

苏鲁三清阁榴辉岩中柯石英的发现及其地质意义探讨

朱孟番, 朱永峰

(造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 在苏鲁三清阁多硅白云母榴辉岩中发现了柯石英包体, 该榴辉岩与超高压含菱镁矿大理岩共生。石榴石中存在的柯石英残晶和多晶石英假相包体表明榴辉岩的变质压力超过2.8 GPa。运用石榴石-单斜辉石 Fe^{2+} -Mg温度计和多硅白云母压力计估算结果表明, 矿物核部的平衡压力为3.1~3.5 GPa ($T=650\sim689\text{ }^{\circ}\text{C}$), 边部的平衡压力为2.9~3.3 GPa ($T=652\sim671\text{ }^{\circ}\text{C}$)。与石榴石伴生的绿辉石普遍发育石英出溶结构。在磷灰石中观察到金属硫化物出溶体。磷灰石富含OH, F, Cl和S等挥发份, 这些挥发性组分的深循环对地壳和地幔之间的相互作用研究具有重要意义。通过磷灰石, 苏鲁—大别俯冲带能够将大量($\sim 80\,000\text{ Mt}$) OH, F和Cl携带到地幔深处。

关键词: 苏鲁地体; 超高压变质; 榴辉岩; 柯石英; 磷灰石; 出溶结构

中图分类号: P588.34

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2007) 03-0581-09

位于中国东部的大别—苏鲁造山带是中国中央造山带的重要组成部分, 其中低温高压变质岩的研究对扬子板块与华北板块的碰撞及其相关地球动力学的探讨具有极其重要的意义(董申保等, 1986)。董申保院士主持完成的“1:400万中国变质地质图”是中国大陆地球动力学研究的里程碑。在此基础上经过多年工作, 在大别山榴辉岩中发现了柯石英(Okey et al, 1989; Wang et al, 1989), 在苏鲁榴辉岩中发现了柯石英假相(Yang and Smith, 1989; Enami and Zang, 1990)和柯石英(Hirajima et al, 1990; Zhang et al, 1990), 从而提出了中国大别山—苏鲁超高压变质带(Wang et al, 1989; Zhang et al, 1990; Cong and Wang, 1999)。后来, 在苏鲁超高压地体中成功实施了中国大陆科学钻探(CCSDB)工程(Xu et al, 1998, Zhu et al, 2007)。继在哈萨克斯坦Kokchetav超高压地体中发现白云石分解结构(Zhu and Ogasawara, 2002a; Shatsky et al, 2006)之后, 在苏鲁含菱镁矿大理岩中发现了白云石分解的岩石学

记录(Zhu, 2004; 朱永峰, 2005), 从而标志着该地区的大陆地壳物质俯冲深度超过180 km。本文对苏鲁赣榆地区三清阁榴辉岩以及其中绿辉石的出溶结构和磷灰石的金属硫化物出溶结构进行研究, 报道了在石榴石中发现的柯石英包体, 并在此基础上讨论该地区超高压变质岩石的折返过程。

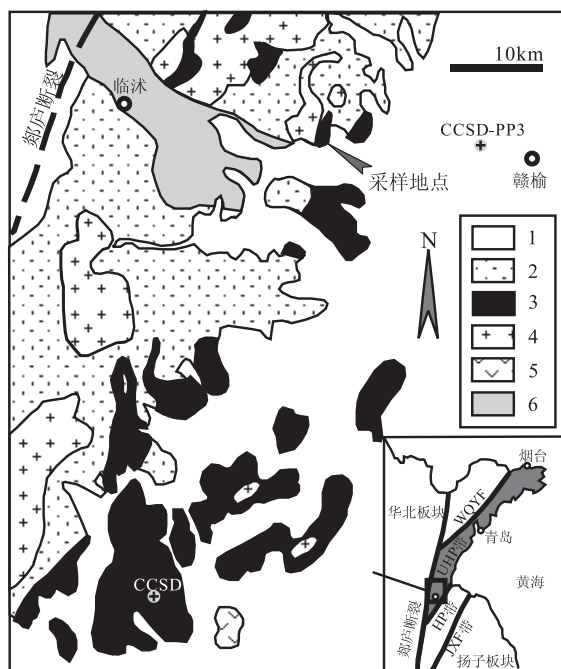
1 地质背景

苏鲁地体是大别高压变质带的东延部分(董申保等, 1986), 位于NNE向郯庐断裂以东, 北部以五莲—青岛—烟台断裂(WYF)为界与中朝克拉通相邻, 南部以嘉山—响水断裂(JXF)为界与扬子克拉通相邻(图1)。根据不同岩性的分布特征, 将苏鲁地体从南到北进一步划分为南部高压变质带、中部非常高压变质带(VHP, 1.5~2.4 GPa)和北部超高压变质带(650~800 $^{\circ}\text{C}$, >2.8 GPa, Xu et al, 2006)。南部高压变质带的主要岩性为含蓝闪石的副片麻岩、石英岩和大理岩; 中部非常高压变质带上部的主要岩性为蓝晶石绿泥石石英

收稿日期: 2007-05-17; 修回日期: 2007-06-14

基金项目: 国家重大基础研究项目(2003CB716502)和国家自然科学基金(40572033)资助

作者简介: 朱孟番, 男, 1985年生, 本科生, 岩石学、地球化学专业; *通讯作者: 朱永峰, 北京大学教授, 博士生导师。E-mail: yfzhu@pku.edu.cn



1-第四系; 2-花岗质片麻岩; 3-变质表壳岩; 4-中生代花岗岩; 5-第三系玄武岩; 6-白垩系沉积盆地
1-Quaternary; 2-granitic gneiss; 3-metamorphosed supercrustal rocks; 4-granite; 5-Tertiary basalt; 6-Cretaceous sedimentary basin

图1 江苏东海地区地质简图

(据1:25万连云港幅地质图; 引自张泽明等, 2002)

Fig. 1 Geological sketch map of the Donghai area in Sulu UHP metamorphic belt (from Zhang et al, 2002)

岩、含蓝晶石云母石英片岩和含蓝晶石钠长石石英片岩, 下部的的主要岩性为大理岩。北部超高压变质带又可以分为两部分, 较南侧主要由含柯石英副片麻岩、蓝晶石石英岩、硬玉石英岩、云母片岩和角闪岩等上地壳岩石组成, 较北侧主要由花岗片麻岩、榴辉岩和超镁铁质岩构成。

江苏省东海、临沭和赣榆县位于苏鲁超高压变质(UHP)带的西南端, 本区由石榴石橄榄岩、榴辉岩、石英多硅白云母片岩、硬玉石英岩、蓝晶石多硅白云母片岩、石榴石多硅白云母片岩、蓝晶石石英岩、多硅白云母石英岩和含绿辉石大理岩等多种UHP变质岩组成, 其原岩主要包括以橄榄岩为代表的超基性岩类、以榴辉岩为代表的基性岩类、以片麻岩和片岩为代表的中酸性岩类、以石英岩为代表的硅质岩类和以大理岩为代表的碳酸盐岩类(张泽明等, 2002)。在超高压变质地体中, 花岗片麻岩和变质表壳岩作为榴辉岩和超基性岩的围岩分别占70%和25%, 榴辉岩和超基性岩只占5%(许志琴等, 2003)。

对苏鲁地区地表露头和CCSD钻孔样品的研究表明, 榴辉岩以及作为榴辉岩和超基性岩围岩的花岗片麻岩、各种类型的副片麻岩、斜长角闪岩、蓝晶石石英岩、大理岩等岩石的锆石中均保存了柯石英以及绿辉石、多硅白云母、石榴石和蓝晶石等超高压变质矿物(刘福来等, 2003, 2005)。表明花岗片麻岩和表壳变质岩等同榴辉岩一起经历了原位超高压变质作用(Xu et al, 2006)。苏鲁地体经过超高压变质后, 在折返过程中经历了角闪岩相等多期退变阶段。苏鲁地体的变质演化可以划分为8个阶段(张泽明等, 2005): (1)绿帘角闪岩相进变质阶段; (2)超高压变质峰期(6.0~7.0 GPa); (3)柯石英榴辉岩相退变质阶段(3.0~4.0 GPa); (4)石英榴辉岩相退变质阶段; (5)麻粒岩相退变质阶段; (6)角闪岩相退变质阶段; (7)绿帘角闪岩相退变质阶段; (8)绿片岩相退变质阶段。Xu et al (2006)发现苏鲁地体南部的高压带和北部的超高压带在年代学上有所区别, 认为南部高压带是折返到地表的扬子板块上地壳, 密度小, 俯冲深度较浅, 在250 Ma时俯冲到30 km深处, 并于232 Ma折返; 而北部超高压带属于折返到地表的扬子板块较深部的地壳, 密度较大, 俯冲到较深的位置, 在240~220 Ma时俯冲到>80 km深处, 并于220~200 Ma折返。

样品采集于江苏赣榆县佃马厂三清阁附近(GPS坐标: 34°53'01"N, 118°52'27"E, 图1)。在大理石开采场可清楚地观察到榴辉岩在大理岩中呈条带状或透镜状, 局部露头上大理岩在榴辉岩中呈脉状或透镜状, 两种岩石共生, 并发生同构造变形。共生的榴辉岩和大理岩均发生了不同程度的退变, 退变的大理岩可以划分为弱退变的菱镁矿大理岩、中等退变的滑石大理岩和强烈退变的透闪石大理岩(朱永峰, 2005)。在弱退变的菱镁矿大理岩中, 观察到了记录白云石分解反应, 代表超过180 km深度发生的变质作用(Zhu, 2004; 朱永峰, 2005)。在与该大理岩共生的多硅白云母榴辉岩中还发现了磷灰石的磁黄铁矿出溶结构(朱永峰 & Massonne, 2005)。

2 榴辉岩的岩石学特征

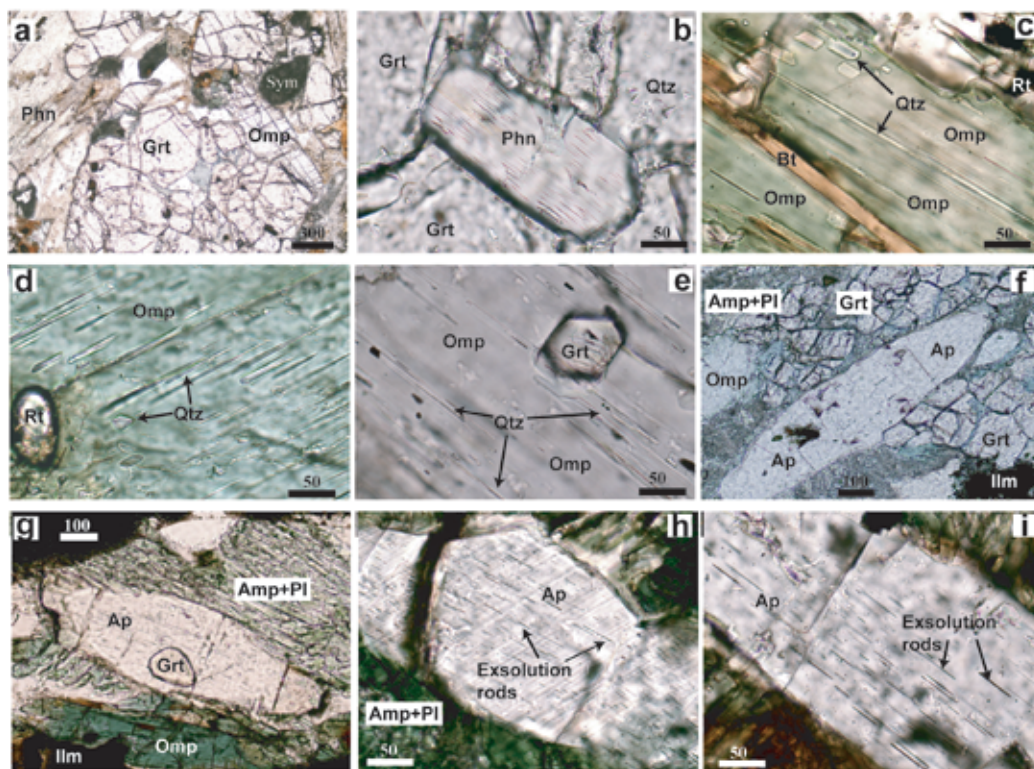
本文所研究的样品包括弱退变的多硅白云母

榴辉岩(样品Sqq03, Sqq08, LYG15, LYG16, LYG17, LYG18, LYG19, LYG21, LYG22)和明显退变的多硅白云母榴辉岩(样品LYG43、LYG44, LYG45, LYG46和LYG47)。基本未退变(或者弱退变)的多硅白云母榴辉岩主要由石榴石、绿辉石和多硅白云母组成(图2)。石榴石颗粒巨大(达5 mm), 含量一般超过30%。石榴石通常含绿辉石、多硅白云母、金红石、磷灰石、石英/柯石英、锆石等包体。在退变明显的样品中, 石榴石颗粒边部发育由斜长石和角闪石组成的冠状体。

绿辉石通常具有后成合晶结构(由斜长石+角闪石组成), 绿辉石内部常见石榴石、金红石、磷灰石和多硅白云母包体。绿辉石发育丰富的出溶现象, 出溶体大多呈针状或长条状, 粗细均匀, 直径约1 μm , 长度可达数百 μm (图2c, d,

e)。部分出溶体呈片晶(宽约10 μm , 图3c的左上角), 我们用激光拉曼光谱仪对这些出溶体进行检测, 发现图谱中有明显的石英峰(466 cm^{-1})和绿辉石的特征峰(681 cm^{-1} , 1015 cm^{-1}), 表明绿辉石中的出溶矿物为石英。

退变榴辉岩中大部分多硅白云母具有棕色黑云母退变边。几乎所有样品都含磷灰石, 磷灰石一般与石榴石和绿辉石共生, 并在磷灰石中见到石榴石包裹体(图2g)。磷灰石自形程度高, 多呈柱状, 大小差别巨大, 有些颗粒甚至比石榴石颗粒还大(图2f)。几乎所有磷灰石都发育出溶结构。磷灰石中的出溶体为不透明矿物, 为粗细均匀的针状物(出溶体宽约1 μm , 长可达数十 μm , 图3g, h, i)。这些出溶体在反射光下为淡黄(反射色, 类似磁黄铁矿)。可以明显区分出两组相



a) 弱退变的多硅白云母榴辉岩; b) 多硅白云母与石榴石和石英接触; c-e) 绿辉石中出溶的石英条纹和片晶, 绿辉石中存在石榴石包体(e); f) 榴辉岩中巨大的磷灰石变斑晶与石榴石共生; g) 磷灰石中含石榴石包裹体, 磷灰石中出溶的金属硫化物条纹; h-i) 磷灰石中的针状出溶体。所有标尺附近的数字代表标尺长度, 单位: μm 。Amp-角闪石, Ap-磷灰石, Bt-黑云母, Grt-石榴石, Ilm-钛铁矿, Omp-绿辉石, Phn-多硅白云母, Pl-斜长石, Qtz-石英, Rt-金红石, Sym-后成合晶
a) Weakly retrograded eclogite; b) Phengite coexists with garnet and Quartz; c-e) Quartz lamellae and garnet inclusion in omphacite; f) A large apatite grain coexists with garnet grains; g) Garnet inclusion in apatite, apatite shows exsolution texture; h-i) Apatites with two sets of opaque exsolution aciculae. All the numbers near the scale bars represent the length of the scale bar with the unit of μm . Amp-amphibole, Ap-apatite, Bt-biotite, Grt-garnet, Ilm-ilmenite, Omp-omphacite, Phn-phengite, Pl-plagioclase, Qtz-quartz, Rt-rutile, Sym-symplectite (Pl + Amp)

图2 三清阁多硅白云母榴辉岩的显微照片(均为单偏光)

Fig. 2 Photomicrographs of phengite eclogites in Sanqinge region. All the pictures are under plain polarized light

互垂直的针状集合体, 其中一组沿磷灰石的长轴方向排列, 另一组出溶针较短, 或者呈小点(出溶针状体延长方向与薄片切片近于直交时)。

总之, 三清阁多硅白云母榴辉岩中石榴石占岩石体积的25%~40%, 颗粒边部经常观察到斜长石+角闪石后成合晶。绿辉石的冠状结构相对比较发育, 绿辉石含量为10%~25%。多硅白云母5%~10%, 通常被黑云母交代。各种冠状体(后成合晶)的总量大于10%(明显退变的榴辉岩样品中后成合晶占的比例可以高达50%以上), 充填在主要矿物相之间。磷灰石的含量一般超过3%(个别样品中磷灰石的含量超过5%)。金红石的含量一般在2%~5%之间变化。

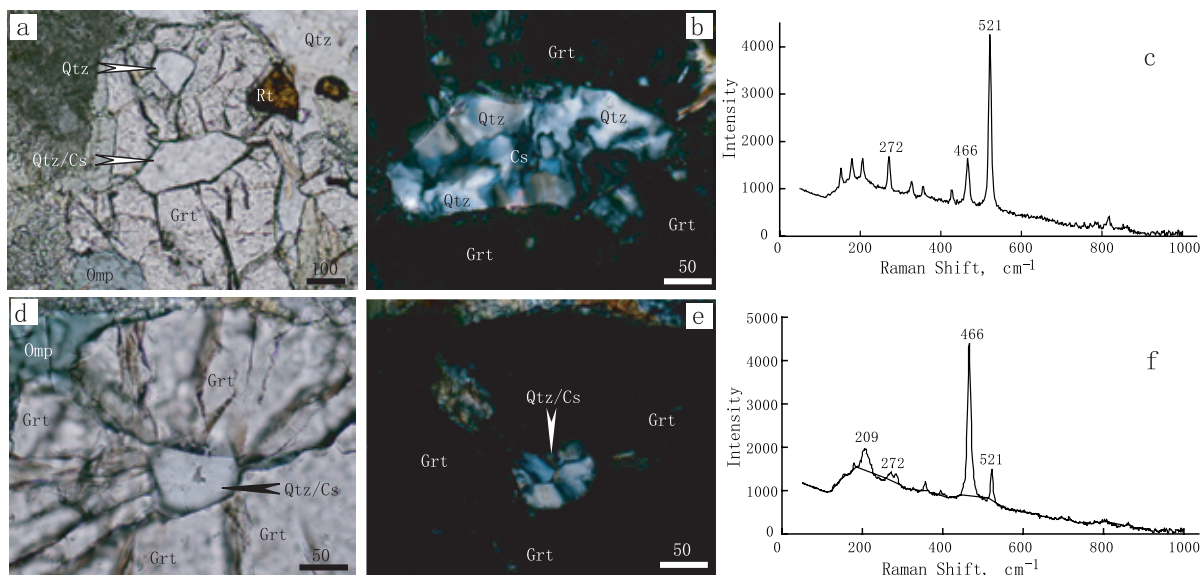
3 石榴石中的柯石英包体

石榴石中的石英包裹体大小为50~200 μm , 多呈椭圆状。石英包裹体周围有典型的放射状裂纹, 以石英颗粒为中心向外发散(图3a, b, d, e)。在柯石英退变成石英的过程中, 由于结构变化会导致体积膨胀, 从而使其寄主矿物石榴石破裂。因此, 通常将石英包裹体周围的放射状裂纹作为柯石英残余及超高压变质岩经历退变的标志。在

正交偏光下观察, 发现这些石英包裹体由很多细小的石英颗粒组成(图3b, e)。这些细小石英多晶集合体形成一个外壳, 围绕着位于包裹体核部的不规则颗粒(即柯石英残余)。激光拉曼光谱测定结果显示(图3c, f), 石英包裹体的激光拉曼光谱中存在明显的柯石英强峰(521 cm^{-1}), 并有若干柯石英的弱峰出现(272 cm^{-1} , 182 cm^{-1} , 152 cm^{-1}), 同时见石英的特征峰(466 cm^{-1})。表明石榴石中被放射状裂纹所包围的石英包裹体由柯石英退变而来, 并且在其中还保存着柯石英残余。含石英的石榴石发育放射状裂隙, 只有在少数情况下在包体核心保存了柯石英, 绝大多数与放射状裂隙伴生的石英集合体中没有柯石英。尽管如此, 柯石英的存在标志着三清阁多硅白云母榴辉岩经历了超高压变质作用。

4 矿物化学以及变质温度计算

对较新鲜的多硅白云母榴辉岩中主要矿物进行了电子探针测试, 石榴石、绿辉石和多硅白云母的电子探针测定结果用Minpet2.02处理后得到矿物分子式(表1), 石榴石中的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 利用Droop(1987)方法计算得出, 单斜辉石中 Fe^{2+} 和



a和d为单偏光下的显微照片; b和e为正交偏光显微照片(样品号为LYG46); c和f为柯石英的拉曼光谱。

Cs-柯石英, Grt-石榴石, Omp-绿辉石, Qtz-石英, Rt-金红石

a and d are under plain polarized light; b and e are under crossed-polarized light; c and f are the Raman spectra of quartz and coesite (Sample LYG46). Cs-coesite, Grt-garnet, Omp-omphacite, Qtz-quartz, Rt-rutile

图3 石榴石中的多晶石英假相、柯石英残余、放射状裂纹以及柯石英的拉曼光谱

Fig. 3 The polycrystalline quartz, the coesite relics in the core, and the surrounding radiating cracks within garnet

Fe^{3+} 通过电价平衡方法得出。石榴石中镁铝榴石的摩尔分数在23%~30%之间,铁铝榴石的摩尔分数在44%~48%之间,钙铝榴石的摩尔分数在20%~29%之间(表1,图4a)。绿辉石中硬玉的摩尔分数为36.5%~45.0%(表1,图4b)。

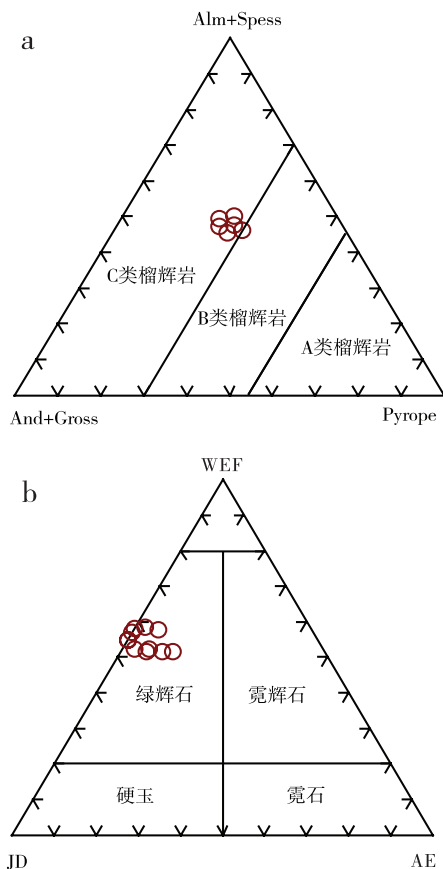
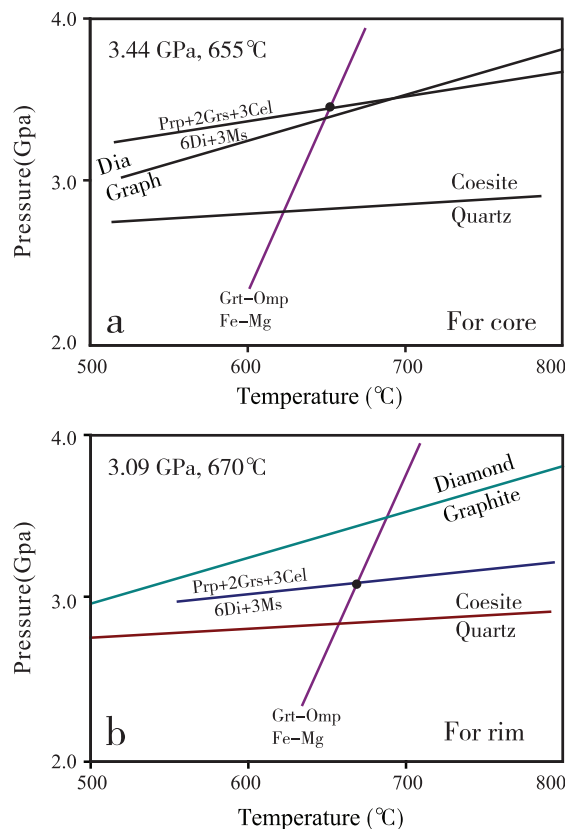


图4 石榴石(a)和单斜辉石(b)端元组分图解

Fig. 4 End-member diagrams of garnets (a) and omphacite (b)

Fe^{2+} 和Mg在共生的石榴石和单斜辉石之间的分配可以用如下交换反应表示(Ellis and Green, 1979): $1/3 \text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{CaFeSi}_2\text{O}_6 = 1/3 \text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ 。 Fe^{2+} 和Mg的分配系数可以用来计算变质反应的温压条件。由于本文在石榴石中发现了柯石英,作者以2.8 GPa这一柯石英稳定存在的压力下限为条件,用不同地质温度计(Ellis and Green, 1979; Krogh, Ravna 2000; Krogh Ravna and Terry, 2004),通过共生石榴石和单斜辉石的化学成分(表1)估算榴辉岩的变质温度,结果为627~701℃。利用Krogh and Terry (2004)温度-压力计可以同时获得温度和压力(处理方法类似Song et al, 2003)。计算

结果表明(图5),石榴石、绿辉石和多硅白云母核部的平衡压力主要集中在3.1~3.5 GPa ($T = 650 \sim 689^\circ\text{C}$),边部的平衡压力主要集中在2.9~3.3 GPa ($T = 652 \sim 671^\circ\text{C}$)。



a) 依据矿物核部成分获得的平衡关系,其交点所标定的
 $p = 3.44 \text{ GPa}$, $T = 655^\circ\text{C}$;
b) 依据矿物边部成分获得的平衡关系,其交点所标定的
 $p = 3.09 \text{ GPa}$, $T = 670^\circ\text{C}$ 。

图5 石榴石、绿辉石和多硅白云母平衡温压计算示意
Fig. 5 p - t diagrams for Sanqing coesite phengite eclogite (sample Sq08) with assemblage Grt + Omp + Phn core (a) and rim (b). Abbreviations are after Kretz (1983).

5 讨论和结论

苏鲁超高压变质带早就发现了柯石英(Hirajima et al, 1990; Zhang et al, 1990)和金刚石(徐树桐等, 2005),但在赣榆地区,只有刘福来等(2003)在片麻岩、大理岩和榴辉岩样品的锆石中发现了柯石英包裹体。本文首次在三清阁榴辉岩中发现了柯石英,柯石英被包裹在石榴石中。依据矿物成分计算获得的温压条件表明,榴辉岩的变质温度在650~689℃区间变化,早期矿物组合(矿物的核部)与晚期的组合(矿物的边部)在变质

察到丰富的磷灰石 (~3%)。按照磷灰石的化学通式 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$, 得出F, Cl, OH的含量分别为3.41%, 6.37%和3.05%, 粗略估计, 俯冲的古秦岭洋壳通过磷灰石带进地幔的F, Cl, OH分别为 $2.15 \times 10^{10} \text{ t}$ 、 $3.99 \times 10^{10} \text{ t}$ 和 $1.92 \times 10^{10} \text{ t}$ 。

致谢: Massonne H-J教授 (Stuttgart Univ.) 参加了野外工作并对我们的工作提出了有益建议; 魏春景教授 (北京大学) 阅读了初稿并提出了建设性的修改意见; 中国大陆钻探首席科学家许志琴院士对我们的工作提供了指导和协助; 《高校地质学报》两位审稿专家提出的具体修改意见对完善本文有重要作用, 特此感谢。

谨以此文祝贺董申保院士九十华诞, 敬贺他指导和具体组织实施的中国变质作用领域研究所获得的巨大成功。

参考文献 [References]:

- 陈晶, 曾令森, 陈方远, 等. 2006. 江苏青龙山磷灰石中出溶体的初步研究. *岩石学报*, 22: 1921–1926.
- [Chen Jing, Zeng Lingsen, Chen Fangyuan, et al. 2006. Primary study of exsolution in apatite from the Qinglongshan, Jiangsu province. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 1921–1926. (in Chinese with English abstract)]
- Cong B, Wang Q. 1999. The Dabie-Sulu UHP rocks slice: Review and prospect. *Chinese Science Bulletin*, 44: 1074–1085.
- Dobrzynetska L F, Schweinehage R, Massonne H J, et al. 2002. Silica precipitates in omphacite from eclogite at Alpe Arami, Switzerland: evidence of deep subduction. *Journal of Metamorphic Geology*, 20: 481–492.
- 董申保, 等. 1986. 1: 400万中国变质地质图. 北京: 地质出版社.
- [Dong Shenbao, et al. 1986. Metamorphic Map of China. 1: 4000 000. Explanatory Text. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)]
- 董申保, 等. 1986. 中国变质作用及其与地壳演化的关系. 北京: 地质出版社, 233页.
- [Dong Shenbao, et al. 1986. Metamorphism in China and Its Relation with the Crustal Evolution. Beijing: Geological Publishing House, P 233 (in Chinese).]
- Droop G T R. 1987. A general equation for estimating Fe^{3+} concentration in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51: 431–435.
- Ellis D J, Green D H. 1979. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 71: 13–22.
- Enami M, Zang Q J. 1990. Quartz pseudomorph after coesite in eclogites from Shandong Province, east China. *American Mineralogist*, 75: 381–386.
- Hirajima T, Ishiwatari A, Cong B, et al. 1990. Coesite from Mengzhong eclogite at Donghai county, northeastern Jiangsu province, China. *Mineralogical Magazine*, 54: 579–583.
- Katayama I, Parkinson C D, Okamoto K, et al. 2000. Supersilic clinopyroxene and silica exsolutions in UHPM eclogite and pelitic gneiss from the Kokchetav massif, Kazakhstan. *American Mineralogist*, 85: 1368–1374.
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 37: 33–96.
- Krogh Ravna E, Terry M P. 2004. Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists—an evaluation of equilibria among garnet-clinopyroxene-kyanite-phengite-coesite/quartz. *J. Metamorphic Geol.*, 18, 211–219.
- Krogh Ravna E. 2000. The garnet-clinopyroxene Fe^{2+} -Mg geothermometer: an updated calibration. *J. Metamorphic Geol.*, 18: 211–219.
- 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: 433–438.
- [Liang Fenghua, Zeng Lingsen, Chen Jing, et al. 2006. Discovery of apatite with copper-bearing pyrrhotite exsolution in an eclogite from Rongcheng, eastern Shandong province. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 433–438. (in Chinese with English abstract)]
- Liu F, Xu Z, Katayama I, Yang J, et al. 2001. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Lithos*, 59: 199–215.
- 刘福来, 张泽明, 许志琴. 2003. 苏鲁地体超高压变质矿物的三维空间分布. *地质学报*, 77: 69–84.
- [Liu Fulai, Zhang Zeming, Xu Zhiqin. 2003. Three-dimensional distribution of ultrahigh-pressure minerals in Sulu terrane. *Acta Geologica Sinica*, 77: 69–84. (in Chinese with English abstract)]
- 刘福来, 许志琴, 薛怀民, 等. 2005. 中国大陆科学钻探主孔0~4500米变质岩石锆石中保存的超高压矿物包体. *岩石学报*, 21: 277–292.
- [Liu Fulai, Xu Zhiqin, Xue Huaimin, et al. 2005. Ultrahigh-pressure mineral inclusions preserved in zircons separated from eclogite and its country-rocks in the main drill hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project (0~4 500 m). *Acta Petrologica Sinica*, 21: 277–292. (in Chinese with English abstract)]
- Luth R W. 2001. Experimental determination of the reaction aragonite+magnesite = dolomite at 5 to 9 GPa. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 141: 222–232.
- Okey A I, Xu S, Sengor A M C. 1989. Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China. *European Journal of Mineralogy*, 1: 595–598.
- Sato K, Katsura T. 2001. Experimental investigation on dolomite dissociation into aragonite + magnesite up to 8.5 GPa. *Earth and Planetary Science Letters*, 184: 529–534.
- Shatsky V S, Ragozin A L, Sobolev N V. 2006. Some aspects of metamorphic evolution of ultrahigh-pressure calc-silicate rocks of the Kokchetav massif. *Geologiya i Geofizika*, 47: 105–118.
- Song S G, Yang J S, Xu Z Q, et al. 2003. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam, Northern Tibet, NW China. *J. Metamorphic Geol.*, 21: 631–644.
- Wang X M, Liou J G, Mao H G. 1989. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China. *Geology*, 17: 1085–1089.
- 吴时国, 殷鸿福. 1994. 根据古生物地理和古地磁资料探讨秦岭二叠纪的海盆重建. *西北地质科学*, 15: 35–44.
- [Wu Shiguo, Yin Hongfu. 1994. Reconstruction of the Permian Qinling sea basin based on paleo-bio-geographic and paleomagnetic data. *Northwest Geoscience*, 15: 35–44. (in Chinese with English abstract)]
- 徐树桐, 刘贻灿, 陈冠宝, 等. 2005. 大别山及苏鲁地区微粒金刚石分类及其大地构造意义. *地质通报*, 24: 1081–1088.
- [Xu Shutong, Liu Yican, Chen Guanbao, et al. 2005. Classification of microdiamonds from eclogites of the Dabie Mountains and Sulu area, east-central China, and their tectonic implications. *Geological Bulletin of China*, 24: 1081–1088. (in Chinese with English abstract)]
- Xu Z, Yang W, Zhang Z, et al. 1998. Scientific significance and site-

- selection researches of the first Chinese Continental Scientific Deep Drillhole. *Continental Dynamics*, 3: 1–13.
- 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 2003. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制. *地质学报*, 77: 433–450.
- [Xu Zhiqin, Zhang Zemin, Liu Fulai, et al. 2003. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, central China. *Acta Geologica Sinica*, 77: 433–450. (in Chinese with English abstract)]
- Xu Z, Zeng L, Liu F, et al. 2006. Polyphase subduction and exhumation of the Sulu high-pressure-ultrahigh-pressure metamorphic terrane. // Hacker B R, McClelland W C, Liou J G, eds. Ultrahigh-Pressure Metamorphism: Deep Continental Subduction. *Geological Society of America Special Papers*, 403: 93–113.
- Yang J, Smith D C. 1989. Evidence for a former sanidine-coesite-eclogite at Lansantou, Eastern China, and the recognition of the Chinese ‘Su-Lu coesite-eclogite province’, East China. *Terra Abstract*, Third International Eclogite Conference, 1: 26.
- Zhang L F, Ellis D J, Jiang W B. 2002. Ultrahigh-pressure metamorphism in western Tianshan, China, Part I. Evidence from inclusions of coesite pseudomorphs in garnet and from quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites. *American Mineralogist*, 87: 853–860.
- Zhang R, Cong B, Hirajima T, et al. 1990. Coesite eclogite in Su-Lu region, eastern China. EOS, *Transactions of American Geophysical Union*, 71: 1708.
- Zhang R Y, Hirajima T, Banno S. 1995. Petrology of ultrahigh-pressure rocks from the southern Su-lu region, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 13: 659–675.
- 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: 609–616.
- [Zhang Zeming, Xu Zhiqin, Liu Fulai, et al. 2002. Composition and metamorphism of the root of the southern Sulu orogen. *Geological Bulletin of China*, 21: 609–616. (in Chinese with English abstract)]
- 张泽明, 张金凤, 游振东, 等. 2005. 苏鲁造山带超高压变质作用及其 P-T 轨迹. *岩石学报*, 21 (2): 257–270.
- [Zhang Zeming, Zhang Jinfeng, You Zhendong, et al. 2005. 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 F, Fu B, Cong 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 Review*, 1276: 1–57.
- Zhu Y F. 2004. Dolomite decomposition structure in UHP marble: evidence for deep subduction (>200 km) of continental crust. 32nd International Geological Congress, Florence, Italy, Abstract volume, 153–157.
- Zhu Y F, Ogasawara Y. 2002a. Carbon recycled into the deep Earth: Evidenced by dolomite dissociation in subduction-zone rocks. *Geology*, 30: 947–950.
- Zhu Y F, Ogasawara Y. 2002b. Phlogopite and coesite exsolution from super-silicic clinopyroxene. *International Geology Review*, 44: 831–836.
- 朱永峰. 2005. 超高压变质大理岩中的白云母分解结构: 大陆地壳物质深循环的新证据. *岩石学报*, 21: 347–354.
- [Zhu Yongfeng. 2005. Dolomite decomposition texture in ultrahigh pressure metamorphic marble: new evidence for the deep recycling of continental materials. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 347–354. (in Chinese with English abstract)]
- 朱永峰, Massonne H J. 2005. 磷灰石中磁黄铁矿出溶结构的发现. *岩石学报*, 21: 405–410.
- [Zhu Yongfeng, Massonne H J. 2005. Discovery of pyrrhotite exsolution in apatite. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (2005) 405–410. (in Chinese with English abstract)]
- Zhu Y F, Massonne H J, Theye T. 2007. Eclogites from the Chinese continental scientific drilling borehole, their petrology and different P-T evolutions. *Island Arc*, in press.

Discovery of Coesite in Sanqinge Eclogite, Sulu UHP Terrane, E China, and Its Geological Significance

ZHU Meng-fan, ZHU Yong-feng

(MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Here we report the discovery of coesite in phengite eclogite at Sanqinge, Ganyu county, Sulu UHP terrane, east China. These eclogites coexist with the UHP magnesite-bearing marble. The coesite relics and polycrystalline quartz after coesite are observed within garnet grains with radial fractures. This finding indicates that the Sanqinge phengite eclogites underwent metamorphism at pressure of >2.8 GPa. Metamorphic pressure for the mineral assemblages of cores correspond to 3.1~3.5 GPa ($T = 650\sim 689^\circ\text{C}$) and their rim assemblages correspond to 2.9~3.3 GPa ($T = 652\sim 671^\circ\text{C}$) by using garnet-omphacite Fe^{2+} -Mg geothermometer and phengite barometer. Quartz exsolution and sulfide exsolution textures occur in omphacites and apatites, respectively. Apatite contains abundant volatiles such as OH, F, Cl, and S, and its subduction to deep mantle is of great significance for the cycle of these volatiles. Based on our approximate estimation, the mass of OH, F and Cl subducted into deep mantle via Sulu-Dabie subduction zone was in the order of 80 000 Mt.

Key words: Sulu terrain; ultrahigh-pressure metamorphism; phengite eclogite; coesite; apatite; exsolution texture