



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404220

引用格式:蔡厚安,杨自安,侯朝勇,等.西南天山克孜尔托岩体年代学、岩石地球化学特征及地质意义[J].科学技术与工程,2025,25(14):5756-5766.

Cai Houan, Yang Zian, Hou Chaoyong, et al. Geochronology, petrochemistry and geological significance of the Kezirto Pluton in Southwestern Tianshan Mountain[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(14): 5756-5766.

西南天山克孜尔托岩体年代学、岩石地球化学特征及地质意义

蔡厚安,杨自安,侯朝勇,薛伟,李伟

(有色金属矿产地质调查中心,北京 100012)

摘要 西南天山克孜尔托岩体位于塔北缘碱性侵入岩带上,主要岩石类型为碱性花岗岩。对该岩体的岩石地球化学特征进行了详细研究,运用高精度等离子体质谱-激光探针法(LA-ICP-MS)测得岩体 U-Pb 同位素年龄,为岩体特征、时代、成因及形成环境研究提供了依据。同时,研究了区内晚古生代岩浆活动的性质及其构造背景能较好地指导区内的勘探工作,具有重要的理论和现实意义。克孜尔托花岗岩岩体分为南北两部分,总稀土元素含量较高,北部岩体 Σ REE 为 $261.723 \times 10^{-6} \sim 834.783 \times 10^{-6}$,南部岩体 Σ REE 为 $422.174 \times 10^{-6} \sim 575.86 \times 10^{-6}$;高场强元素(high field strength elements, HFSE)相对于大离子亲石元素(large ion lithophile elements, LILE)均具有明显的富集,明显亏损 Ba、Sr、P、Ti 元素,具有明显的负 Eu 异常。稀土元素球粒陨石标准化图解呈现轻微右倾的海鸥式形态,轻稀土较重稀土元素轻微富集。克孜尔托岩体为 A1 型花岗岩。南北岩体 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄分别为 (273.8 ± 2.9) Ma 和 (274.8 ± 1.8) Ma,为同期岩体。克孜尔托岩体的形成是由于幔源岩浆的底侵导致下地壳古老的岩石重熔,之后又经历分离结晶作用形成,在形成的过程中遭受了不同程度的地壳混染。岩体经历了深部地幔柱和陆内裂谷的构造环境。

关键词 西南天山;克孜尔托;岩石地球化学;LA-ICP-MS

中图法分类号 P612 P588.1; 文献标志码 A

Geochronology, Petrochemistry and Geological Significance of the Kezirto Pluton in Southwestern Tianshan Mountain

CAI Hou-an, YANG Zi-an, HOU Chao-yong, XUE Wei, LI Wei

(China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China)

[Abstract] The Kezirto pluton is located in the alkaline intrusive rock belt on the northern margin of the Tarim Basin. The lithology is alkaline granite. The petrogeochemical characteristics were studied in detail. The U-Pb isotope age of the pluton was measured by LA-ICP-MS method, which provides a basis for the study of the characteristics, age, genesis and formation environment of the pluton. At the same time, the nature of late Paleozoic magmatic activities and their tectonic settings in the area were studied, which can better guide the exploration work in the area and have important theoretical and practical significance. The Kezirto granite pluton was divided into two parts, north and south. The total rare earth element content is relatively high. The Σ REE of the northern pluton was $261.723 \times 10^{-6} \sim 834.783 \times 10^{-6}$, and the Σ REE of the southern pluton is $422.174 \times 10^{-6} \sim 575.86 \times 10^{-6}$. HFSE (high field strength elements) are obviously enriched relative to LILE (large ion lithophile elements), and elements such as Ba, Sr, P, and Ti are obviously depleted, with obvious negative Eu anomalies. The chondrite-normalized rare earth element diagram shows a slightly right-inclined seagull-like shape, and light rare earth elements are slightly enriched compared to heavy rare earth elements. The Kezirto pluton is A1-type granite. The LA-ICP-MS U-Pb isotope ages of the north and south plutons are (273.8 ± 2.9) Ma and (274.8 ± 1.8) Ma, which are contemporaneous plutons. The formation of the Kezirto pluton is due to the underplating of mantle-derived magma, which leads to the remelting of ancient rocks in the lower crust. After that, it undergoes fractional crystallization. During the formation process, it is contaminated by the crust to different degrees. The pluton has experienced the tectonic environment of deep mantle plume and intracontinental rift.

[Keywords] southwestern Tianshan; Kezirto; petrogeochemistry; LA-ICP-MS

收稿日期:2024-06-06; 修订日期:2025-02-21

基金项目:中国地质调查局项目(DD20160001)

第一作者:蔡厚安(1981—),男,汉族,河南信阳人,博士后,正高级工程师。研究方向:有色金属成矿规律。E-mail:8572036@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

西南天山分布着一条重要的碱性侵入岩与稀有稀散金属成矿带^[1-2]。该成矿带受塔里木板块和南天山板块缝合带的北东东向深大断裂控制^[3-7],带内岩性组合为基性-超基性岩、碱性岩和火成碳酸岩^[8-11]。其成因认识不一,多认为是由区域大规模热事件将幔源物质通过深大断裂带到了木兹都克过渡带形成^[12-17],成岩年龄为 270 ~ 316 Ma^[18-27]。研究区同时还位于塔里木地块西北部,是早二叠世塔里木大火成岩省(Tarim large igneous province, TLIP)的一部分。前人对 TLIP 的形成提出了各种模型,其中地幔柱模型^[28-30]与现有证据最为一致。作为 TLIP 岩浆过程的最后阶段,A 型花岗岩的成岩作用存在争议。而了解 A 型花岗岩的岩石成因对于阐明后期岩浆过程和地球动力学演化至关重要。研究区区域上分布着大量古元古代 A 型花岗岩^[31-34],包括本文研究的克孜尔托岩体。本文研究对其岩石地球化学特征进行了详细研究,运用高精度等离子体质谱-激光探针法(LA-ICP-MS)测得岩体 U-Pb 同位素年龄,系统研究了其地质地球化学特征,为岩体特征、时代、成因及形成环境研究提供了依据。

另一方面,与中国西南天山相邻的中亚邻国产出有多个大型—特大型金属矿床,但中国却至今没有重大发现,因此查清二者的地质背景是否相似就显得尤为重要。中国西北塔里木盆地晚古生代以来经历了强烈的岩浆作用和成矿作用^[35-37],具有代表性的岩浆活动是 TLIP 的形成,其年代从晚石炭世到早二叠世^[28-30]。研究晚古生代岩浆活动的性质及其构造背景具有重要的理论和现实意义。

现研究克孜尔托 A 型花岗岩的岩石地球化学特征,测试其 U-Pb 同位素年龄,分析其成因,挖掘其蕴含的地质意义,以期助力区内 TLIP 研究和勘探工作。

1 地质背景

研究区位于西天山南端[图 1(a)],大地构造位置特殊,处于哈萨克斯坦板块南缘和塔里木板块汇聚叠覆区。研究区区域上位于塔北缘杂岩带的西段,区内受深大断裂控制的富碱性小岩体散布,如图 1(b)所示。其中,塔北缘断裂带控制着霍什布拉克、克孜尔托等岩体呈北东-南西向展布。皮羌断裂控制着古尔拉勒等岩体呈南北向展布^[1]。区域上岩体侵入类型和岩性多样,整体表现出一套由基性-酸性的岩石组合呈岩株、岩墙、岩基、岩脉产出。

克孜尔托岩体位于岩体散布区西南,以北东向隐伏断裂为界分为南北两部分[图 1(b)],面积近

50 km²。岩体呈岩株状产出,岩性单一;平面形态近椭圆状,空间展布与区域北东-南西的构造线方向近乎一致。

2 地质特征

2.1 岩相学、矿物学

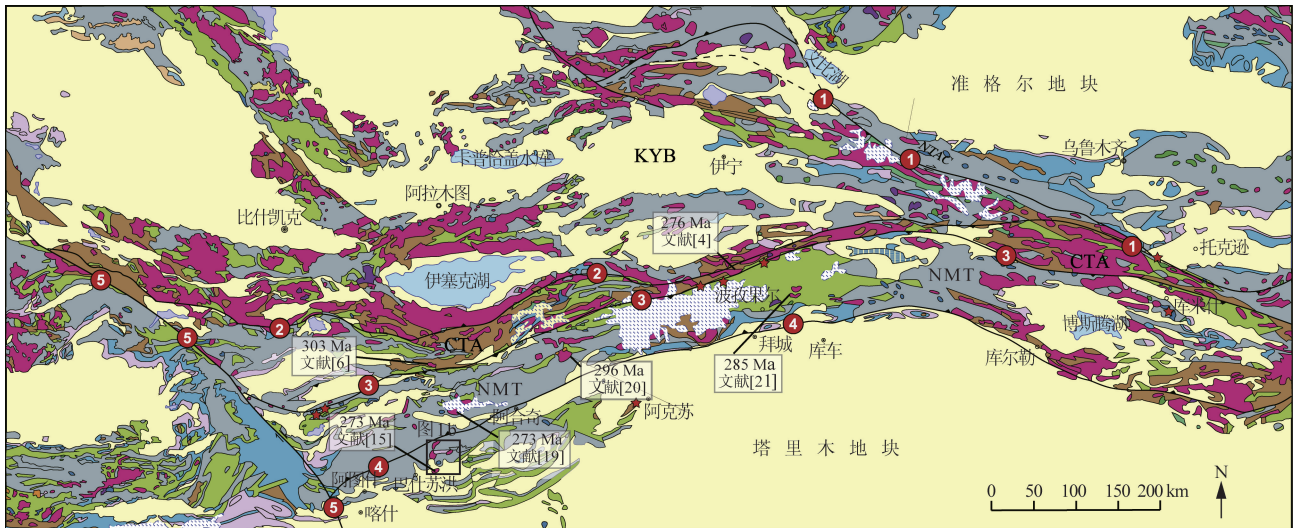
克孜尔托北岩体,浅肉红色,中粗粒结构,块状构造[图 2(a)]。主要造岩矿物为碱性长石(约 50%),灰白色,3 ~ 5 mm 粒状;石英(约 42%),灰白色,粒状,1 mm 左右,油脂光泽;黑云母(约 2%),板状,1 ~ 2 mm;钠铁闪石(约 3%),黑色,短柱状,长 2 mm 左右,玻璃光泽;斜长石(<1%),副矿物含有锆石、磷灰石等,如图 2(b)和图 2(c)所示。

克孜尔托南岩体,浅灰红色,中粗粒结构,块状构造[图 2(d)]。主要造岩矿物为碱性长石(约 53%),灰白色,3 ~ 5 mm 粒状;石英(约 37%),灰白色,粒状,1 mm 左右;黑云母(约 3%),板状,1 ~ 2 mm;钠铁闪石(约 5%),黑色,短柱状,长 2 mm 左右,玻璃光泽;斜长石(<1%),副矿物含有锆石、铁钛氧化物等,如图 2(e)和图 2(f)所示。

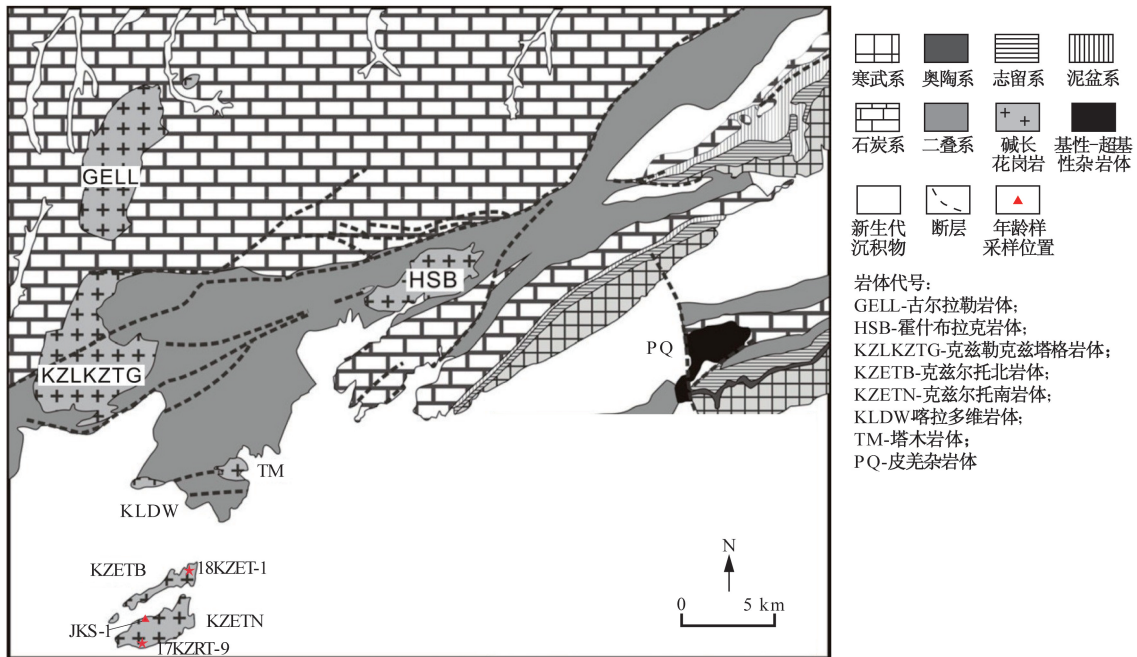
2.2 年代学

北岩体 18KZET-1 样品中分选出来的锆石颗粒呈现出无色透明的晶体,部分锆石颗粒中含有微裂隙和包裹体锆石大多数颗粒为自形的长柱状,大小为 100 ~ 110 μm × 130 ~ 320 μm,长宽比为 1:1.1 ~ 1:2.5,阴极发光图像上可见到清晰的振荡环带[图 3(a)]。此次共测试 30 个点,有 20 个点在²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 的谐和图上(图 3)。选用的 20 颗锆石具有相对高的 Th(44.25 × 10⁻⁶ ~ 210.27 × 10⁻⁶)含量和相对低的 U(104.34 × 10⁻⁶ ~ 372.18 × 10⁻⁶)含量,Th/U 比值在 0.41 ~ 0.56,也说明了这些锆石为岩浆成因的锆石^[39]。²⁰⁶Pb/²³⁸U 的加权平均年龄为(274.8 ± 1.8) Ma,如图 3(c)所示。

南岩体 17KZRT-9 样品中分选出来的锆石颗粒呈现出无色透明的晶体,锆石特征与北岩体的锆石相似,部分锆石颗粒中含有微裂隙和包裹体锆石大多数颗粒为自形的长柱状,大小为 180 ~ 210 μm × 130 ~ 400 μm,长宽比为 1:1.2 ~ 1:3.1,阴极发光图像上可见到清晰的振荡环带。此次共测试 30 个点,所有点均在²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 的谐和图上,如图 3(b)所示。南岩体的锆石具有相对高的 Th(23.53 × 10⁻⁶ ~ 238.97 × 10⁻⁶)含量和相对低的 U(39.42 × 10⁻⁶ ~ 651.48 × 10⁻⁶)含量,Th/U 比值在 0.37 ~ 0.61,说明了这些锆石同样也为岩浆成因的锆石^[39]。²⁰⁶Pb/²³⁸U 的加权平均年龄为(273.8 ± 2.9) Ma (MSWD = 2.9),如图 3(d)所示。



(a) 西天山造山带地质图(据文献[4]修改)



(b) 克孜尔托一带地质图(据文献[38]修改)

图1 西天山造山带地质图和克孜尔托一带地质图

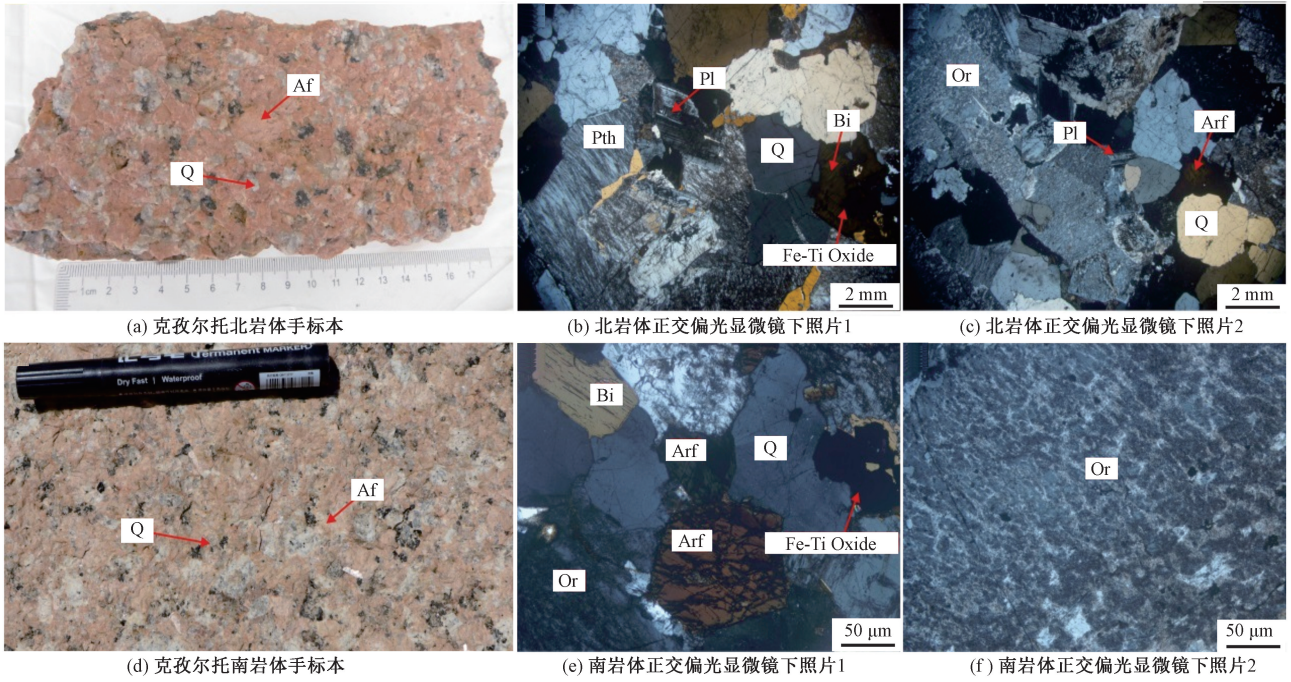
Fig. 1 The geological map of the western Tianshan orogen and geological map of Kezirtu block

2.3 岩石地球化学

2.3.1 主量元素特征

北岩体富硅质、碱质、贫钙质、准铝质。SiO₂ 含量为 67.94% ~ 76.41%, Na₂O 含量为 3.01% ~ 4.02%, K₂O 含量为 4.77% ~ 5.93%, Na₂O + K₂O 含量为 8.08% ~ 9.93%, K₂O > Na₂O, CaO 含量为 0.65% ~ 1.25%, MgO 含量为 0.12% ~ 0.32%, TiO₂ 含量为 0.10% ~ 0.34%, Al₂O₃ 含量为 11.57% ~

14.49%, TFe₂O₃ 含量为 1.31% ~ 3.85%。在岩石分类 TAS 图解中,所有样品均落在花岗岩区域[图 4(a)],与矿物组成分类一致。依据岩石类型判别图解,所有样品均落在碱性区域[图 4(b)],属于高钾钙碱性到钾玄岩系列岩石[图 4(c)]。样品里特曼指数 σ 的变化范围为:1.95 ~ 3.95,属于钙碱性到碱性岩系列。铝饱和指数(A/CNK)的变化范围为 0.92 ~ 0.99,属于准铝质到过铝质岩石[图 4(d)]。



Arf 为钠铁闪石; Bi 为黑云母; Or 为正长石; Pl 为斜长石; Pth 为条纹长石; Q 为石英; Fe 为 Ti; Oxide 为铁钛氧化物

图 2 克孜尔托岩体手标本和镜下照片

Fig. 2 Hand specimens and microscopic photographs of Kezirto pluton

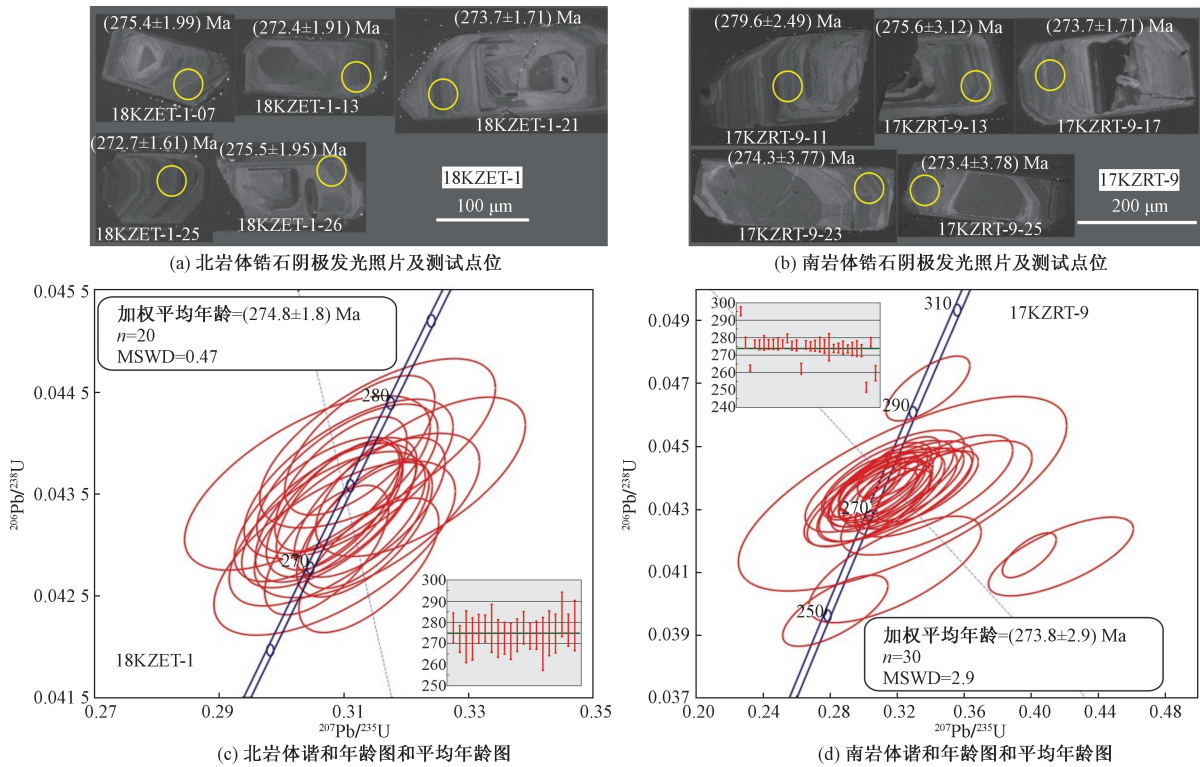


图 3 克孜尔托岩体部分阴极发光照片、锆石谐和年龄图和平均值图

Fig. 3 The cathodoluminescence photos, zircon concordance age and mean age of Kezirto pluton

南岩体富硅质、碱质、贫钙质、准铝质-弱过铝质。SiO₂ 含量为 71.78% ~ 74.13%, Na₂O 含量为 3.56% ~ 3.90%, K₂O 含量为 4.79% ~ 5.38%,

Na₂O + K₂O 含量为 8.54% ~ 9.06%, K₂O > Na₂O, CaO 含量为 1.06% ~ 1.42%, MgO 含量为 0.18% ~ 0.25%, TiO₂ 含量为 0.22% ~ 0.34%, Al₂O₃ 含量为

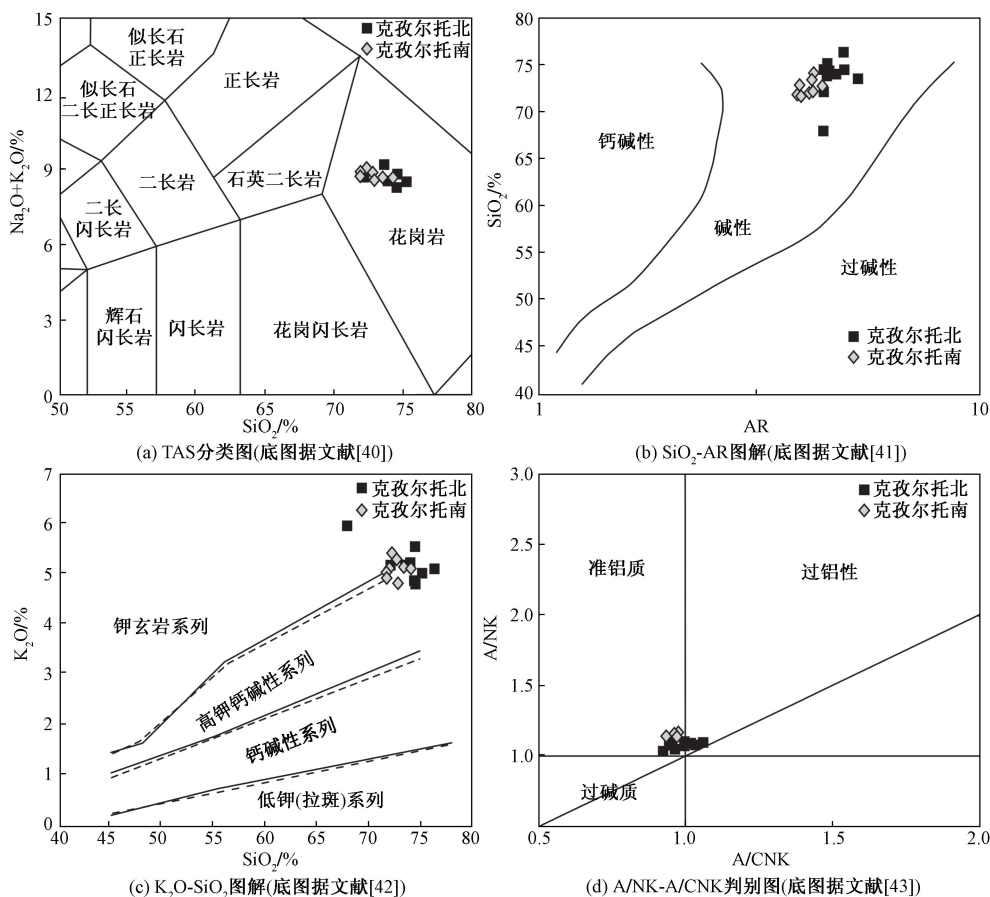


图4 克孜尔托花岗岩地球化学图解

Fig. 4 Geochemical diagram of Kezirto pluton

12.84% ~ 13.76%, $^{\text{T}}\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量为 2.42% ~ 3.57%。在岩石分类 TAS 图解中,所有样品均落在花岗岩区域[图 4(a)],与矿物组成分类一致。依据岩石类型判别图解,所有样品均落在碱性区域[图 4(b)],属于高钾钙碱性到钾玄岩系列岩石[图 4(c)]。样品里特曼指数 σ 的变化范围为:2.35 ~ 2.80,属于钙碱性系列。铝饱和指数 (A/CNK) 的变化范围为 0.93 ~ 0.97,属于准铝质岩石[图 4(d)]。

2.3.2 微量元素特征

南、北岩体的微量元素特征相似,高场强元素 (high field strength elements, HFSE) 较大离子亲石元素 (large ion lithophile elements, LILE) 具有明显的富集(图 5),明显亏损 Ba、Sr、P、Ti,并且北岩体相较于南岩体更为亏损。北岩体的 K 轻微亏损,南岩体的 K 轻微富集。北岩体的 Nb/Ta 为 13.00 ~ 18.12,南岩体的 Nb/Ta 为 15.34 ~ 18.02,均相对稳定。

2.3.3 稀土元素特征

球粒陨石标准化图解呈现轻微右倾的海鸥形态(图 5),南北岩体的轻稀土较重稀土元素轻微富集。其中,北岩体的总稀土元素含量较高, ΣREE 为

$261.72 \times 10^{-6} \sim 834.78 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 1.62 ~ 3.67, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 4.30 ~ 11.06, δEu 为 0.11 ~ 0.21,具有明显的负 Eu 异常。南岩体的总稀土元素含量也较高, ΣREE 为 $422.17 \times 10^{-6} \sim 575.86 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 3.25 ~ 3.73, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 9.21 ~ 11.35, δEu 为 0.28 ~ 0.39,具有明显的负 Eu 异常。

在克孜尔托南岩体采集了 4 件样品,测试了其 Sr-Nd 同位素;结合测年结果,计算了其初始 Sr 同位素比值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(图 6)。岩体 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-1.18 \sim +0.02$,全岩 Nd 两阶段模式年龄 tDM2 为 1.04 ~ 1.14 Ga。

3 讨论

3.1 岩石成因与岩浆演化

特殊类型的岩浆岩或岩石组合能指示其形成时的构造环境。A 型花岗岩具有无水、碱性的特征,并多形成于非造山的构造环境,其常与碰撞后或者弧后的地壳伸展减薄有关^[45]。克孜尔托北岩体具有高 $^{\text{T}}\text{FeO}/\text{MgO}$ (8.80 ~ 12.78)、低 CaO (0.65% ~ 1.25%) 的特征,全碱含量处于 8.08% ~ 9.93%,岩石中还有钠铁闪石,均属于 A 型花岗岩的特征。克

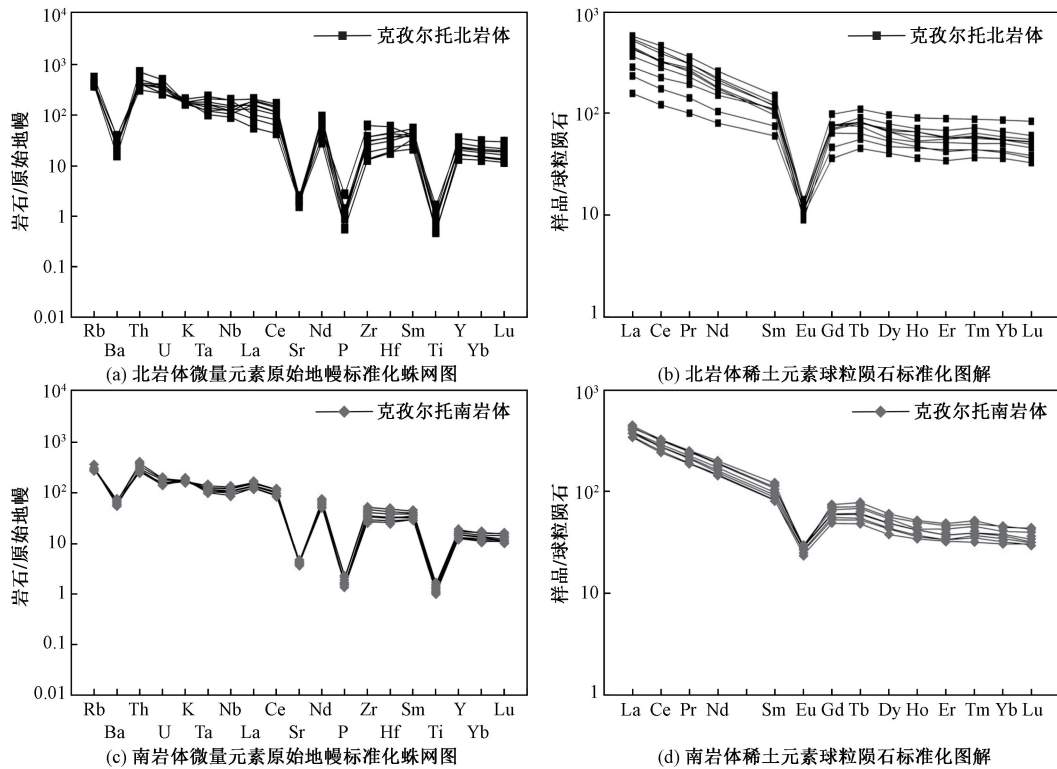


图5 克孜尔托岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图和稀土元素球粒陨石标准化图解(原始地幔和标准化值据文献[44])
 Fig. 5 Primitive-mantle-normalized trace element spider diagram of intrusive rocks and chondrite-normalized REE diagram of Kezirto pluton (primitive mantle and chondrite data from paper[44])

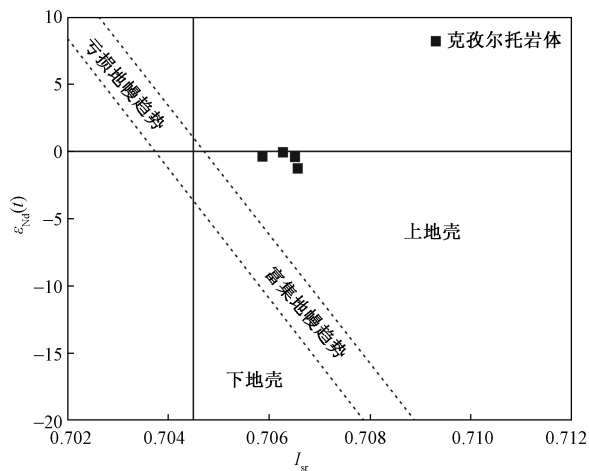


图6 克孜尔托南岩体的 Sr-Nd 同位素特征
 Fig. 6 Sr-Nd isotopic characteristics of the south Kezirto pluton

孜尔托南岩体具有高^TFeO/MgO (10.57 ~ 13.1)、低CaO (1.06% ~ 1.42%) 的特征, 全碱含量处于 8.54% ~ 9.06%, 岩石中也还有钠铁闪石, 也属于 A 型花岗岩的特征。克孜尔托岩体高场强元素较大离子亲石元素富集、强烈亏损 Ba、Sr、P 和 Ti、明显的 Eu 负异常等(图 5)均符合 A 型花岗岩的典型特征。

对花岗质岩石进行了投图分析(图 7), 结果表

明: 所有样品均落在 A 型花岗岩区域。同时 Nb-Y-3Ga 和 Nb-Y-Ce 图解中(图 8), 所有的样品落在 A1 型花岗岩区域。因此, 南、北岩体均属于 A1 型花岗岩。

另外, 本文测试克孜尔托南岩体的二阶段 Nd 模式年龄 t_{DM2} 为 1.04 ~ 1.14 Ga, 与塔木岩体的二阶段 Nd 模式年龄相同。并且在克孜尔托岩体附近的霍什布拉克岩体和克兹勒克兹塔格岩体, 它们也具有相同的二阶段 Nd 模式年龄, t_{DM2} 为 1.0 ~ 1.3 Ga^[15], 说明了形成克孜尔托北、南岩体的岩浆主要来自古老岩石的部分熔融。此次研究中克孜尔托南岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 -1.18 ~ +0.02, 塔木岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 -1.17 ~ +0.06, 克兹勒克兹塔格岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 -0.9 ~ +0.6, 而霍什布拉克岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 -2.8 ~ -2.6^[15]。从这些岩体 $\epsilon_{Nd}(t)$ 特征可以得出形成哈拉峻地区 A1 型花岗岩的岩浆来源于具有两种或两种以上 Nd 同位素储库岩浆的相互作用。在研究区的东部有形成时间几乎相同的皮羌基性-超基性杂岩体, 此岩体具有与 OIB 相似的地球化学特征, 在研究区南部的巴楚地区和瓦吉里塔格地区也有形成时间相同的中酸性、基性-超基性岩体^[22], 对这些基性-超基性岩体的研究证明其岩浆来源于地幔。因此, 皮羌基性-超基性杂岩体等的

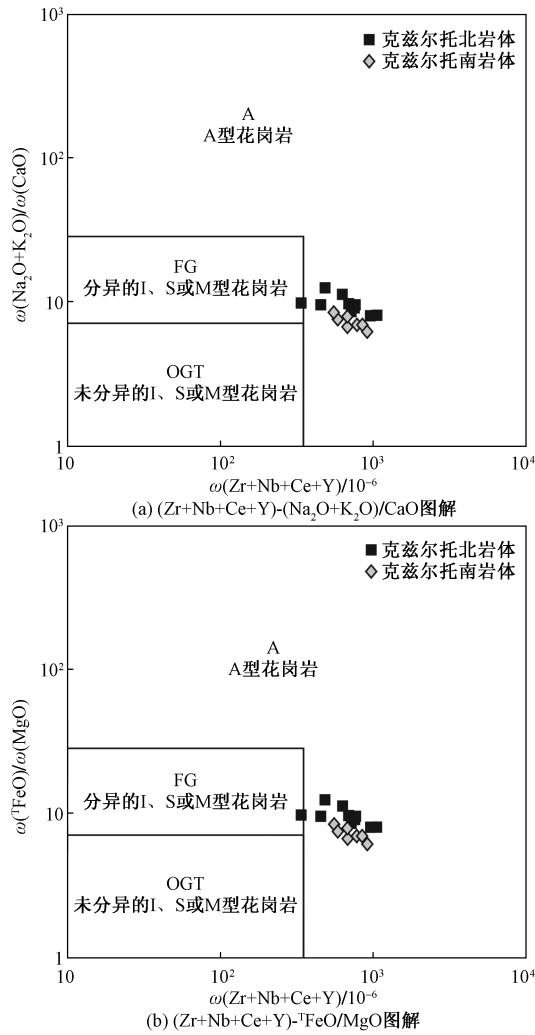


图7 (Zr + Nb + Ce + Y) - (Na₂O + K₂O) / CaO 和 (Zr + Nb + Ce + Y) - ^TFeO / MgO 图解^[46]
 Fig. 7 (Zr + Nb + Ce + Y) - (Na₂O + K₂O) / CaO and (Zr + Nb + Ce + Y) - ^TFeO / MgO diagram^[46]

存在进一步证明研究区花岗质岩浆形成的过程中可能有幔源岩浆的参与。

前人对相邻的哈拉峻地区的 A 型花岗岩开展了研究,对其成因观点较为一致^[14,16,38]。譬如,邹思远^[16]认为哈拉峻地区 A 型花岗岩体是由于底侵于下地壳的镁铁质岩浆分离结晶所产生的中酸性岩浆上升到地壳浅部形成。Huang 等^[38]认为成因模式为幔源岩浆底侵诱发古老的壳源岩石重熔,后经分离结晶作用所形成。曹俊等^[14]对哈拉峻地区的霍什布拉克岩体和克孜尔托北岩体进行了研究,也认为是由底侵于下地壳的镁铁质岩浆分离结晶产生的中酸性岩浆上升到地壳浅部,并伴随有不同程度的地壳混染形成。

从微量元素蛛网图中可以看出,克孜尔托岩体的 Ti 表现出明显的负异常,可能缘于磁铁矿的结

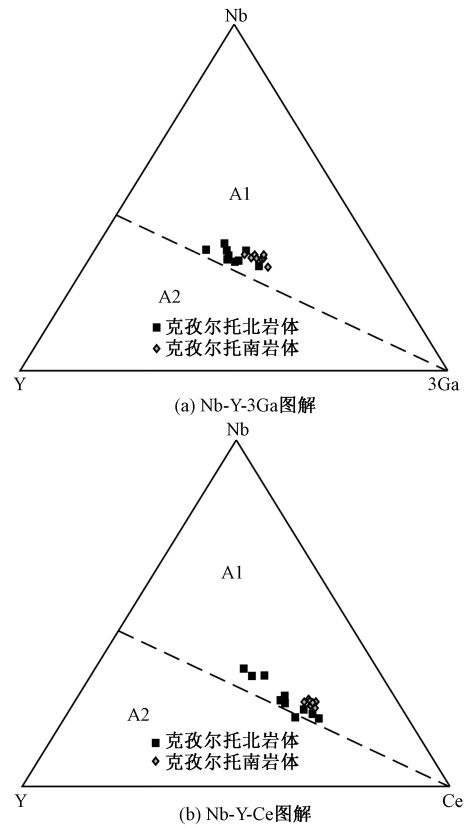


图8 Nb-Y-3Ga 和 Nb-Y-Ce 图解^[47]
 Fig. 8 Nb-Y-3Ga and Nb-Y-Ce diagram^[47]

晶。微量元素中的低 Sr 和稀土元素中的 Eu 负异常,说明了碱性长石的分离结晶,实验岩石学研究证明碱性长石在 A 型花岗质岩浆中开始结晶时的温度只比起源温度低 70 ~ 80 °C^[48],说明在岩浆演化的大部分过程中存在碱性长石的分离结晶^[47,49]。同时,Eu 的负异常暗示了岩浆源区存在大量斜长石的残留。

因此,克孜尔托岩体的形成是由于幔源岩浆的底侵导致下地壳古老的岩石重熔,之后又经历分离结晶作用形成,在形成的过程中遭受了不同程度的地壳混染。

3.2 构造意义

前人对区内的 A 型花岗岩的构造环境提出了几种地球动力学模型,包括岛弧环境^[50]、碰撞后伸展^[31]或板内裂谷^[38,51-52]。都不能很好地解释克孜尔托岩体的特征。本文研究中测得克孜尔托北岩体的年龄为(274.8 ± 1.8) Ma,克孜尔托南岩体年龄为(273.8 ± 2.9) Ma,与前人测得的克孜尔托北岩体年龄值(273 ± 1) Ma^[15]和南岩体年龄值(278 ± 3) Ma^[22,25]在误差范围内一致。与邻区霍什布拉克岩体年龄(278 ± 3) Ma^[22]、巴什苏洪碱长花岗岩年龄(277.0 ± 2.1) Ma^[16]以及皮羌基性-超基性杂岩体年龄(276 ± 4) Ma^[22]都为同期,可

能为同一期岩浆演化的结果,这也是西南天山地区发生大规模碱性岩浆事件的年代。文献[12, 22, 38]研究了霍什布拉克岩体、巴楚县麻扎山岩体、塔木岩体,均属产出于非造山环境的A1型花岗岩。同时,Y-Nb和(Y+Nb)-Rb判别图中,所有点均落在板内花岗岩区域(图9)。说明岩体经历了后造山的构造环境。结合克孜尔托岩体和周围侵入体的年龄,认为此阶段的岩浆作用可能与塔里木盆地二叠纪大火成岩省有关^[12-13, 28, 53],构造环境推测为塔里木地幔柱上涌所诱发的陆内裂谷体系。

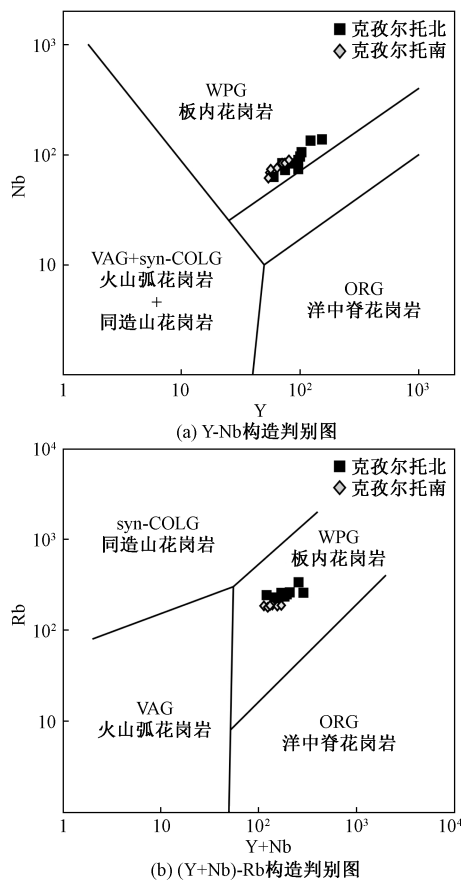


图9 构造判别图^[53]

Fig. 9 Structural discriminant diagram^[53]

综上所述,克孜尔托岩体经历了深部地幔柱和陆内裂谷的构造环境,为更好地认识塔里木克拉通的古元古代构造环境提供了新的证据。

3.3 矿产意义

克孜尔托岩体所处的碱性岩带是中国重要的稀有稀土矿产地,分布着波孜果尔稀有稀土矿等矿床^[2, 10]。研究区与相邻新发现的巴什苏洪铌钽矿^[35-37]具有相似的成矿地质背景。本次研究尝试性地采集了一个细粒碱长花岗岩捡块样,其Nb+Ta含量达到工业品位,Li和Be也有不同程度的富集^[37],具有较好的勘探远景。

4 结论

(1)克孜尔托岩体地球化学特征为稀土元素和HFSEs富集;负Ba、Sr、P、Ti和Eu异常。岩体为A1型花岗岩。稀土元素整体表现平缓、轻微右倾、呈海鸥式分布模式,轻稀土较重稀土元素轻微富集。

(2)克孜尔托岩体LA-ICP-MS U-Pb同位素年龄分别为 (273.8 ± 2.9) Ma和 (274.8 ± 1.8) Ma,为同期岩浆演化的结果,也和西南天山地区发生大规模岩浆事件的年代相吻合,属于TLIP晚期岩浆作用产物。

(3)克孜尔托岩体的形成是由于幔源岩浆的底侵导致下地壳古老的岩石重熔,之后又经历分离结晶作用形成,在形成的过程中遭受了不同程度的地壳混染。克孜尔托A型花岗岩是在板内岩浆作用下发育的,与大陆裂谷和塔里木地幔柱上涌引起的岩石圈变薄有关。

参 考 文 献

- [1] 赵仁夫,杨建国,王满仓,等.西南天山成矿地质背景研究及找矿潜力评价[J].西北地质,2002,35(4):101-121.
Zhao Renfu, Yang Jianguo, Wang Mancang, et al. The study of metallogenic geologic setting and prospecting potential evaluation in southwestern Tianshan Mountains [J]. Northwestern Geology, 2002, 35(4): 101-121.
- [2] 邹天人,李庆昌.中国新疆稀有及稀土金属矿床[M].北京:地质出版社,2006.
Zou Tianren, Li Qingchang. Rare and rare earth metallic deposits in Xinjiang, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [3] Gao J, Long L L, Reiner K, et al. Tectonic evolution of the south Tianshan orogen, NW China: geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98: 1221-1238.
- [4] Gao J, Reiner K, Qian Q, et al. The collision between the Yili and Tarim blocks of the southwestern Altai: geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP-LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan orogen [J]. Tectonophysics, 2011, 499: 118-131.
- [5] 李曰俊,杨海军,赵岩,等.南天山区域大地构造与演化[J].大地构造与成矿学,2009,33(1):94-104.
Li Yuejun, Yang Haijun, Zhao Yan, et al. Tectonic framework and evolution of south Tianshan, NW China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(1): 94-104.
- [6] Seltmann R, Konopelko D, Biske G, et al. Hercynian post-collisional magmatism in the context of Paleozoic magmatic evolution of the Tien Shan orogenic belt [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 42(5): 821-838.
- [7] 孙岳,陈正乐,王永,等.天山山脉中生代差异隆升及其机制探讨[J].大地构造与成矿学,2016,40(2):335-343.
Sun Yue, Chen Zhengle, Wang Yong, et al. Mechanisms of meso-

- Cenozoic differential uplift of Tianshan Mountains[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40(2): 335-343.
- [8] 艾珂丹·阿里根江, 李顺达, 王可勇. 新疆东天山三岔口铜矿床同位素组成及成矿物质来源示踪[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(33): 14095-14103.
- Ai Kedan Aligenjiang, Li Shunda, Wang Keyong. Isotopic composition and source of ore-forming materials of Sanchakou copper deposit in east Tianshan, Xinjiang[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(33): 14095-14103.
- [9] 黄河, 张招崇, 张舒, 等. 新疆西南天山霍什布拉克长花岗岩体岩石学及地球化学特征——岩石成因及其构造与成矿意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 707-718.
- Huang He, Zhang Zhaochong, Zhang Shu, et al. Petrology and geochemistry of the Huoshibulake alkali feldspar granite pluton in southwest Tianshan Mountains, Xinjiang: implications for petrogenesis, tectonic setting and mineralization[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(6): 707-718.
- [10] 刘春花, 吴才来, 郜源红, 等. 南天山拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类锆石 U-Pb 定年及其 Lu-Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2014, 30(6): 1595-1614.
- Liu Chunhua, Wu Cailai, Gao Yuanhong, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu-Hf isotopic system of A-type granitoids in south Tianshan, Baicheng county, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6): 1595-1614.
- [11] 蔡厚安, 李顺庭, 刘增仁, 等. 新疆巴什苏洪稀有矿床碱性杂岩体地球化学特征及地质意义[J]. *矿产与地质*, 2021, 35(4): 670-679.
- Cai Hou'an, Li Shunting, Liu Zengren, et al. Geochemical characteristics and geological significance of alkaline complex in Bashishuhong REE deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Resource and Geology*, 2021, 35(4): 670-679.
- [12] 孙林华, 王岳军, 范蔚茗, 等. 再论巴楚麻扎山正长岩体岩石成因和构造意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2008, 38(1): 8-20.
- Sun Linhua, Wang Yuejun, Fan Weiming, et al. A further discussion of the petrogenesis and tectonic implication of the Mazhasan syenites in the Bachu Area[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2008, 38(1): 8-20.
- [13] 张招崇, 董书云, 黄河, 等. 西南天山二叠纪中酸性侵入岩的地质学和地球化学: 岩石成因和构造背景[J]. *地质通报*, 2009, 28(12): 1827-1839.
- Zhang Zhaochong, Dong Shuyun, Huang He, et al. Geology and geochemistry of the Permian intermediate-acid intrusions in the southwestern Tianshan, Xinjiang, China: implications for petrogenesis and tectonics[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(12): 1827-1839.
- [14] 曹俊, 徐义刚, 邢长明, 等. 塔里木北缘皮羌地区早二叠纪花岗岩质岩体的成因: 对塔里木大火成岩省 A 型花岗岩成因的启示[J]. *岩石学报*, 2013, 29(10): 3336-3352.
- Cao Jun, Xu Yigang, Xing Changming, et al. Origin of the Early Permian granitic plutons from the Piqiang region in the northern Tarim block: implications for the origin of A-type granites of the Tarim large igneous province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(10): 3336-3352.
- [15] 黄河. 中国南天山地区古生代花岗岩与区域地质演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- Huang He. Paleozoic granitoids in the Chinese south Tianshan and its implications for geological evolution of the region[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2013.
- [16] 邹思远. 塔里木大火成岩省晚期岩浆事件与演化过程[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- Zou Siyuan. Magmatic event in the late stage and its evolution of Tarim large igneous province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [17] 杜玉龙, 方维萱, 鲁佳. 新疆萨热克辉长辉绿岩类成岩温度-压力-氧逸度特征与成岩作用演化趋势[J]. *岩石学报*, 2020, 36(2): 484-508.
- Du Yulong, Fang Weixuan, Lu Jia. Characteristics of diagenetic temperature-pressure-oxygen fugacity of gabbro-diorite and tendency of geothermal evolution of magma diagenesis in Sareke, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(2): 484-508.
- [18] 何碧, 赵振瑄, 刘海生, 等. 东天山造山带黑尖山地区花岗岩长岩岩石成因及构造意义: 来自岩石学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学证据[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(25): 10620-10634.
- He Bi, Zhao Zhenguan, Liu Haisheng, et al. Petrogenesis and tectonic significance of Late Devonian granodiorite in Heijinshan area, eastern Tianshan orogenic belt: evidences from petrology, zircon U-Pb geochronology, and geochemistry[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(25): 10620-10634.
- [19] 王超, 刘良, 罗金海, 等. 西南天山晚古生代后碰撞岩浆作用: 以阔克萨彦岭地区巴雷公花岗岩为例[J]. *岩石学报*, 2007, 33(8): 1830-1840.
- Wang Chao, Liu Liang, Luo Jinhai, et al. Late Paleozoic post-collisional magmatism in the southwestern Tianshan orogenic belt, take the Baleigong Pluton in the Kokshal Region as an example[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8): 1830-1840.
- [20] Konopelko D, Biske G, Seltmann R, et al. Hercynian post collisional A-type granites of the Kokshal range, southern Tien Shan[J]. *Lithos*, 2007, 97: 140-160.
- [21] Long L L, Gao J, Wang J B, et al. Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb age of post-collisional granites in the southwest Tianshan orogenic belt of China: examples from the Heiyingshan and Laohutai plutons[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2008, 82(2): 415-424.
- [22] Zhang C L, Xu Y G, Li Z X, et al. Diverse Permian magmatism in the Tarim block, NW China: genetically linked to the Permian Tarim mantle plume[J]. *Lithos*, 2010, 119(3/4): 537-552.
- [23] Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, et al. 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*, 2010, 122: 627-640.
- [24] 刘博, 陈正乐, 任荣, 等. 新疆南天山缝合带的形成时限——来自阔克萨彦岭花岗岩体的锆石年龄新证据[J]. *地质通报*, 2013, 32(9): 1371-1384.
- Liu Bo, Chen Zhengle, Ren Rong, et al. Timing of the south Tianshan suture zone: new evidence of zircon ages from the granitic plutons in Kokshal area[J]. *Geological Bulletin of China*,

- 2013, 32(9): 1371-1384.
- [25] 杨富全, 王立本, 叶锦华, 等. 新疆霍什布拉克地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄[J]. 中国区域地质, 2001, 20(3): 267-273.
Yang Fuquan, Wang Liben, Ye Jinhua, et al. Zircon U-Pb ages of granites in the Huoshi Bulak Area, Xinjiang[J]. Regional Geology of China, 2001, 20(3): 267-273.
- [26] 杨威, 郭召杰, 姜振学, 等. 西南天山前陆盆地侏罗纪-白垩纪盆地格局——来自碎屑锆石年代学的证据[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(3): 533-550.
Yang Wei, Guo Zhaojie, Jiang Zhenxue, et al. Jurassic-Cretaceous basin-range pattern in the southwestern Tian Shan foreland basin: evidence from detrital U-Pb zircon geochronology[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(3): 533-550.
- [27] Zong Z J, Du Y S, Li S T, et al. Petrogenesis of the Early Permian A-type granites in the Halajun region, southwest Tianshan, western Xinjiang, NW China; implications for geodynamics of Tarim large igneous province [J]. International Geology Review, 2020, 1-22.
- [28] 徐义刚, 王焰, 位荀, 等. 与地幔柱有关的成矿作用及其主控因素[J]. 岩石学报, 2013, 29(10): 3307-3322.
Xu Yigang, Wang Yan, Wei Xun, et al. Mantle plume-related mineralization and their principal controlling factors[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(10): 3307-3322.
- [29] Xu Y G, Wei X, Luo Z Y, et al. The early Permian Tarim large igneous province: main characteristics and a plume incubation model[J]. Lithos, 2014, 204: 20-35.
- [30] 徐义刚, 钟玉婷, 位荀, 等. 二叠纪地幔柱与地表系统演变[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(3): 359-373.
Xu Yigang, Zhong Yuting, Wei Xun, et al. Permian mantle plumes and earth's surface system evolution[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(3): 359-373.
- [31] Long X P, Sun M, Yuan C, et al. Zircon REE patterns and geochemical characteristics of Paleoproterozoic anatectic granite in the northern Tarim craton, NW China: implications for the reconstruction of the Columbia supercontinent[J]. Precambrian Research, 2012, 222-223: 474-487.
- [32] Yu S Y, Zhang J X, Zhao X L, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Late Paleoproterozoic A-type granites from the Dunhuang block, SE Tarim craton, China: implications for the break-up of the Columbia supercontinent[J]. Geological Magazine, 2014, 151(4): 629-648.
- [33] 高山林, 张仲培, 刘士林, 等. 塔里木克拉通北部沙雅隆起古元古代 A 型花岗岩的发现及其构造意义[J]. 岩石学报, 2018, 34(7): 2017-2029.
Gao Shanlin, Zhang Zhongpei, Liu Shilin, et al. The discovery and tectonic significance of Paleoproterozoic A-type granite in Shaya uplift of the north Tarim craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(7): 2017-2029.
- [34] 张永旺, 刘汇川, 于志琪, 等. 塔里木克拉通古元古代晚期 A 型花岗岩成因及对哥伦比亚超大陆演化的指示意义[J]. 岩石学报, 2021, 37(4): 1122-1138.
Zhang Yongwang, Liu Huichuan, Yu Zhiqi, et al. Petrogenesis of Late-Paleoproterozoic A-type granites in the Tarim craton and implications for the Columbia assembly and break-up[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(4): 1122-1138.
- [35] 蔡厚安, 李顺庭, 刘增仁, 等. 西南天山巴什苏洪稀有稀土矿地质特征及控矿因素研究[J]. 地质与勘探, 2021, 57(3): 465-477.
Cai Hou'an, Li Shunting, Liu Zengren, et al. Geological characteristics and ore controlling factors of Bashisu hong REE deposit in southwest Tianshan[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(3): 465-477.
- [36] 蔡厚安, 侯朝勇, 张文杰, 等. 新疆巴什苏洪地区稀有矿床特征及找矿方向探讨[J]. 矿产与地质, 2021, 35(3): 379-384.
Cai Hou'an, Hou Chaoyong, Zhang Wenjie, et al. Rare metal deposit characteristics and discussion on exploration direction in Bashisu hong Area, Xinjiang[J]. Mineral Resource and Geology, 2021, 35(3): 379-384.
- [37] 蔡厚安, 杨自安, 王艳丽, 等. 新疆哈拉峻地区碱性岩地质特征及稀有稀土矿找矿远景[J]. 矿产勘查, 2022, 13(S1): 229-237.
Cai Hou'an, Yang Zi'an, Wang Yanli, et al. Geological characteristics of alkaline rocks and prospecting prospect of REE deposits in Halajun Area, Atushi City, Xinjiang, China[J]. Mineral Exploration, 2022, 13(S1): 229-237.
- [38] Huang H, Zhang Z C, Kusky T, et al. Continental vertical growth in the transitional zone between south Tianshan and Tarim, western Xinjiang, NW China: insight from the Permian Halajun A1-type granitic magmatism[J]. Lithos, 2012, 155: 49-66.
- [39] Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2010, 18(4): 423-439.
- [40] Middlemost E A K. Naming material in the magma/igneous rock system[J]. Earth Science Reviews, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [41] Wright J B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis[J]. Geological Magazine, 1969, 106(4): 370-384.
- [42] Peccerillo A, Tylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58: 63-81.
- [43] Mamiand P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 635-643.
- [44] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, 1989, 42: 313-345.
- [45] 贾小辉, 王强, 唐功建. A 型花岗岩的研究进展及意义[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 465-480.
Jia Xiaohui, Wang Qiang, Tang Gongjian. A-type granites: research progress and implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(3): 465-480.
- [46] 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.
- [47] Eby G N. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. Lithos, 1990, 26(1): 115-134.

- [48] Clemens J, Holloway J, White A. Origin of an A-type granite: experimental constraints[J]. *American Mineralogist*, 1986, 7(3): 317-324.
- [49] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641-644.
- [50] 杨树锋, 厉子龙, 陈汉林, 等. 塔里木二叠纪石英正长斑岩岩墙的发现及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1405-1412.
Yang Shufeng, Li Zilong, Chen Hanlin, et al. Discovery of a Permian quartz syenitic porphyritic dyke from the Tarim Basin and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1405-1412.
- [51] Zhang D Y, Zhang Z C, Santosh M, et al. Perovskite and baddeleyite from kimberlitic intrusions in the Tarim large igneous province signal the onset of an End-Carboniferous mantle plume[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 361: 238-248.
- [52] Su Y P, Zheng J P, Liang L L, et al. Derivation of A-type granites by partial melting of newly underplated rocks related with the Tarim mantle plume[J]. *Geological Magazine*, 2019, 156(3): 409-429.
- [53] Pearce J A, Hsrrid 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.