

内蒙古喀喇沁地区早中生代闪长岩中麻粒岩捕虏体矿物化学及变质温压条件

韩庆军¹ 邵济安²

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 北京大学地质系, 北京 100871)

摘要: 在内蒙古东部喀喇沁地区早中生代大营子闪长岩中首次发现基性麻粒岩捕虏体. 初步研究表明它们不同于华北克拉通地表出露的前寒武纪麻粒岩. 根据其主要造岩矿物斜方辉石、单斜辉石、黑云母及斜长石的电子探针分析结果, 重点研究了各主要造岩矿物的化学成分特点, 并讨论了麻粒岩捕虏体的变质作用温压条件. 研究结果表明, 捕虏体岩石的变质作用已达麻粒岩相, 其变质作用条件约为 850~900 °C, 0.6~1.0 GPa. 这些麻粒岩捕虏体反映了研究区早中生代下地壳的组成特点, 为恢复该区早中生代深部地壳结构提供了依据.

关键词: 麻粒岩; 捕虏体; 矿物化学; 早中生代; 内蒙古东部.

中图分类号: P585.3; P588.3 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)01-0021-07

作者简介: 韩庆军, 男, 博士生, 1973年生, 主要从事构造地质学研究.

0 引言

麻粒岩作为大陆深部地壳物质成分的代表, 对探索地壳形成、演化及下地壳的性质具有重要意义. 以往人们主要通过出露于地表的前寒武纪麻粒岩了解下地壳, 但这些麻粒岩大都经历过复杂的构造演化与变质作用历史才抬升至地表. 相比之下, 捕虏体麻粒岩的演化历史要简单得多, 更能直接反映下地壳的性质, 因而也成为人们探索现今下地壳物质组成和演化的最直接对象.

在内蒙古东部喀喇沁旗大营子一带分布了一套早中生代闪长岩(全岩 K-Ar 年龄 205~225 Ma), 其中含有早中生代镁铁质—超镁铁质堆晶岩捕虏体^[1]. 最近, 笔者在闪长岩中又首次发现了基性麻粒岩捕虏体, 初步研究表明它们不同于华北克拉通出露的前寒武纪麻粒岩地体, 可能反映了该地区早中生代深部地壳的组成特点. 这一发现无疑为认识华北早中生代下地壳的形成与演化提供了依据. 本文着重介绍麻粒岩捕虏体的矿物化学特点, 并进一步讨论其变质作用温压条件.

1 样品与岩相学特征

笔者所采集的数十个麻粒岩捕虏体均被包裹于黑云母石英闪长岩中. 野外露头上呈不规则状、次圆状, 直径为 10~20 cm, 有的外面还包有一层薄的褐黄色的蚀变壳. 捕虏体新鲜颜色为灰—灰黑色, 个别由于浅色矿物和暗色矿物相间排列而呈弱条带状构造, 致密块状比重大.

镜下据其矿物组合特征可划分为二辉麻粒岩和单辉麻粒岩两类, 并以前者占多数. 二辉麻粒岩中主要的矿物组合为斜方辉石(15%~30%)、单斜辉石(20%~30%)、黑云母(小于 1%~10%)和斜长石(40%~50%). 而单辉麻粒岩主要组成矿物有单斜辉石(30%~40%)、黑云母(5%~10%)以及斜长石(40%~50%). 副矿物主要为磁铁矿、锆石和磷灰石, 偶见金红石. 岩石中主要矿物的粒径为 0.5~2 mm, 多数在 1 mm 左右, 具粒状变晶结构. 局部显示残余的火成结构, 如有些辉石上包有他形粒状斜长石颗粒, 还有少量斜长石呈不规则他形粒状充填等, 推测原岩为辉长质岩石. 重结晶的辉石矿物以他形粒状为主, 有时可见三联点结构. 斜长石以他形一半自形为主, 多数为粒状, 少量呈板状, 具聚片双晶和格子状肖钠双晶, 有些呈条带状分布. 岩石中黑云

图 1 喀喇沁旗大营子地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Dayingzi area in Harkin County

1. 太古宙片麻岩; 2. 元古宙; 3. 二叠纪花岗岩; 4. 燕山期花岗岩;
5. 早中生代闪长岩; 6. 辉长岩; 7. 辉石岩、苏长岩、斜长岩及角闪岩;
8. 麻粒岩捕虏体采样点; 9. 断层、推测断层及构造破碎带

母质量分数变化较大, 从小于 1% ~ 10%; 所有样品均不含角闪石和石榴子石, 且辉石矿物中无矿物包裹体, 这些特征使之区别于华北前寒武纪麻粒岩。

2 矿物化学特征

麻粒岩捕虏体的主要矿物为辉石、黑云母和斜长石。矿物的电子探针数据主要由北京大学地质学系电子探针室舒桂明测试, 仪器型号为日本岛津公

图 2 麻粒岩捕虏体中辉石成分的 $w(\text{Di}) - w(\text{Hd}) - w(\text{En}) - w(\text{Fs})$ 图^[2]

Fig. 2 $w(\text{Di}) - w(\text{Hd}) - w(\text{En}) - w(\text{Fs})$ diagram of pyroxenes in granulite xenoliths

- 单斜辉石; ○ 斜方辉石; A. 透辉石; B. 次透辉石; C. 顽透辉石;
D. 普通辉石; 1, 2 分别为与贫钙辉石共存的麻粒岩和火成岩单斜辉石的趋势线^[3]

司产的 EPM-810Q。测试条件: 加速电压 15 kV, 束流 3.8 nA。部分由中国科学院地质与地球物理研究所电子探针室韩秀玲分析, 仪器型号为法国产 CAMEBEX SX51, 测试条件: 加速电压 15 kV, 束流 20 nA。测试结果见表 1。限于篇幅, 表中未列出阳离子数。

2.1 辉石

辉石是麻粒岩捕虏体中最重要的造岩矿物之一, 其中包括斜方辉石和单斜辉石。据 Deer 等^[3]分类方案, 斜方辉石为紫苏辉石, 而单斜辉石属普通辉石和次透辉石(图 2)。

2.1.1 斜方辉石 麻粒岩捕虏体中斜方辉石的镁铁比值 $X_{\text{Mg}} = w(\text{MgO}) / [w(\text{MgO}) + w(\text{FeO})]$ 为

图 3 麻粒岩捕虏体中辉石及黑云母的 $w(\text{MgO}) - w(\text{FeO})$ 变异

Fig. 3 $w(\text{MgO}) - w(\text{FeO})$ diagrams of pyroxene and biotite in granulite xenoliths

- + 前寒武纪地体麻粒岩; ○ 汉诺坝玄武岩中麻粒岩捕虏体; ● 本区麻粒岩捕虏体; △ 堆晶岩捕虏体; □ 澳洲北昆士兰麻粒岩捕虏体; ◇ 山东金伯利岩



表 1 基性麻粒岩捕虏体主要造岩矿物的平均化学成分及变质温度

Table 1 Compositions of main rock-forming minerals in mafic granulite xenoliths and equilibrated temperatures

$w_B/\%$	Hn8-1			Hn8-2			Hn9				Hn11-1			
	Opx	Cpx	Bio	Opx	Cpx	Bio	Opx	Opx	Cpx	Bio	Plg	Opx	Cpx	Bio
SiO ₂	51.86	52.26	38.00	51.66	51.35	38.58	52.55	52.30	52.02	38.93	48.56	52.50	51.94	38.21
TiO ₂	0.06	0.13	2.47	0.05	0.26	2.41	0.06	0.09	0.17	1.96	0.06	0.02	0.23	4.97
Al ₂ O ₃	1.11	2.31	15.18	1.28	1.84	14.20	1.49	1.81	2.57	15.48	31.89	0.47	1.88	13.75
Cr ₂ O ₃	0.02	0.03	0.15	0.02	0.05	0.16	0.01	0.16	0.07	0.07	0.38	0.04	0.00	0.05
FeO*	22.87	8.20	12.38	23.30	9.73	11.38	22.58	23.21	9.90	10.97	0.00	22.59	12.31	14.74
MnO	0.39	0.22	0.03	0.47	0.21	0.02	0.25	0.31	0.28	0.00	0.00	0.24	0.34	0.00
MgO	22.65	14.33	18.28	21.24	14.03	18.44	22.02	21.63	14.76	19.04	0.17	22.67	15.90	14.94
CaO	0.49	22.28	0.25	0.81	21.38	0.00	1.00	1.07	20.82	0.17	15.27	0.73	17.02	0.23
Na ₂ O	0.03	0.15	0.35	0.25	0.36	0.32	0.17	0.03	0.38	0.42	2.74	0.44	0.36	0.22
K ₂ O	0.01	0.01	9.61	0.04	0.00	9.91	0.02	0.03	0.07	9.66	0.30	0.03	0.27	9.70
total	99.49	99.94	96.70	99.12	99.23	95.42	100.15	100.64	101.02	96.70	99.37	99.73	100.29	96.81
Wo(An)	0.010	0.458		0.017	0.441		0.021	0.022	0.424		0.742	0.015	0.349	
En(Ab)	0.632	0.410		0.609	0.403		0.611	0.611	0.418		0.241	0.632	0.454	
Fs(Or)	0.360	0.130		0.380	0.160		0.368	0.368	0.157		0.020	0.353	0.197	
X _{Mg}	0.50	0.64	0.60	0.47	0.59	0.62	0.50	0.48	0.60	0.63		0.50	0.56	0.50
$w(Mg)/w(Fe)$			2.63			2.89				3.10				1.81
$t_{wb}/^{\circ}C$		916.4			912.2				957.0				921.9	
$t_w/^{\circ}C$		946.8			951.8				1017.9				946.4	

$w_B/\%$	Hn11-2				Hn12*			Hn7			Hn10		
	Opx	Cpx	Bio	Plg	Opx	Opx	Cpx	Cpx	Bio	Plg	Cpx	Cpx	Bio
SiO ₂	52.14	52.83	36.84	56.01	52.15	51.40	51.06	52.42	37.56	54.24	50.59	50.66	37.14
TiO ₂	0.34	0.04	4.85	0.08	0.17	0.23	0.47	0.00	3.39	0.00	0.57	0.29	5.19
Al ₂ O ₃	1.14	1.02	14.19	27.51	0.75	0.83	1.68	1.70	14.59	29.38	3.26	2.88	14.77
Cr ₂ O ₃	0.05	0.04	0.11	0.00	0.39	0.04	0.00	0.05	0.18	0.00	0.16	0.08	0.09
FeO*	22.55	9.89	17.09	0.38	26.64	27.20	12.33	8.83	14.56	0.54	9.29	8.90	12.22
MnO	0.33	0.29	0.10	0.00	0.38	0.35	0.30	0.20	0.00	0.04	0.20	0.23	0.05
MgO	21.50	13.93	13.37	0.06	18.95	18.66	12.50	14.28	15.61	0.00	14.52	14.65	16.50
CaO	1.31	22.21	0.08	9.61	1.20	1.25	21.11	21.79	0.27	11.67	20.21	21.73	0.18
Na ₂ O	0.19	0.04	0.00	6.14	0.16	0.29	0.24	0.28	0.20	5.00	0.22	0.56	0.84
K ₂ O	0.02	0.05	9.05	0.43	0.02	0.00	0.08	0.05	9.29	0.06	0.12	0.01	9.32
total	99.57	100.30	95.68	100.22	100.81	100.25	99.77	99.55	95.65	100.93	99.14	99.99	96.30
Wo(An)	0.027	0.450		0.453	0.025	0.026	0.439	0.449		0.561	0.424	0.443	
En(Ab)	0.613	0.393		0.523	0.545	0.536	0.361	0.409		0.435	0.424	0.415	
Fs(Or)	0.360	0.157		0.024	0.430	0.438	0.200	0.142		0.003	0.152	0.142	
X _{Mg}	0.49	0.59	0.44		0.42	0.41	0.50	0.62	0.52		0.61	0.62	0.58
$w(Mg)/w(Fe)$			1.40						1.91				2.41
$t_{wb}/^{\circ}C$		891.2			855.9								
$t_w/^{\circ}C$		920.6			898.0								

注: FeO* 为全铁; * 为中国科学院地质与地球物理研究所电子探针室测试, 其余由北京大学地质学系电子探针室分析; t_{wb} 为以 Wood 等^[4]二辉石温度计的计算结果, t_w 为以 Wells^[5]二辉石温度计的计算结果。

0.41~0.50, 多数近于 0.5. 其 MgO 和 FeO* 质量分数在图 3 中落于华北地体麻粒岩斜方辉石^[2,6-10]和汉诺坝捕虏体麻粒岩斜方辉石^[11]之间, 相对于前者富 Mg 贫 Fe, 而较后者富 Fe 贫 Mg. 有关研究表明, 变质岩中斜方辉石的 CaO 质量分数不会超过 1.5%, 且 CaO 质量分数的增加反映其形成的温度增高^[12]. $w(MgO) - w(Al_2O_3) - w(SiO_2)$ 体系的实验研究表明, 斜方辉石中 Al₂O₃ 的质量分数随温

度升高而增加^[13], 在不与石榴子石共生的斜方辉石中, Al₂O₃ 质量分数随压力增加而增加^[14]. 本区麻粒岩捕虏体中斜方辉石的 CaO 质量分数均小于 1.5%, 为 0.49%~1.31%, 平均 0.98%; Al₂O₃ 质量分数为 0.47%~1.81%, 多数小于 1.5%. 和华北前寒武纪麻粒岩中斜方辉石相比, 显示了 CaO 高而 Al₂O₃ 和 Na₂O 低的特点(表 2), 反映其形成温度较高而压力稍低.

表 2 麻粒岩捕虏体与华北克拉通前寒武纪地体麻粒岩中辉石矿物平均成分比较

Table 2 Comparison of pyroxene compositions in granulite xenoliths with those in Precambrian granulite terrane from North China craton

样品地	斜方辉石						单斜辉石						
	样品数	$\omega_B/\%$					样品数	$\omega_B/\%$					
		MgO	FeO*	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O		MgO	FeO*	CaO	Al ^{VI}	Na	Ti
冀东 ^[2,6,7]	19	18.49	26.63	0.82	1.75	0.12	27	12.25	11.24	20.19	0.075	0.053	0.022
桦甸 ^[8]	5	16.60	29.62	0.72	1.14	0.28	3	12.17	11.90	21.13	0.013	0.059	0.007
水厂 ^[9]	7	18.24	24.90	1.30	1.63	0.13	4	12.76	10.63	19.84	0.062	0.038	0.006
赤峰 ^[10]	26	19.57	25.84	0.52	1.15	0.03	46	12.79	10.25	19.73	0.082	0.062	0.006
本区	8	21.19	21.37	0.98	1.11	0.02	9	14.32	9.95	20.95	0.019	0.021	0.007

紫苏辉石在变质岩中开始形成的温度较高,一般认为它标志着麻粒岩相的开始.然而,由于麻粒岩捕虏体的原岩可能是辉长岩类岩石,因此有必要判别这些斜方辉石是早期岩浆成因的还是经后期麻粒岩相变质作用形成的. Dobretsov 等^[15]曾提出以下判别式来判断斜方辉石的成因(式中元素符号代表辉石结构式中的相应阳离子数, Fe^{3+} 校正采用郑巧荣^[16]方法,以下同):

$$D(x) = -13.5 + 59.6Al^{IV} + 16.6 N(Fe^{3+}) + 21.2 N(Fe^{2+}) + 15.9 N(Mn) - 5.12 N(Mg) + 0.9 N(Na). \quad (1)$$

若 $D(x)$ 大于 0, 为麻粒岩相(无石榴子石)的辉石; 若 $D(x)$ 小于 0, 为岩浆成因辉长岩类的辉石. 本区捕虏体麻粒岩斜方辉石 $D(x)$ 均大于 0, 表明为麻粒岩相变质成因. 另外, Bhattacharyya^[17] 曾据 Al_2O_3 和 $(MgO + FeO + Fe_2O_3)$ 的质量分数来区分火成和变质成因的斜方辉石, 认为 $[\omega(MgO) + \omega(FeO) + \omega(Fe_2O_3)] + 0.775 \omega(Al_2O_3)$ 大于 44.304 者为变质成因, 反之则为岩浆成因. 本区斜方辉石该值均大于 44.304, 进一步说明为麻粒岩相变质作用产物.

据 Dobretsov 等^[18] 的数理统计, 斜方辉石的形成条件综合反映在其成分上, 并提出以下判别式:

$$D(x) = -4282 + 683 N(Si) + 2192 N(Al^{VI}) + 2182 N(Fe^{3+}) + 1455 N(Mn) + 1442 N(Mg) + 1427 N(Ca) + 1700 N(Na + K). \quad (2)$$

认为 $D(x)$ 大于 0, 属高温麻粒岩相; $D(x)$ 小于 0, 属角闪麻粒岩相. 本区麻粒岩捕虏体斜方辉石 $D(x)$ 值均大于 0, 显示其形成温度较高, 已达高温麻粒岩相.

2.1.2 单斜辉石 麻粒岩捕虏体中单斜辉石成分见表 1. 总的来说, 显示了富 Mg、贫 Fe、低 Al、Ti、Na 的特点. 单斜辉石镁铁比值 X_{Mg} 为 0.5~0.64. 在 $\omega(MgO) - \omega(FeO^*)$ 图中, 其 MgO、FeO* 质量分

数明显不同于华北前寒武纪地体麻粒岩中单斜辉石, 而与河北汉诺坝玄武岩中麻粒岩捕虏体单斜辉石相近. 实验资料表明, 单斜辉石的 Al^{VI} 、Na 质量分数一般随压力增大而增加^[2,19]; CaO 质量分数可反映温度变化趋势, 随温度降低而增高, 而压力对它的影响在 1000 °C 以下可忽略不计^[20]; Ti 的效应与 Na 正相反, 随压力增大, 钛辉石分子质量分数减少, 当压力大于 1 GPa 时, 它们不出现^[19]. 本区麻粒岩捕虏体中单斜辉石 Al 质量分数较低, 其中 $\omega(Al^{VI})$ 为 0.028%~0.103%, 平均 0.074%, 大于 Al^{IV} 平均质量分数(0.019), 且二者未见明显相关关系. CaO 质量分数为 17.0%~22.4%. Na 的质量分数变化较大, 从 0.003%~0.040%, 平均 0.021%, Na 和 Al^{VI} 呈负相关关系. Ti 的质量分数很低, 平均为 0.007%. 和华北地体麻粒岩中单斜辉石相比, 本区单斜辉石 CaO 质量分数略高, 而 Al^{VI} 、Na 质量分数低(表 2), 暗示它们形成的温度略高而压力低, 但 Ti 的质量分数相近, 可能又暗示压力不会太低. 按矿物化学成分计算端元分子, 单斜辉石的硬玉分子($NaAl[Si_2O_6]$)很低, 最高也不超过 2%, 意味着其形成压力不会太高. 总之, 本区麻粒岩捕虏体中单斜辉石的化学成分特征表明其形成温度较高而压力低, 与斜方辉石成分反映结果相一致.

单斜辉石成分与寄主岩成因密切相关. Vejnar^[21] 曾采用 $\omega(Ti) - \omega(Al_2O_3)$ 和 $\omega(Si + Al) - \omega(Al_2O_3)$ 变异图将单斜辉石分为变质成因和岩浆成因两大类. 在这两种图解上, 本区单斜辉石均落入变质成因区(图 4). 以 Dobretsov^[15] 提出的判别单斜辉石成因类型的方法进行计算, 本区麻粒岩捕虏体中单斜辉石亦为麻粒岩相变质成因.

从图 2 中可以看出, 单斜辉石基本上均沿 Binns 所确定的麻粒岩相单斜辉石趋势线附近分布(据文献^[2]). 图中共生二辉石的关系与火成岩中的相似;



图4 麻粒岩捕虏体单斜辉石的 $w(\text{TiO}_2) - w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 $[\text{w}(\text{Si}) + \text{w}(\text{Al})] - w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 图解

Fig.4 $w(\text{TiO}_2) - w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ and $[\text{w}(\text{Si}) + \text{w}(\text{Al})] - w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ diagrams of clinopyroxenes in granulite xenoliths

a. 变质成因; b. 岩浆成因

二辉石投影点连线与 $w(\text{Wo}) - w(\text{En})$ 交于 $\text{Wo}_{70}\text{En}_{30}$ 与 $\text{Wo}_{80}\text{En}_{20}$ 之间, 这说明二辉石是平衡共生的^[22], 且与火成岩中二辉石的平衡共生相似^[3].

2.2 黑云母

麻粒岩捕虏体中普遍含有黑云母, 其质量分数小于 1%~10% 不等, 大多呈棕红色, 这是 TiO_2 质量分数高的标志. Ti 对云母, 尤其对黑云母的颜色有强烈影响. 一般 TiO_2 质量分数越高, 云母颜色越红^[8].

黑云母的化学成分见表 1. 从表中可以看出, 其成分上较富 Mg, 大多数 $w(\text{Mg})/w(\text{Fe})$ 比值大于 2, 已经属于金云母范畴. 在 $w(\text{MgO}) - w(\text{FeO}^*)$ 图解中, 明显较华北前寒武纪地体麻粒岩中黑云母^[8] 富 MgO 贫 FeO^* , 较山东金伯利岩中典型金云母^[23] 和本区同一寄主岩中所包堆晶岩捕虏体中金云母^[1] 贫镁富铁, 而和澳大利亚昆士兰基性麻粒岩捕虏体中黑云母^[24] 相当. 另外, 本区麻粒岩捕虏体中黑云母还显示了 Ti 高、Mn 低、 Al^{VI} 和 Si 都较低的特点. $w(\text{TiO}_2)$ 为 2.4%~5.2%, $w(\text{MnO})$ 为 0.0%~0.1% (多数小于 0.05%), $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 13.8%~15.2%, Al^{VI} 在以 22 个氧原子计算的化学式中为 0.00~0.19, Al^{IV} 相对较高, $w(\text{Al}^{\text{IV}})/w(\text{Si}) = 0.419\sim 0.469$, Al^{IV} 与 Al^{VI} 间未见明显相关关系.

黑云母的上述特点(Ti 高、Mn 低、 Al^{VI} 低)清楚地说明捕虏体变质作用已达麻粒岩相. Ti 高、Mn 低、 Al^{VI} 低正是麻粒岩相黑云母的特点^[8]. 许多研究者都证明了黑云母中 Ti 的质量分数是变质程度的



图5 麻粒岩捕虏体中黑云母 $w(\text{TiO}_2) - 100 w(\text{Fe}) / [\text{w}(\text{Fe}) + \text{w}(\text{Mg})]$ 图解

Fig.5 $w(\text{TiO}_2) - 100 w(\text{Fe}) / [\text{w}(\text{Fe}) + \text{w}(\text{Mg})]$ diagram of biotite in granulite xenoliths

函数, Ti 质量分数随变质程度增高而增加^[2]. 角闪岩相黑云母中 $w(\text{Ti})$ 一般小于 0.3% (以 22 个氧原子计算), 而麻粒岩相黑云母中 Ti 则较高^[25]. 本区麻粒岩捕虏体中黑云母 $w(\text{Ti})$ 一般都大于 0.3%, 最高者达 0.564%. 黑云母的 Al^{VI} 也是变质程度的函数, 低级变质岩中黑云母 Al^{VI} 高, 变质程度高则 Al^{VI} 低, 麻粒岩相黑云母的 $w(\text{Al}^{\text{VI}})$ 通常小于 0.55%, 非泥质麻粒岩相岩石的黑云母 Al^{VI} 更低^[25]. 本区黑云母 $w(\text{Al}^{\text{VI}})$ 最高也只有 0.19%, 远小于 0.55%. 另外, 在变质黑云母的 $w(\text{TiO}_2) - 100 w(\text{Fe}) / [\text{w}(\text{Fe}) + \text{w}(\text{Mg})]$ 图解中^[26], 黑云母样品的成分点均落在了麻粒岩相区(图 5). 因此, 可以说本区捕虏体麻粒岩中黑云母具有麻粒岩相的特点, 为麻粒岩相变质作用的产物.

2.3 斜长石

斜长石是麻粒岩捕虏体中主要浅色造岩矿物. 一般斜长石对于寄主岩石的化学组分、共生矿物和变质作用等都较敏感, 区域变质作用过程中形成的斜长石, 其 An 质量分数随温度升高而增加, 角闪岩相斜长石的成分主要为拉长石或中长石范围, 麻粒岩相者则可达倍长石、拉长石范围^[27]. 据斜长石化学成分计算其端元化学组成, 本区麻粒岩捕虏体中斜长石 An 为 42~74, 分别为中长石、拉长石和倍长石(表 1).

3 变质作用温压条件讨论

从上述矿物化学的讨论可知, 大营子闪长岩中所包麻粒岩捕虏体的主要造岩矿物均为麻粒岩相变质作用的产物, 且主要的镁铁质矿物是平衡共生的, 因此, 可以利用现有的地质温度计进行变质作用温

度估算. 由于共生矿物组合的限制, 本文主要应用 Wells^[5]和 Wood 等^[4]的二辉石温度计进行估算. 估算结果见表 1. 以 Wood 等^[4]方法估算结果分布于 856~956 °C, 而以 Wells^[5]方法估算的结果分布于 900~1 018 °C, 较前者系统高出 30~50 °C. 鉴于许多研究人员认为这两个温度计计算结果比实际温度约高 60 °C^[28], 因此, 本区麻粒岩捕虏体的变质温度应在 850~900 °C.

由于矿物组合中均无石榴子石和角闪石, 目前尚没有合适的压力计可用来计算其平衡压力. 但 Green 等^[29]的实验结果认为单斜辉石 + 斜方辉石 + 斜长石的稳定矿物组合在 900 °C 条件下不应超过 1.2 GPa. Irving^[30]和 Rushmer^[31]的高温高压实验结果均表明二辉石和斜长石的矿物组合在 0.6~1.1 GPa 和约 1 100 °C 的温压环境中保持稳定. Halliday 等^[32]也认为不含石榴子石的麻粒岩形成深度不会大于 30 km. 本区大多数麻粒岩捕虏体具有二辉石 + 斜长石矿物组合, 且单斜辉石的钛辉石分子质量分数极低, 表明其平衡压力应在 0.6~1.0 GPa, 这也与它们所处的下地壳层位相一致.

4 结论

由矿物化学特点的讨论可知, 大营子闪长岩中深部地壳捕虏体是麻粒岩相变质作用产物, 其主要镁铁质造岩矿物单斜辉石、斜方辉石、黑云母的化学成分特点以及矿物组合中角闪石、石榴子石的缺失等均表明其成因不同于华北前寒武纪麻粒岩. 此麻粒岩捕虏体变质作用温压条件大约为 0.6~1.0 GPa, 850~900 °C, 和前寒武纪地体麻粒岩相比, 变质温度略高而压力稍低. 这套麻粒岩捕虏体包于早中生代闪长岩之中, 反映了研究区早中生代下地壳组成, 为研究当时深部地壳的形成与演化提供了依据.

参考文献:

[1] 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 等. 内蒙古东部早中生代堆积杂岩捕虏体的发现[J]. 科学通报, 1999, 44(5): 478~485.
 [2] 张儒媛, 从柏林. 冀东迁西地区早太古代麻粒岩的矿物化学和结晶的 P-T 条件[J]. 中国科学, 1981, 7: 855~868.
 [3] Deer W A, Howie R A, Zussman J. Rock-forming

minerals. 2nd. Single-chain Silicates. Longman: Longman Group Limited, 1978.

- [4] Wood B J, Banno S. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationship in simple and complex systems. *Cont Mineral Petro*, 1973, 42: 109~124.
 [5] Wells R J. Pyroxene thermometry in simple and complex systems [J]. *Contr Mineral Petro*, 1977, 62: 129~139.
 [6] 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清, 等. 中国早前寒武纪麻粒岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1992.
 [7] 贺高品, 卢良兆. 冀东和内蒙古东南部早前寒武纪变质作用演化 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 1991.
 [8] 阎月华, 翟明国. 吉林桦甸太古代杂岩的矿物化学和变质作用温压条件 [J]. *岩石学报*, 1988, 3: 16~27.
 [9] 靳是琴, 李殿超. 华北麻粒岩相岩石中的辉石 [J]. *长春地质学院学报*, 1986, 2: 30~36.
 [10] 王时麒, 孙承志, 崔文元, 等. 内蒙古赤峰地区金矿地质 [M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1994. 150~159.
 [11] 陈绍海, 张国辉, 周新华, 等. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩类捕虏体的岩石学特征 [J]. *岩石学报*, 1998, 14 (3): 366~379.
 [12] 李殿超. 冀东地区变质岩中斜方辉石的研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 1995, 14(2): 185~190.
 [13] Boyd F R. A pyroxene geotherm [J]. *Geochim et Cosmochim Acta*, 1973, 37: 2533~2546.
 [14] Obata M. The solubility of Al₂O₃ in orthopyroxenes in spinel and plagioclase peridotites and spinel pyroxenite [J]. *Amer Miner*, 1976, 61: 804~816.
 [15] Dobretsov N L, Reverdatto V V, Sobolev V S, et al. Fatsii metamorfizma [M]. Moscow: Izd Nedra, 1970.
 [16] 郑巧荣. 由电子探针分析值计算 Fe³⁺ 和 Fe²⁺ [J]. *矿物学报*, 1983, (1): 55~62.
 [17] Bhattacharyya C. An evaluation of the chemical distinctions between igneous and metamorphic orthopyroxenes [J]. *Amer Miner*, 1971, 56: 499~506.
 [18] Dobretsov N L, Sobolev V S, Khlestov V V. The facies of regional metamorphism at moderate pressures [M]. Translated by Brown D A. Canberra: Aust Natl Univ, Dep Geol Publ, 1973.
 [19] Wood B J. The solubility of alumina in orthopyroxene coexisting with garnet [J]. *Contr Miner Petro*, 1974, 46: 1~15.
 [20] MacGregor I D, Basu A R. Geological problems in estimating mantle geothermal gradients [J]. *Amer Miner*, 1976, 61: 715~724.
 [21] Vejnar Z. Highly ferrous silicates from the Mutenin ferrodiorite ring intrusion, West Bohemia, Czech [J].

Ustred Ustav Geol Vestn, 1975, 50 (5): 265~273.

- [22] 阎月华. 几种镁铁矿物平衡共生的成分标志[J]. 地质科学, 1997, 32(3): 267~274.
- [23] 周作侠. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 1988, 3: 63~73.
- [24] Rudnick R L, Taylor S R. The composition and petrogenesis of the lower crust: a xenolith study [J]. J Geophys Res, 1987, 92: 13981~14005.
- [25] Guidotti C V. Micas in metamorphic rocks [J]. Reviews in Mineralogy, 1984, 13: 357~486.
- [26] 张儒媛, 从柏林. 矿物温度计和矿物压力计[M]. 北京: 地质出版社, 1983.
- [27] 叶慧文. 变质成因矿物研究的主要问题[J]. 长春地质学院学报, 1986, (1): 107~117.
- [28] Rollinson H R. Garnet-pyroxene thermometry and barometry in the Scourie granulites, NW Scotland [J]. Lithos, 1981, 14: 225~238.
- [29] Green D H, Ringwood A E. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation, its petrological applications [J]. Geochim et Cosmochim Acta, 1967, 31: 767~833.
- [30] Irving A J. Geochemical and high-pressure experimental studies of garnet pyroxenite and pyroxene granulite xenoliths from the Delegate basaltic pipes, Australia [J]. J Petrol, 1974, 15: 1~40.
- [31] Rushmer T. Experimental high-pressure granulites: some applications to natural mafic xenoliths suites and Archean granulite terranes [J]. Geology, 1993, 21: 411~414.
- [32] Halliday A N, Dickin A P. Formation and composition of the lower continental crust: evidence from Scottish xenoliths suites. J Geophys Res, 1993, 98 (B1): 581~607.

MINERAL CHEMISTRY AND METAMORPHIC $p-t$ CONDITIONS OF GRANULITE XENOLITHS IN EARLY MESOZOIC DIORITE IN HARKIN REGION, EASTERN INNER MONGOLIA AUTONOMOUS REGION, CHINA

Han Qingjun¹ Shao Ji'an²

- (1. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
2. *Department of Geology, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The mafic granulite xenolith was first reported to have occurred in Early Mesozoic diorite in Harkin region, Eastern Inner Mongolia Autonomous Region, China. The preliminary research indicates that the basic granulite xenoliths are different from the Precambrian granulite exposed on the earth surface of the North China craton. The electron microprobe analysis was performed of the four main rock-forming minerals: orthopyroxene, clinopyroxene, biotite and plagioclase, in comparison with those of Precambrian granulite terrain. The major focus is on the research into the chemical composition of various major rock-forming minerals. In addition, the metamorphic $p-t$ conditions for the granulite xenoliths are discussed. The research results show that the metamorphism of the xenoliths had reached the granulite facies at the metamorphic temperatures ranging from 850 °C to 900 °C and at the metamorphic pressures ranging from 0.6 GPa to 1.0 GPa. These mafic granulite xenoliths reflect the component features of the Early Mesozoic continental lower crust of the research region, providing some evidence for the reconstruction of the Early Mesozoic deep crustal structure.

Key words: granulite; xenolith; mineral chemistry; Early Mesozoic; Eastern Inner Mongolia Autonomous Region.