

# 变质石榴石的成分环带与变质过程

陈能松<sup>1</sup>, 孙敏<sup>2</sup>, 杨勇<sup>1</sup>, 刘嵘<sup>1</sup>, 王勤燕<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 香港大学 地球科学学院 地球科学系, 中国 香港)

**摘要:**介绍了石榴石成分环带(剖面)的现代测试技术,强调了二维成分填图在当代成分环带研究中的重要性。根据石榴石成分环带(剖面)的变化特征,将其划分为匀变连续型成分环带和突变间断型成分环带。匀变连续型环带形成受平衡生长控制;突变间断型成因复杂,其中的台阶型可与多期变质、变质条件大幅度改变、变质反应性质改变或深熔作用干扰等过程有关;脉冲型又可分生长型环带(剖面)和扩散型环带(剖面),后者是变质顶峰后石榴石与包体矿物反应导致石榴石某种成分的晶内扩散有关。东昆仑小庙岩群石榴石的岩相学、主量-微量元素环带和稀土元素配分环带特征表明其是两期变质作用的产物。

**关键词:**主量-微量元素成分环带; 变质过程; 石榴石

中图分类号: P588.3; P578.94<sup>+</sup>7 文献标识码: A 文章编号: 1005-2321(2003)03-0315-6

变质成因的石榴石普遍发育成分环带。由于石榴石可以在原岩化学成分广泛(镁铁质、长英质、泥质和钙质)的岩石和温度压力条件较宽(低压、中压、高压和超高压相系的低中温至超高温)环境中生长,其成分环带变化自然成为揭示与石榴石生长相关的变质过程特征的重要依据之一。石榴石的主量成分环带研究始于 20 世纪 70 年代<sup>[1]</sup>, 80 年代的研究发现,微量元素<sup>[2]</sup>和氧同位素<sup>[3]</sup>在石榴石中可以呈环带分布。近 40 年来,矿物主量-微量元素成分环带与变质过程的研究取得了很大进展。本文拟先介绍石榴石成分环带的测试方法,然后揭示成分环带形成与变质过程制约关系,最后介绍东昆仑造山带东段前寒武系小庙岩群变质石榴石的主量元素和微量元素成分环带的初步研究结果。

## 1 成分填图技术

石榴石成分环带的确定需借助现代微束分析技术,常用的微束分析技术见表 1,这些技术都可进行

原位分析。为解决一个特定的地质问题,往往要综合应用多种原地分析技术,以同时获得满足地质精度和准确度的主量和微量元素的含量和空间分布(环带)。然而,在着手进行主量元素和微量元素测定之前,必须对岩石的矿物组成(包括主要造岩矿物和副矿物)、矿物的包裹关系(或结构环带)、矿物生长史(或变质反应历史)、*p-T* 轨迹乃至区域地质背景有较清楚的了解。

表 1 常用的原位微束分析技术一览表(据文献[3])

Table 1 Commonly used in situ analytical techniques

分析技术	激发微束性质	检测微束性质	激发区/ $\mu\text{m}^3$	最低检出限/ $10^{-6}$
电子探针(EPMA)	e <sup>-</sup>	X-rays	30~300	100~1000
质子探针( $\mu$ -PIXE)	H <sup>+</sup>	X-rays	$10^3\sim 10^5$	3~30
同步 X 射线荧光(SXRF)	X-rays	X-rays	$10^4\sim 3\times 10^4$	0.1~10
二次离子质谱 SIMS	$\text{O}^{2-}, \text{O}^{-}, \text{Cs}^{+}$	Ions	10~500	0.01~0.1
加速质谱(AMS)	$\text{Cs}^{+}$	Ions	$10^4\sim 10^5$	0.0001
激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)	Photon (光子)	Ions	$10^2\sim 10^4$	0.01~1

\* 资料来源见文献[3]。

收稿日期: 2003-03-07; 修订日期: 2003-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49972023, 40272030); 香港 RGC 基金项目(10200229)和杰出青年研究奖基金资助项目

作者简介: 陈能松(1956—), 博士, 教授, 博士生导师, 岩石学专业, 主要从事岩石学教学和造山带变质作用动力学和变质年代学研究。

主量元素环带是进行微量元素环带测定的基础。早期, 较详细的石榴石的主量成分环带测定在过中心的切面上进行等间距的点分析, 然后圈定等值线, 从等值线的变化趋势反映主量元素(主要为 Mn, Mg, Fe, Ca) 从核部到边部的变化<sup>[1]</sup>。从石榴石核部到边部一个方向上做点分析, 再将数据转换到距离  $V_s$  成分坐标图上, 这样的成分环带通常称成分剖面。石榴石切面上的成分变化还可以用电子探针 X-射线填图, 背散射图像分析, 阴极发光和电荷反衬成相(charge contrast imaging) 来表征。背散射成分图像和电荷反衬相分析适用于成分变化较大的样品, 可以反映其大致变化, 不能反映变化的精细细节, 成分变化不大的样品其效果更差。阴极发光成分图像广泛应用于锆石内部精细结构环带研究, 但目前还没有关于石榴石阴极发光图像的报道。尽管这些图像只是定性的, 但可以十分直观地反映主量成分在二维空间上的变化, 揭示石榴石的成核和生长机制<sup>[5]</sup>、多阶段或多期生长<sup>[6]</sup> 和多核性<sup>[7]</sup>, 等等, 因而成为当今成分环带研究的常规手段<sup>[8]</sup>。

基于现代高分辨率和高精度测试技术的进步, 现在已开始强调使用成分填图研究微量环带的重要性<sup>[8, 9]</sup>。Lanzirotti(1995)用 SXRF 技术获得了精美的石榴石的 Y 元素环带<sup>[10]</sup>, Chernoff 和 Carlson (1999)用 SIMS 分析获得了石榴石的 Y, Yb, P, Ti, Sc, Zr, Hf, Na, Li 的成分图<sup>[11]</sup>, 效果相当好。用 SXRF 技术和 SIMS 技术进行成分填图, 价格相当昂贵。Spear 和 Kohn(1996)用日电公司的 733 型电子探针也可进行石榴石的 P, Y, Sc, Cr 等元素的 X-射线成分填图<sup>[9]</sup>, 由于其测定检测下限比 SXRF 技术和 SIMS 技术要高得多(表 1), 所以, 相对于主量

元素分析, 微量元素成分填图的工作电流要高得多(2000 nA), 每个分析点的采样驻留时间也长若干倍(100 ms), 测定机时的增加实际上也增加了分析费用。近年发展起来的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LAM-ICP-MS) 分析具有省时、经济、样品制备简单等优点, 已成为造岩矿物微量元素分析的重要技术之一, 缺点是对样品有严重的破坏性, 同一颗粒无法重复测定。尽管如此, LAM-ICP-MS 仍不失为一个大众化的测定固体矿物微量元素的主要手段。

## 2 成分环带与变质过程

正确判断成分环带是生长成因还是扩散成因对分析变质过程非常重要。生长环带是具有不同成分的石榴石壳生长到生长中的石榴石边缘上而得到的, 扩散环带是生长过程中晶内扩散或停止生长后发生离子交换反应或纯转移反应所至的晶间扩散的结果。大量的研究表明, 石榴石的主量元素和微量元素生长环带依其剖面的变化特点可分连续匀变型和间断突变型。连续匀变型剖面指其变化梯度为零或虽有变化但变化不大的剖面(图 1a), 间断突变型剖面又可分台阶式间断型和脉冲型, 脉冲型又有生长脉冲型和扩散脉冲型之分(图 1b)。连续匀变型成分环带大多以变质  $p-T$  条件的均匀改变进行解释; 间断突变型的成因较复杂, 合理的解释需要占有详细的地质学、岩相学和变质反应资料。

### 2.1 连续匀变型成分环带

石榴石生长过程中的成分变化受  $p-T$  条件变化的制约已是不争事实, 成分环带变化可以定性地

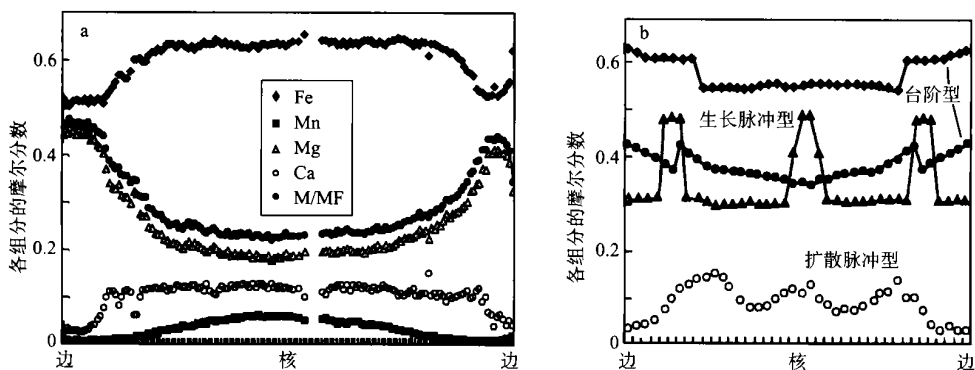


图 1 石榴石典型成分环带、剖面类型

Fig. 1 Typical compositional zonings/profiles in garnet

a—连续匀变型成分环带, 主体为生长环带, 但在右侧因退变重设为扩散环带; b—间断突变型成分环带

提供  $p$ - $T$  矢量信息。对于常见的变质反应, 随温度升高, 石榴石的 Mg 含量增高, Mn 和 Fe 含量逐渐降低, 尤其是 Mn 为石榴石强烈富集元素而呈现典型的钟形剖面, 成为生长环带判别的主要依据。在贫 Ca 的泥质和镁铁质变质岩中, 石榴石的 Ca 受与石榴石和斜长石有关的纯转换反应控制, 通常, 平坦的 Ca 环带指示升温升压的  $p$ - $T$  矢量<sup>[12]</sup>。可见匀变连续型成分环带多属生长环带, 可用于定量计算  $p$ - $T$  轨迹<sup>[13]</sup>。

石榴石的微量元素剖面也可反映  $p$ - $T$  条件的演化趋势, 并与共生的主岩矿物和副矿物有强烈关系。在一个 Ti 饱和的矿物组合中, Ti 在石榴石中的溶解度随压力降低而降低<sup>[12]</sup>。与斜长石、角闪石和钠云母共生的石榴石, Na 含量变化随压力升高而减少, 随温度升高而升高。与 Mn 一样, Y 在石榴石中强烈优先富集, 因此其剖面呈典型的钟状<sup>[14]</sup>, 但当与磷钇矿 (YPO<sub>4</sub>) 共生时, 石榴石中的 Y 含量变化与温度呈反相关。Pyle 和 Spear (2000) 的研究得到如下经验温度计<sup>[15]</sup>:

$$\ln [w_{\text{Grt}}(\text{Y})] = (16\ 031 \pm 862)/T - (13.25 \pm 1.12)$$

本经验校正适用于不含帘石类石榴石带和十字石带的变质条件估计, 准确度为  $\pm 30^\circ\text{C}$ 。另外, 随压力增高, Nd, Sm, Gd 和 Tb 等三价 REE<sup>3+</sup> 在石榴石中含量增加, 其可能的置换形式为  $3\text{REE}^{2+} = 2\text{REE}^{3+} + \square$  (空位)。Dy<sup>3+</sup> 的离子半径 ( $1.027 \times 10^{-10}\text{m}$ ) 与 Eu<sup>2+</sup> 的离子半径 ( $1.025 \times 10^{-10}\text{m}$ ) 最相近, 最易于发生置换, 因此, 可以用 Gd/Dy 比值估计平衡压力的大小<sup>[16]</sup>。其经验校正为

$$p/(100\text{MPa}) = 3.6 + 5.6 [w_{\text{Grt}}(\text{Gd})/w_{\text{Grt}}(\text{Dy})]$$

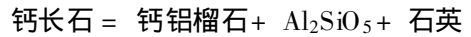
本校正的适用条件是: 石榴石与独居石共生, 单位晶胞大小  $11.46 \times 10^{-10}\text{m}$ , 压力范围 400~900 MPa。

以上微量元素温度计或压力计不需要做压力或温度校正, 可以独立地估计温度或压力的变化。

## 2.2 间断突变型成分环带

(1) 台阶式环带: 变质反应性质的改变或温度-压力条件的大幅度跳跃式改变是台阶式成分环带的可能成因。当温度压力矢量穿过两个以上的变质反应单变线时, 由于参与反应的矿物和其它反应产物的改变, 同种元素在石榴石和其它矿物中的分配系数改变较大, 从而造成该元素的成分剖面上呈台阶式变化。Spear 和 Kohn (1996)<sup>[9]</sup> 依据泥质变质岩中石榴石的微量元素 Sc, Y, P, Cr 的台阶式环带, 论证了石榴石生长过程中存在的岩石发生的熔融过程。

当增压增温时,  $p$ - $T$  矢量从 Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> 多型三相不变点上方的演化使白云母发生贫水熔融反应, 此过程一是导致石榴石停止生长, 二是使斜长石进一步富钙长石分子。当白云母分解完毕,  $p$ - $T$  矢量继续向高温区推进, 黑云母发生缺流体熔融反应, 石榴石重新生长。石榴石恢复生长时与钙含量增高了的斜长石存在以下平衡



从而使重新生长的石榴石的 Ca 含量明显增高。因此, 穿过两阶段生长的石榴石的 Ca 的成分剖面呈跳跃性不连续变化而呈台阶状, 其它元素如 Y, Cr, Sc, P 的成分剖面也呈台阶状。成分台阶的高低(含量差值)与斜长石中钙长石分子含量、熔融的白云母的量 and 压力条件的高低成正比。

对于主量元素, 某些极端快速的构造过程如构造推覆所至的热-冷岩片的堆叠、或伸展减薄, 可使石榴石在构造前后的生长物化条件差别很大, 结果是某些元素在石榴石中的分配系数发生大的间断性变化, 从而形成台阶状剖面。性质不同的多期变质作用更可能导致石榴石形成台阶状环带。一般地, 前一变质作用期生长的石榴石位于核部, 新一变质作用期生长的石榴石增生在原石榴石核外缘上, 形成古石榴石核和新石榴石边。如果石榴石核生长结束时的  $p$ - $T$  条件与新石榴石生长的初始  $p$ - $T$  条件差别很大, 那么在分界处, 元素的成分剖面将不连续, 从而形成台阶状环带。如果新石榴石生长的温度较高, 一些封闭温度较低的元素(如 Mn, Fe, Mg 等)将因晶内扩散而使其台阶环带变趋于不明显甚至消失, 但封闭温度高的元素(如 Ca)的台阶状成分环带将得以保存下来。如果成分剖面台阶变化处与石榴石结构环带(按包裹体的有无或晶内片理特点分)分界相一致, 且古石榴石核的成分环带保留了低温退变再吸收的特征, 那么, 新石榴石与古石榴核往往是多期变质的结果。

(2) 脉冲式环带: 中低温泥质变质岩石榴石的 Mn, Mg 和 Fe 等的成分环带一般为匀变型环带, 但 Ca 成分环带常呈脉冲式环带<sup>[11, 17]</sup>, Y, Yb, Sc, P, Ti, Zr 等微量元素都可呈脉冲式环带<sup>[2, 10, 11, 18]</sup>, 存在 3 个以上脉冲的环带可称振荡环带(图 1b)。脉冲式环带的可能原因有: ①生长速率的短暂改变; ②富 Ca 或其它微量元素的副矿物参与反应使矿物组合中的反应物与生成物发生改变; ③富含某种元素的流体的瞬间注入; ④元素扩散, 等等。大别山黄土

岭麻粒岩发育多世代石榴石变斑晶, 其中第二世代变斑晶常见中心到边缘的中部发育一石英包裹体链, 呈同心圆分布。由于石英包裹体与相邻的石榴石反应形成斜长石, 石榴石中的 Ca 通过晶内扩散迁移到与石英包体接触界面上, 越靠近石英包裹体, Ca 的消耗量越大, 反之亦然, 结果形成一个变化较缓的脉冲式剖面(图 1b)。综合岩相学、变质反应和主量元素及微量元素(包括稀土元素)进行系统分析是揭示脉冲式环带成因的可行途径<sup>[2, 10, 11, 15, 17, 18]</sup>。

### 3 东昆仑小庙岩群石榴石成分环带与多期变质

近年对东昆仑造山带东段中元古代小庙岩群泥质变质岩的若干石榴石的主量元素和微量元素研究, 这里仅作定性介绍, 详细研究将有专文讨论。

受加里东期碰撞构造影响, 小庙岩群目前发育的区域面理已普遍受到改造。平行加里东期面理分布的白云母的  $A_{F-Ar}$  年龄为 398 Ma, 属冷却年龄, 峰期年龄应与相邻的早古生代火山-沉积变质岩系的角闪石  $A_{F-Ar}$  年龄 426 Ma<sup>[19]</sup> 相一致。泥质变质岩的主要变质矿物有石榴石、蓝晶石、十字石、斜长石、白云母、黑云母和石英等。石榴石具结构环带, 核部少含或不含石英包裹体, 边部发育密集的石英包裹体, 包裹体的排列方向(晶内片理)与包绕石榴石的加里东期片理呈高角度相交(图 2a)。从 Ca 的成分填图(图 2a), 石榴石由一个近于等轴状的古石榴石核和新石榴石边构成, 古石榴石核的 Ca 含量

低, 新石榴石边从内向外 Ca 含量分两个带, 内带高, 外带低, Ca 含量在石榴石核与新石榴石边分界处存在间断。石榴石的主量元素成分剖面(图 2b)表明, 从核到边缘穿过古石榴石核和新石榴石边的 Mn 具钟状剖面, 变化基本平滑, 属生长型环带, 但 Ca, Fe, Mg 及  $x(Mg)/x(Mg+Fe)$  比值在边界处呈跳跃式变化, 具台阶状环带特征。古石榴石核由里向外, Ca 含量逐渐降低, Mg 和相应的  $x(Mg)/x(Mg+Fe)$  比值逐渐增高。新石榴石边从里向外, Ca 含量逐渐增高到边缘处呈大幅度降低, Mg 和相应的  $x(Mg)/x(Mg+Fe)$  比值逐渐增高。

古石榴石核和新石榴石边的微量元素和稀土元素具有特征差异。从古石榴石核到新石榴石边, Y 含量降低了 4 倍以上, Ti 含量增高近 3 倍, V, Cr 和 Co 也有不同程度增高(图 3a)。从古石榴石核到新石榴石边, 稀土元素总量明显降低, 稀土元素配分曲线特征从显著的重稀土强烈富集和强烈的负 Eu 异常变为中稀土相对重稀土( $\sum(Sm-Ho)/\sum(Er-Lu)$ )的显著富集和极不明显的负 Eu 异常(图 3b)。

总之, 古石榴石与新石榴石边具有不同的显微构造、不连续的主量元素和微量元素及稀土元素环带和稀土配分型式, 是两个不同的变质事件的产物。 $x(Mg)/x(Mg+Fe)$  比值的间断性变化表明, 新石榴石的变质从低于古石榴石变质顶峰温度开始, 逐渐升温升压, 之后压力显著降低, 但温度仍然继续上升。新石榴石边比古石榴石核具有高得多的 Ca, Ti 含量, 表明其在压力条件相对要高的变质环境中<sup>[12]</sup>。据现有同位素年代学资料, 新石榴石边的生

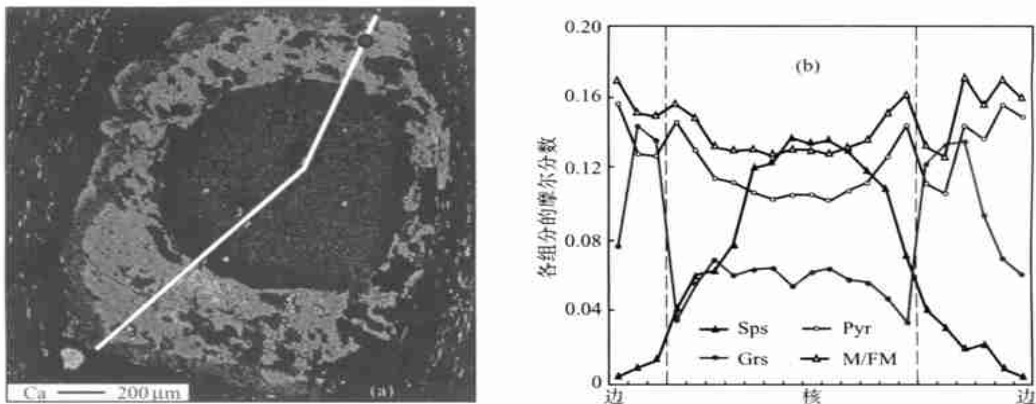


图 2 柴南缘小庙岩群云母片岩中石榴石 Ca 的成分图和成分剖面

Fig. 2 Ca X-ray map and major elemental profiles for garnet from mica to schist of Xiaomiao Group, southern margin of Qaidam Block

(a) 一石榴石 Ca X-射线成分图, 图中灰圈点和白线分别是 LA-ICPMS 微量元素、稀土元素分析点和电子探针主量元素分析剖面; (b) 一主量元素成分剖面

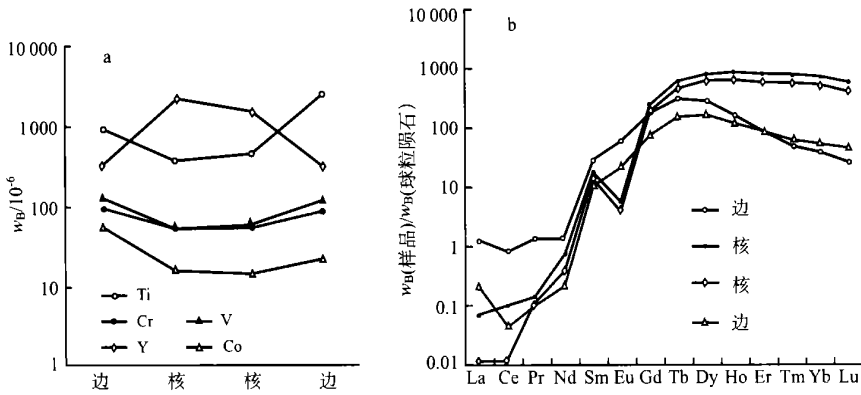


图3 小庙岩群两期石榴石成分特征

Fig. 3 Compositional variations in polymetamorphic garnet from Xiaomiao Group  
a—微量元素成分剖面; b—稀土元素配分型式

长与加里东期构造事件有关, 而古石榴石核生长的确切年龄还有待研究。

## 4 小结

(1) 石榴石中的微量元素和稀土元素比主量元素具有更高的封闭温度, 其成分环带的变化更能揭示变质过程中的温度压力条件的变化和/或矿物组合的变化, 尤其是一些副矿物变化的细节, 为判断石榴石生长过程中的主量元素是平衡控制 (equilibrium control) 还是输运控制 (transport control) [5] 提供线索。

(2) 石榴石成分环带可以划分为连续匀变型环带和间断突变型环带, 后者可进一步划分为台阶式和脉冲式环带。连续匀变型环带是平衡控制生长的结果, 可以用来计算  $p$ - $T$  条件的变化矢量; 台阶式环带可能是两期性质各异的变质作用的产物, 也可能是同一构造期变质作用不同阶段矿物组合改变的产物, 其确切成因需要综合变质变形关系和同位素年代学研究进行系统分析才能作出判断; 脉冲型环带多半是极为局部因素所致, 但如果脉冲环带与结构环带的边界一致, 则可能是区域事件的产物。

(3) 主量元素的 X 射线成分填图虽然费用昂贵、费时且只是定性的, 但可以清楚地揭示石榴石成分在二维空间上的变化细节。只有在 X 射线成分填图基础上测定的线性成分剖面才能有效地揭示成分的定量变化特征, 并为进一步开展系统的原位微量元素和稀土元素测定提供依据。微量元素和稀土元素的分析点距应当适当的小, 以获得更多的数据

点, 更好地揭示石榴石中微量元素和稀土元素的变化细节。

(4) 东昆仑东段小庙岩群的变质程度中等, 石榴石生长记录了两个区域变质作用期。新的石榴石增生边是加里东期构造事件的产物, 古石榴石核可能与前寒武纪构造事件有关。

石榴石主量元素 X 射线成分填图由赵文霞副教授在中山大学分析测试中心用日电 8088R 型电子探针完成, 主量元素剖面分析由杨勇在中国地质大学 (武汉) 测试中心用日电 733 型电子探针完成, 微量元素和稀土元素由刘勇胜博士在西北大学地质学用 193 nm ArF 激光剥蚀系统与 ELAN 6000 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱联机进行分析, 特表谢意。

## References [参考文献]:

- [1] TRACY R J, ROBINSON P, THOMPSON A B. Garnet composition and zoning in the determination of temperature and pressure of metamorphism, central massachusetts [J]. *American Mineralogists*, 1976, 61: 762-775.
- [2] HICKMOTT D D, SHIMIZU N, SPEAR F S, et al. Trace element zoning in a metamorphic garnet [J]. *Geology*, 1987, 15: 573-576.
- [3] PAGE-CHAMBERLAIN C, CONRAD M E. Oxygen isotope zoning in garnet: A record of volatile transport [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 2613-2629.
- [4] KOŠLER J. Laser ablation ICPMS study of metamorphic minerals and processes [A]. SYLVESTER P. *Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences* [M]. Canada: Mineralogical Association of Canada Short Course Series 29, 2001. 185-202.
- [5] SPEAR F S, DANIEL C G. Diffusion control of garnet growth, Harpswell Neck, Maine, USA [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2001, 19: 179-195.

- [6] O'BRIEN P J. Garnet zoning and reaction textures in overprinted eclogites, Bohemian Massif, European Variscides: A record of their thermal history during exhumation[J]. *Lithos*, 1997, 41: 119-133.
- [7] COOKE R A, O'BRIEN P J, CARSWELL D A. Garnet zoning and the identification of equilibrium mineral compositions in high-pressure-temperature granulites from the Moldanubian, Austria[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18: 551-569.
- [8] SPEAR F S. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*[M]. Washington DC: Mineralogical Society of America, 1993.
- [9] SPEAR F S, KOHN M J. Trace element zoning in garnet as a monitor of crustal melting[J]. *Geology*, 1996, 24: 1099-1102.
- [10] LANZIROTTI A. Yttrium zoning in metamorphic garnets[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 4105-4110.
- [11] CHERNOFF C B, CARLSON W B. Trace element zoning in garnet as a record of chemical disequilibrium during garnet growth[J]. *Geology*, 1999, 27: 555-558.
- [12] HICKMOTT D D, SPEAR F S. Major and trace element zoning in garnets from calcareous pelites in the NW Shelburne Falls Quadrangle, Massachusetts: Garnet growth histories in retrograded rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1992, 33: 965-1005.
- [13] SPEAR F S, SELVERSTONE J. Quantitative  $p$ - $T$  paths from zoned minerals: Theory and tectonic applications[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1983, 83: 348-357.
- [14] OTAMENDI J E, DE LA ROSA J D, PATIÑO DOUCE A E, et al. Rayleigh fractionation of heavy rare earths and Yttrium during metamorphic garnet growth[J]. *Geology*, 2002, 30: 159-162.
- [15] PYLE J M, SPEAR F S. An empirical garnet (YAG)-xenotime thermometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2000, 138: 51-58.
- [16] BEA F, MONTERO P, GARUTI G, et al. Pressure dependence of rare earth element distribution in amphibolite and granulite-grade garnets: A LA-ICP-MS study[J]. *Geost Newslett*, 1997, 21: 253-270.
- [17] CHERNOFF C B, CARLSON W D. Disequilibrium for Ca during growth of pelitic garnet[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1997, 15: 421-438.
- [18] HICKMOTT D D, SHIMIZU N. Trace element zoning in garnet from the Kwoiek area, British Columbia: Disequilibrium partitioning during garnet growth[J]? *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1990, 104: 619-630.
- [19] CHEN N S, SUN M, HE L, et al. Precise timing of the Early Paleozoic metamorphism and thrust deformation in the Eastern Kunlun Orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47: 1130-1133.

## MAJOR AND TRACE-ELEMENT ZONING IN METAMORPHIC GARNETS AND THEIR METAMORPHIC PROCESS IMPLICATIONS

CHEN Neng-song<sup>1</sup>, SUN Min<sup>2</sup>, YANG Yong<sup>1</sup>, LIU Rong<sup>1</sup>, WANG Qin-yan<sup>1</sup>  
 (1. Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;  
 2. Department of Earth Sciences, University of Hong Kong, Hong Kong, China)

**Abstract:** This article introduces some of the modern techniques for analyzing compositional zonings/profiles in metamorphic garnet, emphasizing the significance of two-dimensional composition X-ray mapping for such investigations. The compositional zonings/profiles in garnet can be divided into uniform-changed type and abrupt-changed type. The uniform-changed type is formed in equilibrium-controlled growth; the abrupt-changed type may be subdivided into step-changed subtype and spike-changed subtype, the forming mechanism of each is relatively complex. The step-changed subtype may be related to the processes such as polymetamorphism,  $p$ - $T$  changes with large magnitudes, and changes in metamorphic reactions or disturbance of crustal melting. As an example, the petrography, the major and trace element zoning and distribution patterns of REEs in the garnet from the Xiaomia Group in the East Kunlun Mountains suggest two episodes of regional metamorphism.

**Key words:** major and trace elemental zonings; metamorphic processes; garnet