

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.07.006

# 大兴安岭南段晚石炭世敖伦岩体成因及其对古亚洲洋演化的启示

郭喜运<sup>1</sup>, 李猛兴<sup>2\*</sup>GUO Xiyun<sup>1</sup>, LI Mengxing<sup>2\*</sup>

1.山西省矿产资源调查监测中心,山西太原 030024;

2.山西省地质调查院有限公司,山西太原 030006

1. Shanxi Mineral Resources Survey and Monitoring Center, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

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

**摘要:**对位于兴安地块南段的敖伦岩体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和岩石地球化学特征研究,探讨了岩石成因及地质意义。岩体由石英二长岩、二长花岗岩 2 种岩性组成,其中主体岩性二长花岗岩锆石 U-Pb 定年结果为  $315.6 \pm 0.9$  Ma,为晚石炭世岩浆活动的产物。岩体具有富钠( $\text{Na}_2\text{O}$  含量 3.27%~7.24%)、富碱( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  含量 8.19%~9.17%)、弱(强)过铝质( $A/\text{CNK}=1.01\sim 1.22$ )的特征,稀土元素总量偏低( $72.7 \times 10^{-6} \sim 223.3 \times 10^{-6}$ ),负 Eu 异常不明显( $\delta\text{Eu}=0.62\sim 0.93$ ),富集大离子亲石元素(Rb、Th、K 等)及轻稀土元素,亏损 Sr,不同程度亏损高场强元素(Ta、Nb、P、Ti),成因类型以高钾钙碱性的 I 型为主,并向 A 型过渡,具有明显的陆壳成分特征;结合相关构造图解分析,岩体为造山后伸展阶段早期的产物,进而推测该地区古亚洲洋的闭合在晚石炭世( $315.6 \pm 0.9$  Ma)之前。

**关键词:**晚石炭世;I 型花岗岩;地球化学;岩石成因;大兴安岭;地质调查工程

**中图分类号:**P534.45;P588.12<sup>+</sup>1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)07-1191-11

**Guo X Y, Li M X. Petrogenesis of the Late Carboniferous Aolun granite in the southern Da Hinggan Mountains and its insight into the evolution of the Paleo-Asia Ocean. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(7): 1191-1201**

**Abstract:** In this paper, zircon U-Pb age, geochemical characteristics study has been conducted on the Aolun granite, which is located in the Xing'an block. The granite is composed of quartz monosite and monzontic granite. The zircon U-Pb age of monzontic granite is  $315.6 \pm 0.9$  Ma, indicating that they are the products of magmatic activity in the Late Carboniferous. The Aolun granite is enriched in Na ( $\text{Na}_2\text{O}=3.27\% \sim 7.24\%$ ), alkali ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=8.19\% \sim 9.17\%$ ) and belongs to weakly peraluminous-strongly peraluminous granite ( $A/\text{CNK}=1.01 \sim 1.22$ ). The granite has lower  $\Sigma\text{REE}$ , without pronounced negative Eu anomalies ( $\delta\text{Eu}=0.62 \sim 0.93$ ). It also enriched in some LILE (Rb, Th, K) and LREE, depletions Sr and different depletions HFSE (Ta, Nb, P, Ti). The granite is a I-type granite and belongs to the high K calc-alkaline series, and transitions to A-type granite. These features are similar to geochemical characteristics of continental crust composition. Combined with tectonic environment discrimination diagram, the Aolun granite is the product of the early stage post-orogenic extension, it is suggested that the region of the Paleo-Asian Ocean closed before the Late Carboniferous ( $315.6 \pm 0.9$  Ma).

**Key words:** Late Carboniferous; I-type granite; geochemistry; petrogenesis; Da Hinggan Mountains; geological survey engineering

大兴安岭地区属于兴蒙造山带东段的一部分,北侧以蒙古-鄂霍茨克缝合带与西伯利亚克拉通为

界,南侧以索伦-延吉断裂带为界与华北克拉通区分开(图 1-a)。该地区先后经历了古生代古亚洲洋

收稿日期:2020-04-08;修订日期:2020-06-18

资助项目:中国地质调查局项目《1:5 万勃洛浑迪等四幅区调》(编号:1212010781033)

作者简介:郭喜运(1988-),男,高级工程师,从事区域地质调查及矿产勘查工作

\* 通信作者:李猛兴(1985-),硕士,高级工程师,从事矿产勘查工作。E-mail:282665774@qq.com

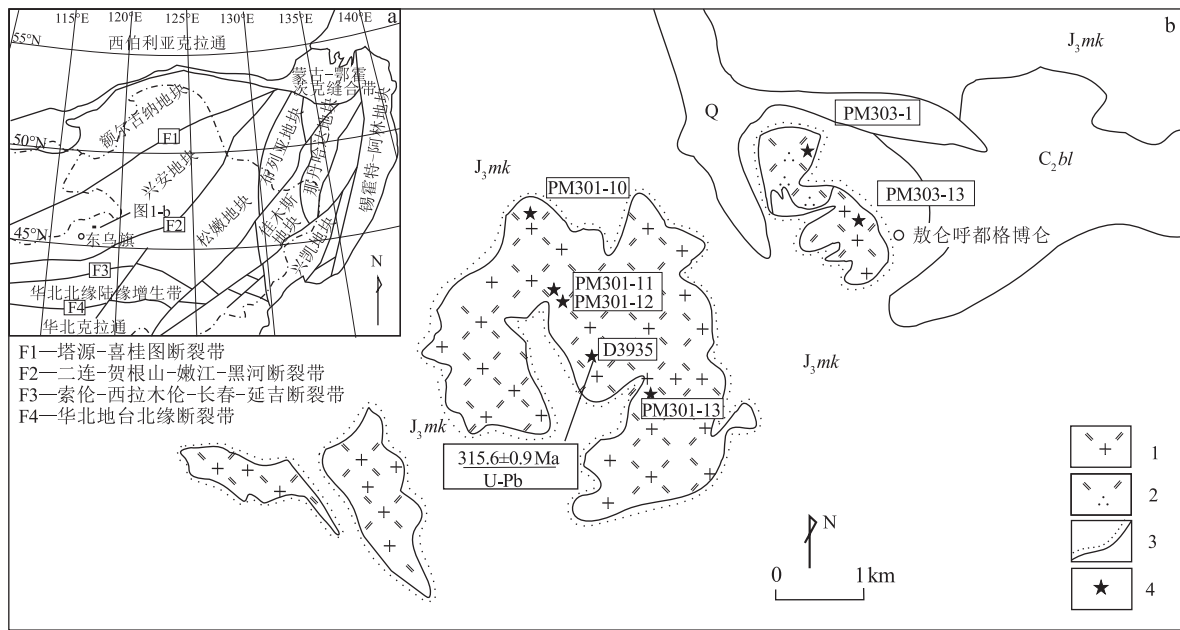


图1 兴蒙造山带东段大地构造略图(a,据参考文献[1]修改)和敖仑岩体地质图<sup>①</sup>(b)

Fig. 1 Tectonic sketch map of the eastern Xing Meng Orogenic Belt(a) and simplified geological map of the Aolun granite(b)  
Q—第四系; $J_3mk$ —满克头鄂博组; $C_2bl$ —宝力高庙组;1—石炭纪二长花岗岩;2—石炭纪石英二长岩;3—角度不整合接触;4—采样位置

域、中生代蒙古—鄂霍茨克域、环太平洋构造域等不同构造体系的叠加、改造<sup>[2-3]</sup>,具有独特的造山过程,是研究兴蒙造山带演化的关键地区。其中,古亚洲洋域的造山过程主要分为古亚洲洋俯冲、板块碰撞缝合、造山后伸展、稳定陆内造山运动等过程<sup>[4]</sup>。在古亚洲洋域造山过程中,区域上形成了不同时期(240~320 Ma)、不同成因类型(I、A型为主)的花岗岩<sup>[5-6]</sup>。这些花岗岩在地表广泛出露,是研究古亚洲洋域造山过程较好的标志体。其中,在板块碰撞后形成了2条规模较大的二叠纪碱性花岗岩带,作为造山后伸展过程的岩浆响应,受到了较高等程度的研究。前人研究表明,该碱性花岗岩锆石U-Pb年龄大部分介于272~303 Ma之间<sup>[4,6-10]</sup>,多形成于造山后或造山后向陆内造山转换的阶段,而对于碰撞阶段或造山后早期的岩浆作用研究较薄弱,稍早期的岩浆活动产物仅见全胜林场正长花岗岩(322 Ma)<sup>[11]</sup>、额日敦岩体(315 Ma)<sup>[12]</sup>等花岗岩的研究报道。

研究区位于内蒙古东乌旗北东的1:5万冈干哈尔图幅内,该地区及周围分布大面积的中生代火山岩,晚古生代的地层、岩浆岩出露十分有限。敖仑岩体为本次工作最新识别出的晚石炭世岩体,本文对其进行了年代学、地球化学等方面的研究,分

析其成因、地质意义,可为该地区晚古生代的构造岩浆活动提供启示,进而为揭示该地区古亚洲洋的演化提供科学依据。

## 1 地质背景及岩体地质

大兴安岭地区的构造格架主要形成于晚古生代板块碰撞、洋盆闭合时期,以各深大断裂为界,共划分出3个构造单元,由南向北分别为松嫩地块、兴安地块、额尔古纳地块(图1-a)。

研究区位于兴安地块南段,区内晚古生代—中生代的火山活动较强烈,分布大面积该时期的陆相火山岩系,尤以中生代最发育。相应的地层为:①宝力高庙组,岩性以灰紫色、深灰色的安山岩、粗面岩为主,局部夹少量深灰色凝灰质砂岩,总体上为深色调,韵律特征明显,由下向上形成3~5个溢流相—喷发沉积相组成的韵律结构;②满克头鄂博组,岩性为灰褐色、灰黄色流纹岩、流纹质角砾凝灰岩等,地层中可见不规则状二长花岗岩角砾。另外,在沟谷及山坡平缓处有少量的第四系分布。

敖仑岩体为1:5万冈干哈尔图幅区调工作首次发现,位于东乌旗北东的敖仑呼都格博仑高地。敖仑岩体呈北东向的岩株状展布,面积约9.0 km<sup>2</sup>,周围被第四系冲洪积、中生代火山岩地层覆盖。主要

由二长花岗岩及少量石英二长岩组成,二者呈明显侵入接触。2 种岩性的特征如下。

石英二长岩:浅灰红色,二长-文象结构,钾长石含量为 40%,大小 0.3~1 mm,他形;斜长石含量为 45%,自形板状,大小 0.5 mm×0.75 mm~1 mm×2 mm,边缘多为钾长石分布;石英含量为 5%~10%,他形,大小 0.5~2 mm;黑云母含量为 5%,褐色,片状晶体;角闪石含量为 1%~2%,粒状,大小 0.5~2 mm。副矿物含量为 2%,以磁铁矿及少量磷灰石、锆石等为主。另外,还有少量绿泥石、褐铁矿等蚀变矿物。

二长花岗岩:肉红色,岩石中可见晚期裂纹,裂纹中石英细脉发育,细粒花岗结构为主,少量可见文象结构。矿物颗粒均匀分布,大小 0.5~2 mm,其中斜长石含量为 40%,板状,局部可见绢云母化;钾长石含量为 30%,他形粒状;石英含量为 25%,他形文象形态;黑云母含量为 2%,棕色片状。副矿物含量为 1%,以磁铁矿、磷灰石、锆石为主。另外,还有零星绢云母、绿泥石等蚀变矿物。

## 2 分析测试方法

对敖仑岩体进行了锆石 U-Pb 定年测试,样品岩性为二长花岗岩,采样位置为北纬 46°08'35"、东经 118°47'21"。对锆石的处理分为分选、制靶、(反射光、阴极发光)照相、测试等过程,以上过程均在天津地质矿产研究所同位素实验室完成。在选取测试点时,尽量避开裂隙发育、包裹体分布的位置,以便获得较真实的年龄信息,具体步骤及使用的仪器见李怀坤等<sup>[13]</sup>。数据处理、作图用 Isoplot (Version3.0)<sup>[14]</sup>程序完成。

对敖仑岩体采集了 7 件主量、微量、稀土元素测试样品(位置见图 1),并在武汉综合岩矿测试中心完成分析测试。

## 3 锆石 U-Pb 年龄

通过对阴极发光(CL)图像的观察(图 2),锆石为淡黄色或近于无色,大部分锆石晶形较好,呈短柱状,少量为不规则的棱角状,粒径大部分在 70~200 μm 之间,长宽比在 1.5:1~2:1 之间,且多见振荡环带结构。锆石 U-Pb 测试结果见表 1,共测试了 18 个锆石点,其 Th 含量为  $7 \times 10^{-6}$ ~ $160 \times 10^{-6}$ ,U 含量为  $58 \times 10^{-6}$ ~ $225 \times 10^{-6}$ ,除 17 号点的 Th/U 值为 0.06 偏低外,其余点的 Th/U 值介于 0.32~1.01 之间,平均为 0.69,具有岩浆锆石的成因特征。18 个点年龄谱和一致,很均匀地落在谐和线上,可信度较高, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $315.6 \pm 0.9 \text{ Ma}$  ( $n=18$ , MSWD=0.17),为晚石炭世(图 3)。

## 4 全岩地球化学特征

### 4.1 主量元素

敖仑岩体由二长花岗岩及少量的石英二长岩组成,二者主量元素特征分述如下。

石英二长岩:SiO<sub>2</sub> 含量为 66.78%,在 TAS 图解上位于 Ir 下方(亚碱性区域)的石英二长岩区(图 4-a),分异程度中等(DI 为 83.42);Na<sub>2</sub>O 含量为 4.99%,K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 含量为 8.49%,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值为 0.7,具有明显的富钠、富碱特征,里特曼指数  $\sigma_{43}=3.0$ ,为钙碱性岩,样品在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图(图 4-b)上位于高钾钙碱性区间;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量偏高,为 16.02%,A/CNK 值为 1.03,在 A/CNK-A/NK 图上位于弱过铝质区,为弱过铝质岩石(图 4-c)。

二长花岗岩:SiO<sub>2</sub> 含量介于 70.21%~76.76% 之间,在 TAS 图解上位于 Ir 下方(亚碱性区域)的花岗岩区(图 4-a),分异程度较高(DI 为 91.4~96.25);

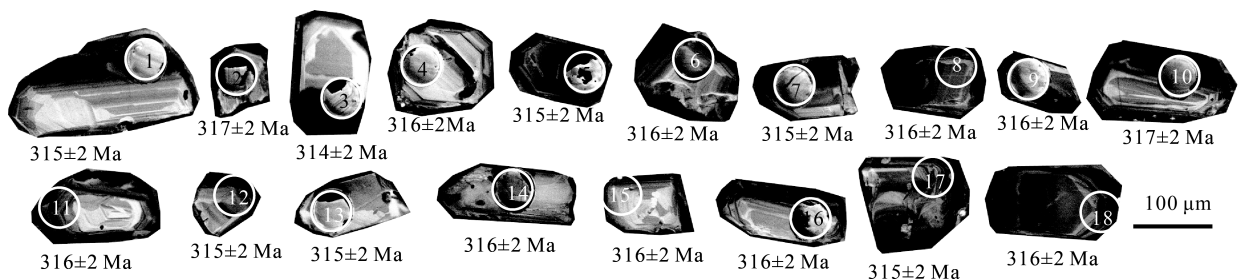


图 2 敖仑岩体锆石阴极发光(CL)图像及年龄

Fig. 2 CL images and dating of zircons for the Aolun granite

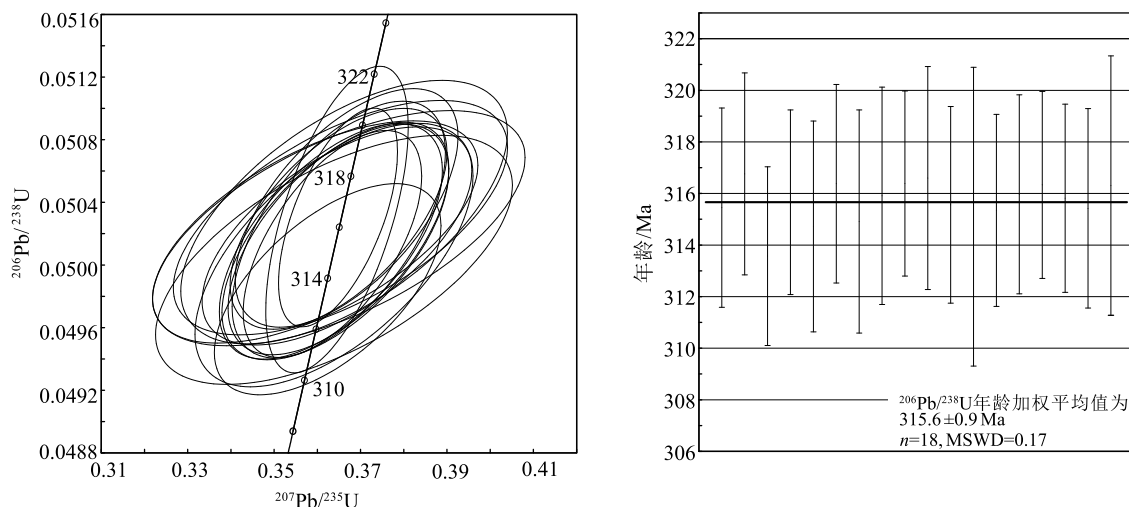


图3 敖仑岩体 U-Pb 谐和图

Fig. 3 U-Pb concordia diagram of zircons of the Aolun granite

表1 敖仑岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 定年结果

Table 1 Results of LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating of the Aolun granite

测点号	含量/ $10^{-6}$			Th/ U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb		U		$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/$ $^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/$ $^{238}\text{U}$	$1\sigma$
	Pb	Th	U													
1	5	73	97	0.76	0.0525	0.0015	0.3631	0.0105	0.0502	0.0003	308	65	315	9	315	2
2	5	59	94	0.63	0.0528	0.0015	0.3668	0.0105	0.0504	0.0003	321	64	317	9	317	2
3	5	67	87	0.78	0.0527	0.0015	0.3624	0.0107	0.0498	0.0003	317	66	314	9	314	2
4	4	62	75	0.82	0.0527	0.0018	0.3645	0.0128	0.0502	0.0003	315	78	316	11	316	2
5	4	50	74	0.68	0.0527	0.0024	0.3639	0.0169	0.0500	0.0003	318	106	315	15	315	2
6	4	45	72	0.63	0.0527	0.0023	0.3653	0.0158	0.0503	0.0003	315	99	316	14	316	2
7	5	62	86	0.73	0.0527	0.0019	0.3639	0.0131	0.0501	0.0003	316	81	315	11	315	2
8	6	82	107	0.76	0.0527	0.0014	0.3650	0.0101	0.0502	0.0003	316	60	316	9	316	2
9	12	160	225	0.71	0.0526	0.0008	0.3648	0.0056	0.0503	0.0003	311	35	316	5	316	2
10	4	57	77	0.74	0.0528	0.0022	0.3662	0.0154	0.0503	0.0003	319	94	317	13	317	2
11	6	90	107	0.85	0.0528	0.0015	0.3649	0.0104	0.0502	0.0003	318	64	316	9	316	2
12	3	45	60	0.75	0.0813	0.0045	0.5617	0.0298	0.0501	0.0005	1229	109	453	24	315	3
13	7	86	130	0.66	0.0526	0.0012	0.3635	0.0084	0.0501	0.0003	311	52	315	7	315	2
14	3	35	58	0.60	0.0527	0.0025	0.3650	0.0176	0.0502	0.0003	316	109	316	15	316	2
15	6	82	115	0.71	0.0526	0.0015	0.3649	0.0102	0.0503	0.0003	312	64	316	9	316	2
16	4	22	71	0.32	0.0519	0.0022	0.3595	0.0154	0.0502	0.0003	282	97	312	13	316	2
17	5	7	118	0.06	0.0527	0.0015	0.3642	0.0107	0.0501	0.0003	315	66	315	9	315	2
18	9	116	151	0.77	0.0526	0.0009	0.3645	0.0067	0.0503	0.0004	310	41	316	6	316	3

注:测试单位为天津地质矿产研究所同位素实验室,测试时间为2010年10月

$\text{Na}_2\text{O}$  含量为 3.27%~7.24%,  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  含量为 8.19%~9.17%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值为 0.19~1.62, 大部分小于 1, 显示富钠且富碱的特征, 里特曼指数  $\sigma_{43} = 2.26\sim 5.23$ , 大部分样品为钙碱性岩, 且在  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$

图(图 4-b)上位于高钾钙碱性区间;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量中等偏高, 为 12.25%~15.37%,  $A/\text{CNK}$  值为 1.04~1.22, 位于 I、S 型花岗岩分界线 ( $A/\text{CNK} = 1.1$ ) 附近, 总体为弱(强)过铝质岩石(图 4-c)。



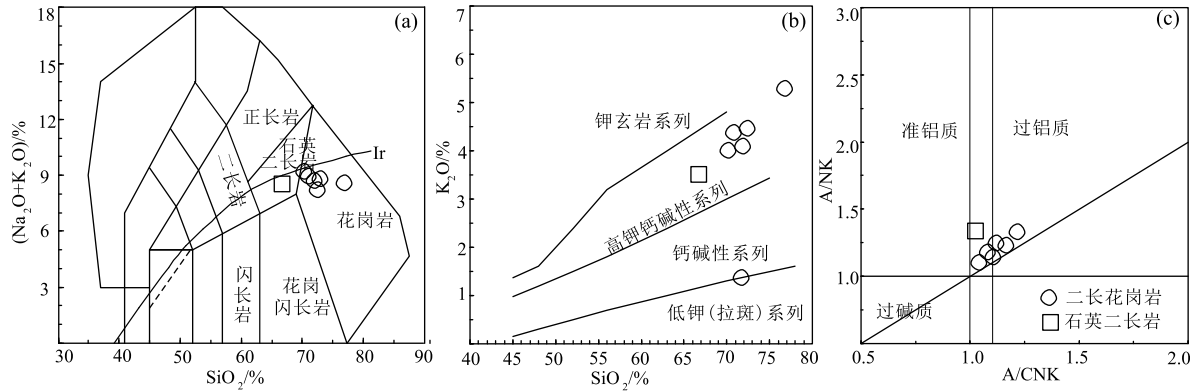


图 4 敖仑岩体  $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$  (a)<sup>[15]</sup>、 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  (b)<sup>[16]</sup> 及  $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$  图解 (c)<sup>[17]</sup>

Fig. 4  $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$  (a),  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  (b) and  $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$  (c) diagrams of the Aolun granite

此外,在哈克图解上,随  $\text{SiO}_2$  含量增加,  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFeO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  含量减少,而  $\text{K}_2\text{O}$  含量增加,显示出同源岩浆演化的特征(图 5)。

#### 4.2 微量及稀土元素

稀土元素方面,具有以下特征:①稀土元素总量  $\Sigma\text{REE}$  (不含 Y) 为  $58.92 \times 10^{-6} \sim 191.41 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $140.60 \times 10^{-6}$ , 含量明显偏低;②轻稀土元素 ( $\Sigma\text{LREE}$ ) 为  $49.69 \times 10^{-6} \sim 168.65 \times 10^{-6}$ , 重稀土元素 ( $\Sigma\text{HREE}$ ) 为  $9.23 \times 10^{-6} \sim 25.88 \times 10^{-6}$ , 二者比值 ( $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ ) 为  $3.57 \sim 6.40$ , ( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 值为  $2.24 \sim 6.35$ , 表现为轻稀土元素相对富集、重稀土元素相对亏损,略呈右倾的稀土元素曲线特征(图 6-a);③( $\text{La}/\text{Sm}$ )<sub>N</sub> =  $1.38 \sim 2.88$ , ( $\text{Gd}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> =  $0.74 \sim 1.27$ , 说明轻、重稀土元素内部之间分馏较弱;④ $\delta\text{Eu} = 0.62 \sim 0.93$ , Eu 亏损不明显。

微量元素方面,在原始地幔蛛网图中,呈现为富集 Rb、Th、K 等元素,不同程度亏损 Ta、Nb、Sr、P、Ti 等元素的右倾形式(图 6-b), 尤以 P、Ti 亏损明显。其中 Ta、Nb 的亏损暗示了岩体与地壳的密切关系, Sr、P、Ti 的亏损应该与钛铁矿、磷灰石等矿物的分离结晶有关。

## 5 讨论

### 5.1 形成时代

敖仑岩体为本次最新厘定的新岩体。通过野外观察,发现其被侏罗系火山岩地层覆盖,初步推断岩浆活动早于侏罗纪,但该岩体与石炭系在地表又缺少明确的接触关系。通过对其中的二长花岗

岩进行锆石 U-Pb 定年,得到了  $315.6 \pm 0.9$  Ma 的地质年龄,时代为晚石炭世。该岩体稍早于区域上产于造山后伸展背景的其他岩体,例如京格斯台岩体 ( $301.3 \pm 1.5$  Ma)<sup>[17]</sup>、白音图嘎岩体 ( $302.8 \pm 1.3$  Ma)<sup>[8]</sup>、扎拉嘎岩体 ( $272.3 \pm 0.7$  Ma)<sup>[9]</sup>、白音乌拉岩体 ( $276 \sim 286$  Ma)<sup>[4]</sup>, 代表了同一地质背景下较早时期的岩浆活动。

### 5.2 岩石成因

敖仑岩体由石英二长岩、二长花岗岩组成,其中石英二长岩含零星的角闪石,分异程度中等 ( $DI = 83.42$ ), 且具有富钠 ( $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 4.99%)、准铝质 ( $\text{A/CNK} = 1.03$ ) 的特征,在  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$  图中位于 I 型区域(图 7-a), 成因类型上属于 I 型。

二长花岗岩具有高硅 ( $\text{SiO}_2$  含量为 70.21% ~ 76.76%)、富碱 ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  为 8.19% ~ 9.17%)、高分异指数 ( $DI = 91.40 \sim 96.25$ ) 的特征,同时钛 ( $\text{TiO}_2$  为 0.11% ~ 0.49%)、钙 ( $\text{CaO}$  为 0.36% ~ 0.75%)、镁 ( $\text{MgO}$  为 0.10% ~ 0.24%) 含量也很低,为高分异 I、S 或 A 型。其具有富钠 ( $\text{Na}_2\text{O}$  为 3.27% ~ 7.24%)、低磷 ( $\text{P}_2\text{O}_5$  为 0.02% ~ 0.11%) 的特征,明显不同于低钠 ( $\text{Na}_2\text{O}$  平均值为 2.81%)、偏高的磷含量 ( $\text{P}_2\text{O}_5$  平均值为 0.14%) 为特征的 S 型花岗岩<sup>[19]</sup>, 在  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$  图中也均位于非 S 型区(图 7-a), 说明其成因不可能为 S 型,而很可能为地表之下未经风化的火成岩。另外,一些相关元素 ( $\text{P}_2\text{O}_5$ 、Rb、Th 等) 对岩石成因的区分也有较好的启示。例如,在准铝质、弱过铝质岩石中,磷具有偏低的溶解度,且随着分异程度升高而降低;在强过铝质岩石中,磷具有较高

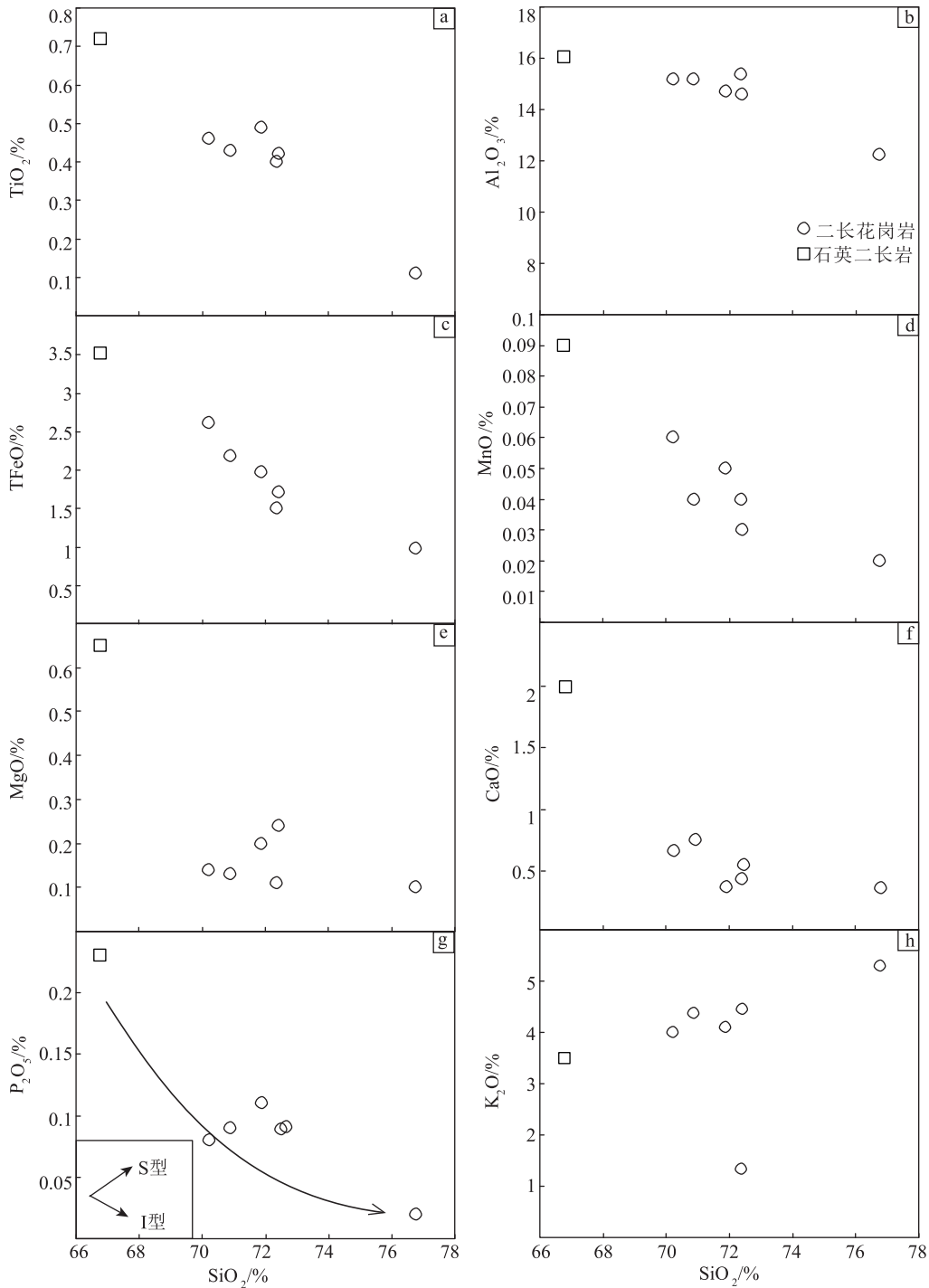


图5 敖仑岩体哈克图解

Fig. 5 Harker diagram of the Aolun granite

的溶解度,且随着分异程度增加而升高,磷的这种特性已经较广泛的应用到花岗岩成因(I、S型)区分上<sup>[23]</sup>。该岩性与石英二长岩的样品在 $P_2O_5-SiO_2$ 散点图上分布呈明显的负相关,显示出了I型花岗

岩的演化特征(图5-g),这也得到Rb-Th图解支持(图7-b)。因此,二长花岗岩应为高分异I型花岗岩。

此外,敖仑岩体又表现出一些A型花岗岩的地

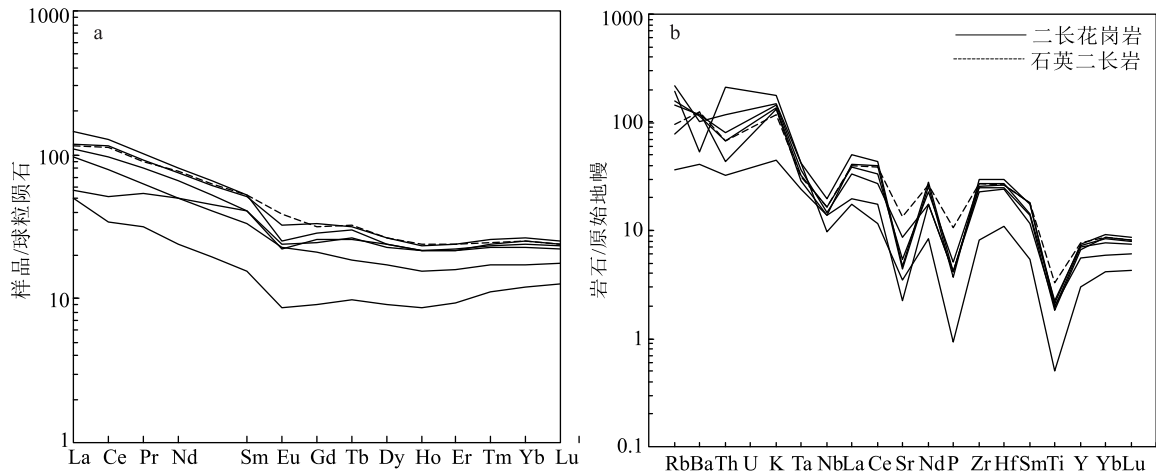


图 6 敖仑岩体稀土元素球粒陨石标准化配分模式 (a) 及原始地幔标准化蛛网图 (b)<sup>[18]</sup>

Fig. 6 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized spider diagram (b) of the Aolun granite

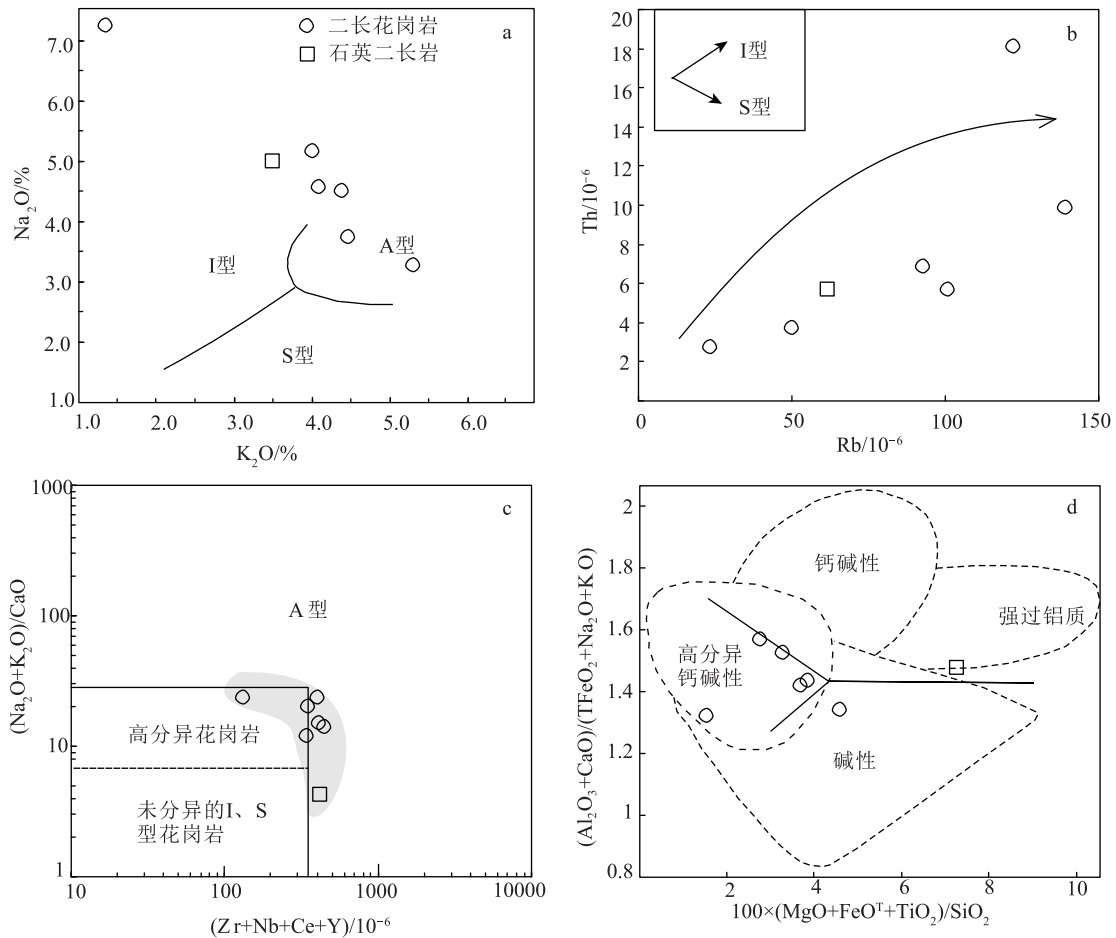


图 7 敖仑岩体岩石成因相关图解 (图 a、c、d 分别据参考文献 [20] [21] [22])

Fig. 7 Petrogenetic diagrams of the Aolun granite

球化学性质,例如,①Zr 含量为  $90.4 \times 10^{-6} \sim 330.0 \times 10^{-6}$ ,含量偏高,部分样品大于 A 型花岗岩的下限 ( $250 \times 10^{-6}$ )<sup>[21]</sup>,且位于 A 型花岗岩区域 (图 7-c);②

全岩锆石饱和温度  $T_z$  (°C) 为  $744 \sim 857^\circ\text{C}$  (表 2),平均为  $830^\circ\text{C}$ ,符合 A 型花岗岩高温的特征<sup>[24]</sup>;③全铁 TFeO 含量为  $0.98\% \sim 3.52\%$ ,也与 A 型花岗岩富铁

表2 敖仑岩体主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace and rare earth elements compositions of the Aolun granite

样品编号	PM303-1	PM301-10	PM301-11	PM303-2	D3935	PM301-13	PM301-12
岩性	石英二长岩	二长花岗岩					
SiO <sub>2</sub>	66.78	71.88	72.41	70.21	70.88	76.76	72.37
TiO <sub>2</sub>	0.72	0.49	0.42	0.46	0.43	0.11	0.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.02	14.69	14.57	15.17	15.16	12.25	15.37
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.52	1.91	1.61	2.63	2.26	0.95	1.48
FeO	1.25	0.25	0.27	0.25	0.15	0.13	0.17
MnO	0.09	0.05	0.03	0.06	0.04	0.02	0.04
MgO	0.65	0.20	0.24	0.14	0.13	0.10	0.11
CaO	1.99	0.37	0.55	0.66	0.75	0.36	0.43
Na <sub>2</sub> O	4.99	4.56	3.73	5.17	4.51	3.27	7.24
K <sub>2</sub> O	3.50	4.09	4.46	4	4.38	5.29	1.34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23	0.11	0.09	0.08	0.09	0.02	0.09
CO <sub>2</sub>	0.1	0.06	0.17	0.04	0.06	0.08	0.06
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.94	1.13	1.25	0.91	0.94	0.51	0.76
DI	83.42	92.95	91.93	91.68	91.40	96.25	94.41
A/CNK	1.03	1.17	1.22	1.08	1.12	1.04	1.09
σ <sub>43</sub>	3.00	2.57	2.26	3.07	2.82	5.23	3.38
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	8.49	8.65	8.19	9.17	8.89	8.56	8.58
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.7	0.9	1.2	0.77	0.97	1.62	0.19
TFeO	3.52	1.97	1.72	2.62	2.18	0.98	1.50
TFeO/MgO	5.41	9.84	7.16	18.69	16.80	9.85	13.65
Rb	61.6	101.0	139.0	49.9	92.6	122.0	23.2
Nb	11.8	11.8	13.8	9.96	10.3	6.83	9.87
Ta	1.28	1.33	1.74	1.19	1.47	1.74	1.00
Th	5.70	5.70	9.85	3.72	6.89	18.10	2.72
Ba	879	788	714	875	819	368	288
Sr	283	113	99.6	93.7	183	73.9	47.4
Zr	304	303	289	330	258	90.4	276
Hf	8.24	8.4	8.17	9.21	7.35	3.4	7.76
Ni	5.78	6.29	5.99	4.14	5.12	15	6.92
Cr	6.65	8.1	5.46	8.17	3.58	5.1	6.11
La	27.20	26.30	34.00	27.90	22.80	11.90	13.30
Ce	68.70	58.70	77.30	71.30	48.50	20.70	31.30
Pr	8.48	7.65	9.75	8.72	5.95	3.00	5.16
Nd	35.50	30.60	38.10	35.10	23.50	11.20	23.50
Sm	8.00	6.31	8.04	7.78	5.11	2.39	6.18
Eu	2.24	1.40	1.46	1.90	1.33	0.50	1.30
Gd	6.45	5.00	5.90	6.82	4.35	1.85	5.30
Tb	1.20	0.99	1.11	1.17	0.69	0.37	0.97
Dy	6.80	5.79	6.02	6.77	4.35	2.30	6.10
Ho	1.37	1.22	1.21	1.33	0.88	0.49	1.23
Er	3.96	3.63	3.55	4.00	2.65	1.55	3.58
Tm	0.63	0.60	0.58	0.65	0.43	0.28	0.61
Yb	4.29	4.09	3.84	4.49	2.94	2.07	4.24
Lu	0.61	0.59	0.56	0.65	0.45	0.32	0.60
Y	34.90	32.60	32.00	33.90	25.40	13.80	30.50
ΣREE	175.43	152.87	191.41	178.58	123.94	58.92	103.38
ΣLREE	150.12	130.96	168.65	152.70	107.19	49.69	80.74
ΣHREE	25.31	21.91	22.76	25.88	16.75	9.23	22.64
ΣLREE/ΣHREE	5.93	5.98	7.41	5.90	6.40	5.38	3.57
(La/Yb) <sub>N</sub>	4.55	4.61	6.35	4.45	5.55	4.11	2.24
(La/Sm) <sub>N</sub>	2.20	2.69	2.73	2.31	2.88	3.21	1.38
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.24	1.01	1.27	1.26	1.22	0.74	1.03
δEu	0.93	0.74	0.62	0.78	0.84	0.7	0.68
Mg <sup>#</sup>	22.27	13.60	17.79	7.66	8.45	13.60	10.20
T <sub>Zr</sub> /°C	833	856	857	853	834	744	837

注:测试单位为武汉综合岩矿测试中心,测试时间为2009年6月。主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为10<sup>-6</sup>



( $\text{TFeO} > 1\%$ ) 的特征吻合<sup>[25]</sup>。另外,在图 7-d 中,大部分样品分布于高分异钙碱性区,个别位于碱性区。因此,综合认为敖仑岩体成因类型以 I 型花岗岩为主,并向 A 型过渡。

岩体的 2 种岩性在空间上为侵入接触,在微量和稀土元素曲线上也具有相似的特征(图 6),说明很可能来自于同一源区。岩体具有偏低的 Cr( $5.1 \times 10^{-6} \sim 8.17 \times 10^{-6}$ )、Ni( $4.14 \times 10^{-6} \sim 15.00 \times 10^{-6}$ ) 含量,其  $\text{Mg}^\#$  值为 7.65~22.27,低于地幔岩浆范围(68~75)<sup>[25]</sup>,Nb/Ta 值为 3.93~9.87,也与地壳值(10~14)接近<sup>[18]</sup>。以上特征均暗示了壳源岩浆的特征。

在哈克图解上,样品总体呈现明显的线性关系,但部分样品线性关系不明显,暗示岩体形成过程中经历了部分熔融、分离结晶 2 种作用(图 5);La-La/Yb 图解(图 8-a)显示,部分熔融作用可能是岩体形成的主要因素,分离结晶作用次之,这也得到 Sr-Ba 图解(图 8-b)的支持,该图解显示岩体在部分熔融或结晶分异过程中斜长石、钾长石未发生明显的分离结晶,与其 Ba、Sr、Eu 亏损不明显相对应(图 6)。综上所述,岩体来自于地壳部分熔融,并经历了一定程度的分离结晶作用。岩体稀土元素含量的变化主要与成岩过程中富轻稀土元素副矿物的分离结晶有关(图 8-c)。例如,部分具有高分异花岗岩特征的样品(PM301-12、PM301-13),稀土元素含量明显偏低,应是岩浆晚期副矿物(磷灰石、独居石等)的分离结晶所致。

### 5.3 地质意义

兴安造山带具有较复杂的构造演化过程,在不同块体俯冲、碰撞拼合过程中导致古亚洲洋消失。研究区西侧的迪彦庙蛇绿岩揭示了早石炭世(345.3±

2.3 Ma)为弧前环境<sup>[28]</sup>。而对于古亚洲洋闭合的时限,一直存在争议。其中一种普遍观点认为,区域上出露的 2 条具有鲜明特色的碱性花岗岩带,可以作为造山碰撞后伸展环境的标志<sup>[4]</sup>,近年来围绕该碱性花岗岩带上的京格斯台岩体等进行了较高级别的锆石定年研究,上述岩体时代多集中在晚石炭世—早二叠世<sup>[4,6-11]</sup>,这也与林西组的沉积下限揭示洋盆闭合早于晚二叠世这一结论吻合<sup>[29]</sup>。

敖仑岩体成因类型以 I 型为主,并向 A 型过渡,与京格斯台碱性花岗岩等岩体具有相似的岩石成因,空间上又处于同一岩浆岩带上,因而具有一致的地质背景。样品在构造图解(图 9)中分布于火山弧花岗岩、板内花岗岩的分界线附近,暗示了其碰撞的特征。综合敖仑岩体的锆石 U-Pb 年龄为  $315.6 \pm 0.9$  Ma,稍早于碱性花岗岩带上的其他岩体,说明该岩体很可能是碰撞后伸展阶段早期的产物。

## 6 结论

(1) 大兴安岭南段敖仑岩体由石英二长岩、二长花岗岩组成,U-Pb 锆石年龄为  $315.6 \pm 0.9$  Ma,时代为晚石炭世。

(2) 岩体具有明显的富钠、富碱、弱(强)过铝质的特征,稀土元素总量偏低,富集大离子亲石元素(Rb、Th、K 等)及轻稀土元素,亏损 Sr 及高场强元素(P、Ti),成因类型以高钾钙碱性的 I 型为主,并向 A 型过渡。

(3) 岩体是碰撞后伸展阶段早期的产物。

**致谢:**感谢项目组成员在野外工作中的帮助,感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见。

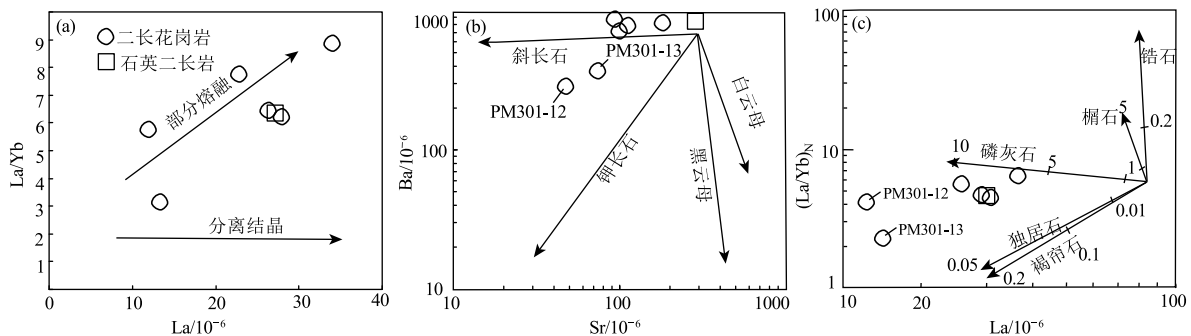


图 8 敖仑岩体 La-La/Yb(a)<sup>[26]</sup>、Sr-Ba(b)<sup>[27]</sup>、La-(La/Yb)<sub>N</sub>(c)<sup>[27]</sup> 关系图解

Fig. 8 La-La/Yb(a)、Sr-Ba(b) and La-(La/Yb)<sub>N</sub>(c) diagrams of the Aolun granite

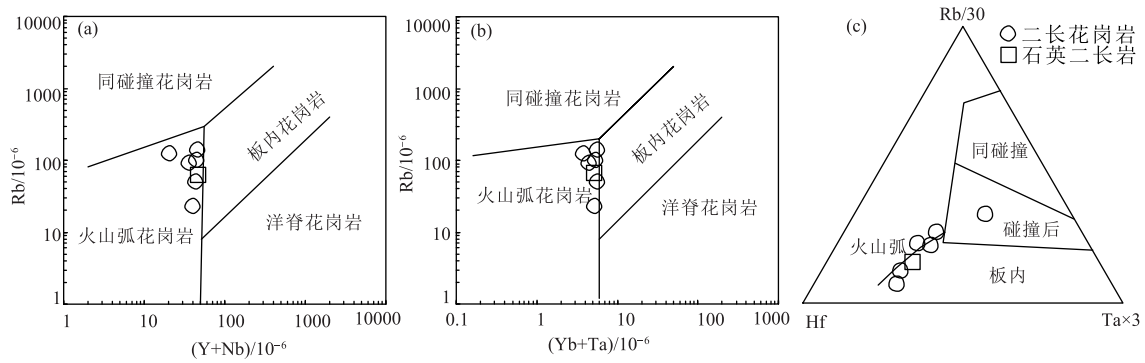
图9 敖伦岩体构造环境判别图解<sup>[30]</sup>

Fig. 9 Tectonic environment discrimination diagrams of the Aolun granite

## 参考文献

- [1] Wu F Y, Yang J H, Sun D Y, et al. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 30(3/4): 542-556.
- [2] Wang T, Zheng Y D, Zhang J J, et al. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes[J]. Tectonics, 2011, 30(6): 7-33.
- [3] 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, 2(6): 1069-1089.
- [4] 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.
- [5] 刘锐, 杨振, 徐启东, 等. 大兴安岭南段海西期花岗岩锆石 U-Pb 年龄、元素和 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学: 岩石成因及构造意义[J]. 岩石学报, 2016, 32(5): 1505-1527.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 杨多, 陈满, 龚全德, 等. 内蒙古阿巴嘎旗白音图嘎地区晚石炭世花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质论评, 2017, 63(5): 1209-1225.
- [9] 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.
- [10] 张超, 吴新伟, 刘永江, 等. 大兴安岭中段早二叠世 A 型花岗岩成因及对扎兰屯地区构造演化的制约[J]. 岩石学报, 2020, 36(4): 1091-1106.
- [11] 崔芳华, 郑常青, 徐学纯, 等. 大兴安岭全胜林场地区晚石炭世岩浆活动研究: 对兴安地块与松嫩地块拼合时间的限定[J]. 地质学报, 2013, 87(9): 1247-1263.
- [12] Tian D X, Yang H, Ge W C, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Late Carboniferous continental arc high-K granites in the Dongwuqi area, central Inner Mongolia, North China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 167: 82-102.
- [13] 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.
- [14] Ludwig K R. Isoplot3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochron Centre Special Publication, 2003, (4): 1-70.
- [15] Le Maitre R W. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms(2<sup>nd</sup> Edition)[J]. Cambridge University Press, 2002: 33-39.
- [16] Morrison W G. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association[J]. Lithos, 1980, 13(1): 97-108.
- [17] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.
- [18] 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 [J]. Geological Society of London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [19] 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.
- [20] Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80(2): 189-200.
- [21] 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.
- [22] Sylvester P J. Post-collisional alkaline granites [J]. The Journal of Geology, 1989, 97: 261-280.
- [23] Chappell B W. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. Lithos, 1999, 46(3): 535-551.
- [24] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magmatypes [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1983, 64(2): 295-304.
- [25] 王强, 赵振华, 熊小林, 桐柏-大别山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘

定[J]. 岩石矿物学杂志, 2000, 19(4): 297-306.

[26] Allegre C J, Minster J F. Quantitative models of trace element behavior in magmatic process[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 38: 1-25.

[27] Wu F Y, Jahn B M, Wilder S A, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (J): Geochronology and petrogenesis. Lithos, 2003, 66(3/4): 241-273.

[28] 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.

[29] 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.

[30] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956-983.

① 山西省地质调查院. 1:5 万勃洛浑迪等四幅区调地质调查报告. 2011.

《地质通报》第 41 卷第 8 期要目预告

空间矿化模式的识别与鉴别 ..... 李裕伟等

京津冀协同发展区活动构造与地壳稳定性研究 ..... 王惠卿等

西藏麻米地区晚侏罗世—早白垩世侵入岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征  
及其对班—怒特提斯洋俯冲过程的制约 ..... 赵守仁等

拉萨地体西部左左乡地区中新世石英二长岩的锆石 U-Pb 年龄、岩石成因及构造模式 ..... 张博川等

藏南墨竹工卡叶巴组双峰式火山岩岩石成因、时代及构造环境 ..... 宋宇航等

云南宁蒞水草坝二长花岗斑岩岩石成因: 锆石 U-Pb 年代学及地球化学约束 ..... 王宏等

2021 年 5 月 12 日云南漾濞 Ms6.4 地震震害特征及成因 ..... 熊伟等

内蒙古西乌旗沙尔哈达晚侏罗世 A 型花岗岩: 地球化学特征、岩石成因与地质意义 ..... 胡鹏等

龙门山北段唐王寨—仰天窝复式向斜辉绿岩脉侵位年代的限定 ..... 丁啸等

海陆过渡相页岩储层研究现状与发展展望 ..... 李琪琪等

银额盆地巴隆乌拉白垩系巴音戈壁组黑色页岩沉积环境及有机质富集模式 ..... 史冀忠等

滇东北会泽麒麟厂铅锌矿床矿化—蚀变指数定量分析及其意义 ..... 张小培等

锦州地区土地资源承载力评价研究 ..... 孙秀波等

青藏高原东部鲜水河断裂带地震滑坡危险性评价 ..... 李彩虹等

季节性冻融过程黄土斜坡失稳机制及稳定性趋势分析 ..... 曾磊等

内蒙古克什克腾旗五道石门枕状玄武岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及构造意义 ..... 段明等