

苏鲁超高压变质带桃行榴辉岩及高压脉体中流体包裹体研究*

范宏瑞 刘爽 胡芳芳 杨奎锋 金成伟

FAN HongRui, LIU Shuang, HU FangFang, YANG KuiFeng and JIN ChengWei

中国科学院地质与地球物理研究所 矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2008-03-10 收到, 2008-07-27 改回.

Fan HR, Liu S, Hu FF, Yang KF and Jin CW. 2008. Fluid inclusions in the ultra-high pressure metamorphic rocks and high pressure metamorphic veins at Taohang in the Sulu terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2003–2011

Abstract Taohang eclogites in the southeastern Shandong Province are located in the middle part of the Sulu ultra-high-pressure metamorphic terrane, eastern China. Eclogites occur as blocks in granitic gneisses. Fluid inclusions in eclogites and eclogite-facies quartz veins at Taohang have preserved remnants of peak metamorphic and exhumation fluids. Detailed fluid inclusion studies reveal trapping of five type fluid inclusions in high and ultrahigh pressure eclogite minerals and vein quartz. These are A-type $N_2 \pm CH_4$ inclusion trapped at high and ultra-high pressure eclogite-facies metamorphic condition, B-type pure- CO_2 liquid phase inclusion with higher density trapped during granulite-facies overprinting metamorphism of eclogites, C-type CO_2-H_2O inclusion and D-type hypersaline inclusion trapped in high pressure eclogite-facies re-crystallization stage, and E-type low salinity H_2O inclusion trapped in the latest stage of ultrahigh pressure exhumation (amphibolite-facies retrogression). The possibility of deciphering the relative chronology of the fluid pulses can provide fluid evolution history during exhumation of ultra-high-pressure metamorphic rocks. Identification of crowded-distributing pure- CO_2 liquid inclusions with higher density trapped in garnet of eclogites provides an evidence for granulite-facies overprinting metamorphism at Taohang.

Key words Fluid inclusion; Eclogite; Quartz vein; Exhumation; Taohang; Sulu terrain

摘要 桃行榴辉岩是苏鲁超高压变质带中段主要榴辉岩体密集分布区之一。流体包裹体研究表明,榴辉岩矿物及高压脉体石英中捕获有五种类型的流体包裹体:在超高压—高压榴辉岩相条件下捕获的 $N_2 \pm CH_4$ 包裹体;在榴辉岩发生麻粒岩相叠加变质作用期间被捕获的 B 型纯 CO_2 液相包裹体;在高压榴辉岩重结晶阶段被捕获的 C 型 CO_2-H_2O 包裹体和 D 型高盐度水溶液包裹体;超高压岩石折返过程中的最晚阶段(角闪岩相退变质甚至更晚)捕获的 E 型低盐度水溶液包裹体。利用榴辉岩矿物及高压脉体石英中捕获的流体包裹体类型及期次可以重建超高压变质作用板片折返过程中的流体性状与演化,而石榴石中捕获的纯 CO_2 包裹体为本区榴辉岩相岩石遭受了麻粒岩相叠加提供了佐证。

关键词 流体包裹体;榴辉岩;石英脉;折返;桃行;苏鲁

中图法分类号 P588.348

鲁东南诸城市桃行榴辉岩带位于苏鲁超高压变质带的中部(图 1a),是该变质带中主要的榴辉岩块体密集分布区之一。在大地构造位置上,苏鲁超高压变质榴辉岩带位于郯庐断裂带以东,为秦岭—大别—苏鲁巨型榴辉岩带被该断裂错断相对北移的部分。杨建军(1991)首次在该地区的榴辉岩中发现了柯石英假像,此后许多学者也曾对本区及邻区的榴

辉岩岩石学、地球化学、同位素年代学等做过详细的研究(张儒媛等,1993; Ye and Hirajima, 1996; Enami and Nagasaki, 1999; Yao *et al.*, 2000; 徐树桐等,2003; 龚冰等,2004; Liu *et al.*, 2006; Gong *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2007; 许志琴,2007; Yang and Power, 2008),这些成果为探讨本区流体在榴辉岩变质和折返过程中的行为与演化奠定了良好的基础。

* 本文受国家自然科学基金项目(40673032 和 40721062)资助。

第一作者简介:范宏瑞,男,1963年生,博士,研究员,岩石学和地球化学专业, E-mail: fanhr@mail.iggcas.ac.cn

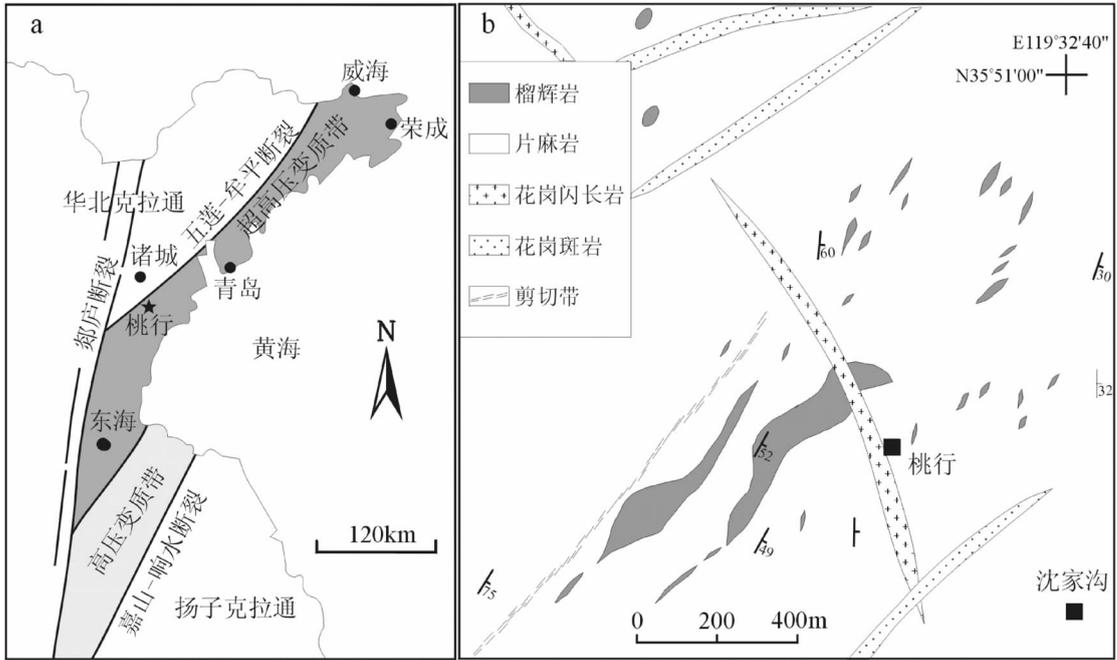


图1 苏鲁超高压变质带区域构造简图(a)及桃行地区地质图(b)(据 Yao *et al.*, 2000 改绘)

Fig. 1 Geological sketch map of Sulu ultra-high pressure terrane (a) and Taohang area (b) (Modified after Yao *et al.*, 2000)

板片俯冲和折返过程中的流体活动是碰撞造山带变质作用、岩浆活动乃至元素分散与聚集研究的重要内容之一 (Miller *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2003)。流体活动程度和总量多少不仅影响造山带的地球动力学过程,而且对壳幔物质再循环及其有关的弧岩浆具有重要意义 (Philipot and Rumble, 2000; Scambelluri and Philipot, 2001; 郑永飞, 2004)。利用同位素、热力学平衡计算流体活度等间接方法可以对板块俯冲和折返过程中的变质流体进行研究 (Zheng *et al.*, 2003; 储雪蕾等, 2005),但高压—超高压变质矿物和脉体中捕获的流体包裹体则是目前唯一能直接观察变质流体相存在和组成的手段 (Fu *et al.*, 2003; 卢焕章等, 2004),而受到研究者的重视。近年来,沈昆等 (1996, 2003a, b, 2005)、Fan *et al.* (2003, 2005a)、刘福来和许志琴 (2004)、Ferrando *et al.* (2005a, b)、范宏瑞等 (2005)、翟伟等 (2005)、Zhang *et al.* (2005, 2006, 2007, 2008)、梁业恒等 (2007),对苏鲁地区高压—超高压变质岩矿物中流体包裹体进行了研究,探讨了在这一变质折返过程中流体的性状及演化,但他们的主要研究对象多集中在苏鲁南部东海地区 (中国大陆科学超深钻) 的榴辉岩及其相关脉体,而对中—北苏鲁地区超高压岩石较少开展研究。本文利用岩相学、流体包裹体显微测温 and 激光拉曼光谱等方法,对苏鲁中部桃行地区超高压变质岩及榴辉岩内细脉石英中的流体包裹体进行测试研究,探讨变质折返过程中流体的演化。

1 区域地质

桃行地区的变质岩主要包括石榴石黑云母片麻岩、蓝晶

石多硅白云母石英岩、含角闪石片麻岩、石榴辉石岩、含透辉石和透闪石大理岩及榴辉岩等 (Yao *et al.*, 2000)。本区的变质岩在宏观上被一系列北北东向的韧性剪切带分割成规模不等的一些透镜状岩块,而榴辉岩又呈透镜状分布在区域片麻岩中 (图 1b),其规模大小不等,大者长 500 余 m,宽约 100m,小者长仅数 m,宽不足 1m。

桃行榴辉岩峰期变质矿物组合为石榴石 + 绿辉石 + 单斜辉石 + 多硅白云母 + 蓝晶石 + 锆石 + 金红石 + 柯石英,绿辉石的硬玉组分为约 60% (Yao *et al.*, 2000)。其峰期变质条件为温度 800 ~ 850 °C、压力 ≥ 2.8 GPa。在超高压峰期之后榴辉岩经历了早期的高压麻粒岩到榴辉岩过渡相和晚期角闪岩相的复杂变质演化 (Yao *et al.*, 2000),早期的退变质作用导致了基质中的绿辉石分解为主要由含硬玉组分 35% 左右的绿辉石和钠长石组成的高压麻粒岩到榴辉岩过渡相组合。温压估算 (Yao *et al.*, 2000) 表明这期叠加变质作用发生于较高的温压条件 (820 ~ 830 °C, 1.5 ~ 1.7 GPa),推测发生高压麻粒岩相过渡榴辉岩相变质的深度为 40km ~ 50km。随后约 35% 硬玉组分的绿辉石在 20km ~ 30km 深的地壳深度又退变为角闪岩相的普通辉石 + 斜长石 + 角闪石后成合晶,温度 740 ~ 700 °C、压力 0.9 ~ 0.7 GPa (Yao *et al.*, 2000)。与苏鲁超高压变质带北部威海和荣成地区的榴辉岩类似 (Nakamura and Hirajima, 2000),桃行地区的榴辉岩也是沿着近等温降压的 *PT* 轨迹自地幔折返到地壳深度,所不同的是桃行地区榴辉岩受高压麻粒岩相变质发生在更深的深度 (Ye *et al.*, 2000)。桃行地区榴辉岩中高压麻粒岩相到过渡榴辉岩相叠加变质作用的发育说明,这一地区的超高压变质

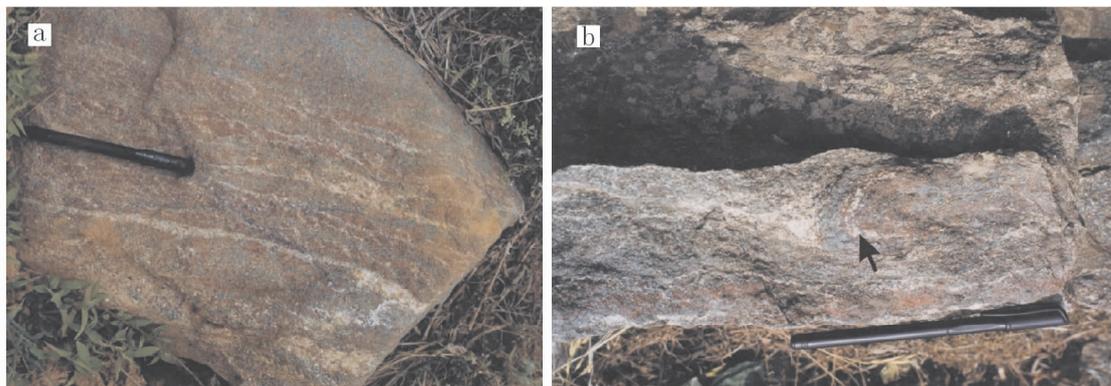


图2 榴辉岩中条带状(a)和褶皱状(b,箭头所指)石英脉

Fig.2 Banded (a) and folded (b, arrow pointed) quartz veins of eclogite-facies in the eclogite at Taohang

岩在折返到地幔浅部时存在着明显的流体活动(叶凯,2001)。Ye *et al.* (2000)在桃行地区花岗质片麻岩锆石中找到了柯石英及其假像包裹体和绿辉石、多硅白云母等矿物包裹体,证明这些花岗质片麻岩围岩同样经历了超高压变质作用。

2 研究样品及测试方法

根据主要的组成矿物相,桃行地区榴辉岩大致可以分为两大类:1)正常榴辉岩:主要由30%~60%石榴石、20%~50%绿辉石及少量其它矿物如石英(2%~10%)、蓝晶石(0~5%)、黝帘石(0~5%)、金红石(0~2%)组成;2)富石榴榴辉岩:主要由大量石榴石(60%~90%)和石英(5%~20%),及少量绿辉石(5%~15%)、黝帘石(0~5%)、蓝晶石(0~5%)、多硅白云母(0~5%)和金红石(2%~5%)组成,其中常有绿辉石组成的细脉穿插,细脉中的绿辉石粒度相对较粗。富石榴榴辉岩常出现在榴辉岩块的核心部位。另外,在该地区还存在有条带状或脉状石英集合体(图2a),它们一般数mm至数cm宽,长数十cm至1m以上,有时在榴辉岩块内围绕榴辉岩发生褶皱(图2b),部分脉体切割榴辉岩块。郑永飞(2004)认为,这些石英脉未经历过峰期超高压变质作用,而是在板块折返过程中介于超高压与高压榴辉岩相之间的某一 $P-T$ 条件下形成的,但它们明显是在高压榴辉岩相重结晶作用之前形成的,因此属于高压变质而不是超高压变质产物。本次流体包裹体研究的矿物样品主要为正常榴辉岩中的石榴石、石英、绿辉石和蓝晶石,以及榴辉岩块体内呈小脉体状产出的脉石英。

流体包裹体的温度和盐度测试是在中国科学院矿产资源研究重点实验室 Linkam THMS 600 型显微冷热台上完成的,并利用 FLUID INC 公司提供的人工合成包裹体标样对热台进行温度标定,该冷热台在 $< -120^{\circ}\text{C}$ 时的测定精度约为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $-120 \sim -70^{\circ}\text{C}$ 区间为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $-70 \sim +100^{\circ}\text{C}$ 区间为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、 $100 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 区间为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。单个包裹体的激光拉曼光谱测定是在该实验室 Renishaw RM-2000 型仪器上进行。

流体包裹体显微测试过程中,低温下($< 30^{\circ}\text{C}$)升温速率为 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$,中、高温下($> 100^{\circ}\text{C}$)升温速率约为 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$,而在相变化温度附近,升温速率减小到 $< 0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。利用流体包裹体计算程序 MacFlincon (Brown and Hagemann, 1995)及 Bakker (1997)提供的流体包裹体数据处理程序对测试结果进行了数据计算,并利用 Thiéry *et al.* (1994)的图解获得含碳包裹体的摩尔体积及摩尔分数。低盐度 H_2O 溶液流体包裹体的盐度是根据包裹体冷冻回温后得到的最后一块冰融化的温度(冰点),再利用 Bodnar (1993)的方程计算获得,而含石盐子晶的高盐度包裹体的盐度则是根据石盐的熔化温度,利用 Hall *et al.* (1988)的方程计算获得。

3 流体包裹体

3.1 流体包裹体岩相学

桃行地区榴辉岩石榴石、石英和绿辉石中含有较少的流体包裹体,但在脉体石英中含有较为丰富的流体包裹体。根据室温下相态及显微测温 and 激光拉曼光谱测试,榴辉岩矿物及脉石英中主要分布有五种类型包裹体:(A) $\text{N}_2 \pm \text{CH}_4$ 包裹体(图3a);(B)纯 CO_2 包裹体(图3b和3c);(C) $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 包裹体(图3d和3e);(D)高盐度 H_2O 溶液包裹体(图3f和3g);(E)低盐度 H_2O 溶液包裹体(图3h)。

A型富 N_2 包裹体一般稀少出现,本次研究仅在部分未发生任何退变榴辉岩样品内被石榴石包裹的未变形石英颗粒中找到少量这种类型的包裹体(图3a)。这类包裹体多为负晶形,个体一般 $< 12\mu\text{m}$,呈孤立状或束状分布。

B型纯 CO_2 包裹体主要赋生在石榴石中,与石榴石相邻的石英内也偶有出现,室温下它类似于空洞,只有冷冻到一定温度后包裹体内才能出现 CO_2 气泡,显示其在常温下为单一液相。纯 CO_2 液相包裹体以孤立状或群组状(指纹状)出现在石榴石中(图3b),个体一般 $< 5\mu\text{m}$ 至 $15\mu\text{m}$,椭圆状、长条形至不规则形(图3c),在与石榴石相邻的石英内包裹体呈圆形或椭圆形。

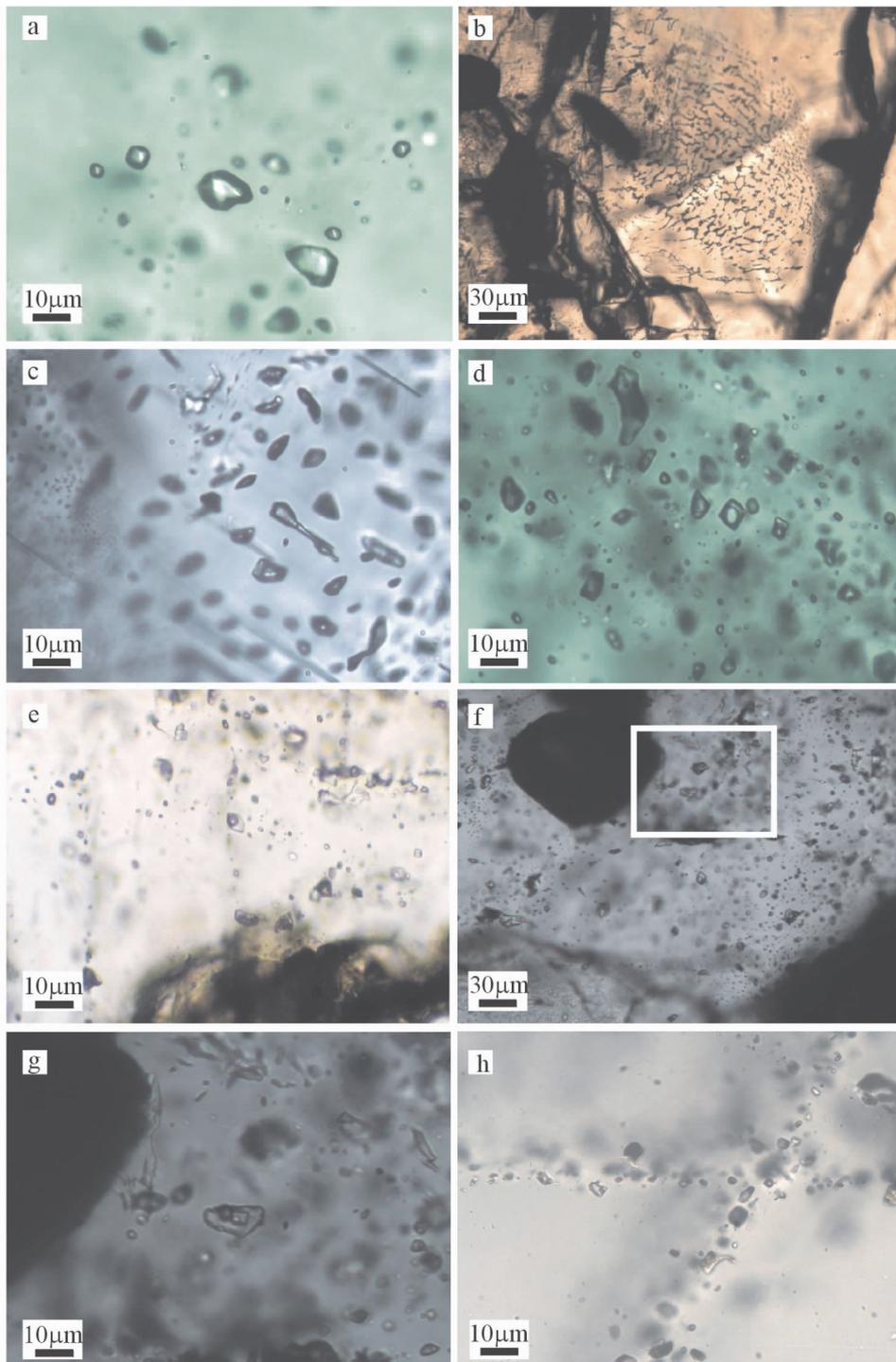


图3 诸城桃行榴辉岩矿物及细脉石英中流体包裹体

a-榴辉岩内被石榴石包裹的石英中束状分布的负晶形富 N_2 包裹体; b-榴辉岩内石榴石中呈指纹状的纯 CO_2 包裹体; c-榴辉岩内石榴石中纯 CO_2 包裹体; d-榴辉岩石英颗粒中呈定向分布的二相 CO_2 - H_2O -NaCl包裹体; e-细脉石英中三相 CO_2 - H_2O -NaCl包裹体; f-脉石英中含石盐子矿物的 H_2O 溶液包裹体; g-脉石英中含石盐子矿物的 H_2O 溶液包裹体(图3f白框内放大); h-脉石英中具有定向排列的低盐度 H_2O 溶液包裹体

Fig. 3 Fluid inclusions in eclogites and eclogite-facies quartz veins at Taohang

a-Negative crystal shape N_2 -rich inclusion in quartz enclosed by garnet in eclogite; b-Pure- CO_2 inclusion showing fingerprint shape in garnet of eclogite; c-Pure- CO_2 inclusion in garnet; d-Two phase CO_2 - H_2O -NaCl inclusion in quartz; e-Three phase CO_2 - H_2O -NaCl inclusion in fine vein quartz; f-Halite-bearing H_2O aqueous inclusion in vein quartz; g-Halite-bearing H_2O aqueous inclusion in vein quartz (enlargement of Fig. 3f); h-Low-salinity H_2O aqueous inclusion showing orientation in vein quartz

C 型 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 是分布最广、丰度最高的包裹体类型,它主要呈小群或沿裂隙分布于榴辉岩石英及细脉体石英中。室温下这类包裹体呈 2~3 相(H_2O 溶液相、 CO_2 液相和/或 CO_2 气相), CO_2 相常占包裹体体积一般在 20%~40% (图 3d),有时在 60% 以上,负晶形或规则状。细脉石英中数量较多,个体大小变化较大,一般 $6\mu\text{m}\sim 15\mu\text{m}$,最大者可达 $35\mu\text{m}$ 以上。在绿辉石和蓝晶石中偶尔也可找到少量沿矿物结晶 c 轴或晶内裂隙分布的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 包裹体。

D 型含子矿物高盐度 H_2O 溶液包裹体主要产于榴辉岩内细脉石英中。这类包裹体由气相、 H_2O 液相和 1 个(偶见 2 个)固体子矿物组成,气相百分比 < 10%~25%,负晶形一长条形或不规则状,个体一般 < $5\mu\text{m}\sim 25\mu\text{m}$ 。这类包裹体一般呈孤立状赋存在细脉石英中(图 3e 和 f),或在榴辉岩石英颗粒中呈定向排列(假次生?),有时沿蓝晶石结晶学 c 轴方向也可以找到少量呈管状的含子矿物高盐度 H_2O 溶液包裹体。

E 型低盐度 H_2O 溶液包裹体由气相和 H_2O 液相组成,气相百分比 < 5%~15%,其大小、形态变化很大,从负晶形到浑圆一不规则形状,个体一般 < $5\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$,主要见于细脉石英中,它们定向或明显沿愈合裂隙分布(图 3h),为最晚期捕获的次生包裹体。

3.2 显微测温结果

冷冻/回温过程中,A 型富 N_2 包裹体仅显示单一相态变化,在 $-151\sim -144^\circ\text{C}$ 均一至液相,接近或略高于 N_2 的临界温度 -147°C ,表明其为富 N_2 包裹体,激光拉曼探针测试也证实了 N_2 的存在(显示 2328cm^{-1} 峰,图 4),部分包裹体还有弱的 CH_4 成分峰的显示(2916cm^{-1} 峰,图 4)。

显微测温研究表明,B 型 CO_2 包裹体被完全冷冻并回温后, CO_2 固相熔化温度 ($T_{\text{m,CO}_2}$) 都非常接近 -56.6°C ,与纯 CO_2 三相点一致。激光拉曼光谱测试也显示只在 1385cm^{-1} 和 1285cm^{-1} 有尖锐峰,表明包裹体内的组成为纯的 CO_2 ,几乎没有 H_2O 、 CH_4 及 N_2 等其它组分。进一步回温后,包裹体都均一至液相。这类纯 CO_2 包裹体均一温度为 $-25.6\sim$

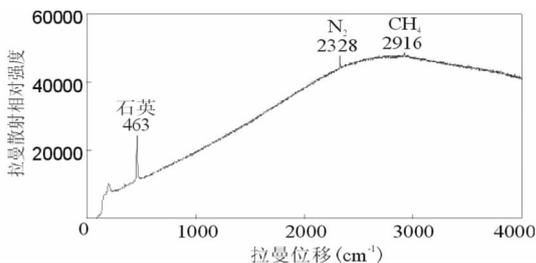


图 4 榴辉岩内被石榴石包裹的石英中 $\text{N}_2\text{-CH}_4$ 包裹体激光拉曼光谱
Fig. 4 Laser Raman spectra of $\text{N}_2\text{-CH}_4$ inclusion in quartz enclosed by garnet in eclogite

+ 10.3°C ,对应的流体密度为 $1.06\sim 0.86\text{g/cm}^3$ 。

C 型 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 包裹体的 CO_2 固相熔化温度 ($T_{\text{m,CO}_2}$) 多集中在 $-57.3\sim -56.6^\circ\text{C}$,少数可低至 -59.2°C (图 5),表明含碳相主要为 CO_2 ,并可能含有少量其它组分,拉曼探针测试显示具较低 CO_2 固相熔化温度的包裹体有弱的 N_2 峰(2328cm^{-1})存在。笼合物熔化温度 ($T_{\text{m,cla}}$) 为 $6.1\sim 9.5^\circ\text{C}$ (图 5),指示液相 H_2O 的含盐度为 7.2%~1.0% NaCl 。包裹体内 CO_2 部分均一温度(至液相)为 $14.1\sim 28.2^\circ\text{C}$ (图 5),含 CO_2 相比比例较大的包裹体多数都在 $160\sim 230^\circ\text{C}$ 范围内就发生了爆裂,从 CO_2 相比比例较小的包裹体获得的完全均一温度 ($T_{\text{h,tot}}$,均一至液相)为 $216\sim 279^\circ\text{C}$ 。根据上述测温数据经计算获得的在总包裹体中 CO_2 的摩尔分数 (X_{CO_2}) 为 0.58~0.13,计算得到的含碳相密度为 $0.83\sim 0.65\text{g/cm}^3$ 。

根据显微测温结果,在加温过程中含子矿物石盐的 D 型高盐度包裹体中的气泡通常先于子矿物消失,石盐的熔化(消失)温度 ($T_{\text{m,NaCl}}$) 为 $224\sim 327^\circ\text{C}$ (图 6),对应盐度为 33.1%~40.4% NaCl 。

冷冻回温过程中 E 型 H_2O 溶液包裹体的初始熔融温度 (T_e) 一般较难观察到,记录到的这类包裹体的初始熔融温度都低于 -20°C ,反映卤水的化学成分可能主要为 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$

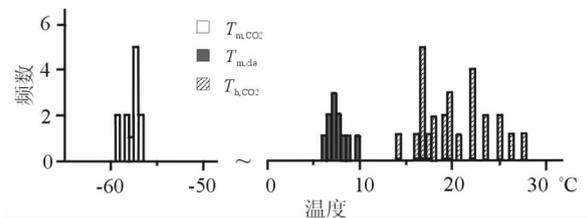


图 5 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体 CO_2 固相熔化温度 ($T_{\text{m,CO}_2}$)、笼合物熔化温度 ($T_{\text{m,cla}}$) 和部分均一温度 ($T_{\text{m,CO}_2}$) 频率分布直方图

Fig. 5 Frequency histograms of CO_2 solid final melting temperature, clathrate melting temperature and partial homogenization temperature of $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ fluid inclusions

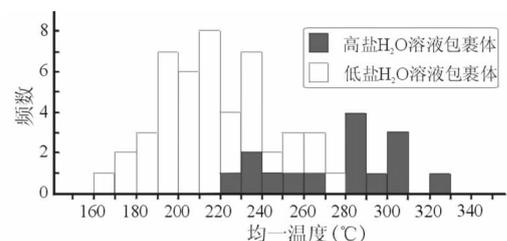


图 6 高盐度和低盐度包裹体均一温度直方图

Fig. 6 Frequency histograms of homogenization temperature of hypersaline and low saline H_2O fluid inclusions

体系(卢焕章等,2004)。包裹体的冰点($T_{m,ice}$)为 $-6.2 \sim -0.5^{\circ}\text{C}$,均一温度(至液相)为 $167 \sim 274^{\circ}\text{C}$,对应的包裹体盐度为 $0.9\% \sim 9.5\% \text{ NaCl}$ 。

4 超高压变质岩折返过程中流体性状与演化

4.1 流体包裹体的相对世代与流体演化

上述流体包裹体岩相学和显微测温结果表明,榴辉岩及其脉体石英中赋存的流体包裹体是在相应的超高压变质演化阶段被捕获的,反映了其同时的流体性状。产于榴辉岩中未变形石英颗粒内的A型富 $\text{N}_2(\pm \text{CH}_4)$ 包裹体为原生包裹体,它们在经历了角闪岩相退变质作用的榴辉岩中缺失,因而认为这类包裹体可能是在超高压—高压榴辉岩相阶段被捕获的,这也证明了稳定同位素研究(Zheng *et al.*, 2003)获得的,在超高压峰期变质期间没有自由流动的、弥散性流体相存在。超高压变质岩中出现富 N_2 包裹体是较普遍的现象,Klemd(1989)在德国Müncheberg片麻岩杂岩的榴辉岩相变沉积岩中也发现了密度极高的 $\text{CO}_2\text{-N}_2$ 流体包裹体,沈昆等(1996)在苏鲁梭罗树、Xiao *et al.* (2000)和Fu *et al.* (2003)在苏鲁胡家林榴辉岩和大别山碧溪岭与浒湾榴辉岩石榴石与石英中曾发现富 N_2 包裹体,他们也认为这类包裹体是在超高压—高压榴辉岩相条件下捕获的。富 N_2 流体的来源,目前一般认为可能与俯冲源岩中云母或长石矿物内 NH_4^+ 分解有关(Andersen *et al.*, 1989),至于 N_2 流体的确切来源,有赖于今后对榴辉岩氮同位素等做进一步分析。B型纯 CO_2 液相包裹体主要以指纹状产于榴辉岩石榴石中,推测这类包裹体是在榴辉岩发生麻粒岩相叠加变质作用期间被捕获的;C型 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体和D型高盐度 H_2O 溶液包裹体是桃行榴辉岩脉体石英中最常见的包裹体类型,它们主要以假次生或原生的形式赋存,推测这两类包裹体是在高压榴辉岩重结晶阶段被捕获的。这两类包裹体的直接穿插期次关系在显微镜下未曾找到,它们都以原生或假次生的形式产出,能否代表高压条件下存在的不混溶 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 流体相还需作进一步的研究工作。刘福来和许志琴(2004)发现,在南苏鲁东海中国大陆科学钻探工程主孔片麻岩和退变榴辉岩锆石中保存了与柯石英等典型超高压矿物共存于同一变质增生微区以水溶液为主的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体,沈昆等(2003b)在该区榴辉岩石榴石中找到原生高密度盐水溶液包裹体,而Zhang *et al.* (2008)在东海池庄榴辉岩脉体石英中找到成分更为复杂的高盐流体包裹体,他们皆认为这些包裹体是在超高压—高压变质峰期被捕获的,代表了峰期流体组成;低盐度 H_2O 溶液包裹体明显呈次生,应是在超高压岩石折返过程中最晚阶段(角闪岩相退变质甚至更晚)被捕获的,代表了角闪岩相及绿片岩相退变质流体组成。

4.2 高密度纯 CO_2 流体与麻粒岩相叠加变质

桃行榴辉岩在峰期变质阶段之后,经历了过渡高压减压阶段(Yao *et al.*, 2000),这一阶段特征矿物反应是峰期的绿辉石(Cpx-I)分解成新生的绿辉石(Cpx-II)与钠质斜长石组成的后合成晶,或围绕石英颗粒形成新生的绿辉石(Cpx-II)与钠质斜长石环边。Yao *et al.* (2000)认为,这套具有共生关系的绿辉石+斜长石矿物组合在变质岩中比较少见,它既不属于正常的榴辉岩相矿物组合,也不属于正常的麻粒岩相矿物组合,而是一种较典型的过渡榴辉岩—高压麻粒岩相矿物组合(Kryza *et al.*, 1996)。我们在榴辉岩石榴石中发现的高密度 CO_2 包裹体对该区曾发生过渡榴辉岩—高压麻粒岩相叠加作用提供了证据。根据前人(Wang *et al.*, 1993; Banno *et al.*, 2000; Nakamura and Hirajima, 2000)研究成果,苏鲁超高压北带荣成一威海地区的榴辉岩在退变质过程中普遍遭受了麻粒岩相的叠加作用,超高压变质岩中出现了后生顽火辉石。同样在这一地区榴辉岩石榴石中也赋生有高密度 CO_2 包裹体(Fan *et al.*, 2005a)。

麻粒岩相变质岩富含 CO_2 包裹体是一个常见现象,其来源也是一个未解之谜。不同学者对麻粒岩相岩石中为何出现高密度富 CO_2 包裹体也有不同成因解释(卢焕章等, 2004): (1) 上地幔的去气作用; (2) 侵入深部地壳的玄武岩冷凝优先吸取 H_2O 而留下共存的富 CO_2 气体; (3) 有些麻粒岩地体中大量存在的钙硅酸盐岩和含铁石英岩(原来含菱铁矿)的变质可提供大量 CO_2 ; (4) 板块碰撞使大陆架沉积物深埋脱碳。本区麻粒岩相叠加榴辉岩石榴石中捕获的纯 CO_2 包裹体的来源还需要做进一步工作来确认,或许榴辉岩及围岩中夹杂的钙硅酸盐和菱铁矿等矿物及围岩透闪石大理岩在增温麻粒岩相变质过程中发生的少量(局部)脱气反应是形成纯 CO_2 流体的原因。

5 结论

(1) 桃行榴辉岩矿物及高压脉体石英中存在有五种类型包裹体: ① A型 $\text{N}_2 \pm \text{CH}_4$ 包裹体; ② B型纯 CO_2 液相包裹体; ③ C型 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体; ④ D型高盐度水溶液包裹体; ⑤ E型低盐度水溶液包裹体。利用榴辉岩矿物及高压脉体石英中捕获的流体包裹体类型及期次可以重建超高压变质作用板片折返过程中的流体性状与演化。

(2) 桃行榴辉岩石榴石中的纯 CO_2 包裹体是在过渡榴辉岩—高压麻粒岩相叠加变质作用期间被捕获的,它为本区榴辉岩相岩石遭受了麻粒岩相叠加提供了佐证。

致谢 野外工作和成文过程中,得到沈昆高级工程师、郭敬辉研究员、叶凯研究员、杨建军研究员、刘景波研究员等有益的建议和帮助,两位匿名评审人对本文提出了宝贵的修改

意见, 在此一并表示诚挚谢意。

References

- Andersen T, Burke EAJ and Austrheim H. 1989. Nitrogen-bearing, aqueous fluid inclusions in some eclogites from the Western Gneiss Region of the Norwegian Caledonides. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 103: 153 – 165
- Bakker RJ. 1997. Clathrates: Computer programs to calculate fluid inclusion *V-X* properties using clathrate melting temperatures. *Computers & Geosciences*, 3: 1 – 18
- Banno S, Enami M, Hirajima T, Ishiwatari A and Wang QC. 2000. Decompression pressure-temperature path of coesite eclogite to granulite from Weihai, eastern China. *Lithos*, 52: 97 – 108
- Bodnar RJ. 1993. Revised equation and stable for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 683 – 684
- Brown PE and Hagemann SG. 1995. MacFlinco and its application to fluids in Archean lode-gold deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3943 – 3952
- Chu XL, Guo JH, Fan HR and Jin CW. 2005. Origin of extremely ¹⁸O-enriched eclogites in the Rongcheng region, Shandong Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 839 – 845 (in Chinese with English abstract)
- Enami M and Nagasaki A. 1999. Prograde *P-T* path of kyanite eclogites from Junan in the Sulu ultrahigh-pressure province, eastern China. *The Island Arc*, 8: 459 – 474
- Fan HR, Guo JH, Chen F, Jin CW, Shen K and Satir M. 2003. Fluid evolution and exhumation history of ultra-high-pressure rocks at Lanshantou, Su-Lu terrane, Eastern China. *Journal of Geochemical Exploration*, 78 – 79: 51 – 54
- Fan HR, Guo JH, Hu FF, Chu XL, Chen FK and Jin CW. 2005a. Fluid inclusions evidence for differential exhumation of ultrahigh pressure metamorphic rocks in the Sulu terrane. *Chinese Science Bulletin*, 50(11): 1139 – 1148
- Fan HR, Guo JH, Hu FF, Chu XL and Jin CW. 2005b. Fluid inclusions and exhumation history of ultra-high-pressure metamorphic rocks at Lanshantou in the Sulu terrane, southeastern Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1125 – 1132 (in Chinese with English abstract)
- Ferrando S, Frezzotti ML, Dallai L and Compagnoni R. 2005a. Fluid-rock interaction in UHP phengite-kyanite-epidote eclogite from the Sulu orogen, eastern China. *International Geology Review*, 47: 750 – 774
- Ferrando S, Frezzotti ML, Dallai L and Compagnoni R. 2005b. Multiphase solid inclusions in UHP rocks (Su-Lu, China): Remnants of supercritical silicate-rich aqueous fluids released during continental subduction. *Chemical Geology*, 223: 68 – 81
- Fu B, Touret JLR and Zheng YF. 2003. 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
- Gong B, Zheng YF, Wu YB, Zhao ZF, Gao TS, Tang J, Chen RX and Fu B. 2007. Geochronology and stable isotope geochemistry of UHP metamorphic rocks at Taohang in the Sulu Orogen, east-central China. *International Geology Review*, 49: 259 – 286
- Gong B, Zheng YF and Wu YB. 2004. Oxygen isotope geochemistry of UHP metamorphic rocks at Taohang in the Sulu terrane and its constraints on radiometric dating. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1097 – 1115 (in Chinese with English abstract)
- Hall DL, Sterner SM and Bodnar RJ. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions. *Economic Geology*, 83: 197 – 202
- Klemd R. 1989. *PT* evolution and fluid inclusion characteristics of retrograded eclogites, Münchberg gneiss complex, Germany. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 102: 221 – 229
- Kryza R, Pin C and Vielzeuf D. 1996. High pressure granulites from the Sudetes (SW Poland): Evidence of crustal subduction and collisional thickening in the Variscan belt. *Journal of Metamorphic Geology*, 14: 531 – 546
- Liang YH, Sun XM, Xu L, Zhai W, Liang JL, Tang Q and Li AJ. 2007. Fluid inclusions in quartz veins in HP-UHP metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 23(12): 3280 – 3286 (in Chinese with English abstract)
- Liu FL, Gerdes A, Liou JG, Xue HM and Liang FH. 2006. SHRIMP U-Pb zircon dating from Sulu-Dabie dolomitic marble, eastern China: Constraints on prograde, ultrahigh-pressure and retrograde metamorphic ages. *Journal of Metamorphic Geology*, 24: 569 – 589
- Liu FL and Xu ZQ. 2004. Fluid inclusions hidden in coesite-bearing zircons in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from southwestern Sulu terrane in eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 49(4): 396 – 404
- Lu HZ, Fan HR, Ni P, Ou GX, Shen K and Zhang WH. 2004. Fluid Inclusions. Beijing: Science Press, 395 – 419 (in Chinese)
- Miller JA, Buick IS, Cartwright I and Barnicoat A. 2002. Fluid processes during the exhumation of high-*P* metamorphic belts. *Mineralogical Magazine*, 66: 93 – 119
- Nakamura D and Hirajima T. 2000. Granulite-facies overprinting of ultrahigh-pressure metamorphic rocks, northeastern Su-Lu region, eastern China. *Journal of Petrology*, 41: 563 – 582
- Philippot P and Rumble III D. 2000. Fluid-rock interaction during high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphism. *International Geology Review*, 42: 312 – 327
- Scambelluri M and Philippot P. 2001. Deep fluids in subduction zones. *Lithos*, 55: 213 – 227
- Shen K, Xu HF and Xu ZQ. 1996. Characteristics of metamorphic fluids in the eclogites and its country rocks from the ultrahigh-pressure metamorphic belt in Jiaonan terrain, Shandong. In: *Proc. of Researches on the Geology and Mineral Resources in Shandong Province*. Jinan: Shandong Science and Technology Publishing House, 62 – 80 (in Chinese with English abstract)
- Shen K, Zhang ZM, van den Kerkhof AM, Xiao YL and Hoefs J. 2003a. Metamorphic fluids and their evolution in the UHP rocks from the pre-pilot hole of Jiangsu Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 77: 522 – 532 (in Chinese with English abstract)
- Shen K, Zhang ZM, van den Kerkhof AM, Xiao YL and Xu ZQ. 2003b. Unusual high-density and saline aqueous inclusions in ultrahigh pressure metamorphic rocks from Sulu terrane in eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 48: 2018 – 2023
- Shen K, Zhang ZM, Sun XM and Xu L. 2005. Composition and evolution of ultrahigh-pressure metamorphic fluids; the fluid inclusion study of the drill cores from the main hole of Chinese Continental Scientific Drilling Program. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 489 – 504 (in Chinese with English abstract)
- Sun XM, Tang Q, Sun WD, Xu L, Zhai W, Liang JL, Liang YH, Shen K, Zhang ZM, Zhou B and Wang FY. 2007. Monazite, iron oxide and barite exsolutions in apatite aggregates from CCSD drillhole eclogites and their geological implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 2896 – 2905
- Thiéry R, van der Kerkhof A M and Dubessy F. 1994. *VX* properties of CH₄-CO₂ and CO₂-N₂ fluid inclusions: Modeling for *T* < 31 °C and *P* < 400 bar. *European Journal of Mineralogy*, 6: 753 – 771
- Wang Q, Ishiwatari A, Zhao ZY, Hirajima T, Hiramatsu N, Enami M, Zhai M, Li J and Cong B. 1993. Coesite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China. *European Journal of Mineralogy*, 5: 141 – 152

- Xiao Y, Hoefs J, van den Kerkhof AM, Fiebig J and Zheng YF. 2000. Fluid history of UHP metamorphism in Dabie Shan, China: A fluid inclusion and oxygen isotope study on the coesite-bearing eclogite from Bixiling. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 139: 1–16
- Xu ST, Liu YC, Chen GB, Compagnoni R, Rolfo F, He MC and Liu HF. 2003. New finding of micro-diamonds in eclogites from Dabie-Sulu region in central-eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 48(10): 988–994
- Xu ZQ. 2007. Continental deep subduction and exhumation dynamics: Evidence from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling and the Sulu HP-UHP metamorphic terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 23(12): 3041–3053 (in Chinese with English abstract)
- Yang JJ. 1991. Eclogites, Garnet Pyroxenites and Related Ultrabasics in Shandong and North Jiangsu of East China. Beijing: Geological Publishing House, 1–99 (in Chinese with English abstract)
- Yang JJ and Powell R. 2008. Ultrahigh-pressure garnet peridotites from the devolatilization of sea-floor hydrated ultramafic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 26: 695–716
- Yao YP, Ye K and Liu JG. 2000. A transitional eclogite to high pressure granulite-facies overprint on coesite eclogite at Taohang in the Sulu ultrahigh-pressure terrane, eastern China. *Lithos*, 52: 109–120
- Ye K and Hirajima T. 1996. High-pressure marble at Yangguntun, Rongcheng County, Shandong Province, eastern China. *Mineralogy and Petrology*, 57: 151–165
- Ye K, Yao YP, Katayama I, Cong BL, Wang QC and Maruyama S. 2000. Large areal extent of ultrahigh-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China. *Lithos*, 52: 157–164
- Ye K. 2001. Study progress of mineralogy and petrology in Dabieshan-Sulu ultrahigh (UHP) metamorphic terrane. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(3): 141–148 (in Chinese with English abstract)
- Zhai W, Sun XM, Xu L, Zhang Z M, Liang JL, Liang YH and Shen K. 2005. Fluid inclusions of Qinglongshan ultrahigh pressure metamorphic eclogite and fluid evolution, north Jiangsu Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 482–488 (in Chinese with English abstract)
- Zhang RY, Cong BL and Liou ZG. 1993. Su-Lu ultrahigh-pressure metamorphic terrane and explanation of its origin. *Acta Petrologica Sinica*, 9(3): 211–226 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Shen K, Xiao YL, van den Kerkhof AM and Hoefs J. 2005. Fluid composition and evolution attending UHP metamorphism: Study of fluid inclusions from drill cores, southern Sulu belt, eastern China. *International Geology Review*, 47: 297–309
- Zhang ZM, Shen K, Xiao YL, Hoefs J, Liou JG and Xu ZQ. 2006. Mineral and fluid inclusions in zircon of UHP metamorphic rocks from the CCSD Main Hole: A record of metamorphism and fluid activity. *Lithos*, 92: 378–398
- Zhang ZM, Shen K, Liou JG and Zhao XD. 2007. Fluid inclusions associated with exsolved quartz needles in omphacite of UHP eclogites, Chinese Continental Scientific Drilling Main Drill Hole. *International Geology Review*, 49: 479–486
- Zhang ZM, Shen K, Sun WD, Liu YS, Liou JG, Shi C and Wang JL. 2008. Fluids in deeply subducted continental crust: Petrology, mineral chemistry and fluid inclusion of UHP metamorphic veins from the Sulu orogen, eastern China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 3200–3228
- Zheng YF, Fu B, Gong B and Li L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China; Implication for geodynamics and fluid regime. *Earth Science Reviews*, 62: 105–161
- Zheng YF. 2004. Fluid activity during exhumation of deep subducted continental plate. *Chinese Science Bulletin*, 49(10): 917–929 (in Chinese)

附中文参考文献

- 储雪蕾, 郭敬辉, 范宏瑞, 金成伟. 2005. 荣成地区特别富¹⁸O 榴辉岩的成因. *岩石学报*, 21(3): 839–845
- 范宏瑞, 郭敬辉, 胡芳芳, 储雪蕾, 金成伟. 2005. 鲁东南岚山头超高压变质岩流体包裹体特征与板片折返史. *岩石学报*, 21(4): 1125–1132
- 龚冰, 郑永飞, 吴元保. 2004. 胶南桃行超高压变质岩的氧同位素地球化学及其年代学制约. *岩石学报*, 20(5): 1097–1115
- 梁业恒, 孙晓明, 徐莉, 翟伟, 梁金龙, 汤倩, 李爱菊. 2007. CCSD (0~5158m) HP-UHP 变质岩中石英脉流体包裹体研究. *岩石学报*, 23(12): 3280–3286
- 刘福来, 许志琴. 2004. 南苏鲁超高压岩石含柯石英锆石中的流体包裹体. *科学通报*, 49(2): 181–189
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪陪, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 395–419
- 沈昆, 许惠芬, 许志琴. 1996. 胶南地体超高压变质带榴辉岩及围岩中变质流体特征和地质意义. *山东地质矿产研究文集*. 济南: 山东科学技术出版社, 62–80
- 沈昆, 张泽明, van den Kerkhof AM, 肖益林, Hoefs J. 2003a. 江苏东海中国大陆科学钻探工程预先导孔 (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, van den Kerkhof A M, 肖益林, 许志勤, Hoefs J. 2003b. 南苏鲁超高压榴辉岩中罕见的原生高密度盐水溶液包裹体. *科学通报*, 48: 1076–1081
- 沈昆, 张泽明, 孙晓明, 徐莉. 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
- 翟伟, 孙晓明, 徐莉, 张泽明, 梁金龙, 梁业恒, 沈昆. 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
- 许志琴. 2007. 深俯冲和折返动力学: 来自中国大陆科学钻孔主钻及苏鲁超高压变质带的制约. *岩石学报*, 23(12): 3041–3053
- 叶凯. 2001. 大别山—苏鲁超高压变质带的矿物学和岩石学研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 20(3): 141–148
- 杨建军. 1991. 苏鲁榴辉岩及有关超基性岩. 北京: 地质出版社, 26–79
- 徐树桐, 刘贻灿, 陈冠宝, Compagnoni R, Rolfo F, 何谋春, 刘惠芳. 2003. 大别、苏鲁地区榴辉岩中新发现的微粒金刚石. *科学通报*, 48(10): 1069–1075
- 张儒媛, 从柏林, 刘忠光. 1993. 苏鲁超高压变质地体及其成因解释. *岩石学报*, 9(3): 211–226
- 郑永飞. 2004. 深俯冲大陆板块折返过程中的流体活动. *科学通报*, 49(10): 917–929