

# 山东梭罗树地幔橄榄岩微量元素的质子 探针研究

## The Study of Trace Element Using the Proton-Microprobe for Suoluosu Mantle Peridotite, Sandong Province

徐平<sup>1</sup> 陈友红<sup>2</sup> 张旗<sup>1</sup> 邬显康<sup>2</sup> 朱节清<sup>2</sup> 谷英梅<sup>2</sup>

Xu Ping<sup>1</sup>, Chen Youhong<sup>2</sup>, Zhang Qi<sup>1</sup>, Wu Xiankang<sup>2</sup>,  
Zhu Jiqing<sup>2</sup> and Gu Yingmei<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地质研究所 北京 100029; 2. 中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;

2. Shanghai Nuclear Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800)

**摘要** 作者利用质子微探针和微束 PIXE 定量分析技术,对山东梭罗树地幔橄榄岩中橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、尖晶石和石榴石等矿物的微量元素组成与分布进行了研究。结果表明,不相容元素(Sr, Y, Zr)主要富集于单斜辉石内,尖晶石则几乎富集质子探针所能检出的所有微量元素,而石榴石中微量元素含量最少。研究表明,微区微量元素分布很不均匀,推测可能受地幔交代过程中溶液的渗滤效应以及存在微粒包裹体的共同制约。

**Abstract** Minerals in mantle peridotite from the Souluosu area, Sandong Province have been analysed on proton-microprobe for Ni, Zn, Ga, Rb, Sr, Zr, Y. The result shows that these elements are contained in specific acceptor minerals, such as olivine contains the highest Ni, orthopyroxene contains median Ni, and both they contains few Zn (Zn and Ni are compatible elements), while clinopyroxene has high incompatible elements (Sr, Zr, Y), spinel has high Ni, Zn and Ga, but garnet has fewest these elements. The inhomogeneous distribution of these elements is observed obviously in several hundred micron area of the minerals. This may result from the infiltration of fluids during mantle metasomatism and may be related to tiny inclusions enriched in specific elements.

• 本文1995年3月15日收,1995年11月29日改回。

本文为国家自然科学基金和中国科学院核分析技术开放实验室资助项目成果之一。

第一作者简介:徐平 男 1965年出生 工程师 矿物岩石专业

主题词 地幔橄榄岩 质子微探针 微量元素 山东 梭罗树

key word: Mantle peridotite; Proton-microprobe; Trace element; Shandong; Suoluosu area

分类号: P588.12; P595

Classific. code: P588.12; P595

梭罗树二辉橄榄岩位于山东省东南部的日照县境内,为苏北-胶南高压榴辉岩带内出露面积最大的地幔橄榄岩 ( $4.6 \times 0.5 \text{ km}^2$ ),以尖晶石二辉橄榄岩为主。岩体内有许多包裹体,为石榴辉石岩、含柯石英榴辉岩及辉橄岩等(赵大升等 1993)。岩体侵入在元古界胶南群片麻岩中,接触处围岩具强烈的糜棱岩化。在梭罗树地幔橄榄岩中观察到了尖晶石转变为石榴石的现象,尖晶石呈粒状产出,周围被石榴石细粒集合体环绕,指示由尖晶石向石榴石相的转变,为进化变质作用的反映(赵大升等 1993)。电子探针分析表明,橄榄石的 Fo 为 91.1~91.3,斜方辉石的 En 为 89.2~91.2,石榴石为镁铝榴石(Pyr 占 65%~66%),尖晶石的 Cr/(Cr+Al) 为 0.11~0.13,表明梭罗树二辉橄榄岩为弱亏损的地幔岩,其中尖晶石的 Cr/(Cr+Al) 比值很低,相当于玄武岩中地幔包体的范围(鄂莫岚等 1986),代表了大陆下岩石圈地幔的残片。计算的  $T$  为  $784^\circ\text{C} \sim 913^\circ\text{C}$ ,  $P$  为 1860~1980MPa,约相当于 52~59km 深度,是通常所认为的尖晶石-石榴石相转变的界面(深度约为 60km)。在尖晶石-石榴石相转变的过程中,微量元素的组成与分布特征能够灵敏地反映矿物相转变的地球化学过程。本文使用质子微探针方法对样品微区进行定点和扫描分析,测定了橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、尖晶石和石榴石等矿物的微量元素组成与分布特征,提供了地幔橄榄岩在尖晶石-石榴石相转变过程中元素地球化学活动的信息。

## 1 实验样品和分析方法

本次分析的样品取自梭罗树岩体中段深部较为新鲜的石榴尖晶石橄榄岩。岩石具糜棱状碎斑结构,主要原生矿物为橄榄石和斜方辉石以及少量的透辉石、铬尖晶石和石榴石,它们均遭受了不同程度的次生蚀变。样品磨成两面抛光的光薄片,再镀上碳膜以利导电。

实验是在上海原子核研究所的质子微探针上进行的。质子探针与其他微区分析技术比较有许多优点:其检测限低,为  $0.1 \sim 50 \mu\text{g/g}$  (Sie et al. 1991);可同时分析许多元素(包括主元素和微量元素);与离子探针不同,质子探针是一种无标样分析技术,不需要详细的校准程序(Adam et al. 1993)。本次实验参数为:加速器产生的质子能量为 3.0MeV,束流强度约为 50 和 100pA。测量分为定点和扫描两种方式。定点测量时,束斑直径为  $15 \mu\text{m}$ ;扫描测量的区域为尖晶石和石榴石矿物,扫描范围为  $55 \times 390 \mu\text{m}$ ,束斑直径  $5 \mu\text{m}$ 。为了提高探测灵敏度,在 Si(Li) 探测器前面加有  $110 \mu\text{m}$  厚的 Al 箔,以吸收主要元素(如 Fe)的 X 射线谱峰强度。定点测量时,通过记录矿物中各测点的 X 射线能谱,采用 AXIL 解谱程序离线计算各元素的 X 射线净峰面积,使用 TTSPM 厚靶定量分析程序,以电子探针分析的 Fe 作为内标元素,采用内标法和迭代归一法计算微量元素的含量。对于扫描分析,采用多参量数据获取方式,同时记录束斑的扫描坐标 X、Y 和产生的 X 射线能量,经离线处理,从 X、Y、E 三维数据块中获得扫

描区域内各元素的含量分布图。

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 定量分析

分析结果列于表1。在橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、尖晶石和石榴石内微量元素的含量有明显的差异(见表1)。橄榄石主要富集Ni,斜方辉石也只含有少量的Ni,其平均含量分别为3100 $\mu\text{g/g}$ 和470 $\mu\text{g/g}$ 。Ni是相容元素,在地幔部分熔融过程中优先进入橄榄石。此外,在这两种矿物内还含有少量的Zn(其平均含量分别为23 $\mu\text{g/g}$ 和26 $\mu\text{g/g}$ )。Zn也是相容元素(O'Reilly et al. 1991),从表1看出,橄榄石和斜方辉石中的Zn含量比单斜辉石高出1~4倍。

单斜辉石中不相容微量元素,如Sr、Y、Zr等丰度最高。O'Reilly et al. (1991)指出,不相容元素主要集中在非难熔矿物相中。单斜辉石与橄榄石和斜方辉石相比属于非难熔矿物相,本次研究与上述作者的推论是一致的。

表1 山东梭罗树石榴尖晶石橄榄岩中矿物微量元素的质子探针分析结果( $\mu\text{g/g}$ )

Table 1 Result of proton-microprobe analysis of Suoluoshu mantle peridotite, Sandong( $\mu\text{g/g}$ )

矿物	橄榄石		斜方辉石		单斜辉石		尖晶石		石榴石	
编号	SH19-20-1	SH19-20-1	SH19-20-1	SH19-20-1	SH19-20-4	SH19-20-4	SH19-20-2	SH19-20-3	SH19-20-2	SH19-20-3
Ni	3075 (29)	3136 (20)	503 (11)	442 (9)	333 (8)	175 (3)	2720 (46)	2276 (43)	-	167 (20)
Zn	24 (3)	22 (2)	38 (3)	15 (2)	-	8 (1)	3208 (36)	2972 (33)	14 (2)	5 (3)
Ga	-	-	-	-	-	5 (1)	219 (12)	172 (9)	-	-
Rb	-	-	-	-	-	-	22 (6)	-	11 (4)	-
Sr	-	-	-	-	84 (3)	58 (2)	7 (2)	-	6 (1)	-
Y	-	-	-	-	9 (1)	18 (1)	-	-	-	-
Zr	-	-	-	-	26 (5)	22 (2)	-	-	-	-

注:表中“-”表示元素含量低于检出限;括号内的数据为分析的标准方差。

尖晶石中Ni, Zn和Ga的丰度异常高,其中Ni的丰度接近橄榄石中的Ni含量(表1),Zn的平均含量高达3090 $\mu\text{g/g}$ ,Ga的平均含量为195 $\mu\text{g/g}$ ,而这两个元素都属于相容元素(O'Reilly et al 1991)。Griffin et al. (1994)指出,铬尖晶石中Zn的含量与其形成的温度有关。与尖晶石相比石榴石中所含的微量元素则很少,其丰度也是所有矿物中最低的(表1)。

### 2.2 元素的分布特征

图1为尖晶石和石榴石的微区扫描图,图2为扫描区域内获得的元素分布图。从图1中

看出, Cr 的分布明显地区分开尖晶石和石榴石相的界线, 因为尖晶石的 Cr 含量很高(据电子探针分析结果,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量在 10.5~12.8 (wt%) 之间, 比石榴石高出 13~27 倍), 与石榴石相比, 尖晶石几乎富集质子探针所能检出的所有微量元素。有趣的是, 尖晶石内元素的分布是很不均匀的。以 Fe 为例, 其分布特征是中心略高, 边部略低, 并呈条带状分布, 与扫描区域内尖晶石的条带状构造具有很好的对应关系。Zn 的分布与 Fe 类似, 表明二者可能受同一种因素制约。而在 Ni、Ga、Rb 和 Zr 的分布图中, 局部区域元素丰度明显增加成一尖峰。这种现象很难用晶格中元素的置换来加以解释, 而很可能是由于矿物内存在富含某一元素的微粒矿物包体造成的。O'Reilly et al. (1991) 认为, 岩石中微量元素的分布取决于富集该元素的特定矿物的存在与否。他们还指出, 这种元素分布不均一的现象, 是尖晶石二辉橄榄岩在开放系统下地幔交代作用的结果, 它使得硅酸盐熔体在渗滤过程中被稀释, 造成不同矿物的交代分带, 从而导致微区微量元素分布的显著变化。本区尖晶石中 Ni 元素的局部富集以及质子探针和电子探针分析中均发现强的 Ni、Fe、S 谱线, 暗示尖晶石矿物内含有硫化物(镍黄铁矿)的微粒包体。同样, Zn 和 Ga 的锯齿状分布可能表示尖晶石在结晶过程中捕获了富 Zn 和 Ga 的硫化物微粒。

在扫描区域的石榴石矿物中, 除了 Ni 在局部位置略有聚集的趋势外, 基本上没有检出其它微量元素, 这种现象值得进一步研究。推测在尖晶石相转变为石榴石相的过程中, 微量元素很可能是受到了石榴石相的强烈排斥作用, 而使得石榴石矿物内微量元素丰度明显降低。

### 3 结 语

根据上述研究, 获得了以下几点认识:

(1) 在梭罗树地幔橄榄岩中, 不相容元素(如 Sr、Y、Zr 等)主要富集于相对非难熔矿物相(单斜辉石)中, 与以前的认识是一致的。

(2) 尖晶石富集几乎所有质子探针可检出的微量元素, 尖晶石 Ni、Zn 和 Ga 的丰度高, 由于上述元素均是相容元素, 表明在地幔橄榄岩中尖晶石也是难熔相; 此外, Ni、Zn 和 Ga 在尖晶石中分布不均匀, 而且, 在尖晶石中已检出镍黄铁矿, 说明尖晶石在结晶分离过程中捕获了富 Ni、Zn 和 Ga 的硫化物微颗粒。看来, Ni、Zn 和 Ga 在尖晶石相中呈不同的形式存在, 这一现象是本次研究中发现的, 值得进一步研究。

(3) 由尖晶石相向石榴石相转变的过程中, 微量元素分布与含量呈现明显的变化, 一方面

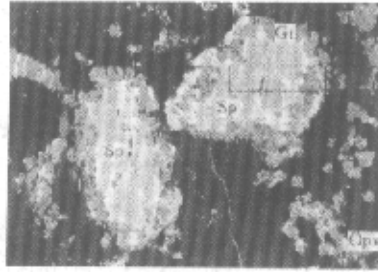


图1 SH19-20-2尖晶石(Sp)和石榴石(Gt)矿物微区扫描分析位置图(方框区)BSE×250  
Fig. 1 The micro-area scanning position (rectangle) on Sp and Gt minerals in SH19-20-2 BSE×250

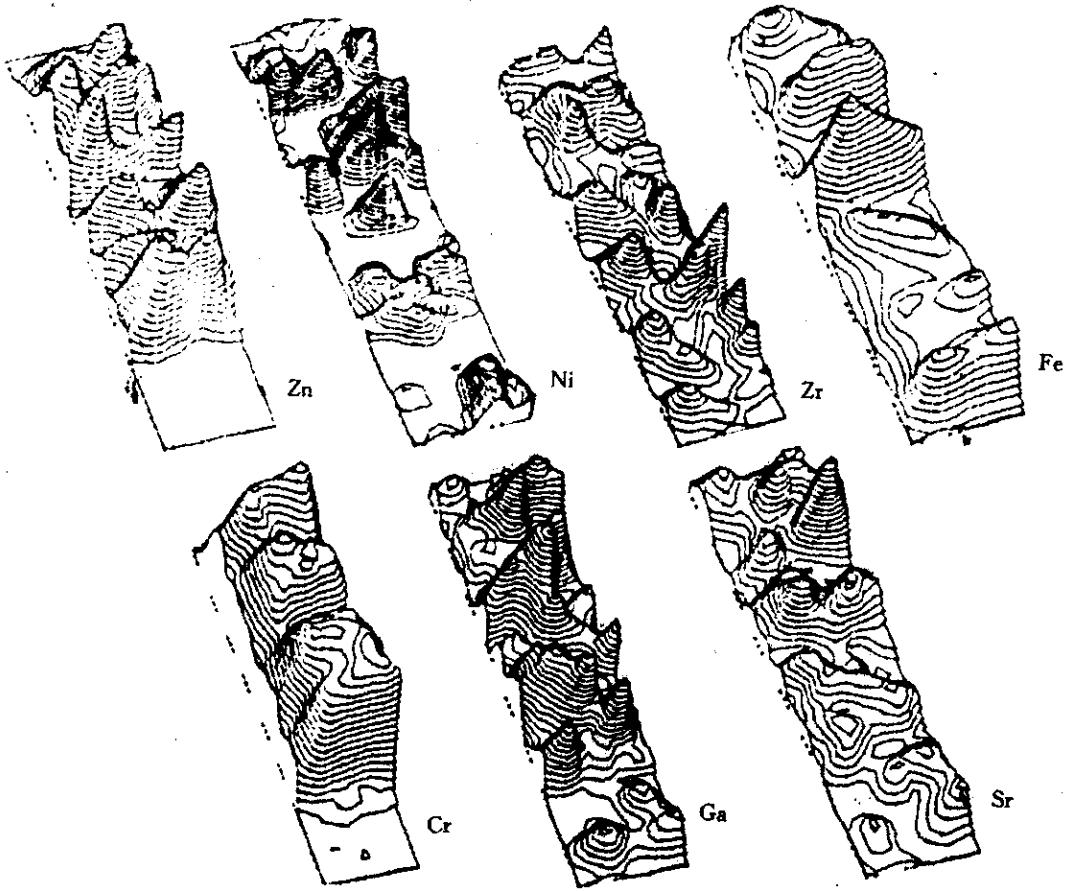


图 2 SH19-20-2 区内 Sp 和 Gt 内元素分布的质子探针扫描三维数据块  
 元素扫描三维数据块的上方是图 1 中分析区的左端,下方是右端

Fig. 2 The 3-dimensional distribution of elements on Sp and Gt in SH19-20-2  
 by using proton-microprobe Scanning

可能是尖晶石二辉橄榄岩在开放系统下地幔交代作用导致的。另一方面，还与尖晶石和石榴石相容纳微量元素能力的明显差异有关。推测在尖晶石-石榴石相转变的过程中，微量元素一部分被排斥到石榴石相边缘，另一部分可能集中在石榴石相中的包裹体内。与其他矿物相比，石榴石中包裹体最常见，这些包裹体的成因很复杂，有些可能代表早期变质相的残余，据本次研究，也不能排除某些包裹体与吸纳微量元素的作用有关。

## 参考文献

- 赵大升, 张旗, 刘若新等. 山东梭罗树微岩中的尖晶石石榴石相转变初步研究. 科学通报, 38: 1581~1584
- 鄂莫岚等. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社, 1~490
- Sie S H, Griffin W L, Ryan C G, et al., 1992. 质子微探针: 矿物分析中的一场革命 (陆荣荣译), 国外地质, (4): 1~5
- Adam J, Green T H and Sie S H. 1993. Proton microprobe determined partitioning of Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb and Ta between experimentally produced amphiboles and silicate melts with variable F content. Chem. Geol., 109: 29~49
- Griffin W L, Ryan C G and Win T T. 1994. Mapping the earth's mantle in 4D using the proton microprobe (Abstract). in: 4-th Inter. Conf. NMTA, Shanghai, China, 1994. 28
- O'Reilly S Y, Griffin W L and Ryan C G. 1991. Residence of trace elements in metasomatized spinel lherzolite xenoliths: a proton-microprobe study. Contr. Mineral. Petrol., 109: 98~113