

阿尔泰造山带南缘乌恰沟片麻状花岗质侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义

张越, 陈隽璐, 白建科, 唐卓

(中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要:新疆富蕴县境内的乌恰沟片麻状黑云母二长花岗岩及沿构造线展布的片麻状细粒花岗岩脉出露在阿尔泰造山带南缘, 围岩均为苏普特岩群黑云斜长片麻岩。运用 LA-ICP-MS 方法对乌恰沟片麻状黑云母二长花岗岩和片麻状细粒花岗岩脉进行锆石 U-Pb 测年分析。测年结果显示, 片麻状黑云母二长花岗岩体的生成年龄为 (393.5 ± 4.5) Ma, 即形成于早泥盆世, 与区域地质背景对比来看, 该岩体为碰撞造山阶段所形成; 片麻状细粒花岗岩脉的侵入时代为 (293.5 ± 6) Ma, 表示该区的构造热事件时限。构造变形特征显示片麻状花岗质侵入体与该区左行韧性剪切变形密切相关, 据此推测出该地区地层变质变形时代, 以及该区左行韧性剪切作用的时限。

关键词:阿尔泰造山带南缘; 锆石 U-Pb 定年; 片麻状花岗质侵入体; 构造演化; 乌恰沟

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2015)03-0127-13

LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Gneissic Granitic Intrusive Mass in Wuqiagou on the Southern Margin of Altay Orogenic Belt and Its Geological Significance

ZHANG Yue, CHEN Junlu, BAI Jianke, TANG Zhuo

(Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Wuqiagou gneissic biotite adamellite and the gneissic fine-grained granite dike which spread along the tectonic lines in Wuqiagou of Fuyun County of Xinjiang, exposed on the southern margin of Altay orogenic belt, and the wall rock is Supute group biotite plagioclase gneiss. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating analysis on gneissic biotite adamellite and gneissic fine-grained granite dike were carried out. The dating results show that the gneissic biotite adamellite granite's formation age is (393.5 ± 4.5) Ma in Lower Devonian. By comparison of regional geological settings, this rock mass was formed by the collision orogenic stage. In contrast, the intrusion age of the gneissic fine-grained granite dike is (293.5 ± 6) Ma, which just signifies the time limit of tectonic thermal event in this area. Tectonic deformation features show the close relationship be-

收稿日期: 2015-03-20; 修回日期: 2015-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202077)、中国地质调查局项目(12120113041000, 1212011220649)联合资助

作者简介: 张越(1985-), 男, 陕西省西安市, 研究实习员, 硕士研究生, 主要从事蛇绿岩及大地构造研究。E-mail: yanshisank@163.com

tween the gneissic granitic intrusive mass and sinistral ductile shearing of the tectonic lines. The deformation and metamorphism age and the time limit of sinistral ductile shearing in this region were presumably speculated.

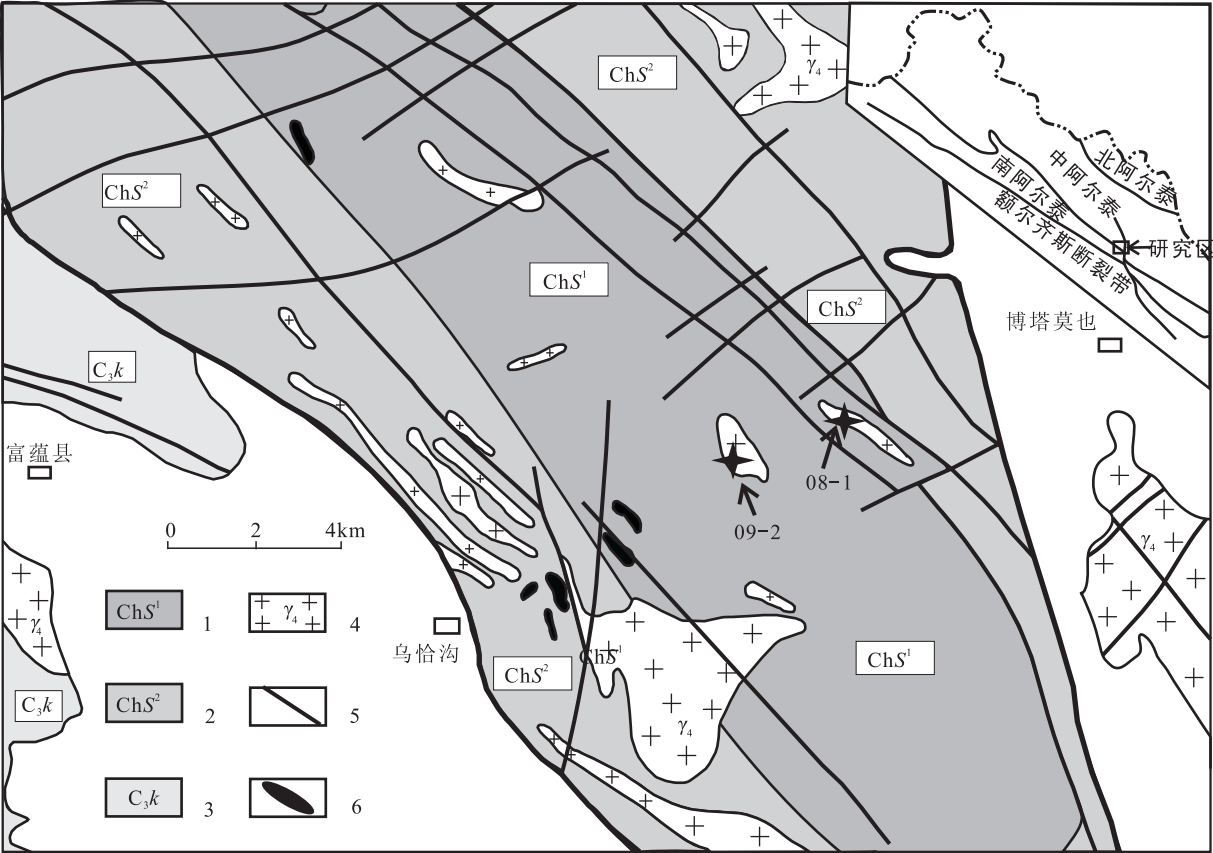
Keywords:the southern margin of Altay orogenic belt; zircon U – Pb dating; gneissic granitic intrusive mass; tectonic evolution; Wuqiagou

中国境内阿尔泰造山带位于北亚造山区南部(李锦轶等,2006),其南以额尔齐斯断裂带为界与准噶尔构造带相接;阿尔泰造山带内部一般以红山嘴-诺尔特断裂和康布铁堡-库尔特断裂为界,将阿尔泰造山带进一步划分为北、中、南 3 个亚带(Li et al. , 2003)(图 1)。

关于阿尔泰造山带形成演化,传统的研究认为其经历了新元古代晚期至寒武纪稳定大陆边缘演化、奥陶纪至石炭纪中期活动大陆边缘演化、石炭纪晚期碰撞造山作用(Li et al. , 2003; 何国琦等,

1994;许继峰等,2001;Windley et al. ,2002;Xiao et al. ,2004;王涛等,2005;童英等,2006a)、二叠纪后碰撞演化阶段(何国琦等,1994;王涛等,2005;王涛等,2010)和中生代晚期以来的陆内造山作用几个阶段,最终形成现今阿尔泰造山带的地质和地貌特征(张亚峰等,2013)。

阿尔泰造山带分布大量不同时代、不同成因类型的中酸性侵入体,这些中酸性侵入体均形成于阿尔泰造山带的不同构造演化阶段,对这些中酸性侵入体的形成时代及成因类型研究可为探讨阿尔泰造



1. 中元古代苏普特岩群下段;2. 中元古代苏普特岩群上段;3. 晚石炭世喀喇额尔齐斯组;4. 华力西期片麻状花岗岩;5. 断层;6. 基性侵入体

图 1 阿尔泰富蕴乌恰沟一带地质图及采样位置图

Fig.1 Geological map and sampling location in Wuqiagou area, Funyun

山带演化历史提供证据。

前人曾对中国阿尔泰地区花岗岩研究做了大量的工作,并积累了较丰富的资料(王涛等,2010)。近年来随着地质大调查项目的开展,中国阿尔泰造山带的花岗岩研究取得了重大进展,识别出众多的早古生代和中生代花岗岩(王涛等,2005;滕家欣等,2006;童英等,2007;Yuan et al.,2007;孙敏等,2009)。其中一部分岩体沿区域构造线呈线性状展布,主要发育在北西向强烈左行韧性剪切带内。例如,阿勒泰南、沙尔布拉克南和富蕴南等线性小型花岗岩体代表了伴随区域剪切作用而发生的岩浆热事件;另一部分为不规则圆形、椭圆形,岩体地质及其年代学研究显示其为典型的后碰撞花岗岩。例如,喇嘛昭岩体、哈拉苏岩体等(Windley et al.,2002;王涛等,2005;肖庆辉等,2002)。通过对不同类型花岗岩体的研究,为区域构造格架的建立、围岩地层形成时代的确立提供了帮助,同时可以帮助限定构造变形时代,建立该区构造-热事件序列。

出露于富蕴县东乌恰沟中的片麻状花岗质侵入体,表现出2期变形特征,至今未见对其变形时代的研究报道。这2期变形花岗岩体的围岩均为黑云母片麻岩,其围岩归属目前争议较大。因此本次选择富蕴县东乌恰沟片麻状黑云母二长花岗岩体及线性细粒花岗岩脉进行测年研究,目的是研究该区不同变形期次的时限,为建立该区构造-岩浆热事件序列提供资料依据。

1 地质背景和样品特征

研究区位于阿尔泰造山带南缘,处于额尔齐斯断裂带西段与可可托海-二台断裂带交汇位置,出露的主要地层为中元古代苏普特岩群。苏普特岩群下段(ChS¹)主要为角闪黑云斜长片麻岩-十字黑云片岩夹变粒岩建造,岩性主要为深灰色角闪黑云斜长片麻岩、片岩夹混合岩、变粒岩和浅粒岩;苏普特岩群下段(ChS²)主要为条带状、条痕状混合岩夹片麻岩夹角闪斜长片麻岩建造,岩性主要为灰色条带状、条痕状混合岩、均质混合岩、渗透混合岩、雾状混合岩夹片麻岩、角闪斜长片岩。乌恰沟发育大量侵入岩,其岩石类型主要为片麻状二长花岗岩、镁铁质岩体及伟晶岩脉,岩体多呈岩珠、岩脉产出,与围岩呈明显的侵入接触。构造上,研究区发育大量北西走

向的断裂,多左形韧性剪切为主,属于额尔齐斯断裂带的分支断裂;同时还发育大量北东走向的左行脆性走滑断裂,其明显切过北西走向的断裂。

片麻状黑云母二长花岗岩(样品09-2)采自乌恰沟G216道178 km处,样品采集点GPS坐标:46°58.813'N,89°42.442'E。所采样品的岩体呈灰白色,片麻状构造,岩性为片麻状黑云母二长花岗岩,岩体空间上呈透镜状,出露面积约1.5 km²。围岩为苏普特岩群黑云斜长片麻岩,两者呈侵入接触关系。岩体与围岩均以片麻理为变形面理发生了褶皱变形,岩体片麻理产状为40°/45°,岩体围岩的片麻理产状为210°/75°,片麻理走向均为北西,与区域构造线方向一致。显微镜下(图2),该片麻状黑云母二长花岗岩为全晶质半自形粒状结构,钾长石含量约20%~25%,斜长石含量约15%~20%,石英含量约40%~45%,黑云母含量约10%~15%。局部具变余碎斑-糜棱结构,初溶交代结构;碎斑主要为斜长石,其次为石英、钾长石,碎斑呈不规则球状、椭球状和透镜状,大致定向分布,外形因重结晶和增生变得不规则,个别呈长柱状,碎斑含量为30%~40%;基质主要为石英、斜长石、钾长石和少量黑云母,黑云母常集合呈条带状定向分布或绕碎斑转动,有时被白云母交代,析出帘石磷铁矿等。石英呈扁豆状,带状定向,内部重结晶明显,但仍保留塑变特征。在基质中出现最多的是碱长石塑变集合体,它们交代斜长石或碎斑,可能是重熔产物。这些特征表明岩体受到了变质、变形作用的改造。

片麻状细粒花岗岩岩脉(样品08-1)采自乌恰沟G216道178 km向西6 km的地层中,采样位置:47°00.219'N,89°44.771'E;该岩脉呈灰白色,片麻状构造;围岩为苏普特岩群黑云母片麻岩;岩脉片麻理为40°/55°,岩体围岩的片麻理产状为220°/60°,岩脉片麻理与围岩片麻理走向以微角度相交,均为北西走向,与区域构造线方向一致。显微镜下(图3),该细粒花岗岩为全晶质半自形粒状结构,钾长石含量约20%~25%,斜长石含量约20%~25%,石英含量约40%~45%,黑云母含量约10%~15%。局部具变碎斑-糜棱结构,片麻状构造。其中,碎斑主要为斜长石,碎斑呈不规则外形的球状、椭球状和透镜状,大致定向分布,可能因重结晶再生长而不规则化,碎斑含量20%~30%;基质主要为石英、斜长石和黑云母,具鳞片粒状变晶结构,黑云母定向明

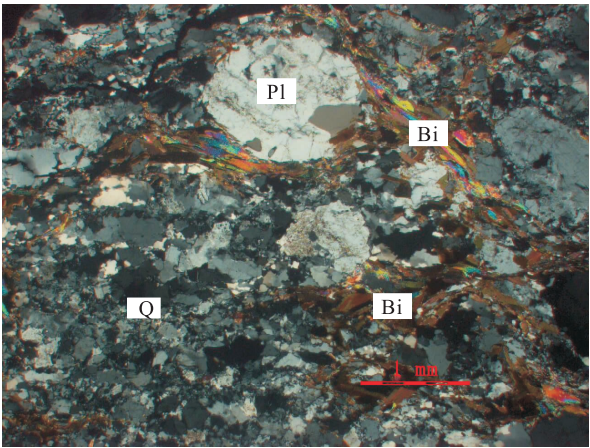
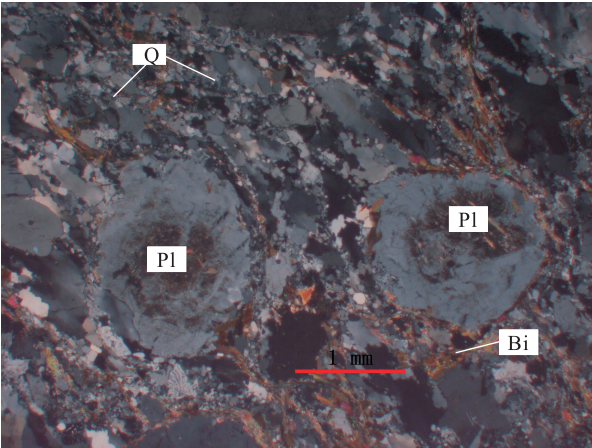


图 2 乌恰沟片麻状黑云母二长花岗岩岩相学特征图

Fig. 2 Petrographics features of gneissic biotite adamellite in Wuqiagou

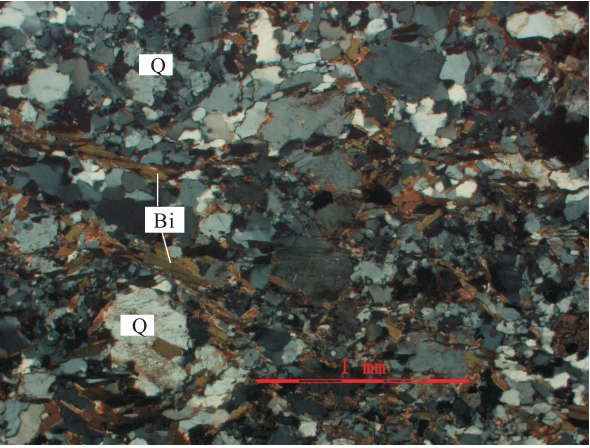
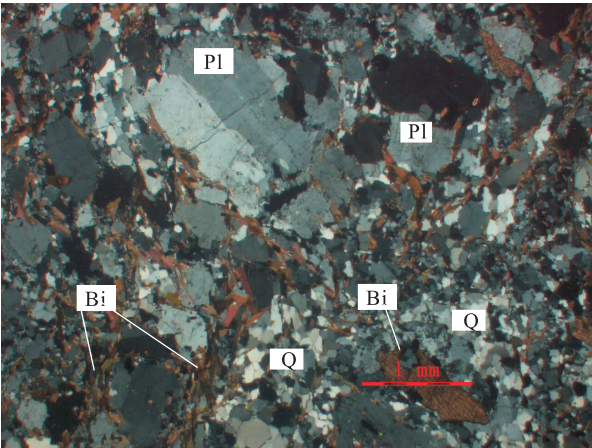


图 3 乌恰沟片麻状细粒花岗岩脉岩相学特征图

Fig. 3 Petrographics features of gneissic fine grain granite dike in Wuqiagou

显,但呈浸染断续分布,石英定向塑性拉长不明显。基质交代现象明显,少量钾长石交代斜长石现交代蠕虫结构。这些特征表明,岩体受到了变质、变形作用的改造。

2 分析方法

野外采集新鲜样品 20 kg,样品经过常规的粉碎、磁选,分选出纯度较高的锆石,在双目显微镜下经过人工挑选出纯度在 99% 以上的锆石,然后将锆石颗粒黏在双面胶上,用无色透明的环氧树脂固定于样品靶上,待环氧树脂充分固化后,对样品靶表面经研磨抛光,直至锆石新鲜截面露出。对靶上锆石

进行镜下反射光、透射光照相后,进行 CL 分析及 LA-ICP-MS 分析,锆石的阴极发光(CL)显微照片在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 Cameca 电子探针仪器上完成,分析电压 15 kV,电流 19 nA。

LA-ICP-MS(激光剥蚀等离子体质谱)法单颗粒锆石微区 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学教育部重点实验室完成,采用 Agilent 型 ICP-MS,采用的激光斑束直径是 30 μm ,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。在分析中,锆石年龄采用国际标准锆石 91 500 作为外标标准物质;U,Pb 含量分析以 ^{29}Si 作为内标, NIST SRM 610 作为外标进行校正;同位素比值数据处理采用 GLITTER(4.0)

软件, 并使用 Andersen (2002) 的软件对测试, 数据进行普通铅校正 (Anderson et al., 2002), 锆石加权年龄计算及和谐图的绘制采用 ISOPLOT3.0 版软件程序 (Ludwig et al., 2003) 进行, 详细分析步骤和数据处理方法请参考 Gao et al., 2002; 柳小明等, 2002; 袁洪林等, 2003。

3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

笔者对乌恰沟片麻状黑云母二长花岗岩 (09-2) 及片麻状细粒花岗岩 (08-1) 进行定年, 所测定的锆石 CL 图像见图 4、图 5。

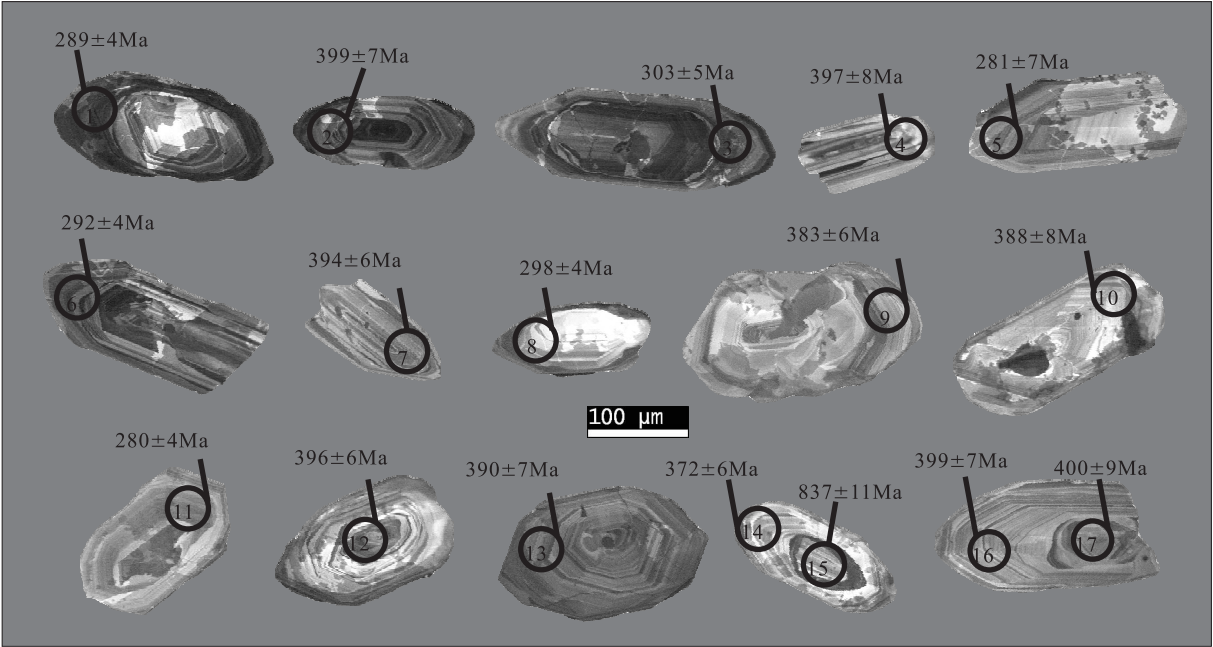


图 4 乌恰沟片麻状黑云母二长花岗岩 (09-2) 锆石的 CL 图像
Fig. 4 CL images of zircons from gneissic biotite adamellite in Wuqiagou area

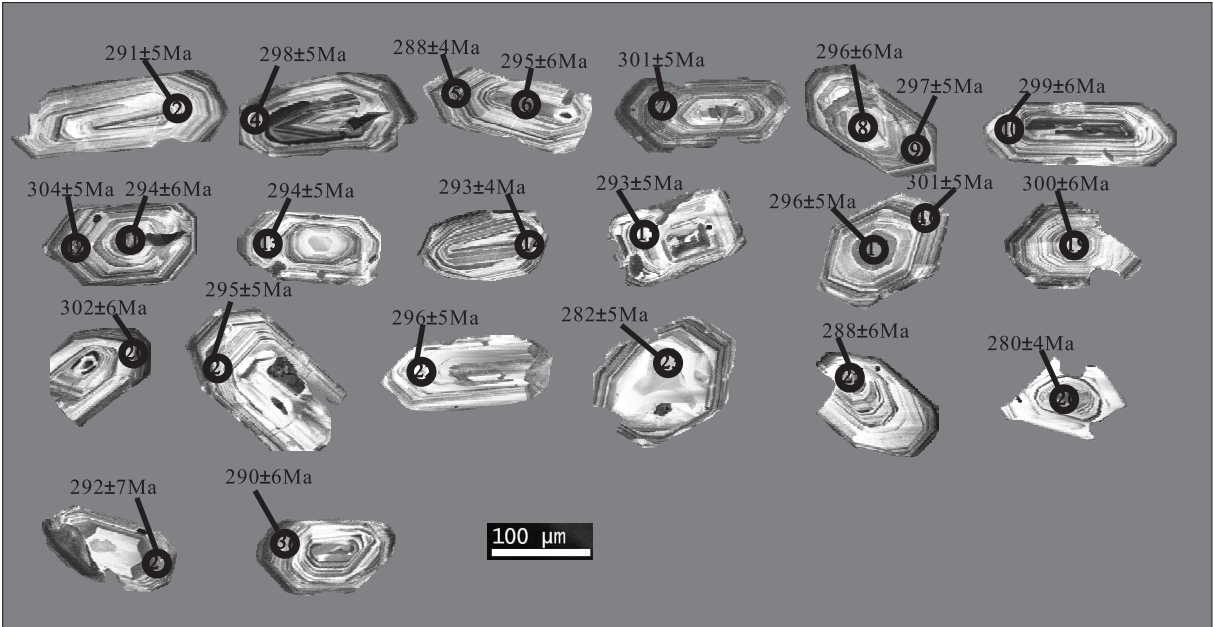


图 5 乌恰沟片麻状细粒花岗岩脉 (08-1) 锆石的 CL 图像
Fig. 5 CL images of zircons from gneissic fine grain granite dike in Wuqiagou

片麻状黑云母二长花岗岩(样品 09-2)的锆石样品,双目镜下颜色呈淡红色透明体,锆石整体呈短柱状,部分晶体两端可见双锥。柱状锆石晶体长约 50~200 μm ,宽度一般在 50~100 μm ,长宽比多在 2:1~3:1,部分锆石晶形不完整,系碎样过程中人为影响。

阴极发光图像 CL(图 4)显示锆石发育强度差异明显的震荡环带或具有较宽的条带状结构,核幔结构清晰,为典型岩浆锆石的特征,少数锆石含有一个光性特征明显不同的核部,可能为继承锆石(图 4 中 15 点)。锆石 U-Pb 年龄分析结果见表 1,锆石 Th 含量较高,为 $351.75 \times 10^{-6} \sim 15\,649.94 \times 10^{-6}$,U 含量也较高,为 $381.04 \times 10^{-6} \sim 1\,652.02 \times 10^{-6}$,但所有测点的 Th/U 值均在 0.15~0.92,该比值明显高于变质成因的锆石(通常<0.1),而与岩浆成因锆石一致(>0.4)(Hoskin et al., 2000),个别锆石 Th/U 值为 0.1~0.4,可能为后期变质流体影响所致。对 09-2 样品测定了 15 粒锆石,有效点数 17 个,其中 2 个点位于锆石核部。在 U-Pb 谐和图上可以看出,所有分析点并不是集中于一个范围,而是出现了 2 个集中区,主体集中在 $(390.7 \pm 6.7) \text{Ma}$ 年龄段(图 6),其次为 $(290.9 \pm 8.9) \text{Ma}$ (图 7),其中一个点为锆石核部继承锆石(15 点)年龄为 $(837 \pm 11) \text{Ma}$ 。依据锆石阴极发光内部结构的差异和锆石

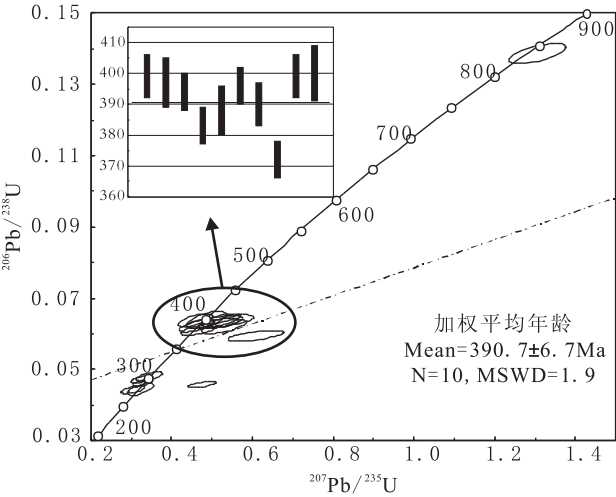


图 6 乌恰沟片麻状黑云母二长花岗岩(09-2)锆石 U-Pb($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 在 390.7Ma 左右)加权平均图

Fig. 6 U-Pb ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ range of about 390.7Ma) weighted average mean age diagram of zircons from gneissic biotite adamellite in Wuqiagou

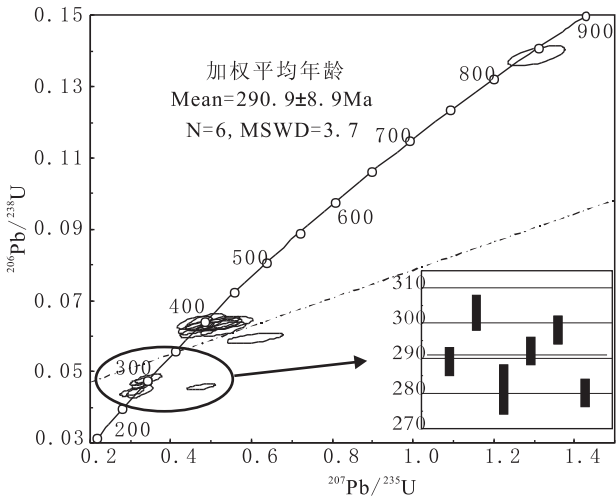


图 7 乌恰沟片麻状黑云母二长花岗岩(09-2)锆石 U-Pb($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 在 290.9Ma 左右)加权平均图

Fig. 7 U-Pb ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ range of about 290.9Ma) weighted average mean age diagram of zircons from gneissic biotite adamellite in Wuqiagou

表面年龄明显的分为 3 类,第一种如测点 15 为锆石核部,属明显的继承性锆石,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄 $(837 \pm 11) \text{Ma}$ 代表捕获锆石的年龄;第二种形成于锆石形成于 372~400Ma,为岩浆锆石,锆石形态完整,个别具核幔结构,但锆石振荡环带清楚,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面加权平均年龄 $(390.7 \pm 6.7) \text{Ma}$ 代表锆石形成年龄;第三种锆石形成于 280~303Ma,均具有明显的核幔结构,核部多呈云杉状,明显发生了构造热事件的扰动,其边部为环状条带或纹带,属岩浆锆石,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面加权平均年龄 $(290.9 \pm 8.9) \text{Ma}$ 代表了一期构造热事件时代。

片麻状细粒花岗岩脉(样品 08-1)的锆石样品,双面镜下颜色呈淡黄色或无色透明体。大部分锆石呈短柱状,个别呈长柱状,柱状锆石晶体长约 80~200 μm ,宽度一般在 50~100 μm ,长宽比多在 2:1~3:1。大部分锆石晶形完整,部分锆石残缺不全,系碎样过程中人为影响。锆石岩浆结晶环带较发育,锆石晶体 CL(图 5)显示清晰的核幔结构,发育较好的韵律环带。锆石 U-Pb 年龄分析结果见表 2,所有锆石的 Th 含量为 $379.48 \times 10^{-6} \sim 2\,188.92 \times 10^{-6}$,U 含量也较高,为 $535.49 \times 10^{-6} \sim 1\,970.40 \times 10^{-6}$,Th/U 值总体在 0.35~1.12 内变化,属典型的岩浆结晶锆石。24 个测点显示的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化为 280~304Ma,且都

表 1 阿尔泰乌恰沟地区片麻状黑云母二长花岗岩(09-2)锆石的 LA - ICP - MS U - Pb 定年结果表
Tab.1 Results of zircon LA - ICP - MS U - Pb dating of gneissic biotite adamellite in Wuqiagou area

样点 编号	含量(10 ⁻⁶)				同 位 素 比 值								年 龄(Ma)								
	²³⁸ U	²³² Th	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	
1	1 613.62	692.48	313.43	28.50	0.074 44	0.003 1	0.475 63	0.023 0	0.045 84	0.000 6	0.011 96	0.000 5	0.44	240	11	395	16	289	4	1053	77
2	666.71	458.24	176.70	11.33	0.061 12	0.003 4	0.522 89	0.031 7	0.063 90	0.001 2	0.016 92	0.000 8	0.76	339	15	427	21	399	7	644	99
3	1 022.57	679.97	206.81	12.23	0.052 22	0.002 8	0.344 54	0.021 5	0.048 14	0.000 8	0.013 16	0.000 6	0.75	264	11	301	16	303	5	295	112
4	720.98	387.57	194.40	12.53	0.060 74	0.006 1	0.520 62	0.056 0	0.063 48	0.001 2	0.017 01	0.000 9	0.55	341	19	426	37	397	8	630	202
5	668.55	351.75	124.92	6.25	0.053 94	0.003 9	0.323 32	0.021 0	0.044 49	0.001 1	0.013 03	0.000 9	0.56	262	18	284	16	281	7	369	102
6	1 552.45	539.75	296.13	18.06	0.050 74	0.002 5	0.328 72	0.016 0	0.046 35	0.000 7	0.013 42	0.000 7	0.35	270	14	289	12	292	4	229	84
7	579.50	476.71	145.67	7.93	0.059 76	0.003 6	0.516 50	0.032 8	0.062 95	0.001 0	0.015 72	0.000 7	0.82	315	14	423	22	394	6	595	110
8	1 652.02	434.70	324.35	17.95	0.048 43	0.002 6	0.327 24	0.018 2	0.047 35	0.000 7	0.018 62	0.001 4	0.15	373	29	287	14	298	4	120	98
9	921.28	894.92	233.07	14.33	0.054 55	0.003 5	0.468 44	0.029 6	0.061 19	0.001 1	0.016 47	0.000 9	0.92	330	18	390	20	383	6	394	111
10	525.88	2411.61	208.82	111.34	0.061 61	0.004 1	0.530 06	0.036 6	0.062 05	0.001 3	0.019 80	0.001 1	0.41	396	22	432	24	388	8	660	113
11	1 102.257	962.09	324.97	183.20	0.049 26	0.003 1	0.303 94	0.019 9	0.044 39	0.000 7	0.011 29	0.000 5	0.59	227	10	269	15	280	4	160	118
12	711.65	4 604.86	321.32	247.58	0.061 36	0.003 0	0.534 75	0.028 0	0.063 41	0.001 0	0.016 46	0.000 8	0.42	330	15	435	19	396	6	652	85
13	531.41	8 958.00	292.97	242.06	0.054 28	0.003 4	0.462 68	0.028 2	0.062 34	0.001 2	0.014 74	0.000 7	0.76	296	14	386	20	390	7	383	104
14	815.09	15 649.94	454.29	723.31	0.087 07	0.003 7	0.727 85	0.031 2	0.060 48	0.000 9	0.020 44	0.000 7	0.84	359	4	483	29	372	6	1050	161
15	1 289.356	828.111	677.122	141.200	0.067 66	0.002 2	1.306 53	0.046 8	0.138 62	0.001 9	0.033 29	0.001 5	0.22	662	29	849	21	837	11	858	52
16	593.05	8 445.91	363.16	341.11	0.052 67	0.003 2	0.459 26	0.028 2	0.063 87	0.001 1	0.017 08	0.000 9	0.59	342	18	384	20	399	7	314	107
17	381.04	5 714.88	239.27	200.52	0.057 13	0.004 0	0.486 81	0.032 7	0.063 98	0.001 6	0.016 56	0.001 1	0.60	332	21	403	22	400	9	497	105

注:LA - ICP - MS U - Pb 同位素含量及年龄测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,使用 Andersen 等的软件进行了普通铅校正。

表 2 阿尔泰乌恰沟地区片麻状细粒花岗岩脉(08-1)锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表
Tab. 2 Results of zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of gneissic fine grain granite dike in Wuqiagou area

样 点 编 号	含量(10^{-6})				同 位 素 比 值						年 龄(Ma)	
	^{238}U	^{232}Th	^{206}Pb	^{207}Pb	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
											$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
2	555.57	383.28	106.37	5.73	0.383 81	0.024 6	0.046 13	0.000 8	0.012 24	0.000 6	0.72	246
					0.003 7			0.000 8		0.000 6	0.72	246
											13	330
4	1 128.03	725.13	212.92	11.69	0.356 94	0.022 9	0.047 23	0.000 9	0.012 04	0.000 5	0.66	242
					0.003 2			0.000 9		0.000 5	0.66	242
											10	310
5	1 042.63	884.10	196.80	10.98	0.353 92	0.022 5	0.045 66	0.000 6	0.011 75	0.000 4	0.88	236
					0.003 1			0.000 6		0.000 4	0.88	236
											8	307
6	858.94	874.02	165.79	12.90	0.548 04	0.051 4	0.047 91	0.000 9	0.016 58	0.001 2	0.99	287
					0.006 2			0.000 9		0.001 2	0.99	287
											4	358
7	1 125.73	950.76	217.47	16.20	0.433 66	0.024 0	0.047 87	0.000 8	0.012 27	0.000 5	0.88	247
					0.003 4			0.000 8		0.000 5	0.88	247
											10	366
8	828.11	705.29	159.22	12.07	0.445 72	0.026 2	0.047 03	0.000 9	0.014 35	0.000 7	0.91	288
					0.003 8			0.000 9		0.000 7	0.91	288
											15	374
9	1 124.30	851.81	214.86	14.35	0.375 63	0.020 1	0.047 15	0.000 8	0.012 25	0.000 6	0.80	246
					0.003 0			0.000 8		0.000 6	0.80	246
											12	324
10	783.87	551.70	150.75	9.30	0.388 66	0.024 3	0.047 51	0.001 0	0.012 24	0.000 7	0.70	246
					0.003 9			0.001 0		0.000 7	0.70	246
											14	333
11	618.14	484.37	118.17	6.04	0.368 46	0.024 9	0.046 63	0.000 9	0.013 35	0.000 7	0.82	268
					0.003 7			0.000 9		0.000 7	0.82	268
											14	319
12	974.43	751.77	190.94	11.57	0.366 34	0.023 1	0.048 27	0.000 8	0.011 99	0.000 6	0.79	241
					0.003 1			0.000 8		0.000 6	0.79	241
											11	317
13	883.49	701.16	170.05	9.71	0.351 76	0.022 4	0.046 67	0.000 8	0.012 81	0.000 5	0.81	257
					0.003 2			0.000 8		0.000 5	0.81	257
											11	306
14	1 050.28	379.48	203.19	12.84	0.377 06	0.020 4	0.046 53	0.000 7	0.014 94	0.000 9	0.35	300
					0.002 8			0.000 7		0.000 9	0.35	300
											15	293
15	535.49	400.99	104.50	5.77	0.416 23	0.028 0	0.046 47	0.000 8	0.013 64	0.000 7	0.76	274
					0.003 8			0.000 8		0.000 7	0.76	274
											14	353
16	779.75	645.12	156.02	9.37	0.401 85	0.023 0	0.047 73	0.000 9	0.013 66	0.000 6	0.83	274
					0.003 6			0.000 9		0.000 6	0.83	274
											12	343
17	762.48	522.60	150.72	9.26	0.416 03	0.025 5	0.046 95	0.000 9	0.013 83	0.000 7	0.61	278
					0.004 1			0.000 9		0.000 7	0.61	278
											14	353
19	841.27	658.88	167.63	10.32	0.430 36	0.025 3	0.047 71	0.000 9	0.012 12	0.000 6	0.79	243
					0.003 9			0.000 9		0.000 6	0.79	243
											12	363
20	1 344.60	676.45	271.05	16.35	0.386 83	0.022 5	0.047 97	0.000 9	0.012 54	0.000 7	0.51	252
					0.003 3			0.000 9		0.000 7	0.51	252
											13	332
21	981.69	737.58	189.82	11.12	0.390 61	0.046 9	0.046 76	0.000 8	0.011 43	0.000 5	0.79	230
					0.007 8			0.000 8		0.000 5	0.79	230
											10	335
22	757.68	523.38	148.65	9.12	0.427 56	0.030 4	0.046 95	0.000 8	0.013 40	0.000 7	0.71	269
					0.004 7			0.000 8		0.000 7	0.71	269
											14	361
23	763.90	698.09	142.41	8.09	0.394 12	0.030 2	0.044 74	0.000 9	0.010 05	0.000 4	0.95	202
					0.004 1			0.000 9		0.000 4	0.95	202
											9	337
25	812.46	593.84	153.53	9.36	0.442 95	0.033 9	0.045 71	0.000 9	0.012 52	0.000 6	0.76	252
					0.004 8			0.000 9		0.000 6	0.76	252
											12	372
26	1 970.40	2 188.92	363.85	25.82	0.367 50	0.018 4	0.044 40	0.000 7	0.012 88	0.000 5	1.12	259
					0.002 6			0.000 7		0.000 5	1.12	259
											9	318
27	970.79	879.56	187.39	10.50	0.338 20	0.021 3	0.046 34	0.001 1	0.010 71	0.000 5	0.98	215
					0.003 4			0.001 1		0.000 5	0.98	215
											10	296
30	996.70	716.85	190.68	10.85	0.334 85	0.022 6	0.046 09	0.000 9	0.011 44	0.000 7	0.77	230
					0.003 8			0.000 9		0.000 7	0.77	230
											15	293

注:LA-ICP-MS U-Pb 同位素含量及年龄测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,使用 Andersen 等的软件进行了普通铅校正。

落在 U-Pb 谐和线上或附近较小区域内,在置信度 95% 时的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (93.5 ± 6)

Ma (MSWD=0.18) (图 8), 代表了细粒花岗岩脉的形成年龄。

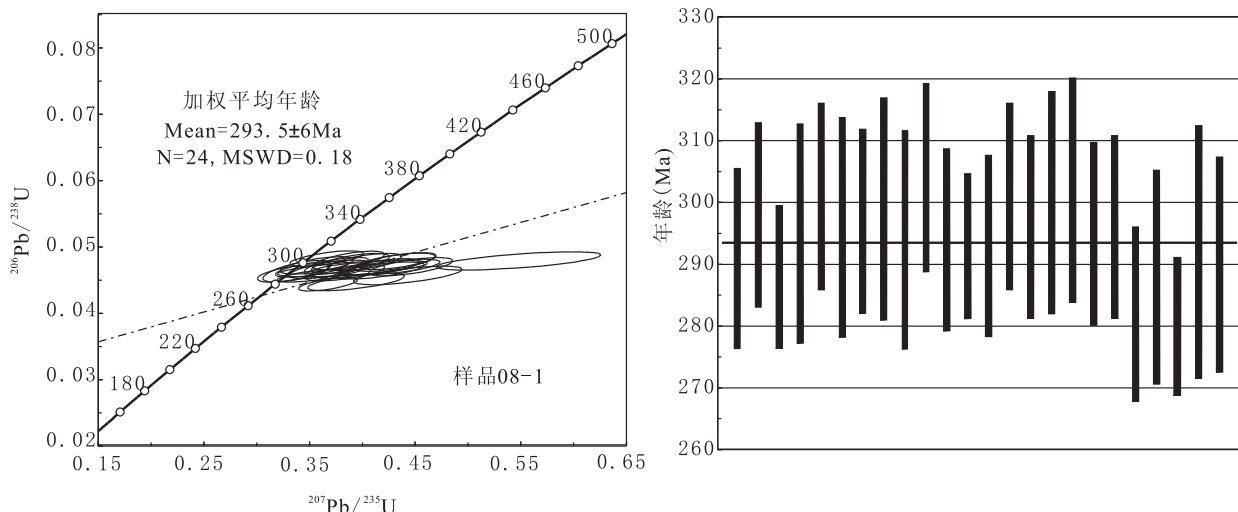


图 8 乌恰沟细粒花岗岩脉锆石 U-Pb ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 在 293.5Ma 左右) 加权平均图

Fig. 8 U-Pb ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ range of about 293.5Ma) weighted average mean age diagram of zircons from gneissic fine grain granite dike in Wuqiagou

4 讨论

(1) 年龄确定。片麻状黑云母二长花岗岩 (09-2) 样品挑选出的锆石, 环带明显, 核边结构清晰可辨。出现的 2 个集中期有 3 种可能的解释: $(1390.7 \pm 6.7)\text{Ma}$ 代表捕获锆石的年龄, $(290.9 \pm 8.9)\text{Ma}$ 代表岩体的侵位年龄, $(2390.7 \pm 6.7)\text{Ma}$ 代表岩体的侵位年龄, $(290.9 \pm 8.9)\text{Ma}$ 代表后期侵入的花岗质脉体的年龄; $(3390.7 \pm 6.7)\text{Ma}$ 代表岩体的侵位年龄, $(290.9 \pm 8.9)\text{Ma}$ 很可能是 Pb 丢失或者后期构造热事件变质流体影响年龄。很显然第 3 种可能性更大, 原因如下: $(1390.7 \pm 6.7)\text{Ma}$ 是统计权重平均值, 其锆石数量占绝大多数代表岩体自身年龄的可能性大; 二岩体的围岩为中元古代苏普特岩群比所测得的年龄要大, 不可能为捕获锆石; $(3390.7 \pm 6.7)\text{Ma}$ 的锆石形态和环带基本都较 $(290.9 \pm 8.9)\text{Ma}$ 的锆石形态好, $(290.9 \pm 8.9)\text{Ma}$ 的部分锆石有明显的黑边, 且边部具有明显的弱分带和云雾状分带特征, 其 U 的含量明显高于 $(390.7 \pm 6.7)\text{Ma}$ 的锆石 U 含量, 可能为后期构造热事件变质流体影响年龄 (Nozhkin et al., 1995; Rollinson et al., 1980; 吴元保等 2004)。故笔者认为, LA-

ICPMS 锆石 U-Pb 同位素测年结果 (图 6、表 1) 表明, $(390.7 \pm 6.7)\text{Ma}$ 为此岩体的岩浆结晶年龄, 即形成于早泥盆世, 与区域地质背景对比来看, 该岩体为碰撞造山阶段所形成 (王涛等, 2010); $(290.9 \pm 8.9)\text{Ma}$ 则表示该区的构造热事件时限, 应该为后造山阶段构造热事件影响年龄 (童英等, 2007); 而该 $(837 \pm 11)\text{Ma}$ (锆石含有一个光性特征明显不同的核部, 可能为继承锆石的年龄) 代表其源区有新元古代中期的地壳物质, 表明阿尔泰造山带含有古老地层的

信息。片麻状细粒花岗岩 (08-1) 样品挑选出的锆石, 环带明显, 核边结构清晰可辨。 $(293.5 \pm 6)\text{Ma}$ 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄, 则代表了所研究岩岩脉的侵位时代。该年龄与 09-2 样品的 290Ma 左右年龄基本一致, 显示为受额尔齐斯断裂左行走滑构造变形影响, 发育早二叠世线性展布的小岩体 (岩脉), 同时该次构造热事件导致 09-2 样品的变质年龄。

(2) 区域左行走滑时限及对地层变质变形带年龄的限制。通过前人对该构造带内阿拉尕尔-塔尔浪地区的不同类型花岗岩年代学研究结果 (袁超等, 2005), 发现不同类型的花岗岩具有相似的锆石 U-Pb 年龄, 片麻状二云母花岗岩的锆石 SHRIMP 年

龄为 (411 ± 5) Ma 和 (414 ± 7) Ma, 灰黑色片麻状花岗岩的锆石 SHRIMP 年龄为 (398 ± 9) Ma 和 (406 ± 5) Ma, 肉红色细粒二长花岗岩的锆石 SHRIMP 年龄为 (400 ± 8) Ma。对阿尔泰山南缘基性杂岩进行角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年(陈汉林等, 2006), 结果显示坪年龄为 (262.7 ± 1.1) Ma, 分析认为角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄代表的是后期构造热事件影响的年龄。不同学者利用角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, 在不同地区获得了 $240 \sim 270$ Ma 的年龄, 该组年龄不可能是一次局部的构造事件所造成的年龄, 而是代表了一次重要的、区域性的、强烈的构造热事件的年龄。

笔者研究确定的乌恰沟线性展布的片麻状细粒花岗岩脉 (293 ± 6) Ma 的侵位年龄, 以及片麻状黑云母二长花岗岩的变质年龄为 (290 ± 8.9) Ma, 对阿尔泰山脉南部左行韧性剪切变形的时代, 提供了有力的约束。前人把对同变质、变形的云母类单矿物 Ar-Ar 定年获得的 $244 \sim 265$ Ma (Laurent - Charvet et al., 2002; Laurent - Charvet et al., 2003) 和 236 Ma (周刚等, 2007) 作为额尔齐斯断裂带的峰期活动时代。此外, 通过研究确定的沙尔布拉克南和阿勒泰南小型线性花岗岩体的 275 Ma 的侵位年龄(孙桂华等, 2009), 以及富蕴县南具有与区域构造线相一致片麻理的变形黑云母花岗岩的侵位年龄为 281 Ma, 未变形的黑云母花岗岩的侵位年龄为 275 Ma (童英等, 2006a)。结合前人研究成果, 笔者认为 (293 ± 6) Ma 可以作为额尔齐斯断裂带左行走滑运动开始时限的下限, 281 Ma 时仍然存在一定规模的后造山剪切作用以及相应的变形作用, 但是在 275 Ma 之后变形开始减弱, 其结束年龄可能为 236 Ma, 或者更晚。

额尔齐斯带中青河片麻岩的锆石 U-Pb 年龄为 (281 ± 3) Ma, 胡霁琴等结合片麻岩中锆石阴极发光图像特征提出, 该地区变质作用和岩浆作用的时间范围在 $293 \sim 271$ Ma (胡霁琴等, 2006)。通过研究确定阿尔泰山冲乎尔地区发育蓝晶石-夕线石型变质带变质, 该带独居石 CHIME 法定年结果为 $(268 \pm 10) \sim (261 \pm 20)$ Ma (郑常青等, 2007), 该变质带与阿勒泰红柱石-夕线石型变质带形成时代 $(262 \pm 10) \sim (264 \pm 22)$ Ma 一致(郑常青等, 2005), 证明阿尔泰山地区在二叠纪中期曾经发生过一次大规模的构造热事件。据阿尔泰山地区富蕴至青河一带变质岩中的黑云母、白云母和角闪石的 Ar-Ar 年龄 $265 \sim$

236 Ma, 以及本次岩体变质年龄 (290.9 ± 8.9) Ma 和地层中岩脉的侵位年龄 (293.5 ± 6) Ma, 推断出构造带东段富蕴至青河一带地层, 剪切作用伴随着挤压变形所形成的变质变形带始于 293 Ma, 结束于 236 Ma。对阿尔泰山中段塔尔浪地区斜长角闪岩 Ar-Ar 测年, 结果呈现出似马鞍型坪谱, 最小年龄坪为 (297.3 ± 6.1) Ma, 确定其为变质年龄(蔡克大等, 2007), 反映出该构造带中西段剪切作用可能始于 (297.3 ± 6.1) Ma。

5 结论

(1) 阿尔泰山带南缘乌恰沟片麻状黑云母二长花岗岩生成年龄为 (390.7 ± 6.7) Ma, 片麻状细粒花岗岩脉侵位年龄为 (293.5 ± 6) Ma。两个岩体均受到额尔齐斯断裂带左形剪切作用的影响, 形成与区域构造线一致的片麻理。

(2) 阿尔泰山脉南缘和额尔齐斯断裂带左行走滑运动可能都始自早二叠世早期, 结束于中三叠世早期, 或者更晚。额尔齐斯构造带东段富蕴至青河一带, 剪切作用伴随着挤压变形所形成的变质变形带始于 293 Ma, 结束于 236 Ma; 而该构造带中西段剪切作用可能始于 (297.3 ± 6.1) Ma。

(3) 阿尔泰山乌恰沟地区存在新元古代中期古老地层的的信息, 继承锆石年龄 (837 ± 11) Ma, 预示该区存在古老地层。

参考文献(References):

- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. 地质学报, 2006, 80 (1): 148-168.
- LI Jinyi, HE Guoqi, XU Xin, et al. Crustal Tectonic Framework of Northern Xinjiang and Adjacent Regions and Its Formation[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (1): 148-168.
- 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 新疆人民出版社和香港文化教育出版社, 1994: 1-437.
- HE Guoqi, LI Maosong, LIU Dequan, et al. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China[M]. Wulumuqi: Xinjiang People Publishing House, 1994: 1-437.

- 许继峰, 陈繁荣, 于学元, 等. 新疆北部阿尔泰地区库尔特蛇绿岩: 古弧后盆地系统的产物[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 344-352.
- XU Jifeng, CHEN Fanrong, YU Xueyuan, et al. Kuerti ophiolite in Altay area of north Xinjiang: magmatism of an Ancient back-arc basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(3): 344-352.
- 王涛, 洪大卫, 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[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 640-650.
- WANG Tao, HONG Dawei, TONG Ying, et al. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogeny: its implications for vertical continental growth[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3): 640-650.
- 童英, 洪大卫, 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 年龄及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2006a, 25(2): 85-90.
- TONG Ying, HONG Dawei, WANG Tao, et al. TIMS U-Pb zircon ages of Fuyun post-orogenic linear granite plutons on the southern margin of Altai orogenic belt and their implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006a, 25(2): 85-90.
- 王涛, 童英, 李舫, 等. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 595-610.
- WANG Tao, TONG Ying, LI Shan, et al. Spatial and temporal variations of granitoids in the Alitay orogeny and their implications for tectonic setting and crustal growth: perspectives from Chinese Altai[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2010, 29(6): 595-610.
- 张亚峰, 蔺新望, 郭岐明, 等. 新疆富蕴地区中泥盆统阿勒泰组喀腊曼哲火山岩地球化学特征及构造环境研究[J]. 西北地质, 2013, 46(4): 66-80.
- ZHANG Yafeng, LIN Xinwang, GUO Qiming, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Environment Studies of Altay Group Volcanic Rocks of Middle Devonian Epoch in Kalamanzhe Area of the Fuyun Region, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2013, 46(4): 66-80.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(8): 1933-1944.
- TONG Ying, WANG Tao, HONG Dawei, et al. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(8): 1933-1944.
- 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 同位素组成突变的启示[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2009, 39(7): 935-948.
- SUN Min, LONG Xiaoping, CAI Keda, et al. Early Paleozoic ridge subduction in the Chinese Altai: Insight from the abrupt change in zircon Hf isotopic compositions[J]. Sci China Ser D-Earth Sci, 2009, 39(7): 935-948.
- 滕家欣, 王庆明. 阿尔泰成矿带主要矿产类型及勘查选区[J]. 西北地质, 2006, 39(2): 17-33.
- TENG Jiaxin, WANG Qingming. Major Ore Deposits in Altay Metallogenic Zone and Propecting Areas[J]. North-western Geology, 2006, 39(2): 17-33.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 102-118.
- XIAO Qinghui, DENG Jinfu, MA Daquan, et al. The way of investigation on granitoids[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 102-118.
- 柳小明, 高山, 袁洪林, 等. 193nm LA-ICP-MS 对国际地质标准参考物质中 42 种主元素和微量元素的分析[J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 408-418.
- LIU Xiaoming, GAO Shan, YUAN Honglin, et al. Analysis of 42 major and trace elements in glass standard reference materials by 193nm LA-ICPMS[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(3): 408-418.
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1511-1520.
- YUAN Honglin, WU Fuyuan, GAO Shan, et al. LA-ICPMS zircon U-Pb age and REE of Cenozoic pluton in NE China[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(14): 1511-1520.
- 张进红, 王京彬, 丁汝福. 阿尔泰造山带康布铁堡组变质火山岩特征和铀-铅年龄[J]. 中国区域地质, 2000, 19(3): 281-287.
- ZHANG Jinhong, WANG Jingbin, DING Rufu. Characteristics and U-Pb ages of zircon in matavolcanics from the Kangbutiebao Formation in the Altai orogeny, Xinjiang[J]. Regional Geology of China, 2000, 19(3): 281-287.
- 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- WU Yuanbao, ZHEN Yongfei. The genetic mineralogy of zircon and the constraint to the interpretation of U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1640.
- 袁超, 孙敏, 肖文交, 等. 阿尔泰南缘花岗岩的锆石 U-Pb 年代学及其地球化学特征[A]. 2005 年全国岩石学与地球动力学会议论文集[D]. 2005, 418-419.

- YUAN Chao, SUN Ming, XIAO Wenjiao, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of granitic in the southern Altay margin[A]. Collected Papers of National Symposium on Petrology and Geodynamics [D], 2005;418-419.
- 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 等. 阿尔泰造山带南缘基性杂岩的形成背景及其动力学含义[J]. 岩石学报, 2006, 022(01): 127-134.
- CHEN Hanlin, YANG Shufeng, LI Zilong, et al. Tectonic setting of mafic rocks in southern Altay orogenic belt and its geodynamic implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 022(01): 127-134.
- 周刚, 张招崇, 王新昆, 等. 新疆玛因鄂博断裂带中花岗质糜棱岩锆石 U-Pb SHRIMP 和黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及意义[J]. 地质学报, 2007, 81(3): 359-369.
- ZHOU Gang, ZHANG Zhaochong, WANG Xinkun, et al. Zircon U-Pb SHRIMP and ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of the granitic mylonite in the Mayinebo fault belt of north Xinjiang and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(3): 359-369.
- 孙桂华, 李锦轶, 杨天南, 等. 阿尔泰山脉南部线性花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2009, 36(5): 976-987.
- SUN Guihua, LI Jinyi, YANG Tiannan, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of two linear granite plutons in southern Altay Mountains and its tectonic implications [J]. Geology in China, 2009, 36(5): 976-987.
- 胡霭琴, 韦刚健, 邓文峰, 等. 阿尔泰地区青河西南片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 022(01): 1-10.
- HU Aiqin, WEI Gangjian, DENG Wenfeng, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating and its significance for gneisses from the southwest area to Qinghe Country in the Altai, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 022(01): 1-10.
- 蔡克大, 袁超, 孙敏, 等. 阿尔泰塔尔浪地区斜长角闪岩和辉长岩的形成时代、地球化学特征和构造意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 877-888.
- CAI Ke Da, YUAN Chao, SUN Min, et al. Geochemical characteristics and ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages of the amphibolites and gabbros in Tarlang area; implications for tectonic evolution of the Chinese Altai[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(5): 877-888.
- 郑常青, 徐学纯. 新疆阿尔泰冲乎尔地区蓝晶石—矽线石型变质带独居石 CHIME 二叠纪年龄及地质意义[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 566-573.
- ZHENG Changqing, XU Xuechun. Permian CHIME ages of monazites for the kyanite-sillimanite type metamorphic belt in Chonghuer area, Altai, Xinjiang and their geological implications[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 566-573.
- 郑常青, 徐学纯. 新疆阿尔泰红柱石—矽线石型变质带独居石年龄及其地质意义[J]. 世界地质, 2005, 24(3): 236-242.
- ZHENG Changqing, XU Xuechun. Monazite ages and geological implications of andalusite-sillimanite type metamorphic belt in Aletai, Xinjiang[J]. Global Geology, 2005, 24(3): 236-242.
- LI Jinyi, XIAO Wenjiao, WANG Kezhao, et al. Neoproterozoic-Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, NW China[J]. Iagod Guidebook Series, 2003, 10: 31-74.
- WINDLEY F B, KRONER A, GUO J, et al. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution [J]. The Journal of Geology, 2002, 110: 19-737.
- XIAO W, Windley B F, Badarch G, et al. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids; implications for the growth of central Asia[J]. Journal of the Geological Society, 2004, 161: 339-342.
- YUAN Chao, SUN Min, XIAO Wenjiao, et al. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids[J]. Chemical Geology, 2007, 242: 22-39.
- Anderson T. Correlation of common lead in U-Pb analysis that do not report ²⁰⁴Pb[J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59-79.
- LUDWIG K R. ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 1-70.
- GAO Shan, LIU Xiaoming, YUAN Honglin. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICP-MS[J]. Geostand News, 2002, 22: 181-195.
- Hoskin PWO, Black LP. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolithigneous zircon. Journal of Metamorphic Geology [J]. 2000, 18(4): 423-439.
- Nozhkin A D, Turkina O M. Radiogeochemistry of the charnokite-granulite complex, Sharyzhgaysk Window, Siberian Platform[J]. Geochem Int, 1995, 32: 62-78.
- Rollinson H R, Windley B F. Selective elemental depletion during metamorphism of Archean granulites, Contrib [J]. Mineral Petrol, 1980, 72: 257-263.
- Laurent-Charvet S, Charvet J, Shu L S, et al. Ductile strike-slip shear zones in eastern Xinjiang, NW China: A

Late Palaeozoiclate-collisional intracontinental adjustment [J]. Terra Nova. , 2002,14(4): 249-256.
Laurent-Charvet S, Monie P, Charvet J, et al. Late-Paleozoicstrike-slip shear zones in northeastern Xinjiang (NW China): newstructural and geochronological data [J]. Tectonics,2003, 22 (2): 1009-1032.

宁夏白云岩冶镁史话

镁是继钢铁、铝之后的第三大金属材料,具有许多优良的性能,应用前景极为广泛。工业用镁的纯度可达到 99.9%,但是纯镁不能用作结构材料,在纯镁中加入铝、锌、锂、锰、锆和稀土等元素形成的镁合金具有较高的强度,可以作为结构材料广泛应用。镁铝合金是当今世界发展、应用最快的轻合金,其轻质、高强度和美观的特性,使其用途广泛、用量剧增,大到卫星、飞机、汽车,小到计算机、手机、相机,甚至一些小五金。

我国的镁资源储量居世界首位,是镁资源大国和镁生产大国。国内采用白云岩冶镁的工艺技术是皮江法:将白云石(CaCO₃·MgCO₃)加入还原炉,在温度 1150℃~1200℃范围煅烧为氧化物(CaO·MgO),同一起投入的硅铁(FeSi)发生反应,即 2MgO·CaO(固)+FeSi(固)→2Mg(气)+Ca₂SiO₄+Fe,气相 Mg 沉淀为固相的粗镁,粗镁再经过精炼、铸锭得到成品镁。宁夏青龙山一带白云岩矿集区,是皮江法冶炼镁的优质原料来源。

1986 年,宁夏地矿局地质研究所关注到宁夏以往发现的矿产地多属于冶金熔剂级的,不能满足冶镁要求。经查阅有关地质资料,发现青龙山一带蓟县系地层中部分样品含 MgO、CaO 较好。在对比分析有关国内外资料的基础上,了解到南京幕府山白云岩矿所属镁厂利用白云岩采用皮江法工艺提炼金属镁,其工业指标基本接近日本宇都镁厂冶镁白云岩指标要求(MgO/CaO 摩尔比 1~1.03, SiO₂≤1%, Al₂O₃+Fe₂O₃≤0.5%, Na₂O+K₂O≤0.05%),认为在该区寻找与日本宇都镁厂的工业指标接近的冶镁白云岩是可能的。经过调查工作,终于在青龙山地区蓟县系地层中找到了矿石质量好,层位稳定,各组分含量均达到工业要求的冶镁白云岩矿产地及可供玻璃和陶瓷工业利用的白云岩产地。此后,宁夏开始筹建镁厂,拉开冶镁的序幕。目前,宁夏已有 10 余家国内外著名的冶镁企业,初步形成了石嘴山、吴忠、中卫三市为主的镁产业基地。

国家科技部经过对全国镁厂的调研考察,认为宁夏具有发展镁产业的优势条件,科技部高新司批准在宁夏建立“高品质镁合金生产基地”。2001 年科技部组织的“十五”科技攻关重大专项“镁合金开发应用及产业化”项目公开招标,宁夏鑫达镁业有限公司、惠冶镁业有限公司和郑州轻金属研究院,中标承担了“先进皮江法炼镁关键技术开发及产业化”子课题,沈阳工业大学、宁夏华源冶金实业有限公司、东风汽车集团公司和北京有色金属研究总院中标承担了“高性能镁合金及其挤压产品关键技术研究开发及产业化”子课题。

2008 年国务院《关于进一步促进宁夏经济社会发展的若干意见》要求,“支持镁及镁合金等新材料生产企业开发新产品、延长产业链,将宁夏建成国内重要的镁硅及其深加工产品基地。”经过多年发展,宁夏镁产业建立了煤—煤气—金属镁—镁合金—镁材—镁渣—水泥产业链和煤—半焦兰炭—硅铁—金属镁产业链的循环经济模式。在全区金属镁生产企业大力推广蓄热式还原炉炼镁技术和窑尾余热回收利用技术,大幅降低了炼镁能源消耗。

2013 年,宁夏回族自治区镁及镁合金研究设计院“DCS 自控技术在还原炉上的应用”及“宁夏镁及镁合金服务技术检测平台建设”项目顺利通过宁夏自治区专家组验收。前一项目提高了金属镁冶炼还原过程中能源和资源综合利用率,降低了劳动强度,改善了作业现场环境,提高了安全生产水平,符合国家和地方产业政策,实现了还原燃烧系统的自动控制,优化了还原工艺,该项目首次在 2 万 t/a 镁冶炼生产线上应用,经济效益明显,具有推广应用前景。后一项目针对企业镁及镁合金检测的薄弱环节,检测镁及各类金属组分 20 多种,为企业提供了准确、快捷的产品质量检测服务,确保了产品质量。

在人们的印象之中,宁夏金属矿产不多,但金属镁矿却不少。目前,山西、河南、宁夏三省区,为我国镁业的前三强。

(西安地质调查中心 杨合群;宁夏地质调查院 艾宁,毛自力,武丹)