

包头—忽鸡沟一带麻粒岩相岩石 的矿物学和结晶P-T条件*

崔文元 李万兵** 舒桂明

(北京大学地质系)

主题词: 变质作用; 温度; 压力; 地质温度计; 分配系数

提 要: 本文提供了77个石榴石、辉石、角闪石、黑云母和斜长石等单矿物能谱和湿化学分析资料, 研究了各种矿物对的分配系数。用二辉石地质温度计估算的变质作用温度为770—860℃, 用其他矿物对估算的温度多数在二辉石温度计获得的温度范围内。用Wood的石榴石—斜方辉石地质压力计和Newton—Perkins以及Wells石榴石—斜方辉石—斜长石地质压力计公式估算的变质作用压力为 $(8-10) \times 10^8 \text{Pa}$, 地热梯度为24.6—27.5℃/km, 属低—中压型麻粒岩相。

研究区位于包头至石拐子一线以北、胡三元店—忽鸡沟至哈达门沟北端以南。本区前人曾做过许多有价值的专题研究^[1-6], 本文只对本区变质矿物学和变质作用的温压条件进行了研究。

一、地 质 概 况

本区主要出露有太古代乌拉山群, 多分布在乌拉山复背斜的北翼, 其南翼大部被山前大断裂断陷。

乌拉山群由下而上可划分为三套变质岩石组合。下部为各种麻粒岩、变粒岩和片麻岩夹有辉石角闪岩; 中部以黑云角闪斜长片麻岩为主, 夹变粒岩、斜长角闪岩及磁铁石英岩; 上部为黑云及角闪斜长片麻岩、石英岩、含堇青石^[6]、矽线石榴钾长片麻岩、不同类型的大理岩, 夹有磁铁石英岩。变质程度主要为麻粒岩相, 局部为高角闪岩相。其原岩下部为玄武岩夹有安山岩、凝灰岩和凝灰质砂岩, 属基性火山岩建造; 中部为中酸性火山岩夹有凝灰、凝灰质砂岩, 属中酸性火山岩含铁建造; 上部为杂砂岩、长石砂岩、石英长石砂岩、粘土岩、石灰岩、火山岩及凝灰岩夹含铁石英岩, 属碎屑岩—碳酸盐—火山岩含铁建造。三套岩石组合由下而上构成一个完整的火山沉积旋回。

辉石角闪岩矿物组合是角闪石+紫苏辉石+单斜辉石±斜长石±黑云母。麻粒岩的矿物组合是斜方辉石+单斜辉石+斜长石±角闪石±黑云母±石榴石±石英+不透明矿物。角闪斜长片麻岩的主要矿物组合是角闪石+斜长石±透辉石±钾长石±黑云母+石英。矽线石榴黑云钾长片麻岩主要矿物组合是矽线石+石榴石+黑云母±堇青石+钾长石+斜长石+石英+不透明矿物。斜长角闪岩的矿物组合是角闪石+斜长石±透辉石。

本文的标本采集地点、标本号及岩石名称见图1和表1。

* 国家自然科学基金资助课题。 ** 中国科学院地质研究所。

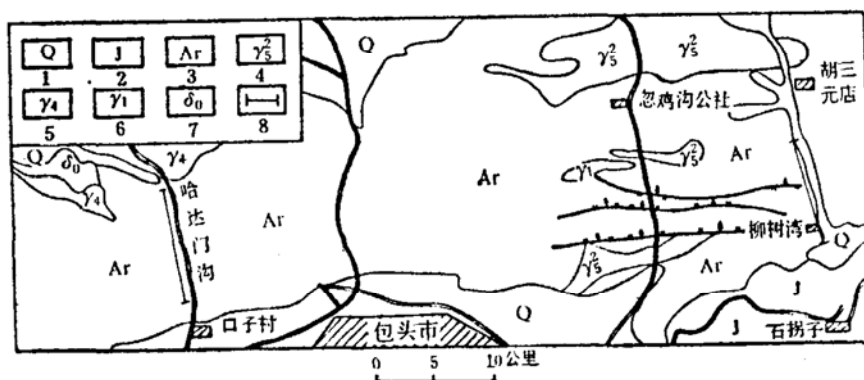


图 1 包头—忽鸡沟一带地质简图

Fig. 1 Geological outline map of Baotou-hujigou area

1. 第四系; 2. 侏罗系; 3. 太古界; 4. 燕山早期花岗岩; 5. 华力西晚期花岗岩; 6. 太古代花岗岩; 7. 加里东晚期闪长岩; 8. 取样剖面线

表 1 取样地点和岩石名称

Table 1 Sampling Locaties and name of rocks

样 号	取 样 地 点	岩 石 名 称
80731	哈达门沟至石合门	角闪黑云斜长片麻岩
80716	公路的路标为:	黑云斜长角闪岩
80732	12.8 公里处	角闪二辉麻粒岩
80736	12.3 公里处	石榴黑云斜长片麻岩
	6.8 公里处	
	5.5 公里处	
9A61	忽鸡沟铁矿区	角闪二辉麻粒岩
9A62		黑云角闪二辉麻粒岩
9A63		石榴二辉麻粒岩
80810	柳树湾村以南200米处	角闪二辉麻粒岩
80815	柳树湾村东	角闪二辉麻粒岩
80822	柳树湾村以北450米	角闪二辉麻粒岩
80826	柳树湾村以北500米	角闪二辉麻粒岩
80831	相家湾以北700米	黑云二辉角闪岩

二、矿 物 学

本文着重研究了辉石、角闪石和长石等矿物,采用湿化学和能谱^①分析两种方法测定化学成分。

能谱仪测定的全铁<FeO>,对于辉石和石榴石用电价差值法^[7]换算出 Fe₂O₃ 和 FeO。

(一) 石榴石

主要见于黑云母石榴斜长片麻岩和矽线石榴钾长片麻岩,麻粒岩中只局部出现。从表 2 可见,铁铝榴石端员分子占优势,其次为镁铝榴石和钙铝榴石端员分子。

利用张启锐的判别式^[8]计算结果表明,表 2 中石榴石均 $Y_1 > Y_2$,属于麻粒岩相的产物。

① 能谱分析使用加拿大多伦多大学地质系能谱仪测定,标样为该实验室标样矿物。

在 $Mg/(Mg + Fe + Mn)$ 对 Ca 的标绘图上, 均位于麻粒岩相区^[9]。

表 2 石榴石、斜长石、角闪石和黑云母的化学成分

Table 2 Chemical compositions of garnets, plagioclase, amphiboles and biotites

矿物名	石榴石		斜长石	角闪石 (湿化学分析)							黑云母	
样号	9A63	80736	9A63	80810	80815	80823	80826	80831	80713	80716	9A63	80736
成分	1	2	1	1	2	3	4	5	6	7	1	2
SiO ₂	37.43	38.34	56.11	39.30	40.30	41.20	40.40	41.40	40.60	41.80	36.81	38.03
TiO ₂				2.46	2.62	2.38	2.50	2.70	2.06	2.26	6.12	3.53
Al ₂ O ₃	20.93	21.82	28.68	12.98	12.66	11.66	11.61	11.66	9.58	9.74	12.75	16.39
Fe ₂ O ₃	1.95	0.92		1.09	3.57	1.44	3.05	1.04				
FeO	25.39	27.38		16.39	12.63	11.66	17.92	11.39	16.19	14.94		
<FeO>	27.15	28.21									18.87	14.92
MnO	1.12	1.17		0.37	0.19	0.13	0.25	0.16	0.58	0.55		
MgO	5.18	8.39		9.90	10.44	12.50	11.20	12.90	12.30	12.40	12.43	15.17
CaO	7.02	1.71	11.52	11.30	11.00	11.30	11.36	11.26	11.26	11.10		
Na ₂ O			3.99	1.52	1.48	1.48	1.24	1.60	1.20	1.24	0.37	0.29
K ₂ O			0.12	1.66	1.62	1.22	1.78	1.18	1.42	1.62	9.82	10.22
H ₂ O ⁺				1.89	1.96	1.98	1.80	2.01	1.95	1.86		
F				0.11	0.14	0.05	0.46	0.07	0.25	0.22		
-2F=0				-0.05	-0.06	-0.02	-0.20	-0.03	-0.11	-0.09		
Los				1.05	1.51	2.59	2.14	2.11	2.95	2.90		
总量	99.03	99.73	100.42	99.86	99.92	99.52	99.10	99.38	99.98	100.32	97.17	98.53

(二) 辉石

二辉石是麻粒岩和二辉角闪岩中主要造岩矿物, 单斜辉石也出现于斜长角闪岩中。

斜方辉石化学成分列于表 3。根据 W. E. Tröger 的分类^[10], 除序号 3 为铁紫苏辉石外, 其余均为紫苏辉石。偏光镜下平行消光, 多色性明显, Ng—浅绿色, Nm—浅黄色, Np—浅红色, 这是麻粒岩相紫苏辉石的典型特征。有人认为其多色性既不与任何色素离子 (如钛、锰、铁) 又不与任何微量元素有关, 而是铝进入八面体孔隙部分地代替铁和镁, 使晶胞参数 a 和 b 强烈收缩的结果。

斜方辉石较富含铁, 其 f 值 [$f = 100(Fe^{+2} + Fe^{+3} + Mn)/(Mg + Fe^{+2} + Fe^{+3} + Mn)$] 变化范围为 45.26—53.16。FeO、MgO 和 SiO₂ 重量百分数为: FeO > 16%; MgO < 24%; SiO₂ < 52.45%, 具有明显的区域变质成因辉石特征^[11]。在 MgO + FeO + Fe₂O₃ 对 Al₂O₃ 标绘图中^[11], 斜方辉石投影点均落在变质成因的区域内; 在 f 对 Ca 和 Al^N 标绘图中^[12], 多数落在麻粒岩区域中, 少数位于其附近。

单斜辉石化学成分列于表 3。根据 W. E. Tröger 的分类^[10], 表 3 中序号 1-3 和 5 为普通辉石, 其余的为次透辉石。

由表 3 可见, 单斜辉石的 f 值变化范围很小 (30—40.64%)。在 f 对 Al^N 标绘图中^[12], 多数投影点落在二辉麻粒岩区域内, 少数点位于其附近。

单斜辉石中 CaO、Al₂O₃ 和 Na₂O 平均值分别为 21.15%、3.12% 和 0.40%, 与卓资—

表 3 二辉石的化学成分

Table 3 Chemical composition of two-pyroxenes

矿物名称	斜 方 辉 石								
分析方法	化 学 分 析			能 谱 分 析					
样 号	80810	80826	9A62	9A63	9A61	9A62	80815	80822	80732
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
成分									
SiO ₂	49.00	50.20	46.90	50.44	51.16	51.58	52.45	51.71	51.96
TiO ₂	0.34	0.36	2.25				0.21		
Al ₂ O ₃	1.86	1.86	3.47	0.96		1.36		0.42	0.28
Fe ₂ O ₃			3.25	3.31	2.43		0.08	1.32	1.11
FeO	26.46	22.91	25.88	26.99	25.67	28.16	26.49	28.11	27.96
<FeO>				29.97	27.86	28.16	26.56	29.30	28.96
MnO	0.84	0.84	0.67	0.45	0.64	0.75	0.08	0.49	0.06
MgO	17.76	20.50	14.57	17.37	19.35	18.00	19.67	17.97	18.30
CaO	1.56	1.50	2.14	0.48	0.28	0.52	0.55	0.93	0.73
Na ₂ O	0.18	0.14	0.29	0.27					
K ₂ O	0.10	0.12	0.10						
Los	1.64	1.24							
总量	99.74	99.78	99.51	100.29	99.53	100.37	100.07	100.95	100.94

续表

矿物名称	单 斜 辉 石									
分析方法	化 学 分 析				能 谱 分 析					
样 号	80810	80815	80826	80831	9A63	9A61	9A62	80815	80822	80732
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
成分										
SiO ₂	51.10	50.06	49.90	48.50	52.18	51.23	51.46	50.79	51.76	52.84
TiO ₂	0.46	0.34	0.62	0.74	0.18	0.30	0.27	0.22	0.64	
Al ₂ O ₃	2.94	2.46	3.50	3.86	2.44	4.07	3.50	2.73	4.05	1.70
Fe ₂ O ₃	2.44	5.27	2.82	2.42	0.73	0.03	0.03	0.63	2.93	
FeO	8.33	4.80	7.45	7.09	10.41	10.23	12.85	13.63	7.64	10.05
<FeO>					11.07	10.26	12.88	14.20	10.28	10.05
MnO	0.46	0.40	0.37	0.28	0.26	0.37	0.20	0.54		0.39
MgO	12.64	13.04	13.00	12.80	12.64	12.19	11.70	10.32	12.17	13.26
CaO	20.27	20.60	20.36	21.50	21.78	21.77	20.70	21.33	21.12	22.11
Na ₂ O	0.52	0.68	0.48	0.72	0.31	0.28	0.29	0.22	0.48	
K ₂ O	0.12	0.14	0.14	0.14						
Los	0.53	1.08	1.33	1.47						
总量	100.24	99.41	99.97	99.52	100.78	100.47	100.99	100.41	100.79	100.35

阳高^[13]和宣化—四台嘴一带^[14]比较,以高钙低Al₂O₃和Na₂O为特征。近代实验资料表明单斜辉石中顽火辉石的含量随温度降低而固溶体减弱,故使单斜辉石中Ca含量增高,一般认为压力效应与温度相反^[15-17]。实验资料还表明,单斜辉石中硬玉组分随压力增大而增高。因此,本区辉石形成的温压条件应比卓资—阳高一带低。

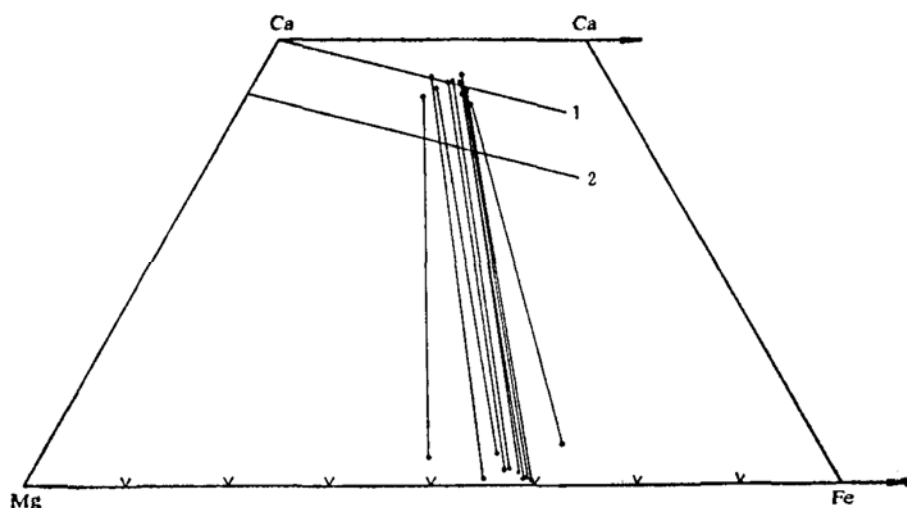


图2 共生斜方辉石和单斜辉石成分图

Fig. 2 Chemical composition of coexisting ortho- and clinopyroxenes

线1、2分别为与贫钙辉石共生的麻粒岩和火成岩中单斜辉石趋势线（据Binns, 1965）^[18]

图2表明，本区单斜辉石是在 Binns 确定的麻粒岩单斜辉石趋势线附近^[18]，说明是在麻粒岩相条件下形成的。由图中还可以看出，本区辉石服从正常的斜方—单斜辉石对成分关系（表3中未列出全部数据）。在 Wo—En 结上交点位置很接近（Wo 73—78）这暗示二辉石达到了平衡。

（三）角闪石

本区角闪石主要产于麻粒岩、角闪二辉岩、斜长角闪岩和角闪斜长片麻岩中。其化学成分列于表2。根据Leake分类^[19]，表2中角闪石都属于钙质角闪石，为含钾—含亚铁 韭闪石（序号1）和含钾—含镁绿钙闪石（序号2和4）以及含钾—含亚铁准闪角闪石（序号3和5—7）。在TiO₂对K₂O+Na₂O、Al^{IV}对Al^{VI}和Si对Al^{VI}变异图中所研究的角闪石均落入麻粒岩相区。

（四）黑云母

黑云母主要出现于片麻岩类岩石中，麻粒岩中也有少量出现。其化学成分数据列于表2。根据W.E. Tröger分类^[10]，表中均为少铁黑云母。镜下多呈半自形晶，多色性很明显，Ng = Nm = 褐红色或褐色，Np = 浅黄色。这是麻粒岩相黑云母的典型特征。有的学者认为黑云母的多色性与TiO₂的含量有关^[20]，TiO₂含量越高，其颜色就越红。本文研究的黑云母TiO₂含量在3.53—6.12%之间变化。黑云母和石榴石的详细研究见另文^[4-5]。

（五）长石

斜长石是麻粒岩、片麻岩和斜长角闪岩中的主要造岩矿物，化学成分列于表2。石榴二辉麻粒岩中斜长石牌号An₅₅。镜下可见由出溶作用形成的反条纹长石。

钾长石（多为条纹长石）产于片麻岩中。镜下见有由出溶作用和交代作用形成的两种条纹长石。

三、共生铁镁矿物之间的阳离子分配

Kretz(1961) 根据热力学原理首先研究了共生单斜辉石和斜方辉石之间铁和镁分配。其后, 人们常用共生矿物之间元素分配系数来研究矿物的形成条件。

若两种共生矿物 $\alpha = (A, B, \dots, K)N$ 和 $\beta = (A, B, \dots, K)M$, A 元素在两种矿物中的分配用下式表示:

$$K_{Da}^{\alpha-\beta} = \frac{X_a^{\alpha-\beta}}{1 - X_a^{\alpha}} \cdot \frac{1 - X_a^{\beta}}{X_a^{\beta}}$$

这里 $K_{Da}^{\alpha-\beta}$ 是分配系数, X_a^{α} 和 X_a^{β} 是 α 和 β 两种矿物克分子分数 $A/(A+B+\dots, K)$. 为了简化和便于与文献资料对比, 把 $X_a^{\alpha}/(1 - X_a^{\alpha})$ 和 $X_a^{\beta}/(1 - X_a^{\beta})$ 两个量分别用 X_a^{α} 和 X_a^{β} 表示。

X_{Mg}^{α} : $Mg/(Fe^{2+} + Mn)$, 在二辉石、角闪石和石榴石中;

X_{Ca}^{α} : $Ca/(Na + K)$, 在角闪石和单斜辉石中;

X_{Ca}^{Gt} : $Ca/(Fe^{2+} + Mg + Mn)$, 在石榴石中;

X_{Na}^{α} : Na/Ca , 在角闪石和单斜辉石中。

本文研究的标本都在偏光镜下进行过仔细的共生分析。凡确定为共生矿物者均满足互相必须直接接触^[36]、相互无交代现象和符合矿物相律要求等条件。

根据表 2 至 8 算出的分配系数平均值及与有关文献对比资料列于表 4。一般认为, 在一定平衡条件下, 共生二辉石 $K_{D(Mg)}^{opx-cpx}$ 随形成时 P—T 条件的变化而变化, 与矿物本身的 Mg/Fe^{2+} 值无关, 本文平均值为 0.563, 稍高于由 Saxena 确定的变质岩的 $K_{D(Mg)}^{opx-cpx}$ 平均值 (0.54)。由表 4 还可见, 其他矿物对各元素的分配系数与文献中麻粒岩相相应的分配系数

表 4 麻粒岩相中的 K_D 值对比

Table 4 Comparison of K_D values in granulite facies

作 者	变 质 相	平 均 K_D 值				
		$K_{D(Mg)}^{opx-cpx}$	$K_{D(Mg)}^{am-cpx}$	$K_{D(Ca)}^{am-cpx}$	$K_{D(Na)}^{am-cpx}$	$K_{D(Mg)}^{Gt-cpx}$
本 文 崔文元 ⁽¹⁴⁾	麻粒岩相	0.563	0.585	0.153	0.237	0.183
	麻粒岩相	0.541	0.700	0.167	0.285	0.200
Mottana ⁽²¹⁾	麻粒岩相	0.64	0.64		0.46	0.23
	角闪岩相		0.85		0.95	0.15
Huber & Tse ⁽²¹⁾	麻粒岩相		0.622—0.689	0.340—0.454	0.398	0.190—0.195

基本上是一致的^[14,21],这成为本区麻粒岩相成岩条件的一个佐证,看来共生矿物间已接近达到了化学平衡。

四、变质作用的P—T条件

(一) 二辉石地质温度计

本文采用了 Wood-Banno^[22] (1973)、Wells^[23] (1977)、Nehru-Wyllie^[24] (1974)、Lindsley-Dixen^[25] (1976)和Lindsley^[26] (1981) 等人五种方法估算了研究区辉石形成的温度(后一种方法采用压力为8.5MPa),其结果列于表5。

由表5可见,五种方法计算结果表明(依次用 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 和 T_5 表示), T_1 和 T_4 平均

表5 二辉石地质温度计的主要参数及获得的温度

Table 5 Main parameters and temperatures obtained from the two-pyroxene geothermometers

样号	$a_{\text{MgSiO}_3}^{\text{cpx}}$	$a_{\text{MgSiO}_3}^{\text{opx}}$	$X_{\text{Fe}}^{\text{opx}}$	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$	$T_4(^{\circ}\text{C})$	$T_5(^{\circ}\text{C})$
80810	0.038	0.264	0.455	837	877	738	794	1052
80826	0.057	0.337	0.385	892	935	801	873	1043
9A63	0.043	0.246	0.456	854	906	773	844	852
9A61	0.042	0.307	0.427	841	875	734	784	909
9A62	0.050	0.256	0.467	865	924	794	875	919
80815	0.049	0.308	0.430	858	901	764	827	733
80732	0.047	0.272	0.462	854	905	770	840	930
平均				857	903	768	834	920

T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 和 T_5 分别用Wood-Banno^[22] (1973)、Wells^[23] (1977)、Nehru-Wyllie^[24] (1974)、Lindsley^[25] (1976)和Lindsley^[26] (1981)公式计算的温度。

值是近似的,其变化范围为834—857 $^{\circ}\text{C}$,而 T_2 和 T_5 较高,平均值为903和920 $^{\circ}\text{C}$,而 T_3 较低,平均值为768 $^{\circ}\text{C}$ 。多数学者认为Wood—Banno法对于不是很高压力下形成的岩石和含铁、铝

表6 用Perchuk和Saxena相图估测的温度

Table 6 Temperatures obtained by Perchuk's and Saxena's diagrams

分析方法	湿化学分析					能谱
样号	8081	80815	80826	80831	9A63	80736
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	OPX—aM	820	850			
	CPX—aM	790	800	780	740	
	CPX—Bi				750	
	Gr—Bi				660	680
	Gr—Bi*				820	770

* 用Saxena相图估测的温度,其他均用Perchuk相图估测的。

的辉石是合适的。但有一些学者认为此种方法估算温度过高^[27-30],有人建议将计算温度向下修正60 $^{\circ}\text{C}$ 。Wood和Banno本人认为他们的方法精度为 $\pm 60^{\circ}\text{C}$ 。这样用Wood—Banno方法估算的总平均温度为793 $^{\circ}\text{C}$ 。除 T_2 和 T_5 外,本区用二辉石地质温度计估算的平均温度范围为770—860 $^{\circ}\text{C}$ 。

(二) 辉石—角闪石、单斜辉石—黑云母和石榴石—黑云母地质温度计

用Perchuk^[31]相图和Saxena^[32]的共生石榴石和黑云母之间的转换Mg—Fe分配系数与温度关系的图解估算的温度列于表6。从表中可见,湿化学分析的4对单斜辉石

一角闪石和2对斜方辉石—一角闪石矿物对估算的平均温度分别为778℃和835℃。能谱分析的2对石榴石—黑云母和1对单斜辉石—黑云母矿物对用Perchuk相图获得的平均温度分别为670℃和750℃。而2对石榴石—黑云母矿物对用Saxena方法获得的平均温度为795℃,这与其他矿物对获得的温度是一致的,显然用Perchuk的石榴石—黑云母矿物对相图获得的温度偏低。其他矿物对获得的平均温度多数在二辉石矿物对获得的温度范围之内,故本区变质作用温度应在770—860℃范围内。

(三) 地质压力计

根据表2和表3中9A63的斜方辉石、石榴石和斜长石的化学成分,用Wood^[23]的斜方辉石—石榴石地质压力计公式和Newton—Perkins^[41]以及Wells^[42]的石榴石—斜方辉石—斜长石地质压力计公式估算的压力(采用温度为700℃),三种方法获得压力依次为 $9.2 \times 10^8 \text{ Pa}$ 、 $8.3 \times 10^8 \text{ Pa}$ 和 $10.1 \times 10^8 \text{ Pa}$,所以研究区变质作用的压力应在 $(8-10) \times 10^8 \text{ Pa}$ 范围内。

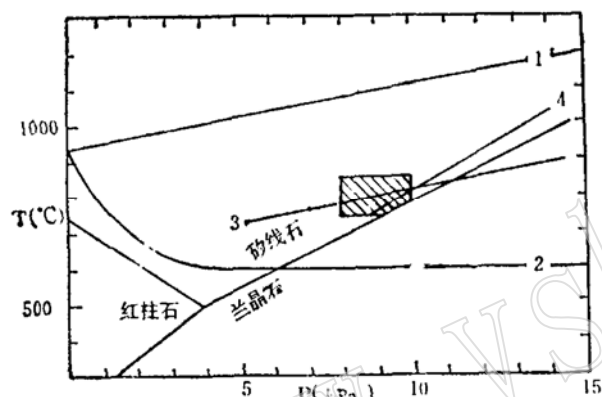


图3 包头—忽鸡沟麻粒岩相岩石的P—T图

Fig.3 P-T diagram for the rocks of granulite facies from Baotou-Hujigou area

1和2分别为花岗岩干和湿的固相线^[39]

700℃以上实验最小压力需要 $8 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。

上述全部资料绘在图3中,阴影线区指示出变质作用的P—T条件,3、4线穿过该区,位于矽线石—兰晶石反应界线的矽线石一侧。可见,由岩相学观察推导的P—T条件和矿物对地质温压计估算的温压条件是一致的。故本区太古代麻粒岩相岩石变质作用的P—T条件为770—860℃, $(8-10) \times 10^8 \text{ Pa}$, 地热梯度为24.6—27.5℃/km, 属于低—中压型麻粒岩相。 $(8-10) \times 10^8 \text{ Pa}$ 的压力与28—35公里的埋藏深度相当。

参 考 文 献

[1] 崔文元等,1983,中国北部太古代区域变质杂岩的氧同位素的研究,国际前寒武纪地壳演化讨论会论文集,地质出版社。

[2] 钱祥麟等,1985,内蒙、冀东太古代界麻粒岩相岩带的演化,地质研究论文集,北京大学出版社,20—29页。

本区变质岩中,长石中出熔条纹的出现表明,变质作用P—T条件应接近于Mores的固溶线的临界线(图3中线3)。在矽线石榴钾长片麻岩中,常见矽线石、石榴石、石英和斜长石共存,并见有斜长石转变为石榴石、矽线石和石英,故可由反应式钙长石=钙铝榴石+矽线石+石英来确定(直线4)^[35]。本区未发现有兰晶石,故变质作用的温压条件应限制在矽线石—兰晶石反应界线的矽线石一侧。在某些基性麻粒岩中出现石榴石,表明它是由斜方辉石和斜长石反应形成的,据一些资料表明^[37-39],该反应在800℃时,需要 $(9-10) \times 10^8 \text{ Pa}$, Newton指出^[40],对于基性麻粒岩中的石榴石,在

- [3] 沈其韩等, 1983, 内蒙南部太古代集宁群麻粒岩—片麻岩的岩石学和稀土地球化学特征, 国际前寒武纪地壳演化讨论会论文摘要汇编。
- [4] 赵印香等, 1983, 内蒙中部前寒武纪变质杂岩中黑云母化学成分的变化及其与变质程度的关系, 矿物岩石, 3卷1期 12—22页。
- [5] 崔文元等, 1987, 集宁—张家口地区变质岩中石榴石和黑云母的化学成分及其结晶P-T条件, 矿物岩石 (印刷中)
- [6] 内蒙古第一区域地质调查队等单位, 1985, 内蒙古区域变质作用研究 (印刷中)
- [7] 郑巧荣, 1983, 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} , 矿物学报, 第1期, 55—62页
- [8] 靳是琴等, 1984, 成因矿物学概论, 下册, 146页, 吉林大学出版社。
- [9] Saxena, S. K., 1968, Distribution of elements between coexisting minerals and the nature of solid solution in Garnet, Amer. Min., 53, 994-520.
- [10] Troger, W. E., 1971, Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale.
- [11] Bhattacharyya, C., 1971, An evaluation of the chemical distinction between igneous and metamorphic orthopyroxenes, Amer. Min., 56, 499-506.
- [12] Dobretsov, N. L., 1968, Paragenetic types and composition of metamorphic Pyroxenes, . Petr., 9, 358-377.
- [13] 崔文元, 1983, 卓资—阳高一带麻粒岩的矿物学和结晶P-T条件, 地质研究论文集, 北京大学出版社。
- [14] 崔文元, 1984, 宣化—四台嘴一带麻粒岩相岩石的矿物学和结晶的P-T条件, 地质学报, 第3期。
- [15] Boyd, F. R., 1973, The orthopyroxene geothermometer, Geochim. Cosmochim. Acta, 37, 2533-2546.
- [16] Lindsley, D. H. and Dixon, S. A., 1976, Diopside-enstatite equilibrium at 850 to 1400°C, 5 to 35 Kb, Amer. J. Sci., 276, 1031-1285.
- [17] Nehru, C. E., 1976, Pressure dependence of the enstatite limb of the enstatite-diopside solvus, Amer. Min., 61, 578-581.
- [18] Binns, B. A., 1965, The mineralogy of metamorphosed basic rocks from the willyama complex, Broken Hill district, New South Wales. Part 11: Pyroxenes, garnets, plagioclases and opaque oxides, Min. Mag., 35, 561-567.
- [19] Leake, B. E., 1978, Nomenclature of amphiboles, Can. Min., 16, 501-520.
- [20] Rossman, G. R., 1984, Spectroscopy of micas, In Reviews in Mineralogy, 13, 145-177.
- [21] Hubberten, J. J. M. W. M., 1973, Distribution of elements in some basic granulite-facies rocks, North-Holl and publishing company—Amsterdam—London.
- [22] Wood, B. J. and Banno, S., 1973, Garnet-orthopyroxene and complex systems, Contr. Min. Petr., 42, 109-124.
- [23] Wells, P. R. A., 1977, Pyroxene thermometry in simple and complex systems, Contr. Min. Petr., 62, 129-139.
- [24] Nehru, C. E., and Wyllie, P. J., 1974, Electron microprobe measurement of pyroxenes coexisting with H_2O -undersaturated liquid in the join $CaMgSi_2O_6$ - $Mg_2Si_2O_6$ - H_2O at 30 Kbar, with applications to geothermometry, Contr. Min. Petr., 48, 221-228.
- [25] Lindsley, D. H., and Dixon, S. A., 1976, Diopside-enstatite equilibria at 850 to 1400°C, 5 to 35 Kb, Amer. J. Sci., 276, 1285-1301.
- [26] Lindsley, D. H., Grover, J. E., Davidson, P. M., 1981, The thermodynamics of the $Mg_2Si_2O_6$ - $CaMgSi_2O_6$ join: a review and a new model. Advances in Physical Geochemistry, Vol. 1 (R. C. Newton, A. Navrotsky and B. J. Wood, eds.) Springer-Verlag, New York.
- [27] Hewins, R. H., 1975, Pyroxene geothermometry of some granulite facies rocks, Contr. Min. Petr., 50,

205-209.

[28] Wilson, A. F., 1976, Aluminium in coexisting Pyroxenes as a sensitive indicator of changes in metamorphic grade within the mafic granulite terrane of the Fraser Range, Western Australia, *Contr. Min. Petr.*, 56, 255-277.

[29] Wood, B. J., 1975, Influence of Pressure, temperature and bulk composition on the appearance of garnet in orthogneiss; an example from South Harris, Scotland, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 26, 299-311.

[30] Weaver, B. L. and Tarney, T., et al., In *Archaean Geochemistry* (ed. B. F. Windley and S. M. Naqvi), Elsevier, Amsterdam.

[31] Perchuk, I. L., 1969, The effect of temperature and Pressure on equilibrium of natural ironmagnesium minerals, *Intern. Geol. Rev.*, II: 875-901.

[32] Saxena, S. K., 1969, Distribution of Fe and Mg between coexisting garnet and biotite, *Contr. Min. Petr.*, 22, 259-267.

[33] Wood, B. J., 1974, The solubility of alumina in orthopyroxene coexisting with garnet, *Contr. Min. Petr.*, 46, 1-15.

[34] Morse, S. A., 1970, Alkali feldspars with water at 5Kb Pressure, *Jour. Petr.*, II: 221-253.

[35] Ghent, E. D., 1976, Plagioclase-garnet- Al_2SiO_5 -quartz; a potential geobarometer-geothermometer, *Amer. Min.*, 61, 710-714.

[36] 温克勒, 1980, 变质岩成因, 科学出版社。

[37] Rensen, B. J., 1971, Theoretical Phase relations involving cordierite and garnet in the system $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, *Contr. Min. Petr.*, 33, 191-214.

[38] Newton, R. C., Charlus, T. V., et al., 1974, A calorimetric investigation of stability of anhydrous magnesium cordierite with application to granulite facies metamorphism, *Contr. Min. Petr.*, 44, 295-311.

[39] Newton, R. C., 1972, An experimental determination of the high-Pressure stability limits of magnesium under wet and dry condition, *J. Geol.*, 80, 398-420.

[40] Newton, R. C., 1978, In *Archaean Geochemistry* (ed. B. F. Windley and S. M. Naqvi), Elsevier, Amsterdam.

[41] Newton, R. C., Perkins, D., 1982, Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz, *Amer. Min.*, 67, 203-222.

[42] Wells, P. R. A., 1979, Chemical and thermal evolution of Archaean static crust, southern West Greenland, *J. Petrol.*, 20, 187-226.

Mineralogy and P-T Conditions of Crystallization in the Rocks of Granulite Facies from Baotou-Hujigou Area

Cui Wenyuan

Li Wanbing*

Shu Guiming

(Department of Geology, Beijing University)

Key words: metamorphism; temperature; pressure; geothermometer; geobarometer

Abstract

The widely distributed Archaean rocks of Wulashan Group in the area

mainly belong to granulite facies. The rocks of Wulashan Group consist of granulite, granulitite and amphibole-plagioclase-gneiss in lower unit. The rocks of middle unit are composed of biotite-amphibole-plagioclase-gneiss, intercalated with granulite, amphibolite and magnetite-quartzite. The rocks of upper unit consist of biotite(or amphibole) -plagioclase-gneiss, quartzite, cordierite-bearing-sillimanite-garnet-K-feldspar-gneiss and marble intercalated with magnetite-quartzite. Energy dispersive X-ray spectrometer and wet. chemical analysis were carried out on orthopyroxene, clinopyroxene, garnet, amphibole, biotite and plagioclase from the rocks. It appeared that chemical equilibrium was approximated. Metamorphic crystallization temperatures, obtained by the Wood-Banno, Nehru-Wyllie and Lindsley-Dixen two-pyroxene geothermometer method fall in the range 768–857°C. Metamorphic temperatures obtained by the Perchuk's amphibole-orthopyroxene, biotite-clinopyroxene geothermometers diagrams range from 700–835°C. Metamorphic temperatures by Saxena's garnet-biotite geothermometer diagram range from 770–820°C with a mean of 795°C. Pressure calculated by Wood garnet-orthopyroxene geobarometer method is 9.9×10^8 Pa. Pressure calculated by Newton-Perkins and Wells garnet-orthopyroxene-plagioclase geobarometer methods range from 8.3 to 10.1 with a mean of 9.2×10^8 Pa.

*Institute of Geology, Academia Sinica.