

辽西—赤峰一带太古代变质杂岩中 石榴石的研究

王长秋 崔文元

(北京大学地质学系, 北京 100871)

主题词: 石榴石 麻粒岩相岩石 P-T条件 辽西—赤峰

提 要: 石榴石是研究区内暗色镁铁质岩、麻粒岩及片麻岩的主要造岩矿物之一。成分分析表明, 它们是含钙铝榴石分子较多的镁铝-铁铝系列石榴石; 红外光谱测定其近于铁铝榴石; 穆斯堡尔谱分析表明, Fe^{3+} 含量增多将引起石榴石内六配位多面体变形程度增大; 晶胞参数 a_0 与 Ca^{2+} 含量呈正相关。本区石榴石是麻粒岩相变质作用的产物, 形成的温压条件为 $780-840^{\circ}C$ 、 $0.85-1.10$ GPa。形成石榴石的反应是复杂的, 其中包括角闪石与斜长石的增温脱水反应以及紫苏辉石+斜长石组合向石榴石+单斜辉石组合转化的滑动反应。

1 区域地质概况

研究区位于辽宁省西部建平县境内及内蒙赤峰市的东部和南部, 属华北地台北缘、内蒙地轴之东段。产出石榴石的太古代变质杂岩集中出露于区内 NNE 向排列的努鲁儿虎隆起上及七老图隆起的南端。

在前人的工作基础上^①, 笔者根据最近三年多的工作成果, 把该区变质岩系划分为下部建平变质杂岩(原小塔子沟组)和上部大营子群(原大营子组)。石榴石见于建平变质杂岩中。建平变质杂岩以(含单斜辉石)片麻岩、麻粒岩、斜长角闪(辉石)岩夹磁铁石英岩为特征, 局部出现大理岩。原岩主要为 TTG 系列岩石(英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩)或其喷出岩的等同物(英安岩、珍珠流纹岩及流纹安山岩), 其次为拉斑玄武岩、凝灰质粉砂岩和铁硅质岩等。本文研究样品的编号、岩石名称、矿物组合及采样地点见表 1。

2 石榴石的产状及物理性质概述

石榴石主要产于暗色镁铁质岩、麻粒岩及一些片麻岩中。其寄主岩石大体有三种矿物组合类型: ①紫苏辉石+单斜辉石+石榴石+斜长石+石英±角闪石±钾长石±黑云母; ②角闪石+单斜辉石+石榴石+斜长石±石英; ③斜长石+钾长石+石英+石榴石±角闪石。石榴石颗粒桔红色。偏光镜下, 无色或淡玫瑰色, 分布不甚均匀。组合①和②中的石

① 1:20 万建平幅、下洼幅、喀喇沁幅及 1:5 万头道营子幅地质图说明书。

表 1 样品编号、岩石名称、矿物组合及采样地点
Table 1. Number of samples, name of rocks, mineral assemblages and sampling locations

样号	岩石名称	主要矿物组合*	采样地点		
6-4-3	紫苏斜长麻粒岩	Pl + Hy + Gar + Q + Bi + Cpx + Ksp	建平县 任家湾子岔道口		
6-4B-1	石榴二辉斜长角闪岩	Hb + Pl + Hy + Cpx + Gar + Bi			
6-5-4	含黑云角闪石榴斜长片麻岩	Pl + Gar + Hb + Bi + Cpx			
6-5B-3	含石榴长英片麻岩	Pl + Ksp + Q + Gar			
6-8-7	单辉石榴斜长角闪岩	Hb + Pl + Gar + Cpx		南营子村西	
6-11-2				马家沟村路边	
6-24-1	含角闪石榴单辉斜长片麻岩			岳家台子村西	
6-26-3	石榴黑云斜长片麻岩	Pl + Q + Ksp + Bi + Gar + Hb		丰富台沟内北山	
6-29-1	含角闪石榴斜长片麻岩	Pl + Q + Gar + Hb + Cpx		任家台子村边	
6-30-2	含单辉石榴斜长角闪岩	Hb + Cpx + Gar + Pl		任家湾子岔道口	
6-30-5	角闪石榴单斜辉石岩				
6-30-7	含石榴二辉斜长角闪岩	Hb + Pl + Cpx + Hy + Gar + Q		长皋金矿附近	
6-32-3	含石榴黑云紫苏斜长麻粒岩	Pl + Q + Hy + Bi + Gar + Cpx + Hb			
6-33-1	斜长单辉石榴角闪岩	Hb + Gar + Pl + Cpx			山嘴
6-42-1	石榴单辉斜长角闪岩	Hb + Pl + Cpx + Gar + Hy			侯家杖子小山包
6-44-1	含石榴角闪黑云二辉斜长麻粒岩	Pl + Q + Hy + Cpx + Hb + Bi + Gar + Ksp			安太沟沟口
6-49-5	含黑云石榴紫苏斜长麻粒岩	Pl + Hy + Q + Gar + Bi + Cpx + Hb			马家沟内
C-1	黑云二辉二长麻粒岩	Pl + Ksp + Q + Hy + Cpx + Bi + Gar			长皋金矿
C-2					
Ji-1	石榴黑云二辉二长麻粒岩	Gar + Bi + Cpx + Hy + Pl + Ksp + Q			安太沟口
Ji-2	含角闪石榴黑云二辉斜长麻粒岩	Pl + Hy + Cpx + Bi + Gar + Hb	贝子府 大北沟南		
8D-3-1	单辉石榴角闪斜长片麻岩	Pl + Hb + Gar + Cpx + Q			
8D-13-1	角闪斜长单辉石榴石岩	Hb + Gar + Cpx + Pl			
8D-14-1	石榴斜长角闪岩				
8D-20-2	含单辉石榴斜长角闪岩	Hb + Pl + Gar + Cpx + Bi			
7Y-10-2	石榴单辉斜长片麻岩	Pl + Cpx + Gar + Hb + Q		黑里河南东尚家营子	
7Y-10-5	石榴单辉角闪斜长片麻岩	Gar + Cpx + Pl + Hb		村东河套边	

* Pl: 斜长石; Ksp: 钾长石; Q: 石英; Bi: 黑云母; Hb: 角闪石; Hy: 紫苏辉石; Cpx: 单斜辉石; Gar: 石榴石

榴石内常含许多石英、长石等矿物包裹体,呈筛状,而组合③中的石榴石内则少见矿物包裹体。有的石榴石被蠕虫状角闪石和斜长石组成的反应边所包围(照片1),石榴石本身由

于退变反应的消耗而变小至消失。7 个石榴石的比重测定结果变化于 3.89—4.07 (表 2)。

3 石榴石的化学成分特征

36 个石榴石样品的电子探针分析结果列于表 2。它们均为含钙铝榴石分子较多的镁铝-铁铝系列石榴石。

本区石榴石的端员分子计算 (表 2) 表明, 它们均以铁铝榴石端员占优势 (48.58%—60.06%), 其次为镁铝榴石端员 (20.85%—32.24%) 和钙铝榴石端员 (3.44%—21.88%), 而锰铝榴石端员 (0.92%—4.33%), 钙铁榴石端员 (0—9.64%) 和钙铬榴石端员 (0—1.02%) 都很少。

前人研究表明, 石榴石的成分受寄主岩石的成分控制^[1]。副变质岩中与正变质岩中的石榴石成分明显不同, 本区亦然。如原岩为沉积岩的 6-5B-3 中石榴石比其它正变质岩中的石榴石表现出贫钙的特征, 这与原岩贫钙有关。但是, 原岩为同类岩石的变质岩中, 石榴石与寄主岩石的成分的依赖关系不明显。本区 15 个样品的石榴石与其寄主岩的相应组分的相关分析表明, 其间无线性相关关系。相关系数分别为 $r_{\text{SiO}_2} = -0.201$ 、 $r_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0.209$ 、 $r_{\text{TiO}_2} = 0.049$ 、 $r_{\text{MgO}} = -0.127$ 、 $r_{\text{CaO}} = 0.379$ 、 $r_{\text{MnO}} = -0.504$ 、 $r_{\langle \text{FeO} \rangle} = 0.196$ 、 $r_{\text{Na}_2\text{O}} = 0.006$ 。

对于石榴石与变质作用的关系, 前人也给予了相当的注意。Maegregor^[1]指出, 随温度的增高, 铝榴石固溶体系列中钙铝榴石组合更易分解出来, 而在高压下易进入固溶体, 且压力愈高, 钙铝榴石与镁铝榴石的混溶程度愈高。A. Raheim 和 D. H. Green^[2]对基性岩的高温高压实验表明, 石榴石中钙铝榴石分子含量主要随压力增大而增多, 与温度关系不大。本区的石榴石除 6-5B-3 由于其原岩是沉积的、钙铝榴石分子很低外, 余者均较高, 这可能表明本区石榴石的形成压力较高。本区石榴石的主要氧化物含量的变化范围及平均值与印度 Madras 和我国密云^[3]的同类岩石中石榴石的很相似, 表明其变质程度很相近。

4 石榴石的波谱学特征

4.1 X-射线粉晶衍射分析

石榴石的晶胞参数 a_0 能反映出石榴石族矿物成分的变化, 进而与其形成条件联系起来。在石榴石的晶体结构中, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 占据八配位的似立方体或十二面体中心, Al^{3+} 和 Fe^{3+} 占据六配位的八面体中心。如大半径的二价阳离子 (如: Ca^{2+}) 进入石榴石晶体, 将导致八配位多面体变大, 而大半径的三价阳离子 (如: Fe^{3+}) 进入, 也会使六配位多面体变形而加大。这样, 就会使硅氧四面体相应变大, 反映在晶胞参数上便是 a_0 的变大。B. J. Skinner^[4]的人工合成石榴石端员矿物的资料也表明, a_0 以钙铁榴石最大, 钙铝榴石次之, 铁铝榴石和锰铝榴石更小, 镁铝榴石最小。

笔者用 X-射线粉晶法测量石榴石的 (10、4、0) 面网反射以求晶胞参数, 结果见表 2。 a_0 变化于 11.5705—11.5931 Å, 平均为 11.5795 Å。这与世界一些麻粒岩相区中石榴石的 a_0 极为相近^[3]。这类石榴石中 a_0 主要与矿物中 Ca^{2+} 有关, 随 Ca^{2+} 含量增加而增大^[3,5]。本区石榴石 a_0 与 Ca^{2+} 正相关, 相关系数为 0.871, 投影点基本沿着 R. A.

Binns^[5]所确定的 a_0 与 Ca^{2+} 的线性相关直线分布 (图 1)。

4.2 红外吸收光谱

9 个石榴石样品的红外光谱见图 2。图谱都很相似, 反映出石榴石成分上的相似性。与标准图谱对比, 近于铁铝榴石。

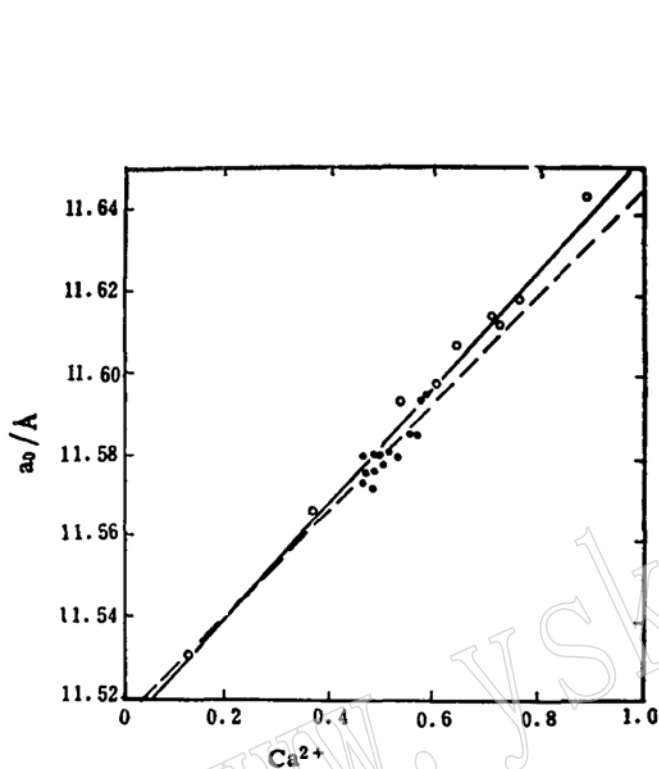


图 1 石榴石的 a_0 与 Ca^{2+} 的相关关系

Fig. 1 Correlation between cell parameter a_0 and Ca^{2+} content of garnets

图中: ●为本文数据点, 虚线为本文得到的相关线, 直线方程: $a_0 = 11.5132 + 0.1298 \text{Ca}^{2+}$
○及实线引自文献[5]

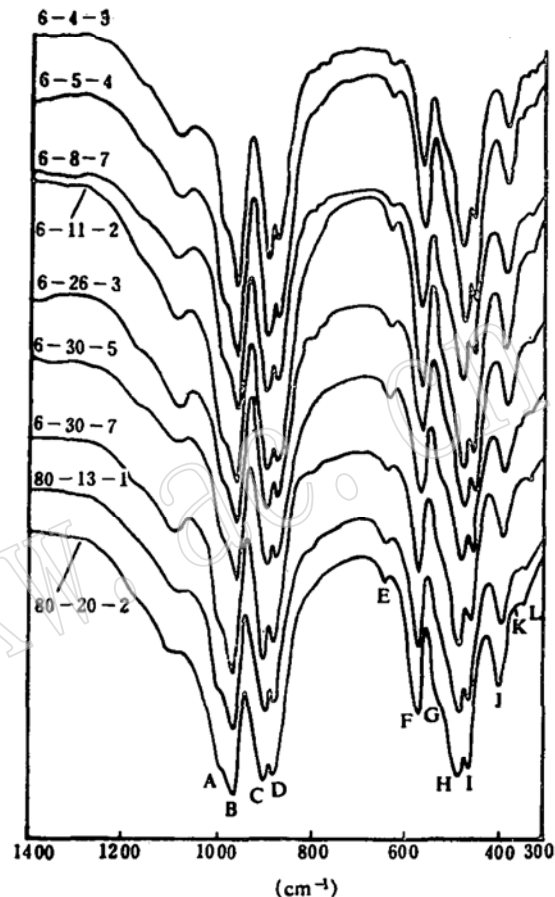


图 2 石榴石的红外吸收光谱

Fig. 2 Infrared absorption spectra of garnets

测试条件: PE983 G 型红外分光光度计; 室温下测谱; 扫描范围 $4000-180 \text{cm}^{-1}$; KBr 固体模压法制样。测试者: 朱炜炯

4.3 穆斯堡尔谱

表 3 给出了 3 个石榴石样品的穆斯堡尔谱参数。3 个图谱 (略) 大体相似, 但其间也有微小差异。

测定结果表明它们均含少量 Fe^{3+} 。对于 Fe^{2+} 的一对双峰, 其化学位移和四极分裂值均保持不变; 而 Fe^{3+} 的一对双峰, 化学位移明显变化, 但无规律性, 而四极分裂值则呈较明显的变化规律, 随着 Fe^{3+} 含量的增多, 四极分裂值逐渐降低。四极分裂揭示的是矿物中配位多面体的变形程度。这就表明, Fe^{3+} 进入晶格引起了石榴石中 FeO_6 八面体的变形, Fe^{3+} 愈多, 变形程度愈大, 反映在四极分裂上即为数值的逐渐降低。

表 3 石榴石的穆斯堡尔参数

Table 3. Mössbauer parameters of garnets

样品号	化学位移 $I.S. (mm/s)$	四极分裂 $Q.S. (mm/s)$	线宽 $\Gamma (mm/s)$	面积比 A %	指派	拟合度 χ^2	$\langle Fe \rangle$	Fe 的分配
6-4-3	1.27	3.54	{ 0.34 0.38	88	Fe^{2+}	1.15	1.628	Fe^{2+} 1.433
	0.26	0.35	0.37	12	Fe^{3+}			Fe^{3+} 0.195
6-11-2	1.27	3.54	{ 0.26 0.28	90	Fe^{2+}	0.97	1.543	Fe^{2+} 1.389
	0.31	0.33	0.38	10	Fe^{3+}			Fe^{3+} 0.154
6-30-7	1.28	3.54	{ 0.25 0.29	93	Fe^{2+}	1.28	1.737	Fe^{2+} 1.662
	0.27	0.29	0.48	7	Fe^{3+}			Fe^{3+} 0.125

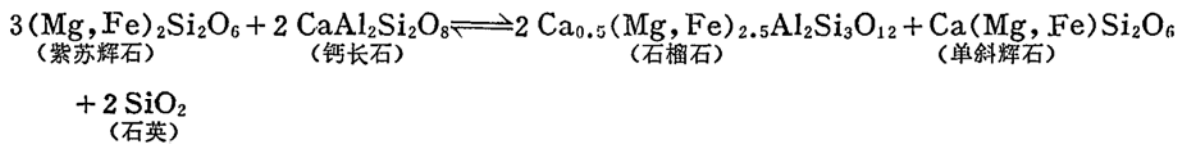
实验条件：采用等加速穆斯堡尔谱仪室温下测谱。用天然铁的六线谱作速度校正，放射源为 ^{57}Co (Pd 衬底)，约 25mCi，探测器为 NaI(Tl)。实验结果用 MUSFUN 程序拟合。

测试者：中国科学院地质研究所 李 哲。

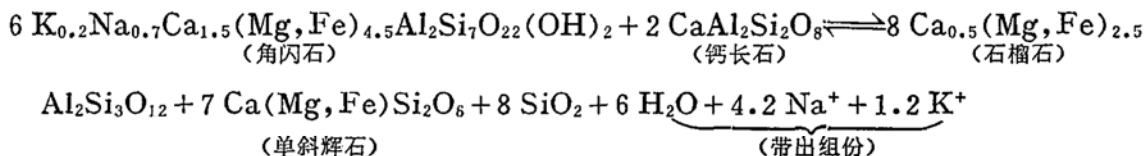
5 成因讨论

5.1 石榴石与其它矿物间的结构关系

如前所述，本区石榴石的寄主岩石有三种矿物组合类型。组合①以含紫苏辉石较多为特征。这类岩石中，常见到紫苏辉石呈大小不等的不规则残留体，有的被石榴石和单斜辉石小颗粒所包围（照片 2），岩石中斜长石含量较高；单斜辉石颗粒小且晶形较好；石榴石内常含许多石英及长石等矿物包体。这些特征指示了石榴石的形成与紫苏辉石及斜长石的滑动反应有关，即：



组合②在本区最常见。这类组合的岩石中，石榴石内长石与石英等的包体也很多；石榴石与单斜辉石大多接触界线平直，亦有交生现象；而角闪石的形态很不规则，有空心状、锯齿状和港湾状等（照片 3）；石榴石及单斜辉石内常见小颗粒的角闪石；并且，有时在一个薄片可见到有的地方只有斜长石和角闪石，而其它地方出现石榴石和单斜辉石，而角闪石和斜长石明显减少。这些均表明，石榴石的形成与角闪石和斜长石的增温脱水反应有关，可能的反应式如下：



这一反应可以由本区出现的石榴石和辉石退变成角闪石和斜长石的反应来证实（照片 1）。

它是由角闪岩相进入麻粒岩相的临界反应之一。

组合③中暗色铁镁矿物不存在或极少出现，石榴石晶形较好且少见矿物包体（照片4）。这些石榴石可能是岩石遭受进变质过程中由少量铁镁组分与长英质矿物反应生成。因而，石榴石的成因是比较复杂的。

5.2 石榴石的形成条件

本区石榴石利用张启锐^[1]提出的判别式

$$Y_1 = 1.64612 \text{ MgO} + 2.54713 \text{ CaO} - 9.72784$$

$$Y_2 = 1.03927 \text{ MgO} + 2.07836 \text{ CaO} - 4.59629$$

计算，结果（表2）表明，它们均属麻粒岩相，即 $Y_1 > Y_2$ ；在 $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe} + \text{Mn})$ 对 Ca 的图解^[6]（图3）中，均落入麻粒岩相区；在索波列夫^[1]的石榴石端员组分的三元图解（图4）中，基本落入麻粒岩相区。这表明，本区石榴石是麻粒岩相变质作用的产物。

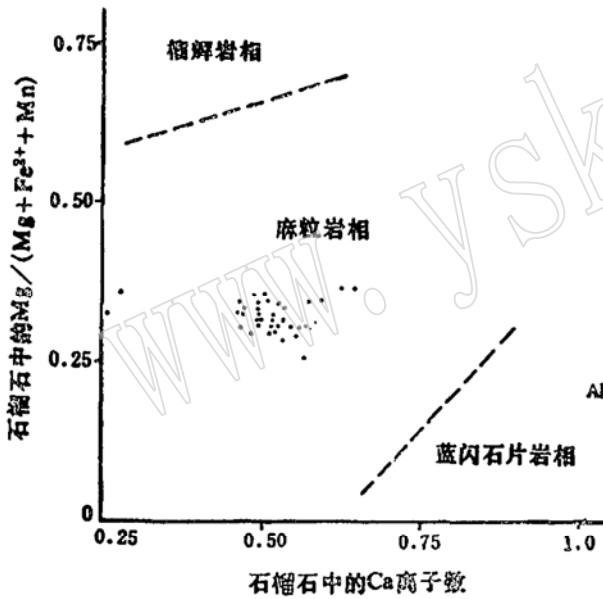


图3 不同变质相的石榴石成分区间图^[6]
Fig. 3 Chemical composition ranges of garnets from different metamorphic facies

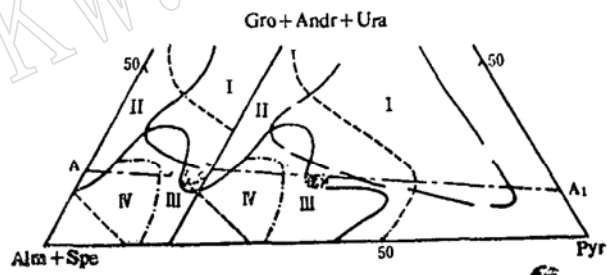


图4 不同变质相的石榴石成分区间图（据索波列夫，1970）

Fig. 4 Chemical composition ranges of garnets from different metamorphic facies
I—榴辉岩相；II—麻粒岩相；III—角闪岩相；IV—绿帘角闪岩相和角闪岩相
AA₁ 线为与无钙的铁镁矿物共生的石榴石（线之上）和与含钙的铁镁矿物共生的石榴石（线之下）的界线

采用 Ellis-Green^[7]、Ganguly^[8] 和 Wells^[9] 提出的石榴石-单斜辉石地质温度计及 Perchuk^[10] 的石榴石-斜方辉石地质温度计进行温度估算，结果见表4。在 1.0 GPa 和 1.1 GPa 的压力下，温度范围是 780—840℃。这与这个地区用二辉石地质温度计估算的

结果基本一致^①

表4 用石榴石-辉石地质温度计估算的温度

Table 4. Temperature measurements by garnet-pyroxene geothermometer

样号	T ₁ (°C)		T ₂ (°C)		T ₃ (°C)		T ₄ (°C)	
	1.0 Gpa	1.1 Gpa	1.0 Gpa	1.1 Gpa	1.0 Gpa	1.1 Gpa	1.0 Gpa	1.1 Gpa
6-4-3(1)	788	791	825	828	837	840	801	806
6-4-3(2)	742	745	785	787	789	792	791	796
6-8-7(1)	808	811	824	826	835	838		
6-8-7(2)	810	814	823	826	835	838		
6-11-2(1)	815	818	823	826	835	838		
6-11-2(2)	800	803	816	818	826	829		
6-24-1	831	835	845	847	861	864		
6-30-2	770	773	813	815	822	825		
6-30-5	794	797	821	823	832	835		
6-30-7	765	768	820	822	831	834	838	843
6-32-3(1)							811	816
6-32-3(2)							822	827
6-33-1	834	838	858	861	876	879		
6-42-1	764	767	798	800	805	808		
6-44-1	813	817	855	857	872	875	817	822
6-49-5							835	840
8D-3-1	802	805	834	837	848	851		
8D-13-1	764	767	805	807	813	816		
8D-14-1	755	758	803	806	810	813		
8D-20-2	772	775	814	816	824	827		
7Y-10-2	805	808	833	835	846	849		
7Y-10-5(1)	763	766	804	807	812	815		
7Y-10-5(2)	777	780	801	803	808	811		
平均值	789	792	820	822	831	834	816	821

T₁、T₂、T₃ 分别为 Ellis-Green 法、Ganguly 法及 Wells 法的石榴石-单斜辉石矿物对温度计得到的温度，T₄ 为 Perchuk 法的石榴石-斜方辉石温度计得到的温度

采用 Newton 和 Perkins^[11] 的石榴石-辉石-斜长石-石英组合地质压力计进行压力估算，选择温度为 750°C、800°C 和 850°C，计算结果见表 5，压力范围是 0.85—1.10 GPa。综上所述，形成石榴石的温压条件为 780—840°C，0.85—1.10 GPa。

① 王长秋，1989，辽西—赤峰一带太古代变质杂岩的地质特征及矿物学。北京大学硕士论文。

表 5 用石榴石-辉石-斜长石-石英组合地质压力计计算的压力 (单位: Gpa)

Table 5. Pressures calculated by geobarometer of the garnet-pyroxene-plagioclase-quartz assemblage

样号	组合 温度选择	Opx-Gar-Pl-Q 组合			Cpx-Gar-Pl-Q 组合		
		750℃	800℃	850℃	750℃	800℃	850℃
6-4-3(1)		1.00	1.04	1.08	0.81	0.85	0.89
6-4-3(2)		1.00	1.04	1.07	0.77	0.81	0.85
6-8-7(1)					0.88	0.93	0.97
6-8-7(2)					0.89	0.93	0.98
6-11-2(1)					0.83	0.87	0.90
6-11-2(2)					0.81	0.85	0.89
6-24-1					0.86	0.91	0.96
6-30-2					0.79	0.83	0.88
6-30-7		1.05	1.09	1.13	0.74	0.78	0.81
6-32-3(1)		1.04	1.08	1.12			
6-32-3(2)		1.04	1.08	1.12			
6-44-1		1.05	1.09	1.13	0.81	0.85	0.89
6-49-5		1.04	1.07	1.11			
7Y-10-5(1)					0.78	0.82	0.85
7Y-10-5(2)					0.92	0.97	1.01

参 考 文 献

- 1 靳是琴, 李鸿超. 成因矿物学概论. 吉林: 吉林大学出版社, 1986.
- 2 Raheim A, Green D H. Experimental determination temperature and pressure dependence of the Fe-Mg partition coefficient for coexisting garnet and clinopyroxene. *Contrib. Min. Petrol.*, 1974, 48: 179-203.
- 3 卢良兆, 郑松彦, 叶惠文. 密云高岭地区麻粒岩相石榴石-单斜辉石矿物对的特征及成因讨论. *长春地质学院学报*, 1979, (4): 10-25.
- 4 Skinner B J. Physical properties of end-members of the garnet groups. *Am. Min.*, 1956, 41: 428-436.
- 5 Binns R A. The mineralogy of metamorphosed basic rocks from the Williams complex, Broken Hill district, New South Wales. *Min. Mag.*, 1965, 35: 561-587.
- 6 Saxena S K. Distribution of elements between coexisting minerals and nature of solid solution in garnet. *Am. Min.*, 1968, 53: 994-1014.
- 7 Ellis D J, Green D H. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contrib. Min. Petrol.*, 1979, 71: 13-22.
- 8 Ganguly J. Garnet and clinopyroxene solid solutions and geothermometry based on Fe-Mg distribution coefficient. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1979, 43: 1021-1029.
- 9 Wells P R A. Chemical and thermal evolution of Archean sialic crust, Southernwest Greenland. *J. Petrol.*, 1979, 20: 107-226.
- 10 Perchuk L L et al. Precambrian granulites of the Aldan shield, eastern Siberia, USSR. *J. metamorphic Geol.*, 1985, 3: 265-310.
- 11 Newton R C, Perkins D. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. *Am. Min.*, 1982, 67: 203-222.

**Studies of Garnets from the Archean Metamorphic
Complex in Liaoxi (West Liaoning) -
Chifeng Area**

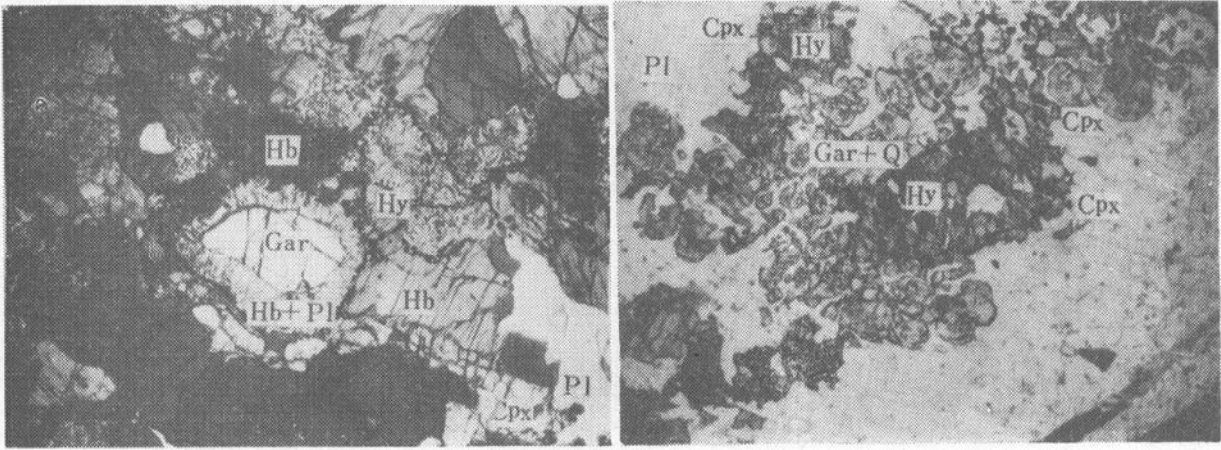
Wang Changqiu, Cui Wenyuan

(Department of Geology, Beijing University 100871)

Key words: garnet; rock of granulite facies; P-T conditions; Liaoxi (West Liaoning)-Chifeng

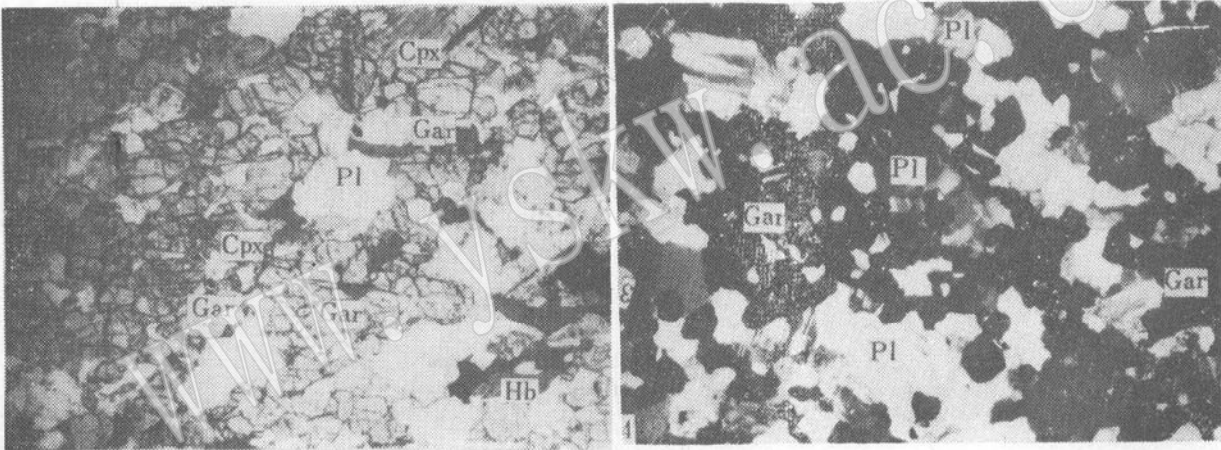
Abstract

Garnet group is one of the major rock-forming minerals in dark mafic rocks, granulite and gneiss of the Archean metamorphic complex in Liaoxi-Chifeng area. It is of pyrope-almandine series containing lots of grossular molecules according to electron microprobe analyses and is close to almandine according to infrared absorption spectra. Mössbauer spectra of garnets show that the increase in Fe^{3+} content will lead to further deformation of six-coordinated polyhedra in garnets. There exists positive correlation between the cell parameter a_0 and the Ca^{2+} content of garnets. Chemical composition and structural relationship with other coexisting minerals suggest that garnets are products of granulite facies metamorphism under the condition of temperature 700—840°C and pressure 0.85—1.10 GPa. The reactions causing the formation of garnets are complex, which include the temperature rising dehydration reaction of hornblende and plagioclase and the sliding reaction from the hypersthene+plagioclase assemblage to the garnet+clinopyroxene assemblage.



1

2



3

4

图版说明

- 照片 1 蠕虫状角闪石和斜长石在石榴石周围形成反应边。
单偏光 × 25
- 照片 2 石榴石、石英及单斜辉石围绕紫苏辉石。
单偏光 × 25
- 照片 3 单斜辉石、石榴石和角闪石的接触关系。单斜辉石和石榴石较为自形，而角闪石形态不规则。单偏光 × 25
- 照片 4 石榴石与斜长石共生。正交偏光 × 25