

大别-苏鲁造山带超高压榴辉岩和脉体磷灰石含氯特征与变质流体演化

刘景波*, 张灵敏, 陈意, 郭顺, 程南飞

中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

* 联系人, E-mail: jingbolu@mail.igcas.ac.cn

2013-05-26 收稿, 2013-06-07 接受 2013-07-29 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2009CB825001)和国家自然科学基金(41072049, 41090371)资助

摘要 根据磷灰石中的氯组分含量, 研究了大别-苏鲁超高压变质带中榴辉岩和其中的脉体形成过程中流体的盐度及其变化. 仰口榴辉岩中磷灰石在进变质过程中显示为氯含量增加, 反映出俯冲的大陆岩石经受了逐步干化和流体活动性降低的过程; 在退变质过程中氯含量降低, 反映超高压岩石折返过程中流体含量增加. 大别-苏鲁超高压变质带一些典型的露头, 包括池庄、青龙山、毛北、碧溪岭、毛屋、朱家冲和花凉亭等地的超高压榴辉岩及其中的脉体, 其磷灰石成分变化很大, 指示榴辉岩相变质和脉体形成过程中流体盐度变化很大, 从低盐度流体到高盐度流体均存在, 不同露头有所差异. 总体来看, 不同盐度的流体在变质过程中普遍存在, 流体盐度的变化可能与大陆地壳俯冲/折返过程中岩石水化和脱水反应有关.

关键词

大别-苏鲁超高压
变质带
榴辉岩
磷灰石
变质流体
变质作用

高压-超高压变质岩石中, 矿物中的盐水包裹体是一种最常见的类型^[1-11]. 这些盐水包裹体主要出现在蓝晶石、绿辉石和石榴石等榴辉岩相矿物中, 表明它们出现在高压-超高压变质阶段. 目前含盐流体对变质岩石成因影响的研究并不多, 很可能过低估计了它们在变质过程中的作用^[12], 已有的相平衡研究也很少考虑这样的流体体系. 盐流体除流体包裹体的记录外, 几乎忽略了其对应的矿物成分记录. 换言之, 哪些矿物记录了盐流体存在的信息? 其成分变化又是如何与流体成分变化相关联的? 通过对大别-苏鲁超高压变质带榴辉岩和脉体中磷灰石的氯含量进行研究, 我们确定了高压-超高压变质过程中流体的盐度变化. 根据磷灰石的氯含量变化, 可对大陆岩片俯冲和折返过程中流体含量的变化特征予以制约.

1 仰口榴辉岩中的磷灰石

苏鲁造山带仰口榴辉岩是一个研究程度很高的

露头. 该榴辉岩体由变质反应边辉长岩、反应边榴辉岩、细粒榴辉岩和粗粒榴辉岩(正常榴辉岩)组成, 显示了明显的进变质特征. 变质反应边辉长岩仍然保留早期岩浆结晶矿物, 如单斜辉石、斜方辉石和黑云母等; 反应边榴辉岩和正常榴辉岩中早期岩浆矿物已完全消失. 反应边榴辉岩中石榴石反应边发育, 正常榴辉岩中反应边石榴石消失, 岩石转变为粒状变晶结构. 反应边榴辉岩的温压估算指示出它们形成于高压变质阶段, 并在超高压变质阶段有明显的再平衡发生. 正常榴辉岩的温压估算则表明, 这些榴辉岩在超高压条件下发生了完全重结晶. 我们对3类岩石中的磷灰石进行了系统的成分研究, 结果显示它们在OH, Cl和F含量上存在系统变化(图1). 正常柯石英榴辉岩中磷灰石明显高于其他两类岩石的Cl含量, 反映流体盐度在超高压条件下比高压条件下要高. 这个特征表明, 大陆地壳岩石在俯冲过程中发生水化反应导致岩石向干化方向发展, 即随着俯冲

引用格式: 刘景波, 张灵敏, 陈意, 等. 大别-苏鲁造山带超高压榴辉岩和脉体磷灰石含氯特征与变质流体演化. 科学通报, 2013, 58: 2165-2168
Liu J B, Zhang L M, Chen Y, et al. Chlorine contents in apatites of eclogites and hosted veins from the Dabie-Sulu UHP belt: Implication for fluid evolution in the process of metamorphism. Chin Sci Bull, 2013, 58: 2165-2168, doi: 10.1360/972013-578

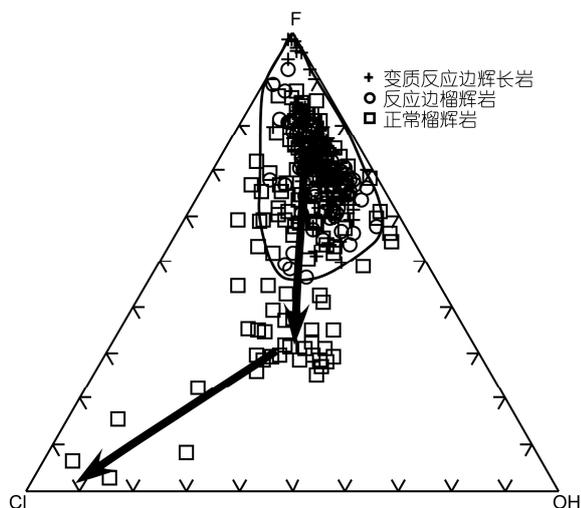


图1 仰口变质反应边辉长岩、反应边榴辉岩和正常榴辉岩中磷灰石的成分^[13]
箭头表示了磷灰石沿进变质方向的成分变化

深度增加, 陆壳流体会逐步被一些特定的水化变质反应所吸收, 使得超高压变质的陆壳岩石向无水方向发展。

对折返退变质过程中形成的产物, 包括多硅白云母石英脉、角闪石反应边、后成合晶反应中形成的磷灰石也进行了系统挥发成分研究(图2), 折返过程中随压力降低, 磷灰石氯含量降低, 反映出岩石在折返过程中流体含量增加, 相应的流体盐度降低。究其原因可能是深俯冲大陆地壳折返过程中, 超高压岩石中的多硅白云母发生分解, 产生流体并释放到岩石之中, 使得大陆地壳朝着富流体方向发展^[13,14]。

2 大别-苏鲁其他地区榴辉岩和高压脉体中的磷灰石

苏鲁超高压变质带中的露头包括池庄、青龙山和毛北。池庄榴辉岩中磷灰石氯含量为 0.01%~2.34% (质量分数, 下同), 榴辉岩中石英脉、富绿辉石-石英脉和富多硅白云母-石英脉中磷灰石氯含量为 0.0~0.2%, 绿辉石-黝帘石-蓝晶石-石英脉中磷灰石氯含量为 0.1%~1.68%。青龙山榴辉岩中磷灰石氯含量为 0.03%~0.35%。毛北浅色榴辉岩磷灰石氯含量为 0.01%~0.18%, 深色榴辉岩为 0.2%~0.45%, 蓝晶石-石英脉为 0.32%~0.36%, 绿辉石脉为 0.04%~0.28%, 黝帘石-石英脉为 0.0~0.1%^[15]。

大别造山带的露头包括碧溪岭、毛屋、朱家冲和

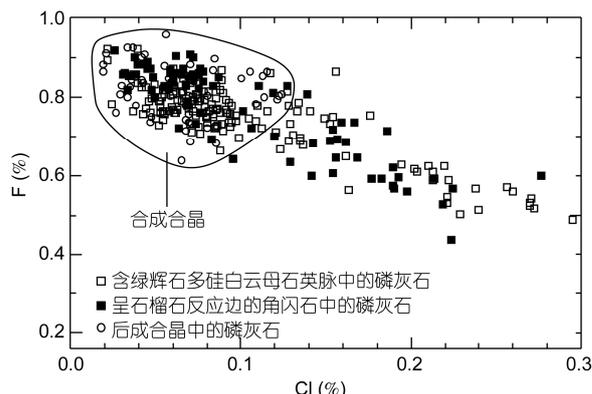


图2 仰口榴辉岩类退变质磷灰石的成分特征^[14]

花凉亭。碧溪岭浅色榴辉岩与深色榴辉岩中的磷灰石氯含量范围相似, 在 0.1%~1.45%; 退变榴辉岩的磷灰石氯含量比较低(<0.2%); 榴辉岩中绿辉石脉和蓝晶石-石英脉的磷灰石氯含量为 0.22%~0.91%。花凉亭榴辉岩及其中绿帘石脉、绿帘石-石英脉和绿帘石-滑石-蓝晶石-石英脉中的磷灰石氯含量都很低(<0.3%)。朱家冲榴辉岩和蓝晶石-多硅白云母-石英脉中磷灰石氯含量非常低(<0.05%)^[15]。毛屋各类基性-超基性岩中的磷灰石氯含量都很高, 其中榴辉岩中的磷灰石氯含量为 0.4%~2.7%, 石榴二辉石岩中的为 1.1%~1.9%, 石榴方辉橄榄岩中的为 0.1%~7%, 退变质的滑石透闪石岩中的为 0.4%~0.8%。

3 磷灰石成分指示的流体成分特征

榴辉岩中磷灰石氯含量特征指示高压-超高压变质过程中存在广泛的盐水流体活动。磷灰石的 $X_{\text{FAP}}/X_{\text{OHAP}}$ 和 $X_{\text{ClAP}}/X_{\text{OHAP}}$ 比值指示了岩石中流体成分的差异^[15]。池庄、碧溪岭和毛屋岩石中流体的盐度很高, 氟含量很低。毛北和青龙山岩石中与磷灰石平衡的流体具有高的氟含量和中等盐度。朱家冲和花凉亭榴辉岩中流体的氟含量中等, 盐度很低。各类脉体中磷灰石组分反映出成脉流体成分存在差异。池庄的绿辉石-黝帘石-蓝晶石-石英脉磷灰石组分指示流体盐度变化范围较大; 其他3类脉体以及毛北的脉体中的磷灰石组分代表的流体盐度较低。碧溪岭的两类脉体中磷灰石对应的流体氟含量均很低, 盐度较高。花凉亭的3类脉体磷灰石对应的流体氟含量低、盐度低。

榴辉岩和脉体中磷灰石 $X_{\text{ClAP}}/X_{\text{OHAP}}$ 比值与变化反映出与磷灰石平衡的流体盐度与变化^[15]。榴辉岩

变质过程中的流体是盐水流体, 盐度变化很大. 一方面在一个标本上就显示了大的盐度变化, 表明变质过程流体的盐度是变化的. 另一方面, 不同露头的比值差别很大, 表明变质地壳不同区域流体的盐度也是有差别的.

我们研究的典型榴辉岩露头中, 一些榴辉岩和脉体已有流体包裹体盐度的研究结果, 包括青龙山榴辉岩^[16]、池庄绿辉石-黝帘石-蓝晶石-石英脉^[17,18]、碧溪岭榴辉岩^[8]、朱家冲榴辉岩中多硅白云母-蓝晶石-石英脉和黝帘石-石英脉^[19]. 把我们测定的磷灰石 $X_{\text{ClAp}}/X_{\text{OHAp}}$ 比值与相应榴辉岩和脉体中不同期次流体包裹体盐度对比, 形成了磷灰石 $X_{\text{ClAp}}/X_{\text{OHAp}}$ 比值与流体包裹体盐度之间的相关关系(图 3). 从图 3 可以看出, 磷灰石 $X_{\text{ClAp}}/X_{\text{OHAp}}$ 比值与流体包裹体盐度呈很好的线性正相关关系. 榴辉岩和脉体磷灰石 $X_{\text{ClAp}}/X_{\text{OHAp}}$ 比值在 0~0.35 所对应的流体包裹体盐度约为 0~40% NaCl 当量. 根据这一关系, 可以通过磷灰石的 $X_{\text{ClAp}}/X_{\text{OHAp}}$ 比值来估计与磷灰石平衡的流体盐度.

总体来看, 不同盐度的流体在变质过程中普遍存在, 可能与大陆地壳俯冲/折返过程中岩石的水化和脱水反应有关. 前人对大别-苏鲁造山带超高压变质岩矿物稳定同位素和水含量研究表明, 大陆地壳俯冲和折返过程中流体活动具有内部缓冲性质, 即

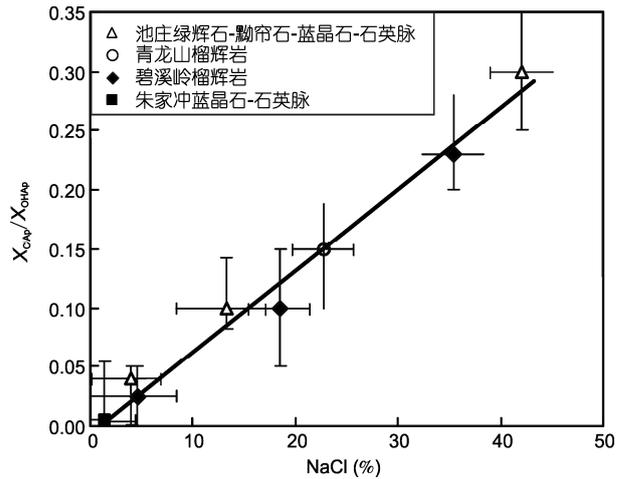


图 3 榴辉岩和脉体中磷灰石的 $X_{\text{ClAp}}/X_{\text{OHAp}}$ 与相应流体包裹体盐度的关系^[15]

进变质和退变质流体均是来自俯冲/折返板片自身^[20,21]. 仰口榴辉岩中磷灰石在进变质过程中显示为氯含量增加, 退变质过程中氯含量降低, 可能与围岩片麻岩多硅白云母的形成(水化反应)和分解(脱水反应)相关, 前者反映了流体活动性减弱, 后者反映流体活动性增加. 从这个关系来看, 磷灰石氯含量可以用作度量大陆地壳俯冲和折返过程中板片内部流体活动性的指标, 即高氯含量对应于低流体活动性, 而低氯含量对应于高流体活动性.

参考文献

- 1 Philippot P, Selverstone J. Trace-element-rich brines in eclogitic veins: Implications for fluid composition and transport during subduction. *Contrib Mineral Petrol*, 1991, 106: 417-430
- 2 Selverstone J, Franz G, Thomas S, et al. Fluid variability in 2 GPa eclogites as an indicator of fluid behaviour during subduction. *Contrib Mineral Petrol*, 1992, 112: 341-357
- 3 Philippot P, Chevallier P, Chopin C, et al. Fluid composition and evolution in coesite-bearing rocks (Dora-Maira massif, western Alps): Implication for element recycling during subduction. *Contrib Mineral Petrol*, 1995, 121: 29-44
- 4 Scambelluri M, Pennacchioni G, Philippot P. Salt-rich aqueous fluids formed during eclogitization of metabasites in the Alpine continental crust (Austroalpine Mt. Emilius unit, Italian western Alps). *Lithos*, 1998, 43: 151-167
- 5 Glassley W E. Elemental composition of concentrated brines in subduction zones and the deep continental crust. *Precambrian Res*, 2001, 105: 371-383
- 6 Scambelluri M, Philippot P. Deep fluids in subduction zones. *Lithos*, 2001, 55: 213-227
- 7 Svensen H, Jamteit B, Banks D A, et al. Halogen contents of eclogite facies fluid inclusions and minerals: Caledonides, western Norway. *J Metamorph Geol*, 2001, 19: 165-178
- 8 Xiao Y L, Hoefs J, van den Kerkhof A M, et al. Fluid history of UHP metamorphism in the Dabie Shan, China: A fluid inclusion and oxygen isotope study on the coesite-bearing eclogite from Bixiling. *Contrib Mineral Petrol*, 2000, 139: 1-16
- 9 Xiao Y L, Hoefs J, van den Kerkhof A M, et al. Fluid evolution during HP and UHP metamorphism in Dabie Shan, China: Constraints from mineral chemistry, fluid inclusions and stable isotopes. *J Petrol*, 2002, 43: 1505-1527

- 10 Fu B, Touret J L R, Zheng Y F. Fluid inclusions in coesite-bearing eclogites and jadeite quartzites at Schuanghe, Dabie Shan, China. *J Metamorph Geol*, 2001, 19: 531–548
- 11 Fu B, Zheng Y F, Touret J L R. Petrological, isotopic and fluid inclusion studies of eclogites from Sujiahe, NW Dabie Shan (China). *Chem Geol*, 2002, 187: 107–128
- 12 Newton R C, Aranovich L Y, Hansen E C, et al. Hypersaline fluids in Precambrian deep-crustal metamorphism. *Precambrian Res*, 1998, 91: 41–63
- 13 Liu J B, Zhang L M, Mao Q, et al. Increasing chlorinity in fluids along the prograde metamorphic path: Evidence from apatite from Yangkou eclogite, Sulu, China. In: Dobrzhinetskaya L F, Faryad S W, Wallis S, et al., eds. *Ultrahigh-Pressure Metamorphism: 25 Years After the Discovery of Coesite and Diamond*. London: Elsevier, 2011. 213–242
- 14 Liu J B, Liu W Y, Ye K, et al. Chlorine-rich amphibole in Yangkou eclogite, Sulu ultrahigh-pressure metamorphic terrane, China. *Eur J Miner*, 2009, 21: 1265–1285
- 15 张灵敏, 刘景波, 程南飞, 等. 大别-苏鲁高压超高压带榴辉岩和脉体中磷灰石 Cl 含量和流体盐度关系的研究. *岩石学报*, 2013, 29: 1525–1539
- 16 翟伟, 孙晓明, 徐莉, 等. 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*, 2005, 21: 482–488
- 17 沈昆, 张泽明, 石超, 等. 江苏东海榴辉岩相变质脉体的流体包裹体研究. *岩石学报*, 2008, 24: 1987–2002
- 18 Zhang Z M, Shen K, Sun W D, et al. Fluids in deeply subducted continental crust: Petrology, mineral chemistry and fluid inclusion of UHP metamorphic veins from the Sulu orogen, eastern China. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72: 3200–3228
- 19 Franz L, Romer R L, Klemd R, et al. Eclogite-facies quartz veins within metabasites of the Dabie Shan (eastern China): Pressure-temperature-time-deformation path, composition of the fluid phase and fluid flow during exhumation of high-pressure rocks. *Contrib Mineral Petrol*, 2001, 141: 322–346
- 20 Zheng Y F. Fluid regime in continental subduction zones: Petrological insights from ultrahigh-pressure metamorphic rocks. *J Geol Soc*, 2009, 166: 763–782
- 21 Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem Geol*, 2012, 328: 5–48