doi: **10.12029/gc20170108**

顾玉超, 陈仁义, 贾斌, 宋万兵, 余昌涛, 鞠楠. 2017. 内蒙古边家大院铅锌银矿床深部正长花岗岩年代学与形成环境研究[J]. 中国地质, 44(1): 101−117.

Gu Yuchao, Chen Renyi, Jia Bin, Song Wanbing, Yu Changtao, Ju Nan. 2017. Zircon U−Pb dating and geochemistry of the syenogranite from the Bianjiadayuan Pb−Zn−Ag deposit of Inner Mongolia and its tectonic implications[J]. Geology in China, 44(1): 101−117(in Chinese with English abstract).

内蒙古边家大院铅锌银矿床深部正长花岗岩年代学与形成环境研究

顾玉超[1,2] 陈仁义[2] 贾斌[2] 宋万兵[2] 余昌涛[2] 鞠楠[2]

(1.中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083;2.中国地质调查局沈阳地质调查中心,辽宁 沈阳 110034)

提要:文章对内蒙古边家大院铅锌银多金属矿床深部正长花岗岩进行了LA−ICP−MS锆石U−Pb同位素测年,并对花岗岩的主量元素、微量元素和Sr−Nd同位素组成做了分析研究。结果显示,边家大院正长花岗岩加权平均年龄为(140.31±0.34)Ma,为大兴安岭南段早白垩世岩浆活动集中期产物;研究区至少有两期岩浆活动,早期酸性岩浆侵位,约10 Ma后中基性岩浆侵位,成岩与成矿同期进行。花岗岩地球化学特征具有高SiO_2、K_2O,低MgO、CaO、TiO_2的主量元素特征,A/CNK在0.98~1.19,属于准铝−弱过铝系列;富集Rb、Th、U、K等大离子亲石元素(LILE),亏损Sr、P、Ti等高场强元素(HFSE);稀土总量ΣREE较大,δEu为0.12~0.14,强烈Eu负异常;$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$和$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$初始比值,分别介于0.7066~0.7077和0.5121~0.5122(t=140 Ma),$\varepsilon_{Nd}(t)$为−5.0 ‰ ~ −6.6‰,成岩物质来自于中元古界下地壳铁镁质源岩的部分熔融。研究表明边家大院正长花岗岩是在早白垩世受到了蒙古—鄂霍次克海"剪刀式"闭合造山后的伸展条件和岩石圈减薄作用的影响,形成于高温低压环境的A型花岗岩。高温低压环境还可能与该区域岩石圈发生拆沉作用有关。

关 键 词:A型花岗岩;高温低压环境;锆石U−Pb测年;边家大院

中图分类号:P597;P618.42~43 **文献标志码**:A **文章编号**:1000−3657(2017)01−0101−17

Zircon U−Pb dating and geochemistry of the syenogranite from the Bianjiadayuan Pb−Zn−Ag deposit of Inner Mongolia and its tectonic implications

GU Yuchao[1,2], CHEN Renyi[2], JIA Bin[2], SONG Wanbing[2], YU Changtao[2], JU Nan[2]

(1. *School of Earth Sciences and Resources*,*China University of Geosciences*(*Beijing*), *Beijing* 100083, *China;* 2. *Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Shenyang* 110034, *Liaoning, China)*

Abstract: In this study, a series of analyses such as LA−ICP−MS zircon U−Pb isotopic dating and major elements, trace elements

---

收稿日期:2016−01−26;**改回日期**:2016−12−12

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项经费(201311018)资助。

作者简介:顾玉超,男,1986年生,博士生,工程师,从事矿床学和岩石学研究;E−mail:guyi1224@126.com。

通讯作者:陈仁义,男,1966年生,博士,研究员,主要从事矿床学与矿产勘查规划研究工作;E−mail:cgschenry@126.com。

and Sr−Nd isotope composition investigation were performed for the syenogranite located in the deep layer of the Bianjiadayuan Pb−Zn−Ag polymetallic deposit, Inner Mongolia. Formed during the magmatic concentration period of early Cretaceous in southern Da Hinggan Mountains, the syenogranite in this deposit has age of (140.31±0.34) Ma. There were at least two periods of magmatic activity in the study area: Acid magma invaded in the early period, whereas intermediate magma and basic magma invaded about 10 Ma later. Ore−forming and rock−forming activities occurred over the same period. Geochemistry of major elements in the syenogranite is characterized by high SiO_2 and K_2O and low MgO, CaO and TiO_2 with A/CNK ratio between 0.98 and 1.19, suggesting metaluminous−weakly peraluminous series. The syenogranite is enriched in LILE such as Rb, Th, U and K and depleted in HFSE such as Sr, P and Ti. The ΣREE values are slightly high. The δEu lies between 0.12 and 0.14, exhibiting significant negative Eu anomalies. The initial ratio of $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ is between 0.7066 and 0.7077, while the initial ratio of $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ is between 0.5121 and 0.5122 (t=140 Ma); $\varepsilon Nd(t)$ values vary in the range of −5.0 to −6.6. Therefore, the petrogenetic materials were the products of partial melting of mafic−ultramafic source rock in middle Proterozoic lower crust. The analyses reveal that the syenogranite in the Bianjiadayuan deposit is A−type granite formed in the environment of high temperature and low pressure with the impact of the post−orogenic extension of Mongolia−Okhotsk scissor−type closed orogeny and lithospheric thinning in early Cretaceous. The high temperature and low pressure environment was probably related to the regional lithosphere demolition effect.

Key words: A−type granite; environment of high temperature and low pressure; isotopic dating of LA−ICP−MS zircon U−Pb; Bianjiadayuan

About the first author: GU Yuchao, born in 1986, engineer, doctor candidate, engages in the study of mineral deposits and regional metallogeny; E−mail: guyi1224@126.com.

About the corresponding author: CHEN Renyi, born in 1966, senior researcher, doctor, engages in the study of mineral deposits and mineral exploration plan; E−mail: cgschenry@126.com.

Fund Support: Supported by Land and Resources for Public Sector Research and Special Funds（No.201311018）.

1 引 言

大兴安岭成矿带位于古亚洲洋和滨西太平洋构造域交汇部位，经历了复杂的构造运动和大规模岩浆活动，并在燕山期达到顶峰，是中国北方重要的多金属成矿省。近年来在大兴安岭南段尤其是西拉木伦河大断裂附近，发现了一系列大、中型铜−铅−锌−银多金属矿床，典型矿床有拜仁达坝铅锌银矿床（刘家军等，2010；江思宏等，2010）、维拉斯托铜锌矿床（刘翼飞等，2014）、道伦达坝铜多金属矿床（周振华等，2014）、白音诺尔铅锌矿床（江思宏等，2011；舒启海等，2011）、大井锡铜多金属矿床（王莉娟等，2000，2015；江思宏等，2012），沿北东向断裂带两侧呈线状分布，成为中国北方找矿重要潜力区。该区集中在三叠纪到早白垩世发生了大规模的花岗岩浆侵位，并且在晚侏罗—早白垩世达到顶峰（Graham et al., 2001; Jahn et al., 2001; Wu et al., 2005）。

前人对边家大院铅锌银多金属矿与成矿关系密切的辉长岩、闪长岩和石英斑岩进行了锆石U−Pb测年，获得形成年龄分别为（133±0.86）Ma、（130±0.75）Ma和（140±1.2）Ma（王喜龙等，2013；2014），为早白垩世岩浆活动产物。本文对边家大院铅锌银多金属矿新近在深部700 m附近发现的正长花岗岩进行锆石U−Pb年代学研究，并分析其地球化学特征，详细探讨其岩浆来源、岩石成因和构造背景。

2 地质概况

内蒙古边家大院铅锌银多金属矿位于大兴安岭南段，西拉木伦河深大断裂以北，二连—贺根山断裂以南的林西地区，地理坐标东经118°02′57″~118°04′27″；北纬43°31′01″~43°32′01″。区域地层出露主要有石炭系、二叠系和白垩系。石炭系火山岩在区内仅零星出露；二叠系较为发育，中统哲斯组（P_2zs）为一套浅海相沉积的碎屑岩组合，上统林西组（P_3l）为一套河流−陆相湖泊碎屑岩组合；白垩系在本区呈大面积出露，以火山碎屑岩为主。受海西期和燕山期构造活动影响，区域断裂构造十分发育，主要有北东向、北西向和东西向断裂。北东向为本区主体构造，控制区内火山岩展布和矿床分布。三组断裂长期活动，交汇切割，构成网格状格局。区域岩浆活动频繁，以燕山中晚期最为强烈，

岩体主要为花岗岩和花岗闪长岩浅成-超浅成岩株、岩脉,沿北东向断裂展布(图1)。

矿区(床)出露的地层只有二叠系中统哲斯组中段(P_2zs^2)、上段(P_2zs^3)和第四系(图2),其中哲斯组中段(P_2zs^2)是矿区(床)的主体地层,也是边家大院铅锌银矿主要赋矿围岩,岩性由灰色-深灰色-黑色泥质板岩、粉砂质泥质板岩、粉砂质板岩、细砂质板岩等互层组成,具水平层理及平行层理构造。矿区内褶皱构造较少,断裂构造较为发育,其中3条北西走向断裂规模较大、长期活动(走滑-平移、压扭-张性转换),成为构造格架的主体。3条断裂处于特定的构造位置(林西复向斜的翼部),断裂之间形成了一系列次级北东、北西、近南北向构造,呈雁列式展布,控制了矿区岩体的侵位,为后期成矿提供了有利空间。矿区岩浆活动较为强烈,发育岩体主要有辉绿辉长岩、石英斑岩和新近发现的正长花岗岩;脉岩主要有花岗闪长岩、花岗斑岩、闪长岩、石英二长斑岩和花岗细晶岩等。铅锌银矿体多赋存于岩体与围岩接触带附近的构造裂隙中。本次深入研究的正长花岗岩在地表几乎没有露头,通过钻孔勘探得知侵入深度在600 m以下。矿区围岩蚀变大体可划分为3个阶段,成矿前期围岩蚀变主要有绢云母化、黏土化、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化等;成矿期围岩蚀变主要有砂板岩类的硅化、黄铁矿化和闪长岩类的高岭土化、绢云母化、碳酸盐化和绿泥石化等;成矿后期围岩蚀变主要是碳酸盐化。

矿区内铅锌银矿化主要分为脉型和角砾岩筒型2种:东部主要以脉状矿化为主,矿体主要分布于砂板岩与辉绿辉长岩接触带和构造裂隙中,以北西走向为主,其次为近南北向,基本与区域断裂走向一致,证明矿体受断裂控制。西部主要以角砾岩筒型矿化为主,其角砾大小不等,主要为闪长岩、花岗闪长岩和石英二长斑岩等,多见硅化、绿泥石化。矿床主要金属矿物有:方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿;次要金属矿物有:毒砂、黄铜矿;微量矿物有银黝铜矿、辉银矿;脉石矿物有:石英、方解石、高

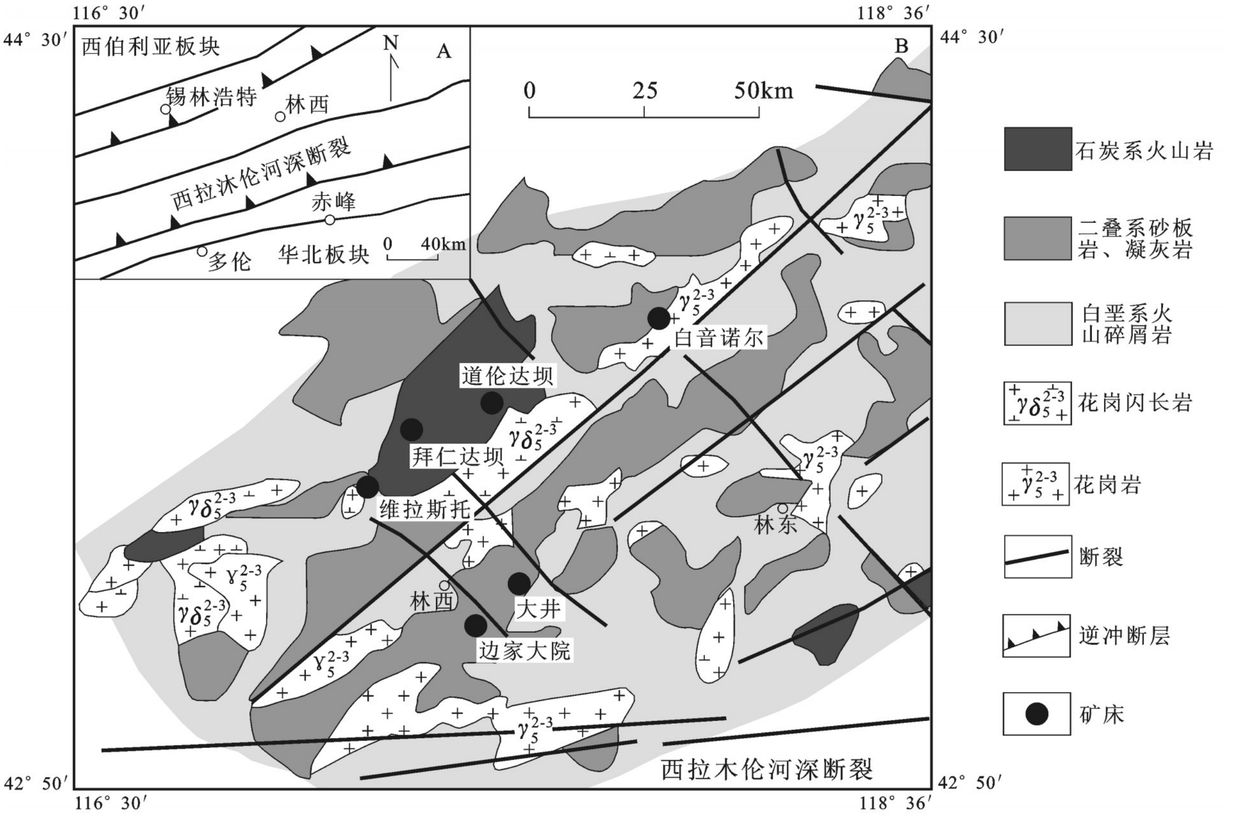

图1 大兴安岭南段区域地质-矿床分布图(据Chu et al.,2001修改)
Fig.1 Regional geological map of the southern section of Da Hinggan Mountains, showing distribution of ore deposits (modified from Chu et al.,2001)

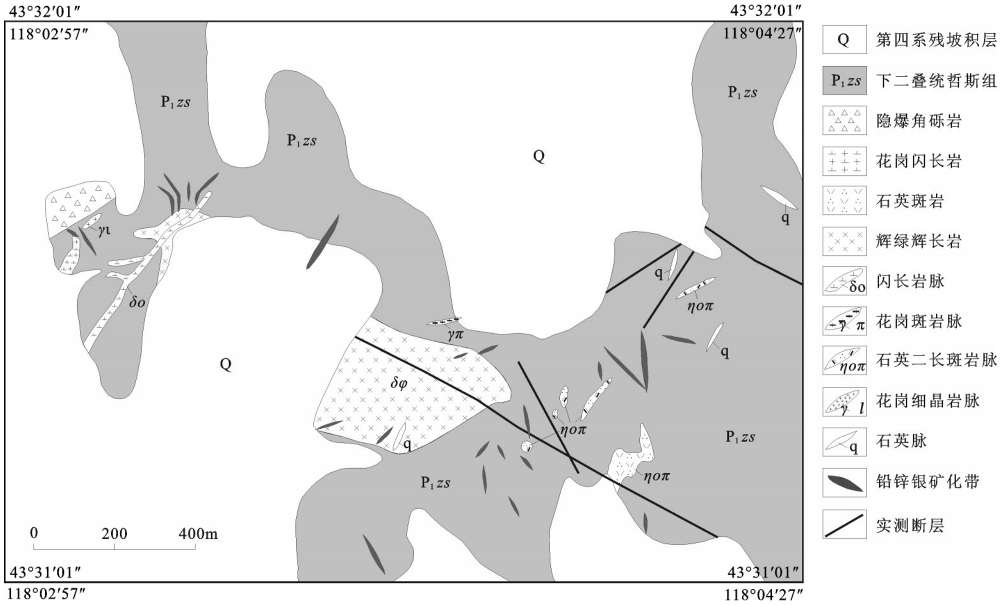

图2 内蒙古边家大院铅锌多金属矿区地质图（据内蒙古自治区核工业二四三大队，2011❶修改）
Fig. 2 Geological map of the Bianjiadayuan lead and zinc polymetallic deposit, Inner Mongolia (modified from No. 243 Party of Inner Mongolia Nuclear Geology, 2011❶)

岭土、绿泥石等。矿石结构主要有自形-半自形粒状结构、包含结构、交代残余结构、碎裂结构等；矿石构造主要有脉状构造、条带状构造、细脉浸染状构造等。结合矿石的结构构造、矿物穿切关系及矿物生成顺序，将边家大院铅锌多金属矿按热液成矿期划分3个成矿阶段：分别为毒砂-黄铁矿阶段、磁黄铁矿-黄铜矿阶段和银多金属硫化物阶段（阮班晓等，2013）。

3　样品特征和分析方法

3.1 样品特征

本次研究正长花岗岩采自边家大院铅锌银多金属矿床ZKB03-67、ZKB19-43和ZKB23-59钻孔，深度分别为720 m、430 m和624 m，样品较新鲜，有轻微绢云母化、绿帘石化。岩石具中粗粒花岗结构，块状构造。主要由钾长石（条纹长石），斜长石，石英及少量黑云母组成（图3a）。镜下特征：钾长石全部为条纹长石，呈半自形晶板状和他形晶，部分条纹长石的钾长石主晶具格状双晶，表明主晶钾长石应是微斜长石；客晶斜长石多呈不规则斑块状且不同程度绢云母化，钾长石含量约40%。斜长石呈半自形晶板状，多数具有细密的聚片双晶，推测其种属应以更长石为主，含量约20%，斜长石轻微绢云母化。石英呈他形粒状或不规则状，表面洁净透明，含量约38%。黑云母呈细板条状，多以集合体形式存在于长石、石英颗粒边界处，含量≤2%（图3b）。

3.2 分析方法

实验测试前对样品进行处理，人工碎样、挑选无蚀变的新鲜样品碎块进行分析测试，以排除绿帘石化对测试结果的影响。锆石分选在国土资源部东北矿产资源监督检测中心完成，通过重液分离和磁选方法分选出锆石，双目镜下挑选晶形较好，颗粒大于50 μm的锆石（大于1000颗）；锆石制靶、阴极发光（CL）图像在北京锆年领航科技有限公司完成，挑选晶形完好、颗粒大于80 μm的锆石用无色透明的环氧树脂固定制靶，并对锆石中心部位打磨抛光，然后对样品进行透射光、反射光照相和阴极发光（CL）图像分析；LA-ICP-MS锆石定年样品的锆石微区U-Pb年龄测定在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室进行，将德国Lambda Physik公司的ComPex 102 ArF准分子激光器(工作物质ArF，波长193 nm)与Agilent 7500ce型ICP-MS以及MicroLas公司的GeoLas 200M光学系统连接，采用了屏蔽矩（Shield Touch）和cs透镜。剥蚀物质的载气为He气。用美国国家标准技术研究院研制的人

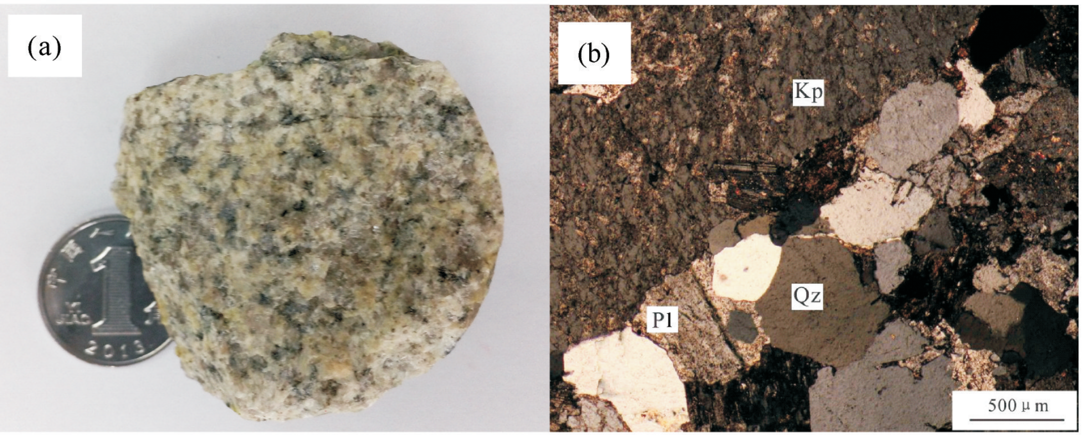

图3 内蒙古边家大院铅锌矿正长花岗岩特征(a)及镜下特征(b)
Qz—石英；Kp—钾长石；Pl—斜长石
Fig.3 The photographs (a) and microscope photographs (b) of syenogranite from the Bianjiadayuan lead and zinc polymetallic deposit
Qz−Quartz; Kp−Feldspar; Pl−Plagioclase

工合成硅酸盐玻璃标准参考物质NIST612进行仪器最优化，采用Plesovice标准锆石外部校正法进行锆石原位U−Pb分析。采用的激光束斑直径为32 μm，激光剥蚀深度为30~40 μm，频率为5 Hz，能量密度为6 J/cm^2。数据采集为20 s气体空白和60 s激光剥蚀。同位素比值数据处理和U−Pb表观年龄计算采用Glitter程序进行，普通Pb校正采用Andersen（2002，2005）的方法，后期数据处理、年龄协和曲线及加权平均值采用Ludwig（2003）的isoplot（ver3.0）软件进行。

主量、微量和稀土元素分析测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成，仪器型号AL104，PW2404 X射线荧光光谱仪，测试方法和依据参照GB/T14506.14−2010《硅酸盐岩石化学分析方法第14部分：氧化亚铁量测定》、GB/T14506.28−2010《硅酸盐岩石化学分析方法第28部分：16个主次成分量测定》，实验过程中温度20°C，相对湿度29%。

Sr−Nd同位素分析在北京核工业地质研究院分析测试研究中心采用ISOPROBE−T热电离质谱计完成，检测方法依据EJ/T 692−1992《岩石矿物铷锶等时年龄测定》。Rb、Sr质量分馏用^{86}Sr/^{88}Sr=0.1194校正，标准测量结果：NBS987为^{86}Sr/^{88}Sr=0.710250±7，全实验流程本底为2×10^{-10}g；Sm、Nd质量分馏用^{146}Nd/^{144}Nd=0.7219校正，标准测量结果：JMC为^{143}Nd/^{144}Nd=0.512109±3，全实验流程本底小于5×10^{-11}g。计算$\varepsilon_{\mathrm{Sr}}(t)$和$\varepsilon_{\mathrm{Nd}}(t)$过程中，(^{87}Sr/^{86}Sr)$_{\mathrm{U.R}}$=0.7045，(^{87}Rb/^{86}Sr)$_{\mathrm{U.R}}$=0.0827；(^{143}Nd/^{144}Nd)$_{\mathrm{CHUR}}$=0.512638，(^{147}Sm/^{144}Nd)$_{\mathrm{CHUR}}$=0.1967。计算T_{DM}过程中，(^{143}Nd/^{144}Nd)$_{\mathrm{DM}}$和(^{147}Sm/^{144}Nd)$_{\mathrm{DM}}$分别为亏损地幔现今的同位素比值，用大洋中脊玄武岩（MORB）代表，其值采用(^{143}Nd/^{144}Nd)$_{\mathrm{DM}}$=0.51315，(^{147}Sm/^{144}Nd)$_{\mathrm{DM}}$=0.2135（Jacobsen et al.，1984）。

4 分析结果

4.1 锆石LA−ICP−MS年代学

边家大院正长花岗岩锆石呈半自形−自形短柱状或等轴粒状，粒度在80~200 μm，长宽比为3∶1~2∶1，表面平整干净。CL图像下显示大部分锆石震荡环带结构特征明显（图4），Th含量为85.7×10^{-6}~393.8×10^{-6}，U含量为237.6×10^{-6}~585.3×10^{-6}，Th/U比值为0.36~0.67（表1），为岩浆成因的原岩结晶锆石。

为了精确测定正长花岗岩的成岩年代，本次实验一共测了26个点，经过普通Pb校正并作锆石U−Pb年龄谐和图（图5），26个分析点均落在谐和线上及附近，谐和较好；U−Pb年龄变化于145~137 Ma，其中18个分析点落在141~139 Ma，年龄加权平均值为（140.31±0.34）Ma（n=26，MSWD=0.14）。结合锆石为岩浆成因锆石，因此该年龄可以代表边家大

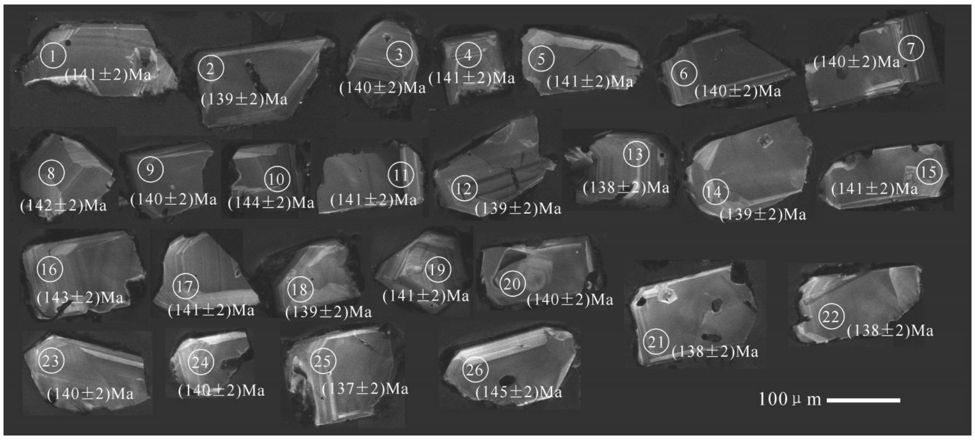

图4 内蒙古边家大院铅锌银多金属矿正长花岗岩锆石阴极发光(CL)图像及测试位置

Fig.4 Cathodoluminescence (CL) images and test positions of representative zircons from the syenogranite in the Bianjiadayuan lead and zinc polymetallic deposit

表1 边家大院铅锌多金属矿正长花岗岩锆石LA−ICP−MS测年结果

Table 1 LA−ICP−MS data for zircons from the syenogranite of the Bianjiadayuan lead and zinc polymetallic deposit

测点号	含量/10^{-6}			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma			
	Pb	^{232}Th	^{238}U		^{207}Pb/^{206}Pb	1σ	^{207}Pb/^{235}U	1σ	^{206}Pb/^{238}U	1σ	^{207}Pb/^{235}U	1σ	^{206}Pb/^{238}U	1σ
D211-1-01	6.39	102.06	256.15	0.40	0.0497	0.0023	0.1523	0.0068	0.0222	0.0003	144	6	141	2
D211-1-02	8.49	148.76	344.72	0.43	0.0468	0.0018	0.1408	0.0053	0.0218	0.0003	134	5	139	2
D211-1-03	8.64	148.44	344.83	0.43	0.0495	0.0018	0.1503	0.0055	0.0220	0.0003	142	5	140	2
D211-1-04	6.32	102.03	257.16	0.40	0.0483	0.0022	0.1472	0.0067	0.0221	0.0003	139	6	141	2
D211-1-05	9.46	153.87	378.98	0.41	0.0506	0.0017	0.1546	0.0050	0.0222	0.0003	146	4	141	2
D211-1-06	11.53	224.54	452.16	0.50	0.0504	0.0016	0.1521	0.0047	0.0219	0.0003	144	4	140	2
D211-1-07	10.29	214.64	374.37	0.57	0.0482	0.0037	0.1457	0.0111	0.0219	0.0003	138	10	140	2
D211-1-08	5.88	85.72	237.60	0.36	0.0458	0.0023	0.1406	0.0070	0.0223	0.0003	134	6	142	2
D211-1-09	6.32	104.89	253.99	0.41	0.0504	0.0024	0.1528	0.0072	0.0220	0.0003	144	6	140	2
D211-1-10	11.22	192.76	412.62	0.47	0.0461	0.0025	0.1437	0.0077	0.0226	0.0003	136	7	144	2
D211-1-11	15.92	393.79	585.26	0.67	0.0519	0.0014	0.1585	0.0041	0.0222	0.0003	149	4	141	2
D211-1-12	10.28	194.37	412.39	0.47	0.0455	0.0016	0.1368	0.0048	0.0218	0.0003	130	4	139	2
D211-1-13	6.47	100.14	263.65	0.38	0.0519	0.0022	0.1550	0.0065	0.0216	0.0003	146	6	138	2
D211-1-14	6.49	101.33	259.40	0.39	0.0461	0.0030	0.1380	0.0087	0.0217	0.0003	131	8	139	2
D211-1-15	11.09	216.72	433.44	0.50	0.0491	0.0016	0.1496	0.0049	0.0221	0.0003	142	4	141	2
D211-1-16	10.25	162.27	403.84	0.40	0.0495	0.0017	0.1537	0.0050	0.0225	0.0003	145	4	143	2
D211-1-17	7.84	128.76	314.63	0.41	0.0482	0.0020	0.1465	0.0059	0.0221	0.0003	139	5	141	2
D211-1-18	5.90	90.73	241.15	0.38	0.0497	0.0023	0.1500	0.0068	0.0219	0.0003	142	6	139	2
D211-1-19	10.82	197.16	427.77	0.46	0.0479	0.0016	0.1465	0.0049	0.0222	0.0003	139	4	141	2
D211-1-20	7.79	132.86	306.31	0.43	0.0503	0.0020	0.1526	0.0060	0.0220	0.0003	144	5	140	2
D211-1-21	9.36	172.09	378.49	0.45	0.0483	0.0018	0.1438	0.0051	0.0216	0.0003	136	5	138	2
D211-1-22	9.56	180.99	374.07	0.48	0.0484	0.0038	0.1444	0.0112	0.0216	0.0003	137	10	138	2
D211-1-23	9.37	158.71	372.86	0.43	0.0489	0.0018	0.1482	0.0052	0.0220	0.0003	140	5	140	2
D211-1-24	11.30	215.67	446.23	0.48	0.0479	0.0016	0.1448	0.0047	0.0219	0.0003	137	4	140	2
D211-1-25	8.59	149.10	341.61	0.44	0.0461	0.0019	0.1362	0.0054	0.0215	0.0003	130	5	137	2
D211-1-26	12.15	205.08	467.72	0.44	0.0466	0.0015	0.1462	0.0046	0.0228	0.0003	139	4	145	2

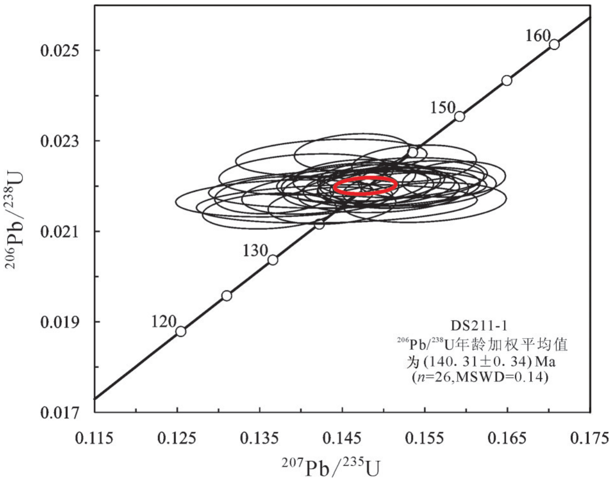

图5 内蒙古边家大院铅锌银多金属矿正长花岗岩锆石U−Pb年龄谐和图

Fig.5 U−Pb concordia diagrams for zircons of the syenogranite from the Bianjiadayuan lead and zinc polymetallic deposit

院正长花岗岩体侵位年龄，为早白垩世。这一结果与王喜龙等（2014）测得的石英斑岩侵位年龄非常接近，可以认为边家大院深部正长花岗岩与石英斑岩为同一期岩浆活动的产物，较本区辉长岩、闪长岩成岩年龄（133±0.86）Ma、（130±0.75）Ma早7~10 Ma（王喜龙等，2013）。

4.2 主量、微量、稀土元素特征

边家大院正长花岗岩主量、微量、稀土元素特征见表2。正长花岗岩具有高SiO_2（72.78%~73.37%，平均73.09%）、高K_2O（4.55%~5.36%），低MgO（0.20%~0.25%）、CaO（0.27%~1.09%）、TiO_2（0.14%~0.16%）的主量元素特征；Al_2O_3（12.76%~13.26%）、全碱Na_2O+K_2O（8.28%~8.62%，平均8.43%）含量中等；K_2O/Na_2O在1.21~1.84，较为富钾（图6a）。A/CNK在0.98~1.19，属于准铝−弱过铝系列，与岩石中几乎不含白云母和石榴子石等过铝质矿物相特征一致。Fe_2O_3含量0.27%~0.64%，FeO含量2.03%~2.65%，低Fe^{3+}/Fe^{2+}。在K_2O-SiO_2图解上位于高钾钙碱性−钾玄岩系列区（图6b）。

边家大院正长花岗岩与中国、天山—兴安花岗岩微量元素对比，Th、U、Zr、Hf和稀土元素含量较高，Sr、P含量略低；在原始地幔标准化配分图解上（图7a），边家大院正长花岗岩微量元素分布呈现整体右倾形态，大体与中国、天山—兴安花岗岩分布一致，为典型花岗岩微量元素标准化分布趋势；富集Rb、Th、U、K等大离子亲石元素（LILE），亏损Sr、P、Ti等高场强元素（HFSE）。高Rb、低Sr、Ba的元素特征反映了钾长石和斜长石结晶在花岗岩中占据主导地位，这与其矿物组成特征相吻合。

边家大院正长花岗岩稀土总量ΣREE较大，为290.49×10^{-6}~345.75×10^{-6}，远大于中国、天山—兴安花岗岩稀土总量。在球粒陨石标准化图解上（图7−b）呈显著右倾趋势，轻重稀土均富集，LREE/HREE为6.09~8.77。δEu为0.12~0.14，强烈Eu负异常，结合低Al、Sr特征，指示残留相中可能有富Ca的斜长石存在。$(La/Sm)_N$比值为2.98~3.75，$(Gd/Yb)_N$比值为1.14~1.37，表明轻稀土分馏明显，重稀土分馏不明显。花岗质岩浆演化晚期常常出现轻稀土元素含量减少、重稀土元素含量增加的特征（Cocherie et al.，1994）；边家大院正长花岗岩较为符合此特征，可能是由于岩浆晚期独居石或褐帘石副矿物结晶分异导致。

4.3 Sr−Nd同位素

本文对边家大院正长花岗岩进行锆石U−Pb测年，得到加权平均年龄为（140.31±0.34）Ma（n=26，MSWD=0.14）。因此以140 Ma作为边家大院铅锌矿正长花岗岩体的主成岩年龄，来计算Sr、Nd同位素初始比值及相关参数。正长花岗岩的$f_{Sm/Nd}$平均−0.4，而且除DS211−3的$^{147}Sm/^{144}Nd$比值为0.1307，其他3个样品$^{147}Sm/^{144}Nd$比值均小于0.13，因此对Sm−Nd同位素模式年龄T_{DM}的计算可以采用单阶段模式（Li et al.，1979）。

边家大院铅锌矿正长花岗岩Sr−Nd同位素组成和测定结果和计算结果见表3。$^{87}Rb/^{86}Sr$比值在11.51~25.81，$^{87}Sr/^{86}Sr$比值在0.7302~0.7590；极高的$^{87}Rb/^{86}Sr$比值和较高的$^{87}Sr/^{86}Sr$比值显示了该区域具有成熟大陆壳特征。$^{147}Sm/^{144}Nd$比值为0.1156~0.1307，接近地壳平均值0.119（Jacobsen et al.，1979）；$^{143}Nd/^{144}Nd$比值变化范围很小（0.5122~0.5123）。$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$和$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$初始比值分别介于0.7066~0.7077和0.5121~0.5122（t=140 Ma），$\varepsilon_{Nd}(0)$为−6.4‰~−8.0‰，$\varepsilon_{Nd}(t)$为−5.0‰~−6.6‰；$f_{Sm/Nd}$为−0.34~−0.41，同样显示其具备大陆岩石圈特征，成岩物质来自于地壳。Nd同位素模式年龄T_{DM}为1340~1632 Ma，说明岩浆物质可能来自于中元古界地壳残

表2 边家大院铅锌矿正长花岗岩主量元素含量(%)和微量元素(10^{-6})含量

Table 2 Major elements (%) and trace elements (10^{-6}) compositions of syenogranite from the Bianjiadayuan lead and zinc polymetallic deposit

分析项目	DS211-1	DS211-2	DS211-3	DS211-7	中国	天山—兴安	分析项目	DS211-1	DS211-2	DS211-3	DS211-7	中国	天山—兴安
SiO_2	73.27	73.37	72.78	72.92	72.20	72.73	Sr	35.9	36.8	56.1	53.3	174	179
TiO_2	0.15	0.14	0.16	0.16	0.28	0.26	P	126.6	117.9	122.3	126.6	393	349
Al_2O_3	13.18	13.26	12.76	13.13	14.20	14.04	Zr	279	235	280	254	147	141
Fe_2O_3	0.54	0.64	0.27	0.45	0.88	0.90	Hf	9.35	7.88	9.1	8.8	5	4.7
FeO	2.16	2.21	2.65	2.03	1.05	0.89	Y	58.5	51.3	67.5	73.2	20	19
MnO	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	Sc	2.37	2.48	2.53	2.47	5	4.7
MgO	0.25	0.21	0.22	0.20	0.52	0.46	V	11.4	8.97	8.76	11.6	23	22
CaO	0.30	0.27	0.96	1.09	1.35	1.32	Cr	8.57	9.19	6.52	7.02	5.1	4
Na_2O	3.29	2.92	3.75	3.63	3.54	3.86	Ga	25.1	25.3	20.1	24.1	18	18
K_2O	5.24	5.36	4.55	4.99	4.32	4.09	La	57.7	70.2	60.4	69	33	26
P_2O_5	0.03	0.03	0.03	0.03	0.09	0.07	Ce	115	139	122	139	62	52
LOI	0.81	0.81	1.04	0.60	-	-	Pr	14.1	16.7	15.2	16.7	7	5.76
Total	99.25	99.26	99.19	99.27	-	-	Nd	54.6	63.3	60.6	63.9	25.4	21.2
Na_2O+K_2O	8.53	8.28	8.30	8.62	7.86	7.95	Sm	10.7	12.1	13.1	12.5	4.6	3.9
K_2O/Na_2O	1.59	1.84	1.21	1.37	1.22	1.06	Eu	0.42	0.48	0.49	0.45	0.82	0.72
A/CNK	1.13	1.19	0.99	0.98	1.09	1.06	Gd	9.35	9.42	11.2	10.7	4.5	4.5
DI	91.86	91.34	89.51	90.21	-	-	Tb	1.74	1.69	2.18	2.1	0.64	0.55
M	1.52	1.47	1.74	1.80	-	-	Dy	10.1	9.07	12.2	11.9	4	3.7
t/°C	1095	1078	1070	1050	-	-	Ho	1.81	1.51	2.15	2.13	0.79	0.74
Rb	320	311	223	312	158	125	Er	6.47	5.36	7.17	7.35	2.24	2.18
Ba	222	219	267	193	557	461	Tm	1.03	0.882	1.19	1.19	0.38	0.38
Th	30.6	27.2	26.5	29.7	16.6	12.8	Yb	6.56	5.67	7.51	7.75	2.1	2.2
U	10.5	16.4	10.3	9.72	2.8	2.13	Lu	0.91	0.8	1.03	1.08	0.33	0.33
Nb	24.7	19.6	24	24.9	13.4	11	ΣREE	290.49	336.18	316.42	345.75	147.80	124.16
Ta	2.48	2.38	2.73	2.9	1.27	0.92	LREE/HREE	6.65	8.77	6.09	6.82	8.87	7.52
Pb	17.2	19.2	21	31.1	26	19	Eu /Eu*	0.13	0.14	0.12	0.12	0.18	0.17

注:中国、天山—兴安花岗岩主量元素值据史长义等(2005,2007),中国花岗岩为6080件样品平均值,天山—兴安造山带花岗岩为1259件样品平均值。A/CNK=$Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$为摩尔比,DI(标准矿物组分:石英+正长石+钠长石+霞石+白榴石+六方钾霞石),据Thornton and Tuttle(1960)。$M=(Na+K+2Ca)/(Al\times Si)$(阳离子比率);$t(°C)=12900/\{\ln[49600/\omega(Zr)]+0.85M+2.95\}-273.5$,据Wotson et al.(1983)。

留物质。

5 讨 论

5.1 成岩成矿时代探讨

大兴安岭南段是大兴安岭地区乌兰浩特以南火山-侵入岩带的南延地段。前人资料表明,大兴安岭地区强烈岩浆活动主要集中在150~120 Ma,花岗岩侵位主要集中在140~120 Ma(邵积安等,1998)。总结前人对大兴安岭南段典型矿区酸性侵入岩的测年工作,敖仑花钼矿花岗斑岩年龄为(134±4) Ma(马星华等,2009);黄岗锡铁矿钾长花岗岩和花岗斑岩年龄为(136.7±1.1)Ma和(136.8±0.57)Ma(周振华等,2010);半拉山斑岩钼矿花岗斑岩年龄为(132.1±1.8)Ma(曾庆栋等,2010);大井矿区外围小城子村南部石英斑岩年龄为(146.1±0.9)Ma(江思宏等,2012)。说明大兴安岭南段从晚三叠世至早白垩世经历了强烈的火山活动和花岗岩类侵位,林西地区以早白垩世居多并达到巅峰(Liu et al.,2005)。张永北等(2003)将该区岩浆侵入划分为3个阶段,分别在175 Ma左右、155 Ma左右和

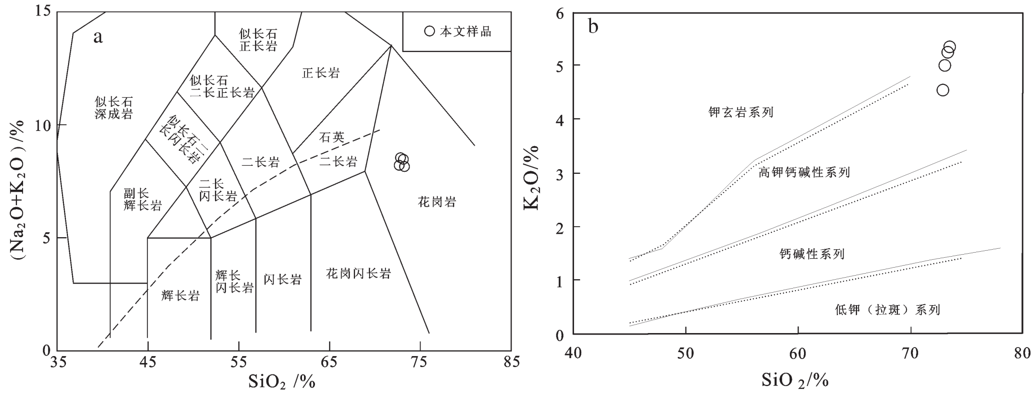

图6 内蒙古边家大院铅锌矿正长花岗岩SiO_2−全碱图解(a,据Middlemost,1994)、SiO_2−K_2O图解(b,据Peccerillo,Taylor,1976)
Fig.6 SiO_2−Alkaliclassification diagram (a, after Middlemost,1994) and SiO_2−K_2O diagram (b, after Peccerillo & Taylor, 1976) of syenogranite from the Bianjiadayuan lead and zinc polymetallic deposit

表3 边家大院铅锌矿正长花岗岩Sr−Nd同位素分析结果
Table 3 Sr−Nd isotopic composition of syenogranite from the Bianjiadayuan lead and zinc polymetallic deposit

样号	DS211-1	DS211-2	DS211-3	DS211-7
$Rb/10^{-6}$	320	311	223	312
$Sr/10^{-6}$	35.9	36.8	56.1	53.3
$^{87}Rb/^{86}Sr$	25.8050	24.4659	11.5078	16.9463
$^{87}Sr/^{86}Sr$	0.759062	0.755326	0.730216	0.741472
误差 2σ	17	10	11	13
$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$	0.707711	0.706639	0.707316	0.707749
$\varepsilon Sr(t)$	47.9	32.7	42.3	48.5
$Sm/10^{-6}$	10.7	12.1	13.1	12.5
$Nd/10^{-6}$	54.6	63.3	60.6	63.9
$^{147}Sm/^{144}Nd$	0.1185	0.1156	0.1307	0.1183
$^{143}Nd/^{144}Nd$	0.512230	0.512288	0.512261	0.512308
误差 2σ	9	6	7	8
$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$	0.512121	0.512182	0.512141	0.512200
$\varepsilon_{Nd}(0)$	-8.0	-6.8	-7.4	-6.4
$\varepsilon_{Nd}(t)$	-6.6	-5.4	-6.2	-5.0
$f_{Sm/Nd}$	-0.40	-0.41	-0.34	-0.40
T_{DM}/Ma	1473	1340	1632	1346

140 Ma左右。

本文通过LA−ICP−MS锆石定年，得到边家大院正长花岗岩加权平均年龄为(140.31±0.34)Ma，与石英斑岩同期；另外边家大院辉长岩和闪长岩侵位年龄均在130 Ma左右（王喜龙等，2013，2014），皆为大兴安岭南段早白垩世岩浆活动集中期产物。由此可知，边家大院矿区至少有2期岩浆活动，早期酸性岩浆侵位，中基性岩浆约10 Ma后侵位。本次对正长花岗岩的锆石U−Pb测年不但对大兴安岭南段林西地区侵入岩和边家大院铅锌银矿床深部岩体的年龄做了补充，而且印证了早白垩世是林西地区花岗岩侵位的高峰期。

矿区内成矿作用与岩浆活动在时间上、空间上和成因上有密切联系。受次火山岩体控制，铅锌矿体与正长花岗岩脉、石英斑岩脉、闪长岩脉紧密伴生，随着侵入岩脉侵位于先期形成的断裂构造之中，矿液随着侵入岩的侵位形成于裂隙之间，并有矿体切穿侵入岩脉体现象；王喜龙等（2014）对石英斑岩中的辉钼矿进行Re−Os测年，得到模式年龄为140 Ma，由此推断矿液的上涌可能伴随岩浆活动具有多期次性，并且成岩与成矿同期进行。

5.2 花岗岩类型探讨

Loiselle & Wones（1979）提出了A型花岗岩的概念，定义为具有碱性（alkaline）、贫水（anhydrous）和非造山（anorogenic）“3A”特征的花岗岩。随着对此类花岗岩认识的不断深入，学者们总结了A型花岗岩的地球化学特征（Collins et al.，1982；Whalen et al.，1987；陈培荣等，1998；赵振华等，1999；苏玉平等，2005；张旗等，2006，2012）。边家大院正长花岗岩主量元素富Si、K，贫Ca、Mg、Al、Ti和P；微量元素强烈富集Nb、Ta、Zr、Y、Ga、Yb，亏损Ba、Sr和Eu（图7a）；高REE总量，稀土配分曲线呈燕式分布，δEu值在0.12~0.14，具有强烈的负Eu异常特征（图7b）；Ga含量在20.1×10^{-6}~25.3×10^{-6}，Ga/Al比值较大。综上所述，边家大院正长花岗岩应为典型的A型花岗岩。

A型花岗岩在中国广泛分布，以南岭地区最为典型；花岗岩中Sr和Yb的含量对地球化学特征研

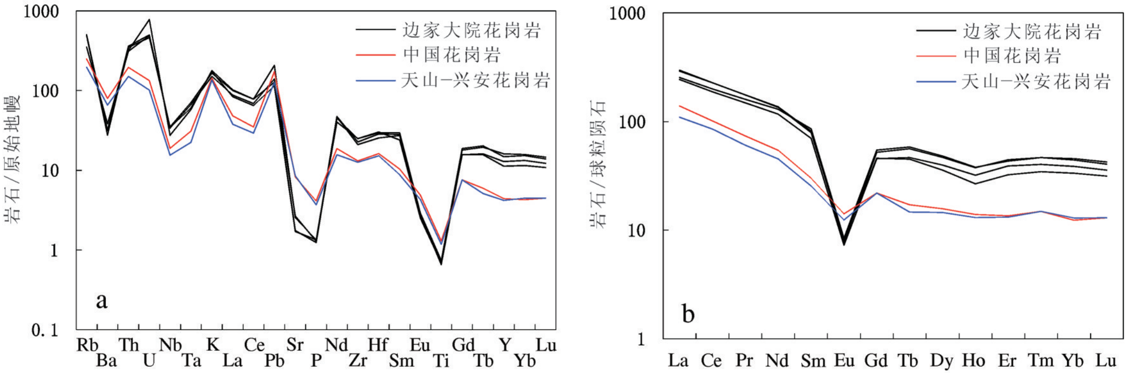

图7 微量元素原始地幔标准化图解(a)、稀土元素球粒陨石标准化图解(b)(标准值据Sun and McDonough,1989)
Fig. 7 Primitive mantle−normalized trace element patterns (a) and chondrite−normalized REE patterns (b) of syenogranite from the Bianjiadayuan lead and zinc polymetallic deposit (chondrite and primitive mantle normalized data after Sun and McDonough,1989)

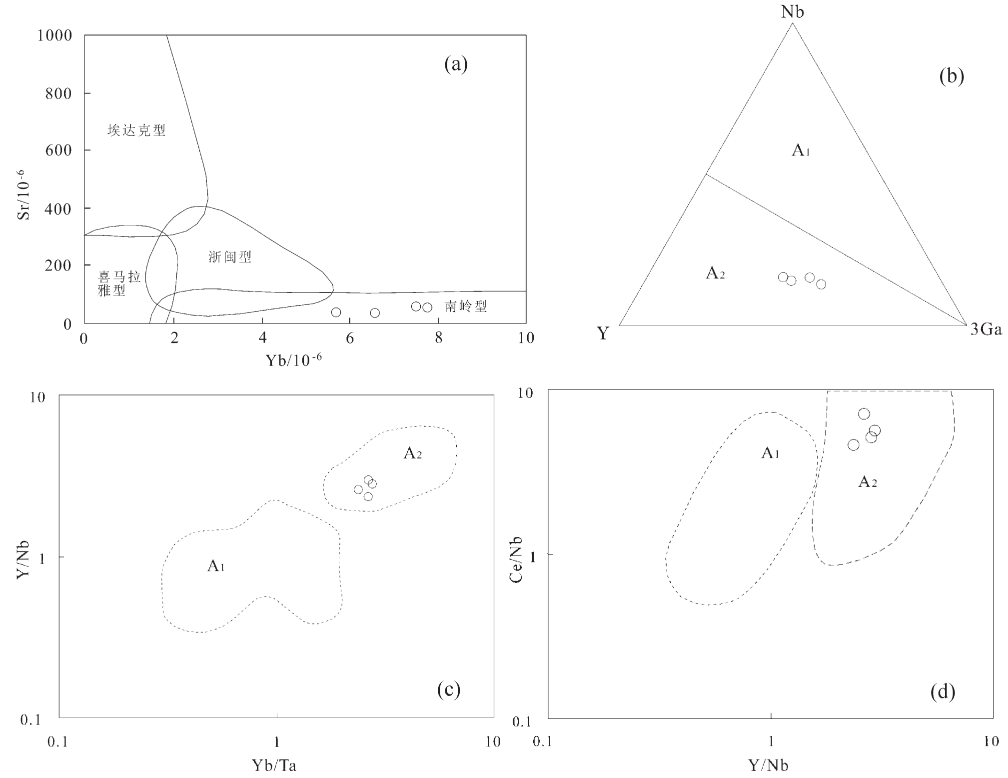

图8 内蒙古边家大院正长花岗岩Sr−Yb图解(a)、A_1、A_2型花岗岩分类图解(b、c、d,据Eby,1992)
Fig.8 Sr−Yb diagram (a) and A_1 and A_2 classification diagram of granite (b c d, after Eby, 1992) of syenogranite from Bianjiadayuan

究具有重要意义,它们的含量和比值可能与源区残留相的组成相关,反映花岗岩形成的温度和压力。张旗等(2006,2010)根据Sr和Yb的含量将花岗岩划分为高Sr低Yb的埃达克岩、低Sr低Yb的喜马拉雅型花岗岩、高Sr高Yb的广西型花岗岩、低Sr高Yb的浙闽型花岗岩和非常低Sr高Yb的南岭型花岗岩(相当于A型花岗岩)。边家大院正长花岗岩Sr含量在35.9×10^{-6}~56.1×10^{-6},Yb含量在5.67×10^{-6}~7.75×10^{-6},结合Eu负异常特征判定其为张旗等所划分的南岭型花岗岩(图8a)。无论将此类花岗岩称

作南岭型花岗岩还是A型花岗岩，都是学术界为了更方便地探讨和区分花岗岩的成因、岩浆来源和形成环境等而提出。

Eby（1992）对不同构造环境下的A型花岗岩进行了总结，将A型花岗岩划分为A$_1$型花岗岩和A$_2$型花岗岩。A$_1$型花岗岩代表非造山的大陆裂谷或板内环境，A$_2$型花岗岩代表造山后的伸展环境。在Rb−（Y+Nb）图解A型花岗岩投在板内环境的前提下，边家大院正长花岗岩在Y−Nb−3Ga图解、Y/Nb−Yb/Ta图解和Ce/Nb−Y/Nb图解上，均落在A$_2$型花岗岩区域（图8b、c、d），为Eby（1992）所划分的A$_2$型花岗岩。

5.3 岩浆源区

对花岗岩成因而言，第一重要的是源区特征，其次是部分熔融程度、压力、温度和挥发分加入情况，岩浆混合作用、结晶分异作用可能对其影响很小（张旗等，2008）。排除岩浆在上升侵位过程中的同化混染作用可以更加准确分析边家大院正长花岗岩岩浆源区特征。岩浆的结晶分异作用对Sr同位素组成影响很小，而受到其他物质的混染作用时，(^{87}Sr/^{86}Sr)$_i$与1/Sr、$\varepsilon_{Nd}(t)$与1/Nd会呈正相关线性关系（Briqueu et al.，1979）。边家大院正长花岗岩在(^{87}Sr/^{86}Sr)$_i$−1/Sr和$\varepsilon_{Nd}(t)$−1/Nd协变图解上（图9a、9b），(^{87}Sr/^{86}Sr)$_i$、$\varepsilon_{Nd}(t)$与1/Sr、1/Nd无正相关线性关系；表明花岗岩初始岩浆在上升侵位过程中没有受到明显的混染作用，因此可以采用花岗岩的主量元素、微量元素、Sr−Nd同位素组成来示踪岩浆源区特征。

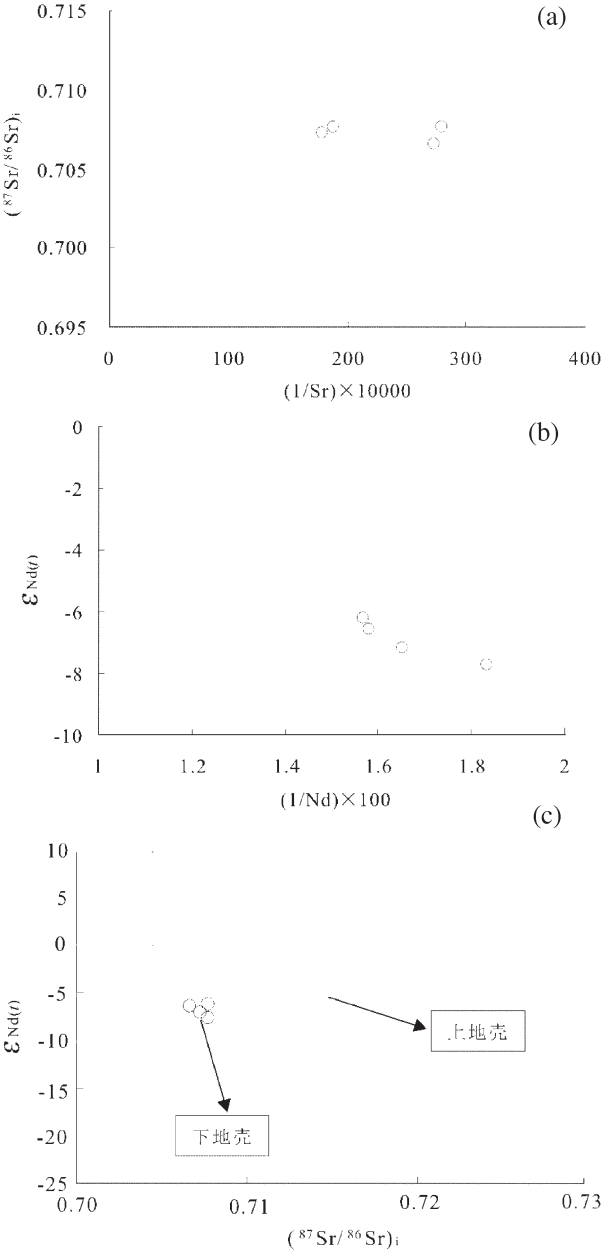

图9 边家大院正长花岗岩(^{87}Sr/^{86}Sr)$_i$−1/Sr(a)、$\varepsilon_{Nd}(t)$−1/Nd(b)、(^{87}Sr/^{86}Sr)$_i$−$\varepsilon_{Nd}(t)$ (c,据吴福元等,1999)相关图解
Fig. 9 Diagrams of (^{87}Sr/^{86}Sr)$_i$−1/Sr(a) , $\varepsilon_{Nd}(t)$−1/Nd(b) and (^{87}Sr/^{86}Sr)$_i$−$\varepsilon_{Nd}(t)$ (c, after Wu et al.,1999) of syenogranite from the Bianjiadayuan lead and zinc polymetallic deposit

上文通过微量元素的分析证实了岩浆源区残留相有富钙的斜长石残留，吴福元等（2007）认为此类岩浆不可能是由幔源岩浆分异而来；Wyllie（1977）提出酸性岩浆岩无法由地幔直接熔融形成，其成岩必然有壳源物质参与；Ba、Sr、Nb、Ta和Ti元素亏损也暗示其不可能由软流圈物质部分熔融直接形成（Foley et al.，1992）。边家大院正长花岗岩$\varepsilon_{Nd}(0)$为−6.44～−7.96，远低于原始地幔值；$\varepsilon_{Nd}(t)$为−6.17～−7.69，$f_{Sm/Nd}$参数在−0.34～−0.41，结果均为负值，表明其成岩物质来自于地壳。在(^{87}Sr/^{86}Sr)$_i$−$\varepsilon_{Nd}(t)$相关图上（图9c），边家大院正长花岗岩投点在下地壳区域，表明岩浆来源极大可能是下地壳的重熔。实验岩石学证明地壳中基性岩部分熔融形成化学成分偏基性的准铝质花岗岩类，而地壳中碎屑沉积岩部分熔融形成偏酸性的过铝质花岗岩类（Beard et al.，1991；Wolf et al.，1992；Johannes et al.，1996；Patino−Douce et al.，1998）。上文通过主量元素分析，边家大院正长花岗岩为准铝−弱过铝质花岗岩，其原岩很有可能为中基性岩类。物探资料基本证

实了大兴安岭地区下地壳下部主要为铁镁质等基性岩（许文良等，1994），结合Nd同位素模式年龄T_{DM}为1340~1632 Ma，推测边家大院正长花岗岩岩浆来源应为中元古界下地壳铁镁质源岩的部分熔融。

5.4 形成环境及构造意义

大兴安岭南段地区处于多块体拼合的特殊地质构造中，其中生代侵入岩形成的大地构造背景及后期构造演化一直是该区研究的热点问题之一。目前学者们对大兴安岭南段中生代中晚期侵入岩形成于板块内部伸展环境的认识基本达成一致，邵济安等（2001）认为该地区岩浆的形成和演化与板内伸展环境下的底侵作用有关；林强、葛文春等（2000）提出了张性环境是与地幔柱的上涌而导致

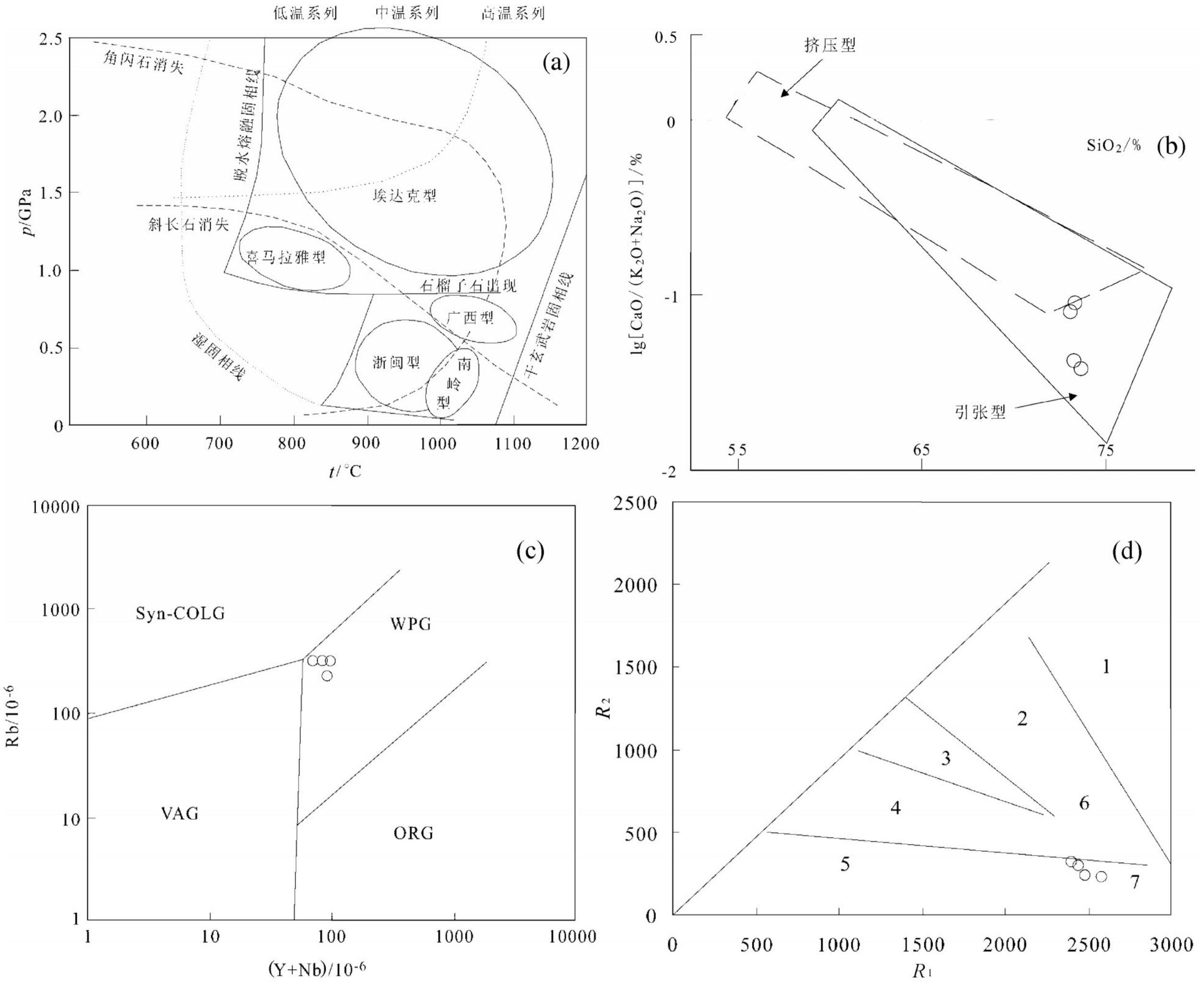

图10不同类型花岗岩形成$p-t$条件(a,据张旗,2014)、花岗岩类lg[CaO/(K_2O+Na_2O)−SiO_2]图解(b,据Brown,1982)、Rb−(Y+Nb)图解(c,据Pearce et al.,1984)、R_1-R_2图解(d,据Batchelor et al.,1985)

ORG—洋中脊花岗岩;Syn−COLG—同碰撞花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;WPG−板内花岗岩;1—地幔分离（斜长花岗岩）;2—破坏性活动板块边缘（板块碰撞前）花岗岩;3—板块碰撞后隆起期花岗岩;4—晚造山期花岗岩;5—非造山期A型花岗岩;6—同碰撞S型花岗岩;7—造山期后A型花岗岩; R_1=[4Si−11（Na+K）−2（Fe+Ti）];R_2=（Al+2Mg+6Ca）

Fig.10 $p-t$ diagram (a, after Zhang, 2014), lg[CaO/(K_2O+Na_2O)−SiO_2] diagram (b, after Brown,1982) , Rb−Y+Nb diagram (c, after Pearce et al.,1984) and R_1-R_2 diagram (d, after Batchelor et al.,1985) of syenogranite from the Bianjiadayuan lead and zinc polymetallic deposit(c):

ORG−Ocean Ridge Granites; Syn−COLG− Synchronous−Collision Granites; VAG−Volcanic Arc Granites; WPG−Intraplate Granites；1−Mantle fractionates (Plagiogranites); 2−Pre−plate collision granites; 3−Post collision uplift granites; 4−Late−orogenic Granites; 5−Anorogenic A−Type Granites; 6− Syn− collision S− Type Granites; 7− Post− orogenic; A− Type Granites. R_1=[4Si− 11（Na + K）− 2（Fe + Ti）];R_2=（Al + 2Mg + 6Ca）

上覆岩石圈伸展有关；吕志成等（2004）提出了此张性环境还可能与南蒙古—兴安造山带北缘蒙古—鄂霍次克残余洋在中生代的“剪刀式”闭合和南蒙古—兴安造山带南缘内蒙—吉黑坳拉槽在中生代的闭合作用有关。

Defant＆Drummond（1990）根据Sr、Y含量首次将花岗岩与其形成时的压力联系起来。张旗等（2009，2011，2014）根据花岗岩类型探讨了与地壳厚度、形成温度等一系列花岗岩的形成环境问题。以石榴石、斜长石和角闪石的反应线作为标志，不同类型花岗岩在$p-t$相图上位于不同位置（图10a）。南岭型（A型）花岗岩位于石榴石出现线之下，残留相有斜长石，所处压力小于0.6 GPa，温度在960 ~1070°C，为高温低压环境，相当于正常地壳厚度或更薄（30 km左右或小于30 km）的伸展环境。边家大院A型花岗岩是否符合此特征，同样形成于高温低压的伸展环境呢?

花岗岩岩浆在未结晶时是完全熔融的，并且侵位时基本是绝热的，因此岩浆早期的结晶温度可以近似代表其形成环境的温度（刘昌实等，2003）；通过锆石饱和温度计算可以估算岩浆的结晶温度，计算过程详见Wotson et al.（1983），经计算，边家大院A型花岗岩阳离子比率（M值）为1.47~1.80，形成温度为1050 ~1095°C（表2），高于黑云母发生脱水反应温度（760~830°C），暗示源岩的部分熔融作用可能起因于角闪石的脱水反应（张宏飞等，2005），不但印证了其形成于高温环境，也符合上文讨论的花岗岩岩浆来源为中元古界下地壳铁镁质源岩的部分熔融的结论。

边家大院正长花岗岩在lg[CaO/(K_2O+Na_2O)−SiO_2]图解上投点于引张型区域（图10b），在Rb−（Y+Nb）图解上投点于板内花岗岩区域（图10c），在R_1-R_2图解上投点于造山期后A型花岗岩区域（图10d）。低Ba/Nb比值（7.8~11.2）明显不同于岛弧火山岩的特征（Ba/Nb>30），表明其成因与同时代的俯冲作用无关（邵济安等，1999）。现有资料表明，太平洋板块是从晚白垩世进入大规模扩张阶段（Larson et al.，1985），而蒙古−鄂霍次克海于中晚侏罗世闭合（Zorin，1999），边家大院正长花岗岩的形成年龄（140 Ma）应属蒙古—鄂霍次克海闭合的造山期后；另外蒙古—鄂霍次克海闭合作用是由西向东方向进行（Metelkin et al.，2010），对大兴安岭南段所处板块的构造力为张性力，其构造运动使板块内部压力减小，因此推断该区域晚侏罗世的伸展环境与蒙古—鄂霍次克海的闭合作用有关，而与太平洋闭合作用无关（顾玉超等，2016）。结合其花岗岩类型为A_2型和前人对大兴安岭南段侵入岩形成环境的认识，可以判定边家大院正长花岗岩是在早白垩世受到了蒙古—鄂霍次克海“剪刀式”闭合造山后的伸展条件和岩石圈减薄作用的影响，形成于高温低压环境的A型花岗岩。

另外，笔者推测高温低压的伸展环境还可能与该区域发生过下地壳拆沉作用有关。边家大院正长花岗岩形成于高温低压环境，其高温热源来自哪里？大兴安岭南段既然在早白垩世没有发生大规模的板块碰撞作用，那么其高温环境应该是板块内部自身作用所产生。早期地壳经历了垂直方向的增生加厚，当达到榴辉岩相并且密度大于下覆岩石圈地幔的同时，重力失稳，下地壳沉入软流圈而导致软流圈上升并提供大量热源，加热铁镁质源岩使其部分熔融；同时下地壳的拆沉也是低压条件的体现。

6 结 论

本文通过LA−ICP−MS锆石定年，得到边家大院正长花岗岩加权平均年龄为（140.31±0.34）Ma，与石英斑岩同期；边家大院矿区至少有2期岩浆活动，早期酸性岩浆侵位，约10 Ma后中基性岩浆侵位；成岩与成矿同期进行。

边家大院正长花岗岩是在早白垩世受到了蒙古—鄂霍次克海“剪刀式”闭合造山后的伸展条件和岩石圈减薄作用的影响，形成于高温低压环境的A型花岗岩。高温低压的伸展环境还可能与该区域发生过下地壳拆沉作用有关。岩浆来源为中元古界下地壳铁镁质源岩部分熔融的产物。

致谢：野外考察期间受到赤峰市利拓矿业有限公司孙幼平的大力支持和帮助；感谢北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室和核工业北京地质研究院分析测试研究中心分别在锆石LA−ICP−MS U−Pb测试以及主量、微量和稀土元素分析、Sr−Nd同位素分析中给予的大力帮助；感谢中国地质大学（北京）肖荣阁教授对本文提出的宝贵意见；感谢审稿专家和编辑对本文提出的修改意见和建议。

注释

❶内蒙古自治区核工业二四三大队.2011.林西县边家大院矿区地形地质图(1:2000).

References

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

Andersen T. 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation[J]. Chemical Geology, 216: 249−270.

Batchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interprelation of granitoid rock series using muhication[J]. Chemical Geology, 48 (1): 43−55.

Beard J S, Lofgren G E. 1991. Dehydration melting and water−saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1.3 and 6.9 kbar[J]. Journal of Petrology, 32: 365−402.

Briqueu L, Lancelot J R. 1979. Rb− Sr systematics and crustal contamination models for calc− alkeline igneous rocks[J]. Earth Planet. Sci. lett., 43: 385−396.

Brown G C. 1982. Calc− alkaline intrusive rocks: Their diversity, evolution and relation to volcanic arcs[C]//Thorpe RS(ed.). Andesites− Orogenic Andesites and Related Rocks. New York: John Wiley & Sons, 437−461.

Chen Peirong, Zhang Bangtong, Kong Xinggong, Cai Bicong, Ling Hongfei, Ni Qisheng. 1998. Geochemical characteristics and tectonic implication of Zhaibei A−type granitic intrusives in South Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 14(3): 289− 298 (in Chinese with English abstract).

Chu Xuelei, Huo Weiguo, Zhang Xun. 2001. Sulfur, carbon and lead isotope studies of the Dajing polymetallic deposit in Linxi County, Inner Mongolia, China− Implication for metallogenic elements from hypo− magmatic Source[J]. Resource Geology, 51(4): 333−344.

Cocherie A, Rossi P, Fouillac A M, Vidal P. 1994. Crust and mantle contributions to granite genesis− An example from the Variscan batholith of Corsica,France,studied by trace−element and Nd−Sr−O isotope systematics[J]. Chemical Geology, 115: 173−211.

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.

Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modem arc magmas by melting of young subduction lithosphere[J]. Nature, 347: 662−665.

Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A− type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Geology, 20(7): 641−644.

Foley S, Amand N. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their orogin[J]. Lithos, 28: 182−185.

Gu Yuchao, Jia Bin, Yu Changtao, Zhang Chunhui, Shi Yi, Li Yupeng, Cong Longjiang. 2016. Geochemistry and Sr− Nd isotopic characteristics of volcanic rocks in the Dazuozishanin copper polymetallic deposit, Inner Mongolia, and their geological implications[J]. Geology in China, 43(2): 66− 79 (in Chinese with English abstract).

Graham S A, Hendrix M S, Johnson C L, Badamgarav D, Badarch G, Amory J, Porter M, Barsbold, R, Webb L E, Hacker B R. 2001. Sedimentary record and tectonic implications of Mesozoic rifting in southeast Mongolia[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 113: 1560−1579.

Jahn B M, Wu Fuyuan, Capdevila R, Martineau F, Zhao Zhenhua, Wang Yixian. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing’an (Khingan) Mountains in NE China[J]. Lithos, 59: 171−198.

Jacobsen S B, Wasserburg G J. 1979. The mean age of mantle and crustal reservoirs[J]. Journal of Geophysical Research, 84(B13): 7411−7428.

Jacobsen S B, Wasserbury G J. 1984. Sm− Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites, Ⅱ[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 67: 137−150.

Jiang Sihong, Liang Qingling, Liu Yifei, Liu Yan. 2012. Zircon U−Pb ages of the magmatic rocks occurring in and 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. 2011. 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, Yun Fei. 2010. Sulfur and lead isotopic compositions of Bairendaba and Weilasituo silver−polymetallic deposits, Inner Mongolia[J]. Mineral deposits, 28(1): 101−112 (in Chinese with English abstract).

Johannes W, Holtz F. 1996. Petrogenesis and Experiment Petrology of Granitic Rocks[M]. Berlin: Springer, 1−254.

Larson R L, Pitman, W C, Golovchenko X, Cande S C, Dewey J F, Haxby W F, La Brecque J L 1985. The bedrock geology of the world[Z]. New York: W.H. Freeman and Company.

Li X H, McCulloch M T. 1996. Secular variation in the Nd isotopic composition of Neoproterozic sediments from the southern margin of the Yangtze block: evidence for a proterozoic continental collision in southeast China[J]. Precambrian Research, 76: 67−76.

Lin Qiang, Ge Wenchun, Sun Deyou, Wu Fuyuan, Yuan Zhongkuan, Li Wenyuan, Yin Chengxiao, Chen Mingzhi, Min Gengde, Quan Zhichun. 2000. Genetic relationships between two types of Mesozoic rhyolite and basalts in great Xing an ridge[J]. Journal of

Changchun University of Science and Technology, 30(4): 322−328 (in Chinese with English abstract).

Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, Wang Rucheng, Hu Huan. 2003. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A type rock suites[J]. Geological Journal of China Universites, 9(4): 573−591 (in Chinese with English abstract).

Liu Jiajun, Xing Yongliang, Wang Jianping, Zhai Degao, Yao Meijuan, Wu Shenghua, Fu Chao. 2010. Discovery of falkmanite from the Bairendaba superlarge Ag− Pb− Zn polymetallic deposit, Inner Mongolia and its origin significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 40(3): 565−572 (in Chinese with English abstract).

Liu Wei, Siebel W, Li Xinjun, Pan Xiaofei. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: Constraints on basaltic underplating[J]. Chem. Geol., 219: 5−35.

Liu Yifei, Fan Zhiyong, Jiang Hucan, Nie Fengjun, Jiang Sihong, Ding Chengwu, Wang Fengxiang. 2014. Genesis of the Weilasituo−Bairendaba porphyry−hydrothermal vein type system in Mongolia, China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2373−2385 (in Chinese with English abstract).

Loiselle M C, Wones D R. 1979. Characterisics and origin of anorogenic granites[J]. Geological Society of America Abstract Progressing, 11: 468.

Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.0− A Geochronological Toolkit for Micro− Soft Excel[M]. Bekeley Geochronology Center, Special Publication, 4: 1−70.

Lv Zhicheng, Duan Guozheng, Hao Libo, Li Dianchao, Pan Jun, Wu Fengchang. 2004. Petrological and geochemical studies on the intermediate−basic volcanic rocks from the middle−south part of the Da Hinggan Mountains[J]. Geological Journal of China Universities, 10(2): 186−198 (in Chinese with English abstract).

Ma Xinghua, Chen Bin, Lai Yong, Lu Yinghuai. 2009. Petrogenesis and mineralization chronology study on the Aolunhua porphyry Mo deposit, Inner Mongolia, and its geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(11): 2939− 2950 (in Chinese with English abstract).

Metelkin D V, Vemikovsky V A, Kazansky A Y. 2010. Late Mesozoic tetonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence[J]. Gondwana Research, 18(2/3): 400−419.

Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 67: 137−150.

Patino− Douce A E, Harris N. 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis[J]. Journal of Petrology, 1998, 39: 689−710.

Pearce J A. Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 25: 956−983.

Peccerillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc−alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 50: 63−81.

Ruan BanXiao, Lv XinBiao, Liu ShenTai, Yang Wu. 2013. Genesis of Bianjiadayuan Pb−Zn−Ag deposit in Inner Mongolia: Constraints from U− Pb dating of zircon and multi− isotope geochemistry[J]. Mineral Deposits, 32(3): 501− 514 (in Chinese with English abstract).

Shao Ji'an, Liu Futian, Chen Hui, Han Qingjun. 2001. Relationship between Mesozoic magmatism and subduction in Da Hinggan−Yanshan area[J]. Acta Geologica Sinica, 37(1): 48−55 (in Chinese with English abstract).

Shao Ji'an, Zhang Lvqiao, Mu Baolei. 1998. Tectono− thermal evolution of middle− south section of the Da Hinggan Mountains[J]. Science in China (Series D), 28(3): 193− 200 (in Chinese).

Shao Ji'an, Zhang Lvqiao, Mu Baolei. 1999. Magmatism in the Mesozoic extending orogenic process of Da Hinggan Mts.[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 6(4): 339−346 (in Chinese with English abstract).

Shi Changyi, Yan Mingcai, Chi Qinghua. 2007. Abundances of chemical elements of granitoids in different geotectonic units of China and their characteristics[J]. Acta Geologica Sinica, 81(1): 48−59 (in Chinese with English abstract).

Shi Changyi, Yan Mingcai, Liu Chongmin, Chi Qinghua, Hu Shuqi, Gu Tiexin, Bu Wei, Yan Weidong. 2005. Abundances of chemical elements in granitoids of China and their characteristics[J]. Geochimica, 34(5): 470−482 (in Chinese with English abstract).

Shu Qihai, Lai Yong, Wei Liangmin, Sun Yi, Wang Chao. 2011. Fluid inclusion study of the Baiyinnuo'er Zn−Pb deposit, south segment of the Great Xing'an Mountain, northeastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(5): 1467− 1482 (in Chinese with English abstract).

Su Yuping, Tang Hongfeng. 2005. Trace element geochemistry of A−type granites[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 24(3): 245−251 (in Chinese with English abstract).

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J (eds.). Magmatism in Oceanic Basins. Geological Society Special Publication, 42: 313−345.

Thornton C, Tuttle O. 1960. Chemistry of igneous rocks,part1: Differentiation index.America[J]. Journal of Science, 280: 664−684.

Wang Lijuan, Wang Jingbin, Wang Yuwang, Long Lingli. 2015. Metallogenic mechanism of fluid and prospecting forecast of Dajing Sn− Cu polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(4): 991− 1001 (in Chinese with English abstract).

Wang Lijuan, Wang Yuwang, Wang Jingbing, Jin Xindi, Zhu Heping. 2000. Study of tin and copper metallogenetic fluid from Dajing deposit and its genetic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 16

(4): 609−614 (in Chinese with English abstract).

Wang Xilong, Liu Jiajun, Zhai Degao, Yang Yongqiang, Wang Jianping, Zhang Qibin, Zhang Anli. 2014. U− Pb dating, geochemistry and tectonic implications of Bianjiadayuan quartz porphyry, Inner Monglia, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 33(5): 654− 665 (in Chinese with English abstract).

Wang Xilong, Liu Jiajun, Zhai Degao, Yang Yongqiang, Wang Jianping, Zhang Qibin, Zhang Anli, Wang Xiaoliang. 2013. LA−ICP−MS zircon U−Pb dating, geochemistry of the intrusive rocks from the Bianjiadayuan Pb− Zn− Ag deposit, Inner Mongolia, China and tectonic implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 37(4): 730−742 (in Chinese with English abstract).

Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effect in avariety of crustal magmas types[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 64: 295−304.

Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A− type granites: Geochemical characteristcs, discriminations and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407−419.

Wolf M B, Wyllie P J. 1992. The formation of tonalitic liquids during the vapor−absent partial melting of amphibolite at 10 kbar[J]. Eos, 70: 506−518.

Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, Zheng Yongfei. 2007. Discussions on the Petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217−1238 (in Chinese with English abstract).

Wu Fuyuan, Lin Jingqian, Wilde S A, Zhang Xiao'ou, Yang Jinhui. 2005. Nature and significance of the early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. Earth Planet Sci. Lett., 233: 103−119.

Wu Fuyuan, Sun Deyou, 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).

Wyllie P J. 1977. Effects of H_2O and CO_2 on magma generation in the crust and mantle[J]. Journal of the Gelogical Society, 134: 215−234.

Xu Wenliang, Sun Deyou, Zhou Yan. 1994. The Magmatism and Crustal Structure of Geoscience Transect, Manzhouli− Suifenhe, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1−94.

Zeng Qingdong, Liu Jianming. 2010. Zircon SHRIMP U− Pb dating and geological significance of the granite porphyry from Banlashan porphyry molybdenum deposit in Xilamulun molybdenum metallogenic belt[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 40(4): 828−834 (in Chinese with English abstract).

Zhang Hongfei, Jin Lanlan, Zhang Li, Harris N, Zhou Lian, Hu Shenghong, Zhang Benren. 2005. The Nature of the Substrate and Structure Property Limited by Geochemistry and Pb− Sr− Nd isotopic composition from West Qinling Granites[J]. Science in China (Series D), 35(10): 914−926(in Chinese).

Zhang Qi. 2014. Geodynamic implications of continental granites[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(4): 785−798 (in Chinese with English abstract).

Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, Wang Yuanlong. 2009. Reason for Gold and Copper Discovery in Mountain with Tungsten and Tin Discovery on Plain[J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 34(4): 548− 566 (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).

Zhang Qi, Ran Hao, Li Chengdong. 2012. A−type granite: What is the essence[J]? Acta Petrologica et Mineralogica, 31(4): 621−626 (in Chinese with English abstract).

Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia Xiuqin. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(9): 2249−2269 (in Chinese with English abstract).

Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, Li Chengdong. 2008. Adakites and Granites: Challenges and Opportunities[M]. Beijing: China Land Press, 1−344.

Zhang Yongbei, Sun Shihua, Hongma H, Mao Qian. 2003. Magma contamination of acidic rocks in Linxi area in southern Da Hinggan Mountains, northeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 19(3): 369−384 (in Chinese with English abstract).

Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Han Xiaodong. 1999. The formation mechanism study of tetrad effects of Rare− Earth Elements in granites−in case of Qianlishan and Baerzhe granites[J]. Science in China (Series D), 29(4): 331−338 (in Chinese).

Zhou Zhenhua, Lv Linsu, Yang Yongjun, Li Tao. 2010. Petrogenesis of the Early Cretaceous A− type granite in the Huanggang Sn− Fe deposit, Inner Mongolia: Constraintsfrom zircon U−Pb dating and geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(12): 3521− 3537 (in Chinese with English abstract).

Zhou Zhenhua, Ouyang Hegen, Wu Xinli, Liu Jun, Che Hewei. 2014. Geochronology and geochemistry study of the biotite granite from the Daolundaba Cu− W polymetallic deposit in the Inner Mogolia and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(1): 79−94 (in Chinese with English abstract).

Zorin Y A. 1999. Geodynam ics of the western part of the Mongolia−Okhotsk collisional belt, Trans− Baikal region (Russia) and Mongolia[J]. Tectonophysics, 306: 33−56.

附中文参考文献

陈培荣, 章邦桐, 孔兴功, 蔡笔聪, 凌洪飞, 倪琦生. 1998. 赣南寨背A型花岗岩体的地球化学特征及其构造地质意义[J]. 岩石学报, 14(3): 289−298.

顾玉超, 贾斌, 余昌涛, 张春晖, 时溢, 李玉鹏, 丛龙江. 2016. 内蒙古大座子山铜多金属矿火山岩地球化学、Sr−Nd同位素特征及地质意义[J]. 中国地质, 43(2): 66−79.

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. 2011. 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, 云飞. 2010. 内蒙古拜仁达坝及维拉斯托银多金属矿床的硫和铅同位素研究[J]. 矿床地质, 28(1): 101−112.

林强, 葛文春, 孙德有, 吴福元, 元钟宽, 李文远, 尹成孝, 陈明植, 闵庚德, 权致纯. 2000. 大兴安岭中生代两类流纹岩与玄武岩的成因联系[J]. 长春科技大学学报, 30(4): 322−328.

刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 王汝成, 胡欢. 2003. A型岩套的分类、判别标志和成因[J]. 高校地质学报, 9(4): 573−591.

刘家军, 邢永亮, 王建平, 翟德高, 要梅娟, 吴胜华, 付超. 2010. 内蒙拜仁达坝超大型 Ag−Pb−Zn 多金属矿床中针硫锑铅矿的发现与成因意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(3): 565−572.

刘翼飞, 樊志勇, 蒋胡灿, 聂凤军, 江思宏, 丁成武, 王丰翔. 2014. 内蒙古维拉斯托—拜仁达坝斑岩−热液脉状成矿体系研究[J]. 地质学报, 88(12): 2373−2385.

吕志成, 段国正, 郝立波, 李殿超, 潘军, 吴丰昌. 2004. 大兴安岭中南段中生代中基性火山岩岩石学地球化学研究[J]. 高校地质学报, 10(2): 186−198.

马星华, 陈斌, 赖勇, 鲁颖淮. 2009. 内蒙古敖仑花斑岩钼矿床成岩成矿年代学及地质意义[J]. 岩石学报, 25(11): 2939−2950.

阮班晓, 吕新彪, 刘申态, 杨梧. 2013. 内蒙古边家大院铅锌银矿床成因−来自锆石 U−Pb 年龄和多元同位素的制约[J]. 矿床地质, 32(3): 501−514.

邵济安, 刘福田, 陈辉, 韩庆军. 2001. 大兴安岭—燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系[J]. 地质学报, 75(1): 56−63.

邵济安, 张履桥, 牟保磊. 1998. 大兴安岭中南段中生代的构造热演化[J]. 中国科学(D辑), 28(3): 193−200.

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, 6(4): 339−346.

史长义, 鄢明才, 迟清华. 2007. 中国不同构造单元花岗岩类元素丰度及特征[J]. 地质学报, 81(1): 48−59.

史长义, 鄢明才, 刘崇民, 迟清华, 胡树起, 顾铁新, 卜维, 鄢卫东. 2005. 中国花岗岩类化学元素丰度及特征[J]. 地球化学, 34(5): 470−482.

舒启海, 赖勇, 魏良民, 孙艺, 王潮. 2011. 大兴安岭南段白音诺尔铅锌矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 27(5): 1467−1482.

苏玉平,唐红峰. 2005. A型花岗岩的微量元素地球化学[J].矿物岩石地球化学通报, 24(3): 245−251.

王莉娟, 王京彬, 王玉往, 龙灵利. 2015. 内蒙古大井锡铜多金属矿床流体成矿机理及外围找矿预测[J]. 岩石学报, 31(4): 991−1001.

王莉娟, 王玉往, 王京彬, 靳新娣, 朱和平. 2000. 大井矿床锡铜矿体成矿流体研究及其成因意义[J]. 岩石学报, 16(4): 609−614.

王喜龙, 刘家军, 翟德高, 杨永强, 王建平, 张琪彬, 张安立. 2014. 内蒙古边家大院矿区石英斑岩 U−Pb 年代学、岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 33(5): 654−665.

王喜龙, 刘家军, 翟德高, 杨永强, 王建平, 张琪彬, 张安立, 王晓亮. 2013. 内蒙古边家大院铅锌银矿区侵入岩 LA−ICP−MS 锆石 U−Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 37(4): 730−742.

吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217−1238.

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.

许文良, 孙德有, 周燕. 1994. 满洲里—绥芬河地学断面岩浆作用和地壳结构[M]. 北京: 地质出版社, 1−94.

曾庆栋, 刘建明. 2010. 西拉沐伦钼矿带半拉山斑岩钼矿床花岗斑岩锆石 SHRIMP U−Pb 测年及其地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版), 40(4): 828−834.

张宏飞, 靳兰兰, 张利, Harris N, 周炼, 胡圣虹, 张本仁. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb−Sr−Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制[J]. 中国科学(D辑, 35(10): 914−926.

张旗. 2014. 大陆花岗岩的地球动力学意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(4): 785−798.

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.

张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2009. “上山”找金铜, “下山”找钨锡及其理由[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 34(4): 548−566.

张旗, 冉皞, 李承东. 2012. A型花岗岩的实质是什么[J]? 岩石矿物学杂志, 31(4): 621−626.

张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr−Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9): 2249−2269.

张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩:挑战与机遇[M]. 北京:中国大地出版社, 1−344.

张永北, 孙世华, 本间弘次, 毛骞. 2003. 大兴安岭南段林西地区中生代酸性岩类岩浆的混染作用[J]. 岩石学报, 19(3): 369−384.

赵振华, 熊小林, 韩小东. 1999. 花岗岩稀土元素四分组效应形成机理探讨−以千里山和巴尔哲花岗岩为例[J].中国科学, 29(4): 331−338.

周振华, 吕林素, 杨永军, 李涛. 2010. 内蒙古黄岗锡铁矿区早白垩世 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): 3521−3537.

周振华, 欧阳荷根, 武新丽, 刘军, 车合伟. 2014. 内蒙古道伦达坝铜钨多金属矿黑云母花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(1): 79−94.