

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.129>



# 大兴安岭南段小乌兰沟正长花岗岩成因:锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学、地球化学及Hf同位素的制约

章培春<sup>1</sup>,彭 勃<sup>1\*</sup>,赵金忠<sup>2</sup>,王 鑫<sup>2</sup>,贺 吉<sup>2</sup>,张 爱<sup>2</sup>,双 龙<sup>3</sup>

1. 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037
2. 内蒙古自治区地质调查院内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室,内蒙古呼和浩特 010020
3. 内蒙古自治区矿产实验研究所,内蒙古呼和浩特 010031

**摘要:**大兴安岭南段西坡发育有大量晚侏罗世—早白垩世花岗岩,深入讨论岩石成因对该地区中生代地球动力学背景及其构造演化的研究具有重要地质意义。报道了小乌兰沟正长花岗岩的锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄,全岩地球化学及锆石Hf同位素数据。小乌兰沟正长花岗岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $139.4 \pm 0.7\text{ Ma}$ ,属早白垩世。样品主量元素表现为富硅、富钾的高钾钙碱性系列岩石,A/CNK值介于1.00~1.11之间,属弱过铝质。微量元素富集Rb、Th、U等大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),强烈亏损Ba、Sr、P、Ti等高场强元素(HFSE),Eu负异常明显( $\delta\text{Eu}=0.007 \sim 0.009$ ), $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 值基本小于 $350 \times 10^{-6}$ ,含磁铁矿,未见原生白云母和碱性暗色矿物,属高分异I型花岗岩。小乌兰沟正长花岗岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于+5.5~+8.9之间,Hf同位素模式年龄 $t_{\text{DM2}}$ 变化于700~947 Ma之间。结合区域研究,小乌兰沟正长花岗岩为上元古界变基性岩与中奥陶统变中性岩在低压、高温条件下发生部分熔融作用形成,是蒙古—鄂霍茨克洋闭合后伸展作用的产物。

**关键词:**大兴安岭南段西坡;蒙古—鄂霍茨克洋;小乌兰沟;LA-ICP-MS U-Pb年代学;Hf同位素;地球化学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2022)08-2889-13

收稿日期: 2021-05-24

## Petrogenesis of the Syenogranite in the Xiaowulangou Area of Southern Great Xing'an Range: Constraints from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopes

Zhang Peichun<sup>1</sup>, Peng Bo<sup>1\*</sup>, Zhao Jinzhong<sup>2</sup>, Wang Xin<sup>2</sup>, He Ji<sup>2</sup>, Zhang Ai<sup>2</sup>, Shuang Long<sup>3</sup>

1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China
2. Inner Mongolia Key Laboratory of Magmatic Mineralization and Ore-Prospecting, Inner Mongolia Geological Survey Institute, Hohhot 010020, China
3. Inner Mongolia Minerals Experiment Research Institute, Hohhot 010031, China

**基金项目:**中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金(Nos. KK2017, KK2018);国家自然科学基金项目(No. 41802103);内蒙古自治区地质勘查基金项目(No. NMKD2015-40)。

**作者简介:**章培春(1986—),男,博士研究生,从事固体矿产勘查与矿床学相关研究。ORCID: 0000-0001-8170-4517, E-mail: nmddyzpc@163.com  
**\*通讯作者:**彭勃,ORCID: 0000-0002-9944-1425, E-mail: p.engbo@163.com

**引用格式:**章培春,彭勃,赵金忠,王鑫,贺吉,张爱,双龙,2022.大兴安岭南段小乌兰沟正长花岗岩成因:锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学、地球化学及Hf同位素的制约.地球科学,47(8):2889—2901.

**Citation:** Zhang Peichun, Peng Bo, Zhao Jinzhong, Wang Xin, He Ji, Zhang Ai, Shuang Long, 2022. Petrogenesis of the Syenogranite in the Xiaowulangou Area of Southern Great Xing'an Range: Constraints from Zircon LA-ICP-MS U-Pb Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopes. *Earth Science*, 47(8):2889—2901.

**Abstract:** The Late Jurassic-Early Cretaceous granites are widely developed in the west slope of Southern Great Xing'an Range, and an in-depth study of the petrogenesis is of great geological significance to reveal the Mesozoic geodynamic background and tectonic evolution. In this paper, we report the zircon LA-ICP-MS U-Pb age and Hf isotopic data, whole-rock major and trace element composition data from Xiaowulangousyeno granite. LA-ICP-MS U-Pb dating yields a weighted mean of  $139.4 \pm 0.7$  Ma, indicating that Xiaowulangousyeno granite formed in the Early Cretaceous. Geochemically, the syenogranite belongs to Si-K-rich calc-alkaline series,  $A/CNK=1.00\sim1.11$  and are weak peraluminous. The syenogranite enriched in Rb, Th, U(LILE) and light rare earth elements(LREE), relatively depleted in Ba, Sr, P, Ti(HFSE), with obvious Eu negative anomaly( $\delta\text{Eu}=0.007\sim0.009$ ). In addition, the  $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$  values of syenogranite is less than  $350\times10^6$ . The syenogranite contains magnetite, and no primary muscovite and alkaline mafic minerals. All these features above suggest that Xiaowulangousyeno granite belongs to highly fractionated I-type granite. The zircons  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of syenogranite are  $+5.5\sim+8.9$ , and the two stage model ages ( $t_{\text{DM2}}$ ) range 700 Ma to 947 Ma. Combined with the regional geological background, we conclude that the Xiaowulangousyeno granite originated from the partial melting of upper Proterozoic meta-mafic rocks and middle Ordovician meta-andesite rocks under low pressure and high temperature, and the syenogranite was the product of extension after the closure of Mongol-Okhotsk Ocean.

**Key words:** The west slope of Southern Great Xing'an Range; Mongol-Okhotsk Ocean; Xiaowulangou; LA-ICP-MS U-Pb geochronology; Hf isotopes; geochemistry.

## 0 引言

中亚造山带是全球最大的显生宙增生型造山带,关于其增生造山过程以及成矿作用一直以来是国内外学者研究和讨论的热点。我国东北地区位于中亚造山带东段,是由一系列地块拼贴而成,主要包括额尔古纳地块、兴安地块、松辽地块、松嫩—张广才岭地块等(Wu *et al.*, 2011)(图1a)。古生代时期,该区域主要经历了古亚洲洋演化,经历了多个微陆块的拼贴造山作用,并最终闭合于索伦—西拉木伦缝合带(Xiao *et al.*, 2015; 许文良等, 2019),发生一系列晚二叠世—早三叠世构造岩浆事件;中生代时期,受蒙古—鄂霍茨克洋、(古)太平洋板块俯冲作用的影响,产生了大量侏罗—白垩纪岩浆记录(葛文春等, 2000)。随之,一些关于构造演化的花岗质岩石和火山岩得到了深入研究。但是,由于我国东北地区构造演化的复杂性,至今仍有许多重要地质问题存在分歧,尤其是蒙古—鄂霍茨克洋的俯冲极性及其与古太平洋构造域对我国东北地区的时空影响范围还存在争议。

大兴安岭南段位于我国东北地区南西侧(图1b),北西以二连—贺根山—黑河断裂为界,南至索伦—西拉木伦断裂,东临嫩江—白城断裂,并以大兴安岭主脊为界,划分为西坡、主峰及东坡3部分。相比于东坡和主峰区域,西坡的研究程度较为薄弱。目前,在大兴安岭南段西坡新发现一系列晚侏罗世—早白垩世岩浆活动,形成北大山、小乌兰沟、五十家子、白音查干东山以及维拉斯托等岩体(张

天福等, 2019; 武广等, 2021),然而,关于上述岩体形成的地球动力学机制仍不明确,一部分学者认为是与蒙古—鄂霍茨克洋向南俯冲相关(许文良等, 2013; 王建国等, 2013; Wang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2021),还有部分学者认为与古太平洋俯冲的弧后伸展有关(刘新等, 2017)。

小乌兰沟地区大地构造位置处于中亚造山带东段,蒙古—鄂霍茨克缝合带南东侧,主要受控于古亚洲洋和蒙古—鄂霍茨克两大构造域影响,是研究大兴安岭南段西坡岩体形成构造背景的理想地区。本文选取小乌兰沟大型岩基为研究对象,进行锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学、岩石地球化学及Hf同位素研究,结合中国东北地区中生代构造演化的研究成果,对小乌兰沟岩体成因及区域地球动力学背景提供约束。

## 1 区域地质背景

小乌兰沟岩体位于大兴安岭南段西坡。区域出露地层主要有前寒武结晶基底、古生代褶皱基底及中生代火山—沉积盖层(图2)。其中,前寒武结晶基底主要包括锡林郭勒杂岩,岩石类型主要有黑云石英片岩、黑云斜长片麻岩以及少量斜长角闪岩、变粒岩等。古生代褶皱基底主要包括奥陶系、石炭系及二叠系,其中二叠系出露广泛,由底至顶分别有寿山沟组、大石寨组、哲斯组及林西组,主要为一套浅海—滨海—湖相陆源碎屑岩沉积建造,其间浅海—滨海相沉积地层夹有中基性火山岩及碳酸盐岩。中生代火山—沉积盖层分布面积较大,主要

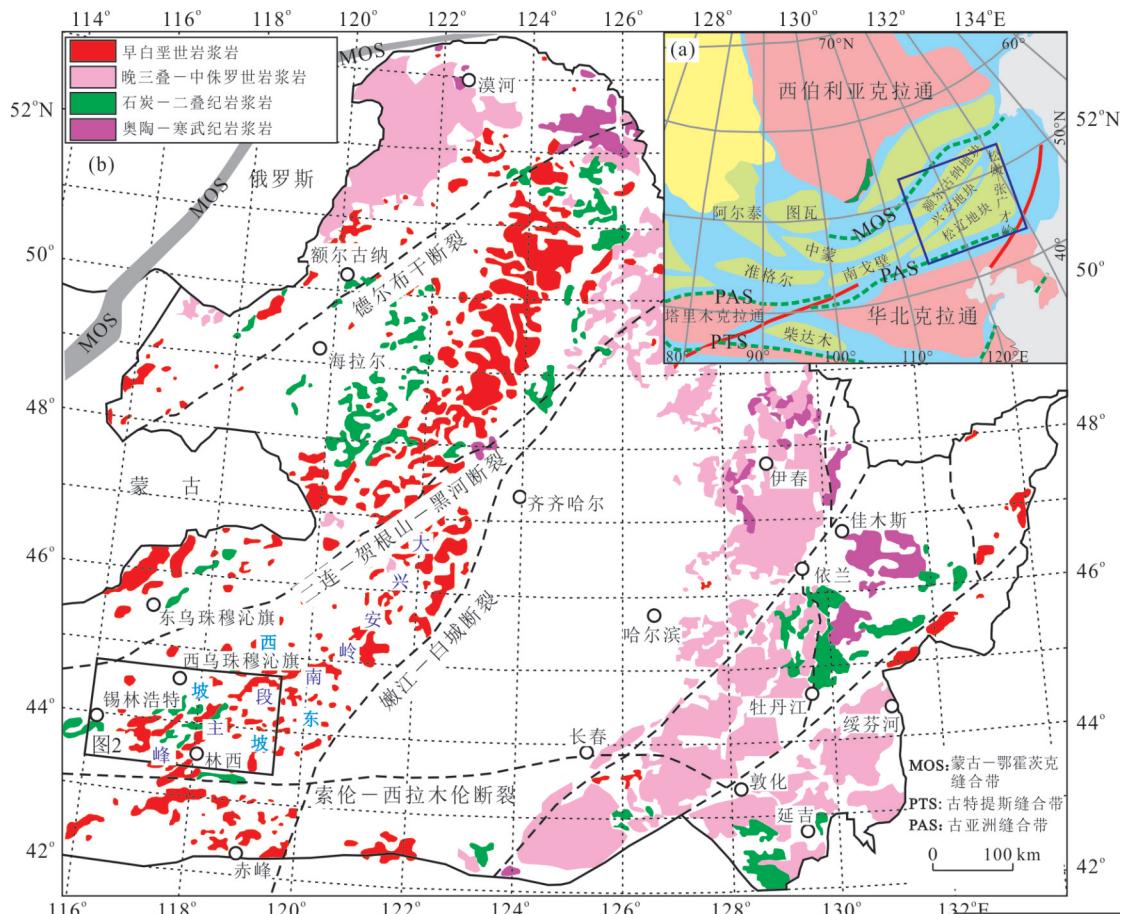


图1 东北亚构造分区图(a)(据 Tang *et al.* 2016)和中国东北显生宙花岗岩类地质略图(b)(据 Li *et al.*, 2021)

Fig.1 (a) Tectonic subdivision of the NE Asia (modified after Tang *et al.*, 2016), and (b) geological map of Phanerozoic granitoids in NE China (after Li *et al.*, 2021)

包括侏罗系、白垩系，岩石类型主要为一套中酸性火山碎屑岩、熔岩。区域岩浆岩主要为中酸性侵入岩，形成时代以侏罗—白垩纪为主，次为石炭一二叠纪、三叠纪，多呈岩基状产出，少见岩珠状，岩石类型主要为花岗闪长岩、石英闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩等。区域构造格架主要受古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋、古太平洋构造演化控制，由早到晚、由南至北表现为近东西向、北东向到北北东向转变。其中，断裂构造主要以北东、北北东向为主，次为东西向，局部见有南北向。东西、北东向区域深大断裂具有长期性、反复性，对区域岩浆岩、地层具有一定控制作用。

## 2 岩体特征及样品采集

小乌兰沟岩体主要呈岩基状产出,出露面积较大,约 $260\text{ km}^2$ ,总体呈NE-SW向展布(图2)。岩石类型主要有二长花岗岩、正长花岗岩,其中二长花

岗岩分布面积较大,其间见有闪长岩、伟晶岩呈脉状贯入,以北东向为主,而正长花岗岩分布面积相对较小,呈岩珠状产出,其间见有石英脉呈东西向、北东向穿切。

本次用于进行年代学、地球化学及同位素测试的样品为小乌兰沟岩体北西侧正长花岗岩,采自野外新鲜岩体露头,具体采样位置如图2所示。样品风化面呈灰黄色,新鲜面浅肉黄色,具花岗结构,块状构造(图3a~3c)。经镜下观察,岩石矿物成分主要由钾长石、斜长石、石英及黑云母组成,其中钾长石,呈半自形粒状一半自形板状,多数发育有条纹构造,少数见有格子双晶,为微斜长石,粒径多数为2~4 mm,少数为0.5~2.0 mm,含量约占55%;斜长石,呈半自形板状,具聚片双晶,粒径0.3~2.0 mm,含量约占20%;石英,呈它形粒状,烟灰色,油脂光泽,粒径0.3~4.0 mm,含量约占22%;黑云母,呈鳞片状,淡黄—深棕色,粒径0.2~1.0 mm,含量约占3%(图3d)。

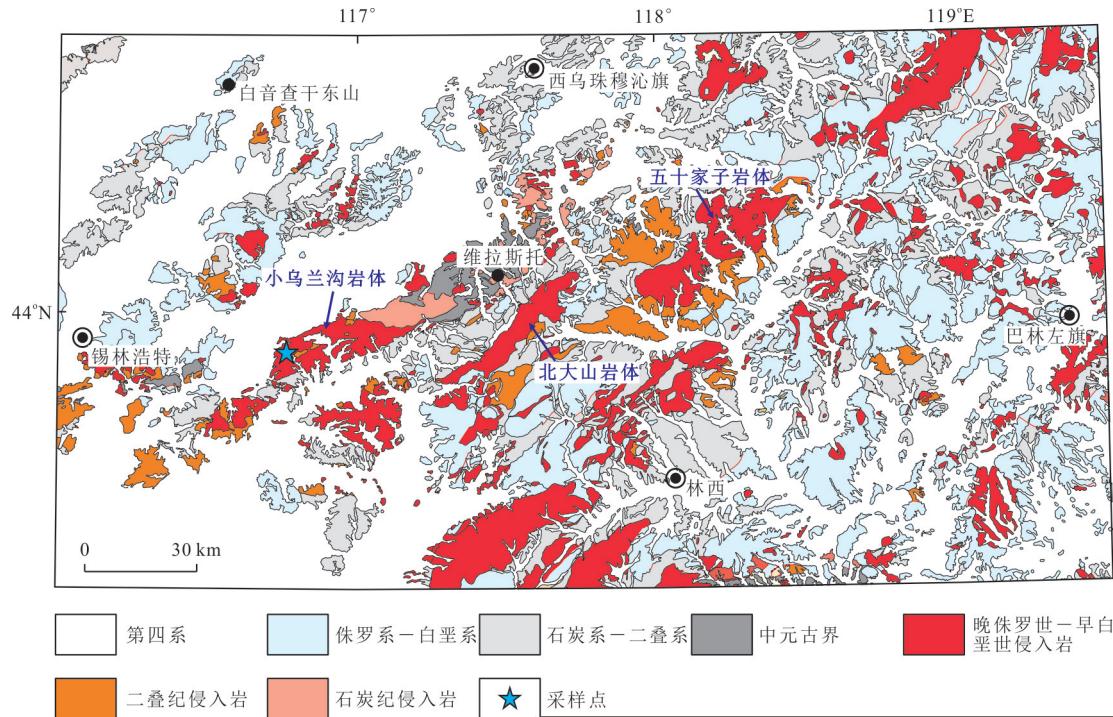


图 2 小乌兰沟及相邻区域地质

Fig.2 Simplified geological map in Xiaowulangou and its adjacent area

据内蒙古自治区地质调查院, 2019. 内蒙古锡林浩特市—巴林左旗铜多金属矿成矿规律及选区研究

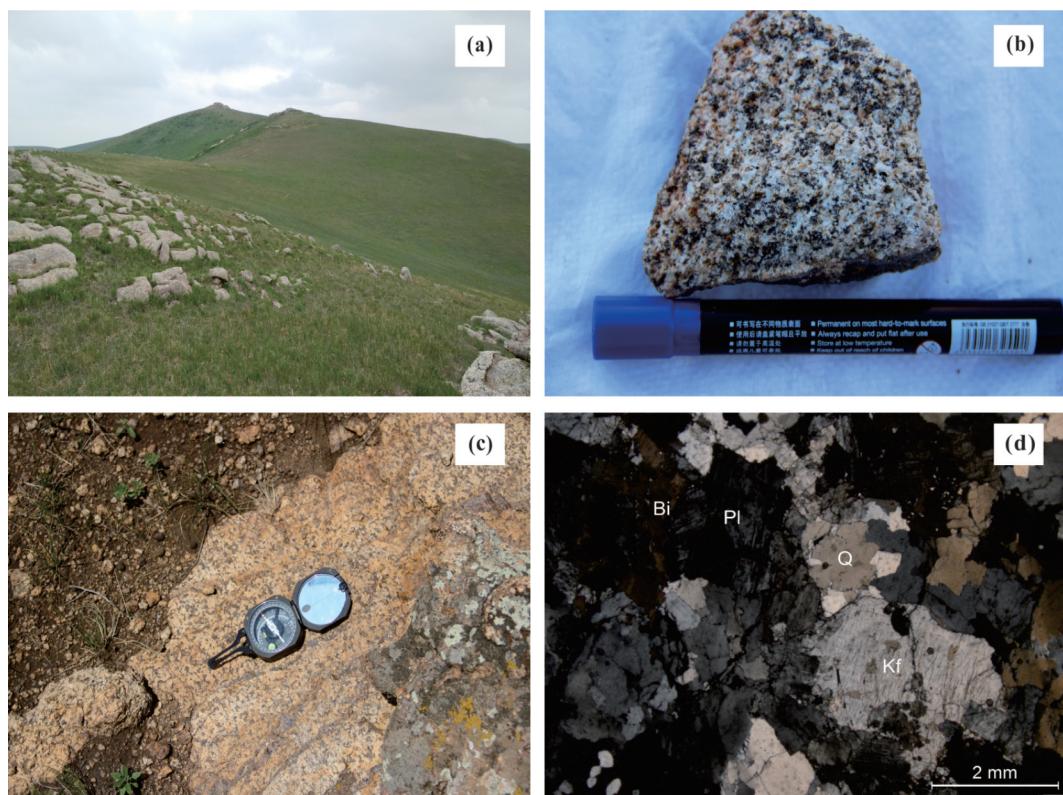


图 3 小乌兰沟正长花岗岩野外露头 (a、c)、手标本 (b) 及镜下显微照片 (d)

Fig.3 Field photographs (a, c), hand specimens (b) and microphotographs (d) of the Xiaowulangousyenogranite

Bi. 黑云母; Pl. 斜长石; Kf. 钾长石; Q. 石英

### 3 分析方法

本文用于主量、微量元素分析测试的样品是在内蒙古自治区矿产实验研究所完成。主量元素测试采用XRF玻璃熔片法,分析精度和准确度优于5%;微量元素分析采用ICP-MS分析方法,分析精度和准确度优于10%。

锆石单矿物挑选、锆石制靶、显微(反射光、透射光)及阴极发光(CL)照相是由北京锆年领航科技有限责任公司完成。首先,将样品破碎、淘洗,进行人工重砂挑选;其次,利用电磁、重液分选,初步挑选锆石颗粒;第三,利用双目镜,进一步优选、提纯锆石颗粒;最后,将锆石颗粒置于环氧树脂中,进行抛光,用于显微(反射光、透射光)及阴极发光(CL)照相。

锆石U-Pb同位素分析是在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源成矿作用与资源评价重点实验室完成。锆石定年分析仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的NewwaveUP213激光剥蚀系统。激光剥蚀孔径为 $32\text{ }\mu\text{m}$ ,频率为10 Hz,能量密度约为 $2.5\text{ J/cm}^2$ ,以He为载气。锆石U-Pb年龄的测定采用GJ-1为外标大的校正方法,每隔10个样品分析点测1次标样。以Si作为标来测定锆石中U、Pb和Th的含量。数据处理采用ICPMSData-Cal程序,锆石年龄谐和图用Isoplot3.0程序完成。详细的实验测试过程参考侯可军等(2009)。

锆石Hf同位素分析由中国地质科学院矿产资源研究所自然资源成矿作用与资源评价重点实验

室Neptune多接受电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)和NewwaveUP213紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)完成,相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。

### 4 分析结果

#### 4.1 锆石U-Pb同位素

小乌兰沟正长花岗岩样品中,锆石多呈透明状,无色、浅黄、黄色,金刚光泽,具四方柱状,粒径以 $50\sim130\text{ }\mu\text{m}$ 为主,次为 $130\sim180\text{ }\mu\text{m}$ ,少见 $180\sim230\text{ }\mu\text{m}$ ,长宽比以 $1.5:1.0\sim2:1$ 为主,次为 $2.5:1.0\sim3:1$ ,个别达 $4:1$ 。阴极发光图像显示,锆石多具震荡环带,韵律清晰,个别见有继承性锆石核,外侧裹有新生锆石边(图4)。锆石U含量介于 $168\times10^{-6}\sim1206\times10^{-6}$ 之间, Th含量介于 $70\times10^{-6}\sim633\times10^{-6}$ 之间, Th/U值为 $0.27\sim0.61$ ,大于0.1(附表1),显示样品中锆石均为岩浆锆石。实验过程中,共选取28粒裂纹较少,晶体环带生长较发育的锆石开展测试,共测29点,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值介于136.3~141.2 Ma之间,加权平均年龄为 $139.4\pm0.7\text{ Ma}$ , MSWD为0.48(图4)。该年龄代表了小乌兰沟正长花岗岩的侵位时代,属早白垩世。

#### 4.2 地球化学特征

**4.2.1 主量元素** 小乌兰沟正长花岗岩主量元素及特征值如附表2所示,测试样品中 $\text{SiO}_2$ 含量较高,介于 $74.08\%\sim76.84\%$ 之间, $\text{Fe}_2\text{O}_3=0.84\%\sim1.24\%$ , $\text{FeO}=0.46\%\sim1.06\%$ , $\text{FeO}^\text{T}=1.57\%\sim1.81\%$ , $\text{MgO}=0.13\%\sim0.18\%$ , $\text{FeO}^\text{T}/(\text{FeO}^\text{T}+$

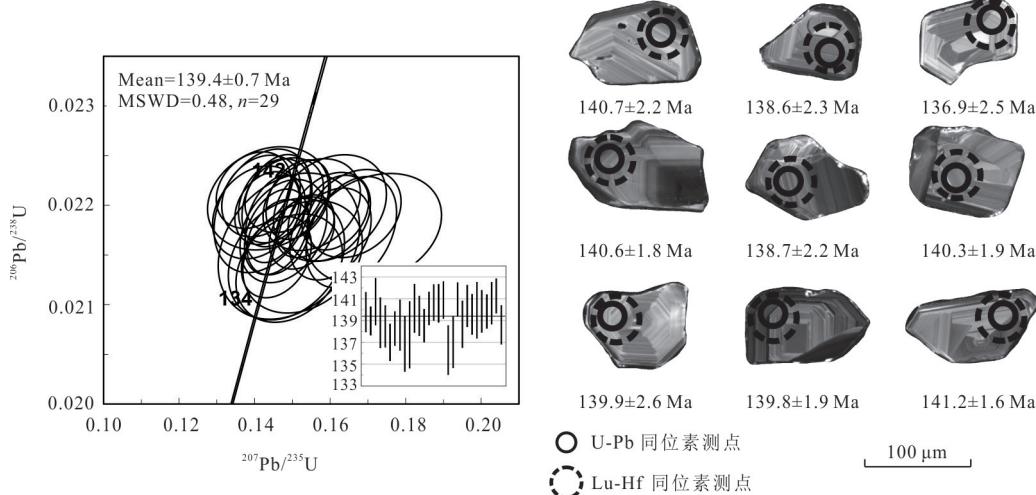


图4 小乌兰沟地区正长花岗岩锆石阴极发光图像及U-Pb年龄谐和图

Fig.4 Concordia diagram of zircon U-Pb ages and CL images of syenogranite in the Xiaowulangou area

$MgO$  值变化于 0.90~0.93 之间。 $K_2O=4.89\% \sim 5.67\%$ ,  $Na_2O=3.1\% \sim 3.54\%$ , 相对富钾贫钠 ( $K_2O/Na_2O=1.45 \sim 1.62$ )。在  $SiO_2-K_2O$  图解中, 正长花岗岩样品落入高钾钙碱性的岩石区域(图 5a)。 $Al_2O_3=12.09\% \sim 13.04\%$ , 铝饱和指数  $A/CNK$  介于 1.00~1.11 之间, 在  $A/CNK-A/NK$  图解中基本落入弱过铝质岩石系列中(图 5b)。总体上小乌兰沟正长花岗岩样品属高钾钙碱性系列弱过铝质岩石。

**4.2.2 微量元素** 小乌兰沟正长花岗岩微量元素及特征值如附表 2 所示, 样品稀土总量介于  $191.23 \times 10^{-6} \sim 254.20 \times 10^{-6}$  之间,  $La_N/Yb_N$  比值为 3.38~4.75, LREE/HREE 值为 6.87~8.00, 负 Eu 异常明显 ( $\delta Eu=0.007 \sim 0.009$ ), 在稀土元素配分曲线上, 显示出轻稀土富集, 重稀土相对平坦的曲线特

征(图 6a), 呈现略微右倾“海鸥”型。在原始地幔标准化微量元素蛛网图解上, 样品明显富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE), 亏损 Ba、P、Ti、Sr 等高场强元素(HFSE)(图 6b)。此外, 样品中  $10000Ga/Al$  比值介于 3.27~3.65 之间, 远大于 2.6,  $Zr+Nb+Ce+Y$  值为  $323.7 \times 10^{-6} \sim 405.8 \times 10^{-6}$ , 平均值  $351.4 \times 10^{-6}$ , 大于  $350 \times 10^{-6}$ 。

#### 4.3 锆石 Lu-Hf 同位素

在对小乌兰沟正长花岗岩样品进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年研究的基础上, 同时开展了锆石微区原位 Hf 同位素分析测试, 结果如附表 3 所示, 样品中锆石  $^{176}Hf/^{177}Hf$  初始比值为 0.282 842~0.282 935,  $\epsilon_{Hf}(t)$  值为 +5.5~+8.9, 平均值为 +7.7,  $t_{DM2}$  变化于 700~947 Ma 之间。

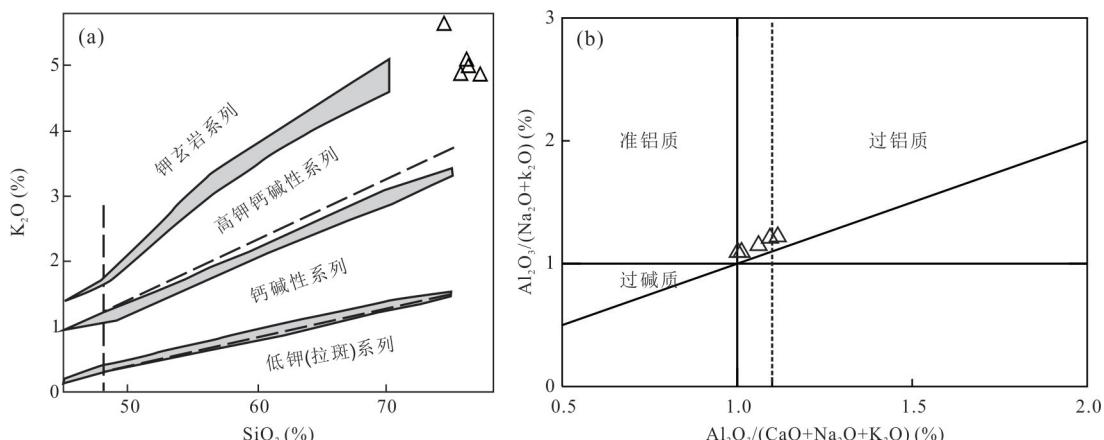


图 5 小乌兰沟正长花岗岩  $SiO_2-K_2O$  图(a)(据 Peccerillo *et al.*, 1976)和  $A/CNK-A/NK$  图(b)(据 Maniar *et al.*, 1989)

Fig.5 Plot of  $SiO_2$  vs.  $K_2O$ (a)(after Peccerillo *et al.*, 1976) and  $A/CNK$  vs.  $A/NK$ (b)( after Maniar *et al.*, 1989) of syenogranite from the Xiaowulangou area

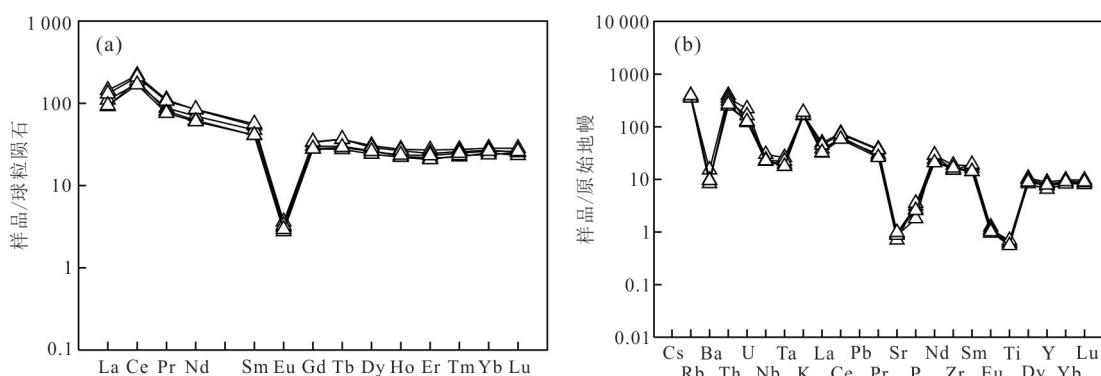


图 6 小乌兰沟正长花岗岩球粒陨石标准化稀土模式配分图(a)(标准化值据 Boynton, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun *et al.*, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element multi-variation diagrams (b) for syenogranite from the Xiaowulangou area (chondrite-normalization and primitive mantle-normalization values from Boynton, 1984 and Sun *et al.*, 1989)

## 5 讨论

### 5.1 岩石类型

一般来说,S型花岗岩具强过铝质,而小乌兰沟正长花岗岩A/CNK值介于1.00~1.11之间,平均值1.05,低于典型S型花岗岩A/CNK值,且未见原生白云母等矿物,因此,排除了S型花岗岩的可能。实验研究表明,准铝质、弱过铝质岩浆中,磷灰石的溶解度较低,且在岩浆分异的过程中与SiO<sub>2</sub>呈负相关性(Wolf and London, 1994)。本文数据显示,小乌兰沟正长花岗岩P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>值较低(0.01%~0.09%),且与SiO<sub>2</sub>出现负相关性(图7a),因此小乌兰沟正长花岗岩可能属于I型花岗岩。

小乌兰沟正长花岗岩主量元素表现为富硅、富碱、贫钙、低镁,分异指数为93.16~94.9,且含有磁铁矿,指示岩浆富水、高氧逸度、高分异特征。微量元素方面,小乌兰沟正长花岗岩富集高场强元素U、Th及大离子亲石元素Rb,而亏损Sr、Ba、P、Ti(图6b),Rb/Sr值介于11.58~14.97之间,指示成岩过程中发生了斜长石、磷灰石及钛铁矿等分离结晶作用,为岩体的高程度分异演化所致。稀土元素方面,小乌兰沟正长花岗岩稀土总量较高,为191.23×10<sup>-6</sup>~254.20×10<sup>-6</sup>,平均值219.42×10<sup>-6</sup>,LREE/HREE=6.87~8.00,(La/Yb)<sub>n</sub>=3.38~4.75,(Gd/Yb)<sub>n</sub>=1.04~1.24,表现为轻稀土富集且分馏明显,而重稀土分馏不显著,配分曲线呈略微右倾型(图6a),并具有明显负Eu异常,指示岩体具有高分异I型花岗岩特点。

通常A型与高分异I型花岗岩具有一些相似的地球化学特征,如高硅、富碱,且富集Rb、Th、U,而明显亏损Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti、Eu等。区别在于A型花岗岩更加富钾、负铕,Ga/Al值、Zr+Nb+Ce+Y值及成岩温度相对I型花岗岩更高。本文小乌兰沟正长花岗岩虽然10 000Ga/Al值较高,大于2.6,但不含有典型碱性暗色矿物,且Zr+Nb+Ce+Y值除CG-5样品外,其余均小于350×10<sup>-6</sup>,并在(Zr+Nb+Ce+Y)-(FeO<sup>T</sup>/MgO)、(Zr+Nb+Ce+Y)-(10 000Ga/Al)及(Zr+Nb+Ce+Y)-(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O/CaO)图解中,样品基本落入高分异I型花岗岩区域(图7b~7d)。随振民和陈跃军(2011)认为,岩浆的起源温度受大地构造背景的制约,在伸展构造体制下岩石圈减薄、地幔岩浆底侵可能导致高温花岗岩的出现。据二者统计,大兴安岭地区白垩纪I型花岗

岩锆石饱和温度变化范围为720~793 °C,而A型花岗岩锆石饱和温度高达868~928 °C。小乌兰沟正长花岗岩锆石饱和温度虽较高(796~812 °C),但明显低于区域A型花岗岩的锆石饱和温度。因此,我们认为小乌兰沟正长花岗岩更可能属于高分异I型花岗岩,而非A型花岗岩。

### 5.2 岩浆源区

目前,关于I型花岗岩的成因还存在着较大的争议,一般包括有以下几种模式,分别为幔源玄武质岩浆的强烈分离结晶模式(Beard *et al.*, 1991)、幔源分异岩浆底侵,致使地壳物质发生部分熔融模式(Richards, 2011)以及幔源岩浆底侵与长英质岩浆混合发生分离结晶模式(邱检生等, 2008)。

已有研究表明,Th、Ce等过亲岩浆元素和Zr、Hf等亲岩浆元素在H-(H/M)图解中,倾斜排列代表岩石的部分熔融,而水平排列则代表岩石的分离结晶(彭勃等, 2019),本文小乌兰沟正长花岗岩样品具倾斜的排列形式(图8),指示该岩体具有部分熔融成因。Defant and Drummond(1990)认为,幔源岩浆直接分异产生高含量SiO<sub>2</sub>的花岗质岩浆的可能性非常小,而小乌兰沟正长花岗岩SiO<sub>2</sub>含量高达74.08%~76.84%,因此,小乌兰沟正长花岗岩不可能通过幔源岩浆分异演化而形成。另外,幔源岩浆与壳源岩浆混合一般会产生铁镁质包体,但小乌兰沟正长花岗岩中并未发现暗色闪长质包体,且锆石ε<sub>Hf</sub>(t)值为+5.5~+8.9(3.4个ε单位),变化范围非常小,指示岩浆源区相对均一,并非由岩浆混合所致。

实验岩石学表明,变玄武质岩石(斜长角闪岩)部分熔融可形成中酸性钙碱性岩浆(Rushmer, 1991; Rapp and Watson, 1995),即斜长石+角闪石+石英→斜方辉石+单斜辉石+磁铁矿+熔体。徐备等(1996)认为,大兴安岭地区锡林郭勒杂岩中夹有斜长角闪岩、角闪石岩等,形成于1 025±41 Ma, ε<sub>Nd</sub>(t)值为+6.25,来源于中等亏损幔源区。而小乌兰沟正长花岗岩属钙碱性岩石,锆石ε<sub>Hf</sub>(t)值为+5.5~+8.9,Hf同位素二阶段模式年龄介于947~700 Ma之间,暗示小乌兰沟正长花岗岩源区可能与锡林郭勒杂岩相关。考虑到钙碱性I型花岗岩更可能来源于中性岩的部分熔融(Clemens *et al.*, 2011),区域上中奥陶统包尔汉图群见有变角闪斜长安山岩、变含石英角闪斜长安山岩等,具有Ba、Sr亏损特征,与小乌兰沟正长花岗岩相似。因此,我

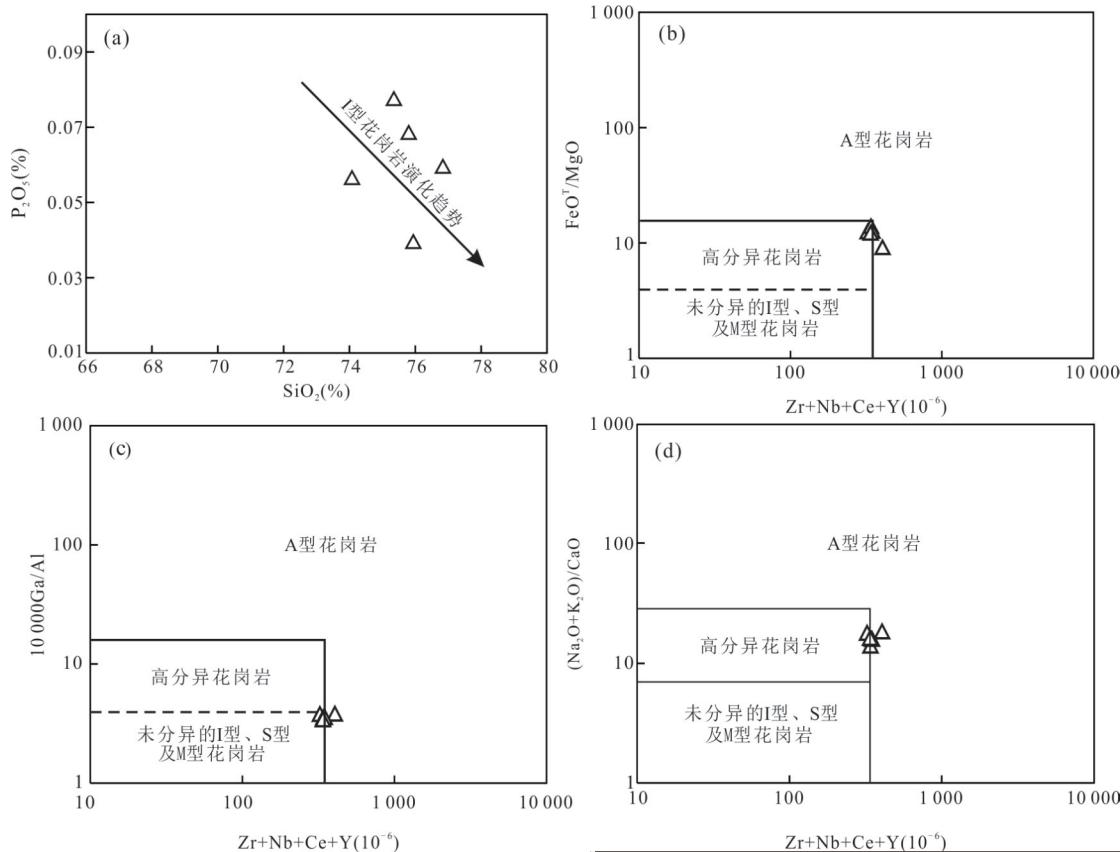
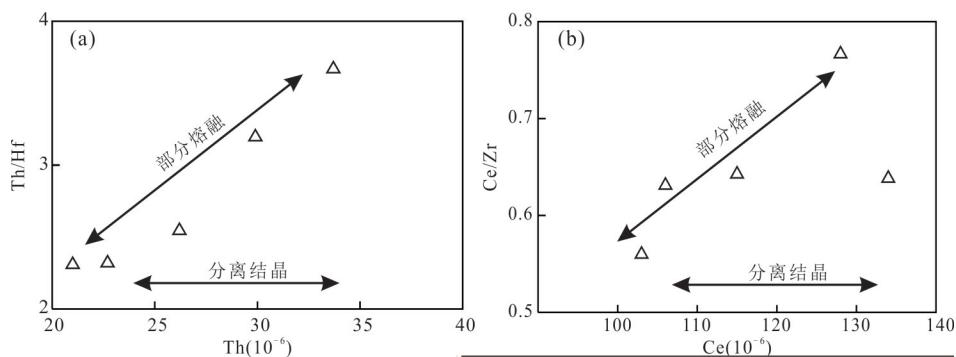
图 7 小乌兰沟正长花岗岩成因类型判别图解 (b, c, d 据 Whalen *et al.*, 1987)Fig.7 Discrimination diagrams for the syenogranite from the Xiaowulangou area (b, c, d after Whalen *et al.*, 1987)

图 8 小乌兰沟正长花岗岩 Th/Hf-Th(a) 和 Ce/Zr-Ce(b) 图解

Fig.8 Th/Hf-Th (a) and Ce/Zr-Ce (b) diagrams for Xiaowulangou syenogranite

们认为锡林郭勒杂岩变基性岩与中奥陶统包尔汉图群变中性岩可能共同为小乌兰沟正长花岗岩源岩, 为部分熔融的初始端元。Watson and Harrison (1983)认为, 锆石的饱和度对熔体温度和成分可定量表示, 即  $T_x(\text{°C}) = \{12900/[InDzr(\text{熔体}) + 0.85M + 2.95]\} - 273$ , 其中  $M = (\text{Na} + \text{K} + 2\text{Ca}) / (\text{Si} \times \text{Al})$ , 经计算, 小乌兰沟正长花岗岩锆石饱和温度介于 796~812 °C 之间, 指示源区原始岩浆或原始侵位岩浆的温度最低为 800 °C 左右。据 Palin *et al.*

(2016) 研究, 当温度达到 850 °C 时, 变基性岩在 5 kbar 下(相对低压)可产生 20% 的熔体, 残留相为斜长石 30%、单斜辉石 20%、斜方辉石 5%、角闪石 45%; 在 10 kbar 下(相对高压)可产生 10% 的熔体, 残留相为斜长石 17%、单斜辉石 17%、角闪石 59%、石英 7%。而变中性岩在 5 kbar 下(相对低压)可产生 40% 熔体, 伴有斜长石 70%、斜方辉石 25%、单斜辉石 5%; 在 10 kbar 下(相对高压)可产生 20% 熔体, 伴有斜长石 32%、角闪石 33%、钾长石 8%、石榴

子石9%、石英18%，经计算：

$$D_i = \sum_{j=1}^n W_{t_j} \times D_i^j, \quad (1)$$

其中： $D_i$ 为微量元素总分配系数； $W_{t_j}$ 为残留相各矿物重量百分比， $D_i^j$ 为残留相各矿物与熔体间分配系数(Bedard, 2006)。

$$C_L/C_0 = 1/(D_i(1-F) + F), \quad (2)$$

其中： $C_L/C_0$ 为微量元素含量相对于源岩的初始含量的比值； $D_i$ 为微量元素总分配系数； $F$ 为部分熔融程度。

经批式熔融模型微量元素计算结果显示(图9a~9d)，熔体稀土元素含量除变中性岩在低压条件下高于小乌兰沟正长花岗岩外，其余均偏低。小乌兰沟正长花岗岩具高硅、富碱特征，且亏损Nb、Ta、P、Ti、Ba、Sr、Eu等元素，Sr/Y比值也较低，介于0.50~0.58之间，指示源区为壳源，且结晶深度较浅。因此，结合计算结果，小乌兰沟正长花岗岩更可能为低压条件下部分熔融所致。考虑到在低压条件下，变中性岩部分熔融稀土元素含量高于小乌兰沟

正长花岗岩，而变基性岩部分熔融稀土元素含量低于小乌兰沟正长花岗岩，因此，小乌兰沟正长花岗岩更可能为变基性岩、变中性岩在低压条件下共同发生部分熔融作用所形成。

### 5.3 构造背景

前人研究表明，中生代以来，东北亚地区主要经历了古亚洲洋闭合后的伸展作用以及蒙古—鄂霍茨克构造域和古太平洋构造域的双重影响(许文良等, 2013)。关于古亚洲洋闭合后的伸展，大多数学者认为其主要表现为西拉木伦河一带发育的早一中三叠世花岗岩及相关火山岩，形成时代为250~200 Ma，而本文所研究的小乌兰沟正长花岗岩形成时代为早白垩世(139.4±0.7 Ma)，因此，该岩体不可能为古亚洲洋闭合后伸展作用的产物。至于古太平洋构造域影响范围，前人研究表明，其影响域主要位于朝鲜半岛—松辽盆地以东，并在晚白垩世随着古太平洋板块后撤向东迁移(Wang et al., 2015)，而小乌兰沟正长花岗岩位于松辽盆地以西，

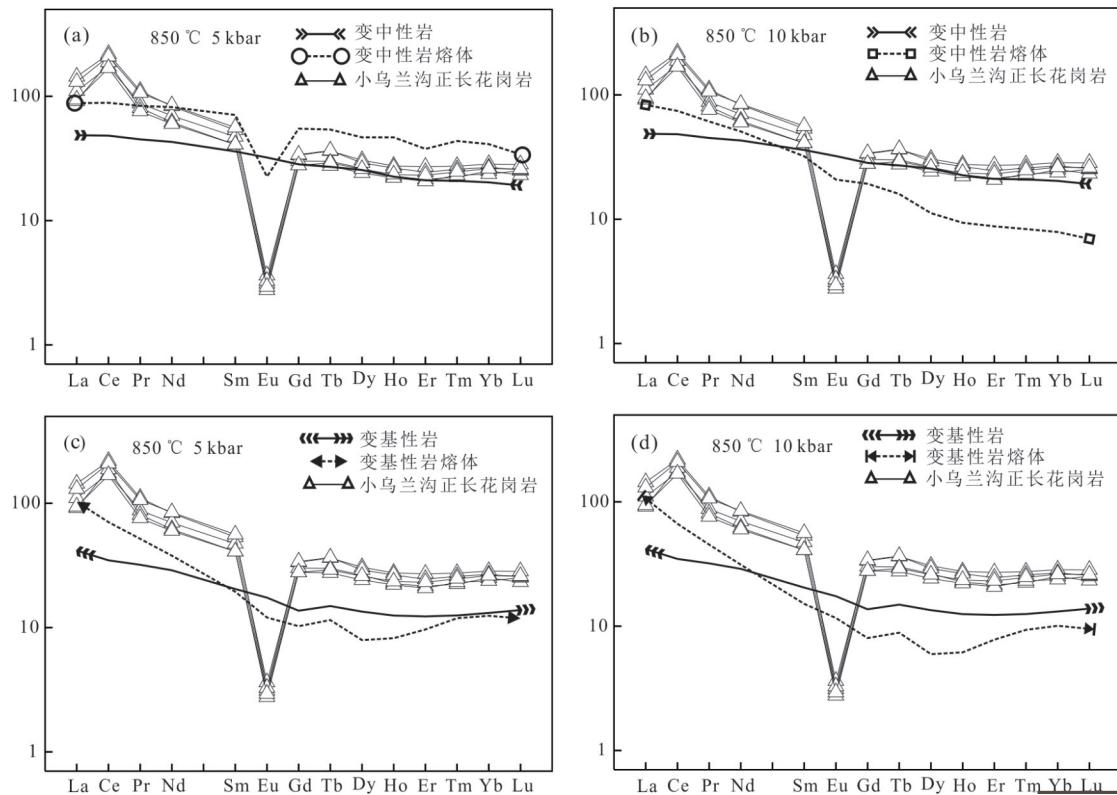


图9 小乌兰沟正长花岗岩基于批式熔融模型的稀土元素模拟

Fig.9 REE modelling based on batch melting model for the Xiaowulangou syenogranite

a. 变中性岩低压部分熔融过程(5 kbar); b. 变中性岩高压部分熔融过程(10 kbar); c. 变基性岩低压部分熔融过程(5 kbar); d. 变基性岩高压部分熔融过程(10 kbar); 标准化值据 Boynton(1984); 初始成分为包尔汉图群变中性岩(中国地质大学地质调查研究院, 2012. 锡林浩特幅、种蓄场桃林塔拉分场幅、锡林浩特炼铜厂幅、巴音胡硕分场幅区域地质调查)、锡林郭勒杂岩变基性岩(内蒙古自治区地质调查院, 2018. 内蒙古自治区锡林郭勒盟锡林浩特等4幅1:5万区域矿产地质调查)

且所处的构造岩浆岩带与古太平洋俯冲方向呈较大角度斜交,表明小乌兰沟正长花岗岩所处区域受古太平洋构造域影响较小。

蒙古—鄂霍茨克缝合带位于中亚造山带东段北西,随着额尔古纳地块早中生代北东向岩浆弧的识别(Tang *et al.*, 2016),学者们开始关注蒙古—鄂霍茨克洋南向俯冲的构造演化。Xu *et al.*(2013)在额尔古纳一根河地区识别了一套具活动陆缘的早侏罗世玄武岩—玄武安山岩钙碱性火山岩组合;王伟等(2012)获得满洲里地区与乌奴格吐山斑岩型铜钼矿床相关的早侏罗世花岗岩,形成时代为183~180 Ma,李强等(2021)在大兴安岭北段额尔古纳地块上识别出一套与俯冲相关的早—中三叠世钙碱性安山岩,指示蒙古—鄂霍茨克洋在早—中三叠世时期就已经存在俯冲作用,直至早侏罗世仍在进行。中—晚侏罗世时期,蒙古—鄂霍茨克洋开始自西向东呈剪刀式闭合,在黑河—孙吴地区、满洲里—额尔古纳地区及冀北—辽西地区均有岩浆作用响应。在黑河—孙吴地区发现的白云母花岗岩,形成时代为168±2 Ma(许文良, 2013);在满洲里—额尔古纳地区,发现有碱性—亚碱性过渡属性的塔木兰沟玄武岩—粗安岩—粗面岩火山岩组合;在冀北—辽西地区,发现自北向南逆冲推覆构造,时限为158~155 Ma(Zhang *et al.*, 2008),以上研究表明蒙古—鄂霍茨克洋在其闭合的过程中发生有自北向南的地壳加厚。

进入早白垩世时期,蒙古—鄂霍茨克洋南东侧,沿大兴安岭北东向火山—沉积盆地产出一套双峰式火山岩组合,包括流纹岩、玄武安山岩等,形成时代介于144~137 Ma(王建国, 2013; 薛晓刚等, 2018; 蒋孝君, 2021),与此同时,在北大山(140 Ma)、维拉斯托(138~137 Ma)、五十家子(150.3~137.1 Ma)、小乌兰沟(139.4 Ma)等地相继发现有同期中酸性侵入岩,成因类型表现为高分异I型及A<sub>2</sub>型花岗岩。研究表明,A<sub>2</sub>型和高分异I型花岗岩岩石组合往往代表区域构造应力由挤压向拉张的转换,是构造环境变迁的重要岩石学标志(Li *et al.*, 2007),而双峰式火山岩也代表了伸展构造背景。因此,大兴安岭地区在蒙古—鄂霍茨克洋的影响下,在早白垩世期间构造体制已逐步转变为伸展构造环境。

综上所述,大兴安岭地区在早白垩世(144~137 Ma)集中爆发有一期岩浆活动,主要包括有双

峰式火山岩、A<sub>2</sub>型花岗岩及高分异I型花岗岩,代表了一套相对高温、伸展背景的岩石组合,为蒙古—鄂霍茨克洋南向俯冲、后碰撞伸展环境的产物。期间,大兴安岭地区发生岩石圈减薄、软流圈上涌,幔源物质以底侵方式进入下地壳,导致上元古界变基性岩与中奥陶统变中性岩在相对高温、低压条件下发生部分熔融,随后快速上侵至浅部地壳或喷出地表,形成NE-SW向双峰式火山岩及白音查干东山、五十家子A<sub>2</sub>型花岗岩和以及北大山、维拉斯托、小乌兰沟等高分异I型花岗岩。

## 6 结论

(1) 小乌兰沟正长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 139.4±0.7 Ma, 形成时代为早白垩世。

(2) 小乌兰沟正长花岗岩为高钾钙碱性系列弱过铝质岩石,属高分异I型花岗岩,为上元古界变基性岩与中奥陶统变中性岩在低压、高温条件下发生部分熔融所形成。

(3) 小乌兰沟正长花岗岩的形成主要受控于蒙古—鄂霍茨克洋闭合后的伸展作用。

致谢:在成文过程中感谢中国地质科学院矿产资源研究所白玉岭博士、李英雷博士、王倩博士以及审稿专家对本文提出的宝贵意见。此外,在野外考察和样品采集中得到了内蒙古自治区地质调查院锡林浩特矿调项目组的大力支持,在样品测制过程中,得到了内蒙古自治区岩浆作用与成矿重点实验室、内蒙古自治区矿产实验研究所、北京锆年领航科技有限公司及中国地质科学院矿产资源研究所自然资源成矿作用与资源评价重点实验室的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

附表见本刊官网([www.earth-science.net](http://www.earth-science.net))。

## References

- Boynton, W. V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. *Rare Earth Element Geochemistry*, 63—114.
- Beard, J. S., Lofgren, G. E., 1991. Dehydration Melting and Water-Saturated Melting of Basaltic and Andesitic Greenstones and Amphibolites at 1, 3, and 6.9 Kb. *Journal of Petrology*, 32(2): 365—401. <https://doi.org/10.1093/petrology/32.2.365>
- Bedard, J. H., 2006. A Catalytic Delamination-Driven Model for Coupled Genesis of Archaean Crust and Sub-Continental Lithospheric Mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): 4753—4772.

- ca Acta*, 70(5): 1188–1214. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.11.008>
- Clemens, J. D., Stevens, G., Farina, F., 2011. The Enigmatic Sources of I-Type Granites: The Peritectic Connexion. *Lithos*, 126(3/4): 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.004>
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Ge, W.C., Lin, Q., Sun, D.Y., et al., 2000. Geochemical Research into Origins of Two Types of Mesozoic Rhyolites in DaXing'AnLing. *Earth Science*, 25(2): 172–178 (in Chinese with English abstract).
- Hou, K.J., Li, Y.H., Zhou, T.R., et al., 2007. Laser Ablation-MC-ICP-MS Technique for Hf Isotope Microanalysis of Zircon and Its Geological Applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595–2604(in Chinese with English abstract).
- Hou, K.J., Li, Y.H., Tian, Y.R., 2009. In Situ U-Pb Zircon Dating Using Laser Ablation-Multi Ion Counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481–492(in Chinese with English abstract).
- Jiang, X.J., Peng, Y.B., Dong, X.J., et al., 2021. The Remote Role of Mongolia-Okhotsk Ocean: Evidences from the Origin of Rhyolite Porphyry in Yangpangou Area, the Southeast of Inner Mongolia. *Earth Science*, 46(9): 3057–3073 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.Y., Qian, Y., Tekoumc, L., et al., 2021. Petrogenesis of Jurassic Granitoids on Liaodong Peninsula, Northeast China: Constraints on the Evolution of the Mongol-Okhotsk and Pacific Tectonic Regimes. *Journal of Earth Science*, 32(1): 127–143. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1372-0>
- Li, Q., Cheng, X.Q., Chen, W., et al., 2021. Discovery of the Early-Middle andesite in the Erguna Massif and Its Indication of the Southward Subduction of the Mongol-BOkhotsk Ocean Plate. *Earth Science*, 46(8): 2768–2785 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.H., Li, Z.X., Li, W.X., et al., 2007. U-Pb Zircon, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on Age and Origin of Jurassic I- and A-Type Granites from Central Guangdong, SE China: A major Igneous Event in Response to Foundering of a Subducted Flat-Slab? *Lithos*, 96(1–2): 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.09.018>
- Li, Y. L., Wu, G., Zhao, S. J., et al., 2021. Large-Scale Late Triassic to Early Jurassic High  $\epsilon_{\text{Hf}}(T)$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$  Felsic Rocks in the Ergun Massif (NE China): Implications for Southward Subduction of the Mongol-Okhotsk Oceanic Slab and Lateral Crustal Growth. *International Journal of Earth Sciences*, 110(2): 539–558. <https://doi.org/10.1007/s00531-020-01969-8>
- Liu, X., Li, X.G., Zhu, X.Y., et al., 2017. Mineralization Process of the Baiyinchagan Tin Polymetallic Deposit in Inner Mongolia II : Chronology of Ore-bearing Porphyry, Geochemical Characteristics and Geological Implications of the Granite Porphyry. *Mineral Exploration*, 8 (6): 981–996(in Chinese with English abstract).
- Maniar, M. L., Kalonia, D. S., Simonelli, A. P., 1989. Use of Liquid Chromatography and Mass Spectroscopy to Select an Oligomer Representative of Polyester Hydrolysis Pathways. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 78(10): 858–862. <https://doi.org/10.1002/jps.2600781016>
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Palin, R. M., White, R. W., Green, E. C. R., et al., 2016. High-Grade Metamorphism and Partial Melting of Basic and Intermediate Rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(9): 871–892. <https://doi.org/10.1111/jmg.12212>
- Peng, B., Li, B.L., Qin, G.Z., et al., 2019. Petrogenesis of the Quartz Diorite in the Yanhu Area of Lhasa Terrane, Tibet: Constraints from Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes. *Acta Geologica Sinica*, 93(3): 606–621(in Chinese with English abstract).
- Qin, J.S., Xiao, E., Hu, J., et al., 2008. Petrogenesis of Highly Fractionated I-Type Granites in the Coastal Area of Northeastern Fujian Province: Constraints from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (11) :2468–2484(in Chinese with English abstract).
- Rushmer, T., 1991. Partial Melting of Two Amphibolites: Contrasting Experimental Results under Fluid - Absent Conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(1): 41–59. <https://doi.org/10.1007/bf00311184>
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8–32 Kbar: Implications for Continental Growth and Crust: a Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- Richards, J. P., 2011. Magmatic to Hydrothermal Metal Fluxes in Convergent and Collided Margins. *Ore Geolo-*

- gy Reviews, 40(1): 1—26. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.05.006>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sui, Z. M., Chen, Y. J., 2011. Zircon Saturation Temperatures of Granites in Eastern Great Xing'an Range, and Its Geological Signification. *Global Geology*, 30(2): 162—172(in Chinese with English abstract).
- Tang, J., Xu, W. L., Wang, F., et al., 2016. Early Mesozoic Southward Subduction History of the Mongol-Okhotsk Oceanic Plate: Evidence from Geochronology and Geochemistry of Early Mesozoic Intrusive Rocks in the Erguna Massif, NE China. *Gondwana Research*, 31(5): 218—240. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.12.010>
- Watson, E. B., Harrison, T. M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295—304. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(83\)90211-x](https://doi.org/10.1016/0012-821x(83)90211-x)
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407—419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- Wolf, M. B., London, D., 1994. Apatite Dissolution into Peraluminous Haplogranitic Melts: An Experimental Study of Solubilities and Mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(19): 4127—4145. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90269-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90269-0)
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Ge, W. C., et al., 2011. Geochronology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1—30. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.11.014>
- Wang, W., Xu, W. L., Wang, F., et al., 2012. Zircon U-Pb Chronology and Assemblages of Mesozoic Granitoids in the Manzhouli-Erguna Area, NE China: Constraints on the Regional Tectonic Evolution. *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 88—105(in Chinese with English abstract).
- Wang, J. G., He, Z. H., Xu, W. L., 2013. Petrogenesis of Riebeckite Rhyolites in the Southern DaHinggan Mts: Geohronological and Geochemical Evidence. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 853—863(in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Guo, L., Zhang, L., et al., 2015. Timing and Evolution of Jurassic-Cretaceous Granitoid Magmatism in the Mongol-Okhotsk Belt and Adjacent Areas, NE Asia: Implications for Transition from Contractional Crustal Thickening to Extensional Thinning and Geodynamic Settings. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97(1): 365—392. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.10.005>
- Wu, G., Liu, R. L., Chen, G. Z., et al., 2021. Mineralization of the Weilasituo Rare Metal-Tin-Polymetallic Ore Deposit in Inner Mongolia: Insights from Fractional Crystallization of Granitic Magmas. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 637—664(in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Chen, B., Shao, J. A., 1996. Sm-Nd and Rb-Sr Isotopic Geochronology of the Xilin Gol. Complex, Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 41(2): 153—155(in Chinese).
- Xu, W. L., Pei, F. P., Wang, F., et al., 2013. Spatial-Temporal Relationships of Mesozoic Volcanic Rocks in NE China: Constraints on Tectonic Overprinting and Transformations between Multiple Tectonic Regimes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74(25): 167—193. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.04.003>
- Xu, W. L., Wang, F., Pei, F. P., et al., 2013. Mesozoic Tectonic Regimes and Regional Ore-Forming Background in NE China: Constraints from Spatial and Temporal Variations of Mesozoic Volcanic Rock Associations. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 339—353(in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Sun, C. Y., Tang, J., et al., 2019. Basement Nature and Tectonic Evolution of the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt. *Earth Science*, 44(5): 1620—1646(in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Sun, S., et al., 2015. A Tale of Amalgamation of Three Permo-Triassic Collage Systems in Central Asia: Oroclines, Sutures, and Terminal Aceretion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1): 477—507. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105254>
- Xue, X. G., Zhou, C. H., Zhang, X. B., et al., 2018. Zircon U-Pb Dating and Geochemical Characteristics of Volcanic Rocks in the Meiletu Formation of Eastern Xilin Gol League, Inner Mongolia and Their Geological Implications. *Geology and Exploration*, 54(5): 0957—0967(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. H., Ge, W. C., Wu, F. Y., et al., 2008. Large-Scale Early Cretaceous Volcanic Events in the Northern Great Xing'an Range, Northeastern China. *Lithos*, 102(1/2): 138—157. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.08.011>
- Zhang, T. F., Guo, S., Xin, H. T., et al., 2019. Petrogene-

sis and Magmatic Evolution of Highly Fractionated Granite and Their Constraints on Sn-(Li-Rb-Nb-Ta) Mineralization in the Weilasituo Deposit, Inner Mongolia, Southern Great Xing'an Range, China. *Earth Science*, 44(1): 248—267(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 葛文春, 林强, 孙德有, 等, 2000. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究. 地球科学, 25(2): 172—178.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等, 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报, 23(10): 2595—2604.
- 侯可军, 李延河, 田有荣, 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质, 28(4): 481—492.
- 蒋孝君, 彭云彪, 董晓杰, 等, 2021. 蒙古—鄂霍次克洋的远程作用: 来自内蒙古东南部羊盘沟地区流纹斑岩成因的证据. 地球科学, 46(9): 3057—3073.
- 刘新, 李学刚, 祝新友, 等, 2017. 内蒙古白音查干锡多金属矿床成矿作用研究Ⅱ: 成矿花岗斑岩年代学、地球化学特征及地质意义. 矿产勘查, 8(6): 981—996.
- 李强, 程学芹, 陈伟, 等, 2021. 额尔古纳地块早一中三叠世安山岩的发现及其对蒙古—鄂霍茨克洋南向俯冲的指示. 地球科学, 46(8): 2768—2785.
- 彭勃, 李宝龙, 秦广洲, 等, 2019. 西藏拉萨地块盐湖石英闪长岩成因: 锆石 SHRIMP U-Pb 年代学、地球化学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素的制约. 地质学报, 93(3): 606—621.
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 等, 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报, 24(11): 2468—2484.
- 随振民, 陈跃军, 2011. 大兴安岭东部花岗岩类锆石饱和温度及其地质意义. 世界地质, 30(2): 162—172.
- 武广, 刘瑞麟, 陈公正, 等, 2021. 内蒙古维拉斯托稀有金属—锡多金属矿床的成矿作用: 来自花岗质岩浆结晶分异的启示. 岩石学报, 37(3): 637—664.
- 王伟, 许文良, 王枫, 等, 2012. 满洲里—额尔古纳地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年代学与岩石组合: 对区域构造演化的制约. 高校地质学报, 18(1): 88—105.
- 王建国, 和钟铧, 许文良, 2013. 大兴安岭南部钠闪石流纹岩的岩石成因: 年代学和地球化学证据. 岩石学报, 29(3): 853—863.
- 徐备, 陈斌, 邵济安, 1996. 内蒙古锡林郭勒杂岩 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素年代研究. 科学通报, 41(2): 153—155.
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 等, 2013. 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. 岩石学报, 29(2): 339—353.
- 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. 地球科学, 44(5): 1620—1646.
- 薛晓刚, 周长红, 张学斌, 等, 2018. 内蒙古锡林郭勒盟东部梅勒图组火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义. 地质与勘探, 54(5): 957—967.
- 张天福, 郭硕, 辛后田, 等, 2019. 大兴安岭南段维拉斯托高分异花岗岩体的成因与演化及其对 Sn-(Li-Rb-Nb-Ta) 多金属成矿作用的制约. 地球科学, 44(1): 248—267.