

# 内蒙集宁群麻粒岩相中 石榴石的稀土元素特征

韩松 黄忠祥 杨瑞瑛

(中国科学院高能物理研究所)

**关键词:** 石榴石; 稀土元素; 麻粒岩; 内蒙

**提 要:** 采用现代高精度中子活化分析方法分析研究了内蒙集宁群麻粒岩相中石榴石的痕量稀土, 原岩为火山质岩石和原岩为正常沉积岩中的石榴石显示出完全不同的稀土配分型式, 认为变质岩中的石榴石, 其稀土元素特征可用来判别深变质岩的原岩性质, 区分正副变质岩。

石榴石是一族比较常见的正硅酸盐系列矿物, 可产于岩浆岩、变质岩、交代岩以及沉积岩中, 生成条件极为多样, 并以成分复杂和形成广泛的固溶体为特征。石榴石的化学通式可表示为 $X_3Y_2[SiO_4]_3$ , 其中X代表二价阳离子, 主要为 $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$ 等; Y代表三价阳离子, 主要为 $Al^{3+}$ 、 $Fe^{3+}$ 、 $Cr^{3+}$ 、 $Mn^{3+}$ 以及 $TR^{3+}$ 等。石榴石族矿物构成若干类质同象系列, 其端员组份主要有以下六种, 即镁铝榴石 $Mg_3Al_2[SiO_4]_3$ ; 铁铝榴石 $Fe_3Al_2[SiO_4]_3$ ; 锰铝榴石 $Mn_3Al_2[SiO_4]_3$ ; 钙铝榴石 $Ca_3Al_2[SiO_4]_3$ ; 钙铁榴石 $Ca_3Fe_2[SiO_4]_3$ ; 钙铬榴石 $Ca_3Cr_2[SiO_4]_3$ 。此外, 在自然界中还有锰铁榴石 $Mn_3Fe_2[SiO_4]_3$ 存在。

美国Irving等人<sup>[1]</sup>曾对包括金伯利岩、碱性玄武岩、玄武岩、英安岩以及流纹岩中的石榴石进行了分析研究。稀土元素分配系数是按石榴石/液相进行计算的。他们强调基质对石榴石稀土分配系数的影响, 认为石榴石的稀土分配系数随着基质 $SiO_2$ 含量的增加而递增, 铁铝榴石的分配系数比镁铝榴石的分配系数高10倍以上。锰铝榴石-钙铁榴石系列强烈富集重稀土, 比球粒陨石高5000倍<sup>[1]</sup>。

对于变质岩中石榴石稀土元素特征的研究, 目前还很少见到报导。本文以我国内蒙集宁群麻粒岩-片麻岩中的石榴石为例, 探讨区域变质岩石中石榴石的稀土元素特征, 并讨论不同原岩成分麻粒岩中石榴石的稀土元素变化情况。

## 一、样品来源及地质概况

石榴石样品采自内蒙南部太古代集宁群麻粒岩-片麻岩中。

集宁群为一套古老的深变质岩系, 可划分为上下两部分。下部岩系以二辉斜长麻粒岩为主, 夹紫苏石榴黑云母斜长片麻岩和二辉斜长片麻岩, 偶见薄层磁铁石英岩, 其原岩属火山岩, 主要是一套中基性火山熔岩和火山碎屑岩以及少量含铁硅质岩, 构成一巨型火山-火山沉积旋迴。集宁群上部岩系由夕线石石榴钾长(或二长)片麻岩、石英岩和少量碳酸盐岩组成, 其原岩相当于泥砂质-碳酸盐建造, 可与印度孔兹岩对比, 是在浅海陆棚环境下形成的, 沉积特征明显。集宁群上下两部分岩石的变质程度均达到了麻粒岩相。

几个样品分别采自集宁群不同层位的不同岩性岩石中,它们代表着不同原岩成分的麻粒岩-片麻岩。样品Nm81-22为含榴二辉麻粒岩中的石榴石,原岩属中基性火山岩;Nm81-171为黑云母石榴斜长片麻岩中的石榴石,原岩属中性火山凝灰岩;Nm80-104为紫苏石榴黑云母斜长片麻岩中的石榴石,系铁矿围岩,原岩为中基性火山凝灰岩。样品Nm81-8、N80-67、Nm84-28和N80-191均采自集宁群上部岩系,皆为夕线石石榴钾长片麻岩中的石榴石,原岩均属正常沉积岩。

## 二、样品处理及分析方法<sup>[2]</sup>

矿物样品的稀土元素分析数据,全部由中子活化法取得。

含石榴石的岩石样品经粉碎后过200目筛,在显微镜下挑选,其纯度可达98%左右。样品在干燥器中干燥数天后,将全岩及单矿物样品分别称取10—50毫克左右,与自配的两套独立的混合标准用高纯铝箔包好。同时称取约50毫克的USGS BCR-1及NBS SRM-1632a,作为比较标准。将样品及标样放入反应堆中进行照射,中子通量为 $8.7 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ,照射时间为18个小时。根据核素的半衰期长短和 $\gamma$ 射线互相干扰情况。我们选择了5—7天、12—15天和两个月以上的冷却时间,分别测定了短寿命、中等寿命及长寿命核素的 $\gamma$ 射线。所用测量仪器为SCORPIO-3000型,程控Ge(Li)谱仪(美国CAN-BERRA型)探测器的有效体积为 $136 \text{ cm}^3$ ,对 $^{60}\text{Co}$ 的1332keV $\gamma$ 射线的分辨率为1.87keV,峰康比为55.5/1,数据处理采用SCORPIO/SPECTRAN软件包中的 $\gamma$ 谱分析程序和本实验室编写的重峰解谱程序。本次工作中作为标样测定了1632a和BCR两个标准参考物,其分析数据与标样定值相当接近<sup>[3][4]</sup>(见表1),差值在允许范围之内,分析精度完全符合规定要求。

表1 标样分析结果对比表

Table 1 Comparison of standard sample analyses

元 素	分 析 结 果 (ppm)			
	标 样 SRM-1632a		标 样 USGS-BCR-1	
	本 次 工 作	标 样 定 值 <sup>[3]</sup>	本 次 工 作	标 样 定 值 <sup>[4]</sup>
Sm	2.63	2.8 ± 0.3	6.49	6.6
Yb	1.12	0.98 ± 0.07	3.83	3.36
La	18.8	18	26.8	26
Lu	0.20	0.18 ± 0.03	0.59	0.55
Ba	116	122	678	675
Nd	12.6	10.2 ± 2	50	46.6
Rb	30.2	33.4 ± 1.5	30.55	29
Ce	29.7	29.2 ± 1.3	53.9	53.3
Th	4.16	4.45 ± 0.13	6.0	5.78
Cr	37.4	35.1 ± 1.2	17.6	10.9
Hf	1.64	1.57 ± 0.09	4.7	4.97
Cs	2.55	2.3 ± 0.1	0.95	1.36
Tb	0.324	0.32 ± 0.05	1.0	1.08
Ta	0.386	0.4	—	—
Co	10.6	6.7 ± 0.3	38	40.1
Eu	0.59	0.56 ± 0.02	1.94	2.11

## 三、石榴石的地球化学特征

## 1. 石榴石的化学成分

内蒙集宁群各种麻粒岩中石榴石的化学成分及端员分子比已列于表2中。

为判别石榴石的成因, 将表2中的数据投于 $Mg/(Mg + Fe^{2+} + Mn)$ 值对Ca量变异图(图1)

表2 内蒙集宁群各种麻粒岩中石榴石化学成分特征表

Table 2 Chemical composition of garnets from various granulites in Jining Group, Inner Mongolia

元素及 组份	原岩为火山质岩石的石榴石			原岩为正常沉积岩的石榴石		
	Nm81-171	Nm80-104	Nm81-22	Nm81-8	N80-67	N80-191
化 学 成 分 (重 量%)						
SiO <sub>2</sub>	38.58	39.98	38.076	38.94	38.41	39.79
TiO <sub>2</sub>	0.044	0.06	0.055	0.049	0.034	0.088
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.39	21.48	20.993	22.14	21.46	21.55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.14	4.42	—	3.82	2.97	2.38
FeO	25.12	26.61	28.021	23.77	26.61	24.02
MnO	1.144	0.25	1.571	0.27	0.39	0.33
MgO	8.31	8.67	4.253	9.5	9.09	10.55
CaO	1.975	0.63	6.8	1.404	1.09	1.15
N <sub>2</sub> O	0.018	0.1	0.033	0.011	0.05	0.05
K <sub>2</sub> O	0.008	0.1	0.013	0.032	0.09	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	—	—	—	—	0.063	0.07
总和	99.73	99.35	99.81	99.94	100.26	100.2
原 子 数 值						
Si	2.986	3.068	3.011	2.973	2.963	3.025
Al	1.951	1.943	1.956	1.992	1.951	1.93
Ti	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.005
Fe <sup>3+</sup>	0.183	0.255	—	0.22	0.172	0.136
Fe	1.624	1.487	1.851	1.516	1.715	1.525
Ni	—	—	—	—	—	—
Mn	0.075	0.016	0.105	0.017	0.025	0.021
Mg	0.958	0.992	0.501	1.081	1.045	1.195
Ca	0.164	0.052	0.576	0.115	0.09	0.094
Na	0.003	0.015	0.005	0.002	0.007	0.007
K	0.001	0.01	0.001	0.003	0.009	0.004
总和	7.947	7.842	8.011	7.921	7.981	7.943
端 员 组 份 百 分 比						
And	5.805	2.034	—	4.209	3.134	3.304
Pyr	33.975	38.935	17.082	39.608	36.346	42.155
Spe	2.659	0.638	3.587	0.64	0.886	0.75
Alm	57.561	59.63	59.695	55.544	59.634	53.792
Gro	0	0	19.636	0	0	0

(化学分析结果由地质科学院张荫芳同志提供。)

中。从图中可以看出,所有石榴石样品都落在ZC线下方的麻粒岩相和角闪岩相中,属地壳中变质成因石榴石<sup>[5]</sup>。

分析结果表明,无论原岩成分为火山质岩石或原岩为正常沉积岩,其石榴石的成分均以铁铝榴石分子(Alm)为主,约占50—60%,次为镁铝榴石分子(Pyr),一般占34—42%,此外,还有少量钙铁榴石分子(And)和锰铝榴石分子(Spe)。比较独特的是样品Nm81-22,石榴石的成分中含有较多的钙铝榴石分子(Gro)。总体上看,原岩成分不同的两类麻粒岩,其石榴石的种属基本相同。

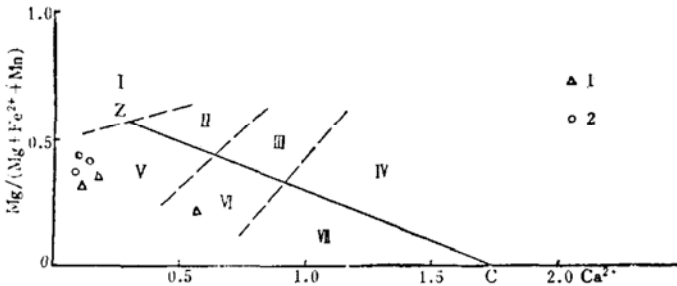


图1 石榴石成因判别图

Fig. 1 Discrimination diagram for  
geneses of garnets  
(据丛柏林<sup>[5]</sup>, 1977)

ZC线为上地幔岩浆成因石榴石和地壳成因石榴石的分界线。

V—麻粒岩相; VI—角闪岩相; VII—蓝闪石片岩相。

1—原岩为火山质岩石的石榴石;

2—原岩为正常沉积岩的石榴石

## 2. 石榴石的稀土元素特征

内蒙集宁群两类麻粒岩中石榴石的稀土元素含量以及原岩成分不同的两类岩石的稀土分析结果见表3。

从稀土元素的配分型式看,原岩为火山质岩石的石榴石(图2)和原岩为正常沉积岩的石榴石(图3),两者存在明显的差异。

样品Nm81-22的原岩为中基性火山熔岩,其中石榴石的 $\Sigma\text{REE} = 157.54\text{ppm}$ ,  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{CN}} = 0.12$ ,  $\delta\text{Eu} = 0.53$ ,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{CN}} = 0.35$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{CN}} = 0.02$ , 稀土配分型式呈HREE强烈富集, LREE明显亏损的强烈分离型。它与许多文献中报导的岩浆型石榴石的稀土配分型式十分相似,与美国Breziny安山岩中的石榴石对比(见图4),它们的LREE/HREE值,  $\delta\text{Eu}$ 值,轻重稀土的分离程度等都很相近,石榴石的端员分子比也相当接近(见表4)。一者为变质矿物,另一者为岩浆矿物,它们的稀土配分型式及化学成分如此相似,其原因可能是含榴二辉麻粒岩的原岩成分为中基性火山熔岩,与安山岩的成分相近,变质成因的石榴石在化学成分和稀土元素含量、配分型式等方面承袭了原品的成分特征。

样品Nm80-104的原岩为中基性火山凝灰岩,系铁矿围岩,其石榴石的 $\Sigma\text{REE} = 126.37$ ,  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{CN}} = 1.49$ , 具有较平坦的LREE配分,很可能是同化混染的结果。 $\delta\text{Eu} = 0.13$ ,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{CN}} = 0.47$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{CN}} = 0.378$ , 稀土配分型式为LREE较平坦, HREE相对富集的适度分离型。

样品Nm80-171的原岩为安山质凝灰岩,其石榴石的 $\Sigma\text{REE} = 91.48$ ,  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{CN}} = 0.34$ ,  $\delta\text{Eu} = 0.289$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{CN}} = 0.33$ , 稀土配分型式为LREE较亏损, HREE较富集的适度分离型。

N80-191、Nm84-28和Nm81-8均为夕线石石榴石片麻岩,原岩属正常沉积岩。三个样品石榴石的 $\Sigma\text{REE}$ 分别为238.59、94.8和189.9,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{CN}}$ 值为0.79、0.18和1.38。它们的共同特点是具有强烈的负铕异常,  $\delta\text{Eu}$ 值分别为0.049、0.042和0.087。除Nm84-28的

表3 内蒙集宁群岩石及石榴石稀土元素含量特征表

Table 3 Rare earth element contents of rocks and garnets from Jining Group, Inner Mongolia

元素及 特征值	岩 石		原岩为火山质岩石中的石榴石			原岩为正常沉积岩中的石榴石		
	Nm81-80 夕线石石榴 榴斜长片 麻岩	Nm81-171 黑云母石 榴斜长片 麻岩	Nm81-171	Nm80-104	Nm81-22	Nm81-8	Nm84-28	N80-191
稀 土 元 素 含 量 (ppm)								
La	32.7	33.5	4.94	17	2.55	27.95	4.15	34.9
Ce	42.5	54	15.9	25	17.1	58.3	8.38	61.2
Nd	26.1	26.8	21.6	20.8	—	42.8	15.5	52.7
Sm	5.83	6.39	8.76	6.93	1.9	14.7	12.6	19.2
Eu	1.79	1.74	0.954	0.513	0.353	0.482	0.285	0.39
Gd	10.24	3.98	24.9	17.6	31.4	27.3	30.7	31.2
Tb	2.12	0.68	3.38	4.88	9.66	3.26	5.79	6.09
Yb	7.83	2.83	9.55	29.6	72.4	13.3	15.27	28.9
Lu	1.13	0.412	1.50	4.06	10	1.13	2.14	4.01
特 征 数 值								
ΣREE	130.24	130.33	91.48	126.37	157.54	189.9	94.8	238.59
δEu	0.7	0.99	0.289	0.13	0.53	0.087	0.042	0.049
(La/Yb) <sub>CN</sub>	2.73	7.79	0.33	0.378	0.02	1.38	0.18	0.79
(Gd/Yb) <sub>CN</sub>	1.05	1.12	2.09	0.47	0.35	1.64	1.61	0.86
(La/Sm) <sub>CN</sub>	3.39	3.19	0.34	1.49	0.12	1.15	0.199	1.10

注：由中科院高能所应用部，杨瑞英、黄忠祥、韩松采用中子活化方法分析。

LREE较亏损外，N80-191和Nm81-8的(La/Sm)<sub>CN</sub>分别为1.10和1.15。N80-191和Nm84-28的(Gd/Yb)<sub>CN</sub>分别为0.86和1.61，Nm80-8的(Tb/Yb)<sub>CN</sub> = 0.99。由此可见，原岩为正常沉积岩的石榴石稀土配分型式为轻重稀土分离程度不大，并以具有较大的负铕异常为特征。

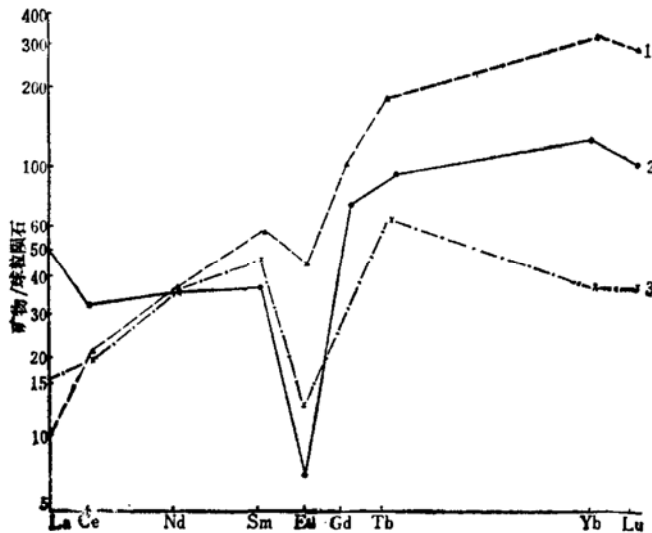


图2 原岩为火山质岩石的石榴石的稀土配分曲线

Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of garnets in granulites originating from volcanic rocks

1—样品Nm81-22；2—样品Nm80-104；  
3—样品Nm81-171

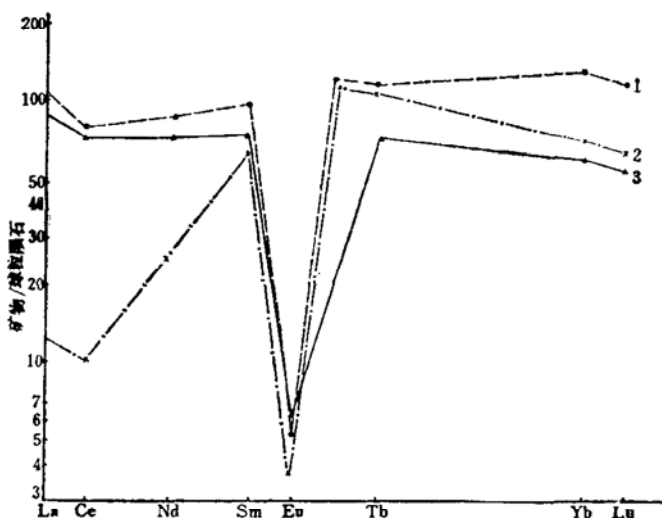


图3 原岩为正常沉积岩的石榴石的稀土配分曲线

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of garnets in granulites originating from normal sedimentary rocks

1—样品Nm80-191; 2—样品Nm84-28; 3—样品Nm81-8

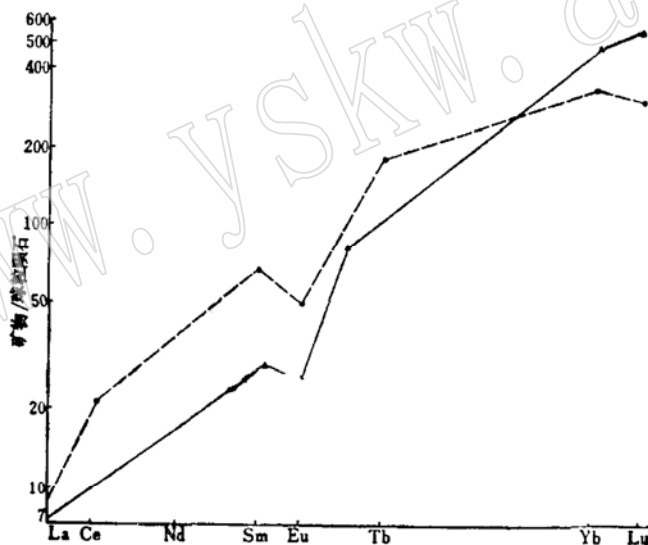


图4 石榴石稀土元素特征对比图

Fig. 4 Comparison of REE characteristics between garnets

1—美国Breziny安山岩中的石榴石;  
2—内蒙集宁群含榴二辉麻粒岩中的石榴石 (样品Nm81-22)

表4 石榴石化学成分对比表

Table 4 Comparison of chemical composition between garnets

产地	石榴石端员分子含量 (%)					
	Pyr	Alm	Spe	Gro	And	Ura
内蒙集宁群含榴二辉麻粒岩中石榴石	17.082	59.695	3.587	19.636	0	0
美国Breziny安山岩中石榴石	18.0	60.7	6.3	10.6	4.1	0.15

从以上实际资料可以看出,内蒙集宁群麻粒岩-片麻岩中的石榴石,其稀土配分型式随原岩不同而变化,大致从原岩为中基性火山熔岩→火山凝灰岩→正常沉积岩,石榴石的稀土配分型式呈现出LREE/HREE值越来越大,而 $\delta\text{Eu}$ 值越来越小的变化趋势。

#### 四、结 语

大多数研究人员认为,石榴石普遍强烈地富集HREE。我们研究了各种变质岩中石榴石的稀土元素特征后发现,在麻粒岩相的变质作用过程中,原岩为火山质岩石的石榴石,大多保持岩浆型石榴石的稀土配分特点,呈现出HREE的强烈富集,并可与相应火山岩中的岩浆成因石榴石的稀土配分型式进行对比。对于原岩为正常沉积岩的石榴石,其稀土配分型式却显示另外一些特点,主要表现为LREE和HREE的分离程度不明显,但具有较强的负铕异常。我们曾研究过一些矽卡岩中的石榴石的稀土元素特征,发现矽卡岩外带中的石榴石有LREE较HREE富集的现象,类似于原岩为正常沉积岩的变质成因石榴石的稀土配分型式。以上分析表明,变质岩中的石榴石,其稀土元素特征很明显地受原岩性质控制,原岩成分不同的变质岩,其石榴石的稀土配分型式有明显的区别。笔者认为,即使对于深度变质的麻粒岩相变质岩,其石榴石的稀土配分型式亦可用来判断原岩性质,区分正副变质岩。

石榴石样品及主元素化学分析数据均由中国地质科学院地质研究所沈其韩先生及张荫芳同志提供,谨向他们表示衷心的感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] Irving, A. J. and Frey, F. A., 1978. Distribution of trace elements between garnet megacrysts and host volcanic liquids of kimberlitic to rhyolitic composition, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 42, pp. 771-787.
- [2] 杨瑞琰, 黄忠祥, 1985, 岩石中多元素仪器中子活化分析及其在地学中的应用. 核技术, 第1期。
- [3] Flanagan, F. J., 1972. 1972 values for international geochemical reference samples, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 37, pp. 1189-1199.
- [4] Germani, S. M., 1980. *Anal Chem*, vol. 52, p. 240.
- [5] 丛柏林、张雯华, 1977, 榴辉岩中的石榴石. 科学通报, 第9期, p. 413-416.

### Rare Earth Element Characteristics of the Garnets in Granulites from Jining Group, Inner Mongolia

Han Song      Huang Zhongxiang      Yang Reiyang

(Institute of High Energy physics, Academia Sinica)

**Key words:** garnet; rare earth element; granulite; Inner Mongolia

#### Abstract

The Jining Group in Inner Mongolia consists of a suite of hypometamorphic rocks of granulite facies, with the lower part being mainly two-pyroxene-plagioclase gneiss originating from volcanic rocks and the upper part, sillimanite-garnet-

potash feldspar gneiss from normal sedimentary rocks. The garnet samples collected from different parts of Jining Group belong chemically to similar species and are composed mainly of almandine (50-60 norm%) and pyrope (34-42 norm%), with less andradite and spessartite.

The trace and rare earth elements in garnets from granulites of Jining Group have been determined by means of modern highprecision neutron activation analytical technique.

Experimental results show that the chondrite-normalized pattern of rare earth elements is mainly affected by the properties of original rocks instead of by the composition of garnets. In the process of metamorphism the garnets from metamorphic volcanic rocks mostly retain the distribution characteristics of magmatic type garnets, showing considerable enrichment of heavy rare earth elements, while those from metasedimentary rocks fail to show obvious LREE and HREE separation but have relatively strong negative Eu anomalies.

It is considered that the rare earth element characteristics of the garnets in metamorphic rocks might serve as an indicator for distinguishing ortho-rocks from para-rocks, and for determining properties of original rocks.