科学通报 2014 年 第 59 卷 第 20 期: 1984 ~ 1991
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

阿尔泰造山带超高温变泥质麻粒岩的确定及其地质意义

仝来喜*, 陈义兵, 陈林丽

中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640
* 联系人, E-mail: lxtong@gig.ac.cn

2013-07-23 收稿, 2014-03-09 接受, 2014-04-14 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2011CB080901)资助

摘要 通过岩相学和矿物成分特征及 *P-T* 计算结果, 最近在阿勒泰以东喀拉苏附近发现了超高温变泥质麻粒岩, 其矿物组合为石榴石+斜方辉石+矽线石+堇青石+尖晶石+黑云母+斜长石+石英等. 斜方辉石具有高铝特点, 其 Al_2O_3 含量高达 8.7wt%, 指示了超高温变质的条件, 其峰期变质条件为: *P*=~0.80 GPa, *T*=~960℃. 变质结构关系和 *P-T* 估算结果表明了一个峰期后近等压冷却的逆时针 *P-T* 轨迹. 锆石 U-Pb 年龄结果(271±5 Ma)支持了该超高温变质事件发生于二叠纪. 喀拉苏附近超高温变泥质麻粒岩的发现确认了阿尔泰造山带二叠纪超高温变质作用的存在, 表明在二叠纪阿尔泰造山带南缘高热流伸展背景可能与二叠纪(270~280 Ma)塔里木地幔柱活动有密切成因关系.

关键词
超高温变质作用
变泥质麻粒岩
阿尔泰造山带
P-T 轨迹

近年来, 超高温变质作用的研究已成为国内外变质地质学领域继超高压变质作用研究之后的另一个重要地学前沿课题. 超高温变质作用是指地壳岩石遭受峰期变质温度超过 900℃的非常高温的麻粒岩相变质作用, 常出现特征矿物组合如斜方辉石+矽线石+石英、假蓝宝石+石英、大隅石+石英等, 斜方辉石以高铝(Al_2O_3>8.0wt%)为特征(wt%, 质量分数, 余同)[1~3]. 目前国际上已报道 30 多处含有超高温麻粒岩的产地, 如南极、印度和我国华北等[4~6]. 由于超高温麻粒岩含有关于下地壳演化和壳-幔相互作用过程的重要信息, 对认识和理解下地壳演化和壳-幔相互作用过程至关重要. 本文通过岩相学和 *P-T* 计算结果, 确认了超高温变泥质麻粒岩在阿尔泰造山带的存在, 建立了其 *P-T* 演化轨迹, 这为认识阿尔泰造山带的演化过程提供了重要的岩石学制约.

1 地质背景

阿尔泰造山带属于中亚造山带的重要组成部分, 也是世界上典型的显生宙增生造山带[7~9]. 该造山带位于西伯利亚板块西南缘, 其南部以额尔齐斯深大断裂与准噶尔板块为界[10,11]. 该带岩石记录了新元古代至晚古生代的构造演化过程, 广泛发育古生代中-低压型递增变质带和片麻岩热穹隆构造[12~15], 并蕴含丰富的矿产资源. 递增变质带可分为蓝晶石型和红柱石型两种类型, 其变质演化主要以绿片岩相-角闪岩相变质作用为特征[13,15], 局部达到麻粒岩相[16~18]. 绿片岩相-角闪岩相变质作用被认为发生于晚泥盆纪(~365 Ma)[11,15], 可能与早-中古生代的弧-陆碰撞有关[11,19]. 其他研究者则进一步认为该带低压高温变质作用发生在 380~390 Ma 期间, 并与洋脊俯冲和板片窗的发育有关[20~22]. 此外, 该带麻粒岩相高温变质作用被认为发生于二叠纪(270~290 Ma)[17,18], 反映了该区在晚古生代经历了一次重要的高级构造变质热事件[23,24].

大量花岗质岩石和正片麻岩占据该带面积约 40%, 主要由早古生代同造山型和晚古生代后造山或

引用格式: 仝来喜, 陈义兵, 陈林丽. 阿尔泰造山带超高温变泥质麻粒岩的确定及其地质意义. 科学通报, 2014, 59: 1984–1991
英文版见: Tong L X, Chen Y B, Chen L L. Confirmation of ultrahigh-temperature metapelitic granulite in the Altay orogen and its geological significance. Chin Sci Bull, 2014, 59, doi: 10.1007/s11434-014-0319-1

非造山型花岗岩体组成, 可分为英云闪长岩、花岗闪长岩、黑云母花岗岩和少量二云母花岗岩[19]. 前者年龄集中在 370~450 Ma 之间, 具有岩浆弧作用特征[19,25], 后者年龄集中在 270~280 Ma 之间[26~29], 具有幔源成因特征[30]. 另外, 在富蕴县喀拉通克和乌恰沟也有 280 Ma 左右的幔源成因的镁铁质侵入岩-超镁铁质侵入杂岩分布[31,32], 这些二叠纪岩浆作用也和额尔齐斯深大断裂带/剪切带的时间完全一致[33].

近年来, 随着王伟等人[18]在阿勒泰大喀拉苏附近发现中低压高温(~800℃)泥质麻粒岩及 Li 等人[34]报道了在富蕴乌恰沟存在超高温(>900℃)泥质麻粒岩组合以来, 支持了阿尔泰造山带经历了高温-超高温麻粒岩相变质作用. 然而到目前, 对其变质 *P-T* 演化历史仍缺乏详细的研究, 对其形成构造背景也存在不同认识. 例如: 王伟等人[18]认为阿尔泰造山带二叠纪麻粒岩相中低压高温变质作用形成于伸展构造背景, 而 Li 等人[34]认为麻粒岩相超高温变质作用则与阿尔泰地区古生代洋壳的俯冲和板块碰撞有关. 本文则对最近在阿勒泰喀拉苏附近发现的超高温变泥质麻粒岩及其矿物组合进行了详细的岩相学研究和温压计算, 建立了其 *P-T* 演化轨迹, 并结合已有的年龄数据, 探讨了其可能形成的构造背景.

2 岩相学特征

本文所描述的超高温变泥质麻粒岩位于阿勒泰东南喀拉苏附近, 也就是王伟等人[18]报道的该区中低压泥质麻粒岩带中(图 1). 超高温变泥质麻粒岩以构造透镜体产于中低压泥质麻粒岩中, 二者经历了部分熔融和混合岩化, 且后者显示 D1 褶皱与 D2 剪切构造. 其主要岩相学特征见下面.

超高温变泥质麻粒岩主要矿物电子探针数据(表 1)由中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的 JXA-8100 型电子探针仪完成, 其实验条件为: 加速电压 15 kV; 束流 3×10^{-8} Å; 束斑 1 μm; 采样 ZAF 校正方法.

该超高温变泥质麻粒岩主要矿物组合为石榴石(10%), 斜方辉石(7%~8%), 矽线石(2%~3%), 堇青石(10%~12%), 尖晶石(4%~5%), 黑云母(15%~20%), 斜长石(15%~20%), 石英(20%~25%)及少量钛铁矿和磁铁矿等副矿物, 未见钾长石. 岩石发育 S1 和 S2 至少两期组构(图 2(a)), 可能对应露头的 D1 挤压变形和 D2 剪切变形. 粗粒的黑云母、石榴石、斜方辉石、堇青石、斜长石和石英构成 S1 面理和峰期 M1 矿物组合. 石榴石含有钛铁矿和黑云母(图 2(a))及尖晶石和斜方辉石等包裹体(图 2(b)), 堇青石也包裹尖晶石和矽线石等矿物(图 2(c)). 基质中斜方辉石、矽线石、

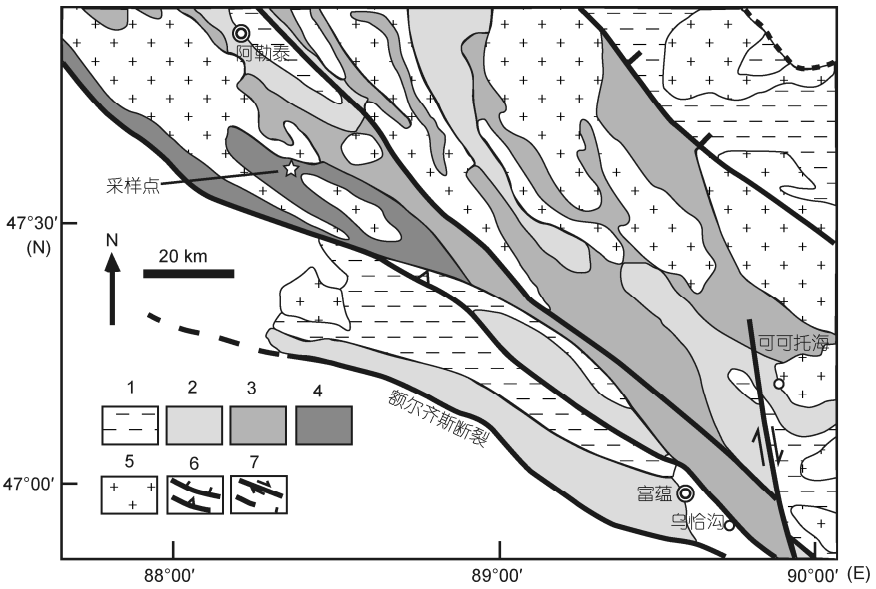

图 1 新疆阿勒泰地区地质图

据王伟等人[18]修改. 1, 绿片岩相; 2, 低角闪岩相; 3, 高角闪岩相(矽线石带); 4, 麻粒岩相; 5, 花岗岩; 6, 正断层和逆冲断层; 7, 走滑断层和推测断层

表 1 阿尔泰超高温变泥质麻粒岩中主要矿物探针分析 a)

	gt(c)	gt(r)	opx(i)	opx(c)	opx(c)	opx(r)	opx(2)	sil	sp(i)	sp(o)	cd	bt	pl
SiO_2	38.88	39.06	49.19	47.25	47.14	48.23	47.87	37.62	0.03	0.02	49.71	36.22	60.85
TiO_2	0.07	0.06	0.03	0.00	0.08	0.04	0.05	0.02	0.04	0.00	0.06	4.57	0.01
Al_2O_3	22.02	21.6	4.59	8.73	8.65	6.29	6.84	60.94	59.14	57.44	33.96	16.60	24.35
Cr_2O_3	0.03	0.03	0.03	0.00	0.03	0.00	0.01	0.04	0.25	1.16	0.00	0.12	0.00
FeO	28.48	30.20	25.52	24.73	24.82	24.75	25.32	0.79	28.59	31.86	4.25	14.31	0.03
MnO	1.10	1.17	0.25	0.26	0.18	0.23	0.54	0.00	0.09	0.07	0.05	0.01	0.00
MgO	8.44	6.68	20.49	18.79	18.45	19.54	18.45	0.01	10.42	6.58	11.21	13.77	0.01
CaO	1.24	1.42	0.06	0.03	0.05	0.03	0.05	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	5.72
Na_2O	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.08	0.14	0.09	0.22	8.74
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	10.14	0.16
ZnO									1.39	2.32			
总量	100.26	100.23	100.16	99.79	99.41	99.11	99.15	99.50	100.02	99.58	99.39	95.96	99.85
O	12	12	6	6	6	6	6	10	4	4	18	11	8
Si	3.000	3.040	1.842	1.775	1.781	1.825	1.820	2.047	0.001	0.001	4.962	2.692	2.711
Ti	0.004	0.004	0.001	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.005	0.255	0.000
Al	2.003	1.982	0.203	0.387	0.385	0.281	0.307	3.907	1.884	1.882	3.997	1.455	1.279
Cr	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.005	0.025	0.000	0.007	0.000
Fe^{3+}	0.000	0.000	0.110	0.063	0.049	0.068	0.051	0.000	0.111	0.099	0.071	0.000	0.001
Fe^{2+}	1.838	1.966	0.689	0.714	0.735	0.716	0.754	0.036	0.531	0.641	0.284	0.890	0.000
Mn	0.072	0.077	0.008	0.008	0.006	0.007	0.017	0.000	0.002	0.002	0.004	0.001	0.000
Mg	0.971	0.775	1.144	1.052	1.039	1.102	1.045	0.001	0.420	0.273	1.668	1.525	0.001
Ca	0.103	0.118	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.005	0.000	0.000	0.001	0.000	0.273
Na	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.004	0.008	0.017	0.032	0.755
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.962	0.009
Zn									0.040	0.069			
总和	7.993	7.965	4	4	4	4	4	5.998	3	3	11.008	7.819	5.030
X_{Mg}	0.346	0.283	0.624	0.596	0.586	0.606	0.581		0.424	0.277	0.855	0.631	
X_{Al}			0.102	0.194	0.193	0.141	0.154						

a) gt(c), 石榴石核部; gt(r), 石榴石边部; opx(i), 石榴石中斜方辉石包裹体; opx(c), 斜方辉石核部; opx(r), 斜方辉石边部; opx(2), M2 斜方辉石; sp(i), 尖晶石包裹体; sp(o), 基质中尖晶石; sil, 矽线石; cd, 堇青石; bt, 黑云母; pl, 斜长石; X_{Mg}= Mg/(Fe^{2+}+Mg); X_{Al}=Al/2

黑云母、斜长石和石英定向排列, 构成 S2 面理与 M2 组合(图 2(d)). 石榴石核部 MgO 含量高于边部, 分别为 8.4wt%和 6.7wt%. 斜方辉石包裹体 Al_2O_3 含量较低, 为 4.6wt%左右, 其对应的 X_{Al}(=Al/2)值为 0.102. 峰期斜方辉石的 Al_2O_3 含量明显高于包裹体中和第二期组合中斜方辉石 Al_2O_3 含量, 而其核部具有最高的 Al_2O_3 含量 8.7wt%, 也明显高于其边部的 Al_2O_3 含量 6.3wt%, 其对应的 X_{Al} 值分别为 0.194 和 0.141. 堇青石的 Mg/(Fe^{2+}+Mg)比值为 0.855. 尖晶石包裹体具有比基质中尖晶石低的 ZnO 含量, 分别为 1.4wt%和 2.3wt%, 其 Mg/(Fe^{2+}+Mg)比值分别为 0.424 和 0.277. 黑云母为棕褐色, 其 Mg/(Fe^{2+}+Mg)比值为 0.631, 其 TiO_2 含量最高为 4.6wt%. 斜长石的 An 含量位于 31%~46%之间.

矿物结构关系和矿物成分表明该超高温变泥质麻粒岩主要存在三期矿物组合: (1) 峰期前含斜方辉石-尖晶石或尖晶石-矽线石的包裹体矿物组合(M0), 斜方辉石以低的 Al_2O_3 含量(4wt%~5wt%)为特征; (2) 峰期含石榴石-斜方辉石-堇青石的超高温变质矿物组合(M1), 斜方辉石以高的 Al_2O_3 含量(8.7wt%)为特征; (3) 峰期后含斜方辉石-矽线石-黑云母的高温矿物组合(M2), 斜方辉石则以中等 Al_2O_3 含量(6wt%~7 wt%)为特征.

3 变质温压条件与 *P-T* 轨迹

由于许多石榴石-斜方辉石温压计未考虑岩石在

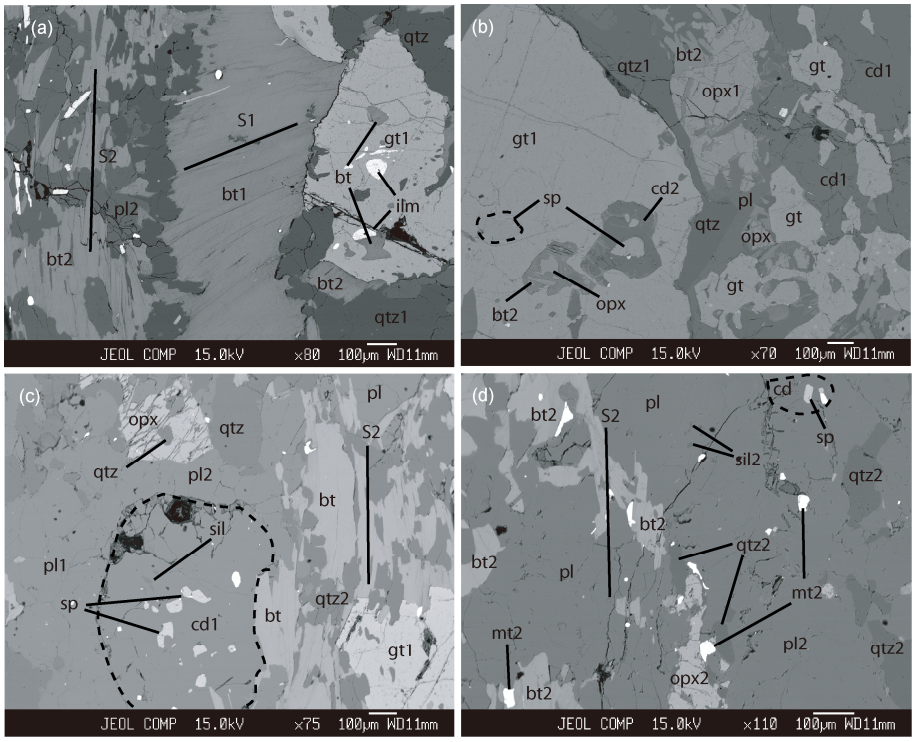

图 2　阿尔泰超高温变泥质麻粒岩背散射(BSI)显微照片

(a) 不同方向黑云母排列定义了两组片麻理 S1 和 S2, 石榴石含有较小的黑云母和钛铁矿包体; (b) 石榴石变斑晶含有早期斜方辉石和尖晶石的包体, 并分别发育黑云母和堇青石退变反应边; (c) 堇青石含有早期尖晶石和矽线石包体; (d) 定向排列的斜方辉石+矽线石+黑云母+斜长石+石英组合. 矿物缩写: gt, 石榴石; opx, 斜方辉石; sp, 尖晶石; ilm, 钛铁矿; mt, 磁铁矿; qtz, 石英; 其他同表 1. 1 和 2 分别代表 M1 矿物组合与 M2 矿物组合

经历麻粒岩相变质作用后的退变质降温期间矿物对之间普遍发生的 Fe^{2+}-Mg 重调, 因此这些温压计往往不能给出真正峰期或峰期前的温压条件值. 所以, 本文采用 Pattison 等人[35]经过校正的石榴石-斜方辉石矿物对温压计来估算该超高温变泥质麻粒岩峰期和峰期前的温压条件.

石榴石中低铝的斜方辉石包裹体和其靠近的石榴石可以作为矿物对来估算峰期前变质阶段(M0)的温压条件, 计算结果表明峰期前变质阶段 *P-T* 条件为~0.7 GPa 和~890℃. 石榴石靠近核部的成分和其平衡的高铝斜方辉石核部成分组成矿物对可以反映峰期变质矿物组合(M1)的形成条件, 计算结果显示峰期超高温变质阶段矿物组合的 *P-T* 条件为~0.8 GPa 和~960℃. 由于峰期后含斜方辉石-矽线石-黑云母的高温变质矿物组合(M2)缺乏石榴石矿物而无法采用上面的石榴石-斜方辉石矿物对温压计来计算其变质温压条件, 可以用 Thermocalc 平均 *P-T* 计来计算, 计算结果表明峰期后阶段矿物组合(M2)形成的变质条件为~0.9 GPa 和~870℃.

因此, 由上面 3 个不同变质阶段的 *P-T* 条件在变泥质岩的 KFMASH 模式体系成岩格子中[36]定义了一个具有初始前进的升压加热和峰期超高温变质阶段后近等压冷却的逆时针 *P-T* 演化轨迹(图 3). 峰期前含斜方辉石-尖晶石或尖晶石-矽线石的包裹体矿物组合(M0)形成的 *P-T* 条件为~0.7 GPa 和~890℃, 这与含尖晶石组合在成岩格子中的中-低压高温稳定域很接近, 也很一致. 而峰期超高温变质阶段矿物组合(M1)形成的 *P-T* 条件为~0.8 GPa 和~960℃, 与峰期斜方辉石高铝含量(Al_2O_3>8.0wt%)指示其达到了超高温(>900℃)变质条件的特征一致. 峰期后含斜方辉石-矽线石-黑云母的高温变质矿物组合(M2)形成的变质条件为~0.9 GPa 和~870℃, 则与该组合在成岩格子中的中压高温稳定域非常一致(图 3). 这也说明如果黑云母和斜方辉石-矽线石-石英是共生矿物组合, 并不能一定指示其达到超高温变质作用的条件.

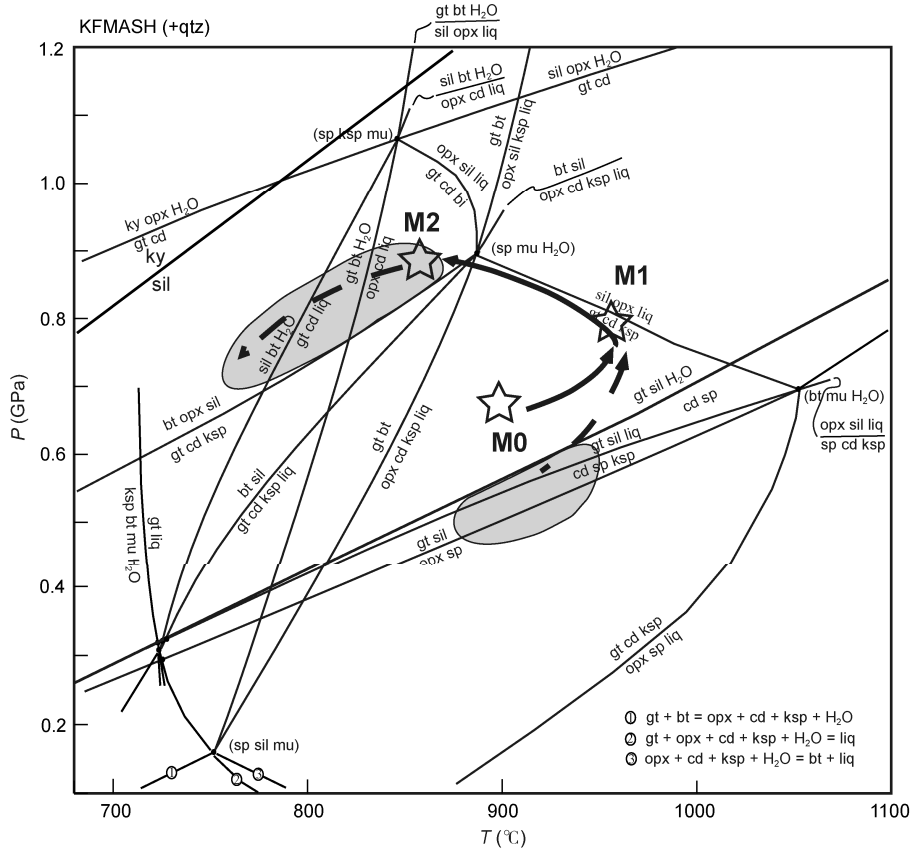

图 3 阿尔泰超高温变泥质麻粒岩的 *P-T* 演化轨迹

变泥质岩在 KFMASH 体系的 *P-T* 成岩格子图据文献[36]. 矿物缩写: ky, 蓝晶石; mu, 白云母; ksp, 钾长石; liq, 熔体; 其他同图 2

4 锆石 U-Pb 年龄

锆石的 U-Pb 分析是在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室的 RESolution M50 型激光剥蚀系统的 Agilent 7500a 型 LA-ICP-MS 联机设备上完成, 详细分析流程见文献[37,38]. 该超高温变泥质麻粒岩中的锆石主要为较自形的长柱状, 在 CL 图像上, 没有明显的环带(图 4(a)). Th/U 比值大于 0.1, 应为变质重结晶期间形成的锆石. 对 18 粒锆石进行测试所得的年龄主要分布于 260~280 Ma 之间, 其谐和年龄为 271±5 Ma (n=18, MSWD=1.5) (图 4(b)). 该组锆石形成于超高温变质作用期间, 其年龄应反映了阿尔泰超高温变质事件发生的时间.

5 地质意义

本文通过详细的岩相学观察和矿物温压计算, 首次确定了在阿勒泰喀拉苏附近存在含石榴石-斜方辉石-矽线石-堇青石的超高温变泥质麻粒岩. 斜方辉石成分具有高铝特点, 其 Al_2O_3 含量高达 8.7wt%, 指示了其峰期变质作用达到了超高温(>900℃)的条件. *P-T* 估算结果表明其峰期变质条件为~0.8 GPa 和~960℃, 而 3 个不同变质阶段矿物组合的 *P-T* 条件在 KFMASH 模式体系成岩格子中[36]定义了一个具有初始前进的升压加热和峰期后近等压冷却的逆时针 *P-T* 演化轨迹(图 3). 具有峰期后近等压冷却的逆时针 *P-T* 演化轨迹通常反映了一个涉及初始地壳挤压紧接着发生伸展的大地构造过程, 这一过程往往伴随着深源岩浆的侵入或地幔岩石圈的减薄, 并提供重要的热源导致增厚地壳的快速加热[39]. 因此, 该研究获得的峰期后近等压冷却的逆时针 *P-T* 演化轨迹反映了阿尔泰超高温变泥质麻粒岩可能形成于一个涉及深源岩浆的侵入并伴随着下地壳伸展加热的大地构造背景, 这和王伟等人[18]得出的该区中-低压高温泥质麻粒岩形成于具有高热流伸展构造背景的结论一致.

上述研究结果则与 Li 等人[34]报道的富蕴县乌恰

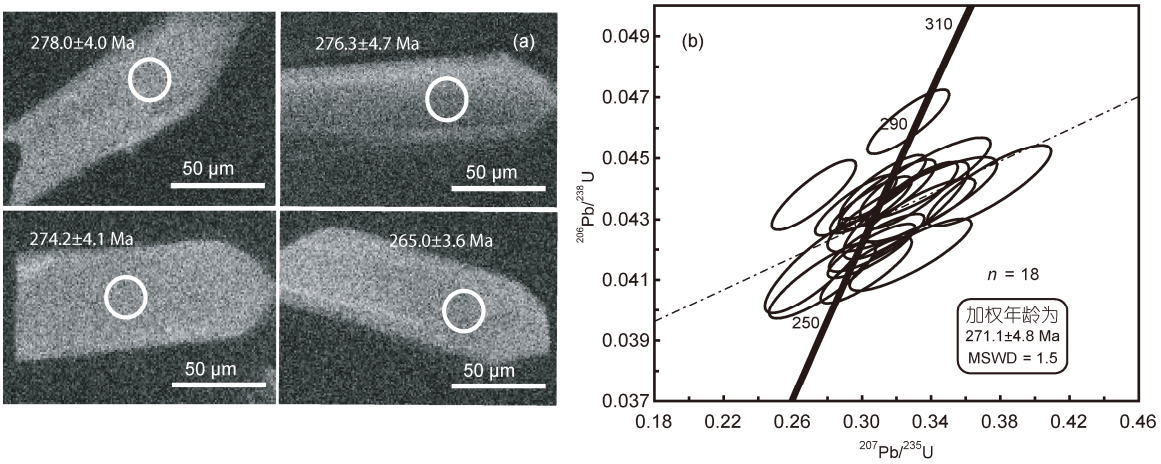

图 4　阿尔泰超高温变泥质麻粒岩中锆石的阴极发光图片及 U-Pb 谐和图

沟超高温(>900℃)泥质麻粒岩具有峰期后减压的顺时针 *P-T* 轨迹以及可能与洋壳俯冲和板块碰撞有关的推论不一致, 由于二者矿物组合与结构关系类似, 其峰期矿物含有早期尖晶石等包裹体, 说明峰期超高温变质之前变质阶段处于含尖晶石组合在成岩格子中的中-低压高温稳定域, 因此乌恰沟超高温变泥质麻粒岩实际上可能也经历了类似的峰期后近等压冷却的逆时针*P-T*演化历史. 喀拉苏超高温变泥质麻粒岩的锆石 U-Pb 年龄测定结果主要分布于 260~280 Ma 之间, 其谐和年龄为 271±5 Ma, 表明阿尔泰超高温变质事件发生于二叠纪. 尽管 Li 等人[34]对乌恰沟超高温变泥质麻粒岩进行了锆石定年并认为该区超高温变质事件可能形成于早古生代(~499 Ma), 但之后的锆石年龄结果(~277 Ma)支持了阿尔泰造山带的超高温变质事件发生于二叠纪[40]. 该超高温变质事件时间也与该造山带其他中-低压高温麻粒岩和片麻岩的二叠纪变质年龄(270~280 Ma)一致[17,18,41,42], 表明阿尔泰造山带超高温-高温麻粒岩相变质事件均发生于二叠纪. 由于超高温变泥质麻粒岩以构造透镜体产于中低压高温泥质麻粒岩中, 据此推测超高温变泥质麻粒岩可能通过 D2 构造作用就位于中-低压高温泥质麻粒岩之中.

本文确定的阿尔泰二叠纪超高温麻粒岩相变质事件在时间上与新疆二叠纪塔里木地幔柱活动的时间(~275 Ma)高度一致[43], 而且也与阿尔泰地区广泛的二叠纪(280~260 Ma)形成于后造山或非造山伸展背景的、具有幔源成因的基性到花岗质岩浆作用的时间非常一致[29~33]. 因此, 阿尔泰超高温变质作用可能与由二叠纪地幔柱活动引起的岩浆侵入和下地壳伸展加热有关. 例如, 后造山或非造山的喇嘛昭花岗岩和富蕴县南花岗质岩墙分别侵位于 276 和 275 Ma[26,27], 它们来源于后造山幔源基性岩浆的底侵[30], 而富蕴喀拉通克的镁铁质杂岩(287 Ma)也被认为形成于后造山伸展背景下幔源岩浆的底侵[31]. 这些均支持了在阿尔泰地区存在二叠纪(~275 Ma)地幔柱活动[29,44]. 因此, 阿尔泰超高温变质事件可能与二叠纪塔里木地幔柱活动引起的岩浆底侵和下地壳伸展加热密切相关, 这和该超高温麻粒岩的逆时针 *P-T* 演化轨迹所反映的构造背景一致, 也与阿尔泰多处发育片麻岩热穹隆构造一致. 由于阿尔泰造山带主期角闪岩相变质作用演化发生于泥盆纪[15], 其对应的弧-陆碰撞作用形成了该造山带的主要格局[11,19], 以及超高温变质事件与和额尔齐斯深大断裂带/剪切带发育时间的一致性[33], 说明该带超高温变质作用的性质可能是由二叠纪塔里木地幔柱活动引起的叠加的构造热变质事件.

致谢　感谢中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室李聪颖和涂湘林在锆石 LA-ICP-MS 年代学测试分析过程中给予的帮助以及审稿人提出的修改意见.

参考文献

1 Harley S L. Extending our understanding of ultrahigh temperature crustal metamorphism. J Mineral Petrol Sci, 2004, 99: 140–158
2 Brown M. Metamorphism, plate tectonics, and the supercontinent cycle. Earth Sci Front, 2007, 14: 1–18
3 Harley S L. Refining the *P-T* records of UHT crustal metamorphism. J Metamorph Geol, 2008, 26: 125–154
4 Tong L, Wilson C J L. Tectonothermal evolution of the ultrahigh temperature metapelites in the Rauer Group, east Antarctica. Precambrian Res, 2006, 149: 1–20
5 Tsunogae T, Santosh M. Spinel-sapphirine-quartz-bearing composite inclusion within garnet from an ultrahigh-temperature pelitic granulite: Implications for metamorphic history and *P-T* path. Lithos, 2006, 92: 524–536
6 Santosh M, Tsunogae T, Li J H, et al. Discovery of sapphirine-bearing Mg-Al granulites in the North China Craton: Implications for Palaeoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism. Gondwana Res, 2007, 11: 263–285
7 Sengor A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. Nature, 1993, 54: 117–137
8 Jahn B M. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic. In: Malpas J, Fletcher C J N, Ali J R, et al., eds. Aspects of the Tectonic Evolution of China. London: Geological Society Special Publicationgs, 2004, 226: 73–100
9 Xiao W, Windley B F, Badarch G, et al. Palaeozoic accretion and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of Central Asia. J Geol Soc Lond, 2004, 161: 339–342
10 何国琦, 韩宝福, 岳永君, 等. 中国阿尔泰造山带的构造分区和地壳演化. 新疆地质科学, 1990, 2: 9–20
11 Windley B F, Kroner A, Guo J, et al. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution. J Geol, 2002, 110: 719–737
12 庄育勋. 中国阿尔泰造山带变质作用 *PTSt* 演化和热-构造-片麻岩穹隆形成机制. 地质学报, 1994, 68: 35–47
13 张翠光, 魏春景, 邱林. 新疆阿尔泰造山带变质作用演化及其地质意义. 新疆地质, 2004, 22: 16–23
14 徐学纯, 郑常青, 赵庆英. 阿尔泰海西造山带区域变质作用类型与地壳演化. 吉林大学学报, 2005, 35: 7–11
15 Wei C, Clarke G, Tian W, et al. Transition of metamorphic series from the kyanite- to andalusite-types in the Altai orogen, Xinjiang, China: Evidence from petrography and calculated KMnFMASH and KFMASH phase relations. Lithos, 2007, 96: 353–374
16 厉子龙, 陈汉林, 杨树锋, 等. 阿尔泰基性麻粒岩的发现: 来自矿物学的证据. 岩石学报, 2004, 20: 1445–1455
17 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 等. 阿尔泰造山带富蕴基性麻粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其构造意义. 岩石学报, 2006, 22: 1351–1358
18 王伟, 魏春景, 王涛, 等. 中国阿尔泰造山带泥质麻粒岩的确定及地质意义. 科学通报, 2009, 54: 918–923
19 Wang T, Hong D, Jahn B M, et al. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen. J Geol, 2006, 114: 735–751
20 Windley B F, Alexeiev D, Xiao W, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic belt. J Geol Soc Lond, 2007, 164: 31–47
21 孙敏, 龙晓平, 蔡克大, 等. 阿尔泰早古生代末期洋中脊俯冲: 锆石 Hf 同位素突变的启示. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 935–948
22 Jiang Y, Sun M, Zhao G, et al. The ~390 Ma high-*T* metamorphic event in the Chinese Altai: A consequence of ridge-subduction? Am J Sci, 2010, 310: 1421–1452
23 肖文交, 韩春明, 袁超, 等. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约. 岩石学报, 2006, 22: 1062–1076
24 Xiao W, Han C, Yuan C, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. J Asian Earth Sci, 2008, 32: 102–117
25 Sun M, Yuan C, Xiao W, et al. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai: Progressive accretionary history in the early to middle Paleozoic. Chem Geol, 2008, 247: 352–383
26 王涛, 洪大伟, 童英, 等. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石SHRIMP年龄-成因及陆壳垂向生长意义. 岩石学报, 2005, 21: 640–650
27 童英, 洪大伟, 王涛, 等. 阿尔泰造山带南缘富蕴后造山线形花岗岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 2006, 25: 85–89
28 周刚, 张招崇, 罗世宾, 等. 新疆阿尔泰南缘玛因鄂博高温型强过铝花岗岩: 年龄-地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 2007, 23: 1909–1920
29 Zhang C L, Santosh M, Zou H B, et al. Revisiting the "Irtish tectonic belt": Implications for the Palaeozoic tectonic evolution of the Altai orogen. J Asian Earth Sci, 2012, 52: 117–133

30 童英, 王涛, 洪大伟, 等. 中国阿尔泰造山带花岗岩 Pb 同位素组成特征: 幔源成因佐证及陆壳生长意义. 地质学报, 2006, 80: 517–528
31 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 科学通报, 2004, 49: 2324–2328
32 陈立辉, 韩宝福. 新疆北部乌恰沟地区镁铁质侵入岩的年代学地球化学和同位素组成: 对地幔源区特征和深部过程的约束. 岩石学报, 2006, 22: 1201–1214
33 Briggs S M, Yin A, Manning C E, et al. Late Paleozoic tectonic evolution history of the Ertix Fault in the Chinese Altai and its implications for the development of the Central Asian Orogenic System. Geol Soc Am Bull, 2007, 119: 944–960
34 Li Z, Li Y, Chen H, et al. SHRIMP U-Pb zircon chronology of ultrahigh-temperature spinel-orthopyroxene-garnet granulite from south Altay orogenic belt, Northwestern China. Isl Arc, 2010, 19: 506–516
35 Pattison D R M, Chacko T, Farquhar J, et al. Temperatures of granulite-facies metamorphism: Constraints from experimental phase equilibria and thermobarometry corrected for retrograde exchange. J Petrol, 2003, 44: 867–900
36 仝来喜, 刘小汉, 王彦斌, 等. 东南极拉斯曼丘陵泥质麻粒岩的变质作用演化. 地质学报, 2012, 86: 1273–1290
37 涂湘林, 张红, 邓文峰, 等. RESolution 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用. 地球化学, 2011, 40: 83–98
38 Liu Y, Hu Z, Gao S, et al. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. Chem Geol, 2008, 257: 34–43
39 Sandiford M, Powell R. Some remarks on high-temperature-low-pressure metamorphism in convergent orogens. J Metamorph Geol, 1991, 9: 333–340
40 厉子龙, 励音其, 汪惠惠, 等. 阿尔泰晚古生代超高温变质作用及其演化. 2012 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要, 2012. 319
41 胡霭琴, 韦刚健, 邓文峰, 等. 阿尔泰地区青河县西南片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 2006, 22: 1–10
42 郑常青, 徐学纯, Kato T, 等. 新疆阿尔泰冲乎尔地区蓝晶石-夕线石型变质带独居石 CHIME 二叠纪年龄及其地质意义. 高校地质学报, 2007, 13: 566–573
43 Zhang C L, Li Z X, Li X H, et al. A Permian large igneous province in Tarim and Central Aisian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275 Ma mantle plume? Geol Soc Am Bull, 2010, 122: 2020–2040
44 Pirajno F, Mao J, Zhang Z, et al. The association of mafic-ultramafic intrusions and A-type magmatism in the Tian Shan and Altay orogens, NW China: Implications for geodynamic evolution and potential for the discovery of new ore deposits. J Asian Earth Sci, 2008, 32: 165–183