

南天山西段巴雷公花岗岩体的地质年代学及 锆石 Hf 同位素特征

——岩石成因及对构造演化的约束

黄河¹, 王涛^{1,2}, 秦切^{1,3}, 童英¹, 郭磊¹, 张磊¹, 侯继尧^{1,3}, 宋鹏^{1,3}

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

3. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 位于中国南天山增生造山带西段的巴雷公岩体的岩石类型为黑云母二长花岗岩。岩体中2件样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 291 ± 3 Ma 和 283 ± 3 Ma。该岩体具有较高的 SiO_2 (65.88% ~ 72.99%)、 K_2O (4.23% ~ 6.86%) 和全碱含量 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.45\% \sim 9.96\%$), 呈现明显的 Ba、Nb-Ta、Sr、P 和 Ti 的负异常, 以及轻稀土元素相对于重稀土元素的轻-中度富集和明显的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.27 \sim 0.60$)。上述这些特征与 A 型花岗岩一致。其锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-4.3 \sim +1.7$, 二阶段 Hf 模式年龄为 1.20 ~ 1.58 Ga。锆石 Hf 同位素和全岩地球化学特征暗示岩体起源于高温、低压条件下的下地壳中元古代角闪岩相变质基性火成岩的部分熔融。巴雷公岩体的围岩属于代表了南天山洋残迹的蛇绿混杂岩的一部分。巴雷公岩体无变形, 侵入至蛇绿混杂岩单元中, 具有“钉合岩体”的特点, 从而为进一步限定洋盆闭合于二叠纪之前提供了证据。南天山增生造山带二叠纪岩体的 Hf 同位素均显示古老物源, 揭示该增生造山带深部均为古老物质, 是塔里木古老基底物质大量卷入的反映。

关键词: A 型花岗岩; 南天山; 增生造山带; 古老地壳

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)06-0971-20

Geochronology and zircon Hf isotope of Baleigong granitic pluton in the western part of the South Tianshan Mountains: Petrogenesis and implications for tectonic evolution

HUANG He¹, WANG Tao^{1,2}, QIN Qie^{1,3}, TONG Ying¹, GUO Lei¹, ZHANG Lei¹, HOU Ji-yao^{1,3}
and SONG Peng^{1,3}

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Baleigong granitic pluton, located in the western part of South Tianshan Accretionary Orogenic Belt, Xinjiang, is composed mainly of biotite monzogranite. LA-ICP-MS zircon U-Pb analysis of two samples yielded crystallization ages of 291 ± 3 Ma and 283 ± 3 Ma. The pluton possesses high SiO_2 (65.88% ~ 72.99%), K_2O (4.23% ~ 6.86%) and total alkali ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.45\% \sim 9.96\%$) values. With respect to trace (including REE) elements, the samples are characterized by strong troughs in Ba, Nb-Ta, Sr, P and Ti,

收稿日期: 2015-09-07; 修订日期: 2015-10-14

基金项目: NSFC-新疆联合基金重点支持项目(U1403291); 中国地质调查局项目(1212010611803, 1212010811033, 12120113096500, 12120113094000); 国家科技支撑项目(2011BAB06B02-04); 中国地质科学院地质研究所中央级公益性基本业务费专项基金

作者简介: 黄河(1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: huanghecugb@126.com。

slight to moderate enrichment of LREEs and negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.27 \sim 0.60$). These features suggest that the Baleigong pluton is of A-type in genesis. Zircons from the pluton show $\epsilon\text{Hf}(t)$ values from -4.3 to $+1.7$ and corresponding two-stage Hf model ages from 1.20 Ga to 1.58 Ga. Zircon Hf isotope and whole-rock geochemistry implies that the parental magma was derived from the partial melting of Mesoproterozoic amphibolite-facies mafic lower crust rocks at high temperature and low pressure. The country rocks of the pluton belong to parts of ophiolitic mélange that represent the remnant of Paleo-South Tianshan Ocean. The Baleigong pluton, which was undeformed and intruded into the unit of ophiolite mélange, can be regarded as a “stitching pluton”. Therefore, the final closure of the oceanic basin and the collision of continental blocks is expected to have occurred before the emplacement of the pluton (before Early Permian). On a regional scale, zircons from Early Permian granitoids and acid volcanic lavas predominately show Late Paleoproterozoic to Late Mesoproterozoic two-stage Hf model ages, implying that sources for those felsic magmas were dominantly composed of ancient crustal rocks with negligible juvenile materials.

Key words: A-type granite; South Tianshan Mountains; accretionary orogenic belt; ancient crust

中亚造山带 (Central Asian Orogenic Belt, CAOB) 位于亚洲腹地, 在大地构造上北邻西伯利亚克拉通, 南接塔里木克拉通 (图 1a, Sengör *et al.*, 1993; Cawood *et al.*, 2009; Xiao *et al.*, 2013), 由众多构造属性各不相同的地体拼合而成。这些地体具有不同的起源与性质, 包括古老陆块、古生代岛弧、蛇绿岩套残片、海山和增生杂岩体等 (Windley *et al.*, 1990, 2007; Jahn *et al.*, 2000a, 2000b; Jahn, 2004)。在新元古代和整个古生代时期, 中亚造山带的构造演化与古亚洲洋开启-闭合过程以及各个地体之间的碰撞造山密切相关。在这一过程中 (Jahn *et al.*, 2000a, 2000b; Xiao *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2011), 各块体间形成了大量增生型造山带, 并伴随着复杂的构造活动、变质作用和岩浆作用。其中, 花岗质岩体在中亚造山带广泛分布, 这些岩体在追索大陆岩石圈性质、壳幔物质交换和约束造山带构造演化方面具有独特的“指纹”和“探针”的作用。

南天山增生造山带位于中国新疆西天山南缘, 它的形成与古生代南天山洋俯冲闭合、以及紧随其后的塔里木地块和哈萨克斯坦-伊犁-中天山地块的陆陆碰撞造山密切相关。相较于西天山其他构造块体, 南天山增生造山带内出露的岩浆岩 (主要是花岗岩类) 相对较少, 约占总面积的 5%。近年来, 研究者对南天山造山带内的岩浆岩类开展了较为深入的研究, 报道了大量的高精度地质年代学及地球化学数据 (见图 1 及所附参考文献)。值得注意的是, 尽管大多数学者认为碰撞发生在二叠纪以前, 但亦有观点认为碰撞发生在二叠纪或三叠纪 (详见后述)。在南天山造山带, 一些早二叠世岩体侵入到造山带中

的已就位的蛇绿岩/蛇绿混杂岩单元中, 具有后碰撞“钉合岩体”的性质, 研究它们对于约束增生造山和陆陆碰撞作用的时限具有重要意义 (韩宝福等, 2010; Han *et al.*, 2010)。本次研究选取位于南天山造山带西段的巴雷公岩体作为研究对象, 该岩体侵入到巴雷公蛇绿混杂岩单元的火山熔岩中。本文报道了它的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、锆石 Hf 同位素特征及全岩主量、微量地球化学特征。在此基础上, 探讨了巴雷公岩体的岩石成因。根据本文新报道的和区域上已发表的数据资料, 本文讨论了岩体形成的构造环境, 以及南天山造山带深部地壳物质 (岩浆源区) 的特征。

1 区域地质背景

中国北疆地区位于中亚造山带西部, 地理上包括阿尔泰山脉、准噶尔盆地、天山山脉和塔里木盆地北缘。其中, 横贯乌兹别克斯坦到蒙古国西南部、延伸约 2 500 km 的天山山脉, 在北疆地区可细分为西天山和东天山, 二者之间大致以托克逊-库米什高速公路为界 (李锦轶等, 2006; Gao *et al.*, 2009)。大地构造上, 西天山从北至南由北天山增生造山带、哈萨克斯坦-伊犁地块、中天山地块、南天山增生造山带和塔里木地块北缘组成 (图 1b)。其中, 南天山增生造山带北侧以中-南天山缝合带为界, 南侧以塔里木北缘断裂带为界。

一般认为, 塔里木地块与中亚造山带的拼贴碰撞, 是沿着中-南天山缝合带一线进行的。除增生杂岩体外, 南天山增生造山带在地质上还包含了陆陆

碰撞发生之前的塔里木地块最北端的部分(Qian *et al.*, 2007; Gao *et al.*, 2009; Han *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2013)。因而, 该造山带组成成分非常

复杂, 不仅包含了前寒武纪塔里木基底岩石和附着其上的洋壳增生物质, 还包括了一部分塔里木地块北缘的陆缘/浅海沉积物。

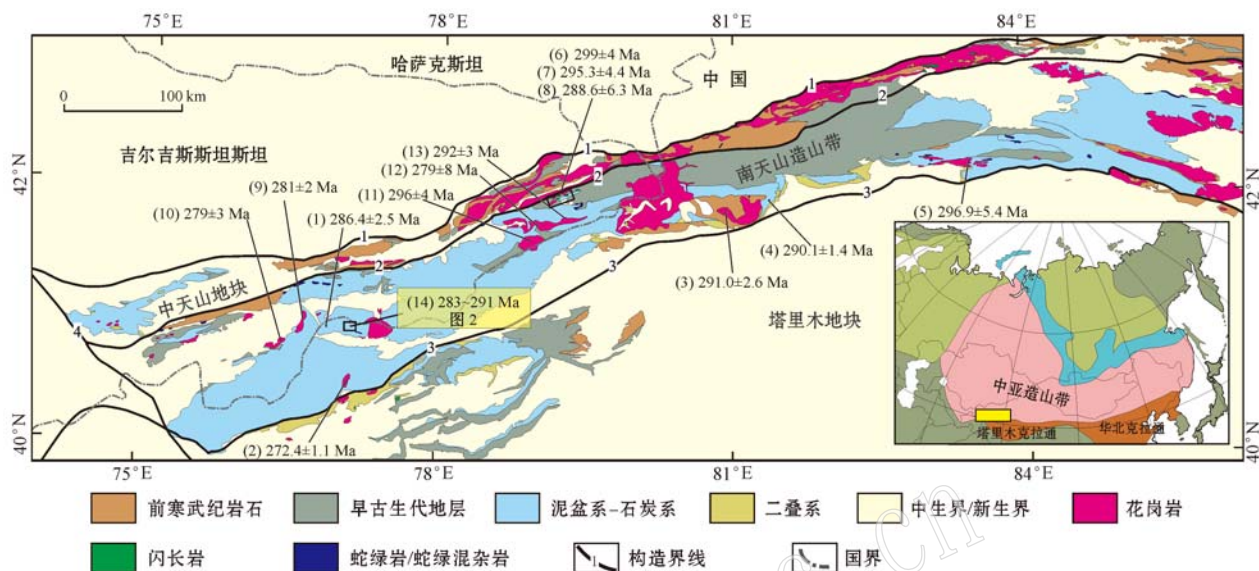


图1 南天山增生造山带及邻区地质图(引自 Huang *et al.*, 2015)

Fig. 1 Geological map of China's South Tianshan Accretionary Orogenic Belt and adjacent regions (after Huang *et al.*, 2015)

主要构造界线: 1—尼古拉耶夫线-北那拉提断裂带; 2—中-南天山缝合带; 3—塔里木北缘断裂带; 4—塔拉斯-费尔干纳右旋走滑断层;

晚古生代岩体年龄及 Nd 同位素数据来源: ①—Huang *et al.*, 2012; ②—Zhang and Zou, 2013; ③—黄河等, 2011; ④—Huang *et al.*,

2014; ⑤—朱志新等, 2008; ⑥—⑧—Konopelko *et al.*, 2009; ⑨—⑬—Konopelko *et al.*, 2007; ⑭—本次研究

major tectonic boundaries: 1—Nikolaev Line-North Nalati fault; 2—South-Central Tianshan suture; 3—North Tarim fault; 4—Talas-Fergana dex-

tral strike-slip fault; data sources for ages of Late Paleozoic granitoids: ①—Huang *et al.*, 2012; ②—Zhang and Zou, 2013; ③—Huang He *et al.*, 2011; ④—Huang *et al.*, 2014; ⑤—Zhu Zhixin *et al.*, 2008; ⑥—⑧—Konopelko *et al.*, 2009; ⑨—⑬—Konopelko *et al.*, 2007; ⑭

—present study

基底岩石主要出露在南天山碰撞带的中部, 以古元古界兴地塔格群和中元古界阿克苏群为代表(Yang and Zhou, 2009)。两条近 200 km 的高压/超高压变质岩带沿中-南天山缝合带两侧展布, 局部出现高压低温型(HP-LT, 蓝片岩相)变质岩, 以透镜体或小块体的形式出现, 是俯冲作用的直接证据。蓝闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄集中分布在 345 Ma 前后(Chen *et al.*, 1999; 高俊等, 2006; Gao *et al.*, 2011)。

古生代蛇绿混杂岩岩片在该区广泛出露, 一般认为这些岩石代表了古生代南天山洋的残迹。这些蛇绿混杂岩中, 最古老的火成岩年龄发现于达鲁巴依蛇绿岩中, 侵位年代为新元古代(杨海波等, 2005)。大多数蛇绿岩中基性-超基性火成岩的侵位年龄主要分布在晚奥陶世至中泥盆世。地球化学数据暗示这些岩石形成于俯冲带之上的环境中(SSZ)中。此外, 这些蛇绿岩中的沉积岩普遍含有晚古生

代微体古生物化石, 主要包括放虫类和牙形虫类(Huang *et al.*, 2013, 及所附参考文献)。

出露的地层包括震旦系和下寒武统沉积岩, 以及寒武系至石炭系海相/非海相碳酸盐岩、碎屑岩、硅质岩间夹火山岩在南天山碰撞带内十分普遍。在大多数地区二叠系缺失, 局部为一套不整合覆盖在强烈褶皱的上石炭统海相碳酸盐岩之上的火山岩(王盟等, 2014)。与天山其他地区相比较, 南天山碰撞带内侵入岩出露相对较少, 露头面积仅占总面积的~5%。这其中, 大多数侵入岩的年龄都为晚石炭世到早二叠世, 主要分布在造山带西段和中段; 早古生代岩石出露面积相对较小, 且集中在造山带东段(见图1及所附参考文献)。

本次研究的巴雷公岩体位于南天山造山带西段阿合奇县境内托什干河上游(阿合奇县西北约 120 km), 岩体呈小岩株状产出。区内地层主要为上志留统-上石炭统(图2)。其中, 上志留统-下泥盆统乌

帕塔尔坎群为研究区分布最广泛的地层单元,其下部、中部为一套钙质砂岩、粉砂岩夹页岩,顶部为一套基性火山熔岩夹火山碎屑岩;中泥盆统托什罕组与乌帕塔尔坎群整合接触,主要分布在研究区中部,由一套浅灰色-暗灰色鲕粒状灰岩夹少量薄层泥质、

砂质灰岩;上石炭统包括下部的艾克提克群和上部的喀拉治尔加组,二者之间呈整合接触,前者主要为一套绢云母化泥质粉砂岩,后者以千枚岩化粉砂质页岩为主。

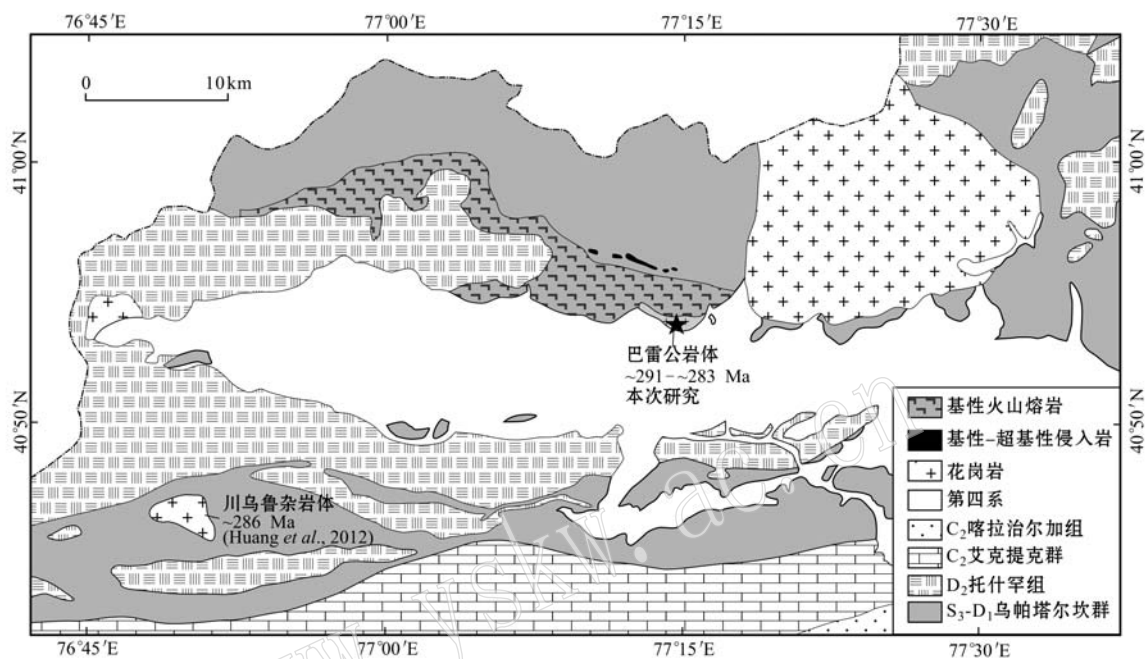


图 2 巴雷公一带岩体地质图(据王超等,2007 修改)

Fig. 2 Geological map of the Baleigong area (modified after Wang Chao *et al.*, 2007)

2 岩体地质及岩相学

巴雷公岩体出露面积为 3.24 km²,呈小岩株状产出,露头平面呈长条状。巴雷公岩体北侧与乌帕塔尔坎群上部的火山熔岩呈侵入接触关系,可见该岩体明显呈脉状(岩枝)侵入于围岩中,岩体中亦见有少量围岩捕虏体。南侧被第四纪沉积物所覆盖。露头的岩石组成比较均一,几乎全部由黑云母二长花岗岩组成。岩体风化面呈肉红色,新鲜面为浅灰色,具块状构造和中粗粒半自形粒状结构。主要造岩矿物包括碱性长石(30%~55%,体积分数,下同)、斜长石(20%~40%)、石英(20%~35%)和黑云母(5%~15%),偶见普通角闪石。副矿物为锆石、铁钛氧化物、磷灰石等。

3 测试方法

本文对 2 件黑云母二长花岗岩样品中的锆石进行了 U-Pb 年代学测定和 Lu-Hf 同位素成分分析。使用常规的重液浮选和电磁分离方法挑选出锆石颗粒,随后在双目镜下根据颜色、自形程度、形态学和透明度等特征进行初步分类,并挑选出具有代表性的锆石,将锆石样品分别用双面胶粘贴在载玻片上,放上 PVC 环,然后将环氧树脂和固化剂进行充分混合后注入 PVC 环中,待树脂充分固化后将样品从载玻片上剥离,并对其进行抛光,直到样品露出一个光洁的平面,并进行锆石阴极发光(CL)照相。

样品的 LA-ICP-MS U-Pb 定年在国家地质实验测试中心完成。实验采用的 ICP-MS 型号为 Ther-

mo Finnigan Element 2, 激光剥蚀系统为 New Wave UP 213。激光剥蚀斑束直径为 40 μm , 激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气。标准锆石 GJ-1 作为外标参与测试和数据处理, 而标准锆石 Plesovice 被用于质量控制。每间隔 10 个样品测点测试 2 次 GJ-1 和 1 次 Plesovice。采用 Glitter(ver40, Macquarie University, van Achterbergh *et al.*, 2001)程序对锆石的同位素比值及元素含量进行计算。并按照 Andersen(2002)的方法, 用 LAM-ICPMS Common Lead Correction(ver3.15)对其进行了普通铅校正。年龄计算及谐和图采用 Isoplot(ver3.0)完成。

锆石 Hf 同位素成分测试在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的激光剥蚀多接收等离子质谱(LA-MC-ICP-MS)完成, 其中激光剥蚀器型号为 New Wave 公司生产的 UP193FX 型固体激光剥蚀系统, MC-ICP-MS 型号为 Thermo Fisher 公司生产的 Neptune Plus。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 将剥蚀物质从激光探针传送到 MC-ICP-MS 之前与 Ar 混合, 形成混合气。根据锆石大小, 剥蚀直径一般采用 35 μm , 少数采用 25 μm , 激光脉冲频率为 8 Hz, 信号采集次数 200 次, 采集时间 1 min 左右。仪器的测试条件及详细分析流程可参见 Wu 等(2006)和侯可军等(2007)。在进行锆石 Lu-Hf 同位素成分计算时, ^{176}Lu 的衰变常数采用 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer *et al.*, 2007), $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值的计算采用 Bouvier 等(2008)推荐的球粒陨石 Hf 同位素值: $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$ 。Hf 模式年龄采用现代亏损地幔的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}$ 比值 0.28325 和 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}$ 比值 0.0384 (Griffin *et al.*, 2000)、平均地壳的 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{C}}$ 比值 0.015 (Amelin *et al.*, 1999) 进行计算。

样品的主量、微量(含稀土)元素分析在加拿大温哥华 Acme 实验室完成。主量元素测试首选对样品进行偏硼酸锂/四硼酸盐融合和硝酸稀释溶解, 选取 0.2 g 样品进行 ICP-AES 分析, 烧失量根据点火后 1000℃ 的质量差别得出。稀土元素和难溶元素的测定先选取样品进行偏硼酸锂/四硼酸盐融合和硝酸稀释溶解, 再进行 ICP-MS 分析。

4 测试结果

4.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学

选取 2 件黑云母二长花岗岩样品(BLG13-01 和 BLG13-16)的锆石开展 LA-ICP-MS U-Pb 年代学测试和 MC-ICP-MS Hf 同位素分析。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试结果列于表 1。如图 3a 所示, 大多数锆石颗粒呈不完整长柱状、短柱状形态, 长轴粒径一般在 150 μm 以上, 总体比较发育振荡环带。锆石的 Th/U 比值在 0.13~0.52 之间。上述特征说明所分析的锆石颗粒基本为岩浆锆石。

对样品 BLG13-01 中分选出的 30 颗锆石进行了年代学测试。其中, 24 颗锆石的投点位于协和曲线附近, 而另有 6 颗锆石年龄不协和。24 颗协和的锆石颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 290~292 Ma, 得到的加权平均年龄为 $291 \pm 3 \text{ Ma}$ (MSWD=0.07); 另一件样品 BLG13-16 中分析的 30 颗锆石中, 有 2 颗锆石协和度较差, 其余 28 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布在 280~290 Ma 之间, 得到的加权平均年龄为 $283 \pm 3 \text{ Ma}$ (MSWD=0.095)。综合本次研究的定年结果, 巴雷公岩体的侵位时代为早二叠世中期(291~283 Ma)。

4.2 MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素分析结果

巴雷公岩体 2 件黑云母二长花岗岩样品的 MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素分析结果列于表 2 中。所有开展 Hf 同位素测定的锆石均已进行 U-Pb 定年, 且 Hf 同位素分析的位置与 U-Pb 同位素定年的位置位于同一环带上。2 件样品锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000470~0.002236, 且除 1 个测点外(BLG13-16 中的测点 23), 其余测点该比值均低于 0.002, 这一特征说明由 ^{176}Lu 衰变生成的 ^{176}Hf 极少, 而锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值可以用于探讨其成因信息(侯可军等, 2007)。

对样品 BLG13-01 中 22 颗锆石进行了 Hf 同位素成分分析, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布范围为 0.282529 至 0.282646, 相应的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 -2.4~+1.7(图 4a, 用每颗锆石各自的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄进行计算, 下同)。22 颗锆石的二阶段模式年龄(t_{DM2})为 1.20~1.46 Ga。在概率密度曲线图中, t_{DM2} 的峰值为 ~1.37 Ga(图 4b); 样品 BLG13-16 中共有 27 颗锆石开展了 Hf 同位素分析, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布范围为 0.282478~0.282642, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 -4.3~+1.4(图

表 1 巴雷公黑云母二长花岗岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses for Baleigong biotite monzogranite pluton

Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma				协和度/%			
	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
	1σ		1σ	1σ		1σ	1σ		1σ			1σ		
BLG13-01														
01	0.30	0.054 37	0.004 79	0.344 40	0.031 20	0.046 18	0.001 39	386	202	301	24	291	9	96.56
02	0.23	0.050 56	0.001 82	0.329 32	0.012 84	0.046 07	0.001 36	221	85	289	10	290	8	99.66
03	0.31	0.064 26	0.004 18	0.395 99	0.028 95	0.045 76	0.001 44	750	141	339	21	288	9	82.29
04	0.23	0.064 09	0.003 34	0.445 08	0.018 97	0.050 37	0.001 51	745	113	374	13	317	9	82.02
05	0.31	0.051 57	0.002 99	0.340 03	0.021 27	0.046 13	0.001 39	266	135	297	16	291	9	97.94
06	0.27	0.054 35	0.004 49	0.350 32	0.029 87	0.046 19	0.001 39	386	190	305	22	291	9	95.19
07	0.33	0.056 98	0.002 32	0.364 11	0.016 17	0.046 08	0.001 37	491	92	315	12	290	8	91.38
08	0.27	0.054 15	0.003 46	0.336 96	0.023 06	0.046 22	0.001 40	377	148	295	18	291	9	98.63
09	0.26	0.080 46	0.005 04	0.510 71	0.027 79	0.046 03	0.001 42	1 208	127	419	19	290	9	55.52
10	0.23	0.054 97	0.002 17	0.347 21	0.014 99	0.046 12	0.001 36	411	90	303	11	291	8	95.88
11	0.33	0.063 92	0.004 03	0.389 34	0.021 52	0.044 18	0.001 34	739	137	334	16	279	8	80.29
12	0.22	0.054 14	0.001 55	0.348 58	0.011 29	0.046 13	0.001 35	377	66	304	9	291	8	95.53
13	0.24	0.054 32	0.003 05	0.348 15	0.020 75	0.046 20	0.001 37	384	130	303	16	291	8	95.88
14	0.30	0.052 91	0.002 83	0.339 29	0.019 53	0.046 31	0.001 38	325	125	297	15	292	9	98.29
15	0.24	0.053 35	0.001 64	0.329 40	0.011 35	0.046 08	0.001 35	344	71	289	9	290	8	99.66
16	0.27	0.052 80	0.003 28	0.335 08	0.021 97	0.046 04	0.001 37	320	145	293	17	290	8	98.97
17	0.15	0.062 41	0.001 26	0.344 75	0.008 34	0.046 03	0.001 34	688	44	301	6	290	8	96.21
18	0.25	0.074 25	0.003 81	0.464 59	0.019 39	0.045 38	0.001 35	1 048	106	387	13	286	8	64.69
19	0.30	0.053 81	0.002 10	0.336 93	0.014 61	0.046 12	0.001 36	363	90	295	11	291	8	98.63
20	0.31	0.052 31	0.004 77	0.336 59	0.031 83	0.046 33	0.001 40	299	209	295	24	292	9	98.97
21	0.25	0.054 84	0.001 64	0.349 96	0.012 01	0.046 27	0.001 35	406	69	305	9	292	8	95.55
22	0.24	0.054 92	0.002 04	0.352 23	0.014 65	0.046 16	0.001 36	409	85	306	11	291	8	94.85
23	0.22	0.053 01	0.001 24	0.335 36	0.009 15	0.046 05	0.001 34	329	54	294	7	290	8	98.62
24	0.25	0.052 55	0.001 42	0.336 96	0.010 50	0.046 16	0.001 35	309	63	295	8	291	8	98.63
25	0.26	0.056 83	0.006 18	0.355 73	0.039 63	0.046 03	0.001 39	485	247	309	30	290	9	93.45
26	0.23	0.053 53	0.002 01	0.345 21	0.014 68	0.046 12	0.001 36	351	87	301	11	291	8	96.56
27	0.23	0.053 24	0.001 27	0.339 19	0.009 49	0.046 05	0.001 34	339	55	297	7	290	8	97.59
28	0.24	0.086 47	0.005 66	0.561 37	0.032 50	0.047 09	0.001 44	1349	130	452	21	297	9	47.81
29	0.30	0.052 70	0.001 61	0.336 34	0.012 05	0.046 17	0.001 35	316	71	294	9	291	8	98.97
30	0.31	0.051 81	0.001 49	0.332 55	0.010 81	0.046 30	0.001 34	277	67	292	8	292	8	100.00

续表 1
Continued Table 1

Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma				协和度/%					
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$							
	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$						
BLG13-16														
01	0.20	0.051 94	0.001 53	0.328 25	0.010 20	0.045 23	0.001 13	283	69	288	8	285	7	98.95
02	0.45	0.054 84	0.007 83	0.339 20	0.049 76	0.044 56	0.001 25	406	323	297	38	281	8	94.31
03	0.24	0.054 39	0.001 72	0.342 19	0.011 52	0.044 70	0.001 12	387	73	299	9	282	7	93.97
04	0.33	0.056 00	0.001 68	0.347 09	0.011 03	0.044 54	0.001 11	452	68	303	8	281	7	92.17
05	0.28	0.054 63	0.003 98	0.326 28	0.024 52	0.045 04	0.001 16	397	168	287	19	284	7	98.94
06	0.31	0.056 23	0.003 89	0.343 09	0.024 56	0.045 17	0.001 15	461	158	300	19	285	7	94.74
07	0.30	0.053 23	0.002 80	0.322 81	0.017 93	0.044 45	0.001 13	339	122	284	14	280	7	98.57
08	0.24	0.053 76	0.002 33	0.330 15	0.015 05	0.045 00	0.001 13	361	100	290	11	284	7	97.89
09	0.45	0.052 93	0.002 84	0.322 40	0.018 21	0.044 71	0.001 14	326	125	284	14	282	7	99.29
10	0.28	0.054 62	0.004 73	0.329 24	0.029 87	0.044 81	0.001 18	397	198	289	23	283	7	97.88
11	0.29	0.053 56	0.003 29	0.337 60	0.021 57	0.045 11	0.001 14	353	142	295	16	284	7	96.13
12	0.22	0.052 90	0.001 74	0.338 56	0.011 73	0.044 79	0.001 11	325	76	296	9	282	7	95.04
13	0.24	0.052 51	0.002 79	0.324 73	0.018 61	0.044 44	0.001 14	308	124	286	14	280	7	97.86
14	0.31	0.054 55	0.001 87	0.335 09	0.013 31	0.045 03	0.001 14	394	79	293	10	284	7	96.83
15	0.21	0.078 13	0.003 92	0.506 29	0.021 89	0.047 00	0.001 19	1 150	102	416	15	296	7	59.46
16	0.26	0.054 44	0.002 36	0.333 42	0.015 24	0.044 64	0.001 11	389	100	292	12	282	7	96.45
17	0.28	0.052 86	0.003 18	0.325 60	0.020 64	0.044 49	0.001 13	323	140	286	16	281	7	98.22
18	0.40	0.054 31	0.008 13	0.329 55	0.050 94	0.044 73	0.001 30	384	328	289	39	282	8	97.52
19	0.22	0.055 69	0.001 25	0.337 30	0.008 12	0.045 99	0.001 13	440	51	295	6	290	7	98.28
20	0.24	0.053 37	0.001 58	0.335 92	0.010 63	0.044 81	0.001 11	345	69	294	8	283	7	96.11
21	0.13	0.052 41	0.002 68	0.329 86	0.017 55	0.044 45	0.001 10	303	120	289	13	280	7	96.79
22	0.35	0.051 18	0.003 27	0.327 66	0.021 75	0.044 80	0.001 12	249	147	288	17	283	7	98.23
23	0.52	0.055 96	0.001 84	0.341 65	0.012 03	0.044 48	0.001 10	451	75	298	9	281	7	93.95
24	0.29	0.061 24	0.004 28	0.373 94	0.024 31	0.044 29	0.001 15	648	155	323	18	279	7	84.23
25	0.27	0.052 60	0.003 48	0.341 45	0.023 66	0.044 71	0.001 12	312	153	298	18	282	7	94.33
26	0.25	0.051 84	0.003 63	0.324 58	0.023 63	0.045 24	0.001 14	278	161	285	18	285	7	100.00
27	0.23	0.052 55	0.001 91	0.340 35	0.013 00	0.044 82	0.001 10	309	85	297	10	283	7	95.05
28	0.23	0.051 67	0.002 75	0.324 33	0.017 78	0.044 40	0.001 09	271	125	285	14	280	7	98.21
29	0.26	0.053 47	0.002 73	0.339 76	0.017 99	0.044 36	0.001 10	349	119	297	14	280	7	93.93
30	0.27	0.053 57	0.001 92	0.334 85	0.013 89	0.044 80	0.001 12	353	83	293	11	283	7	96.47

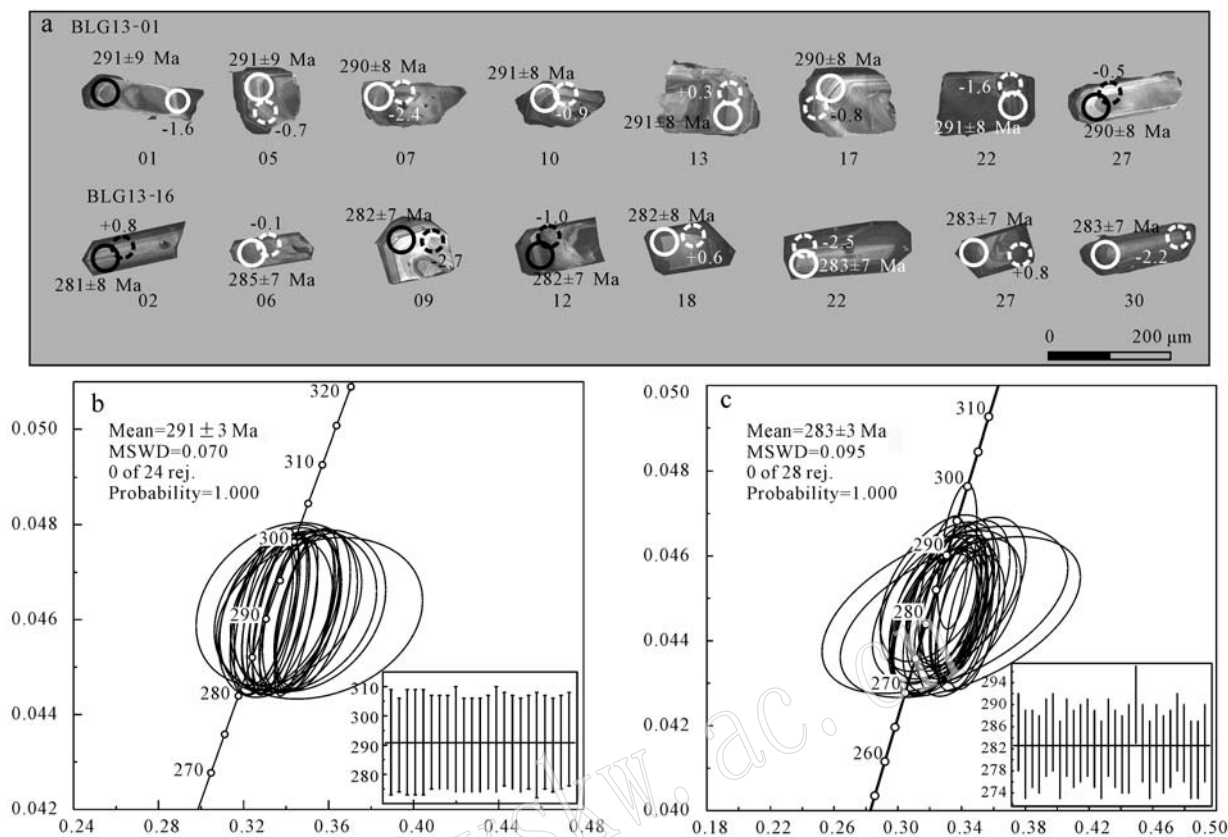


图3 巴雷公二长花岗岩体锆石的阴极发光(CL)(a)照片和U-Pb协和图(b、c)

Fig. 3 Cathodoluminescence images (a) and diagrams of U-Pb Concordia (b, c) for zircons from the Baleigong monzogranite pluton

4c), t_{DM2} 范围为 1.21~1.58 Ga, 在概率密度曲线图中的峰值为 ~1.40 Ga。

4.3 全岩主量元素与微量元素

共对 14 件巴雷公岩体的代表性样品开展了全岩主量和微量(含稀土)元素分析, 测试分析结果列于表 3。这些样品均为黑云母二长花岗岩, 具有较高的 SiO_2 (65.88% ~ 72.99%)、 Fe_2O_3^T (1.82% ~ 3.92%)、 Al_2O_3 (13.20% ~ 16.22%)、 K_2O (4.23% ~ 6.86%) 和全碱含量 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.45\% \sim 9.96\%$)、 CaO (1.22% ~ 2.66%) 和 Na_2O (2.81% ~ 3.80%) 含量中等, TiO_2 (0.24% ~ 0.60%)、 MgO (0.26% ~ 0.92%)、和 $\text{Mg}^\#$ (22~36) 值相对较低。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{CaO}$ 图解中(图 5a), 本次研究的样品大多落入碱钙质和碱质的区域内。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解中, 样品基本都落入钾玄质的范围内(图 5b)。样品的铝饱和指数(ASI 或 A/CNK)为 0.94~1.03, A/NK 值为 1.15~1.38, 呈准铝质-弱过铝质的特征(图 5c)。

在微量元素上, 巴雷公岩体样品表现出明显的

大离子亲石元素(如 Rb、U)相对于高场强元素(如 Nb-Ta、Zr-Hf、P 和重稀土元素)的富集。样品具有中等含量的 Ba ($405 \times 10^{-6} \sim 701 \times 10^{-6}$) 和 Zr-Hf ($\text{Zr} = 225 \times 10^{-6} \sim 333 \times 10^{-6}$, $\text{Hf} = 5.4 \times 10^{-6} \sim 8.1 \times 10^{-6}$), Sr 含量较低 ($77 \times 10^{-6} \sim 186 \times 10^{-6}$)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中, 样品表现出明显的 Ba、Nb-Ta、Sr、P 和 Ti 的负异常。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中, 样品呈现出轻稀土元素相对于重稀土元素的轻-中度富集 [$(\text{La}/\text{Yb})_N$ 大多集中在 8.91~23.5, 其中 1 个样品较高, 为 33.7], 并具较平缓的重稀土元素配分模式和明显的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.27 \sim 0.60$)。

5 讨论

5.1 岩石成因

巴雷公岩体样品中富含碱性长石, 轻重稀土分馏程度较低, 重稀土比较平缓, 且具有明显的 Eu 的负异常。此外, 样品 10 000 Ga/Al 的比值为 2.29~

表 2 巴雷公黑云母二长花岗岩体的 MC-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素成分
Table 2 MC-ICP-MS zircon Hf isotopic compositions of Baleigong monzogranite pluton

点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon\text{Hf}(t)$	2σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$	t_{DM1}/Ga	2σ	t_{DM2}/Ga	2σ
BLG13-01													
01	291	0.044 718	0.001 327	0.000 042	0.282 552	0.000 043	-1.6	1.52	-0.960	1.00	0.06	1.41	0.10
02	290	0.034 963	0.001 061	0.000 003	0.282 567	0.000 034	-1.1	1.19	-0.968	0.97	0.05	1.38	0.08
05	291	0.014 971	0.000 470	0.000 005	0.282 573	0.000 032	-0.7	1.13	-0.986	0.95	0.04	1.36	0.07
06	291	0.028 522	0.000 846	0.000 004	0.282 578	0.000 038	-0.6	1.35	-0.975	0.95	0.05	1.35	0.09
07	290	0.035 633	0.001 127	0.000 035	0.282 529	0.000 033	-2.4	1.15	-0.966	1.03	0.05	1.46	0.07
08	291	0.022 236	0.000 700	0.000 003	0.282 562	0.000 031	-1.2	1.11	-0.979	0.97	0.04	1.39	0.07
10	291	0.025 408	0.000 798	0.000 003	0.282 569	0.000 029	-0.9	1.04	-0.976	0.96	0.04	1.37	0.07
12	291	0.027 901	0.000 944	0.000 006	0.282 577	0.000 032	-0.7	1.15	-0.972	0.95	0.05	1.35	0.07
13	291	0.022 874	0.000 704	0.000 013	0.282 604	0.000 037	0.3	1.31	-0.979	0.91	0.05	1.29	0.08
14	292	0.021 485	0.000 687	0.000 006	0.282 598	0.000 031	0.1	1.11	-0.979	0.92	0.04	1.30	0.07
15	290	0.039 530	0.001 217	0.000 015	0.282 558	0.000 030	-1.4	1.05	-0.963	0.99	0.04	1.40	0.07
16	290	0.052 269	0.001 711	0.000 038	0.282 553	0.000 039	-1.7	1.36	-0.948	1.01	0.06	1.42	0.09
17	290	0.024 594	0.000 812	0.000 013	0.282 573	0.000 031	-0.8	1.10	-0.976	0.96	0.04	1.36	0.07
19	291	0.026 442	0.000 913	0.000 010	0.282 557	0.000 028	-1.4	0.98	-0.973	0.98	0.04	1.40	0.06
20	292	0.035 090	0.001 113	0.000 055	0.282 646	0.000 034	1.7	1.19	-0.966	0.86	0.05	1.20	0.08
21	292	0.030 410	0.000 955	0.000 007	0.282 589	0.000 033	-0.2	1.17	-0.971	0.94	0.05	1.33	0.07
22	291	0.033 281	0.001 045	0.000 004	0.282 551	0.000 030	-1.6	1.04	-0.969	0.99	0.04	1.41	0.07
23	290	0.022 925	0.000 780	0.000 009	0.282 588	0.000 060	-0.3	2.13	-0.977	0.93	0.08	1.33	0.13
24	291	0.017 515	0.000 581	0.000 008	0.282 561	0.000 036	-1.2	1.26	-0.983	0.97	0.05	1.38	0.08
25	290	0.031 919	0.001 001	0.000 008	0.282 582	0.000 024	-0.5	0.86	-0.970	0.95	0.03	1.34	0.05
26	291	0.024 918	0.000 760	0.000 020	0.282 616	0.000 033	0.7	1.15	-0.977	0.90	0.05	1.27	0.07
27	290	0.022 774	0.000 761	0.000 015	0.282 583	0.000 029	-0.4	1.02	-0.977	0.94	0.04	1.34	0.06
BLG13-16													
02	281	0.030 722	0.001 021	0.000 015	0.282 625	0.000 044	0.8	1.55	-0.969	0.89	0.06	1.25	0.10
03	282	0.036 064	0.001 165	0.000 019	0.282 546	0.000 035	-2.0	1.24	-0.965	1.00	0.05	1.43	0.08
04	281	0.034 484	0.001 118	0.000 031	0.282 610	0.000 033	0.2	1.17	-0.966	0.91	0.05	1.29	0.07
05	284	0.019 940	0.000 656	0.000 001	0.282 550	0.000 033	-1.7	1.18	-0.980	0.98	0.05	1.42	0.07

续表 2
Continued Table 2

点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon\text{Hf}(t)$	2σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$	t_{DM1}/Ga	2σ	t_{DM2}/Ga	2σ
06	285	0.021 528	0.000 719	0.000 002	0.282 549	0.000 038	-1.8	1.34	-0.978	0.99	0.05	1.42	0.08
07	280	0.024 754	0.000 831	0.000 007	0.282 597	0.000 037	-0.2	1.30	-0.975	0.92	0.05	1.31	0.08
08	284	0.025 681	0.000 904	0.000 004	0.282 635	0.000 030	1.2	1.07	-0.973	0.87	0.04	1.23	0.07
09	282	0.050 726	0.001 620	0.000 093	0.282 528	0.000 039	-2.7	1.37	-0.951	1.04	0.06	1.48	0.09
10	283	0.016 334	0.000 562	0.000 005	0.282 598	0.000 046	0.0	1.63	-0.983	0.92	0.06	1.31	0.10
11	284	0.023 874	0.000 815	0.000 013	0.282 566	0.000 034	-1.2	1.21	-0.975	0.97	0.05	1.38	0.08
12	282	0.042 266	0.001 366	0.000 022	0.282 577	0.000 030	-1.0	1.05	-0.959	0.97	0.04	1.36	0.07
13	280	0.014 561	0.000 500	0.000 006	0.282 563	0.000 038	-1.3	1.34	-0.985	0.96	0.05	1.38	0.08
14	284	0.022 731	0.000 751	0.000 011	0.282 593	0.000 039	-0.2	1.39	-0.977	0.93	0.06	1.32	0.09
15	296	0.032 709	0.001 075	0.000 006	0.282 551	0.000 033	-1.5	1.16	-0.968	0.99	0.05	1.42	0.07
16	282	0.023 464	0.000 784	0.000 011	0.282 588	0.000 035	-0.4	1.22	-0.976	0.93	0.05	1.33	0.08
17	281	0.023 140	0.000 777	0.000 009	0.282 611	0.000 034	0.3	1.19	-0.977	0.90	0.05	1.28	0.07
18	282	0.029 742	0.001 001	0.000 010	0.282 619	0.000 045	0.6	1.60	-0.970	0.90	0.06	1.26	0.10
19	290	0.050 794	0.001 657	0.000 032	0.282 478	0.000 036	-4.3	1.28	-0.950	1.11	0.05	1.59	0.08
20	283	0.032 706	0.001 178	0.000 059	0.282 642	0.000 036	1.4	1.28	-0.965	0.87	0.05	1.21	0.08
21	280	0.040 557	0.001 307	0.000 010	0.282 592	0.000 030	-0.5	1.06	-0.961	0.94	0.04	1.33	0.07
22	283	0.029 834	0.001 058	0.000 004	0.282 532	0.000 039	-2.5	1.39	-0.968	1.02	0.06	1.46	0.09
23	281	0.067 231	0.002 236	0.000 048	0.282 545	0.000 046	-2.3	1.61	-0.933	1.03	0.07	1.45	0.10
24	279	0.021 161	0.000 706	0.000 016	0.282 542	0.000 042	-2.1	1.48	-0.979	1.00	0.06	1.43	0.09
25	282	0.035 721	0.001 180	0.000 035	0.282 577	0.000 043	-0.9	1.50	-0.964	0.96	0.06	1.36	0.09
26	285	0.017 823	0.000 608	0.000 006	0.282 564	0.000 035	-1.2	1.23	-0.982	0.96	0.05	1.38	0.08
27	283	0.040 255	0.001 414	0.000 034	0.282 627	0.000 033	0.8	1.18	-0.957	0.89	0.05	1.25	0.07
28	280	0.028 584	0.000 939	0.000 003	0.282 522	0.000 033	-2.9	1.16	-0.972	1.03	0.05	1.48	0.07
29	280	0.040 433	0.001 321	0.000 025	0.282 570	0.000 038	-1.2	1.36	-0.960	0.97	0.05	1.38	0.09
30	283	0.019 061	0.000 635	0.000 001	0.282 538	0.000 035	-2.2	1.25	-0.981	1.00	0.05	1.44	0.08

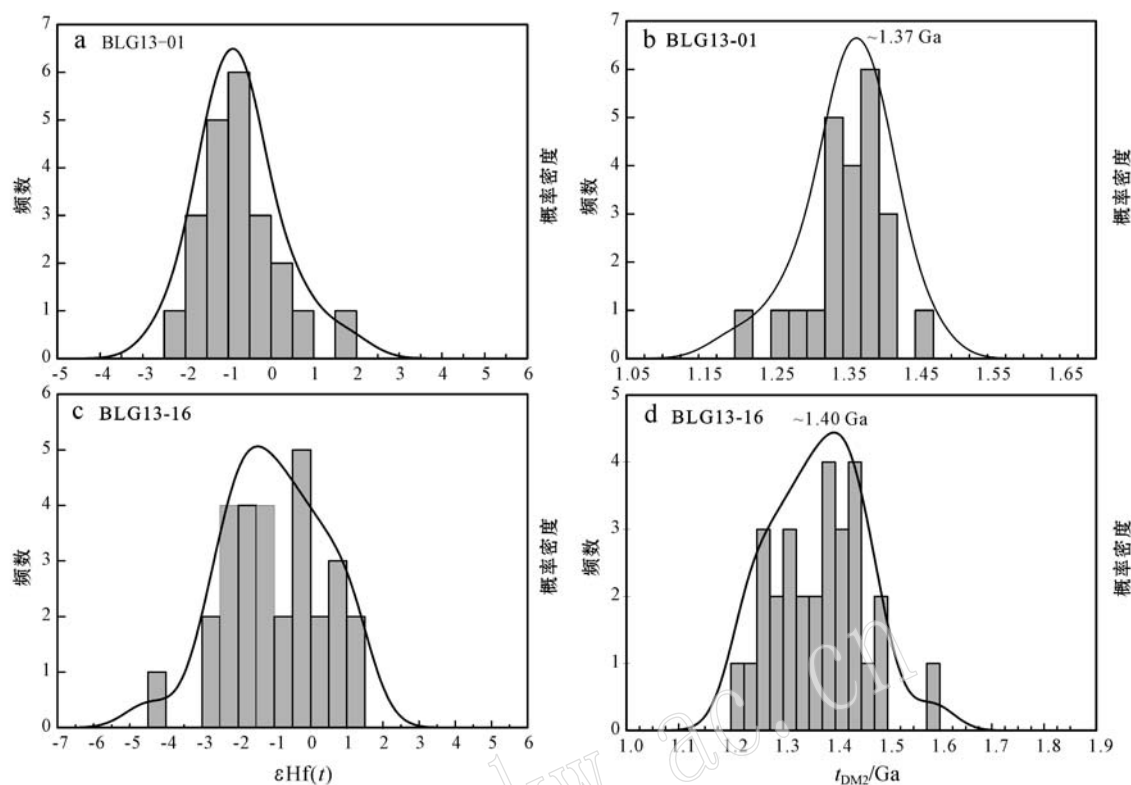


图4 巴雷公黑云母二长花岗岩体样品 BLG13-01 和 BLG13-16 的锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 和二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 的频率分布直方图及概率密度曲线图

Fig. 4 Frequency distribution histograms and probability density curves for $\epsilon\text{Hf}(t)$ and two-stage Hf model ages of zircons from samples BLG13-01 and BLG13-16

2.83, 在 Whalen 等 (1987) 提出的区分的一组以 10 000 Ga/Al 为横坐标的花岗岩成因类型图解中, 巴雷公岩体样品基本落入 I-S 型和 A 型花岗岩界线附近 (图 7a 和 7b); 而在 Zr + Nb + Ce + Y 为横坐标的一组图解中, 样品基本落入 A 型花岗岩的区域 (图 7c 和 7d)。综上所述, 巴雷公花岗岩体在成因类型上应属于 A 型花岗岩。根据形成的构造环境不同, 一般将 A 型花岗岩进一步细分为 A1 型和 A2 型两个亚类, 在 Eby (1990) 一组分类图解中, 巴雷公岩体均落入 A2 型亚类的区域 (图 7e 和 7f)。此外, 同时期形成的吉尔吉斯斯坦境内南天山 A 型花岗岩类和中国境内古尔拉勒花岗岩体也基本落入 A2 亚类的区域。暗示这些岩体都形成于陆陆碰撞造山的构造体制下。

对于 A 型花岗质岩浆的起源, 目前学界争议的焦点集中在这类岩浆主要是是壳源、幔源还是壳幔混源 (Bonin and Giret, 1990; Eby, 1990; Creaser *et al.*, 1991; Turner *et al.*, 1992; Martin, 2006)。巴雷公黑云母二长岩体附近并未出露有同时代的基性

- 中性岩浆岩, 岩体具有古老的二阶段 Hf 模式年龄 (峰值分别为 ~ 1.37 Ga 和 ~ 1.40 Ga), 并且具有较高的 SiO_2 和 K_2O 含量及较低的 $\text{Mg}^\#$ (22~37), 这些特征基本排除了幔源或壳幔混合成因, 而暗示岩体起源于古老地壳物质的重融。岩体 2 件进行了锆石 Hf 同位素测试的样品的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值范围均较小, 分布范围分别为 4.1 和 5.7 个 epsilon 单位, 二阶段模式年龄差异亦不显著。并且这 2 件样品锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 和 t_{DM2} 在概率密度曲线上均显示出类似正态分布的特征 (图 4), 暗示源岩的成分比较单一。此外, 在全岩地球化学特征上, 样品表现出准铝质-弱过铝质及显著的 Nb-Ta 和 Ti 的负异常等特征, 指示该岩体的原始岩浆主要起源于深部古老地壳中火成岩/变质火成岩物质的部分熔融。

巴雷公黑云母二长花岗岩富含黑云母等含水矿物, 暗示其母岩浆具有富水的特征, 而源岩中可能含有一定量的含水矿物。根据前人的实验结果 (Beard and Lofgren, 1991; Rapp and Watson, 1995), 壳源熔体中的 K_2O 含量主要受源区矿物成分和部分熔融

表 3 巴雷公黑云母二长花岗岩体代表性样品的主量($w_B/\%$)与微量(含稀土)($w_B/10^{-6}$)元素含量

Table 3 Major ($w_B/\%$) and trace (including rare earth)($w_B/10^{-6}$) elements for representative samples from the Baleigong granitic pluton															
	BLG13-1	BLG13-2	BLG13-3	BLG13-5	BLG13-6	BLG13-7	BLG13-8	BLG13-9	BLG13-10	BLG13-11	BLG13-12	BLG13-13	BLG13-15	BLG13-16	
SiO ₂	71.79	67.33	70.99	70.74	70.08	65.88	71.41	67.95	72.05	70.72	67.89	72.99	69.75	70.23	
TiO ₂	0.24	0.60	0.44	0.24	0.38	0.45	0.34	0.45	0.36	0.33	0.50	0.27	0.55	0.30	
Al ₂ O ₃	13.93	14.83	13.20	14.44	14.09	16.22	13.87	15.40	13.45	14.28	14.82	13.31	13.63	14.85	
Fe ₂ O ₃ ^T	1.82	3.92	2.93	1.84	2.74	3.08	2.46	2.96	2.64	2.40	3.42	2.18	3.68	2.20	
MnO	0.03	0.06	0.05	0.02	0.03	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.06	0.03	0.06	0.03	
MgO	0.26	0.90	0.62	0.27	0.48	0.73	0.43	0.69	0.46	0.44	0.82	0.27	0.92	0.38	
CaO	1.22	2.51	1.92	1.33	1.54	2.66	1.48	2.35	1.50	1.68	2.31	1.25	2.34	1.50	
Na ₂ O	2.95	3.20	3.01	3.10	2.84	3.80	3.03	3.58	2.99	3.26	3.46	2.81	3.22	3.21	
K ₂ O	6.53	5.37	5.07	6.86	6.59	5.78	6.18	5.72	5.75	5.57	4.84	5.60	4.23	6.44	
P ₂ O ₅	0.05	0.16	0.11	0.06	0.09	0.13	0.08	0.13	0.09	0.08	0.12	0.07	0.14	0.07	
LOI	1.00	0.90	1.50	0.90	0.90	1.00	0.50	0.50	0.50	1.00	1.60	1.00	1.30	0.60	
Mg [#]	25	35	33	25	29	36	29	35	29	30	36	22	37	29	
Sc	4	6	4	4	4	4	5	4	5	5	5	4	5	5	
V	10	36	26	12	15	31	20	27	21	20	34	12	39	19	
Co	2.1	5.7	4.6	2	3.2	4.3	3.1	4.8	2.8	3	5.2	2.5	5.8	2.3	
Ni	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	
Cu	0.8	4.3	2.3	2.7	5.6	2.3	3.5	1.5	2.1	2	13.3	3.6	12.2	2	
Zn	31	49	37	31	39	38	38	35	43	37	47	28	48	38	
Ga	17.7	20.8	18.4	19.2	17.1	20	18.2	19.8	17.4	21.4	18.3	17.6	17.6	19.6	
Cs	7.6	10.4	7.2	4.2	7	14.7	8.1	17.2	6.7	5.1	11.1	5.3	10.5	7.2	
Rb	262.7	196.2	237.9	195.3	190.1	254.9	220.4	254.9	210.6	203.6	241.7	165.3	199.4	234.8	
Ba	466	701	494	433	591	566	474	579	421	405	563	407	444	465	
Th	14.9	23.2	23.8	11.6	18.4	20.7	18	27	18.1	18.8	23.4	24.1	26.9	16.8	
U	2.2	4.2	5.6	1.4	2.4	4.3	2.5	5.8	2.7	2.4	3.4	2	4	2.1	
Nb	14.7	17.4	17.1	7.9	12.9	12.7	15.4	13.8	15.9	15.4	16.1	14	16.8	14.1	

续表 3
Continued Table 3

	BLG13-1	BLG13-2	BLG13-3	BLG13-5	BLG13-6	BLG13-7	BLG13-8	BLG13-9	BLG13-10	BLG13-11	BLG13-12	BLG13-13	BLG13-15	BLG13-16
Ta	1	1.7	1.6	0.5	1.1	1.2	1.1	1.4	0.9	1.3	1.6	0.9	1.8	0.8
La	53.9	81.2	50.3	54.2	80.5	42.9	62.9	38.5	65.9	64.6	41	113.6	54.2	53.2
Ce	103.8	147.5	100.9	98.8	143.7	82.9	121.7	72.7	124.4	124	79.6	198.3	98.1	96.1
Pb	8.9	8.9	12.8	8.2	7.5	9.1	8.1	8.8	10	10.3	14.5	8.7	13.4	9.7
Pr	11.64	14.37	10.94	10.78	14.6	8.45	13.17	8.24	13.39	13.68	9.05	21.23	10.96	11.34
Sr	81.3	173.1	170.1	87.4	119.4	177.9	101.2	165.2	91.6	115.9	185.6	76.8	153.4	101.4
Nd	41.7	46.3	40.9	37	50.7	28.4	48.2	27.6	46.2	49.5	31.2	71.5	38.4	42
Zr	227	332.9	280.2	225.9	316.8	226.1	264.9	224.6	273.7	261.5	253.7	280.6	254	246.7
Hf	6.1	8.1	7	5.4	8	5.6	7.8	5.4	7.4	7.1	7	7	6.6	6.4
Sm	8.05	7.75	7.51	6.76	8.48	5.81	8.96	5.44	9.35	8.77	6.23	11.13	7.07	8.17
Eu	0.8	1.16	0.99	0.86	0.95	1.11	0.79	0.92	0.81	0.9	1.1	0.82	1.01	0.85
Gd	7.65	6.59	7.15	5.98	6.8	5.48	8.71	5.12	8.89	8.28	5.84	8.03	6.26	7.69
Tb	1.04	0.93	1.05	0.8	0.84	0.75	1.17	0.74	1.22	1.19	0.82	0.91	0.91	1.12
Dy	7.1	6.16	6	5.01	5.49	4.98	7.23	4.8	7.82	8.23	5.22	4.89	6.25	6.59
Y	36.4	33.2	37.3	26.5	28.7	27.5	40.9	29.4	42.3	40.1	29.9	26.1	33.9	41.6
Ho	1.27	1.08	1.26	0.92	0.97	0.84	1.37	0.84	1.39	1.47	0.93	0.93	1.16	1.37
Er	3.63	3.36	3.88	2.5	2.84	2.52	3.88	3.09	4.15	3.97	2.81	2.24	3.31	3.67
Tm	0.48	0.49	0.54	0.35	0.39	0.44	0.56	0.4	0.59	0.55	0.45	0.32	0.51	0.52
Yb	3.32	3.28	4	2.12	2.46	2.55	3.57	2.79	3.62	3.73	3.3	2.42	3.5	3.24
Lu	0.47	0.46	0.58	0.32	0.44	0.37	0.54	0.43	0.55	0.55	0.49	0.34	0.56	0.44
(La/Yb) _N	11.65	17.76	9.02	18.34	23.47	12.07	12.64	9.90	13.06	12.42	8.91	33.67	11.11	11.78
δEu	0.31	0.50	0.41	0.41	0.38	0.60	0.27	0.53	0.27	0.32	0.56	0.27	0.46	0.33

注: $Mg^\# = [w(MgO)/40.31] / [w(MgO)/40.31 + w(Fe_2O_3)] \times 0.8998 / 71.85 \times 0.85 \times 100$; $\delta Eu = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$ 。

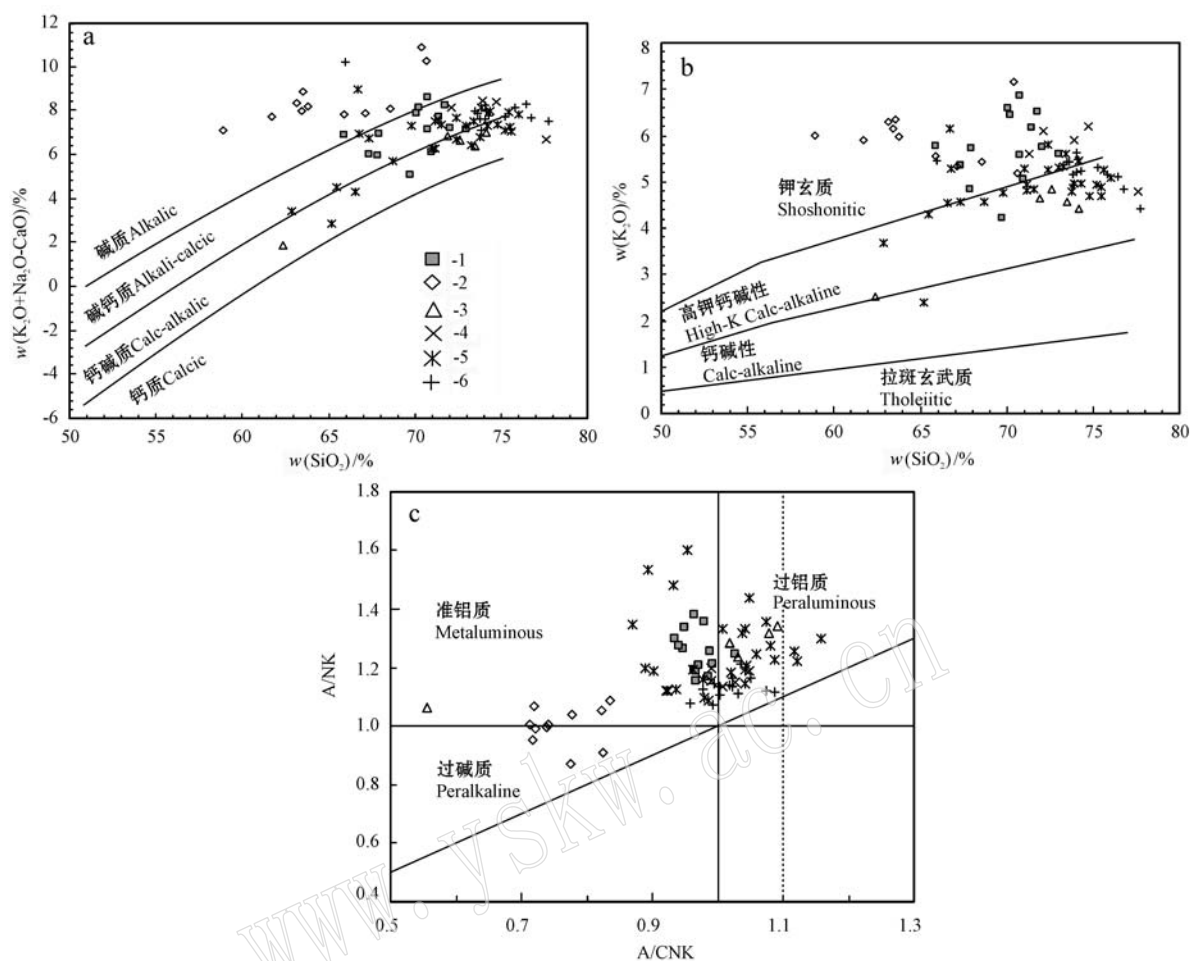


图 5 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{CaO}$ (a)(底图据 Frost *et al.*, 2001)、 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ (b)(底图据 Peccerillo and Taylor, 1976)

和 $\text{A/CNK} - \text{A/NK}$ 图解(c)(底图据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 5 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{CaO}$ (a) (after Frost *et al.*, 2001), $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ (b) (after Peccerillo and Taylor, 1976) and $\text{A/CNK} - \text{A/NK}$ (c) (after Maniar and Piccoli, 1989) diagrams

1—巴雷公二长花岗岩体(图 1 中编号 14); 2—川乌鲁二长-正长岩体(图 1 中编号 1); 3—盲起苏花岗闪长岩体(图 1 中编号 5); 4—英买来二云母花岗岩体(图 1 中岩体编号 3); 5—吉尔吉斯斯坦南天山花岗岩(图 1 中岩体编号 6~13); 6—古尔拉勒碱长花岗岩体(图 1 中岩体编号 2)

1—Baleigong monzogranite pluton (intrusion No. 14 in Fig. 1, present study); 2—Chuanwulu monzonite-syenite pluton (intrusion No. 1 in Fig. 1); 3—Mangqisu granodiorite pluton (intrusion No. 5 in Fig. 1); 4—Yingmailai two-mica granite pluton (intrusion No. 3 in Fig. 1); 5—A-type granitoids from Kyrgyz South Tianshan (intrusion Nos. 6~13 in Fig. 1); 6—Gu'erlale alkali-feldspar pluton (intrusion No. 2 in Fig. 1)

压力这两个因素控制。实验岩石学资料还证实脱水熔融过程中如涉及含水矿物如角闪石和黝帘石的分解脱水,更加容易产生高 K 的熔体。在较低或正常的压力条件下,“湿”的中-高钾质变质玄武岩的部分熔融可以形成高钾的长英质熔体(Sisson *et al.*, 2005)。样品具有低的 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ 比值(2.85~6.67),并且在 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ 图解中(图略, Patiño Douce, 1999)落入角闪岩部分熔融的熔体成

分区域内,暗示原始岩浆主要起源于富钾变质玄武岩(角闪岩相)的脱水熔融。Rapp 等(1995)的实验表明基性火成岩低程度(5%~10%)部分熔融形成的熔体富 SiO_2 ,而 Al_2O_3 含量较低;而 20%~40%的部分熔融形成的熔体的 SiO_2 含量相当于中性岩的成分,而 Al_2O_3 含量较高。考虑到巴雷公岩体富 Si 和准铝质-弱过铝质的特征,笔者认为其原始岩浆起源于辉长质岩石低度(5%~10%)的部分熔融。岩体样品的锆石饱和温度计算结果为 795~839℃(计

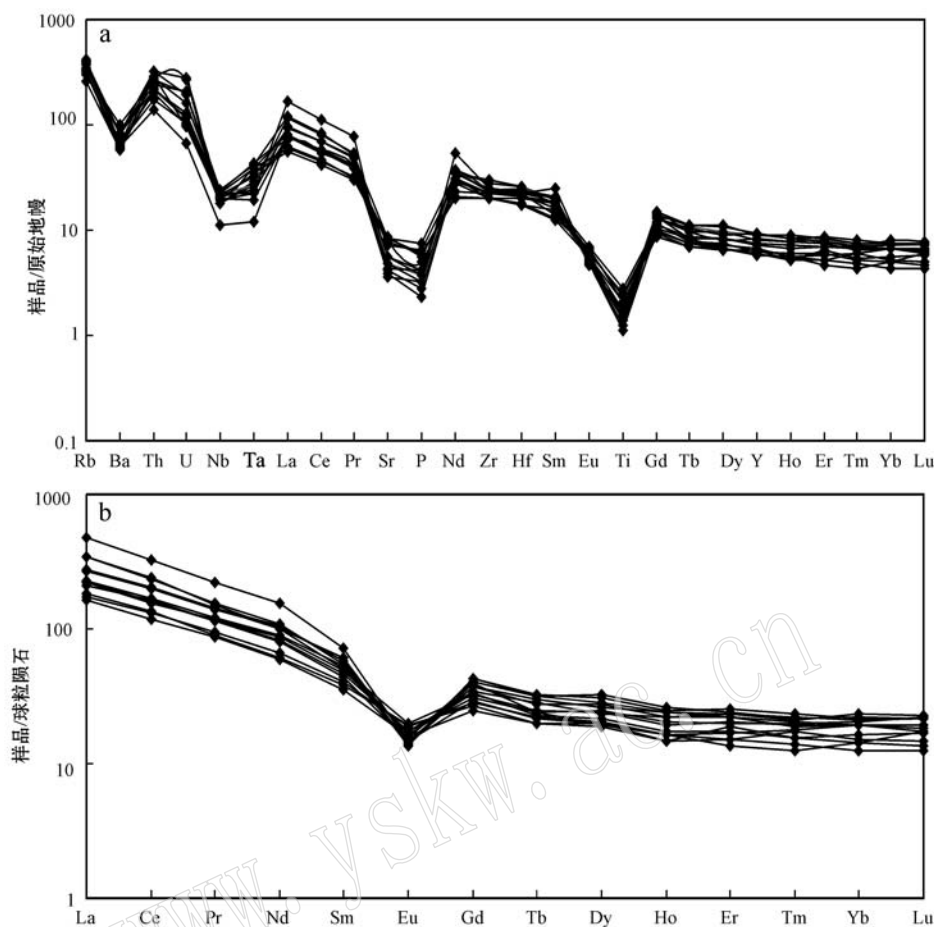


图6 微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(b)(标准化数据引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized multiple trace element diagrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) (primitive mantle and chondrite values after Sun and McDonough, 1989)

算方法见 Watson *et al.*, 2006)。需要注意的是, 2件测年样品中均未发现继承锆石, 暗示熔体中 Zr 未达到过饱和状态, 故实际岩浆起源温度要高于计算出的锆石饱和温度的上限(吴福元等, 2007)。样品的 Sr 含量较低, 具有明显的 Eu 的负异常, 暗示源区有一定斜长石的残留, 说明部分熔融作用应发生在相对较低的压力环境中。

综上所述, 巴雷公岩体为 A 型花岗岩类, 其母岩浆应起源于高温、低压条件下的下地壳中元古代角闪岩相变质火成岩的部分熔融。

5.2 构造环境

目前对古生代南天山洋最终闭合、塔里木地块与哈萨克斯坦-伊犁-中天山陆块碰撞拼贴的时代, 学界仍存在争议。大多数学者认为碰撞发生在二叠纪以前(Han *et al.*, 2011, 及所附参考文献), 但亦有

认为碰撞发生在二叠纪(Brookfield, 2000)或三叠纪(Zhang *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2010, 2013)。

在早二叠世, 南天山造山带发生了区域性的岩浆事件(图 1), 以形成大量花岗质岩石为特征。其中, 在中国境内, 本次巴雷公岩体及前人报道的古尔拉勒岩体(图 1 中编号 2)均为 A 型花岗岩, 而在吉尔吉斯斯坦境内, A 型花岗岩的分布更为广泛(编号 6~13)。前已述及, 这些 A 型岩体均为 A2 型亚类, 指示南天增生造山带在早二叠世已进入伸展环境, 但仍处于造山阶段。值得注意的是, 据前人研究, 巴雷公岩体所侵入的基性火山岩为代表了南天山洋遗迹的蛇绿混杂岩的一部分(王超等, 2007)。前已述及, 巴雷公岩体的母岩浆起源于中元古代基底岩石部分熔融, 暗示形成巴雷公岩体的岩浆事件发生在陆陆碰撞之后、蛇绿混杂岩被逆冲推覆到塔里木陆

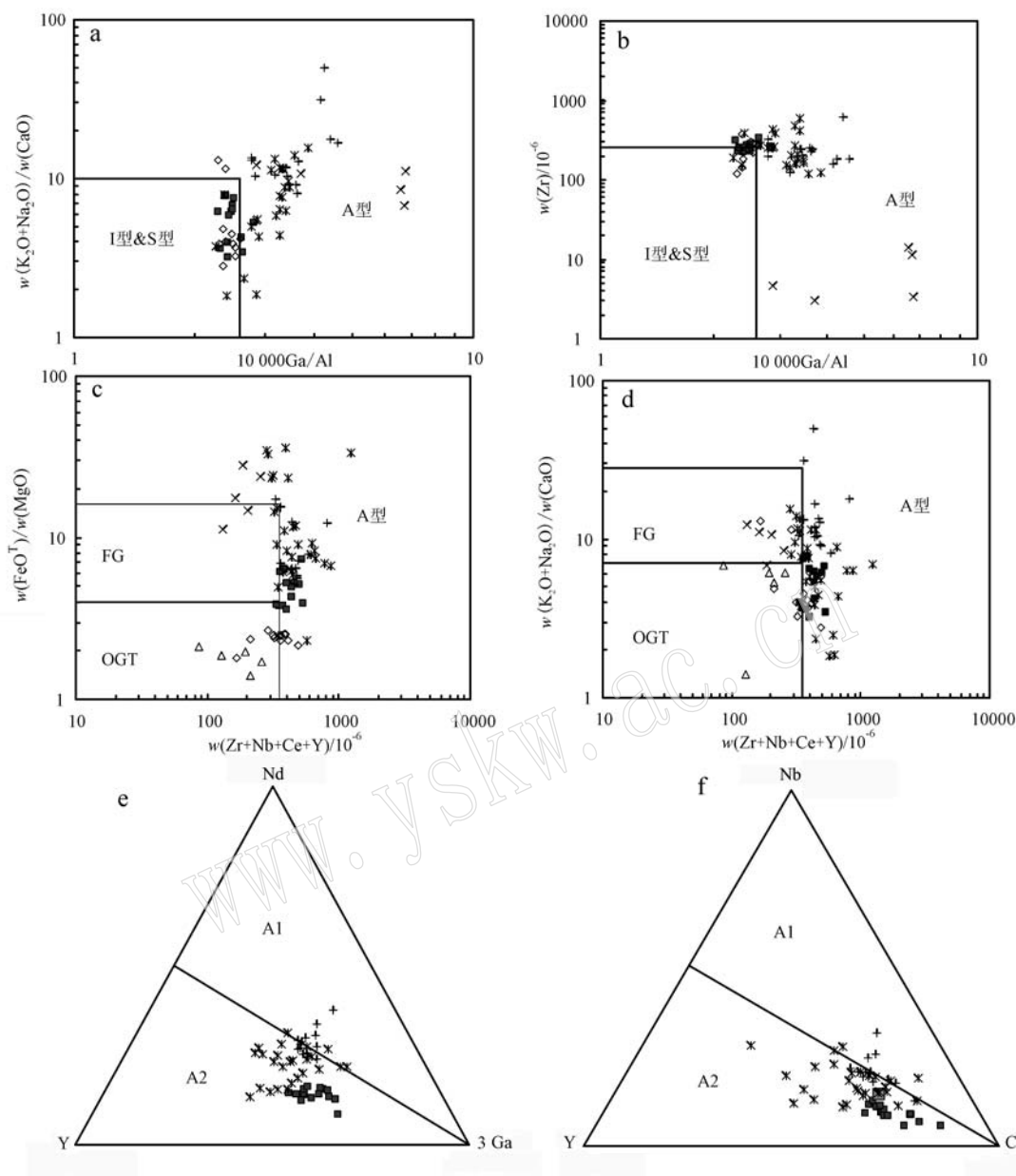


图 7 I/S型和A型花岗岩判别图解(a~d)(底图据 Whalen *et al.*, 1987)和 A1/A2 亚类判别图解(e、f)(底图据 Eby, 1990; 图例同图 5)

Fig. 7 Discrimination diagrams for I/S-and A-type granites (a~d) (after Whalen *et al.*, 1987), and for A1- and A2-subtypes (e and f) (after Eby, 1990; symbols as for Fig. 5)

缘之上的情形中。因此,巴雷公岩体具有“钉合岩体”的性质(Han *et al.*, 2010; 韩宝福等, 2010),而洋盆闭合、陆陆碰撞事件应当发生在早二叠世之前。

从大区域尺度观察,南天山造山带内已有 Hf 同位素资料的早二叠世长英质岩石均表现出相对“古老”的同位素特征。如图 8 所示,来自 4 个花岗岩岩体样品和小提坎立克组酸性火山熔岩样品中的锆石(共 177 颗)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 $-9.5 \sim +4.9$ 之间(图

8a),对应的锆石二阶段 Hf 模式年龄为 $1.0 \sim 1.9$ Ga (图 8b),峰期为 ~ 1.43 Ga 至 ~ 1.25 Ga(图 8c)。暗示南天山造山带内早二叠世花岗质岩浆作用的源区为古元古代晚期—中元古代晚期形成的地壳物质,而缺乏年轻地壳物质的参与的信息。这与先前通过花岗岩全岩 Nd 同位素得到的特征相一致(黄河等, 2011; Huang *et al.*, 2012)。相对古老的深部地壳物质组成,暗示这一增生型造山带根部主要由塔里

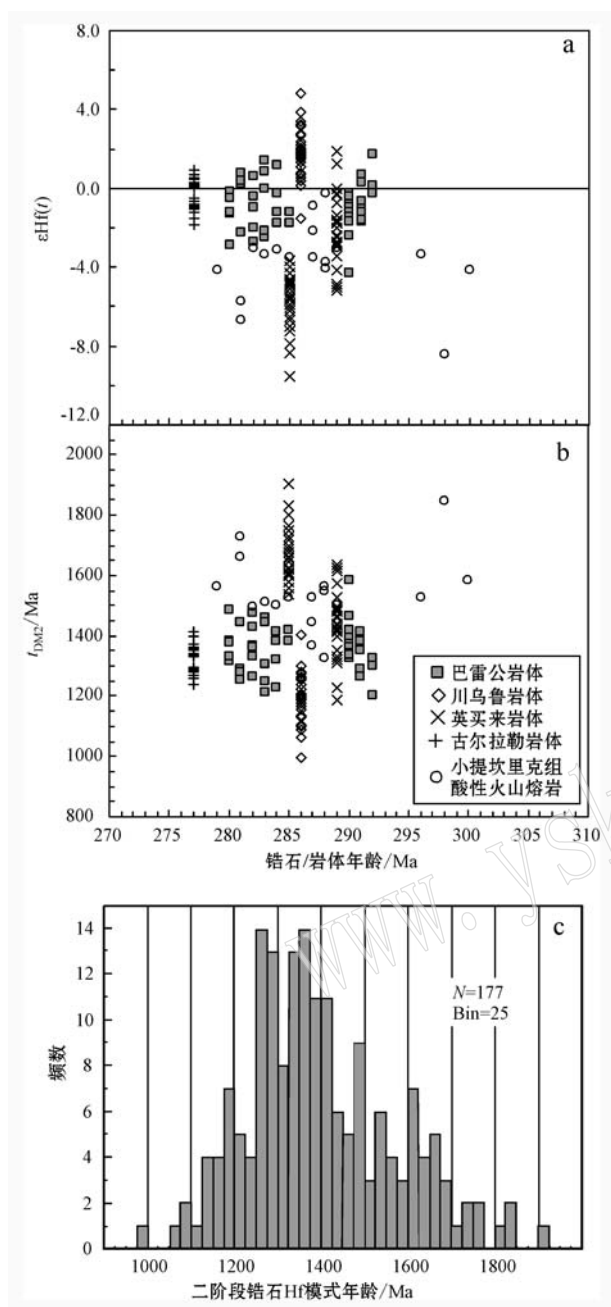


图8 南天山花岗质岩石锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 和 t_{DM2} 随年龄变化图解(a,b)以及二阶段 Hf 模式年龄频率分布直方图(c)
Fig. 8 Zircon or pluton age versus $\epsilon\text{Hf}(t)$ and two-stage Hf model age diagrams (a and b), and frequency distribution histogram of two-stage Hf model ages (c) for zircons from the granitoids in the South Tianshan Orogenic Belt
数据来源: 巴雷公岩体(本次研究); 川乌鲁岩体(Huang *et al.*, 2012); 英买来岩体(项目组未发表数据); 古尔拉勒岩体(Zhang and Zou, 2013); 小提坎里克组酸性火山熔岩(Huang *et al.*, 2015)
data sources: Baleigong pluton (present study); Chuanwulu pluton (after Huang *et al.*, 2012); Yingmailai pluton (unpublished data); Gu'erlale pluton (after Zhang and Zou, 2013); Felsic volcanic lavas of the Xiaotikanlike Formation (after Huang *et al.*, 2015)

木克拉通基底物质构成, 而缺失显生宙形成的年轻地壳。

6 结论

(1) 巴雷公黑云母二长花岗岩体测年结果分别为 291 ± 3 Ma 和 283 ± 3 Ma, 进一步揭示了早二叠世中期花岗岩浆的广泛发育。

(2) 巴雷公花岗岩体在成因类型上属于 A 型花岗岩。其母岩浆起源于高温、低压条件下的下地壳中元古代角闪岩相变质火成岩的部分熔融。

(3) 巴雷公花岗岩体不变形、切割蛇绿混杂岩的组成单元, 显示后改造及钉合岩体特点, 限定蛇绿岩缝合带就位于早二叠世中期之前。区域上大量出露的早二叠世 A 型花岗岩显示该时期该地区构造体制已转入伸展环境。

(4) 巴雷公花岗岩的 Hf 同位素模式年龄为 $1.20 \sim 1.58$ Ga, 并且区域上早二叠世长英质岩石均表现出相对“古老”的 Hf 同位素特征, 显示南天山增生造山带深部主要由古老物质组成。

致谢 本文测试分析工作得到国家地质实验测试中心和南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室相关工作人员的大力协助, 审稿人和编辑同志为本文的修改提出了大量的宝贵意见并付出了辛勤劳动, 在此一并致谢。

References

- Amelin Y, Lee D-C, Halliday A N, *et al.* 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 399: 252~255.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59~79.
- Beard J S and Lofgren G E. 1991. Dehydration Melting and Water-Saturated Melting of Basaltic and Andesitic Greenstones and Amphibolites at 1, 3, and 6.9 kb[J]. *Journal of Petrology*, 32: 365~401.
- Bonin B and Giret A. 1990. Plutonic alkaline series: Daly gap and intermediate compositions for liquids filling up crustal magma chambers [J]. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* (Bull. Suisse Minéral. et Pétrogr.), 70(2): 175~187.

- Bouvier A, Vervoort J D and 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[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273: 48~57.
- Brookfield M. 2000. Geological development and Phanerozoic crustal accretion in the western segment of the southern Tien Shan (Kyrgyzstan, Uzbekistan and Tajikistan)[J]. *Tectonophysics*, 328: 1~14.
- Cawood P, Kroner A, Collins W, *et al.* 2009. Earth accretionary orogens in space and time[J]. *Geological Society of London Special Publication*, 318: 1~36.
- Chen C, Lu H, Jia D, *et al.* 1999. Closing history of the southern Tianshan oceanic basin, western China: an oblique collisional orogeny[J]. *Tectonophysics*, 302(1): 23~40.
- Creaser R A, Price R C and Wormald R J. 1991. A-type granites revisited: assessment of a residual-source model[J]. *Geology*, 19(2): 163~166.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26(1): 115~134.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, *et al.* 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42 (11): 2 033~2 048.
- Gao J, Klemd R, Qian Q, *et al.* 2011. The collision between the Yili and Tarim blocks of the Southwestern Altaids: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan Orogen[J]. *Tectonophysics*, 499: 118~131.
- Gao J, Long L L, Klemd R, *et al.* 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1 221~1 238.
- Gao Jun, Long Lingli, Qian Qing, *et al.* 2006. South Tianshan: a late Paleozoic or a Triassic orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 049~1 061(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, *et al.* 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122: 627~640.
- Han Baofu, Guo Zhaojie and He Guoqi. 2010. Timing of major suture zones in North Xinjiang, China: constraints from stitching plutons[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2 233~2 246(in Chinese with English abstract).
- Han B F, He G Q, Wang X C, *et al.* 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China[J]. *Earth-Science Reviews*, 109: 74~93.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595~2 604(in Chinese with English abstract).
- Huang H, Zhang Z C, Kusky T, *et al.* 2012. Geochronology and geochemistry of the Chuanwulu complex in the South Tianshan, western Xinjiang, NW China: Implications for petrogenesis and Phanerozoic continental growth[J]. *Lithos*, 140~141: 65~84.
- Huang H, Zhang Z C, Santosh M, *et al.* 2013. Early Paleozoic tectonic evolution of the South Tianshan collisional belt: Evidence from geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the Tie' reke Monzonite Pluton, Northwest China[J]. *The Journal of Geology*, 121: 401~424.
- Huang He, Zhang Zhaochong, Zhang Dongyang, *et al.* 2011. Petrogenesis of Late Carboniferous to Early Permian Granitoid Plutons in the Chinese South Tianshan: implications for Crustal Accretion[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(8): 1 305~1 333(in Chinese with English abstract).
- Huang H, Zhang Z C, Santosh M, *et al.* 2014. Geochronology, geochemistry and metallogenic implications of the Boziguo'er rare metal-bearing peralkaline granitic intrusion in South Tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 61: 157~174.
- Huang H, Zhang Z C, Santosh M, *et al.* 2015. Petrogenesis of the Early Permian volcanic rocks in the Chinese South Tianshan: Implications for crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 228: 23~42.
- Jahn, B M. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 226(1): 73~100.
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000a. Massive granitoid generation in central Asia: Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. *Episodes*, 23: 82~92.
- Jahn B M, Wu F Y and Hong D W. 2000b. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central A-

- sia[J]. *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet Sci.)*, 109(1): 5~20.
- Konopelko D, Biske G, Seltnann R, *et al.* 2007. Hercynian post-collisional A-type granites of the Kokshaal Range, southern Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. *Lithos*, 97(1): 140~160.
- Konopelko D, Seltnann R, Biske G, *et al.* 2009. Possible source dichotomy of contemporaneous post-collisional barren I-type versus tin-bearing A-type granites, lying on opposite sides of the South Tien Shan suture[J]. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 206~216.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- Martin R F. 2006. A-type granites of crustal origin ultimately result from open-system fenitization-type reactions in an extensional environment[J]. *Lithos*, 91(1): 125~136.
- Patino Douce A E P. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 168(1): 55~75.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63~81.
- Qian Q, Gao J, Klemd R, *et al.* 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[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 551~569.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36: 891~931.
- Scherer E E, Whitehouse M J and M Nker C. 2007. Zircon as a monitor of crustal growth[J]. *Elements*, 3: 19~24.
- Sengör A M C, Natal'in B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299~307.
- Sisson T W, Ratajeski K, Hankins W B, *et al.* 2005. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(6): 635~661.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processed [A]. Saunders A K and Norry M J. *Magmatism in Ocean Basins* Geological Society[C]. 42: 313~345.
- Turner S P, Foden J D and Morrison R S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: an example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. *Lithos*, 28(2): 151~179.
- van Achterbergh E, Ryan C, Jackson S, *et al.* 2001. Data reduction software for LA-ICPMS. *Laser-Ablation-ICPMS in the earth sciences-principles and applications*[J]. *Miner Assoc Can (short course series)*, 29: 239~243.
- Wang Chao, Liu Liang, Che Zicheng, *et al.* 2007. Geochronology, petrogenesis and significance of Baleigong mafic rocks in Kokshal segment, southwestern Tianshan Mountains[J]. *Geological Review*, 53(6): 743~754(in Chinese with English abstract).
- Wang Meng, Zhang Jinjiang, Qi Guowei, *et al.* 2014. Geochemistry and geochronology of Early Permian acid volcanic rocks along Kuqa River and its tectonic implication in the southern margin of South Tianshan Orogen, Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Geology*, 49(1): 242~258 (in Chinese with English abstract).
- Watson E B, Wark D A and Thomas J B. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413~433.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, *et al.* 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, Central Asia[J]. *Geology*, 18: 128~131.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164: 31~47.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217~1238(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. *Chemical Geology*, 234: 105~126.
- Xiao W J, Windley B F, Allen M B, *et al.* 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. *Gondwana Research*, 23: 1316~1341.
- Xiao W J, Huang B C, Han C M, *et al.* 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens[J]. *Gondwana Research*, 18: 253~273.
- Yang Haibo, Gao Peng, Li Bing, *et al.* 2005. The geological character of the Sinian Dalubayi ophiolite in the west Tianshan, Xinjiang[J].

- Xinjiang Geology, 23(2): 123~126(in Chinese with English abstract).
- Yang S H and Zhou M F. 2009. Geochemistry of the ~ 430 Ma Jingbulake mafic-ultramafic intrusion in Western Xinjiang[J]. Lithos, 113: 259~273.
- Zhang C L and Zou H B. 2013. Permian A-type granites in Tarim and western part of Central Asian Orogenic Belt (CAOB): Genetically related to a common Permian mantle plume? [J]. Lithos, 172~173: 47~60.
- Zhang L F, Ai Y L, Li X P, *et al.* 2007. Triassic collision of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks[J]. Lithos, 96: 266~280.
- Zhu Zhixin, Li Jinyi, Dong Lianhui, *et al.* 2008. The age determination of Late Carboniferous intrusions in Mangqisu region and its constraints to the closure of oceanic basin in South Tianshan, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 24 (12): 2 761~2 766(in Chinese with English abstract).
- 高俊, 龙灵利, 钱青, 等. 2006. 南天山: 晚古生代还是三叠纪碰撞造山带? [J]. 岩石学报, 22(5): 1 049~1 061.
- 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010. “钨合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限[J]. 岩石学报, 26(8): 2 233~2 246.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2 595~2 604.
- 黄河, 张招崇, 张东阳, 等. 2011. 中国南天山晚石炭世-早二叠世花岗质侵入岩的岩石成因与地壳增生[J]. 地质学报, 85(8): 1 305~1 333.
- 李锦轶, 王克卓, 李亚萍, 等. 2006. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化[J]. 地质通报, 25(8): 895~909.
- 王超, 刘良, 车自成, 等. 2007. 西南天山阔克萨彦岭巴雷公镁铁质岩石的地球化学特征, LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其大地构造意义[J]. 地质论评, 53(6): 743~754.
- 王盟, 张进江, 戚国伟, 等. 2014. 新疆南天山南缘库车河流域早二叠世酸性火山岩的地球化学, 锆石年代学及构造意义[J]. 地质科学, 49: 242~258.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1 217~1 238.
- 杨海波, 高鹏, 李兵, 等. 2005. 新疆西天山达鲁巴依蛇绿岩地质特征[J]. 新疆地质, 23(2): 123~126.
- 朱志新, 李锦轶, 董连慧, 等. 2008. 新疆南天山盲起苏晚石炭世侵入岩的确定及对南天山洋盆闭合时限的限定[J]. 岩石学报, 24(12): 2 761~2 766.

附中文参考文献