

内蒙古中部太古界乌拉山岩群变质作用特征

贾和义 刘颖璠 张志祥 高宝明

(内蒙古自治区地质调查院, 呼和浩特 010020)

[摘要] 内蒙古中部太古界乌拉山岩群变质作用 $P-T$ 轨迹表现为顺时针形式, 峰期变质的温度为 $830\sim 948^\circ\text{C}$, 压力为 0.942 GPa 。是麻粒岩相变质作用发生于地壳大幅度增厚的环境, 强烈的构造变动和区域性高热流共同作用的结果。从第二阶段峰期变质到第三阶段近等温减压过程为区域性地壳减薄的开始, 直至第四期角闪岩相的退变质阶段显示出地壳大幅度减薄和抬升剥蚀的特点。

[关键词] 麻粒岩; 变质作用; 乌拉山岩群; 内蒙古中部

[分类号] P588.34

[文献标识码] A

太古界乌拉山岩群变质岩系分布于大青山地区, 西起包头, 向东延至呼和浩特市一带, 构成了阴山地区太古界麻粒岩相变质岩系的主体。近年来, 许多地质学家对该套岩系进行了较详细的研究, 取得了不少新的认识^{[1],[2]}; 作者曾在大青山地区呼和浩特市以北进行了不同比例尺的区域地质调查, 对乌拉山岩群变质岩系的变质温压条件研究取得了一些认识, 供参考。

1 区域地质特征

太古界乌拉山岩群由一套深变质岩系组成, 其麻粒岩和各种片麻岩系位于乌拉山岩群的下部层位, 而大理岩位于上部层位。麻粒岩和片麻岩是乌拉山岩群的主要岩石类型, 可分为含榴二辉麻粒岩、二辉斜长麻粒岩、石榴黑云片麻岩、角闪斜长片麻岩和长英质片麻岩等; 大理岩为辉石、橄榄石大理岩。

乌拉山岩群高级变质岩系特征变质矿物共生组合为紫苏辉石+透辉石+斜长石+石英; 紫苏辉石+透辉石+角闪石(棕色)+斜长石+石英; 紫苏辉石+钾长石+石榴石+石英; 角闪石(棕色)+斜长石+石榴石+石英等^[3]。

2 特征变质矿物

乌拉山岩群高级变质岩系特征变质矿物为斜方辉石、单斜辉石、石榴石、角闪石(棕色)、黑云母及斜长石等。

a 斜方辉石(Opx): 主要是紫苏辉石, 可分为峰期变质作用形成的紫苏辉石和峰期后形成的紫苏辉石。前者与单斜辉石和石榴石共生, 多数自形程度高, 沿片麻理广泛分布。后者受应力拉长而发生细颈化或形成辉石链。该类紫苏辉石分布于新生构造叶理带内。峰期变质的紫苏辉石显微镜下多具浅绿色(N_g)、浅红色(N_p)多色性, 变晶粒状半自形—它形晶, 具辉石式解理。粒度变化较大, 一般 $0.2\sim 1.0\text{ mm}$, 个别 $2.0\sim 5.0\text{ mm}$ 大小。多数平行消光, 有时为斜消光, 但消光角不超过 10° 。

电子探针分析结果表明, 峰期变质形成的紫苏辉石 Al_2O_3 为 $2.18\%\sim 2.38\%$, FeO 为 $24\%\sim 28\%$, CaO 在 $0.53\%\sim 2.18\%$ 之间。这一特点与太古宙麻粒岩区的斜方辉石基本类似, 属于贫钙的镁铁辉石。

b 单斜辉石(Cpx): 以透辉石和普通辉石为

[收稿日期] 2004-04-10

[基金项目] 中国地质调查局资助项目(20001300008051)

[作者简介] 贾和义(1955-), 男, 教授级高工, 主要事区域地质调查及综合研究

主。普通辉石赋存于暗色麻粒岩中, 常与斜方辉石共生。透辉石常赋存于二辉斜长麻粒岩中。单斜辉石多呈浅绿色, 粒度 0.5~2 mm 不等。单斜辉石 SD_2 为 50%~54%, AlO_3 在 2.41%~6.3% 之间, TD_2 在 0.11%~0.54% 之间, CaO 在 20%~22% 之间。其含铁度在不同的岩石中存在较大的差异, 低者为 15, 高者可达 90, 变化趋势有从超基性岩→中性岩→变质沉积岩逐渐增加的趋势。

c 角闪石(Hb): 角闪石主要分布在斜长角闪岩中, 此外在麻粒岩、角闪斜长片麻岩和变质基性脉岩中也有出现。按角闪石变质世代分为: 残留于石榴石晶体中的角闪石呈淡绿色, 晶体呈不规则状, 粒晶在 1~2 mm; 与紫苏辉石共生的角闪石呈棕红色, 粒径多数在 2~3 mm, 是区域性片麻理构造的主要暗色矿物; 由紫苏辉石退变质形成的角闪石多数分布于后期的构造破碎带内, 角闪石呈淡绿色, 粒径在 1~2 mm, 长轴定向形成叶理, 切割了早期的片麻理。

按化学成分特征, 角闪石(见表 1)划分为低铁韭闪石, 赋存于乌拉山岩群角闪斜长片麻岩、角闪岩中。其成分中 $Mg/(Mg+Fe^{+})$ 比值是本区角闪岩中最高的, 而硅离子数较低, 是变质温度高的一种; 另一种是低铁韭闪角闪石, 它们镁铁比值依

次降低, 反映了结晶温度依次降低的趋势。两种闪石光学性质上有差异, 前者呈红褐色, 后者从棕褐色-暗黄绿色-黑绿色。在钙质角闪石分类图解上浅闪二长变粒岩落入浅闪角闪石区, 而其它所有角闪石落入含镁绿钙角闪石区(图 1)。

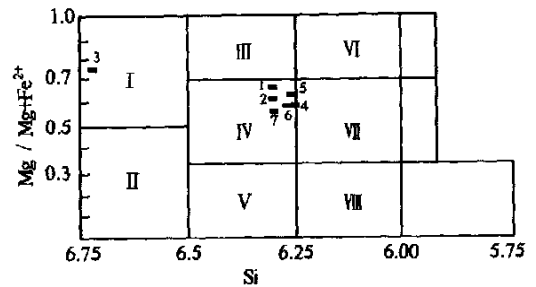


图 1 钙质角闪石分类图解

Fig 1 Classified diagram of calcic hornblendes (据 Leake, 1978)

- I. 浅闪角闪石; II. 亚铁浅闪石; III. 镁绿钙闪石;
IV. 含镁绿钙闪石; V. 绿钙闪角闪石; VI. 镁绿钙闪石;
VII. 含镁绿钙闪石; VIII. 绿钙闪石

另外在少数薄片可见到另一种蓝绿色角闪石, 常在辉石或原生角闪石的边部形成反应边, 或者为无色—浅绿色的角闪石集合体, 是退化变质的产物。

d 黑云母(Bi): 黑云母常出现在酸性麻粒岩

表 1 乌拉山群岩石中角闪石的化学成分及阳离子数

Table 1 Chemical compositions and cation ionic number of hornblendes in the rocks of Wulashan rock suite

样号	岩性	w /%								
		SD_2	TD_2	AlO_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
1	黑云斜长角闪岩	42.03	1.09	11.01	18.74	0.46	12.58	9.35	1.7	1.12
2	斜长角闪岩	42.51	0.81	11.38	16.33	0.18	12.8	11.7	1.57	0.64
3	浅闪二长变粒岩	46.61	0.36	9.12	12.4	0.45	16	10.84	1.66	0.62
4	斜长角闪石榴透辉石岩	42.35	1.18	12.08	16.4	0.16	11.35	11.22	1.92	1.48
5	斜长角闪石榴透辉石岩	42.6	1.74	13.61	13.18	0.12	12.57	11.25	1.87	1.27
6	斜长角闪石榴透辉石岩	41.89	1.14	11.64	18.36	0.07	11.34	10.5	1.97	1.11
7	透辉斜长片麻岩	41.6	0.82	10.6	18.73	0.36	10.72	12.32	1.23	1.35

以 23 个氧计算的阳离子数

样号	TSi	Tal	Cal	CTi	CMg	CFe ²⁺	BFe ²⁺	BMn	BCa	BAl	ACa	ANa	AK
1	6.344	1.656	0.3	0.124	2.83	1.744	0.623	0.059	1.318	0	0.194	0.498	0.216
2	6.36	1.639	0.366	0.09	2.855	1.699	0.355	0.023	1.62	0	0.254	0.455	0.122
3	6.78	1.22	0.343	0.039	3.449	1.148	0.36	0.055	1.585	0	0.105	0.468	0.115
4	6.349	1.651	0.48	0.133	2.535	1.849	0.206	0.02	1.774	0	0.027	0.558	0.283
5	6.26	1.738	0.619	0.192	2.775	1.43	0.189	0.015	1.77	0.024	0	0.509	0.238
6	6.316	1.684	0.383	0.129	2.549	1.912	0.403	0.009	1.558	0	0.11	0.576	0.214
7	6.359	1.64	0.267	0.094	2.442	2.187	0.207	0.047	1.746	0	0.272	0.385	0.263

样品分析: 北京大学地质学系测试中心。资料来源: 内蒙古地质调查院《白云鄂博幅(K49C003002) 1:25 万区域地质报告》, 2003。

中,与角闪石类似。黑云母也可以分为两个时代,早期的黑云母粒度较大,粒径为 0.5~1 mm,具棕红色—棕黄色多色性。内部长有瘤状、栉状的不透明矿物包体。这种黑云母与辉石之间的界线模糊。晚期的黑云母常为细小鳞片状的集合体,具棕褐色—棕黄色多色性,分布于辉石或石榴石的边缘、裂隙中,或呈辉石和石榴石的假象存在,因此这种黑云母为晚期退变质作用的产物。在多数情况下,黑云母定向排列,构成片理、片麻理及糜棱叶理。

黑云母的电子探针分析数据见表 2。以富镁为最大特征,其 TiO_2 为 0.03%~5.72%, Al_2O_3 为 12.30%~14.58%,在特罗戈娃(1965) $TiO_2-Fe \cdot 100/(Fe+Mg)$ 变质相关系图中样品均落入麻粒岩相区(见图 2)。黑云母的多色性是成分的反映,它与 TiO_2 和 $Fe_2O_3/(FeO+Fe_2O_3)$ 密切相关。多色性由红褐色暗褐色褐色黄褐色绿褐色绿色的变化趋势,反映了 TiO_2 的含量降低或 $Fe_2O_3/(FeO+Fe_2O_3)$ 比值增高,是变质温度由高向低变

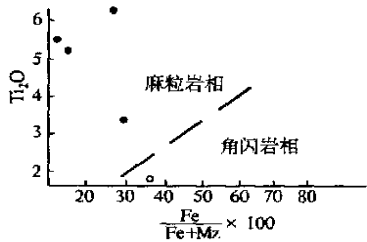


图 2 黑云母的 $TiO_2-100(Fe/(Fe+Mg))$ 图解
Fig 2 $TiO_2-100(Fe/(Fe+Mg))$ diagram of biotites
(据特罗戈娃, 1965)

化的结果。

e 石榴石: 石榴石广泛分布于乌拉山岩群各类岩石之中。二辉麻粒岩、石榴黑云片麻岩内都有石榴石的出现。其颜色多呈淡红色,呈等轴变晶状和粗大的变斑晶两种形态出现。一般情况在变质基性岩中呈等轴变晶粒状。在变质泥岩中,某种粗大的石榴石变斑晶中含有硅线石、黑云母、斜长石和石英的包体。与二辉石共生的石榴石,其粒径粗大,晶体中含有角闪石、斜长石包裹体。该类石榴石分布相对广泛,是变质峰期的特征矿物。而分布于辉石边部呈晶芽细粒的石榴石是峰期变质后的特征矿物。

峰期变质形成的石榴石的电子探针分析结果和端元分子含量见表 3,其 FeO_2 的含量为 20%~30%, MgO 为 4.82%~11.6%。在图 3 石榴石成分区间图解上多数样品投入麻粒区。其电子探针分析结果与矿物共生组合反映出的麻粒岩相变质温压条件是一致的。

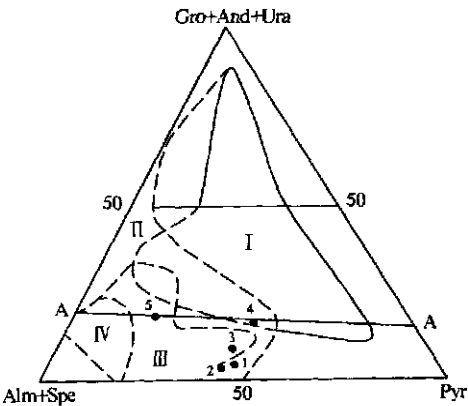


图 3 石榴石成分区间图解
Fig 3 Component interval diagram of garnets
(索波列夫, 1970)

I. 榴辉岩相; II. 麻粒岩相; III. 角闪岩相;
IV. 绿帘角闪岩相

表 2 黑云母的电子探针分析数据
Table 2 Electron microprobe analysis data of biotites

	w / %			
	1	2	3	4
SiO_2	40.49	38.89	37.27	37.33
TiO_2	3.30	5.05	5.45	5.49
Al_2O_3	14.58	13.94	15.41	14.16
Cr_2O_3	0.49	0.07		
FeO	6.05	12.45	9.57	9.93
MnO	0	0.19	0.9	0.18
MgO	20.53	15.38	15.65	16.63
CaO	0	0	0.20	0.16
K_2O	8.86	10.01	11.61	11.43
NaO	0	0	0.15	0.15
Total	94.03	95.98	94.43	95.36

以 23 个氧为基础计算的阳离子数				
样品名	1	2	3	4
Si	3.171	3.111	6.041	6.113
Al^{IV}	1.346	1.315	1.295	1.211
Al^{VI}			1.643	1.522
Ti	0.178	0.304	0.664	0.676
Fe^{3+}			0.005	0.005
Fe^{2+}	0.396	0.833	0.257	0.007
Mn	0	0.013	0.123	0.025
Mg	2.396	1.834	3.779	4.035
Ca	0	0	0.035	0.028
K	0.885	1.022	2.299	2.388
Na	0		0.047	0.048

样品分析: 北京大学地质学系测试中心。资料来源: 内蒙古地质调查院《白云鄂博幅(K49C003002) 1:25 万区域地质报告》, 2003。

表 3 石榴石电子探针分析结果

Table 3 Electron microprobe analysis data of garnets

序号		1	2	3	4	5
岩性		斜长角闪 石榴透辉石 岩	矽线石榴 碱长片麻 岩	石榴黑云 斜长片麻 岩	含石墨矽 线榴石片 麻岩	含石榴黑 云碱长片 麻岩
w / %	SiO ₂	38.03	37.48	36.23	38.75	34.24
	TiO ₂	0	0	0.2	0	0
	Al ₂ O ₃	21.04	21.63	22.22	19.36	22.58
	Cr ₂ O ₃	0	0.19	0	0	0.03
	FeO	28.67	29.6	28.47	30.11	30.2
	MnO	1.11	1	1.03	1	2.15
	MgO	4.82	9.17	9.29	9.76	9.61
	CaO	6.38	0.88	2.51	1.03	1.22
	Na ₂ O	0.09	0	0.06	0.08	0
	Total	100.14	99.76	100.01	100.09	100
阳离子数及矿物端元组成	TSi	2.985	2.902		2.998	2.645
	TAl	0.015	0.098		0.002	0.355
	Al ^{VI}	1.93	1.875		1.763	1.699
	Ti	0	0		0	0
	Cr	0	0.012		0	0.002
	Fe ²⁺	1.882	1.917		1.948	1.951
	Mg	0.564	1.059		1.126	1.107
	Mn	0.074	0.066		0.066	0.141
	Ca	0.537	0.073		0.085	0.101
	Na	0.014	0		0.012	0
	O	12	12		12	12
	Alm+Spe	62.31	52.56	48.31	84.27	51.84
	Pyr	19	44	43	43	44
	Gro+And+Ura	18.37	3.06	8.41	3.22	4.027

样品分析: 北京大学地质学系测试中心。资料来源: 内蒙古地质调查院《白云鄂博幅(K49C003002) 1:25 万区域地质报告》, 2003。

3 乌拉山岩群变质阶段的划分

第一阶段矿物共生组合: 早期变质阶段记录了麻粒岩相变质作用的开始, 在大量石榴石晶体中分布的角闪石和斜长石、石英和矽线石、黑云母、斜长石、石英的包裹体, 是早期的矿物组合。

峰期阶段矿物共生组合: 石榴石与单斜辉石共生和石榴石与斜方辉石共生, 是变质作用进入了高角闪岩相- 麻粒岩相的温压条件形成的矿物组合。

恒温降压的变质阶段。岩相标志是石榴石的反应边结构, 反应边为斜长石和角闪石的后成合晶。这是等温降压阶段的矿物转变, 在石榴黑云片麻岩内, 也存在另一种典型的反应边结构, 它们是围绕石榴石分布的和紫苏辉石+ 斜长石的后成合

晶环边。变质反应为石榴石+ 石英→紫苏辉石+ 斜长石。

晚期变质阶段具有降温降压退化变质的特点, 薄片可见辉石出现绿色角闪石退变反应边。

4 变质作用热力学条件及变质作用动力学分析

4.1 变质作用热力学条件

结合邻区最新取得的岩石化学数据及矿物电子探针分析结果, 对乌拉山岩群的变质作用的温压条件进行详细描述, 探讨变质作用的轨迹。

乌拉山岩群变质岩相标志较清楚, 在铁镁质岩石中, 可以找到早期阶段至中晚阶段变质温压转化的一系列岩相记录。石榴透辉石岩或斜长角闪透辉石岩中可区分三个世代的矿物共生组合, 其共生矿物为二辉石对、石榴石-斜方辉石对、角闪石-斜长石对。

斜长角闪石榴透辉石岩(B9002-3-2) 中三个不同世代的角闪石-斜长石温度变化(见图 4), 早期石榴石中包晶斜长石角闪石矿物对温度计和结合邻区资料推测的压力, 确定早期变质的温度为 690 , 压力为 0.7 GPa。

共生二辉石温度计(高角闪岩相- 麻粒岩相的变质阶段): 在大青山一带的乌拉山岩群斜长角闪石榴透辉石岩(B3067-2, B9002-3-2) 的二辉石矿物对, 采用三种不同的方法分别计算结果见表 4, 其温度在 622~88~893~615 , 压力为 1.099 GPa。

表 4 乌拉山岩群二辉石矿物对温度计算结果表

Table 4 Calculated temperatures of pyroxene mineral pair in the Wulashan rock suite

样品号	t ₁ /	t ₂ /	t ₃ /	p/GPa
B3067-2	893.615	622.88	687.8	
B9002-3-2	831.5	761.27	841.734	1.099

资料来源: 内蒙古地质调查院《白云鄂博幅(K49C003002) 1:25 万区域地质报告》, 2003。

(1) t₁ 为 Wood & Nauno (1970) 计算公式:

$$T/K = -10202 / \ln \{ \alpha_{MgSi_2O_6}^{Cp} / \alpha_{MgSi_2O_6}^{Op} \} - 7.65 \times X_{Fe}^{Op} + 3.88 (X_{Fe}^{Op})^2 - 4.6$$

(2) t₂ 为 Wyllie & Nehru (1974) 计算公式:

$$T/K = -5006 / \ln \{ \alpha_{MgSi_2O_6}^{Cp} / \alpha_{MgSi_2O_6}^{Op} \} - 3.75 \times X_{Fe}^{Op} + 1.90 (X_{Fe}^{Op})^2 - 1.70$$

(3) t₃ 为 Lindsley & Dixon, 1976 计算公式:

$$T/K = -3951 / \ln \{ \alpha_{MgSi_2O_6}^{Cp} / \alpha_{MgSi_2O_6}^{Op} \} - 2.96 \times X_{Fe}^{Op} + 1.56 (X_{Fe}^{Op})^2 - 0.75$$

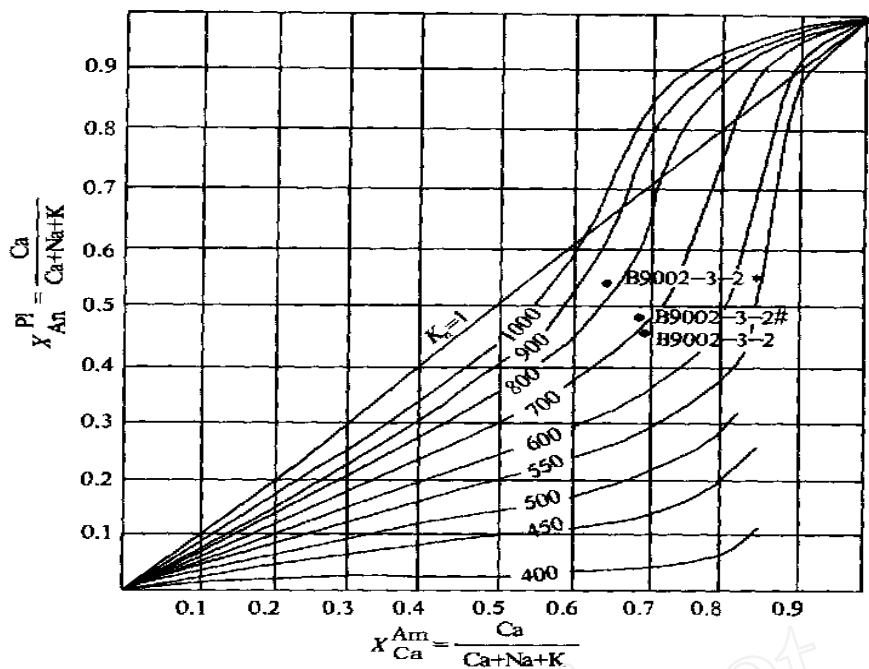


图 4 共存的角闪石和斜长石之间钙分配等温线图
Fig 4 Calcium distribution isothermal map between coexisting hornblende and plagioclase
(据 Демук 1966)

石榴石与单斜辉石共生, 是变质作用进入高角闪岩相- 麻粒岩相下限的温压条件下开始形成的矿物共生。该组合中有角闪石的存在, 斜长角闪石榴透辉石岩 (B9002-3-2) 与石榴石平衡共生的斜长石-角闪石温度为 830 (见图 4); 而石榴石-斜方辉石 (表 5) 温度为 948~698 , 压力为 0.941 GPa。其变质反应为: 角闪石+ 斜长石+ 黝帘石→石榴石+ 单斜辉石+ 石英。

表 5 乌拉山岩群石榴石- 斜方辉石矿物对温度计算结果
Table 5 Calculated temperatures of garnet-orthopyroxene mineral pair in the Wulashan rock suite

样品号	$t_1/$	$t_2/$	p/GPa
B9002-3-2	641.4	948~698	0.9418

资料来源: 内蒙古地质调查院《白云鄂博幅 (K49C003002) 1:25 万区域地质报告》, 2003。S. K. Sen, A. & B. H. O. teacharga, (1984), 计算公式: $T/K = [2713 + 0.22P + 3300X_{Ca}^{Gt} + 195(X_{Fe}^{Gt} - X_{Mg}^{Gt})] / [-R \ln K_D + 0.787 + 1.5X_{Ca}^{Gt}]$

结合乌拉山岩群峰期矿物共生组合特征, 采用与石榴石平衡共生的角闪石-斜长石温度计和石榴石-斜方辉石温度压力计, 确定峰期变质的温度为 830~948 , 压力为 0.942 GPa。

恒温降压的变质阶段是峰期后的一次变质作用, 斜长角闪石榴透辉石岩 (B9002-3-2) 中石榴石周围后成合晶中的斜长石-角闪石温度为 740

(见图 4), 计算的压力为 0.78~0.82 GPa, 是峰期后近等温减压阶段的温度和压力条件。

晚期变质阶段具有降温降压退变质的特点, 代表性的变质反应为 $Op_x + Cp_x + Pl \rightarrow Hb + Pl + Q$, 结合区域资料和变质反应的临界温度和压力, 估算本阶段变质温度为 650~700 , 压力为 0.55 GPa。

4.2 变质作用动力学分析

乌拉山岩群变质作用 $P-T-t$ 轨迹图 (见图 5) 中的第一温度、压力点代表形成石榴石晶体中分布的角闪石和斜长石包裹体的变质温压条件。第二温度、压力点是峰期麻粒岩相形成的石榴石与单斜辉石共生和石榴石与斜方辉石共生矿物的温压条件。第三温度、压力点是形成围绕石榴石分布的和紫苏辉石+斜长石的后成合晶环边的变质温压条件。第四温度、压力点代表形成辉石出现绿色角闪石退变反应边的变质温压条件。

从乌拉山岩群变质作用 $P-T-t$ 轨迹图可以看出乌拉山岩群经历了多次变质热事件的改造。变质温度和压力变化较大, 温度在 600~800 , 压力在 0.5~1.0 GPa 之间。压力的变化幅度相对较大。是一个典型的近等热减压^[4]的 $P-T-t$ 轨迹, 表明乌拉山岩群是麻粒岩相变质峰期发生于地壳大幅度增厚的环

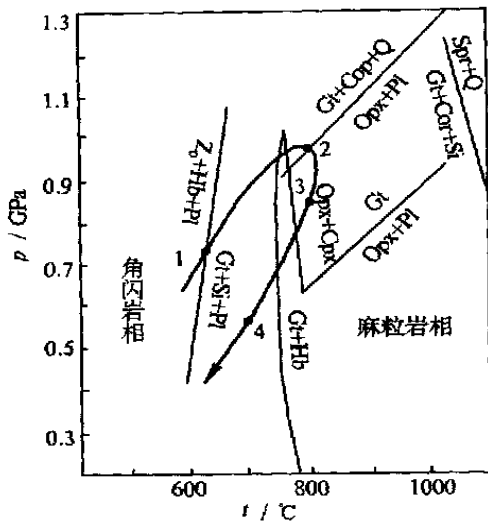


图 5 乌拉山岩群变质作用 PTt 轨迹图

Fig 5 Metamorphic PTt path graph of the Wulashan rock suite

境, 强烈的构造变动和区域性高热流共同作用的结果。之后, 地壳由于重力均衡作用迅速回返上升, 并经剥蚀而变薄, 导致相应的压力降低。由于这一过程迅速进行, 故岩石的温度仍可

保持峰期状态, 变化不大。在距今 2 500 Ma 左右^[5], 本区有一次构造减薄的过程, 即晚太古代色尔腾山裂谷使太古代古陆裂解, 加快了地壳减薄的速度, 所以出现了等温减压- 降温降压的过程, 是地壳拉伸和剥蚀共同作用的结果。

[参 考 文 献]

- [1] 甘盛非. 内蒙古乌拉山群麻粒岩相岩石的变质温压条件[J]. 矿物岩石, 1991, 11(2): 10- 18
- [2] 卢良兆, 靳是琴, 徐学纯, 等. 内蒙东南部早前寒武纪孔兹岩系成因及含矿性[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1992
- [3] 学卢良兆, 徐学纯, 董永胜. 中朝克拉通北部早前寒武纪变质作用演化的三种主要样式及其地质动力[J]. 高校地质学报, 1998, 4(1):
- [4] 刘喜山, 金巍, 李树雄. 内蒙古中部早元古代造山事件中麻粒岩相低压变质作用[J]. 地质学报, 1992, 66(3): 244- 256
- [5] 伍家善. 华北陆台早前寒武纪重大地质事件[M]. 北京: 地质出版社, 1992
- [6] 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

Metamorphic characteristics of Archean Wulashan rock suite in middle region of Inner Mongolia, China

JIA He-yi, LU Ying-fan, ZHANG Zhi-xiang, GAO Bao-ming

(Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot, China)

Abstract The metamorphic PTt path of the Archean Wulashan rock suite is in the form of clockwise in the middle region of Inner Mongolia, and the metamorphic temperature ranges from 830 to 948 °C, and pressure is 0.942 GPa. The above shows that granulite facies metamorphism occurred in the crust of increasing thickness and caused by strong tectonic disturbance and regional high heat flow. The approximate isothermal and reduced pressure from second to third stage is the beginning of regional thinning crust. The fourth degrading metamorphic stage of amphibolite facies shows the characteristics of thinning crust, uplift and denudation.

Key words: granulite; metamorphic process; Wulashan rock suite; middle region of Inner Mongolia