大兴安岭北部漠河地区早奥陶世A型花岗岩锆石U-Pb年代学、地球化学及Hf同位素研究

吴琼[1)]，丰成友[2)]，瞿泓滢[1)]，钟世华[1)]，刘建楠[1)]，张明玉[1)]

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）中国地质调查局西安地质调查中心，西安，710054

内容提要：大兴安岭北部漠河地区黑云母二长花岗岩中锆石自形程度较好，主要为长柱状，具有较为清晰的韵律环带结构，表明锆石岩浆成因。锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学研究显示岩石形成时代为早奥陶世（481±5Ma）。岩石地球化学研究显示，岩石属于钙碱性、弱过铝质系列花岗岩，高硅（SiO_2＝71.42％～72.57％）、富碱（ALK＝8.11％～8.76％）、贫镁（MgO＝0.52％～0.54％）。10000Ga/Al值为2.73～2.85，Zr＋Nb＋Ce＋Y含量374×10^{-6}～495×10^{-6}，岩浆形成温度801～897℃，判断岩石为A型花岗岩。岩石有中等的负Eu异常（δEu＝0.24～0.35），Rb/Sr值为1.18～1.38、Ba/La值为8.7～12.4、$Mg^{\#}$值为23.3～30.3，及低Ni（1.51×10^{-6}～5.59×10^{-6}）、Cr（6.60×10^{-6}～13.4×10^{-6}）、V（20.0×10^{-6}～21.6×10^{-6}）含量。岩石的$\varepsilon_{Hf}(t)$值为－2.22～5.57，二阶段模式年龄（t_{DM2}）变化于1021～1453Ma之间，主要源于中新元古代增生地壳。结合区域构造演化及构造判别，认为岩石形成于额尔古纳地块与西伯利亚板块拼合造山后的伸展背景。

关键词：锆石U-Pb年龄；岩石地球化学；兴华渡口群；A型花岗岩；大兴安岭；漠河地区

额尔古纳地块位于兴蒙造山带东段的大兴安岭地区，呈北东向延伸，长1500km以上，是中亚-蒙古-兴安巨型复合造山带内的重要大地构造单元，自北向南分布有额尔古纳地块、兴安造山带和松嫩地块等（Sun Guangrui et al.，2002；Ge Wenchun et al.，2007）。该地块北侧为中生代蒙古—鄂霍茨克褶皱带；西南缘被晚古生代南蒙古海洋沉积物所覆盖；东北部与莫梅恩（马门）地块相连；东南部以天山—南蒙古—大兴安岭晚古生代缝合带为界与松嫩地块、布列亚—佳木斯复合地块相邻，并被晚古生代—中生代岩浆作用彻底改造（Wu Guang et al.，2005；Biao Shanghu et al.，2012）。区内出露最古老地质体为兴华渡口群，主要分布于呼玛县、塔河县、漠河县、大兴安岭地区呼中区、新林区。近年研究认为，原兴华渡口群应解体为变质表壳岩和变质深成岩两大类。解体后的变质表壳岩类为典型的变质基性—酸性火山岩及部分变质沉积岩系构成的火山—沉积建造，称为“兴华渡口群”；变质深成岩类为原划分的混合岩、混合片麻岩类及原划分的混合花岗岩类，共同构成花岗质片麻杂岩，为岩浆侵入作用的产物（Biao Shanghu et al.，1999；Sun Guangrui et al.，2002；Wu Fuyuan et al.，2011）。然而，解体后的变质深成岩侵入年代及成因机制仍然存在争议：一种观点认为岩石形成于古元古代类似于大陆边缘弧后裂谷型火山—沉积盆地的构造环境（Regional Geology of Heilongjiang Province，1993；Sun Guangrui et al.，2002）；而另一种观点认为岩石主要形成于显生宙（Wu Fuyuan et al.，2011）。鉴于此，本文对解体后的曾被定为变质深成岩的黑云母二长花岗岩进行了岩石地球化学、年代学及Hf同位素研究，并从A型花岗岩角度展开讨论，旨在揭示其形成时代及构造背景。

注：本文为国家重点研发计划（课题编号2016YFC0600205）“南岭成矿带典型成矿系统的深部过程和成矿模式”，项目资助的成果。
收稿日期：2018-05-08；改回日期：2018-09-25；网络发表时间：2019-01-03；责任编辑：黄敏。
作者简介：吴琼，女，1991年生，博士研究生，矿物学、岩石学、矿床学专业。Email：qiongwu0525@126.com。通讯作者：丰成友，男，1971年生，博士生导师，，主要从事矿床地质、地球化学研究。Email：fengchy@cags.ac.cn。

引用本文：吴琼，丰成友，瞿泓滢，钟世华，刘建楠，张明玉．2019．大兴安岭北部漠河地区早奥陶世A型花岗岩锆石U-Pb年代学、地球化学及Hf同位素研究．地质学报，93(2)：368～380，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019021.
Wu Qiong，Feng Chengyou，Qu Hongying，Zhong Shihua，Liu Jiannan，Zhang Mingyu．2019．Geochronology，geochemistry and Hf isotopes of the Early Ordovician A-type granite in the Mohe Region，northeastern Da Hinggan Mountains．Acta Geologica Sinica，93(2)：368～380.

1　地质背景及样品描述

1.1　地质背景

研究区位于兴蒙造山带东段的大兴安岭北部地区，大地构造位置上属于额尔古纳地块(图 1a)(Ge Wenchun et al.，2005；Wu Guang et al.，2005)。区内出露地层自元古界至新生界。元古界兴华渡口群分布于区域的东南部，岩石类型主要有斜长角闪岩类、片麻岩类、变(浅)粒岩类、片岩类及大理岩等(Regional Geology of Heilongjiang Province，1993；Biao Shanghu et al.，1999；Sun Guangrui et al.，2002；Wu Fuyuan et al.，2011)。泥盆系零星分布于区域西北部，主要为泥灰岩、板岩、生物灰岩等。中生界侏罗系分布面积广泛，主要为陆相山间砾岩、河道相、湖泊相沉积岩等；白垩系主要由为砾岩、砂岩、凝灰岩等组成(Regional Geology of Heilongjiang Province，1993)。区域内岩浆活动规模大，时间跨度长，新元古代、早古生代、中生代岩浆岩均有出露。新元古代侵入岩主要呈北东向展布于恩和—室韦—太平川一带，漠河、碧水、阿尔木等地区也有零星出露(Zhao Shuo et al.，2016a，2016b)。早古生代的花岗岩体总体呈北西西向展布，岩石组合为二长花岗岩—钾长花岗岩—碱长花岗岩—花岗闪长岩(Qin Xiufeng et al.，2007)，如漠河周围的洛古河岩体、塔河岩体、西门都里河花岗岩体以及十八站东的哈拉巴岩体(Wu Guang et al.，2005；Ge Wenchun et al.，2005；Sui Zhenmin et al.，2007)。区内还分布着大量中生代花岗岩，以晚三叠到早—中侏罗世为主，呈北东向分布(Wu Fuyuan et al.，2011)主要受鄂霍茨克洋闭合及古太平洋构造域活动影响(Wu Taotao et al.，2016)。各个时代的花岗岩中均发育二长花岗岩单元，新元古代的花岗质岩石以发育碱性长石巨斑晶为特点，且由于经历多次构造运动，往往出现不同程度的片

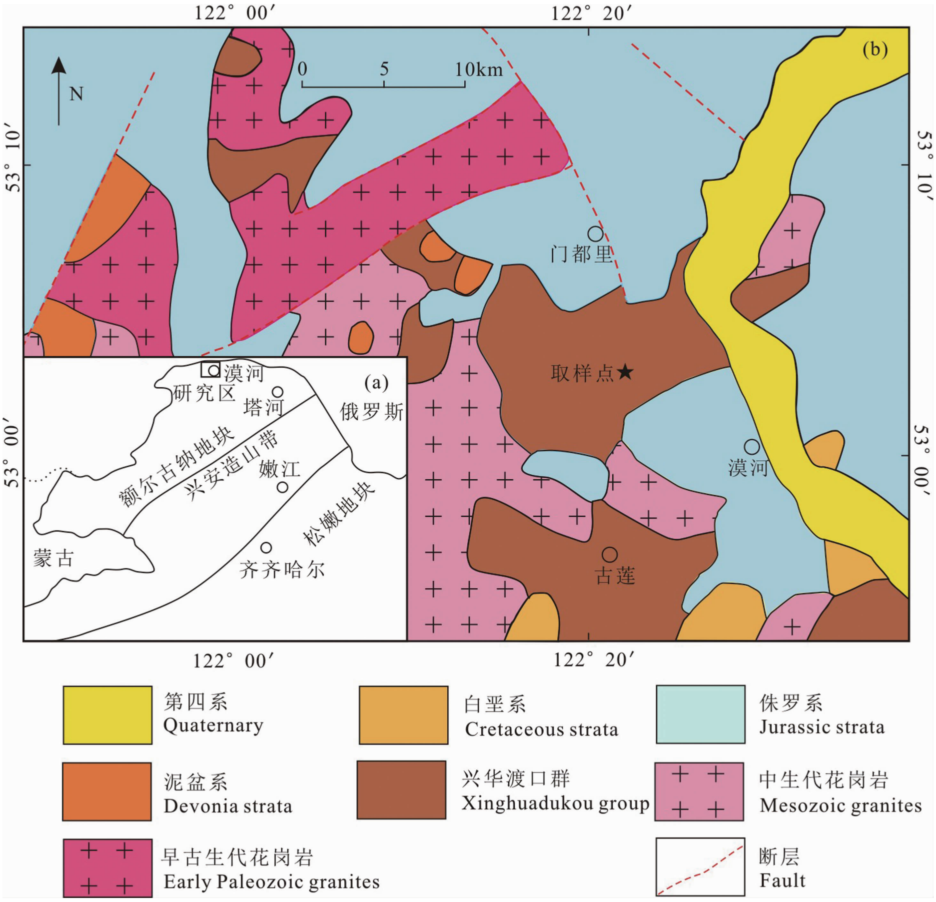

图 1　大兴安岭北部地区地质略图(兴华渡口群解体后边界未在图中划分，据黑龙江省区域地质志，1993；Wu et al.，2011)

Fig. 1　Geological sketch map of the Northern Great Xing'an Range(The boundary of reorganization of Xinghuadukou group is not shown in this map)

理化现象，而早古生代花岗岩中的二长花岗岩单元往往呈灰色—灰白色，中细不等粒花岗结构，岩石无明显变形，基本不发育片理化定向，局部出现糜棱岩化(Wu Guang et al., 2005)。区内断裂构造发育，按方向划分为NEE、NNE、NW、EW向四组断裂构造。断裂构造表现为多期次，早期表现为NEE、EW向同沉积断裂，晚期受太平洋板块运动的影响产生NNE向深大断裂(Regional Geology of Heilongjiang Province, 1993)。

1.2 样品描述

本次测试样品取自漠北公路西约50m处(N53°03′14″,E122°22′03″)的一处黑云母二长花岗岩露头，周围植被覆盖严重，分散采取了6个花岗岩样品分别用于岩石地球化学分析及锆石年代学测试。该岩石曾被认为归属于原兴华渡口群，原兴华渡口群解体后归到变质深成岩类中，兴华渡口群解体后的边界在图中并未划分(Biao Shanghu et al., 1999; Sun Guangrui et al., 2002; Wu Fuyuan et al., 2011)。岩石手标本风化面为褐色，新鲜面为灰黑色，块状构造，局部为弱片麻状构造，细粒花岗结构(图2a)。岩石主要组成矿物为石英、碱性长石、斜长石和黑云母：其中石英含量约30%～35%，粒度约0.5～1mm，呈它形粒状，波状消光；碱性长石含量约30%～35%，粒度1～2mm，最大4mm，主要有条纹长石和微斜长石，条纹结构和格子双晶发育；斜长石含量约20%～25%，粒度约1～2mm，呈半自形板状，聚片双晶发育，局部发生绢云母蚀变；黑云母约10%，片状，多色性明显。副矿物主要有磁铁矿、锆石和磷灰石等(图2b)。

2 分析方法

2.1 岩石地球化学测试

样品主量元素和微量元素在吉林大学测试实验中心测定。主量元素测定采用X-射线荧光光谱仪(PW1401/10)测定(GB/T14506.28-93)，相对标准偏差2%～5%。微量元素和稀土元素分析采用美国安捷伦科技有限公司Agilent7500A型电感耦合等离子质谱仪测试(Z/T0223-2001)，样品测试经国际标样BHVO-2、BCR-2和国家标样GBW07103、GBW07104监控，微量元素和稀土元素的分析精度为：元素含量大于10×10^{-6}的误差小于5%，小于10×10^{-6}的误差小于10%。

2.2 锆石LA-ICP-MS年代学

锆石挑选由河北省廊坊区域地质调查研究所实验室利用标准重矿物分离技术分选完成。经过双目镜下仔细挑选，将不同特征的锆石粘在双面胶上，并用无色透明的环氧树脂固定；待其固化之后，将表面抛光至锆石中心。在测试前，通过透射光、反射光和CL图像仔细研究锆石的晶体形态与内部结构特征，以选择最佳测试点。锆石制靶、透反射光、阴极发光以及锆石U-Pb年龄测定和痕量元素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。本次测试采用的激光剥蚀束斑直径为32μm，激光剥蚀样品的深度为20～40μm；实验中采用He作为剥蚀物质的载气。锆石年龄采用国际标准锆石91500作为外标，元素含量采用NIST SRM610作为外标，^{29}Si

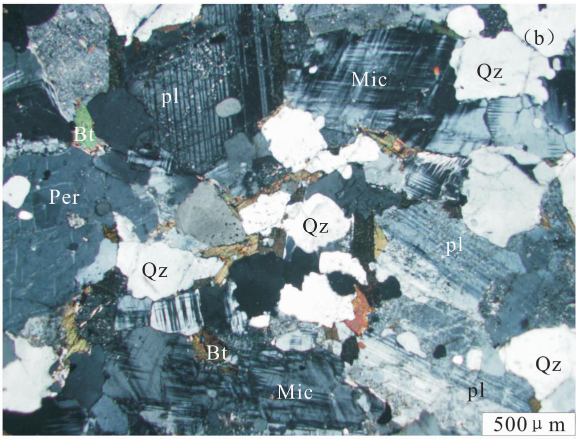

图2 大兴安岭北部地区花岗岩手标本和显微照片(+)

Fig. 2 Photograph (a) and Microphotographs (+) (b) of granite in the Northern Great Xing'an Range

Bt—黑云母；Per—条纹长石；Pl—斜长石；Qz—石英；Mic—微斜长石

Bt—biotite; Per—perthite; Pl—plagioclase; Qz—qutze; Mic—microcline

作为内标元素（锆石中 SiO_2 的质量分数为 32.8%（Yuan Honglin et al., 2003），分析方法见文献（Yuan Honglin et al., 2004）；普通铅校正采用 Anderson 推荐的方法（Anderson, 2002）；样品的同位素比值及元素含量计算采用 ICP-MS-DATECAL 程序（Liu Yongsheng et al., 2008, 2010），年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot 程序（Ludwig, 2003）。

2.3 锆石 Lu-Hf 同位素

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质大学（武汉）地质过程与矿产资源国家重点实验室（GPMR 利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱（LA-MC-ICP-MS）完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005（Lambda Physik，德国），MC-ICP-MS 为 Neptune Plus（Thermo Fisher Scientific，德国）。采用单点剥蚀模式，斑束固定为 44μm。详细仪器操作条件和分析方法可参照（Hu Zhaochu et al., 2012）。

$^{179}Hf/^{177}Hf = 0.7325$ 和 $^{173}Yb/^{171}Yb = 1.132685$ 被用于计算 Hf 和 Yb 的质量分馏系数 β_{Hf} 和 β_{Yb}（Fisher et al., 2014）。$^{179}Hf/^{177}Hf$ 和 $^{173}Yb/^{171}Yb$ 的比值被用于计算 Hf（β_{Hf}）and Yb（β_{Yb}）的质量偏差。使用 $^{176}Yb/^{173}Yb = 0.79639$ 来扣除 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同量异位干扰（Fisher et al., 2014）。使用 $^{176}Lu/^{175}Lu = 0.02656$（Janne et al., 1997）来扣除干扰程度相对较小的 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的同量异位干扰。分析数据的离线处理（包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正）采用软件 ICP-MS Data Cal（Liu Yongsheng et al., 2010）完成。

3 分析结果

3.1 地球化学特征

3.1.1 主量元素

岩石分析结果及特征值见表 1，其中 SiO_2 含量为 71.42%～72.57%；Na_2O、K_2O 和 CaO 含量分别为 2.05%～2.20%、6.02%～6.68% 和 1.05%～1.18%；全碱含量较高（ALK＝8.11%～8.76%）；铝饱和指数 A/CNK＝1.08～1.14。MgO 含量为 0.52%～0.54%，$Mg^{\#}$ 值为 23.3～30.3。岩石样品在 TAS 图解中落入亚碱性花岗岩范围内（图 3a）；A/CNK-A/NK 图解（图 3b）上全部落入过铝质区域，显示岩石属弱过铝质系列。

3.1.2 微量元素

岩石稀土总量高（$\Sigma REE = 342\times10^{-6}\sim479\times10^{-6}$），配分曲线显示出为明显右倾，$(La/Yb)_N$ 为

表 1　大兴安岭北部地区花岗岩主量元素（%）、稀土元素和微量元素含量（10^{-6}）及有关参数

Table 1　Major (%), REE and trace element content (10^{-6}) and parameter of granites in the Northern Great Xing'an Range

SAMPLE	SBS-1-01	SBS-1-02	SBS-1-03	SBS-1-04	SBS-1-05	SBS-1-06
SiO_2	71.91	72.14	72.57	71.69	71.42	72.34
TiO_2	0.43	0.42	0.35	0.43	0.44	0.44
Al_2O_3	13.79	13.58	13.62	13.65	13.56	13.83
Fe_2O_3	1.37	1.92	1.95	1.64	1.74	0.77
FeO	1.00	0.54	0.42	1.47	1.60	1.60
MnO	0.09	0.09	0.08	0.08	0.10	0.09
MgO	0.52	0.54	0.53	0.54	0.54	0.52
CaO	1.08	1.05	1.18	1.09	1.11	1.10
K_2O	2.08	2.05	2.2	2.09	2.13	2.18
Na_2O	6.68	6.66	6.36	6.02	6.27	6.12
P_2O_5	0.11	0.11	0.09	0.11	0.11	0.11
LOI	0.63	0.59	0.52	0.83	0.77	0.64
Total	99.69	99.69	99.86	99.64	99.77	99.73
$Mg^{\#}$	29.1	29.6	30.3	24.5	23.3	28.6
A/CNK	1.09	1.09	1.08	1.14	1.10	1.13
La	86.6	98.6	92.7	76.4	69.0	84.0
Ce	185	214	209	182	154	190
Pr	24.2	27.7	26.1	21.4	18.9	22.5
Nd	84.9	96.3	90.8	77.7	68.7	80.9
Sm	15.9	17.5	16.5	14.3	12.9	15.1
Eu	1.02	1.29	1.57	1.21	1.07	1.28
Gd	11.0	12.2	11.7	10.5	9.59	10.9
Tb	1.16	1.26	1.2	1.16	1.07	1.19
Dy	5.20	5.62	5.31	4.60	4.30	4.78
Ho	0.69	0.8	0.67	0.63	0.62	0.65
Er	1.72	1.98	1.59	1.42	1.50	1.50
Tm	0.14	0.17	0.13	0.14	0.17	0.15
Yb	0.92	1.07	0.89	0.84	0.97	1.38
Lu	0.22	0.24	0.22	0.12	0.14	0.12
Y	19.3	22.2	18.7	18.8	19.0	20.6
ΣREE	419	479	459	392	342	414
LREE	398	456	437	373	324	394
HREE	21.0	23.3	21.7	19.4	18.3	20.7
LREE/HREE	19.0	19.5	20.1	19.2	17.7	19.0
$(La/Yb)_N$	67.3	66.0	75.0	65.4	51.1	43.7
δEu	0.24	0.27	0.35	0.29	0.28	0.29
δCe	0.99	1.01	1.04	1.09	1.02	1.05
Rb	205	228	242	204.9	188.9	214.8
Ba	790	857	1150	774.5	742.7	812.9
Th	48.6	53.7	51.8	43.1	39.0	46.7
U	3.03	3.14	3.32	3.21	3.09	3.11
Nb	9.55	8.45	7.86	8.96	9.23	9.07
Ta	0.32	0.34	0.45	1.13	1.14	1.14
Sr	150	165	205	150	141	168
Zr	260	242	259	191	267	154
Hf	8.86	8.21	8.62	5.24	7.45	4.02
Ni	1.51	5.59	4.26	3.63	4.84	4.67
Cr	6.60	12.20	13.40	8.89	9.43	7.58
V	20.0	21.6	20.6	19.9	21.0	20.8
Rb/Sr	1.37	1.38	1.18	1.36	1.34	1.28
Ba/La	9.12	8.69	12.4	10.1	10.8	9.68

注：$ALK = K_2O + Na_2O$；$A/CNK = Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$，分子比；$Na_2O/K_2O$ 质量比；$Mg^{\#} = 100\times[Mg^{2+}/(Mg^{2+} + TFe^{2+})]$。

43.7～75.0，LREE 富集（324×10^{-6}～456×10^{-6}），HREE 亏损（18.3×10^{-6}～23.3×10^{-6}），轻重稀土元素分馏明显（图 4a）。岩石 MREE 和 HREE 之间不仅不是以上凹曲线模式分布，而且$(Dy/Yb)_N$值和 SiO_2的含量不存在明显的负相关性，认为结晶分异过程不是控制岩浆演化的主要途径（Macpherson et al., 2006）。岩石具有中等的负 Eu 异常（δEu＝0.24～0.35），暗示岩石源区斜长石残留。

原始地幔标准化微量元素蛛网图（图 4b）显示，岩石相对富集大离子亲石元素（Rb、K）和不相容元素（Th、Ta、Zr、Hf、La、Ce、Nd、Sm、Gd），亏损大离子亲石元素（Ba、Sr）和高场强元素（U、Nb、Ta、P、Ti）。Ba、Sr 亏损可能由于岩浆起源于斜长石稳定区导致。Nb、Ta 和 Ti 亏损可能由于源区残留金红石、榍石和钛铁矿，P 亏损可能源区磷灰石残留。

3.2 锆石 LA-ICP-MS 年代学

样品锆石阴极发光图像（CL）显示锆石生长振荡环带和韵律结构，形态以长柱状为主，少数为短柱状，为典型的岩浆成因（图 5a）。它们 U-Pb 同位素年龄分析结果列于表 2。如表所示，其中 9 个比较集中的测点 U 和 Th 含量分别介于 313×10^{-6}～1876×10^{-6}和 99×10^{-6}～1746×10^{-6}之间，Th/U 比值平均值 0.49，符合岩浆锆石 Th/U 大于 0.4 的特征（Weaver, 1991）。9 个锆石点数据较为集中，均落在谐和线之上（图 5b），锆石的$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权值为 481±5Ma，MSDW＝0.085（图 5b），481Ma

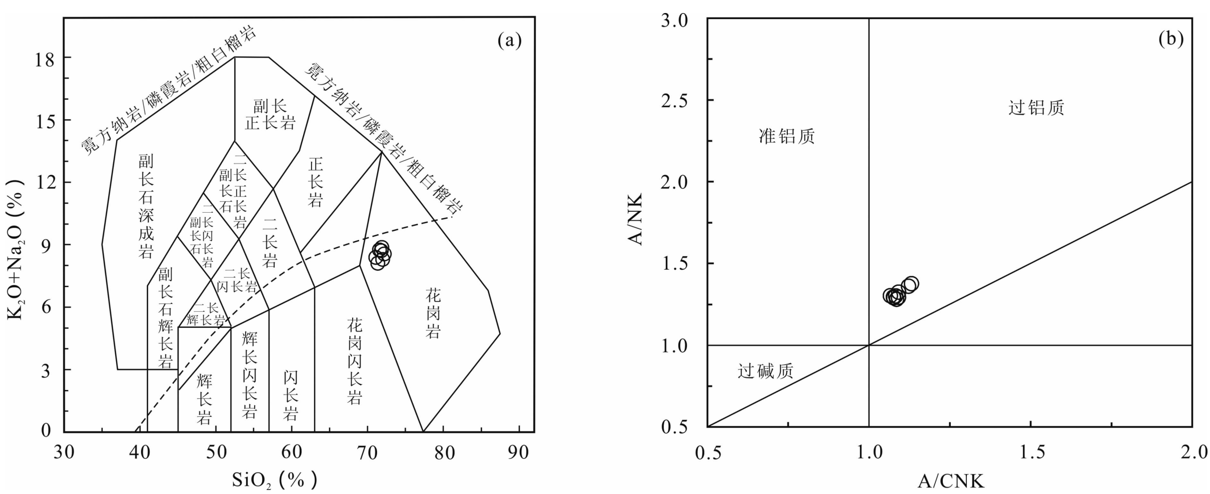

图 3 大兴安岭北部地区花岗岩的 TAS 图解（分界线上方为碱性，下方为亚碱性据 Irvine et al., 1971）(a) 和 A/CNK-A/NK 图解(b)

Fig. 3 TAS diagram for granites (the upper part of the dividing line is alkaline while the lower part is subalkaline after Irvine et al., 1971) (a) and A/CNK-ANK diagram (b) of granites in the Northern Great Xing'an Range

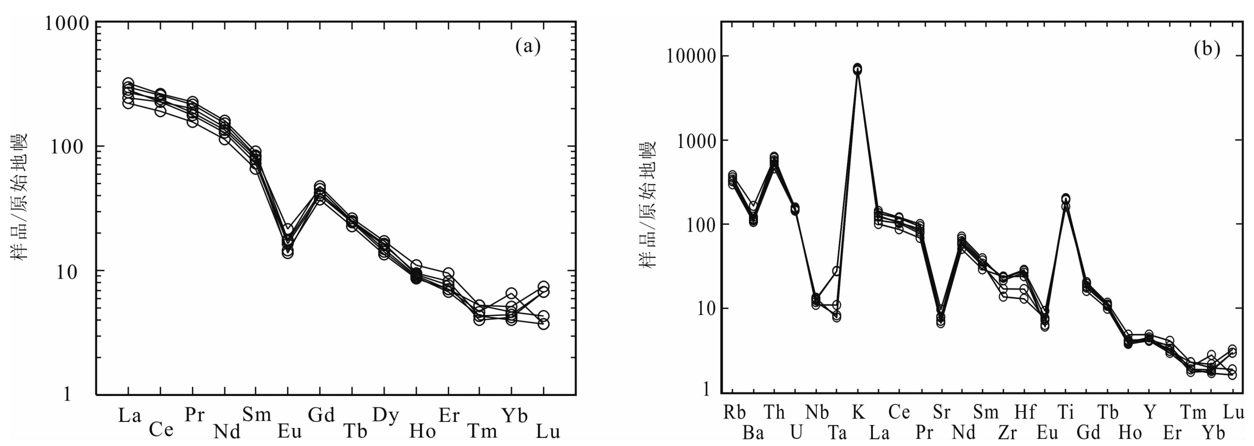

图 4 大兴安岭北部地区花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化配分图解(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)（据 Sun et al., 1989）

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) of granite in the Northern Great Xing'an Range (chondrite-normalized values and primitive mantle values from Sun et al., 1989)

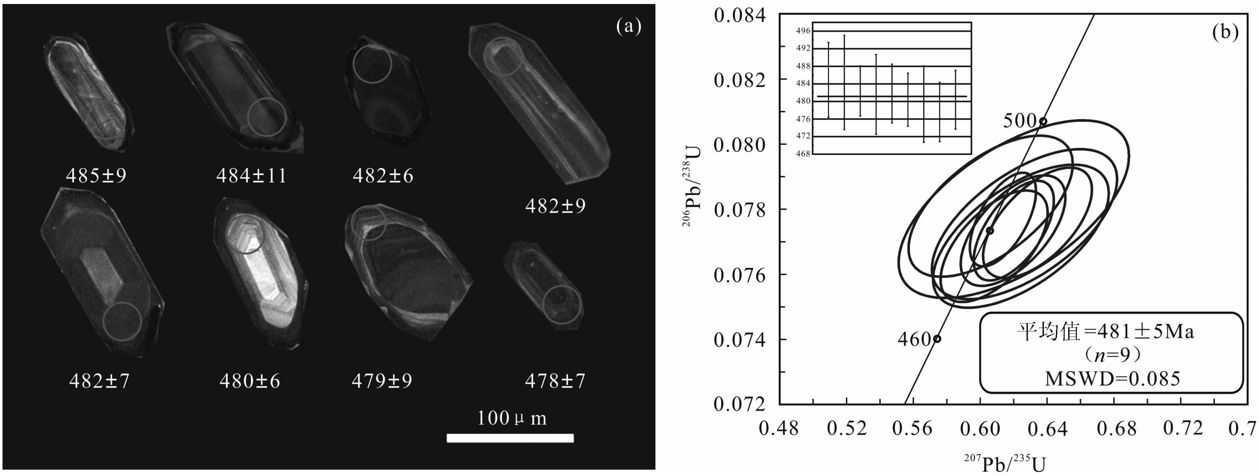

图 5　大兴安岭北部地区花岗岩中部分锆石阴极发光图像(a)和 U-Pb 年龄谐和图及加权平均年龄(b)

Fig. 5　CL images of zircons (a) and zircon U-Pb concordia diagram and weighted average ages diagram (b) of granites in the Northern Great Xing'an Range

表 2　大兴安岭北部地区花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析及锆石中钛地质温度计算结果

Table 2　LA-ICP-MS zircon U-Pb analytic data and Ti geological temperature calculation of granites in the Northern Great Xing'an Range

测点	含量($\times10^{-6}$)		Th/U	同位素比值及误差						年龄(Ma)及误差						钛地质温度计算	
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	Ti($\times10^{-6}$)	T(℃)
SBS-2-01	526	1231	0.43	0.0563	0.0035	0.6062	0.0324	0.0781	0.0014	462	131	481	21	485	9	32.1	855
SBS-2-02	621	1695	0.37	0.0576	0.0046	0.6201	0.0455	0.078	0.0018	514	167	490	29	484	11	39.4	878
SBS-2-03	522	695	0.75	0.0572	0.0021	0.6136	0.0131	0.0777	0.001	500	78	486	8	482	6	46.5	897
SBS-2-04	390	1443	0.27	0.0585	0.0039	0.6264	0.0366	0.0776	0.0015	550	138	494	23	482	9	19.0	801
SBS-2-05	997	1876	0.53	0.0593	0.0027	0.6342	0.0215	0.0776	0.0011	576	94	499	13	482	7	25.1	829
SBS-2-06	1746	1821	0.96	0.0581	0.0022	0.62	0.0158	0.0774	0.001	534	83	490	10	480	6	26.7	835
SBS-2-07	99	742	0.13	0.0586	0.0037	0.6243	0.0347	0.0772	0.0015	552	133	493	22	479	9	31.3	852
SBS-2-08	103	313	0.33	0.0574	0.0026	0.6083	0.0212	0.0769	0.0011	506	97	483	13	478	7	31.8	854
SBS-2-09	513	802	0.64	0.0581	0.0026	0.6196	0.0207	0.0774	0.0011	533	95	490	13	480	7	29.9	847
SBS-2-10	72	28	2.53	0.0863	0.0045	0.9264	0.0400	0.0778	0.0014	1345	98	666	21	483	8		
SBS-2-11	18	49	0.37	0.0636	0.0026	0.6796	0.0189	0.0775	0.0010	727	83	527	11	481	6		
SBS-2-12	15	35	0.44	0.0855	0.0040	0.9187	0.0333	0.0779	0.0013	1328	88	662	18	483	8		
SBS-2-13	16	30	0.54	0.0758	0.0027	0.8176	0.0178	0.0782	0.0010	1089	71	607	10	486	6		
SBS-2-14	20	35	0.57	0.0663	0.0028	0.7158	0.0222	0.0783	0.0011	817	87	548	13	486	7		
SBS-2-15	16	91	0.18	0.0681	0.0023	0.7252	0.0123	0.0772	0.0010	872	68	554	7	480	6		
SBS-2-16	14	72	0.19	0.0813	0.0046	0.8650	0.0410	0.0772	0.0015	1229	106	633	22	479	9		
SBS-2-17	35	96	0.36	0.0890	0.0044	0.9498	0.0373	0.0774	0.0013	1404	92	678	19	481	8		

左右代表了岩浆结晶年龄,属早奥陶世。

3.3　锆石 Lu-Hf 同位素

岩石中锆石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值为 0.282413～0.282642,$\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -2.22～5.57,除了 6 号 7 号点为正值,其余都为负值,Hf 同位素单阶段模式年龄(t_{DM1})和二阶段模式年龄(t_{DM2})分别变化于 871～1165Ma 和 1021～1453Ma 之间(表 3)。

4　讨论

4.1　岩石类型

岩石 SiO_2 含量高(71.42%～72.57%),Na_2O+K_2O 含量为 8.11%～8.76%,CaO 含量为 1.05%～1.18%(<1.8%),A/CNK 值为 1.08～1.14。岩石 FeO^T/MgO 比值(平均值 4.23)高于 I 型花岗岩(平均值 2.27)、S 型(平均值 2.38)和 M 型(平均值 2.37)花岗岩(Whalen et al.,1987),而与澳大利亚 Lachlan 褶皱带中的 A 型花岗岩(4.16～35.3)(Pearce et al., 1984)接近。岩石亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Eu、Ti 等,与东北典型 A 型花岗岩微量元素特征类似(Wu et al., 2002)。岩石 10000Ga/Al 值(2.73～2.85)高于 A 型花岗岩下限 2.6FeO^T/(Whalen et al.,1987),在(K_2O+Na_2O)、

表 3　大兴安岭北部地区花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3　LA-ICPMS zircon Hf analyses of the granites in the Northern Great Xing'an Range

测点	t(Ma)	^{176}Yb/^{177}Hf	^{176}Lu/^{177}Hf	^{176}Hf/^{177}Hf(corr)	2σ	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	2σ	$t_{DM1(Hf)(Ma)}$	$t_{DM2(Hf)(Ma)}$	$f_{Lu/Hf}$
SBS-2-01	485	0.027044	0.001013	0.282563	0.000878	−7.41	2.86	0.92	976	1171	−0.97
SBS-2-02	484	0.019703	0.000705	0.282483	0.000664	−10.23	0.13	0.83	1079	1322	−0.98
SBS-2-03	482	0.035710	0.001299	0.282642	0.001019	−4.61	5.57	1.18	871	1021	−0.96
SBS-2-04	482	0.024676	0.000939	0.282536	0.000405	−8.36	1.93	1.03	1012	1223	−0.97
SBS-2-05	482	0.027293	0.001005	0.282562	0.000841	−7.41	2.86	0.99	976	1171	−0.97
SBS-2-06	480	0.009764	0.000315	0.282413	0.000572	−12.71	−2.22	0.91	1165	1453	−0.99
SBS-2-07	479	0.021216	0.000692	0.282455	0.001291	−11.20	−0.83	0.87	1117	1376	−0.98
SBS-2-08	478	0.019086	0.000715	0.282570	0.001602	−7.14	3.23	0.97	958	1151	−0.98
SBS-2-09	480	0.028230	0.001000	0.282565	0.001698	−7.32	2.95	1.00	972	1166	−0.97

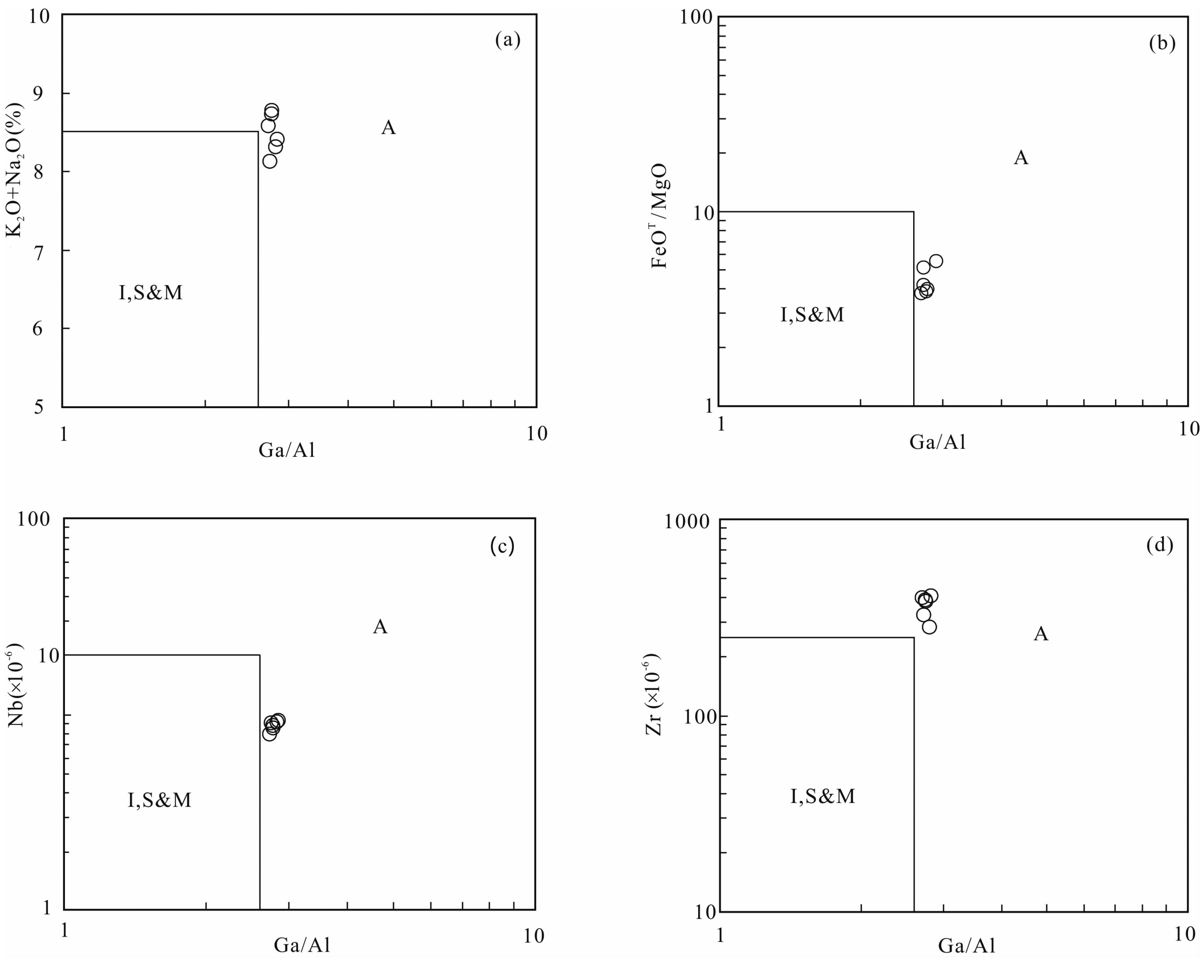

图 6　大兴安岭北部地区花岗岩的(Na_2O+K_2O)，FeO^T/MgO，Nb，Zr 对 Ga/Al 判别图解(据 Whalen et al.，1987)

Fig. 6　Diagrams of (Na_2O+K_2O), FeO^T/MgO, Nb, Zr vs. Ga/Al of granites in the Northern Great Xing'an Range(after Whalen et al., 1987)

FeO^T/MgO、Nb、Zr 对 10000Ga/Al 图解上(图 6)，岩石全部落在 A 型花岗岩范围。由于高分异的其他类型花岗岩的某些地球化学特征与 A 型花岗岩类似，Whalen et al.(1987)和 Eby(1990)提出 A 型花岗岩总是比其他类型花岗岩有更高的 Zr+Nb+Ce+Y 含量(>350×10^{-6})，进而区分高分异 I 型和未分异的其他类型花岗岩。本次测试样品 Zr+Nb+Ce+Y=374×10^{-6}～495×10^{-6} 含量(>350×10^{-6})，表明岩石为 A 型花岗岩。本文利用锆石 Ti 地质温度计计算公式(Watson et al.，2006)对锆石测试结果中 9 个有效点计算得到岩石形成的温度为 801～897℃，符合 A 型花岗岩形成温度相较 I 型花岗岩(764℃)一般较高(800℃)的特点(Wang Qiang et al.，2000；Clemens et al.，1986)。

4.2　岩浆源区及构造背景

Eby(1992)根据化学成分将 A 型花岗岩类分为 A_1 型和 A_2 型 2 个亚类，并认为 A_1 型与洋岛岩浆来源相同的地幔分异产物，A_2 型来源于大陆地壳或底侵的镁铁质地壳。由于 A 型花岗岩具有特殊的地球化学特征，往往对岩石成因及地球动力学研究具有一定指导意义，A_1 型花岗岩往往产于非造山的板内裂谷环境，A_2 型花岗岩产于于造山作用晚期(或造山后)相对稳定的拉张环境(Whalen et al., 1987; Eby, 1992; Wang Dezi et al., 1995; Hong Dawei et al., 1995; Zhou Ruo et al., 1997)。

在 Rb/Nb-Y/Nb(图 7a)及 Y-Nb-Ce(图 7b)图解上，岩石全部落入 A_2 区。在 Maniar 和 Piccoli (1989)提出的多组主元素构造环境判别图解中，显示岩石为造山后花岗岩类(POG)，而不是裂谷花岗岩(图 8)。目前 A 型花岗岩起源于壳源基本被大部分学者认可接受，但其源区成分尚未形成统一认识(Wang Yuxi et al., 2017)。额尔古纳地块上除了早古生代的 A 型花岗岩之外，还存在新元古代的 A 型花岗岩，这两期 A 型花岗岩形成的动力学背景在下文中进行讨论。

本文中岩石为低 Sr($150\times10^{-6}\sim205\times10^{-6}<400\times10^{-6}$)低 Yb($0.89\times10^{-6}\sim1.07\times10^{-6}<2\times10^{-6}$)型花岗岩，有中等的负 Eu 异常($\delta$Eu=0.24～

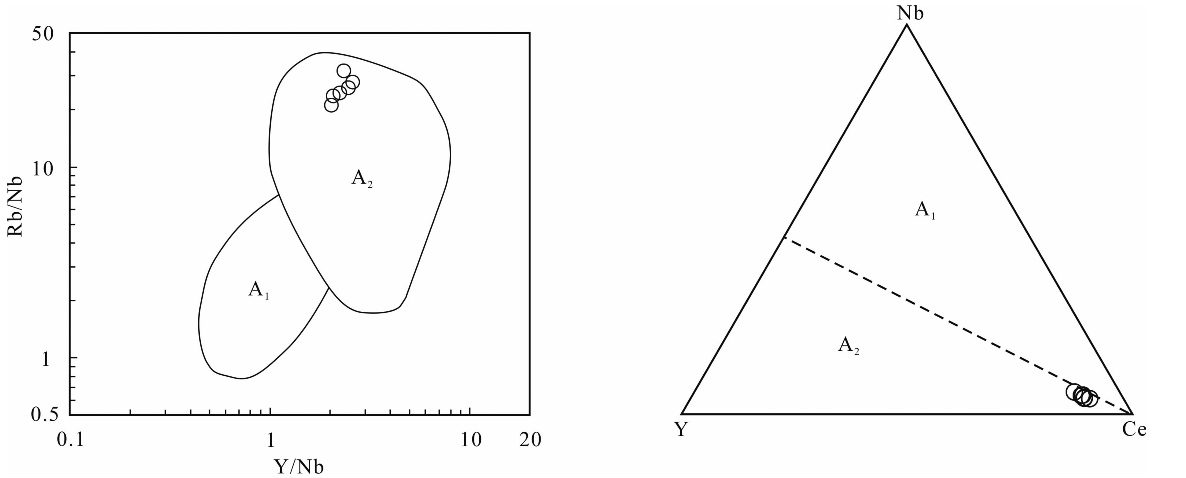

图 7　大兴安岭北部地区花岗岩的 Rb/Nb-Y/Nb 图解(a)(Eby, 1992)和岩石的 Y-Nb-Ce 图解(b)(Eby, 1992)

Fig. 7　Rb/Nb-Y/Nb diagrams(a) Y-Nb-Ce diagrams(b) of granites in the northern Great Xing'an Range (after Eby, 1992)

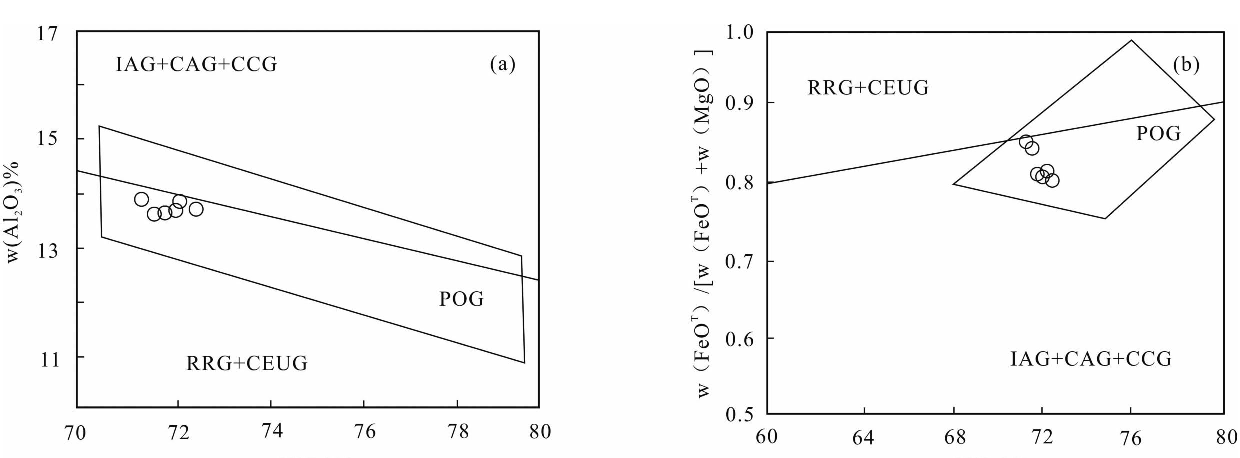

图 8　大兴安岭北部地区花岗岩 Al_2O_3-SiO_2 图解(a)和 $FeO^T/(FeO^T+MgO)$-SiO_2 图解(b)(据 Maniar et al., 1989)

Fig. 8　Diagrams of Al_2O_3 vs. SiO_2(a) and $FeO^T/(FeO^T+MgO)$ vs. SiO_2(b) of granites in the northern Great Xing'an Range (after Maniar et al., 1989)

IAG—岛弧花岗岩；RRG—与裂谷有关花岗岩；CAG—大陆弧花岗岩；CEUG—大陆的造陆抬升花岗岩；CCG—大陆碰撞花岗岩；POG—造山后花岗岩

IAG—island-arc granite; RRG—granite related to rift; CAG—continent-arc granite; CEUG—continent emergence-uplift granite; CCG—continent-collision granite; POG—post-orogenic granite

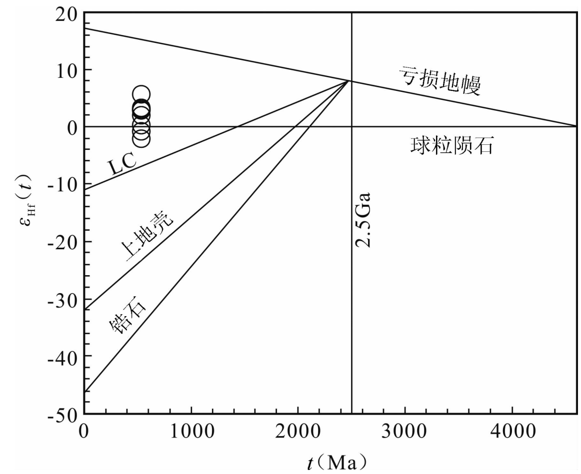

图 9 大兴安岭北部地区花岗岩的 $\varepsilon_{Hf}(t)$-t 图解
(Wu Fuyuan et al., 2007)

Fig. 9 $\varepsilon_{Hf}(t)$-t diagram of granites in the Northern Great Xing'an Range(Wu Fuyuan et al., 2007)

0.35),源区可能有斜长石残留。岩石具有低 Mg# 含量 23.3～30.3(<45),及低 Ni(1.51×10^{-6}～5.59×10^{-6})、Cr(6.60×10^{-6}～13.4×10^{-6})、V(20.0×10^{-6}～21.6×10^{-6})含量,结合岩石的 Rb/Sr 值(1.18～1.38)和 Ba/La 值(8.7～12.4),均更接近地壳和远离地幔的比值(Rb/Sr 地壳值 0.35,地幔值 0.034(Taylor et al., 1995)、Ba/La 地壳值 9.6、地幔值 25(Weaver, 1991)),认为岩石源于下地壳部分熔融。

锆石 Hf 同位素也对岩浆源区性质给出了很好的制约(Amelin et al., 2000;Griffin et al., 2002)。在 $\varepsilon_{Hf}(t)$-t 图解上(图 8),这些花岗岩的数据多数落在球粒陨石演化线之上。已发表的额尔古纳地块古生代及中生代花岗岩的 Nd-Hf 同位素资料(Ge Wenchun et al., 2007; Sui Zhenmin et al., 2007; Zhang Yanlong et al., 2008, 2010)表明中—新元古代是额尔古纳地块的地壳增生的重要时期。因此,认为花岗质岩浆的原岩起源于中新元古代亏损地幔的增生的中—基性火山岩石部分熔融,形成过程中可能有古老地壳物质的混染。

近年来大量的有关额尔古纳地块的锆石年代学数据为讨论额尔古纳地块的构造归属提供了重要的证据,得耳布镇和韩家园子附近发现～2.6Ga 和～1.6Ga 的花岗岩,表明额尔古纳地块可能具有早前寒武系结晶基底(Sun Lixin et al., 2013; Shao Jun et al., 2015),对兴华渡口群的研究也被证实其形成时代为不早于新元古代的角闪岩相变质表壳岩(Miao Laicheng et al., 2007;Wu Guang et al., 2012; Ge Wenchun et al., 2015)。额尔古纳地块上发现大量的新元古代碎屑锆石和捕获锆石(Meng En et al., 2010;Wu Guang et al., 2012)以及新元古代侵入体(She Hongquan et al., 2012; Zhao Shuo et al., 2016a, 2016b; Tang Jie et al., 2013; Gou Jun et al., 2013),表明额尔古纳地块上的确存在新元古代的岩浆活动,由老到新从后碰撞花岗岩到 A 型花岗岩过渡,也会有部分显示 I 型花岗岩特征,其 Hf 同位素显示形成于新元古代的花岗岩的原始岩浆来自中元古代起源于亏损地幔的增生基性地壳(Zhao Shuo et al., 2016b)。对比全球新元古代岩浆构造热事件,认为额尔古纳地块上的新元古代岩浆活是对 Rodinia 超大陆形成和演化中的地壳响应(Zhao Shuo et al., 2016b),可能与超地幔柱活动有关。新元古代 A 型花岗岩与本次研究的花岗岩对比,其 Hf 同位素显示具有相似的岩浆源区。

近年来对西伯利亚板块(Salnikova et al., 1998),蒙古—图瓦地块(Salnikova et al., 2001)、额尔古纳地块(Sorokin et al., 2004; Wu Guang et al., 2005; Ge Wenchun et al., 2005; Qin Xiufeng et al. 2007; Wu Fuyuan et al., 2011)年代学、地磁学的研究表明西伯利亚板块南缘和蒙古—图瓦地块、额尔古纳地块之间存在一条规模宏大的早古生代增生、碰撞造山带。位于额尔古纳地块北极村、漠河和红旗一带出露的变质杂岩(漠河杂岩)由一系列孔兹岩系构成。年代学研究显示,漠河杂岩代表性岩石石榴—夕线片麻岩变质年龄为 496Ma;黑云斜长片麻岩变质年龄为 496Ma;漠河东南 80km 的红旗地区的黑云斜长片麻岩变质年龄为 497Ma;漠河角闪斜长片麻岩变质年龄为 495Ma(Zhou Jianbo et al., 2010; Zhou Jianbo et al., 2011)。上述结果表明,额尔古纳地块变质基底在 500Ma 左右存在一期高级变质事件(Zhou Jianbo, 2011)。通过对大兴安岭北段兴华渡口岩群研究发现,其第二世代褶皱变形(D2)与变质作用密切相关(～500Ma),同时形成区域上 NEE 向左行逆冲型韧性剪切带(Li Yangchun et al., 2000; Zhou Jianbo et al., 2010)。此外,兴凯—萨拉伊尔期,区域震旦纪—早寒武世的倭勒根岩群、兴隆群和额尔古纳河组形成北东向延伸褶皱(Xue Mingxuan, 2012)。漠河西部的洛古河岩体二长花岗岩和石英闪长岩年龄分别为 504Ma、517Ma,形成于主碰撞之后的隆升期及造山晚期(Wu Guang et al., 2005)。以及漠河地区西门都里花岗岩体 502Ma(Qin Xiufeng et al., 2007)

形成于挤压向拉张转换的构造环境，表明区域上 500Ma 左右已开始处于拉张构造背景，标志着萨拉伊尔运动影响的结束。本文测试二长花岗岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄为 481Ma（早奥陶世），具有 A_2 型花岗岩的特征，可能形成于额尔古纳地块与西伯利亚板块拼合造山后伸展拉张背景下，标志着该区已转入板内环境。该认识也得到了额尔古纳地块东部 467～472Ma 之间的 A 型淡色亚碱性花岗岩（Sorokin，2004）、西伯利亚贝加尔湖西南部地区 471～488Ma 造山后花岗岩（Salnikova et al.，1998）、俄罗斯境内的图瓦地块上 490 Ma 的早古生代后造山花岗岩（Salnikova et al.，2001）的支持。

5　结论

（1）获得大兴安岭北部漠河地区黑云母二长花岗岩岩浆锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄值为 481±5Ma，属早奥陶世。

（2）黑云母二长花岗岩属 A_2 型花岗岩，岩浆形成温度 801～897℃，主要源于中新元古代增生地壳。

（3）黑云母二长花岗岩形成于额尔古纳地块与西伯利亚板块拼合造山后伸展拉张背景下。

References

Amelin Y, Halliday A N, Lee D C. 2000. Early-Middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotope studies of single zircon grains. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64: 4205～4225.

Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb. Chemical Geology, 192(1/2): 59～79.

Biao Shanghu, Li Yangchun, He Xiaohua, Zhou Xingfu, Ma Liling. 1999. The Geochemical Characteristics of the Xinghuadukou Group in the Lulin Forestry Center, Tahe, Heilongjiang Province. Regional Geology of China, 18(1): 28～32(in Chinese with English abstract).

Biao Shanghu, Zheng Weizheng, Zhou Xingfu. 2012. Zircon U-Pb age of the North Da Hinggan Mts., NE China and its constraint to attribute of the Ergun block. Acta Geologica sinica, 86(8): 1262～1272(in Chinese with English abstract).

Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province. 1993. Regional geology of Heilongjiang Province. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).

Clemens J D, Holloway J R., White A J R. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints. American Mineral, 71 (3/4): 317～324.

Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. Lithos, 26: 11～134.

Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. Geology, 20: 641～644.

Fisher C M, Vervoot J D, Hanchar J M. 2014. Guidelines for reporting zircon Hf istopic data by LA-MC-ICPMS and potential pitfalls in the interpretation of these data. Chemical Geology, 363: 125～133.

Ge Wenchun, Sui Zhenmin, Wu Fuyuan, Zhang Jiheng, Xu Xuechun, Cheng Ruiyu. 2007. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic characteristics and their implications of the Early Paleozoic granites in the northeastern Da Hinggan Mts., northeastern China. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 423～440(in Chinese with English abstract).

Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, A A Abdel Rahman. 2005. Emplacement age of the Tahe Granite and its constraints on the tectonic nature of the Erguna block in the northern part of the Da Hinggan Range. Chinese Science Bulletin, 50(12): 1239～1247(in Chinese with English abstract).

Ge Wenchun, Chen Jingsheng, Yang Hao, Zhao Guochun, Zhang Yanlong, Tian Dexin. 2015. Tectonic implications of new zircon U-Pb ages for the Xinghuadukou Complex, Erguna Massif, northern Great Xing'an Range, NE China. Journal of Asian Earth Sciences, 106: 169～185.

Gou Jun, Sun Deyou, Ren Yunsheng, Liu Yongjiang, Zhang Shuyi, Fu Changliang, Wang Tianhao, Wu Pengfei, Liu Xiaoming. 2013. Petrogenesis and geodynamic setting of Neoproterozoic and Late Paleozoic magmatism in the Manzhouli-Erguna area of Inner Mongolia, China: Geochronological, geochemical and Hf isotopic evidence. Journal of Asian Earth Sciences, 68: 114～137.

Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly Suzanne Y, Xu Xisheng, Zhou Xinmin. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. Lithos, 61: 237～269.

Hong Dawei, Wang Shiguang, Han Baofu, Jin Manyuan. 1995. Tectonic setting classification and discrimination criteria for alkaline granites. Science in China, 25(4): 418～426(in Chinese with English abstract).

Hu Zhaochu, Liu Yongsheng, Gao Shan, Liu Wengui, Zhang Wen, Tong Xirun, Lin Lin, Zong Keqing, Li Ming, Cheng Haihong, Zhao Lian, Yang Lu. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and Jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 27: 1391～1399.

Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, 8: 523～548.

Janne B T, Catherine C, Frances. 1997. Separation of Hf and Lu for high-precision isotope analysis of rock samples by magnetic sector-multiple collector ICP-MS. Contributions to Mineralogy and Petrology, 127: 248～260.

Li Yangchun, Zhou Xingfu, Li Yongxiu, Hao Yonghong, Liu Zhen, 2000. The Relation Ship Between the Metamorphism and Deformation of Xinghuadukou Rock Group in North Part Daxiang'anling. Progress In Precambrian Research, 23(1): 44～50.

Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Wang Dongbing. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-periotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51(1/2): 537～571.

Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Günther Detlef, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. Chemical Geology, 257(1/2): 34～43.

Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Execl. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1～70.

Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, 101: 635～643.

Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. 2006. Adakites without slab melting: high pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. Earth and Planetary Science Letters, 243:581～593.

Meng En, Xu Wenliang, Pei Fuping, Yang Debin, Yu Yang, Zhang Xingzhou. 2010. Detrital-Zircon Geochronology Of Late Paleozoic Sedimentary Rocks In Eastern Heilongjiang Province, Ne China: Implications For The Tectonic Evolution Of The Eastern Segment Of The Central Asian Orogen. Tectonophysics, 485(1): 42～51.

MiaoLaicheng, Liu Dunyi, Zhang Fuqin, Fan Weiming, Shi Yuruo, Jie Hangqiang, 2007. Zircon SHRIMP U-Pb ages of the "Xinghuadukou Group" in Hanjiayuanzi and Xinlin area and the "Zhalantun Group" in inner ongolia, Da Hinggan Mountains. Chinese Science Bulletin, 52(5):591～601. (in Chinese with English abstract).

Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Petrol, 25(4): 956～983.

Qin Xiufeng, Yin Zhigang, Wang Yan, Guo Yuansheng, Liu Xuguang, Zhou Shiqiang. 2007. Early Paleozoic adakitic rocks in Mohe area at the northern end of the Da Hinggan Mountains and their geological significance. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1501～1511(in Chinese with English abstract).

Salnikova E B, Kozakov K. Kotov A B, Kröner A, Todit W, Bibikova E V, Nutman A, Ykovleva S Z, Kovach V P. 2001. Age of Palaeozoic granites and metamorphism in the Tuvino-Mongolian Massif of the Central Asian Mobile Belt: Loss of a Precambrian microcontinent. Precambrian Research, 110: 143～164.

Salnikova E B, Sergeev S A, Kotov A B, Yakoleva S Z, Steiger R H, Reznitskiy L Z, Vasil'ev E P. 1998. U-Pb zircon dating of granulite metamorphism in the Sludyanskiy Complex, eastern Siberia. Gondwana Research, 1: 195～205.

She Hongquan, Li Jinwen, Xiang Pingan, Guan Jidong, ang Yuncheng, Zhang Deuan, Tan Gang, Zhang Bin. 2012. U-Pb ages of the zircon from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution. Acta Petrologica Sinica, 28(2): 217～240(in Chinese with English abstract).

Sorokin, A. A., Kudryahov, N. M, Li Jinyi, Zhuravlev D Z, Yin Pin, Sun Guihua, Gao Liming. 2004. Early Paleozoic granitoids in the eastern margin of the Argu'na terrane, Amur area: first geochemical and geocheonologic data. Petrology, 12(4): 367～376.

Sui Zhenmin. 2007. Zircon U-Pb ages, petrogenesis and crustal evolution of the granites in northeastern part of the Great Xing'an Range. Changchun: Jilin University. 1～148. (in Chinese with English abstract).

Sun Guangrui, Li Ynagchun, Li Chunyu. 2002. The basement tectonics of Ergun massif. Geology and Resources, 11(3): 129～139(in Chinese with English abstract).

Sun S S, Mcdonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J(eds). Magmatism in the ocean basins. Geol. Spec. Pub., 2: 313～345.

Taylo S R, Mclennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. Reviews of Geophysics, 33(2): 241～265.

Tang Jie, Xu Wenliang, Wang Feng, Wang Wei, Xu Meijun, Zhang Yihang. 2013. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic magmatism in the Erguna Massif, NE China: Petrogenesis and implications for the breakup of the Rodinia supercontinent. Precambrian Research, 224: 597～611.

Wang Dezi, Zhao Guangtao, Qiu Jiansheng. 1995. The tectonic constraint on the Late Mesozoic A-type granitoids in eastern China. Geological Journal of China Universities, 1(2): 13～20 (in Chinese with English abstract).

Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin. 2000. The Ascertainmen of Late-Yanshannian A-Type Granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt. Acta Petrologica et Mineralogica, 19(4): 297～306 (in Chinese with English abstract).

Wang Feng, Xu Wenliang, Gao Fuhong, Pei Fuping, Zhao Lei, Yang Yang. 2014. Precambrian terrane within the Songnen-Zhangguangcai Range Massif, NE China: Evidence from U-Pb ages of detrital zircons from the Dongfengshan and Tadong groups. Gondwana Research, 26(1): 402～413.

Wang Yuxi, Wang Jinrong, Zhoux Xiaoling, Wang Huaitao, Di Pengfei, Wang Xiaowei,Chen Wanfeng. 2017. The cracking of Columbia supercontinent: Evidence from the Dahongshan A-type granite in the Southeastern Tarim Craton. Acta Geologica Sinica, 91(11): 2369～2386 (in Chinese with English abstract).

Waston E B, Wark D A, Thomas J B. 2006. Crystallization themometers for zircon and rutile. Contributions to Mineralogy and Petrology, 151: 413～433.

Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints. Earth and Planetary Science Letters, 104: 381～397.

Whalen J B, Cueeie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407～419.

Wilde S A, Wu Fuyuan, Zhang Xingzhou. 2001. The Mashan Complex: SHRIMP U-Pb Zircon Evidence for a Late Pan-African Metamorphic Event in NE China and Its Implication for Global Continental Reconstructions. Geochimica, 30(1): 35～50(in Chinese with English abstract).

Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun, Zhang Yanbin, Matthew L Grant, Simon A Wilde, Bor-Ming Jahn. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. Journal of Asian Earth Sciences, 41: 1～30.

Wu Fuyuan, Sun Deyou, Li Huimin, Bor-Ming Jahn, Simon A Wilde. 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. Chemical Geology, 187: 143～173.

Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007. Lu-Hf isotopic systematics systematics and their applications in petrology. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185～220 (in Chinese with English abstract).

Wu Guang, Sun Fengyue, Zhao Caisheng, Li Zhitong, Zhao Ailin, Pang Qingbang, Li Guangyuan. 2005. Discovery of the Early Paleozoic Post Orogenic Granite in Northern Margin of the Erguna Massif and Its Significance. Chinese Scinence Bulletin, 50: 2278～2288(in Chinese with English abstract).

Wu Guang, Chen Yuchuan, Chen Yanjing, Zeng Qingtao. 2012. Zircon U-Pb ages of the metamorphic supracrustal rocks of the Xinghuadukou Group and granitic complexes in the Argun massif of the northern Great Hinggan Range, NE China, and their tectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 49(3): 214～233.

Wu Taotao, Chen Cong, Liu Kai, Bao Qingzhong, Zhou Yongheng, Song Wanbinf. 2016. Petrogenesis and tectonic setting of the monzonite granite in Yitulihe area, Northern Great Xing'an Range. Acta Geologica Sinica, 90(10): 2637～2647 (in Chinese with English abstract).

Xiao Long, Robert P A, Xu Jifeng. 2004. The role of deep processes controls on variation of compositions of adakitic rocks. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 219～228(in Chinese with English abstract).

Xue Mingxuan. 2012. Metallogenesis of endogenic gold deposits in Heilongjiang province. Changchun: Jilin University, 1～176 (in Chinese with English abstract).

Yuan Hongli, Gao Shan, Liu Xiaoming, Li Huimin, Detlef Günther, Wu Fuyuan. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. Geostandards and Geoanalytical Research, 28(3): 353～370.

Yuan Honglin, Wu Fuyuan, Gao Shan, Liu Xiaoming, Xu Ping, Sun Deyou. 2003. Determination of U-Pb age and trace element of zircon of Cenozoic intrusion in NE by Laser-ablation inductively couple plasma mass spectrometry. Chinese Science Bulletin, 48(14): 1511～1520 (in Chinese with English abstract).

Zhang Qi, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia Xiuqin, Li Chengdodng. 2008. Criteria for the recognition of pre-, syn- and post-orogenic granitic rocks. Geological Bulletin of China, 27(1): 1～18(in Chinese with English abstract).

Zhang Yanlong, Ge Wenchun, Liu Xiaoming, Zhang Jiheng. 2008. Isotopic Characteristics and Its Significance of the Xinlin Town Pluton, Great Hingggan Mountains. Journal of Jilin University, 38(2): 177～186 (in Chinese with English abstract).

Zhang Yanlong, Zhao Xuchao, Ge Wenchun, Zhang Jiheng, Gao Yan. 2010. Geochemical characteristics and genesis of Tahe granitic complex in northern part of the Da Hinggan Range. Acta Petrological Sinica, 26(12): 3507～3520(in Chinese with English abstract).

Zhao Shuo, Xu Wen Liang, Wang Feng, Wang Wei, Tang Jie, Zhang Yihan. 2016a. Neoproterozoic magmatisms in the Erguna Massif, NE China: Evidence from zircon U-Pb geochronology. Geotectonica et Metallogenia, 40(3): 559～573(in Chinese with English abstract).

Zhao Shuo, Xu Wenliang, Tang Jie, Li Yu, Guo Peng. 2016b. Neoproterozoic magmatic event and tectonic attribution of the Erguna Massif: Constraints from geochronological, geochemical and Hf isotopic data of intrusive rocks. Earth Science, 41(11): 1803～1829 (in Chinese with English abstract).

Zhou Ruo, Yang Jing, Ren Jin. 1997. Comprarative study on the characteristics and genesis between I and A-type granite of Suzhou area. Earth Science, 22(3): 240～245(in Chinese with English abstract).

Zhou Jianbo, Simon A Wilde, Zhao Guochun, Zhang Xingzhou, Wang Hu, Zeng Weishun. 2010. Was the easternmost segment of the Central Asian Orogenic Belt derived from Gondwana or Siberia: An intriguing dilemma? Journal of Geodynamics, 50: 300～317.

Zhou Jianbo, Zhang Xingzhou, Simon A W, Zheng Changqing. 2011. Confirming of the Heilongjiang ～500Ma Pan-African khondalite belt and its tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 27(04): 1235～1245 (in Chinese with English abstract).

参考文献

表尚虎，李仰春，何晓华，周兴福，马丽玲. 1999. 黑龙江省塔河绿林林场—带兴华渡口群岩石地球化学特征. 中国区域地质，18(1)：28～33.

表尚虎，郑卫政，周兴福. 2012. 大兴安岭北部锆石 U-Pb 年龄对额尔古纳地块构造归属的制约. 地质学报，86(8)：1262～1272.

葛文春，隋振民，吴福元，张吉衡，徐学纯，程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义. 岩石学报，23(2)：424～440.

葛文春，吴福元，周长勇，A A Abdel Rahman. 2005. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约. 科学通报，50(12)：1239～1247.

黑龙江省地矿局，1993. 黑龙江省区域地质志. 北京：地质出版社.

洪大卫，王式洸，韩宝福，靳漫元. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志. 中国科学，25(4)：418～426.

李仰春，周兴福，李永秀，郝永鸿，柳震. 2000. 大兴安岭北段兴华渡口岩群多期褶皱解析及变质变形关系. 前寒武纪研究进展，23(1)：44～50.

苗来成，刘敦一，张福勤，范蔚茗，石玉若，颉颃强. 2007. 大兴安岭韩家园子和新林地区兴华渡口群和扎兰屯群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. 科学通报，52(5)：591～601.

秦秀峰，尹志刚，汪岩，郭原生，刘旭光，周世强. 2007. 大兴安岭北端漠河地区早古生代埃达克质岩特征及地质意义. 岩石学报，23(6)：1501～1511.

隋振民，2007. 大兴安岭北部花岗岩类锆石 U-Pb 年龄、岩石成因及地壳演化. 长春：吉林大学. 1～148.

佘宏全，李进文，向安平，关继东，杨郧城，张德全，谭刚，张斌. 2012. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系. 岩石学报，28(2)：217～240.

孙广瑞，李仰春，张昱. 2002. 额尔古纳地块基底地质构造. 地质与资源，11(3)：129～139.

王德滋，赵广涛，邱检生. 1995. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约. 高校地质学报，1(2)：13～21.

王强，赵振华，熊小林. 2000. 桐柏—大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定. 岩石矿物学杂志，19(4)：297～306.

王玉玺，王金荣，周小玲，王怀涛，第鹏飞，王晓伟，陈万峰. 2017. Columbia 超大陆裂解：来自塔里木克拉通东南缘大红山 A 型花岗岩的证据. 地质学报，91(11)：2369～2386.

Wilde S A，吴福元，张兴洲. 2001. 中国东北麻山杂岩晚泛非期变质的锆石 SHRIMP 年龄证据及全球大陆再造意义. 地球化学，30(1)：35～50.

吴涛涛，陈聪，刘凯，鲍庆中，周永恒，宋万兵. 2016. 大兴安岭北部伊图里河地区二长花岗岩的成因及构造背景. 地质学报，90(10)：2637～2647.

吴福元，李献华，郑永飞，高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报，23(2)：185～220.

武广，孙丰月，赵财胜，李之彤，赵爱琳，庞庆帮，李广远. 2005. 额尔古纳地块北缘早古生代后碰撞花岗岩的发现及其地质意义. 科学通报，50：2278～2288.

肖龙，Robert P R，许继锋. 2004. 深部过程对埃达克岩质岩石成分的制约. 岩石学报，20(2)：219～228.

薛明轩，2012. 黑龙江省内金属成矿作用研究. 长春：吉林大学，1～176.

袁洪林，吴福元，高山，柳小明，徐平，孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报，48(14)：1511～1520.

赵硕，许文良，王枫，王伟，唐杰，张一涵. 2016a. 额尔古纳地块新元古代岩浆作用：锆石 U-Pb 年代学证据. 大地构造与成矿学，40(3)：559～573.

赵硕，许文良，唐杰，李宇，郭鹏. 2016b. 额尔古纳地块新元古代岩浆作用与微陆块构造属性：来自侵入岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Hf 同位素的制约. 地球科学，41(11)：1803～1829.

张旗，王元龙，金惟俊，贾秀勤，李承东. 2008. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别. 地质通报，127(1)：1～18.

张彦龙，葛文春，柳小明，张吉衡. 2008. 大兴安岭新林镇岩体的同位素特征及其地质意义. 吉林大学学报，38(2)：177～186.

张彦龙，赵旭晁，葛文春，张吉衡，高妍. 2010. 大兴安岭北部塔河花岗杂岩体的地球化学特征及成因. 岩石学报，26(12)：3507～3520.

周若，杨静，任进. 1997. 苏州地区 I-A 型花岗岩特征与成因的对比研究. 地球科学，22(3)：240～245.

周建波，张兴洲，Simon，A. W.，郑常青. 2011. 中国东北～500Ma 泛非期孔兹岩带的确定及其意义. 岩石学报，27(04)：1235～1245.

Geochronology, geochemistry and Hf isotopes of the Early Ordovician A-type granite in the Mohe Region, northeastern Da Hinggan Mountains

WU Qiong[1)], FENG Chengyou[*2)], QU Hongying[1)], ZHONG Shihua[1)], LIU Jiannan[1)], ZHANG Mingyu[1)]

1) *MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Insititute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

2) *Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an*, 710054

* *Corresponding author: fengchy@cags.ac.cn*

Abstract

Zircons from the granites in the Mohe region, northeastern Da Hinggan Mountains are euhedral in shape and display oscillatory zoning in CL image, implying their magmatic origin. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results indicate that these rocks were formed in the Early Ordovician (481 ± 5Ma). Lithogeochemcial analysis shows that these rocks belong to the calc-alkaline, slightly peraluminous series granitoids, characterized by high SiO2 contents (71.42% ~ 72.57%), high alkali contents (8.11% ~ 8.76%) but low MgO contents (0.52%~0.54%). The 10000Ga/Al ratios in these rocks vary from 2.73 to 2.85, Zr+Nb+Ce+Y contents 374~495$\times10^{-6}$, and the temperature of magma formed is 801~897℃, all these characteristics indicate the rocks belong to aluminous A-type granite. The granites are characterized by the low Sr(150×10^{-6} ~ 205×10^{-6}) and low Yb (0.89×10^{-6} ~ 1.07×10^{-6}) and δEu values (0.24~0.35). The rocks have Rb/Sr ratios (1.18 ~ 1.38), Ba/La rations (8.7 ~ 12.4), $Mg^{\#}$ rations (23.3~30.3)and low contents Ni (1.51×10^{-6} ~ 5.59×10^{-6}), Cr(6.6×10^{-6} ~ 13.4×10^{-6}), V (20.0×10^{-6} ~ 21.6×10^{-6}). The in situ zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ value varies from −2.22 to 5.57 and the two-stage model age (T_{DM2}) varies from 1021 to 1453 Ma, suggesting that the primary magma was derived from partial melting of juvenile crustal materials. It can be concluded from regional tectonic evolution and discrimination diagram of tectonic setting that the granites formed in the post-orogenic extension setting due to agglomeration of Siberia block and Erguna Massif.

Key words: zircon U-Pb chronology; geochemistry; Xinghuadoukou Group; A-type granite; Da Hinggan Mountains; Mohe Area