



## 大兴安岭甘南地区花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、 地球化学特征及其地质意义

李晓海, 张海华, 李文博, 丁秋红, 张 健, 陈树旺

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

**摘要:** 通过对大兴安岭中北段甘南地区黑甘地 1 井钻遇的二云二长花岗岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究, 确定其形成时代、岩石成因, 从而揭示区域构造背景。花岗岩的锆石呈半自形—自形, 振荡生长环带明显。测年结果显示, 二云二长花岗岩形成于 161 Ma, 为晚侏罗世早期岩浆事件的产物。地球化学分析结果显示, 岩石具有高硅( $\text{SiO}_2$  69.81%~74.3%)、富铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$  13.5%~16.8%)、贫铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0.26%~0.6%) 等特征, 在化学成分上属于准铝质-弱过铝质系列。富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K 和高场强元素 Hf, 贫 Nb、Ta、Ti 等高场强元素; 相对富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 为 I 型花岗岩。岩浆起源于新生代加厚陆壳物质的部分熔融。研究结果表明晚侏罗世早期二云二长花岗岩的形成与蒙古-鄂霍次克缝合带闭合过程中的陆-陆碰撞环境有关, 其形成时代限定了蒙古-鄂霍次克洋在大兴安岭中北段甘南地区的闭合时代为晚侏罗世早期。

**关键词:** 晚侏罗世; 二云二长花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; 地球化学特征; 蒙古-鄂霍次克洋; 大兴安岭

## LA-ICP-MS ZIRCON U-Pb DATING AND GEOCHEMISTRY OF THE GRANITES IN GANNAN AREA, DAXINGANLING MOUNTAINS: Geological Implication

LI Xiao-hai, ZHANG Hai-hua, LI Wen-bo, DING Qiu-hong, ZHANG Jian, CHEN Shu-wang

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

**Abstract:** The formation age and petrogenesis of the two-mica monzogranite drilled from HGD-1 well in Gannan area of central-northern Daxinganling Mountains are determined and the regional tectonic setting is revealed on the basis of LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and petrogeochemistry studies. The zircons in granite are subidiomorphic-idiomorphic, with obvious oscillatory growth zone. The dating results show that the two-mica monzogranite was formed at 161 Ma, which is the product of magmatic event in early Late Jurassic. Geochemical analysis results indicate that the granite is characterized by high Si ( $\text{SiO}_2$  69.81%~74.3%), rich Al ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  13.5%~16.8%), and poor Fe ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0.26%~0.6%), belonging to quasi aluminous-weak peraluminous series in terms of chemical composition, with enriched LILEs (Rb, Ba and K) and HFSE (Hf), and depleted HFSEs (Nb, Ta and Ti), and relatively enriched LREEs and depleted HREEs, which is of I-type granite. The magma originates from the partial melting of newly thickened continental crust material. The study results reveal that the formation of the early Late Jurassic two-mica monzogranite is related to the continent-continent collision environment during the closure progress of Mongol-Okhotsk suture zone, and its formation

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-12-06. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“松辽盆地北部及外围石炭-二叠系油气地质调查”(DD20190097); “东北地区重要盆地多能源资源地质调查”(DD20221664).

作者简介: 李晓海(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事油气基础地质调查研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//641426683@qq.com

age restricts the closing time of Mongol-Okhotsk Ocean to the early Late Jurassic in Gannan area of central-northern Daxinganling Mountains.

**Key words:** Late Jurassic; two-mica monzogranite; zircon U-Pb age; geochemistry; Mongol-Okhotsk Ocean; Daxinganling Mountains

## 0 引言

东北地区位于中亚造山带东段,自西向东依次划分为额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块(松辽地块)、佳木斯地块。该区构造演化历史复杂,古生代一早中生代经历了古亚洲洋构造体系演化<sup>[1-6]</sup>,中生代又经历了古太平洋和蒙古-鄂霍克次洋的叠加改造<sup>[7-13]</sup>。近年来,对东北地区花岗质岩石和火山岩的年代学与地球化学的研究,主要集中在对古亚洲洋构造体系与古太平洋构造体系影响的研究方向<sup>[14-16]</sup>,相比之下,对蒙古-鄂霍克次构造体系演化及影响范围讨论相对较少。

2016年,中国地质调查局开展“北方新区、新层系油气资源调查”项目研究,以松辽盆地北部及外围深层系石炭—二叠系为主要方向,针对石炭—二叠纪沉积盆地的性质、地层展布特征、地层变质程度、中生代以来岩浆活动、构造运动改造过程等问题,开展了油气基础地质调查工作。

笔者通过对大兴安岭中北段甘南地区的二云二长花岗岩进行年代学与地球化学研究,讨论二云二长花岗岩的形成时代、岩石成因及其形成的构造背景,以期为东北地区中生代构造演化的认识提供新的证据,同时为石炭—二叠纪沉积盆地经中生代改造和保存特征提供依据。

## 1 区域地质概况

研究区行政区划位于黑龙江省齐齐哈尔市甘南县境内,大地构造位置处于松辽盆地西北部斜坡区。区内主要出露有古生界寒武系和志留系、中生界白垩系、新生界第四系(图1)。研究区花岗岩分布广泛,大体呈NE向展布,侵入到寒武纪和志留纪地层当中,并被白垩系覆盖。区内构造以NNE—NE向、NW向断裂为主。前人根据岩体与地层之间的侵入关系和少量的锆石U-Pb及全岩K-Ar同位素年龄数据认为,研究区内的花岗质岩石除少量中生代(侏罗纪)花岗岩之外,主体

属于晚古生代(主要是二叠纪)花岗岩体<sup>①</sup>。

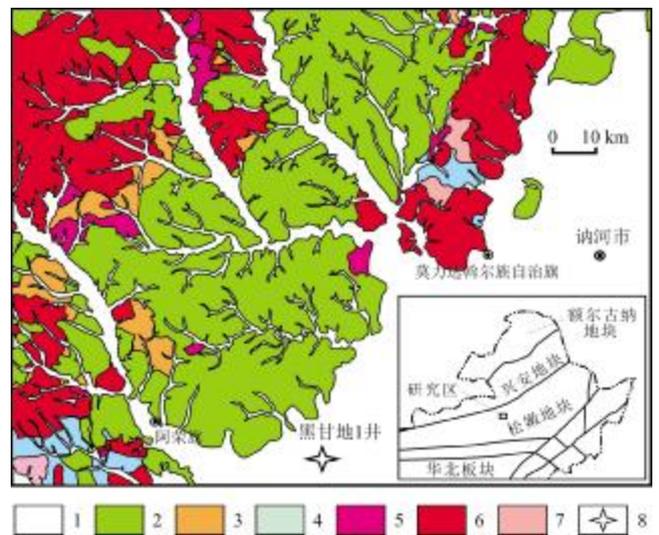


图1 研究区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

1—新生界(Cenozoic); 2—白垩系(Cretaceous); 3—志留系(Silurian); 4—寒武系(Cambrian); 5—侏罗纪花岗岩(Jurassic granite); 6—二叠纪花岗岩(Permian granite); 7—石炭纪花岗岩(Carboniferous granite); 8—采样点(sampling site)

本研究的二云二长花岗岩( $\eta\gamma J_3$ )采样地点位于甘南县长吉岗乡北东2.5 km处,地表为第四系。样品采集于中国地质调查局沈阳地质调查中心2018年实施的地质调查井“黑甘地1井”岩心(图1)。该井完钻井深905 m,自上而下发育的地层:0~57 m为第四系,57~365.4 m为晚白垩世沉积地层,365.4~905 m(未穿)为二云二长花岗岩。从过井大地电磁测深(MT)剖面(图2)可以看出,二云二长花岗岩体分布较大,厚度在600~1 300 m,侵位到石炭—二叠纪地层中。

## 2 样品特征与分析方法

### 2.1 岩石学特征

岩石为浅肉红色中细粒二云二长花岗岩,中细粒

①黑龙江省地质调查研究总院. M51C004003(阿荣旗幅) 1:250 000 区域地质调查报告. 2005.

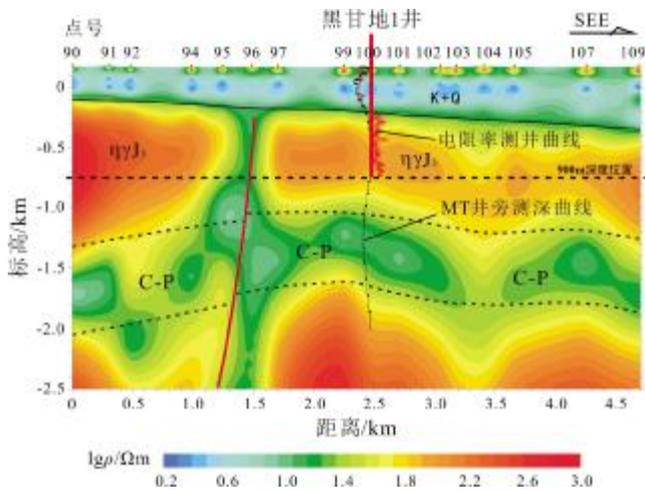


图2 黑甘地1井电磁测深剖面

Fig. 2 Magnetotelluric sounding profile of HGD-1 well

花岗结构, 蠕虫结构, 块状构造(图3a)。矿物成分由斜长石、碱性长石、石英、白云母及黑云母组成。斜长石: 含量 25%~45%, 粒径 0.4~2.6 mm, 半自形宽板状, 聚片双晶较细密, 可见环带结构, 绢云母星点状分布, 部分中心绢云母化强烈; 碱性长石: 含量 20%~35%, 粒径 0.3~3.2 mm, 他形宽板状, 条纹结构; 石英: 含量 25%~40%, 粒径 0.1~2.0 mm, 他形粒状, 波状消光, 部分小粒石英为硅化作用, 石英和斜长石组成蠕虫结构; 白云母: 含量 2%~5%, 粒径 0.2~0.8 mm, 无色, 片状, 鲜艳的二级至三级干涉色; 黑云母: 含量 3%~8%, 粒径 0.2~1.0 mm 黄褐色, 片状, 部分绿泥石化(图 3b)。

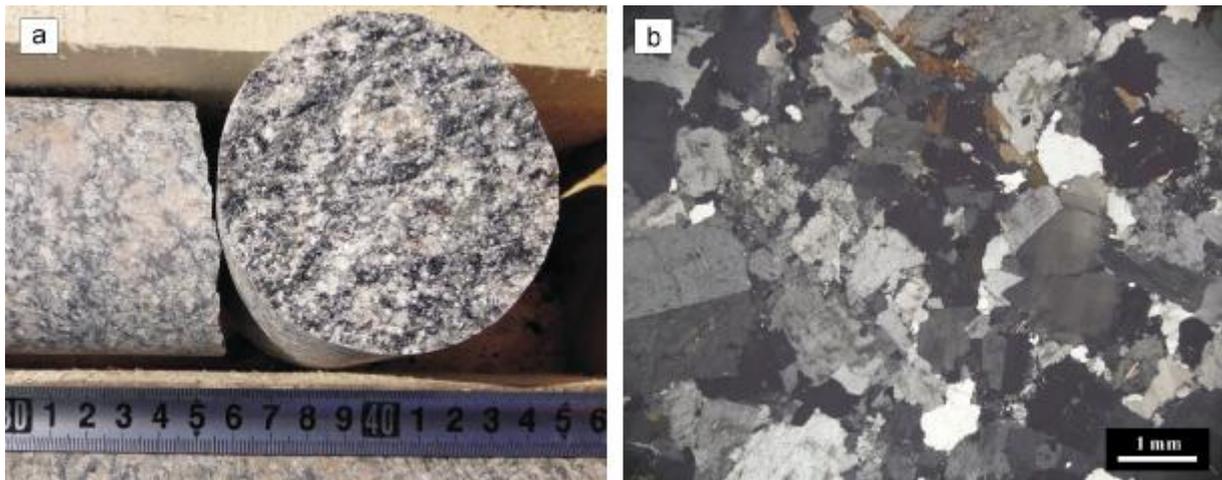


图3 晚侏罗世二云二长花岗岩宏观和显微照片

Fig. 3 Macroscopic and microscopic photographs of the Late Jurassic two-mica monzogranite

## 2.2 测年方法

将挑选好的晶形完好、透明度高、干净且无裂纹的锆石用环氧树脂固定, 待环氧树脂充分固化后抛光至锆石露出核部, 然后进行锆石的 CL 照相及 LA-ICP-MS 分析。锆石靶的制备过程与 SHRIMP 方法相似<sup>[17]</sup>。锆石 U-Pb 测试的仪器为美国 New Wave Research Inc. 公司生产的激光剥蚀进样系统(UP 193SS)和美国 Agilent 科技有限公司生产的 Agilent 7500a 型四级杆等离子质谱仪联合构成的激光等离子质谱系统(LA-ICP-MS)。实验用 36 μm 的激光束斑直径和 10 Hz 的激光频率, 激光取样过程采用 5 s 的预剥蚀时间、20 s 的冲洗样品池时间以及 40 s 的剥蚀取样时间。实验采用人工合成硅酸盐玻璃 NIST610 作为外标<sup>[18]</sup>、Si 作为内标进行元素校正, 采用标准锆石 91500 作为外标进行 U-Pb 同位素分馏效应的校正计算, 澳大利亚锆石标样 TEM<sup>[19]</sup>和 QH<sup>[20]</sup>作为监控盲样来监视测试过程中的稳定性和数据质量。数据处理采用澳大利亚 Glitter 软件(ver. 4.4, Macquarie University)完成, 普通铅校正方法同 Andersen<sup>[21]</sup>。

## 3 分析测试结果

### 3.1 同位素年龄

本研究对甘南地区黑甘地 1 井 388.5 m 花岗岩样品(HG388.5TWS)进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析, 点测 25 个。阴极发光图(图 4)上可见, 样品锆

石多为自形, 大多锆石具有岩浆结晶锆石的晶体形态, 多为长柱状, 少数呈短柱状, 粒径主要集中在 90~200  $\mu\text{m}$  之间, 长宽比大多为 2:1, 具有清晰的岩浆震荡环带, 少部分锆石有不同程度破碎, Th/U 介于 0.09~1.29 间, 平均为 0.51. 以上特征表明样品锆石为岩浆成因锆石.

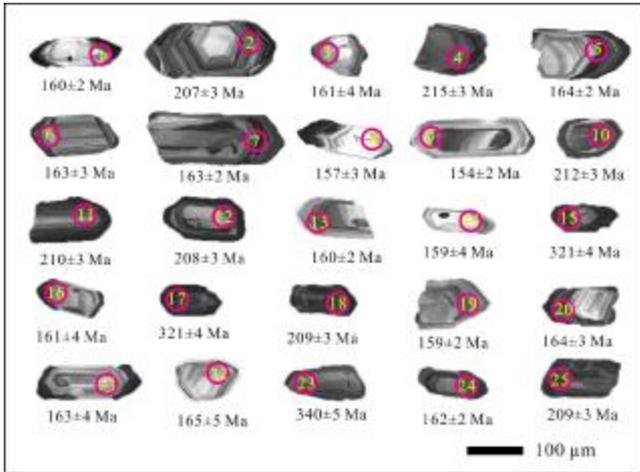


图4 花岗岩阴极发光图像和年龄

Fig. 4 CL images and ages of the selected zircons from granite samples

锆石样品测试结果(表1, 扫描首页 OSID 二维码可见)显示, 3个测试点数据(15点、17点和23点)偏离谐和线, 其余22个点数据均在谐和线上及其附近, 其中15个分析点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $161.4 \pm 1.2 \text{ Ma}$  (MSWD=2.8,  $n=15$ )(图5), 另一组  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $210.0 \pm 2.5 \text{ Ma}$  (MSWD=3.3,  $n=7$ ), 应为继承锆石年龄. 结合上述分析可知,  $161.4 \pm 1.2 \text{ Ma}$  代表了岩体的形成年龄, 该岩体为晚侏罗世早期侵入岩.

### 3.2 地球化学特征

二云二长花岗岩样品的主量元素、微量元素和稀土元素测定由中国地质调查局沈阳地质调查中心实验测试中心完成. 其中, 主量元素采用 X 射线荧光光谱仪测定, 相对标准偏差为 2%~5%; 微量及稀土元素均采用电感耦合等离子体质谱仪测定, 相对标准偏差小于 10%. 经镜下观察, 剔除风化、蚀变样品, 选取了 15 个样品进行了主量、稀土、微量元素的测试. 样品的分析测试是在等离子体质谱仪 ICP-MS (X Series II) 上完成的, 测试结果的相对标准偏差小于 5%.

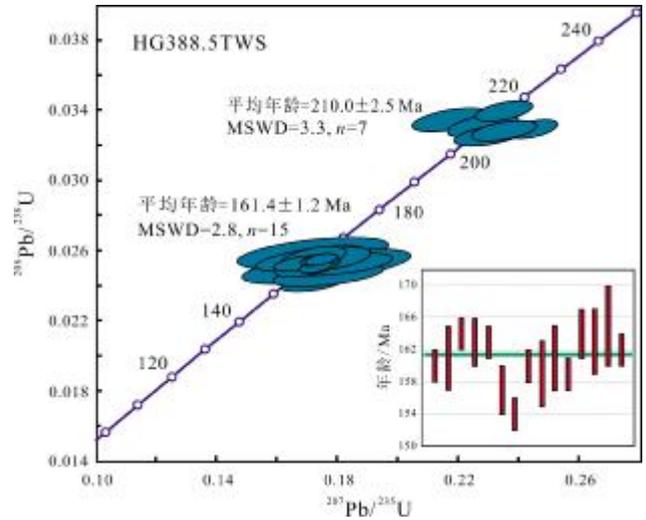


图5 锆石 U-Pb 谐和图及加权平均年龄图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram and weighted mean age

#### 3.2.1 主量元素

二云二长花岗岩的主要元素分析结果(表2, 扫描首页 OSID 二维码可见)显示,  $\text{SiO}_2$  含量介于 69.81%~74.30% 之间, 岩石酸性程度较高,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量介于 13.50%~16.80%,  $\text{K}_2\text{O}$  为 2.43%~4.45%,  $\text{CaO}$  为 0.88%~2.13%,  $\text{MgO}$  为 0.04%~0.32%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为 0.26%~0.6%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值为 0.41~1.11,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=8.11\% \sim 8.81\%$ , 铝饱和指数 A/CNK 为 1.01~1.07 (<1.1),  $\text{MgO}$  含量为 0.04%~0.32%,  $\text{TiO}_2$  为 0.09%~0.25%. 在侵入岩 TAS 图解(图 6a)上, 二云二长花岗岩样品全部落入花岗岩区域, 与岩相学观察特征一致. 在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解(图 6b)上, 二云二长花岗岩样品点多数落入高钾性区, 部分点落入高钾钙碱性区. 在铝饱和指数图解(图 6c)上, 样品落入准铝-弱过铝质花岗岩区. 在  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{Na}_2\text{O}$  图解(图 6d)上落入 I 型花岗岩区.

#### 3.2.2 稀土和微量元素

二云二长花岗岩的稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )为  $54.53 \times 10^{-6} \sim 131.02 \times 10^{-6}$ , 轻稀土元素(LREE)变化范围为  $49.05 \times 10^{-6} \sim 124.20 \times 10^{-6}$ , 重稀土元素(HREE)变化范围为  $5.49 \times 10^{-6} \sim 12.01 \times 10^{-6}$ (表3, 扫描首页 OSID 二维码可见), 显示轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损的特点; LREE/HREE 值为 6.04~18.75;  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 5.82 \sim 27.69$ , 变化范围较小. 轻稀土元素配分曲线相对较陡, 而重稀土元素配分曲线近水平分布. 主体具有弱的 Eu 负异常, 个别具有 Eu 正异常( $\delta\text{Eu} = 0.70 \sim 1.13$ , 平均 0.92).

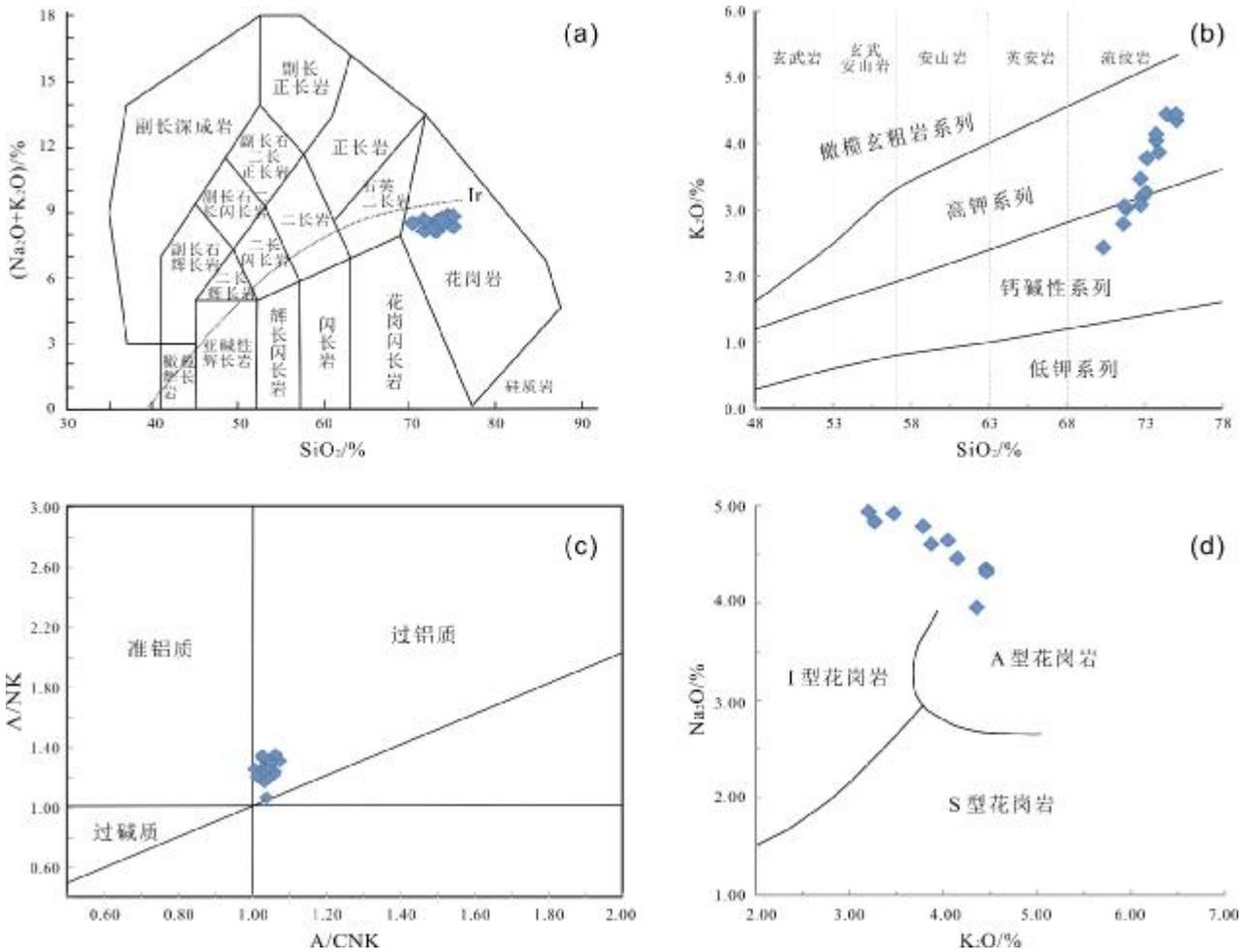


图 6 晚侏罗世二云二长花岗岩岩石类型系列图解  
(据文献[6, 22-23])

Fig. 6 Classification discrimination diagrams of the Late Jurassic two-mica monzogranite  
(After References [6, 22-23])

表明轻、重稀土元素分馏较明显, 而重稀土元素分馏不明显. 二云二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈右倾型(图 7).

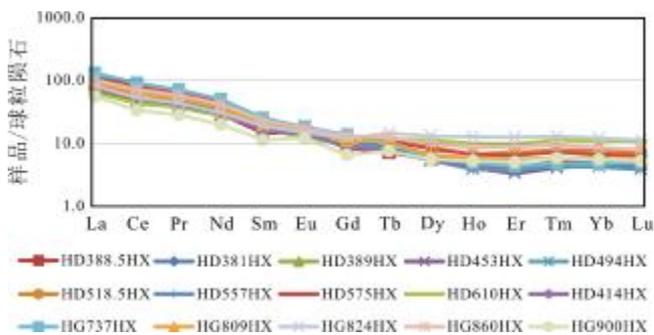


图 7 二云二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图解  
Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of two-mica monzogranite

二云二长花岗岩微量元素蛛网图(图 8)上, 富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K 和高场强元素 Hf, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(表 4, 扫描首页 OSID 二维码可见), 显示壳源岩浆的典型特征<sup>[24]</sup>.

#### 4 讨论

##### 4.1 花岗岩形成时代、类型及成因

研究区侵入岩较发育, 位于大兴安岭构造岩浆带的中北段, 分布在研究区西部和西北部. 岩石类型复杂, 从基性到酸性岩均有出露, 以中深成的花岗岩为主. 前人根据岩体与地层之间的侵入关系和少量的锆石 U-Pb 及全岩 K-Ar 同位素年龄数据认为, 研究区内的花岗质岩石除少量中生代(早侏罗世)花岗岩之

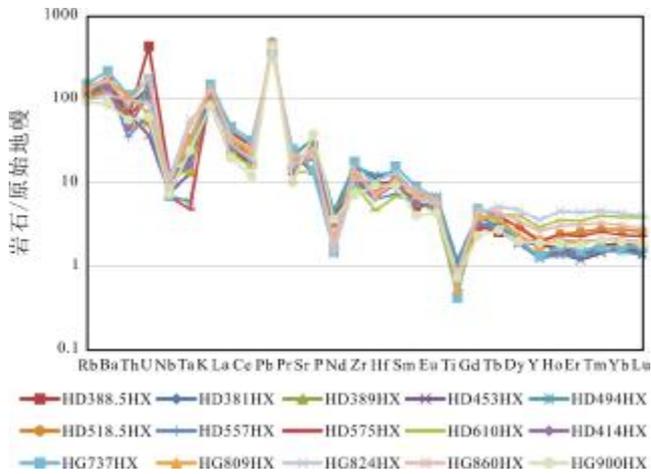


图8 二云二长花岗岩微量元素蛛网图

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams of two-mica monzogranite

外,主体属于晚古生代(主要是二叠纪)花岗岩体<sup>①</sup>。黑甘地1井位于研究区南部,地表为第四系,构造位置属于松辽盆地西北部斜坡区。通过黑甘地1井二云二长花岗岩的锆石 CL 图像(图4)可以看出锆石具有典型的岩浆振荡生长环带,结合其较高的 Th/U 比值(0.09~1.29),说明它们均是岩浆结晶作用的产物,所测定的年龄代表了岩体的形成时代。锆石 U-Pb 定年结果显示,研究区黑甘地1井钻遇二云二长花岗岩的形成时代为  $161.4 \pm 1.2$  Ma,为晚侏罗世早期。该年龄与大兴安岭中段东福二长岩<sup>[22]</sup>、大兴安岭北段伊勒呼里山二长花岗岩<sup>[25]</sup>的形成时代一致,指示研究区晚侏罗世早期岩浆事件的存在。

二云二长花岗岩具有高硅、富铝、富碱、低磷、低钛的特征,铝饱和指数 A/CNK 值为 1.01~1.07,小于 1.1,在 A/CNK-A/NK 图解(图6c)中位于准铝质-弱过铝质区域;在稀土元素配分模式图(图7)上,呈现轻、重稀土元素的显著分异、微弱的 Eu 负异常到正异常的特征,稀土元素配分曲线呈右倾型。K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值为 0.41~1.11,平均值为 0.76,相对富钾。结合矿物特征和 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解,显示高钾钙碱性系列花岗岩的特点,成因类型属于 I 型花岗岩。高钾钙碱性 I 型花岗岩的岩浆来源主要为下地壳岩石的部分熔融<sup>[26-27]</sup>。二云二长花岗岩以富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,具有微弱的 Eu 负异常到正异常,明

显不同于幔源岩浆演化所形成的强烈负 Eu 异常的酸性岩石,显示岩浆为地壳来源或遭受过地壳物质的混染,表明其原始岩浆起源于加厚陆壳物质的部分熔融。在埃达克 Sr/Y-Y 判别图解(图9)上,二云二长花岗岩大部分落在埃达克型安山岩和英安岩区。前人研究认为埃达克岩形成于高压背景<sup>[23, 28-29]</sup>,综合认为甘南地区二云二长花岗岩的原始岩浆起源于新增生的加厚陆壳物质的部分熔融。

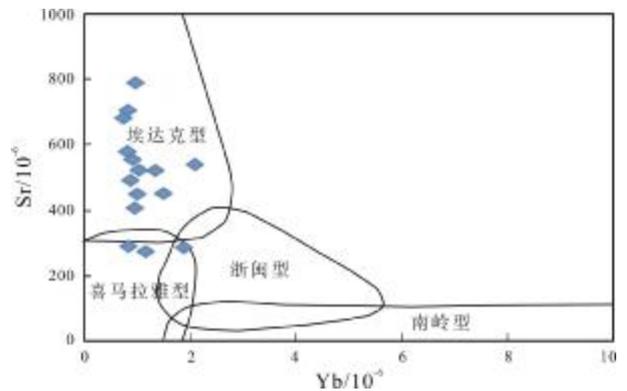


图9 二长花岗岩 Sr-Yb 分类图

(据文献[6, 23])

Fig. 9 The Sr-Yb classification diagram of monzogranite

(After References [6, 23])

#### 4.2 花岗岩形成的构造背景

前人研究认为环太平洋构造体系中生代对东北亚大陆俯冲影响距离可能不会超过长春—沈阳一线<sup>[30-34]</sup>,影响的范围主要在松辽盆地及以东地区,并且认为中侏罗世晚期—早白垩世早期为古太平洋板块俯冲的间歇期,没有对欧亚大陆进行俯冲<sup>[7]</sup>,在该时期内整个中国东部受古太平洋板块的影响有限。而蒙古—鄂霍次克构造体系影响的空间范围主要在松辽盆地以西以及华北地块北缘<sup>[8, 35-36]</sup>。结合成岩分析,二云二长花岗岩的原始岩浆起源于新增生的加厚陆壳物质的部分熔融,表明二云二长花岗岩是加厚陆壳物质部分熔融的产物,指示该区二云二长花岗岩产出于陆壳加厚或陆-陆碰撞环境,与 R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub> 图解(图10)揭示的样品大部分位于同碰撞期花岗岩成因区吻合。位于大兴安岭北段大索尔珠沟地区的谢尼奇山岩体(161 Ma)、伊勒呼里山岩体(158 Ma)及大兴安岭中段东福岩体(161 Ma),均形成于陆壳加厚的背景,与蒙古—鄂霍次克洋的闭合有关<sup>[22, 25, 37]</sup>。

① 黑龙江省地质调查研究总院. M51C004003(阿荣旗幅) 1:250 000 区域地质调查报告. 2005.

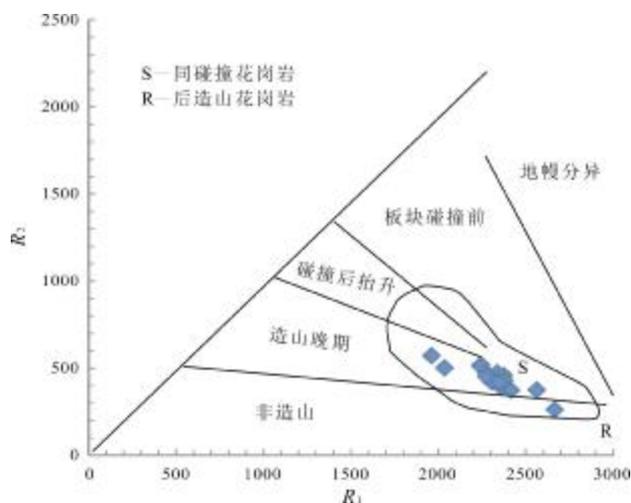


图 10 二云二长花岗岩  $R_1$ - $R_2$  图解  
(据文献[6,22,25])

Fig. 10 The  $R_1$ - $R_2$  diagram of two-mica monzogranite  
(After References [6, 22, 25])

综上所述,二云二长花岗岩的形成与蒙古-鄂霍次克洋闭合过程中的陆-陆碰撞环境有关,岩石的形成时代(161 Ma)限定了大兴安岭中北段齐齐哈尔甘南地区的闭合时代为晚侏罗世早期。

## 5 结论

(1)产于大兴安岭甘南地区的二云二长花岗岩的锆石 U-Pb 定年结果显示其形成于晚侏罗世早期(161 Ma)。

(2)岩石学和地球化学特征表明,二云二长花岗岩属准铝-弱过铝质高钾钙碱性系列岩石,富集大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,显示微弱的 Eu 负异常到正异常,轻、重稀土元素分异显著,富集轻稀土元素。原始岩浆起源于新增生的加厚陆壳物质的部分熔融,显示 I 型花岗岩的特征,为同碰撞期陆壳加厚过程的产物。

(3)二云二长花岗岩的形成应与蒙古-鄂霍次克洋闭合过程中的陆-陆碰撞环境有关,限定了蒙古-鄂霍次克洋在大兴安岭中北段甘南地区的闭合时代为晚侏罗世早期。

## 参考文献(References):

[1]李锦铁,牛宝贵,宋彪,等.长白山北段地壳的形成与演化[M].北京:地质出版社,1999:1-137.  
Li J Y, Niu B G, Shong B, et al. Formation and evolution of the crust

in the northern Changbai Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-137. (in Chinese)

[2]Li Y, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic volcanic rocks on the western margin of the Songnen-Zhangguangcai Range Massif, NE China: Implications for the amalgamation history of the Xing'an and Songnen-Zhangguangcai Range massifs[J]. Lithos, 2014, 205: 394-410.

[3]Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(1): 1-30.

[4]Meng E, Xu W L, Pei F P, et al. Detrital-zircon geochronology of Late Paleozoic sedimentary rocks in eastern Heilongjiang Province, NE China: Implications for the tectonic evolution of the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Tectonophysics, 2010, 485(1/4): 42-51.

[5]Cao H H, Xu W L, Pei F P, et al. Zircon U-Pb geochronology and petrogenesis of the Late Paleozoic-Early Mesozoic intrusive rocks in the eastern segment of the northern margin of the North China Block[J]. Lithos, 2013, 170-171: 191-207.

[6]张海华,李永飞,张健,等.大兴安岭中部乌兰浩特地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J].现代地质,2020,34(3):483-493.  
Zhang H H, Li Y F, Zhang J, et al. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and tectonic implications of granites in the Wulanhaote area, central Daxing'an Mountains [J]. Geoscience, 2020, 34(3): 483-493.

[7]赵芝.大兴安岭北部晚古生代岩浆作用及其构造意义[D].长春:吉林大学,2011.  
Zhao Z. Late Paleozoic magmatism and its tectonic significance in the northern Great Xing'an Range, northeastern China [D]. Changchun: Jilin University, 2011.

[8]许文良,王枫,裴福萍,等.中国东北中生代构造体制与区域成矿背景:来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J].岩石学报,2013,29(2):339-353.  
Xu W L, Wang F, Pei F P, et al. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(2): 339-353.

[9]徐美君,许文良,王枫,等.小兴安岭中部早侏罗世花岗岩质的年代学与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.

[10]Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of Early-Middle Triassic magmatism in the Erguna Massif, NE China:

- Constraints on the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean[J]. *Lithos*, 2014, 184–187: 1–16.
- [11] 孟凡超, 刘嘉麒, 崔岩, 等. 中国东北地区中生代构造体制的转变: 来自火山岩时空分布与岩石组合的制约[J]. *岩石学报*, 2014, 30(12): 3569–3586.
- Meng F C, Liu J Q, Cui Y, et al. Mesozoic tectonic regimes transition in the Northeast China: Constraints from temporal-spatial distribution and associations of volcanic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(12): 3569–3586.
- [12] 唐克东, 鞠楠, 张大权, 等. 关于古亚洲洋构造演化研究的几点思考[J]. *地质与资源*, 2022, 31(3): 246–258, 330.
- Tang K D, Ju N, Zhang D Q, et al. Implication of the tectonic evolution of Paleo-Asian Ocean [J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(3): 246–258, 330.
- [13] 张允平, 宋维民, 那福超, 等. 蒙古-鄂霍次克褶皱系地质特征及其构造属性讨论[J]. *地质与资源*, 2022, 31(3): 259–274, 288.
- Zhang Y P, Song W M, Na F C, et al. Geological characteristics and tectonic attribute of Mongolia-Okhotsk fold system[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(3): 259–274, 288.
- [14] 许文良, 葛文春, 裴福萍, 等. 东北地区中生代火山作用的年代学格架及其构造意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(S1): 286–287.
- Xu W L, Ge W C, Pei F P, et al. The chronology framework of Mesozoic volcanism in Northeast China and its tectonic significance [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(S1): 286–287. (in Chinese)
- [15] Meng E, Xu W L, Pei F P, et al. Permian bimodal volcanism in the Zhangguangcai Range of eastern Heilongjiang Province, NE China: Zircon U-Pb-Hf isotopes and geochemical evidence [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(2): 119–132.
- [16] 贾旭, 任俊光, 徐文坦, 等. 大兴安岭多宝山区晚古生代碱长花岗岩锆石 U-Pb 年龄: 对兴安和松嫩地块碰撞拼合时间的限定[J]. *中国地质*, 2022, 49(2): 586–600.
- Jia X, Ren J G, Xu W T, et al. Zircon U-Pb dating of Late Paleozoic alkali-feldspar granite in Duobaoshan, Daxing'anling Mountains: Constrains on collision and assembly time of Xing'an and Songnen blocks[J]. *Geology in China*, 2022, 49(2): 586–600.
- [17] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质论评*, 2002, 48(S1): 26–30.
- Song B, Zhang Y H, Wan Y S, et al. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 2002, 48(S1): 26–30.
- [18] Pearce N J G, Perkins W T, Westgate J A, et al. A compilation of new and published major and trace element data for NIST SRM 610 and NIST SRM 612 glass reference materials [J]. *Geostandards Newsletter*, 1997, 21(1): 115–144.
- [19] Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2003, 200(1/2): 155–170.
- [20] 李献华, 唐国强, 龚冰, 等. Qinghu (清湖) 锆石: 一个新的 U-Pb 年龄和 O, Hf 同位素微区分析工作标样[J]. *科学通报*, 2013, 58(20): 1954–1961.
- Li X H, Tang G Q, Guo B, et al. Qinghu zircon: A working reference for microbeam analysis of U-Pb age and Hf and O isotopes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(36): 4647–4654.
- [21] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59–79.
- [22] 杜继宇, 宋维民, 杨佳林, 等. 大兴安岭中段东福岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造背景[J]. *地质通报*, 2020, 39(6): 919–928.
- Du J Y, Song W M, Yang J L, et al. An analysis of zircon U-Pb age, geochemistry and tectonic setting of Dongfu pluton in Tuquan, middle Da Hinggan Mountains [J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(6): 919–928.
- [23] 尹志刚, 李敏, 李文龙, 等. 大兴安岭中北段大金山地区早侏罗世埃达克质花岗岩闪长岩的成因及构造环境[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2019, 38(1): 69–79.
- Yin Z G, Li M, Li W L, et al. The origin and tectonic environment of the Early Jurassic adakitic granodiorite in the Dajinshan area of the central and northern Da Hinggan Range [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2019, 38(1): 69–79.
- [24] 杨高学, 李永军, 吴宏恩, 等. 东准噶尔卡拉麦里地区黄山山花岗岩和包体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(12): 3197–3207.
- Yang G X, Li Y J, Wu H E, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Huangyangshan pluton and its enclaves from Kalamaili area eastern Junggar, Xinjiang, and geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(12): 3197–3207.
- [25] 尹志刚, 宫兆民, 张跃龙, 等. 大兴安岭北段伊勒呼里山晚侏罗世二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 2018, 37(7): 1291–1301.
- Yin Z G, Gong Z M, Zhang Y L, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Late Jurassic monzonitic granite from Yilehuli Mountain in northern Da Hinggan Mountains and their geological implications [J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(7): 1291–1301.
- [26] 胡培远, 李才, 解超明, 等. 藏北羌塘中部桃形湖蛇绿岩中钠长花岗岩——古特提斯洋壳消减的证据[J]. *岩石学报*, 2013, 29(12): 4404–4414.
- Hu P Y, Li C, Xie C M, et al. Albite granites in Taoxinghu ophiolite in central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau, China: Evidences of Paleo-Tethys oceanic crust subduction [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(12): 4404–4414.
- [27] 贾晓亮, 郭瑞清, 柴凤梅, 等. 新疆库鲁克塔格西段泥盆纪二长花

- 岗岩年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报, 2013, 32(2/3): 239-250.
- Jia X L, Guo R Q, Chai F M, et al. Geochemistry and geochronology of monzogranites in Kuruktag of Xinjiang and their tectonic implications[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(2/3): 239-250.
- [28]张旗, 焦守涛. 埃达克岩来自高压背景——一个科学的、可靠的、有预见性的科学发现[J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1675-1683.
- Zhang Q, Jiao S T. Adakite comes from a high-pressure background: A scientific, reliable, predictable scientific discovery [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(6): 1675-1683.
- [29]秦秀峰, 尹志刚, 汪岩, 等. 大兴安岭北端漠河地区早古生代埃达克岩特征及地质意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1501-1511.
- Qin X F, Yin Z G, Wang Y, et al. Early Paleozoic adakitic rocks in Mohe area at the northern end of the Da Hinggan Mountains and their geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(6): 1501-1511.
- [30]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.
- [31]Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids [J]. Lithos, 1999, 46(3): 411-429.
- [32]陈志广, 张连昌, 卢百志, 等. 内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代、地球化学及地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1437-1449.
- Chen Z G, Zhang L C, Lu B Z, et al. Geochronology and geochemistry of the Taipingchuan copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia, and its geological significances[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(5): 1437-1449.
- [33]余宏全, 李进文, 向安平, 等. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 571-594.
- She H Q, Li J W, Xiang A P, et al. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 571-594.
- [34]唐杰, 许文良, 王枫, 等. 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, 2018, 48(5): 549-583.
- Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Subduction history of the Paleopacific slab beneath Eurasian continent: Mesozoic-Paleogene magmatic records in Northeast Asia [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(5): 527-559.
- [35]赵越, 杨振宇, 马醒华. 东亚大地构造发展的重要转折[J]. 地质科学, 1994, 29(2): 105-119.
- Zhao Y, Yang Z Y, Ma X H. Geotectonic transition from Paleasian system and Paleotethyan system to Paleopacific active continental margin in eastern Asia[J]. Scientia Geologica Sinica, 1994, 29(2): 105-119.
- [36]李宇, 丁磊磊, 许文良, 等. 孙吴地区中侏罗世白云母花岗岩的年代学与地球化学: 对蒙古-鄂霍茨克洋闭合时间的限定[J]. 岩石学报, 2015, 31(1): 56-66.
- Li Y, Ding L L, Xu W L, et al. Geochronology and geochemistry of muscovite granite in Sunwu area, NE China: Implications for the timing of closure of the Mongol-Okhotsk Ocean[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(1): 56-66.
- [37]李欢. 大兴安岭北段大索尔珠沟地区侏罗纪岩浆演化及找矿潜力评价[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- Li H. Jurassic magmatic evolution process and prospecting potential evaluation in Dasuerzhugou region of the northern Great Xing'an Range[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.