ~ 1.89%)、 $\text{CaO}$  (21.46% ~ 21.90%) 和较高的  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值 (1.46 ~ 1.64). 从核部到边部, 辉石岩的成分没有明显的变化 (图 2). 该辉石岩与周围的岩体之间, 在主量元素上没有明显的化学交换. 因此可以依据主量元素与微量元素之间的关系来限定其超高压变质作用前的微

表 1 山东荣成石榴辉石岩及附近蓝晶石榴辉岩的主要元素(%) 和微量元素( $\mu\text{g/g}$ )地球化学成分

Table 1 Major (%) and trace element ( $\mu\text{g/g}$ ) compositions for the Rongcheng garnet pyroxenites and kyanite eclogites

样品	R 1	R 2	R 4	R 5	LR1F 4	LR1F 7	RM2F 1	RM2I 2	RM 2I 3	RM 2I 4	RM 2I 5
	蓝晶石榴辉岩				过渡石榴辉石岩			石榴辉石岩			
SiO <sub>2</sub>	48.98	49.00	48.85	49.52	46.65	43.58	42.91	42.54	42.95	43.12	42.81
TiO <sub>2</sub>	0.25	0.24	0.91	0.37	1.54	1.78	1.81	1.77	1.89	1.79	1.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.1	14.87	16.64	15.01	16.12	13.13	14.11	14.33	13.9	14.83	13.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.98	1.58	1.77	1.53	2.96	2.44	2.36	2.62	2.23	2.82	2.36
FeO	7.33	7.25	6.47	6.95	6.07	6.90	7.02	6.58	7.11	6.38	7.11
MnO	0.21	0.19	0.18	0.17	0.14	0.14	0.15	0.13	0.14	0.13	0.15
MgO	11.05	11.12	9.07	10.84	6.51	8.29	8.36	8.27	8.42	8.13	8.54
CaO	11.25	11.48	12.05	12.67	15.15	21.48	21.85	21.9	21.78	21.63	21.46
Na <sub>2</sub> O	1.67	1.69	1.91	1.93	1.20	0.54	0.56	0.63	0.62	0.56	0.52
K <sub>2</sub> O	0.37	0.23	0.28	0.34	1.10	0.03	0.02	0.01	0.03	0.05	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.01	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
LOI	1.46	1.63	0.98	1.16	2.34	1.28	0.26	0.56	0.26	0.34	0.98
Total	99.84	99.5	99.44	100.75	99.80	99.60	99.82	99.73	99.73	100.24	99.58
Sc	33.77	29.35	30.25	27.67	28.5	24.3	10.29	14.72	15.18	15.81	10.36
V	185.1	175.5	177.3	187.7	241	339	394.5	379.4	383.6	358.6	419.2
Cr	449.6	462.4	286.8	510.3	111	168	207.8	195.4	174.6	196.7	168.5
Ni	119.9	104.1	82.46	109.3	54.6	76.8	52.48	52.7	51.27	50.26	57.94
Co	71.09	43.9	110.1	69.48	31.4	36.7	24.13	23.18	22.37	38.45	49
Cu	14.4	22.29	65.92	41.61	29.1	10.2	24.21	17.61	20.02	19.61	22.08
Zn	103.4	93.83	63.56	65.36	160	114	100.2	96.27	93.38	86.28	104.6
Ga	10	10	15	12	22.8	23.3	22	23	21	22	21
Rb	2	11	15	109	47.2	1.75	7	8	8	11	8
Sr	203.4	135.7	255.4	96.12	773	117	106.5	100.4	99.11	83.61	106.9
Y	8.33	7.3	8.84	7.62	17.7	21.0	17.74	21.18	22.35	23.12	18.02
Zr	-	-	-	-	135	150	156	154	157	152	150
Nb	-	2	4	-	6.25	4.96	8	7	9	8	8
Ba	80.55	58.55	75.85	37.72	204	18.5	14.37	14.61	14.42	24.04	14
La	0.44	0.66	1.08	0.77	15.4	17.2	19.41	20.35	20.44	21.3	18.65
Ce	1.08	1.4	3.4	2.11	39.3	43.1	43.14	45.21	45.06	49.65	39.48
Pr	0.18	0.26	0.62	0.38	4.76	5.20	5.16	5.51	5.15	5.69	4.77
Nd	0.97	1.29	3.17	2.26	18.9	21.6	21.52	22.75	18.83	21.86	20.7
Sm	0.45	0.62	1.15	0.92	3.75	4.40	4.82	5.24	5.75	5.39	4.66
Eu	0.34	0.35	0.65	0.54	0.93	0.96	1.16	1.28	1.19	1.25	1.1
Gd	0.65	0.91	1.21	1.31	3.16	3.99	4.68	5.57	3.64	6.08	3.45
Tb	0.13	0.18	0.2	0.26	0.49	0.60	0.58	0.76	0.64	0.75	0.6
Dy	0.85	0.96	1.1	1.23	2.93	3.65	3.26	3.75	4.34	4.43	3.27
Ho	0.17	0.21	0.22	0.28	0.62	0.73	0.65	0.8	0.84	0.84	0.68
Er	0.45	0.6	0.47	0.78	1.96	2.27	1.69	2.18	2.35	2.37	1.82
Tm	0.07	0.1	0.07	0.12	0.28	0.31	0.25	0.3	0.35	0.34	0.26
Yb	0.58	0.69	0.5	0.82	1.90	1.96	1.68	2	2.23	2.21	1.7
Lu	0.08	0.12	0.08	0.14	0.28	0.31	0.28	0.34	0.32	0.36	0.28
Mg #	72.9	73.2	71.4	73.5	65.6	68.1	68.0	69.1	67.9	69.4	68.2
LREE	4.11	5.49	11.28	8.29	86.2	96.45	99.89	105.91	100.06	111.22	92.81
CaO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.745	0.772	0.724	0.844	0.940	1.636	1.549	1.528	1.567	1.459	1.615
Sm/Nd	0.464	0.481	0.363	0.407	0.198	0.204	0.224	0.230	0.305	0.247	0.225
Rb/Sr	0.010	0.081	0.059	1.134	0.061	0.015	0.066	0.080	0.081	0.132	0.075
V/Sc	5.481	5.980	5.861	6.784	8.456	13.951	38.338	25.774	25.270	22.682	40.463
Eu/Eu *	1.909	1.415	1.673	1.494	0.820	0.696	0.742	0.719	0.790	0.663	0.833
(La/Gd) <sub>N</sub>	0.567	0.608	0.748	0.492	4.082	3.611	3.474	3.060	4.704	2.935	4.528
(La/Yb) <sub>N</sub>	0.525	0.662	1.496	0.650	5.612	6.076	7.999	7.045	6.346	6.673	7.596

注: 其中 N 为球粒陨石标准化, 标准化值采用 Sun and McDonough(1989).

量元素地球化学特征. 在主量元素成分上, 它与产自 Gurney, 1975), 也和山东日照胡家岭的石榴辉石岩南非金伯利岩中的榴辉岩块相似 (Harte and 相似(Zhang *et al.*, 2003; Yang, 2006). 和南非的

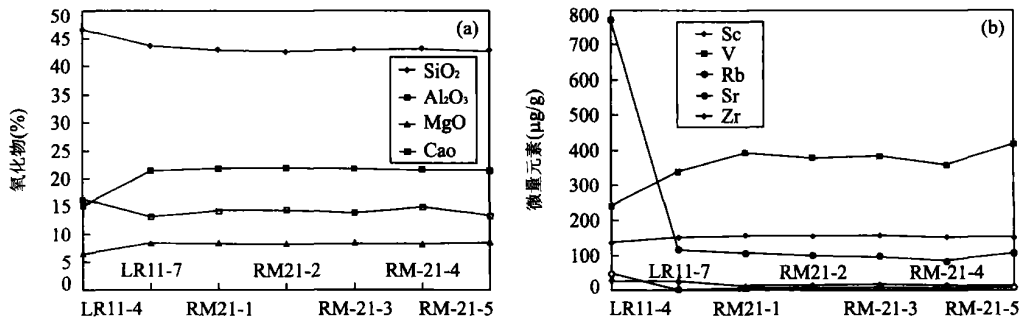


图 2 荣成石榴辉石岩的主要元素(a)和微量元素(b)随位置的变化关系

Fig. 2 Diagrams showing selected major (a) and trace element (b) compositions as a function of location within the Rongcheng garnet pyroxenite

榴辉岩包体相比, 荣成辉石岩的  $\text{CaO}$  和  $\text{TiO}_2$  ( $\sim 1.8\%$ ) 相对高, 但  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值较低. 高  $\text{CaO}/(\text{MgO} + \text{FeO})$  比值和该包体不见斜方辉石出溶相一致. 荣成辉石岩的主要成分可以非常完美地重投到具有高达  $23\text{mol}\%$  Tschermak 含量的单斜辉石的分子式中 (Yang *et al.*, 2005). 在这一点上, 和 Zhang and Liou (2003) 在山东日照发现的石榴辉石岩相似. 这两项独立完成的研究结果都表明这种特殊的石榴辉石岩的原岩可能纯粹是由单斜辉石组成的辉石岩.

和蓝晶石榴辉岩相比, 荣成辉石岩具有明显较低的 Sc ( $10.3 \sim 15.8 \mu\text{g/g}$ )、Cr ( $168.5 \sim 207.8 \mu\text{g/g}$ )、Ni ( $50.3 \sim 57.9 \mu\text{g/g}$ )、Co ( $23.2 \sim 49.0 \mu\text{g/g}$ )、Ba ( $14.0 \sim 24.0 \mu\text{g/g}$ ) 但较高的 V ( $358.6 \sim 419.2 \mu\text{g/g}$ )、Y ( $17.7 \sim 23.1 \mu\text{g/g}$ )、Zr ( $150 \sim 157 \mu\text{g/g}$ )、Nb ( $7 \sim 9 \mu\text{g/g}$ ) (表 1). Cr、Ni 和 Co 的含量远远低于典型的基性和超基性岩浆. LREE 含量为  $92.8 \sim 111.2 \mu\text{g/g}$ , 在球粒陨石标准化稀土元素分布模式图上 (图 3), 表现为 LREE 富集 ( $(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.076 \sim 7.999$ )、HREE 相对平直、显著的负 Eu 异常 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.66 \sim 0.83$ ). 这种稀土分布模式强烈表明该辉石岩的原岩不可能富含石榴石. 相对于蓝晶石榴辉岩, Sc 的相对亏损及异常高的 V/Sc 比值 ( $> 22.7$ ), 榴辉岩或石榴辉石岩中的石榴石的 V/Sc 比值一般小于 5.0 (Barth *et al.*, 2001, 2002; 曾令森等, 2006), 这也证明原岩中石榴石不可能是主要矿物相, 荣成辉石岩中的石榴石是原岩形成后后期变质反应的产物.

样品 LR11-4 含薄层尖晶石, 和后期伟晶岩距离最近. 受伟晶岩脉的影响,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  升高, 但  $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$  和  $\text{MgO}$  降低, 同时也反映在 Rb 和 Sr 含

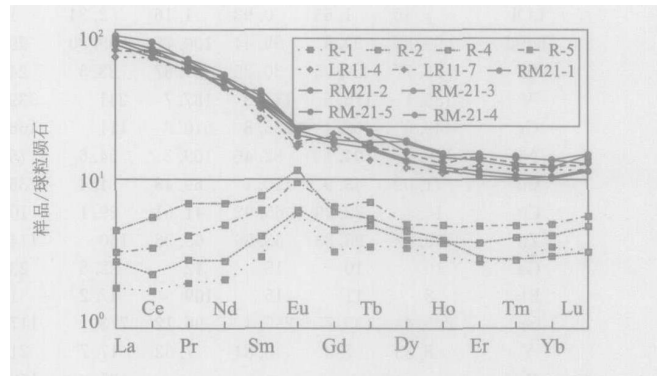


图 3 山东荣成蓝晶石榴辉岩和石榴辉石岩的稀土分布模式

Fig. 3 Chondrite normalized REE distribution pattern for the Rongcheng garnet pyroxenite and kyanite eclogites

量的升高上. 而 R5 是和后期长英质脉接触的蓝晶石榴辉岩, 和其他所分析的榴辉岩相比, 该榴辉岩最显著的变化是伴随  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  的轻微增高, Rb 含量增高将近 10 倍, 但 Sr 和 Ba 的含量降低  $1.5 \sim 2.0$  倍, 在其他微量元素 (包括 LREE) 上, 基本上没有变化 (表 1). 这些观测结果表明超高压变质作用后的流体作用对榴辉岩或辉石岩的稀土元素和高场强元素 (Zr、Hf、Nb、Ta、Ti 等) 基本上没有影响.

### 3 成因讨论

从主要元素的组成来看, 荣成石榴辉石岩的最显著的特征是: (1) 低  $\text{SiO}_2$ , 异常高  $\text{CaO}$  和  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值; (2) LREE 富集、异常高且变化较大的 V/Sc 比值; (3) 较高的  $\text{TiO}_2$ 、Zr 含量; (4) 较低的 Cr、Ni 和 Co. 其原岩的成因有可能①榴辉岩的碳酸盐化; ②来自深部的高硅石榴石岩; ③高钙低硅的基性岩浆或④高钙辉长岩的堆晶.

样品 R5 和 LR1+4 在不同程度上受来自于后期长英质脉流体的影响, 反映在 Rb 和 Sr 含量的变化上, 但它们的 LREE 含量并没有显示出相应的变化. 这些观测结果表明超高压变质后的流体作用对所分析的石榴辉石岩的稀土地球化学特征影响极小, 可以利用荣成辉石岩和蓝晶石榴辉岩的稀土元素地球化学特征来限定它们可能的成因.

REE 在富 CO<sub>2</sub> 的流体中的溶解度非常低 (Meen *et al.*, 1989), 碳酸盐化不太可能导致荣成辉石岩富集 LREE 的特征, 所以碳酸盐化不太可能是其成因之一. 由于钙和钛在石榴石中溶解度随压力的升高而升高 (Zhang *et al.*, 2003), 荣成辉石岩的高钙和高钛的特征的另一种可能是其原岩为高硅的石榴石岩 (majoritic garnetite). 流体与矿物 (辉石、石榴石和橄榄石) 的 REE 配分关系的研究揭示了在流体中 LREE 是相容元素, 而 HREE 为不相容元素 (Brenan and Watson, 1991; Brenan, 1993), 如果荣成辉石岩的原岩在高压条件下与含 Na、Cl 的流体反应, 该辉石岩应表现出 LREE 亏损的特征, 这和该辉石岩 LREE 富集的特征相悖. 因此, 笔者认为荣成辉石岩的 LREE 富集的特征为其原岩的特征. LREE 在石榴石中不相容, 可以排除高硅的石榴石岩为其原岩的可能性. 另外, 荣成石榴辉石岩具有异常高的 V/Sc 比值 (> 22.7), 这与石榴石较低的 V/Sc 比值 (< 5.0) 不吻合, 也可以排除高硅的石榴石岩为其原岩的可能性.

蓝晶石榴辉岩的 V/Sc 比值的 变化范围 为 5.5~6.8, 和典型玄武岩的 V/Sc 比值相当; 而辉石岩的 V/Sc 变化范围为 22.7~44.5 (表 1). 由于岩浆岩和变质岩的 V 和 Sc 含量不受变质作用或流体交代作用的影响, 它们的 V/Sc 比值实际上反映了原岩的特征 (Lee *et al.*, 2005). Sc 在石榴石与单斜辉石之间的配分系数 ( $D^{Gt/Cpx}$ ) 大约 2, 即 Sc 在石榴石中比单斜辉石相容. 相反地, V 在单斜辉石中比石榴石相容, 导致单斜辉石的 V/Sc 比大大地高于石榴石的 V/Sc 比值. 在榴辉岩中, 含钛氧化物也是 V 的主要赋存矿物, 例如, Barth *et al.* (2001, 2002) 对高镁和低镁两套榴辉岩的石榴石和辉石的 V 和 Sc 的测试, 发现辉石的 V/Sc 比值变化范围为 9.7~30.7, 石榴石为 0.14~4.7, 钛铁矿为 55.9~212.5. 荣成石榴辉石岩中石榴石和单斜辉石的分布比较均一, 所分析样品间的异常高和变化的 V/Sc 比值反映了所测样品中钛铁矿的相对含量的变化. 另外, 尽

管辉石岩的 V/Sc 高度变化, 但 LREE 的含量基本上是恒定值 (图 3), 反映了稀土元素主要分布在石榴石和辉石中, 后期的出溶作用对稀土元素地球化学特征的影响极小.

在该石榴辉石岩中, 石榴石严格地沿 4 组辉石式的晶面出溶和主要元素组分可以完美地满足单斜辉石的分子式, 强烈地表明该辉石岩曾经是纯粹由单斜辉石组成. 荣成石榴辉石岩的和日照石榴辉石岩相比, 最显著的不同点在于, 荣成辉石岩低镁、富集 LREE, Zr 的含量高. 高钛、低钠的特征似乎预示着该辉石岩为堆晶成因. 从稀土配分特征来看, 明显的负 Eu 异常, 这和高钙辉石的特征相吻合 (McKay, 1992), 同时表明该辉石岩的原岩几乎不含斜长石, 而且受斜长石分异作用的影响及石榴石不是主要相. 如果荣成辉石岩的母岩从辉长岩岩浆中通过堆晶作用而形成, 那么将观测到: LREE 相对于 HREE 亏损, 由于相对于 HREE, LREE 在辉石中是不相容元素; 和较高的 Cr、Ni、Co 等, 由于 Cr、Ni 和 Co 在单斜辉石中是相容元素; 这两项特征都和荣成辉石岩 LREE 富集和较低的 Cr、Ni 和 Co 的含量相悖 (表 1). 除非荣成辉石岩的原始岩浆是地幔高温部分熔融形成的超基性岩岩浆, 在高温高压 ( $P > 15 \times 10^5$  kPa,  $T > 1300$  °C), 橄榄石的分离结晶作用导致最终岩浆中和橄榄石不相容元素 (如 LREE) 的富集和相容元素 (Cr, Ni, Co 等) 的亏损及 MgO 的降低, 形成荣成辉石岩的母岩.

另一种可能性是, 荣成石榴辉石岩的最早母岩为高钙的基性岩浆. 对洋中脊、洋岛和岛弧玄武岩中橄榄石和尖晶石中熔体包裹体的研究揭示了 2 种类型的高钙岩浆 (Carr and Rose, 1984; Della Pasqua and Varne, 1997; Kamenetsky *et al.*, 1997, 1998; Sigurdsson *et al.*, 2000; Schiano *et al.*, 2000; Green *et al.*, 2004). 高钙基性岩浆包括那些具有  $Mg^{\#}$  ( $Mg^{\#} = 100 \times Mg / (Mg + Fe)$ ) > 60,  $CaO > 13.5\%$  和  $CaO / Al_2O_3 > 1$  的基性岩浆 (Medard *et al.*, 2004). A 类来源于洋中脊、洋岛和弧后盆地, CIPW 的标准矿物为紫苏辉石, 通常富硅 ( $SiO_2 = 48\% \sim 53\%$ ), 贫碱 ( $Na_2O + K_2O < 2.2\%$ ); B 类主要产自于岛弧, CIPW 的标准矿物为霞石, 通常贫硅 ( $SiO_2 = 44\% \sim 47\%$ ), 富碱 ( $Na_2O + K_2O > 3.0\%$ ) (Medard *et al.*, 2004). 实验研究表明上地幔部分熔融形成高钙岩浆的在压力为  $(15 \sim 20) \times 10^5$  kPa, 温度大于  $1330$  °C (Schmidt *et al.*, 2004). 荣成石榴辉石岩

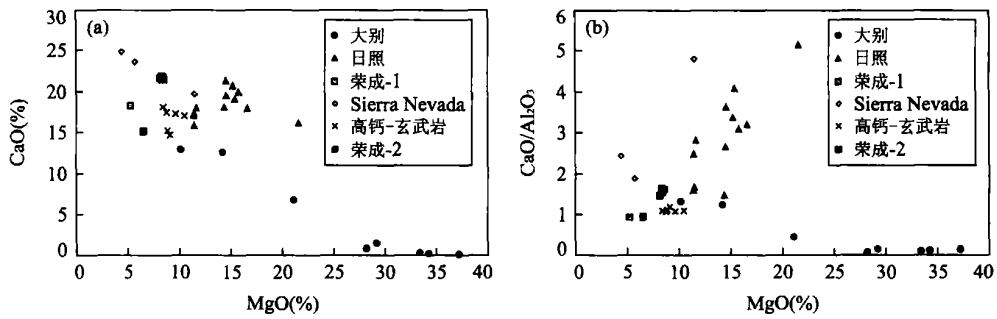


图 4 大别-苏鲁超高压变质带的石榴辉石岩的 CaO 含量(a) 和  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (b) 与 MgO 之间的关系

Fig. 4 Covariation diagram of CaO (a),  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (b) versus MgO in garnet pyroxenites from the Dabie Sulu UHP metamorphic belt and Sierra Nevada. The island arc type ultra calcic basaltic lavas are also shown for comparison

数据来源: 大别山据 Zhang *et al.* (2000)、Jahn *et al.* (2003); 山东日照据 Zhang and Liou (2003)、Yang (2006); 荣成 1 据 Jahn *et al.* (1996)、Jahn (1998); Sierra Nevada 据 Ducea and Saleeby (1996)、Douge *et al.* (1988); 高钙-玄武岩据 Medard *et al.* (2004); 荣成 2 据本研究

具有高 CaO (~22.0%) 和  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值 (1.46 ~ 1.64),  $\text{Mg}^\#$  为 68 ~ 69, 低  $\text{SiO}_2$  (42.5% ~ 43.1%) (表 1), CIPW 标准矿物是霞石, 具有岛弧型的高钙基性岩浆相似的特征 (图 4), 但  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  都很低, 明显低于典型岛弧型的高钙基性岩浆. 在图 4 中, 荣成辉石在  $\text{CaO}-\text{MgO}$  和  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$  的关系图上, 位于岛弧型高钙基性岩浆和 Sierra Nevada 新生代火山岩携带的包体之间, 和山东日照及大别碧溪岭的石榴辉石岩具有很大的差异性. Sierra Nevada 包体具有 LREE 亏损的特征 (Ducea and Saleeby, 1996), 为下地壳部分熔融的残留体. 因此, 荣成石榴辉石岩有可能形成于与岛弧型高钙岩浆类似的具有 LREE 富集特征的基性岩浆, 但经历了 K 和 Na 的亏损过程. 这种可能性有待进一步的实验岩石学的研究, 揭示可能影响岛弧型高钙岩浆的  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  含量的因素.

从稀土元素配分模式上看, 荣成辉石岩与蓝晶石石榴辉岩呈镜像关系, 似乎意味着它们可能是同源的, 即荣成辉石岩和蓝晶石石榴辉岩分别代表从辉长岩岩浆分异的 2 个端元, 分离结晶的高钙单斜辉石和受辉石分离结晶作用影响的辉长岩岩浆, 简单的稀土元素配分系数计算发现  $D^{\text{px}/\text{melt}}$  (LREE) 是实验测定的 10 ~ 10000 倍, 这表明荣成辉石岩与蓝晶石石榴辉岩之间不存在平衡关系, 不可能是同源的. 荣成蓝晶石石榴辉岩的稀土配分模式与威海的榴辉岩具有某些相似的特征, 具体表现在 LREE 亏损, 较平直的 HREE, 相对升高的 Sm/Nd 比值, 但荣成榴辉岩具有显著的正 Eu 异常, 反映了原岩富集斜长石, 稀土元素的地球化学特征主要由榴辉岩的原岩中的斜长石和单斜辉石控制. Jahn *et al.* (1996) 把威海榴辉岩的高度 LREE

亏损解释为超高压变质作用前在高压条件下含卤的水岩作用的结果, 含卤流体溶解并带走了榴辉岩的大量 LREE. 如果本研究的蓝晶石石榴辉岩也经历了类似的过程, 那么很难想象包裹在它们其中的石榴辉石岩不经历相似的化学反应. 因此, 荣成蓝晶石石榴辉岩有可能记录了原岩成岩过程中的特殊岩浆分异作用或原岩形成于不同的构造背景, 这些问题有待进一步深入的研究来解决.

Yang *et al.* (2005) 对该辉石岩的温压计算表明, 该辉石岩最初形成于压力为  $(21 \sim 22) \times 10^5$  kPa, 温度大于  $1100^\circ\text{C}$  条件下. 基本上满足上述 2 种过程所要求的部分熔融和岩浆分异作用发生在较高的温度和压力条件. 虽然目前, 根据现有的全岩地球化学和矿物化学数据, 笔者还无法区分到底是荣成辉石岩的母岩形成于堆晶过程还是高钙岩浆, 但无论哪一种过程都表明在苏鲁超高压变质带中, 一些超高压变质岩的母岩形成于高温部分熔融或岩浆演化作用, 明显不同于大多数榴辉岩或片麻岩的原岩形成环境.

## References

- Bath, M. G., Rudnick, R. L., Horn, I., et al., 2001. Geochemistry of xenolithic eclogites from West Africa, Part I: A link between low MgO eclogites and Archean crust formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65: 1499–1527.
- Barth, M. G., Rudnick, R. L., Horn, I., et al., 2002. Geochemistry of xenolithic eclogites from West Africa, Part II: Origins of the high MgO eclogites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66: 4325–4345.
- Brenan, J. M., Watson, E. B., 1991. Partitioning of trace ele-

- ments between olivine and aqueous fluids at high P T conditions: Implications for the effect of fluid composition on trace element transport. *Earth and Planetary Science Letters*, 107: 672 – 688.
- Brenan, J. M., 1993. Partitioning of fluorine and chlorine between apatite and aqueous fluids at high pressure and temperature: Implications for the F and Cl content of high P T fluids. *Earth and Planetary Science Letters*, 117: 251 – 263.
- Carr, M. J., Rose, W. I., 1984. CENTAM: A data base of Central American volcanic rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33: 239 – 240.
- Della Pasqua, F. N., Varne, R., 1997. Primitive ankaramitic magmas in volcanic arcs: A melt inclusion approach. *Canadian Mineralogist*, 35: 291 – 312.
- Dodge, F. C. W., Lockwood, J. P., Calk, L. C., 1988. Fragments of mantle and crust from beneath the Sierra Nevada batholith: Xenoliths in volcanic pipe near Big Creek, California. *GSA Bulletin*, 100: 938 – 947.
- Ducea, M. N., Saleeby, J. B., 1996. Buoyancy sources for a large unrooted mountain range, the Sierra Nevada, California: Evidence from xenolith thermobarometry. *J. Geophys. Res.*, 101: 8229 – 8244.
- Green, D. H., Schmidt, M. W., Hibberson, W. O., 2004. Island arc ankaramites: Primitive melts from fluxed refractory lherzolitic mantle. *Journal of Petrology*, 45: 391 – 403.
- Harte, B., Gurney, J. J., 1975. Evolution of clinopyroxene and garnet in an eclogite nodule from the Roberts Victor kimberlite pipe, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 9: 367 – 387.
- Jahn, B. M., Cornichet, J., Cong, B., et al., 1996. Ultrahigh  $\epsilon_{Nd}$  eclogites from an UHP metamorphic terrane of China. *Chemical Geology*, 127: 61 – 79.
- Jahn, B. M., Fan, Q., Yang, J. J., et al., 2003. Petrogenesis of the Maowu pyroxenite eclogite body from the UHP metamorphic terrane of Dabieshan: Chemical and isotopic constraints. *Lithos* 70: 243 – 267.
- Jahn, B. M., 1998. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites of the Dabie orogen: Implications for continental subduction and collisional tectonics. In: Hacker, B., Liou, J. G., eds., *When continents collide: Geodynamics and geochemistry of ultrahigh pressure rocks*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 203 – 239.
- Kamenetsky, V. S., Crawford, A. J., Eggins, S., et al., 1997. Phenocrysts and melt inclusion chemistry of near axis seamounts, Valu Fa Ridge, Lau Basin: Insight into mantle wedge melting and the addition of subduction components. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 151: 205 – 223.
- Kamenetsky, V. S., Eggins, S. M., Crawford, A. J., et al., 1998. Calcic melt inclusions in primitive olivine at 43°N: Evidence for melt rock reaction/melting involving clinopyroxene rich lithologies during MORB generation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 160: 115 – 132.
- Kato, T., Enami, M., Zhai, M., 1997. Ultra high pressure (UHP) marble and eclogite in the Su Lu UHP terrane, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 15: 169 – 182.
- Lee, C. T. A., Leeman, W. P., Canil, D., et al., 2005. Similar V/Sc systematics in MORB and Arc basalts: Implication for the oxygen fugacities of their mantle source region. *Journal of Petrology*, 46: 2313 – 2336.
- Liang, F. H., Zeng, L. S., Chen, J., et al., 2006. Discovery of apatite with copper bearing pyrrhotite exsolution in an eclogite from Rongcheng, eastern Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 433 – 438 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Katayama, I., et al., 2001. Mineral inclusions in zircon of para and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCS-D PPI, Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Lithos* 59: 199 – 215.
- McKay, G. A., 1992. Partitioning of rare earth elements between major silicate minerals and basaltic melts. *Review in Mineralogy*, 21: 45 – 77.
- Massonne, H. J., Bartsch, H. J., 2002. An unusual garnet pyroxenite from the Granulitgebirge, Germany: Origin in the transition zone (> 400 km depths) or in a shallower upper mantle region. *International Geological Review*, 44: 779 – 796.
- Medard, E., Schmidt, M. W., Schiano, P., 2004. Liquidus surfaces of ultracalcic primitive melts: Formation conditions and sources. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148: 201 – 215.
- Meen, J. K., Egger, D. H., Ayers, J. C., 1989. Experimental evidence for very low solubility of rare earth elements in CO<sub>2</sub> rich fluids at mantle conditions. *Nature* 340: 301 – 303.
- Nakamura, D., Hirajima, T., 2000. Granulite facies overprinting of ultrahigh pressure metamorphic rocks, north eastern Su Lu region, eastern China. *Journal of Petrology*, 41: 563 – 582.
- Schiano, P., Eiler, J. M., Hutcheon, I. D., et al., 2000. Primitive CaO rich, silica undersaturated melts in island arcs: Evidence for the involvement of clinopyroxene rich



- lithologies in the petrogenesis of arc magmas. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 1, Paper number 1999G000032.
- Schmidt, M. W., Green, D. H., Hibberson, W. O., 2004. Ultracalcic magmas generated from Ca depleted mantle: An experimental study on the origin of ankaramites. *Journal of Petrology*, 45: 531 – 554.
- Sigurdsson, I. A., Steinthorsson, S., Gronvold K., 2000. Calcium rich melt inclusions in Cr spinels from Borgarfraun, northern Iceland. *Earth and Planetary Science Letters*, 183: 15 – 26.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders, A., Norry, M., eds., Magmatism in the ocean basins. *Geological Society London Special Publication*, 42: 313 – 345.
- Tang, J., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2004. Zircon U/Pb ages and oxygen isotopes of high grade metamorphic rocks in the eastern part of the Shandong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1039 – 1062 (in Chinese with English abstract).
- Wallis S. R., Ishiwatari, A., Hirajima, T., et al., 1997. Occurrence and field relationships of ultrahigh pressure metagranitoid and coesite eclogite in the Sulu terrane, eastern China. *Journal of the Geological Society, London*, 154: 45 – 54.
- Wang, Q., Ishiwatari, A., Zhao, Z., et al., 1994. Coesite bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China. *European Journal of Mineralogy*, 5: 141 – 152.
- Yang, J. J., 1991. Eclogites, garnet, pyroxenites and related ultrabasics in Shandong and north Jiangsu of east China. Geological Publishing House, Beijing, 26 – 52 (in Chinese).
- Yang, J. J., 2006. Ca rich garnet clinopyroxene rocks at Hujialin in the Su Lu terrane (eastern China): Deeply subducted arc cumulates. *Journal of Petrology* (in press).
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Wu, C. L., et al., 2002. SHRIMP U/Pb dating on coesite bearing zircon: Evidence for Indosinian ultrahigh pressure metamorphism in Sulu, east China. *Acta Geological Sinica*, 76: 354 – 371 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T. N., Zeng, L. S., Liou, J. G., 2005. Mineral evolution of a garnet pyroxenite nodule within eclogite, eastern Sulu ultrahigh pressure metamorphic terrane, East China. *Journal of Metamorphic Geology*, 23: 667 – 680.
- Yang, T. N., Xu, Z. Q., Leech, M., 2004. Mass balance during retrogression of eclogite facies minerals in the Rongcheng eclogite, eastern Sulu ultrahigh pressure terrane, China. *American Mineralogist*, 89: 1525 – 1532.
- Ye, K., Cong, B. L., Ye, D. N., 2000. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km. *Nature*, 407: 734 – 736.
- Zeng, L. S., Zhang, Z. M., Liu, F. L., et al., 2006. V/Sc as a new tool to fingerprint the magmatic differentiation processes in the formation of the protoliths for the CCSD eclogites. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7) (in Chinese with English abstract, in press).
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Yang, J. S., et al., 2000. Petrochemical constrains for dual origin of garnet peridotites from the Dabie Sulu UHP terrane, eastern central China. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 149 – 166.
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., 2003. Clinopyroxenite from the Sulu ultrahigh pressure terrane, eastern China: Origin and evolution of garnet exsolution in clinopyroxene. *American Mineralogist*, 88: 1591 – 1600.
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Ernst, W. G., 1995. Ultrahigh pressure metamorphism and decompressional P-T paths of eclogites and country rocks from Weihai, eastern China. *The Island Arc*, 4: 293 – 309.
- Zhang, R. Y., Zhai, S. M., Fei, Y. W., et al., 2003. Titanium solubility in coexisting garnet and clinopyroxene at very high pressure: The significance of exsolved rutile in garnet. *Earth and Planetary Science Letters*, 216: 591 – 601.

#### 附中文参考文献

- 梁凤华, 曾令森, 陈晶, 等, 2006. 胶东荣成榴辉岩中含铜磁黄铁矿出溶结构的磷灰石的发现及其意义. *岩石学报*, 22(2): 433 – 438.
- 唐俊, 郑永飞, 吴元保, 等, 2004. 胶东地块东部变质岩锆石 U/Pb 定年和氧同位素研究. *岩石学报*, 20(5): 1039 – 1062.
- 杨建军, 1991. 中国东部山东和江苏北部的榴辉岩、辉石岩和有关的超基性岩. 北京: 地质出版社, 26 – 52.
- 杨经绥, 许志琴, 吴才来, 等, 2002. 含柯石英锆石的 SHRIMP U/Pb 定年: 胶东印支期超高压变质作用的证据. *地质学报*, 76(3): 354 – 371.
- 曾令森, 张泽明, 刘福来, 等, 2006. V/Sc 比值——可透视榴辉岩变质作用并指示基性岩浆作用的一种新的地球化学工具: 在 CCSD 主孔榴辉岩中的应用. *岩石学报*, 22(7) (待刊).