

南天山巴音布鲁克花岗岩岩体成因： 锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素及其地球化学证据

魏强¹⁾, 张成立¹⁾, 何贤英²⁾, 马中平³⁾, 高晓峰³⁾, 杨蓉⁴⁾, 黄栋¹⁾, 李平³⁾

1) 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安, 710069;

2) 新疆油田公司准东采油厂, 新疆阜康, 831511;

3) 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安, 710054; 4) 陕西国际商贸学院, 陕西咸阳, 712046

内容提要:巴音布鲁克岩体为南天山北缘出露不多的代表性早古生代花岗岩体, 由二长花岗岩和钾长花岗岩构成, 两类岩石均显示富集 Rb、Ba、Th、K 和 Pb 等 LILE, 亏损 Nb、Ta、Ti 等 HFSE 的活动陆缘弧岩浆地球化学特征。其中, 二长花岗岩相对低 SiO₂ 和 K₂O, 略高 CaO、Fe₂O₃^T 和 MgO, 具轻重稀土中等分馏、弱负 Eu 异常的稀土元素分布模式。钾长花岗岩明显高 SiO₂, 富 K₂O, 低 CaO 和 MgO, 强烈亏损 Sr、Ba、Eu、Ti 和 P, 高 DI 指数(94.31~95.52)和高 Rb/Sr 比值, 轻重稀土中等分馏, 呈现出强负 Eu 异常的稀土分布模式, 指示岩浆经历了较高程度演化。二长花岗岩和钾长花岗岩分别获得 464.5 ± 3.5 Ma 和 430.2 ± 3.2 Ma 的形成年龄, 对应的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别为 -8.66~-6.56 和 -5.33~-2.19, Hf 陆壳模式年龄 T_{DM^C} 分别为 1.58~1.69 Ga 和 1.33~1.49 Ga, 明显高于其形成年龄, 表明岩浆主要源自中元古代基底陆壳物质的部分熔融。结合南天山北缘和中天山南缘类似的同期花岗岩的广泛出现认为, 巴音布鲁克岩体中的二长花岗岩和钾长花岗岩分别代表了南天山洋早期俯冲消减活动陆缘弧岩浆和晚期成熟岩浆演化的结果, 表明其大洋俯冲消减作用一直持续到志留世仍未结束。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 花岗岩; 巴音布鲁克岩体; 南天山

西天山造山带是中亚造山带中国境内的重要组成部分, 其被伊犁-中天山地块分割为南北两个构造带。其中, 南部南天山构造带被认为是天山古大洋盆演化过程形成的一条重要构造带(Han Qiong et al., 2015; Huang He et al., 2015; Li Yuejun et al., 2009; Wan Tianfeng et al., 2015; Xiao Wenjiao et al., 2013), 其北界的汗腾格里峰—科克苏河—巴伦台—库米什一线(中天山南缘断裂带)是分割哈萨克斯坦—准噶尔板块和塔里木板块的重要界线(He Guoqi, 2001)。目前, 多数学者赞同南天山洋早古生代期间向北俯冲于中天山之下, 北部中天山南缘为活动大陆边缘, 在中天山南缘库米什—巴伦台及西南天山等地确定了大量与俯冲消减有关的早古生代火山弧花岗岩类(Xu Xueyi et al., 2006; Han Baofu et al., 2004; Yang Tiannan et al., 2006; Zhang Chengli et al., 2007; Wang Shoujing et al., 2010; Zhang xi et al., 2011; Ma Xuxuan et al.,

2013, 2014; Xu Xueyi et al., 2013; Zhang Yingli et al., 2014; Zhong Lingli et al., 2015; Chen Bei et al., 2015)。然而, 由于一些早古生代花岗岩显示铝质 A 型花岗岩的成因特征, 也有学者提出南天山 490~380 Ma 期间存在与造山有关的晚期扩张事件(Han Baofu et al., 2004)。最近, Ma Xuxuan et al. (2014)在中天山识别出形成于 365 Ma 的 A 型花岗岩, 认为是中天山与吐哈地体碰撞后伸展的产物, 表明可能的造山后伸展发生于晚古生代早期的晚泥盆世。Zhong Linglin et al. (2015)在中天山南缘也确定存在 417 Ma 的钾长花岗岩, 并认为代表了南天山洋盆闭合、中天山地块与塔里木地块碰撞后的伸展事件, 因而有关的造山后伸展早泥盆世初已发生。显然, 有关南天山洋盆俯冲消减起始时间、过程及闭合时限仍未取得一致意见, 主要原因是对这一时期花岗岩类、特别是钾长花岗岩的成因性质存在较大分歧, 而且不同的认识均是依据中天山个别花岗岩

注: 本文为中国地质调查局天山成矿带地质调查评价成果集成项目(编号 12120113042200)及西北重大岩浆事件及其成矿作用和构造背景综合研究项目(编号 12120114020501)联合资助成果。

收稿日期: 2016-02-17; 改回日期: 2016-06-28; 责任编辑: 周健。

作者简介: 魏强, 男, 1991 年。硕士生, 矿物、岩石及矿床学专业。Email: 446331872@qq.com。通讯作者: 张成立, 男, 1956 年生。教授, 博士生导师, 从事岩石地球化学研究。Email: clzhang@nwu.edu.cn。

的成因解释所获得,缺乏全区和南天山早古生代相关岩浆作用研究的支持。因此,加强南天山早古生代花岗岩成因及形成构造环境研究将为这些问题的解决提供重要证据和约束条件。

前人在南天山北缘已相继识别出一些早古生代花岗岩体(Zhang Chengli et al., 2007; Yang Jingsui et al., 2011; Chen Bei et al., 2015),这些岩体位于塔里木地块北缘南天山与伊犁-中天山地块交界关键地带。巴音布鲁克岩体是南天山北缘出露不多最具代表性的早古生代复式岩体(图 1b),成为确定南天山早古生代花岗岩成因、探讨其形成环境的理想地质体,但目前仍缺乏该岩体的详细年代学和成因研究,本文在野外地质及岩相学观察基础上,开展岩体锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素及地球化学的系统研究,并综合区域上早古生代花岗岩类的研究成果,深入探讨南天山早古生代构造演化过程。

1 岩体地质及岩石学

1.1 岩体地质

巴音布鲁克地区地理位置位于中国西天山东部,大地构造属于南天山构造带的北部(图 1b)边缘,区内主要发育早古生代志留系火山沉积岩和晚古生代泥盆系灰岩、碎屑岩以及石炭系火山碎屑岩(Bai Jianke et al., 2015),西部出露有侏罗系陆相地层,多数地区被第四系覆盖(图 1c)。在紧邻巴音布鲁克镇东部开都河以东和乌兰布拉克以北出露一古生代花岗岩体(后称巴音布鲁克岩体),大致延北西-南东向展布,长约 60km,宽约 20km,为不规则岩基产出,其南北多被第四系覆盖,仅在西南部和东北部见有泥盆纪、石炭纪地层不整合覆盖(图 1c)。岩体内部主要由中粗粒二长花岗岩和钾长花岗岩组成,局部有后期细粒花岗岩脉侵入,构成一典型复式岩基。其中,钾长花岗岩占据该岩体出露面积约 80%左右(图 1c),呈均一块状构造(图 2a);二长花岗岩略发育定向构造,显示弱的片麻状构造(图 2c),主要出露于岩基中南部(图 1c),多呈不规则透镜状包裹于钾长花岗岩体中,二者之间为截然侵入关系,局部可见中细粒钾长花岗岩脉侵入片麻状二长花岗岩之中,说明为两期岩浆活动的结果。

1.2 岩石学特征

二长花岗岩呈灰红色,具片麻状构造,中粗粒花岗岩结构,除石英颗粒外,多数矿物呈半自形-自形晶。主要矿物包括斜长石(35%±),微斜长石(30%±),

石英(20%±),角闪石(8%±),黑云母(6%±),副矿物为锆石、磷灰石和榍石等(<1%)。其中,角闪石和黑云母均不同程度绿泥石化,微斜长石发生绢云母或泥化,斜长石局部有一定绢云母化(图 2b)。钾长花岗岩呈淡肉红色,具均一块状构造和粗粒花岗岩结构,由钾长石(55%±)、石英(30%±)、斜长石(10%±)及少量黑云母(5%±)组成,副矿物为磷灰石、锆石和少量不透明氧化物(1%左右)。斜长石呈柱状,发育聚片双晶,略有绢云母化;钾长石以较大的颗粒呈他形或半自形板状产出,并以泥土化较强的正长石为主,部分为具格子双晶的微斜长石,石英则多为他形粒状充填于其他矿物之中,黑云母呈半自形状(图 2d)。

2 分析方法

所有样品的主微量元素、锆石 U-Pb 定年测试分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素分析采用 XRF(Rikagu RIX 2100)玻璃熔饼法完成,分析过程经 BCR-2 和 GBW07105 标样监控,分析精度优于 5%。微量元素分析,在 Teflon 高压溶样弹中溶样后,用 ICP-MS(Agilent 7500a)测定,样品经 AGV-1,BCR-2,G2 和 RGM-1 国际标样监控,分析精度优于 10%,REE(除 Hf 和 Lu)、Rb、Y、Zr、Nb、Hf 和 Ta 等元素相对误差 <5%。

锆石矿物在廊坊区域地质实验室采用传统重、磁法分选获得,分离出的锆石在双目镜下选出结晶好、透明度高、无裂隙、无包裹体的锆石颗粒固结于环氧树脂中,经打磨抛光制成样靶。此后,在西北大学大陆动力学国家重点实验室,经场发射环境扫描电子显微镜附属的 Gatan MonoCL3⁺ 系统进行锆石矿物内部结构的阴极发光(CL)图像分析,以备后续锆石 U-Pb 定年原位分析。

锆石 U-Pb 定年原位(in situ)分析,在连接有德国 Micro Las 公司生产的 Geo las 200M 激光剥蚀系统的 Agilent 7500a ICP-MS 分析。分析过程以 He 为剥蚀物质载气,用美国国家标准合成硅酸盐玻璃 NIST610 进行仪器最佳化,用²⁹Si 作内标测定锆石 U、Th 和 Pb 的含量,用 91500 标准锆石作外部校正。测试所用激光斑束直径为 32μm,具体的分析方法及仪器参数见 Yuan Honglin et al. (2004) 的描述。元素含量以 NIST610 为内标,用 Glitter(ver4.0, Macquarie University) 计算所测同位素比值及含量。年龄计算及协和图绘制利用 Isoplot 3.0

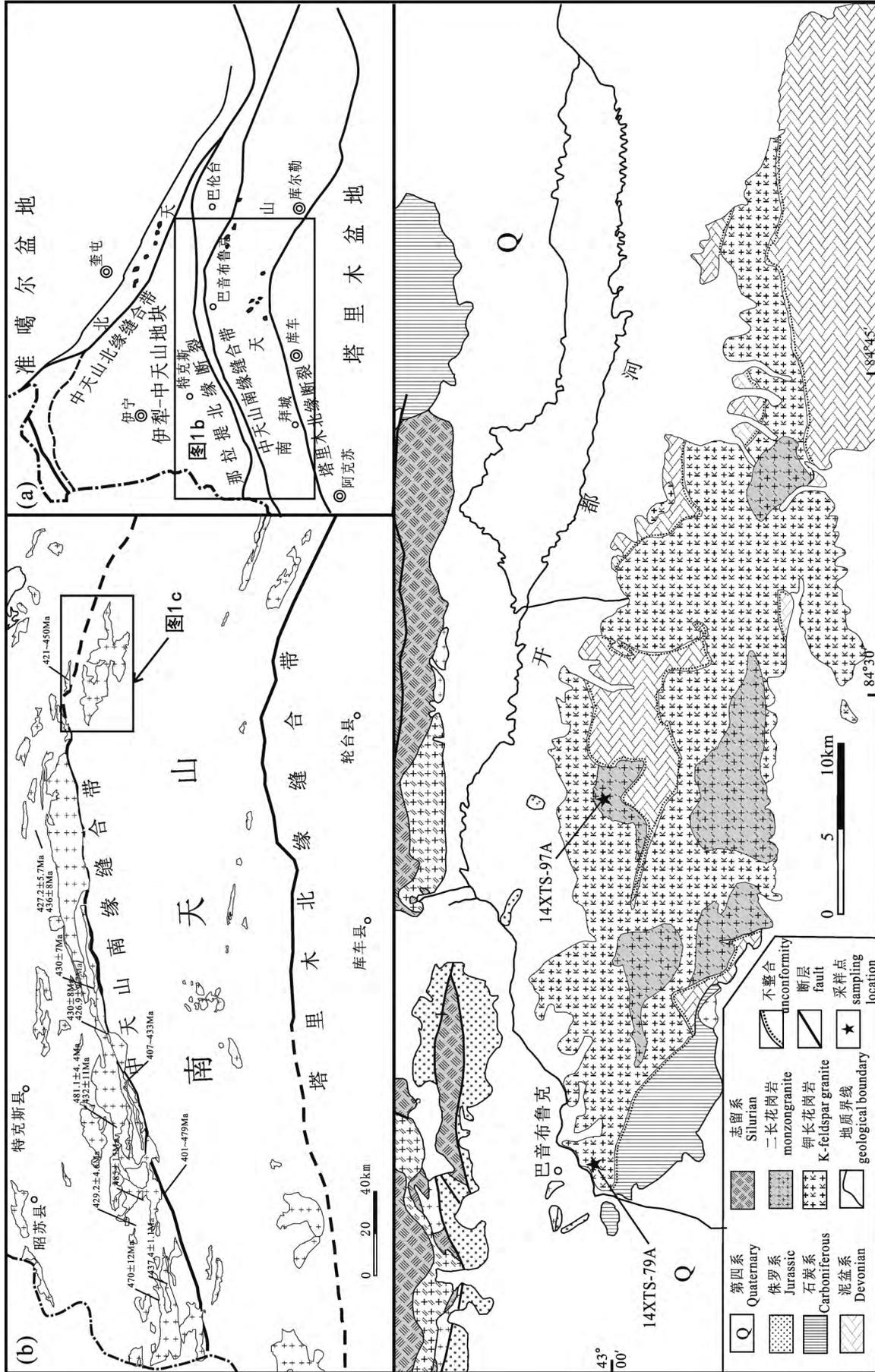


图1 巴音布鲁克地区地质简图(据中国天山造山带1:100万地质图, 2002和1:20万巴音布鲁克幅地质图, 1996(修编))

Fig.1 Geological sketch map in the Bayinbuluke area (a, b, modified from 1:1000000 geological map of Tianshan Orogen in China, 2002 and 1:200000 geological map of Bayinbuluke, 1996)



图 2 巴音布鲁克岩体野外及岩石显微照片

Fig 2 Represented field photos and photomicrographs for the Bayinbuluke granitic pluton

(a)、(b)—二长花岗岩；(c)、(d)—钾长花岗岩；Q—石英；Pl—斜长石；Mc—微斜长石；Bt—黑云母；Hb—角闪石

(a), (b)—Monzogranite; (c), (d)—K-feldspar granite; Q—quartz; Pl—plagioclase; Mc—microcline; Bt—biotite; Hb—hornblende

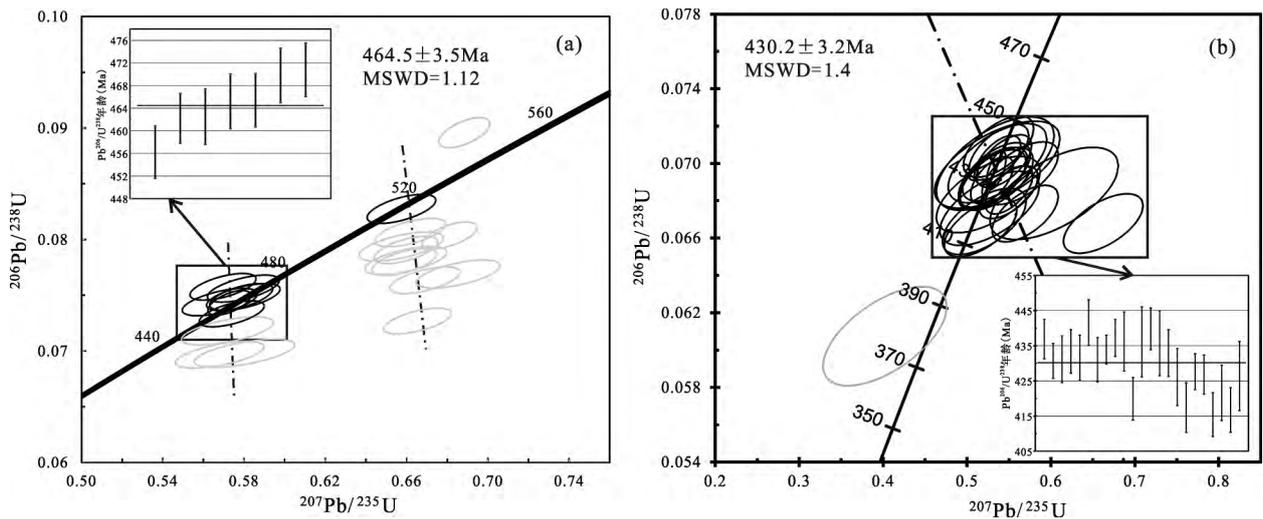


图 3 巴音布鲁克岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig 3 Zircon U-Pb concordia diagrams for the Bayinbuluke monzogranite and K-feldspar granite

(a)—二长花岗岩；(b)—钾长花岗岩

(a)—monzogranite; (b)—K-feldspar granite

程序获得(Ludwig,2003)。

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的 LA-MC-ICP-MS 仪器上完成,激光剥蚀系统为 Geo Las 2005,德国 Thermo Fishier Scientifics 公司的

Neptune Plus MC-ICP-MS 用于分辨时间信号,激光斑束直径为 44μm,脉冲频率设定为 6Hz。分析时采用 X 截取锥和 Jet 样品锥,同时加上 4ml/min 的 N₂,以提高 Hf 同位素测试精度,详细仪器参数见 Hu Zhaochu et al. (2012)。测试中以锆石标样

91500 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282308 \pm 12(2\sigma)$) 用于同位素分馏校正, GJ-1 作为监控样, 数据计算与校正过程同 Liu Yongsheng et al. (2010a), 对实验数据的离线处理采用 ICP-MS DataCal 9.0 软件完成 (Liu et al., 2008, 2010a, b)。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算采用的 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Söderlund et al., 2004), 现今球粒陨石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282785$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0336$ (Bouvier et al., 2008); Hf 地壳模式年龄 (T_{Hf}^{C}) 计算使用的现今大陆平均地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ (Griffin et al., 2002)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

二长花岗岩的锆石多为无色透明至半透明, 呈自形-半自形长柱状, 长宽比为 1:3~1:4, 粒径介于 100~300 μm 之间。对 25 粒锆石进行原位 U-Pb 定年分析后, 获得两组年龄的锆石 (表 1)。其中 11 个测点的锆石年龄明显偏老, 但除测点 14XTS-97A-05 获得 $512.5 \pm 5.14 \text{ Ma}$ 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的谐和年龄外, 其他锆石均因不同程度 Pb 丢失而远离谐和线, 构成一条上交点年龄为 515Ma 的不一致线 (图 3a), 二者在误差范围一致。该组锆石总体上发光性较差, 但部分颗粒仍可见岩浆韵律环带 (图 4a), 他们的 Th/U 比值变化于 0.17~0.62 之间, 表明是一组经历了后期热事件干扰的继承岩浆锆石, 代表区内一期较早的岩浆事件。此外, 还有一粒谐和度较差的岩浆锆石获得 553Ma 的不谐和年龄 (14XTS-97A-05 测点), 暗示还存在更早的岩浆活动。其余 10 个测点获得一组相对年轻的锆石年龄, 这些锆石多呈长柱状自形晶, 高 Th/U 比值 (0.28~1.85), 发光性相对较好, 内部具明显的岩浆韵律环带 (图 4b), 代表岩浆成因锆石, 部分锆石也不同程度的发生 Pb 丢失, 但多数测点落在谐和线上 (图 3a)。其中, 由 7 个高谐和度测点获得 $464.5 \pm 3.5 \text{ Ma}$ 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄, 与不一致线上上交点年龄 461Ma 在误差范围一致, 代表二长花岗岩的冷凝结晶年龄。

钾长花岗岩的锆石呈无色透明至半透明自形-半自形短柱状, 宽长比为 1:2~1:3, 粒径介于 100~200 μm 之间, 这些锆石的 Th/U=0.46~1.34, 多数锆石发光强, 并显示密集的岩浆震荡环带 (图 4c), 说明是温度相对较低、缓慢结晶环境下岩浆结晶的结果 (Wu Yuanbao et al., 2004)。个别锆石具明显的核-幔结构, 核及幔部的锆石发光和结构差异

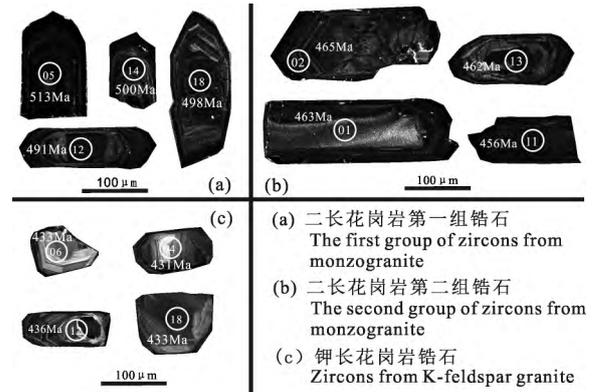


图 4 巴音布鲁克二长花岗岩和钾长花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 4 CL images of zircons from the Bayinbuluke monzogranite and K-feldspar granite

明显 (图 4c), 其幔部弱的发光性很可能是其具有高含量的 U、Th 所致 (表 1)。所测定的 24 粒锆石中, 除一粒有明显的 Pb 丢失外, 其他 23 个测点均获得较好的谐和年龄, 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $430.2 \pm 3.2 \text{ Ma}$, 与其 $434.5 \pm 4.5 \text{ Ma}$ 的交点年龄在误差范围一致 (图 3b), 因而解释为钾长花岗岩的冷凝结晶年龄。

3.2 锆石 Hf 同位素

两类花岗岩的锆石 Hf 同位素分析结果列于表 2, 其中二长花岗岩锆石测点的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化较大, 介于 0.015020~0.143856 之间, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.000620 \sim 0.005727$, 明显低于 0.002, 表明其形成后少有放射性成因 Hf 的积累, 所测 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值可代表其形成时的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (Wu Fuyuan et al., 2007)。计算获得的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}} = -0.96 \sim -0.83$, 远小于镁铁质地壳 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}} (-0.34)$ 和长英质地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}} (-0.72)$ (Vervoort and Jonathan, 1996), 因而采用 Hf 陆壳存留年龄 (T_{DM}^{C}) 估算其源区由亏损地幔被抽取出来的时间较为合理。根据该样品中较老一组继承锆石 513Ma 的年龄计算得到的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -7.632 \sim -3.20$, 相应的 $T_{\text{DM}}^{\text{C}} = 1446 \sim 1674 \text{ Ma}$; 而由岩体形成年龄 465Ma 计算获得的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -8.66 \sim -6.56$, $T_{\text{DM}}^{\text{C}} = 1581 \sim 1686 \text{ Ma}$ (表 2)。

钾长花岗岩锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf} = 0.016452 \sim 0.036394$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.000668 \sim 0.001430$, 均小于 0.002, 也说明这些锆石形成后无放射成因 Hf 的积累。由岩体获得的 430Ma 的形成年龄计算得到的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -5.33 \sim -2.19$, $T_{\text{DM}}^{\text{C}} = 1332 \sim 1491 \text{ Ma}$ 。

表1 巴音布鲁克岩体锆石 U-Pb 定年结果

Table 1 Zircon U-Pb dating data for the Bayinbuluke granitic pluton

测点号	含量($\times 10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Th	U		Pb ²⁰⁷ / Pb ²⁰⁶	1 σ	Pb ²⁰⁷ / U ²³⁵	1 σ	Pb ²⁰⁶ / U ²³⁸	1 σ	Pb ²⁰⁷ / Pb ²⁰⁶	1 σ	Pb ²⁰⁷ / U ²³⁵	1 σ	Pb ²⁰⁶ / U ²³⁸	1 σ
14XTS-97A															
14XTS-97A-01	508	555	0.92	0.0553	0.0016	0.5681	0.0122	0.0744	0.0008	425	62	457	8	463	5
14XTS-97A-02	531	902	0.59	0.0560	0.0014	0.5786	0.0102	0.0749	0.0008	452	56	464	7	465	5
14XTS-97A-03	244	745	0.33	0.0649	0.0017	0.6282	0.0112	0.0702	0.0007	770	54	495	7	437	4
14XTS-97A-04	784	917	0.85	0.1102	0.0026	1.1182	0.0163	0.0735	0.0008	1802	43	762	8	458	5
14XTS-97A-05	439	1120	0.39	0.0576	0.0015	0.6575	0.0112	0.0828	0.0009	513	55	513	7	513	5
14XTS-97A-06	361	1038	0.35	0.0663	0.0017	0.6655	0.0111	0.0727	0.0008	817	51	518	7	452	5
14XTS-97A-07	543	755	0.72	0.0577	0.0019	0.5718	0.0150	0.0718	0.0008	519	70	459	10	447	5
14XTS-97A-08	204	494	0.41	0.0603	0.0021	0.5802	0.0163	0.0698	0.0008	613	72	465	10	435	5
14XTS-97A-09	2140	8024	0.27	0.0557	0.0012	0.6884	0.0083	0.0896	0.0009	440	48	532	5	553	5
14XTS-97A-10	340	976	0.35	0.0600	0.0017	0.6574	0.0137	0.0794	0.0009	605	60	513	8	492	5
14XTS-97A-11	1493	807	1.85	0.0567	0.0015	0.5739	0.0106	0.0733	0.0008	480	57	461	7	456	5
14XTS-97A-12	287	1673	0.17	0.0605	0.0015	0.6597	0.0103	0.0791	0.0008	621	52	515	6	491	5
14XTS-97A-13	2169	7606	0.29	0.0559	0.0012	0.5728	0.0070	0.0743	0.0007	447	48	460	4	462	4
14XTS-97A-14	939	1509	0.62	0.0595	0.0015	0.6618	0.0115	0.0806	0.0008	586	54	516	7	500	5
14XTS-97A-15	774	1772	0.44	0.0685	0.0016	0.7849	0.0109	0.0831	0.0008	883	47	588	6	515	5
14XTS-97A-16	305	794	0.38	0.0646	0.0018	0.6854	0.0136	0.0769	0.0008	762	57	530	8	478	5
14XTS-97A-17	532	1109	0.48	0.0562	0.0016	0.5797	0.0120	0.0748	0.0008	459	61	464	8	465	5
14XTS-97A-18	1303	2635	0.49	0.0615	0.0014	0.6812	0.0089	0.0804	0.0008	656	48	528	5	498	5
14XTS-97A-19	579	1186	0.49	0.0636	0.0016	0.6691	0.0114	0.0764	0.0008	727	53	520	7	474	5
14XTS-97A-20	428	1010	0.42	0.0613	0.0015	0.6589	0.0106	0.0780	0.0008	649	52	514	6	484	5
14XTS-97A-21	188	640	0.29	0.0613	0.0017	0.6596	0.0133	0.0781	0.0008	648	58	514	8	485	5
14XTS-97A-22	274	965	0.28	0.0545	0.0015	0.5696	0.0107	0.0758	0.0008	394	58	458	7	471	5
14XTS-97A-23	130	460	0.28	0.0592	0.0019	0.5681	0.0144	0.0697	0.0008	573	67	457	9	434	5
14XTS-97A-24	1849	1378	1.34	0.0556	0.0015	0.5797	0.0117	0.0756	0.0008	437	60	464	8	470	5
14XTS-97A-25	1066	2295	0.46	0.0719	0.0016	0.7972	0.0106	0.0804	0.0008	984	46	595	6	499	5
14XTS-79A															
14XTS-79A-01	84	127	0.66	0.0480	0.0060	0.4024	0.0487	0.0607	0.0018	101	270	343	35	380	11
14XTS-79A-02	107	155	0.69	0.0563	0.0025	0.5442	0.0217	0.0701	0.0009	463	97	441	14	437	6
14XTS-79A-03	143	298	0.48	0.0556	0.0021	0.5298	0.0168	0.0691	0.0008	436	81	432	11	431	5
14XTS-79A-04	85	98	0.88	0.0560	0.0033	0.5344	0.0294	0.0692	0.0011	453	126	435	19	431	7
14XTS-79A-05	80	105	0.77	0.0719	0.0037	0.6624	0.0313	0.0668	0.0011	984	102	516	19	417	6
14XTS-79A-06	137	131	1.05	0.0558	0.0030	0.5352	0.0267	0.0696	0.0010	444	116	435	18	433	6
14XTS-79A-07	82	105	0.79	0.0556	0.0031	0.5311	0.0272	0.0693	0.0011	436	119	433	18	432	6
14XTS-79A-08	124	148	0.84	0.0550	0.0030	0.5377	0.0276	0.0709	0.0011	412	119	437	18	442	7
14XTS-79A-09	129	239	0.54	0.0557	0.0030	0.5311	0.0259	0.0691	0.0011	440	114	433	17	431	6
14XTS-79A-10	2241	2937	0.76	0.0557	0.0013	0.5348	0.0077	0.0696	0.0007	440	52	435	5	434	4
14XTS-79A-11	158	343	0.46	0.0554	0.0022	0.5365	0.0182	0.0702	0.0009	430	85	436	12	437	5
14XTS-79A-12	179	185	0.97	0.0556	0.0042	0.5364	0.0388	0.0700	0.0014	434	160	436	26	436	8
14XTS-79A-13	254	190	1.34	0.0613	0.0031	0.5694	0.0260	0.0673	0.0010	651	104	458	17	420	6
14XTS-79A-14	134	278	0.48	0.0553	0.0050	0.5338	0.0463	0.0700	0.0017	425	190	434	31	436	10
14XTS-79A-15	88	199	0.44	0.0553	0.0027	0.5381	0.0234	0.0706	0.0010	423	104	437	15	440	6
14XTS-79A-16	45	69	0.64	0.0556	0.0053	0.5362	0.0493	0.0699	0.0015	436	199	436	33	436	9
14XTS-79A-17	118	124	0.94	0.0640	0.0056	0.6039	0.0504	0.0684	0.0016	743	174	480	32	426	10
14XTS-79A-18	73	98	0.74	0.0588	0.0034	0.5635	0.0300	0.0695	0.0011	560	120	454	19	433	7
14XTS-79A-19	69	75	0.91	0.0558	0.0045	0.5255	0.0408	0.0683	0.0014	443	171	429	27	426	8
14XTS-79A-20	83	85	0.97	0.0564	0.0038	0.5206	0.0330	0.0669	0.0012	469	143	426	22	417	7
14XTS-79A-21	92	212	0.43	0.0582	0.0023	0.5502	0.0187	0.0686	0.0009	536	85	445	12	428	5
14XTS-79A-22	134	136	0.99	0.0582	0.0027	0.5497	0.0231	0.0685	0.0009	538	100	445	15	427	6
14XTS-79A-23	63	98	0.65	0.0562	0.0033	0.5162	0.0286	0.0666	0.0010	461	127	423	19	415	6
14XTS-79A-24	55	86	0.64	0.0566	0.0044	0.5271	0.0391	0.0676	0.0013	473	164	430	26	422	8

表 2 巴音布鲁克岩体锆石 Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon Hf isotopic data for the Bayinbuluke monzogranite and K-feldspar granite

测点号	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (t)	2σ	T _{DM1}	T _{DM2}	f _{Lu/Hf}
14XTS-97A									
14XTS-97A-02	0.029932	0.001368	0.282274	0.000013	-6.78	0.5	1392	1631	-0.96
14XTS-97A-05	0.030071	0.001409	0.282267	0.000011	-8.09	0.4	1405	1658	-0.96
14XTS-97A-08	0.039475	0.001699	0.282275	0.000010	-6.85	0.3	1403	1635	-0.95
14XTS-97A-10	0.032333	0.001507	0.282284	0.000010	-7.49	0.4	1383	1628	-0.95
14XTS-97A-11	0.068885	0.002693	0.282274	0.000012	-7.24	0.4	1443	1654	-0.92
14XTS-97A-12	0.015020	0.000620	0.282368	0.000011	-4.24	0.4	1235	1464	-0.98
14XTS-97A-13	0.088036	0.003541	0.282328	0.000014	-5.61	0.5	1397	1571	-0.89
14XTS-97A-14	0.031983	0.001458	0.282283	0.000010	-7.52	0.4	1383	1630	-0.96
14XTS-97A-17	0.033887	0.001609	0.282296	0.000012	-6.09	0.4	1370	1596	-0.95
14XTS-97A-18	0.025081	0.001195	0.282271	0.000013	-7.87	0.5	1390	1647	-0.96
14XTS-97A-19	0.026182	0.001296	0.282250	0.000010	-8.65	0.3	1424	1687	-0.96
14XTS-97A-20	0.027950	0.001332	0.282255	0.000009	-8.46	0.3	1418	1677	-0.96
14XTS-79A									
14XTS-79A-02	0.023508	0.000895	0.282417	0.000012	-3.32	0.43	1175.81	1390.05	-0.97
14XTS-79A-03	0.016604	0.000672	0.282362	0.000010	-5.20	0.35	1245.04	1485.41	-0.98
14XTS-79A-04	0.023773	0.000971	0.282404	0.000012	-3.82	0.42	1196.76	1415.03	-0.97
14XTS-79A-06	0.030340	0.001212	0.282433	0.000012	-2.85	0.43	1163.16	1365.80	-0.96
14XTS-79A-07	0.016741	0.000687	0.282397	0.000009	-3.99	0.32	1197.95	1424.02	-0.98
14XTS-79A-08	0.024802	0.001042	0.282408	0.000011	-3.69	0.40	1193.13	1408.52	-0.97
14XTS-79A-09	0.017724	0.000707	0.282386	0.000012	-4.38	0.43	1213.54	1443.67	-0.98
14XTS-79A-10	0.089104	0.003073	0.282378	0.000015	-5.33	0.54	1305.08	1491.34	-0.91
14XTS-79A-11	0.033350	0.001215	0.282383	0.000008	-4.61	0.29	1233.29	1455.26	-0.96
14XTS-79A-12	0.025613	0.001024	0.282441	0.000012	-2.53	0.42	1146.71	1349.43	-0.97
14XTS-79A-13	0.036394	0.001430	0.282441	0.000012	-2.63	0.44	1158.53	1354.48	-0.96
14XTS-79A-14	0.016452	0.000668	0.282392	0.000010	-4.13	0.35	1203.07	1431.14	-0.98
14XTS-79A-15	0.024666	0.000983	0.282403	0.000009	-3.83	0.31	1197.61	1415.81	-0.97
14XTS-79A-17	0.023311	0.000959	0.282445	0.000013	-2.36	0.45	1139.02	1341.12	-0.97
14XTS-79A-18	0.022824	0.000924	0.282448	0.000011	-2.24	0.40	1133.43	1334.77	-0.97
14XTS-79A-19	0.021785	0.000911	0.282425	0.000012	-3.03	0.42	1164.66	1375.28	-0.97
14XTS-79A-20	0.026694	0.001081	0.282400	0.000012	-3.97	0.42	1205.13	1422.88	-0.97
14XTS-79A-22	0.031231	0.001286	0.282449	0.000014	-2.30	0.48	1142.60	1337.74	-0.96
14XTS-79A-23	0.029489	0.001239	0.282414	0.000016	-3.53	0.55	1190.70	1400.28	-0.96
14XTS-79A-24	0.018322	0.000777	0.282448	0.000013	-2.19	0.47	1128.84	1332.38	-0.98

3.3 主量元素特征

分别选择二长花岗岩和钾长花岗岩代表性样品各 5 件,开展全岩和微量元素地球化学分析(表 3)。与岩相学分析相同,主元素特征也将岩体分为二长花岗岩和钾长花岗岩两类(图 5a)。其中,二长花岗岩有中等含量的硅, SiO₂ = 67.95% ~ 69.10%, 相对高铝(Al₂O₃ = 14.60% ~ 15.62%), 略高钾(K₂O/Na₂O = 0.99 ~ 1.18)、MgO(1.11% ~ 1.40%)、CaO(1.74% ~ 2.84%) 和铁(TFe₂O₃ = 3.27% ~ 3.77%), 铝饱和指数 A/CNK = 1.03 ~ 1.14, 利特曼指数 s = 1.67 ~ 2.27, 分异指数 DI = 71.65 ~ 76.73, 属过铝质高钾钙碱性岩系(图 5b, c, d)。而钾长花岗岩明显富硅(SiO₂ = 76.06% ~ 77.40%)、碱和高钾(K₂O = 4.83% ~ 5.57%, K₂O/Na₂O = 1.33 ~ 1.76), 铝中等偏低(Al₂O₃ = 11.28% ~

12.28%)、显著低镁(MgO = 0.07% ~ 0.08%) 和钙(CaO = 0.18% ~ 1.03%), 其 A/CNK = 0.92 ~ 1.03, s = 1.93 ~ 2.42, DI = 94.31 ~ 95.52, 为分异较高的准铝到过铝质高钾钙碱性和橄榄玄粗岩系列岩石(图 5b, c, d)。总体上, 两类岩石均表现了准铝到过铝质高钾钙碱性系列岩石的特征(图 5), 只是二长花岗岩相对低硅、高铝, 具中等分异度, 而钾长花岗岩高硅、富碱, 相对低铝, 分异度较高。

3.4 微量元素特征

二长花岗岩具中等含量的稀土总量(ΣREE = 132.17 × 10⁻⁶ ~ 190.23 × 10⁻⁶) 和中等程度的轻重稀土分馏(La_N/Yb_N = 9.56 ~ 13.15), 弱的铈负异常(δEu = 0.63 ~ 0.71), 呈现了中等轻重稀土分馏、右倾弱铈负异常稀土谱型(图 6a)。微量元素地幔标准化蛛网图显示了相对富集 Rb、Ba、U、K、Pb 等大

表3 巴音布鲁克岩体主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果
Table 3 Major (%) and trace element ($\times 10^{-6}$) analytic data of the Bayinbuluk granitic pluton

岩性 样号	二长花岗岩					钾长花岗岩				
	14XTS-97	14XTS-98	14XTS-99	14XTS-100	14XTS-101	14XTS-79	14XTS-80	14XTS-86	14XTS-83	14XTS-84
SiO ₂	68.90	68.19	69.10	67.95	68.20	76.79	76.06	77.40	75.60	77.08
TiO ₂	0.41	0.45	0.44	0.37	0.43	0.12	0.13	0.02	0.19	0.07
Al ₂ O ₃	14.60	15.09	14.80	15.62	15.01	11.28	12.21	12.01	12.28	11.54
Fe ₂ O ₃ ^T	3.30	3.77	3.44	3.27	3.59	0.84	1.00	1.06	1.71	1.97
MnO	0.07	0.12	0.08	0.08	0.09	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01
MgO	1.22	1.40	1.14	1.11	1.32	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07
CaO	2.16	1.74	2.98	2.57	2.84	1.03	0.73	0.35	0.36	0.18
Na ₂ O	3.52	3.47	3.12	3.56	3.35	2.92	3.21	3.63	3.31	3.35
K ₂ O	3.52	4.09	3.49	3.59	3.33	5.15	5.41	4.83	5.57	4.95
P ₂ O ₅	0.11	0.12	0.12	0.10	0.12	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
LOI	1.89	1.68	0.92	1.47	1.25	1.35	1.06	0.50	0.83	0.66
Total	99.70	100.12	99.63	99.69	99.53	99.59	99.91	99.89	99.94	99.89
K ₂ O/Na ₂ O	1.00	1.18	1.12	1.01	0.99	1.76	1.69	1.33	1.68	1.48
A/NK	1.52	1.49	1.66	1.6	1.65	1.09	1.1	1.07	1.07	1.06
A/CNK	1.08	1.14	1.03	1.08	1.05	0.92	0.98	1.02	1.01	1.03
V	43.7	46.6	46.9	42.9	57.8	2.73	3.20	1.47	4.44	2.23
Cr	6.31	3.65	3.89	4.81	4.36	7.45	2.07	10.2	1.93	4.33
Co	43.8	43.2	49.9	50.9	49.5	63.9	66.2	64.0	62.4	64.2
Ni	4.47	2.79	3.36	3.88	3.55	5.70	2.62	7.19	2.42	4.79
Cu	2.18	7.40	4.79	2.95	4.23	3.60	2.83	2.70	3.56	4.26
Ga	18.3	18.6	18.7	18.7	18.9	15.2	16.4	18.1	15.1	12.7
Rb	110	143	108	108	101	165	175	185	181	148
Sr	338	322	367	442	383	42.1	42.6	16.7	38.2	19.3
Y	23.4	25.0	25.3	19.0	25.0	31.8	29.7	26.9	24.2	25.8
Zr	165	160	167	166	184	167	195	133	231	85.0
Nb	22.9	24.9	24.5	17.5	24.1	10.8	11.6	11.7	12.3	8.07
Cs	1.50	1.94	1.79	1.75	1.88	1.58	1.68	1.85	2.40	2.19
Ba	829	1154	952	893	887	141	155	81.2	158	51.8
La	40.7	34.3	40.6	29.2	31.9	72.5	68.7	20.2	69.0	28.7
Ce	78.9	70.9	84.5	55.9	63.4	137	129	48.0	142	56.1
Pr	8.53	7.67	8.80	6.24	7.22	14.8	14.0	6.44	14.00	6.91
Nd	30.7	28.8	32.3	22.9	27.2	50.9	48.4	25.9	48.2	26.3
Sm	5.57	5.69	6.12	4.45	5.37	8.44	7.85	6.50	7.80	5.59
Eu	1.13	1.17	1.22	0.99	1.12	0.27	0.29	0.19	0.32	0.22
Gd	4.90	5.10	5.45	3.94	4.83	7.07	6.57	5.85	6.48	5.10
Tb	0.72	0.76	0.79	0.57	0.73	1.04	0.95	0.90	0.89	0.79
Dy	4.06	4.40	4.49	3.28	4.22	6.06	5.43	5.14	4.94	4.50
Ho	0.77	0.83	0.84	0.63	0.81	1.19	1.07	1.00	0.93	0.90
Er	2.19	2.33	2.37	1.81	2.34	3.31	2.97	2.79	2.55	2.51
Tm	0.32	0.34	0.34	0.26	0.34	0.46	0.43	0.42	0.36	0.37
Yb	2.09	2.19	2.20	1.72	2.25	2.81	2.59	2.69	2.21	2.31
Lu	0.32	0.33	0.32	0.26	0.33	0.39	0.37	0.41	0.31	0.34
Hf	4.63	4.47	4.55	4.56	4.93	4.84	5.55	6.43	6.68	3.18
Ta	1.85	1.94	1.95	1.45	1.91	0.97	1.06	1.21	1.19	0.57
Pb	21.7	94.0	23.7	22.2	21.1	12.2	12.7	12.0	13.2	12.1
Th	18.5	15.9	19.3	12.5	11.9	11.0	11.3	31.4	10.9	18.0
U	3.01	2.74	2.42	2.49	2.44	1.43	2.07	2.83	3.45	1.96
∑REE	181	165	190	132	152	306	288	126	300	141
(La/Yb) _N	13.15	10.57	12.45	11.41	9.56	17.42	17.86	5.06	21.04	8.39
δEu	0.65	0.65	0.63	0.71	0.66	0.10	0.12	0.09	0.13	0.12

离子亲石元素,一定程度亏损 Nb、Ta、Ti 和 P 等高场强元素亏损(图 6b)。

与二长花岗岩相比,钾长花岗岩的稀土总量较高($\sum \text{REE} = 126.43 \times 10^{-6} \sim 306.12 \times 10^{-6}$),轻重

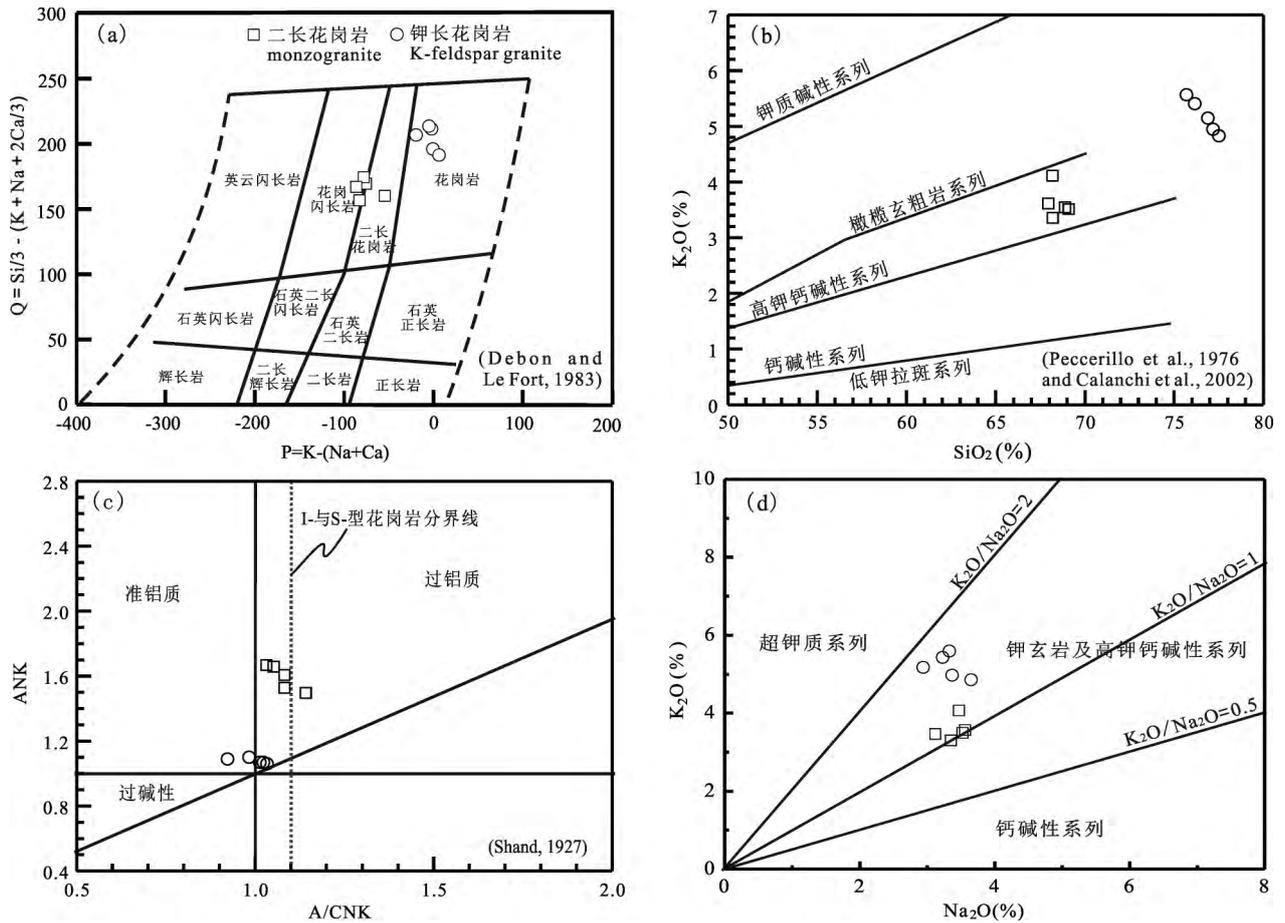


图 5 巴音布鲁克岩体岩石元素判别图

Fig. 5 Granitoids discrimination diagrams of the Bayinbuluke monzogranite and K-feldspar granite

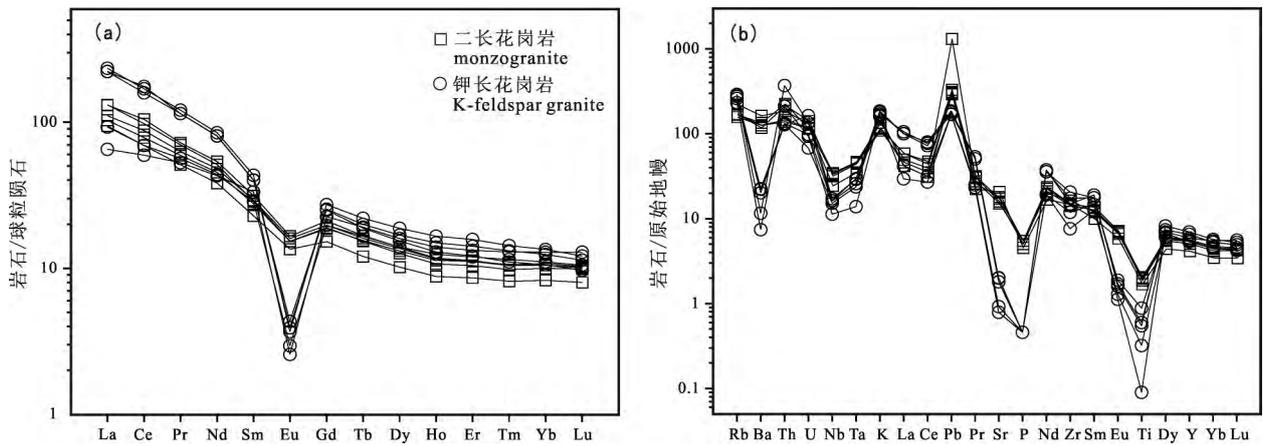


图 6 巴音布鲁克岩体稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化数据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagrams (b) for the Bayinbuluke monzogranite and K-feldspar granite(normalized values from Sun and McDonough, 1989)

稀土中等分馏($La_N/Yb_N=5.06\sim 21.04$),强烈负铕异常($\delta Eu=0.09\sim 0.13$),显示了轻重稀土中度分馏、强负铕异常的右倾稀土谱型(图 6a)。微量元素原始地幔标准化蛛网图也显示了富集 Rb、Th、U、K、Pb 等元素,一定程度亏损 Nb、Ta 和强烈亏损

Sr、Ba、Eu 和 P、Ti 等元素(图 6b)。

4 讨论

4.1 岩体形成时代

有关巴音布鲁克岩体的形成时代,在巴音布鲁

表 4 南天山及中天山南缘早古生代花岗岩年龄统计

Table 4 The age of early Paleozoic granitoids from the southern margin of the central Tianshan and south Tianshan

构造带	岩体	岩性	年龄(Ma)	资料来源
中天山	那拉提岩体	黑云母二长花岗岩	497±6	Xu Xueyi et al. ,2013
	艾西买依根岩体	二云母花岗岩	490±13	Han Baofu et al. ,2004
	森木塔斯岩体	花岗闪长岩	485±15	Xu Xueyi et al. ,2010
	科桑溶洞岩体	花岗岩	481±4	Zhu Yongfeng et al. ,2012
	桑树园子岩体	花岗闪长岩	481±17	Li Qiugen et al. ,2009
	比开岩体	花岗岩	479±2	Gao Jun et al. ,2008
	桑树园子岩体	花岗岩	476±2	Huang Gang et al. ,2012
	巴伦台岩体	花岗闪长岩	475±2	Ma Xuxuan et al. ,2013
	巴伦台岩体	闪长岩	474±2	Ma Xuxuan et al. ,2013
	巴伦台岩体	花岗闪长岩	473±6	Shi Yuruo et al. ,2014
	夏特岩体	闪长岩	470±12	Qian Qing et al. ,2007
	天湖岩体	花岗岩	467±10	Hu Aiqin et al. ,2007
	桑树园子岩体	黑云母花岗岩	458±9	Shi Yuruo et al. ,2014
	包尔图岩体	花岗岩	456±2	Wang Xingjun et al. ,2011
	巴伦台岩体	黑云母花岗岩	456±1	Han Baofu et al. ,2004
	巴伦台岩体	辉长岩	452±1	Zhong Linglin et al. ,2015
	巴伦台岩体	花岗闪长岩	451±3	Ma XuXuan et al. ,2014
	乔霍特岩体	花岗闪长岩	451±3	Zhang xi et al. ,2011
	库米什岩体	黑云母二长花岗岩	446±2	Chen Bei et al. ,2015
	巴伦台岩体	闪长岩	445±1	Zhong Linglin et al. ,2015
	巴伦台岩体	辉长岩	442±7	Shi Yuruo et al. ,2014
	冰达坂	花岗岩	442±4	Zhu Yongfeng et al. ,2006
	红柳河岩体	花岗岩	441±3	Li Wuping et al. ,2001
	红柳河岩体	闪长岩	441±2	Li Wuping et al. ,2001
	巴伦台南岩体	花岗闪长岩	440±0	Li Ping et al. ,2011
	巴伦台岩体	辉长岩	439±1	Zhong Linglin et al. ,2015
	夏特东南岩体	花岗闪长岩	437±1	Long Lingli et al. ,2011
	恰布河岩体	二长花岗岩	436±8	Zhu Zhixin et al. ,2006
	巴伦台岩体	钾长花岗岩	434±4	Ma XuXuan et al. ,2014
	科克苏河东岸岩体	花岗岩	433±6	Gao Jun et al. ,2008
	哈拉温克尔岩体	黑云母二长花岗岩	432±11	Xu Xueyi et al. ,2010
	乔霍特岩体	钾长花岗岩	431±6	Zhang Xi et al. ,2011
	库米什岩体	黑云母钾长花岗岩	431±3	Chen Bei et al. ,2015
	穹库什太岩体	碱性花岗岩	430±8	Long Lingli et al. ,2011
	那拉提岩体	花岗闪长岩	430±7	Xu Xueyi et al. ,2010
	巴伦台岩体	花岗岩	430±2	Zhong Linglin et al. ,2015
	巴伦台岩体	闪长岩	430±1	Zhao Yijue et al. ,2015
	森木塔斯岩体	辉长岩	429±5	Xu Xueyi et al. ,2013
	甘沟岩体	花岗岩	428±10	Shi Yuruo et al. ,2007
	森木塔斯岩体	石英闪长岩	427±9	Xu Xueyi et al. ,2010
	小盐池岩体	二长闪长岩	427±8	Wang Degui et al. ,2006
	恰布河岩体	白云母花岗岩	427±6	Xu Xueyi et al. ,2013
	穹库什台北岩体	二长花岗岩	427±10	Li Ping et al. ,2011
	星星峡岩体	花岗闪长岩	425±6	Lei Ruxiong et al. ,2011
	马鞍桥岩体	花岗岩	425±3	Dong Yunpeng et al. ,2011
	哈布腾苏岩体	酸性火山岩	425±3	Pu Xiaofei et al. ,2011
	哈布腾苏岩体	酸性火山岩	425±3	Pu Xiaofei et al. ,2011
	巴伦台岩体	闪长岩	425±1	Zhong Linglin et al. ,2015
	星星峡岩体	石英闪长岩	425±0	He Zhengyu et al. ,2012
	巴伦台南岩体	闪长岩	424±4	Li Ping et al. ,2011
卡瓦拉克岩体	花岗岩	424±3	Peng Mingxing et al. ,2012	
库米什岩体	花岗岩	424±1	Xu Xueyi et al. ,2006	
科布尔特岩体	酸性火山岩	423±2	Pu Xiaofei et al. ,2011	
科布尔特岩体	酸性火山岩	423±2	Pu Xiaofei et al. ,2011	

续表 4

构造带	岩体	岩性	年龄(Ma)	资料来源
	戈伦唐古什岩体	斜长花岗岩	421±11	Han Baofu et al. ,2004
	科克苏河东岸岩体	辉长闪长岩	420±4	Li Ping et al. ,2011
	巴伦台岩体	辉长岩	420±1	Zhong Linglin et al. ,2015
	比开岩体	花岗闪长岩	419±2	Long Lingli et al. ,2007
	巴伦台岩体	花岗岩	417±1	Zhong Linglin et al. ,2015
	古洛沟岩体	斜长花岗岩	416±4	Jiang Tuo et al. ,2015
	比开岩体	花岗岩	413±1	Long Lingli et al. ,2007
	库米什岩体	二云母花岗岩	407±3	Chen Bei et al. ,2015
南天山	巴雷公岩体	火山岩	450±2	Wang Chao et al. ,2008
	库尔干南岩体	石英闪长岩	426±2	夏林圻,2007
	库尔干南岩体	斜长花岗岩	425±2	夏林圻,2007
	黄尖石山岩体	花岗岩	423±16	Zhang Chengli et al. ,2007
	欧西达坂岩体	二长花岗岩	421±3	Wang Chao et al. ,2008
	铁门关岩体	花岗闪长岩	421±2	Ge Rongfeng et al. ,2012
	铁门关东南岩体	花岗闪长岩	419±3	Guo Riqing et al. ,2013
	博斯腾乡岩体	石英闪长岩	418±3	Guo Riqing et al. ,2013
	库勒湖蛇绿岩	辉长岩	418±3	Ma Zhongping et al. ,2007
	欧西达坂岩体	石英闪长岩	418±2	Zhang Bin et al. ,2014

克幅 1 : 20 万地质图中将其界定为晚古生代花岗岩侵入体,在 1 : 100 万中国天山及邻区地质图(2007)中将其归为泥盆纪花岗岩体,这些限定基本是区域对比的结果,缺乏同位素年代学定年数据的支持。本文通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得该岩体二长花岗岩 465Ma 的形成年龄和保存有 513Ma 岩浆活动信息的年龄,钾长花岗岩的形成年龄为 430Ma,证明该岩体是一个早古生代中奥陶世—中志留世期间由不同期次花岗岩浆活动形成的复式花岗岩体。近年来,在中天山南缘陆续确定存在大量早古生代花岗岩类侵入体(Han Baofu et al. ,2004; Zhu Yongfeng et al. ,2005; Xu Xueyi et al. ,2006; Yang Tiannan et al. ,2006; Long Lingli et al. ,2007; Qian Qin et al. ,2007; Gao Jun et al. ,2008; Xu Xueyi et al. ,2010; Zhang Xi et al. ,2011; Li Ping et al. ,2011; Long Lingli et al. ,2011; Zhu Yongfeng et al. ,2012; Xu Xueyi et al. ,2013; Tian Yazhou et al. ,2014; Chen Bei et al. ,2015; Zhong Linglin et al. ,2015),在南天山北缘库米什地区阿克塔西片麻状花岗岩和黄尖石山花岗岩体也分别获得 458Ma(Han Baofu et al. ,2004)和 423Ma(Zhang Chengli et al. ,2007)的形成年龄,巴音布鲁克以东戈伦塔古什片麻状花岗岩体得到 421Ma 的形成年龄(Han Baofu et al. ,2004)。此外,并在南天山南部博斯腾湖南及西部等地也识别出一些形成于 490~418Ma 期间的早古生代花岗岩(Han Baofu et al. ,2004; 夏林圻,2007; Ge Rongfeng et al. ,2012; Guo Ruiqing et al. ,2013; Zhang Bin et al. ,2014)

(表 4),证明在早古生代期间南天山北部和南部与中天山南缘一同发生了重要的花岗岩类构造岩浆热事件,并在 424Ma 的晚志留世达到峰期(图 7)。

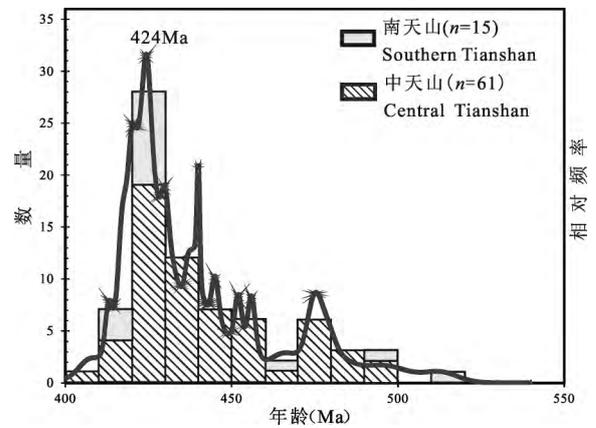


图 7 南天山及中天山南缘早古生代花岗岩年龄频率图
Fig. 7 The age frequency diagram of early Paleozoic granitoids in the south Tianshan and southern margin of the central Tianshan

4.2 岩石成因类型

巴音布鲁克岩体二长花岗岩硅含量中等($SiO_2 = 67.95\% \sim 69.10\%$),略高铝($Al_2O_3 = 14.60\% \sim 15.62\%$, $ACNK = 1.03 \sim 1.14$)和钾($K_2O/Na_2O = 0.99 \sim 1.18$),相对高钙、镁和铁, FeO^T/MgO 比值低($2.69 \sim 3.02$);稀土含量中等($132.17 \times 10^{-6} \sim 190.23 \times 10^{-6}$),具轻重稀土中度分馏弱负异常的右倾谱型(图 6a);微量元素明显富集 Rb、Ba、Sr、K、Pb 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素(图 6b),显示过铝质高钾钙碱性花岗岩的地球

化学特征。矿物组合为斜长石+微斜长石+石英+角闪石和黑云母,副矿物有锆石、磷灰石和磁铁矿,显示I型花岗岩矿物组合特征。由Miller等(2003)的锆饱和温度计算公式 $t_{Zr} = 129000/[2.95 + 0.85M + \ln(496000/Zr_{\text{熔体}})]$ 计算获得的温度为785~794°C,与冷花岗岩形成温度范围一致。岩体中继承锆石的出现指示岩浆中的锆处于饱和状态,由锆饱和岩浆计算获得的温度可近似代表花岗岩类的近液相线的温度(Miller et al., 2003)。巴音布鲁克二长花岗岩中出现继承锆石,指示岩浆中的锆是饱和的,计算所得低于800°C温度代表其近液相线温度,因此表明该岩体是含水条件下部分熔融形成的冷花岗岩,这与二长花岗岩中存在大量角闪石和黑云母等含水矿物相一致。

与二长花岗岩明显不同,巴音布鲁克岩体钾长花岗岩明显高硅($SiO_2 = 75.60\% \sim 77.40\%$)、富钾($K_2O/Na_2O = 1.33 \sim 1.76$),贫钙、铁、镁,为准铝到弱过铝质($A/CNK = 0.92 \sim 1.03$)高钾钙碱性系列岩石(图5c)。岩石矿物组成由钾长石(微斜长石)+斜长石+石英和黑云母及少量锆石、磷灰石组成,无白云母和石榴石等原生富铝矿物出现,他们的 P_2O_5 与 SiO_2 不存在S型花岗岩的正相关关系,也呈现了I型花岗岩的成因特征。这种高钾I型花岗岩被认为是地壳中含水的陆下岩石圈地幔派生的钙碱性到高钾钙碱性镁铁质—中性变火成岩部分熔融所形成(Roberts and Clemens, 1993)。然而,钾长花岗岩相对高 $FeO^T/MgO(10.50 \sim 28.14)$ 和 Rb/Sr 比值($3.92 \sim 11.08$),富集 Rb, Th, U, K 等元素,显著亏损 Ba, Sr, P, Eu 和 Ti (图6),较其他花岗岩类富 K, Rb ,低 Ca, Na, Al, Fe, Mg 和 Ti (图8),分异指数 DI 高达95.52,说明中基性岩部分熔融形成的岩浆又经历了进一步的分异与演化。通常,斜长石分离结晶致使 Ca, Sr 和 Ba 随 SiO_2 增加而降低的同时也造成 Eu 明显亏损, Ti 和 P 的负异常则是含钛矿物(如钛铁矿)和磷灰石分离结晶的结果。因此,巴音布鲁克钾长花岗岩高度富钾($4.83\% \sim 5.57\%$)和很低含量的 $P_2O_5(0.01\%)$ 、 $TiO_2(0.02\% \sim 0.19\%)$ 以及强烈的铕负异常($\delta Eu = 0.09 \sim 0.12$)显然是岩浆演化过程经历了斜长石、磷灰石和含钛副矿物(如钛铁矿)等矿物分离结晶作用的结果,从而也导致了他们较其他长英质岩类更为富钾。另一方面,由于经过高度分异而形成的I型花岗岩,其矿物组成和化学成分都趋近于低共结花岗岩组成,在很大程度上往往会表现出与A型花岗岩十分类似的地球化

学特征(Wu Fuyuan et al., 2007)。但通常情况下,A型花岗岩与高度分异的花岗岩类相比,显著富铁($Fe/Mg > 10$),高 Ga/Al 比值($10000 \times Ga/Al \geq 2.60$),富 $Zr + Nb + Ce + Y$ 等高场强元素(Whalen et al., 1987)。巴音布鲁克钾长花岗岩尽管有较高的 FeO^T/MgO 比值($10.50 \sim 28.14$),但他们的 Ga/Al 比值和 $Zr + Nb + Ce + Y$ 含量均低于A型花岗岩对应值(图9b),高的 FeO^T/MgO 比值显然是岩浆高度分异演化过程富镁矿物分离结晶所致。此外,根据锆饱和温度计算获得的巴音布鲁克钾长花岗岩形成温度介于739~821°C之间,多低于高形成温度($> 800^\circ C$)的A型花岗岩类(Dall'agnol et al., 1999)。因此,巴音布鲁克钾长花岗岩主要是低温、含水条件下钙碱性—高钾钙碱性中基性火成岩发生部分熔融的岩浆又经历了以斜长石为主要矿物相的分离结晶作用高度分异演化后所形成,因而也致使他们与二长花岗岩不同,均已发生了分异的钙碱性花岗岩为特征(图9)。

4.3 源区讨论

锆石高 Hf 、低 Lu ,具很低的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值,其形成后基本无放射性成因 Hf 的积累。此外,锆石高的封闭温度和极高的稳定性决定了后期构造热事件难于对 $Lu-Hf$ 同位素体系造成大影响,因此测定的锆石 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值可代表其形成时体系的 Hf 同位素组成,从而有效记录岩浆源区的特征(Griffin et al., 2002; Wu Fuyuan et al., 2007)。一般说来,正的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值代表来自亏损幔源物质或新生地壳的源区,负的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值指示来自古老陆壳岩石源区,变化范围很大的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值则是不同物质源区混合作用的结果(Kröner et al., 2014)。

巴音布鲁克二长花岗岩锆石 Hf 同位素组成较均一, $^{176}Hf/^{177}Hf = 0.282274 \sim 0.282328$,由其形成年龄计算获得的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 均为负值,变化于 $-8.89 \sim -6.80$ 之间;另一组继承锆石的 $^{176}Hf/^{177}Hf = 0.282250 \sim 0.282368$, $\epsilon_{Hf}(t) = -7.63 \sim -3.20$,在 $t-\epsilon_{Hf}(t)$ 图解中均落在1.45 Ga地壳演化线以上(图10)。两组锆石的 Hf 陆壳模式年龄 T_{DM}^C 分别为1.58~1.69 Ga和1.45~1.67 Ga,明显高于岩体形成年龄,指示主要源自中元古代地壳物质的部分熔融。同样,巴音布鲁克钾长花岗岩的锆石也表现了较为均一的 Hf 同位素组成,其 $^{176}Hf/^{177}Hf = 0.282362 \sim 0.282448$, $\epsilon_{Hf}(t) = -5.33 \sim -2.19$, $T_{DM}^C = 1.33 \sim 1.49$ Ga,也证明是中元古代地壳物质部分熔融的产物。两类花岗岩的 Th/U 和 Nb/Ta

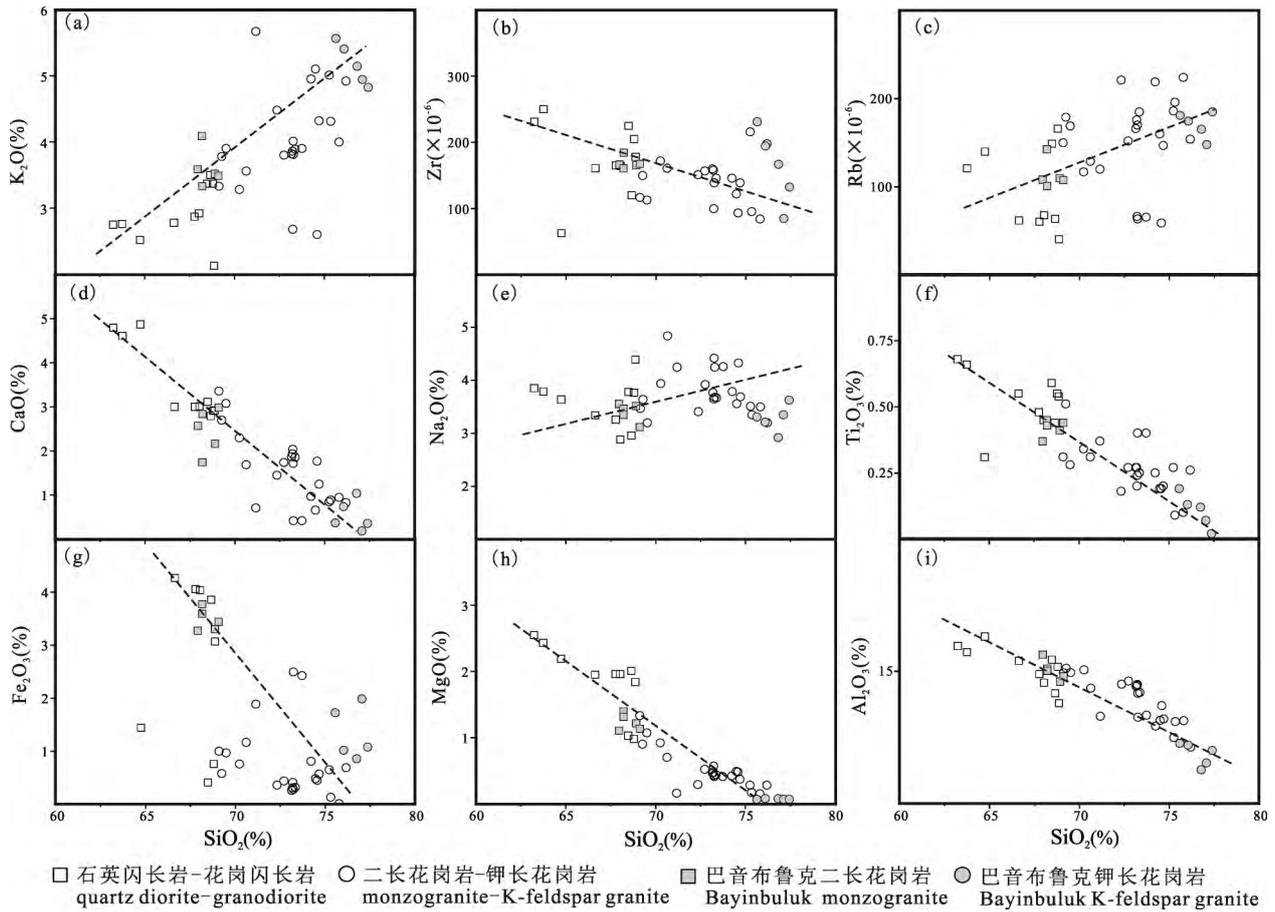


图 8 巴音布鲁克岩体哈克图解

Fig. 8 Harker diagrams for the Bayinbuluke monzogranite and K-feldspar granite

数据来自 Zhang Xi et al., 2011; Xu Xueyi et al., 2013 和本文

Data from Zhang Xi et al., 2011; Xu Xueyi et al., 2013 & this paper

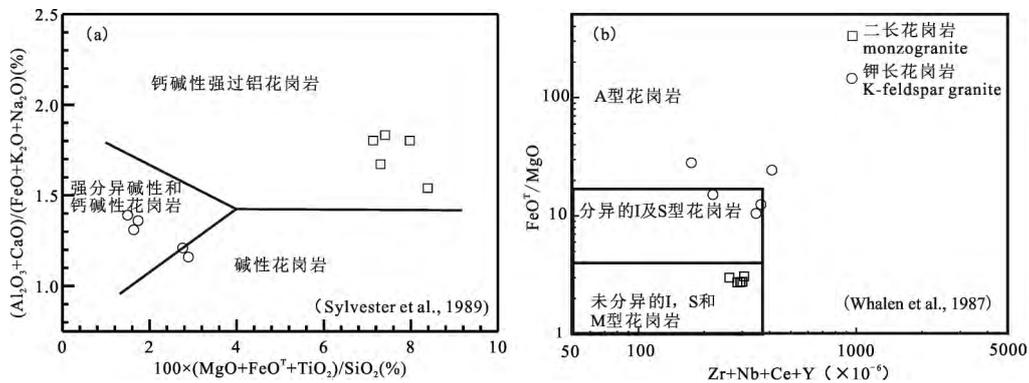


图 9 巴音布鲁克花岗岩成因类型判别图解

Fig. 9 Discrimination diagrams of the Bayinbuluke granitoid

比值分别为 4.88~7.98, 12.08~12.84 和 3.15~11.08, 9.62~14.23, 明显高于幔源岩石 Th/U (≈ 4)、低于 Nb/Ta (≈ 17.4) 比值 (Sun S S et al., 1989), 接近于下地壳岩石的 Th/U (≈ 6.0), Nb/Ta (≈ 8.3) 比值 (Rudnick and Gao, 2003), 证明该岩体

物质主要源自下地壳物质。然而,在 $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解中尽管钾长花岗岩锆石 Hf 组分落在 1.45 Ga 地壳演化线之上,但却明显偏离二长花岗岩 Hf 同位素组分演化趋势,分布在相对靠近球粒陨石演化线的区域 (图 10), 反映二者的源区组分存在一定差异。在

岩体成分变异图解中,两类岩石之间也存在一明显的成分间断,未构成线性演化关系(图8),也排除二者为同源岩浆演化的结果。然而,与该岩体有类似Hf同位素组成特征的花岗岩类在南天山北部的库米什南部也有发育(Chen Bei et al., 2015),而且该区同期花岗岩的Nd同位素组成也指示其他来自中元古代陆壳物质(Zhang Chengli et al., 2007),暗示巴音布鲁克钾长花岗岩有可能与这些花岗岩浆活动存在成因关系,并可能来自类似的物质源区。前人在中天山基底岩石中获得了1.40~1.45 Ga的花岗岩形成年龄(Hu Ai qin et al., 2007; He Zhenyu et al., 2015),在侵入于这些基底中的古生代花岗岩中也发现了1.4~1.7 Ga的继承锆石(He Zhenyu et al., 2012),证明了中元古代古老基底岩石的广泛存在,他们的Nd同位素组成指示这些基底岩石可能在1.8 Ga前已形成(Hu Ai qin et al., 1999; Chen Yibing et al., 2000)。近年来,也在西天山地区的中天山构造带陆续也发现大量形成于新元古代早期(1.0~0.7 Ga)的片麻状花岗岩(Yang Tiannan et al., 2008; Hu Ai qin et al., 2010; Wang Bo et al., 2014a; Chen Xinyue et al., 2009; Gao Jun et al., 2015; Huang Zongying et al., 2015),并在其西延的吉尔吉斯斯坦境内也有报道(Kröner et al., 2012)。这些花岗岩类以负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和中元古代Hf模式年龄(Kröner et al., 2012, 2013; Gao Jun et al., 2015)为特征,与中天山南缘和南天山北部的早古生代花岗岩同位素特征十分类似(Xu Xueyi et al., 2013; Shi Yuruo et al., 2014; Zhong Linglin L et al., 2015),均反映为中元古代陆壳物质再造的产物,同样证明了中、南天山存在类似的中元古代基底物质。最近,对南天山北缘榆树沟麻粒岩-橄辉岩地体研究也揭示中、南天山曾可能同属一个地块(Ji Shaocheng et al., 2014),可能于新元古代早期由于罗迪尼亚超大陆的裂解而相互分离,此后再度汇聚拼合而成为一体(Kröner et al., 2012; He Guoqi et al., 2001)。

4.4 形成构造环境

形成于465 Ma的巴音布鲁克岩体二长花岗岩体具明显的片麻状构造,指示形成于汇聚挤压的构造环境,矿物组成上与高钾钙碱性角闪花岗岩(ACG)矿组成特征一致(Barbarin, 1999),除长英质矿物外,还出现较多黑云母和角闪石含水矿物,锆石饱和温度 $<800^{\circ}\text{C}$,与俯冲消减带含水矿物脱水、流体参与环境下部分熔融形成的地温花岗岩岩浆产

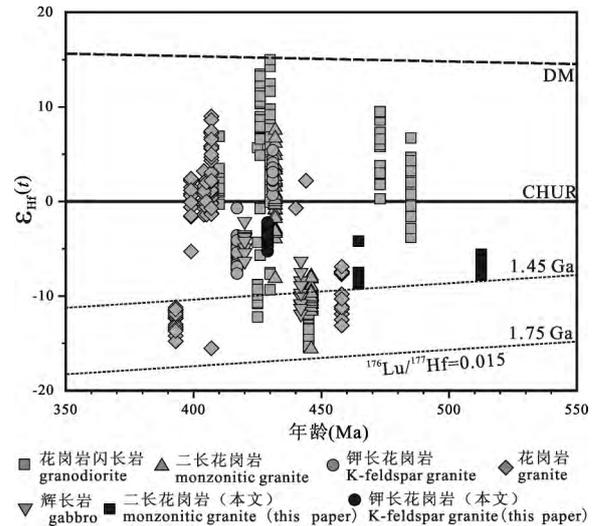


图10 巴音布鲁克岩体锆石年龄- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解

Fig. 10 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. U-Pb age diagram of zircons from Bayinbuluk granitoid

数据来自 Shi Yuruo et al., 2014; Chen Bei et al., 2015; Zhong Linglin et al., 2015 及本文

Data from Shi Yuruo et al., 2014; Chen Bei et al., 2015; Zhong Linglin et al., 2015 & this paper

物特征一致(Miller et al., 2003)。这些岩石具中等含量的硅、相对高镁、铁和钙,富集Rb, Ba, Th, U和K等大离子亲石元素,贫高场强元素,亏损Nb, Ta和Ti, P等元素,具轻重稀土中度分馏、弱负铕异常的稀土模式(图6),显示了大陆边缘消减带岛弧钙碱性花岗岩类地球化学特征(Pearce et al., 1984; Wilson, 1989),在Yb-Ta和(Y+Nb)-Rb图解中较一致的落在火山弧花岗岩区(图11)。类似的花岗岩类在其东部的南天山北缘的库米什南部铜花山一带也广为发育(Zhang Chengli et al., 2007; Yang Jingsui et al., 2011; Chen Bei et al., 2015),在西部查干萨依地区出现430 Ma的与消减有关的镁铁质侵入体(Yang Shenghong et al., 2009),他们一同构成一条长达数百千米的早古生代以辉长岩-花岗岩闪长岩-花岗岩为组合特征的钙碱性花岗岩带。与这些花岗岩类对应,在巴音布鲁克地区还发育与南天山洋盆的俯冲消减有关的晚志留世弧火山岩(Ma Zhongping et al., 2006, 2008),二者共同构成南天山北缘一条早古生代弧岩浆岩带。与南天山北缘这条早古生代弧岩浆岩带相对应,在紧邻巴音布鲁克岩体东北部的乔霍特铜矿地区的中天山南缘,也确定存在与巴音布鲁克岩体形成时代和岩石地球化学特征一致的450 Ma花岗岩闪长岩和431 Ma钾长花岗岩组成的俯冲消减有关的火山弧钙碱性I型花岗

岩(Zhang Xi et al., 2011),并在其东部的库米什和巴伦台地区有大量形成于 450~450 Ma 的花岗闪长岩和二长花岗岩及 430~420 Ma 的钾长花岗岩类出现,他们均显示了与俯冲消减环境形成的花岗岩类类似的岩石地球化学属性,这些岩石的 Hf 同位素变化范围大,出现了负和正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$,这与大陆边缘弧区来自新生幔源岩浆与古老陆壳熔融混合岩浆的 Hf 同位素特征一致(Kröner et al., 2014),揭示这些花岗岩类主要源自中元古代基底陆壳物质部分熔融,同时有新生幔源物质的添加(Ma Xuxuan et al., 2013, 2014; Shi Yuruo et al., 2014; Zhong Linglin et al., 2015; Chen Bei et al., 2015)。在巴音布鲁克西部的西南天山地区也先后确定形成于 450~420 Ma 期间的与大洋俯冲消减有关的类似成因的大陆弧钙碱性花岗岩(Long Lingli et al., 2007; Xu Xueyi et al., 2010; Xu Xueyi et al., 2013),甚至向西出中国国境到吉尔吉斯坦的 Aktyuz 地区还存在 530~450 Ma 的活动陆缘弧的辉长岩和花岗闪长岩类(Kröner et al., 2012)。与该带花岗岩类相伴,在西南天山的哈布腾苏和科普尔特地区还发育一套形成于 427~420 Ma 的由玄武岩,安山岩,英安岩,流纹岩和石英斑岩构成的岛弧火山岩(Pu Xiaofei et al., 2011),进一步西延进入吉尔吉斯坦 Aktyuz 地区也产出有 449 Ma 安山岩和 452 Ma 的流纹岩类(Kröner et al., 2012)。这些形成时代接近、形成环境类似的花岗岩类和火山岩类的时空有序、成带分布,证明沿中天山南缘和南天山北缘确实发育一条宏大的早古生代活动陆缘弧岩浆侵入岩和喷出岩岩带。其中,中天山南缘已知最早的弧岩浆活动在 530 Ma 已开始(Kröner et al., 2012),指示早寒武世中期大洋俯冲消减已开始,而巴音布鲁克岩体二长花岗岩记录的 516 Ma 的继承岩浆锆石的年龄则说明,南天山北缘的俯冲消减作用在中寒武世早期也已发生。

此后至 430 Ma 左右,该岩浆岩带仍持续早期二长花岗岩/或花岗闪长岩类岩浆活动的同时,并开始大量出现诸如巴音布鲁克钾长花岗岩类。前人在中、南天山确定存在 380~490Ma 的钾长花岗岩,但认为他们缺乏典型活动陆缘花岗岩类地球化学特征,并显示铝质 A 型花岗岩成因特征,从而提出可能代表南天山洋南支的扩张或早古生代一次造山晚期伸展环境(Han Baofu et al., 2004)。然而,巴音布鲁克钾长花岗岩富碱,高硅、钾,低镁和钙,相对富集 Rb、Th、U、K 等元素,显示钙碱性—高钾钙碱性

中基性火成岩熔融产物的特征。但他们明显亏损 Nb、Ta 和 Sr, Ba, P 和 Ti 等元素,具轻重稀土中度分馏的强负钕异常的稀土模式(图 6),高 Rb/Sr 比值, $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ 比值低于 A 型花岗岩下限值(2.60)(Whalen et al., 1987),分异指数 DI 高达 95 左右,充分证明他们是中元古代陆壳物质部分熔融的岩浆又发生了一定程度的分离结晶作用,形成的较高分异演化特征的钾长花岗岩。另一方面,与巴音布鲁克岩体相伴的一些早古生代钙碱性花岗闪长岩或二长花岗岩具有较大变化范围偏正和偏负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (图 10),指示了这一时期是一个与弧环境有关的新生幔源岩浆与岛弧基底古老陆壳物质部分熔融岩浆共同活动的结果。因此,本文研究的巴音布鲁克晚期钾长花岗岩及区域上同时代钾长花岗岩的出现可能代表了活动大陆边缘演化至相对晚期、大陆边缘弧成熟度较高阶段弧岩浆发生了一定分异演化而成的 I 型钾长花岗岩,证明这一时期与大洋俯冲消减有关的岩浆活动仍未结束,并可能一直持续到早泥盆世,这与岩浆锆石年龄统计划分的古生代岩浆活动期次结果相一致(Xia Bin et al., 2014)。

5 结论

(1)巴音布鲁克岩体由高钾钙碱性二长花岗岩和钾长花岗岩构成,锆石 U-Pb 定年分别获得 $464.5 \pm 3.5\text{Ma}$ 和 $430.2 \pm 3.2\text{Ma}$ 的形成年龄,代表了南天山早古生代不同阶段岩浆活动的产物,他们与南天山北缘和中天山南缘同期花岗岩类共同构成一条早古生代花岗岩类岩浆带。

(2)巴音布鲁克岩体两类岩石均以相对富集大离子亲石元素、贫高场强元素,亏损 Nb、Ta、Sr、Ti 和 P 的活动陆缘岛弧高钾钙碱性 I 型花岗岩为特征,具负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和老于其形成年龄的 Hf 陆壳模式年龄,为中元古代基底陆壳物质在大洋俯冲消减环境下部分熔融的产物。其中二长花岗岩是南天山洋早期(中奥陶世)俯冲消减过程洋壳脱水引发的弧岩浆产物,钾长花岗岩则是俯冲消减晚期(中志留世)弧岩浆发生结晶分异演化的结果,结合前人在该条岩浆带中确定存在 380Ma 的钾长花岗岩推断,与南天山洋俯冲消减有关的花岗岩浆活动可能一直持续到中泥盆世。

References

- Bai Jianke, Li Zhipei, Xu Xueyi, Sun Jiming, Niu Yazhuo. 2015. Carboniferous volcanic-sedimentary succession and basin

- properties in Ili area, western Tianshan, Xinjiang. *Geological Review*, 61 (1):195~206(in Chinese with English abstract).
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46:605~626.
- Bouvier A, Vervoort J D, Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth & Planetary Science Letters*, 273(1/2):48~57.
- Chen B, Long X P, Yuan C, Wang Y J, Sun M, Xiao W J, Cai K D, Huang Z Y. 2015. Geochronology and geochemistry of Late Ordovician-Early Devonian gneissic granites in the Kumishi area, northern margin of the South Tianshan Belt; Constraints on subduction process of the South Tianshan Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113(1):293~309.
- Chen Xinyue, Wang Yuejun, Sun Llinhua, Fan Weiming. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the granitic gneisses from Bingdaban and Laerdundaban (Tianshan Orogen) and their geological significances. *Geochimica*, 38 (5): 424 ~ 431 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yibing, Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Zhang Qianfeng. 2000. Precambrian basement age and characteristics of Southwestern Tianshan: Zircon U-Pb geochronology and Nd-Sr isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1):91~98(in Chinese with English abstract).
- Dall'agnol R, Scaillet B, Pichavant M. 1999. An Experimental study of a lower Proterozoic A-type granite from the Eastern Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Petrology*, 40(11):1673~1698.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Neubauer F, Liu Xiaoming, Hauzenberger C, Zhou Dingwu, Li Wei. 2011. Syn- and post-collisional granitoids in the Central Tianshan orogen; Geochemistry, geochronology and implications for tectonic evolution. *Gondwana Research*, 20(2~3):568~581.
- Gao Jun, Long Lingli, Klemd R, Qian Qing, Liu Dunyi, Xiong Xiaoming, Su Wen, Liu Wei, Wang Yiantian. 2008. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China; geochemical and age constraints of granitoid rocks. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6):1221~1238.
- Gao Jun, Wang X S, Klemd R. 2015. Record of assembly and breakup of Rodinia in the Southwestern Altaids: Evidence from Neoproterozoic magmatism in the Chinese Western Tianshan Orogen. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113:173~193.
- Ge Rongfeng, Zhu Wenbin, Wu Hailin, Zheng Bihai, Zhu Xiaoping, He Jinwen. 2012. The Paleozoic northern margin of the Tarim Craton: Passive or active? *Lithos*, 142~143(6):1~15.
- Guo Ruiqing, Nijiati · Abuluxun, Qin Qie, Jia Xiaoliang, Zhu Zhixin, Wang Kezhuo, Li Yaping. 2013. Geological characteristics and tectonic significance of Silurian granitic intrusions in the northern Tarim craton, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 32(2):220~238(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reily Y S, Xu X S, Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3):237~269.
- Han Baofu, He Guoqi, Wu Tairan, Li Huimin. 2004. Zircon U-Pb dating and geochemical fractures of early Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang; Implications for tectonic evolution. *Xinjiang Geology*, 22(1):04~11(in Chinese with English abstract).
- Han Qiong, Gong Xiaoping, Cheng Songlin, Zhang Ji, Song Xianglong, Feng Jun, Pan Zhanchao, Xie Lei, Su Hu, Liu Xueliang. 2015. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of volcanic rocks in Beizhan iron ore of the West Tianshan. *Acta Geologica Sinica*, 89 (1): 70 ~ 82 (in Chinese with English abstract).
- He Guoqi, Li Maosong, Han Baofu. 2001. Geotectonic research of Southwest Tianshan and its adjacent area, China. *Xinjiang Geology*, 19(1):7~11(in Chinese with English abstract).
- He Zhenyu, Zhang Zeming, Zong Keqing, Wang Wei, Yu Fei. 2012. Zircon geochronology of Xingxingxia quartz dioritic gneisses; Implications for the tectonic evolution and Precambrian basement affinity of Chinese Tianshan orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6):1857~1874(in Chinese with English abstract).
- He Zhenyu, Klemd R, Zhang Zeming, Zong Keqing, Sun Lixin, Huang Botao. 2015. Mesoproterozoic continental arc magmatism and crustal growth in the eastern Central Tianshan Arc Terrane of the southern Central Asian Orogenic Belt; Geochronological and geochemical evidence. *Lithos*, 236~237:74~89.
- Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Zhang Qianfeng, Chen Yibing. 1999. Nb isotopic constraint to the basal era and crust accretion of Tianshan orogenic belt. *Science in China (Series D)*, 29(2):104~112(in Chinese with English abstract).
- Hu Aiqin, Wei Gangjian, Jiang Boming, Zhang Jibin, Deng Wenfeng, Chen Linli. 2010. Formation of the 0.9 Ga Neoproterozoic granitoids in the Tianshan Orogen, NW China: Constraints from the SHRIMP zircon age determination and its tectonic significance. *Geochimica*, 39(3):197~212(in Chinese with English abstract).
- Hu Aiqin, Wei Gangjian, Zhang Jibin, Deng Wenfeng, Chen Linli. 2007. SHRIMP U-Pb age for zircons of East Tianhu granitic gneiss and tectonic evolution significance from the eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8):1795~1802(in Chinese with English abstract).
- Hu Zhaochu, Liu Yongsheng S, Gao Shan, Liu Wengui, Zhang Wen, Tong Xirun, Liu Lin, Zong Keqing, Li Ming, Chen Haihong, Zhou Lian, Yang Lu. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9):1391~1399.
- Huang Gang, Jia Zhenkui, Li Huaimin, Wang Xinlu, Guo Jun. 2012. Early Ordovician arc magmatite in central Tianshan—

- Evidences of geochronology and geochemical on granitic gneiss from Sangshuyuanzi area. *Xinjiang Geology*, 30(3):243~252 (in Chinese with English abstract).
- Huang He, Wang Tao, Qin Qie, Hou Jiyao, Tong Ying, Guo Lei, Zhang Lei, Wang Jing, Liang Zhaoyuan. 2015. Zircon Hf isotopic characteristics of granitoids from the Baluntai region, central Tianshan: Implications for tectonic evolution. *Acta Geologica Sinica*, 89(12):2286~2313(in Chinese with English abstract).
- Huang Zongying, Long Xiaoping, Kröner A, Yuan Chao, Wang Yujing, Chen Bei, Zhang Yunying. 2015. Neoproterozoic granitic gneisses in the Chinese Central Tianshan Block; Implications for tectonic affinity and Precambrian crustal evolution. *Precambrian Research*, 269:73~89.
- Ji Shaocheng, Wang Qian, Shao Tongbin, Sun Shengsi, Li Awei, Katsuyoshi M, Yosuke K, Li Jianfeng. 2014. The Yushugou granulite-peridotite terrane as a Paleozoic continental crust-mantle transition zone exposed at the northern margin of the southern Tianshan (Xinjiang). *Geotectonica et Metallogenia*, 38(3):473~494(in Chinese with English abstract).
- Jiang Tuo, Gao Jun, Klemd R, Qian Qing, Zhang Xi, Wang Xinsui, Tan Zhou, Zhu Zhixin. 2015. Genetically and geochronologically contrasting plagiogranites in South Central Tianshan ophiolitic mélange: Implications for the breakup of Rodinia and subduction zone processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113:266~281.
- Kröner A, Alexeiev D V, Hegner E, Rojas-Agramonte Y, Corsini M, Chao Y, Wong J, Windley B F, Liu D, Tretyakov A A. 2012. Zircon and muscovite ages, geochemistry, and Nd-Hf isotopes for the Aktyuz metamorphic terrane: Evidence for an Early Ordovician collisional belt in the northern Tianshan of Kyrgyzstan. *Gondwana Research*, 21(4):901~927.
- Kröner A, Alexeiev D V, Rojas-Agramonte Y, Hegner E, Wong J, Xia X, Belousova E, Mikolaichuk A V, Seltmann R, Liu D, Kiselev V V. 2013. Mesoproterozoic (Grenville-age) terranes in the Kyrgyz North Tianshan: Zircon ages and Nd-Hf isotopic constraints on the origin and evolution of basement blocks in the southern Central Asian Orogen. *Gondwana Research*, 23(1):272~295.
- Kröner A, Kovach V, Belousova E, Hegner E, Armstrong R, Dolgoplova A, Seltmann R, Alexeiev D V, Hoffmann J E, Wong J, Tong Y, Wilde S A, Degtyarev K E, Rytisk E. 2014. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 25(1):103~125.
- Lei Ruxiong, Wu Changzhi, Gu Lianxing, Zhang Zunzhong, Chi Guoxiang, Jiang Yaohui. 2011. Zircon U-Pb chronology and Hf isotope of the Xingxingxia granodiorite from the Central Tianshan zone (NW China): Implications for the tectonic evolution of the southern Altai. *Gondwana Research*, 20(s2~3):582~593.
- Li Ping. 2011. The petrogenesis of Paleozoic granites in the middle and west segment of the Central Tianshan and constrain to the process of the ocean-continent transition of the Tianshan. A Dissertation Submitted for the Degree of Master of Chang'an University.
- Li Qiugen, Liu Shuwen, Song Biao, Wang Yanbin, Chen Youzhang. 2009. Late Mesoproterozoic to Paleozoic tectonothermal events in the eastern segment of the central Tianshan tectonic zone of northwestern China: Constraints from SHRIMP zircon geochronology. *Earth Science Frontiers*, 16(2):175~184 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuping, Wang Tao, Li Jinbao, Kang Xu, Yu Fusheng, Han Qingjun, Ma Zhongping. 2001. The U-Pb age of zircon from Late Caledonian granitoids in Hongliuhe area, East Tianshan Mountains, Northwest China and its geological implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3):231~235 (in Chinese with English abstract).
- Li Yuejun, Yang Haijun, Zhao Yan, Luo Juncheng, Zheng Duoming, Liu Yalei. 2009. Tectonic framework and evolution of South Tianshan, NW China. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(1):94~104(in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Günther D, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(s1~2):34~43.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, Gao Changgui, Gao Shan, Xu Juan, Chen Haihong. 2010a. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15):1535~1546.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 2010b. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1~2):537~571.
- Long Lingli, Gao Jun, Xiong Xianming, Qian Qing. 2007. Geochemistry and geochronology of granitoids in Bikai region, southern Central-Tianshan mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*; 23(4) 719~732 (in Chinese with English abstract).
- Long Lingli, Gao Jun, Klemd R, Beier C, Qian Qian, Zhang Xi, Wang Jingbin, Jiang Tuo. 2011. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 126(3-4):321~340.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT, a geochronological toolkit for Microsoft Excel 3.00. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1(5):1~75.
- Ma Xuan, Shu Liangshu, Santosh M, Li Jinyi. 2013. Petrogenesis and tectonic significance of an early Palaeozoic mafic-intermediate suite of rocks from the Central Tianshan, northwest China. *International Geology Review*, 55(5):548~573.

- Ma Xuxuan, Shu Liangshu, Meert J G, Li Jinyi. 2014. The Paleozoic evolution of Central Tianshan: Geochemical and geochronological evidence. *Gondwana Research*, 25(2): 797~819.
- Ma Zhongping, Xia Linqi, Xu Xueyi, Li Xiangming, Xia Zuchun, Wang Lishe. 2006. The tectonic setting and implication of volcanic-magmatic complex from the Upper-Silurian Bayinbuluke Formation, southern Tianshan. *Journal of Jilin University*, 36(5): 736~743 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhongping, Xia Linqi, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Xia Zuchun, Wang Lishe. 2007. Dating for zircons of gabbro from Kulehu ophiolite, southern Tianshan, and its geological implication. *Journal of Northwest University*, 37(1): 107~110 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhongping, Xia Linqi, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Xia Zuchun, Wang Lishe. 2008. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Early Paleozoic igneous rocks from Bayinbuluke, Southern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2289~2300 (in Chinese with English abstract).
- Miller C F, McDowell S M, Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31(6): 529~532.
- Peng Mingxing, Zhong Chungen, Zuo Qionghua, Zhu Wanming, Yang Shiwen, Huang Xun. 2012. The formation age and their geological significance of gneissose granites neighbouring Kawabulake area in East Tianshan Mountain. *Xinjiang Geology*, 30(1): 12~18 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W, Tindli A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Pu Xiaofei, Song Shuguang, Zhang Lifei, Wei Chunjing. 2011. Silurian arc volcanic slices and their tectonic implications in the southwestern Tianshan UHPM belt, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1675~1687 (in Chinese with English abstract).
- Qian Q, Gao J, Klemd R, He G Q, Song B, Liu D Y, Xu R H. 2007. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiata, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 98(3): 551~569.
- Roberts M P, Clemens J D. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21: 825~828.
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. *Treatise Geochem*, (3): 1~64.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth & Planetary Science Letters*, 219(3-4): 311~324.
- Shi Yuruo, Liu Duniyi, Zhang Qi, Jian Ping, Zhang Fuqin, Miao Laicheng. 2007. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Gangou granitoids, Central Tianshan Mountains, Northwest China and tectonic significances. *Chinese Science Bulletin*, 52(11): 1507~1516.
- Shi Yuruo, Jian Ping, Kröner A, Jahn B M, Liu Duniyi, Zhang Wei, Ma Huadong. 2014. Zircon ages and Hf isotopic compositions of plutonic rocks from the Central Tianshan (Xinjiang, northwest China) and their significance for early to mid-Palaeozoic crustal evolution. *International Geology Review*, 56(11): 1413~1434.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, 42: 313~345.
- Tian Yazhou, Yang Jingsui, Liu Fei, Zhao Yijue, Feng Guangying, Niu Xiaolu, Zhang Lan, Gao Jian. 2014. Petrological characteristics of Bulusitai gabbro and its constraint to the time of South Tianshan ocean subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2363~2380 (in Chinese with English abstract).
- Vervoort J D, Patchett P J. 1996. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(19): 3717~3733.
- Wang Bo, Liu Hongsheng, Shu Liangshu, Jahn B M, Chung Sunlin, Zhai Yazhong, Liu Duniyi. 2014a. Early Neoproterozoic crustal evolution in northern Yili Block: insights from migmatite, orthogneiss and leucogranite of the Wenquan metamorphic complex in the NW Chinese Tianshan. *Precambrian Research*, 242: 58~81.
- Wang Chao, Liu Liang, Luo Jinhai, Cheng Zicheng. 2008. The southwestern tianshan palaeozoic ocean basin evolution: Records from petrology. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(z1): 278~279 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chao, Luo Jinhai, Che Zicheng, Liu Liang, Zhang Jingyi. 2009. Geochemical characteristics and U-Pb LA-ICP-MS zircon dating of the oxidaban pluton from Xinjiang, China: Implications for a Paleozoic oceanic subduction process in southwestern Tianshan. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 272~283 (in Chinese with English abstract).
- Wang Degui, Zhang Xiaomei, Fu Hongxia. 2006. SHRIMP U-Pb dating of zircons from the north Xiaoyanchi monzodiorite, East Tianshan, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 966~968 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shoujing, Wang Juli. 2010. The geochemical characteristics and chronology of the K-feldspar granite in Baluntai area, Xinjiang. *Journal of Northwest University*, 40(1): 105~110 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xingjun, Wang Genhou, Zhuan Shaopeng, Li Guangdong, Wang Deqiang, Wu Lianheng. 2011. Late Ordovician collision and orogen in middle Tianshan: Evidences of geochemical analyses and geochronology on metamorphosed granitoid rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2203~2212 (in Chinese with English abstract).
- Wan Tianfeng, Zhao Qingle, Wang Qianqian. 2015. Paleozoic tectono-metallogeny in the Tianshan-Altay region, central Asia.

- Acta Geologica Sinica(English Edition), 89(4):1120~1132.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 95(4):407~419.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London:Unwin Hyman Inc. 153~226.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):185~220(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Zircon genetic mineralogy research and restriction to the interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16):1589~1604(in Chinese with English abstract).
- Xia Bin, Zhang Lifei, Xia Yang, Bader T. 2014. The tectonic evolution of the Tianshan Orogenic Belt: Evidence from U-Pb dating of detrital zircons from the Chinese southwestern Tianshan accretionary mélange. *Gondwana Research*, 25(25):1627~1643.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Allen M B. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage. *Gondwana Research*, 23(4):1316~1341.
- Xu Xueyi, Ma Zhongping, Xia Zuchun, Xia Linqi, Li Xiangmin, Wang Lishe. 2006. TMS U-Pb isotopic dating and geochemical characteristics of Paleozoic granitic rocks from the middle-western section of Tianshan. *Northwestern Geology*, 39(1):50~75(in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Wang Hongliang, Ma Guolin, Li Ping, Chen Juanlu, Li Ting. 2010. Geochronology and Hf isotope characteristics of the Paleozoic granite in Nalati area, West Tianshan Mountains. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6):691~706(in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Wang Hongliang, Chen Junlu, Ma Zhongping, Zhu Tao, Wang Ning, Dong Yunpeng. 2013. Geochemistry and geochronology of Paleozoic intrusions in the Nalati (Narati) area in western Tianshan, Xinjiang, China: Implications for Paleozoic tectonic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72:33~62.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, Li Huiming, Gunther D, Wu Fuyuan. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandard & Geoanalytical*, 28(3):353~370.
- Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Li Tianfu, Chen Songyong, Ren Yufeng, Li Jinyang, Liu Zhao. 2011. U-Pb ages of zircons from ophiolite and related rocks in the Kumishi region at the southern margin of Middle Tianshan, Xinjiang: Evidence of Early Paleozoic oceanic basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1):77~95(in Chinese with English abstract).
- Yang Shenghong, Zhou Meifu. 2009. Geochemistry of the ~430Ma Jingbulake mafic-ultramafic intrusion in Western Xinjiang, NW China: Implications for subduction related magmatism in the South Tianshan orogenic belt. *Lithos*, 113:259~273.
- Yang Tiannan, Li Jinyi, Sun Guihua, Wang Yanbin. 2006. Earlier Devonian active continental arc in Central Tianshan: evidence of geochemical analyses and Zircon SHRIMP dating on mylonitized granitic rock. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1):41~48(in Chinese with English abstract).
- Yang Tiannan, Li Jinyi, Sun Guihua, Wang Yanbin. 2008. Mesoproterozoic continental arc type granite in the Central Tianshan Mountains: zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemical analyses. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 82:117~125.
- Zhang Bin, Chen Wen, Yu Shun, Yin Jiyuan, Li Jie, Sun Jingbo, Yang Li, Yang Jing. 2014. Subduction process of South Tianshan Ocean during Paleozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8):2351~2362(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Zhou Dingwu, Wang Juli, Wang Runsan. 2007. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopic composition and genesis implications of Huangjianshishan granite intrusion in Kumishi area of southern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8):1821~1829(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xi, Gao Jun, Dong Lianhui, Li Jilei, Jiang Tuo, Qian Qing, Su Wen. 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of I type granitoids from Qiaohuote copper deposit in Central Tianshan of Xinjiang and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6):1637~1648(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yingli, Wang Zongqi, Yan Zhen, Wang Qing. 2014. New insights on sedimentology, provenance analysis of the Early Silurian in the Quruqtagh area, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 88(10):1970~1980(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yijue, Yang Jingsui, Liu Shijun, Liu Fei, Tian Yazhou. 2015. The origin of the Baluntai diorite in Central Tianshan Mountains, Xinjiang, and its geological significance. *Geology in China*, 42(5):1228~1241(in Chinese with English abstract).
- Zhong Linglin, Wang Bo, Shu Liangshu, Liu Hhongsheng, Mu Lixiu, Ma Yuzhou, Zhai Yazhong. 2015. Structural overprints of early Paleozoic arc-related intrusive rocks in the Chinese Central Tianshan: Implications for Paleozoic accretionary tectonics in SW Central Asian Orogenic Belts. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113(1):194~217.
- Zhu Yongfeng, Zhang Lifei, Gu Libing B, Guo Xuan, Zhou Jing. 2005. SHRIMP chronology and trace element geochemical study of the Carboniferous volcanic rocks in West Tianshan. *Chinese Science Bulletin*, 50(18):78~88(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng, Song Biao. 2006. Petrology and SHRIMP chronology of mylonitized Tianger granite, Xinjiang: Also about the dating on hydrothermal zircon rim in granite. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1):135~144(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng. 2012. The zircon U-Pb age for the Neoproterozoic-Ordovician granites in the Kesang Rongdong region, southwestern Tianshan Mts., Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7):2113~2120(in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhixin, Wang Kezhuo, Zheng Yujie, Sun Guihua, Zhang Chao, Li Yaping. 2006. Zircon SHRIMP dating of Silurian and Devonian

granitic intrusions in the southern Yili block, Xinjiang and preliminary discussion on their tectonic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1193~1200 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 白建科, 李智佩, 徐学义, 孙吉明, 牛亚卓. 2015. 新疆西天山伊犁地区石炭纪火山—沉积序列及盆地性质. *地质论评*, 61(1): 195~206.
- 陈新跃, 王岳军, 孙林华, 范蔚茗. 2009. 天山冰达坂和拉尔敦达坂花岗岩片麻岩 SHRIMP 锆石年代学特征及其地质意义. *地球化学*, 38(5): 424~431.
- 陈义兵, 胡霏琴, 张国新, 张前锋. 2000. 西南天山前寒武纪基底时代和特征: 锆石 U-Pb 年龄和 Nd-Sr 同位素组成. *岩石学报*, 16(1): 91~98.
- 郭瑞清, 尼加提·阿布都逊, 秦切, 贾晓亮, 朱志新, 王克卓, 李亚萍. 2013. 新疆塔里木北缘志留纪花岗岩类侵入岩的地质特征及构造意义. *地质通报*, 32(2): 220~238.
- 韩宝福, 何国琦, 吴泰然, 李惠民. 2004. 天山早古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年, 岩石地球化学特征及其大地构造意义. *新疆地质*, 22(1): 04~11.
- 韩琼, 弓小平, 程松林, 张冀, 宋相龙, 凤骏, 潘展超, 谢磊, 苏虎, 刘学良. 2015. 西天山备战铁矿火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究. *地质学报*, 89(1): 70~82.
- 何国琦, 李茂松, 韩宝福. 2001. 中国西南天山及邻区大地构造研究. *新疆地质*, 19(1): 7~11.
- 贺振宇, 张泽明, 宗克清, 王伟, 于飞. 2012. 星星峡石英闪长质片麻岩的锆石年代学: 对天山造山带构造演化及基底归属的意义. *岩石学报*, 28(6): 1857~1874.
- 胡霏琴, 张国新, 张前锋, 陈义兵. 1999. 天山造山带基底时代和地壳造山的 Nd 同位素制约. *中国科学(D 辑)*, 29(2): 104~112.
- 胡霏琴, 韦刚健, 江博明, 张积斌, 邓文峰, 陈林丽. 2010. 天山 0.9 Ga 新元古代花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. *地球化学*, 39(3): 197~212.
- 胡霏琴, 韦刚健, 张积斌, 邓文峰, 陈林丽. 2007. 天山东段天湖东片麻状花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和构造演化意义. *岩石学报*, 23(8): 1795~1802.
- 黄岗, 贾振奎, 李怀敏, 王新录, 郭俊. 2012. 中天山早奥陶世弧岩浆岩的确定——来自桑树园子一带花岗岩质片麻岩年代学和地球化学证据. *新疆地质*, 30(3): 243~252.
- 黄河, 王涛, 秦切, 侯继尧, 董英, 郭磊, 张磊, 王静, 梁昭元. 2015. 中天山巴仑台地区花岗岩质岩石的 Hf 同位素研究: 对构造演化及大陆生长的约束. *地质学报*, 89(12): 2286~2313.
- 嵇少丞, 王茜, 邵同宾, 孙圣思, 李阿伟, 道林克祯, 近藤洋裕, 李建峰. 2014. 新疆榆树沟麻粒岩—橄榄岩地体: 南天山北缘出露代表的古生代大陆壳—幔过渡带. *大地构造与成矿学*, 38(3): 473~494.
- 李平. 2011. 中天山中西段古生代花岗岩成因及对天山洋陆转换时限的制约. 西安: 长安大学硕士学位论文.
- 李秋根, 刘树文, 宋彪, 王彦斌, 陈友章. 2009. 中天山东段中元古代晚期—古生代构造—热事件: SHRIMP 锆石年代学证据. *地学前缘*, 16(2): 175~184.
- 李伍平, 王涛, 李金宝, 康旭, 于福生, 韩庆军, 马忠平. 2001. 东天山红柳河地区晚加里东期花岗岩岩石锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球学报*, 22(3): 231~235.
- 李日俊, 杨海军, 赵岩, 罗俊成, 郑多明, 刘亚雷. 2009. 南天山区域大地构造与演化. *大地构造与成矿学*, 33(1): 94~104.
- 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 钱青. 2007. 新疆中天山南缘比开(地区)花岗岩地球化学特征及年代学研究. *岩石学报*, 23(4): 719~732.
- 马中平, 夏林圻, 徐学义, 李向民, 夏祖春, 王立社. 2006. 南天山北部志留系巴音布鲁克组火山—侵入杂岩的形成环境及构造意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36(5): 732~743.
- 马中平, 夏林圻, 徐学义, 李向民, 夏祖春, 王立社. 2007. 南天山库勒湖蛇绿岩锆石年龄及其地质意义. *西北大学学报(自然科学版)*, 37(1): 107~110.
- 马中平, 夏林圻, 徐学义, 李向民, 夏祖春, 王立社. 2008. 南天山北部巴音布鲁克早古生代火成岩的地球化学特征与岩石成因. *岩石学报*, 24(10): 2289~2300.
- 彭明兴, 钟春根, 左琼华, 朱婉明, 杨世文, 黄迅. 2012. 东天山卡瓦布拉克地区片麻状花岗岩形成时代及地质意义. *新疆地质*, 30(1): 12~18.
- 蒲晓菲, 宋述光, 张立飞, 魏春景. 2011. 西南天山超高压变质带中志留纪岛弧火山岩片及其构造意义. *岩石学报*, 27(6): 1675~1687.
- 田亚洲, 杨经绥, 刘飞, 赵一珏, 冯光英, 牛晓露, 张岚, 高健. 2014. 新疆布鲁斯台辉长岩岩石学特征及对南天山洋俯冲时限的制约. *岩石学报*, 30(8): 2363~2380.
- 王超, 刘良, 罗金海, 车自成. 2008. 西南天山古生代洋盆演化: 来自岩石学的记录. *矿物岩石地球化学通报*, 27(z1): 278~279.
- 王超, 罗金海, 车自成, 刘良, 张敬芝. 2009. 新疆欧西达坂花岗岩体地球化学特征和锆石 LA-ICP-MS 定年: 西南天山古生代洋盆俯冲作用过程的启示. *地质学报*, 83(2): 272~283.
- 王德贵, 张晓梅, 伏红霞. 2006. 东天山小盐池北二长闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年. *地质通报*, 25(8): 966~968.
- 王守敬, 王居里. 2010. 新疆巴伦台钾长花岗岩的地球化学及年代学. *西北大学学报(自然科学版)*, 40(1): 105~110.
- 王行军, 王根厚, 专少鹏, 李广栋, 王德强, 吴连亨. 2011. 中天山晚奥陶世碰撞造山: 来自变质花岗岩地球化学及年代学证据. *岩石学报*, 27(7): 2203~2212.
- 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.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 49(16): 1589~1604.
- 夏林圻. 2007. 天山岩浆作用. 北京: 中国大地出版社.
- 徐学义, 马中平, 夏祖春, 夏林圻, 李向民, 王立社. 2006. 天山中西段古生代花岗岩 TIMS 法锆石 U-Pb 同位素定年及岩石地球化学特征研究. *西北地质*, 39(1): 50~75.
- 徐学义, 王洪亮, 马国林, 李平, 陈隽璐, 李婷. 2010. 西天山那拉提地区古生代花岗岩的年代学和锆石 Hf 同位素研究. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 691~706.
- 杨经绥, 徐向珍, 李天福, 陈松永, 任玉峰, 李金阳, 刘钊. 2011. 新疆中天山南缘库米什地区蛇绿岩的锆石 U-Pb 同位素定年: 早古生代洋盆的证据. *岩石学报*, 27(1): 77~95.
- 杨天南, 李锦铁, 孙桂华, 王彦斌. 2006. 中天山早泥盆世陆弧: 来自花岗岩类麻岩地球化学及 SHRIMP-U/Pb 定年的证据. *岩石学*

- 报, 22(1):41~48.
- 张斌, 陈文, 喻顺, 尹继元, 李洁, 孙敬博, 杨莉, 杨静. 2014. 南天山洋古生代期间俯冲作用过程探讨. 岩石学报, 30(8):2351~2362.
- 张成立, 周鼎武, 王居里, 王润三. 2007. 南天山库米什南黄尖石山岩体的年代学、地球化学和 Sr、Nd 同位素组成及其成因意义. 岩石学报, 23(8):1821~1829.
- 张喜, 高俊, 董连慧, 李继磊, 江拓, 钱青, 苏文. 2011. 新疆中天山乔霍特铜矿区 I 型花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 27(6):1637~1648.
- 张英利, 王宗起, 闫臻, 王清. 2014. 新疆库鲁克塔格早志留世地层沉积学、物源分析新认识. 地质学报, 88(10):1970~1980.
- 赵一珏, 杨经绥, 刘仕军, 刘飞, 田亚洲. 2015. 新疆中天山巴仑台闪长岩成因及其地质意义. 中国地质, 42(5):1228~1241.
- 朱永峰, 张立飞, 古丽冰, 郭璇, 周晶. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究. 科学通报, 50(18):78~88.
- 朱永峰, 宋彪. 2006. 新疆天格尔糜棱岩化花岗岩的岩石学及其 SHRIMP 年代学研究. 兼论花岗岩中热液锆石边的定年. 岩石学报, 22(1):135~144.
- 朱永峰. 2012. 西南天山科桑溶洞新元古代一早奥陶世花岗岩锆石 U-Pb 年代学研究. 岩石学报, 28(7):2113~2120.
- 朱志新, 王克卓, 郑玉洁, 孙桂华, 张超, 李亚萍. 2006. 新疆伊犁地块南缘志留纪和泥盆纪花岗岩侵入体锆石 SHRIMP 定年及其形成时构造背景的初步探讨. 岩石学报, 22(5):1193~1200.

Origin of Bayinbuluk Pluton in Southern Tianshan: Evidences from Zircon U-Pb Dating, Hf Isotope and Geochemistry

WEI Qiang¹⁾, ZHANG Chengli¹⁾, HE Xianying²⁾, MA Zhongping³⁾, GAO Xiaofeng³⁾,
YANG Rong⁴⁾, HUANG Dong¹⁾, LI Ping³⁾

1) Key Laboratory of Continental Dynamics of Northwest University, Department of Geology,
Northwest University, Xi'an, 710069;

2) Zhundong Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, Fukang, Xinjiang, 831511;

3) Xi'an Center of Geological Survey. CGS, Xi'an, 710054;

4) Shaanxi Institute of International Trade & Commerce, Xianyang, Shaanxi, 712046

Abstract

Bayinbuluke pluton is one typical representative of granitic intrusions exposed in the northern margin of South Tianshan and composed mainly of monzogranite and K-feldspar granites. Both rocks are characterized by enrichment in Rb, Ba, Th, K and Sr, poor HFSE and depletion of Nb, Ta, Ti and P, geochemically similar to those of island magmatism occurred in active margins. Of them, monzogranite has relative low SiO₂ and K₂O, higher CaO, Fe₂O₃^T and MgO, showing LREE-enriched and HREE depleted REE patterns with slightly negative Eu anomalies. Whereas K-feldspar granite has higher SiO₂ and K₂O, lower CaO and MgO contents and strongly depleted in Sr, Ba, Eu, Ti and P, displaying medium LREE-enriched and HREE-depleted REE patterns with strong negative Eu anomalies. Furthermore, both of them have higher DI (94.31~95.52) and Rb/Sr ratios. All suggests that it likely resulted from the higher differentiation of calc-alkaline magmas. Zircon U-Pb dating yields forming ages of 452.2 ± 5.3 Ma and 430.2 ± 3.2 Ma for monzogranite and K-feldspar granites, with the $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values ranging from -8.89 to -6.80 and from -5.33 to -2.19 as well as T_{DM}^{C} of 1.58~1.69 Ga and 1.33~1.49 Ga, respectively, suggesting they were derived from Meso-Proterozoic crustal materials in the basement. Combined with coeval granitoids occurring widely in both South Tianshan and southern margin of central Tianshan, monzogranites and K-feldspar granites are reprehensive of arc magmatism during early subduction and later mature arc period, suggesting that subduction of South Tianshan ocean crust continued till Silurian.

Key words: zircon U-Pb dating; granite; Bayinbuluke intrusion; South Tianshan