

内蒙古火龙沟铅锌矿床成矿岩体年代学、地球化学及其地质意义*

杨文生¹, 余宏全^{1*}, 席文泽², 康永建¹, 向安平¹, 李进文¹, 李长俭^{1,3}, 赵迎磊⁴

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2 招远市灵山金矿, 山东 招远 265400; 3 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

4 辽宁省地质勘察院, 辽宁 沈阳 116100)

摘要 内蒙古火龙沟铅锌矿床是近期勘查发现、预期可达中型规模以上的铅锌矿床之一, 笔者对该矿区的侵入岩——正长花岗岩进行了 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和主量、微量元素分析, 锆石 U-Pb 定年结果为 (224.0 ± 2.5) Ma, 表明, 该岩体侵位于晚三叠世。岩石地球化学研究结果显示火龙沟正长花岗岩体具有明显富 SiO_2 和 ALK、贫 MgO 和 TFe 的特点, $A/NK-A/CNK$ 图解显示正长花岗岩属于准铝质花岗岩。微量元素蛛网图显示富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、K, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti。稀土元素配分模式表现出富集 LREE, 亏损 HREE 的右倾型, $LREE/HREE = 8.04 \sim 10.40$, 具有明显 Eu 的负异常。花岗岩锆饱和温度计算结果表明该花岗岩岩浆形成温度为 820°C , 属于高温花岗岩, 以上地球化学特征和高温的特点表明该花岗岩为 A 型花岗岩。结合区域构造演化历史, 笔者认为该花岗岩体形成于古亚洲洋闭合后的造山后垮塌岩石圈伸展构造环境。

关键词 地球化学 侵入岩 锆石 U-Pb 定年 LA-MC-ICP-MS 构造背景 火龙沟矿区 内蒙古

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Geochronology and geochemistry of syenogranite in lead-zinc Huolonggou deposit of Inner Mongolia and its geological implications

YANG WenSheng¹, SHE HongQuan¹, XI WenZe², KANG YongJian¹, XIANG AnPing¹, LI JinWei¹,
LI ChangJian^{1,3} and ZHAO YingLei⁴

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;

2 Zhaoyuan Lingshan Gold Mine, Zhaoyuan 265400, Shandong, China; 3 School of Earth Science and Mineral Resources,

China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4 Geological Prospecting Institute of Liaoning Province, Shenyang 116100, Liaoning, China)

Abstract

A new lead-zinc ore deposit was recently discovered in Huolonggou of Inner Mongolia. Chronologic and geochemical research was carried out on intrusions in this region. The LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating result of the granite intrusive is (224.0 ± 2.5) Ma, suggesting that the granite was intruded in late Triassic. Geochemically, the values of major elements indicate that this granite is characterized by rich SiO_2 and alkali and poor MgO and Fe. In a plot of A/NK versus A/CNK , the rocks belong to metaluminous type. In the spider diagrams

* 本文得到地质调查项目(编号:12120115069901)、(编号:12120113090100)和国家重点基础研究发展计划(编号:2013CB429803)联合资助

第一作者简介 杨文生,男,1991年生,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:895163616@qq.com

** 通讯作者 余宏全,男,1965年生,研究员,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email:shehongquan@sina.com

收稿日期 2015-06-27;改回日期 2016-04-22。张绮玲编辑。

of rare elements, the rocks are obviously rich in large lithophile elements, especially rich in Rb, Th, U and K, but poor in Nb, Ta and Ti. REE distribution curve is significantly rightly oblique. LREE/HREE ratios range from 8.04 to 10.40 with apparent negative Eu anomalies. Using zircon saturation thermometer, the authors calculated the formation temperature of this granite and the results show that most of the rocks exceed 800°C, with an average value of 820°C. Such a high crystallization temperature and geochemical characteristics indicate that this granite belongs to A-type granite. Combined with the regional tectonic evolution history, the authors hold that the formation of this A-type granite in the Huolonggou ore deposit was related to the post-orogenic process, most probably due to lithospheric delamination.

Key words: geochemistry, intrusion, zircon U-Pb dating, LA-MC-ICP-MS, tectonic setting, Huolonggou ore deposit, Inner Mongolia

大兴安岭位于中亚造山带东段,地质历史时期先后经历了古亚洲洋构造域、鄂霍次克洋构造域和古太平洋构造域的叠加,构造形迹极其复杂(邵治安等,1997;孙德有等,2000;2004;Wu et al.,2007;Miao et al.,2008;Han et al.,2011;余宏全等,2012;康永建等,2014)。目前,普遍认为古亚洲洋的演化具有多块体、多阶段拼合的特点,由于复杂的构造演化历史外加东北地区覆盖严重,使得古亚洲洋在东北地区的具体闭合时间和闭合位置饱受争议(葛文春等,2005;李锦轶等,2007;聂凤军等,2007)。近年来,地质工作者在白音乌拉-东乌珠穆沁旗碱性花岗岩带及其东延部分的黑河一带发现了许多三叠纪A型花岗岩,这些花岗岩呈带状分布,该岩性带自发现以来便受到研究人员的广泛关注(洪大卫等,1994),该花岗岩带为古亚洲洋闭合年限问题的解决提供了可能(张万益等,2012),但是这个岩带中的成员与成矿、尤其是与铅锌成矿有关者却鲜有提及,本文作者通过对比分析,发现火龙沟正长花岗岩同属于该花岗岩带,并最终确定该花岗岩即为成矿岩体。

研究区位于大兴安岭成矿带中部,与大兴安岭南段相比,大兴安岭中北段有着特殊的森林和草原自然条件,使得该区的研究程度相对较低,一定程度上影响了对该区岩浆活动和构造演化历史的认识,进而阻碍了该区相关岩浆矿床的找矿勘查新突破。随着近几年矿产勘查力度的不断增加,在火龙沟铅锌矿区取得了显著的找矿成果。勘查结果显示,矿体主要呈脉状分布在花岗岩岩体内或火山岩围岩的接触带,其次可见铅锌矿呈浸染状分布在岩体中,这些现象表明成矿与成岩关系密切。本文通过对正长花岗岩体进行LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年,结果显示该岩体形成于晚三叠世,而非前人认为的侏罗纪。准确厘定矿区与成矿密切相关的花岗岩体的

侵入时代,对深入认识矿床成因,区内岩浆活动规律和构造演化历史有着重要意义。因此,本文在火龙沟矿区正长花岗岩系统采样的基础上,进行了LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年和岩石地球化学分析,准确厘定了该岩体的侵入时代、岩石成因类型,并进一步探讨了该花岗岩体形成的构造背景,以期为大兴安岭中部地区的构造演化历史和该区的找矿勘查提供一定的理论依据。

1 区域地质概况

火龙沟铅多金属矿床位于内蒙古自治区阿尔山市明水河镇以北,直线距离约50 km处。总面积64.26 km²,地理坐标位于E120°40′00″、N47°05′00″和E120°45′30″、N47°05′00″之间。研究区位于大兴安岭中段,大地构造上位于兴蒙造山带的兴安地体和松嫩地块晚古生代拼合带附近(图1),属于西伯利亚板块,西伯利亚东南陆缘增生带,东乌旗-扎兰屯火山型被动陆缘。空间上与大兴安岭北段铜铅铅锌铁成矿带一致,位于二连-贺根山构造带北西盘、德尔布干断裂带的南东盘,处在大兴安岭主脊深断裂带上。区域内发育有北东向断裂带、东西构造带及北西向构造带等,其中东西向断裂带与北东向断裂带相互交切。局部发育棋盘格式断裂和破火山口环状断裂构造。北北东向构造体系是区域内分布最广,规模最大的构造体系,以断裂和褶皱为主。主要褶皱构造有:平原林场向斜、背斜,五岔沟背斜、向斜,架子山背斜、向斜褶皱群等,还有天池棋盘格式构造等。

区域上出露的地层由古至新有古生界石炭系上统一二叠系下统宝力高庙组(C₂-P₁bl):主要为一套中酸性火山熔岩,夹有凝灰质含砾砂岩;二叠系下

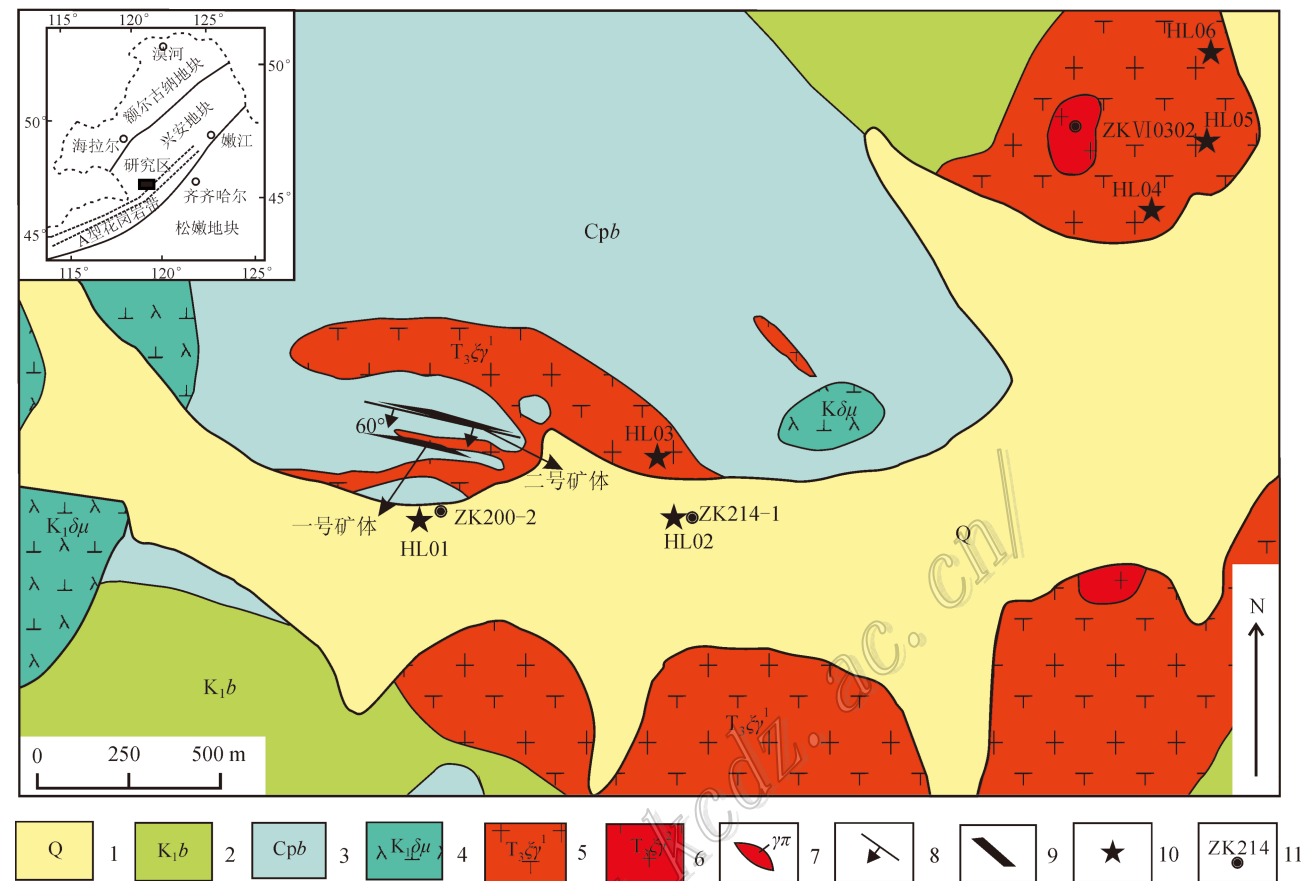


图 1 火龙沟矿区地质简图(据余宏全等,2012; 张万益等,2012; 刘文权等,2014)

1—第四系; 2—白音高老组中酸性火山岩; 3—宝力高庙组杏仁状安山岩; 4—细粒闪长玢岩; 5—似斑状正长花岗岩; 6—中细粒正长花岗岩; 7—花岗斑岩; 8—断层; 9—矿化体; 10—采样位置; 11—钻孔及编号

Fig. 1 Geological map of the Huolonggou ore deposit (modified after She et al., 2012; Zang et al., 2012; Liu et al., 2014)

1—Quaternary; 2—Baiyingaolao Formation intermediate-acid volcanic rocks; 3—Baoligaomiao Formation amygdaloidal andesite;

4—Fine-grained diorite porphyrite; 5—Porphphyaceous syenogranite; 6—Medium-fine grained syenogranite; 7—Granite porphyry; 8—Fault;

9—Mineralized body; 10—Sampling location; 11—Drill hole and its serial number

统大石寨组(P_1ds): 粉砂岩、砂板岩夹安山岩、酸性熔岩; 二叠系上统林西组(P_2l): 砂板岩、粉砂质凝灰岩、晶屑凝灰岩夹灰褐色安山岩、砂砾岩及粉细砂岩; 中生界侏罗系上统满克头鄂博组(J_3mk): 酸性火山岩; 玛尼吐组(J_3mn): 中性-中酸性火山岩; 白音高老组(J_3b): 酸性火山岩; 白垩系下统梅勒图组(K_1m): 安山岩和英安岩。

侵入岩较发育, 侵入活动集中在古生代—中生代, 主要有二叠纪闪长岩($P\delta$); 三叠纪花岗岩($T\gamma$); 侏罗纪闪长岩($J\delta$)、石英二长岩($J\gamma\eta$)和二长花岗岩($J\gamma$)、石英正长斑岩($J\gamma\sigma\pi$)、花岗岩($J\gamma$)、花岗斑岩($J\gamma\pi$)、黑云母花岗岩($J\gamma\beta$)、花岗闪长岩($J\gamma\delta$)、斜长花岗斑岩($J\gamma\sigma\pi$)。其中二叠纪岩浆活动微弱, 岩石

类型较少, 主要有分布于工作区西南 60 km 处的别里其尔等地, 以小岩株产出, 岩性为黑灰色黑云母花岗岩及细粒闪长岩。该期岩体往往被中、新生代火山岩覆盖或被燕山早期花岗岩吞蚀。三叠纪是本区岩浆岩侵入活动强烈的时期, 分布较广, 造成古生代地层与燕山早期火山岩、次火山岩及侵入岩广泛接触。自东而西可划分为 3 条醒目的北东向侵入岩带, 分别为: 草根台—架子山侵入岩带; 西口—好森沟侵入岩带; 青石砬子—金家沟侵入岩带。此外, 勘查区尚分布有北东向、北东东向、北西向及近东西向的花岗斑岩脉、闪长玢岩脉、二长斑岩脉等(刘文权等, 2014)。

2 矿床地质特征

区内出露地层主要有石炭系宝力高庙组和下白垩统白音高老组,宝力高庙组出露面积较广,分布在矿区北部,岩性主要为杏仁状安山岩,在岩体接触带附近可见蚀变、矿化现象;白音高老组出露面积较小,分布在矿区西南部、东南部,与石炭系宝力高庙组呈平行不整合接触,岩性主要为中酸性火山岩,野外地质调查结果显示,该地层无任何矿化、蚀变现象。区内发育一条 NWW 向断层,产状 $210^{\circ}/\angle 60^{\circ}$,规模较小,长度约 500 m,主要分布在二号矿体边部,矿体产状受断层控制显著。矿区侵入岩出露广泛,主要以三叠纪和白垩纪侵入岩为主,三叠纪侵入岩主要有似斑状正长花岗岩、正长花岗岩,主要分布在矿区中南部和东部,野外地质调查和钻孔编录结果显示正长花岗岩与成矿关系密切;白垩纪侵入岩为闪长玢岩,主要分布在矿区西部,该岩体无矿化蚀变现象,且距离矿体较远,因此,作者认为该岩体与成

矿关系不大;此外,花岗斑岩脉零星分布在正长花岗岩岩体中,接触关系不清晰,推测为正长花岗岩岩浆后期演化的产物。

矿区铅锌矿体产于正长花岗岩体和石炭系宝力高庙组的接触带,以及呈脉状分布在石炭系火山岩地层中,矿体产状和花岗岩体的侵位密切相关(图 1),矿体类型主要为脉状矿体。矿石矿物以方铅矿、闪锌矿为主,及少量黄铜矿、磁黄铁矿和磁铁矿等;脉石矿物主要有钾长石、斜长石、石英、绢云母、绿泥石等。矿石结构以粒状半自形结构为主,局部可见固溶体分离结构。矿石构造以细脉状、脉状为主,局部可见浸染状、星点状、团块状构造。矿石类型主要为石英脉型、热液角砾岩型(图 2a),其中热液角砾成分以凝灰质和安山质为主(图 2b),角砾呈棱角状、次棱角状,胶结物主要为硅化石英,角砾普遍蚀变较强,以绢云母化、绿泥石化蚀变为主。围岩蚀变较强,并且紧紧围绕正长花岗岩岩体发育,由岩体接触界线向外,依次发育硅化、绢云母化、绿泥石化等。

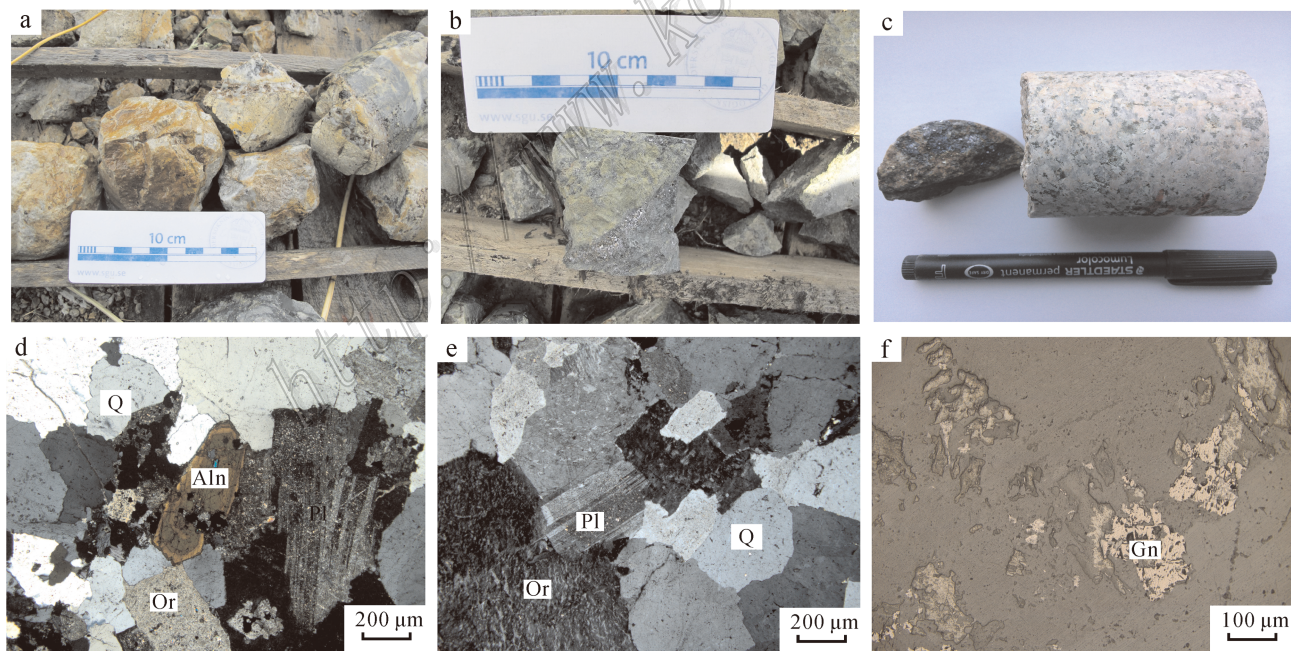


图 2 火龙沟矿床矿石及岩相学特征

a. 热液角砾岩型铅锌矿石; b. 含矿构造角砾岩,岩石角砾为安山岩; c、d、e. 正长花岗岩; f. 方铅矿化花岗岩

Q—石英; Pl—斜长石; Aln—褐帘石; Or—正长石; Gn—方铅矿

Fig. 2 Ores and petrography of the Huolonggou ore deposit

a. Photo of the hydrothermal breccia type lead-zinc ores; b. Ore-bearing tectonic breccias; c, d, e. Syenogranite; f. Galena altered granite

Q—Quartz; Pl—Plagioclase; Aln—Allanite; Or—Orthoclase; Gn—Galena

3 样品采集和岩相学特征

3.1 样品采集

本次研究所需样品均采集于火龙沟矿区不同钻孔的不同深度,样品 HL01 采自钻孔 200-2 的 44 m 处,样品 HL02 采自钻孔 214-1 的 190 m 处,样品 HL03 采自钻孔 214-1 北部 300 m 地表,样品 HL04 采自钻孔 200-2 的 44 m 处,样品 HL05 经纬度坐标为 E120°28′45″,N47°07′23″,样品 HL06 经纬度坐标为 E120°28′32″,N47°06′57″,全部样品基本新鲜无蚀变,岩体特征已在上节详细描述,具体采样位置见图 1。

3.2 花岗岩样品岩相学特征

本次研究所选样品为控制矿体产状的正长花岗岩岩体。岩石呈浅肉红色,花岗结构,块状构造,(图 2c)主要造岩矿物为钾长石(65%)、斜长石(10%)、石英(20%)、黑云母(5%),副矿物为磁铁矿、褐帘石(图 2d)。钾长石表面粗糙,粒径 0.3 mm,条纹长石较为常见。斜长石表面相对干净,半自形,粒径 0.25 mm,大多可见聚片双晶,部分斜长石发生绢云母化蚀变。石英中流体包裹体较为发育,证明该岩体演化到了后期有流体出溶。黑云母大多发生绿泥石化蚀变,但仍然保留原矿物晶型,副矿物可见褐帘石。岩石中可见绿帘石化,呈星点状,团块状分布,方铅矿和闪锌矿呈浸染状分布。

4 测试方法及分析结果

4.1 测试方法

LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年中,锆石的前期处理工作由冶金三局分析测试研究中心完成,采用常规粉碎和电磁选方法进行分选,再在双目镜下用手工方法逐个挑选锆石颗粒。锆石颗粒的阴极发光图像(CL)和锆石制靶在北京锆年领航科技有限公司完成。根据可见光图像尽量选择无或者少包裹体的部位,尽可能避开裂纹部位;同时,根据阴极发光图像,尽量避免斑点位置跨越不同世代的晶体区域。同时,这些照片也为数据的解释提供一定的依据。U-Pb 同位素定年及锆石微量元素分析在中国地质科学院矿产资源研究所重点实验室进行,具体实验原理和流程见文献(Cocherie et al., 2008; 侯可军等, 2009)。原始的测试数据经过 ICPMSDataCal 软件离线处理完成(Liu et al., 2008; 2010)。锆石谐和图用

Isoplot 程序获得(Ludwig, 2003)。

侵入岩主量、微量和稀土元素分析测试在冶金三局分析测试研究中心完成。主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定,检测下限为 0.01% ($w(\text{FeO})$ 为 0.05%);微量和稀土元素使用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法测定,检测下限为 0.05×10^{-6} 。

4.2 锆石形态学分析和定年结果

火龙沟花岗岩岩体中锆石形态和阴极发光图像见图 3,通过 CL 图像可见锆石主要呈自形-半自形的短柱状、长柱状,粒径介于 50~120 μm 之间,长宽比为 3:1,个别为粒状。锆石阴极发光明暗强度差异较大,这是由于锆石中 Th、U、REE 含量不同所导致的(Hanchar et al., 1993; 1995; Rubatto et al., 2000; Calvin et al., 2003)(表 1)。本文所测锆石都具有典型的岩浆震荡环带,环带的宽度普遍较宽,也指示一种高温的锆石结晶环境。锆石中绝大部分 Th 和 U 含量普遍较低,并且变化较小, $w(\text{Th})$ 平均为 142.69×10^{-6} , $w(\text{U})$ 平均为 242.92×10^{-6} ,Th/U 比值变化范围为 0.45~1.15,所有测试点的 Th/U 比值都大于 0.10。上述特点均反映出测试的锆石是岩浆结晶成因的(Belousova et al., 2002; Hoskin et al., 2003; Möller et al., 2003)(表 1)。共测试样品 19 个,其中 14-19 点可能由于普通铅含量太高或者有普通铅的丢失的缘故,而使得协和度低于 90%,并且 14 点和 19 点的锆石具有扇形分带,与典型的岩浆锆石不符,因此在协和年龄计算时被剔除;剩余的 13 个测试点协和度均大于 90%(表 1),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 219~234 Ma,获得的协和年龄为 (224.8 ± 1.0) Ma,加权平均年龄为 (224.0 ± 2.5) Ma(MSWD = 1.3)。在 U-Pb 谐和图上,所有数据投影点落于谐和线或其附近(图 4),表明锆石形成后 U-Pb 体系基本保持封闭。综上所述,本文所测样品的锆石 U-Pb 年龄可代表本岩体侵位年龄,即火龙沟花岗岩岩体的侵位年龄为 (224.0 ± 2.5) Ma,属于晚三叠世花岗岩,这一结果与原来将其划为燕山期花岗岩的认识明显不同,该岩体也是该区为数不多的具有确切锆石 U-Pb 年龄数据的三叠纪花岗岩。

4.3 岩石地球化学

4.3.1 主量元素分析结果

火龙沟花岗岩样品的常量元素、微量元素及稀土元素分析结果列于表 2,该花岗岩体的 $w(\text{SiO}_2)$ 介于 69.38%~71.97%,均值为 70.96%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为

表 1 火龙沟矿床正长花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定结果
Table 1 LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb isotope analyses of syenogranite from the Huolonggou ore deposit

样号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\omega(\text{B})/10^{-6}$			Th/U	(年龄 $\pm 1\sigma$)/Ma	
					Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
1	0.05321 ± 0.00361	0.26054 ± 0.02116	0.03491 ± 0.00093	0.01105 ± 0.00079	5.941	80.268	149.588	0.54	235 ± 17	221 ± 6
2	0.05432 ± 0.00229	0.25813 ± 0.01056	0.03488 ± 0.00039	0.01144 ± 0.00047	14.122	248.986	336.222	0.74	233 ± 8	221 ± 2
3	0.05691 ± 0.00392	0.26903 ± 0.01717	0.03554 ± 0.00071	0.00989 ± 0.00068	7.674	92.892	196.073	0.47	242 ± 14	225 ± 4
4	0.05486 ± 0.00512	0.26320 ± 0.02267	0.03601 ± 0.00102	0.00961 ± 0.00069	5.613	82.142	136.209	0.60	237 ± 18	228 ± 6
5	0.05502 ± 0.00245	0.26404 ± 0.01115	0.03519 ± 0.00045	0.01037 ± 0.00042	13.892	346.279	301.587	1.15	238 ± 9	223 ± 3
6	0.05354 ± 0.00184	0.25973 ± 0.00839	0.03543 ± 0.00041	0.01045 ± 0.00041	24.795	341.728	619.033	0.55	234 ± 7	224 ± 3
7	0.05506 ± 0.00263	0.27260 ± 0.01192	0.03677 ± 0.00062	0.01088 ± 0.00044	10.737	124.766	268.358	0.46	245 ± 10	233 ± 4
8	0.05146 ± 0.00267	0.251820 ± 0.0139	0.03590 ± 0.00045	0.01098 ± 0.00044	17.487	214.415	446.721	0.48	228 ± 11	227 ± 3
9	0.05433 ± 0.00586	0.25919 ± 0.02724	0.03452 ± 0.00011	0.01229 ± 0.00089	8.352	96.545	216.216	0.45	234 ± 22	219 ± 6
10	0.05446 ± 0.00338	0.26357 ± 0.01555	0.03600 ± 0.00063	0.01214 ± 0.00058	4.453	50.625	112.529	0.45	238 ± 12	228 ± 4
11	0.05615 ± 0.00419	0.26208 ± 0.01957	0.03466 ± 0.00071	0.01047 ± 0.00062	4.500	54.394	119.737	0.45	236 ± 16	220 ± 4
12	0.05622 ± 0.00522	0.26222 ± 0.02281	0.03492 ± 0.00091	0.01217 ± 0.00083	4.952	63.804	129.084	0.49	236 ± 18	221 ± 6
13	0.05467 ± 0.00385	0.27713 ± 0.02037	0.03694 ± 0.00079	0.01273 ± 0.00073	4.801	60.810	115.838	0.52	248 ± 16	234 ± 5
14	0.05432 ± 0.01422	1.05271 ± 0.08395	0.03907 ± 0.00093	0.03408 ± 0.00294	4.874	47.572	83.363	0.57	730 ± 42	247 ± 6
15	0.06587 ± 0.02254	6.38813 ± 0.47897	0.08552 ± 0.00411	0.17237 ± 0.01504	14.561	57.900	77.211	0.75	2031 ± 66	529 ± 24
16	0.05691 ± 0.00446	0.31043 ± 0.02275	0.0355 ± 0.00086	0.01031 ± 0.00062	3.654	56.418	1.568	0.62	275 ± 18	225 ± 5
17	0.05486 ± 0.00694	0.53153 ± 0.0428	0.0407 ± 0.00114	0.01742 ± 0.00136	4.041	51.160	78.711	0.65	433 ± 28	257 ± 7
18	0.05502 ± 0.04773	1.34787 ± 0.47565	0.0418 ± 0.00357	0.05589 ± 0.02124	4.980	50.679	96.272	0.53	867 ± 209	264 ± 22
19	0.05506 ± 0.00762	0.40827 ± 0.02658	0.03474 ± 0.00095	0.01055 ± 0.00055	2.762	47.758	67.682	0.71	348 ± 19	220 ± 6

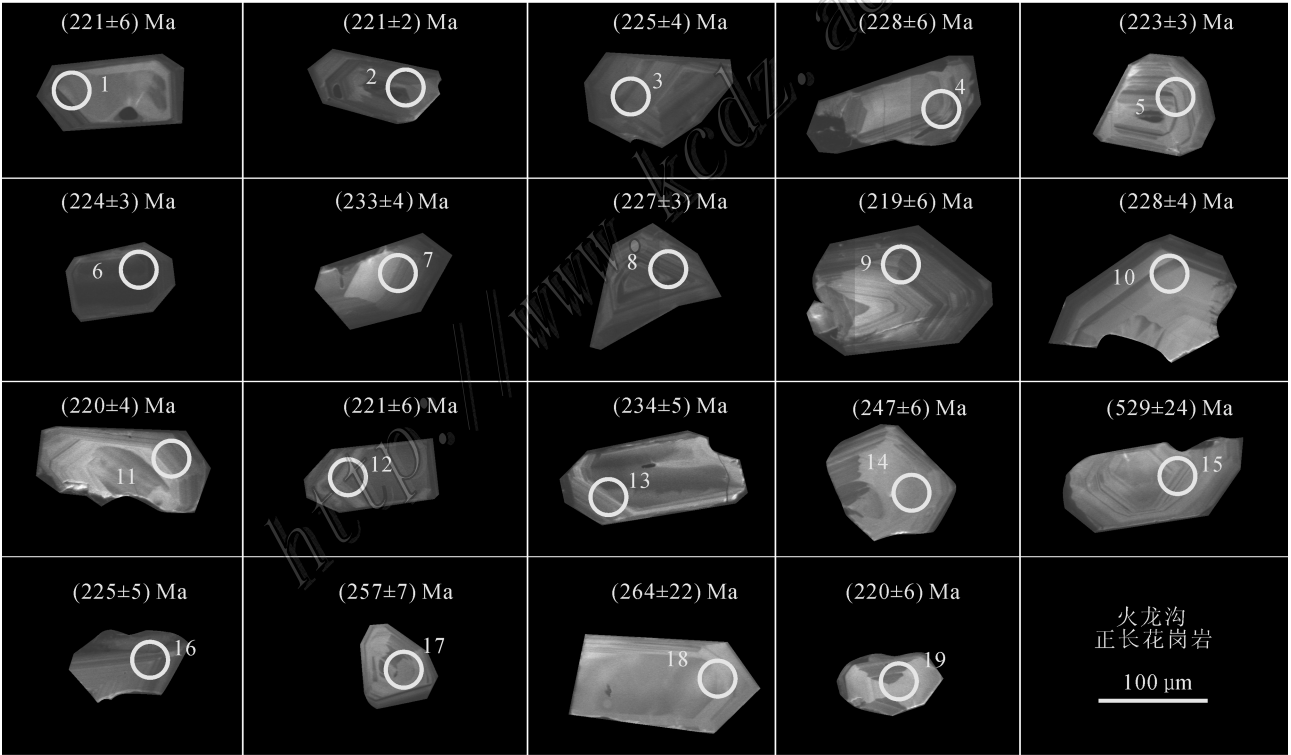


图 3 火龙沟矿床正长花岗岩中锆石阴极发光图和测点号

Fig. 3 CL images of zircon grains for syenogranite from the Huolonggou ore deposit and serial number of measuring points

13.49% ~ 13.88%，均值为 13.64%； $\omega(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 介于 8.87% ~ 10.08%，均值为 9.32%； $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 1.22 ~ 1.61，平均为 1.51； $\omega(\text{FeO} + \text{MgO})$ 为 2.10% ~ 3.13%。由此可见，该花岗岩体

具有高硅、富碱、贫镁、铁的特点，在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上落入钾玄岩系列区域(图 5a)；铝饱和指数 (A/CNK) 介于 0.86 ~ 1.00，在 $A/\text{NK}-A/\text{CNK}$ 图解上显示它为准铝质花岗岩(图 5b)。

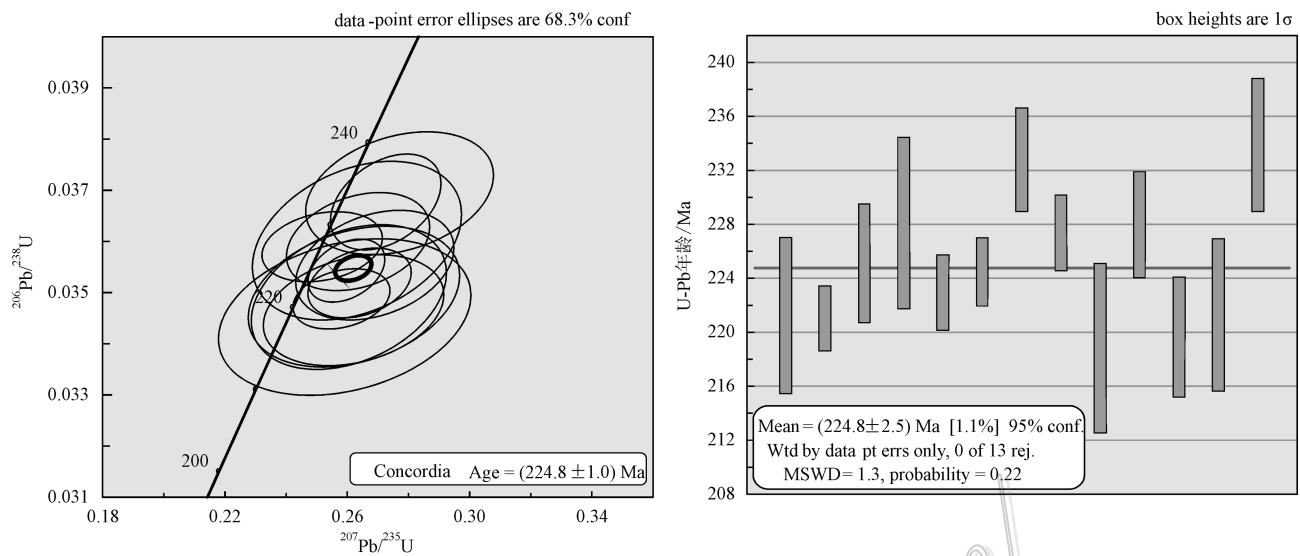


图 4 正长花岗岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和年龄及年龄直方图
Fig. 4 LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram and histogram of syenogranite

4.3.2 微量元素分析结果

火龙沟花岗岩体微量元素的原始地幔标准化蛛网图见图 6a。图中显示出较好的规律性,大离子亲石元素(LILE)Rb、Th、U、K 明显富集,Ba、Sr 明显亏损;同样高场强元素(HFSE)中明显亏损 Nb、Ta、Ti,但是 Zr 和 Hf 相对富集,根据后文地球化学投图和岩石成因讨论,认为符合 A 型花岗岩的特征。

4.3.3 稀土元素分析结果

火龙沟花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分布曲线见图 6b。该图显示该岩体稀土元素总量较高($\Sigma\text{REE} = 248.62 \times 10^{-6} \sim 301.13 \times 10^{-6}$, 平均为 265.11×10^{-6}),具有轻稀土元素相对富集,重稀土元素亏损的特点; $\text{LREE}/\text{HREE} = 8.04 \sim 10.40$,平均为 8.95, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 7.35 ~ 10.21,平均为 8.61,这些特点显示轻、重稀土元素分馏程度较高,具有明显 Eu 的负异常($\delta\text{Eu} = 0.35 \sim 0.45$,平均为 0.39),整体显示出左陡右缓的“V”形分布型式。Eu 的亏损说明岩浆源区发生部分熔融的过程中,有斜长石的残留,或者在岩浆结晶分异过程中,斜长石发生了结晶分异。

5 火龙沟花岗岩形成时的温压条件

花岗岩研究中一个较难获取的资料是岩浆形成时的温压条件,因此温压资料的匮乏在一定程度上影响了花岗岩成因问题的讨论。对于温度,由于花

岗岩浆大多是绝热式上升就位的,那么岩浆在早期结晶时的温度可以近似代表岩浆形成时的温度,因此锆石的饱和温度计算为该问题的解决提供了新的思路。Watson 等(1983a; 1983b)从高温实验(700 ~ 1300℃)中得出锆石溶解度模拟公式。原理是基于花岗岩副矿物锆石中 Zr 在岩浆开始结晶状态下,固液两相中的分配系数是温度的函数,而其他因素对其没有明显影响(Calvin et al., 2003),由 Zr 溶解度公式推导出锆石饱和温度:

$$\ln D_{\text{Zr}}(496000/\text{熔体}) = [-3.8 - 0.85 \times (M - 1)] + 12900/T$$

$$\text{整理得: } T_{\text{Zr}}(\text{℃}) = \{12900/[\ln D_{\text{Zr}}(496000/\text{熔体}) + 0.85 \times M + 2.95]\} - 273.15$$

$$\text{其中, } M = (2\text{Ca} + \text{K} + \text{Na})/(\text{Si} \times \text{Al})$$

式中, D_{Zr} 为 Zr 分配系数, M 值计算公式中 Ca、Na、K、Si、Al 为锆石寄主岩石主量元素 Si、Al、Fe、Mg、Ca、Na、K、P 原子数归一化计算后的原子百分数。

不做 Zr、Hf 校正时,纯锆石中 $w(\text{Zr})$ 为 $496\,000 \times 10^{-6}$,一般用全岩中的 Zr 含量近似代表熔体中的 Zr 含量。本文将计算结果列于表 3,可见火龙沟花岗岩岩体岩浆形成时的温度范围为 804.92 ~ 828.50℃,平均为 820℃,属于高温花岗岩(Miller et al., 2003)。

对于火龙沟花岗岩的形成压力,本文只能通过该岩体的地球化学点讨论其源区的残留矿物相,进而初步探讨其形成时的压力条件。Castillo(2006)

表 2 火龙沟矿床正长花岗岩岩体主量元素($w(B)/\%$)、微量和稀土元素($w(B)/10^{-6}$)的化学成分

Table 2 Chemical compositions of major elements ($w(B)/\%$), trace elements and REE ($w(B)/10^{-6}$) of syenogranite from the Huolonggou ore deposit

组分	HL01	HL02	HL03	HL04	HL05	HL06
SiO ₂	71.51	71.53	71.20	71.97	70.13	69.38
TiO ₂	0.30	0.29	0.32	0.30	0.36	0.35
Al ₂ O ₃	13.57	13.61	13.60	13.49	13.72	13.88
Fe ₂ O ₃ ^T	2.97	2.84	2.69	2.90	3.55	3.19
FeO	2.08	2.33	1.41	2.27	2.36	2.45
MnO	0.14	0.07	0.14	0.07	0.06	0.06
MgO	0.54	0.54	0.69	0.65	0.73	0.68
CaO	1.02	1.13	1.02	1.07	1.28	1.48
Na ₂ O	3.56	3.61	3.61	3.49	3.59	4.54
K ₂ O	5.53	5.61	5.80	5.38	5.65	5.55
P ₂ O ₅	0.08	0.08	0.09	0.09	0.11	0.10
总和	101.31	101.63	100.57	101.67	101.54	101.68
烧失量	0.82	0.77	0.92	0.67	0.91	0.86
Mg [#]	29.61	30.61	37.41	34.21	32.34	33.24
σ	2.90	2.98	3.14	2.71	3.15	3.86
A/CNK	0.99	0.97	0.97	1.00	0.96	0.86
Rb	175.00	176.50	187.10	154.30	170.60	163.20
Ba	550.32	540.03	574.60	503.70	671.32	586.53
Th	20.86	21.14	19.22	16.84	16.23	16.49
U	4.49	7.26	7.55	3.74	3.87	4.86
Nb	16.33	16.90	14.79	15.96	13.65	14.57
Ta	1.45	1.62	1.26	1.27	1.08	1.15
Sr	144.90	128.90	88.91	147.40	152.90	144.30
Hf	6.10	6.10	6.42	6.80	6.46	6.48
Zr	276.19	257.96	261.46	255.77	286.49	275.88
Y	33.85	32.84	30.87	29.67	24.05	29.50
Ti	1804.77	1728.21	1898.65	1825.53	2172.77	2119.74
Pb	1020.00	269.70	159.80	128.20	70.94	55.96
La	53.59	43.41	43.58	42.45	42.92	48.87
Ce	140.59	113.48	112.67	114.29	118.28	128.62
Pr	14.48	13.04	12.02	12.71	13.17	13.81
Nd	51.46	48.01	43.57	46.02	47.43	49.12
Sm	10.06	9.40	8.67	9.19	8.78	9.43
Eu	1.16	1.07	1.09	1.12	1.24	1.21
Gd	9.36	8.81	8.23	8.48	7.69	8.73
Tb	1.36	1.29	1.21	1.23	1.06	1.23
Ho	1.46	1.42	1.35	1.30	1.04	1.28
Er	4.30	4.18	4.02	3.84	3.04	3.80
Tm	0.67	0.65	0.63	0.58	0.46	0.58
Yb	4.33	4.24	4.12	3.70	3.02	3.73
Lu	0.63	0.64	0.60	0.53	0.44	0.54
ΣREE	301.13	256.81	248.62	252.27	254.11	277.75
ΣLREE	271.33	228.41	221.59	225.78	231.82	251.05
ΣHREE	29.81	28.40	27.02	26.49	22.28	26.70
ΣLREE/ΣHREE	9.10	8.04	8.20	8.52	10.40	9.40
La _N /Yb _N	8.88	7.35	7.59	8.22	10.21	9.39
δEu	0.36	0.35	0.39	0.38	0.45	0.40

注: Fe₂O₃^T 代表全铁 此值单位为 1。

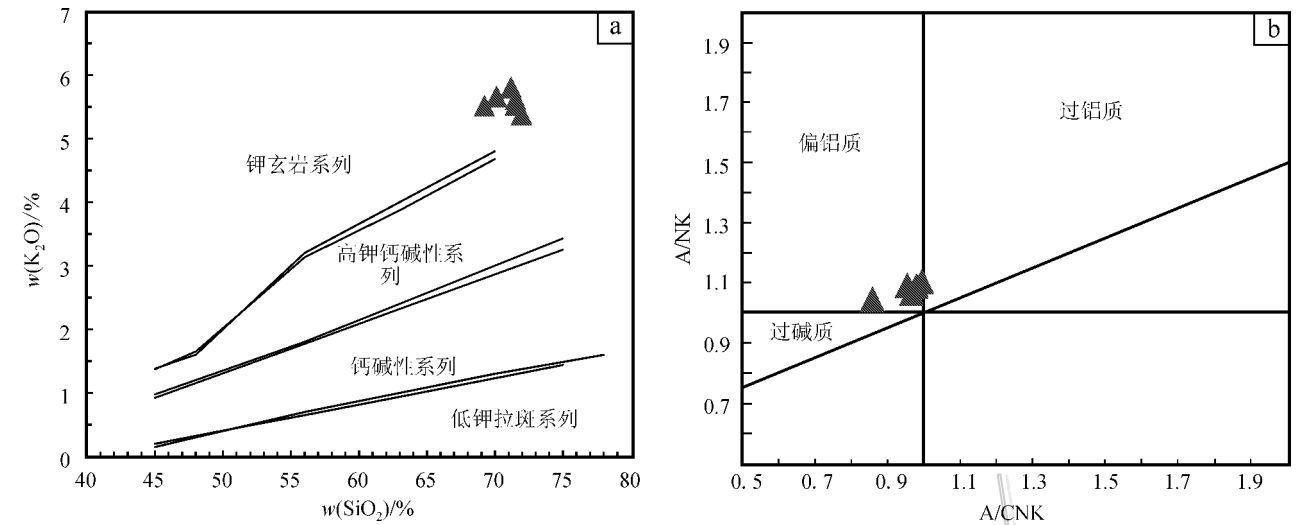


图 5 火龙沟矿床正长花岗岩 K_2O-SiO_2 图解(a)和 $A/NK-A/CNK$ 图解(b)

Fig. 5 K_2O-SiO_2 (a) and $A/NK-A/CNK$ diagrams (b) of syenogranite from the Huolonggou ore deposit

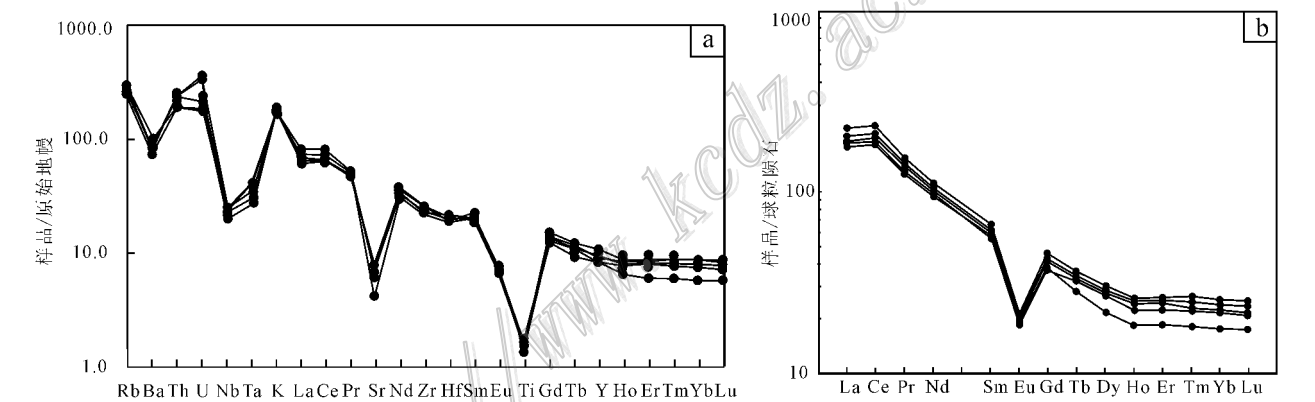


图 6 火龙沟矿床正长花岗岩微量元素原始地幔标准化曲线图(a)和稀土元素球粒陨石标准化曲线图(b) (标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element patterns (a) and chondrite-normalized rare earth element patterns (b) of syenogranite from the Huolonggou ore deposit (normalized values after Sun et al., 1989)

表 3 火龙沟矿床正长花岗岩的 Zr 饱和温度计算结果

Table 3 Calculated zircon saturation temperature for syenogranite from the Huolonggou ore deposit

样品号	D_{Zr}	M	$Ln(D_{Zr})$	Zr 饱和温度/℃
HL01	1795.88	1.49	7.49	828.50
HL02	1922.81	1.53	7.56	818.96
HL03	1897.02	1.54	7.55	819.42
HL04	1939.23	1.47	7.57	822.90
HL05	1731.29	1.58	7.46	824.76
HL06	1797.88	1.79	7.49	804.92

注：计算中所用的主量元素成分数据见表 2。

总结出一些岩石地球化学特征与残留矿物相之间的

关系。高 $Sr(>300\times10^{-6})$ 和无负 Eu 异常,表明源区残留相中基本无斜长石;低 $Y(<15\times10^{-6})$ 、高 $Sr/Y(>20)$ 、低 $Yb(<1.9\times10^{-6})$ 和高 $La/Yb(>20)$, 均是源区残留相中有石榴子石的特征表现。火龙沟花岗岩具有低 $Sr(89\times10^{-6}\sim152\times10^{-6})$ 和负 Eu 异常,表明源区残留相中具有斜长石,高 $Y(39\times10^{-6}\sim49\times10^{-6})$ 、低 $Sr/Y(2.2\sim3.9)$ 、较高 $Yb(3\times10^{-6}\sim4.3\times10^{-6})$ 和低 $La/Yb(7.35\sim10.21)$, 都说明了源区无石榴子石残留。当斜长石作为残留相且不存在石榴子石时,压力应该小于 10 kPa 或深度小于 30 km,由此可见火龙沟花岗岩岩浆起源的压

力较低。

6 讨论

6.1 成岩、成矿时代

详细的野外地质调查、岩相学和矿相学观察表明,矿体产在岩体与围岩的接触带,铅锌矿呈浸染状分布在岩体中,围岩蚀变明显受控于花岗岩的侵位,并且铅在火龙沟花岗岩岩体中的平均值 $w(\text{Pb})$ 为 284.1×10^{-6} ,远远高于中国花岗岩的铅平均值(26×10^{-6} ,史长义等,2005),而天山兴安造山系中花岗岩类铅含量更低, $w(\text{Pb})$ 平均值为 19×10^{-6} (史长义等,2007)。张乾等(2004)经过大量测试,认为铅主要赋存于钾长石中,而锌主要赋存在斜长石、角闪石及辉石等暗色矿物中。钾长石在后期流体作用下容易发生水热蚀变,转变为绢云母、方解石、石英等矿物,在这种转变过程中,铅会大量析出进入流体相,这种变化能够为后期铅的成矿提供成矿物质(张乾等,2004)。这也解释了矿化部位硅化、绢云母化较强的现象。上述分析表明,花岗岩岩体与成矿密切相关,岩体提供或部分提供了成矿物质 Pb 的来源。花岗岩岩体与矿体密切伴生的关系,表明成矿与成岩同时或稍晚形成。因此,花岗岩岩体的成岩年龄可以大致代表火龙沟铅锌矿的成矿时代,4.2 节中获得岩体的形成时代为 $(224.0 \pm 2.5) \text{ Ma}$,即火龙沟铅锌矿床属于晚三叠世岩浆热液活动的产物。该地区对于三叠纪成矿的岩体报道较少,在后期的找矿勘查中对该时期的岩体应予以重视。

6.2 花岗岩岩体基本特征

前文分析结果表明,火龙沟花岗岩具有高硅、富 ALK、贫镁、铁的特点,属于准铝质岩石。稀土元素具有轻稀土元素明显富集、重稀土元素相对亏损、明显 Eu 负异常的特点。微量元素具有富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Th、U、K,但相对亏损 Ba、Sr,亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti,相对富集 Zr 和 Hf 的特点。由于 Ba、Sr、Eu 与 Ca 的性质十分接近,倾向于富集在含 Ca 矿物中,表明花岗岩岩浆演化过程中要么存在含钙矿物斜长石的分离结晶,要么该花岗岩源区存在斜长石残余,本文于第五节中通过元素比值等方式倾向于后者。由于斜长石在源区作为残留相而导致这类元素在早期岩浆形成过程中表现为相容元素,从而使这类元素亏损,而 Nb、Ta、Ti 的亏损主要受金红石结晶分异的影响,随着岩浆的分离结

晶,Zr、Hf 通常易于进入锆石中,而早期由于锆石不饱和而使得 Zr、Hf 以不相容元素赋存于岩浆中,到了演化晚期随着锆石的结晶而富集。Eby(1990)指出,对于 A 型花岗岩,当 $w(\text{SiO}_2) = 70\%$ 时, $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) = 7\% \sim 11\%$, $w(\text{CaO}) < 1.8\%$, $\text{FeO}^*/\text{MgO} = 8 \sim 80$ 。本区花岗岩的主量元素特征与 A 型花岗岩特征非常吻合,另外,10000 Ga/Al-Zr、10000 Ga/Al-Nb、10000 Ga/Al-Ce、10000 Ga/Al-Y 判别图解(图 7a~d),显示大部分样品落在 A 型花岗岩的区域,而在 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO}$ 、 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} - \text{FeO}^*/\text{MgO}$ 的判别图解(图 7e、f)中,样品全部落在 A 型花岗岩的区域。前文计算所得到的 5 个样品中锆石的饱和温度为 $805 \sim 829^\circ\text{C}$,平均为 820°C 。花岗岩为绝热上升侵位,花岗岩中最早结晶的矿物可以代表岩浆温度,因此可以认为该岩体的岩浆温度为 820°C ,其高温的特点也支持该岩体为 A 型花岗岩。另外,在该地区也存在同时期的 A 型花岗岩,即查干岩体,该岩体的岩浆结晶年龄为 $236 \sim 229 \text{ Ma}$,与火龙沟岩体在时间上和空间上具有一致性,葛文春等(2005)等通过大石寨岩体的锆石年龄(230 Ma)预测查干岩体的规模可能更大,或者区内还存在其他的中、晚三叠世花岗岩。火龙沟 A 型花岗岩的发现印证了该观点,但是火龙沟花岗岩岩体和查干岩体是不是同一个岩体还有待进一步研究。

目前对于 A 型花岗岩的成因和分类问题仍然存在争议(吴福元等,2007;Bonin,2007),国内有关 A 型花岗岩综述性文章也是层出不穷,对该类花岗岩的争论更是普遍存在,主要争论点在于 A 型花岗岩的本质问题,A 型花岗岩的分类还有没有必要继续存在,如何正确识别 A 型花岗岩,高分异的 I 型花岗岩和 A 型花岗岩如何区分等,由于篇幅所限,作者不讨论以上问题。之所以如此多的学者关注 A 型花岗岩,是因为其具有明确的构造指示意义(图 8)。很多学者致力于将花岗岩的类型和大地构造背景相联系,但是由于花岗岩的源区继承性和较高度度的演化,使得花岗岩和构造环境并没有一一对应的关系。实验岩石学已经证明 A 型花岗岩具有很高的温度,平均结晶温度达 800°C 以上(Eby,1990;吴福元等,2007),矿物学特征对应于锆石中缺少岩浆作用之前的古老岩浆核(King et al.,1997),化学组成上普遍表现出低 Sr、Eu 和富集 Nb、Zr 等元素的特点,反映其源区存在斜长石的残留(形成压力较低,一般 $< 30 \text{ km}$)。如

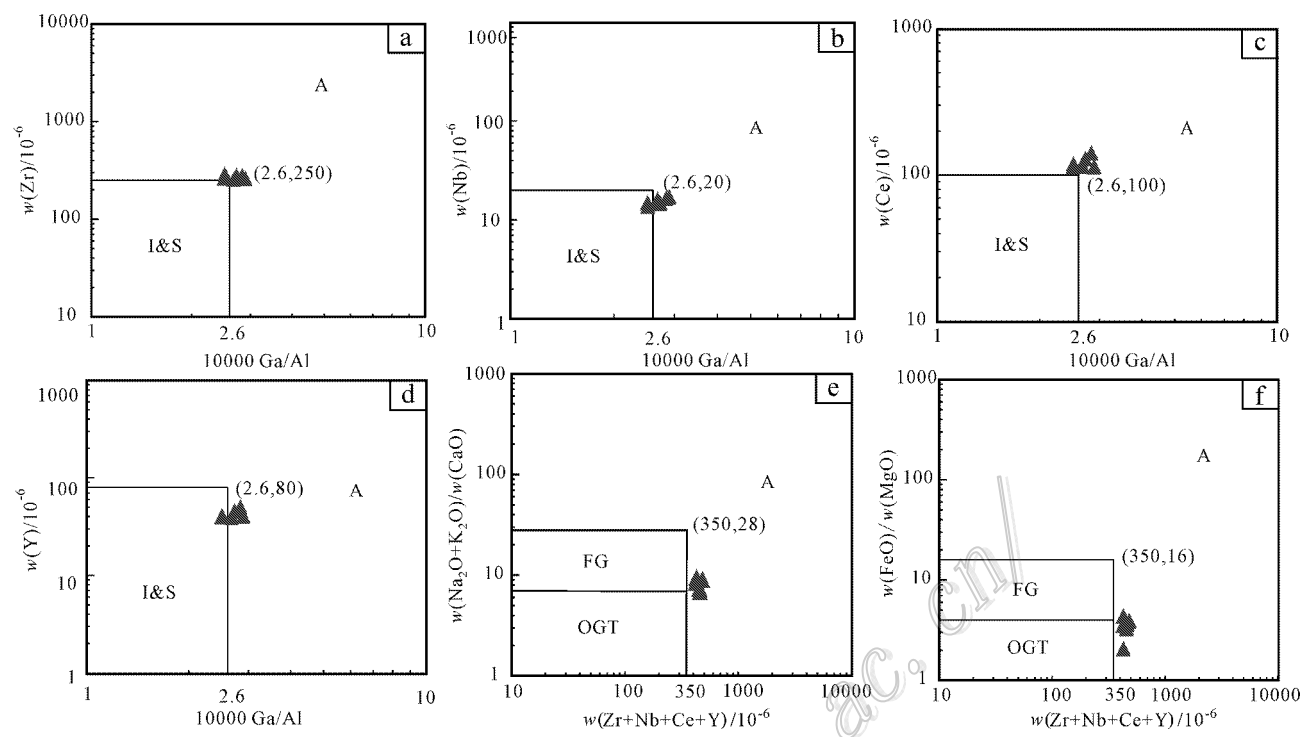


图 7 火龙沟正长花岗岩 10000 Ga/Al-Zr, 10000 Ga/Al-Nb, 10000 Ga/Al-Ce, 10000 Ga/Al-Y 和 Zr + Nb + Ce + Y-
(Na₂O + K₂O)/CaO, Zr + Nb + Ce + Y-FeO/MgO 判别图解(据 Whalen et al. , 1987), 显示 A 型花岗岩特征
Fig. 7 10000 Ga/Al-Zr, 10000 Ga/Al-Nb, 10000 Ga/Al-Ce, 10000 Ga/Al-Y and Zr + Nb + Ce + Y- (Na₂O + K₂O)/CaO,
Zr + Nb + Ce + Y-FeO/MgO discrimination diagrams (after Whalen et al. , 1987), showing A-type nature of the granite
in Huolonggou

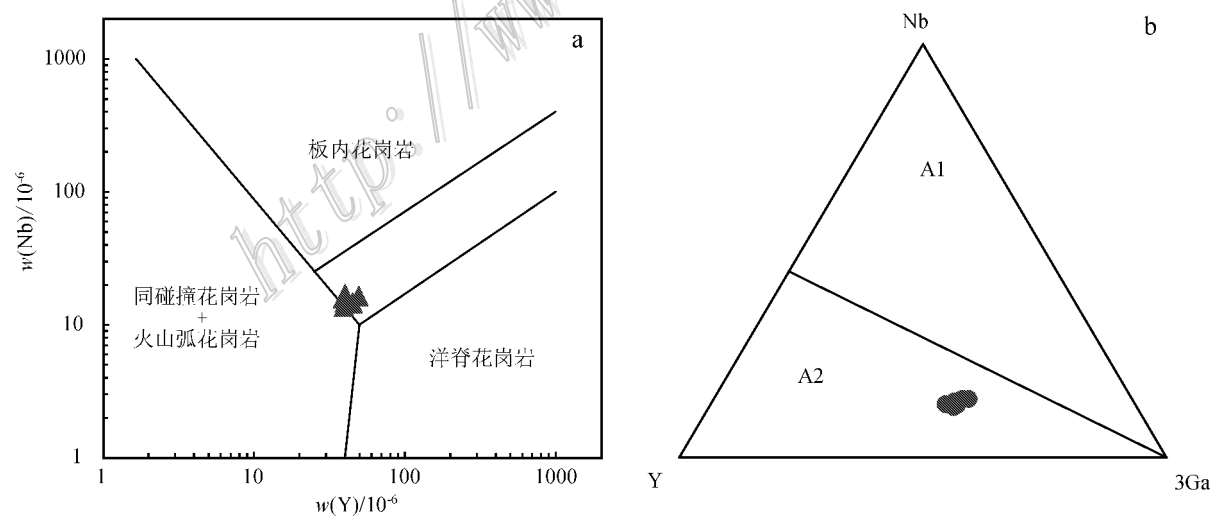


图 8 火龙沟正长花岗岩构造环境判别图解(a 据 Pearce et al. , 1984 ;b 据 Eby, 1992)
Fig. 8 Tectonic environment discrimination diagrams of A-type granites in Huolonggou (Fig. a after Pearce et al. ,
1984 ;Fig. b after Eby, 1992)

果浅部地壳能够发生高温部分熔融,显然暗示其深部存在热异常,而这大多只会在拉张情况下出现。因此,对于 A 型花岗岩的构造指示意义基本上达到共识,即形成于伸展的构造环境(吴福元等,2007)。不少学者通过统计一个地区的 A 型花岗岩的侵入年代和空间分布规律来论证该地区整体的构造演化历

史(Wu et al., 2002; 葛文春等, 2005; 张万益等, 2012), 结果表明该方法确实是行之有效的, 那么下文就来探讨火龙沟正长花岗岩岩体对研究区的构造指示意义。

6.3 花岗岩体的构造指示意义

大兴安岭地区在古生代期间经历了额尔古纳、兴安、松嫩、佳木斯等众多微地块之间的碰撞拼合演化过程, 前人研究表明, 兴安地块和松嫩地块在晚石炭世之前便沿着贺根山-嫩江-黑河缝合带碰撞拼合结束, 形成兴安-松嫩微板块(孙德有等, 2000), 火龙沟正长花岗岩和该时期的拼合作用关系不大。而在兴安-松嫩微板块和其南部的华北板块之间还存在着古亚洲洋, 对于古亚洲洋的具体闭合时间和位置现在还存在争议, 一种观点认为, 古亚洲洋在早古生代末期—晚古生代早期闭合(Zhang et al., 1989; 白登海等, 1993a; 1993b), 另一种观点认为华北板块和兴安-松嫩微板块在晚二叠世—早三叠世才完成拼贴(李锦轶等, 2007; 童英等, 2010)。近年来地质工作者在白音乌拉-东乌珠穆沁旗碱性花岗岩带及其东延部分的黑河一带发现了许多三叠纪 A 型花岗岩, 包括苏尼特左旗 A 型花岗岩(石玉若等, 2007), 查干敖包石英闪长岩(张万益等, 2008), 清水 A 型花岗岩(孙德有等, 2004)等, 这些花岗岩呈带状分布, 并且在时间上具有一致性, 该花岗岩带的发现为上述争论的解决提供了可能, 本文所研究的火龙沟花岗岩在侵入时间和大地构造背景上与该花岗岩带具有一致性, 应该同属于该花岗岩带。由于 A 型花岗岩特殊的构造指示意义(形成于伸展环境), 本文作者认为, 如此大规模的 A 型花岗岩带的出现, 可以指示出该地区至少在晚三叠世处于一种伸展的构造环境, 暗示着华北板块和兴安松嫩微板块在中三叠世之前碰撞拼合结束(即古亚洲洋在该时期之前闭合), 并且进入造山后垮塌岩石圈伸展阶段。在 Pearce 等(1984)的构造判别图解上, 该岩体位于板内区域(图 8a), 它们属于 Eby(1992)提出的 A2 型花岗岩(图 8b), 由此可见该岩体属于板内的造山后花岗岩, 根据时间上的近缘性, 本文作者认为该花岗岩带便是在这种造山后伸展的构造环境下形成的。

7 结 论

(1) 通过锆石 LA-MC-ICP-MS 定年, 确定火龙沟地区花岗岩岩体的侵位年龄为 (224.0 ± 2.5) Ma,

并不是前人一直认为的燕山期花岗岩。

(2) 该地区已经找到的铅锌矿体与本文研究的岩体侵位密切相关, 岩体较高的铅含量为成矿提供了有利条件, 该地区仍然有进一步勘探的价值。经研究, 本文作者将该矿床类型初步定为与岩体侵位有关的热液矿床, 进一步的矿产勘查工作应围绕三叠纪正长花岗岩岩体展开。

(3) 通过岩石地球化学特点、岩体形成温度 (820°C)、同地区同时代侵入的 A 型花岗岩, 判断火龙沟花岗岩为 A 型花岗岩, 该花岗岩同属于白音乌拉-东乌珠穆沁旗碱性花岗岩带的一部分, 暗示着华北板块和兴安-松嫩微陆块在晚三叠世之前便已经碰撞拼合结束, 进入造山后垮塌岩石圈伸展阶段。

志 谢 成文过程中审稿专家及编辑部对论文提出了宝贵的修改意见, 在此一并志以诚挚的谢意!

References

- Bai D H, Zhang L, Kong X R, Jiang B B and Gao W. 1993a. A magnetotelluric study of the Paleozoic collision zone in the east of Inner Mongolia: I. observations and data analyses [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 36(3): 326-336 (in Chinese with English abstract).
- Bai D H, Zhang L and Kong X R. 1993b. A magnetotelluric study of the Paleozoic collision zone in the east of Inner Mongolia: II. two-dimensional interpretation [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 36(6): 773-778 (in Chinese with English abstract).
- Belousova E, Griffin W L and O'Reilly S Y. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects [J]. *Lithos*, 97(1): 1-29.
- Calvin F M, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Granites implication of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance [J]. *Geology*, 31(6): 529-532.
- Castillo P R. 2006. An overview of adakite petrogenesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 257-268.
- Cocherie A and Robert M. 2008. Laser ablation coupled with ICP-MS applied to U-Pb iron geochronology: A review of recent advances [J]. *Gondwana Research*, 14: 597-608.
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis

- [J]. *Lithos*, 26(1): 115-134.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641-652.
- Ge W C, Wu F Y, Zhou C Y and Zhang J H. 2005. Zircon U-Pb ages and its significance of the Mesozoic granites in the Wulanhaote region, central DaXingan Mounatin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 749-762 (in Chinese with English abstract).
- Han G Q, Liu Y J and Neubauer Franz. 2011. Origin of terranes in the eastern Central Asian orogenic belt, NE China: U-Pb ages of detrital zircons from Ordovician-Devonian sandstones, North Da Xing'an Mts [J]. *Tectonophysics*, 511(3): 109-124.
- Hanchar J M and Rudnick R L. 1995. Revealing hidden structures: The application of cathodoluminescence and back-scattered electron imaging to dating zircons from lower crustal xenoliths [J]. *Lithos*, 36(3): 289-303.
- Hanchar J M and Miller C F. 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories [J]. *Chemical Geology*, 110(1): 1-13.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27-62.
- Hong D W, Huang H Z, Xiao Y J, Xu H M and Jin M Y. 1994. The Permian alkali granites in central inner Mongolia and their geodynamic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(3): 219-230 (in Chinese with English abstract).
- Hou K J, Li Y H and Tian Y R. 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).
- Kang Y J, She H Q and Xiang A P. 2014. Indo China Epoch magmatic activities and metallogenic implications in the Badaguan ore district, Inner Mongolia [J]. *Geology in China*, 41(4): 1215-1225 (in Chinese with English abstract).
- King P L, White A J R and Chappell B W. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, south eastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 38(3): 371-391.
- Li J T, Gao L M and Sun G H. 2007. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565-582 (in Chinese with English abstract).
- Liu W Q, Ren Z Q and Wang D L. 2014. 2013 annual work summary and design in 2014 of Huolonggou lead polymetallic mining area, Inner Mongolia Autonomous Region [R]. Inner Mongolia Nonferrous Geological Mining Co., LTD. (in Chinese).
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1-70.
- Miao L C, Fan W M and Liu D Y. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5): 348-370.
- Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Hot and cold granites: Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance [J]. *Geology*, 31(6): 529-532.
- Möller A, O'Brien P J and Kennedy A. 2003. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: Example from the ultrahigh-temperature granulites of Ogaland (SW Norway) [J]. *EMU Notes in Mineralogy*, 5: 5-82.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983.
- Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps [M]. Berlin-Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 373-400.
- Shao J A, Mou B L and He G Q. 1997. Geological processes of the process of structural overlapping between Paleo-Asia domain and Paleo-Pacific domain in northern part of North China [J]. *Science in China (Series D)*, 27(5): 390-394 (in Chinese with English abstract).
- She H Q, Li J W and Xiang A P. 2012. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 571-594 (in Chinese with English abstract).
- Shi C Y, Yan M C and Liu C M. 2005. Abundances of chemical elements in different rock types of the granitoids of China and its characteristics [J]. *Computing Techniques For Geophysical And Geochemical Exploration*, 27(3): 256-262 (in Chinese with English abstract).
- Shi C Y, Yan M C and Chi Q H. 2007. Abundances of chemical elements of granitoids in different geotectonic units of China and their characteristics [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 47-59 (in Chinese with English abstract).

- Shi Y R, Liu D Y and Zhang Q. 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of Triassic A-type granites in Sonid Zuoqi, central Inner Mongolia, China and its tectonic implications[J]. Geological Bulletin of China, 26(2) :183-189(in Chinese with English abstract).
- Sun D Y, Wu F Y and Li H M. 2000. Emplacement age of the postorogenic A-type granites in Northwestern Lesser Xing'an Ranges, and its relationship to the eastward extension of Suolunshan-Hegenshan-Zhalaiite collisional suture zone [J]. Chinese Science Bulletin, 45(20) :2217-2222 (in Chinese).
- Sun D Y, Wu F Y, Zhang Y B and Gao S. 2004. The final closing time of the west Lamulum River-Changchun-Yanji plate suture zone : Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 34(2) :174-181(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts : Implications for mantle composition and processes [A]. In : Saunders A D and Norry M J, eds. Magmatism in the Oceanic Basalts [C]. Geological Society Special Publication. 313-345.
- Tong Y, Hong D W, Wang T Shi X J, Zhang J J and Zeng T. 2010. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the Sino-Mongolian border and its tectonic and metallogenic implications[J]. Acta Geoscientia Sinica, 31(3) :395-412(in Chinese with English abstract).
- Watson E B and Harrison T M. 1983a. Zircon saturation revisited : Temperature and composition effect in a variety of crustal magmas types[J]. Earth and Planetary Science Letters, 64 :295-304.
- Watson E B and Harrison T M. 1983b. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest [J]. Earth Sciences, 308 :841-844.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites : Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. Contrib. Mineral Petrol., 95 :407-419.
- Wu F Y. 2002. A-type granites in northeastern China : Age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. Chemical Geology, 187(1) :143-173.
- Wu F Y, Li X H, Yang J H and Zheng Y F. 2007. Discussions on the Petrogenesis of granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6) :1217-1238(in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Zhao G C and Sun D Y. 2007. The Hulan group : Its role in the evolution of the general Asian orogenic belt of NE, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 30(3) :542-556.
- Zhang Q, Liu Z H, Qiu Y Z, Gao J Y and Wang Y X. 2004. Lead in potassium feldspar and contribution to mineralization [J]. Geology and Prospecting, (1) :45-49(in Chinese with English abstract).
- Zhang W Y, Nie F J and Jiang S H. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb age of quartz diorite in Chagan Obo of Inner Mongolia and its geological significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 27(3) :177-184(in Chinese with English abstract).
- Zhang W Y, Nie F J, Gao Y G and Liu Y. 2012. Geochemical characteristics and genesis of Triassic Chagan Obo alkaline quartz diorites in Inner Mongolia [J]. Acta Petrologica Sinica, 28(2) :525-534 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y P and Tang K D. 1989. Pre-Jurassic tectonic evolution of intercontinental region and the suture zone between the North China and Siberian platforms[J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 3 :47-56.

附中文参考文献

- 白登海,张丽,孔祥儒,蒋邦本,高文. 1993a. 内蒙古东部古生代块体碰撞区的大地电磁测深研究- I 观测与资料分析 [J]. 地球物理学报, 36(3) :326-336.
- 白登海,张丽,孔祥儒. 1993b. 内蒙古东部古生代块体碰撞区的大地电磁测深研究- II. 二维解释 [J]. 地球物理学报, 36(6) :773-778.
- 葛文春,吴福元,周长勇,张吉衡. 2005. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. 岩石学报, 21(3) :749-762.
- 洪大卫,黄怀曾,肖宜君,徐海明,靳满元. 1994. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义 [J]. 地质学报, 68(3) :219-230.
- 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.
- 康永建,余宏全,向安平,田京,李进文,杨郅城,郭志军,董旭舟. 2014. 内蒙古八大关矿区印支期岩浆活动及其找矿意义 [J]. 中国地质, 41(4) :1215-1225.
- 李锦轶,高立明,孙桂华,李亚萍,王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井子晚三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束 [J]. 岩石学报, 23(3) :565-582.
- 刘文权,任贞奎,王大璐. 2014. 内蒙古自治区阿尔山市火龙沟矿区铅多金属矿预查 2013 年度工作总结及 2014 年设计 [R]. 内蒙古有色地质矿业有限公司.

- 邵济安,牟保磊,何国琦. 1997. 华北北部在古亚洲域与古太平洋域构造叠加过程中的地质作用[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 27(5):390-394.
- 余宏全,李进文,向安平,关继东,杨郎城,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[J]. 岩石学报,28(2):571-594.
- 史长义,鄢明才,刘崇民. 2005. 中国不同岩石类型花岗岩类元素丰度及特征[J]. 物探化探计算技术,27(3):256-262.
- 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):47-59.
- 石玉若,刘敦一,张旗,简平,张福勤,苗来成,张履桥. 2007. 内蒙古中部苏尼特左旗地区三叠纪 A 型花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其区域构造意义[J]. 地质通报,26(2):183-189.
- 孙德有,吴福元,李惠民,林强. 2000. 小兴安岭西北部造山后型花岗岩的时代及与索伦山-贺根山-扎赉特碰撞拼合带东延的关系[J]. 科学通报,45(20):2217-2222.
- 孙德有,吴福元,张艳斌,高山. 2004. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版),34(2):174-181.
- 童英,洪大卫,王涛,史兴俊,张建军,曾涛. 2010. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义[J]. 地球学报,31(3):395-412.
- 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.
- 张乾,刘志浩,裘愉卓,高计元,王一先. 2004. 钾长石中的铅及其对成矿的贡献[J]. 地质与勘探,(1):45-49.
- 张万益,聂凤军,江思宏,刘妍,许东青,郭灵俊. 2008. 内蒙古查干敖包石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志,27(3):177-184.
- 张万益,聂凤军,高延光,刘妍. 2012. 内蒙古查干敖包三叠纪碱性石英闪长岩的地球化学特征及成因[J]. 岩石学报,28(2):525-534.