

北阿尔金白尖山地区花岗闪长岩锆石 U-Pb 定年、 Hf 同位素组成及其地质意义

刘锦宏, 刘良, 盖永升, 康磊, 杨文强, 廖小莹, 杨敏

大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安, 710069

内容提要:白尖山花岗闪长岩位于北阿尔金红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带东段, 呈大套岩株状产于拉配泉岩群之中。该花岗闪长岩具有较低的 SiO_2 含量(62.58%~65.05%), 富 CaO (4.02%~4.98%), 铝饱和指数 $A/\text{CNK} < 1.0$ (0.89~0.98), 富集 K、Rb、Ba, 亏损 Nb、Ta、Zr、Ti, 属于准铝质钙碱性岩石系列, 具 I 型花岗岩的特征; 其稀土元素 $\Sigma\text{REE} = 90.2 \sim 137.8 \mu\text{g/g}$, 具有轻重稀土元素分馏明显, 轻稀土元素相对富集的特点, 具弱的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu}_N = 0.84 \sim 0.92$)。该岩石变化范围较大的锆石 Hf 同位素组成 ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.96 \sim 7.99$) 可能与源区物质不充分的岩浆混染有关, 结合地球化学特征及其与实验岩石学资料的对比, 其形成应为洋壳俯冲时板片脱水诱发下地壳基性岩石部分熔融产生的初始岩浆结晶作用的产物, 同时在岩浆侵位过程中还受到上地壳物质(杂砂岩等)的混染。锆石 U-Pb 年龄为 $475.2 \pm 2.0 \text{ Ma}$, 结合锆石 CL 图像具有岩浆环带特征和 Th/U 值(0.30~0.75), 推断该年龄为花岗闪长岩的形成年龄。综合区域地质背景, 本次研究的白尖山花岗闪长岩应为红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带东部地区早古生代洋壳俯冲岛弧岩浆活动的组成部分, 与西部红柳沟地区(恰什坎萨依及巴什考供盆地北缘)的花岗闪长岩和石英闪长岩共同构成北阿尔金早古生代洋壳俯冲产生的岛弧岩浆岩带。此外, 由西到东红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带的南北两侧均发育早古生代与洋壳俯冲有关的花岗质岩石, 表明整个北阿尔金洋俯冲时期可能具有双向性。

关键词: 红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带; 花岗闪长岩; 锆石 U-Pb 定年与 Hf 同位素; 岛弧; 下地壳部分熔融; 新疆

花岗质岩石是造山带不同演化阶段地球动力学过程、壳幔相互作用的物质记录(Barbarin, 1999; Jahn et al., 1999; Xiao Qinghui et al., 2007; Wang Tao et al., 2009; Zhang Qi et al., 2010; Qin Jiangfeng, 2010; Wang Nan et al., 2016)。系统研究造山带中各类花岗质岩石的源区性质、形成机制和构造背景是反演造山带地质演化过程的重要途径。北阿尔金红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带是阿尔金造山带的重要组成部分, 夹持于阿北变质地块与米兰河-金雁山地块之间(图 1a)。前人通过对其中基性岩石、深水沉积和蛇绿岩以及高压变质岩石的综合研究, 提出该混杂岩带是早古生代洋壳俯冲作用的产物(Liu Liang et al., 1999; Xu Zhiqin et al., 1999; Sobel and Arnaud, 1999; Zhang Jianxin et al., 2007 及其引用文献)。近年来, 许多研究者在该混杂岩带的西段(红柳沟一带)鉴别出一批早古生代花岗岩岩体(Chen Xuanhua et al., 2003; Qi

Xuexiang et al., 2005; Wu Cailai et al., 2005, 2007; Kang Lei et al., 2011; Gao Xiaofeng et al., 2012; Gai Yongsheng et al., 2015), 不仅提高了该混杂岩带的研究程度, 同时深化了其所记录的与洋盆开启、洋壳俯冲及洋陆碰撞等相关地质作用的认知。如 Gao Xiaofeng et al. (2012) 和 Gai Yongsheng et al. (2015) 先后在红柳沟地区的蛇绿混杂岩带中发现了洋壳部分熔融成因的斜长花岗岩, 确定其形成时代分别为 $512 \pm 2 \text{ Ma}$ 和 $519 \pm 4 \text{ Ma}$, 认为其是红柳沟-拉配泉洋盆裂解初期的产物; Qi Xuexiang et al. (2005) 在恰什坎萨依花岗闪长岩中测出锆石 U-Pb 年龄为 $481.5 \pm 5.3 \text{ Ma}$, Wu Cailai et al. (2007) 在巴什考供盆地北缘斯米尔布拉克岩体中测得石英闪长岩的年龄为 $481.6 \pm 5.6 \text{ Ma}$, 两者均属于 I 型花岗岩, 产于岛弧或陆缘弧环境, 说明区内洋壳俯冲作用的存在; Kang Lei et al. (2011) 测得红柳沟钾长花岗岩年龄为 $500.3 \pm 1.2 \text{ Ma}$, 认为其形

注: 本文为国家重点基础研究发展计划项目(编号 2015CB856103)、国家自然科学基金项目(编号 41430209、41421002)、教育部创新团队(编号 IRT1281)和西北大学大陆动力学国家重点实验室自主研究重点课题联合资助成果。

收稿日期: 2016-02-03; 改回日期: 2016-06-29; 责任编辑: 周健。

作者简介: 刘锦宏, 男, 1991 年生, 在读硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: 1065699715@qq.com。通讯作者: 刘良, 男, 1956 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩石大地构造学和矿物成因研究。Email: liuliang@nwu.edu.cn。

成于与洋壳俯冲有关的陆缘火山弧环境;Wu Cailai et al. (2005)获得巴什考供盆地南缘花岗质杂岩体中的巨斑花岗岩、红色花岗岩、灰白色似斑状花岗岩和粉红色似斑状花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 474.3 ± 6.8 Ma、 446.6 ± 5.2 Ma、 434.5 ± 3.8 Ma 和 431.1 ± 3.8 Ma, 结合区域地质特征认为该花岗质杂岩体形成于同碰撞-碰撞后的构造环境。由此可见,前人通过研究红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带西部地区出露的部分花岗质岩石,初步揭示了该混杂岩带早古生代的地质演化过程(Qi Xuexiang et al., 2005; Wu Cailai et al., 2007; Kang Lei et al., 2011)。但目前对该混杂岩带东部地区(尤其是喀腊大湾与白尖山地区)广泛分布的花岗质岩石的研究相对比较薄弱,如 Han Fengbin et al. (2012)初步报道了喀腊大湾地区几个花岗质岩体的形成时代(417~514 Ma)及其期次,但缺少对这些花岗质岩石地球化学和同位素特征及其成因与构造背景的研究。此外,Liu Han et al. (2013)综合前人在红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带西部(贝克滩一带)南北两侧出露的大量花岗质岩石的研究,认为西部北阿尔金洋盆具有双向俯冲性质。因此,系统研究红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带东部花岗质岩石的地球化学特征、成因,深入探讨东、西段同时代花岗质岩石的可比性、东部北阿尔金洋盆的俯冲极性问题,对全面揭示该蛇绿混杂岩带的形成与演化过程有重要意义。鉴于此,本文选取该混杂岩带东段白尖山花岗闪长岩体(图 1c)作为重点研究对象,试图通过对该岩体进行年代学、地球化学和锆石 Hf 同位素特征的深入研究,为红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带东段早古生代的演化提供进一步的约束,并结合西部前人的研究成果,进一步探讨了北阿尔金蛇绿混杂岩带的演化和整个北阿尔金洋盆的俯冲极性。

1 区域地质背景及样品岩相学特征

1.1 区域地质背景

阿尔金造山带位于青藏高原东北缘,地处塔里木盆地与柴达木盆地之间。该造山带从北至南可划分为四个构造单元(图 1a):阿北地块(主要为古元古代一新太古代角闪岩至麻粒岩相变质杂岩)(Wang Chao et al., 2015)、红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带(Liu Liang et al., 1999; Chen Xuanhua et al., 2003; Qi Xuexiang et al., 2005; Chen Bolin et al., 2016 及其他相关文献)、米兰河-金雁山地块(主要由古元古界变质岩、大理岩及新元古界厚层叠

层石灰岩组成)以及南阿尔金俯冲碰撞杂岩带(Liu Liang et al., 1999; Xu Zhiqin et al., 1999; Zhang et al., 2001; Che Zicheng et al., 2002)。其中南阿尔金俯冲碰撞杂岩带又可划分为南阿尔金高压-超高压变质带以及阿帕-茫崖蛇绿构造混杂岩带(Liu Liang et al., 2009; Yang Wenqiang et al., 2012)。

阿尔金造山带北缘的红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带近东西走向,主要由蛇绿岩、具复理石特征的深海/半深海碎屑岩、碳酸盐岩和变质岩组成。蛇绿岩主要由玄武岩、枕状玄武岩、细碧岩、凝灰岩、硅质岩及基性、超基性岩脉或岩墙组成,具有过渡型洋中脊玄武岩性质,并与洋岛玄武岩共生(Guo Zhaojie et al., 1998; Liu Liang et al., 1999; Wu Jun et al., 2002),其中,枕状玄武岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 524 ± 44 Ma (Liu Liang, 1999),辉长岩的锆石 U-Pb 年龄为 479 ± 8 Ma (Yang Jingsui et al., 2008)。变质岩出露于贝克滩东侧,主要包括低温高压泥质片岩、蓝片岩、榴辉岩等,呈薄层状或透镜状产出,走向近东西,与围岩呈断层接触(Che Zicheng et al., 1995; Liu Liang et al., 1999; Zhang Jianxin et al., 2007)。

1.2 岩相学特征

白尖山花岗闪长岩采样点的地理坐标为北纬 $39^{\circ}10'13.2''$,东经 $91^{\circ}51'52.2''$,岩石侵入于拉配泉岩群火山岩组之中,呈大套岩株状产出。岩石风化面为黑褐色,新鲜面呈灰绿色(图 2a, b),块状构造,细粒结构,主要组成矿物包括斜长石(35%~40%)、石英(25%~35%)、绿帘石(15%~25%)、绿泥石(约 2%)及少量副矿物榍石、磷灰石、锆石等。其中,斜长石自形程度较好,粒径多介于 0.5~1 mm 之间,绿帘石化现象显著(图 2c, d),表明岩石经历了明显的后期蚀变;石英为不规则粒状,粒径介于 0.2~0.5 mm 之间;绿帘石可以分为两类,第一类多呈细小粒状分布于斜长石中,为斜长石蚀变产物(图 2c, d 中 Ep_1)。第二类呈半自形、自形分布于斜长石颗粒之间(图 2c, d 中 Ep_2),且镜下可见其呈近似六边形(图 2c 中 Ep_2)和短柱状(图 2d 中 Ep_2)的形态。根据岩石发生明显蚀变改造的特征,分布于斜长石颗粒间的绿帘石可能为钙质角闪石蚀变的产物,其近似六边形和短柱状形态可能是保存了原角闪石矿物的晶形轮廓。

2 样品制备和分析方法

2.1 岩石地球化学分析样品制备

首先,挑选新鲜的岩石样品(除去蚀变、分化和

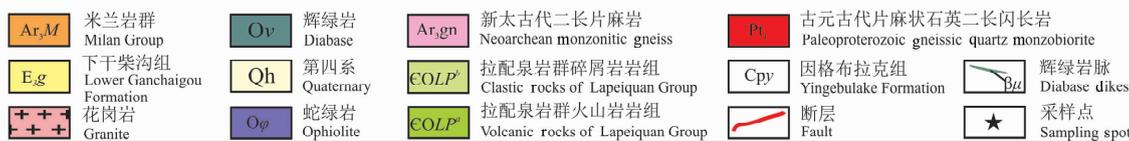
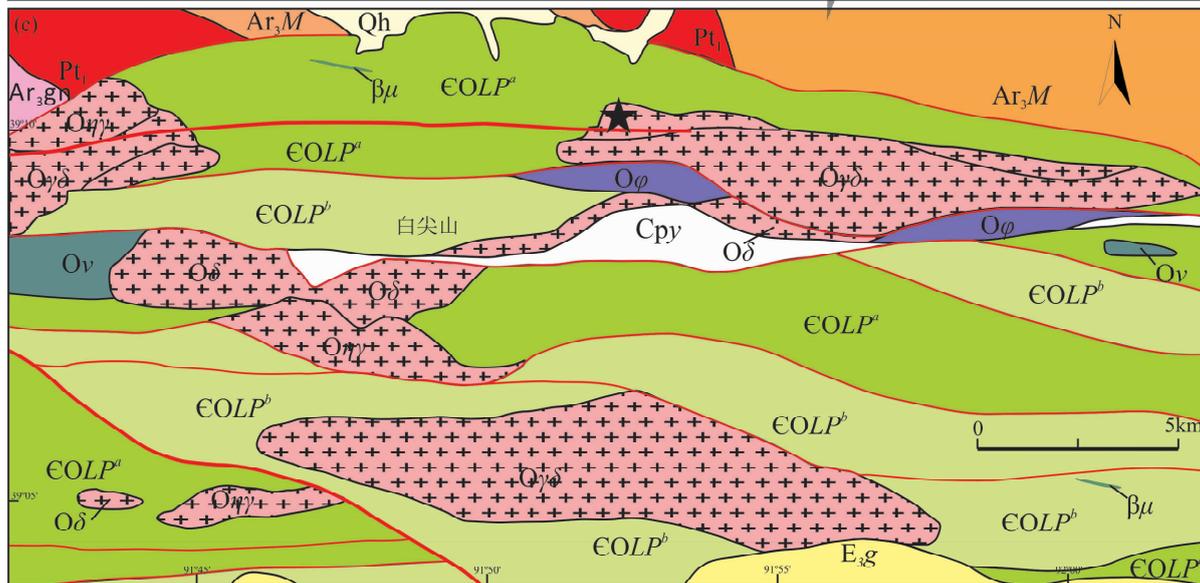
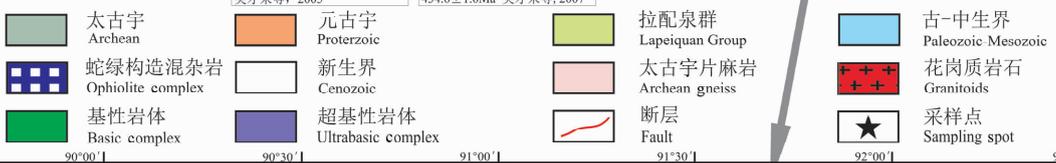
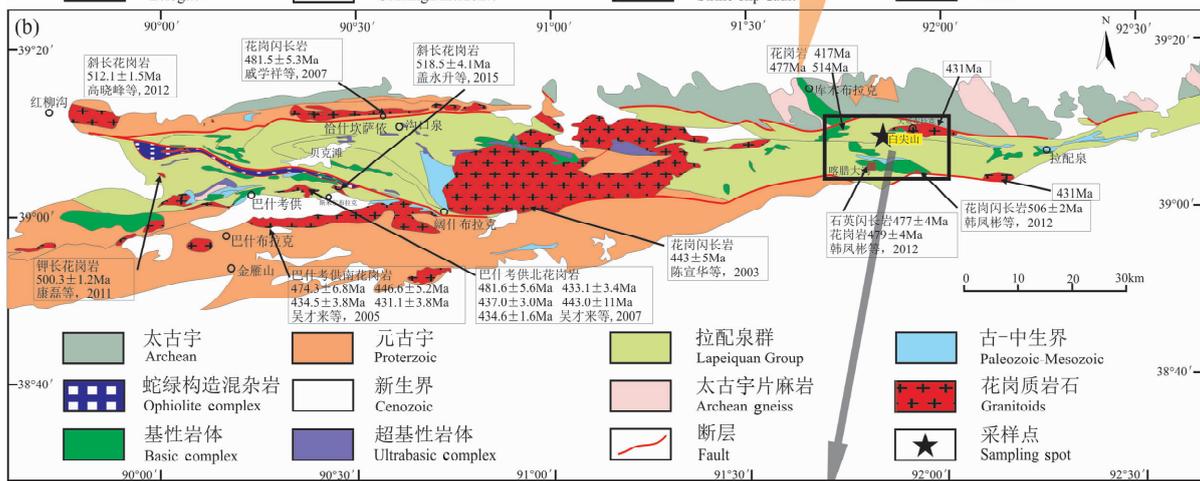
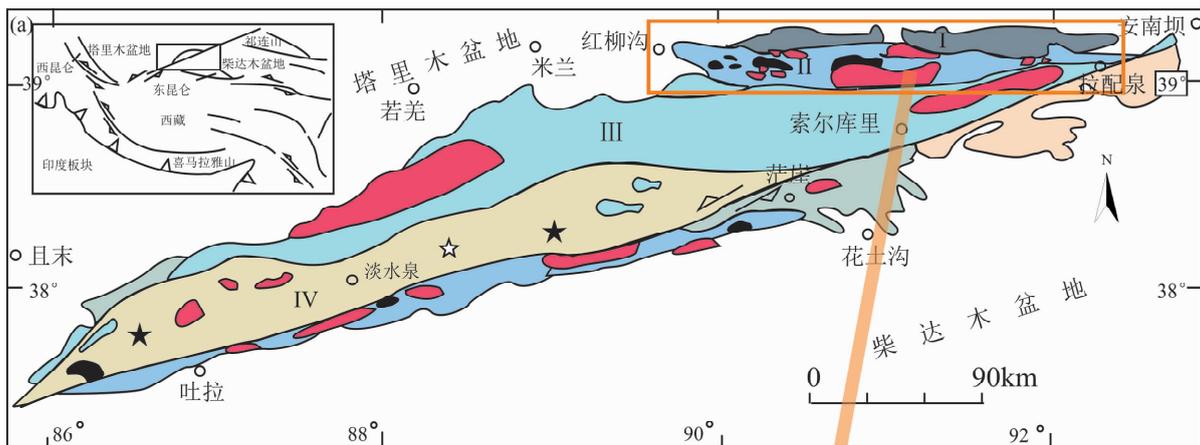


图 1 阿尔金山造山带地质构造简图(a, 据康磊等, 2011 修编)、红柳沟-拉配泉混杂岩带花岗质岩石分布图(b, 据 1:50 万阿尔金-东昆仑西段成矿带地质矿产图^①修编)和北阿尔金山地区地质图(c, 根据 1:25 万石棉矿幅地质图^②修编)
Fig. 1 Geological sketch map of Altyn Tagh orogen (a, modified after Kang Lei et al., 2011), distribution map of granitic rocks in Hongliugou-Lapeiquan ophiolite belt (b, modified after geology and mineral resources map in Altun-western East Kunlun metallogenic belt^①) and geological sketch map of Baijianshan in North Altyn Tagh (c, modified after geological map in Shimiankuang area^②)

I—阿北地块; II—红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带; III—米兰河-金雁山地块; IV—南阿尔金俯冲碰撞杂岩带
I—The north Altyn Archean complex; II—Hongliugou-Lapeiquan ophiolite belt; III—the Milanhe-Jinyanshan block; IV—the south Altyn continental-type subduction-collision complex

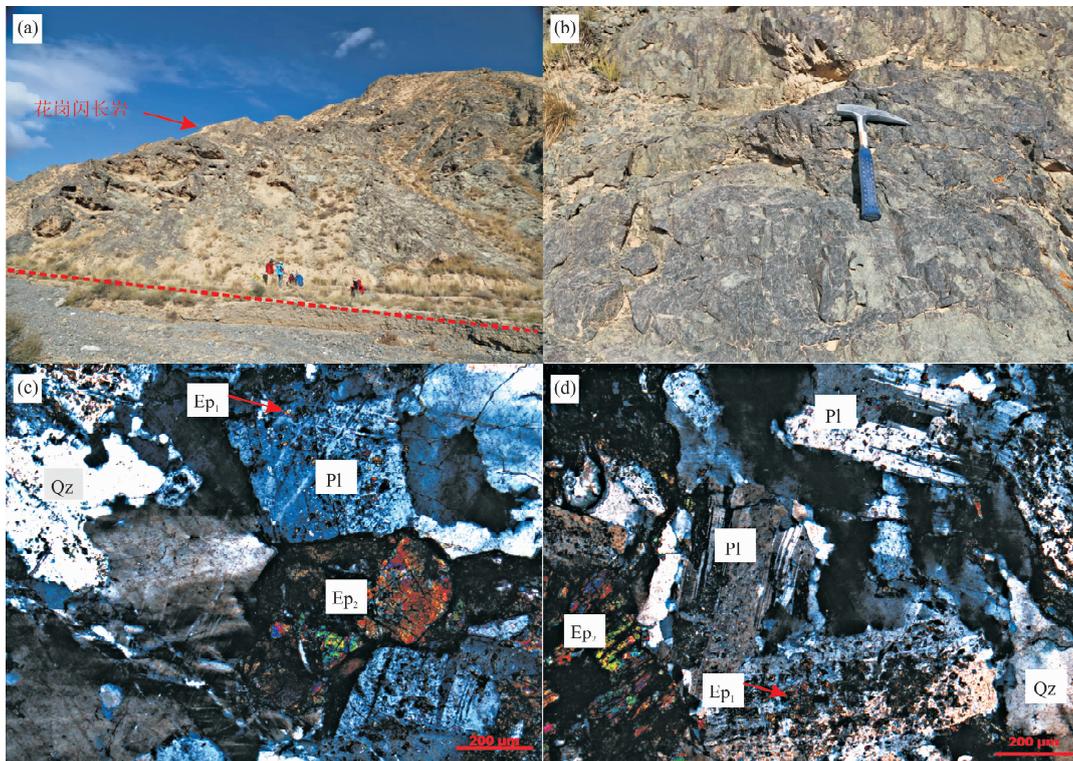


图 2 白尖山花岗闪长岩野外地质产状(a, b)及显微岩石学特征(c, d)

Fig. 2 Field occurrence (a, b) and microtextures of Baijianshan granodiorite (c, d) in North Altyn Tagh
(a), (b)—Field photo of the granodiorite; (c), (d)—microtextures of the granodiorite; Pl—plagioclase; Qz—quartz; Ep₁—the first epidote; Ep₂—the second epidote

污染的岩石部分)用于岩石地球化学分析研究,然后采用破碎机将样品粗碎至直径为 5~8 mm 的颗粒,在保证粗碎样品均匀的前提下,再利用碳化钨钵体碎样机将样品细碎至 200 目。

2.2 定年样品制备

锆石的分离挑选工作在河北廊坊诚信地质服务有限公司完成,锆石挑选完成后,对分离出的锆石在双目镜下进一步挑选出结晶好、无裂缝和透明度高的颗粒,然后用环氧树脂固定并抛光至颗粒露出一半。

2.3 全岩主量元素、微量元素分析

本文的所有测试分析工作均在西北大学大陆动

力学国家重点实验室完成。其中,全岩主量元素分析采用 XRF 玻璃熔饼法完成,分析精度一般优于 2%,处理过程为:先称取细碎样品 $0.7 \pm 0.0001\text{g}$,加入 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ $5.2 \pm 0.001\text{g}$,作为助熔剂及脱模剂的 LiF $0.4 \pm 0.001\text{g}$,氧化剂 NH_4NO_3 $0.3 \pm 0.001\text{g}$,将四者混和均匀后,放入铂金锅中,再加滴 1~2 滴脱模剂溴化锂。在 1200°C 下加热 8min,至冷却后将玻璃熔片从锅中倒出,将玻璃熔片放入荧光光谱仪(XRF)自动进样系统进行测试;微量元素分析在 Elan 6100 DRC 型 ICP-MS 上完成,样品测试中用标样 AVG-1、BHVO-1 以及 BCR-2 进行监控。

2.4 锆石 U-Pb 同位素分析

锆石样品在测定之前用浓度为 3% 的稀 HNO₃ 清洗样品表面,以除去样品表面的污染物,然后进行阴极发光(CL)照相、LA-ICP-MS 原位微量元素分析。锆石定年及微量元素分析采用的 ICP-MS 为 Agilent 公司的 Agilent7500a 型仪器。

数据分析前首先用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器的最佳化,使仪器达到最大的灵敏度、最小的氧化物产率(ThO⁺/Th⁺ < 2%) 和最低的背景值。测定过程中激光剥蚀斑束直径为 30 μm,每测定 12 个样品点测试一次 NIST610、91500 及 GJ-1,在这 12 个点之间测定完 6 个样品点后再测定 1 次 91500。数据处理采用 ICPMSDataCal8.3 程序,年龄计算以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值分馏校正;元素浓度采用 NIST610 作外标,Si 作内标。锆石谐和图用 ISOPLOT(ver3.0) 程序获得,对于年龄小于 1Ga 的年轻锆石采用 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄。

2.5 锆石 Hf 同位素分析

锆石原位 Lu-Hf 同位素测定与 U-Pb 年龄运用同一套剥蚀系统,测定过程在 Nu Plasma (Wrexham, UK) 多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上完成,分析过程中激光束斑直径为 44 μm,Hf 同位素测点点位选取在与 U-Pb 年龄点位重合或其旁侧点处,具体分析步骤和数据处理方法详见 Yuan et al. (2008)。

3 主微量元素地球化学特征

北阿尔金山白尖山花岗闪长岩全岩 SiO₂ 含量为 62.58%~65.05%,TiO₂ 为 0.47%~0.52%,Na₂O 为 2.71%~3.97%,K₂O 为 1.56%~2.89%,TF₂O₃ 为 4.99%~5.75%,全碱(K₂O + Na₂O) 为 5.36%~5.90%(表 1)。该结果表明,北阿尔金山白尖山地区花岗闪长岩具有较低的 SiO₂、全碱(Alk)含量的特征,同时具有较高的 Al₂O₃ 含量(14.78%~15.59%),MgO = 1.84%~2.95%,Mg[#] = 46~56。里特曼指数 σ < 1.8 (介于 1.4~1.7 之间),在 SiO₂-K₂O 图解中显示主体为钙碱性岩石系列(图 3a);铝饱和指数(A/CNK) < 1.0(0.89~0.98),在 A/CNK-A/NK 图解中(图 3b),所有样品投点均落在偏铝质区域。在 SiO₂-Rb/Zr 图解中(图 3c),所有样品落入 I 型和 A 型花岗岩区;而在 SiO₂-Zr 图解中,样品则均落入 I 型花岗岩区(图 3d);另外,区别 I 型与 A 型花岗质岩石的矿物学标志,是前者普遍含角闪石,而后者则含碱性暗色

矿物(Xu Xisheng and Qiu Jiansheng, 2010)。结合前述该岩石中中长石颗粒间呈近似六边形(图 2c 中的 Ep₂)和短柱状(图 2d 中的 Ep₂)形态的绿帘石可能为钙质角闪石的蚀变产物,综合分析该岩石总体应为 I 型偏铝质钙碱性花岗闪长岩。同时,本次研究的花岗闪长岩与北阿尔金山红柳沟-拉配泉混杂岩带西部恰什坎萨依岛弧型花岗闪长岩(Qi Xuexiang et al., 2005) 和巴什考供盆地北缘斯米尔布拉克的石英闪长岩(Wu Cailai et al., 2007) 均具有相似的地球化学特征(图 3)。

白尖山花岗闪长岩稀土元素总含量 ΣREE = 90.2~137.8 μg/g,稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(图 4a)显示轻重稀土元素分馏明显,轻稀土元素相对富集,其中,(La/Yb)_N = 7.56~14.03,(La/Sm)_N = 3.21~5.60,(Gd/Lu)_N = 1.34~1.63,具有弱的 Eu 负异常(δEu_N = 0.84~0.92)。在全岩原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 4b)具有 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素亏损,K、Rb、Ba 等大离子亲石元素以及 Th、U 富集的特征。同样,通过与西部恰什坎萨依岛弧型花岗闪长岩(Qi Xuexiang et al., 2005) 和巴什考供盆地北缘斯米尔布拉克石英闪长岩(Wu Cailai et al., 2007) 的对比显示,三者均具有高场强元素 Nb、Ti、P 负异常,Th 为正异常(图 4)的相似的微量元素分布特点。

4 锆石 LA-ICP-MS 定年分析

白尖山花岗闪长岩中的锆石结晶程度较好,晶面干净光滑,呈短柱状或近等轴粒状;锆石阴极发光图像显示,锆石内岩浆振荡环带清晰,未见继承性锆石及变质边(图 5);所测锆石的 Th/U 比值介于 0.30~0.75 之间,除一颗外其他均大于 0.40。以上特征表明该花岗闪长岩锆石为典型的岩浆成因(Corfu et al., 2003; Hoskin and Schaltegger, 2003)。

本次研究利用 LA-ICP-MS U-Pb 定年对 24 颗锆石进行了 24 个测点的测试分析,结果见表 2,样品投点主体落在谐和线附近,除去谐和度较低的 3 个测点,其他所有测点的年龄加权平均值为 475.2 ± 2.0 Ma(图 6a)。锆石的球粒陨石标准化稀土配分模式图显示具有明显左倾的重稀土富集型配分模式,Ce 正异常和弱的 Eu 负异常(δEu_N = 0.26~0.48),显示典型的岩浆锆石特征(图 6b 和表 3)。因此,475.2 ± 2.0 Ma 可代表白尖山花岗闪长岩的结晶年龄,即其形成时代为 475.2 ± 2.0 Ma。

表 1 白尖山花岗闪长岩的主微量 (%) 和稀土元素 ($\mu\text{g/g}$) 分析结果Table 1 Analyses data of major elements (%) and trace elements ($\mu\text{g/g}$) of Baijianshan granodiorite

样品号	14A-53a	14A-53b	14A-53c	14A-53cR	14A-53d	14A-53e	14A-53f	14A-53g
SiO ₂	65.05	62.58	63.44	63.35	62.87	63.83	62.88	63.65
TiO ₂	0.47	0.52	0.48	0.49	0.49	0.47	0.5	0.5
Al ₂ O ₃	14.78	15.59	15.48	15.41	15.58	15.22	15.1	15.28
TFe ₂ O ₃	4.99	5.75	5.41	5.41	5.69	5.46	5.7	5.52
MnO	0.1	0.12	0.12	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12
MgO	1.84	2.37	2.92	2.95	2.51	2.29	2.51	2.24
CaO	4.98	4.71	4.02	4.03	4.52	4.96	4.48	4.17
Na ₂ O	2.71	3.55	3.71	3.74	3.97	3.04	2.94	3.21
K ₂ O	2.89	2.09	2.12	2.11	1.56	2.32	2.68	2.69
P ₂ O ₅	0.12	0.14	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
LOI	1.9	2.42	2.34	2.35	2.24	2.38	2.69	2.22
TOTAL	99.83	99.84	100.16	100.09	99.69	100.22	99.73	99.73
K ₂ O+Na ₂ O	5.6	5.64	5.83	5.85	5.53	5.36	5.62	5.9
Na ₂ O/K ₂ O	0.94	1.70	1.75	1.77	2.54	1.31	1.10	1.19
A/CNK	0.89	0.93	0.98	0.98	0.95	0.92	0.95	0.97
A/NK	1.95	1.92	1.84	1.83	1.89	2.02	1.95	1.86
Mg [#]	46.22	48.99	55.71	55.96	50.69	49.43	50.65	48.60
Li	5.96	6.85	9.2	9.34	8.09	5.51	8.92	5.3
Be	1.69	1.5	1.61	1.59	1.63	1.42	1.54	1.62
Sc	14.1	15.6	15.9	15.9	14.1	14.4	15.4	14.9
V	126	121	122	122	120	117	123	119
Cr	22.4	15.3	14.6	19.5	13.3	14.6	14.8	15.6
Co	21.2	20.2	25.8	25.6	23.7	21.1	17	22
Ni	11.2	7.29	6.16	10.1	6.07	6.86	7.34	7.92
Cu	32.5	30.6	25.9	25.3	23.1	16.9	5.81	29.5
Zn	46.6	56.3	59.9	58.9	58.8	52.2	57.7	54.9
Ga	14.9	15	15.3	15.2	15	14.2	14.4	14.8
Ge	1.41	1.32	1.24	1.23	1.27	1.16	1.2	1.4
Rb	67.5	47.6	48.9	48.8	36.6	56.9	72.6	72
Sr	373	317	241	241	271	309	332	331
Y	17.5	17.3	16.9	17	14	14.8	16.1	16.9
Zr	122	134	130	122	142	119	128	119
Nb	9.4	8.6	8.99	8.99	8.68	7.82	8.23	8.87
Cs	0.35	0.28	0.36	0.35	0.22	0.31	0.53	0.48
Ba	929	846	739	735	554	894	933	803
La	28.5	27.3	33.9	33.4	19.1	16.8	18.9	25.1
Ce	53.1	52.8	59.3	59	39.6	37.6	41.4	52
Pr	5.75	5.62	6.11	6.09	4.47	4.45	4.86	5.65
Nd	20.9	20.5	22.3	22.3	16.3	16.7	18.5	20.1
Sm	3.95	3.91	3.91	3.96	3.16	3.39	3.68	3.84
Eu	1.05	1.04	1.04	1.05	0.9	0.99	1.03	1.04
Gd	3.5	3.5	3.49	3.46	2.86	3.09	3.32	3.42
Tb	0.5	0.49	0.48	0.49	0.41	0.44	0.47	0.48
Dy	2.93	2.87	2.81	2.83	2.39	2.56	2.78	2.87
Ho	0.58	0.57	0.56	0.57	0.49	0.52	0.57	0.58
Er	1.73	1.69	1.69	1.69	1.45	1.56	1.65	1.73
Tm	0.26	0.25	0.25	0.26	0.23	0.24	0.25	0.26
Yb	1.74	1.74	1.73	1.72	1.59	1.6	1.72	1.75
Lu	0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.25	0.27	0.28
Hf	3.2	3.47	3.43	3.3	3.83	3.11	3.4	3.34
Ta	0.85	0.66	0.68	0.68	0.55	0.55	0.6	0.71
Pb	15.7	15	15.1	15.5	15.6	14.7	16.2	16.8
Th	17.1	16.9	20.6	20.4	15.8	13.8	12	16.6
U	2.94	1.82	2.83	2.81	2.19	1.83	3.53	2.68
ΣREE	124.81	122.63	137.85	137.02	93.25	90.19	99.46	119.09
δEu _N	0.84	0.84	0.85	0.85	0.89	0.92	0.88	0.86
(La/Yb) _N	11.76	11.28	14.03	13.97	8.62	7.56	7.91	10.30
(La/Sm) _N	4.66	4.52	5.60	5.46	3.91	3.21	3.33	4.21
(Gd/Lu) _N	1.58	1.63	1.58	1.59	1.34	1.53	1.49	1.50

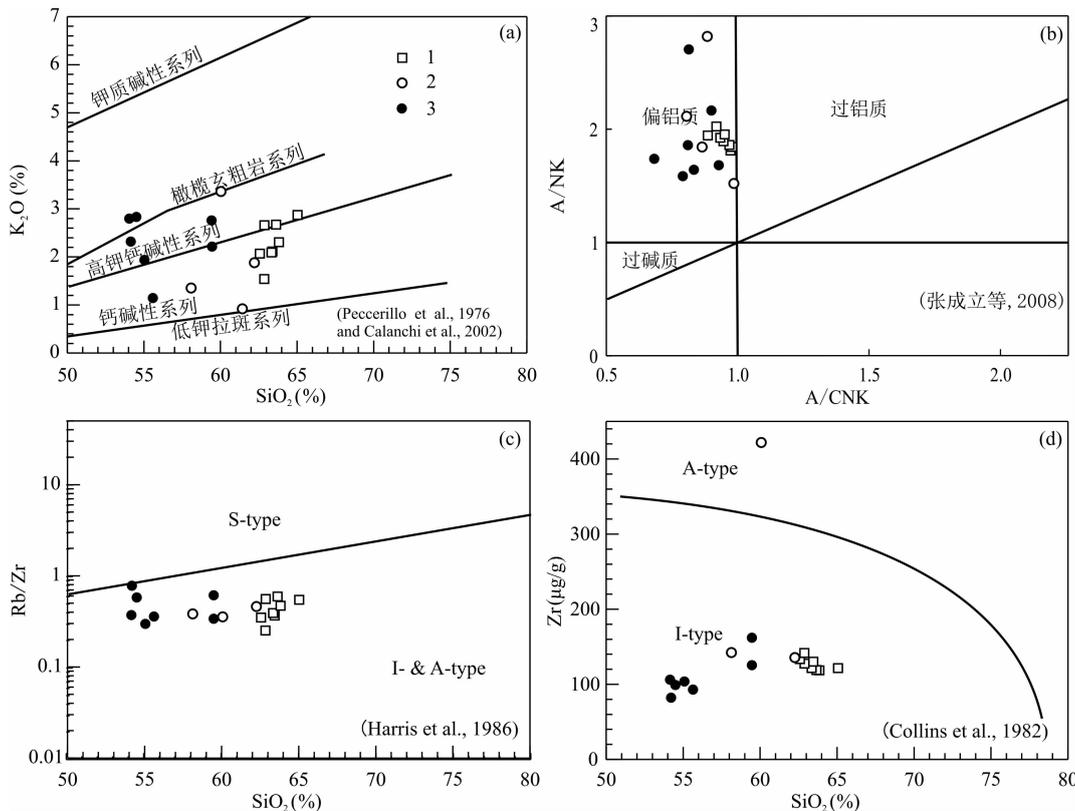


图 3 花岗闪长岩 SiO_2 - K_2O 图解(a, 据 Peccerillo et al., 1976 和 Calanchi et al., 2002), A/CNK - A/NK 图解(b, 据张成立等, 2008 和张辉善等, 2016), SiO_2 - Rb/Zr 图解(c, 据 Harris et al., 1986)及 SiO_2 - Zr 图解(d, 据 Collins et al., 1982)
 Fig. 3 SiO_2 - K_2O plot (a, after Peccerillo et al., 1976 and Calanchi et al., 2002), A/CNK - A/NK plot (b, after Zhang Chengli et al., 2008 and Zhang Huishan et al., 2016), SiO_2 - Rb/Zr plot (c, after Harris et al., 1986) and SiO_2 - Zr plot (d, after Collins et al., 1982) of granodiorite

1—白尖山花岗闪长岩(本文); 2—红柳沟-拉配泉混杂岩带西部恰什坎萨依花岗闪长岩(据戚学祥等, 2005);
 3—巴什考供盆地北缘斯米尔布拉克石英闪长岩(据吴才来等, 2007)

1—Baijianshan granodiorite (this paper); 2—Qishikansayi granodiorite in the west of Hongliugou-Lapeiquan ophiolite belt (after Qi Xuexiang et al., 2005); 3—Simierbulake quartz-diorite in the north margin of the Bashikaogong Basin (after Wu Cailai et al., 2007)

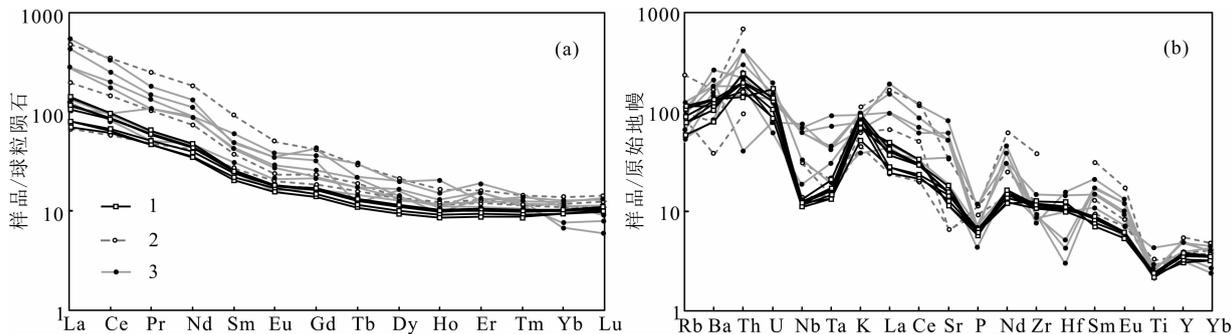


图 4 花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)及微量元素对原始地幔标准化蛛网图(b)
 (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive-mantle normalized spider diagram (b) of granodiorite (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

1—白尖山花岗闪长岩(本文); 2—红柳沟-拉配泉混杂岩带西部恰什坎萨依花岗闪长岩(据戚学祥等, 2005);
 3—巴什考供盆地北缘斯米尔布拉克石英闪长岩(据吴才来等, 2007)

1—Baijianshan granodiorite (this paper); 2—Qishikansayi granodiorite in the west of Hongliugou-Lapeiquan ophiolite belt (after Qi Xuexiang et al., 2005); 3—Simierbulake quartz-diorite in the north margin of the Bashikaogong Basin (after Wu Cailai et al., 2007)

表 2 白尖山花岗闪长岩锆石 U-Pb 测试结果

Table 2 Zircon U-Pb isotope data for Baijianshan granodiorite

样品号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
14A-53-02	85.9	321	677	0.47	0.0586	0.0022	0.6132	0.0256	0.0754	0.001	550	77	486	16	469	6
14A-53-04	124	476	864	0.55	0.0581	0.0012	0.6147	0.0171	0.0763	0.0013	600	51	487	11	474	8
14A-53-05	24.8	65.4	215	0.3	0.058	0.0023	0.6118	0.0239	0.0762	0.001	532	85	485	15	473	6
14A-53-06	116	509	742	0.69	0.0573	0.0015	0.6158	0.0161	0.0776	0.0008	506	53	487	10	482	5
14A-53-07	165	720	1121	0.64	0.0577	0.0012	0.601	0.0127	0.0751	0.0007	520	44	478	8	467	4
14A-53-08	75.8	278	571	0.49	0.0581	0.0017	0.6102	0.0178	0.076	0.0009	532	65	484	11	472	5
14A-53-09	97.7	351	739	0.48	0.0585	0.0013	0.6225	0.015	0.0768	0.0009	550	50	491	9	477	5
14A-53-10	189	879	1176	0.75	0.0567	0.0012	0.6	0.0125	0.0765	0.0008	480	44	477	8	475	5
14A-53-11	87.4	335	634	0.53	0.0559	0.0012	0.5982	0.0129	0.0773	0.0007	456	48	476	8	480	4
14A-53-12	30.9	114	212	0.54	0.0586	0.0023	0.6175	0.0221	0.077	0.0012	550	87	488	14	478	7
14A-53-13	65.7	225	533	0.42	0.0577	0.0014	0.6124	0.0152	0.0766	0.0008	520	54	485	10	476	5
14A-53-14	52	173	432	0.4	0.057	0.0014	0.6094	0.0149	0.0773	0.0008	500	54	483	9	480	5
14A-53-15	84.8	303	651	0.46	0.0586	0.0019	0.6196	0.0192	0.0765	0.001	550	70	490	12	475	6
14A-53-16	87.5	351	666	0.53	0.0568	0.0013	0.5912	0.0138	0.0752	0.0007	483	50	472	9	467	4
14A-53-18	84.1	332	571	0.58	0.0567	0.0014	0.6065	0.0143	0.0774	0.0008	480	83	481	9	481	5
14A-53-19	54.9	189	454	0.42	0.0581	0.0016	0.6131	0.0156	0.0766	0.0007	600	57	486	10	476	4
14A-53-20	67.6	266	481	0.55	0.0559	0.0014	0.5871	0.0145	0.0759	0.0007	456	56	469	9	472	4
14A-53-21	47.1	158	390	0.41	0.0551	0.0015	0.5898	0.0156	0.0776	0.0006	413	59	471	10	482	4
14A-53-22	83.5	309	622	0.5	0.0587	0.0014	0.6197	0.0143	0.0766	0.0007	567	52	490	9	476	4
14A-53-23	79.4	298	645	0.46	0.059	0.0013	0.6185	0.0141	0.0758	0.0007	565	48	489	9	471	4
14A-53-24	53.7	216	385	0.56	0.0587	0.0023	0.6208	0.0234	0.0768	0.0009	554	81	490	15	477	6

表 3 白尖山花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石稀土元素测定结果($\mu\text{g/g}$)Table 3 LA-ICP-MS trace element analyses ($\mu\text{g/g}$) of zircon from Baijianshan granodiorite

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	δEu_N
14A-53-02	0.23	13.4	0.18	1.72	2.69	1.13	13.0	4.16	54.8	21.1	115	29.1	361	65.2	0.48
14A-53-04	0.00	15.9	0.04	1.52	1.84	0.81	10.4	3.86	50.7	20.4	108	27.9	337	61.6	0.45
14A-53-05	0.01	5.91	0.02	0.40	0.78	0.29	4.94	1.79	23.8	9.76	53.2	13.9	180	32.4	0.35
14A-53-06	4.39	37.2	1.08	5.93	2.74	1.08	13.2	4.40	57.3	22.7	120	29.4	358	68.8	0.45
14A-53-07	0.11	20.8	0.12	1.68	2.92	1.07	15.1	4.97	64.4	26.6	136	32.9	400	73.7	0.40
14A-53-08	0.02	12.2	0.09	1.57	2.70	0.93	11.8	3.96	50.9	20.7	109	27.4	333	63.4	0.43
14A-53-09	0.28	16.3	0.28	2.61	3.12	1.02	13.1	4.27	58.0	23.6	126	32.4	402	76.4	0.42
14A-53-10	0.00	23.0	0.08	1.32	2.46	1.07	16.0	5.24	68.6	27.6	144	35.0	422	78.3	0.39
14A-53-11	0.02	13.8	0.13	2.05	2.73	1.15	14.8	4.78	60.6	24.2	126	31.0	379	70.1	0.44
14A-53-12	0.22	14.1	0.11	1.59	2.97	0.65	14.1	4.31	53.3	20.1	95.5	21.4	227	36.9	0.26
14A-53-13	0.00	10.7	0.05	1.09	2.09	0.64	9.04	3.08	41.1	17.1	91.4	22.6	279	53.5	0.38
14A-53-14	2.78	13.7	0.53	3.23	1.27	0.38	5.83	1.75	23.9	9.43	50.4	12.8	159	30.1	0.36
14A-53-15	0.16	14.1	0.08	1.22	1.40	0.55	6.97	2.49	31.8	12.7	66.8	16.9	204	37.0	0.44
14A-53-16	0.05	13.3	0.17	2.52	3.76	1.19	16.2	5.16	65.6	25.5	133	32.4	389	71.9	0.40
14A-53-18	2.44	16.9	0.64	5.11	5.09	1.65	19.7	6.06	70.8	26.5	133	31.1	372	67.3	0.44
14A-53-19	0.00	9.38	0.03	0.58	1.08	0.48	5.83	2.01	27.7	11.7	63.2	16.0	197	39.2	0.46
14A-53-20	0.49	11.3	0.20	2.52	3.14	1.20	14.2	4.60	54.7	21.4	109	25.5	308	57.4	0.46
14A-53-21	0.00	8.63	0.03	0.73	1.50	0.50	7.29	2.61	34.0	14.7	80.3	20.1	254	50.3	0.38
14A-53-22	0.03	13.0	0.11	1.14	2.28	0.91	11.2	4.19	52.1	21.8	115	28.5	339	64.9	0.45
14A-53-23	0.00	13.3	0.04	0.86	1.53	0.56	7.72	2.67	36.9	16.1	89.5	23.2	290	58.0	0.41
14A-53-24	0.01	9.36	0.15	2.86	5.43	1.60	21.0	6.97	83.3	32.5	158	37.1	416	73.4	0.40

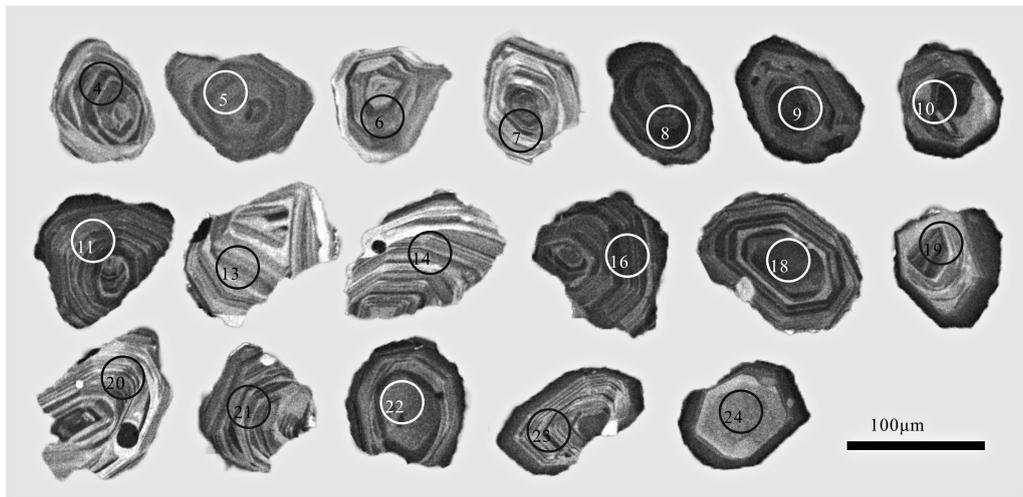


图5 白尖山花岗闪长岩的锆石 CL 图像

Fig. 5 CL image of zircons from Baijianshan granodiorite

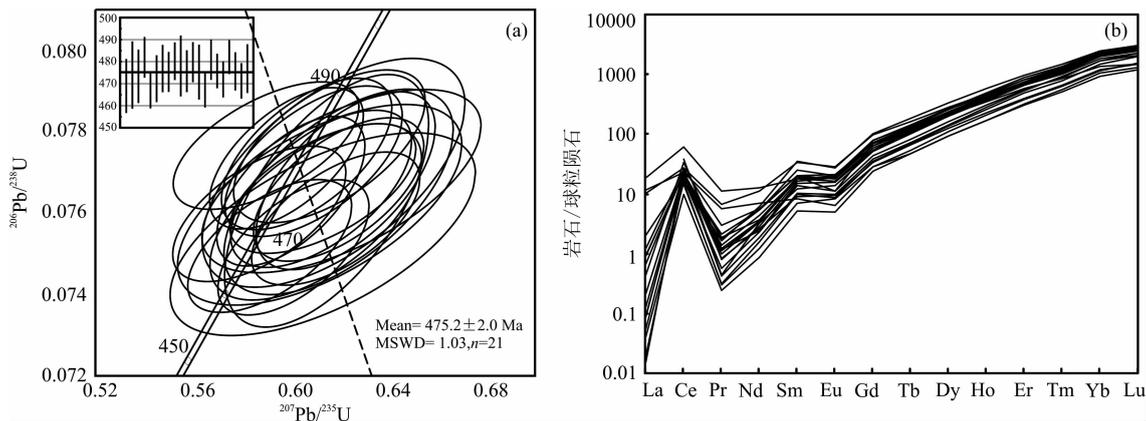


图6 白尖山花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄谱和图(a)及球粒陨石标准化稀土配分模式图(b)

Fig. 6 Zircon U-Pb age concordia diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Baijianshan granodiorite

5 锆石 Hf 同位素分析

对白尖山花岗闪长岩样品中 U-Pb 年龄谱和度高的 21 个测点进行 Hf 同位素测定, 获得了 19 个点位的 Hf 同位素分析数据(表 4)。结果显示, 所有锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 都小于 0.0017, 表明该样品中锆石放射性成因的 ^{176}Hf 可以忽略不计, 所测得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 基本可以代表其形成时的初始值(Patchett, 1983; Wu Fuyuan et al., 2007)。据 Hf 同位素相关计算公式(Wu Fuyuan et al., 2007), 可知白尖山花岗闪长岩中的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围为 0.282403~0.282706, 均值为 0.282527, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.96 \sim 7.99$, 其数值变化较大, 且以正值为主(表 4 及图 7)。

白尖山花岗闪长岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的变化范围为 $-2.96 \sim 7.99$, 其变化范围较大的 Hf 同位素组成是

由于源区物质组成不均一或是不充分的岩浆混染作用造成的(Zheng et al., 2008)。锆石的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 为 $-0.98 \sim -0.95$, 均值为 -0.97 , 明显小于镁铁质地壳的 -0.34 , 亦小于硅铝质地壳的 -0.72 , 故采用二阶段模式年龄来反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间(或其源区物质在地壳中平均存留年龄), 样品锆石的二阶段模式年龄 T_{DM2} 的变化范围为 886~1490 Ma。

6 讨论

6.1 岩浆物质来源

实验岩石学表明, 地壳中的基性岩类(玄武质成分)部分熔融形成化学成分偏基性的准铝质花岗闪长质岩石(Johannes and Holtz, 1996; Sisson et al., 2004); 地壳中碎屑沉积岩类部分熔融形成偏酸性的过铝质花岗岩石; 泥沙质沉积岩类部分熔融

表 4 白尖山花岗闪长岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 4 LA-MC-ICP-MS zircon Hf isotopic compositions of Baijianshan granodiorite

样品号	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	T_{DM1}	T_{DM2}	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
14A-53-2	469	0.019719	0.000937	0.282464	0.000028	-10.89	-0.86	1.12	1112	1367	-0.97
14A-53-4	474	0.023546	0.001085	0.282507	0.000030	-9.39	0.71	1.20	1057	1285	-0.97
14A-53-5	473	0.017202	0.000783	0.282606	0.000029	-5.86	4.31	1.18	909	1085	-0.98
14A-53-6	482	0.023509	0.001079	0.282459	0.000028	-11.06	-0.79	1.13	1123	1374	-0.97
14A-53-7	467	0.016268	0.000778	0.282574	0.000024	-7.00	3.04	1.01	954	1150	-0.98
14A-53-8	472	0.022954	0.001065	0.282438	0.000028	-11.81	-1.75	1.14	1152	1419	-0.97
14A-53-9	477	0.029871	0.001399	0.282456	0.000028	-11.17	-1.11	1.15	1137	1388	-0.96
14A-53-10	480	0.018037	0.000864	0.282706	0.000025	-2.32	7.99	1.05	770	886	-0.97
14A-53-11	478	0.020711	0.000829	0.282592	0.000027	-6.36	3.91	1.10	930	1111	-0.98
14A-53-12	470	0.014155	0.000671	0.282681	0.000026	-3.21	6.94	1.06	801	936	-0.98
14A-53-13	480	0.012196	0.000579	0.282453	0.000032	-11.28	-0.90	1.24	1117	1379	-0.98
14A-53-14	475	0.037680	0.001698	0.282533	0.000025	-8.44	1.49	1.04	1036	1243	-0.95
14A-53-15	467	0.024596	0.001124	0.282497	0.000027	-9.73	0.21	1.11	1071	1307	-0.97
14A-53-17	481	0.027715	0.001293	0.282431	0.000023	-12.04	-1.87	0.97	1169	1433	-0.96
14A-53-18	472	0.012964	0.000619	0.282549	0.000027	-7.89	2.31	1.10	985	1195	-0.98
14A-53-19	482	0.019482	0.000924	0.282544	0.000029	-8.08	2.24	1.15	1000	1206	-0.97
14A-53-20	476	0.020610	0.000963	0.282578	0.000027	-6.85	3.33	1.09	953	1141	-0.97
14A-53-21	477	0.028386	0.001252	0.282403	0.000029	-13.07	-2.96	1.18	1208	1490	-0.96
14A-53-22	471	0.016413	0.000802	0.282539	0.000026	-8.25	1.87	1.07	1004	1218	-0.98

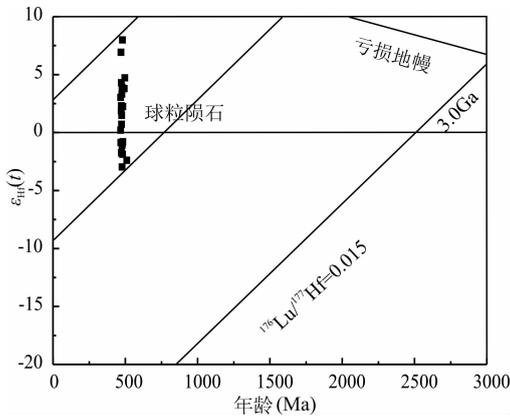


图 7 白尖山花岗闪长岩锆石 Hf 同位素 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图解

Fig. 7 Zircon Hf isotopic $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -age plot of Baijianshan granodiorite

形成强烈富铝和富钾的花岗岩 (Patino Douce and Harris, 1998)。Rapp 和 Watson(1995) 针对变质玄武岩部分熔融的研究进一步认为, 压力较高时脱水部分熔融产生具有高 Na_2O 特征的熔体。对于源岩由地壳沉积岩熔融形成的花岗岩, Sylvester(1998) 认为富黏土的泥质岩源岩熔体的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 较低 (<0.3), 而来自于贫黏土的砂屑质源岩熔体的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 较高 (>0.3); 而对于泥质岩源岩熔融产生的花岗岩, Harris 和 Inger(1992) 研究认为其还具有高 Sr/Ba (0.5~1.6) 及正 Eu 异常等特征。

白尖山 I 型花岗闪长岩 SiO_2 含量较低 (62.58%~65.05%), 富 Na_2O (2.71%~3.97%), 铝饱和指数

(A/CNK) <1.0 (0.89~0.98), 为准铝质钙碱性岩石系列, 这些主要特点与上述基性岩部分熔融的熔体特征基本吻合。同时, 该岩石的其它特点, 如 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 介于 1.1~1.8 之间 (>0.3)、弱 Eu 负异常及低 Sr/Ba (0.3~0.5) 又暗示基性岩熔融产生的熔体在上升过程中可能还受到了砂屑质地壳沉积岩的混染。另外, 在不同源岩脱水熔融产生花岗质岩石的相关图解中 (图 8), 该岩石样品投点落入基性岩与变质杂砂岩的重叠区 (图 8a), 变玄武岩区或变硬砂岩区以及变玄武岩与变硬砂岩的混合区域 (图 8b~d); 此外, 该岩石样品锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围较大 (表 4 及图 7), 大部分为正值, 最高可达 7.99。上述特征共同表明白尖山花岗闪长岩应是基性地壳物质部分熔融的产物, 并在侵位过程中受到了上地壳砂屑质 (杂砂岩等) 物质的混染。由图 8 还可以看出, 西部恰什坎萨依岛弧型花岗闪长岩 (Qi Xuexiang et al., 2005) 和巴什考供盆地北缘斯米尔布拉克的石英闪长岩 (Wu Cailai et al., 2007) 与本文研究的白尖山花岗闪长岩具有相似的源岩特征。

6.2 岩石成因类型

已有研究表明, 北阿尔金山红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带西段出露早古生代的高压泥质片岩、蓝片岩与榴辉岩 (Zhang Jianxin et al., 2007), 并发育大量与洋壳俯冲作用有关的花岗质岩石组合 (Chen Xuanhua et al., 2003; Qi Xuexiang et al., 2005; Wu Cailai et al., 2005, 2007; Kang Lei et al.,

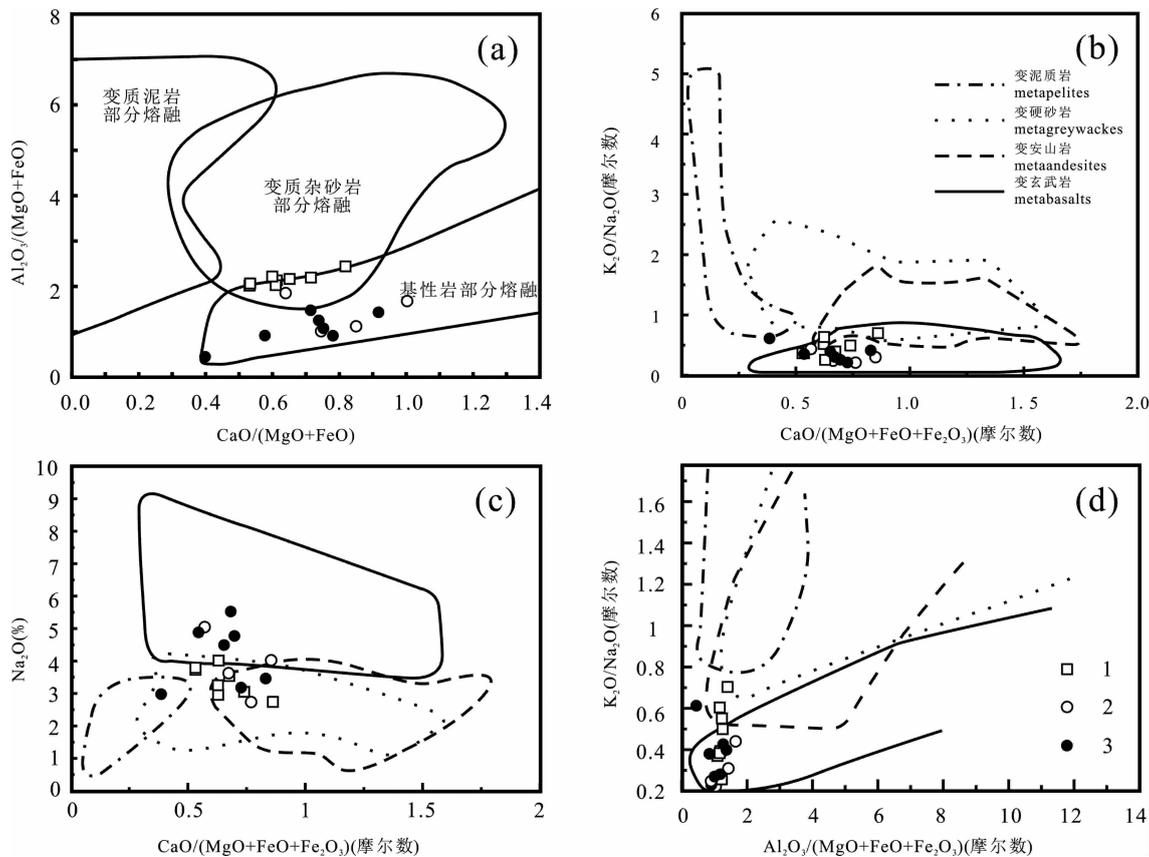


图 8 不同源岩脱水部分熔融实验获得的熔体成分图解(a, 据 Altherr et al., 2000 and Zhang Yafeng et al., 2015; b~d, 据 Rainer and Wolfgang, 2002; 吴才来等, 2007)

Fig.8 The diagrams for different chemical compositions by dehydration melting of various rocks obtained in experimental studies (a, after Altherr et al., 2000 and Zhang Yafeng et al., 2015; b~d, after Rainer and Wolfgang, 2002 and Wu Cailai et al., 2007)

- 1—白尖山花岗闪长岩(本文); 2—红柳沟-拉配泉混杂岩带西部恰什坎萨依花岗闪长岩(据戚学祥等, 2005);
- 3—巴什考供盆地北缘斯米尔布拉克石英闪长岩(据吴才来等, 2007)

1—Baijianshan granodiorite (this paper); 2—Qiashekansayi granodiorite in the west of Hongliugou-Lapeiquan ophiolite belt (after Qi Xuexiang et al., 2005); 3—Simierbulake quartz-diorite in the north margin of the Bashikaogong Basin (after Wu Cailai et al., 2007)

2011; Gao Xiaofeng et al., 2012; Gai Yongsheng et al., 2015), 表明早古生代时期北阿尔金洋壳俯冲作用及其岛弧岩浆作用的存在。如红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带西部的红柳沟钾长花岗岩(Kang Lei et al., 2011)、恰什坎萨依花岗闪长岩(Qi Xuexiang et al., 2005)和巴什考供石英闪长岩(Wu Cailai et al., 2007), 均形成于岛弧背景下, 可能与该时期洋壳俯冲板片脱水产生的流体诱发地壳岩石的部分熔融作用有关。然而, 红柳沟钾长花岗岩的形成时代为 500 ± 1.2 Ma, 具有富 SiO_2 (72.95%~74.49%) 贫 CaO (1.05%~2.02%) 的特征; 而恰什坎萨依花岗闪长岩和巴什考供石英闪长岩的形成时代相近(分别为 481.5 ± 5.3 Ma 与 481.6 ± 5.6 Ma), 此二者 SiO_2 含量相对较低(54.12%~

62.25%) 而富 CaO (3.44%~8.27%), 前者形成时代明显早于后二者, 前者的地球化学特征亦明显不同于后二者, 这些差异暗示它们的形成可能对应于洋壳俯冲不同阶段脱水产生的流体所诱发的不同深度地壳岩石的部分熔融。据 Wei Chunjing and Zhang Yinghui (2008) 的研究, 洋壳俯冲作用产生流体可发生在不同的俯冲阶段, 这是由于矿物发生脱水所需的温压条件不同所致。即在洋壳俯冲的早期, 其俯冲深度不深, 流体诱发部分熔融的可能是中上地壳物质, 因此形成 SiO_2 含量较高和贫 CaO 的花岗质岩石; 而随着俯冲深度的增加, 温度、压力均增大, 流体会引起下地壳基性物质的部分熔融, 从而形成 SiO_2 含量较低和富 CaO 的花岗质岩石。

本文研究的白尖山花岗闪长岩 SiO_2 含量相对

较低 (62.58% ~ 65.05%), 富 CaO (4.02% ~ 4.98%), 这一特点与恰什坎萨依花岗闪长岩和巴什考供石英闪长岩非常相似, 而且它们三者的形成时代基本一致。结合区域地质背景, 可以认为白尖山花岗闪长岩及红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带西部恰什坎萨依花岗闪长岩和巴什考供石英闪长岩可能是洋壳俯冲中晚期, 温压条件增大, 洋壳脱水产生流体导致下地壳基性岩石部分熔融的产物, 而红柳沟钾长花岗岩则是洋壳俯冲早期较浅深度所释放的流体诱发中上地壳沉积岩部分熔融的产物。

目前, 一般认为花岗质岩石大多是绝热上升就位的, 在此过程中温度变化慢而压力变化较快, 所以岩浆早期结晶时的温度可以近似代表岩浆起源时的温度 (Wu Fuyuan, 2007)。因此, 为进一步确定该花岗闪长岩源岩的熔融条件, 本文采用锆石饱和温度计和锆石钛温度计 (Watson and Harrison, 1983; Ferry and Watson, 2007) 探讨其熔融温度。利用锆石饱和温度计 (Watson and Harrison, 1983) 和锆石钛温度计 (Ferry and Watson, 2007), 计算白尖山花岗闪长岩的结晶温度见表 5。从表中可以看出, 两种温度计的计算结果比较一致, 介于 722~780°C 之间, 可近似代表白尖山花岗闪长质岩浆的起源温度。

6.3 岩浆活动的构造环境

本文的白尖山花岗闪长岩具有 K、Rb、Ba 等大离子亲石元素以及 Th、U 富集, Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素亏损的特征, 这一特点与成熟岛弧地壳岩石 (Qi Xuexiang et al., 2005) 及北祁连岛弧玄武岩 (Xia Linqi, 1995) 相似 (Xia Linqi et al., 1995)。另外, 在 Sr/Y-Y 图解上 (图 9a), 样品投点落入岛弧岩浆岩区, 在 Pearce et al. (1984) Ta-Yb, Nb-Y 和 Rb-(Y+Nb) 微量元素构造环境判别图解上 (图 9b~d), 本文样品的所有投点都落在火山弧花岗岩区。结合前述区域地质背景综合分析, 该花岗闪长岩应形成于与洋壳俯冲有关的岛弧构造环境。

6.4 构造地质意义

前已述及, 本次研究的北阿尔金红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带东部白尖山花岗闪长岩与该混杂岩带西部恰什坎萨依花岗闪长岩 (Qi Xuexiang et al., 2005) 和巴什考供盆地北缘的石英闪长岩 (Wu Cailai et al., 2007) 具有基本一致的形成时代和相似的地球化学特征, 因此, 白尖山花岗闪长岩应为红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带东部地区早古生代洋壳俯冲岛弧岩浆活动的组成部分, 与西部红柳沟地区 (恰什坎萨依与巴什考供盆地北缘) 的花岗闪长岩和

石英闪长岩共同构成北阿尔金早古生代洋壳俯冲产生的岛弧岩浆岩带。

表 5 白尖山花岗闪长岩锆石饱和温度计和锆石 Ti 温度计计算结果

Table 5 Values by zircon saturation thermometer and Ti-in-zircon thermometer for Baijianshan granodiorite

样品号	锆石饱和温度计		
	M	D_{Zr}	T_{Zr} (°C)
14A-53a	1.79	4065.57	736
14A-53b	1.77	3701.49	745
14A-53c	1.67	3815.38	749
14A-53cR	1.69	4065.57	743
14A-53d	1.74	3492.96	751
14A-53e	1.76	4168.07	736
14A-53f	1.72	3875.00	745
14A-53g	1.68	4168.07	742

锆石序号	锆石 Ti 温度计	
	Ti	$T_{(Ti)}$ (°C)
14A-53-02	4.03	722
14A-53-04	6.31	762
14A-53-05	7.73	780
14A-53-06	4.72	736
14A-53-07	5.14	743
14A-53-08	5.62	751
14A-53-09	6.19	760
14A-53-10	6.08	758
14A-53-11	6.49	764
14A-53-13	5.06	742
14A-53-14	4.98	740
14A-53-15	5.79	754
14A-53-16	5.71	752
14A-53-18	5.33	746
14A-53-19	5.62	751
14A-53-20	4.62	734
14A-53-21	5.15	743
14A-53-22	6.26	761
14A-53-23	6.12	759

注: $M = (2Ca + K + Na) / (Si \times Al)$, 令 $Si + Al + Fe + Mg + Ca + Na + K + P = 1$ (均为原子数分数), D_{Zr} 近似为 $496000 / \text{全岩锆含量}$, T_{Zr} (°C) = $129000 / [\ln D_{Zr} + 0.85M + 2.95] - 273.15$ (Bruce Watson and Harrison, 1983); $T_{(Ti)}$ (°C) = $5080 / (5.711 - \lg(Ti)) - 273.15$ (Ferry and Watson, 2007)。

另外, 依据恰什坎萨依花岗闪长岩和巴什考供盆地北缘的石英闪长岩分布在红柳沟蛇绿混杂岩带的北、南两侧的地质产状特征 (图 1b), Liu Han et al., (2013) 认为北阿尔金洋盆西部具有双向俯冲的性质。而在该蛇绿混杂岩带的东部 (图 1b), 其北侧出露本文研究的白尖山花岗闪长岩, 南侧喀腊大湾地区出露形成时代为 477 ± 4 Ma 的石英闪长岩 (Han Fengbin et al., 2012), 南、北两侧花岗质岩石的形成时代基本一致, 同样表明北阿尔金洋盆东部

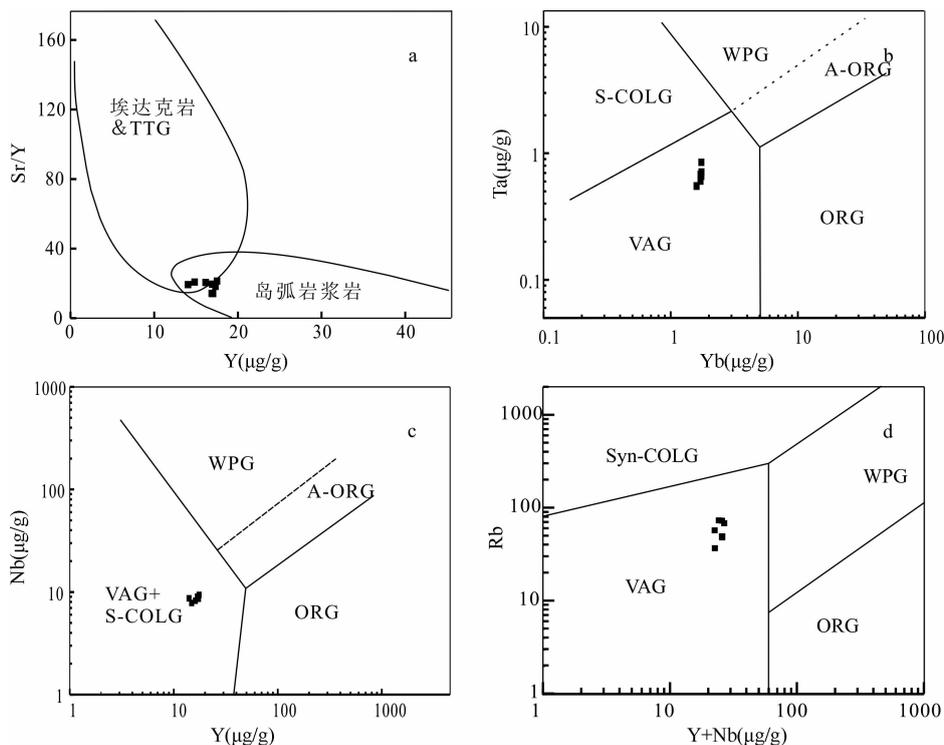


图9 白尖山花岗闪长岩 Sr/Y-Y 图解(a, 据 Defant and Drummond, 1990 修改)及微量元素构造环境判别图(b~d, 据 Pearce et al., 1984 and Mabi Awei et al., 2015)

Fig. 9 Sr/Y-Y plot (a, modified after Defant and Drummond, 1990) and diagrams for discriminating environment by trace element (b~d, after Pearce et al., 1984 and Mabi Awei et al., 2015) of Baijianshan granodiorite

VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩; S-COLG—同碰撞花岗岩

VAG—Volcanic arc granites; ORG—ocean ridge granites; WPG—within plate granites; S-COLG—syn-collision granites

亦可能具有双向俯冲的性质。因此,整个北阿尔金洋盆早古生代俯冲时期具有双向性。

7 结论

(1) 主、微量元素特征表明,白尖山地区花岗闪长岩属于 I 型偏铝质钙碱性岩石系列,并显示出典型的岛弧型岩浆岩性质。

(2) 该花岗闪长岩具有 SiO_2 含量相对较低(62.58%~65.05%)和富 CaO (4.02%~4.98%)的地球化学特征,并结合与实验岩石学资料的对比和锆石 Hf 同位素组成的分析,该花岗闪长岩应为洋壳俯冲板片脱水诱发下地壳基性岩石部分熔融而产生的初始岩浆结晶作用的产物,同时在岩浆侵位过程中还受到地壳物质(杂砂岩等)的混染。

(3) 锆石 U-Pb 定年结果表明白尖山花岗闪长岩的形成年龄为 475.2 ± 2.0 Ma,结合区域地质背景及前人对红柳沟-拉配泉俯冲蛇绿混杂岩带东、西段大量花岗质岩石的研究,本文认为白尖山地区花岗闪长岩形成于洋壳俯冲有关的岛弧环境,可以与该混杂岩带西部红柳沟地区同类岩石构成早奥陶纪

一个共同的岛弧带。此外,由西到东红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带的南北两侧均发育早古生代与洋壳俯冲有关的花岗质岩石,表明整个北阿尔金洋俯冲时期可能具有双向性。

注释

- ① 1:50万阿尔金-东昆仑西段成矿带地质矿产图. 西安地质矿产研究所.
- ② 石棉矿幅(J46C001002)1:25万地质图. 天津地质矿产研究所. 2007.

References

- Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C, Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1/3): 51~73.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605~626.
- Calanchi N, Peccerillo A, Tranne C A, Lucchini F, Rossi P L, Kempton P, Barbieri M, Wu T W. 2002. Petrology and geochemistry of volcanic rocks from the island of Panarea: implications for mantle evolution beneath the Aeolian island arc

- (southern Tyrrhenian sea). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115(3~4): 367~395.
- Che Zicheng, Liu Liang, Liu Hongfu, Luo Jinhai. 1995. Discovery and occurrence of high-pressure metapelitic rocks from Altun Mountain areas, Xinjiang Autonomous Region. *Chinese Science Bulletin*, 40(23): 1988~1991 (in Chinese with English abstract).
- Che Zicheng, Liu Liang, Luo Jinhai. 2002. *Geotectonics of China and Adjacent Regions*. Beijing: Science Press, 207~369 (in Chinese).
- Chen Bolin, Li Songbin, Jiang Rongbao, Chen Zhengle, Han Fengbin, Cui Lingling, Li Li, Zhao Shuming, Qi Wanxiu, Yang Yi, Wang Shixin, Wang Yong, Zhou Yonggui, Hao Ruixiang. 2016. Zircon SHRIMP U-Pb dating of intermediate-felsic volcanic rocks from the Kaladawan Area, Altun Mountains and its tectonic environment. *Acta Geologica Sinica*, 90(4): 708~727(in Chinese with English abstract).
- Chen Xuanhua, George G, Wang Xiaofeng, Yang Feng, Chen Zhengle. 2003. Granite from North Altyn Tagh, NW China: U-Pb Geochronology and Tectonic Setting. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 22(4): 294~298 (in Chinese with English abstract).
- Collins B J, Beams S D, White A J R, et al. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions To Mineralogy and Petrology*, 80: 189~200.
- Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469~500.
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347, 662~665.
- Ferry J M, Watson E B. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429~437.
- Gai Yongsheng, Liu Liang, Kang Lei, Yang Wenqiang, Liao Xiaoying, Wang Yawei. 2015. The origin and geologic significance of plagiogranite in ophiolite belt at North Altyn Tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2549~2565 (in Chinese with English abstract).
- Gao Xiaofeng, Xiao Peixi, Guo Lei, Dong Zengchan, Xi Rengang. 2012. Opening of an early Paleozoic limited oceanic basin in the northern Altyn area: Constraints from plagiogranites in the Hongliugou-Lapeiquan ophiolitic melange. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 42(3): 359~368 (in Chinese).
- Gehrels G E, Yin A, Wang X F. 2003. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 108(B9): ETG 5~1.
- Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Wang Jianjun. 1998. Sm-Nd isochron age of the ophiolite belt at the margin of the Alty Tagh Mountains and its tectonic signification. *Chinese Science Bulletin*, 43(18): 1981~1984 (in Chinese).
- Han Fengbin, Chen Bolin, Cui Lingling, Wang Shixin, Chen Zhengle, Jiang Rongbao, Li Li, Qi Wanxiu. 2012. Zircon SHRIMP U-Pb age of intermediate-acid intrusive rocks in Kaladawan area, eastern Altun Mountains, NW China, and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2277~2291 (in Chinese with English abstract).
- Hao Jie, Wang Erqi, Liu Xiaohan, Sang Haiqing. 2006. Jinyanshan collisional orogenic belt of the early Paleozoic in the Altun mountains: evidence from single zircon U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating for the arc magmatite and ophiolitic melanges. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2743~2752 (in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Inger S. 1992. Trace element modelling of pelite-derived granites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(1): 46~56.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hancher J M, Hoskin P W O, eds. *Zircon: Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. New York: American Mineralogy Society, 53: 27~62.
- Johannes W, Holtz F. 1996. *Petrogenesis and experimental petrology of granitic rock*. Berlin: Springer-Verlag, 335.
- Kang Lei, Liu Liang, Cao Yuting, Wang Chao, Yang Wenqiang, Zhu Xiaohui. 2011. Geochemistry, zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and Hf isotopes of Hongliugou moyite from north Altyn Tagh tectonic belt. *Geological Bulletin of China*, 30(7): 1066~1076 (in Chinese with English abstract).
- Liu Han, Wang Guocan, Yang Zijiang, Luo Yanjun, Gao Rui, Huang Wenxing. 2013. Geochronology and Geochemistry of the Qishikansayi Basalt and Its Constraint on the Closure Progress of the North Altyn Ocean. *Acta Geologica Sinica*, 87(1): 38~54 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Che Zicheng, Wang Yan, Luo Jinhai, Chen Danling. 1999. The petrological characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 57~64 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Chen Danling, Wang Chao, Zhang Chengli. 2009. New progress on geochronology of high-pressure /ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the South Altyn Tagh, the North Qaidam and the North Qinling orogenic, NW China and their geological significance. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(3): 472~479 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang. 1999. High-pressure metamorphic rocks and ophiolite in Altun Mountains and their geological significance. Ph. D. Dissertation. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1~70 (in Chinese with English summary).
- Mabi Awei, Muhetaer Zari, Wen Dengkui, Zhang Mingchun. 2015. Geochemical characteristics of Southern Genie granite in the Eastern Tibet and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 305~318(in Chinese with English abstract).
- Nigel B. W. Harris, Julian A. Pearce, Andrew G. Tindle. 1986. *Geochemical characteristics of collision-zone magmatism*. Geological Society, London, Special Publications, 19: 67~81.
- Patchett P J. 1983. Importance of the Lu-Hf isotopic system in studies of planetary chronology and chemical evolution. *Geochim Cosmochim Acta*, 47: 81~91.
- Patino Douce A E, Harris N. 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis. *Journal of Petrology*, 39(4): 689~710.
- Pearce J A, Nigel N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic

- rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, (1): 63~81.
- Qi Xuexiang, Li Haibing, Wu Cailai, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Meng Fancong, Shi Rendeng, Chen Songyong. 2005. The zircon SHRIMP U-Pb dating of the Qiashikayi granodiorite in Northern Altun. *Chinese Science Bulletin*, 50(6): 571~576 (in Chinese).
- Qin Jiangfeng. 2010. The formation mechanism and deep dynamic setting of Late Triassic granitoids in Qinling orogenic belt. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Northwest University, 1~266 (in Chinese with English summary).
- Rainer A, Wolfgang S. 2002. I-type plutonism in a continental back-arc setting: Miocene granitoids and monzonites from the central Aegean Sea, Greece. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143: 397~415.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: Implications for continental growth and crustmantle recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891~931.
- Sisson T W, Ratajeski K, Hanks W B, Glazner A F. 2004. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, (6): 635~661.
- Sobel E R, Arnaud N A. 1999. Possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China. *Tectonics*, 18: 64~74.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry M J (eds.), *Magmatism in Oceanic Basins*. Geological Society of London Special Publications, 42(1): 313~345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1~4): 29~44.
- Wang Chao, Liu Liang, Yang Wenqiang, Wang Yawei, Liao Xiaoying, Cao Yuting, Kang Lei. 2015. Archean-paleoproterozoic crustal growth and modification in North Altyn Tagh-Dunhuang Block: implications from zircon U-Pb geochronology study. *Geological Review*, 61(sup.): 718~719 (in Chinese).
- Wang Nan, Wu Cailai, Ma Changqian, Lei Min, Guo Wenfeng, Zhang Xin, Chen Hongjie. 2016. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic characteristics for granites in Sanweishan Area, Dunhuang Block. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2681~2705 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Wang Xiaoxia, Tian Wei, Zhang Chengli, Li Wuping, Li Shan. 2009. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: Implications for orogenic processes in the orogens of central China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 39(7): 949~971 (in Chinese).
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Wei Chunjing, Zhang Yinghi. 2008. Phase transition and subduction magmatism of the subducted oceanic lithosphere. *Science Bulletin*, (20): 2449~2459 (in Chinese).
- Wu Cailai, Yang Jingsui, Yao Shangzhi, Zeng Lingsen, Chen Songyong, Li Haibing, Qi Xuexiang, Wooden J L, Mazadab F K. 2005. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin, North Altun, NW. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 846~858 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Yao Shangzhi, Zeng Lingsen, Yang Jingsui, Wooden J L, Chen Songyong, Mazadab F K. 2007. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin-Simierbulake, North Altun, NW. *Science in China (Series D)*, 37(1): 10~26 (in Chinese).
- Wu Fuyuan, 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).
- Wu Jun, Lan Chaoli, Li Jiliang, Yu Liangjun. 2002. Geochemical evidence of MORB and OIB combination in Hongliugou ophiolite manges, Altun fault belt. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(1): 24~30 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. 1995. Dynamics of tectonovolcano-magmatic evolution from North Qilian mountains, China. *Northwest Geoscience*, 16(1): 12~17 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Xing Zuoyun, Zhang Yi, Wu Guangying, Tong Jinsong. 2007. Major frontiers on studies of granite formation. *Geological Review*, 53(sup.): 17~27 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng, Qiu Jiansheng. 2010. *Igneous Petrology*. Beijing: Science Press, 90~96.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Jiang Mei, Li Haibing, Cui Junwen. 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun Sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 193~204 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, Su Dechen, Chen Songyong, Wang Xibin, Wooden J. 2008. Petrology and SHRIMP age of the Hongliugou ophiolite at Milan, North Altun, at the northern margin of the Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1567~1584 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenqiang, Liu Liang, Ding Haibo, Xiao Peixi, Cao Yuting, Kang Lei. 2012. Geochemistry, geochronology and zircon Hf isotopes of the Dimnalike granite in South Altyn Tagn and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4139~4150 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Honglin, Gao Shan, Dai Mengning, Zong Chunlei, G nther Detlef, Fontaine Gisela Helene, Liu Xiaoming, Diwu Chunrong. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247(1~2): 100~118.
- Zhang Chengli, Wang Tao, Wang Xiaoxia. 2008. Origin and Tectonic Setting of the Early Mesozoic Granitoids in Qinling Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 304~316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Huishan, He Shiping, Ji Wenhua, Wang Chao, Shi Junbo, Kang Kongyue, Zhang Jie, Zhu Dawei, Tang Hongwei, Li Chengdong, Xi Dehua. 2016. Implications of Late Cambrian granite in Tianshuihai Massif for the evolution of Proto-Tethy ocean: evidences from zircon geochronology and geochemistry.

- Acta Geologica Sinica, 90(10): 2582~2602 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Yu Shengyao, Chen Wen, Chen Songyong. 2007. ^{39}Ar - ^{40}Ar geochronology of high-pressure / low-temperature blueschist and eclogite in the North Altyn Tagh and their tectonic implications. *Geology in China*, 34(4): 558~564 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Cui Junwen. 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. *Lithos*, 56(2~3): 187~206.
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, Wang Yuanlong. 2010. On the classification of granitic rocks based on whole rock Sr and Yb concentrations. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3431~3455 (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 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Wu Rongxin, Wu Yuanbao, Zhang Shaobing, Yuan Honglin, Wu Fuyuan. 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust: geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Research*, 136: 351~383.
- ### 参 考 文 献
- 车自成, 刘良, 刘洪福, 罗金海. 1995. 阿尔金山地区高压变质泥质岩石的发现及其产出环境. *科学通报*, 40(14): 1298~1300.
- 车自成, 刘良, 罗金海. 2002. 中国及其邻区区域大地构造学. 北京: 科学出版社, 207~369.
- 陈柏林, 李松彬, 蒋荣宝, 陈正乐, 韩凤彬, 崔玲玲, 李丽, 赵树铭, 祁万修, 杨屹, 王世新, 王永, 周永贵, 郝瑞祥. 2016. 阿尔金喀腊大湾地区中酸性火山岩 SHRIMP 年龄及其构造环境. *地质学报*, 90(4): 708~727.
- 陈宣华, Gehrels G, 王小凤, 杨风, 陈正乐. 2003. 阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨. *矿物岩石地球化学通报*, 22(4): 294~298.
- 盖永升, 刘良, 康磊, 杨文强, 廖小莹, 王亚伟. 2015. 北阿尔金蛇绿混杂岩带中斜长花岗岩的成因及其地质意义. *岩石学报*, 31(9): 2549~2565.
- 高晓峰, 校培喜, 过磊, 董增产, 奚仁刚. 2012. 北阿尔金地区早古生代有限洋盆开启时限: 来自斜长花岗岩的证据. *中国科学*, 42(3): 359~368.
- 郭召杰, 张志诚, 王建君. 1998. 阿尔金山边缘蛇绿岩带的 Sm-Nd 等时线年龄及其大地构造意义. *科学通报*, 43(18): 1981~1984.
- 韩凤彬, 陈柏林, 崔玲玲, 王世新, 陈正乐, 蒋荣宝, 李丽, 祁万修. 2012. 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性侵入岩 SHRIMP 年龄及其意义. *岩石学报*, 28(7): 2277~2291.
- 郝杰, 王二七, 刘小汉, 桑海清. 2006. 阿尔金山脉中金雁山早古生代碰撞造山带: 弧岩浆岩的确定与岩体锆石 U-Pb 和蛇绿混杂岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究的证据. *岩石学报*, 22(11): 2743~2752.
- 康磊, 刘良, 曹玉亭, 王超, 杨文强, 朱小辉. 2011. 北阿尔金构造带红柳沟钾长花岗岩地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素组成. *地质通报*, 30(7): 1066~1076.
- 刘函, 王国灿, 杨子江, 罗彦军, 高睿, 黄文星. 2013. 恰什坎萨伊沟玄武岩年代学、地球化学特征及其对北阿尔金洋盆闭合过程的制约. *地质学报*, 87(1): 38~54.
- 刘良, 车自成, 王焰, 罗金海, 陈丹玲. 1999. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义. *岩石学报*, 15(1): 57~64.
- 刘良, 陈丹玲, 王超, 张成立. 2009. 阿尔金、柴北缘与北秦岭高压-超高压岩石年代学研究进展及其构造地质意义. *西北大学学报*, 39(3): 472~479.
- 刘良. 1999. 阿尔金高压变质岩与蛇绿岩及其大地构造意义. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1~70.
- 马比阿伟, 木合塔尔·扎日, 文登奎, 张明春. 2015. 三江造山带义敦岛弧中段格聂(南)花岗岩体地球化学特征及地质意义. *地质学报*, 89(2): 305~318.
- 戚学祥, 李海兵, 吴才来, 杨经绥, 张建新, 孟繁聪, 史仁灯, 陈松永. 2005. 北阿尔金恰什坎萨依花岗岩闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *科学通报*, 50(6): 571~576.
- 秦江锋. 2010. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩类成因机制及深部动力学背景. 博士学位论文. 西安: 西北大学, 1~266.
- 王超, 刘良, 杨文强, 王亚伟, 廖小莹, 曹玉亭, 康磊. 2015. 北阿尔金-敦煌地块太古代-古元古代地壳生长和改造: 来自锆石 U-Pb 年代学的研究. *地质论评*, 61(增刊): 718~719.
- 王楠, 吴才来, 马昌前, 雷敏, 郭文峰, 张昕, 陈红杰. 2016. 敦煌地块三危山地区花岗岩体地球化学、锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素特征. *地质学报*, 90(10): 2681~2705.
- 王涛, 王晓霞, 田伟, 张成立, 李伍平, 李舫. 2009. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示. *中国科学*, 39(7): 949~971.
- 魏春景, 张颖慧. 2008. 俯冲大洋岩石圈的相转变与俯冲带岩浆作用. *科学通报*, (20): 2449~2459.
- 吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 曾令森, 陈松永, 李海兵, 戚学祥, Wooden J L, Mazadab F K. 2005. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗岩体特征及锆石 SHRIMP 定年. *岩石学报*, 21(3): 846~858.
- 吴才来, 姚尚志, 曾令森, 杨经绥, Wooden J L, 陈松永, Mazadab F K. 2007. 北阿尔金巴什考供-斯米尔布拉克花岗岩杂岩特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *中国科学*, 37(1): 10~26.
- 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.
- 吴峻, 兰朝利, 李继亮, 俞良军. 2002. 阿尔金红柳沟蛇绿混杂岩中 MORB 与 OIB 组合的地球化学证据. *岩石矿物学杂志*, 21(1): 24~30.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1995. 北祁连山构造-火山岩浆演化动力学. *西北地质科学*, 16(1): 12~17.
- 肖庆辉, 邱瑞照, 邢作云, 张昱, 伍光英, 童劲松. 2007. 花岗岩成因研究前沿的认识. *地质论评*, 53(增刊): 17~27.
- 徐夕生, 邱检生. 2010. 火成岩岩石学. 北京: 科学出版社, 90~96.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 姜枚, 李海兵, 崔军文. 1999. 阿尔金断

- 裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. 地质学报, 73(3): 193~204.
- 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 苏德辰, 陈松永, 王希斌, Wooden J L. 2008. 北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年. 岩石学报, 24(7): 1567~1584.
- 杨文强, 刘良, 丁海波, 校培喜, 曹玉亭, 康磊. 2012. 南阿尔金迪木那里克花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素特征及其构造地质意义. 岩石学报, 28(12): 4139~4150.
- 张成立, 王涛, 王晓霞. 2008. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境. 高校地质学报, 14(3): 304~316.
- 张辉善, 何世平, 计文化, 王超, 史俊波, 康孔跃, 张杰, 祝大伟, 汤宏伟, 李承栋, 蕙德华. 2016. 甜水海地块晚寒武世花岗岩对原特提斯洋演化的启示: 来自锆石年代学和地球化学的证据. 地质学报, 90(10): 2582~2602.
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 陈文, 陈松永. 2007. 北阿尔金 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年代学及其区域构造意义. 中国地质, 34(4): 558~564.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2010. 三论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类应用. 岩石学报, 26(12): 3431~3455.
- 张亚峰, 蒿新望, 郭岐明, 王星, 赵端昌, 党晨, 姚珊. 2015. 阿尔泰山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.

Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Compositions of the Baijianshan Granodiorite in North Altyn Tagh and Its Geological Significance

LIU Jinhong, LIU Liang, GAI Yongsheng, KANG Lei, YANG Wenqiang, LIAO Xiaoying, YANG Min
State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, 710069

Abstract

The Baijianshan granodiorite, located in the eastern segment of the Hongliugou-Lapeiquan ophiolite belt in North Altyn Tagh, occurs as large stocks intruding into the Lapeiquan Group. The whole-rock geochemical analysis shows that the granodiorite is low in SiO_2 (62.58%~65.05%), high in CaO (4.02%~4.98%), characterized with $(A/CNK) < 1.0$ (0.89~0.98), enriched in K, Rb and Ba, depleted in Nb, Ta, Zr and Ti, suggesting it belongs to weakly peraluminous calc-alkaline series and be characteristic of I-type granite. The total REE content of the Baijianshan granodiorite varies from 90.2 to 137.8 $\mu\text{g/g}$. The chondrite-normalized REE distribution patterns show relative enrichment of LREE with weakly negative Eu anomaly ($\delta\text{Eu}_N = 0.84 \sim 0.92$). There is a large range of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ from -2.96 to 7.99, which is interpreted to be influenced by magmatic contamination. The geological characteristics and the experimental petrology data jointly show that the granodiorite was formed by partial melting of lower crust rocks and contaminated by the upper crust materials. Zircon LA-ICP-MS dating of granodiorite yields a U-Pb age of 475.2 ± 2.0 Ma for zircons characterized by oscillatory zoning and $\text{Th}/\text{U} > 0.3$, and hence this age can be regarded as the formation age of the granodiorite. Combined with regional geological background, the Baijianshan granodiorite should be an eastern component of early Paleozoic magmatic activity in the Hongliugou-Lapeiquan ophiolite belt, which, together with the Qiashikansayi granodiorite and the Bashikaogong quartz-diorite (from the western Hongliugou area) forms a common island-arc magmatic rock belt. The early Paleozoic subduction-type granitoids, distributed in both northern and southern sides of EW-trending Hongliugou-Lapeiquan ophiolite belt, also shows that the whole North Altyn ocean is characterized by bidirectional subduction.

Key words: Hongliugou-Lapeiquan ophiolite belt; granodiorite; LA-ICP-MS U-Pb zircon dating and Hf isotopes; island arc; part-melting of the lower crust; Altyn Tagh; Xinjiang