

新疆西南天山高压-超高压变质带中 磷灰石的地球化学研究

郑萌萌, 张丽娟, 吕增, 张立飞

(北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 作为不同地质环境中普遍发育并能稳定存在的副矿物, 磷灰石是卤素和 REE、Sr、Y 等微量元素的重要载体, 对研究岩石成因、流体成分及演化等具有重要的指导意义。新疆西南天山高压-超高压变质带的榴辉岩及高压脉体中普遍发育磷灰石。磷灰石主要以矿物包体、粒间颗粒及脉体矿物的形式产出, 本文主要以后两种粒径大于 0.1 mm 的磷灰石为研究对象。电子探针分析结果表明, 不同类型的磷灰石均为氟磷灰石, F 含量变化范围为 1.44% ~ 3.56%, Cl 含量则在 0.09% 以内变化, 反映了与之平衡的流体盐度较低。LA-ICP-MS 微区原位分析结果表明, 磷灰石均相对富集 Sr、Y 和 REE, 亏损大离子亲石元素和高场强元素, 稀土元素总量变化范围为 10×10^{-6} ~ 660×10^{-6} , 变化较大。根据稀土元素总量和分馏情况, 可以把样品中的磷灰石分为稀土元素总量较低的轻稀土亏损型、稀土元素总量适中的平坦型和稀土元素总量较高的中稀土富集型 3 类。自形大颗粒的磷灰石具有从核部到边部稀土元素含量明显降低的成分环带, 可能反映了磷灰石的生长过程, 并暗示了流体成分的变化。

关键词: 磷灰石; 稀土元素; 流体; 脉体; 榴辉岩; 西南天山

中图分类号: P578.92⁺2; P574

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)04-0501-18

Geochemistry of apatite from HP-UHP metamorphic belt in southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang

ZHENG Meng-meng, ZHANG Li-juan, LÜ Zeng and ZHANG Li-fei

(MOE Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Apatite is a ubiquitous accessory mineral in many geological settings and is stable over a wide range of pressure and temperature. With halogens, rare earth elements (REEs), strontium, yttrium and other minor elements, apatite can reflect the formation of rocks and change of fluid composition. Apatite is one of the most common accessory minerals in eclogites and high pressure veins from HP-UHP metamorphic belt in Chinese southwest Tianshan Mountains, Xinjiang. The occurrences of apatites include inclusions, intergranular grains and vein apatites. This study mainly focused on the apatites whose diameters are larger than 0.1 mm and which were formed at or after the stage of peak metamorphism. According to the results of major element analysis, all the apatites are fluorapatites. The concentration of fluorine ranges between 1.44% and 3.56%, and that of chlorine is below 0.09%, which suggests that the salinity of the fluid in equilibrium with apatites is low. The results of LA-ICP-MS analysis suggest that all the apatites have relatively high concentrations of Sr, Y and REEs,

收稿日期: 2017-01-03; 接受日期: 2017-04-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB856105); 国家自然科学基金项目(41330210, 41520104004)

作者简介: 郑萌萌(1990-), 女, 汉族, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: salsikke@pku.edu.cn; 通讯作者: 张丽娟(1986-), 女, 汉族, 讲师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: ljzhang2016@pku.edu.cn

网络优先出版时间: 2017-05-15; 网络优先出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20170505.1718.002.html>

low concentrations of large ion lithophile elements (LILEs, such as Rb and Ba) and high field-strength elements (HFSEs, such as Zr, Nb, Hf, Ta and Ti), and various values of total rare earth elements (ΣREE) from 10×10^{-6} to 660×10^{-6} . Based on the ΣREE and their differentiation, all the samples can be divided into three types: LREEs enrichment with low ΣREE , flat pattern with medium ΣREE and MREEs enrichment with high ΣREE . An euhedral elongated apatite displays a growth zoning with the concentrations of REEs gradually decreasing from core to rim, which may reflect the growing process of the apatite and change of fluid composition.

Key words: apatite; rare earth element; fluid; vein; eclogite; southwestern Tianshan Mountains

Fund support: Major State Basic Research Development Program (2015CB856105); National Natural Science Foundation (41330210, 41520104004)

磷灰石是火成岩、变质岩和沉积岩中常见的副矿物,基本化学成分为 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$, 根据主要附加阴离子的不同,可以分为氟磷灰石 $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}]$ 、氯磷灰石 $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}]$ 和羟磷灰石 $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})]$ 3 个亚种 (Hughes *et al.*, 1989; Deer *et al.*, 1996)。磷灰石的结构和化学特征使得很多微量元素(如 REE、Sr、Mn 等)可以通过类质同像替换进入磷灰石中 (Watson and Green, 1981; Pan and Fleet, 2002; Prowatke and Klemme, 2006)。磷灰石稳定存在的温压范围很宽 (Spear and Pyle, 2002), 在常见水溶液中的溶解度极低 (Ayers and Watson, 1991, 1993; Antignano and Manning, 2008)。实验研究表明即使在地壳岩石熔融的条件下磷灰石的核部也可以保留初始的微量元素特征 (Harrison and Wason, 1984; Watson *et al.*, 1985), 因此,在进行岩石成因、矿床成因、流体演化和构造地质演化等研究中磷灰石具有重要的指示意义 (Berger and Braun, 1997; Smith and Yardly, 1999; Bararand and Pagel, 2001; Belousova *et al.*, 2002; Piccoli and Candela, 2002; Spear and Pyle, 2002; Barfod *et al.*, 2005; Tsuboi, 2005; Douce and Roden, 2006; Pagé *et al.*, 2016)。

新疆西南天山高压-超高压变质带为世界上少有的经历过大洋深俯冲作用的低温超高压变质带 (张立飞等, 2007)。磷灰石在变基性岩、变泥质岩及其高压脉体中广泛发育,但有关西南天山高压-超高压变质带中的磷灰石目前还鲜有系统研究。本文将以西天山高压-超高压变质带中的磷灰石为研究对象,从岩相学、主微量元素地球化学等方面进行研究,以期厘清西南天山磷灰石的成分和类型,并对俯冲带变质流体的成分及演化进行初步探讨。

1 地质背景

西南天山高压-超高压变质带是指位于新疆昭苏县南部的一条长达 200 km 的蓝片岩-榴辉岩带 (图 1a)。该带呈东西向展布,夹持于伊犁-中天山板块和塔里木板块之间,向西延出国界与哈萨克斯坦境内的 Atbashy 超高压变质榴辉岩-蓝片岩带相连 (Tagiri *et al.*, 1995), 向东尖灭于巴音布鲁克盆地。该变质带出露一套以榴辉岩、蓝片岩、多硅白云母片岩为代表的高压-超高压岩石组合 (Gao and Klemd, 2000, 2003; Klemd *et al.*, 2002, 2015; Zhang *et al.*, 2002a, 2002b; 张立飞等, 2005), 超高压变质作用特征矿物柯石英的陆续发现也表明该变质带确实经历了超高压变质作用 (Lü *et al.*, 2008, 2009, 2012a, 2012b, 2013, 2014; Lü and Zhang, 2012; Yang *et al.*, 2013; 田作林等, 2016; Tan *et al.*, 2017)。近年来,越来越多的年代学研究表明,西南天山榴辉岩相峰期变质作用发生在古生代石炭纪约 320~310 Ma (Gao and Klemd, 2003; Klemd *et al.*, 2005, 2011; Zhang *et al.*, 2009; Su *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2013; Du *et al.*, 2014; Tan *et al.*, 2017)。但对该高压-超高压变质带折返机制还存在争议。Lü 等 (2012b) 将该变质带进一步划分为北部的超高压亚带和南部的高压亚带 (图 1b), 认为是位于不同俯冲深度的两个岩块折返拼贴的结果; 而 Klemd 等 (2011, 2015) 和李继磊等 (2017) 则认为是俯冲隧道构造混杂模式。

西南天山高压-超高压变质带流体活动强烈,存在多期的水岩相互作用,并且广泛发育高压脉体。部分研究认为榴辉岩相脉体的存在指示了进变质过

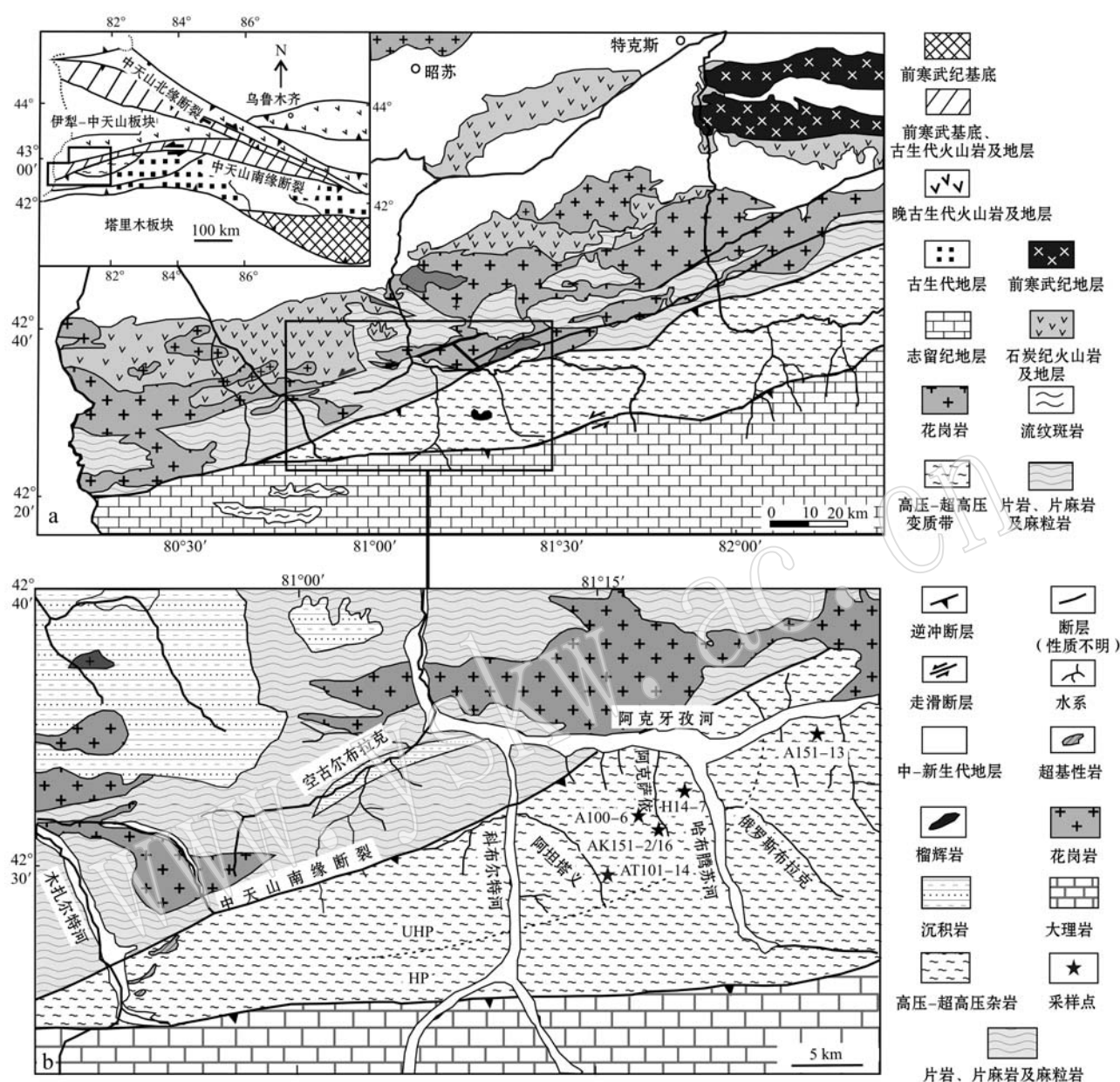


图1 新疆西南天山高压-超高压变质带及邻区地质简图(a)和采样点分布图(b)(修改自吕增等, 2014)

Fig. 1 Simplified geological map of the HP-UHP metamorphic belt and adjacent areas in southwestern Tianshan Mountains (modified after Lü Zeng *et al.*, 2014)

程中脱水作用的发生(Gao and Klemd, 2001; Gao *et al.*, 2007),即流体为内部成因;部分研究认为是外来流体在沿水致裂隙流动过程中淋滤出来的物质形成了这些榴辉岩相脉体,并导致围岩中微量元素含量的系统变化(Gao *et al.*, 2007; John *et al.*, 2008);也有部分研究认为是形成于围岩脱水产生的内部流体和外部渗透进来的流体共同作用产生了这些榴辉岩相脉体(Beinlich *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2013, 2015);还有部分研究认为西南天山高压-超高压变质带中的高压脉体形成于超高压榴辉岩的折返

阶段,为硬柱石脱水作用形成,表明减压过程中也可以发生强烈的流体活动和微量元素迁移(Lü *et al.*, 2012a; Zhang *et al.*, 2016)。上述研究表明西南天山高压-超高压变质带脉体体系具有复杂的成因和演化过程。

2 样品描述

本文样品采自西南天山高压-超高压变质带中阿坦塔义河、阿克萨依河、哈布腾苏河和阿克牙孜河

沿岸(图 1b), 采样点的 GPS 点位分别为 AT101-14 (42°28′54.80″N, 81°15′38.40″E)、A100-6 (42°31′42.16″N, 81°17′40.92″E)、AK151-2/16 (42°30′55.47″N, 81°18′49.31″E)、H14-7 (42°32′54.20″N, 81°19′40.60″E) 和 A151-13 (42°35′05.5″N, 81°27′24.1″E)。含磷灰石的岩石类型主要为榴辉岩及高压脉体, 包括石英脉、绿辉石脉和绿帘石脉。磷灰石的赋存状态主要有以下 3 种: 以矿物包裹体的形式存在于石榴石、绿辉石等峰期变质矿物中; 以粒间颗粒的形式存在于石榴石、绿辉石等峰期变质矿物之间; 以脉体矿物的形式存在于石英脉、绿辉石脉和绿帘石脉中。第 1 种形式的磷灰石形成于进变质阶段, 保存下来的相对较少, 且颗粒较小。本次研究对象主要是粒径大于 0.1 mm 的第 2、3 种形式的磷灰石。

含磷灰石的榴辉岩包括样品 H14-7 和 AK151-2。样品 H14-7(图 2a)主要由绿辉石(45%)、石榴石

(25%)、钠云母(12%)、冻蓝闪石(8%)、白云石(5%)组成, 还含有少量斜黠帘石、磷灰石、金红石、黄铁矿等。磷灰石呈不规则它形分布在绿辉石基质中, 粒径约为 0.2~0.5 mm, 与绿辉石和白云石接触共生(图 3a); 有些磷灰石中还含有绿辉石和白云石等矿物包裹体(图 3b), 表明磷灰石形成于峰期变质阶段。样品 AK151-2 由绿辉石(40%)、石榴石(30%)、石英(12%)、多硅白云母(8%)、蓝闪石(5%)以及少量绿帘石、金红石、磷灰石和碳酸盐矿物组成。磷灰石一是以粒间颗粒的形式存在于绿辉石和多硅白云母等峰期矿物之间, 二是分布在榴辉岩薄片尺度的石英细脉中(图 3c), 均呈半自形-它形, 粒径约 0.1~0.5 mm。

含磷灰石的石英脉包括样品 A100-6 和 AK151-16。样品 A100-6 主要由石英、金红石和磷灰石组成, 围岩为强烈退变质的泥质片岩。样品 AK151-16

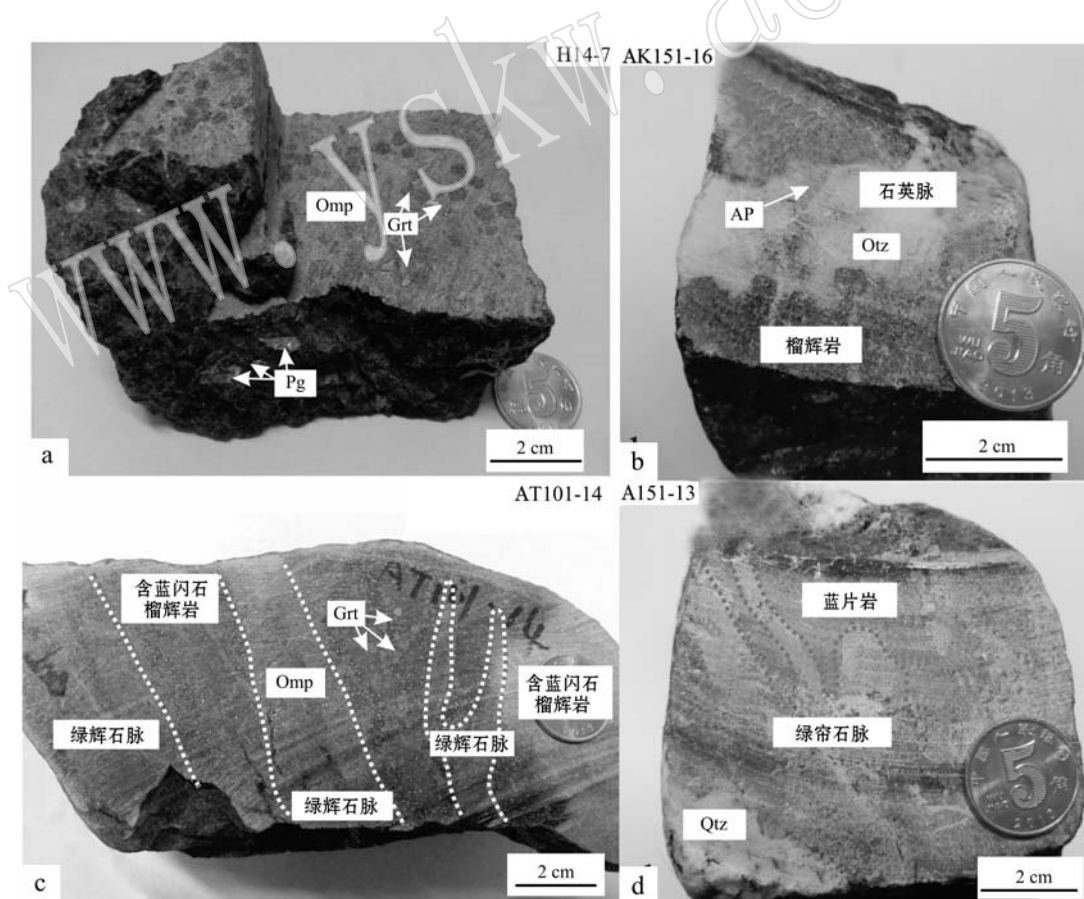


图 2 含磷灰石样品的手标本照片

Fig. 2 Photographs of hand specimen of apatite-bearing rocks

本文矿物缩写据沈其韩(2009): Grt—石榴石; Omp—绿辉石; Pg—钠云母; Qtz—石英; Ap—磷灰石

Mineral abbreviation after Shen Qihan (2009): Grt—garnet; Omp—omphacite; Pg—paragonite; Qtz—quartz; Ap—apatite

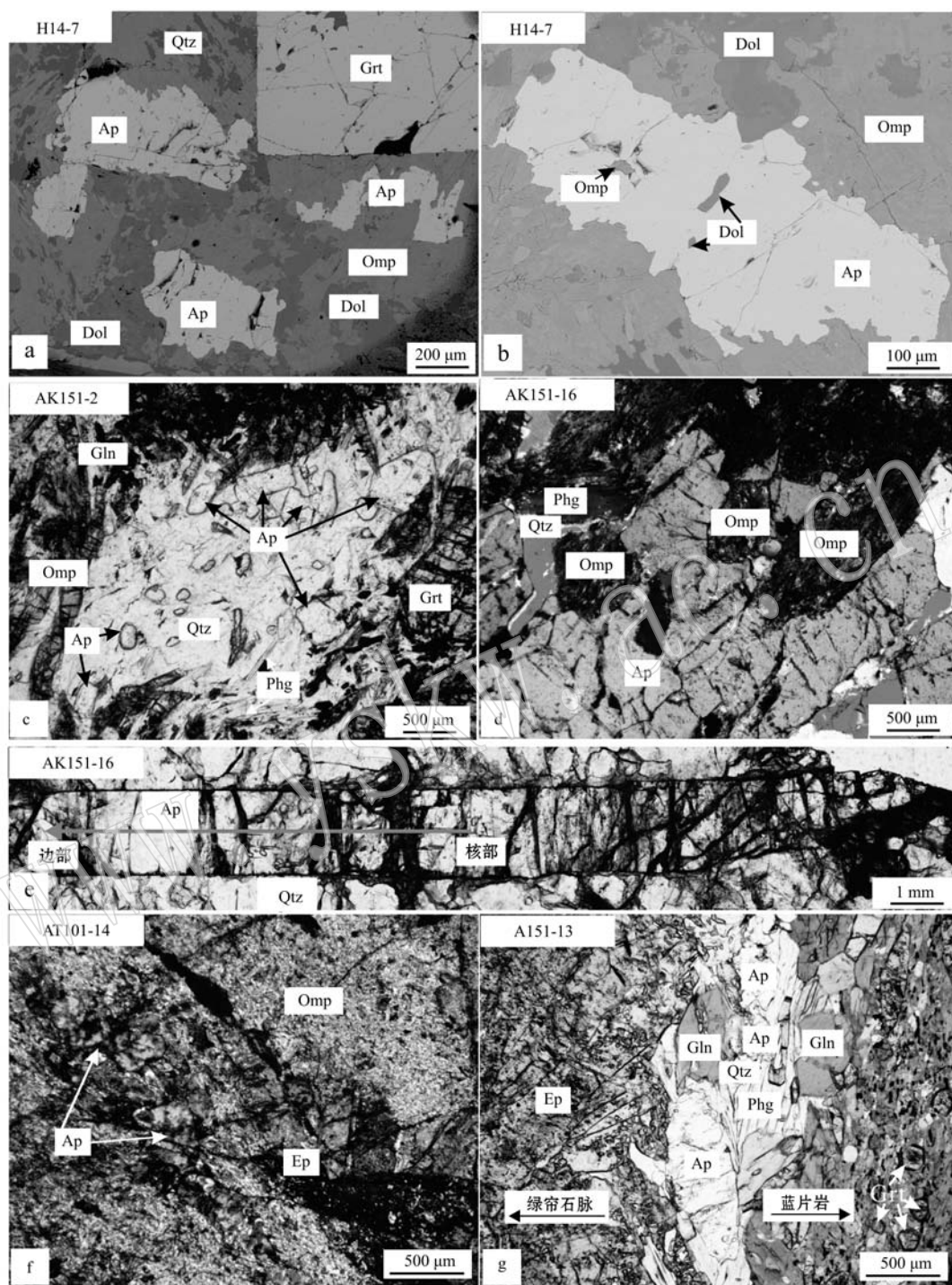


图3 西南天山高压-超高压变质带中磷灰石的显微照片及电子背散射图像

Fig. 3 Photomicrographs and BSE images of apatites from HP-UHP belt in southwestern Tianshan Mountains

a—榴辉岩(H14-7)中磷灰石与石榴石、绿辉石和白云石接触共生; b—榴辉岩(H14-7)中磷灰石含有绿辉石和白云石包裹体; c—榴辉岩(AK151-2)局部石英细脉中发育多颗它形磷灰石; d—石英脉中大颗粒磷灰石含有绿辉石、石英和多硅白云母包裹体; e—石英脉中发育长约1 cm、宽约1 mm的自形针柱状磷灰石; f—绿辉石脉中的磷灰石; g—围岩蓝片岩与绿帘石脉体接触带处发育的磷灰石; 矿物缩写: Rt—金红石; Gln—蓝闪石; Ep—绿帘石; Phg—多硅白云母; Dol—白云石; 其它矿物缩写同图2

a—apatites associated in contact with garnet, omphacite and dolomite in eclogite (H14-7); b—apatite containing inclusions of omphacite and dolomite in eclogite (H14-7); c—anhedral apatites developed in the quartz-dominated tiny vein of eclogite (AK151-2); d—a big apatite crystal containing inclusions of omphacite, quartz and phengite from the quartz-dominated vein; e—an euhedral apatite needle 1 centimeter long and 1 millimeter wide from the quartz-dominated vein; f—apatites in the omphacite-dominated vein; g—apatites in the contact zone of host blueschist and epidote-dominated vein; Mineral abbreviation: Rt—rutile; Gln—glaucophane; Ep—epidote; Phg—phengite; Dol—dolomite; others as for Fig. 2

除石英外,还含有磷灰石及少量石榴石、绿辉石、绿帘石、白云石等(图 2b),围岩为退变质较强的榴辉岩。石英脉中的磷灰石粒径从 0.1 mm~3 cm 不等,既有厘米级的自形柱状颗粒(图 3e),也有不足 1 mm 的它形颗粒;部分磷灰石含有石英和绿辉石包裹体(图 3d)。样品 AT101-14 为含磷灰石的绿辉石脉,由绿辉石(40%)、绿帘石(25%)、蓝闪石(15%)、多硅白云母(10%)、磷灰石(5%)、碳酸盐等矿物组成,围岩为含蓝闪石榴辉岩(图 2c)。磷灰石呈不规则它形分布在绿辉石脉中,粒径约 0.1~1 mm,大小不一(图 3f)。样品 A151-13 为含磷灰石的绿帘石脉,由绿帘石(45%)、蓝闪石(30%)、多硅白云母(10%)、石英(10%)、磷灰石(5%)等矿物组成,围岩为绿帘石蓝片岩(图 2d)。磷灰石呈不规则它形分布在绿帘石脉中,大小从 0.1 mm 到 2 mm 不等,脉体与围岩接触带处更容易发育较大颗粒的磷灰石(图 3g)。

结合矿物组合并运用 Grt-Cpx 温度计(Ravna, 2000)和 Grt-Cpx-Phen 压力计(Ravna and Terry, 2004)初步估算得到榴辉岩的峰期变质条件为 470~530℃、2.4~2.7 GPa,可代表以粒间颗粒的形式存在于石榴石、绿辉石等峰期变质矿物之间磷灰石形成的大致温压范围。同样运用 Grt-Cpx 温度计(Ravna, 2000)和 Grt-Cpx-Phen 压力计(Ravna and Terry, 2004)估算脉体的形成条件约为 530~580℃、1.8~2.2 GPa,表明脉体形成于减压折返阶段,与前人的研究结果一致(Lü *et al.*, 2012a; Zhang *et al.*, 2016),这也初步代表了脉体中磷灰石的形成条件。

3 分析方法

硅酸盐矿物的主量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室 JXA-8230 型电子探针仪器上完成,加速电压 15 kV,束流 1×10^{-8} A,束斑直径 2 μm ,修正方法 PRZ,标准样品采用美国 SPI 公司 53 种矿物。矿物分子式采用 AX 软件计算(Holland: <http://www.esc.cam.ac.uk/research/research-groups/research-projects/tim-hollands-software-pages/ax>)。

磷灰石的主量元素分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室 JEOL JXA-8230 型电子探针测试仪器上完成,加速电压 15 kV,电流 20 nA,束斑直径 5 μm ,用天然矿物样品和 ZAF 校正处理程序进行仪器标定和数据校正。电子背散射图像也在同一台仪器上采集。

磷灰石的微量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室通过 LA-ICP-MS 测定。分析仪器为 Agilent 7500ce 型电感耦合等离子质谱仪,配备 COMPexPro102 型(波长 193 nm)准分子激光剥蚀系统。根据磷灰石颗粒大小,激光束斑直径分别采用 60 μm 、44 μm 或 32 μm 。每个点分析过程包括 15 s 激光剥蚀时间、20 s 背景测试时间和 65 s 样品信号获取时间。元素含量采用 Ca 元素作为内标,NIST 610 玻璃标样作为外标,NIST 612 和 614 作为监测标样。数据的处理采用 GLITTER 4.4.2 程序进行分析。大部分元素的分析精度(1σ)均小于 5%,但 Rb、Zr、Nb、Hf、Ta、Th 的分析精度为 15% 左右。

4 分析结果

4.1 主要硅酸盐矿物的主量元素

榴辉岩和高压脉体中代表性硅酸盐矿物的电子探针分析结果见表 1。高压脉体与相对应围岩中的相应矿物在成分上具有相似性。石榴石均为铁铝榴石(Alm)端员。绿辉石的硬玉组分较高(大于 30%)。榴辉岩 H14-7 中含有冻蓝闪石,其它样品中主要为蓝闪石。多硅白云母 Si 离子数大于 3.4, K 离子数大于 0.8。钠云母 Na 离子数在 0.9 左右。绿帘石 Ps 值 $[\text{Fe}^{3+}/(\text{Al} + \text{Fe}^{3+}) \times 100]$ 变化范围为 12~30,少量斜黝帘石 Ps 值小于 10。

4.2 磷灰石的主量元素

磷灰石代表性主量元素分析结果见表 2。所有磷灰石样品的 CaO 含量变化范围为 54.17%~57.22%,平均值为 55.35%; P_2O_5 为 39.68%~42.41%,平均值为 41.35%; F 为 1.44%~3.56%,而 Cl 含量很低,在 0.09% 以内,故磷灰石均为氟磷灰石。

榴辉岩中的磷灰石具有较低的 F 含量(H14-7 为 1.44%~1.72%, AK151-2 为 2.04%~2.98%), Cl 含量变化较大(H14-7 为 0.01%~0.07%, AK151-2 < 0.01%)。而前人在该区榴辉岩及榴辉岩相脉体中发现的磷灰石具有较低的 Cl 含量(0.01% 以内, Gao *et al.*, 2007; John *et al.*, 2008; Beinlich *et al.*, 2010), F 含量变化较大(个别可达 4.4%, 如 Beinlich *et al.*, 2010)。绿辉石脉(AT101-14)和绿帘石脉(A151-13)中的磷灰石具有较低的 Cl 含量(在 0.02% 以内),而 F 含量变化较大(AT101-14 为

表 1 代表性硅酸盐矿物的主量元素成分

Table 1 Major element composition of silicate minerals																	
样品 位置 矿物	H14-7 榴辉岩		AK151-2 榴辉岩	A100-6 围岩	AK151-16 石英脉	AT101-16 围岩	AT101-14 围岩	AI51-13 围岩	H14-7 榴辉岩		AK151-2 榴辉岩	A100-6 围岩	AK151-16 石英脉	AT101-14 围岩	AT101-14 绿辉石脉	H14-7 榴辉岩	AK151-2 榴辉岩
	Grt-C	Grt-R	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Brs	Gln
SiO ₂	37.67	38.15	37.47	36.92	37.82	37.24	37.85	56.87	55.13	57.17	55.03	56.45	55.73	51.62	55.43		
TiO ₂	0.00	0.02	0.21	0.08	0.02	0.11	0.00	0.12	0.06	0.05	0.04	0.03	0.07	0.19	0.11		
Al ₂ O ₃	21.06	21.25	20.91	20.68	20.93	20.27	21.19	10.89	10.33	11.69	9.76	10.25	10.28	8.50	10.96		
Cr ₂ O ₃	0.00	0.05	0.06	0.00	0.03	0.00	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00	0.08	0.01	0.13	0.00		
FeO ^T	28.31	26.45	32.10	36.08	29.07	30.97	30.15	3.43	10.23	4.56	10.51	6.16	5.62	9.91	14.25		
MnO	0.46	0.45	0.73	0.85	0.69	2.32	1.78	0.01	0.03	0.00	0.03	0.02	0.00	0.04	0.00		
MgO	3.66	4.91	0.94	2.25	1.44	2.65	2.46	8.39	5.12	7.16	5.21	7.53	8.23	14.30	7.89		
CaO	8.01	8.64	7.99	3.03	10.19	7.02	7.16	14.20	10.28	11.67	11.06	12.69	13.31	9.07	0.92		
Na ₂ O	0.02	0.01	0.03	0.00	0.07	0.03	0.00	6.77	8.32	8.35	8.57	7.58	7.10	3.29	7.92		
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.05	0.03		
NiO	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.11	0.03		
Total	99.20	99.92	100.48	99.88	100.27	100.61	100.66	100.73	99.51	100.65	100.25	100.79	100.35	97.22	97.54		
氧原子数	12	12	12	12	12	12	12	6	6	6	6	6	6	6	23	23	
Si	2.99	2.98	3.00	2.99	3.01	2.96	3.00	2.00	1.99	2.00	1.97	1.99	1.97	7.35	7.83		
Ti	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01		
Al	1.97	1.96	1.98	1.97	1.96	1.90	1.98	0.45	0.44	0.48	0.41	0.43	0.43	1.43	1.83		
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00		
Fe ³⁺	0.04	0.07	0.00	0.04	0.03	0.17	0.02	0.00	0.16	0.08	0.24	0.10	0.11	0.09	0.03		
Fe ²⁺	1.84	1.66	2.15	2.40	1.90	1.89	1.98	0.10	0.15	0.06	0.08	0.08	0.06	1.09	1.66		
Mn	0.03	0.03	0.05	0.06	0.05	0.16	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00		
Mg	0.43	0.57	0.11	0.27	0.17	0.31	0.29	0.44	0.28	0.37	0.28	0.40	0.44	3.03	1.66		
Ca	0.68	0.72	0.69	0.26	0.87	0.60	0.61	0.54	0.40	0.44	0.43	0.48	0.51	1.38	0.14		
Na	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.46	0.58	0.57	0.60	0.52	0.49	0.91	2.17		
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01		
Sum	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	15.36	15.33		
Adr	2.06	3.72	0.00	2.11	1.61	8.57	0.85										
Uvt	0.00	0.15	0.20	0.00	0.10	0.00	0.20										
Alm	61.61	55.52	71.72	80.21	63.66	63.89	66.07										
Sps	1.04	1.01	1.67	1.94	1.54	5.27	3.97										
Prp	14.52	19.19	3.73	9.06	5.73	10.62	9.70										
Grs	20.77	20.41	22.67	6.68	27.36	11.65	19.22										
Jadeite								45.60	42.20	48.90	35.70	41.30	37.80				

续表 1
Continued Table 1

样品号 位置 矿物	AK151-16			AT101-14			Al51-13			H14-7			AK151-2			AT101-14			Al51-13		
	围岩	Gln		围岩	Gln		围岩	Gln		围岩	Pg		榴辉岩	Phg		围岩	Ep		围岩	Ep	
SiO ₂	55.94	56.96	57.53	57.08	57.08	57.08	52.75	50.56	51.71	39.33	51.94	51.94	38.90	38.34	38.65	38.34	38.08	38.26	38.08	38.08	38.26
TiO ₂	0.04	0.00	0.04	0.07	0.07	0.07	0.10	0.28	0.18	0.14	0.18	0.18	0.16	0.13	0.05	0.13	0.10	0.08	0.10	0.08	0.08
Al ₂ O ₃	10.58	10.68	8.52	7.78	7.78	7.78	22.97	27.33	24.24	30.16	24.86	24.86	25.86	27.02	26.83	27.02	23.16	23.21	23.16	23.21	23.21
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01	0.03	0.07	0.03	0.02	0.04	0.02	0.04	0.04
FeO ^T	15.49	11.34	11.66	13.39	13.39	13.39	4.07	2.28	2.87	3.58	4.14	4.14	8.86	8.33	7.91	8.33	13.30	12.77	13.30	12.77	12.77
MnO	0.00	0.02	0.06	0.07	0.07	0.07	0.05	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.10	0.01	0.02	0.01	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
MgO	7.53	10.30	11.78	11.31	11.31	11.31	3.44	2.86	4.09	0.15	3.63	3.63	0.07	0.11	0.08	0.11	0.08	0.15	0.08	0.15	0.15
CaO	1.17	1.12	1.07	1.86	1.86	1.86	0.00	0.01	0.00	24.22	0.00	0.00	22.55	24.00	23.65	24.00	22.15	22.24	22.15	22.24	22.24
Na ₂ O	7.64	6.98	7.34	6.74	6.74	6.74	0.03	0.60	0.33	0.00	0.43	0.43	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
K ₂ O	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	11.30	10.81	10.41	0.03	10.88	10.88	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NiO	0.03	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.03	0.03
Total	98.44	97.44	98.06	98.34	98.34	98.34	94.72	94.77	93.86	97.72	96.09	96.09	96.52	98.00	97.26	98.00	97.03	96.90	97.03	96.90	96.90
氧原子数	23	23	23	23	23	23	11	11	11	12.5	11	11	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
Si	7.86	7.88	7.93	7.91	7.91	7.91	3.58	3.40	3.51	3.03	3.48	3.48	3.05	2.98	3.02	2.98	3.02	3.03	3.02	3.03	3.03
Ti	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al	1.75	1.74	1.38	1.27	1.27	1.27	1.84	2.17	1.94	2.74	1.96	1.96	2.39	2.48	2.47	2.48	2.16	2.17	2.16	2.17	2.17
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.05	0.19	0.30	0.33	0.33	0.33	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.58	0.50	0.50	0.50	0.87	0.84	0.87	0.84	0.84
Fe ²⁺	1.77	1.12	1.04	1.23	1.23	1.23	0.23	0.13	0.16	0.11	0.23	0.23	0.01	0.04	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mn	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	1.58	2.12	2.42	2.34	2.34	2.34	0.35	0.29	0.41	0.02	0.36	0.36	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02
Ca	0.18	0.17	0.16	0.28	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	1.90	2.00	1.98	2.00	1.88	1.89	1.88	1.89	1.89
Na	2.08	1.87	1.96	1.81	1.81	1.81	0.00	0.08	0.04	0.00	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
K	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	0.93	0.90	0.00	0.93	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	15.29	15.16	15.31	15.29	15.29	15.29	6.99	7.01	6.98	8.03	7.03	7.03	7.95	8.03	8.00	8.03	7.96	7.96	7.96	7.96	7.96
Ps										4.30			19.40	16.74	16.79	16.74	28.74	27.86	28.74	27.86	27.86

其中 C—核部; R—边部; Adr—钙铁榴石; Uvt—钙铬榴石; Alm—铁铝榴石; Sps—锰铝榴石; Prp—镁铝榴石; Grs—钙铝榴石; Jadeite = (Na - Fe³⁺ - 2Ti) × 100; Ps = Fe³⁺ / (Al + Fe³⁺) × 100。

表 2 磷灰石代表性主量元素成分

Table 2 Major element composition of apatites

$w_B/\%$

岩性	榴辉岩				石英脉						绿辉石脉		绿帘石脉		
样号	H14-7		AK151-2		AK151-16			A100-6			AT101-14		A151-13		
点位	核部	核部	核部	核部	核部	幔部	边部	核部	幔部	边部	核部	核部	边部	核部	核部
SiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
Y ₂ O ₃	0.00	0.01	0.03	0.01	0.09	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00
FeO ^T	0.04	0.00	0.06	0.12	0.03	0.04	0.04	0.02	0.00	0.00	0.07	0.07	0.05	0.00	0.01
NiO	0.07	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
MnO	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.08	0.01	0.01	0.00	0.06	0.01	0.07
MgO	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.04	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01
CaO	55.94	55.14	54.60	55.08	56.34	55.87	55.44	55.37	55.26	55.41	55.39	55.20	55.77	55.42	55.72
SrO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.07	0.06	0.05	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
BaO	0.02	0.03	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.01	0.02	0.00	0.00	0.04	0.08
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00
K ₂ O	0.15	0.32	0.07	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅	41.64	41.00	40.59	41.15	41.65	40.25	41.30	41.60	41.88	41.74	42.35	41.42	41.34	41.82	41.53
SO ₃	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
F	1.45	1.72	2.98	2.09	2.11	1.84	1.98	2.90	2.48	2.37	3.27	3.46	2.20	2.38	2.64
Cl	0.07	0.01	0.00	0.00	0.03	0.06	0.00	0.09	0.02	0.05	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
* OH	0.94	0.83	0.32	0.69	0.70	0.76	0.74	0.37	0.55	0.58	0.26	0.16	0.65	0.59	0.49
Sum	99.39	98.28	98.38	98.55	100.31	98.12	98.99	100.14	99.91	99.67	101.21	100.26	99.49	99.72	100.11
-O=F,Cl	-0.62	-0.73	-1.25	-0.88	-0.90	-0.79	-0.84	-1.24	-1.05	-1.01	-1.38	-1.46	-0.93	-1.00	-1.11
Total	98.77	97.55	97.12	97.67	99.41	97.33	98.15	98.90	98.86	98.67	99.84	98.80	98.56	98.72	99.00
* * X _{FAp}	0.38	0.46	0.79	0.56	0.56	0.49	0.53	0.77	0.66	0.63	0.87	0.92	0.59	0.63	0.70
X _{ClAp}	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
X _{OHAp}	0.61	0.54	0.21	0.45	0.44	0.50	0.47	0.22	0.34	0.37	0.13	0.08	0.41	0.37	0.30
根据 13 个阴离子计算 (Pasero <i>et al.</i> , 2010)															
Si	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Y	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Ni	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	5.09	5.07	4.94	5.02	5.05	5.15	5.04	4.92	4.94	4.97	4.84	4.87	5.03	4.96	4.97
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.02	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P	3.00	2.98	2.90	2.96	2.95	2.93	2.96	2.92	2.96	2.96	2.92	2.89	2.95	2.96	2.93
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	8.12	8.08	7.86	7.99	8.01	8.09	8.03	7.85	7.91	7.93	7.77	7.77	7.99	7.93	7.91
F	0.39	0.47	0.79	0.56	0.56	0.50	0.53	0.76	0.65	0.63	0.84	0.90	0.59	0.63	0.70
Cl	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

* 磷灰石中 OH 含量的计算是根据卤素位置全部被 Cl、F 和 OH 填充得到的；* * X_{FAp}、X_{ClAp} 和 X_{OHAp} 的计算根据 Piccoli and Candela (2002)。

2.25%~3.56%，A151-13 为 1.66%~2.64%）。石英脉中的磷灰石 F 和 Cl 含量均有较大变化。其中 AK151-16 中磷灰石 F 含量为 1.67%~2.55%，Cl 含量在 0.06% 以内；A100-6 中磷灰石 F 含量范围为

2.12%~3.17%，Cl 含量为 0.01~0.09%（图 4）。同一样品中不同磷灰石颗粒之间 F 和 Cl 含量略有差异，但变化不大。单颗粒的磷灰石并无明显的 Cl 成分环带。

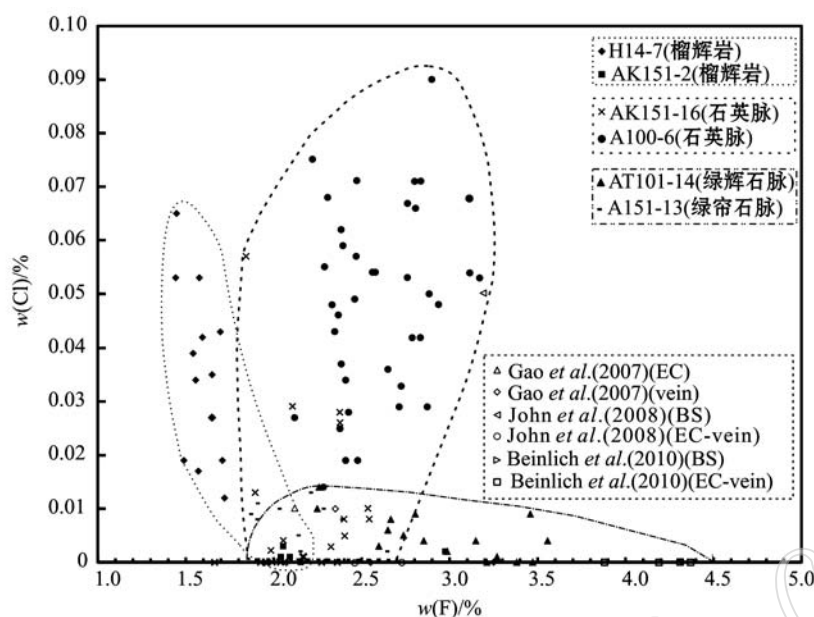


图 4 磷灰石的 F 和 Cl 的含量投图

Fig. 4 Mass percentage diagram between F and Cl of apatites in samples

4.3 磷灰石的微量元素

磷灰石代表性微量元素分析结果见表 3。整体而言,样品中的磷灰石富集 Sr、Y 和稀土元素(REE),亏损大离子亲石元素(LILE,如 Rb 和 Ba)和高场强元素(HFSE,如 Ti、Zr、Hf、Nb 和 Ta),大部分点位的 Rb、Zr、Nb、Hf、Ta 含量低于仪器的最低检测限。不同样品中磷灰石的 REE 变化明显(图 5),稀土元素总量从 12×10^{-6} 到 657×10^{-6} 均有出现,轻重稀土元素的分馏情况也有较大差异, $(La/Yb)_N = 0.1 \sim 28$,无明显的 Ce 异常和 Eu 异常。

榴辉岩(H14-7 和 AK151-2)中的磷灰石富集 Sr(分别为 $678 \times 10^{-6} \sim 894 \times 10^{-6}$ 和 $455 \times 10^{-6} \sim 1520 \times 10^{-6}$)和 Y(分别为 $37 \times 10^{-6} \sim 117 \times 10^{-6}$ 和 $16 \times 10^{-6} \sim 172 \times 10^{-6}$)。H14-7 中不同磷灰石颗粒的稀土元素配分模式较为一致(图 5a),稀土元素总量变化范围为 $44 \times 10^{-6} \sim 122 \times 10^{-6}$,平均值为 78×10^{-6} ,轻稀土元素(LREE)相对重稀土元素(HREE)亏损, LREE/HREE 平均值为 0.75, $(La/Yb)_N$ 为 0.2 ~ 0.4, $(Sm/Yb)_N$ 为 0.6 ~ 1.4。AK151-2 基质中与峰期矿物共存的磷灰石稀土元素模式为稀土元素总量适中的平坦型,稀土元素总量为 $166 \times 10^{-6} \sim 296 \times 10^{-6}$,平均值为 253×10^{-6} , LREE/HREE 平均值为 2.0, $(La/Yb)_N$ 为 1.3 ~ 2.2, $(Sm/Yb)_N$ 为 2.8 ~ 4.1;生长在石英细脉中的磷灰石则具有明显的核边结构:核部为稀土元素总

量较高的 MREE 富集型,稀土元素总量为 $307 \times 10^{-6} \sim 579 \times 10^{-6}$,平均值为 434×10^{-6} , LREE/HREE 平均值为 2.3, $(La/Yb)_N$ 为 3.7 ~ 15, $(Sm/Yb)_N$ 为 18 ~ 88;边部为稀土元素总量较低的 LREE 亏损型,稀土元素总量为 $12 \times 10^{-6} \sim 21 \times 10^{-6}$,平均值为 16×10^{-6} , LREE/HREE 平均值为 0.6, $(La/Yb)_N$ 为 0.1 ~ 0.8, $(Sm/Yb)_N$ 为 0.8 ~ 1.5。如图 5b 中的 AK151-2.3 与 AK151-2.2、AK151-2.14 与 AK151-2.13,分别对应两颗磷灰石的核部与边部,可见核部比边部的稀土元素含量高,中重稀土元素的分馏也更明显。

石英脉(A100-6 和 AK151-16)中的磷灰石均富集 Sr(分别为 $1951 \times 10^{-6} \sim 2462 \times 10^{-6}$ 和 $660 \times 10^{-6} \sim 1537 \times 10^{-6}$)和 Y(分别为 $189 \times 10^{-6} \sim 336 \times 10^{-6}$ 和 $14 \times 10^{-6} \sim 85 \times 10^{-6}$)。A100-6 中不同磷灰石颗粒的稀土元素组成类似(图 5c),稀土元素总量变化范围为 $352 \times 10^{-6} \sim 518 \times 10^{-6}$,平均值为 402×10^{-6} , LREE/HREE 平均值为 1.3, $(La/Yb)_N$ 为 0.7 ~ 5.6, $(Sm/Yb)_N$ 为 3.4 ~ 8.6。AK151-16 中的它形磷灰石组成较均一,稀土元素总量为 $234 \times 10^{-6} \sim 643 \times 10^{-6}$,平均值为 436×10^{-6} , LREE/HREE 平均值为 2.2, $(La/Yb)_N$ 为 6.6 ~ 22, $(Sm/Yb)_N$ 为 40 ~ 107,无明显的成分环带;而自形磷灰石核部到边部的微量元素变化明显,其中一颗长约 1 cm、宽约 1 mm 的长柱状磷灰石(图 3e),沿长轴方向,

表 3 磷灰石代表性微量元素成分

$w_B/10^{-6}$

Table 3 Representative trace element composition of apatites

岩性 样号 点位	榴辉岩					石英脉					绿辉石脉		绿帘石脉	
	H14-7		AK151-2			A100-6		AK151-16			AT101-14		A151-13	
	核部	核部	核部	边部	核部	核部	核部	边部	幔部	核部	核部	核部	核部	核部
Ti	6.80	6.95	5.58	6.44	6.01	3.78	3.16	7.89	8.27	9.16	3.80	4.64	7.09	6.40
Mn	65.95	55.93	149.20	113.40	71.19	—	—	23.51	30.03	33.48	—	—	336.50	195.70
Fe	485.6	283.5	305.3	455.4	677.2	—	—	447.9	436.2	434.1	—	—	514.1	362.0
Rb	0.02	0.07	—	—	—	—	0.05	—	0.01	0.09	0.03	—	0.03	0.02
Sr	840.6	690.1	454.5	661.6	1321.0	2171.0	2095.0	660.2	1131.0	1444.0	1141.0	522.5	1008.0	439.8
Y	112.30	37.32	166.10	18.87	51.12	232.30	215.20	14.39	45.55	82.26	249.10	92.70	257.50	40.97
Zr	—	0.05	—	—	0.19	—	—	—	0.01	0.01	—	0.04	0.02	—
Nb	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.01	—	—	—	—
Ba	1.55	0.82	0.24	—	0.35	1.94	2.02	0.15	1.23	5.14	2.55	0.33	0.71	0.35
Hf	—	—	—	0.09	0.12	—	—	—	—	0.01	—	—	—	—
Ta	—	—	—	0.03	—	0.02	—	—	—	0.00	—	—	—	0.01
Pb	8.54	10.02	16.91	13.69	42.13	34.32	34.21	8.31	21.23	26.15	15.46	2.41	17.87	1.91
Th	—	0.03	—	—	0.34	0.84	4.50	—	—	0.02	0.16	0.03	0.03	0.02
U	0.05	0.05	0.03	—	0.13	3.01	3.49	0.00	0.03	0.34	0.05	0.04	0.02	0.02
La	4.92	1.33	20.32	0.34	16.32	13.20	26.37	0.22	2.62	22.37	48.48	19.48	19.43	2.46
Ce	15.47	4.61	63.66	1.46	70.56	42.42	80.16	0.74	11.01	87.41	145.15	57.85	64.58	8.44
Pr	2.84	0.97	10.79	0.29	17.16	8.59	15.77	0.14	2.56	18.51	23.85	9.35	11.22	1.63
Nd	19.41	6.94	63.01	2.46	152.27	63.83	112.38	1.00	19.67	141.57	135.59	51.91	70.92	11.91
Sm	8.97	4.05	21.53	1.64	107.45	38.53	59.00	0.66	13.09	82.42	40.79	15.70	29.55	5.41
Eu	4.27	1.47	9.23	0.79	46.44	16.47	21.88	0.33	5.64	34.13	15.01	5.60	11.60	2.01
Gd	13.56	5.82	31.09	3.08	117.64	77.49	99.26	1.40	23.38	114.89	49.21	18.77	42.63	9.17
Tb	2.54	0.91	5.86	0.56	9.24	12.26	13.74	0.29	3.08	12.03	7.66	2.83	8.41	1.60
Dy	17.87	6.01	35.26	3.68	23.43	56.06	56.18	1.98	12.28	34.61	43.75	16.51	52.83	9.57
Ho	4.41	1.41	7.27	0.66	2.18	8.46	8.08	0.48	1.75	3.49	9.33	3.50	10.50	1.85
Er	13.08	4.63	16.68	1.41	3.28	16.84	15.34	1.29	2.65	4.14	23.48	8.81	24.39	4.69
Tm	1.78	0.68	1.76	0.20	0.23	1.72	1.50	0.15	0.19	0.26	2.69	0.96	2.79	0.50
Yb	10.93	4.67	8.53	1.22	1.36	8.43	7.65	0.81	0.68	0.95	14.10	5.41	14.53	2.78
Lu	1.75	0.75	0.87	0.18	0.16	1.00	0.88	0.13	0.07	0.10	1.72	0.77	1.54	0.40
ΣREE	121.80	44.25	295.87	17.97	567.78	352.10	518.19	9.61	98.67	556.87	560.81	217.45	364.92	62.42
LREE/HREE	0.85	0.78	1.76	0.64	2.60	1.97	1.56	0.47	1.24	2.27	2.69	2.78	1.32	1.04
(La/Yb) _N	0.32	0.20	1.71	0.20	8.62	5.58	2.47	0.20	2.76	16.98	2.47	2.58	0.96	0.63
(Sm/Yb) _N	0.91	0.96	2.80	1.50	87.92	3.38	8.57	0.90	21.39	96.91	3.21	3.22	0.91	1.21
δCe	1.00	0.95	1.04	1.06	0.92	0.97	0.94	1.01	0.95	0.99	1.04	1.05	1.05	1.00
δEu	1.18	0.93	1.09	1.05	1.26	1.02	0.87	1.01	0.98	1.07	1.02	1.00	1.00	0.87

注：—代表未检测或低于检测限。

从核部到边部微量元素含量呈降低趋势，稀土元素总量从 557×10^{-6} 降低到 9.6×10^{-6} ，尤其是 MREE 和 LREE 含量明显降低，而 HREE 含量基本不发生变化(图 5d)。

绿辉石脉(AT101-14)和绿帘石脉(A151-13)中不同磷灰石颗粒的微量元素组成较为相似，均富集 Sr(分别为 $523 \times 10^{-6} \sim 1\,286 \times 10^{-6}$ 和 $440 \times 10^{-6} \sim 1\,024 \times 10^{-6}$)和 Y(分别为 $91 \times 10^{-6} \sim 249 \times 10^{-6}$ 和 $41 \times 10^{-6} \sim 258 \times 10^{-6}$)(表 4)。AT101-14 中磷灰石稀土元素总量为 $217 \times 10^{-6} \sim 561 \times 10^{-6}$ ，平均

值为 347×10^{-6} ，HREE 相对亏损，LREE 与 MREE 无明显分馏，LREE/HREE 平均值为 2.7， $(La/Yb)_N$ 为 2.4~3.2， $(Sm/Yb)_N$ 为 3.0~4.4。A151-13 中磷灰石稀土元素总量为 $62 \times 10^{-6} \sim 365 \times 10^{-6}$ ，平均值为 136×10^{-6} ，总体上具有相对平坦的稀土元素配分模式，MREE略有富集，LREE/HREE平均值为1.4， $(La/Yb)_N$ 为 0.6~3.1， $(Sm/Yb)_N$ 为 1.7~7.3。

表 4 总结了不同样品中磷灰石的主要微量元素特征，根据稀土元素含量及分馏情况，可以将西南天山的磷灰石划分为 3 种类型：① 稀土元素总量较低的

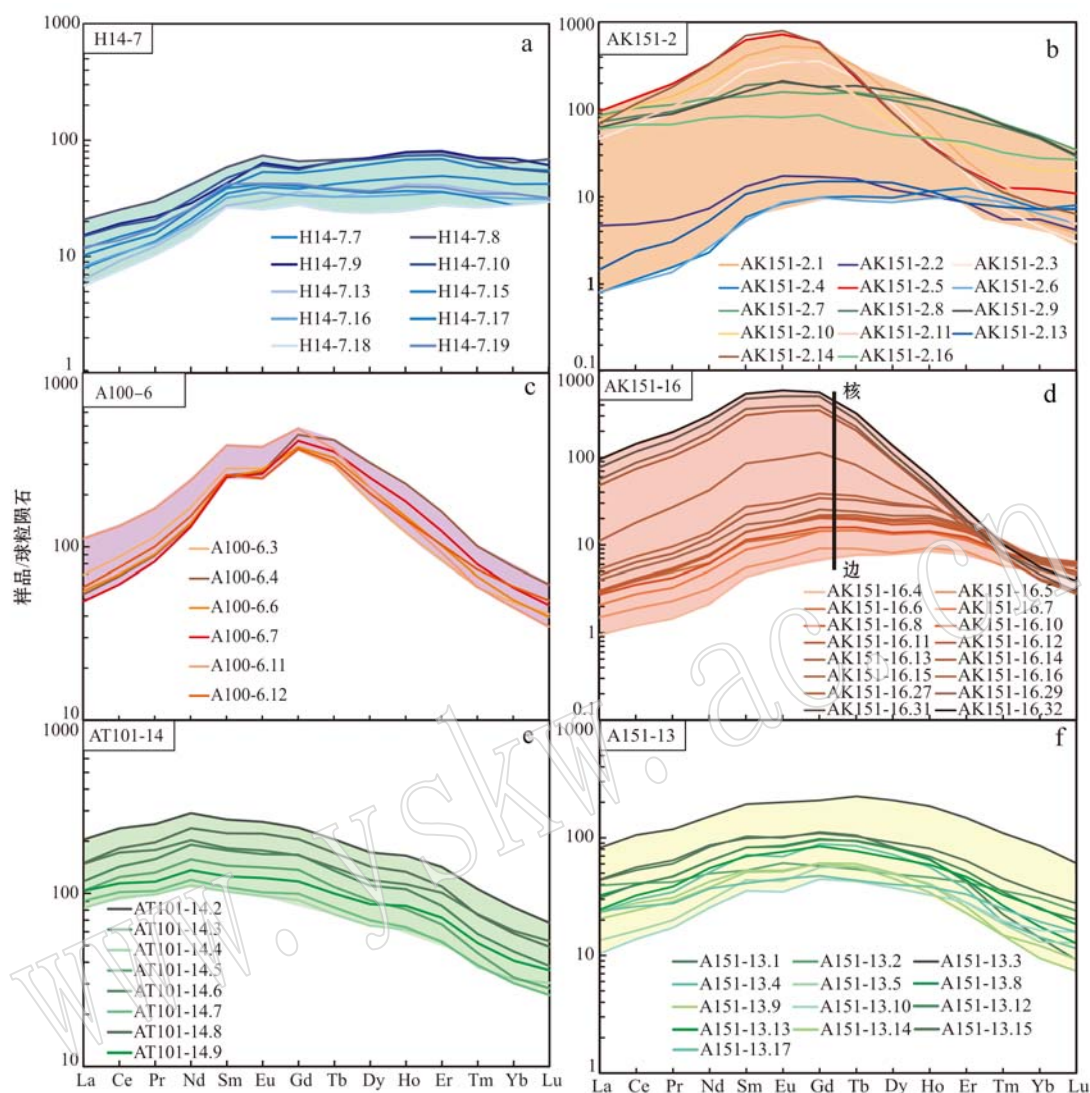


图 5 磷灰石球粒陨石标准化稀土模式图[球粒陨石标准化数据来自 Sun and McDonough(1989)]

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of apatites(normalization-values after Sun and McDonough, 1989)

LREE 亏损型: 稀土元素总量低于 100×10^{-6} , $(La/Yb)_N < 1$, $(Sm/Yb)_N < 1.5$, 如榴辉岩样品 H14-7 中多数磷灰石的核部、AK151-2(榴辉岩)和 AK151-16(石英脉)中磷灰石的边部; ② 稀土元素总量适中的平坦型: 稀土元素总量介于 $100 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 之间, $1 < (La/Yb)_N < 3$, $1.5 < (Sm/Yb)_N < 5$, 如 AT101-14(绿辉石脉)和 A151-13(绿帘石脉)中磷灰石的核部、AK151-2(榴辉岩)基质中磷灰石、AK151-16(石英脉)中磷灰石的幔部; ③ 稀土元素总量较高的 MREE 富集型: 稀土元素总量高于 400×10^{-6} , $(La/Yb)_N > 3$, $(Sm/Yb)_N > 5$, 如石英脉 A100-6 中多数磷灰石的核部、AK151-2(榴辉岩)和 AK151-16(石英脉)中磷灰石的核部。上述分类反映

了磷灰石的稀土元素分馏情况与稀土元素总量之间的关系, 即随着磷灰石稀土元素总量的降低, MREE 和 LREE 相对 HREE 要降低得更明显, 导致配分模式呈现 MREE 富集、LREE 与 MREE 平坦至 LREE 亏损的变化规律。大别-苏鲁造山带中的磷灰石也具有类似的变化特征(汤倩等, 2007; 宗克清等, 2007; 陈振宇等, 2009)。

5 讨论

5.1 磷灰石的微量元素

西南天山高压-超高压变质带中常见的变质矿物有石榴石、绿辉石、白云母、金红石/榍石、锆石、磷

表 4 磷灰石的主要微量元素特征及分类

 $w_B/10^{-6}$

Table 4 Characteristics and classification of trace elements in apatite

样品	Sr	Y	LREE	MREE	HREE	Σ REE	(La/Yb) _N	(Sm/Yb) _N
(1) 稀土元素总量较低的 LREE 亏损型								
H14-7(榴辉岩)	678~894	37~117	14~43(25)	18~47(32)	12~33(22)	44~122(78)	0.2~0.4	0.6~1.4
AK151-2(石英细脉中 Ap-R)	662~992	16~20	2~8(4)	6~10(8)	3~5(4)	12~21(16)	0.1~0.8	0.8~1.5
AK151-16(自形 Ap-R)	660~1 027	14~42	2~13(7)	5~23(12)	3~6(5)	10~42(24)	0.2~0.9	0.9~4.4
(2) 稀土元素总量适中的平坦型								
AK151-2(榴辉岩基质中 Ap)	455~998	52~172	99~158(130)	51~123(98)	16~35(29)	166~296(253)	1.3~2.2	2.8~4.1
AK151-16(自形 Ap-M)	1 098~1 187	46~61	36~168(115)	57~191(139)	5~7(6)	99~366(261)	2.8~10.7	21~69
AT101-14(绿辉石脉)	523~1 286	91~249	139~353(218)	59~156(98)	19~51(30)	217~561(347)	2.4~3.2	3.0~4.4
AI51-13(绿帘石脉)	440~1 024	41~258	24~166(64)	28~145(56)	8~54(17)	62~365(136)	0.6~3.1	1.7~7.3
(3) 稀土元素总量较高的 MREE 富集型								
AK151-2(石英细脉中 Ap-C)	1 116~1 520	45~88	126~280(201)	163~304(224)	7~14(9)	307~579(434)	3.7~15	18~88
A100-6(石英脉)	1 951~2 462	189~336	117~235(151)	193~250(215)	32~57(40)	352~518(402)	0.7~5.6	3.4~8.6
AK151-16(它形 Ap)	1 135~1 537	50~85	108~342(209)	121~289(220)	6~9(7)	234~643(436)	6.6~22	40~107
AK151-16(自形 Ap-C)	1 282~1 444	65~82	225~270(247)	243~278(260)	7~9(8)	475~557(516)	116~17	97~102

括号内为平均值; LREE 为 La、Ce、Pr、Nd 含量之和; MREE 为 Sm、Eu、Gd、Tb、Dy 含量之和; HREE 为 Ho、Er、Tm、Yb、Lu 含量之和; Ap-R 指磷灰石的边部; Ap-M 指磷灰石的幔部; Ap-C 指磷灰石的核心部。

灰石、角闪石/蓝闪石、绿帘石等 (Zhang *et al.*, 2002a, 2002b; Lü *et al.*, 2008, 2009, 2012a, 2014; Lü and Zhang, 2012)。整体而言, 西南天山高压-超高压变质带中的磷灰石富集 Sr 和 Y, 亏损 LILE、HFSE 和 HREE, 轻中稀土元素 (L-MREE) 含量变化较大。LILE、HFSE 和 HREE 的亏损主要是因为它们在磷灰石中的分配系数较低 (Watson and Green, 1981; Fujimaki, 1986; Prowatke and Klemme, 2006); 再者, 白云母相对富集 LILE (Melzer and Wunder, 2000; Zack *et al.*, 2001), 金红石、榍石和锆石等副矿物相对富集 HFSE (Schmidt *et al.*, 2009; Lucassen *et al.*, 2010; John *et al.*, 2011), 石榴石相对富集 HREE (如 Hauri *et al.*, 1994; Kohn *et al.*, 2009), 这些矿物与磷灰石共存, 也进一步降低了相关元素在磷灰石中的分配。而绿帘石则与磷灰石比较相似, 富集 Sr 和 L-MREE, 尤其是 LREE (Hermann, 2002; Spandl *et al.*, 2003), 因此当绿帘石和磷灰石共存时, 磷灰石的 L-MREE 含量降低 (图 5a、5e~5f), 而不与绿帘石共生的石英脉中磷灰石的核部 (图 5b~5d) 则表现出 L-MREE 含量较高的特征; 绿辉石、角闪石和蓝闪石的微量元素含量较低 (Gao *et al.*, 2007; van der Straaten *et al.*, 2008; Beinlich *et al.*, 2010; Lü *et al.*, 2012a), 对磷灰石微量元素的影响不大。

变质岩中单矿物的微量元素成分环带可以分为生长环带和扩散环带 (Kohn, 2003)。微量元素在磷灰石中具有显著不同的扩散系数 (Watson *et al.*, 1985; Farver and Giletti, 1989; Cherniak *et al.*,

1991; Cherniak and Ryerson, 1993; Cherniak, 2000, 2005), 如 Sr 的扩散速率 (Watson *et al.*, 1985) 比 REE 的扩散速率 (Cherniak, 2000) 高出两个数量级, 所以磷灰石形成后的扩散作用将会使微量元素在磷灰石中产生显著不同的扩散距离。但样品石英脉 AK151-16 中的磷灰石 (图 3e) 颗粒沿长轴方向各微量元素的变化基本是同步的 (无明显扩散距离) (图 5d), 且从核部到边部 Sr 含量只是稍微降低 (图 6a), 并没有 L-MREE 的降低那么明显 (图 6b), 故该成分环带应为磷灰石的生长环带。另外, 研究表明短期增温 (宗克清等, 2006) 或部分熔融 (汤倩等, 2007) 也是导致磷灰石具有稀土元素环带的原因。然而, 西南天山高压-超高压变质岩石在折返过程中并未发现有短期增温或部分熔融的证据。因此, 磷灰石的微量元素环带只可能是记录了生长过程中微量元素的变化。当核部磷灰石形成时, 周围流体含有充足的微量元素, L-MREE 因为在磷灰石中的分配系数较大 (Watson and Green, 1981; Fujimaki, 1986) 而优先进入到磷灰石晶格中。随着磷灰石的结晶生长并不断地从全岩成分中抽取稀土元素, 流体中的 L-MREE 浓度开始降低, 尤其是 LREE 明显降低, 而 HREE 的浓度变化很小, 导致磷灰石边部的稀土元素含量尤其 L-MREE 含量明显降低。此外, 相对 MREE 和 HREE, LREE 具有较强的活动性, 更容易受到后期退变质或流体作用的影响而从磷灰石中逸散出去 (Zhao *et al.*, 2007; 陈振宇等, 2009), 这也可能是西南天山高压-超高压变质带中磷灰石 LREE 含量普遍不高的原因之一。

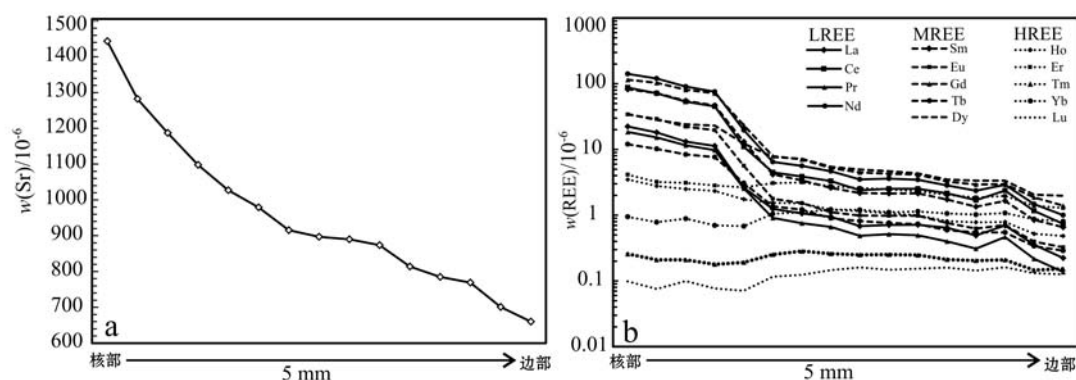


图 6 自形柱状磷灰石沿长轴方向从核部到边部的 Sr(a)和 REE(b)含量变化图

Fig. 6 The changes in concentration of Sr and REE from core to rim along the long axis of an euhedral elongated apatite

5.2 磷灰石的成因推断及其所反映的流体成分和演化过程

高压脉体的形成过程被认为是矿物脱水的结果,并伴随主岩矿物的溶解和脉体矿物的沉淀(Putnis and John, 2010)。磷灰石作为岩石中的主要含磷矿物相,具有较低的溶解度(Ayers and Watson, 1991; Antignano and Manning, 2008),在成岩流体具有一定的 Ca、P 含量以及合适的温压条件下,容易发生沉淀结晶。当流体作用比较充分时,磷灰石可以形成较大颗粒甚至自形柱状晶体,如富 Si 流体(石英脉中的磷灰石,样品 A100-6 和 AK151-16)和富碳酸盐流体(铁白云石脉中的磷灰石, van der Straaten *et al.*, 2008)中容易形成粒径大于 0.1 mm 的磷灰石。此外,磷灰石的结晶也会影响其它矿物的沉淀。Rapp 等(2010)研究认为变质流体中 Cl 和 F 的存在(尤其是 F)会增加 Ti 的溶解度,而当磷灰石沉淀后,流体中的 F 含量会显著降低,进而导致金红石发生沉淀,这也可以解释高压脉体中金红石与磷灰石普遍共生的现象(Gao *et al.*, 2007; Lü *et al.*, 2012a; Zhang *et al.*, 2016)。

脉体与围岩中矿物种类及成分的相似性(表 1)反映了成脉流体很可能是内部流体来源。榴辉岩样品(AK151-2)中局部发育的薄片尺度的石英细脉无疑是岩石内部脱水形成的,其中磷灰石稀土元素的含量与模式均与石英脉(AK151-16)中磷灰石稀土元素的含量与模式相同,也进一步说明了石英脉体极有可能为内部流体成因。石英脉中磷灰石 L-MREE 的含量从核到边是逐渐降低的(图 5b、5d),也间接说明了没有外部流体的参与。另外,脉体均切穿围岩(图 2b~2d)表明脉体的形成晚于围岩,与温压计算

的结果相吻合。这也与 Lü 等(2012a)和 Zhang 等(2016)认为西南天山高压-超高压变质带中的高压脉体形成于榴辉岩折返阶段内部流体成因的认识是一致的。

西南天山高压-超高压变质带中榴辉岩和脉体中的磷灰石均为富 F 贫 Cl 的氟磷灰石,这与人研究认为的变质岩中的磷灰石均为氟磷灰石是一致的(Spear and Pyle, 2000)。这一方面是因为 F 离子半径(0.121 nm)小于 Cl 离子半径(0.167 nm),更容易进入磷灰石的 Z 位(刘羽等, 2003);另一方面, F 在磷灰石中的分配系数要比 Cl 大得多(Brenan, 1993),流体中 Cl 含量需比 F 大 2 个数量级以上才可能使磷灰石含有相同原子比的 F 和 Cl(Smith and Yardley, 1999)。同时,这也表明西南天山的流体具有含 F 且盐度较低的特点,明显不同于大别-苏鲁变质带中磷灰石的高 Cl 含量(可高达 2.7%, 刘景波等, 2013)的特征。此外,绿辉石脉、石英脉和绿帘石脉的普遍存在以及绿辉石中较高的硬玉成分均表明流体中溶解了大量的 Na、Al、Ca 和 Si(Gao *et al.*, 2007; John *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2012; Lü *et al.*, 2012a; Chen *et al.*, 2013)。如上所述,石英脉中磷灰石表现出的生长环带(图 5b、5d)也暗示着成脉流体中的 L-MREE 含量不断减少而 HREE 含量几乎不变的特点。

6 结论

通过对西南天山高压-超高压变质带中粒径大于 0.1 mm 的磷灰石的研究发现:

(1) 榴辉岩及高压脉体中不同产状的磷灰石均

为氟磷灰石。根据磷灰石的稀土元素总量和分馏情况,可以将磷灰石分为3种类型:稀土元素总量较低($<100 \times 10^{-6}$)的LREE亏损型、稀土元素总量适中($100 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$)的平坦型和稀土元素总量较高($>400 \times 10^{-6}$)的MREE富集型。

(2) 高压脉体可能为内部流体成因,且成脉流体具有富F、Na、Al、Ca、Si及贫Cl的特点;脉体中自形磷灰石生长环带的发育则反映了流体成分的变化。

致谢 感谢两位匿名评审人建设性的修改意见。

References

- Antignano A and Manning C E. 2008. Fluorapatite solubility in H_2O and H_2O -NaCl at 700 to 900°C and 0.7 to 2.0 GPa[J]. *Chemical Geology*, 251(1): 112~119.
- Ayers J C and Watson E B. 1991. Solubility of apatite, monazite, zircon, and rutile in supercritical aqueous fluids with implications for subduction zone geochemistry[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 335(1638): 365~375.
- Ayers J C and Watson E B. 1993. Apatite/fluid partitioning of rare-earth elements and strontium: Experimental results at 1.0 GPa and 1000°C and application to models of fluid-rock interaction[J]. *Chemical Geology*, 110(1~3): 299~314.
- Bararand J and Pagel M. 2001. Cathodoluminescence study of apatite crystals[J]. *American Mineralogist*, 86(4): 473~484.
- Barfod G H, Krogstad E J, Frei R, *et al.* 2005. Lu-Hf and Pb-Sr geochronology of apatites from Proterozoic terranes: A first look at Lu-Hf isotopic closure in metamorphic apatite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(7): 1847~1859.
- Beinlich A, Klemd R, John T, *et al.* 2010. Trace-element mobilization during Ca-metasomatism along a major fluid conduit: eclogitization of blueschist as a consequence of fluid-rock interaction[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(6): 1892~1922.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2002. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 76(1): 45~69.
- Berger M and Braun I. 1997. Pb-Pb dating of apatite by a step wise dissolution technique[J]. *Chemical geology*, 142(1): 23~40.
- Brenan J M. 1993. Partitioning of fluorine and chlorine between apatite and aqueous fluids at high pressure and temperature: Implications for the F and Cl content of high p-T fluids[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 117(1): 251~263.
- Chen R X, Zheng Y F and Hu Z. 2012. Episodic fluid action during exhumation of deeply subducted continental crust: geochemical constraints from zoisite-quartz vein and host metabasite in the Dabie orogeny[J]. *Lithos*, 155: 146~166.
- Chen Zhenyu, Zeng Lingsen and Meng Lijuan. 2009. Mineralogy and trace elemental geochemistry of apatite in Sulu eclogites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1663~1677 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z Y, Zhang L F, Du J X, *et al.* 2013. Zr-in-rutile thermometry in eclogite and vein from southwestern Tianshan, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63: 70~80.
- Cherniak D J. 2000. Rare earth element diffusion in apatite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(22): 3871~3885.
- Cherniak D J. 2005. Uranium and manganese diffusion in apatite[J]. *Chemical Geology*, 219(1): 297~308.
- Cherniak D J, Lanford W A and Ryerson F J. 1991. Lead diffusion in apatite and zircon using ion implantation and Rutherford backscattering techniques[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(6): 1663~1673.
- Cherniak D J and Ryerson F J. 1993. A study of strontium diffusion in apatite using Rutherford backscattering spectroscopy and ion implantation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(19): 4653~4662.
- Deer W A, Howie R A and Zussman J. 1996. *Rock-forming Minerals*. Vol. 5: Non-silicates, Apatite(2nd Ed)[M]. New York: Longman, 297~334.
- Douce A E P and Roden M. 2006. Apatite as a probe of halogen and water fugacities in the terrestrial planets[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(12): 3173~3196.
- Du J X, Zhang L F, Shen X J, *et al.* 2014. A new PT-t path of eclogites from Chinese southwestern Tianshan: Constraints from PT pseudosections and Sm-Nd isochron dating[J]. *Lithos*, 200: 258~272.
- Farver J R and Giletti B J. 1989. Oxygen and strontium diffusion kinetics in apatite and potential applications to thermal history determinations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(7): 1621~1631.
- Fujimaki H. 1986. Partition coefficients of Hf, Zr, and REE between zircon, apatite, and liquid[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94(1): 42~45.
- Gao J, John T, Klemd R, *et al.* 2007. Mobilization of Ti-Nb-Ta during subduction: evidence from rutile-bearing dehydration segregations and veins hosted in eclogite, Tianshan, NW China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(20): 4974~4996.

- Gao J and Klemd R. 2000. Eclogite occurrences in the Southern Tianshan high-pressure belt, Xinjiang, Western China[J]. *Gondwana Research*, 3(1): 33~38.
- Gao J and Klemd R. 2001. Primary fluids entrapped at blueschist to eclogite transition: evidence from the Tianshan meta-subduction complex in northwestern China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142(1): 1~14.
- Gao J and Klemd R. 2003. Formation of HP-LT rocks and their tectonic implications in the western Tianshan Orogen, NW China: geochemical and age constraints[J]. *Lithos*, 66(1): 1~22.
- Gou L L and Zhang L F. 2009. Petrology and U-Th-Pb chemical monazite dating of the low-P metapelitic granulites at the region of Muzhaerte River in southwestern Tianshan, NW China, and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2 271~2 280(in Chinese with English abstract).
- Harrison T M and Watson E B. 1984. The behavior of apatite during crustal anatexis: equilibrium and kinetic considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1 467~1 477.
- Hauri E H, Wagner T P and Grove T L. 1994. Experimental and natural partitioning of Th, U, Pb and other trace elements between garnet, clinopyroxene and basaltic melts[J]. *Chemical Geology*, 117(1~4): 149~166.
- Hermann J. 2002. Allanite: thorium and light rare earth element carrier in subducted crust[J]. *Chemical Geology*, 192(3): 289~306.
- Hughes J M, Cameron M and Crowley K D. 1989. Structural variations in natural F, OH and Cl apatites[J]. *American Mineralogist*, 74(7~8): 870~876.
- John T, Klemd R, Klemme S, *et al.* 2011. Nb-Ta fractionation by partial melting at the titanite-rutile transition[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 161(1): 35~45.
- John T, Klemd R, Gao J, *et al.* 2008. Trace-element mobilization in slabs due to non steady-state fluid-rock interaction: constraints from an eclogite-facies transport vein in blueschist (Tianshan, China)[J]. *Lithos*, 103(1): 1~24.
- Klemd R, Bröcker M, Hacker B R, *et al.* 2005. New age constraints on the metamorphic evolution of the high-pressure/low-temperature belt in the western Tianshan Mountains, NW China[J]. *The Journal of Geology*, 113(2): 157~168.
- Klemd R, Gao J, Li J L, *et al.* 2015. Metamorphic evolution of (ultra)-high-pressure subduction-related transient crust in the South Tianshan Orogen (Central Asian Orogenic Belt): Geodynamic implications[J]. *Gondwana Research*, 28(1): 1~25.
- Klemd R, John T, Scherer E E, *et al.* 2011. Changes in dip of subducted slabs at depth: petrological and geochronological evidence from HP-UHP rocks (Tianshan, NW-China)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 310(1): 9~20.
- Klemd R, Schröter F C, Will T M, *et al.* 2002. P-T evolution of glaucophane omphacite bearing HP-LT rocks in the western Tianshan Orogen, NW China: new evidence for 'Alpine-type' Tectonics[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(2): 239~254.
- Kohn M J. 2003. Geochemical zoning in metamorphic minerals[J]. *The Crust*, 3: 229~261.
- Kohn M J. 2009. Models of garnet differential geochronology[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(1): 170~182.
- Li J L, Gao J, John T, *et al.* 2013. Fluid-mediated metal transport in subduction zones and its link to arc-related giant ore deposits: constraints from a sulfide-bearing HP vein in lawsonite eclogite (Tianshan, China)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 120: 326~362.
- Li J L, Klemd R, Gao J, *et al.* 2015. A common high-pressure metamorphic evolution of interlayered eclogites and metasediments from the 'ultrahigh-pressure unit' of the Tianshan metamorphic belt in China[J]. *Lithos*, 226: 169~182.
- Li Q L, Lin W, Su W, *et al.* 2011. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from southwestern Chinese Tianshan, NW China [J]. *Lithos*, 122(1): 76~86.
- Liu Jingbo, Zhang Lingmin, Chen Yi, *et al.* 2013. Chlorine contents in apatites of eclogites and hosted veins from the Dabie-Sulu UHP belt: implication for fluid evolution in the process of metamorphism[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(22): 2 165~2 168(in Chinese).
- Liu Yu and Peng Mingsheng. 2003. Advances in the researches on structural substitution of apatite[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(4): 413~415(in Chinese with English abstract).
- Lucassen F, Dulski P, Abart R, *et al.* 2010. Redistribution of HFSE elements during rutile replacement by titanite[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(2): 279~295.
- Lü Z, Bucher K and Zhang L F. 2013. Omphacite-bearing calcite marble and associated coesite-bearing pelitic schist from the meta-ophiolitic belt of Chinese western Tianshan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 37~47.
- Lü Z, Bucher K, Zhang L F, *et al.* 2012b. The Habutengsu metapelites and metagreywaches in western Tianshan, China: Metamorphic evolution and tectonic implications[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(9): 907~926.
- Lü Z and Zhang L F. 2012. Coesite in the eclogite and schist of the Atantayi Valley, southwestern Tianshan, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(13): 1 467~1 472.
- Lü Zeng Zhang Lifei. 2014. New progress in the study of UHP metamorphism of China's southwestern Tianshan orogenic belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(4): 770~778(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Lü Z, Zhang L F and Chen Z Y. 2014. Jadeite- and dolomite-bearing coesite eclogite from western Tianshan, NW China [J]. *European Journal of Mineralogy*, 26(2): 245~256.
- Lü Z, Zhang L F, Du J X, *et al.* 2008. Coesite inclusions in garnet from eclogitic rocks in western Tianshan, northwest China: Convincing proof of UHP metamorphism [J]. *American Mineralogist*, 93(11~12): 1 845~1 850.
- Lü Z, Zhang L F, Du J X, *et al.* 2009. Petrology of coesite-bearing eclogite from Habutengsu Valley, western Tianshan, NW China and its tectonometamorphic implication [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(9): 773~787.
- Lü Z, Zhang L F, Du J X, *et al.* 2012a. Petrology of HP metamorphic veins in coesite-bearing eclogite from western Tianshan, China: Fluid processes and elemental mobility during exhumation in a cold subduction zone [J]. *Lithos*, 136~139: 168~186.
- Melzer S and Wunder B. 2000. Island-arc basalt alkali ratios: constraints from phengite-fluid partitioning experiments [J]. *Geology*, 28(7): 583~586.
- Pagé L, Hattori K, de Hoog J C M, *et al.* 2016. Halogen (F, Cl, Br, I) behaviour in subducting slabs: a study of lawsonite blueschists in western Turkey [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 442: 133~142.
- Pan Y M and Fleet M E. 2002. Compositions of the apatite-group minerals: substitution mechanisms and controlling factors [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 48(1): 13~49.
- Pasero M, Kampf A R, Ferraris C, *et al.* 2010. Nomenclature of the apatite supergroup minerals [J]. *European Journal of Mineralogy*, 22(2): 163~179.
- Piccoli P M and Candela P A. 2002. Apatite in igneous systems [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1): 255~292.
- Prowatke S and Klemme S. 2006. Trace element partitioning between apatite and silicate melts [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(17): 4 513~4 527.
- Putnis A and John T. 2010. Replacement processes in the earth's crust [J]. *Elements*, 6(3): 159~164.
- Rapp J F, Klemme S, Butler I B, *et al.* 2010. Extremely high solubility of rutile in chloride and fluoride-bearing metamorphic fluids: an experimental investigation [J]. *Geology*, 38(4): 323~326.
- Ravna E K. 2000. The garnet-clinopyroxene Fe^{2+} -Mg geothermometer: an updated calibration [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(2): 211~219.
- Ravna E J K and Terry M P. 2004. Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists-an evaluation of equilibria among garnet-clinopyroxene-kyanite-phengite-coesite/quartz [J]. *Journal of metamorphic Geology*, 22(6): 579~592.
- Schmidt A, Weyer S, John T, *et al.* 2009. HFSE systematics of rutile-bearing eclogites: new insights into subduction zone processes and implications for the earth's HFSE budget [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(2): 455~468.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500 (in Chinese with English abstract).
- Smith M P and Yardley B W D. 1999. Fluid evolution during metamorphism of the Otago Schist, New Zealand: (1) Evidence from fluid inclusions [J]. *Journal of metamorphic Geology*, 17: 173~186.
- Spandler C, Hermann J, Arculus R, *et al.* 2003. Redistribution of trace elements during prograde metamorphism from lawsonite blueschist to eclogite facies: implications for deep subduction-zone processes [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 146(2): 205~222.
- Spear F S and Pyle J M. 2002. Apatite, monazite, and xenotime in metamorphic rocks [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1): 293~335.
- Su W, Gao J, Klemm R, *et al.* 2010. U-Pb zircon geochronology of Tianshan eclogites in NW China: implication for the collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altaids [J]. *European Journal of Mineralogy*, 22(4): 473~478.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tagiri M, Yano T, Bakirov A, *et al.* 1995. Mineral parageneses and metamorphic paths of ultrahigh-pressure eclogites from Kyrgyzstan Tien-Shan [J]. *Island Arc*, 4(4): 280~292.
- Tan Z, Agard P, Gao J, *et al.* 2017. P-T-time-isotopic evolution of coesite-bearing eclogites: Implications for exhumation processes in SW Tianshan [J]. *Lithos*, 278~281: 1~25.
- Tang Qian, Sun Xiaoming, Liang Jinlong, *et al.* 2007. Rare earth elements (REE) geochemistry of apatites in HP-UHP metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) project and their implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(12): 3 255~3 266 (in Chinese with English abstract).
- Tian Zuolin, Wei Chunjing and Zhang Zeming. 2016. Petrology and metamorphic p-T path of coesite-bearing pelitic schist from southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(2): 265~275 (in Chinese with English abstract).
- Tsuboi M. 2005. The use of apatite as a record of initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and indicator of magma processes in the Inagawa pluton, Ryoke belt, Japan [J]. *Chemical geology*, 221(3): 157~169.
- van der Straaten F, Schenk V, John T, *et al.* 2008. Blueschist-facies

- rehydration of eclogites (Tian Shan, NW-China): implications for fluid-rock interaction in the subduction channel[J]. *Chemical Geology*, 255(1): 195~219.
- Watson E B and Green T H. 1981. Apatite/liquid partition coefficients for the rare earth elements and strontium[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 56: 405~421.
- Watson E B, Harrison T M and Ryerson F J. 1985. Diffusion of Sm, Sr, and Pb in fluorapatite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(8): 1 813~1 823.
- Yang X, Zhang L F, Tian Z L, *et al.* 2013. Petrology and U-Pb zircon dating of coesite-bearing metapelite from the kebuerte Valley, western Tianshan, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70: 295~307.
- Zack T, Rivers T and Foley S. 2001. Cs-Rb-Ba systematics in phengite and amphibole: an assessment of fluid mobility at 2.0 GPa in eclogites from Trescolmen, Central Alps[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(6): 651~669.
- Zhang Lifei, Ai Yongliang, Li Qiang, *et al.* 2005. The formation and tectonic evolution of UHP metamorphic belt in southwestern Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1 029~1 038 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L F, Du J X, Shen X J, *et al.* 2009. The timing of UHP-HP eclogitic rocks in Western Tianshan, NW China: The new SIMS U-Pb zircon dating, Lu/Hf and Sm/Nd isochron ages[A]. 8th International Eclogite Conference[C].
- Zhang L F, Ellis D J and Jiang W. 2002a. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, Part I: evidences from the inclusion of coesite pseudomorphs in garnet and quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites[J]. *American Mineralogist*, 87(7): 853~860.
- Zhang L F, Ellis D J, Williams S, *et al.* 2002b. Ultrahigh pressure metamorphism in western Tianshan, China, Part II: evidence from magnesite in eclogite[J]. *American Mineralogist*, 87(7): 861~866.
- Zhang Lifei, Lü Zeng, Li Xuping, *et al.* 2007. A comparative study on the UHP metamorphic ophiolitic rocks in Zermatt-Saas zone, western Alps and western Tianshan, China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 498~506(in Chinese).
- Zhang L J, Zhang L F, Lü Z, *et al.* 2016. Nb-Ta mobility and fractionation during exhumation of UHP eclogite from southwestern Tianshan, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 122: 136~157.
- Zhao Z F, Zheng Y F, Chen R X, *et al.* 2007. Element mobility in mafic and felsic ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(21): 5 244~5 266.
- Zong Keqing, Liu Yongsheng, Gao Changgui, *et al.* 2007. Spatial variations of trace element and Sr isotopic compositions of apatite in eclogite from the CCSD main hole [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(12): 3 267~3 274(in Chinese with English abstract).
- Zong Keqing, Liu Yongsheng, Liu Xiaoming, *et al.* 2006. In situ trace element geochemistry of single minerals in eclogites from the CCSD main hole (100~1 100 m)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1 891~1 904(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈振宇, 曾令森, 孟丽娟. 2009. 苏鲁榴辉岩中磷灰石的矿物学和微量元素地球化学[J]. *岩石学报*, 25(7): 1 663~1 677.
- 李继磊, 高俊, 王信水. 2017. 西南天山洋壳高压-超高压变质岩石的俯冲隧道折返机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 47(1): 23~39.
- 刘景波, 张灵敏, 陈意, 等. 2013. 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[J]. *科学通报*, 58(22): 2 165~2 168.
- 刘羽, 彭明生. 2003. 磷灰石结构替换的研究进展[J]. *岩石矿物学杂志*, 22(4): 413~415.
- 吕增, 张立飞. 2014. 西南天山造山带超高压变质作用研究新进展[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(4): 770~778.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(5): 495~500.
- 汤倩, 孙晓明, 梁金龙, 等. 2007. CCSD HP-UHP 变质岩中磷灰石稀土元素(REE)地球化学及其示踪意义[J]. *岩石学报*, 23(12): 3 255~3 266.
- 田作林, 魏春景, 张泽明. 2016. 新疆西南天山含柯石英泥质片岩的岩石学特征及变质作用 p - T 轨迹[J]. *岩石矿物学杂志*, 35(2): 265~275.
- 张立飞, 艾永亮, 李强, 等. 2005. 新疆西南天山超高压变质带的形成与演化[J]. *岩石学报*, 21(4): 1 029~1 038.
- 张立飞, 吕增, 李旭平, 等. 2007. 西阿尔卑斯 Zermatt-Saas 洋壳深俯冲超高压变质带与我国新疆西南天山超高压变质带的比较[J]. *高校地质学报*, 13(3): 498~506.
- 宗克清, 刘勇胜, 高长贵, 等. 2007. CCSD 主孔榴辉岩中磷灰石微量元素和 Sr 同位素组成研究[J]. *岩石学报*, 23(12): 3 267~3 274.
- 宗克清, 刘勇胜, 柳小明, 等. 2006. CCSD 主孔 100~1 100 m 榴辉岩中单矿物的原位微区微量元素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 22(7): 1 891~1 904.