

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.09.010

内蒙古布林庙晚石炭世碱长花岗岩的发现及其对古亚洲洋演化的制约

郝书清¹, 戎秀伟¹, 王丽娟^{2*}, 李猛兴³

HAO Shuqing¹, RONG Xiuwei¹, WANG Lijuan^{2*}, LI Mengxing³

1. 山西省第三地质工程勘察院有限公司, 山西 晋中 030620;

2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061;

3. 山西省地质调查院有限公司, 山西 太原 030006

1. Shanxi Third Geological Engineering Investigation Institute Co., Ltd., Jinzhong 030620, Shanxi, China;

2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;

3. Shanxi Institute of Geological Survey Co., Ltd., Taiyuan 030006, Shanxi, China

摘要:对贺根山蛇纹岩带北缘的布林庙碱长花岗岩体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征研究,以期解释其岩石成因及地质意义。研究表明:碱长花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄为 304 ± 1 Ma,为晚石炭世岩浆活动的产物;所有样品的地球化学特征相似,表现为高硅、富碱且相对富钾、弱过铝质的特点,富集 Rb、K 等大离子亲石元素,贫 P、Sr、Ti 等元素。结合样品的 $10000\text{Ga}/\text{Al}$ 值、TFeO 含量、Zr 含量、锆石饱和温度等相关指标,认为岩体为高钾钙碱性(钾玄岩)系列的 A 型花岗岩。岩体形成于贺根山洋盆闭合后,是古亚洲洋造山后伸展阶段早期阶段的产物。

关键词:布林庙;碱长花岗岩;锆石 U-Pb 年龄;地球化学;岩石成因;地质调查工程;内蒙古

中图分类号: P534.45; P588.12⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)09-1613-11

Hao S Q, Rong X W, Wang L J, Li M X. Discovery of the Late Carboniferous alkali-feldspar granite from the Bulinmiao area in Inner Mongolia and its constraints on the evolution of the Paleo-Asian-Ocean. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41 (9): 1613-1623

Abstract: In this paper, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Bulinmiao alkali-feldspar granite pluton located in the northern margin of the Hegenshan ophiolite belt are studied in order to explain its petrogenesis and tectonic significance. The study shows that the zircon U-Pb dating give weighted average age of 304 ± 1 Ma, indicating that it is the product of magmatic activity in the Late Carboniferous. The general characteristics of the granite samples are similar, showing the characteristics of high silicon, rich alkali, rich K, and weak peraluminous. Trace elemental data of these rocks show LILE (Rb, K) enrichment, HFSE (P, Sr, Ti) depletion. Combining with the $10000\text{Ga}/\text{Al}$ value, TFeO, Zr contents and zircon saturation temperatures of the sample, the pluton is an aluminous A-type granite and belongs to the high-K calc-alkaline series. The granite was the product of the early stage post-orogenic extension after closure of Hegenshan Ocean.

Key words: Bulinmiao; alkali-feldspar granite; zircon U-Pb dating; geochemistry; petrogenesis; geological survey engineering; Inner Mongolia

兴蒙造山带位于巨型中亚造山带的东段,夹持于华北板块、西伯利亚板块之间(图 1-a),经历了多

个(古亚洲洋、古太平洋、蒙古-鄂霍茨克洋)构造体系的叠加、改造作用,是中亚造山带漫长、复杂的构

收稿日期:2019-07-02;修订日期:2021-07-01

资助项目:中国地质调查局项目《1:5 万哈达图(L50E013019)等四幅区调》(编号:12120113056400)及自然资源部项目《我国典型地区大气水-地表水-地下水资源综合评估与水平衡研究——以溇滢平原为例》(编号:B201905)

作者简介:郝书清(1964-),男,硕士,高级工程师,从事矿产勘查工作。E-mail:457120566@qq.com

*通信作者:王丽娟(1981-),女,硕士,高级工程师,从事地球化学研究。E-mail:282665774@qq.com

造演化史中极重要的地质单元^[1-3],其地理范围一般包括中国境内的内蒙古中东部、大兴安岭地区^[4]。其中,古亚洲洋可能自早古生代开始俯冲,在晚古生代末期,又发生了洋盆闭合、板块拼合增生等重要地质过程^[2-3,5]。

在兴蒙造山带的构造演化过程中,古亚洲洋最终闭合的位置、时限一直是重要的研究主题,并取得了丰富的研究成果。综合地层、岩浆作用、电磁测深等资料,对古亚洲洋的最终闭合位置,主要有以下2种观点:索伦-西拉木伦-长春-延吉缝合带^[6-8]和黑河-嫩江-贺根山缝合带^[9-10]。另外,还有学者把黑河-嫩江-乌兰浩特-锡林浩特南-艾力格庙缝合带作为古亚洲洋的最终闭合位置^[3,11]。对于闭合的时限,存在泥盆纪^[11-12]、晚石炭世-中三叠世^[3,13-18]等观点。古亚洲洋缝合带的位置及闭合时限的多样性,显示了兴蒙造山带构造演化过程的独特性、复杂性。

花岗岩作为造山带的重要组成部分,蕴含着丰富的板块碰撞、地壳增生等地质信息,为研究造山带的构造演化提供了良好的窗口。在黑河-嫩江-贺根山缝合带上发育大量晚古生代花岗岩,构成了一条巨型岩浆岩带。但其构造背景并未取得统一的认识,主要分歧有陆内裂谷^[11,11]、造山后伸展环境(碱性-二长花岗岩,303~271 Ma)^[13-17]、大洋俯冲环境(奥长花岗岩-闪长岩,325~309 Ma)^[19-22]、活动大陆边缘弧后伸展环境(碱长花岗岩,325 Ma)^[23]。以上年龄数据(325~271 Ma)大致勾勒出了二连-东乌旗一带晚古生代岩浆岩的演化过程。对于构造背景认识的分歧,可能是由于研究对象处于不同的时代所致。另外,尽管前人对该时期花岗岩进行了较详尽的研究,但有些岩体仍缺少年代学数据等方面的工作,布林庙碱长花岗岩就是其中之一。

研究区及周围(1:5万哈达图等四幅的经纬度范围为北纬45°40'~46°00'、东经118°30'~119°00')位于东乌旗东部,有大面积的中生代火山岩、第四系分布,面积约1430 km²的范围内尚未见晚古生代岩浆作用的确切报道。本次进行区域地质调查工作时首次发现了布林庙碱长花岗岩,弥补了晚古生代岩浆岩在该地区空间上的缺失。本文从锆石U-Pb年龄、全岩地球化学特征等方面对该岩体进行了详细研究,并分析其岩石成因及构造意义,为该地区

晚古生代洋盆闭合的时限提供了年代学数据的约束,也为兴蒙造山带北部的晚古生代构造岩浆演化提供了研究素材。

1 地质背景及岩相学特征

研究区位于内蒙古自治区东乌珠穆沁旗以东,大地构造位置位于黑河-嫩江-贺根山缝合带的北缘(图1-b),该缝合带呈NE方向展布,被广泛认为是古亚洲洋闭合的地区之一,主要依据:①沿缝合带上的朝克山、贺根山等地断续出露形成于早石炭世的蛇绿岩,属于洋壳物质残余^[24-26];②沿该缝合带断续出露一条巨型的碱性岩浆岩带,侵位稍晚于蛇绿岩,普遍被认为是造山后或非造山环境下伸展背景的产物^[13-17]。此外,还有学者把该缝合带以南的黑河-嫩江-乌兰浩特-锡林浩特南-艾力格庙缝合带作为古亚洲洋南缘的最终闭合位置^[3,11]。

该岩体分布于布林庙一带的巴音查干山、额新高吉高尔山等地(图1-c),命名为布林庙碱长花岗岩。岩体总体以NE方向的岩株形态分布,出露面积约3.2 km²,整体出露较差,两侧被第四系、侏罗系火山岩地层角度不整合覆盖,火山岩地层中可见花岗岩角砾,也间接说明了二者间的接触关系。岩体中局部可见糜棱岩化,受露头限制产状不清,但提供了变质变形的地质记录。岩体主要由碱长花岗岩组成,根据斑晶及矿物粒度,分为细中粒碱长花岗岩、细粒斑状碱长花岗岩2种岩性,二者之间呈渐变过渡接触。另外,在岩体的南侧可见零星不规则椭圆状的捕虏体,岩性为斑状角闪二长岩。各岩性特征描述如下。

细中粒碱长花岗岩(图2-a):浅灰色,细中粒花岗岩结构,部分样品呈文象结构,块状构造。矿物组成为:钾长石(70%,粒度大小2~5 mm),板状,明显高岭土化;石英(25%,0.5~2 mm),他形粒状;斜长石(5%,0.2~1 mm),半自形板状,零星分布。

细粒斑状碱长花岗岩(图2-b):浅灰红色,似斑状结构,基质呈微细粒的文象结构,斑晶为钾长石(5%~10%,1~2.5 mm),自形板状,可见高岭土化。基质由钾长石、石英组成,粒度0.1~0.5 mm,其中钾长石(65%~70%)呈半自形板状-他形粒状;石英(20%)呈他形粒状。

斑状角闪二长岩(图2-c):浅灰红色,斑状-基质微细晶结构,块状构造。斑晶粒度一般为1~

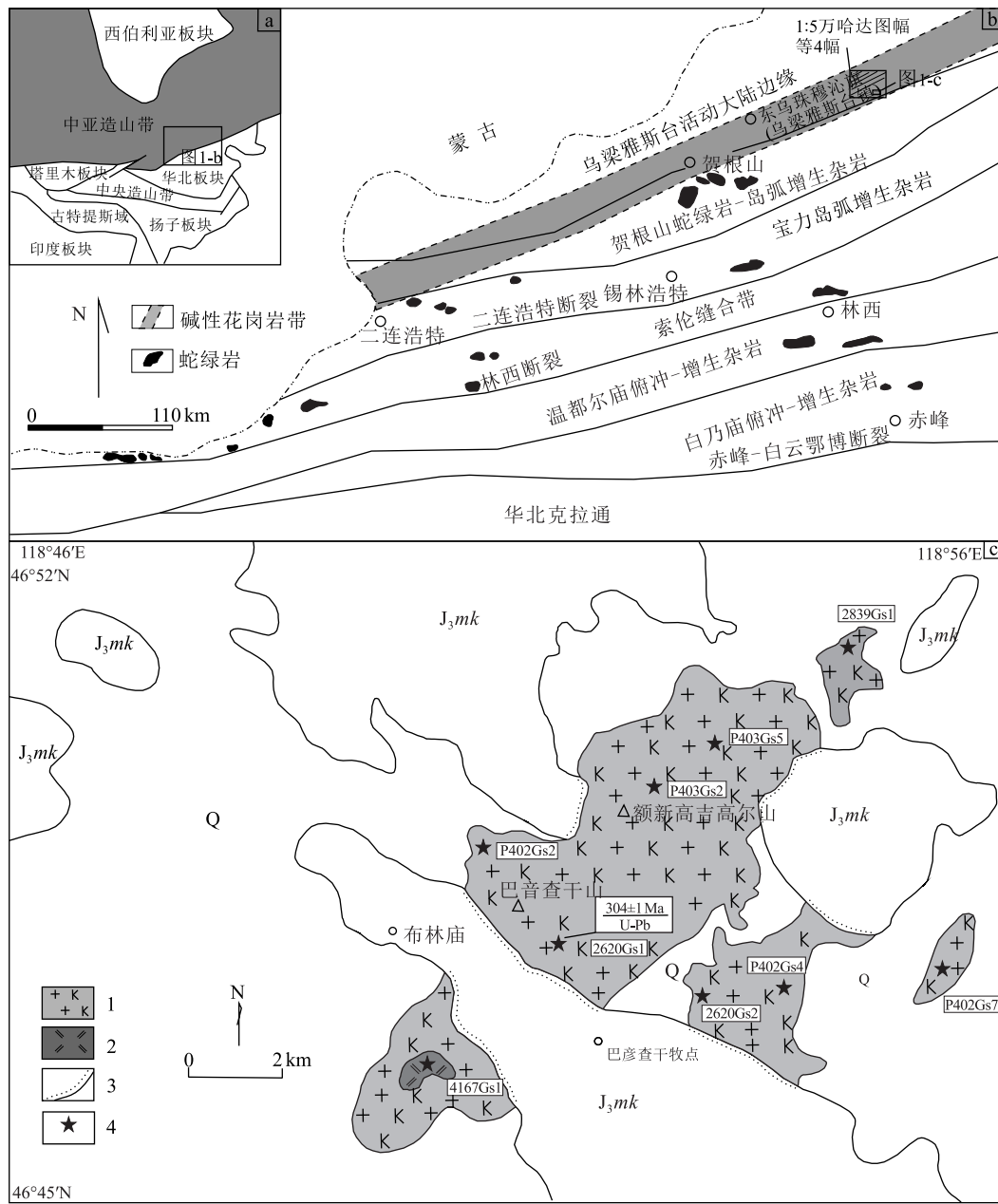


图 1 研究区位置与岩体地质图

Fig. 1 The tectonic location of the study area and the sketch pluton map

a—中亚造山带位置图;b—华北北部区域构造地质图(据参考文献[5]);c—布林庙碱长花岗岩地质图。Q—第四系; J_3mk —侏罗系满克头鄂博组;1—晚石炭世碱长花岗岩(细中粒、细粒斑状);2—晚石炭世斑状角闪二长岩;3—角度不整合界线;4—采样位置

4.5 mm, 由斜长石、角闪石组成, 其中斜长石(30%)呈半自形板状, 发育聚片双晶; 角闪石(5%)呈半自形短柱状。基质粒度一般小于 0.5 mm, 由斜长石、钾长石、石英组成, 其中斜长石(30%)具轻微绿帘石化、高岭土化蚀变, 局部被钾长石交代; 钾长石(20%)、石英(5%~10%)常呈文象状共生。

2 锆石 U-Pb 测年

2.1 测试方法

本次对布林庙碱长花岗岩中的细中粒碱长花岗岩进行了锆石 U-Pb 测年, 采样位置为北纬 45°46'48"、东经 118°51'27", 样品重量约 25 kg。首先在河北省区调所实验室完成样品破碎, 采用常规方法

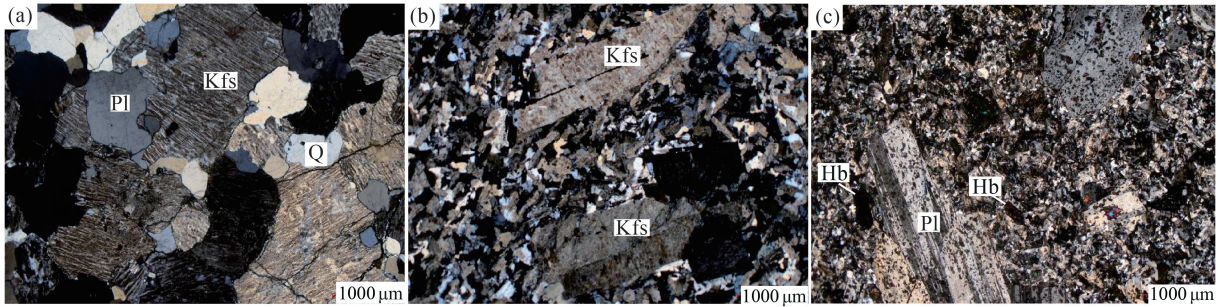


图2 碱长花岗岩显微镜下特征

Fig. 2 Photomicrographs of the alkali-feldspar granite

Q—石英;Pl—斜长石;Kfs—钾长石;Hb—角闪石

把样品粉碎至70~100目,经人工淘洗、重力、磁选分离等方法进行粗选,然后在双目镜下精选出符合要求的锆石颗粒,锆石颗粒要求透明度好、晶形相对完整、无裂痕;锆石制靶、阴极发光(CL)照相均在天津地质调查中心同位素实验室完成,采用激光烧蚀多接受器等离子质谱仪进行U-Pb测年,具体仪器配置及实验流程见李怀坤^[27];采用Isoplot (Version3.0)程序进行数据处理并绘制年龄谐和图^[28]。

2.2 测试结果

CL图像显示,锆石呈粉黄色,晶形完整,颗粒较大,形态以自形柱状、断柱状为主,长轴多为100~150 μm,内部具明显的韵律环带结构(图3)。Th/U值为0.30~0.87,平均为0.44。较高的Th/U值及CL图像说明,样品锆石为岩浆成因。24颗锆石的测试数据见表1。测点结果均集中分布于谐和曲

线上(图4),²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为304±1 Ma($n=24$,MSWD=0.66),代表其成岩年龄。

3 元素地球化学特征

3.1 测试方法

本次在布林庙碱长花岗岩的不同部位较系统地采集了9件地球化学样品,采样位置见图1-c。样品均取自无蚀变的新鲜基岩露头,具有较好的代表性。样品测试前用水清洗,去除表面杂质,经磨样机械破碎至200目供分析。其中,主量元素分析在山西省地质调查院岩矿检测中心完成,使用原子吸收分光光度计(型号:A-68)、分光光度计(型号:A-8a)等仪器测定,分析误差优于2%;微量元素分析在武汉矿产资源监督检测中心完成,使用电感耦合等离子体质谱仪(型号:X7)测定,分析误差优于5%。

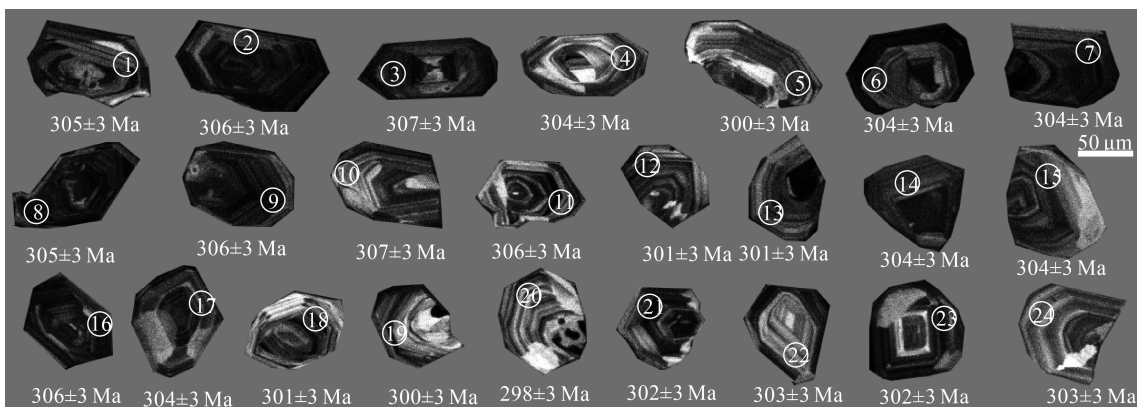


图3 布林庙碱长花岗岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 CL images of the fine-grained alkali-feldspar granite in the Bulinmiao area

表 1 布林庙碱长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 定年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating results of the alkali feldspar granite in the Bulinmiao area

测点号	含量/ 10^{-6}				同位素比值						年龄/Ma					
	Th/ ^{238}U			Th/ ^{232}Th	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
	Pb	^{232}Th	^{238}U													
1	25	252	499	0.51	0.0524	0.0009	0.350	0.006	0.0484	0.0005	301	39	304	6	305	3
2	30	209	617	0.34	0.0523	0.0007	0.350	0.005	0.0486	0.0005	298	32	305	5	306	3
3	31	316	616	0.51	0.0521	0.0007	0.350	0.005	0.0487	0.0005	290	32	305	5	307	3
4	14	148	285	0.52	0.0521	0.0011	0.347	0.007	0.0483	0.0005	290	47	303	6	304	3
5	13	137	265	0.52	0.0527	0.0012	0.346	0.008	0.0477	0.0005	316	53	302	7	300	3
6	28	220	573	0.38	0.0524	0.0007	0.350	0.005	0.0484	0.0005	304	30	304	4	304	3
7	24	154	509	0.30	0.0524	0.0008	0.349	0.006	0.0483	0.0005	303	34	304	5	304	3
8	22	139	460	0.30	0.0523	0.0007	0.350	0.005	0.0484	0.0005	300	32	304	5	305	3
9	27	215	560	0.38	0.0523	0.0007	0.351	0.005	0.0487	0.0005	297	31	305	5	306	3
10	12	86	243	0.35	0.0523	0.0011	0.352	0.008	0.0489	0.0005	299	46	306	7	307	3
11	21	241	423	0.57	0.0523	0.0008	0.350	0.006	0.0486	0.0005	299	33	305	5	306	3
12	13	108	258	0.42	0.0523	0.0015	0.345	0.010	0.0479	0.0005	297	66	301	9	301	3
13	21	159	432	0.37	0.0527	0.0012	0.348	0.008	0.0479	0.0005	317	52	303	7	301	3
14	10	75	214	0.35	0.0523	0.0015	0.348	0.010	0.0482	0.0005	299	66	303	9	304	3
15	8	55	155	0.36	0.0526	0.0021	0.351	0.015	0.0484	0.0005	312	92	305	13	304	3
16	20	212	404	0.53	0.0524	0.0008	0.351	0.006	0.0487	0.0005	301	35	306	5	306	3
17	12	118	245	0.48	0.0524	0.0014	0.349	0.010	0.0483	0.0005	303	62	304	9	304	3
18	20	200	410	0.49	0.0525	0.0014	0.346	0.010	0.0478	0.0005	307	62	302	9	301	3
19	10	75	202	0.37	0.0527	0.0024	0.346	0.016	0.0476	0.0005	315	103	302	14	300	3
20	10	104	214	0.48	0.0531	0.0026	0.346	0.017	0.0473	0.0005	332	110	302	15	298	3
21	23	357	412	0.87	0.0529	0.0009	0.349	0.006	0.0479	0.0005	323	39	304	6	302	3
22	9	85	181	0.47	0.0524	0.0015	0.347	0.010	0.0481	0.0005	301	66	303	9	303	3
23	18	157	362	0.43	0.0528	0.0015	0.349	0.010	0.0479	0.0005	319	65	304	9	302	3
24	6	42	132	0.31	0.0524	0.0017	0.348	0.012	0.0481	0.0005	301	39	303	10	303	3

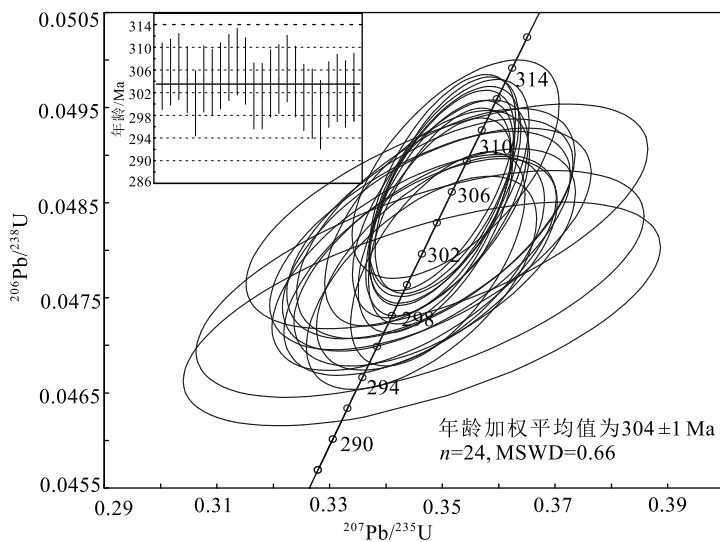


图 4 布林庙碱长花岗岩锆石 U-Pb 谐和图
Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagram of the alkali feldspar granite in the Bulinmiao area

3.2 测试结果

表 2 列出了布林庙碱长花岗岩的主量、微量元素测试结果及相关参数。

布林庙碱长花岗岩在 $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图解(图 5-a)上位于花岗岩区,且主量元素特征相似,表现为:① SiO_2 含量为 72.48%~77.22%,具较窄的变化区间,平均值为 75.42%,岩石的分异指数(DI)高(93.87~97.01),说明岩体经历了较强的分异作用;② $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 8.02%~10.26%,平均值为 8.87%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.95~2.28,具有全碱含量中等偏高、明显富钾的特征,在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 岩石图解(图 5-b)上位于高钾钙碱性-钾玄岩区;③ Al_2O_3 含量为 11.95%~14.22%,平均值为 12.81%,铝饱和指数 A/CNK 为 1.01~1.15,在 A/CNK-

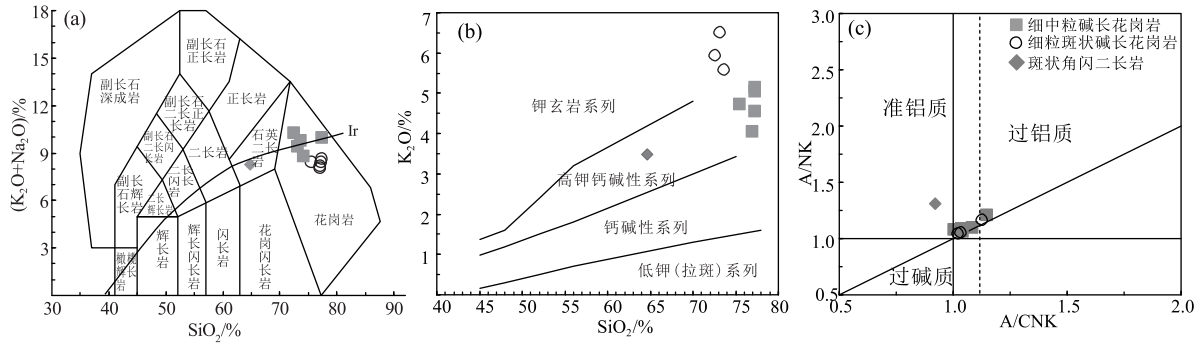


图5 碱长花岗岩 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ (a)^[29]、 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ (b)^[30] 及 $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$ (c)^[31] 图解

Fig. 5 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ (a), $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ (b) and $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$ (c) diagrams of the alkali-feldspar granite

A/NK 图解(图 5-c)上以弱过铝质为主;④具显著的贫铁(TFeO 为 0.56%~2.48%)、低钙(0.06%~0.30%)、低镁(0.08%~0.21%)、低磷(0.02%~0.05%)的特点。

布林庙碱长花岗岩的稀土元素总量(ΣREE)为 $79.97 \times 10^{-6} \sim 442.45 \times 10^{-6}$, 平均值为 221.12×10^{-6} , 稀土元素总量中等; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 2.92 \sim 4.44$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 0.71~2.20, 轻稀土元素内部的分馏程度相对重稀土元素明显; $\text{LREE}/\text{HREE} = 4.95 \sim 11.40$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 3.51 \sim 15.09$, 轻稀土元素相对重稀土元素富集; $\delta\text{Eu} = 0.16 \sim 0.47$, 具明显负 Eu 异常。样品在稀土元素球粒陨石标准化图上均呈相似的右倾曲线特征(图 6-a)。微量元素也显示相似的分布曲线特征, 均不同程度地富集 Rb、Th、U、K 元素, 弱亏损 Ba 元素, 强烈亏损 Sr、P、Ti 等元素(图 6-b)。

细中粒碱长花岗岩与细粒斑状碱长花岗岩相

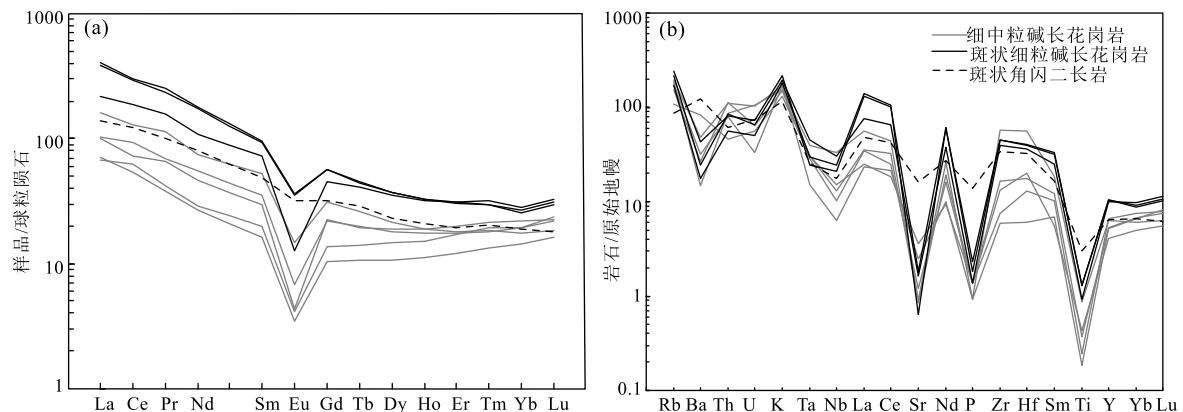


图6 碱长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a)及微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(标准化值参考文献[32])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b) of the alkali-feldspar granite

比,地球化学性质既有相似之处,也有一定的差异。区别在于前者明显高硅(SiO_2 分别为 75.44%~77.22%、72.48%~73.61%)、低铝(Al_2O_3 分别为 11.95%~12.52%、13.45%~14.22%)、低碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 分别为 8.02%~8.49%、9.41%~10.26%)、低稀土元素总量(ΣREE 分别为 $79.97 \times 10^{-6} \sim 192.90 \times 10^{-6}$ 、 $279.90 \times 10^{-6} \sim 442.45 \times 10^{-6}$)。

斑状角闪二长岩与碱长花岗岩(细中粒、细粒斑状)相比,其 SiO_2 含量为 64.65%、分异指数(DI)为 78.78,明显偏低;全碱总量偏低($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O} = 8.23\%$)、明显富钠($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.72$, Na_2O 含量为 4.78%); Al_2O_3 含量为 15.25%, A/CNK 为 0.93,为准铝质岩石(图 5-c),可能与较高的钙($\text{CaO} = 2.60\%$)含量有关。与主体岩性相比,稀土元素除具不明显的负 Eu 异常($\delta\text{Eu} = 0.79$)外,其余特征基本一致;微量元素具 Ba 的正异常,中等亏损 Sr、P、Ti 等元素。

表 2 布林庙碱长花岗岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace and rare earth elements compositions of the alkali-feldspar granite in the Bulinmiao area

岩性	细中粒碱长花岗岩					细粒斑状碱长花岗岩			斑状角闪 二长岩
	样品号	P403 Gs-2	2620 Gs-1	2620 Gs-2	D2839 Gs-1	P402 Gs-7	P403 Gs-5	P402 Gs-4	P402 Gs-2
SiO ₂	75.44	77.07	77.21	77.13	77.22	72.48	73.61	73.23	64.65
Al ₂ O ₃	11.95	12.29	12.22	12.52	12.10	14.22	13.45	13.74	15.25
TiO ₂	0.28	0.12	0.08	0.14	0.06	0.30	0.42	0.43	0.98
CaO	0.10	0.06	0.44	0.29	0.30	0.11	0.14	0.21	2.60
MgO	0.09	0.17	0.15	0.19	0.12	0.08	0.09	0.21	1.56
K ₂ O	4.66	3.98	4.54	5.01	5.11	5.90	5.53	6.54	3.45
Na ₂ O	3.78	4.20	3.90	3.01	3.38	4.36	4.21	2.87	4.78
MnO	0.14	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.10
P ₂ O ₅	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.05	0.30
CO ₂	0.35	0.08	0.10	0.06	0.22	0.04	0.13	0.22	0.09
H ₂ O ⁺	0.51	0.42	0.38	0.88	0.40	0.38	0.48	0.70	1.35
DI	93.87	96.33	96.55	95.82	97.01	96.80	96.12	94.44	78.78
TFeO	2.48	1.27	0.75	0.56	0.86	1.53	1.85	1.52	4.35
TFeO/MgO	27.56	7.47	4.99	2.94	7.19	19.13	20.56	7.24	2.79
10000Ga/Al	3.92	2.78	2.21	2.19	2.43	3.12	3.43	3.11	2.50
K ₂ O+Na ₂ O	8.44	8.18	8.44	8.02	8.49	10.26	9.74	9.41	8.23
K ₂ O/Na ₂ O	1.23	0.95	1.16	1.66	1.51	1.35	1.31	2.28	0.72
A/CNK	1.04	1.09	1.01	1.15	1.04	1.03	1.02	1.13	0.93
NK/A	0.94	0.91	0.93	0.83	0.92	0.95	0.96	0.86	0.76
Rb	118.2	68.83	98.07	123.90	110.90	136.9	108.8	155.3	55.68
Ga	24.79	18.13	14.31	14.49	15.58	23.57	24.39	22.62	20.15
Ba	102.72	579.9	184.70	333.90	223.57	172.46	123.31	301.29	858.00
Th	7.43	3.9	9.50	9.35	6.74	7.17	4.81	6.86	5.15
U	2.22	1.17	1.33	2.16	0.70	1.38	1.05	1.52	1.55
Zr	648.5	185.1	85.10	148.80	67.00	446.3	508.1	510.3	377.00
Nb	23.81	9.36	7.26	10.78	4.52	21.79	17.39	14.85	12.47
Ta	1.62	1.26	1.18	1.26	0.62	1.83	1.21	1	1.05
Sr	19.02	18.01	25.57	75.97	52.68	34.58	13.45	38.41	342.00
Hf	17.28	5.48	4.01	6.20	1.89	11.25	12.6	12.33	10.02
La	38.78	24.39	23.71	17.04	16.09	52.05	95.91	91.22	32.97
Ce	78.38	57.59	44.46	32.85	38.02	116.22	186.26	178.38	74.89
Pr	10.74	6.63	6.31	3.66	4.02	14.85	24.04	22.56	9.65
Nd	35.24	25.92	21.88	12.68	13.65	51.32	83.72	80.64	37.17
Sm	8.15	5.4	4.56	2.48	3.07	11.19	14.75	14.19	7.41
Eu	0.86	0.4	0.25	0.20	0.24	0.73	2.09	2.06	1.86

续表 2

岩性	细中粒碱长花岗岩				细粒斑状碱长花岗岩				斑状角闪二长岩
	样品号	P403 Gs-2	2620 Gs-1	2620 Gs-2	D2839 Gs-1	P402 Gs-7	P403 Gs-5	P402 Gs-4	P402 Gs-2
Gd	6.42	4.58	4.59	2.15	2.82	9.22	11.54	11.61	6.65
Tb	0.99	0.75	0.72	0.40	0.53	1.53	1.67	1.68	1.08
Dy	5.39	4.58	4.82	2.69	3.73	9.09	9.33	9.46	5.86
Ho	1.07	1	1.07	0.63	0.86	1.82	1.86	1.87	1.19
Er	3.02	2.93	3.32	1.99	2.84	5.22	5.17	5.1	3.22
Tm	0.47	0.46	0.55	0.34	0.50	0.82	0.76	0.75	0.52
Yb	2.97	3.31	3.73	2.45	3.29	4.85	4.56	4.36	3.26
Lu	0.47	0.56	0.58	0.41	0.61	0.84	0.79	0.75	0.46
Y	28.55	24.13	29.85	18.48	23.40	45.62	47.67	47.07	29.67
ΣREE	192.9	138.5	120.55	79.97	90.27	279.70	442.45	424.60	186.20
LREE	172.15	120.33	101.17	68.91	75.09	246.36	406.77	389.05	163.95
HREE	20.80	18.17	19.38	11.06	15.18	33.39	35.68	35.58	22.25
LREE/HREE	8.28	6.62	5.22	6.23	4.95	7.38	11.4	10.93	7.37
(La/Yb) _N	9.37	5.29	4.56	4.99	3.51	7.70	15.09	15.01	7.25
(La/Sm) _N	3.07	2.92	3.36	4.44	3.38	3.00	4.20	4.15	2.87
(Gd/Yb) _N	1.79	1.14	1.02	0.73	0.71	1.57	2.09	2.20	1.69
δEu	0.35	0.24	0.17	0.26	0.24	0.21	0.47	0.47	0.79
T _{Zr} /°C	930	809	736	796	720	881	896	909	839

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10^{-6}

4 讨论

4.1 岩体时代

前人对二连—贺根山地区的晚古生代花岗岩进行了详细的锆石 U-Pb 测年,精确的同位素数据表明,晚古生代的岩浆活动时代集中于 325~271 Ma,岩浆活动持续了约 54 Ma,基本上构建了该地区的晚古生岩浆活动年代学格架^[17,19-23]。布林庙碱长花岗岩的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 304±1 Ma,与前人数据对比,代表了该岩浆岩带中期的岩浆活动。

4.2 岩石成因

本文采用最常用的 ISMA 花岗岩分类方案,结合矿物学、地球化学特征,对布林庙碱长花岗岩的成因类型分析。

斑状角闪二长岩含有 I 型花岗岩特有的角闪石矿物,同时具准铝质(A/CNK=0.93)、富钠(Na₂O 为 4.78%)、高钙(CaO 为 2.60%)、高锶(Sr 为 342×10⁻⁶)的特点,暗示源岩来自于未经地表风化的火成

岩,为典型的 I 型花岗岩^[33-34]。

碱长花岗岩(细中粒、细粒斑状)的 SiO₂ 含量为 72.48%~77.22%,分异指数(DI)为 93.87~97.01,说明经历了较强的分异演化。2 种岩性均有弱过铝质(A/CNK 以 1.01~1.09 为主)、富钠(Na₂O 平均值为 4.31%)、低磷(P₂O₅ 为 0.02%~0.05%)的特点,明显不同于高分异 S 型花岗岩(A/CNK>1.1,Na₂O 平均值为 2.81%,P₂O₅ 平均值为 0.14%)^[30]。因此 2 种岩性只可能为高分异 I 型或 A 型。

高分异 I 型、A 型花岗岩由于经历了强烈的分异作用,其成因类型难以准确识别^[35-36]。碱长花岗岩(细中粒、细粒斑状)样品在图 7-a 中散落在高分异钙碱性、碱性区也说明了这一点。但结合一些特殊地球化学指标,2 种岩性倾向于 A 型花岗岩,表现为:①碱性指数 NK/A 为 0.83~0.96,平均值为 0.91,略高于 A 型花岗岩的下限(0.85)^[37];②Zr 含量为 67.0×10⁻⁶~648.5×10⁻⁶,具有较大的含量变化区间,但在岩石成因图解中几乎都落在 A 型花岗岩区(图 7-b);③10000Ga/Al 值为 2.19~3.92,与 A 型花岗

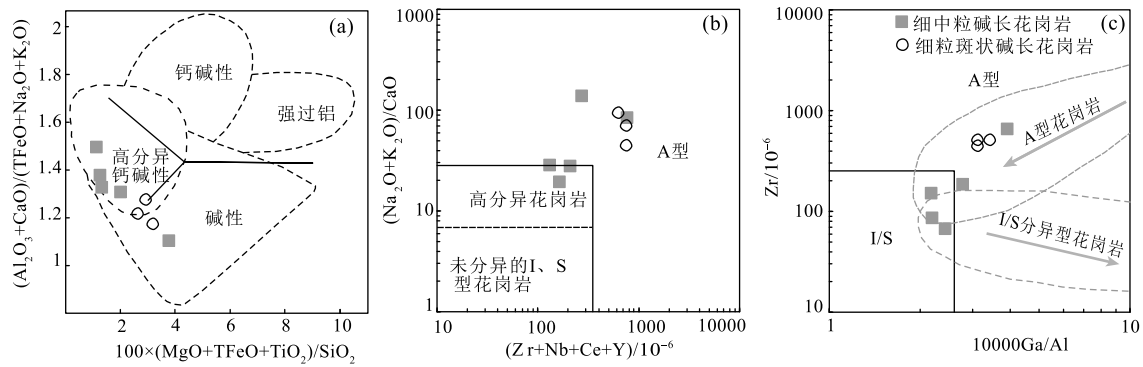


图 7 碱长花岗岩岩石成因图解(a 据参考文献[36]; b 据参考文献[37]; c 据参考文献[35,37])

Fig. 7 Petrogenetic diagrams of the alkali-feldspar granite

岩的下限(2.60)相比,部分样品偏低,可能与岩体的强烈分异演化有关,但在岩石成因图解上显示出 A 型花岗岩强烈分异演化的特征^[35](图 7-c);④锆石饱和温度计算结果 T_{Zr} (°C) 为 720~930°C,平均值为 834°C,除 2 件样品外均大于 800°C,与具有高温特征的 A 型花岗岩一致(800~900°C)^[38]。因此,把碱长花岗岩(细中粒、细粒斑状)归为 A 型花岗岩。

4.3 构造意义

兴蒙造山带上自南向北发育 2 条重要的缝合带,分别为西拉木伦-索伦-长-延吉春缝合带^[6-8]和黑河-嫩江-贺根山^[9-10](或黑河-嫩江-乌兰浩特-锡林浩特南-艾力格庙)^[3,11]缝合带。其中,西拉木伦-索伦-长春延吉缝合带一般认为是古亚洲洋最终闭合的位置^[3,5,10];而贺根山-黑河-嫩江缝合带由于处于兴蒙造山带、乌梁雅斯台大陆边缘之间,沿缝合带广泛发育蛇绿岩、岛弧型岩浆岩及 A 型花岗岩,也是造山带演化的关键地区^[22]。从岩浆作用看,黑河-嫩江-贺根山缝合带上具有俯冲特征的岩浆岩的发育(450~499 Ma),说明古亚洲洋向北的俯冲自早古生代已经开始^[39-40],但是对于闭合的时限存在不同认识,这可能与区域上的早石炭世地质记录出露较少有关。一种观点认为,贺根山洋盆在中晚泥盆世已经闭合^[11],早石炭世仅是新打开的一个时空规模很有限的陆内洋盆^[3],区域上的晚古生代碱性花岗岩形成于陆内裂谷环境^[1];还有观点认为,贺根山洋盆在石炭纪处于洋壳俯冲消减、洋陆转换的过程,表现为东乌旗地区的奥长花岗岩-闪长岩等岛弧岩浆岩发育(325~309 Ma),进一步揭示区域上大洋俯冲一直持续到早石炭世—晚石炭

世早期^[19-22],稍晚的代表伸展体制的碱性-二长花岗岩(303~271 Ma)的发育,即是该地区洋陆转换的岩浆作用响应^[13-17]。

从岩浆作用看,上述 2 种观点对该晚古生代碱性花岗岩形成背景的认识分别为陆内裂谷、造山后伸展环境。布林庙碱长花岗岩在空间上与区域上的碱性花岗岩带密切共生,地球化学性质相似,可以认为是岩浆岩带的一部分。该岩体锆石 U-Pb 年龄为 304 ± 1 Ma,很可能介于该地区碰撞晚期、造山后伸展环境 2 种构造体制之间。因此,查明其形成的地质背景,对厘清该地区晚古生代 2 种构造体制转折节点具有重要意义。该岩体具有 A 型花岗岩的地球化学性质,在 R_1-R_2 构造图解上位于造山后 A 型花岗岩区(图 8-a),在 Nb-Y-3Ga、Nb-Y-Ce 构造图解上进一步限定为造山后环境区域,而非裂谷环境(图 8-b、c)。以上说明,岩体形成于后碰撞的早期伸展环境,进一步精细限定贺根山洋盆在晚石炭世(304 ± 1 Ma)已经闭合,此时造山作用已经结束。

5 结论

(1) 内蒙古布林庙碱长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 304 ± 1 Ma,为晚石炭世时期岩浆活动的产物。

(2) 岩体具有高硅、富碱且相对富钾、弱过铝质为主的特点,为高钾钙碱性(钾玄岩)系列的 A 型花岗岩。

(3) 岩体形成于贺根山洋盆闭合后,是造山后伸展阶段早期的产物。

致谢:野外调查工作中项目组同事给予了大力

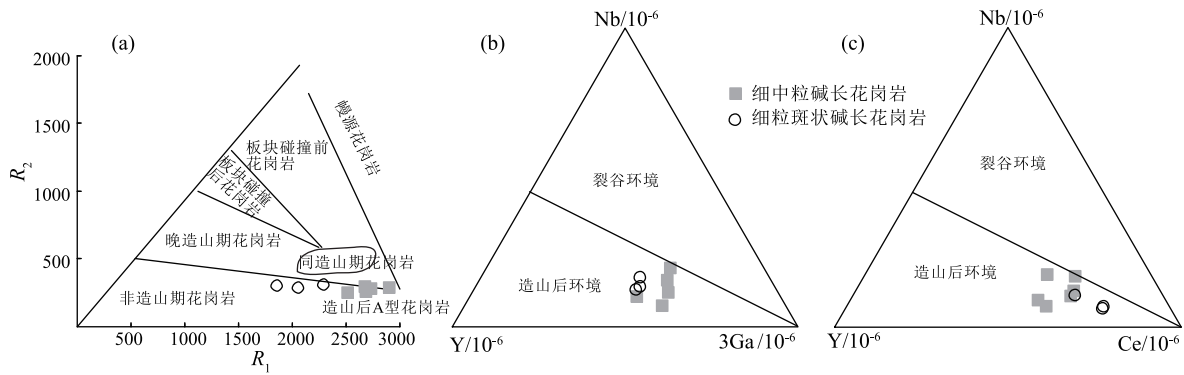


图8 布林庙碱长花岗岩构造环境图解(a据参考文献[41];b,c据参考文献[42])

Fig. 8 Tectonic environment discrimination diagrams of the alkali-feldspar granite in the Bulinmiao area

a— R_1 - R_2 图解;b— Nb - Y - $3Ga$ 图解;c— Nb - Y - Ce 图解

帮助,成文过程中得到山西省地质调查院有限公司王权正高级工程师的指导,同时审稿专家对论文提出了建设性修改意见,在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- [1] 徐备,王志伟,张立杨,等.兴蒙陆内造山带[J].岩石学报,2018,34(10):2819-2844.
- [2] 许文良,王枫,裴福萍,等.中国东北中生代构造体制与区域成矿背景:来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J].岩石学报,2013,29(2):339-353.
- [3] 许文良,孙晨阳,唐杰,等.兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程[J].地球科学,2019,44(5):1620-1646.
- [4] 李梦瞳,唐军,王志伟,等.内蒙古中部苏左旗早石炭世火山岩年代学与地球化学研究:对中亚造山带东部石炭纪构造演化和地壳属性的制约[J].岩石学报,2020,36(3):799-819.
- [5] Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. Tectonics, 2003, 22(6): 1069-1090.
- [6] 陈斌,马星华,刘安坤,等.锡林浩特杂岩和蓝片岩的锆石 U-Pb 年代学及其对索伦缝合带演化的意义[J].岩石学报,2009,25(12):3123-3129.
- [7] 李锦轶,高立明,孙桂华,等.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板块碰撞时限的约束[J].岩石学报,2007,23(3):565-582.
- [8] 韩江涛,袁天梦,刘文玉,等.西伯利亚板块与华北克拉通碰撞带地电结构及对深部缝合边界的讨论[J].地球物理学报,2019,62(3):1159-1171.
- [9] 包志伟,陈森煌,张桢堂,等.内蒙古贺根山地区蛇绿岩稀土元素 Sm-Nd 同位素研究[J].地球化学,1994,23(4):339-349.
- [10] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(1): 1-30.
- [11] 徐备,赵盼,鲍庆中,等.兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探[J].岩石学报,2014,30(7):1841-1857.
- [12] 张晋瑞,魏春景,初航,等.兴蒙造山带构造演化的新模式:来自内蒙古中部四期不同类型变质作用的证据[J].岩石学报,2018,34(10):2857-2872.
- [13] 王树庆,胡晓佳,赵华雷,等.内蒙古京格斯台晚石炭世碱性花岗岩年代学及地球化学特征——岩石成因及对构造演化的制约[J].地质学报,2017,91(7):1467-1482.
- [14] 程银行,李艳锋,李敏,等.内蒙古东乌旗碱性侵入岩的时代、成因及地质意义[J].地质学报,2014,88(11):2086-2096.
- [15] 洪大卫,黄怀曾,肖宜君,等.内蒙古东部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J].地质学报,1994,68(3):219-230.
- [16] 童英,洪大卫,王涛,等.中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义[J].地球学报,2010,31(3):395-412.
- [17] 周传芳,杨华本,李向文,等.大兴安岭北段新林地区晚石炭世花岗岩的岩石成因及地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(1):97-111.
- [18] 张健,张德军,郑月娟,等.内蒙古林西上二叠统林西组碎屑锆石 LA-ICP-MS 年代学及其构造意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(4):1090-1103.
- [19] 王帅,李英杰,王金芳,等.内蒙古西乌旗晚石炭世马尼塔埃达克岩的发现及其对古亚洲洋东段洋内俯冲的约束[J].地质通报,2021,40(1):82-94.
- [20] 李敏,李敏,程银行,等.内蒙古东乌旗晚古生代闪长岩、二长花岗岩年代学特征及岩石成因[J].中国地质,2016,43(2):380-394.
- [21] 刘建峰,迟效国,张兴洲,等.内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义[J].地质学报,2009,83(3):365-376.
- [22] 王金芳,李英杰,李红阳,等.贺根山缝合带白音呼舒奥长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J].地质论评,2019,65(4):857-872.
- [23] 张磊,吕新彪,刘阁,等.兴蒙造山带东段大陆后 A 型花岗岩特征与成因[J].中国地质,2013,40(3):869-884.
- [24] 李英杰,王金芳,王根厚,等.内蒙古迪彦庙蛇绿岩带达哈特前弧玄武岩的发现及其地质意义[J].岩石学报,2018,34(2):469-482.
- [25] 黄波,付冬,李树才,等.内蒙古贺根山蛇绿岩形成时代及构造启

- 示[J]. 岩石学报, 2016, 32(1): 158-176.
- [26] 熊光强, 刘敏, 张达, 等. 内蒙古西乌旗迪彦庙蛇绿岩带内辉长岩地球化学及年代学[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(5): 1599-1614.
- [27] 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 等. 北京高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束[J]. 岩石学报, 2010, 26(7): 2131-2140.
- [28] Ludwig K R. Isoplot3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochron Centre Special Publication, 2003, (4): 1-70.
- [29] Le Maitre R W. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms[M]. Cambridge University Press, 2002: 33-39.
- [30] Morrison W G. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association[J]. Lithos, 1980, 13(1): 97-108.
- [31] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. The Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.
- [32] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in Ocean Basins. Geological Society of London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [33] Chappell B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. Lithos, 1999, 46: 535-551.
- [34] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [35] 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(7): 745-765.
- [36] Allegre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic process[J]. Earth and Planetary Science Letters, 38(1): 1-25.
- [37] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contrib. Miner. Petrol., 1987, 95: 407-419.
- [38] King P L, White A J R, Chappell B W. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia[J]. Journal of Petrology, 1997, 38(3): 371-391.
- [39] 李红英, 周志广, 李鹏举, 等. 内蒙古东乌珠穆沁旗晚奥陶世辉长岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2016, 62(2): 300-316.
- [40] 杨泽黎, 王树庆, 胡晓佳, 等. 内蒙古东乌珠穆沁旗早古生代辉长闪长岩年代学和地球化学特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2018, 37(3): 349-365.
- [41] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. Chemical Geology, 1985, 48(1): 43-55.
- [42] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Geology, 1992, 20(7): 641-644.