

内蒙古太古宙变质岩系中石榴石的矿物学特征及其地质意义

张 萌 芳

(中国地质科学院地质研究所)

主题词: 石榴石; 矿物晶型特征; X射线衍射; 穆斯堡尔谱; 形成条件; 内蒙古

提 要: 本文对内蒙古南部太古宙集宁群变质岩系中6个石榴石样品进行了研究, 讨论了晶体形态、物理性质、化学成分与岩石成分和波谱学之间的关系。研究表明, 本区(含石墨)富铝片麻岩类岩石中, 石榴石以富镁的铁铝榴石组份为主, 而二辉石岩中的石榴石则以富钙的铁铝榴石组份为主。石榴石钙的含量受岩石成分所控制。从测得的晶胞参数来看, 除个别者外, a_0 值均随着 Ca^{2+} 的含量增加而增大。据穆斯堡尔谱分析, 本区集宁群变质岩系中除个别样品受到了氧化或蚀变而有 Fe^{3+} 成分混入外, 大部分石榴石可能都是在变质程度比较高的还原环境下形成的。

一、地质概况

内蒙太古宙地层西起包头东到集宁、兴和一带, 大致呈东西向展布, 主要属集宁群和乌拉山群。集宁群变质岩系可概括为麻粒岩和片麻岩两大类。麻粒岩类位于该群下部, 主要由辉石麻粒岩、石榴角闪二辉石岩组成, 并夹含辉石斜长片麻岩。片麻岩类位于该群上部, 主要由一套(含石墨)矽线石榴斜长(钾长、二长)片麻岩、浅粒岩和石榴石英岩组成。乌拉山群下部主要由角闪斜长片麻岩、含石榴石黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩等组成。

集宁群变质岩系的矿物共生组合是: 紫苏辉石+透辉石+角闪石±黑云母±石英+不透明矿物; 紫苏辉石+透辉石±石榴石±角闪石+斜长石+石英+不透明矿物; 紫苏辉石+角闪石±黑云母+斜长石+石英; 石榴石+矽线石+斜长石(钾长石)+石英+石墨; 角闪石±黑云母+石榴石+斜长石+石英; 石榴石+矽线石+董青石+斜长石(钾长石)+石英。

二、石榴石的产状

石榴石在本区变质岩系中比较常见。在集宁群上部含石墨富铝片麻岩系中产出最多, 其

次见于集宁群下部(角闪)二辉黑云斜长片麻岩和少数二辉斜长麻粒岩以及角闪二辉石岩中。此外,还见于侵入含石榴石斜长片麻岩的伟晶花岗岩脉中。

石榴石在岩石中呈星点状(粒径1—2mm)、麻点状(粒径0.5—3mm)、变斑状(粒径1—1.5cm)和团块状集合体(粒径0.5—2cm)产出,其产出状态和矿物含量受到一定层位控制。在含石墨矽线石榴片麻岩中常见有石榴石+黑云母(长石和石英)组合与矽线石+黑云母(长石和石英)组合组成的相间条带;在黑云矽线石榴钾长(二长)片麻岩中,平均含量为20—25%,常呈麻点状和变斑状集合体,在含矽线石石榴浅粒岩中,含量为6—35%,常呈麻点状和星点状;在紫苏石榴二长片麻岩和二辉斜长麻粒岩中,含量为5—6%左右,呈星点状均匀地分散在岩石中。

三、晶体形态、物理性质和光学性质

1. 晶体形态

本区石榴石的晶体形态可分为两类:一类为菱形十二面体和四角三八面体,另一类为半自形粒状和团块状集合体。

2. 物理性质

石榴石呈褐红、暗红、玫瑰红和浅粉红色,风化后呈褐—棕褐色。油脂光泽,参差状断口,性脆。比重为3.86—4.10^①。

3. 光学性质

石榴石在偏光镜下呈无色至浅粉红色,未见光性异常,正突起,无解理,裂纹极发育,晶粒有时具筛孔状结构,筛孔中有石英、斜长石以及一些泥质物充填。在含黑云母矽线石榴钾长(二长)片麻岩中,还见有石榴石晶体包有矽线石、黑云母、绿泥石、尖晶石和磁铁矿等。石榴石折光率为1.767—1.781(在白光下测得)。

四、石榴石的化学成分

将6个石榴石的化学成分结果和以12个氧为基础计算的阳离子数及端元组份列于表1,晶体化学式列于表2。为对比起见,将它们寄主的岩石成分列于表3。

本文所研究的石榴石大致分为两类:一类是以矽线石榴斜长(钾长、二长)片麻岩为主,另一类是以含石榴石角闪二辉石岩为主。前者化学成分以FeO、Al₂O₃含量高、Fe₂O₃、CaO、MnO含量低为特征,MgO含量最高为11.37%,最低为7.24%(序号5边部成分)、TiO₂、Na₂O、K₂O含量都很低。后者CaO和MnO的含量分别为6.82%和1.86%,FeO含量为27.81%。根据序5号样品的电子探针分析,石榴石从中心到边部的成分变化很小,SiO₂和Al₂O₃无大变化(数字在误差范围之内),FeO、MgO和CaO稍有减少,故可推断本区富铝片麻岩中石榴石成分基本上是均匀的。除个别样品外,矿物中CaO含量大部分受岩石成分控制。

① 用静水力学称重法测得。

表 1 石榴石的化学成分

Table 1. Chemical composition of garnets

序号 样号 成分	1	2*	3	4	5		6
	Nm84-75	Nm81-208	Nm84-28	Nm84-23	Nm84-37 (中心)	Nm84-37 (边部)	N80-165
SiO ₂	38.42	38.80	38.93	39.71	37.26	37.76	39.84
TiO ₂	0.14	0.12		0.05			
Al ₂ O ₃	20.96	22.04	22.14	22.38	21.54	21.49	22.45
Cr ₂ O ₃	0.12		0.01	0.01	0.06	0.13	0.05
Fe ₂ O ₃		3.13					
FeO	27.81	25.00	28.70	25.96	31.91	31.29	26.09
MnO	1.86	0.24	0.28	0.35	0.34	0.41	0.49
MgO	4.08	8.35	9.99	11.37	8.35	7.24	11.04
CaO	6.82	1.63	1.22	1.02	1.24	1.19	0.65
Na ₂ O		0.01			0.03	0.04	0.04
K ₂ O		0.08					
P ₂ O ₅					0.10	0.07	0.04
合计	100.21	99.40	101.27	100.85	100.83	99.62	100.69
比重	4.00	3.863	4.095	4.10	4.01		
折光率	1.767	1.776	1.781	1.767	1.780		

按12个氧为基础计算的阳离子数

Si	3.02	2.99	2.97	2.99	2.91	2.97	3.01
Al ^{IV}		0.01	0.03	0.01	0.09	0.03	
Al ^{VI}	1.95	1.99	1.96	1.98	1.89	1.96	2.00
Ti	0.01	0.01					
Fe ³⁺		0.18					
Fe ²⁺	1.83	1.61	1.83	1.64	2.08	2.06	1.65
Mn	0.12	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
Mg	0.48	0.96	1.14	1.28	0.97	0.85	1.24
Ca	0.58	0.13	0.10	0.08	0.10	0.10	0.05
Na						0.01	0.01
K		0.01					

矿物端元组份(分子%)

铁铝榴石	60.79	59.25	59.22	54.31	66.88	67.54	55.37
镁铝榴石	15.95	35.27	36.89	42.38	29.26	27.87	41.61
钙铝榴石	19.27	4.93	3.24	2.65	3.22	3.61	2.01
锰铝榴石	3.99	0.55	0.65	0.66	0.64	0.98	1.01

* 为化学分析结果,由中国地质科学院岩矿测试研究所分析。其他样品均为电子探针分析,由中国科学院地质研究所电子探针室分析。电子探针分析样品中铁为全铁,但在计算阳离子数时均做为Fe²⁺处理。

表 2 石榴石的晶体化学式

Table 2. Crystallochemical formula of garnets

序号	样号	晶体化学式
1	NM84—75	$(Mg_{0.48} Fe_{1.03} Ca_{0.05} Mn_{0.12})_{3.01} (Al_{1.95}^{IV} Ti_{0.01})_{1.96} (Si_{2.02} O_{12})$
2	Nm81—208	$(Mg_{0.98} Fe_{1.41}^{2+} Ca_{0.13} Mn_{0.02})_{2.72} (Al_{1.99}^{IV} Fe_{0.13}^{3+} Ti_{0.01})_{2.13} (Si_{2.00} Al_{0.01}^{IV})_{3.00} O_{12}$
3	Nm84—28	$(Mg_{1.14} Fe_{1.05} Ca_{0.10} Mn_{0.02})_{3.00} Al_{1.98}^{IV} [(Si_{2.07} Al_{0.03}^{IV})_{3.00} O_{12}]$
4	Nm84—23	$(Mg_{1.23} Fe_{1.04} Ca_{0.05} Mn_{0.02})_{3.02} Al_{1.95}^{IV} [(Si_{2.00} Al_{0.01}^{IV})_{3.00} O_{12}]$
5	Nm84—37(中心)	$(Mg_{0.97} Fe_{2.05} Ca_{0.10} Mn_{0.02})_{3.17} Al_{1.99}^{IV} [(Si_{2.01} Al_{0.09}^{IV})_{3.00} O_{12}]$
5	Nm84—37(边部)	$(Mg_{0.95} Fe_{2.08} Ca_{0.10} Mn_{0.03})_{3.04} Al_{1.95}^{IV} [(Si_{2.07} Al_{0.03}^{IV})_{3.00} O_{12}]$
6	N80—165	$(Mg_{1.24} Fe_{1.05} Ca_{0.05} Mn_{0.03})_{2.97} Al_{2.00}^{IV} (Si_{3.01} O_{12})$

表 3 石榴石的寄主岩石化学成分

Table 3. Chemical composition of the host rocks of garnets

样号	Nm84—75	Nm81—208	Nm84—28	Nm84—23	Nm84—37	N80—165
岩石名称	含石榴石角闪 二辉石岩	矽线石榴斜 长片麻岩	含石墨黑云矽线 石榴斜长片麻岩	含石墨黑云石 榴二长片麻岩	长英质矽线石榴 斜长片麻岩	含黑云母矽线石榴 钾长(二长)片麻岩
SiO ₂	42.73	60.51	59.44	65.32	56.71	59.91
TiO ₂	1.21	0.85	0.72	0.63	1.02	0.74
Al ₂ O ₃	12.23	21.90	23.44	16.81	20.44	21.37
Fe ₂ O ₃	6.92	0.40	0.30	0.16	0.87	1.08
FeO	14.87	7.96	6.57	7.02	8.89	5.54
MnO	0.68	0.06	0.03	0.06	0.12	0.10
MgO	6.33	2.77	2.40	2.47	3.96	3.34
CaO	12.39	0.52	0.35	1.04	1.14	1.00
Na ₂ O	0.68	0.29	0.58	2.25	2.24	2.43
K ₂ O	0.16	3.45	5.13	2.67	2.88	3.30
P ₂ O ₅	0.09	0.05	0.04	0.44	0.04	0.07
H ₂ O	1.16	1.44	1.06	0.26	0.60	0.63
CO ₂	0.54	0.43	0.36	0.45	0.27	0.05
合计	99.99	100.63	100.42	99.58	99.18	99.56

分析者：中国地质科学院岩矿测试技术研究所

表4 石榴石X射线衍射分析
Table 4. X-ray powder diffraction data for garnets

序号	Nm84—75			Nm81—208			Nm84—28			Nm84—23			Nm84—37		
	I	d	hkl	I	d	hkl	I	d	hkl	I	d	hkl	I	d	hkl
1	1	3.3477	222	1	3.3326	222				1	3.3465	222	1	3.3449	222
2	7	2.8958	400	7	2.8756	400	7	2.8790	400	7	2.8781	400	7	2.8763	400
3	10	2.5914	420	10	2.5750	420	10	2.5750	420	10	2.5737	420	10	2.5732	420
4	4	2.4715	332	4	2.4551	332	4	2.455	332	4	2.4545	332	4	2.4532	332
5	4	2.3655	422	4	2.3500	422	4	2.351	422	4	2.3497	422	4	2.3486	422
6				4	2.2588	431 510	4	2.258	431 510	4	2.2572	431 510	4	2.2563	431 510
7	3	2.1163	521	3	2.1015	521	3	2.102	521	3	2.1016	521	3	2.101	521
8										1	2.0347	440	1	2.034	440
9	4	1.8792	611 532	4	1.8679	611 532	4	1.868	611 532	4	1.8674	611 532	4	1.8667	611 532
10	2	1.8322	620							2	1.8194	620	2	1.8193	620
11				3	1.6636	444	3	1.662	444	3	1.6611	444	3	1.6607	444
12	6	1.6066	640	6	1.5973	640	6	1.597	640	6	1.596	640	6	1.5957	640
13	8	1.5483	642	8	1.5397	642	8	1.539	642	8	1.5378	642			
14	3	1.4484	800	3	1.4409	800	3	1.439	800	3	1.4384	800	3	1.4383	800
15	1	1.4266	840 β							1	1.4164	840 β			
16										1	1.3956	842 β	1	1.3955	842 β
17				3	1.2876	840	3	1.287	840	3	1.2868	840	3	1.2862	840
18	4	1.2496	842	4	1.2566	842	4	1.256	842	4	1.2557	842	4	1.2555	842
19	3	1.2219	664	3	1.2276	664	3	1.227	664	3	1.2268	664	3	1.2267	664
20	1	1.2217	851							1	1.2132	851	1	1.2129	851
21										1	1.1875	864 β	1	1.1869	864 β
22										2	1.1625	941	2	1.1624	941
23										1	1.1389	862	1	1.1392	862
24	4	1.0764	864 α_1	5	1.0695	864	4	1.069	864 α_1	4	1.0686	864 α_1	4	1.0685	864 α_1
25	2	1.0763	864 α_2				2	1.066	864 α_2	2	1.0685	864 α_2	2	1.0683	864 α_2
26	4	1.0583	10.4.2 α_1	4	1.0517	10.4.2	4	1.054	10.4.2 α_1	4	1.0506	10.4.2 α_1	4	1.0504	10.4.2 α_1
27	2	1.0583	10.4.2 α_2				2	1.051	10.4.2 α_2	2	1.0505	10.4.2 α_2	2	1.0504	10.4.2 α_2
28				4	1.0183	8.8.0	4	1.017	880						
$a_0(\text{Å})$	11.594			11.524			11.521			11.509			11.508		

续表

序号	Nm84—75			Nm81—208			Nm84—28			Nm84—23			Nm84—37		
	I	d	hkl	I	d	hkl	I	d	hkl	I	d	hkl	I	d	hkl
实验条件	PW1700 自动粉末衍射仪 铜靶, 电压 45kV, 电流 45mA 扫描速度: 1.2°(2θ)/分			飞利浦自动粉末衍射仪 铜靶, 电压 50kV 电流 40mA 扫描速度: 1°(2θ)/分			PW1700 自动粉末衍射仪 铜靶, 电压 50kV 电流 40mA 扫描速度: 1.2°(2θ)/分			PW1700 自动粉末衍射仪 铜靶, 电压 45kV 电流 45mA 扫描速度: 1.2°(2θ)/分			同左		

分析者: 中国地质科学院矿床地质研究所X光室王立本

五、石榴石的波谱分析

1. X 射线衍射分析数据

将 5 个石榴石 X 射线衍射分析数据和晶胞参数 a_0 (Å) 值列于表 4。从表 1 和表 4 可以看出, 石榴石晶胞参数 (a_0 值) 随 Ca^{2+} 含量增加而增大。根据 a_0 值和折光率将石榴石投影在铁铝榴石—镁铝榴石—钙铝榴石—钙铁榴石四组份图解⁽¹⁾ (图 1) 中, 结果与化学分析资料换算得的矿物端元组份基本一致, 即以富镁的铁铝榴石为主, 并有少量富钙的铁铝榴石。

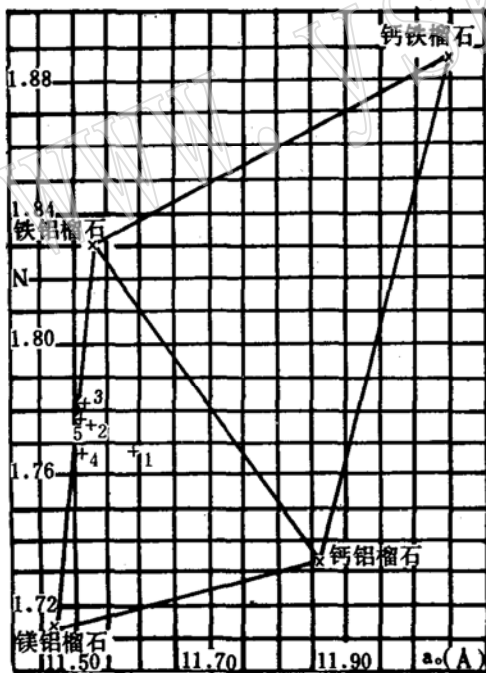


图 1 石榴石中铁铝榴石—镁铝榴石—钙铝榴石—钙铁榴石四组份图解
Fig. 1 Almandine—pyrope—grossularite—andradite four components diagram of garnets

2. 穆斯堡尔谱分析

为了进一步研究石榴石中铁的赋存状态, 对 5 个样品进行了穆斯堡尔谱的分析, 其穆斯堡尔谱参数见表 5。从表中可看出本区石榴石有两种, 一种石榴石全部由 Fe^{2+} 成分 (序号 2、3、4) 组成, 在谱线图中只有一对峰 (图 2), 另一种石榴石既含有 Fe^{2+} 成分又含有少量 Fe^{3+} 成分 (序号 1、5), 在谱线图中出现两对峰 (图 3)。

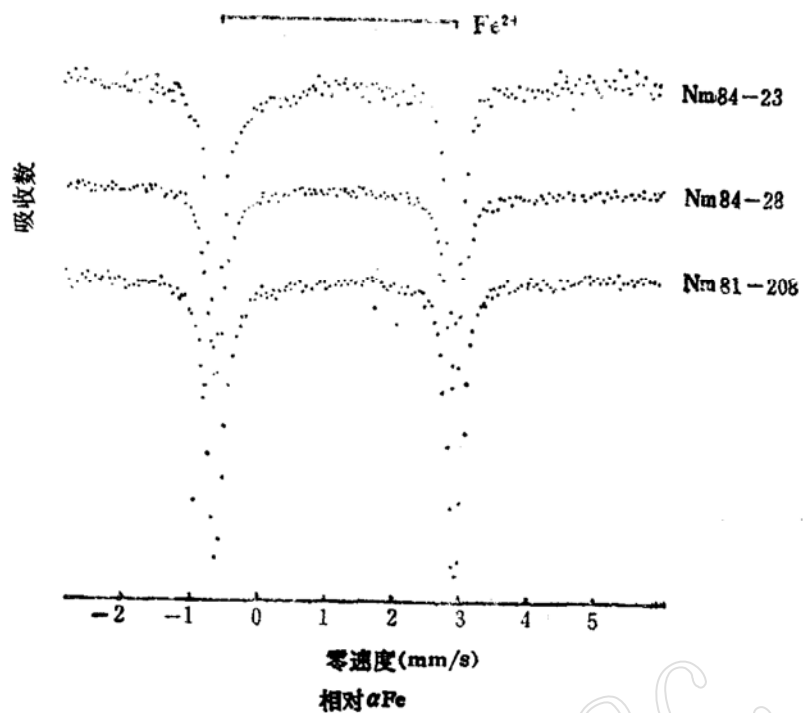


图2 石榴石的穆斯堡尔谱图

Fig. 2 Mössbauer spectra of garnets

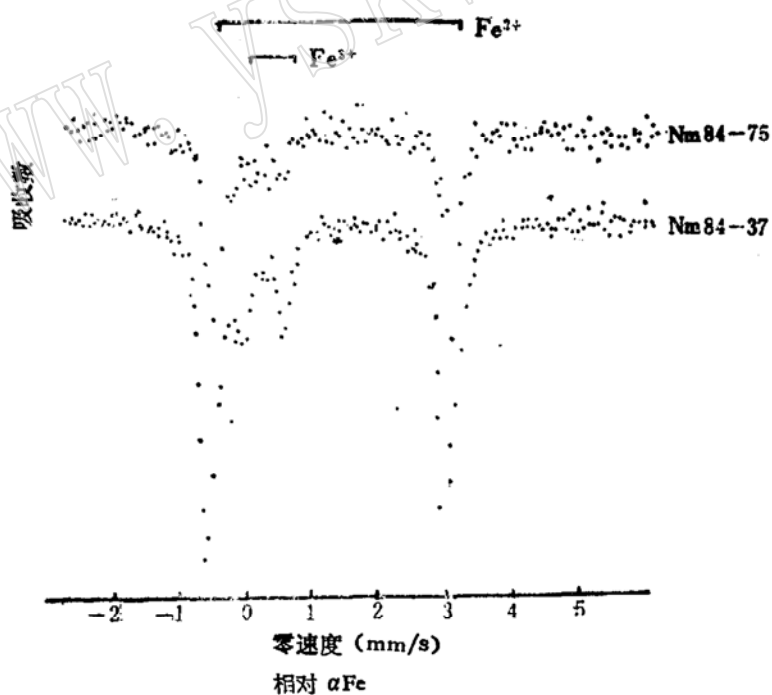


图3 石榴石的穆斯堡尔谱图

Fig. 3 Mössbauer spectra of garnets

表 5 石榴石的穆斯堡尔谱参数
Table 5. Mössbauer parameters of garnets

序号	样号	中心位移 (mm/s)		四极分裂 (mm/s)		线宽 (mm/s)		面积百分数 (%)		X ²
		Fe ³⁺ (外峰)	Fe ²⁺	Fe ³⁺ (外峰)	Fe ²⁺	Fe ³⁺ (外峰)	Fe ²⁺	Fe ³⁺ (外峰)	Fe ²⁺	
1	Nm84—75	1.35	0.45	3.59	0.40	0.28		92.83	7.16	315
2	Nm81—208	1.35		3.58		0.29		100		284
3	Nm84—28	1.29		3.53		0.29		100		214
4	Nm84—23	1.29		3.53		0.27		100		402
5	Nm84—37	1.29	0.30	3.54	0.60	0.29		77.20	22.80	363

分析者：中国地质科学院地质研究所穆斯堡尔谱实验室
条件：国产 (261厂) 等加速穆斯堡尔谱仪，Co⁵⁷，速度2.4mm/s

六、石榴石的形成条件

1. 成因类型

根据 Б. Г. Лутц, Г. М. Другова 及 Н. В. Соболев 等人^[2] 利用 CaO—MgO—(FeO+MnO) 三角图解 (图 4) 划分不同变质相中石榴石成分标志以及从柏林^[3] 划分镁铝榴石的成因分类图解 (图 5)，本区石榴石投影点全部落在麻粒岩相区。

张启锐^[4] 利用世界各地石榴石化学分析资料，用数理统计法求出角闪岩相矽线石带的石榴石和麻粒岩相石榴石判别式如下：

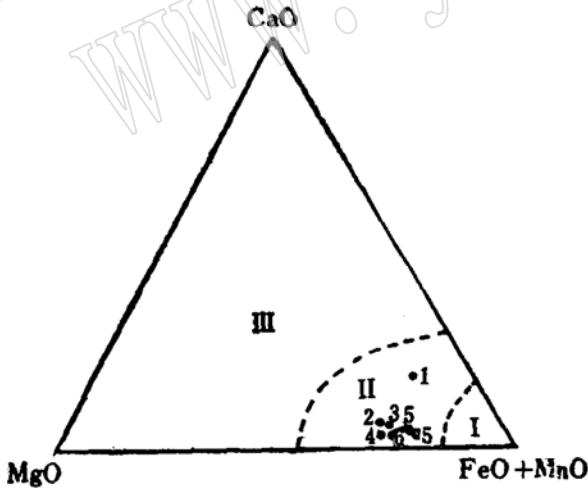


图 4 不同变质相中石榴石成分标志
Fig. 4 Characteristic chemical composition of garnets from different metamorphic facies.

(图中·为石榴石晶体边部成分)

$$y_1 = 1.64612 \times \text{MgO} + 2.54713 \times \text{CaO} - 9.72784$$

$$y_2 = 1.03927 \times \text{MgO} + 2.07836 \times \text{CaO} - 4.59625$$

当 $y_1 > y_2$ 时，石榴石属于麻粒岩相；若 $y_1 < y_2$ 时则属于角闪岩相。本区石榴石按此方法计算结果如下：

Nm84—75	$y_1 = 14.36$	$y_2 = 13.82$	$y_1 > y_2$
Nm81—208	$y_1 = 8.16$	$y_2 = 3.46$	$y_1 > y_2$
Nm84—28	$y_1 = 9.82$	$y_2 = 9.18$	$y_1 > y_2$

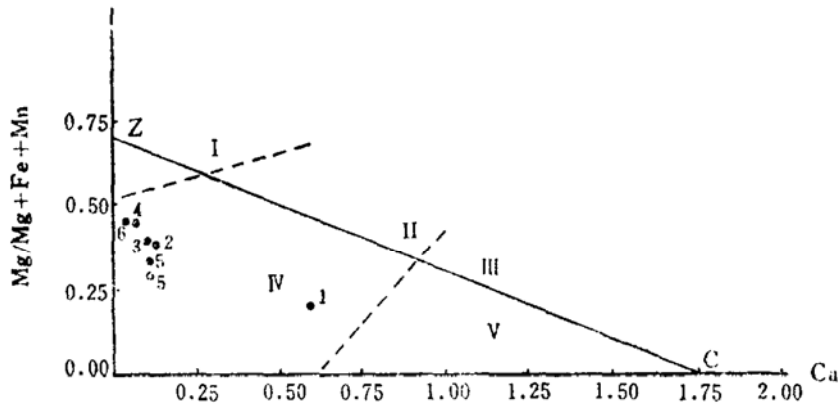


图5 镁铝榴石的成因分类

Fig. 5 Genetic classification of pyropes

(• 石榴石晶体边部成分)

Nm84—23	$y_1 = 11.59$	$y_2 = 7.22$	$y_1 > y_2$
Nm84—37	$y_1 = 7.17$	$y_2 = 6.65$	$y_1 > y_2$ (中心成分)
	$y_1 = 5.22$	$y_2 = 5.40$	$y_1 < y_2$ (边部成分)
N80—165	$y_1 = 10.10$	$y_2 = 8.22$	$y_1 > y_2$

以上结果表明除Nm84—37号样品(边部成分)有些微小变化, $y_1 < y_2$ 外, 其它样品全部 $y_1 > y_2$, 无疑说明是在麻粒岩相条件下形成的。

2. 变质作用的P—T条件

(1) 变质作用的温度

根据Perchuk⁽³⁾的实验图解和公式

$$X_{Mg}^{Grt} = \frac{Mg}{Mg + Fe + Mn + Ti}$$

$$X_{Mg}^{Bt} = \frac{Mg}{Mg + Fe + Mn + Ti}$$

$$K_{DMg}^{Bt/Grt} = \frac{X_{Mg}^{Bt}(1 - X_{Mg}^{Grt})}{X_{Mg}^{Grt}(1 - X_{Mg}^{Bt})}$$

$$T^{\circ}C = \frac{3650}{\ln K_D + 2.57} - 273$$

计算, 获得的变质温度列于表6。根据叶大年的意见和靳世琴等人的计算, 黑云母—石榴石矿物对温度偏低 100℃左右。笔者曾对集宁群中的二辉石对做了温度计算, 结果在 750℃—900℃之间。从表6可见, 本区区域变质作用的温压条件是较均匀的, 二辉石对温度可能代表了麻粒岩相变质作用高峰期的温度, 而黑云母—石榴石对温度则是代表了麻粒岩相变质作用稍晚期的温度。

(2) 变质作用的压力

根据H. G. F. 温克勒⁽⁵⁾的研究结果, 在 700℃和 $(8-10) \times 10^8$ Pa条件下, $Opx + pl =$

表6 黑云母—石榴石地质温度计主要参数及温度(°C)

Table 6. Main parameters and temperatures Obtained from biotite—garnet geothermometers

样号	(Mg/Mg+Fe+Mn+Ti) ^{Gar}	(Mg/Mg+Fe+Mn+Ti) ^{Bi}	T ₁ (°C)查图	T ₂ (°C)计算
N80—165	0.4257	0.7576	675	658

Cpx + Gar 将产生 Cpx + Gar + Q + Opx + Pl 组合。由于角闪石和黑云母的存在，压力不会大于 $10 \times 10^8 \text{Pa}$ 。据此，推测集宁群麻粒岩相的变质作用压力为 $(7-10) \times 10^8 \text{Pa}$ 。

七、结论

1. 根据石榴石的成分与变质矿物共生组合特点，本区富铝片麻岩中的石榴石和角闪二辉石岩中的石榴石，是在区域变质条件下形成的。

2. 穆斯堡尔谱分析数据再次表明，本区富铝片麻岩和角闪二辉石岩中的石榴石是在变质程度比较高的还原环境下形成的。

3. 石榴石成分受岩石成分所控制，其晶胞参数值随 Ca^{2+} 的含量增加而增大。

本文在撰写过程中得到了沈其韩研究员和高吉凤副研究员的指导和帮助，在此一并致谢。

参考文献

- (1) 中国科学院贵阳地球化学研究所, 1978, 矿物X射线粉晶鉴定手册。科学出版社。
- (2) 高吉凤, 1981, 冀东迁安滦县含铁岩系变质作用的特征。中国地质科学院地质研究所所刊, 第3号。
- (3) 张儒媛, 从柏林, 1983, 矿物温度计和矿物压力计。地质出版社。
- (4) 程裕淇、沈其韩、王泽九, 1982, 山东太古代雁翎关变质火山—沉积岩。地质出版社。
- (5) H.G.F.温克勒, 1980, 变质岩成因。科学出版社(中译本)。

Some Mineralogical Characteristics of Garnet in Archeozoic Metamorphic rocks of Inner Mongolia and Its Geological Significance

Zhang Infang

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences)

Key words: garnet; characteristics of crystal shape; X—ray diffraction; Mössbauer spectra; formation condition; Inner Mongolia

Abstract

Based on a study of six garnet samples from Archeozoic metamorphic rocks in Inner Mongolia, this paper discusses the relationship of crystal shape, physical properties, chemical composition of garnets and components of the

rocks to spectroscopy as well as the formation condition of garnets.

The end member components calculated from mineral composition indicate that the garnets in aluminous gneiss consist mainly of Mg-rich almandine, while those in amphibole websterite are composed chiefly of Ca-rich almandine. Chemically, calcium content of garnets is as a rule rather low, controlled by composition of the host rocks. With very few exceptions, the cell parameter (a_0) grows larger with the increasing Ca^{2+} content.

It is considered from an analysis of Mössbauer spectra that garnets in metamorphic rocks of Jining Group might have mostly been formed under a reduction conditions.

www.yskw.ac.cn