

·专题研究·

西天山阿吾拉勒西段群吉萨依花岗斑岩 地球化学特征及其成因

闫永红¹, 薛春纪¹, 张招崇¹, 丁振信¹, 杨伟海², 韩宗华²

(1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室; 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083;
2. 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局七零三队, 新疆 伊犁 835000)

摘要: 西天山阿吾拉勒西段群吉萨依花岗斑岩侵入于群吉萨依背斜北西侧伏端下二叠统乌朗组火山岩中, 具似斑状结构, 斑晶为斜长石、钾长石、角闪石、黑云母, 基质具花岗质半自形微晶粒状结构, 主要由斜长石、钾长石、石英等组成。群吉萨依花岗斑岩具有高 SiO_2 (71.17%~72.59%)、富 Na_2O (8.86%~9.39%)、贫 K_2O (0.07%~0.28%) 的特点, 铝饱和指数 (A/CNK) 为 0.87~0.92, A/NK 为 0.97~1.01, 富集 Th、U 和 Pb, 亏损 Nb、Ta、Sr、P、Ti, 相对于 Th 和 U 亏损 Rb、Ba 和 K 等, 属过碱质-弱准铝质的分异 I 型花岗岩类。锆石 SHRIMP U-Pb 法测得花岗斑岩成岩年龄 302 ± 4 Ma, 即形成于石炭纪末—二叠纪初。岩石具有低的 I_{Sr} (0.705 12~0.705 36) 和正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (+2.1~+2.7), 样品的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值为 -0.43~-0.56, 单阶段模式年龄 t_{DM} 为 713~863 Ma, 和该区早石炭世分布的玄武质岩石具有相似的 Sr-Nd 同位素特征。结合区域构造背景, 推测该岩体形成于后碰撞伸展阶段, 是由底侵的玄武质岩石在角闪石-石榴石相的条件下发生部分熔融形成的。

关键词: 花岗斑岩, 岩石学, I 型花岗岩, U-Pb 测年, 岩石成因

中图分类号: P588.12⁺1; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)02-0139-15

Geochemistry and genesis of the Qunjisayi granite porphyry in the west of Awulale area, Western Tianshan Mountains

YAN Yong-hong¹, XUE Chun-ji¹, ZHANG Zhao-chong¹, DING Zhen-xin¹, YANG Wei-hai²
and HAN Zong-hua²

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. No. 703 Geological Party, Xinjiang Geoexploration Bureau for Nonferrous Metals, Yili 835000, China)

Abstract: The Qunjisayi porphyry granite is located in Awulale area of Western Tianshan Mountains. It intruded into the volcanic rocks of lower Permian Wulang Formation located at the northwestern end of the Qunjisayi anticline. All samples from the pluton are characterized by porphyreous texture, the phenocrysts are composed of plagioclase, potassium feldspar, hornblende and biotite, and the matrix consisting mainly of plagioclase, potassium feldspar and quartz is of granitic hypidiomorphic microcrystalline-granular texture. The porphyry granite is geochemically characterized by high SiO_2 (71.17%~72.59%) and Na_2O (8.86%~9.39%), and low K_2O (0.07%~0.28%), with A/CNK being 0.87~0.92 and A/NK 0.97~1.01. It is enriched in Th, U, Pb, but depleted in Nb, Ta, Sr, P and Ti. It is also depleted in Rb, Ba and K relative to Th and U. The

收稿日期: 2012-10-21; 修订日期: 2012-12-12

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAB06B02); 中国地质调查局工作项目(1212011085069, 1212011220919)

作者简介: 闫永红(1987-), 男, 矿床学专业, 硕士研究生, E-mail: yanyonghong-123@126.com; 通讯作者: 薛春纪(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事矿床学、矿产普查与勘探专业教学和研究工作, E-mail: chunji.xue@cugb.edu.cn

porphyry granite belongs to peralkaline-mataluminous fractionated I-type granite. The zircon SHRIMP U-Pb age of the porphyry granite 302 ± 4 Ma indicates its generation in the Late Carboniferous to Early Permian period. It is suggested that the porphyry granite is similar to the lower Carboniferous basalts in the same area, as evidenced by the following data: low initial Sr isotope ratio ($I_{Sr} = 0.70512 \sim 0.70536$), positive $\epsilon Nd(t) = +2.1 \sim +2.7$, $f_{Sm/Nd} = -0.43 \sim -0.56$ and the Nd model age ($t_{DM} = 713 \sim 863$ Ma). In association with the tectonic background, it is inferred that the primary magma of Qunjisayi porphyry granite was most likely derived from the partial melting of the underplating basaltic rocks under the conditions of amphibolite- or garnet-phase after collision.

Key words: porphyry granite; petrology; I-type granite; zircon U-Pb age; magmatic origin

西天山阿吾拉勒位于中亚造山带的西南部 (Coleman, 1989; Sengör *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2000a; Khain *et al.*, 2003; Yakubchuk, 2004)。中亚造山带是塔里木、哈萨克斯坦-伊犁、西伯利亚等陆块之间古亚洲洋俯冲、陆块碰撞、地壳增生的结果 (Coleman, 1989; Windley *et al.*, 1990; Allen *et al.*, 1993; Sengör *et al.*, 1993; Shi *et al.*, 1994; Gao *et al.*, 1998; Xiao *et al.*, 2004a; Liu and Fei, 2006; Qian *et al.*, 2008)。阿吾拉勒构造带石炭-二叠纪岩浆岩广泛出露, 西段小型铜矿多有分布 (连小平, 2004; 尹意求等, 2005; 刘凤鸣, 2008; 肖晓林等, 2008; 韩刚, 2010), 中东段铁矿潜力巨大, 是重要 Cu-Au-Fe 成矿带 (Zhai *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010)。目前对阿吾拉勒构造带石炭-二叠纪岩浆活动及 Fe-Cu 成矿背景的研究, 存在北天山洋陆俯冲成因岛弧带 (Zhu *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2006a; 王强等, 2006; Wang *et al.*, 2007b) 陆陆碰撞造山后伸展带 (Wang *et al.*, 2004a; 韩宝福等, 2004; 王京彬和徐新, 2006) 陆内裂谷带 (车自成和刘良, 1996; 顾连兴等, 2000; Xia *et al.*, 2004b, 2008) 地幔柱产物 (夏林圻等, 2004; Pirajno *et al.*, 2008) 等不同认识。阿吾拉勒西段地表铜矿化显著, 重大找矿突破令人期待, 是否具备形成大型-超大型 (如斑岩型或火山块状硫化物型) 铜矿的构造-岩浆条件等科学问题备受关注。本文针对西天山阿吾拉勒西段群吉萨依地区花岗斑岩开展岩石学、地球化学和成岩时代研究, 旨在为揭示石炭-二叠纪岩浆活动及 Fe-Cu 成矿背景提供新的参考。

1 区域地质

西天山通常从北向南划分为北天山、中天山、南

天山 3 个构造单元 (Windley *et al.*, 1990; Allen *et al.*, 1993; Gao *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 1999; Gao *et al.*, 2007; Biske and Seltnann, 2010)。阿吾拉勒构造-成矿带处在北天山的中部, 群吉萨依花岗斑岩产在阿吾拉勒构造-成矿带的西段 (图 1)。

北天山主体由哈萨克斯坦-伊犁陆块及其南北活动陆缘构成, 北界为阿拉尔断裂带, 南界是尼古拉耶夫-那拉提山北坡断裂带 (Charvet *et al.*, 2004, 2007; Wang B, 2006; Wang B *et al.*, 2007, 2008; Jacque Charvet *et al.*, 2011)。北天山区域前寒武系包括古元古界温泉群、中元古界哈尔达坂群和特克斯群、新元古界开尔塔斯群、库松木切克群和科克苏群, 主要分布在北天山北部和南部, 哈萨克斯坦东南部 Anrakhai 山 Uzunbulak 花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄为 2 791 Ma, Serektas 河花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄为 1 789 Ma (Kröner *et al.*, 2007), 阿吾拉勒西段片麻岩锆石 U-Pb 年龄为 1 609 Ma (李继磊等, 2009), 反映北天山有确切前寒武纪基底。

在前寒武系基底之上, 北天山下古生界主要分布在阿吾拉勒成矿带北侧的科古琴-博罗霍洛一带, 表现为哈萨克斯坦-伊犁陆块北部被动边缘类复理石细碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造夹少量玄武岩; 上古生界为火山岩-火山碎屑岩-碎屑岩-碳酸盐岩建造, 泥盆-石炭纪火山-沉积主体为海相和海-陆过渡相, 二叠系是陆相火山-沉积建造。区域海西期中酸性岩浆侵入作用显著, 不同阶段岩体均有出露 (图 1)。阿吾拉勒西段侵入岩主要为海西晚期形成的浅成相花岗斑岩、流纹斑岩、石英钠长斑岩、闪长玢岩和辉绿岩等, 同位素年龄为 239~285 Ma (K-Ar 法, 莫江平等, 1996), 248~284 Ma ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法, 赵振华等, 2003)。

在阿吾拉勒构造带中东段, 发现查岗诺尔、备战、松湖等重要火山岩型铁矿床, 表现出巨大的铁矿

找矿潜力；在西段，发现有群吉萨依、努拉塞等小型铜矿和多处铜矿点。在阿吾拉勒构造带北侧的吐拉

苏地区，泥盆-石炭纪火山-沉积盆地内产有阿希等新疆西天山重要浅成低温热液型金矿床(图 1)。

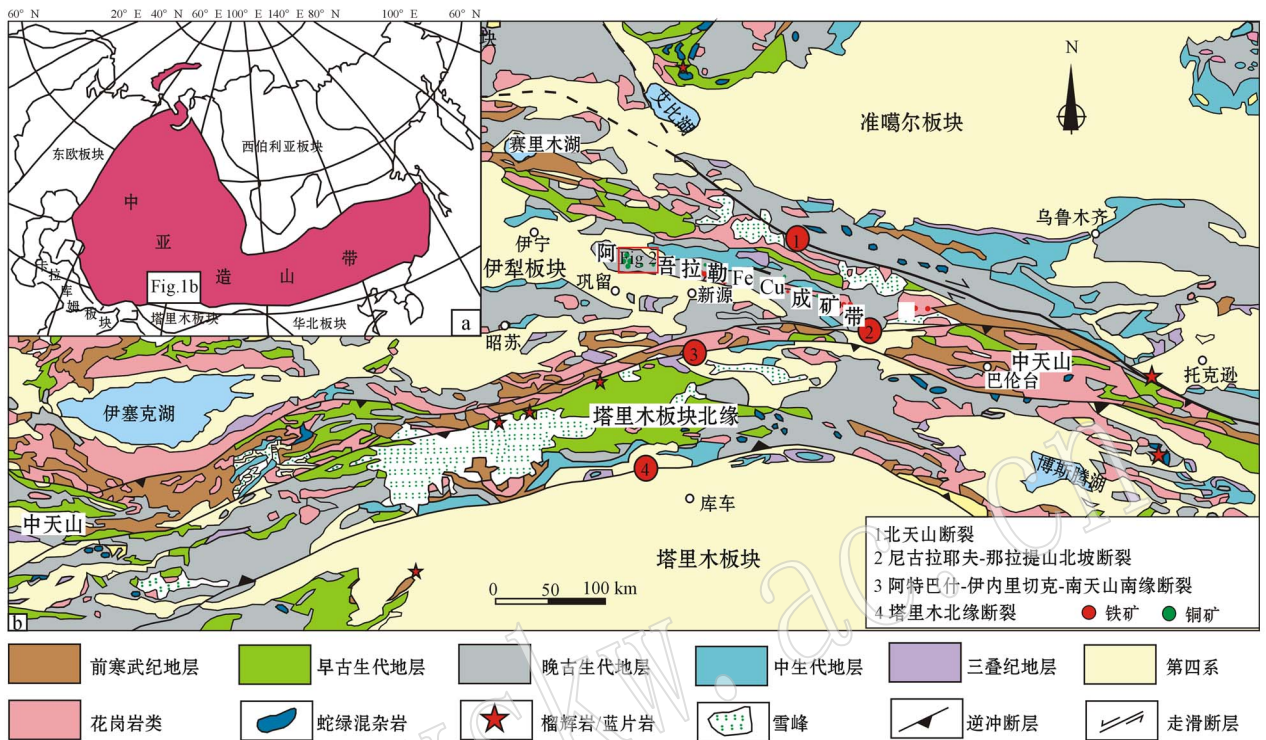


图 1 西天山在中亚造山带中的位置(a, 据 Sengör, 1993, Han 等, 2010 和 Xiao 等, 2010)和天山造山带及阿吾拉勒造山带格架图(b, 据 Gao 等, 1998, 2009a, Dong 等, 2010)

Fig. 1 Tectonic sketch map of the Central Asian orogenic belt, showing the location of the Tianshan belt (a, modified after Sengör, 1993, Han *et al.*, 2010 and Xiao *et al.*, 2010); Geological map of the Tianshan orogen, showing the Awulale metallogenetic belt (b, modified after Gao *et al.*, 1998, 2009a and Dong *et al.*, 2010)

2 岩体地质和岩相学

群吉萨依花岗岩斑岩位于尼勒克县城南约 11 km 处，岩体中心地理坐标 N 43° 41′, E 82° 27′, 标高 1 420 m(图 2)。除小面积第四系覆盖外，群吉萨依地区地层出露较好，时代主要为二叠纪。下二叠统为乌朗组，厚度 3 115 m, 分下、中、上 3 个岩性段：下段主要由灰绿色安山岩夹砂砾岩组成；中段下部为紫灰色凝灰质砂岩、粗粒砂岩、粉砂岩、玄武岩及安山岩，中部是灰紫、灰绿色凝灰质砂岩，流纹岩及流纹质角砾岩，上部由灰紫、暗灰色凝灰质砂岩、玄武岩及安山岩组成；上段主要由流纹斑岩、钠质流纹岩夹砾岩组成(图 2)。上二叠统为晓山萨依组，厚度 700 m, 划分为下、中、上 3 个岩性段：下段由灰紫、紫灰色中-厚层复成分砾岩、含砾砂岩、长石岩屑砂岩、粉砂岩组成，中段由紫灰色巨厚层-块状复成分砾

岩、粗粒长石岩屑砂岩、细粒长石岩屑砂岩组成，上段由浅灰、灰色薄-中层状细粒岩屑杂砂岩、薄层状粉砂岩、深灰色微薄层泥岩、细粒钙质岩屑砂岩、钙质粉砂岩夹深灰色薄层泥灰岩、泥晶粉屑灰岩组成(图 2)。上、下二叠统为角度不整合接触。乌郎组火山岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 298 ± 7 Ma(李华芹等, 1997)。

二叠纪地层在群吉萨依地区呈现走向 NW、向 NW 侧伏的背斜构造(图 2)。背斜核部主要由乌朗组构成，向南北两翼地层时代变新，出现晓山萨依组陆相碎屑岩。与褶皱构造一致，群吉萨依地区断裂构造 NW 走向，压扭和平移性质明显，有错动地层展布特点(图 2)，反映古生代造山过程先后发生近南北向挤压和近东西走向的走滑。

大致沿群吉萨依背斜核部 NW 向出露多个浅成侵入岩体(图 2)，岩性包括辉绿岩、钠长斑岩和花岗岩斑岩。在这些侵入体及其附近程度不等均有铜矿化

显示,其中群吉萨依辉绿岩中已发现和评价出小型铜矿床。群吉萨依花岗斑岩处在群吉萨依背斜向 NW 的侧伏端,与群吉萨依铜矿化辉绿岩相邻,侵入于下二叠统乌郎组,出露形态呈鞍形(图 2),西半部

分岩体走向 45°,长约 480 m,宽 100~120 m,东半部分岩体走向 310°,长约 400 m,宽 80~110 m。与岩体接触的围岩见阳起石化、绢云母、绿泥石、绿帘石、碳酸盐化等蚀变。

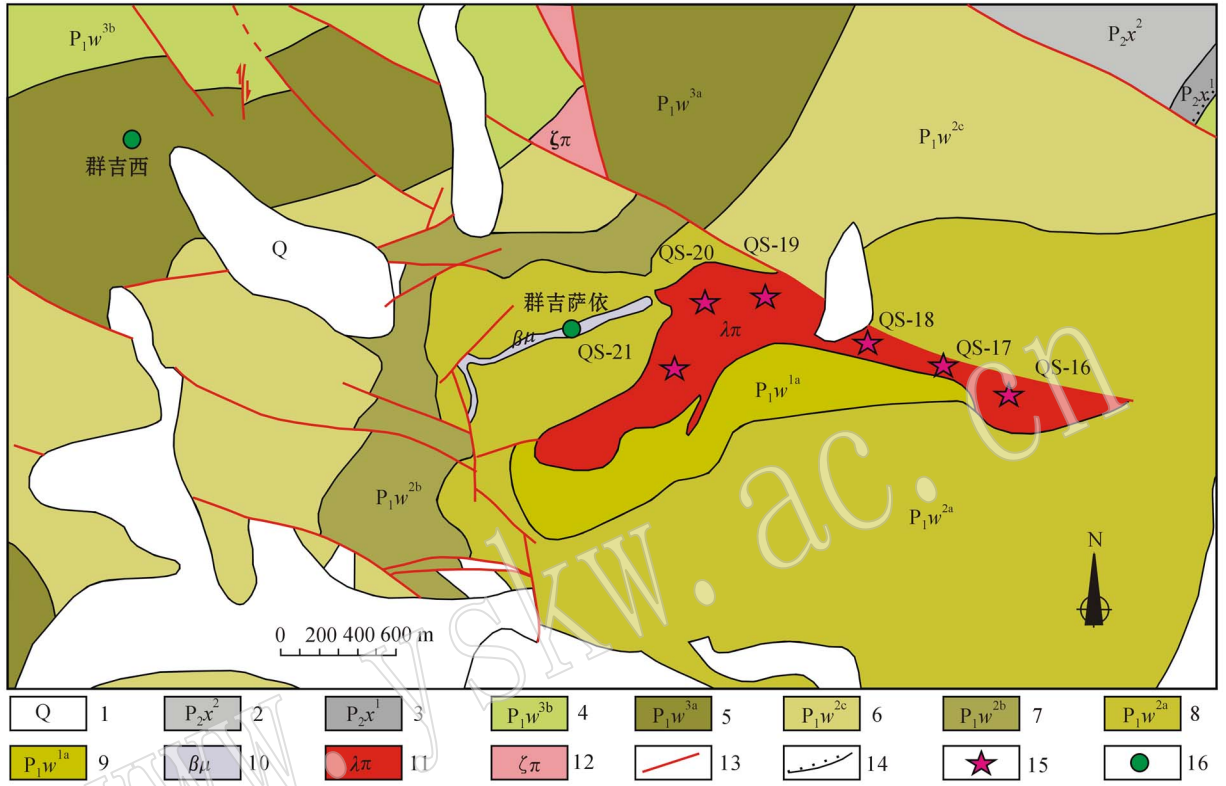


图 2 西天山阿吾拉勒西段群吉萨依地区地质矿产图(据邵行来等, 2010^①修编)

Fig. 2 Geological and mineral resource map of Qunjisayi area, western Awulale, western Tianshan Mountains (modified after Shao Xinglai *et al.*, 2010^①)

- 1—第四系沉积物; 2—上二叠统晓山萨依组中段; 3—上二叠统晓山萨依组下段; 4—下二叠统乌郎组上段的上亚段; 5—下二叠统乌郎组上段的下亚段; 6—下二叠统乌郎组中段的上亚段; 7—下二叠统乌郎组中段的中亚段; 8—下二叠统乌郎组中段的下亚段; 9—下二叠统乌郎组下段的下亚段; 10—辉绿岩; 11—花岗斑岩; 12—钠长斑岩; 13—断裂; 14—角度不整合线; 15—采样点; 16—铜矿
- 1—Quaternary sediments; 2—middle member of the Upper Permian Xiaoshansayi Formation; 3—lower member of the Upper Permian Xiaoshansayi Formation; 4—upper submember of upper member of the lower Permian Wulang Formation; 5—lower submember of upper member of the lower Permian Wulang Formation; 6—upper submember of middle member of the lower Permian Wulang Formation; 7—middle submember of middle member of the lower Permian Wulang Formation; 8—lower submember of middle member of the lower Permian Wulang Formation; 9—lower submember of lower member of the lower Permian Wulang Formation; 10—diabase; 11—granite porphyry; 12—albite porphyry; 13—fault; 14—angular unconformity; 15—sampling point; 16—Cu ore deposit

花岗斑岩呈肉红色,块状构造,似斑状结构,斑晶含量约 17%,主要为斜长石(6%~8%, $An = 6 \sim 8$)、钾长石(3%~5%)、角闪石(1%~2%)和黑云母(1%左右);斜长石斑晶呈半自形柱状、板状,一般粒度 0.2 mm×0.25 mm,大者为 1.0 mm×2.0 mm(图 3a);钾长石可见简单双晶;角闪石斑晶横截面呈六

边形,浅绿色,多色性明显,见简单双晶(图 3a);黑云母斑晶呈自形片状,一组完全解理,大小 0.4 mm×1.5 mm(图 3b)。基质为半自形微晶粒状结构,约占 83%,由斜长石(20%~30%)、钾长石(10%~20%)、石英(20%)等组成,副矿物见楣石、磁铁矿、磷灰石、锆石等。

① 邵行来,等. 2010. 新疆尼勒克县群吉萨依铜矿及外围普查物探工作报告.

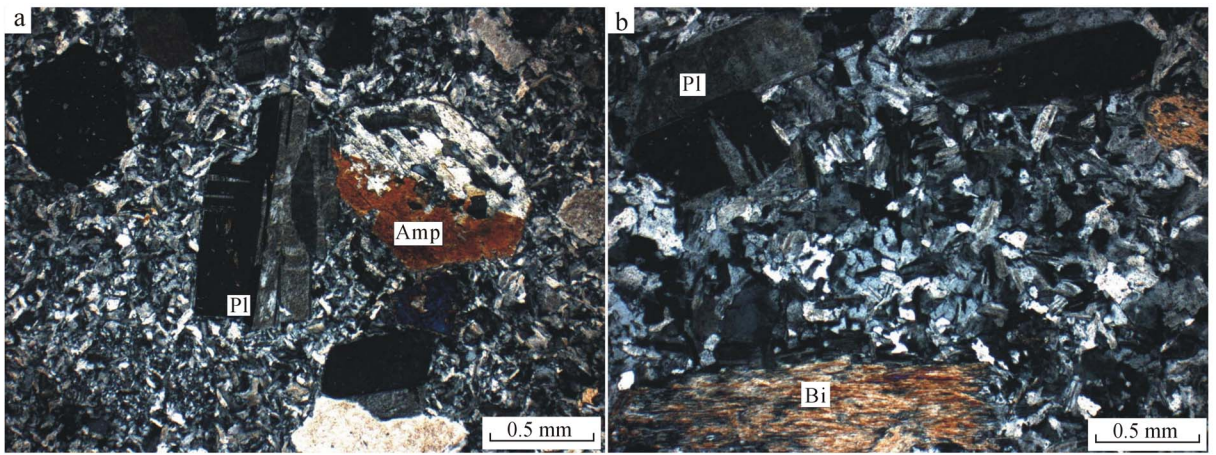


图3 群吉萨依花岗斑岩样品显微照片

Fig. 3 Microphotos of Qunjisayi granite porphyry

a—花岗斑岩中斜长石(Pl)和角闪石(Amp)斑晶,角闪石斑晶简单双晶,基质为半自形微粒结构(正交偏光); b—花岗斑岩中斜长石(Pl)和黑云母(Bi)斑晶,基质为半自形微粒结构(正交偏光)

a—plagioclase (Pl) and simple twin of amphibole (Amp) in hypidiomorphic-granular groundmass, granite porphyry (crossed nicols); b—plagioclase (Pl) and biotite (Bi) in hypidiomorphic-granular groundmass, granite porphyry (crossed nicols)

3 样品分析及结果

3.1 样品分析方法

样品产自群吉萨依花岗斑岩体内,具体采集地点见图2。所用样品新鲜、未风化,无蚀变矿化。样品粉碎至200目粉末,在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成主量和微量元素组成分析。主量元素组成用X射线荧光光谱法分析,所用仪器为菲利普PW2404 X射线荧光光谱仪;微量元素组成用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析,仪器为HR-ICP-MS(Element I)型质谱仪。

锆石的分选由河北廊坊区调院通过常规方法完成。样品破碎至80~120目,用水淘洗粉尘后,先用磁铁除去磁铁矿等磁性矿物,再用重液选出锆石,最后在双目镜下挑选完成。锆石和标样一起粘在玻璃板上,用环氧树脂浇铸,制靶并抛光,抛光后在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室进行锆石透射光、反射光和阴极发光显微镜下观察和照相,锆石定年在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心SHRIMP上按照标准分析流程(宋彪等,2002;简平等,2003)完成。所使用的标准锆石为SL13(铀含量为 238×10^{-6} ,年龄为572 Ma)和TEM(年龄为417 Ma),前者用于标定U、Th和Pb的含量,后者用于校正年龄。TEM和未知样品的分析按

照1:5进行。数据处理及U-Pb谱和图绘制采用ISOPLLOT 3.0(Ludwig,2003)。

Rb-Sr和Sm-Nd同位素分析由核工业北京地质研究院分析测试研究中心的Finnigan MAT261可调多接收器固体质谱仪上进行,详细的分析流程类似黄萱和吴利仁(1990)。标样结果如下: Sr标样NBS987为 $0.710\ 250 \pm 7$; Nd标样JMC $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512\ 109 \pm 3$; 用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.119\ 4$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\ 9$ 进行Sr和Nd同位素质量分馏校正,标样和样品的分析按照1:10进行。Sm和Nd的实验室全流程本底大约是 10^{-11} g 。Rb和Sr的实验室全流程本底约 $(3\sim 5) \times 10^{-10}\text{ g}$ 。

3.2 分析结果

3.2.1 锆石U-Pb年龄

锆石SHRIMP U-Pb定年分析结果见表1和图4。锆石多为无色长柱状晶形,锆石颗粒长约100~200 μm ,宽约50~150 μm ,长宽比为2:1~4:1,从CL图像(图4)看,大多数锆石晶形也较完整,无裂纹,并呈现出明显的振荡环带结构,岩浆成因锆石特征明显。群吉萨依花岗斑岩中锆石Th含量为 $(46\sim 304) \times 10^{-6}$,U含量为 $(70\sim 409) \times 10^{-6}$ (表1),Th/U=0.22~1.16,平均值0.65,也显示出岩浆成因锆石特点。24粒锆石测年结果(表1、图4、图5),除测点17、22因U含量偏高、年龄(分别为 $272 \pm 4\text{ Ma}$ 和 $253 \pm 4\text{ Ma}$)偏离较大外,其余22个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

表 1 群吉萨依花岗岩中锆石 SHRIMP U-Pb 测年结果
Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb dating results of Qunjisayi granite porphyry

点号	$\alpha_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值		年龄/Ma							
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$						
QJSY-1	68	138	0.50	0.313	9.1	0.047 64	1.6	80	210	291	21	300.0	5
QJSY-2	93	179	0.53	0.320	7.8	0.050 63	1.5	-14	190	283	19	318.4	5
QJSY-3	70	143	0.50	0.347	8.1	0.049 06	1.6	257	180	295	23	308.7	5
QJSY-4	120	182	0.68	0.303	9.6	0.048 64	1.5	-50	230	288	17	306.2	5
QJSY-5	121	215	0.58	0.313	7.9	0.049 19	1.5	4	190	277	18	309.5	5
QJSY-6	46	70	0.68	0.336	8.2	0.045 55	1.8	349	180	298	16	287.1	5
QJSY-7	62	111	0.58	0.330	14	0.049 65	1.7	111	320	278	31	312.4	5
QJSY-8	80	72	1.16	0.285	19	0.048 82	1.9	-207	470	295	19	307.3	6
QJSY-9	177	237	0.77	0.279	9.4	0.045 40	1.5	-81	230	253	14	286.2	4
QJSY-10	190	244	0.81	0.346	6.0	0.049 78	1.4	214	130	307	10	313.2	4
QJSY-11	169	253	0.69	0.337	5.0	0.048 04	1.4	238	110	289	11	302.5	4
QJSY-12	113	212	0.55	0.320	8.3	0.048 66	1.9	83	190	280	20	306.3	6
QJSY-13	50	103	0.50	0.272	21	0.047 36	1.8	-251	520	254	42	298.3	5
QJSY-14	122	212	0.60	0.303	7.3	0.047 64	1.5	7	170	280	15	300.0	4
QJSY-15	61	106	0.60	0.330	10	0.048 19	1.6	179	230	296	20	303.4	5
QJSY-16	111	187	0.62	0.313	7.6	0.047 37	1.6	98	180	277	16	298.4	5
QJSY-17	88	409	0.22	0.282	3.8	0.043 11	1.4	71	84	252	18	272.1	4
QJSY-18	253	397	0.66	0.293	4.8	0.046 23	1.4	-4	110	280	9	291.3	4
QJSY-19	92	155	0.61	0.329	11	0.049 58	1.7	107	250	287	23	312.0	5
QJSY-20	226	354	0.66	0.314	5.0	0.047 38	1.4	100	110	280	10	298.4	4
QJSY-21	140	193	0.75	0.300	8.0	0.046 86	1.5	23	190	267	14	295.2	4
QJSY-22	304	401	0.78	0.246	7.6	0.040 06	1.4	-82	180	229	10	253.2	4
QJSY-23	59	121	0.50	0.292	20	0.046 73	1.8	-37	470	260	42	294.4	5
QJSY-24	277	272	1.05	0.296	6.5	0.045 30	2.9	70	140	275	11	285.4	8

注: 1σ 为百分误差。

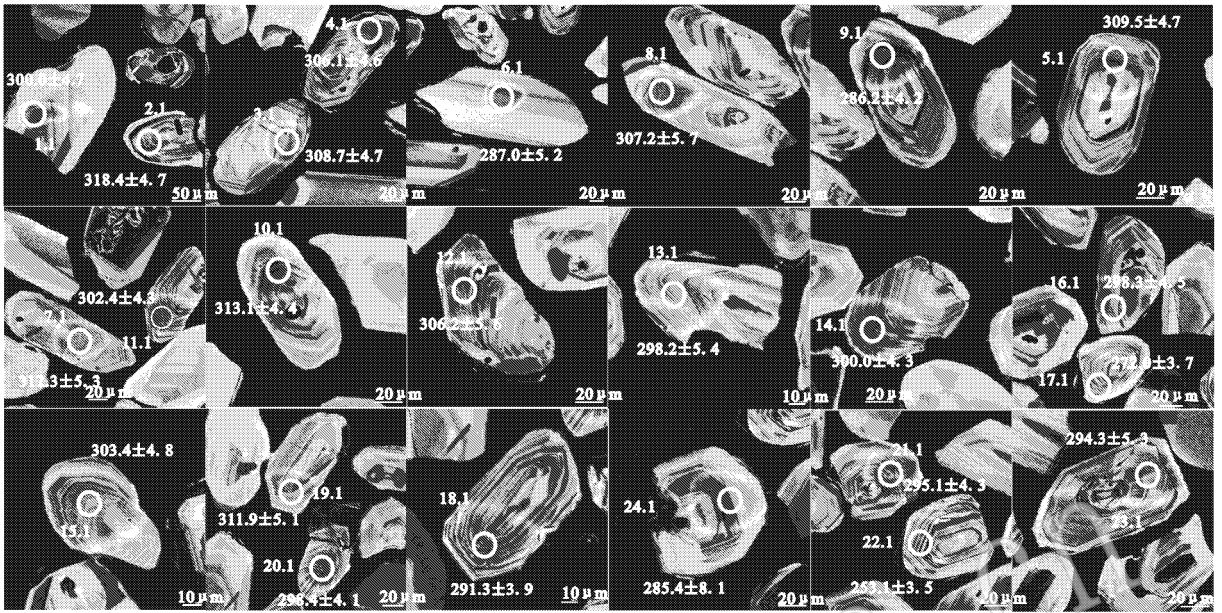


图 4 群吉萨依花岗斑岩中锆石样品的阴极发光照片
Fig. 4 CL images of zircon crystals in Qunjisayi granite porphyry

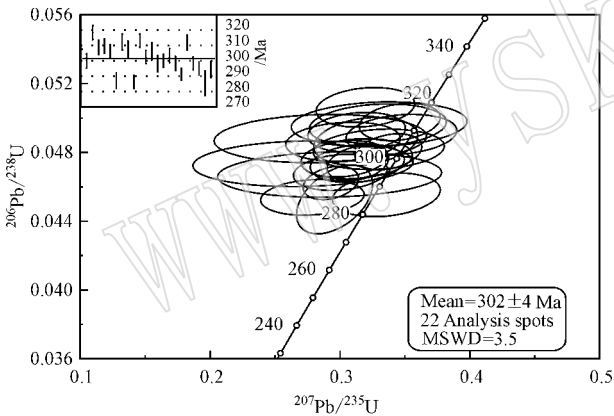


图 5 群吉萨依花岗斑岩中锆石 U-Pb 法谐和年龄图
Fig. 5 U-Pb concordia diagram of zircon in Qunjisayi granite porphyry

年龄集中在 $285 \pm 8 \sim 318 \pm 5$ Ma 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 302 ± 4 Ma (95% conf., MSWD = 3.5), 可信度较高, 代表了花岗斑岩成岩年龄。群吉萨依地区下二叠统乌郎组火山岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 298 ± 7 Ma (李华芹等, 1997), 与本次测得侵入其中的花岗斑岩年龄在误差内一致。

3.2.2 全岩地球化学

表 2 列出了群吉萨依岩体代表性岩石样品的化学成分、CIPW 标准矿物及主要的岩石化学参数。群吉萨依花岗斑岩样品中 SiO_2 含量变化在 71.17% ~ 72.59% 之间, TiO_2 的变化范围不大, 为 0.19% ~

0.23%, Al_2O_3 在 14.76% ~ 15.36% 之间, 平均为 15.10%, Na_2O 和 K_2O 含量分别为 8.86% ~ 9.39% 和 0.07% ~ 0.28%, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量为 9.13% ~ 9.56%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值高, 均大于 1, 为 33 ~ 132, 可能与其钠长石含量较高有关, 说明本区花岗岩主要富碱、富钠、低钾。

里特曼指数 σ 变化范围为 2.94 ~ 3.23, 指示其为钙碱性岩石。铝饱和指数 A/CNK 的值为 0.87 ~ 0.92, 平均 0.90, A/NK 值为 0.97 ~ 1.01, 平均 0.99, 表明花岗岩为过碱质-弱准铝质系列。分异指数 $\text{DI} = 92.7 \sim 94.6$, 反映岩体经历了高程度分异演化作用。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 6a), 群吉萨依花岗斑岩岩体富集大离子亲石元素(如 Th、U)和 Pb, 明显亏损高场强元素(如 Sr、P、Ti)相对于 Th 和 U 亏损 Rb、Ba 和 K(图 6a)。Nb、Ta 具有弱的负异常, 可能指示岩浆来源于地壳重熔(李锦轶等, 2007), 或源区有金红石、钛铁矿等残留, 或与富 Nb、Ta 矿物结晶分异有关(Green and Pearson, 1986); Sr 亏损常与岩浆中斜长石结晶分异有关, 或反映岩浆源区残留有斜长石, P、Ti 亏损指示磷灰石、钛铁矿的结晶分异(张旗等 2008; 李永军等, 2012)。

群吉萨依花岗斑岩稀土元素总量 $\Sigma\text{REE} = (50.16 \sim 100.23) \times 10^{-6}$, 平均 71.58×10^{-6} , 较低

表 2 群吉萨依花岗斑岩主量($w_B/\%$) 微量
($w_B/10^{-6}$)元素组成

Table 2 Compositions of main($w_B/\%$) and trace($w_B/10^{-6}$)
elements in Qunjisayi granite porphyry

样品编号	QS-16	QS-17	QS-18	QS-19	QS-20	QS-21
SiO ₂	72.59	71.17	71.91	71.55	71.30	72.05
TiO ₂	0.23	0.19	0.19	0.22	0.20	0.21
Al ₂ O ₃	14.76	15.06	15.19	15.20	15.36	15.05
Fe ₂ O ₃	0.260	0.805	0.325	0.495	0.295	0.340
FeO	0.80	1.55	0.75	0.55	0.65	0.80
MnO	0.017	0.036	0.024	0.024	0.020	0.023
MgO	0.68	0.68	0.68	0.79	0.74	0.71
CaO	0.88	0.87	0.89	0.93	0.96	0.73
Na ₂ O	9.25	8.86	9.05	9.17	9.28	9.39
K ₂ O	0.07	0.27	0.20	0.20	0.28	0.08
P ₂ O ₅	0.107	0.070	0.067	0.083	0.073	0.086
LOI	0.13	0.15	0.50	0.58	0.63	0.31
Na ₂ O+K ₂ O	9.32	9.13	9.25	9.37	9.56	9.47
Na ₂ O/K ₂ O	132.14	32.81	45.25	45.85	33.14	117.38
A/NCK	0.87	0.92	0.91	0.89	0.89	0.89
A/NK	0.97	1.01	1.01	0.99	0.99	0.97
FeO ^T /MgO	1.52	3.34	1.53	1.26	1.24	1.56
σ	2.94	2.98	2.96	3.07	3.23	3.09
石英(Q)	17.52	15.80	16.29	15.42	14.19	15.98
正长石(Or)	0.42	1.60	1.19	1.19	1.67	0.48
钙长石(An)	0	0.53	0.23	0	0	0
钠长石(Ab)	75.80	75.29	77.13	77.68	78.1	77.37
分异指数(DI)	93.74	92.69	94.61	94.29	93.96	93.83
SI	6.15	5.59	6.18	7.05	6.58	6.27
AR	3.95	3.69	3.71	3.77	3.83	4.00
Ba	22.8	128.0	97.3	117.0	167.0	75.9
Rb	1.12	5.29	3.43	4.46	7.10	1.12
Sr	36.8	103.0	83.1	45.0	52.1	38.2
Nb	5.27	5.89	5.47	4.50	5.86	5.14
Ta	0.366	0.396	0.421	0.417	0.453	0.394
Y	9.22	8.14	7.54	8.05	9.12	6.11
Zr	140.0	92.2	89.1	124.0	136.0	150.0
Hf	3.9.0	2.99	2.67	3.41	3.82	3.99
Pb	40.60	15.20	3.11	14.90	8.41	1.31
Th	2.14	2.58	2.42	2.23	2.39	2.51
U	0.641	0.837	1.060	1.640	1.350	0.678
Sc	3.08	4.50	4.12	4.58	4.68	4.28
V	51.8	69.7	48.5	44.5	75.5	112.0
Cr	10.30	12.00	9.99	13.00	14.70	15.70
Mo	1.080	1.220	0.886	0.935	0.933	1.010
Co	1.36	2.52	1.65	1.66	1.52	1.52
Ni	5.76	7.49	3.77	4.03	5.31	5.43
Cu	9.18	36.70	18.90	9.39	6.76	10.20
Zn	12.20	17.80	9.63	10.00	11.30	7.78
Ga	18.0	18.8	17.4	18.5	19.2	19.8
Li	9.87	11.30	15.00	12.30	12.10	14.00
Cs	0.024	0.070	0.057	0.078	0.105	0.081

续表 2

Continued Table 2

样品编号	QS-16	QS-17	QS-18	QS-19	QS-20	QS-21
La	11.5	16.4	15.6	17.5	20.2	10.3
Ce	24.2	33.4	30.7	33.9	46.2	21.8
Pr	3.08	3.71	3.35	3.27	5.22	2.42
Nd	12.0	13.5	12	11.2	18.4	9.27
Sm	2.22	1.92	1.85	2.04	2.91	1.57
Eu	0.37	0.63	0.58	0.6.0	0.73	0.44
Gd	1.93	1.67	1.74	1.58	2.20	1.36
Tb	0.33	0.30	0.27	0.25	0.34	0.22
Dy	1.70	1.66	1.51	1.41	1.69	1.15
Ho	0.33	0.28	0.25	0.27	0.29	0.18
Er	0.90	0.99	0.77	0.80	0.88	0.60
Tm	0.15	0.15	0.12	0.14	0.13	0.12
Yb	0.96	0.88	0.88	0.87	0.93	0.64
Lu	0.14	0.14	0.10	0.12	0.11	0.10
ΣREE	59.81	75.62	69.73	73.93	100.23	50.16
LREE/HREE	8.30	11.48	11.34	12.63	14.24	10.49
(La/Yb) _N	8.61	13.43	12.73	14.51	15.56	11.49
(La/Sm) _N	3.34	5.51	5.44	5.54	4.48	4.24
(Tb/Lu) _N	1.60	1.47	1.78	1.35	2.13	1.53
δEu	0.54	1.05	0.97	0.98	0.84	0.89
δCe	0.98	1.01	0.99	1.02	1.08	1.03

的稀土元素总量与地壳重熔型花岗岩(S型)的较高稀土元素含量(邱家骧, 1991)明显不同。由稀土元素配分曲线(图 6b)和 $(La/Yb)_N$ 的变化范围 8.61 ~ 15.56、平均 12.72 可知, 该岩体轻稀土元素富集, 呈明显的右倾型, 其中轻稀土元素分异明显, 而重稀土元素分异不明显, 在稀土元素配分图上显示左陡 [$(La/Sm)_N = 3.34 \sim 5.54$] 而右缓 [$(Tb/Lu)_N = 1.35 \sim 2.13$] 的特征, 具弱的负 Eu 异常特征(图 6b), δCe 为 0.98 ~ 1.08, 平均 1.02, 总体反映了造山带中钙碱性花岗岩的普遍特征。

3.2.3 Sr-Nd 同位素

花岗斑岩体的 Sr-Nd 同位素分析结果见表 3。其锶同位素初始值 I_{Sr} 总体较低, 且变化范围相对较小(0.705 12 ~ 0.705 36), ^{143}Nd 同位素初始值 I_{Nd} 变化范围为 0.512 360 ~ 0.512 390, 其中以 300 Ma 计算的花岗斑岩 $\epsilon Nd(t)$ 值为 +2.11 ~ +2.70; 样品的 $f_{Sm/Nd}$ 值为 -0.43 ~ -0.56, 单阶段模式年龄 t_{DM} 具有意义, 其 t_{DM} 为 713 ~ 863 Ma。正的 $\epsilon Nd(t)$ 低的 I_{Sr} 值和年轻的 Nd 模式年龄一致指示了亏损地幔组分的贡献, 同时, 均一的同位素组成也在某种程度上反映了岩浆在上升过程中没有遭受明显的地壳混染。

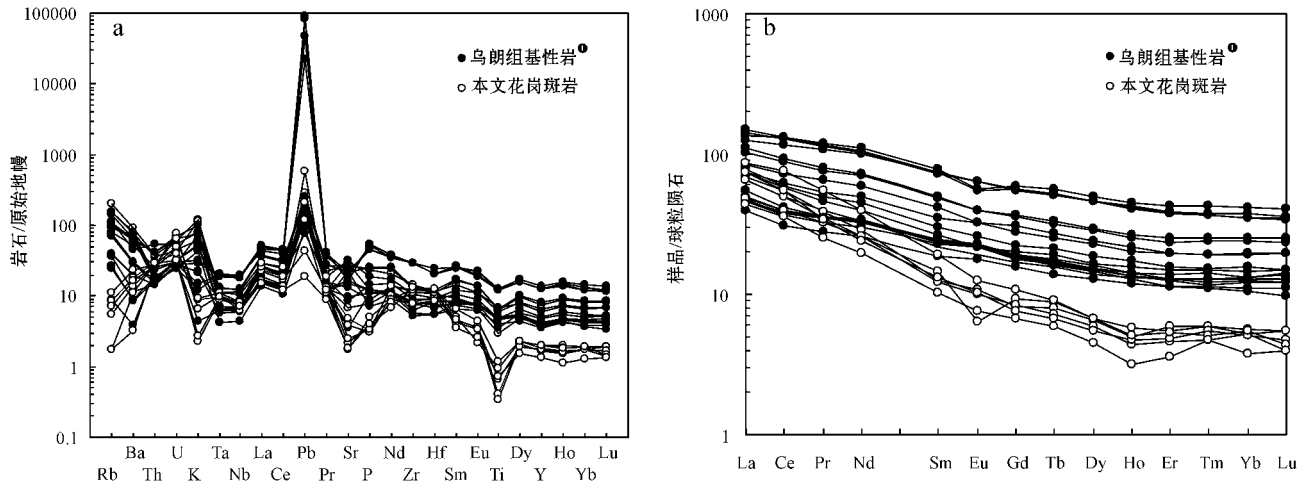


图 6 群吉萨依花岗斑岩微量元素蛛网图 (a) 和稀土元素配分曲线 (b)

Fig. 6 Rare element spidergrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Qunjisayi granite porphyry

表 3 群吉萨依地区花岗斑岩 Rb-Sr, Sm-Nd 同位素分析结果

Table 3 Rb-Sr, Sm-Nd isotopic analyses of Qunjisayi granite porphyry

岩石名称	样品号	$\omega_{\text{Rb}}/10^{-6}$		$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	I_{Sr}	$\epsilon \text{ Sr}(t)$	$\omega_{\text{Nd}}/10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	I_{Nd}	$\epsilon \text{ Nd}(t)$
		Rb	Sr						Sm	Nd					
花岗斑岩	QS-16	0.873	43.2	0.058 5	0.705 606	11	0.705 36	0.001 45	2.62	14	0.113 1	0.512 582	7	0.512 36	2.11
花岗斑岩	QS-17	4.99	107	0.134 9	0.705 736	9	0.705 16	0.001 17	2.09	13.6	0.092 9	0.512 559	8	0.512 38	2.44
花岗斑岩	QS-18	3.35	83.5	0.116 1	0.705 618	12	0.705 12	0.001 11	2.18	13.8	0.095 5	0.512 551	6	0.512 36	2.18
花岗斑岩	QS-22	7.11	102	0.201 6	0.706 007	9	0.705 15	0.001 15	2.06	12.8	0.097 3	0.512 581	7	0.512 39	2.70
花岗斑岩	QS-23	2.63	68.1	0.111 7	0.705 562	11	0.705 19	0.001 20	2.34	16.2	0.087 3	0.512 561	7	0.512 39	2.69

注：计算样品的 $I_{\text{Sr}}, \epsilon \text{ Sr}(t)$ 都统一到 300 Ma； $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11}$ ， $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12}$ 。

4 讨论

4.1 岩石类型

岩体造岩矿物中角闪石和黑云母的存在显示了 I 型花岗岩的特点 (高秉璋等, 1991)。岩石高 SiO_2 ，富 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ，富钠，铝饱和指数 A/CNK 的值为 $0.87 \sim 0.92$ ， A/NK 值为 $0.97 \sim 1.01$ ，平均 0.99，属 I 型花岗岩 (高秉璋等, 1991)。岩体中铁、镁、钙、钛含量低，贫磷， P_2O_5 含量均在 0.11% 以下。在 QAP 三角图解中样品点均投影在 I 型花岗岩区 (图略)。微量元素组成上，该岩体富集 Th、U 和 Pb，明显亏损高场强元素 (如 Sr、P、Ti) 及相对亏损 Nb、Ta 相对于 Th 和 U 亏损 Rb、Ba 和 K (图 6)，岩体的 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素含量及 Ga/Al 比值均较典型 A 型花岗岩 (Whalen *et al.*, 1987) 偏低，在图 7 中均投影

在高分异的 I 或 S 型区域。稀土元素配分图上呈明显的左陡右缓的右倾斜形，明显不同于典型的 S 型花岗岩常表现出的“海鸥型”稀土元素配分型式。结合岩石分异演化程度高的特点 ($\text{DI} = 92.7 \sim 94.6$)，表明群吉萨依花岗斑岩应属分异的 I 型花岗岩。

4.2 构造环境

多数研究认为西天山区域石炭纪末 (约 300 Ma) 或之前古亚洲洋闭合，发生碰撞造山 (Coleman, 1989; Allen *et al.*, 1993; Carroll *et al.*, 1995; Gao *et al.*, 1998; Xia *et al.*, 2004; 高俊等, 2006; Wang Q *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2011)。韩宝福等 (2010) 及 Han 等 (2010) 获得侵位于北天山蛇绿杂岩中的四棵树“钉合岩体”的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 316 ± 3 Ma。该岩体切穿了北天山蛇绿混杂岩带，其测年结果表明了准噶尔洋的关闭时间或者准噶尔板块和伊犁板块间的碰撞时间可能发生在早石

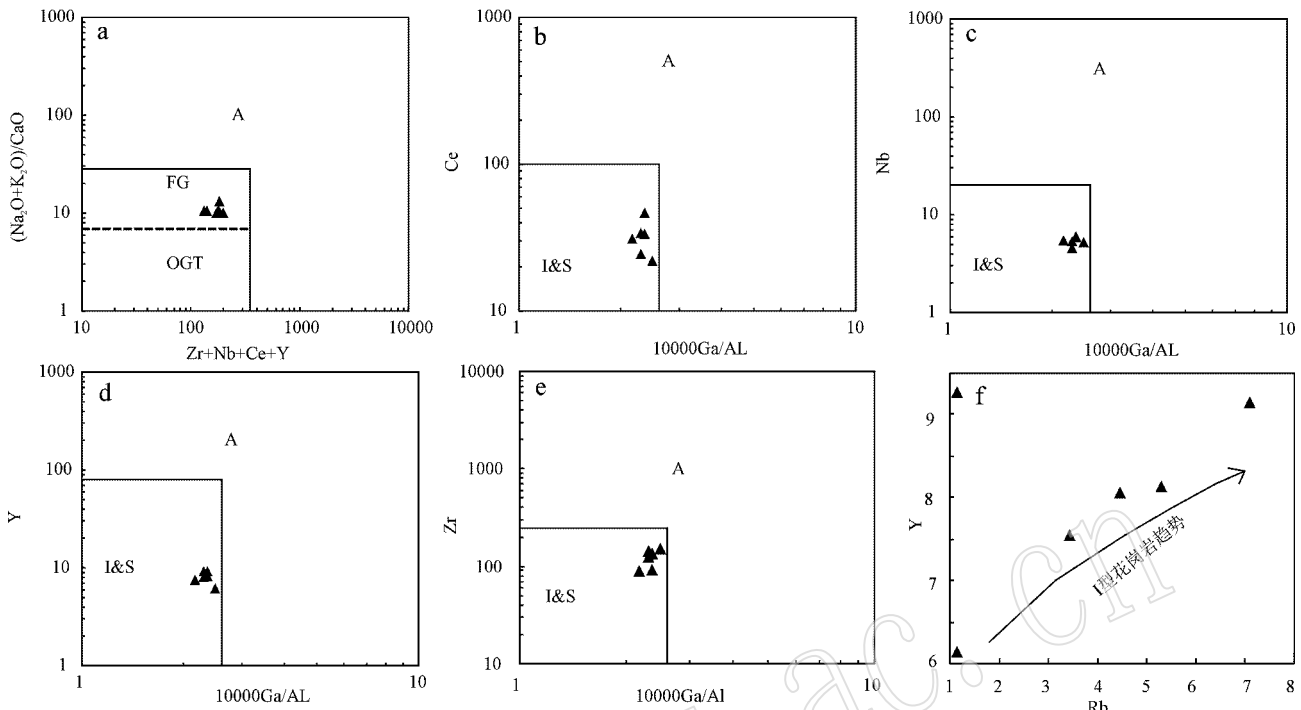


图 7 群吉萨依花岗斑岩岩石系列判别地球化学图解

Fig. 7 Geochemical discriminant diagrams of the rock series in Qunjisayi granite porphyry

炭世末。本文所测得的花岗斑岩岩体形成年龄为 302 ± 4 Ma, 明显晚于北天山洋(或准噶尔洋)的关闭时间, 说明该岩体形成于后碰撞阶段。而群吉萨依花岗斑岩侵入的下二叠统乌朗组陆相火山岩发育,

双峰式火山喷发性质明显, 指示了伸展构造环境(姜常义等, 1992; 李鸿等, 2011)。在 $Rb/30 - Hf - 3 Ta$ 判别图解(图 8a)上落入板内区域, 在 $R_1 - R_2$ 构造判别图(图 8b)中落在造山晚期和非造山之间, 大

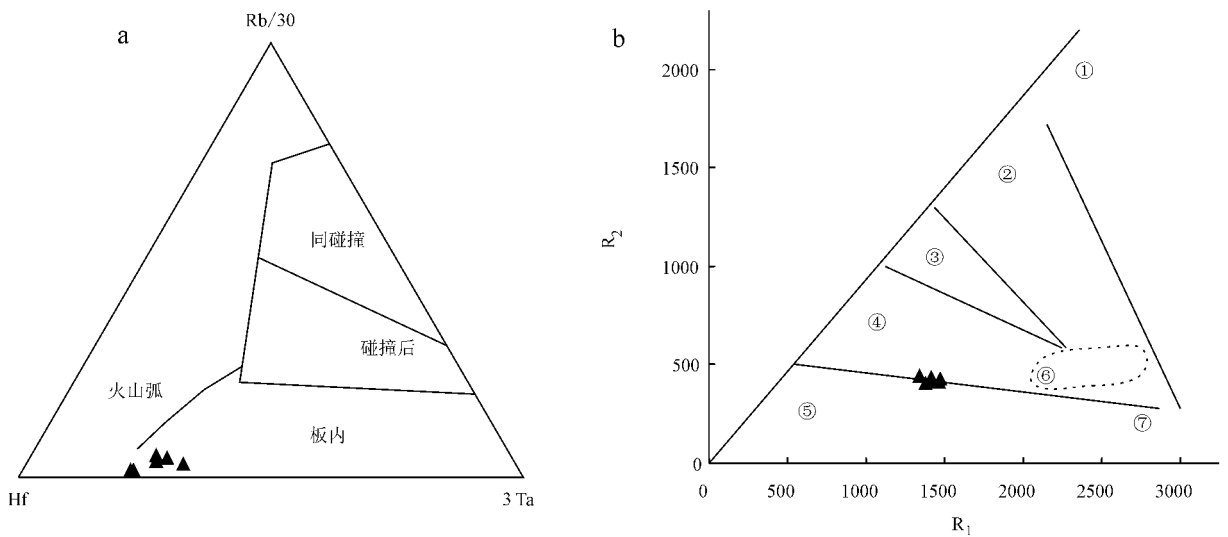


图 8 $Rb/30 - Hf - 3 Ta$ 和 $R_1 - R_2$ 构造判别图

Fig. 8 Discrimination diagrams of $Rb/30 - Hf - 3 Ta$ and $R_1 - R_2$

①—地幔分离; ②—板块碰撞前; ③—碰撞后抬升; ④—造山晚期; ⑤—非造山; ⑥—同碰撞期; ⑦—造山期后

①—mantle differentiation; ②—pre-collision; ③—post-collisional uplift; ④—late orogenic; ⑤—non-orogenic; ⑥—syn-collisional; ⑦—post-orogenic

部分落入造山晚期。所以认为该岩体形成的构造背景为后碰撞伸展构造环境。前面所述的岩体具有的富集大离子亲石元素、亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti)应是从源区继承而来,不应该被视为产于俯冲环境的标志,因为典型地壳熔体高场强元素含量很低(Ryerson and Watson, 1987)。

4.3 源区物质

花岗岩斑岩的 Sr、Nd 同位素特征表明,该岩体具有亏损地幔的岩浆特点,即低的 I_{Sr} (0.705 12 ~ 0.705 36) 和正的 $\epsilon Nd(t)$ 值(+2.1 ~ +2.7);样品的 $f_{Sm/Nd}$ 值为 -0.43 ~ -0.56, 单阶段模式年龄 t_{DM} 有意义,其 t_{DM} 为 713 ~ 863 Ma, 这一点与中亚造山带北部出露的大量花岗岩具有明显的相似性(Jahn *et al.*, 2000b, 2000c; 洪大卫等, 2000)。而图 9 表明群吉萨依地区花岗岩斑岩的 Sr 和 Nd 同位素组成特征与阿吾拉勒石炭纪的玄武质岩石(朱永峰等, 2006)非常接近。因此群吉萨依地区出露的花岗斑岩不可能由与它们有重要 Sr 和 Nd 同位素组成差别的西天山元古宙基底岩石(图 9)熔融形成。直接来源于地幔也是不可能的,地幔橄榄岩的直接熔融不可能产生酸性程度达英安岩的岩浆(Green *et al.*, 1980; Defant and Drummond, 1990)。尽管阿吾拉勒存在与花岗岩斑岩同时代的玄武岩,但我们认为这些花岗岩不可能是玄武岩浆结晶分异的产物。首先,因为花岗岩斑岩具有比玄武岩更低的 HREE 和 Y, 而角闪石是富集 Y 和 HREE 的,但是在玄武岩中并未见到角闪石;另外,在原始地幔标准化微量元素图

解和球粒陨石标准化稀土配分图解(图 6a、6b)中,两者具有不同的配分图,表明花岗岩斑岩不可能由与其同时代的玄武岩经分离结晶作用形成。

样品正的 $\epsilon Nd(t)$ 、低的 I_{Sr} 值及其很小的变化范围证实了岩浆在上升过程中没有遭受明显的地壳混染。地壳混染往往造成 $\epsilon Nd(t)$ 和 SiO_2 的负相关, I_{Sr} 和 SiO_2 的正相关以及 Rb、Ba 等元素富集;而样品的 $\epsilon Nd(t)$ 变化范围很小且没有与 SiO_2 呈明显的负相关性, I_{Sr} 同样变化范围很小且与 SiO_2 没有明显的相关性,样品 Rb/Nb=0.21~1.21, 远低于大陆地壳的相应值,甚至低于下地壳的比值。此外,如果存在明显的地壳混染,样品应该出现明显的 Nb、Ta 的负异常,而样品并未出现这种特征。因此,样品的元素和同位素地球化学特征并没有遭受明显地壳物质的混染,相反,更有可能是其源区特征的反映。

样品中存在微弱的负 Eu 异常,表明花岗岩斑岩似乎没有发生斜长石的分离结晶作用;然而个别样品具有正 Eu 异常,暗示花岗岩体的原始岩浆熔出后,源区没有斜长石的残留,斜长石全部熔融进入了熔体,导致原始岩浆的 Eu 含量很高。但是,样品具有轻微亏损 Sr, 且 CaO、 δEu 、Sr、Ba 与 SiO_2 具有明显的负相关性,表明尽管斜长石的分离结晶作用较弱但依然是存在的。

花岗岩斑岩与本区下石炭统玄武岩有一定的成因联系,推断可能是由石炭纪底侵的玄武岩发生部分熔融而形成的。群吉萨依花岗岩斑岩的低 Sr、Y 和 HREE 表明其源区残留相富含 HREE 的石榴石±角闪石,是玄武质岩石在角闪岩相或石榴石相条件下部分熔融的产物,而根据拉斑玄武岩- H_2O (5%)体系压力-温度相图(Green, 1982),来阐明角闪石-石榴石为残留相存在需要的最小压力和温度应大约为 1 GPa 和 650°C (Green, 1982)。在正常的地温梯度条件下,地温梯度线不与含 H_2O 的玄武岩固相线相交,玄武质岩石不能产生熔融;在高地温梯度条件下,地温梯度线能与含 H_2O 玄武岩固相线相交。Rapp 等(1995)、Sen 和 Dunn(1994)证实,玄武质岩石在压力大于 1.2 GPa(相当于地壳厚度大于 40 km)、温度在 1 000 ~ 1 100°C 条件下能够产生类似的熔体。而幔源物质的底侵将导致天山地壳厚度增加和地温梯度增加,特别是岩石圈伸展引起的地幔隆升将导致地温梯度大大增加,同时地幔产生以 H_2O 为主的去气作用,导致下地壳玄武岩固相线温度大大降低。当地温达到玄武岩固相线温度之上,在角

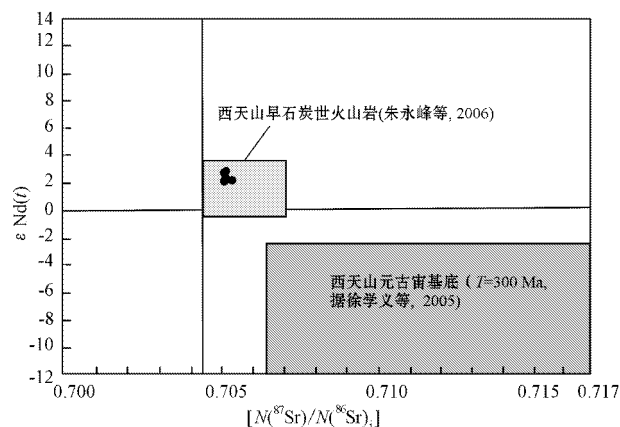


图 9 群吉萨依花岗岩斑岩的 $\epsilon Nd(t)$ - $[N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)]$ 图

Fig. 9 Plot of $\epsilon Nd(t)$ versus $[N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)]$ of Qunjisayi granite porphyry

闪石-石榴石相温压条件下,底侵在地壳底部的玄武质岩石发生部分熔融(熊小林等,2001)。而据彭聪等(2000)地震P波解释的天山地区现今地壳厚度46~48 km,如果这一地壳厚度在古生代形成,并在中生代没发生明显的变化,那么晚古生代这一地壳厚度可以满足底侵玄武岩发生部分熔融的条件,本区中生代微弱的岩浆活动可以为地壳厚度不发生明显变化提供一些佐证(熊小林等,2001)。

综上所述群吉萨依花岗斑岩的形成可能是由底侵的玄武质下地壳在角闪石-石榴石残留相的条件下部分熔融形成的。

5 结论

西天山阿吾拉勒西段群吉萨依花岗斑岩侵入于群吉萨依背斜北西侧伏端下二叠统乌朗组火山岩中,具似斑状结构,斑晶为斜长石、钾长石、角闪石、黑云母,基质具花岗质半自形微晶粒状结构。岩体具有高硅、富钠低钾和低磷含量特征,铝饱和指数A/CNK为0.87~0.92,A/NK为0.97~1.01,高集Th、U和Pb,亏损Nb、Ta、Sr、P、Ti,相对于Th和U亏损Rb、Ba和K等,属过碱质-弱准铝质的分异I型花岗岩类。

SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得花岗斑岩成岩年龄 302 ± 4 Ma,即石炭纪末—二叠纪初。结合其形成于后碰撞构造环境及该岩体的Sr和Nd同位素特征,推测该岩体形成于后碰撞伸展阶段,是由底侵的玄武质下地壳在角闪石-石榴石残留相的条件下部分熔融形成的。

致谢 感谢南方矿业公司在野外调查工作中的全力支持帮助,核工业北京研究院分析测试中心、北京离子探针中心等单位在实验室研究中积极配合,匿名审稿人对文章提出了宝贵意见,在此一并致以诚挚的谢意。

References

Allen M B, Windley B F and Zhang C. 1993. Palaeozoic collisional tectonics and magmarism of the Chinese TianShan, central Asia[J]. *Tectonophysics*, 220(1-4): 89-115.

Biske Y S and Seltmann R. 2010. Paleozoic Tian-Shan as a transitional region between the Rheic and Urals-Turkestan oceans[J]. *Gondwana Res.*, 17: 602-613.

Carroll A R, Graham S A, Hendrix M S, *et al.* 1995. Late Paleozoic tectonic amalgamation of northwestern China: Sedimentary record of the northern Tarim, northwestern Turan, and southern Junggar basins[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 107(5): 571-594.

Charvet J, Laurent-Charvet S, Shu L S, *et al.* 2004. Paleozoic geodynamic evolution of Tianshan orogenic belt(NW China): Welding of Tarim and Junggar continental blocks[A]. *Symposium G05-09 Tethys Reconstruction*, Abstract[C]. 155.

Charvet J, Shu L S and Laurent-Charvet S. 2007. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan(NW China): Welding of the Tarim and Junggar plates[J]. *Episodes*, 30: 162-186.

Che Zicheng and Liu Liang. 1996. Review on the Ancient Yili Rift, Xingjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3): 478-490 (in Chinese with English abstract).

Chen C M, Lu H F, Jia D, *et al.* 1999. Closing history of the southern Tianshan oceanic basin, Western China: An oblique collisional orogeny[J]. *Tectonophysics*, 302: 23-40.

Coleman R C. 1989. Continental growth of Northwest China[J]. *Tectonics*, 8(3): 621-635.

Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted Lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662-665.

Gao Bingzhang, Hong Dawei, Zhen Jijian, *et al.* 2010. A Guide to the Method of the 1:50 000 Regional Geological Survey in Igneous Granite Area[M]. *Xinjiang Geology*, 28: 1-15 (in Chinese with English abstract).

Gao J, Li M S, Xiao X X, *et al.* 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China[J]. *Tectonophysics*, 287(1-4): 213-231.

Gao Jun, Long Longli, Qian Qing, *et al.* 2006. South Tianshan: A Late Paleozoic or a Triassic orogen? [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1049-1061 (in Chinese with English abstract).

Gao J, John T, Klemd R, *et al.* 2007. Mobilization of Ti-Nb-Ta during subduction: Evidence from rutile-bearing dehydration segregations and veins hosted in eclogite, Tianshan, NW China[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 4974-4996.

Green T H. 1980. Island arc and continent-building magmatism-A review of petrogenetic models based on experimental petrology and geochemistry[J]. *Tectonophysics*, 63: 367-385.

Green T H. 1982. Anatexis of mafic crust and high pressure crystallization of andesite[A]. Thorpe R S. *Andesite-Orogenic Andesite and Related Rocks*[C]. New York: John Wiley, 465-487.

Green T H and Pearson N J. 1986. Rare-earth element partitioning between sphene and coexisting silicate liquid at high pressure and temperature[J]. *Chemical Geology*, 55(1-2): 105-119.

Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, *et al.* 2000. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan: Their tectonic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 305-316 (in Chinese with English abstract).

Han Baofu, He Guoqi, Wu Tairan, *et al.* 2004. Zircon U-Pb ages,

- geochemical characteristics and tectonic implications of the early Paleozoic granitic, Tianshan [J]. *Xinjiang Geology*, 22(1): 4~11 (in Chinese with English abstract).
- Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, *et al.* 2010a. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, Western China [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 122: 627~640.
- Han Gang. 2010. Analysis the geological characteristics and metallogenic regularity of the copper-bearing cryptoexplosion breccia in Qunjisayi copper deposit in Nileke county, Xinjiang [J]. *Xinjiang Non-ferrous Metal*, 4: 26~30 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xuan and Wu Liren. 1990. Nd-Sr isotopes of granitoids from Shanxi province and their significance for tectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2: 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, *et al.* 2000. Genesis of positive (ϵ_{Nd}) granitoids in the Da Hing Gan MTS. Mongolia orogenic belt and growth continental crust [J]. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441~456 (in Chinese with English abstract).
- Jacques Charvet, Shu Liangshu, Sébastien Laurent Charvet, *et al.* 2011. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 54: 166~184.
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000a. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*, 91: 181~193.
- Jahn B M, Wu F and Chen B. 2000b. Massive granitoid generation in central Asia: Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic [J]. *Episodes* 23: 82~92.
- Jahn B M, Wu F and Hong D. 2000c. Important crustal growth in the Phanerozoic: isotopic evidence of granitoids from east-central Asia [J]. *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet Sci.)*, 109(1): 5~20.
- Jian Ping, Liu Dunyi and Sun Xiaomeng. 2003. SHRIMP dating of Carboniferous Jinshajiang opiolite in wester Yunnan and Suchuan: geochronological constraints on the evolution of the Paleo-Tethys oceanic crust [J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 217~277 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi, Wu Wenkui, Zhang Xueren, *et al.* 1992. Magma action and tectonic evolution in A Wulale district, Western Tianshan Mountain [J]. *Acta Xi'an Geological Institute*, 2(18): 18~24 (in Chinese with English abstract).
- Khain E V, Bibikova E V, Salnikova E B, *et al.* 2003. The Palaeo-Asian ocean in the Neoproterozoic and early Palaeozoic: New geochronologic data and palaeotectonic reconstructions [J]. *Precambrian Research*, 122(1~4): 329~358.
- Kröner A, Windley B F, Badarch G, *et al.* 2007. Accretionary growth and crust formation in the Central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian/Nubian shield [A]. Hatcher R D, Carlson M P, McBride J H, *et al.* 4-D Framework of Continental Crust [C]. *Geological Society of America Memoir* 200: 181~209.
- Li Hong, Zhou Jibing, Hu Keliang, *et al.* 2011. Geochemical characteristics and tectonic environment of the Wulung Formation volcanic rocks in the Awulale area of Western Tianshan [J]. *Xinjiang Geology*, 4(29): 381~384 (in Chinese).
- Li Huaqin, Zhou Su and Cai Hong. 1997. Chronology of mineralization of the Nileike copper deposit in northern Xinjiang [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18: 185~187 (in Chinese with English abstract).
- Li Jilei, Su Wen, Zhang Xi, *et al.* 2009. Zircon Cameca U-Pb dating and its significance for granulite-facies gneisses from the western Awulale Mountain, West Tianshan, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1852~1862 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, *et al.* 2007. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plate [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565~582 (in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun, Yang Gaoxue, Li Hong, *et al.* 2012. Confirmation of Devonian volcanic rocks from Yining block, Xinjiang and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1225~1237 (in Chinese with English abstract).
- Lian Xiaoping. 2004. Geological characteristics and petrogenesis of the Qunjisayi copper deposit, Xinjiang [J]. *Xinjiang Non-ferrous Metal*, 5~7 (in Chinese with English abstract).
- Liu Fengming. 2008. Geological characteristics and petrogenesis of the Qunjisayi copper deposit in Nileke county, Xinjiang [J]. *Xinjiang Non-ferrous Metal*, 15~20 (in Chinese with English abstract).
- Liu W and Fei P X. 2006. Methane-rich fluid inclusions from ophiolitic dunite and post-collisional mafic-ultramafic intrusion: The mantle dynamics underneath the Palaeo-Asian ocean through to the post-collisional period [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 242(3~4): 286~301.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLLOT 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft excel [J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 4: 70.
- Mo Jiangping, Huang Mingyang, Qin Longfang, *et al.* 1996. Genesis of continental volcanic type copper deposits in Awulale, Xinjiang [J]. *Mineral Resources and Geology*, 10(4): 217~223 (in Chinese with English abstract).
- Peng Cong and Gao Rui. 2000. Lithosphere Structure and Vertical Variation of Chinese Continent and Near Oceanic Area [M]. Beijing: Seismic Publishing House, 83~85 (in Chinese with English abstract).
- Pirajno F, Mao J W, Zhang Z C *et al.* 2008. The Association of mafic-ultramafic intrusions and A-type magmatism in the Tian Shan and Altay orogens, NW China: Implications for geodynamic evolution and potential for the discovery of new ore deposits [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2~4): 165~183.
- Qian Q, Gao J, Klemd R, *et al.* 2008. Early Paleozoic tectonic evolution Of the Chinese South Tianshan Orogen: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiata, NW China [J]. *International Journal of Earth Sciences*, DOI 10.1007/s00531-007-0268-x.
- Qiu Jiaxiang. 1991. *Applied Magma Petrology* [M]. Wuhan: China U-

- niversity of Geoscience Publishing House, 225~248 (in Chinese with English abstract).
- Rapp R P. 1995. Amphibole-out phase boundary in partially melted metabasalt: its control over liquid fraction and composition and source permeability [J]. *J. Geophys. Res.*, 100: 15 601~15 610.
- Ryerson F J and Watson E B. 1987. Rutile saturation in magmas: implications for Ti-Nb-Ta depletion in island-arc basalts [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 86: 225~239.
- Sen C and Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: Implication for the origin of adakites [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 117: 394~409.
- Sengör A M C, Natalin B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 364(6435): 299~307.
- Shi Y S, Lu H F and Jia D. 1994. Paleozoic plate-tectonic evolution of the Tarim and western Tianshan regions, western China [J]. *International Geology Review*, 36(11): 1 058~1 066.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, *et al.* 2002. Mount marking and procedure of the SHRIMP dating [J]. *Geological Review*, 48 (Suppl.): 26~30 (in Chinese with English abstract).
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, *et al.* 2010. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic magmatic rocks in the Lamasu-Dabate area, northwestern Tian shan (west China): Evidence for a tectonic transition from arc to post-collisional setting [J]. *Lithos*, 119: 393~411.
- Wang B. 2006. ion géodynamique du Bloc de Yili (nord-ouest Chine) au Paléozoïque (PhD Dissertation) [D]. Universities of Nanjing and Orleans, 1~231.
- Wang B, Faure M, Shu L S, *et al.* 2008. Paleozoic tectonic evolution of the Yili Block, Wester Chinese, Tianshan [J]. *Bull. Soc. Géol. France*, 179: 483~490.
- Wang B, Shu L S, Faure M, *et al.* 2007. Geochemical constraints on Carboniferous volcanic rocks of Yili Block (Xinjiang NW China): Implication on tectonic evolution of Wester Tianshan [J]. *J. Asian Earth Sci.*, 29: 148~159.
- Wang J B, Wang Y W and Wang I J. 2004a. The Junggar immature continental crust province and its mineralization [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 337~344 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingbin and Xu Xin. 2006. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 23~31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Wyman D A, Zhao Z H, *et al.* 2007b. Petrogenesis of Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basalts in the Alataw area, northern Tianshan Range (western China): Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia orogenic belt [J]. *Chemical Geology*, 236(1~2): 42~64.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, *et al.* 2006. Carboniferous adakite-high-Mg andesite-Nb-enriched basaltic rock suites in the Northern Tianshan area: Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia Orogenic Belt and Cu-Au mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 11~30 (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]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407~419.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, *et al.* 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tian Shan Range (Central Asia) [J]. *Geology*, 18(2): 128~131.
- Winter J D. 2001. An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology [M]. New Jersey: Prince Hall, 1~697.
- Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, *et al.* 2008. Relative contributions of crust and mantle to the generation of the Tianshan Carboniferous rift-related basic lavas, northwestern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(4~6): 357~378.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2004. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 903~910 (in Chinese with English abstract).
- Xia L Q, Xu X Y, Xia Z C, *et al.* 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 116(3~4): 419~433.
- Xiao W J, Huang B C, Han C M, *et al.* 2010. A review of the western part of the Altaid: A key to understanding the architecture of accretionary orogens [J]. *Gondwana Research*, 18: 253~273.
- Xiao W J, Windley B F, Badarch G, *et al.* 2004a. Paleozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of Central Asia [J]. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339~342.
- Xiao Xiaolin, Lou Fasheng and Wu Xinhua. 2008. Metallogenic conditions and prospecting for copper deposits in Nileke region of the western Tianshan, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 26(2): 142~146 (in Chinese with English abstract).
- Xiong X L, Zhao Z H, Bai Z H, *et al.* 2001. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of west Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46: 811~817 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Ma Zhongping, Xia Zuchun, *et al.* 2005. Discussion of the sources and characteristics on Sr, Nd, Pb isotopes of the Carboniferous to Permian post-collision granites from Tianshan [J]. *North Western Geology*, 38(2): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Yakubehuk A. 2004. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage: A revised model [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 761~779.
- Yin Yiqiu, Chen Weimin, Mo Jiangping, *et al.* 2005. Discovery of copper-bearing cryptoexplosion breccia pipe in Qunjisayi copper deposit in Nileke county, Xinjiang and its significance [J]. *Mineral Resources and Geology*, 19(3): 246~252 (in Chinese with English abstract).
- Zhai W, Sun X M, Sun W D, *et al.* 2009. Geology, geochemistry, and genesis of Axi: A Paleozoic low-sulfidation type epithermal gold deposit in Xinjiang, China [J]. *Ore Geology Review*, 36: 265~281.
- Zhang D Y, Zhang Z C, Xue C J, *et al.* 2010. Geochronology and geochemistry of the ore-forming porphyries in the Lailisig 'er-Lamasu Region of the Western Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China:

- Implication for petrogenesis metallogenesis, and tectonic setting[J]. Journal of Geology, 118:543~563.
- Zhang L C, Xiao W J, Qin K Z, et al. 2006a. The adakite connection of the Tuwu-Yandong copper porphyry belt, eastern Tianshan, NW China: Trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry[J]. Mineralium Deposita, 4(2):188~200.
- Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, et al. 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity[M]. Beijing: China Land Press, 1~344 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, Xiong Xiaolin, et al. 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronological study of late Paleozoic volcanic-hypabyssal igneous rocks in western Tianshan, Xinjiang[J]. Geochimica, 32(4):317~327 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y F, Zhang L F, Gu L B, et al. 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 50(19):2201~2212.
- Zhu Yongfeng, Zhou Jing and Guo Xuan. 2006. Petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, N W China[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5):1341~1350 (in Chinese with English abstract).
- 车自成, 刘良. 1996. 论伊犁古裂谷[J]. 岩石学报, 12(3):478~490.
- 高秉璋, 洪大卫, 郑基俭, 等. 花岗岩类区1:5万区域地质填图方法指南[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1991.
- 高俊, 龙灵利, 钱青, 等. 2006. 南天山: 晚古生代还是三叠纪碰撞造山带?[J]. 岩石学报, 22(5):1049~1061.
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 等. 2000. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境[J]. 岩石学报, 16(3):305~316.
- 韩宝福, 何国琦, 吴泰然, 等. 2004. 天山早古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义[J]. 新疆地质, 22(1):4~11.
- 韩刚. 2010. 浅析新疆尼勒克县群吉萨依铜矿之含矿隐爆角砾岩的地质特征及成矿规律[J]. 新疆有色金属, 4:26~30.
- 黄萱, 吴利仁. 1990. 陕西地区岩浆岩 Nd, Sr 同位素特征及其与大地构造发展的联系[J]. 岩石学报, 2:1~11.
- 洪大卫, 王式洗, 谢锡林, 等. 2000. 兴蒙造山带正 ϵ_{Nd} 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. 地学前缘, 7(2):441~456.
- 简平, 刘敦一, 孙晓猛. 2003. 颠川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年: 古特第斯洋壳演化的同位素年代学制约[J]. 地质学报, 77(2):217~227.
- 姜常义, 吴文奎, 张学仁, 等. 1992. 西天山阿吾拉勒地区岩浆活动与构造演化[J]. 西安地质学院学报, 18(1):18~24.
- 李鸿, 周继兵, 胡克亮, 等. 2011. 西天山阿吾拉勒地区下二叠统乌朗组火山岩地球化学特征及构造环境[J]. 新疆地质, 4(29):381~384.
- 李华芹, 周肃, 蔡红. 1997. 新疆北部尼勒克铜矿成矿作用年代学研究[J]. 地球学报, 18(增刊):185~187.
- 李继磊, 苏文, 张喜, 等. 2009. 西天山阿吾拉勒西段麻粒岩相片麻岩锆石 Cameca U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 28(12):1852~1862.
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. 岩石学报, 23(3):565~582.
- 李永军, 杨高学, 李鸿, 等. 2012. 新疆伊宁地块晚泥盆世火山岩的确认及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(4):1225~1237.
- 连小平. 2004. 新疆群吉萨依铜矿地质特征及成因分析[J]. 新疆有色金属, 5~7.
- 刘凤鸣. 2008. 新疆尼勒克县群吉萨依铜矿地质特征及成因浅析[J]. 新疆有色金属, 15~20.
- 莫江平, 黄明扬, 覃龙芳, 等. 1996. 新疆阿吾拉勒陆相火山岩型铜矿成矿研究[J]. 矿产与地质, 10(4):217~223.
- 彭聪, 高锐. 2000. 中国大陆及邻近海域岩石圈/软流圈结构横向变化研究[M]. 北京: 地震出版社, 83~85.
- 邱家骥. 1991. 应用岩浆岩岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 225~248.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质评论, 48(增刊):26~30.
- 王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿[J]. 地质学报, 80(1):23~31.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 2006. 天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富 Nb 岛弧玄武岩: 对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义[J]. 岩石学报, 22(1):11~30.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 地质通报, 23(9):903~910.
- 肖晓林, 楼法生, 吴新华. 2008. 新疆西天山尼勒克县地区铜金属成矿条件及找矿远景分析[J]. 新疆地质, 26(2):142~146.
- 熊小林, 赵振华, 白正华, 等. 2001. 西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质中酸性岩及地壳垂向增生[J]. 科学通报, 46(4):281~287.
- 徐学义, 马中平, 夏祖春, 等. 2005. 天山石炭一二叠纪后碰撞花岗岩的 Sr, Nd, Pb 同位素源区示踪[J]. 西北地质, 38(2):1~18.
- 尹意求, 陈维民, 莫江平, 等. 2005. 新疆尼勒克县群吉萨依铜矿的含矿隐爆角砾岩筒的发现及其地质找矿意义[J]. 矿产与地质, 19(3):246~252.
- 张旗, 王焰, 熊小林, 等. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇[M]. 北京: 中国大地出版社, 1~344.
- 赵振华, 白正华, 熊小林, 等. 2003. 西天山北部晚古生代火山-浅侵位岩浆岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年[J]. 地球化学, 33(4):317~327.
- 朱永峰, 周晶, 郭璇. 2006. 西天山石炭纪火山岩岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 22(5):1341~1350.

附中文参考文献