

# 东准噶尔贝勒库都克铝质 A 型花岗岩 微量元素地球化学特征及地质意义

杨高学<sup>1</sup>, 李永军<sup>1</sup>, 司国辉<sup>2</sup>, 吴宏恩<sup>3</sup>, 张永智<sup>3</sup>, 金朝<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安地质矿产勘查开发院, 陕西 西安 710100;

3. 新疆维吾尔自治区有色地质矿产勘查院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 通过对新疆东准噶尔卡拉麦里地区贝勒库都克岩体的岩石地球化学特征的研究, 结果表明, 在贝勒库都克黑云母花岗岩中 Rb、K 和 Th 等大离子亲石元素明显富集, 相对富集 Zr、Hf 等高场强元素, 相对亏损 Ba、Sr、Nb 和 Eu 等元素, 稀土元素含量相对较高, Eu 的负异常极强, 稀土元素配分模式呈平坦的“V”字型, 属于典型的铝质 A 型花岗岩。该花岗岩在成因上属于 A2 型, 形成于后碰撞的张性环境, 其来源可能与洋壳和岛弧建造组成的年轻地壳有关。花岗岩微量元素构造判别图显示它是一种后碰撞花岗岩, 标志卡拉麦里地区在晚石炭世造山作用的结束和板内构造演化的开始。该岩体锡质量分数普遍都比较高( $15.50 \times 10^{-6}$ ), 为锡的成矿物质来源和锡矿床学的深入探索提供重要参考。

**关键词:** 地球化学; A 型花岗岩; 地质意义; 贝勒库都克; 东准噶尔

**中图分类号:** P591 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)01-0034-06

## Trace Elements Geochemistry Feature and Tectonic Significance of the Beilekuduke Aluminous A-type Granite in East Junggar

YANG Gao-xue<sup>1</sup>, LI Yong-jun<sup>1</sup>, SI Guo-hui<sup>2</sup>, WU Hong-en<sup>3</sup>, ZHANG Yong-zhi<sup>3</sup>, JIN Zhao<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Xi'an Research Institute of Geology and Mineral Resources Exploration and Exploitation, Xi'an 710100, Shaanxi, China;

3. Xinjiang Institute of Geological Exploration for Nonferrous Resources, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

**Abstract** The geochemistry feature of rock in Beilekuduke granite in Kalamaili region of East Junggar, Xinjiang is discussed. The result shows that the biotite granites are typical aluminum A-type granites because of the enrichment of large-ion lithophile elements(Rb, K, Th etc), relative enrichment of high field strength elements(Zr, Hf), relative loss of Ba, Sr, Nb, Eu, a high level of rare earth elements(REE), Eu negative anomaly extremely and flat “V” shaped of REE pattern. The granite is belong to A2-type originally and formed in the post-collision expansion environment, and may be derived from the young crust constructed by the oceanic crust and island arcs. Trace elements in granite tectonic discriminate diagram shows that it is a post-collisional granite, and indicates that the end of Late Carboniferous orogenesis in Kalamaili region and the start of plate tectonic evolution. The content of Sn, which is generally large ( $15.50 \times 10^{-6}$ ) in the granite, is very important for the study of tin mineral deposit and source.

**Key words:** geochemistry; A-type granite; geology significance; Beilekuduke; East Junggar

## 0 引言

东准噶尔属于巨型中亚造山带, 也是中亚—兴

蒙巨型构造成矿域的主要组成部分, 构造上位于西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和准噶尔板块的交汇部位, 是一个构造背景极其复杂、岩浆活动极其强

收稿日期: 2009-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40534020); 新疆维吾尔自治区国土资源厅国土资源大调查项目(QD200508)

作者简介: 杨高学(1980-), 男, 宁夏固原人, 理学博士研究生, 从事区域地质调查和岩石地球化学研究。E-mail: mllygx@126.com

烈的地区。在东准噶尔的东北缘分布有 3 条富碱花岗岩带, 从北向南依次为额尔齐斯花岗岩带、乌伦古花岗岩带和卡拉麦里花岗岩带<sup>[1-2]</sup>。对额尔齐斯花岗岩带、乌伦古花岗岩带前人有详细的研究, 在岩石成因上, 提出了地壳岩石部分熔融和幔源岩浆高度分异等不同的成岩模式<sup>[1,3]</sup>, 而对卡拉麦里地区大面积分布的花岗岩研究却显得较少, 笔者选取贝勒库都克黑云母花岗岩体为研究对象, 在论述其微量元素地球化学特征的同时(岩石化学另文讨论), 进一步探讨构造意义。

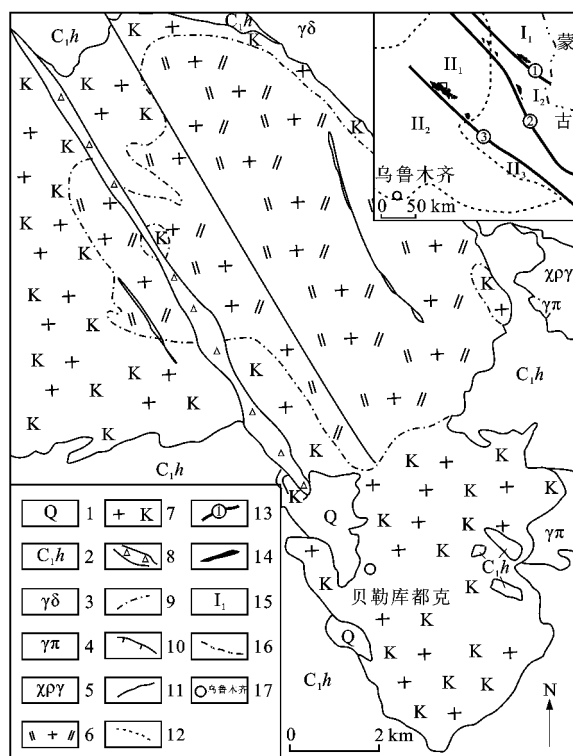
## 1 地质概况

东准噶尔卡拉麦里地区夹持在野马泉和准噶尔 2 个陆块之间, 是东准噶尔古生代造山带主要组成部分。早泥盆世形成的卡拉麦里蛇绿岩带北西向延伸, 可能是有限洋盆的洋壳残片<sup>[4-8]</sup>。区内分布的地层单位主要为泥盆系卡拉麦里组和石炭系黑山头组、姜巴斯套组, 卡拉麦里断裂的南部零星分布有少量志留纪地层。区内花岗岩发育, 可分为与金、铜成矿有关的钙碱性花岗岩和与锡成矿有关的富碱花岗岩两类<sup>[9-10]</sup>, 其岩性有花岗闪长岩、黑云母花岗岩、角闪石花岗岩和碱性花岗岩等。不同期次、大小不等的岩体出露面积约 1 100 km<sup>2</sup>, 主要侵入体包括萨惹什克北、黄羊山、苏吉泉、贝勒库都克(图 1)。它们多为岩枝(株), 具有强酸、富碱和高分异的特点, 前人获得同位素年龄为 248~338 Ma<sup>[11]</sup>, 对黄羊山碱性花岗岩进行单颗粒锆石 U-Pb 测年, 获得其年龄为 300~305 Ma<sup>[12]</sup>。

## 2 微量元素特征

分析样品均采自基岩露头, 样品新鲜, 无蚀变, 采集位置避开了研究区内的接触带、蚀变带、断裂破碎带等。微量元素、稀土元素在宜昌地质矿产研究所采用 ICP-MS 法分析, 符合 DZ-0130-94 标准。

贝勒库都克黑云母花岗岩微量元素质量分数列于表 1。贝勒库都克岩体以低  $w(\text{Ba})$ 、 $w(\text{Sr})$  和高  $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$  为特征。其中  $w(\text{Rb})$  为  $(172 \sim 598) \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Ba})$ 、 $w(\text{Sr})$  分别为  $(9.04 \sim 245) \times 10^{-6}$  和  $(7.3 \sim 80.2) \times 10^{-6}$ ; 高场强元素 Zr、Nb、Y、Yb 质量分数较低及  $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$  总量较低, 这些特征显示该岩体岩石具有后造山 A 型花岗岩岩石的地球化学特征<sup>[13-14]</sup>。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 2)上, Ba、Nb、Sr、Eu 等元素形成



1—第四系; 2—石炭系黑山头组; 3—花岗闪长岩; 4—花岗斑岩; 5—碱长花岗岩; 6—二长花岗岩; 7—正长花岗岩; 8—破碎带; 9—脉动接触关系; 10—超动接触关系; 11—侵入接触关系; 12—构造带界线; 13—断裂及编号; 14—花岗岩带; 15—构造区; 16—国界; 17—地名; I<sub>1</sub>—阿尔泰构造带; I<sub>2</sub>—阿尔曼太构造带; II<sub>1</sub>—卡拉麦里构造带; II<sub>2</sub>—准噶尔盆地; II<sub>3</sub>—将军庙构造带; ①—额尔齐斯断裂; ②—阿尔曼太断裂; ③—卡拉麦里断裂; 引自文献[15]

图 1 东准噶尔贝勒库都克岩体分布

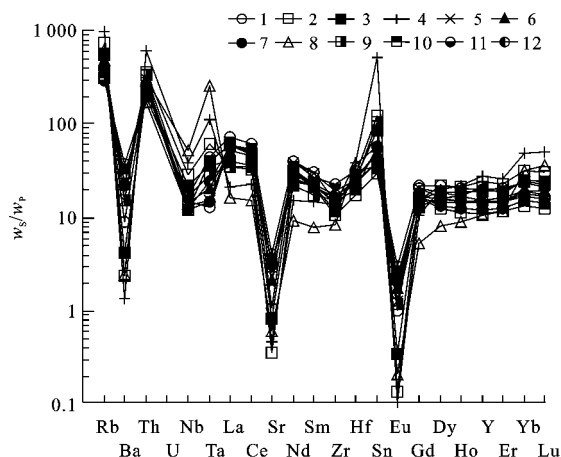
Fig. 1 Geological Sketch of the Distribution of the Beilekuduk Granite in East Junggar

4 个尖锐的低谷, 其余元素呈富集状态, 其中不相容元素  $w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Th})$  等正异常最为明显, 为原始地幔的 1 000 倍左右,  $w(\text{Sn})$  为  $(4.61 \sim 80.01) \times 10^{-6}$ , 平均为  $15.50 \times 10^{-6}$ , 约为地壳的 5 倍, 在蛛网图中表现为显著的高峰。其次为 La、Ce、Ta 等元素质量分数约为原始地幔的 40 倍左右, 而 Hf、Zr、Y、Yb 等相容元素质量分数正异常偏低, 小于 20 倍。Nb、Ta 质量分数的负异常为 A2 型花岗岩所特有, 而 A1 型花岗岩表现为 Nb、Ta 的富集。在洋脊花岗岩标准化微量元素图解(图 3)中显示具板内花岗岩的特征。  $10\,000 \times [w(\text{Ga})/w(\text{Al})]$  值为 2.98~4.45, 明显高于 I 型和 S 型花岗岩的平均值(分别为 2.10 和 2.28)<sup>[16]</sup>。

贝勒库都克黑云母花岗岩的稀土元素质量分数较高  $((133.14 \sim 337.78) \times 10^{-6})$ ,  $w(\sum \text{REE})$  大多接

**Tab.1 Trace Element Contents and Related Index of the Beilekuduke Granite in East Junggar**

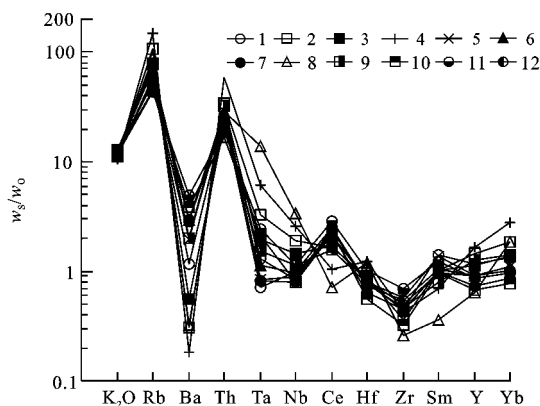
注:表中各微量元素(包括 LREE、HREE)质量分数/ $10^{-6}$



1~12—样品序号, 同表 1; 引自文献[16]; 原始地幔标准化值来自 Sun 等<sup>[17]</sup>;  $w_s$ —样品质量分数;  $w_p$ —原始地幔质量分数

图 2 原始地幔标准化微量元素配分模式

Fig. 2 Primitive Mantle Normalized Trace Element Patterns

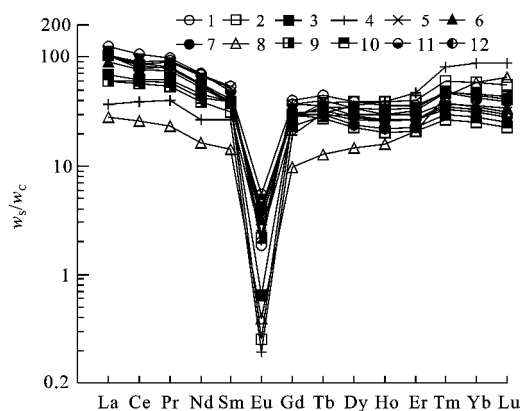


1~12—样品序号, 同表 1; 引自文献[19];  $w_o$ —洋脊花岗岩质量分数

图 3 洋脊花岗岩标准化微量元素配分模式

Fig. 3 Ocean Ridge Granite Mantle Normalized Trace Element Patterns

近  $300 \times 10^{-6}$ , 且随酸度增加而呈现增大趋势; 相对富集轻稀土元素。  $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$  为 0.45 ~ 2.19,  $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$  为 0.42 ~ 4.12, Eu 的负异常极强,  $\delta(\text{Eu})$  为 0.01 ~ 0.13, 呈平坦的“V”字型稀土元素配分模式(图 4), 表明源区有斜长石强烈分离结晶作用,  $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$  均小于 5, 说明轻、重稀土元素的分馏不明显,  $w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N$  为 1.39 ~ 2.75,  $w(\text{Gd})_N/w(\text{Yb})_N$  为 0.21 ~ 1.18, 其分馏程度与尼日利亚及中国山海关等地产于裂谷、类裂谷环境的钠闪花岗岩明显不同<sup>[20]</sup>, 而与祁漫塔格铝质 A 型花岗岩较为相似<sup>[21]</sup>。



1~12—样品序号, 同表 1; 引自文献[22]; 球粒陨石标准化值来自 Sun 等<sup>[23]</sup>;  $w_c$ —球粒陨石质量分数

图 4 球粒陨石标准化稀土元素配分模式

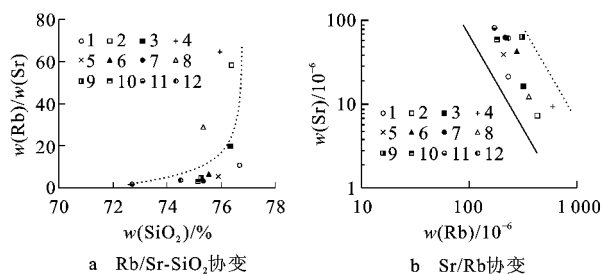
Fig. 4 Chondrite-normalized REE Patterns

### 3 岩石成因及构造意义

贝勒库都克黑云母花岗岩的地球化学成分特征同典型的 A 型花岗岩的特征相一致, 属 A 型花岗岩。然而, Loisele 等<sup>[24]</sup> 提出的 A 型花岗岩并没有包含成因方面的信息。A 型花岗岩在矿物组成以及地球化学成分上可能同上述定义的 A 型花岗岩一致, 但形成方式上可能有差异, 或部分熔融作用, 或岩浆分离结晶作用或交代作用。A 型花岗岩形成的构造环境也不只限于板内裂谷, 还可以形成于造山期后的构造背景。同时, 在成岩物质来源上也可能是多样化的。Eby<sup>[13]</sup> 用微量元素比值将 A 型花岗岩划分为 A1 和 A2 两个亚类, 他们有着各自不同的成因及构造环境方面的信息: A1 型代表着与洋岛岩浆、板内岩浆、裂谷带岩浆来源相同的地幔分异产物, 其形成与裂谷环境或地幔柱热点有关, 且侵位于大陆裂谷或板内的构造环境, A2 型来源于大陆地壳或板下地壳, 且与陆—陆碰撞或岛弧岩浆作用有关, 代表着碰撞后环境或造山期后环境。

贝勒库都克黑云母花岗岩的投影点在 Rb/Sr-SiO<sub>2</sub> 图上(图 5a)呈指数曲线, 在 Rb-Sr 图解上(图 5b)显示陡倾的负相关线, 且这些花岗岩的 Ba、Sr、Eu 等元素强烈亏损, 表明分离结晶是该岩体的主导成岩作用。

综合分析, 贝勒库都克黑云母花岗岩来源可能与洋壳和岛弧建造组成的年轻地壳有关, 这些年轻地壳在晚古生代的构造演化过程中很可能被埋深于下地壳<sup>[25]</sup>, 在幔源岩浆提供热源的情况下它们作为源岩部分熔融形成了本区花岗岩。李锦轶等<sup>[26]</sup>



1~12—样品序号, 同表 1

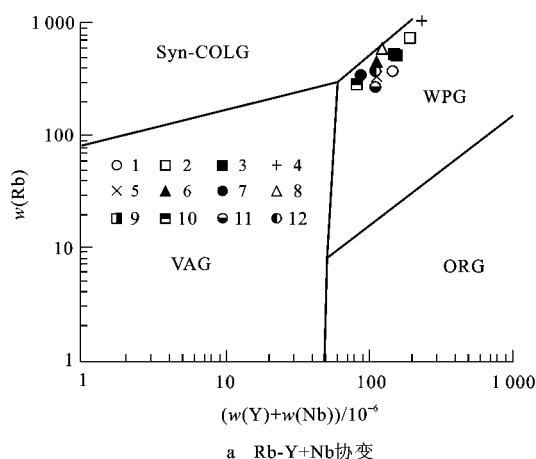
图 5 贝勒库都克花岗岩 Rb/Sr-SiO<sub>2</sub> 及 Sr-Rb 微量元素判别

Fig. 5 Rb/Sr vs SiO<sub>2</sub> and Sr vs Rb Trace Element Discriminant Diagrams of the Beilekuduke Granite

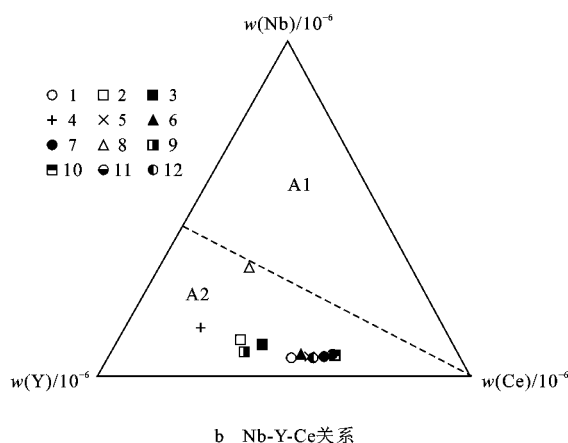
的认识也支持以上结论, 认为花岗岩的同位素幔源特征不能表明这些岩岩都来源于亏损地幔, 它们也可以由洋壳岩石圈及其派生物质与古陆壳混合

物重熔所形成。另外, King 等<sup>[27]</sup> 研究认为, 由再循环俯冲洋壳低程度部分熔融产生的酸性岩浆富集大离子亲石元素和高场强元素等不相容微量元素, 这与笔者的认识相吻合。

花岗岩的微量元素组成明显受其成岩的构造环境制约, Pearce<sup>[28]</sup> 对形成于不同构造背景下的大量花岗岩微量元素进行了统计研究, 在此基础上提出了适用性较好的花岗岩构造环境的微量元素判别图。根据这些图解, 本区花岗岩类都落在靠近火山弧花岗岩的板内花岗岩区域(图 6a), 这表明本区花岗岩具有板内花岗岩的某些地球化学特征, 但非板内花岗岩, 是一种后碰撞花岗岩。这与在 Nb-Y-Ce 图(图 6b)中投图结果相一致。它们就位于后碰撞的张性构造背景, 其形成标志着卡拉麦里地区造山作用的结束, 并转入了板内构造演化阶段。



a Rb-Y+Nb 协变



b Nb-Y-Ce 关系

1~12—样品序号, 同表 1; Syn-COLG—同碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩

图 6 贝勒库都克花岗岩 Rb-Y+Nb 及 Nb-Y-Ce 判别

Fig. 6 Rb-Y+Nb and Nb-Y-Ce Discriminant Diagrams for the Beilekuduke Granite

结合前人对卡拉麦里蛇绿岩研究<sup>[11-12]</sup>, 对东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代构造—岩浆演化过程的认识大致如下: 泥盆纪期间, 卡拉麦里有限洋盆形成并发生南北双向俯冲, 形成陆缘火山弧; 早石炭世, 有限洋盆最终关闭, 转变为陆间残余海盆发育阶段; 晚石炭世, 随着碰撞造山作用结束, 由发生俯冲的洋壳和岛弧岩石建造组成的年轻地壳(可能还有少量陆间残余海盆沉积物)经过部分熔融和结晶分异作用, 形成巨量富碱花岗岩岩浆侵位, 幔源岩浆的底垫作用<sup>[29]</sup> 可能提供了热源; 从晚石炭世末期开始, 东准噶尔整个进入了板内演化阶段。

## 4 黑云母花岗岩与矿化

本区碱性花岗岩锡质量分数普遍都比较高

( $15.50 \times 10^{-6}$ ), 在岩体顶部或边缘转弯处等有利地段, 若发育有晚期交代蚀变作用, 如云英岩化、钠闪石化、钠长石化及黄玉化等, 锡得以富集, 以含锡石云英岩或含锡石石英脉的形式成为矿床。在苏吉泉一带该岩体中产生出的球状石墨是一种特殊的矿化现象, 强烈的硅化和弱孔雀石化与其相伴, 据初步研究, 是岩浆夹持的碳质岩石被改造的结果。另外, 其中有水晶晶洞和钾长石伟晶岩发育。

## 5 结语

(1) 贝勒库都克黑云母花岗岩明显富集 Rb、K、Th 等大离子亲石元素, 相对富集 Zr、Hf 等高场强元素, 相对亏损 Ba、Sr、Nb 等元素, 稀土元素含量

较高, Eu 的负异常极强, 稀土元素配分模式呈平坦的“V”字型, 属于准铝质 A 型花岗岩。

(2) 贝勒库都克黑云母花岗岩在成因上属于 A2 型, 形成于后碰撞的张性环境, 其来源可能与洋壳和岛弧建造组成的年轻地壳有关, 黄羊山碱性花岗岩的形成标志着卡拉麦里地区造山作用的结束和板内构造演化的开始。

(3) 卡拉麦里地区贝勒库都克黑云母花岗岩与 A 型花岗岩有关的锡矿, 不仅在中国, 而且在世界其他地方也不多见。尽管目前矿床规模不算太大, 但其为锡的成矿物质来源和锡矿矿床学的深入探索提供了珍贵的基础素材。同时, 作为中国一种新的锡矿类型——与造山期后拉张构造环境 A2 型碱性花岗岩有关的锡矿床, 也为中国锡矿资源的进一步探寻开辟了新的方向。对碱性花岗岩及其成矿作用的进一步研究都具有重要的理论和实际意义。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 忻建刚, 袁奎荣, 刘家远. 新疆东准噶尔北部碱性花岗岩的特征、成因及构造意义[ J ]. 大地构造与成矿学, 1995, 19(3): 214-226.
- [ 2 ] 刘家远, 喻亨祥, 吴郭泉. 新疆东准噶尔两类碱性花岗岩及其地质意义[ J ]. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18(2): 89-94.
- [ 3 ] 韩宝福, 王式洸, 江博明, 等. 新疆乌伦古河碱性花岗岩 Nd 同位素特征及其对显生宙地壳生长的意义[ J ]. 科学通报, 1997, 42(17): 1829-1832.
- [ 4 ] 李锦轶. 新疆东准噶尔蛇绿岩的基本特征和侵位历史[ J ]. 岩石学报, 1995, 11(增刊): 73-84.
- [ 5 ] 赵同阳, 周可法, 张晓帆, 等. 基于小波变换的反射光谱分析在蛇绿岩识别中的应用研究——以西准噶尔地区为例[ J ]. 西北地质, 2007, 40(4): 87-93.
- [ 6 ] 宋泰忠, 王瑾, 林海, 等. 内蒙古北山地区小黄山蛇绿岩地质特征[ J ]. 西北地质, 2008, 41(3): 55-63.
- [ 7 ] 赵玉锁, 路彦明, 马德锡. 东准卡拉麦里地区放射虫硅质岩地球化学特征[ J ]. 西北地质, 2008, 41(3): 64-70.
- [ 8 ] 李锦轶, 肖序常, 汤耀庆, 等. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征[ J ]. 地质论评, 1990, 36(4): 305-316.
- [ 9 ] 毕承思, 沈湘元, 徐庆生, 等. 新疆贝勒库都克锡矿带含锡花岗岩地质特征[ J ]. 岩石矿物学杂志, 1993, 12(3): 213-223.
- [ 10 ] 刘家远, 喻亨祥, 吴郭泉. 新疆北部卡拉麦里富碱花岗岩带的碱性花岗岩与锡矿[ J ]. 有色金属矿产与勘查, 1997, 6(3): 129-135.
- [ 11 ] 喻亨祥, 吴郭泉, 刘家远. 新疆东准噶尔地区两类花岗岩与两个成矿系列[ J ]. 大地构造与成矿学, 1998, 22(2): 119-127.
- [ 12 ] 苏玉平, 唐红峰, 刘丛强, 等. 新疆东准噶尔苏吉泉铝质 A 型花岗岩的确立及其初步研究[ J ]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25

- (3): 175-184.
- [ 13 ] Eby G N. Chemical Subdivision of the A-type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications[ J ]. *Geology*, 1992, 20(7): 641-644.
- [ 14 ] 洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 等. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志[ J ]. 中国科学(B 辑), 1995, 25(4): 418-426.
- [ 15 ] 李永军, 吴宏恩, 杨高学. 新疆青河、奇台县红柳沟—苏吉泉一带 1:50 000 区域地质矿产调查成果报告[ R ]. 乌鲁木齐: 新疆有色地质矿产调查局, 2008.
- [ 16 ] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis[ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407-419.
- [ 17 ] 邱检生, 王德滋, 蟹泽聪史, 等. 福建沿海铝质 A 型花岗岩的地球化学及岩石成因[ J ]. 地球化学, 2000, 29(4): 313-321.
- [ 18 ] 新疆维吾尔自治区地质矿产局区调队. 天山花岗岩地质[ M ]. 北京: 地质出版社, 1985.
- [ 19 ] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[ J ]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [ 20 ] Bowden P, Kinnaird J A. The Petrology and Geochemistry of Alkaline Granites from Nigeria[ J ]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1984, 35(1/3): 199-211.
- [ 21 ] 陈丹玲, 刘良, 车自成, 等. 祁漫塔格印支期铝质 A 型花岗岩的确定及初步研究[ J ]. 地球化学, 2001, 30(6): 540-546.
- [ 22 ] 亨德森. 稀土元素地球化学[ M ]. 田丰, 施烺, 译. 北京: 地质出版社, 1989.
- [ 23 ] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[ J ]. *Geological Society, London, Special Publication*, 1989, 42: 313-345.
- [ 24 ] Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and Origin of Anorogenic Granites[ J ]. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, 1979, 11(7): 468.
- [ 25 ] Chen B, Jahn B M. Genesis of Post-collisional Granitoids and Basement Nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr Isotope and Trace Element Evidence[ J ]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23(5): 691-703.
- [ 26 ] 李锦轶, 肖序常. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述[ J ]. 地质科学, 1999, 34(4): 405-419.
- [ 27 ] King E M, Valley J W, Davis D W, et al. Oxygen Isotope Ratios of Archean Plutonic Zircons from Granite-greenstone Belts of the Superior Province: Indicator of Magmatic Source[ J ]. *Precambrian Research*, 1998, 92(4): 365-387.
- [ 28 ] Pearce J A. Sources and Settings of Granitic Rocks[ J ]. *Episodes*, 1996, 19(4): 120-125.
- [ 29 ] 韩宝福, 何国琦, 王式洸. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质[ J ]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(1): 16-21.