

变质橄榄岩中尖晶石的分形结构因子类型及其成因意义

沈步明

(中国科学院地质研究所 北京 100029)

摘要 利用沈步明(1993)提出的分形结构因子的新方法,计算了橄榄岩包体、方辉橄榄岩、纯橄榄岩和铬铁矿等六种尖晶石的分形结构因子。划分了四种尖晶石分形结构因子类型:Al和Cr强变异型、Al和Cr变异型、Mg和 Fe^{2+} 变异型、Mg和 Fe^{2+} 强变异型,结合尖晶石的地质产状讨论了这四种类型的成因意义。通过大量分形结构因子的计算和图表,有力说明分形结构因子对于表征物质在空间分布的结构性和数据之间的相关性,是一种有效的定量手段。在推测尖晶石和主岩的成因方面,尖晶石的Cr(Al)和Mg(Fe^{2+})的FSF值图解更优于尖晶石的 $Cr/(Cr+Al)$ - $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 图解。

主题词 变质橄榄岩 尖晶石 分形 / 分形结构因子 信息维

1 前言

变质橄榄岩中的尖晶石是一个极其重要矿物,研究它的化学组成变化,可以揭示地幔的演化过程和蛇绿岩套的形成环境。由于蛇绿岩套中的变质橄榄岩绝大部分都经历了地幔变质作用和强烈的蚀变,原生矿物的组成和结构都受到强烈的改造和破坏,主要元素、某些较活动的微量元素和稀土组分发生了迁移,因此通过全岩组成和主要造岩矿物来搞清蛇绿岩及其铬铁矿的成因类型和成因机制存在着相当困难。而尖晶石和铬铁矿在蚀变和变质条件下是一个较稳定的矿物,即使在强烈蚀变的岩石中也有较新鲜的样品存在,因此,它为研究地幔演化过程提供了良好条件。

尖晶石 $Cr/(Cr+Al)$ 和 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 的比值变化图解是一个非常重要的图(见图12)。在图的上部,由于三种成因的尖晶石成分变化趋势线交汇在一起,给利用这个图解来推测主岩的形成环境带来困难。本文将利用尖晶石阳离子的分形结构因子推测原岩的形成环境,进行岩石成因分类,可以解决上述困难。

• 本文1993年8月15日收到,1994年3月21日改回。
本文为国家自然科学基金资助项目(49272098)成果之一。
作者简介:沈步明 男 53岁 副研究员 矿物学专业

2 分形结构因子的含义

分形结构因子(Fractal Structure Factor, 以下简称FSF), 是由沈步明等(1993)在信息维基础上提出来的。在分形理论中, 信息维是一个非常重要的量, 它是系统熵的变化率, 其计算公式为:

$$I(r) = - \sum_{i=1}^r P_i(r) \cdot \ln P_i(r) \quad (1)$$

$$I(r) = I_0 - D_1 \cdot \ln(r)$$

其中, r 是粗视化尺度, 表示等分空间成子空间的数; $P_i(r)$ 是进入第 i 号子空间点的频率; $I(r)$ 是总信息量, 即系统的熵; D_1 是信息维。因为容量维只考虑了子空间“空”与“非空”的区别, 而信息维对每个子空间所包含信息的多少加于区别, 因而, 信息维比容量维能更好地反映复杂图像的不均匀性。我国许多学者利用信息维去处理地震台站记录的震级变化, 收到了显著的效果, 实践表明: 强震前普遍出现信息维下降现象, 可以把这种降维过程视为强震发生前普遍出现的前兆。因而, 信息维的方法已成为地震预报的一种手段(蒋海昆 1992; 朱令人等 1992)。

分形结构因子与信息维的计算方法完全相同, 数值也完全相同, 其差别是信息维只取负值, 而分形结构因子有正值和负值之分。为了计算方便, 计算分形结构因子时, 将公式(2)改为:

$$I(r) = I_0 + \text{FSF} \cdot \ln(r) \quad (3)$$

FSF 值的正、负号由频率分布的峰偏系数决定, 如果峰偏系数是正值, 对应的 FSF 也为正值, 相反, 对应的 FSF 为负值。峰偏系数计算公式(林少官 1963) 为:

$$C_s = \frac{\mu_3}{\sigma_3} = \mu_3 \cdot (\sqrt{\mu_2})^{-3} \quad (4)$$

$$C_c = \frac{\mu_4}{\sigma_4} = \mu_4 \cdot \mu^{-2} \quad (5)$$

$$\mu_r = \frac{\sum (x - \bar{x})^r}{N} \quad (6)$$

其中, r 是中心距的阶数; N 为样品数; x 为测量值; \bar{x} 为测量值的平均值; C_s 为峰偏系数; C_c 为峰凸系数。关于分形结构因子的详细计算方法, 请参考有关文献, 下面将详细阐明分形结构因子的含义。

(1) 从表面来看, 分形结构因子与信息维仅仅是正负号的差别, 但实质上, 分形结构因子的含义与信息维有重要差别。分形结构因子的实质是: 将信息维与峰偏系数、频率分布和相关分析有机结合起来, 使它成为表征物质在空间分布的结构性和测量数据之间相关性的定量化工具, 或者说它已成为表征非正态分布特征的定量化工具。

(2) 分形结构因子比其它参数能更好地表征非正态分布的特征。其理由有三条: 第一, 正态分布的平均值、方差和变异系数的计算, 常采用算术平均法, 但非正态分布的上述参数计算不能采用算术平均法。到目前为止, 其平均值的计算尚未根本解决; 第二, 尽管峰偏系

数和峰凸系数能够反映非正态分布的某些特征,但是它们都是以单峰为前提的,不能表征复杂的多峰的频率分布的特征;第三,因为分形结构因子被定义为系统熵的变化率,没有采用算术平均值的方法,因而它能够表征复杂的频率分布的特征。

(3) 分形结构因子可以定量地表征各种频率分布曲线的偏倚性。如果频率分布曲线是一条水平线,其分形结构因子为1;如果频率分布曲线是一条垂直线,其分形结构因子为0;正态分布的分形结构因子大致分布在0.90~0.97之间;对数正态分布的分形因子大致在0.3~0.8之间。分形结构因子是利用0至1的数值表征各种频率分布的结构特性,便于进行样本之间的对比。

(4) 在同一系统中的两种物质,如果其FSF值都是正值或都是负值,说明这两种物质的变化呈正相关关系,否则为负相关关系。FSF为正值表示其频率分布为正偏斜,即高于算术平均值的样品数比低于算术平均值的样品少。如果FSF是一个比较小的正值,可以推测某些高于平均值的样品可能在局部地区聚集,或者说局部样品的测量值显著地高于算术平均值;反之,FSF为负值表示其频率分布为负偏斜。如果FSF是一个较小的负值,就可以推测某些低于平均值的样品可能在局部地区聚集,或者说局部样品的测量值显著地低于算术平均值。

(5) 分形结构因子和其它分形维一样可以表征复杂图形和数组的自相似性,即可以表示自身的(即单个的)相关性,而相关系数是表示两个变量之间的相关性,很显然,前者比后者更容易进行多变量之间相关性的对比。

3 六种尖晶石阳离子的分形结构因子计算

尖晶石主要由Al、Cr、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和Mg组成。计算其成分的分形结构因子之前,首先按 $(Fe^{2+}, Mg)_8(Cr, Fe^{3+}, Al)_{16}O_{32}$ 分子式重新计算了尖晶石的阳离子组成。然后,计算其阳离子的分形结构因子。为了便于对比,本文研究的尖晶石的化学组成,采自代表亏损程度不同的玄武岩中变质包体(下称橄榄岩包体,鄂莫岚 1979),西藏蛇绿岩套中的方辉橄榄岩,西藏东巧和罗布莎地区的纯橄榄岩和铬铁矿(王希斌等 1987;王恒升等 1983;邓万明 1988;中国科学院青藏高原综合考察队 1981)以及新疆西准蛇绿岩套中的方辉橄榄岩和唐巴勒地区蛇绿岩套中铬铁矿^①等的资料,其分形结构因子见表1。为了便于对比,也计算了 $Cr/(Cr+Al)$ 和 $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 的比值,列在表2中。

计算尖晶石阳离子分形结构因子时, r 的取值分别为5,6,7,...,14,对应于每个 r 值,可以求出一个 $I(r)$ 值,上述各种岩类的尖晶石阳离子所对应的 $I(r)-\ln(r)$ 图解表示在图1~9中。

^① 张驰. 新疆西准噶尔蛇绿岩套地质特征及含矿性研究报告, 1990.

表1 六种尖晶石阳离子的分形结构因子

Table 1 The fractal structure factor of cation for spinel

| 岩类 | 橄榄岩包体 | | 西藏方辉橄榄岩 | | 新疆方辉橄榄岩 | | 西藏铬铁矿 | | 西藏纯橄榄岩 | | 唐巴勒铬铁矿 | |
|---------------------|--------|-------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | FSF | R | FSF | R | FSF | R | FSF | R | FSF | R | FSF | R |
| Cr | 0.888 | 0.978 | -0.779 | 0.951 | 0.815 | 0.963 | -0.912 | 0.989 | -0.901 | 0.996 | -0.912 | 0.994 |
| Al | -0.901 | 0.994 | 0.831 | 0.987 | -0.819 | 0.992 | 0.895 | 0.994 | 0.912 | 0.997 | 0.760 | 0.907 |
| Fe ³⁺ | 0.919 | 0.998 | 0.898 | 0.996 | 0.875 | 0.992 | 0.895 | 0.998 | 0.904 | 0.998 | 0.839 | 0.994 |
| Fe ²⁺ | 0.943 | 0.996 | -0.894 | 0.996 | 0.917 | 0.983 | 0.888 | 0.997 | 0.879 | 0.995 | 0.699 | 0.955 |
| Mg | -0.925 | 0.996 | 0.894 | 0.996 | -0.862 | 0.996 | -0.909 | 0.998 | -0.879 | 0.995 | -0.708 | 0.963 |
| Al+Fe ³⁺ | -0.876 | 0.988 | 0.802 | 0.952 | -0.839 | 0.980 | 0.892 | 0.984 | 0.908 | 0.997 | 0.930 | 0.980 |
| Cr+Fe ³⁺ | 0.860 | 0.992 | -0.829 | 0.990 | 0.826 | 0.993 | -0.901 | 0.994 | -0.916 | 0.997 | -0.747 | 0.893 |
| 样品总数 | 90 | | 52 | | 44 | | 63 | | 67 | | 60 | |

表2 六种尖晶石的一些参数

Table 2 Some parameters for spinel

| 岩类 | 样品数 | 橄榄岩包体 | 西藏方辉橄榄岩 | 新疆方辉橄榄岩 | 西藏铬铁矿 | 西藏纯橄榄岩 | 唐巴勒铬铁矿 |
|---------------------------|----------------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
| | | 90 | 52 | 44 | 63 | 67 | 60 |
| Cr | C _s | 1.815 | -1.160 | 1.549 | -0.470 | -0.446 | -2.014 |
| | C _c | 5.942 | 3.759 | 5.674 | 1.761 | 2.700 | 8.514 |
| | X | 2.426 | 10.251 | 8.512 | 11.561 | 11.964 | 12.725 |
| | F | 0.671 | 0.169 | 0.151 | 0.053 | 0.900 | 0.056 |
| Al | C _s | -1.369 | 1.302 | -1.773 | 0.458 | 0.344 | 1.714 |
| | C _c | 4.802 | 4.223 | 8.008 | 1.678 | 2.277 | 11.242 |
| | X | 12.908 | 5.348 | 7.090 | 3.693 | 3.544 | 2.723 |
| | F | 0.131 | 0.312 | 0.166 | 0.144 | 0.253 | 0.287 |
| Fe ³⁺ | C _s | 1.309 | 0.649 | 0.849 | 0.601 | 1.361 | 0.850 |
| | C _c | 4.490 | 3.158 | 3.521 | 2.547 | 5.800 | 4.727 |
| | X | 0.793 | 0.442 | 0.517 | 0.760 | 0.492 | 0.563 |
| | F | 0.637 | 0.610 | 0.510 | 0.301 | 0.611 | 0.618 |
| Fe ²⁺ | C _s | 0.553 | -0.866 | 0.971 | 0.635 | 0.187 | 1.588 |
| | C _c | 3.188 | 3.766 | 5.041 | 2.414 | 3.003 | 9.416 |
| | X | 1.571 | 3.456 | 3.409 | 2.157 | 3.723 | 2.858 |
| | F | 0.341 | 0.117 | 0.122 | 0.163 | 0.107 | 0.163 |
| Mg ²⁺ | C _s | -0.688 | 0.857 | -0.467 | -0.748 | -0.187 | -1.568 |
| | C _c | 2.988 | 3.682 | 3.934 | 2.843 | 3.003 | 9.311 |
| | X | 6.392 | 4.538 | 4.603 | 5.841 | 4.277 | 5.140 |
| | F | 0.093 | 0.090 | 0.080 | 0.062 | 0.093 | 0.091 |
| Cr/(Cr+Al ³⁺) | | 0.157 | 0.657 | 0.545 | 0.758 | 0.771 | 0.824 |
| Mg/(Fe ²⁺ +Mg) | | 0.802 | 0.568 | 0.575 | 0.730 | 0.535 | 0.643 |

注：表中C_s为峰偏系数；C_c为峰凸系数；X为平均值；F为变异系数。

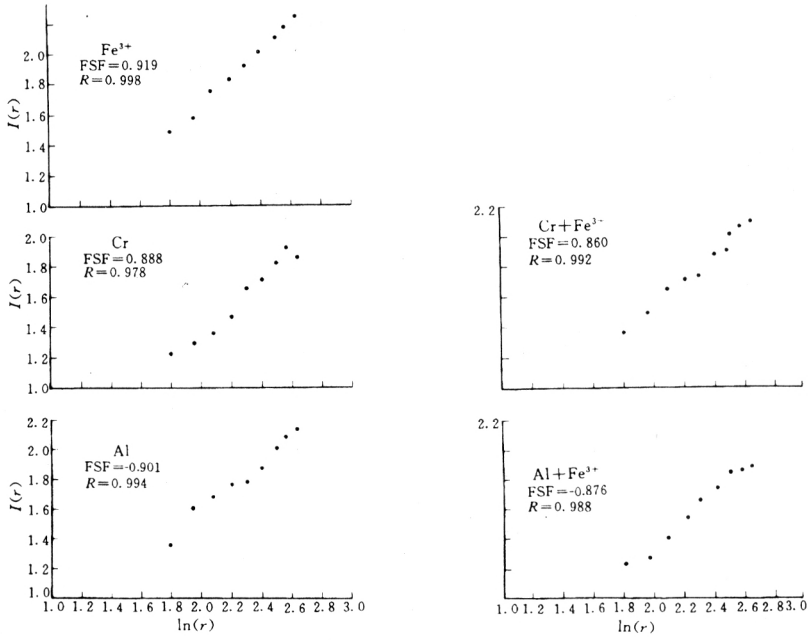


图 1 橄榄岩包体中尖晶石 Cr、Al、Fe³⁺的 $I(r)$ - $\ln(r)$ 图

Fig. 1 $I(r)$ versus $\ln(r)$ diagrams of Cr, Al and Fe³⁺ for spinel from ultramafic xenoliths

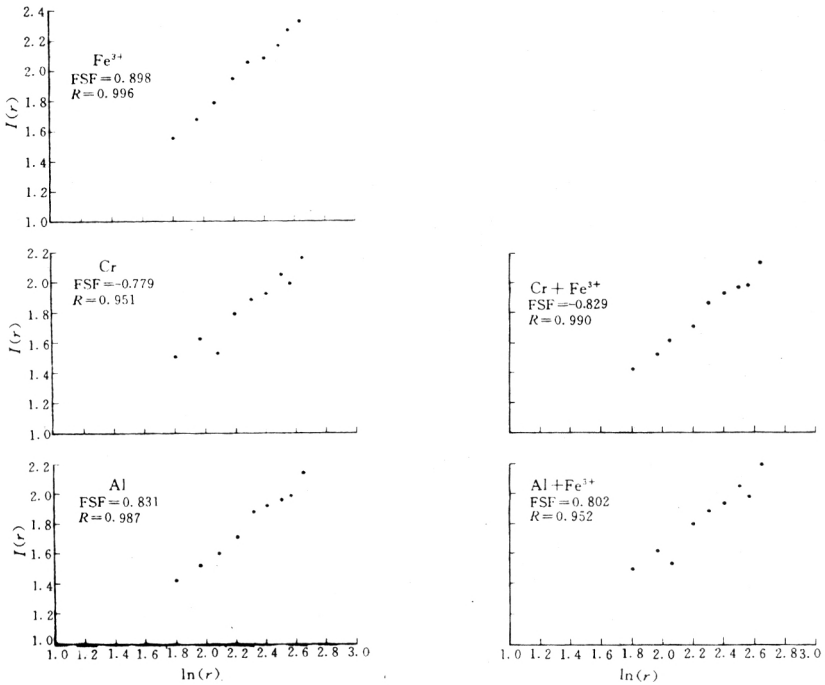


图 2 西藏方辉橄榄岩中尖晶石 Cr、Al、Fe³⁺的 $I(r)$ - $\ln(r)$ 图

Fig. 2 $I(r)$ versus $\ln(r)$ diagrams of Cr, Al and Fe³⁺ for spinel from harzburgites in Tibet

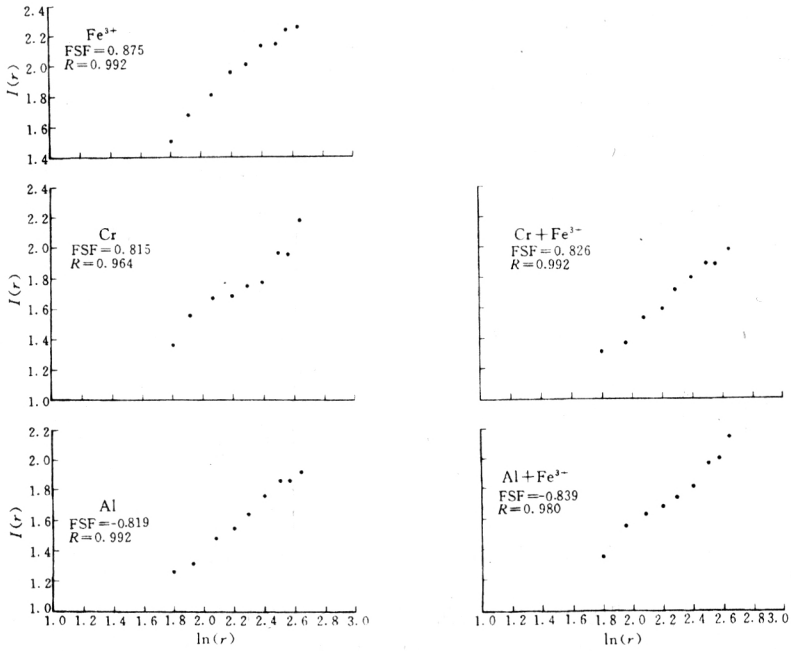


图3 新疆西准方辉橄榄岩尖晶石 Cr、Al、Fe³⁺的 I(r)-ln(r)图

Fig. 3 I(r) versus ln(r) diagrams of Cr, Al and Fe³⁺ for spinel from harzburgites in West Junggar

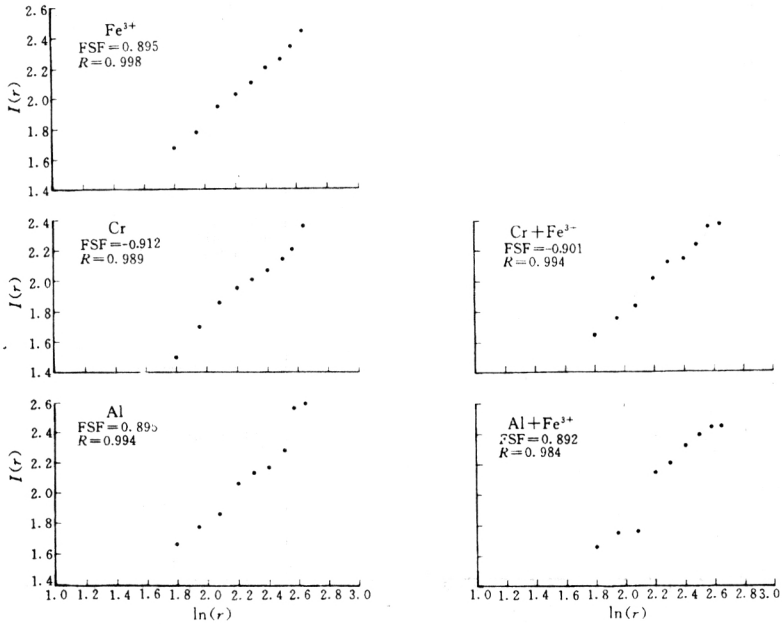


图4 西藏东巧和罗布莎铬铁矿 Cr、Al、Fe³⁺的 I(r)-ln(r)图

Fig. 4 I(r) versus ln(r) diagrams of Cr, Al and Fe³⁺ for chromites in Dongqiao and Luobusha, Tibet

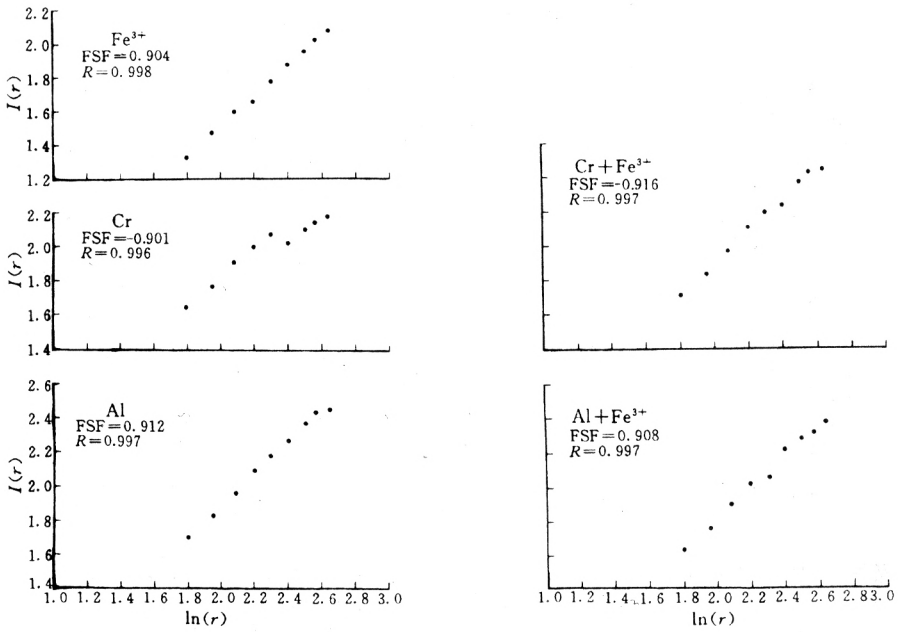


图 5 西藏东巧和罗布莎纯橄岩尖晶石 Cr、Al、Fe³⁺ 的 $I(r)$ - $\ln(r)$ 图

Fig. 5 $I(r)$ versus $\ln(r)$ diagrams of Cr, Al and Fe³⁺ for spinel from dunitites in Dongqiao and Luobusha, Tibet

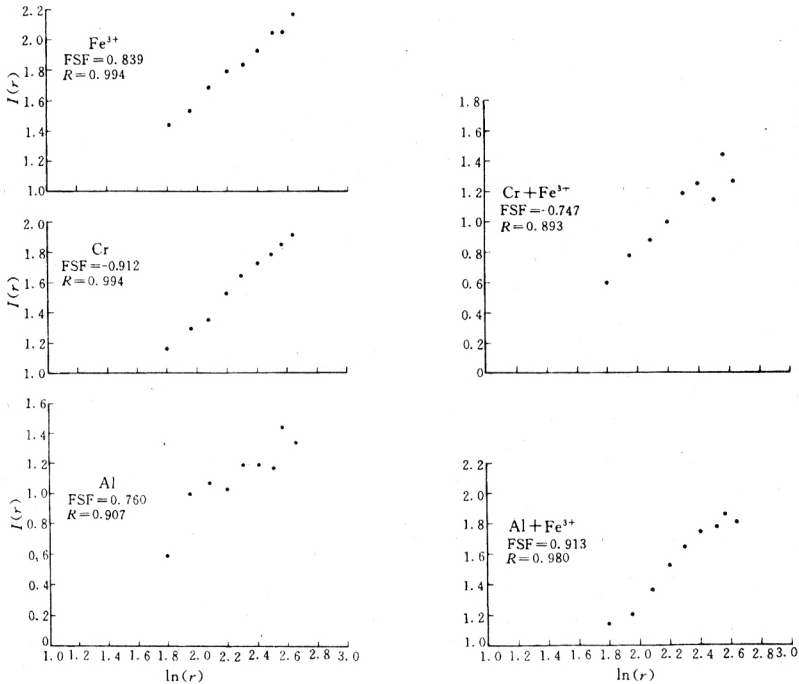


图 6 新疆唐巴勒地区铬铁矿 Cr、Al、Fe³⁺ 的 $I(r)$ - $\ln(r)$ 图

Fig. 6 $I(r)$ versus $\ln(r)$ diagrams of Cr, Al and Fe³⁺ for chromites in Tangbale, Xinjiang

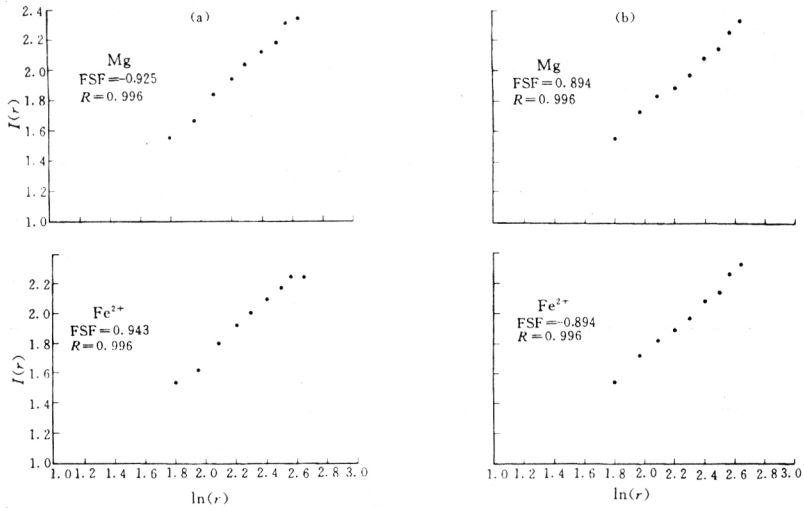


图7 橄榄岩包体、西藏方辉橄榄岩和新疆唐巴勒地区铬铁矿的尖晶石 Mg 和 Fe²⁺ 的 $I(r)$ - $\ln(r)$ 图
(a)橄榄岩包体, (b)新疆方辉橄榄岩

Fig. 7 $I(r)$ versus $\ln(r)$ diagrams of Mg and Fe²⁺ for spinel from ultramafic xenoliths, and from harzburgites in Tibet, and from chromites in Tangbale, Xinjiang

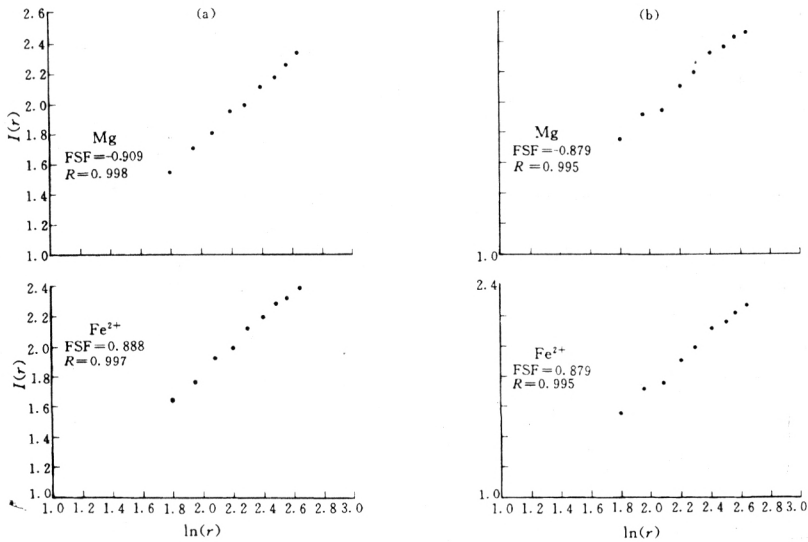


图8 西藏的纯橄岩和铬铁矿等尖晶石 Mg 和 Fe²⁺ 的 $I(r)$ - $\ln(r)$ 图
(a)纯橄岩, (b)铬铁矿

Fig. 8 $I(r)$ versus $\ln(r)$ diagrams of Mg and Fe²⁺ for spinel from dunites and chromites in Tibet

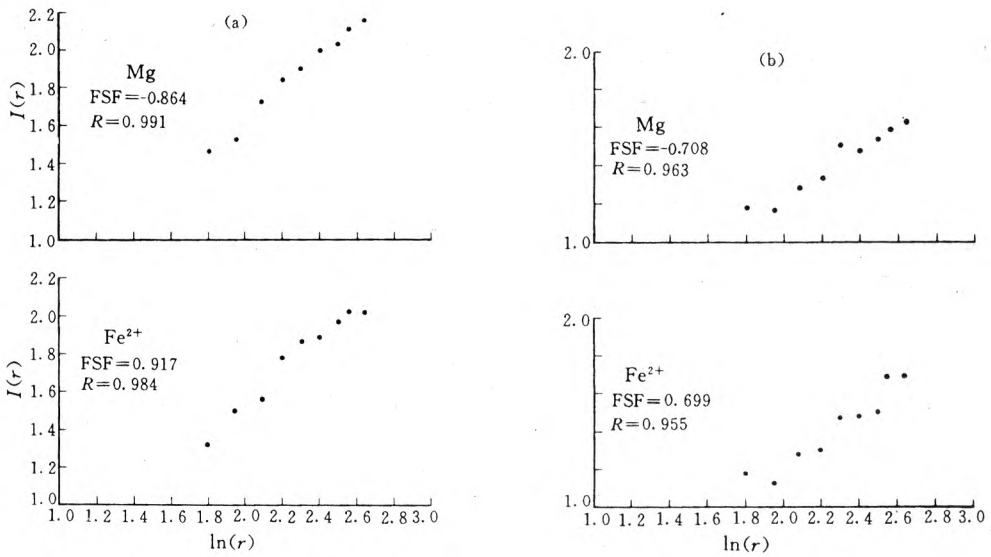


图 9 新疆西准方辉橄榄岩和唐巴勒铬铁矿尖晶石 Mg 和 Fe²⁺ 的 $I(r)$ - $\ln(r)$ 图
(a)方辉橄榄岩, (b)铬铁矿

Fig. 9 $I(r)$ versus $\ln(r)$ diagrams of Mg and Fe²⁺ for spinel from harzburgites in West Junggar, and from chromites in Tangbale, Xinjiang

从 1~9 图中可以看出: 各个阳离子的 $I(r)$ 与 $\ln(r)$ 的线性关系比较好, 其线性拟合系数 R 大部分都在 0.98 以上, 说明 $I(r)$ 与 $\ln(r)$ 之间具有自相似性, 存在无标度区, 求出的分形结构因子是可信的。

尖晶石阳离子的分形结构因子具有如下意义:

(1) 利用尖晶石中阳离子分形结构因子, 可以确定尖晶石各组分的类质同象关系。如表 1 所示, 除个别岩类外, 每种岩类的尖晶石 Mg 和 Fe²⁺ 阳离子的 FSF 值都非常接近, 并且符号相反, 这说明尖晶石中的 Mg 和 Fe²⁺ 确是完全类质同像替代的关系。Cr、Fe³⁺ 和 Al 的类质同像替代关系存在两种可能: $Cr + Fe^{3+} \rightleftharpoons Al$ 或 $Cr \rightleftharpoons Al + Fe^{3+}$ 。究竟属于哪一类质同像替代关系, 可以利用表 1 中 Cr 和 Al 的线性拟合系数 R 决定, 拟合系数小说明其线性关系差, 可以推测该元素加上 Fe³⁺ 与另一元素呈完全类质替代关系。比如橄榄岩包体中的尖晶石, Cr 和 Al 的 FSF 分别是 0.888 和 -0.901, 其拟合系数分别为 0.978 和 0.994, 很显然, Cr 的拟合系数小, 说明其类质同像替代关系应是 $Cr + Fe^{3+} \rightleftharpoons Al$ 。同样, $Cr + Fe^{3+}$ 的拟合系数比 $Al + Fe^{3+}$ 大, 也说明 $Cr + Fe^{3+} \rightleftharpoons Al$ 呈完全类质同像替代关系。从表 1 看出, 除了新疆唐巴勒地区的铬铁矿是呈 $Al + Fe^{3+} \rightarrow Cr$ 类质同像替代外, 其它五类尖晶石都是 $Cr + Fe^{3+} \rightleftharpoons Al$ 类质同像替代。

(2) 利用各种岩类尖晶石的 Cr 和 Al 平均 FSF 值与 Mg 和 Fe²⁺ 平均 FSF 值的差异, 可以确定这两组元素变化的强度。分形结构因子可以定量地表征各种频率分布曲线的偏倚性, 如果频率分布曲线是一条水平线, 其分形结构因子为 1; 如果频率分布曲线是一条垂直线, 其分形结构因子为 0; 正态分布的分形结构因子大致分布在 0.90~0.97 之间; 对数正态分布

的分形因子大致在 0.3~0.8 之间。如果 FSF 是一个比较小的正值,可以推测某些高于平均值的样品可能在局部地区聚集,或者说局部样品的测量值显著地高于算术平均值。反之,FSF 为负值表示其频率分布为负偏斜。如果 FSF 是一个较小的负值,就可以推测某些低于平均值的样品可能在局部地区聚集,或者说局部样品的测量值显著地低于算术平均值。

对于同一类的尖晶石来说,虽然其采样位置可能分布很不均匀,但它并不影响利用其尖晶石的各个组分的 FSF 值去表征它们的变化。如果 Cr 和 Al 的平均 FSF 值小于 Mg 和 Fe^{2+} 平均的 FSF 值,就表明前者的变化大于后者。对于不同类的尖晶石来说,由于采样位置构形的差别,可能会影响其 FSF 值的大小,进行上述推测时要慎重。

(3) 利用尖晶石中各元素 FSF 值的正负号,可以表征各类尖晶石元素之间的相关关系。如果其 FSF 值都是正值或都是负值,说明这两个元素的变化呈正相关关系,否则为负相关关系,如图 10 和图 11 所示。同时,也可以利用各元素之间 FSF 值的差值判断其相似程度,差值越小,暗示其相似程度越好。

4 尖晶石分形结构因子的分类

根据六种岩类的分形结构因子,可以划分成如下四种类型。

4.1 Al 和 Cr 强变异型

玄武岩中变质橄榄岩包体的、西藏和新疆蛇绿岩套方辉橄榄岩的尖晶石分形结构因子属此类型。其特点是:尖晶石中 Cr 和 Al 的变化强于 Mg 和 Fe^{2+} 的变化,主要表现在 1) 尖晶石的类质同像替代方式是 $Cr + Fe^{3+} \rightleftharpoons Al$, 暗示 Fe^{3+} 与 Cr 的变化趋势是一致的; 2) Cr 和 Al 的 FSF 值小于 Mg 和 Fe^{2+} 的 FSF 值,反映了 Cr 和 Al 的变化大于 Mg 和 Fe^{2+} 的变化; 3) Cr 和 Mg 以及 Al 和 Fe^{2+} 的 FSF 的符号是相反的,反映了它们的变化是负相关。

上述三种尖晶石阳离子变异特征与图 12 中地幔部分熔融 $Cr/(Cr+Al)-Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 的变化是一致的。因此,可以认为 Al 和 Cr 强变异型的分形结构因子表征了地幔部分熔融成因的尖晶石成分变化的特征。

4.2 Al 和 Cr 变异型

西藏东巧和罗布莎铬铁矿的分形结构因子属本类型,其特点是:总的来说,Al 和 Cr 的变化大于 Mg 和 Fe^{2+} 的变化,主要表现在 1) 尖晶石的类质同像替代方式是 $Cr + Fe^{3+} \rightleftharpoons Al$; 2) Cr 和 Al 的 FSF 值小于 Mg 和 Fe^{2+} 的 FSF 值,反映了 Cr 和 Al 的变化大于 Mg 和 Fe^{2+} 的变化; 3) Cr 和 Mg 以及 Al 和 Fe^{2+} 的 FSF 的符号都是正号或都是负号,反映了它们的变化是正相关。很明显,除了第三个特征外,其它两个特征均与 Cr 和 Al 强变异型特征相同。

4.3 Mg 和 Fe^{2+} 变异型

西藏东巧和罗布莎纯橄榄岩的分形结构因子属本类型,其特点是:总的来说,Mg 和 Fe^{2+} 的变化大于 Cr 和 Al 的变化,其主要表现在 1) 尖晶石的类质同像替代方式是 $Cr + Fe^{3+} \rightleftharpoons Al$; 2) Cr 和 Al 的 FSF 值大于 Mg 和 Fe^{2+} 的 FSF 值,反映了 Cr 和 Al 的变化小于 Mg 和 Fe^{2+} 的

变化; 3)Cr 和 Mg 以及 Al 和 Fe²⁺ 的 FSF 值的符号都是正的或都是负的, 反映了它们的变化是正相关。很明显, 除了第一个特征外, 其它两个特征均与 Mg 和 Fe²⁺ 强变异型特征相同。

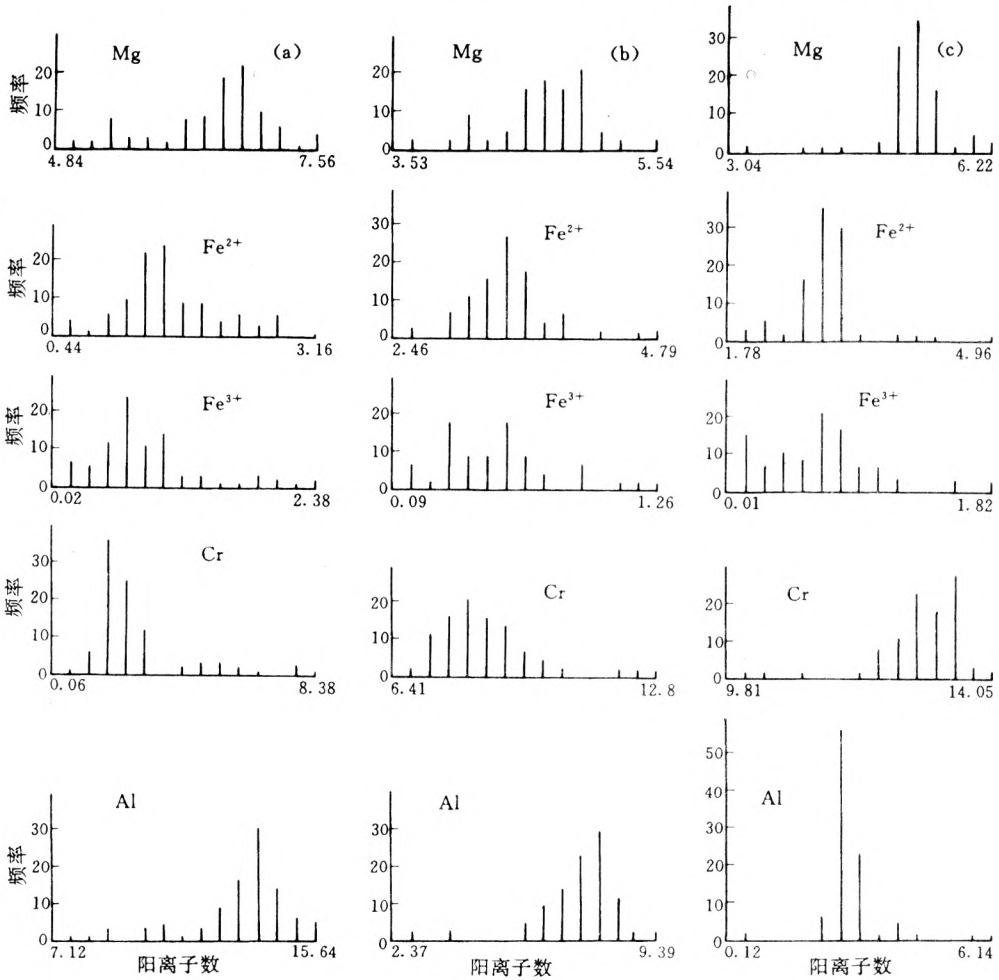


图 10 橄榄岩包体、新疆西准方辉橄榄岩和新疆唐巴勒地区铬铁矿尖晶石阳离子频率分布直方图
(a)橄榄岩包体; (b)新疆方辉橄榄岩; (c)新疆唐巴勒地区铬铁矿

Fig. 10 Histograms of cation for spinel from ultramafic xenoliths, and from harzburgites in West Junggar, and from chromites in Tangbale, Xinjiang

4.4 Mg 和 Fe²⁺ 强变异型

新疆唐巴勒地区铬铁矿的分形结构因子属此类型。其特点是: Mg 和 Fe²⁺ 的变化强于 Cr 和 Al 的变化, 主要表现在 1) 尖晶石的类质同像替代方式是 Al+Fe³⁺ ⇌ Cr; 2) Cr 和 Al 的 FSF 值大于 Mg 和 Fe²⁺ 的 FSF 值, 反映了 Cr 和 Al 的变化小于 Mg 和 Fe²⁺ 的变化; 3) Cr 和 Mg 以及 Al 和 Fe²⁺ 的 FSF 值的符号都是正的或都是负的, 反映它们的变化是正相关。这三种阳离子的变异特征与第一类的变化特征完全相反, 与图 12 上的橄榄石分异作用的 Cr/(Cr+Al)-Mg/(Mg+Fe²⁺) 的变化一致, 可以认为 Mg 和 Fe²⁺ 强变异型分形结构因子表征了

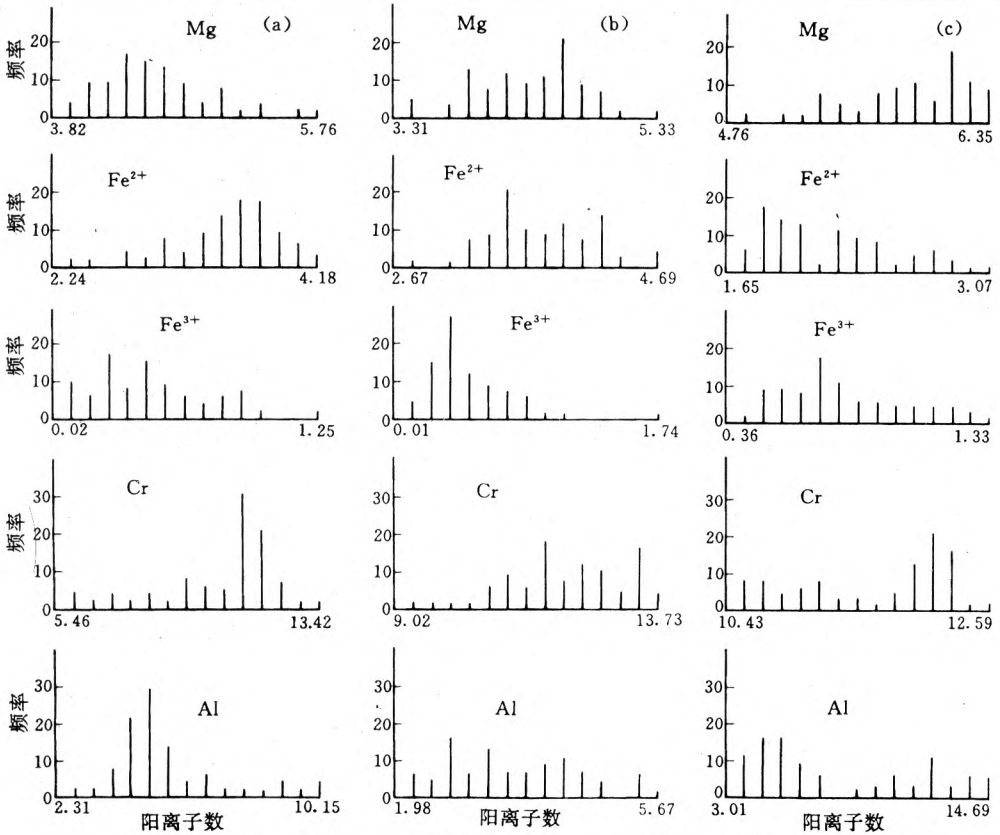


图 11 西藏的方辉橄榄岩、纯橄榄岩和铬铁矿等尖晶石阳离子频率分布直方图

(a)方辉橄榄岩; (b)纯橄榄岩; (c)铬铁矿

Fig. 11 Histograms of cation for spinel from harzburgite, dunites and chromites in Tibet

岩浆结晶分异成因的尖晶石成分的变化特征。

5 橄榄岩中尖晶石分形结构因子类型的成因意义

大量研究表明,与地幔部分熔融成因有关的尖晶石,随着部分熔融程度的增加,其 Cr^{II} ($Cr/(Cr+Al)$) 比值增加, Mg^{II} ($Mg/(Mg+Fe^{2+})$) 比值降低,即 Cr 与 Mg 的变化呈负相关。但是,与橄榄石分异作用即岩浆结晶分异作用有关的尖晶石,其 Mg^{II} 比值的变化与上述趋势相反,即随着结晶分异作用的增强, Cr^{II} 和 Mg^{II} 的比值都呈下降趋势, Cr 和 Mg 的变化呈正相关(见图 12)。尖晶石的这两种不同成因的变化趋势线在高 Cr^{II} 比值区交汇在一起,给利用这两个比值推测其成因带来了许多困难。另外, Dick et al. (1984) 利用尖晶石的 Cr^{II} 比值把超镁铁质构造岩分为三类: $Cr^{II} < 0.6$ 的为 I 型; $Cr^{II} > 0.6$ 的为 III 型; II 型为过渡型,包括 I 和 III 型尖晶石的变化范围。深海橄榄岩属 I 型, III 型为与岛弧有关的火山岩和侵入岩、大陆侵入岩组合以及大洋高原玄武岩。II 型具有复合成因。很明显,由于 II 型的 Cr^{II} 的变化范围与 I 和 III 型的范围重叠,也给利用 Cr^{II} 推断其成因带来困难。

本文尖晶石分形结构因子的研究将可能解决这种成因上的多解性问题。下面将详细说明

尖晶石分形结构因子的成因意义。

(1) 利用上述的尖晶石分形结构因子的类型，可以确定所研究的尖晶石的成因类型。如果尖晶石的分形结构因子属 Cr 和 Al 强变异型，则可以推断其尖晶石与地幔部分熔融的成因有关；如果尖晶石的分形结构因子属 Mg 和 Fe²⁺ 强变异型，则可以推断其尖晶石的成因与岩浆结晶分异作用有关；如果尖晶石的分形结构因子属 Cr 和 Al 变异型或 Mg 和 Fe²⁺ 变异型，则可以推测该尖晶石的成因与地幔部分熔融和岩浆结晶分异两种作用有关，不过前者偏重于地幔部分熔融作用，后者偏重于岩浆结晶分异作用。

(2) 利用 Cr 和 Al 平均 FSF 值与 Mg 和 Fe²⁺ 平均 FSF 值的直角坐标图可以清楚地表示尖晶石的成因特点。如图 13 所示，属于 Cr 和 Al 强变异型的橄榄岩包体、西藏方辉橄榄岩和新疆方辉橄榄岩中的尖晶石位于图的左上方；属于 Mg 和 Fe²⁺ 强变异型的新疆唐巴勒铬铁矿位于图的右下方；属于 Cr 和 Al 变异型的西藏铬铁矿以及属于 Mg 和 Fe²⁺ 变异型的西藏纯橄岩中尖晶石位于图的中间部位。这样就解决了地幔亏损强烈的纯橄岩和堆晶岩中的尖晶石在 Cr/(Cr + Al)-Mg/(Mg + Fe²⁺) 图上相互交叉，不容易区别的问题(见图 14)。为什么尖晶石的分形结构因子的图解有这样好的效果呢？这是因为分形结构因子是表征 Cr、Al、Mg、Fe²⁺ 的变化，而不是表征它们的绝对值，对于表示那些 Cr/(Cr + Al) 比值大，但其变化又很小的尖晶石来说，其效果是非常好的。

(3) 利用上述方法，确定其尖晶石的分形结构因子类型以后，可以利用尖晶石的 Crⁿ 比值和 Mgⁿ 比值再进行分类，即分形结构因子与常规的 Crⁿ、Mgⁿ 比值相结合的次一级分类。对属于 Al 和 Cr 强变异型的岩类，可用 Crⁿ 比值进行次一级分类，比如，橄榄岩包体、西藏方辉橄榄岩和新疆方辉橄榄岩中的尖晶石属 Al 和 Cr 强变异型，它们的 Crⁿ 平均值分别为 0.157、0.657 和 0.545，因此，可以推测这三者的部分熔融程度从小到大的排列顺序应该是橄榄岩包体、新疆方辉橄榄岩、西藏方辉橄榄岩。对属于 Mg 和 Fe²⁺ 强变异型的岩体，可用 Mgⁿ 比值的变化进行次一级分类。对于 Al 和 Cr 变异型岩体，可以主要用 Crⁿ 比值同时又考虑 Mgⁿ 比值进行次一级分类。对于 Mg 和 Fe²⁺ 变异型岩体，可以主要用 Mgⁿ 比值同时又考虑 Crⁿ 比值进行次一级分类。

(4) 尖晶石 Cr 和 Al 变异型以及 Mg 和 Fe²⁺ 变异型的特征暗示它们与地幔部分熔融和岩浆结晶分异两种作用有关。如果这种推测成立，将可能揭示纯橄岩中造岩尖晶石和造矿尖晶石的形成机制。在蛇绿岩套中有地幔残余和堆晶成因的两种纯橄岩。堆晶纯橄岩中的尖晶石与岩浆结晶分异作用有关，这是人们公认的。但对地幔残体中的造岩尖晶石与造矿尖晶石的成因却不是很清楚的。为什么造矿尖晶石比造岩尖晶石富 Mg 贫 Fe²⁺？目前一个比较

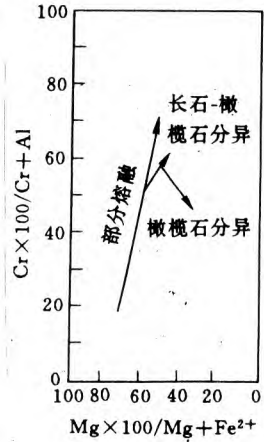


图 12 三种成因的尖晶石的 Cr/Cr+Al-Mg/Mg+Fe²⁺ 变化图

Fig. 12 Cr/(Cr + Al) Versus Mg/(Mg + Fe²⁺) diagram for various genitic spinel

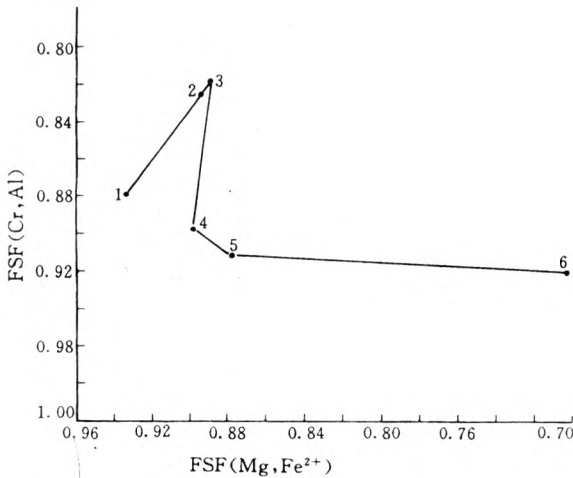


图 13 六种尖晶石的 $FSF_{(Al,Cr)}-FSF_{(Mg,Fe^{2+})}$ 图解
 $FSF_{(Al,Cr)}$ 表示 Al 和 Cr 的平均 FSF 值; $FSF_{(Mg,Fe^{2+})}$ 表示 Mg 和 Fe^{2+} 的平均 FSF 值; 1. 橄榄岩包体中的尖晶石; 2. 西藏方辉橄榄岩中的尖晶石; 3. 新疆方辉橄榄岩中的尖晶石; 4. 西藏东巧和罗布莎铬铁矿; 5. 西藏纯橄榄岩中铬铁矿; 6. 新疆唐巴勒地区铬铁矿

Fig. 13 $FSF(Al,Cr)$ versus $FSF(Mg,Fe^{2+})$ diagram for various genitic spinel

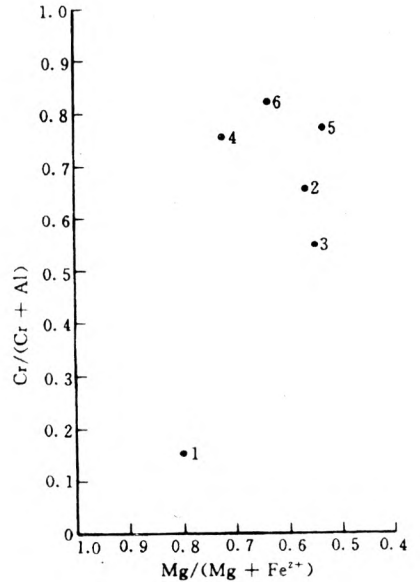


图 14 六种尖晶石的 $Cr/(Cr+Al)-(Mg/Mg+Fe^{2+})$ 图解
 图中数字的含义同图 13

Fig. 14 $Cr/(Cr+Al)$ versus $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ diagram for various genitic spinel

通常的解释是：在地幔部分熔融过程中形成的尖晶石在低温下经受了重新平衡作用，因为造岩尖晶石比造矿尖晶石颗粒小，低温下再平衡使前者更容易富 Fe (Dick et al. 1984)。按照这种观点，造矿尖晶石成因于地幔部分熔融作用，但轻微经受了低温下再平衡作用，而造岩尖晶石虽然成因于地幔部分熔融作用，但后来经受了较强的低温再平衡作用。有趣的是，本文研究的西藏东巧和罗布莎的铬铁矿，其分形结构因子属 Cr 和 Al 变异性，即是 $Cr+Fe^{3+} \rightleftharpoons Al$ 类质同像以及 Cr 和 Al 的变化大于 Mg 和 Fe^{2+} 的变化，反映了地幔部分熔融作用特点，而 Cr 和 Mg 以及 Al 和 Fe^{2+} 呈正相关又反映了尖晶石的成分变化具有岩浆作用的特点。另外，西藏纯橄榄岩中尖晶石，其分形结构因子属 Mg 和 Fe^{2+} 变异性，即呈 $Cr+Fe^{3+} \rightleftharpoons Al$ 类质同像，反映了地幔部分熔融作用尖晶石的特点，而 Mg 和 Fe^{2+} 的变化，Cr 和 Mg 以及 Al 和 Fe^{2+} 呈正相关，又明显反映了岩浆成因尖晶石的特点。这种“低温下的再平衡”观点仅是一种解释，是否有可能是由于部分熔融和岩浆分异两种作用叠加的结果，有待进一步研究。

总的来说，正是由于分形结构因子的方法是通过定量地刻画元素的频率分布的偏倚性，揭示尖晶石各元素间的类质的同像替代关系和变化强度，因此，它能够更本质地反映元素的变化特征，可以解决利用 Cr^{n+} 和 Mg^{n+} 比值图解进行推测时所遇到的在高 Cr^{n+} 比值区多成因重叠问题。

参 考 文 献

- 蒋海昆. 1992. 新疆近期两次地震序列的时间信息维的特征. 地震地磁观测与研究, 13(2): 1~7
- 朱令人, 周信勇, 王海涛. 1992. 地震活动信息维的研究. 地震学报, 14(4): 385~392
- 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 王方国. 1987. 西藏蛇绿岩. 北京: 地质出版社
- 王恒升等. 1983. 中国铬铁矿床及成因. 北京: 科学出版社, 15
- 邓万明. 1988. 藏北蛇绿岩中尖晶石类矿物的化学成分. 地质科学, (2): 122
- 中国科学院青藏高原综合考察队. 1981. 西藏岩浆活动和变质作用. 北京: 科学出版社, 190
- 叶良和, 张开春. 1987. 西准噶尔地区绿岩套地质-数学特征及超基性岩含铬性统计预测. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, (17): 117~193
- 鄂莫岚, 赵大升. 1979. 中国东部新生代玄武岩及深源包体. 北京: 科学出版社
- 沈步明, 王思敬. 1993. 一个新的频率分布的特征参数—分形结构因子. 科学通报, (8): 724~727
- 沈步明. 1993. 分形结构因子及其在地质学上的应用. 岩石学报, (3): 268~276
- Dick H J B and Bullen J. 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotite and spatially associated lavas, Contrib. Mineral. Petrol., 86: 54~76

THE TYPE OF FRACTAL STRUCTURE FACTOR FOR SPINEL FROM META- PERIDOTITE AND ITS SIGNIFICANCE

Shen Buming

(Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029)

Keywords : Meta-peridotite; Spinel; Fractal structure factor; Fractal dimension of information content; Fractal

Abstract

The fractal structure factors (FSF) of spinel from ultramafic xenolith, harzburgite, dunite and chromite have been calculated using a new method presented by Shen (1993). Four kinds of type and its significance for fractal structure factor of spinel also have been studied, and the four kinds of type are: (1) very strong variety of Al and Cr; (2) strong variety of Al and Cr; (3) strong variety of Mg and Fe^{2+} ; (4) very strong variety of Mg and Fe^{2+} . It is shown by a lot of table and figure that the fractal structure factor is a strong approach to express the structurization of space distribution of matter and interrelation between data. The FSF(Al, Cr) versus FSF(Mg, Fe^{2+}) diagram is better than Cr/(Cr+Al) versus Mg/(Mg+ Fe^{2+}) diagram to presume the cause of formation of spinel and original rock.