

编号: 0258-7106(2011)05-0787-12

# 内蒙古白音诺尔铅锌矿床印支期成矿的年代学证据\*

江思宏 聂凤军 白大明 刘翼飞 刘妍

(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)

**摘要** 内蒙古白音诺尔铅锌矿床是大兴安岭地区最大的铅锌矿床, 矿体主要沿碳酸盐岩与花岗闪长岩的接触带产出。对矿区内及外围主要岩体的锆石 LA-MC-ICP-MS 测年结果表明, 矿区外围花岗岩岩基的形成年龄为  $(134.8 \pm 1.2) \text{Ma}$  (MSWD=2.40), 矿区内花岗闪长岩的形成年龄为  $(244.5 \pm 0.9) \text{Ma}$  (MSWD=0.85), 石英斑岩为  $(129.2 \pm 1.4) \text{Ma}$  (MSWD=5.5)。这说明, 白音诺尔铅锌矿的矿化蚀变发生在花岗闪长岩的就位过程中, 成矿时代为印支早期, 而不是前人认为的燕山早期, 但受到燕山晚期岩浆活动影响, 有成矿作用的叠加。

**关键词** 地球化学; LA-MC-ICP-MS 锆石测年; 印支期; 白音诺尔; 内蒙古

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

## Geochronology evidence for Indosinian mineralization in Baiyinnuoer Pb-Zn deposit of Inner Mongolia

JIANG SiHong, NIE FengJun, BAI DaMing, LIU YiFei and LIU Yan

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

### Abstract

The Baiyinnuoer ore deposit in Inner Mongolia is the largest Pb-Zn deposit in the Da Hinggan Mountains. The ore bodies in this ore deposit mainly occur along the contact zone between the granodiorite and the carbonate rock. In order to constrain the emplacement age of the intrusive rocks within and around the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit, the authors dated the zircons of four samples from the intrusive rocks by using the LA-MC-ICP-MS method. Three reliable weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of  $(134.8 \pm 1.2) \text{Ma}$  (MSWD=2.40),  $(244.5 \pm 0.9) \text{Ma}$  (MSWD=0.85), and  $(129.2 \pm 1.4) \text{Ma}$  (MSWD=5.5) were obtained from the granite batholiths around the Baiyinnuoer ore deposit, granodiorite and quartz porphyry in the ore deposit, respectively. These data indicate that the main Pb-Zn mineralization in the Baiyinnuoer ore deposit took place during the early Indosinian epoch instead of during the early Yanshannian epoch considered by previous researches. The superimposed mineralization might have taken place in the ore deposit during the late Yanshannian epoch, as evidenced by the dating result in this paper.

**Key words:** geochemistry, LA-MC-ICP-MS zircon dating, Indosinian epoch, Baiyinnuoer, Inner Mongolia

白音诺尔铅锌矿是中国北方地区的一个大型铅锌矿床, 发现于1970年, 1971年至1989年分别由内蒙古自治区区调二队和内蒙古自治区第三地质大队

二分队进行普查, 于1989年底提交了《内蒙古自治区巴林左旗白音乌拉苏木白音诺尔铅锌矿区详细普查报告》, 探明矿石储量3 272.87万t, 铅金属量

\* 本文受全国危机矿山项目(编号: 20089948)和地质大调查项目(编号: 1212010911029)联合资助

第一作者简介 江思宏, 男, 1968年生, 博士, 研究员, 主要从事金属矿床成矿规律研究。Email: jiangsihong1@163.com

收稿日期 2011-01-12。改回日期 2011-04-12。张绮玲编辑。

66.08 万 t, 锌金属量 177.94 万 t, 银金属量 1 026.33 t (陈玉清等, 2002)。随后, 前人对该矿陆续开展了大量研究工作(张德全等, 1990; 1991; 赵一鸣等, 1997; 曾庆栋等, 2007a; 2007b; 牛树银等, 2008), 取得了许多成果, 多数人认为属于典型的矽卡岩型矿床(张德全等, 1991; 赵一鸣等, 1997), 成矿时代为燕山期, 只有少部分学者认为是喷流沉积型, 其主成矿时代为二叠纪, 并有燕山期成矿作用的叠加(曾庆栋等, 2007a)。本文通过对矿区内及附近可能与成矿有关的主要侵入岩(脉)的锆石 LA-MC-ICP-MS 测年研究, 结果表明, 白音诺尔铅锌矿的形成主要与印支期岩浆活动有关, 后期可能受到燕山晚期岩浆活动影响, 有成矿作用的叠加。

## 1 区域地质与矿床地质概况

白音诺尔大型铅锌矿床地处天山-蒙古-兴安造山带东部、大兴安岭中南段巴林左旗的北部, 白音诺尔-景峰北东向断裂与白音诺尔-罕庙东西向断裂交汇处(张德全等, 1990; 1991; 赵一鸣等, 1997)。矿区及外围地层走向、侵入岩产出和主要的断裂与褶皱均呈北东向展布, 北部产出有白音乌拉火山机构, 西部和东部均为晚侏罗世陆相火山岩盆地。矿体主要沿二叠系黄岗梁组碳酸盐岩与花岗闪长(斑)岩和石英正长斑岩的接触带产出, 并多赋存于背斜两翼的层间滑脱带和褶皱顶部虚脱带内。

白音诺尔铅锌矿区内共发现工业矿体 162 个, 其总体特征可概述为矿体数量多、形态复杂、产状、厚度和品位变化大、矿体成群(或带)分布。以矿区中心地带北东向褶皱轴为界, 可将该矿床划分为南、北两个矿带(图 1), 其中南矿带有矿体 54 个, 主要矿体 1、2、3、3~4 号等; 北矿带有矿体 108 个, 主要矿体 4~8、17、18、19、19~4 号等。单个矿体大多在层间破碎带的矽卡岩内呈透镜状、鞍状和脉状产出, 多个矿体构成层面近于平行或斜交的似层状矿体。一般来讲, 矿体大多在矽卡岩中产出, 走向一般为 20~40°, 倾向南东或北西, 倾角一般在 60°左右, 长度为 100 m 到 450 m 不等, 延深在 250 m 左右, 最大倾斜延深大于 400 m。矿体厚度一般为 3~10 m。

矿区内矽卡岩大多沿花岗闪长岩与下二叠统大理岩或结晶灰岩接触带分布, 部分沿石英正长斑岩、石英斑岩与大理岩接触带产出, 少量位于侏罗纪火山岩或二叠纪浅变质砂岩与大理岩接触带(张德全

等, 1991)。外矽卡岩带相对较为发育, 矽卡岩类型有辉石矽卡岩、石榴子石矽卡岩、石榴子石-辉石矽卡岩和辉石-石榴子石矽卡岩, 其中矿床西部以石榴子石矽卡岩为主, 东部则主要是辉石矽卡岩。从岩体到大理岩, 变质交代岩具有明显的分带, 它们分别是透辉石-石榴子石矽卡岩→石榴子石-透辉石矽卡岩→透辉石矽卡岩(含退化蚀变矿物)→大理岩, 其中透辉石矽卡岩和石榴子石-透辉石矽卡岩是铅-锌矿体的直接容矿围岩(张德全等, 1991)。

矿石中主要金属矿物有闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、黄铜矿, 其次有黄铁矿、毒砂、磁铁矿。野外地质调查和室内研究结果表明, 白音诺尔铅锌矿床的形成过程大体上分为两期, 早期成矿作用与花岗闪长(斑)岩侵位活动有关, 并且沿花岗闪长(斑)岩体和大理岩接触带形成矽卡岩型铅-锌矿体, 晚期成矿作用与石英正长斑岩侵位活动有关, 并且沿石英正长斑岩体和大理岩接触带形成矽卡岩型铅-锌矿体(张德全等, 1991)。每期成矿作用又大致有 3 个不同的成矿阶段: ① 矽卡岩阶段, 形成钙铝-钙铁榴石和透辉石-次透辉石-钙铁辉石-锰钙辉石等矽卡岩矿物组合; ② 石英-硫化物阶段, 是铅锌的主要成矿阶段, 据矿物先后顺序, 分成 3 个亚阶段, 分别是早期方铅矿-闪锌矿亚阶段, 闪锌矿-方铅矿-黄铜矿亚阶段和晚期方铅矿-闪锌矿亚阶段; ③ 硫化物-硫酸盐阶段, 铅锌矿化微弱, 是银的主要成矿阶段(张德全等, 1991)。

## 2 实验样品及分析方法

### 2.1 样品采集

似斑状黑云母正长花岗岩: 样品均采自矿区北部花岗岩基, 从白音诺尔铅锌矿至西乌旗的公路旁, 3 件样品 BYN1、BY09-1 和 BY09-2 的坐标分别为: 44°29′19.2″, 118°50′14.3″; 44°29′18.4″, 118°50′15.4″; 44°29′6.6″, 118°50′10.9″。手标本上岩石呈浅肉红色, 粗粒结构, 块状构造。镜下鉴定结果表明, 黑云母正长花岗岩主要由钾长石(45%)、斜长石(20%~25%)、石英(25%~30%)和黑云母(3%~5%)组成, 具似斑状结构, 似斑晶为斜长石、钾长石和石英。斜长石似斑晶呈自形板状, 具环带构造; 钾长石似斑晶也呈自形板状, 显微条纹构造发育, 具卡式双晶; 石英似斑晶呈等轴粒状。粒径大小在 5~10 mm 之间, 约占岩石的 30%。基质主要由钾长石、石英和斜长石组成, 其中钾长石与石英常相互交生形



<http://www.kcdz.ac.cn/>

图1 白音诺尔铅锌矿床地质简图(改编自内蒙古赤峰地质矿产勘查开发院,2005<sup>①</sup>)

上侏罗统满克头鄂博组:1—流纹质熔结凝灰岩;2—安山岩;3—流纹质凝灰岩;4—凝灰质砾岩;5—流纹质凝灰熔岩;6—流纹质角砾熔岩;下二叠统黄岗梁组:7—泥质板岩;8—大理岩;9—粉砂泥质板岩。燕山期火山岩:10—安山玢岩;11—石英斑岩;12—正长斑岩;13—花岗闪长岩;14—铅锌矿体;15—砂卡岩;16—角岩;17—实测/推测断层;18—背斜轴

Fig.1 Simplified geological map of the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit (modified after Chifeng Institute of Geological and Mineral Exploration and Development of Inner Mongolia, 2005)

Upper Jurassic Manketou Obo Formation: 1—Rhyolitic ignimbrite; 2—Andesite; 3—Rhyolitic tuff; 4—Tuffaceous conglomerate; 5—Rhyolitic ignimbrite; 6—Rhyolitic breccia lava; Lower Permian Huanggangliang Formation: 7—Argillaceous slate; 8—Marble; 9—Silty-argillaceous slate; 10—Andesite porphyrite; 11—Quartz porphyry; 12—Syenite porphyry; 13—Granodiorite; 14—Pb-Zn ore body; 15—Skarn; 16—Hornfels; 17—Measured/inferred fault; 18—Anticlinal axis

① 内蒙古赤峰地质矿产勘查开发院. 2005. 内蒙古赤峰市白音诺尔铅锌矿深部及外围普查立项申请书. 内部报告.

成文象结构,斜长石含量较少,呈他形板状,矿物粒度一般小于2 mm。在阴极发光照片中(图2),BYN1号样品所含锆石颗粒一般大于100  $\mu\text{m}$ ,呈短柱状,晶形完好,环带发育,具有明显的岩浆锆石的特点,包裹的残留锆石少见。

石英斑岩:样品采自南矿带露天采坑(编号BY09-7号,坐标:北纬44°26′52.3″,东经118°53′12.7″)呈脉状产出,宽约5 m,走向近南北,产状260°/87°,岩脉的两侧为砂卡岩。镜下鉴定结果表明,岩石具斑状结构,斑晶由石英和长石构成,含量在10%左右,基质成分主要为长英质霏细物。具有一定的蚀变,主要为绢云母化和碳酸盐化。在阴极发光照片中(图2),其所含锆石颗粒一般大于100  $\mu\text{m}$ ,多数呈短柱状,少数呈长柱状,晶形较为完整,环带发育,具有明显的岩浆锆石的特点,包裹的残留锆石少见。

花岗闪长岩:共采集3件样品,其中BY09-3和BY09-5号样品均采自南矿带露天采坑,坐标分别为44°26′56.1″,118°53′9.6″;44°26′54.7″,118°53′11.1″。BY09-19号样品采自南矿带800中段9A线。镜下鉴定结果表明,花岗闪长岩具花岗结构,斜长石呈自形板状、宽板状,钾长石呈他形板状,局部呈粗大的他形晶包嵌斜长石,石英呈他形粒状充填于长石晶体之间。岩石主要由斜长石( $\geq 45\%$ )、钾长石(10%~15%)和石英(20%~25%)组成,暗色矿物黑云母和角闪石约占15%左右,均已蚀变,其中黑云母已完全被绿泥石、绿帘石和次闪石交代,残留自形叶片状晶形,角闪石也完全被次闪石交代,残留自形柱状晶形。矿物粒度以2~5 mm的中粒为主,5~10 mm的粗粒次之。在阴极发光照片中(图2),BY09-19号样品所含锆石颗粒多数大于100  $\mu\text{m}$ ,长柱状和短柱状均可见及,晶形较为完整,环带发

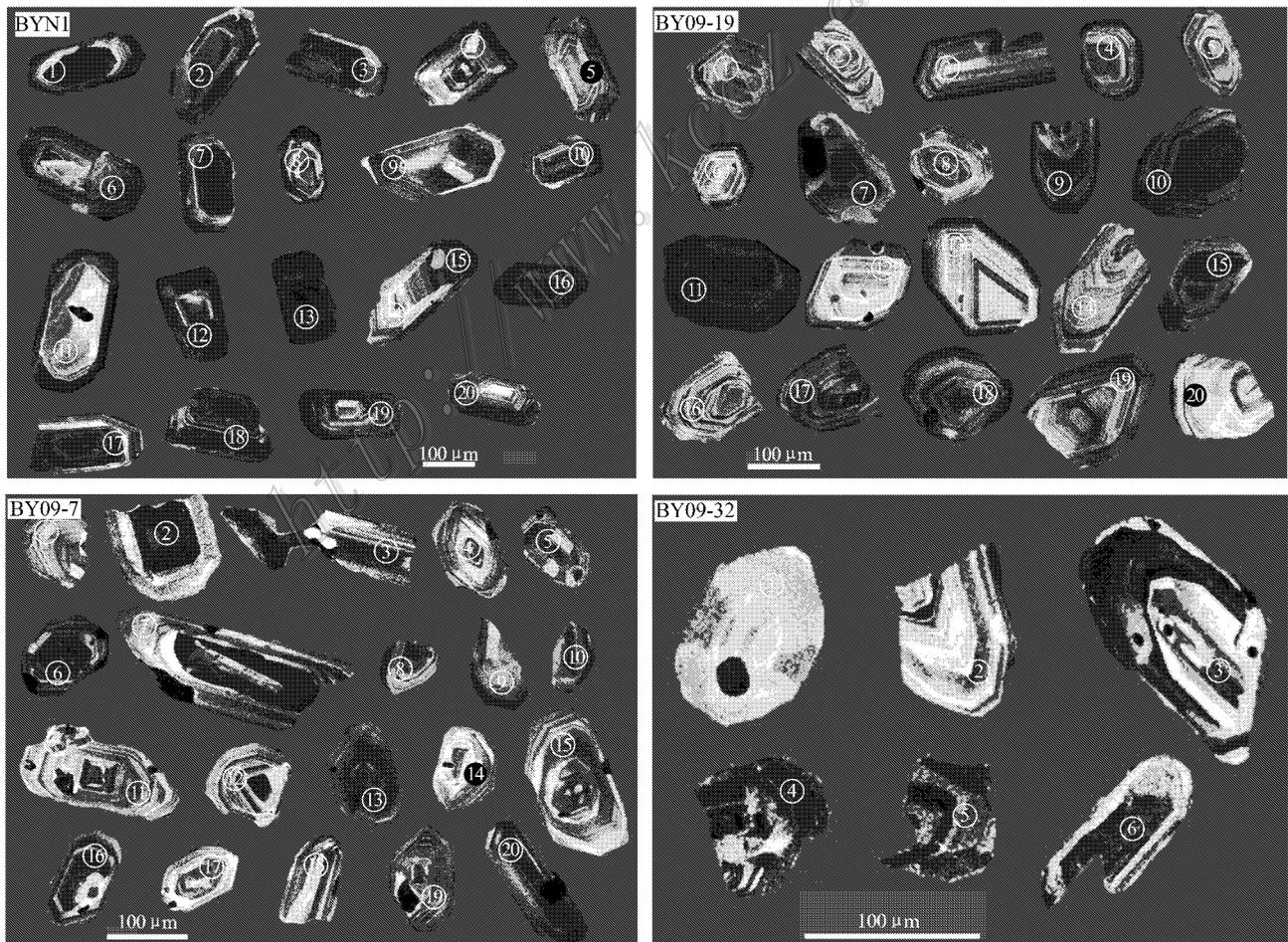


图2 白音诺尔铅锌矿区及外围侵入岩的锆石阴极发光照片

Fig. 2 CL images of zircon crystals from the intrusive rocks within and around the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit

育,具有明显的岩浆锆石的特点。锆石里面常见小的残留锆石包裹体。

安山玢岩:BY09-32号安山玢岩样品采自北矿带800中段99A线,呈脉状产出,脉宽约1.5m,明显切穿含矿矽卡岩。镜下鉴定结果表明,岩石具斑状结构,其斑晶主要为中长石和暗色矿物,含量在5%左右,基质具交织结构,主要由中长石(65%~70%)、暗色矿物(20%~25%)和少量石英(3%~5%)组成。岩石蚀变较为强烈,其中近一半的中长石被绢云母-黏土矿物和碳酸盐矿物所交代,暗色矿物几乎全部被绿泥石交代。在阴极发光照片中(图2),其所含锆石颗粒小于100 $\mu\text{m}$ ,多呈短柱状,有的晶形较为完整,有的残缺不全,环带发育程度差别较大,具有岩浆锆石的特点。在锆石里面常见小的残留锆石包裹体。

## 2.2 样品分析方法

锆石 LA-MC-ICP-MS 测年是在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成,锆石定年分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。采用单点剥蚀的方式,数据分析前用锆石 GJ-1 进行仪器调试,使之达到最优状态,锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标,U、Th 含量以锆石 M127( $w(\text{U}) 923 \times 10^{-6}$ ;  $w(\text{Th}) 439 \times 10^{-6}$ ;  $\text{Th}/\text{U} = 0.475$ , Nasdala et al., 2008)为外标进行校正。测试过程中在每测定 5~7 个样品前后重复测定 2 个锆石 GJ-1 对样品进行校正,并测量一个锆石 Plesovice,观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMSDataCal 4.3 程序(Liu et al., 2008),测量过程中绝大多数分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 1000$ ,未进行普通铅校正, $^{204}\text{Pb}$ 由离子计数器检测, $^{204}\text{Pb}$ 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响,对 $^{204}\text{Pb}$ 含量异常高的分析点在计算时剔除,锆石年龄谐和图用 Isoplot 3.0 程序获得。详细实验测试过程可参见侯可军等(2009)文献。样品分析过程中,Plesovice 标样作为未知样品的分析结果为  $(337.4 \pm 1.8) \text{Ma}$  ( $n = 6$ ,  $2\sigma$ ),对应的年龄推荐值为  $337.13 \pm 0.37(2\sigma)$  (Slama et al., 2008),两者在误差范围内完全一致。

## 3 分析结果

### 3.1 锆石测年结果

对采自矿区外围花岗岩基中的黑云母正长花岗

岩 BYN1 号样品中的 19 粒锆石进行了 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年,每粒锆石测试 1 个点,锆石中的 U、Th 含量较高,变化较大,其中  $w(\text{U})$ 为  $(365.44 \sim 1713.76) \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Th})$ 为  $(101.33 \sim 638.25) \times 10^{-6}$ (表 1),Th/U 比值为 0.24~0.55。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于  $(129.82 \sim 138.35) \text{Ma}$ ,在去掉年龄值误差较大的 5 个测点,即 9、14、15、18、19,获得的剩余 14 个点的加权平均年龄值为  $(134.8 \pm 1.2) \text{Ma}$ ,  $\text{MSWD} = 2.4$ (表 1,图 3),代表花岗岩的结晶年龄,属于早白垩世。

对采自矿区内的石英斑岩 BY09-7 号样品中的 20 粒锆石进行了 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年,每粒锆石测试 1 个点,锆石中的 U、Th 含量较高,变化较大, $w(\text{U})$ 为  $(76.27 \sim 2858.2) \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Th})$ 为  $(42.6 \sim 1361.2) \times 10^{-6}$ (表 1),Th/U 比值为 0.33~1.62。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于  $(115.20 \sim 152.01) \text{Ma}$ ,去掉年龄值误差较大的 7 个测点,3、7、8、11、12、19、20,获得的剩余 13 个点的加权平均年龄值为  $(129.2 \pm 1.4) \text{Ma}$ ,  $\text{MSWD} = 5.5$ (表 1,图 3),这个年龄代表石英斑岩的结晶年龄,属于早白垩世。

对采自矿区内的花岗闪长岩 BY09-19 号样品中的 20 粒锆石进行了 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年,每粒锆石测试 1 个点,锆石中的  $w(\text{U})$ 为  $(148.62 \sim 809.67) \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Th})$ 为  $(48.18 \sim 322.6) \times 10^{-6}$ (表 1),Th/U 比值为 0.29~0.53。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于  $(238.05 \sim 250.61) \text{Ma}$ ,去掉年龄值误差较大的 2 个测点,4、5,获得的剩余 18 个点的加权平均年龄值为  $(244.51 \pm 0.9) \text{Ma}$ ,  $\text{MSWD} = 0.85$ (表 1,图 3)这个年龄代表花岗闪长岩的结晶年龄,属于早三叠世。

对采自矿区内的安山岩脉 BY09-32 号样品中的 7 粒锆石进行了 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年,每粒锆石测试 1 个点,锆石中的 U、Th 含量变化较大, $w(\text{U})$ 为  $(123.82 \sim 2427.21) \times 10^{-6}$ ,  $w(\text{Th})$ 为  $(92.85 \sim 835.87) \times 10^{-6}$ (表 3),Th/U 比值为 0.33~1.07。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值变化于  $(135.26 \sim 1841.21) \text{Ma}$ 。因为可测的锆石颗粒较少,因此难以获得可靠的测年数据。但是根据单个锆石的测年数据,可以推测安山岩里面的锆石来源相对较为复杂,既有反映来自基底的老的锆石年龄  $(1841.21 \text{Ma})$ ,也有反映印支期事件的锆石年龄  $(233.62 \sim 246.02 \text{Ma})$ ,但是多数锆石年龄集中在燕山期,尤其是两个较为一致的早白垩世年龄数据,135.26 Ma 和

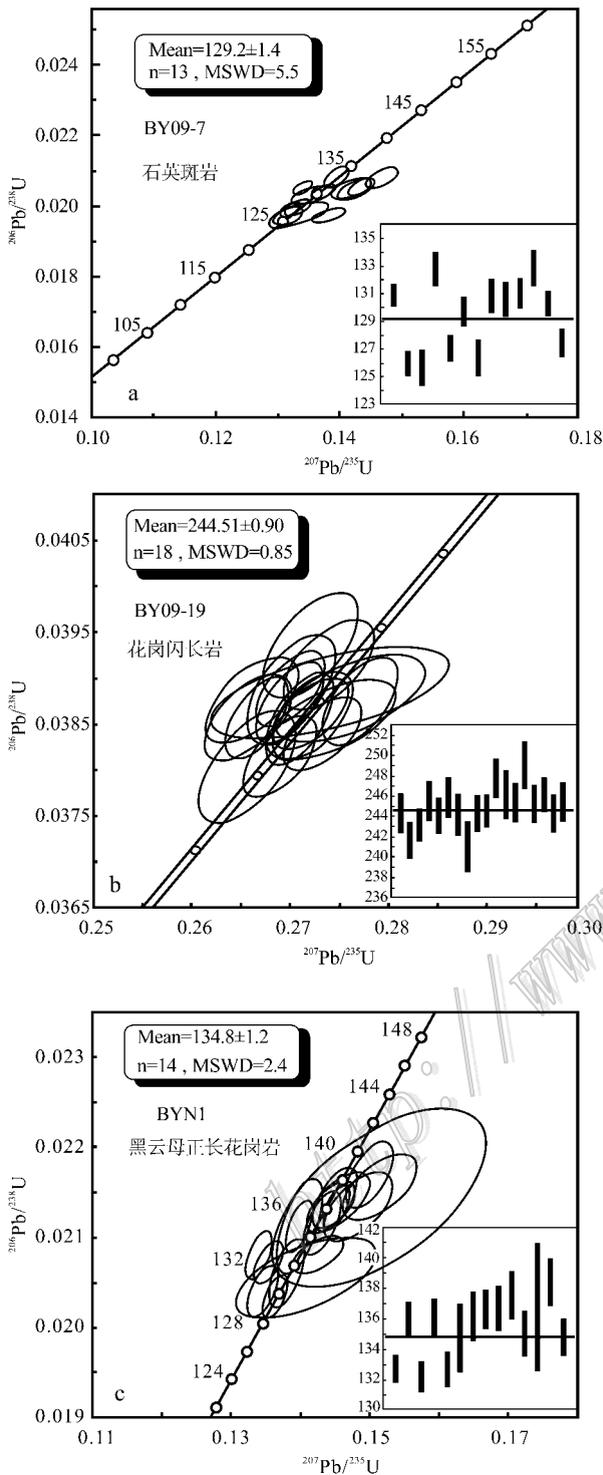


图3 白音诺尔铅锌矿区及外围侵入岩的锆石 U-Pb 一致曲线图

Fig.3 Concordia plot showing all LA- MC-ICP-MS data points for zircons from the intrusive rocks within and around the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit

135.78 Ma,与上述矿区外围花岗岩基的结晶年龄基本一致,可能表明安山岩形成于早白垩世,与区域燕山期大规模岩浆活动有关。

### 3.2 岩石地球化学特征

矿区外围花岗岩基中的黑云母正长花岗岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 变化于75.66%~77.44%之间(表2), $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为10.69%~11.72%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为4.34%~4.73%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为3.63%~3.85%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 大于 $w(\text{Na}_2\text{O})$ ;A/NKC值为0.86~0.94,均小于1,显示铝略不饱和;里特曼指数 $\sigma$ 值为1.95~2.24,属于钙碱性系列。这表明黑云母正长花岗岩为富钾铝不饱和花岗岩。稀土元素总量变化于 $(145.013 \sim 172.669) \times 10^{-6}$ 之间, $\delta\text{Eu}$ 为0.16~0.23,显示Eu强烈亏损。所有样品的稀土元素配分曲线极为相似(图4),表现为强分异的稀土元素组成模式,暗示它们具有相同的物质来源和成岩演化过程。微量元素的质量分数:Rb为 $(216 \sim 266) \times 10^{-6}$ ,Sr为 $(36.5 \sim 69.2) \times 10^{-6}$ ,Ba为 $(79.1 \sim 162) \times 10^{-6}$ ,Nb为 $(9.67 \sim 15.6) \times 10^{-6}$ ,Ta为 $(0.978 \sim 1.59) \times 10^{-6}$ ,Zr为 $(246 \sim 281) \times 10^{-6}$ ,Y为 $(22.8 \sim 33.8) \times 10^{-6}$ ,Th为 $(43.6 \sim 45.5) \times 10^{-6}$ ,Rb/Sr比值为3.84~5.92,Sr/Ba比值为0.37~0.67,Nb/Ta比值为8.87~9.89,Zr/Y比值为7.40~12.32;在微量元素蛛网图上(图5)明显富集大离子亲石元素(LILE),其中Rb、Th、K、Ce、Nd、Hf、Sm、Yb相对富集,Ba、Nb、Sr、P、Ti相对亏损。

矿区内的石英斑岩 $w(\text{SiO}_2)$ 为75.51%(表2), $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为13.22%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为5.86%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为1.04%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 远远大于 $w(\text{Na}_2\text{O})$ ,A/NKC值为1.41,大于1,显示铝过饱和。这表明石英斑岩为富钾过铝质岩石。稀土元素总量为 $146.489 \times 10^{-6}$ , $\delta\text{Eu}$ 为0.10,显示Eu强烈亏损。其稀土元素配分曲线(图4)和微量元素蛛网图(图5)与上述黑云母正长花岗岩非常相似,暗示它们之间具有一定的内在联系。

矿区内花岗闪长岩 $w(\text{SiO}_2)$ 变化于63.96%~69.60%之间(表2), $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为12.01%~14.39%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为2.02%~2.97%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为2.93%~4.33%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 大于 $w(\text{K}_2\text{O})$ ,A/NKC值为0.78~0.86,均小于1,显示铝略不饱和;里特曼指数 $\sigma$ 值为0.92~2.52,属于钙碱性系列。这表明花岗闪长岩为富钠铝不饱和岩石。稀土元素总量变化于 $(105.185 \sim 123.400) \times 10^{-6}$ , $\delta\text{Eu}$ 为0.68~

表 1 白音诺尔铅锌矿区及外围侵入岩的锆石 LA-MC-ICP-MS 测年结果

Table 1 LA-MC-ICP-MS data for zircons from intrusive rocks within and around the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit

测点	$\alpha(B) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$			Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Con.	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma
	Pb	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$						
BYN1 黑云母正长花岗岩									
1	21.58	340.90	1119.60	0.30	0.0496 ± 6.8	0.1423 ± 23.6	0.0208 ± 1.4	98%	132.74 ± 0.87
2	29.81	638.25	1619.24	0.39	0.0493 ± 2.1	0.1448 ± 12.3	0.0213 ± 1.7	99%	135.99 ± 1.05
3	11.54	248.00	643.45	0.39	0.0474 ± 3.6	0.1352 ± 13.7	0.0207 ± 1.5	97%	132.19 ± 0.98
4	12.04	246.44	564.69	0.44	0.0491 ± 6.7	0.1441 ± 22.3	0.0213 ± 1.9	99%	136.08 ± 1.18
5	16.22	264.68	1106.04	0.24	0.0468 ± 2.5	0.1338 ± 12.6	0.0208 ± 1.8	96%	132.68 ± 1.11
6	23.76	408.59	1510.81	0.27	0.0485 ± 2.8	0.1396 ± 21.5	0.0211 ± 3.5	98%	134.72 ± 2.20
7	18.33	260.67	836.50	0.31	0.0503 ± 9.0	0.1479 ± 32.5	0.0213 ± 2.5	97%	136.12 ± 1.58
8	11.46	277.17	594.77	0.47	0.0493 ± 7.5	0.1455 ± 27.2	0.0214 ± 2.0	99%	136.57 ± 1.27
9	23.93	474.51	1598.48	0.30	0.2480 ± 5.3	0.1404 ± 65.7	0.0205 ± 3.0	98%	131.12 ± 1.87
10	21.18	400.40	895.46	0.45	0.0490 ± 4.1	0.1447 ± 20.8	0.0214 ± 2.3	99%	136.61 ± 1.45
11	9.90	230.22	417.88	0.55	0.0509 ± 10.2	0.1510 ± 34.5	0.0216 ± 2.4	96%	137.47 ± 1.54
12	30.23	567.33	1713.76	0.33	0.0489 ± 2.5	0.1428 ± 17.4	0.0212 ± 2.3	99%	134.96 ± 1.48
13	7.43	101.33	365.44	0.28	0.0521 ± 32.0	0.1509 ± 100.3	0.0214 ± 6.6	95%	136.72 ± 4.14
14	16.29	309.43	972.79	0.32	0.0478 ± 3.1	0.1343 ± 14.6	0.0204 ± 1.9	98%	130.18 ± 1.19
15	11.39	198.15	836.07	0.24	0.0449 ± 6.2	0.1270 ± 21.8	0.0205 ± 1.8	92%	130.67 ± 1.13
16	10.45	153.71	582.26	0.26	0.0502 ± 7.5	0.1496 ± 22.1	0.0217 ± 2.4	97%	138.35 ± 1.52
17	25.17	530.85	1158.05	0.46	0.0480 ± 2.6	0.1395 ± 13.0	0.0211 ± 1.8	98%	134.74 ± 1.16
18	13.81	242.08	957.97	0.25	0.0486 ± 2.7	0.1361 ± 11.5	0.0203 ± 1.6	99%	129.82 ± 0.99
19	28.05	514.40	1537.27	0.33	0.0486 ± 3.1	0.1378 ± 16.7	0.0206 ± 2.5	99%	131.42 ± 1.60
BY09-7 石英斑岩									
1	23.30	658.10	772.24	0.85	0.0475 ± 2.7	0.1343 ± 10.5	0.0205 ± 1.2	97%	130.91 ± 0.78
2	60.94	1361.20	2858.20	0.48	0.0508 ± 3.8	0.1385 ± 17.8	0.0197 ± 1.3	95%	125.95 ± 0.84
3	15.65	417.84	415.07	1.01	0.0502 ± 7.3	0.1248 ± 24.0	0.0180 ± 2.5	96%	115.20 ± 1.56
4	5.78	133.17	282.00	0.47	0.0486 ± 5.3	0.1316 ± 18.0	0.0197 ± 2.0	99%	125.61 ± 1.27
5	15.68	294.59	727.77	0.40	0.0514 ± 3.9	0.1472 ± 17.0	0.0208 ± 1.9	95%	132.74 ± 1.23
6	28.18	751.03	1039.11	0.72	0.0482 ± 2.1	0.1323 ± 10.6	0.0199 ± 1.4	99%	127.05 ± 0.89
7	3.66	50.29	153.47	0.33	0.0516 ± 12.5	0.1405 ± 37.6	0.0198 ± 1.7	94%	126.46 ± 1.10
8	3.59	123.45	76.27	1.62	0.0511 ± 12.6	0.1654 ± 41.1	0.0235 ± 2.4	96%	149.87 ± 1.50
9	2.46	42.60	129.84	0.33	0.0487 ± 8.3	0.1358 ± 22.9	0.0203 ± 1.7	99%	129.64 ± 1.05
10	3.42	89.13	186.73	0.48	0.0491 ± 10.0	0.1340 ± 29.8	0.0198 ± 2.1	98%	126.32 ± 1.31
11	18.49	351.20	861.69	0.41	0.0582 ± 7.0	0.1557 ± 23.0	0.0194 ± 1.8	82%	123.78 ± 1.11
12	6.85	151.96	285.87	0.53	0.0543 ± 19.3	0.1778 ± 80.5	0.0239 ± 7.5	91%	152.01 ± 4.74
13	18.58	434.68	815.47	0.53	0.0503 ± 5.5	0.1424 ± 24.1	0.0205 ± 1.9	96%	130.83 ± 1.18
14	7.02	125.95	343.86	0.37	0.0507 ± 5.0	0.1427 ± 18.0	0.0205 ± 1.9	96%	130.54 ± 1.23
15	15.07	346.00	636.12	0.54	0.0512 ± 6.1	0.1438 ± 14.0	0.0205 ± 1.7	95%	130.98 ± 1.05
16	29.96	812.12	1163.08	0.70	0.0488 ± 2.4	0.1398 ± 13.3	0.0208 ± 2.0	99%	132.79 ± 1.28
17	18.48	429.56	838.93	0.51	0.0490 ± 3.4	0.1377 ± 12.7	0.0204 ± 1.3	99%	130.21 ± 0.84
18	10.04	230.11	452.13	0.51	0.0486 ± 4.4	0.1335 ± 14.1	0.0200 ± 1.5	99%	127.39 ± 0.97
19	8.06	155.84	408.58	0.38	0.0516 ± 4.4	0.1576 ± 14.5	0.0222 ± 1.4	95%	141.47 ± 0.88
20	12.12	253.85	416.72	0.61	0.0508 ± 5.2	0.1591 ± 25.6	0.0227 ± 2.6	96%	144.63 ± 1.63
BY09-19 花岗闪长岩									
1	11.97	135.27	328.36	0.41	0.0512 ± 3.9	0.2722 ± 27.8	0.0386 ± 3.1	99%	244.05 ± 1.94
2	15.46	184.09	383.17	0.48	0.0512 ± 3.4	0.2690 ± 24.7	0.0381 ± 2.9	99%	241.31 ± 1.81
3	12.19	136.89	370.84	0.37	0.0517 ± 4.4	0.2733 ± 26.3	0.0384 ± 2.6	98%	242.86 ± 1.63
4	10.51	97.96	328.22	0.30	0.0509 ± 3.7	0.2643 ± 28.0	0.0376 ± 2.7	99%	238.05 ± 1.70
5	19.59	216.35	534.71	0.40	0.0521 ± 3.3	0.2843 ± 24.8	0.0396 ± 2.8	98%	250.61 ± 1.74
6	8.35	78.22	235.33	0.33	0.0516 ± 6.8	0.2762 ± 49.6	0.0388 ± 3.1	99%	245.26 ± 1.95
7	16.02	206.34	420.96	0.49	0.0516 ± 6.7	0.2742 ± 43.1	0.0385 ± 2.9	99%	243.80 ± 1.78
8	10.54	112.88	387.28	0.29	0.0507 ± 7.4	0.2740 ± 79.6	0.0388 ± 3.3	99%	245.62 ± 2.03
9	26.64	322.60	809.67	0.40	0.0510 ± 1.9	0.2710 ± 22.8	0.0386 ± 3.3	99%	243.87 ± 2.05

续表 1  
Cont. Table 1

测点	$\sum(BY)\mu g \cdot g^{-1}$			Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	Con.	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄/Ma
	Pb	$^{232}Th$	$^{238}U$						
BY09-19 花岗闪长岩									
10	11.93	114.77	347.76	0.33	$0.0507 \pm 3.7$	$0.2657 \pm 32.2$	$0.0380 \pm 4.0$	99%	$240.61 \pm 2.50$
11	11.99	116.34	408.09	0.29	$0.0502 \pm 2.6$	$0.2668 \pm 22.3$	$0.0386 \pm 2.9$	98%	$243.95 \pm 1.79$
12	16.83	199.49	425.33	0.47	$0.0511 \pm 2.9$	$0.2721 \pm 25.2$	$0.0386 \pm 2.5$	99%	$244.22 \pm 1.58$
13	19.15	202.70	610.77	0.33	$0.0507 \pm 3.1$	$0.2739 \pm 30.3$	$0.0391 \pm 3.2$	99%	$247.56 \pm 1.98$
14	7.19	62.81	215.75	0.29	$0.0505 \pm 3.5$	$0.2701 \pm 29.3$	$0.0389 \pm 3.9$	98%	$245.87 \pm 2.42$
15	17.62	199.18	404.61	0.49	$0.0519 \pm 2.9$	$0.2771 \pm 25.0$	$0.0387 \pm 3.1$	98%	$245.06 \pm 1.95$
16	9.84	100.31	272.25	0.37	$0.0501 \pm 3.1$	$0.2722 \pm 31.6$	$0.0394 \pm 3.8$	98%	$248.84 \pm 2.35$
17	22.87	300.82	563.30	0.53	$0.0506 \pm 2.3$	$0.2700 \pm 22.4$	$0.0387 \pm 3.0$	99%	$244.91 \pm 1.85$
18	10.66	113.51	320.93	0.35	$0.0504 \pm 2.8$	$0.2700 \pm 22.9$	$0.0389 \pm 2.7$	98%	$245.87 \pm 1.68$
19	6.10	62.37	207.03	0.30	$0.0499 \pm 3.6$	$0.2656 \pm 28.4$	$0.0386 \pm 3.1$	98%	$243.95 \pm 1.92$
20	5.36	48.18	148.62	0.32	$0.0498 \pm 4.7$	$0.2661 \pm 31.1$	$0.0388 \pm 3.1$	97%	$245.13 \pm 1.92$
BY09-32 安山玢岩									
1	8.47	92.85	198.51	0.47	$0.0493 \pm 3.8$	$0.2643 \pm 32.4$	$0.0389 \pm 4.1$	96%	$246.02 \pm 2.57$
2	6.69	93.70	123.82	0.76	$0.0527 \pm 14.4$	$0.2673 \pm 91.3$	$0.0367 \pm 4.3$	96%	$232.62 \pm 2.65$
3	10.91	314.09	293.68	1.07	$0.0480 \pm 5.1$	$0.1667 \pm 32.0$	$0.0253 \pm 4.5$	97%	$160.81 \pm 2.80$
4	141.56	428.62	1243.41	0.34	$0.2180 \pm 28.7$	$0.8357 \pm 108.0$	$0.0279 \pm 2.3$	-11%	$177.68 \pm 1.46$
5	95.32	93.22	281.33	0.33	$0.1187 \pm 2.8$	$5.4077 \pm 593.4$	$0.3306 \pm 37.8$	97%	$1841.21 \pm 18.32$
6	41.64	835.87	2427.21	0.34	$0.0496 \pm 1.6$	$0.1450 \pm 15.6$	$0.0212 \pm 2.2$	98%	$135.26 \pm 1.40$
7	26.47	621.99	1236.66	0.50	$0.0500 \pm 2.2$	$0.1469 \pm 14.0$	$0.0213 \pm 1.8$	97%	$135.78 \pm 1.14$

注: 误差  $1\sigma$ 。图 4 白音诺尔铅锌矿区及外围侵入岩的稀土元素  
配分模式图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of intrusive rocks within and around the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit

0.93, 显示 Eu 略微亏损。所有样品的稀土元素配分曲线极为相似(图 4), 暗示它们具有相同的物质来源和成岩演化过程。微量元素的质量分数: Rb 为  $(103 \sim 145) \times 10^{-6}$ , Sr 为  $(245 \sim 464) \times 10^{-6}$ , Ba 为  $(376 \sim 668) \times 10^{-6}$ , Nb 为  $(5.99 \sim 8.45) \times 10^{-6}$ , Ta 为  $(0.353 \sim 0.419) \times 10^{-6}$ , Zr 为  $(99.9 \sim 329) \times 10^{-6}$ ,

图 5 白音诺尔铅锌矿区及外围侵入岩的原始地幔标准化  
微量元素蛛网图(据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram of intrusive rocks within and around the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit (after Sun et al., 1989)

Y 为  $(17.2 \sim 23.1) \times 10^{-6}$ , Th 为  $(8.84 \sim 9.85) \times 10^{-6}$ , Rb/Sr 比值为  $0.27 \sim 0.59$ , Sr/Ba 比值为  $0.58 \sim 0.75$ , Nb/Ta 比值为  $16.97 \sim 20.17$ , Zr/Y 比值为  $5.28 \sim 14.37$ 。在微量元素蛛网图上(图 5), 明显富集

表 2 白音诺尔铅锌矿区及外围侵入岩的主元素(%)、微量和稀土元素( $\mu\text{g/g}$ )分析结果表Table 2 Major elements(%), REE and trace elements( $\mu\text{g/g}$ ) analyses of intrusive rocks within and around the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit

	黑云母正长花岗岩			花岗闪长岩			石英斑岩	安山玢岩
	BYN1	BY09-1	BY09-2	BY09-3	BY09-5	BY09-19	BY09-7	BY09-32
SiO <sub>2</sub>	75.66	77.44	77.2	66.03	69.6	63.96	75.51	52.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.72	10.69	11.34	13.43	12.01	14.39	13.22	15.54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.77	0.94	0.6	1.91	1.57	1.23	0.67	3.35
FeO	0.75	0.55	0.35	2.35	2.3	2.85	0.30	5.40
MgO	0.15	0.11	0.10	2.90	1.90	2.99	0.18	3.71
CaO	0.71	0.79	0.59	3.15	4.56	4.17	0.70	5.45
Na <sub>2</sub> O	3.82	3.85	3.63	4.09	2.93	4.33	1.04	3.65
K <sub>2</sub> O	4.73	4.34	4.58	2.97	2.02	2.94	5.86	2.57
MnO	0.036	0.037	0.025	0.14	0.13	0.14	0.035	0.14
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.11	0.078	0.57	0.54	0.66	0.054	1.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.025	0.015	0.16	0.14	0.17	0.013	0.30
LOI	1.15	0.75	1.16	1.85	1.85	1.68	2.11	6.04
总和	99.656	99.632	99.668	99.55	99.55	99.51	99.692	99.44
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	8.55	8.19	8.21	7.06	4.95	7.27	6.9	6.22
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O*	1.24	1.13	1.26	0.73	0.69	0.68	5.63	0.70
A/CNK*	0.92	0.86	0.94	0.86	0.78	0.80	1.41	0.83
$\sigma^*$	2.24	1.95	1.97	2.16	0.92	2.52	1.46	4.19
La	36.7	37	31.7	23.8	22.6	20.8	28.2	21.6
Ce	69.1	72.8	62.6	49	45.6	42.2	57.9	42.9
Pr	7.99	8.28	6.89	5.95	5.45	5.29	7.21	5.56
Nd	28.1	29.3	24.2	23.5	21.5	20.6	26.1	22.9
Sm	5.2	5.44	4.02	4.85	4.05	3.83	5.43	4.29
Eu	0.36	0.25	0.233	1	0.973	1.09	0.172	1.69
Gd	4.44	4.22	3.55	4.03	3.58	3.28	4.7	4.31
Tb	0.807	0.775	0.621	0.724	0.627	0.52	0.916	0.699
Dy	5.31	5.08	3.97	4.12	3.91	3.06	5.87	4.57
Ho	1.04	0.998	0.746	0.815	0.729	0.596	1.17	0.835
Er	3.62	3.36	2.41	2.55	2.35	1.73	3.68	2.34
Tm	0.655	0.584	0.49	0.344	0.347	0.257	0.619	0.353
Yb	4.38	3.98	3.04	2.36	2.22	1.66	3.89	2.33
Lu	0.696	0.602	0.543	0.357	0.367	0.272	0.632	0.378
$\Sigma$ REE	168.398	172.669	145.013	123.4	114.303	105.185	146.489	114.755
(La/Yb) $\times 10^3$	5.52	6.12	6.87	6.64	6.71	8.25	4.78	6.11
$\delta\text{Eu}^*$	0.23	0.16	0.19	0.68	0.77	0.93	0.10	1.20
(Dy/Lu) $\times 10^3$	0.76	0.84	0.73	1.15	1.06	1.12	0.92	1.20
Hf	11.3	9.1	10.7	4.07	8.12	3.54	12.5	8.24
Ta	1.59	0.978	1.41	0.378	0.419	0.353	0.815	0.241
Pb	30.3	30.8	74.8	32.7	43.8	77.4	19.8	65.8
Bi	2.19	0.488	0.445	0.211	0.257	0.125	0.189	0.253
Zr	250	246	281	122	329	99.9	366	377
Nb	15.6	9.67	12.5	6.63	8.45	5.99	13	5.77
Mo	1.05	1.57	0.84	0.998	1.69	0.702	0.497	0.516
Cd	0.373	0.335	0.939	0.352	0.528	0.492	0.887	0.691
In	0.03	0.049	0.024	0.067	0.1	0.048	0.064	0.058
Sn	4.75	5.28	3.95	7.46	14	4.11	6.24	2.35
Sb	0.121	0.229	0.256	1.17	1.57	1.66	0.412	0.872
Cs	6.01	6	3.51	27.8	8.82	9.73	10.8	12.5
Ba	162	79.1	97.5	426	376	668	165	776
W	3.48	0.885	1.72	1.95	2.32	1.26	1.05	0.784
Re	0.003	0.001	0.005	0.004	0.006	0.002	0.001	0.001
Tl	1.48	0.876	1.43	2.58	1.75	2.93	2.43	0.679
Th	43.6	45.5	44.7	9.75	9.85	8.84	18.6	4.28
U	5.87	5.61	4.71	3.07	2.67	2.8	3.97	1.57
Rb	266	216	216	145	103	124	294	78
Sr	69.2	53.1	36.5	245	283	464	35.5	639
Y	33.8	31.7	22.8	23.1	22.9	17.2	35.4	23.3

注: \* 单位为 1。

表3 白音诺尔铅锌矿区及外围侵入岩的 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of intrusive rocks within and around the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit

样品编号	岩石名称	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\epsilon_{\text{Sr}}(T)$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\sigma$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	$T_{\text{DM}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$
BYNI	黑云母正长花岗岩	11.1241	0.726298	11	0.70511	10.91	0.1119	0.512622	10	-0.431	793	1.14	-0.31
BY09-1	黑云母正长花岗岩	11.7719	0.727931	12	0.70551	16.58	0.1122	0.51255	9	-0.430	904	-0.27	-1.72
BY09-2	黑云母正长花岗岩	17.1257	0.737718	9	0.70510	10.76	0.1004	0.512611	7	-0.490	728	1.12	-0.53
BY09-3	花岗闪长岩	1.7127	0.710106	16	0.70416	-0.73	0.1248	0.512654	5	-0.366	853	2.55	0.31
BY09-5	花岗闪长岩	1.0533	0.709223	9	0.70557	19.23	0.1139	0.512557	8	-0.421	908	1.00	-1.58
BY09-19	花岗闪长岩	0.7734	0.706837	14	0.70415	-0.86	0.1124	0.512601	7	-0.429	829	1.91	-0.72
BY09-7	石英斑岩	23.9666	0.751438	11	0.70750	44.68	0.1258	0.512588	7	-0.360	977	0.19	-0.98
BY09-32	安山玢岩	0.3532	0.706276	9	0.70560	17.85	0.1133	0.512418	7	-0.424	1113	-2.86	-4.29

大离子亲石元素(LILE),其中 Rb、Th、K、Ce、Nd、Sm、Yb 相对富集, Ba、Nb、Ti 相对亏损。与黑云母正长花岗岩相比,花岗闪长岩明显具有富 Sr、Ba,贫 Rb、Nb、Ta、Th, Nb/Ta 比值高和 Rb/Sr 比值低的特点,暗示二者之间在成岩物质来源上具有明显的差别。

矿区内安山玢岩的  $w(\text{SiO}_2)$  为 52.23% (表 2),  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 15.54%,  $w(\text{K}_2\text{O})$  为 2.57%,  $w(\text{Na}_2\text{O})$  为 3.65%,  $w(\text{Na}_2\text{O})$  大于  $w(\text{K}_2\text{O})$ , A/NKC 值为 0.83, 小于 1, 显示铝略不饱和。这表明安山玢岩为富钠铝不饱和岩石。稀土元素总量为  $114.755 \times 10^{-6}$ ,  $\delta\text{Eu}$  为 1.20, 显示 Eu 略微富集。在微量元素蛛网图上(图 5), 富集大离子亲石元素(LILE), 其中 Ba、K、Ce、Sr、Zr、Yb 相对富集, Rb、Th、Nb、Ta、Nd、Ti 相对亏损。

Sr 同位素计算结果表明, 矿区外围花岗岩基中的黑云母正长花岗岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值变化于 0.70510~0.70551 之间(表 3), 极差 0.00041, 变化范围较小; 矿区内的石英斑岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值为 0.70750, 矿区内花岗闪长岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值变化于 0.70415~0.70557 (表 3), 极差 0.00142, 变化范围较小; 矿区内安山玢岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值为 0.70560。

根据 Sm-Nd 同位素分析(表 3), 在单阶段模式下, 黑云母正长花岗岩的  $T_{\text{DM}}$  值变化范围为 728~904 Ma, 石英斑岩的  $T_{\text{DM}}$  值为 977 Ma, 花岗闪长岩的  $T_{\text{DM}}$  值变化范围为 829~908 Ma, 安山玢岩的  $T_{\text{DM}}$  值为 1113 Ma。上述岩石的  $T_{\text{DM}}$  值总体比较接近, 与其实际侵位年龄差别较大, 且所有  $T_{\text{DM}}$  值均大于岩体实际形成年龄。上述样品的  $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$  值位于 -0.360~-0.490 之间, 说明这些岩石的 Sm/Nd 分异不太明显, 可以认为岩石中的 Sm-Nd 同位素体系较好地记录了其原岩的特征, 这也为探讨本区花岗

岩类的成因提供了保证。

矿区外围花岗岩基中的黑云母正长花岗岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(134 \text{ Ma})$  值变化范围为 -0.27~+1.14, 石英斑岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(129 \text{ Ma})$  值为 +0.19, 花岗闪长岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(244 \text{ Ma})$  值变化范围为 +1.00~+2.55, 安山玢岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(135 \text{ Ma})$  值为 -2.86。

为了便于对比, 用 130 Ma 来计算这些岩石的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值和  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值。在  $\epsilon_{\text{Nd}}(130 \text{ Ma})$  ( $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  130 Ma) 图上(图 6), 可以看出, 花岗闪长岩与黑云母正长花岗岩和石英斑岩的投点比较接近, 而与安山玢岩相距较远, 这说明花岗闪长岩与黑云母正长花岗岩和石英斑岩可能具有相同或者相似的源区。

## 4 讨论与结论

前人曾在白音诺尔铅锌矿开展了同位素年代学测定工作, 并获得花岗闪长(斑)岩和矿区火山岩的

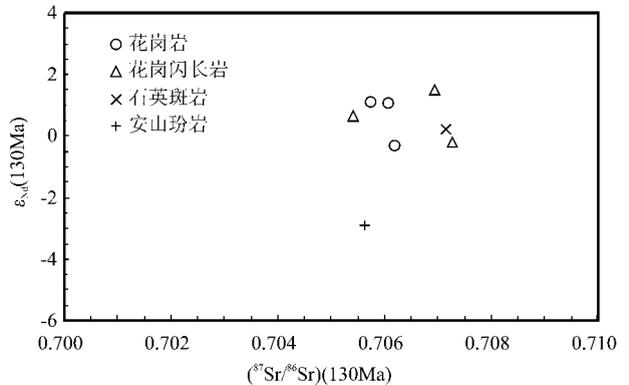


图 6 白音诺尔铅锌矿区及外围侵入岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(130 \text{ Ma})$  ( $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  130 Ma) 图解

Fig.6  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs.  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  diagram showing isotopic features of intrusive rocks within and around the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit

Rb-Sr 等时线年龄分别为 171 Ma 和 160 Ma(张德全等,1991)。本文 LA-MC-ICP-MS 锆石测年结果表明,矿区外围花岗岩岩基的形成年龄为 $(134.8 \pm 1.2) \text{Ma}$ , 区内花岗闪长岩的形成年龄为 $(244.5 \pm 0.9) \text{Ma}$ , 石英斑岩为 $(129.2 \pm 1.4) \text{Ma}$ 。从测年结果来看, 矿区及外围主要岩浆活动虽然仍然是以燕山期为主, 但是年龄值要比前人的结果小了仅 30 Ma。更为重要的是, 本次测年结果新发现了印支期侵位的花岗闪长岩。由于花岗闪长岩与成矿关系密切, 铅锌矿体主要产于花岗闪长岩与碳酸盐岩的接触带, 只有很少部分铅锌矿体沿正长斑岩与碳酸盐的接触带产出(图1), 因此, 认为白音诺尔铅锌矿的形成主要与花岗闪长岩有关, 而花岗闪长岩的年龄可以近似代表白音诺尔铅锌矿的形成时代。这说明, 白音诺尔铅锌矿主要形成于印支早期, 而不是前人认为的燕山早期(张德全等,1991;赵一鸣等,1997)。当然, 受燕山期岩浆活动的影响, 白音诺尔部分铅锌矿的形成也确实与燕山期脉岩关系密切。

白音诺尔铅锌矿与成矿有关的花岗闪长岩成岩年代学的精确测定, 为探讨本区金属矿床成矿规律提供了新的思路。众所周知, 大兴安岭地区燕山期岩浆活动十分强烈, 形成了大量的火山岩与侵入岩, 以及与其有关的众多的金属矿床(张炯飞等,2002)。可能也正是由于本区燕山期岩浆活动强烈, 将那些形成于燕山期以前的矿床改造, 从而造成燕山期以前的成矿地质事件被掩盖。因此, 白音诺尔铅锌矿与成矿有关的印支期花岗闪长岩的形成时代的确定, 为在本区大规模燕山期成矿事件当中鉴别出一些更早的成矿事件提供了实例。关于大兴安岭地区印支期成矿事件, 以前还鲜有报道, 近年来, 张连昌等(2010)在车户沟斑岩型钼矿床获得的岩体锆石 U-Pb 年龄和矿石中辉钼矿 Re-Os 年龄均为 245 Ma, 花岗斑岩锆石 SHRIMP 测年结果为 $(245 \pm 2.7) \text{Ma}$ , 笔者在金厂沟梁金矿伴生的钼矿体中获得的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 $(244.7 \pm 2.5) \text{Ma}$ (待发表数据)。因此, 白音诺尔铅锌矿与成矿有关的花岗闪长岩的锆石测年结果表明, 大兴安岭地区印支期成矿似乎不应该是一个孤立的地质事件, 这已经在不少学者当中形成了共识(曾庆栋等,2009)。加强野外地质调查与室内的精确测年工作, 有望识别出更多的、更早的成矿事件, 从而有利于更加深化对大兴安岭地区区域成矿规律的认识, 丰富该区成矿规律的研究内容。

志 谢 野外地质工作得到了内蒙古白音诺尔铅锌矿于峰副总经理和魏良民工程师, 以及赤峰市国土资源局张跃副局长和付国立科长的大力支持与协助, 在此深表谢意。

## References

- Chen Y Q, Li C S and Zong D K. 2002. Mineral exploration type and productive exploration in Baiyinnuoer lead-zinc mine [J]. *Nonferrous Mines*, 31(3): 16-18 (in Chinese with English abstract).
- Hou K J, Li Y H and Tian Y Y. 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).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q and Wang D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 51: 537-571.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Mattinson J M, Corfu F, Dörr W, Kamo S L, Kennedy A K, Kronz A, Reiners P W, Frei D, Kosler J, Wan Y, Götze J, Höger T, Kröner A and Valley J. 2008. Zircon M257-a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32: 247-265.
- Niu S Y, Sun A Q, Guo L J, Wang B D, Hu H B and Liu J M. 2008. Ore-control structures and prospecting for the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit in the Da Hinggan Range [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 72-80 (in Chinese with English abstract).
- Sláma J, Kosler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hanchar J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N and Whitehouse M J. 2008. Plesovice zircon-A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 249: 1-35.
- SUN S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 42: 313-345.
- Zeng Q D, Liu J M, Jia C S, Wan Z M, Yu C M, Ye J and Liu H T. 2007a. Sedimentary exhalative origin of the Baiyinnuoer zinc-lead deposit, Chifeng, Inner Mongolia: Geological and sulfur isotope evidence [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(4): 659-667 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Q D, Liu J M, Wan Z M, Yu C M, Ye J and Liu H T. 2007b. Structural controls and exploration targets of the Baiyinnuoer zinc-lead deposit, Chifeng, Inner Mongolia [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(4): 430-434 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Q D, Liu J M, Zhang Z L, Qin F, Chen W J, Zhang R B, Yu C M and Ye J. 2009. Ore-forming time of the Jiguanshan porphyry molybdenum deposit, northern margin of North China Craton and the Indosinian mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 393-398 (in Chinese with English abstract).

- Zhang D Q and Bao X W. 1990. A study on the petrology, geochemistry and genesis of the Bayan Nur intermediate-acidic volcano-plutonic complex in eastern Inner Mongolia [ J ]. Geological Review, 36(4): 289-297 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang D Q, Lei Y F, Luo T Y, Bao X P and Wang S L. 1991. Geological characteristics and metallogeny of the Baiyinnuo lead-zinc deposit, Inner Mongolia [ J ]. Mineral Deposits, 10(3): 204-216 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang J F, Zhu Q, Wu G, Shao J, Zhu H C and Jin C Z. 2002. On metallogenetic epoch of hydrothermal deposits in Da Hinggan area [ J ]. Mineral Deposits, 21(Supp. ): 309-311 ( in Chinese ).
- Zhang L C, Wu H Y, Xiang P, Zhang X J, Chen Z G and Wan B. 2010. Ore-forming processes and mineralization of complex tectonic system during the Mesozoic: A case from Xilamulun Cu-Mo metallogenic belt [ J ]. Acta Petrologica Sinica, 26(5): 1351-1362 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Y M and Zhang D Q. 1997. Metallogeny and prospective evaluation of copper-polymetallic deposits in the Da Hinggan mountains and its adjacent regions [ M ]. Beijing: Seismological Press. 1-318 ( in Chinese ).
- 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.
- 牛树银, 孙爱群, 郭利军, 王宝德, 胡华斌, 刘建明. 2008. 大兴安岭白音诺尔铅锌矿控矿构造研究与找矿预测 [ J ]. 大地构造与成矿学, 32(1): 72-80.
- 曾庆栋, 刘建明, 贾长顺, 万志民, 于昌明, 叶杰, 刘红涛. 2007. 内蒙古赤峰市白音诺尔铅锌矿沉积喷流成因: 地质和硫同位素证据 [ J ]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(4): 659-667.
- 曾庆栋, 刘建明, 万志民, 于昌明, 叶杰, 刘红涛. 2007b. 内蒙古赤峰市白音诺尔铅锌矿床构造控制与找矿方向 [ J ]. 大地构造与成矿学, 31(4): 430-434.
- 曾庆栋, 刘建明, 张作伦, 覃锋, 陈伟军, 张瑞斌, 于昌明, 叶杰. 2009. 华北克拉通北缘鸡冠山斑岩钼矿床成矿年代及印支期成矿事件 [ J ]. 岩石学报, 25(2): 393-398.
- 张德全, 鲍修文. 1990. 内蒙古白音诺中酸性火山-深成杂岩体的岩石学、地球化学与成因研究 [ J ]. 地质论评, 36(4): 289-297.
- 张德全, 雷蕴芬, 罗太阳, 鲍修坡, 王胜利. 1991. 内蒙古白音诺尔铅锌矿床地质特征及成矿作用 [ J ]. 矿床地质, 10(3): 204-216.
- 张炯飞, 朱群, 武广, 邵军, 祝宏臣, 金成洙. 2002. 大兴安岭热液矿床成矿时代 [ J ]. 矿床地质, 21(增刊): 309-311.
- 张连昌, 吴华英, 相鹏, 张晓静, 陈志广, 万博. 2010. 中生代复杂构造体系的成矿过程与成矿作用——以华北大陆北缘西拉木伦钼铜多金属成矿带为例 [ J ]. 岩石学报, 26(5): 1351-1362.
- 赵一鸣, 张德全. 1997. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价 [ M ]. 北京: 地震出版社. 1-318.

#### 附中文参考文献

- 陈玉清, 李长生, 宗德奎. 2002. 白音诺尔铅锌矿勘探类型及生产探矿 [ J ]. 有色矿山, 31(3): 16-18.

<http://www.kcwg.com>