第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)



引文格式：陈喜峰，张雪亭，吴华英. 东昆仑埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学特征及其地质意义[J]. 西北地质，2026，59(5)：24−39. DOI：10.12401/j.nwg.2025044

Citation：CHEN Xifeng, ZHANG Xueting, WU Huaying. Geochemical Characteristics and Zircon U-Pb Age of Medium-Fine Grained Granite of Aikengdelesite Cu-Mo deposit in East Kunlun and It's Geological Implications[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(5)：24−39. DOI：10.12401/j.nwg.2025044

东昆仑埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学特征及其地质意义

陈喜峰[1]，张雪亭[2]，吴华英[2]

（1. 中国地质调查局发展研究中心，北京　100037；2. 中国冶金地质总局矿产资源研究院，北京　101300）

摘　要：印支期是东昆仑造山带的重要构造演化和岩浆活动期，研究该时期的侵入岩对认识东昆仑造山带构造演化及其与成矿作用的关系具有重要意义。笔者基于对东昆仑南坡杂岩带的埃坑德勒斯特含铜–钼矿化中细粒花岗岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 年代学、岩浆源区和成岩构造环境的研究，为理解东昆仑造山带晚古生代—早中生代时期构造演化与成矿作用提供新的证据。结果表明，岩石具有富 SiO_2、Al_2O_3 和低 TiO_2、MgO、CaO 的特点，属准过铝质–过铝质钙碱性系列岩石。岩石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈右倾型，显示弱 Eu 负异常，富集 Rb、Ba、Th、U、K 等元素，亏损 Nb、Ta、Ti、Sr、P 等元素。锆石 U-Pb 年龄为（253.7±1.9）Ma，属晚二叠世晚期岩浆活动的产物，其形成于大陆边缘弧环境，并与下地壳物质发生部分熔融有关。

关键词：中细粒花岗岩；地球化学特征；锆石 U-Pb 年龄；构造环境；埃坑德勒斯特；东昆仑

中图分类号：P588.141；P588.145；P597.3　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1009-6248(2026)05-0024-16

Geochemical Characteristics and Zircon U-Pb Age of Medium-Fine Grained Granite of Aikengdelesite Cu-Mo deposit in East Kunlun and It's Geological Implications

CHEN Xifeng[1], ZHANG Xueting[2], WU Huaying[2]

（1. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China；2. Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101300, China）

Abstract：Indosinian is one of the important tectonic evolution and magmatic activity period of the East Kunlun orogenic belt，thus，the intrusive rocks of this period are critical to discuss the relationship between the tectonic evolution and the polymetallic mineralization of the East Kunlun orogenic belt. There is close relationship between the medium-fine grained granite and copper & molybdenum mineralization in Aikengdelesite Cu-Mo ore district from subduction-accretionary complex belt in southern slope of the East Kunlun orogenic belt. An

收稿日期：2023-12-01；**修回日期**：2024-04-07；**责任编辑**：吕鹏瑞

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD202609101804、DD20211404）联合资助。

作者简介：陈喜峰（1979−），男，正高级工程师，博士，从事矿物学、岩石学、矿床学研究。E−mail：chen6100117@126.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

comprehensive study of the geochemical characteristics, zircon U-Pb age, magma source and diagenetic tectonic environment were carried out for the medium-fine grained granite in Aikengdelesite Cu-Mo ore district, aiming to provide new evidence for the Late Paleozoic to Early Mesozoic tectonic evolution and polymetallic mineralization of the East Kunlun. The studied medium-fine grained granite is calc-alkaline series rock, with high SiO_2 (72.43% to 73.83%), high Al_2O_3 (13.10% to 13.60%) and weakly negative Eu anomaly, and is relatively enriched in LREE, Rb, Ba, Th, U and K, but relatively depleted in HREE, Nb, Ta, Ti, Sr and P. LA-ICP-MS zircon U-Pb analysis of the medium-fine grained granite yielded an Late Permian age of (253.7±1.9) Ma. The medium-fine grained granite was formed in a continental arc environment of active continental margin and related to the partial melting of lower crust.

Keywords: medium-fine grained granite; geochemical characteristics; zircon U-Pb dating; tectonic setting; Aikengdelesite; East Kunlun

东昆仑造山带是中国中央造山带的重要组成部分, 在漫长的地质演化中经历了多期、多旋回的洋陆转化和强烈的陆内造山等复杂的地质构造演化过程(任海东等, 2023; 熊万宇康等, 2023), 是一条多旋回复合造山带, 主要经历了太古宙古陆核形成、元古宙古陆裂解及大洋玄武岩高原形成、加里东期造山作用、晚华力西期—印支期造山作用以及随后的陆内活动阶段等多个地质构造演化阶段(莫宣学等, 2007; Dong et al., 2018; Pan et al., 2022;), 发生了多期强烈的岩浆活动, 金属矿产成矿条件优越, 是中国重要的多金属成矿带之一。近年来, 东昆仑造山带矿产勘查取得了重大进展, 特别是夏日哈木超大型镍矿床和一些斑岩型矿床(点)的发现(王秉璋等, 2014; 张照伟等, 2021), 表明了东昆仑造山带具有重新认识的必要性。

东昆仑造山带具有较好的斑岩型矿床成矿条件(罗照华等, 1999; 丰成友, 2012; Wang et al., 2018; Xu et al., 2023)。近年来在该造山带发现了多处斑岩型矿床(点), 如分布于祁漫塔格–都兰构造带的乌兰乌珠尔铜锡矿床(佘宏全等, 2007)、鸭子沟钼矿化点和赛钦南铜钼矿化点(李世金等, 2008a), 东昆北构造带的卡尔却卡铜矿床、托克妥铜金矿点、清水河东沟钼铅矿点和鄂拉山构造带的赛什塘铜矿床等矿床(点)(李世金等, 2008b; 李东生等, 2010; 刘建楠等, 2012), 显示出东昆仑造山带具较好的斑岩型矿床成矿潜力。但上述斑岩型矿床(点)大多分布于祁漫塔格–都兰构造带、东昆北构造带和鄂拉山构造带内, 而在东昆南构造带发现的斑岩型矿床(点)较少。

埃坑德勒斯特铜钼矿床为近年来在东昆南构造带新发现的斑岩型铜钼矿 , 目前正在开展勘查工作, 基础地质研究薄弱, 对区内岩浆活动的时空格架、岩浆岩组合、岩浆作用序列及与矿化的关系等问题有待于进一步厘定。该矿区的铜、钼矿化与中细粒花岗岩和花岗斑岩关系密切(刘建楠等, 2012; 张雪亭等, 2017)。前人已对花岗斑岩的地球化学特征和锆石 U-Pb 年代学等做了较详细的研究, 铜、钼矿化中细粒花岗岩是该矿区含矿斑状岩浆岩组合的重要岩浆岩类型之一, 但其岩石地球化学特征、成岩时代和产出构造环境等未进行研究。笔者对该矿区含铜、钼中细粒花岗岩进行岩石地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究, 厘定其成岩时代, 探讨其成因和产出的地质构造环境, 为认识埃坑德勒斯特铜钼矿床的成因提供新的依据, 并为理解东昆仑造山带晚古生代—早中生代地质构造演化历史及与 Cu、Mo 成矿作用提供新的证据。本研究对全面认识东昆仑造山带晚古生代—早中生代地质构造演化–岩浆活动及其成矿作用具有重要意义, 为东昆仑造山带的进一步找矿部署提供新的启示。

1　地质背景

埃坑德勒斯特铜钼矿床位于青海省都兰县诺木洪镇南八滩以南的埃坑德勒斯特沟的中游一带, 大地构造位置位于东昆仑造山带的东昆仑南坡杂岩带的中生代弧后前陆盆地内(图 1a; 张雪亭等, 2017; 杨延乾等, 2018; Li et al., 2022)。

东昆仑造山带的区域构造格架具有东西分区、南北分带的特征, 大致以格尔木–乌图美仁一带为界, 将东昆仑造山带划分为东昆仑东段(都兰地区)和东昆仑西段(祁漫塔格地区)东、西两个分区(莫宣学等,

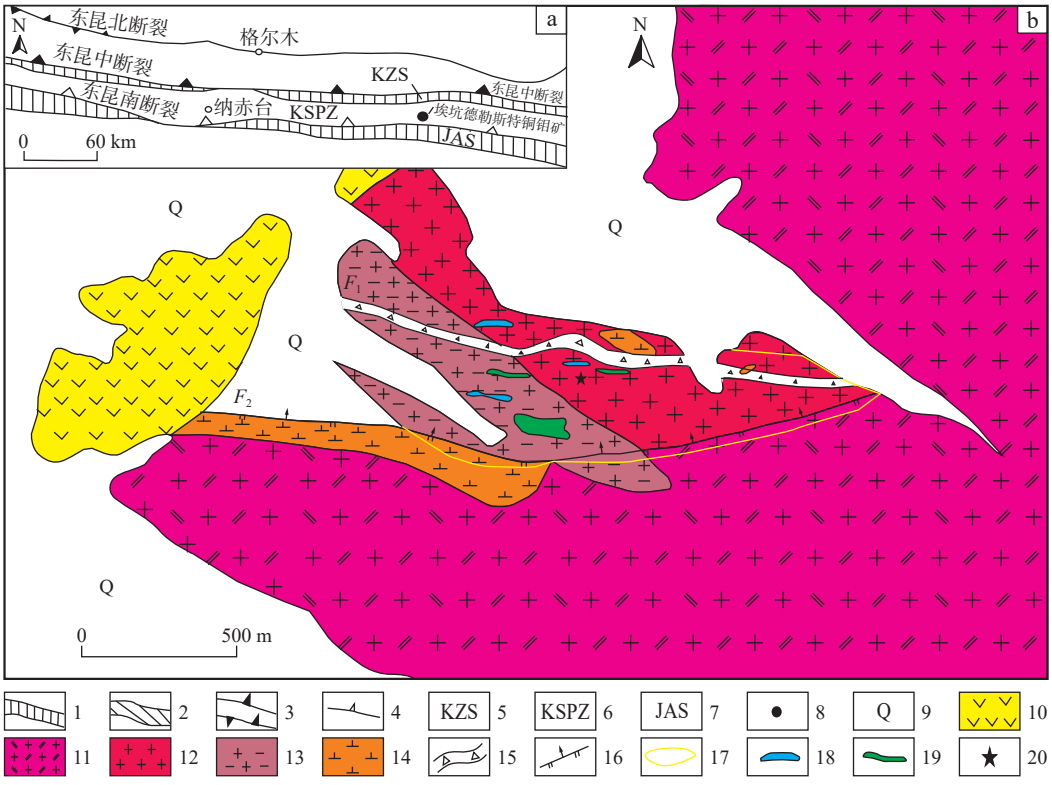
2007; 郭广慧等, 2023)。东昆仑造山带内由北向南发育 3 条近 EW 向展布、横贯全区的区域性深大断裂, 分别是东昆北断裂、东昆中断裂和东昆南断裂(图 1a)。依据这 3 条断裂, 该造山带由北向南可划分为东昆北构造带、东昆中构造带和东昆南构造带等 3 个构造带(He et al., 2016; 韩建军等, 2023)。

东昆仑造山带自元古宙至中生代构造–岩浆活动强烈, 经历了复杂的地质构造演化过程, 发生了加里东期、华力西期、印支期和燕山期等多期构造–岩浆活动(田龙等, 2023), 以印支期最为强烈, 这些构造–岩浆活动为区域内与中酸性侵入岩类有关的金属矿产的成矿作用提供了优越的成矿条件(张雪亭等, 2007, 2017)。研究区所在的东昆仑南坡杂岩带是古特提斯北部活动陆缘的南部边缘区域, 早古生代以来至中生代形成了多期次、广泛分布的花岗岩类, 具备斑岩型铜钼矿的成矿条件(莫宣学等, 2007; 张雪亭等, 2017)。前人研究表明, 该杂岩带内花岗岩类以印支期最为强烈, 来源于下地壳, 形成于大陆边缘环境(刘建楠等, 2012; Xu et al., 2023)。

2 区域地质

区内发育 NW 向和近 EW 向两组缝合带, 以近东西向为主, 主要缝合带有赛什腾–锡铁山–哇洪山新元古代—早古生代缝合带、祁漫塔格–都兰新元古代—早古生代缝合带、东昆中新元古代—早古生代缝合带(KZS)和西大滩–阿尼玛卿晚古生代缝合带(JAS)。

构造以断裂构造为主, 包括东昆北断裂、东昆中断裂和东昆南断裂等 3 条深大断裂为主, 它们宽数十米至数千米不等, 规模大, 活动时间长。这些深大断裂对岩浆岩的侵入、规模和空间分布具有一定的控制作用, 岩浆岩分布广泛, 从基性到酸性岩浆岩均有出露。在东昆北断裂和东昆中断裂之间发育东昆中岩浆弧带, 在东昆中断裂和东昆南断裂之间分布有东昆仑南坡杂岩带(KSPZ)。东昆仑南坡杂岩带是东昆仑南坡西大滩–阿尼玛卿晚古生代缝合带(JAS)北部边缘岩浆弧带的重要组成部分, 是斑岩型矿床的重要成



1.主缝合带; 2.次缝合带; 3.新元古代—早古生代俯冲方向; 4.晚古生代—早中生代俯冲方向; 5.东昆中新元古代—早古生代缝合带; 6.东昆仑南坡杂岩带; 7.西大滩–阿尼玛卿晚古生代缝合带; 8.埃坑德勒斯特铜钼矿; 9.第四系; 10.三叠系洪水川组; 11.二长花岗岩; 12.中细粒花岗岩; 13.花岗斑岩; 14.闪长岩; 15.破碎带; 16.断层; 17.蚀变区域; 18.钼矿体; 19.铜矿体; 20.采样位置

图1 埃坑德勒斯特铜钼矿区地质简图(据张雪亭等, 2007 修改)

Fig. 1 Sketch geological map of the Aikengdelesite Cu-Mo deposit

矿潜力区(图 1a; 刘建楠等, 2012; 张雪亭等, 2017), 埃坑德勒斯特铜钼矿床为近年来在该带新发现的斑岩型铜钼矿。

岩浆活动频繁, 大致经历了华力西期、印支期和燕山期 3 个旋回, 以印支期为主, 斑岩型成矿条件优越, 为重要的斑岩型矿床成矿预测区。区内岩浆岩较发育, 分布有二长花岗岩、花岗斑岩、中细粒花岗岩、闪长岩及闪长岩脉(图 1b), 构成一个岩浆岩组合, 但对他们的生成、演化过程有待于深入研究。

区内出露地层主要为三叠系洪水川组(图 1b), 分布在矿区的西部, 总体上呈 NW 向展布, 岩性以安山岩、安山质凝灰岩为主, 夹有少量硅质岩、碳质板岩。断裂构造发育, 以近 EW 向为主, 地表形成宽几米至近百米的破碎带(图 1b)。破碎带及其两侧高岭土化、黄铁矿化、黄钾铁矾化、碳酸盐化及褐铁矿化较为发育。岩浆活动强烈, 出露的侵入岩主要为二长花岗岩、中细粒花岗岩、花岗斑岩和闪长岩等, 呈不规则的岩基、岩株状产出(图 1b)。此外, 发育后期侵入的闪长岩脉、闪长玢岩脉及酸性岩脉(刘建楠等, 2012)。二长花岗岩是矿区出露面积最大的侵入岩, 主要分布于矿区的南部和东北部, 锆石 U-Pb 年龄为(268.7±1.6)Ma(杨延乾等, 2013)。花岗斑岩主要分布在矿区中部, 地表呈 NW 向展布, 出露面积约为 0.4 km^2, 锆石 U-Pb 年龄为(242±1.2)Ma(张雪亭等, 2017)。中细粒花岗岩和花岗斑岩是矿区主要的铜、钼矿化岩体(刘建楠等, 2012), 地表可见孔雀石化和蓝铜矿矿化。火山岩发育, 主要分布于洪水川组中。围绕中细粒花岗岩和花岗斑岩发育蚀变, 主要蚀变类型有青磐岩化、绢英岩化、高岭土化、硅化和钾化, 以花岗斑岩和中细粒花岗岩为中心由内向外依次为硅化–钾长石化带→绢英岩化带→泥化带(高岭土化)→青磐岩化带(绿泥石化、绿帘石化)→黄铁矿化及碳酸盐化、黄钾铁矾化, 与典型斑岩型铜矿蚀变分带特征基本一致。

矿区已圈出 3 条钼矿体和 3 条铜矿体, 其中, 有 2 条钼矿体和 1 条铜矿体产于中细粒花岗岩内, 2 条铜矿体和 1 条钼矿体产于花岗斑岩内, 所有矿体基本均呈近 EW 向展布, 主要呈透镜状、脉状。铜矿体长为 120～212 m, 厚为 0.61～2.81 m, Cu 品位为 0.21%～1.06%; 钼矿体长为 80～120 m, 厚为 0.95～4.79 m, Mo 品位为 0.03%～0.16%。矿石矿物主要为孔雀石、辉钼矿、蓝铜矿、黄铁矿、黄铜矿及方铅矿、闪锌矿。脉石矿物主要为石英、斜长石、云母等。矿石构造以块状和浸染状为主。

3　岩体特征

3.1　岩体地质特征

中细粒花岗岩主要分布于矿区中部, 呈北西向展布的不规则岩珠状产出, 出露面积约为 1 km^2, 岩体内发育后期侵入的闪长岩脉。岩体地表呈碎裂状, 节理较发育, 见有硅化、钾长石化、青磐岩化、黄铁矿化、碳酸盐化和黄钾铁矾化等蚀变。除中细粒花岗岩外, 矿区还发育二长花岗岩、花岗斑岩、闪长岩、闪长岩脉等, 他们与中细粒花岗岩构成一个岩浆岩组合, 具有明显的侵入接触关系。其中, 中细粒花岗岩侵入于二长花岗岩中, 花岗斑岩侵入于二长花岗岩和中细粒花岗岩中, 闪长岩和闪长岩脉侵入于二长花岗岩、中细粒花岗岩和花岗斑岩中(图 1b)。

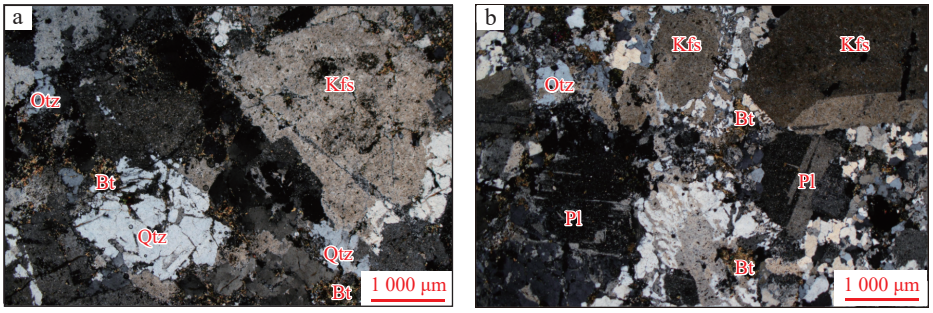
3.2　岩相学特征

样品取自矿区中部中细粒花岗岩与花岗斑岩接触带附近(图 1b)。岩石新鲜面为浅肉红色, 块状构造, 半自形–自形粒状结构。主要矿物为钾长石、斜长石和石英, 次要矿物主要有角闪石、黑云母等, 副矿物为磷灰石、锆石、磁铁矿等, 次生矿物主要有绢云母、绿泥石、绿帘石。钾长石含量约为 30%, 半自形板状, 粒度一般为 2～6 mm, 具伊利石化、绢云母化等, 表面脏。斜长石含量约为 35%, 半自形, 粒度一般为 2～5 mm, 部分粒度为为 0.3～2 mm, 少部分粒度为 5～7 mm, 具高岭石化、绢云母化等, 表面脏。石英含量约为 25%～30%, 呈他形粒状, 粒度一般为 2～3 mm, 部分粒度为 0.4～2 mm, 波状消光。黑云母含量约为 3%, 呈片状, 粒径为 1～2 mm(图 2)。

4　测试方法

4.1　主量元素、稀土元素和微量元素测试方法

采样时选择新鲜的岩石样品, 对采集的样品磨制薄片进行显微镜下鉴定后, 选择具有代表性的样品由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成全岩主量元素、稀土元素和微量元素测试。主量元素的含量采用硅酸盐岩石化学分析方法 X 射线荧光光谱法测定, 实验仪器为飞利浦 PW2404 型 X 射线荧光光谱仪, RSD<3%, 分析结果见表 1。稀土元素和微量元素采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法测定, 实验



Pl.斜长石；Bt.黑云母；Qtz.石英；Kfs.钾长石

图2 埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩显微照片(正交偏光)

Fig. 2 Photos of microphotographs of the medium-fine grained granite in Aikengdelesite Cu-Mo deposit

仪器为 Finnigan MAT 公司生产的 HR-ICP-MS (Element Ⅰ), 实验相对湿度为 30%, 温度为 20 ℃, 含量大于 20×10^{-6} 的元素的分析误差为±5%, 含量小于 20×10^{-6} 的元素的分析误差为±10%, 分析结果见表 2。

4.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试方法

锆石单矿物分选由河北省区域地质调查院实验室完成, 用于分选锆石的中细粒花岗岩样品经人工破碎后, 按常规重力和磁选方法分选出锆石。选取透明、无裂隙、无包裹体、粒径较大的锆石颗粒作为测定对象。将锆石与标样(TEM=417 Ma)置于玻璃板上, 用环氧树脂固定制成样品靶, 然后磨至锆石中心充分暴露。对锆石进行透射光、反射光显微照相和阴极发光图像分析。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试分析由中国地质大学(北京)科学研究院实验中心完成, 采用由

表 1 埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩主量元素(%)测试结果表

Tab. 1 Major element composition (%) of the medium-fine grained granite in Aikengdelesite Cu-Mo deposit

样号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	Loss	Total	Na_2O/K_2O	K_2O+Na_2O	A/CNK	A/NK	σ	τ
AK11-1	72.54	0.19	13.56	1.00	2.15	0.04	0.71	0.82	3.74	3.35	0.06	1.74	99.90	1.12	7.09	1.20	1.39	1.70	51.68
AK11-2	72.62	0.43	13.10	1.36	2.40	0.04	0.94	0.94	4.26	1.84	0.09	1.96	99.98	2.32	6.10	1.22	1.45	1.26	20.56
AK11-3	72.43	0.19	13.32	1.47	2.50	0.06	0.86	1.02	3.48	3.19	0.07	1.40	99.99	1.09	6.67	1.21	1.45	1.51	51.79
AK11-4	73.83	0.15	13.73	1.14	2.00	0.07	0.59	1.41	4.66	1.39	0.05	0.97	99.99	3.35	6.05	1.17	1.50	1.19	60.47
AK11-5	73.00	0.20	13.60	1.23	1.65	0.04	0.50	2.42	4.31	2.12	0.06	0.86	99.99	2.03	6.43	0.99	1.45	1.38	46.45
AK11-6	73.01	0.21	13.28	1.29	1.65	0.07	0.61	2.31	3.38	2.98	0.05	1.16	100.00	1.13	6.36	1.02	1.51	1.35	47.14

表 2 埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩稀土元素和微量元素(10^{-6})测试结果表

Tab. 2 REE and trace element composition (10^{-6}) of the medium-fine grained granite in Aikengdelesite Cu-Mo deposit

样号	AK11-1	AK11-2	AK11-3	AK11-4	AK11-5	AK11-6
Rb	70	47	65	42	51	82
Sr	236	209	223	376	299	246
Cs	1.1	1.54	1.22	1.41	0.45	2.62
Ba	916	553	1 014	4 908	2 570	1 734
Th	17.1	9.22	15.3	10.1	9.95	11.4
U	4.24	2.26	3.85	2.41	2.96	2.84
Nb	15	7.92	13.5	6.47	6.59	7.43
Ta	1.85	0.6	1.87	0.60	0.52	0.67
Zr	148	169	133	159	168	157
Hf	4.12	4.74	4.07	4.66	4.52	5.01

续表2

样号	AK11-1	AK11-2	AK11-3	AK11-4	AK11-5	AK11-6
Sc	5.68	7.1	5.35	3.81	4.20	3.93
Pb	16	9.78	14.9	47.6	25.4	29.1
V	38	44.6	35.7	28.30	27.70	27.40
Cr	11.2	8.35	7.26	7.51	5.86	6.74
Co	2.18	3.89	4.01	2.81	3.29	3.58
Cu	292	446	299	47	32	84
Ga	9.11	10.7	9.82	9.01	9.61	9.39
Li	4.57	8.4	4.84	6.96	5.26	7.12
La	22.1	27.2	27.8	28.30	30.30	30.20
Ce	36.2	53.1	49.1	47.50	50.50	51.30
Pr	3.97	6.07	4.99	4.72	5.45	5.18
Nd	12.6	22	17	15.8	17.6	17.2
Sm	1.84	4.18	2.66	2.39	3.19	2.63
Eu	0.46	1.06	0.67	0.59	0.79	0.65
Gd	2.15	3.87	2.96	2.96	3.29	2.84
Tb	0.426	0.762	0.573	0.474	0.596	0.538
Dy	2.83	4.68	3.33	2.81	3.17	3.04
Ho	0.591	0.988	0.672	0.580	0.624	0.663
Er	2.01	2.87	2.05	1.83	2.20	2.21
Tm	0.44	0.532	0.421	0.361	0.452	0.420
Yb	2.96	3.47	2.78	2.34	2.47	2.34
Lu	0.507	0.486	0.443	0.392	0.415	0.458
Y	17.8	25.1	19.9	15.0	18.3	18.3
ΣREE	89.08	131.27	115.45	111.05	121.05	119.67
LREE	77.17	113.61	102.22	99.30	107.83	107.16
HREE	11.91	17.66	13.23	11.75	13.22	12.51
LREE/HREE	6.48	6.43	7.73	8.45	8.16	8.57
La_N/Yb_N	5.36	5.62	7.17	8.68	8.80	9.26
δEu	0.71	0.81	0.73	0.68	0.75	0.73

美国 New Wave Research Inc.公司生产的激光剥蚀进样系统(UP193SS)和美国 Agilent 科技有限公司生产的 Agilent 7500a 型四极杆等离子体质谱仪联合构成的激光等离子体质谱仪, 激光波长为 193 nm, 激光频率为 10 Hz, 剥蚀物质载气为高纯度 He 气, 流量为 0.8 L/min。Angilent 7500 a 等离子体质谱仪工作条件: 冷却气(Ar)流量为 0.92 L/min, 功率为 1 350 W, 测试点束斑直径为 30 μm, 预剥蚀时间为 5 s, 剥蚀时间为 45 s, 输出激光能量为 1.2 J/cm^2, 测试使用能量为 90%。元素含量以国际标样 NIST SRM610 为外部标准, ^{29}Si 为内部标准计算, NIST SRM612 和 NIST SRM614 做监控盲样。锆石 U-Pb 同位素及 U、Th 数据处理使用 Glitter4.4.1 软件, 锆石年龄计算采用国际标准锆石 91 500 为外标进行同位素比值校正, 以标准锆石 TEMORA 和 Qinghu 为监控盲样, 单个数据点误差均为 1σ, 加权平均值误差为 1σ, 加权平均年龄值采用^{206}Pb/^{238}U 年龄进行计算, 其加权平均值为 95% 的置信度。^{204}Pb 校正方法同 Andersen(2002)。年龄谐和图和加权平均年龄的计算及绘图使用 Ludwig(2003)编制的 Isoplot 3.0 软件完成。

5 分析结果

5.1 中细粒花岗岩主量元素、稀土元素和微量元素特征

本研究挑选较为新鲜的岩石样品进行主量元素、稀土元素和微量元素测试分析，尽可能避免了热液蚀变对测试结果的不利影响。

5.1.1 主量元素

中细粒花岗岩的 SiO_2 含量为 72.43%～73.83%，均值为 72.91%；Al_2O_3 含量为 13.10%～13.60%，均值为 13.43%；Na_2O 含量为 3.38%～4.66%，均值为 3.97%；K_2O 含量为 1.84%～3.35%，均值为 2.48%；K_2O+Na_2O 含量为 6.05%～7.09%，均值为 6.45%；Na_2O 含量普遍高于 K_2O 含量，Na_2O/K_2O 值为 1.05～3.35；MgO 含量为 0.50%～0.94%，均值为 0.70%；TFe_2O_3 含量为 2.88%～3.97%，均值为 3.31%；TiO_2 含量为 0.15%～0.43%，均值为 0.23%；CaO 含量为 0.82%～2.42%，均值为 1.49%，总体显示高 SiO_2、富 Al_2O_3，低 TiO_2、MgO、CaO 的特征（表 1）。在 SiO_2-Na_2O+K_2O 图解上落入亚碱性花岗岩区（图 3a），在 SiO_2-K_2O 图解上落入钙碱性系列及高钾钙碱性系列区域（图 3b），A/CNK 值为 0.99～1.22，均值为 1.13，在 A/CNK-A/NK 图解上主要落入准铝质–过铝质区域（图 3c），里特曼指数 σ 值为 1.26～1.70，小于 3.3，显示钙碱性花岗岩特征。

5.1.2 稀土元素和微量元素

稀土元素和微量元素分析结果（表 2）显示，稀土总量 ΣREE=89.08×10^{-6}～131.27×10^{-6}，平均值为 114.59×10^{-6}；LREE=77.17×10^{-6}～113.61×10^{-6}，平均值为 101.22×10^{-6}；HREE=11.75×10^{-6}～17.66×10^{-6}，平均值为 13.38×10^{-6}；LREE/HREE=6.43～8.57，平均值为 7.64；$(La/Yb)_N$=5.36～9.26，平均值为 7.48。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈右倾型（图 4a），显示轻、重稀土分馏明显，富集轻稀土，重稀土相对亏损。δEu=0.68～0.81，均值为 0.73，具有弱 Eu 负异常。在微量元素原始地幔标准化图解上（图 4b），表现为富集大离子亲石元素（Rb、Ba、K）和活泼的不相容元素（Th、U），高场强元素 Nb、Ta 相对亏损，具有显著的“TNT”型微量元素分配特征。

5.2 中细粒花岗岩锆石 U-Pb 年龄与稀土元素特征

5.2.1 锆石 U-Pb 年龄

中细粒花岗岩锆石颗粒较大（宽约为 40～90 μm），自形程度较高，呈长柱状，长宽比约为 2∶1～4∶1。在阴极发光图上（图 5），具有较好的锥面和柱面，生长振荡环带清晰，为典型的岩浆锆石。锆石的 Th 含量为 86.52×10^{-6}～1 242.18×10^{-6}，均值为 410.47×10^{-6}；U 含量为 127.47×10^{-6}～1 380.82×10^{-6}，均值为 576.25×10^{-6}，$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 263～247 Ma，所有测点落于谐和图上（表 3，图 6a）；$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为（253.7±1.9）Ma（MSWD=1.6），表明中细粒花岗岩为晚二叠世晚期岩浆活动的产物。

5.2.2 锆石稀土元素特征

测试结果（表 4）显示，锆石的稀土总量 ΣREE=405.35×10^{-6}～3 756.00×10^{-6}，均值为 1 692.32×10^{-6}，稀土含量较高；LREE=9.82×10^{-6}～102.96×10^{-6}，均值为 43.44×10^{-6}；HREE=395.32×10^{-6}～3 665.43×10^{-6}，均值为 1 648.88×10^{-6}；LREE/HREE=0.01～0.05，均值为 0.026；δEu=0.23～0.65，均值为 0.37；Eu 具有负异常，δCe=1.28～181.04，均值为 40.08，Ce 具强烈的正异常，球粒陨石标准化稀

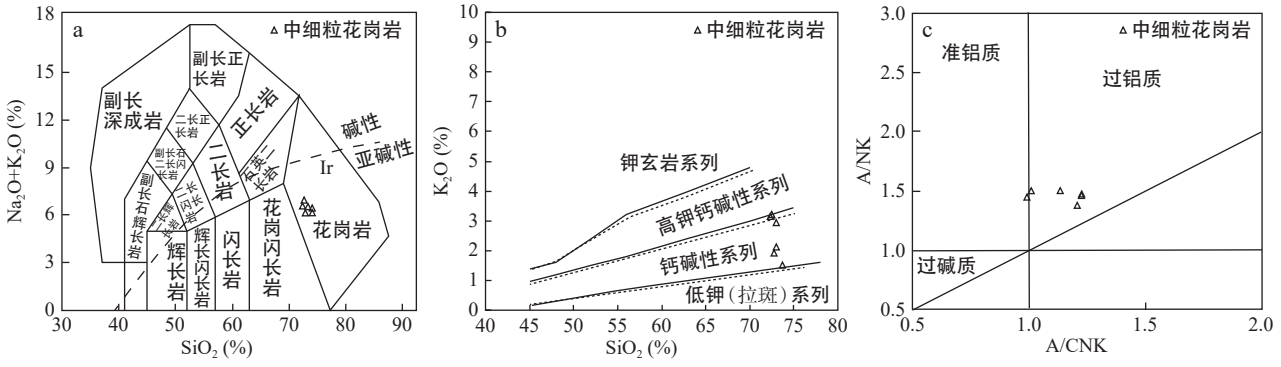


图3 埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩 Na_2O+K_2O-Si_2O（a）、K_2O-SiO_2（b）、A/NK-A/CNK（c）图解

（a.底图据 Middlemost, 1985, 1994；b、c.底图据 Peccerillo, 1976）

Fig. 3 (a) Na_2O+K_2O-Si_2O, (b) K_2O-SiO_2 and (c) A/NK-A/CNK diagrams of the medium-fine grained granite in Aikengdelesite Cu-Mo deposit

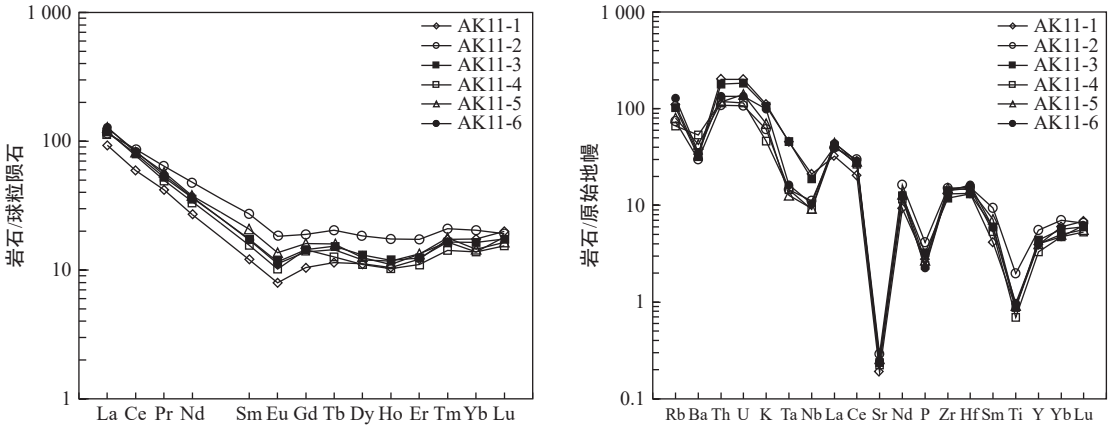


图4　埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图(a)和微量元素原始地幔蛛网图(b)
(a.球粒陨石标准化值和 b.原始地幔标准化值均据 Sun et al., 1989)

Fig. 4　(a) Chondrite-normalized REE diagram and (b) primitive mantle-normalized trace element spider of the medium-fine grained granite in Aikengdelesite Cu-Mo deposit



图5　埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩锆石阴极发光照片

Fig. 5　Cathodeluminescence images of zircon grains of the medium-fine grained granite in Aikengdelesite Cu-Mo deposit

土配分曲线呈较陡的左倾模式, 强烈富集重稀土(图 6b), 表现出岩浆锆石的特点。不同成因的锆石具有不同 Th/U 值, 岩浆锆石的 Th/U 值一般大于 0.4, 变质锆石 Th/U 值一般小于 0.1(Raynfr et al., 2005; 李长民, 2009), 文中锆石 Th/U 值为 0.26～1.52, 均值为 0.73, 表明锆石应属岩浆锆石。

6　讨论

6.1　岩石成因

中细粒花岗岩的主量元素特征显示, 该岩体富 SiO_2、Al_2O_3, 贫 TiO_2、MgO, Na_2O 的含量大于 K_2O, CaO 的含量相对偏低, 里特曼指数 σ 小于 3.3, 表明中细粒花岗岩属准铝质–过铝质钙碱性系列岩石(图 3)。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(图 4a)具有弱 Eu 负异常。微量元素原始地幔标准化曲线(图 4b)显示明显的 Sr 亏损, 低 Sr 花岗岩可能来自加厚的下地壳深部(张旗等, 2006)。

原始地幔微量元素标准化蛛网图上 Nb、Ta、P、Ti 相对负异常和 Zr、Hf 相对正异常的地球化学特征(图 4b), 反映了中细粒花岗岩具有典型的大陆地壳的特点(Dungan et al., 1986; Condie, 1989; Davies et al., 1987; Foley, 1992)。壳源岩浆 Rb/Sr 平均值为 0.35, 幔源岩浆 Rb/Sr 平均值为 0.034(Taylor et al., 1985), 本区样品 Rb/Sr 值为 0.11～0.33, 平均值为 0.24, 远大于幔源岩浆 Rb/Sr 平均值为 0.034, 显示壳源岩浆特点。Sr/Ba

表 3 埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果

Tab. 3 The results of zircon isotopic LA-ICP-MS U-Th-Pb analyses of the medium-fine grained granite in Aikengdelesite Cu-Mo deposit

测试点	含量(10^{-6})			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
					$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$	
	Th	U	Pb		比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ
AK11-01	1 242.18	1 380.82	66.69	0.90	0.054 74	0.001 09	0.297 68	0.006 29	0.039 44	0.000 55	402	24	265	5	249	3
AK11-02	135.74	244.70	10.96	0.55	0.051 23	0.002 03	0.281 59	0.011 18	0.039 86	0.000 61	251	63	252	9	252	4
AK11-03	678.08	785.83	37.51	0.86	0.051 26	0.001 20	0.281 67	0.006 81	0.039 84	0.000 57	253	30	252	5	252	4
AK11-04	414.93	665.16	30.05	0.62	0.053 23	0.001 35	0.291 43	0.007 57	0.039 70	0.000 57	339	34	260	6	251	4
AK11-05	217.77	576.77	24.70	0.38	0.051 37	0.001 25	0.284 05	0.007 12	0.040 10	0.000 58	257	32	254	6	253	3
AK11-06	368.79	529.80	24.02	0.70	0.053 36	0.001 64	0.287 05	0.008 93	0.039 01	0.000 58	344	44	256	7	247	4
AK11-07	90.92	127.47	6.03	0.71	0.051 40	0.002 89	0.285 50	0.015 95	0.040 27	0.000 68	259	97	255	13	255	4
AK11-08	86.52	158.87	7.17	0.54	0.050 99	0.002 68	0.283 03	0.014 77	0.040 25	0.000 67	240	90	253	12	254	4
AK11-09	285.84	447.73	20.45	0.64	0.051 90	0.001 66	0.284 91	0.009 21	0.039 80	0.000 59	281	47	255	7	252	4
AK11-10	644.57	834.78	40.18	0.77	0.051 39	0.001 16	0.287 91	0.006 75	0.040 62	0.000 58	258	29	257	5	257	3
AK11-11	454.84	624.97	29.49	0.73	0.051 24	0.001 41	0.286 51	0.008 06	0.040 55	0.000 59	252	38	256	6	256	4
AK11-12	350.83	557.92	25.94	0.63	0.051 43	0.001 32	0.289 08	0.007 61	0.040 76	0.000 59	260	35	258	6	258	4
AK11-13	313.39	494.94	23.05	0.63	0.051 92	0.001 52	0.291 25	0.008 71	0.040 68	0.000 59	282	42	260	7	257	4
AK11-14	411.13	391.71	19.85	1.05	0.051 98	0.001 74	0.289 00	0.009 77	0.040 32	0.000 60	285	50	258	8	255	4
AK11-15	547.01	760.08	36.20	0.72	0.051 30	0.001 35	0.288 03	0.007 76	0.040 71	0.000 59	254	36	257	6	257	3
AK11-16	488.49	926.05	41.76	0.53	0.053 64	0.001 36	0.298 01	0.007 79	0.040 29	0.000 58	356	34	265	6	255	4
AK11-17	273.94	1 036.93	44.14	0.26	0.053 55	0.002 08	0.295 19	0.010 63	0.039 98	0.000 58	352	90	263	8	253	4
AK11-18	88.87	150.06	6.97	0.59	0.051 68	0.003 57	0.290 62	0.019 93	0.040 78	0.000 72	271	125	259	16	258	4
AK11-19	549.29	1 014.93	46.26	0.54	0.057 28	0.001 32	0.320 86	0.007 69	0.040 62	0.000 58	502	29	283	6	257	3
AK11-20	952.15	888.34	44.52	1.07	0.051 75	0.001 43	0.284 98	0.008 05	0.039 93	0.000 58	274	39	255	6	252	4
AK11-21	289.08	379.92	18.19	0.76	0.051 12	0.001 68	0.285 25	0.009 45	0.040 46	0.000 62	246	48	255	7	256	4
AK11-22	747.90	536.08	29.01	1.40	0.051 44	0.001 69	0.286 47	0.009 51	0.040 38	0.000 61	261	49	256	8	255	4
AK11-23	232.81	152.91	8.71	1.52	0.051 53	0.003 16	0.289 23	0.017 61	0.040 70	0.000 71	265	108	258	14	257	3
AK11-24	373.08	364.27	19.29	1.02	0.052 63	0.001 87	0.302 40	0.010 84	0.041 67	0.000 64	313	54	268	8	263	4
AK11-25	211.55	361.72	16.61	0.58	0.051 31	0.001 69	0.289 23	0.009 61	0.040 88	0.000 62	255	49	258	8	258	4
AK11-26	317.08	510.88	23.11	0.62	0.051 36	0.001 63	0.286 83	0.009 23	0.040 49	0.000 60	257	47	256	7	256	4

值为 0.08～0.38, 平均值为 0.20, 远小于幔源岩浆的 Sr/Ba 平均值为 3.02(Sun et al., 1989), 显示壳源岩浆特点。壳源岩浆 Nb/Ta 值一般为 11～12, 幔源岩浆 Nb/Ta 值一般为 17.5±2(Green et al., 1975), 本区样品 Nb/Ta 值为 7.22～13.20, 平均值为 10.99, 显示壳源岩浆特点。壳源岩浆 La/Nb、Th/Nb 和 Th/La 平均值分别为 2.2、0.44 和 0.204, 幔源岩浆 La/Nb、Th/Nb 和 Th/La 平均值分别为 0.94、0.177 和 0.125(Saunders et al., 1988; Weaver et al., 1991)。本区样品 La/Nb 值为 1.47～4.60, 平均值为 3.33; Th/Nb 值为 1.13～1.56, 平均值为 1.34; Th/La 值为 0.33～0.77, 平均值为 0.45, 显示壳源岩浆特点。样品 Nd/Th 值(0.74～2.39, 均值为 1.51)与壳源岩石平均值(Nd/Th≈3)接近, 远低于幔源岩石平均值(Nd/Th＞15)(Bea et al., 2001); Th/U 值(3.36～4.08, 均值为 3.94)接近下地壳的 Th/U 值(4.46)(张竞嘉等, 2021), 也显示壳源特点。

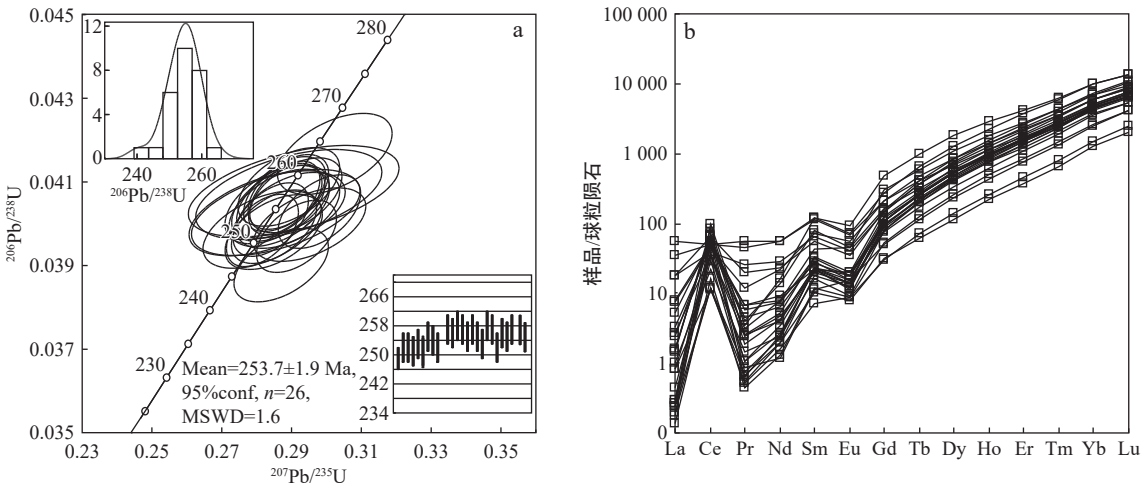


图6　埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)和锆石原位稀土元素球粒陨石标准化分布模式图(b)(球粒陨石标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 6　(a) U-Pb concordia plots for zircons and (b) chondrite-normalized REE patterns of zircons of the medium-fine grained granite in Aikengdelesite Cu-Mo deposit

在 La_N/Yb_N-δEu 图解上(图 7a), 样品落入壳型花岗岩区; 在 La/Yb-La 图解上(图 7b), 样品落入部分熔融区; MgO-Si_2O 图解上(图 7c), 样品落入加厚地壳熔融区, 表中细粒花岗岩的形成主要地壳部分熔融有关。

花岗岩的生成与再造的方式主要有 3 种: ①以幔源岩浆为载体的地幔物质发生岩浆混合作用形成花岗岩; ②地壳物质发生部分熔融形成花岗岩; ③包括壳源物质和幔源物质的混合成因的花岗岩(肖庆辉等, 2002; Kroner, 2006; He et al., 2016)。基于上述对矿区中细粒花岗岩源区的判断, 再结合矿区花岗斑岩(244.2±2.1 Ma)形成于下地壳物质部分熔融(刘建楠等, 2012; Xu et al., 2023)、二长花岗岩(268.7±1.6 Ma)形成于下地壳物质部分熔融(杨延乾等, 2018)的认识, 认为中细粒花岗岩(253.7±1.9 Ma)的形成与下地壳物质的部分熔融有关。

6.2　地质意义

前人研究表明(罗照华等, 1999; Yu et al., 2020; Gao et al., 2021), 晚华力西期—早燕山期, 东昆仑造山带经历了一个最完善、连续的造山旋回。将东昆仑晚华力西期—早燕山期构造演化划分为 3 个阶段: ①洋脊形成与扩张阶段(309～260 Ma); ②大洋板块大规模俯冲阶段(260～230 Ma), 火成岩具安第斯型活动大陆边缘构造属性; ③早印支期后期, 洋壳俯冲作用停止, 巴颜喀拉洋封闭, 东昆仑地区转入陆内造山阶段(230～190 Ma)。受巴颜喀拉–阿尼玛卿洋俯冲的影响, 东昆仑中—晚石炭世开始了大洋板块的俯冲, 东昆南带及其以北地区为晚华力西期—印支期活动边缘, 俯冲作用伴有板片部分熔融, 发生岩浆大规模侵入活动, 这一过程持续到二叠纪末—三叠纪初, 260～230 Ma 是主要的俯冲期, 处于大规模“B”型俯冲阶段, 东昆仑处于活动大陆边缘构造环境(刘成东等, 2004; 莫宣学等, 2007)。对于本研究区而言, 巴颜喀拉洋在晚华力西期开始在现今的东昆南断裂依次向北侧发生强烈的俯冲作用, 东昆南构造带及其以北地区成为晚华力西期—印支期造山旋回的活动大陆边缘, 俯冲作用伴随有大规模的岩浆侵入活动, 形成陆缘岩浆弧带, 直至印支早期(244 Ma)结束(李碧乐等, 2012)。

大陆边缘弧火成岩的 Zr/Y 值一般为 4～12 (Condie, 1989), 文中细粒花岗岩样品的 Zr/Y 值为 6.68～10.60, 平均值为 8.35, 显示大陆边缘弧火成岩的特征; 样品富集 Ba、LREE 和亏损 Nb、Ta、Ti、P 也显示出弧型地壳的特征(Taylor et al., 1985; Rudnick, 1995)。在 Y-Nb 构造环境判别图解中(图 8a), 所有样品都落入同碰撞花岗岩和火山弧花岗岩区, 可以确定中细粒花岗岩并非产自大洋洋脊和板内环境; 而后采用 Rb-Y+Nb 图解(图 8b)和 Ta-Yb 图解(图 8c)进一步区分同碰撞环境和火山弧环境, 所有样品都落入火山弧花岗岩类区, 初步判断中细粒花岗岩形成于陆缘弧构造环境;在 CaO-TFeO+MgO 图解(图 8c)上所有样品落入 IAG+CAG+CCG 区域, 再结合在 A/NK-A/CNK 图解上主要落入准铝质-过铝质区域, 初步判定属于大陆

表 4 埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩锆石 LA-ICP-MS 原位稀土元素(10^{-6})分析结果

Tab. 4 The results of REE element (10^{-6}) for Zircon LA-ICP-MS in-situ spots analysis of the medium-fine grained granite in Aikengdelesite Cu-Mo deposit

测试点	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	δEu	δCe
AK11-01	6.67	61.98	2.83	16.25	12.34	2.89	43.04	17.03	213.11	80.64	362.61	88.90	995.71	207.31	2 111.31	102.96	2 008.35	0.05	0.38	3.50
AK11-02	0.06	7.36	0.05	0.74	1.11	0.51	6.30	2.62	35.58	14.56	73.86	20.21	252.82	61.76	477.53	9.82	467.71	0.02	0.58	34.45
AK11-03	0.04	33.97	0.05	0.91	2.68	0.71	18.90	8.91	119.99	49.71	239.70	61.83	709.63	157.66	1 404.69	38.36	1 366.33	0.03	0.30	181.04
AK11-04	0.58	33.88	0.43	2.94	4.26	0.88	22.13	9.95	140.91	59.48	296.21	76.79	882.73	194.21	1 725.38	42.97	1 682.41	0.03	0.28	16.63
AK11-05	0.24	13.65	0.14	1.12	2.42	0.54	16.68	8.01	122.37	52.69	260.59	69.96	819.25	176.35	1 544.01	18.11	1 525.90	0.01	0.26	18.32
AK11-06	1.22	33.44	0.54	3.45	4.82	1.02	22.71	9.80	132.33	55.03	269.21	70.42	832.38	186.25	1 622.61	44.48	1 578.13	0.03	0.30	10.16
AK11-07	0.19	6.86	0.06	0.93	1.52	0.47	6.36	2.33	29.26	12.23	61.04	16.64	216.07	51.39	405.35	10.04	395.32	0.03	0.46	15.13
AK11-08	0.03	10.14	0.04	0.61	1.81	0.51	10.69	4.62	65.70	27.89	142.01	37.83	452.74	102.63	857.25	13.14	844.11	0.02	0.35	68.35
AK11-09	0.06	18.63	0.06	1.16	3.30	0.69	17.70	7.53	107.16	45.33	224.25	59.36	727.53	164.55	1 377.31	23.91	1 353.41	0.02	0.28	74.29
AK11-10	0.35	52.32	0.24	2.46	4.97	1.14	30.92	13.69	191.54	78.96	393.86	100.56	1 182.18	259.14	2 312.33	61.48	2 250.85	0.03	0.28	44.08
AK11-11	0.06	38.89	0.07	1.09	3.60	1.06	25.25	10.79	155.50	65.95	321.47	83.82	1 001.77	225.65	1 934.97	44.77	1 890.20	0.02	0.34	142.71
AK11-12	0.06	23.84	0.10	1.58	3.37	0.65	21.85	9.49	133.42	55.09	272.08	70.95	832.41	180.95	1 605.83	29.60	1 576.24	0.02	0.23	76.37
AK11-13	1.82	30.76	0.66	4.28	3.30	0.82	16.72	7.33	101.85	44.13	221.48	59.15	745.24	164.33	1 401.87	41.64	1 360.23	0.03	0.34	6.90
AK11-14	1.78	27.16	1.15	10.06	10.95	3.28	43.74	14.98	176.17	64.44	288.39	69.85	793.98	165.24	1 671.18	54.38	1 616.79	0.03	0.46	4.65
AK11-15	0.36	43.30	0.25	1.90	3.53	0.90	21.93	9.55	136.69	56.53	274.84	72.12	867.24	190.82	1 679.96	50.24	1 629.72	0.03	0.31	35.60
AK11-16	4.18	23.87	2.44	13.47	9.84	2.41	30.87	13.85	181.43	72.29	343.90	89.17	1 013.30	214.92	2 015.94	56.21	1 959.73	0.03	0.42	1.83
AK11-17	8.10	30.75	4.25	25.89	18.43	4.07	57.27	24.58	327.61	128.00	606.28	150.48	1 673.14	343.75	3 402.60	91.49	3 311.11	0.03	0.38	1.28
AK11-18	0.05	7.11	0.08	0.55	1.73	0.90	10.36	4.24	58.40	24.60	127.96	33.71	429.75	104.28	803.72	10.42	793.30	0.01	0.65	27.91
AK11-19	4.33	40.04	1.92	10.69	8.27	2.03	32.20	15.17	212.26	87.33	428.40	111.22	1 266.06	281.11	2 501.03	67.28	2 433.75	0.03	0.38	3.40
AK11-20	0.38	41.65	0.18	2.00	3.56	0.81	24.15	9.45	133.83	53.58	259.75	66.17	746.34	165.16	1 507.00	48.58	1 458.43	0.03	0.27	39.22
AK11-21	0.10	21.66	0.10	1.22	3.30	1.14	19.57	8.23	107.11	42.88	202.69	53.43	633.99	136.85	1 232.27	27.52	1 204.75	0.02	0.43	52.59
AK11-22	0.07	58.64	0.34	7.53	18.60	5.39	98.11	37.66	455.84	165.70	696.36	163.25	1 708.66	339.85	3 756.00	90.57	3 665.43	0.02	0.39	94.97
AK11-23	0.07	29.47	0.38	6.52	12.28	2.64	61.21	22.51	283.27	105.49	465.62	111.29	1 178.59	234.58	2 513.92	51.36	2 462.56	0.02	0.29	44.54
AK11-24	0.20	20.91	0.30	3.62	6.58	2.67	32.96	12.18	146.30	55.70	255.01	63.97	765.57	164.58	1 530.54	34.27	1 496.27	0.02	0.55	21.19
AK11-25	0.63	20.86	0.23	2.18	2.98	0.80	15.21	6.35	85.60	35.71	180.54	47.87	598.26	132.57	1 129.79	27.67	1 102.11	0.03	0.36	13.49
AK11-26	0.79	27.97	0.66	3.77	4.03	1.05	19.02	8.22	118.19	48.86	243.98	64.76	770.69	163.92	1 475.91	38.27	1 437.64	0.03	0.37	9.52

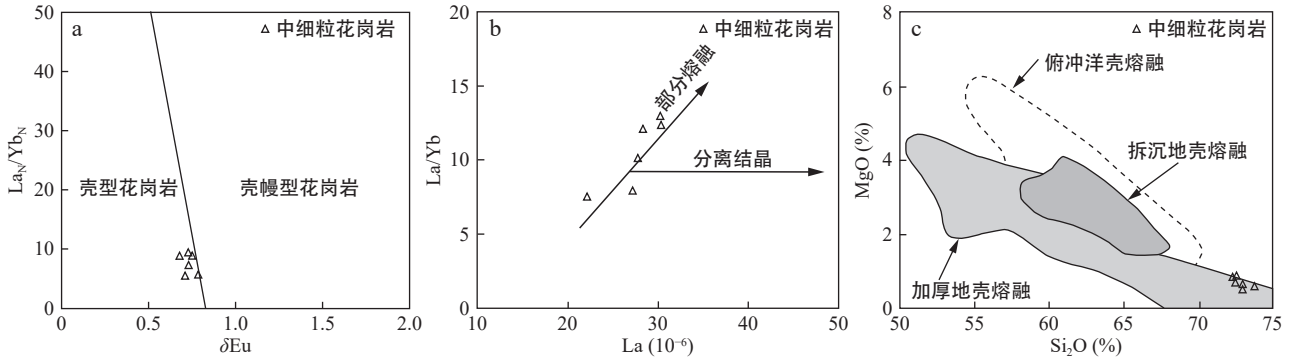
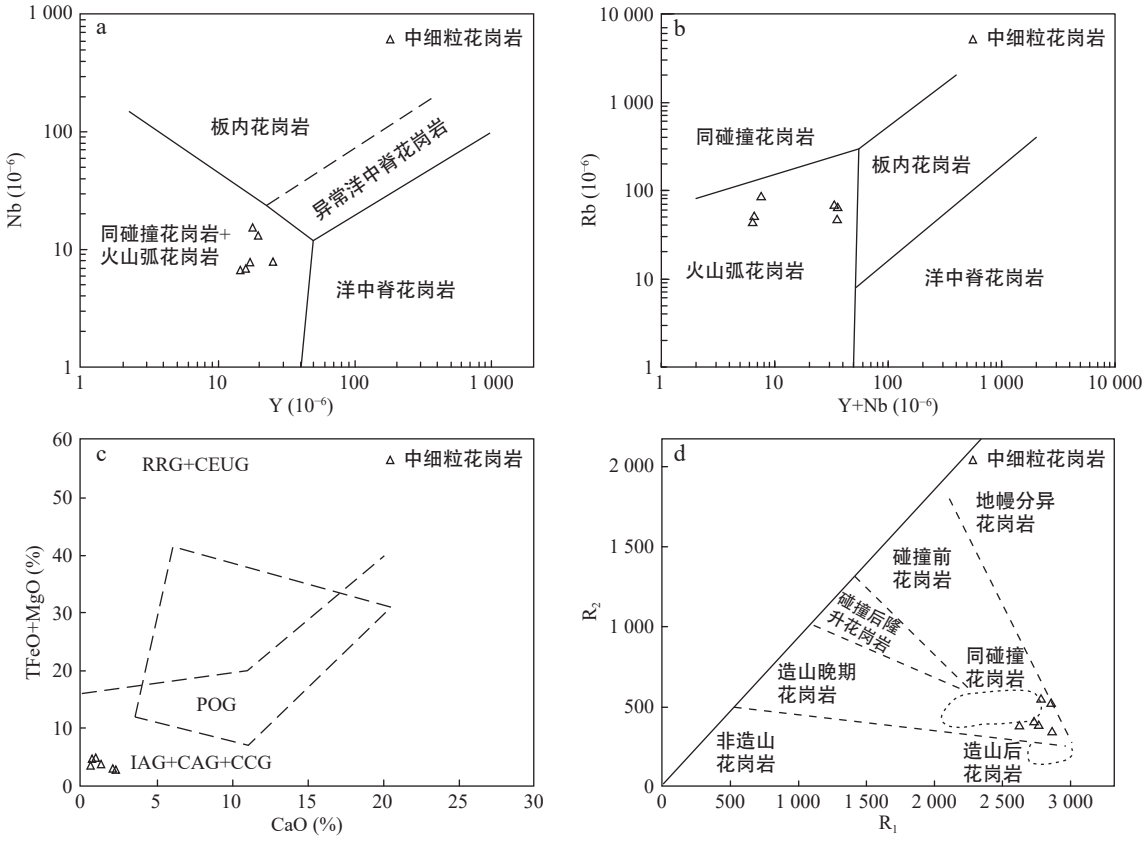


图7　埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩 La_N/Yb_N-δEu(a.底图据王中刚等，1989)、La/Yb-La(b.底图据 Maniar et al., 1989)、MgO-Si_2O(c.底图据 Allegre et al., 1978)

Fig. 7　(a) La_N/Yb_N-δEu, (b) La/Yb-La and (c) MgO-Si_2O diagrams of the medium-fine grained granite in Aikengdelesite Cu-Mo deposit



IAG.岛弧花岗岩类；CAG.大陆弧花岗岩类；CCG.大陆碰撞花岗岩类；RRG.与裂谷有关的花岗岩类；CEUG.与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类；POG.后碰撞花岗岩类

图8　埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩 Nb-Y(a)、Rb-Y+Nb(b)、TFeO+MgO-CaO(c)、R_1-R_2(d)图解(a、b.底图据 Pearce et al., 1984; c.底图据 Maniar et al., 1989; d.底图据 Batchelor et al., 1985)

Fig. 8　(a) Nb-Y, (b) Rb-Y+Nb, (c) TFeO+MgO-CaO and (d) R_1-R_2 diagrams of the medium-fine grained granite in Aikengdelesite Cu-Mo deposit

弧花岗岩(肖庆辉等, 2002); 在 R_2-R_1 图解(图 8d)中样品基本落入碰撞前花岗岩区及同碰撞花岗岩类的边缘, 表明中细粒花岗岩的形成可能与俯冲作用有关。

根据矿区发育的二长花岗岩、中细粒花岗岩、花岗斑岩和闪长岩等 4 类主要侵入岩的接触关系。结合前人获得的二长花岗岩年龄为(268.7±1.6)Ma(杨延

乾等, 2013)和花岗斑岩年龄为(242±1.2)Ma(张雪亭等, 2017)的研究成果, 以及本次研究获得的中细粒花岗岩年龄为(253.7±1.9)Ma, 认为埃坑德勒斯特铜钼矿区至少发生了 4 期岩浆侵入活动。早期发生二长花岗岩的侵入活动, 之后依次发生了中细粒花岗岩、花岗斑岩和闪长岩的侵入活动, 组成构造岩浆岩组合, 表明区域岩浆活动较活越、强烈。根据上述区域地质构造演化背景分析, 结合区域上发育有与洋壳有关的蛇绿岩带这一证据(杨经绥等, 2005), 本次研究获得的中细粒花岗岩年龄(253.7±1.9)Ma 显示, 该岩体侵位于大洋板块大规模俯冲阶段及大规模岩浆侵入活动高峰期(袁万明等, 2000; 莫宣学等, 2007; 曾闰灵, 2021), 应属活动大陆边缘岩浆弧的产物。

综上所述, 区内在(253.7±1.9)Ma 处于大洋俯冲阶段, 为碰撞前活动大陆边缘向同碰撞的转换期, 是斑岩型铜钼矿床的重要成矿期, 埃坑德勒斯特铜钼矿床的发现, 为在区域内寻找铜钼矿床指出了新方向, 应开展进一步的勘查找矿工作。

7 结论

(1)岩石地球化学特征显示, 东昆仑埃坑德勒斯特铜钼矿床中细粒花岗岩富 SiO_2、Al_2O_3, 贫 TiO_2、MgO, Na_2O 的含量大于 K_2O, CaO 的含量相对偏低, 富集 Rb、Ba、K、Th、U 等元素, Nb、Ta 相对亏损, 具有显著的“TNT”型微量元素分配特征, 属准铝质–过铝质钙碱性花岗岩。

(2)中细粒花岗岩锆石 U-Pb 年龄为(253.7±1.9) Ma, 属晚二叠世晚期岩浆活动的产物, 该时期区内处于大洋俯冲阶段, 中细粒花岗岩形成于大洋板块大规模俯冲作用, 形成于活动大陆边缘陆缘弧环境, 推测其形成与下地壳物质发生部分熔融有关。

致谢: 样品的测试工作得了核工业北京地质研究院分析测试研究中心和中国地质大学(北京)科学研究实验中心的大力支持, 野外工作得到了青海省第五地质矿产勘查院的大力帮助, 在此致以谢意。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

丰成友, 王松, 李国臣, 等. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩: 年代学、地球化学及成矿意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 665−678.

FENG Chengyou, WANG Song, LI Guochen, et al. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantage area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 665−678.

郭广慧, 钟世华, 李三忠, 等. 运用机器学习和锆石微量元素构建花岗岩成矿潜力判别图解: 以东昆仑祁漫塔格为例[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 57−70.

GUO Guanghui, ZHONG Shihua, LI Sanzhong, et al. Constructing Discrimination Diagrams for Granite Mineralization Potential by Using Machine Learning and Zircon Trace Elements: Example from the Qimantagh, East Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 57−70.

韩建军, 李红刚, 何俊, 等. 东昆仑东段到木提岩体成因及构造意义: 来自年代学及地球化学的约束[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 140−154.

HAN Jianjun, LI Honggang, HE Jun, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of Daomuti Intrusive Rocks in East Kunlun Orogen: Constraints from the Geochronology and Geochemistry[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 140−154.

李碧乐, 孙丰月, 于晓飞. 东昆中隆起带东段闪长岩 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(4): 1163−1172.

LI Bile, SUN Fengyue, YU Xiaofei, et al. U-Pb dating and geochemistry of diorite in the eastern section from eastern Kunlun middle uplifted basement and granitic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(4): 1163−1172.

李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究, 2009, 148(6): 161−174.

LI Changmin. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of Zircons[J]. Geological Survey and Research, 2009, 148(6): 161−174.

李东生, 张占玉, 苏生顺, 等. 青海卡尔却卡铜钼矿床地质特征及成因探讨[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 239−244.

LI Dongsheng, ZHANG Zhanyu, SU Shengshun, et al. Geological characteristics and genesis of the Kaerqueka copper molybdenum deposit in Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(4): 239−244.

李世金, 孙丰月, 丰成友, 等. 青海东昆仑鸭子沟多金属矿的年代学研究[J]. 地质学报, 2008a, 82(7): 949−955.

LI Shijin, SUN Fengyue, FENG Chengyou, et al. Geochronological study on Yazigou polymetallic deposit in Eastern Kunlun, Qinghai Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2008a, 82(7): 949−955.

李世金, 孙丰月, 王力, 等. 青海东昆仑卡尔却卡多金属矿区斑岩型铜矿的流体包裹体研究[J]. 矿床地质, 2008b, 27(3): 399−406.

LI Shijin, SUN Fengyue, WANG Li, et al. Fluid inclusion studies of porphyry copper mineralization in Kaerqueka polymetallic ore district, East Kunlun Mountains, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 2008b, 27(3): 399−406.

刘成东, 莫宣学, 罗照华, 等. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用: 来自锆石 SHRIMP 年代学的证据[J]. 科学通报, 2004, 49(6): 596−602.

LIU Chengdong, MO Xuanxue, LUO Zhaohua, et al. The Eastern Kunlun Crust-mantle magma mingling: evidences from zircon ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(6): 596−602.

刘建楠, 丰成友, 亓锋, 等. 青海都兰县下得波利铜钼矿区锆石 U-Pb 测年及流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 679−690.

LIU Jiannan, FENG Chengyou, QI Feng, et al. SIMS zircon U-Pb dating and fluid inclusion studies of Xiadeboli County, Qinghai Province, China[J]. Actor Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 679−690.

罗照华, 邓晋福, 曹永清, 等. 青海省东昆仑地区晚古生代—早中生代火山活动与区域构造演化[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 51−56.

LUO Zhaohua, DENG Jinfu, CAO Yongqing, et al. Volcanism and regional tectonic evolution during late Paleozoic-early Mesozoic period in the East-Kunlun, Qinghai Province[J]. Geoscience, 1999, 13(1): 51−56.

莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 403−414.

MO Xuanxue, LUO Zhaohua, DENG Jinfu, et al. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun orogenic belt[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 403−414.

田龙, 康磊, 刘良, 等. 东昆仑巴什尔希晚奥陶世二长花岗岩成因及其地质意义[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 28−45.

TIAN Long, KANG Lei, LIU Liang, et al. Petrogenesis and Geological Implications of Bashenerxi Monzogranite from East Kunlun Orogen Belt[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 28−45.

王秉璋, 陈静, 罗照华, 等. 东昆仑祁漫塔格东段晚二叠世—早侏罗世侵入岩岩石组合时空分布、构造环境的讨论[J]. 岩石学报, 2014, 30(11): 3213−3228.

WANG Bingzhang, CHEN Jing, LUO Zhaohua, et al. Spatial and temporal distribution of Late Permian-Early Jurassic intrusion assemblages in eastern Qimantag, East Kunlun, and their tectonic settings[J]. Actor Petrologica Sinica, 2014, 30(11): 3213−3228.

任海东, 王涛, 潘彤, 等. 东昆仑东段三叠纪岩浆岩 Nd–Hf 同位素组分特征、物源演变规律及其构造背景[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 95−112.

REN Haidong, WANG Tao, PAN Tong, et al. Nd–Hf Isotopic Characteristics, Evolution Trend and Tectonic Setting of Triassic Magmatic Rocks in the Eastern Segment of East Kunlun Orogeny[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 95−112.

王中刚, 于学元, 赵振东, 等. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1−535.

肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩类研究思维与方法 [M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1−294.

熊万宇康, 赵梦琪, 于淼, 等. 造山带洋陆转换过程与岩浆作用: 以东昆仑都兰地区古生代花岗岩为例[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 113−139.

XIONG Wanyukang, ZHAO Mengqi, YU Miao, et al. Ocean−Continent Transition Process and Magmatism in Orogenic Belts: A Case Study of Paleozoic Granites in the Dulan Area of East Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 113−139.

杨延乾, 李碧乐, 许庆林, 等. 东昆仑埃坑德勒斯特二长花岗岩锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 西北地质, 2013, 46(1): 56−62.

YANG Yanqian, LI Bile, XU Qinglin, et al. Zircon U-Pb ages and its geological significance of the Monzonitic granite in the Aikengdelesite, Eastern Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2013, 46(1): 56−62.

杨延乾, 李碧乐, 马延景, 等. 东昆仑埃坑德勒斯特二长花岗岩岩石地球化学特征及岩石成因[J]. 西北地质, 2018, 51(1): 104−114.

YANG Yanqian, LI Bile, MA Yanjing, et al. Geochemistry and Genesis of Monzonitic Granite from Aikengdelesite Area in East Kunlun, Qinghai[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(1): 104−114.

杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 东昆仑阿尼玛卿地区古特提斯火山作用和板块构造体系[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(5): 369−380.

YANG Jingsui, XU Zhiqin, LI Haibing, et al. The paleo Tethyan volcanism and plate tectonic regime in the A'nyemaqenregion of East Kunlun, northern Tibet Plateau[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005, 24(5): 369−380.

袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 等. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录[J]. 地质论评, 2000, 46(2): 203−211.

YUAN Wanming, MO Xuanxue, YU Xuehui, et al. Geological records of the regional tectonic environments during the Indo-Chinese period within granites in the East-Kunlun[J]. Geological Reviews, 2000, 46(2): 203−211.

佘宏全, 张德全, 景向阳, 等. 青海省乌兰乌珠尔斑岩铜矿床地质特征与成因[J]. 中国地质, 2007, 34(2): 306−314.

SHE Hongquan, ZHANG Dequan, JING Xiangyang, et al. Geological characteristics and genesis of the Ulan Uzhur porphyry copper deposit in Qinghai[J]. Geology in China, 2007, 34(2): 306−314.

曾闰灵, 魏俊浩, 李欢, 等. 东昆仑鑫拓斑状二长花岗岩成因及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2021, 45(6): 1233−1251.

ZENG Runling, WEI Junhao, LI Huan, et al. Petrogenesis of the Xintuo porphyritic monzogranite from East Kunlun and its geological implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(6): 1233−1251.

张竞嘉, 云龙, 田霄, 等. 北山南带新场岩体地球化学特征及构造意义[J]. 世界核地质科学, 2021, 38(2): 249−261.

ZHANG Jingjia, YUN Long, TIAN Xiao, et al. Geochemical characteristics of Xinchang pluton in souther Beishan and its tectonic significansc[J]. World Nuclear Geoscience, 2021, 38(2): 249−261.

张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(9): 2249−2269.

ZHANG Qi, WANG Yan, LI Chengdong, et al. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(9): 2249−2269.

张雪亭, 杨生德, 杨站君, 等. 青海省板块构造研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1−177.

张雪亭, 姚远, 郑杰, 等. 东昆仑南坡埃坑北花岗斑岩的成岩年龄及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2017, 53(4): 680−685.

ZHANG Xueting, YAO Yuan, ZHENG Jie, et al. Diagenetic age of the granite porphyry in northern Aikengdelesite south of East Kunlun and geological implications[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(4): 680−685.

张照伟, 王亚磊, 邵继, 等. 东昆仑夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床成矿特征[J]. 矿床地质, 2021, 40(6): 1230−1247.

ZHANG Zhaowei, WANG Yalei, SHAO Ji, et al. Metallogenic characteristics of Xiarihamu super-large magmatic nickel-cobalt sulfide deposit in eastern Kunlun Orogenic Belt[J]. Mineral Deposits, 2021, 40(6): 1230−1247.

Allegre C J, Minster J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 38(1): 1−25.

Andersen T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb[J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59−79.

Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. Chemical Geology, 1985, 48(1): 43−55.

Bea F, Arzamastsev A, Montero P, et al. Anomalousalkaline rocks of Soustov, Kola;Evidence of mantlederived metasomatic fluids affecting crustal materials[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2001, 140(5): 554−566.

Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. Lithos, 1989, 23: 1−18.

Davies G R, Macdonald R. Crustal influences in the petrogenesis of the Naivasha basalt-comendite complex: Combined trace clement and Sr-Nd-Pb isotope constraints[J]. Journal of Petrology, 1987, 28(6): 1009−1031.

Dong Y P, He D F, Sun S S, et al. Subduction and accretionary tectonics of the East Kunlun orogen, western segment of the Central China Orogenic System[J]. Earth Science Reviews, 2018, 186: 231−261.

Dungan M A, Indstrom M M, Mcmillan N J, et al. Open system magmatic evolution of the Taos Plateau volcanic field, northern New Mexico: The petrology and geochemistry of the Servilleta Basalt[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1986, 91: 5999−6028.

Gao H C, Sun F Y. Middle to Late Triassic granitic magmatism in the East Kunlun Orogenic Belt, NW China: Petrogenesis and implications for a transition from subduction to post-collision setting of the Palaeo-Tethys Ocean[J]. Geological Journal, 2021, 56: 3378−3395.

Foley S F. Petrological characterization of the source components of potassic magmas: geochemical and experimental constraints[J]. Lithos, 1992, 28(3−6): 187−204.

Green D H. Genesis of Archean peridotitic magmas and constraints on Archean geothermal gradients and tectonics[J]. Geology, 1975, 3: 1−15.

He D F, Dong Y P, Liu X M, et al. Tectono-thermal events in East Kunlun, Northern Tibetan Plateau: Evidence from zircon U-Pb geochronology[J]. Gondwana Research, 2016, 30: 179−190.

Kroner A. Evolution of the Archean continental crust[J]. Nature, 2006, 443(7113): 811−817.

Li R B, Pei X Z, Li Z C, et al. Paleo-Tethyan Ocean Evolution and Indosinian Orogenesis in the East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau[J]. Minerals, 2022, 12: 1590.

Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for microsoft excel[M]. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, 2003, 4: 74.

Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635−643.

Middlemost E A K. Magmas and magmatic rocks[M]. London: Longman, 1985: 1−266.

Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Review, 1994, 37(3−4): 215−224.

Pan Z C, Sun F Y, Cong Z C, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Triassic Granitoids in the Ela Mountain Area of the East Kunlun Orogenic Belt[J]. Minerals, 2022, 12: 880.

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: 956−983.

Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey, Contrib[J]. Mineral Petrology, 1976, 58: 63−81.

Raynfr N, Stfrn R A, Carr S D. Grain-scalcVariations intrace element composition of fluid altered Zircon, acasta gneiss complex, Northwestern Canada[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2005, 148(6): 721−734.

Rudnick R L. Making continental crust[J]. Nature, 1995, 378(6557): 571−578.

Saunders A D, Norry M J, Tarney J. Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: trace element constraints[J]. Journal of Petrology Special Lithosphere Issue, 1988, 425−445.

Sun S S and McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society of London Special Publication, 1989, 42(1): 313−345.

Taylor S R, Mclennan S M. The continental crust its composition and evolution [J]. United States: Blackwell, 1985.

Wang H, Feng C, Li R, et al. Geological characteristics, metallogenesis, and tectonic setting of porphyry–skarn Cu deposits in East Kunlun Orogen[J]. Geological Journal, 2018, 53: 58−76.

Weaver B L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace clement isotopic constraints. Earth Planet[J]. Science, 1991, 104: 3810.

Xu Q L, Sun, Y G, Mao, G Z, et al. Petrogenesis of the Ore-Related Intrusions of the Aikengdelesite Mo (–Cu) and Halongxiuma Mo Deposits: Implication for Geodynamic Evolution and Mineralization in the East Kunlun Orogen, Northwest China[J]. Minerals, 2023, 13: 447.

Yu M, Dick J M, Feng C Y, et al. The tectonic evolution of the East Kunlun Orogen, northern Tibetan Plateau: A critical review with an integrated geodynamic model[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2020, 191: 104168.