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*

钱兵[1] 高永宝[1**] 李侃[1] 张照伟[1] 周安顺[2] 吴玉诗[3]

QIAN Bing[1], GAO YongBao[1**], LI Kan[1], ZHANG ZhaoWei[1], ZHOU AnShun[2] and WU YuShi[3]

1. 西安地质矿产研究所,国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室,西安 710054
2. 吉林省地质调查院,长春 130061
3. 吉林省通化地质矿产勘查开发院,通化 134001
1. *Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an* 710054, *China*
2. *Institute of Geologic Survey of Jilin Province, Changchun* 130061, *China*
3. *Institute of Tonghua Geologic Exploration and Mineral Development of Jilin Province, Tonghua* 134001, *China*

2014-10-01 收稿, 2015-01-05 改回.

Qian B, Gao YB, Li K, Zhang ZW, Zhou AS and Wu YS. 2015. Zircon U-Pb-Hf isotopes and whole rock geochemistry constraints on the petrogenesis of iron-rare metal mineralization related alkaline granitic intrusive rock in Yugouzi area, eastern Kunlun, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9):2508-2520

Abstract In recent years, Eastern Kunlun Qimantage area widely developed mineralization closely related intermediate to felsic intrusive rocks, regarded as a polymetallic mineralization prospect area. The Yugouzi iron-REE deposit is located in the western part of Qimantage area, the ore bodies composed of iron-copper (molybdenum) polymetallic exo-skarn ore bodies and niobium, rubidium and other rare metal ore bodies situated in granite. Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of K-feldspar granite yield an age of 210.0 ± 0.6Ma, suggesting a Late Triassic magmatic activity. The K-feldspar granite intrusion is a typical alkali granite, it consist dominantly of perthite (60% ~65%), plagioclase (10% ~15%), quartz (20% ~22%), riebeckite (4% ~5%) and minor biotite (1% ~2%). Geochemically, the K-feldspar granite shows Si-rich, K-rich, metaluminous and calc-alkaline features. Trace elements composition shows this K-feldspar granite enriched Nb, Zr, Rb, Th, U and LREEs, and depleted in Ba, Sr, P, Ti, and strong negative europium anomalies (δEu = 0.09 ~0.26), suggesting affinity with A-type granites. The zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ values and two-staged Hf model ages (t_{DM2}) are -6.71 ~2.25 and 1102 ~1674Ma respectively, which indicated a significant involvement of mantle components in petrogenesis. Based on the comprehensive studies, we suggested that the Yugouzi rock formed in the post-orogeniesis extension environment, the age of the alkaline K-feldspar granite indicating the post-orogenesis in Qimantage area has basically been gradually evolved by the Late Triassic (about 212 ~210Ma). The age of mineralization, O isotope and electron microprobe results all show closely relationship between the granite and the iron-rare metal mineralization, also indicating a good potential of iron-rare metal mineralization in this type granite in the Qimantage area, eastern Kunlun Mountains.

Key words Alkaline granite; Geochronology; Hf isotopes; Yugouzi area; Eastern Kunlun Mountains

摘 要 东昆仑祁漫塔格地区是近年来发现的具有优越多金属成矿条件的地区,区内中-酸性侵入岩广泛发育且与成矿关系密切。于沟子铁-稀有多金属矿床位于祁漫塔格地区西部,矿床主要由产于钾长花岗岩外接触带矽卡岩内的铁-铜(钼)多金

* 本文受中国地质调查局地质调查项目(1212011121088、1212011121092、1212011120183)、国家自然科学青年基金项目(41102050)、国土资源部公益性行业科研专项项目(201511020)、陕西省自然科学基础研究计划项目(2013JM5010)、陕西省青年科技新星计划项目(2015KJXX-71)和中国地质调查局青年地质英才计划(2013)联合资助.

第一作者简介:钱兵,男,1985 年生,助理研究员,矿物学、岩石学、矿床学专业,主要研究方向为成矿作用及成矿规律,E-mail:qianbin219@163.com

** **通讯作者**:高永宝,男,1982 年生,副研究员,矿床学专业,主要研究方向岩浆作用与成矿,E-mail:gaoyongbao2006@126.com

属矿化体及产于花岗岩体内部的铌、铷等稀有元素矿化体组成。锆石 LA-MC-ICP-MS 定年测得钾长花岗岩 U-Pb 年龄为 210.0 ±0.6Ma，属晚三叠世末期岩浆活动的产物。岩体主要由条纹长石(60% ~65%)、斜长石(10% ~15%)、石英(20% ~22%)、钠闪石(4% ~5%)和少量黑云母(1% ~2%)等组成，为典型的碱性花岗岩。地球化学特征上，该岩体具有高硅、高钾、准铝、钙碱性特点，富 Nb、Zr、Rb、Th、U，贫 Ba、Sr、P、Ti 等元素，稀土元素总量较高，富集轻稀土，具强烈的负 Eu 异常($\delta Eu = 0.09 \sim 0.26$)，属于 A 型花岗岩。锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -6.71 ~2.25，平均为 -1.15，二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})为 1102 ~1674Ma，显示在成岩过程中有地幔物质的参与。综合研究认为，于沟子岩体形成于晚三叠世末后造山板内伸展阶段，该碱性花岗岩的确定，标志着东昆仑祁漫塔格地区在晚三叠世末(212 ~210Ma)已逐步演化为伸展构造背景下的后造山构造阶段。同时矿床的成矿时代、氧同位素及电子探针结果均显示花岗岩与铁-稀有多金属成矿有关，指示出该类型碱性花岗岩具有良好的铁-稀有多金属成矿潜力。

关键词　碱性花岗岩；年代学；Hf 同位素；于沟子地区；东昆仑

中图法分类号　P588.121；P597.3

1　引言

东昆仑祁漫塔格地区是近年来发现的具有优越多金属成矿条件的地区，该区广泛发育多期花岗岩类(郭正府等，1998；袁万明等，2000)，其中晚古生代-早中生代花岗岩类与区内矽卡岩型铁(铜、铅、锌)、斑岩型铜(钼)及热液型铅锌等矿化有关(丰成友等，2010，2011，2012；高永宝等，2010，2012；高永宝和李文渊，2011；李洪普等，2010；王松等，2009；李碧乐等，2010；党兴彦等，2006；伍跃中等，2011；李世金等，2008)，研究该时期岩浆岩与成矿作用关系具有重要的实践意义。前人根据野外接触关系、岩石地球化学和年代学资料将东昆仑地区晚古生代-早中生代构造岩浆旋回划分为三个阶段：早期的俯冲造山阶段、中期碰撞-后碰撞造山阶段及晚期的后造山阶段(莫宣学等，2007；刘成东等，2002，2003a，b，2004；罗照华等，1999)，其中俯冲造山和碰撞-后碰撞造山阶段形成的花岗岩分布范围广泛，而后造山阶段的花岗岩分布较少，前人对前两阶段花岗岩的成岩时代、岩石地球化学、成岩机制、成岩成矿作用关系等方面进行了大量的研究(袁万明等，2000，2003；王秉璋等，2009；丰成友等，2012；高永宝等，2010，2012；高永宝和李文渊，2011；吴祥珂等，2011；李碧乐等，2012；刘云华等，2006a，b；谌宏伟等，2005；伍跃中等，2009；孙雨等，2009)，对不同构造阶段的作用时限也进行了限定(莫宣学等，2007；郭正府等，1998；丰成友等，2012；高永宝等，2012)，但是后碰撞阶段的时限尤其是后碰撞挤压、伸展旋回的时限仍需进一步厘定，挤压-伸展构造机制的转换还需要更广泛的证据，尤其需要碱性 A 型花岗岩证据的支持。

于沟子地区位于东昆仑祁漫塔格矿集区西部，区内发育大量含钠闪石的碱性花岗岩类，具有 A 型花岗岩的特征。同时区内的铁-稀有多金属矿化与该类型花岗岩关系密切，这也是祁漫塔格地区近年来新发现的唯一具有稀有多金属成矿潜力的地区，研究该区花岗岩对认识祁漫塔格地区稀有多金属成矿具有重要意义。本文在详细观察该地区铁-稀有多金属矿床地质特征的基础上，通过岩石地球化学、成岩时代及锆石 Hf 同位素研究，探讨与该类型矿化有关的花岗岩成因，确定成岩成矿的构造背景并进一步探讨成岩、成矿之间的关系。

2　区域地质背景及矿床地质特征

2.1　区域地质背景

祁漫塔格地区处于阿尔金、东昆仑、柴达木地块西端相互交织的部位(图 1a)，总体属东昆仑弧盆系(李荣社等，2008)。区内各个时代地层出露较齐全，除了缺失二叠纪地层以外，从古元古代到第四纪均有出露，区内构造活动强烈，褶皱构造以北西西向的复式向斜为主，北西西向、北西向和近东西向断裂构成了主体构造骨架，不同级别和序次的断裂构造的交汇聚合部位，往往是成岩成矿的有利部位。区内岩浆活动频繁，侵入岩发育广泛，从元古宙到晚中生代均有发育，由老到新依次可划分为前寒武纪(元古宙)、早古生代($\in$-D_3)、晚古生代-早中生代(D_3-T_3)、晚中生代-新生代(J_1-)四个时段，岩性以花岗岩类为主，伴有一定量的闪长岩和少量的辉橄岩、辉长岩等。以早古生代、晚古生代-早中生代花岗岩发育最为广泛(郭正府等，1998；莫宣学等，2007)，区内大规模的多金属成矿也与这两期花岗岩关系最为密切。

2.2　矿床地质特征

于沟子矿床位于祁漫塔格矿集区西部(图 1a)，矿区内出露的地层为蓟县系狼牙山组、奥陶-志留系鸭子泉构造混杂岩和第四系坡积物(图 1b)。狼牙山组地层分布于矿区的北部及东南部，岩性主要为灰岩、大理岩、石英岩。鸭子泉构造混杂岩呈北东向带状横贯整个矿区，由一套暗绿色石英闪长岩、辉长岩、硅质岩、大理岩及凝灰岩等组成。区内构造活动发育，主要为受构造混杂岩带控制的北东向断裂构造。区内岩浆活动强烈，侵入岩主要为钾长花岗岩、二长花岗岩、石英闪长岩脉、辉长岩脉等，根据岩性特征及野外接触关系，于沟子岩体分为中心和边缘两个侵入相，分别对应的岩性为钾长花岗岩和二长花岗岩，两者为同一期次不同阶段岩浆侵入活动的产物，该期侵入岩与区内成矿关系密切。

区内矿化类型复杂，分为铁-铜(钼)多金属矿体和铌(铷)

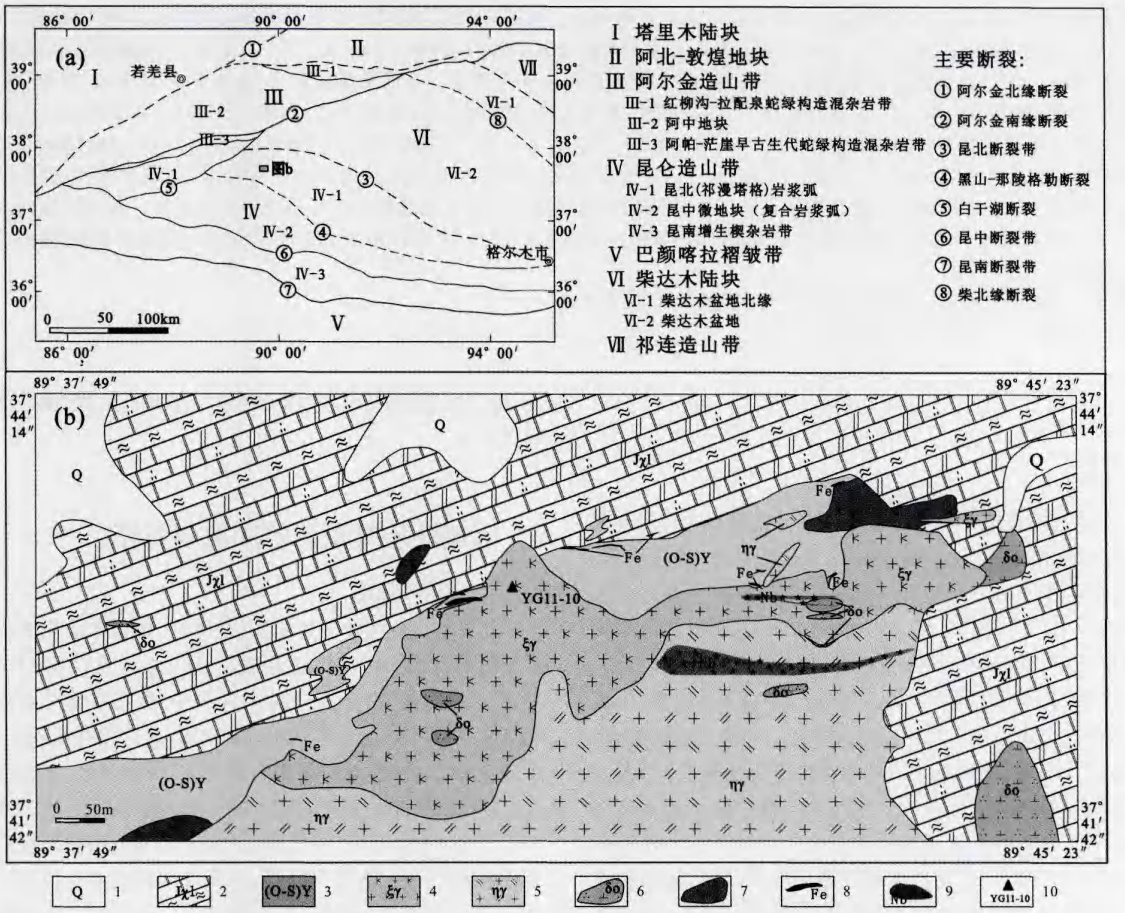


图 1 区域大地构造简图(a, 据李荣社等,2008 修改)和于沟子矿区地质简图(b,据吉林省地质调查院,2012[①]修改)

1-第四系;2-蓟县系狼牙山组;3-祁漫塔格群鸭子泉构造混杂岩;4-钾长花岗岩;5-二长花岗岩;6-石英闪长岩脉;7-辉长岩脉;8-磁铁矿矿体;9-铌(铷)矿体;10-样品采样位置

Fig. 1 Regional tectonic sketch map (a, modified after Li *et al.*, 2008) and Geology sketch map of Yugouzi deposit (b)

1-Quaternary; 2-Langyashan Formation in Jixian Group; 3-Yaziquan tectonic melange of Qimantage Group; 4-K-feldspar granite; 5-monzogranite; 6-quartz diorite dyke; 7-gabbro dyke; 8-magnetite ore body; 9-Nb ore body; 10-sample number and locations

等稀有-稀土多金属矿体两种类型。

铁-铜(钼)多金属矿体主要分布于钾长花岗岩外接触带矽卡岩内(图 1b),受北东向、东西向次级断裂构造控制。截止 2012 年共发现矿体 19 条,其中铁矿体 13 条,铁铜矿体 1 条,钼矿体 1 条,钼矿化体 1 条,铜矿体 3 条(吉林省地质调查院, 2012)。主矿体为 10 号铁矿体,呈脉状、囊状,长度约 500m,平均宽度 3.35m,平均厚度 2.91m,Fe^T 为 43.35 × 10^{-2}。金属矿物主要为磁铁矿、黄铜矿、辉钼矿,非金属矿物为黄铁矿、石榴石、透辉石、绿帘石、绿泥石、石英、方解石、高岭石等。矿石构造以块状构造为主,浸染状、细脉状、星点状构造次之;矿石结构主要为自形-半自形粒状结构、他形粒状结构、交代残余结构、包含结构等。围岩蚀变主要由矽卡岩化、绿帘石化、碳酸盐化、黄铁矿化、硅化、高岭土化等。

铌(铷)等稀有-稀土多金属矿化带分布于钾长花岗岩和二长花岗岩内,截止目前,共圈定稀有-稀土多金属矿化体 4 条(吉林省地质调查院,2012.),其中铌矿体 1 条,矿化体 3 条,圈定的铌矿体为 1 号矿体,平均宽度 1.94m,推断长 700m,平均品位为 0.018%。矿体中伴生有铷、钽、锆等稀有-稀土多金属元素矿化,其中铌、钽等稀有多金属元素主要赋存于烧绿石中,稀土等多金属元素赋存于褐帘石中。

3 样品特征及测试方法

3.1 样品特征

本次选取矿区内与成矿有关的未遭受蚀变作用的钾长

① 吉林省地质调查院. 2012. 新疆东昆仑西段白干湖成矿带金、铜多金属勘查于沟子铁多金属普查区、纳尔滚铜多金属预查区工作总结

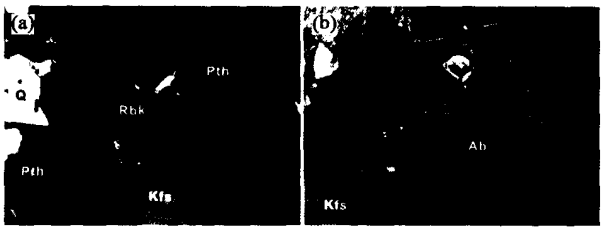


图 2　于沟子钾长花岗岩显微照片

Kfs-钾长石；Pth-条纹长石；Rbk-钠闪石；Q-石英；Ab-钠长石

Fig. 2　Micrograph illustrating minerals of Yugouzi K-feldspar granite

Kfs-K-feldspar; Pth-perthite; Rbk-riebeckite; Q-quartz; Ab-albite

花岗岩为研究对象，采样位置为 N37°43′06.21″，E89°41′00.91″（图 1b）。样品呈肉红色，粒状结构，块状构造。主要矿物组合为钾长石（60% ~65%）、斜长石（10% ~15%）、石英（20% ~22%）、钠闪石（4% ~5%）、黑云母（1% ~2%），副矿物主要为锆石和磷灰石。钾长石种属为条纹长石，呈他形粒状，粒径为 1.5 ~4.0mm，以交代条纹为主，呈网脉状沿晶体内部或边部取代（图 2a），表面有泥化；斜长石呈细小板状，粒径为 0.4 ~2.5mm，偶见棋盘格子状钠长石（图 2b）。石英呈他形粒状结构，粒径约 4.0 ~5.0mm。岩石中的暗色矿物主要为钠闪石（图 2a），为典型的碱性矿物，矿物多色性明显，深蓝-绿褐多色性，干涉色达二级，局部钠闪石表面被绿帘石交代。从岩石学和矿物组成上看，于沟子钾长花岗岩为碱性花岗岩。

3.2　分析方法

岩石主量、微量、稀土元素分析在西安地质矿产研究所国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成，其中主量元素分析仪器为荷兰帕纳科公司 Axios 4.0kw 顺序式——X 射线荧光光谱仪（XRF），分析精度优于 5%；微量和稀土元素分析仪器为美国热电公司 Series II 型电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS），分析精度优于 5% ~10%。

锆石 CL 图像在西北大学大陆动力学国家重点实验室电子探针仪加载的阴极发光仪上完成。锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年测试分析在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完成，定年分析仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀束斑直径为 25μm，以 He 为载气。对锆石标准的定年精度和准确度在 1%（2σ）左右，锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标，U、Th 含量以锆石 M127（U：923×10^{-6}；Th：439×10^{-6}；Th/U：0.475）（Sláma *et al.*，2008）为外标进行校正。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序（Liu *et al.*，2010），锆石年龄及谐和图绘制用 Isoplot 3.0 程序。详细分析步骤和数据处理方法见侯可军等（2009）。

锆石 Hf 同位素测试在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 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统（LA-MC-ICP-MS）上进行的，实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气，剥蚀直径为 55μm，测定时使用锆石国际标样 GJ-1 作为参考物质，分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置。相关仪器运行参数及详细分析流程见侯可军等（侯可军等，2007）。分析过程中锆石标准 GJ-1 的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 测试加权平均值为 0.281993 ± 15（2SD，n = 21），与文献报道值（侯可军等，2007；Elhlou *et al.*，2006）在误差范围内完全一致。

4　分析结果

4.1　岩石地球化学

钾长花岗岩 SiO_2 含量为 70.85% ~75.69%，Al_2O_3 为

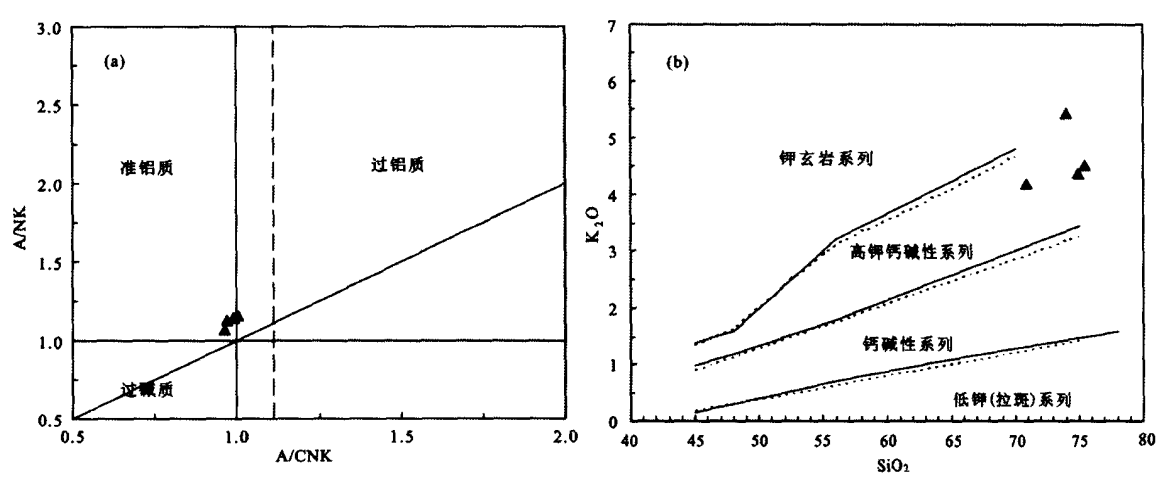


图 3　于沟子钾长花岗岩 A/NK-A/CNK（a，据 Rickwood，1989）及 K_2O-SiO_2（b，据 Maniar and Piccoli，1989）图解

Fig. 3　Diagrams of A/NK-A/CNK (a, after Rickwood, 1989) and K_2O-SiO_2 (b, after Maniar and Piccoli, 1989) of the Yugouzi K-feldspar granite

表 1 于沟子钾长花岗岩主量元素(wt%)、稀土和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果表

Table 1 Compositions of major element(wt%) and trace element($\times 10^{-6}$) of the Yugouzi K-feldspar granite

样品号	YG11-06	YG11-07	YG11-08	YG11-09	样品号	YG11-06	YG11-07	YG11-08	YG11-09
SiO_2	73.97	75.69	70.85	74.94	Gd	8.54	6.35	8.81	10.20
TiO_2	0.10	0.14	0.22	0.14	Tb	1.26	0.99	1.28	1.42
Al_2O_3	13.20	12.66	15.19	13.08	Dy	7.84	5.67	7.47	7.39
Fe_2O_3	0.71	0.36	0.72	0.24	Ho	1.57	1.22	1.45	1.32
FeO	0.80	0.70	1.19	1.41	Er	4.48	3.46	4.27	4.10
MnO	0.04	0.04	0.05	0.08	Tm	0.77	0.52	0.74	0.68
MgO	0.25	0.29	0.32	0.28	Yb	4.96	3.32	4.66	4.84
CaO	0.97	1.25	1.61	1.14	Lu	0.67	0.52	0.64	0.63
Na_2O	3.64	3.27	4.91	3.60	Y	45.0	39.0	41.7	44.8
K_2O	5.53	4.67	4.29	4.46	ΣREE	334.3	229.6	396.1	646.7
P_2O_5	0.01	0.04	0.04	0.03	LREE	304.2	207.5	366.8	616.1
LOI	0.78	0.85	0.62	0.59	HREE	30.09	22.05	29.32	30.58
Total	100.00	99.96	100.01	99.99	LREE/HREE	10.11	9.41	12.51	20.15
Na_2O/K_2O	0.66	0.70	1.14	0.81	$(La/Yb)_N$	11.01	10.54	14.32	21.93
$(Na_2O+K_2O)/CaO$	9.45	6.35	5.71	7.07	δEu	0.09	0.26	0.14	0.09
FeO^T/MgO	5.76	3.53	5.74	5.81	Rb	221	54.5	198	21
A/CNK	0.96	0.99	0.97	1.02	Ba	162	200	256	36
σ	2.71	1.92	3.03	2.03	Th	33.8	28.0	29.8	32.5
DI	93.36	91.51	89.11	90.47	U	7.80	5.08	8.17	3.24
La	76.1	48.8	93.0	148.0	Ta	3.26	3.26	3.38	3.27
Ce	148	97.6	178	311	Nb	58.2	40.5	59.0	49.5
Pr	16.0	11.1	19.5	33.9	Sr	27	74	36	43
Nd	54.3	41.0	65.0	108.0	Zr	204	104	393	308
Sm	9.51	8.38	10.80	14.80	Hf	6.53	4.30	10.40	8.70
Eu	0.28	0.65	0.47	0.40	Ga	21.0	21.2	23.2	21.8

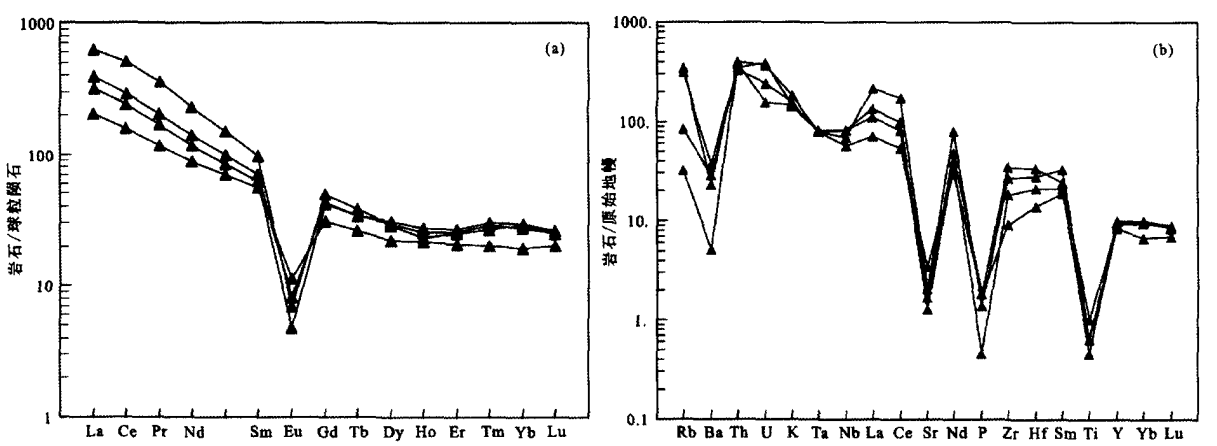


图 4 于沟子钾长花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive-mantle-nomalized trace element distribution patterns of the Yugouzi K-feldspar granite (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

12.66% ~ 15.19%,全碱含量高($K_2O + Na_2O$ = 7.94% ~ 9.20%,平均为 8.59%)且相对富钾(Na_2O/K_2O 为 0.66 ~ 1.14,平均值为 0.83),富铁贫镁(FeO^T/MgO 为 3.53 ~ 5.81),此外岩石 TiO_2、MnO、CaO、P_2O_5 含量较低,A/CNK 为 0.96 ~ 1.02,里特曼指数(σ)为 1.92 ~ 3.03,为钙碱性系列(表 1)。A/NK-A/CNK 图解显示其为准铝质花岗岩(图 3a),K_2O-SiO_2 图解显示其为高钾钙碱性系列花岗岩(图 3b),主量元素特征显示于沟子钾长花岗岩为高钾钙碱性系列准铝质花岗岩。

钾长花岗岩稀土元素总量较高(ΣREE 平均值为 401.7

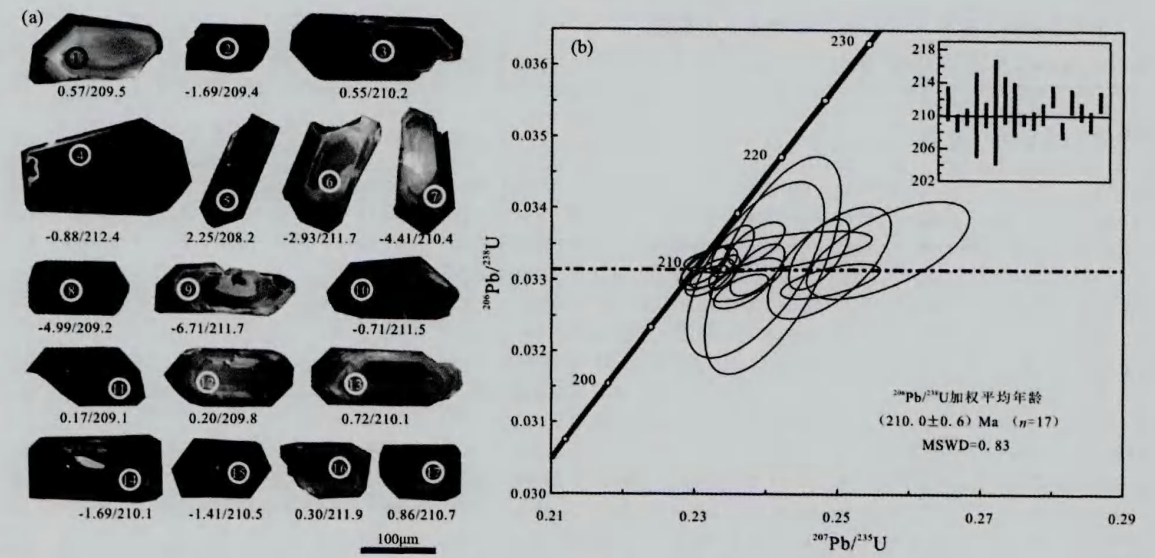


图 5　于沟子钾长花岗岩锆石阴极发光图像(含 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值及 U-Pb 年龄值)(a)和锆石 U-Pb 谐和图(b)

Fig. 5　Zircon CL images for microbeam analyzed spots with $\varepsilon_{Hf}(t)$ values and apparent U-Pb ages (a) and zircon U-Pb concordia diagram (b) of the Yugouzi K-feldspar granite

$\times 10^{-6}$)(表 1),可能与该岩体富含稀土元素矿化有关。从球粒陨石标准化配分图(图 4a)来看,稀土元素为右倾型配分模式,相对富集轻稀土且分馏明显(LREE/HREE 为 9.41 ~ 20.15,$(La/Yb)_N$ 为 10.54 ~ 21.93),强烈的负 Eu 异常(δEu 为 0.09 ~ 0.26),表明岩石可能经历了强烈的斜长石分离结晶作用。与典型的 A 型花岗岩稀土元素特征一致(Anderson *et al.*, 2003; 吴锁平等, 2007)。

从微量元素原始地幔标准化分布曲线(图 4b)来看,岩石相对富集 Nb、Zr、Ta、Hf 等高场强元素及 Rb、Th、U 等大离子亲石元素(表 1),而贫 Ba、Sr、P、Ti 等元素。P、Ti 不相容元素的强烈亏损指示岩体经历了较高程度的分异演化,分离结晶矿物相主要为斜长石、磷灰石和钛铁矿等。岩体微量元素具有典型 A 型花岗岩特征(Anderson *et al.*, 2003; 吴锁平等, 2007)。

4.2　LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

本次定年的钾长花岗岩的单颗粒锆石多为柱状自形晶且发育振荡环带(图 5a)。锆石中的 Th/U 比值可以指示锆石的成因,岩浆锆石的 Th/U 比值一般大于 0.1,而变质锆石的 Th/U 比值一般小于 0.1 (Belousova *et al.*, 2002),本次测试的锆石 Th/U 比值变化范围在 0.53 ~ 1.37 之间(表 2),均远高于 0.1,属于典型的岩浆成因锆石。由锆石的阴极发光图像可以看出(图 5a),所测锆石均具有清晰的内部结构和典型的岩浆振荡环带,不具有核-幔结构,表明这些锆石是岩浆形成后一次结晶形成的,应代表的是岩浆冷却结晶及岩体侵位的时代。

样品在进行普通铅校正后的有效数据点为 17 个(表 2),$^{206}Pb/^{238}U$ 表观年龄为(208.2 ± 1.0Ma ~ 211.9 ± 2.8Ma),加权平均年龄为(210.0 ± 0.6Ma)(MSWD = 0.83),在 $^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ 谐和图上分析数据均落在谐和线上或其附近(图 5b)。因此,于沟子地区钾长花岗岩的形成年龄为 210.0 ± 0.6Ma,属于晚三叠世。

4.3　锆石 Hf 同位素

Hf 同位素测试主要在紧邻锆石年龄分析点部位进行,共测试分析 Hf 同位素 17 个,结果见表 3。钾长花岗岩中大部分锆石的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值均小于 0.002(除 YG11-10-10, YG11-10-13, YG11-10-15, YG11-10-16),显示锆石在形成以后具有较低成因 Hf 的积累。测试出的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值为 0.282455 ~ 0.282711,平均 0.28261,较均一;用相应的年龄值计算,$\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -6.71 ~ 2.25,平均为 -1.15;单阶段 Hf 模式年龄(t_{DM1})为 772 ~ 1129Ma,平均为 913Ma;二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})为 1102 ~ 1674Ma,平均为 1320Ma。

5　讨论

5.1　岩石成因类型

花岗岩成因类型目前分为 S 型、I 型、A 型和 M 型四类,其成因类型的判定需要结合矿物组成及地球化学特征来综合考虑。矿物组成上,于沟子地区花岗岩矿物组合以钠闪石-条纹长石-钠长石矿物为特征,属于典型的碱性矿物组合,暗色矿物钠闪石的大量出现暗示其属于典型的碱性花岗岩。岩石地球化学特征上,主量元素特征表明岩石具有高硅(SiO_2

表 2 于沟子钾长花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石分析数据

Table 2 Zircon LA-MC-ICP-MS analytical data of the Yugouzi K-feldspar granite

测点号	^{232}Th ($\times10^{-6}$)	^{238}U ($\times10^{-6}$)	Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$	
				比值	1δ	比值	1δ	比值	1δ	年龄(Ma)	1δ	年龄(Ma)	1δ	年龄(Ma)	1δ
YG11-10-1	91	162	0.56	0.05095	0.00038	0.23189	0.00176	0.03303	0.00010	239.0	18.5	211.8	1.5	209.5	0.7
YG11-10-2	82	122	0.67	0.05098	0.00044	0.23193	0.00222	0.03302	0.00017	239.0	20.4	211.8	1.8	209.4	1.1
YG11-10-3	113	139	0.82	0.05070	0.00045	0.23178	0.00265	0.03314	0.00020	227.8	25.0	211.7	2.2	210.2	1.3
YG11-10-4	294	363	0.81	0.05166	0.00049	0.23849	0.00262	0.03349	0.00020	333.4	22.2	217.2	2.1	212.4	1.3
YG11-10-5	60	104	0.57	0.05226	0.00051	0.23633	0.00251	0.03282	0.00016	298.2	22.2	215.4	2.1	208.2	1.0
YG11-10-6	259	334	0.78	0.05109	0.00026	0.23511	0.00199	0.03339	0.00024	255.6	13.0	214.4	1.6	211.7	1.5
YG11-10-7	67	117	0.57	0.05058	0.00042	0.23125	0.00218	0.03318	0.00017	220.4	13.9	211.2	1.8	210.4	1.1
YG11-10-8	95	121	0.78	0.05209	0.00062	0.23710	0.00338	0.03298	0.00020	300.1	27.8	216.0	2.8	209.2	1.2
YG11-10-9	66	93	0.72	0.05248	0.00187	0.24155	0.00872	0.03338	0.00020	305.6	76.8	219.7	7.1	211.7	1.2
YG11-10-10	1833	1613	1.14	0.05379	0.00035	0.24726	0.00282	0.03335	0.00033	361.2	14.8	224.4	2.3	211.5	2.1
YG11-10-11	670	628	1.07	0.05475	0.00093	0.24889	0.00461	0.03297	0.00016	466.7	37.0	225.7	3.7	209.1	1.0
YG11-10-12	872	977	0.89	0.05132	0.00024	0.23399	0.00142	0.03309	0.00016	253.8	11.1	213.5	1.2	209.8	1.0
YG11-10-13	1823	1535	1.19	0.05216	0.00039	0.23838	0.00636	0.03312	0.00082	300.1	16.7	217.1	5.2	210.1	5.1
YG11-10-14	474	532	0.89	0.05225	0.00041	0.23863	0.00253	0.03313	0.00024	298.2	21.3	217.3	2.1	210.1	1.5
YG11-10-15	410	670	0.61	0.05270	0.00046	0.24081	0.00629	0.03319	0.00102	316.7	25.0	219.1	5.1	210.5	6.3
YG11-10-16	430	314	1.37	0.05579	0.00142	0.25697	0.00756	0.03341	0.00045	442.6	55.6	232.2	6.1	211.9	2.8
YG11-10-17	68	129	0.53	0.05425	0.00081	0.24871	0.00570	0.03323	0.00052	388.9	33.3	225.5	4.6	210.7	3.3

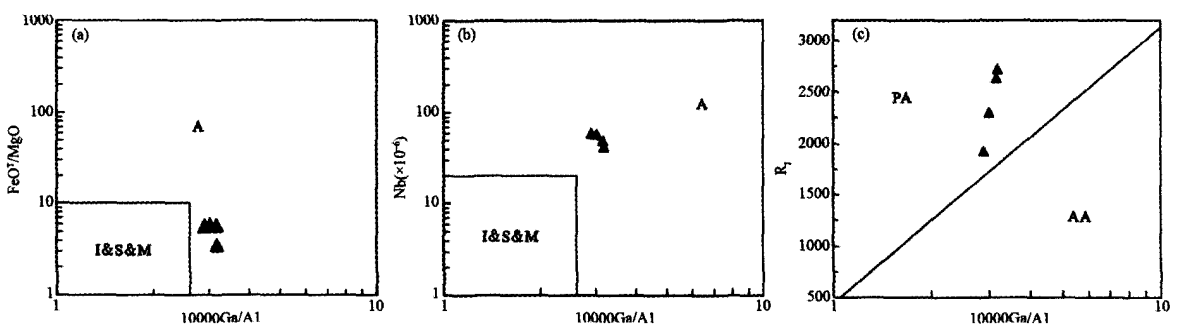


图 6 A 型花岗岩构造判别图解

A、I、S、M 分别代表 A 型、I 型、S 型、M 型花岗岩;$R_1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$;PA 代表后造山 A 型花岗岩;AA 代表非造山 A 型花岗岩;(a、b)据 Whalen *et al.* (1987);(c)据洪大卫等(1995)

Fig. 6 A-type granite tectonic discriminant diagrams

A, I, S, M are representative of A-type, I-type, S-type, M-type granite; $R1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$; PA, AA is representatives of post-orogenic granite, anorogenic granite. (a, b) after Whalen *et al.* (1987); (c) after Hong *et al.* (1995)

=70.85% ~75.69%)、高钾(K_2O =4.29% ~5.53%,平均为 8.59%)、贫镁(MgO =0.25% ~0.32%)、低钙(CaO =0.97% ~1.61%)、全碱含量高($K_2O + Na_2O$ =7.94% ~9.20%)、相对富钾(Na_2O/K_2O 为 0.66 ~1.14,平均值为 0.83)、富铁贫镁(FeO^T/MgO 为 3.53 ~5.81)、准铝质等特征,微量元素具有强烈的负 Eu 异常,富集高场强元素(Nb、Zr、Ta、Hf)和大离子亲石元素(Rb、Th、U),而 Sr、P、Ti 等出现明显亏损。矿物学及岩石地球化学表明于沟子地区钾长花岗岩具有典型的 A 型花岗岩全部特征(Pitcher, 1993; King *et al.*, 1997; Tollo *et al.*, 2004; Collins *et al.*, 1982; Loiselle and Wones, 1979; Poitrasson *et al.*, 1994; 吴锁平等, 2007)。同时在 Whalen *et al.* (1987)提出的判别图上也都落入 A 型花岗岩区域(图 6a, b),因此这些岩石属于典型的 A 型花岗岩。

5.2 岩浆起源及演化特征

岩石稀土元素为右倾型配分模式,强烈的负 Eu 异常(δEu 为 0.09 ~0.26),暗示了花岗岩经历了高度演化,斜长石分离对岩浆分异演化起了重要的作用。微量元素强烈富集 Rb、Th、U、Nb 等元素,亏损 Ba、Sr、Ti、P 等元素,Rb 的强烈富集说明岩浆分异作用进行得很充分;Nb 等元素的富集暗示了其具有地幔来源的性质;Ti 的明显亏损指示钛铁矿的分离结晶,也暗示岩浆含有地壳成分;P 亏损指示磷灰石的分离结晶;Ba、Sr 的亏损应与斜长石的分离结晶有关,与 Eu 的负异常相对应,进一步印证了花岗岩经历了高度演化。

表 3　于沟子钾长花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3　Summary of Hf isotopic compositions of the Yugouzi K-feldspar granite

测点号	表面年龄 (Ma)	Age (Ma)	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2δ	$\varepsilon_{Hf}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{Lu/Hf}$
YG11-10-1	209.5		0.056583	0.001385	0.282663	0.000022	0.57	842	1210	-0.96
YG11-10-2	209.4		0.048323	0.001212	0.282599	0.000019	-1.69	929	1354	-0.96
YG11-10-3	210.2		0.045612	0.001102	0.282661	0.000022	0.55	839	1212	-0.97
YG11-10-4	212.4		0.074654	0.001846	0.282623	0.000021	-0.88	912	1305	-0.94
YG11-10-5	208.2		0.050948	0.001303	0.282711	0.000023	2.25	772	1102	-0.96
YG11-10-6	211.7		0.053428	0.001273	0.282563	0.000024	-2.93	983	1435	-0.96
YG11-10-7	210.4		0.030314	0.000700	0.282527	0.000020	-4.14	1017	1511	-0.98
YG11-10-8	209.2		0.039301	0.000878	0.282505	0.000027	-4.99	1054	1563	-0.97
YG11-10-9	211.7	210.0	0.049701	0.001105	0.282455	0.000023	-6.71	1129	1674	-0.97
YG11-10-10	211.5		0.091358	0.002293	0.282630	0.000018	-0.71	913	1293	-0.93
YG11-10-11	209.1		0.063762	0.001512	0.282653	0.000019	0.17	860	1235	-0.95
YG11-10-12	209.8		0.060485	0.001458	0.282653	0.000017	0.20	859	1234	-0.96
YG11-10-13	210.1		0.095949	0.002298	0.282671	0.000019	0.72	852	1201	-0.93
YG11-10-14	210.1		0.057359	0.001430	0.282599	0.000019	-1.69	934	1355	-0.96
YG11-10-15	210.5		0.090413	0.002214	0.282610	0.000021	-1.41	939	1337	-0.93
YG11-10-16	211.9		0.084262	0.002048	0.282657	0.000022	0.30	866	1229	-0.94
YG11-10-17	210.7		0.050696	0.001176	0.282670	0.000027	0.86	828	1193	-0.96

注：$\varepsilon_{Hf}(t)=10000\times\{[(^{176}Hf/^{177}Hf)_S-(e^{\lambda t}-1)]/[(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0}-(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}\times(e^{\lambda t}-1)]-1\}$；$t_{DM}=1/\lambda\ln\{1+[(^{176}Hf/^{177}Hf)_S-(^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM}]/[(^{176}Hf/^{177}Hf)_S-(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM}]\}$；$t_{DM}^{C}=t_{DM}-(t_{DM}-t)\times[(f_{cc}-f_{DM})]$，$f_{Lu/Hf}=(^{176}Lu/^{177}Hf)_S/(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}-1$；其中：$\lambda=1.867\times10^{-11}$/a（据 Söderlund *et al.*，2004）；$(^{176}Lu/^{177}Hf)_S$ 和 $(^{176}Hf/^{177}Hf)_S$ 为样品测量值，$(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}=0.0332$，$(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR,0}=0.282772$（据 Blichert-Toft and Albarède，1997）；$(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM}=0.0384$，$(^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM}=0.283\,25$（据 Griffin *et al.*，2000）；$(^{176}Lu/^{177}Hf)_{平均地壳}=0.015$；$f_{cc}=[(^{176}Lu/^{177}Hf)_{平均地壳}/(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}]-1$，$f_S=f_{Lu/Hf}$；$f_{DM}=[(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM}/(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR}]-1$

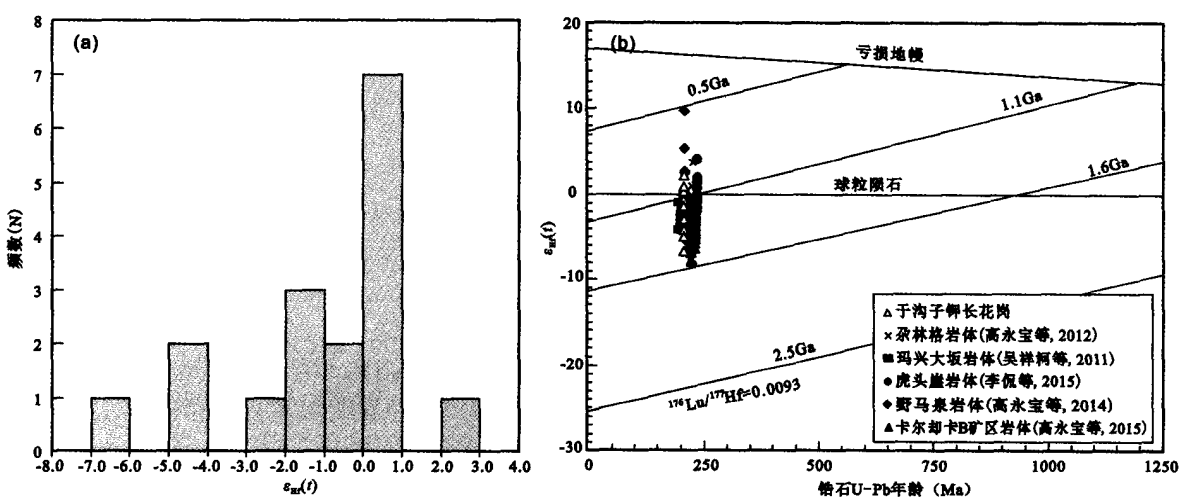


图 7　于沟子钾长花岗岩锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 频数分布图(a)及 $\varepsilon_{Hf}(t)$-锆石年龄图解(b)

图 b 中地壳演化线的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值为 0.0093（据 Veroort and Patchert，1996）

Fig. 7　Histogram of zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ value (a) and $\varepsilon_{Hf}(t)$ vs. zircon U-Pb age diagram (b) from the Yugouzi K-feldspar granite

In Fig. 7b: assuming the crustal evolution path of $^{176}Lu/^{177}Hf$ ratio is 0.0093 (after Veroort and Patchert, 1996)

锆石因具有极低的 Lu/Hf 比值及其稳定性而成为目前探讨岩浆起源与演化和示踪岩石源区及壳幔相互作用的重要工具（Amelin *et al.*，1999，2000；Knudsen *et al.*，2001；Griffin *et al.*，2002；吴福元等，2007）。于沟子地区钾长花岗岩 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -6.71～2.25，平均为 -1.15，且 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值主要集中于 0 附近（图 7a），t_{DM2} 值为 1102～1674Ma，暗示源岩可能来自于古老地壳的重熔，并有地幔物质的参与。将其与三叠世祁漫塔格地区玛兴大坂岩体（吴祥珂等，2011）、尕林

格岩体(高永宝等,2012)、虎头崖岩体(李侃等, 2015)及卡尔却卡岩体(高永宝等, 2015)对比分析,发现具有相似的$\varepsilon_{Hf}(t)$值特征(图7b),暗示于沟子岩体与东昆仑地区广泛发育的三叠纪花岗岩一样,具有相似的岩浆起源特征,而前人对区域内三叠纪花岗岩研究表明,其在成岩的过程中均具有幔源物质组分参与的特征,一种可能的解释是幔源基性岩浆底侵下地壳致其部分熔融产生花岗质岩浆,并发生了不完全混合作用(莫宣学等, 2007; 罗照华等, 1999, 2002; 刘红涛, 2001; 刘成东等, 2002, 2003a, 2004; 谌宏伟等, 2005; 丰成友等, 2012; 高永宝等, 2012)。

5.3 成岩成矿构造背景

东昆仑造山带是一个多期叠加的多旋回造山带(任纪舜等, 1980; 殷鸿福和张克信, 1998),一般认为东昆仑地区晚古生代-早中生代经历了早期的俯冲造山阶段、中期碰撞-后碰撞造山阶段和晚期后造山板内伸展阶段。前人对其形成时限进行了大量的研究,目前比较统一的认识是俯冲造山阶段主要发生在中-晚二叠世到早三叠世(260~240Ma)(莫宣学等, 2007; 郭正府等, 1998),碰撞-后碰撞造山阶段应起始于中三叠世(约237Ma)(莫宣学等, 2007; 丰成友等, 2012),而其结束时间还存在较大的争议,如莫宣学等(2007)认为东昆仑山南坡的下侏罗统兰道弯乌苏组分布于西段红山包、中段八宝山及东段塔妥等地达千米以上的陆相类磨拉石沉积为后造山崩塌的标志,认为后碰撞造山阶段可能结束于190Ma,但其又认为三叠纪末期-侏罗纪的一些浅成-超浅成酸性斑岩可能属于后造山阶段花岗岩,在晚三叠纪末期整个祁漫塔格地区可能就已经进入了板内伸展构造环境下的后造山阶段;丰成友等(2012)通过总结景忍富钾A型花岗岩(204.1±2.6Ma),认为碰撞-后碰撞造山阶段可能在204Ma时结束,但刘云华等(2006b)认为该岩体属于后造山阶段的产物,代表的是造山后期的引张环境。可见碰撞-后碰撞构造阶段的结束及后造山板内伸展阶段的起始时间还需要更广泛证据的支持,高永宝等(2014)通过对区内野马泉矿床南矿带正长花岗岩(213±1Ma)(A型)的研究,认为在212Ma时碰撞-后碰撞构造阶段已基本结束;陈丹玲等(2001)认为祁漫塔格西北端小红山一带的A型花岗岩(212±7Ma)可能为晚期后造山板内伸展阶段的产物,到晚三叠世整个祁漫塔格地区都处于伸展构造背景之下。这些研究均缺乏后造山板内伸展阶段代表性岩石类型的证据支持。

本次研究证实于沟子地区钾长花岗岩(210.0±0.6Ma)为典型的碱性花岗岩,进一步判别显示其属于后造山A型花岗岩(图6c),代表了造山期后的张性构造环境(Eby, 1992; 洪大卫等, 1995),因此,可以限定祁漫塔格地区在晚三叠世末(约212~210Ma)已逐步演化为伸展构造背景下的后造山构造阶段。

5.4 成矿意义

祁漫塔格地区中-晚三叠纪花岗岩与矽卡岩型铁(铜、铅、锌)、斑岩型铜(钼)及热液型铅锌等矿化有关,其中,矽卡岩型铁多金属矿床最为发育(如尕林格、野马泉南矿带、景忍、卡尔却卡B矿区、虎头崖Ⅰ-Ⅲ矿带等)(丰成友等, 2010, 2011, 2012; 高永宝等, 2010, 2012; 李洪普等, 2010; 李碧乐等, 2010; 党兴彦等, 2006; 李世金等, 2008),前人通过高精度锆石U-Pb及辉钼矿Re-Os等成岩成矿年代学研究表明铁铜多金属矿床中成岩、成矿作用基本同时,限定了铁铜多金属矿床的成矿时代主要集中在239~210Ma(李世金等, 2008; 佘宏全等, 2007; 王松等, 2009; 丰成友等, 2010, 2011, 2012; 高永宝等, 2012)。本次研究的于沟子矿床中铁矿化主要产于碱性花岗岩外接触的矽卡岩内,稀有(铌、铷、锆等)多金属矿化主要产于碱性花岗岩体内部,暗示成矿与花岗岩有关;矿床中辉钼矿Re-Os年龄为210.1±4.8Ma(丰成友等, 2010),表明多金属矿化与花岗岩基本同时形成,与地质事实吻合;同时,磁铁矿的$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$同位素为2.8‰~4.7‰(作者待刊数据),显示成矿流体主要来源于岩浆水,磁铁矿电子探针结果(TiO_2平均值为0.30%,Al_2O_3平均值为0.75%,MgO平均值为1.02%,作者待刊数据)显示其具有接触交代成因的标型特征,这些特征亦表明矿化与花岗岩有关。综合研究认为,于沟子矿床为与晚三叠世末后造山板内伸展阶段碱性花岗岩有关的铁-稀有(铌、铷、锆等)多金属矿床。

于沟子铁-稀有多金属矿床是目前为止区内唯一一处发现的与后造山花岗岩有关的具有稀有金属矿化的矿床,该类型矿化的确立,表明东昆仑祁漫塔格地区具有良好的稀有多金属找矿前景,与矿化有关的后造山阶段的碱性花岗岩可作为寻找该类型矿床的重要标志。

6 结论

(1)东昆仑祁漫塔格地区花岗岩体LA-MC-ICP-MS U-Pb年龄分析表明,与铁-稀有多金属矿化有关的钾长花岗岩的结晶年龄为210.0±0.6Ma,属于晚三叠世末。岩石中含大量钠闪石,具有碱性花岗岩的特点,地球化学判别显示其属于后造山A型花岗岩,侵位于东昆仑晚古生代-早中生代晚期后造山张性构造环境中。该类型花岗岩的产出,表明东昆仑祁漫塔格地区在晚三叠世末(212~210.0Ma)已逐步演化为伸展构造背景下的后造山构造阶段。

(2)岩石地球化学特征表明,钾长花岗岩属于高钾钙碱性准铝质岩石,经历了强烈的斜长石分离结晶作用及高度的演化;锆石Hf同位素特征表明,于沟子地区钾长花岗岩与东昆仑地区广泛发育的三叠纪花岗岩一样,可能源于幔源基性岩浆底侵下地壳致其部分熔融产生的花岗质岩浆,并发生了不完全混合作用。

(3)矿床地质、地球化学特征表明,于沟子矿床为与晚三叠世碱性花岗岩有关的铁-稀有多金属矿床;东昆仑祁漫塔格地区具有良好的碱性花岗岩型稀有金属矿床成矿潜力;后

造山碱性花岗岩可作为寻找该类型矿床的重要标志。

致谢 野外工作得到了吉林地质调查院野外一线工作人员王正科工程师、张学海工程师、王聚胜工程师等人的大力协助；样品测试和数据处理过程中得到了西北大学大陆动力学实验室弓虎军副教授及中国地质科学院侯可军助理研究员的帮助；研究过程中得到合肥工业大学袁峰教授、澳大利亚塔斯马尼亚大学张乐骏博士、西安地质调查中心叶芳研究员、王亚磊助理研究员、赵慧博助理工程师的有益指导；审稿过程中得到了审稿专家提出的宝贵修改意见；在此一并表示衷心的感谢。

References

Amelin Y, Lee DC, Halliday AN and Pidgeon RT. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. Nature, 399(6733): 252 - 255

Amelin Y, Lee DC and Halliday AN. 2000. Early-Middle Archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(24): 4205 - 4225

Anderson IC, Frost CD and Frost BR. 2003. Petrogenesis of the Red Mountain pluton, Laramie anorthosite complex, Wyoming: Implications for the origin of A-type granite. Precambrian Research, 124(2 - 4): 243 - 267

Belousova E, Griffin W, O'Reilly SY and Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. Contrib. Mineral. Petrol., 143(5): 602 - 622

Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. Earth Planet. Sci. Lett., 148(1 - 2): 243 - 258

Chen DL, Liu L, Che ZC, Luo JH and Zhang YX. 2001. Determination and preliminary study of Indosinian aluminous A-type granites in the Qimantag area, southeastern Xinjiang. Geochimica, 30(6): 540 - 546 (in Chinese with English abstract)

Chen HW, Luo ZH, Mo XX, Liu CD and Ke S. 2005. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun orogenic belt. Geology in China, 32(3): 386 - 395 (in Chinese with English abstract)

Collins WJ, Beams SD, White AJR *et al.* 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. Contrib. Mineral. Petrol., 80(2): 189 - 200

Dang XY, Fan GZ, Li ZM, Fan XH and Gu Y. 2006. Typic deposit analysis in the eastern Kunlun area, NW China. Northwestern Geology, 39(2): 143 - 155 (in Chinese with English abstract)

Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. Geology, 20(7): 641 - 644

Elhlou S, Belousova E, Griffin WL, Pearson NJ and O'Reilly SY. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation. Geochim. Cosmochim. Acta, 70(18): A158

Feng CY, Li DS, Wu ZS, Li JH, Zhang ZY, Zhang AK, Shu XF and Su SS. 2010. Major types, time-space distribution and metallogeneses of polymetallic deposits in the Qimantage metallogenic belt, Eastern Kunlun area. Northwestern Geology, 43(4): 10 - 17 (in Chinese with English abstract)

Feng CY, Wang XP, Shu XF, Zhang AK, Xiao Y, Liu JN, Ma SC, Li GC and Li DX. 2011. Isotopic chronology of the Hutouya skarn lead-zinc polymetallic ore district in Qimantage area of Qinghai Province and its geological significance. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 41(6): 1806 - 1817 (in Chinese with English abstract)

Feng CY, Wang S, Li GC, Ma SC and Li DS. 2012. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantage area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances. Acta Petrologica Sinica, 28(2): 665 - 678 (in Chinese with English abstract)

Gao YB, Li WY and Tan WJ. 2010. Metallogenic characteristics and analysis of the prospecting potential in the area of Qimantage. Northwestern Geology, 43(4): 35 - 43 (in Chinese with English abstract)

Gao YB and Li WY. 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)

Gao YB, Li WY, Ma XG, Zhang ZW and Tang QY. 2012. Genesis, geochronology and Hf isotopic compositions of the magmatic rocks in Galinge iron deposit, Eastern Kunlun. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 48(2): 36 - 47 (in Chinese with English abstract)

Gao YB, Li WY, Qian B, Li K, Li DS, He SY, Zhang ZW and Zhang JW. 2014. Geochronology, geochemistry and Hf isotopic compositions of the granitic rocks related with iron mineralization in Yemaquan deposit, East Kunlun, NW China. Acta Petrologica Sinica, 30(6): 1647 - 1665 (in Chinese with English abstract)

Gao YB, Li K, Qian B, Li WY, Li DS, Su SS, Zhang CG, Zhang DM and Wang SM. 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. Geology in China, 42(3): 646 - 662 (in Chinese with English abstract)

Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Achterbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. Geochim. Cosmochim. Acta, 64(1): 133 - 147

Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson NJ, O'Reilly SY, Xu XS and Zhou XM. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. Lithos, 61(3 - 4): 237 - 269

Guo ZF, Deng JF, Xu ZQ, Mo XX and Luo ZH. 1998. Late Palaeozoic-Mesozoic intracontinental orogenic process and intermedate-acidic igneous rocks from the Eastern Kunlun Mountains of northwestern China. Geoscience, 12(3): 344 - 352 (in Chinese with English abstract)

Hong DW, Wang SG, Han BF and Jin MY. 1995. Tectonic discrimination on alkaline granites. Science in China (Series B), 25(4): 418 - 426 (in Chinese)

Hou KJ, Li YH, Zou TR, Qu XM, Shi YR and Xie GQ. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2595 - 2604 (in Chinese with English abstract)

Hou KJ, Li YH and Tian YR. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. Mineral Deposits, 28(4): 481 - 492 (in Chinese with English abstract)

King PL, White AJR, Chappell BW *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-Type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. J. Petrol., 38(3): 371 - 391

Knudsen TL, Griffin WL, Hartz EH, Andresen A and Jackson SE. 2001. In situ hafnium and lead isotope analyses of detrital zircons from the Devonian sedimentary basin of NE Greenland: A record of repeated crustal reworking. Contributions to Mineralogy and Petrology, 141(1): 83 - 94

Li BL, Sun FY, Yu XF, Ding QF, Qian Y, Zhang H and Xu QL. 2010. Genetic type and mineralizing mechanism of the Yelasai copper deposit in Kaerqueka area, eastern Kunlun, Qinghai Province. Acta Petrologica Sinica, 26(12): 3796 - 3708 (in Chinese with English abstract)

Li BL, Sun FY, Yu XF, Qian Y, Wang G and Yang YQ. 2012. U-Pb dating and geochemistry of diorite in the eastern section from eastern

Kunlun middle uplifted basement and granitic belt. Acta Petrologica Sinica, 28(4): 1163 - 1172 (in Chinese with English abstract)

Li HP, Song ZB, Tian XD and Lu WQ. 2010. The mineralization chracteristics and prospecting of Sijiaoyang Pb-Zn polymetallic deposit in Eastern Kunlun in Qinghai. Northwestern Geology, 43 (4): 179 - 187 (in Chinese with English abstract)

Li K, Gao YB, Qian B, He SY, Liu YL, Zhang ZW, Zhang JW and Wang YL. 2015. Geochronology, geochemical characteristics and Hf isotopic compositions of granite in the Hutouya deposit, Qimantag, East Kunlun. Geology in China, 42(3): 630 - 645 (in Chinese with English abstract)

Li RS, Ji WH and Yang YC. 2008. The Geology in Kunlun and Its Adjacent Region. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 400 (in Chinese)

Li SJ, Sun FY, Wang L, Li YC, Liu ZH, Su SS and Wang S. 2008. Fluid inclusion studies of porphyry copper mineralization in Kaerqueka polymetallic ore district, East Kunlun Mountains, Qinghai Province. Mineral Deposits, 27(3): 399 - 406 (in Chinese with English abstract)

Liu CD, Zhang WQ, Mo XX, Luo ZH, Yu XH, Li SW and Zhao X. 2002. Features and origin of mafic microgranular enclaves in the Yuegelu granite in the Eastern Kunlun. Geological Bulletin of China, 21(11): 739 - 744 (in Chinese with English abstract)

Liu CD, Mo XX, Luo ZH, Yu XH, Chen HW, Li SW and Zhao X. 2003a. Pb-Sr-Nd-O isotope characteristics of granitoids in East Kunlun orogenic belt. Acta Geoscientica Sinica, 24(6): 584 - 588 (in Chinese with English abstract)

Liu CD, Zhou S, Mo XX, Luo ZH, Yu XH, Li SW and Zhao X. 2003b. Constraints of petrochemistry and $^{40}Ar/^{39}Ar$ aging of post-collision granites in Eastern Kunlun Orogenic Belt. Journal of East China Geological Institute, 26(4): 301 - 305 (in Chinese with English abstract)

Liu CD, Mo XX, Luo ZH, Yu XH, Chen HW, Li SW and Zhao X. 2004. Mixing events between the crust-and mantle-derived magmas in Eastern Kunlun: Evidence from zircon SHRIMP Ⅱ chronology. Chinese Science Bulletin, 49(8): 828 - 834

Liu HT. 2001. Qimantage terrestrial volcanics: Petrologic evidence of active continental margin of Tarim plate during Late Indo-China epoch. Acta Petrologica Sinica, 17(3): 337 - 351 (in Chinese with English abstract)

Liu YH, Mo XX, Zhang XT and Xu GW. 2006a. The geochemical characteristics and the meaning of skarn-type deposits in Yemaquan area, Eastern Kunlun. Geology and Mineral Resources of South China, 14(3): 31 - 36 (in Chinese with English abstract)

Liu YH, Mo XX, Yu XH, Zhang XT and Xu GW. 2006b. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Jingren granite, Yemaquan region of the East Kunlun and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2457 - 2463 (in Chinese with English abstract)

Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51(1 - 2): 537 - 571

Loiselle MC and Wones DS. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. Geological Society of America, 11: 468

Luo ZH, Deng JF, Cao YQ, Guo ZF and Mo XX. 1999. On Late Paleozoic-Early Mesozoic volcanism and regional tectonic evolution of eastern Kunlun, Qinghai Province. Geoscience, 13(1): 51 - 56 (in Chinese with English abstract)

Luo ZH, Ke S, Cao YQ, Deng JF and Chen HW. 2002. Late Indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun. Geological Bulletin of China, 21(6): 292 - 297 (in Chinese with English abstract)

Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geol. Soc. Am. Bull., 101(5): 635 - 643

Mo XX, Luo ZH, Deng JF, Yu XH, Liu CD, Chen HW, Yuan WM and Liu YH. 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)

Pitcher WS. 1993. The Nature and Origin of Granite. Netherlands: Springer, 1 - 316

Poitrasson F, Pin C, Duthou JL and Platevoet B. 1994. Aluminous subsolvus anorogenic granite genesis in the light of Nd isotopic heterogeneity. Chem. Geol., 112(3 - 4): 199 - 219

Ren JS, Jiang CF, Zhang ZK and Qin DY. 1980. Tectonics and Evolution of China. Beijing: Science Press, 1 - 124 (in Chinese)

Tollo RP, Aleinikoff JN, Bartholomew MJ and Rankin DW. 2004. Neoproterozoic A-type granitoids of the central and southern Appalachians: Intraplate magmatism associated with episodic rifting of the Rodinian supercontinent. Precambrian Research, 128(1 - 2): 3 - 38

Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. Lithos, 22(4): 247 - 263

She HQ, Zhang DQ, Jing XY, Guan J, Zhu HP, Feng CY and Li DX. 2007. Geological characteristics and genesis of the Ulan Uzhur porphyry copper deposit in Qinghai. Geology in China, 34(2): 306 - 314 (in Chinese with English abstract)

Sláma J, Košler J, Condon DJ, Crowley JL, Gerdes A, Hanchar JM, Horstwood MSA, Morris GA, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett MN and Whitehouse MJ. 2008. Plešovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. Chemical Geology, 249(1 - 2): 1 - 35

Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. Earth Planet. Sci. Lett., 219(3 - 4): 311 - 324

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 - 345

Sun Y, Pei XZ, Ding SP, Li RB, Feng JY, Zhang YF, Li ZC, Chen YX, Zhang XF and Chen GC. 2009. Halagatu magma mixing granite in the East Kunlun Mountains: Evidence from zircon U-Pb dating. Acta Geologica Sinica, 83(7): 1000 - 1010 (in Chinese with English abstract)

Vervoort JD and Patchett PJ. 1996. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(19): 3717 - 3733

Wang BZ, Luo ZH, Li HY, Chen HW and Hu XL. 2009. Petrotectonic assemblages and temporal-spatial framework of the Late Paleozoic-Early Mesozoic intrusions in the Qimantage Corridor of the East Kunlun belt. Geology in China, 36(4): 769 - 782 (in Chinese with English abstract)

Wang S, Feng CY, Li SJ, Jiang JH, Li DS and Su SX. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite in the Kaerqueka polymetallic ore deposit, Qimantage Mountain, Qinghai Province, and its geological implications. Geology in China, 36(1): 74 - 84 (in Chinese with English abstract)

Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics discrimination and petrogenesis. Contrib. Mineral. Petrol., 95(4): 407 - 419

Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185 - 220 (in Chinese with English abstract)

Wu SP, Wang MY and Qi KJ. 2007. Present situation of researches on A-type granites: A review. Acta Petrologica et Mineralogica, 26 (1): 57 - 66 (in Chinese with English abstract)

Wu XK, Meng FC, Xu H and Cui MH. 2011. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd-Hf isotopic compositions of the Maxingdaban Late Triassic granitic pluton from Qimantag in the eastern Kunlun. Acta Petrologica Sinica, 27(11): 3380 - 3394 (in Chinese with English abstract)

Wu YZ, Wang Z, Guo L and Xiao PX. 2009. Tectonic constraint on the temporal and spatial variation of granitoid rocks in the Qimantag region, Eastern Kunlun: Evidence from the changes of potassium and sodium contents. Acta Geologica Sinica, 83(7): 964 - 981 (in

Chinese with English abstract)
Wu YZ, Qiao GB and Chen DH. 2011. A preliminary study on relationship between tectonic magmatism and mineralization in Qimantage Area, Eastern Kunlun Mountains. Geotectonica et Metallogenia, 35(2): 232 - 241 (in Chinese with English abstract)
Yin HF and Zhang KX. 1998. Evolution and characteristics of the Central Orogenic Belt. Earth Science, 23(5): 438 - 442 (in Chinese with English abstract)
Yuan WM, Mo XX, Yu XH and Luo ZH. 2000. The record of indosinian tectonic setting from the granotoid of Eastern Kunlun Mountains. Geological Review, 46(2): 203 - 211 (in Chinese with English abstract)
Yuan WM, Mo XX, Wang SC and Zhang XT. 2003. The relationship between gold mineralization and regional tectonic evolution in the Eastern Kunlun Mountains. Geology and Prospecting, 39(3): 5 - 8 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈丹玲，刘良，车自成，罗金海，张云翔. 2001. 祁漫塔格印支期铝质 A 型花岗岩的确定及初步研究. 地球化学，30(6)：540 - 546

谌宏伟，罗照华，莫宣学，刘成东，柯珊. 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. 中国地质，32(3)：386 - 395

党兴彦，范桂忠，李智明，范晓华，顾英. 2006. 东昆仑成矿带典型矿床分析. 西北地质，39(2)：143 - 155

丰成友，李东生，吴正寿，李军红，张占玉，张爱奎，舒晓峰，苏生顺. 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. 西北地质，43 (4)：10 - 17

丰成友，王雪萍，舒晓峰，张爱奎，肖晔，刘建楠，马圣钞，李国臣，李大新. 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. 吉林大学学报(地球科学版)，41(6)：1806 - 1817

丰成友，王松，李国臣，马圣钞，李东生. 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. 岩石学报，28(2)：665 - 678

高永宝，李文渊，谭文娟. 2010. 祁漫塔格地区成矿地质特征及找矿潜力分析. 西北地质，43(4)：35 - 43

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

高永宝，李文渊，马晓光，张照伟，汤庆艳. 2012. 东昆仑尕林格铁矿床成因年代学及 Hf 同位素制约. 兰州大学学报(自然科学版)，48(2)：36 - 47

高永宝，李文渊，钱兵，李侃，李东生，何书跃，张照伟，张江伟. 2014. 东昆仑野马泉铁矿相关花岗质岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素特征. 岩石学报，30(6)：1647 - 1665

高永宝，李侃，钱兵，李文渊，李东生，苏生顺，Zhang CG，张大民，王生明. 2015. 东昆仑卡而却卡铜矿区花岗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. 中国地质，42(3)：646 - 662

郭正府，邓晋福，许志琴，莫宣学，罗照华. 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. 现代地质，12(3)：344 - 352

洪大卫，王式洸，韩宝福，靳满元. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志. 中国科学(B 辑)，25(4)：418 - 426

侯可军，李延河，邹天人，曲晓明，石玉若，谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报，23(10)：2595 - 2604

侯可军，李延河，田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质，28(4)：481 - 492

李碧乐，孙丰月，于晓飞，丁清峰，钱烨，张晗，许庆林. 2010. 青海东昆仑卡尔却卡地区野拉塞铜矿床成因类型及成矿机制. 岩石学报，26(12)：3796 - 3708

李碧乐，孙丰月，于晓飞，钱烨，王冠，杨延乾. 2012. 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. 岩石学报，28(4)：1163 - 1172

李洪普，宋忠宝，田向东，芦文全. 2010. 东昆仑四角羊铅锌多金属矿床成矿地质特征及找矿意义. 西北地质，43(4)：179 - 187

李侃，高永宝，钱兵，何书跃，刘永乐，张照伟，张江伟，王亚磊. 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. 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. 北京：地质出版社，1 - 400

李世金，孙丰月，王力，李玉春，刘振宏，苏生顺，王松. 2008. 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. 矿床地质，27(3)：399 - 406

刘成东，张文秦，莫宣学，罗照华，喻学惠，李述为，赵欣. 2002. 东昆仑约格鲁岩体暗色微粒包体特征及成因. 地质通报，21(11)：739 - 744

刘成东，莫宣学，罗照华，喻学惠，谌宏伟，李述为，赵欣. 2003a. 东昆仑造山带花岗岩类 Pb-Sr-Nd-O 同位素特征. 地球学报，24(6)：584 - 588

刘成东，周肃，莫宣学，罗照华，喻学惠，李述为，赵欣. 2003b. 东昆仑造山带后碰撞花岗岩岩石地球化学和 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 同位素年代学约束. 华东地质学院学报，26(4)：301 - 305

刘成东，莫宣学，罗照华，喻学惠，谌宏伟，李述为，赵欣. 2004. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用：来自锆石 SHRIMP 年代学的证据. 科学通报，49(6)：596 - 602

刘红涛. 2001. 祁漫塔格陆相火山岩：塔里木陆块南缘印支期活动大陆边缘的岩石学证据. 岩石学报，17(3)：337 - 351

刘云华，莫宣学，张雪亭，许国武. 2006a. 东昆仑野马泉地区矽卡岩矿床地球化学特征及其成因意义. 华南地质与矿产，14(3)：31 - 36

刘云华，莫宣学，喻学惠，张雪亭，许国武. 2006b. 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. 岩石学报，22(10)：2457 - 2463

罗照华，邓晋福，曹永清，郭正府，莫宣学. 1999. 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. 现代地质，13(1)：51 - 56

罗照华，柯珊，曹永清，邓晋福，谌宏伟. 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动. 地质通报，21(6)：292 - 297

莫宣学，罗照华，邓晋福，喻学惠，刘成东，谌宏伟，袁万明，刘云华. 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

任纪舜，姜春发，张正坤，秦德余. 1980. 中国大地构造及其演化. 北京：科学出版社，1 - 124

佘宏全, 张德全, 景向阳, 关军, 朱华平, 丰成友, 李大新. 2007. 青海省乌兰乌珠尔斑岩铜矿床地质特征与成因. 中国地质, 34(2): 306 - 314

孙雨, 裴先治, 丁仨平, 李瑞保, 冯建赟, 张亚峰, 李佐臣, 陈有炘, 张晓飞, 陈国超. 2009. 东昆仑哈拉尕吐岩浆混合花岗岩: 来自锆石 U-Pb 年代学的证据. 地质学报, 83(7): 1000 - 1010

王秉璋, 罗照华, 李怀毅, 谌宏伟, 胡旭莉. 2009. 东昆仑祁漫塔格走廊域晚古生代-早中生代侵入岩岩石组合及时空格架. 中国地质, 36(4): 769 - 782

王松, 丰成友, 李世金, 江军华, 李东生, 苏生顺. 2009. 青海祁漫塔格卡尔却卡铜多金属矿区花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义. 中国地质, 36(1): 74 - 84

吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185 - 220

吴锁平, 王梅英, 戚开静. 2007. A 型花岗岩研究现状及其述评. 岩石矿物学杂志, 26(1): 57 - 66

吴祥珂, 孟繁聪, 许虹, 崔美慧. 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. 岩石学报, 27(11): 3380 - 3394

伍跃中, 王战, 过磊, 校培喜. 2009. 东昆仑祁漫塔格地区花岗岩类时空变化的构造控制——来自钾钠含量变化的证据. 地质学报, 83(7): 964 - 981

伍跃中, 乔耿彪, 陈登辉. 2011. 东昆仑祁漫塔格地区构造岩浆作用与成矿关系初步探讨. 大地构造与成矿学, 35(2): 232 - 241

殷鸿福, 张克信. 1998. 中央造山带的演化及其特点. 地球科学, 23(5): 438 - 442

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

袁万明, 莫宣学, 王世成, 张雪亭. 2003. 东昆仑金成矿作用与区域构造演化的关系. 地质与勘探, 39(3): 5 - 8