

# 榴辉岩中金红石的矿物地球化学研究及其意义

陈振宇<sup>1</sup>, 王登红<sup>1</sup>, 陈毓川<sup>2</sup>, 徐 珏<sup>1</sup>, 余金杰<sup>1</sup>, 王平安<sup>3</sup>

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 中国地质科学院, 北京 100037

3. 中国地质调查局发展与研究中心, 北京 100037

**摘要:** 金红石的微量元素分析在俯冲带地质作用示踪、榴辉岩原岩判别以及形成温度估算等的研究中具有重要指示作用, 其 U-Pb 同位素和 Hf 同位素分析则对于确定高级变质岩的冷却时代以及探讨物质来源和壳幔作用过程具有重要意义. 初步研究显示, 苏鲁超高压变质地体及大陆科学钻探岩心中不同产状、不同类型的榴辉岩中的金红石具有不同的微量元素特征, 对榴辉岩原岩及金红石形成温度具有很好的指示作用; 3 个金红石样品的 Pb 同位素组成在逐步淋溶分析的某个中间阶段和最后阶段均出现有相似规律的 2 次突变, 其余阶段则相对平稳, 有可能反映了金红石在其生长过程中构造环境背景的变化. 进一步对金红石进行详细系统的矿物地球化学分析, 有望在苏鲁地体大陆深俯冲—折返过程的地球动力学及榴辉岩型金红石矿床的研究中获得一些新的认识.

**关键词:** 金红石; 微量元素; 同位素; 超高压变质岩; 榴辉岩型金红石矿床.

中图分类号: P578.4

文章编号: 1000-2383(2006)04-0533-06

收稿日期: 2006-04-05

## Mineral Geochemistry of Rutile in Eclogite and Its Implications

CHEN Zhen-yu<sup>1</sup>, WANG Deng-hong<sup>1</sup>, CHEN Yu-chuan<sup>2</sup>, XU Jue<sup>1</sup>, YU Jin-jie<sup>1</sup>, WANG Ping-an<sup>3</sup>

1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

**Abstract:** The study of rutile's mineral geochemistry can provide important information for the investigation of petrology and the geodynamics of a subduction zone. Rutile-bearing eclogite (eclogitic-rutile deposit) in Sulu UHPM terrane and the >5 000 m deep CCSD main hole provide a good opportunity for the geochemical investigation of rutile. Preliminary research has shown that eclogites of different occurrences and different types in Sulu UHPM terrane and CCSD main hole have different trace element contents, which indicate that trace elements in rutile can serve as a practical tool for provenance tracing of eclogite and for estimation of rutile mineralization temperature. Pb isotope composition of 3 rutile samples showed two abrupt changes during step-leaching analysis, which may be a reflection of tectonic condition variation during the growth history of rutile, and have potential use in tracing the process of continental subduction-exhumation. Further detailed studies on the geochemistry of rutile are needed to provide new knowledge on the geodynamics of the subduction-exhumation of Sulu terrane, and on the eclogitic rutile deposit.

**Key words:** rutile; trace elements; isotope; UHPM rocks; eclogitic rutile ore.

金红石是一种在许多岩性(如高级变质岩、岩浆岩、沉积岩及热液矿床)中都很常见的副矿物. 对变质岩、尤其是俯冲带变质岩中的金红石矿物的研究, 可以为我们提供非常丰富而且重要的信息:(1)金红石具有的超高压及极高压指示意义的结构多型( $\alpha$ -PbO<sub>2</sub>型 TiO<sub>2</sub>、萤石结构 TiO<sub>2</sub>、斜锆石型结构

TiO<sub>2</sub>)使得金红石在大陆深俯冲深度示踪及超高压变质岩的折返动力学的研究中具有重要意义(宋衍茹和金振民, 2002);(2)含硅金红石的发现也为俯冲带变质岩是否经历超高压变质提供了一种新的证据(Yang *et al.*, 2003);(3)金红石矿物中可以容纳高达百分含量级的一些高价态/高场强元素(HFSE)如 V、Cr、Fe、Al、Nb、Sn、Sb、Ta、Zr、W(Zack *et al.*, 2002; Zack *et al.*, 2004b), 而高场强元素, 特别是 Nb、Ta 和 Nb/Ta 比值在俯冲带地质作用及壳—幔相互作用的研究中具有重要的指示意义(Green, 1995);(4)金红石中适量的 U、Pb 含量及其约为 450 °C 的 U-Pb 体系封闭温度, 使得金红石的 U-Pb 年龄可以精确限定变质岩的变质或冷却年龄(Li *et al.*, 2003);金红石中微量的 Hf 含量也为我们提供了对金红石进行 Hf 同位素测定并用于探讨物质来源及壳幔相互作用的可能(Mathieu *et al.*, 2005)。

在以上几项研究中, 前两项虽然也具有重要意义, 但在实际工作中要寻找金红石的超高压或极高压结构多型以及含硅金红石有一定的难度, 在某种程度上是“可遇不可求”的。因此, 本文将主要对近年来国外在俯冲带变质岩中金红石矿物的微量元素和同位素地球化学研究进展作一个简单的综述, 重点对金红石的矿物地球化学研究在苏鲁超高压变质岩和榴辉岩型金红石矿床研究中的指示意义进行探讨。

## 1 金红石的微量元素地球化学

金红石作为俯冲带变质岩中容纳和控制 HFSE 特别是 Nb、Ta 元素配分的重要矿物, 及其被认为是俯冲板片脱水及熔融过程中 HFSE 的最主要储库, 并可由此解释普遍存在的岛弧火山岩 Nb 负异常现象, 因此一直以来受到了许多地质学家的重视(Zack *et al.*, 2002)。Nb、Ta 及其他高场强元素被广泛应用于作为地质过程和地球模式的指示剂, 研究 Nb/Ta 比值变化的起源以及 Nb/Ta 比值在壳—幔体系演化中的指示性具有重要的地球动力学意义(Green, 1995)。为了解 HFSE 在深俯冲过程中的行为及俯冲带变质岩中金红石对 HFSE 容纳和控制的程度, 国外已有一些研究者在实验岩石学上做了许多工作, 包括测定 Nb、Ta、Zr、Hf、U、Th 等元素在金红石/熔浆 D<sup>rutile/melt</sup>(Jenner *et al.*, 1993; Foley *et al.*, 2000; Green, 2000)及金红石/流体 D<sup>rutile/fluid</sup>(Brenan *et al.*, 1994; Stalder *et al.*, 1998;

Green, 2000)之间的微量元素分配系数。实验结果显示, Nb、Ta 的 D<sup>rutile/melt</sup> 在 100~500 之间, Zr、Hf 的 D<sup>rutile/melt</sup> 约为 5(Foley *et al.*, 2000); Nb、Ta、Zr 和 Hf 的 D<sup>rutile/fluid</sup> 值都大于 100(900 °C 和 1.0 GPa 条件下, Brenan *et al.*, 1994)。

Rudnick *et al.* (2000) 为寻找隐藏的超球粒陨石 Nb/Ta 值的存储库以平衡大陆地壳和亏损地幔的低球粒陨石 Nb/Ta 值, 对取自大陆地壳岩石和地幔捕虏体榴辉岩中的金红石采用电子探针和 LA-ICPMS 方法进行了主量元素和微量元素分析, 结果显示, 金红石虽然只是榴辉岩中的副矿物, 但它基本上控制了全岩的 Nb、Ta 元素含量, 用金红石的 Nb/Ta 比值就可代表榴辉岩全岩的 Nb/Ta 比值。Kalfoun *et al.* (2002) 对东南西伯利亚玄武岩中受交代的地幔橄榄岩捕虏体中的金红石、钛铈钙矿等富 Ti 氧化物、单斜辉石及全岩进行了高场强元素分析(电子探针和 ICPMS 方法), 质量平衡计算表明钛氧化物控制了 95% 以上的全岩 Nb 和 Ta 含量, 多个金红石的平均 Nb/Ta 比值与全岩的 Nb/Ta 比值非常接近, 全岩的 Nb/Ta 比值可以通过对富 Nb、Ta 金红石的分析来制约。Zack *et al.* (2002) 对阿尔卑斯中部 Trescolmen 的榴辉岩(俯冲洋壳成因)及其围岩石榴石云母片岩中的金红石进行微量元素分析(电子探针和 LAM-ICPMS 方法)及质量平衡计算表明, 榴辉岩中的金红石可控制 >90% 的全岩 Ti、Nb、Ta 和 W 元素含量及 5%~45% 的 V、Cr、Mo 和 Sn 元素含量, 且大多数金红石显示出在同一颗粒或同一薄片的不同颗粒之间成分的均一性。

以上这些实验研究和实际测定结果都表明, 金红石矿物在俯冲板片脱水及熔融过程中是 HFSE 尤其是 Nb、Ta 的主要储存库, 而且是俯冲带变质岩中控制和配分这些元素的主要矿物, 金红石的存在和含量将直接影响俯冲带变质岩的 Nb/Ta 比值及其他 HFSE 的特征。

此外, Zack *et al.* (2004a, 2004b) 的最新研究表明, 金红石中的 Zr 元素含量与其形成温度有良好的线性关系, Zr 元素含量可作为金红石形成的温度计, 这样就有可能通过对不同变质阶段生成的金红石分别测量其 Zr 元素含量, 计算其形成温度以反演变质岩的变质演化 P-T-t 轨迹; 近年来的研究还发现, 金红石中的一些微量元素如 Nb、Cr、W 的含量与其原岩有继承和对应关系, 具有原岩指示意义, 可用于判断其原岩类型, 即金红石的矿物化学在沉积

岩的物源区研究及变质岩的原岩判别中也具有重要的示踪作用(Giftze, 1996; Preston *et al.*, 1998; Preston *et al.*, 2002; Zack *et al.*, 2004b).

以上研究表明,对俯冲带变质岩中金红石矿物的微量元素分析,不但可了解高场强元素在深俯冲及折返过程中的行为,进而探讨深俯冲—折返过程即板块会聚边界的壳—幔物质相互作用的信息,还可以利用金红石的 Zr 元素含量温度计获得金红石的成矿温度,利用 Nb、Cr 等元素的含量配分探讨其原岩性质,等等。

## 2 金红石的同位素地球化学

金红石可以在许多高级变质岩中形成,其 U-Pb 同位素测年常被用于确定高级变质岩的冷却时代以构造其冷却曲线.对于古老高级变质岩中的金红石 U-Pb 测年已有许多报道(Li *et al.*, 2003).对时代较年轻的超高压变质岩如榴辉岩中的金红石 U-Pb 测年目前还较少报道,其主要原因可能是这些金红石中的 U、Pb 含量一般都比较低,较难获得准确的 U-Pb 年龄.李秋立等(2001)、Li *et al.*(2003)曾对南大别超高压变质带内金河桥榴辉岩中的金红石进行 U-Pb 同位素分析,利用等时线法和依据绿辉石 Pb 同位素组成扣除普通 Pb 法获得了一致的高精度金红石 U-Pb 年龄( $218 \pm 1.2$ )Ma,并结合金红石及其共生矿物对金红石—石英的氧同位素温度计分析计算,精确限定了南大别超高压岩石在峰期变质之后所经历的第一次快速冷却到  $470\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右时的时间.Franz *et al.*(2001)在对南大别高压低温带北缘低温榴辉岩中石英脉的金红石进行 U-Pb 测年时,获得一个样品的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表观年龄为  $207 \sim 221$  Ma;而 Treloar *et al.*(2003)曾报道了 Pakistan Himalaya 含柯石英榴辉岩中金红石( $44.1 \pm 1.1$ )Ma 的 U-Pb 年龄,无论这个年龄被解释成金红石的生长年龄还是冷却年龄,可以肯定,它对峰期变质作用持续的时间起到了明确的限定.这个年龄可能也是目前报道的最小的金红石 U-Pb 年龄.

金红石中通常含有微量的 Hf 元素,这使得我们有可能对金红石进行 Hf 同位素的分析.近年来,化学分离方法的极大改进和热二次电离质谱分析技术(hot-SIMS),特别是多接收器双耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)的应用使得 Lu-Hf 同位素方法正在逐步变成常规方法(凌文黎和程建萍,1999).

Hf 同位素组成在地壳、岩石圈地幔的不同端元及软流圈之间变化很大,反映了这些具有不同 Lu/Hf 比值的地球化学储库长期演化的结果.在熔浆从软流圈中分异出来的过程中,Hf 优先进入熔浆中,使得残余相中具有相对较高的 Lu/Hf 比值,部分陆下岩石圈地幔因此可能具有较高的 Lu/Hf 比值,不过,若发生后期熔浆的交代作用,则可能由于 Hf 的引入而产生具有较低 Lu/Hf 比值的岩石圈地幔单元,利用这种变化可以对影响岩石圈地幔的交直流体的来源进行示踪,并探讨该岩石圈地幔单元的历史演化(Mathieu *et al.*, 2005).

目前对金红石矿物的 Hf 同位素的研究还不多,但是可以预见,作为超高压变质岩尤其是榴辉岩中的一种重要的副矿物,金红石的 Hf 同位素研究将对深俯冲—折返过程中的物质来源及壳幔相互作用的探讨有重要意义.

## 3 对苏鲁超高压变质岩和榴辉岩型金红石矿床研究的启示

苏鲁超高压变质带产出有富含金红石的榴辉岩,在东海、新沂一带的榴辉岩体中已发现 20 多个金红石矿体,形成了大型的榴辉岩型金红石矿床(黄建平等,2002).超高压变质带地表出露的其他变质岩也含有数量不等的金红石或其他钛矿物.对中国大陆科学钻探(CCSZ)所揭示的各种超高压变质岩钻孔岩心、矿心的观察、编录也揭示出各种超高压变质岩不同程度的金红石富集(钛矿化)现象(徐珏等,2004).金红石在这里不仅是榴辉岩中最重要的副矿物之一,而且是榴辉岩型金红石矿床的矿石矿物.那么,在苏鲁超高压变质岩和榴辉岩型金红石矿床的研究中,金红石的矿物地球化学能否对我们有所启示?

王汝成等(2005)曾利用电子探针对 CCSZ 主孔 3 类榴辉岩(金石榴辉岩、多硅白云母榴辉岩和蓝晶石榴辉岩)中的金红石主要进行了 Nb、Cr、Zr 等微量元素的分析,发现 3 类榴辉岩具有不同的 Nb、Cr 地球化学特征,很好地反映了其原岩性质并可用于判别原岩类型;而利用金红石的 Zr 含量温度计则可计算金红石的成矿温度.笔者等则对苏鲁地表露头不同产状的几个榴辉岩(毛北榴辉岩、青龙山榴辉岩、班庄榴辉岩)中的金红石进行了 Nb、Cr、Zr、Fe、V 等微量元素的分析,结果发现不同产状的榴辉岩

中金红石具有不同的 Nb、Cr、Fe、V 等微量元素特征,同样可以很好地与其原岩性质相对应;而利用金红石的 Zr 含量温度计计算的金红石成矿温度与王汝成等(2005)的结果相近(Chen *et al.*, 2005).最近我们又分别对取自 CCSD 岩心的 18 个榴辉岩样品和苏鲁地表不同产状的 18 个榴辉岩样品中的金红石进行了微量元素分析,并对榴辉岩原岩性质和金红石成矿温度进行了探讨(余金杰等,待发表资料).虽然这些初步研究已经表明,金红石的微量元素分析是研究榴辉岩原岩特征及其钛成矿作用的实用方法之一(王汝成等,2005),但我们还缺少对金红石的微量元素地球化学及其指示意义的详细系统的研究工作,还有许多问题有待于进一步研究解决,比如,除了对不同类型、不同产状榴辉岩及不同变质岩岩石中的金红石(或其他钛矿物)的微量元素特征及其指示意义的探讨外,不同赋存状态的金红石是否分别代表了不同的变质演化阶段?不同演化阶段的金红石是否具有不同的微量元素特征?而这些特征在苏鲁超高压变质带的岩石学演化、HFSE 在深俯冲—折返过程中的地球化学行为、壳幔相互作用以及榴辉岩型金红石矿床的研究中,又能提供哪些有用的信息?搞清这些问题,将使我们超高压变质岩中金红石的微量元素地球化学特征及其在苏鲁超高压变质岩、金红石矿床以及大陆深俯冲—折返过程的动力学研究中的指示意义取得一些新的认识.

我们在进行苏鲁地区金石榴辉岩矿床的研究中,曾挑选了 3 个榴辉岩中的金红石(D1、D5、D8)进行 U-Pb 同位素分析,遗憾的是,由于放射性成因 Pb 的含量过低,未能获得准确的 U-Pb 年龄,但是在分析过程中,通过对单颗粒金红石样品分别进行 7~12 步的逐步淋溶(step leaching)获得了一系列的 Pb 同位素组成数据,有意思的是,这些金红石的 Pb 同位素组成并不落在一条生长线上(图 1),而是不同样品在逐步淋溶的某个中间阶段和最后阶段所获得的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  均出现有相似规律的 2 次突变,其余阶段则相对平稳(图 2). Franz *et al.* (2001) 在对南大别 HP/LT 带北缘低温榴辉岩中石英脉的金红石进行 U-Pb 测年时,其中 1 个样品是由一颗 4 cm 长的单个金红石晶体分成 3 个部分分别测量的,由这 3 个部分所给出的 Pb 同位素组成也是因为变化太大而未能落在一条生长线上,但是从  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的模式图上判断并没有后

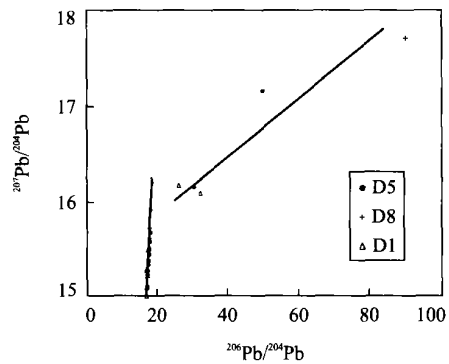


图 1 金红石的铅同位素组成图解

Fig. 1 Plot of Pb isotope composition of rutiles

期的 Pb 加入或 Pb 丢失发生,对此他们给出的解释是该金红石晶体初始的 Pb 同位素组成是不均一的,意味着石英脉中的金红石在超高压变质岩抬升过程的退变质流体中生长时,在其结晶生长过程中流体中的 Pb 同位素组成是变化的.我们所分析的样品——榴辉岩中的金红石可能是从深俯冲阶段开始结晶生长的,其生长过程中不存在那么多的流体,但其 Pb 同位素组成也同样要受到原岩及周围环境的影响.由此向我们提出了一个重要的问题:金红石的这种 Pb 同位素组成变化情况是否可能反映了金红石在不同生长阶段放射性 Pb 同位素体系曾受到某种明显的干扰,并进而可能反映了金红石在其生长过程中构造环境背景的变化,即由下地壳到地幔再回到上地壳的整个大陆深俯冲—折返过程(Wang *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2005).

对单颗粒金红石进行 Pb 同位素组成的逐步淋溶法分析,这可能是第一次,而利用所获得的 Pb 同位素组成变化来示踪金红石结晶生长过程构造背景变化的分析,也只是初步的探讨.如果可以证明这种方法可行的,则将对苏鲁超高压变质带的深俯冲—折返过程提供重要的示踪证据.

大陆板块汇聚边界的壳幔作用是大陆动力学研究的重要内容之一(许志琴,2004). Hf 同位素是探讨壳幔作用的良好指示剂,目前对 Hf 同位素的研究主要以锆石矿物为主,而金红石在超高压变质岩中也是主要的 Hf 元素赋载体,尤其在苏鲁金石榴辉岩中,金红石的含量最高可占到榴辉岩体积的 10%(徐珏等,2004),因此,金红石的 Hf 同位素分析将对探讨苏鲁超高压变质岩尤其是金红石矿的物质来源以及深俯冲—折返过程中的壳幔作用具有重要意义.

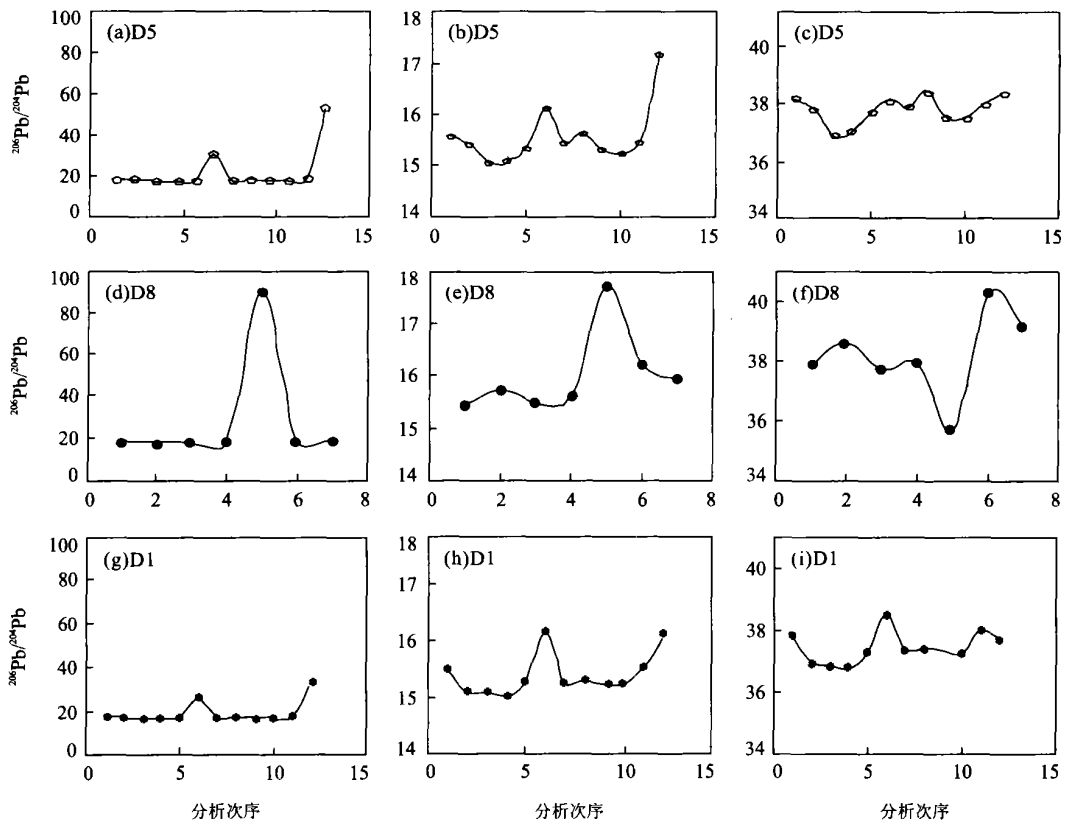


图 2 金红石在逐步淋溶过程中铅同位素组成的变化  
 Fig. 2 Variation of Pb isotope composition of rutile during step leaching

### 4 结论

金红石是俯冲带变质岩尤其是榴辉岩中重要的副矿物,实验研究和实际分析均已表明,金红石矿物是俯冲带变质岩中容纳和控制高场强元素(HFSE)的最主要矿物之一,金红石矿物微量元素地球化学的研究对于探讨高场强元素在俯冲变质过程中的地球化学行为、变质岩原岩判别以及金红石形成温度等方面具有重要意义,而金红石的 U-Pb 同位素年龄可为高级变质岩的冷却年龄提供精确的制约,其 Hf 同位素的研究则对于探讨壳幔作用演化具有重要指示意义。

苏鲁地区地表广泛出露的和大陆科学钻探工程主孔 5 000 多 m 的超深钻所揭露的各种含金红石超高压变质岩尤其是金红石榴辉岩矿床,为我们研究金红石的矿物地球化学及其对苏鲁超高压变质岩和榴辉岩型金红石矿床的指示意义提供了良好的机会,初步研究已经显示,金红石的微量元素分析是研究榴辉岩原岩特征及其钛成矿作用的实用方法之

一,金红石的 Pb 同位素组成有可能将对苏鲁超高压变质带的深俯冲—折返过程提供重要的示踪证据,进一步对金红石进行详细系统的微量元素和 U-Pb、Hf 同位素地球化学分析,有望在苏鲁超高压变质岩的演化及深俯冲—折返过程中超高压变质岩的演化、HFSE 的地球化学行为及壳幔相互作用、榴辉岩型金红石矿床的矿质来源、成矿时代、成矿温度及成矿动力学等问题的探讨中获得一些新的认识。

致谢:杨经绥研究员认真审阅了全文并提出许多宝贵的修改意见,在此深表感谢!

### References

Brenan, J. M., Shaw, H. F., Phinney, D. L., et al., 1994. Rutile-aqueous fluid partitioning of Nb, Ta, H, Zr, U and Th: Implications for high field strength element depletions in island-arc basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 128, 327—339.

Chen, Z. Y., Chen, Y. C., Wang, D. H., et al., 2005. Rutilites in eclogite from Sulu UHPM terrane: A preliminary study. In: Mao, J. W., Bierlein, F. P., eds., *Mineral de-*

- posit research: Meeting the global challenge (Proceeding of the 8th Biennial SGA meeting). Springer, 731–733.
- Mathieu, C., O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., et al., 2005. Hf isotopes of MARID (mica-amphibole-rutile-ilmenite-diopside) rutile trace metasomatic processes in the lithospheric mantle. *Geology*, 33: 45–48.
- Foley, S. F., Barth, M. G., Jenner, G. A., 2000. Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 933–938.
- Franz, L., Romer, R. L., Klemd, R., et al., 2001. 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.*, 141: 322–346.
- Gfetze, J., 1996. Genetic information of accessory minerals in clastic sediments. *Zentralbl. Geol. Palaontol.*, Teil 1, 101–118.
- Green, T. H., 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chem. Geol.*, 120: 347–359.
- Green, T. H., 2000. The effect of rutile on high-field-strength element behaviour in the crust-mantle system. EMPG VIII, *J. Conf. Abst.*, 5: 44.
- Huang, J. P., Ma, D. S., Liu, C., et al., 2002. Rutile deposits in eclogite of ultrahigh pressure metamorphic belt in the northeast of Jiangsu Province and ore genesis. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 38(4): 514–524 (in Chinese with English abstract).
- Jenner, G. A., Foley, S. F., Jackson, S. E., et al., 1993. Determination of partition coefficients for trace elements in high pressure-temperature experimental run products by laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LAM-ICP-MS). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57: 5099–5103.
- Kalfoun, F., Ionov, D., Merlet, C., 2002. HFSE residence and Nb/Ta ratios in metasomatized, rutile-bearing mantle peridotites. *Earth and Planetary Science Letters*, 199: 49–65.
- Li, Q. L., Li, S. G., Zhou, H. Y., et al., 2001. U-Pb age of rutile in UHP eclogite: The evidence of rapid cooling. *Chinese Science Bulletin*, 46(19): 1655–1658 (in Chinese).
- Li, Q. L., Li, S. G., Zheng, Y. F., et al., 1999. A high precision U-Pb age of metamorphic rutile in coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China: A new constraint on the cooling history. *Chemical Geology*, 200: 255–265.
- Li, Q. L., Li, S. G., Zheng, Y. F., et al., 2003. A high precision U-Pb age of metamorphic rutile in coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China: A new constraint on the cooling history. *Chemical Geology*, 200: 255–265.
- Ling, W. L., Cheng, J. P., 2003. New constraints of Lu-Hf isotope on some critical geological issues (I): Early evolution of the earth. *Geological Science and Technology Information*, 18(1): 79–84 (in Chinese with English abstract).
- Preston, J., Hartley, A., Hole, M., et al., 1998. Integrated whole-rock trace element geochemistry and heavy mineral chemistry studies: Aids to the correlation of continental red-bed reservoir in the Beryl Field, UK North Sea. *Pet. Geosci.*, 4: 7–16.
- Preston, J., Hartley, A., Mange-Rajetzky, M., et al., 2002. The provenance of Triassic continental sandstones from the Beryl field, northern North Sea: Mineralogical, geochemical, and sedimentological constraints. *J. Sediment. Res.*, 72: 18–29.
- Rudnick, R. L., Barth, M., Horn, I., et al., 2000. Rutile-bearing refractory eclogites missing link between continents and depleted mantle. *Science*, 287: 278–281.
- Song, Y. R., Jin, Z. M., 2002. Nanometer-sized UHP Rutile: Tracing the depth of continental deep subduction. *Earth Science Frontier*, 9(4): 267–272 (in Chinese with English abstract).
- Stalder, R., Foley, S. F., Brey, G. P., et al., 1998. Mineral-aqueous fluid partitioning of trace elements at 900–1 200 °C and 3.0 GPa to 5.7 GPa: New experimental data set for garnet, clinopyroxene and rutile and implications for mantle metasomatism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62: 1781–1801.
- Treloar, P. J., O'Brien, P. J., Parrish, R. R., et al., 2003. Exhumation of early Tertiary, coesite-bearing eclogites from the Pakistan Himalaya. *Journal of the Geological Society, London*, 160: 367–376.
- Wang, D. H., Li, H. Q., Chen, Y. C., et al., 2005. Lead isotopic composition of rutiles from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) hole and its genetic significance for the superlarge rutile deposit in Maobei, Jiangsu Province. In: Mao, J. W., Bierlein, F. P., eds., Mineral deposit research: Meeting the global challenge (Proceeding of the 8th Biennial SGA meeting). Springer, 69–72.

附中文参考文献

李昌年, 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 74—109.

刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等, 2001. 中国苏北预先导孔 CCSD-PP2 片麻岩中锆石的矿物包裹体及其超高压变质作用的证据. 科学通报, 241—246.

刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等, 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别. 岩石学报, 20(1): 9—26.

刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等, 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔 2 000~3 000 m 正、副片麻岩的地球化学性质及其成因机制. 岩石学报, 21(2): 305—324.

戚学祥, 许志琴, 齐金忠, 2005. 苏鲁地体南部高压变质带岩石地球化学特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 24(5): 476—484.

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(4): 433—450.

杨经绥, 陈世忠, 张仲明, 等, 2005. 苏鲁超高压变质带岗上石榴橄榄岩岩体: 中国大陆科学钻探卫星孔 (CCSD-PP3 钻孔) 初步研究. 岩石学报, 21(2): 239—304.

杨启军, 钟增球, 周汉文, 2003. 大别苏鲁超高压地体折返过程中岩石组合演化的地球化学约束. 地球科学——中国地质大学学报, 28(3): 241—249.

游振东, 苏尚国, 梁凤华, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m 超高压变质岩岩相学特征与变质变形史. 岩石学报, 20(1): 43—52.

张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2003. 南苏鲁造山带的超高压变质岩及岩石化学研究. 地质学报, 77(4): 478—491.

张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔 (100~2 050 m) 榴辉岩岩石化学研究. 岩石学报, 20(1): 27—42.

赵子福, 郑永飞, 陈斌, 等, 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔 (734~933 m) 榴辉岩和片麻岩元素及 Sr-Nd 同位素地球化学研究. 岩石学报, 21(2): 325—338.

\*\*\*\*\*

(上接 538 页)

Wang, R. C., Wang, S., Qiu, J. S., et al., 2005. Rutile in the UHP eclogites from the CCSD main drillhole (Donghai, eastern China): Trace element geochemistry and metallogenetic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 465—474 (in Chinese with English abstract).

Xu, J., Chen, Y. C., Wang, D. H., et al., 2004. Titanium mineralization in the ultrahigh-pressure metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling 100—2 000 m main hole. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 19—26 (in Chinese with English abstract).

Xu, Z. Q., 2004. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).

Yang, J. S., Bai, W. J., Fang, Q. S., et al., 2003. Silicon-rutile—An ultra-high pressure (UHP) mineral from an ophiolite. *Progress in Natural Science*, 13(7): 528—531.

Zack, T., Kronz, A., Foley, S., et al., 2002. Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists. *Chem. Geol.*, 184: 97—122.

Zack, T., Moraes, R., Kronz, A., 2004a. Temperature dependence of Zr in rutile: Empirical calibration of a rutile thermometer. *Contr. Min. Petrol.*, 148: 471—488.

Zack, T., von Eynatten, H., Kronz, A., 2004b. Rutile geo-

chemistry and its potential use in quantitative provenance studies. *Sediment Geol.*, 171: 37—58.

附中文参考文献

黄建平, 马东升, 刘聪, 等, 2002. 苏北超高压变质带榴辉岩型金红石矿床及其成因. 南京大学学报 (自然科学版), 38(4): 514—524.

李秋立, 李曙光, 周红英, 等, 2001. 超高压榴辉岩中金红石 U-Pb 年龄: 快速冷却的证据. 科学通报, 46(19): 1655—1658.

凌文黎, 程建萍, 1999. Lu-Hf 同位素体系对若干基础地质问题的新制约(之一)——地球早期演化. 地质科技情报, 18(1): 79—84.

宋衍茹, 金振民, 2002. 纳米级超高压相金红石——大陆深俯冲深度的示踪. 地学前缘, 9(4): 267—272.

王汝成, 王硕, 邱检生, 等, 2005. CCSD 主孔揭示的东海超高压榴辉岩中金红石: 微量元素地球化学及其成矿意义. 岩石学报, 21(2): 465—474.

徐珏, 陈毓川, 王登红, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m 超高压变质岩中的钛矿化. 岩石学报, 20(1): 19—26.

许志琴, 2004. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果. 岩石学报, 20(1): 1—8.