

doi: 10.12029/gc20200706001

魏巍, 黄行凯, 徐巧, 蒋斌斌, 刘孜, 祝新友, 巫锡勇. 2024. 大兴安岭中南段哈力黑坝岩体的年代学、地球化学及其构造拆沉作用[J]. 中国地质, 51(3): 978–994.

Wei Wei, Huang Xingkai, Xu Qiao, Jiang Binbin, Liu Zi, Zhu Xinyou, Wu Xiyong. 2024. Geochronology and geochemistry of Haliheiba pluton in the central and southern Great Hinggan Range and its tectonic delamination[J]. *Geology in China*, 51(3): 978–994(in Chinese with English abstract).

大兴安岭中南段哈力黑坝岩体的年代学、地球化学及其构造拆沉作用

魏巍^{1,2}, 黄行凯³, 徐巧⁴, 蒋斌斌⁵, 刘孜⁶, 祝新友⁵, 巫锡勇²

(1. 西南交通大学, 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学, 地球科学与工程学院, 四川 成都 611756; 3. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭 364200; 4. 北京绿勘科技有限责任公司, 北京 101100; 5. 中色紫金地质勘查(北京)有限责任公司, 北京 100012; 6. 北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京 100012)

摘要:【研究目的】在区域地质调查基础上, 本文探讨了大兴安岭中南段哈力黑坝岩体早白垩世花岗岩成岩年代、岩石成因类型、源区性质及地球动力学背景。【研究方法】本文基于显微镜、XRF 和 (LA-)ICP-MS 等手段对哈力黑坝岩体早白垩世花岗岩进行了岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素组成研究。【研究结果】哈力黑坝早白垩世花岗岩主要包括中细粒黑云母花岗岩和细粒斑状黑云母花岗岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果分别为 (139.1±0.7)Ma 和 (138.4±1.0)Ma。岩石主量元素具有高硅 (74.09%~77.19%)、富碱 (7.92%~8.46%), 低 CaO (0.35%~1.14%) 和低 MgO (0.15%~0.47%) 的特征, 属高钾钙碱性系列; 其 A/CNK 值介于 0.95~1.08, 为准铝质—弱过铝质岩石。岩石相对富集轻稀土元素, $(La/Yb)_N=3.69\sim 13.17$, 稀土配分模式图呈右倾海鸥型, 具有较为明显的负铕异常 ($\delta Eu = 0.11\sim 0.47$)。岩石微量元素组成显示岩石富集 Rb、U、Th、Zr、Hf 等元素, 强烈亏损 Sr、Ba、Ti、P 等元素。岩石具有高正的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 (+5.0~+11.2) 和年轻的二阶段 Hf 模式年龄 (408~731 Ma)。【结论】哈力黑坝岩体早白垩世花岗岩为铝质 A 型花岗岩, 其源区主要为年轻地壳物质, 并有老地壳物质的贡献, 形成于伸展的大地构造背景, 受控于岩石圈拆沉减薄过程。

关键词: 锆石 U-Pb 年代学; 早白垩世花岗岩; Hf 同位素; 哈力黑坝; 大兴安岭中南段; 地质调查工程

创新点: (1) 哈力黑坝花岗岩为早白垩世铝质 A 型花岗岩, 主要来源于年轻地壳物质的部分熔融; (2) 哈力黑坝花岗岩形成于伸展构造背景, 受到岩石圈拆沉减薄过程的控制。

中图分类号: P597.3; P588.121 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)03-0978-17

Geochronology and geochemistry of Haliheiba pluton in the central and southern Great Hinggan Range and its tectonic delamination

WEI Wei^{1,2}, HUANG Xingkai³, XU Qiao⁴, JIANG Binbin⁵, LIU Zi⁶, ZHU Xinyou⁵, WU Xiyong²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. Zijin Mining Group Co. Ltd., Shanghang 364200, Fujian, China; 4. Beijing Eco-friendly Exploration Technology Co. Ltd., Beijing 101100, China; 5. Sino-Zijin Resources, Beijing 100012, China; 6. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources Co. Ltd., Beijing 100012, China)

收稿日期: 2020-07-06; 改回日期: 2020-08-27

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160072)资助。

作者简介: 魏巍, 男, 1993 年生, 博士, 从事矿产资源预测评价; E-mail: lamborww0801@sina.com。

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] The diagenetic age, petrogenetic types, source properties and geodynamic background of the Early Cretaceous granites of Haliheba pluton in the central and southern part of Great Hinggan Range are discussed based on the regional geological survey.

[Methods] The lithography of granite, U–Pb chronology, geochemistry and Hf isotope composition of zircon are studied by means of microscope, XRF and (LA–) ICP–MS. **[Results]** The Early Cretaceous granites in Haliheba are composed of fine to medium–grained biotite granite and fine–grained porphyritic biotite granite, and zircon U–Pb ages are (139.1 ± 0.7) Ma and (138.4 ± 1.0) Ma, respectively. The granites are characterized by high SiO_2 (74.09%–77.19%) and alkali enrichment (7.92%–8.46%), and belong to high–K calc–alkaline series. The A/CNK values range from 0.95 to 1.08, indicating that they are metaluminous to weakly peraluminous rocks. The chondrite–normalized REE patterns are characterized by enrichment of LREEs with $(\text{La}/\text{Yb})_N$ values varying from 3.69 to 13.17 and by prominent negative Eu anomalies with δEu values ranging from 0.11 to 0.47. The granites show the enrichment of Rb, U, Th, Nb, Ta, Zr and Hf, and the depletion of Sr, Ba, Ti and P. Zircon Hf isotopic compositions suggest that these granites have high positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (+5.0 – +11.2) and fairly young two–stage Hf model ages (408–731 Ma).

[Conclusions] The Haliheba granites are aluminous A–type granites, which were mainly derived from partial melting of the juvenile crustal materials associated with ancient crustal materials under extensional tectonic setting that was probably controlled by lithospheric delamination and thinning.

Key words: zircon U–Pb chronology; Early Cretaceous granite; Hf isotope; Haliheba; central and southern Great Hinggan Range; geological survey engineering

Highlights: (1) The Haliheba granites belong to Early Cretaceous aluminium A–type granites, which are mainly derived from partial melting of juvenile crustal materials; (2) The Haliheba granite was formed in extensional tectonic setting that was controlled by lithospheric delamination and thinning.

About the first author: WEI Wei, male, born in 1993, doctor, engaged in prediction and assessment of mineral resources; E–mail: lamborww0801@sina.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20160072).

1 引言

大兴安岭地区在大地构造位置上位于中亚造山带东部,处于古亚洲洋构造域与滨西太平洋构造域的叠加部位。该区经历了长期复杂的构造演化事件:(1)太古宙—古元古代结晶基底的形成(Sengör et al., 1993; 苏茂荣等, 2020);(2)新元古代—晚二叠世古亚洲洋的复杂闭合(Xiao et al., 2003);(3)三叠纪—早侏罗世华北板块与西伯利亚板块的碰撞造山(Wu et al., 2004; 李锦轶等, 2007);(4)中侏罗世开始古太平洋板块的俯冲(吴福元和孙德有, 1999; 吴福元等, 2000; Wu et al., 2000);(5)晚侏罗世—早白垩世古太平洋板块俯冲背景下的地壳伸展(Wilde, 2015; Wilde and Zhou, 2015; Liu et al., 2016)。长期的构造演化伴随着大量花岗质岩浆的侵位和喷发,尤其是形成了以 NE 向展布为特征的中生代构造—岩浆活动带,同时伴随着锡铅锌银的成矿大爆发,成为中国乃至世界上重要的多金属成矿带,引起了学者们的广泛关注。

近年来,随着区域地质调查工作的开展,学者

们在大兴安岭中南段地区识别出一系列早白垩世花岗质岩石,获得大量年龄及地球化学数据,在岩浆演化、物质来源等方面取得了重大进展,并对其形成于伸展的大地构造背景达成共识(江思宏等, 2011a; Wu et al., 2011; 杨奇荻等, 2014; 李剑锋等, 2016)。前人通过 Sr–Nd 同位素对岩浆源区性质进行制约,认为大兴安岭地区花岗岩主要来源于年轻地壳物质的部分熔融,记录了显生宙重要的大陆地壳生长事件(吴福元等, 1997; 洪大卫等, 2000),而这一认识可进一步通过 Hf 同位素进行佐证。哈力黑坝岩体是大兴安岭中南段地区重要的花岗岩岩基之一,与白音诺尔大型铅锌银矿床相邻,但目前研究相对较少。前人对该岩体中的黑云母正长花岗岩开展了年代学和地球化学特征方面的初步研究(江思宏等, 2011b),但该岩体的岩石成因、源区特征及地球动力学背景等方面还需进一步研究。据此,本文通过对哈力黑坝岩体早白垩世花岗岩开展岩相学、锆石 U–Pb 年代学、地球化学以及 Hf 同位素特征研究,讨论其成岩时代、成因类型、源区性

质及地球动力学意义,旨在为大兴安岭中南段地区晚中生代构造-岩浆演化提供新的认识。

2 地质概况

大兴安岭中南段在大地构造位置上属中亚造山带东部,夹持于二连—贺根山断裂与西拉沐沦断裂之间(Wilde, 2015)(图 1a)。区内主要出露古生界、中生界及第四系。古生界主要为一套二叠系变

质细碎屑岩夹少量火山碎屑岩组合,包括寿山沟组、大石寨组、哲斯组和林西组。中生界为一套晚中生代火山碎屑岩组合夹少量陆相碎屑沉积岩、火山熔岩,包括满克头鄂博组、玛尼吐组和白音高老组,这套中生代火山岩在大兴安岭地区极其发育,被认为形成于晚侏罗世—早白垩世(杜洋等, 2017; 刘晨等, 2017; 何鹏等, 2022)。区内岩浆活动非常强烈,以中生代发育的一系列特征相异的花岗质侵

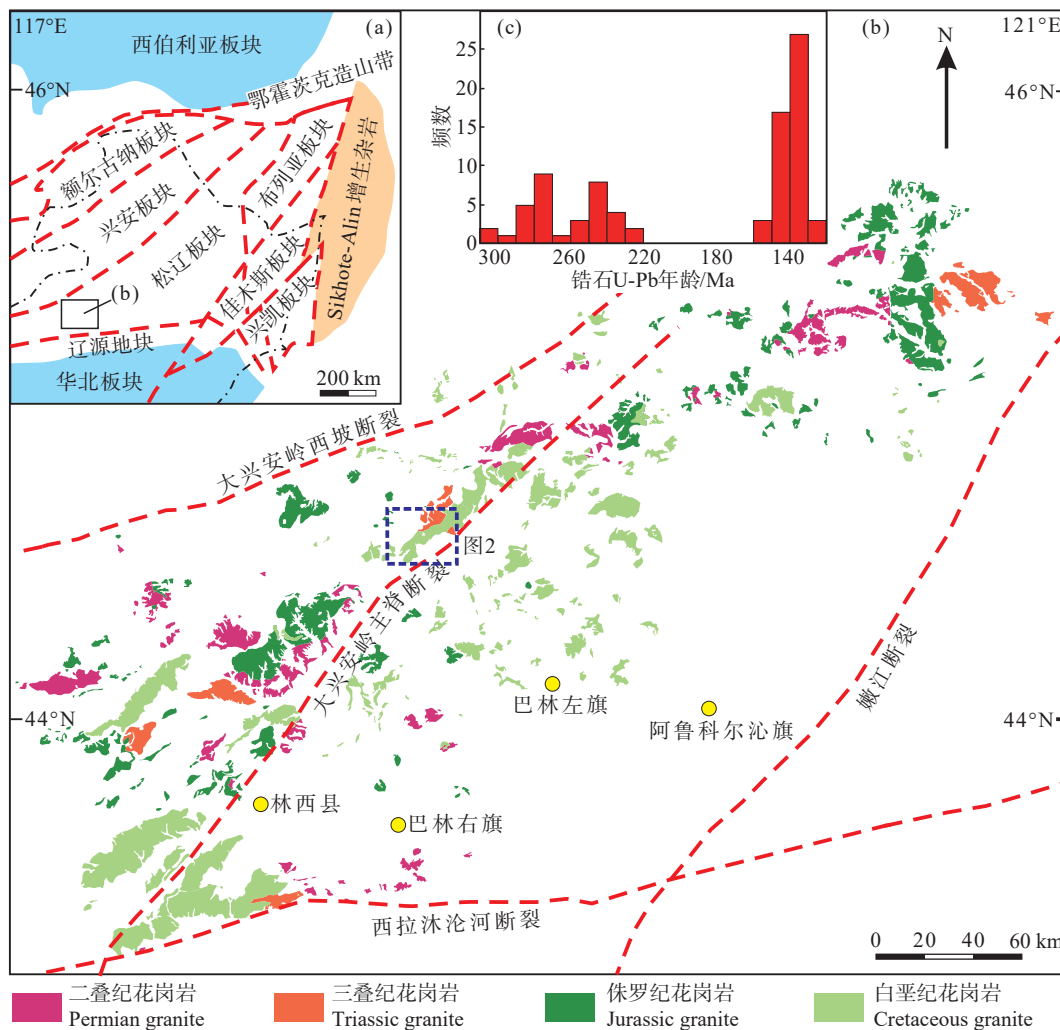


图 1 中亚造山带东部大地构造简图(a, 底图据 Zhou and Wilde, 2013 修改)、大兴安岭中南段花岗岩分布图(b)和大兴安岭中南段花岗岩锆石 U-Pb 年龄分布直方图(c)

花岗岩年龄资料来源于 Liu et al., 2005; 葛文春等, 2005; 刘伟等, 2007; 马星华等, 2009; 江思宏等, 2012; 王兴安等, 2012; Zhou et al., 2012; Li et al., 2013; 施璐等, 2013; 田德欣等, 2013; 杨奇荻等, 2014; 万乐, 2015; Zeng et al., 2015; 李剑锋等, 2016; 祝新友等, 2016

Fig.1 Tectonic sketch map of eastern Central Asian Orogenic Belt (a, modified from Zhou and Wilde, 2013), distribution map of granites from the central and southern Great Hinggan Range (b) and histogram of zircon U-Pb ages of granites from central and southern Great Hinggan Range (c)

Granites age data from Liu et al., 2005; Ge Wenchun et al., 2005; Liu Wei et al., 2007; Ma Xinghua et al., 2009; Jiang Sihong et al., 2012; Wang Xing'an et al., 2012; Zhou et al., 2012; Li et al., 2013; Shi Lu et al., 2013; Tian Dexin et al., 2013; Yang Qidi et al., 2014; Wan Le, 2015; Zeng et al., 2015; Li Jianfeng et al., 2016; Zhu Xinyou et al., 2016

入岩和大面积分布的火山岩为代表(邵济安等, 1999, 2005)(图 1b)。大兴安岭中南段中生代主要发育两期岩浆侵入活动, 分别为三叠纪(230~250 Ma)和晚侏罗世—早白垩世(120~150 Ma)(Wu et al., 2011)(图 1c)。

哈力黑坝岩体位于内蒙古赤峰北部巴林左旗境内白音诺铅锌矿北部约 2 km 处, 呈岩基产出, 走向 30°~40°, 出露面积约 150 km²。该区出露地层主要为中二叠统哲斯组和晚侏罗—早白垩世满克头鄂博组火山岩(图 2), 哲斯组为一套变质砂岩、粉砂岩和大理岩, 晚侏罗—早白垩世满克头鄂博组火山岩主要由凝灰岩和火山角砾岩组成。哈力黑坝岩体为一复式岩体, 主要由中细粒黑云母花岗岩、细粒斑状黑云母花岗岩和花岗闪长岩组成。

3 样品特征及分析方法

本文中细粒黑云母花岗岩(CXPC3; 118°45'36"E,

44°31'12"N)和细粒斑状黑云母花岗岩(CXPC7; 118°44'35"E, 44°31'56"N)均采集于野外新鲜露头。中细粒黑云母花岗岩, 主要分布于哈力黑坝岩体中北部, 发育大量的暗色包体(图 3a), 显示出岩浆混合的特征(魏巍等, 2017)。中细粒黑云母花岗岩主要由石英(35%)、碱性长石(45%)、黑云母(10%)和斜长石(5%)组成(图 3b)。细粒斑状黑云母花岗岩呈似斑状结构, 斑晶主要由石英(15%)和碱性长石(10%)组成; 基质为细粒花岗结构, 主要由石英(20%)、碱性长石(35%)、斜长石(10%)和黑云母(5%)组成(图 3c、d)。两类花岗岩的副矿物主要为磁铁矿、磷灰石和独居石, 且碱性长石多为条纹长石(图 3b)。碱性长石蚀变较弱, 斜长石多已发生绢英岩化呈交代假象结构, 黑云母多发生绿泥石化和白云母化(图 3b、d)。

样品主微量元素的分析测试在核工业北京地质研究院完成, 主量元素分析采用 X-荧光光谱仪(XRF), 微量元素分析采用电感耦合等离子质谱仪

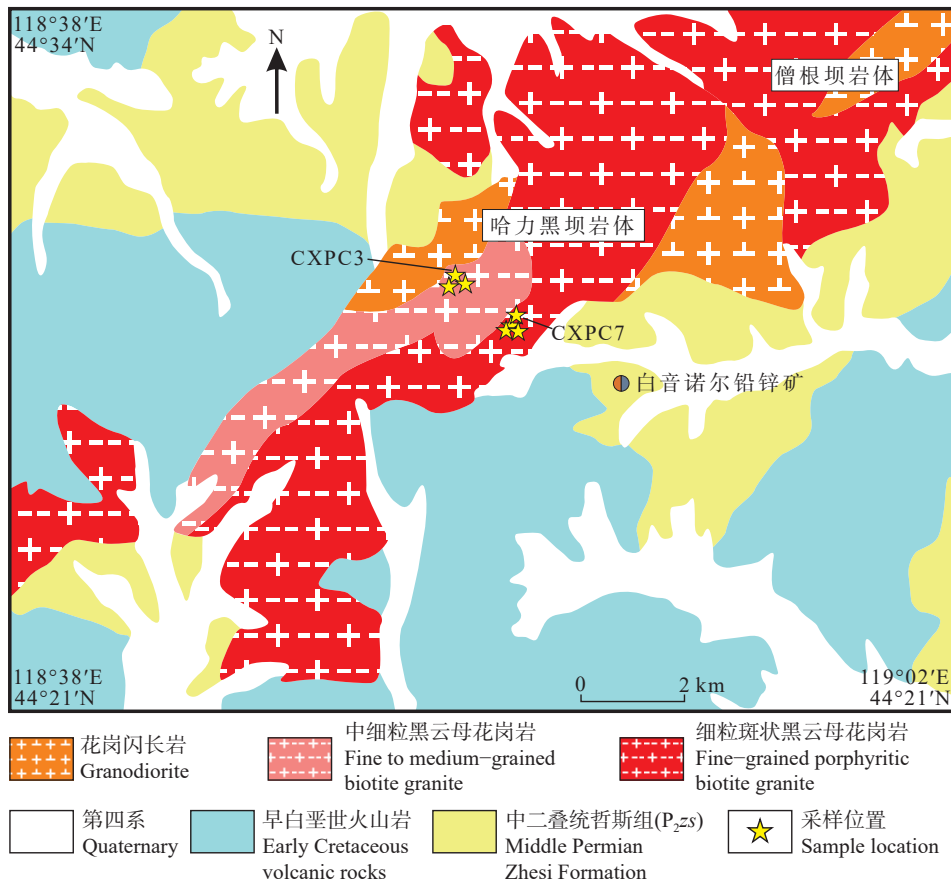


图 2 哈力黑坝岩体地质简图
Fig.2 Geological sketch map of Haliheiba pluton

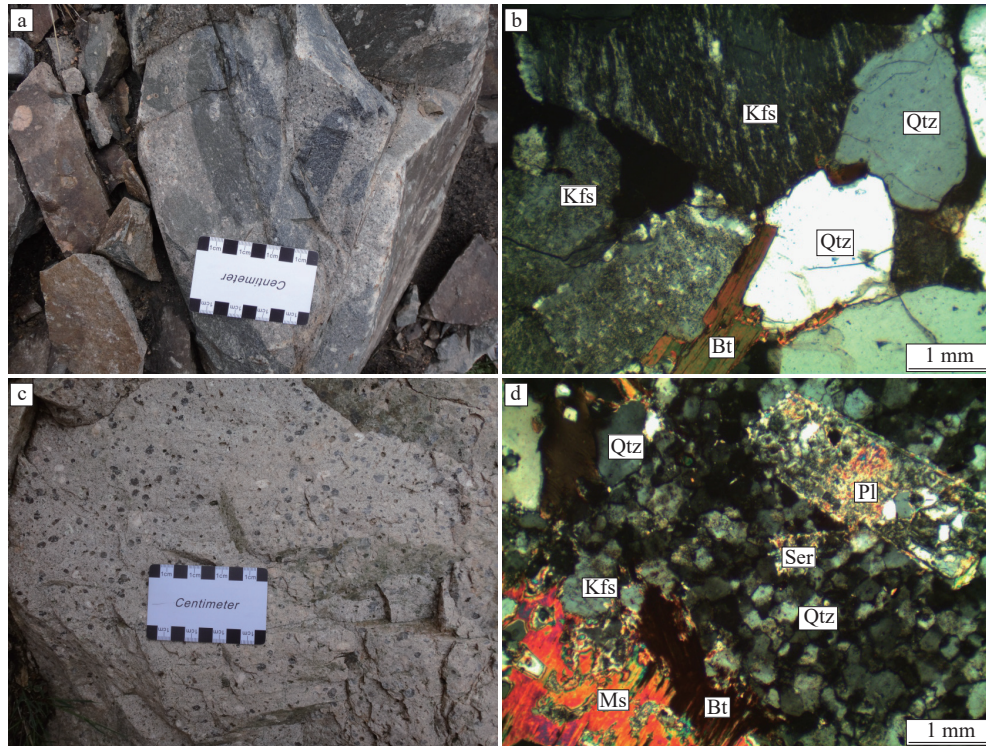


图 3 哈力黑坝早白垩世花岗岩野外照片(a, c)及显微照片(b, d)

a, b—中细粒黑云母花岗岩; c, d—细粒斑状黑云母花岗岩; Qtz—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Ms—白云母; Ser—绢云母

Fig.3 Field photographs (a, c) and microphotographs (b, d) of Early Cretaceous granites in Haliheiba

a, b—Medium-fine grained biotite granite; c, d—Fine grained porphyritic biotite granite; Qtz—Quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—Plagioclase; Bt—Biotite; Ms—Muscovite; Ser—Sericite

(ICP-MS), 主量元素的 XRF 分析误差优于 5%, 微量元素 ICP-MS 分析误差一般优于 10%。锆石制靶由北京凯德正科技有限公司完成, 锆石 CL 图像在中科院地质与地球物理研究所拍摄, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析和 Hf 同位素原位分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析采用美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500 型 ICP-MS 和德国 Lambda-Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统联机进行。实验采用国际标样 91500 为外标进行同位素分馏校正。测试结果通过 GLITTER 软件计算得出, 实验获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正以扣除普通 Pb 的影响, 谐和图的绘制采用 Isoplot 3.0 完成 (Ludwig, 2001)。详细的实验分析步骤和数据处理见 Yuan et al.(2004), 给定的误差水平在 1σ 。在完成上述锆石 U-Pb 同位素测试之后, 选取具有谐和年龄的锆

石进行 Hf 同位素测试。锆石 Hf 同位素测试采用英国 Nu Instruments Ltd 公司生产的 Nu Plasma HR 型 MC-ICP-MS, 详细的分析步骤和数据处理见 Yuan et al.(2008)。锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以测得的单点锆石年龄(t)计算, 采用现今的球粒陨石比值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282772$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0332$ 。单阶段模式年龄 (T_{DM1}) 采用现今的亏损地幔比值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0384$ 。两阶段模式年龄 (T_{DM2}) 采用平均大陆地壳假定比值 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.015$ 。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

样品中锆石粒径一般在 100~300 μm , 形状多呈短柱状或长柱状, 长宽比多为 1:1~3:1, 自形程度较高。锆石 CL 图像(图 4a)显示, 多数锆石发育典型的岩浆振荡环带结构, Th/U 比值为 0.24~1.15, 表明其为岩浆成因锆石。锆石 LA-ICP-MS 结果如

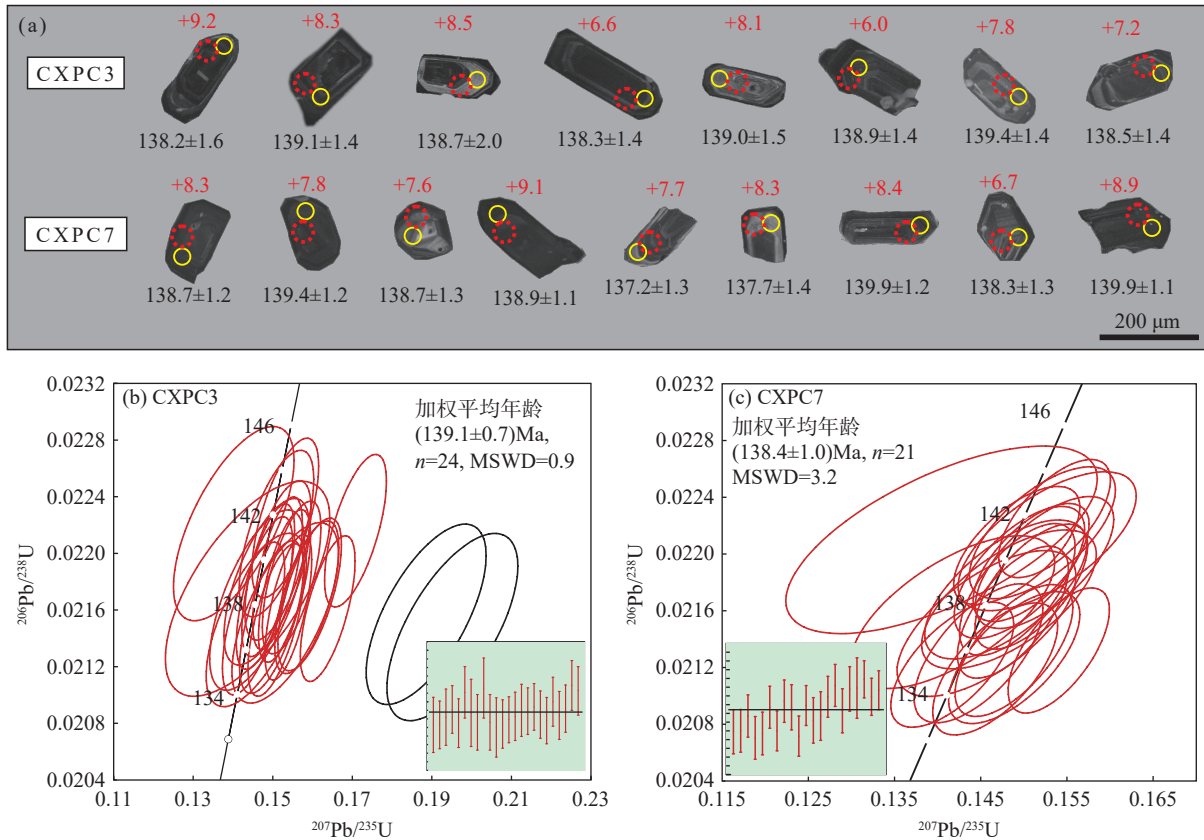


图 4 哈力黑坝早白垩世花岗岩代表性锆石 CL 图像(a)与锆石 U-Pb 年龄谐和图(b, c)

图 a 中黄色圈表示年龄测点, 年龄单位 Ma, 红色圈表示 Hf 同位素测点

Fig.4 Representative cathodoluminescence (CL) images (a) and U-Pb concordia diagrams of zircons of Early Cretaceous granites in Haliheiba (b, c)

The yellow circles for U-Pb age analytical spots and red circles for Hf isotope analytical spots, age unit: Ma

表 1 所示。

中细粒黑云母花岗岩样品 CXPC3 共 24 个测点, 其结果显示绝大多数测点都位于谐和线上及附近, 24 个点获得加权平均值(139.1 ± 0.7)Ma, $\text{MSWD}=0.9$ (图 4b)。细粒斑状黑云母花岗岩样品 CXPC7 共 21 个测点, 结果显示这些测点全部都位于谐和线上, 21 个点获得加权平均值为 (138.4 ± 1.0)Ma, $\text{MSWD}=3.2$ (图 4c)。结果显示两类花岗岩均为早白垩世岩浆活动的产物。

4.2 主微量元素特征

样品主量元素和微量元素分析结果见表 2。两类花岗岩的主微量元素特征相似, SiO_2 含量较高, 为 74.09%~77.19%, 平均为 75.81%, Al_2O_3 含量为 12.09%~12.79%, 平均为 12.41%, 全碱含量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)为 7.92%~8.46%, 平均为 8.18%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.70~1.07, 表现出高硅、富碱的特征。其在

SiO_2 - K_2O 图解中落在高钾钙碱性系列区域(图 5a)。样品的 CaO 、 TiO_2 、 TFe_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 P_2O_5 含量较低, 平均值分别为 0.70%、0.15%、1.45%、0.30%、0.02%、0.04%。A/CNK 为 0.95~1.08, A/NK 为 1.12~1.16, 为准铝质—弱过铝质岩石(图 5b)。

岩石稀土元素含量 $\sum\text{REE}=149.74 \times 10^{-6}$ ~ 225.62×10^{-6} , $\text{LREE}/\text{HREE}=1.90$ ~ 5.36 , $(\text{La}/\text{Yb})_N=3.69$ ~ 13.17 , 显示轻稀土富集的特征。在球粒陨石标准化后的稀土元素配分图中(图 6a), 呈右倾海鸥型, 具有较为明显的负 Eu 异常, $\delta\text{Eu}=0.11$ ~ 0.47 。在微量元素原始地幔标准化图解(图 6b)中, 花岗岩相对富集 Nb、Ta、Zr、Hf、Rb、U、Th 等元素, 而强烈亏损 Ba、Sr、P、Ti、Eu 等元素, 10000 Ga/Al 比值高(2.80~3.78)。

4.3 Hf 同位素特征

选取具有谐和年龄的锆石进行 Hf 同位素测

表 1 哈力黑坝早白垩世花岗岩锆石 LA-ICP-MS 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of Early Cretaceous granites in Haliheiba

样品号及分析点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
CXPC3-1	148	360	0.41	0.04912	0.00196	0.1459	0.0052	0.02153	0.00025	153.7	91.0	138.3	4.6	137.3	1.6
CXPC3-2	321	933	0.34	0.05080	0.00134	0.1509	0.0029	0.02153	0.00022	231.7	59.6	142.7	2.6	137.3	1.4
CXPC3-3	455	1323	0.34	0.04888	0.00187	0.1461	0.0049	0.02167	0.00026	141.9	87.4	138.4	4.3	138.2	1.6
CXPC3-4	349	1227	0.28	0.04948	0.00126	0.1489	0.0027	0.02181	0.00022	170.5	58.6	140.9	2.4	139.1	1.4
CXPC3-5	253	837	0.30	0.05034	0.00143	0.1497	0.0033	0.02155	0.00022	210.9	64.6	141.6	2.9	137.5	1.4
CXPC3-6	173	578	0.30	0.04942	0.00155	0.1509	0.0038	0.02214	0.00024	167.9	71.5	142.7	3.4	141.1	1.5
CXPC3-7	44	151	0.29	0.04788	0.00298	0.1437	0.0085	0.02175	0.00031	92.3	142.1	136.3	7.5	138.7	2.0
CXPC3-8	129	314	0.41	0.05144	0.00208	0.1531	0.0055	0.02158	0.00026	260.6	90.3	144.7	4.8	137.6	1.6
CXPC3-9	81	260	0.31	0.04574	0.00220	0.1402	0.0062	0.02221	0.00028	0.1	95.4	133.2	5.5	141.6	1.8
CXPC3-10	375	327	1.15	0.06335	0.00239	0.1886	0.0062	0.02157	0.00026	719.9	78.2	175.4	5.3	137.6	1.6
CXPC3-11	367	617	0.59	0.06584	0.00261	0.1952	0.0067	0.02148	0.00027	801.2	80.8	181.0	5.7	137.0	1.7
CXPC3-12	284	1033	0.27	0.04884	0.00140	0.1452	0.0032	0.02154	0.00022	140.0	65.9	137.6	2.8	137.4	1.4
CXPC3-13	703	2048	0.34	0.05161	0.00123	0.1539	0.0024	0.02162	0.00021	268.0	53.8	145.4	2.1	137.9	1.3
CXPC3-14	298	954	0.31	0.05298	0.00147	0.1586	0.0033	0.02169	0.00022	327.7	61.6	149.4	2.9	138.3	1.4
CXPC3-15	170	440	0.39	0.04935	0.00173	0.1485	0.0044	0.02180	0.00024	164.4	79.8	140.6	3.9	139.0	1.5
CXPC3-16	431	1333	0.32	0.05091	0.00128	0.1530	0.0027	0.02177	0.00022	236.7	57.1	144.5	2.4	138.9	1.4
CXPC3-17	566	1659	0.34	0.05012	0.00125	0.1512	0.0026	0.02186	0.00022	200.6	56.7	143.0	2.3	139.4	1.4
CXPC3-18	346	1094	0.32	0.04936	0.00132	0.1479	0.0029	0.02172	0.00022	164.9	61.5	140.1	2.6	138.5	1.4
CXPC3-19	2272	2168	1.05	0.05492	0.00138	0.1638	0.0028	0.02161	0.00021	408.9	54.4	154.0	2.5	137.8	1.4
CXPC3-20	213	889	0.24	0.04994	0.00145	0.1513	0.0034	0.02195	0.00023	192.4	66.3	143.1	3.0	140.0	1.4
CXPC3-21	476	1024	0.46	0.05316	0.00147	0.1593	0.0033	0.02171	0.00022	335.8	61.4	150.1	2.9	138.4	1.4
CXPC3-22	497	1204	0.41	0.05136	0.00138	0.1547	0.0030	0.02183	0.00022	257.0	60.4	146.1	2.6	139.2	1.4
CXPC3-23	258	820	0.31	0.04987	0.00145	0.1532	0.0034	0.02225	0.00023	189.0	66.2	144.7	3.0	141.9	1.5
CXPC3-24	417	1181	0.35	0.05584	0.00147	0.1708	0.0032	0.02216	0.00022	445.8	57.2	160.1	2.8	141.3	1.4
CXPC7-1	359	1193	0.30	0.04922	0.00139	0.1447	0.0031	0.02130	0.00020	158.4	64.9	137.3	2.7	135.9	1.3
CXPC7-2	462	1342	0.34	0.05060	0.00134	0.1489	0.0028	0.02132	0.00019	222.4	60.3	140.9	2.5	136.0	1.2
CXPC7-3	443	1517	0.29	0.04993	0.00129	0.1487	0.0026	0.02159	0.00019	191.6	59.0	140.8	2.3	137.7	1.2
CXPC7-4	421	1398	0.30	0.05017	0.00139	0.1467	0.0030	0.02119	0.00019	202.7	63.0	139.0	2.6	135.2	1.2
CXPC7-5	464	1157	0.40	0.05076	0.00143	0.1489	0.0031	0.02127	0.00019	229.8	63.9	140.9	2.8	135.7	1.2
CXPC7-6	496	1239	0.40	0.04977	0.00131	0.1492	0.0027	0.02175	0.00019	184.4	60.2	141.2	2.4	138.7	1.2
CXPC7-7	578	1714	0.34	0.05240	0.00128	0.1541	0.0024	0.02132	0.00018	302.9	54.6	145.5	2.1	136.0	1.1
CXPC7-8	298	1018	0.29	0.04961	0.00139	0.1495	0.0031	0.02187	0.00019	176.6	64.1	141.5	2.7	139.4	1.2
CXPC7-9	345	598	0.58	0.04935	0.00159	0.1479	0.0038	0.02175	0.00020	164.5	73.8	140.1	3.4	138.7	1.3
CXPC7-10	285	1218	0.23	0.04845	0.00136	0.1417	0.0029	0.02122	0.00018	121.5	64.7	134.6	2.6	135.4	1.2
CXPC7-11	501	1442	0.35	0.05029	0.00130	0.1509	0.0027	0.02177	0.00018	208.2	58.9	142.7	2.4	138.9	1.1
CXPC7-12	205	563	0.36	0.04914	0.00172	0.1457	0.0042	0.02151	0.00021	154.7	79.9	138.1	3.8	137.2	1.3
CXPC7-13	198	476	0.42	0.04764	0.00188	0.1418	0.0048	0.02159	0.00022	80.8	91.8	134.6	4.3	137.7	1.4
CXPC7-14	437	1213	0.36	0.05039	0.00145	0.1524	0.0033	0.02194	0.00019	212.9	65.2	144.0	2.9	139.9	1.2
CXPC7-15	377	997	0.38	0.04984	0.00148	0.1522	0.0035	0.02215	0.00019	187.3	67.8	143.8	3.1	141.2	1.2
CXPC7-16	237	692	0.34	0.04960	0.00168	0.1483	0.0041	0.02168	0.00020	176.4	77.3	140.4	3.7	138.3	1.3
CXPC7-17	268	737	0.36	0.05013	0.00169	0.1527	0.0042	0.02209	0.00020	200.9	76.5	144.3	3.7	140.8	1.3
CXPC7-18	85	253	0.34	0.04607	0.00260	0.1405	0.0074	0.02210	0.00027	0.1	131.8	133.5	6.6	140.9	1.7
CXPC7-19	797	1897	0.42	0.05000	0.00128	0.1536	0.0027	0.02225	0.00017	195.0	58.4	145.1	2.3	141.9	1.1
CXPC7-20	554	1775	0.31	0.04979	0.00131	0.1508	0.0028	0.02194	0.00017	185.1	60.0	142.7	2.4	139.9	1.1
CXPC7-21	475	1521	0.31	0.04896	0.00135	0.1492	0.0030	0.02206	0.00017	146.1	63.5	141.2	2.6	140.7	1.1

试, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以测得的单点锆石年龄计算, t 代表单点锆石年龄, 测试及计算结果见表 3。

样品 CXPC3 中 20 个点 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的比值为 0.282827~0.283008, 加权平均值为 0.282907±0.000019 ($2\sigma, n=20$), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 +5.0~+11.2, 加权平均值为 +7.3, 峰值集中在 +7~+9, 二阶段 Hf 模式年龄为 408~731 Ma, 平均为 592 Ma。样品 CXPC7 中 21 个点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的比值为 0.282858~

0.282988, 加权平均值为 0.282915±0.000014 ($2\sigma, n=21$), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围为 +6.0~+10.5, 加权平均值为 +7.9, 峰值集中在 +6~+9, 二阶段 Hf 模式年龄为 441~678 Ma, 平均为 576 Ma。

5 讨 论

5.1 成岩 (成矿) 时代

哈力黑坝花岗岩锆石 U-Pb 年龄测试结果显

表 2 哈力黑坝早白垩世花岗岩主微量元素含量 (氧化物/%, 微量元素/10⁻⁶)

Table 2 Major and trace element content of Early Cretaceous granites in Haliheiba (oxide/%, trace element/10⁻⁶)

样品号	CXPC3-1	CXPC3-2	CXPC3-3	CXPC7-1	CXPC7-2	CXPC7-3	CXPC7-4
岩性	中细粒黑云母花岗岩			细粒斑状黑云母花岗岩			
SiO ₂	74.09	77.19	76.92	76.40	76.40	75.39	74.29
TiO ₂	0.20	0.15	0.08	0.13	0.16	0.13	0.20
Al ₂ O ₃	12.60	12.19	12.09	12.45	12.09	12.67	12.79
Fe ₂ O ₃	0.36	0.17	0.51	0.33	0.47	0.33	0.62
FeO	1.39	0.72	0.61	1.03	0.68	1.03	1.15
MnO	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04
MgO	0.43	0.16	0.37	0.33	0.22	0.15	0.47
CaO	1.14	0.35	0.46	0.56	0.69	0.76	0.96
Na ₂ O	3.73	3.14	3.41	3.86	3.62	3.83	3.79
K ₂ O	4.73	5.12	4.68	4.09	4.30	4.53	4.43
P ₂ O ₅	0.08	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.06
LOI	0.52	0.63	0.72	0.62	0.67	0.45	0.53
Total	99.45	99.93	99.96	99.96	99.43	99.44	99.45
Na ₂ O+K ₂ O	8.46	8.26	8.09	7.95	7.92	8.36	8.22
A/CNK	0.95	1.08	1.05	1.06	1.02	1.01	1.00
A/NK	1.12	1.14	1.13	1.16	1.14	1.13	1.16
σ	2.30	2.00	1.93	1.89	1.88	2.16	2.16
DI	91.32	95.48	94.66	93.42	94.10	93.47	91.24
Li	20.70	13.60	14.30	19.00	15.00	20.90	19.00
Be	3.59	5.33	7.62	4.88	5.09	5.30	4.23
Sc	1.85	2.67	1.18	1.48	1.48	1.47	2.15
V	10.90	5.08	2.81	5.47	5.87	4.67	8.12
Cr	1.63	0.99	0.81	1.21	1.13	0.73	1.72
Co	1.79	0.78	0.78	1.02	1.08	0.82	1.56
Ni	1.60	1.12	0.99	1.17	0.99	0.88	1.33
Cu	4.18	45.00	2.11	2.53	3.17	6.50	6.90
Zn	57.40	38.10	31.20	39.30	34.10	41.60	39.40
Ga	22.20	24.70	24.20	20.10	19.50	20.30	19.00
Rb	191.00	241.00	216.00	166.00	160.00	192.00	174.00
Sr	160.00	41.30	31.90	72.70	91.10	72.00	83.40
Mo	0.67	2.80	0.86	0.62	0.42	0.90	0.51
Cd	0.23	0.20	0.13	0.18	0.20	0.18	0.16
In	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04
Sb	0.08	0.12	0.14	0.11	0.19	0.06	0.10
Cs	3.83	4.60	6.47	4.04	2.79	4.24	6.43
Ba	370.00	119.00	77.30	153.00	270.00	153.00	283.00
W	2.72	70.90	1.01	0.92	0.87	0.90	1.13
Tl	1.09	1.69	1.21	0.83	1.15	1.12	0.99
Pb	22.70	20.20	24.00	23.00	19.30	37.40	18.00
Bi	1.75	0.37	1.81	0.19	3.11	4.01	0.47
Th	42.20	22.10	55.00	34.10	22.90	36.80	33.10
U	4.89	2.30	6.12	5.37	2.79	12.10	3.15
Nb	11.20	11.10	22.50	11.10	12.00	21.10	11.70
Ta	1.89	1.24	5.93	1.63	1.72	2.95	1.28
Zr	124.00	113.00	111.00	106.00	80.70	109.00	129.00
Hf	4.34	4.93	5.31	3.89	3.18	4.51	4.53
La	36.10	36.70	31.70	26.10	38.00	35.60	35.30
Ce	64.50	81.70	68.00	59.30	72.00	75.30	64.90
Pr	7.29	11.10	7.11	5.48	7.28	9.15	7.17
Nd	25.00	39.80	25.70	19.40	25.10	30.20	28.00
Sm	3.82	6.30	5.01	3.34	3.72	6.06	4.68
Eu	0.55	0.26	0.18	0.28	0.38	0.26	0.40
Gd	3.35	5.92	4.79	3.18	3.33	5.31	4.11
Tb	0.59	0.99	1.11	0.61	0.53	1.05	0.73
Dy	2.88	5.31	6.71	3.57	2.80	5.64	3.64
Ho	0.55	1.07	1.47	0.73	0.53	1.15	0.79
Er	1.74	3.06	4.37	2.33	1.54	3.54	2.29
Tm	0.35	0.53	0.88	0.47	0.28	0.70	0.42
Yb	2.30	3.80	6.17	3.00	2.07	5.20	2.84
Lu	0.33	0.47	0.89	0.45	0.29	0.71	0.44
Y	18.50	28.60	45.80	21.50	15.50	37.70	24.30
ΣREE	167.83	225.62	209.89	149.74	173.35	217.56	180.01
LREE/HREE	4.39	3.51	1.90	3.15	5.36	2.55	3.50
δEu	0.47	0.13	0.11	0.26	0.33	0.14	0.28
(La/Yb) _N	11.26	6.93	3.69	6.24	13.17	4.91	8.92
10000Ga/Al	3.33	3.83	3.78	3.05	3.05	3.03	2.80
Zr+Nb+Ce+Y	218.20	234.40	247.30	197.90	180.20	243.10	229.90

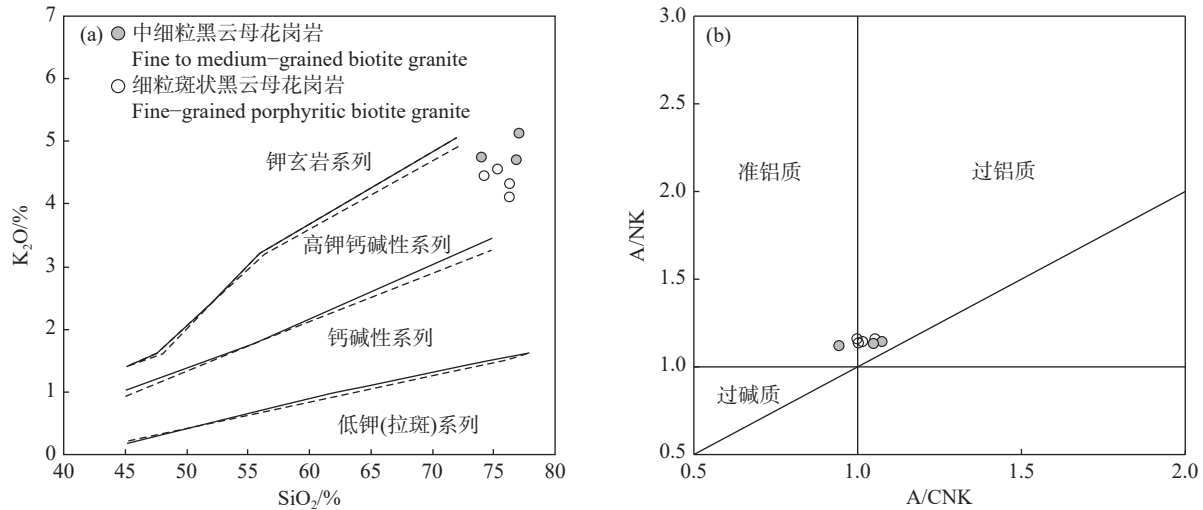


图 5 哈力黑坝早白垩世花岗岩 SiO_2 - K_2O 图解(a)和 A/CNK - A/NK 图解(b)
Fig.5 SiO_2 - K_2O diagram (a) and A/CNK - A/NK diagram (b) of Early Cretaceous granites in Haliheiba

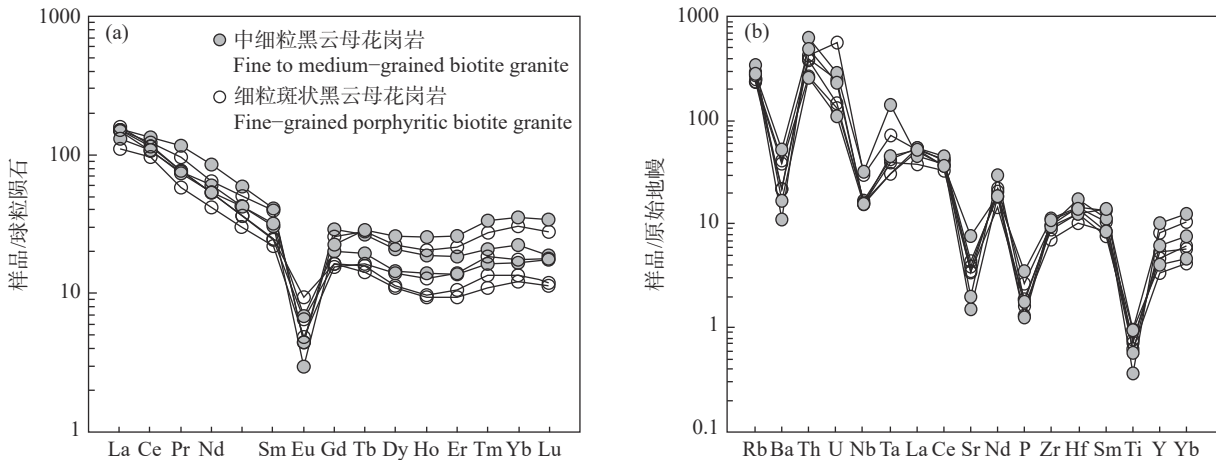


图 6 哈力黑坝早白垩世花岗岩(a)球粒陨石标准化稀土配分图与(b)原始地幔标准化微量元素蛛网图(球粒陨石与原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of Early Cretaceous granites in Haliheiba (chondrite-normalized and primitive mantle-normalized values after Sun and McDonough, 1989)

示, 中细粒黑云母花岗岩和细粒斑状黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为 $(139.1 \pm 0.7) \text{ Ma}$ ($n=24$, $\text{MSWD}=0.9$) 和 $(138.4 \pm 1.0) \text{ Ma}$ ($n=21$, $\text{MSWD}=3.2$), 为早白垩世岩浆活动的结果, 这与前人测得的哈力黑坝岩体细粒斑状黑云母花岗岩年龄在误差范围内基本一致(江思宏等, 2011b)。它们与区内相邻的花加拉嘎岩体($139 \pm 1 \text{ Ma}$)、乌兰达坝岩体($137 \pm 1 \text{ Ma}$)、小井子岩体($138 \pm 1 \text{ Ma}$)和乌兰楚鲁特岩体($139.8 \pm 1.2 \text{ Ma}$ 和 $141.9 \pm 0.8 \text{ Ma}$)都属于同时期岩浆活动的产物(杨奇荻等, 2014; 李剑锋等, 2016), 与大兴安岭地区早白垩世岩浆活动大致对

应(葛文春等, 2005; 刘伟等, 2007; 王兴安等, 2012; Zhou et al., 2012; 施璐等, 2013; 田德欣等, 2013; 万乐, 2015; 祝新友等, 2016)。因此大兴安岭地区早白垩世的岩浆活动非常发育, 成岩时代集中在 $145 \sim 130 \text{ Ma}$, 并伴随着大规模的锡铅锌银多金属成矿作用, 形成了一系列与岩浆活动有关的锡铅锌银矿床, 如维拉斯托、黄岗、大井、红岭、双尖子山等(潘小菲等, 2009; 周振华等, 2010; 翟德高等, 2012; 毛景文等, 2013; 吴冠斌等, 2013; 万多等, 2014)。

5.2 岩石成因类型

自 Loiselle and Wones(1979)最初提出 A 型花

表 3 哈力黑坝早白垩世花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotopic composition of Early Cretaceous granites in Haliheiba

点号	<i>t</i> /Ma	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (<i>t</i>)	2σ	<i>T</i> _{DM1} /Ma	<i>T</i> _{DM2} /Ma	<i>f</i> _{Lu/Hf}
CXPC3-1	137.3	0.282903	0.025060	0.000699	0.000003	7.6	0.1	490	594	-0.98
CXPC3-2	137.3	0.282934	0.034261	0.000960	0.000009	8.6	0.3	451	540	-0.97
CXPC3-3	138.2	0.282950	0.038447	0.001053	0.000005	9.2	0.2	429	511	-0.97
CXPC3-4	139.1	0.282922	0.032150	0.000904	0.000002	8.3	0.1	467	561	-0.97
CXPC3-5	137.5	0.282896	0.032285	0.000897	0.000010	7.3	0.3	504	609	-0.97
CXPC3-6	141.1	0.282909	0.028014	0.000791	0.000001	7.9	0.0	484	583	-0.98
CXPC3-7	138.7	0.282927	0.022330	0.000631	0.000004	8.5	0.2	456	551	-0.98
CXPC3-8	137.6	0.282832	0.041640	0.001162	0.000003	5.0	0.1	597	725	-0.96
CXPC3-9	141.6	0.282827	0.022111	0.000604	0.000001	5.0	0.0	596	731	-0.98
CXPC3-10	137.6	0.282900	0.042228	0.001143	0.000012	7.4	0.4	501	602	-0.97
CXPC3-11	137.0	0.282880	0.033415	0.000911	0.000002	6.8	0.1	526	637	-0.97
CXPC3-12	137.4	0.282933	0.033815	0.000922	0.000004	8.6	0.2	451	541	-0.97
CXPC3-13	137.9	0.282913	0.058903	0.001581	0.000019	7.9	0.7	488	580	-0.95
CXPC3-14	138.3	0.282875	0.034884	0.000979	0.000007	6.6	0.2	534	647	-0.97
CXPC3-15	139.0	0.282917	0.028177	0.000738	0.000002	8.1	0.1	472	569	-0.98
CXPC3-16	138.9	0.282858	0.034047	0.000949	0.000003	6.0	0.1	558	677	-0.97
CXPC3-17	139.4	0.282909	0.053215	0.001389	0.000003	7.8	0.1	491	586	-0.96
CXPC3-18	138.5	0.282892	0.033775	0.000914	0.000002	7.2	0.1	509	616	-0.97
CXPC3-19	137.8	0.283008	0.071354	0.001896	0.000002	11.2	0.1	354	408	-0.94
CXPC3-20	140.0	0.282912	0.029114	0.000813	0.000005	7.9	0.2	480	578	-0.98
CXPC7-1	135.9	0.282936	0.031750	0.000888	0.000002	8.7	0.1	447	536	-0.97
CXPC7-2	136.0	0.282923	0.037649	0.001083	0.000012	8.2	0.4	467	560	-0.97
CXPC7-3	137.7	0.282877	0.037908	0.001043	0.000005	6.6	0.2	532	644	-0.97
CXPC7-4	135.2	0.282880	0.044944	0.001376	0.000011	6.7	0.4	532	640	-0.96
CXPC7-5	135.7	0.282896	0.054362	0.001436	0.000023	7.2	0.8	511	611	-0.96
CXPC7-6	138.7	0.282924	0.034846	0.000970	0.000004	8.3	0.1	464	557	-0.97
CXPC7-7	136.0	0.282988	0.043114	0.001156	0.000011	10.5	0.4	375	441	-0.97
CXPC7-8	139.4	0.282909	0.026305	0.000728	0.000005	7.8	0.2	483	583	-0.98
CXPC7-9	138.7	0.282903	0.036297	0.001021	0.000003	7.6	0.1	496	597	-0.97
CXPC7-10	135.4	0.282912	0.035219	0.000960	0.000003	7.8	0.1	482	581	-0.97
CXPC7-11	138.9	0.282946	0.038714	0.001070	0.000005	9.1	0.2	434	518	-0.97
CXPC7-12	137.2	0.282910	0.084491	0.002193	0.000032	7.7	1.1	501	589	-0.93
CXPC7-13	137.7	0.282925	0.050315	0.001390	0.000007	8.3	0.2	468	558	-0.96
CXPC7-14	139.9	0.282927	0.051037	0.001377	0.000017	8.4	0.6	465	553	-0.96
CXPC7-15	141.2	0.282905	0.027553	0.000782	0.000002	7.7	0.1	489	591	-0.98
CXPC7-16	138.3	0.282877	0.039219	0.001092	0.000006	6.7	0.2	533	644	-0.97
CXPC7-17	140.8	0.282909	0.040882	0.001138	0.000015	7.8	0.5	488	585	-0.97
CXPC7-18	140.9	0.282894	0.029011	0.000810	0.000001	7.3	0.0	505	611	-0.98
CXPC7-19	141.9	0.282858	0.043941	0.001221	0.000005	6.0	0.2	562	678	-0.96
CXPC7-20	139.9	0.282939	0.045649	0.001231	0.000009	8.9	0.3	446	531	-0.96
CXPC7-21	140.7	0.282966	0.036242	0.000951	0.000003	9.9	0.1	405	480	-0.97

花岗岩这一概念,其含义已发生深刻变化。A 型花岗岩本来的定义为碱性(alkaline)、贫水(anhydrous)和非造山(anorogenic)的花岗岩,不涉及成岩物质来源。随着研究程度的加深,A 型花岗岩覆盖了除典型的 S 型和 I 型花岗岩以外的各种花岗岩,并不局限于“贫水”和“非造山”环境。A 型花岗岩包括碱性 A 型花岗岩和铝质 A 型花岗岩两个亚类。碱性 A 型花岗岩以出现碱性暗色矿物(如钠闪石-钠铁闪石、霓石-霓辉石、铁橄榄石等)为特征,而铝质 A 型花岗岩常常与 I 型和 S 型花岗岩具有相似的矿物学与地球化学特点,从而导致花岗岩成因类型的判

定困难。目前对 A 型花岗岩尚没有一个统一的认识,但其总体地球化学特征为高 SiO₂,高 TFeO/MgO 和 10000 Ga/Al 比值,富集高场强元素,强烈亏损 Ba、Sr、Eu、P 和 Ti 等元素。无论 A 型花岗岩定义怎样,该类花岗岩具有较高的形成温度和较低的形成压力是学者们的共识。因此 A 型花岗岩的形成通常与伸展背景有关,因为只有伸展的背景才能满足这类花岗岩较高的形成温度和较低的形成压力条件。

哈力黑坝早白垩世花岗岩主要矿物组合为石英、碱性长石、少量斜长石和黑云母,不含碱性暗色

矿物。在化学成分特征方面,本文花岗岩具有较高的 SiO_2 和 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 含量,较低的 CaO 和 MgO 含量,高 TFeO/MgO 和 $10000\text{Ga}/\text{Al}$ 比值,富集 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素,强烈亏损 Ba、Sr、P、Ti、Eu 元素,具有明显的负钨异常(图 6b)。以上矿物学和地球化学特征都显示出 A 型花岗岩的特征 (Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987; Eby, 1992)。在花岗岩成因类型判别图解(图 7a~d)中,哈力黑坝花岗岩都落在 A 型花岗岩区域内。在 $\text{SiO}_2\text{-TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 图解(图 7e)中,花岗岩样品落入铁质 A 型花岗岩与镁质 A 型花岗岩的过渡区域。在 $\text{SiO}_2\text{-(Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ 图解(图 7f)中,哈力黑坝花岗岩具有与碱钙质 A 型花岗岩和钙碱质 A 型花岗岩相似的特征。此外,哈力黑坝花岗岩的锆石饱和温度平均为 793°C (Wei et al., 2020),与 A 型花岗岩的形成温度相近。最重要的是,大兴安岭地区在晚中生代发育大量的地壳伸展构造,在区域伸展的大地构造背景下,广泛的 A 型花岗质岩浆侵位,形成一系列与地壳伸展相关的 A 型花岗岩 (王兴安等, 2012; Zhou et al., 2012; 施璐等, 2013; 田德欣等, 2013; 杨奇荻等, 2014; 万乐, 2015),哈力黑坝花岗岩正是该时期 A 型花岗岩的代表。主量元素显示哈力黑坝早白垩世花岗岩相对富铝 (Al_2O_3 含量大于 12%), A/CNK 值(0.95~1.08)绝大多数大于 1。因此,哈力黑坝早白垩世花岗岩应属于铝质 A 型花岗岩。

5.3 岩浆源区特征及地球动力学背景

已有研究表明,大兴安岭地区花岗岩总体具有明显的低初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值、高初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值、正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和年轻的 Nd 模式年龄的特点,暗示其源岩主要为显生宙增生的年轻地壳物质(吴福元等, 1997; 洪大卫等, 2000),反映显生宙以来重要的地壳生长事件。本文的 Hf 同位素研究成果也进一步提供了有力的佐证。

哈力黑坝早白垩世花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 +5.0 ~ +11.2, 具有年轻的二阶段 Hf 模式年龄(平均小于 0.6 Ga)。这一结果与甘珠尔庙 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +2.9 ~ +13.9)、乌兰浩特 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +6.5 ~ +9.4) 和黄岗地区 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +1.9 ~ +18.3) 同时代花岗岩 Hf 同位素组成特征相似(周漪等, 2011; Zhou et al., 2012; 杨奇荻等, 2014), 同时也与大兴安岭中南段同时代的流纹岩 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +4.6 ~ +10.9)、凝灰岩 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

为 +1.7 ~ +9.7) 和中基性—中酸性火山岩 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +2.9 ~ +5.8) Hf 同位素组成基本一致(张连昌等, 2007; 张超等, 2014; 刘晨等, 2017)。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)\text{-}t$ 图解(图 8)中,样品数据点均落在球粒陨石与亏损地幔演化线之间,并相对集中靠近球粒陨石一侧,同时,样品数据点基本都落在底侵下地壳演化线之下,进一步说明花岗岩主要来源于新生地壳物质的部分熔融。而 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+5.0 ~ +11.2) 具有较大的变化范围,又暗示其源区成分具有一定的复杂性(Yang et al., 2007),其中可能还有老地壳物质的贡献。

值得注意的是,本区早三叠世花岗闪长岩 (~248 Ma) $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围为 +9.2 ~ +15.1 (平均值为 +12.6) (作者未发表数据),明显高于早白垩世花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(平均值为 +7.8)。这一特点在大兴安岭中南段的其他地区也有体现(周漪等, 2011; 杨奇荻等, 2014),如乌兰浩特地区 230 Ma、175 Ma 和 135 Ma 花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 +11.6、+11.6、+8.2,甘珠尔庙地区 154 Ma 和 140 Ma 花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 +12.5、+7.4。从上可以看出,大兴安岭中南段乌兰浩特地区、甘珠尔庙地区以及本区,早白垩世以前的花岗质岩石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显高于早白垩世花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值。这种 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显降低的趋势,暗示自三叠纪—中晚侏罗世至早白垩世,大兴安岭中南段花岗质岩浆的源区发生了显著变化,源区中古老地壳物质组分贡献逐渐增多,而年轻地壳组分的贡献逐渐减少,这种源区性质的改变可能与研究区晚侏罗世—早白垩世发生的岩石圈拆沉作用有关(Wu et al., 2007; Zhang et al., 2010)。资料显示,大兴安岭中南段地区早中侏罗世主要发育后碰撞 I 型花岗岩类(梅微, 2014),暗示区域于早侏罗世一定程度上处于碰撞造山环境。区域早白垩世发育大量板内非造山 A 型花岗岩指示其进入板内伸展的演化阶段(邵济安和张履桥, 2002; Wu et al., 2002; Zhang et al., 2008)。大兴安岭中南段地区发育大量晚侏罗世埃达克质火山岩,表明该时期区域上存在加厚的下地壳(高晓峰等, 2005),而区域早白垩世花岗岩 Sr 含量基本都小于 100×10^{-6} , Yb 大于 2×10^{-6} ,说明该时期地壳是减薄的(张旗等, 2011)。前人通过对比大兴安岭地区不同时代(160 Ma、145 Ma、125 Ma)的玄武质岩石特征发现 125 Ma 玄武质岩石已基本具有亏损地幔性质,145 Ma 玄武质岩石表现出拉斑玄武岩的特点,表明区域上发生过大规模的岩

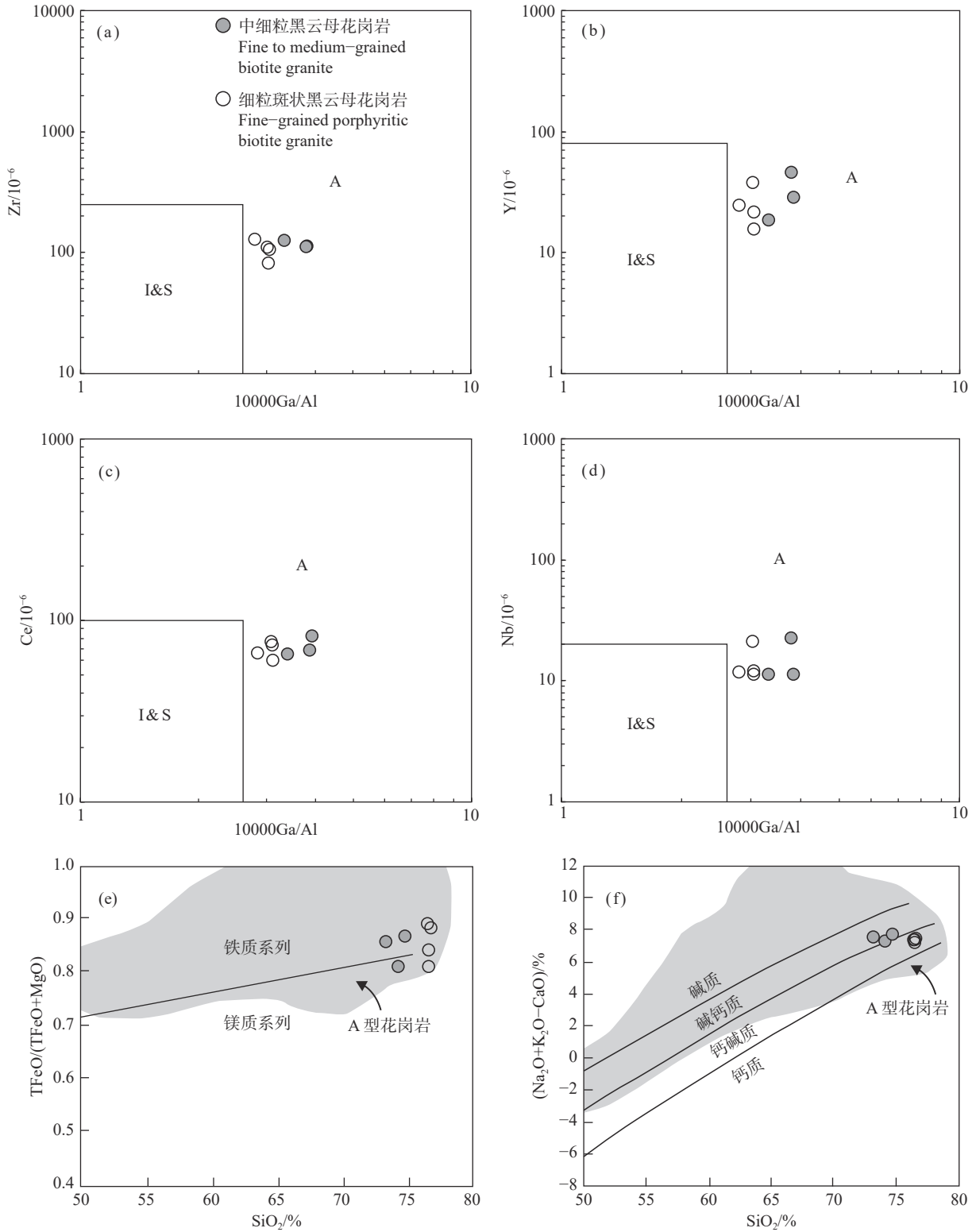


图 7 哈力黑坝早白垩世花岗岩成因判别图解

a-d— $10000Ga/Al$ -Zr, Y, Ce, Nb 图解(底图据 Eby, 1992); e— SiO_2 - $TFeO/(TFeO+MgO)$ 图解(底图据 Frost et al., 2001); f— SiO_2 - (Na_2O+K_2O-CaO) 图解(底图据 Frost et al., 2001)

Fig.7 Petrogenetic discrimination diagrams of Early Cretaceous granites in Haliheiba

a-d— $10000Ga/Al$ vs. Zr, Y, Ce and Nb diagrams (after Eby, 1992); e— SiO_2 vs. $TFeO/(TFeO+MgO)$ diagrams (after Frost et al., 2001); f— SiO_2 vs. (Na_2O+K_2O-CaO) diagrams (after Frost et al., 2001)

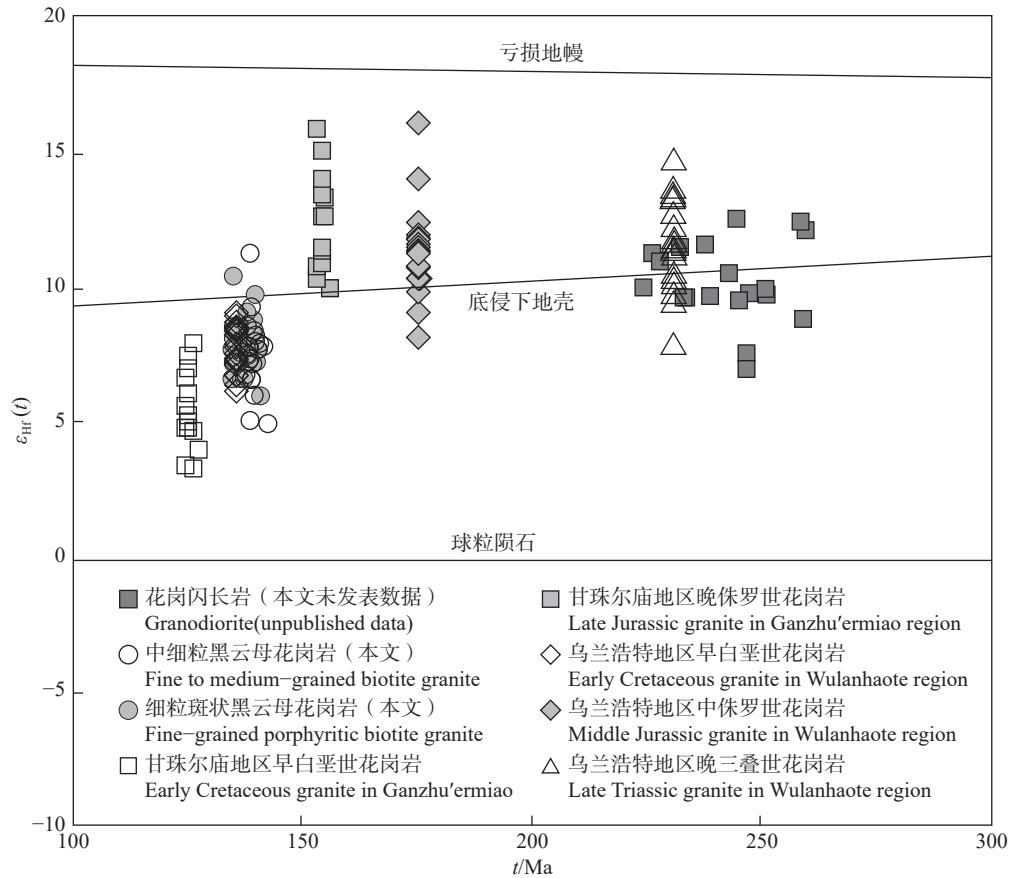


图 8 哈力黑坝早白垩世花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图(底侵下地壳演化线据 Liu et al., 2005; 乌兰浩特地区花岗岩数据引自周漪等, 2011; 甘珠尔庙地区花岗岩数据引自杨奇获等, 2014)

Fig. 8 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ diagram of Early Cretaceous granites in Haliheiba (The evolution lines of the underplated lower crust after Liu et al., 2005; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the granites from Wulanhaote and Ganzhu'ermiao region after Zhou Yi et al. 2011 and Yang Qidi et al. 2014, respectively)

石圈拆沉减薄事件, 时限为晚侏罗世—早白垩世(可能为 150~120 Ma)(吴福元和孙德有, 1999), 这与大兴安岭中南段地区晚中生代花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的变化情况耦合, 因此晚侏罗世被认为是构造体制转换期。岩石圈的拆沉诱发软流圈地幔上涌, 导致地壳伸展, 地壳物质部分熔融, 形成大规模的岩浆活动, 这可能也是大兴安岭地区发育大面积晚侏罗世—早白垩世花岗岩的原因。

6 结 论

通过对大兴安岭中南段哈力黑坝岩体早白垩世花岗岩岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素的研究, 可以得出如下结论:

(1) 哈力黑坝中细粒黑云母花岗岩和细粒斑状黑云母花岗岩的形成年龄分别为 $(139.1 \pm 0.7)\text{Ma}$ 和 $(138.4 \pm 1.0)\text{Ma}$, 表明其形成于早白垩世。

(2) 哈力黑坝早白垩世花岗岩主量元素显示高硅富碱的特征, A/CNK 值介于 0.95~1.08, 为高钾钙碱性系列, 准铝质—弱过铝质花岗岩, 微量元素特征显示其为铝质 A 型花岗岩。

(3) 哈力黑坝早白垩世花岗岩具有正高 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+5.0 ~ +11.2), 主要来源于年轻地壳物质的部分熔融, 并有老地壳物质的贡献, 是伸展背景下岩浆活动的产物, 受控于岩石圈的拆沉减薄过程。

致谢: 感谢西北大学大陆动力学国家重点实验室和核工业北京地质研究院实验人员在实验过程中给予的帮助; 感谢两位匿名审稿专家提出的建设性意见。

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59-79.

- Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189–200.
- Du Yang, Liu Zhenghong, Cui Weilong, Wang Shijie, Wang Yang, Du Chuanye. 2017. Formation age and geochemical characteristics of volcanic rocks from Manketouebo Formation in Keyihe area, Da Hingan Mountains and its tectonic implications[J]. *Global Geology*, 36(1): 54–65 (in Chinese with English abstract).
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20: 641–644.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048.
- Gao Xiaofeng, Guo Feng, Fan Weiming, Li Chaowen, Li Xiaoyong. 2005. Origin of the Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks from the northern Da Hingan Mountain, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 737–748 (in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, Zhang Jiheng. 2005. Zircon U–Pb ages and its significance of the Mesozoic granites in the Wulanhaote region, central Da Hingan Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 749–762 (in Chinese with English abstract).
- He Peng, Guo Shuo, Zhang Tianfu, Zhang Yuelong, Su Hang, Fu Qilong. 2022. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of volcanic rocks from Manketouebo Formation in Wulagai area, southern Da Hingan Mountains[J]. *Geology in China*, 49(2): 601–619 (in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, Zhang Jisheng. 2000. Genesis of positive $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ granitoids in the Da Hingan Mts. —Mongolia orogenic belt and growth continental crust[J]. *Earth Science Frontiers*, (2): 441–456 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Sihong, Liang Qingling, Liu Yifei, Liu Yan. 2012. Zircon U–Pb ages of the magmatic rocks occurring in around the Dajing Cu–Ag–Sn polymetallic deposit of Inner Mongolia and constrains to the ore-forming age[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 495–513 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Sihong, Nie Fengjun, Bai Daming, Liu Yifei, Liu Yan. 2011a. Geochronology evidence for Indosinian mineralization in Baiyinnuoer Pb–Zn deposit of Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 30(5): 787–798 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Sihong, Nie Fengjun, Liu Yifei, Hou Wanrong, Bai Daming, Liu Yan, Liang Qingling. 2011b. Geochronology of intrusive rocks occurring in and around the Mengentaolegai silver–polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1755–1769 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianfeng, Wang Keyong, Quan Hongyan, Sun Fengyue, Zhao Laishi, Zhang Xuebing. 2016. Discussion on the magmatic evolution sequence and metallogenic geodynamical setting background Hongling Pb–Zn deposit in the southern Da Xing'an Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1529–1542 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, Li Yaping, Wang Yanbo. 2007. Shuangjingzi 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*, (3): 565–582 (in Chinese with English abstract).
- Li S, Wilde S A, Wang T, Guo Q Q. 2013. Incremental growth and origin of the Cretaceous Renjiayingzi pluton, southern Inner Mongolia, China: Evidence from structure, geochemistry and geochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 75(8): 226–242.
- Liu Chen, Sun Jinggui, Qiu Dianming, Gu A'lei, Han Jilong, Sun Fanting, Yang Mei, Feng Yangyang. 2017. Genesis and geological significance of Mesozoic volcanic rocks in Xiaomo'erke, northern slope of Greater Khingan Range: Hf isotopic geochemistry and zircon U–Pb chronology[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(4): 1138–1158 (in Chinese with English abstract).
- Liu W, Siebel W, Li X J, Pan X F. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: Constraints on basaltic underplating[J]. *Chemical Geology*, 219(1/4): 5–35.
- Liu Wei, Pan Xiaofei, Xie Liewen, Li He. 2007. Sources of material for the Linxi granitoids, the southern segment of the Da Hingan Mts. : When and how continental crust grew[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 441–460 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Li W M, Feng Z Q, Wen Q B, Neubauer F, Liang C Y. 2016. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 43: 123–148.
- Loiselle M C, Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Geological Society of America, Abstracts with Programs*, 11: 468.
- Ludwig K R. 2001. User's Manual for Isoplot/EX (Rev. 2.49): A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1–55.
- Ma Xinghua, Chen Bin, Lai Yong, Lu Yinghui. 2009. Petrogenesis and mineralization chronology study on the Aolunhua porphyry Mo deposit, Inner Mongolia, and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 247–258 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Wu Guang, Jiang Sihong, Liu Chenglin, Li Houmin, Ouyang Hegen, Liu Jun. 2013. Metallogenic regularity and metallogenic series of ore deposits in Inner Mongolia and adjacent areas[J]. *Mineral Deposits*, 32(4): 715–729 (in Chinese with English abstract).
- Mei Wei. 2014. Mesozoic Magmatism and Mineralization in Northern Chifeng, Inner Mongolia[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1–174.
- Pan Xiaofei, Guo Lijun, Wang Shuo, Xue Huaimin, Hou Zengqian,

- Tong Ying, Li Zhiming. 2009. Laser microprobe Ar–Ar dating of biotite from the Weilasituo Cu–Zn polymetallic deposit in Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 473–479 (in Chinese with English abstract).
- Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299–307.
- Shao Ji'an, Zhang Lūqiao. 2002. Mesozoic dyke swarms in the north of North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 312–318 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhang Lūqiao, Mu Baolei. 1999. Magmatism in the Mesozoic extending orogenic process of Da Hinggan Mts[J]. *Earth Science Frontiers*, (4): 339–346 (in Chinese with English abstract).
- Shao Ji'an, Zhang Lūqiao, Xiao Qinghui, Li Xiaobo. 2005. Rising of Da Hinggan Mts. in Mesozoic: A possible mechanism of intracontinental orogeny[J]. *Acta Geologica Sinica*, (3): 789–794 (in Chinese with English abstract).
- Shi Lu, Zheng Changqing, Yao Wengui, Li Juan, Xu Jiulei, Gao Yuan, Cui Fanghua. 2013. Geochronology, petro–geochemistry and tectonic setting of the Hamagou Forest Farm A–type granites in the Wuchagou region, central Great Xinggan Range[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 1264–1276 (in Chinese with English abstract).
- Su Maorong, Li Yinglei, Liu Huichuan, Shao Yongxu, Zhang Qing, Zhou Fei, Cao Lei, Sun Jinghao. 2020. Paleoproterozoic basement in eastern Central Asia Orogenic Belt: Evidence from granite and sedimentary strata in Sino–Mongolia border area[J]. *Geology in China*, 47(4): 1186–1203 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle compositions and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345.
- Tian Dexin, Wang Qinghai, Ge Wenchun, Zhang Yanlong, Chen Huijun, Yang Hao. 2013. Zircon U–Pb ages and geochemical characteristics of Lūshui alkali feldspar granites in Arshan, Inner Mongolia and their tectonic implications[J]. *Global Geology*, 32(4): 681–693 (in Chinese with English abstract).
- Wan Duo, Li Jianfeng, Wang Yicun, Wang Keyong, Wang Zhigao, Wei Liangmin. 2014. Re–Os radiometric dating of molybdenite in Hongling lead–zinc polymetallic deposit, Inner Mongolia, and its significance[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(6): 687–695 (in Chinese with English abstract).
- Wan Le. 2015. Tectonic Setting and Geological Characteristics of the Mesozoic Granites of Wushijiazui in Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–69 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xing'an, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong, Zhu Kai. 2012. Petrogenesis and tectonic setting of the K–feldspar granites in Chaihe area, central Greater Xing'an Range: Constraints from petro–geochemistry and zircon U–Pb isotope chronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2647–2655 (in Chinese with English abstract).
- Wei W, Zou T, Huang X K, Jiang B B, Zhu X Y, Wu X Y. 2020. Petrogenesis of early Cretaceous granitoids in the southern Great Xing'an Range, NE China: Constraints from the Haliheiba pluton[J]. *Chemie der Erde–Geochemistry*, 80: 125608.
- Wei Wei, Chen Jianping, Huang Xingkai, Zhu Xinyou, Xu Qiao, Liu Zi. 2017. Magmatic migmatization of Haliheiba pluton: Petrographic study of dark inclusion, U–Pb chronology and Hf isotope of zircon mineral in central and southern section of the Da Hinggan Mountains area[J]. *Mineral Exploration*, 8(6): 948–956 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A–type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419.
- Wilde S A, Zhou J B. 2015. The late Paleozoic to Mesozoic evolution of the eastern margin of the Central Asian orogenic belt in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 909–921.
- Wilde S A. 2015. Final amalgamation of the Central Asian Orogenic Belt in NE China: Paleo–Asian Ocean closure versus Paleo–Pacific plate subduction: A review of the evidence[J]. *Tectonophysics*, 662: 345–362.
- Wu Fuyuan, Lin Qiang, Jahn Bor–ming. 1997. On the isotopic characteristics of the post–orogenic granites in orogenic belt of north China and their implications for crustal growth[J]. *Chinese Science Bulletin*, (20): 2188–2192 (in Chinese).
- Wu Fuyuan, Sun Deyou. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, (4): 313–318 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Zhang Guangliang, Ren Xiangwen. 2000. Deep geodynamics of Yanshanian Movement[J]. *Geological Journal of China Universities*, (3): 379–388 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Han R, Yang J H, Wilde S A, Zhai M G. 2007. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U–Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 238: 232–248.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Sun D Y. 2000. Phanerozoic continental crustal growth: Sr–Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. *Tectonophysics*, 328: 87–113.
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S A. 2002. A–type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 187: 143–173.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1–30.
- Wu F Y, Wilde S A, Zhang G L, Sun D Y. 2004. Geochronology petrogenesis of the post–orogenic Cu–Ni sulfide–bearing mafic–ultramafic complexes in Jilin Province, NE China[J]. *Journal*

- of *Asian Earth Sciences*, 23: 781–797.
- Wu Guanbin, Liu Jingmin, Zeng Qingdong, Sun Huashan, Liu Mingtao. 2013. Inner Mongolia Daxinganling double top mountain lead zinc silver mineralization age[J]. *Journal of Minerals*, 33(S2): 619 (in Chinese).
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, Zhai M G. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Tectonics*, 22: 1069.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, Xie L W, Yang Y H, Liu X M. 2007. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U–Pb dating and Hf isotope analysis of zircons[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 247: 100–118.
- Yang Qidi, Guo Lei, Wang Tao, Zeng Tao, Zhang Lei, Tong Ying, Shi Xingjun, Zhang Jianjun. 2014. Geochronology, origin, sources and tectonic settings of Late Mesozoic two-stage granites in the Ganzhuermiao region, central and southern Da Hinggan Range, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1961–1981 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Dai M N, Zong C L, Günther D, Fontaine G H, Liu X M, Diwu C R. 2008. Simultaneous determinations of U–Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser–ablation quadrupole and multiple–collector ICP–MS[J]. *Chemical Geology*, 247: 100–118.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, Günther D, Wu F Y. 2004. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation–inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Geostandards Newsletter*, 28: 353–370.
- Zeng Q D, Sun Y, Chu S X, Duan X X, Liu J M. 2015. Geochemistry and geochronology of the Dongshanwan porphyry Mo–W deposit, Northeast China: Implications for the Late Jurassic tectonic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 472–485.
- Zhai Degao, Liu Jiajun, Yang Yongqiang, Wang Jianping, Ding Li, Liu Xingwang, Zhang Mei, Yao Meijuan, Su Li, Zhang Hongyu. 2012. Petrogenetic and metallogenic ages and tectonic setting of the Huanggangliang Fe–Sn deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 513–523 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Yang Weihong, He Zhonghua, Wu Hao, Wu Qing. 2014. Chronology and geochemistry of rhyolites in Manketou'ebo Formation from Ta'erqi area, southern–central Great Xing'an Range[J]. *Global Geology*, 33(2): 255–265 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J H, Gao S, Ge W C, Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Li M. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xingan Range, northeastern China: Implications for subduction–induced delamination[J]. *Chemical Geology*, 276: 144–165.
- Zhang L C, Zhou X H, Ying J F, Wang F, Guo F, Wan B, Chen Z G. 2008. Geochemistry and Sr–Nd–Pb–Hf isotopes of Early Cretaceous basalts from the Great Xinggan Range, NE China: Implications for their origin and mantle source characteristics[J]. *Chemical Geology*, 256: 12–23.
- Zhang Lianchang, Chen Zhiguang, Zhou Xinhua, Ying Jifeng, Wang Fei, Zhang Yutao. 2007. Characteristics of deep sources and tectonic–magmatic evolution of the Early Cretaceous volcanics in Genhe area, Da–Hinggan Mountains: Constraints of Sr–Nd–Pb–Hf isotopic geochemistries[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2823–2835 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, Wang Yan, Wang Yuanlong. 2011. Granitic rocks and their formation depth in the crust[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(2): 259–269 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J B, Wilde S A. 2013. The crustal accretion history and tectonic evolution of the NE China segment of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 23: 1365–1377.
- Zhou Yi, Ge Wenchun, Wang Qinghai. 2011. Petrogenesis of Mesozoic granite in Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountains: Constraints from geochemistry and Sr–Nd–Hf isotope[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(5): 901–923 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z H, Mao J W, Lyckberg P. 2012. Geochronology and isotopic geochemistry of the A–type granites from the Huanggang Sn–Fe deposit, southern Great Hinggan Range, NE China: Implication for their origin and tectonic setting[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 49: 272–286.
- Zhou Zhenhua, Lü Linsu, Feng Jiarui, Li Chao, Li Tao. 2010. Molybdenite Re–Os ages of Huanggang skarn Sn–Fe deposit and their geological significance, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 667–679 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Zhang Zhihui, Fu Xu, Li Baiyang, Wang Yanli, Jiao Shoutao, Sun Yalin. 2016. Geological and geochemical characteristics of the Weilasito Sn–Zn deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 43(1): 188–208 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 杜洋, 刘正宏, 崔维龙, 王师捷, 王阳, 杜传业. 2017. 大兴安岭克一河地区满克头鄂博组火山岩形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. *世界地质*, 36(1): 54–65.
- 高晓峰, 郭锋, 范蔚茗, 李超文, 李晓勇. 2005. 南兴安岭晚中生代中酸性火山岩的岩石成因[J]. *岩石学报*, 21(3): 737–748.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2005. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U–Pb 年龄及地质意义[J]. *岩石学报*, 21(3): 749–762.
- 何鹏, 郭硕, 张天福, 张跃龙, 苏航, 付启龙. 2022. 大兴安岭南端乌拉盖地区满克头鄂博组火山岩年代学、地球化学研究及构造环境分析[J]. *中国地质*, 49(2): 601–619.
- 洪大卫, 王式铤, 谢锡林, 张季生. 2000. 兴安造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. *地学前缘*, (2): 441–456.

- 江思宏, 梁清玲, 刘翼飞, 刘妍. 2012. 内蒙古大井矿区及外围岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时间的约束[J]. 岩石学报, 28(2): 495-513.
- 江思宏, 聂凤军, 白大明, 刘翼飞, 刘妍. 2011a. 内蒙古白音诺尔铅锌矿床印支期成矿的年代学证据[J]. 矿床地质, 30(5): 787-798.
- 江思宏, 聂凤军, 刘翼飞, 侯万荣, 白大明, 刘妍, 梁清玲. 2011b. 内蒙古孟恩陶勒盖银多金属矿床及其附近侵入岩的年代学[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6): 1755-1769.
- 李剑锋, 王可勇, 权鸿雁, 孙丰月, 赵来时, 张雪冰. 2016. 大兴安岭南段红岭铅锌矿床岩浆演化序列与成矿动力学背景探讨[J]. 岩石学报, 32(5): 1529-1542.
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 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古板块碰撞时限的约束[J]. 岩石学报, (3): 565-582.
- 刘晨, 孙景贵, 邱殿明, 古阿雷, 韩吉龙, 孙凡婷, 杨梅, 冯洋洋. 2017. 大兴安岭北段东坡小莫尔可地区中生代火山岩成因及其地质意义: 元素、Hf 同位素地球化学与锆石 U-Pb 同位素定年[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(4): 1138-1158.
- 刘伟, 潘小菲, 谢烈文, 李禾. 2007. 大兴安岭南段林西地区花岗岩类的源岩: 地壳生长的时代和方式[J]. 岩石学报, 23(2): 441-460.
- 马星华, 陈斌, 赖勇, 鲁颖淮. 2009. 内蒙古敖伦花斑岩矿床成岩成矿年代学及地质意义[J]. 岩石学报, 25(11): 247-258.
- 毛景文, 周振华, 武广, 江思宏, 刘成林, 李厚民, 欧阳荷根, 刘军. 2013. 内蒙古及邻区矿床成矿规律与成矿系列[J]. 矿床地质, 32(4): 715-729.
- 梅微. 2014. 内蒙古赤峰北部地区中生代岩浆作用与成矿研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 1-174.
- 潘小菲, 郭利军, 王硕, 薛怀民, 侯增谦, 童英, 李志明. 2009. 内蒙古维拉斯托铜锌矿床的白云母 Ar/Ar 年龄探讨[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 473-479.
- 邵济安, 张履桥. 2002. 华北北部中生代岩墙群[J]. 岩石学报, (3): 312-318.
- 邵济安, 张履桥, 牟保磊. 1999. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用[J]. 地学前缘, (4): 339-346.
- 邵济安, 张履桥, 肖庆辉, 李晓波. 2005. 中生代大兴安岭的隆起——一种可能的陆内造山机制[J]. 岩石学报, (3): 789-794.
- 施璐, 郑常青, 姚文贵, 李娟, 徐久磊, 高源, 崔芳华. 2013. 大兴安岭中段五岔沟地区蛤蟆沟林场 A 型花岗岩年代学、岩石地球化学及构造背景研究[J]. 地质学报, 87(9): 1264-1276.
- 苏茂荣, 李英雷, 刘汇川, 邵永旭, 张青, 周飞, 曹磊, 孙景浩. 2020. 中亚造山带东段早元古代结晶基底: 来自中蒙边境花岗岩和沉积地层的证据[J]. 中国地质, 47(4): 1186-1203.
- 田德欣, 王清海, 葛文春, 张彦龙, 陈会军, 杨浩. 2013. 内蒙古阿尔山绿水碱长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 世界地质, 32(4): 681-693.
- 万多, 李剑锋, 王一存, 王可勇, 王志高, 魏良民. 2014. 内蒙古红岭铅锌多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 39(6): 687-695.
- 万乐. 2015. 内蒙古五十家子地区中生代花岗岩地质特征及形成构造背景[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-69.
- 王兴安, 徐仲元, 刘正宏, 朱凯. 2012. 大兴安岭中部柴河地区钾长花岗岩的成因及构造背景: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 同位素年代学的制约[J]. 岩石学报, 28(8): 2647-2655.
- 魏巍, 陈建平, 黄行凯, 祝新友, 徐巧, 刘孜. 2017. 大兴安岭中南段哈力黑坝岩体岩浆混合作用: 暗色包体岩相学、年代学和锆石 Hf 同位素启示[J]. 矿产勘查, 8(6): 948-956.
- 吴福元, 林强, 江博明. 1997. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义[J]. 科学通报, (20): 2188-2192.
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, (4): 313-318.
- 吴福元, 孙德有, 张广良, 任向文. 2000. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. 高校地质学报, (3): 379-388.
- 吴冠斌, 刘建明, 曾庆栋, 孙华山, 刘铭涛. 2013. 内蒙古大兴安岭双尖子山铅锌银矿床成矿年龄[J]. 矿物学报, 33(S2): 619.
- 杨奇荻, 郭磊, 王涛, 曾涛, 张磊, 童英, 史兴俊, 张建军. 2014. 大兴安岭中南段甘珠尔庙地区晚中生代两期花岗岩的时代、成因、物源及其构造背景[J]. 岩石学报, 30(7): 1961-1981.
- 翟德高, 刘家军, 杨永强, 王建平, 定立, 刘星旺, 张梅, 要梅娟, 苏犁, 张红雨. 2012. 内蒙古黄岗梁铁锡矿床成岩、成矿时代与构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 31(4): 513-523.
- 张超, 杨伟红, 和钟铎, 吴浩, 吴庆. 2014. 大兴安岭中南段塔尔气地区满克头鄂博组流纹岩年代学和地球化学研究[J]. 世界地质, 33(2): 255-265.
- 张连昌, 陈志广, 周新华, 英基丰, 王非, 张玉涛. 2007. 大兴安岭根河地区早白垩世火山岩深部源区与构造-岩浆演化: Sr-Nd-Pb-Hf 同位素地球化学制约[J]. 岩石学报, (11): 2823-2835.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 王焰, 王元龙. 2011. 花岗岩与地壳厚度关系探讨[J]. 大地构造与成矿学, 35(2): 259-269.
- 周漪, 葛文春, 王清海. 2011. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的成因——地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石矿物学杂志, 30(5): 901-923.
- 周振华, 吕林素, 冯佳睿, 李超, 李涛. 2010. 内蒙古黄岗砂卡岩型锡铁矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(3): 667-679.
- 祝新友, 张志辉, 付旭, 李柏阳, 王艳丽, 焦守涛, 孙雅琳. 2016. 内蒙古赤峰维拉斯托大型锡多金属矿的地质地球化学特征[J]. 中国地质, 43(1): 188-208.