

兴安地块南段晚泥盆世包格德岩体时代的厘定及地质意义

李猛兴

(山西省地质调查院, 山西 太原 030006)

摘要: 中亚造山带东端兴安地块南段的包格德岩体由石英二长岩、二长花岗岩和花岗斑岩3种岩性组成, 岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果分别为 368 ± 1 Ma、 364 ± 1 Ma、 355 ± 1 Ma, 为晚泥盆-早石炭世岩浆活动的产物; 岩体的 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 含量为 7.62%~8.82%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.93~4.21, 具有富碱且相对富钾的特点, A/CNK 为 0.95~1.20, 以准铝质-弱过铝质为主, 成因上为高钾钙碱性系列的 I 型花岗岩; 岩体具有偏低的稀土元素总量 (83.60×10^{-6} ~ 163.40×10^{-6}), 中等的铕负异常 ($\delta\text{Eu}=0.34\sim 0.78$), 相对富集大离子亲石元素 (Rb、Th、K) 及轻稀土元素, 不同程度亏损 Ba、Sr、Ti 及 P 等元素; 岩体形成于活动大陆边缘弧的伸展环境, 与古亚洲洋的演化有关。

关键词: 兴安地块; 活动大陆边缘; 古亚洲洋; 晚泥盆世; I 型花岗岩; 岩石成因

中图分类号: P597+.3; P588.12+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)03-0484-17

The determination of Late Devonian Baogede granite in the southern part of the Xing'an block and its significance

LI Meng-xing

(Shanxi Institute of Geological Survey, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Late Devonian Baogede granite in the southern part of the Xing'an block were studied and its petrogenesis and geological significance were discussed in this paper. The rocks are composed of quartz monzonite, monzonitic granite and granite porphyry. Zircon U-Pb dating results of syenogranite and alkali-feldspar granite are 368 ± 1 Ma, 364 ± 1 Ma and 355 ± 1 Ma respectively, indicating that they are the products of magmatic activity in the Late Devonian to Early Carboniferous period. $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) = 7.62\% \sim 8.82\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.93 \sim 4.21$, characterized by full high alkali content and high potassium. $A/\text{CNK} = 0.95 \sim 1.20$, suggesting metaluminous to weakly peraluminous rocks. They belong to the high-K calc-alkaline series I-type granites. They are low in total REE ($83.60 \times 10^{-6} \sim 163.40 \times 10^{-6}$), and the negative europium anomaly is medium ($\delta\text{Eu} = 0.34 \sim 0.78$). They are rich in large ion lithophile elements (Rb, Th, K) and light rare earth elements, and have suffered from different degrees of loss of Ba, Sr, P and Ti elements. The Baogede granite was formed in an extended environment of the active continental margin, and its formation was related to the Paleo-Asian Ocean.

Key words: Xing'an block; active continental margin; Paleo-Asian ocean; Late Devonian; I-type granite; petrogenesis

Fund support: Project of China Geological Survey (1212010781033)

收稿日期: 2020-05-20; 接受日期: 2021-03-17; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (1212010781033)

作者简介: 李猛兴 (1985-), 男, 工程师, 主要从事矿产勘查工作, E-mail: 282665774@qq.com。

兴蒙造山带位于中亚造山带东端,是经历了多个构造体系叠加作用的复杂区域,造山过程具有明显的独特性、复杂性(徐备等, 2014),其地理范围一般包括了我国境内的东北地区及内蒙古中东部。古生代为古亚洲洋的演化时期,兴蒙造山带经历了大陆裂解、洋壳俯冲、微陆块之间的碰撞拼贴等地质过程(Xiao *et al.*, 2003; 许文良等, 2019),区域上形成了一系列岛弧、增生杂岩、蛇绿岩及微地块相间分布的特征,其中东北地区以缝合带为界自北往南分别为额尔古纳、兴安、松嫩、佳木斯地块等构造单元(李锦轶等, 2004; 刘永江等, 2010; 徐备等, 2018; 许文良等, 2019);中生代又经历了两大构造体系(古太平洋和蒙古-鄂霍茨克洋)的活化与破坏(唐杰等, 2018),才形成了目前现有的构造格局。在古亚洲洋复杂的演化过程中,岩浆作用强烈,其侵位时代集中于早古生代、晚古生代两个时期。作为造山过程最直接的地质记录,这些不同时期出露的花岗岩为认识造山过程中的俯冲、碰撞拼合等地质过程提供了有利线索,对恢复造山带的结构亦具有重要指示意义。

前人研究表明,古亚洲洋的俯冲可能自早古生代已经开始,具有向南北两侧双向俯冲的特征。作为古亚洲洋向北俯冲过程最直接的岩浆记录,在造山带北缘的苏左旗-东乌旗一带早古生代花岗岩不同程度发育,年龄介于 496~414 Ma 之间(陈斌等, 1996; 王树庆等, 2016; 李红英等, 2016; 杨泽黎等, 2017, 2018)。而对于洋盆闭合的时限及位置,结合地层、古生物、岩浆作用及地磁测深物理技术等方面的研究,一般认为古亚洲洋最终消亡的位置在索伦山缝合带(李锦轶等, 2007; 陈斌等, 2009)及贺根山缝合带(包志伟等, 1994; 卜建军等, 2020)。但对于闭合的时限却有不同认识:一种观点为泥盆纪,之后的晚古生代进入了伸展环境及裂谷发育过程(徐备等, 2014; 张晋瑞等, 2018);另一种观点认为古亚洲洋的俯冲一直持续到晚古生代,直到晚石炭-中二叠世洋盆最终闭合(时代为 C_2-T_2)(洪大卫等, 1994; Xiao *et al.*, 2003; 程银行等, 2014; 薛富红等, 2015; 孔令杰等, 2017; 韩江涛等, 2019)。

上述说明,前人对区域上早古生代的构造演化认识相对统一,而对晚古生代的构造演化尤其洋盆的闭合时限存在争议。产生争议的原因在于对造山带演化过程中俯冲、造山后伸展两种构造背景具体转换的时限认识不清。作为构造演化过程的直接地

质记录,前人对造山带岩浆岩的研究主要集中于与俯冲、造山后伸展背景有关的早、晚古生代,而受制于岩浆岩出露情况对于二者之间尤其泥盆纪-早石炭世(约 414~318 Ma)时期岩浆作用的研究程度较低,构造属性缺乏明确解释。本文以研究区出露的晚泥盆世包格德岩体为研究对象,对其进行了详细的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征研究,分析了其岩石成因及地质意义,为区域上古生代的岩浆活动提供年代学等方面的素材,进而也为该时期造山带的构造演化过程在时间、空间尺度上进一步限定。

1 地质背景及岩石学特征

研究区位于内蒙古的中北部,构造位置上属于兴安地块的南段,兴安地块北侧以塔源-喜桂图断裂带为界与额尔古纳地块区分开,南侧以二连-贺根山-嫩江-黑河断裂带为界与松嫩地块区分开(图 1a)。区内为大面积的晚古生代-中生代火山岩系分布,相对应的地层为石炭系宝力高庙组,岩性为深灰色、灰黑色的角砾凝灰岩、凝灰质砂砾岩等;侏罗系满克头鄂博组,岩性为灰紫色、灰黄色的流纹岩、粗面英安岩等。另外,在沟谷处有少量第四系分布(图 1b)。

岩体位于东乌旗北东的包格德呼和哈达高地附近,命名为包格德岩体。包格德岩体周围被大面积的晚古生代-中生代火山岩地层角度不整合覆盖,地表总体上呈南北向的岩株形态出露,长约 6 km,宽 1~1.3 km,地表出露面积约 7.2 km²,为泥盆纪 3 期侵入的岩体,主要由石英二长岩、二长花岗岩及花岗斑岩 3 种岩性组成。其中石英二长岩出露规模较小,受出露限制与其余 2 种岩性之间缺乏明确的接触关系,但在二长花岗岩中可见少量不规则状的石英二长岩捕虏体,间接说明了二者为侵入接触;后两种岩性出露规模较大,二者接触部位烘烤边发育,且可见花岗岩斑岩呈岩脉、岩枝状穿插于二长花岗岩中。3 种岩性的特征分述如下。

① 花岗斑岩:肉红色,斑状结构,基质为细晶结构,局部可见钾长石、石英呈不规则次生的文象结构(图 2a)。斑晶大小 4~7 mm,以钾长石及少量斜长石、石英为主,其中钾长石 25%(体积分数)左右,为板状、宽板状的斑晶;斜长石 10%左右,板状;石英含量 5%左右,粒状。基质约 60%左右,粒度大小为 0.1~0.5 mm,成分为钾长石(自形板状)、斜长石(半自形板状)和石英(粒状,聚片双晶发育)。副矿物为

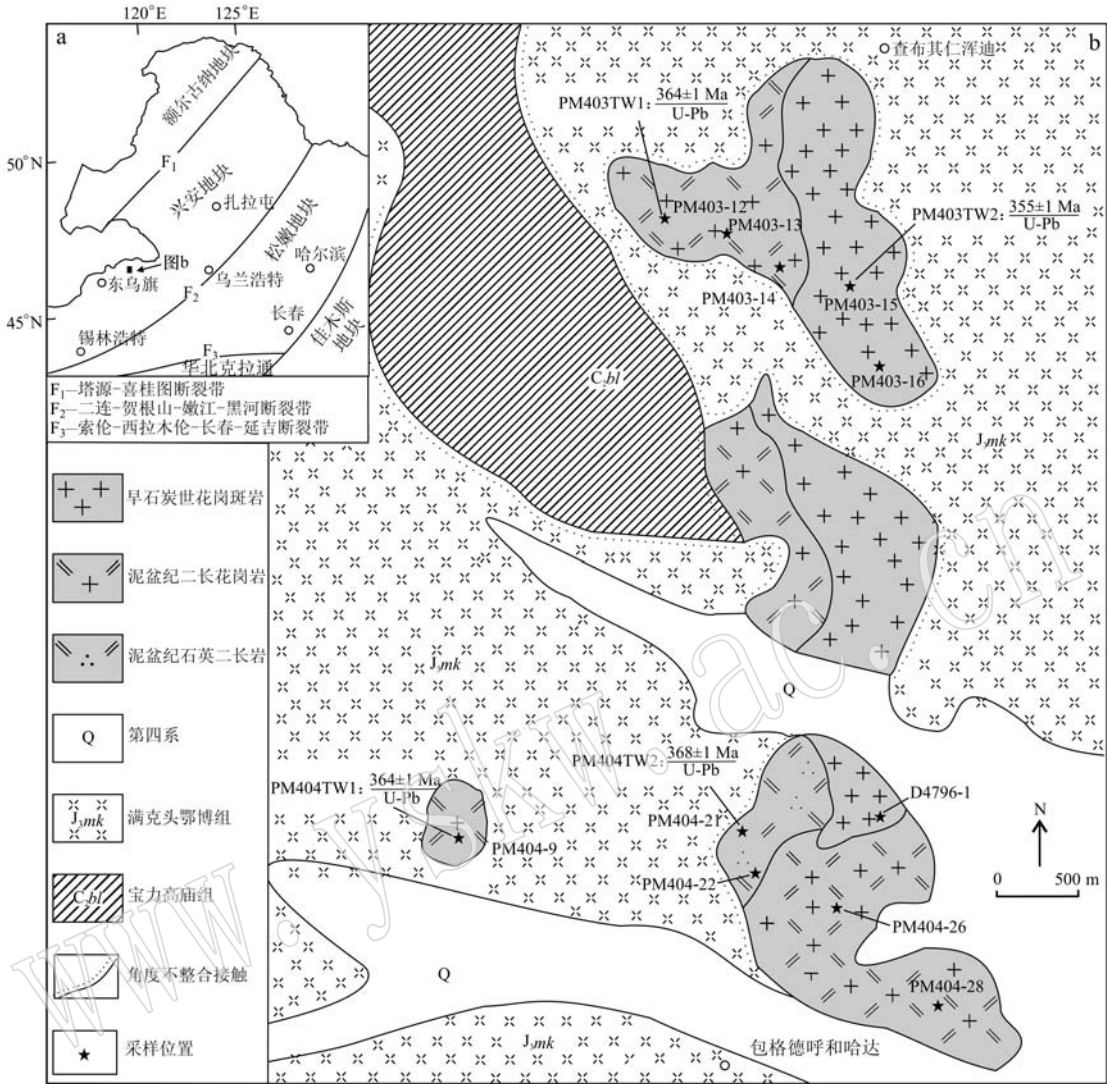


图1 兴蒙造山带东段大地构造图(a, 据许文良等, 2019)和包格德岩体地质图(b, 据山西省地质调查院, 2011)^①
Fig. 1 Tectonic sketch map of the eastern Xing-Meng Orogenic Belt(a, after Xu Wenliang *et al.*, 2019) and simplified geological map of the Baogede granite (b, after Shanxi Institute of Geological Survey, 2011)^①

磁铁矿及零星的磷灰石、锆石和榍石。

② 二长花岗岩：肉红色，以细中粒花岗结构为主(图2b)，粒度一般为1~4 mm，部分样品呈文象结构(图2c)。其中钾长石30%左右，自形程度较好，多为板状；斜长石35%左右，半自形；石英25%左右，不规则粒状分布。另外，还有少量黑云母，约1%~5%左右。副矿物为磁铁矿、磷灰石和锆石。

③ 石英二长岩：浅黄褐色，细中粒粒状结构，粒度一般为1.2~5 mm，其中斜长石45%~50%左右，半自形板状；钾长石25%~35%左右，板状，局部呈斜

长石镶边分布；石英15%左右，它形粒状；角闪石5%左右，柱状，轻微绿泥石化。另外，可见少量黑云母(5%左右)呈鳞片状分布。副矿物以磁铁矿、磷灰石及少量锆石为主。

2 样品采集及分析方法

在包格德岩体中共采集了11件主量、微量、稀土元素样品，测试单位为武汉综合岩矿测试中心，在X荧光光谱仪上采用XRF法完成了主量元素测试，

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

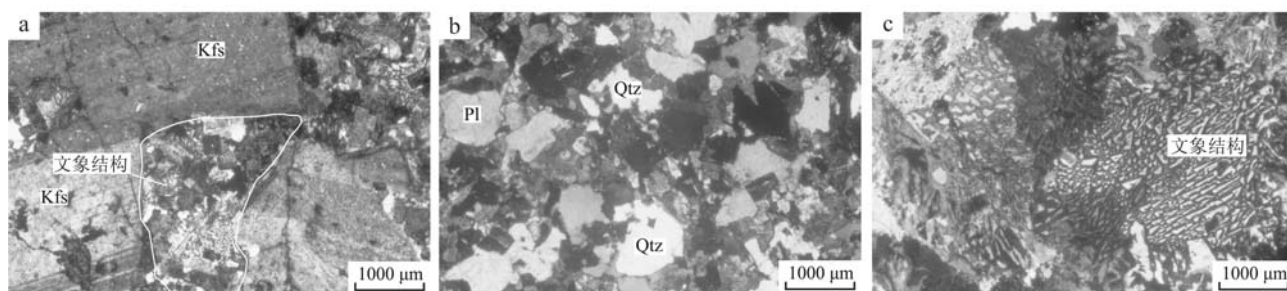


图2 包格德岩体的显微照片(正交偏光)

Fig. 2 Microscopic photographs of the Baogede granite (crossed nicols)

a—花岗斑岩局部呈文象结构; b—二长花岗岩的细中粒花岗结构; c—二长花岗岩的文象结构; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qtz—石英
a—granite porphyry exhibiting graphic structure; b—monzonitic granite exhibiting granitic structure; c—monzonitic granite exhibiting graphic structure; Kfs—potash feldspar; Pl—plagioclase; Qtz—quartz

在等离子体质谱仪(ICAP6300)完成了微量、稀土元素测试。

由于本区特殊的地理景观,多数地段风化严重,包格德岩体3种岩性之间接触性质不明显,本次在石英二长岩、花岗斑岩中分别采集了1件样品(PM404TW2、PM403TW2),二长花岗岩中采集了2件样品(PM403TW1、PM404TW1)进行锆石U-Pb定年,采样位置见图1。在采集过程中尽量采取无蚀变或蚀变较轻、裂隙不发育的新鲜基岩,每件样品的重量约12 kg。首先在山西省地质调查院岩矿鉴定室对样品进行粉碎、淘洗、分选,挑选出符合要求的锆石,然后在天津地质调查中心同位素实验室在双目镜下把符合要求的锆石粘在载玻片上,注入环氧树脂固化,待样品固化后对其进行打磨、抛光,然后对样品进行反射光及阴极发光(CL)照相,以便在测试时选点更明确。测试采用的仪器及步骤见相关文献(李怀坤等, 2010),在Isoplot (Version 3.0)程序完成数据及谐和图处理(Ludwig *et al.*, 2003)。

3 结果与分析

3.1 锆石 U-Pb 年代学

4件样品的测试结果见表1。

PM403TW2(花岗斑岩): 锆石颜色多为淡黄色,晶体以长柱状为主,个别晶体较为破碎呈不规则棱角状,长宽比为1:2~1:3,粒径200~350 μm。反射光下可见锆石颗粒溶蚀坑、裂纹发育,个别晶体中含气泡。CL图像中锆石边部可见清晰的振荡环带(图

3), 8、14、15点中可见残留的继承性锆石。从表1可知,共测试20个点,剔除不谐和点(点18、19),其余18个有效分析点的Th含量为 $59 \times 10^{-6} \sim 146 \times 10^{-6}$, U含量为 $71 \times 10^{-6} \sim 138 \times 10^{-6}$, Th/U值为0.76~1.13。18个有效分析点均较集中的分布于谐和曲线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于357~352 Ma之间,加权平均年龄为 $355 \pm 1 \text{ Ma}$ ($n=18$, MSWD=0.31)(图4)。

PM404TW1(二长花岗岩): 锆石颜色以淡黄色为主,少数近于无色,晶体以短柱状为主,长宽比为1:1.5~1:2,粒径160~200 μm,部分晶体破碎呈不规则棱角状。反射光下可见晶体表面干净,少数较为粗糙,个别晶体中含暗色包体及气泡。CL图像上环带结构发育(图3),部分点(3、10)中可见继承性锆石。从表1可知,共测试20个点,剔除不谐和点(点5、11),其余18个有效分析点的Th含量为 $57 \times 10^{-6} \sim 229 \times 10^{-6}$, U含量为 $65 \times 10^{-6} \sim 198 \times 10^{-6}$, Th/U值为0.74~1.16。剔除不谐和点,18个有效分析点均集中分布于谐和曲线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于368~361 Ma之间,加权平均年龄为 $364 \pm 1 \text{ Ma}$ ($n=18$, MSWD=0.46)(图4)。

PM403TW1(二长花岗岩): 锆石颜色以浅褐黄色为主,少数为浅褐色、无色,短柱状为主,个别细小呈破碎的不规则棱角状,长宽比为1:1~1:1.5,大小以150~250 μm为主。反射光下可见晶体表面透明,未见包体。CL图像上环带结构发育(图3),部分锆石点(3、8、9)中含继承性锆石。从表1可知,共测试22个点,剔除不谐和点(点7、8、10、16、17),其

表 1 包格德岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the Baogede granite

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Pb	²³² Th	²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ		
PM403TW2: 花岗岩岩, 坐标为 N46°07'53", E119°05'02"																
1	8	132	117	1.13	0.053 3	0.001 0	0.417 1	0.007 8	0.056 8	0.000 4	341	7	354	7	356	2
2	6	86	93	0.93	0.054 4	0.001 5	0.423 2	0.011 0	0.056 4	0.000 4	387	11	358	9	354	2
3	7	82	108	0.76	0.054 1	0.001 3	0.422 4	0.009 5	0.056 6	0.000 4	374	9	358	8	355	2
4	7	104	114	0.91	0.054 0	0.001 1	0.420 6	0.008 2	0.056 5	0.000 4	371	7	357	7	354	2
5	8	110	138	0.80	0.053 8	0.000 9	0.419 5	0.006 7	0.056 6	0.000 3	362	6	356	6	355	2
6	8	120	129	0.94	0.053 4	0.000 9	0.417 4	0.007 1	0.056 7	0.000 4	345	6	354	6	356	2
7	6	88	88	1.00	0.054 0	0.001 2	0.420 5	0.009 8	0.056 5	0.000 3	372	9	356	8	354	2
8	6	77	89	0.87	0.054 7	0.001 3	0.426 4	0.010 4	0.056 6	0.000 3	398	10	361	9	355	2
9	5	90	83	1.10	0.054 7	0.001 8	0.425 6	0.013 1	0.056 4	0.000 4	402	13	360	11	354	3
10	6	97	88	1.10	0.053 9	0.002 0	0.422 9	0.018 9	0.056 9	0.000 4	365	14	358	16	357	3
11	4	59	71	0.84	0.054 7	0.002 5	0.424 6	0.020 2	0.056 3	0.000 4	400	18	359	17	353	3
12	6	84	100	0.85	0.054 4	0.001 4	0.425 7	0.010 6	0.056 7	0.000 4	389	10	360	9	356	2
13	6	91	98	0.93	0.053 8	0.002 3	0.420 8	0.017 8	0.056 8	0.000 4	361	15	357	15	356	2
14	5	69	83	0.83	0.054 5	0.001 8	0.422 5	0.013 3	0.056 3	0.000 4	390	13	358	11	353	3
15	6	80	87	0.93	0.055 2	0.002 4	0.426 6	0.018 1	0.056 1	0.000 4	419	19	361	15	352	2
16	9	146	137	1.06	0.054 1	0.001 2	0.422 5	0.009 1	0.056 7	0.000 4	375	8	358	8	355	3
17	7	93	102	0.91	0.054 0	0.001 7	0.418 7	0.012 5	0.056 2	0.000 4	372	12	355	11	353	3
18*	8	75	102	0.74	0.057 4	0.002 9	0.482 7	0.035 5	0.060 9	0.000 7	509	26	400	29	381	4
19*	11	138	150	0.92	0.102 4	0.003 4	0.769 5	0.029 8	0.054 5	0.000 5	1 669	56	579	22	342	3
20	7	88	114	0.77	0.053 8	0.001 2	0.418 9	0.009 2	0.056 5	0.000 4	362	8	355	8	354	3
PM404TW1: 二长花岗岩, 坐标为 N46°06'03", E119°04'16"																
1	13	229	198	1.16	0.054 2	0.001 2	0.433 6	0.009 6	0.058 1	0.000 4	378	8	366	8	364	2
2	9	114	140	0.81	0.054 2	0.001 2	0.434 0	0.010 5	0.058 1	0.000 4	379	8	366	9	364	3
3	12	143	183	0.78	0.053 5	0.001 6	0.433 3	0.012 7	0.058 7	0.000 4	351	10	366	11	368	2
4	9	151	134	1.12	0.054 1	0.001 4	0.433 5	0.011 1	0.058 2	0.000 4	374	10	366	9	364	2
5*	14	158	120	1.32	0.062 2	0.001 6	0.405 2	0.015 9	0.047 3	0.000 8	680	17	345	14	298	5
6	5	60	77	0.79	0.054 3	0.001 7	0.436 5	0.013 6	0.058 3	0.000 4	384	12	368	11	365	2
7	9	109	112	0.97	0.055 0	0.002 3	0.437 2	0.024 1	0.057 7	0.000 5	411	17	368	20	362	3
8	11	103	138	0.74	0.054 8	0.001 1	0.442 5	0.008 7	0.058 5	0.000 4	405	8	372	7	367	2
9	5	57	65	0.88	0.053 7	0.001 8	0.427 7	0.013 5	0.057 8	0.000 5	357	12	362	11	362	3
10	8	76	96	0.79	0.053 8	0.001 3	0.431 0	0.010 7	0.058 1	0.000 4	363	9	364	9	364	3

续表 1-1
Continued Table 1-1

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	²³² Th	²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
11*	17	121	125	0.97	0.047 7	0.000 9	0.365 6	0.007 1	0.055 6	0.000 3	85	2	316	6	349	2
12	10	115	110	1.04	0.054 7	0.001 0	0.440 0	0.008 2	0.058 3	0.000 4	399	8	370	7	366	2
13	9	111	106	1.04	0.053 8	0.000 9	0.433 3	0.006 7	0.058 4	0.000 4	363	6	366	6	366	2
14	7	85	93	0.91	0.054 2	0.001 2	0.434 6	0.009 0	0.058 1	0.000 4	380	8	366	8	364	3
15	6	71	84	0.84	0.055 0	0.001 2	0.441 4	0.009 7	0.058 2	0.000 5	413	9	371	8	365	3
16	5	61	74	0.82	0.054 8	0.001 9	0.439 6	0.015 4	0.058 2	0.000 4	403	14	370	13	365	2
17	10	162	152	1.07	0.053 7	0.000 8	0.429 1	0.006 0	0.058 0	0.000 4	357	5	363	5	363	3
18	5	66	83	0.80	0.053 6	0.001 4	0.427 7	0.010 6	0.057 9	0.000 4	352	9	362	9	363	3
19	6	71	90	0.79	0.054 4	0.001 5	0.435 9	0.011 4	0.058 1	0.000 4	387	10	367	10	364	3
20	10	138	148	0.93	0.054 8	0.003 1	0.435 1	0.025 8	0.057 6	0.000 4	405	23	367	22	361	3
PM403TW1: 二长花岗岩,坐标为 N46°08'45" E119°04'02"																
1	17	301	245	1.23	0.054 1	0.000 8	0.434 5	0.004 9	0.058 3	0.000 4	374	5	366	4	365	3
2	10	115	162	0.71	0.054 1	0.001 0	0.432 9	0.006 1	0.058 1	0.000 5	374	7	365	5	364	3
3	7	92	92	1.00	0.054 1	0.001 4	0.434 9	0.014 0	0.058 3	0.000 4	374	10	367	12	366	2
4	13	155	194	0.80	0.054 1	0.001 0	0.435 7	0.007 7	0.058 5	0.000 3	373	7	367	6	366	2
5	12	165	194	0.85	0.054 5	0.000 7	0.437 0	0.005 5	0.058 2	0.000 4	390	5	368	5	365	2
6	26	489	365	1.34	0.053 9	0.000 5	0.432 6	0.003 0	0.058 2	0.000 4	366	3	365	3	365	3
7*	10	310	333	0.93	0.049 5	0.000 8	0.174 2	0.002 8	0.025 5	0.000 2	174	3	163	3	162	1
8*	3	95	90	1.06	0.049 5	0.002 7	0.174 6	0.009 7	0.025 6	0.000 2	172	9	163	9	163	1
9	12	148	185	0.80	0.055 1	0.000 8	0.442 6	0.006 5	0.058 3	0.000 4	416	6	372	5	365	2
10*	18	93	259	0.36	0.055 2	0.000 7	0.541 4	0.004 8	0.071 1	0.000 6	421	5	439	4	443	3
11	9	128	133	0.96	0.054 3	0.000 9	0.433 3	0.007 0	0.057 9	0.000 4	383	7	366	6	363	2
12	21	225	300	0.75	0.053 8	0.000 7	0.430 4	0.005 2	0.058 0	0.000 4	364	5	363	4	363	2
13	13	171	160	1.07	0.054 8	0.001 3	0.438 1	0.009 5	0.057 9	0.000 4	406	9	369	8	363	2
14	18	192	234	0.82	0.054 9	0.000 6	0.440 4	0.004 8	0.058 1	0.000 4	410	5	371	4	364	3
15	19	202	232	0.87	0.054 8	0.000 6	0.439 4	0.004 2	0.058 1	0.000 5	405	4	370	4	364	3
16*	112	154	197	0.78	0.136 7	0.000 8	7.598 7	0.045 8	0.403 1	0.003 2	2 186	13	2 185	13	2 183	17
17*	7	19	8	2.33	0.613 0	0.006 4	14.911 8	0.244 0	0.176 4	0.002 2	4 539	47	2 810	46	1 047	13
18	19	258	226	1.14	0.053 8	0.000 7	0.432 2	0.004 8	0.058 2	0.000 4	364	5	365	4	365	2
19	18	182	239	0.76	0.054 4	0.000 7	0.435 3	0.004 8	0.058 0	0.000 4	388	5	367	4	364	2
20	16	244	200	1.22	0.054 2	0.000 7	0.434 4	0.004 9	0.058 2	0.000 4	378	5	366	4	364	3
21	8	124	102	1.22	0.054 1	0.001 9	0.433 4	0.015 0	0.058 1	0.000 4	377	13	366	13	364	2
22	14	158	200	0.79	0.054 6	0.000 8	0.438 1	0.006 2	0.058 2	0.000 4	397	6	369	5	365	2

续表 1-2
Continued Table 1-2

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Pb	²³² Th	²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ
PM404TW2: 岩性为石英二长岩, 坐标为 N46°06'21", E119°05'32"												
1	19	276	288	0.96	0.440 8	0.004 0	0.059 0	0.000 5	381	3	371	3
2*	4	63	58	1.09	0.433 5	0.036 1	0.057 7	0.000 4	390	32	366	30
3	28	450	421	1.07	0.439 1	0.002 9	0.058 9	0.000 4	375	3	370	2
4	27	247	433	0.57	0.442 7	0.003 2	0.058 8	0.000 3	397	3	372	3
5	28	328	449	0.73	0.442 2	0.002 9	0.058 7	0.000 4	396	3	372	2
6	17	229	263	0.87	0.439 5	0.004 1	0.058 8	0.000 4	379	4	370	3
7	26	436	376	1.16	0.438 7	0.002 8	0.058 6	0.000 5	384	3	369	2
8	12	186	171	1.09	0.437 3	0.005 5	0.058 6	0.000 4	374	5	368	5
9	23	281	356	0.79	0.439 6	0.003 3	0.058 7	0.000 5	384	3	370	3
10	28	436	427	1.02	0.439 9	0.004 0	0.058 8	0.000 4	381	3	370	3
11*	67	92	201	0.46	5.145 8	0.022 1	0.313 9	0.002 0	1 940	11	1 844	8
12	29	432	450	0.96	0.434 5	0.002 6	0.058 4	0.000 4	370	3	366	2
13	25	310	403	0.77	0.438 4	0.003 3	0.058 9	0.000 4	371	3	369	3
14	23	275	367	0.75	0.433 7	0.003 3	0.058 8	0.000 5	350	3	366	3
15	23	354	347	1.02	0.435 4	0.004 5	0.058 4	0.000 4	374	3	367	4
16	27	295	441	0.67	0.439 3	0.003 6	0.058 9	0.000 4	377	3	370	3
17	8	143	122	1.17	0.439 7	0.009 2	0.058 5	0.000 3	393	8	370	8
18*	18	249	254	0.98	0.475 9	0.005 4	0.062 7	0.000 4	415	5	395	5
19	24	405	358	1.13	0.436 8	0.003 2	0.058 8	0.000 4	366	3	368	3
20	8	155	120	1.29	0.436 5	0.007 7	0.058 5	0.000 3	375	7	368	6

*表示该测试点为不谐和点。

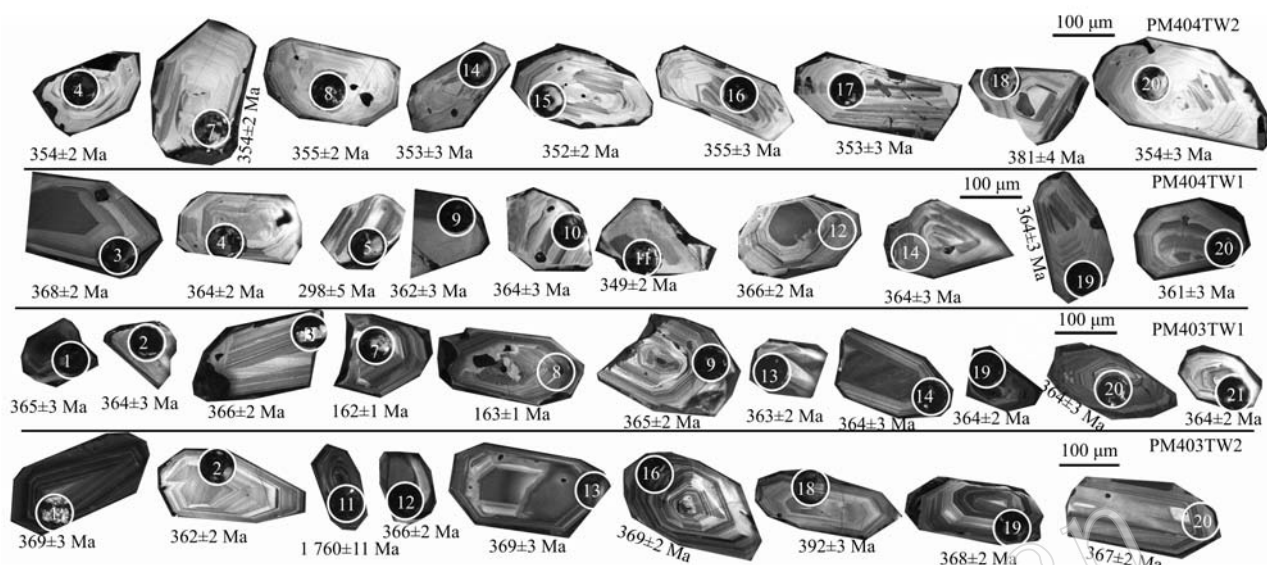


图3 包格德岩体典型锆石阴极 CL 图像

Fig. 3 CL images of the the Baogede granite

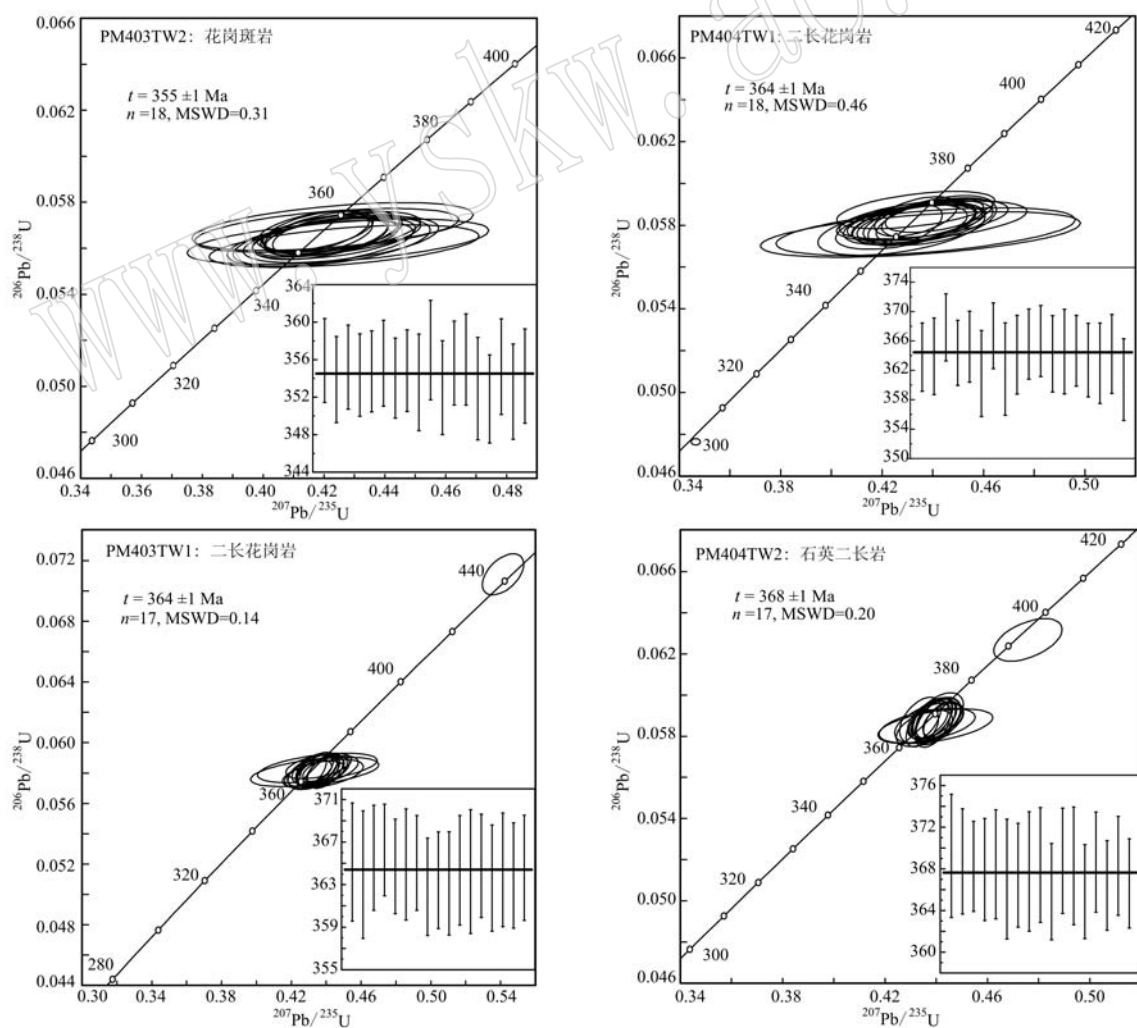


图4 包格德岩体 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams of the the Baogede granite

余 17 个有效分析点的 Th 含量为 $92 \times 10^{-6} \sim 489 \times 10^{-6}$, U 含量为 $92 \times 10^{-6} \sim 365 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.71 ~ 1.34。其中 7、8 点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 163 ~ 162 Ma 之间, 年龄值偏小可能与后期岩浆热事件作用导致的普通铅含量的丢失有关 (Da Silva *et al.*, 2000), 锆石图像上具明显的溶蚀结构或骨架状结构也暗示经历了热液蚀变作用; 16、17 号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 2183 ± 17 Ma、 1047 ± 13 Ma, 可能为捕获的中、古元古代的基底锆石。17 个有效分析点均集中分布于谐和曲线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 366 ~ 363 Ma 之间, 加权平均年龄为 364 ± 1 Ma ($n = 17$, MSWD = 0.14) (图 4), 具有与样品 PM404TW1 一致的地质年龄。

PM404TW2 (石英二长岩): 锆石颜色多为淡黄色, 少数为紫色、无色, 晶体完整, 多为晶面清晰的柱状晶体, 长宽比为 1:2 ~ 1:2.5, 颗粒大小为 150 ~ 220 μm 。反射光下晶体表面干净、光亮, 晶形复杂, 个别晶体表面见溶蚀坑。大部分锆石在 CL 图像上可见清晰的环带结构 (图 3), 其中 13、20 点中可见继承性锆石。从表 1 可知, 共测试 20 个点, 剔除不谐和点 (点 2、11、18), 其余 17 个有效分析点的 Th 含量为 $143 \times 10^{-6} \sim 450 \times 10^{-6}$, U 含量为 $120 \times 10^{-6} \sim 450 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.57 ~ 1.29。其中 11 号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 为 1760 ± 11 Ma, 可能为捕获的古元古代的基底锆石。17 个有效分析点均集中分布于谐和曲线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 369 ~ 366 Ma 之间, 加权平均年龄为 368 ± 1 Ma ($n = 17$, MSWD = 0.20) (图 4)。

结合锆石图像特征及 Th/U 值, 说明 4 件样品具有明显的岩浆成因, 所测得的年龄代表了岩体真实的侵位年龄。LA-ICP-MS 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 测年结果显示, 包格德岩体由 3 期侵入体组成, 分别为 368 ± 1 Ma 的石英二长岩、 364 ± 1 Ma 的二长花岗岩及 355 ± 1 Ma 的花岗斑岩, 岩浆活动持续约 13 Ma。

3.2 主量、微量元素地球化学特征

包格德岩体的主量、微量、稀土元素测试结果及相关参数见表 2。

岩体 SiO_2 含量 66.67% ~ 78.24%, 分异指数 DI 为 78.41 ~ 97.54, 表明岩体的分异演化程度较高; Na_2O 为 1.61% ~ 4.25%, K_2O 为 3.77% ~ 6.78%, ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 为 7.62% ~ 8.82%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为

0.93 ~ 1.57, 个别值达到 4.21, 具有富碱且相对富钾的特征, 里特曼指数为 1.72 ~ 3.13, 为钙碱性岩, 在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 散点图上大部分样品位于高钾钙碱性区间, 个别样品分布于钾玄岩区 (图 5a); Al_2O_3 含量为 11.20% ~ 15.43%, 含量稍微偏低, 大部分样品 A/CNK 为 0.95 ~ 1.08, 为准铝质-弱过铝质岩石, 个别样品 A/CNK 为 1.12 ~ 1.20, 属于过铝质岩石 (图 5b); 在哈克图解上, K_2O 随着 SiO_2 增加而一定程度的增加, 其余主量元素随 SiO_2 增加而明显减少, 呈现了明显的线性关系, 暗示了同源岩浆演化的特征 (图 6)。

岩体稀土元素总量 (不含 Y) 为 $83.60 \times 10^{-6} \sim 163.40 \times 10^{-6}$, 平均 133.50×10^{-6} , 含量偏低; 轻稀土元素含量为 $76.80 \times 10^{-6} \sim 142.90 \times 10^{-6}$, 重稀土元素含量为 $6.80 \times 10^{-6} \sim 21.00 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 6.79 ~ 16.57, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 5.43 ~ 18.52, 明显富集轻稀土元素; $(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.12 \sim 5.66$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 0.93 \sim 1.95$, 表明岩体的轻稀土元素相对重稀土元素内部发生了明显的分馏, 在图中呈右倾的特征 (图 7a); $\delta\text{Eu} = 0.34 \sim 0.78$, Eu 具一定程度的亏损。微量元素表现为相对富集大离子亲石元素 (Rb、Th、K), 不同程度亏损 Ba、Sr、Ti 及 P 等元素 (图 7b)。其中 Ba、Sr 的亏损可能与斜长石的分离结晶有关, Ti、P 的亏损可能与钛铁矿、磷灰石的分离结晶有关。

4 讨论

4.1 岩体时代

前人 (内蒙古自治区地质局, 1979)^① 曾把二长花岗岩、花岗斑岩分别归属为华力西晚期、燕山早期, 但是缺少年代学数据的支持。本次对包格德岩体中的花岗斑岩、二长花岗岩、石英二长岩 3 种岩性进行了锆石 U-Pb 测年, 它们的锆石 U-Pb 年龄分别为 355 ± 1 Ma、 364 ± 1 Ma、 368 ± 1 Ma, 结合锆石图像特征及较高的 Th/U 值, 这些年龄应代表了岩体真实的侵位年龄, 表明其形成时代介于早石炭-晚泥盆世之间, 且以晚泥盆世为主, 而不是之前认为的华力西晚期、燕山早期。

4.2 岩石成因

包格德岩体中石英二长岩 SiO_2 含量为 66.67% ~ 67.60%, DI 为 78.41 ~ 84.10, 具有中等程度的分

① 内蒙古自治区地质局. 1979. 1:20 万贺斯格乌拉牧场幅区域地质调查报告.

表2 包格德岩体主量元素 ($w_B/\%$)、微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果
Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements compositions of the Baogede granite

岩性	花岗斑岩			二长花岗岩						石英二长岩	
	PM403-15	PM403-16	D4796-1	PM404-9	PM403-12	PM403-13	PM403-14	PM404-26	PM404-28	PM404-21	PM404-22
SiO ₂	76.98	78.24	71.16	69.21	76.01	76.18	77.83	74.20	78.21	66.67	67.60
TiO ₂	0.18	0.14	0.36	0.55	0.20	0.26	0.15	0.23	0.20	0.69	0.57
Al ₂ O ₃	12.34	11.67	14.45	14.80	12.90	12.49	11.90	13.55	11.20	15.09	15.43
Fe ₂ O ₃	0.64	0.56	1.92	1.55	0.87	0.62	0.61	1.46	1.13	2.01	2.09
FeO	0.35	0.12	0.40	0.98	0.23	0.33	0.18	0.28	0.23	1.95	1.23
MnO	0.05	0.02	0.08	0.08	0.03	0.01	0.03	0.05	0.03	0.13	0.09
MgO	0.16	0.08	0.46	0.72	0.17	0.26	0.14	0.20	0.12	1.38	0.88
CaO	0.15	0.21	0.97	2.41	0.89	0.24	0.31	0.66	0.25	2.62	1.83
Na ₂ O	3.42	3.57	4.25	3.63	2.96	1.61	3.21	4.08	2.76	4.04	4.20
K ₂ O	4.77	4.71	4.51	4.78	4.66	6.78	4.87	4.24	5.03	3.77	4.62
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.08	0.14	0.02	0.05	0.02	0.06	0.05	0.17	0.13
H ₂ O ⁺	0.68	0.47	1.08	0.87	0.80	0.86	0.53	0.73	0.56	1.17	1.00
CO ₂	0.11	0.07	0.09	0.07	0.09	0.11	0.07	0.09	0.04	0.07	0.11
总量	99.85	99.87	99.81	99.79	99.83	99.8	99.85	99.83	99.81	99.76	99.78
K+Na	8.19	8.28	8.76	8.41	7.62	8.39	8.08	8.32	7.79	7.81	8.82
K/Na	1.39	1.32	1.06	1.32	1.57	4.21	1.52	1.04	1.82	0.93	1.10
A/CNK	1.12	1.03	1.06	0.95	1.12	1.20	1.07	1.08	1.07	0.97	1.01
NK/A	0.88	0.94	0.82	0.75	0.77	0.80	0.89	0.83	0.89	0.71	0.77
σ	1.97	1.94	2.71	2.68	1.75	2.11	1.87	2.21	1.72	2.55	3.13
DI	96.21	97.54	90.16	83.80	92.28	94.86	96.26	92.93	95.97	78.41	84.10
FeO ^T	0.93	0.62	2.13	2.37	1.01	0.89	0.73	1.59	1.25	3.76	3.11
FeO ^T /MgO	5.79	7.80	4.63	3.30	5.96	3.41	5.21	7.97	10.39	2.72	3.53
Mg [#]	23.65	18.85	27.99	35.35	23.25	34.46	25.66	18.46	14.73	39.78	33.75
La	18.00	30.80	23.60	32.40	28.60	33.30	21.50	32.00	32.00	25.00	27.00
Ce	38.40	55.40	56.00	63.00	62.30	73.40	49.60	56.50	67.00	53.00	62.60
Pr	4.18	7.28	5.94	7.85	5.86	7.36	4.98	8.07	8.13	6.81	7.15
Nd	13.80	24.50	21.20	28.90	19.80	24.60	16.50	30.20	28.90	25.70	26.50
Sm	2.16	4.40	3.94	5.29	3.26	3.82	2.60	5.71	5.70	5.19	5.11
Eu	0.26	0.46	0.70	1.19	0.46	0.49	0.39	0.84	0.72	1.22	1.18
Gd	1.73	3.46	3.43	4.08	2.86	3.04	2.11	4.62	4.75	4.12	4.16
Tb	0.29	0.57	0.54	0.66	0.41	0.44	0.33	0.83	0.88	0.67	0.71
Dy	1.59	2.78	2.97	3.36	2.11	1.91	1.62	4.68	5.38	3.49	3.79
Ho	0.33	0.53	0.60	0.65	0.42	0.38	0.32	0.96	1.12	0.67	0.75
Er	1.08	1.66	1.83	1.95	1.37	1.20	1.06	3.06	3.40	2.01	2.26
Tm	0.19	0.27	0.32	0.30	0.22	0.18	0.18	0.54	0.60	0.32	0.38
Yb	1.35	1.90	2.27	2.14	1.63	1.29	1.35	3.78	4.22	2.16	2.61
Lu	0.20	0.26	0.33	0.31	0.23	0.19	0.20	0.55	0.61	0.32	0.38
Y	9.50	15.70	16.60	17.70	12.80	10.50	9.80	25.50	31.30	18.70	20.80
Σ REE	83.60	134.30	123.70	152.10	129.50	151.60	102.70	152.30	163.40	130.70	144.60
LREE	76.80	122.70	111.30	138.60	120.20	142.90	95.50	133.30	142.40	117.00	129.60
HREE	6.80	11.40	12.30	13.50	9.30	8.60	7.20	19.00	21.00	13.80	15.00
L/H	11.35	10.73	9.06	10.30	13.00	16.57	13.34	7.01	6.79	8.51	8.62
(La/Yb) _N	9.60	11.61	7.45	10.85	12.56	18.52	11.40	6.09	5.43	8.32	7.42
(La/Sm) _N	5.38	4.52	3.86	3.96	5.66	5.63	5.33	3.62	3.62	3.12	3.41
(Gd/Yb) _N	1.07	1.51	1.25	1.57	1.45	1.95	1.29	1.01	0.93	1.58	1.32
δ Eu	0.40	0.34	0.57	0.76	0.45	0.42	0.49	0.49	0.41	0.78	0.76
Cr	3.66	1.67	7.50	10.10	4.65	1.63	3.77	3.10	4.13	7.92	7.38
Ni	14.50	11.30	10.80	11.90	9.27	8.09	14.70	7.62	12.20	13.30	10.90
Rb	131	115	107	133	105	187	131	83	113	107	125
Nb	14.50	11.60	15.60	11.80	11.80	18.80	11.50	14.80	17.60	11.70	13.00
Ta	1.71	1.27	1.92	1.15	1.59	1.24	1.68	1.67	1.92	1.35	1.37
Th	10.50	10.00	13.70	10.60	11.40	8.56	9.74	7.42	13.50	11.00	11.60
Ba	282	124	736	718	604	607	228	563	579	671	768
Sr	71.30	44.30	278.00	425.00	137.00	324.00	74.30	105.00	96.60	575.00	550.00
Zr	119	100	173	226	129	111	84	205	226	199	268
Hf	4.46	4.24	5.56	6.17	4.14	3.41	3.06	6.56	6.70	5.70	7.30
Nb/Ta	8.48	9.13	8.13	10.26	7.42	15.16	6.85	8.86	9.17	8.67	9.49
$t_{Zr}/^{\circ}\text{C}$	773	752	792	801	779	773	741	814	829	789	821

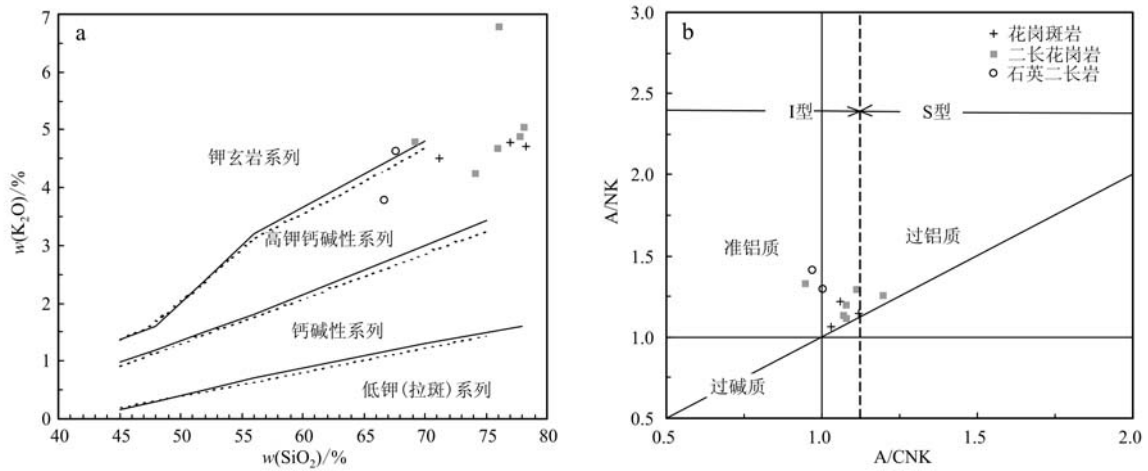


图5 包格德岩体 K_2O-SiO_2 图解(a, 据 Morrison, 1980) 及 $A/NK-A/CNK$ 图解(b, 据 Maniar and Piccoli, 1989)
Fig. 5 K_2O-SiO_2 diagram (a, after Morrison, 1980) and $A/NK-A/CNK$ diagram (b, after Maniar and Piccoli, 1989) of the Baogede granite

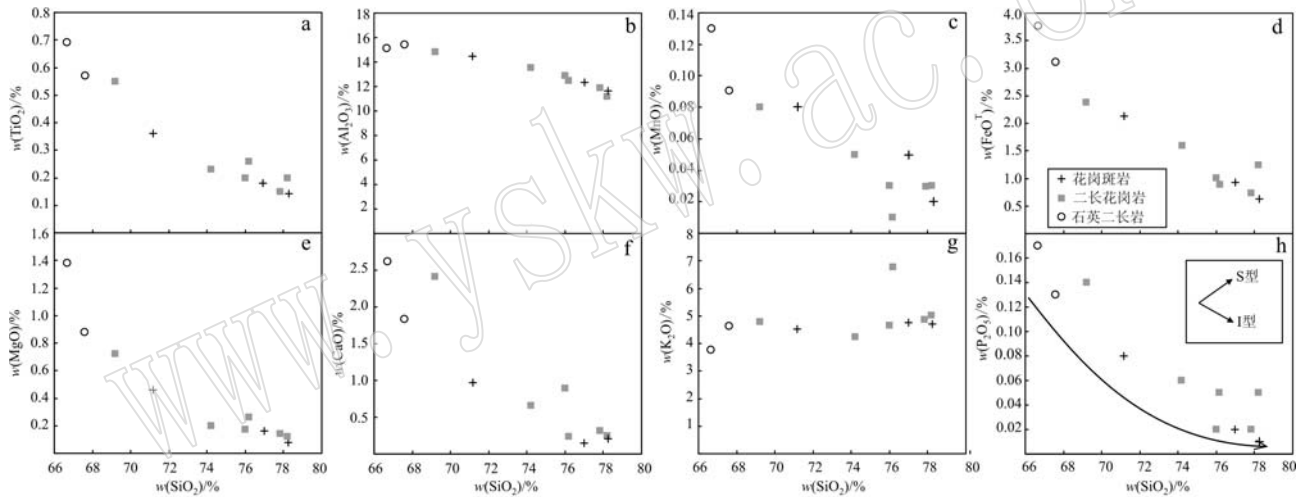


图6 包格德岩体哈克图解
Fig. 6 Harker diagram of the Baogede granite

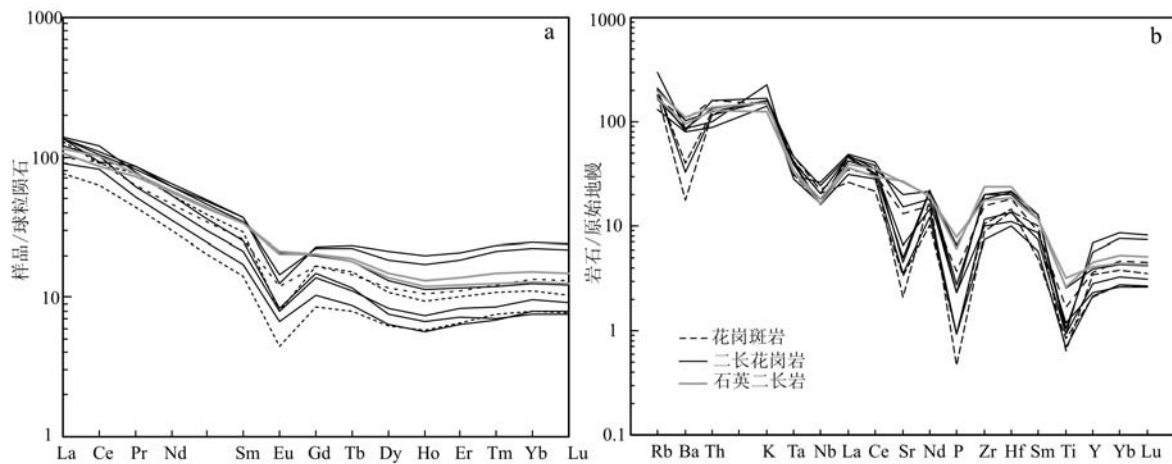


图7 包格德岩体稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a)及微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) (标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized spider diagram(b) of the Baogede granite (after Sun and McDonough, 1989)

异;二长花岗岩、花岗斑岩 SiO_2 含量为 69.21%~78.24%, DI 为 83.80~97.54, 具有高硅、高分异指数的特征, CaO 为 0.15%~2.41%, P_2O_5 为 0.01%~0.14%, TiO_2 为 0.14%~0.55%, 钙、磷、钛含量普遍偏低, 以上显示两种岩性分异程度明显偏高。

包格德岩体 K_2O 含量介于 3.77%~6.78% 之间, 很明显不属于 M 型花岗岩 (通常 <1%)。也具有不同于 A 型花岗岩的一系列地球化学特征: ① 碱性指数 NK/A 为 0.71~0.94, 平均值为 0.82, 略低于碱性特征的 A 型花岗岩 ($\text{NK}/\text{A} > 0.85$) (Whalen *et al.*, 1987); ② Zr 含量为 $84 \times 10^{-6} \sim 268 \times 10^{-6}$, 大部分低于 A 型花岗岩下限 (250×10^{-6}) (Whalen *et al.*, 1987), 在岩石成因图解中大部分样品均落在了非 A 型花岗岩区域 (8a, 8b); ③ 铁镁比 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 介于 2.72~10.39 之间, 平均值为 5.52, 有别于 A 型花岗岩富铁贫镁的特征 ($\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO} > 10$) (Whalen *et al.*, 1987); ④ 锆石饱和温度 t_{Zr} 为 741~829°C, 平均 787°C (表 2), 也低于具有高温成岩特征的 A 型花岗岩 ($t_{\text{Zr}} > 830^\circ\text{C}$) (Watson and Harrison, 1983)。另外, 样品在图解 8c 中样品均位于高分异钙碱性区、钙碱性区, 也不支持其为 A 型花岗岩。以上说明, 包格德岩体只可能为 I 或 S 型花岗岩。

通常情况下, 铝饱和指数 A/CNK 是区分 I、S 型花岗岩的有效标志, 但该指标通常应用于未经强烈结晶分异的花岗岩 (Chappell and White, 1992; 吴福元等, 2007), 文中样品 A/CNK 大部分为 0.95~1.08, 个别为 1.12~1.2, 总体上为准铝质-弱过铝质岩石, 在 $\text{A}/\text{CNK} - \text{A}/\text{NK}$ 图解中显示了 I 型花岗岩的分布特征 (图 5b)。其 P_2O_5 含量为 0.01%~0.17%, 平均值为 0.07%, 也明显低于高分异 S 型花岗岩

(P_2O_5 平均值为 0.14%) (King *et al.*, 1997), 且在 $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2$ 图解中呈现 I 型花岗岩的负相关性 (图 6h)。另外, 岩体 Na_2O 含量为 1.61%~4.25%, 平均值为 3.43%, 与 I 型 (Na_2O 平均值为 3.21%) 接近, 而远高于 S 型花岗岩 (Na_2O 平均值为 2.81%) (King *et al.*, 1997)。因此, 包格德岩体为 I 型花岗岩, 且主体岩性分异程度较高 (图 8c)。

包格德岩体的 3 种岩性在空间上为明显的侵入接触, 主量元素 (TiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO 、 FeO^{T} 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5) 与 SiO_2 含量变化呈明显的线性关系 (图 6), 微量、稀土元素具有相似的配分曲线特征 (图 7a、7b), 以上均暗示了岩体为同源岩浆演化的可能。岩体具有偏低的 $\text{Mg}^{\#}$ 值 ($14.73 \times 10^{-6} \sim 39.78 \times 10^{-6}$) 及 Cr (为 $1.63 \times 10^{-6} \sim 10.10 \times 10^{-6}$)、 Ni (为 $7.62 \times 10^{-6} \sim 14.70 \times 10^{-6}$) 含量, 结合样品 Nb/Ta 值 (6.85~15.16) 低于幔源岩浆 (17 ± 1), 而与大陆地壳 (10~14) 接近 (Sun and McDonough, 1989)。说明以壳源岩浆为主。其 Ba、Sr、Eu 的亏损 (图 7a、7b) 可能与岩浆形成过程中斜长石的分异有关 (图 9a)。哈克图解 (图 6)、 $\text{La}/\text{Yb} - \text{La}$ 图解 (图 9b) 显示: 部分熔融、分离结晶作用是控制岩体岩浆演化过程中的主要因素。其稀土元素含量的变化可能与副矿物磷灰石的分离结晶有关 (图 9c), 其中磷灰石的分离结晶与其低磷 (P_2O_5 含量以 0.01%~0.08% 为主) 特征一致。

4.3 构造意义

兴蒙造山带北缘具有俯冲成因的早古生代岛弧岩浆岩不同程度发育, 该花岗岩带年龄介于 496~414 Ma 之间, 持续约 82 Ma, 保留了古亚洲洋早期向北俯冲的岩浆记录 (陈斌等, 1996; 王树庆等, 2016;

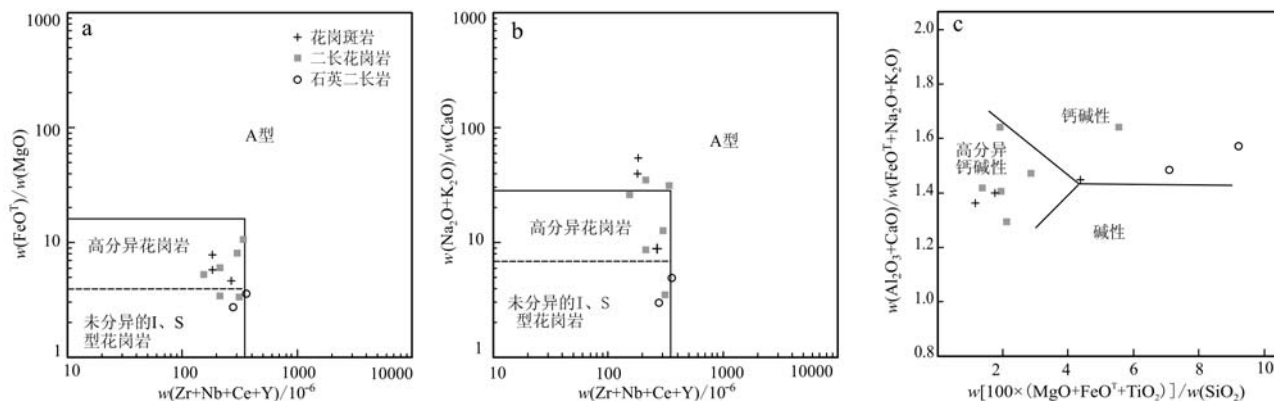


图 8 包格德岩体岩石成因图解 (a, b 据 Whalen *et al.*, 1987; c 据 Sylvester, 1989)

Fig. 8 Petrogenetic diagrams of the Baogede granite (a, b after Whalen *et al.*, 1987; c after Sylvester, 1989)

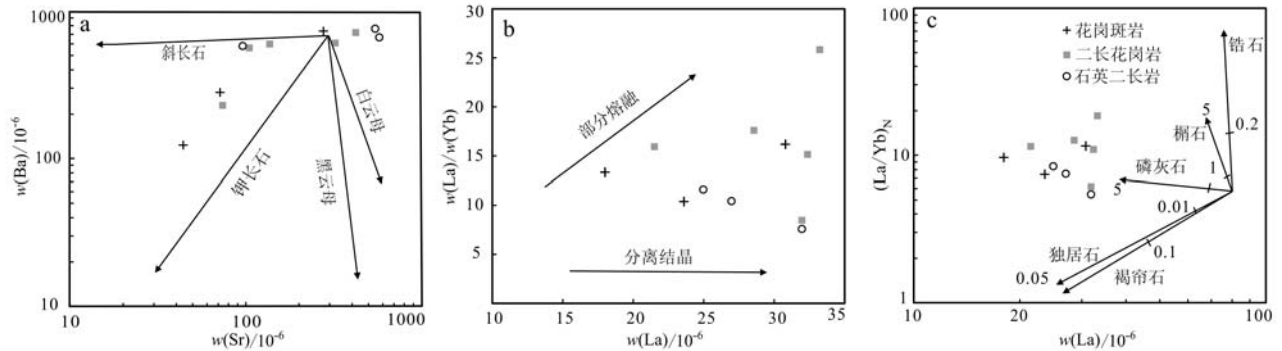


图9 包格德岩体 Ba-Sr、La/Yb-La、 $(La/Yb)_N$ -La 关系图,图中分异趋势线上数字代表分离结晶程度

(a,c 据 Wu *et al.*, 2003; b 据 Allegre and Minster, 1978)

Fig. 9 Ba-Sr, La/Yb-La, $(La/Yb)_N$ -La diagram of the Baogede granite, the data on the lines represent the fractionation degree(a,c after Wu *et al.*, 2003; b after Allegre and Minster, 1978)

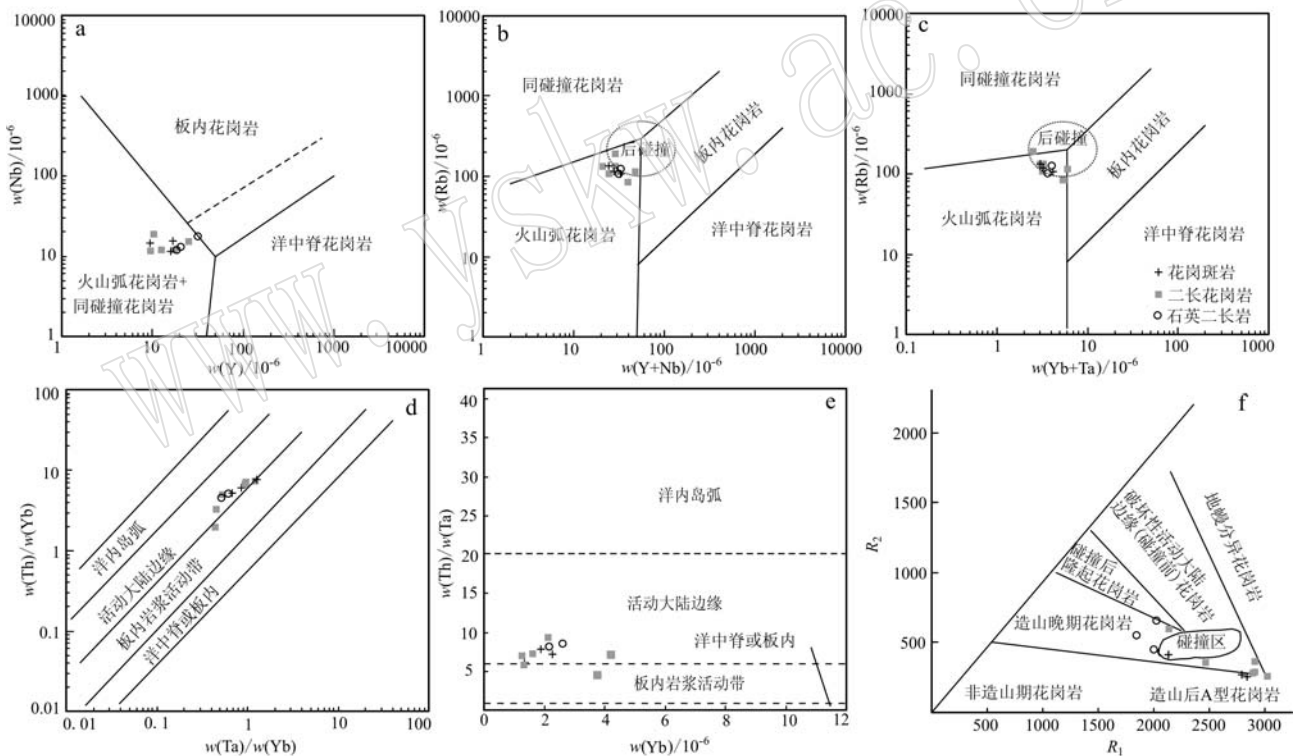


图10 包格德岩体的构造环境图解(a、b、c 据 Pearce *et al.*, 1984; d、e 据 Gorton and Schandl, 2000; f 据 Batchelor and Bowden, 1985)

Fig. 10 Tectonic environment discrimination diagrams of the Baogede granite (a, b, c after Pearce *et al.*, 1984; d, e after Gorton and Schandl, 2000; f after Batchelor and Bowden, 1985)

李红英等, 2016; 杨泽黎等, 2017, 2018);而与伸展背景有关的碱性岩浆岩带的形成时期为晚石炭-中二叠世,代表兴蒙造山带的北缘整体进入了洋盆闭合后的造山后伸展环境中(洪大卫等, 1994; 程银行等, 2014; 薛富红等, 2015; 孔令杰等, 2017; 韩江

涛, 2019)。因此,泥盆纪-早石炭世时期便成为了造山带构造格局的重要转折时期。泥盆纪-早石炭世时期,区域上陆相、海陆交互地层发育,暗示了洋盆趋于消亡或已闭合(徐备等, 2014; 张晋瑞等, 2018)。沿造山带的北缘存在一条重要的缝合线,

即二连-贺根山-嫩江-黑河缝合带,该缝合带既是重要的生物群界线,又是两大陆块(兴安、松嫩)的分界线(许文良等,2019)。沿该缝合带也断续出露与此地质背景有关的岩浆活动产物,例如:缝合带西段苏左旗早石炭世火山岩(346~335 Ma,李梦瞳等,2020),东段牙克石花岗岩闪长岩(331 Ma,赵芝等,2010)。以上说明,早石炭世时期在二连-贺根山-嫩江-黑河缝合带的东、西段洋盆已经闭合。而缝合带中部的东乌旗地区随着陆壳拉张出现了具有弧后盆地性质的陆内小洋盆-贺根山洋盆(Xiao *et al.*, 2003; 黄波等,2016; 张晋瑞等,2018; 许文良等,2019),贺根山洋盆的构造演化过程在晚泥盆-早石炭世时期是有限的俯冲还是已经消亡?这可以从该时期的岩浆作用得到回答。

包格德岩体由花岗斑岩、二长花岗岩、石英二长岩3种岩性组成,为一套高钾钙碱性的I型花岗岩组合。具有大离子亲石元素(Rb、Th、K)富集,高场强元素(Ti、Nb、Ta)不同程度亏损的特征,在Nb-Y、Rb-Y+Nb、Rb-Yb+Ta构造图上样品也几乎都落在了火山弧花岗岩区(图10a、10b、10c),显示了火山弧或活动陆缘岩浆岩的特点(许文良等,2012)。在Th/Yb-Ta/Yb、Th/Ta-Yb构造图解上样品分布相对集中,进一步显示了活动大陆边缘岩浆岩的特征(图10d、10e)。在 R_1-R_2 构造图解上分布比较零散,均位于造山晚期、破坏性活动大陆边缘花岗岩的交汇区域(图10f),暗示其形成于碰撞前的造山晚期构造环境。综上,包格德岩体形成于活动大陆边缘环境的弧后盆地上,是贺根山洋向北俯冲消减的产物。同时,包格德岩体的构造背景显示贺根山洋闭合晚于368~355 Ma,进一步制约了贺根山洋闭合的上限,这一认识为兴蒙造山带北缘的古生代构造演化提供了新的地质依据。

5 结论

(1) 包格德岩体由石英二长岩、二长花岗岩及花岗斑岩组成,锆石U-Pb年龄分别为 368 ± 1 Ma、 364 ± 1 Ma、 355 ± 1 Ma,为晚泥盆-早石炭世时期岩浆活动的产物;

(2) 岩体具有高硅、富碱且富钾、准铝质-弱过铝质的特征,稀土元素偏低,负钨异常中等,相对富集大离子亲石元素(Rb、Th、K)及轻稀土元素,不同程度亏损Ba、Sr、Ti及P等元素,为高钾钙碱性系列

的I型花岗岩;

(3) 岩体形成于活动大陆边缘,为弧后洋盆环境的产物,所以贺根山洋盆闭合应晚于368~355 Ma。

References

- Allegre C J and Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic process[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1~25.
- Bao Zhiwei, Chen Senhuang, Zhang Zhentang, *et al.* 1994. Study on Re and Sm-Nd isotopes of Hegenshan Ophiolite, Inner Mongolia[J]. *Geochimica*, 23(4): 339~349(in Chinese with English abstract).
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1): 43~55.
- Bu Jianjun, He Weihong, Zhang Kexin, *et al.* 2020. Evolution of the Paleo-Asian Ocean: Evidences from paleontology and stratigraphy[J]. *Earth Science*, 45(3): 711~727(in Chinese with English abstract).
- Chappell B W and White A J R. 1992. I and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 83(1~2): 1~26.
- Chen Bin, Ma Xinghua, Liu Ankun, *et al.* 2009. Zircon U-Pb ages of the Xilinhot metamorphic complex and blueschist, and implications for tectonic evolution of the Solonker suture[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3 123~3 129(in Chinese with English abstract).
- Chen Bin and Xu Bei. 1996. The main characteristics and tectonic implications of two kinds of paleozoic granitoids in Sunidzuqi central Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(4): 546~561(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Li Yanfeng, Li Min, *et al.* 2014. Geochronology and petrogenesis of the alkaline pluton in Dong Ujimqi, Inner Mongolia and its tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(11): 2 086~2 096(in Chinese with English abstract).
- Da Silva L C, Gresse P C, Scheeper R, *et al.* 2000. U-Pb SHRIMP and Sm-Nd age constraints on the timing and sources of the Pan African Cape Granite Suite, South Africa[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 30(4): 795~815.
- Gorton M P and Schandl E S. 2000. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks[J]. *The Canadian Mineralogist*,

- 8(5): 1 065~1 073.
- Han Jiangtao, Yuan Tianmeng, Liu Wenyu, *et al.* 2019. Geoelectric structure of the collision zone between the Siberia plate and the North China Craton and discussion on the deep suture boundary[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(3): 1 159~1 171 (in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Huang Huaizeng, Xiao Yijun, *et al.* 1994. The Permian alkaline granites in central Inner Mongolia and their geodynamic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 68(3): 219~230 (in Chinese with English abstract).
- Huang Bo, Fu Dong, Li Shucai, *et al.* 2016. The age and tectonic implications of the Hegenshan ophiolite in Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(1): 158~176 (in Chinese with English abstract).
- King P L, White A J R and Chappell B W. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, south-eastern Australia[J]. Journal of Petrology, 38(3): 371~391.
- Kong Lingjie, Han Baofu, Zheng Bo, *et al.* 2017. Geochronology, geochemistry and tectonic significances of the granites to the northeast of Erenhot, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 36(4): 433~457 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongying, Zhou Zhiguang, Li Pengju, *et al.* 2016. Geochemical features and significance of Late Ordovician gabbros in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. Geological Review, 62(2): 300~316 (in Chinese with English abstract).
- Li Huaikun, Zhu Shixing, Xiang Zhenqun, *et al.* 2010. Zircon U-Pb dating on tuffbed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing; Further Constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(7): 2 131~2 140 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, *et al.* 2007. Shuangjingzhi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean Paleo-plates[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(3): 565~582 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Mo Shenguo, He Zhengjun, *et al.* 2004. The timing of crustal sinistral strike-slip movement in the northern Great Khing, an ranges and its constraint on reconstruction of the crustal tectonic evolution of NE China and adjacent areas since the Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 11(3): 157~168 (in Chinese with English abstract).
- Li Mengtong, Tang Jun, Wang Zhiwei, *et al.* 2020. Geochronology and geochemistry of the Early Carboniferous volcanic rocks in Sonid Zuoqi, Inner Mongolia; Implication for the Carboniferous tectonic evolution and crustal nature of the eastern Central Asia Orogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(3): 799~819 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongjiang, Zhang Xingzhou, Jin Wei, *et al.* 2010. Late Paleozoic tectonic evolution in North China[J]. Geology in China, 37(4): 943~951 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochron Centre Special Publication, (4): 1~70.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 101(5): 635~643.
- Morrison W G. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association[J]. Lithos, 13(1): 97~108.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 25(4): 956~983.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society of London, Special Publications, 42(1): 313~345.
- Sylvester P J. 1989. Post-collisional alkaline granites[J]. The Journal of Geology, 97: 261~280.
- Tang Jie, Xu Wenliang, Wang Feng, *et al.* 2018. Subduction history of the Paleo-Pacific slab beneath Eurasian continent: Mesozoic-Paleogene magmatic records in Northeast Asia[J]. Science China: Earth Sciences, 48(5): 549~583 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuqing, Xin Houtian, Hu Xiaojia, *et al.* 2016. Geochronology, geochemistry and geological significance of Early Paleozoic Wulanaobaotu intrusive rocks, Inner Mongolia[J]. Earth Science, 41(4): 555~569 (in Chinese with English abstract).
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magmatypes[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 64(2): 295~304.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contrib. Miner. Petrol., 95: 407~419.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilder S A, *et al.* 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China [1]: Geochronology and petrogenesis[J]. Lithos, 66(3~4): 241~273.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1 217~

1 238(in Chinese with English abstract).

3 245~3 258(in Chinese with English abstract).

Xiao W J, Windley B F, Hao J, *et al.* 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 1 069~1 090.

Xu Bei, Wang Zhiwei, Zhang Liyang, *et al.* 2018. The Xing-Meng intra-continent orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(10): 2 819~2 844(in Chinese with English abstract).

Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qingzhong, *et al.* 2014. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1 841~1 857(in Chinese with English abstract).

Xu Wenliang, Sun Chenyang, Tang Jie, *et al.* 2019. Basement nature and tectonic evolution of the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt[J]. *Earth Science*, 44(5): 1 620~1 646(in Chinese with English abstract).

Xu Wenliang, Wang Feng, Meng En, *et al.* 2012. Paleozoic-early mesozoic tectonic evolution in the eastern Heilongjiang Province, NE China: Evidence from igneous rock association and U-Pb geochronology of detrital zircons[J]. *Journal of Jinlin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1 378~1 389(in Chinese with English abstract).

Xue Fuhong, Zhang Xiaohui, Deng Jiangxia, *et al.* 2015. Late Jurassic A-type granite from the Dalai region of central Inner Mongolia: Geochemistry, petrogenesis and tectonic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1 774~1 788(in Chinese with English abstract).

Yang Zeli, Wang Shuqing, Hu Xiaojia, *et al.* 2017. Petrogenesis of the Early Paleozoic Jieryalantu pluton in Inner Mongolia: Constraints from geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(8): 1 369~1 384(in Chinese with English abstract).

Yang Zeli, Wang Shuqing, Hu Xiaojia, *et al.* 2018. Geochronology and geochemistry of Early Paleozoic gabbroic diorites in East Ujimqin Banner of Inner Mongolia and their geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(3): 349~365(in Chinese with English abstract).

Zhang Jinrui, Wei Chunjing, Chu Hang, *et al.* 2018. New model for the tectonic evolution of Xing'an-Inner Mongolia Orogenic Belt: Evidence from four different phases of metamorphism in Central Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(10): 2 857~2 872(in Chinese with English abstract).

Zhao Zhi, Chi Xiaoguo, Liu Jianfeng, *et al.* 2010. Late Paleozoic arc-related magmatism in Yakeshi region, Inner Mongolia: Chronological and geochemical evidence[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11):

附中文参考文献

包志伟, 陈森煌, 张桢堂, 等. 1994. 内蒙古贺根山地区蛇绿岩稀土元素和 Sm-Nd 同位素研究[J]. *地球化学*, 23(4): 339~349.

卜建军, 何卫红, 张克信, 等. 2020. 古亚洲洋的演化: 来自古生物地层学方面的证据[J]. *地球科学*,

陈 斌, 马星华, 刘安坤, 等. 2009. 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*, 25(12): 3 123~3 129.

陈 斌, 徐 备. 1996. 内蒙古苏左旗地区古生代两类花岗岩类的基本特征及构造意义[J]. *岩石学报*, 12(4): 546~561.

程银行, 李艳锋, 李 敏, 等. 2014. 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*, 88(11): 2 086~2 096.

韩江涛, 袁天梦, 刘文玉, 等. 2019. 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*, 62(3): 1 159~1 171.

洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 等. 1994. 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*, 68(3): 219~230.

黄 波, 付 冬, 李树才, 等. 2016. 内蒙古贺根山蛇绿岩形成时代及构造启示[J]. *岩石学报*, 32(1): 158~176.

孔令杰, 韩宝福, 郑 波, 等. 2017. 内蒙古二连浩特东北部花岗岩的年代学、地球化学特征及构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 36(4): 433~457.

李红英, 周志广, 李鹏举, 等. 2016. 内蒙古东乌旗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*, 62(2): 300~316.

李怀坤, 朱士兴, 相振群, 等. 2010. 北京延庆高干庄组凝灰岩的锆石 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*, 26(7): 2 131~2 140.

李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 2007. 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*, 23(3): 565~582.

李锦轶, 莫申国, 和政军, 等. 2004. 大兴安岭北段地壳左行走滑运动的时代及其对中国东北及邻区中生代以来地壳构造演化重建的制约[J]. *地学前缘*, 11(3): 157~168.

李梦瞳, 唐 军, 王志伟, 等. 2020. 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*, 36(3): 799~819.

刘永江, 张兴洲, 金 巍, 等. 2010. 东北地区晚古生代区域构造演化[J]. *中国地质*, 37(4): 943~951.

- 唐杰, 许文良, 王枫, 等. 2018. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史: 东北亚陆缘中生代-古近纪岩浆记录[J]. 中国科学: 地球科学, 48(5): 549~583.
- 王树庆, 辛后田, 胡晓佳, 等. 2016. 内蒙古乌兰敖包图早古生代侵入岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 地球科学, 41(4): 555~569.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1 217~1 238.
- 徐备, 王志伟, 张立杨, 等. 2018. 兴蒙陆内造山带[J]. 岩石学报, 34(10): 2 819~2 844.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等. 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元初探[J]. 岩石学报, 30(7): 1 841~1 857.
- 许文良, 孙晨阳, 唐杰, 等. 2019. 兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程[J]. 地球科学, 44(5): 1 620~1 646.
- 许文良, 王枫, 孟恩, 等. 2012. 黑龙江省东部古生代-早中生代的构造演化: 火成岩组合与碎屑锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1 378~1 389.
- 薛富红, 张晓辉, 邓江夏, 等. 2015. 内蒙古中部达拉地区晚侏罗世 A 型花岗岩: 地球化学特征、岩石成因与地质意义[J]. 岩石学报, 31(6): 1 774~1 788.
- 杨泽黎, 王树庆, 胡晓佳, 等. 2017. 内蒙古吉尔嘎郎图早古生代岩体成因-年代学、地球化学及 Nd-Hf 同位素制约[J]. 地质通报, 36(8): 1 369~1 384.
- 杨泽黎, 王树庆, 胡晓佳, 等. 2018. 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, 37(3): 349~365.
- 张晋瑞, 魏春景, 初航, 等. 2018. 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, 34(10): 2 857~2 872.
- 赵芝, 迟效国, 刘建峰, 等. 2010. 内蒙古牙克石地区晚古生代弧岩浆岩: 年代学及地球化学证据[J]. 岩石学报, 26(11): 3 245~3 258.

《岩石矿物学杂志》编辑部荣获“第五届全国青年地质大会特别学术贡献奖”

2021 年是建党 100 周年, 为纪念这个重要的历史时刻, 由中国地质学会青年工作委员会(简称青工委)发起并举办的“第五届全国青年地质大会”于 2021 年 4 月在贵州贵阳召开。本次大会是我国青年才俊交流成果、展现风采的最为重要的会议之一, 大会紧扣时代脉搏, 相继围绕地质找矿、生态文明建设、“一带一路”建设、“两山”理论等主题开展学术交流和研讨。引导广大青年地质工作者不忘初心、牢记使命, 面向建成富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化国家的宏伟目标, 以更为长远的历史眼光、更为宽广的科学视角、更为创新的发展理念, 开拓地质工作的服务领域, 提升地质工作对经济社会高质量发展和保障人民生命财产安全的贡献, 发挥青年先锋队的作用。同时, 引导青年地质工作者个人的理想追求融入党和国家事业之中, 在推动学术创新、服务大局和中心工作上做出重要贡献, 在实现地质大国向地质强国转变和实现中华民族伟大复兴的伟大征程中建立功勋。

围绕上述目标, 《岩石矿物学杂志》于 2021 年第

40 卷第 2 期组织出版了“第五届全国青年地质大会基础地质”专辑, 本专辑系统报道了过去两年我国青年地质工作者在岩石学、矿物学和矿床学等基础地质学科领域的最新研究进展, 共收录 17 篇文章。专辑收录的文章评审严格、学术严谨、编校质量高, 得到了中国地质学会青年工作委员会的认可与肯定, 《岩石矿物学杂志》编辑部荣获“第五届全国青年地质大会特别学术贡献奖”!

