

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.720>



南阿尔金陆块科克萨依新元古代 花岗岩成因及地质意义

陈红杰^{1,2}, 吴才来^{1*}, 雷敏¹, 郭文峰¹, 张昕¹, 郑坤¹, 高栋¹, 吴迪²

1. 中国地质科学院地质研究所, 中国地质调查局大陆动力学研究中心, 北京 100037

2. 中国地质大学, 北京 100083

摘要: 南阿尔金陆块是阿尔金造山带的重要组成部分, 大量新元古代花岗岩出露于南阿尔金亚干布阳—帕夏拉依档—科克萨依一带, 这些花岗岩记录了与 Rodinia 超大陆汇聚有关的动力学信息, 因此对其进行研究有利于对阿尔金造山带演化历史的认识和理解。选取了科克萨依花岗岩岩体进行了岩相学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成的研究。研究表明: (1) 科克萨依二长花岗岩的主要矿物有: 石英、钾长石、斜长石、黑云母和白云母; 花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 947~945 Ma。 (2) 地球化学特征显示, 岩石具有高 SiO₂ (71.54%~74.69%)、高 Na₂O+K₂O (6.33%~7.40%), 低 CaO (1.59%~2.00%), 低 MgO (0.43%~0.61%) 和 TiO₂ (0.25%~0.37%) 的特征, 相对富钾, K₂O/Na₂O 比值为 1.02~1.71, A/CNK 在 1.10~1.14 之间, 属高钾钙碱性系列的过铝质花岗岩, 富集 Rb、Th、K、La 等元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等元素; 轻稀土富集而重稀土亏损, 具有明显的负 Eu 异常。 (3) 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -4.09~+3.87 之间, 二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 1.6~2.0 Ga。这些特征表明科克萨依二长花岗岩是古老地壳富长石贫黏土的(变)杂砂岩部分熔融形成的 S 型花岗岩。结合相邻地区新元古代花岗岩类的地球化学、同位素特征及阿尔金区域构造资料, 认为科克萨依二长花岗岩形成于新元古代时期, 是碰撞造山环境下的产物, 是 Rodinia 超大陆汇聚碰撞过程的响应。

关键词: 花岗岩; 地球化学; U-Pb 年代学; Hf 同位素特征; 南阿尔金陆块。

中图分类号: P588.121; P597.3

文章编号: 1000-2383(2018)04-1278-15

收稿日期: 2017-12-20

Petrogenesis and Implications for Neoproterozoic Granites in Kekesayi Area, South Altyn Continent

Chen Hongjie^{1,2}, Wu Cailai^{1*}, Lei Min¹, Guo Wenfeng¹, Zhang Xin¹, Zheng Kun¹, Gao Dong¹, Wu Di²

1. Centre for Continental Dynamics, China Geological Survey, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: The South Altyn continental block is an important geological unit of the Altyn Tagh orogenic belt. Numerous Neoproterozoic granites outcrops in the South Altyn continental block, and are mainly located in Paxialayidang-Yaganbuyang-Kekesayi area. These granites provide indispensable dynamics information of the Rodinia supercontinent aggregation in Neoproterozoic. Therefore, the study of granites can help us to understand the formation and evolution history of the Altyn Tagh orogenic belt. In this paper, Kekesayi granitic pluton was studied by means of petrography, geochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotopic analyses. The results are as follows. (1) Main minerals of Kekesayi monzonitic granite are: quartz + K-feldspar + plagioclase + biotite + muscovite. Zircon U-Pb dating shows that the granite was emplaced in 947–945 Ma. (2) Geochemistry characteristics show high SiO₂ (71.54%–74.69%), K₂O + Na₂O (6.33%–7.40%) contents and low CaO

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41272079); 中国地质调查局项目(Nos.12120115027001, 121201102000150005-06).

作者简介: 陈红杰(1985—), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业. ORCID: 0000-0002-4274-9410. E-mail: chenhongjie525@126.com

*** 通讯作者:** 吴才来, ORCID: 0000-0001-8933-7010. E-mail: wucailai@126.com

引用格式: 陈红杰, 吴才来, 雷敏, 等. 2018. 南阿尔金陆块科克萨依新元古代花岗岩成因及地质意义. 地球科学, 43(4): 1278–1292.

(1.59%—2.00%), MgO (0.43%—0.61%) and TiO_2 (0.25%—0.37%) contents, with $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios of 1.02—1.71 and A/CNK ratios of 1.10—1.14, showing a typical high-K calc-alkaline series with peraluminous features. Meanwhile, the granite is also enriched in Rb, K, Th and La, and depleted in Nb, Ta, Sr and Ba, with negative Eu anomalies and relative enrichment in LREE. (3) $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range from -4.09 to +3.87 while two-stage model ages (t_{DM2}) vary in 1.6—2.0 Ga. It is argued that the Kekesayi monzonitic granites were derived from partial melting of the meta-grey wackes of Late Paleoproterozoic to Early Mesoproterozoic ancient crustal materials. In combination with other Neoproterozoic granite features, the petrogenesis and isotopic geochronology indicate that the Kekesayi monzonitic granite was formed in collisional orogeny setting and may have been triggered by the assemblage of Rodinia supercontinent in Neoproterozoic.

Key words: granite; geochemistry; U-Pb chronology; Hf isotopic characteristics; South Altyn continent.

0 引言

花岗岩记录了造山带的演化历史,前人提出了多种花岗岩成因模型来反映不同的形成机制(Bonin, 2007).在造山带演化的不同阶段(洋壳俯冲和陆陆碰撞阶段)均可产出大规模的花岗岩基(Milani *et al.*, 2015).陆陆碰撞阶段导致大陆地壳的部分熔融产生同碰撞花岗岩岩浆作用,而同碰撞岩浆作用是多样的,例如埃达克岩、低 Sr/Y 钠质熔岩、石英闪长岩以及 S 型花岗岩(Song *et al.*, 2015).S 型花岗岩主要产于碰撞或碰撞后环境,具有高的铝饱和指数 $\text{A/CNK} > 1.1$, 高 SiO_2 含量,低 Na_2O ($< 3.2\%$)含量(Chappell and White, 2001).S 型花岗岩的形成与大陆碰撞造山作用密切相关,对理解造山带演化及地壳生长具有重要意义(Zhao *et al.*, 2017).

Grenville 期一系列的造山事件(1 300 ~ 900 Ma)将不同的大陆块体和微陆块体拼接成了 Rodinia 超大陆(Hoffman, 1991; Moores, 1991; Li *et al.*, 1995, 2008),随后受超级地幔柱的影响而发生裂解(Santosh *et al.*, 2009).阿尔金造山带位于塔里木克拉通南缘,作为 Rodinia 超大陆的重要组成部分,塔里木克拉通记录了 Rodinia 超大陆汇聚(1.05~0.90 Ga)和裂解(0.82~0.74 Ga)事件(Lu *et al.*, 2008).近年来的研究表明,阿尔金造山带中部的南阿尔金陆块出露大面积新元古代花岗岩质岩石及高压变质岩(王永和等, 2004; 覃小峰等, 2008),这些新元古代花岗质岩石均具有同碰撞性质(王超等, 2006; Yu *et al.*, 2013a; 王立社等, 2015; 李琦等, 2015).此外,与阿尔金相邻的东昆仑—柴北缘—祁连地区也相继有发现新元古代早期岩浆事件的报道,这些新元古代岩浆事件表明该时期岩浆活动范围较为广泛,与我国西部地区不同陆块之间的汇聚有关,也是对西部地区克拉通基底形成及全球 Rodinia 超大陆汇聚事件的响应(陆松年, 1998; 郭进京等,

1999; 梅华林等, 1999; 陈能松等, 2006; Wan *et al.*, 2006; 于胜尧等, 2011; 张建新等, 2011; 孟繁聪等, 2013; Yu *et al.*, 2013a, 2013b; Wang *et al.*, 2013).

受古生代造山事件叠加的影响,阿尔金造山带中元古代至新元古代的地壳演化过程仍不清楚.新元古代岩浆活动的性质及分布,与 Grenville 全球造山事件和 Rodinia 超大陆的关系,并没有得到很好的限制.本文以南阿尔金陆块科克萨依岩体作为研究对象,在详实的野外调查基础上,对其进行岩石学、年代学及同位素地球化学等方面的研究,并结合区域地质构造特征,探讨阿尔金地区新元古代岩浆作用及其与构造演化,以及与罗迪尼亚超大陆汇聚事件的关系.

1 区域地质背景

阿尔金山地处青藏高原北缘,介于塔里木板块、柴达木微板块、阿拉善地块之间,是塔里木盆地和青藏高原的天然分界线,被认为是塔里木克拉通变质基底的主要出露区域之一(张建新等, 2011).阿尔金造山带经过多期的岩浆活动的强烈改造,在新元古代至早古生代经历了与板块汇聚有关的地壳深俯冲高压超高压变质作用(车自成等, 1995; 王永和等, 2004; 刘永顺等, 2009),其后又遭受中—新生代的大型走滑断裂的改造,表明阿尔金造山带是由不同构造层次、不同时期和不同构造环境的地质体组成的复合造山带(刘良等, 1996, 1999; 许志琴等, 1999; 张建新等, 1999; Zhang *et al.*, 2001; Cui, 2011; 吴才来等, 2016).前人根据造山带内不同地质体的岩石学、地球化学、同位素年代学特征,自北向南依次划分为阿北变质地体、北阿尔金蛇绿混杂岩带、中阿尔金地块、南阿尔金高压超高压带(即南阿尔金陆块)、南阿尔金早古生代蛇绿混杂岩带(许志琴等, 1999; Liu *et al.*, 2009, 2012; 吴才来等, 2014, 2016).



图 a 据 Liu *et al.* (2012); b 据吴才来等 (2016); c 据西安地质矿产研究所 (2003) 编新疆 1:25 万苏吾什杰幅区域地质调查报告。TRB. 塔里木盆地; QL. 祁连山; QDB. 柴达木盆地; WKL. 西昆仑; EKL. 东昆仑; HMLY. 喜马拉雅山

科克萨依岩体主要岩性为二长花岗岩,呈灰白

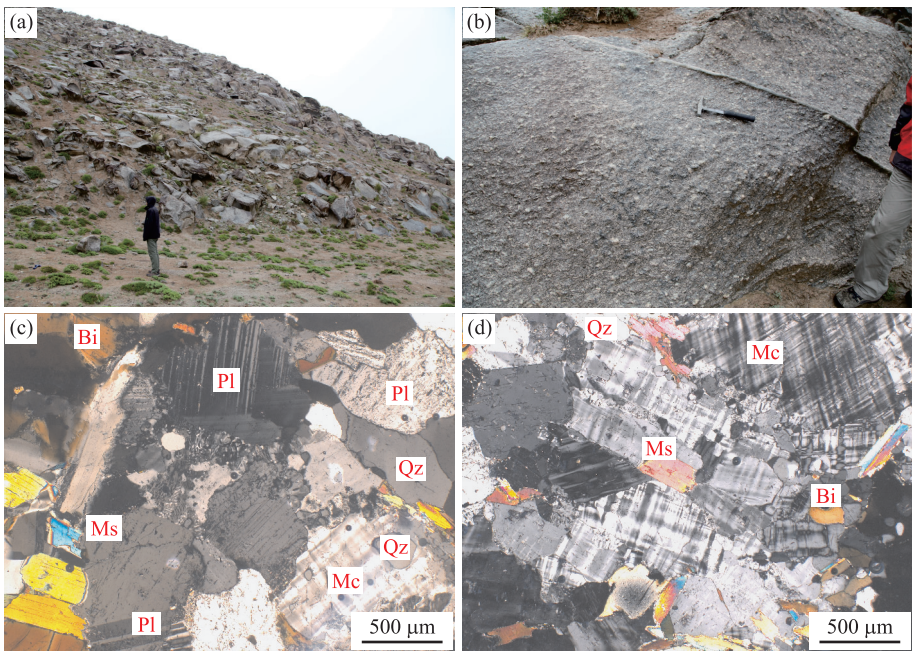


图 2 科克萨依岩体野外及镜下照片

Fig.2 Outcrops and photomicrographs of Kekesayi granite

a.科克萨依岩体野外露头;b.新元古代花岗岩野外露头;c,d.二长花岗岩镜下照片(正交偏光);Pl.斜长石;Mc.微斜长石;Qz.石英;Bi.黑云母;Ms.白云母

色—灰色(图 2a),表面具球状风化,含钾长石斑晶,眼球状中细粒结构,片麻状构造,局部地方塑性变形较强烈,并发育石英脉(图 2b).结合野外露头观察和室内镜下分析,主要矿物组合为:石英约 25%~35%,钾长石约 25%~35%,斜长石约 20%~30%,黑云母约 3%~5%,白云母约 1%~3%(图 2c).石英呈半自形—他形,具有波状消光;微斜长石呈半自形宽板状,具有格子双晶,晶体中包裹有石英、云母等细小晶体;斜长石半自形,晶体表面较为浑浊,绢云母化较为强烈;黑云母呈褐色—浅黄色片状,局部绿泥石化;白云母多色性明显,两种云母均呈断续片状定向排列(图 2d);主要副矿物有磁铁矿、磷灰石等.

3 分析方法

3.1 全岩化学分析

岩石粉末碎样和化学全分析工作由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室完成.将岩石样晒干,经无污染粗碎、细碎至小于 0.5 cm 的岩块后混匀,用四分法缩分出 100 g 左右样品,在恒温干燥箱中 45 ℃ 烘干,用高铝瓷球磨机研磨至 200 目筛(小于 0.074 mm),测定各种化学元素含量.其中常量元素氧化物及 Sr、Ba、Zn、Rb、Nb、

Zr、Ga 等微量元素含量使用 X 荧光光谱仪测定;稀土元素和其他微量元素使用高分辨等离子质谱测定. H_2O^+ 、 CO_2 、LOI 等指标的分析测试方法分别参照 GB/T14506.2-1993、GB9835-1988、LY/T1253-1999 标准执行.分析测试时插入国家一级标准物质控制分析准确度,按样品总数的 5%抽取检查样品编成密码进行重复分析,以及对异常点进行再次重复分析以控制分析测试精密密度.经统计检验,分析结果的检出限、准确度、精密度和报出率等指标都满足或优于《地质矿产实验室测试质量管理规范》中的相关要求.大多数元素测试精度为 5%,少量小于 10×10^{-6} 的元素测试精度为 10%.

3.2 锆石 U-Pb 定年

锆石的分选工作由河北廊坊区域调查研究院完成,将样品破碎至 40~80 目,使用常规的重液浮选和电磁分离方法,然后在双目镜下手工挑选出锆石;根据锆石的自形程度、颜色、形态及透明度等特征进行分类,选出有代表性的锆石进行制靶.拍摄透反射照片及阴极发光照片等程序由中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室完成.激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)锆石原位微区 U-Pb 定年工作在中国科学技术大学壳幔物质与环境重点实验室完成,仪器型号为 ICP-MS ELAN DRC-II 型.激光剥蚀的斑束直径为 32~44 μm ,激光剥蚀样品

的深度约为 20~40 μm ,实验以 He 为载气,结合锆石反射、透射照片,避开锆石内部裂隙和包裹体,采样方式为单点剥蚀,每测定 4 个样品点后测定标样一次.锆石 U-Pb 同位素组成分析采用 91500 国际标准锆石作为外标, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄的加权平均值误差为 $\pm 2\sigma$;元素含量测定采用 NIST SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标.U/Pb 比值数据处理采用 Lada-ting@Zrn,普通 Pb 同位素校正处理使用 Andersen *et al.*(2002)方法,校正后的数据使用美国 Berkeley 地质年代中心编制的 ISPLIT 和 SQUID 程序(Ludwig, 2003),锆石的加权平均年龄及谐和图用 Isoplot 程序获得.

3.3 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素的分析是在前述锆石 U-Pb 同位素的基础上完成的.测试分析在中国地质科学院地质研究所 LA-MC-ICP-MS 实验室进行,采用的仪器为 Neptune Plus 型多接收等离子质谱和 Geo-LasPro 193nm 激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS).实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径为 44 μm ,测定时使用锆石国际标样 GJ-1 作为参考标样.分析过程中锆石标样 GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282\,007 \pm 0.000\,025 (2\sigma)$.计算初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 时,Lu 的衰变常数采用 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer *et al.*, 2001),锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算时采用球粒陨石 Hf 同位素值 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.036$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\,785$ (Bouvier *et al.*, 2008).在 Hf 的地幔模式年龄计算中,亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 现在值采用 0.253 25, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 采用 0.038 4(Griffin *et al.*, 2000),地壳模式年龄计算时采用平均地壳的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.015$ (Griffin *et al.*, 2002).相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007).

4 分析结果

4.1 地球化学特征

本文对科克萨依新元古代二长花岗岩 8 个样品进行了主量和微量元素分析,其详细分析结果见附表 1.主量元素分析结果显示: SiO_2 含量为 71.54%~74.69%, Al_2O_3 含量为 13.15%~14.24%, Na_2O 含量为 2.65%~3.14%, K_2O 含量为 3.20%~4.67%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量为 6.33%~7.40%, FeO^{T} 含量为 2.29%~2.94%, MgO 含量为 0.43%~0.61%, CaO 含量为 1.59%~2.00%, TiO_2 含量为 0.25%~0.37%(附表 1).根据 SiO_2 - $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 分类图,科克萨依二长花岗岩样品全落入花岗岩区(图 3a),岩石属高钾钙碱性系列(图 3b).铝饱和指数 A/CNK 值介于 1.10~1.14,显示强过铝质特征(图 3c).

科克萨依二长花岗岩稀土配分模式整体与亚干布阳花岗岩(另文发表)较为一致,表现为轻稀土富集、重稀土相对亏损的右倾型(图 4a).REE 总量为 $129.58 \times 10^{-6} \sim 171.2 \times 10^{-6}$,LREE/HREE 为 5.27~8.17,平均 6.70. $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 4.32~9.79,表明轻、重稀土之间的分馏程度较高, $(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{N}}$ 为 0.91~1.91,表明 LREE 元素内部具有一定程度分馏.而样品 HREE 元素内部分馏程度较低, δCe 为 0.98~1.04,此外均表现出中等负 Eu 异常, δEu 为 0.48~0.58(附表 1).微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 4b),科克萨依二长花岗岩整体趋势与亚干布阳花岗岩类似.富集 K、Th、Rb、U 等元素,亏损 Nb、Ta、Sr、Ba 和 Ti 等元素.Eu 负异常暗示岩浆在形成过程可能存在斜长石的分离结晶或源区有斜长石的残留,Ti 的亏损可能与钛铁矿的分离结晶作用有关.

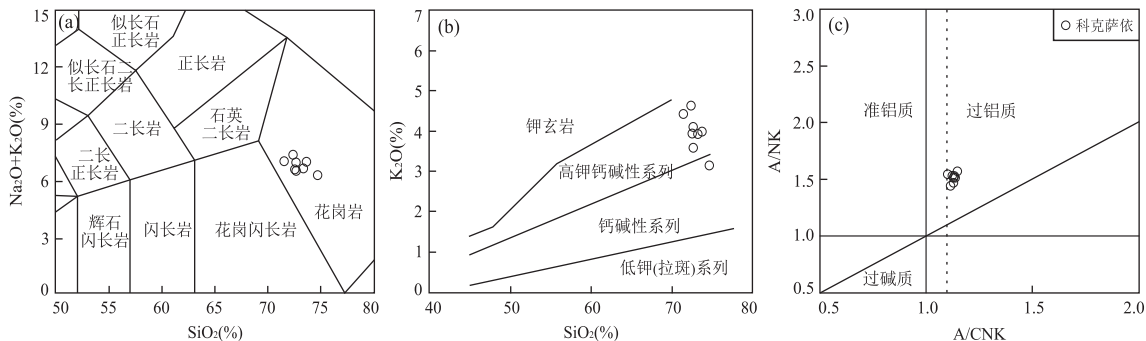


图 3 科克萨依新元古代花岗岩体全岩 SiO_2 - $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (a), SiO_2 - K_2O (b) 和 A/CNK-A/NK 图解(c)
Fig.3 Whole-rock SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ classification diagram (a), SiO_2 vs. K_2O diagram (b) and A/CNK vs. A/NK diagram (c) of Keksayi Neoproterozoic granites

图 a 据 Maniar and Piccoli(1989);图 b 据 Middlemost(1994);图 c 据 Martin *et al.*(2005)

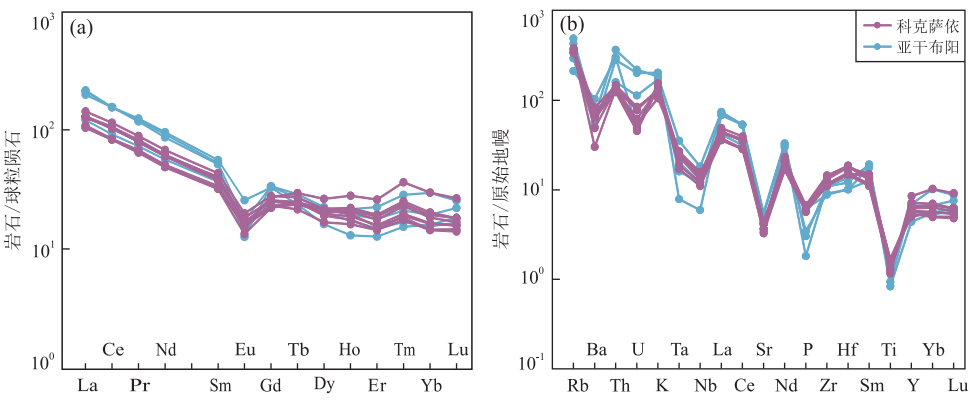


图 4 科克萨依花岗岩全岩稀土配分模式(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b) for the granites in Kekesayi area
标准化值据 Sun and McDonough(1989)

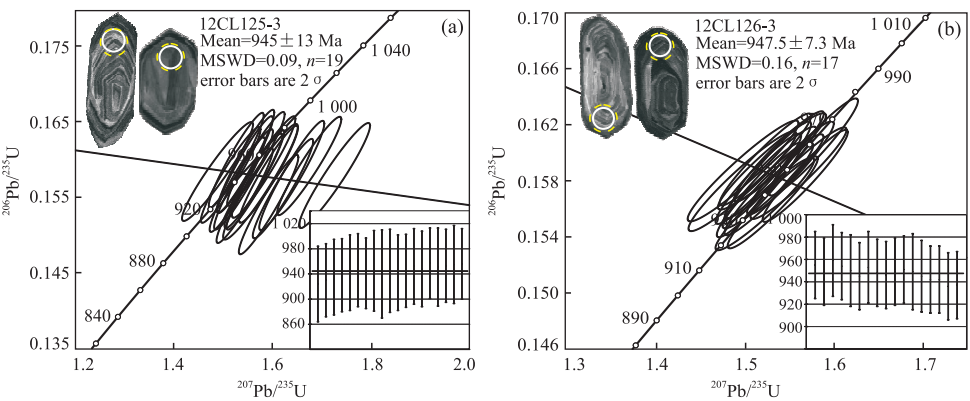


图 5 科克萨依地区花岗岩体锆石谐和曲线

Fig.5 Concordia plots of the granites in Kekesayi area

4.2 锆石 U-Pb 年代学

本文用于锆石 U-Pb 同位素定年的两个样品采自科克萨依岩体.对 2 个花岗岩样品进行了锆石 U-Pb 定年,测点均选择锆石结晶时生成的环带部位,分析结果如下.

样品 12CL125-3 锆石的 CL 图像显示呈灰黑色,晶形较好,主要为长柱状,个别呈椭圆状,具清晰岩浆振荡环带,锆石长约 100~200 μm ,长宽比约为 2 : 1~3 : 1,个别锆石边缘具有暗黑色边,可能是受后期变质作用改造的结果(图 5a).对该样品一共 19 个点进行了测试,测点结果表明 Th 含量为 $5.83 \times 10^{-6} \sim 30.69 \times 10^{-6}$,U 含量为 $26.23 \times 10^{-6} \sim 172.35 \times 10^{-6}$,Th/U 比值为 0.05~0.39,平均为 0.21,显示岩浆锆石的特征(附表 2).通过锆石内部的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 进行年龄计算,锆石年龄变化于 957~924 Ma 之间,加权平均年龄为 945 ± 13 Ma (MSWD=0.09)(图 5a).

样品 12CL126-3 锆石的 CL 图像显示呈灰黑

色,晶形完整,锆石长约 100~250 μm ,长宽比约为 2 : 1~1.5 : 1,主要呈椭圆状,个别为长柱状,具清晰岩浆振荡环带,个别锆石边缘具有暗黑色边,可能是受到后期变质作用改造的结果(图 5b).对该样品共进行了 17 个点的测试,测点结果表明 Th 含量为 $5.87 \times 10^{-6} \sim 21.01 \times 10^{-6}$,U 含量为 $24.81 \times 10^{-6} \sim 199.01 \times 10^{-6}$,Th/U 比值为 0.05~0.85,平均值为 0.28,显示岩浆锆石的特征(附表 2).通过锆石内部的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 进行年龄计算,锆石年龄变化于 959~936 Ma 之间,加权平均年龄为 947.5 ± 7.3 Ma(MSWD=0.16)(图 5b).

4.3 锆石 Lu-Hf 同位素

对科克萨依岩体二长花岗岩两个样品(12CL125-3、12CL126-3)分别进行锆石原位 Lu-Hf 同位素分析,共计 35 个点(附表 3).分析结果如下.

样品 12CL125 的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值是 0.037 092~0.082 695, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 范围为 0.282 178~0.282 318, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 0.001 143~0.002 571

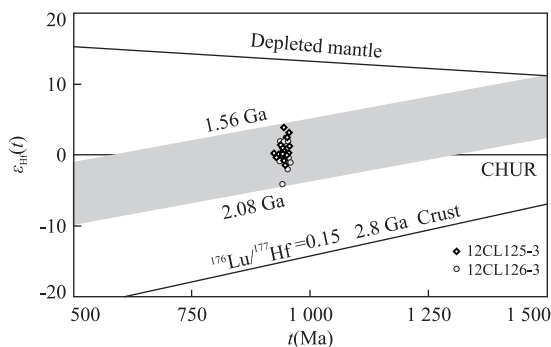


图 6 科克萨依花岗岩体锆石 Hf 同位素组成

Fig. 6 Hf isotopic compositions of zircons from granites in Kekesayi area

之间,平均值小于 0.002.对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化于 $-1.36 \sim +3.87$,根据锆石 U-Pb 年龄计算的二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 变化介于 1.56 ~ 1.89 Ga.样品 12CL126 的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值是 0.027 723 ~ 0.067 292, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 范围为 0.282 100 ~ 0.282 264, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 0.000 809 ~ 0.002 007 之间,平均值小于 0.002.对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化于 $-4.10 \sim +2.45$,根据锆石 U-Pb 年龄计算的二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 变化介于 1.66 ~ 2.08 Ga (图 6). $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} < 0.002$,代表锆石形成后放射性成因 Hf 同位素积累较少,因此 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本上可以代表锆石结晶时同位素体系中 Hf 同位素组成.锆石的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}(s) = -0.92 \sim -0.98$,与大陆铁镁质地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}(s) = -0.34$ 相比明显较小,所以二阶段模式年龄可以代表源区物质从亏损地幔抽取的时间(第五春荣等,2007).

5 讨论

5.1 岩石成因与源区特征

S 型花岗岩常含有白云母、石榴石、堇青石等过铝质矿物,岩石常为过铝质, $A/\text{CNK} > 1.1$,且 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ (Sylvester, 1998).科克萨依二长花岗岩样品富碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.48\% \sim 8.89\%$), $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $A/\text{CNK} > 1.1$, CIPW 标准计算均出现刚玉 (1.58% ~ 2.10%),属强过铝质钙碱性花岗岩.此外,岩石中含过铝质矿物白云母,以及锆石中含有继承锆石,以上特征均指示科克萨依二长花岗岩为过铝质 S 型花岗岩.过铝质 S 型花岗岩一般形成于区域挤压环境下或者与俯冲相关的背景下 (Barbarin, 1996; Collins, 1998; Douce and Harris,

1998; Douce, 1999; Healy *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2014);实验岩石学表明,在一定的温度压力条件下,多种源岩的部分熔融均可以产生过铝质花岗质熔体 (Rapp *et al.*, 1991; Rapp and Watson, 1995; Johannes and Holtz, 1996; Winther and Newton, 1996),熔体的成分变化则取决于初始熔融物质的成分、温度和压力,以及初始物质的含水量差异 (Hansen *et al.*, 2002).因此,判别强过铝质花岗岩的源岩性质成为判别构造环境的关键.

科克萨依二长花岗岩的 Th/U 比值 (6.62 ~ 11.63) 平均为 9.14,稍高于上地壳平均值 4.2; Zr/Hf 比值为 26.2 ~ 28.38,稍低于上地壳的 Zr/Hf 比值 (~37) (Gao *et al.*, 1998); Nb/Ta 比值为 8.9 ~ 13.2,与地壳岩石的比值 (11 ~ 13) 非常接近 (Barth *et al.*, 2000),这些特征显示其源岩具有地壳沉积岩的特征. $\text{Mg}^\#$ 值的高低是判断岩浆熔体来源的重要指标,当 $\text{Mg}^\# < 40$ 时认为是地壳部分熔融形成的熔体,而 $\text{Mg}^\#$ 较高的则可能有幔源物质的加入 (Rapp and Watson, 1995).科克萨依二长花岗岩的 $\text{Mg}^\#$ 值在 25.00 ~ 28.49 之间,平均为 27.25,同样指示该套花岗岩主要来源于地壳物质的部分熔融.

通过 C/MF-A/MF 图解 (图 7a) 可以看出,样品均落入杂砂岩的部分熔融范围;在 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}^\text{T} + \text{MgO} + \text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{FeO}^\text{T} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ 判别图解 (图 7b) 中,样品也全落在砂质岩的范围内 (Douce, 1999).岩石的 $\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO}$ 比值为 4.48 ~ 5.35, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值为 37.75 ~ 51.91,平均为 44.7, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 1.02 ~ 1.71,这些地球化学特征显示与地壳沉积岩部分熔融形成的 S 型花岗岩相似 (路凤香和桑隆康, 2002),暗示其源岩为陆壳沉积的砂质岩 (Sylvester, 1998).实验岩石学表明, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 的比值主要受控于源区长石/黏土成分的比例,富长石、贫黏土的砂屑岩熔融形成的过铝质花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 一般大于 0.3.科克萨依花岗岩的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.53 ~ 0.71,平均为 0.62,类似于澳大利亚 Lachlan 褶皱带上的 S 型花岗岩 (图 7c).在 Rb/Sr-Rb/Ba 图解中 (图 7d) 样品都落入砂质岩熔融区域内.结合 Rb-Th 具有负相关的特征 (图 8a)、 $\text{CaO} - \text{FeO}^\text{T} + \text{MgO} - (\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}))$ 图解 (图 8b) 及较低的 $\text{Mg}^\#$ 值,笔者认为该套二长花岗岩的源岩为杂砂岩.

锆石饱和温度可以近似代表花岗岩近液相线的温度, Watson and Harrison (1983, 2005) 通过高温实验获得锆石溶解度模拟公式 $T_{\text{Zr}}(^{\circ}\text{C}) = \{12\,900 \times$

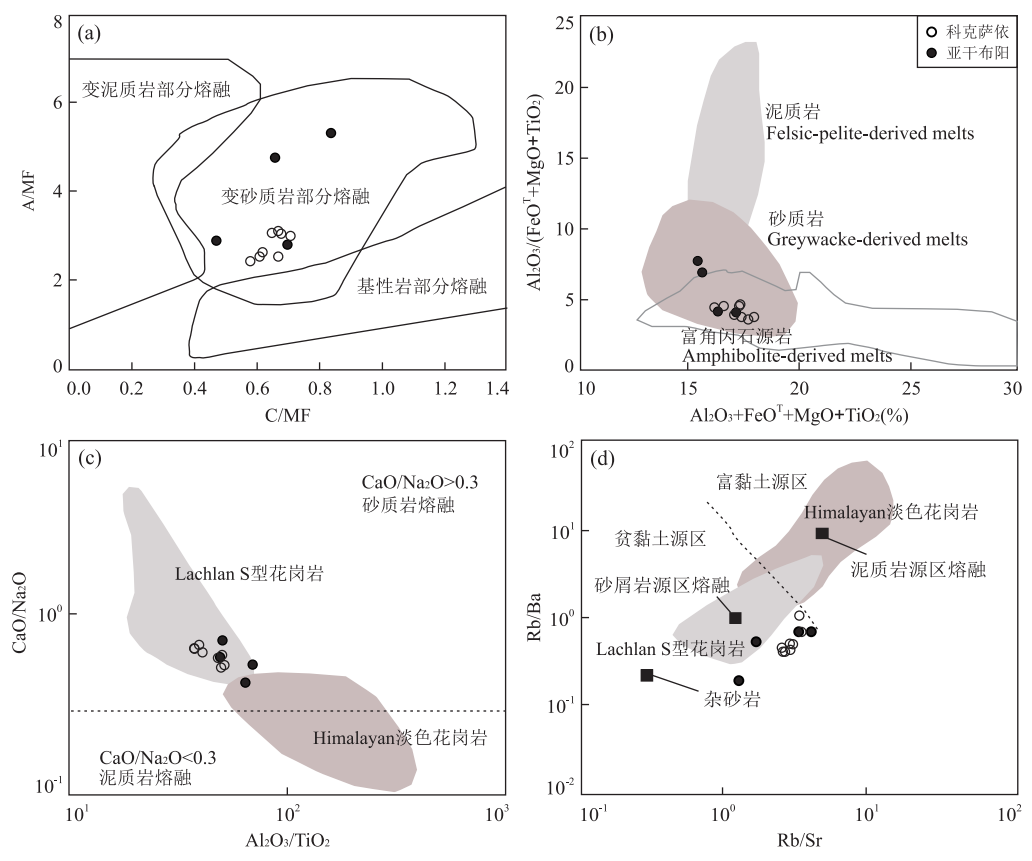


图 7 科克萨依地区花岗质岩体 C/MF-A/MF 图解(a), $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ 图解(b), $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiO}_2 - \text{CaO} / \text{Na}_2\text{O}$ 图解(c)和 Rb/Sr-Rb/Ba 图解(d)

Fig.7 Geochemical diagrams of granites in Kekesayi area, C/MF vs. A/MF (a), $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ vs. $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)$ (b), $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiO}_2$ vs. $\text{CaO} / \text{Na}_2\text{O}$ (c), Rb/Sr vs. Rb/Ba (d)

图 a 据 Alther *et al.*(2000); 图 b 据 Douce(1999); 图 d 据 Sylvester(1998). 数据来源: Himalayan 浅色花岗岩据 Searle and Fryer(1986); Inger and Harris(1993); Ayres and Harris(1997). Lachlan S 型花岗岩据 Chappell and Simpson(1984); Healy *et al.*(2004)

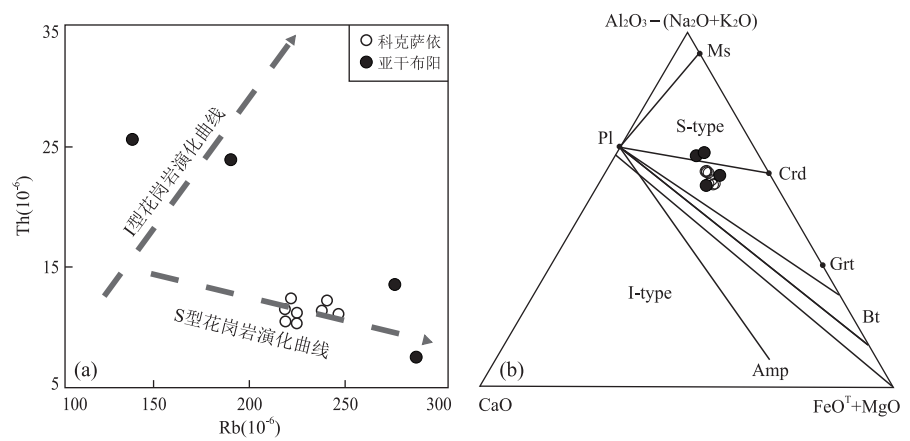


图 8 Rb-Th 图解(a)和 $\text{CaO} - \text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} - (\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}))$ 图解(b)

Fig.8 Diagram of Rb-Th (a) and diagram of $\text{CaO} - \text{FeO}^{\text{T}} + \text{MgO} - (\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}))$ (b)

图 a 据 Chappell *et al.*(1999); 图 b 据 White and Chappell(1977)

$[\ln D_{\text{Zr}} (496\ 000 / \text{熔体}) + 0.85M + 2\ 195] \} - 273.15$, 公式中 Zr 为分配系数, M 为 $(\text{Na} + \text{K} + 2 \times \text{Ca}) / (\text{Al} \times \text{Si})$ 的阳离子含量比值. 计算结果表明, 科克萨依二长花岗岩 M 值为 $1.25 \sim 1.31$, 锆石温度为 $775 \sim 796\ ^\circ\text{C}$. 当地壳中发生低温 ($< 800\ ^\circ\text{C}$) 部分熔融产生岩浆时, 源区应有水的加入, 而岩浆中的水通

常来自于黑云母、白云母及角闪石等矿物的脱水反应 (Best and Christiansen, 2001). 科克萨依二长花岗岩具有较高的 SiO_2 (平均 72.97%)、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (平均 6.87%) 含量、 $\text{A/CNK} > 1.1$ (平均 1.14), 及较低的 $\text{FeO}^\text{T} + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ 含量 (平均 3.4%), 暗示其可能是由云母分解脱水而引发部分熔融 (Patiño Douce, 2005).

科克萨依二长花岗岩的 Sr 含量 ($69.23 \times 10^{-6} \sim 93.19 \times 10^{-6}$) 较低, 存在 δEu 负异常以及 Nb 亏损, 暗示在岩浆形成过程中可能存在斜长石的分离结晶作用或源区有斜长石的残留. Yb 的含量高低可能与形成的深度有关, 并且可以反馈源区是否存在石榴石的残留 (张旗等, 2006). 科克萨依二长花岗岩具有高 Yb ($2.46 \times 10^{-6} \sim 5.07 \times 10^{-6}$) 和 Y ($22.83 \times 10^{-6} \sim 38.75 \times 10^{-6}$) 特征, La/Yb 比值为 $6.02 \sim 13.65$, 暗示源区未残留石榴石, 部分熔融程度应在石榴石稳定区以上 (Defant *et al.*, 2002). 根据实验岩石学, 低 Sr 高 Yb 型花岗岩残留相为斜长石, 通常在熔体与斜长石平衡条件下形成, 与浙闽型花岗岩具有相似的特征 (张旗等, 2010). 脱水部分熔融的实验表明, 在 1.6 GPa 时残留相出现石榴石 (Rapp *et al.*, 1991), 由于残留相没有石榴石, 推断该二长花岗岩的形成压力较低. 科克萨依二长花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主要集中于 $-4.09 \sim +3.87$, 二阶段模式年龄 ($t_{\text{DM}2}$) 集中于 $1.56 \sim 2.08$ Ga (图 6), 表明科克萨依花岗岩主要源于元古代—中元古代的地壳物质.

5.2 构造环境与意义

阿尔金地区新元古代花岗岩多具有同碰撞花岗岩的性质, 并被认为与 Rodinia 超大陆的汇聚事件有关 (王超等, 2006; 覃小锋等, 2008; 李琦等, 2015; 王

立社等, 2015). 阿尔金造山带西段环形山锆石 U-Pb 年龄为 928 ± 7.7 Ma, 被认为是产于 Rodinia 超大陆汇聚背景下, 地壳沉积岩部分熔融形成的 S 型花岗岩 (王立社等, 2015); 而阿尔金造山带中部帕夏拉依档盖里克岩体锆石的 U-Pb 年龄为 886.5 ± 5 Ma, 形成于同碰撞构造环境, 是地壳角闪岩部分熔融形成的产物 (李琦等, 2015).

笔者对采自科克萨依二长花岗岩体的两个样品进行了锆石 U-Pb 定年分析, 分析结果显示岩体形成于 $945 \sim 947$ Ma, 代表该岩体的结晶年龄, 表明该岩体形成于新元古代. 岩石的微量元素 Rb 含量为 $214.8 \times 10^{-6} \sim 242.8 \times 10^{-6}$, Nb 和 Ta 含量分别为 $7.89 \times 10^{-6} \sim 11.20 \times 10^{-6}$ 和 $0.70 \times 10^{-6} \sim 1.10 \times 10^{-6}$, Nb/Ta = $8.6 \sim 11.3$, 总体具有高 Rb、低 Yb、Nb、Ta 的特征, 类似于同碰撞型花岗岩 (Pearce *et al.*, 1984). 在 R_1 - R_2 构造环境判别图解 (图 9a) 中, 显示样品与同碰撞构造作用有关, 在岩石 Nb-Y 判别图解中 (图 9b), 科克萨依岩体与亚干布阳岩体样品具有相似的特征, 基本全落入同碰撞区域. 结合科克萨依花岗岩岩体的锆石 U-Pb 年龄, 笔者认为科克萨依岩体可能形成于同碰撞环境, 是 Rodinia 超大陆汇聚阶段不同板块之间碰撞的产物.

在与阿尔金相邻的昆仑、祁连山、柴北缘等造山带均有新元古代花岗岩的报道, 且都卷入了早古生代末期构造—热事件. 如祁漫塔格花岗岩 (940 Ma) (孟繁聪等, 2013)、北山柳园与榴辉岩共生的花岗质岩石 (880 Ma) (梅华林等, 1999)、祁连山响河花岗岩 (917 ± 12 Ma) (郭进京等, 1999) 和柴北缘沙柳河一带的花岗片麻岩 (~ 900 Ma) (于海峰等, 1999) 等, 这些花岗岩被认为产于同碰撞构造背景, 是我国

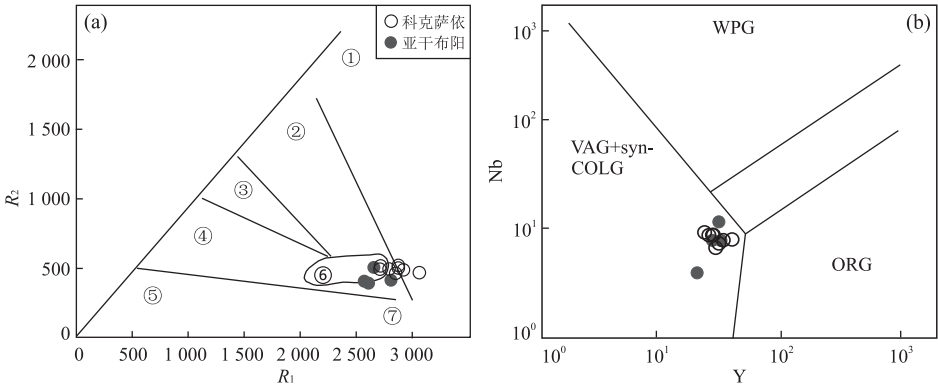


图 9 岩石 R_1 - R_2 构造环境判断图解 (a) 和岩石 Nb-Y 图解 (b)

Fig.9 R_1 - R_2 discrimination diagram (a) and Nb-Y diagram (b)

图 a 底图据 Batchelor and Bowden (1985); 图 b 底图据 Pearce *et al.* (1984). ①地幔分异产物; ②板块碰撞前; ③碰撞隆起后; ④造山晚期; ⑤非造山; ⑥同碰撞; ⑦造山期后

西部陆块汇聚碰撞的反映。此外,部分学者认为新元古代早期阿尔金—祁连—柴达木北缘和塔里木板块可能是同一个块体,在 Grenville 造山的后期阶段(950~900 Ma),暂时连接到中国华南板块的北部或 Rodinia 的西部,这些地区出露的新元古代花岗岩可能源于活动大陆边缘的中—基性火成岩(Yu *et al.*, 2013a)。目前阿尔金构造带还没有确切的新元古代变质事件的证据,但是在阿尔金造山带中部出露很多早古生代花岗岩与榴辉岩(张建新等,1999;刘良等,2002, 2003;张安达等,2004;王超等,2006),暗示这些新元古代花岗质岩石可能遭受到古生代构造事件的影响。

中元古代(1.3~1.8 Ga)期间阿尔金地区存在塔里木地块、中阿尔金微陆块、柴达木地块几个古老地块(覃小锋等,2006)。这些陆块在新元古代发生了汇聚碰撞,最终导致塔里木地块、柴达木地块及中阿尔金微陆块的拼合,并引起大陆边缘沉积物部分熔融形成花岗岩。正是这次大规模碰撞造山事件,导致塔里木变质基底的最终固结(Lu *et al.*, 2008)。本文通过对阿尔金南缘科克萨依岩体的岩石学、地球化学、同位素年代学的研究认为,科克萨依二长花岗岩形成于新元古代时期(947~945 Ma) Rodinia 超大陆汇聚阶段。南阿尔金陆块中类似的新元古代岩浆活动是 Grenville 全球性造山事件的结果(刘永顺等,2009; Yu *et al.*, 2013a; Wang *et al.*, 2013)。

6 结论

(1)科克萨依二长花岗岩,主要由石英、钾长石、斜长石、黑云母、白云母等矿物组成。地球化学特征显示其具有高 SiO_2 、高 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量,低 CaO 、 MgO 含量, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 1.59~2.61, $\text{A}/\text{CNK} > 1.1$,属过铝质高钾钙碱性系列,由地壳杂砂岩部分熔融形成的。

(2)锆石 U-Pb 年龄为 947.5~945 Ma,反映了本区新元古代时期发生过强烈的构造—热事件;锆石 Hf 同位素结果显示: $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -4.09~3.87, t_{DM2} 为 1.56~2.08 Ga,表明其源岩主要源于古元古代—中元古代的地壳。

(3)科克萨依二长花岗岩是新元古代时期碰撞造山的产物,是 Grenville 全球造山事件和 Rodinia 超大陆汇聚事件的响应。

致谢:感谢两位匿名评审人提出的宝贵意见!

References

- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., et al., 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. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00052-3)
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192 (1-2): 59-79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X)
- Ayres, M., Harris, N., 1997. REE Fractionation and Nd-Isotope Disequilibrium during Crustal Anatexis: Constraints from Himalayan Leucogranites. *Chemical Geology*, 139 (1-4): 249-269.
- Barbarin, B., 1996. Genesis of the Two Main Types of Peraluminous Granitoids. *Geology*, 24 (4): 295-298. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0295:gottmt>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0295:gottmt>2.3.co;2)
- Barth, M. G., McDonough, W. F., Rudnick, R. L., 2000. Tracking the Budget of Nb and Ta in the Continental Crust. *Chemical Geology*, 165 (3-4): 197-213. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00173-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00173-4)
- Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters. *Chemical Geology*, 48 (1-4): 43-55. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90034-8)
- Best, M. G., Christiansen, E. H., 2001. *Igneous Petrology*. Blackwell Science, Oxford.
- Bonin, B., 2007. A-Type Granites and Related Rocks: Evolution of a Concept, Problems and Prospects. *Lithos*, 97 (1-2): 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.12.007>
- Bouvier, A., Vervoort, J. D., Patchett, P. J., 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd Isotopic Composition of CHUR: Constraints from Unequilibrated Chondrites and Implications for the Bulk Composition of Terrestrial Planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273 (1-2): 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>
- Chappell, B. W., 1999. Aluminium Saturation in I- and S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46 (3): 535-551.
- Chappell, B. W., Simpson, P. R., 1984. Source Rocks of I- and S-Type Granites in the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Mathematical and Physical Sciences (Series A)*, 310 (1514): 693-707.
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 2001. Two Contrasting Granite Types: 25 Years Later. *Journal of the Geological Society of Australia*, 48 (4): 489-499.
- Che, Z. C., Liu, L., Liu, H. F., et al., 1995. Discovery and Occur-

- rence of High Pressure Metapelitic Rocks from Altun Mountain Areas, Xinjiang Autonomous Region, *Chinese Science Bulletin*, 40(14): 1298—1300 (in Chinese).
- Chen, N.S., Li, X.Y., Wang, X.Y., et al., 2006. Zircon SHRIMP U-Pb Age of Neoproterozoic Metagranite in the North Kunlun Unit on the Southern Margin of the Qaidam Block in China, *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1311—1314 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. X., Song, S. G., Niu, Y. L., et al., 2014. Melting of Continental Crust during Subduction Initiation: A Case Study from the Chaidanuo Peraluminous Granite in the North Qilian Suture Zone, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 132: 311—336. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.02.011>
- Collins, W. J., 1998. Evaluation of Petrogenetic Models for Lachlan Fold Belt Granitoids: Implications for Crustal Architecture and Tectonic Models, *Australian Journal of Earth Sciences*, 45(4): 483—500. <https://doi.org/10.1080/08120099808728406>
- Cui, J. W., 2011. Ductile Shearing Age of the South Altun Fault and Its Tectonic Implications, *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3422—3434.
- Defant, M. J., Xu, J. F., Kepezhinskas, P., et al., 2002. Adakites: Some Variations on a Theme, *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129—142.
- Diwu, C. R., Sun, Y., Lin, C. L., et al., 2007. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes and Their Geological Significance of Yiyang TTG Gneisses from Henan Province, China, *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 253—262 (in Chinese with English abstract).
- Douce, A. E. P., 1999. What do Experiments Tell Us about the Relative Contributions of Crust and Mantle to the Origin of Granitic Magmas? In: Castro, A., Fernandez, C., Vigneresse, J. L., eds., *Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques*, Geological Society, London, *Special Publications*, 168(1): 55—75.
- Douce, A. E. P., Harris, N., 1998. Experimental Constraints on Himalayan Anatexis, *Journal of Petrology*, 39(4): 689—710. <https://doi.org/10.1093/petrology/39.4.689>
- Gao, S., Luo, T. C., Zhang, B. R., et al., 1998. Chemical Composition of the Continental Crust as Revealed by Studies in East China, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959—1975. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(98\)00121-5](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(98)00121-5)
- 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, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133—147. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00343-9)
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes, *Lithos*, 61(3—4): 237—269. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00082-8)
- Guo, J. J., Zhao, F. Q., Li, H. K., 1999. Jinningian Collisional Granite Belt in the Eastern Sector of the Central Qilian Massif and Its Implication, *Acta Geoscientia Sinica*, 20(1): 10—15 (in Chinese with English abstract).
- Hansen, J., Skjerlie, K. P., Pedersen, R. B., et al., 2002. Crustal Melting in the Lower Parts of Island Arcs: An Example from the Bremanger Granitoid Complex, West Norwegian Caledonides, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(3): 316—335. <https://doi.org/10.1007/s00410-001-0342-5>
- Healy, B., Collins, W. J., Richards, S. W., 2004. A Hybrid Origin for Lachlan S-Type Granites: The Murrumbidgee Batholith Example, *Lithos*, 78(1—2): 197—216. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.047>
- Hoffman, P. F., 1991. Did the Breakout of Laurentia Turn Gondwanaland Inside-Out? *Science*, 252: 891—901.
- Hou, K. J., Li, Y. H., Zou, T. R., et al., 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS Technique for Hf Isotope Microanalysis of Zircon and Its Geological Applications, *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595—2604 (in Chinese with English abstract).
- Inger, S., Harris, N., 1993. Geochemical Constraints on Leucogranite Magmatism in the Langtang Valley, Nepal Himalaya, *Journal of Petrology*, 34(2): 345—368.
- Johannes, W., Holtz, F., 1996. Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61049-3>
- Li, X., Bogdanova, S. V., Collins, A. S., et al., 2008. Assembly, Configuration, and Break-up History of Rodinia: A Synthesis, *Precambrian Research*, 160(1—2): 179—210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021>
- Li, Q., Zeng, Z. C., Chen, N., et al., 2015. Zircon U-Pb Ages, Geochemical Characteristics and Tectonic Implications of Neoproterozoic Gailike Gneiss in the South Altyn Tagh, *Geoscience*, 29(6): 1271—1283 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Zhang, L. H., Powell, C. M., 1995. South China in Rodinia: Part of the Missing Link between Australia-East Antarctica and Laurentia? *Geology*, 23(5): 407. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0407:scirpo>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0407:scirpo>2.3.co;2)
- Liu, L., Che, Z. C., Luo, J. H., et al., 1996. Recognition and Implication of Eclogite in the Western Altun Mountains,

- Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 41(16): 1485—1488 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., Che, Z. C., Wang, Y., et al., 1999. The Petrological Character 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, L., Sun, Y., Luo, J. H., et al., 2003. Ultrahigh Pressure Metamorphism of Granitic Gneiss in the Yinggelisayi Area, Altun Mountains, NW China. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1184—1192 (in Chinese).
- Liu, L., Sun, Y., Xiao, P. X., et al., 2002. Discovery of Ultra-High Pressure Magnesite Bearing Garnet Lherzolite (>3.8 GPa) in the Altyn Tagh, Northwest China. *Chinese Science Bulletin*, 47(9): 657—662 (in Chinese).
- Liu, L., Wang, C., Cao, Y. T., et al., 2012. Geochronology of Multi-Stage Metamorphic Events: Constraints on Episodic Zircon Growth from the UHP Eclogite in the South Altyn, NW China. *Lithos*, 136—139: 10—26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.09.014>
- Liu, L., Wang, C., Chen, D. L., et al., 2009. Petrology and Geochronology of HP-UHP Rocks from the South Altyn Tagh, Northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3—4): 232—244. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2008.10.007>
- Liu, Y. S., Yu, H. F., Xin, H. T., et al., 2009. Tectonic Units Division and Precambrian Significant Geological Events in Altyn Tagh Mountain, China. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1430—1438 (in Chinese with English abstract).
- Lu, F. X., Sang, L. K., 2002. Petrology. Geological Publishing House, Beijing, 82—94 (in Chinese).
- Lu, S. N., 1998. A Review of Advance in the Research on the Neoproterozoic Rodinia Supercontinent. *Geological Review*, 44(5): 489—495 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. N., Li, H. K., Zhang, C. L., et al., 2008. Geological and Geochronological Evidence for the Precambrian Evolution of the Tarim Craton and Surrounding Continental Fragments. *Precambrian Research*, 160(1—2): 94—107. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.025>
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:tdog>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co;2)
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., et al., 2005. An Overview of Adakite, Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG), and Sanukitoid: Relationships and Some Implications for Crustal Evolution. *Lithos*, 79(1—2): 1—24. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.048>
- Mei, H. L., Li, H. M., Lu, S. N., et al., 1999. The Age and Origin of the Liuyuan Granitoid, Northwestern Gansu. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(1): 14—17 (in Chinese with English abstract).
- Meng, F. C., Cui, M. H., Wu, X. K., et al., 2013. Magmatic and Metamorphic Events Recorded in Granitic Gneisses from the Qimantage, East Kunlun Mountains, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2107—2122 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3—4): 215—224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Milani, L., Lehmann, J., Naydenov, K. V., et al., 2015. A-Type Magmatism in a Syn-Collisional Setting: The Case of the Pan-African Hook Batholith in Central Zambia. *Lithos*, 216—217: 48—72. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.11.029>
- Moores, E. M., 1991. Southwest U.S. East Antarctic (SWEAT) Connection: A Hypothesis. *Geology*, 19: 425—428.
- Patiño Douce, A. E., 2005. Vapor-Absent Melting of Tonalite at 15—32 kbar. *Journal of Petrology*, 46(2): 275—290.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Qin, X. F., Li, J., Lu, J. P., et al., 2006. Tectonic Evolution of the Western Segment of the Altyn Tagh Collisional Orogen, Northwest China. *Geological Bulletin of China*, 25(1—2): 104—112 (in Chinese with English abstract).
- Qin, X. F., Xia, B., Li, C. Q., et al., 2008. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Precambrian Granitic Gneiss in the Western Segment of Altyn Tagh Tectonic Belt. *Geoscience*, 22(1): 34—44 (in Chinese with English abstract).
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8—32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891—931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- Rapp, R. P., Watson, E. B., Miller, C. F., 1991. Partial Melting of Amphibolite/Eclogite and the Origin of Archean Trondhjemites and Tonalites. *Precambrian Research*, 51(1—4): 1—25. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(91\)90092-o](https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90092-o)
- Santosh, M., Maruyama, S., Yamamoto, S., 2009. The Making and Breaking of Supercontinents: Some Speculations Based on Superplumes, Super Downwelling and the Role of Tectosphere. *Gondwana Research*, 15(3—4): 324—341. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.11.004>

- Scherer, E., Munker, C., Mezger, K., 2001. Calibration of the Lutetium-Hafnium Clock. *Science*, 293 (5530): 683 — 687. <https://doi.org/10.1126/science.1061372>
- Searle, M.P., Fryer, B.J., 1986. Garnet, Tourmaline and Muscovite-Bearing Leucogranites, Gneisses and Migmatites of the Higher Himalayas from Zaskar, Kulu, Lahoul and Kashmir. *Geological Society, London, Special Publications*, 19: 185 — 201.
- Song, S.G., Wang, M.J., Wang, C., et al., 2015. Magmatism during Continental Collision, Subduction, Exhumation and Mountain Collapse in Collisional Orogenic Belts and Continental Net Growth: A Perspective. *Science China Earth Sciences*, 58(8): 1284 — 1304. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5102-x>
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313 — 345.
- Sylvester, P.J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1 — 4): 29 — 44. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00024-3)
- Wan, Y.S., Zhang, J.X., Yang, J.S., et al., 2006. Geochemistry of High-Grade Metamorphic Rocks of the North Qaidam Mountains and Their Geological Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(2 — 3): 174 — 184. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.09.018>
- Wang, C., Liu, L., Yang, W.Q., et al., 2013. Provenance and Ages of the Altyn Complex in Altyn Tagh: Implications for the Early Neoproterozoic Evolution of Northwestern China. *Precambrian Research*, 230: 193 — 208. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.02.003>
- Wang, C., Liu, L., Che, Z.C., et al., 2006. U-Pb Geochronology and Tectonic Setting of the Granitic Gneiss in Jianggaleisayi Eclogite Belt, the Southern Edge of Altyn Tagh. *Geological Journal of China Universities*, 12(1): 74 — 82 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L.S., Zhang, W., Duan, X.X., et al., 2015. Isotopic Age and Genesis of the Monzogranitic Gneiss at the Huanxingshan in Middle Altyn Tagh. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 119 — 132 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.H., Xiao, P.X., Zhang, H.W., et al., 2004. New Results and Major Progress in Regional Geological Survey of the Suwushijie Sheet. *Geological Bulletin of China*, 23(5 — 6): 560 — 563 (in Chinese with English abstract).
- 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. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(83\)90211-x](https://doi.org/10.1016/0012-821x(83)90211-x)
- Watson, E.B., Harrison, T.M., 2005. Zircon Thermometer Reveals Minimum Melting Conditions on Earliest Earth. *Science*, 308(5723): 841 — 844. <https://doi.org/10.1126/science.1110873>
- White, A.J.R., Chappell, B.W., 1977. Ultrametamorphism and Granitoid Genesis. *Tectonophysics*, 43: 7 — 22.
- Winther, K.T., Newton, R.C., 1996. Experimental Melting of Hydrous Low-K Tholeiite: Evidence on the Origin of Archean Cratons. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 39: 213 — 228.
- Wu, C.L., Gao, Y.H., Lei, M., et al., 2014. Zircon SHRIMP U-Pb Dating, Lu-Hf Isotopic Characteristics and Petrogenesis of the Palaeozoic Granites in Mangya Area, Southern Altun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2297 — 2323 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C.L., Lei, M., Wu, D., et al., 2016. Zircon U-Pb Dating of Paleozoic Granites from South Altun and Response of the Magmatic Activity to the Tectonic Evolution of the Altun Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2276 — 2315 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Yang, J.S., Zhang, J.X., et al., 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 — 205 (in Chinese with English abstract).
- Yu, S.Y., Zhang, J.X., Li, H.K., et al., 2013a. Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Lu-Hf Isotopic Composition of Eclogites and Their Host Gneisses in the Dulan Area, North Qaidam UHP Terrane: New Evidence for Deep Continental Subduction. *Gondwana Research*, 23(3): 901 — 919. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.07.018>
- Yu, S.Y., Zhang, J.X., Real, P.G.D., et al., 2013b. The Grenvillian Orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam Mountain Belts of Northern Tibet Plateau: Constraints from Geochemical and Zircon U-Pb Age and Hf Isotopic Study of Magmatic Rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73: 372 — 395. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.04.042>
- Yu, H.F., Lu, S.N., Liu, Y.S., et al., 2002. Composing of the Altyn Tagh Formation—Complex and Its Tectonic Signification. *Geological Bulletin of China*, 21(12): 834 — 840 (in Chinese with English abstract).
- Yu, H.F., Lu, S.N., Mei, H.L., et al., 1999. Characteristics of Neo-Proterozoic Eclogite Granite Zones and Deep Level Ductile Shear Zone in Western China and Their Significance for Continental Reconstruction. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 532 — 538 (in Chinese with English abstract).

- Yu, S. Y., Zhang, J. X., Gong, J. H., 2011. Zr-in-Rutile Thermometry in HP/UHT Granulite in the Bashiwake Area of the South Altun and Its Geological Implications. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 140–150 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., et al., 2001. Petrology and Geochronology of Eclogites from the Western Segment of the Altyn Tagh, Northwestern China. *Lithos*, 56(2–3): 187–206. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(00\)00052-9](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(00)00052-9)
- Zhang, A. D., Liu, L., Sun, Y., et al., 2004. SHRIMP U-Pb Dating of Zircons and Its Geological Significance from UHP Granitoid Gneiss in Altyn Tagh. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2527–2532 (in Chinese).
- Zhang, J. X., Li, H. K., Meng, F. C., et al., 2011. Polyphase Tectonothermal Events Recorded in “Metamorphic Basement” from the Altyn Tagh, the Southeastern Margin of the Tarim Basin, Western China: Constraint from U-Pb Zircon Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 23–46 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., et al., 1999. The Ages of U-Pb and Sm-Nd for Eclogite from the Western Segment of Altyn Tagh Tectonic Belt. *Chinese Science Bulletin*, 44(10): 1109–1112 (in Chinese).
- Zhang, Q., Jin, W. J., Li, C. D., et al., 2010. Revisiting the New Classification of Granitic Rocks Based on Whole-Rock Sr and Yb Contents: Index. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 985–1015 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Li, C. D., et al., 2006. Granite Classification on the Basis of Sr and Yb Contents and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249–2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. X., Wei, J. H., Fu, L. B., et al., 2017. The Early Paleozoic Xitieshan Syn-Collisional Granite in the North Qaidam Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, NW China: Petrogenesis and Implications for Continental Crust Growth. *Lithos*, 278–281: 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.01.019>
- 车自成, 刘良, 刘洪福, 等, 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.
- 陈能松, 李晓彦, 王新宇, 等, 2006. 柴达木地块南缘昆北单元变质新元古代花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. *地质通报*, 25(11): 1311–1314.
- 第五春荣, 孙勇, 林慈鑫, 等, 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学. *岩石学报*, 23(2): 253–262.
- 郭进京, 赵凤清, 李怀坤, 1999. 中祁连东段晋宁期碰撞型花岗岩及其地质意义. *地球学报*, 20(1): 10–15.
- 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. *岩石学报*, 23(10): 2595–2604.
- 李琦, 曾忠诚, 陈宁, 等, 2015. 阿尔金南缘新元古代盖里克片麻岩年代学、地球化学特征及其构造意义. *现代地质*, 29(6): 1271–1283.
- 刘良, 车自成, 罗金海, 等, 1996. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义. *科学通报*, 41(16): 1485–1488.
- 刘良, 车自成, 王焰, 等, 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, 孙勇, 肖培喜, 等, 2002. 阿尔金发现超高压(> 3.8 GPa)石榴二辉橄榄岩. *科学通报*, 47(9): 657–662.
- 刘良, 孙勇, 罗金海, 等, 2003. 阿尔金英格利萨依花岗岩质片麻岩超高压变质. *中国科学(D辑)*, 33(12): 1184–1192.
- 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 等, 2009. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件. *地质通报*, 28(10): 1430–1438.
- 陆松年, 1998. 新元古时期 Rodinia 超大陆研究进展述评. *地质论评*, 44(5): 489–495.
- 路凤香, 桑隆康, 2002. 岩石学. 北京: 地质出版社, 82–94.
- 梅华林, 李惠民, 陆松年, 等, 1999. 甘肃柳园地区花岗质岩石时代及成因. *岩石矿物学杂志*, 18(1): 14–17.
- 孟繁聪, 崔美慧, 吴祥珂, 等, 2013. 东昆仑祁漫塔格花岗岩片麻岩记录的岩浆和变质事件. *岩石学报*, 29(6): 2107–2122.
- 覃小锋, 李江, 陆济璞, 等, 2006. 阿尔金碰撞造山带西段的构造特征. *地质通报*, 25(1–2): 104–112.
- 覃小锋, 夏斌, 黎春泉, 等, 2008. 阿尔金构造带西段前寒武纪花岗质片麻岩的地球化学特征及其构造背景. *现代地质*, 22(1): 34–44.
- 王超, 刘良, 车自成, 等, 2006. 阿尔金南缘榴辉岩带中花岗片麻岩的时代及构造环境探讨. *高校地质学报*, 12(1): 74–82.
- 王立社, 张巍, 段星星, 等, 2015. 阿尔金环形山花岗岩片麻岩同位素年龄及成因研究. *岩石学报*, 31(1): 119–132.
- 王永和, 校培喜, 张汉文, 等, 2004. 苏吾什杰幅地质调查新成果及主要进展. *地质通报*, 23(5–6): 560–563.
- 吴才来, 郜源红, 雷敏, 等, 2014. 南阿尔金茫崖地区花岗岩类锆石 SHRIMP U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征及岩石成因. *岩石学报*, 30(8): 2297–2323.
- 吴才来, 雷敏, 吴迪, 等, 2016. 南阿尔金古生代花岗岩 U-Pb 定年及岩浆活动对造山带构造演化的响应. *地质学报*, 90(9): 2276–2315.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等, 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):

附中文参考文献

- 193—205.
- 于海峰,陆松年,刘永顺,等,2002.“阿尔金山岩群”的组成及其构造意义.地质通报,21(12): 834—840.
- 于海峰,陆松年,梅华林,等,1999.中国西部新元古代榴辉岩—花岗岩带和深层次韧性剪切带特征及其大陆再造意义.岩石学报,15(4): 532—538.
- 于胜尧,张建新,宫江华,2011.南阿尔金巴什瓦克高压/超高温麻粒岩中金红石 Zr 温度计及其地质意义.地学前缘,18(2): 140—150.
- 张安达,刘良,孙勇,等,2004.阿尔金超高压花岗质片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义.科学通报,49(22): 2335—2341.
- 张建新,李怀坤,孟繁聪,等,2011.塔里木盆地东南缘(阿尔金山)“变质基底”记录的多期构造热事件:锆石 U-Pb 年代学的制约.岩石学报,27(1): 23—46.
- 张建新,张泽明,许志琴,等,1999.阿尔金构造带西段榴辉岩的 Sm-Nd 及 U-Pb 年龄——阿尔金构造带中加里东期山根存在的证据.科学通报,44(10): 1109—1112.
- 张旗,金惟俊,李承东,等,2010.再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类:标志.岩石学报,26(4): 985—1015.
- 张旗,王焰,李承东,等,2006.花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义.岩石学报,22(9): 2249—2269.