



论文

内蒙古东部早中生代麻粒岩捕虏体的岩石学及其构造意义

邵济安^{①②*}, 魏春景^①^① 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 地球与空间科学学院, 北京 100871;^② 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

* E-mail: wangcc@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2010-10-15; 接受日期: 2011-03-10

国土资源部科技专项(编号: SinoProbe-04-02)、国家自然科学基金(批准号: 90714008, 40972039, 40821002)和中国科学院矿产资源研究重点实验室资助

摘要 内蒙古赤峰和宁城地区早中生代闪长岩中发现了麻粒岩捕虏体, 其主要组成矿物为紫苏辉石、透辉石和斜长石, 含有少量的黑云母、角闪石及钛铁矿。麻粒岩具粒状变晶结构和弱片麻状构造。有些样品中出现大量由拉长石和蠕虫状紫苏辉石构成的交生结构, 并偶见中长石和拉长石颗粒周围发育由倍长石和蠕虫状紫苏辉石构成的环边, 指示早期可能存在过石榴石并分解于随后减压作用中。有些样品中出现变余辉长结构以及紫苏辉石内部存在叶片状透辉石, 说明其原岩为苏长岩或辉长岩。变质作用研究和温压计算表明该区麻粒岩捕虏体经历了如下变质演化过程: (1) 一套侵位于下地壳的辉长苏长岩发生等压冷却形成可能含有石榴石的高压麻粒岩; (2) 之后被闪长岩浆捕获并快速上升, 发生等温降压变成低压二辉麻粒岩; (3) 伴随闪长岩冷却结晶, 二辉麻粒岩发生等压降温, 发生了不同程度的退变质作用。由基性岩浆底侵作用形成的以辉石岩为主的堆晶岩和由辉长-苏长岩冷却形成的中-高压麻粒岩共同组成了该区早中生代更新的下地壳。

关键词早中生代
麻粒岩捕虏体
下地壳
华北克拉通

麻粒岩相的变质岩通常被看作下地壳的产物。前寒武纪的地体麻粒岩经历了长期复杂的变动, 记录了不同阶段的变质历史。以捕虏体形式存在的显生宙麻粒岩则反映了显生宙以来下地壳经历的热事件, 可以看作研究下地壳的探针。前人对分别在内蒙古赤峰和宁城地区发现的麻粒岩捕虏体作了研究和报道, 其 U-Pb 年龄为 251~236 Ma, 是被早中生代 223~218 Ma 的闪长岩捕获的^[1~4]。这些年龄的精度不同, 但是可以表明, 它们基本上是早中生代的产物。本文将侧重麻粒岩变质作用的研究, 探讨麻粒岩的

原岩和变质作用的 P - T 轨迹。目前对华北早中生代下地壳变质作用的研究还十分有限, 本文试图通过变质作用过程的研究, 对该区早中生代构造热演化的背景有进一步了解, 从而对华北中生代岩石圈的增生和减薄有一个更加全面的认识。

1 麻粒岩产出的构造背景

本文讨论的麻粒岩产出内蒙古赤峰以南的宁城地区及赤峰以西 40 km 的柴胡栏子, 前者受控于华北

克拉通内部中晚元古燕辽沉降带北缘的隆化-黑里河-建平深断裂; 后者受控于华北克拉通和古生代兴蒙造山带之间的赤峰-开原断裂. 这两条均为自元古代以来长期活动的岩石圈断裂(图 1), 它们是本区麻粒岩形成的重要构造背景.

宁城黑里河北侧的河南营子麻粒岩捕虏体保存在早中生代以二长闪长岩、黑云母石英闪长岩为主的闪长岩侵入体中, 闪长岩沿黑里河断续出露约 75 km². 除了麻粒岩捕虏体外, 侵入体中还捕获了较多的堆晶岩捕虏体(如橄辉岩、辉石岩、辉长岩、斜长岩、角闪岩)^[4]及其他变质岩捕虏体(如斜长角闪岩、含石英的斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩等). 柴胡栏子麻粒

岩捕虏体出现在早中生代辉石闪长岩侵入体中, 闪长岩东西长 4 km, 南北宽 200~400 m.

2 早中生代麻粒岩的岩石学特征

本区麻粒岩捕虏体呈灰黑色, 次圆-浑圆状, 直径 10~20 cm, 外面多见一层褐黄色蚀变边, 隐约可见片麻状构造, 岩石致密, 比重大(图 2(a)). 捕虏体分布不均, 由于柴胡栏子闪长岩的粒度相对较粗, 抗风化能力弱, 麻粒岩捕虏体大多脱落呈滚石.

根据捕虏体的矿物组成特征可分为二辉麻粒岩和单辉麻粒岩, 以前者为主. 二辉麻粒岩主要矿物为

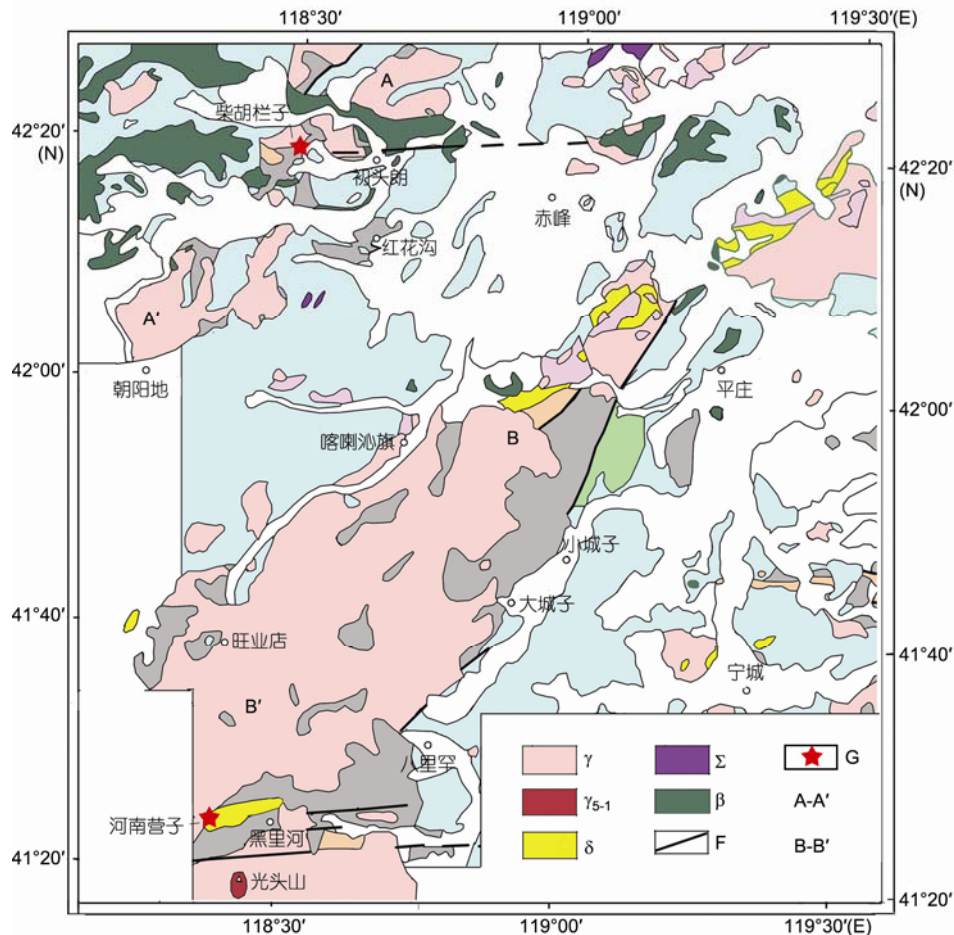


图 1 麻粒岩捕虏体分布的地质简图及构造背景图

γ, 显生宙花岗岩类; γ_{s-1}, 早中生代碱性花岗岩; δ, 闪长岩; Σ, 基性、超基性岩; β, 新生代玄武岩; F, 断层; G, 麻粒岩捕虏体样品点; A-A', 铭山隆起; B-B', 马鞍山隆起

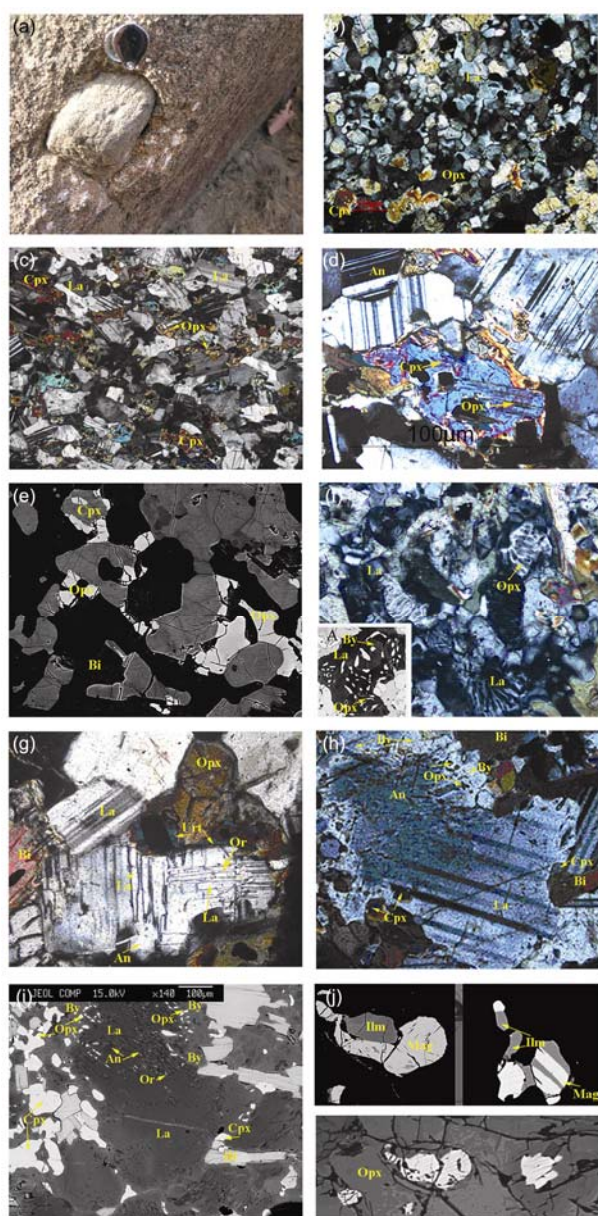


图2 麻粒岩捕虏体及其所含矿物

(a) 河南营子闪长岩中的麻粒岩捕虏体(HNY-1); (b) 麻粒岩的粒状变晶结构(chl-7-1); (c) 麻粒岩中的变余辉长结构(HNY-9); (d) 透辉石出溶的紫苏辉石叶片(HNY-11); (e) 左上角透辉石(暗色)内部为粒状紫苏辉石(浅色)以及透辉石外围和透辉石颗粒之间的紫苏辉石; (f) 由拉长石和紫苏辉石构成的交生结构(chl-5)(右下角为放大的背闪射图像, 隐约可见被环状紫苏辉石包围的略浅色的多边形矿物假象, 现为倍长石); (g) 斜长石的反条纹结构和紫苏辉石外缘的纤闪石; (h) 由中长石和拉长石组成的斜长石集合体外围有倍长石边(浅蓝色), 倍长石和其中蠕虫状紫苏辉石(暗绿色)组成的交生结构(HN20); (i) 同(h)范围的背闪射图像, 可进一步辨认中长石(最暗)和钾长石(最亮); (j) 平行连生的钛铁矿和含钛磁铁矿条带(上), 围绕金属矿物在紫苏辉石中形成的环形和放射状裂隙(下). Opx-紫苏辉石; Cpx-单斜辉石; By-倍长石; La-拉长石; An-中长石; Or-钾长石; Urt-纤闪石; Bi-黑云母; Ilm-钛铁矿; Mag-含钛磁铁矿

紫苏辉石(20%~30%)、次透辉石(15%~20%)、黑云母(<10%)、角闪石(5%~10%)斜长石(40%), 副矿物主要有磷灰石、锆石、不透明矿物等组成。此外, 显微镜下还可见到少量残存的橄榄石, 偶见金红石。单辉麻粒岩的透辉石含量占 30%~40%, 黑云母(<10%)、斜长石(40%~50%)。

麻粒岩以粒状的变晶结构为主(图 2(b)), 显示弱片麻状构造, 局部存在变余辉长结构(图 2(c))。矿物粒度多为细粒(1~0.1 mm)和微粒(<0.1 mm)为主, 自形程度不等。麻粒岩还出现反条纹长石、细粒交生结

构、出溶结构、筛状结构等。

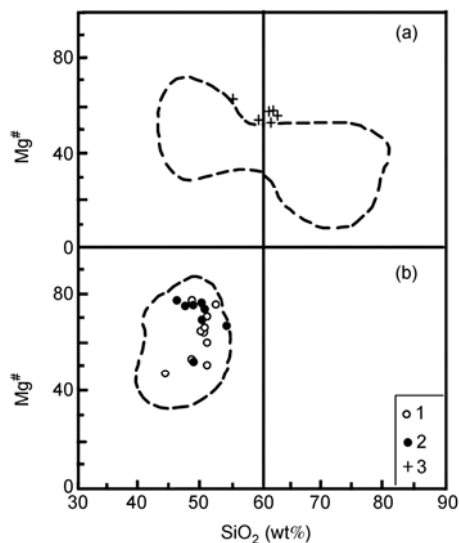
本区麻粒岩主要为一套基性镁铁质麻粒岩(表 1), $\text{SiO}_2=45\%\sim 52\%$, $\text{MgO}=4.23\%\sim 12.57\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=11.05\%\sim 19.95\%$, $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})=1.86\%\sim 4.3\%$, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3=0.31\sim 0.84$ 。多数麻粒岩含有 CIPW 标准矿物 q, di, hy, 部分含有 ol, $\text{Mg}^\#$ 值为 47~77。

在 SiO_2 对 $\text{Mg}^\#$ 的图解中(图 3), 本区早中生代麻粒岩捕虏体与张北汉诺坝新生代玄武岩(25~10 Ma)捕获的镁铁质麻粒岩捕虏体^[5]一起落入世界范围的麻粒岩变化区域(图 3(b)虚线所圈闭的范围)^[6]。相比

表 1 麻粒岩捕虏体的主元素和 CIPW 标准矿物含量(wt %)^{a)}

样品	HNy-1	Hn1	HN20	Hn12	Hn11	CH1	CH3	chl-7	chl-5	chl-4
SiO ₂	44.95	48.55	50.85	51.68	52.34	50.35	48.79	51.11	51.32	51.75
TiO ₂	1.37	0.39	1.46	0.86	0.38	0.59	1.51	0.94	0.73	0.53
Al ₂ O ₃	19.95	14.42	16.98	17.38	13.72	10.56	17.36	11.05	11.91	16.36
Fe ₂ O ₃	11.93*	0.96	2.76	5.55	0.41	11.11*	11.42*	5.47	5.10	4.29
FeO		7.38	8.02	3.76	7.53			7.06	6.90	4.71
MnO	0.20	0.26	0.24	0.17	0.27	0.21	0.17	0.16	0.18	0.14
MgO	4.23	12.57	8.36	5.89	11.19	8.33	4.95	10.15	11.96	7.96
CaO	11.85	10.84	5.33	8.45	8.50	16.70	9.40	9.76	9.26	10.30
Na ₂ O	2.27	1.32	0.68	3.62	0.62	0.48	2.21	1.05	1.47	1.86
K ₂ O	0.88	1.33	2.96	0.67	2.55	0.40	1.48	0.81	0.43	0.38
P ₂ O ₅	1.28	0.10	0.71	0.33	0.10	0.58	1.28	0.21	0.14	0.28
烧失量	0.67	1.61	1.15	1.17	1.83	0.28	0.90	1.92	0.52	1.24
总量	99.58	99.73	99.5	99.53	99.44	99.47	99.59	99.69	99.92	99.80
q			8.60		2.98	5.52	2.51	5.33	2.03	4.70
pl	62.11	41.39	28.02	61.03	33.10	30.01	53.00	32.75	37.41	51.76
or	5.32	7.98	17.79	4.02	15.42	2.42	8.93	4.90	2.54	2.30
di	7.44	19.28		8.78	11.83	44.31	4.40	19.99	16.63	11.67
hy	6.38	13.31	32.90	20.32	33.10	11.96	21.74	30.72	35.94	25.08
ol	9.38	14.34		0.52						
Mg [#]	47	77	64	60	76	65	52	65	70	52

a) 除了 chl-7 是单辉麻粒岩外, 其余均为二辉麻粒岩, *代表 TFe_2O_3

图 3 麻粒岩的 SiO_2 对 $\text{Mg}^\#$ 图解^[6]

(a) 太古代麻粒岩; (b) 麻粒岩捕虏体. 1, 本区早中生代闪长岩中的麻粒岩捕虏体; 2, 汉诺坝玄武岩中镁铁质的麻粒岩捕虏体^[5]; 3, 建平地区太古代麻粒岩^[7]

之下, 本区麻粒岩捕虏体较汉诺坝麻粒岩捕虏体 $\text{Mg}^\#$ 的值略低, 而较辽西建平地区太古代麻粒岩^[7] 基性程度高. 从表 1 来看, 河南营子麻粒岩比柴胡栏子麻粒岩 SiO_2 含量偏低, 而且变化大, 其中 Ca, Mg 和 Al 含

量变化较大. 这与两地背景不同有关, 与河南营子麻粒岩一起被闪长岩捕虏的还有基性、超基性堆晶岩捕虏体, 而柴胡栏子目前发现较多的是角闪质岩石捕虏体, 推测两地麻粒岩的变质原岩组成略有不同, 据余宏全研究^[3], 认为柴胡栏子角闪质岩石早期也是堆晶岩.

3 麻粒岩的矿物学特征

本区麻粒岩主要组成矿物包括: 紫苏辉石、透辉石、斜长石、黑云母、角闪石、钛铁矿、磁铁矿等.

3.1 紫苏辉石

本区麻粒岩捕虏体所含的斜方辉石绝大部分为紫苏辉石(图 4, 5). 紫苏辉石浅棕色, 呈短柱状或他形粒状. 其矿物组分的范围为: $\text{En}=67\%\sim54\%$, $\text{Fs}=31\%\sim42\%$, CaO 含量 $0.16\%\sim1.5\%$, Al_2O_3 含量 $0.3\%\sim1.8\%$. 根据成分和结构特征可将紫苏辉石分成 3 类(表 2):

I 类为富钙紫苏辉石其 $\text{CaO}>1\%$, 可出溶透辉石晶片或保留橄榄石的残留体.

II 类紫苏辉石分布在单斜辉石内部(图 2(d)), 或者呈粒状分布在单斜辉石之间(图 2(e)), 在背闪射图像中紫苏辉石外围往往具有铁含量相对增高的亮边.

这类紫苏辉石在成分上相对低钙(介于 0.7%~1%), 在图 4 中主要为变质成因, 个别落入岩浆与变质成因区的界线处。

III类紫苏辉石指的是与斜长石交生的蠕虫状紫苏辉石。这种紫苏辉石-斜长石交生也可能被看作后成合晶, 因为它可以被解释成由以前形成的矿物, 例如石榴子石分解而形成的^[9]。然而当之前形成的矿物都消失了时, 采用交生一词来描述这种结构更合适。在麻粒岩捕虏体中有两种紫苏辉石-斜长石的交生结构: 一种是拉长石和紫苏辉石组成的, 纺锤状的紫苏辉石出现在早期矿物形成之后(图 2(f)), 或者如图 2(f)右下角的背闪射图像所示, 紫苏辉石围绕着目前是倍长石的多边形晶体分布。另一种是紫苏辉石和倍长石的交生结构, 倍长石作为边缘存在于由中长石和拉长石组成的斜长石外围(图 2(h), (i))。

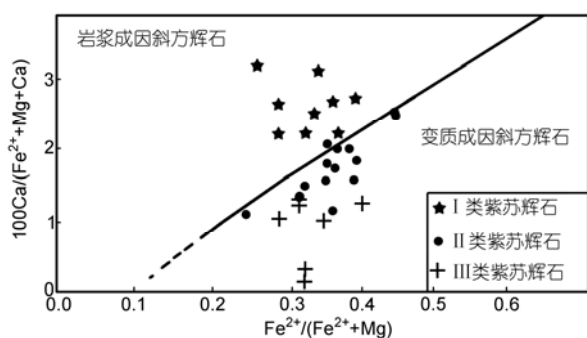


图 4 紫苏辉石成因判别图解^[8]

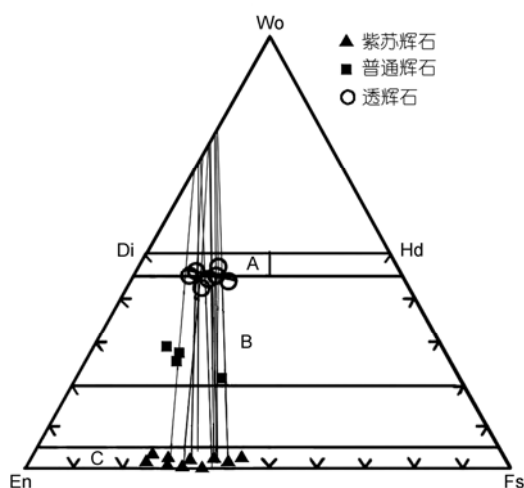


图 5 麻粒岩的辉石分类图

图中细线是共生 Opx-Cpx 成分图。A-透辉石; B-普通辉石; C-斜方辉石

纺锤形的紫苏辉石近于放射状分布在暗色的拉长石中。在背闪射图像中, 紫苏辉石集合体中心相对浅色的部分是图 2(f)右下角局部放大。这种紫苏辉石-斜长石交生结构通常被认为是石榴石麻粒岩的减压标志^[10]。

此外, 有些紫苏辉石颗粒外缘存在被蚀变成纤闪石边(图 2(g)), 或者有些紫苏辉石残留在角闪石中, 表明它们都遭受了后期的退变质作用。

3.2 单斜辉石

根据结构和组分特征可将单斜辉石分成两类(图 5): I类为普通辉石, 出现在变晶结构发育的麻粒岩中, 其 $Wo=21\sim29$, 例如图 2(b)中一些他形粒状的普通辉石, 它们是作为残留的岩浆矿物形成于变质前的高温岩浆阶段(表 2)。

II类为透辉石, 大多半自形粒状, 有的包含在中长石内部, 有的与相邻的紫苏辉石、富钛的黑云母或斜长石共生, 或者显示出溶、交代等关系。在组分上, 它们以高钙、低镁为特征, $Wo=45\pm$, 明显区别于普通辉石。

3.3 斜长石

斜长石是麻粒岩中重要的组成矿物之一, 其中以较基性的拉长石为主(图 6), 按照斜长石的结构和组分可以分为以下 4 种:

I类是出现在变余辉长结构之中的拉长石, $An=61\sim68$ 。拉长石颗粒较粗大, 自形程度较好, 常见环带构造、卡-钠复合双晶, 双晶带单体较宽(图 2(c), (h))。II类是与紫苏辉石组成交生结构的拉长石、倍长石, $An=65\sim79$ (图 2(f))。常见这些交生结构环绕更富钙的倍长石生长。III类为中长石($An=45\sim48$)和拉长石。中长石作为暗色团块出现在拉长石中(图 2(h), (i)), 此类中的拉长石($An=50\sim56$), 低于 I类中的拉长石。此外, 拉长石中含有小颗粒的钾长石($Or=90\sim93$), 后者可能是早期富钾的斜长石出溶的(图 2(h), (i))。IV类是作为环带分布在斜长石集合体外缘的倍长石(图 2(h)), 也可见于交生结构核部的倍长石(图 2(f)左下角), 这类倍长石基性程度高, $An>80$ (表 2)。

3.4 黑云母

按产状和组分可将黑云母分为早、晚两期。早期棕红色黑云母 TiO_2 可高达 5%(表 2), 常包裹辉石和

表 2 麻粒岩中主要矿物的组分与结构特征^{a)}

分类	样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总量	组分特征	结构特征
Opx	chl-4-1	53.63	0.26	0.92	20.29	0.41	23.60	1.28	0.02	0.00	100.44	高钙高钛	含出溶钛铁矿-钛磁铁矿的高钙紫苏辉石
	HNY-23	53.54	0.19	0.89	21.10	0.31	23.24	1.57	0.04	0.01	100.91		
	Hn11-2	52.14	0.34	1.14	22.55	0.33	21.5	1.31	0.19	0.02	99.52		
	HN12-1	53.50	0.20	0.63	23.64	0.30	21.15	1.35	0.05	0.01	100.82	高钙富铁	出溶次透辉石
	chl 7-1	54.11	0.17	1.05	15.63	0.40	26.05	1.59	0.03	0.01	99.27	高钙高镁	与粒状普通辉石共生
	HN20-5	51.40	0.05	1.43	24.78	0.58	20.42	0.86	0.02	0.01	99.61	低镁高铁	交代结构发育的紫苏辉石
	Hn12	52.15	0.17	0.75	26.64	0.38	18.95	1.20	0.19	0.02	100.09		
	chl-5-1	54.09	0.12	0.98	20.16	0.23	24.36	—	—	0.01	100.62	低钙 镁偏高	和拉/倍长石组成交生结构的紫苏辉石
	chl-5-8	53.83	0.10	0.93	20.27	0.18	24.24	0.06	0.01	0.01	100.34		
	chl-5-9	53.81	0.10	0.88	20.06	0.19	24.49	—	—	—	100.20		
Cpx	chl-4-2	55.15	0.22	2.57	10.92	0.18	18.14	11.69	0.32	0.08	99.26	高镁低钙	粒状结构发育的普通辉石
	chl-7-1	50.19	1.21	8.10	8.09	0.14	17.00	12.04	1.04	0.52	99.29	Wo=21~29	
	HNY-1-2	51.54	0.63	2.56	8.47	0.34	13.97	21.69	0.49	0.02	99.71	高钙低镁	交代结构发育的透辉石
	HN20-3	51.24	0.12	2.80	10.21	0.28	12.81	22.04	0.33	—	99.89	Wo=45±	
	HN20-13	53.02	0.02	29.44	0.29	0.00	0.23	12.46	4.20	0.19	99.84	An=61	具变余辉长结构的拉长石
	chl-5-11	51.41	0.00	31.94	0.45	0.00	0.01	13.36	3.46	0.04	100.67	An=68	
Pl	chl-5-3	48.85	0.03	33.38	0.41	—	0.01	15.67	2.22	0.04	100.63	An=79	组成交生结构的拉/倍长石
	chl-5-4	52.72	—	30.81	0.35	0.01	0.01	12.78	3.84	0.05	100.64	An=65	
	HN12-4	59.03	0.02	25.09	0.06	0.00	0.01	10.10	5.80	0.31	100.43	An=48	与拉长石共生的中长石
	HN20-12	56.73	0.06	26.96	0.22	0.00	0.02	9.40	6.04	0.19	99.61	An=46	
	HN20-1	47.62	0.01	32.59	0.18	0.03	0.01	16.77	2.20	0.03	99.44	An=81	呈环带状于斜长石外缘或交生结构中心的倍长石
	chl-5-1	47.40	0.00	33.22	0.28	0.02	0.01	16.79	2.06	0.02	99.80	An=82	
	1 HN10-5	38.42	5.7	12.5	13.27	0.03	16.63	0.04	0.49	9.09	96.17	高钛	棕色富钛黑云母
	2 HN20-11	40.96	1.71	14.95	12.17	0.39	18.29	0.03	0.26	10.40	98.88	低钛	自形程度差
Am	chl-4-1	43.43	3.61	11.17	11.49	0.14	13.70	11.54	2.02	0.95	98.37	高钛	自形程度高
Urt	chl4-3	46.44	0.36	18.02	7.56	0.10	10.01	13.82	1.74	0.28	98.22	低钛	绕紫苏辉石外缘
Ilm	HNY-1	0.02	51.76	0.04	45.78	0.59	0.92		0.02		99.14	钛铁矿	大多呈平行的
Mag	HNY-2	0.04	2.3	0.91	92.38	0.07	0.16	—	0.05	—	95.91	磁铁矿	连生条带
Rt	Hn10-1	0.09	97.68	0.02	1.07	0.00	0.03	0.60	0.00	0.04	99.62		偶见的金红石

a) 矿物缩写同图 2, 样号为探针分析的矿物样品号, 与表 3 对应

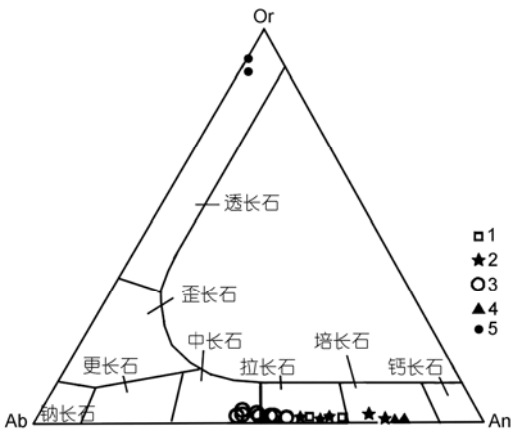


图 6 麻粒岩中长石的 Or-Ab-An 图解

1- I 类斜长石; 2- II 类斜长石; 3-III 类斜长石; 4-IV 类斜长石;
5-钾长石

长石等, 具黑云母的筛状变晶的特点. 晚期低的钛黑云母作为反应边镶嵌在早期黑云母周边(表 2).

3.5 角闪石

本区麻粒岩中存在早、晚两期角闪石, 早期角闪石自形程高, 为浅棕-浅黄色, 它们镶嵌于其他矿物之间, 或被其他矿物所包裹. 晚期角闪石为淡绿色, 呈环带状包裹着紫苏辉石周边. 本区所有的角闪石都属于钙质角闪石, 因为它们的 $(Ca+Na)_B \geq 1.34$, $(Na)_B < 0.67$. 相比之下, 早期角闪石高钛(TiO_2 达 3.61%); 晚期角闪石低钛(TiO_2 0.36%)(表 2).

3.6 不透明矿物

麻粒岩中不透明矿物以钛铁矿和磁铁矿为主,

它们作为各种形态的粒间颗粒出现或者被包裹在其他矿物内部。磁铁矿以高的 TiO_2 含量为特征。背闪射图像揭示钛磁铁矿和含钛磁铁矿成为平行连生的条带(图 2(j)下部), 偶见金红石(表 2)。显微镜下还见到被紫苏辉石所包裹的椭圆形的金属矿物集合体, 金属矿物由钛铁矿和含钛磁铁矿条带组成(图 2(j)上部), 在围绕着它们的紫苏辉石中发育了环形和放射状裂隙(图 2(j)下部)。这可以被解释为在金红石转变成钛铁矿和含钛磁铁矿过程中, 因体积膨胀所致(与王仁民教授私人讨论)。

4 麻粒岩的形成过程的初步认识

根据上述岩石学的研究, 对本区麻粒岩的形成过程可以得到一个基本的认识。麻粒岩从其原岩形成的高温岩浆阶段到作为捕虏体被闪长岩捕获之后的变质阶段, 可划分为 A~D 4 个阶段(图 7)。

4.1 辉长苏长岩阶段(A)

幔源岩浆底辟体侵入到下地壳并经历结晶分异作用, 形成了辉长岩、苏长岩等各种堆晶岩。作为典型代表的辉长-苏长岩中可出现普通辉石、紫苏辉石、拉长石、富钛磁铁矿或者橄榄石等。其中紫苏辉石富钙, 拉长石含有较高钾组分等, 都反映岩浆温度较高。根据堆晶岩和麻粒岩的捕虏体在高温、高压波速下测定的资料, 确定它们最初形成的深度为 37 km, 相当于 1.0 GPa^[15]。在这一压力条件下, 本文采用 Brey 和 Köhler^[16]给出的二辉石温度计, 其温度值为 1007~1104℃(表 3), 与 1.0 GPa 时玄武质岩浆的固相线温度^[12](约为 1100℃)基本一致。

4.2 中高压麻粒岩阶段(B)

在下地壳压力下, 辉长-苏长岩冷却可发生如下变质反应:

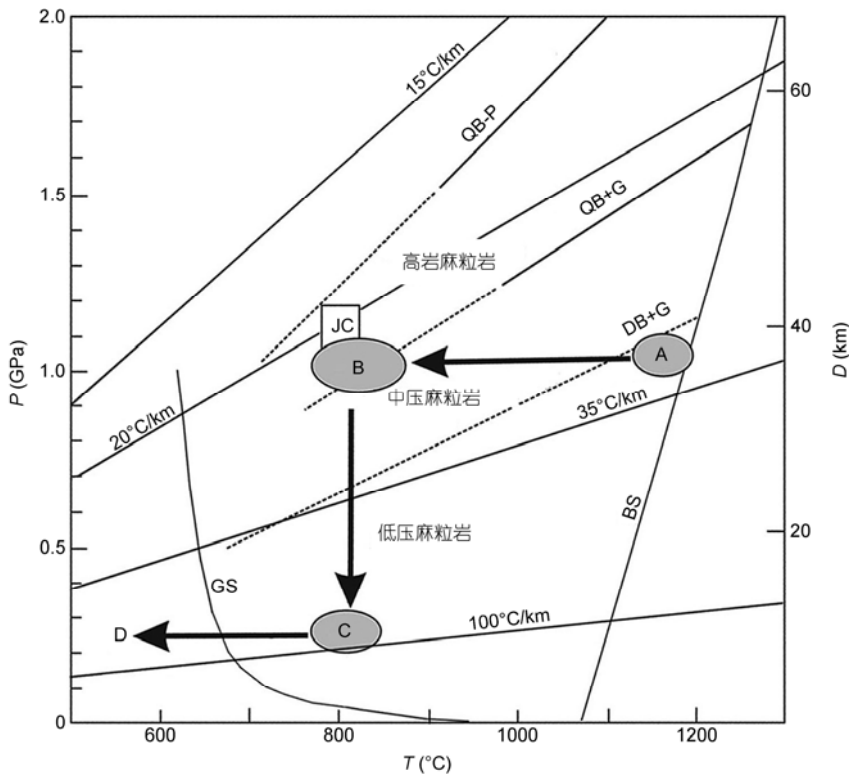


图 7 赤峰地区中生代麻粒岩包体 P - T 条件及其形成演化过程

OB+G 和 QB+G 分别为橄榄玄武岩和石英拉斑玄武岩中出现石榴石的反应线^[11], QB-P 为石英拉斑玄武岩中斜长石消失反应线(进入榴辉岩范围)^[11], BS 为基性岩干固相线^[12], GS 为花岗闪长岩饱和水固相线^[13], JC 为辽西建平早前寒武纪高压麻粒岩^[14]。A, 堆晶辉长岩阶段; B, 中高压麻粒岩阶段; C, 低压麻粒岩阶段; D, 退变阶段

表 3 二辉石温度计计算结果

Opx-Cpx 温度计计算结果 ^[16]									
Opx	chl-7-1	chl-4-1	HNy-23	chl5-2	Hn11-2	Hn8-2	Hn8-1	HN-20-7	Hn9
Cpx	chl-7-1	chl-4-1	HNy-1-1	chl5-2	Hn11-2	Hn8-2	Hn8-1	HN-20-10	Hn9
<i>T</i> (°C)	1007	1104	925	912	895	888	868	842	807

普通辉石+富钙斜长石(拉长石)→石榴石+单斜辉石(透辉石)+贫钙斜长石(中长石)(无橄榄石或含标准矿物石英)

橄榄石+富钙斜长石(拉长石)→石榴石+贫钙斜长石(中长石)(含有橄榄石)

形成高压麻粒岩组合: 石榴石+单斜辉石+中长石. 可能与岩石中缺少流体有关, 这一降温过程所发生的麻粒岩化并未达到平衡, 仍保留若干苏长岩的结构和矿物特征, 但是由于降温作用发生了一系列前述出溶变化. 根据 Green 和 Ringwood^[11]实验资料, 并结合本文的二辉石温度计, 确定这一阶段的 P - T 条件为 $T=800\sim 900^{\circ}\text{C}$ (表 3), $P=1.0\text{ GPa}$. 从 A 向 B 阶段过渡可看做近等压降温阶段.

4.3 低压麻粒岩阶段(C)

伴随闪长质岩浆的上侵, 下地壳的高压麻粒岩绝热抬升到地壳上部, 叠加了低压麻粒岩相的变质作用. 可能的变质反应为:

石榴石+中长石→紫苏辉石+倍长石(或拉长石)

具体表现为原来的石榴石结构域转变为紫苏辉石和拉长石或倍长石构成的交生体, 粗大的中长石和拉长石颗粒边缘出现由倍长石($An>80$)和紫苏辉石构成的环边(图 2(i)). 有些样品中钛铁矿和钛磁铁矿周围出现放射状裂纹, 暗示高压麻粒岩阶段可能存在的金红石随着压力降低转化为钛铁矿时发生过体积膨胀. 岩石中出现的富钛角闪石和黑云母也是这一阶段的产物, 它们可能与闪长质岩浆结晶晚期少量流体注入有关. 依据二辉石温度计算值为 807°C , 结

合闪长岩体的侵位深度, 确定这一阶段的 $T\approx 800^{\circ}\text{C}$, $P\approx 0.3\text{ GPa}$. 从 B 向 C 过渡的阶段基本上可以看作近等温降压阶段.

4.4 退变质阶段(D)

闪长质岩浆结晶后, 发生流体注入, 导致紫苏辉石发生纤闪石化, 原来的富钛角闪石和黑云母分解形成钛铁矿和低钛黑云母和角闪石等. 根据 Robertson 和 Willey^[13]实验资料, 其温度应低于 700°C .

5 小结

堆晶岩和麻粒岩捕虏体都形成于早中生代一段不长的(251~218 Ma)地质历史中, 同位素年龄记录了这段历史. 就是在这样一个较短的时间内, 在经历了一个近等温减压和近等压降温的过程之后, 早中生代麻粒岩作为捕虏体被闪长岩带到中-上地壳, 闪长岩及其中的麻粒岩捕虏体发生明显的退变质作用.

早中生代的堆晶岩和麻粒岩同是早中生代底侵作用的产物, 它们可能共同组成了早中生代更新的下地壳, 此时的太古代麻粒岩已经位于新增生地壳的上部^[17]. 在下地壳增生、变质过程中, 岩石圈断裂的控制作用是明显的, 在隆化-黑里河-建平断裂带西段张家口新生代大麻坪玄武岩中也发现了早中生代的麻粒岩^[18]. 它们记载了早中生代华北克拉通增生的历史, 它们和晚中生代华北克拉通的改造与减薄一样, 都是一段不可忽视的壳幔相互作用的历史.

致谢 感谢参与本文野外工作的侯青叶副教授和刘东盛同学以及协助进行探针分析的张文兰教授, 感谢给予有益讨论和启发的王仁民教授、罗照华教授, 感谢郭敬辉研究员对本文的详细修正.

参考文献

- 邵济安, 韩庆军. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2000, 30(增刊): 148-153
- 韩庆军, 邵济安. 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其变质作用温压条件. 地球科学, 2000, 25: 385-391

- 3 余宏全, 王义文, 李庆环, 等. 内蒙古赤峰柴胡栏子金矿基性麻粒岩包体特征及其成矿动力学意义. 地质学报, 2006, 80: 863–875
- 4 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. 科学通报, 1999, 44: 478–485
- 5 张国辉, 周新华, 孙敏, 等. 下地壳及壳幔过渡带化学不均一性. 地球化学, 1998, 27: 153–169
- 6 Rudnick R L. Xenoliths-samples of the lower continental crust. In: Fountain D M, Arculus R J, Kay S M, eds. The Continental Lower Crust. Amsterdam: Elsevier, 1992. 269–316
- 7 王长秋. 辽西-赤南一带太古代变质杂岩的地质特征和矿物学. 北京大学硕士研究生毕业论文, 1989. 11–21
- 8 Rietmeijer F J M. Chemical distinction between igneous and metamorphic orthopyroxenes especially those coexisting with Ca-rich clinopyroxenes, especially: A re-evolution. Min Mag, 1983, 47: 143–151
- 9 陈曼云, 金巍, 郑常青. 变质岩鉴定手册. 北京: 地质出版社, 2009. 17
- 10 Harley S L. The origins of granulites: a metamorphic perspective. Geol Mag, 1989, 126: 215–247
- 11 Green D H, Ringwood A E. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. Geochim Cosmochim Acta, 1967, 31: 767–833
- 12 Lambert I B, Wyllie P J. Melting of gabbro (quartz eclogite) with excess water to 35 kilobars, with geological applications. J Geol, 1972, 80: 693–708
- 13 Robertson J K, Willey P J. Experimental studies on rocks from the Deboullie Stock, northern Maine, including melting relations in the water deficient environment. J Geol, 1971, 79: 549–571
- 14 魏春景, 张翠光, 张阿利, 等. 辽西建平杂岩高压麻粒岩相变质作用的 P - T 条件及地质意义. 岩石学报, 2001, 17: 269–282
- 15 邵济安, 韩庆军. 内蒙古东部早中生代壳幔过渡带——捕虏体岩石高温高压下弹性波速实验证据, 中国科学 D 辑: 地球科学, 2000, 30(增刊): 154–160
- 16 Brey G P, Köhler T. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. J Petrol, 1990, 31: 1353–1378
- 17 邵济安, 等. 大兴安岭的隆起与地球动力学背景. 北京: 地质出版社, 2007. 30–89
- 18 Wilde S A, Zhou X, Nemchin A A, et al. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. Geology, 2003, 31: 817–820