

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

CCSD 主孔金红石与石榴子石中锆石包裹体的 Hf 元素地球化学特征

蔡志慧, 曾令森, 张泽明, 梁凤华, 陈方远

中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室, 北京, 100037

内容提要:本文样品是采自中国大陆科学钻探(CCSD)主孔的含金红石榴辉岩,在这些样品中常常含有锆石副矿物,锆石可以呈粒间矿物存在,也可以包裹在其他矿物(如石榴子石、金红石)中。背散射电子图像(BSE)显示这些锆石包裹体的亮度较弱,颗粒较小(约10~30 μm),发育多晶面,晶体内部结构和成分均匀。采用能谱分析(EDS)方法来测量锆石的元素成分含量,结果表明:①这些锆石具有很高的 Hf 含量,金红石中达到1.51%~2.45%,石榴子石中为1.77%~2.13%;②Zr/Hf 值约为35.92,比一般的基性原岩中的锆石的 Zr/Hf 值明显要低,这些特征说明它们很可能是形成在超高压条件下的变质锆石。

关键词:榴辉岩;变质锆石;Zr/Hf 值;中国大陆科学钻探工程

锆石(ZrSiO_4)是沉积岩、火成岩和变质岩中一种常见的、重要的副矿物,具有十分稳定的物理和化学性质,其他矿物(如柯石英、金刚石、石榴子石、金红石等)一旦被锆石捕获,其化学成分很难改变,所以锆石被认为是保存超高压矿物的最好的“容器”(Tabata et al., 1998; Katayama et al., 2000; Ye et al., 2000a; Liu et al., 2001)。这些包裹体组合为探讨超高压地区的岩石成因及演化历史提供了大量的岩石学和地球化学方面的信息。如,在榴辉岩及其围岩的锆石中发现柯石英这种超高压矿物,说明榴辉岩及其围岩曾一起经历过俯冲和超高压变质过程(Okay et al., 1989; Zhang et al., 1995; Liou et al., 2000)。同时,锆石也是 U、Th、Hf 及 REE 的重要载体(Sawka, 1988),锆石 U-Pb 定年是同位素年代学研究中最常用、最有效的方法。近年来,伴随着高精度离子探针(SIMS)、激光熔离等离子质谱仪(LA-ICP-MS)、高灵敏度高分辨率离子探针(SHRIMP)和新一代高精度 TIMS 技术的发展,越来越多的研究专注于确定不同类型锆石的地球化学特征,同时配合高精度的定年测试,来更好地确定所获得锆石 U-Pb 年龄的意义(如:Heaman et al., 1990; Hacker et al., 1998; Ye et al., 2000b; Liu et al., 2001, 2004)。另外,氧在锆石中扩散速率非常低(Watson et al., 1997; Zheng et al., 1998),所以

可以很好地保存锆石形成时的初始氧同位素组成(Valley et al., 1994; King et al., 1998; Zheng et al., 2004),提供丰富的变质岩原岩氧同位素信息,若将锆石氧同位素研究和 U-Pb 测年研究相结合,可以为推测变质岩的原岩性质提供有效的制约(Zheng et al., 2004; 吴元保等, 2005)。

然而,在变质岩中,判断锆石的形成环境一直是一个突出的问题。虽然已经有很多学者(如 Peucat et al., 1982; Gebauer et al., 1985; Rubatto et al., 1999)从锆石的晶体形貌学角度探讨过这个问题,但这只能粗略地区分出锆石的种类,定性地指示寄主岩体的化学成分特点。也有研究(如 Rubatto et al., 2000)利用锆石的 Th、U 含量及 Th/U 值来判断锆石形成环境,不同成因的锆石具有不同的 Th、U 含量及 Th/U 值,岩浆锆石的 Th、U 含量较高, Th/U 一般大于0.4;变质锆石的 Th、U 含量较低, Th/U 值一般小于0.1,但这一点并不绝对,因为有的岩浆锆石的 Th/U 值也可以小于0.1(Gebauer, 1996);所以,无论单纯地观察锆石晶体形状还是通过测量 Th、U 含量及 Th/U 值来判断锆石的形成环境具有一定的局限性,还需要其他方面的证据。本文将利用锆石的 Zr、Hf 含量及 Zr/Hf 值来探讨高压-超高压变质条件下新生锆石的地球化学特征。实际上,很早就有人提出了用锆石的 Zr/Hf 值来判断岩浆岩的类

注:本文为科技部“973”基础研究项目(编号 2003CB716504)和国土资源部百人计划项目(编号 A2503)资助的成果。

收稿日期:2006-09-01;改回日期:2006-09-18;责任编辑:周健。

作者简介:蔡志慧,女,1980年生,硕士研究生,构造地质专业。通讯地址:100037,中国地质科学院地质研究所;电话:010-68990664;Email:cai_zhihui@gmail.com。

型,刘英俊(1984)根据前人研究成果,指出岩浆岩从基性向酸性岩演化的过程中,锆石中 Zr/Hf 值逐渐减小;随着碱性增高,锆石中 Zr/Hf 值升高,根据这一点可以区分岩浆岩系列。但在岩石变质作用过程中,伴随着温压,尤其是流体组分的变化,局部 Zr/Hf 值有可能发生变化,最终可能反映在新生的变质锆石中。如, Rubatto 等(1999)对麻粒岩相和榴辉岩相岩石中锆石含 Hf 量的测定结果表明,压力的升高促使锆石的 Hf 含量增高(即 Zr/Hf 值降低)。由于变质锆石的 Zr/Hf 值取决于锆石生长时 Zr 和 Hf 在锆石与基质之间的配分行为,同时这种配分行为在高压—超高压变质环境下,压力的变化是主控因素,因此,在高压—超高压变质岩中,变质锆石的 Zr/Hf 值所代表的含义需要一个新的解释,本文将以前中国大陆科学钻探(CCSD)主孔榴辉岩中的锆石为研究对象,具体阐释这个问题。

中国大陆科学钻探(CCSD)位于江苏连云港的东海县,处于苏鲁超高压变质带的西南缘。苏鲁一大别超高压变质带被公认为是世界上规模最大的超高压变质带,一直以来,厘定苏鲁一大别超高压变质岩的 P - T - t 轨迹是超高压变质作用研究的重点之一,而如何更好地限定榴辉岩超高压变质条件是探讨苏鲁超高压变质带 P - T - t 轨迹的一个关键环节,本文通过测量 CCSD 主孔金红石榴辉岩中锆石的 Hf 含量、Zr/Hf 值再结合锆石的形貌特征,得出这些锆石形成于超高压环境下。

1 样品的岩相学特征

所研究的样品采自苏鲁超高压变质带中国大陆科学钻探(CCSD)主孔中,采样深度约为 530~540 m,属于含金红石榴辉岩岩性一构造单元,由金红石榴辉岩夹超镁铁质岩及少量片麻岩组成,总体面理走向 10°N ,倾向 100°E ,倾角 55° (许志琴等,2004)。全岩化学特征表明这些样品属于高 Ti 型榴辉岩。高 Ti 型榴辉岩的特征是: SiO_2 含量很低($<45\%$), TiO_2 含量很高($3\%\sim 6\%$), CaO 和 TFeO 含量也相当高,原岩相当于玄武岩、苦橄岩或安山质玄武岩(张泽明等,2004)。样品的主要矿物组成是石榴子石、绿辉石和金红石,还有少量的磷灰石、钛铁矿等(图版 I-1)。其中石榴子石碎裂较严重,没有明显的退变质特征,在其内部发现颗粒较小的锆石包裹体,大多数在 $10\sim 15\ \mu\text{m}$ 左右,包裹体周围没有裂隙(图版 I-5、6);而金红石有的作为包裹体存在于其他矿物中,有的以粒间颗粒形式存在于石榴子石、绿辉石等矿物

之间,部分具有轻微的钛铁矿退化边(图版 I-1、2)。背散射电子(BSE)图像中可以看到有的金红石中出溶两组细长的钛铁矿(宽度约 $1\ \mu\text{m}$)(图版 I-3),也可以看到粒度很小的锆石包裹体。有的锆石矿物颗粒稍大可以达到 $30\ \mu\text{m}$ (图版 I-4),石榴子石和金红石中的锆石有着相似的矿物形态特征:他形,轮廓不规则,透明度差,内部较均匀,没有明显的生长环带,矿物背散射电子(BSE)图像显示弱发光效应(图版 I-3、4),这些特征与 Wang 等(2004)所描述的处于结晶平衡状态的超高压变质锆石十分相似,但是不能仅从锆石的这些晶体形貌学特征就判断它是形成在超高压的条件下,还需要有其他方面的证据。

2 测试方法

将榴辉岩样品制成光学薄片,在显微镜下着重观察样品中金红石的产状、与共生矿物的接触关系、包裹体的种类、特征,尤其是锆石包裹体的形态、结构等特征。采用 JEOL JSM-5610 扫描电镜与 OXFORD 公司的能量色散显微分析仪(EDS),工作电压为 20 kV,用 Co 及其他纯金属和硅酸盐矿物标样,进行背散射电子图像(BSE)观察和矿物化学成分分析,BSE 图像可以很好地显示锆石的表面和内部结构特征(裂隙、包裹体分布)。整个实验过程在中国地质科学院地质研究所大陆动力学重点实验室完成,得到金红石和石榴子石中锆石包裹体的成分数据(表1)。

表 1 CCSD 榴辉岩金红石和石榴子石中锆石包裹体 EDS 测试数据

Table 1 EDS compositions of zircon inclusions in rutiles and garnets from the CCSD eclogites

测试点	寄主矿物	SiO_2 (%)	TiO_2 (%)	ZrO_2 (%)	HfO_2 (%)	总量 (%)	t ($^{\circ}\text{C}$)
Rt-1	Rt	31.61	>0.08	66.48	1.52	100.06	920.48
Rt-2	Rt	31.11	>0.08	66.68	1.98	100.08	872.70
Rt-3	Rt	31.21	>0.08	66.00	2.45	99.95	868.92
Rt-4	Rt	31.70	>0.08	66.51	1.51	99.97	852.24
Rt-5	Rt	31.26	>0.08	66.76	1.69	99.96	852.67
Rt-6	Rt	31.51	>0.08	66.11	2.13	99.96	831.67
Rt-7	Rt	30.73	>0.08	67.32	1.71	99.94	816.06
Grt-1-1	Grt	31.45		66.13	1.77	99.35	
Grt-1-2	Grt	31.13		66.22	1.78	99.12	
Grt-1-3	Grt	31.19		65.54	2.13	98.87	
Grt-1-4	Grt	31.06		66.92	2.00	99.98	
Grt-1-5	Grt	31.45		66.13	1.77	99.35	

注: Rt—金红石; Grt—石榴子石; 分析单位为中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室。

3 结果与讨论

标准锆石(ZrSiO_4), 67.2% ZrO_2 , 32.8% SiO_2 , Zr^{4+} 的配位数为8, 整个锆石的晶体结构也可以看作是由 $[\text{SiO}_4]$ 四面体和 $[\text{ZrO}_8]$ 多面体联结而成的。晶格中常常有 Hf、Th、U、Nb、Ti 等元素混入。处于结晶平衡状态的超高压变质锆石中的 Hf、Th、U、Y 含量较均匀, 而且 Th、U、Y 含量很低, 以至于难以利用电子探针检测到它们各自的含量, Hf 含量则很高 (Spear, 1995; Wang and Griffin, 2004)。同一锆石颗粒不同位置的元素含量区别很小, 如表1中, 每个测试点元素含量为同一锆石颗粒中的平均值, 不同锆石颗粒的元素含量有所区别, 金红石中锆石包裹体的 SiO_2 含量为 30.73%~31.70%, ZrO_2 含量为 66.00%~66.76%, HfO_2 含量为 1.51%~2.45%; 石榴子石中锆石包裹体的 SiO_2 含量为 31.06%~31.45%, ZrO_2 含量为 66.13%~66.92%, HfO_2 含量为 1.77%~2.13% (表1)。无论是金红石中锆石还是石榴子石中的锆石平均 HfO_2 含量 (分别为 1.86% 和 1.89%) 都明显高于一般的基性原岩中锆石 HfO_2 含量 (0.78%~1.24%) (Wang and Griffin, 2004), 甚至高于花岗岩岩浆锆石, 而一般认为花岗岩岩浆锆石的 Hf 含量 (1.39%) 是岩浆锆石中最高的 (Wang et al., 2002), 从这一点上也可以说本实验锆石不是岩浆锆石, 而是变质锆石。那么究竟是一个什么过程导致榴辉岩 (原岩是基性岩) 中的这种变质锆石强烈富 Hf 呢? 研究表明: 压力升高的情况下锆石的晶格会发生收缩, 每升高 10 kbar, Zr-O 键的长度会减小 0.0003 nm (Hazen and Finger, 1979), 根据类质同象替代的规律, 键长相对接近则容易发生替换。在超

高压条件下 (一般认为压力在 30~40 kbar), 压力的升高将更有利于 Hf^{4+} (离子半径为 0.078 nm) 替代 Zr^{4+} (离子半径为 0.079 nm) 进入锆石晶格, 而 Th^{4+} 、 U^{4+} 、 Y^{3+} 离子半径明显比 Zr^{4+} 的大, 在超高压变质条件下更难进入锆石晶格。根据锆石的这种元素地球化学特征, 可以判断锆石的类型 (Wang and Griffin, 2004)。如图 1a 中, 金红石中锆石 $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ 投点部分落在 Wang 等 (2004) 所描述的超高压变质锆石的投点范围内 (HfO_2 含量是 1.79%~2.32%, ZrO_2 含量是 65.229%~67.71%), 而有的金红石中锆石的 HfO_2 含量甚至高出 2.32% (如样品 Rt-3), 也有的 HfO_2 含量不到 1.79%, 但明显高于 Wang and Griffin (2004) 所描述的原生锆石的这一值 (0.78%~1.24%), 所以说本实验金红石中的锆石包裹体最有可能形成在超高压环境中。石榴子石中的锆石包裹体的 $\text{ZrO}_2/\text{HfO}_2$ 投点则全部落在超高压变质锆石的投点范围内 (图 1b)。再从榴辉岩中锆石的 HfO_2 含量直方图 (图 2) 上看, 大多数锆石 HfO_2 含量在 1.8%~2.2% 之间。由于锆石是包裹在其他矿物中的, 不会受到富 Hf 流体的作用影响, 所以说锆石包裹体所记录的是超高压条件下的元素含量特征。再综合榴辉岩中锆石的这种元素化学特征和前面提到的矿物形貌学特征, 得出结论: 所研究的锆石包裹体很可能形成于超高压环境下。

根据锆石的元素地球化学特征 (如 Hf 元素地球化学特征), 一方面可以确定是否达到超高压变质条件, 另外一方面也可以在这基础上建立相应的地质温压计, 如 Watson 等 (2005, 2006) 根据 TiO_2 在系统中达到饱和 (有金红石存在) 估算出变质锆石的形成温度, 本次研究中对金红石中的锆石包裹体中的

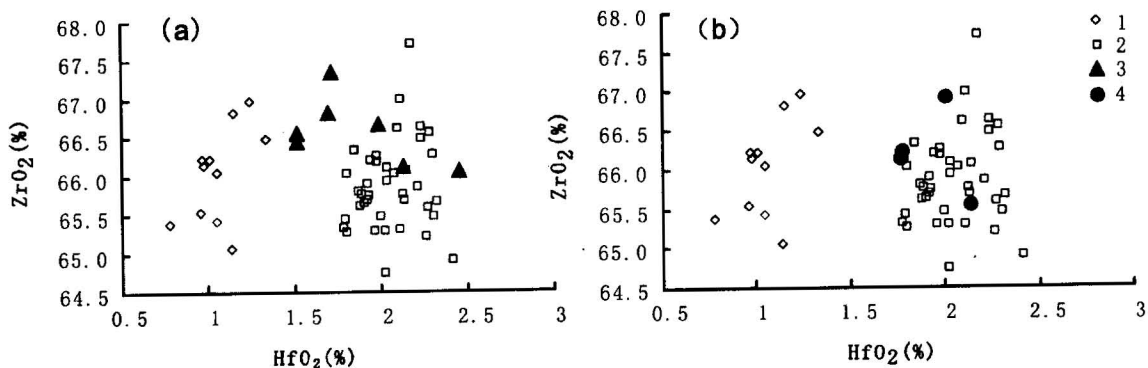


图 1 金红石(a)和石榴子石(b)中变质锆石的 ZrO_2 与 HfO_2 关系图

Fig. 1 Plot of ZrO_2 vs. HfO_2 for metamorphic zircon from rutiles (a) and garnets (b)

1—原生锆石 (引自 Wang 等, 2004); 2—变质锆石 (引自 Wang 等, 2004); 3—金红石中锆石; 4—石榴子石中锆石

1—Primary zircon (after Wang et al., 2004); 2—metamorphic zircon (after Wang et al., 2004); 3—zircon in rutile; 4—zircon in garnet

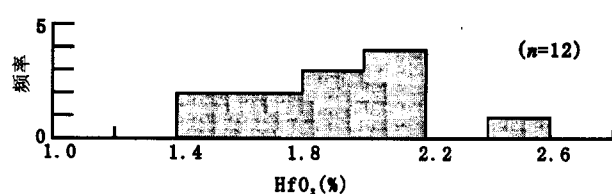


图 2 榴辉岩中锆石的 HfO₂ 含量直方图

Fig. 2 Histogram of HfO₂ for zircon in eclogites from CCSD

含 Ti 量也进行了测试,但能谱实验数据表明金红石内锆石包裹体 Ti 含量较高,大于 0.08 %,可能是由于受到周围金红石的影响,若选择其他试验方法如高精度离子探针(SIMS)、电子探针(ESP)会得到较准确的 Ti 含量数据。除了可以将这种确定了是形成在超高压变质条件下的锆石作为地质温度计外,值得一提的是,如果在样品中找到粒度更大一些的锆石包裹体颗粒,就可以对锆石进行原位探针测年实验,可以得到更准确的、接近代表苏鲁超高压变质锆石 U-Pb 年龄,为榴辉岩所经历的超高压变质过程提供更严格的年代学制约。

4 结论

(1)在 CCSD 主孔的 530~540 m 处榴辉岩样品中含有石榴子石、绿辉石及少量磷灰石、金红石、钛铁矿等矿物,在金红石和石榴子石中发现典型的变质锆石包裹体,变质锆石颗粒很小(约 10~30 μm),他形,轮廓不规则,透明度差,矿物 BSE 图像亮度较弱,内部较均匀,没有明显的生长环带。

(2)锆石包裹体体现出强烈富 Hf 的特征:平均 HfO₂ 含量为 1.91 %, Zr/Hf 值为 35.92。结合锆石的元素化学特征和矿物形貌学特征,推测导致这一现象的原因可能是由于所研究的锆石包裹体形成于超高压环境下。

致谢:十分感谢周开富、赵旭东、于胜尧同学,与他们的共同讨论和学习使笔者在本文的编写过程中受到很多启发。

参 考 文 献

刘英俊. 1984. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1~548.
王汝成, 王硕, 邱检生, 倪培. 2005. CCSD 主孔揭示的东海超高压榴辉岩中的金红石: 微量元素地球化学及其成矿意义. 岩石学报, 21(2): 465~474.
王硕, 王汝成, 邱检生, 倪培, 余金杰. 2006. CCSD 主孔超高压榴辉岩金红石的矿物包裹体研究. 岩石矿物学杂志, 25(1): 61~70.

吴元保, 郑永飞, 龚冰, 赵子福. 2005. 北淮阳新开岭地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成. 地球科学——中国地质大学学报, 30: 659~672.
许志琴, 张泽明, 刘福来, 杨经绥, 唐哲民, 陈世忠, 柴耀楚, 李天福, 陈方远. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 1200 m 构造柱及变形构造初步解析. 岩石学报, 20(1): 53~72.
张泽明, 许志琴, 刘福来, 游振东, 沈昆, 杨经绥, 李天福, 陈世忠. 2004. 中国大陆科学钻探主孔(100~2050 m)榴辉岩岩石化学研究. 岩石学报, 20(1): 27~42.
张泽明, 肖益林, 沈昆, 高勇军. 2005. 苏鲁超高压榴辉岩的石榴子石生长成分环带及变质作用 P - T 轨迹. 岩石学报, 21: 809~818.
Banno S, Enami M, Hirajima T, Ishiwatari A, Wang Q C. 2000. Decompression P - T path of coesite eclogite to granulite from Weihai, eastern China. Lithos, 52: 97~108.
Enami M, Zhang Q, Yin Y. 1993. High-pressure eclogites in northern Jiangsu—southern Shandong province, eastern China. Journal of Metamorphic Geology, 11: 589~603.
Finch R J, Hancher J M. 2003. Structure and chemistry of zircon and zircon-group minerals. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53: 1~25.
Gebauer D A. 1996. P - T - t path for an (ultra-?) high-pressure ultramafic-mafic rock-association and its felsic country-rocks based on SHRIMP-dating of magmatic and metamorphic zircon domains. Example: Alp Arami (Central Swiss Alps). In: Earth Processes Reading the Isotopic Code. Geophysical Mono-graph, 95: 307~329.
Gebauer D, Lappin M, Grunfelder M, Wyttenbach A. 1985. The age and origin of some Norwegian eclogites: a U-Pb zircon and REE study. Chemical Geology, 52: 227~247.
Hacker B R, Ratshbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D, Dong S W. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling—Dabie orogen. Earth and Planetary Science Letters, 161: 215~230.
Hazen R M, Finger L W. 1979. Crystal structure and compressibility of zircon at high pressure. American Mineralogist, 64: 196~201.
Heaman L M, Bowins R, Crockett J. 1990. The chemical composition of igneous zircon suites: implications for geochemical tracer studies. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54: 1597~1607.
Hirajima T, Ishiwatari A, Cong B L, Zhang R Y, Banno S, Nozaka T. 1990. Identification of coesite in Mengzhong eclogite from Donghai county, northeastern Jiangsu Province, China. Mineralogical Magazine, 54: 579~584.
Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53: 27~62.
Katayama I, Zayakhstan A A, Maruyama S. 2000. Progressive P - T records from zircon in Kokchetav UHP—HP rocks, northern Kazakhstan. The Island Arc, 9: 417~427.
King E M, Valley J W, Davis D W, et al. 1998. Oxygen isotope ratios of Archean plutonic zircons from granite—greenstone belts of the Superior Province: Indicator of magmatic source. Precambrian Research, 92: 365~387.
Liou J G, Zhang R Y. 1998. Petrogenesis of ultrahigh-pressure garnet-bearing ultramafic body from Maowu, the Dabie Mountains, central China. The Island Arcs, 7: 33~96.
Liou J G, Hacker B R, Zhang R Y. 2000. Into the forbidden zone.

- Science, 287: 1215~1216.
- Liu F L, Xu Z Q, Katayama I, et al. 2001. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PPI, Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Lithos*, 59: 199~215.
- Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, et al. 2004. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneiss, southwestern Sulu terrane, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 22: 315~326.
- Liu Y J. 1984. *Element Geochemistry*. Beijing: Science Press, 1~548 (in Chinese).
- Okay A I, Xu S, Sengor A M C. 1989. Coesite from the Dabie Mountains eclogite, central China. *European Journal of Mineralogy*, 1: 595~598.
- Peucat J J, Vidal P, Godard G, Postaire B. 1982. Precambrian U-Pb zircon ages in eclogites and garnet pyroxenites from South Brittany (France): an old oceanic crust in the West European Hercynian belt? *Earth and Planetary Science Letters*, 60: 70~78.
- Rubatto D, Gebauer G, Compagnoni R. 1999. Dating of eclogite-facies zircons: the age of Alpine metamorphism in the Sesia-Lanzo Zone (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 167: 141~158.
- Rubatto D, Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps. *Cathodoluminescence in Geoscience*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 373~400.
- Sawka W N. 1988. REE and trace element variation in accessory minerals and hornblende from the strongly zoned McMurtry Meadows Pluton, California. *Trans Roy Soc Edinburgh: Earth Science*, 79: 157~168.
- Spear F S. 1995. *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths*. Monograph Series. Mineralogical Society of America, Washington, DC, USA, 1~799.
- Wang X, Griffin W L, et al. 2002. Morphology and geochemistry of zircons from late Mesozoic igneous complexes in coastal SE China: implications for petrogenesis. *Mineralogical Magazine*, 66: 235~251.
- Wang X, Griffin W L. 2004. Unusual Hf contents in metamorphic zircon from coesite-bearing eclogites of the Dabie Mountains, east-central China: implications for the dating of ultrahigh-pressure metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, 22: 629~637.
- Wang R C, Wang S, Qiu J S, Ni P. 2005. Rutile in the UHP eclogites from the CCSD main drill hole (Donghai, eastern China): Trace-element geochemistry and metallogenetic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 465~474 (in Chinese with English abstract).
- Wang S, Wang R C, Qiu J S, Ni P, Yu J J. 2006. Mineral inclusions in rutile of Sulu UHP eclogites from the main drill hole of CCSD, Donghai. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 61~70 (in Chinese with English abstract).
- Watson E B, Cherniak D J, Hancher J M, Harrison T M, Wark D A. 1997. The incorporation of Pb into zircon. *Chemical Geology*, 141: 19~31.
- Watson E B, Harrison T M. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest earth. *Science*, 308: 841~844.
- Watson E B, Wark D A, Thomas J B. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151: 413~433.
- Wu Y B, Zheng Y F, Gong B, Zhao Z F. 2005. Zircon U-Pb ages and oxygen isotope compositions for granite at Xinkailing in the Beihuaiyang zone and their significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30: 659~672 (in Chinese with English abstract).
- Valley J W, Chiarenzelli J R, McLelland J M. 1994. Oxygen isotope geochemistry of zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 126: 187~206.
- Xu Z Q, Zhang Z M, Liu F L, Yang J S, Tang Z M, Chen S Z, Chai Y C, Li T F, Chen F Y. 2004. The structure profile of 0~1200 m in the main borehole, Chinese Continental Scientific Drilling and its preliminary deformation analysis. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 53~72 (in Chinese with English abstract).
- Yang J J, Jhan B M. 2000. Deep subduction of mantle-derived garnet peridotites from the Su-Lu UHP metamorphic terrane in China. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 167~180.
- Ye K, Yao Y, Katayama I, Cong B L, Wang Q C, Maruyama S. 2000a. Large area extent of ultrahigh-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China: new implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss. *Lithos*, 52: 157~164.
- Ye K, Cong B L, Ye D N. 2000b. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km. *Nature*, 407: 734~736.
- Zack T, Moraes R, Kronz A. 2004. Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148: 471~488.
- Zhang R Y, Liou J G, Cong B L. 1994. Petrogenesis of garnet-bearing ultramafic rocks and associated eclogites in the Su-Lu ultrahigh-pressure metamorphic terrane, China. *Metamorphic Geology*, 18: 149~166.
- Zhang R Y, Hirajima T, Banno S, Cong B L, Liou J G. 1995. Petrology of ultrahigh-pressure rocks from the southern Sulu region, eastern China. *Metamorphic Geology*, 13: 659~675.
- Zhang Z M, You Z D, Han Y J, Sang L K. 1996. Petrology, metamorphic process and genesis of the Dabie-Sulu eclogite belt, Eastern-Central China. *Acta Geologica Sinica*, 9: 134~156.
- Zhang Z M, Xu Z Q, Liu F L, You Z D, Shen K, Yang J S, Li T F, Chen S Z. 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100~2050m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 27~42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Xiao Y L, Sen K, Gao Y J. 2005. Garnet growth compositional zonation and metamorphic P-T path of the ultrahigh-pressure eclogites from the Sulu orogenic belt, eastern Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 809~818 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Xiao Y L, Xu Z Q, Hoefs J, Liu F L, Liou J G, Simon K. 2006. UHP metamorphic rocks from the Chinese continental scientific drilling project: I. Petrology and geochemistry of the main hole (0~2,050m). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, DOI 10. 1007/s 00410-006-0080-9.
- Zheng Y F, Fu B, Li Y L, et al. 1998. Oxygen and hydrogen isotope chemistry of ultra high pressure eclogites from the Dabie Mountains and the Sulu terrane. *Earth and Planet Science Letters*, 155: 113~129.
- Zheng Y F, Wu Y B, Chen F K, et al. 2004. Zircon U-Pb and

oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in
igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et*

Cosmochimica Acta, 68: 4159~4179.

Hf Geochemistry of Zircon Inclusions in Rutile and Garnet from the CCSD

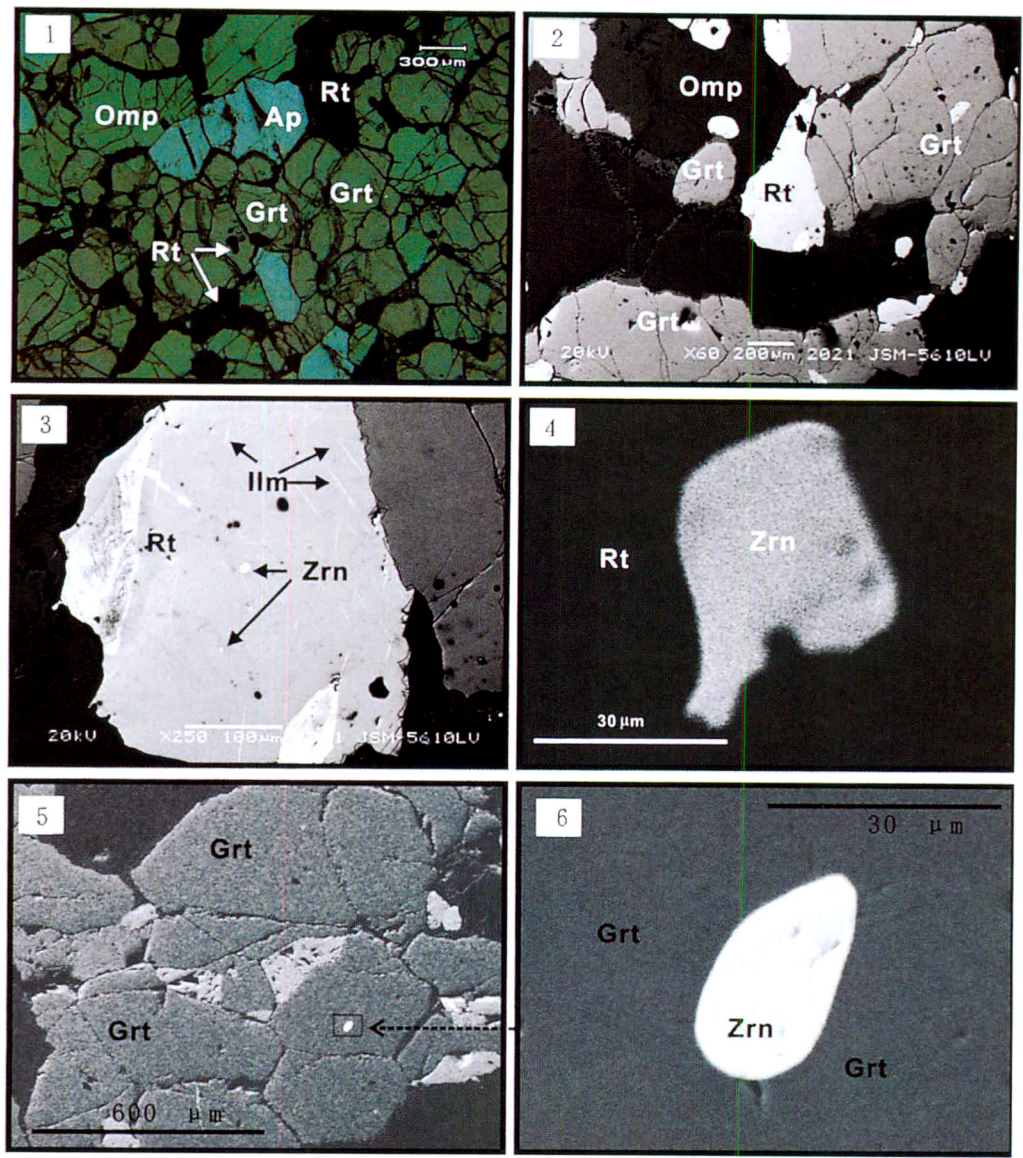
CAI Zhihui, ZENG Lingsen, ZHANG Zeming, LIANG Fenghua, CHEN Fangyuan

Key Laboratory for Continental Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing, 100037

Abstract

Except zircons as intergranular grains, zircon inclusions ($\sim 10\sim 30\ \mu\text{m}$) were also found in rutiles as well as garnets in rutile-bearing eclogites recovered from the CCSD main borehole. Backscattered electron (BSE) imaging of such zircons show that they have multi-faceted shape, homogeneous internal structure and weak BSE luminescence. Hf concentrations in these zircons was measured by Energy dispersive spectroscopy (EDS) technique. These data show that these zircons inclusions have (1) relatively high Hf concentrations with HfO_2 ranging from 1.51% to 2.45 % in rutile, and 1.77% to 2.13% in garnet, respectively; (2) low Zr/Hf ratio (35.92), significantly lower than the Zr/Hf rate of zircon in mafic protolith. Relatively elevated Hf concentrations and in turn decreased Zr/Hf ratios in these zircon inclusions suggest that they might formed at UHP metamorphic conditions.

Key words: eclogite; metamorphic zircon; Zr/Hf ratios; CCSD



榴辉岩中的金红石和石榴子石及其锆石包裹体。

1. 样品 B262R222P1f 榴辉岩中的金红石(单偏光)。
2. 样品 B262R222P1f 榴辉岩中的金红石(电子背散射图像)。
3. 金红石中的锆石包裹体与钛铁矿出溶体(背散射电子图像)。
4. 金红石中的锆石包裹体(背散射电子图像)。
5. 样品 B262R222P1f 榴辉岩中含锆石包裹体的石榴子石(单偏光)。
6. 石榴子石中的锆石包裹体(背散射电子图像)。

Ap—磷灰石;Grt—石榴子石;Ilm—钛铁矿;Omp—绿辉石;Rt—金红石;Zrn—锆石。

Zircon-bearing rutiles and garnets in eclogite.

1. Rutile in eclogite of sample B262R222P1f (plane-polarized light).
2. rutile in eclogite of sample B262R222P1f (back-scattered electron image).
3. zircon inclusions and ilmenite exsolution in rutile (back-scattered electron image).
4. zircon inclusion in rutile (back-scattered electron image).
5. zircon-bearing garnet in eclogite of sample B262R222P1f (plane-polarized light).
6. zircon inclusion in rutile (back-scattered electron image).

Ap—apatite; Grt—garnet; Ilm—ilmenite; Omp—omphacite; Rt—rutile; Zrn—zircon.