

阿尔泰东南缘泥盆纪花岗质岩石的锆石 U-Pb 年龄、成因演化及构造意义： 钙碱性—高钾钙碱性—碱性岩浆演化新证据

宋鹏^{1, 2)}, 童英¹⁾, 王涛¹⁾, 秦切²⁾, 张建军¹⁾, 宁东旭³⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 2) 中国地质大学(北京), 北京, 100083;

3) 新疆地矿局第八地质大队, 新疆阿克苏, 843000

内容提要:中国阿尔泰广泛发育的花岗质岩石已获得大量研究, 但是其东南缘研究薄弱, 制约了对整个阿尔泰造山带构造岩浆演化的认识。本文新获得阿尔泰东南缘四个花岗质岩体(昆格依特、库吉尔特、布铁乌及卡拉特玉别)锆石 U-Pb 年龄, 分别为 382 ± 4 Ma、 381 ± 4 Ma、 385 ± 5 Ma 和 363 ± 6 Ma。岩石学、地球化学特征等显示这些花岗质岩石具有高钾钙碱性、准铝质—弱过铝质的 I 型特点, 全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-2.42 \sim -0.53$, Nd 模式年龄 t_{DM} 为 $1.6 \sim 1.3$ Ga; 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-3.44 \sim +13.26$, 绝大多数为正值, 锆石 Hf 二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}-2}$ 为 $2.5 \sim 0.6$ Ga, 表明源区物质组成复杂, 有较多的新生幔源物质参与花岗质岩石的形成, 并含有古老地壳成分。综合已有年龄分析显示, 中国阿尔泰花岗质岩石的形成时代可分为 $480 \sim 440$ Ma(峰期 460 Ma)、 $420 \sim 390$ Ma(峰期 400 Ma)、 $390 \sim 370$ Ma(峰期 380 Ma)、 $370 \sim 360$ Ma(峰期 365 Ma)、 $360 \sim 350$ Ma。处于岩浆发育峰期的早泥盆世($420 \sim 390$ Ma)多为准铝—过铝质的钙碱性系列; 中晚泥盆世($390 \sim 360$ Ma)多为准铝—弱过铝质的高钾钙碱性系列; $370 \sim 360$ Ma 为高钾钙碱性系列。该地区 363 Ma 的高钾钙碱性花岗质岩石的确定, 为进一步厘定整个阿尔泰泥盆纪花岗质岩浆由钙碱性($480 \sim 390$ Ma), 到高钾钙碱性($390 \sim 360$ Ma), 再到 354 Ma 的布尔根碱性花岗岩的演变特点提供了新的证据, 进一步揭示阿尔泰造山带该时期由俯冲增生演变到碰撞及后碰撞的演化过程。

关键词: 花岗质岩石; 锆石年龄; 岩浆演化; 同位素; 泥盆纪; 阿尔泰

中亚造山带(CAOB)是全球最大的显生宙增生造山带(Sengör et al., 1993; Windley et al., 2007; Xiao Wenjiao et al., 2015), 也是全球最大的陆壳生长区(Jahn et al., 2000a, 2000b; Wilhem et al., 2012)。作为中亚造山带的重要组成部分, 阿尔泰造山带在中亚造山带中占据特殊的地位, 是全球重要的矿产基地(Ding Jianhua et al., 2016), 发育有大量的花岗质岩石, 前人已对其做了大量工作。早期的研究认为其形成于晚古生代(Zou Tianren et al., 1988; Wang Zhonggang et al., 1990, 1998; Zhao Zhenhua et al., 1993)。近些年通过大量的高精度锆石 U-Pb 测年, 在阿尔泰识别出大量的早—中古生代花岗质岩石(如 Tong Ying et al., 2005, 2007; Wang Tao et al., 2006, 2010; Yuan Chao et al., 2007; Yang Fuquan et al., 2008; Liu Jianmin

et al., 2009; Sun Min et al., 2009; Liu Guoren et al., 2010; Cai Keda et al., 2011; Liu Wei et al., 2012; Zhang Yafeng et al., 2014, 2015; Hong Tao et al., 2015), 而晚古生代岩浆活动较弱, 仅有零星相关报道(如 Shen Xiaoming et al., 2011; Tong Ying et al., 2012, 2014; Gao Jianfeng et al., 2013; Yang Fuquan et al., 2013)。中国阿尔泰造山带被认为是早—中古生代俯冲—增生机制形成的造山带(Wang Tao et al., 2006, 2010; Sun Min et al., 2008), 该造山带岩浆活动大致分为 460 Ma、400 Ma、375 Ma 三个阶段, 大约在 400 Ma 岩浆作用达到顶峰(如 Wang Tao et al., 2006; Tong Ying et al., 2007; Liu Wei et al., 2012)。在阿尔泰东南部, 发育典型的碱性花岗岩即布尔根碱性花岗岩(Wang Zhonggang et al., 1998; Zhu Xiaoqing et al.,

注: 本文受 NSFC-新疆联合基金重点支持项目(U1403291)和中国地质调查局项目(编号: 12120113094000、1212010811033、12120113096500、1212010611803)联合资助。

收稿日期: 2016-05-09; 改回日期: 2016-07-31; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 宋鹏, 男, 1988 年生, 博士研究生, 花岗岩与构造地质学, Email: songpengyx@foxmail.com。通讯作者: 王涛, 男, 1959 年生, 博士生导师, 研究员, 从事花岗岩及构造研究, Email: taowang@cags.ac.cn。

2006),获得锆石年龄为 354Ma(Tong Ying et al., 2012)。目前,存在的问题是泥盆纪钙碱性花岗岩(400~370Ma)与 354Ma 的碱性花岗岩是否有关系?什么关系?是无关的两次独立岩浆事件还是有联系的一个构造岩浆演化关系?另外,前人研究相对集中于阿尔泰造山带中西部,而其东南缘研究程度非常有限,大多数岩体缺乏精确的锆石年龄,岩浆活动期次以及成因还不明确,制约了对阿尔泰东南缘甚至整个阿尔泰古生代的构造岩浆演化的认识。

为此,本文对阿尔泰东南缘花岗岩体进行了研究,获得 4 个代表性花岗质岩体的锆石 U-Pb 年龄,并进行了岩石学、地球化学研究,探讨其成因演化和构造背景,为整体认识阿尔泰岩浆活动期次以及构造演化提供新的依据,特别是鉴别出 360Ma 的花岗质岩石,为探索上述泥盆纪钙碱性花岗岩(400~370Ma)与 354Ma 的碱性花岗岩之间的关系问题提供新的线索。

1 区域地质概况

阿尔泰造山带位于中亚造山带西南部,北邻西萨彦岭古岛弧带,南侧以额尔齐斯断裂与准噶尔地块相接。中国阿尔泰位于其西南缘,大地构造位置属西伯利亚板块南部大陆边缘增生区,为古亚洲洋构造域的北带(Windley et al., 2007; Zhang Kexin et al., 2015)。总的来看,中国阿尔泰造山带以红山嘴—诺尔特断裂、康布铁堡—库尔特断裂和额尔齐斯断裂带为界,划分为北、中、南阿尔泰(He Guoqi et al., 1994; Li Jinyi et al., 2003; Xiao Wenjiao et al., 2004)。Windley et al. (2002)将其由北向南划分为 6 个块体(图 1):块体 1 即北阿尔泰块体,主要由泥盆纪到早石炭世火山岩(英安岩和安山岩)和沉积岩组成。块体 2 和块体 3 构成了中阿尔泰,被认为是阿尔泰微陆块的重要组成部分(Windley et al., 2002)。块体 2 由新元古代(震旦纪)—中奥陶世低级变质沉积—火山岩系组成(哈巴河组),夹少量的早泥盆世沉积岩和火山岩,块体 3 包括角闪岩相—绿片岩相的变质沉积岩、火山岩。根据前人研究,块体 2 和块体 3 可能属于一个构造块体,具微陆块性质(Hu Aiqin et al., 2000; Wang Tao et al., 2006, 2009)。块体 4 和块体 5 位于南阿尔泰,块体 4 主要为志留纪—泥盆纪低级变质的弧火山岩,块体 5 主要由泥盆系含有化石的连续沉积物组成,其上被晚石炭世地层覆盖,也包括一些变质程度较高的片岩和片麻岩。块体 6 基本由泥盆纪

火山沉积岩系和少量奥陶纪灰岩及一些石炭纪火山岩组成,多认为该块体属于准噶尔地块,额尔齐斯断裂带将其与阿尔泰造山带隔开。

研究区内主要出露地层为哈巴河群变质岩系。该套岩系属滨海—浅海相碎屑岩建造,岩性主要为变粒岩、片岩、片麻岩、变砂岩、千枚岩、混合岩等,早期 1:20 万青河幅区域地质调查报告根据岩相不同划分为下、中、上亚群,后来部分学者根据变质程度、等时线年龄等将该区哈巴河群划分为古—中元古界克木齐群和新元古界富蕴群(Li Tiande et al., 1996; Hu Aiqin et al., 2002);其次还出露有早石炭世红山嘴组地层和玛因鄂博组地层。作为区内出露最老的岩石,哈巴河群曾被认为是中国阿尔泰前寒武纪基底(He Guoqi et al., 1990),但近期其碎屑锆石 U-Pb 年龄的研究显示其最大的沉积年龄为 470 Ma,认为深部不存在古老物质,特别是前寒武纪基底(Long Xiaoping et al., 2007)。

阿尔泰东南缘花岗质岩石分布广泛,主要由泥盆纪和二叠纪花岗质岩体构成,岩石类型主要为(似斑状)花岗闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩、二长花岗岩和碱性花岗岩等。依据有无变形及与造山作用的关系,可以粗略的分为两类:一类是发生变形的同构造(或者同造山)岩体,另一类是未发生变形的后构造(或者后造山)岩体(Wang Tao et al., 2006)。本文所研究的昆格依特、库吉尔特、布铁乌和卡拉特玉别岩体早期曾被归并为一个(杂)岩体,即青格里闪长岩(杂)岩体(Wang Zhonggang et al., 1998)。

2 岩体特征及样品概况

本文所研究的 4 个较为典型的花岗质岩体,从北向南依次为昆格依特、库吉尔特、布铁乌和卡拉特玉别岩体(图 2)。昆格依特岩体位于中阿尔泰(块体 3)东部,青格里杂岩南部昆格依特河一带,出露面积约 70km²,岩性有花岗闪长岩、英云闪长岩等;主体为一套中细粒花岗闪长岩,样品采自岩体的东南边部,为块状构造,中细粒花岗结构,主要矿物为斜长石,半自形板状,含量 50%~55%,石英它形粒状,见波状消光,含量 20%~25%,钾长石为微斜长石,它形粒状,发育格子双晶,含量 10%~15%,黑云母片状,含量 10%,角闪石为半自形—它形柱状,含量 5%,次生矿物为绢云母、高岭土等,副矿物主要由锆石、磁铁矿等组成(图 3a)。

库吉尔特岩体位于青格里杂岩南部的库吉尔特一带,形状不规则,总体呈南东向展布,出露面积约

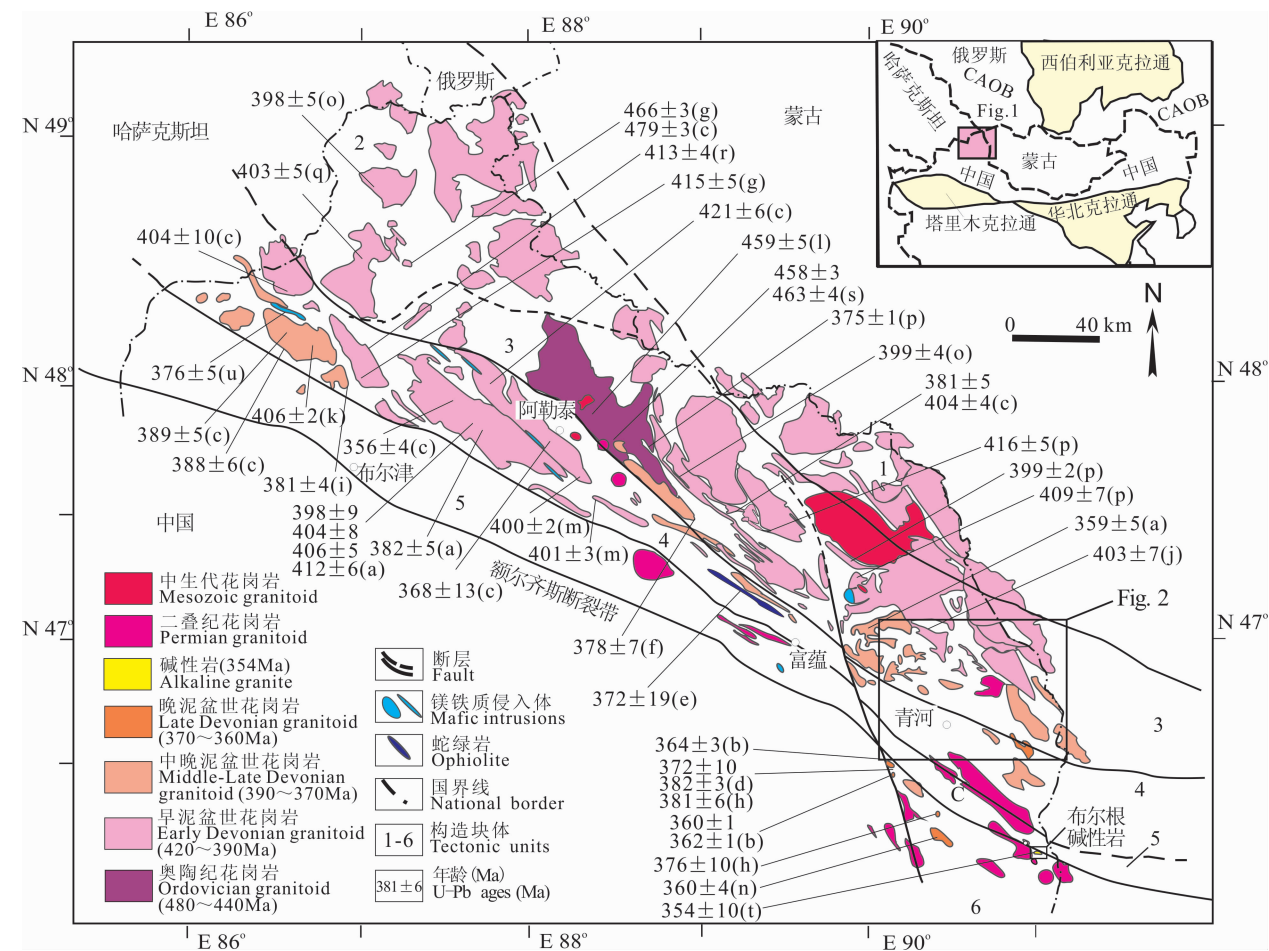


图 1 阿尔泰造山带地质简图及花岗岩分布图(据 Wang Tao et al., 2006, 2010; Tong Ying et al., 2012 修改)

Fig. 1 Generalized geological map of the Chinese Altai orogen
(modified from Wang Tao et al., 2006, 2010; Tong Ying et al., 2012)

图 1 年龄数据来源:(a)—Yuan Chao et al., 2007;(b)—Hong Tao et al., 2015;(c)—Cai Keda et al., 2011;(d)—Xue Chunji et al., 2010;(e)—Zhang Haixiang et al., 2003;(f)—Xu Lingang et al., 2010;(g)—Sun Min et al., 2009;(h)—Zhang Zhaochong et al., 2006;(i)—Sun Min et al., 2008;(j)—Zhang Yafeng et al., 2014;(k)—Li Yong et al., 2012;(l)—Chai Fengmei et al., 2010;(m)—Liu Guoren et al., 2010;(n)—Zhou Gang et al., 2009;(o)—Tong Ying et al., 2007;(p)—Wang Tao et al., 2006;(q)—Tong Ying et al., 2005;(r)—Zeng Qiaosong et al., 2007;(s)—Liu Feng et al., 2008;(t)—Tong Ying et al., 2012;(u)—Cai Keda et al., 2010

Sources of previous published U-Pb ages for granitic rocks in the Fig. 1:(a)—Yuan Chao et al., 2007;(b)—Hong Tao et al., 2015;(c)—Cai Keda et al., 2011;(d)—Xue Chunji et al., 2010;(e)—Zhang Haixiang et al., 2003;(f)—Xu Lingang et al., 2010;(g)—Sun Min et al., 2009;(h)—Zhang Zhaochong et al., 2006;(i)—Sun Min et al., 2008;(j)—Zhang Yafeng et al., 2014;(k)—Li Yong et al., 2012;(l)—Chai Fengmei et al., 2010;(m)—Liu Guoren et al., 2010;(n)—Zhou Gang et al., 2009;(o)—Tong Ying et al., 2007;(p)—Wang Tao et al., 2006;(q)—Tong Ying et al., 2005;(r)—Zeng Qiaosong et al., 2007;(s)—Liu Feng et al., 2008;(t)—Tong Ying et al., 2012;(u)—Cai Keda et al., 2010

26.8km²。主体岩性为一套灰白色中细粒石英闪长岩,样品采自岩体的北部,为块状构造,中细粒结构,主要矿物为斜长石,半自形板状,含量 75%~80%,具有定向性,石英它形粒状,含量 10%,钾长石半自形—它形粒状,含量 3%,黑云母片状,含量 10%~15%,次生矿物为绢云母和绿帘石等,副矿物为锆石、磷灰石等(图 3b)。岩石中所见包体较多,多为镁铁质暗色包体,包体大小 5~25 cm,多呈圆状、浑圆状、长条状。

布铁乌岩体位于青河县东部,青格里杂岩南部,岩体呈长条状,沿南东方向的构造线展布,面积约 151km²。主体岩性为一套中细粒似斑状花岗闪长岩,局部见有石英和长石拉长且定向,显示较强的面理,样品采自岩体的北部,为块状构造,似斑状—基质中细粒结构,斑晶为钾长石和斜长石,含量 20%~25%,斑晶大者达 3cm×4cm,小者为 1cm,其中斜长石,半自形板状,发育环带结构,钾长石为微斜长石,发育格子双晶;基质大小为 0.5~2mm,少量 2

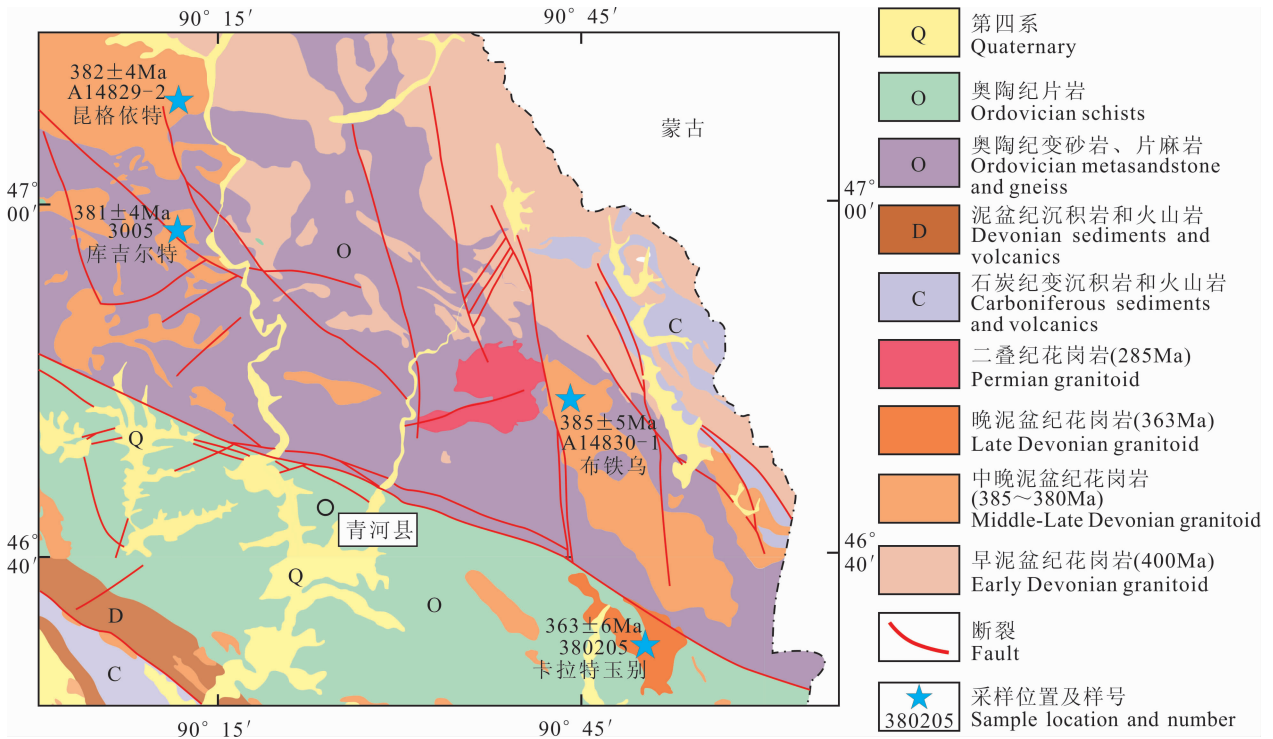


图 2 阿尔泰东南缘地质图(据 1 : 20 万青河幅、二台幅修改)

Fig. 2 Geological sketch map of the southeastern Chinese Altai (after 1 : 200000 Geological Maps of Qinghe and Ertai)

~5mm, 含量为石英 25%~30%, 斜长石 35%~40%, 钾长石 5%~10%, 黑云母 5%~10%, 另有少量原生白云母(2%~3%), 副矿物为锆石、磁铁矿等(图 3c)。岩石中见有暗色细粒包体, 呈浑圆状、长条状等。

卡拉特玉别岩体位于南阿尔泰(块体 4)最东端, 青格里杂岩南部, 形状不规则, 面积约为 60km²。主体岩性为一套细粒似斑状花岗闪长岩, 样品采自岩体的中西部, 为块状构造, 似斑状—基质细粒结构, 斑晶为斜长石、石英, 大小 4~5mm, 含量 5%~8%, 斜长石半自形板状, 石英半自形粒状, 见波状消光; 基质为斜长石、钾长石、石英、角闪石、黑云母, 大小 0.2~0.5mm, 部分 0.5~2mm, 斜长石半自形板状, 占 45%~50%, 钾长石它形粒状, 占 10%~15%, 石英它形粒状, 波状消光明显, 占 20%~25%, 黑云母片状, 偶见绿泥石化, 占 10%~15%, 角闪石半自形柱状, 偶见绿泥石化, 占 2%~3%, 副矿物为磁铁矿、锆石和磷灰石(图 3d)。

3 测试方法及测试结果

3.1 测试方法

样品在河北省廊坊市宏信地质勘查技术服务有限公司采用常规方法进行粉碎, 并用常规重选和电磁选方法进行锆石分选, 再在双目镜下挑选出晶形

和透明度较好的锆石颗粒, 将其粘贴在环氧树脂表面, 待固结后抛磨, 使锆石内部充分暴露, 然后进行反射光、透射光和阴极发光显微照相。通过对反射光、透射光和阴极发光图像的观察分析, 排除多裂纹、多包裹体和抛光不清晰的锆石, 并且选择具有代表性的锆石进行测试。

锆石 U-Pb 年代学分析在中国地质调查局西安地质调查中心微区同位素地球化学实验室完成, 所用质谱仪型号为 Agilent 7700x 及配套的 Geolas Pro 激光剥蚀系统。采用 32 μm 的激光束斑直径、6.0 J/cm² 的激光能量密度和 9Hz 的激光频率, 激光取样过程采用 20 秒的背景采集时间、40 秒的剥蚀取样时间和 10 秒的样品池冲洗时间, 剥落的样品由高纯氦气(1.100 L/min)带入 ICP-MS; 同位素 ²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁸Pb 和 ²³²Th 采用 20ms, ²³⁸U 采用 10ms, ²⁰⁷Pb 采用 30ms 的积分时间; 采用锆石标样 91500 作为外标进行 U-Pb 同位素分馏效应和质量歧视的校正计算, Plesovice 锆石标样作为监控盲样来监视测试过程的稳定性, 保证每 5 个样品点至少插一组标样。数据处理应用 Glitter (ver4.0, Macquarie University) 计算程序计算锆石的同位素比值和元素含量; 应用 Isoplot (3.71) 计算程序 (Ludwig, 2008) 对锆石样品的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄和

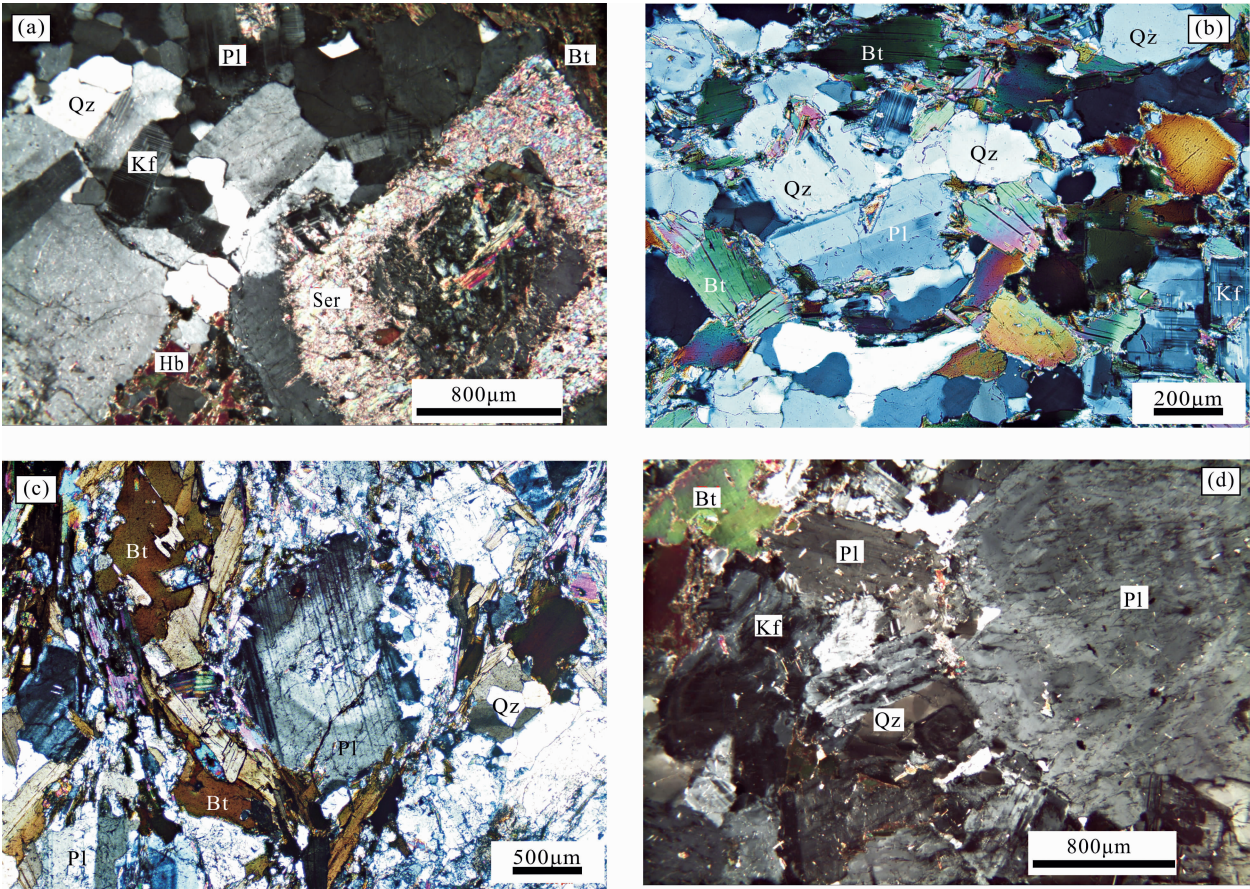


图 3 阿尔泰东南缘花岗质岩石显微照片

Fig. 3 Photomicrographs of granitic rocks from the southeastern Chinese Altai

(a)—昆格依特花岗闪长岩;(b)—库吉尔特石英闪长岩;(c)—布铁乌似斑状花岗闪长岩;(d)—卡拉特玉别似斑状花岗闪长岩

Qz—石英;Pl—斜长石;Kf—钾长石;Bt—黑云母;Ser—绢云母;Hb—角闪石

(a)—granodiorite from Kungeyite pluton;(b)—quartz diorite from Kujierte pluton;(c)—porphyritic granodiorite from Butiewu pluton;

(d)—porphyritic granodiorite from Kalateyubie pluton

Qz—Quartz;Pl—Plagioclase;Kf—K-feldspar;Bt—Biotite;Ser—Sericite;Hb—Hornblende

$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄在谐和图上进行投图,并计算年龄谐和测点的加权平均值(基于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄)。

样品的主量、微量和稀土元素分析在加拿大温哥华 Acme 分析实验室完成的。首先选取 0.20g 粉末样品与 1.50g LiBO_2 助熔剂置于石墨坩埚内进行充分混合,然后将混合物于马弗炉上在 1050°C 下加热 15min,提取熔融后的混合物,倒入 100mL 由去离子水和 ACS 级纯度硝酸配置的 5% 浓度的 HNO_3 中。将溶液摇晃 2h 使其充分溶解,取一部分置入聚丙烯分析管内。通过电感耦合等离子光谱分析(ICP-AES)进行主要氧化物和 Ba、Sc、Cu、Zn 和 Ni 含量的分析,在 ICP-MS 上进行其它微量元素以及稀土元素含量的分析。对于贵金属的分析,称取 0.50g 样品,置于 3ml 高温的(95°C)王水中进行溶解后,通过 ICP-MS 进行分析。

Rb-Sr、Sm-Nd 同位素化学分离纯化和同位素比值测量在中国科学技术大学放射性成因同位素地球化学实验室完成。Rb-Sr 同位素和 REE 分离纯化在装有 5mL AG50W-X12 交换树脂(200~400 目)的石英交换柱中完成,Sm-Nd 同位素的分离纯化在装有 1.7mL Teflon 粉末的石英交换柱中完成。同位素比值测试在 MAT-262 热电离子质谱计完成,Rb-Sr 同位素比值测定采用 Ta 金属带和 Ta-HF 发射剂;Sm-Nd 同位素比值测定采用双 Re 金属带的形式。测量得到的同位素比值采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 进行质量分馏校正。详细的同位素分析流程可以参见文献(Chen Fukun et al., 2002, 2007)。

锆石 Hf 同位素测试是在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学重点实验室完成,测试所

用仪器为 Neptune Plus 多接收等离子质谱和 Compex pro. 193 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,将剥蚀物质从激光探针传送到 MC-ICP-MS 之前与 Ar 混合,形成混合气。锆石 Hf 测试点位选择 U-Pb 年龄测试点附近,根据锆石大小,剥蚀直径一般采用 44 μm ,少数采用 32 μm ,激光脉冲频率为 8Hz,测定时使用国际上通用的锆石标样 GJ1 作为参考物质,分析过程中锆石标准 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282015\pm8(2\sigma, n=10)$ 。具体流程及仪器运行条件等见文献(Hou Kejun et al., 2007; Wu Fuyuan et al., 2007)。

3.2 测试结果

3.2.1 锆石 U-Pb 年代学

本次研究的样品中分选出的锆石大多晶型较为完整,偶见不完整晶型。CL 照片显示锆石形态以棱柱状、长柱状为主,少量短柱状。锆石颗粒的长轴

多在 100~220 μm 之间,长宽比约为 3:1~1:1。锆石透明度较好,多数具有明显的振荡环带(图 4)。上述特征说明本次研究新测的锆石主要为岩浆锆石。锆石 U-Pb 分析结果列于表 1 中。

本次研究对库吉尔特石英闪长岩测年样品(3005)共分析了 23 个测点,测点多数位于边部,少数位于核部。23 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄投点均落在谐和线及其附近,Th/U 比值为 0.47~1.20。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 介于 362~474Ma 之间,可分为 2 组(图 5a)。第一组有 4 个测点,年龄介于 457~471Ma,为捕获锆石或者继承锆石的年龄;第二组有 19 个测点,构成集中的主锆石群, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $381\pm4\text{Ma}$,时代为晚泥盆世,代表了库吉尔特岩体的侵位年龄。

昆格依特花岗闪长岩测年样品(A14829-2)共分析了 30 个测点。其中 16 号在谐和年龄中明显偏离谐和线,故加权平均值计算时予以剔除。其余 29

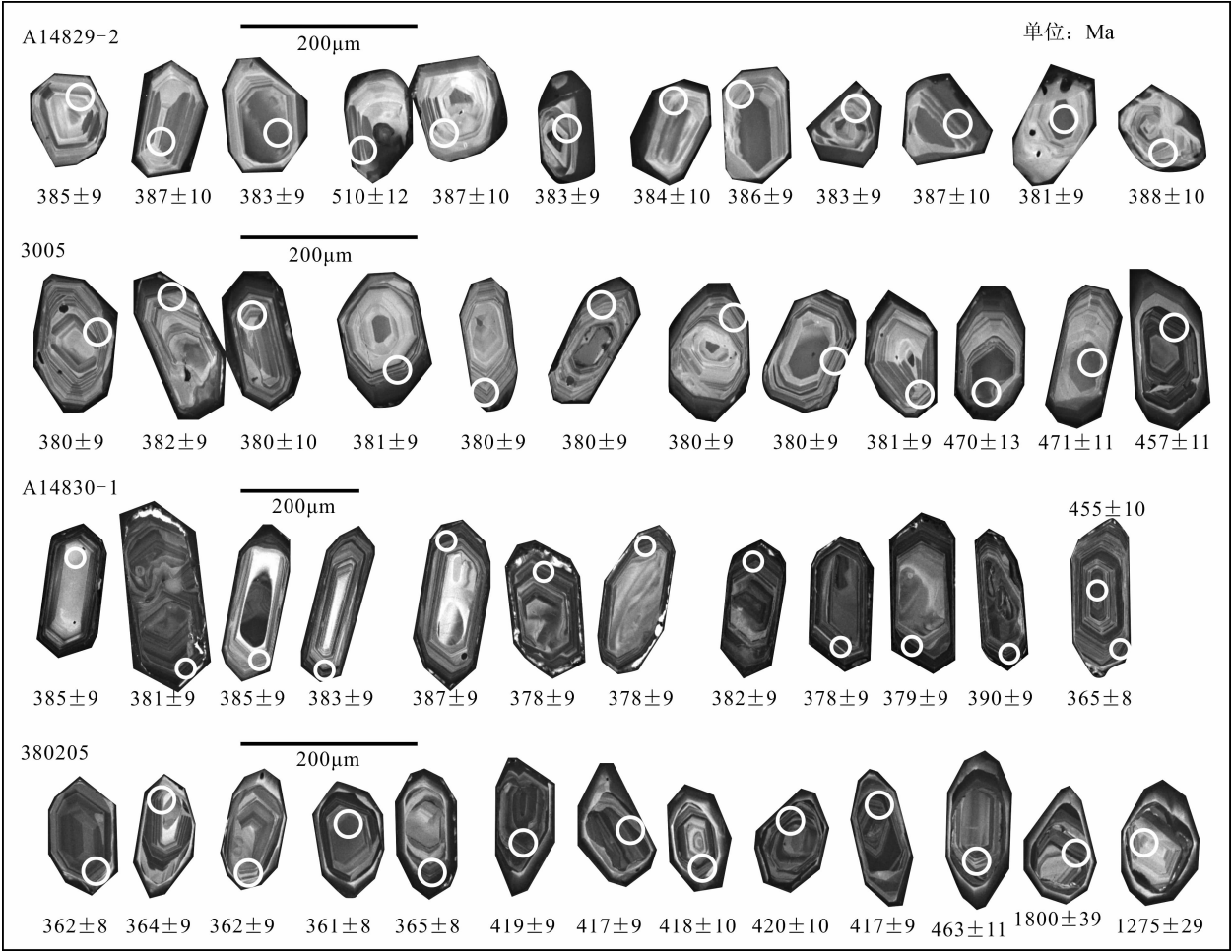


图 4 阿尔泰东南缘花岗质岩石锆石 CL 图

Fig. 4 Zircon CL images of granitic rocks in the southeastern Chinese Altai

表 1 阿尔泰东南缘花岗岩岩石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS Zircon U-Pb age dating results for representative granitic rocks from the southeastern Chinese Altai															
测点号	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	^{232}Th	^{238}U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
库吉尔特															
3005-02	119.7	207.0	0.58	0.06512	0.00174	0.48656	0.01464	0.05421	0.00147	378	10	380	11	390	70
3005-03	85.2	143.2	0.60	0.06425	0.00182	0.49361	0.01799	0.05574	0.00196	380	10	382	10	393	63
3005-04	87.0	168.9	0.51	0.19687	0.00509	2.15011	0.05627	0.07924	0.00173	385	10	384	10	381	67
3005-05	73.9	137.3	0.54	0.06485	0.00173	0.50068	0.01534	0.05601	0.00156	376	10	389	11	463	71
3005-06	122.2	258.7	0.47	0.06443	0.00177	0.49891	0.01640	0.05618	0.00173	471	12	501	12	638	56
3005-07	56.3	104.5	0.54	0.08042	0.00220	0.62980	0.02068	0.05682	0.00174	380	10	383	11	402	73
3005-08	113.2	201.4	0.56	0.08677	0.00224	0.67183	0.01804	0.05617	0.00128	382	10	381	9	371	58
3005-09	80.2	124.7	0.64	0.06576	0.00176	0.47573	0.01511	0.05249	0.00153	380	10	374	11	339	71
3005-10	63.2	109.7	0.58	0.06474	0.00175	0.49114	0.01577	0.05504	0.00164	471	13	473	15	484	83
3005-11	109.6	137.1	0.80	0.06492	0.00179	0.48869	0.01678	0.05461	0.00177	380	10	391	10	456	65
3005-12	127.5	189.0	0.67	0.06517	0.00176	0.49377	0.01581	0.05497	0.00163	381	10	379	9	364	60
3005-13	339.6	643.2	0.53	0.12649	0.00328	1.12285	0.03046	0.06440	0.00150	474	12	479	10	504	48
3005-14	956.2	793.7	1.20	0.08700	0.00224	0.68410	0.01844	0.05704	0.00131	457	11	481	10	595	47
3005-15	109.0	227.6	0.48	0.06468	0.00175	0.48876	0.01590	0.05482	0.00166	380	10	378	9	366	58
3005-16	82.4	151.8	0.54	0.06450	0.00177	0.48717	0.01651	0.05480	0.00176	381	10	376	10	342	64
3005-17	74.0	139.6	0.53	0.06505	0.00177	0.50647	0.01679	0.05648	0.00176	380	10	410	11	581	63
3005-18	91.5	153.7	0.60	0.06426	0.00185	0.46706	0.01819	0.05273	0.00202	381	10	381	10	379	62
3005-19	167.4	204.3	0.82	0.06435	0.00177	0.49222	0.01725	0.05549	0.00185	381	10	395	10	476	61
3005-20	87.4	161.9	0.54	0.14754	0.00393	1.41558	0.04112	0.06960	0.00181	381	10	385	10	409	60
3005-21	75.7	130.4	0.58	0.06199	0.00172	0.46134	0.01614	0.05399	0.00181	382	10	379	10	364	69
3005-22	228.8	265.4	0.86	0.06293	0.00174	0.50659	0.01720	0.05840	0.00189	383	10	387	9	405	55
3005-23	103.3	183.0	0.56	0.06432	0.00183	0.48342	0.01825	0.05452	0.00201	381	10	362	10	239	69
3005-24	129.0	213.1	0.61	0.08540	0.00222	0.69667	0.01952	0.05917	0.00146	384	10	392	10	444	61
布铁乌															
A14830-1-01	93.3	143.4	0.65	0.06472	0.00164	0.50892	0.01527	0.05703	0.00162	404	10	418	10	492	62
A14830-1-02	80.9	202.4	0.40	0.06407	0.00163	0.50311	0.01519	0.05696	0.00163	400	10	414	10	489	63
A14830-1-03	40.5	735.6	0.06	0.06379	0.00155	0.49034	0.01267	0.05576	0.00128	399	9	405	9	442	50
A14830-1-04	108.0	276.0	0.39	0.06270	0.00161	0.45688	0.01435	0.05286	0.00159	392	10	382	10	323	67
A14830-1-05	31.5	405.1	0.08	0.06238	0.00156	0.47681	0.01358	0.05545	0.00147	390	9	396	9	430	58
A14830-1-06	49.4	372.2	0.13	0.06321	0.00158	0.48486	0.01376	0.05564	0.00147	395	10	401	9	438	57
A14830-1-07	31.0	537.9	0.06	0.06115	0.00152	0.46744	0.01318	0.05544	0.00145	383	9	389	9	430	57
A14830-1-08	29.0	377.4	0.08	0.06054	0.00153	0.46355	0.01357	0.05554	0.00153	379	9	387	9	434	60
A14830-1-09	62.1	341.5	0.18	0.06057	0.00151	0.50481	0.01411	0.06046	0.00156	379	9	415	10	620	55
A14830-1-10	66.8	221.5	0.30	0.05873	0.00150	0.42263	0.01300	0.05219	0.00152	368	9	358	9	294	65
A14830-1-11	43.3	298.8	0.14	0.05760	0.00144	0.41833	0.01212	0.05268	0.00142	361	9	355	9	315	60
A14830-1-12	64.3	362.1	0.18	0.06165	0.00154	0.45895	0.01308	0.05400	0.00143	386	9	384	9	371	58
A14830-1-13	38.2	304.8	0.13	0.05943	0.00151	0.43653	0.01314	0.05328	0.00151	372	9	368	9	341	63
A14830-1-14	75.1	614.4	0.12	0.06406	0.00157	0.47549	0.01270	0.05384	0.00130	400	10	395	9	364	53
A14830-1-15	281.8	306.5	0.92	0.06439	0.00160	0.51067	0.01411	0.05752	0.00146	402	10	419	9	511	55
A14830-1-16	117.5	251.1	0.47	0.06423	0.00163	0.50743	0.01502	0.05731	0.00160	401	10	417	10	503	61
A14830-1-17	82.3	663.7	0.12	0.06097	0.00150	0.47058	0.01267	0.05599	0.00136	382	9	392	9	452	53
A14830-1-18	54.4	247.0	0.22	0.05958	0.00159	0.44265	0.01524	0.05390	0.00182	373	10	372	11	367	74
A14830-1-19	15.2	376.2	0.04	0.06009	0.00149	0.47320	0.01287	0.05713	0.00141	376	9	393	9	496	54
A14830-1-20	124.6	446.0	0.28	0.06162	0.00157	0.46667	0.01386	0.05493	0.00153	386	10	389	10	410	61
A14830-1-21	26.1	431.5	0.06	0.06417	0.00162	0.49667	0.01451	0.05615	0.00153	401	10	409	10	458	60
A14830-1-22	75.5	267.3	0.28	0.06268	0.00158	0.47679	0.01369	0.05518	0.00147	392	10	396	9	420	58
A14830-1-23	68.5	231.9	0.30	0.06136	0.00158	0.45863	0.01426	0.05422	0.00161	384	10	383	10	380	65
A14830-1-24	109.4	327.9	0.33	0.06197	0.00160	0.48492	0.01493	0.05676	0.00166	388	10	401	10	482	64
A14830-1-25	111.7	374.3	0.30	0.06052	0.00152	0.45300	0.01304	0.05430	0.00145	379	9	379	9	383	59
A14830-1-26	43.8	247.3	0.18	0.06053	0.00158	0.44780	0.01449	0.05367	0.00167	379	10	376	10	357	69
A14830-1-27	35.1	393.9	0.09	0.05828	0.00146	0.44276	0.01260	0.05511	0.00145	365	9	372	9	416	57

续表 1

测点号	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	²³² Th	²³⁸ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ
A14830-1-28	279.0	596.9	0.47	0.07314	0.00179	0.59017	0.01514	0.05853	0.00132	455	11	471	10	550	49
A14830-1-29	66.4	175.2	0.38	0.05899	0.00153	0.45727	0.01444	0.05623	0.00170	370	9	382	10	461	66
A14830-1-30	138.4	541.1	0.26	0.06335	0.00159	0.47715	0.01346	0.05464	0.00142	396	10	396	9	398	57
昆格依特															
A14829-2-01	69.7	106.8	0.65	0.06167	0.00161	0.47459	0.01646	0.05581	0.00190	386	10	394	11	445	74
A14829-2-02	131.4	142.4	0.92	0.05959	0.00154	0.43195	0.01456	0.05257	0.00173	373	9	365	10	310	73
A14829-2-03	213.1	204.6	1.04	0.05981	0.00149	0.44845	0.01308	0.05438	0.00150	375	9	376	9	387	60
A14829-2-04	124.5	167.3	0.74	0.05977	0.00150	0.45669	0.01366	0.05542	0.00158	374	9	382	10	429	62
A14829-2-05	75.2	107.4	0.70	0.06201	0.00166	0.46392	0.01685	0.05426	0.00196	388	10	387	12	382	79
A14829-2-06	128.7	134.3	0.96	0.06124	0.00159	0.45648	0.01527	0.05406	0.00177	383	10	382	11	374	72
A14829-2-07	67.9	105.7	0.64	0.06312	0.00167	0.47754	0.01660	0.05487	0.00188	395	10	396	11	407	74
A14829-2-08	71.2	108.5	0.66	0.06141	0.00167	0.48460	0.01807	0.05723	0.00214	384	10	401	12	500	81
A14829-2-09	82.3	121.6	0.68	0.06299	0.00164	0.47496	0.01576	0.05469	0.00177	394	10	395	11	400	70
A14829-2-10	122.7	134.2	0.91	0.08244	0.00206	0.70443	0.02031	0.06197	0.00168	511	12	541	12	673	57
A14829-2-11	68.2	101.1	0.68	0.06193	0.00165	0.47812	0.01715	0.05600	0.00199	387	10	397	12	452	77
A14829-2-12	142.8	185.6	0.77	0.06240	0.00156	0.49447	0.01446	0.05748	0.00159	390	9	408	10	510	60
A14829-2-13	229.3	330.1	0.69	0.05970	0.00151	0.44869	0.01352	0.05452	0.00157	374	9	376	9	392	63
A14829-2-14	145.8	445.0	0.33	0.06124	0.00149	0.46086	0.01235	0.05458	0.00133	383	9	385	9	395	54
A14829-2-15	88.7	133.9	0.66	0.05972	0.00152	0.46456	0.01429	0.05642	0.00166	374	9	387	10	468	64
A14829-2-16	87.5	110.7	0.79	0.05672	0.00149	0.49143	0.01610	0.06284	0.00202	356	9	406	11	703	67
A14829-2-17	88.1	137.6	0.64	0.05975	0.00160	0.45310	0.01623	0.05500	0.00195	374	10	379	11	412	77
A14829-2-18	105.4	157.9	0.67	0.06174	0.00165	0.46440	0.01643	0.05456	0.00191	386	10	387	11	394	76
A14829-2-19	166.5	293.7	0.57	0.05959	0.00154	0.44140	0.01414	0.05372	0.00166	373	9	371	10	359	68
A14829-2-20	81.2	131.9	0.62	0.05794	0.00157	0.44753	0.01610	0.05602	0.00201	363	10	376	11	453	78
A14829-2-21	62.4	119.0	0.52	0.06365	0.00174	0.48613	0.01810	0.05539	0.00206	398	11	402	12	428	81
A14829-2-22	158.8	224.7	0.71	0.06124	0.00162	0.45024	0.01555	0.05332	0.00181	383	10	377	11	343	75
A14829-2-23	141.2	189.4	0.75	0.05953	0.00155	0.44841	0.01468	0.05463	0.00174	373	9	376	10	397	69
A14829-2-24	104.7	128.3	0.82	0.06192	0.00165	0.45436	0.01614	0.05322	0.00187	387	10	380	11	338	78
A14829-2-25	103.9	155.3	0.67	0.05979	0.00160	0.43786	0.01555	0.05311	0.00186	374	10	369	11	334	78
A14829-2-26	77.5	122.9	0.63	0.06272	0.00172	0.47164	0.01750	0.05454	0.00202	392	10	392	12	394	80
A14829-2-27	256.9	258.9	0.99	0.06099	0.00155	0.46091	0.01388	0.05481	0.00157	382	9	385	10	405	62
A14829-2-28	136.1	150.1	0.91	0.06323	0.00168	0.47485	0.01654	0.05447	0.00187	395	10	395	11	390	74
A14829-2-29	83.9	126.9	0.66	0.06204	0.00172	0.48025	0.01811	0.05615	0.00212	388	10	398	12	458	81
A14829-2-30	74.2	123.9	0.60	0.05907	0.00167	0.43011	0.01748	0.05281	0.00217	370	10	363	12	321	91
卡拉特玉别															
380205-01	441.5	621.4	0.71	0.06735	0.00166	0.51698	0.01309	0.05567	0.00121	420	10	423	9	439	47
380205-02	177.8	335.1	0.53	0.05789	0.00146	0.43818	0.01220	0.05489	0.00138	363	9	369	9	408	54
380205-03	145.5	275.6	0.53	0.05867	0.00152	0.43329	0.01313	0.05356	0.00151	368	9	366	9	353	63
380205-04	371.8	386.4	0.96	0.06657	0.00168	0.51140	0.01397	0.05571	0.00136	415	10	419	9	441	53
380205-05	101.0	226.2	0.45	0.05816	0.00152	0.43911	0.01369	0.05475	0.00161	364	9	370	10	402	64
380205-06	228.8	576.7	0.40	0.06673	0.00164	0.51672	0.01300	0.05615	0.00121	416	10	423	9	458	47
380205-07	226.4	282.1	0.80	0.07455	0.00188	0.58476	0.01596	0.05688	0.00139	464	11	468	10	486	53
380205-08	551.4	723.7	0.76	0.06722	0.00165	0.52538	0.01311	0.05668	0.00120	419	10	429	9	478	47
380205-09	126.7	191.0	0.66	0.06810	0.00175	0.52691	0.01548	0.05611	0.00152	425	11	430	10	457	59
380205-10	160.4	401.6	0.40	0.06600	0.00163	0.50608	0.01309	0.05561	0.00125	412	10	416	9	437	49
380205-11	240.8	641.0	0.38	0.06687	0.00164	0.51905	0.01309	0.05629	0.00122	417	10	425	9	463	48
380205-12	91.8	194.8	0.47	0.05695	0.00154	0.43318	0.01480	0.05516	0.00183	357	9	365	10	419	72
380205-13	238.1	513.5	0.46	0.05713	0.00142	0.42214	0.01125	0.05358	0.00127	358	9	358	8	354	53
380205-14	306.9	938.1	0.33	0.06689	0.00165	0.53251	0.01357	0.05773	0.00128	417	10	434	9	519	48
380205-15	220.2	251.8	0.87	0.05790	0.00149	0.42866	0.01304	0.05369	0.00153	363	9	362	9	358	63
380205-16	51.6	402.0	0.13	0.05767	0.00143	0.43307	0.01152	0.05446	0.00129	362	9	365	8	390	52
380205-17	65.9	186.6	0.35	0.05862	0.00153	0.44711	0.01404	0.05531	0.00165	367	9	375	10	425	65
380205-18	144.6	343.7	0.42	0.05826	0.00145	0.45415	0.01218	0.05653	0.00135	365	9	380	9	473	53

续表 1

测点号	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	^{232}Th	^{238}U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
380205-19	226.2	381.1	0.59	0.06899	0.00172	0.54299	0.01463	0.05708	0.00138	430	10	440	10	494	53
380205-20	93.8	205.6	0.46	0.32213	0.00801	5.03463	0.12608	0.11335	0.00244	1800	39	1825	21	1854	38
380205-21	31.2	115.9	0.27	0.21887	0.00555	2.53591	0.06770	0.08402	0.00200	1276	29	1282	19	1293	46
380205-22	110.4	452.3	0.24	0.06713	0.00166	0.53525	0.01411	0.05782	0.00135	419	10	435	9	523	51
380205-23	129.9	303.4	0.43	0.05742	0.00147	0.42481	0.01257	0.05366	0.00148	360	9	360	9	357	61
380205-24	119.7	207.0	0.58	0.06512	0.00174	0.48656	0.01464	0.05421	0.00147	378	10	380	11	390	70

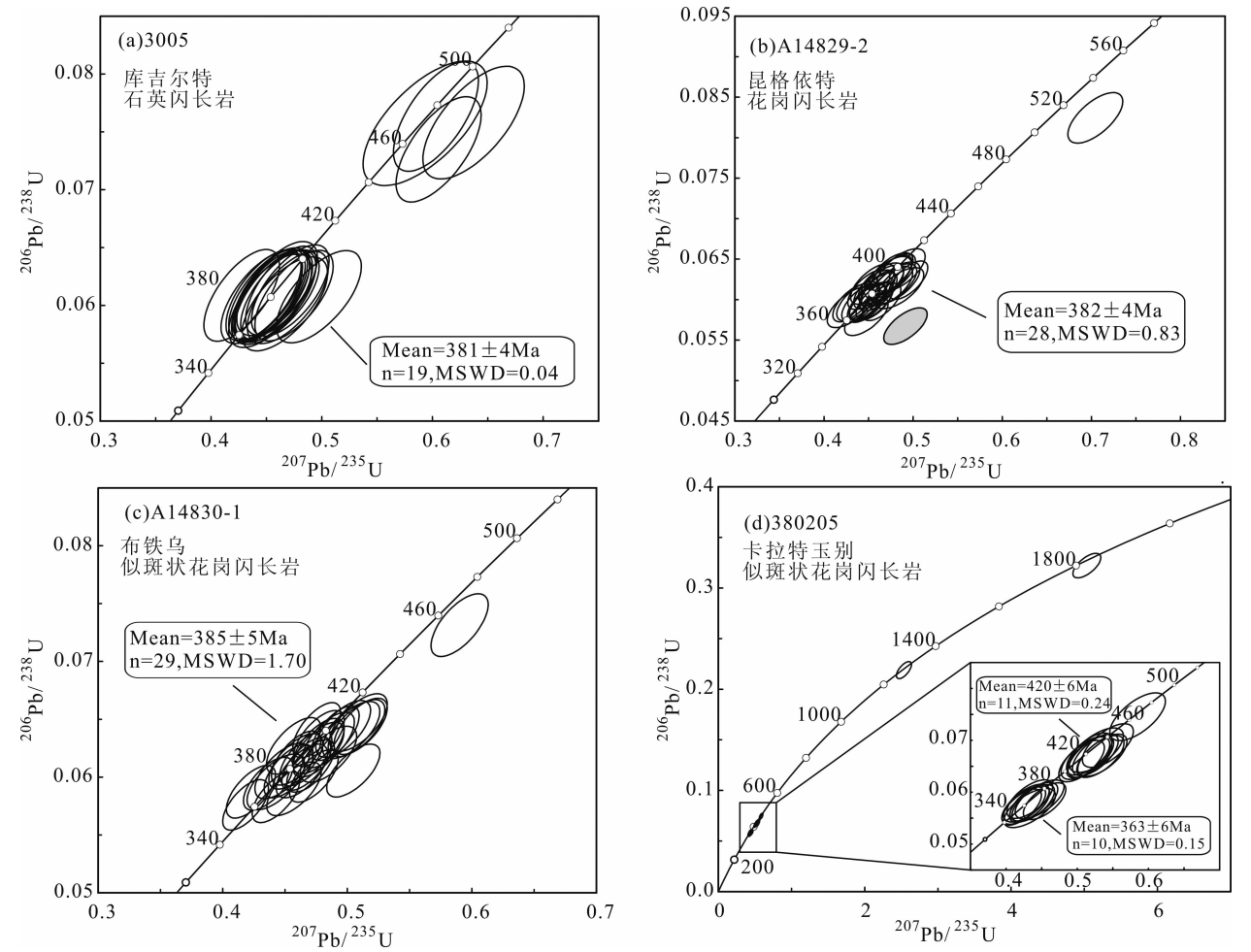


图 5 阿尔泰东南缘花岗质岩石锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of granitic rocks in the southeastern Chinese Altai

个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 投点均落在谐和线及其附近,谐和性好(图 5b),Th/U 比值为 0.33~1.04。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 介于 363~510Ma,其中 10 号测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 510Ma,可能为岩浆在上升侵位过程中捕获围岩获得。其余 28 个年龄介于 395~363Ma,构成集中的主锆石群, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $382\pm 4\text{Ma}$,时代为晚泥盆世,代表了昆格依特岩体的侵位年龄。

布铁乌似斑状花岗闪长岩测年样品(A14830-

1)共分析了 30 个测点。所有测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄投点均落在谐和线及其附近,谐和性好(图 5c),Th/U 比值为 0.06~0.92。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 介于 361~455Ma,其中 28 号测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 455Ma,可能为岩浆在上升侵位过程中捕获围岩获得。剩余 29 个年龄介于 363~395Ma,构成集中的主锆石群, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 $385\pm 5\text{Ma}$,时代为中泥盆世,代表了布铁乌岩体的侵位年龄。

卡拉特玉别似斑状花岗闪长岩测年样品(380205)共分析了 24 个测点,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 和²⁰⁷Pb/²³⁵U 年龄投点均落在谐和线及其附近,谐和性较好(图 5d),Th/U 比值为 0.13~0.96。²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 357~1800Ma,可分为 4 组。第一组有 3 个测点,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分别为 463Ma、1275Ma 和 1800Ma,应为继承或者捕获锆石,第二组有 11 个测点,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 412~430Ma,可能为岩浆在上升侵位过程中捕获围岩获得,第三组有 10 个测点,年龄介于 367~358Ma,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄的加权平均值为 363±6Ma,时代为晚泥盆世,代表了卡拉特玉别岩体的侵位年龄。

3.2.2 岩石地球化学特征

本文新测试的阿尔泰东南缘花岗岩质岩体样品主、微量元素测试结果见表 2。

阿尔泰东南缘昆格依特花岗闪长岩、库吉尔特石英闪长岩、布铁乌和卡拉特玉别似斑状花岗闪长岩 4 个岩体的主量元素地球化学特征:SiO₂ 含量不高(60.15%~68.98%),铝含量相对较高,前三者为 15.04%~16.85%,而卡拉特玉别似斑状花岗闪长岩较之更高一些为 16.88%~18.94%,MgO 含量

分别为 3.37%~3.74%、1.89%~2.61%、0.88%~1.13%和 1.77%~2.91%,全碱(Na₂O+K₂O)含量差别较大,布铁乌和卡拉特玉别似斑状花岗闪长岩(7.12%~9.25%和 6.39%~6.83%)明显高于其他两个岩体(库吉尔特石英闪长岩 4.97%~6.38%和昆格依特 4.55%~5.00%)。结合其他地球化学特征显示,库吉尔特、卡拉特玉别岩体为弱过铝质的钙碱性—高钾钙碱性过渡系列,昆格依特岩体为准铝质的钙碱性—高钾钙碱性过渡系列,而布铁乌岩体为弱过铝质的高钾钙碱性系列(图 6)。

微量及稀土元素地球化学特征:昆格依特花岗闪长岩稀土元素总量∑REE(114.25×10⁻⁶~128.89×10⁻⁶), (La/Yb)_N=5.27~7.52;库吉尔特石英闪长岩∑REE(79.96×10⁻⁶~153.14×10⁻⁶), (La/Yb)_N=4.54~6.91;布铁乌似斑状花岗闪长岩∑REE(156.67×10⁻⁶~188.52×10⁻⁶), (La/Yb)_N=7.13~11.24;卡拉特玉别似斑状花岗闪长岩∑REE(81.57×10⁻⁶~97.76×10⁻⁶), (La/Yb)_N=9.61~17.32。在稀土元素球粒陨石标准化图解中,具较为明显的轻稀土元素富集、重稀土亏损的右倾型(LREE/HREE=4.4~12.5)。库吉尔特、昆格

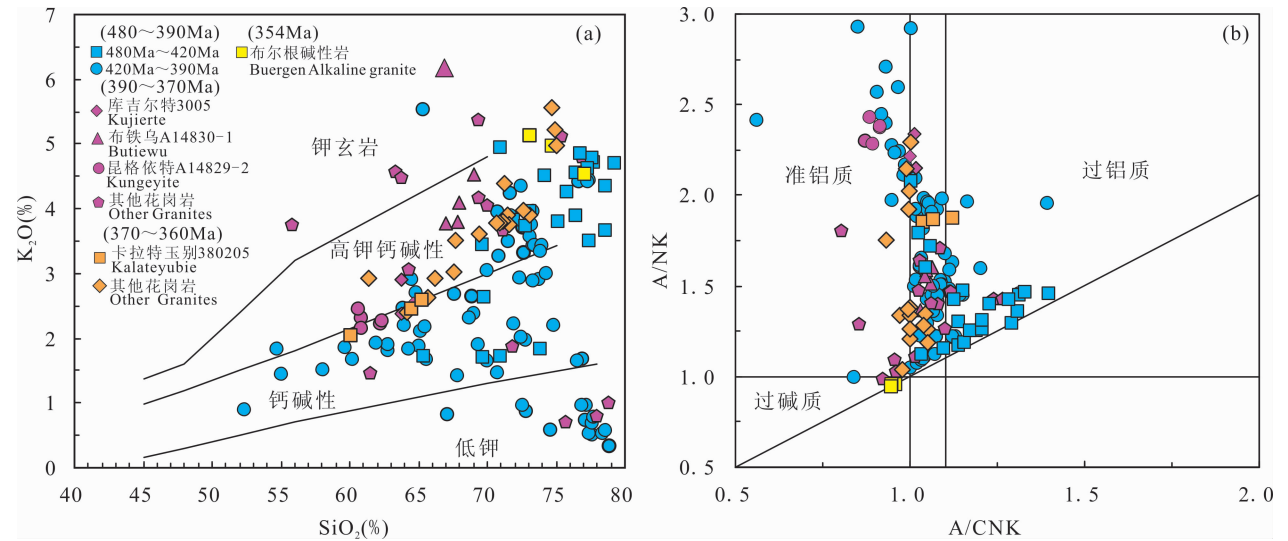


图 6 阿尔泰花岗质岩石的(a)SiO₂-K₂O 图解(底图据 Peccerillo et al., 1976)和 (b)A/CNK-A/NK 图解(底图据 Maniar et al., 1989)

Fig. 6 (a) SiO₂ vs. K₂O diagram (after Peccerillo et al., 1976) and (b) A/CNK vs. A/NK diagram (after Maniar et al., 1989) for the studied 480~354Ma granitic rocks in Chinese Altai

数据来源:Zhang Haixiang et al., 2003; Wang Tao et al., 2006, 2010; Zhang Zhaochong et al., 2006; Briggs et al., 2007; Tong Ying et al., 2007, 2012; Yuan Chao et al., 2007; Zeng Qiaosong et al., 2007; Liu Feng et al., 2009, 2010; Sun Min et al., 2008; Yang Fuquan et al., 2008; Chai Fengmei et al., 2010; Liu Guoren et al., 2010; Shen Xiaoming et al., 2011; Zhang Yafeng et al., 2014 和本文
Data sources (Zhang Haixiang et al., 2003; Wang Tao et al., 2006, 2010; Zhang Zhaochong et al., 2006; Briggs et al., 2007; Tong Ying et al., 2007, 2012; Yuan Chao et al., 2007; Zeng Qiaosong et al., 2007; Liu Feng et al., 2009, 2010; Sun Min et al., 2008; Yang Fuquan et al., 2008; Chai Fengmei et al., 2010; Liu Guoren et al., 2010; Shen Xiaoming et al., 2011; Zhang Yafeng et al., 2014 and this study)

表 2 阿尔泰东南缘花岗质岩石主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)化学组成

Table 2 Major elements (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) compositions of granitic rocks from the southeastern Chinese Altai								
样品号	3005	3005-1	3005-2	A14830-1.1	A14830-1.2	A14830-1.3	A14830-1.4	A14830-1.5
年代	381Ma			385Ma				
岩体	库吉尔特			布铁乌				
岩性	石英闪长岩			似斑状花岗闪长岩				
SiO ₂	63.76	64.58	63.78	67.90	66.98	66.83	68.98	67.98
Al ₂ O ₃	15.70	15.46	15.98	15.37	16.08	16.01	15.04	15.69
Fe ₂ O ₃	5.92	5.79	5.53	4.30	4.17	3.53	3.69	3.69
MgO	2.61	2.58	2.44	1.13	1.10	0.88	0.96	0.96
CaO	4.48	4.66	4.90	2.67	2.87	2.08	2.33	2.72
Na ₂ O	2.53	2.57	2.60	3.32	3.68	3.07	3.07	3.43
K ₂ O	2.90	2.53	2.37	3.80	3.77	6.18	4.52	4.10
TiO ₂	0.75	0.72	0.71	0.56	0.52	0.44	0.47	0.49
P ₂ O ₅	0.16	0.18	0.22	0.19	0.19	0.17	0.18	0.18
MnO	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09	0.08	0.09
LOI	0.90	0.70	1.20	0.50	0.40	0.50	0.50	0.50
Total	99.81	99.83	99.83	99.85	99.85	99.82	99.85	99.86
A/CNK	1.02	1.00	1.01	1.07	1.05	1.03	1.06	1.04
Mg#	50.70	50.90	50.70	37.98	38.07	36.75	37.75	37.75
La	29.10	17.00	14.10	34.20	32.30	30.70	30.00	30.90
Ce	62.70	41.70	28.20	76.20	67.40	64.70	62.80	67.90
Pr	7.08	4.62	3.46	8.75	7.78	7.44	7.59	7.67
Nd	27.70	18.80	14.30	34.50	30.20	28.90	27.80	30.10
Sm	5.67	4.18	4.14	7.49	6.30	6.07	6.19	6.58
Eu	1.12	1.09	0.96	1.32	1.46	1.46	1.33	1.43
Gd	5.69	4.62	3.92	7.29	6.30	5.65	6.03	6.22
Tb	0.91	0.76	0.64	1.21	1.02	0.88	1.01	0.93
Dy	5.27	4.44	4.20	7.44	5.72	5.18	6.03	5.41
Ho	1.08	0.85	0.79	1.45	1.02	0.93	1.13	1.00
Er	2.94	2.57	2.35	4.17	2.94	2.49	3.12	2.80
Tm	0.45	0.38	0.31	0.55	0.40	0.35	0.44	0.37
Yb	3.02	2.49	2.23	3.44	2.51	1.96	2.78	2.31
Lu	0.41	0.41	0.36	0.51	0.39	0.29	0.42	0.35
Y	30.10	25.20	24.40	41.10	30.50	24.90	33.10	27.60
ΣREE	153.14	103.91	79.96	188.52	165.74	157.00	156.67	163.97
δEu	0.60	0.75	0.72	0.54	0.70	0.75	0.66	0.67
(La/Yb) _N	6.91	4.90	4.54	7.13	9.23	11.24	7.74	9.60
Ba	393.00	322.00	295.00	483.00	527.00	920.00	578.00	544.00
Co	14.40	14.20	13.70	7.60	7.70	6.60	6.70	6.40
Cs	6.80	6.10	6.10	3.80	4.40	3.10	3.50	3.60
Ga	17.10	16.80	17.80	17.10	17.90	16.90	15.40	16.10
Hf	7.20	6.30	7.60	5.60	5.50	4.60	6.00	4.60
Nb	9.30	8.90	8.70	10.80	10.00	8.20	8.40	9.40
Rb	131.00	116.60	110.30	131.20	130.40	151.30	131.30	126.80
Sr	221.20	225.70	233.80	152.90	164.90	160.40	146.00	164.70
Ta	0.80	0.70	0.90	0.80	0.70	0.50	0.50	0.60
Th	11.90	7.20	3.80	15.40	13.40	11.70	12.80	12.00
U	1.90	1.60	1.40	2.10	1.60	1.30	1.20	1.40
V	137.00	138.00	135.00	53.00	51.00	43.00	44.00	45.00
Zr	251.60	236.60	295.90	214.30	208.50	168.90	226.40	172.30
Zn	66.00	68.00	62.00	51.00	53.00	40.00	43.00	44.00
Ni	20.60	20.60	19.10	10.80	10.50	8.30	8.90	9.50
Sc	18.00	15.00	13.00	9.00	8.00	7.00	7.00	7.00
Cu	22.80	26.00	33.40	12.80	13.50	11.70	10.20	11.80
Pb	3.70	3.40	3.60	3.00	2.90	2.80	2.70	2.60
Nb/Ta	11.63	12.71	9.67	13.50	14.29	16.40	16.80	15.67

续表 2

样品号	380205	380205-1	3802051	A14829-2. 1	A14829-2. 2	A14829-2. 3	A14829-2. 4	A14829-2. 5
年代	363Ma			382Ma				
岩体	卡拉特玉别			昆格依特				
岩性	似斑状花岗闪长岩			花岗闪长岩				
SiO ₂	64. 56	65. 23	60. 15	60. 83	62. 30	60. 90	62. 34	60. 66
Al ₂ O ₃	17. 03	16. 88	18. 94	15. 57	15. 30	15. 23	15. 43	15. 61
Fe ₂ O ₃	4. 38	4. 26	5. 41	6. 84	6. 43	6. 91	6. 30	6. 92
MgO	1. 95	1. 77	2. 91	3. 60	3. 42	3. 73	3. 37	3. 74
CaO	4. 01	3. 71	3. 72	6. 09	5. 64	5. 99	5. 70	5. 83
Na ₂ O	3. 94	3. 81	4. 80	2. 59	2. 46	2. 39	2. 45	2. 55
K ₂ O	2. 45	2. 58	2. 03	2. 32	2. 23	2. 16	2. 27	2. 45
TiO ₂	0. 42	0. 42	0. 45	0. 61	0. 64	0. 67	0. 72	0. 73
P ₂ O ₅	0. 13	0. 08	0. 10	0. 14	0. 13	0. 15	0. 13	0. 14
MnO	0. 05	0. 05	0. 07	0. 14	0. 13	0. 14	0. 12	0. 14
LOI	0. 90	1. 00	1. 20	1. 10	1. 10	1. 50	1. 00	1. 00
Total	99. 85	99. 85	99. 80	99. 81	99. 79	99. 80	99. 79	99. 81
A/CNK	1. 04	1. 07	1. 12	0. 87	0. 92	0. 89	0. 92	0. 89
Mg #	50. 92	49. 19	55. 63	55. 09	55. 35	55. 71	55. 49	55. 74
La	21. 00	19. 80	21. 70	22. 40	23. 40	23. 20	21. 70	22. 90
Ce	39. 30	34. 60	43. 30	50. 30	47. 80	48. 90	45. 20	49. 50
Pr	4. 13	3. 81	4. 36	6. 10	5. 97	5. 91	5. 34	5. 77
Nd	14. 60	13. 80	15. 20	24. 20	23. 60	24. 30	21. 50	23. 40
Sm	2. 85	2. 49	2. 81	5. 46	5. 10	5. 25	4. 25	5. 03
Eu	1. 06	1. 01	0. 89	1. 15	1. 05	1. 15	1. 07	1. 14
Gd	2. 22	1. 97	2. 44	5. 32	4. 75	5. 00	4. 39	4. 94
Tb	0. 36	0. 28	0. 42	0. 86	0. 81	0. 83	0. 72	0. 77
Dy	1. 68	1. 46	2. 45	5. 06	4. 64	4. 97	4. 28	4. 40
Ho	0. 32	0. 29	0. 48	1. 00	0. 89	0. 95	0. 81	0. 95
Er	1. 00	0. 94	1. 58	3. 08	2. 66	2. 75	2. 27	2. 63
Tm	0. 13	0. 13	0. 25	0. 45	0. 39	0. 42	0. 34	0. 40
Yb	1. 03	0. 82	1. 62	3. 05	2. 62	2. 61	2. 07	2. 39
Lu	0. 17	0. 17	0. 26	0. 46	0. 38	0. 43	0. 31	0. 38
Y	11. 70	10. 20	15. 80	29. 60	26. 60	27. 10	21. 60	25. 10
ΣREE	89. 85	81. 57	97. 76	128. 89	124. 06	126. 67	114. 25	124. 60
δEu	1. 24	1. 35	1. 01	0. 64	0. 64	0. 68	0. 75	0. 69
(La/Yb) _N	14. 62	17. 32	9. 61	5. 27	6. 41	6. 38	7. 52	6. 87
Ba	300. 00	315. 00	295. 00	389. 00	509. 00	423. 00	545. 00	394. 00
Co	10. 00	8. 50	11. 50	18. 30	17. 30	18. 90	18. 10	20. 20
Cs	3. 50	4. 10	5. 70	4. 40	4. 60	5. 50	5. 20	5. 60
Ga	17. 70	16. 60	18. 90	15. 80	15. 10	15. 30	16. 40	15. 90
Hf	4. 90	5. 20	5. 40	3. 90	4. 10	5. 10	4. 30	4. 70
Nb	5. 60	5. 30	4. 70	5. 20	6. 30	5. 20	6. 60	6. 70
Rb	97. 00	98. 40	68. 90	84. 90	86. 80	84. 70	92. 20	104. 10
Sr	276. 20	272. 30	443. 30	242. 70	238. 00	238. 60	253. 20	245. 10
Ta	0. 40	0. 50	0. 60	0. 50	0. 40	0. 30	0. 40	0. 50
Th	10. 00	11. 20	11. 20	7. 90	9. 20	6. 70	7. 50	5. 90
U	0. 60	0. 70	0. 90	1. 30	1. 10	1. 30	1. 00	1. 10
V	89. 00	83. 00	130. 00	158. 00	144. 00	152. 00	155. 00	163. 00
Zr	213. 50	232. 10	212. 10	138. 60	147. 70	182. 90	172. 30	172. 60
Zn	52. 00	49. 00	88. 00	42. 00	52. 00	54. 00	53. 00	50. 00
Ni	27. 50	24. 90	41. 70	21. 20	26. 60	25. 90	27. 00	25. 80
Sc	8. 00	9. 00	8. 00	23. 00	20. 00	24. 00	20. 00	22. 00
Cu	63. 20	57. 20	6. 80	22. 20	27. 50	25. 00	26. 40	27. 50
Pb	2. 10	2. 20	2. 50	2. 20	1. 90	2. 20	2. 10	2. 40
Nb/Ta	14. 00	10. 60	7. 83	10. 40	15. 75	17. 33	16. 50	13. 40

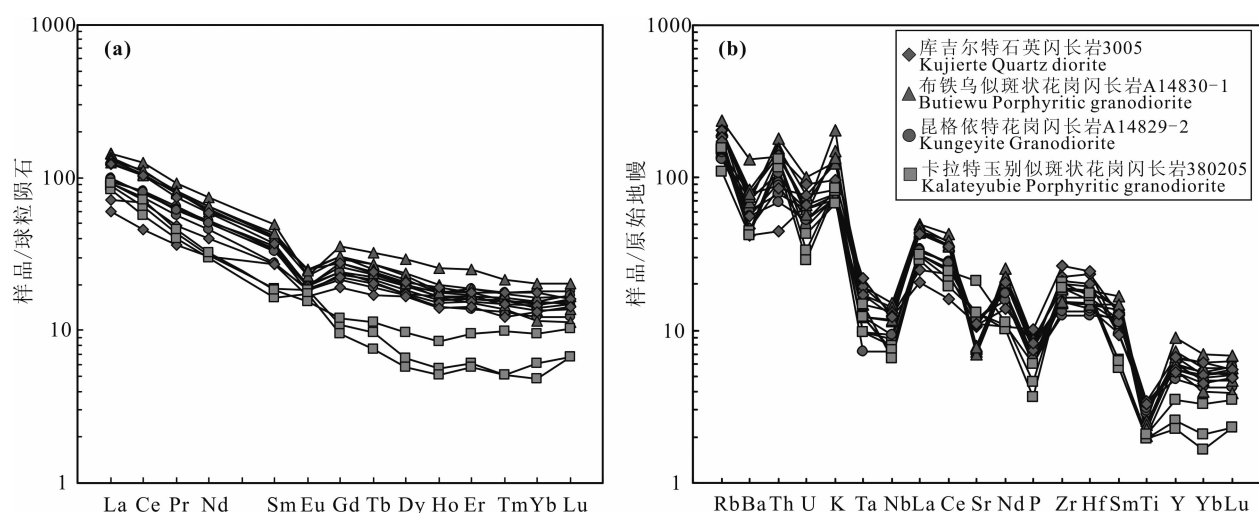


图 7 阿尔泰东南缘花岗质岩石稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石和原始地幔标准化数据引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive-mantle normalized spidergrams of granitic rocks in the southeastern of Chinese Altai (primitive mantle values are from Sun and McDonough, 1989)

依特和布铁乌花岗质岩石都具有明显的负 Eu 异常($\delta\text{Eu}=0.54\sim0.75$),呈一定程度的“v”型谷,但卡拉特玉别花岗闪长岩 δEu 为正异常($1.01\sim1.35$)。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图解中,均整体表现出 Rb、Th、K 富集, Ta、Nb、Sr、P、Ti 亏损的特点(图 7)。

3.2.3 Hf 同位素特征

选取具有谐和年龄的典型锆石进行了 Hf 同位素测试,每颗锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以自身锆石年龄计算(表 3)。

昆格依特花岗闪长岩(样品 A14829-2)共测试了 20 个点的锆石 Hf 同位素原位分析,1 粒捕获锆石(510Ma)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282616, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +5.28,二阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM}-2}$)为 1.1Ga。其余 19 个点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282633~0.282807, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +3.31~+9.62,二阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM}-2}$)为 1.2~0.8Ga。

库吉尔特石英闪长岩(样品 3005)共分析了 20 个点的锆石 Hf 同位素原位分析,4 粒捕获锆石(474~457Ma)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282574~0.282763, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +3.02~+9.36,二阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM}-2}$)为 1.3~0.8Ga。其余 16 个点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282447~0.282802, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +3.77~+9.00,18 号点为 -3.44,二阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM}-2}$)为 1.6~0.8Ga。

布铁乌似斑状花岗闪长岩(样品 A14830-1)共测试了 20 个点的锆石 Hf 同位素原位分析,1 粒捕

获锆石(455Ma)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282417, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -2.83,二阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM}-2}$)为 1.6Ga。其余 19 个点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282738~0.282907, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +6.10~+11.09,二阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM}-2}$)为 1.0~0.6Ga。

卡拉特玉别似斑状花岗闪长岩(样品 380205)共测试了 19 个点的锆石 Hf 同位素原位分析,共有 10 个捕获/继承锆石,1 粒锆石(1854Ma)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281626, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -0.16, $t_{\text{DM}-2}$ 为 2.5Ga,1 粒锆石(1293Ma)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282357, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 +13.26, $t_{\text{DM}-2}$ 为 1.2Ga,1 粒锆石(463Ma)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282630, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 +4.51, $t_{\text{DM}-2}$ 为 1.2Ga,7 粒锆石(430~412Ma)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282490~0.282864, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -1.10~+11.67, $t_{\text{DM}-2}$ 为 1.5~0.7Ga。其余 9 个 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282647~0.282822, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +3.27~+9.37,二阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM}-2}$)为 1.2~0.8Ga。

3.2.4 Sr、Nd 同位素

综合整个阿尔泰,仅对昆格依特和布铁乌岩体进行 Sr、Nd 同位素分析,结果见表 4。昆格依特和布铁乌花岗闪长岩具有高的 Sr 含量($84.9\times10^{-6}\sim131.2\times10^{-6}$), Sr 初始值变化较大,为 0.7067~0.7087, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 为 1.01~2.49, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 0.512363~0.512446, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -2.42~-0.53, Nd 同位素模式年龄 $t_{\text{DM}-1}$ 为 1.6~1.3Ga。

表 3 阿尔泰东南缘花岗质岩石锆石 Hf 同位素测试结果

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of representative granitic rocks in the southeastern Chinese Altai

测点号	Age (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM1} (Ma)	<i>t</i> _{DM2} (Ma)	<i>f</i> _{Lw/Hf}
库吉尔特									
3005-01	383	0.081651	0.001298	0.282708	0.000029	5.84	777	1011	−0.96
3005-02	380	0.073676	0.001189	0.282708	0.000024	5.79	775	1012	−0.96
3005-03	381	0.070099	0.001126	0.282731	0.000025	6.65	741	958	−0.97
3005-04	383	0.126725	0.001932	0.282802	0.000024	9.00	655	809	−0.94
3005-05	380	0.057476	0.000939	0.282727	0.000022	6.53	743	965	−0.97
3005-06	380	0.072320	0.001149	0.282767	0.000022	7.90	690	876	−0.97
3005-07	380	0.052913	0.000852	0.282723	0.000020	6.40	748	973	−0.97
3005-08	380	0.061754	0.001005	0.282707	0.000023	5.80	773	1012	−0.97
3005-09	379	0.058392	0.000958	0.282693	0.000023	5.29	792	1043	−0.97
3005-10	457	0.067655	0.001280	0.282763	0.000021	9.36	699	843	−0.96
3005-11	474	0.076378	0.001303	0.282578	0.000023	3.16	962	1253	−0.96
3005-12	381	0.058605	0.000964	0.282688	0.000020	5.18	798	1052	−0.97
3005-13	379	0.079102	0.001253	0.282737	0.000020	6.78	736	948	−0.96
3005-14	470	0.060444	0.000982	0.282574	0.000023	3.02	960	1259	−0.97
3005-15	380	0.069434	0.001119	0.282650	0.000025	3.77	856	1141	−0.97
3005-16	379	0.051458	0.000855	0.282650	0.000025	3.82	850	1137	−0.97
3005-17	471	0.147495	0.002478	0.282736	0.000024	8.32	762	920	−0.93
3005-18	376	0.049268	0.000826	0.282447	0.000023	−3.44	1134	1596	−0.98
3005-19	384	0.054163	0.000892	0.282713	0.000022	6.13	762	993	−0.97
3005-20	380	0.067954	0.001147	0.282683	0.000023	4.93	809	1067	−0.97
布铁乌									
A14830-1-01	404	0.138458	0.002164	0.282829	0.000023	10.32	620	740	−0.93
A14830-1-02	400	0.098348	0.001567	0.282816	0.000023	9.96	627	760	−0.95
A14830-1-03	392	0.168490	0.002672	0.282811	0.000027	9.31	655	796	−0.92
A14830-1-04	395	0.207043	0.003269	0.282762	0.000027	7.49	739	915	−0.90
A14830-1-05	378	0.184310	0.003053	0.282825	0.000028	9.41	641	778	−0.91
A14830-1-06	379	0.194654	0.003152	0.282769	0.000025	7.42	727	907	−0.91
A14830-1-07	367	0.157079	0.002517	0.282778	0.000029	7.68	700	881	−0.92
A14830-1-08	361	0.170377	0.002684	0.282773	0.000029	7.34	711	898	−0.92
A14830-1-09	385	0.255606	0.004093	0.282873	0.000025	11.01	586	681	−0.88
A14830-1-10	372	0.218113	0.003498	0.282854	0.000028	10.21	605	722	−0.89
A14830-1-11	400	0.307074	0.004898	0.282807	0.000030	8.74	705	839	−0.85
A14830-1-12	402	0.150592	0.002366	0.282810	0.000023	9.55	651	788	−0.93
A14830-1-13	395	0.214930	0.003417	0.282907	0.000027	12.57	523	588	−0.90
A14830-1-14	455	0.050421	0.000888	0.282417	0.000021	−2.83	1178	1619	−0.97
A14830-1-15	365	0.257452	0.004124	0.282887	0.000026	11.09	565	660	−0.88
A14830-1-16	378	0.217078	0.003366	0.282808	0.000030	8.73	673	822	−0.90
A14830-1-17	378	0.244323	0.003973	0.282738	0.000028	6.10	792	991	−0.88
A14830-1-18	387	0.176457	0.002812	0.282780	0.000026	8.06	704	872	−0.92
A14830-1-19	383	0.137404	0.002189	0.282779	0.000026	8.10	694	866	−0.93
A14830-1-20	401	0.210647	0.003449	0.282803	0.000026	9.00	681	822	−0.90
昆格依特									
A14829-2-01	385	0.068580	0.001195	0.282705	0.000020	5.80	780	1015	−0.96
A14829-2-02	373	0.089865	0.001523	0.282751	0.000024	7.10	720	923	−0.95
A14829-2-03	374	0.104901	0.001784	0.282800	0.000024	8.76	655	817	−0.95
A14829-2-04	374	0.082415	0.001399	0.282772	0.000020	7.88	688	873	−0.96
A14829-2-05	387	0.065009	0.001101	0.282633	0.000018	3.31	880	1176	−0.97
A14829-2-06	383	0.074648	0.001280	0.282815	0.000020	9.62	625	769	−0.96
A14829-2-07	394	0.063702	0.001097	0.282703	0.000019	5.95	780	1013	−0.97
A14829-2-08	384	0.066093	0.001126	0.282698	0.000022	5.53	789	1032	−0.97
A14829-2-09	393	0.050317	0.000855	0.282726	0.000018	6.80	743	957	−0.97
A14829-2-10	510	0.076857	0.001309	0.282616	0.000024	5.28	908	1146	−0.96
A14829-2-11	390	0.073264	0.001248	0.282681	0.000021	5.03	815	1068	−0.96

续表 3

测点号	Age (Ma)	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM1} (Ma)	<i>t</i> _{DM2} (Ma)	<i>f</i> _{Lu/Hf}
A14829-2-12	373	0.071423	0.001198	0.282794	0.000020	8.67	654	822	−0.96
A14829-2-13	383	0.089842	0.001509	0.282772	0.000020	8.05	690	869	−0.95
A14829-2-14	373	0.089784	0.001473	0.282713	0.000024	5.77	774	1008	−0.96
A14829-2-15	386	0.058069	0.000972	0.282652	0.000019	3.99	850	1132	−0.97
A14829-2-16	373	0.136716	0.002342	0.282807	0.000023	8.88	654	808	−0.93
A14829-2-17	363	0.090181	0.001532	0.282704	0.000023	5.20	789	1036	−0.95
A14829-2-18	397	0.062981	0.001052	0.282781	0.000021	8.76	670	835	−0.97
A14829-2-19	383	0.091066	0.001533	0.282737	0.000024	6.80	741	950	−0.95
A14829-2-20	372	0.064700	0.001097	0.282706	0.000024	5.59	776	1018	−0.97
卡拉特玉别									
380205-01	359	0.075580	0.001339	0.282755	0.000023	6.99	711	919	−0.96
380205-02	418	0.066238	0.001171	0.282490	0.000021	−1.10	1083	1480	−0.96
380205-03	1293	0.048693	0.000876	0.282357	0.000028	13.26	1261	1241	−0.97
380205-04	1854	0.043874	0.000740	0.281626	0.000023	−0.16	2264	2536	−0.98
380205-05	430	0.063174	0.001123	0.282800	0.000020	10.13	644	773	−0.97
380205-06	365	0.101478	0.001687	0.282822	0.000023	9.37	622	771	−0.95
380205-07	367	0.103639	0.001855	0.282752	0.000024	6.91	726	930	−0.94
380205-08	361	0.070896	0.001241	0.282766	0.000023	7.44	693	891	−0.96
380205-09	362	0.120556	0.001961	0.282780	0.000026	7.77	687	871	−0.94
380205-10	358	0.079778	0.001520	0.282736	0.000024	6.24	742	966	−0.95
380205-11	357	0.082897	0.001581	0.282724	0.000025	5.78	760	995	−0.95
380205-12	417	0.124014	0.002072	0.282810	0.000025	9.96	645	773	−0.94
380205-13	412	0.138701	0.002348	0.282864	0.000029	11.67	572	659	−0.93
380205-14	424	0.114541	0.001988	0.282731	0.000023	7.31	759	949	−0.94
380205-15	463	0.121699	0.002147	0.282630	0.000026	4.51	909	1159	−0.94
380205-16	416	0.154717	0.002434	0.282763	0.000028	8.16	721	888	−0.93
380205-17	364	0.056169	0.001042	0.282703	0.000023	5.30	780	1031	−0.97
380205-18	362	0.056707	0.001107	0.282647	0.000024	3.27	860	1159	−0.97
380205-19	424	0.164412	0.002714	0.282809	0.000025	9.86	659	785	−0.92

$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = \{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (\text{e}^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (\text{e}^{\lambda t} - 1)] - 1\} \times 10,000$ $T_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln\{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$ $T_{\text{DM}2} = 1/\lambda \times \ln\{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S},t} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\} + t$, where, s = sample, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997; Griffin et al., 2000) t = crystallization age of zircon. $\lambda = 1.865 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$ (Soderlund et al. 2004). $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{C}} = 0.015$.

表 4 阿尔泰东南缘昆格依特、布铁乌岩体 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Sr-Nd isotopic compositions of the Kungeyite and Butiewu plutons in the southeast of Chinese Altai

样号	岩性	位置	年龄/Ma	Rb	Sr	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	Isr	Sm	Nd
A14829-2	中细粒花岗岩闪长岩	昆格依特	382	84.9	242.7	1.013	0.712217	14	0.7067	5.5	24.2
A14830-1	中细粒似斑状花岗岩闪长岩	布铁乌	385	131.2	152.9	2.486	0.722334	14	0.7087	7.5	34.5
样号	岩性			¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	ε _{Nd} (0)	<i>f</i> _{Sm/Nd}	ε _{Nd} (<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM-1} (Ma)	<i>t</i> _{DM-2} (Ma)
A14829-2	中细粒花岗岩闪长岩	昆格依特	382	0.1364	0.512363	10	−5.4	−0.31	−2.42	1553	1328
A14830-1	中细粒似斑状花岗岩闪长岩	布铁乌	385	0.1313	0.512446	10	−3.7	−0.33	−0.53	1304	1176

$\epsilon_{\text{Nd}} = ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{S}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1) \times 10000$, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{S}} / (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1$, where s = sample, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$, and $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$. The model ages (t_{DM}) were calculated using a linear isotopic ratio growth equation: $t_{\text{DM}1} = 1/\lambda \times \ln(1 + ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{S}} - 0.51315) / ((^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{S}} - 0.2137))$.

4 讨论

4.1 阿尔泰泥盆纪花岗质岩石时空分布与岩石类型组合

中国阿尔泰花岗岩已经报道有大量(100 多个)

锆石 U-Pb 年龄。但是,阿尔泰东南缘很多岩体未获得过精确的年龄,这次新获得的锆石 U-Pb 年龄分别为 382±4Ma、381±4Ma、385±5Ma 和 363±6Ma,揭示了两期(385~380Ma 和 363Ma)岩浆事件,进一步揭示了早中古生代是阿尔泰花岗岩岩浆活

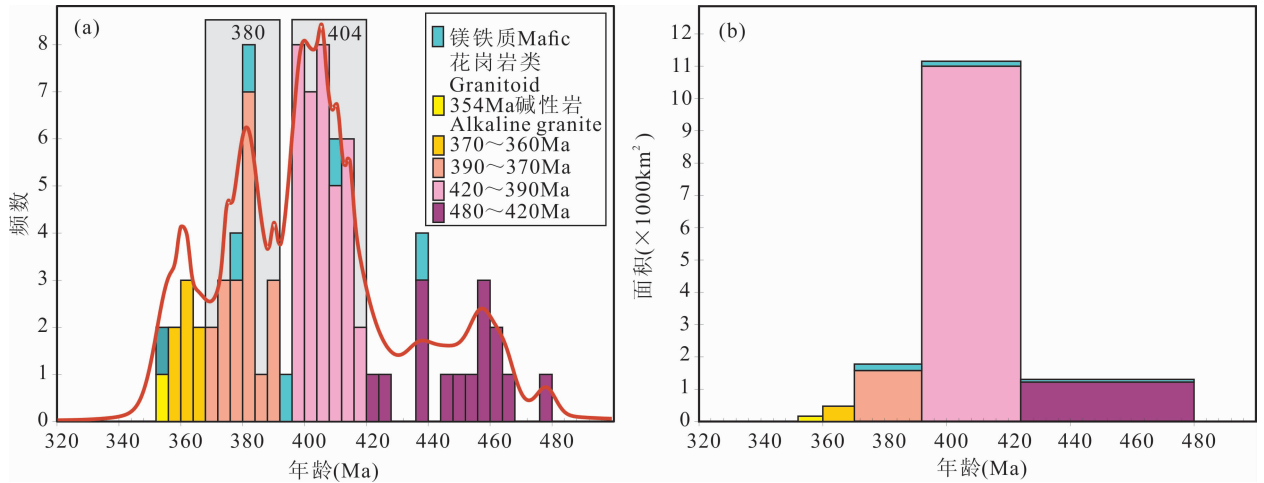


图 8 阿尔泰早—中中生代侵入岩年龄直方图(a)及面积图(b)(资料来源见图 1)

Fig. 8 Histograms of U-Pb ages (a) and areas (b) of Early-Middle Paleozoic intrusive rocks in Chinese Altai (Data sources refer to Fig. 1)

动的高峰期(Wang Tao et al., 2006, 2010; Tong Ying et al., 2007, 2012, 2014; Yuan Chao et al., 2007; Cai Keda et al., 2011)。相对来说,400Ma 左右就位的花岗质岩石多集中发育于阿尔泰中部和西部,为闪长岩—花岗闪长岩—花岗岩系列,且数量从中性到酸性依次增多,发育不同程度的片麻状构造(如 460Ma 花岗质片麻岩, Wang Tao et al., 2006);而中泥盆世花岗质岩体极少,仅有 3 个,岩性多为花岗闪长岩,分布在阿尔泰南部;晚泥盆世花岗质岩体则明显集中分布在阿尔泰东南部,且出现在南、中阿尔泰的边界处(图 1, 8)。

晚泥盆世 380Ma 左右是阿尔泰泥盆纪花岗质岩浆活动的另一个峰期(图 8a),其岩体面积同早泥盆世花岗质岩体相比较小,它们中的大多数主要沿着中国阿尔泰南部北西向断裂分布,变形程度也相对早泥盆世较弱,且晚泥盆世岩体岩石类型多样,由似斑状花岗闪长岩、二长花岗岩、石英闪长岩等组成,少量以辉绿岩、辉长岩脉侵入到塔尔浪、哈巴河等大型岩体中,分布面积上也与早泥盆世差别较大(图 8b)。同时,在中晚泥盆世岩体南部多为石炭—二叠纪花岗质岩体,因此,阿尔泰花岗质岩石在时空分布上总体显示出由中部和北部向南东变新的趋势(图 1)。

4.2 岩石成因类型及物源

本次研究的 4 个中晚泥盆世花岗质岩体,总体属于准铝质—弱过铝质高钾钙碱性系列,其中昆格依特岩体为 A/CNK 为 0.87~0.92,为准铝质系列,其余三个岩体 A/CNK 为 1.00~1.12,为弱过

铝质,显示为 I 型花岗岩特征,且昆格依特岩体与卡拉特玉别岩体均含有 I 型花岗岩特征矿物角闪石。另外,布铁乌岩体(385Ma)为高钾钙碱性系列,其余三个岩体中样品处于中高钾钙碱性过渡区域。阿尔泰东南缘 390~360Ma 花岗质岩石与中国阿尔泰中晚泥盆世同期花岗质岩石地球化学性质相似,多为准铝—弱过铝质的高钾钙碱性系列和钾玄岩系列的 I 型花岗岩,而早泥盆世(420~390Ma)花岗质岩石多位于钙碱性系列,其次为高钾钙碱性,以 I 型花岗岩为主(图 6)。结合在阿尔泰东南缘布尔根一带出现的 354Ma 的碱性花岗岩(Tong Ying et al., 2012),阿尔泰泥盆纪的岩浆活动随着年龄的变小而显示出一种钙碱性系列—高钾钙碱性—碱性系列演化的趋势。

本文测得的 Hf 同位素显示,阿尔泰东南缘中晚泥盆世花岗质岩石的成岩年龄的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围较大,为 -3.44~+11.09,其中绝大多数为正值,对应的二阶段模式年龄为 1.6~0.6Ga,锆石 Hf 同位素特征具有明显的不均一性,说明该地区成岩物质来源的不均一(图 9),以新生幔源来源物质成分为主,但是,混入有很多古老的地壳物质。在整个阿尔泰地区古生代花岗质岩石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ —年龄图解中也可以看出(图 10),绝大多数具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,显示较多幔源的年轻地壳组分参与花岗岩的形成。阿尔泰这种普遍含有幔源组分的年轻地壳来源花岗岩也揭示了显生宙显著地大陆地壳生长特点(Chen Bin et al., 2002; Sun Min et al., 2008; Wang Tao et al., 2009; Cai Keda et al., 2011)。

阿尔泰东南缘昆格依特和布铁乌花岗质岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-2.42 \sim -0.53$, Nd 模式年龄 $t_{\text{DM}-1}$ 为 $1.6 \sim 1.3\text{Ga}$, 指示其物源主要为古老的地壳成分。值得注意的是,该地区花岗质岩石含有很多较老的捕获锆石和残留核。特别是在本次研究的卡拉特玉别岩体中发现了 18 亿年的古老锆石,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -0.16 , $t_{\text{DM}-2}$ 为 2.5Ga , 暗示阿尔泰东南缘地壳深部存在古老组分。同时,在所有块体中, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值随着侵位年龄的逐渐变小,总体显示出了随着侵位年龄的变新, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值先增加 ($480 \sim 420\text{Ma}$) 再降低 ($420 \sim 390\text{Ma}$) 后增加 ($390 \sim 360\text{Ma}$) 的特点,反映出年轻物质的先减少后增加, 390Ma 辉长岩具有较低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,这与阿尔泰泥盆纪的两个岩浆活动峰期相吻合。

而不同的块体则具有不同的 Hf 同位素组成特征(图 10),块体 3 具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,从早到晚显示出先降低后升高,降低再升高的特点,而块体 4 似乎与块体 3 相反,先升高后降低,升高再降低的特点,且 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正,这可能与阿尔泰向南增生,其中部具有相对较厚的古老地壳组分有关。

此外,在原始地幔标准化的微量元素蛛网图解中,阿尔泰东南缘的 4 个岩体均表现出 Rb、K 富集,亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti,其中 P、Ti、Nb、Ta 的亏损说明岩浆可能经历了磷灰石、榍石、金红石等矿物的分离结晶作用,显示了大陆地壳的特征。在球粒陨石标准化的稀土元素分布型式图中,卡拉特玉别岩体稀土总量明显小于其余三个岩体,且其具有 Eu 的正异常,而其他三个岩体具有 Eu 的负异常, Eu 的亏损与长石的分离结晶作用或者长石残留在源区

有关,卡拉特玉别岩体具有 Eu 的正异常 ($1.01 \sim 1.35$), 结合其地球化学特征 SiO_2 ($60.15\% \sim 65.23\%$), 高 Al_2O_3 ($16.88\% \sim 18.94\%$), MgO ($1.77\% \sim 2.91\%$), 低 Y ($10.2 \times 10^{-6} \sim 15.8 \times 10^{-6}$), 低 Yb ($0.82 \times 10^{-6} \sim 1.62 \times 10^{-6}$), Sr 含量高达 443.3×10^{-6} , 具有较高的 Sr/Y 值 ($23.6 \sim 28.1$) 和 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值 ($9.61 \sim 17.32$), 指示卡拉特玉别花岗闪长岩具有埃达克质岩石的特征 (Defant et al., 1990)。另外,在库吉尔特和布铁乌岩体中发育大量镁铁质暗色包体,可能存在幔源岩浆的物质贡献。因此,阿尔泰东南缘花岗质岩石中的年轻物源可能主要为底侵的幔源年轻物质,侵入深部古老地壳,发生岩浆混合的产物,这与前人用 Sr-Nd 同位素资料得出中国阿尔泰造山带早—中生代花岗质岩石的物源为老陆壳及新生幔源物质相混合的结论相一致 (Zhou Gang et al., 2007; Wang Tao et al., 2009; Tong Ying et al., 2014)。这也进一步表明该区存在古老的基底。

4.3 构造背景

前人对阿尔泰泥盆纪的构造环境做了很多工作,之前被认为是被动大陆边缘 (He Guoqi et al., 1990), 如今越来越多的认识为与早—中生代的俯冲增生有关,并提出了活动大陆边缘的陆弧 (Wang Tao et al., 2006; Tong Ying et al., 2007; Yang Fuquan et al., 2008; Liu Feng et al., 2010; Zhang Yafeng et al., 2014; Hong Tao et al., 2015), 洋岛俯冲增生 (Zhang Zhaochong et al., 2006; Xue Chunji et al., 2010; Yang Tiannan et al., 2011), 或洋脊俯冲 (Sun Min et al., 2008,

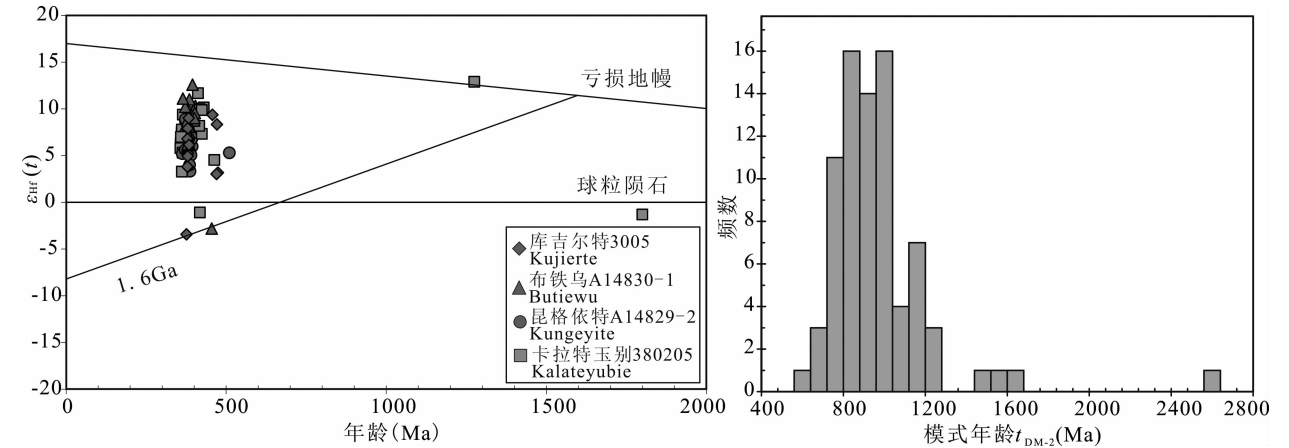


图 9 阿尔泰东南缘中晚泥盆世花岗质岩石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 随年龄变化图解(a)及 Hf 模式年龄 $t_{\text{DM}-2}$ 频率分布直方图(b)
Fig. 9 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age versus $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (a) and frequency distribution histogram of Hf model ages ($t_{\text{DM}-2}$) (b) for zircons from the granitic rocks in the southeastern Chinese Altai

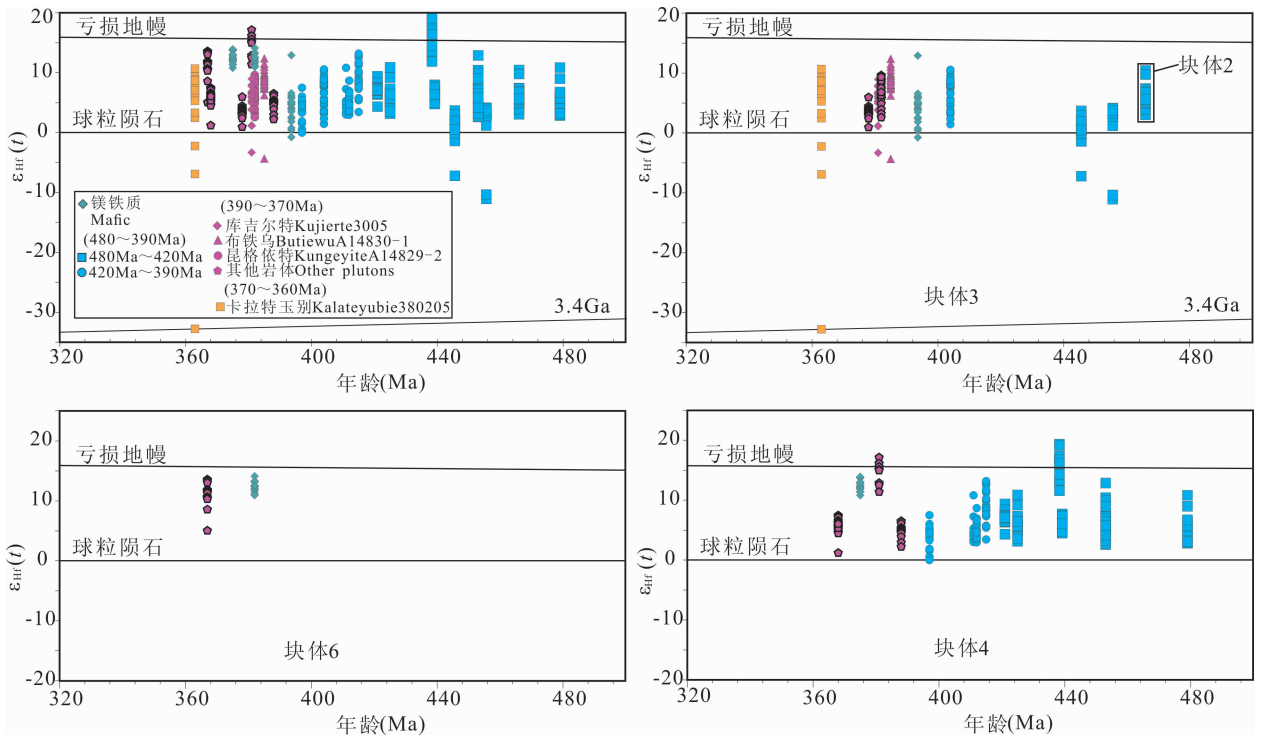


图 10 阿尔泰不同块体侵入岩 Hf 同位素与年龄相关图

Fig. 10 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age versus $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value diagrams of the Pleozoic intrusions in different terranes of the Chinese Altai

数据来源:Sun Min et al., 2008, 2009; Cai Keda et al., 2010, 2011; Shen Xiaoming et al., 2011;
Yang Tiannan et al., 2011;Lv Zhenghang et al., 2012 和本文

Data sources (Sun Min et al., 2008, 2009; Cai Keda et al., 2010, 2011; Shen Xiaoming et al., 2011;
Yang Tiannan et al., 2011;Lv Zhenghang et al., 2012 and this study)

2009; Cai Keda et al., 2010, 2011; Shen Xiaoming et al., 2011)等认识。本文研究的阿尔泰花岗质岩石从奥陶纪到早石炭世花岗岩性质由高钾钙碱性—钙碱性—高钾钙碱性—碱性岩转变,发现 Hf 同位素特征具有相应的先增加(奥陶纪—志留纪)后减少(早泥盆世)再增加(中晚泥盆世)的特点,可能经历了从奥陶纪以来的洋岛弧,泥盆纪陆弧(陆壳物质加入)到晚泥盆世—早石炭世(碰撞—后造山)陆壳物质相对减少(更多的幔源物质参与花岗岩的形成)的过程。

阿尔泰东南缘中晚泥盆世岩体总体为一套花岗闪长岩组合,具有准铝质—弱过铝质特点,轻稀土相对富集、重稀土相对亏损,具有明显的 Nb、Ti、P、Ba、Ta 和 Sr 等元素的负异常,且具有 Rb、Th、K 和 La 的正异常,不仅显示其具有弧花岗岩的性质(Sajona et al., 1996),而且它们的形成可能具有陆壳熔融成因(Taylor et al., 1985)。这些花岗质岩石具有的低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-2.42 \sim -0.53$)以及较高的 Isr 值($0.7067 \sim 0.7087$)也提供了这方面的证据。同时具高的 Th/Ta 值,达到 $10.3 \sim 25.6$ (其中样品

3005-2 为 4.2),反映了俯冲带岩浆作用的特点(Rogers et al., 1989)。因此,中晚泥盆世花岗质岩石应形成于陆弧环境。另外,从整个中国阿尔泰来看,在微量元素 Y-Nb 构造环境判别图解上(图 11),阿尔泰东南缘中晚泥盆世岩体同整个泥盆世样品点均落在同碰撞和火山弧区域,进一步利用 $(\text{Y} + \text{Nb})\text{-Rb}$ 构造环境图解(图 11)分析可见,阿尔泰东南缘岩体同中晚泥盆世花岗质岩石样品点均落于火山弧区域内,同时绝大多数均落于后碰撞区域,说明阿尔泰在 $480 \sim 360\text{Ma}$ 可能都处于俯冲增生环境下。而在阿尔泰花岗质岩体的 $\text{Rb}/10\text{-Hf-3Ta}$ 构造判别图解中,样品点具有由 $480 \sim 370\text{Ma}$ 火山弧—大陆碰撞区域向样品 $370 \sim 360\text{Ma}$ 板内区域演化趋势,在 $\text{Rb}/30\text{-Hf-3Ta}$ 图解中,样品由 $480 \sim 370\text{Ma}$ 火山弧向 $370 \sim 360\text{Ma}$ 后碰撞区域演化,进而演化到布尔根碱性岩(图 12)。以上构造图解说明在阿尔泰东南部中晚泥盆世花岗质岩石与阿尔泰其他早古生代花岗质岩石应处于相同的大陆弧背景,而晚泥盆世($370 \sim 360\text{Ma}$)则可能具有碰撞特点。一般来说,高钾钙碱性系列花岗岩产生在陆弧环境或

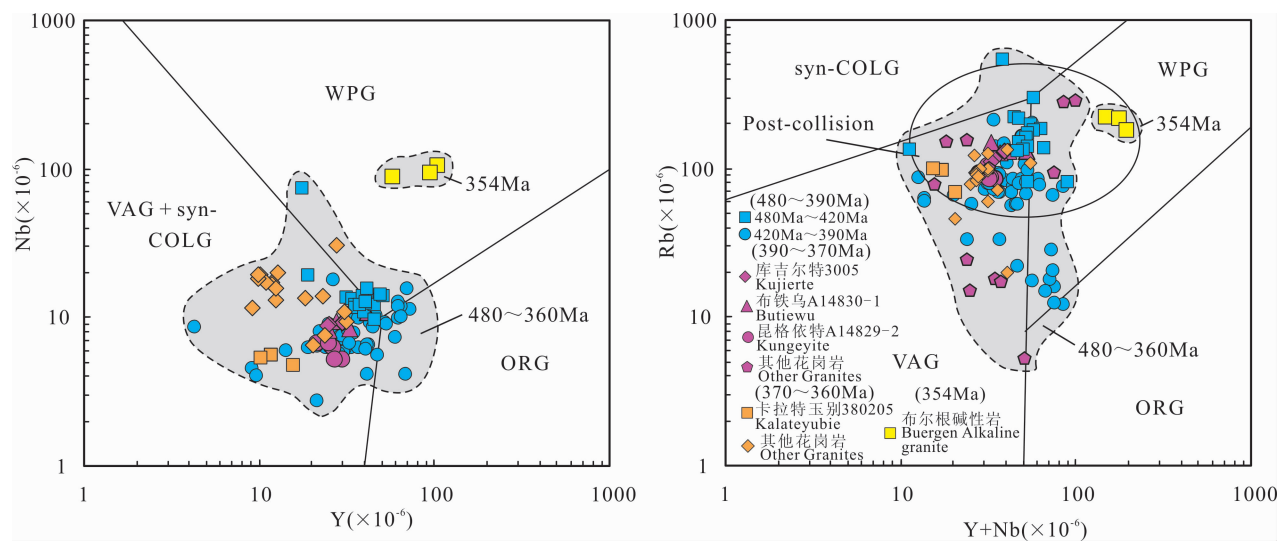


图 11 阿尔泰花岗质岩石构造环境判别图(底图据 Pearce et al. , 1984)

Fig. 11 Discrimination diagrams of tectonic setting of granitic rocks from Chinese Altai(after Pearce et al. , 1984)

资料来源(见图 6)WPG—板内花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;Syn-COLG—同碰撞花岗岩;ORG—洋脊花岗岩

Data sources(Refer to Fig. 6)WPG—within-plate granites; VAG—volcanic arc granites;

Syn-COLG—Syn-collision granites; ORG—ocean ridge granites

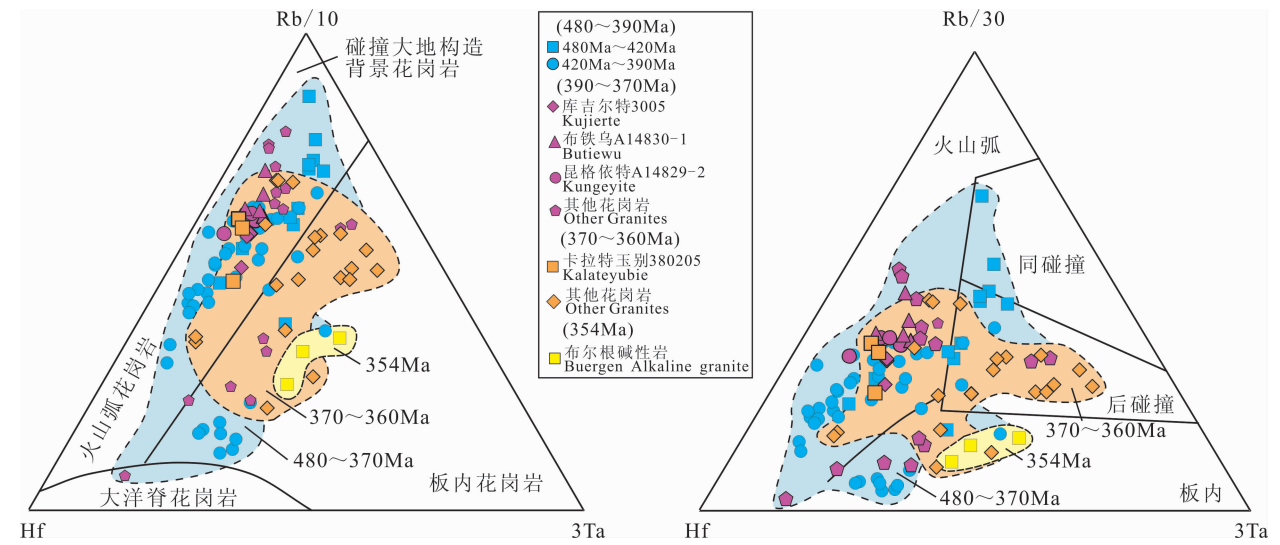


图 12 阿尔泰花岗质岩石构造环境判别图(底图据 Harris et al. , 1986)

Fig. 12 Discrimination diagrams of tectonic setting of granitic rocks from the Chinese Altai(after Harris et al. , 1986)

资料来源(Zhang Haixiang et al. , 2003; Zhang Zhaochong et al. , 2006; Briggs et al. , 2007; Yuan Chao et al. , 2007; Zeng Qiaosong et al. , 2007; Sun Min et al. , 2008; Yang Fuquan et al. , 2008; Liu Feng et al. , 2009, 2010; Zhou Gang et al. , 2009; Liu Guoren et al. , 2010; Shen Xiaoming et al. , 2011; Tong Ying et al. , 2012 和本文)

Data source (Zhang Haixiang et al. , 2003; Zhang Zhaochong et al. , 2006; Briggs et al. , 2007; Yuan Chao et al. , 2007; Zeng Qiaosong et al. , 2007; Sun Min et al. , 2008; Yang Fuquan et al. , 2008; Liu Feng et al. , 2009, 2010; Zhou Gang et al. , 2009; Liu Guoren et al. , 2010; Shen Xiaoming et al. , 2011; Tong Ying et al. , 2012 and this study)

后碰撞环境(Pitcher, 1983)及构造体制转化背景(Barbarin, 1999),中晚泥盆世花岗质岩石多数为准铝质—弱过铝质的高钾钙碱性岩石类型。结合以上岩石类型、地球化学和同位素特征,显示中国阿尔泰晚泥盆世(370~360Ma)花岗质岩石所处构造背景

复杂,应处于俯冲到碰撞转折期或碰撞期,暗示可能是构造环境转换时期。

在阿尔泰东南部的布尔根碱性花岗岩获得的 354Ma 锆石 U-Pb 年龄,厘定为后碰撞或后造山环境(Tong Ying et al. , 2012),其构造背景已从挤压

造山变为伸展环境。本文确定的 363Ma 无变形高钾钙碱性花岗闪长岩,为阿尔泰造山带从 400Ma 峰期的钙碱性弧花岗岩,转换为 354Ma 碱性花岗岩的岩浆提供了关键的岩浆证据,从而构成了一个完整的由钙碱性、到高钾钙碱性再到碱性的花岗岩浆演化序列。这进一步表明,360Ma 左右应是碰撞与后碰撞的转换期。因此,本文进一步证明,阿尔泰在奥陶世—早石炭世应经历了俯冲(480~370Ma)—碰撞(370~360Ma)—后碰撞(354Ma)的过程(图 12)。

5 结论

(1)在中国阿尔泰造山带东南缘花岗岩研究薄弱地区,获得了四个花岗质岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄,分别为 $382 \pm 4\text{Ma}$ 、 $381 \pm 4\text{Ma}$ 、 $385 \pm 5\text{Ma}$ 和 $363 \pm 6\text{Ma}$,揭示了两期(385~380Ma)和 363Ma 两期岩浆事件。363Ma 花岗质岩石的确定,为研究阿尔泰从早期(早—中泥盆世)钙碱性—高钾钙碱性花岗质岩浆到晚期(晚泥盆世)高钾钙碱性花岗质岩浆演变到碱性岩浆(布尔根碱性花岗岩)提供了新的年代学证据。

(2)这些 385~380Ma 花岗质岩石主要为未变形的花岗闪长岩、石英闪长岩等,主要为高钾钙碱性、准铝质—弱过铝质的 I 型花岗岩, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-3.44 \sim +11.09$,绝大多数为正值,二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}-2}$ 为 $1.6 \sim 0.6\text{Ga}$,部分具有负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-2.42 \sim -0.53$,较老的 Nd 模式年龄 $t_{\text{DM}-1}$ ($1.6 \sim 1.3\text{Ga}$),显示源区以古老地壳成分与新生物质成分混源特点,其形成于活动大陆边缘的陆弧环境。

(3)综合分析,阿尔泰古生代花岗岩分为三大阶段:即 480~370Ma 都为俯冲增生环境;370~360Ma 为俯冲到碰撞转折或碰撞环境;354Ma 为后碰撞环境(至少在阿尔泰东南部)。在阿尔泰东南部,363Ma 花岗闪长岩无变形,为高钾钙碱性, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-3.44 \sim +13.26$, $t_{\text{DM}-2}$ 为 $2.5 \sim 0.7\text{Ga}$,为阿尔泰造山带从 400Ma 峰期的钙碱性弧花岗岩组成,转换为 354Ma 碱性花岗岩的岩浆演化提供了关键证据,也进一步揭示了俯冲增生到后增生(晚碰撞—后碰撞)的造山转换过程。

致谢:感谢杨奇荻、黄河、史兴俊、任海东博士在成文过程中提供的帮助,感谢吕彪硕士在野外的帮助,两位评审专家对本文提出很多很好的修改意见,在此一并深表谢意。

References

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid

types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*. 46(3): 605~626.

Blichert-Toft J, Albareda F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth Planet. Sci. Lett.* 148, 243~258.

Briggs S M, Yin An, Manning C E, Chen Zhengle, Wang Xiaofeng, Grove M. 2007. Late Paleozoic tectonic history of the Ertix Fault in the Chinese Altai and its implications for the development of the Central Asian Orogenic System. *Geological Society of America Bulletin*. 119(7-8): 944~960.

Cai Keda, Sun Min, Yuan Chao, Zhao Guochun, Xiao Wenjiao, Long Xiaoping, Wu Fuyuan. 2011. Prolonged magmatism, juvenile nature and tectonic evolution of the Chinese Altai, NW China: Evidence from zircon U - Pb and Hf isotopic study of Paleozoic granitoids. *Journal of Asian Earth Sciences*. 42(5): 949~968.

Cai Keda, Sun Min, Yuan Chao, Zhao Guochun, Xiao Wenjiao, Long Xiaoping, Wu Fuyuan. 2010. Geochronological and geochemical study of mafic dykes from the northwest Chinese Altai: Implications for petrogenesis and tectonic evolution. *Gondwana Research*. 18(4): 638~652.

Chai Fengmei, Dong Lianhui, Yang Fuquan, Liu Feng, Geng Xinxia, Huang Chengke. 2010. Age, geochemistry and petrogenesis of Tiemierite granites in the Kelang basin at the southern margin of Altay, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (2): 377~386(in Chinese with English abstract).

Chen Bin, Jahn B M. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications. *Geological Magazine*. 139 (01).

Chen Fukun, Li Xianghui, Wang Xiuli, Li Qiuli, Siebel W. 2007. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan belt, southwestern China. *International Journal of Earth Sciences*, 96(6):1179~1194.

Chen Fukun, Siebel W, Satir M, Terziolu M, Saka K. 2002. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone. *International Journal of Earth Sciences*, 91(3): 469~481.

Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere. *Nature*, 347: 662~665.

Ding Jianhua, Xing Shuwen, Xiao Keyan, Ma Yubo, Zhang Tingting, Liu Yaling. 2016. Geological Characteristics and Resource Potential Analysis of the Altay North Junggar Chromite-Cu-Au-Pb-Zn-Ni Metallogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*. 90(7):1334~1352(in Chinese with English abstract).

Gao Jianfeng, Zhou Meifu. 2013. Magma mixing in the genesis of the Kalatongke dioritic intrusion: Implications for the tectonic switch from subduction to post-collision, Chinese Altay, NW China. *Lithos*, 162-163(2):236~250.

Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, van Achterbergh E, O'Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope

- composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 64, 133~147.
- Harris N B W, Marzouki F M H, Ali S. 1986. The Jabel Sayd Complex, Arabian shield: Geochemical constrains on the origin of peralkaline and related granites. *J. Geol. Soc. Lond*, 143: 287~295.
- He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, Tang Yanling, Zhou Ruhong. 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China. Urumuqi: Xinjiang People's Publishing House, 1~437(in Chinese with English abstract).
- He Guoqi, Han Baofu, Yue Yongjun, Wang Jiaheng. 1990. Tectonic division and crustal evolution of Altay orogenic belt in China. *Geoscience of Xinjiang*, 2: 9~20 (in Chinese with English abstract).
- Hong Tao, Xiang Peng, You Jun, Zhang Lianchang, Wu Chu, Wu Qi, Xu Xingwang. 2015. Texture and formation age of the eastern Irtysh collision belt. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 571~593(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, Qu Xiaoming, Shi Yuruo, Xie Guiqing. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595~2604(in Chinese with English abstract).
- Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Zhang Qianfeng, Li Tiande, Zhang Jibin. 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 Aiqin, Jahn B M, Zhang Guoxin, Chen Yibing, Zhang Qianfeng. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 328(1): 15~51.
- Jahn B M, Wu Fuyuan, Chen Bin. 2000a. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23(2):82~92.
- Jahn B M, Wu Fuyuan, Chen Bin. 2000b. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-earth sciences*, 91(1-2): 181~193.
- Li Jinyi, Xiao Wenjiao, Wang Kezhao, Sun Guihua, Gao Liming. 2003. Neoproterozoic-Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, NW China. In: *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Aiyai and Tianshan*. Proceedings of the International Symposium of the IGCP-473 Project, IAGOD Guidebook Series 10. London: CERCAMS/NHM 31~74.
- Li Tiande, Qi Zhiming, Xiao Shilu, Wu Boqing. 1996. New improvement of comparative study of geology and mineration of Altai between China and Kazakhstan. In: *Chinese Geological Society (eds). Thesis Volume of the Symposium of the 8th Five Yea Plan of Geoscience for Contribution to 30th IGC*. Beijing: Metallurgical Industrial Publishing House: 256 ~ 259 (in Chinese with English abstract).
- Li Yong, Zhou Gang, Chai Fengmei. 2012. LA-ICP-MS U-Pb Ages and Geological Implications of the Habahe Pluton at the Southern Margin of the Altay, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 30(2): 146~151(in Chinese with English abstract).
- Liu Feng, Yang Fuquan, Li Yanhe, Guo Zhenglin, Chai Fengmei, Geng Xinxia, Zhang Zhixin. 2010. The Chronology and Geochemistry of the Granite from the Serbulak Iron Deposit in the Southern Margin of Altay, Xingjiang. *Acta Geologica Sinica*, 84(2): 195~205(in Chinese with English abstract).
- Liu Feng, Yang Fuquan, Mao Jingwen, Chai Fengmei, Geng Xinxia. 2009. Study on chronology and geochemistry for Abagong granite inAltay orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1416~1425(in Chinese with English abstract).
- Liu Feng, Li Yanhe, Mao Jingwen, Yang Fuquan, Chai Fengmei, Geng Xinxia, Yang Zongxi. 2008. SHRIMP U-Pb Ages of the Abagong Granities in the Altay Orogen and Their Geological Implications. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(6): 795~804 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guoren, Dong Lianhui, Gao Fuping, Chen Jianxiang, Zhao Hua, Wang Dingsheng, Song Zhizong, He Lixin, Qin Jihua. 2010. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Dating and Geochemistry of the Devonian Granites from the Middle Kelan River Valley of Altay in Xinjiang. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 519~531 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianmin, Chen Bolin, Dong Shuwen, Zhao Yue, Liu Xiaochun. 2009. Ages of Pseudotachylite and Its Wall Rocks from the Keketuohai —Ertai Fault Zone, Xinjiang, Northwest China. *Geological Review*, 55(4). 581~589(in Chinese with English abstract).
- Liu W, Liu X J, Xiao W J. 2012. Massive granitoid production without massive continental-crust growth in the Chinese Altay: Insight into the source rock of granitoids using integrated zircon U-Pb age, Hf-Nd-Sr isotopes and geochemistry. 312. 629~684.
- Long Xiaoping, Sun Min, Yuan Chao, Xiao Wenjiao, Lin Shoufa, Wu Fuyuan, Xia Xiaoping, Cai Keda. 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): TC5015
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3. 00; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. (BerkeleyCA).
- Lv Zhenghang, Zhang Hui, Tang Yong, Guan Shenjin. 2012. Petrogenesis and magmatic - hydrothermal evolution time limitation of Kelumute No. 112 pegmatite in Altay, Northwestern China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopes. *Lithos*, 154: 374~391.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids: *Geological Society of America Bulletin*, v. 101, n.

- 5, p. 635 - 643.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4):956~983.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 58(1):63~81.
- Pitcher W S. 1983. Granite type and tectonic environment. Hsu, K. J. (ed.). *Mountain Building Processes*. Academic Press, London, 19~40.
- Rogers G, Hawkesworth C J. 1989. A geochemical traverse across the North Chilean Andes: evidence for crust generation from the mantle wedge. *Earth Planet. Sci. Lett.* 91:271~285.
- Sajona F G, Maury R C, Bellon H, Cotton J, Defant M. 1996. High field strength element enrichment of Pliocene-Pleistocene island-arc basalts, Zamboanga Peninsula, western Mindanao (Philippines). *J. Petrol.* 37:693~726.
- Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299~307.
- Shen Xiaoming, Zhang Haaixiang, Wang Qiang, Wyman D A, Yang Yueheng. 2011. Late Devonian - Early Permian A-type granites in the southern Altay Range, Northwest China: Petrogenesis and implications for tectonic setting of "A2-type" granites. *Journal of Asian Earth Sciences*. 42(5): 986~1007.
- Soderlund U, Patchett P J, Verroot J D, Isachsen C E. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusion. *Earth Planet. Sci. Lett.* 219, 311~324.
- Sun Min, Long Xiaoping, Cai Keda, Jiang Yingde, Wang Buyun, Yuan Chao, Zhao Guochun, Xiao Wenjiao, Wu Fuyuan. 2009. Early Paleozoic ridge subduction in the Chinese Altai: Insight from the abrupt change in zircon Hf isotopic compositions. *Sci China Ser D-Earth Sci.* 39(7): 935~948 (in Chinese with English abstract).
- Sun Min, Yuan Chao, Xiao Wenjiao, Long Xiaoping, Xia Xiaoping, Zhao Guochun, Lin Shoufa, Wu Fuyuan, 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 S S, McDonough W F. 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society of London Special Publications*, 42(1):313~345.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell; Oxford Press, 1~312.
- Tong Ying, Wang Tao, Jahn B M, Sun Min, Hong Dawei, Gao Jianfeng. 2014. Post-accretionary permian granitoids in the Chinese Altai orogen: Geochronology, petrogenesis and tectonic implications. 314. 80~109.
- Tong Ying, Wang Tao, Siebel W, Hong Dawei, Sun Min. 2012. Recognition of early Carboniferous alkaline granite in the southern Altai orogen: post-orogenic processes constrained by U-Pb zircon ages, Nd isotopes, and geochemical data. *International Journal of Earth Sciences*. 101(4): 937~950.
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, Dai Yajian, Han Baofu, Liu Xiaoming. 2007. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications. *Acta Petrologica*, 23(8):1933~1944 (in Chinese with English abstract).
- Tong Ying, Wang Tao, Hong Dawei, Liu Xiaoming, Han Baofu. 2005. Zircon U-Pb Age of Syn-orogenic Tielieke Pluton in the Western Part of Altay Orogenic Belt and Its Structural Implications. *Acta Geoscientia Sinica*. 26(Sup.): 74~77 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Tong Ying, Li Shan, Zhang Jianjun, Shi Xingjun, Li Jinyi, Han Baofu, Hong Dawei. 2010. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: perspectives from Chinese Altay. *Acta Petrologica Et Mineralogica*. 29(6): 595~618 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Jahn B M, Kovach V P, Tong Ying, Hong Dawei, Han Baofu. 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 Tao, Hong Dawei, Jahn B M, Tong Ying, Wang Yanbin, Han Baofu, Wang Xiaoxia. 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 Zhonggang, Zhao Zhenhua, Zou Tianren. 1998. Geochemistry of the granitoids in Altay. Beijing: Science Press, 1~152 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhonggang, Zhao Zhenhua. 1990. Origin and Evolution of the Granitoids in Altay. *Geoscience of Xinjiang*, 1: 69~77 (in Chinese with English abstract).
- Wilhem C, Windley B F, Stampfli G M. 2012. The Altaids of Central Asia: A tectonic and evolutionary innovative review. *Earth-Science Reviews* 113, 303~341.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao Wenjiao, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*. 164(1): 31~47.
- Windley B F, Kröner A, Guo Jinhui, Qu Guosheng, Li Yingyi, Zhang Chi. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic Geology of the Altai Orogen, NW China: New Zircon Age Data and Tectonic Evolution. *The Journal of Geology*. 110(6): 719~737.
- Wu Fuyuan Y, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Sun Shu, Li Jiliang, Huang Baochun,

- Han Chunming, Yuan Chao, Sun Min, Chen Hanlin. 2015. A Tale of Amalgamation of Three Permo-Triassic Collage Systems in Central Asia: Oroclines, Sutures, and Terminal Accretion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 43, 477~507.
- Xiao W J, Windley B F, Badarch G, Sun S, Li J Y, Qin K, 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.
- Xu Lingang, Mao Jingwen, Yang Fuquan, Daniel H, Zheng Jianmin. 2010. Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*. 39(5): 423~440.
- Xue Chunji, Zhao Zhanfeng, Wu Ganguo, Dong Lianhui, Feng Jing, Zhang Zhaochong, Zhou Gang, Chi Guoxiang, Gao Jinggang. 2010. The multiperiodic suerimposed porphyry copper mineralization in Central Asian Tectonic Region; A case study of geology, geochemistry and chronology of Halasu copper deposit, Southeastern Altai, China. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 053~082 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Liu Feng, Chai Fengmei, Geng Xinxia, Zhang Zhixin, Guo Xuji, Liu Guoren. 2013. A review of the geological characteristics and mineralization history of iron deposits in the Altay orogenic belt of the Xinjiang, Northwest China. *Ore Geology Reviews*, 54(8):1~16.
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Yan Shenghao, Liu Feng, Chai Fengmei, Zhou Gang, Liu Guoren, He Lixin, Geng Xinxia, Dai Junzhi. 2008. Geochronology, Geochemistry and Geological Implications of the Mengku Synorogenic Plagiogranite Pluton in Altay, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*. 82(4): 485~499 (in Chinese with English abstract).
- Yang T N, Li J Y, Zhang J and Hou K J. 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 Chao, Sun Min, Xiao Wenjiao, Li Xianhua, Chen Hanlin, Lin Shoufa, Xia Xiaoping, Long Xiaoping. 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids. *Chemical Geology*. 242(1-2): 22~39.
- Yuan Chao, Sun Min, Long Xiaoping, Xia Xiaoping, Xiao Wenjiao, Li Xianhua, Lin Shoufa, Cai Keda. 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).
- Zeng Qiaosong, Chen Guanghao, Wang He, Shan Qiang. 2007. Geochemical characteristic, SHRIMP zircon U-Pb dating and tectonic implication for granitoids in Chonghuer basin, Altai, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1921~1932 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haixiang, Niu Hecai, Kentaro T, Yu Xueyuan, Hiroaki S, Jun'ichi I. 2003. Zircon SHRIMP U-Pb dating on plagiogranite from Kuerti ophiolite in Altay, North Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 48(20): 2231~2235.
- Zhang Kexin, Pan Guitang, He Weihong, Xiao Qinghui, Xu Yadong, Zhang Zhiyong, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Li Jinyi, Zhao Xiaoming, Xing Guangfu, Wang Yonghe, Yin Fuguang, Hao Guojie, Zhang Changjie, Zhang Jin, Gong Yiming. 2015. New Division of Tectonic-Strata Superregion in China. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 40(2): 206~233 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yafeng, Lin Xinwang, Wang Xing, Guo Qiming, Zhao Duanchang, Lv Junli, Wang Xu. 2014. LA-ICP-MS U-Pb Geochronology, Petrogenesis and Its Geological Implications of Kungeyte Plutons in Southern Altay Orogenic Belt. *Geoscience*, 28(1): 16~28 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yafeng, Lin Xinwang, Guo Qiming, Wang Xing, Zhao Duanchang, Dang Chen, Yao Shan. 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemistry of Aral Granitic Plutons in Koktokay Area in the southern Altay Margin and their source significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 339~354.
- Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bolin, Zhou Gang, He Yongkang, Chai Fengmei, He Lixin, Wan Yusheng. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating for granite of subduction in the north of east Junggar, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 51(13): 1565~1574 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Wang Zhonggang, Zou Tianren, Masuda A. 1993. The REE, isotopic composition of O, Pb, Sr and Nd and diagenetic model of granitoids in Altay region. *New improvement of solid geosciences in northern Xinjiang*. Beijing: Science Press, 239~266 (in Chinese with English title).
- Zhou Gang, Wu Ganguo, Dong Lianhui, Zhang Zhaochong, Dong Yongguan, Tong Ying, He Lixin, Ying Lijuan. 2009. Formation time and geochemical feature of Wutubulak pluton in the northeastern margin of Junggar in Xinjiang and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1390~1402 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Gang, Zhang Zhaochong, Luo Shibin, He Bin, Wang Xiang, Ying Lijuan, Zhao Hua, Li Aihong, He Yongkang. 2007. Confirmation of high-temperature strongly peraluminous Mayin' ebo granites in the south margin of Altay, Xinjiang: age, geochemistry and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1909~1920 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaoqing, Wang Zhonggang, Wang Yuanlong, Bi Hua. 2006. Geological characteristics of the post-orogenic alkaline granites in Xingjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2945~2956 (in Chinese with English abstract).
- Zou Tianren, Cao Huizhi, Wu Boqing. 1988. Orogenic and anorogenic granitoids of the Altay Mountains, Xinjiang and their discrimination criteria. *Acta Geologica Sinica*, (03): 228~245 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

柴凤梅,董连慧,杨富全,刘锋,耿新霞,黄承科. 2010. 阿尔泰南缘

- 克朗盆地铁木尔特花岗岩体年龄、地球化学特征及成因. 岩石学报. 26(02): 377~386.
- 丁建华, 邢树文, 肖克炎, 马玉波, 张婷婷, 刘亚玲. 2016. 阿尔泰—准噶尔北缘铬铁矿-Cu-Au-Pb-Zn-Ni 成矿带主要成矿地质特征及潜力分析. 地质学报. 90(7): 1334~1352.
- 何国琦, 李茂松, 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 新疆人民出版社和香港文化教育出版社, 1~437.
- 何国琦, 韩宝福, 岳永君, 王嘉桁. 1990. 中国阿尔泰造山带的构造分区和地壳演化. 新疆地质科学, 2: 9~20.
- 洪涛, 相鹏, 游军, 张连昌, 吴楚, 吴琪, 徐兴旺. 2015. 额尔齐斯碰撞带东段结构与形成时代. 岩石学报. 31(02): 571~593.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报. 23(10): 2595~2604.
- 胡霁琴, 张国新, 张前锋, 李天德, 张积斌. 2002. 阿尔泰造山带变质岩系时代问题的讨论. 地质科学. (02): 129~142.
- 李天德, 祁志明, 肖世录, 吴柏青. 1996. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰地质及成矿研究的新进展. 见: 中国地质学会编. 献给三十届国际地质大会“八五”地质科技重要成果学术交流会议论文选集. 北京: 冶金工业出版社: 256~259.
- 李永, 周刚, 柴凤梅. 2012. 阿尔泰南缘哈巴河岩体 LA-ICP-MS 锆石定年及地质意义. 新疆地质. 30(02): 146~151.
- 刘锋, 杨富全, 李延河, 郭正林, 柴凤梅, 耿新霞, 张志欣. 2010. 新疆阿尔泰南缘萨尔布拉克铁矿区花岗岩年代学及地球化学研究. 地质学报. 84(02): 195~205.
- 刘锋, 杨富全, 毛景文, 柴凤梅, 耿新霞. 2009. 阿尔泰造山带阿巴宫花岗岩体年代学及地球化学研究. 岩石学报(06): 1416~1425.
- 刘锋, 李延河, 毛景文, 杨富全, 柴凤梅, 耿新霞, 杨宗喜. 2008. 阿尔泰造山带阿巴宫花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义. 地球学报. 29(06): 795~804.
- 刘国仁, 董连慧, 高福平, 陈剑祥, 赵华, 王定胜, 宋志勇, 何立新, 秦纪华. 2010. 新疆阿尔泰克拉克河中游泥盆纪花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地球化学特征. 地球学报. 31(04): 519~531.
- 刘建民, 陈柏林, 董树文, 赵越, 刘晓春. 2009. 新疆富蕴可可托海—二台断裂带中假玄武玻璃及其围岩的年代学研究. 地质论评. 55(04): 581~589.
- 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: 地球科学). 39(07): 935~948.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 代雅建, 韩宝福, 柳晓明. 2007. 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. 岩石学报. 23(08): 1933~1944.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 柳晓明, 韩宝福. 2005. 阿尔泰造山带西段同造山铁列克花岗岩体锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 地球学报. 26(Sup.): 74~77.
- 王涛, 童英, 李舫, 张建军, 史兴俊, 李锦轶, 韩宝福, 洪大卫. 2010. 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. 岩石矿物学杂志, 29(6): 595~618.
- 王中刚, 赵振华, 邹天人. 1998. 阿尔泰花岗岩类地球化学. 北京: 科学出版社, 1~152.
- 王中刚, 赵振华. 1990. 阿尔泰花岗岩类的成因与演化. 新疆地质科学. 北京: 地质出版社, (1): 69~77.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报. 23(2): 185~220.
- 薛春纪, 赵战锋, 吴淦国, 董连慧, 冯京, 张招崇, 周刚, 池国祥, 高景岗. 2010. 中亚构造域多期叠加斑岩铜矿化: 以阿尔泰东南缘哈腊苏铜矿床地质、地球化学和成岩成矿时代研究为例. 地学前缘. 17(02): 53~82.
- 杨富全, 毛景文, 闫升好, 刘锋, 柴凤梅, 周刚, 刘国仁, 何立新, 耿新霞, 代军治. 2008. 新疆阿尔泰蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义. 地质学报. 82(4): 485~499.
- 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(07): 1635~1644.
- 曾乔松, 陈广浩, 王核, 单强. 2007. 阿尔泰冲乎尔盆地花岗质岩类的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报. 23(08): 1921~1932.
- 张克信, 潘桂棠, 何卫红, 肖庆辉, 徐亚东, 张智勇, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 李锦轶, 赵小明, 邢光福, 王永和, 尹福光, 郝国杰, 张长捷, 张进, 龚一鸣. 2015. 中国构造—地层大区划分新方案. 地球科学(中国地质大学学报). 40(02): 206~233.
- 张亚峰, 蔺新望, 王星, 郭岐明, 赵端昌, 吕军利, 王旭. 2014. 阿尔泰造山带南缘昆格依特岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、岩石成因及其地质意义. 现代地质. 28(01): 16~28.
- 张亚峰, 蔺新望, 郭岐明, 王星, 赵端昌, 党晨, 姚珊. 2015. 阿尔泰南缘可可托海地区阿拉尔花岗岩体 LA ICP MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其源区意义. 地质学报, 89(2): 339~354.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 周刚, 贺永康, 柴凤梅, 何立新, 万渝生. 2006. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩的 SHRIMP U-Pb 锆石定年. 科学通报. 51(13): 1565~1574.
- 赵振华, 王中刚, 邹天人, Masuda A. 1993. 阿尔泰花岗岩类 REE 及 O、Pb、Sr、Nd 同位素组成及成岩模型. 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 239~266.
- 周刚, 吴淦国, 董连慧, 张招崇, 董永观, 童英, 何立新, 应立娟. 2009. 新疆准噶尔北东缘乌图布拉克岩体形成时代、地球化学特征及地质意义. 岩石学报. (06): 1390~140.
- 周刚, 张招崇, 罗世宾, 何斌, 王祥, 应立娟, 赵华, 李爱红, 贺永康. 2007. 新疆阿尔泰山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(08): 1909~1920.
- 朱笑青, 王中刚, 王元龙, 毕华. 2006. 新疆后造山碱性花岗岩的地质特征. 岩石学报(12): 2945~2956.
- 邹天人, 曹惠志, 吴柏青. 1988. 新疆阿尔泰造山花岗岩和非造山花岗岩及其判别标志. 地质学报. (03): 228~245.

Zircon U-Pb Ages and Genetic Evolution of Devonian Granitic Rocks in the Southeastern Chinese Altai and Its Tectonic Implications: New Evidence for Magmatic Evolution of Calc-alkaline-High-K Calc-alkaline-Alkaline Rocks

SONG Peng^{1,2)}, TONG Ying¹⁾, WANG Tao¹⁾, QIN Qie²⁾, ZHANG Jianjun¹⁾, NING Dongxu³⁾

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

2) *China University of Geosciences, Beijing, 100083*

3) *No. 8 Geological Team, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Akesu, 843000, Xinjiang*

Abstract

Many researches on the granitoids in most area of the Chinese Altai have been carried out, but retracing the entire tectono-magmatic evolutionary history of the Chinese Altai orogen is still being restricted due to the lack of understanding on the southeastern Altai. This study is based on four samples of granitic plutons (Kungeyite, Kujierte, Butiewu and Kalateyubie), zircon U-Pb (LA-ICP-MS) dating yields the ages of $382 \pm 4\text{Ma}$, $381 \pm 4\text{Ma}$, $385 \pm 5\text{Ma}$ and $363 \pm 6\text{Ma}$, respectively. These granitic rocks belong to high-K calc-alkaline and metaluminous-weakly peraluminous series of type I, depending on their petrological and geochemical characteristic. They have negative whole rock $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of $-2.42 \sim -0.53$ with Nd model ages t_{DM} of $1.6 \sim 1.3\text{Ga}$ and zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of $-3.43 \sim +12.89$ (mostly positive), with Hf model ages $t_{\text{DM}-2}$ of $2.5 \sim 0.6\text{Ga}$, suggesting complex sources. These data indicates mantle-derived substances involved during the process of generation of granitoids as well as ancient crustal compositions. The Devonian granitic rocks in the Chinese Altai can be classified as Early Devonian ($420 \sim 390\text{Ma}$) and Middle-Late Devonian ($390 \sim 360\text{Ma}$); the former is mostly calc-alkaline series of metaluminous-peraluminous and the latter is high-K calc-alkaline series of metaluminous-weakly peraluminous. It provides new evidence for the features of evolvement of the Early-Middle Devonian granitoids from calc-alkaline series ($480 \sim 390\text{Ma}$) to high-K calc-alkaline series ($390 \sim 360\text{Ma}$), then to alkine granite (354Ma), because of the certainty of high-K calc-alkaline granitic rock (363Ma) in this area. This evolvement further confirmed the evolution process of the Chinese Altai are consistent with tectonic settings from subduction to collision and then to post-collision extentional environment. Combined with the analysis of isotope and regional geological data, we conclude that the Middle-Late Devonian granitoids in the southeastern Chinese altai are active continental arc environment in the background of subduction. The Late Devonian granitoids have the characteristics of collision, followed by the Early Carboniferous post-collision alkaline granite.

Key words: Granitic rocks; LA-ICP-MS zircon U-Pb ages; Magmatic evolution; Isotope geochemistry; Devonian; Altai