

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.224>



# 东昆仑祁漫塔格阿确墩地区侵入岩 U-Pb 年代学、 地球化学及其地质意义

李 婷<sup>1,2</sup>, 李 猛<sup>1,2</sup>, 胡朝斌<sup>1,2</sup>, 李 瑶<sup>1,2</sup>, 孟 杰<sup>1,2</sup>, 高晓峰<sup>1,2</sup>, 查显锋<sup>1,2</sup>

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 造山带地质研究中心, 陕西西安 710054

2. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西西安 710054

**摘要:** 祁漫塔格地区岩浆岩的成岩时代和形成环境的确定能对东昆仑造山带加里东期构造演化时限加以约束。对祁漫塔格西北部阿确墩地区石英闪长岩和二长花岗岩进行了年代学和岩石地球化学研究, 结果显示, 石英闪长岩属准铝质—弱过铝质钙碱性系列岩石; 轻重稀土分馏明显, 具中等一轻微铕负异常 ( $\delta\text{Eu}=0.79\sim0.90$ ); 相对富集 Rb、K、Hf、Zr、Tb、Nd 等元素, 不同程度地亏损 Ba、P、Ti、Nd、Ta、Y; 具有 I型花岗岩类特征。二长花岗岩属弱过铝质钙碱性系列岩石; 轻重稀土分异程度极大, 具明显铕负异常 ( $\delta\text{Eu}=0.42\sim0.45$ ); 富集大离子亲石元素(如 Rb、K、La、Ce、Nd、Tb 等), 亏损高场强元素(P、Ti、Nd、Ta)和 Ba、Sr、U 等元素; 为高分异 I型花岗岩。 $\text{Nd}/\text{Th}$ 、 $\text{Nb}/\text{Ta}$ 、 $\text{Mg}^{\#}$  值等指标显示石英闪长岩为壳源特征且受到幔源岩浆的影响, 推测是幔源岩浆底侵地壳物质发生部分熔融形成的; 二长花岗岩则是壳源的, 可能与幔源岩浆底侵诱发的上地壳物质部分熔融有关, 且经历了强烈的结晶分离作用。石英闪长岩和二长花岗岩的 LA-ICP-MS 镍石 U-Pb 年龄分别为  $448.8\pm3.9$  Ma 和  $405.2\pm3.6$  Ma, 代表其形成时代。石英闪长岩总体显示出与俯冲消减作用有关的岛弧岩浆岩地球化学特征; 二长花岗岩在构造环境图解中显示为碰撞背景, 但微量元素与同碰撞花岗岩典型特征不符, 综合分析认为形成于后碰撞构造背景下。结合区域构造演化, 推测东昆仑祁漫塔格地区在晚奥陶世持续处于俯冲消减环境中, 早泥盆世之前进入后碰撞造山阶段。

**关键词:** 东昆仑造山带; 祁漫塔格; 阿确墩地区; 侵入岩; 镍石 U-Pb 定年; 地球化学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2018)12-4350-14

收稿日期: 2018-06-29

## Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Its Geological Implications of Intrusions in Aquedun Area from Qimantag, East Kunlun, China

Li Ting<sup>1,2</sup>, Li Meng<sup>1,2</sup>, Hu Chaobin<sup>1,2</sup>, Li Yao<sup>1,2</sup>, Meng Jie<sup>1,2</sup>, Gao Xiaofeng<sup>1,2</sup>, Zha Xianfeng<sup>1,2</sup>

1. Xi'an Center of Geological Survey, Orogen Research Center, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China

**Abstract:** The determination of formation time and tectonic setting of intrusions in Qimantag area can limit the time of Caledonian tectonic evolution in East Kunlun orogen. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry of quartz diorite and monzonite adamellite in Aquedun of northwestern Qimantag area are studied in this paper. Results show that quartz diorite belongs to metaluminous-weakly peraluminous and calc-alkaline series of I-type granite, with moderate Eu negative abnormality ( $\delta\text{Eu}=0.79\sim0.90$ ) and significant fractionation between light REE and heavy REE, enriched in Rb, K, Hf, Zr, Tb, Nd and depleted of Ba, P, Ti, Nd, Ta, Y. Monzonite adamellite belongs to weakly peraluminous and calc-alkaline series of high-fractionated I-type granite, with significant negative Eu abnormality ( $\delta\text{Eu}=0.42\sim0.45$ ) and significant fractionation between light REE and heavy REE, enriched in LILE(Rb, K, La, Ce, Nd, Tb) and depleted in HFSE(P, Ti, Nd, Ta) and Ba, Sr, U. The ratios of  $\text{Nd}/\text{Th}$ ,  $\text{Nb}/\text{Ta}$  and  $\text{Mg}^{\#}$  of quartz diorite show crustal characteristics with the addition of small amount of mantle-derived materials,

**基金项目:** 中国地质调查局项目(No.DD20160002)。

**作者简介:** 李婷(1984—), 女, 硕士, 工程师, 矿物学、岩石学、矿床学专业。ORCID: 0000-0002-0051-8147. E-mail: liting\_xacgs@163.com

**引用格式:** 李婷, 李猛, 胡朝斌, 等, 2018. 东昆仑祁漫塔格阿确墩地区侵入岩 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义. 地球科学, 43(12): 4350—4363.

produced by partial melting of the continental crust induced by mantle derived magmas underplating. The ratios of Nd/Th, Nb/Ta and Mg<sup>#</sup> of monzonite adamellite show crustal characteristics, produced by partial melting of the upper continental crust induced by mantle derived magmas underplating and may have experienced the fractional crystallization at the same time. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of the quartz diorite and monzonite adamellite are 448.8±3.9 Ma and 405.2±3.6 Ma, respectively, which represents their formation time. The chemical characteristics of quartz diorite are closely related to the island-arc environments in subduction belt. Monzonite adamellite falls into the zone of collision setting with tectonic setting discrimination diagrams, but the trace elements do not match with typical collision-orogenic granite, so we think monzonite adamellite is post-collision-orogenic granite. Combined with the regional tectonic evolution, it is concluded that Qimantag block of East Kunlun orogen maybe is in the subduction stage in Late Ordovician, and in the post-collision stage before Early Devonian.

**Key words:** East Kunlun orogen; Qimantag; Aquedun area; intrusion; zircon U-Pb dating; geochemistry.

## 0 引言

祁漫塔格位于东昆仑造山带西段,南邻巴颜喀拉—羌塘地块,北邻柴达木盆地,西部被阿尔金大型走滑断裂斜截,东部与东昆仑其他地区相连,是连接东西昆仑的纽带,对探讨东昆仑地区地质构造演化具有重要意义。由于自然条件恶劣,祁漫塔格地区研究程度相对较低,且已有报道多集中在东部,对西部报道较少。本地区出露大规模的侵入岩体构成祁漫塔格构造岩浆岩带,研究认为其早古生代岩浆活动与加里东期构造旋回有关(莫宣学等,2007)。前人在鸭子泉地区发现早奥陶世(约 480 Ma)岛弧型蛇绿岩残片,表明祁漫塔格地区曾存在早古生代洋盆(原特提斯洋),并发生洋壳俯冲作用(崔美慧等,2011);宽沟一小狼牙山地区发现具有岛弧或钙碱性弧火山岩特征的双峰式火山岩(440~450 Ma),认为与洋陆俯冲作用有关(王秉璋等,2012)。洋壳俯冲结束和碰撞造山的时限则存在不同看法。刘桂珍等(2014)认为中奥陶世—早志留世的花岗岩形成于同碰撞环境;周建厚等(2015)认为洋盆在晚奥陶世已经闭合,在志留纪处于伸展环境(高永宝和李文渊,2011)。郑震等(2016)认为原特提斯洋在中志留世闭合;于森等(2017)认为南北祁漫塔格在晚志留世(422 Ma)已经开始碰撞,并持续到早泥盆世(398 Ma)。郝娜娜等(2014)则认为晚志留世(420 Ma 左右)已经从同碰撞挤压造山转为后碰撞区域拉伸环境。

阿确墩地区位于祁漫塔格山西北部,其发育的中酸性侵入岩体一般认为是石炭—二叠纪岩浆活动的产物,缺少精确的锆石 U-Pb 同位素测年数据和岩石地球化学研究。本文在野外地质调查基础上,对阿确墩区内出露的石英闪长岩和二长花岗岩开展了深入的年代学和岩石地球化学分析,厘清其成岩时代为早古生代,并讨论其岩石成因,为探讨东昆仑造

山带加里东期构造演化进程提供佐证。

## 1 地质背景及岩石学特征

前人对于东昆仑造山带的构造单元划分各有不同,大致以东昆北断裂带、东昆中断裂带、东昆南断裂带为界,自北向南依次划分为东昆北(祁漫塔格)弧后盆地、东昆中微陆块(复合岩浆弧)、东昆南增生杂岩带和巴彦喀拉褶断带等构造单元。阿确墩地区处于祁漫塔格陆块和柴达木地块的结合部位,属东昆北(祁漫塔格)弧后盆地(图 1)构造单元。

区内断层发育,多呈北西西—南东东或近东西向展布。变质基底以元古界金水口岩群白水河岩组为主,是一套由片麻岩、混合岩、大理岩夹石英片岩、变粒岩等组成的中深变质岩系。区内还出露上奥陶统滩间山群(祁漫塔格群)、石炭系大干沟组及新生代地层,缺失中生代地层。滩间山群以近东西向分布于祁漫塔格山北坡,主要为一套火山岩、碎屑岩、碳酸盐岩组合,其中玄武岩形成时限为 450~440 Ma(高晓峰等,2011),总体显示了从早期的裂谷盆地向过渡型洋壳盆地演化的过程(李荣社等,2007)。大干沟组与两边侵入岩呈断层接触,是一套碳酸盐岩建造沉积,以灰岩、生物碎屑灰岩为主。该区还出露大面积的侵入岩,主要岩石组合为辉长岩—石英闪长岩—花岗闪长岩—二长花岗岩—钾长花岗岩,呈不规则岩株状侵入白水河岩组和祁漫塔格群,是由多期构造岩浆作用叠加形成的。

本文在阿确墩地区东北方向约 10 km 库木布拉克处采集了 2 件侵入岩样品:石英闪长岩(KM01)和二长花岗岩(KM02),采样位置分别为 37°57'N,90°17.52'E 和 37°57.53'N,90°16.79'E(图 1)。

石英闪长岩呈灰绿色—灰黑色,细粒结构,块状构造。其主要矿物组成为斜长石(60%~80%)、角闪

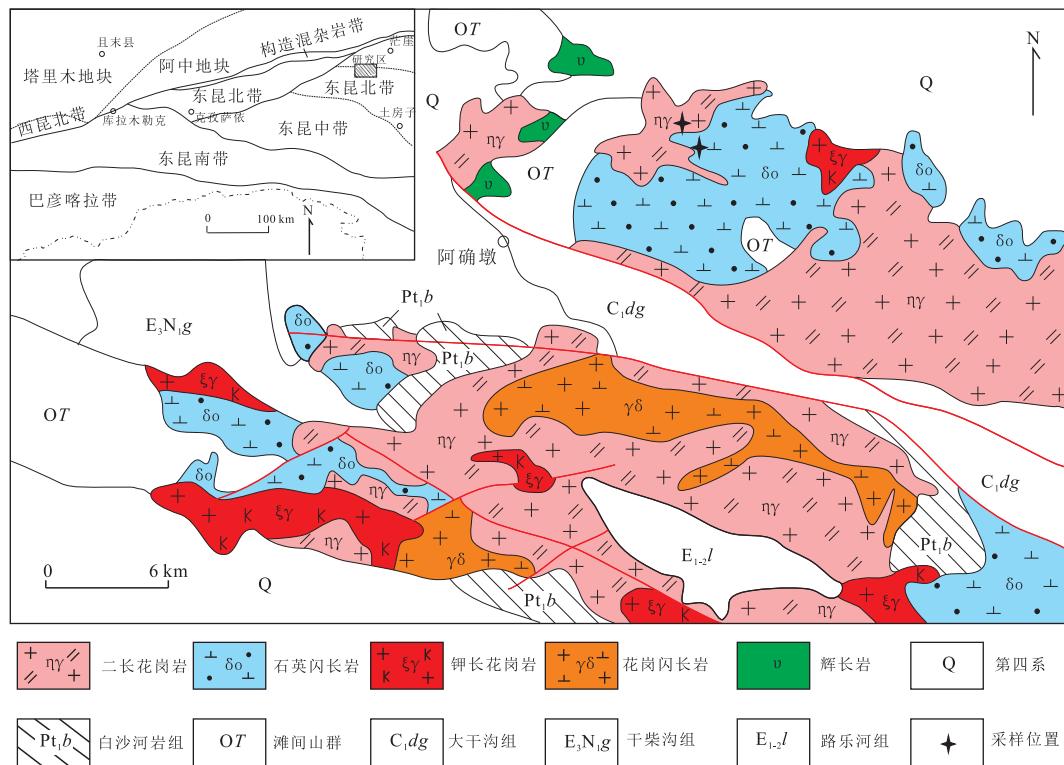


图 1 东昆仑阿确墩地区地质简图

Fig.1 The sketch geological map of the Aqedun area in the East Kunlun orogen

石(10%~15%)、石英(5%~10%)、钾长石(2%~5%)和黑云母(5%~10%),副矿物为锆石、磷灰石等.斜长石呈半自形板柱状,粒度为0.8~1.5 mm;角闪石呈短柱状或粒状,粒度为0.3~2.0 mm,多色性明显,呈蓝绿色—绿色;石英呈他形粒状,波状消光,粒度为0.2~2.0 mm,表面无或少见风化侵蚀现象.岩体含有暗色基性(中基性)包体,大小为1 cm×2 cm~5 cm×8 cm.

二长花岗岩表面呈灰白色—肉红色,中粒—粗粒花岗结构,块状构造.其主要矿物组成为斜长石(30%~40%)、钾长石(30%~35%)、石英(20%~25%)、黑云母(>5%)、角闪石(3%~5%),副矿物有锆石、榍石等.斜长石呈半自形板柱状,聚片双晶不发育,粒度为2~3 mm;钾长石呈他形粒状或板状,粒径较大,可达5 mm×5 mm;石英呈他形粒状,波状消光,粒度为0.5~2.0 mm,表面无或少见风化侵蚀现象.

## 2 分析测试方法

### 2.1 全岩地球化学测试

样品的主量、微量和稀土元素测试在中国地质

调查局西安地质调查中心完成,测试结果见附表1.主量元素除FeO、LOI采用标准湿化学法分析外,其他采用PW4400型X荧光光谱仪(XRF)测定,分析误差低于5%;微量元素和稀土元素采用X-SeriesII型电感耦合等离子质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定,检测限优于 $5 \times 10^{-9}$ ,相对标准偏差优于5%.

### 2.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

野外采集新鲜样品约10 kg,由河北省廊坊区域地质调查研究所岩矿实验室利用标准重矿物分离技术进行锆石分选.分选后在双目镜下挑选无包裹体、无裂纹、透明度好、粒度较大的单颗粒锆石进行测试.将待测试锆石使用无色透明的环氧树脂固定,待固结后进行抛磨至锆石内部充分暴露.随后在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心进行锆石透射光、反射光、阴极发光(CL)照相及LA-ICP-MS U-Pb同位素测定.根据反射光和阴极发光(CL)图像对比分析锆石内部结构特征,选取合适位置进行U-Pb同位素测定.采用德国Coherent公司生产的GeoLas Pro 193 nm准分子型激光剥蚀系统和美国Agilent公司生产的Agilent 7700x电感耦合等离子体质谱仪联机进行同位素测试.采用激光束斑

直径为  $32 \mu\text{m}$ , 激光剥蚀样品的深度为  $20\sim40 \mu\text{m}$ , He 作为剥蚀物质载气。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质, 元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, $^{29}\text{Si}$  作为内标, 测试过程中采用单点剥蚀方式。所得数据应用 Glitter (ver4.0, Mac Quarrie University) 程序进行计算和处理。所有样品均采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄, 年龄计算及谐和图采用 Isoplot (ver3.0) 程序 (Ludwig, 2003) 完成。单个数据点的误差均为  $1\sigma$ , 其加权平均值为 95% conf..

### 3 分析测试结果

#### 3.1 主量元素

石英闪长岩样品  $\text{SiO}_2$  含量为  $62.32\%\sim63.45\%$ , 属中性岩类,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为  $1.29\%\sim1.55\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为  $3.91\%\sim4.16\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  值为  $5.27\%\sim5.65\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值为  $0.32\sim0.39$ , 显示出明显的富钠特征;  $\text{CaO}$  含量为  $4.65\%\sim5.23\%$ ,  $\text{FeO}$  含量为  $3.98\%\sim4.48\%$ ,  $\text{FeO}^\text{T}$  为  $4.67\%\sim5.10\%$ ,  $\text{MgO}$  含量为  $2.00\%\sim2.17\%$ ;  $\text{Mg}^\#$  为  $42.79\sim44.06$ 。里特曼指数为  $1.43\sim1.65$ , 碱度率 (AR) 为  $1.61\sim1.69$ 。在 TAS 图解 (图 2a) 中, 样品点落入钙碱性系列, 闪长岩和花岗闪长岩交界范围内; 在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解 (图 2b) 中落入钙碱性系列岩石范围内;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为  $17.22\%\sim17.41\%$ , 岩石的铝饱和指数 A/CNK 为  $0.99\sim1.02$ , 属准铝质—弱过铝质岩石; 以上特征说明岩体为准铝质—弱过铝质钙碱性系列岩石。

二长花岗岩样品  $\text{SiO}_2$  含量较高,  $\text{SiO}_2$  含量为  $74.55\%\sim75.50\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为  $12.58\%\sim13.01\%$ ,

$\text{K}_2\text{O}$  含量为  $3.90\%\sim4.25\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为  $3.62\%\sim3.88\%$ ,  $\text{FeO}$  含量为  $1.65\%\sim1.82\%$ ,  $\text{CaO}$  含量为  $1.00\%\sim1.24\%$ ,  $\text{MgO}$  含量为  $0.23\%\sim0.27\%$ 。样品的  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  值为  $7.60\%\sim7.95\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值为  $1.03\sim1.15$ ,  $\text{FeO}^\text{T}$  为  $2.02\%\sim2.39\%$ ,  $\text{Mg}^\#$  为  $15.36\sim17.45$ , 里特曼指数介于  $1.78\sim2.00$ , 碱度率 (AR) 为  $3.45\sim3.79$ 。在 TAS 图解 (图 2a) 中, 样品点全部落入花岗岩范围内; 在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解 (图 2b) 中大部分样品点落在钙碱系列岩石范围内, 仅有一个在高钾钙碱性系列范围内; 岩石的铝饱和指数 A/CNK 为  $1.00\sim1.02$ , 属弱过铝质。二长花岗岩体为弱过铝质钙碱性系列岩石。

#### 3.2 微量和稀土元素

石英闪长岩样品的稀土总量较低, 介于  $61.48\times10^{-6}\sim84.52\times10^{-6}$ , 平均值为  $70.53\times10^{-6}$ 。LREE 值为  $48.40\times10^{-6}\sim70.24\times10^{-6}$ , HREE 值为  $11.92\times10^{-6}\sim14.87\times10^{-6}$ , LREE/HREE 值为  $3.40\sim4.92$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_\text{N}$  比值为  $2.63\sim4.57$ ,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_\text{N}$  比值为  $1.22\sim1.33$ , 表明石英闪长岩轻稀土富集, 轻重稀土元素中度分馏。稀土元素配分曲线呈现整体“右倾型”分布, 具有中等—轻微铕负异常 ( $\delta\text{Eu}=0.79\sim0.90$ , 平均值为 0.82) (图 3a)。原始地幔标准化的微量元素蛛网图 (图 3b) 上, 岩体富集  $\text{Rb}$ 、 $\text{K}$ 、 $\text{Hf}$ 、 $\text{Zr}$ 、 $\text{Tb}$ 、 $\text{Th}$  等元素, 不同程度地亏损高场强元素 ( $\text{P}$ 、 $\text{Ti}$ 、 $\text{Nd}$ 、 $\text{Ta}$ ) 和  $\text{Ba}$ 、 $\text{Y}$  等元素。

二长花岗岩样品的稀土总量较高, 介于  $127.91\times10^{-6}\sim147.77\times10^{-6}$ , 平均值为  $136.77\times10^{-6}$ 。LREE 为  $108.79\times10^{-6}\sim126.60\times10^{-6}$ , HREE 为  $17.85\times10^{-6}\sim21.17\times10^{-6}$ , LREE/HREE 值为  $5.69\sim6.79$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_\text{N}$  比值为  $5.12\sim6.58$ ,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_\text{N}$  比值为  $1.09\sim1.26$ , 表明岩体轻稀

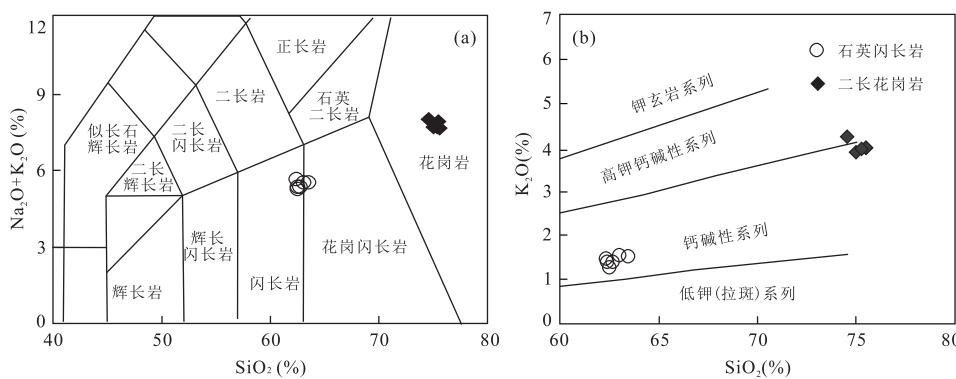


图 2 东昆仑阿确墩地区岩体主量元素判别图解

Fig.2 Major element diagrams of intrusions in Aqedun area in the East Kunlun orogen

a.据 Middlemost(1994) 清绘; b.岩石类型边界引自 Rickwood(1989)

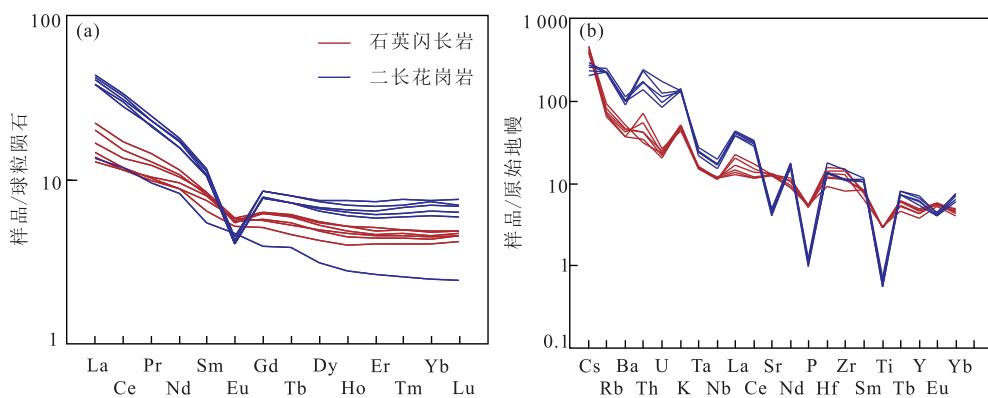


图 3 东昆仑阿确墩地区岩体REE球粒陨石标准化配分型式(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.3 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element pattern (b) of intrusions in Aque-dun area in the East Kunlun orogen

球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough(1989)

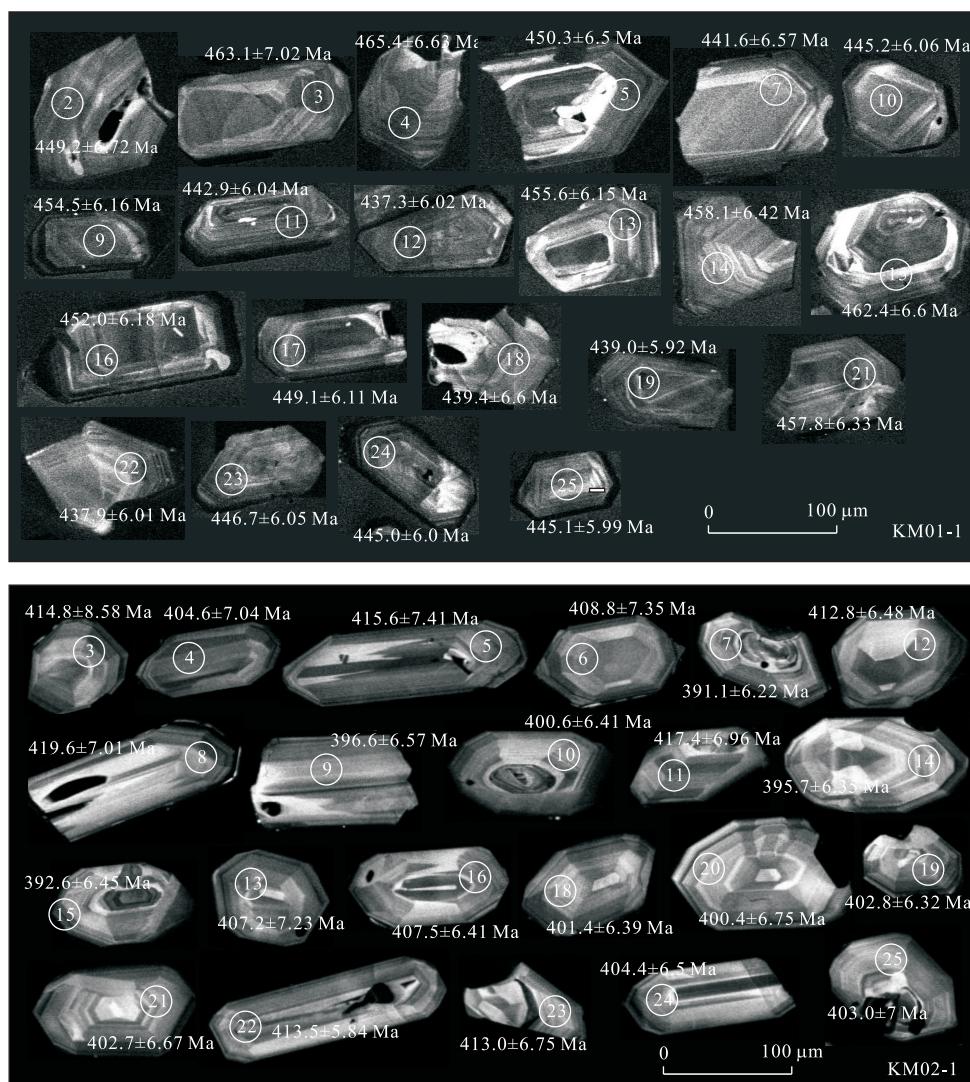


图 4 东昆仑阿确墩地区岩体锆石 CL 图像

Fig.4 CL images of zircons of intrusions in Aque-dun area in the East Kunlun orogen

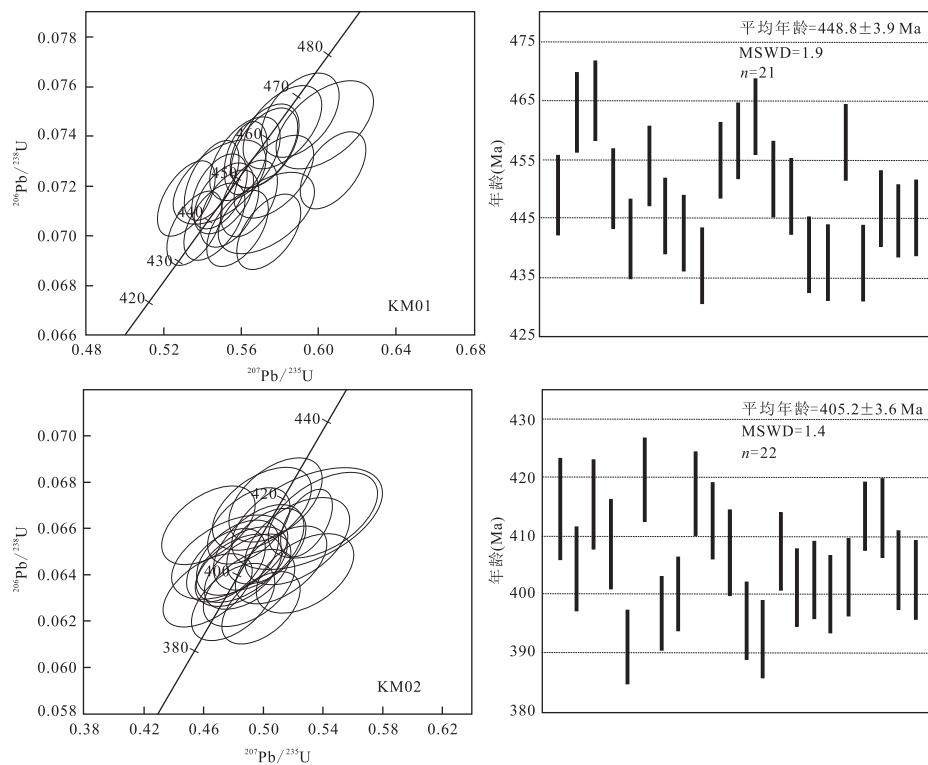


图 5 东昆仑阿确墩地区岩体 LA-ICP-MS 锯石 U-Pb 年龄谐和图和表面加权平均年龄图

Fig.5 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams and weighted average ages of intrusions in Aqedun area in the East Kunlun orogen

土富集,轻重稀土分异程度极为明显.稀土元素配分曲线呈现出整体向右陡倾的分布模式,具明显铕负异常( $\delta\text{Eu}=0.42\sim0.45$ ,平均值为0.44)(图3a).原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图3b)表现出岩体富集大离子亲石元素(Rb、K、La、Ce、Th、Tb等),亏损高场强元素(P、Ti、Nd、Ta)和Ba、Sr、U等元素.

### 3.3 LA-ICP-MS 锯石 U-Pb 定年

石英闪长岩和二长花岗岩中锯石颗粒均结晶较好,晶面光滑,大多为半透明—透明的柱状晶体,呈浅褐色—淡黄色—无色,长宽比为2:1~3:1,粒径介于100~200 μm.石英闪长岩锯石的Th/U含量分别为 $60,23 \times 10^{-6} \sim 461.11 \times 10^{-6}$ 和 $108.85 \times 10^{-6} \sim 651.34 \times 10^{-6}$ ,Th/U比值为1.40~3.71.二长花岗岩锯石的Th/U含量分别为 $40.33 \times 10^{-6} \sim 347.28 \times 10^{-6}$ 和 $98.69 \times 10^{-6} \sim 370.75 \times 10^{-6}$ (附表2),Th/U比值为1.07~2.45.两者的Th/U比值均高于变质锯石的Th/U比值(一般小于0.1),与岩浆锯石接近.阴极发光(CL)图像(图4)显示,两种岩石锯石内部均显示典型岩浆锯石生长韵律环带或明暗相间的条带结构,表明其锯石为岩浆成因.

两种岩石LA-ICP-MS 锯石 U-Pb 同位素分析结果见附表2,年龄谐和图和表面加权平均年龄图

见图5.石英闪长岩25个锯石分析点中21个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄比较集中,均落在谐和线上及其附近,加权平均年龄为 $448.8 \pm 3.9$  Ma(95% conf., MSWD=1.90),表明其岩浆锯石结晶时代为晚奥陶世.本文对二长花岗岩中25个锯石点进行分析,其中22个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在谐和线附近形成了一个聚集区,其加权平均年龄为 $405.2 \pm 3.6$  Ma(95% conf., MSWD=1.40),代表二长花岗岩的形成年龄,属早泥盆世.

## 4 讨论

### 4.1 岩石类型和成因分析

本文中石英闪长岩和二长花岗岩均为准铝质—弱过铝质岩石(ACNK<1.1),CIPW 标准矿物计算结果中刚玉分子含量分别为0.08%~0.72%和0.05%~0.26%,均小于1%,与S型花岗岩为强过铝质、刚玉分子含量>1%的典型特征(Chappell and White, 2001)有所不同.在 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解(图6b)中,石英闪长岩样品落入I型花岗岩区域,二长花岗岩样品落入I型与A型花岗岩交界处.研究表

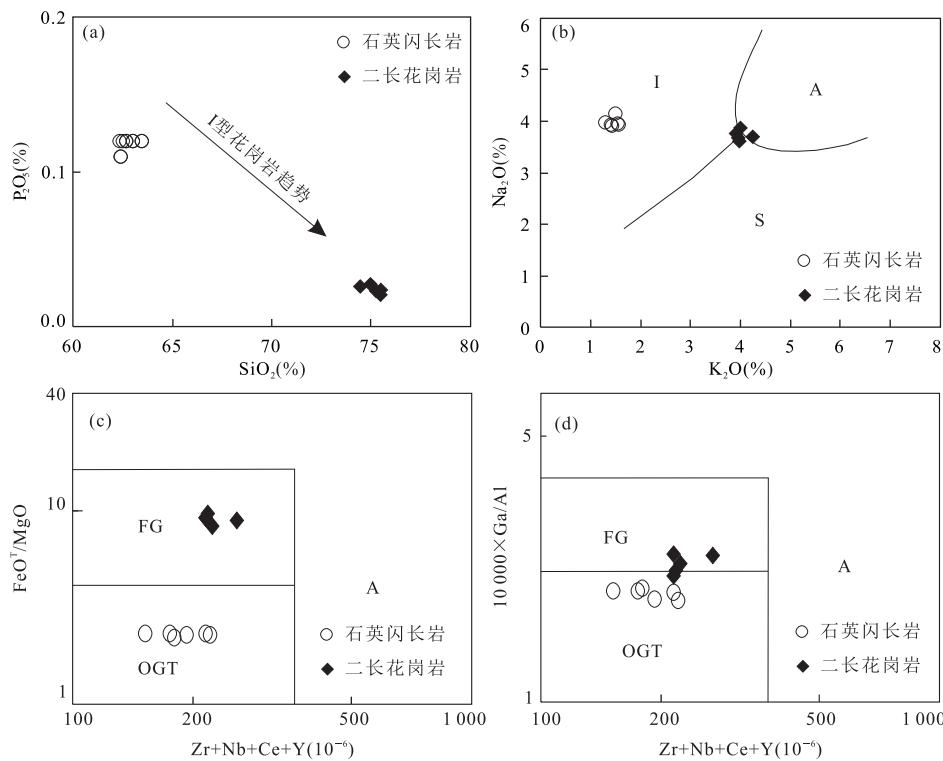


图 6 东昆仑阿确墩地区岩体地球化学图解

Fig.6 Diagrams of intrusions in Aquedun area in the East Kunlun orogen

FG.分异的 M,I,S 型花岗岩; OGT.未分异的 M,I,S 型花岗岩

明,高分异的 I、S 型花岗岩通常会表现出与 A 型花岗岩相似的化学特征(King *et al.*, 1997).两种岩石的  $10^4 \times Ga/Al$  值分别为 1.84~1.98 和 2.14~2.43, 平均值为 1.92 和 2.30, Zr 的含量分别为  $92 \times 10^{-6}$ ~ $172 \times 10^{-6}$  和  $123 \times 10^{-6}$ ~ $164 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $136.5 \times 10^{-6}$  和  $132.8 \times 10^{-6}$ , 全部低于 A 型花岗岩的下限值(2.6 和  $350 \times 10^{-6}$ ) (Whalen *et al.*, 1987), 排除了它们属于 A 型花岗岩的可能. 在  $(K_2O+Na_2O)/CaO-Zr+Nb+Ce+Y$  (图略)、 $FeO^T/MgO-Zr+Nb+Ce+Y$  (图 6c)、 $10^4 \times Ga/Al-Zr+Nb+Ce+Y$  图解(图 6d) 中石英闪长岩样品落入未分异花岗岩类范围内, 二长花岗岩样品则基本落入分异的花岗岩区域中. 考虑到二长花岗岩的固结指数为 2.29~2.60, 分异指数为 89.46~90.87, 其明显为高分异花岗岩.I 型和 S 型花岗岩的很多分类指标在高分异的花岗岩判别中失效, 但  $P_2O_5$  是鉴别两类花岗岩的较为可靠的标志(吴福元等, 2007). 实验研究表明, 强过铝质岩浆中通常具较高的  $P_2O_5$  含量, 且在岩浆分异过程中随  $SiO_2$  的增加而升高; 准铝质到弱过铝质岩浆中  $P_2O_5$  含量变化趋势与之相反. 本文中两类岩石的  $P_2O_5$  含量都很低, 分别为 0.11%~0.12% 和 0.02%~0.03%, 并且

与  $SiO_2$  含量呈负相关关系, 与 I 型花岗岩变化趋势类似(图 6a). 综合分析认为石英闪长岩具有 I 型花岗岩特征, 二长花岗岩为高分异 I 型花岗岩.

#### 4.2 熔融条件和岩石成因

对花岗质岩浆而言, 岩浆早期结晶的温度可以近似代表岩浆形成时的温度. 锯石是花岗质岩浆中较早结晶的矿物之一, 除温度外很少受其他因素影响, 具有极强的稳定性, 因此可通过计算锯石饱和温度来近似得到岩浆起源时的温度(吴福元等, 2007). 通过锯石饱和温度计算公式(Miller *et al.*, 2003)得出石英闪长岩的锯石饱和温度为 726~776 °C, 平均值为 755 °C; 二长花岗岩的锯石饱和温度为 764~789 °C, 平均值为 771 °C, 属低温花岗岩. 张旗等(2006)根据中酸性岩浆岩中  $Sr (400 \times 10^{-6})$  和  $Yb (2 \times 10^{-6})$  的含量将花岗岩类划分为 5 种类型, 认为其与岩浆形成时的压力有密切关系. 按此分类, 石英闪长岩属低 Sr 高 Yb 型, 形成于低压环境, 可能属于较薄或正常厚度地壳, 残留相为角闪石(斜长石+角闪石+辉石); 二长花岗岩属极低 Sr 高 Yb 型, 可能代表了非常低压下的产物(张旗等, 2010). 根据岩石学资料, 岩浆源区中残留斜长石时表明岩浆起源的压力较低(<10 kPa 或者 30 km)(吴福元等,

2007).当石榴子石为主要残留相时,熔体表现为 HREE 的强烈亏损和低 Y( $<15 \times 10^{-6}$ )和 Yb( $<1.9 \times 10^{-6}$ )、高 La/Yb( $>20$ )等特征。本文中样品分别具有高的 Y( $17.2 \times 10^{-6} \sim 22.2 \times 10^{-6}$  和  $27.1 \times 10^{-6} \sim 32.3 \times 10^{-6}$ )和 Yb( $2.00 \times 10^{-6} \sim 2.42 \times 10^{-6}$  和  $2.96 \times 10^{-6} \sim 3.71 \times 10^{-6}$ )值、低 La/Yb(2.63 ~ 4.57 和 5.12 ~ 6.58)值以及未分异的 HREE 形态,源区均无石榴子石残留,表明源区较浅,压力低。

研究表明,岩石中 Nb/Ta 值可以指示源区特征和演化过程,本文中样品比值分别为 12.73 ~ 13.69 和 11.89 ~ 12.52,明显低于上地幔平均值(17.5),略高于或接近大陆地壳的比值(12)(Sun and McDonough, 1989)。Nd/Th 值分别为 2.43 ~ 4.54 和 1.02 ~ 1.84,略低于壳源岩石( $\sim 3$ ),远低于幔源岩石( $>15$ )(Bea et al., 2001)。在 Nb/Ta-Nb 图解中(图 7),二长花岗岩样品落入上地壳范围,石英闪长岩样品则落入上地壳附近范围,有所偏离。实验岩石学认为 Mg<sup>#</sup> 值能有效判断熔体中是否存在地幔物质,无论熔融程度如何,玄武质下地壳部分熔融形成的岩石 Mg<sup>#</sup> 较低( $<40$ ),而 Mg<sup>#</sup>  $>40$  的岩石有可能与地幔物质的加入有关(Rapp and Watson, 1995)。本文中石英闪长岩的 Mg<sup>#</sup> 值为 42.79 ~ 44.06,平均值为 43.30,略大于 40,二长花岗岩的 Mg<sup>#</sup> 值为 15.36 ~ 17.45,平均值为 16.34,远小于 40。结合野外石英闪长岩中发现暗色矿物包体的现象,认为在其成岩过程中有地幔物质的加入,可能与幔源岩浆的底侵有关。高分异 I 型花岗岩可以由幔源岩浆底侵或侵入的地壳部分熔融形成(Li et al., 2007),也可以由幔源玄武质岩浆和壳源长英质岩浆混合,随后发生强烈的结晶分异作用产生(邱检生等, 2008)。对本文二长花岗岩而言并未发现幔源岩浆的影响,因此其成因更有可能是前者。

二长花岗岩中 Eu 的强烈亏损指示源区部分熔融过程中发生了斜长石和钾长石的分离结晶,而 Sr、Ba 的亏损也进一步支持这种作用的存在(图 8);样品中 P 的强烈亏损应是磷灰石的分离结晶导致;Nb、Ta 和 Ti 的亏损则可能与含钛矿物(如钛铁矿、榍石等)的分离结晶有关(Raith, 1995)。相对而言,石英闪长岩具有中等程度 Eu 负异常,表明其斜长石分离结晶作用并不明显,同样其磷灰石、含钛矿物的分离结晶作用也相对较弱,Ba-Sr 图解(图 8)显示其与钾长石和黑云母的分离结晶作用相关。CIPW 标准矿物计算结果(附表 1)也证实了这一点。

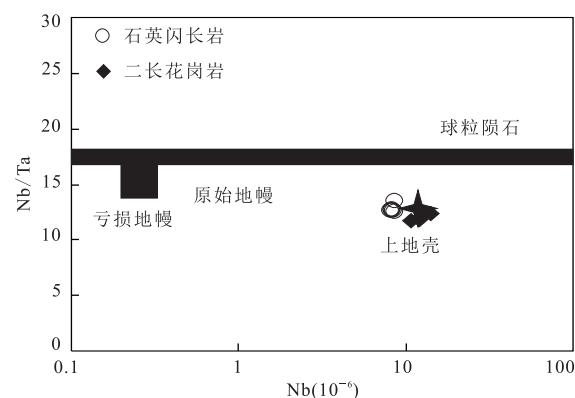


图 7 东昆仑阿确墩地区岩体 Nb-Nb/Ta 图解

Fig.7 Nb - Nb/Ta diagram of intrusions in Aqedun area in the East Kunlun orogen

据 Barth et al.(2000)

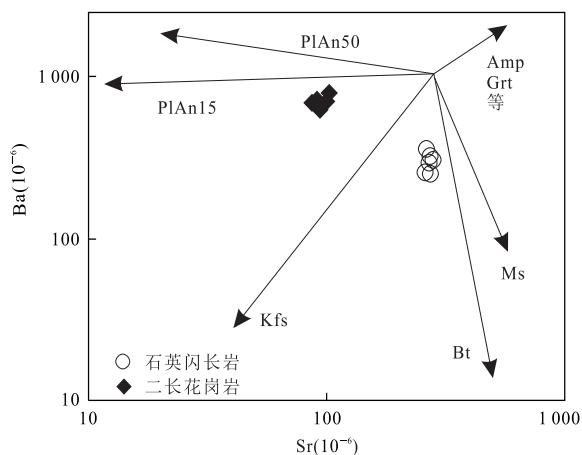


图 8 东昆仑阿确墩地区岩体 Sr-Ba 图解

Fig.8 Sr-Ba diagram of intrusions in Aqedun area in the East Kunlun orogen

据 Li et al.(2007); PlAn50, 斜长石(An=50); PlAn15, 斜长石(An=15); Kfs, 钾长石; Amp, 角闪石; Grt, 石榴石; Ms, 白云母; Bt, 黑云母

综上分析,石英闪长岩可能是在低温、低压条件下,处于俯冲-碰撞构造背景下的幔源岩浆底侵地壳物质发生部分熔融,同时混合少量幔源物质形成的;二长花岗岩可能与低温、极低压条件下,幔源岩浆底侵提供大量热量,诱发上地壳物质部分熔融有关,期间经历了强烈的结晶分离作用。

### 4.3 形成环境及构造意义

关于东昆仑早古生代构造-岩浆活动,前人已取得大量研究成果。莫宣学等(2007)将早古生代东昆仑造山带与北祁连造山带进行对比,认为其在加里东构造旋回经历了完整的原特提斯洋洋壳形成及扩张、俯冲消减、碰撞-后碰撞造山和造山后崩塌一

隆升的演化过程。

东昆仑地区原特提斯洋洋壳扩张最早的记录为苦海—阿尼玛卿地区洋岛型辉长岩( $555 \pm 9$  Ma)(李王晔等,2007),以及阿尼玛卿玛积雪山洋中脊型辉长岩( $535 \pm 10$  Ma)(Li *et al.*,2007)、阿尼玛卿布青山地区可可尔塔 MORB 型蛇绿岩( $516.4 \pm 6.3$  Ma)(刘战庆等,2011a,2011b)等,集中在前寒武或早寒武世。

祁晓鹏等(2016)发现东昆中长石山蛇绿岩中辉长岩( $537 \pm 3.5$  Ma)具有 E-MORB 和 IAB 的双重特征,形成于弧后盆地,表明在早寒武世原特提斯洋洋壳已经开始向北俯冲。东昆仑可可沙地区辉长岩( $509.4 \pm 6.8$  Ma)(冯建赞等,2010)和中酸性岩浆杂岩体( $515.2 \pm 4.4$  Ma)(张亚峰等,2010)也可能是对俯冲事件的响应。德尔尼岛弧型闪长岩( $493 \pm 6$  Ma),指示了阿尼玛卿地区洋壳的俯冲消减(李王晔等,2007)。布青山构造混杂带中岛弧型中酸性岩石( $441 \sim 438$  Ma)(刘战庆等,2011a,2011b;李瑞保等,2014)、东昆南马尔争地区早奥陶世花岗岩(任二

峰等,2012)、东昆中蛇绿构造混杂岩带中镁铁质岩石( $438 \pm 2$  Ma)(刘彬等,2013)和花岗岩( $436.8 \sim 433.7$  Ma)的发现表明东昆仑造山带在早志留世仍处于洋洋壳俯冲消减阶段。在祁漫塔格地区,崔美慧等(2011)报道了鸭子泉中基性火山岩( $480 \pm 9$  Ma)具有岛弧特征。高晓峰等(2010)测得巴什尔希岩体 A 型花岗岩形成时代为  $458 \pm 9$  Ma,认为是东昆仑地区局部弧后盆地拉张的产物。本文中石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄为  $448.8 \pm 3.9$  Ma,为晚奥陶世。地球化学特征表明,石英闪长岩具中等含量的硅、高钙、高镁,富集 Rb、K、Th 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素,具中等轻重稀土分馏,中等—轻微铕负异常的稀土配分模式,总体显示出与俯冲消减作用有关的岛弧岩浆岩特征(Pearce *et al.*,1984; Sun and McDonough,1989)。在 Rb—Y+Nb 构造判别图解(图 9a)中,样品全部落入火山弧区域,反映出火山弧花岗岩的亲缘性;在 Rb/10—Hf-Ta×3 图解(图 9b)中,样品落入火山弧花岗岩类区域。在 R1—R2 构造判别图解(图 9c)中,样品落

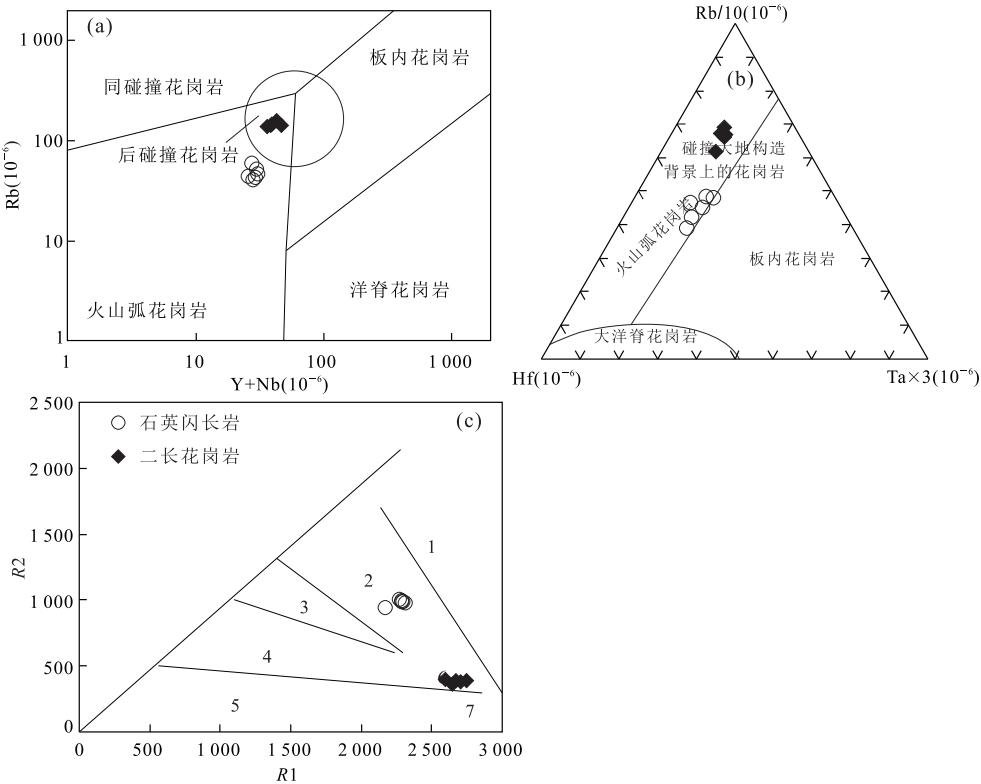


图 9 东昆仑阿确墩地区岩体构造环境判别图

Fig.9 Tectonic setting discrimination diagrams of intrusions in Aqedun area in the East Kunlun orogen

1.地幔斜长岩幔源花岗岩;2.钙碱性更长花岗岩—板块碰撞前消减地区花岗岩;3.高钾钙碱性花岗岩—板块碰撞后隆起区花岗岩;4.造山晚期—晚造山期花岗岩(二长岩);5.非造山期 A 型花岗岩;6.同碰撞花岗岩(S型);7.造山后期 A 型花岗岩。a、c 据 Pearce *et al.*(1984);b 据 Harris *et al.*(1986)

入板块碰撞前消减地区花岗岩类区域内。结合区域构造演化认为祁漫塔格地区在晚奥陶世处于洋壳俯冲消减环境下。

洋壳俯冲结束后,东昆仑地区进入碰撞造山阶段。温泉地区陆壳型榴辉岩( $428 \pm 2$  Ma)(孟繁聪等,2015)、夏日哈木—苏海图榴辉岩( $411.1 \pm 1.9$  Ma)(祁生胜等,2014)、东昆北五龙沟地区花岗岩( $417 \sim 419$  Ma)(陆露等,2013),都被认为是洋盆闭合后的碰撞造山作用的产物。关于东昆仑地区碰撞造山何时结束,原特提斯洋完全闭合的时限,莫宣学等(2007)以吐木勒克蓝闪石片岩时代为依据,认为在晚奥陶世洋盆闭合。陈能松等(2007)根据区域上变质作用认为原特提斯洋完全闭合可能在志留纪末。王国灿等(2003)研究东昆中带加里东晚期逆冲型韧性剪切变形,得到韧性剪切变形年龄约为 426 Ma,认为这代表了加里东晚期沿东昆中构造带发生的碰撞缝合事件。施彬等(2016)认为黑海地区过铝质花岗岩(420.5 Ma)标志着加里东构造旋回的结束。格尔木哈西牙地区约在 411 Ma(杨柳等,2014)、金水口地区约在 406 Ma(刘彬等,2012)进入后碰撞的伸展阶段。田广阔等(2016)测定大干沟北部花岗岩体形成时代为  $392 \pm 2$  Ma,具有造山后伸展阶段特征。在祁漫塔格地区,东部那棱郭勒河地区在 420 Ma 左右已经从同碰撞挤压造山向后碰撞区域拉伸环境转换(郝娜娜等,2014)。谌宏伟等(2006)得到祁漫塔格喀雅克登塔格杂岩体年龄为  $403.3 \pm 7.2$  Ma,具造山后特征,认为祁漫塔格地区在早泥盆世已经处于造山后伸展阶段。本文中二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为  $405.2 \pm 3.6$  Ma,其形成时代为早泥盆世。岩体富集 Rb、Y、Yb 等微量元素,这与同碰撞花岗岩的典型特征不符(Pearce *et al.*, 1984)。样品在微量元素 Rb—Y+Nb 构造判别图解(图 9a)中全部落入后碰撞花岗岩区域,在 Rb/10—Hf—Ta  $\times 3$  图解(图 9b)中落入碰撞大地构造背景的花岗岩区域,在 R1—R2 构造判别图解(图 9c)中落入同碰撞花岗岩范围。研究表明,同碰撞阶段主要发育 S 型花岗岩,而后碰撞阶段的岩石类型多样,I 型、S 型和 A 型花岗岩均有可能产出。前文所述的二长花岗岩极低 Sr 高 Yb 型的特征也暗示其可能与地壳拉伸减薄有关,而不太可能产生于同碰撞阶段地壳加厚的背景下。因此笔者认为二长花岗岩应形成于后碰撞构造背景,即祁漫塔格地区在早泥盆世之前碰撞造山可能已经结束,洋盆完全闭合。东昆仑地区早中泥盆世地层的缺失,晚泥盆世陆相磨拉石的广泛发育及其

在区域上与下伏地层的造山角度不整合,代表着东昆仑地区早古生代加里东构造旋回的结束。

## 5 结论

(1) 祁漫塔格阿确墩地区石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $448.8 \pm 3.9$  Ma, 为晚奥陶世; 二长花岗岩锆石 U-Pb 加权平均年龄为  $405.2 \pm 3.6$  Ma, 为早泥盆世。

(2) 石英闪长岩属准铝质—弱过铝质钙碱性系列岩石,具有 I 型花岗岩类特征,可能是幔源岩浆底侵地壳物质发生部分熔融,混合少量幔源物质形成的。二长花岗岩属弱过铝质钙碱性系列,为高分异 I 型花岗岩,显示壳源特征,应与幔源岩浆底侵诱发上地壳物质部分熔融有关,经历了强烈的结晶分离作用。

(3) 石英闪长岩具俯冲消减作用有关的岛弧岩浆岩特征,二长花岗岩应形成于后碰撞构造背景下,结合区域构造演化综合分析,笔者推测祁漫塔格地区在晚奥陶世已经处于洋壳俯冲环境中,在早泥盆世之前碰撞造山结束,洋盆完全闭合。

附表 1、附表 2 见:<http://www.earth-science.net/WebPage/Article.aspx?id=4061>

## References

- 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)
- Bea, F., Arzamastsev, A., Montero, P., et al., 2001. Anomalous Alkaline Rocks of Soustov, Kola: Evidence of Mantle-Derived Metasomatic Fluids Affecting Crustal Materials. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140 (5): 554—566. <https://doi.org/10.1007/s004100000211>
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 2001. Two Contrasting Granite Types: 25 Years Later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48 (4): 489—499. <https://doi.org/10.1046/j.1440-0952.2001.00882.x>
- Chen, H. W., Luo, Z. H., Mo, X. X., et al., 2006. SHRIMP Ages of Kayakedengtage Complex in the East Kunlun Mountains and Their Geological Implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25 (1): 25—32 (in Chinese with English abstract).
- Chen, N. S., Wang, Q. Y., Chen, Q., et al., 2007. Components and Metamorphism of the Basements of the Qaidam and Oulongbuluke Micro-Continental Blocks, and a Tentative Interpretation of Paleocontinental Evolution in NW-

- Central China. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 43—55 (in Chinese with English abstract).
- Cui, M.H., Meng, F.C., Wu, X.K., 2011. Early Ordovician Island Arc of Qimantag Mountain, Eastern Kunlun: Evidences from Geochemistry, Sm-Nd Isotope and Geochronology of Intermediate-Basic Igneous Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3365—3379 (in Chinese with English abstract).
- Feng, J.Y., Pei, X.Z., Yu, S.L., et al., 2010. The Discovery of the Mafic-Ultramafic Melange in Kekesha Area of Dulan County, East Kunlun Region, and Its LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age. *Geology in China*, 37(1): 28—38 (in Chinese with English abstract).
- Gao, X.F., Xiao, P.X., Jia, Q.Z., 2011. Redetermination of the Tanjianshan Group: Geochronological and Geochemical Evidence of Basalts from the Margin of the Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 85(9): 1452—1463 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.1111/j.1747-2878.2011.02107.x>
- Gao, X.F., Xiao, P.X., Xie, C.R., et al., 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Geological Significance of Bashierxi Granite in the Eastern Kunlun Area, China. *Geological Bulletin of China*, 29(7): 1001—1008 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y.B., Li, W.Y., 2011. Petrogenesis of Granites Containing Tungsten and Tin Ores in the Baiganhu Deposit, Qimantage, NW China: Constraints from Petrology, Chronology and Geochemistry. *Geochimica*, 40(4): 324—336 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.19700/j.0379-1726.2011.04.002>
- Hao, N.N., Yuan, W.M., Zhang, A.K., et al., 2014. Late Silurian to Early Devonian Granitoids in the Qimantage Area, East Kunlun Mountains: LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages, Geochemical Features and Geological Setting. *Geological Review*, 60(1): 201—215 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2014.01.022>
- Harris, N.B.W., Pearce, J.A., Tindle, A.G., 1986. Geochemical Characteristics of Collision-Zone Magmatism. *Collision Tectonics*, 19(5): 67—81.
- King, P.L., White, A.J.R., Chappell, B.W., et al., 1997. Characterization and Origin of Aluminous A-Type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371—391. <https://doi.org/10.1093/petroj/38.3.371>
- Li, R.B., Pei, X.Z., Li, Z.C., et al., 2014. Age, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Yikehalaer Granodiorite in Buqingshan Tectonic Melange Belt, Southern Margin of East Kunlun. *Acta Geoscientifica Sinica*, 35(4): 434—444 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3975/cagsb.2014.04.05>
- Li, R.S., Ji, W.H., Zhao, Z.M., et al., 2007. Progress in the Study of the Early Paleozoic Kunlun Orogenic Belt. *Geological Bulletin of China*, 26(4): 373—382 (in Chinese with English abstract).
- Li, W.Y., Li, S.G., Guo, A.L., et al., 2007. Zircon SHRIMP U-Pb Age and Trace Element Geochemistry of Kuhai Gabbro and Deer Ni Diorite, Southern Tectonic Belt, Eastern Kunlun, Qinghai—Constraints on the South Boundary of Late Neoproterozoic-Early Ordovician Archipelagic Ocean. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 37(Suppl.1): 288—294 (in Chinese).
- Li, X.H., Li, Z.X., Li, W.X., et al., 2007. U-Pb Zircon, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on Age and Origin of Jurassic I- and A-Type Granites from Central Guangdong, SE China: A Major Igneous Event in Response to Foundering of a Subducted Flat-Slab? *Lithos*, 96(1—2): 186—204. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.09.018>
- Liu, B., Ma, C.Q., Jiang, H.A., et al., 2013. Early Paleozoic Tectonic Transition from Ocean Subduction to Collisional Orogeny in the Eastern Kunlun Region: Evidence from Huxiaoqin Mafic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2093—2106 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Ma, C.Q., Zhang, J.Y., et al., 2012. Petrogenesis of Early Devonian Intrusive Rocks in the East Part of Eastern Kunlun Orogen and Implication for Early Palaeozoic Orogenic Processes. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1785—1807 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G.Z., Zhang, Y.X., Xue, J.Q., et al., 2014. Zircon LA-ICPMS U-Pb Dating and Geochemistry of Basement Granites from North Kunlun Faults Zone, Western Qaidam Basin and Their Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1615—1627 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.Q., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2011a. Early Paleozoic Intermediate-Acid Magmatic Activity in Bairiqieta Area along the Buqingshan Tectonic Mélange Belt on the Southern Margin of East Kunlun: Constraints from Zircon U-Pb Dating and Geochemistry. *Geology in China*, 38(5): 1150—1167 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.Q., Pei, X.Z., Li, R.B., et al., 2011b. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology of the Two Suites of Ophiolites at the Buqingshan Area of the Anyemagen Orogenic Belt in the Southern Margin of East Kunlun and Its Tectonic Implication. *Acta Geologica Sinica*, 85(2):

- 185—194 (in Chinese with English abstract).
- Lu, L., Zhang, Y.L., Wu, Z.H., et al., 2013. Zircon U-Pb Dating of Early Paleozoic Granites from the East Kunlun Mountains and Its Geological Significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 34 (4): 447—454 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Meng, F.C., Cui, M. H., Jia, L. H., et al., 2015. Paleozoic Continental Collision of the East Kunlun Orogen: Evidence from Protoliths of the Eclogites. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (12): 3581—3594 (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)
- Miller, C. F., McDowell, S. M., Mapes, R. W., 2003. Hot and Cold Granites? Implications of Zircon Saturation Temperatures and Preservation of Inheritance. *Geology*, 31 (6): 529. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0529:hacgio>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0529:hacgio>2.0.co;2)
- Mo, X.X., Luo, Z. H., Deng, J.F., et al., 2007. Granitoids and Crustal Growth in the East-Kunlun Orogenic Belt. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403—414 (in Chinese with English abstract).
- 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>
- Qi, S.S., Song, S.G., Shi, L.C., et al., 2014. Discovery and Its Geological Significance of Early Paleozoic Eclogite in Xiarihamu-Suhaitu Area, Western Part of the East Kunlun. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (11): 3345—3356 (in Chinese with English abstract).
- Qi, X. P., Yang, J., Fan, X. G., et al., 2016. Age, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Changshishan Ophiolite in Central East Kunlun Tectonic Mélange Belt along the East Section of East Kunlun Mountains. *Geology in China*, 43 (3): 797—816 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.12029/gc20160308>
- Qiu, J.S., Xiao, E., Hu, J., et al., 2008. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Coastal Area of Northeastern Fujian Province: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry, and Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (11): 2468—2484 (in Chinese with English abstract).
- Raith, J. G., 1995. Petrogenesis of the Concordia Granite Gneiss and Its Relation to W-Mo Mineralization in Western Namaqualand, South Africa. *Precambrian Research*, 70 (3—4): 303—335. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(94\)00049-w](https://doi.org/10.1016/0301-9268(94)00049-w)
- 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>
- Ren, E.F., Zhang, G. L., Qiu, W., et al., 2012. Characteristics of Geochemistry and Tectonic Significance of Caledonian Granite in the Maerzheng Region in the South Area of East Kunlun. *Geoscience*, 26 (1): 36—44 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood, P.C., 1989. Boundary Lines within Petrologic Diagrams Which Use Oxides of Major and Minor Elements. *Lithos*, 22 (4): 247—263. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(89\)90028-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(89)90028-5)
- Shi, B., Zhu, Y.H., Zhong, Z.Q., et al., 2016. Petrological, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Caledonian Peraluminous Granites in Hehai Region, Eastern Kunlun. *Earth Science*, 41 (1): 35—54 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.003>
- 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. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tian, G.K., Meng, F.C., Fan, Y.Z., et al., 2016. The Characteristics of Early Paleozoic Post-Orogenic Granite in the East Kunlun Orogen: A Case Study of Dagangou Granite. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35 (3): 371—390 (in Chinese with English abstract).
- Wang, B.Z., Luo, Z.H., Pan, T., et al., 2012. Petrotectonic Assemblages and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Early Paleozoic Volcanic Rocks in Qimantag Area, Tibetan Plateau. *Geological Bulletin of China*, 31 (6): 860—874 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G.C., Chen, N.S., Zhu, Y. H., et al., 2003. Geochronology Evidence and Implication of Late Caledonian Ductile Shear Deformation of Thrusting-Type in Kunzhong Orogenic Belt, East Kunlun. *Acta Geologica Sinica*, 77 (3): 432 (in Chinese).
- Whalen, J.B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95 (4): 407—419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Wu, F.Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Discussions on

- the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6):1217—1238(in Chinese with English abstract).
- Yang, L., Zhou, H. W., Zhu, Y. H., et al., 2014. Geochemical Characteristics and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages of Intermediate to Mafic Dyke Swarms in Haxiya Area, Golmud, Qinghai Province. *Geological Bulletin of China*, 33(6):804—819 (in Chinese with English abstract).
- Yu, M., Feng, C. Y., He, S. Y., et al., 2017. The Qiman Tagh Orogen as a Window to the Crustal Evolution of the Northern Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 91(4):703—723 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Zhang, Y. F., Pei, X. Z., Ding, S. P., et al., 2010. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Quartz Diorite at the Kekesha Area of Dulan County, Eastern Section of the East Kunlun Orogenic Belt, China and Its Significance. *Geological Bulletin of China*, 29(1):79—85 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Z., Chen, Y. J., Deng, X. H., et al., 2016. Muscovite  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating of the Baiganhu W-Sn Orefield, Qimantag, East Kunlun Mountains, and Its Geological Implications. *Geology in China*, 43(4):1341—1352 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.12029/gc20160419>
- Zhou, J. H., Feng, C. Y., Shen, D. L., et al., 2015. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Implications of Granodiorite in the Northwest of Weibao Deposit, Xinjiang Qimantage. *Acta Geologica Sinica*, 89(3):473—486 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 谌宏伟,罗照华,莫宣学,等,2006.东昆仑喀雅克登塔格杂岩体的 SHRIMP 年龄及其地质意义.岩石矿物学杂志,25(1):25—32.
- 陈能松,王勤燕,陈强,等,2007.柴达木和欧龙布鲁克陆块基底的组成和变质作用及中国中西部古大陆演化关系初探.地学前缘,14(1):43—55.
- 崔美慧,孟繁聪,吴祥珂,2011.东昆仑祁漫塔格早奥陶世岛弧:中基性火成岩地球化学、Sm-Nd 同位素及年代学证据.岩石学报,27(11):3365—3379.
- 冯建赟,裴先治,于书伦,等,2010.东昆仑都兰可可沙地区镁铁—超镁铁质杂岩的发现及其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄.中国地质,37(1):28—38.
- 高晓峰,校培喜,贾群子,2011.滩间山群的重新厘定——来自柴达木盆地周缘玄武岩年代学和地球化学证据.地质学报,85(9):1452—1463.
- 高晓峰,校培喜,谢从瑞,等,2010.东昆仑阿牙克库木湖北巴什尔希花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义.地质通报,29(7):1001—1008.
- 高永宝,李文渊,2011.东昆仑造山带祁漫塔格地区白干湖含钨锡矿花岗岩:岩石学、年代学、地球化学及岩石成因.地球化学,40(4):324—336.
- 郝娜娜,袁万明,张爱奎,等,2014.东昆仑祁漫塔格晚志留世—早泥盆世花岗岩:年代学、地球化学及形成环境.地质论评,60(1):201—215.
- 李瑞保,裴先治,李佐臣,等,2014.东昆仑南缘布青山构造混杂带亿可哈拉尔花岗闪长岩年代学、地球化学特征及构造意义研究.地球学报,35(4):434—444.
- 李荣社,计文化,赵振明,等,2007.昆仑早古生代造山带研究进展.地质通报,26(4):373—382.
- 李王晔,李曙光,郭安林,等,2007.青海东昆南构造带苦海辉长岩和德尔尼闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及痕量元素地球化学——对“祁—柴—昆”晚新元古代—早奥陶世多岛洋南界的制约.中国科学(D辑:地球科学),37(增刊 1):288—294.
- 刘彬,马昌前,蒋红安,等,2013.东昆仑早古生代洋壳俯冲与碰撞造山作用的转换:来自胡晓钦镁铁质岩石的证据.岩石学报,29(6):2093—2106.
- 刘彬,马昌前,张金阳,等,2012.东昆仑造山带东段早泥盆世侵入岩的成因及其对早古生代造山作用的指示.岩石学报,28(6):1785—1807.
- 刘桂珍,张玉修,薛建勤,等,2014.柴达木盆地西部昆北断阶带基底花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义.岩石学报,30(6):1615—1627.
- 刘战庆,裴先治,李瑞保,等,2011a.东昆仑南缘布青山构造混杂岩带早古生代白日切特中酸性岩浆活动:来自锆石 U-Pb 测年及岩石地球化学证据.中国地质,38(5):1150—1167.
- 刘战庆,裴先治,李瑞保,等,2011b.东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义.地质学报,85(2):185—194.
- 陆露,张延林,吴珍汉,等,2013.东昆仑早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.地球学报,34(4):447—454.
- 孟繁聪,崔美慧,贾丽辉,等,2015.东昆仑造山带早古生代的大陆碰撞:来自榴辉岩原岩性质的证据.岩石学报,31(12):3581—3594.
- 莫宣学,罗照华,邓晋福,等,2007.东昆仑造山带花岗岩及地壳生长.高校地质学报,13(3):403—414.
- 祁生胜,宋述光,史连昌,等,2014.东昆仑西段夏日哈木—苏海图早古生代榴辉岩的发现及意义.岩石学报,30(11):

3345—3356.

祁晓鹏,杨杰,范显刚,等,2016.东昆仑东段东昆中构造混杂岩带长石山蛇绿岩年代学、地球化学特征及其构造意义.中国地质,43(3):797—816.

邱检生,肖娥,胡建,等,2008.福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约.岩石学报,24(11):2468—2484.

任二峰,张桂林,邱炜,等,2012.东昆南马尔争地区加里东期花岗岩岩石地球化学特征及构造意义.现代地质,26(1):36—44.

施彬,朱云海,钟增球,等,2016.东昆仑黑海地区加里东期过铝质花岗岩岩石学、地球化学特征及地质意义.地球科学,41(1):35—54.

田广阔,孟繁聪,范亚洲,等,2016.东昆仑早古生代造山后花岗岩的特征——以大干沟花岗岩为例.岩石矿物学杂志,35(3):371—390.

王秉璋,罗照华,潘彤,等,2012.青藏高原祁漫塔格地区早古生代火山岩岩石构造组合和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄.地质通报,31(6):860—874.

王国灿,陈能松,朱云海,等,2003.东昆仑东段昆中构造带晚加里东期逆冲型韧性剪切变形的年代学证据及其意

义.地质学报,77(3):432.

吴福元,李献华,杨进辉,等,2007.花岗岩成因研究的若干问题.岩石学报,23(6):1217—1238.

杨柳,周汉文,朱云海,等,2014.青海格尔木哈希牙地区中基性岩墙群地球化学特征与 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄.地质通报,33(6):804—819.

于森,丰成友,何书跃,等,2017.祁漫塔格造山带——青藏高原北部地壳演化窥探.地质学报,91(4):703—723.

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 分类及其他地质意义.岩石学报,22(9):2249—2269.

张亚峰,裴先治,丁仁平,等,2010.东昆仑都兰县可可沙地区加里东期石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义.地质通报,29(1):79—85.

郑震,陈衍景,邓小华,等,2016.东昆仑祁漫塔格地区白干湖钨锡矿田白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 定年及地质意义.中国地质,43(4):1341—1352.

周建厚,丰成友,沈灯亮,等,2015.新疆祁漫塔格维宝矿区西北部花岗闪长岩年代学、地球化学及其构造意义.地质学报,89(3):473—486.