

# 阿尔泰超高温变泥质麻粒岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义\*

仝来喜<sup>1</sup> 陈义兵<sup>1</sup> 徐义刚<sup>1</sup> 周信<sup>1,2</sup> 刘兆<sup>1,2</sup>

TONG LaiXi<sup>1</sup>, CHEN YiBing<sup>1</sup>, XU YiGang<sup>1</sup>, ZHOU Xin<sup>1,2</sup>, LIU Zhao<sup>1,2</sup>

1. 同位素地球化学国家重点实验室, 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2013-04-20 收稿, 2013-08-01 改回.

Tong LX, Chen YB, Xu YG, Zhou X and Liu Z. 2013. Zircon U-Pb ages of the ultrahigh-temperature metapelitic granulite from the Altai orogen, NW China, and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10):3435–3445

**Abstract** Recently we have firstly recognized an ultrahigh-temperature (UHT) metapelitic granulite from the migmatitic paragneiss near Kalasu in the Chinese Altai, NW China, with an assemblage of Gt-Opx-Sil-Cd-Sp-Bt-Pl-Qtz. Orthopyroxene shows a high-Al feature, with an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content in excess of 8.0%, indicating that its peak metamorphism reached UHT conditions (>900°C). *P-T* estimate results show its peak metamorphic conditions as: *P* = ~8 kb, *T* = ~960°C. The preliminary *P-T* estimate results indicate an anticlockwise *P-T* path with a post-peak near isobaric cooling. Through LA-ICP-MS technique, the U-Pb age dating for zircons from the UHT metapelitic granulite has been undertaken, and the age data are mainly between 260 ~ 280 Ma, with an intercept at 271 ± 5 Ma, sparse ages of 380 ~ 390 Ma, and detrital ages mainly between 450 ~ 500 Ma. The age data support that the UHT metamorphic event in the Altai orogen occurred during the Permian, highly consistent with the timing of the Permian Tarim mantle plume (~275 Ma), and also coeval with the extensive Permian (260 ~ 280 Ma) post-orogenic or anorogenic mafic and granitic intrusions in the region. Thus, the Permian UHT metapelitic granulite in the Altai orogen may be closely associated with a magmatic underplating and extensional heating in the lower crust, as a result of the Permian Tarim mantle plume event, and this is also compatible with its anticlockwise *P-T* path.

**Key words** Ultrahigh-temperature; Metapelitic granulite; Chinese Altai; Zircon U-Pb ages

**摘要** 最近我们通过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超高温变泥质麻粒岩,其矿物组合为石榴石+斜方辉石+夕线石+堇青石+尖晶石+黑云母+斜长石+石英等。斜方辉石成分具有高铝特点,其 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量高于 8.0%,指示了其峰期变质作用达到了超高温(>900°C)的条件。*P-T* 计算结果显示其峰期变质条件为:*P* = ~8.0 kb, *T* = ~960°C。初步 *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。我们对其中锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定,年龄结果主要分布于 260 ~ 280 Ma 之间,具有峰值年龄 271 ± 5 Ma,个别年龄为 380 ~ 390 Ma,继承锆石主要分布于 450 ~ 500 Ma 之间。该年龄结果表明阿尔泰超高温变质事件发生于二叠纪,在时间上与二叠纪塔里木地幔柱活动的时间(~275 Ma)高度一致,且也和该区广泛的二叠纪(260 ~ 280 Ma)后造山或非造山的基性岩和花岗岩侵入是同时的。因此,阿尔泰二叠纪超高温变泥质麻粒岩的形成,可能与由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,这也与该超高温变泥质麻粒岩的逆时针 *P-T* 轨迹所反映的构造背景一致。

**关键词** 超高温;变泥质麻粒岩;阿尔泰;锆石 U-Pb 年龄

中图法分类号 P588.347; P597.3

\* 本文受国家重点基础研究发展计划 973 项目(2011CB808901)资助。

第一作者简介:仝来喜,男,1965年生,研究员,从事变质地质学研究, E-mail: lxtong@gig.ac.cn

## 1 引言

过去几年来,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前沿课题。它是指地壳岩石遭受峰期变质温度通常超过 900℃ 的非常高温的麻粒岩相变质作用,并发育特征的变质矿物组合如斜方辉石+夕线石+石英,假蓝宝石+石英,尖晶石+石英等,斜方辉石以高铝( $Al_2O_3 > 8.0\%$ )为特征,其压力条件主要位于夕线石的稳定域,其原岩多为富镁铝和硅饱和的变泥质岩(Harley, 1998, 2004)。目前,国际上已有至少 30 多处含有这些指示性矿物组合的超高温麻粒岩的不同产地报道,且大多位于前寒武纪变质地体中(Brown, 2007)。其中代表性的产地有南极的 Napier 杂岩(Harley and Motoyoshi, 2000)和 Rauer 群岛(Tong and Wilson, 2006),南印度的 Palni 丘陵(Raith *et al.*, 1997)和我国华北的土贵乌拉(Santosh *et al.*, 2007)等地。由于这些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,因此对超高温麻粒岩进行研究对认识和理解下地壳演化和壳-幔相互作用过程至关重要。

近年来, Li *et al.* (2010) 报道了阿尔泰富蕴县乌恰沟含超高温泥质麻粒岩矿物组合,其锆石 U-Pb 年龄为 ~499Ma, 并认为阿尔泰超高温变质事件发生于早古生代。最近,他们获得了晚古生代的锆石 U-Pb 年龄(269 ~ 290Ma),认为该超高温变质事件发生于二叠纪(厉子龙等, 2012),二者年龄显示明显不同,但都认为与古亚洲洋俯冲和板块碰撞有关。本文通过岩相学和初步 *P-T* 计算结果,确定了阿勒泰喀拉苏附近存在超高温变泥质麻粒岩,并对其进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定。锆石年龄结果表明阿尔泰超高温变质事件发生于二叠纪(260 ~ 280Ma), 并和二叠纪塔里木地幔柱活动的时间高度一致。因此,阿尔泰二叠纪超高温变质作用可能与广泛的二叠纪塔里木地幔柱活动有密切成因联系,这对认识中亚造山带的增生演化过程具有重要的科学意义。

## 2 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(Sengör *et al.*, 1993; Jahn, 2004; Xiao *et al.*, 2004)。阿尔泰造山带位于西伯利亚板块的西南缘,其南部以北西向的额尔齐斯深大断裂与准噶尔板块为界(图 1)。该造山带记录了新元古代到晚古生代的构造演化过程,由北向南通常被划分为五个以断层为边界的地体或大地构造单元(何国琦等, 1990; Windley *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006, 2009)。单元 I 和单元 II 分别由泥盆纪-石炭纪火山-沉积岩和新元古代-奥陶纪及少量泥盆纪沉积-火山岩组成,经历了低绿片岩相变质作用;单元 III(或中阿尔泰地体)形成阿尔泰造山带的主体,主要

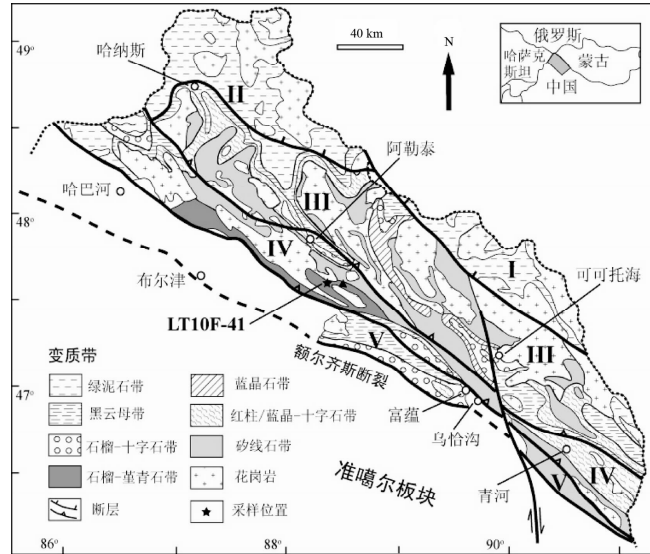


图 1 中国阿尔泰地区变质地质图(据 Wei *et al.*, 2007 修改)

Fig. 1 The metamorphic geological map of the Chinese Altai (modified after Wei *et al.*, 2007)

由新元古代-奥陶纪变沉积岩和变火山岩组成,具有前寒武纪基底或微陆块的特点,普遍经历了绿片岩相-高角闪岩相变质作用;单元 IV(或琼库尔-阿巴宫地体)主要由志留纪-泥盆纪火山-碎屑沉积岩组成,可能代表岛弧产物,并经历了绿片岩相-高角闪岩相变质作用,局部达到麻粒岩相变质作用(厉子龙等, 2004; 陈汉林等, 2006; Chen *et al.*, 2006; 王伟等, 2009);单元 V(或额尔齐斯地体)由前寒武纪基底和泥盆纪-石炭纪火山-碎屑沉积岩组成,经历了绿片岩相-角闪岩相变质作用。

该造山带中分布着大量花岗质岩石和正片麻岩,其面积占该带约 40% 左右,主要由早古生代同造山型和晚古生代后造山或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不同类型(Wang *et al.*, 2006)。这些花岗质岩石和正片麻岩主要具有早-中古生代的锆石 U-Pb 年龄,其年龄主要分布在 400Ma 左右(或 370 ~ 450Ma 之间),并具有弧岩浆作用特征(王涛等, 2005; Wang *et al.*, 2006; Yuan *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2008)。其它晚古生代花岗质岩石和正片麻岩也广泛分布,其锆石 U-Pb 年龄主要分布在 270 ~ 280Ma 之间(童英等, 2006a; 周刚等, 2007; Zhang *et al.*, 2010, 2012),也有 280Ma 左右的镁铁质侵入岩和基性-超基性侵入杂岩分别分布于富蕴县乌恰沟和喀拉通克(韩宝福等, 2004; 陈立辉和韩宝福, 2006), 并和额尔齐斯深大断裂带/剪切带的时间(~280Ma)一致(Laurent-Charvet *et al.*, 2003; Briggs *et al.*, 2007)。

阿尔泰造山带广泛发育古生代中-低压型递增变质带和数个花岗质片麻岩热穹隆构造(庄育勋, 1994; 张翠光等, 2004; 徐学纯等, 2005; Wei *et al.*, 2007)。递增变质带可分

表 1 超高温变泥质麻粒岩中主要矿物的电子探针分析结果 (wt%)

Table 1 The EPMA analysis results for major minerals in the UHT metapelitic granulite (wt%)

Mineral	gt(c)	gt(r)	opx(c)	opx(r)	sill	sp(i)	sp(o)	cd	bt	pl
SiO <sub>2</sub>	38.88	39.06	47.41	48.23	37.62	0.03	0.02	49.71	36.22	60.85
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.06	0.13	0.04	0.02	0.04	0.00	0.06	4.57	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.02	21.6	8.52	6.29	60.94	59.14	57.44	33.96	16.60	24.35
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.03	0.02	0.00	0.04	0.25	1.16	0.00	0.12	0.00
FeO	28.48	30.20	25.00	24.75	0.79	28.59	31.86	4.25	14.31	0.03
MnO	1.10	1.17	0.23	0.23	0.00	0.09	0.07	0.05	0.01	0.00
MgO	8.44	6.68	18.62	19.54	0.01	10.42	6.58	11.21	13.77	0.01
CaO	1.24	1.42	0.04	0.03	0.08	0.00	0.00	0.01	0.00	5.72
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.08	0.14	0.09	0.22	8.74
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	10.14	0.16
ZnO						1.39	2.32			
Totals	100.26	100.23	99.98	99.11	99.50	100.02	99.58	99.39	95.96	99.85
O	12	12	6	6	10	4	4	18	11	8
Si	3.000	3.040	1.781	1.825	2.047	0.001	0.001	4.962	2.692	2.711
Ti	0.004	0.004	0.004	0.001	0.001	0.001	0.000	0.005	0.255	0.000
Al	2.003	1.982	0.377	0.281	3.907	1.884	1.882	3.997	1.455	1.279
Cr	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001	0.005	0.025	0.000	0.007	0.000
Fe <sup>3+</sup>	0.000	0.000	0.055	0.068	0.000	0.111	0.099	0.071	0.000	0.001
Fe <sup>2+</sup>	1.838	1.966	0.730	0.716	0.036	0.531	0.641	0.284	0.890	0.000
Mn	0.072	0.077	0.007	0.007	0.000	0.002	0.002	0.004	0.001	0.000
Mg	0.971	0.775	1.042	1.102	0.001	0.420	0.273	1.668	1.525	0.001
Ca	0.103	0.118	0.002	0.001	0.005	0.000	0.000	0.001	0.000	0.273
Na	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.004	0.008	0.017	0.032	0.755
K	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.962	0.009
Zn						0.040	0.069			
Sum	7.993	7.965	4	4	5.998	3	3	11.008	7.819	5.030
X <sub>Mg</sub>	0.346	0.283	0.588	0.606		0.424	0.277	0.855	0.631	
X <sub>Al</sub>			0.189	0.141						

注:gt(c)-石榴石核部;gt(r)-石榴石边部;opx(c)-斜方辉石核部;opx(r)-斜方辉石边部;sp(i)-尖晶石包裹体;sp(o)-基质中尖晶石

为蓝晶石型和红柱石型两种类型,Windley *et al.* (2002)认为该变质带具有巴罗型变质带特征。该带主要表现为绿片岩相-角闪岩相变质作用,在红柱石型变质带的高温部分发育石榴石-堇青石带(图1)(庄育勋,1994;Wei *et al.*, 2007),并达到了麻粒岩相变质条件(王伟等,2009)。庄育勋(1994)和胡霁琴等(2002)分别报道了Rb-Sr全岩等时线年龄365Ma和锆石U-Pb年龄367Ma,被Windley *et al.* (2002)和Wei *et al.* (2007)解释为该带绿片岩相-角闪岩相变质作用发生的时间,并认为该年龄代表早期蓝晶石型变质作用的年代。近年来的锆石U-Pb年代学研究进一步支持了该造山带早期角闪岩相变质作用发生于泥盆纪380~390Ma期间(Long *et al.*, 2007; Zheng *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2010)。这形成了对该造山带构造背景两种不同的认识,一种认为该造山带在泥盆纪发生弧-陆碰撞(Windley *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006; Wei *et al.*, 2007),另一种认为该变质带在泥盆纪(380~390Ma)发生洋脊俯冲和板片窗的发育,经历低压高温变质作用(Windley *et al.*, 2007; 孙敏等,2009; Jiang *et al.*, 2010)。

此外,近年来,麻粒岩或片麻岩中锆石U-Pb或独居石Th-Pb年龄结果表明阿尔泰造山带在二叠纪经历了一次重要的高级构造变质热事件(肖文交等,2006;Xiao *et al.*, 2008),其年龄主要分布于260~280Ma之间(胡霁琴等,2006;陈汉林等,2006;郑常青等,2007;Briggs *et al.*, 2007;王伟等,2009)。例如,王伟等(2009)在阿勒泰东大喀拉苏附近发现泥质麻粒岩组合,具有峰期条件~800°C/5~6kb和变质年龄为~290Ma。而Li *et al.* (2010)报道了在富蕴县乌恰沟超高温泥质麻粒岩具有峰期条件~1000°C/9~10kb和早古生代的年龄(499Ma),之后新的锆石年龄结果(277Ma)支持了该超高温变质事件发生于二叠纪(房子龙等,2012)。到目前,对该二叠纪构造变质事件的性质和构造背景仍存在不同的认识,如:阿尔泰造山带在二叠纪发生洋壳的俯冲和板块碰撞,从而导致麻粒岩高温或超高温变质作用(Chen *et al.*, 2006; 房子龙等,2012),或二叠纪麻粒岩相变质作用形成于伸展构造背景(王伟等,2009),或存在二叠纪(260~280Ma)地幔柱事件(Pirajno *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2010, 2012)。

表2 超高温变泥质麻粒岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb analysis results for zircons in the UHT metapelitic granulite

Spot No.	Th/U		Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 $\sigma$
	( $\times 10^{-6}$ )	( $\times 10^{-6}$ )													
LT10F-41-27	171	201	0.85	0.04781	0.00345	0.27711	0.02035	0.04098	0.00083	100.1	153.7	248.4	16.2	258.9	5.1
LT10F-41-41	176	208	0.84	0.05330	0.00320	0.30239	0.01741	0.04131	0.00071	342.7	137.0	268.3	13.6	261.0	4.4
LT10F-41-16	96	162	0.59	0.04723	0.00367	0.27456	0.02029	0.04144	0.00102	61.2	174.0	246.3	16.2	261.8	6.3
LT10F-41-42	119	161	0.74	0.05732	0.00397	0.32805	0.02324	0.04183	0.00078	505.6	153.7	288.1	17.8	264.2	4.8
LT10F-41-40	166	211	0.79	0.05283	0.00305	0.30547	0.01666	0.04196	0.00059	320.4	136.1	270.7	13.0	265.0	3.6
LT10F-41-44	149	190	0.79	0.05301	0.00312	0.30848	0.01817	0.04223	0.00063	327.8	133.3	273.0	14.1	266.6	3.9
LT10F-41-08	105	136	0.77	0.05479	0.00414	0.32545	0.02396	0.04329	0.00106	466.7	165.7	286.1	18.4	273.2	6.6
LT10F-41-45	118	154	0.77	0.05650	0.00365	0.33351	0.02110	0.04330	0.00069	472.3	142.6	292.2	16.1	273.2	4.3
LT10F-41-38	154	197	0.78	0.04897	0.00258	0.29647	0.01553	0.04346	0.00066	146.4	124.1	263.6	12.2	274.2	4.1
LT10F-41-35	175	199	0.87	0.05030	0.00252	0.30516	0.01556	0.04347	0.00062	209.3	116.7	270.4	12.1	274.3	3.8
LT10F-41-02	91	112	0.81	0.05309	0.00504	0.32909	0.03236	0.04347	0.00103	331.5	249.0	288.9	24.7	274.3	6.4
LT10F-41-39	141	187	0.76	0.05424	0.00296	0.32874	0.01754	0.04378	0.00072	388.9	122.2	288.6	13.4	276.2	4.5
LT10F-41-43	194	210	0.92	0.05219	0.00311	0.31450	0.01846	0.04381	0.00076	294.5	141.6	277.7	14.3	276.4	4.7
LT10F-41-32	128	211	0.61	0.05148	0.00268	0.31212	0.01633	0.04406	0.00070	261.2	94.4	275.8	12.6	277.9	4.3
LT10F-41-25	112	149	0.75	0.06169	0.00419	0.37348	0.02363	0.04410	0.00088	664.8	345.4	322.2	17.5	278.2	5.4
LT10F-41-04	135	165	0.82	0.05307	0.00389	0.33661	0.02487	0.04436	0.00088	331.5	166.6	294.6	18.9	279.8	5.4
LT10F-41-01	18	756	0.02	0.04959	0.00246	0.32673	0.01557	0.04620	0.00069	176.0	114.8	287.1	11.9	291.1	4.3
LT10F-41-37	98	847	0.12	0.05959	0.00206	0.51160	0.01820	0.06134	0.00096	587.1	69.4	419.5	12.2	383.7	5.8
LT10F-41-36	498	883	0.56	0.05982	0.00220	0.52713	0.02153	0.06272	0.00128	598.2	79.6	429.9	14.3	392.1	7.8
LT10F-41-34	113	380	0.30	0.05483	0.00227	0.53316	0.02627	0.06997	0.00175	405.6	92.6	433.9	17.4	436.0	10.5
LT10F-41-10	538	1598	0.34	0.05657	0.00239	0.58067	0.02471	0.07332	0.00106	476.0	88.0	464.9	15.9	456.2	6.3
LT10F-41-18	396	724	0.55	0.04725	0.00214	0.50745	0.02225	0.07520	0.00102	61.2	103.7	416.7	15.0	467.4	6.1
LT10F-41-03	391	771	0.51	0.04927	0.00209	0.53631	0.02083	0.07618	0.00105	161.2	100.0	436.0	13.8	473.3	6.3
LT10F-41-24	358	1618	0.22	0.05352	0.00184	0.57317	0.01930	0.07646	0.00092	350.1	77.8	460.1	12.5	475.0	5.5
LT10F-41-12	1168	3934	0.30	0.04854	0.00180	0.54212	0.02055	0.07827	0.00134	124.2	87.0	439.8	13.5	485.8	8.0
LT10F-41-07	206	1963	0.11	0.05072	0.00205	0.56920	0.02213	0.07837	0.00125	227.8	94.4	457.5	14.3	486.4	7.5
LT10F-41-21	371	466	0.80	0.05215	0.00225	0.57438	0.02463	0.07863	0.00119	300.1	98.1	460.8	15.9	488.0	7.1
LT10F-41-22	319	974	0.33	0.05386	0.00188	0.59401	0.02037	0.07889	0.00109	364.9	79.6	473.4	13.0	489.5	6.5
LT10F-41-05	445	837	0.53	0.05105	0.00259	0.58764	0.02805	0.07942	0.00147	242.7	123.1	469.4	17.9	492.7	8.8
LT10F-41-20	114	208	0.55	0.04973	0.00287	0.58872	0.03403	0.08430	0.00156	189.0	139.8	470.0	21.8	521.7	9.3
LT10F-41-19	448	1016	0.44	0.05204	0.00214	0.89530	0.03610	0.12109	0.00172	287.1	99.1	649.2	19.3	736.9	9.9
LT10F-41-06	423	1149	0.37	0.05447	0.00256	0.95937	0.04175	0.12211	0.00212	390.8	107.4	683.0	21.6	742.7	12.2
LT10F-41-17	125	295	0.42	0.05259	0.00253	1.07424	0.05118	0.14160	0.00252	309.3	109.2	740.8	25.1	853.7	14.2
LT10F-41-09	180	510	0.35	0.06483	0.00265	1.31953	0.05529	0.14401	0.00239	768.5	87.0	854.3	24.2	867.3	13.4
LT10F-41-31	64	240	0.27	0.08594	0.00298	2.30966	0.10456	0.18818	0.00496	1336.7	62.2	1215.3	32.1	1111.5	26.9

### 3 分析方法

矿物电子探针数据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 15kV;束流  $3 \times 10^{-8}$  A;束斑 1 $\mu\text{m}$ ;采用 ZAF 校正方法,结果见表 1。

锆石的阴极发光图像是在同位素地球化学国家重点实验室的 JXA-8100 型电子探针仪上完成。锆石的 U-Pb 分析是在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,实验过程中物质载体为 He 气,仪器监控标样为硅酸盐玻

璃 NIST610,并采用标准锆石 TEMORA 作为测年外标,激光斑束直径为 24 $\mu\text{m}$ ,频率为 8Hz。实验数据采用 ICP-MS DataCal 6.7 软件进行处理(Liu *et al.*, 2008),详细的实验流程可参考涂湘林等(2011),实验数据见表 2。

### 4 岩相学特征及变质温压条件

超高温变泥质麻粒岩产于阿勒泰东南喀拉苏附近混合岩化副片麻岩中,也就是王伟等(2009)报道的该区中低压泥质麻粒岩带中(图 1)。其主要矿物组合为:石榴石(10%),斜方辉石(7%~8%),夕线石(2%~3%),堇青石(10%),尖晶石(4%~5%),黑云母(15%~20%),斜长石(15%~

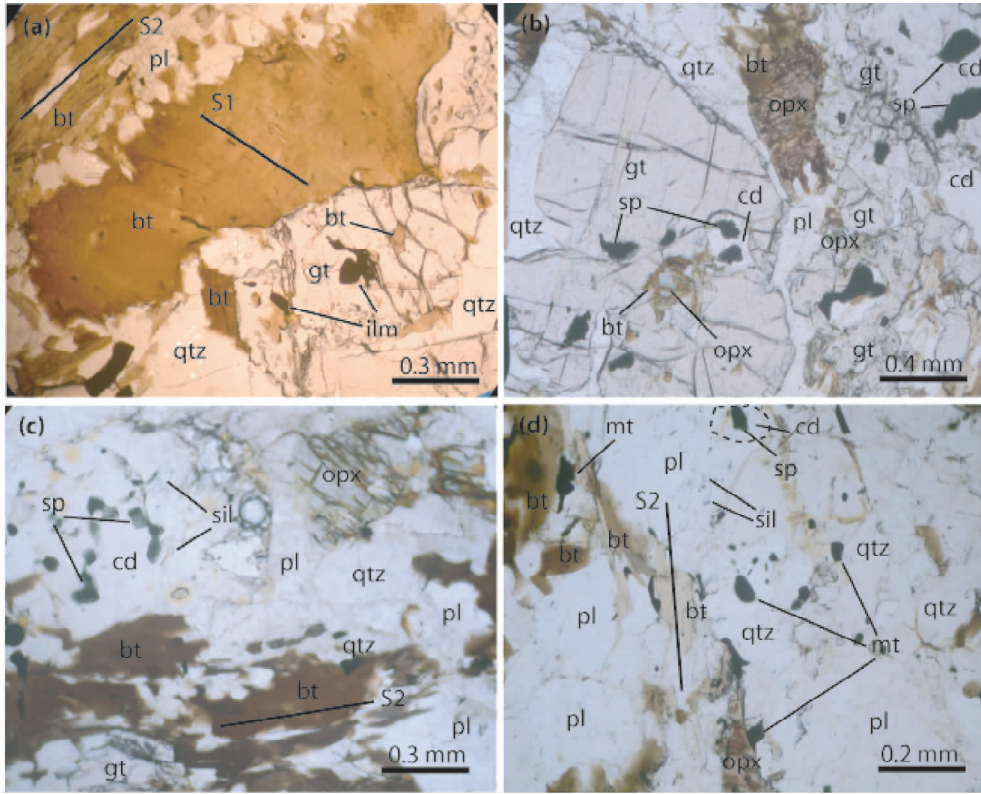


图 2 阿尔泰超高温变质泥质麻粒岩显微照片

(a)-不同方向黑云母排列定义了两期片麻理 S1 和 S2,石榴石含有黑云母和钛铁矿包裹体;(b)-石榴石变斑晶含有尖晶石和斜方辉石的包裹体,并分别发育黑云母和堇青石退变反应边;(c)-堇青石中央尖晶石和夕线石包裹体;(d)-平衡共生的斜方辉石+夕线石+黑云母+斜长石+石英组合. 矿物缩写:gt-石榴石;opx-斜方辉石;sil-夕线石;cd-堇青石;sp-尖晶石;bt-黑云母;pl-斜长石;ilm-钛铁矿;mt-磁铁矿;qtz-石英

Fig. 2 The microphotographs of the UHT metapelite granulite in the Chinese Altai

20%), 石英(20% ~ 25%) 及少量钛铁矿和磁铁矿等副矿物, 该组合与 Li *et al.* (2010) 报道的乌恰沟超高温泥质麻粒岩组合一致, 均不含钾长石矿物. 岩相学观察表明, 该岩石发育 S1 和 S2 至少两期组构(图 2a), 其中 S1 组构主要由粗粒的黑云母-石榴石-斜方辉石-堇青石等矿物组合构成, 而 S2 组构主要由定向排列的黑云母-斜方辉石-夕线石-斜长石等矿物组合组成. 石榴石含有尖晶石和斜方辉石等峰期前包裹体矿物(图 2b), 且堇青石也含有尖晶石和夕线石等包裹体矿物(图 2c). 矿物结构关系表明至少存在二期矿物组合:(1) 峰期含石榴石-斜方辉石-堇青石的变质矿物组合(M1), 斜方辉石以高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量(8.5%) 为特征;(2) 基质中定向排列的含有斜方辉石-夕线石-黑云母的峰期后变质矿物组合(M2), 斜方辉石以中等 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量(6% ~ 7%) 为特征(图 2d). 石榴石的 MgO 含量核部高于边部, 分别为 8.4% 和 6.7%, 对应的 X<sub>Mg</sub> (= Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>)) 比值分别为 0.35 和 0.28. 峰期斜方辉石和峰期后斜方辉石的 X<sub>Al</sub> (= Al/2) 值分别为 0.189 和 0.141(表 1), 其对应的 X<sub>Mg</sub> 比值分别为 0.59 和 0.61. 堇青石的 X<sub>Mg</sub> 比值为 0.855, 较富 MgO. 尖晶石包裹体具有比基质中尖晶石低的 ZnO 含量, 分别为 1.4% 和 2.3%. 黑云母为棕褐色, 其 X<sub>Mg</sub> 比值为 0.631, 其 TiO<sub>2</sub> 含

量最高为 4.6%(表 1). 斜长石的 An 含量位于 31 ~ 46 之间.

由于峰期变质矿物组合(M1)中斜方辉石的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量超过 8.0%, 这指示了峰期变质作用达到了超高温(>900℃)变质的条件(Harley, 1998, 2004). 但是, 由于高级变质岩在降温过程中矿物对之间普遍发生 Fe<sup>2+</sup>-Mg 重调, 因此, Fe<sup>2+</sup>-Mg 交换温度计往往不能给出真正的峰期温压条件. 所以, 本文我们采用 Pattison *et al.* (2003) 校正过的石榴石-斜方辉石矿物对温压计来估算该麻粒岩峰期的温压条件. 利用石榴石靠近核部的成分和其平衡的高铝斜方辉石成分, 经过计算, 结果显示峰期超高温变质阶段矿物组合(M1)形成的 P-T 条件为 ~0.8kb/ ~960℃. 由于峰期后含斜方辉石-夕线石-黑云母的变质矿物组合(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 P-T 条件为 ~0.9kb/ ~870℃. 因此, 峰期超高温变质阶段 M1 到峰期后高温阶段 M2 反映了一个近等压冷却的逆时针 P-T 轨迹(详细的 P-T 轨迹将另文发表).

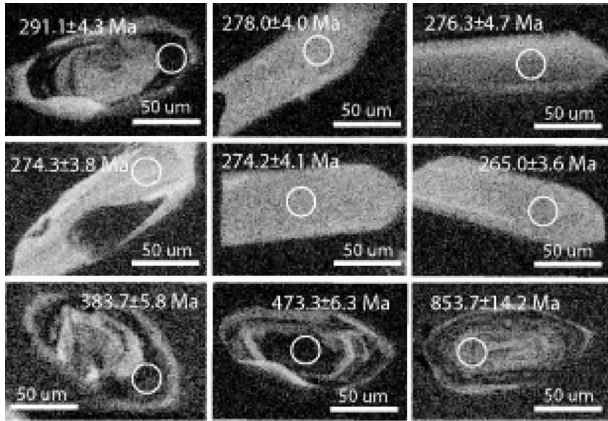


图3 超高温变泥质麻粒岩中代表性锆石阴极发光图像  
Fig. 3 The CL images for representative zircons in the UHT metapelitic granulite

## 5 锆石 U-Pb 年龄结果

阿尔泰超高温变泥质麻粒岩中代表性锆石阴极发光图像列于图3, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及分析结果列于表2。该超高温变泥质麻粒岩中锆石多数自形程度较好, 呈长柱状, 锆石长宽比约为 2 : 1 ~ 4 : 1, 没有明显的岩浆韵律环带, 其 CL 图像表现为淡灰色, 介于典型变质锆石和岩浆锆石之间(图3)。少数锆石呈短柱状或浑圆状。表2和锆石 U-Pb 年龄谐和图显示其年龄主要分布于 260 ~ 280Ma 之间, 个别年龄 380 ~ 390Ma, 继承锆石年龄主要分布于 450 ~ 500Ma 之间, 少量继承锆石具有新元古代年龄(图4)。

其中 18 颗锆石所得的一组  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和年龄为  $271 \pm 5\text{Ma}$  ( $N = 18$ ,  $\text{MSWD} = 1.5$ ), 加权平均  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $272 \pm 4\text{Ma}$  ( $N = 18$ ,  $\text{MSWD} = 3.1$ ) (图5)。其中有一颗锆石 Th/U 比值小于 0.1, 与典型的变质锆石一致, 其年龄为  $291 \pm 4\text{Ma}$ 。该年龄与王伟等(2009)报道的该区低压高温麻粒岩相变质作用的时间一致。但是, 其它年龄分布于 260 ~ 280Ma 之间的锆石 Th/U 比值均大于 0.1, 结合其柱状形态和没有明显岩浆环带, 可判断其为变质重结晶形成的锆石, 即该组锆石形成于超高温变质作用期间, 该组年龄应反映了超高温变质事件发生的时间。实际上在高温麻粒岩相变质事件期间形成的变质锆石 Th/U 比值也可以大于 0.1, 例如, Dong *et al.* (2013) 就报道了我国华北前寒武纪片麻岩中形成于高级变质作用期间的锆石的 Th/U 比值大于 0.1。由于超高温变质作用期间存在部分熔融和变质重结晶作用, 因此该组变质锆石 Th/U 比值大于 0.1 以及其柱状锆石特征也与超高温变质过程一致。所以, 该组年龄实际上应该反映了阿尔泰超高温变质事件发生的时间。

个别具有泥盆纪年龄 380 ~ 390Ma 的锆石 Th/U 比值也大于 0.1 (表2), 其 CL 图像显示典型变质锆石特征(图3), 可能反映了该超高温麻粒岩局部保留了该区较早期变质事

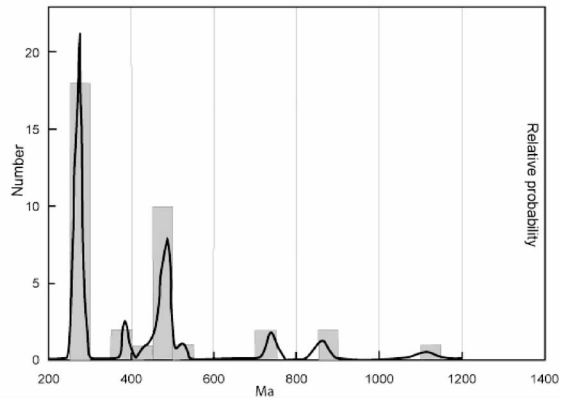
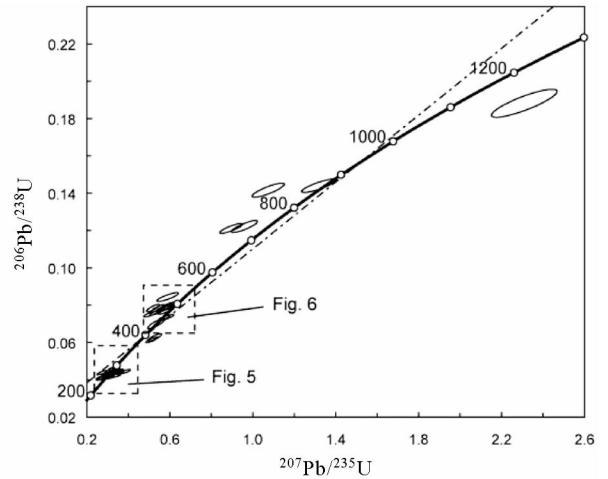


图4 超高温变泥质麻粒岩锆石 U-Pb 年龄谐和图  
Fig. 4 The U-Pb concordant age diagram for zircons in the UHT metapelitic granulite

件的年龄信息记录。年龄主要分布于 450 ~ 500Ma 之间的继承锆石 CL 图像也显示变质锆石特征(图3), 其 Th/U 比值同样也都大于 0.1 (表2), 所得的一组  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和年龄为  $491 \pm 46\text{Ma}$  ( $N = 11$ ,  $\text{MSWD} = 1.9$ ), 加权平均  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $476 \pm 10\text{Ma}$  ( $N = 11$ ,  $\text{MSWD} = 4.2$ ) (图6)。该组年龄数据大多位于谐和线之上, 可能是由于这些变质成因的继承锆石发生了 Pb 丢失或者由于分析误差所致。另外, 还有少量新元古代变质成因的继承锆石年龄为 740 ~ 870Ma (表2)。这些早古生代和新元古代变质成因的继承锆石可能反映了该超高温变泥质麻粒岩的源区来自于早古生代和新元古代变质地体或基底的剥蚀。

## 6 地质意义

本文通过岩相学观察和矿物温压计算, 确定了在阿勒泰喀拉苏附近存在含石榴石-斜方辉石-夕线石-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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量高于 8.0%, 指示了其峰期变质作用达到了超高温 (>900°C) 的条件。初步 P-T 估算结果表明了一个峰期后近



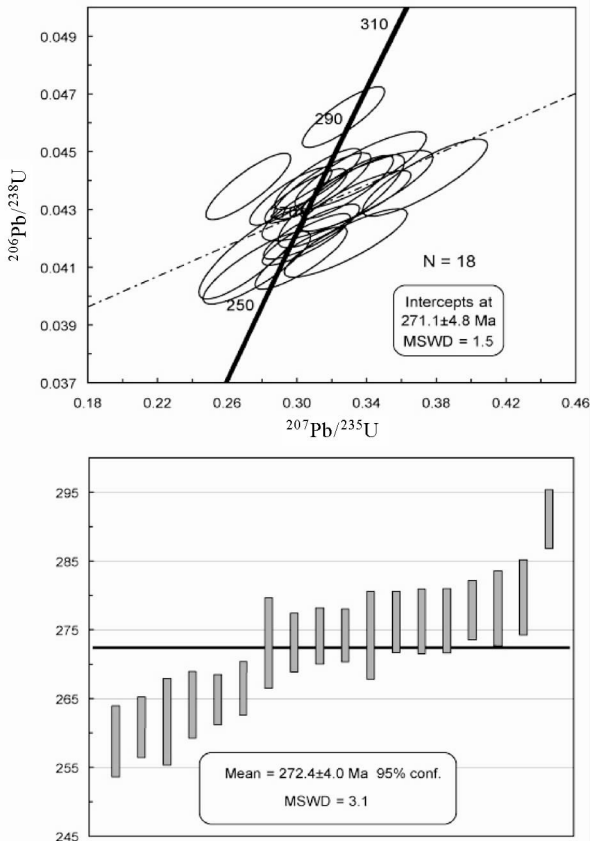


图5 二叠纪锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 The U-Pb concordant age diagram for the Permian zircons

等压冷却的逆时针  $P-T$  轨迹。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的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下地壳的快速加热 (Sandiford and Powell, 1991)。

该超高温变质泥质麻粒岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄结果主要分布于 260 ~ 280Ma 之间 (表 2), 其谐和年龄为  $271 \pm 5\text{Ma}$ , 加权平均年龄为  $272 \pm 4\text{Ma}$  (图 5)。锆石特征和锆石 Th/U 比值大于 0.1, 说明其形成于超高温变质作用期间。该年龄结果支持了阿尔泰超高温变质事件发生于二叠纪, 而且在时间上与新疆二叠纪塔里木地幔柱活动的时间 ( $\sim 275\text{Ma}$ ) 高度一致 (Zhang *et al.*, 2010)。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。已有的研究显示阿尔泰地区发育广泛的二叠纪 (260 ~ 280Ma) 形成于后造山或非造山伸展背景的幔源的基性到花岗岩侵入岩 (表 3)。例如, 后造山或非造山的喇嘛昭花岗岩和富蕴县南花岗岩质岩墙分别位于 276Ma 和 275Ma (王涛等, 2005; 童英等, 2006a), 它们来源于后造山幔源基性岩浆的底侵 (童英等, 2006b), 而富蕴喀拉克的镁铁质杂岩 (287Ma) 也被认为形成于后造山伸展背景

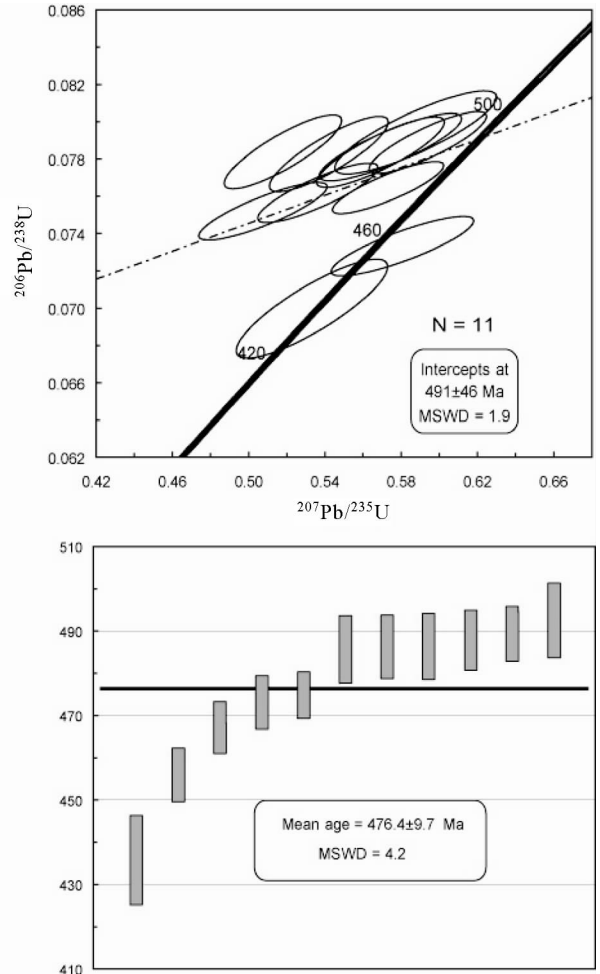


图6 早古生代锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 The U-Pb concordant age diagram for the Palaeozoic zircons

下幔源岩浆的底侵 (韩宝福等, 2004), 这些支持了在阿尔泰地区存在二叠纪 ( $\sim 275\text{Ma}$ ) 地幔柱活动 (Zhang *et al.*, 2010, 2012)。因此, 阿尔泰超高温变质事件可能与二叠纪地幔柱活动引起的岩浆底侵和下地壳伸展加热密切相关, 这和王伟等 (2009) 得出的该区低压泥质麻粒岩形成于二叠纪伸展构造背景的结论完全一致。这也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, 而且也与阿尔泰多处发育片麻岩热穹隆构造一致。

本文获得的阿尔泰超高温变质泥质麻粒岩的二叠纪变质年龄结果, 也与阿尔泰地区其它片麻岩和麻粒岩的二叠纪 (260 ~ 280Ma) 变质年龄一致 (表 3), 表明阿尔泰造山带在二叠纪 (260 ~ 280Ma) 经历了一次重要的高级构造变质热事件 (胡霁琴等, 2006; 陈汉林等, 2006; 肖文交等, 2006; 郑常青等, 2007; 王伟等, 2009)。例如, 胡霁琴等 (2006) 报道了清河片麻岩的变质年龄为 281Ma, 而陈汉林等 (2006) 报道了富蕴乌恰沟镁铁质麻粒岩的变质年龄为 271Ma。尽管 Li *et al.* (2010) 通过对乌恰沟超高温变质泥质麻粒岩锆石初步定年认

表3 阿尔泰造山带已报道的二叠纪同位素年龄

Table 3 Permian isotopic ages reported from the Chinese Altai

产地	岩石类型	方法	年龄 (Ma)	文献
清河	片麻岩	SHRIMP	281 ± 3	胡霁琴等(2006)
富蕴乌恰沟	镁铁质麻粒岩	SHRIMP	271 ± 6	陈汉林等(2006)
富蕴	片麻岩	in situ Th-Pb	278 ± 9, 275 ± 8	Briggs <i>et al.</i> (2007)
阿尔泰-富蕴	片麻岩	CHIME	261 ~ 268	郑常青等(2007)
喀拉苏	泥质麻粒岩	SHRIMP	293 ± 2	王伟等(2009)
富蕴乌恰沟	泥质麻粒岩	LA-ICP-MS	269 ~ 292	厉子龙等(2012)
清河	辉长岩	SHRIMP	272 ± 2	Zhang <i>et al.</i> (2010)
富蕴-清河	混合岩	SHRIMP	283 ± 4	Zhang <i>et al.</i> (2012)
喀拉通克	镁铁质杂岩	SHRIMP	287 ± 5	韩宝福等(2004)
黄山东	镁铁质侵入岩	SHRIMP	269 ± 2	Zhou <i>et al.</i> (2004)
喇嘛昭	花岗岩	SHRIMP	276 ± 9	王涛等(2005)
富蕴	花岗岩	TIMS	281 ± 5, 275 ± 2	童英等(2006a)
清河	花岗岩	SHRIMP	283 ± 4	周刚等(2007)
富蕴	镁铁质侵入岩	SHRIMP	257, 280	陈立辉和韩宝福 (2006)

为该区超高温变质事件可能形成于 499Ma,但是最近新的年龄结果显示乌恰沟超高温变质事件也发生于二叠纪(277Ma)(厉子龙等,2012)。这与本文获得的二叠纪超高温变质年龄结果在误差内完全一致,也与二叠纪塔里木地幔柱活动的时间一致。而且,该二叠纪超高温变质事件也与额尔齐斯深大断裂带/剪切带的发育时间非常一致(Laurent-Charvet *et al.*, 2003; Briggs *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2012)。

另外,本文获得的个别泥盆纪变质年龄 380 ~ 390Ma(表2),说明该超高温麻粒岩可能局部保留了该区曾经历较早期变质事件的年龄信息。Windley *et al.* (2002)和 Wei *et al.* (2007)把庄育勋(1994)报道的阿尔泰地区变质岩的 Rb-Sr 全岩年龄 365Ma 与胡霁琴等(2002)报道的该区片麻岩的 U-Pb 下交点年龄 367Ma 解释为该区变质年龄,说明该区在晚泥盆纪经历了角闪岩相变质事件。近年来,一些新的锆石 U-Pb 和独居石 Th-Pb 年龄结果表明该造山带早期变质事件发生于泥盆纪 380 ~ 390Ma 期间(袁超等,2007; Long *et al.*, 2007; Zheng *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2010)。因此,这说明阿尔泰地区经历了泥盆纪角闪岩相和二叠纪麻粒岩相两期变质事件。

此外,变质成因的继承锆石年龄主要分布于 450 ~ 5Ma 之间,少量变质成因继承锆石具有新元古代年龄 740 ~ 870Ma(表2)。最近的阿尔泰地区片麻岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究支持了阿尔泰造山带存在新元古代到早古生代的变质地体或结晶基底,并和泛冈瓦纳大陆具有相似的热历史(Yang *et al.*, 2011)。因此,这些早古生代和新元古代变质成因的继承锆石可能反映了该超高温变质麻粒岩的源区来自于早古生代和新元古代变质地体或基底的剥蚀。

## 7 结论

(1)我们首次确定了在阿勒泰喀拉苏附近存在超高温变

泥质麻粒岩,其矿物组合为石榴石 + 斜方辉石 + 夕线石 + 堇青石 + 尖晶石 + 黑云母 + 斜长石 + 石英等。斜方辉石成分具有高铝特点,其  $Al_2O_3$  含量高于 8.0%,指示了其峰期变质作用达到了超高温(>900°C)的条件。*P-T* 计算结果显示其峰期变质条件为: $P = \sim 8.0\text{kb}$ ,  $T = \sim 960^\circ\text{C}$ ,峰期后具有近等压冷却的逆时针 *P-T* 轨迹。

(2)该超高温麻粒岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄结果主要分布于 260 ~ 280Ma 之间,其谐和年龄为  $271 \pm 5\text{Ma}$ ,加权平均年龄为  $272 \pm 4\text{Ma}$ 。该年龄结果表明阿尔泰超高温变质事件发生于二叠纪,在时间上与二叠纪塔里木地幔柱活动的时间( $\sim 275\text{Ma}$ )一致。因此,阿尔泰超高温变质作用可能与由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。

(3)个别泥盆纪变质年龄 380 ~ 390Ma 显示该超高温麻粒岩可能局部保留了该区曾经历较早期变质事件的年龄信息。变质成因的继承锆石主要分布于 450 ~ 500Ma 之间,少量为新元古代年龄,它们可能反映了该超高温麻粒岩的源区来自于早古生代和新元古代变质地体或基底的剥蚀。

**致谢** 感谢广州地化所同位素地球化学国家重点实验室陈林丽在矿物探针分析及李聪颖和涂湘林在锆石 LA-ICP-MS 年代学测试分析过程中给与的帮助。感谢两位审稿人对本文的审阅和有益的建议。

## References

- Briggs SM, Yin A, Manning CE, Chen ZL, Wang XF and Grove M. 2007. 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. *GSA Bulletin*, 119(7-8): 944-960
- Brown M. 2007. Metamorphic conditions in orogenic belts: A record of secular change. *International Geology Review*, 49(3): 193-234



- Chen HL, Li ZL, Yang SF, Dong CW, Xiao WJ and Tainosho Y. 2006. Mineralogical and geochemical study of a newly discovered mafic granulite, Northwest China; Implications for tectonic evolution of the Altay orogenic belt. *The Island Arc*, 15(1): 210–222
- Chen HL, Yang SF, Li ZL, Yu X, Xiao WJ, Yuan C and Li JL. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb chronology of Fuyun basic granulite and its tectonic significance in Altaid orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1351–1358 (in Chinese with English abstract)
- Chen LH and Han BF. 2006. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic composition of mafic intrusive rocks in Wujiaogou area, north Xinjiang: Constraints for mantle sources and deep processes. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1201–1214 (in Chinese with English abstract)
- Dong CY, Wan YS, Wilde SA, Xu ZY, Ma MZ, Xie HQ and Liu DY. 2013. Earliest Paleoproterozoic supracrustal rocks in the North China Craton recognized from the Daqingshan area of the Khondalite Belt: Constraints on craton evolution. *Gondwana Research*, in press
- Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Li ZH. 2004. SHRIMP zircon U-Pb age of mafic-ultramafic complex bearing copper and nickel and its geological significance in Kalatongke and East Huangshan, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2324–2328 (in Chinese)
- Harley SL. 1998. On the occurrence and characterization of ultrahigh-temperature crustal metamorphism. In: Treloar PJ and O'Brien PJ (eds.). *What Drives Metamorphism and Metamorphic Reactions?* Geol. Soc. London Special Publ., 138: 81–107
- Harley SL and Motoyoshi Y. 2000. Al zoning in orthopyroxene in a sapphirine quartzite; Evidence for >1120°C UHT metamorphism in the Napier Complex, Antarctica, and implications for the entropy of sapphirine. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 138(4): 293–307
- Harley SL. 2004. Extending our understanding of ultrahigh temperature crustal metamorphism. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 99(4): 140–158
- He GQ, Han BF, Yue YJ and Wang JH. 1990. Tectonic division and crustal evolution of Altay orogenic belt in China. *Geoscience of Xinjiang*, (2): 9–20 (in Chinese)
- Hu AQ, Zhang GX, Zhang QF, Li TD and Zhang JF. 2002. A review on ages of Precambrian metamorphic rocks from Altai orogen in Xinjiang, NW China. *Chinese Journal of Geology*, 37(2): 129–142 (in Chinese with English abstract)
- Hu AQ, Wei GJ, Deng WF and Chen LL. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating and its significance for gneisses from the southwest area to Qinghe County in the Altai, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 1–10 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic. In: Malpas J, Fletcher CJN, Ali JR and Aitchison JC (eds.). *Aspects of the Tectonic Evolution of China*, Special Publication, 226: 73–100
- Jiang YD, Sun M, Zhao GC, Yuan C, Xiao WJ, Xia XP, Long XP and Wu FY. 2010. The ~390Ma high-T metamorphic event in the Chinese Altai: A consequence of ridge-subduction? *American Journal of Science*, 310(10): 1421–1452
- Laurent-Charvet S, Charvet J, Monié P and Shu LS. 2003. Late Paleozoic strike-slip shear zones in eastern central Asia (NW China): New structural and geochronological data. *Tectonics*, 22(2): 1009, doi:10.1029/2001TC901047
- Li ZL, Chen HL, Yang SF, Xiao WJ and Tainosho Y. 2004. Discovery of mafic granulites from the Altay orogenic belt: Evidence from mineralogical study. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1445–1455 (in Chinese with English abstract)
- Li ZL, Li YQ, Chen HL, Santosh M, Xiao WJ and Wang HH. 2010. SHRIMP U-Pb zircon chronology of ultrahigh-temperature spinel-orthopyroxene-garnet granulite from south Altay orogenic belt, northwestern China. *Island Arc*, 19(3): 506–516
- Li ZL, Li YQ, Wang HH, Chen HL and Yang XQ. 2012. Late Palaeozoic ultrahigh temperature metamorphism of the Altai and its evolution. Lanzhou: 2012 National Symposium on Petrology and Geodynamics (Abst.), 319 (in Chinese)
- Liu YS, Hu ZC, Gao S, Günther D, Xu J, Gao CG and Chen HH. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43
- Long XP, Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Lin SF, Wu FY, Xia XP and Cai KD. 2007. Detrital zircon age and Hf isotopic studies for metasedimentary rocks from the Chinese Altai: Implications for the early Paleozoic tectonic evolution of the central Asian orogenic Belt. *Tectonics*, 26(5), doi:10.1029/2007TC002128
- Pattison DRM, Chacko T, Farquhar J and McFarlane CRM. 2003. Temperatures of granulite-facies metamorphism: Constraints from experimental phase equilibria and thermobarometry corrected for retrograde exchange. *Journal of Petrology*, 44(5): 867–900
- Pirajno F, Mao JW, Zhang ZC, Zhang ZH and Chai FM. 2008. 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. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2–4): 165–183
- Raith M, Karmakar S and Brown M. 1997. Ultra-high-temperature metamorphism and multi-stage decompressional evolution of sapphirine-granulites from the Palni hill ranges, southern India. *Journal of Metamorphic Geology*, 15(3): 379–399
- Sandiford M and Powell R. 1991. Some remarks on high-temperature-low-pressure metamorphism in convergent orogens. *Journal of Metamorphic Geology*, 9(3): 333–340
- Santosh M, Tsunogae T, Li JH and Liu SJ. 2007. Discovery of sapphirine-bearing Mg-Al granulites in the north China Craton: Implications for Palaeoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism. *Gondwana Research*, 11(3): 263–285
- Şengör AMC, Natal' in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 54(6435): 117–137
- Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Long XP, Xia XP, Zhao GC, Lin SF, Wu FY and Kröner A. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai: Progressive accretionary history in the early to middle Palaeozoic. *Chemical Geology*, 247(3–4): 352–383
- Sun M, Long XP, Cai KD, Jiang YD, Wang BY, Yuan C, Zhao GC, Xiao WJ and Wu FY. 2009. Early Palaeozoic ridge subduction in the Chinese Altai: Insight from the abrupt change in zircon Hf isotopic compositions. *Science in China (Series D)*, 39(7): 935–948 (in Chinese)
- Tong L and Wilson CJL. 2006. Tectonothermal evolution of the ultrahigh temperature metapelites in the Rauer Group, East Antarctica. *Precambrian Research*, 149(1–2): 1–20
- Tong Y, Hong DW, Wang T, Wang SG and Han BF. 2006a. TIMS U-Pb zircon ages of Fuyun post-orogenic linear granite plutons on the southern margin of Altay orogenic belt and their implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(2): 85–89 (in Chinese)
- Tong Y, Wang T, Hong DW and Han BF. 2006b. Pb isotopic composition of granitoids from the Altay orogen (China): Evidence for mantle-derived origin and continental growth. *Acta Geologica Sinica*, 80(4): 517–528 (in Chinese with English abstract)
- Tu XL, Zhang H, Deng WF, Ling MX, Liang HY, Liu Y and Sun WD. 2011. Application of RESolution in situ laser ablation ICP-MS in trace element analyses. *Geochimica*, 40(1): 83–98 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Hong DW, Tong Y, Han BF and Shi YR. 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: Its implications for vertical continental growth.

- Acta Petrologica Sinica, 21 (3): 640 – 650 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Hong DW, Jahn BM, Tong Y, Wang Y, Han BF and Wang XX. 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen. *The Journal of Geology*, 114(6): 735 – 751
- Wang T, Jahn BM, Kovach VP, Tong Y, Hong DW and Han BF. 2009. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the central Asian orogenic Belt. *Lithos*, 110(1–4): 359 – 372
- Wang W, Wei CJ, Wang T, Lu YX and Chu H. 2009. Confirmation of pelitic granulite in the Altai orogen and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 54(14): 918 – 923 (in Chinese)
- Wei CJ, Clarke G, Tian W and Qiu L. 2007. Transition of metamorphic series from the kyanite- to andalusite-types in the Altai orogen, Xinjiang, China: Evidence from petrography and calculated KFMASH and KFMASH phase relations. *Lithos*, 96(3–4): 353 – 374
- Windley BF, Kröner A, Guo JH, Qu GS, Li JY and Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution. *Journal of Geology*, 110(6): 719 – 737
- Windley BF, Alexeiev D, Xiao W, Kroner A and Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic belt. *Journal of the Geological Society, London*, 164(1): 31 – 47
- Xiao W, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li J, Qin K and Wang Z. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339 – 342
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Lin SF, Li ZL, Mao QG, Zhang JE, Sun Y and Li JL. 2006. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of northern Xinjiang (NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleasian domain. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1062 – 1076 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Sun M, Lin SF, Chen HL, Li ZL, Li JL and Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2–4): 102 – 117
- Xu XC, Zheng CQ and Zhao QY. 2005. Metamorphic types and crustal evolution of Hercynian orogenic belt in Altai region, Xinjiang. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 35(1): 7 – 11 (in Chinese with English abstract)
- Yang TN, Li JY, Zhang J and Hou KJ. 2011. The Altai-Mongolia terrane in the Central Asian Orogenic belt (CAOB): A peri-Gondwana one? Evidence from zircon U-Pb, Hf isotopes and REE abundance. *Precambrian Research*, 187(1–2): 79 – 98
- Yuan C, Sun M, Xiao WJ, Li XH, Chen HL, Lin SF, Xia XP and Long XP. 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids. *Chemical Geology*, 242(1–2): 22 – 39
- Yuan C, Sun M, Long XP, Xia XP, Xiao WJ, Li XH, Lin SF and Cai KD. 2007. Constraining the deposition time and tectonic background of the Habahe Group of the Altai. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1635 – 1644 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CG, Wei CJ and Qiu L. 2004. Evolution of metamorphism and its geologic significance in Altaides, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 22(1): 16 – 23 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL, Li ZX, Li XH, Xu YG, Zhou G and Ye HM. 2010. A Permian large igneous province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275Ma mantle plume? *GSA Bulletin*, 122: 2020 – 2040
- Zhang CL, Santosh M, Zou HB, Xu YG, Zhou G, Dong YG, Ding RF and Wang HY. 2012. Revisiting the “Irish tectonic belt”: Implications for the Paleozoic tectonic evolution of the Altai orogen. *Journal of Asian Earth Science*, 52: 117 – 133
- Zheng CQ, Kato T, Enami M and Xu XC. 2007. CHIME monazite ages of metasediments from the Altai orogen in northwestern China: Devonian and Permian ages of metamorphism and their significance. *Island Arc*, 16(4): 598 – 604
- Zheng CQ, Xu XC, Kato T and Enami M. 2007. Permian CHIME ages of monazites for the kyanite-sillimanite type metamorphic belt in Chonghuier area, Altai, Xinjiang and their geological implications. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 566 – 573 (in Chinese with English abstract)
- Zhou G, Zhang ZC, Luo SB, He B, Wang X, Ying LJ, Zhao H, Li AH and He YK. 2007. Confirmation of high-temperature strongly peraluminous Mayin’ ebo granites in the south margin of Altai, Xinjiang: Age, geochemistry and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1909 – 1920 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF, Leshner CM, Yang ZX, Li JW and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, eastern Xinjiang, northwest China: Implications for the tectonic evolution of the central Asian orogenic belt. *Chemical Geology*, 209(3–4): 233 – 257
- Zhuang YX. 1994. The *PTSt* evolution of metamorphism and development mechanism of the thermal-structural-gneiss domes in the Chinese Altaides. *Acta Geologica Sinica*, 68(1): 35 – 47 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 余兴, 肖文交, 袁超, 李继亮. 2006. 阿尔泰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*, 22(5): 1351 – 1358
- 陈立辉, 韩宝福. 2006. 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*, 22(5): 1201 – 1214
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 李宗怀. 2004. 新疆喀拉托克和山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *科学通报*, 49(22): 2324 – 2328
- 何国琦, 韩宝福, 岳永君, 王嘉纘. 1990. 中国阿尔泰山带的构造分区和地壳演化. *新疆地质科学*, (2): 9 – 20
- 胡霭琴, 张国新, 张前锋, 李天德, 张积斌. 2002. 阿尔泰山带变质岩系时代问题讨论. *地质科学*, 37(2): 129 – 142
- 胡霭琴, 韦刚健, 邓文峰, 陈林丽. 2006. 阿尔泰山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*, 22(1): 1 – 10
- 厉子龙, 陈汉林, 杨树锋, 肖文交, Tainosho Y. 2004. 阿尔泰山基性麻粒岩的发现: 来自矿物学的证据. *岩石学报*, 20(6): 1445 – 1455
- 厉子龙, 励音其, 汪惠惠, 陈汉林, 杨孝强. 2012. 阿尔泰山晚古生代超高温变质作用及其演化. 兰州: 2012 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要, 319
- 孙敏, 龙晓平, 蔡克大, 蒋映德, 王步云, 袁超, 赵国春, 肖文交, 吴福元. 2009. 阿尔泰山早古生代末期洋中脊俯冲: 锆石 Hf 同位素组成突变的启示. *中国科学(D辑)*, 39(7): 935 – 948
- 童英, 洪大伟, 王涛, 王式洗, 韩宝福. 2006a. 阿尔泰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, 25(2): 85-89
- 童英, 王涛, 洪大伟, 韩宝福. 2006b. 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, 80(4): 517-528
- 涂湘林, 张红, 邓文峰, 凌明星, 梁华英, 刘颖, 孙卫东. 2011. 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, 40(1): 83-98
- 王涛, 洪大伟, 童英, 韩宝福, 石玉若. 2005. 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, 21(3): 640-650
- 王伟, 魏春景, 王涛, 娄玉行, 初航. 2009. 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, 54(14): 918-923
- 肖文交, 韩春明, 袁超, 陈汉林, 孙敏, 林寿发, 厉子龙, 毛启贵, 张继恩, 孙枢, 李继亮. 2006. 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, 22(5): 1062-1076
- 徐学纯, 郑常青, 赵庆英. 2005. 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(地球科学版), 35(1): 7-11
- 袁超, 孙敏, 龙晓平, 夏小平, 肖文交, 李献华, 林寿发, 蔡克大. 2007. 阿尔泰哈巴河群的沉积时代及其构造背景. 岩石学报, 23(7): 1635-1644
- 张翠光, 魏春景, 邱林. 2004. 新疆阿尔泰造山带变质作用演化及其地质意义. 新疆地质, 22(1): 16-23
- 郑常青, 徐学纯, Kato T, Enami M. 2007. 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, 13(3): 566-573
- 周刚, 张招崇, 罗世宾, 何斌, 王祥, 应立娟, 赵华, 李爱红, 贺永康. 2007. 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, 23(8): 1909-1920
- 庄育勋. 1994. 中国阿尔泰造山带变质作用  $PTSt$  演化和热-构造-片麻岩穹窿形成机制. 地质学报, 68(1): 35-47