

东昆仑祁漫塔格地区晚三叠世正长花岗岩岩石成因及构造意义

张明玉¹, 丰成友¹, 王 辉², 李大新¹, 瞿泓滢¹, 刘建楠¹, 周建厚¹

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 青海省东昆仑祁漫塔格地区肯德可克矿区外围东部发育一正长花岗岩体, 主要矿物组合为正长石(50% ~ 60%) + 石英(20% ~ 30%) + 斜长石(10% ~ 20%) + 黑云母(1% ~ 5%)。其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 217.9 ± 1.7 Ma (MSWD = 0.74, $n = 20$), 形成时代为晚三叠世, 与祁漫塔格地区铁多金属矿床基本同时形成。岩石地球化学组成具有高硅($\text{SiO}_2 = 74.53\% \sim 75.28\%$)、富碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 8.81\% \sim 8.95\%$)、富铁贫镁($\text{FeO}^T/\text{MgO} = 18.02 \sim 31.48$)的特征, 并具强烈的负 Eu 异常($\delta\text{Eu} = 0.04 \sim 0.05$), 富集 Rb、Th、U、K、Ga, 亏损 Sr、Ba、Ta、P、Ti, 显示其为准铝质 A 型花岗岩。正长花岗岩锆石 $\text{Hf}(t)$ 为 2.0 ~ 12.4, 平均 6.4, 显示其源区具有壳幔混合作用的特征, 壳幔物质交换为区内铁多金属矿化提供了大量成矿物质。该正长花岗岩属 A2 型花岗岩, 暗示其形成于造山后的伸展构造体制, 反映了祁漫塔格地区晚华力西-印支期造山旋回于晚三叠世由造山后期转为伸展阶段。

关键词: 地球化学; 锆石 U-Pb 年代学; Hf 同位素; A 型花岗岩; 祁漫塔格

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)02-0197-14

Petrogenesis and tectonic implications of the Late Triassic syenogranite in Qimantag area, East Kunlun Mountains

ZHANG Ming-yu¹, FENG Cheng-you¹, WANG Hui², LI Da-xin¹, QU Hong-ying¹,

LIU Jian-nan¹ and ZHOU Jian-hou¹

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The syenogranite in Qinghai Province is located on the east periphery of the Kendekeke deposit in the Qimantag area, East Kunlun Mountains. It consists of alkali feldspar (50% ~ 60%), quartz (20% ~ 30%), plagioclase (10% ~ 20%), and biotite and hornblende (1% ~ 5%). The results of LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope dating reveal that the syenogranite was formed at 217.9 ± 1.7 Ma (MSWD = 0.74, $n = 20$), suggesting the Late Triassic and the same time as the metallogenic age of the iron-polymetallic deposit in Qimantag area. The syenogranite is characterized by high silicon ($\text{SiO}_2 = 74.62\% \sim 75.28\%$), high alkali ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 8.81\% \sim 8.95\%$), and fairly high ratio of FeO^T/MgO (18.02 ~ 31.48). The trace element and REE compositions show the features of significant negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.04 \sim 0.05$), enrichment of Rb, Th, U, K, Ga, and depletion

收稿日期: 2017-02-14; 接受日期: 2017-08-11

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201411025); 中国地质调查局地质调查项目(1212011085528); 中国地质调查局高层次地质人才培养计划(201309); 青年地质英才计划(201112)

作者简介: 张明玉(1992-), 女, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: zhangmy.66@163.com; 通讯作者: 瞿泓滢(1978-), 高级工程师, 矿产普查与勘探专业, E-mail: hongyingqu@126.com。

of Sr, Ba, Ta, P, Ti. The geochemical characteristics indicate that the syenogranite belongs to metaluminous-weakly peraluminous A-type granite. The $\epsilon\text{Hf}(t)$ values of syenogranite vary from 2.0 to 12.4 with the two-stage model ages being t_{DM2} of 1 126 ~ 458 Ma. It is held that the source region of syenogranite probably had a mixture with the mantle and ancient crust, which provided abundant materials for the iron-polymetallic mineralization in this area. In the discrimination diagrams of A-type granite, the syenogranite falls into A2-type granites, which suggests that it was formed in an extensional tectonic regime after the orogenic process. All these characteristics display a transition of the Late Variscan-Indosinian orogenic cycle from the epi-orogenic stage to the extensional tectonic regime in Qimantag area in the late Triassic.

Key words: geochemistry; zircon U-Pb geochronology; Hf isotope; A-type granite; Qimantag

Fund support: Special Scientific Research Fund of Ministry of Land and Resources (201411025); Geological Survey Program from China Geological Survey (1212011085528); Program of High-level Geological Talents (201309); Youth Geological Talents of China Geological Survey (201112)

青海省祁漫塔格地区地处东昆仑造山带西段,主要经历了早古生代和晚古生代-早中生代两个构造-岩浆旋回及晚中生代-新生代造山作用(莫宣学等,2007),区域内加里东期、华力西期、印支期和燕山期经历了强烈的岩浆侵入活动,其中尤以印支期呈岩脉、岩枝及不规则状产出的中酸性侵入岩对区内铁铜铅锌钼成矿作用意义最大。前人对祁漫塔格地区印支期花岗岩进行了详细研究,认为该区印支期花岗岩主要可分为 260 ~ 240 Ma 和 240 ~ 210 Ma 两个阶段(陈国超等,2013;王秉璋等,2014;张炜等,2016),其中 260 ~ 240 Ma 主要发育陆缘弧型花岗质岩石,且具有明显的岩浆混合作用特征;240 ~ 210 Ma 阶段祁漫塔格地区处于后碰撞造山背景(丰成友等,2012;高永宝等,2012;于淼等,2017),主要发育混合成因的花岗岩。前人主要集中研究了 240 ~ 210 Ma 阶段的 I 型、S 型花岗岩,对于标志着后碰撞伸展构造背景的 A 型花岗岩研究较为匮乏。本文选取祁漫塔格地区肯德可克矿床东部出露的正长花岗岩体,对其进行了岩石学、年代学、地球化学及 Hf 同位素特征研究,探讨其成因及形成的地球动力学环境,以期对祁漫塔格地区的构造演化研究提供新的依据。

1 区域及岩体地质

东昆仑祁漫塔格地处青藏高原东北部东昆仑复合造山带的西段,东北与柴达木地块相邻,西南以昆南断裂为界(图 1a)。肯德可克铁多金属矿床位于祁漫塔格地区的狼牙山-景忍一带,是一个以铁、金矿为主并伴生钴、铋、银、铅、锌、铜等多金属的综合型矿床,与毗邻的野马泉、尕斯库勒铁多金属矿床具有

相似的地质构造背景、成矿地质条件和矿化特征。

研究区邻近于肯德可克矿区东部,地处祁漫塔格山脉与柴达木盆地的接壤地带。区域内出露地层主要有中元古界蓟县系狼牙山组(Jxl)灰岩、白云质灰岩,上奥陶统铁石达斯群(O_3ts)板岩、白云岩夹火山岩、硅质岩,上泥盆统牦牛山组(D_3m)玄武岩、安山岩、酸性凝灰岩,下石炭统大干沟组(C_1dg)海陆交替相砂岩、砂砾岩夹灰岩,上石炭统纳苏组(C_2d)生物碎屑灰岩、灰岩与白云岩,上三叠统鄂拉山组(T_3e)含角砾流纹质凝灰岩、安山岩与火山角砾岩以及第四系(Q_4)的冲积洪积物、风积洪积物和风积坡积物等(图 1b)(刘云华等,2006;奚仁刚等,2010;潘晓萍等,2013)。区域内构造线近东西向和北西向展布,褶皱、断裂构造发育,断裂构造以东西向、北西向为主,其次有北北西向、南北向、北东向(伊有昌等,2006)(图 1a)。

区域上岩浆岩成带出现,以中酸性岩为主,明显受北西向和北东向断裂控制,主要有加里东期、印支早期、印支晚期花岗岩,又以印支晚期花岗岩最为常见(图 1b),岩石组合复杂,构成了规模巨大的祁漫塔格构造-岩浆岩带(莫宣学等,2007)。肯德可克矿区内岩浆活动频繁,主要出露有上奥陶统铁石达斯群火山岩,地表侵入岩极少出露,仅在斜井和钻孔中零星出露石英斑岩、闪长玢岩和二长花岗岩等脉岩,规模均较小。伊有昌等(2006)、潘彤(2008)、李欢等(2012)根据矿床地质特征、矿区含硅质岩、火山岩特征判断肯德可克为一喷流沉积成因的矿床,随着钻孔中及矿区东部二长花岗岩(奚仁刚等,2010;肖晔等,2013)、玛兴大坂二长花岗岩(吴祥珂等,2011)的发现及研究,证实了印支期岩浆活动与矿化的密切关系。

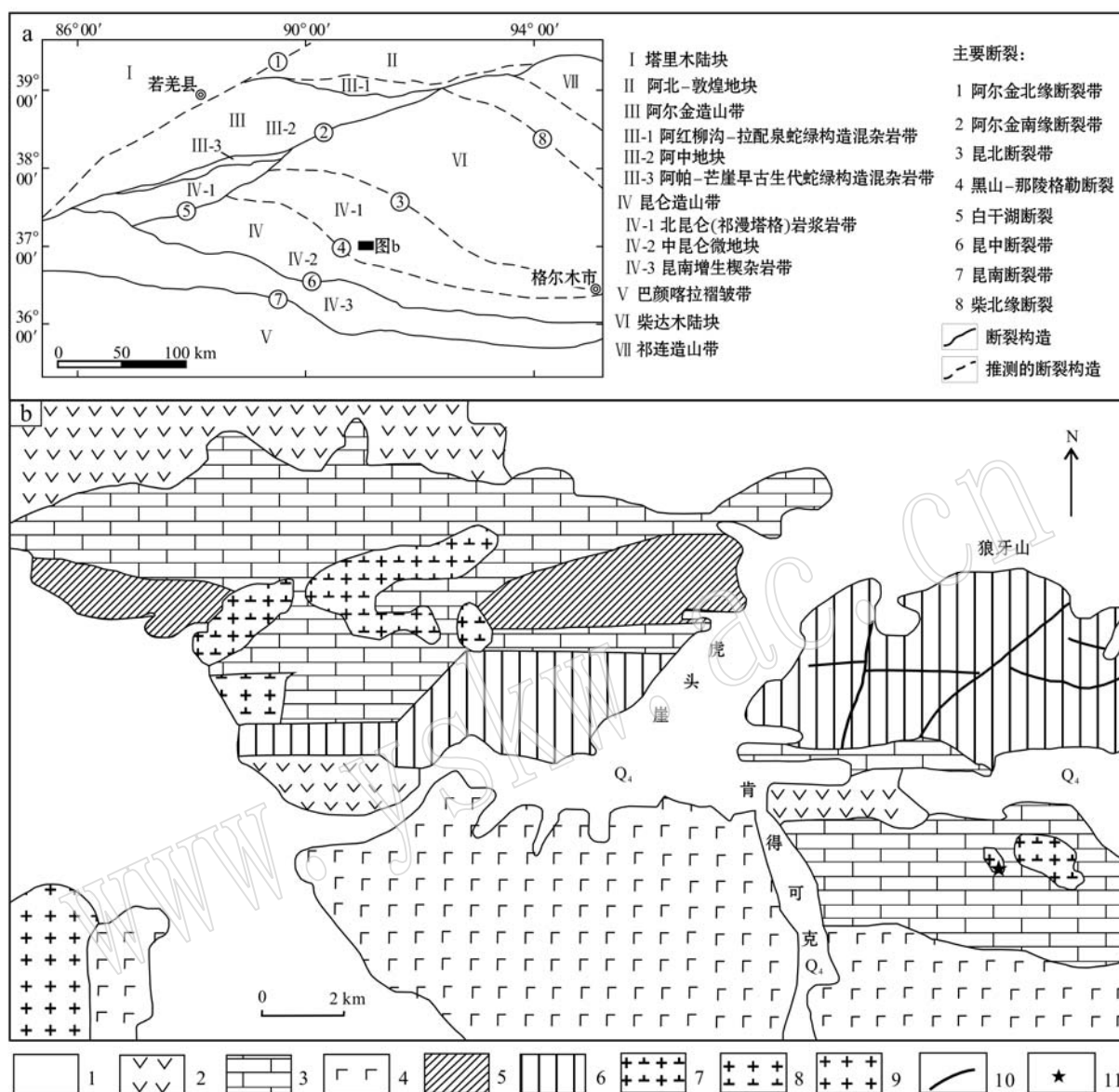


图 1 区域大地构造简图[a, 据李荣社等(2008)修改]及肯德可克与邻区地质简图[b, 据刘云华等(2006)修改]

Fig. 1 Regional tectonic sketch map (a, modified after Li Rongshe *et al.*, 2008) and geological sketch map of the Kendekeke area (b, modified after Liu Yunhua *et al.*, 2006)

1—第四系; 2—上三叠统; 3—上石炭统 纳苏组、下石炭统 大干沟组; 4—上泥盆统 托牛山组; 5—上奥陶统 铁石达斯群; 6—蓟县系 狼牙山组; 7—印支晚期花岗岩; 8—印支早期花岗岩; 9—加里东期花岗岩; 10—断层; 11—采样点

1—Quaternary; 2—Upper Triassic; 3—Upper Carboniferous Dīāosu Formation and Lower Carboniferous Dagangou Formation; 4—Upper Devonian Maoniushan Formation; 5—Upper Ordovician Tieshidasi Formation; 6—Jixianian Langyashan Formation; 7—Late Indosinian granite; 8—Early Indosinian granite; 9—Caledonian granite; 10—fault; 11—sampling location

本文用于年代学及岩石地球化学研究的样品采于肯德可克矿区外围狼牙山南侧(坐标为 $N37^{\circ}01'12''$, $E91^{\circ}48'56''$), 岩体出露面积约 0.8 km^2 。岩石为肉红色、中细粒正长花岗岩, 块状构造, 细晶结构, 局部呈似斑状结构(图 2a), 主要矿物成分为正长石(50% ~ 60%)、石英(20% ~ 30%)、斜长石(10% ~

20%)、黑云母(1% ~ 5%), 副矿物有黄铁矿、锆石等。其中正长石主要呈半自形-他形板条状、粒状, 较新鲜, 卡氏双晶发育, 可见不同程度高岭土化(图 2b); 石英多呈他形粒状分布于其他矿物颗粒之间; 斜长石主要为半自形板柱状; 黑云母为片状。

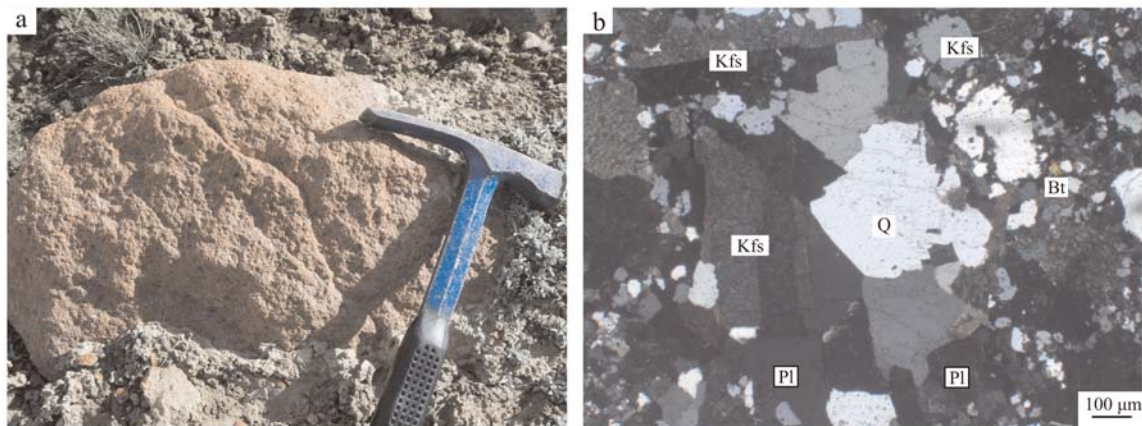


图2 肯德可克矿区外围正长花岗岩野外(a)及镜下特征照片(b)

Fig. 2 Photograph (a) and microphotograph (b) of syenogranite on the periphery of the Kendekeke deposit

a—正长花岗岩野外露头; b—正长花岗岩主要由正长石(Kfs)、石英(Q)、斜长石(Pl)和黑云母(Bt)组成(正交偏光)

a—outcrop of syenogranite; b—syenogranite consisting of K-feldspar(Kfs), quartz(Q), plagioclase(Pl) and biotite(Bt)(cross nicols)

2 测试分析方法

锆石分选采用重砂方法完成,首先将岩石样品破碎到80~100目,再经重砂淘选和电磁选,分选出无磁性重矿物样品,之后在北京领航锆年有限责任公司进行锆石的制靶和阴极发光(CL)照相。通过双目镜挑选晶形和透明度较好、粒径足够大的锆石颗粒,然后将其用树脂固定于靶上,打磨并抛光至锆石中心部位暴露出来,同时拍摄阴极发光(CL)图像。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成,实验仪器为 Aligent 7500。数据分析通过即时分析软件 GLITTER(Griffin *et al.*, 2002)计算获得同位素比值、年龄和误差,普通铅按照 Andersen(2002)的方法进行校正,校正后的数值应用 Isoplot/Ex Version 3.23(Ludwig, 2003)完成锆石 U-Pb 年龄谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值作图。

主量、稀土和微量元素地球化学分析在国家地质实验测试中心进行。首先将样品破碎、磨碎至200目制成分析样品,分别测定主量、微量及稀土元素含量。主要氧化物及全铁含量(FeO^T)利用X荧光光谱仪(XRF)测定,分析精度优于1%;稀土及微量元素利用等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,分析相对标准误差小于10%。

锆石 Hf 同位素测试在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室利用装有

New Wave UP213 激光剥蚀系统的 Neptune MC-ICP-MS 测试。激光束斑的直径为 35 μm 。实验过程中采用 He 气作为剥蚀物质的载气,使用锆石国际标样 GJ-1 作为参考物质,分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见文献(吴福元等, 2007b; 侯可军等, 2007)。 ϵ_{Hf} 和 Hf 模式年龄计算中采用的球粒陨石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 772(Blichert and Albarede, 1997), 亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.283 25(Vervoort and Blichert, 1999), 二阶段模式年龄计算中采用平均地壳的 f_{cc} 为 -0.548。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

肯德可克矿区外围正长花岗岩(LYS02)锆石自形程度高,以短柱及长柱状晶形为主,发育明显的震荡环带结构(图3),Th/U 值较高,为 0.43~0.87,平均 0.58,具有岩浆结晶锆石的特征。对 20 颗岩浆环带清晰的锆石进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素组成分析,测试结果如表 1, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值分布集中,为 $204 \pm 11 \sim 227 \pm 6$ Ma, 加权平均年龄为 217.9 ± 1.7 Ma (MSWD=0.74, $n=20$),代表正长花岗岩的结晶年龄(图4)。

3.2 主量及微量元素

3.2.1 主量元素

正长花岗岩 SiO_2 含量为 74.53%~75.28%(表2),

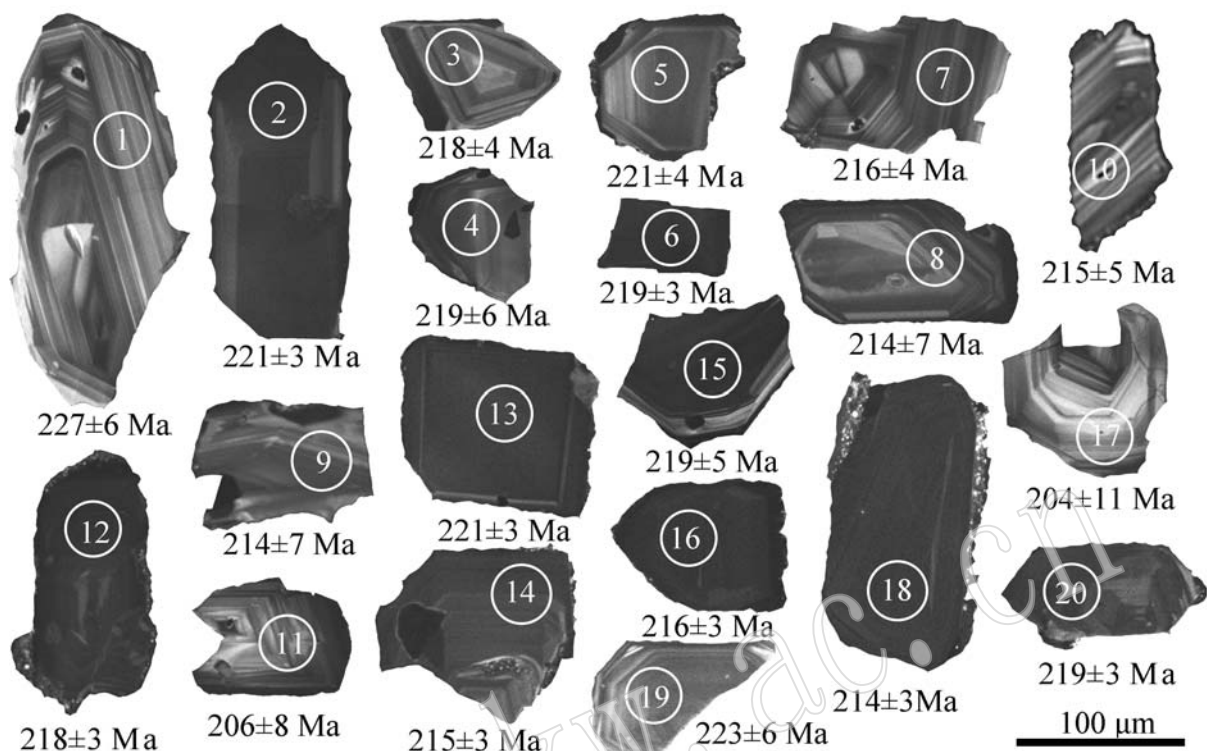


图3 肯德可克矿区外围正长花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of zircons of the syenogranite on the periphery of the Kendekeke deposit

表1 肯德可克矿区外围正长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data for syenogranite on the periphery of the Kendekeke deposit

测点号	$w_B/10^{-6}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Th	U	Th/U	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ
LYS02 01	80.87	118.2	0.68	0.051 83	0.004 76	0.255 70	0.022 77	0.035 78	0.000 90	278	155	231	18	227	6
LYS02 02	179.7	409.3	0.44	0.049 60	0.002 13	0.238 66	0.009 85	0.034 89	0.000 53	176	68	217	8	221	3
LYS02 03	155.2	204.3	0.76	0.049 70	0.003 15	0.235 96	0.014 39	0.034 43	0.000 69	181	103	215	12	218	4
LYS02 04	74.36	166.8	0.45	0.049 60	0.004 68	0.236 79	0.021 49	0.034 62	0.001 00	176	150	216	18	219	6
LYS02 05	200.3	231.1	0.87	0.046 33	0.003 05	0.222 47	0.014 16	0.034 82	0.000 68	15	101	204	12	221	4
LYS02 06	232.2	468.8	0.50	0.050 43	0.002 00	0.240 01	0.009 13	0.034 52	0.000 51	215	61	218	7	219	3
LYS02 07	133.8	220.1	0.61	0.047 40	0.003 12	0.222 94	0.014 18	0.034 11	0.000 67	69	103	204	12	216	4
LYS02 08	62.47	140.3	0.45	0.056 12	0.005 74	0.261 22	0.025 62	0.033 76	0.001 08	457	162	236	21	214	7
LYS02 09	80.82	144.6	0.56	0.047 95	0.005 71	0.223 19	0.025 67	0.033 76	0.001 13	97	194	205	21	214	7
LYS02 10	121.5	180.4	0.67	0.048 55	0.004 12	0.227 16	0.018 59	0.033 93	0.000 85	126	136	208	15	215	5
LYS02 11	76.23	137.5	0.55	0.054 77	0.006 84	0.244 98	0.029 40	0.032 44	0.001 23	403	200	222	24	206	8
LYS02 12	462.1	845.3	0.55	0.049 78	0.001 49	0.235 85	0.006 75	0.034 36	0.000 43	185	43	215	6	218	3
LYS02 13	319.7	428.1	0.75	0.051 82	0.002 30	0.249 04	0.010 58	0.034 85	0.000 55	277	68	226	9	221	3
LYS02 14	170.5	392.3	0.43	0.049 77	0.002 46	0.233 01	0.011 09	0.033 95	0.000 55	184	81	213	9	215	3
LYS02 15	196.9	457.4	0.43	0.050 92	0.003 42	0.242 98	0.015 62	0.034 61	0.000 77	237	107	221	13	219	5
LYS02 16	573.5	999.2	0.57	0.051 14	0.001 62	0.239 91	0.00727	0.034 02	0.000 44	247	46	218	6	216	3
LYS02 17	47.82	105.5	0.45	0.151 23	0.016 01	0.764 91	0.072 28	0.036 69	0.001 89	397	583	220	61	204	11
LYS02 18	361.9	639.5	0.57	0.049 70	0.001 85	0.231 52	0.008 28	0.033 78	0.000 46	181	58	211	7	214	3
LYS02 19	139.6	201.0	0.69	0.047 55	0.004 52	0.230 38	0.021 24	0.035 14	0.000 91	77	155	211	18	223	6
LYS02 20	410.5	737.9	0.56	0.052 53	0.001 88	0.250 29	0.008 55	0.034 56	0.000 48	309	52	227	7	219	3

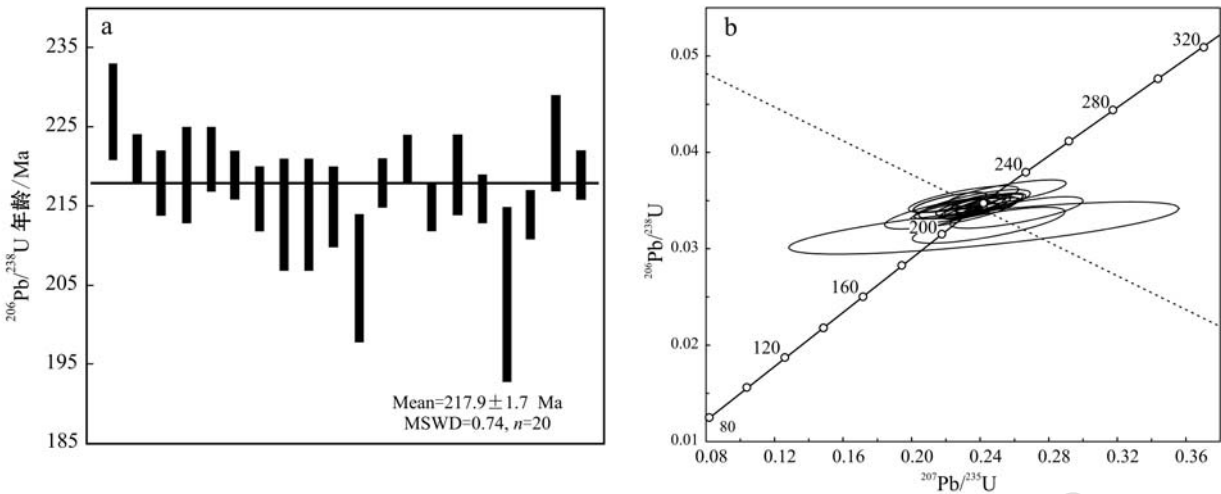


图 4 肯德可克矿区外围正长花岗岩锆石 U-Pb 加权平均年龄(a)和谐和年龄图(b)
Fig. 4 Diagrams of zircon U-Pb weighted average ages (a) and concordia ages (b) of the syenogranite on the periphery of the Kendekeke deposit

表 2 肯德可克矿区外围正长花岗岩主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果
Table 2 Compositions of major elements ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of the syenogranite on the periphery of the Kendekeke deposit

样品号	LYS-1	LYS-2	LYS-3	LYS-4	LYS-5	样品号	LYS-1	LYS-2	LYS-3	LYS-4	LYS-5
SiO ₂	74.62	75.28	74.53	75.07	74.94	Y	43.0	34.8	40.3	49.9	38.7
TiO ₂	0.10	0.11	0.09	0.11	0.10	ΣREE	296.81	231.15	237.35	303.32	263.13
Al ₂ O ₃	12.61	12.89	12.59	12.54	12.69	LREE	264.75	208.54	209.26	269.92	237.70
Fe ₂ O ₃	0.55	0.18	0.46	0.56	0.72	HREE	32.06	22.61	28.09	33.40	25.43
FeO	1.08	1.10	1.01	1.08	1.08	LREE/HREE	8.26	9.22	7.45	8.08	9.35
MnO	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	(La/Yb) _N	8.68	10.05	8.56	9.47	10.75
MgO	0.05	0.07	0.05	0.08	0.06	δEu	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
CaO	0.83	0.64	0.78	0.80	0.49	δCe	1.01	0.96	0.91	0.83	0.86
Na ₂ O	3.91	4.16	3.91	3.83	4.02	Rb	244	225	250	258	267
K ₂ O	5.04	4.74	4.95	4.98	4.90	Ba	68.8	51.1	52.0	43.2	32.8
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	Th	25.5	19.3	23.3	27.0	22.5
LOI	0.80	0.67	0.93	0.94	0.68	U	4.67	4.85	4.40	5.00	4.22
Na ₂ O + K ₂ O	8.95	8.90	8.86	8.81	8.92	Nb	23.7	21.5	27.9	26.9	24.1
K ₂ O/Na ₂ O	1.29	1.14	1.27	1.30	1.22	Ta	1.84	1.50	1.68	1.81	1.56
FeO ^T /MgO	31.48	18.02	28.46	19.79	28.78	Sr	35.6	23.6	35.0	29.5	20.9
A/CNK	0.94	0.98	0.95	0.95	0.99	Zr	215	242	196	212	198
A/NK	1.06	1.08	1.07	1.07	1.06	Hf	9.33	9.15	8.67	8.94	8.30
σ	2.53	2.45	2.49	2.42	2.49	Li	8.23	12.40	9.14	6.42	9.14
DI	94.56	94.81	94.69	94.31	95.07	Be	3.88	3.24	3.17	3.78	4.30
La	61.0	49.6	52.5	68.0	60.1	Sc	2.76	2.56	2.02	2.43	2.81
Ce	126.0	94.5	95.6	116.0	104.0	V	0.74	0.61	0.74	0.75	0.57
Pr	14.1	10.8	11.4	16.1	13.4	Cr	2.16	1.78	2.04	1.91	1.52
Nd	54.0	46.4	41.9	59.2	51.6	Co	0.18	0.23	0.21	0.18	0.18
Sm	9.50	7.12	7.75	10.50	8.49	Ni	0.46	0.24	0.37	0.34	0.27
Eu	0.15	0.12	0.11	0.12	0.11	Cu	7.46	4.49	5.31	14.40	8.82
Gd	8.95	6.38	7.22	9.28	6.94	Zn	57.3	51.9	43.3	66.2	65.3
Tb	1.44	1.05	1.21	1.58	1.18	Mo	1.79	1.15	2.16	1.88	1.96
Dy	8.64	6.02	7.87	8.77	6.64	Bi	0.33	12.30	1.02	0.53	3.17
Ho	1.66	1.18	1.45	1.79	1.33	Sn	5.98	4.12	6.98	5.50	5.37
Er	4.88	3.39	4.62	5.36	4.13	Pb	32.4	24.1	19.6	41.5	27.0
Tm	0.75	0.54	0.67	0.74	0.62	Ga	20.2	20.6	18.3	19.2	21.3
Yb	5.04	3.54	4.40	5.15	4.01	Cs	3.42	1.86	2.25	2.51	2.32
Lu	0.70	0.51	0.65	0.73	0.58	t/°C	804	820	798	805	803

K_2O 含量为 4.74% ~ 5.04%, CaO 含量为 0.49% ~ 0.83, MgO 含量为 0.05% ~ 0.08%; 碱含量较高, $K_2O + Na_2O$ 为 8.81% ~ 8.95%, 里特曼指数 σ 为 2.42 ~ 2.53, A/CNK 介于 0.94 ~ 0.99 之间, 属准铝质花岗岩(图 5a); 富钾贫钠, K_2O/Na_2O 值介于 1.14 ~ 1.30 之间; FeO^T/MgO 值为 18.02 ~ 31.48, 总体属高钾钙碱性系列(图 5b)。

3.2.2 微量元素

肯德可克铁矿区正长花岗岩岩体稀土元素总量较高($\Sigma REE = 231.15 \times 10^{-6} \sim 303.32 \times 10^{-6}$), 在球

粒陨石标准化的稀土元素配分曲线中呈右倾型配分特征(图 6a); 5 件样品 $LREE/HREE$ 为 7.45 ~ 9.35, $(La/Yb)_N$ 为 8.56 ~ 10.75, 表现为轻稀土元素富集, 轻重稀土元素分馏强烈, 并具有明显的负 Eu 异常($\delta Eu = 0.04 \sim 0.05$)。5 件样品的原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 6b), 配分型式基本一致, 以富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、K 和亏损过渡元素 Sr、Ba 及高场强元素 Nb、Ta、Ti 等为特征, 具较高的 Rb/Sr 值(6.85 ~ 12.8)和 Rb/Nd 值(4.36 ~ 5.97)。

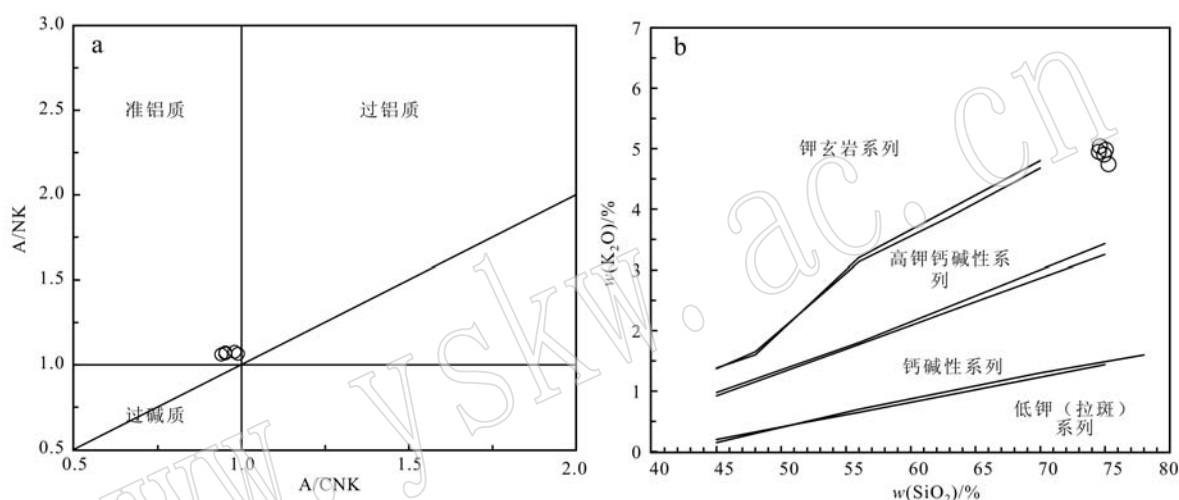


图 5 肯德可克矿区外围正长花岗岩 A/NK - A/CNK 图解(a) 及 $K_2O - SiO_2$ 图解(b)

Fig. 5 Diagrams of A/NK - A/CNK (a) and $K_2O - SiO_2$ (b) of the syenogranite on the periphery of the Kendekeke deposit

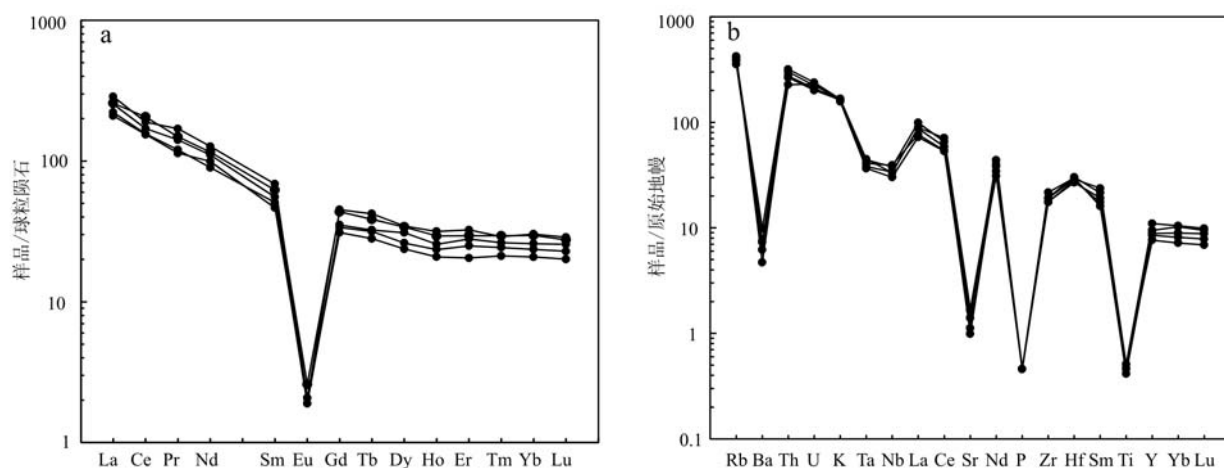


图 6 肯德可克矿区外围正长花岗岩稀土元素配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b)(标准化值据 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 6 Chondrite-normalized rare earth element patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagrams (b) for syenogranite on the periphery of the Kendekeke deposit (normalization values after McDonough and Sun, 1995)

3.3 锆石 Hf 同位素特征

在正长花岗岩紧邻锆石年龄分析点的部位(图3)又进行了 Hf 同位素测试,结果(表3)显示锆石颗粒 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 705 ~ 0.282 988, 平均

0.282 825。按照 $t = 217.9\text{ Ma}$ 计算, $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 为 2.0 ~ 12.4, 平均为 6.4。单阶段 Hf 模式年龄 t_{DM1} 为 790 ~ 374 Ma, 二阶段 Hf 模式年龄 t_{DM2} 介于 1 126 ~ 458 Ma 之间。

表3 肯德可克矿区外围正长花岗岩体锆石原位 Hf 同位素组成

Table 3 Zircon in situ Hf isotopic data of the syenogranite on the periphery of the Kendekeke deposit

测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{corr.}}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	$t_{2\text{DM}}/\text{Ma}$	f_{La}/Hf
LYS02-01	0.135 143	0.002 087	0.282 937	0.282 928	0.000 019	10.3	461	595	-0.94
LYS02-02	0.094 895	0.001 383	0.282 755	0.282 750	0.000 019	4.0	712	999	-0.96
LYS02-03	0.078 299	0.001 229	0.282 749	0.282 744	0.000 022	3.8	717	1 011	-0.96
LYS02-04	0.157 953	0.002 312	0.282 998	0.282 988	0.000 015	12.4	374	458	-0.93
LYS02-05	0.097 091	0.001 387	0.282 905	0.282 900	0.000 022	9.3	497	659	-0.96
LYS02-06	0.148 167	0.002 254	0.282 985	0.282 976	0.000 019	12.0	391	486	-0.93
LYS02-07	0.121 757	0.001 783	0.282 803	0.282 796	0.000 025	5.6	651	895	-0.95
LYS02-08	0.095 297	0.001 438	0.282 779	0.282 773	0.000 022	4.8	679	946	-0.96
LYS02-09	0.083 889	0.001 268	0.282 699	0.282 694	0.000 022	2.0	790	1 126	-0.96
LYS02-10	0.110 428	0.001 646	0.282 803	0.282 796	0.000 018	5.6	648	894	-0.95
LYS02-11	0.087 579	0.001 317	0.282 789	0.282 784	0.000 017	5.2	662	922	-0.96
LYS02-12	0.125 587	0.001 903	0.282 958	0.282 950	0.000 018	11.1	427	545	-0.94
LYS02-13	0.107 834	0.001 623	0.282 800	0.282 794	0.000 023	5.6	651	899	-0.95
LYS02-14	0.139 639	0.002 065	0.282 849	0.282 840	0.000 020	7.2	589	794	-0.94
LYS02-15	0.105 653	0.001 635	0.282 749	0.282 742	0.000 020	3.7	726	1 016	-0.95
LYS02-16	0.118 697	0.001 808	0.282 748	0.282 740	0.000 022	3.7	731	1 020	-0.95
LYS02-17	0.145 359	0.002 129	0.282 874	0.282 865	0.000 017	8.1	553	738	-0.94
LYS02-18	0.102 595	0.001 594	0.282 764	0.282 757	0.000 019	4.3	703	981	-0.95
LYS02-19	0.155 231	0.002 301	0.282 884	0.282 875	0.000 014	8.4	541	716	-0.93
LYS02-20	0.139 585	0.002 103	0.282 839	0.282 830	0.000 028	6.8	604	818	-0.94
LYS02-21	0.128 459	0.001 951	0.282 713	0.282 705	0.000 020	2.4	784	1 100	-0.94
LYS02-22	0.099 849	0.001 523	0.282 730	0.282 724	0.000 020	3.1	751	1 057	-0.95
LYS02-23	0.130 703	0.001 982	0.282 862	0.282 854	0.000 026	7.7	568	763	-0.94

4 讨论

4.1 成岩年龄

近年来成岩成矿年代学研究表明,印支期是祁漫塔格地区成矿强度最大、最具有经济意义的多金属成矿期,且成矿多发生在 245 ~ 220 Ma。于淼等(2015)获得尕林格矿床磁铁铁矿石金云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄为 235.8 Ma;张爱奎等(2016)获得野马泉矿区与成矿密切相关的石英二长闪长岩、二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 220.0 Ma 和 222.8 Ma;丰成友等(2011)对虎头崖矿区铜钼多金属矿石进行了辉钼矿 Re-Os 测年,获得成矿年龄为 230 ~ 225 Ma;高永宝(2013)获得卡而却卡矿区Ⅶ号带砂卡岩型矿体中的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 246.1 Ma;奚仁刚等(2010)及肖晔等(2013)获得肯德可克矿区与成矿密切相关的二长花岗岩成岩年龄

分别为 $230.5 \pm 4.2\text{ Ma}$ (矿区内)、 $229.5 \pm 0.5\text{ Ma}$ (坑道及钻孔内)(锆石 LA-ICP-MS);吴祥珂等(2011)研究了矿区南部的玛兴大坂二长花岗岩体,认为其与成矿密切相关,且成岩年龄为 $218 \pm 2\text{ Ma}$;潘晓萍等(2013)获得矿区北侧英安质熔结凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $227.1 \pm 1.2\text{ Ma}$;赵财胜等(2006)对矿区西部辉长岩脉的斜长石进行 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测试获得坪年龄 $207.8 \pm 1.9\text{ Ma}$ 。上述研究结果表明肯德可克铁矿主要形成于 230 ~ 210 Ma 之间,与祁漫塔格地区印支期成矿作用近乎同时发生。本文采用 LA-ICP-MS 法获得肯德可克铁矿区外围正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 $217.9 \pm 1.7\text{ Ma}$,表明正长花岗岩形成于晚三叠世,与肯德可克铁多金属矿床基本同时形成。

4.2 岩石成因

肯德可克晚三叠世正长花岗岩以石英、钾长石等浅色矿物为主,并含有黑云母、角闪石等暗色矿

物,其地球化学成分具有高硅($\text{SiO}_2 = 74.53\% \sim 75.28\%$)、富碱且相对富钾($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 8.81\% \sim 8.95\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.14 \sim 1.30$)、富铁贫镁($\text{FeO}^T/\text{MgO} = 18.02 \sim 31.48$)的特征,稀土微量元素组成(表2)显示其经历了较高分异的结晶分异作用($\text{DI} = 94.31 \sim 95.07$),且其锆饱和温度较高($798 \sim 820^\circ\text{C}$, 平均 806°C),并在 Whalen 等(1987)提出的花岗岩构造判别图中落入 A 型花岗岩区域(图7),显示弱过铝质 A 型花岗岩的特征。

近年来,祁漫塔格地区小红山(陈丹玲等, 2001)、野马泉(薛宁等, 2009; 奚仁刚等, 2010; 高永

宝等, 2014)、虎头崖(张晓飞等, 2016)等地区均有晚三叠世富钾高分异花岗岩的报道,这些岩体具有相似的地球化学性质,在 A 型花岗岩判别图中分布在 A 型花岗岩与 I 型、S 型花岗岩过渡区域(图7),结合其矿物组成及岩石学特征,均应为 A 型花岗岩。一般认为 A 型花岗岩是判断伸展背景的重要岩石学标志(吴福元等, 2007a), Eby (1992) 根据不同的伸展背景将 A 型花岗岩划分为对应板内裂谷环境(A1型)和后碰撞伸展环境(A2型)的两个亚类。上述花岗岩体在 A 型花岗岩分类判别图(图8)中绝大多数落入 A2 区,说明它们形成于造山后的伸展体制,反

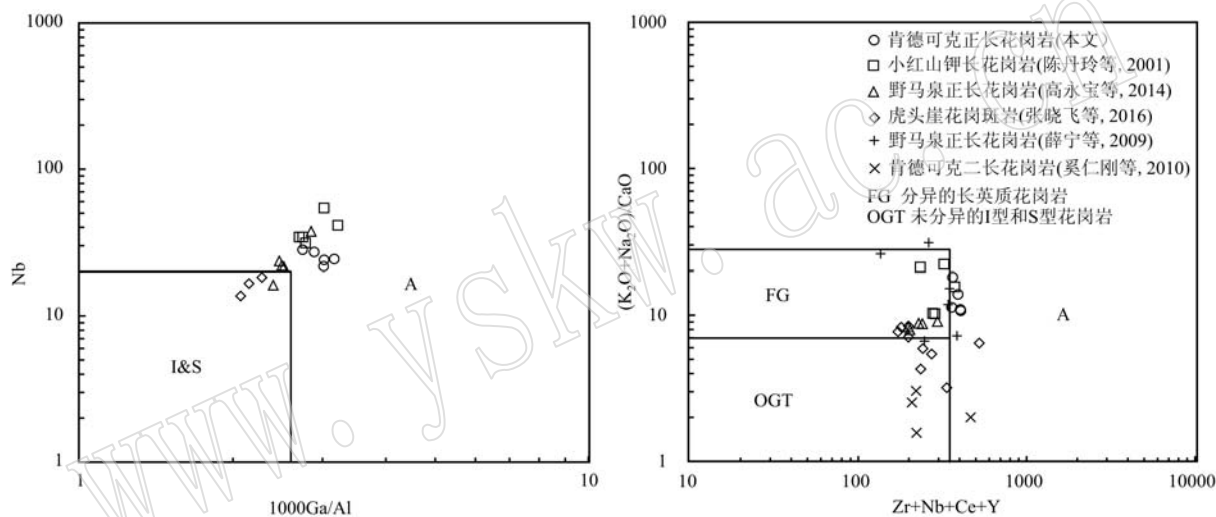


图7 A型花岗岩判别图(据 Whalen 等, 1987)

Fig. 7 Discrimination diagrams for A-type granite (after Whalen *et al.*, 1987)

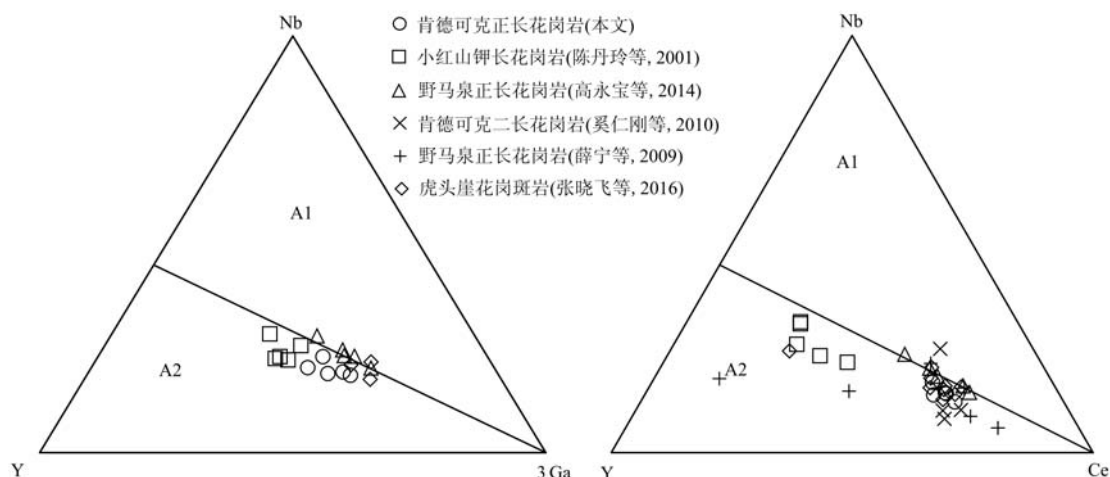


图8 A型花岗岩分类判别图(据 Eby, 1992)

Fig. 8 Discrimination diagrams for two types of A-type granite (after Eby, 1992)

映了祁漫塔格地区于晚三叠世由造山后期转为伸展阶段(丰成友等,2012)。

4.3 岩浆源区及形成动力学背景

肯德可克正长花岗岩锆石原位 Hf 同位素 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化范围小(0.282 705 ~ 0.282 988),表明所测样品锆石中的 Hf 同位素分布均一,指示具有

单一岩浆源区; $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 为 2.0 ~ 12.4,说明其源区具有壳幔混源的特征,以壳源组分为主,并受到新生下地壳物质的混染(图 9a);二阶段模式年龄 t_{DM2} 介于 458 ~ 1 126 Ma 之间,可能记录了显生宙期间祁漫塔格地区大量地幔物质以岩浆的形式侵入到地壳基底岩石中形成新生地壳的过程(莫宣学等,2007)。

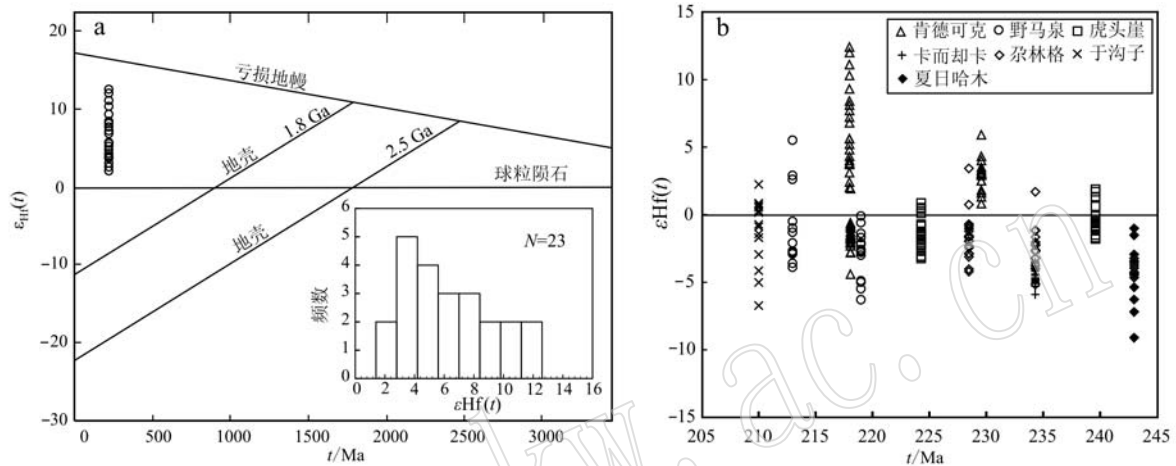


图9 肯德可克矿区外围正长花岗岩(a)及祁漫塔格地区三叠纪花岗岩(b)中锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ 图解

Fig. 9 $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ diagram for the zircons from syenogranite on the periphery of the Kendekeke deposit (a) and the Triassic granitoids in the Qimantag area (b)

祁漫塔格地区广泛发育中晚三叠世中酸性侵入岩,其中发育有大量含镁铁质微粒包体,且 Nd-Hf 同位素组成均显示为壳幔混源的特征(姚磊等,2015b)。肯德可克(赵财胜等,2006)、小尖山(奥琮等,2015)、卡而却卡(姚磊等,2015a)、加鲁河(刘成东等,2004)等地区三叠纪辉长岩的出现,也代表了祁漫塔格地区晚华力西—印支期造山旋回晚期幔源岩浆的底侵作用(莫宣学等,2007)。祁漫塔格地区各矿区三叠纪花岗岩 Hf 同位素组成略有差异(表4、图9b),也显示了其源区幔源或新生下地壳岩浆与壳源花岗质岩浆不同程度的混合作用。

前人研究表明,显生宙以来,东昆仑地区主要经历了始特提斯和古特提斯两个重要演化过程(李荣社等,2007;刘彬等,2012),相应存在加里东期和晚华力西—印支期两个主要构造岩浆旋回(莫宣学等,2007),华力西—印支期构造岩浆活动比加里东期更为强烈。在 260 ~ 230 Ma 期间,东昆仑即处在太平洋板块大规模俯冲—碰撞阶段(郭正府等,1998),此后东昆仑地区由挤压向伸展转变(李光明等,2001),三叠纪中晚期为造山后伸展阶段,深部表现为岩石圈

地幔的拆沉作用,大规模的幔源基性岩浆底侵及其与壳源岩浆的混合(罗照华等,2002;刘成东等,2004;谌宏伟等,2005),形成区域内大规模具壳幔混源特征的花岗岩(237 ~ 204 Ma,丰成友等,2012),同时也为区域成矿提供了丰富的物质来源,岩浆在侵入过程中与含碳酸盐岩地层围岩进行了物质交代,形成矽卡岩型多金属矿床(丰成友等,2010)。

5 结论

肯德可克外围正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 217.9 ± 1.7 Ma,形成时代为晚三叠世。其主量元素组成具有高硅、富碱、富铁贫镁且弱过铝质的特征, K_2O 含量为 4.74% ~ 5.04%,属准铝质或弱过铝质高钾钙碱性系列;岩相学及微量稀土元素组成显示其为 A 型花岗岩,且形成于造山后的伸展构造体制(A2 型)。正长花岗岩锆石 Hf 同位素组成 $\varepsilon\text{Hf}(t) = 2.0 \sim 12.4$,显示其源区具有壳幔混合作用的特征。肯德可克正长花岗岩体的形成反映了晚三叠世祁漫塔格地区晚华力西—印支期造山旋回由造山后

表4 祁漫塔格地区三叠纪花岗岩年代学及 Hf 同位素组成

Table 4 Chronological and Hf isotopic data of the Triassic granitoids in the Qimantag area

矿区	岩性	年龄/Ma	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM}/Ma	资料来源
肯德可克	二长花岗岩	229.5±0.5	0.8~5.9 (2.9)	1 211~888 (1 075)	肖晔等(2013)
	二长花岗岩	218±2	-4.4~-0.6 (-1.7)	1 190~1 080 (1 140)	吴祥珂等(2011)
	正长花岗岩	217.9±1.7	2.0~12.4 (6.4)	1 126~458 (845)	本文
野马泉	石英二长闪长岩	219±1	-6.3~-0.1 (-2.9)	1 659~1 264 (1 438)	高永宝等(2014)
	正长花岗岩	213±1	-3.9~-5.5 (-0.8)	1 497~895 (1 300)	
虎头崖	正长花岗岩	239.7±0.8	-1.9~-1.8 (-0.5)	1 388~1 153 (1 299)	李佩等(2015)
	花岗闪长岩	224.3±0.6	-3.3~-0.8 (-1.5)	1 470~1 207 (1 352)	
卡而却卡	花岗闪长岩	234.4±0.6	-5.8~-3.4 (-4.3)	1 596~1 485 (1 541)	高永宝等(2015)
尕林格	石英二长岩	234.4±0.6	-5.1~-1.7 (-2.4)	1 587~1 157 (1 415)	高永宝等(2012)
	石英二长闪长岩	228.3±0.5	-4.2~-3.4 (-1.6)	1 523~1 042 (1 363)	
于沟子	钾长花岗岩	210.0±0.6	-6.7~-2.3 (-1.2)	1 674~1 102 (1 320)	钱兵等(2015)
夏日哈木	石英闪长岩	243±1	-9.0~-1.0 (-4.3)	1 840~1 340 (1 544)	王冠等(2014)

期转为伸展阶段。此阶段深部岩石圈地幔的拆沉, 引发了幔源基性岩浆底侵及其与壳源岩浆的混合, 形成区域内大规模具壳幔混源特征的花岗岩。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1~2): 59~79.
- Ao Cong, Sun Fengyue, Li Bile, *et al.* 2015. U-Pb dating, geochemistry and tectonic implications of Xiaojianshan gabbro in Qimantage Mountain, eastern Kunlun orogenic belt [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(6): 1 176~1 184 (in Chinese with English abstract).
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243~258.
- Chen Danling, Liu Liang, Che Zicheng, *et al.* 2001. Determination and preliminary study of Indosinian aluminous A-type granites in the Qimantag area, southeastern Xinjiang [J]. *Geochimica*, 30(6): 540~546 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, *et al.* 2013. Geochronology and genesis of the Helegang Xilikete granitic plutons from the southern margin of the eastern East Kunlun orogenic belt and their tectonic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1 525~1 541 (in Chinese with English abstract).
- Chen Hongwei, Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, *et al.* 2005. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun orogenic belt [J]. *Geology in China*, 32(3): 386~395 (in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 20(7): 641~644.
- Feng Chengyou, Li Dongsheng, Wu Zhengshou, *et al.* 2010. Major types, time-space distribution and metallogenesis of polymetallic deposits in the Qimantage metallogenic belt, eastern Kunlun area [J]. *Northwestern Geology*, 43(4): 10~17 (in Chinese with English abstract).
- Feng Chengyou, Wang Song, Li Guochen, *et al.* 2012. Middle to late Triassic granitoids in the Qimantag area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenetic significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 665~678 (in Chinese with English abstract).
- Feng Chengyou, Wang Xueping, Shu Xiaofeng, *et al.* 2011. Isotopic chronology of the Hutouya skarn lead-zinc polymetallic ore district in Qimantage area of Qinghai Province and its geological significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1 806~1 816 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yongbao. 2013. The Intermediate-acid Intrusive Magmatism and Mineralization in Qimantag, East Kunlun Mountains [D]. Xi'an: Thesis for Doctor Degree of Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Gao Yongbao, Li Kan, Qian Bing, *et al.* 2015. The genesis of granodiorites and dark enclaves from the Kaerqueka deposit in east Kunlun belt: Evidence from zircon U-Pb dating, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic compositions [J]. *Geology in China*, 42(3): 646~662 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yongbao, Li Wenyuan, Ma Xiaoguang, *et al.* 2012. Genesis, geochronology and Hf isotopic compositions of the magmatic rocks in

- Galings iron deposit, Eastern Kunlun[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 48(2): 36 ~ 47(in Chinese with English abstract).
- Gao Yongbao, Li Wenyuan, Qian Bing, *et al.* 2014. Geochronology, geochemistry and Hf isotopic compositions of the granitic rocks related with iron mineralization in Yemaquan deposit, East Kunlun, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(6): 1 647 ~ 1 665(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. Lithos, 61(3 ~ 4): 237 ~ 269.
- Guo Zhengfu, Deng Jinfu, Xu Zhiqin, *et al.* 1998. Late palaeozoic-mesozoic intracontinental orogenic process and intermediate-acidic igneous rocks from the Eastern Kunlun Mountains of Northwestern China[J]. Geoscience, 12(3): 344 ~ 352(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2 595 ~ 2 604(in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Shen Yuanchao and Liu Tiebing. 2001. Geological and geochemical characteristics of Variscan granite in the Qimantag region, eastern Kunlun[J]. Geology and Prospecting, 37(1): 73 ~ 78(in Chinese with English abstract).
- Li Huan and Xi Xiaoshuang. 2012. Geochemistry and sedimentary exhalative mineralization in Hutouya-Kendekeke field, Qinghai Province, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 22(3): 772 ~ 783(in Chinese with English abstract).
- Li Kan, Gao Yongbao, Qian Bing, *et al.* 2015. Geochronology, geochemical characteristics and Hf isotopic compositions of granite in the Hutouya deposit, Qimantag, East Kunlun[J]. Geology in China, 42(3): 630 ~ 645(in Chinese with English abstract).
- Li Rongshe, Ji Wenhua and Yang Yongcheng. 2008. Geology of Kunlun Mountains and Adjacent Areas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 400(in Chinese).
- Li Rongshe, Ji Wenhua, Zhao Zhenming, *et al.* 2007. Progress in the study of the Early Paleozoic Kunlun orogenic belt[J]. Geological Bulletin of China, 26(4): 373 ~ 382(in Chinese).
- Liu Bin, Ma Changqian, Zhang Jinyang, *et al.* 2012. Petrogenesis of Early Devonian intrusive rocks in the east part of Eastern Kunlun Orogen and implication for Early Palaeozoic orogenic processes[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(6): 1 785 ~ 1 807(in Chinese with English abstract).
- Liu Chengdong, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, *et al.* 2004. Mixing events between the crust- and mantle-derived magmas in Eastern Kunlun: Evidence from zircon SHRIMP II chronology[J]. Chinese Science Bulletin, 49(6): 596 ~ 602(in Chinese).
- Liu Yunhua, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, *et al.* 2006. Zircon SHEIMP U-Pb dating of the Jingren granite, Yemaquan region of the East Kunlun and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2 457 ~ 2 463(in Chinese with English abstract).
- Ludwig R K. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 1 ~ 70.
- Luo Zhaohua, Ke Shan, Cao Yongqing, *et al.* 2002. Late Indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun[J]. Geological Bulletin of China, 21(6): 292 ~ 297(in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. Chemical Geology, 120(3 ~ 4): 223 ~ 253.
- Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, *et al.* 2007. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun orogenic belt[J]. Geological Journal of China Universities, 13(3): 403 ~ 414(in Chinese with English abstract).
- Pan Tong. 2008. Geochemical features and origin of siliceous rocks of Kendekeke Co-Au deposit in the Eastern Kunlun metallogenic belt, Qinghai[J]. Geology and Prospecting, 44(2): 51 ~ 54(in Chinese with English abstract).
- Pan Xiaoping, Li Rongshe, Yu Pusheng, *et al.* 2013. The age of country rocks of the Kendekeke Fe-Co polymetallic deposit in Qimantag area and its significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 32(1): 53 ~ 62(in Chinese with English abstract).
- Qian Bin, Gao Yongbao, Li Kan, *et al.* 2015. Zircon U-Pb-Hf isotopes and whole rock geochemistry constraint on the petrogenesis of iron-rare metal mineralization related alkaline granitic intrusive rock in Yugouzi area, eastern Kunlun, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(9): 2 508 ~ 2 520(in Chinese with English abstract).
- Vervoort J and Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(3 ~ 4): 533 ~ 556.
- Wang Bingzhang, Chen Jing, Luo Zhaohua, *et al.* 2014. Spatial and temporal distribution of Late Permian- Early Jurassic intrusion assemblages in eastern Qimantag, East Kunlun, and their tectonic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(11): 3 213 ~ 3 228(in Chinese with English abstract).
- Wang Guan, Sun Fengyue, Li Bile, *et al.* 2014. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of diorite in Xiarihamu ore district from East Kunlun and its geological significance[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 44(3): 876 ~ 891(in Chinese with English abstract).

- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407 ~ 419.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007a. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1 217 ~ 1 238(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007b. Lu-Hf isotopic systematic and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185 ~ 220(in Chinese with English abstract).
- Wu Xiangke, Meng Fancong, Xu Hong, *et al.* 2011. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd-Hf isotopic compositions of the Maxingdaban Late Triassic granitic pluton from Qimantag in the eastern Kunlun[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(11): 3 380 ~ 3 394(in Chinese with English abstract).
- Xi Rengang, Xiao Peixi, Wu Yuezhong, *et al.* 2010. The geological significances, composition and age of the Monzonitic granite in Kendekeke iron mine[J]. Northwestern Geology, 43(4): 195 ~ 202(in Chinese with English abstract).
- Xiao Ye, Feng Chengyou, Liu Jiannan, *et al.* 2013. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating and sulfur isotope characteristics of Kendekeke Fe-polymetallic deposit, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 32(1): 177 ~ 186(in Chinese with English abstract).
- Xue Ning, An Yongsheng, Li Wufu, *et al.* 2009. Characteristic and genesis of normal granite in the Yemaquan area of Qinghai[J]. Journal of Qinghai University (Nature Science), 27(2): 18 ~ 22(in Chinese with English abstract).
- Yao Lei, Lü Zhicheng, Yu Xiaofei, *et al.* 2015b. Petrogenesis, geochemistry and zircon U-Pb age of the granite from No. VI section of Hutouya deposit, Qimantag area, Qinghai Province, and its geological significance[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 45(3): 743 ~ 758(in Chinese with English abstract).
- Yi Youchang, Jiao Gejun and Zhang Fenying. 2006. Characteristics of Kendekeke Fe-Co multi-metal deposit in east Kunlun, Qinghai Province[J]. Geology and Prospecting, 42(3): 30 ~ 35(in Chinese with English abstract).
- Yu Miao, Feng Chengyou, He Shuyue, *et al.* 2017. The Qiman Tagh orogen as a window to the crustal evolution of the northern Tibetan plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 91(4): 703 ~ 723(in Chinese with English abstract).
- Yu Miao, Feng Chengyou, Liu Hongchuan, *et al.* 2015. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Galinge large skarn iron deposit in Qinghai Province and geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 89(3): 510 ~ 521(in Chinese with English abstract).
- Zhang Aikui, Mo Xuanxue, Yuan Wanming, *et al.* 2016. Petrogenesis and tectonic setting of Yemaquan Triassic granite from the West of the Eastern Kunlun Mountain range, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 36(2): 157 ~ 173(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Zhou Hanwen, Zhu Yunhai, *et al.* 2016. The evolution of Triassic granites associated with mineralization within East Kunlun orogenic belt: Evidence from the petrology, geochemistry and zircon U-Pb geochronology of the Mohexiala pluton[J]. Earth Science, 41(8): 1 334 ~ 1 348(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaofei, Li Zhiming, Jia Qunzi, *et al.* 2016. Geochronology, geochemistry and geological significance of granite porphyry in Hutouya polymetallic deposit, Qimantag Area, Qinghai Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46(3): 749 ~ 765(in Chinese with English abstract).
- Zhao Caisheng, Yang Fuquan and Dai Junzhi. 2006. Metallogenic age of the Kendekeke Co, Bi, Au deposit in East Kunlun Mountains, Qinghai Province, and its significance[J]. Mineral Deposits, 25(S1): 427 ~ 430(in Chinese).

附中文参考文献

- 奥 琮, 孙丰月, 李碧乐, 等. 2015. 东昆仑祁漫塔格地区小尖山辉长岩地球化学特征、U-Pb 年代学及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 39(6): 1 176 ~ 1 184.
- 陈丹玲, 刘 良, 车自成, 等. 2001. 祁漫塔格印支期铝质 A 型花岗岩的确定及初步研究[J]. 地球化学, 30(6): 540 ~ 546.
- 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等. 2013. 东昆仑造山带东段南缘和勒冈希里克特花岗岩体时代、成因及其构造意义[J]. 地质学报, 87(10): 1 525 ~ 1 541.
- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等. 2005. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制[J]. 中国地质, 32(3): 386 ~ 395.
- 丰成友, 李东生, 吴正寿, 等. 2010. 东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类型、时空分布及多金属成矿作用[J]. 西北地质, 43(4): 10 ~ 17.
- 丰成友, 王 松, 李国臣, 等. 2012. 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, 28(2): 665 ~ 678.
- 丰成友, 王雪萍, 舒晓峰, 等. 2011. 青海祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区年代学研究及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6): 1 806 ~ 1 817.
- 高永宝. 2013. 东昆仑祁漫塔格地区中酸性侵入岩岩浆活动与成矿作用[J]. 西安: 长安大学博士论文.
- 高永宝, 李 侃, 钱 兵, 等. 2015. 东昆仑卡而却卡铜矿区花岗岩闪长岩及其暗色微粒包体成因: 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素证据[J]. 中国地质, 42(3): 646 ~ 662.

- 高永宝, 李文渊, 马晓光, 等. 2012. 东昆仑杂林格铁矿床成因年代学及 Hf 同位素制约[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 48(2): 36~47.
- 高永宝, 李文渊, 钱兵, 等. 2014. 东昆仑野马泉铁矿相关花岗岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J]. 岩石学报, 30(6): 1647~1665.
- 郭正府, 邓晋福, 许志琴, 等. 1998. 青藏东昆仑晚古生代末-中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J]. 现代地质, 12(3): 344~352.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2595~2604.
- 李光明, 沈远超, 刘铁兵. 2001. 东昆仑祁漫塔格地区华力西期花岗岩地质地球化学特征[J]. 地质与勘探, 37(1): 73~78.
- 李欢, 奚小双. 2012. 青海虎头崖-肯德可克矿区地球化学特征及其喷流沉积作用[J]. 中国有色金属学报, 22(3): 772~783.
- 李侃, 高永宝, 钱兵, 等. 2015. 东昆仑祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区花岗岩年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J]. 中国地质, 42(3): 630~645.
- 李荣社, 计文化, 杨永成. 2008. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出版社, 1~400.
- 李荣社, 计文化, 赵振明, 等. 2007. 昆仑早古生代造山带研究进展[J]. 地质通报, 26(4): 373~382.
- 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[J]. 岩石学报, 28(6): 1785~1807.
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 等. 2004. 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, 49(6): 596~602.
- 刘云华, 莫宣学, 喻学惠, 等. 2006. 东昆仑野马泉地区景忍花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(10): 2457~2463.
- 罗照华, 柯珊, 曹永清, 等. 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动[J]. 地质通报, 21(6): 292~297.
- 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[J]. 高校地质学报, 13(3): 403~414.
- 潘彤. 2008. 青海东昆仑肯德可克钴金矿床硅质岩特征及成因[J]. 地质与勘探, 44(2): 51~54.
- 潘晓萍, 李荣社, 于浦生, 等. 2013. 祁漫塔格地区肯德可克铁钴多金属矿围岩时代及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 32(1): 53~62.
- 钱兵, 高永宝, 李侃, 等. 2015. 新疆东昆仑于沟子地区与铁-稀有多金属成矿有关的碱性花岗岩地球化学、年代学及 Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 31(9): 2508~2520.
- 王秉璋, 陈静, 罗照华, 等. 2014. 东昆仑祁漫塔格东段晚二叠世一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, 30(11): 3213~3228.
- 王冠, 孙丰月, 李碧乐, 等. 2014. 东昆仑夏日哈木矿区闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 44(3): 876~891.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217~1238.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007b. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 吴祥珂, 孟繁聪, 许虹, 等. 2011. 青海祁漫塔格玛兴大坂晚三叠世花岗岩年代学、地球化学及 Nd-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 27(11): 3380~3394.
- 奚仁刚, 校培喜, 伍跃中, 等. 2010. 东昆仑肯德可克铁矿区二长花岗岩组成、年龄及地质意义[J]. 西北地质, 43(4): 195~202.
- 肖晔, 丰成友, 刘建楠, 等. 2013. 青海肯德可克铁多金属矿区年代学及硫同位素特征[J]. 矿床地质, 32(1): 177~186.
- 薛宁, 安勇胜, 李五福, 等. 2009. 青海野马泉地区正长花岗岩的基本特征及成因[J]. 青海大学学报(自然科学版), 27(2): 18~22.
- 姚磊, 吕志成, 庞振山, 等. 2015a. 青海祁漫塔格地区卡而却卡矿床晚二叠世辉长岩的成因[J]. 矿物学报, (S1): 1054.
- 姚磊, 吕志成, 于晓飞, 等. 2015b. 青海祁漫塔格地区虎头崖矿床 IV 矿带花岗岩的成岩时代、地球化学特征和成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 45(3): 743~758.
- 伊有昌, 焦革军, 张芬英. 2006. 青海东昆仑肯德可克铁钴多金属矿床特征[J]. 地质与勘探, 42(3): 30~35.
- 于淼, 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[J]. 地质学报, 91(4): 703~723.
- 于淼, 丰成友, 刘洪川, 等. 2015. 青海杂林格砂卡岩型铁金云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学及成矿地质意义[J]. 地质学报, 89(3): 510~521.
- 张爱奎, 莫宣学, 袁万明, 等. 2016. 东昆仑西部野马泉地区三叠纪花岗岩成因与构造背景[J]. 矿物学报, 36(2): 157~173.
- 张炜, 周汉文, 朱云海, 等. 2016. 东昆仑与成矿有关的三叠纪花岗岩演化: 基于莫河下拉岩体岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 地球科学, 41(8): 1334~1348.
- 张晓飞, 李智明, 贾群子, 等. 2016. 青海祁漫塔格虎头崖多金属矿区花岗岩斑岩地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(3): 749~765.
- 赵财胜, 杨富全, 代军治. 2006. 青海东昆仑肯德可克钴金矿床成矿年龄及意义[J]. 矿床地质, 25(S1): 427~430.