



## 黑龙江伊春地区早侏罗世 A 型花岗岩地球化学特征及构造环境探讨

张洪文<sup>1,2</sup>, 平先权<sup>2</sup>, 黄伟<sup>1</sup>, 刘金业<sup>1</sup>, 高博<sup>1</sup>, 艾磊<sup>2</sup>, 王刚<sup>1</sup>, 孙艳秋<sup>3</sup>

1. 中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江牡丹江 157021;

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074; 3. 牡丹江市第二高级中学, 黑龙江牡丹江 157021

**摘要:** 黑龙江省伊春地区大地构造位于兴蒙造山带东段的小兴安岭-张广才岭弧盆系内, 中生代发育多期次岩浆活动, 记录了弧盆系的构造演化过程. 通过对伊春北部白桦青年队地区的中生代花岗岩进行详细的岩石学及地球化学特征和年代学研究, 结果显示, 区内出露的中生代花岗岩主要包括中细粒正长花岗岩、似斑状二长花岗岩. 中细粒正长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果为  $190.6 \pm 1.7$  Ma, 为早侏罗世. 岩石地球化学特征显示具有高硅 ( $\text{SiO}_2=72.8\% \sim 77.43\%$ ), 富碱 ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=7.43\% \sim 8.61\%$ ), 贫镁 ( $\text{MgO}=0.11\% \sim 0.54\%$ ), 钙 ( $\text{CaO}=0.24\% \sim 1.77\%$ ), 磷 ( $\text{P}_2\text{O}_5=0.02\% \sim 0.08\%$ ), 钛 ( $\text{TiO}_2=0.05\% \sim 0.31\%$ ) 的特点, A/CNK 值为 1.05~1.15, 为过铝质、高钾钙碱性花岗岩. 微量元素方面, 亏损高场强元素 Nb、Ti、P 和大离子亲石元素 Ba、Sr, 富集 Rb、K、Th、Hf 等元素. 稀土配分曲线总体上呈不对称右倾型, 且 Eu 负异常 ( $\delta\text{Eu}=0.08 \sim 0.72$ ) 明显. 这些地球化学特征显示研究区早侏罗世花岗岩具 A<sub>2</sub> 型花岗岩的特点, 形成于造山后的伸展构造背景. 结合小兴安岭地区的岩浆活动和构造事件记录, 认为黑龙江伊春地区早侏罗世岩浆侵位活动可能发生在古太平洋板块西向俯冲所造成的造山后伸展构造背景下.

**关键词:** 早侏罗世; A 型花岗岩; 地球化学; 构造环境; 黑龙江省

## GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND TECTONIC ENVIRONMENT OF THE EARLY JURASSIC A-TYPE GRANITES IN YICHUN AREA, HEILONGJIANG PROVINCE

ZHANG Hong-wen<sup>1,2</sup>, PING Xian-quan<sup>2</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, LIU Jin-ye<sup>1</sup>, GAO Bo<sup>1</sup>, AI Lei<sup>2</sup>, WANG Gang<sup>1</sup>, SUN Yan-qiu<sup>3</sup>

1. Mudanjiang Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Mudanjiang 157021, Heilongjiang Province, China; 2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Mudanjiang No. 2 Senior High School, Mudanjiang 157021, Heilongjiang Province, China

**Abstract:** The Yichun area of Heilongjiang Province is tectonically located in the Xiaoxinganling-Zhangguangcailing arc-basin system in the eastern Xingan-Mongolian orogenic belt, with multiple-stage magmatic activities occurred in Mesozoic, which has recorded the tectonic evolution of arc-basin system. The paper studies in detail the petrology, geochemistry and chronology of the Mesozoic granites in Baihuaqingniandui area of northern Yichun. The results show

收稿日期: 2022-06-21; 修回日期: 2022-11-04. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国地质调查局地调专项“黑龙江 1:5 万三兴山、白桦林场、友谊经营所、鸡爪河林场(M52E021011、M52E022011、M52E023011、M52E024010)幅区域地质矿产调查”(项目编号 12120113072600).

作者简介: 张洪文(1988—), 男, 工程师, 主要从事基础地质调查与研究, 通信地址 黑龙江省牡丹江市东安区卧龙街 45 号, E-mail//524725538@qq.com

通信作者: 平先权(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事深部地壳组成及演化和碱性岩研究, 通信地址 湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号, E-mail//xqping@cug.edu.cn

that the Mesozoic granites exposed in the area mainly include fine-medium-grained syenogranite and porphyritic monzogranite. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields the age of  $190.6 \pm 1.7$  Ma, indicating the fine-medium-grained syenogranite was formed in the Early Jurassic. Lithochemically, the granites are characterized by high Si, rich in alkali, poor in Mg, Ca, P and Ti, with the A/CNK value of 1.05–1.15, belonging to peraluminous, high potassium calc-alkaline series, and depletion of HFSEs (Nb, Ti and P) and LILEs (Ba and Sr), and enrichment of elements such as Rb, K, Th and Hf. The REE patterns show asymmetrically right-dipping type, with obvious negative Eu anomaly. These geochemical characteristics reveal that the Early Jurassic granites in the area are typically of A<sub>2</sub>-type, formed in the post-orogenic extensional tectonic setting. Combined with the magmatic activities and tectonic events in Xiaoxinganling Mountains, it is believed that the Early Jurassic magmatic emplacement in Yichun area may have occurred under the post-orogenic extensional tectonic background caused by the westward subduction of paleo-Pacific Plate.

**Key words:** Early Jurassic; A-type granite; geochemistry; tectonic environment; Heilongjiang Province

## 0 引言

小兴安岭地区位于兴蒙造山带的东段,处于古亚洲洋构造域和环太平洋构造域的交汇部位,是构造岩浆活动最复杂的造山带之一<sup>[1-2]</sup>。中生代花岗岩在小兴安岭出露面积较大,与大兴安岭地区的花岗岩组成了中国东北地区的“花岗岩海”<sup>[3-9]</sup>。近年来对东北地区“花岗岩海”的形成时代、成因及其形成的大地构造背景的研究取得了许多重要进展<sup>[10-11]</sup>,但目前缺乏统一的认识:一种观点认为是古亚洲洋闭合后,中亚造山带内发生拆沉作用而产生大量岩浆上涌形成的;另一种观点则认为受古太平洋构造体系的制约<sup>[12-14]</sup>。鉴于此,笔者通过对小兴安岭-张广才岭弧盆系内伊春市白桦青年队地区的早侏罗世正长花岗岩和二长花岗岩的岩石学及地球化学特征进行研究,探讨其形成时代、岩石成因及构造背景,为本地区及区域上的构造演化研究提供基础资料。

## 1 地质背景

研究区位于小兴安岭东南麓黑龙江省伊春市白桦青年队地区,大地构造位置处于兴蒙造山带东段,位于小兴安岭-张广才岭弧盆系内,西部与大兴安岭弧盆系相邻,西南为松嫩地块,东部以太平沟-依兰-黄松俯冲增生杂岩带与佳木斯-兴凯地块相分隔<sup>[15]</sup>(图 1)。区域地质历史演化漫长,经历多期构造热事件,中生代岩浆活动尤为剧烈<sup>[16-17]</sup>。区内出露的中生界地层主要为下白垩统板子房组、宁远村组、嫩江组和新生界中—上新统孙吴组。研究区中生代花岗岩主要由早侏罗世中细粒正长花岗岩、似斑状二长花岗岩,晚二叠世二长

花岗岩和中奥陶世二长花岗岩组成。早侏罗世中细粒正长花岗岩主要分布在研究区的西部和北部,呈岩株、小岩株、小岩瘤状产出。该花岗岩侵入到晚二叠世花岗岩,涌动侵入早侏罗世似斑状二长花岗岩中,被孙吴组地层覆盖。早侏罗世似斑状二长花岗岩在研究区的中部呈岩株状产出,该花岗岩侵入到中奥陶世花岗岩,被孙吴组、嫩江组、宁远村组地层覆盖(图 2)。样品 CM1 采自白桦青年队东 3 km,坐标为  $128^{\circ}43'52.8''E$ ,  $48^{\circ}25'21.5''N$ ,岩性为正长花岗岩(图 2)。



图 1 研究区大地构造位置图  
(据文献[15]修改)

Fig. 1 Tectonic location map of the study area  
(Modified from Reference [15])

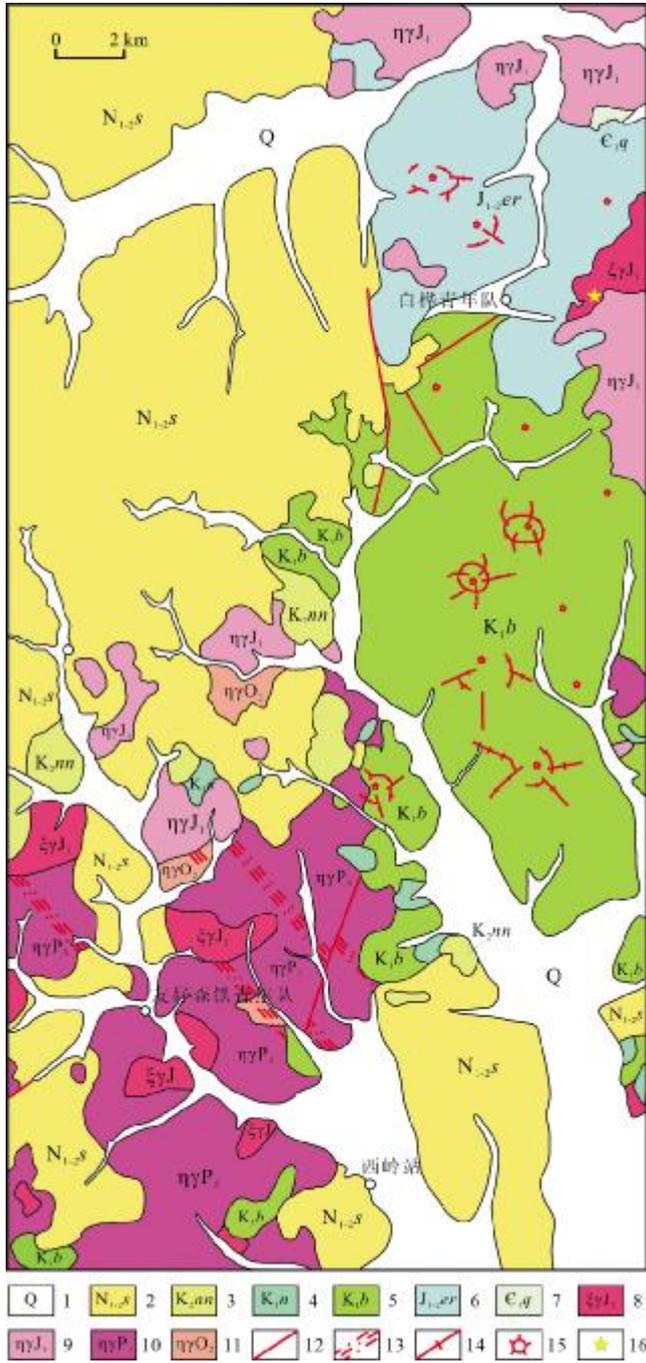


图2 研究区区域地质图

Fig. 2 Regional geological map of the study area

1—第四系(Quaternary); 2—孙吴组(Sunwu fm.); 3—嫩江组(Nenjiang fm.); 4—宁远村组(Ningyuancun fm.); 5—板子房组(Banzifang fm.); 6—二浪河组(Erlanghe fm.); 7—铅山组(Qianshan fm.); 8—早侏罗世中细粒正长花岗岩(Early Jurassic fine-medium-grained syenogranite); 9—早侏罗世似斑状二长花岗岩(Early Jurassic porphyritic monzogranite); 10—晚二叠世花岗岩(Late Permian granite); 11—中奥陶世花岗岩(Middle Ordovician granite); 12—断层(fault); 13—韧性剪切带(ductile shear zone); 14—火山断裂(volcanic fault); 15—火山口(crater); 16—U-Pb 测年采样点(U-Pb dating sampling site)

### 2 岩相学特征

早侏罗世中细粒正长花岗岩为中细粒花岗结构, 粒度均匀(图 3a、c). 钾长石为肉红色, 呈半自形宽板状、他形粒状, 粒径 2~4 mm, 含量为 40%~50%; 斜长石为灰白色, 呈半自形粒状一条状, 粒径 1~3 mm, 含量为 10%~15%; 石英为烟灰色, 呈他形粒状, 波状消光, 与钾长石镶嵌分布, 粒径 2~4 mm, 含量为 30%~35%; 黑云母为褐色, 呈不规则片状或集合体状, 粒径 0.6~4 mm, 含量约 3%. 副矿物组合为锆石+赤褐铁矿+钛铁矿等.

早侏罗世似斑状二长花岗岩, 似斑状结构, 块状构造(图 3b、d). 钾长石似斑晶为浅肉红色, 呈半自形宽板状, 粒径 1~2 cm, 含量为 5%~10%; 基质为中粒结构, 主要矿物有钾长石、斜长石、石英、黑云母. 钾长石为浅肉红色, 粒径 3~7 mm, 含量为 25%~30%; 斜长石为灰白色, 粒径 2~6 mm, 含量为 20%~30%; 石英为灰白色、烟灰色, 粒径 3~5 mm, 波状消光, 局部与钾长石或黑云母镶嵌分布, 含量为 20%~25%. 暗色矿物主要为黑云母, 存在绿泥石化的蚀变现象, 粒径 1~2 mm, 含量为 2%~5%. 副矿物组合为锆石+磷灰石+榍石+绿帘石等.

### 3 分析方法

#### 3.1 锆石 U-Pb 定年

锆石 U-Pb 定年的样品均选取新鲜岩石样品碎至 80 目以下, 然后分选出锆石, 在双目显微镜下挑选晶形好、无裂隙、透明干净且较自形的锆石颗粒. 把挑选出来的自形程度好、颗粒大的锆石在玻璃板上用环氧树脂固定并抛光. 锆石的阴极发光图像在廊坊宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成. 锆石 U-Pb 定年分析在中国地质大学(北京)科学研究院实验中心完成. 锆石测年所采用的仪器为 Agilent 7500a 型 LA-ICP-MS 及与之配套的 New Wave 193SS 激光剥蚀系统, 标准锆石 91500 作为 U-Pb 同位素比值的外标, 样品的同位素比值及元素含量计算采用 Glitter (ver4.4.1) 软件, 常用实验参数见文献[18-19].

#### 3.2 全岩地球化学分析

岩石化学分析样品加工与测试均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成, 测试选取地表新鲜的基岩样品. 主量元素通过熔片、X 射线荧光光谱法

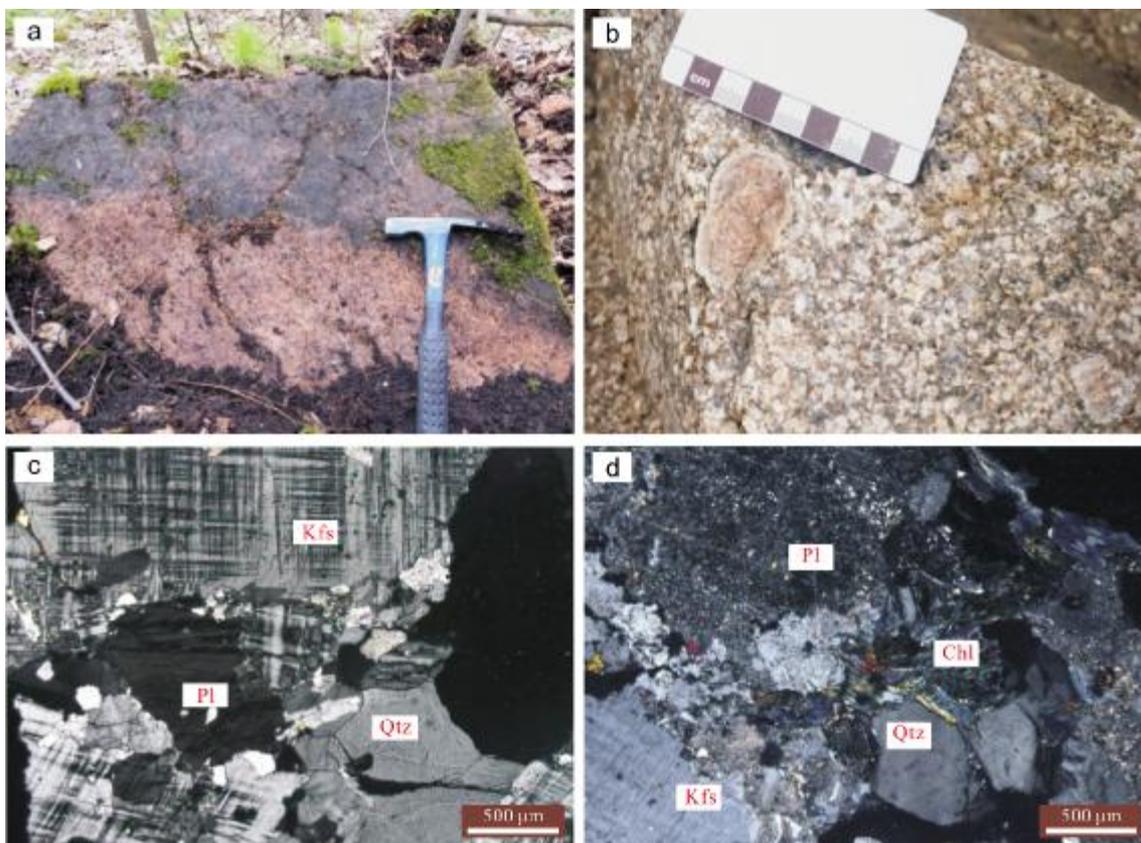


图3 白桦青年队地区花岗岩类野外宏观露头 and 显微特征照片

Fig. 3 Field outcrops and microphotographs of the granite samples from Baihuaqingniandai area

a—正长花岗岩野外露头(field outcrop of syenogranite); b—似斑状二长花岗岩野外露头(field outcrop of porphyritic monzogranite); c—正长花岗岩镜下特征(正交偏光)(microscopic characteristics of syenogranite under cross-polarized light); d—似斑状二长花岗岩镜下特征(正交偏光)(microscopic characteristics of porphyritic monzogranite under cross-polarized light); Pl—斜长石(plagioclase); Kfs—钾长石(K-feldspar); Qtz—石英(quartz); Chl—绿泥石(chlorite)

(XRF)分析测试,详细分析流程见文献[20];微量元素采用等离子体质谱法(ICP-MS)测定,详细分析流程与步骤见文献[21]. 主量元素分析精度优于5%,微量元素分析精度优于10%.

## 4 分析结果

### 4.1 年代学特征

岩石样品(CM1)中锆石特征及U-Pb年龄测试结果如表1(扫描首页OSID二维码可见). 锆石多数为无色透明,自形柱状、少数粒状,多数发育振荡环带构造,其Th/U比值范围为0.33~0.78,总体表现出岩浆锆石的特征(图4a). 14颗锆石测点得出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 $190.6\pm 1.7$  Ma, MSWD=2.1(图4b、c),与小兴安岭中部的风水沟河群( $175\pm 1$  Ma)、白石林场岩体( $184\pm 2$  Ma)、石林林场花岗岩体( $195\pm 4$  Ma)的测年结

果基本一致<sup>[22-23]</sup>,即为早侏罗世.

前人在工作区的邻幅新第二林场地区的二长花岗岩中获得的单颗粒U-Pb锆石LA-ICP-MS年龄为 $190\pm 1.0$  Ma<sup>[24]</sup>,与小兴安地区已报道的中生代南岔林场岩体( $180\pm 2$  Ma)、东安金矿( $184\pm 2$  Ma)、寒月林场岩体( $195\pm 2$  Ma)二长花岗岩的U-Pb测年结果基本一致<sup>[25-26]</sup>,即为早侏罗世.

综上所述,研究区二长花岗岩、正长花岗岩成岩时代主要集中在175~195 Ma,为同一期构造岩浆活动的产物. 同时上述测年结果表明在小兴安岭-张广才岭弧盆系内存在大规模的早侏罗世岩浆事件.

### 4.2 岩石地球化学特征

#### 4.2.1 主量元素

研究区早侏罗世花岗岩主量元素分析结果如表2(扫描首页OSID二维码可见).  $\text{SiO}_2$ 含量(质量分数)

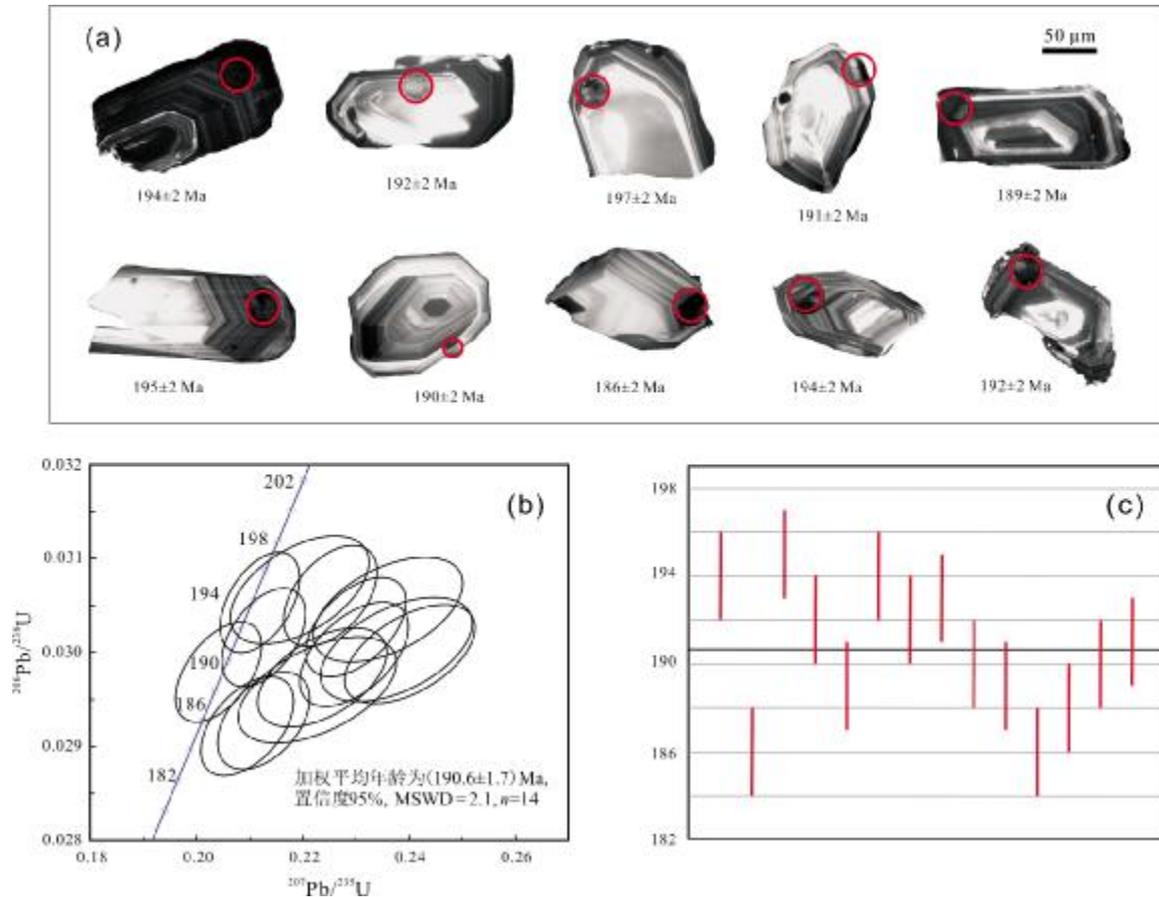


图4 白桦青年队地区正长花岗岩锆石 CL 图像和 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 4 Zircon CL images and U-Pb age concordia diagram of the syenogranites in Baihuaqingniandui area

a—正长花岗岩中锆石阴极发光图像(zircon CL image of syenogranite); b—锆石 U-Pb 年龄谱和图(zircon U-Pb age concordia diagram); c—锆石 U-Pb 年龄棒图(zircon U-Pb age bar diagram)

为 72.8%~77.43%，为酸性花岗岩类(图 5a)； $K_2O$  含量为 4.13%~5.38%，在  $K_2O-SiO_2$  图(图 5b)中落入高钾钙碱性系列内。 $Na_2O$  含量 2.84%~3.99%， $K_2O+Na_2O$  介于 7.43%~8.61%， $K_2O/Na_2O$  平均为 1.29，表明为钾质岩系； $Al_2O_3$  含量 12.04%~13.95%； $P_2O_5$  含量 0.02%~0.08%； $TiO_2$  含量 0.05%~0.31%。岩石标准矿物(CIPW)组合中，石英为 34.06~38.89，属于  $SiO_2$  饱和型。分异指数(DI)为 86.42~96.41，平均值为 93.91，岩浆分异程度较高。 $A/CNK=1.05\sim 1.15$ ，为过铝质花岗岩。

#### 4.2.2 微量及稀土元素

研究区内早侏罗世花岗岩稀土元素总量  $\Sigma REE$  为  $53.07\times 10^{-6}\sim 264\times 10^{-6}$ ，含量较高。 $(La/Yb)_N$  为 1.30~13.79，表明轻稀土较重稀土相对富集，在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图 6a)中，曲线总体上呈不对称右倾型。 $\delta Eu$  为 0.08~0.72，为强 Eu 负异常型(表 2，

扫描首页 OSID 二维码可见)。

在原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图 6b)中，早侏罗世花岗岩表现为富集大离子亲石元素 Rb、K 和高场强元素 Th、Hf 等，相对亏损大离子亲石元素 Ba、Sr 和高场强元素 Nb、Ti、P，表现出壳源岩浆的特点<sup>[29]</sup>。

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因

研究区似斑状二长花岗岩和中细粒正长花岗岩均属于高钾钙碱性系列， $SiO_2$  含量高，分异指数(DI)为 86.42~96.41，表明岩石分异程度较高。从主量元素分析结果看，研究区早侏罗世花岗岩具有相对富铝( $A/CNK=1.05\sim 1.15$ )等特点，轻稀土较重稀土相对富集， $(La/Yb)_N$  为 1.30~13.79，岩石的稀土配分曲线形态呈左高右低、左陡右缓的不对称右倾型，并具有强

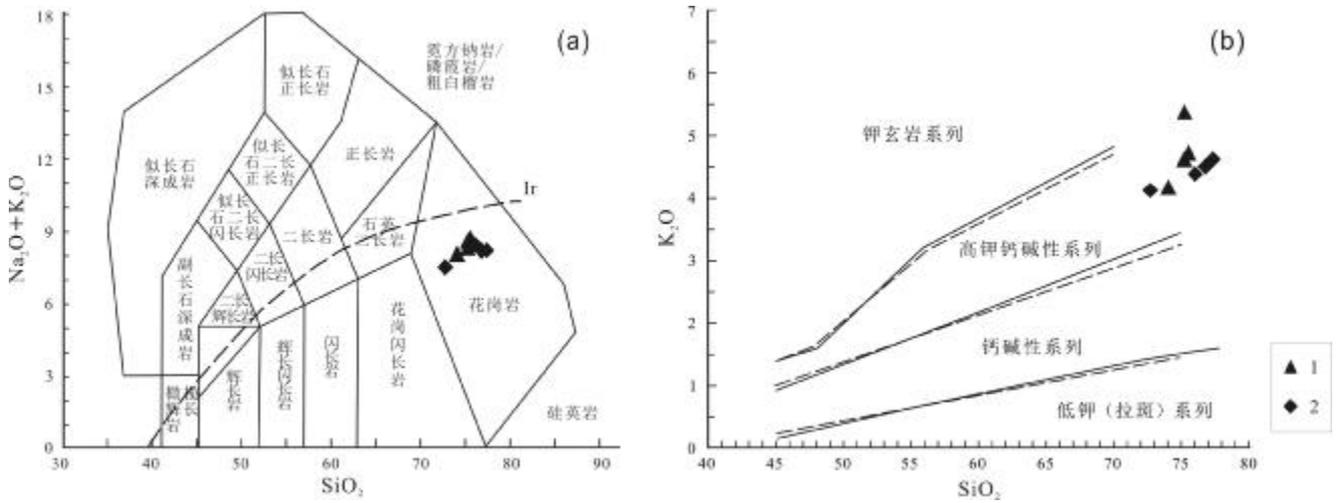


图 5 研究区花岗岩类岩石 TAS 图解和 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解  
(据文献[27-28])

Fig. 5 The TAS and K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> diagrams of granites in the study area  
(After References [27-28])

1—中细粒正长花岗岩 (fine-medium-grained syenogranite); 2—似斑状二长花岗岩 (porphyritic monzogranite)

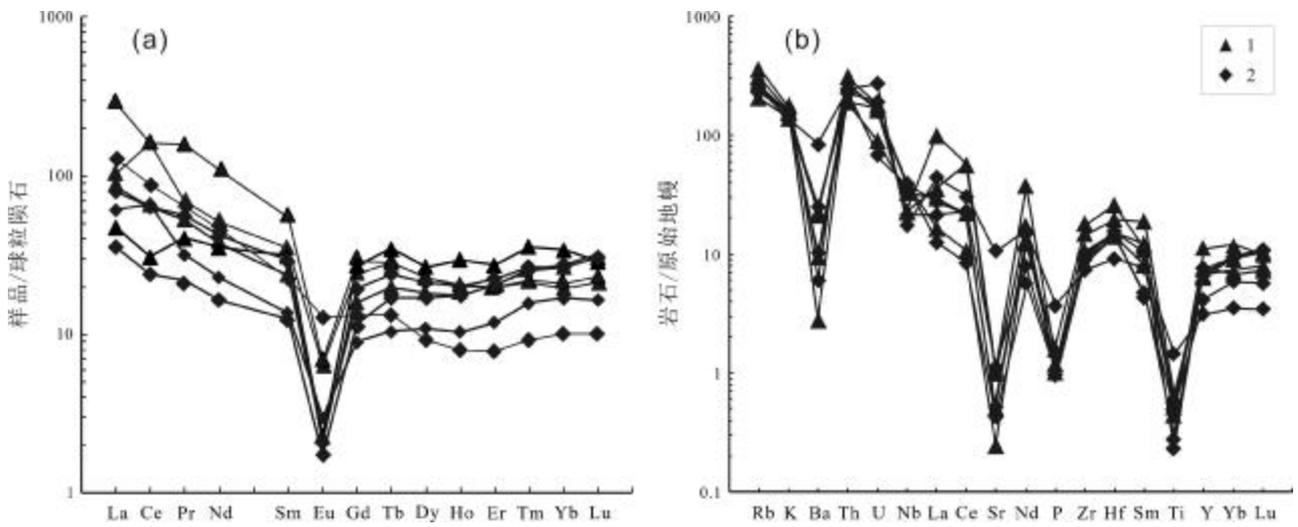


图 6 研究区花岗岩类岩石稀土元素配分曲线模式图和微量元素蛛网图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergrams of the granites in the study area  
1—中细粒正长花岗岩 (fine-medium-grained syenogranite); 2—似斑状二长花岗岩 (porphyritic monzogranite)

烈的 Eu 负异常. 这与 A 型花岗岩的特征相似<sup>[30]</sup>. 在 Whalen<sup>[31]</sup> 提出的判别 A 型、I 型和 S 型花岗岩成因的图解(图 7)中, 本文花岗岩也落入典型的 A 型花岗岩区域. 这些证据表明白桦青年队地区早侏罗世花岗岩为 A 型花岗岩.

从微量元素结果看, 研究区早侏罗世花岗岩显示富集大离子亲石元素 Rb、K 和高场强元素 Th、Hf, 亏

损高场强元素 Nb、Ti 和大离子亲石元素 Ba、Sr, 也与 A 型花岗岩特征相符<sup>[32-37]</sup>. Sr、Eu 的负异常可能是岩浆演化过程中大量的斜长石结晶分异所致; P 和 Ti 的亏损说明岩浆经历了磷灰石和钛铁矿等副矿物的分异作用, 反映出岩浆来源于地壳的特点<sup>[38]</sup>.

### 5.2 构造背景

花岗岩是地壳重要的组成部分, 记载着岩石圈演

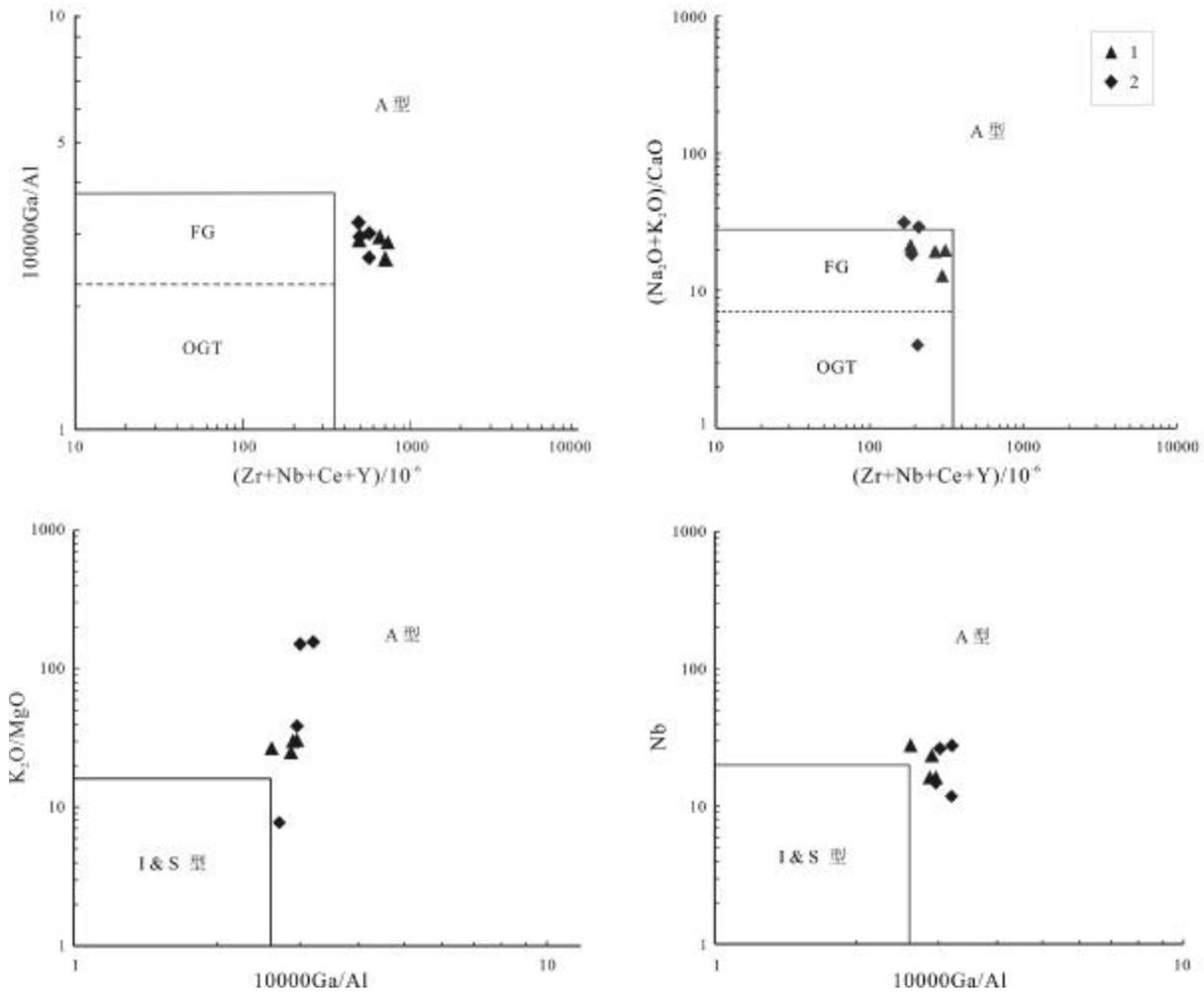


图7 研究区早侏罗世花岗岩成因类别判别图  
(据文献[31])

Fig. 7 Various chemical discrimination diagrams of early Jurassic granites in the study area  
(After Reference [31])

OGT—未分异的I、S和M型花岗岩(undifferentiated I-, S- and M-type granites); FG—分异I型花岗岩(differentiated I-type granite); 1—中细粒正长花岗岩(fine-medium-grained syenogranite); 2—似斑状二长花岗岩(porphyrritic monzogranite)

化的重要信息. 花岗岩成因可反映其形成的构造环境和地球动力学背景<sup>[39-42]</sup>. 近些年来对A型花岗岩的研究取得了新的进展, 将其进一步划分为A<sub>1</sub>和A<sub>2</sub>两类. A<sub>1</sub>型花岗岩代表了一种非造山环境, 形成于大陆裂谷时期或板内岩浆作用; A<sub>2</sub>型形成的构造环境范围比较广泛, 包括陆边缘伸展、陆内剪切相关的伸展或是后碰撞伸展环境<sup>[43-46]</sup>. 研究区早侏罗世花岗岩Y/Nb平均值为1.49, 大于1.2, 具有较明显的Nb亏损, (La/Yb)<sub>N</sub>平均值为5.5, 小于10, 具有造山后期A<sub>2</sub>型花岗岩的特点<sup>[22]</sup>. 在Nb-Y-Ce和Rb/Nb-Y/Nb判别图解(图8)中,

样品主要落入A<sub>2</sub>区, 表明研究区早侏罗世花岗岩为后碰撞A型花岗岩.

在阳离子R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>图解(图9)中, 主要落入造山期后A型花岗岩区, 显示具有造山期后A型花岗岩的特点, 说明其形成于碰撞结束后的陆内后造山期拉张环境. 王泉等<sup>[48]</sup>认为由于大陆板片断裂诱发了软流圈物质上涌, 引起了下地壳和原有老地壳的部分熔融, 形成的混合岩浆由于浮力作用上侵于中上地壳最终定位, 形成伊春地区早侏罗世花岗岩带. 随后板片根部拆沉垮塌引起岩石圈拆沉, 导致岩石圈减薄转入伸展环境,

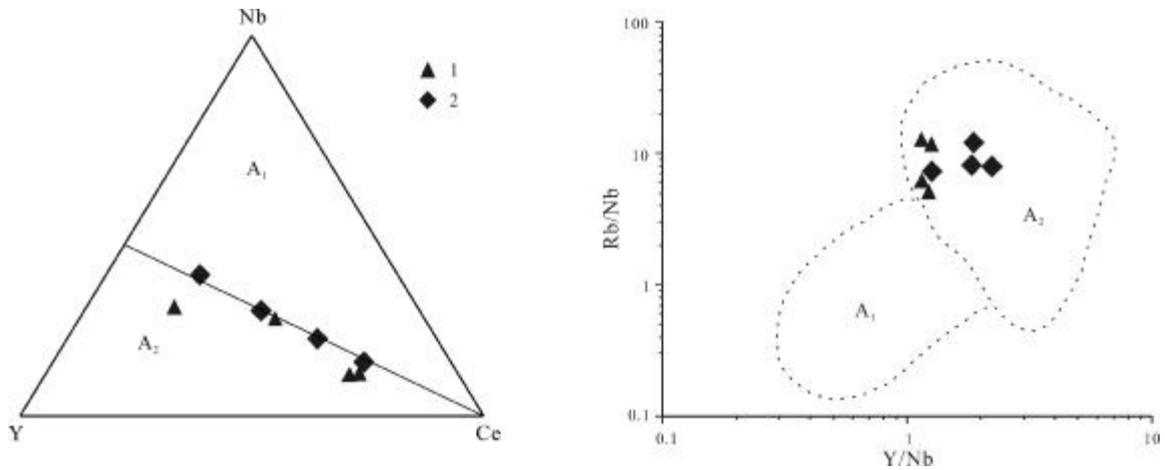


图 8 研究区花岗岩类岩石 Nb-Y-Ce 和 Rb/Nb-Y/Nb 判别图解  
(据文献[37])

Fig. 8 The Nb-Y-Ce and Rb/Nb-Y/Nb discrimination diagrams of granites in the study area  
(After Reference [37])

1—中细粒正长花岗岩(fine-medium-grained syenogranite); 2—似斑状二长花岗岩(porphyrific monzogranite)

形成 A 型花岗岩质岩浆. 尹志刚等<sup>[29]</sup>认为由于太平洋板块的大规模西向俯冲, 区域上处于同碰撞期转换为造山后构造体制阶段产生的区域伸展构造环境.

陆后伸展环境下的产物.

### 6 结论

(1)黑龙江伊春地区发育有中细粒正长花岗岩和似斑状二长花岗岩, 锆石 U-Pb 定年显示其结晶年龄为  $190.6 \pm 1.7$  Ma, 即岩浆侵位时代为早侏罗世.

(2)岩石地球化学结果显示, 区内花岗岩具有高硅、富钾、富铝、低镁和贫钙的特点, 属于铝质、高钾钙碱性系列; 富集大离子亲石元素 Rb、K 和高场强元素 Th、Hf, 亏损高场强元素 Nb、Ti 和大离子亲石元素 Ba、Sr, 为铝质 A 型花岗岩, 岩浆起源于地壳的部分熔融.

(3)结合区域地质背景、岩石学特征和地球化学研究, 早侏罗世研究区处于后造山构造体制阶段产生的区域伸展构造环境, 可能是古太平洋板块西向俯冲欧亚大陆的结果.

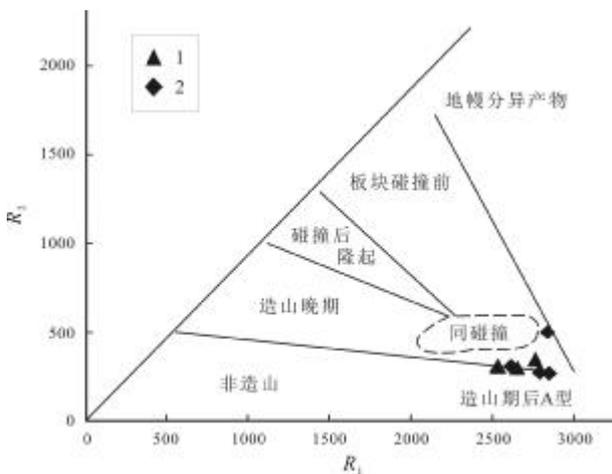


图 9 研究区花岗岩类岩石成因分类  $R_1-R_2$  图解  
(据文献[47])

Fig. 9 The  $R_1-R_2$  discrimination diagram of granites in the study area  
(After Reference [47])

1—中细粒正长花岗岩(fine-medium-grained syenogranite); 2—似斑状二长花岗岩(porphyrific monzogranite)

综上所述, 结合小兴安岭地区的区域资料分析, 早侏罗世研究区处于后造山构造体制阶段产生的区域伸展构造环境; 区内花岗岩为古太平洋西向俯冲欧亚大

### 参考文献 (References):

[1]Zhou J B, Cao J L, Wilde S A, et al. Paleo-Pacific subduction-accretion: Evidence from geochemical and U-Pb zircon dating of the Nadanhada accretionary complex, NE China[J]. Tectonics, 2014, 33(12): 2444-2466.  
[2]Zhang X Z, Guo Y, Zhou J B, et al. Late Paleozoic-Early Mesozoic tectonic evolution in the east margin of the Jiamusi massif, eastern Northeastern China[J]. Russian Journal of Pacific Geology, 2015, 9 (1): 1-10.

- [3] 吴福元, 孙德有, 林强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 181-189.  
Wu F Y, Sun D Y, Lin Q. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(2): 181-189.
- [4] 陈会军, 付俊彧, 钱程, 等. 东北地区前中生代花岗岩类年龄与时空分布[J]. 地质通报, 2021, 40(6): 827-844.  
Chen H J, Fu J Y, Qian C, et al. Chronology and spatiotemporal distribution of pre-Mesozoic granites in Northeast China[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(6): 827-844.
- [5] 王涛. 花岗岩混合成因研究及大陆动力学意义[J]. 岩石学报, 2000, 16(2): 161-168.  
Wang T. Origin of hybrid granitoids and the implications for continental dynamics[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(2): 161-168.
- [6] 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.  
Zhang C, Wu X W, Liu Y J, et al. Genesis of Early Permian A-type granites in the middle of the Great Xing'an Range and constraints on tectonic evolution of the Zhalantun area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(4): 1091-1106.
- [7] 刘宇威, 杜兵盈, 张铁安, 等. 大兴安岭环二库地区新元古代晚期花岗岩发现及其地质意义[J]. 地质与资源, 2017, 26(5): 453-459.  
Liu Y W, Du B Y, Zhang T A, et al. Discovery and geological significance of the Late Neoproterozoic granite in Huanerku, Daxinganling region[J]. Geology and Resources, 2017, 26(5): 453-459.
- [8] 陈卓, 李向文, 张胜江, 等. 黑龙江十五里桥金矿龙江组火山岩地球化学特征及构造背景分析[J]. 地质与资源, 2019, 28(5): 413-422.  
Chen Z, Li X W, Zhang S J, et al. Geochemistry and tectonic setting of the volcanic rocks of Longjiang Formation in Shiwuliqiao Gold Deposit, Heilongjiang Province[J]. Geology and resources, 2019, 28(5): 413-422.
- [9] 田子龙, 赵庆英, 李子昊, 等. 内蒙古突泉县姜家屯侏罗纪花岗岩闪长岩年代学及地球化学特征[J]. 地质与资源, 2017, 26(6): 542-551.  
Tian Z L, Zhao Q Y, Li Z H, et al. Geochronology and geochemistry of the Jurassic granodiorite in Jiangjiatun, Tuquan County of Inner Mongolia[J]. Geology and Resources, 2017, 26(6): 542-551.
- [10] 张龙, 任传涛, 陈桂虎, 等. 物化探综合找矿方法在吉林省汪清县复兴地区勘查中的应用[J]. 地质与资源, 2022, 31(1): 68-75.  
Zhang L, Ren C T, Chen G H, et al. Application of integrated geophysical and geochemical prospecting methods in Fuxing area, Jilin Province[J]. Geology and Resources, 2022, 31(1): 68-75.
- [11] 曾振, 孙雷, 张兴洲, 等. 饶河杂岩中枕状玄武岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 地质与资源, 2019, 28(2): 119-127.  
Zeng Z, Sun L, Zhang X Z, et al. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of the pillow basalts from Raohe complex: Geological implications[J]. Geology and Resources, 2019, 28(2): 119-127.
- [12] 葛茂卉, 张进江, 刘恺. 小兴安岭-张广才岭铁力地区侏罗纪辉绿岩年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 2020, 36(3): 726-740.  
Ge M H, Zhang J J, Liu K. Geochronology, geochemistry and zircon Hf isotope of the Jurassic diabase from the Tieli area, Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range, and its geological implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(3): 726-740.
- [13] 张立仕, 孙丰月, 李碧乐, 等. 小兴安岭-张广才岭成矿带福安堡钼矿区花岗岩类的岩石成因和构造背景: 元素地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素约束[J]. 地质学报, 2021, 95(8): 2471-2492.  
Zhang L S, Sun F Y, Li B L, et al. Petrogenesis and tectonic setting of granitoids in the Fu'anpu molybdenum deposit, Lesser Xing'an-Zhangguangcai Range metallogenic belt: Constraints from element geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(8): 2471-2492.
- [14] 李仰春, 韩振哲, 吴淦国, 等. 黑龙江伊春地区早中生代花岗岩成矿作用及成矿能力差异性探讨[J]. 地质与勘探, 2013, 49(1): 28-38.  
Li Y C, Han Z Z, Wu G G, et al. Metallogenesis and metallogenic differences of the Early Mesozoic granites in the Yichun area, Heilongjiang Province[J]. Geology and Exploration, 2013, 49(1): 28-38.
- [15] 刘英才, 付俊彧, 赵春荆, 等. 《东北地区 1:150 万大地构造相图》的编制[J]. 地质与资源, 2020, 29(1): 1-6.  
Liu Y C, Fu J Y, Zhao C J, et al. Compilation of *The 1:150 000 Tectonic Facies Map of Northeast China*[J]. Geology and Resources, 2020, 29(1): 1-6.
- [16] 许文良, 王旖旎, 王枫, 等. 西太平洋俯冲带的演变: 来自东北亚陆缘增生杂岩的制约[J]. 地质论评, 2022, 68(1): 1-17.  
Xu W L, Wang Y N, Wang F, et al. Evolution of western Pacific subduction zones: Constraints from accretionary complexes in NE Asian continental margin[J]. Geological Review, 2022, 68(1): 1-17.
- [17] 王粉丽, 王海鹏, 鲁红峰. 大兴安岭北上其地区晚石炭世花岗岩类 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义[J]. 西北地质, 2017, 50(4): 51-58.  
Wang F L, Wang H P, Lu H F. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of Late Carboniferous granites from Shangqi area in Great Xing'an Range and its significance[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(4): 51-58.
- [18] 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 zircons from mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.

- [19]Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 469–500.
- [20]Chen F, Hegner E, Todt W. Zircon ages and Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, 88(4): 791–802.
- [21]Chen F, Siebel W, Satir M, et al. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2002, 91(3): 469–481.
- [22]李超, 孙国胜, 杨乃峰, 等. 小兴安岭石林林场 A 型花岗岩地球化学特征及构造环境 [J]. *世界地质*, 2013, 32(1): 1–7.  
Li C, Sun G S, Yang N F, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of A-type granite in Shilin forestry center in Xiaoxing'anling [J]. *Global Geology*, 2013, 32(1): 1–7.
- [23]徐美君, 许文良, 王枫, 等. 小兴安岭中部早侏罗世花岗岩的年龄学及地球化学及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 354–368.  
Xu M J, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Jurassic granitoids in the central Lesser Xing'an Range, NE China and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2): 354–368.
- [24]姜浩杰. 伊春西部新第二林场-跃进林场中生代花岗岩特征及地质意义 [D]. 成都: 成都理工大学, 2017.  
Jiang H J. Characteristics and geological significance of the Mesozoic granites of the New Second Forest Farm-Yuejin Forest Farm in Western Yichun [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [25]杨长江, 王亚春. 小兴安岭东南部伊春中生代花岗岩的锆石 U-Pb 测年及其地质意义 [J]. *吉林地质*, 2010, 29(4): 1–5, 31.  
Yang C J, Wang Y C. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and the geological significance for Yichun Mesozoic granites in southeast Lesser Khingan Range [J]. *Jilin Geology*, 2010, 29(4): 1–5, 31.
- [26]李碧乐, 孙永刚, 陈广俊, 等. 小兴安岭东安金矿区细粒正长花岗岩 U-Pb 年龄、岩石地球化学、Hf 同位素组成及地质意义 [J]. *地球科学*, 2016, 41(1): 1–16.  
Li B L, Sun Y G, Chen G J, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Hf isotopic composition and its geological implication of the fine-grained syenogranite in Dong'an goldfield from the Lesser Xing'an Mountains [J]. *Earth Science*, 2016, 41(1): 1–16.
- [27]Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971(8): 523–548.
- [28]Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58: 63–81.
- [29]尹志刚, 宫兆民, 王春生, 等. 小兴安岭平顶山一带早侏罗世花岗岩类年代学、地球化学特征及其地质意义 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(1): 107–125.  
Yin Z G, Gong Z M, Wang C S, et al. Chronological, geochemical characteristics and geological significance of Early Jurassic granites in Pingdingshan area of Lesser Xing'an Range [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(1): 107–125.
- [30]Xu W L, Ji W Q, Pei F P, et al. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(3): 392–402.
- [31]Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(4): 407–419.
- [32]李永军, 杨高学, 吴宏恩, 等. 东准噶尔贝勒库都克铝质 A 型花岗岩的厘定及意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2009, 28(1): 17–25.  
Li Y J, Yang G X, Wu H E, et al. The determination of Beilekuduke aluminous A-type granites in East Junggar, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2009, 28(1): 17–25.
- [33]邱检生, 王德滋, 刘洪, 等. 大别造山带北缘后碰撞富钾火山岩: 地球化学与岩石成因 [J]. *岩石学报*, 2002, 18(3): 319–330.  
Qiu J S, Wang D Z, Liu H, et al. Post-collisional potash-rich volcanic rocks in the north margin of Dabie orogenic belt: Geochemistry and petrogenesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(3): 319–330.
- [34]韩振哲. 小兴安岭东南段早中生代花岗岩类时空演化特征与多金属成矿 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.  
Han Z Z. Characteristics of temporal and spatial evolution and polymetallic mineralization of Early Mesozoic granites in southeastern Xiaoxing'an Mountains [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [35]Sylvester P J. Post-collisional alkaline granites [J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97(3): 261–280.
- [36]Dawei H, Shiguang W, Baofu H, et al. Post-orogenic alkaline granites from China and comparisons with anorogenic alkaline granites elsewhere [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1996, 13(1): 13–27.
- [37]Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641–644.
- [38]张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2249–2269.  
Zhang Q, Wang Y, Li C D, et al. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(9): 2249–2269.
- [39]李金超, 国显正, 孔会磊, 等. 东昆仑浪麦滩地区 A 型花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2021, 95(5): 1508–1522.  
Li J C, Guo X Z, Kong H L, et al. Geochronology, geochemical characteristics and geological significance of A-type granite from the

- Langmaitan area, East Kunlun[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5): 1508-1522.
- [40]莫宣学. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. *高校地质学报*, 2011, 17(3): 351-367.
- Mo X X. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(3): 351-367.
- [41]郑永飞, 陈伊翔. 大陆俯冲带壳幔相互作用[J]. *地球科学*, 2019, 44(12): 3961-3983.
- Zheng Y F, Chen Y X. Crust-mantle interaction in continental subduction zones[J]. *Earth Science*, 2019, 44(12): 3961-3983.
- [42]王涛, 王晓霞, 郭磊, 等. 花岗岩与大地构造[J]. *岩石学报*, 2017, 33(5): 1459-1478.
- Wang T, Wang X X, Guo L, et al. Granitoid and tectonics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(5): 1459-1478.
- [43]张薇洁. A型花岗岩成因的热力学模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- Zhang W J. Thermodynamic modeling of the origin of A-type granites [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [44]王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 内蒙古西乌旗德勒哈达早白垩世A型花岗岩形成时代: 锆石 U-Pb 定年证据[J]. *中国地质*, 2018, 45(1): 197-198.
- Wang J F, Li Y J, Li H Y, et al. Formation age of the Delehada Early Cretaceous A-type granite in Xiwu Banner, Inner Mongolia: evidence from zircon U-Pb chronology[J]. *Geology in China*, 2018, 45(1): 197-198.
- [45]王存智, 黄志忠, 赵希林, 等. 下扬子地区姚村 A型花岗岩年代学、地球化学特征及岩石成因[J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 549-563.
- Wang C Z, Huang Z Z, Zhao X L, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Early Cretaceous Yaocun A-type granite in the Lower Yangtze Region[J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 549-563.
- [46]尚永明, 李小伟, 祝新友, 等. 内蒙古赤峰五十家子岩体成因及其对岩石圈伸展减薄的指示[J]. *中国地质*, 2022, 49(4): 1323-1345.
- Shang Y M, Li X W, Zhu X Y, et al. Petrogenesis and its implications for the lithospheric thinning of the Wushijiazui pluton in Chifeng, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2022, 49(4): 1323-1345.
- [47]Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. *Chemical Geology*, 1985, 48: 43-55.
- [48]王泉, 余友, 韦健, 等. 黑龙江东部伊春-延寿晚三叠世—早侏罗世花岗岩岩基带深部约束机制[J]. *矿产勘查*, 2017, 8(2): 229-238.
- Wang Q, Yu Y, Wei J, et al. Deep constraints mechanism of Late Triassic-Early Jurassic Yichun-Yanshou granite batholith belt, eastern Heilongjiang[J]. *Mineral Exploration*, 2017, 8(2): 229-238.

(上接第 354 页/Continued from Page 354)

- [16]马诗敏, 徐新阳, 倪金, 等. 陆海统筹资源环境承载能力评价体系构建[J]. *地质与资源*, 2021, 30(2): 186-192.
- Ma S M, Xu X Y, Ni J, et al. Evaluation system construction for the resources and environment carrying capacity of sea-land coordination [J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(2): 186-192.
- [17]陈文婷, 夏青, 苏婧, 等. 基于时差相关分析和模糊神经网络的白洋淀流域水环境承载力评价预警[J]. *环境工程*, 2022, 40(6): 261-271.
- Chen W T, Xia Q, Su J, et al. Evaluation and early warning of water environmental carrying capacity in Baiyangdian Basin based on time-difference correlation analysis and fuzzy neural network [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(6): 261-271.
- [18]马诗敏, 李旭光, 杨泽, 等. 内蒙古奈曼旗水环境承载力评价[J]. *地质与资源*, 2017, 26(6): 603-607.
- Ma S M, Li X G, Yang Z, et al. Evaluation on the water environment bearing capacity in Naiman Qi, Inner Mongolia [J]. *Geology and Resources*, 2017, 26(6): 603-607.
- [19]高素莲, 姜腾龙, 张峰, 等. 济南市水环境承载力评价[C]/中国环境科学学会 2021 年科学技术年会论文集(二). 北京: 中国环境科学学会, 2021: 49-51.
- Gao S L, Jiang T L, Zhang F, et al. Evaluation of water environment carrying capacity in Jinan[C]/Beijing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2021: 49-51. (in Chinese)
- [20]王晓艳, 章四龙, 刘磊. 基于 AHP-熵权法的水环境承载力模糊综合评价[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(9): 206-212.
- Wang X Y, Zhang S L, Liu L. Fuzzy comprehensive evaluation of water environmental carrying capacity based on AHP-entropy method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(9): 206-212.
- [21]顾琦玮, 张亮, 赵晓辉, 等. 基于 ANP-正态云模型的区域水环境承载力评价[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2021, 19(5): 506-515.
- Gu Q W, Zhang L, Zhao X H, et al. Evaluation of regional water environment carrying capacity based on ANP-normal cloud model[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2021, 19(5): 506-515.
- [22]万炳彤, 赵建昌, 鲍学英, 等. 基于 SVR 的长江经济带水环境承载力评价[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(2): 896-905.
- Wan B T, Zhao J C, Bao X Y, et al. Evaluation of water environment bearing capacity of Yangtze River economic belt based on SVR model [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(2): 896-905.