

· 专题研究 ·

大兴安岭南段海流特高分异花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成矿意义

章培春¹, 彭 勃¹, 赵金忠², 张占飞², 赵 静², 郭广飞³, 左玉山², 贺 吉², 王 鑫²

(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研究院 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. 内蒙古矿业开发有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘 要: 大兴安岭南段在晚侏罗世-早白垩世期间集中爆发有多期岩浆活动, 深入讨论花岗岩岩石成因及岩浆演化过程对该地区中生代地球动力学背景及成矿作用研究具有重要意义。本文报道了海流特中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩、花岗伟晶岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和全岩地球化学数据。海流特中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩、花岗伟晶岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 142.0 ± 0.7 Ma、 141.2 ± 1.1 Ma、 139.7 ± 2.4 Ma, 属早白垩世。样品主量元素表现为高硅、富碱, A/CNK 值为 $1.01 \sim 1.18$, 平均 1.09 , 属弱过铝质。微量元素富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素 (LILE), 亏损 Ba、Sr、P、Ti 等高场强元素 (HFSE), Eu 负异常明显 ($\delta\text{Eu} = 0.012 \sim 0.040$), Zr+Nb+Ce+Y 值介于 $38.25 \times 10^{-6} \sim 258.2 \times 10^{-6}$ 之间, 小于 350×10^{-6} , 锆石饱和温度为 $723 \sim 778^\circ\text{C}$, 未见原生白云母及碱性暗色矿物。岩浆演化过程中经历了斜长石、钾长石等矿物的分离结晶, 且 Zr/Hf、La/Ta、La/Nb 值低于正常花岗岩范围, Nb/Ta、Y/Ho 值处于正常花岗岩区域, 稀土四分组效应参数 $\text{TE}_{1,3}$ 介于 $1.18 \sim 1.34$ 之间, 大于 1.1 。综上, 海流特岩体属早白垩世高分异 I 型花岗岩, 在结晶分异过程中存在弱的熔-流体相互作用, 具有钨锡、稀有金属等成矿潜力。

关键词: 高分异花岗岩; 年代学; 地球化学; 成矿意义; 海流特; 大兴安岭南段

中图分类号: P581; P597⁺.3; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)06-1029-18

Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and mineralization significance of Hailiute highly fractionated granites in the Southern Da Hinggan Mountains

ZHANG Pei-chun¹, PENG Bo¹, ZHAO Jin-zhong², ZHANG Zhan-fei², ZHAO Jing², GUO Guang-fei³,
ZUO Yu-shan², HE Ji² and WANG Xin²

(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 Mining Development Co., Ltd., Hohhot 010010, China)

Abstract: There were multiple episodes of magmatism in the Southern Da Hinggan Mountains during the Late Jurassic to Early Cretaceous, and an in-depth study of the petrogenesis and evolutionary process is of great geological significance to reveal the Mesozoic geodynamic background and mineralization. In this paper, LA-ICP-MS zircon

收稿日期: 2022-03-24; 接受日期: 2022-09-19; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20221684); 国家自然科学基金项目 (4200020803); 国家重点研发计划 (2021YFC2900100); 内蒙古自治区地质勘查基金项目 (NMKD2015-40)

作者简介: 章培春 (1986-), 男, 博士研究生, 研究方向为固体矿产勘查与矿床学研究, E-mail: nmddyzpc@163.com; 通讯作者: 彭 勃 (1989-), 男, 副研究员, 主要从事固体矿产勘查与矿床学方面的研究, E-mail: p. engbo@163.com。

U-Pb dating and whole-rock geochemistry for medium-grained adamellite, fine-grained adamellite and granite pegmatite in Hailiute area were carried out. The zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average ages of the medium-grained adamellite, fine-grained adamellite and granite pegmatite are 142.0 ± 0.7 Ma, 141.2 ± 1.1 Ma and 139.7 ± 2.4 Ma respectively, belonging to the Early Cretaceous. They have high SiO_2 and total alkali contents, and their A/CNK value is $1.01 \sim 1.18$, with an average value of 1.09, which is weak peraluminous. They are characterized by enrichment of large ion lithophile elements such as Rb, Th and K and depletion of high field strength elements including Ba, Sr, P and Ti, with extremely negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.012 \sim 0.040$). The $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ value of them is between 38.25×10^{-6} and 258.2×10^{-6} , less than 350×10^{-6} . The zircon saturation temperature of them is 723°C to 778°C . The primary muscovite and alkaline-mafic minerals are not found among them. The magma experienced the fractional crystallization of plagioclase and K-feldspar during its evolution. The Zr/Hf , La/Ta and La/Nb of them are lower than the range of normal granite, however Nb/Ta and Y/Ho of them are in the area of normal granite. The parameters of tetrad effect of rare earth element ($\text{TE}_{1,3}$) of them is between 1.18 and 1.34, greater than 1.1. In conclusion, the Hailiute granite belongs to early Cretaceous highly differentiated I-type granite. It has weak interaction between melt and fluid in the process of crystallization differentiation, which can promote the formation of tungsten, tin and rare metals minerals.

Key words: highly fractionated granites; geochronology; geochemistry; mineralization significance; Hailiute; the Southern Da Hinggan Mountains

Fund support: Project of China Geological Survey (DD20221684); National Natural Science Foundation of China (4200020803); National Key Research and Development Program of China (2021YFC2900100); Geological Exploration Fund Project of Inner Mongolia (NMKD2015-40)

大兴安岭南段位于中亚造山带东段,关于其中生代地球动力学背景及成矿作用一直以来是国内外学者研究和讨论的热点(毛景文等, 2005; 许文良等, 2013; Wang *et al.*, 2015)。已有研究表明,大兴安岭南段在晚侏罗世-早白垩世期间集中爆发有多期岩浆活动,包括有双峰式火山岩、A型花岗岩及I型花岗岩,形成了诸如五十家子、北大山、海流特、小乌兰沟等大型花岗质岩基及白音查干东山、维拉斯托、黄岗、毛登-小孤山、石灰窑等成矿岩体(周振华等, 2010a, 2010b; 翟德高等, 2012; 孙艳等, 2015; 刘新等, 2017; 姚磊等, 2017; 季根源等, 2021; 武广等, 2021; 尚永明等, 2022; 章培春等, 2022),这些岩体多数具有高硅、富碱、富含挥发分、Eu负异常显著等特点,与钨锡、稀有金属、萤石等矿产密切相关。武广等(2021)与张天福等(2019)对维拉斯托岩体进行了研究,探讨了岩浆演化与成矿的关系,建立了维拉斯托稀有金属-锡多金属矿床成矿模式。然而,该区域其他岩体,尤其是具有一定钨锡及稀有金属矿化线索的岩体,包括海流特、小乌兰沟、五十家子等,还缺乏岩石成因与成矿作用联系的探讨,这在一定程度上制约了大兴安岭南段稀有金属、钨锡等矿产的找矿突破及成矿规律总结。

海流特岩体位于大兴安岭南段南西侧,北东距北大山-维拉斯托岩体约60 km,南西20 km处为石灰窑岩体,在空间位置上,三者同属大兴安岭南段北东向构造-岩浆岩带,可能具有相似的构造背景及成岩成矿作用。目前,维拉斯托岩体已形成大型稀有金属-锡多金属矿床,石灰窑岩体形成大型稀有金属矿床,海流特岩体也发现有Rb、Be、W、Sn、Bi等元素地球化学异常及与石英脉、伟晶岩脉密切相关的钨锡、锂铷、铌钽、萤石矿化,指示海流特岩体具有一定成矿潜力。

本次工作选取海流特岩体为研究对象,在详尽的野外地质调查基础上,开展岩相学、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和全岩地球化学研究,并结合区域中生代构造演化及成矿规律,对海流特岩体的成岩时代、岩石成因、岩浆演化及其成矿意义提供约束,以期为大兴安岭南段中生代成岩成矿作用研究提供依据。

1 区域地质背景

大兴安岭南段大地构造位置处于西伯利亚克拉通与华北克拉通之间(图1a),北西以二连-贺根山-

黑河断裂为界,南至索伦-西拉沐伦断裂,东临嫩江-白城断裂,并以大兴安岭主脊断裂为界,划分为西坡、主峰及东坡3部分(图1b)。

大兴安岭南段出露的地层主要包括古元古界、古生界石炭系、二叠系,中生界侏罗系、白垩系及新生界第四系(图1b),其中以古生界二叠系及中生界侏罗系、白垩系分布最为广泛。古元古界主要包括锡林浩特岩群,变质程度为绿片岩相-角闪岩相,岩石类型包括黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩、黑云片岩、二云片岩、斜长角闪岩及变粒岩等。古生界主要包括石炭系、二叠系,其中石炭系为一套连续沉积的碎屑岩、碳酸盐岩及火山岩组合;而二叠系

包括上下两部分,下部总体为一套浅海-滨海相连续沉积建造,局部为深海-海陆交互相沉积,上部为一套陆相湖相沉积建造,局部夹有中-中酸性火山岩。中生界主要包括侏罗系、白垩系,两者形成了规模较大的火山-沉积盖层,底部以酸性、中酸性火山碎屑岩、熔岩为主,顶部为中基性熔岩盖层。新生界主要为第四系阿巴嘎组玄武岩及湖积、冲洪积、冲积、风积等松散堆积物,集中分布于沟谷与平缓洼地之中。

大兴安岭南段岩浆岩主要以中酸性侵入岩为主,形成时代多为燕山期,次为印支期、华力西期,其中燕山期侵入岩主要包括花岗闪长岩、石英闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩、碱性花岗岩及花岗伟晶岩

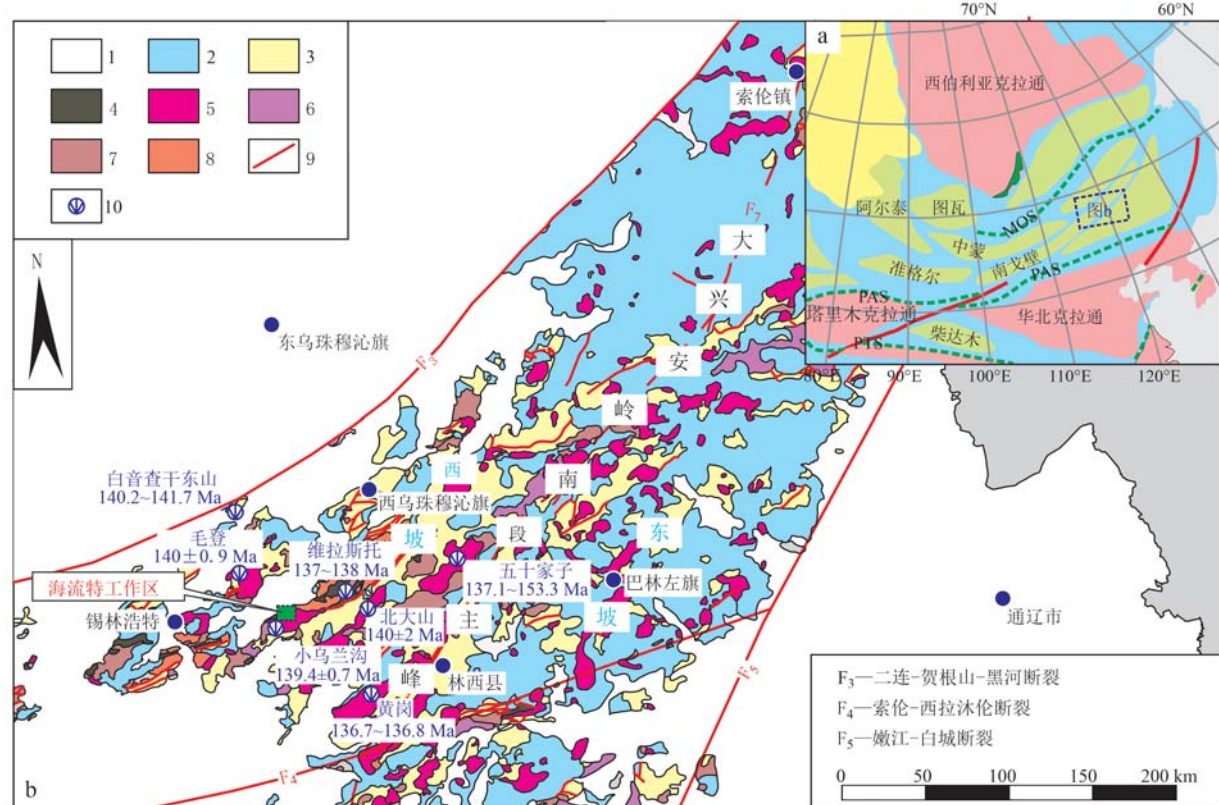


图1 大兴安岭南段大地构造图(a, 据 Tang *et al.*, 2016)和区域地质简图(b, 据内蒙古自治区地质调查研究院, 2018^①修改)

Fig. 1 Tectonic setting(a, after Tang *et al.*, 2016) and regional geological map of the Southern Da Hinggan Mountains (b, modified after Inner Mongolia Geological Survey Institute, 2018^①)

1—第四系; 2—中生代火山-沉积地层; 3—上古生界; 4—古元古界; 5—晚侏罗-早白垩世花岗岩; 6—三叠纪侵入岩; 7—二叠纪侵入岩; 8—石炭纪侵入岩; 9—断层; 10—U-Pb 同位素年龄(数据来源: 周振华等, 2010a, 2010b; 刘新等, 2017; 姚磊等, 2017; 季根源等, 2021; 武广等, 2021; 章培春等, 2022; 尚永明等, 2022)

1—Quaternary; 2—Mesozoic volcano-sedimentary strata; 3—Upper Paleozoic strata; 4—Proterozoic metamorphic strata; 5—Late Jurassic-Early Cretaceous granitoids; 6—Triassic intrusive rocks; 7—Permian intrusive rocks; 8—Carboniferous intrusive rocks; 9—fault; 10—U-Pb isotopic age (ages data from Zhou Zhenhua *et al.*, 2010a, 2010b; Liu Xin *et al.*, 2017; Yao Lei *et al.*, 2017; Ji Genyuan *et al.*, 2021; Wu Guang *et al.*, 2021; Zhang Peichun *et al.*, 2022; Shang Yongming *et al.*, 2022)

① 内蒙古自治区地质调查研究院. 2018. 内蒙古自治区矿产地质图.

等,岩石类型主要以A型、I型为主, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为正值(周振华等, 2010a, 2010b; 刘新等, 2017; 姚磊等, 2017; Ouyang *et al.*, 2015; 武广等, 2021; 尚永明等, 2022; 季根源等, 2022; 章培春等, 2022)。

大兴安岭南段构造格架整体以北东向为主,次为东西、北西及南北向,其中北东、东西向构造多为区域性深大断裂,具有长期性、反复性,对区域地层、岩浆岩的分布具有一定控制作用。

2 岩体特征及样品采集

海流特岩体位于大兴安岭南段南西侧(图1b),主要呈岩基状沿北东-南西向分布,岩石类型主要为中粒二长花岗岩及细粒二长花岗岩,二者为相变接触关系。其中中粒二长花岗岩分布于岩基内侧,其间见有大量石英脉穿切,局部伴有钨、铌钽矿化;细粒二长花岗岩分布于岩基外侧,其间不仅见有石英脉穿切,还见有大量伟晶岩脉贯入,脉岩方向以北东

向为主,北西向次之(图2)。

本次用于进行年代学、地球化学测试的样品为中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩及花岗伟晶岩,具体采样位置见图2。中粒二长花岗岩(HLT-Z-1)($E116^{\circ}46'52''$, $N43^{\circ}55'16''$),具中粒花岗结构,块状构造(图3a),主要包括斜长石、钾长石、石英及黑云母,其中钾长石呈半自形粒状,条纹构造发育,粒径2~3 mm,约占40%(体积分数);斜长石呈半自形板状,聚片双晶发育,粒径1~2 mm,约占35%;石英呈他形粒状,粒径2 mm左右,约占23%;黑云母深棕褐色,呈鳞片状,具镁铁质特征,粒径1~2 mm,约占2%(图3d)。细粒二长花岗岩(HLT-X-2)($E116^{\circ}52'20''$, $N43^{\circ}57'44''$),具细粒花岗结构,块状构造(图3b),主要由钾长石、斜长石、石英及少量黑云母组成,其中钾长石呈半自形粒状,粒径0.5~1.5 mm,约占35%;斜长石呈半自形粒状,局部见聚片双晶,粒径0.5~1 mm,约占40%;石英呈他形不规则状,粒径0.5~1 mm,约占21%;黑云母深棕褐色,呈片状,具镁铁质特征,粒径0.5~1 mm,约占4%(图3e)。花

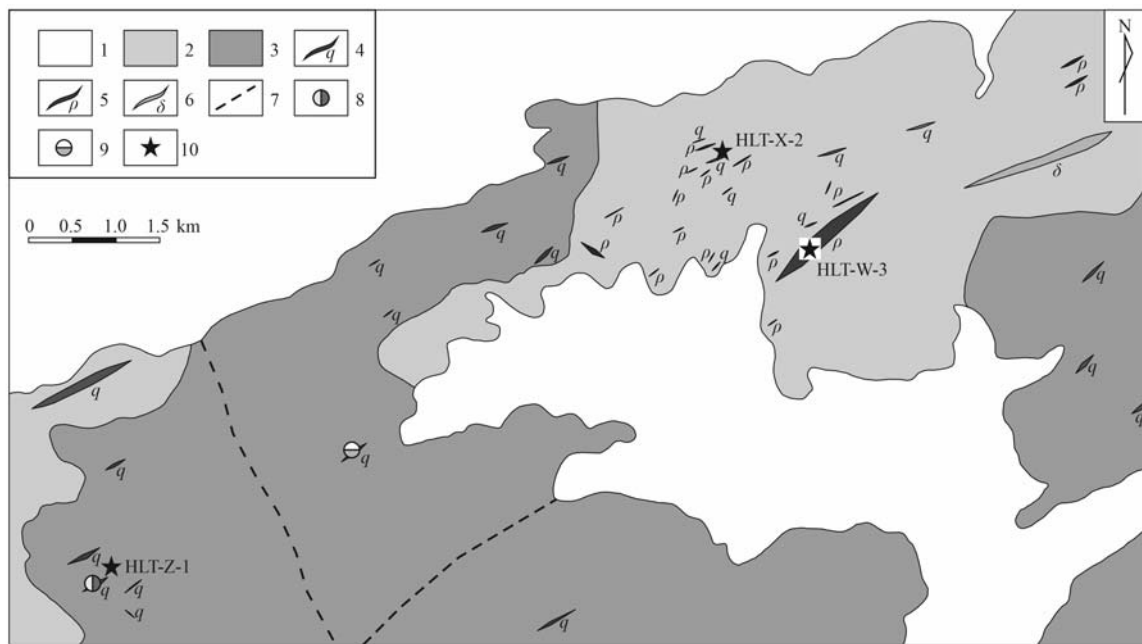


图2 大兴安岭南段海流特地区地质简图(据内蒙古自治区地质调查研究院, 2018^①修改)

Fig. 2 Geological map of Hailiute area in the Southern Da Hinggan Mountains (modified after Inner Mongolia Geological Survey Institute, 2018^①)

1—第四系; 2—细粒二长花岗岩; 3—中粒二长花岗岩; 4—石英脉; 5—花岗伟晶岩脉; 6—闪长岩脉; 7—断层; 8—钨矿化; 9—铌钽矿化; 10—采样位置

1—Quaternary; 2—fine-grained adamellite; 3—medium-grained adamellite; 4—quartz vein; 5—granite pegmatite vein; 6—diorite vein; 7—fault; 8—tungsten mineralization; 9—niobium-tantalum mineralization; 10—sampling location

① 内蒙古自治区地质调查研究院. 2018. 内蒙古自治区锡林郭勒盟锡林浩特等四幅 1:5 万地质矿产图.

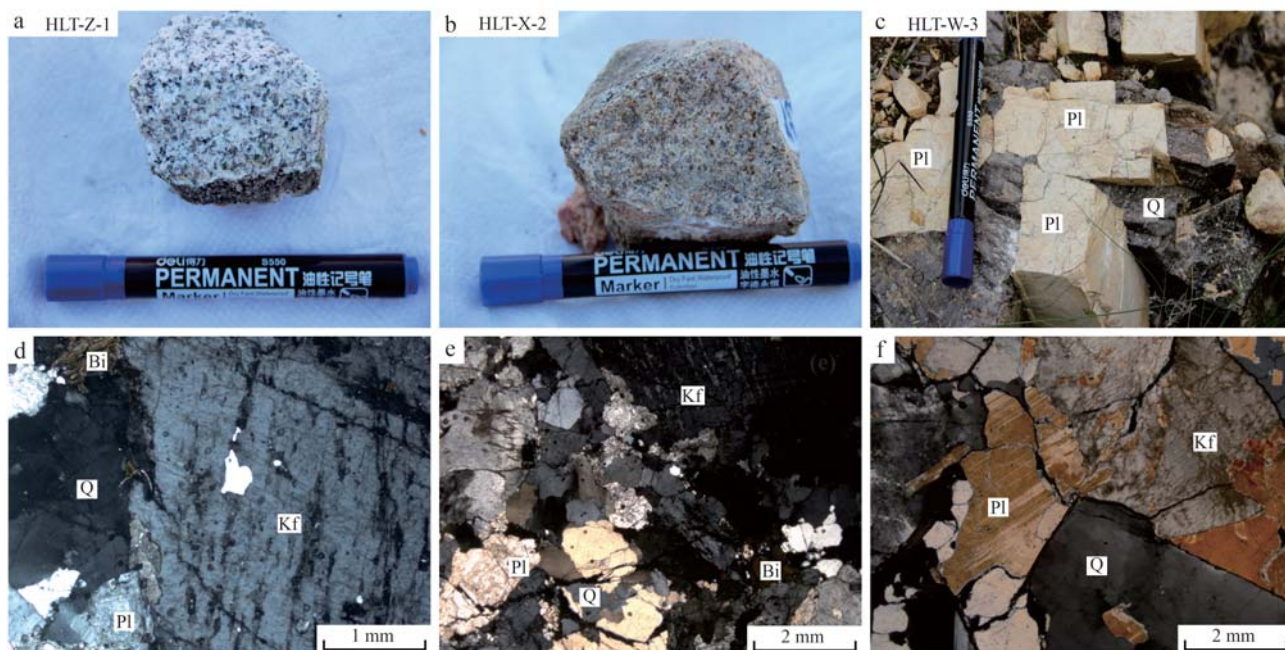


图3 海流特中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩和花岗伟晶岩手标本及镜下显微照片

Fig. 3 Hand specimens and microphotographs of the medium-grained adamellite, fine-grained adamellite and granite pegmatite in Hailiute area

a—中粒二长花岗岩手标本; b—细粒二长花岗岩手标本; c—花岗伟晶岩手标本; d—中粒二长花岗岩(正交偏光),粒状结构,钾长石发育条纹结构,黑云母淡黄—深棕色,片状; e—细粒二长花岗岩(正交偏光),粒状结构,发育钾长石、斜长石、石英、黑云母,石英呈他形粒状,分布于斜长石颗粒之间; f—花岗伟晶岩(正交偏光),主要由钾长石、斜长石、石英组成,颗粒较大; Bi—黑云母; Pl—斜长石; Kf—钾长石; Q—石英

a—hand specimens of medium-grained adamellite; b—hand specimens of fine-grained adamellite; c—hand specimens of granite pegmatite; d—orthogonal-polarized light microphotographs of medium-grained adamellite with granular structure, in which K-feldspar develops stripe structure. Biotite is flaky and light yellow dark brown in color; e—orthogonal-polarized light microphotographs of fine-grained adamellite with granular structure, developing K-feldspar, plagioclase, quartz and biotite, and quartz occurring in plagioclase with an irregular shape; f—orthogonal-polarized light microphotographs of granite pegmatite, mainly consisting of K-feldspar, plagioclase and quartz coarse grains; Bi—biotite; Pl—plagioclase; Kf—K-feldspar; Q—quartz

花岗伟晶岩(HLT-W-3)(E116°53'01", N43°57'05"),具花岗伟晶结构,块状构造,粒径4~8 cm,少数可达10 cm(图3c),斜长石呈半自形板状,发育聚片双晶,干净无蚀变,约占40%;钾长石呈半自形粒状—半自形板状,为条纹长石、微斜长石和正长石,约占20%;石英呈他形粒状,约占39%;黑云母呈片状,约占1%(图3f)。

3 分析方法

主量、微量元素分析由内蒙古自治区矿产实验研究所完成,其中FeO采用重铬酸钾滴定的容量法,其余主量元素测试选用XRF玻璃熔片法,分析精度、准确度优于5%;微量元素测试首先采用HF+HNO₃密封溶解,其次加入Rh内标溶液转为1% HNO₃介质,最终选用ICP-MS测定,分析精度、准确度优于10%。

锆石挑选由内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室完成,首先将样品粉碎、淘洗,并利用电磁、重液分选,然后在双目镜下进行优选、提纯。锆石制靶、阴极发光(CL)照相由北京锆年领航科技有限责任公司完成,首先将锆石颗粒置于环氧树脂之中,抛光后进行显微(反射光、透射光)及阴极发光(CL)照相,为锆石LA-ICP-MS U-Pb定年选点提供依据。

锆石LA-ICP-MS U-Pb同位素分析由内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室完成,仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的Newwave-UP213激光剥蚀系统。激光剥蚀孔径为32 μm,频率为10 Hz,能量密度约为2.5 J/cm²,以He为载气。锆石U-Pb年龄的测定采用GJ-1为外标的校正方法,每隔10个样品分析点测1次标样,并以Si作为标准,测定锆石中U、Pb和Th的含量。数据处理采用ICPMS-DataCal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)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

海流特中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩、花岗

伟晶岩样品中锆石多呈透明状,无色或浅黄,金刚光泽,四方柱状,震荡环带明显,韵律清晰,粒径以 60~180 μm 为主,长宽比多介于 1.5:1~2.5:1 之间,少数达 4:1(图 4)。此外,锆石 U 含量为 139×10^{-6} ~ 2161×10^{-6} ,Th 含量为 104×10^{-6} ~ 1099×10^{-6} ,Th/U 值介于 0.46~1.35 之间,大于 0.1(表 1),指示样品

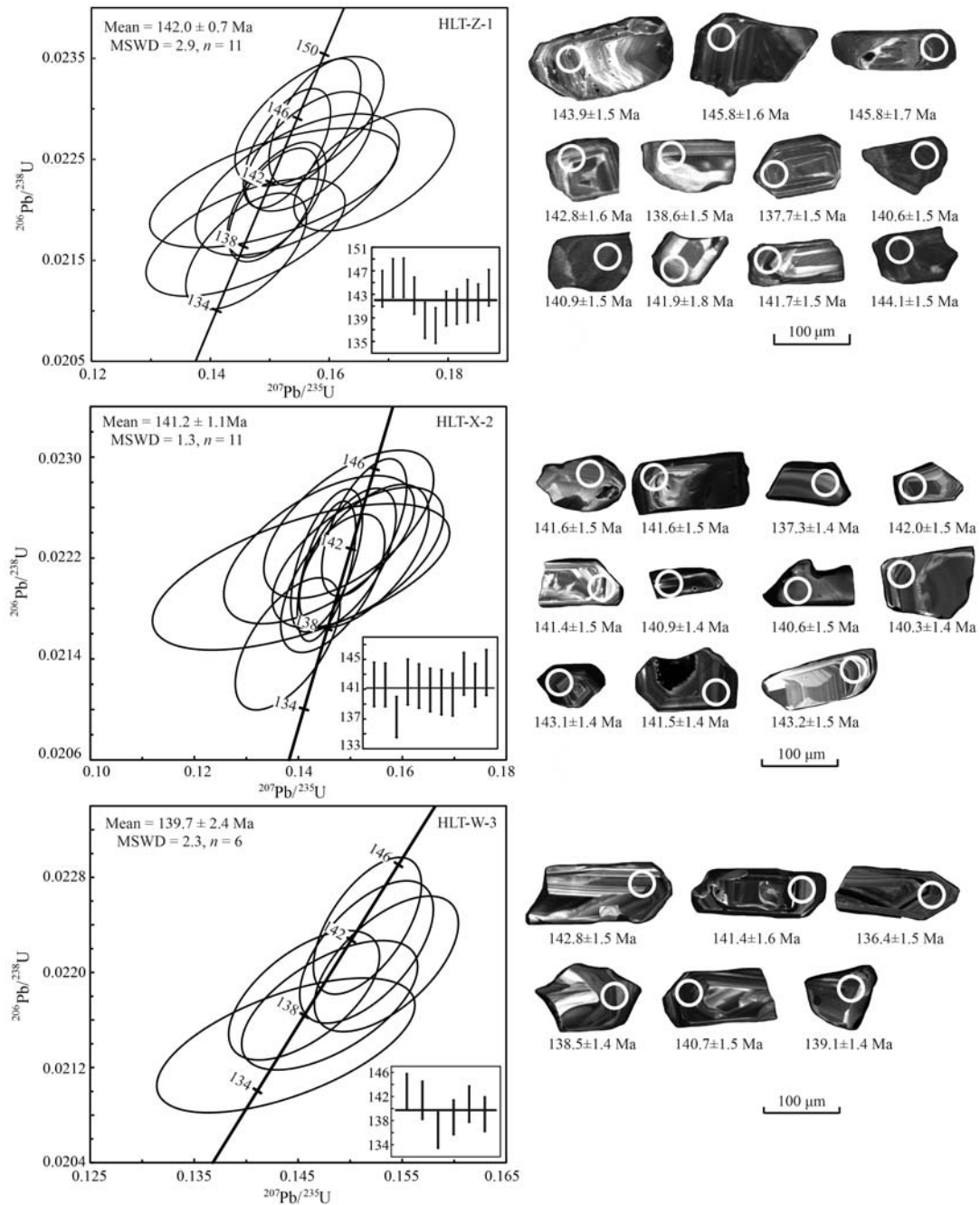


图 4 海流特地区中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩及花岗伟晶岩锆石阴极发光图像及 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Concordia diagram of zircon U-Pb ages and CL images of medium-grained adamellite, fine-grained adamellite and granite pegmatite in the Hailiute area

表 1 海流特中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩和花岗伟晶岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb ages of zircons from the medium-grained adamellite, fine-grained adamellite and granite pegmatite in Hailiute area

测点	$w_{\text{B}}/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma	
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
HLT-Z-1												
1	9	268	365	0.73	0.050 3	0.001 4	0.156 6	0.004 4	0.022 6	0.000 2	143.9	1.5
2	16	344	649	0.53	0.050 0	0.000 9	0.157 6	0.003 2	0.022 9	0.000 3	145.8	1.6
3	8	209	315	0.67	0.049 3	0.001 5	0.156 7	0.005 1	0.022 9	0.000 3	145.8	1.7
4	8	240	315	0.76	0.054 0	0.001 7	0.167 6	0.005 5	0.022 4	0.000 2	142.8	1.6
5	6	312	231	1.35	0.048 4	0.002 2	0.145 9	0.006 8	0.021 7	0.000 2	138.6	1.5
6	9	252	382	0.66	0.048 9	0.001 3	0.146 0	0.004 2	0.021 6	0.000 2	137.7	1.5
7	16	410	685	0.60	0.049 5	0.001 0	0.150 6	0.003 1	0.022 0	0.000 2	140.6	1.5
8	12	293	528	0.55	0.049 6	0.001 1	0.151 2	0.003 4	0.022 1	0.000 2	140.9	1.5
9	8	161	304	0.53	0.050 5	0.002 1	0.154 6	0.007 0	0.022 3	0.000 3	141.9	1.8
10	5	154	181	0.85	0.049 0	0.002 8	0.150 7	0.008 5	0.022 2	0.000 2	141.7	1.5
11	16	328	697	0.47	0.049 0	0.000 9	0.152 9	0.003 0	0.022 6	0.000 2	144.1	1.5
HLT-X-2												
1	7	146	314	0.46	0.049 7	0.001 6	0.152 5	0.005 1	0.022 2	0.000 2	141.6	1.5
2	6	160	237	0.67	0.049 7	0.002 2	0.151 5	0.006 7	0.022 2	0.000 2	141.6	1.5
3	8	192	380	0.50	0.046 4	0.001 4	0.137 9	0.004 1	0.021 5	0.000 2	137.3	1.4
4	5	164	228	0.72	0.047 0	0.002 4	0.144 0	0.007 5	0.022 3	0.000 2	142.0	1.5
5	16	338	719	0.47	0.047 6	0.000 9	0.145 4	0.002 8	0.022 2	0.000 2	141.4	1.5
6	29	1 099	1 178	0.93	0.047 7	0.000 7	0.145 4	0.002 3	0.022 1	0.000 2	140.9	1.4
7	3	104	139	0.75	0.046 9	0.003 9	0.140 5	0.011 7	0.022 1	0.000 2	140.6	1.5
8	9	236	390	0.61	0.048 4	0.001 3	0.146 6	0.004 1	0.022 0	0.000 2	140.3	1.4
9	13	323	541	0.60	0.049 3	0.001 1	0.152 7	0.003 3	0.022 4	0.000 2	143.1	1.4
10	10	254	441	0.58	0.048 8	0.001 2	0.149 5	0.003 8	0.022 2	0.000 2	141.5	1.4
11	5	146	231	0.63	0.048 4	0.002 1	0.149 7	0.006 7	0.022 5	0.000 2	143.2	1.5
HLT-W-3												
1	50	1 025	2 161	0.47	0.049 1	0.000 6	0.151 7	0.002 1	0.022 4	0.000 2	142.8	1.5
2	24	545	1 003	0.54	0.049 6	0.000 8	0.151 6	0.002 6	0.022 2	0.000 2	141.4	1.6
3	8	295	323	0.91	0.048 7	0.001 7	0.143 8	0.005 1	0.021 4	0.000 2	136.4	1.5
4	11	237	485	0.49	0.049 5	0.001 1	0.148 0	0.003 5	0.021 7	0.000 2	138.5	1.4
5	33	1 013	1 288	0.79	0.050 3	0.000 8	0.153 5	0.002 8	0.022 1	0.000 2	140.7	1.5
6	15	420	593	0.71	0.048 5	0.001 0	0.145 6	0.003 0	0.021 8	0.000 2	139.1	1.4

中锆石均为岩浆锆石。实验过程中,选取裂纹少、环带生长明显的锆石开展 LA-ICP-MS U-Pb 测试,共测 28 点,获中粒二长花岗岩(HLT-Z-1) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 137.7~145.8 Ma,加权平均年龄为 142.0 ± 0.7 Ma, MSWD 为 2.9;细粒二长花岗岩(HLT-X-2) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 137.3~143.2 Ma,加权平均年龄为 141.2 ± 1.1 Ma,MSWD 为 1.3;花岗伟晶岩(HLT-W-3) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 136.4~142.8 Ma,加权平均年龄为 139.7 ± 2.4 Ma,MSWD 为 2.3。

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量元素

海流特岩体主量元素组成见表 2。其中 SiO_2 含

量较高,介于 72.80%~76.06%之间, Al_2O_3 含量为 12.42%~15.22%,铝饱和指数 A/CNK 除 HLT-W-3-2(1.181)以外,其余均介于 1.0~1.11 之间, K_2O 含量为 5.13%~7.50%, Na_2O 含量为 1.98%~3.62%,相对富钾贫钠($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.44 \sim 3.77$), $\text{MgO} = 0.096\% \sim 0.300\%$,含量较低,其中花岗伟晶岩相对于中粒二长花岗岩及细粒二长花岗岩更加富碱,分异指数更高($DI_{\text{花岗伟晶岩}} = 96.2 \sim 96.8$; $DI_{\text{中、细粒二长花岗岩}} = 92.3 \sim 95.4$)。在 QAP 图解中(图 5a),样品基本落入二长花岗岩区域,在 A/NK-A/CNK 图解中,样品基本落入弱过铝质岩石系列中(图 5b)。综上,海流特岩体整体属相对富钾弱过铝质花岗岩类。

表 2 海流特中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩、花岗伟晶岩主量元素 ($w_B/\%$)、微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 含量
 Table 2 Major elements contents ($w_B/\%$) and trace elements contents ($w_B/10^{-6}$) of medium-grained adamellite, fine-grained adamellite and granite pegmatite from the Hailiute area

样品号	中粒二长花岗岩		细粒二长花岗岩		花岗伟晶岩	
岩石名称	HLT-Z-1-1	HLT-Z-1-2	HLT-X-2-1	HLT-X-2-2	HLT-W-3-1	HLT-W-3-2
SiO ₂	75.45	76.06	73.57	72.80	72.83	75.84
TiO ₂	0.140	0.140	0.190	0.110	0.020	0.016
Al ₂ O ₃	13.03	12.42	13.40	13.74	15.22	13.54
Fe ₂ O ₃	0.84	0.97	2.12	2.55	0.24	0.27
FeO	0.93	0.85	0.84	0.30	0.22	0.12
FeO ^T	1.69	1.72	2.75	2.59	0.44	0.36
MnO	0.027	0.025	0.040	0.036	0.008	0.006
MgO	0.190	0.150	0.300	0.200	0.120	0.096
CaO	0.670	0.670	0.360	0.420	0.350	0.064
Na ₂ O	3.15	3.19	3.62	3.61	3.21	1.98
K ₂ O	5.13	5.22	5.2	5.46	7.5	7.46
P ₂ O ₅	0.074	0.099	0.036	0.097	0.170	0.150
H ₂ O ⁺	0.57	0.43	0.53	0.66	0.32	0.30
LOI	0.60	0.43	0.42	0.57	0.40	0.26
Mg [#]	16.73	13.43	16.29	12.08	32.92	31.51
A/CNK	1.089	1.024	1.094	1.088	1.083	1.181
A/NK	1.212	1.138	1.155	1.158	1.134	1.193
DI	94.6	95.4	92.4	92.3	96.8	96.2
Ga	31.3	35.9	15.8	22.1	29.4	30.2
Rb	471	766	209	362	836	825
Ba	27.5	9.2	324.0	190.0	30.8	28.9
Th	28.80	14.50	17.90	23.80	2.32	1.88
U	1.27	1.94	1.77	2.31	3.32	6.30
Nb	47.1	30.8	11.2	20.4	7.2	9.1
Ta	2.07	2.78	1.01	1.59	1.23	1.09
Sr	7.39	2.59	70.00	51.80	19.10	19.70
Zr	132.0	71.2	113.0	94.2	16.0	12.3
Hf	19.20	13.80	6.54	7.76	2.23	1.20
La	10.20	16.40	14.00	15.80	0.75	0.78
Ce	52.20	67.50	38.90	39.90	1.50	1.65
Pr	2.97	5.56	4.08	4.57	0.25	0.27
Nd	12.10	19.60	14.90	16.70	0.99	0.82
Sm	3.11	4.83	3.35	3.83	0.77	0.47
Eu	0.20	0.18	0.27	0.22	0.05	0.07
Gd	3.20	4.12	2.89	3.14	1.07	0.60
Tb	0.70	0.89	0.67	0.73	0.39	0.25
Dy	4.89	5.31	4.27	4.47	3.21	1.97
Ho	0.97	1.09	0.91	0.86	0.67	0.45
Er	2.91	3.27	2.72	2.49	2.06	1.27
Tm	0.51	0.52	0.46	0.42	0.35	0.23
Yb	3.68	3.72	3.01	2.75	2.35	1.57
Lu	0.55	0.57	0.48	0.45	0.35	0.23
Sc	7.45	4.62	4.57	3.25	2.93	2.60
Y	26.9	28.1	30.9	29.3	23.4	15.2
LREE/HREE	4.64	5.85	7.83	8.62	0.41	0.62
ΣREE	98.19	133.56	136.07	147.30	14.76	10.63
δEu	0.019	0.012	0.026	0.019	0.017	0.040
δCe	2.26	1.70	1.22	1.12	0.83	0.86
(La/Yb) _N	1.87	2.97	3.14	3.87	0.22	0.33
(La/Sm) _N	2.06	2.14	2.63	2.59	0.61	1.04
(Gd/Yb) _N	0.70	0.89	0.77	0.92	0.37	0.31
10 000 Ga/Al	4.54	5.46	2.23	3.04	3.65	4.21
<i>t</i> _{Zr} /°C	778	723	764	748	—	—
TE _{1,3}	1.34	1.30	1.18	1.18	1.20	1.31

注: $t_{Zr}/^{\circ}\text{C} = \{12\,900 / [\ln D_{Zr(\text{熔体})} + 0.85 M + 2.95]\} - 273$, 其中 $D_{Zr(\text{熔体})} = 496\,000 / \text{全岩中的 Zr 含量}$, 此外, 令 $\text{Si} + \text{Al} + \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Na} + \text{K} + \text{P} = 1$ (原子分数), 则全岩岩石化学参数 $M = (\text{Na} + \text{K} + 2\text{Ca}) / (\text{Si} + \text{Al})$ (Watson and Harrison, 1983; 秦江锋等, 2005); $\text{TE}_{1,3} = \{ [\text{Ce}_{\text{cn}} / (\text{La}_{\text{cn}}^{2/3} \times \text{Nd}_{\text{cn}}^{1/3}) \times \text{Pr}_{\text{cn}} / (\text{La}_{\text{cn}}^{1/3} \times \text{Nd}_{\text{cn}}^{2/3})]^{1/2} \times [\text{Tb}_{\text{cn}} / (\text{Gd}_{\text{cn}}^{2/3} \times \text{Ho}_{\text{cn}}^{1/3}) \times \text{Dy}_{\text{cn}} / (\text{Gd}_{\text{cn}} \times \text{Ho}_{\text{cn}}^{2/3})]^{1/2} \}^{1/2}$ (Irber, 1999)。

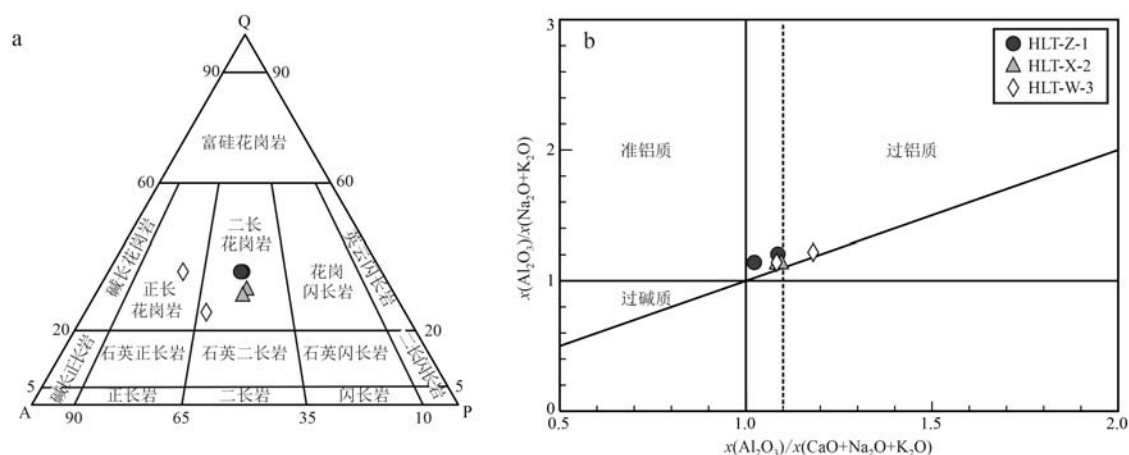


图5 海流特中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩及花岗伟晶岩 QAP 图 (a, 据 Le Maitre *et al.*, 2004) 和 A/NK-A/CNK 图 (b, 据 Maniar *et al.*, 1989)

Fig. 5 QAP diagram (a, after Le Maitre *et al.*, 2004) and A/NK-A/CNK diagram (b, after Maniar *et al.*, 1989) of medium-grained adamellite, fine-grained adamellite and granite pegmatite from the Hailiute area

4.2.2 微量元素

海流特岩体微量元素组成见表2, 样品稀土总量介于 $10.63 \times 10^{-6} \sim 147.30 \times 10^{-6}$ 之间, $(La/Yb)_N$ 值为 $0.22 \sim 3.87$, LREE/HREE 值为 $0.41 \sim 8.62$, 负 Eu 异常明显 ($\delta Eu = 0.012 \sim 0.04$)。在稀土元素配分曲线上, 花岗伟晶岩轻稀土元素含量相对较少, 重稀土元素相对富集, 呈现左倾特征; 而中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对平坦, 呈现略微右倾“海鸥”型特征 (图 6a)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 样品明显富集

Rb、Th、K 等大离子亲石元素 (LILE), 而亏损 Ba、Sr、Ti 等高场强元素 (HFSE) (图 6b), $Zr+Nb+Ce+Y$ 值介于 $38.25 \times 10^{-6} \sim 258.2 \times 10^{-6}$ 之间, 远小于 350×10^{-6} 。

5 讨论

5.1 成岩时代

已有研究表明, 在晚侏罗世—早白垩世期间, 大兴安岭南段集中爆发有多期岩浆活动, 成岩时限为

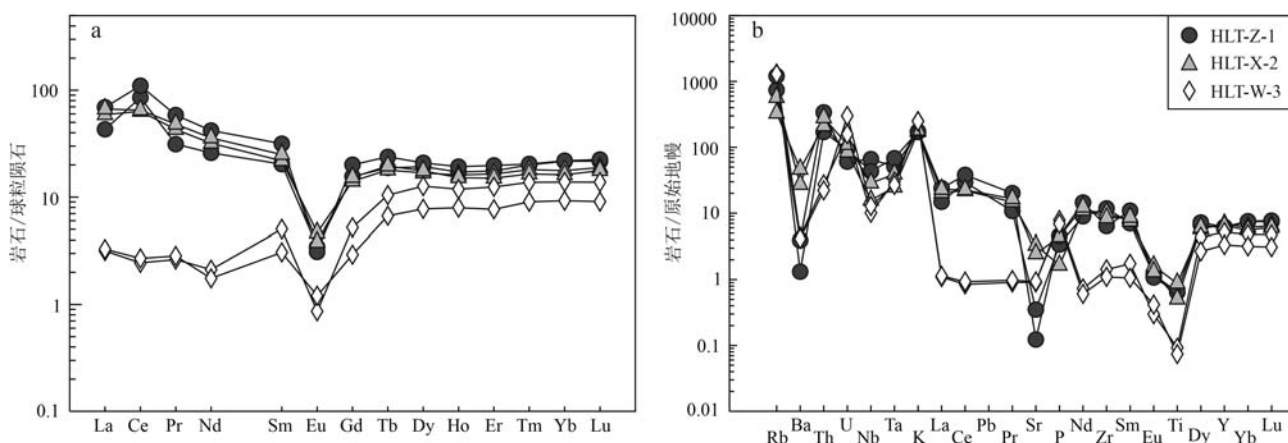


图6 海流特中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩及花岗伟晶岩球粒陨石标准化稀土模式配分图 (a, 标准化值据 Boynton, 1984) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element multi-variation diagrams (b) for medium-grained adamellite, fine-grained adamellite and granite pegmatite from the Hailiute area (chondrite-normalization and primitive mantle-normalization values from Boynton, 1984 and Sun and McDonough, 1989)

153.3~136.7 Ma(周振华等, 2010a, 2010b; 刘新等, 2017; 姚磊等, 2017; 季根源等, 2021; 武广等, 2021; 尚永明等, 2022; 章培春等, 2022)(图 1b)。海流特岩体位于大兴安岭南段南西侧, 本文共获得 3 组锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄, 分别为 142.0 ± 0.7 Ma、 141.2 ± 1.1 Ma、 139.7 ± 2.4 Ma, 与区域上北大山岩体、小乌兰沟岩体、五十家子岩体以及维拉斯托、黄岗、毛登-小孤山、白音查干东山等矿床成矿岩体所获得的锆石 U-Pb 年龄基本一致, 指示在 142.0~139.7 Ma 期间, 海流特地区与区域同时发生了早白垩世花岗岩类的侵位。此外, 大多数学者认为大兴安岭南段早白垩世岩浆岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值多介于 -0.80~+14.20 之间, 且多具有年轻的二阶段模式年龄 (<1.0 Ga)(Ouyang *et al.*, 2015), 指示大兴安岭南段早白垩世岩浆岩包括海流特岩体在内, 其源区可能同为新生下地壳。

5.2 岩石成因

已有研究表明, 典型 S 型花岗岩通常具有强过铝质, 且含有白云母、堇青石等富铝矿物, 而海流特岩体 A/CNK 值除 HLT-W-3-2 外, 其余均处于 1.00~1.11 之间 (1.024~1.094), 指示海流特岩体不可能为 S 型花岗岩。对于 A 型与高分异 I 型花岗岩, 一般来说, 两者具有相似的地球化学特征, 但 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 含量、锆饱和温度以及 $10\,000\text{ Ga}/\text{Al}$ 值等具有一定的区别 (Whalen *et al.*, 1987; King *et al.*, 1997)。海流特岩体 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 值介于 38.25×10^{-6} ~ 258.2×10^{-6} 之间, 远小于 A 型花岗岩 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ 下限值 350×10^{-6} , 锆饱和温度为 723~778℃, 平均 753℃, 也低于 A 型花岗岩的平均锆饱和温度 839℃ (King *et al.*, 1997)。尽管岩体中 $10\,000\text{ Ga}/\text{Al}$ 值较高, 为 2.23~5.46, 平均 3.85, 大于 A 型花岗岩 $10\,000\text{ Ga}/\text{Al}$ 下限值 2.6, 但岩体中不含有典型碱性暗色矿物。因此, 海流特岩体也不可能为 A 型花岗岩。

海流特岩体整体表现为高硅、富碱、贫镁、贫钙、弱过铝质, 富集高场强元素 U、Th 及大离子亲石元素 K、Rb, 亏损 Sr、Ba、Ti、Eu (图 6a, 6b), 具有 I 型花岗岩地球化学特征。此外, ① 岩体中 Zr 含量由中、细粒二长花岗岩到花岗伟晶岩逐渐降低 (71.2×10^{-6} ~ 132×10^{-6} → 12.3×10^{-6} ~ 16×10^{-6}), 指示岩浆可能存在分异演化, 致使 Zr 含量逐步由不饱和向饱和过渡 (Watson and Harrison, 1983, 1984); ② 岩体中 Rb/Sr 值为 3.0~295.8, 平均 75.9, 指示岩体在形成过程

中, 斜长石、钛铁矿、磷灰石等发生了分离结晶作用; ③ 岩体中分异指数 DI 介于 92.3~96.8 之间, 显示高分异特征; ④ 岩体中花岗伟晶岩表现出重稀土元素富集 (图 6a), 一般来说, REE 等高场强元素在早期分异过程中易进入难熔矿物 (如锆石、独居石及 Fe-Ti 氧化物), 致使其在残余熔体中含量较低, 但若岩体中有大量 F 存在时, REE 等高场强元素便有利于在残余熔体中富集, 且随 F 含量的不断增加, 磷灰石中从 LaPO_4 到 GdPO_4 再到 YbPO_4 溶解度也急剧增加 (张德会等, 2004), 海流特岩体中 P_2O_5 含量由中、细粒二长花岗岩 (0.036%~0.099%) 到花岗伟晶岩 (0.15%~0.17%) 明显增加, 且重稀土元素富集, 指示海流特岩体可能由富含挥发分 F 而发生高度结晶分异所致, 从而引起重稀土元素的富集; ⑤ 在 $\text{Zr}-(10\,000\text{ Ga}/\text{Al})-(\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO})-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 、 $(10\,000\text{ Ga}/\text{Al})-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 及 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO})-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 图解中, 样品基本落入高分异花岗岩区域 (图 7a~7d)。因此, 海流特岩体更可能为高分异 I 型花岗岩。

5.3 岩浆起源与演化

5.3.1 岩浆源区

目前, 关于 I 型花岗岩的形成主要有以下几种模式, 包括幔源玄武质岩浆的强烈分离结晶模式 (Beard and Lofgren, 1991)、下地壳变质基性岩的部分熔融模式 (Chappell and White, 1974) 以及幔源岩浆与长英质岩浆混合发生分离结晶模式等 (邱检生等, 2008)。一般来说, 幔源岩浆直接分异产生花岗质岩浆需其 9 倍体积的镁铁质岩浆, 而海流特岩体附近并未发现如此大规模的镁铁质岩浆活动证据 (Turner *et al.*, 1992; 王楠等, 2020), 因此该岩体不大可能通过幔源岩浆的分异演化而来。另一方面, 幔源岩浆与壳源岩浆混合一般会产生铁镁质包体, 但在海流特岩体的调查中并未发现暗色包体, 指示该岩浆源区相对均一, 并非幔源岩浆与长英质岩浆的混合。目前的研究表明, 大兴安岭南段大多数显生宙花岗岩均具有较高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值以及较低的 Hf、Nd 同位素模式年龄, 指示该区域显生宙花岗岩多起源于新元古代新生地壳物质 (吴福元等, 1999; Jahn *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2000, 2002; 季根源等, 2022), 海流特岩体位于大兴安岭南段南西侧, 与区域上北大山、维拉斯托、毛登-小孤山、白音查干东山、小乌兰沟等岩体具有相似的成岩年龄及地球化学特征, 因此, 海流特岩体很可能与区域上同

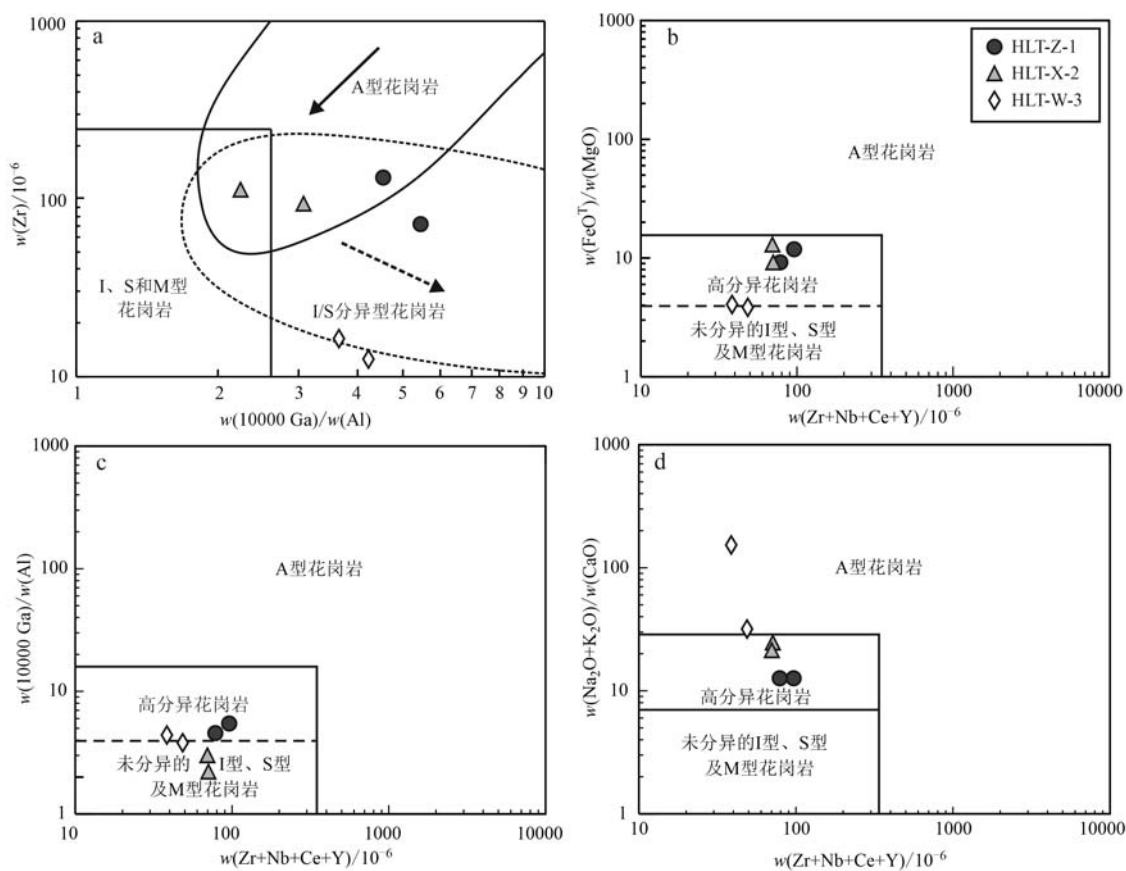


图7 海流特中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩及花岗伟晶岩成因类型判别图解

(a 据吴福元等, 2017; b、c、d 据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 7 Discrimination diagrams for the medium-grained adamellite, fine-grained adamellite and granite pegmatite from the Hailiute area (a after Wu Fuyuan *et al.*, 2017; b, c, d after Whalen *et al.*, 1987)

期的岩体具有相似的起源, 为新生的下地壳变基性岩的部分熔融(姚磊等, 2017; 刘新等, 2017; Fei *et al.*, 2018; 武广等, 2021; 季根源等, 2022)。

5.3.2 岩浆演化

通常认为, 花岗岩在演化过程中, Zr 含量逐渐由不饱和向饱和过渡(Watson and Harrison, 1983, 1984)。海流特岩体中 Zr 含量由中、细粒二长花岗岩向花岗伟晶岩逐渐降低, 且随着 Zr 含量的降低, FeO^T 、 TiO_2 、Sr 以及 Zr/Hf 、 Nb/Ta 、 Ba/Sr 值也逐渐降低(图 8)。研究表明, Sr 易进入斜长石, 随着斜长石的分离结晶, 残余岩浆中 Sr 含量逐渐降低(图 8d); 而 Ba 易进入钾长石, 随着钾长石的分离结晶, 残余岩浆中 Ba 含量及 Ba/Sr 值逐渐降低(图 8g, Li *et al.*, 2007a, 2007b); TiO_2 的降低表明岩体在演化过程中可能发生了富钛矿物钛铁矿或金红石的结晶分异(图 8b); 对于 Zr/Hf 值的降低, 很可能是由于锆石的分离结晶所造成(图 8e); 而 Nb/Ta 值的降低多由

黑云母的分离结晶所引起(Stepanov *et al.*, 2014), FeO^T 的变化也表明岩体在演化过程中镁铁矿物分离结晶作用较为明显(图 8a、8f)。Gualda 和 Ghiorso (2015) 认为 MELTS 软件可模拟一定条件下岩浆的分离结晶过程, 故选取中、细粒二长花岗岩作为初始岩浆成分, 分离结晶温度按锆石饱和温度设置在 $700 \sim 800^\circ\text{C}$ 之间, 压力、氧逸度参照海流特岩体北西侧具有相似成岩年龄、地球化学特征的斑状二长花岗岩, 设置为 198 MPa 及 $\Delta\text{NNO}-0.5$ (季根源等, 2021)。模拟结果显示, 当温度在 710°C 时, 液相基本消失, 分离相为 I 类长石 14.85%、II 类长石 42.99%、石英 33.12%、石榴子石 4.21%、尖晶石 0.05%、氧化物 0.27%, 分离相基本与花岗伟晶岩矿物组成相似, 同时也与微量元素定量模拟图解一致(图 9), 指示海流特岩体由中、细粒二长花岗岩到花岗伟晶岩发生了较为明显的钾长石、斜长石等分离结晶作用。Bau (1996) 认为部分微量元素的含量及关键元素比值可

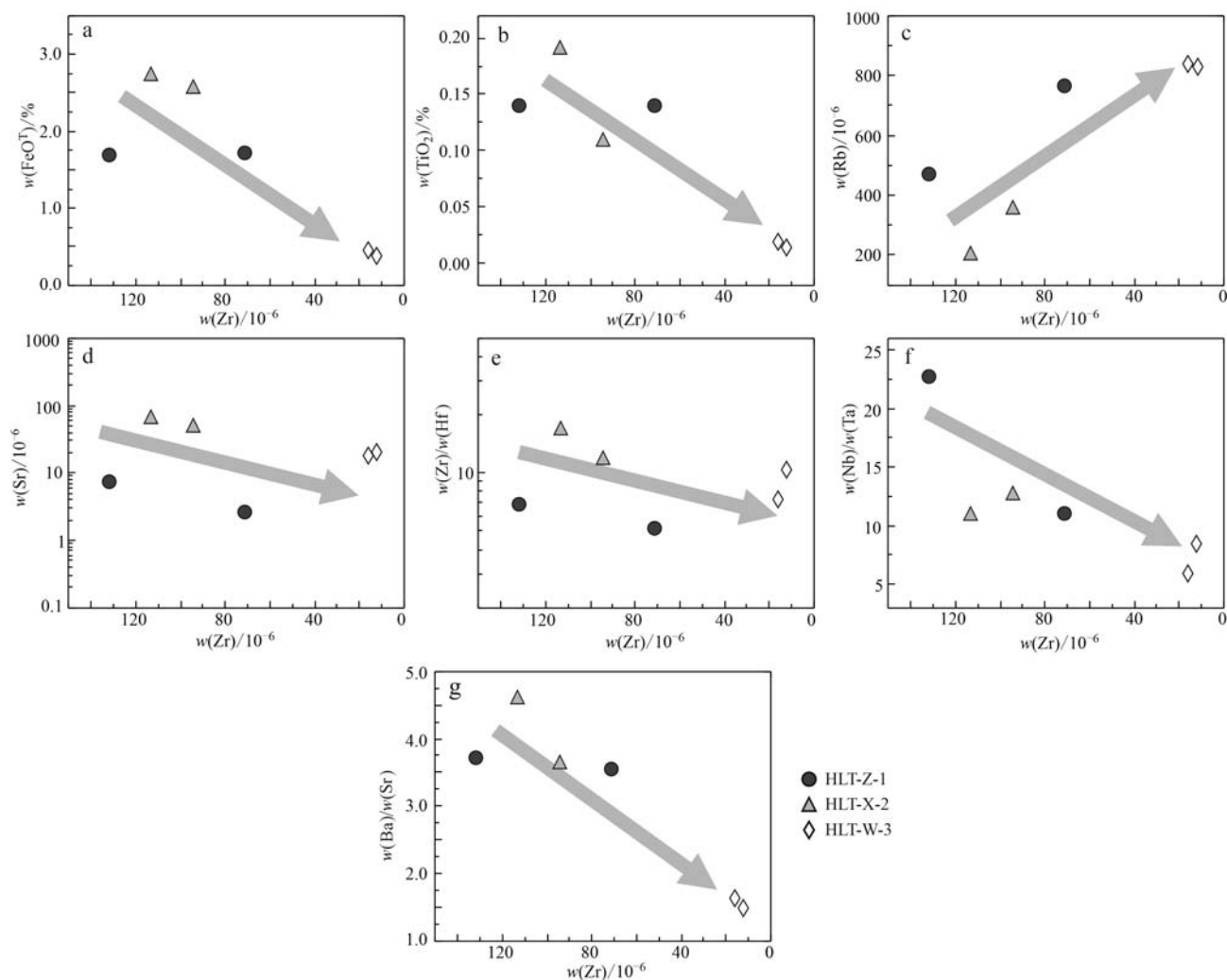


图8 海流特中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩及花岗伟晶岩 Zr 含量对 FeO^T 、 TiO_2 、Rb、Sr、Zr/Hf、Nb/Ta 及 Ba/Sr 相关性图解

Fig. 8 Variations of Zr against FeO^T , TiO_2 , Rb, Sr, Zr/Hf, Nb/Ta and Ba/Sr of the medium-grained adamellite, fine-grained adamellite and granite pegmatite from the Hailiute area

用来判断花岗岩的分离结晶程度。全岩微量元素表明,海流特岩体中花岗伟晶岩相对于中、细粒二长花岗岩具有更高的 Rb 含量以及更明显的 Eu 负异常,其中 Rb 含量由中、细粒二长花岗岩到花岗伟晶岩平均值为 452×10^{-6} 增至 830.5×10^{-6} ,指示海流特岩体花岗伟晶岩具有更高的分异演化程度 (Chen *et al.*, 2016)。另一方面, Nb/Ta 值会随着岩浆的分异演化而明显减小,图 8f 显示,海流特岩体中、细粒二长花岗岩 Nb/Ta 值平均约 14.44,而花岗伟晶岩 Nb/Ta 值平均约 7.10,由中、细粒二长花岗岩到花岗伟晶岩 Nb/Ta 值缩小到二分之一,也指示海流特岩体由中、细粒二长花岗岩到花岗伟晶岩经历了更高分

异演化 (Bau, 1996; Ballouard *et al.*, 2016)。

一般来说,岩浆的高度分异演化最终会引起熔-流体相互作用,导致微量元素特殊的地球化学行为 (赵振华等, 1992; Jahn *et al.*, 2001; Monecke *et al.*, 2011; Ballouard *et al.*, 2016; Aibai *et al.*, 2019)。Zr 与 Hf、Nb 与 Ta、Y 与 Ho、La 与 Ta 以及 La 与 Nb 具有相似的地球化学行为,在一般的岩浆体系中, Zr/Hf、Nb/Ta、Y/Ho、La/Ta、La/Nb 值并不发生改变 (Green, 1995; Jahn *et al.*, 2001),但在岩浆高度分异演化发生熔-流体相互作用时, Zr/Hf、Nb/Ta、La/Ta、La/Nb 以及 Y/Ho 值便会显著减小 (Irber, 1999; Jahn *et al.*, 2001)。研究表明,在正常岩浆岩中, Zr/Hf

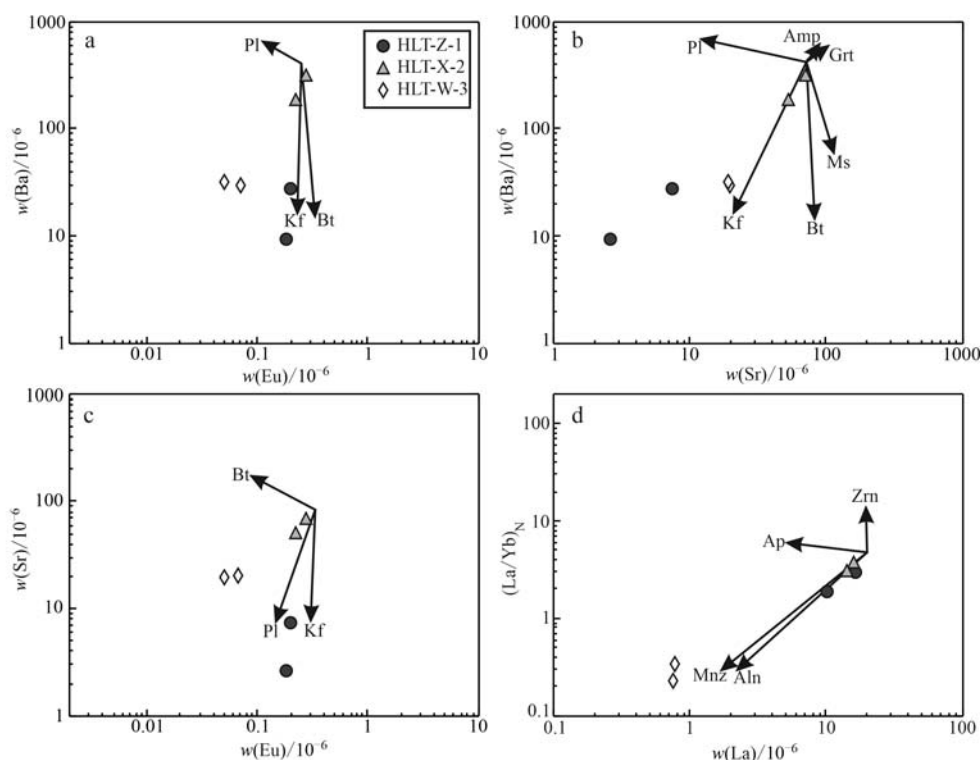


图9 海流特中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩及花岗伟晶岩微量元素定量模拟图解(据 Xu *et al.*, 2015 和武广等, 2021 修改)

Fig. 9 Numerical modelling diagrams for trace elements of the medium-grained adamellite, fine-grained adamellite and granite pegmatite from the Hailiute area (modified after Xu *et al.*, 2015; Wu Guang *et al.*, 2021)

Aln—褐帘石; Amp—角闪石; Ap—磷灰石; Bt—黑云母; Grt—石榴石; Kf—钾长石; Mnz—独居石; Ms—白云母; Pl—斜长石; Zrn—锆石
Aln—allantite; Amp—amphibole; Ap—apatite; Bt—biotite; Grt—garnet; Kf—K-feldspar; Mnz—monazite; Ms—muscovite; Pl—plagioclase;
Zrn—zircon

值的范围介于 36~40 之间,平均 38;Y/Ho 值的范围介于 24~34 之间,平均 28;Nb/Ta、La/Ta、La/Nb 值分别为 5~17、16~20、0.96~1.20 之间(Jochum *et al.*, 1986; Anders and Grevesse, 1989; Jahn *et al.*, 2001; Ballouard *et al.*, 2016)。海流特岩体 Zr/Hf 值为 5.16~17.28、Nb/Ta 值为 5.85~22.75、Y/Ho 值为 25.78~34.93、La/Ta 值为 0.61~13.86、La/Nb 值为 0.09~1.25,其中 Zr/Hf、La/Ta、La/Nb 值明显低于正常花岗岩范围(图 10a、10d、10e),而 Nb/Ta、Y/Ho 值处于正常花岗岩区域(图 10b、10c),指示岩体在形成过程中可能处于过渡状态,熔-流体相互作用相对较弱。此外,岩浆演化过程中熔-流体相互作用,不仅表现在 Zr/Hf、Nb/Ta、Y/Ho、La/Ta 以及 La/Nb 值的改变,也会在稀土元素四分组效应有所响应。所谓四分组,是指以 Nd、Gd、Er 为界,将稀土元素每 4 个元素分为一组,即(La、Ce、Pr、Nd), (Pm、Sm、Eu、Gd), (Gd、Tb、Dy、Ho), (Er、Tm、Yb、Lu) 4 组

(赵振华等, 1992)。Irber(1999)认为,稀土元素第 1 组、第 3 组可定量表达岩体是否发生稀土元素四分组效应,即 $TE_{1,3} = t1 \times t3$, 其中 $t1 = (Ce/Ce^1 \times Pr/Pr^1)^{1/2}$, $t3 = (Tb/Tb^1 \times Dy/Dy^1)^{1/2}$; $Ce/Ce^1 = Ce_{cn}/(La_{cn}^{2/3} \times Nd_{cn}^{1/3})$, $Pr/Pr^1 = Pr_{cn}/(La_{cn}^{1/3} \times Nd_{cn}^{2/3})$, $Tb/Tb^1 = Tb_{cn}/(Cd_{cn}^{2/3} \times Ho_{cn}^{1/3})$, $Dy/Dy^1 = Dy_{cn}/(Dy_{cn}^{1/3} \times Ho_{cn}^{2/3})$, cn 表示球粒陨石标准化。当 $TE_{1,3} < 1.0$ 时,岩体并未发生稀土元素四分组效应;当 $TE_{1,3}$ 介于 1.0~1.1 之间时,岩体存在较弱的稀土元素四分组效应;而当 $TE_{1,3} > 1.1$ 时,岩体具有明显的稀土元素四分组效应(Irber, 1999)。海流特岩体 $TE_{1,3}$ 为 1.18~1.34,平均 1.25,大于 1.1,指示岩体发生了明显的稀土元素四分组效应,与熔-流体相互作用密切相关。对比北大山、维拉斯托岩体,在 Zr/Hf- $TE_{1,3}$ 、Nb/Ta- $TE_{1,3}$ 、Y/Ho- $TE_{1,3}$ 、La/Ta- $TE_{1,3}$ 及 La/Nb- $TE_{1,3}$ 关系图中(图 10a~10e),海流特岩体恰处于北大山、维拉斯托岩体演化的过渡区域。武广等(2021)认为北大山岩

体仅经历了分离结晶作用,而维拉斯托岩体除分离结晶作用外,还发生了明显的熔-流体相互作用。因此,图 10 进一步指示了海流特岩体不仅发生有分离

结晶作用,还具有较高的演化程度,从而引起了熔-流体相互作用,影响了部分微量元素的地球化学行为。

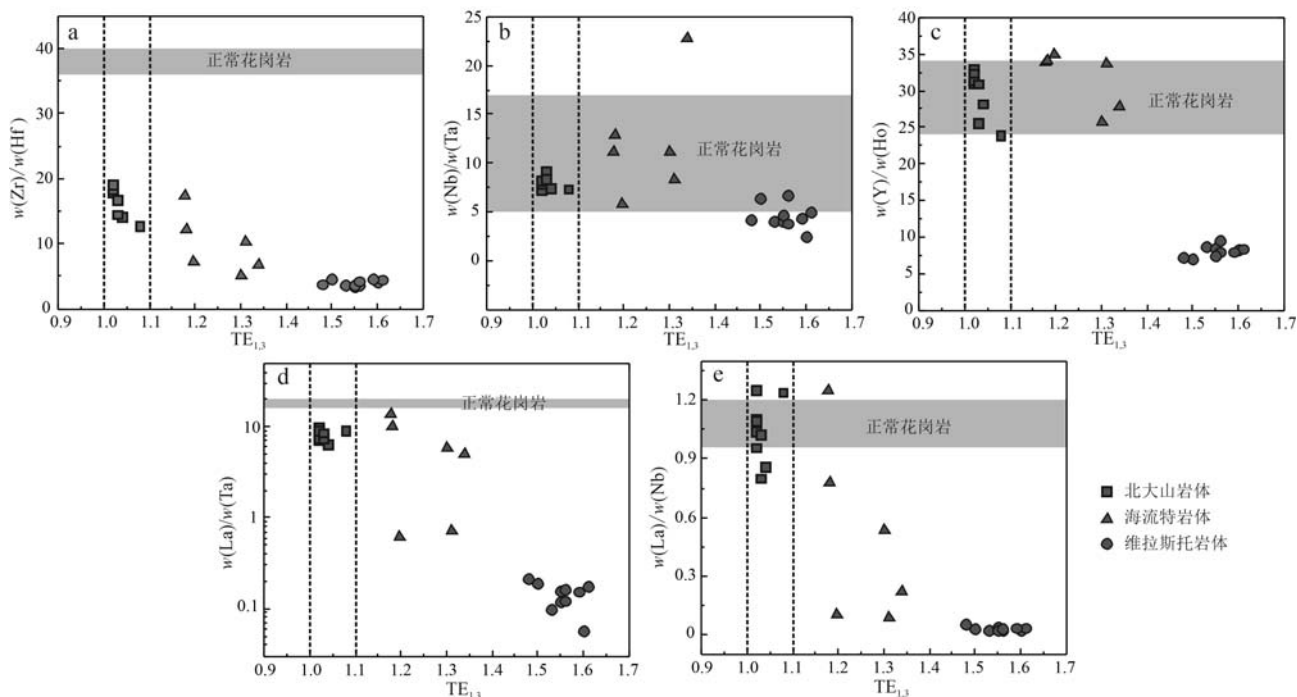


图 10 海流特花岗岩演化程度判别图(北大山、维拉斯托数据源自武广等, 2021)

Fig. 10 Discrimination diagrams for evolution degree of Hailiute granites (data of Beidashan and Weilasituo after Wu Guang *et al.*, 2021)

综上所述,海流特岩体可能起源于年轻的地下壳变基性岩的部分熔融,随后经历了相对高程度的分异演化,发生了斜长石、钾长石等矿物的分离结晶,并在晚期出现熔-流体相互作用。

5.4 成矿指示意义

目前,大多数学者认为,富 F 的高分异花岗岩与钨、锡及稀有金属矿床具有密切的联系(Chen *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2018)。研究表明,岩浆中 F 在结晶分异过程中与不相容元素不断富集,致使体系中固相线温度不断下降(Manning, 1981),在物理化学条件适宜或与围岩发生交代作用时,形成稀有金属(如铌钽铁矿)、锡石、萤石及白钨矿等。大兴安岭南段尤其是锡林浩特-巴林左旗一带晚侏罗世-早白垩世花岗岩,个别成矿作用明显的岩体富含黄玉或 F 含量较高,如维拉斯托岩体在岩浆演化过程中产生黄玉(武广等, 2021),白音查干东山花岗斑岩中 F 含量平均 0.69%,高者可达 1.3%、2.27%(刘新等, 2017),毛登岩体斑状二

长花岗岩、花岗斑岩中磷灰石 F 含量平均达 3.01%、3.53%,且岩体中普遍发育萤石、黄玉等富 F 矿物(季根源等, 2022);本次工作中,在岩体南东侧局部云英岩化明显处发现有细小萤石颗粒;区域上其余岩体个别与围岩接触部位或其内部见有萤石矿床的出现。因此,大兴安岭南段在晚侏罗世-早白垩世期间形成有富 F 花岗岩,具有较好的钨、锡及稀有金属矿床的成矿潜力。

海流特岩体位于大兴安岭南段南西侧,北东东距北大山-维拉斯托岩体约 60 km,其间见有石英脉、伟晶岩脉穿切,局部伴有 W、Sn、Nb、Ta 及萤石矿化。对比北大山、维拉斯托岩体,三者具有相似的结晶年龄、岩石成因及构造背景,而不同的是岩浆演化程度及熔-流体相互作用有所区别。张天福等(2019)认为维拉斯托岩体高程度的结晶分异控制了矿床 Li、Rb、Nb、Ta 等稀有金属的富集,而熔-流体相互作用制约了 Sn、Zn、Cu、Pb 的形成,挥发分 F、Cl 的含量能够有效地改变 Li、Rb、Nb、Ta、Cu、Zn、Mo 等元

素在岩浆结晶分异过程中流体/熔体的分配系数 (Keppler, 1993), 进而制约岩体的成矿能力。海流特岩体相对于维拉斯托岩体熔-流体相互作用较弱, 而较北大山岩体熔-流体相互作用较强 (图 10), 在局部出溶富含 Li、Rb、Nb、Ta 等稀有元素或产出流体相 W、Sn 热液, 表现为伟晶岩型 Li、Rb、Nb、Ta 矿化或石英脉型 W 矿化、云英岩型 Sn 矿化等, 经化学样

分析, 个别钨矿化较强石英脉地段捡块样 WO_3 含量达 0.11% (图 11a、11b); 个别云英岩化较强地段捡块样 Sn 含量达 0.38% (图 11c、11d); 个别稀有元素矿化较强地段捡块样 Nb_2O_5 含量达 373×10^{-6} 、 Ta_2O_5 含量达 25×10^{-6} (作者未发表数据。图 11e、11f), 指示该区域具有一定成矿远景, 但由于分异演化程度及熔-流体相互作用相对较弱, 致使成矿潜力受限。

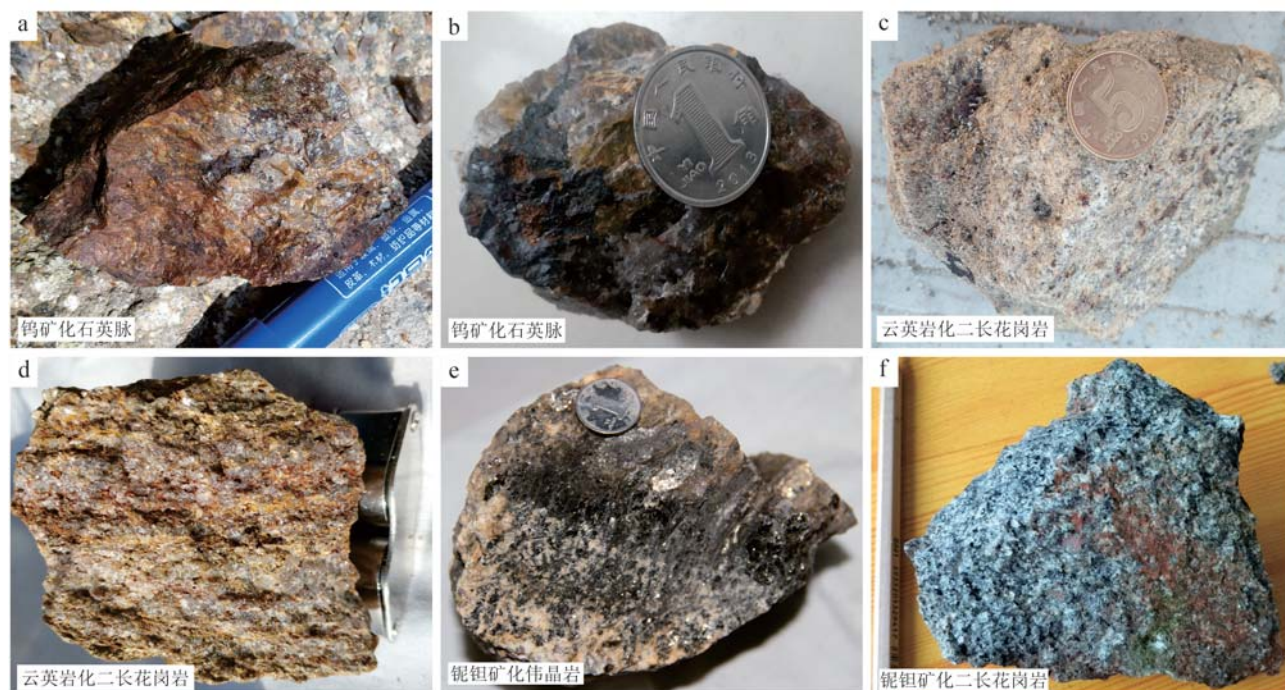


图 11 海流特钨、锡及稀有元素矿化花岗岩手标本照片

Fig. 11 Hand specimens of the tungsten, tin and rare element mineralized granite in Hailiute area

6 结论

(1) 海流特中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩、花岗伟晶岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 142.0 ± 0.7 Ma、 141.2 ± 1.1 Ma、 139.7 ± 2.4 Ma, 形成时代为早白垩世。

(2) 海流特岩体属 I 型花岗岩, 经历了较高分化的分异演化, 发生了斜长石、钾长石等矿物的分离结晶, 并在晚期出现熔-流体相互作用。

(3) 海流特岩体局部发现与石英脉、伟晶岩脉密切相关的钨锡及稀有元素矿化, 具有一定成矿潜力。

致谢 感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见。同时, 感谢内蒙古自治区地质调查院锡林浩特矿调

项目组在野外考察和样品采集中的大力支持。

References

- Aibai A, Zhang Z C, Cheng Z G, *et al.* 2019. Highly differentiated juvenile crust-derived magmas linked with the Xilekuduke porphyry Mo (Cu) deposit in East Junggar, NW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 115: 103103.
- Anders E and Grevesse N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53 (1): 197 ~ 214.
- Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, *et al.* 2016. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition [J]. *Geology*, 44 (3): 231 ~ 234.
- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*

- gy, 123(3): 323~333.
- Beard J S and Lofgren G E. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6.9 kb[J]. *Journal of Petrology*, 32(2): 365~401.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[A]. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry[C]. Amsterdam: Elsevier, 63~114.
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geology*, 8: 173~174.
- Chen B, Ma X H and Wang Z Q. 2014. Origin of the fluorine-rich highly differentiated granites from the Qianlishan composite plutons (South China) and implications for polymetallic mineralization[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93: 301~314.
- Chen Y X, Li H, Sun W D, *et al.* 2016. Generation of Late Mesozoic Qianlishan A2-type granite in Nanling Range, South China: Implications for Shizhuoyuan W-Sn mineralization and tectonic evolution[J]. *Lithos*, 266-267: 435~452.
- Fei X H, Zhang Z C, Cheng Z H, *et al.* 2018. Highly differentiated magmas linked with polymetallic mineralization: A case study from the Cuihongshan granitic intrusions, Lesser Xing'an Range, NE China [J]. *Lithos*, 302-303: 158~177.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 120 (3~4): 347~359.
- Gualda G A R and Ghiorso M S. 2015. MELTS_Excel: A Microsoft Excel-based MELTS interface for research and teaching of magma properties and evolution[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 16 (1): 315~324.
- Hou Kejun, Li Yanhe and Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481~492 (in Chinese with English abstract).
- Huang H, Wang T, Zhang Z C, *et al.* 2018. Highly differentiated fluorine-rich, alkaline granitic magma linked to rare metal mineralization: A case study from the Boziguo'er rare metal granitic pluton in South Tianshan Terrane, Xinjiang, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 96: 146~163.
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3~4): 489~508.
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. *Episodes*, 23(2): 82~92.
- Jahn B M, Wu F Y, Capdevila R, *et al.* 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China[J]. *Lithos*, 59(4): 171~198.
- Ji Genyuan, Jiang Sihong, Zhang Longsheng, *et al.* 2021. Petrogenic and metallogenic significance of Alubaogeshan granite in Maodeng deposit of southern Da Hinggan Mountains: Evidence from mineralogy of zircon, amphibole and biotite[J]. *Mineral Deposits*, 40(3): 449~474 (in Chinese with English abstract).
- Ji Genyuan, Jiang Sihong, Zhang Longsheng, *et al.* 2022. Chronology and geochemical characteristics of the highly fractionated alkali feldspar granite from the Maodeng deposit in the southern Great Xing'an Range[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(3): 855~882 (in Chinese with English abstract).
- Jochum K P, Seufert H M, Spettel B, *et al.* 1986. The solar-system abundances of Nb, Ta, and Y, and the relative abundances of refractory lithophile elements in differentiated planetary bodies [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(6): 1173~1183.
- Keppler H. 1993. Influence of fluorine on the enrichment of high field strength trace elements in granitic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 114(4): 479~488.
- King P L, White A J R, Chappell B W, *et al.* 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371~391.
- Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B, *et al.* 2004. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms; Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks* [M]. New York: Cambridge University Press.
- Li X H, Li W X and Li Z X. 2007a. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1873~1885.
- Li X H, Li Z X, Li W X, *et al.* 2007b. 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? [J]. *Lithos*, 96(1~2): 186~204.
- Liu Xin, Li Xuegang, Zhu Xinyou, *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[J]. *Mineral Exploration*, 8(6): 981~996 (in Chinese with English abstract).
- Manning D A C. 1981. The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 kb[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76(2): 206~215.
- Maniar M L, Kalonia D S and Simonelli A P. 1989. Use of Liquid Chromatography and Mass Spectroscopy to Select An Oligomer Representative of Polyester Hydrolysis Pathways[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 78(10): 858~862.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Zhang Zuoheng, *et al.* 2005. Mesozoic large-

- scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169~188(in Chinese with English abstract).
- Monecke T, Kempe U, Trinkler M, *et al.* 2011. Unusual rare earth element fractionation in a tin-bearing magmatic-hydrothermal system[J]. *Geology*, 39(4): 295~298.
- Ouyang H G, Mao J W, Zhou Z H, *et al.* 2015. Late Mesozoic metallogeny and intracontinental magmatism, southern Great Xing'an Range, northeastern China[J]. *Gondwana Research*, 27(3): 1 153~1 172.
- Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, *et al.* 2008. Petrogenesis of highlu fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2 468~2 484(in Chinese with English abstract).
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Li Yongfei, *et al.* 2005. Zircon saturation temperatures of Yangba granodiorite and mafic microgranular enclaves in northern margin of Yangtze Block and its significance[J]. *Northwestern Geology*, 38(3): 1~5(in Chinese with English abstract).
- Shang Yongming, Li Xiaowei, Zhu Xinyou, *et al.* 2022. Petrogenesis and its implications for the lithospheric thinning of the Wushijiazui pluton in Chifeng, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*: 49(4): 1 323~1 345(in Chinese with English abstract).
- Stepanov A S, Mavrogenes J A, Meffre S, *et al.* 2014. The key role of mica during igneous concentration of tantalum[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 167(6): 1 009.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes[J]. *Geological Society Special Publication*, 42(1): 313~345, doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.
- Sun Yan, Wang Ruijiang, Li Jiankang, *et al.* 2015. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of the muscovite and regional exploration prospect of Shihuiyao rubidium-multi-metal deposit, Selenhot, Inner Mongolia[J]. *Geological Review*, 61(2): 463~468(in Chinese with English abstract).
- Tang Jie, Xu Wenliang, Wang Feng, *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[J]. *Gondwana Research*, 31: 218~240.
- Turner S P, Foden J D and Morrison R S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia[J]. *Lithos*, 28(2): 151~179.
- Wang Nan, Liu Zhibo, Song Yang, *et al.* 2020. Geochronology and petrogenesis of highly fractionated Early Cretaceous granite in Baingoin area, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(2): 409~425(in Chinese with English abstract).
- Wang T, Guo L, Zhang L, *et al.* 2015. Timing and evolution of Jurassic-Cretaceous granitoid magmatisms in the Mongol-Okhotsk Belt and adjacent areas, NE Asia: Implications for transition from contractional crustal thickening to extensional thinning and geodynamic settings[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 365~392. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.10.005.
- Wang Z Q, Chen B and Ma X H. 2014. Petrogenesis of the Late Mesozoic Guposhan composite plutons from the Nanling Range, South China: Implications for W-Sn mineralization[J]. *American Journal of Science*, 314(1): 235~277.
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Watson E B and Harrison T M. 1984. Accessory minerals and the geochemical evolution of crustal magmatic systems: A summary and prospectus of experimental approaches[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 35(1~3): 19~30.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407~419.
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, *et al.* 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. *Tectonophysics*, 328(1~2): 89~113.
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, *et al.* 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. *Science China Earth Sciences*, 60: 1 201~1 219(in Chinese).
- Wu Fuyuan, Sun Deyou and Lin Qiang. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 181~189(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 187(1~2): 143~173.
- Wu Guang, Liu Ruilin, Chen Gongzheng, *et al.* 2021. Mineralization of the Weilasituo rare metal-Tin-polymetallic ore deposit in Inner Mongolia: Insights from fractional crystallization of granitic magmas[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(3): 637~664(in Chinese with English abstract).
- Xu B, Jiang S Y, Wang R, *et al.* 2015. Late Cretaceous granites from the giant Dulong Sn-polymetallic ore district in Yunnan Province, South China: Geochronology, geochemistry, mineral chemistry and Nd-Hf isotopic compositions[J]. *Lithos*, 218~219: 54~72.
- Xu Wenliang, Wang Feng, Pei Fuping, *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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 339~353(in Chinese with English abstract).
- Yao Lei, Lü Zhicheng, Ye Tianzhu, *et al.* 2017. Zircon U-Pb age, geochemical and Nd-Hf isotopic characteristics of quartz porphyry in the

- Baiyinchagan Sn polymetallic deposit, Inner Mongolia, southern Great Xing'an Range, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3 183~3 199 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dehui, Zhang Wenhui and Xu Guojian. 2004. The ore fluid geochemistry of F-rich silicate melt-hydrous fluid system and its metallogeny—The current status and problems[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 479~490 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peichun, Peng Bo, Zhao Jinzhong, *et al.* 2022. Petrogenesis of the syenogranite in the Xiaowulangu area of Southern Great Xing'an Range: Constraints from zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology, geochemistry and Hf isotopes [J]. *Earth Science*; 47(8): 2 889~2 901(in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianfu, Guo Shuo, Xin Houtian, *et al.* 2019. Petrogenesis 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[J]. *Earth Science*, 44(1): 248~267 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Degao, Liu Jiajun, Yang Yongqiang, *et al.* 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).
- Zhao Zhenhua, Masuda A and Shabani M.B. 1992. Tetrad effects of rare-earth elements in rare-metal granites [J]. *Geochimica*, 21(3): 221~233 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenhua, Lü Linsu, Yang Yongjun, *et al.* 2010a. Petrogenesis of the Early Cretaceous A-type granite in the Huanggang Sn-Fe deposit Inner Mongolia: Constraints from zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3 521~3 537 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenhua, Lü Linsu, Yang Yongjun, *et al.* 2010b. Zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes and geological significance of Huanggang granites in the Southern Da Hinggan Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 559~560 (in Chinese).
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. *岩石学报*, 21(1): 169~188.
- 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞, 等. 2005. 扬子板块北缘阳坝岩体锆石饱和温度的计算及其意义[J]. *西北地质*, 38(3): 1~5.
- 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[J]. *岩石学报*, 24(11): 2 468~2 484.
- 孙艳, 王瑞江, 李建康, 等. 2015. 锡林浩特石灰窑钨多金属矿床白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代及找矿前景分析[J]. *地质论评*, 61(2): 463~468.
- 尚永明, 李小伟, 祝新友, 等. 2022. 内蒙古赤峰五十家子岩体成因及其对岩石圈伸展减薄的指示[J]. *中国地质*, 49(4): 1 323~1 345.
- 王楠, 刘治博, 宋扬, 等. 2020. 西藏班戈地区早白垩世高分异花岗岩年代学及岩石成因[J]. *岩石学报*, 36(2): 409~425.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 47(7): 745~765.
- 吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生[J]. *岩石学报*, 15(2): 181~189.
- 武广, 刘瑞麟, 陈公正, 等. 2021. 内蒙古维拉斯托稀有多金属-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[J]. *岩石学报*, 37(3): 637~664.
- 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[J]. *岩石学报*, 29(2): 339~353.
- 姚磊, 吕志成, 叶天竺, 等. 2017. 大兴安岭南段内蒙古白音查干 Sn 多金属矿床石英斑岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Nd-Hf 同位素特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 33(10): 3 183~3 199.
- 张德会, 张文淮, 许国建. 2004. 富 F 熔体溶液体系流体地球化学及其成矿效应——研究现状及存在问题[J]. *地学前缘*, 11(2): 479~490.
- 章培春, 彭勃, 赵金忠, 等. 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[J]. *地球科学*, 47(8): 2 889~2 901.
- 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[J]. *地球科学*, 44(1): 248~267.
- 翟德高, 刘家军, 杨永强, 等. 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.
- 赵振华, 增田彰正, 夏巴尼 M.B. 1992. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应[J]. *地球化学*, 21(3): 221~233.
- 周振华, 吕林素, 杨永军, 等. 2010a. 内蒙古黄岗铁矿区早白垩世 A 型花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学制约[J]. *岩石学报*, 26(12): 3 521~3 537.
- 周振华, 吕林素, 杨永军, 等. 2010b. 大兴安岭南段黄岗花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *矿床地质*, 29(S1): 559~560.

附中文参考文献

- 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[J]. *矿床地质*, 28(4): 481~492.
- 季根源, 江思宏, 张龙升, 等. 2021. 大兴安岭南段毛登矿区阿鲁包格山岩体成岩成矿意义——锆石、角闪石和黑云母矿物学证据[J]. *矿床地质*, 40(3): 449~474.
- 季根源, 江思宏, 张龙升, 等. 2022. 大兴安岭南段毛登高分异碱长花岗岩成岩时代与地球化学特征[J]. *岩石学报*, 38(3): 855~882.
- 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: 成矿花岗岩斑岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *矿产勘查*, 8(6): 981~996.