

引用格式:宋红伟,赵民,刘坤朋,等.内蒙古牙尔盖地区哈布楚浑迪隆起晚石炭世花岗岩类岩石化学特征及其构造环境[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(5):9-20.

SONG Hongwei,ZHAO Min,LIU Kunpeng,et al.The petrochemical characteristics and tectonic environment of Late Carboniferous granitoids of the Habchuhudi's uplift in Yalgai area, Inner Mongolia[J].Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2019,38(5):9-20.

内蒙古牙尔盖地区哈布楚浑迪隆起晚石炭世花岗岩类岩石化学特征及其构造环境

宋红伟¹,赵民²,刘坤朋¹,余阳¹

(1.河南省航空物探遥感中心,河南 郑州 450053;

2.内蒙古煤炭地质勘查(集团)231有限公司,内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要:通过对哈布楚浑迪隆起晚石炭世花岗岩类进行岩相学、年代学和岩石化学分析,首次系统讨论了牙尔盖地区与古生代区域构造线展布一致的古生代侵入岩岩石化学特征及构造环境。研究表明,该花岗岩类属于钙碱性系列,总体表现为高硅、中-高钾、偏铝质-过铝质特征。大离子亲石元素相对富集Rb,贫K、Ba,高场强元素相对富集Zr、Hf、Nb、Ta、Sr、P、Ti不同程度亏损。轻重稀土强烈分馏,轻稀土分馏明显,重稀土分馏不明显,Eu具有不同程度的亏损。LA-ICP-MS U-Pb测年结果显示²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为 305.5 ± 1.90 Ma,形成时代为晚石炭世。系列判别图解显示,研究区花岗岩类具有火山弧花岗岩特征,部分样品具有同碰撞或板内花岗岩特征,成因类型属S型。

关键词:晚石炭世花岗岩类;哈布楚浑迪隆起;岩石化学特征;构造环境;牙尔盖

中图分类号:P585.3

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2019)05-0009-12

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2019.05.002

The petrochemical characteristics and tectonic environment of Late Carboniferous granitoids of the Habchuhudi's uplift in Yalgai area, Inner Mongolia

SONG Hongwei¹, ZHAO Min², LIU Kunpeng¹, YU Yang¹

(1.Henan Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center, Zhengzhou, Henan 450053,China;

2.Inner Mongolia Coal Geological Exploration (Group) 231 Co. Ltd, Hulunbuir, Inner Mongolia 021000,China)

Abstract: The lithofacies, chronology and analysis of petrochemical characteristics and tectonic environment of the Paleozoic intrusive rocks for Habchuhudi's uplift in Yalgai area was discussed systematically for the first time. The results show that the granites belong to calc-alkaline series and are characterized by high silicon, medium-high potassium and alumina-peraluminous. It's also characterized by remarkable fractionation between LREEs and HREEs, especially obvious with LREEs and not with HREEs, and there are different negative Eu anomalies. LA-ICP-MS U-Pb dating results show that the weighted average age of ²⁰⁶Pb/²³⁸U is 305.5 ± 1.90 Ma and the formation age was Late Carboniferous. Discriminant diagrams show that the granites in the study area (their genetic type is S-type) have the characteristics of volcanic arc granites, and some samples show the characteristics of syn-collision or intra-plate granites.

收稿时间:2018-12-03

基金项目:内蒙古地质勘查基金项目(NMKD2013-09)

作者简介:宋红伟(1972—),男,河南辉县人,高级工程师,主要从事区域地质调查、矿产地质勘查工作。

E-mail:hoveysong@126.com

Key words: Late Carboniferous granitoids; Habchuhudi's uplift; petrochemical characteristics; tectonic environment; Yalgai

大兴安岭增生造山带地处古生代近东西向中亚蒙古造山带和中生代北北东向滨太平洋造山带的叠加复合部位^[1-2],古生代期间该区表现为西伯利亚板块和华北板块之间系列微陆块多次拼合、裂解,中生代期间该区又经历了环太平洋构造体系和蒙古-鄂霍次克海构造体系的双重叠加和改造^[3],是研究中亚蒙古造山带东段有关造山过程、演化及中生代造山作用叠加、复合和改造的理想地区^[1-2]。

内蒙古牙尔盖地区位于大兴安岭增生造山带北段西坡,地处大兴安岭隆起与海拉尔拗陷的衔接部位。哈布楚浑迪隆起位于牙尔盖地区东部,是以晚石炭世北东向花岗岩类为核,以中生代中酸性火山碎屑岩和熔岩为两翼的一个背形隆起。前人对其核部花岗岩类的形成时代、岩浆源区、成因类型及构造环境未进行过系统研究。区域上,王新宇等^[1]认为大兴安岭增生造山带晚石炭世花岗岩沿北东向即古生代区域构造线的方向展布,且主要呈I型花岗岩特征,但其中的白音陶勒盖岩体(316.7 ± 2.1 Ma)具有S型花岗岩的特征。赵强^[4]认为大兴安岭北段牙克石地区晚古生代花岗岩类分为中、晚两期,中期花岗岩类成因类型属I型,晚期属于S型。张影^[5]将大兴安岭中部石炭纪侵入岩分为三期,认为晚石炭世侵入岩形成于同碰撞-后碰撞的构造环境。本研究通过哈布楚浑迪花岗岩体的岩相学、年代学及地球化学特征,研究牙尔盖地区哈布楚浑迪隆起晚石炭世花岗岩类形成的成因类型、岩浆源区和构造环境,探讨牙尔盖地区晚石炭世花岗岩类的地球化学属性,指导研究区地质勘查工作,并有助于中亚蒙古造山带东段有关造山过程及演化的研究。

1 地质背景

研究区为盆岭相间的构造格局,构造形态从西北至南东依次划分为锡尼河盆地、牙尔盖隆起、那木南达吧凹陷、哈布楚浑迪隆起、查干楚鲁廷额很浑迪凹陷五个五级构造单元(图1)。锡尼河盆地广为第四系冲洪积物覆盖,牙尔盖隆起由古元古代兴华渡口群(Pt_1X)和古生界石炭系莫尔根河组(C_1m)构成,那木南达吧凹陷主要沉积有中生界上侏罗系白音高老组(J_3b)与下白垩系梅勒图组(K_1m),哈布楚浑迪隆起主要由古生界泥盆系大民山组($D_{2-3}d$)海相中基性、酸性火山岩、火山碎屑岩及碎屑岩和石炭系莫尔根河组(C_1m)中酸性喷出岩夹细碎屑岩等浅变质岩构成,查干楚鲁廷额很浑迪凹陷主要沉积有中生界上侏罗系玛尼吐组(J_3mn)、白音高老组(J_3b)。

经历了吕梁运动、华力西运动、燕山运动和喜山运动等构造旋回。岩浆活动时代分别为古生代泥盆纪、石炭纪(华里西期)和中生代侏罗纪、白垩纪(燕山期),以石炭纪中性、中酸性、酸性岩浆活动为主,侏罗纪中性、中酸性、酸性岩浆活动次之,白垩纪分布最少,以中性、酸性岩浆活动为主。

研究区于古元古代泛大洋中形成结晶基底。古生代西伯利亚板块与华北板块之间形成古亚洲洋,至三叠纪由于洋盆的扩张作用形成由多个新老小洋盆组成的微陆块或地体的多岛复杂洋区,微陆块碰撞、拼合形成额尔古纳、兴安、松嫩-张广才岭三个地块^[6]。随着晚侏罗世蒙古-鄂霍次克洋的关闭及早白垩世蒙-鄂褶皱系的形成^[6-8],研究区最终归位于西伯利亚板块东南陆缘增生带。

2 岩体地质及其岩石学特征

哈布楚浑迪隆起侵入岩体呈北东向展布,与古生代区域构造线方向一致(图1)。由南西向北东共有6个岩体组成,岩性主要为正长花岗岩($C\gamma$)、斜长花岗岩($C\gamma o$)和花岗闪长岩($C\gamma \delta$),面积 $0.92 \sim 16.06 \text{ km}^2$,呈岩株或岩枝产出,与早石炭世莫尔根河组(C_1m)呈侵入接触关系,与晚侏罗世玛尼吐组(J_3mn)和白音高老组(J_3b)均呈沉积覆盖接触关系。

本次研究采用主量、微量和稀土元素分析,并辅之以镜下观察,以了解其岩石学特征。样品分别采自5个岩体(图1)的边缘或中心等不同部位,以增加样品的代表性。

镜下鉴定显示三种岩石的结构、构造大致相同,均呈中细粒它形-半自形粒状结构、块状构造(图2)。正长花岗岩($C\gamma$)主要由石英($33\% \pm$)、钾长石($53\% \pm$)、斜长石($7\% \pm$)组成,暗色矿物主要为少量黑云母

(5%±);斜长花岗岩(Cγo)主要矿物为石英(30%±)、斜长石(60%±),暗色矿物为黑云母(7%±)和角闪石(2%±);花岗闪长岩(Cγδ)主要由石英(22%±)、钾长石(13%±)、斜长石(47%±)组成,暗色矿物为角闪石(8%±)和黑云母(9%±)。三类岩石中斜长石均呈宽板状、板柱状和板粒状,发育聚片双晶,表现为中酸性斜长石特征。

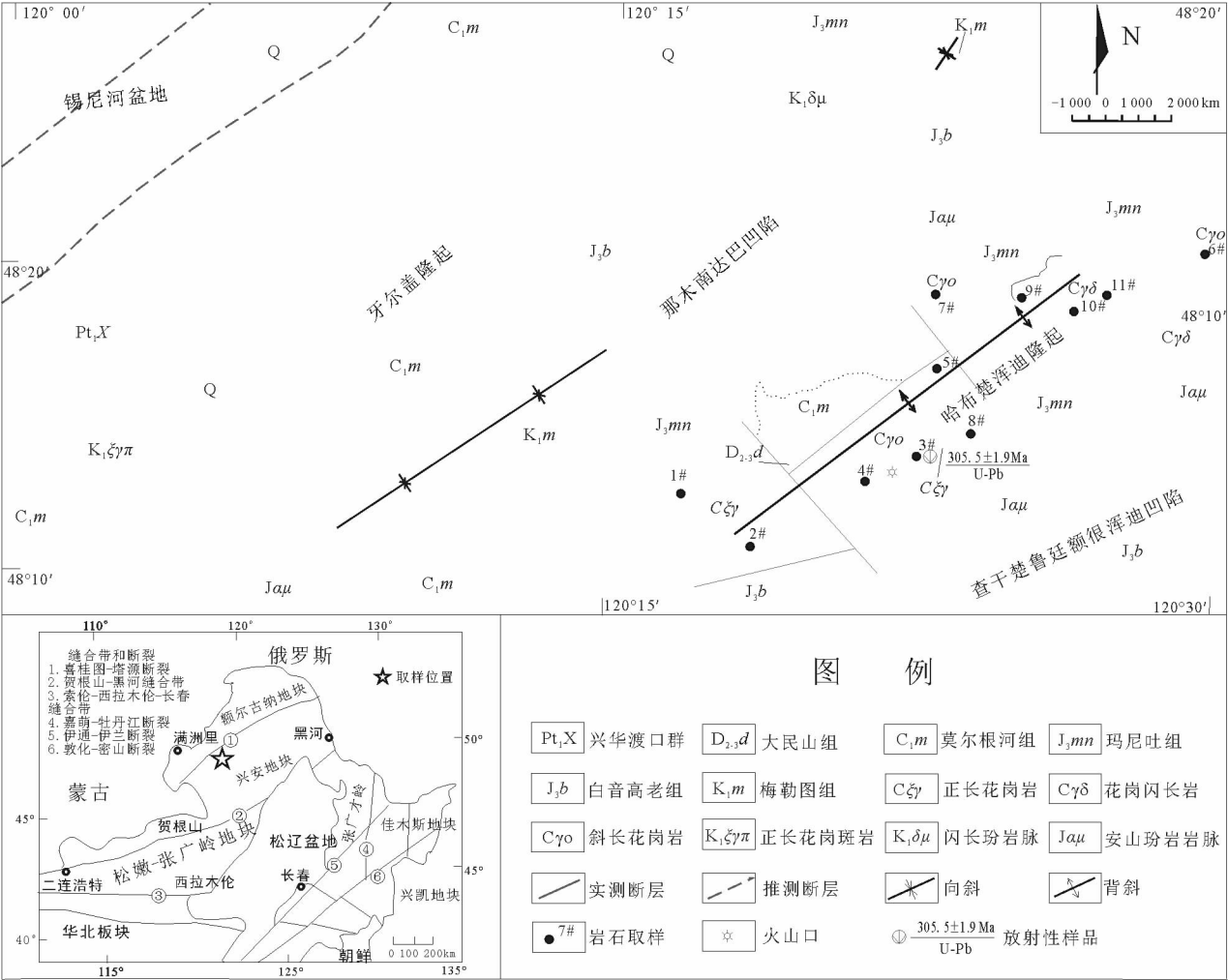
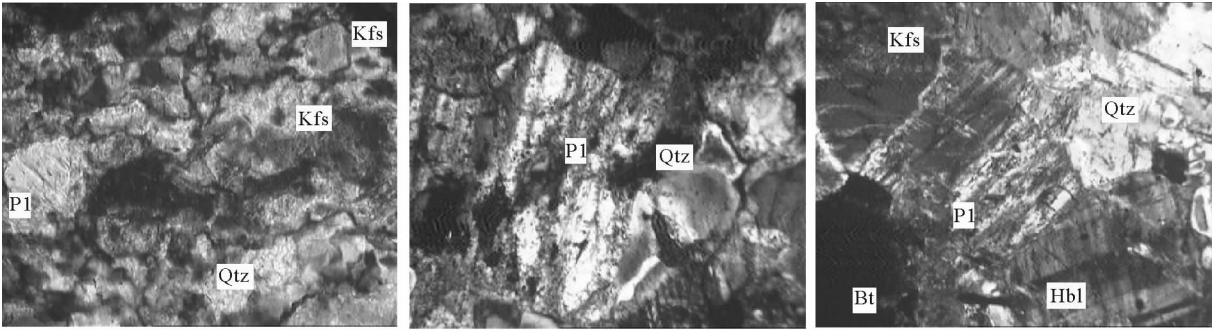


图 1 研究区地质构造示意图

Fig. 1 Diagram of geological structure of the study area



(a) 正长花岗岩

(b) 斜长花岗岩

(c) 花岗闪长岩

Qtz—石英;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Hbl—普通角闪石;Bt—黑云母

图 2 牙尔盖地区晚石炭世花岗岩类显微照片

Fig. 2 Photomicrographs of the Late Carboniferous granitoids in Yalgai area

3 岩石化学特征

本次测试样品的主量元素、微量元素及稀土元素均委托呼伦贝尔市原野测试有限责任公司承担。主量元素运用重量法、容量法、可见分光光度法和原子吸收分光光度法等进行测试,采用高温箱式电阻炉(SX2-4-10)、50 mL 滴定管、可见分光光度计(723N)和原子吸收分光光度计(GGX-610)等仪器,检测依据为 GB/T14506.3~24—2010 硅酸盐岩石化学分析方法,分别用于测定 SiO₂、LOI、Al₂O₃、CaO、MgO、FeO、TiO₂、Fe₂O₃、MnO、P₂O₅ 和 K₂O、Na₂O。微量元素和稀土元素的测试,除 Zr、Hf 运用 X 射线荧光光谱法(X-ray fluorescence,XRF),测试仪器型号为 AxiosmAX,其余均运用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry,ICP-MS),微量元素测试仪器 PE-Nexion300Q,稀土元素测试仪器 PE-Nexion350Q。

3.1 主量元素化学特征

在进行主量元素分析计算时,对各项氧化物总量之和超出 99.25%~100.75%可信度要求的样品采取加权法,使其总和为 99.25%~100.75%之间,并对遭受氧化作用较强的样品进行铁调整,重新核定是否达到该可信度要求,然后参与计算并制作相关图解。根据岩石主量元素分析结果(表 1),研究区晚石炭世花岗岩类三类岩石的岩石化学特征如下:

表 1 牙尔盖地区晚石炭世花岗岩类岩石化学分析及参数表
Tab. 1 petrochemical analysis and parameter details of Late Carboniferous granitoids in Yalgai area

样号	岩石名称	代号	化学成分及含量/%													特征参数					
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	FeO	烧失量	总量	Alk	N/K	τ	A/CNK	σ
1	正长	Cξγ	76.11	12.60	0.15	0.01	0.39	0.36	1.80	4.85	2.71	0.04	0.04	0.22	1.08	99.28	7.62	0.56	66.47	1.21	1.72
2	花岗		72.76	14.51	0.33	0.03	0.72	0.56	2.54	4.56	3.51	0.05	0.11	0.50	0.75	100.18	8.11	0.77	33.48	1.21	2.18
3	岩		69.12	14.64	0.33	0.01	2.30	1.02	3.59	3.31	4.27	0.07	0.14	1.40	0.38	100.20	7.70	1.29	30.97	0.99	2.18
4			71.07	13.67	0.27	0.01	0.77	0.55	3.59	4.30	3.87	0.05	0.11	0.83	0.68	99.09	8.40	0.90	35.96	1.10	2.35
5	斜长	Cγo	75.84	12.03	0.17	0.00	0.84	0.56	2.86	4.14	2.67	0.04	0.03	0.32	0.41	99.50	6.92	0.64	56.00	1.16	1.40
6	花岗		66.86	16.74	0.35	0.00	4.46	1.64	3.80	0.48	4.23	0.05	0.09	1.08	1.6	99.78	4.81	8.82	35.50	1.07	0.91
7	岩		75.47	12.45	0.11	0.08	0.33	0.16	1.74	4.76	4.48	0.03	0.03	0.47	0.14	100.11	9.24	0.94	72.45	0.95	2.63
8			72.04	14.07	0.13	0.00	1.32	0.43	2.79	4.09	4.55	0.04	0.06	0.57	0.21	100.09	8.73	1.11	73.92	0.98	2.56
9	花岗	Cγδ	59.94	16.03	0.60	0.00	4.72	2.09	6.82	2.00	4.33	0.12	0.42	2.48	1.97	99.55	6.68	2.17	19.59	0.90	2.21
10	闪长		75.10	12.80	0.05	0.17	1.32	0.35	1.71	2.70	4.96	0.02	0.02	0.29	0.13	99.49	7.72	1.84	158.00	0.95	1.82
11	岩		73.20	14.69	0.01	0.05	0.22	0.20	1.50	2.23	7.67	0.32	0.08	0.36	0.44	100.53	9.85	3.44	699.00	0.95	3.25

正长花岗岩(Cξγ):SiO₂ 含量为 69.12%~76.11%,平均 72.66%,属酸性岩;Al₂O₃ 含量为 12.60%~14.64%,平均 13.79%;K₂O>Na₂O,N/K 值为 0.56~1.29;Alk 为 7.62%~8.11%,平均 7.81%;里特曼指数(σ)为 1.72~2.18,平均 2.03;铝饱和指数 A/CNK 为 0.99~1.21,平均 1.14(表 1)。在岩石(K₂O+Na₂O)-SiO₂ 图解中,样点均落入亚碱性系列区(图 3(a))。在亚碱性火山岩分类 K₂O-SiO₂ 图解中,样点均落入高钾钙碱性岩区(图 3(b))。在 A/CNK-A/NK 图解中,分别有 1 个和 2 个样点落入偏铝质和过铝质区(图 3(c))。

斜长花岗岩(Cγo):SiO₂ 含量 66.86%~75.84%,平均 72.26%,属于酸性岩类;Al₂O₃ 含量 12.03%~16.74%,平均 14.26%;Na₂O 含量 2.67%~4.55%,平均 3.97%;Alk 为 4.71%~9.24%,平均 7.53%;N/K 值一般为 0.64~1.11,最高达 8.82;里特曼指数(σ)为 0.91~2.63,平均 1.97;A/CNK 值 0.95~1.16,平均 1.05(表 1)。在(K₂O+Na₂O)-SiO₂ 图解中,样点均落入亚碱性区(图 3(a))。在 K₂O-SiO₂ 图解中,样点基本落入高钾钙碱性岩区,仅样品 6 落入低钾拉斑玄武岩区(图 3(b))。在 A/CNK-A/NK 图解中,分别有 2 个和 3 个样点落入偏铝质和过铝质区(图 3(c))。

花岗闪长岩(C $\gamma\delta$):SiO₂ 含量 59.94%~75.10%,平均 69.41%,属于中酸性岩类;Al₂O₃ 含量 12.80%~16.03%,平均 14.51%;A/CNK 值 0.90~0.95,平均 0.93;Alk 值为 6.68%~9.85%,平均 8.08%;N/K 值为 1.84~3.44,平均 2.48;里特曼指数(σ)为 1.82~3.25,平均 2.43(表 1)。根据(K₂O+Na₂O)-SiO₂ 图解,样点均落入亚碱性区(图 3(a))。在 K₂O-SiO₂ 图解中,样点均落入中钾钙碱性岩区(图 3(b))。在 A/CNK-A/NK 图解中,分别有 2 个和 1 个样点落入偏铝质和过碱性区(图 3(c))。

综合岩石造岩元素含量特征与岩石各类组合参数图解(表 1、图 3),三类岩石均属酸性岩类亚碱性系列,其中正长花岗岩(C $\xi\gamma$)与斜长花岗岩(C $\gamma\sigma$)总体表现为高硅、钾质,属偏铝质-过铝质、高钾钙碱性岩石系列。花岗闪长岩(C $\gamma\delta$)总体表现为高硅、钠质,属偏铝质-过碱性岩石系列。

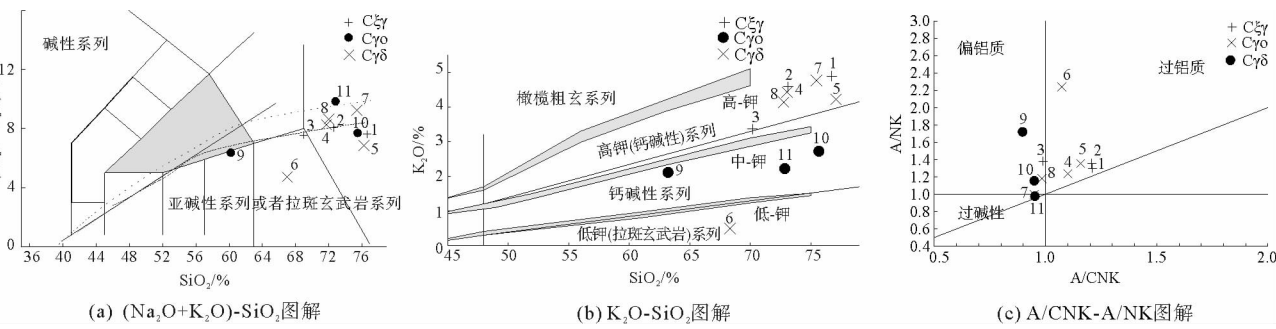
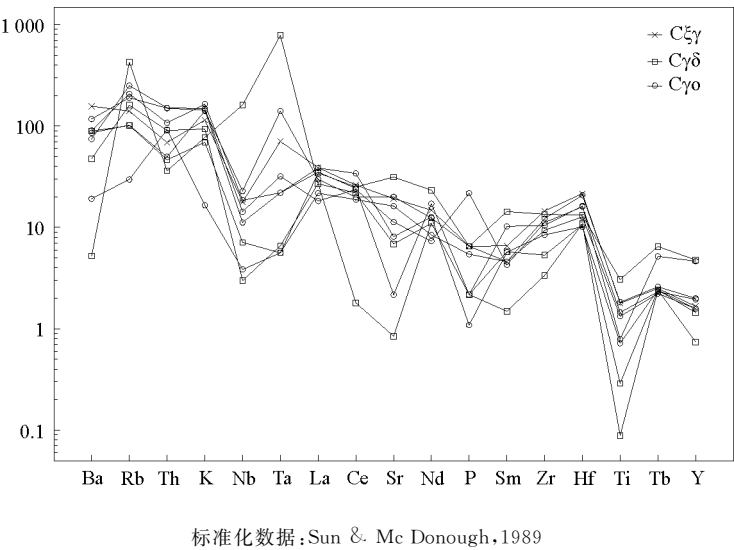


图 3 晚石炭世花岗岩类岩石类型组合图^[9]

Fig. 3 Series diagram of rock types for Late Carboniferous granitoids

3.2 微量元素特征

根据微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4),曲线整体表现为左侧 Ba、Rb、Tb、K 为隆起,右侧向右倾斜的一组密集曲线。从曲线形态来看,晚石炭纪花岗岩类具有火山弧花岗岩特征,仅样品 11 呈同碰撞花岗岩特征,该样品左侧表现为 M 型隆起,Ba、Th 具有不同程度亏损。根据 Rb-Hf-Ta 图解(图 5),样品主要落在火山弧花岗岩区,少量落在碰撞晚期-碰撞后花岗岩区和板内花岗岩区,说明古生代古亚洲洋板块已经向华北板块发生了俯冲,岩浆应沿重新活动的横断层构造框架中的剪切带进行侵位。



标准化数据:Sun & Mc Donough,1989

图 4 晚石炭世花岗岩类微量元素原始地幔标准化蛛网图^[13]

Fig. 4 Primitive mantle-normalized trace elemcuts spider diagram of the Late Corboniferous granitoids

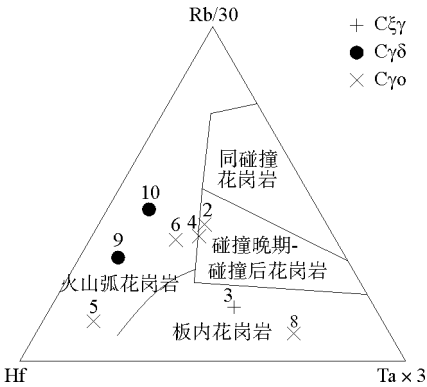


图 5 Rb/30-Hf-Ta×3 判别图解^[14]

Fig. 5 Rb/30-Hf-Ta×3 discriminant diagram

岩石微量元素分析结果见表 2,根据微量元素蛛网图可知,正长花岗岩($C\xi\gamma$)、斜长花岗岩($C\gamma o$)、花岗闪长岩($C\gamma\delta$)均表现为大离子亲石元素富集 Rb,贫 K、Ba。高场强元素中 Zr、Hf 相对富集,Nb、Ta、Ti 表现为不同程度亏损(Ta 元素个别表现为富集),其中斜长花岗岩($C\gamma o$)和花岗闪长岩($C\gamma\delta$)明显亏损,说明晚石炭世花岗岩类与洋壳俯冲削减作用有关,并具有大陆地壳物质的参与^[10]。Sr、P、Ti 几种元素除样品 4 外均表现为明显亏损,说明具有大陆弧背景下造山花岗岩的特征,而 Nb、Ta 的负异常进一步说明该花岗岩属于正常弧花岗岩^[11],据此可以判定是增生在大陆边缘的新的地壳。此外,富集 Rb、贫 Ba,具有 Ba、Nb、Sr、Ti 的负异常,说明本区花岗岩类经过了强烈的岩浆分异结晶作用^[11]。而 Sr 由于主要赋存于斜长石等含钙矿物中,其亏损能够指示岩浆源区斜长石残留相的增加,是发生了以斜长石为主的分离结晶作用所致,说明岩浆源区较浅^[12]。大兴安岭增生造山带晚石炭世花岗岩类大部分富集大离子亲石元素,亏损高场强元素^[1]。

表 2 牙尔盖地区晚石炭世花岗岩类微量元素分析及参数表

Tab. 2 Microelement analysis and parameter details of Late Carboniferous granitoids in Yalgai area

$\mu\text{g/g}$

样号	代号	岩石 名称	微量元素含量													Rb/Sr
			Ba	Rb	Th	Nb	Ta	Ce	Sr	P	Sm	Zr	Hf	Ti	Y	
3	Cξγ	正长 花岗岩	1 098.0	89.2	5.79	12.70	2.89	47.9	406.0	600	2.92	163.0	6.66	2 284	7.57	0.86
4	Cγo	斜长 花岗岩	521.0	159.0	12.70	10.20	1.31	43.4	238.0	2 000	1.90	125.0	4.93	1 853	8.88	0.67
5			821.0	121.0	12.60	7.99	0.90	62.4	171.0	100	2.53	94.7	3.13	919	7.18	0.71
6			134.0	18.9	7.75	2.74	0.23	34.5	342.0	500	2.04	105.0	3.93	1 699	7.19	0.06
7			633.0	132.0	9.03	13.20	0.90	44.5	45.7	200	4.55	117.0	5.02	1 009	21.10	2.89
8			601.0	64.8	4.17	16.30	5.76	36.4	423.0	600	2.04	137.0	6.41	2 339	9.08	0.86
9	Cγδ	花岗 闪长岩	624.0	64.2	3.90	5.07	0.23	46.0	662.0	600	6.36	151.0	4.07	3 919	21.70	0.10
10			333.0	102.0	7.61	2.13	0.27	40.1	145.0	200	2.55	59.7	3.28	370	3.36	0.70
11			36.5	271.0	3.04	115.00	32.20	3.3	17.8	200	0.66	37.6	3.36	113	6.56	15.23

注:图 4 中 K 元素数据由表 1 的 K_2O 换算而来,La、Nd、Tb 三元素数据见表 3。

3.3 稀土元素特征

根据岩石稀土元素分析结果(表 3),晚石炭世花岗岩类三类岩石稀土元素特征如下:

正长花岗岩($C\xi\gamma$):稀土元素总量为 $111.64\ \mu\text{g/g}$, $LR/HR=17.27$, $(La/Yb)_N=27.27$,轻重稀土强烈分馏,轻稀土强烈富集,重稀土弱富集; $\delta Eu=0.99$,几乎不存在 Eu 负异常。稀土配分型式表现为总体右倾的曲线(图 6),重稀土富集呈近似平坦型,曲线斜率中等。Eu 无异常说明斜长石未发生分离结晶。重稀土元素富集、中 Y($7.57\ \mu\text{g/g}$),反映岩浆源区较浅,且与长石、石英参与熔融有关。

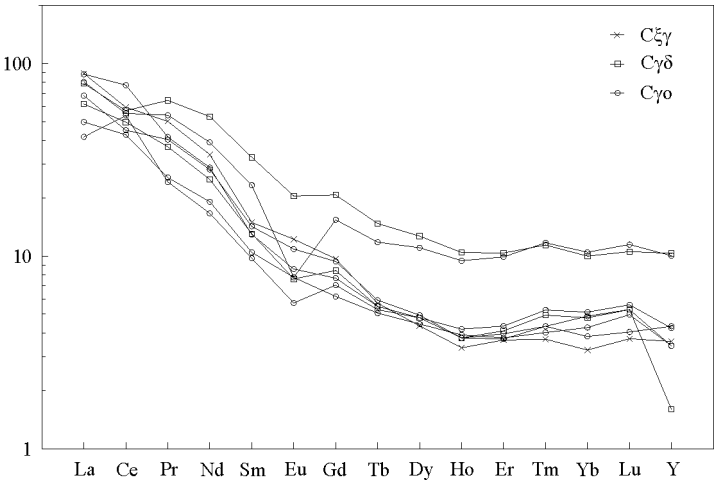
斜长花岗岩($C\gamma\delta$):稀土元素总量中等,为 $88.26\sim133.82\ \mu\text{g/g}$, $LR/HR=7.42\sim12.70$, $(La/Yb)_N=7.87\sim12.88$,轻重稀土强烈分馏,轻稀土强烈富集,重稀土强烈亏损; $\delta Eu=0.71\sim0.77$,为中等程度负 Eu 异常。稀土配分型式表现为一总体向右陡倾的曲线,曲线斜率大,在 Eu 处呈 V 字型浅谷。

花岗闪长岩($C\gamma o$):稀土元素总量为 $72.65\sim121.45\ \mu\text{g/g}$, $LR/HR=7.56\sim18.53$, $(La/Yb)_N=7.67\sim18.04$,轻重稀土强烈分馏,轻稀土强烈富集,重稀土较富集; $\delta Eu=0.40\sim0.93$,为弱-中等负 Eu 异常。稀土配分型式表现为总体右倾的曲线,重稀土富集呈近似平坦型,曲线斜率中等。Eu 无异常或弱负异常说明斜长石未发生分离结晶。重稀土元素富集、Y($7.18\sim21.10\ \mu\text{g/g}$),反映岩浆源区由浅到深,且与角闪石、石榴石参与熔融有关。

从稀土元素配分曲线(图 6)上看,除正长花岗岩外,Eu 均有不同程度的亏损,轻重稀土强烈分馏,轻稀土分馏明显,重稀土分馏不明显,三种岩性岩浆源区的深浅存在一定差异。

表 3 牙尔盖地区晚石炭世花岗岩类稀土元素分析及参数表

Tab. 3 Analysis and parameter details REE of Late Carboniferous granitoids in Yalgai area																$\mu\text{g/g}$	
样号	代号	岩石名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
3	C $\xi\gamma$	正长花岗岩	27.5	47.9	6.11	20.2	2.92	0.90	2.51	0.27	1.40	0.24	0.77	0.12	0.68	0.12	7.57
4		斜长花岗岩	12.9	43.4	2.96	10.0	1.90	0.42	1.83	0.25	1.54	0.30	0.91	0.17	1.07	0.18	8.88
5		斜长花岗岩	27.3	62.4	5.07	17.3	2.53	0.63	1.99	0.26	1.54	0.27	0.83	0.14	1.02	0.17	7.18
6		斜长花岗岩	15.4	34.5	3.12	11.5	2.04	0.57	1.60	0.24	1.43	0.28	0.79	0.13	0.89	0.16	7.19
7	C $\gamma\delta$	斜长花岗岩	24.9	44.5	6.58	23.4	4.55	0.57	4.00	0.56	3.56	0.68	2.08	0.38	2.19	0.37	21.10
8		斜长花岗岩	21.1	36.4	4.92	16.9	2.78	0.80	2.43	0.28	1.59	0.27	0.78	0.14	0.80	0.13	9.08
9		花岗闪长岩	24.4	46.0	7.85	31.8	6.36	1.51	5.38	0.70	4.09	0.75	2.18	0.37	2.09	0.34	21.70
10		花岗闪长岩	19.1	40.1	4.51	15.0	2.55	0.56	2.18	0.26	1.54	0.27	0.86	0.16	1.00	0.17	3.36



标准化数据:Boynton,1984

图 6 晚石炭世花岗岩类稀土元素球粒陨石标准化配分模式图^[13]

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of Late Carboniferous granitoids

4 时代讨论

4.1 年代学分析方法

测试样品(TW-tk59B)的破碎及锆石挑选工作由河北省廊坊市区域地质矿产调查研究所承担;样品中的锆石制靶和阴极发光图像的采集由北京讯得丰科技有限发展公司完成,锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年由吉林大学测试科学实验中心完成;实验原理及流程见文献[15-17]。采用国际标准锆石 91500 为外标,同时使用锆石中含量稳定的²⁹Si 为内标,锆石测定过程中激光束斑直径为 39 μm 。实验数据采用 Anderson(2002)方法进行普通铅校正,最后运用 Isoplot3(2006)程序绘制谐和图^[18]。

4.2 锆石 U-Pb 年龄测定结果

对测试样品(TW-tk59B)选取 23 粒锆石进行定年分析,共获得 23 个有效数据(表 4)。锆石阴极发光图像(CL)显示 23 粒锆石晶型较好,多为短柱状,呈自形-半自形,两端多发育有双锥,长宽比约 2 : 1~3 : 1,且具有密集的岩浆韵律震荡环带(图 7),为典型岩浆成因锆石^[19-20]。

样品 TW-tk59B 中锆石的 U、Th 含量分别为 202.9~1 586.3 $\mu\text{g/g}$ 和 496.7~2 965.8 $\mu\text{g/g}$,Th/U 介于 0.41~0.87 之间(表 4),符合岩浆锆石 Th/U 比值 >0.4 ^[21-22]的特征。锆石谐和年龄为 305.6 ± 0.95 Ma (图 8(a)),加权平均年龄为 305.5 ± 1.90 Ma(图 8(b)),表明其形成时代为晚石炭纪。

表 4 牙尔盖地区石炭纪正长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据

Tab. 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for Carboniferous syenite in Yalgai area

测点号	含量/($\mu\text{g/g}$)		Th/U	同位素比值								年龄/Ma									
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		σ			
TW-tk59B-01	601.2	1047.9	0.57	0.054	579	0.001	691	0.359	135	0.011	771	0.047	642	0.000	891	395	70	312	9	300	6
TW-tk59B-02	586.3	1 815.6	0.87	0.053	031	0.001	280	0.356	310	0.007	533	0.048	813	0.000	722	332	54	310	6	307	4
TW-tk59B-03	280.5	667.5	0.42	0.076	162	0.004	907	0.518	512	0.043	876	0.047	661	0.001	247	1 099	134	424	29	300	8
TW-tk59B-04	310.8	737.5	0.42	0.056	036	0.001	805	0.374	079	0.014	217	0.048	100	0.000	895	454	68	323	11	303	6
TW-tk59B-05	304.2	721.7	0.42	0.052	787	0.001	533	0.351	755	0.009	625	0.048	587	0.000	821	320	65	306	7	306	5
TW-tk59B-06	551.7	1 283.8	0.43	0.050	617	0.001	180	0.343	016	0.008	852	0.048	900	0.000	631	233	54	300	7	308	4
TW-tk59B-07	327.8	764.3	0.43	0.052	652	0.001	731	0.352	477	0.011	021	0.048	673	0.000	666	322	74	307	8	306	4
TW-tk59B-08	744.3	1 815.2	0.40	0.052	449	0.001	037	0.350	197	0.006	877	0.048	457	0.000	604	306	44	305	5	305	4
TW-tk59B-09	814.4	1 430.7	0.57	0.052	270	0.001	433	0.348	955	0.009	849	0.048	450	0.000	813	298	66	304	7	305	5
TW-tk59B-10	923.3	1 112.9	0.83	0.050	783	0.001	583	0.341	846	0.010	232	0.048	946	0.000	791	232	68	299	8	308	5
TW-tk59B-11	517.9	917.4	0.56	0.053	991	0.002	402	0.362	052	0.015	969	0.048	772	0.001	041	372	72	314	12	307	6
TW-tk59B-12	846.9	1 303.6	0.65	0.054	227	0.001	079	0.364	951	0.008	637	0.048	476	0.000	557	389	44	316	6	305	3
TW-tk59B-13	202.9	496.7	0.41	0.054	353	0.002	398	0.364	196	0.016	433	0.048	470	0.000	752	387	100	315	12	305	5
TW-tk59B-14	851.0	1 460.0	0.58	0.052	925	0.001	103	0.356	773	0.007	408	0.048	957	0.000	599	324	48	310	6	308	4
TW-tk59B-15	479.9	749.5	0.64	0.055	802	0.002	039	0.377	971	0.013	232	0.049	396	0.000	819	456	82	326	10	311	5
TW-tk59B-16	453.2	2 137.6	0.68	0.052	926	0.001	011	0.354	107	0.007	400	0.048	439	0.000	593	324	43	308	6	305	4
TW-tk59B-17	302.7	684.1	0.44	0.051	491	0.001	646	0.340	999	0.011	016	0.048	072	0.000	627	261	79	298	8	303	4
TW-tk59B-18	723.4	1 472.5	0.49	0.050	081	0.001	751	0.339	228	0.014	924	0.048	834	0.001	017	198	79	297	11	307	6
TW-tk59B-19	128.9	1 781.6	0.63	0.053	085	0.001	321	0.353	554	0.009	584	0.048	461	0.000	983	332	56	307	7	305	6
TW-tk59B-20	744.0	1 249.0	0.60	0.052	678	0.001	594	0.353	457	0.009	715	0.049	066	0.000	972	322	64	307	7	309	6
TW-tk59B-21	432.1	829.7	0.52	0.050	993	0.001	397	0.341	200	0.008	786	0.048	804	0.000	683	239	63	298	7	307	4
TW-tk59B-22	807.2	1 513.5	0.53	0.054	793	0.001	407	0.365	813	0.008	784	0.048	858	0.000	903	467	57	317	7	308	6
TW-tk59B-23	443.0	902.4	0.49	0.053	510	0.001	520	0.355	676	0.011	026	0.048	140	0.000	737	350	65	309	8	303	5

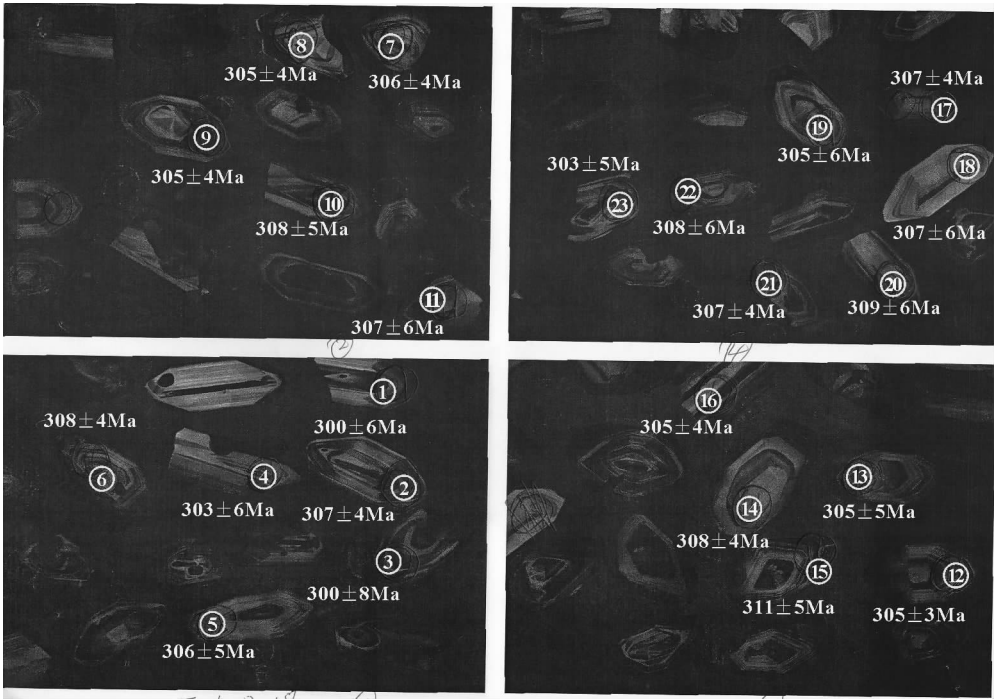


图 7 石炭纪正长花岗岩样品 TW-tk59B 锆石阴极发光图像

Fig. 7 CL images of selected zircons for samples TW-tk59B from the Carboniferous syenogranite

4.3 时代认定

研究区石炭纪正长花岗岩(C ξ γ) 岩体侵位于泥盆系中上统大民山组及下石炭统莫尔根河组,同位素采样点位于米浩勒浑迪一带晚石炭世花岗岩类岩体中部,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年(图 8)显示其加权平均年龄为 305.5 ± 1.90 Ma,形成时代属晚石炭纪。研究表明,大兴安岭增生造山带古生代晚石炭世花岗岩类年龄为 $295.1 \pm 2.8 \sim 335 \pm 5$ Ma^[1],大兴安岭中部晚石炭世侵入岩同位素 U-Pb 年龄为 $299 \sim 322$ Ma^[5],相邻红花尔基地区古生代晚石炭世二长花岗岩 U-Pb 年龄为 310.5 ± 1.3 Ma^[23],苏格河幅晚石炭世锆石 U-Pb 年龄 $303 \sim 314$ Ma^[24],说明牙尔盖地区正长花岗岩样品测试年龄与区域上相邻研究区晚石炭世花岗岩类时代基本一致。

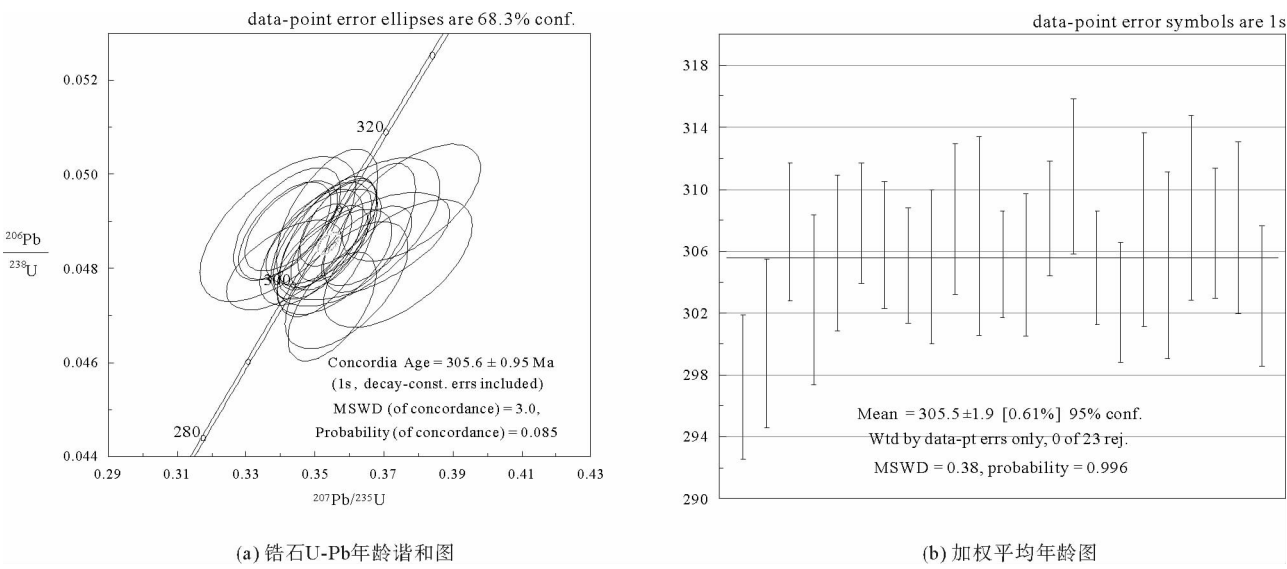


图 8 石炭纪正长花岗岩样品 TW-tk59B 锆石年龄

Fig. 8 Zircon age of samples TW-tk59B from the carboniferous syenogranite

5 花岗岩构造环境及成因类型

晚石炭世花岗岩类均呈(高钾)钙碱性,弧成熟度较高。在花岗岩 Rb-(Y+Nb)图解中(图 9),样品均落在火山弧区域(VAG),说明其形成与俯冲作用有关,处于岛弧或大陆边缘弧环境^[9];在 ACF 图解中(图 10)样点基本落入 S 型区域,仅样品 10 落入 I 型区域,研究区花岗闪长岩黑云母含量偏高,具有 I/S 型过渡的特征,反映本区临近俯冲晚期,或由俯冲逐渐转向碰撞的构造机制。微量元素配分曲线和 Rb-Hf-Ta 图解均表明研究区花岗岩以火山弧花岗岩为主,后者显示少量样品属于碰撞晚期-碰撞后花岗岩和板内花岗岩,有效地支持了 ACF 图解得出的结论。

研究区石炭纪花岗岩体主要侵位于哈布楚浑迪背斜轴部,而大兴安岭地区在早石炭世已开始由碰撞向伸展拉张阶段转换^[23],说明本区晚石炭世花岗岩类侵位时间与邻区红花尔基晚石炭世二长花岗岩相似,处于碰撞向伸展的转换过程中,前期挤压滑脱为后期岩浆侵位提供了空间条件,岩浆侵入与俯冲碰撞相比具有一定的滞后性。主量元素岩石化学分析表明该花岗岩 Rb/Sr 比值总体偏低(表 2),反映岩浆源区深度较浅。稀土元素配分曲线呈明显的右倾特征(图 6),该期侵入岩具有轻重稀土强烈分离、轻稀土强烈富集而重稀土强烈亏损的特征,且具有不同程度的 Eu 负异常,应为源区岩石在部分熔融过程中富含重稀土的角闪石和富含 Eu 的斜长石作为残留相的结果。

同位素测年显示研究区花岗岩属晚石炭纪(华力西期),研究表明在晚泥盆世-中二叠世由于古亚洲洋洋内俯冲作用在区域上广泛形成了弧岩岩浆^[10]。弧俯冲带岩浆形成是多源的,包括洋壳、上覆的楔形地幔、楔

形地幔上面的地壳,并且有水的参与,其热源一般是在大陆边缘弧受汇聚挤压岩石圈增厚之后,由密度大的岩石圈根拆沉诱发的对流地幔带来^[27]。研究区晚石炭世花岗岩类的形成,是随着古亚洲洋板片向微陆块的俯冲和碰撞,导致地壳加厚和地壳岩层褶皱隆起,拆沉作用引起对流地幔底侵并为下地壳源区岩石熔融提供热源形成原生岩浆,由于楔形地幔在俯冲过程中卷入大量的泥盆系、石炭系并熔融到原生壳源岩浆,且岩浆在上升过程中压力逐渐降低并伴有水的参与,压力-温度-组分达到一种新的平衡,形成派生壳源岩浆。褶皱隆起和构造断裂为岩浆侵位提供了有利条件,致使研究区晚石炭世花岗岩类形成并沿区域构造线方向呈带状分布。

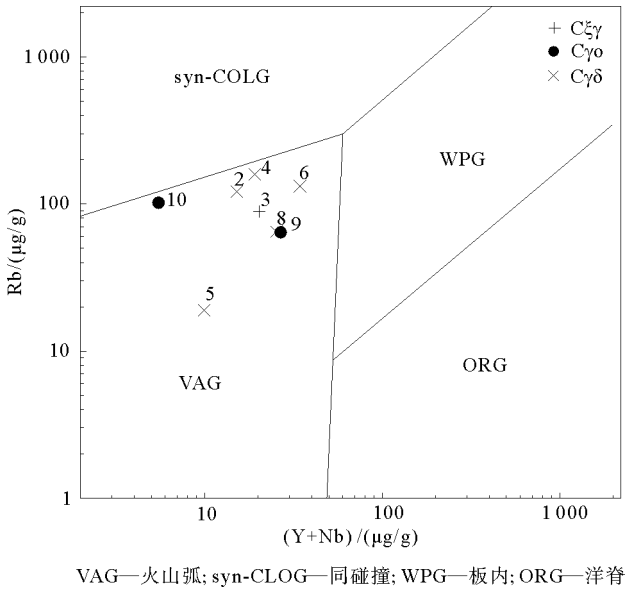


图 9 晚石炭世花岗岩类 Rb-(Y+Nb)图解^[25]

Fig. 9 Diagram of Late Carboniferous granitoids Rb-(Y+Nb)

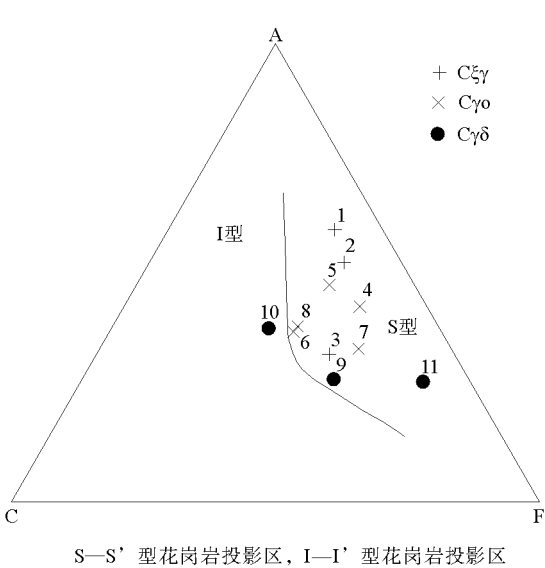


图 10 晚石炭世花岗岩类 ACF 图解^[26]

Fig. 10 Diagram of Late Carboniferous granitoids ACF

6 结论

- 1) 研究区晚石炭世花岗岩类属于(高钾-中钾)钙碱性系列,其中正长花岗岩和斜长花岗岩的化学成分以高硅、钾质、偏铝质-过铝质为特征,花岗闪长岩以高硅、钠质、偏铝质-过碱性为特征。
- 2) 岩石微量元素分析表明,晚石炭世花岗岩类具有大陆弧背景下造山花岗岩的特征,是增生在大陆边缘的新的地壳,岩浆源区较浅且发生了以斜长石为主的分离结晶作用。
- 3) 岩石稀土分配曲线表明,除正长花岗岩外,晚石炭世花岗岩类轻重稀土强烈分馏,轻稀土分馏明显,重稀土分馏不明显, Eu 均有一定程度的亏损,进一步说明三类岩石岩浆源区的深浅存在一定差异。
- 4) 获得牙尔盖地区石炭纪正长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄值为 305.5±1.90 Ma,属晚石炭世。
- 5) 研究区花岗岩类构造环境判别类型为火山弧花岗岩,部分样品具有同碰撞或板内花岗岩特征,成因类型属于 S 型花岗岩。

参考文献:

[1]王新宇,侯青叶.大兴安岭增生造山带上晚石炭世花岗岩类空间分布[J].地球科学进展,2012,27(增1):138-140.
[2]薛怀民,郭利军,侯增谦,等.大兴安岭西南坡成矿带晚古生代中期未变质岩浆岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学[J].岩石矿物学杂志,2010,29(6):811-823.
XUE Huaimin, GUO Lijun, HOU Zengqian, et al. SHRIMP zircon U-Pb ages of the middle Neopaleozoic unmetamorphosed magmatic rocks in the southwestern slope of the Da Hinggan Mountains, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica et Mineralogi-

- ca, 2010, 29(6): 811-823.
- [3] 唐杰, 许文良, 王枫. 东北亚早中生代火成岩组合的时空变异: 对古太平洋板块俯冲开始时间的制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(6): 1181-1194.
- TANG Jie, XU Wenliang, WANG Feng. Rock associations and their spatial-temporal variations of the Early Mesozoic igneous rocks in the NE Asia: Constraints on the initial subduction timing of the Paleo-Pacific plate[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(6): 1181-1194.
- [4] 赵强. 大兴安岭北段牙克石地区晚古生代花岗岩类成因类型及地质意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [5] 张影. 大兴安岭中部石炭纪侵入岩的年代学、地球化学及其地球动力学意义[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [6] 纪政, 葛文春, 杨浩, 等. 大兴安岭中段晚三叠世安第斯型安山岩: 蒙古-鄂霍茨克大洋板片南向俯冲作用的产物[J]. 岩石学报, 2018, 34(10): 2917-2930.
- JI Zheng, GE Wenchun, YANG Hao, et al. The Late Triassic Andean-type andesite from the central Great Xing'an Range: Products of the southward subduction of the Mongol-Okhotsk oceanic plate[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(10): 2917-2930.
- [7] 莫中国, 韩美莲, 李锦轶, 等. 蒙古-鄂霍茨克造山带的组成及造山过程[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 24(3): 50-52.
- MO Shenguo, HAN Meilian, LI Jinyi, et al. Compositions and orogenic processes of Mongolia-Okhotsk orogen[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science) 2005, 24(3): 50-52.
- [8] 张晓飞, 刘俊来, 冯俊岭, 等. 内蒙古锡林浩特乌拉苏太石寨组火山岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 2016, 35(5): 766-775.
- ZHANG Xiaofei, LIU Junlai, FENG Junling, et al. Geochronological and geochemical features of volcanic rocks of Dashizhai formation in Ural Sutai of Xilin Hot, Inner Mongolia, and their geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(5): 766-775.
- [9] RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22: 247-263.
- [10] 茹艳娇, 徐学义, 李智佩, 等. 西天山乌孙山地区大哈拉军山组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造环境[J]. 地质通报, 2012, 31(1): 50-62.
- RU Yanjiao, XU Xueyi, LI Zhipai, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and tectonic background of the Dahalajunshan formation volcanic rocks in Wusunshan area, West Tianshan Mountains[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(1): 50-62.
- [11] 马永非, 刘永江, 秦涛, 等. 大兴安岭中段扎赉特旗地区石炭纪花岗岩的岩石成因、构造背景及对增生造山作用的指示[J]. 岩石学报, 2018, 34(10): 2931-2955.
- MA Yongfei, LIU Yongjiang, QIN Tao, et al. Carboniferous granites in the Jalaid Banner area, middle Great Xing'an Range, NE China: Petrogenesis, tectonic background and orogeny accretionary implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(10): 2931-2955.
- [12] 戴慧敏, 杨忠芳, 马振东, 等. 大兴安岭查巴奇地区中生代侵入岩岩石地球化学特征及构造背景[J]. 中国地质, 2012, 40(10): 138-140.
- DAI Huimin, YANG Zhongfang, MA Zhendong, et al. The petrogeochemical characteristics and tectonic setting of Mesozoic intrusive rocks in Chabaqi area of the Da Hinggan Mountains[J]. Geology in China, 2012, 40(10): 138-140.
- [13] 杨学明. 岩石地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000: 155-170.
- [14] SALTERS V J M, HART S R. The mantle sources of ocean ridges, island and arcs: The Hf-isotope connection[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 104(2/4): 364-380.
- [15] YUAN H L, GAO S, LIU X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Geostandard Newsletter: The Journal of Geostandards and Geoanalysis, 2004, 28(3): 353-370.
- [16] LIU Y S, GAO S, HU Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircon from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [17] LIU Y S, HU Z C, GAO C G, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by

- LA-ICP-MS[J].Chinese Science Bulletin,2010,55(15):1535-1546.
- [18]韩作振,闫俊磊,刘辉,等.吉林永吉地区南楼山组火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(1):10-19.
- HAN Zuozhen,YAN Junlei,LIU Hui,et al.Zircon U-Pb chronology and geochemical characteristics of volcanic rocks from the Nanloushan formation in Yongji area, Jilin province[J].Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science) 2018,37(1):10-19.
- [19]冯乔,徐子苏,张耀,等.青岛胶南隆起带小珠山早白垩世花岗岩锆石 U-Pb 年代学及胶东半岛中生代花岗岩成因初探[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(2):1-13.
- FENG Qiao,XU Zisu,ZHANG Yao,et al.Zircon U-Pb geochronology of the Early Cretaceous Xiaozhushan granite in Qingdao Jiaonan uplift and tectonic evolution of Mesozoic granite in Jiaodong Peninsula[J].Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science) 2019,38(2):1-13.
- [20]吴元保,郑永飞.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J].科学通报,2004,49(16):1589-1604.
- WU Yuanbao,ZHENG Yongfei.Zircon genetic mineralogy and its constraints on U-Pb age interpretation[J].Chinese Science Bulletin,2004,49(16):1589-1604.
- [21]BELOUSOVA E,GRIFFIN W,O'REILLY S Y,et al.Igneous zircon:Trace element composition as an indicator of source rock type[J].Contributions to Mineralogy and Petrology,2002,143(5):602-622.
- [22]ROWLEY D B,XUE F,TUCKER R D,et al.Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan:U/Pb zircon geochronology[J].Earth and Planet Science Letters,1997,151(3):191-203.
- [23]赵世峰.大兴安岭东北部红花岗基地区古生代花岗岩年代学、元素、Hf 同位素地球化学特征[D].长春:吉林大学,2016.
- [24]白志达,徐德兵.牙克石幅 M51C003001、苏格河幅 M51C004001、阿尔山幅 L50C001004 1:25 万区域地质调查报告[R].北京:中国地质大学(北京),2015.
- [25]PEARCE J A,HARRIS N B W,TINDLE A G,et al.Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J].Journal of Petrology,1984,25:956-983.
- [26]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].武汉:中国地质大学出版社,1991:20-37.
- [27]邓晋福,罗照华,苏尚国,等.岩石成因、构造环境与成矿作用[M].北京:地质出版社,2004:21-32.

(责任编辑:高丽华)

(上接第 8 页)

- [16]杨士雄,郑卓,宗永强,等.田洋玛珥湖中更新世以来磁化率特征及其环境意义[J].中山大学学报(自然科学版),2012,51(3):121-127.
- YANG Shixiong,ZHENG Zhuo,ZONG Yongqiang,et al.Characteristics and environmental significance of magnetic susceptibility of the Tianyang Maar lake since Middle Pleistocene[J].Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2012,51(3):121-127.
- [17]齐向前,陈鹏,余继峰,等.山东山旺盆地地质研究现状及展望[J].科技创新导报,2012(26):31.
- [18]梁明媚,王宇飞,李承森.山旺中新世植被演替及古气候定量研究[J].古地学报,2001,3(3):11-20.
- LIANG Mingmei,WANG Yufei,LI Chengsen.Palaeovegetation succession and quantitative palaeoclimate reconstruction of the Miocene Shanwang assemblage[J].Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),2001,3(3):11-20.

(责任编辑:高丽华)