

国庆钨矿钾长花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义

李鹏,吕新彪,陈超,曹晓峰,玛依拉·艾山,苏妤芸

(中国地质大学资源学院;中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北武汉 430074)

摘要: 国庆钾长花岗岩岩体出露于内蒙古自治区额济纳旗西南部的盘陀山一带,北邻牛圈子-洗肠井缝合带,LA-ICP-MS测得该岩体的U-Pb年龄为 439.1 ± 8 Ma。岩体 SiO_2 含量73.31%~74.36%, $A/\text{CNK} > 1.1$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.25 \sim 1.40$,里特曼指数介于2.06~2.22之间,属于高钾钙碱性、过铝质花岗岩系列,岩体富集大离子亲石元素,亏损高场强元素。稀土和微量元素分析显示钾长花岗岩总体轻稀土元素富集,轻、重稀土元素分馏较低,具有较明显Eu负异常($\delta\text{Eu} = 0.65 \sim 0.77$),具K、Rb、Ba、Th等元素富集,Nb、Ce、Zr、Hf、Sm、Y、Yb等元素亏损的特征。综合分析表明,国庆钾长花岗岩为壳源S型同碰撞花岗岩,结合区域构造演化历史,认为国庆钾长花岗岩为古老地壳物质重熔形成,是早志留世月牙山-洗肠井古洋盆闭合同碰撞阶段的产物。同时对该区志留-泥盆纪碰撞伸展环境下成矿前景初步分析,为矿床研究和区域矿产预测工作提供参考。

关键词: 钾长花岗岩;同碰撞;国庆钨矿;内蒙古北山

中图分类号:P588.12⁺1;P597⁺.3

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2011)01-0013-12

Chronology and geochemical characteristics of K-feldspar granite in the Guoqing tungsten deposit and their geological implications

LI Peng, LÜ Xin-biao, CHEN Chao, CAO Xiao-feng, Mayila Aishan and SU Yu-yun

(Faculty of Resources, China University of Geosciences; State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Located near Pantuoshan district in Ejina Banner of southwestern Mongolia, Guoqing K-feldspar granite body lies in southern Niujuanzi-Xichangjing suture zone. LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating of zircon separated from the rock yields an average weighted $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 439.1 ± 8 Ma. The results of geochemical study indicate that SiO_2 are in the range of 73.31%~74.36%, $A/\text{CNK} > 1.1$, and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.25 \sim 1.40$, the Rittmann index of k-feldspar granite varies from 2.06 to 2.22, suggesting a high-K calc-alkaline series and peraluminous nature. The results also indicate that Guoqing K-feldspar granite body is highly enriched in large ion lithophile elements and strongly depleted in high field strength elements. The chondrite-normalized REE and trace elements patterns demonstrate low fractionation level between LREE and HREE, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 3.40 \sim 5.44$, and negative Eu ($\delta\text{Eu} = 0.65 \sim 0.77$), which might have been related to the plagioclase residuals during the partial melt of the original rock. The spider diagrams are characterized by Nb, Ce, Zr, Hf, Sm, Y, Yb depletion and K, Rb, Ba, Th enrichment. Rb/Sr ratios are between 4.37 and 4.70, and such high Rb/Sr ratios (> 2) suggest that Guoqing granite body was probably triggered by dehydration melting of mica during

收稿日期:2010-05-09;修订日期:2010-10-14

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重点资助项目(2007BA25B04)

作者简介:李鹏(1986-),男,硕士生,矿物、岩石、矿床学专业,E-mail:snowformart@163.com;通讯作者:吕新彪(1962-),男,教授,博士生导师,E-mail:lvxb_01@163.com。

the geological process. High levels of Nb and Ta and characteristics of $Ta > Nb$ indicate high-degree evolution of the granite body, which laid the foundation of tungsten elements enrichment. CaO/Na_2O ratios range from 0.152 to 0.165, and all the values are lower than 0.3, suggesting the origination from re-melting of the early Precambrian crystalline basement. In addition, the inherited zircon in the granite body yields a large number of ages between 616 Ma and 1 046 Ma. In Hongliuhe area, the zircon U-Pb age of granite that intruded into ophiolite is 404.8 ± 5.2 Ma, implying that the south Tianshan oceanic crust was formed as early as Early Cambrian, and closed before Emsian. In Xichangjing area, the closure of South Tianshan Ocean was before 439.1 ± 8 Ma, suggesting a scissors-type opening-closing tectonic pattern. The results of geochemical study show that the S-type K-feldspar granite, which was crust-derived, might have been formed by the closure of the Hongliuhe-Yueyashan Paleo-ocean during the syn-collision stage. There are Yingzuihongshan, Wangxushan and Guoqing tungsten ore deposits in Xichangjing area. These ore deposits which were formed in the contact zone or the fissure system surrounding the granite intrusion have a close relationship with Silurian-Devonian granite intrusions. Moreover, in the tectonic setting of transformation from collision to extension from Silurian to early-Devonian, the granites related to such tectonic settings deserve detailed studies, which can not only help understand the tectonic evolution but also provide a theoretic basis for the exploration of regional mineral resources.

Key words: K-feldspar granite; syn-collision; Guoqing tungsten deposit; Beishan Mountain, Inner Mongolia

北山成矿带是我国西北地区重要的金属成矿带之一,大地构造位置位于塔里木板块-哈萨克斯坦板块-西伯利亚板块交汇部位,其独特的构造位置和丰富的矿产资源一直为地质学家所关注(何国琦等,1994;刘雪亚等,1995;胡霏琴等,1997;聂风军等,2002;杨合群等,2006)。国庆钨矿由西安地质矿产研究所于2003年发现,位于内蒙古自治区额济纳旗西南部的盘陀山一带,北邻牛圈子-洗肠井缝合带产出。该区先后发现了鹰嘴红山、国庆、望旭山等钨矿床,其中国庆钨矿规模有望达大型以上。经过野外调研,发现该地区钨矿床成因与区域大面积出露的中酸性花岗岩关系密切。因此,加强该区的地质、含矿中酸性花岗岩岩体成因及其产出的构造背景研究对认识该区构造演化,总结区域成矿规律具有重要的意义。本文通过对与钨矿成矿关系密切的钾长花岗岩主量元素、微量元素和同位素年代学研究,来探讨该岩体的成因、构造背景及其地质意义。

1 区域及矿区基本地质特征

北山地区发育多个构造块体,北山造山带是由这些块体通过构造拼贴而形成的(左国朝等,1987;刘雪亚等,1995;聂风军等,2002)。国庆钨矿位于红柳河-牛圈子-洗肠井断裂带以南约15 km处的马鬃山地块与公婆泉-月牙山地块之间。根据构造地层关系和化石证据,形成月牙山蛇绿岩带的洋盆于中

奥陶世晚期发育成熟,于晚奥陶世中期开始闭合,并逐步形成一套包括蛇绿岩混杂岩在内的叠瓦状推覆构造(左国朝等,1990;周国庆等,2000)。此后该地区进入陆内演化阶段,并伴随陆内造山和深部地质作用,发育一系列中酸性侵入岩(图1)。

国庆钨矿大地构造位于塔里木板块东北缘,盘陀山-古铜井近东西向挤压隆起带西段,区域出露的地层主要有:中元古界长城系白湖群浅海相陆缘碎屑岩系,以成熟度较高的变质石英砂岩、绢云母粉砂质板岩为主,变质程度较低;蓟县系泥质粉砂岩、白云质大理岩及硅化大理岩;新元古界青白口系灰岩、变质粉砂岩及粉砂质板岩;中部及西部可见二叠系双堡塘组灰色砾岩、砂岩、粉砂岩及侏罗系赤金桥组灰色砂砾岩、粉砂质泥岩。

矿区内中酸性侵入岩发育,早期侵入岩为花岗闪长岩,晚期侵入岩为红色钾长花岗岩,钨矿化与后期红色钾长花岗岩成矿关系密切。钾长花岗岩侵入体平面上呈东西方向展布,岩体与围岩地层的外接触带可见热接触变质现象,局部可见石英斜长斑岩以及云英岩化花岗岩。

矿体呈细脉状和似层状(图2a),沿走向 125° 展布。矿石主要呈细脉浸染状构造、脉状构造。矿石矿物为黑钨矿、白钨矿。矿石类型可分为电气石化-云英岩化钾长花岗岩型钨矿石、云英岩化-电气石化花岗质细晶岩脉型钨矿石和电气石-石英细脉型钨矿石。

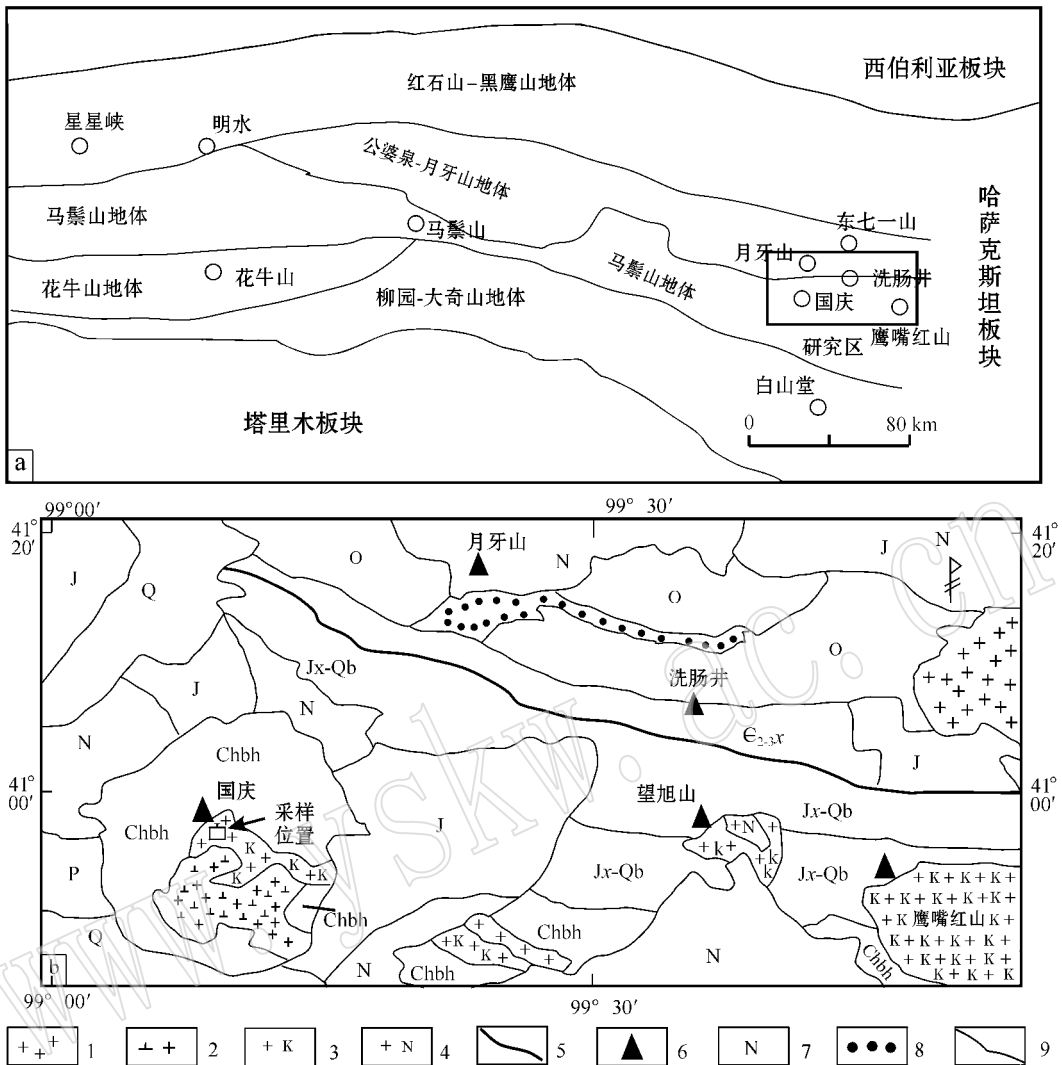


图 1 北山区域构造单元划分(a) [据聂凤军等(2002)修改]和国庆钨矿区域地质简图(b)
(据甘肃省地质局地质力学区域测量队 1:20 万五道明幅修改)

Fig. 1 Tectonic sketch map of Beishan area (a, modified after Nie Fengjun *et al.*, 2002) and geological sketch map of Guoqing tungsten deposit (b, modified after Wudaoming Sheet of 1:200 000 regional survey by Regional Geomechanic Surveying Party, Gansu Bureau of Geology)

1—花岗岩; 2—花岗闪长岩; 3—钾长花岗岩; 4—斜长花岗岩; 5—月牙山-洗肠井大断裂; 6—钨矿床(点); 7—地层及时代; 8—蛇绿岩套; 9—地层界线; Chbh—长城系白湖组; Jx-Qb—蓟县系-青白口系; O—奥陶系; P—二叠系; J—侏罗系; Q—第四系; N—新第三系
1—granite; 2—granodiorite; 3—K-feldspar granite; 4—plagioclase granite; 5—Yueyashan-Xichangjing great fault; 6—tungsten ore deposit (ore spot); 7—Strata and age; 8—ophiolite suite; 9—stratigraphic boundary; Chbh—Baihu Formation of Changchenian System; Jx-Qb—Jixianian System-Qingbaikouan System; O—Ordovician; P—Permian; J—Jurassic; Q—Quaternary; N—Neogene

2 样品岩相学、测试方法与分析结果

2.1 国庆岩体岩相学特征

本文所采集的样品为晚期侵入的钾长花岗岩, 选择无矿化、无明显蚀变新鲜的岩石为研究对象。岩体手标本为浅肉红色, 中细粒结构, 块状构造。可

见钾长石、石英、白云母等矿物。室内镜下鉴定该岩体主要组成矿物为微斜长石(55%~65%) (图 2c), 单偏光镜下表面呈灰白色, 负低突起, 自形程度较差, 可见特征的格子双晶(图 2d), 局部有弱的绢云母化。石英含量约 25%~30%, 无色透明, 无节理, 表面光滑, 常呈大小不等的粒状充填于长石颗粒之间。白云母局部可见, 分布不均匀主要呈片状, 呈条纹状

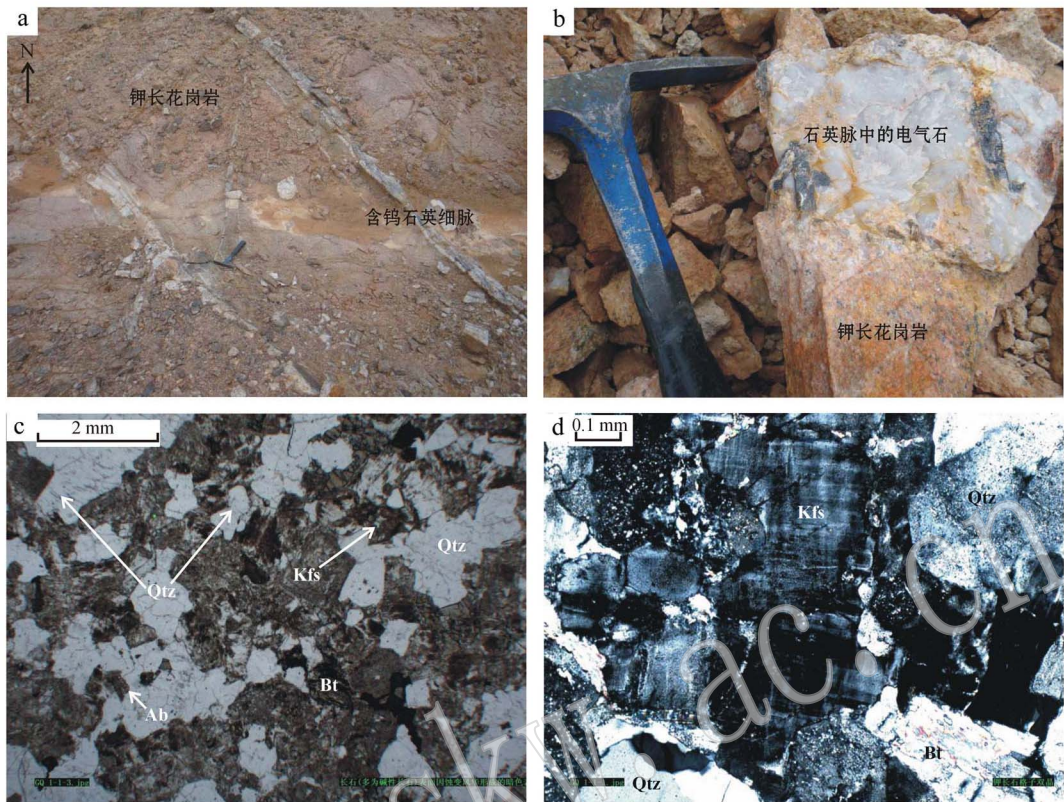


图 2 国庆钾长花岗岩体野外及镜下特征

Fig. 2 Photographs of samples (a, b), microphotographs(c, d) of K-feldspar granite in Guoqing tungsten deposit

集合体产出。斜长石少量。副矿物有磁铁矿、钛铁矿、榍石、独居石、锆石、磷灰石等。野外可见岩体有电气石化(图 2b)。

2.2 分析方法

本次研究共测试分析了 8 件与成矿密切相关的钾长花岗岩样品,所有样品测试项目均由湖北省地质矿产勘查开发局实验测试中心完成。检测温度为 10~23℃,湿度为 33%~60%。主量元素分析仪为荷兰产 PW2440 波长色散 X 荧光光谱仪,分析精度优于 3.2%,稀土元素为法国产 JY38S 等离子体原子发射光谱,分析精度优于 4%。

花岗岩锆石年代学研究样品挑样及制靶由河北省廊坊市区域地质矿产调查研究所实验室完成。首先将锆石样品置于环氧树脂中,进行抛光使锆石核心出露再进行阴极发光显微照相。同时结合反射光和透射光,观察锆石结晶形态、颜色、内部包裹体、透明度、裂隙等,挑选出细长柱状、包裹体数量较少、具有明显的岩浆震荡环带、直线生长纹的自形岩浆锆石晶体。锆石原位微区测试在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)激光剥蚀

等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上完成,激光束斑直径为 32 μm 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气。U-Th-Pb 同位素组成分析以锆石 91500 作为外标,微量元素以 SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标,详细分析流程和原理参照 Yuan 等(2004)所报道的进行。

2.3 分析结果

2.3.1 含钨花岗岩地球化学特征

主量微量元素分析结果见原始数据分析(表 1),国庆钨矿与成矿密切相关的钾长花岗岩 SiO_2 含量较为集中地分布在 73.31%~74.36%, Na_2O 和 K_2O 的含量分别为 3.4%~3.69% 和 4.58%~4.74%, MgO 含量变化范围为 0.22%~0.27%, Al_2O_3 变化范围为 14.15%~14.54%, TiO_2 变化范围为 0.1%~0.13%, P_2O_5 含量变化为 0.08%~0.13%, A/CNK 变化范围为 1.23~1.28,均大于 1.1,属于过铝质系列。钾长花岗岩里特曼指数 δ 变化范围为 2.06~2.22,属于钙碱性系列。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 岩浆系列判别图解中投点集中于高钾钙碱性系列(图 3)。

微量元素分析结果表明:钨矿钾长花岗岩稀土元素总量($\sum\text{REE}$)介于 39.57×10^{-6} ~ 60.66×10^{-6}

表 1 国庆钾长花岗岩主量元素($w_B/\%$)与稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 1 Content of trace elements($w_B/10^{-6}$) and major elements($w_B/\%$) in Guoqing K-feldspar granite

样号	GQ-1	GQ-2	GQ-3	GQ-4	GQ-5	GQ-6	GQ-7	GQ-8
SiO ₂	74.12	74.36	74.34	74.71	74.00	74.31	73.96	74.27
TiO ₂	0.13	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Al ₂ O ₃	14.35	14.24	14.15	14.22	14.50	14.37	14.54	14.24
Fe ₂ O ₃	0.85	0.88	0.99	0.70	0.74	0.70	0.69	0.70
FeO	0.5	0.38	0.37	0.33	0.42	0.53	0.68	0.63
MnO	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04
MgO	0.27	0.27	0.22	0.22	0.27	0.24	0.26	0.27
CaO	0.55	0.54	0.56	0.57	0.56	0.54	0.58	0.55
Na ₂ O	3.46	3.43	3.59	3.61	3.69	3.44	3.51	3.4
K ₂ O	4.67	4.67	4.58	4.59	4.62	4.61	4.59	4.74
P ₂ O ₅	0.08	0.08	0.08	0.08	0.12	0.11	0.13	0.11
Rb	313	311	292	295	307	303	301	301
Sr	66.6	67.2	66.3	67.5	66.5	66.8	67.9	67.6
Y	18.3	16.7	15.2	16.7	16.9	16.1	17.2	14.4
Zr	68.2	65.4	63.1	64	62.4	61.3	62	61.4
Nb	15	14.9	12.3	11.9	9.38	10.2	14.6	10.3
Ba	262	251	261	268	255	267	255	253
La	11	10.5	10.5	11.6	8.7	7.93	10.2	6.4
Ce	22.6	22.9	23.5	22.2	19	16.1	21.1	14.3
Pr	2.85	2.65	3.03	2.75	2.34	2.01	2.59	1.74
Nd	9.78	9.34	8.87	9.87	8.05	7.46	9.4	5.76
Sm	2.69	2.56	2.57	2.65	2.44	2.2	2.75	1.81
Eu	0.55	0.52	0.54	0.58	0.48	0.47	0.54	0.4
Gd	3.06	2.93	2.76	3.08	2.8	2.52	3.18	2.23
Tb	0.54	0.56	0.5	0.52	0.52	0.48	0.58	0.44
Dy	3.26	3.22	2.89	3.1	3.14	3.02	3.42	2.76
Ho	0.6	0.6	0.54	0.58	0.57	0.56	0.61	0.51
Er	1.69	1.6	1.46	1.57	1.64	1.51	1.68	1.44
Tm	0.25	0.25	0.23	0.23	0.23	0.24	0.25	0.22
Yb	1.55	1.57	1.41	1.53	1.48	1.45	1.57	1.35
Lu	0.24	0.23	0.22	0.24	0.23	0.22	0.23	0.21
Hf	2.4	2.4	2.2	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1
Ta	2.68	2.45	2.41	2.42	1.81	1.82	1.59	2.03
Th	4.67	3.76	5.11	4.38	4.75	5.75	5.1	6.28
U	1.5	1.53	1.67	1.34	1.67	1.93	1.51	2.09

之间, $LREE/HREE = 3.32 \sim 4.90$, $(La/Yb)_N = 3.40 \sim 5.44$, 反映国庆钾长花岗岩总体为轻稀土元素富集, 轻、重稀土元素之间分馏较低。

在稀土元素 C1 球粒陨石标准化图解(图 4)中, 国庆钾长花岗岩表现出右倾趋势, 具有较明显的 Eu 负异常特征(δEu 介于 0.56~0.62 之间), Ce 显示弱的负异常(δCe 介于 0.93~1.94 之间)。在 ORG 标准化的微量元素蛛网图上, 高场强元素(HFSE)和大离子亲石元素(LILE)有较明显的分异, 样品具有 K、Rb、Ba、Th 等元素富集, Nb、Ce、Zr、Hf、Sm、Y、Yb 等元素亏损的特征。

2.3.2 锆石形貌及 CL 结构

国庆花岗岩岩体锆石形态和阴极发光图像如图 5 所示, 钾长花岗岩中锆石主要为无色透明~浅黄白色、近等粒状~长柱状, 长度约 80~150 μm 之间。阴极发光图像显示锆石主要为以下两个类型: 具有典型岩浆振荡环带的锆石(GQ-6、GQ-11、GQ-22)和具有核边结构、包括具微弱环带晶核被新生岩浆锆石包裹和存在窄的次生增生边锆石(谭俊等, 2008)(GQ-2、GQ-24、GQ-25、GQ-14、GQ-5)。

钾长花岗岩锆石微量元素测试(表 2)Th、U 含量分别为 $91.73 \times 10^{-6} \sim 378.07 \times 10^{-6}$ 和 $205.33 \times 10^{-6} \sim 743.57 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.27~0.46, 明显大于变质锆石 Th/U 比值(< 0.1)(Hoskin and Black,

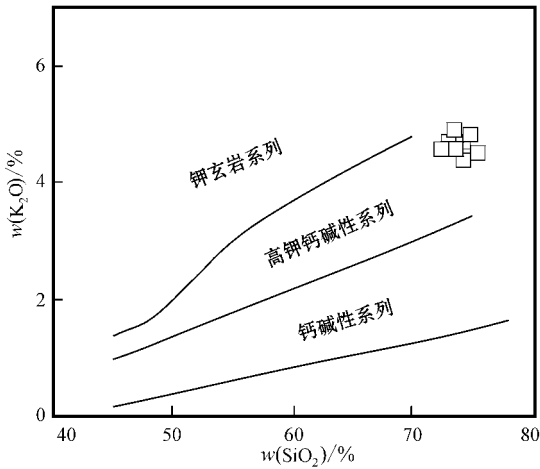


图3 国庆钨矿钾长花岗岩 K_2O-SiO_2 岩浆系列判别图解(据 Peccerillo 和 Taylor, 1976)

Fig. 3 K_2O-SiO_2 diagrams of K-feldspar in Guoqing tungsten deposit (after Peccerillo and Taylor, 1976)

2000; Griffin *et al.*, 2004), 表明其为岩浆成因。

LA-ICP-MS 分析测试结果中, 剔除的年龄数据有 12 个, 如 GQ-2、GQ-17、GQ-23、GQ-24 均为具有内核的锆石, 获得年龄为前寒武纪的内核年龄, 可能为前寒武纪老结晶基底的继承锆石年龄; 如 GQ-10、GQ-20, ^{204}Pb 含量为局部异常高值, 可能是锆石中存在金属显微包体所致; 如 GQ-8、GQ-16, $^{206}Pb/^{238}U$ 与 $^{207}Pb/^{235}U$ 比值随时间呈上升趋势, 显示为混合年龄, 可信度较差; 如 GQ-12、GQ-15、GQ-19, 测试曲线紊乱, 透射光检查发现有若干微裂隙存在。其余的 13 个数据点, 在谐和图中成群分布在一组曲线上及其附近, 年龄集中在 422~461 Ma 之间, 加权平均年

龄为 439.1 ± 8 Ma (MSWD=2.8)(图 6)。

3 讨论

3.1 构造环境分析

区域上, 北山地区处于西伯利亚板块-哈萨克斯坦板块-塔里木板块拼贴交汇处。北山地区自前寒武纪至三叠纪末其内部的若干构造单元经历了复杂的构造演化。李四光、黄汲清等老一辈地质学家早在 20 世纪 70~80 年代对中国西北地区构造体系做了深入的探讨(黄汲清等, 1980), 并按板块构造学说对中国板块构造轮廓做了划分, 奠定了北山地区板块框架。此后, 一些专家学者对北山地区进行了系统的研究, 对北山地区内部若干微板块的构造演化提出了不同的观点, 对不同构造单元的演化(左国朝等, 1987; 任纪舜, 1984; 刘雪亚等, 1995)及其与成矿的关系进行了深入的探讨。

北山地区的地壳演化与金属成矿作用历史可追溯到中元古代, 马鬃山中间地块和塔里木板块敦煌地块北缘安北-旧寺墩构造带就是这一时期构造演化的产物, 发生了中酸性火山喷发、古陆壳剥蚀与沉积作用、岩浆侵入和区域变质作用。在红柳河-牛圈子-洗肠井蛇绿岩带以北的下寒武统黑色岩系中富含磷、砷、铀、钼、铁锰等成矿元素, 局部地段(破城山、大豁落山等)富集成磷矿、砷矿、热水沉积型重晶石矿, 指示红柳河裂谷水体较深且相对缺氧, 显然裂谷已演化至一定的规模(王立社等, 2009)。当红柳河-牛圈子-洗肠井洋盆达到威尔逊旋回顶峰后, 早古生代中期板块构造格局发生改变, 进入俯冲闭合

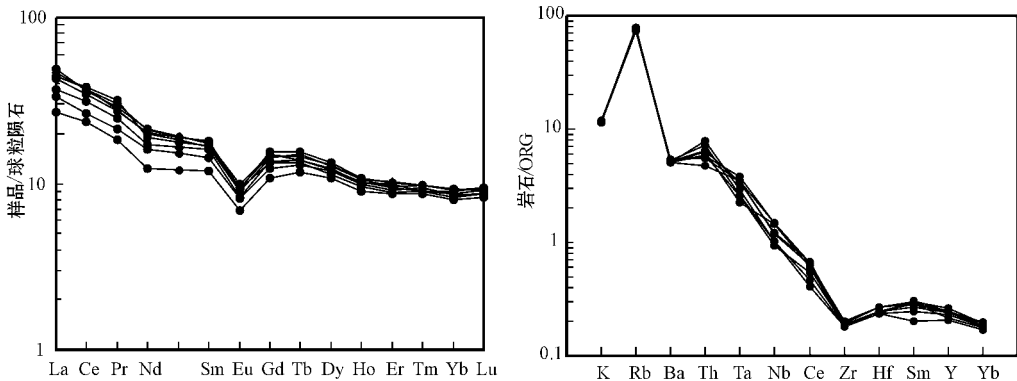


图4 国庆钨矿钾长花岗岩稀土元素配分曲线及微量元素蛛网图(据 McDonough & Sun, 1995)

Fig. 4 Chondrite normalized REE patterns of K-feldspar and spider diagrams of trace elements in Guoqing tungsten deposit

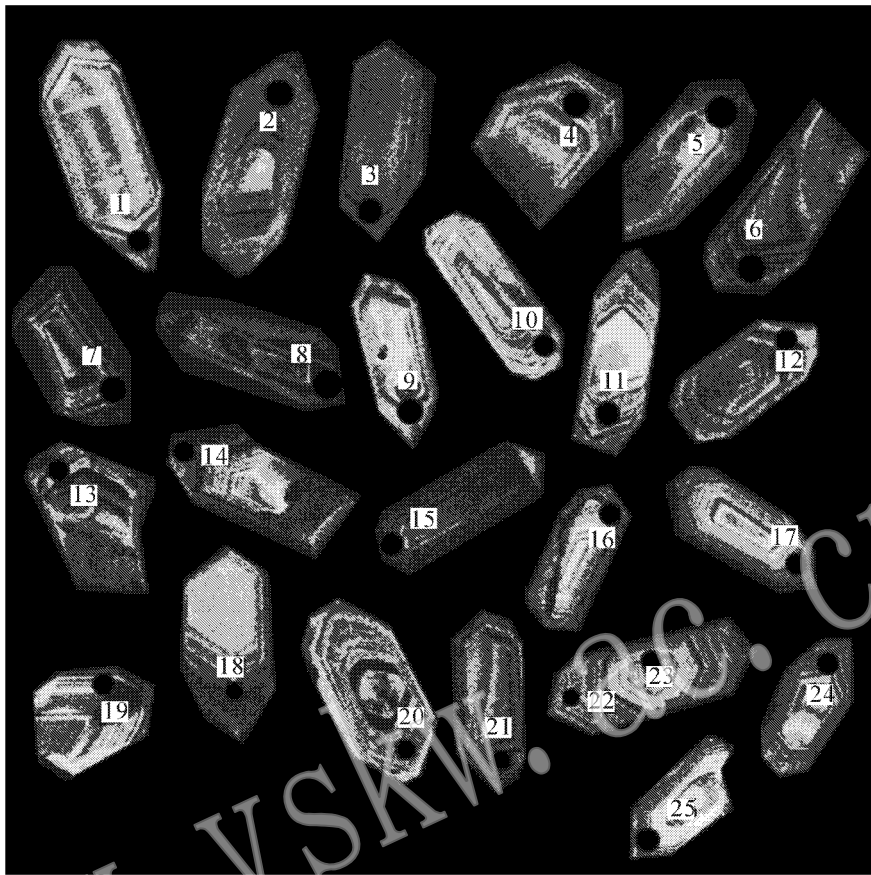


图 5 国庆花岗岩岩体锆石形态和阴极发光图像
Fig. 5 CL images of zircon crystals form K-feldspar granite

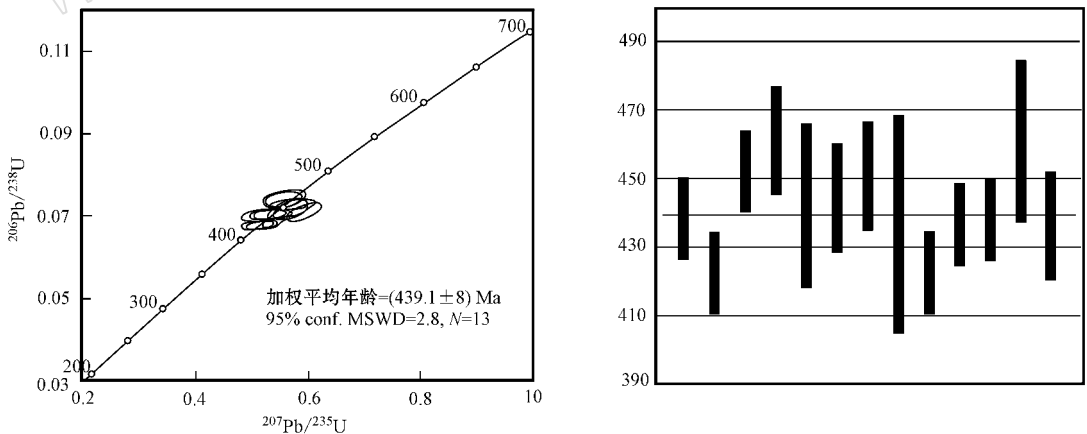


图 6 国庆钾长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图
Fig. 6 LA-ICP-MS U-Pb concordia plot for zircon of Guoqing K-feldspar granite

演化阶段,在其西部北缘形成了中上志留统公婆泉群岛弧相火山沉积岩系(左国朝等,1990;戴霜等,2003;何世平等,2005)。本次研究显示红柳河-牛圈子-洗肠井洋盆东部南缘于早志留世就已进入碰撞

造山作用期,残余洋壳连同两端板块发生较强烈的挤压抬升。王立社等(2009)报道红柳河洋盆北部哈尔滨头口布花岗岩于早中泥盆世(锆石 U-Pb 同位素年龄为 387.6 ± 8.2 Ma)侵位,岩体中捕获或继承有晚蓟县

表 2 国庆鹤矿钾长花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb data for zircons of Guoqing K-feldspar granite

测试点号	^{232}Th		^{238}U		Th/U	同位素比值				年龄/Ma					
	^{232}Th	^{238}U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ
	GQ-1	131.29	405.36	0.533 9		0.012 1	0.070 3	0.000 5	0.021 5	0.000 4	434	8	438	3	431
GQ-2	118.23	430.52	0.935 1	0.028 0	0.100 3	0.001 8	0.040 7	0.001 1	670	15	616	10	806	22	
GQ-3	194.28	400.92	0.520 6	0.012 0	0.067 7	0.000 5	0.020 9	0.000 4	426	8	422	3	419	8	
GQ-4	121.83	422.51	0.579 9	0.013 6	0.072 6	0.000 6	0.022 0	0.000 5	464	9	452	3	439	9	
GQ-5	136.49	367.24	0.555 8	0.014 4	0.074 1	0.000 7	0.022 6	0.000 5	449	9	461	4	451	9	
GQ-6	208.64	485.73	0.594 2	0.012 9	0.070 9	0.000 9	0.018 4	0.000 8	474	8	442	6	369	15	
GQ-7	106.46	392.22	0.565 5	0.013 9	0.071 3	0.000 6	0.023 0	0.000 5	455	9	444	4	460	11	
GQ-8	238.07	593.11	0.636 5	0.023 1	0.067 2	0.000 4	0.021 8	0.000 9	500	14	419	3	436	17	
GQ-9	127.30	381.12	0.564 6	0.013 9	0.072 4	0.000 6	0.023 5	0.000 5	455	9	450	4	470	10	
GQ-10	378.88	826.71	0.665 5	0.019 2	0.059 3	0.000 5	0.019 8	0.000 4	518	12	372	3	395	9	
GQ-11	133.68	522.74	0.772 9	0.018 4	0.089 3	0.001 2	0.033 0	0.000 7	581	11	551	7	656	13	
GQ-12	148.99	574.10	0.997 6	0.033 1	0.097 4	0.002 0	0.027 3	0.000 7	703	17	599	11	545	14	
GQ-13	128.17	441.20	0.550 4	0.012 3	0.070 1	0.001 3	0.023 4	0.000 6	445	8	437	8	467	11	
GQ-14	189.15	449.43	0.511 7	0.011 5	0.067 7	0.000 5	0.020 7	0.000 4	420	8	422	3	415	8	
GQ-15	168.37	743.57	0.801 1	0.172 2	0.069 6	0.000 7	0.028 3	0.000 9	597	97	434	4	564	17	
GQ-16	149.59	205.33	3.552 3	0.071 4	0.270 6	0.002 6	0.082 9	0.001 7	1 539	16	1 544	13	1 609	31	
GQ-17	91.73	337.57	1.238 3	0.044 1	0.117 2	0.002 6	0.050 5	0.001 5	818	20	714	15	996	29	
GQ-18	108.42	386.48	0.528 3	0.013 1	0.070 1	0.000 5	0.021 2	0.000 5	431	9	437	3	424	9	
GQ-19	158.07	516.70	1.559 6	0.121 4	0.074 1	0.001 4	0.090 8	0.000 3	954	48	461	8	1 756	153	
GQ-20	232.52	687.42	0.809 4	0.015 0	0.061 9	0.000 5	0.031 3	0.000 6	602	8	387	3	622	12	
GQ-21	130.18	387.70	0.560 1	0.013 0	0.070 3	0.000 5	0.022 8	0.000 5	452	8	438	3	457	10	
GQ-22	92.61	346.40	0.560 1	0.015 0	0.074 1	0.000 9	0.025 5	0.000 8	452	10	461	6	508	16	
GQ-23	293.28	311.86	1.591 5	0.039 7	0.137 4	0.002 3	0.059 3	0.001 0	967	16	830	13	1 164	20	
GQ-24	92.22	246.13	1.987 6	0.080 7	0.176 1	0.005 8	0.060 7	0.001 8	1 111	27	1 046	32	1 191	34	
GQ-25	131.39	368.60	0.514 9	0.013 5	0.070 0	0.000 6	0.019 6	0.000 5	422	9	436	4	391	9	

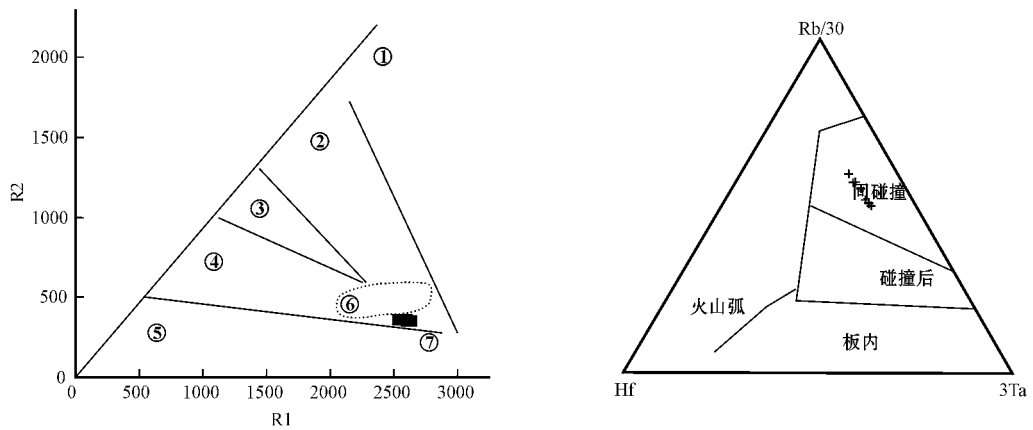


图 7 国庆钨矿钾长花岗岩 R2 - R1 图解和 Rb/30 - Hf - 3Ta 图解 据 Batchelor & Bowden , 1985)

Fig. 7 R2 - R1 and Rb/30 - Hf - 3Ta diagrams of Guoqing K-feldspar granite

- ①—地幔斜长花岗岩 ; ②—板块碰撞前花岗岩 ; ③—板块碰撞后隆起花岗岩 ; ④—一晚造山花岗岩 ; ⑤—非造山区 A 型花岗岩 ;
- ⑥—同碰撞花岗岩 ; ⑦—造山期后 A 型花岗岩
- ①—mantle plagioclase granite ; ②—granite before plate collision ; ③—uplifted granite after plate collision ; ④—late orogenic granite ;
- ⑤—A-type granite of nonorogenic area ; ⑥—syn-collision granite ; ⑦—post-orogenic A type granite

纪源区锆石(锆石 U-Pb 同位素年龄为 1172 ± 7 Ma), 花岗岩同位素年龄及其地球化学特征共同表明 红柳河-牛圈子-洗肠井构造带在中泥盆世时, 进入由挤压向伸展环境转换的构造体制。

在研究区西部红柳河地区, 红柳河北闪长岩岩体 (441.4 ± 1.6 Ma) 和前进工业区花岗岩岩体 (440.9 ± 3.1 Ma) (李伍平等, 2001) 证实红柳河地区存在晚加里东期岩浆活动, 与早古生代晚期红柳河-牛圈子-洗肠井古洋盆闭合有关(南天山洋), 上侵玄武质岩浆侵入地壳诱发前寒武结晶基底重熔, 形成红柳河北闪长岩岩体和前进工业区花岗岩岩体。侵入到红柳河蛇绿岩中未变形变质花岗岩的形成时代为 404.8 ± 5.2 Ma, 给出了蛇绿岩侵位的上限, 即红柳河蛇绿岩代表的洋壳至少在 404.8 ± 5.2 Ma 前在红柳河地区已经闭合, 蛇绿岩构造侵位已经完成 (张元元等, 2008)。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究确定了红柳河古洋盆演化的过程, 洋盆扩张发育在 462 Ma 之前, 并在 412 Ma 前闭合(郭召杰等, 2006)。总体上, 该洋盆闭合时间东西存在一定的时间差, 但相隔时间不长, 具剪刀式的闭合特征(贾承造, 1997), 与本区处于同一构造体系中。

研究区钾长花岗岩投点位于碰撞型花岗岩附近, 在微量元素 Rb/30 - Hf - 3Ta 构造判别图解(图 7)上, 钾长花岗岩位于同碰撞花岗岩区; 在 Pearce 等 (1984) 的 Rb - (Y + Nb) 和 Rb - (Yb + Ta) 等非活动性元素构造环境判别图解(图 8)中, 国庆钾长花岗岩

投点均位于同碰撞区域, 显示出相同的构造环境, 与区域构造演化相吻合。综上所述, 本文认为国庆钨矿钾长花岗岩与“红柳河-牛圈子-洗肠井洋盆”闭合、早志留世同碰撞造山事件密切相关。在大陆主造山期, 由于大陆板块间发生强烈的碰撞作用, 地壳受到强烈的构造挤压和缩短, 导致下地壳增厚和壳内构造剪切作用。在此背景下, 地温梯度导致增厚的下地壳地温升高, 加上构造剪切作用所产生的热, 可诱发下地壳物质的部分熔融, 其中可能有外来流体的加入(张宏飞等, 2007)。

3.2 国庆钾长花岗岩基本属性及其成因

国庆钨矿空间上与钾长花岗岩关系密切, 钾长花岗岩里特曼指数变化范围 2.06 ~ 2.22, 属于钙碱性系列。SiO₂ 含量分布 73.31% ~ 74.36%, 全碱含量 8.05% ~ 8.31%。A/CNK 变化范围为 1.23 ~ 1.28, 均大于 1.1, 属于过铝质花岗岩, 暗示是沉积岩同熔的结果, 形成于大陆碰撞环境。样品主量元素 K₂O > N₂O, CIPW 标准矿物计算结果 (2.66 ~ 3.27 > 1) 表明含有刚玉分子, 分异指数 (DI) 为 92.09 ~ 92.61, 说明该岩体具有陆壳沉积物熔融形成的 S 型花岗岩的特征(图 9)。总体上, 国庆钾长花岗岩体是以高硅富铝、多碱质和挥发组分为特征的 S 型花岗岩。

稀土元素配分图解显示国庆钨矿钾长花岗岩具有一定的负铕异常, 可能与原岩熔融过程斜长石组分残留于固相有关(毛景文等, 1995)。大离子亲石元素 Ba 和 Sr 属不相容元素, Rb 属高度不相容元素,

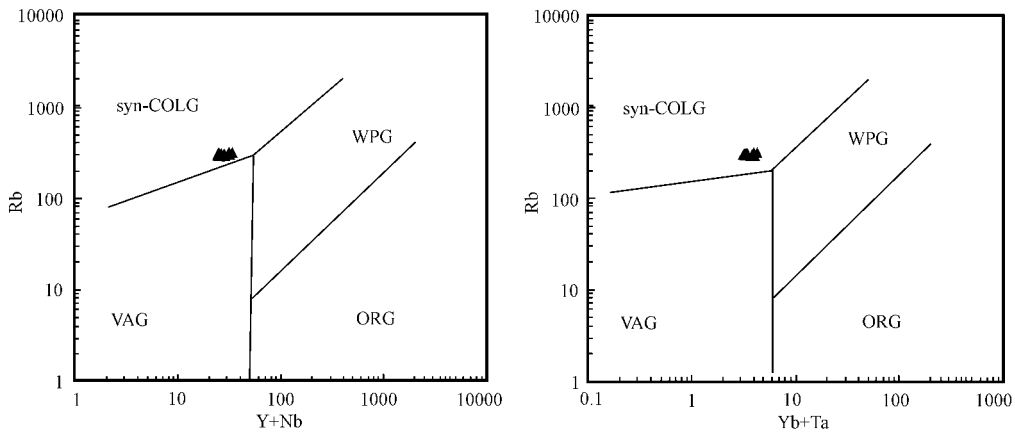


图 8 国庆钾长花岗岩 $Rb-(Y+Nb)$ 、 $Rb-(Yb+Ta)$ 非活动性元素构造环境判别图解 (据 Peace 等, 1984)

Fig. 8 $Rb-(Y+Nb)$ and $Rb-(Yb+Ta)$ diagrams of Guoqing K-feldspar granite

Syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—岛弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩类

Syn-COLG—syn-collision granite; VAG— island arc granite; ORG—ocean ridge granite; WPG— intraplate granitoids

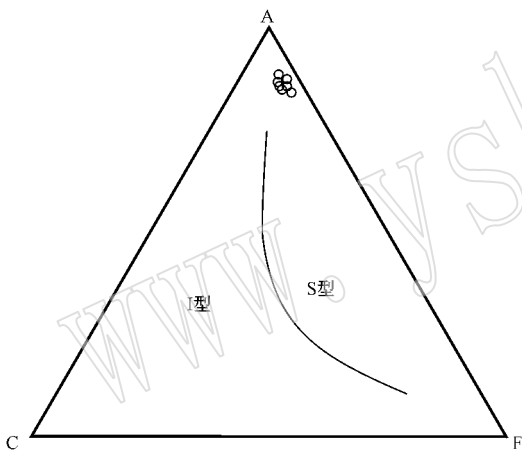


图 9 国庆钾长花岗岩 ACF 图解 (据 Nakada & Takahashi, 1979)

Fig. 9 ACF plot of Guoqing K-feldspar granite (from Nakada & Takahashi, 1979)

其比值 Rb/Ba 及 Rb/Sr 对岩浆作用敏感, 强烈的结晶分异作用可使 Rb/Ba 及 Rb/Sr 比值增高 (邱瑞龙, 1998)。国庆钾长花岗岩岩体 Rb/Sr 比值介于 4.37~4.70 之间, 这种高 Rb/Sr (>2) 的花岗岩与含水矿物云母脱水熔融有关, 而低 Rb/Sr 比值 (<2) 则是含水条件下部分熔融的初始阶段特征 (Harrison *et al.*, 1999)。一般来说, 各类岩浆岩中的 Nb 含量都高于 Ta 含量, 但在岩浆结晶作用晚期, Ta 趋向富集, 尤其是在花岗岩中, 从早期相到晚期相, Ta 逐渐富集, Nb/Ta 比值逐渐减小 (华仁民等, 2003)。国庆钾长花岗岩 Nb、Ta 含量较高, 且 Ta 含量超过了 Nb 含量, 从一个侧面说明含矿岩体经历了高度演

化, 为钨元素富集奠定了基础。

Sylvester (1998) 研究表明, 相对泥质岩熔融生成的强过铝质花岗岩, 砂屑岩熔融生成的强过铝质花岗岩 CaO/Na_2O 比值大于 0.3, 国庆钾长花岗岩 CaO/Na_2O 比值变化范围 0.152~0.165, 均小于 0.3, 指示其形成的原岩主要是以含泥质成分较高的前寒武纪结晶基底重熔形成。本次研究获得国庆钾长花岗岩岩体年龄为 439.1 ± 8 Ma, 锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 内核年龄显示 (GQ-2 为 616 Ma, GQ-17 为 996 Ma, GQ-23 为 830 Ma, GQ-24 为 1 046 Ma) 其形成年龄为前寒武纪, 同样显示老的结晶基底可能为岩体的原岩。

3.3 区域成矿研究

本区已证实的矿床有鹰嘴红山石英脉型黑钨矿、国庆石英脉型钨矿、望旭山钨矿床 (点), 这些矿床与志留-泥盆纪花岗岩侵入体具有密切的时空关系, 钨锡-钨钼矿化均产于花岗岩岩体接触带及其周围的裂隙系统内。鹰嘴红山钨矿锆石 U-Pb 法测定岩体花岗岩年龄为 373.8~398.9 Ma (杨合群等, 2006), 与本文国庆钨矿钾长花岗岩相差约 40 Ma, 本区大面积分布的花岗岩指示在志留-泥盆纪洋盆闭合及后期伸展过程中存在一期重要的构造-岩浆侵入活动。区域研究资料显示: 本地区处于马鬃山地块与公婆泉-月牙山地块碰撞汇聚带, 两者碰撞拼合及后期的拉张回返导致本区大规模的中酸性岩浆侵入活动。岩浆侵入活动和成矿流体伴随区域构造进入浅部, 进而形成高钾高硅花岗岩及中高温气液相关的矿床。1:5 万化探成果显示, 区域上 W、Sn、Mo 在区域上形成明显的异常带, 并受构造和侵入岩

控制明显。本区出露的地层为前寒武纪弱变质的细碎屑岩, W-Sn-Mo 等高温成矿元素含量较高, 为 S 型花岗岩提供了良好的矿源层。岩浆侵位之后, 在热驱动下使老地层中 W-Sn-Mo 活化迁移, 与地壳重熔型岩体后期演化含矿热液共同叠加, 在构造有利部位成矿。因此, 加强对本区志留—泥盆纪花岗岩的研究, 对于区内矿产评价和矿产勘查都有十分重要的意义。

4 结论

对内蒙古北山国庆钾长花岗岩的主量、微量元素及年代学分析研究的结果表明, 该岩体为高钾钙碱性系列, 属于 S 型花岗岩。年代学研究显示红柳河—牛圈子—洗肠井洋盆闭合时间可能为早志留世。国庆钨矿位于西伯利亚—塔里木板块之间, 钾长花岗岩形成于马鬃山地块与月牙山地块同碰撞阶段。综合国庆岩体岩石地球化学特征及区域构造背景, 本文认为对志留—泥盆纪同碰撞及后期拉伸阶段形成的酸性花岗岩展开以 W-Sn-Mo 为主的多金属矿的找矿工作有一定的前景。

致谢 本文是 827 项目组集体讨论的成果, 野外工作得到西安地质矿产研究所国庆项目组的大力协助, 吕新彪教授、张振飞教授在成文过程中给予了细心的指导。特别感谢匿名审稿人提出了宝贵的修改意见。

References

- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48 : 43~55.
- Dai Shuang, Fang Xiaomin, Zhang Xiang, *et al.* 2003. Island arc north of the Tarim-SK plate : the geology and geochemistry of Gongpoquan Group[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 39 (4): 80~87 in Chinese with English abstract.
- Griffin W L, Belousova E A and Shee S. 2004. Crustal evolution in the northern Yilarn Craton : U-Pb and Hf isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Res.*, 131(3~4): 231~282.
- Guo Zhaojie, Shi Hongyu, Zhang Zhicheng, *et al.* 2006. The tectonic evolution of the south Tianshan paleo-oceanic crust inferred from the spreading structures and Ar-Ar dating of the Hongliuhe ophiolite, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 95~102 in Chinese with English abstract.
- Harrison T M, Grove M, McKeegan K D, *et al.* 1999. Origin and episodic emplacement of the Manaslu intrusive complex, central Himalaya[J]. *Petrol.*, 40 : 3~19.
- He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, *et al.* 1994. Xinjiang Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization[M]. Urumqi : The Peoples Press of Xinjiang (in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Zhou Huiwu, Ren Bingchen, *et al.* 2005. Crustal evolution of Palaeozoic in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia, China[J]. *North-western Geology*, 38(3): 7~15 in Chinese with English abstract.
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Metamorph. Geol.*, 8 : 423~439.
- Hu Aiqin, Wang Zhonggang and Tu Guangzhi. 1997. Geological Evolution and Diagenetic-Mineralization Regularity of Northern Xinjiang [M]. Beijing : Science Press (in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin, Zhang Wenlan, Chen Peirong, *et al.* 2003. Comparison in the Characteristics, Origin, and Related Metallogeny between Granites in Dajishan and Piaotang, Southern Jiangxi, China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 609~619 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jiqing, Ren Jishun, Jiang Chunfa, *et al.* 1980. The Tectonic Characteristics of China and Its Evolution[M]. Beijing : Science Press (in Chinese with English abstract).
- Jia Chengzao. 1997. The Features of Structure and Petroleum Geology on Traim Basin of China[M]. Beijing : Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstract).
- Li Wuping, Wang Tao, Li Jinbao, *et al.* 2001. The U-Pb age of zircon from late caledonian granitoids in Hongliuhe area, east Tianshan mountains, northwest China and its geological implication[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3): 231~235 in Chinese with English abstract.
- Liu Xueya and Wang Quan. 1995. Tectonics of orogenic belts in Beishan MTS., western China and their evolution[J]. *Geoscience Research*, 28 : 37~48 in Chinese with English abstract.
- Mao Jingwen, Li Hongyan, Pei Rongfu, *et al.* 1995. Nd-Sr isotopic and petrogenetic studies of the Qianlishan granite stock, Hunan province[J]. *Mineral Deposits*, 14(1): 12~25 (in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the earth[J]. *Chemical Geology*, 120 : 223~253.
- Nakada S and Takahashi M. 1979. Regional variation in chemistry of the Miocene intermediate to felsic magmas in the outer zone and the Setouch province of Southwest Japan[J]. *Mining Geology*, 85(9): 571~582.
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Bai Tianming, *et al.* 2002. Metallogenic Studies and Ore Prospecting in the Conjunction Area of Inner Mongolia Autonomous Region, Gansu Province and Xinjiang Uygur Autonomous Region (Beishan MT.), Northwest China [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Petrol.*, 25(4): 956~983.
- Peccerino R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 50 : 63~81.

- Qiu Ruilong. 1998. Magmatic differentiation and genesis of Jiuhuashan granite [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 17(4): 308~315 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun. 1984. The continental tectonics of china [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, (3~4): 5~13 (in Chinese with English abstract).
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. *Lithos*, 45: 29~44.
- Tan Jun, Wei Junhao, Guo Lingli, et al. 2008. EPMA study of phenocrysts and zircon U-Pb dating of vein rocks and the enlightenment about lithospheric evolution in the Guocheng Area, Jiaodong Peninsula [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 38(8): 913~929 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lisha, Yang Jianguo, Xie Chunlin, et al. 2009. Geochronology and geochemistry of haergentoukoubu granites in the Beishan area, Gansu, China and their geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 377~387 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Li Ying, Yang Jianguo, et al. 2006. Main metallogenic characteristics in the Beishan orogen [J]. *Northwestern Geology*, 39(2): 78~95 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Geosand News*, 28: 353~370.
- Zhang Hongfei, Xiao Long, Zhang Li, et al. 2007. The geochemical characteristics and Pb-Sr-Nd isotopic compositions of Bikou granitoid rocks in Indo-Chinese epoch: the restriction on petrogenesis and its background, in the NW margin of the Yangtze block [J]. *Earth Science*, 37(4): 460~470 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuanyuan and Guo Zhaojie. 2008. Accurate constraint on formation and emplacement age of Hongliuhe ophiolite, boundary region between Xinjiang and Gansu Provinces and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 803~809 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Guoqing, Zhao Jianxin and Li Xianhua. 2000. Characteristics of the Yueyashan ophiolite from western Nei Mongol and its tectonic setting: Geochemistry and Sm-Nd isotopic constraints [J]. *Geochimica*, 29(2): 108~119 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao and He Guoqi. 1990. Plate Tectonics and Metallogenic Regulates in Beishan region [M]. Beijing: Peking University Press (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, He Guoqi, Jin Songqiao, et al. 1987. The Discovery of Nappe Structure and Ophiolite Mélange in the Early Paleozoic Ophiolite Belt, Baiyunshan-Yueyashan-Xichangjing Area in Beishan MT [C]. Beijing: Geological Publishing House, 51~57 (in Chinese with English abstract).
- 戴 霜, 方小敏, 张 翔, 等. 2003. 塔里木-中朝板块北缘志留纪公婆泉群火山岩地球化学及构造意义 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 39(4): 80~87.
- 郭召杰, 史宏宇, 张志诚, 等. 2006. 新疆甘肃交界红柳河蛇绿岩中伸展构造与古洋盆演化过程 [J]. *岩石学报*, 22(1): 95~102.
- 何国琦, 李茂松, 刘德全, 等. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社.
- 何世平, 周会武, 任秉琛, 等. 2005. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化 [J]. *西北地质*, 38(3): 7~15.
- 胡霏琴, 王中刚, 涂光炽, 等. 1997. 新疆北部地质演化及成岩成矿规律 [M]. 北京: 科学出版社.
- 华仁民, 张文兰, 陈培荣, 等. 2003. 赣南大吉山与漂塘花岗岩及有关成矿作用特征对比 [J]. *高校地质学报*, 9(4): 609~619.
- 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 1980. 中国大地构造及其演化 [M]. 北京: 科学出版社.
- 贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社.
- 李伍平, 王 涛, 李金宝, 等. 2001. 东天山红柳河地区晚加里东期花岗岩类岩石锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *地球学报*, 22(3): 231~235.
- 刘雪亚, 王 荃. 1995. 中国西部北山造山带的大地构造及其演化 [J]. *地学研究*, 28: 37~48.
- 毛景文, 李红艳, 裴荣富, 等. 1995. 湖南千里山花岗岩体地质地球化学及与成矿关系 [J]. *矿床地质*, 14(1): 12~25.
- 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 2002. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向 [M]. 北京: 地质出版社.
- 邱瑞龙. 1998. 九华山花岗岩岩浆分异特征及岩石成因 [J]. *岩石矿物学杂志*, 17(4): 308~315.
- 任纪舜. 1984. 中国大陆的组成、构造、演化和动力学 [J]. *地球科学*, 3~4: 5~13.
- 谭 俊, 魏俊浩, 郭玲利, 等. 2008. 胶东郭城地区脉岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及斑晶 EPMA 研究: 对岩石圈演化的启示 [J]. *地球科学*, 38(8): 913~929.
- 王立社, 杨建国, 谢春林, 等. 2009. 甘肃北山火山岩哈尔根头口布花岗岩年代学、地球化学及其地质意义 [J]. *地质学报*, 83(3): 377~385.
- 杨合群, 李 英, 杨建国, 等. 2006. 北山造山带的基本成矿特征 [J]. *西北地质*, 39(2): 78~95.
- 张宏飞, 肖 龙, 张 利, 等. 2007. 扬子陆块西北缘碧口块体印支期花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成: 限制岩石成因及其动力学背景 [J]. *地球科学*, 37(4): 460~470.
- 张元元, 郭召杰. 2008. 甘新交界红柳河蛇绿岩形成和侵位年龄的准确限定及大地构造意义 [J]. *岩石学报*, 24(4): 803~809.
- 周国庆, 赵建新, 李献华. 2000. 内蒙古月牙山蛇绿岩特征及形成的构造背景: 地球化学和 Sr-Nd 同位素制约 [J]. *地球化学*, 29(2): 108~119.
- 左国朝, 何国琦. 1990. 北山板块构造及成矿规律 [M]. 北京: 北京大学出版社.
- 左国朝, 何国琦, 金松桥, 等. 1987. 北山地区白云山-月牙山-洗肠井一带早古生代蛇绿岩带推覆构造及蛇绿混杂体的发现 [M]. 北京: 地质出版社, 51~57.

附中文参考文献

戴 霜, 方小敏, 张 翔, 等. 2003. 塔里木-中朝板块北缘志留纪公婆泉群火山岩地球化学及构造意义 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 39(4): 80~87.