

北山地区园包山一带晚石炭世早期花岗岩 地球化学特征及年代学研究

李 杰, 田 颖, 班长勇, 冯翼鹏, 陈圆圆, 李金和

(河北省区域地质调查院, 河北 廊坊 065000)

摘要: 园包山晚古生代花岗岩位于内蒙古额济纳旗园包山一带, 其岩体特征对红石山蛇绿岩带属性及北山北带的构造演化的重建具有重要意义。通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年, 确定园包山复式岩基中花岗闪长岩、二长花岗岩、奥长花岗岩的年龄分别为 317.1 ± 3.1 、 314.8 ± 2.7 和 313.7 ± 2.3 Ma, 均属晚石炭世。岩石地球化学分析表明, 园包山花岗岩高硅 ($\text{SiO}_2 = 67.77\% \sim 73.00\%$)、富钠 ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 1$), $A/\text{CNK} = 0.95 \sim 1.13$, 属偏铝到弱过铝质, 富集大离子亲石元素 (Rb、Ba、Th、K), 亏损高场强元素 (Ta、Nb、P、Ti), 具有中等强度的负铕异常 ($\delta\text{Eu} = 0.46 \sim 0.65$), 呈现出岛弧环境的岩石地球化学特征。其中奥长花岗岩与花岗闪长岩、二长花岗岩又有所不同, 岩石样品富硅, 具非常弱的负铕异常 ($\delta\text{Eu} = 0.81 \sim 0.99$), 高 Sr/Y 和 La/Yb, 在 Sr/Y-Y 图上落入埃达克岩区域。上述特征差异暗示两者具有不同的源区。综合区域地质资料来看, 晚石炭世早期研究区南侧红石山洋向北俯冲启动了这次大规模构造岩浆活动, 形成了具岛弧性质的园包山花岗岩复式岩基, 其中具埃达克质特征的奥长花岗岩来源于俯冲的洋板块的部分熔融, 暗示红石山洋可能属较为年轻的热洋壳。

关键词: 北山北部; 晚石炭世花岗岩; 岛弧; 埃达克岩

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)02-0160-13

Geochemical characteristics and chronology of early Late Carboniferous granites in Yuanbaoshan area, Beishan region

LI Jie, TIAN Ying, BAN Chang-yong, FENG Yi-peng, CHEN Yuan-yuan and LI Jin-he

(Hebei Academy of Regional Geological Survey, Langfang 065000, China)

Abstract: The Yuanbaoshan Late Carboniferous granite is located in the Yuanbaoshan area, Ejina Banner, Inner Mongolia. Its rock mass characteristics are of great significance for the study of the properties of the Hongshishan ophiolite belt and the reconstruction of the tectonic evolution of the northern Beishan region. LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating shows that the ages of granodiorite, monzonitic granite, and trondhjemite in the Yuanbaoshan composite batholith are 317.1 ± 3.1 Ma, 314.8 ± 2.7 Ma and 313.7 ± 2.3 Ma respectively, suggesting Late Carboniferous. The petrogeochemical analysis shows that the granites of the Yuanbaoshan composite batholith have high silicon ($\text{SiO}_2 = 67.77\% \sim 73.00\%$), and rich sodium ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 1$) with A/CNK being $0.95 \sim 1.13$, belonging to partially aluminous to weakly peraluminous, with the enrichment of LILEs (Rb, Ba, Th, K), depletion of HFSEs (Ta, Nb, P, Ti) and medium strength negative europium anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.46 \sim 0.65$), similar to the petrogeochemical characteristics of island arc environment. The trondhjemite is different from the granodiorite and

收稿日期: 2018-07-07; 接受日期: 2019-01-08; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 内蒙古自治区地质勘查基金(NMKD2014-11)

作者简介: 李 杰(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质矿产调查研究工作, E-mail: yinhelijie@163.com。

monozonitic granite; it is rich in silicon, has very weak negative europium anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.81 \sim 0.99$), high Sr/Y and La/Yb ratios, and falls into the adakite area on the Sr/Y - Y diagram. These differences suggest that they have different source characteristics. According to the regional geological data, the subduction of the Hongshishan oceanic plate under the study area during the early Late Carboniferous initiated large-scale magmatic activity and formed the Yuanbaoshan granite composite batholith with island arc affinity. The plagioclase granite with adakite-like characteristics originated from partial melting of the subductional oceanic plate, implying that the Hongshishan Ocean might have had a relatively young hot oceanic crust during the early Late Carboniferous period.

Key words: northern Beishan; granites of early Late Carboniferous; island arc; adakite

Fund support: Geological Exploration Fund of Inner Mongolia Autonomous Region (NMKD2014-11)

北山地区位于甘新蒙交界地区,是西伯利亚、哈萨克斯坦和塔里木三大板块交汇部位(刘雪亚等, 1995)。区内前寒武纪和古生代地层出露广泛,构造形迹复杂,是了解古亚洲洋构造域南缘地质构造演化历史的重要窗口。长期以来,不同学者对本区的构造分区及构造演化持有多种观点。李春昱等(1983)根据板块构造理论对中国北方板块构造单元进行了划分,奠定了该区板块构造框架。近年来,有不少学者对北山地区进行了调研,以北山地区红石山、石板井-小黄山、红柳河-牛圈子-洗肠井等多条蛇绿岩带构造属性为焦点,提出了一系列构造演化新认识(左国朝等, 1996, 2003; 何世平等, 2002; 龚全胜等, 2002, 2003; 杨合群等, 2012; 孙立新等, 2017; 王国强等, 2018; 专少鹏等, 2018)。其中红石山-百合山-蓬勃山蛇绿混杂岩带是上述蛇绿混杂岩带最靠北的一条,前人根据周围地质体关系将其厘定为早石炭世(左国朝, 1990),王国强等根据红石山蛇绿岩中辉长岩的年龄($346.6 \pm 2.8 \text{ Ma}$),也认为其形成时代为早石炭世。目前关于红石山-百合山-蓬勃山蛇绿岩的构造环境认识主要有3种。一种观点认为该蛇绿岩带于早古生代洋-陆转化结束后的晚古生代(石炭纪)重新裂解拉张形成,是哈萨克斯坦板块与塔里木板块的最终缝合带(赵茹石等, 1994; 龚全胜等, 2002; 何世平等, 2002, 2005; 魏志军等, 2004; 黄增保等, 2006);另一种观点认为该蛇绿岩是古亚洲洋自早古生代持续演化至晚古生代的残余洋壳的地质记录,是哈萨克斯坦板块与西伯利亚板块的缝合线(刘雪亚等, 1995; 聂凤军等, 2002);还有一种观点认为,红石山蛇绿岩带形成于小洋盆环境,并不具有缝合带的性质(左国朝等, 1990; 杨合群等, 2010)。北山北缘晚古生代花岗岩成因及其演化特点与红石山蛇绿岩的性质及演化历史可能存在重要的耦合关系,但是一直以来,受

北山北部中蒙边境一带军事管制、恶劣气候和交通不便的限制,研究区及邻区巨量中酸性岩浆活动缺少精细年代学和系统岩石地球化学的研究。本文在前人资料的基础之上依托“内蒙古额济纳旗园包山1:5万区域矿产地质调查”项目,对北山中蒙边境一带晚古生代花岗岩的年代学、岩石地球化学及形成环境、岩浆成因等问题进行了深入研究,进而揭示晚古生代北山北带中酸性岩浆活动及其构造演化特点。

1 地质背景及岩石学特征

研究区地处北山北部红石山-百合山-蓬勃山蛇绿岩带以北的园包山一带,北接蒙古国,东南距额济纳旗146 km(图1)。早古生代,园包山及大南山、狐狸山一带是活动大陆边缘,先后形成了奥陶系罗雅楚山组(类复理石沉积)、咸水湖组(中基性火山活动)及志留系园包山组(浅海相沉积)、公婆泉组(火山-碎屑沉积)等火山沉积地层。火山活动由弱变强,呈链状火山喷发,具有多旋回横向相变的特征,不同时期的火山活动在空间上具迁移现象(何世平等, 2002)。晚古生代区内形成了北山北带分布最为广泛的中酸性岩浆活动产物,喷出岩以石炭纪白山组巨厚层火山岩为代表,并与中酸性侵入岩共同构成了沿红石山-百合山-蓬勃山蛇绿岩带两侧对称展布的岩浆岩带。园包山花岗岩岩体位于北带北缘,呈复式岩基产出,岩基长轴方向为北东-南西向,出露面积约127 km²。主要岩石组合为花岗闪长岩、二长花岗岩、奥长花岗岩。岩体侵入早古生代地层及石炭纪白山组巨厚层中基性-中酸性火山岩中,后期为晚印支期富Rb、Nb正长花岗岩侵位,岩基两侧发育北北东向韧性变形。根据野外地质识别,上述3种岩性岩体侵位顺序由早到晚为花岗闪长岩→二长花岗岩→奥长花岗岩。

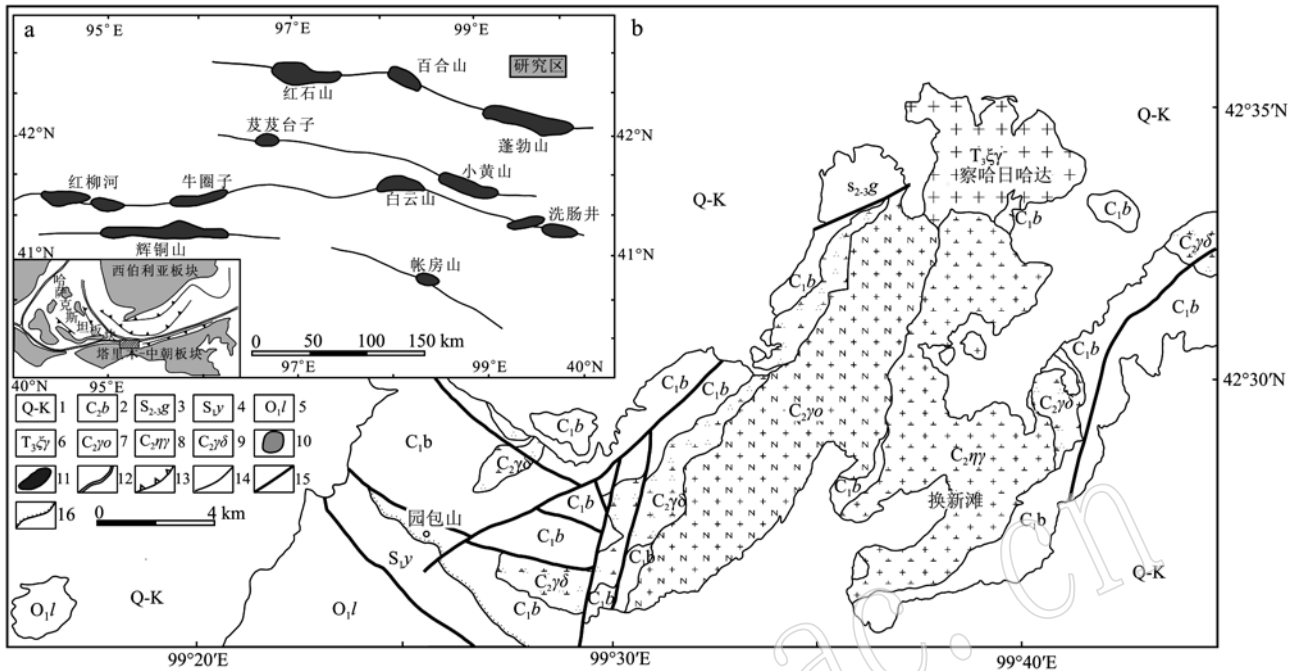


图1 北山蛇绿岩分布略图(a, 据杨合群等, 2010)及园包山一带地质简图(b, 据李杰等, 2017^①)

Fig. 1 The distribution of the Beishan ophiolite (a, after Yang Hequn *et al.*, 2010) and geological sketch map of the Yuanbaoshan area (b, after Li Jie *et al.*, 2017^①)

1—第四系-白垩系沉积盖层; 2—上石炭统白山组; 3—中上志留统公婆泉组; 4—下志留统园包山组; 5—下奥陶统罗雅楚山组; 6—晚三叠世正长花岗岩; 7—晚石炭世奥长花岗岩; 8—晚石炭世二长花岗岩; 9—晚石炭世花岗闪长岩; 10—结晶基底; 11—蛇绿岩带; 12—板块缝合带; 13—高压变质带; 14—地质界线; 15—断层; 16—角度不整合

1—Quaternary and Cretaceous sedimentary cover; 2—Upper Carboniferous Baishan Formation; 3—Middle-Upper Silurian Gongpoquan Formation; 4—Lower Silurian Yuanbaoshan Formation; 5—Lower Ordovician Luoyachushan Formation; 6—Late Triassic syenite granite; 7—Late Carboniferous trondhjemite; 8—Late Carboniferous monzonitic granite; 9—Late Carboniferous granodiorite; 10—crystalline basement; 11—ophiolite belt; 12—plate suture zone; 13—high pressure metamorphic belt; 14—geological boundary; 15—fault; 16—angular unconformity boundary

花岗闪长岩主要出露于园包山复式岩基的西侧, 灰白色, 中细粒花岗结构, 块状构造, 主要由斜长石(60% ±)、钾长石(10% ±)、石英(20% ±)、黑云母假像(10% ±)组成。斜长石呈半自形板状, 粒径一般0.5~2 mm, 部分2~4 mm, 杂乱分布, 强黝帘石化, 局部绢云母化, 少绿帘石化, 可见聚片双晶、环带构造, 局部被钾长石蚕蚀状交代。钾长石为(微斜)条纹长石, 半自形板状-它形粒状, 粒径一般0.2~1.5 mm, 填隙状分布于斜长石间, 局部交代斜长石, 部分晶内包嵌少量斜长石晶体。石英呈它形粒状, 粒径一般0.5~3.5 mm, 集合体状产出, 填隙状分布, 颗粒表面干净, 粒内明显波状消光。黑云母假像呈叶片状, 星散状分布, 被绿泥石及少量绿帘石、碳酸盐、铁质交代, 呈假像产出(图2a)。副矿物为

磷灰石、榍石。

二长花岗岩主要出露于园包山复式岩基东侧。岩石浅肉红色, 中细粒花岗结构, 块状构造, 由斜长石(45%~50%)、钾长石(25%~30%)、石英(20%)、黑云母(5%)组成。斜长石呈半自形板状, 粒径一般为0.2~3 mm, 明显高岭土化、绢云母化, 局部绿帘石化, 聚片双晶较发育, 部分可见环带构造, 常见双晶弯曲、变形及波状消光现象, 少数晶内发育显微裂隙, 局部被钾长石蚕食状交代; 钾长石为(微斜)条纹长石, 呈半自形板状, 粒径一般为0.2~2.5 mm, 局部交代斜长石。石英呈它形粒状, 粒径一般为0.2~3.5 mm, 单晶或集合体状产出; 黑云母大多呈褐绿色, 少数红棕色, 鳞片-叶片状, 片径一般为0.1~0.8 mm, 细小堆状分布, 局部绿泥石化、绿帘石

① 李杰, 班长勇, 连青, 等. 2017. 内蒙古自治区额济纳旗园包山等三幅1:5万区域矿产地质调查矿产地质图.

化,少褐铁矿化(图2b)。

奥长花岗岩出露于园包山复式岩基中部,侵入于花岗闪长岩和二长花岗岩中。岩石呈浅灰白色,中细粒-细粒花岗结构,块状构造,矿物粒度为0.2~4.5 mm。主要矿物为斜长石(70%~75%)和石英(20%~25%),有少量黑云母(5%±)、钾长石(<2%)。斜长石为似中长石,半自形板状,可见聚

片双晶、环带构造,部分可见晶体弯曲、变形现象;石英呈它形粒状、集合体状产出于斜长石晶体之间,杂乱分布,颗粒表面干净,粒内明显带状消光;钾长石为条纹长石,呈它形-半自形状、填隙状分布于斜长石之间;黑云母呈假像叶片状,片径可达3.5 mm,被绿泥石、绿帘石及少量次生石英交代(图2c)。

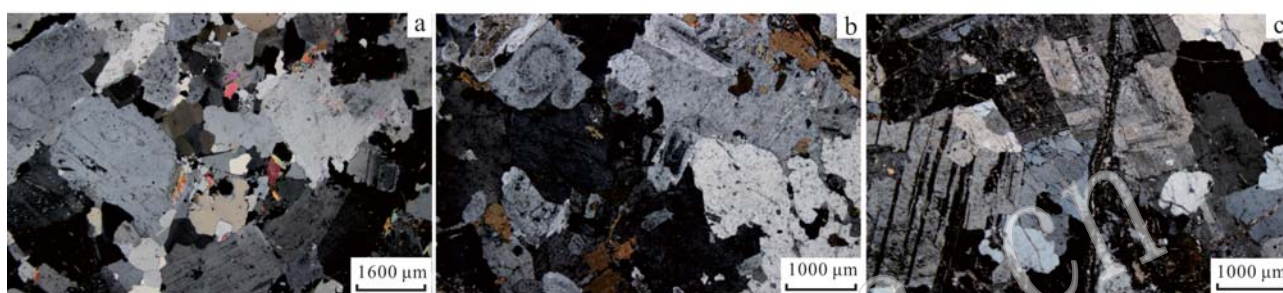


图2 园包山花岗闪长岩(a)、二长花岗岩(b)、奥长花岗岩(c)正交偏光显微照片

Fig. 2 Microscopic photos of granodiorite (a), monzonitic granite (b), trondhjemite (c) in Yuanbaoshan under crossed nicols

2 分析方法

本次工作对园包山复式岩基10个花岗闪长岩、二长花岗岩、奥长花岗岩岩石样品进行了主量、稀土、微量元素测试和锆石U-Pb年代学定年。样品选自地表新鲜岩体,测试的所有样品LOI含量均小于1%,表明样品没有经过强烈的蚀变。主量、稀土和微量元素测试分析由河北省区域地质调查院实验室完成。主量元素用Axiosmax X射线荧光光谱仪测定,FeO应用氢氟酸-硫酸溶样、重铬酸钾滴定的容量法测定,微量、稀土元素使用X-series2等离子质谱仪测定。同位素样品破碎后分离出重砂,经磁选和电磁选后,在双目镜下挑出锆石,选取代表性锆石,在北京锆年领航科技有限公司完成锆石制靶和透反射、阴极发光照相,而后在中国地质科学院地质所大陆构造与动力实验室对样品进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测年,载气为He,激光频率8~10 Hz,剥蚀时间为50 s,激光束直径32 μm。测试过程中,通过CL图像分析选择测点位置,然后采用激光剥蚀等离子体分析技术(LA-ICP-MS)对锆石进行微区原位单点U-Pb同位素定年。

3 分析结果

3.1 锆石U-Pb年龄

锆石样品阴极发光图像(图3)显示样品锆石晶形完好,多呈双锥状,环带发育,内核不发育。锆石U-Pb同位素分析结果(表1)显示, $Th/U = 0.39 \sim 0.67$,均大于0.1,说明该锆石属岩浆成因锆石,与根据锆石形态特征判断结果一致,锆石的结晶年龄可代表花岗岩的成岩年龄。3个岩石样品各选取测点15个,测点数值在U-Pb年龄谐和图上均位于谐和线上或附近(图4),说明锆石U-Pb年龄在误差范围内是谐和的。获得的各样品加权平均年龄为:花岗闪长岩 317.1 ± 3.1 Ma, MSWD = 0.24;二长花岗岩 313.7 ± 2.3 Ma, MSWD = 1.5;奥长花岗岩 314.8 ± 2.7 Ma, MSWD = 1.07。

3.2 岩石地球化学特征

3.2.1 主量元素

表2列出了园包山复式岩基花岗岩类代表性样品的主量元素分析结果,可以看出岩石样品以高硅(67.77%~73.00%)、富钠($Na_2O/K_2O = 1.45 \sim 4.69$)为主要特点。在An-Ab-Or图解(图5)上,奥

表1 园包山复式岩基的LA-ICPMS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb data of Yuanbaoshan composite batholith

岩性	样品号及 分析点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值					年龄/Ma						
		Pb	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		
花岗岩 闪长岩	P2RZ1-01	110.0	294.5	210.9	0.716 2	0.052 7	0.000 8	0.369 7	0.008 6	0.050 9	0.001 0	316.7	33.3	319.4	6.4	319.8	6.0
	P2RZ1-02	63.0	230.6	118.5	0.513 8	0.052 7	0.000 4	0.371 9	0.007 7	0.051 1	0.001 0	316.7	2.8	321.0	5.7	321.4	6.3
	P2RZ1-03	92.0	302.8	182.1	0.601 4	0.052 9	0.001 4	0.369 0	0.014 2	0.050 6	0.001 6	324.1	61.1	318.9	10.5	318.1	9.7
	P2RZ1-04	122.0	329.4	237.4	0.720 7	0.052 7	0.000 4	0.371 9	0.010 0	0.051 2	0.001 3	322.3	16.7	321.1	7.4	321.9	7.9
	P2RZ1-05	70.0	283.8	136.7	0.481 8	0.052 3	0.000 4	0.358 8	0.007 1	0.049 8	0.000 9	298.2	2.8	311.3	5.3	313.2	5.6
	P2RZ1-06	40.5	176.8	75.3	0.425 8	0.052 4	0.000 6	0.365 4	0.008 0	0.050 5	0.001 0	305.6	41.7	316.3	6.0	317.9	6.0
	P2RZ1-07	29.8	135.6	53.6	0.395 1	0.052 9	0.000 6	0.371 9	0.008 7	0.051 0	0.001 1	324.1	13.9	321.1	6.5	320.7	6.7
	P2RZ1-08	155.0	425.9	298.9	0.701 7	0.052 7	0.000 4	0.371 2	0.010 6	0.051 1	0.001 5	322.3	16.7	320.5	7.9	321.2	9.1
	P2RZ1-09	31.9	146.3	58.1	0.397 0	0.054 3	0.000 9	0.378 8	0.013 1	0.050 5	0.001 2	383.4	38.9	326.1	9.7	317.6	7.2
	P2RZ1-10	24.4	122.5	45.4	0.370 2	0.052 7	0.000 7	0.362 9	0.008 0	0.049 9	0.001 0	322.3	27.8	314.3	6.0	314.1	6.1
	P2RZ1-11	43.2	185.9	80.5	0.433 2	0.053 6	0.001 0	0.373 2	0.011 4	0.050 4	0.001 0	353.8	44.4	322.0	8.5	317.2	6.4
	P2RZ1-12	39.6	173.3	77.2	0.445 5	0.052 5	0.000 8	0.362 6	0.005 3	0.050 1	0.000 7	305.6	33.3	314.2	4.0	315.1	4.0
	P2RZ1-13	38.6	197.0	74.1	0.375 9	0.052 9	0.000 9	0.363 9	0.006 5	0.049 9	0.000 8	324.1	52.8	315.1	4.9	313.8	5.0
	P2RZ1-14	32.3	163.1	60.6	0.371 7	0.052 3	0.001 0	0.362 2	0.007 9	0.050 2	0.001 0	298.2	58.3	313.8	5.9	315.5	6.1
	P2RZ1-15	35.9	143.1	69.7	0.486 9	0.052 6	0.001 1	0.370 7	0.009 1	0.051 1	0.001 2	322.3	50.0	320.2	6.8	321.0	7.6
奥长花岗岩	P2RZ2-01	25.6	77.0	43.2	0.561 7	0.050 6	0.000 6	0.356 7	0.008 1	0.051 2	0.001 0	220.4	33.3	309.7	6.1	321.8	6.2
	P2RZ2-02	31.3	131.2	51.4	0.391 6	0.050 6	0.000 5	0.359 5	0.008 4	0.051 5	0.001 1	233.4	22.2	311.8	6.3	323.7	7.0
	P2RZ2-03	37.5	145.1	60.7	0.418 7	0.052 4	0.000 6	0.368 8	0.006 6	0.051 1	0.000 9	301.9	13.9	318.7	4.9	321.3	5.4
	P2RZ2-04	31.8	116.0	55.1	0.475 2	0.051 5	0.000 7	0.351 7	0.007 3	0.049 5	0.000 8	264.9	33.3	306.0	5.5	311.5	4.7
	P2RZ2-05	37.6	134.1	65.9	0.491 7	0.050 9	0.000 6	0.348 7	0.006 5	0.049 7	0.000 9	239.0	41.7	303.7	4.9	312.4	5.5
	P2RZ2-06	46.0	144.0	82.5	0.573 0	0.052 7	0.000 7	0.360 9	0.006 8	0.049 7	0.000 9	322.3	27.8	312.9	5.1	312.8	5.5
	P2RZ2-07	33.6	123.1	59.3	0.481 3	0.051 9	0.000 7	0.354 6	0.008 8	0.049 6	0.001 0	279.7	-50.0	308.2	6.6	311.8	6.2
	P2RZ2-08	54.9	212.0	92.0	0.434 1	0.051 8	0.000 5	0.367 1	0.007 6	0.051 4	0.001 0	276.0	-75.0	317.5	5.7	323.2	5.9

续表 1
Continued Table 1

岩性	样品号及 分析点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U		同位素比值						年龄/Ma					
		Pb	U	Th	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
						1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	
奥 长 花 岗 岩	P2RZ2-09	25.0	100.4	43.1	0.429 1	0.052 3	0.000 7	0.358 4	0.008 3	0.049 7	0.000 9	298.2	33.3	311.0	6.3	312.5	5.7	
	P2RZ2-10	46.3	150.1	84.4	0.562 5	0.052 2	0.000 6	0.358 2	0.009 1	0.049 7	0.001 2	294.5	27.8	310.9	6.8	312.9	7.4	
	P2RZ2-11	88.0	307.3	164.9	0.536 5	0.052 6	0.000 4	0.360 1	0.007 9	0.049 7	0.001 1	322.3	16.7	312.3	5.9	312.4	6.6	
	P2RZ2-12	42.8	136.0	74.1	0.544 5	0.052 9	0.000 7	0.374 8	0.009 0	0.051 4	0.001 0	324.1	33.3	323.2	6.7	323.0	6.0	
	P2RZ2-13	91.0	261.0	179.0	0.685 7	0.052 3	0.000 5	0.354 4	0.004 7	0.049 2	0.000 5	298.2	8.3	308.0	3.6	309.3	3.1	
	P2RZ2-14	38.1	128.9	66.2	0.513 4	0.052 1	0.000 5	0.370 7	0.009 1	0.051 5	0.001 1	300.1	22.2	320.2	6.7	324.0	6.8	
	P2RZ2-15	51.9	173.9	99.3	0.571 3	0.052 5	0.000 5	0.358 7	0.006 4	0.049 5	0.000 8	305.6	36.1	311.2	4.8	311.7	4.8	
	TW2.1	17.1	312.6	260.2	0.832 5	0.052 7	0.000 9	0.362 5	0.006 1	0.050 1	0.000 2	313.9	2.1	314.1	2.1	315.0	1.0	
	TW2.2	18.3	354.0	157.7	0.445 5	0.052 1	0.000 8	0.363 3	0.006 0	0.050 6	0.000 2	289.4	2.0	314.7	2.1	318.2	1.0	
	TW2.3	19.0	368.3	236.1	0.641 0	0.053 5	0.000 7	0.361 4	0.005 1	0.049 0	0.000 2	349.3	1.8	313.3	1.9	308.4	1.0	
	TW2.4	20.8	373.2	316.1	0.847 2	0.053 7	0.000 8	0.374 9	0.005 7	0.050 6	0.000 2	357.3	1.9	323.3	2.0	318.3	1.0	
	TW2.5	15.1	287.5	163.6	0.569 0	0.058 9	0.002 1	0.412 9	0.022 5	0.049 4	0.000 3	564.8	3.8	351.0	5.6	310.5	1.1	
	TW2.6	17.0	325.9	203.0	0.622 8	0.052 0	0.000 8	0.354 2	0.005 4	0.049 4	0.000 2	285.5	1.9	307.9	2.0	310.8	1.0	
	TW2.7	14.7	277.4	197.9	0.713 2	0.054 6	0.001 0	0.369 4	0.006 8	0.049 1	0.000 2	395.6	2.2	319.2	2.2	309.2	1.0	
	TW2.8	27.3	491.1	433.0	0.881 7	0.052 5	0.000 6	0.358 4	0.004 2	0.049 6	0.000 2	304.9	1.6	311.0	1.7	311.8	1.0	
TW2.9	13.2	246.1	145.3	0.590 3	0.054 7	0.001 2	0.379 4	0.007 9	0.050 3	0.000 2	401.7	2.4	326.6	2.4	316.3	1.0		
TW2.10	18.6	335.7	241.8	0.720 4	0.055 3	0.000 8	0.377 2	0.005 8	0.049 5	0.000 2	424.1	1.9	325.0	2.0	311.6	1.0		
TW2.11	18.2	330.9	211.7	0.639 8	0.053 5	0.000 8	0.373 0	0.005 8	0.050 5	0.000 3	348.7	1.9	321.9	2.0	317.8	1.1		
TW2.12	15.8	285.5	178.5	0.625 0	0.053 3	0.001 0	0.373 3	0.007 3	0.050 7	0.000 3	342.1	2.2	322.1	2.3	318.8	1.1		
TW2.13	24.6	442.4	338.7	0.765 6	0.055 6	0.000 7	0.379 4	0.005 0	0.049 5	0.000 2	434.8	1.7	326.6	1.8	311.4	1.0		
TW2.14	15.6	276.9	194.7	0.703 0	0.053 9	0.001 1	0.374 8	0.007 5	0.050 5	0.000 2	367.2	2.4	323.2	2.4	317.8	1.0		
TW2.15	15.2	277.5	196.5	0.708 1	0.052 0	0.000 9	0.351 4	0.006 0	0.049 0	0.000 2	284.8	2.1	305.8	2.1	308.5	1.0		



图3 园包山二长花岗岩(a)、花岗闪长岩(b)、奥长花岗岩(c)锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 CL images of zircons from monzonitic granite (a), granodiorite (b), trondhjemite (c) in Yuanbaoshan

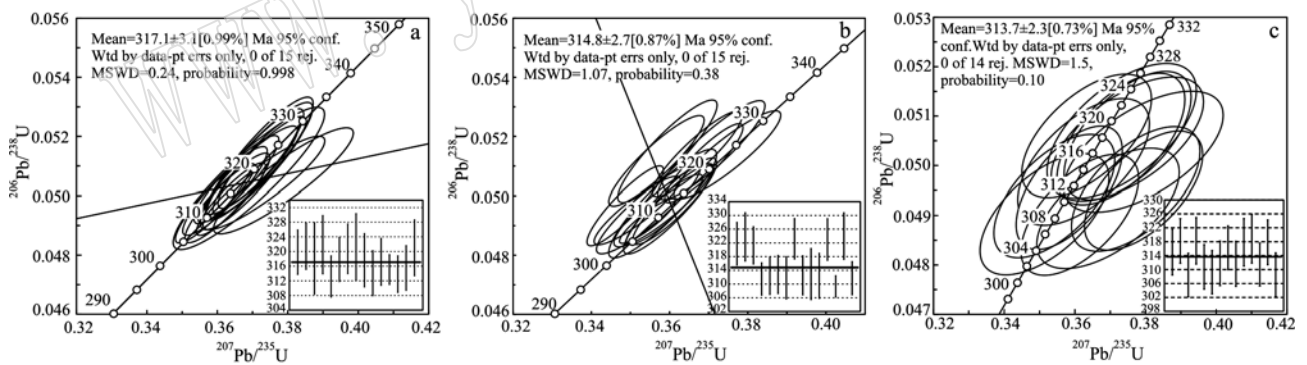


图4 园包山花岗闪长岩(a)、奥长花岗岩(b)、二长花岗岩(c)锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb zircon ages of granodiorite (a), trondhjemite (b), monzonitic granite (c) in Yuanbaoshan

长花岗岩落入英云闪长岩和奥长花岗岩区,考虑到其色率($M \leq 5\%$)远小于10%,将其归为奥长花岗岩更为合适。莱特碱度率(A.R)为1.87~3.59, $A/CNK = 0.95 \sim 1.13$,为偏铝到弱过铝质(图6a)。在 $SiO_2 - A.R$ 图上,二长花岗岩落入碱性岩石系列,花岗岩闪长岩与奥长花岗岩落入钙碱性(+拉斑玄武岩系列)(图6b)。考虑到三者的野外侵位关系(由早到晚:花岗岩闪长岩-二长花岗岩-奥长花岗岩),认为在岩浆源区发生了变化,奥长花岗岩较高

的 $Mg^\#$ 值(40~52)暗示在岩浆源区可能有幔源物质参与了后期的岩浆演化。

3.2.2 稀土、微量元素

表2列出了园包山复式岩基花岗岩类代表性样品稀土元素、微量元素的测定结果。结果显示,花岗闪长岩+二长花岗岩稀土元素特征与奥长花岗岩稀土元素特征有较大差异(图7a),前者稀土元素总量相对较高,变化范围为 $109.82 \times 10^{-6} \sim 143.81 \times 10^{-6}$,平均为 126.74×10^{-6} ,轻重稀土元素比值

表2 园包山复式岩基主要岩体主量($w_B/\%$)、微量及稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 2 Major ($w_B/\%$), trace and rare earth elements ($w_B/10^{-6}$) compositions of Yuanbaoshan composite batholith

岩石名称	花岗闪长岩		奥长花岗岩					二长花岗岩		
样号	P02YQ1-2	P02YQ1-3	P02YQ2-1	P02YQ2-3	P02YQ2-6	P02YQ4-1	P02YQ4-2	P05YQ1-1	P05YQ3-1	YQ02
SiO ₂	67.84	67.77	72.08	67.79	71.89	69.05	68.54	70.34	72.96	73.00
TiO ₂	0.46	0.49	0.22	0.32	0.21	0.28	0.31	0.33	0.28	0.34
Al ₂ O ₃	15.01	14.94	14.99	16.40	14.47	16.24	16.36	14.18	13.57	13.68
Fe ₂ O ₃	1.46	1.81	0.89	1.24	0.43	1.18	1.56	1.35	1.05	0.70
FeO	2.34	2.23	0.94	1.34	1.22	1.15	0.93	1.17	1.29	1.07
MnO	0.08	0.09	0.04	0.07	0.02	0.06	0.06	0.03	0.06	0.08
MgO	1.18	1.24	0.71	0.98	0.99	0.83	0.97	0.50	0.52	0.43
CaO	3.05	3.35	2.50	3.67	1.68	3.54	3.32	1.71	1.53	1.24
Na ₂ O	4.14	3.90	4.97	5.01	4.87	4.94	4.74	5.31	4.56	4.98
K ₂ O	2.22	2.33	1.12	1.21	1.58	1.05	1.50	2.84	3.12	3.44
P ₂ O ₅	0.11	0.11	0.07	0.11	0.07	0.10	0.10	0.08	0.06	0.08
化合水	1.25	1.08	0.87	0.94	1.25	1.12	0.94	0.64	0.40	0.43
吸附水	0.14	0.13	0.12	0.12	0.14	0.14	0.11	0.12	0.14	0.10
烧失量	1.98	1.60	1.37	1.75	2.50	1.45	1.47	2.03	0.87	0.83
A/CNK	1.02	1.00	1.08	1.01	1.13	1.03	1.06	0.95	0.99	0.97
A/NK	1.63	1.67	1.60	1.72	1.49	1.75	1.74	1.20	1.25	1.15
A/R	2.09	2.03	2.07	1.90	2.33	1.87	1.93	3.11	3.07	3.59
Na ₂ O/K ₂ O	1.87	1.67	4.44	4.15	3.08	4.69	3.16	1.87	1.46	1.45
Mg [#]	36.66	36.32	42.06	41.47	52.41	39.98	42.63	27.08	29.21	31.24
La	17.20	20.90	7.07	10.60	5.72	11.60	10.60	21.80	23.90	17.60
Ce	38.70	45.30	16.10	21.50	12.70	23.60	20.70	48.30	51.00	38.90
Pr	5.10	6.20	1.84	2.83	1.67	3.19	2.68	6.38	6.84	5.36
Nd	21.80	26.10	7.43	11.20	7.11	13.00	10.80	26.20	27.70	23.70
Sm	5.06	5.99	1.54	2.18	1.56	2.71	1.97	5.67	6.18	5.76
Eu	1.00	1.11	0.41	0.55	0.48	0.72	0.54	0.97	0.91	1.18
Gd	4.72	5.45	1.40	1.88	1.31	2.24	1.80	5.11	5.86	5.16
Tb	0.92	1.07	0.24	0.30	0.20	0.37	0.28	0.98	1.16	1.12
Dy	5.74	6.80	1.32	1.60	0.89	2.14	1.53	5.95	7.38	7.28
Ho	1.20	1.37	0.26	0.31	0.13	0.42	0.30	1.18	1.53	1.51
Er	3.47	4.15	0.78	0.92	0.34	1.25	0.91	3.39	4.68	4.74
Tm	0.56	0.69	0.13	0.14	0.04	0.20	0.14	0.55	0.79	0.74
Yb	3.73	4.82	0.85	0.93	0.25	1.26	0.91	3.69	5.18	5.02
Lu	0.55	0.62	0.15	0.14	0.07	0.19	0.14	0.52	0.74	0.79
Y	32.30	37.70	7.58	8.72	3.76	11.90	8.09	30.30	43.10	42.60
Ba	619.82	629.06	397.01	381.78	338.63	401.84	559.34	512.61	897.12	807.07
Rb	41.68	47.91	21.87	10.74	44.84	7.94	24.90	54.09	131.56	104.70
Th	7.05	6.69	6.63	2.63	1.08	2.81	3.52	3.84	13.59	7.83
K	18 443.36	19 363.22	9 285.35	10 017.55	13 119.79	8 743.74	12 456.72	23 593.24	25 898.06	28 518.38
Nb	6.25	6.42	4.04	4.26	1.37	3.75	4.11	7.80	11.65	7.00
Ta	0.48	0.47	0.43	0.27	0.14	0.31	0.32	0.60	0.95	0.47
P	461.15	489.03	303.46	478.54	290.21	426.12	444.49	341.23	270.49	351.54
Zr	158.35	169.07	82.02	108.10	91.54	100.57	103.61	257.29	206.40	221.37
Hf	7.48	10.60	4.56	7.16	4.86	6.71	6.91	10.94	9.67	6.65
Ti	2 761.68	2 909.21	1 339.46	1 893.10	1 262.10	1 652.73	1 873.37	1 998.12	1 670.49	2 062.35
Sr	160.10	170.40	320.20	364.50	133.20	341.70	395.50	68.49	130.60	115.05
Sr/Y	4.95	4.52	42.23	41.82	35.46	28.69	48.92	2.26	3.03	2.70
ΣREE	109.82	130.54	39.48	55.08	32.42	62.91	53.32	130.71	143.81	118.83
LREE/HREE	4.25	4.23	6.72	7.86	9.10	6.80	7.87	5.12	4.27	3.51
δEu	0.61	0.58	0.84	0.81	0.99	0.87	0.86	0.54	0.46	0.65
(La/Yb) _N	3.11	2.92	5.61	7.71	15.73	6.20	7.89	3.98	3.11	2.36
(Gd/Yb) _N	1.02	0.91	1.33	1.63	4.31	1.43	1.60	1.12	0.91	0.83
(La/Sm) _N	2.14	2.20	2.89	3.07	2.31	2.69	3.39	2.42	2.43	1.92

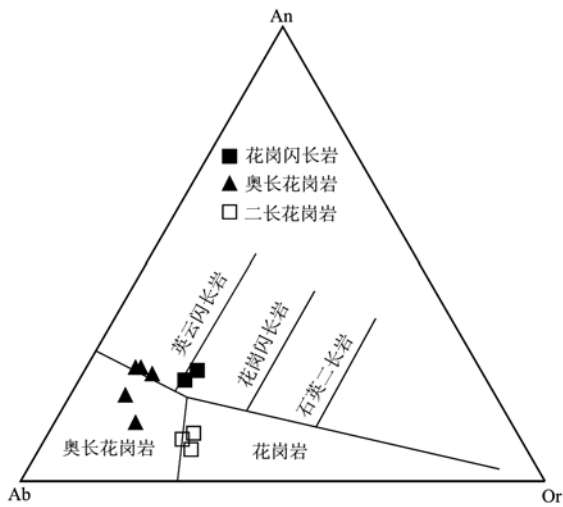


图5 园包山复式岩基 An-Ab-Or 图解

Fig. 5 An-Ab-Or diagram of Yuanbaoshan composite batholith

1—花岗闪长岩; 2—奥长花岗岩; 3—二长花岗岩

1—granodiorite; 2—trondhjemite; 3—monzonitic granite

(LREE/HREE)为3.51~5.12,平均值为4.27,反映轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特点, $\delta\text{Eu} = 0.46 \sim 0.65$,具有中等强度负铕异常,表明岩石经历较大程度的斜长石分离结晶过程;后者稀土元素总量较低,变化范围为 $32.42 \times 10^{-6} \sim 62.91 \times 10^{-6}$,平均为 48.64×10^{-6} , $\text{LREE}/\text{HREE} = 6.72 \sim 9.10$,平均值为7.67, $\delta\text{Eu} = 0.81 \sim 0.99$,显示出更强烈的轻重稀土元素分馏和较弱的负铕异常,说明源区石榴子石及角闪石等为主要的残留相。图7b为岩石样品原始地幔标准化的微量元素蛛网图,显示大离子亲石元素明显富集,特别是Rb、Ba、Th和K富集明显,所有样品具有明显Ta、Nb、P、Ti负异常,类似于岛弧环境的岩石特征。另外,Sr元素在花岗闪长岩+二长花岗岩样品和奥长花岗岩样品中有较大不同,前者表现出较为强烈的负异常(Sr 平均含量为 128.93×10^{-6}),后者表现出正异常(Sr 平均含量为

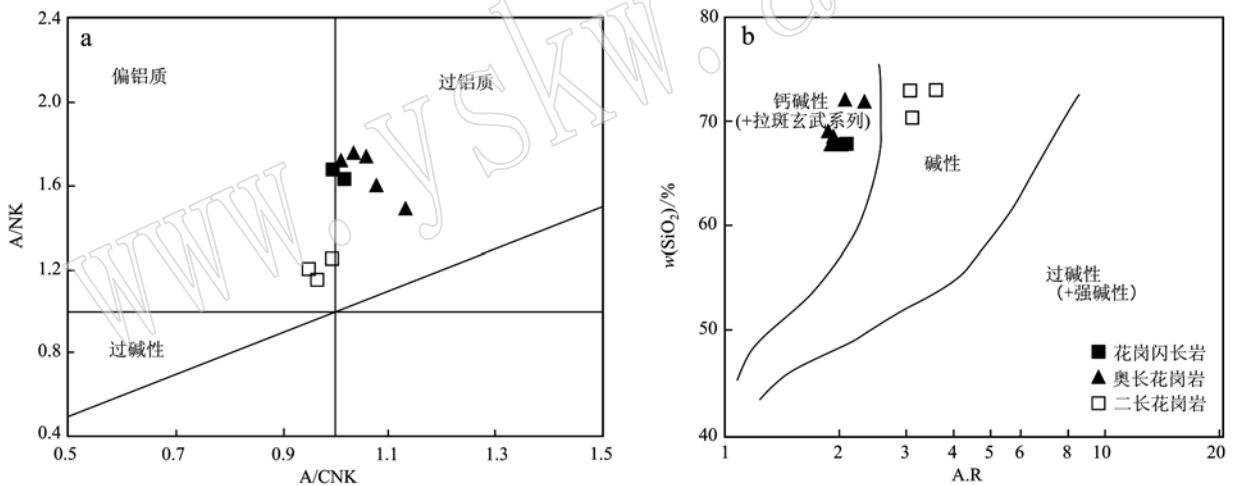


图6 园包山复式岩基 A/NK-A/CNK (a)及 SiO_2 -A.R (b)图解

Fig. 6 A/NK-A/CNK (a) and SiO_2 -A.R (b) diagrams of Yuanbaoshan composite batholith

311.02×10^{-6} 。

4 讨论

4.1 岩体形成时代

根据锆石 U-Pb 年龄测定,花岗闪长岩、二长花岗岩、奥长花岗岩样品年龄值分别为 317.1 ± 3.1 、 313.7 ± 2.3 和 314.8 ± 2.7 Ma,年龄谐和度较高,表明其形成时代均为晚石炭世早期。根据野外侵位关系来看,各岩体侵位顺序由早到晚依次为花岗闪长

岩-二长花岗岩-奥长花岗岩。

4.2 岩石成因及源区特征

从岩石地球化学特征看,园包山复式岩基各岩石样品均表现出富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Th、K)和亏损高场强元素(Ta、Nb、P、Ti)的特征,在 Rb-(Y+Nb)图上落入岛弧花岗岩区域(图8a)。Sr元素在花岗闪长岩+二长花岗岩中表现为负异常,说明岩浆源区存在斜长石的结晶分异(李昌年,1992),同时这两种岩性均具有中等 δEu 负异常,Sr、Eu两种元素地球化学特点反映出一致的源区特点,

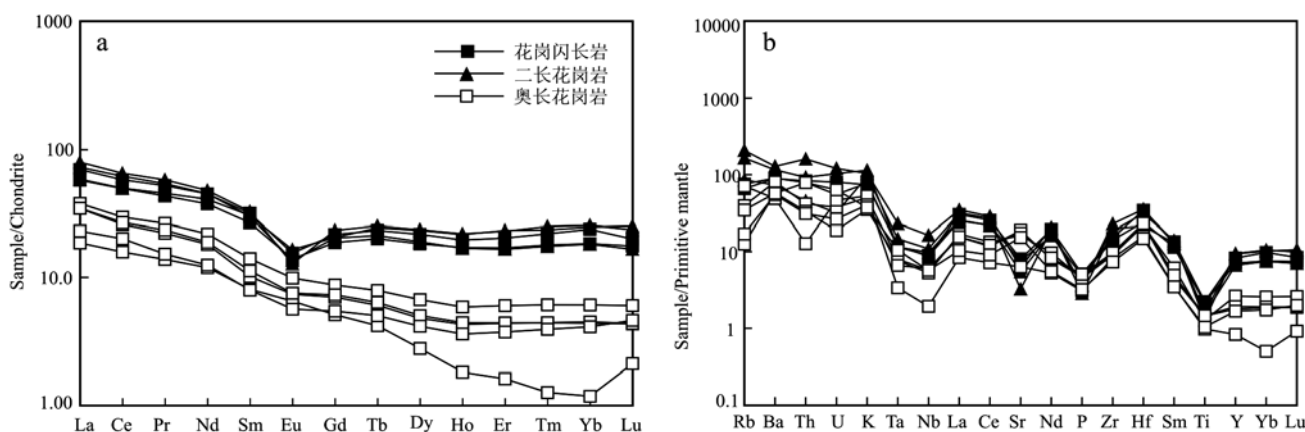


图7 园包山复式岩基稀土元素配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spidergrams (b) of Yuanbaoshan composite batholith

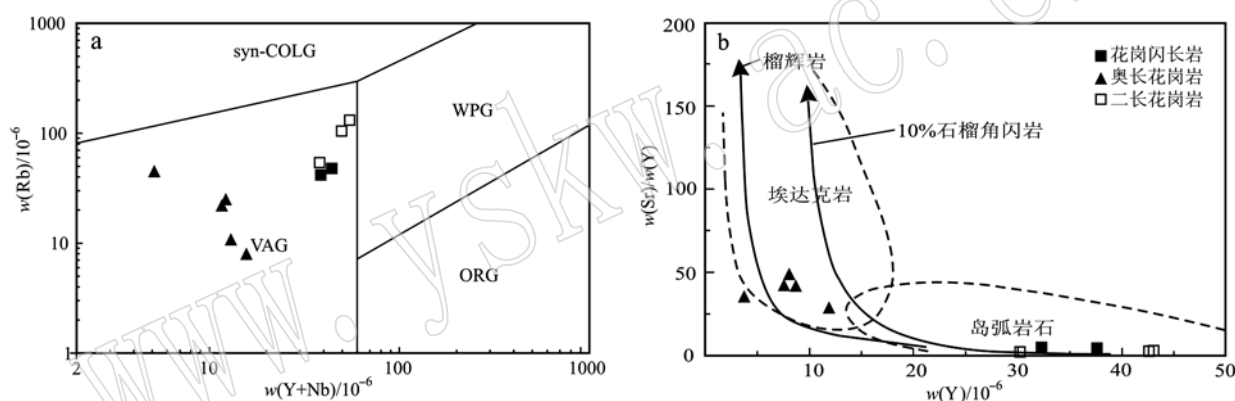


图8 园包山复式岩基 Rb-(Y+Nb)构造环境判别图解(a)及 Sr/Y-Y 图解(b)

Fig. 8 The Rb-(Y+Nb) diagram for discriminating the tectonic setting (a) and the Sr/Y-Y diagram (b) of Yuanbaoshan composite batholith

即花岗闪长岩+二长花岗岩源区存在斜长石的分离结晶或熔融残留,而与之不同的是,奥长花岗岩 Sr、 δEu 异常并不明显。实验岩石学表明, Sr 在斜长石中容易类质同像替换 Ca,在浅部低压条件下当斜长石作为早期结晶相的时候,显示相容元素特征。但是 Sr 在高压的地幔条件下,当斜长石不稳定的时候,显示不相容元素特征 (Green, 1980)。由此看来奥长花岗岩形成压力(深度)要大于花岗闪长岩+二长花岗岩的形成压力(深度),所以认为虽然花岗闪长岩、二长花岗岩、奥长花岗岩三者形成时代近乎同时,但其岩浆源区特征却有一定的差异。

典型的埃达克岩 (adakite),是由俯冲的板片熔融形成的。与岛弧正常的钙碱性岩相比,这类埃达克岩具高 Al ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$)、高 Na ($> 3.5\%$, $\text{K}_2\text{O}/$

$\text{Na}_2\text{O} < 0.5\%$)、高 Sr ($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$)、贫重稀土元素和 Y ($\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$, $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$)、无明显的负 Eu 异常 (Defant *et al.*, 1990; Drummond *et al.*, 1990; Castillo, 2006) 的特点。就区内奥长花岗岩地球化学特征来看, $\text{SiO}_2 = 67.79\% \sim 72.08\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.47\% \sim 16.40\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 4.74\% \sim 5.01\%$, $\text{MgO} = 0.71\% \sim 0.99\%$, $\text{Mg}^\#$ 值 (40 ~ 53) 较高, Sr 含量 $320 \times 10^{-6} \sim 396 \times 10^{-6}$, 除一个值为 133×10^{-6} 外, $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$ ($3.76 \times 10^{-6} \sim 11.9 \times 10^{-6}$), $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$ ($0.85 \times 10^{-6} \sim 1.26 \times 10^{-6}$), $\text{Sr}/\text{Y} > 20$ (28.69 ~ 48.92), 富 Si、Na ($\text{Na}_2\text{O} > 4\%$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 3.08 \sim 4.6$), 富集 LREE [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 5.96 \sim 16.74$], 具微弱的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.81 \sim 0.99$), 表现出埃达克质花岗岩的特征, 在 Sr/Y-Y 图上落入埃达克岩

区域(图8b)。作为古生代发育的陆缘活动带,该区晚古生代巨量中酸性岩浆火山活动时空分布特点暗示该区埃达克质奥长花岗岩很可能具有类似典型的埃达克岩源区,是年轻的俯冲玄武质洋壳部分熔融产物。另外,北山北部及毗邻该区的蒙古国一带,铜金矿点星罗棋布,金矿点达百余处,是我国西北地区最重要的金矿化集中区(聂凤军等,2002)。Thieblemont等(1997)统计了全球43个Au、Ag、Cu、Mo低温热液和斑岩矿床,发现其中38个与埃达克岩有关,因此得出结论:在全球规模上(美国西部、智利、巴布亚新几内亚),多数埃达克岩省是重要的成矿省;在地区规模上,多数矿床的主岩即埃达克岩;在矿区规模上,当埃达克岩与非埃达克岩共存时,成矿主要与前者有关(张旗等,2008)。本文埃达克岩的发现和上述分析表明,北山地区可能存在尚未被认识的大量的埃达克岩,俯冲洋壳熔融可能是本地区晚古生代大规模地壳增生的重要方式之一。

4.3 构造环境及地质意义

综合地质特征和岩石地球化学特征看,花岗闪长岩+二长花岗岩具有典型岛弧岩浆成因特点,即俯冲流体交代地幔楔引起地壳的部分熔融,然后经过结晶分异形成。奥长花岗岩有所不同,该岩石具有埃达克质岩的特征,二者在空间上是紧密相伴的,时间近于同时,这种时空特点所反映的源区特点很难用区内前人已有认识来解释。

前人在研究晚古生代北山北缘构造演化过程中,将早山地体北缘即红石山蛇绿岩带南侧下石炭统白山组及同时代花岗岩类作为红石山洋由北向南侧早山地体俯冲过程中,于大陆边缘形成的陆缘岩浆弧(龚全胜等,2003;任云伟等,2019)。而据1:20万红石山幅、黑鹰山幅、六驼山幅区域地质资料,沿红石山-百合山-蓬勃山一带两侧均发育巨量的晚古生代中酸性岩浆活动,火山活动以下石炭统-下二叠统白山组中基性-中酸性活动为代表(卢进才等,2013)。另外本次工作及近年来北山北缘开展的一系列区调工作也证实,白山组巨量火山岩及晚古生代中酸性侵入岩广泛分布于红石山-百合山-蓬勃山两侧。上述特点表明,红石山-百合山-蓬勃山蛇绿岩带所代表的红石山洋盆在早石炭世很可能发生了双向俯冲,并可能由于两侧陆缘区具有相似的结晶基底,从而在红石山蛇绿岩两侧形成了非常相似的火成岩岩石组合类型,而具有埃达克质岩石类型特点的奥长花岗岩暗示红石山洋属较为年轻的热洋

壳,是热洋壳俯冲消减部分熔融的产物。近年来不同学者对红石山蛇绿岩中玄武岩的研究,也证实其有近似于MORB的特征,形成于大陆裂谷向大洋转化的构造环境,具有类似“红海”型的初始小洋盆(王国强等,2014),或属于裂谷小洋盆(左国朝等,1990;杨合群等,2010)。

5 结论

(1) 园包山复式岩基主要岩石LA-ICP-MS锆石U-Pb测年结果显示,花岗闪长岩、二长花岗岩、奥长花岗岩样品年龄值分别为 317.1 ± 3.1 、 313.7 ± 2.3 和 314.8 ± 2.7 Ma,属晚石炭世早期,代表了北山北带晚古生代最为活跃的一次构造岩浆活动。

(2) 地球化学特征显示,园包山复式岩基晚古生代侵入岩属高硅富钠、偏铝质-弱过铝质碱性-钙碱性花岗岩。岩石样品整体表现出富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Th、K),亏损高场强元素(Ta、Nb、P、Ti),类似岛弧岩浆岩特征。其中晚期侵位的奥长花岗岩具埃达克质花岗岩特征。

(3) 综合区域地质资料来看,石炭纪早期研究区南侧红石山洋向北俯冲启动了这次大规模构造岩浆活动,形成了具岛弧性质的园包山早石炭世花岗岩复式岩基,其中具埃达克质岩特征的奥长花岗岩来源于热洋壳俯冲过程中的部分熔融,暗示南侧红石山洋可能属较为年轻的热洋壳。

References

- Castillo P R. 2006. A review of the genesis of the adakite[J]. Science Bulletin, 51(6): 617~627(in Chinese).
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere[J]. Nature, 34: 662~665.
- Drummond M S and Defant M J. 1990. A model for trondhjemite-trondhjemite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons[J]. Geophys. Res., 95: 21 503~21 521.
- Gong Quansheng, Liu Mingqiang, Li Hailin, et al. 2002. The type and basic characteristics of Beishan orogenic belt, Gansu[J]. Northwest Geology, 35(3): 28~34(in Chinese with English abstract).
- Gong Quansheng, Liu Mingqiang, Liang Minghong, et al. 2003. The tectonic facies and tectonic evolution of Beishan orogenic belt, Gansu

- [J]. *Northwestern Geology*, 36(1): 11 ~ 16 (in Chinese with English abstract).
- Green T H. 1980. Island arc and continent-building magmatism—A review of petrogenic models based on experimental petrology and geochemistry[J]. *Tectonophysics*, 63: 367 ~ 385.
- Guo Hong, Li Xia, Mao Qigui, *et al.* 2006. Characteristics of magmatic Cu-Ni sulfide deposits and their geodynamic mechanism in the East TianShan, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 24 (2): 135 ~ 140 (in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Ren Bingchen, Yao Wenguang, *et al.* 2002. The division of tectonic units of Beishan area, Gansu-Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 35(4): 30 ~ 40 (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]. *Northwestern Geology*, 38 (3): 6 ~ 15 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zengbao and Jin Xia. 2006. Geochemistry features and tectonic setting of the Hongshishan ophiolite in Gansu province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 41(4): 601 ~ 611 (in Chinese with English abstract).
- Li Changnian. 1992. A geochemical method for tectonomagmatic discrimination[J]. *Geological Science and Technology Information*, 11 (3): 73 ~ 84 (in Chinese with English abstract).
- Li Chunyu and Tang Yaoqing. 1983. Some problems on subdivision of palaeo-plates in Asia[J]. *Acta Geologica Sinica*, (1): 1 ~ 10 (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).
- Lu Jincai, Niu Yazhuo, Wei Xianyang, *et al.* 2013. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Late Paleozoic volcanic rocks from the Hongshishan area of the Beishan orogenic belt and its tectonic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2 685 ~ 2 694 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Jiang Sihong and Bai Daming. 2002. Metallogenic Regularity and Prospecting Direction of Metal Deposits in Beishan Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 499 (in Chinese with English abstract).
- Ren Yunwei, Ren Bangfang, Niu Wenchao, *et al.* 2019. Carboniferous volcanics from the Baishan Formation in the Hazhu area, Inner Mongolia: Implications for the Late Paleozoic active continental margin magmatism in the northern Beishan Mountain[J]. *Earth Science*, 44 (1): 312 ~ 327 (in Chinese with English abstract).
- Sun Lixin, Zhang Jiahui, Ren Bangfang, *et al.* 2017. Geochemical characteristics and U-Pb age of Baiyunshan ophiolite melange in the Beishan orogenic belt and their geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(2): 131 ~ 147 (in Chinese with English abstract).
- Thieblemont D, Stein G and Lescuyer J L. 1997. Gisements epithermaux et porphyriques: la connexion adakite[J]. *Earth and Planetary Sciences*, 325: 103 ~ 109.
- Wang Guoqiang, Li Xiangmin, Xu Xueyi, *et al.* 2014. Ziron U-Pb chronological study of the Hongshishan ophiolite in the Beishan area and their tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (6): 1 685 ~ 1 694 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guoqiang, Li Xiangmin, Xu Xueyi, *et al.* 2018. Petrogenesis and tectonic setting of the Carboniferous and Permian volcanic rocks in the Beishan orogenic belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(6): 884 ~ 900 (in Chinese with English abstract).
- Wei Zhijun, Huang Zengbao, Jin Xia, *et al.* 2004. Geological characteristics of ophiolite migmatitic complex of Hongshishan region, Gansu[J]. *Northwestern Geology*, 37 (1): 13 ~ 18 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Li Ying, Zhao Guobin, *et al.* 2010. Character and structural attribute of the Beishan ophiolite[J]. *Northwestern Geology*, 43 (1): 26 ~ 36 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Zhao Guobin, Li Ying, *et al.* 2012. The relationship between paleozoic tectonic setting and mineralization in Xinjiang-Gansu-Inner Mongolia juncture area[J]. *Geological Bulletin of China*, 31 (2/3): 413 ~ 421 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Rushi, Zhou Zhenhuan, Mao Jinhai, *et al.* 1994. Plate-tectonic units and Tectonic evolution in Gansu[J]. *Regional Geology of China*, (1): 28 ~ 36 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao and Li Maosong. 1996. Formation and Evolution of Early Paleozoic Lithosphere in Beishan Area, Gansu[M]. Lanzhou: Gansu science and Technology Press, 1 ~ 92 (in Chinese).
- Zuo Guochao, Liu Yike and Liu Chunyan. 2003. Framework and evolution of the tectonic structure in Beishan area across Gansu Province, Xinjiang Autonomous Region and Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Acta Geologica Gansu*, 12(1): 1 ~ 15 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Zhang Shuling, He Guoqi, *et al.* 1990. Early paleozoic plate tectonics in beishan area[J]. *Scientia Geologica Sinica*, (4): 305 ~ 315 (in Chinese).
- Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, *et al.* 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity[M]. Beijing: China Land Press, 132 ~ 134 (in Chinese with English abstract).

Zhuan Shaopeng, Chen Tao, Shen Zongyi, *et al.* 2018. Early Paleozoic Subduction of the ocean in Beishan region: Zircon U-Pb geochronological and geochemical evidence from the high-Mg diorite in the Shibanjing area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(4): 533 ~ 546 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 龚全胜, 刘明强, 李海林, 等. 2002. 甘肃北山造山带类型及基本特征[J]. *西北地质*, 35(3): 28 ~ 34.
- 龚全胜, 刘明强, 梁明宏, 等. 2003. 北山造山带大地构造相及构造演化[J]. *西北地质*, 36(1): 11 ~ 16.
- 郭宏, 李霞, 毛启贵, 等. 2006. 新疆东天山岩浆铜镍硫化物矿床地质特征及成矿环境[J]. *新疆地质*, 24(2): 135 ~ 140.
- 何世平, 任秉琛, 姚文光, 等. 2002. 甘肃内蒙古北山地区构造单元划分[J]. *西北地质*, 35(4): 30 ~ 40.
- 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): 6 ~ 15.
- 黄增保, 金霞. 2006. 甘肃红石山蛇绿岩地球化学特征及构造环境[J]. *地质科学*, 41(4): 601 ~ 611.
- 李昌年. 1992. 构造岩浆判别的地球化学方法及其讨论[J]. *地质科技情报*, 11(3): 73 ~ 84.
- 李春昱, 汤耀庆. 1983. 亚洲古板块划分以及有关问题[J]. *地质学报*, (1): 1 ~ 10.
- 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]. *地质研究*, 28: 37 ~ 48.
- 卢进才, 牛亚卓, 魏仙样, 等. 2013. 北山红石山地区晚古生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *岩石学报*, 29(8): 2 685 ~ 2 694.
- Castillo P R. 2006. 埃达克岩成因回顾[J]. *科学通报*, 51(6): 617 ~ 627.
- 聂凤军, 江思宏, 白大明. 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, 1 ~ 499.
- 任云伟, 任邦方, 牛文超, 等. 2019. 内蒙古哈珠地区石炭纪白山组火山岩——北山北部晚古生代活动陆缘岩浆作用的产物[J]. *地球科学*, 44(1): 312 ~ 327.
- 孙立新, 张家辉, 任邦方, 等. 2017. 北山造山带白云山蛇绿混杂岩的地球化学特征、时代及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 36(2): 131 ~ 147.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 2014. 甘肃北山红石山蛇绿岩锆石 U-Pb 年代学研究及构造意义[J]. *岩石学报*, 30(6): 1 685 ~ 1 694.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 2018. 北山石炭纪一二叠纪火山岩成因及构造背景[J]. *岩石矿物学杂志*, 37(6): 884 ~ 900.
- 魏志军, 黄增保, 金霞, 等. 2004. 甘肃红石山地区蛇绿混杂岩地质特征[J]. *西北地质*, 37(1): 13 ~ 18.
- 杨合群, 李英, 赵国斌, 等. 2010. 北山蛇绿岩特征及构造属性[J]. *西北地质*, 43(1): 26 ~ 36.
- 杨合群, 赵国斌, 李英, 等. 2012. 新疆-甘肃-内蒙古衔接区古生代构造背景与成矿的关系[J]. *地质通报*, 32(2/3): 413 ~ 421.
- 赵茹石, 周振环, 毛金海, 等. 1994. 甘肃省板块构造单元划分及其构造演化[J]. *中国区域地质*, (1): 28 ~ 36.
- 左国朝, 李茂松. 1996. 甘肃北山地区早古生代岩石圈形成与演化[J]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1 ~ 92.
- 左国朝, 刘义科, 刘春燕. 2003. 甘新蒙北山地区构造格局及演化[J]. *甘肃地质学报*, 12(1): 1 ~ 15.
- 左国朝, 张淑玲, 何国琦, 等. 1990. 北山地区早古生代板块构造特征[J]. *地质科学*, (4): 305 ~ 315.
- 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, 132 ~ 134.
- 专少鹏, 陈超, 申宗义, 等. 2018. 北山地区早古生代洋盆俯冲记录——来自石板井高镁闪长岩的年代学、地球化学证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 37(4): 533 ~ 546.