

内蒙古中部乌拉山地区泥质片麻岩矿物学特征及其变质演化

许亚鑫¹, 戴朝成^{1,2}, 陈佩嘉^{1,2}, 刘涛涛^{1,2}, 王琦^{1,2}, 王新亮^{1,2}

(1. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013; 2. 内蒙古地质矿产勘查院, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要: 乌拉山新太古代泥质片麻岩出露于内蒙古中部乌拉山岩群榴云片麻岩岩组中, 是乌拉山岩组中分布最广的深成变质岩, 主要岩性为黑云石榴二长片麻岩。本文通过详细的岩石学观察, 对典型变质矿物进行系统矿物化学分析, 研究其变质演化特征及构造意义。结果表明: 乌拉山岩群榴云片麻岩岩组中泥质片麻岩经历了四个变质演化阶段, 并通过变质矿物温压计反演限定其变质条件: 早期进变质阶段 (M_1), 其矿物组合特征为核部石榴子石+黑云母+斜长石+石英±夕线石; 峰期变质阶段 (M_2) 的矿物组合特征为石榴子石+夕线石+黑云母+斜长石+石英+钾长石, 该阶段的温压条件为 $T=771\sim 870^\circ\text{C}$, $p=7.5\sim 11.2\text{ Kb}$; 峰后近等温减压阶段 (M_3) 以石榴子石边部大量出现堇青石的冠状结构为特征, 其矿物组合为石榴子石+堇青石+黑云母+斜长石+石英±夕线石, 该阶段的温压条件为 $T=750\sim 800^\circ\text{C}$, $p=6.1\sim 7.0\text{ Kb}$; 晚期降温阶段 (M_4) 的矿物组合特征为石榴子石+黑云母+斜长石+石英+磁铁矿±钾长石, 该阶段的温压条件为 $T=650\sim 659^\circ\text{C}$, $p=4.3\sim 4.8\text{ Kb}$, 泥质片麻岩的变质演化 P-T 轨迹具有近等温降压的顺时针型式, 表明乌拉山地区新太古代晚期乌拉山岩群经历了地壳俯冲加厚随后折返隆升的动力学过程。

关键词: 内蒙古; 乌拉山岩群; 泥质片麻岩; P-T 轨迹; 变质反应

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.01.004

中图分类号: TD98 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 01-0021-10

作为地壳上一个十分特征的地质单元, 高级变质区通常被认为是探讨早期大陆地壳的成因、性质、演化过程和大陆动力学及其演化模式的一个重要窗口^[1]。内蒙古中部乌拉山—大青山地区是华北克拉通北缘早前寒武纪变质杂岩发育地区之一, 区内变质岩的研究历史由来已久。20世纪30年代孙建初将这套变质杂岩命名为桑干群, 1978年内蒙古地层表编写组把整个乌拉山地区高角闪岩相的变质杂岩统归为乌拉山群。之后的1:5万区域地质调查和多项区域地质专题研究^[2-12], 使区内高级变质地层研究取得了大量进展, 如华北克拉通孔兹岩带在古元古代 (~1.95 Ga) 南部鄂尔多斯陆块和北部阴山陆块碰撞形成^[8]; 华北克拉通西缘的贺兰山—千里山地区的泥质麻粒岩得到~15 Kb 的高压环境^[13]; 北缘东段的集宁地区的高级变质岩得到变质温度可达 1000°C 的超高温变质

岩^[14-15], 西段的乌拉山—大青山地区的麻粒岩相岩石变质峰期条件 $T=840\sim 860^\circ\text{C}$, $P=10.2\sim 10.5\text{ Kb}$ ^[16]。由于研究区早前寒武地层经历了复杂的变形变质作用、后期岩浆侵入和深熔作用影响, 且诸多研究都仅限于大青山地区, 而对出露于乌拉山地区的乌拉山岩群的榴云片麻岩岩组研究相对薄弱。本文选取了乌拉山地区榴云片麻岩岩组中的泥质片麻岩作为主要研究对象, 在岩相学和矿物化学的基础上, 计算该区的变质作用温压条件, 探讨其形成时构造背景, 为乌拉山地区高级变质岩的变质演化历史和热力学特征提供科学依据。

1 区域地质概况

乌拉山位于华北克拉通西部地块孔兹岩带, 其南侧为鄂尔多斯陆块, 北侧为阴山陆块 (图 1)。

收稿日期: 2021-06-26

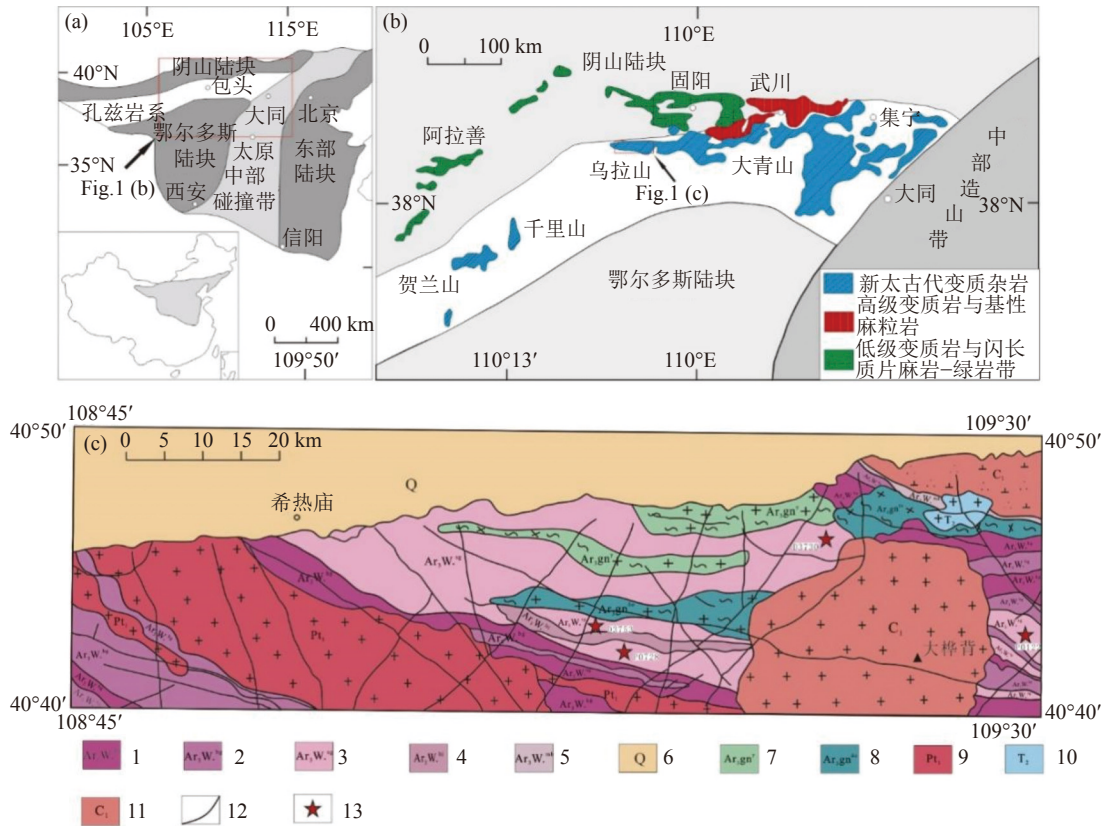
基金项目: 国土资源部大兴安岭成矿带南段地质矿产调查项目 (1212011120718); 国家青年科学基金项目 (41402085)

作者简介: 许亚鑫 (1997-), 女, 硕士研究生, 地质学专业, 主要从事岩石学方面研究。

通信作者: 戴朝成 (1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质学方面研究。

乌拉山地区主要出露早前寒武纪变质基底和显生宙新生代沉积岩系。早前寒武纪变质基底主要为新太古代变质表壳岩与新太古代变质深成岩。新太古代乌拉山岩群呈东西向带状广泛分布；新太古代乌拉山岩群自下而上分为角闪片麻岩岩组、

黑云片麻岩岩组、榴云片麻岩岩组、石榴浅粒岩岩组及大理岩岩组。新太古代变质深成岩主要岩性为紫苏花岗质片麻岩和石英闪长质片麻岩，并可见石英闪长质片麻岩侵入于榴云片麻岩岩组中，后期被古元古代通碰撞花岗岩与中生代岩体侵入。



1. 乌拉山岩群角闪片麻岩岩组 2. 乌拉山岩群黑云片麻岩岩组 3. 乌拉山岩群榴云片麻岩岩组 4. 乌拉山岩群石榴浅粒岩岩组 5. 乌拉山岩群大理岩岩组 6. 第四系沉积物 7. 新太古代紫苏花岗质片麻岩 8. 新太古代石英闪长质片麻岩 9. 古元古代花岗岩 10. 中三叠世正长花岗岩 11. 早石炭世花岗岩 12. 断层 13. 采样点及编号

图 1 乌拉山地区在华北克拉通的分布和构造位置图 (a, b) 和乌拉山地区地质简图及采样位置 (c)

Fig.1 Distribution of Wulashan in North China Craton (a, b) and geological sketch map of Wulashan Area and sample locations (c)

2 岩相学特征

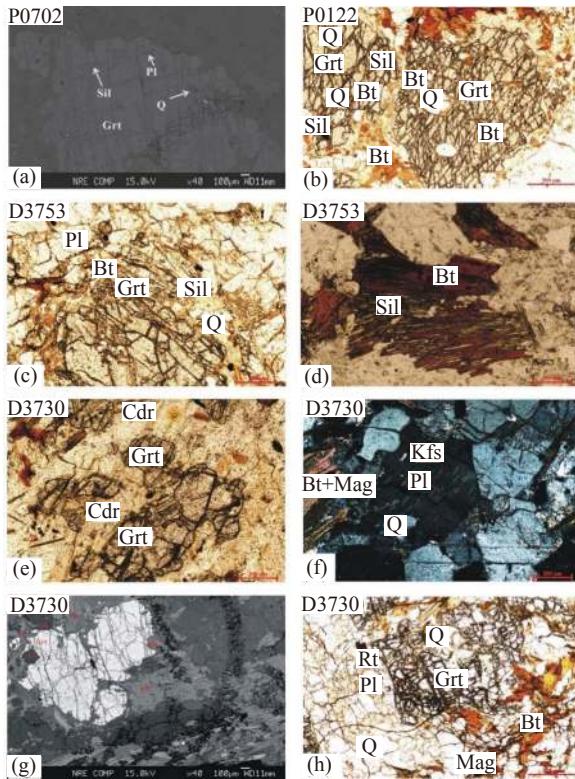
本文研究样品均采自乌拉山岩群榴云片麻岩岩组中，堇青榴云片麻岩 (P0122)、夕线堇青黑云石榴二长片麻岩 (D3730)、黑云石榴二长片麻岩 (P0702)、夕线黑云石榴二长片麻岩 (D3753)。

堇青榴云片麻岩 (P0122)，斑状变晶结构 (图 2b)，片麻状构造。变斑晶为石榴子石 (12%)，基质具粒状变晶结构，主要成分为黑云母 (10%)、斜长石 (35%)、钾长石 (10%)、石英 (30%) 与少量堇青石 (3%)，副矿物为榍石、锆石等。石榴子石变斑晶浑圆状，裂痕发育，粒径 1~3 mm，单偏光下颜色为浅红色，石榴子石核部包含细粒的黑云母、夕线石、长石、石英等矿物包体而形

成筛状变斑晶，代表早期进变质阶段 (Grt1)，边部与矽线石共生与石榴子石较自形，代表峰期阶段 (Grt2)，堇青石环绕石榴子石形成“黑眼圈”结构，代表峰后退变质阶段 (Grt3)。

基质中黑云母呈片状，在基质中与长英质矿物近定向分布；斜长石聚片双晶明显，且双晶纹细密，多为更长石；石英呈他形粒状。

夕线堇青黑云石榴二长片麻岩 (D3730)，相比堇青榴云片麻岩 (P0122)，堇青石大量出现 (图 2e)，围绕在石榴子石边部形成“黑眼圈结构”，在堇青石内部也可见石榴子石、夕线石、石英的颗粒；主要矿物含量：石榴子石 (12%)，黑云母 (10%)，斜长石 (35%)，钾长石 (10%)，石英 (20%)，堇青石 (10%)，夕线石 (3%)。



M₁ 阶段：(a) 包裹在石榴子石中的夕线石、石英、斜长石；(b) 石榴子石筛状变晶结构，石榴子石中早期的夕线石、黑云母、石英；M₂ 阶段：(c) 石榴子石与夕线石、石英、黑云母、斜长石共生组合；(d) 黑云母解理缝沿着转换成夕线石；M₃ 阶段：(e) 大量堇青石围绕石榴子石形成“黑眼圈”(f) 条纹长石中的主晶钾长石和客晶斜长石；M₄ 阶段：(g) 石榴子石边部分解出黑云母、斜长石；(h) 黑云母转变成金红石

(a) rounded sillimanite, quartz and plagioclase enclosed in the garnet; (b) diablastic texture of garnet, early rounded sillimanite, quartz and biotite enclosed in the garnet; (c) garnet porphyroblast coexists with sillimanitequartzbiotite and plagioclase; (d) biotite convert sillimanite along cleavage; (e) Cordierite surrounding garnet; (f) the host K-feldspar and the guest plagioclase in perthite; (g) garnet porphyroblast breaks down to biotite and plagioclase; (h) biotite convert rutile

图 2 乌拉山岩群榴云片麻岩岩组各变质阶段的显微构造照片

Fig.2 Photographs of mineral texturesfeaturing each metamorphic stages in Garnet-biotite gneiss association of Wulashan rock group

黑云石榴二长片麻岩 (P0702)，主要矿物含量：石榴子石 (15%)，黑云母 (10%)，斜长石 (40%)，钾长石 (10%)，石英 (25%)。

夕线黑云石榴二长片麻岩 (D3753)，夕线石主要呈毛发状、针状和粗粒状分布在基质中，也可在黑云母脱水作用形成的假象的解理中发现 (图 2c, d)，主要矿物含量：石榴子石 (12%)，黑云母 (10%)，斜长石 (35%)，钾长石 (10%)，

石英 (30%)，夕线石 (3%)。

乌拉山岩群榴云片麻岩岩组的矿物电子探针分析在东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室完成，采用 JXA-8100 型电子探针仪，实验条件：加速电压 15 kV，电流 20 nA，电子束斑为 1 μm。

3 矿物化学特征

3.1 石榴子石

石榴子石在榴云片麻岩岩组中以变斑晶形式存在，与黑云母、斜长石、石英、堇青石、夕线石等矿物平衡共生，其裂痕发育，在裂痕中可见长石、黑云母、夕线石的包裹体。石榴子石主要为铁铝榴石-镁铝榴石，其端元组分特点是：Alm 为 61.48%~67.14%，平均为 64.43%，Pyr 为 28.39%~34.08%，平均为 30.94% (表 1)。镁铝榴石分子含量高，反映了其变质温度高，也具较高的变质程度，Spe 为 0.95%~1.89%，Gro 为 2.52%~5.42%。在 Gro-Alm+Spe-Pyr 成分图解 (图 3) 显示石榴子石从边部到核部具有成分环带，核部 X_{Mg} (平均值为 0.335) 与边部 X_{Mg} (平均值为 0.316)，相对富镁贫铁特征，与长石接触的石榴子石，核部 X_{Mg} (平均值为 0.331) 与边部 X_{Mg} (平均值为 0.322) 值相近，而与黑云母接触的石榴子石，核部 X_{Mg} (平均值为 0.341) 与边部 X_{Mg} (平均值为 0.305)，X_{Mg} 相差很大，表明是石榴子石与周围其他铁镁质矿物 (黑云母、堇青石等) 更易发生 Mg-Fe 扩散交换反应。

3.2 黑云母

黑云母成分的变化明显地受变质作用控制，因此其化学成分具有一定的差异^[17]。一般认为随着变质温度的升高，黑云母的 X_{Mg} 值增大。变质岩中黑云母的主要成分 Mg, Fe 的含量既受寄主岩成分控制，又与变质程度有关，而 Ti、Fe³⁺ 及 (OH) 的含量则主要取决于变质条件^[18]。乌拉山岩群榴云片麻岩岩组中黑云母成分 TiO₂ 含量较高，为 4.02%~5.38%，平均为 4.46% (表 2)，与石榴子石接触的黑云母的 X_{Mg}=0.64，比基质中的 X_{Mg}=0.56 要高，说明其与石榴子石发生了 Mg-Fe 扩散交换反应 (图 4)。

3.3 长石

研究区乌拉山岩群榴云片麻岩岩组中常见斜长石、钾长石及条纹长石，主要产出形式分三种：以包裹体形式存在于石榴子石变斑晶中；在基质中颗粒粗大与黑云母、石英等矿物共生

表 1 乌拉山岩群榴云片麻岩岩组中石榴子石的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of garnet in Garnet-biotite gneiss association of Wulashan rock group

样品号 点位	P0122					P0702B1			D3753			D3730			
	GC	GC	GR(Bt)	GR(Pl)	GR(Q)	GC	GC	GR	GR(Bt)	GC	GC	GR(Crd)	GR(Bt)	GR(Pl)	GC
SiO ₂	38.11	37.43	37.38	37.22	37.87	38.19	37.32	37.09	37.38	37.93	38.20	38.16	37.49	38.03	38.13
TiO ₂	0.00	0.02	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.07	0.02	0.08
Al ₂ O ₃	22.32	20.90	21.27	21.17	21.12	20.71	21.21	20.54	20.25	20.81	21.06	21.42	21.33	21.42	21.46
Cr ₂ O ₃	0.20	0.12	0.17	0.22	0.19	0.13	0.15	0.11	0.06	0.10	0.06	0.01	0.10	0.09	0.02
FeO ^T	29.98	30.54	31.28	30.97	30.71	30.08	32.30	31.51	32.51	29.05	29.21	30.89	31.33	30.74	30.28
MnO	0.52	0.50	0.48	0.57	0.42	0.64	0.60	0.83	0.57	0.52	0.55	0.46	0.45	0.50	0.51
MgO	8.04	7.35	7.27	7.60	8.19	7.98	7.49	7.19	7.29	8.56	8.61	7.53	7.10	7.41	7.84
CaO	1.17	1.12	1.21	1.26	1.25	0.89	0.97	0.90	1.12	1.16	1.16	1.14	1.21	1.90	1.35
Na ₂ O	0.14	0.17	0.01	0.10	0.08	0.05	0.00	0.00	0.05	0.05	0.03	0.06	0.05	0.07	0.07
K ₂ O	0.07	0.04	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00
Total	100.54	98.18	99.10	99.21	99.84	98.70	100.04	98.19	99.25	98.19	98.87	99.71	99.13	100.22	99.74
以12个氧原子为标准计算的阳离子系数															
Si	2.955	2.984	2.966	2.952	2.974	2.982	3.021	2.948	2.984	3.004	3.004	2.995	2.973	2.977	2.986
Ti	0.000	0.001	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.004	0.001	0.005
Al	2.036	1.907	1.986	1.977	1.951	1.942	1.928	1.971	1.901	1.939	1.948	1.978	1.970	1.973	1.977
Cr	0.012	0.007	0.011	0.014	0.012	0.007	0.008	0.009	0.004	0.006	0.004	0.001	0.006	0.006	0.001
Fe ³⁺	0.104	0.137	0.106	0.180	0.151	0.133	0.048	0.186	0.205	0.077	0.067	0.059	0.086	0.118	0.074
Fe ²⁺	1.826	1.860	1.953	1.852	1.852	1.966	1.931	1.923	1.939	1.834	1.841	1.956	1.977	1.877	1.896
Mn	0.034	0.033	0.032	0.038	0.028	0.056	0.043	0.040	0.038	0.035	0.037	0.031	0.030	0.033	0.034
Mg	0.935	0.902	0.865	0.905	0.953	0.867	0.947	0.887	0.872	1.017	1.015	0.887	0.836	0.870	0.921
Ca	0.097	0.093	0.103	0.107	0.105	0.078	0.075	0.082	0.096	0.098	0.098	0.096	0.102	0.159	0.113
Na	0.020	0.025	0.002	0.016	0.012	0.000	0.008	0.000	0.008	0.008	0.004	0.009	0.008	0.011	0.011
K	0.007	0.004	0.001	0.003	0.000	0.002	0.003	0.000	0.003	0.000	0.000	0.002	0.000	0.004	0.000
X _{Mg}	0.339	0.326	0.307	0.328	0.340	0.329	0.316	0.306	0.310	0.357	0.355	0.312	0.297	0.317	0.327
Alm	63.12	64.42	66.13	63.80	63.04	64.44	65.58	66.26	65.83	61.48	61.56	65.89	67.14	63.86	63.96
Pyr	32.32	31.22	29.30	31.17	32.43	31.61	30.24	29.22	29.62	34.08	33.93	29.86	28.39	29.60	31.08
Spe	1.19	1.13	1.09	1.33	0.95	1.43	1.37	1.89	1.30	1.16	1.23	1.03	1.01	1.13	1.14
Gro	3.37	3.23	3.48	3.70	3.58	2.52	2.80	2.62	3.25	3.29	3.28	3.23	3.46	5.42	3.82

注: FeO^T=Fe₂O₃+FeO; X_{Mg}=(Mg/(Fe+Mg²⁺)). GC石榴子石核部, GR(Bt)与黑云母接触的石榴子石边部, GR(Pl)与斜长石接触的石榴子石边部, GR(Crd)与堇青石接触的石榴子石边部, GR(Q)与石英接触的石榴子石边部

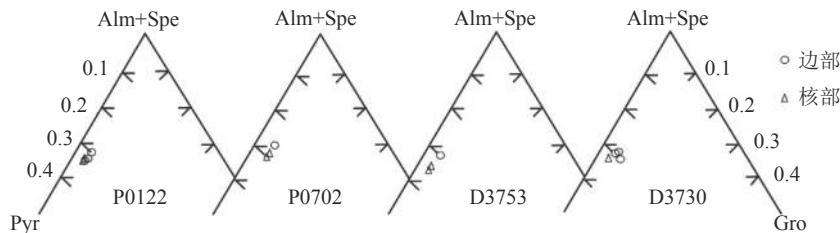


图 3 乌拉山岩群榴云片麻岩岩组中石榴子石的 Gro-Alm+Spe-Pyr
Fig.3 Gro-Alm+Spe-Pyr of garnet from Garnet-biotite gneiss association of Wulashan rock group

在; 以及晚期降压退变质阶段石榴子石发生分解产出在石榴子石边缘和细粒黑云母共生的细粒斜长石。斜长石主要半自形板状晶形, 斜长石发育聚片双晶, 且聚片双晶带较窄; 钾长石晶型为半自形粒状。根据其电子探针分析结果(表 3)及在此基础上确定的斜长石牌号, 研究区斜长石的化学成分变化较大, Or 含量在 0.82~1.73 之间, An 含量在 21.92~33.15 之间, 样品中斜长石均属于中长石-更长石。条纹长石主要是正条纹长石,

在夕线榴云片麻岩(P0702)中条纹长石主晶 Or 端元组分为 87.17, Ab 端元组分为 11.55, An=0.57, 更接近 Ab 端元(图 5)。

3.4 堇青石

榴云片麻岩岩组中的堇青石基本形成围绕石榴子石变斑晶呈不规则状。堇青石的大量出现也代表着榴云片麻岩岩组进入了近等温降压阶段(M₃), 乌拉山岩群的石榴子石主要为铁铝榴石和镁铝榴石, 其 Fe、Mg 组分足以提供堇青石的

表 2 乌拉山岩群榴云片麻岩岩组中黑云母和堇青石化学成分 /%

Table 2 Chemical composition of garnet and cordierite in Garnet-biotite gneiss association of Wulashan rock group

样品号 矿物 点位	P0122			P0702			D3753			D3730			D3730		
	B(Grt)	B(GrtR)	B(GrtR)	B(GrtR)	B(GrtR)	B(GrtC)	Bt(M)	Bt(M)	B(GrtR)	B(Crd)	B(GrtC)	C(Grt)	C(Grt)	Crd	Crd(M)
SiO ₂	35.98	35.85	36.17	36.37	35.84	36.15	35.82	35.21	36.43	35.41	36.34	48.06	48.04	48.26	
TiO ₂	5.38	4.46	5.13	4.51	4.16	4.53	4.02	4.07	4.06	4.62	4.16	0.00	0.00	0.00	
Al ₂ O ₃	16.14	16.49	15.25	17.14	18.33	17.33	17.07	16.89	18.45	17.54	16.82	33.21	33.54	33.77	
Cr ₂ O ₃	0.09	0.21	0.35	0.13	0.27	0.30	0.05	0.05	0.19	0.17	0.11	0.00	0.00	0.00	
FeO ^T	14.35	14.09	12.38	13.57	13.09	13.43	17.25	16.81	13.26	13.97	13.56	6.46	6.04	5.86	
MnO	0.10	0.05	0.05	0.05	0.04	0.06	0.03	0.08	0.05	0.10	0.05	0.03	0.04	0.05	
MgO	13.77	13.99	15.68	14.05	14.34	13.64	12.08	12.42	13.62	14.25	14.56	8.82	9.13	9.25	
CaO	0.17	0.17	0.13	0.09	0.04	0.02	0.04	0.01	0.03	0.04	0.05	0.03	0.01	0.02	
Na ₂ O	0.19	0.36	0.45	0.06	0.01	0.09	0.16	0.14	0.16	0.34	0.17	0.12	0.04	0.04	
K ₂ O	9.13	9.33	9.66	8.44	9.07	9.67	9.46	9.59	8.74	9.52	9.41	0.01	0.01	0.02	
Total	95.28	94.99	95.26	94.42	95.19	95.22	95.98	95.25	94.99	95.96	95.23	96.74	96.85	97.27	
氧离子数	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	18	18	18	
Si	2.683	2.683	2.689	2.705	2.648	2.686	2.688	2.665	2.689	2.624	2.698	4.985	4.967	4.968	
Ti	0.304	0.250	0.286	0.252	0.231	0.251	0.228	0.231	0.225	0.257	0.232	0.000	0.000	0.000	
Al	1.431	1.452	1.333	1.500	1.593	1.506	1.516	1.504	1.602	1.529	1.469	4.053	4.080	4.083	
Cr	0.005	0.012	0.021	0.008	0.016	0.018	0.003	0.003	0.011	0.010	0.006	0.000	0.000	0.000	
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.012	
Fe ²⁺	0.920	0.900	0.783	0.875	0.832	0.857	1.149	1.084	0.847	0.882	0.862	0.556	0.520	0.490	
Mn	0.007	0.003	0.003	0.003	0.002	0.004	0.002	0.005	0.003	0.006	0.003	0.003	0.003	0.004	
Mg	1.556	1.571	1.749	1.568	1.589	1.512	1.266	1.409	1.508	1.584	1.622	1.372	1.416	1.441	
Ca	0.014	0.013	0.010	0.007	0.003	0.002	0.003	0.001	0.002	0.003	0.004	0.003	0.001	0.002	
Na	0.028	0.052	0.064	0.009	0.001	0.013	0.024	0.021	0.023	0.049	0.024	0.024	0.008	0.008	
K	0.878	0.891	0.917	0.801	0.856	0.912	0.912	0.926	0.824	0.901	0.892	0.001	0.001	0.003	
XMg	0.628	0.636	0.691	0.642	0.656	0.638	0.551	0.565	0.640	0.642	0.653	0.711	0.731	0.742	
Al ^{VI}	0.317	0.317	0.311	0.295	0.352	0.314	0.295	0.335	0.311	0.376	0.302				

注：FeO^T=Fe₂O₃+FeO；X_{Mg}=(Mg/(Fe+Mg²⁺))；B(Grt) B(Crd)与石榴子石接触的黑云母，B(M)基质中的黑云母，C(Grt)与石榴子石接触的堇青石，Crd(M)基质中的堇青石。

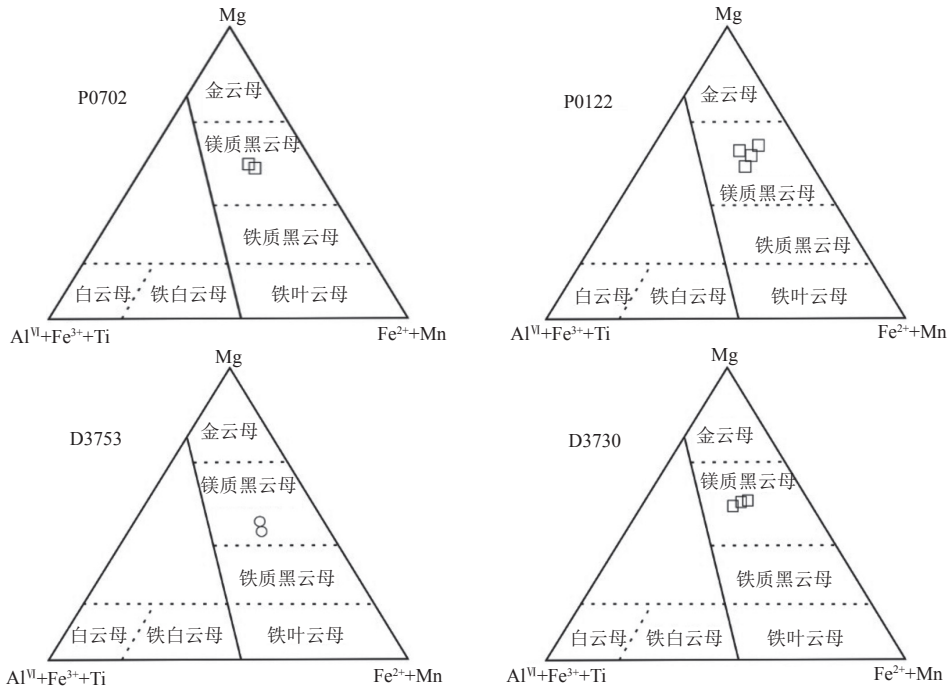


图 4 乌拉山岩群榴云片麻岩岩组中黑云母的 (Al^{VI}+Fe³⁺+Ti) - (Fe²⁺+Mn) -Mg (据 Foster, 1960) 图中正方形代表与石榴子石、堇青石接触的黑云母，圆圈代表基质中粗大的黑云母

Fig.4 (Al^{VI}+Fe³⁺+Ti)-(Fe²⁺+Mn)-Mg of biotite from Garnet-biotite gneiss association of Wulashan rock group (after Foster, 1960) Square-biotite as contact with garnet, cordierite, circle-matrix biotite

表 3 乌拉山岩群榴云片麻岩岩组中长石化学成分 /%

Table 3 Chemical composition of feldspar in Garnet-biotite gneiss association of Wulashan rock group

样品号 点位	P0122		P0702		D3753			D3730					
	Pl(Grt)	Pl(M)	Pl(Grt)	Pth(Kfs)	Pth(Pl)	Pth(Kfs)	Pl(Bt)	Pl(Grt)	Pl(Grt)	Pl(M)	Pl(Grt)	Pl(Grt)	Pl(M)
SiO ₂	63.48	61.98	62.81	63.96	59.62	63.38	59.19	61.05	60.81	58.89	59.45	61.37	63.41
TiO ₂	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	20.90	23.77	21.35	20.46	23.97	20.21	24.27	23.99	23.96	24.93	24.06	23.12	21.11
Cr ₂ O ₃	0.02	0.05	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.16	0.04	0.05	0.04
FeO ^T	0.16	0.15	0.08	0.01	0.03	0.00	0.39	0.01	0.02	0.00	0.21	0.03	0.11
MnO	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00
MgO	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01
CaO	5.94	5.43	5.86	0.00	6.31	0.12	4.84	6.08	5.85	6.9	6.34	6.88	6.13
Na ₂ O	8.48	8.16	8.27	1.17	7.42	1.31	9.32	8.31	8.25	8.58	8.05	7.51	8.34
K ₂ O	0.25	0.16	0.14	14.51	0.17	15.11	0.32	0.24	0.17	0.29	0.24	0.26	0.29
Total	99.24	99.74	98.55	100.16	97.53	100.15	98.37	99.69	99.11	99.82	98.43	99.25	99.44

以8个氧原子为标准计算的阳离子系数

Si	2.841	2.755	2.827	2.933	2.716	2.922	2.690	2.726	2.728	2.648	2.697	2.751	2.833
Ti	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Al ^{VI}	0.159	0.245	0.173	0.067	0.284	0.078	0.310	0.274	0.272	0.352	0.303	0.249	0.167
Al ^{IV}	0.942	1.007	0.957	1.036	1.000	1.019	0.988	0.986	0.992	0.966	0.981	0.970	0.943
Cr	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.006	0.001	0.002	0.001
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.006	0.005	0.003	0.000	0.001	0.000	0.014	0.000	0.001	0.000	0.008	0.001	0.004
Mn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Mg	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
Ca	0.285	0.260	0.283	0.000	0.308	0.006	0.236	0.291	0.281	0.332	0.308	0.330	0.293
Na	0.735	0.707	0.720	0.104	0.654	0.117	0.820	0.718	0.716	0.747	0.707	0.652	0.721
K	0.014	0.009	0.008	0.849	0.010	0.889	0.019	0.014	0.010	0.017	0.014	0.015	0.017
SUM	4.983	4.993	4.972	4.992	4.974	5.032	5.079	5.010	5.002	5.071	5.021	4.972	4.980
Ab	71.06	72.40	71.22	10.88	67.29	11.55	76.35	70.22	71.12	68.14	68.70	65.36	69.94
An	27.57	26.67	27.96	0.00	31.69	0.57	21.92	28.44	27.92	30.34	29.95	33.15	28.46
Or	1.37	0.92	0.82	89.12	1.02	87.87	1.73	1.34	0.97	1.52	1.35	1.49	1.60

注：FeO^T=Fe₂O₃+FeO，Pl(Grt)与石榴子石接触的斜长石，Pl(Bt)与黑云母接触的斜长石，Pl(M)基质中的斜长石，Pth(Pl)，Pth(Kfs)条纹长石中的斜长石

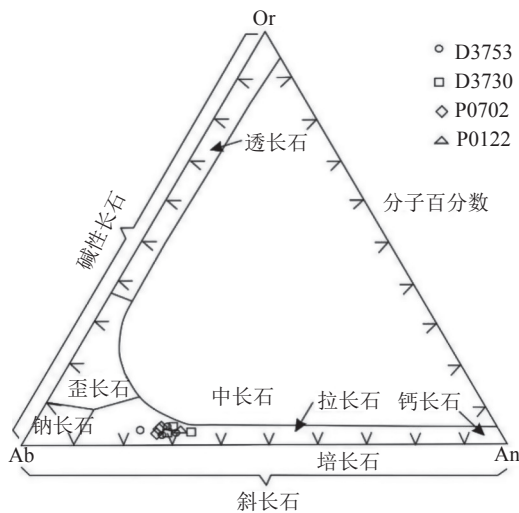


图 5 乌拉山岩群榴云片麻岩岩组中斜长石的 Or-Ab-An
Fig.5 Ternary plot of Or-Ab-An of plagioclase in Garnet-biotite gneiss association of Wulashan rock group

Fe、Mg 需要，但 Si、Al 不足，所以在石榴子石转变成堇青石的同时，应有夕线石和石英的加

入；反应式为： $Alm+Sil+Q \rightarrow Crd^{[19]}$ 。样品中堇青石的化学成分接近，其中 SiO₂ 的含量变化在 48.04%~46.06%，MgO 含量为 8.82%~9.25%，FeO^T 含量为 5.86%~6.46%，X_{Mg} 值在之间 0.71~0.74，属富镁堇青石^[20]，TiO₂，Cr₂O₃，CaO，Na₂O 和 K₂O 的含量都很低。此外，与石榴子石相接触的堇青石有比较明显的成分差异，边部的 FeO^T 含量相对低，MgO 含量相对高，应为降温降压过程中与石榴子石发生了 Mg-Fe 成分交换反应。

4 变质温压条件估算及变质作用演化 P-T 轨迹

通过上述岩相学特征和电子探针观察，根据岩石中的矿物组合特征与矿物间发生的变质反应的不同，将研究区的乌拉山岩群榴云片麻岩岩组的样品划分 4 个变质阶段。变质温压计算利用“GPT”表格^[21]，计算结果见表 4。

表 4 乌拉山岩群榴云片麻岩岩组样品的温度和压力计算结果
Table 4 Geothermobarometry calculation of Garnet-biotite gneiss association of Wulashan rock group

阶段	样品号	温度计	T/°C	参考文献	压力计	P/Kb	参考文献
M ₁	P0122	Grt-Bt 4~5 Kb	642~649	Perchuk & Lavrent'eva, 83			
			637~645	Perchuk et. al., 85			
			647~650	Lavrent'eva & Perchuk, 81			
			638~641	Holdaway & Lee, 77			
M ₂	D3753	Grt-Bt 8~9 Kb	771~779	Perchuk & Lavrent'eva, 83		7.5~9.3	Newton & Haselton, 81
			835~845	Perchuk et. al., 85	Grt-Pl-Sil-Q	9.4~11.2	Koziol, 89
			822~826	Lavrent'eva & Perchuk, 81	750~850°C	8.3~10.0	Koziol & Newton 88
			865~870	Holdaway & Lee, 77			
M ₃	D3730	Grt-Crd 4~7 Kb	726~736	Holdaway & Lee, 77		6.1~6.9	Perchuk et. al., 85
			759~769	Bhattacharya et. al., 88	Grt-Crd-Sil-Q	7.0~6.8	Holdaway & Lee, 77
			732~744	Perchuk et. al., 85	600~800°C	6.4~6.5	Wells, 79
			759~771	Thompson, 76			
M ₄	D3730	Grt-Bt 4~5 Kb	656~663	Perchuk & Lavrent'eva, 83		4.3~4.8	Hoisch, 90
			650~659	Perchuk et. al., 85	Grt-Bt-Pl-Q		
			661~664	Lavrent'eva & Perchuk, 81	600~650°C		
			654~658	Holdaway & Lee, 77			

4.1 早期进变质阶段 (M1) 的温压估算

以包裹体形式存在于石榴子石变斑晶中的细粒黑云母、斜长石、夕线石、石英的共生组合，代表了榴云片麻岩岩组早期的稳定矿物组合：Grt+Bt+Q+Pl±Sil。在进行变质温压计算时选择堇青榴云片麻岩 (P0122) 中的石榴子石斑晶和其中的包裹体形式存在的黑云母，但黑云母包裹体颗粒细小，与石榴子石发生 Fe-Mg 的交换反应彻底，因此石榴子石边部黑云母 X_{Mg} 比基质中的黑云母 X_{Mg} 要高，导致在温压计算过程中相平衡参数 $\ln K_D$ ($K_D=(Alm/Pyr)*(Mg_{Bt}/Fe_{Bt})$) 偏大，采用石榴子石-黑云母温度计^[22-25] 计算结果为 637~650°C，应比实际情况要低，因而无法进行早期进变质阶段的温压计算，计算结果仅作为参考。

4.2 峰期变质阶段 (M2) 的温压估算

基质中出现大量的夕线石，代表了榴云片麻岩岩组变质作用进入了高角闪岩相—麻粒岩相，以黑云母、钾长石、斜长石、石英围绕石榴子石斑晶生长为特征，其矿物组合为 Grt+Sil+Bt+Pl+Q+Kfs。在夕线黑云石榴二长片麻岩 (D3753) 镜下观察时，出现较多的黑云母沿解理转换成毛发状的夕线石，实验证实反应温度在 750°C 以上^[26]，在进行变质温压计算时选择石榴黑云斜长片麻岩 (D3753) 中斑晶石榴子石核部成分和基质中斜长石核部成分以及远离石榴子石的颗粒粗大的黑云母核部成分，采用石榴子石-黑云母温度计^[22-25] 和石榴子石-斜长石-夕线石-石英压力计^[27-29]，计算结果为 T=771~870°C，P=7.5~11.2 Kb。

4.3 峰后近等温减压 (M3) 阶段温压估算

进入这峰后近等温减压阶段的主要标志是：榴云片麻岩岩组中出现的一系列典型的降压反应和由此产生的堇青石的大量出现。矿物组合特征：Grt+Crd+Bt+Pl+Q±Sil。在进行变质温压计算时选择夕线堇青黑云石榴二长片麻岩 (D3730) 中石榴子石边部和与其接触的堇青石，采用石榴子石-堇青石温度计^[22,25,30] 和石榴子石-堇青石-夕线石-石英压力计^[22,25]，计算结果为 (T=726~771°C，P=6.1~7.0 Kb)，但考虑到此阶段的石榴子石-堇青石可能受到后期退变质阶段的影响而发生 Fe-Mg 的再交换反应，计算结果应比实际温度偏低^[31]，从该阶段发生的变质反应来看，将实际变质温度提升到 T=750~800°C。

4.4 晚期降温阶段 (M4) 温压估算

在晚期降温阶段中，石榴子石分解形成细粒鳞片状黑云母和斜长石，并且有些石榴子石边部黑云母退变质形成绿泥石，也可见黑云母中 Ti 出溶形成晚期的金红石、钛铁矿及榍石，矿物组合特征为 Grt+Bt+Pl+Q+Mag±Kfs 在进行变质温压计算时选择夕线堇青黑云石榴二长片麻岩 (D3730) 中石榴子石边部成分和其周围黑云母、斜长石，采用石榴子石-黑云母^[23-25] 温度计和石榴子石-黑云母-斜长石-石英压力计^[32]，计算结果为 T=650~659°C，P=4.3~4.8 Kb。

4.5 乌拉山岩群的变质演化 P-T 轨迹

根据乌拉山岩群榴云片麻岩岩组岩相学特征、矿物相特征和变质温压条件计算，确定其变

质演化 P-T 轨迹为顺时针型式 (图 6), 峰期变质阶段 (M_2) 形成了夕线石稳定矿物组合 (Grt+Sil+Bt+Pl+Q+Kfs), 温压条件为 $T=771\sim 870^\circ\text{C}$, $P=7.5\sim 11.2\text{ Kb}$, 表明研究区榴云片麻岩岩组已俯冲到下地壳 $\sim 30\text{ km}$ 处, 并经历了中-高压麻粒岩相变质作用, 然后在快速折返过程中出现含堇青石矿物组合的减压反应, M_3 阶段的变质温压条件为 $T=750\sim 800^\circ\text{C}$, $P=6.1\sim 7.0\text{ Kb}$, 表明研究区榴云片麻岩岩组已抬升折返到下地壳 $\sim 13\text{ km}$ 处。从峰期变质阶段 (M_2) 到峰后近等温减压 (M_3) 阶段, 温度降低不明显, 而压力降低明显, 反映了榴云片麻岩岩组经历了一个快速折返的构造演化过程^[31], 在随后的抬升折返过程中, 榴云片麻岩岩组受到晚期角闪岩相的退变质作用 (M_4) 的改造, M_4 阶段的变质温压条件为 $T=650\sim 659^\circ\text{C}$, $P=4.3\sim 4.8\text{ Kb}$ 。

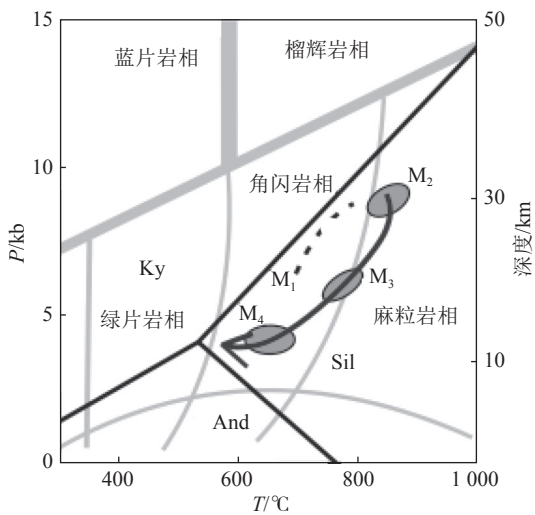


图 6 乌拉山岩群榴云片麻岩岩组变质演化 P-T 轨迹
Fig.6 Metamorphic P-T path of Garnet-biotite gneiss association of Wulashan rock group

5 讨论与结论

研究区新太古代乌拉山岩群榴云片麻岩岩组中泥质片麻岩经历了四个变质演化阶段: 早期进变质阶段、峰期低压麻粒岩相阶段, 变质温度达到 870°C 、峰后近等温降压阶段以及晚期退变质阶段, 其变质演化 P-T 轨迹为顺时针型式 (图 6)。根据前人研究, 这种顺时针 P-T 轨迹与地壳挤压增厚有关, 反映为碰撞造山过程中加厚下地壳折返至地表的动力学过程^[33-35]。研究区早前寒武纪变质基底曾经历了地壳加厚, 陆壳俯冲经历低压麻粒岩相变质作用后隆升遭受角闪岩相退变质的过程。本文研究所得乌拉山岩群榴云片麻岩岩组的

岩相学特征和矿物化学特征与前人^[8,13,16] 在华北陆块北缘孔兹岩带富铝片麻岩研究得到的相似的顺时针型 P-T 轨迹, 在空间分布上具有带状分布特征。

本文得到以下结论:

(1) 研究区乌拉山岩群榴云片麻岩岩组存在不同成因类型的石榴子石、黑云母、夕线石、斜长石、钾长石、堇青石等变质矿物, 其中石榴子石保存了较明显的成因环带。

(2) 岩相学观察、电子探针矿物化学分析结果和变质演化序列表明, 研究区榴云片麻岩组中泥质片麻岩经历了 4 期变质演化: 早期进变质阶段 (M_1), 其矿物组合特征为: 核部 Grt+Bt+Q+Pl±Sil; 峰期变质阶段 (M_2) 的矿物组合特征为 Grt+Sil+Bt+Pl+Q+Kfs; 峰后近等温减压 (M_3) 阶段的矿物组合特征为 Grt+Crd+Bt+Pl+Q±Sil; 晚期降温阶段 (M_4) 的矿物组合特征为 Grt+Bt+Pl+Q+Mag±Kfs。

(3) 采用 Grt-Bt、Grt-Crd 地质温度计和 GASP、GBPQ 地质压力计得到乌拉山岩群榴云片麻岩岩组不同变质阶段的温压条件: 变质峰期榴云片麻岩岩组低压麻粒岩相的最高变质温度达到 870°C ($T=771\sim 870^\circ\text{C}$)、最大变质压力可达 11.2 Kb ($P=7.5\sim 11.2\text{ Kb}$); 峰后近等温降压阶段变质温压条件为 $T=750\sim 800^\circ\text{C}$, $P=6.1\sim 7.0\text{ Kb}$; 晚期降温阶段的变质温压条件为 $T=650\sim 659^\circ\text{C}$, $P=4.3\sim 4.8\text{ Kb}$ 。

(4) 泥质片麻岩的变质演化为顺时针 P-T 轨迹, 标志榴云片麻岩岩组曾经历了地壳加厚遭受麻粒岩相变质后折返地表的动力学过程。

参考文献:

[1] 杨振升, 徐仲元, 刘正宏, 等. 高级变质区岩石地层系统建立的思考与实践-以内蒙古大青山-乌拉山地区为例[J]. 中国地质, 2003, 30(4):343-351.
YANG Z S, XU Z Y, LIU Z H, et al. Consideration and practice of the construction of litho stratigraphic systems in high-grade metamorphic terrains-A case study in the Daqingshan-Wulashan area[J]. Geology in China, 2003, 30(4):343-351.
[2] 沈其韩, 张荫芳, 高吉凤, 等. 内蒙古中南部太古宙变质岩[J]. 中国地质科学院地质研究所所刊, 1990, 21:1-188.
SHEN Q H, ZHANG Y F, GAO J F, et al. Archean metamorphic rocks in central and Southern Inner Mongolia[J]. Acta GeoscientiaSinica, 1990, 21:1-188.
[3] 沈其韩, 张荫芳. 内蒙古中南部早前寒武系变质岩原岩建造和变质作用特征[J]. 中国地质科学院院报, 1990, 20:41-43.
SHEN Q H, ZHANG Y F. The characteristics of the early

- precambrian metamorphic protolith formation, their metamorphism and evolution in central southern Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 1990, 20:41-43.
- [4] 刘喜山, 金巍, 李树勋. 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.
- LIU X S, JIN W, LI S X. Low-pressure metamorphism of granulite facies in an early Proterozoic orogenic event in central inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1992, 66(3):244-256.
- [5] 李树勋. 华北陆台北缘基础地质问题与找矿前景[J]. *辽宁地质*, 1994, 1-2:6-11.
- LI S X. Some issues on basic geology and ore-search prospect on the north margin of north China platform[J]. *Land & Resources*, 1994, 1-2:6-11.
- [6] 甘盛飞, 钱祥麟. 蒙古大青山太古宙麻粒岩带的板块构造演化模式[J]. *地质学报*, 1996, 70(4):298-308.
- GAN S F, QIAN X L. A Plate-tectonic model for the evolution of the daqingshan granulite belt in Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1996, 70(4):298-308.
- [7] 郭敬辉, 翟明国, 李江海, 等. 华北克拉通早前寒武纪桑干构造带的岩石组合特征和构造性质[J]. *岩石学报*, 1996, 12(1):193-207.
- GUO J H, ZHAI M G, LI J H, et al. Nature of the Early Precambrian Sanggan Structure Zone in North China Craton: Evidence from Rock Association[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, 12(1):193-207.
- [8] 赵国春, 孙敏. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合[J]. *中国科学(D辑)*, 2002, 32:538-549.
- ZHAO G C, SUN M. Characteristics of basement tectonic units of North China Craton and early Proterozoic amalgamation[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2002, 32:538-549.
- [9] 吴昌华, 孙敏, 李惠民, 等. 乌拉山-集宁孔兹岩锆石激光探针等离子质谱(LA-ICP-MS)年龄——孔兹岩沉积时限的年代学研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(11):2639-54.
- WU C H, SUN M, LI H M, et al. LA-ICP-MS U-Pbzircon ages of the khondalites form the Wulashan and Jining high-grade terrain in northern margin of the North China Craton: constraints on sedimentary age of the khondalite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(11):2639-54.
- [10] 杜菊民, 张庆龙, 徐士银, 等. 阴山晚中生代板内造山特征及其动力机制——以内蒙大青山为例[J]. *地质学报*, 2009, 83(7):910-922.
- DU J M, ZHANG Q L, XU S Y, et al. Characteristics and dynamic mechanism of Late Mesozoic intraplate orogeny in Yinshan: a case study of Daqingshan, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(7):910-922.
- [11] 翟明国. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. *中国科学: 地质科学*, 2011, 41(8):1037-1046.
- ZHAI M G. Cratonization and the formation of the North China block[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2011, 41(8):1037-1046.
- [12] 徐仲元, 刘正宏, 董晓杰. 内蒙古大青山北麓蓝晶石榴长英质片麻岩的发现: 岩相学、地球化学和锆石 SHRIMP 定年[J]. *地质评论*, 2011, 57(2):243-251.
- XU Z Y, LIU Z H, DONG X J. Discovery of Kyanite Garnet Quartz feldspathic Gneiss in the North Side of Daqing Mts., Inner Mongolia, and Its Petrography, Geochemistry and Zircon SHRIMP Dating[J]. *Geological Review*, 2011, 57(2):243-251.
- [13] 周喜文, 赵国春, 耿元生. 贺兰山高压泥质麻粒岩—华北克拉通西部陆块拼合的岩石学证据[J]. *岩石学报*, 2010, 26:2113-21.
- ZHOU X W, ZHAO G C, GENG Y S. Helan Shan high pressure pelitic granulite petrological evidence for collision event in the western block of the China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26:2113-21.
- [14] 李江海, 刘守偈. 超高温变质作用: 以华北内蒙古土贵乌拉地区为例[J]. *地学前缘*, 2007, 14(3):132-137.
- LI J H, LIU S J. Review of ultrahigh-temperature (UHT) metamorphism study: a case from North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(3):132-137.
- [15] 刘守偈, 李江海, Mr. santosh. 内蒙古土贵乌拉孔兹岩带超高温变质作用: 变质反应结构及 P-T 指示[J]. *岩石学报*, 2008, 24(6):1186-1192.
- LIU S Y, LI J H, Mr. santosh. Ultrahigh temperature metamorphism in tuguiwulakhondalite belt, Inner Mongolia: metamorphic structure and P-T indication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(6):1186-1192.
- [16] 蔡佳, 刘平华, 刘福来, 等. 大青山-乌拉山变质杂岩带石拐地区富铝片麻岩成因矿物学与变质演化[J]. *岩石学报*, 2013, 29(2):437-461.
- CAI J, LIU P H, LIU F L, et al. Genetic mineralogy and metamorphic evolution of Al-rich gneisses in the Shiguai area, Daqingshan-Wulashan metamorphic complex belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2):437-461.
- [17] 孙凯, 周肃, 赵志丹, 等. 西藏尼木变质岩特征及变质温压条件[J]. *岩石学报*, 2011, 27(12):3718-3726.
- SUN K, ZHOU S, ZHAO Z D, et al. Characteristics and pressure-temperature conditions of Nimu metamorphic rocks, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(12):3718-3726.
- [18] 靳是琴, 李鸿超. 几种常见矿物的成因矿物学, 成因矿物学概论(下册)[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1984, 221-270.
- JIN S Q, LI H C. Genetic mineralogy of several common minerals[M]. *Introduction to genetic mineralogy (Volume 2)*. Changchun: Jilin University Press. 1984, 221-270.
- [19] 王薇, 叶惠文. 内蒙古千里山群片麻岩中堇青石的形成与演化[J]. *长春地质学院学报*, 1996, 26(3):273-277.
- WANG W, YE H W. Formation and evolution of cordierite in gneiss of Qianlishan group, Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 1996, 26(3):273-277.
- [20] 常丽华, 陈曼云, 金巍, 等. 透明矿物薄片鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 2006, 107-108.
- CHANG L H, CHEN M Y, JING W, et al. Handbook for identification of transparent mineral flakes[M]. Geological Publishing House. 2006, 107-108.
- [21] Reche J and Martinez FJ. GPT: An excel spreadsheet for thermobarometric calculations in metapelitic rocks[J]. *Computers & Geosciences*, 1996, 22(7):775-784.
- [22] Holdaway MJ and Lee SM. Fe-Mg cordierite stability in high-grade pelitic rocks based on experimental, theoretical and natural observations[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1977, 63(2):175-198.

- [23] Lavrent'eva, I. V., and Perchuk, L. L., Phase correspondence in the system biotite-garnet: experimental data: Dokl[J]. Akad. Nauk SSSR, 1981, 260: 731-734.
- [24] Perchuk, L. L., and Lavrent'eva, I. V. Experimental investigation of exchange equilibria in the system eastern Siberia[J], USSR: Jour. Metamorphic Geology, 1983, 3(3): 265-310.
- [25] Perchuk LL, Aranovich LY, Podlesskii KK, et al. Precambrian granulites of the Aldan shield, eastern Siberia[J]. *USSR. Journal of Metamorphic Geology*, 1985, 3(3):265-310.
- [26] 周喜文. 变泥质岩石中夕线石的成因[J]. *长春科技大学学报*, 2001, 31(4):416.
- ZHOU X W. Genesis of sillimanite in metaargillaceous rocks[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2001, 31(4):416.
- [27] Newton RC and Haselton HT. Thermodynamics of the garnet-plagioclase-Al₂SiO₅-quartz geobarometer. In: Newton RC, Navrotsky A and Wood BJ (eds.). *Thermodynamics of Minerals and Melts*[J]. New York: Springer-Verlag, 1981:131-147.
- [28] Koziol, A. M., and Newton, R. C., Redetermination of the anorthite breakdown reaction and improvement of the plagioclase, garnet, AlSiO₃, quartz barometer: *Am[J]. Mineralogist*, 1988, 73(34): 216-223.
- [29] Koziol, A. M., Recalibration of the garnet-plagioclase-Al, SiO₂, quartz(GASP)geobarometer and applications to natural parageneses[J]: *EOS*, 1989, 70(15): 493.
- [30] Bhattacharya A, Mazumdar AC and Sen SK. Fe-Mg mixing in cordierite: Constraints from natural data and implications for cordierite-garnet geothermometry in granulites[J]. *American Mineralogist*, 1988, 73(3-4):338-344.
- [31] 王舫, 刘福来, 刘平华, 等. 胶北地区早前寒武纪孔兹岩系的变质演化[J]. *岩石学报*, 2010, 26(7):2057-2072.
- WANG F, LIU F L, LIU P H, et al. Metamorphic evolution of Early Precambrian khondalite series in North Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(7):2057-2072.
- [32] Hoisch, T. D. Empirical calibration of six geobarometers for the mineral assemblage quartz+muscovite+biotite+plagioclase+garnet: *Contrib[J]. Miner. Petrol*, 1990, 104(2): 225-234.
- [33] England PC and Thompson AB. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism I Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4):894-928.
- [34] Harley SL. The origins of granulites: A metamorphic perspective[J]. *Geological Magazine*, 1989, 126:215-247.
- [35] Brown M. P-T evolution of orogenic belts and the causes of regional metamorphism[J]. *Geological Society of London*, 1993, 150:227-241.

Mineral Characteristics and Metamorphic Evolution of Pelitic Gneiss in Wulashan Area, Central Inner Mongolia

Xu Yaxin¹, Dai Chaocheng^{1,2}, Chen Peijia^{1,2}, Liu Taotao^{1,2}, Wang Qi^{1,2}, Wang Xinliang^{1,2}

(1.School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi, China; 2.Geology and Mineral Exploration Institute of Inner Mongolia, Hohhot, Inner Mongolia, China)

Abstract: Wulashan Neoproterozoic pelitic gneiss is exposed in the eclogite gneiss formation of Wulashan group in central Inner Mongolia. It is the most widely distributed plutonic metamorphic rock in Wulashan formation. The main lithology is biotite garnet monzonite gneiss. Through detailed petrological observation, this paper makes a systematic mineral chemical analysis of typical metamorphic minerals, and studies their metamorphic evolution characteristics and tectonic significance. The results show that the pelitic gneiss in the eclogite gneiss formation of Wulashan group has experienced four metamorphic evolution stages, and its metamorphic conditions are limited by metamorphic mineral thermobarometer inversion: early progressive metamorphic stage (M₁), its mineral assemblage is characterized by core garnet + biotite + plagioclase + quartz ± sillimanite; The mineral assemblage of the peak metamorphic stage (M₂) is characterized by garnet + sillimanite + biotite + plagioclase + quartz + potassium feldspar. The temperature and pressure conditions of this stage are T= 771~870°C, p = 7.5~11.2 Kb; The post peak near isothermal decompression stage (M₃) is characterized by the coronal structure of cordierite at the edge of garnet. Its mineral assemblage is garnet + cordierite + biotite + plagioclase + quartz ± sillimanite. The temperature and pressure conditions of this stage are T= 750~800°C, p = 6.1~7.0 Kb; The mineral assemblage in the late cooling stage (M₄) is characterized by garnet + biotite + plagioclase + quartz + magnetite ± K-feldspar. The temperature and pressure conditions in this stage are T= 650~659°C, p= 4.3~4.8 Kb. The metamorphic evolution P-T track of argillaceous gneiss has a clockwise pattern of nearly isothermal depressurization. It shows that the Wulashan group in the late Neoproterozoic in Wulashan area experienced the dynamic process of crustal subduction and thickening followed by exhumation and uplift.

Keywords: Inner Mongolia; Wulashan rock group; Pelitic gneiss; P-T path; Metamorphic reaction