

文章编号:1001-8166(2001)04-0508-06

## 变质流体作用的元素地球化学研究\*

唐红峰,刘丛强

(中国科学院地球化学研究所,贵州 贵阳 550002)

**摘要:**变质流体作用是变质岩—流体体系的重要地质作用过程,可以通过有效的地质地球化学方法揭示。综述了变质流体作用的地球化学研究进展,主要包括:流体包裹体、同位素和元素地球化学等方面,强调了元素地球化学研究对于示踪变质流体作用过程的重要性。

**关键词:**变质流体;变质作用;微量元素;地球化学

**中图分类号:**P595 **文献标识码:**A

## 1 引言

变质流体(metamorphic fluids)作为一个专门的研究领域,早在20世纪70年代初即已开始在一些典型变质岩区开展工作并取得重要成果<sup>[1]</sup>。近30年来国内外地质学家的大量研究表明,变质流体不仅已成为当代变质地质学的重要前沿研究课题<sup>[2]</sup>,也渗透到与之相关的地质学的诸多领域,是流体—岩石相互作用研究的重要方面,受到高度重视。

总结前人的研究实例可以看出,变质流体这一概念包含两方面的含义:一是参与变质作用的流体;二是变质作用过程中产生的流体。正如Smith等<sup>[3]</sup>所定义的:广义的变质流体是与变质主岩达到化学和同位素平衡的流体,而更特定地说变质流体是变质作用过程中来源于脱挥发份反应的流体。在国内,对变质流体的定义有两个:①变质流体是峰期变质阶段矿物结晶时封存的与矿物处于平衡状态的流体相<sup>[4]</sup>;②变质流体是指在变质作用过程中因矿物和岩石的去挥发份作用而形成的流体<sup>[5]</sup>。变质流体的内部缓冲作用和外部缓冲作用(渗透作用)等概念的提出<sup>[6]</sup>,是变质流体上述两方面含义的体现。不同研究者对变质流体含义的理解不同,其研究的侧重点各异。前者主要将变质流体作为像温度、压力一样的重要参数,研究流体对于变质作用发

生的动力学制约,如麻粒岩的形成、变质流体性质及其演化等方面<sup>[1,6-8]</sup>。而后者则重点探讨变质过程中流体的运移和演化、同变质期脉体的形成、元素的活化迁移等更大范畴的课题<sup>[9-11]</sup>。

变质流体作用是变质体系中水—岩反应的重要地质过程,有一系列的地质地球化学记录。对变质流体的包裹体、变质流体产物的同位素和元素地球化学研究,是揭示变质流体作用的有效方法和途径。本文在简要总结流体包裹体和同位素方法研究变质流体作用的基础上,着重综述了变质流体作用的元素地球化学研究的某些新进展。

## 2 流体包裹体研究

流体包裹体是研究变质流体的重要途径<sup>[4]</sup>。对变质岩或同变质期脉体矿物中流体包裹体的研究,为阐明变质流体性状和演化、变质流体起源提供重要依据。变质流体组成<sup>[12]</sup>和从流体包裹体研究探讨麻粒岩成因<sup>[1]</sup>是流体包裹体方法对变质流体研究的重大贡献,表明了流体包裹体研究对于变质流体及相关地质问题的认识有相当重要的意义。

90年代以来,由流体包裹体方法研究变质流体的实例更是层出不穷。不仅对变质流体是以H<sub>2</sub>O、

收稿日期:2000-10-08;修回日期:2001-10-08. E-mail: hftang@263.net

\* 基金项目:国家杰出青年科学基金项目“流体—岩石反应体系中稀土元素(和钇)的地球化学”(编号:49625304);国家攀登计划项目“地质流体作用及其成矿效应研究”(编号:95-预-39)资助。

作者简介:唐红峰(1963-),男,湖南攸县人,博士,主要从事岩石学和地球化学研究。

CO<sub>2</sub> 为主要组分的认识进行了充实,而且发现了某些高盐度变质流体的存在<sup>[13-17]</sup>。片麻岩、麻粒岩、榴辉岩等高级和高压变质岩中流体性质和演化,仍然是通过流体包裹体途径研究变质流体的热点<sup>[7,18,19]</sup>。

应该指出,由于变质作用及其产物的演化跨越的时间相当长,流体包裹体捕获后的改造也就很复杂,从而使得变质体系中流体包裹体研究有一定难度,需要注意以下三方面的问题<sup>[20]</sup>:①捕获机制;②捕获后的改造效应;③各种方法相互制约。找到真正代表各个变质阶段的流体包裹体,进行全面综合分析,是阐明变质流体组成及其演化特征的关键。

### 3 同位素地球化学

H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等化合物是变质流体的主要组成,因此 C、H、O 等同位素成为变质流体研究的重要地球化学方法,尤其是探讨变质流体起源和运移等方面有明显的优势和效果。

作为变质流体研究的重要内容,流体的起源一直受到高度重视,也是变质流体作用研究的基础。该项研究目前主要通过两方面的对象实现。一方面,由变质流体的直接产物——同变质期脉体与其变质围岩的同位素组成的对比,研究变质流体的起源。Yardley 等<sup>[10]</sup>对爱尔兰康尼马拉(Connemara)片岩及其中石英脉的氧同位素组成的一致性作了研究,揭示出形成石英脉的变质流体起源于脉体周围的岩石发生变质作用时的脱挥发份反应。Bebout 等<sup>[21,22]</sup>对加利福尼亚卡塔利娜(Catalina)片岩地体自蓝片岩相→绿片岩相→角闪岩相的变质杂岩及其脉体的 C、O 同位素组成的对比研究,为俯冲带变质流体起源研究提供了一个很好的实例。他们的研究结果也显示,俯冲带不同区域变质相带中的流体是来源于其变质围岩,主要是其中富沉积物的部分。与上述实例相反,Kohn 等<sup>[23]</sup>通过对变质岩剖面和石榴石变斑晶氧同位素组成的变化,以及 van Haren 等<sup>[24]</sup>对变质岩中脉体及脉壁附近岩石内单矿物氧同位素组成的研究,认为形成脉体的变质流体主要不是来源于脉体周围的岩石,而是相对于脉体出露地点而言属于外部来源,提出变质流体的流动和渗透作用。某些变质岩中变斑晶(石榴石、十字石等)的氧同位素分带<sup>[25,26]</sup>也为一些变质流体具外部起源提供了证据。另一方面,捕获在变质岩和同变质期脉体矿物中的流体包裹体,可以提供变质流体的诸多信息使其成为研究变质流体起源的另一个重要

对象。对麻粒岩相地体中变质流体碳同位素组成的研究,揭示其流体起源是该方面研究的典范<sup>[27,28]</sup>。

变质流体具有低粘度、强流动性,它们在一定规模上发生运移,包括有限的局部扩散和较大尺度甚至区域性的流动。由于流体与其流动路径内的岩石间存在热和化学上的不平衡,因此某些岩相学的显微结构特征<sup>[29]</sup>和野外露头上的矿物交代蚀变带<sup>[30]</sup>的发育,构成了变质流体运移的“显性”标志,而同位素组成的变化则为变质流体的运移提供了进一步的“隐性”证据。Bowman 等<sup>[31]</sup>通过系统的剖面取样分析,对美国犹他州阿尔塔(Alta)接触变质晕中大理岩的氧同位素研究,得到随着与侵入体距离的增加,大理岩的 δ<sup>18</sup>O 也系统地升高,作者认为造成这种结果的原因是变质过程中变质流体由高温向低温方向的流动。Ferry 等<sup>[32]</sup>对变质过程中流体流动的研究实例进行了系统总结,从变质作用类型、岩石地球化学证据、流体流动通量、流动方向(包括流体向高温、低温或等温的流动)、流动方向与岩石地层的的关系等方面进行区分。利用稳定同位素方法结合水文学中流体平流—扩散模型,对变质流体研究创立了所谓的变质水文学(metamorphic hydrology)<sup>[33]</sup>,同时由简单一维数字模型向更复杂的二维<sup>[34]</sup>和三维<sup>[35]</sup>拓展,研究流体运移路径和通量,是80年代后期以来变质流体研究的一个重要进展。郑永飞等<sup>[36]</sup>对变质流体流动的地球化学研究进行了很好的全面综述,并提出了未来的研究方向。

此外,由于变质流体形成和运移的时间也是变质流体作用研究的基本问题,放射性同位素定年研究无疑是其准确有效的途径。具体可通过以下方法实现:①变质流体产物(如云母)的 Rb-Sr、K-Ar<sup>[37]</sup>;②锆石、独居石的 U-Th-Pb 法<sup>[37]</sup>。尤其是锆石、独居石在变质阶段从流体中新增生的边缘部分的定年;③流体包裹体的 Ar-Ar 定年<sup>[38,39]</sup>。

### 4 元素地球化学

变质作用是原岩矿物组合和结构发生重新调整的过程,该过程中由于流体的参与及其运移,矿物中的元素(包括主量元素和部分微量元素)将无疑有一定的响应,具体有元素的活化迁移(即元素的活动性)、元素的再分配和元素分异等一系列元素地球化学效应。因此,从元素地球化学行为的角度,可以深入揭示变质流体作用的性质和过程。

#### 4.1 元素的活动性

变质岩石学家通常把变质作用看作是一个等化

学的过程,认为该过程中除了有某些挥发性化合物(主要是  $H_2O$  和  $CO_2$ ) 的损失外,其它组成是恒定的。上述等化学变质作用(isochemical metamorphism)的观点是变质岩石学许多方面研究的基础。然而,自 70 年代末以来,越来越多的实例研究表明,在流体参与的变质过程中,岩石中除挥发份以外的部分组分并不是恒定的,而是有明显的变化,即变质作用是一个非等化学过程,从而提出了异化变质作用(allochemical metamorphism)的概念。在非等化学变质作用中,岩石组分变化是部分元素活动性的体现。目前,变质过程中元素的活动性主要通过通过对原岩相同而变质程度不同的岩石之间、变质岩与其对应原岩间、或变质脉体与其变质围岩之间的元素对比分析等三方面途径进行研究。

通过对美国缅因州中南部 Vassalbor 组钙质沉积变质岩不同变质带岩石主量元素的系统对比研究表明,发生接触变质作用的过程中,元素 Na、K 具有明显的活动性,它是流体形成并发生迁移的结果<sup>[41]</sup>。Ague<sup>[40]</sup>通过对大量变泥质岩主量元素的统计分析发现,区域变质作用过程中,随着变质程度的增强,岩石的质量连续减少,该质量损失主要是元素 Si 的丢失,此外也包括其它组分特别是 Ca、Na、K 等在深部地壳变质过程中具强活动性的元素,表明泥质岩的区域变质作用也不是一个等化学过程。庐山双桥山群不同变质带岩石间元素的系统对比研究也表明,泥质岩在发生区域变质作用的过程中,元素 Si、Na、K、Rb、Sr 等有明显的活动性<sup>[41]</sup>。

Hellman 等<sup>[42]</sup>早在 20 世纪 70 年代末通过对变质岩与变质岩中未变质的残留原岩对比研究,得出了玄武岩在经历了埋藏变质作用后,岩石中的稀土(尤其是轻稀土)元素有明显活动性的结论。该项研究是上述第二种途径的典型实例。值得注意的是,由于稀土元素在流体相中的溶解度相当低,长期以来对于它们在变质过程中是否具活动性一直存在较大争议<sup>[43]</sup>。到目前为止对于变质过程中稀土元素的活动性问题,肯定与否定的研究实例并存且难分高下,主要有以下三方面的认识:①稀土元素是不活动的;②稀土元素作为有相近地球化学性质的元素组具整体一致性的活动;③稀土元素具选择性的活动,包括轻稀土元素的活动和重稀土元素的活动。大量研究表明,稀土元素在变质过程中的行为复杂,在某些情况下是不活动的,而在另一些环境中是活动的。归纳前人的研究后发现稀土元素在变质过程中具活动性的实例可见,该种情况下的变质作用均

有流体的参与。

由于世界范围内的许多变质地体中发育大量脉体,其中的同变质期脉体是变质流体的直接产物,流体来源于邻近脉体的变质围岩<sup>[10]</sup>,除此之外还可能来源于远离脉体的岩石<sup>[24,30]</sup>。如果脉体物质主要来源于其变质围岩(包括局部或较远距离的岩石),那么组成脉体的主要元素(Si、Al、Na、K、Ca 等)和部分微量元素无疑有明显的活动性。因此,通过对同变质期脉体与其变质围岩间的元素对比,是研究变质过程中元素活动性的另一个重要途径。笔者对庐山星子群进行的相关研究表明,除了上述主量元素外,包括稀土元素在内的部分微量元素也有一定程度的活动<sup>[44]</sup>。

应特别强调的是,近年来对于俯冲带变质流体作用的元素地球化学研究取得了很大进展。随着俯冲作用的进行,俯冲板片上的大洋沉积物和蚀变大洋玄武岩经历了不断升高的温度—压力条件,即依次经历了绿片岩相、角闪岩相和榴辉岩相的变质作用<sup>[45]</sup>,与区域进变质带相当。因此,俯冲板片的脱挥发份作用实际上是俯冲带变质流体的形成过程。最近,有关俯冲带变质流体作用下的元素活动性分别通过上述三种途径取得了重要成果。Moran 等<sup>[46]</sup>通过对不同变质级的变沉积岩和玄武岩及其原岩系统的 B 含量研究,揭示了俯冲带变质流体作用下该元素随温度的升高而不断同流体一起向外迁移,从而很好地解释了岛弧火山岩 B 相对富集的原因。Behout 等<sup>[47]</sup>则详细研究了美国加利福尼亚一个古俯冲带上的片岩(Catalina Schist)不同变质带岩石的微量元素组成,结果表明,B、N、Cs、As、Sb 等在流体中活泼的元素有明显的活动性,伴随流体的迁移,较高级变质岩石相对于较低级岩石有高达约 80% 的亏损。而 Becker 等<sup>[48]</sup>通过对榴辉岩相的同变质期脉体及其变质围岩间、榴辉岩及其原岩(蚀变的大洋玄武岩)之间<sup>[49]</sup>的元素研究,进一步揭示了俯冲带变质流体作用下元素的地球化学行为,结果也表明流体中活泼的元素(Cs、Rb、Ba、Pb、K 等)有明显的活动性,而高场强元素(Zr、Nb、Ti)和 Y 等相对稳定。此外,通过模拟实验研究俯冲带变质流体作用下的元素活动性也取得一定的进展,Kogiso 等<sup>[50]</sup>的研究表明,元素 Ph、Nd、Rb 分别较之 U—Th、Sm、Sr 更易于被流体迁移。上述研究为岛弧火山岩特征的元素地球化学组成的起源提供了有力证据。所有这些成果表明,变质流体作用的元素地球化学研究在探讨地壳演化和壳—幔物质循环等重大

地质问题上有不可轻视的作用。因此,加强对古俯冲带变质流体作用的研究是今后变质流体研究的一个重要目标<sup>[36]</sup>,其中也应包括模拟俯冲带变质条件的实验研究。

#### 4.2 元素的再分配

变质作用过程中由于原岩矿物的分解、重结晶,形成了新矿物,因此组成矿物的元素也随矿物的上述变化有一个再分配过程。

Shatsky 等<sup>[51]</sup>对前苏联和阿尔卑斯等地榴辉岩或榴辉岩质变质辉长岩的研究表明,高压变质作用过程中稀土元素发生了重新分配,其中的一部分未能进入新的矿物而滞留在矿物颗粒的空隙中。Bea 等<sup>[52]</sup>对下地壳经历了高级变质或超变质作用岩石的微量元素的研究也表明,变质过程中岩石的微量元素发生了重新分配,尽管岩石的微量元素主要受副矿物相(独居石、磷钇矿、磷灰石和锆石)的控制,但是在变质过程中,尤其是有熔体形成后,微量元素的分布状况随着变质反应的进行发生了重新调整。

当变质作用有流体相的参与,则不难设想由原岩矿物分解出来的微量元素将会与流体相中的络阴离子形成配合物,随着流体的运移、沉淀,该部分微量元素不仅进行了再分配,而且可能被迁移出变质岩体系,表现出它们的活动性。Tribuzio 等<sup>[53]</sup>通过对意大利利古里亚(Ligurian)蛇绿岩套中经历了高温变形的辉长岩与未变形的粒玄岩矿物微量元素的对比研究表明,在流体参与下的动力变质作用中,原岩矿物中的微量元素发生了明显的变化,新生变斑晶 Ti-非闪石中的稀土元素较之未发生动力变质的粒玄岩中对应矿物的稀土元素低了近一个数量级,进一步表明有流体参与的变质过程中稀土元素的再分配和活动性。

#### 4.3 元素分异

元素分异是变质过程中又一个需要重点研究的问题,尤其在流体参与下的变质作用中更应如此。变质过程中的元素分异主要包括不同变质相带岩石间的元素分异和相关元素对之间的分异。Bebout 等<sup>[47]</sup>对 Catalina Schist 不同变质相带岩石元素的对比揭示,随着变质程度的增加,微量元素 B、Cs、N(主要赋存于云母中)和 As、Sb(可能主要在氧化物和硫化物中)显示系统的亏损,从而导致了它们与其它元素间的分异。同时,由于这些元素在脱挥发份反应过程中的敏感性不同,变质过程中损失的量有差异,从而导致了它们之间的分异。尽管该项研究是针对俯冲带变质作用进行的,但由于俯冲板片

所经历的温度—压力条件的变化与区域进变质作用变质相带的变化类似,因此上述研究对于变质流体作用下的元素分异研究有一定的普遍意义。该项研究也表明,元素分异是元素活动性所导致的一个必然结果。

由于世界范围内变质地体中发育的同变质期脉体以 Si 饱和为特征,因此变质流体无疑属于富 Si 流体,与岩浆演化晚期的富 Si 流体可能有相似的地球化学行为。对于后者的元素地球化学研究表明,它们具有微量元素对(如 Zr-Hf、Y-Ho 等)的分异和稀土元素的四分组效应<sup>[54-56]</sup>,其中稀土元素的四分组效应实际上也是一种微量元素间的分异。我们对庐山星子群中同变质期脉体的微量元素研究表明,所有脉体的 U-Th 微量元素对发生了明显的分异,在 U/Th-Zr/Hf 协变图上表现出与变质围岩的很大差异<sup>[44]</sup>,并且长英质脉体全岩和其组成矿物白云母、石榴石的稀土元素显示出清楚的四分组效应<sup>[57]</sup>,这些特征不仅进一步表明同变质期脉体是变质流体的直接产物,而且显示了变质流体微量元素的重要特征。

目前,国内对于变质流体作用的地球化学研究主要集中于流体包裹体和稳定同位素两方面,重点是探讨变质流体性质、来源及流体对相关变质作用的制约。而对于能够有效示踪变质流体作用这一重要地质过程的元素地球化学研究严重不足,应予以加强。为此,测试方法和技术手段的发展显得十分迫切,如利用 LA-ICP-MS 方法对单个流体包裹体<sup>[58]</sup>或流体矿物微区的元素含量精确测定,将非常有助于变质流体作用的元素地球化学研究。

#### 参考文献(References):

- [1] Touret J. The granulite facies in Southern Norway. II: The fluid inclusions[J]. *Lithos*, 1971, 4: 423-436.
- [2] Xu Xuechun. Advances in the study of metamorphic fluids[J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3(3-4): 200-208. [徐学纯. 变质流体研究新进展[J]. *地学前缘*, 1996, 3(3-4): 200-208.]
- [3] Smith M P, Yardley B W D. Fluid evolution during metamorphism of the Otago Schist, New Zealand: (1) Evidence from fluid inclusions[J]. *J Metamorphic Geol*, 1999, 17: 173-186.
- [4] Xu Xuechun. Implications and procedures for the study of metamorphic fluids[J]. *Overseas Precambrian Geology*, 1991, (3): 64-77. [徐学纯. 变质流体研究的意义和途径[J]. *国外前寒武纪地质*, 1991, (3): 64-77.]
- [5] Lu Huanzhang, Li Yuanaheng. Ore-forming fluids[A]. In: *Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, ed. Ore Deposit Geochemistry [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. 109-134.* [卢焕章, 李院生. 成矿流体[A]. 见: 中国科学院矿床地球化学开放研究实验室. 矿床地

- 球化学[C]. 北京:地质出版社,1997. 109-134.]
- [6] Zhao Guochun, Liu Shuwen, Sun Deyou. Case studies and their implications for buffering of metamorphic fluids[J]. *Journal of Changchun University Earth Sciences*, 1996, 26(1): 31-36. [赵国春, 刘树文, 孙德有. 变质流体对变质反应温度缓冲作用实例研究及意义[J]. *长春地质学院学报*, 1996, 26(1): 31-36.]
- [7] Liu Shuwen. Fluid evolution during high-grade metamorphism in East Hebei[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, 12(1): 48-58. [刘树文. 冀东高级变质作用中流体演化[J]. *岩石学报*, 1996, 12(1): 48-58.]
- [8] Xu Xuechun. The behavior and evolution of granulite facies metamorphic fluids in the Wulashan area, Inner Mongolia[J]. *Geological Review*, 1992, 38(5): 398-406. [徐学纯. 内蒙古乌拉山地区麻粒岩相变质流体性状及其演化[J]. *地质论评*, 1992, 38(5): 398-406.]
- [9] Yardley B W D. Fluid migration and veining in the Connemara Schists, Ireland[A]. In: Walther J V, Wood B J, eds. *Fluid-Rock Interactions During Metamorphism*[C]. New York: Springer-Verlag, 1986. 109-131.
- [10] Yardley B W D, Bottrell S H. Silica mobility and fluid movement during metamorphism of the Connemara schists, Ireland[J]. *J Metamorphic Geol*, 1992, 10: 453-464.
- [11] Ferry J M. Mineral reactions and element migration during metamorphism of calcareous sediments from the Vassalboro Formation, south-central Maine[J]. *Am Mineral*, 1983, 68: 334-354.
- [12] Roedder E. Fluid inclusions[J]. *Rev Mineral*, 1984, 12: 337-380.
- [13] Fan Hongrui, Xie Yihan, Wang Yinglan. Characteristics and evolution of metamorphic fluid in Kiongerehan area, Western Henan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1992, 12(4): 299-308. [范宏瑞, 谢奕汉, 王英兰. 豫西熊耳山地区变质流体的性质与演化[J]. *矿物学报*, 1992, 12(4): 299-308.]
- [14] Fan Hongrui, Xie Yihan, Zhao Rui, et al. Dual origins of Xiaozhiling gold-bearing quartz veins: Fluid inclusion evidence[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(15): 1424-1430.
- [15] Svensen H, Jamtveit B, Yardley B, et al. Eclogite facies fluids from the Caledonides of western Norway: compositions and implications for fluid-rock interactions[J]. *Mineral Mag*, 1998, 62A: 1481-1482.
- [16] Xiao Y L, Hoefs J, van den Kerkhof A M, et al. Fluid inclusions in ultra high-pressure eclogites from the Dabie Shan, eastern China[J]. *Mineral Mag*, 1998, 62A: 1667-1668.
- [17] Philippot P, Selverstone J. Trace-element-rich brines in eclogitic veins: Implications for fluid composition and transport during subduction[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1991, 106: 417-430.
- [18] Andersen T, Austrheim H, Burke E A J. Fluid inclusions in granulites and eclogites from the Bergen Arcs, Caledonides of W. Norway[J]. *Mineral Mag*, 1990, 54: 145-158.
- [19] Larsen R B, Eide E A, Burke E A J. Evolution of metamorphic volatiles during exhumation of microdiamond-bearing granulites in the Western Gneiss Region, Norway[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 133: 106-121.
- [20] Xu Qidong. Fluid inclusion study in metamorphic rocks: Several key points[J]. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3(3-4): 216-221. [徐启东. 变质岩流体包裹体研究的几个基本问题综述[J]. *地学前缘*, 1996, 3(3-4): 216-221.]
- [21] Bebout G E, Barton M. Fluid flow and metamorphism in a subduction zone hydrothermal system: Catalina Schist terrane, California[J]. *Geology*, 1989, 17: 976-980.
- [22] Bebout G E. Field-based evidence for devolatilization in subduction zones: Implications for arc magmatism[J]. *Science*, 1991, 251: 413-416.
- [23] Kohn M J, Valley J W. Oxygen isotope constraints on metamorphic fluid flow, Townshend Dam, Vermont, USA[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58: 5551-5566.
- [24] van Haren J L M, Auge J J, Rye D M. Oxygen isotope record of fluid infiltration and mass transfer during regional metamorphism of pelitic schist, Connecticut, USA[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 3487-3504.
- [25] Chamberlain C P, Conrad M E. Oxygen isotope zoning in garnet: A record of volatile transport[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1993, 57: 2613-2629.
- [26] Kohn M J, Valley J W, Elsenheimer D, et al. Oxygen isotope zoning in garnet and staurolite: Evidence for closed system mineral growth during regional metamorphism[J]. *Am Mineral*, 1993, 78: 988-1001.
- [27] Hoefs J, Touret J. Fluid inclusion and carbon isotope study from Bamble granulites (South Norway): A preliminary investigation[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1975, 52: 165-174.
- [28] Jackson D H, Mathey D P, Harris N B W. Carbon isotope compositions of fluid inclusions in charnockites from southern India[J]. *Nature*, 1988, 333: 167-170.
- [29] Holness M B. Fluid flow paths and mechanisms of fluid infiltration in carbonates during contact metamorphism: the Beinnan Dubhaich aureole, Skye[J]. *J Metamorphic Geol*, 1997, 15: 59-70.
- [30] Ague J J. Mass transfer during Barrovian metamorphism of pelites, south-central Connecticut. II: Channelized fluid flow and the growth of staurolite and kyanite[J]. *Am J Sci*, 1994, 294: 1061-1134.
- [31] Bowman J R, Willett S D, Cook S J. Oxygen isotopic transport and exchange during fluid flow: one-dimensional models and applications[J]. *Am J Sci*, 1994, 294: 1-55.
- [32] Ferry J M, Gerdes M L. Chemically reactive fluid flow during metamorphism[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1998, 26: 255-287.
- [33] Thompson A B, Connolly J A D. Migration of metamorphic fluid: some aspects of mass and heat transfer[J]. *Earth-Science Rev*, 1992, 32: 107-121.
- [34] Cartwright I, Weaver T R. Two-dimensional patterns of metamorphic fluid flow and isotopic resetting in layered and fractured rocks[J]. *J Metamorphic Geol*, 1997, 15: 497-512.
- [35] Skelton A D L, Graham C M, Bickle M J. Lithological and structural controls on regional 3-D fluid flow patterns during greenschist facies metamorphism of the Dalradian of the SW Scottish Highlands[J]. *J Petrol*, 1995, 36: 563-585.
- [36] Zheng Yongfei, Fu Bin, Wei Chunsheng. Geochemistry of metamorphic fluids: from static-qualitative analysis to dynamic-quantitative study[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(4): 564-575. [郑永飞, 傅斌, 魏春生. 变质流体地球化学:从静态定性“流”向动态定量[J]. *岩石学报*, 1999, 15(4): 564-575.]
- [37] Williams I S, Buick I S, Cartwright I. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia[J]. *J Metamorphic Geol*, 1996, 14: 29-47.
- [38] Kelley S, Turner G, Butterfield A W, et al. The source and significance of argon isotopes in fluid inclusions from areas of mineralization[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 79: 303-318.

- [39] Qiu Huaning, Dai Tongno.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  technique for dating the fluid inclusions of quartz from a hydrothermal deposit[J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(22): 1 887-1 890.
- [40] Ague J J. Evidence for major mass transfer and volume strain during regional metamorphism of pelites[J]. Geology, 1991, 19: 855-858.
- [41] Tang Hongfeng, Liu Congqiang, Xie Guogang. Mass transfer and element mobility of rocks during regional metamorphism-A case study of metamorphosed pelites from the Shuangqiaoshan Group in Lushan[J]. Geological Review, 2000, 46(3): 245-254. [唐红峰, 刘丛强, 谢国刚. 区域变质作用中岩石的质量迁移和元素活动—以庐山双桥山群变泥质岩系为例[J]. 地质论评, 2000, 46(3): 245-254.]
- [42] Hellman P L, Smith R E, Henderson P. The mobility of the rare earth elements: Evidence and implications from selected terrains affected by burial metamorphism[J]. Contrib Mineral Petrol, 1979, 71: 23-44.
- [43] Grauch R I. Rare earth elements in metamorphic rocks[J]. Rev Mineral, 1989, 21: 147-167.
- [44] Tang Hongfeng, Liu Congqiang. Fluid migration and REE mobility during regional metamorphism: Evidence from trace element geochemistry of metamorphic veins within Xingzi Group of Lushan, SE China[J]. Geochimica, 2000, 29(5): 447-454. [唐红峰, 刘丛强. 变质过程中的流体运移和稀土元素活动—庐山星子群变质脉体的微量元素地球化学[J]. 地球化学, 2000, 29(5): 447-454.]
- [45] Wyllie P J. Subduction products according to experimental prediction[J]. Bull Geol Soc Am, 1982, 93: 468-476.
- [46] Moran A E, Sisson V B, Leeman W P. Boron depletion during progressive metamorphism: Implications for subduction processes[J]. Earth Planet Sci Lett, 1992, 111: 331-349.
- [47] Bebout G E, Ryan J G, Leeman W P, et al. Fractionation of trace elements by subduction-zone metamorphism-effect of convergent-margin thermal evolution[J]. Earth Planet Sci Lett, 1999, 171: 63-81.
- [48] Becker H, Jochum K P, Carlson R W. Constraints from high-pressure veins in eclogites on the composition of hydrous fluids in subduction zones[J]. Chem Geol, 1999, 160: 291-308.
- [49] Becker H, Jochum K P, Carlson R W. Trace element fractionation during dehydration of eclogites from high-pressure terranes and the implications for element fluxes in subduction zones[J]. Chem Geol, 2000, 163: 65-99.
- [50] Kogiso T, Tatsumi Y, Nakano S. Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust: I. Experiments and implications for the origin of ocean island basalts[J]. Earth Planet Sci Lett, 1997, 148: 193-205.
- [51] Shatsky V S, Kozmenko O A, Sobolev N V. Behaviour of rare-earth elements during high-pressure metamorphism[J]. Lithos, 1990, 25: 219-226.
- [52] Bea F, Montero P. Behavior of accessory phase and redistribution of Zr, REE, Y, Th, and U during metamorphism and partial melting of metapelites in the lower crust: An example from the Kinzigite Formation of Ivrea-Verbano, NW Italy[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1999, 63: 1 133-1 153.
- [53] Tribuzio R, Riccardi M P, and Ottolini L. Trace element redistribution in high-temperature deformed gabbros from East Ligurian ophiolites (Northern Apennines, Italy): constraints on the origin of syndeformation fluids[J]. J Metamorphic Geol, 1995, 13: 367-377.
- [54] Bau M. Controls on the fractionation of isoivalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect[J]. Contrib Mineral Petrol, 1996, 123: 323-333.
- [55] Bau M, Dulski P. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids[J]. Contrib Mineral Petrol, 1995, 119: 213-223.
- [56] Irber W, Förster H-J, Hecht L, et al. Experimental, geochemical, mineralogical and O-isotope constraints of the Fichtgebirge granites (Germany) [J]. Geol Rundschau, 1997, 86: S110-124.
- [57] Liu C-Q, Tang H-F. Redistribution of rare-earth elements (REE) during metamorphism and its indicative significance for fluid processes: a study on the trace element composition of the Xingzi Group metamorphic rocks in the Lushan area, SE China [J]. Science in China (Series D), 1999, 42: 646-654.
- [58] Audetat A, Gunther D, Heinrich A. Formation of a magmatic-hydrothermal ore deposit: Insights with LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions[J]. Science, 1998, 279: 2091-2094.

## ELEMENTARY GEOCHEMICAL STUDY ON THE ROLES OF FLUIDS DURING METAMORPHISM

TANG Hong-feng, LIU Cong-qiang

(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** The role of metamorphic fluids is an important process in the metamorphic rock-fluid system. This process can be revealed effectively by a series of geological and geochemical approaches. Advances in geochemical studies on the role of fluids during metamorphism are summarized in this paper, including aspects of fluid inclusions, isotopes, and elements. It is particularly emphasized that elementary geochemical study is of importance in tracing the process.

**Key words:** Metamorphic fluids; Metamorphism; Trace elements; Geochemistry.