

# 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\*

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

ZHAI Wei<sup>1</sup>, SUN XiaoMing<sup>1,2</sup>, LIANG JingLong<sup>1</sup>, XU Li<sup>1</sup>, TANG Qian<sup>1</sup>, LIANG YeHeng<sup>1</sup> and SU LiWei<sup>1</sup>

1. 中山大学地球科学系, 广州 510275

2. 中国科学院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, 2006-06-12 改回.

Zhai W, Sun XM, Liang JL, Xu L, Tang Q, Liang YH and Su LW. 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

**Abstract** Epidotes in Qinglongshan ultrahigh pressure metamorphic eclogites experienced four metamorphic stages: Early epidote-amphibolite facies prograde metamorphic stage (I), coesite-eclogite facies stage (II), quartz-eclogite facies stages (III) and late amphibolite facies retrograde metamorphic stage (IV). Chemical compositions of the epidotes formed in stage I are characterized by the high Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents (14.796 ~ 17.84%) and X<sub>Fe</sub> (0.413 ~ 0.486), and low CaO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Epidotes formed in stage II and III show continuous compositional variation. The core which was mainly formed in stage II is relatively enriched in Fe (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 11.933 ~ 12.993%, X<sub>Fe</sub> = 0.322 ~ 0.358) and depleted in CaO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, while the rim which was mainly formed in stage III shows relatively low Fe concentration (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 9.628 ~ 10.138%, X<sub>Fe</sub> = 0.275 ~ 0.286) and high CaO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents. Epidotes formed in stage IV possess similar chemical composition with those of stage I, and are characterized by high Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentrations and X<sub>Fe</sub> (0.433). Compositional variation of epidotes reflects the rapid subduction and exhumation process of Su-Lu ultrahigh pressure metamorphic belt. Three kind of Fe<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> bearing aqueous inclusions have been recognized in the epidote: high-salinity (22.5 to slightly more than 23.2wt% NaCl) inclusions, moderate to high salinity (12.6 ~ 16.0wt% NaCl) and medium salinity (6.4 ~ 11.7wt% NaCl) inclusions, which were formed in stage II, III and IV respectively. Studies of fluid inclusions in epidotes confirm that no large scale penetrative fluid flow occurred during the UHP metamorphism, and the metamorphic fluid expelled during exhumation of the Qinglongshan UHP rocks flowed mainly at grain scale.

**Key words** Epidote, Chemical composition, Fluid inclusion, Eclogites, Qinglongshan, Su-Lu UHP belt

**摘要** 青龙山超高压变质榴辉岩中的绿帘石经历了四个演化阶段: 早期绿帘角闪岩相进变质阶段形成的绿帘石, 其化学成分以含铁高为特征, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 14.796 ~ 17.84%, X<sub>Fe</sub> = 0.413 ~ 0.486, 而 CaO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较低; 柯石英榴辉岩相变质阶段和石榴辉岩相变质阶段形成的绿帘石, 其化学成分呈现连续变化, 核部相对富 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 为 11.933 ~ 12.993%, X<sub>Fe</sub> = 0.322 ~ 0.358, 而 CaO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量低, 主要形成于柯石英榴辉岩相变质阶段; 边部 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量低, 为 9.628 ~ 10.138%, X<sub>Fe</sub> = 0.275 ~ 0.286, 而 CaO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量高, 主要形成于石榴辉岩相退变质阶段; 晚期退变质角闪岩相阶段形成的绿帘石, 其化学成分与绿帘角闪岩相变质阶段相似, 也以富含 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为特征, X<sub>Fe</sub> = 0.433。绿帘石化学成分的变化反映了苏鲁超高压变质带快速

\* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB716501)、国家自然科学基金重大项目(40399142)、国家自然科学基金项目(40373027)和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)联合资助。

第一作者简介: 翟伟,男,1965年生,博士,高级工程师,主要从事流体地球化学和矿床地球化学研究, E-mail: eeszw@mail.sysu.edu.cn

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

俯冲快速折返的过程。绿帘石中存在三种不同盐度的含  $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$  等金属阳离子的 NaCl 水溶液包裹体,高盐度(22.5wt% NaCl 至略大于 23.2wt% NaCl)的水溶液包裹体形成于柯石英榴辉岩相变质阶段,中高盐度(12.6~16.0wt% NaCl)的水溶液包裹体形成于石英榴辉岩相变质阶段,而中等盐度(6.4~11.7 wt% NaCl)的溶液包裹体形成于角闪岩相退变质阶段。绿帘石中流体包裹体的研究证实超高压变质作用及后期的折返过程中并不存在大规模的流体作用,变质流体的活动限于矿物晶体颗粒范围。

**关键词** 绿帘石;化学成分;流体包裹体;榴辉岩;青龙山;苏鲁超高压变质带

**中图分类号** P588.348; P595; P578.956

绿帘石类矿物是一类常见的造岩矿物,其化学成分变化大,广泛出现于各种地质作用过程中,包括近地表的地热系统(Bird, *et al*, 2004)、岩浆作用过程(Schmidt *et al*, 2004)、矽卡岩和斑岩等热液矿床成矿作用过程(Klemd *et al*, 2004)、低压/中压变质作用过程(Grapes *et al*, 2004)以及高压/超高压变质作用过程(Enami *et al*, 2004)。绿帘石类矿物含羟基结构水,超高压变质岩中绿帘石类矿物的出现,说明它们可以在地幔条件下稳定存在,且其中往往保存有矿物形成时的原生流体包裹体(Klemd *et al*, 2004),因此对绿帘石类矿物化学成分和流体包裹体的研究,对探讨地质作用过程的温压条件与矿物成分之间的关系、流体与岩石的作用过程以及大陆地壳深俯冲作用过程中水循环、岩浆作用过程和金属元素的迁移富集成矿都具有重要的意义。本文主要对南苏鲁青龙山超高压变质岩中绿帘石化学成分及其中的流体包裹体进行了研究,并对其演化过程进行了探讨。

## 1 地质背景与样品特征

青龙山榴辉岩位于华北板块和扬子板块之间的苏鲁-大别超高压变质带东段苏鲁超高压变质带的南部,江苏省北部的东海县城东约 20km。苏鲁超高压变质带组成岩石主要由花岗质片麻岩、副片麻岩、榴辉岩、角闪岩、大理岩以及石榴橄榄岩等组成(张泽明等,2002,2004)。青龙山榴辉岩呈条带状产于长英质片麻岩中,主要岩性有石英榴辉岩、蓝晶石多硅白云母榴辉岩、绿帘石斑晶榴辉岩、含绿帘石斑晶石英榴辉岩。在榴辉岩的绿辉石和绿帘石斑晶中发现有柯石英,同时在长英质片麻岩的锆石中也发现有超高压变质的指示矿物柯石英,显示二者整体发生了深俯冲(Zhang *et al*, 1995; Zhang *et al*, 2005a)。青龙山超高压变质岩出现非常低的氢、氧同位素值,榴辉岩中石榴石的  $\delta^{18}O$  低至 -11.1‰,金红石为 -15.0‰,多硅白云母的氢同位素  $\delta D$  低至 -120‰;长英质片麻岩中黑云母的  $\delta^{18}O$  为 -10.8‰(Yui *et al*, 1995; Zheng *et al*, 1998, 2003; Rumble, 1998, 2002; Zhang *et al*, 2005b)。李秋立(2004)用 SHRIMP 法测得青龙山超高压变质峰期的锆石年龄为  $227.4 \pm 3.5$  Ma。

研究样品均为采自青龙山的含绿帘石斑晶石英榴辉岩(537~1,537~2)和含绿帘石斑晶榴辉岩(538~1,538~2),绿帘石斑晶长可达 1~2cm,其中含石榴石、绿辉石、金红石、石英、蓝晶石等矿物包体,在绿辉石或绿帘石斑晶中有柯石

英假像包体(图 1A)。典型的矿物组合为石榴石+绿辉石+多硅白云母+金红石+绿帘石+蓝晶石+石英±角闪石±磷灰石±柯石英假像。在绿辉石边缘可见斜长石和角闪石组成的退变质后合成晶边,蓝晶石边缘有斜长石冠状反应边。

## 2 分析测试方法

矿物电子探针成分分析在中国科学院广州地球化学研究所的日本电子 JXA~8100 电子探针上完成,加速电压为 15.0kV,束斑电流为  $3 \times 10^{-8}$  A,扫描电子束直径为 1.0 $\mu$ m,所用标样为硅酸盐和氧化物。流体包裹体显微测温在中山大学地球科学系的 Linkam THMSG600 型冷热台上完成,测温前用已标定温度的  $CO_2$  包裹体、纯水和重铬酸钾进行了温度校正,仪器精度为 0.1℃。升降温速率  $\leq 15^\circ C/分钟$ ,相转变点附近升降温速度控制在  $\leq 2^\circ C/分钟$ ,当相变现象不明显时升降温速率控制在  $\leq 5^\circ C/分钟$ 。根据显微测温结果用 Flineor 软件(Brown, 1989)计算了流体包裹体的各种物理化学参数。

## 3 绿帘石化学成分特征

绿帘石形成于各种地质环境的不同温压条件下,由于其具有非常缓慢的化学反应动力学特性,一旦形成可以保存其稳定的化学组成,其主量和微量元素特征可以反映形成的 P-T 历史(Enami *et al*, 2004)。苏鲁超高压变质榴辉岩经历了深俯冲并快速折返的复杂的变质作用过程(张泽明等,1996, 2005; Ye *et al*, 2002),根据青龙山超高压变质含绿帘石斑晶榴辉岩和石英榴辉岩中绿帘石的岩相学特征以及化学成分特征,可将绿帘石的形成分为四个阶段:

I 阶段:此阶段的绿帘石呈矿物包裹体赋存于绿帘石斑晶中或石榴石斑晶中,绿帘石颜色较斑晶绿帘石更深、多色性更明显。电子探针分析发现其中有更早期矿物钾长石、黑云母、绿泥石等的残留体(图 1C,表 1)。其化学成分以含铁高为特征, $Fe_2O_3$  的含量高达 14.796~17.84%,而  $CaO$  和  $Al_2O_3$  含量低,分别为 22.644~23.046% 和 18.822~20.898%, $X_{Fe}=0.413 \sim 0.486$ (表 1)。Zhang *et al*(2005a)对青龙山超高压变质榴辉岩中的石榴石斑晶研究认为其核部  $MgO$  含量低且含绿帘石、角闪石及钠云母包体,而无榴辉岩

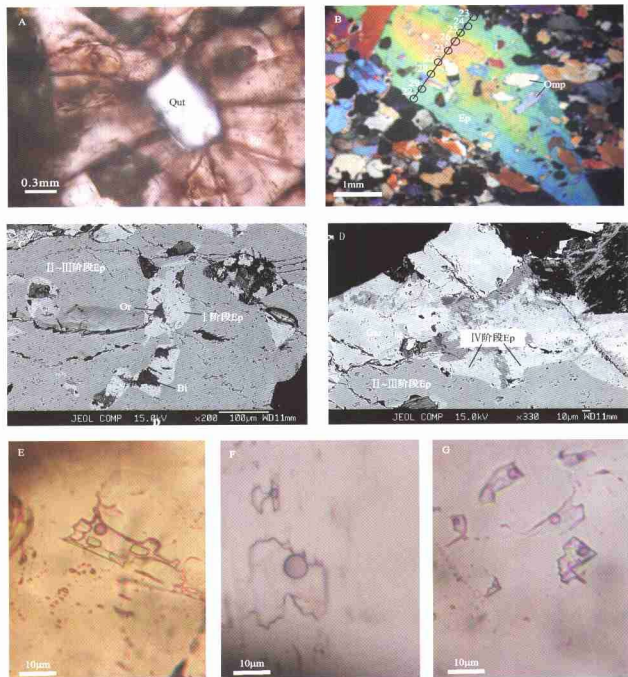


图1 青龙山绿帘石及其中不同盐度水溶液包裹体显微照片

A-Ⅱ阶段的绿帘石斑晶及其中的柯石英假象; B-Ⅱ阶段-Ⅲ阶段的具成分环带的绿帘石斑晶及电子探针分析点位置; C-Ⅰ阶段的绿帘石呈包体出现在Ⅱ阶段-Ⅲ阶段的绿帘石斑晶中; D-Ⅳ阶段的绿帘石分布于Ⅱ阶段-Ⅲ阶段的绿帘石斑晶周围; E、F、G-绿帘石斑晶中的高盐度水溶液包裹体, 中高盐度的水溶液包裹体, 中等盐度的水溶液包裹体。图中矿物代码: Bi-黑云母, Ep-绿帘石, Gr-石榴子石, Omp-绿辉石, Or-钾长石, Qtz-石英。

Fig. 1 Photomicrographs of Qinglongshan epidotes and their fluid inclusions with different salinities aqueous inclusions.

A-Quartz inferred to be a pseudomorph after coesite in epidote porphyroblast formed in stage II; B-epidote porphyroblast with compositional zoning formed in II - III stages and the point of microprobe analysis; C - epidote formed in I stage occurred as inclusions in epidote porphyroblast of II - III stages; D-epidote formed in IV stage distributed around the epidote porphyroblast of II - III stages. E, F, G-high - salinity, moderate - high - salinity and medium - salinity aqueous inclusions in epidote. Bi-Biotite, Ep-epidote, Gr-garnet, Omp-omphacite, Or-K - feldspar, Qtz-Quartz.

表 1 I 阶段绿帘石及其中残留矿物电子探针分析结果 (%)

Tab 1 Electron probe analytical results of stage I epidotes and their residue minerals (%)

样品编号 及测点	537-1/38	537-1/39	537-1/40	537-1/49	537-1/52	537-1/41	537-1/42	537-1/43	537-1/45	537-1/50	537-1/13a
	I 阶段 Ep					I 阶段 Ep 中残留矿物包体				IV 阶段 Ep	
	Ep 斑晶中包体 Ep					Or	Bi	Chl	Qtz	榴辉岩基质 Ep	
Na <sub>2</sub> O	0.012	0.002	—	0.001	0.016	0.187	0.16	0.019	0.007	—	—
K <sub>2</sub> O	—	0.013	0.022	0.024	—	15.41	8.357	0.041	—	0.007	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.384	20.191	20.898	20.998	18.822	14.914	18.939	16.062	0.269	20.255	20.282
SiO <sub>2</sub>	37.304	37.425	37.408	37.528	36.808	62.687	52.891	29.166	96.849	37.411	36.819
CaO	22.747	23.046	22.644	18.879	22.852	1.79	3.506	0.173	0.383	22.493	22.931
MgO	0.001	—	0.08	0.087	0.053	2.972	7.582	20.732	0.402	0.137	0.028
SrO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.027	0.048	0.012	0	0.003	0.009	0.095	0.105	0.012	—	—
TiO <sub>2</sub>	0.004	0.061	0.292	0.359	0.05	0.017	0.001	0.019	0.004	0.596	0.097
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.053	0.096	0.25	0.057	0.064	—	0.06	0.444	0.042	0.259	0.037
FeO	15.62	16.304	15.011	14.796	17.84	1.263	5.313	20.335	0.419	15.649	15.561
Total	96.152	97.186	96.617	92.729	96.508	99.249	96.904	87.096	98.387	96.807	95.755
X <sub>Fe</sub>	0.433	0.445	0.415	0.413	0.486	—	—	—	—	0.433	0.434

注:表中全铁为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,全锰为 Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, X<sub>Fe</sub> = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</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> + Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Ep-绿帘石, Or-钾长石, Bi-黑云母, Chl-绿泥石, Qtz-石英; 表中“—”示低于检测限;

表 2 II 阶段-III 阶段绿帘石电子探针分析结果 (%)

Table 2 Electron probe analytical results of stage II and III epidotes from Qinglongshan (%)

样品编号 及测点	538-1/9	538-1/4	538-1/7	537-2/34	537-2/36	537-2/11	537-2/12	537-2/14	537-2/13	537-2/16	537-2/35	537-2/15	537-2/17	537-2/22	537-2/23
	II 阶段 Ep										III 阶段 Ep				
	Ep 斑晶		无环带		Ep 斑晶		Ep 斑晶		Ep 斑晶		Ep 斑晶幔部				
	核部	Ep 斑晶	核部	中	Coe 旁	核部						Ep 斑晶边部			
Na <sub>2</sub> O	0.031	0.029	0.047	0.02	0.02	0.024	0.021	0.032	—	—	0.009	—	0.013	0.046	0.021
K <sub>2</sub> O	—	0.024	0.029	—	—	0.01	0.014	0.009	0.012	0.01	0.015	0.008	0.016	0.004	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.253	23.45	23.111	24.278	23.529	23.557	24.289	24.944	24.409	24.89	25.324	25.222	25.15	25.223	25.399
SiO <sub>2</sub>	37.892	37.558	37.567	37.966	38.002	37.441	37.664	37.775	37.299	38.303	38.475	37.842	38.307	38.227	38.066
CaO	22.211	22.333	21.937	21.963	21.419	22.49	21.73	21.797	22.016	22.54	23.106	23.17	22.749	22	22.817
MgO	0.374	0.329	0.43	0.349	0.374	0.312	0.483	0.382	0.435	0.364	0.278	0.176	0.313	0.418	0.273
SrO	0.132	0.191	0.074	0.412	0.767	—	0.081	0.053	0.237	—	—	—	—	—	—
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0.021	0.1	0.009	—	0.033	0.018	0.073	0.012	—	0.024	0.07	—	0.061	0.003
TiO <sub>2</sub>	0.097	0.08	0.046	0.063	0.079	0.113	0.052	0.088	0.08	0.053	0.068	0.078	0.08	0.127	0.066
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.083	0.041	0.094	0.009	0.041	0.009	0.023	0.012	0.053	0.021	0.023	—	0.002	0.06	0.03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.997	12.016	12.387	11.562	11.933	11.542	11.177	10.57	10.63	10.239	10.138	9.855	9.844	9.852	9.628
Total	97.07	96.072	95.822	96.631	96.164	95.531	95.552	95.735	95.183	96.42	97.46	96.421	96.474	96.018	96.303
X <sub>Fe</sub>	0.358	0.338	0.347	0.322	0.336	0.328	0.315	0.297	0.303	0.291	0.286	0.280	0.281	0.280	0.275

注:表中全铁为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,全锰为 Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, X<sub>Fe</sub> = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</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> + Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Ep 为绿帘石, Coe 为柯石英。表中“—”示低于检测限;

相的矿物组合,代表绿帘角闪岩相进变质作用阶段的产物。Zhang *et al*(1995)和 Enami *et al*(1993)在南苏鲁地区的超高压变质榴辉岩中也报道了同样的矿物组合,故此阶段绿帘石应形成于绿帘角闪岩相进变质作用阶段。

II 阶段-III 阶段:此两阶段形成的绿帘石多呈斑晶出现,其中有多晶石英组成的柯石英假像包体以及绿辉石、石榴石、多硅白云母以及第 I 阶段的绿帘石矿物包体,并有类似矿物出溶体的结构,绿帘石斑晶出现明显的干涉色与成分环

带(图 1B)。与第一阶段的绿帘石相比,其 Fe 含量低,化学成分从核部到边部呈连续的变化,核部分学成分以相对较富 Fe 为特征, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量为 11.933 ~ 12.993%, SrO 含量也高,为 0.074 ~ 0.767%, 而 CaO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量低,分别为 21.419 ~ 22.333% 和 23.111 ~ 23.557%, X<sub>Fe</sub> = 0.322 ~ 0.358%; 边部 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量低,为 9.628 ~ 10.138%, CaO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量高,分别为 22.0 ~ 23.17% 和 25.15 ~ 25.399%, X<sub>Fe</sub> = 0.275 ~ 0.286% (表 2)。通过对典型具成分环带的绿

表3 典型具成分环带的绿帘石电子探针分析结果(%)

Table 3 Electron probe analytical results of Qinglongshan epidotes with typical compositional zoning(%)

样品编号 及测点	537-2/23				537-2/24				537-2/25				537-2/26				537-2/21				537-2/27				537-2/28				537-2/29				537-2/22			
	Ep 斑晶边(Ⅲ阶段)←								Ep 斑晶核部(Ⅱ阶段)								→Ep 斑晶边(Ⅲ阶段)																			
Na <sub>2</sub> O	0.021	0.022	0.038	0.044	0.031	0.187	0.021	0.011	0.011	0.015	0.004	0.021	0.022	0.038	0.044	0.031	0.187	0.021	0.011	0.011	0.015	0.004	0.021	0.022	0.038	0.044	0.031	0.187	0.021	0.011	0.011	0.015	0.004			
K <sub>2</sub> O	—	—	—	0.016	—	0.073	0.001	0.015	0.015	0.015	0.004	—	—	—	0.016	—	0.073	0.001	0.015	0.015	0.015	0.004	—	—	—	0.016	—	0.073	0.001	0.015	0.015	0.015	0.004			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.399	24.632	24.155	23.458	23.488	23.942	24.535	24.871	24.871	24.871	25.223	23.488	23.942	24.535	24.871	23.488	23.942	24.535	24.871	24.871	24.871	25.223	23.488	23.942	24.535	24.871	23.488	23.942	24.535	24.871	23.488	23.942	24.535			
SiO <sub>2</sub>	38.066	38.091	37.731	37.699	38.052	37.632	38.366	37.892	37.892	37.892	38.227	38.052	37.632	38.366	37.892	38.052	37.632	38.366	37.892	37.892	37.892	38.227	38.052	37.632	38.366	37.892	38.052	37.632	38.366	37.892	38.052	37.632	38.366			
CaO	22.817	22.2	21.823	21.621	20.996	21.95	22.112	22.377	22.377	22.377	22	20.996	21.95	22.112	22.377	20.996	21.95	22.112	22.377	22.377	22.377	22	20.996	21.95	22.112	22.377	20.996	21.95	22.112	22.377	20.996	21.95	22.112			
MgO	0.273	0.367	0.362	0.388	0.456	0.299	0.383	0.336	0.336	0.336	0.418	0.456	0.299	0.383	0.336	0.456	0.299	0.383	0.336	0.336	0.336	0.418	0.456	0.299	0.383	0.336	0.456	0.299	0.383	0.336	0.456	0.299	0.383			
SrO	—	—	0.717	0.506	0.738	0.6	0.014	0.044	0.044	0.044	—	0.738	0.6	0.014	0.044	0.738	0.6	0.014	0.044	0.044	0.044	—	0.738	0.6	0.014	0.044	0.738	0.6	0.014	0.044	0.738	0.6	0.014			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.003	0.033	0.003	0.003	—	0.006	0.006	—	—	—	0.061	—	0.006	0.006	—	—	0.006	0.006	—	—	—	0.061	—	0.006	0.006	—	—	0.006	0.006	—	—	—	0.061			
TiO <sub>2</sub>	0.066	0.099	0.086	0.087	0.032	0.078	0.095	0.093	0.093	0.093	0.127	0.032	0.078	0.095	0.093	0.032	0.078	0.095	0.093	0.093	0.093	0.127	0.032	0.078	0.095	0.093	0.032	0.078	0.095	0.093	0.032	0.078	0.095			
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.069	0.064	0.005	0.064	0.016	0.021	0.039	0.039	0.039	0.06	0.064	0.016	0.021	0.039	0.064	0.016	0.021	0.039	0.039	0.039	0.06	0.064	0.016	0.021	0.039	0.064	0.016	0.021	0.039	0.064	0.016	0.021			
FeO	9.628	10.531	11.153	12.113	12.301	10.71	10.611	10.077	10.077	10.077	9.852	12.301	10.71	10.611	10.077	12.301	10.71	10.611	10.077	10.077	10.077	9.852	12.301	10.71	10.611	10.077	12.301	10.71	10.611	10.077	12.301	10.71	10.611			
Total	96.303	96.044	96.132	95.94	96.158	95.493	96.165	95.755	95.755	95.755	96.018	96.158	95.493	96.165	95.755	96.158	95.493	96.165	95.755	95.755	95.755	96.018	96.158	95.493	96.165	95.755	96.158	95.493	96.165	95.755	96.158	95.493	96.165			
X <sub>Fe</sub>	0.275	0.299	0.315	0.340	0.343	0.309	0.302	0.288	0.288	0.288	0.280	0.343	0.309	0.302	0.288	0.343	0.309	0.302	0.288	0.288	0.288	0.280	0.343	0.309	0.302	0.288	0.343	0.309	0.302	0.288	0.343	0.309	0.302			

注：表中全铁为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，全锰为 Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，X<sub>Fe</sub> = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</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> + Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)，Ep 为绿帘石。表中“—”示低于检测限；

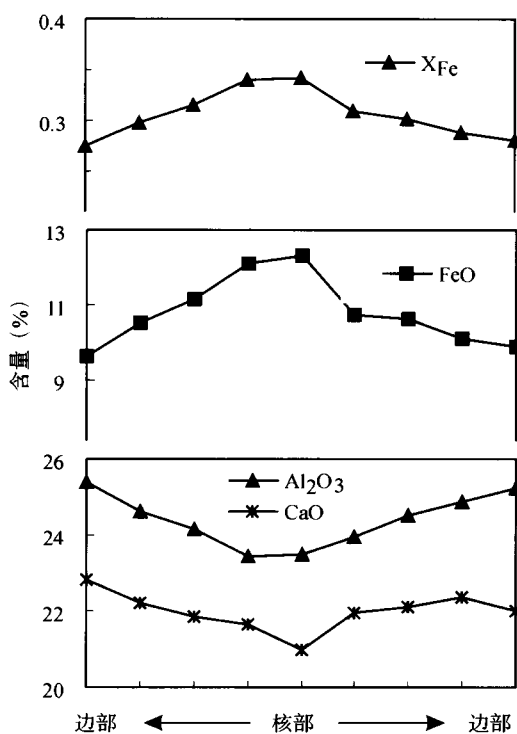


图2 绿帘石成分环带含量变化图  
Fig. 2 Compositional zoning of epidote prophyroblast

帘石斑晶电子探针线分析，其 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量由边部的 9.628% →核部的 12.301% →边部的 9.852%，而 CaO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量由边部的 22.817% 和 25.399% →核部的

20.996% 和 23.458% →边部的 22.377% 和 25.223%，X<sub>Fe</sub> 由边部的 0.275 →核部的 X<sub>Fe</sub> = 0.343 →边部的 X<sub>Fe</sub> = 0.28 (图2,表3)。

含有柯石英或柯石英假像的绿帘石一般被认为是在超高压变质条件下稳定存在的矿物，Zhang *et al* (1992, 1995, 2005)、Hirajima *et al* (1992) 和 Enami *et al* (2004) 在青龙山及南苏鲁其它地区超高压变质岩的绿帘石中发现柯石英或柯石英假象，说明青龙山含柯石英的绿帘石形成于超高压变质峰期。Zhang *et al* (2005a) 认为青龙山超高压峰期变质之后经历了以典型矿物组合斑状角闪石 + 斑状绿帘石 + 蓝晶石 + 钠云母 + 石英 + 石榴石 (环带石榴石的边部) 的石英榴辉岩相变质作用，此阶段与超高压变质作用阶段为一压力降低的连续过渡阶段，以角闪石斑晶和绿帘石变斑晶的继续生长为特征 (Cong *et al*, 1996)。此两阶段的绿帘石难以将其按成分严格区分开，但绿帘石斑晶核部 FeO 含量高部分 (最高可达 12.993%) 形成于超高压变质峰期，为第 II 阶段形成的绿帘石，而边部 FeO 含量低部分 (最低可达 9.628%) 形成于石英榴辉岩相变质阶段，幔部的绿帘石形成于压力降低的超高压变质峰期到石英榴辉岩相的连续过渡阶段。

IV 阶段：此阶段的绿帘石分布于第 II、III 阶段绿帘石斑晶周围的基质中或以长轴斜交于绿帘石斑晶，颜色较斑晶绿帘石深，多色性更明显 (图 1D)。其化学成分与 I 阶段相似，也以富含 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为特征，含量为 15.561 ~ 15.649%，CaO 为 22.493 ~ 22.931%，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 20.255 ~ 20.282%，X<sub>Fe</sub> = 0.43 (表 2)。据 Zhang *et al* (2005a) 研究，石英榴辉岩相变质作用之后青龙山超高压变质岩又经历了角闪岩相退变质作用，石榴石、绿辉

石被斜长石、角闪石的后成合金取代,蓝晶石被斜长石和绿帘石取代,此阶段的绿帘石形成于角闪岩相退变质作用阶段。

#### 4 绿帘石中流体包裹体特征

绿帘石可以形成于各种地质条件下,其中可保存其形成时捕获的原生或假次生流体包裹体(Klemd *et al.*, 2004),因此对研究地质作用过程中流体的性质和水/岩反应过程等都具有重要意义。本文主要对青龙山超高压变质榴辉岩绿帘石中的原生包裹体进行了研究,根据流体包裹体在矿物中形态及分布特征、化学成分及与其它矿物中的流体包裹体进行对比,发现绿帘石中的流体包裹体可分为三类:

**A 高盐度的水溶液包裹体:**以液相  $H_2O$  + 气相  $H_2O$  (体积 < 5%) 为主,主要分布于 II 阶段-III 阶段绿帘石斑晶核部,形态多为长管状或不规则状,可达  $20 \times 40 \mu m$ ,其长轴平行绿帘石的 b 轴(图 1E)。其全结冰温度为  $-63.2 \sim -43.0^\circ C$ ,初熔温度为  $-30.0 \sim -39.0^\circ C$ ,最后熔化相为冰,为近似  $NaCl + MgCl_2 + H_2O$  或  $NaCl + FeCl_2 + H_2O$  体系(卢焕章等, 2004)。在绿帘石中的此类包裹体无法由初熔温度具体确定是  $NaCl + MgCl_2 + H_2O$  体系或  $NaCl + FeCl_2 + H_2O$  体系,且由于这些包裹体细小,水食盐熔化温度很难准确测定,为了便于对比,统一用 wt% NaCl 来表示盐度。

此类包裹体冰点温度低,介于  $-23.0 \sim -15.8^\circ C$ ,峰值温度为  $-21.4 \sim -20.2^\circ C$ ,最后熔化相为冰,相应盐度为 19.3wt% NaCl 至略大于 23.2wt% NaCl\*, 多数盐度为 22.5wt% NaCl 至略大于 23.2wt% NaCl。

气液两相包裹体的均一温度为  $166.3 \sim 248.5^\circ C$ ,峰值温度为  $180 \sim 220^\circ C$  (图 3A, B); 相应的流体密度为  $1.000 \sim 1.075 g/cm^3$ 。

在超高压变质榴辉岩的斑晶绿帘石中的包体石英、基质石英和磷灰石中存在孤立、或面状分布的高盐度的水溶液包裹体,其盐度与绿帘石中的高盐度水溶液包裹体相似,但其初熔温度为  $-53.0 \sim -48.0^\circ C$ ,为近似的  $NaCl + CaCl_2 + H_2O$  体系(翟伟等, 2005)。

**B 中高盐度的水溶液包裹体:**有液相  $H_2O$  + 气相  $H_2O$  (体积 < 5%) 和纯液相包裹体两类,呈长管状或极不规则的条带状,长轴平行绿帘石 b 轴方向(图 1F),主要分布于 II 阶段-III 阶段绿帘石斑晶边部。此类包裹体初熔温度为  $-39.0 \sim -22.0^\circ C$ ,可能为含  $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$  等金属阳离子的  $NaCl-H_2O$  溶液,其冰点温度为  $-14.0 \sim -9.0^\circ C$ ,盐度为 12.9 ~ 17.8wt% NaCl; 冰点峰值温度为  $-11.0 \sim -9.0^\circ C$ ,相应的盐度为 12.6 ~ 16.0wt% NaCl; 均一温度为  $147.0 \sim 231.0^\circ C$ ,气液两相包裹体均一温度峰值为  $180 \sim 240^\circ C$  (图 3A, C),相应的流体密度为  $0.947 \sim 1.044 g/cm^3$ 。在绿帘石斑晶的磷灰石包体中也存在呈群状分布的此类包裹体(翟伟等, 2005)

**C 中等盐度的水溶液包裹体:**有液相  $H_2O$  + 气相  $H_2O$  (体积 < 5%) 和纯液相包裹体两类。主要分布于颜色较深的

IV 阶段形成的绿帘石斑晶或基质绿帘石中,此类包裹体呈不规则状分布,定向性不如前两类明显(图 1G)。其初熔温度在  $-35.0 \sim -21.0^\circ C$ ,可能在  $NaCl-H_2O$  溶液中含有  $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$  等金属阳离子。其冰点温度为  $-8.0 \sim -4.0^\circ C$ ,盐度为 6.4 ~ 11.7 wt% NaCl,冰点峰值温度为  $-7.0 \sim -4.0^\circ C$ ,相应的盐度为 6.4 ~ 10.5wt% NaCl; 气液两相包裹体的均一温度为  $156.0 \sim 219.0^\circ C$ ,峰值位于  $180 \sim 220^\circ C$  (图 3A, D),流体密度为  $0.917 \sim 0.973 g/cm^3$ 。在绿帘石斑晶的石英包体、基质石英中发育呈孤立状、面状或群状分布的此类包裹体,其初熔温度主要集中在  $-20.0 \sim -25.0^\circ C$ ,为近似的  $NaCl + H_2O$  体系。

此外翟伟等(2005)在青龙山榴辉岩的基质石英中还发现有盐度为 0.2 ~ 3.3wt% NaCl 的低盐度水溶液包裹体。绿帘石斑晶中早期进变质作用阶段形成的呈包体矿物存在的绿帘石由于矿物颗粒细小,尚未在其中发现有可进行流体研究的包裹体。青龙山榴辉岩绿帘石中出现的三种盐度的水溶液包裹体,在变斑晶的包体矿物石英或基质矿物石英、磷灰石等中均有发现,说明并不存在 Giaramita *et al.* (1994) 认为的 H 扩散,超高压变质作用及后期的折返过程中并不存在大规模的流体作用,流体的活动主要限于矿物晶体颗粒范围。绿帘石流体包裹体中金属阳离子成分与同期石英等矿物中的流体包裹体的差别可能是由于捕获后与主矿物绿帘石发生离子交换反应的结果。

青龙山榴辉岩中尚未发现含独立  $CO_2$ 、 $CH_4$  等相的流体包裹体, Klemd *et al.* (1994) 及 Gao *et al.* (2001) 对榴辉岩的研究认为绿帘石类矿物形成于非常低的  $X_{CO_2}$  的条件下,这与 Poli *et al.* (1998) 的实验研究结果是一致的。而 Boundy *et al.* (2002) 认为榴辉岩相变质条件下  $X_{CO_2}$  低是由于  $CO_2$  组分进入固体相或在深俯冲作用过程中以去水作用为主,所以绿帘石类矿物常与富水流体共生。

#### 5 绿帘石化学成分与流体演化

Zhang *et al.* (2005a) 对青龙山超高压变质榴辉岩及片麻岩进行了研究,认为其变质作用演化过程可分为四个阶段,第一阶段为超高压变质前的绿帘角闪岩相进变质作用阶段,以石榴石斑晶核部的角闪石、绿帘石、斜长石及钾长石等矿物包体组合为特征,其变质温度为  $550 \sim 600^\circ C$ ,压力为  $P = 10 kbar$ ; 第二阶段为柯石英榴辉岩相的超高压变质作用阶段,以石榴石、绿辉石、多硅白云母、蓝晶石、柯石英、绿帘石、金红石矿物组合为代表,变质温度为  $740 \sim 830^\circ C$ ,压力为  $30 \sim 39 kbar$ ; 第三阶段为石英榴辉岩相退变质阶段,以出现钠

\* 由于  $NaCl + H_2O$  体系的初熔温度为  $-21.6^\circ C$ ,冰点为初熔温度时的盐度为 23.2wt% NaCl,而冰点温度为  $-23.0^\circ C$  时(低于  $-21.6^\circ C$ )不能换算为  $NaCl + H_2O$  体系的盐度,因而用略大于 23.2wt% NaCl 表示

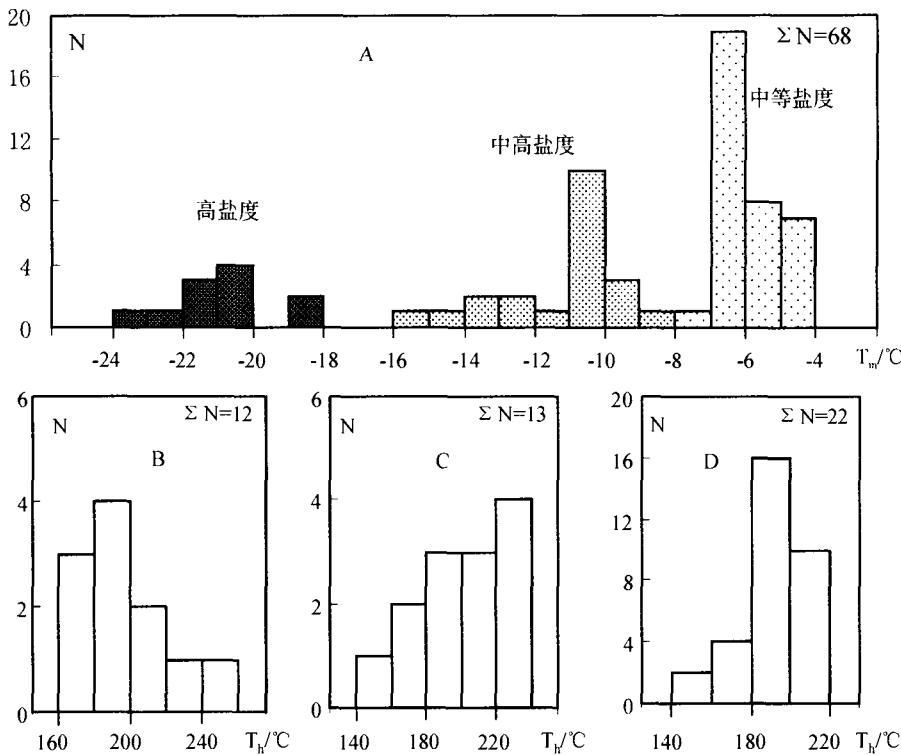


图3 绿帘石中不同盐度水溶液包裹体冰点温度( $T_m$ )与均一温度( $T_h$ )直方图。A-冰点温度。B-、C-、D-、高盐度、中高盐度、中等盐度水溶液包裹体均一温度。

Fig.3 Histograms for freezing and homogenization temperatures of aqueous inclusions with different salinities in epidotes.

A-freezing temperatures, B-, C-, D-homogenization temperatures of high-salinity, moderate-high-salinity, medium-salinity aqueous inclusions.

质或钠钙质角闪石、绿帘石、钠云母斑晶、石英及石榴子石为特征,变质温度为720~740℃,压力为23kbar;第四阶段为角闪岩相退变质阶段,以石榴石、绿辉石被角闪石和斜长石后合金或蓝晶石被斜长石或钠云母、绿帘石取代为特征,变质温度为630℃,压力为10kbar。

青龙山超高压变质榴辉岩经历了以上四个阶段不同温压条件的变质演化过程,其中绿帘石的化学成分及流体相的性质均发生了相应的系统演化。I阶段绿帘石呈包体状出现于后期的绿帘石斑晶中,绿帘石取代更早期矿物钾长石、黑云母、绿泥石等矿物。Enami *et al* (1993)、Zhang *et al* (1995, 2005a)在东海县超高压变质榴辉岩中也报告了石榴石斑晶中的形成于绿帘角闪岩相进变质作用阶段的钾长石、角闪石、绿帘石、斜长石等矿物组合,因此I阶段绿帘石形成于绿帘角闪岩相进变质阶段,其化学成分以含铁高为特征,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量高为14.796~17.84%,而CaO的含量低为18.822~20.898%, $X_{Fe} = 0.413 \sim 0.486$ 。II阶段-III阶段的绿帘石形成于超高压变质柯石英榴辉岩相阶段石英榴辉岩相阶段,主要呈斑晶出现,其中有柯石英假像、绿辉石、石榴石、蓝晶石等矿物包体。其化学成分出现连续的变化,核部相对富Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,为11.933~12.993%,而CaO和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量低,分别为21.419~22.333%和23.111~23.557%, $X_{Fe} = 0.322 \sim 0.358$ ,形成于柯石英榴辉岩相变质阶段;边部Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量

低,为9.628~10.138%,CaO和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量高,分别为22.0~23.17%和25.15~25.399%, $X_{Fe} = 0.275 \sim 0.286$ ,形成于石英榴辉岩相阶段。IV阶段绿帘石形成于退变质角闪岩相阶段,其化学成分与第I阶段相似,也以富含Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为特征,为15.561~15.649%,CaO为22.493~22.931%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为20.255~20.282%, $X_{Fe} = 0.433$ 。其化学成分与P-T演化轨迹如图4。

绿帘石的化学成分受原岩成分、温度、压力以及 $f_{O_2}$ 的制约,由I阶段的绿帘角闪岩相到II阶段-III阶段的柯石英榴辉岩相和石英榴辉岩相,绿帘石的化学成分发生突变,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>显著突然降低,而CaO和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量增加;而由超高压/高压变质阶段到退变质的角闪岩相阶段,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>显著突变性的增加,而CaO和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量降低,也反映了苏鲁超高压变质带快速俯冲快速折返的过程;II阶段柯石英榴辉岩相到III阶段的石英榴辉岩相,绿帘石化学成分呈现连续的变化,出现成分环带,反映了折返早期压力逐渐降低的过程。绿帘角闪岩相进变质阶段和角闪岩相退变质阶段绿帘石富集Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,其 $X_{Fe}$ 分别为0.413~0.486和0.433,可能与地壳浅部流体作用及 $f_{O_2}$ 增加有关。

对于苏鲁-大别超高压变质带演化过程中的流体包裹体许多学者已进行了研究,Fu *et al* (2001, 2002, 2003a, 2003b)对大别山高压/超高压变质岩中流体包裹体的研究认为,峰

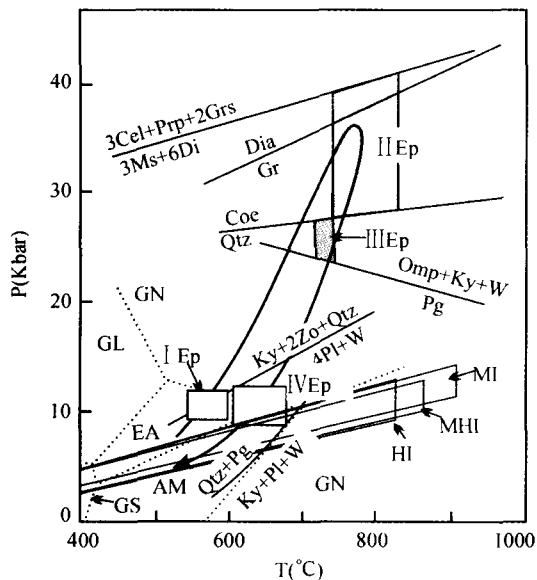


图4 绿帘石演化 P-T 轨迹与流体包裹体等容线 (据 Zhang et al, 2005 修改)

I Ep-、II Ep-、III Ep-、IV Ep- I、II、III、IV 阶段形成的绿帘石。HI-、MHI-、MI-绿帘石中高盐度、中高盐度、低盐度流体包裹体等容线范围。AM-角闪岩相。EA-绿帘角闪岩相。EC-榴辉岩相。GN-麻粒岩相。GS-绿片岩相。GL-蓝片岩相。

Fig. 4 The P-T path of epidote and the isochron of aqueous inclusions (modified after Zhang et al, 2005)

I Ep-, II Ep-, III Ep-, IV Ep-epidote formed in I, II, III, IV stage. HI-, MHI-, MI-the isochron range of high - salinity, moderate - high - salinity, medium - salinity aqueous inclusions in epidote. AM-amphibolite facies. EA-epidote amphibolite facies. EC-eclogite facies. GN-Granulite facies. GS-greenschist facies. GL-glaucophane schist facies.

期变质前的进变质作用阶段出现低盐度的水溶液, 变质作用峰期出现非极性流体相  $N_2 (\pm CO_2 \pm CH_4)$  和高盐度水溶液形成于高压/超高压变质作用峰期阶段, 麻粒岩相退变质作用阶段出现大量外来的  $CO_2$  流体, 而低盐度的流体形成于后期的退变质作用阶段; Xiao 等 (2000, 2002) 认为南大别高压/超高压变质岩进变质作用阶段以富 Ca 流体为特征, 而高盐度流体包裹体代表峰期变质作用阶段的流体, 而北大别以出现典型的麻粒岩相的  $CO_2$  包裹体为主; 沈昆等 (2003a、2003b, 2005) 和 Zhang et al (2004c) 对东海中国大陆科学钻探先导孔岩心研究认为蓝晶石英岩所含黄玉、片麻岩所含锆石中的低盐度  $H_2O-CO_2$  包裹体代表超高压变质峰期前捕获的流体, 榴辉岩中的高盐度、中高盐度的流体包裹体代表超高压变质峰期流体, 榴辉岩或片麻岩中的中-低盐度水溶液包裹体形成于角闪岩相退变质阶段或更晚期; 徐莉等 (2005) 对 CCSD 中石英脉的流体包裹体进行了较系统的研究, 发现其中存在盐水溶液包裹体 (I 类)、NaCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (II 类) 和  $N_2-CH_4$  纯气相 (III 类) 等三类流体包裹体, 榴辉岩和片麻岩

中石英脉流体包裹体的组成和地球化学特征存在明显区别, 但它们各自相似于其寄主岩石中的石英颗粒中包裹体。

青龙山超高压变质榴辉岩的绿帘石斑晶中存在三种类型的水溶液包裹体, 高盐度及中高盐度的流体包裹体主要出现在 II 阶段-III 阶段形成的绿帘石斑晶中, 由于在超高压变质作用过程中的去水作用, 超高压变质峰期水进入在超高压条件下稳定的含水矿物或名义上的无水矿物 (Scambelluri et al, 1998; Su et al, 2004), 绿帘石中高盐度 (22.5wt% NaCl 至略大于 23.2wt% NaCl) 的流体包裹体可能形成于柯石英榴辉岩相变质阶段, 而中高盐度 (12.6 ~ 16.0wt% NaCl) 的流体包裹体形成于石英榴辉岩相变质阶段, 而中等盐度 (6.4 ~ 11.7 wt% NaCl) 的流体包裹体形成于角闪岩相变质阶段, 也是引起苏鲁-大别超高压变质带发生角闪岩相变质作用的主要因素。绿帘石中 II 阶段-III 阶段形成的流体包裹体的等容线均从其相应的变质 P-T 范围的下部经过, 而退变质角闪岩相变质阶段形成的水溶液包裹体的等容线近于通过此阶段绿帘石形成的 P-T 范围 (图 4), 说明在超高压变质岩折返过程中超高压/高压变质作用阶段形成的流体包裹体发生了再平衡, 流体的密度已不能反应其形成时的密度。而角闪岩相退变质过程中形成的流体包裹体近于保存了其形成时的流体密度。

## 6 结论

(1) 青龙山超高压变质榴辉岩中绿帘石的形成分为四个阶段: 早期绿帘角闪岩相进变质阶段的绿帘石, 其化学成分以含铁高为特征,  $Fe_2O_3$  为 14.796 ~ 17.84%, CaO 和  $Al_2O_3$  含量低,  $X_{Fe} = 0.413 \sim 0.486$ , 绿帘石取代早期矿物钾长石、黑云母、绿泥石等矿物而呈包体矿物出现于后期形成的绿帘石斑晶中; 柯石英榴辉岩相变质阶段和石英榴辉岩相变质阶段形成的绿帘石, 其化学成分呈现连续的变化, 核部相对富  $Fe_2O_3$ , 为 11.933 ~ 12.993%, 而 CaO 和  $Al_2O_3$  含量低,  $X_{Fe} = 0.322 \sim 0.358$ , 形成于柯石英榴辉岩相变质阶段; 边部  $Fe_2O_3$  的含量低, 为 9.628 ~ 10.138%, CaO 和  $Al_2O_3$  的含量高,  $X_{Fe} = 0.275 \sim 0.286$ , 形成于石英榴辉岩相阶段; 晚期退变质角闪岩相阶段形成的绿帘石, 其化学成分与绿帘角闪岩相变质阶段相似, 也以富含  $Fe_2O_3$  为特征, 而 CaO 和  $Al_2O_3$  含量低,  $X_{Fe} = 0.433$ 。绿帘石化学成分的变化也反映了苏鲁超高压变质带快速俯冲快速折返的过程。

(2) 青龙山超高压变质岩绿帘石中存在三种盐度的水溶液包裹体, 高盐度 (22.5wt% NaCl 至略大于 23.2wt% NaCl) 的水溶液包裹体形成于柯石英榴辉岩相变质阶段, 而中高盐度 (12.6 ~ 16.0wt% NaCl) 的水溶液包裹体形成于石英榴辉岩相变质阶段, 而中等盐度 (6.4 ~ 11.7 wt% NaCl) 的溶液包裹体形成于角闪岩相变质阶段。

(3) 在绿帘石斑晶的包体矿物石英或基质矿物石英、磷灰石等均发现与绿帘石中盐度相似的流体包裹体, 说明



超高压变质作用及后期的折返过程中并不存在大规模的流作用,流体的活动限于矿物晶体颗粒范围。超高压/高压变质作用过程中形成的流体包裹体在折返过程中已发生了再平衡,流体的密度已不能反应其形成时的原始密度。

**致谢** 野外工作中得到中国大陆科学钻探现场指挥部蔡慈高级工程师、陈世忠博士和孙立文工程师的热情帮助,中国科学院广州地球化学研究所陈林丽协助完成了电子探针分析,在此致以诚挚的谢意!

## References

- Bird D K, Spieler A R. 2004. Epidote in geothermal systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56: 235 - 300
- Boundy T M, Donohue C L, Essene E J, Mezger K, Austrheim H. 2002. Discovery of eclogite facies carbonate rocks from the Lindas Nappe, Caledonides, Western Norway. *Journal of Metamorphic Geology*, 20: 649 - 667
- Brown P E. 1989. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *American Mineralogist*, 74: 1390 - 1393
- Cong B L, Wang Q C. 1996. A review on researches of UHPM rocks in the Dabieshan-Sulu Region. In: Cong B L (Ed.), *Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in The Dabieshan-Sulu Region of China*. Beijing: Science Press, 1 - 170
- Enami M, Liou J G, Mattinson C G. 2004. Epidote minerals in high P/T metamorphic terranes: subduction zone and high- to ultrahigh-pressure metamorphism. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56: 346 - 398
- Enami M, Zang Q, Yin Y. 1993. High-pressure eclogites in northern Jiangsu-southern Shandong province, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 11: 389 - 603
- Fu B, Tourret JLR, Zheng YF. 2001. Fluid inclusions in coesite-bearing eclogites and jadeite quartzite at Shuanghe, Dabie Shan (China). *Journal of Metamorphic Geology*, 19: 531 - 547
- Fu B, Zheng YF, Tourret JLR *et al.* 2002. Petrological, isotopic and fluid inclusion studies of eclogites from Sujiahe, NW Dabie Shan (China). *Chem. Geol.*, 187: 107 - 128
- Fu B, Tourret JLR, Zheng YF *et al.* 2003a. Fluid inclusions in granulites, granulitized eclogites and garnet clinopyroxenites from the Dabie-Sulu terranes, eastern China. *Lithos*, 70: 293 - 319
- Fu B, Tourret JLR, Zheng YF. 2003b. Remnants of premetamorphic fluid and oxygen isotopic signatures in eclogites and garnet clinopyroxenite from the Dabie-Sulu terranes, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 561 - 578
- Xiao Y, Hoefs J, Van den Kerkhof A M *et al.* 2000. Fluid history of UHP metamorphism in Dabie Shan, China: a fluid inclusion and oxygen isotope study on the coesite-bearing eclogite from Bixiling. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 139: 1 - 16
- Xiao Y, Hoefs J, Van den Kerkhof A M *et al.* 2002. Fluid evolution during HP and UHP metamorphism in Dabie Shan, China: constraints from mineral chemistry, Fluid inclusions and stable isotopes. *Journal of Petrology*, 43: 1505 - 1527
- Gao J, Klemd R. 2001. Primary fluids entrapped at blueschist to eclogite transition: evidence from the Tianshan meta-subduction complex in northwestern China. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 142: 1 - 14
- Giaramita M J, Sorensen S S. 1994. primary fluids in low - temperature eclogites; evidenced from two subduction complexes ( Dominican Republic and California, USA). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 117: 279 - 292
- Grapes R H, Hoskin P W O. 2004. Epidote group minerals in low-medium pressure metamorphic terranes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56: 301 - 345
- Hirajima T, Zhang R, Li J Cong B. 1992. Petrology of the nybite-bearing eclogite in the Donghai area, Jiangsu province, eastern China. *Mineralogical Magazine*, 56: 37 - 46
- Klemd R. 2004. Fluid inclusions in epidote minerals and fluid development in epidote-bearing rocks. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56: 197 - 234
- Klemd R, Matthes S, Schuessler U. 1994. Reaction textures and fluid behaviour in very high-pressure calc-silicate rocks of the Mischbacher gneiss complex, Bavaria, Germany. *Journal of Metamorphic Geology*, 12: 735 - 745
- Poli S, Schmidt M W. 1998. The high-pressure stability of zoisite and phase relationships of zoisite-bearing assemblages. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 130: 162 - 175
- Rumble D, Giorgis D, Ireland T, Zhang Z, Xu H F, Yui T-F, Yang J S, Xu Z Q, Liou J G. 2002. Low delta <sup>18</sup>O Zircon, U-Pb Dating, and the Age of the Qinglongshan Oxygen and Hydrogen Isotope Anomaly near Donghai in Jiangsu Province, China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66: 2299 - 2306
- Rumble D, Yui T-F. 1998. The Qinglongshan oxygen and hydrogen isotope anomaly near Donghai in Jiangsu Province, China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62: 3307 - 3321
- Scambelluri M, Pennacchioni G, Phillipot P. 1998. Salt-rich aqueous fluids formed during eclogitization of metabasites in the Alpine continental crust ( Austroalpine Mt. Emilius Unit, Italian Western Alps). *Lithos*, 43: 151 - 167
- Schmidt M W, Poli S. 2004. Magmatic epidote. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 56: 399 - 430
- Shen K, Zhang Z, van den Kerkhof X Y, Hoefs J. 2003. Metamorphic fluids and its evolution in the UHP rocks from the pre-pilot hole of Jiangsu province, China. *Acta Geologica Sinica*, (4): 522 - 532 (in Chinese with English abstract)
- Shen K, Zhang Z M, Sun X M, *et al.* 2005. Composition and evolution of ultrahigh-pressure metamorphic fluids: a fluid inclusion study of the drill core from the main hole of Chinese Continental Scientific Drilling Program. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 489 - 504 (in Chinese with English abstract)
- Su W, Ji Z, Ye K *et al.* 2004. Distribution of hydrous components in jadeite of the Dabie Mountains. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 222: 85 - 100
- Xu L, Sun X M, 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)
- Ye K, Yao Y, Katayama I *et al.* 2000. Large areal extent of ultrahigh-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China: new implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss. *Lithos*, 52: 157 - 164
- Yui T-F, Rumble D, Lo C H. 1995. Unusually low  $\delta^{18}\text{O}$  ultra-high-pressure metamorphic rocks from the Sulu terrain, eastern China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 2859 - 2864
- Zhai W, Sun X M, 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)
- Zhang R Y, Hirajima T, Banno S, Cong B L, Liu J G. 1995. Petrology of ultrahigh-pressure rocks from the southern Su-Lu ultrahigh-pressure metamorphic terrane, China. *Journal Metamorphic Geology*, 12: 169 - 186
- Zhang R Y. 1992. Petrogenesis of high pressure metamorphic rocks in the Su-Lu and Dianxi regions, China. PhD Thesis, Kyoto University, 1 - 167
- Zhang Z, You Z, Han Y, Song L. 1995. Petrology, Metamorphic process and genesis of the Dabie-Sulu eclogite belt, east-central China. *Acta Geologica Sinica*, 69(4): 306 - 324 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Z, Xu Z, Liu F, Meng F, Yang T, Li T, Yin X. 2002. Composition and metamorphism of the root of the southern Sulu

- orogen. Regional Geology of China, 21 (10): 609 - 616 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Z, Xiao Y, Liu F, Lio J G, Hoefs. 2005a. Petrogenesis of UHP metamorphic rocks from Qinglongshan, southern Sulu, east-central China. *Lithos*, 81: 189 - 207
- Zhang Z M, Rumble D, Liou J G, Xiao Y L, Gao Y J. 2005b. Oxygen isotope geochemistry of rocks from the Pre-Pilot Hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD-PPH1). *American Mineralogist*, 90: 857 - 863
- Zhang Z, Shen K, Xiao Y, van den Kerkhof A M, Hoefs J and Liou J G. 2005c. Fluid composition and evolution attending UHP metamorphism; Study of fluid inclusions from drill cores, southern Sulu belt, eastern China. *Inter. Geol. Rev.*, 47: 297 - 309
- Zhang Z, Zhang J, You Z, Sheng K. 2005d. Ultrahigh-pressure metamorphic P-T-t path of the Sulu orogenic belt, eastern central China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 257 - 270 (in Chinese with English abstract)
- Zheng Y, Fu B, Li Y *et al.* 1998. Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of ultrahigh-pressure eclogite from the Dabie mountains and the Sulu terrane. *Earth and Planetary Science Letters*, 155, 113 - 129
- Zheng Y, Fu B, Gong B *et al.* 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China; implications for geodynamics and fluid regime. *Earth-Science Reviews*, 62: 105 - 161
- 附中文参考文献**
- 李秋立, 李曙光, 候振辉, 洪吉安, 杨蔚. 2004. 青龙山榴辉岩高压变质新生锆石 SHRIMP U-Pb 定年、微量元素及矿物包裹体研究. *科学通报*, 49(22): 2329 - 2334
- 沈昆, 张泽明, Van den Kerkhof A M 等. 2003a. 南苏鲁超高压榴辉岩中罕见的原生高盐度盐水溶液包裹体. *科学通报*, 48(10): 1076 - 1081
- 沈昆, 张泽明, Van den Kerkhof A M 等. 2003b. 江苏东海预先导孔 (CCSD-PP1) 超高压岩石变质流体及其演化. *地质学报*, 77(4): 522 - 532
- 沈昆, 张泽明, 孙晓明等. 2005. 超高压变质流体的组成与演化: 中国大陆科学钻探工程主孔岩心的流体包裹体研究. *岩石学报*, 21(2): 489 - 504
- 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
- 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
- 张泽明, 游振东, 韩郁菁等. 1995. 大别-苏鲁榴辉岩带的岩石学、变质作用过程及成因研究. *地质学报*, 69(4): 306 - 324
- 张泽明, 许志琴, 刘福来等. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔 (100 ~ 2050m) 榴辉岩岩石化学研究. *岩石学报*, 20(1): 27 - 41
- 张泽明, 许志琴, 刘福来等. 2002. 南苏鲁造山带根部的物质组成及变质作用. *地质通报*, 21(10): 609 - 616
- 张泽明, 张金凤, 游振东, 沈昆. 2005. 苏鲁造山带超高压变质作用及其 P-T-t 轨迹. *岩石学报*, 21(2): 257 - 270