

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.04.004

阿尔金东段当金山口中酸性侵入体年代学、 地球化学特征及构造意义

李卫红¹, 王军², 李小强², 王玉玺³

(1. 甘肃地矿科技信息中心, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000;

3. 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要:阿尔金东段当金山口侵入体主要由花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩构成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年, 获得当金山口花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $(518 \pm 13)\text{Ma}$, 表明侵位时代为早寒武世。岩石地球化学研究表明, 该岩体具有较高的 SiO_2 含量, 全碱 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量平均为 6.46%, 岩石表现为兼有富钠和富钾的特征, 但以富钠为主, 具有较低的 Fe_2O_3 、 P_2O_5 、 MgO 含量。稀土元素总量 ΣREE 为 $47.28 \times 10^{-6} \sim 368.74 \times 10^{-6}$, 均值为 225.37×10^{-6} , 整体表现出轻重稀土分馏明显, δEu 为 0.45~1.08, 均值为 0.83, 略有负 Eu 异常, 富集高场强元素, 亏损大离子亲石元素, 其中 HFSE 元素中 Th、Ce、Zr、Hf 等富集, 而 Nb、Ta 表现出轻微亏损, 而 LILE 元素中 Ba、Sr、Eu 表现为亏损, Rb 表现为强富集, 主要为钙碱性-高钾钙碱性系列准铝质-过铝质岩石。通过对岩石成因及构造环境分析, 认为本区侵入体可能形成于消减俯冲火山弧环境及后期同碰撞构造环境下, 以壳源角闪岩相基性岩为主的部分熔融, 并有幔源物质参与。结合区域地质资料对比显示, 阿尔金东段当金山口侵入体与西侧南阿尔金蛇绿混杂岩带和东侧祁连造山带古生代花岗岩岩浆活动事件及构造背景存在较好的对比性。

关键词:寒武纪; 地球化学; 构造意义; 阿尔金东段; 当金山口

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)04-0034-17

Chronology, Geochemical Characteristics of the Intermediate Acid Intrusives in Dangjinshankou, Eastern Altun and Their Tectonic Significance

LI Weihong¹, WANG Jun², LI Xiaoqiang², WANG Yuxi³

(1. Gansu Geology and Minerals Scientific Information Center, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Geology Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Third Institute Geology and Mineral Exploration of Gansu Province, Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730050, Gansu, China.)

Abstract: The Dangjinshankou intrusive body in eastern Altun is mainly composed of granite, granodiorite and diorite. LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating shows that the weighted average age of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ of Dangjinshankou granite is $(518 \pm 13)\text{Ma}$, indicating that the emplacement

收稿日期: 2019-12-12; 修回日期: 2020-08-21

基金项目: 2020 年陇原青年创新创业人才项目“地学大数据综合产品研发与应用—甘肃金川超大型铜镍矿深部及外围找矿研究”、“全国自然资源要素综合观测网络建设与运行(2020)”和“甘肃调查数据集成与综合研究”联合资助

作者简介: 李卫红(1962-), 女, 大学本科, 高级工程师, 从事地质矿产管理开发工作。E-mail: Liweihong666@sina.com

age is early Cambrian. Geochemistry shows that the rock mass has a high content of SiO_2 , and the average content of total alkali $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ is 6.46%. The rock is rich in both sodium and potassium, but mainly rich in sodium, with low content of Fe_2O_3 , P_2O_5 and MgO . The total amount of rare earth elements ΣREE is $47.28 \times 10^{-6} - 368.74 \times 10^{-6}$, with an average value of 225.37×10^{-6} . As a whole, the heavy and light rare earth fractionation is obvious, δEu is 0.45—1.08, with an average value of 0.83. Negative europium is slightly anomaly, high field strength elements are enriched, and large ion lithophile elements are depleted. In HFSE elements Th, Ce, Zr, Hf are enriched while Nb, Ta are slightly depleted. In LILE elements Ba, Sr, Eu appear depleted. Rb shows strong enrichment. The granite belongs to quasi aluminous peraluminous rocks of calc-alkaline high-K calc-alkaline series. The analysis of petrogenesis and tectonic environment indicates that the intrusions in this area may form under the environment of subduction volcanic arc and later syn-collision, with the partially melted basic rocks of amphibolite facies and the participation of mantle materials. The regional geological data shows that Dangjinshankou intrusive body has a lot in common with the granitic magma activities and tectonic setting in the ophiolite belt and the Qilian orogenic belt.

Keywords: Cambrian; geochemistry; tectonic significance; eastern Altun; Dangjinshankou

阿尔金造山带位于新疆、青海、甘肃三省交界地带,其南北衔接柴达木盆地与塔里木盆地,西接昆仑断裂带,东段截交祁连构造带,是西北重要的大地构造单元衔接部位,又是青藏高原北部重要的自然边界,一直以来成为解决青藏高原形成演化和中国西北大陆动力学问题的关键地区(TAPPONIER, et al., 1980; BURCHFIEL, et al., 1989; 国家地震局《阿尔金活动断裂带》课题组, 1992; 崔军文等, 1999; 许志琴等, 1999; 葛肖红等, 2001; 万景林等, 2001; 陈宣华等, 2009; 王立社等, 2015; 王玉玺等, 2017a)。前人将该造山带由北向南依次划分为阿北变质地体、红柳沟-拉配泉构造混杂岩带、阿中米兰-金雁山地块、阿南茫崖构造混杂岩带等4个构造单元(许志琴等, 1999; 刘良等, 1998; 王焰等, 1999; 车自成等, 2002; LIU et al., 王立社等, 2016),而对造山带东段当金山口一带与祁连山西段构造带衔接部位研究程度较低。许志琴等(1999)通过对阿尔金构造带两侧的地质体对比研究,认为阿拉善地块对应敦煌地块,北祁连俯冲杂岩带对应北阿尔金杂岩带,中祁连地块对应中阿尔金地块,柴达木盆地北缘俯冲杂岩带对应南阿尔金杂岩带,陈柏林等(2010)通过成矿带对比研究认为,阿尔金山东段成矿带是祁连山西段成矿带的西延部分,或者说阿尔金山东段成矿带是祁连山西段成矿带被阿尔金断裂左行走滑断错的部分。祁连山西段当金山口一带特殊大地构

造位置使其对研究阿尔金造山带与祁连造山带之间的构造演化有至重要作用。当金山口一带正好处于祁连造山带与阿尔金造山带的结合部位,对该地区构造岩浆事件的深入研究能够更好的理解和探讨祁连造山带和阿尔金造山带的构造属性及二者之间的关系。

大规模陆壳深俯冲及其后抬升折返的过程中,必然会引发幔源岩浆与壳源岩浆发生混合作用或大陆地壳的重熔,形成各类花岗岩体(PITCHER, et al., 1993; MILLER, et al., 1999; 刘文强等, 2012; 王国良等, 2016; 刘明强等, 2018; 王国良等, 2018),因此,花岗岩是大陆地壳生长的重要标志,是探讨大陆地壳生长和构造作用最佳窗口和研究对象(伍跃中等, 2009; 肖庆辉等, 2005)。研究表明(王立社等, 2016; 陈柏林等, 2010; PITCHER, et al., 1993; MILLER, et al., 1999; 刘文强等, 2012; 伍跃中等, 2009; 肖庆辉等, 2005; 刘永顺等, 2009; 王玉玺, 2017b),阿尔金造山带是太古代古老地壳形成和多期岩浆活动、古元古代(2 500~1 800 Ma)强烈改造和中基性岩浆侵入、新元古代(1 000~800 Ma)碰撞造山和大规模岩浆活动的基础之上,又经历早古生代古板块之间相互俯冲-碰撞形成的复杂构造带,其后又遭受中新生代走滑断裂系的改造(刘良等, 2015)。因此,在阿尔金山地区花岗岩类非常发育,并且具有形成时代跨度大、分布范围广的特点。对

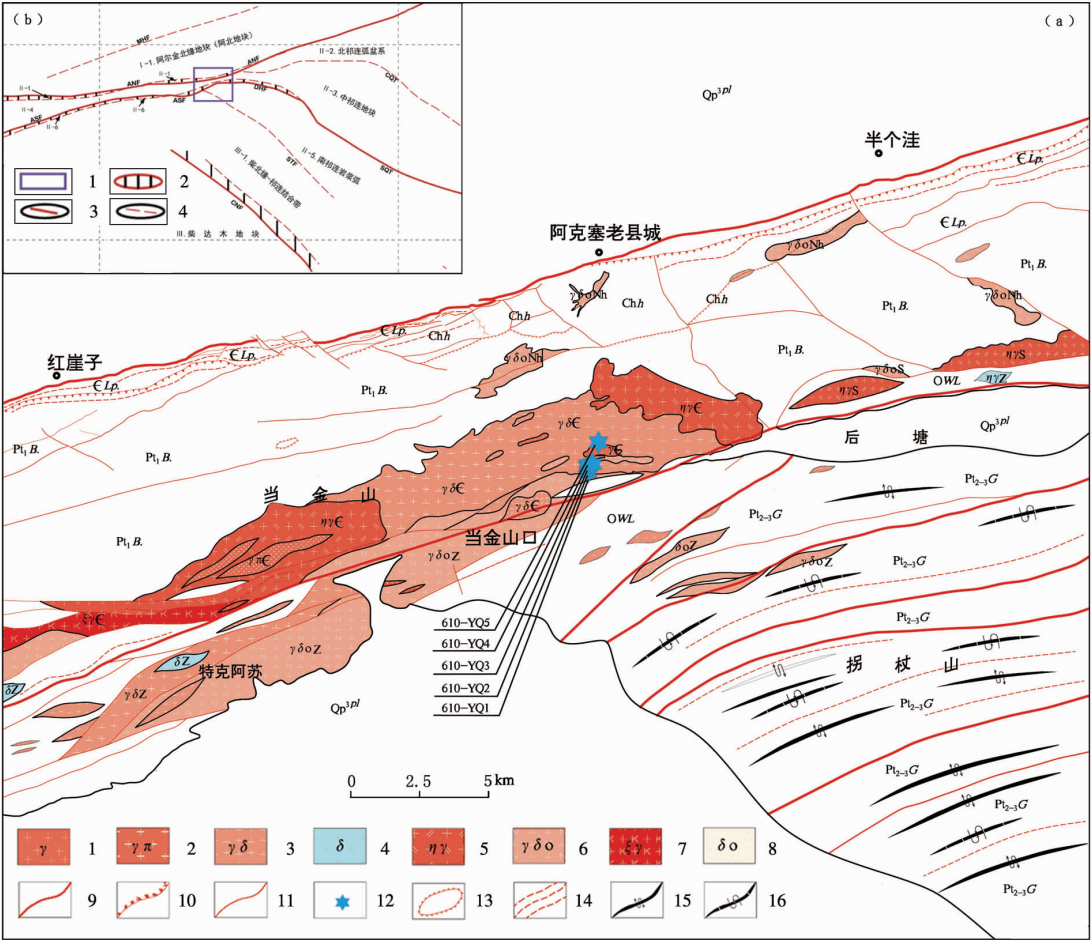
区内花岗岩类与构造作用相互关系的研究有助于全面认识阿尔金山地质构造特征及其演化特点(吴跃中等,2009;刘良等,2015;陆松年等,2003;校培喜等,2003;杨屹等,2004;张安达等,2004;陈宣华等 2003;吴才来等,2007;戚学祥等,2005;菅坤坤等,2018)。

祁连山西段当金山口一带北东、北东东向呈条带状大规模出露中酸性侵入体(图 1),其作为阿尔金造山带构造岩浆演化的响应,记录着该地区壳幔相互作用,岩石圈演化的大量信息。笔者对该地区

中酸性侵入体进行岩石地球化学和年代学分析,通过区域岩浆活动及构造事件对比,对岩石成因、构造意义进行了深入探讨。

1 区域地质背景

研究区北接库木塔格沙漠东缘,南与苏干湖盆地相邻。区内主要发育阿尔金北缘断裂、阿尔金南缘断裂及多条次级断裂,构造线方向主要为近北东、



(a)1. 花岗岩;2. 花岗斑岩;3. 花岗闪长岩;4. 中细粒闪长岩;5. 中粒二长花岗岩;6. 中粒英闪长岩;7. 中粒正长花岗岩;8. 弱糜棱岩化辉绿玢岩;9. 主缘断层;10. 逆冲断层;11. 次级断层;12. 采样点;13. 飞来峰构造;14. 劈理化;15. 背形构造;16. 向形构造;Pt₁B. 北大河岩群;Chh. 桦树沟岩组;Pt₂₋₃G. 拐杖山片岩;Cpl. 拉配泉岩群;OWL. 吾力沟群;MHF. 米兰红柳园断裂;ANF. 阿尔金北缘断裂;ASF. 阿尔金南缘断裂;CQT. 中祁连断裂;DHF. 党河南山断裂;SQT. 南祁连断裂;STF. 赛什腾断裂;CNF. 柴达木北缘断裂;(b) 1. 工作区位置;2. 蛇绿混杂岩带;3. 主边界断裂;4. 次要断裂;I. 塔里木板块;I-1. 阿尔金北缘地块(阿北地块);II. 祁连-阿尔金造山带;II-1. 北阿尔金蛇绿混杂岩带;II-2. 北祁连弧盆系;II-3. 中祁连地体;II-4. 中阿尔金地体;II-5. 南祁连岩浆弧;II-6. 南阿尔金蛇绿混杂岩带;III. 柴达木地块;III-1. 柴北缘-祁连结合带

图 1 祁连山西段当金山口一带地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the Dangjinsankou in the west segment of Qilian mountains

北东东向。已有研究认为,该构造带经历了太古宙—古元古代陆核和结晶基底的形成(崔军文等,1999;车自成等,1995),中元古代稳定大陆边缘沉积,新元古代末期—早古生代板块扩张(郭召杰等,1998),加里东期板块俯冲—碰撞(许志琴等,1999;刘良等,1999;周勇等,1999;SOBEL, et al., 1999),晚古生代剥露夷平和局部浅海沉积。印支期表现伸展作用和碱性岩侵位(YIN, et al., 1999);而晚燕山期以来,由于印度板块与欧亚板块碰撞造山的远程效应,阿尔金断裂带发生了大规模的左行走滑(国家地震局,1992;崔军文等,1999;许志琴等,1999;YIN, et al., 1999;郑健康等,1995;LIU, et al., 1995, 2007;刘永江等,2007)。

研究区在阿尔金山北大面积发育古元古代北大河岩群斜长角闪岩和片岩类,零星出露长城纪桦树沟组变砂岩和变质火山岩;沿北阿尔金构造混杂岩带主要发育基性、超基性岩块,如带状展布的寒武纪拉配泉岩群。当金山口东南拐杖山附近主要发育中新元古代拐杖山片岩、吾力沟群火山岩。区内大面积侵入体与构造线方向近一致,主要分布于阿尔金山南侧,沿阿尔金南缘断裂带近东西向展布(图1)。

2 岩石学特征

当金山口岩体为复式岩体,主要岩性为花岗岩、花岗斑岩、中粒正长花岗岩、中粒二长花岗岩、中粒花岗闪长岩、中粒英云闪长岩和细粒闪长岩(图2)。本次重点对岩体中中粒花岗岩和闪长岩捕虏体进行采样测试研究。本次采集当金山口附近的岩石样品610-YQ1、610-YQ2、610-YQ3、610-YQ4、610-YQ5(图1)。采集样品区侵入体近东西向带状展布,面积较小(图1),其中花岗岩近北东向延展分布,主要为细中粒花岗结构,块状构造,长石占矿物总量的65%~90%,主要为酸性和中性斜长石,钾长石常具明显的环带结构,肉红色,半自形板柱状,大小为0.2~3 mm,含量约13%;斜长石:灰白色,半自形,大小为0.2~4 mm,含量约47%;石英:灰色,他形,粒状,大小为0.5~4 mm,含量约25%;黑云母:黑色,片状,大小为0.2~3 mm,含量约5%;角闪石:黑色,柱状,大小为0.2~5 mm,含量约5%。

花岗闪长岩为灰白色,中细粒花岗结构,块状构造。矿物成分以斜长石、石英、钾长石、角闪石、黑云母为主。其中,斜长石为灰白色,半自形,粒状,粒径为2~3 mm,含量约40%;石英为灰白色,他形,粒状,粒径为1~1.2 mm,含量约15%;钾长石为灰白色,粒状,粒径为2 mm左右,含量约15%;角闪石为灰黑色,柱状,粒径为1.5~2 mm,含量约25%;黑云母为团块状,粒径小于1.3 mm,含量小于5%。

细粒闪长岩呈细粒结构,块状构造。矿物成分以斜长石、石英、钾长石、角闪石、黑云母为主。呈捕虏体分布在中粒英云闪长岩或伟晶岩中。

3 岩石地球化学特征

3.1 分析方法

主量、稀土及微量元素的测量在国土资源部武汉矿产资源监督检测中心(湖北省地质实验测试中心)完成。主量元素含量用X射线荧光光谱仪(XRF)测试,称取0.7g样品,加入适量硼酸,高温熔融成玻璃片,最后在XRF(仪器型号为XRF-1800)上用外标法测定氧化物含量,氧化物总量分析误差为1%~3%,其中FeO含量通过湿化学方法测定,分析精度和准确度优于1%。微量和稀土元素含量采用电感耦合等离子体质谱仪(ICAP6300)完成,首先称取50 mg样品,用酸溶样制成溶液,然后在ICAP6300(仪器编号为2-HY-2008-004)上用内标法进行测定,分析精度和准确度多优于5%。

锆石颗粒选自花岗岩样品928TW5,首先经过破碎,经浮选和电磁选等方法后,挑选出单颗粒锆石。将锆石颗粒用环氧树脂固定于样品靶上。样品靶表面经研磨抛光,直至磨至锆石晶体近中心截面。对靶上锆石进行阴极发光(CL)分析,根据阴极发光照射结果选择典型的岩浆锆石进行U-Pb测年分析。锆石U-Pb年龄测定工作在兰州大学甘肃省西部矿产资源重点实验室采用LA-ICP-MS完成,ICP-MS型号为Agilent7500a型,激光剥蚀系统为New Wave公司生产的UP213固体激光剥蚀系统。测试过程中激光束斑的剥蚀孔径为25 μm ,剥蚀时间为60 s,背景扫描时间40 s,激光脉冲重复频率5 Hz。实验原理和详细的测试方法见JACKSON, et al. (2004)。ICP-MS的分析数据通过及时分析软件Glitter(VAN et al., 2001)计算获得



a. 片麻状中粒斑状英云闪长岩中的细粒英云闪长岩包体;b. 中粒英云闪长岩侵入于细粒闪长岩中,后又花岗伟晶岩脉灌入;
c. 岩体中强烈构造平行化形成的强制片麻理形成的假层状构造;e. 岩体熔融状态下形成的浅色脉体发生透镜化或褶皱

图 2 当金山口岩体特征图

Fig. 2 The characteristics of intrusive mass from Dangjinshankou

同位素比值、年龄和误差。普通铅校正采用 Andersen (2002) 的方法进行校正,分析误差 $\pm 1\sigma$ 。结果用

Isoplot 程序(V. 3. 23)完成年龄计算和谐图的绘制 (LUDWIG, 2003)。

3.2 同位素年龄

该套侵入体时代一直没有确切的资料,前人根据区域对比曾将其形成时代定为志留纪。本次在当金山口长草沟敦格公路西侧的花岗岩之上采集了锆石 U-Pb 同位素测年样品,测年结果见表 1 和图 3。被测锆石颗粒较碎,显示经历了后期脆性构造破坏

作用,锆石 CL 阴极发光图像上均表现出特征性岩浆震荡环带,显示锆石的岩浆成因,锆石边部普遍有次生加大边,应为后期变质作用的结果。同位素比值都分布于 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 一致线附近,给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(518\pm13)\text{Ma}$,时代为早寒武世。

表 1 当金山口花岗闪长岩锆石 U-Pb 同位素测年结果表
Tab. 1 Zircon U-Pb isotopic dating results of the granites from Dangjinshankou

测定点号	同位素比值						年龄(Ma)			
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	比值	$\pm\sigma$	比值	$\pm\sigma$	比值	$\pm\sigma$	年龄	$\pm\sigma$	年龄	$\pm\sigma$
928tw5-01	0.055 16	0.000 6	0.635 85	0.008 26	0.083 6	0.001 03	500	5	518	6
928tw5-02	0.057 33	0.000 64	0.639 09	0.008 43	0.080 84	0.001	502	5	501	6
928tw5-03	0.056 19	0.000 6	0.611 35	0.007 88	0.078 91	0.000 97	484	5	490	6
928tw5-04	0.055 68	0.000 73	0.665	0.009 77	0.086 61	0.001 09	518	6	536	6
928tw5-05	0.058 75	0.000 68	0.693 34	0.009 44	0.085 59	0.001 07	535	6	529	6
928tw5-06	0.055 27	0.000 7	0.652 75	0.009 46	0.085 65	0.001 08	510	6	530	6
928tw5-07	0.061 01	0.000 71	0.709 88	0.009 67	0.084 38	0.001 05	545	6	522	6
928tw5-08	0.057 75	0.000 68	0.666 52	0.009 12	0.083 71	0.001 04	519	6	518	6

注:样品测试单位为兰州大学甘肃省西部矿产资源重点实验室;当金山口花岗闪长岩:样品编号 928TW5,采样经纬度坐标: E94°20'52", N39°21'05"。

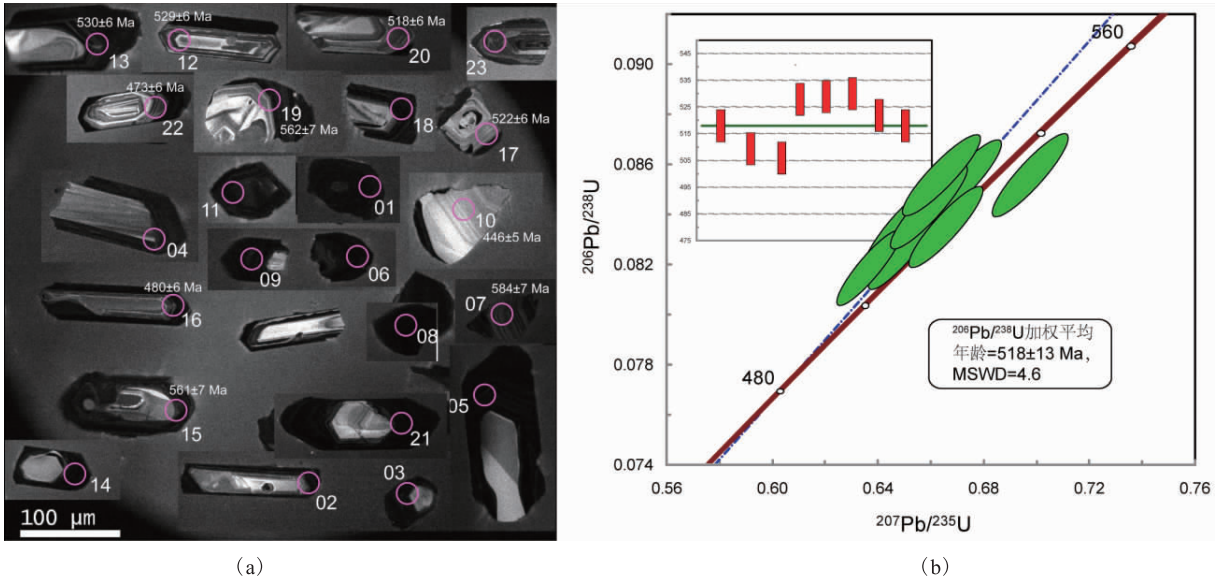


图 3 (a)当金山口花岗岩锆石阴极发光图像、(b)U-Pb 年龄谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄图

Fig. 3 (a)Cathodoluminescence images of zircons and (b)concordia diagram of zircons U-Pb dating age and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age diagram of the granites from Dangjinshankou

3.3 元素地球化学特征

在薄片观察分析基础上,选取新鲜的岩石样品

610-YQ1、610-YQ2、610-YQ3、610-YQ4、610-YQ5 进行主量、微量和稀土元素测量分析(表 2)。

表 2 当金山口侵入体主量元素(%)、微量和稀土元素(10^{-6})分析结果表
Tab.2 Major element (%), trace and REE element (10^{-6}) composition of intrusive mass from Dangjinshankou

样品号	610-YQ1	610-YQ2	610-YQ5	610-YQ3	610-YQ4	样品号	610-YQ1	610-YQ2	610-YQ5	610-YQ3	610-YQ4
花岗岩			闪长岩捕掳体			花岗岩			闪长岩捕掳体		
SiO ₂	73.00	65.89	71.94	50.62	50.05	Nb	4.6	12.6	17.7	31.3	26.9
TiO ₂	0.10	0.50	0.38	2.16	1.95	La	11.7	66.4	95.7	50.3	44.8
Al ₂ O ₃	14.65	16.69	14.34	17.62	17.22	Ce	20.15	107.61	174.39	102.37	90.43
Fe ₂ O ₃	0.49	0.79	0.30	2.25	1.73	Pr	2.22	11.46	19.01	13.57	11.44
FeO	0.30	2.55	1.40	7.00	7.00	Sr	433.15	689.26	129.59	774.40	744.19
MnO	0.03	0.07	0.03	0.13	0.18	Nd	7.13	33.65	57.77	48.55	40.33
MgO	0.29	1.47	0.45	4.53	4.80	Zr	73.80	139.5	258.8	144.5	178.20
CaO	2.96	3.60	1.35	6.97	7.71	Hf	2.43	3.87	6.39	4.05	4.77
Na ₂ O	4.80	4.77	2.91	4.01	3.69	Sm	1.53	5.49	9.17	10.21	8.30
K ₂ O	1.85	1.71	5.58	1.74	1.26	Eu	0.50	1.41	1.11	2.66	2.36
P ₂ O ₅	0.06	0.26	0.09	0.73	0.63	Dy	1.12	3.13	2.89	7.03	5.98
LOI	1.24	1.18	0.86	1.18	2.75	Y	5.60	14.36	11.74	33.08	27.57
Total	99.77	99.49	99.64	98.95	98.98	Ho	0.21	0.60	0.48	1.39	1.16
Na ₂ O+K ₂ O	6.65	6.48	8.49	5.75	4.95	Yb	0.55	1.19	0.94	3.21	2.74
K ₂ O/Na ₂ O	0.39	0.36	1.91	0.43	0.34	Lu	0.08	0.17	0.14	0.48	0.40
σ	1.47	1.82	2.48	3.98	3.12	Σ REE	47.28	237.47	368.74	253.61	219.73
A/CNK	0.96	1.03	1.08	0.83	0.80	LREE	43.24	226.06	357.16	227.67	197.70
A/NK	1.48	1.72	1.32	2.08	2.32	HREE	4.04	11.41	11.58	25.95	22.03
Gd	1.26	4.13	5.30	8.44	7.17	LREE/HREE	10.70	19.82	30.83	8.77	8.97
Tb	0.20	0.61	0.66	1.30	1.09	La _N /Yb _N	15.40	40.05	72.87	11.25	11.72
Er	0.54	1.40	1.02	3.59	3.05	δ Eu	1.08	0.87	0.45	0.85	0.91
Tm	0.08	0.2	0.2	0.51	0.43	δ Ce	0.90	0.88	0.94	0.94	0.95
Rb	44.54	100.20	280.70	68.42	71.31	Zr/Hf	30.37	36.05	40.50	35.68	37.36
Ba	574.64	519.42	894.29	805.53	472.01	Nb/Ta	5.77	14.19	11.43	14.10	14.01
Th	3.21	9.08	37.06	3.28	2.59	Ti/Zr	7.73	21.49	8.86	89.76	65.50
U	1.17	1.1	2.8	0.8	1.2	K/Rb	345.18	141.91	164.91	210.84	146.86
Ta	0.80	0.89	1.54	2.22	1.92	Tzr	700.39	749.53	802.22	889.95	769.77

3.3.1 主要元素特征

据表 2 可知,样品烧失量(LOI)较低,平均为 1.44%,为 0.86%~2.75%,说明岩石后期遭受不同程度的蚀变;SiO₂ 含量为 50.05%~73.00%,全碱 Na₂O+K₂O 含量为 4.95%~8.49%,平均为 6.46%;Na₂O 含量为 2.91%~4.80%,均值为 4.04%;K₂O 含量为 1.26%~5.58%,均值为 2.43%;K₂O/Na₂O 值为 0.34%~1.91%,均值为

0.69%;里特曼指数(σ)为 1.47~3.98,均值为 2.57,均小于 3.3,属于钙碱性系列;Al₂O₃ 含量为 14.34%~17.67%,平均为 16.10%;TiO₂ 含量 0.10%~2.16%,均值为 1.02%;CaO 含量 1.35%~7.71%,均值为 4.52%;P₂O₅ 含量为 0.06%~0.73%,均值为 0.36%;MgO 含量为 0.29%~4.80%,均值为 2.31%;Fe₂O₃ 含量为 0.30%~2.25%,均值为 1.11%;FeO 含量为

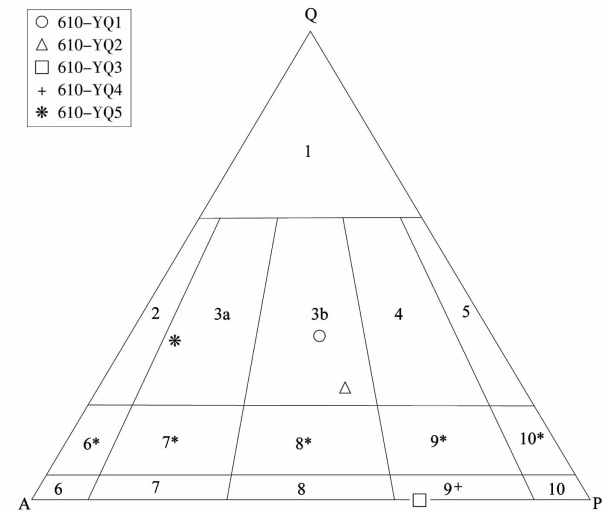
0.30%~7.00%,均值为 3.65%。

从以上数据进行图解分析,在 CIPW 标准矿物组成图解中(图 4),610-YQ1、610-YQ2、610-YQ5 样品落入花岗岩(花岗闪长岩)区,而 610-YQ3、610-YQ4 落入闪长岩类,样品显示为一套中酸性火成岩;在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 5a)中 3 个样品落入钙碱性系列中,610-YQ3 样品落入高钾钙碱性系列,而 610-YQ5 样品落入到钾玄岩系列,表明该套岩体兼有富钠和富钾的特征,但以富钠为主;在 $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$ 图解(图 5b)中,样品 610-YQ2、610-YQ5 落入过铝质花岗岩区外,其余样品均落入准铝质花岗岩区,A/CNK 值为 0.80~1.08,平均值为 0.94,均小于 1.1,属于 I 型花岗岩; SiO_2 与大多数常量元素具有较好的相关性(图 6),显示一致受控于一种岩浆结晶分异演化过程的特征。

3.3.2 稀土和微量元素特征

当金山口侵入岩的稀土元素总量($\sum\text{REE}$)差异较大,为 $47.28\times10^{-6}\sim368.74\times10^{-6}$,均值为 225.37×10^{-6} ; $\text{HREE}=4.04\times10^{-6}\sim25.95\times10^{-6}$, $\text{LREE}=43.24\times10^{-6}\sim357.16\times10^{-6}$, $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}=8.77\sim30.83$,二者明显分异, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=11.25\sim72.87$ 。在球粒陨石标准化 REE 配分曲线图上具为右倾型特征(图 7a),轻稀土富集、重稀土亏损。 δEu 为 0.45~1.08,均值为 0.83,除 610-YQ5 花岗岩样品($\delta\text{Eu}=0.45$)表现出较强 Eu 负异常,其余样品无明显异常,说明在斜

长石岩浆演化过程结晶分异过程中分离结晶作用并不明显; δCe 为 0.88~0.95,均值为 0.92,为轻微亏损,表明岩石遭受了后期表生作用的改造。



1. 富石英花岗岩;2. 碱长花岗岩;3a. 花岗岩;3b. 花岗岩(二长花岗岩);4. 花岗闪长岩;5. 英云闪长岩、斜长花岗岩;6*. 碱长石英正长岩;7*. 石英正长岩;8*. 石英二长岩;9*. 石英二长闪长岩;10*. 石英闪长岩、石英辉长岩、石英斜长岩;6. 碱长正长岩;7. 正长岩;8. 二长岩;9. 二长闪长岩、二长辉岩;10. 闪长岩、辉长岩、斜长岩;Q. 石英;A. 碱性长石;P. 斜长石

图 4 当金山口侵入体 CIPW 标准矿物组成图解 (MIDDLEMOST,1994)

Fig. 4 CIPW compositions of intrusive mass from the Dangjinshankou

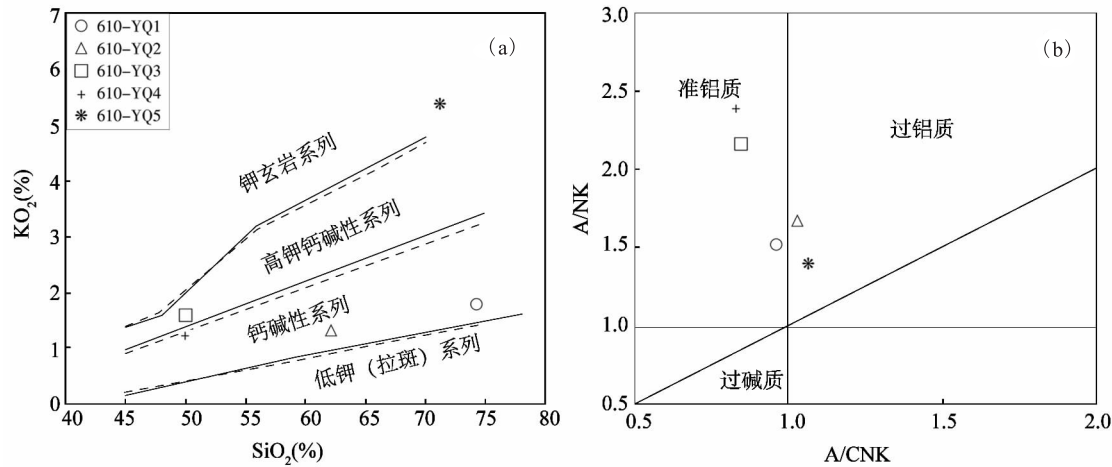


图 5 (a)当金山口侵入体 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 岩石系列判别图(据 PECCERILLO 等,1976; MIDDLEMOST,1985)和(b) $\text{A/NK}-\text{A/CNK}$ 铝质-准铝判别图(据 MANIAR 等,1989)

Fig. 5 (a) K_2O vs. SiO_2 diagram and (b) A/NK vs. A/CNK diagram of intrusive mass from Dangjinshankou

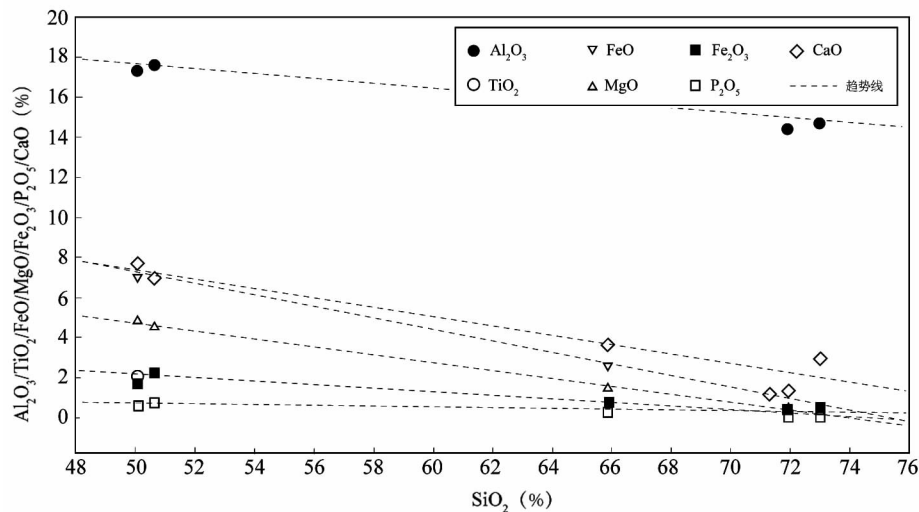


图 6 当金山口侵入体 Hark 图解

Fig. 6 Hark diagram of intrusive mass from Dangjinshankou

在原始地幔标准化的微量元素比值蛛网图上(图 7b)表现出右倾型,富集高场强元素(HFSE)Th、Ce、Zr、Hf 等,而 Nb、Ta 表现出轻微亏损,花岗岩类表现出 Ti 元素强烈亏损,其中 Th 含量为 $2.59 \times 10^{-6} \sim 37.06 \times 10^{-6}$,Ce 含量为 $20.15 \times 10^{-6} \sim 174.39 \times 10^{-6}$,Zr 含量为 $73.80 \times 10^{-6} \sim 258.8 \times 10^{-6}$,Hf 含量为 $2.43 \times 10^{-6} \sim 6.39 \times 10^{-6}$,Nb 含量为 $4.6 \times 10^{-6} \sim 31.3 \times 10^{-6}$,Ta 含量为 $0.80 \times 10^{-6} \sim 2.22 \times 10^{-6}$;Ba、Sr、Eu 低场强大离子亲石元素(LILE)表现为亏损,Rb 表现为强富集,其中 Rb 含量为 $44.54 \times 10^{-6} \sim 280.70 \times 10^{-6}$,Ba 含量为

$472.01 \times 10^{-6} \sim 894.29 \times 10^{-6}$,Sr 含量为 $129.59 \times 10^{-6} \sim 774.40 \times 10^{-6}$,Eu 含量为 $0.50 \times 10^{-6} \sim 2.66 \times 10^{-6}$ 。说明岩浆演化过程中可能遭受到明显的地壳混染作用或源区遭受俯冲组分的强烈改造。综合稀土微量元素特征显示,花岗岩类(610-YQ1、610-YQ2、610-YQ5)其稀土微量含量异常变化较为明显,而闪长岩类(610-YQ2、610-YQ3)稀土微量异常变化并无花岗岩类变化强烈,但 2 种岩石稀土微量元素含量整体变化趋势相似,同时样品间曲线并不是完全相互平行,可能显示不同部位样品分馏程度不相同。

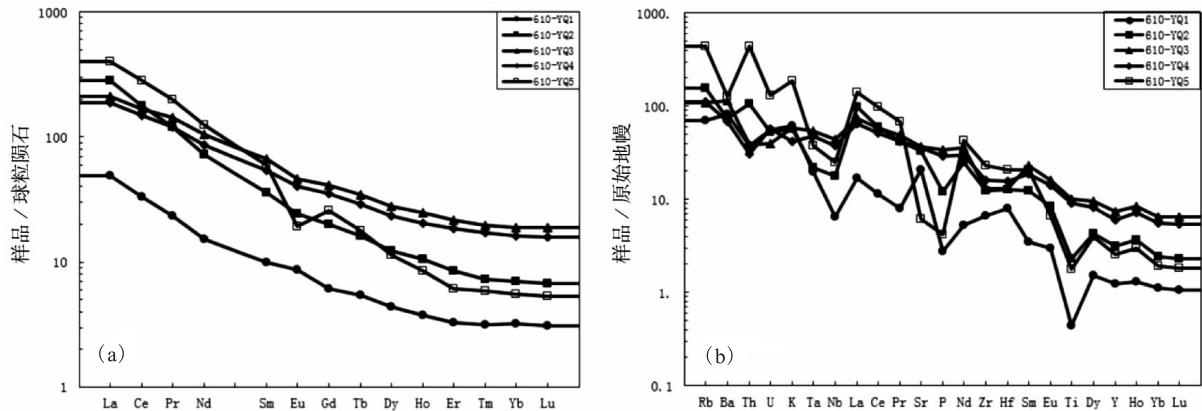


图 7 (a)当金山口侵入岩稀土元素球粒陨石标准化分配图解和(b)微量元素蛛网图(标准化数值据 SUN,et al. ,1989)

Fig. 7 (a) Chondrite-normalized REE patterns and (b)primitive mantle-normalized diagram of the Dangjinshankou granitoids

4 讨论

4.1 岩石成因

花岗岩成因分类方案一直在不断探索中,目前,较为广泛接受的花岗岩类型划分方案主要为 I 型、S 型、M 型和 A 型 (CHAPPELL, et al., 1974; LOISELLE, et al., 1982; PITCHER, et al., 1983; COLLINS, et al., 1979; 吴福元等, 2007; 邱检生等, 2008)。而岩石经历复杂的构造演化及高度分异结晶的作用后,其矿物化学成分之间趋于相似性,使得岩石类别很难鉴别 (LIU, et al., 2007),所以在判别花岗岩成因类型方面需要结合各方面的特征来综合判别 (吴福元等, 2007; 邱检生等, 2008; 康磊等, 2012)。

M 型花岗岩指由地幔岩浆所形成 (LOISELLE,

et al., 1979; PITCHER, et al., 1983),通过后文分析,当金山口侵入体主要是以地壳物质为主,且分布面积较为广泛,应不属于幔源岩浆结晶分异而成,可排除 M 型花岗岩可能性。上述对祁连山西段当金山口侵入体地球化学特征的分析可知,花岗岩和闪长岩具有高钾钙碱性系列、钙碱性系列和钾玄岩系列,有 I 型花岗岩特征;侵入体 A/CNK 值为 0.80 ~ 1.08,平均值为 0.94,均小于 1.1,应属于 I 型花岗岩类。研究表明 (CHAPPELL, et al., 1974),在准铝质、过铝质岩浆分异过程中,磷灰石的溶解度随着 SiO_2 的增加而降低,这一现象可来区分 I 型和 S 型花岗岩类,而从研究区 Hark 图解 (图 6) 可发现, P_2O_5 含量随 SiO_2 含量逐渐降低趋势,与 I 型花岗岩演化趋势一致。综合 Zr - SiO_2 判别图 (图 8a) 和 Y - SiO_2 判别图 (图 8b),样品也主要落入到 I 型花岗岩区域内,对属于 I 型花岗岩这一认识给予佐证。

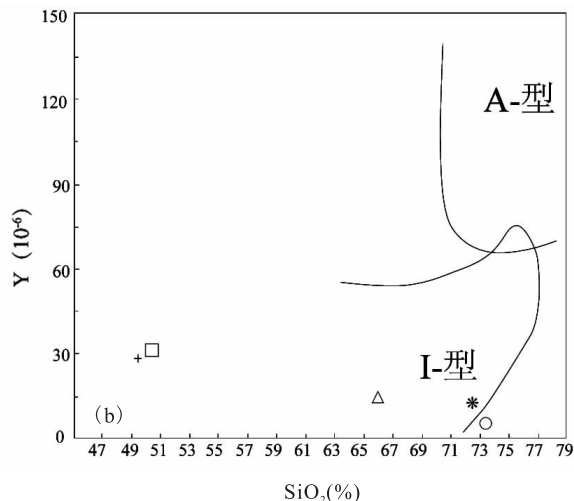
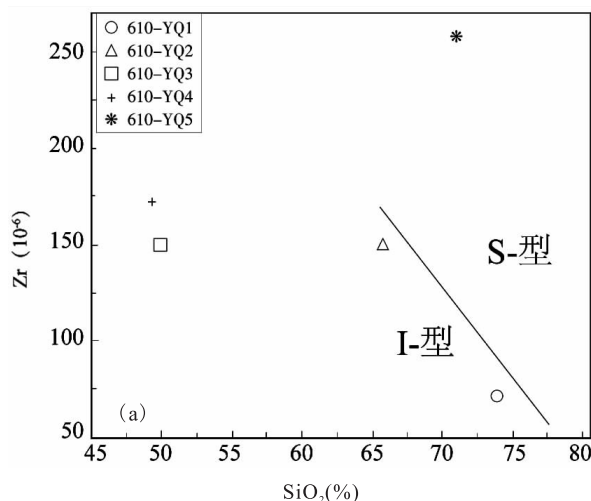


图 8 (a) 祁连山西段当金山口侵入体 Zr - SiO_2 判别图和 (b) Y - SiO_2 判别图 (据 COLLINS, 1982)

Fig. 8 (a) Zr vs SiO_2 digram and (b) Y vs. SiO_2 diagram of the intermediate-acidic porphyry plutons at the Dangjinshankou of the west segment of Qilian Mountains

4.2 构造环境分析

岩体中 Zr 富集和 Ba、Nb、Ta、Ti 的亏损表明岩浆源区岩石中以陆壳组分为主 (康磊等, 2012; GREEN, et al., 1987, 1995; WAN, et al., 1999; BARTH, et al., 2000), Zr/Hf 值接近地壳平均水平 33 (Zr/Hf = 30.37 ~ 40.50) 也说明了这一点。而且, Nb/Ta 值为 5.77 ~ 14.10, 平均值为 11.90, 接近地壳的 Nb/Ta 平均值 (11) (TAYLOR, et al., 1985), 同时, Ti/Zr 值为 7.72 ~ 89.76, 均值为

38.67, 其中 3 个样品 Ti/Zr 值 (7.72、8.86、21.49) 接近地壳的 Ti/Zr 值 (< 20) (WILSON, et al., 1989; FRANCALANCI, et al., 1993), 个别样品的 Nb/Ta 值 (14.00、14.10、14.18) 和 Ti/Zr 值 (65.50、89.76) 较高, 又显示幔源物质的特征。此外, 在 $\delta\text{Eu} - (\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解 (9a) 和 K/Rb - Rb 图解 (9b) 中, 样品在壳型和壳幔型范围内都存在, 说明在成岩过程中可能存在少量幔源物质的参与, 进一步支持了这一观点。

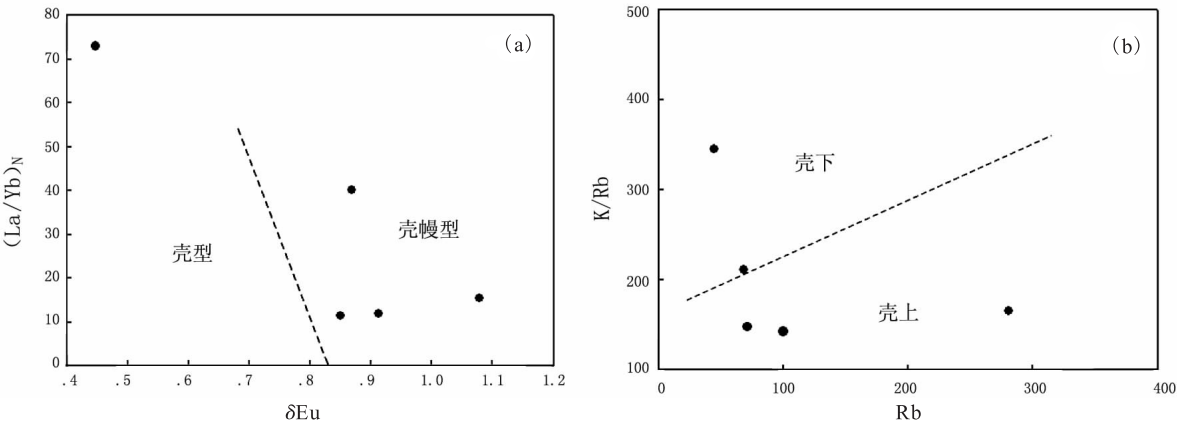


图 9 (a)祁连山西段当金山口侵入体 $\delta Eu - (La/Yb)_N$ 和 (b) $K/Rb - Rb$ 图解

Fig. 9 (a) $\delta Eu - (La/Yb)_N$ and (b) $K/Rb - Rb$ diagram at the Dangjinshankou of the west segment of Qilian mountains

研究表明(JUNG, et al. ,2007), CaO/Na_2O 值可以用来推断中酸性岩浆的源区特征。当 $CaO/Na_2O < 0.5$ 时暗示源区为泥质岩,当比值为 $0.3 \sim 1.5$ 时,中酸性的花岗质岩石则源于变杂砂岩或火成岩,而且角闪岩部分熔融而成的偏中性熔融体会略有略高的 CaO/Na_2O ,当金山口侵入体 CaO/Na_2O 值为 $0.46 \sim 2.09$,均值为 1.13 ,与变砂岩或火成岩较为一致。结合 $(Na_2O + K_2O + FeO + MgO +$

$TiO_2) - (Na_2O + K_2O) / (FeO + MgO + TiO_2)$ 图解(图 10a)和 $A/MF - C/MF$ 图解(图 10b),样品大多落入到角闪岩和基性岩的部分熔融区内,部分有落入到变质砂岩部分熔融区及此 3 个特征区外,这可能与此样品具有高分异特征对花岗岩源岩特征的判定较困难有关(邱检生等,2008;康磊等,2012)。因此,推断该侵入体源岩应为壳源角闪岩相的基性岩部分熔融物质。

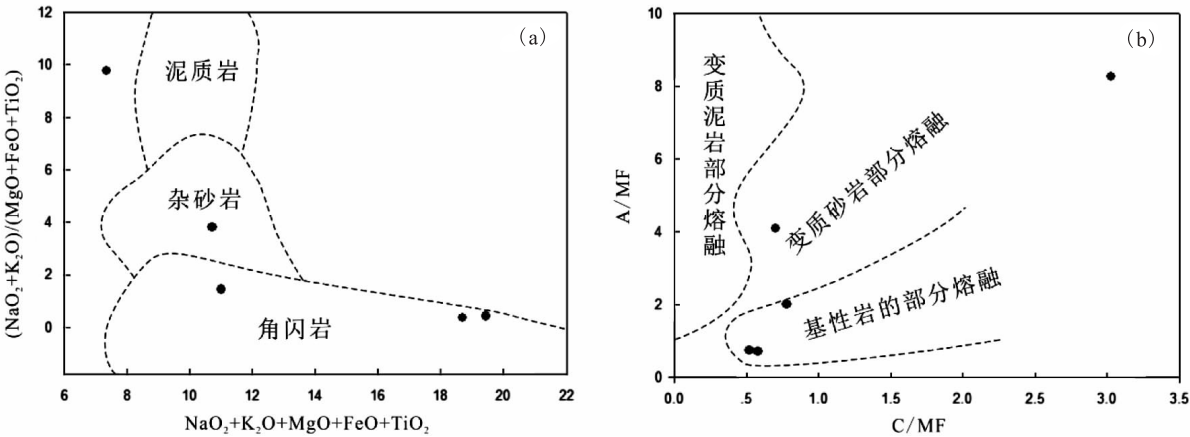


图 10 (a)当金山口侵入体 $(Na_2O + K_2O + FeO + MgO + TiO_2) - (Na_2O + K_2O) / (FeO + MgO + TiO_2)$ 图解(据 PATION, et al. ,1999)和 (b) $A/MF - C/MF$ 图解 ($A/MF = Al_2O_3 / (TFeO + MgO)$ (mol); $C/MF = CaO / (TFeO + MgO)$ (mol)) (据 ALTHER, et al. ,2000)

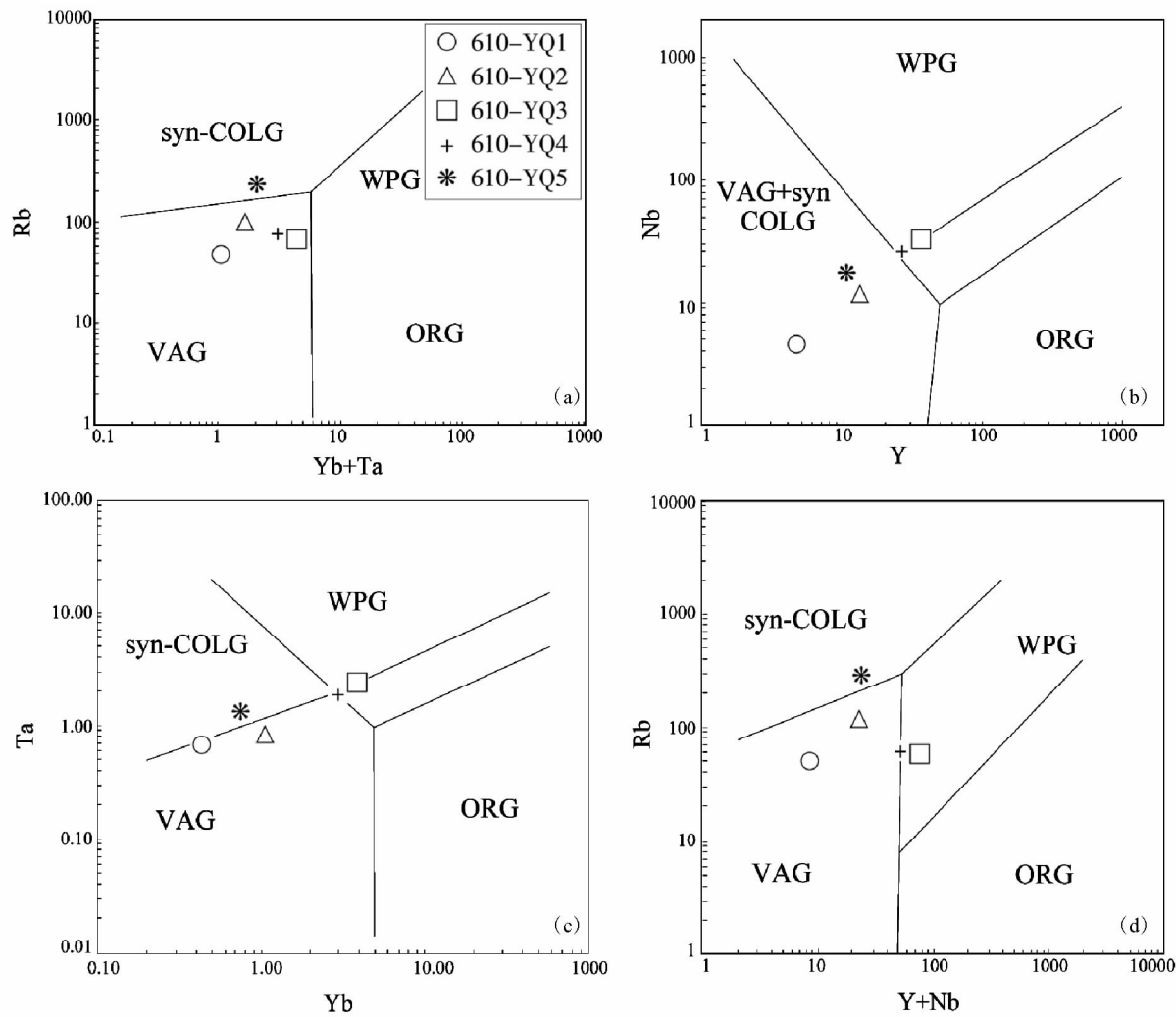
Fig. 10 (a) $(Na_2O + K_2O + FeO + MgO + TiO_2) - (Na_2O + K_2O) / (FeO + MgO + TiO_2)$ and (b) $A/MF - C/MF$ diagrams at the Dangjinshankou of the west segment of Qilian mountains

研究表明,据锆石饱和温度参数可划分出冷花岗岩(Cold granits, $T < 800^{\circ}C$)和热花岗岩(MILL-

ER et al. ,2003),认为冷花岗岩的形成与流体参与有关,多形成在消减带环境脱水和陆壳逆冲叠置加

厚的脱水环境,而热花岗岩的形成与热流密切相关,与流体关系不大,主要形成与板块后期碰撞阶段的陆壳伸展和转换构造环境,与基性岩浆的侵入密切相关。通过计算研究区侵入体锆石饱和温度(T_{Zr}) (表 1),其平均值为 782.37°C ,说明当金山口侵入体可能为冷花岗岩,处于消减带和陆壳叠置加厚脱水环境中;此外,PEARCE 等 1984 年将花岗岩划分为 4 种基本类型:板内花岗岩(WPG)、洋脊花岗岩(ORG)、火山弧花岗岩(VAG)、同碰撞花岗岩

(COLG),他们设计的 $\text{Rb}-\text{Yb}+\text{Ta}$ 、 $\text{Nb}-\text{Y}$ 、 $\text{Ta}-\text{Yb}$ 和 $\text{Rb}-\text{Y}+\text{Nb}$ 图解,在判别过程中,不同环境的花岗岩样品分布极有规律,很少互相重叠,判别准确率超过 95%,被广泛引用(张旗等,2007)。对研究区侵入体做 $\text{Rb}-\text{Yb}+\text{Ta}$ 、 $\text{Nb}-\text{Y}$ 、 $\text{Ta}-\text{Yb}$ 和 $\text{Rb}-\text{Y}+\text{Nb}$ 图解(图 11)显示,样品主要落入到同碰撞花岗岩(COLG)和火山弧花岗岩(VAG)范围内,说明祁连山西段当金山口侵入体形成于消减俯冲火山弧及后期同碰撞的构造环境中。



WPG. 板内花岗岩;ORG. 洋脊花岗岩;VAG. 火山弧花岗岩;Syn-COLG. 同碰撞花岗岩;Late-CPLOG. 后碰撞花岗岩

图 11 (a)研究区侵入体 $\text{Rb}-\text{Yb}+\text{Ta}$ 图解、(b) $\text{Nb}-\text{Y}$ 图解、(c) $\text{Ta}-\text{Yb}$ 图解和 (d) $\text{Rb}-\text{Y}+\text{Nb}$ 图解(据 PEARCE, et al., 1984)

Fig. 11 (a) $\text{Rb}-\text{Yb}+\text{Ta}$ diagram, (b) $\text{Nb}-\text{Y}$ diagram, (c) $\text{Ta}-\text{Yb}$ diagram and (d) $\text{Rb}-\text{Y}+\text{Nb}$ diagram at the Dangjinshankou of the west segment of Qilian mountains

4.3 地质意义

当金山口处于西侧南阿尔金蛇绿混杂岩带与东

侧祁连造山带夹持区段。研究发现,南阿尔金古生代花岗质岩浆活动主要包含 3 期(刘文强等,2012):

第一期时限大约为 500 Ma;第二期约 466~451 Ma;第三期约 424~385 Ma。其中,第一期约 500 Ma 花岗质岩浆活动主要形成于陆-陆碰撞造山作用阶段地壳加厚背景;同时,已有研究也表明(吴才来等,2010),在早古生代 512~501 Ma 期间也发生过洋壳向南俯冲,形成一期花岗质岩浆作用。当金山口复式岩体的形成时代(518 ± 13) Ma 与上述提及的发生在祁连造山带(512~501 Ma)和南阿尔金第一期岩浆作用时代较一致。说明阿尔金造山带和祁连山造山带在该时期可能具有相似的构造背景,进一步印证了阿尔金造山带和祁连山造山带可能为同一构造带的论断(许志琴等,1999;陈柏林等,2010,王玉玺等,2017a)。岩石地球化学特征显示,当金山口复式岩体具有钙碱性-高钾钙碱性准铝质-铝质岩石;源岩物质主要是壳源角闪岩相的基性岩的部分熔融物质,且在成岩过程中可能存在少量幔源物质的参与,说明该当金山口侵入体的形成可能与洋壳俯冲消减熔融有关。综合区域构造研究结果,该时期为南祁连洋或南阿尔金洋的闭合时期(刘良等,1998;王焰等,1999;刘文强等,2012;郭召杰等,1998)。据此可以推测,在距今约 518 Ma 时期,南阿尔金洋或南祁连洋开始闭合,随着洋壳的俯冲折返,形成了当金山复式侵入体,当金山口复式岩体是形成于消减俯冲火山弧同碰撞的构造环境中,是南阿尔金洋闭合早期阶段洋壳俯冲熔融的产物。

5 结论

(1)岩石地球化学特征显示,祁连山西段当金山口侵入体具有钙碱性-高钾钙碱性准铝质-铝质岩石特征;源岩物质主要以壳源角闪岩相的基性岩的部分熔融为主,且在成岩过程中可能存在少量幔源物质的参与;对岩石成因类型分析,认为是结晶分异 I 型花岗岩类。

(2)对岩石学和岩石地球化学特征分析,认为当金山口侵入体形成于消减俯冲火山弧及后期同碰撞的构造环境中。同时,与研究区西侧南阿尔金蛇绿混杂岩带和东侧祁连造山带花岗质岩浆活动事件及构造背景有较好的对比性。

参考文献(References):

- 车自成,刘良,孙勇. 阿尔金铅铋锑钨同位素研究及其早期演化[J]. 地球学报,1995,16(3):334-337.
- CHE Zicheng, LIU Liang, SUN Yong. U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotopic studies for early evolution of the structural belt in Altun Area[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1995, 16(3):334-337.
- 车自成,罗金海,刘良. 中国及邻区大地构造学[M]. 北京:科学出版社,2002,354-386.
- CHE Zicheng, LUO Jinhai, LIU Liang. Geotectonics of China and its adjacent area [M]. Beijing: Science Press, 2002,354-386.
- 陈柏林,崔玲玲,白彦飞,等. 阿尔金断裂走滑位移的确定——来自阿尔金山东段构造带的新证据[J]. 岩石学报,2010,26(11):3387-3396.
- CHEN Bailin, CUI Linlin, BAI Yanfei, et al. A determining on the displacement of the Altun Tagh sinistral strike-slip fault, NW China: New evidence from the tectonic metallogenetic belt in the eastern part of Altun Tagh Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(11):3387-3396.
- 陈宣华,尹安,George Gehrels,等. 阿尔金山东段地质热年代学与构造演化[J]. 地学前缘,2009,16(3):207-219.
- CHEN Xuanhua, YIN An, GEHRELS G, et al. Geothermochronology and tectonic evolution of Eastern Aityn Tagh Mountains, Northwestern China[J]. Earth Science Frontiers, 2009,16(3):207-219.
- 陈宣华,George Gehrels,王小凤,等. 阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报,2003,22(4):294-298.
- CHEN Xuanhua, GEHRELS G, WANG Xiaofeng, et al. Granite from North Altyn Tagh, NW China: U-Pb geochronology and tectonic setting[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2003, 22(4):294-298.
- 崔军文,唐哲民,邓晋福,等. 阿尔金断裂系[M]. 北京:地质出版社,1999,1-249.
- CIU Junwen, TANG Zhemin, DENG Jinfu, et al. Altyn Tagh Fault System[M]. Beijing: Geological Publishing House,1999, 1-249.
- 葛尚虹,刘永江,任收麦,等. 对阿尔金断裂科学问题的再认识[J]. 地质科学,2001,36(3):319-325.
- GE Xiaohong, LIU Yongjiang, REN Shoumai, et al. Re-understanding on some academic problems of the Altun fault[J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(3):

- 319-325.
- 郭召杰,张忠诚,王建君. 阿尔金山边缘蛇绿岩带的 Sm-Nd 等时线年龄及其大地构造意义[J]. 科学通报, 1998,43(18): 1981-1984.
- GUO Zhaojie, ZHANG Zhicheng, WANG Jianjun. Sm-Nd isochron age of ophiolite along northern margin of Altun Tagh mountain and its tectonic significance[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(18):1981-1984.
- 康磊,校培喜,高晓峰,等. 西昆仑慕士塔格岩体的岩石地球化学特征_岩石成因及其构造 [J]. 地质通报,2012,31(12):2001-2014.
- KANG Lei, XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of Muhtagata intrusion in Western Kunlun orogenic belt and their tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(12):2001-2014.
- 刘良,车自成,王焰,等. 阿尔金芒崖地区早古生代蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄证据[J]. 科学通报,1998.43(8): 880-883.
- LIU Liang, CHE Zicheng, WANG Yan, et al. The evidence of Sm-Nd isochron age for the Early Paleozoic ophiolite in Mangya area, Altun Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(8):880-883.
- 刘良,车自成,王焰,等. 阿尔金高压变质带的特征及其构造意义[J]. 岩石学报,1999.15(1): 57-64.
- LIU Liang, CHE Zicheng, WANG Yan, et al. The evidences of Sm-Nd isochron age for the Early Paleozoic ophiolite in Mangya area, Altun Mountain[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(1): 57-64.
- 刘良,康磊,曹玉亭,等. 南阿尔金早古生代俯冲碰撞过程中的花岗岩岩浆作用[J]. 中国科学(地球科学),2015, 45(8): 1126-1137
- LIU Liang,KANG Lei, CAO Yutin, et al. Early Paleozoic granitic magmatism related to the processes from subduction to collision in South Altyn, NW China[J]. Scientia Sinica Terrae, 2015, 45(8): 1126-1137.
- 刘明强,朱永新. 甘肃北山红岩井西南似斑状二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 西北地质,2018,(1):23-33.
- LIU Mingqiang, ZHU Yongxin. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of the orphyritic monzonitic granite from Southwest Hongyanjing in Beishan Area, Gansu Province and its significance[J]. Northwestern Geology, 2018,(1):23-33.
- 刘文强,刘良,丁海波,等. 南阿尔金迪木那里克花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素特征及其构造地质意义[J]. 岩石学报,2012,28(12):4139-4150.
- LIU Wenqiang, LIU Liang, DING Haibo, et al. Geochemistry, geochronology and zircon Hf isotopes of the Dimunalike granite in South Altyn Tagn and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(12):4139-4150.
- 刘永江,NEUBAUER F,葛肖虹,等. 阿尔金断裂带年代学和阿尔金山隆升[J]. 地质科学,2007, 42(1): 134-146.
- LIU Yongjiang, NEUBAUER F, GE Xiaohong, et al. Geochronology of the Altun fault zone and rising of the Altun mountains[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(1): 134-146.
- 刘永顺,于海峰,辛后田,等. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件[J]. 地质通报,2009.28(10): 1430-1438
- LIU Yongshun, YU Haifeng, XIN Houtian, et al. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altyn Tagh Mountain, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(10):1430-1438.
- 陆松年,袁桂邦. 阿尔金山阿克塔什塔格早前寒武纪岩浆活动的年代学证据[J]. 地质学报,2003,77(1):61-68.
- LU Songnian, YUAN Guibang. Geochronology of early Precambrian magmatic activities in Aketashitage, east Altyn-taghe[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(1): 61-68.
- 戚学祥,吴才来,李海兵. 北阿尔金喀孜萨依花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 2005,21(3):859-866.
- QI Xuexiang, WU Cailai, LI Haibing. SHRIMP U-Pb age of zircons from Kazisayi granite in the Northern Altyn Tagh mountains and its signification[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3):859-866.
- 邱检生,肖娥,胡建,等. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报,2008,24(11):2468-2684.
- QIU Jiansheng, XIAO E, HU Jian, et al. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008,24(11): 2468-2684.
- 万景林,王瑜,李齐,等. 阿尔金山北段晚新生代山体抬升的裂变径迹证据[J]. 矿物岩石地球化学通报,2001,20(4):222-224.
- WAN Jinglin, WANG Yu, LI Qi, et al. FT Evidence of Late Cenozoic uplift in Northern Altyn[J]. Bulletin of

- Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2001, 20(4): 222-224.
- 王国良, 陈发彬, 李五福, 等. 北-中祁连过渡带龙王山花岗岩体与花石峡钨钼矿关系讨论[J]. 西北地质, 2018, (4): 227-243.
- WANG Guoliang, CHEN Fabin, LI Wufu, et al. Discussion on the relationship between the Longwangshan granite mass and the Huashixia W Mo deposit in the transitional belt of Northern Central Qilian[J]. Northwestern Geology, 2018, (4): 227-243.
- 王鸿祯, 王自强, 朱鸿, 等. 中国晚元古代构造及古地理[J]. 地质科学, 1980, (2): 103-111.
- WANG Hongzhen, WANG Ziqiang, ZHU Hong, et al. Late Proterozoic structure and palaeogeography of China [J]. Chinese Journal of Geology, 1980, (2): 103-111.
- 王立社, 杨鹏飞, 段星星, 等. 阿尔金南缘中段清水泉斜长花岗岩同位素年龄及成因研究[J]. 岩石学报, 2016, 32(3): 759-774.
- WANG Lishe, YANG Pengfei, DUAN Xingxing, et al. Isotopic age and genesis of plagiogranite from Qing-shuiquan area in the middle of South Altyn Tagh[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(3): 759-774.
- 王立社, 张巍, 段星星, 等. 阿尔金环形山花岗岩片麻岩同位素年龄及成因研究[J]. 岩石学报, 2015, 31(1): 119-132.
- WANG Lishe, ZHANG Wei, DUAN Xingxing, et al. Isotopic age and genesis of the monzogranitic gneiss at the Huanxingshan in middle Altyn Tagh[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(1): 119-132.
- 王焰, 刘良, 车自成, 等. 阿尔金茫崖地区早古生代蛇绿岩的地球化学特征[J]. 地质评论, 1999, 45(增刊): 1010-1014.
- WANG Yan, LIU Liang, CHE Zicheng, et al. Geochemical characteristics of Early Paleozoic ophiolite in Mangnai area, Altun Mountains[J]. Geological Review, 1999, 45(S1): 1010-1014.
- 王玉玺, 第鹏飞, 陈万峰, 等. 塔里木板块东南缘多坝沟金矿区花岗岩类年代学、地球化学特征及找矿意义[J]. 西北地质, 2017a, 50(1): 134-150.
- WANG Yuxi, DI Pengfei, CHEN Wanfeng, et al. Geochemical characteristics and prospecting significance of granites from Duobagou gold deposit in the southeastern Tarim Basin[J]. Northwestern Geology, 2017a, 50(1): 134-150.
- 王玉玺, 王金荣, 周小玲, 等. Columbia 超大陆裂解: 来自塔里木克拉通东南缘大红山 A 型花岗岩的证据[J]. 地质学报, 2017b, 91(11): 2369-2386.
- WANG Yuxi, WANG Jinrong, ZHOU Xiaoling, et al. The cracking of Columbia supercontinent from the evidence of the Dahongshan A-type granites in the southeastern Tarim Craton[J]. Acta Geologica Sinica, 2017b, 91(11): 2369-2386.
- 吴才来, 姚尚志, 曾令森, 等. 北阿尔金巴什考供—斯米尔布拉克花岗岩杂岩特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(1): 10-26.
- WU Cailai, YAO Shangzhi, ZENG Lingseng, et al. Characteristics and zircon SHRIMP U-Pb dating of the Bashkaogong Smilbulak granite complex in North Altyn [J]. Chinese Science(D), 2007, 37(1): 10-26.
- 吴才来, 徐学义, 高前明. 北祁连早古生代花岗质岩浆作用及构造演化[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1027-1044.
- WU Cailai, XU Xueyi, GAO Qianming. Early Palaeozoic granitoid magmatism and tectonic evolution in North Qilian, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4): 1027-1044.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, YANG Jinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1217-1238.
- 伍跃中, 王战, 过磊, 等. 阿尔金山西南段花岗岩类的时空变化与构造作用——来自钾钠含量变化的证据[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(4): 537-587.
- WU Yuezhong, WANG Zhan, GUO Lei, et al. Tectonic control for temporal and spatial variation of granitoids in southwest sector of Altyn Mountains: Evidence from changes of potassium and sodium in granitoids[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(4): 537-587.
- 校培喜. 阿尔金山中段苏吾什杰岩体(群)地质特征[J]. 西北地质, 2003, 36(3): 14-23.
- XIAO Peixi. The geological features of Suwushijie rockbody (group) in Altyn Tagh middle-zone[J]. Northwestern Geology, 2003, 36(3): 14-23.
- 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福, 等. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 343-352.
- XIAO Qinghui, QIU Ruizhao, DENG Jinfu, et al. Granitoids and continental crustal growth modes in China[J]. Chinese Geology, 2005, 32(3): 343-352.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制[J]. 地质学报, 1999, 73(3): 193-205.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, ZHANG Jianxin, et al. A comparison between the tectonic units on the sides of the

- Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(3):193-205.
- 杨屹,陈宣华,GEHRELS G,等. 阿尔金山早古生代岩浆活动与金成矿作用[J]. *矿床地质*, 2004, 23(4):464-472.
- YANG Yi, CHEN Xuanhua, GEHRELS G, et al. Early Paleozoic magmatism and gold metallogenesis in Altun Mountains, Northwest China [J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23(4):464-472.
- 张安达,刘良,孙勇,等. 阿尔金超高压花岗质片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(22):2335-2341.
- ZHANG Anda, LIU Liang, SUN Yong, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages for the UHP metamorphosed granitoid gneiss in Altyn Tagh and their geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (22), 2335-2341.
- 张旗,潘国强,李承东,等. 花岗岩构造环境问题关于花岗岩研究的思考之三[J]. *岩石学报*, 2007, 23 (11): 2683-2698.
- ZHANG Qi, PAN Guoqiang, LI Chendong, et al. Are discrimination diagrams always indicative of correct technic settings of granites? Some crucial questions on granite study (3)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2683-2698.
- 菅坤坤,刘向东,何元方,等. 阿尔金中段大通沟花岗岩体年代学、地球化学特征及其成因[J]. *中国地质*, 2018, 45 (4): 740-752.
- JIAN Kunkun, LIU Xiangdong, HE Yuanfang, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Datonggou granitic plutons in the middle section of Altun Mountains[J]. *Geology in China*, 2018, 45(4): 740-752(in Chinese with English abstract).
- 郑健康. 阿尔金造山带东段地质构造演化概论[J]. *青海地质*, 1995, 4(2): 1-10.
- ZHENG Jiankang. Outline of geological tectonic evolution in the eastern Altun orogenic belt[J]. *Qinghai Geology*, 1995, 4(2): 1-10.
- 周勇,潘裕生. 阿尔金断裂早期走滑运动方向及其活动时间探讨[J]. *地质论评*, 1999, 45(1): 1-9.
- ZHOU Yong, PAN Yusheng. The initial shear sense of the Allun Fault and its timing [J]. *Geological Review*, 1999, 45(1): 1-9.
- 国家地震局《阿尔金活动断裂带》课题组. 阿尔金活动断裂带[M]. 北京:地震出版社, 1992.
- Research group of Altun active fault zone, State Seismological Bureau. Altun active fault belt[M]. Beijing: Earthquake Press, 1992.
- ANDERSEN T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1):59-79.
- BARTH M G, MC DONOUGH W F, RUDNICK R L. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust [J]. *Chemical Geology*, 2000, 165(3/4):197-213.
- BURCHFIEL B C, DENG Q, MOLNAR P, et al. Intra-crustal de-tachment with zones of continental deformation[J]. *Geology*, 1989, 17: 748-752.
- CHAPPELL B W, WHITE A J R. Two contrasting granite type [J]. *Pacific Geol*, 1974, (8):173-174.
- COLLINS W J, BEAMS D, White A J R, et al. Nature and origin of A type granites with particular reference to south-eastern Australia [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1982, (80): 189-200.
- FRANCALANCI L, TAYLORSR S R, MCCULLOCH M T. Geochemical and iso-topic variations in the calcalkaline rocks of Aeolian arc, southern Tyrrhenian Sea, Italy: constraints on magma genesis[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1993, 113:300-313.
- GREEN T H, PEARSON N J. An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti-rich minerals and silicate liquids at high pressure and temperature [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1987, 51 (1): 55-62.
- GREEN T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3-4):347-359.
- JACKSON S E, PEARSON N J, GRIFFIN W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U - Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1): 47-69.
- JUNG S, PFANDER J A. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoid: constraints from $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ and accessory mineral saturation thermometry [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2007, 19:859-870.
- LIU Liang, WANG Chao, CAO Yuting, et al. Geochronology of multi-stage metamorphic events: Constraint on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the South Altyn, NW China [J]. *Lithos*, 2012. 136-139: 10-26.
- LIU Sheng, HU Ruizhong, GAO Shan, et al. U - Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on

- age and origin of Jurassic I and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? [J]. *Lithos*, 2007, 96(1-2):186-204.
- LIU Y J, GENSER J, GE X H, NEUBAUER F, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age evidence for Altyn fault tectonic activities in western China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 48(18): 2024-2030.
- LIU Y J, NEUBAUER F, GENSER J, et al. Geochronology of the initiation and displacement of the Altyn Strike-Slip Fault, western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(2-3): 243-252.
- LOISELLE M C, WONES D S. Characteristics and origin of anorogenic granites [J]. *Geological Society of American Abstracts with Programs*, 1979, 11:468.
- LUDWIG K R. Mathematical-statistical treatment of data and errors for $^{230}\text{Th}/\text{U}$ geochronology [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 52(1): 631-656.
- MILLER C F, MC DOWELL S M, MAPES R W. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance [J]. *Geology*, 2003, 31(6):529-532.
- PATINO DOUNCE A E. What do experiments tell us about the relative contribution of crust and mantle to the origins of granitic magma. Castro A, Fernandez C and Vigneresse JL. Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques [J]. *Geological Society of London, Special Publication*, 1999, 168:55-75.
- PITCHER W S. Granite type and tectonic environment. In: *Mountain building processes* [M]. London: Academic Press, 1983, 19-40.
- PITCHER W S. The nature and origin of granite. In: *Pitcher WS (ed.). Granite type and tectonic environment. Mountain building processes* [M]. London: Academic Press, 1993, 19-40.
- MILLER C, SCHUSTER R, KLOTZLI U, et al. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis [J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40(9):1399-1424.
- SOBEL ER, ARNAUD N. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China [J]. *Tectonics*, 1999, 18(1): 64-74.
- YIN A, GEHRELS G, CHEN X H. Evidence for 280 km of Cenozoic left slip motion along the eastern segment of the Altyn Tagh fault system, western China [J]. *Eos Trans. AGU*, 1999, 80(17), Fall Meet. Suppl. F1018.
- TAPPONIER P, MOLNAR P. Active faulting and Cenozoic tectonics of China [J]. *Geophys Res.* 1977, 82:20-24.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust, its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985:312.
- VAN A E, RYAN C G, JACKSON S E, et al. Data reduction software for LA - ICP - MS in the Earth Sciences [J]. *Mineralogical Association of Canada*, 2001, 29: 239-243.
- WAN Y S. Ba anomaly and its geochemical significance [J]. *Continental Dynamics*, 1999, 4(1):84-87.
- WILSON M. Igneous petrogenesis [M]. London: Unwin Hyman Press, 1989:295-323.