

# 西拉木伦河北岸敖仑花斑岩型钼矿含矿岩体

杨永强<sup>1</sup>, 定立<sup>1,2</sup>, 翟德高<sup>1,2</sup>, 王建平<sup>2</sup>, 刘家军<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

**摘要:** 内蒙古敖仑花钼矿床位于大兴安岭成矿带中南段, 是西拉木伦河北岸一个典型的斑岩型钼矿床。为了精确厘定该矿床含矿岩体的成岩时代, 进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究, 结合花岗岩中锆石的微量元素特征对该矿床成矿岩体物质来源进行了深入的探讨。花岗斑岩锆石 LA-ICP-MS 年代学研究表明花岗斑岩的结晶年龄为  $135.0 \pm 1.0$  Ma, 为燕山期大规模中酸性岩浆活动的产物。该岩体锆石 Th/U 比值大于 0.1, 具明显的 Ce 正异常 ( $Ce^*$  为 1.72~188.71) 和 Eu 负异常 ( $Eu^*$  为 0.05~0.57), 轻稀土亏损, 重稀土富集, La 和 Pr 含量很低, 而 Ce 正异常, 显示为壳源岩浆锆石的特征。纵观矿床地质特征、成岩时代和区域构造演化, 认为敖仑花钼矿床形成于大兴安岭成矿带 140 Ma 左右的锡多金属成矿高峰期, 矿床形成于由挤压造山向碰撞伸展过渡阶段的构造背景。通过与西拉木伦河北岸新发现的钼矿床对比分析, 认为天山—林西为重要的钼成矿带, 这对提高该类矿床的理论研究水平和指导隐伏金属矿床的找矿勘查工作均具有重要意义。

**关键词:** 斑岩型矿床; 成矿岩体; 锆石; 微量元素; 敖仑花钼矿; 成矿预测; 矿床。

中图分类号: P618; P597.3

文章编号: 1000-2383(2012)06-1291-14

收稿日期: 2012-07-10

## Metallogenic Granitoid of Aolunhua Mo Deposit at North Bank of Xilamulun River

YANG Yong-qiang<sup>1</sup>, DING Li<sup>1,2</sup>, ZHAI De-gao<sup>1,2</sup>, WANG Jian-ping<sup>2</sup>, LIU Jia-jun<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract:** The Aolunhua Mo deposit is a typical porphyry deposit, which is located in middle southern section of the Da Hinggan metallogenic belt. In order to determinate the petrogenetic ages of the deposit, we focus our study on granite zircons LA-ICP-MS. Combined with the trace element geochemistry in granites zircons, we discuss in-depth the ore-forming rock's material sources of the deposit. The granite zircons LA-ICP-MS analysis shows that the crystallization age of the granite is  $135.0 \pm 1.0$  Ma, indicating that the granite related with mineralization resulted from magmatism in Early Cretaceous period. The Th/U ratios of the ore-forming rock is greater than 0.1 with a significant positive Ce anomaly ( $Ce^* = 1.72 \sim 188.71$ ) and negative Eu anomalies ( $Eu^* = 0.05 \sim 0.57$ ). It can be concluded that crust-derived magmatic zircon is characterized by poor LREE, rich HREE, low La, Pr content and positive Ce anomaly. Combined with ore deposit geology and mineralization epoch as well as regional tectonic evolution, we draw a conclusion that formation of the Aolunhua Mo deposit is in the peak metallogenic epoch as 140 Ma in the Da Hinggan region. The tectonic settings of the deposit are in the transition period from lithosphere compression to extension. We think that the Tianshan-Linxi is a crustal type section, it has an important role for research this area. At the same time, we contrast some newly discovered Mo deposits along north bank of Xilamulun River, and find that Tianshan-Linxi is an important Mo ore-forming belt, which facilitates the understanding of regional controlling tectonics and prospecting of the ore deposits.

**Key words:** porphyry type deposit; metallogenic granitoids; zircons; trace elements; Aolunhua Mo deposit; ore prospecting; ore deposits.

## 0 引言

大兴安岭南段是我国北方极其重要的 Ag、Pb、Zn、Mo、Sn、Fe、Cu 等多金属矿集区,已发现有大井 Cu-Ag-Sn-Pb-Zn 矿床、拜仁达坝 Pb-Zn-Ag 矿床、黄岗梁 Fe-Sn 矿床、白音诺尔 Pb-Zn 矿床(赵一鸣, 1997;王莉娟等, 2001;刘建明等, 2004;郭利军等, 2009;刘家军等, 2010;周振华等, 2011)等大型一超大型矿床.关于该区域成矿系列、区域成矿特征、成岩、成矿动力学背景等前人已进行了探讨(吕志成等, 2000;王京彬等, 2000;Mao *et al.*, 2003;刘建明等, 2004;薛怀民等, 2010;张梅等, 2011).随着西拉木伦河南岸 Mo 多金属成矿带的发现(孙兴国等, 2008),该带引起了人们的重视.但北岸的成矿规律研究相对较少(夏学惠等, 2002).本文研究的敖仑花钼矿床是西拉木伦河深大断裂北侧少见的以钼为主成矿元素的斑岩型矿床,对其矿床地质、成岩年代学及其地球化学特征的研究,对区域内多金属矿床的成矿机制的认识具有重要价值.因而本文选择与敖仑花钼矿成矿关系密切的花岗斑岩进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和微量元素特征研究,结合花岗斑岩常量及微量元素特征,对成岩时代、成矿动力学背景及区域成矿作用进行了深入研究.

在空间上,沿西拉木伦河断裂两侧出现钼铜矿床集中区(曾庆栋和刘建明, 2010).南岸的矿床可分为 3 期,其对应的时间与构造背景分别为 250~220 Ma 的后碰撞造山作用,180~145 Ma 的构造体制转折和 140~120 Ma 的岩石圈大规模减薄作用(张连昌等, 2009).而北岸的成岩时间集中在 140~130 Ma,在林西新近发现的哈什土斑岩型钼矿,其成矿年龄为  $148.8 \pm 1.6$  Ma(张可等, 2012);林西另一新发现的边家斑岩型钼锡矿,其含矿的石英斑岩的成岩年龄为 140 Ma(位置见图 1),结合敖仑花钼铜矿床本文所测年龄和已发表的文献(马星华等, 2009;舒启海等, 2009),表明林西一天山斑岩型钼矿床带是西拉木伦河断裂北岸在伸展背景时成矿高峰期的重要成矿带,可能是岩石圈大规模减薄的环境.

## 1 区域地质背景

大兴安岭造山带中南段位于西伯利亚板块与华北板块碰撞结合地带(内蒙古自治区地质矿产局, 1991),是我国北方 Cu、Sn、Mo 等多金属成矿带的集

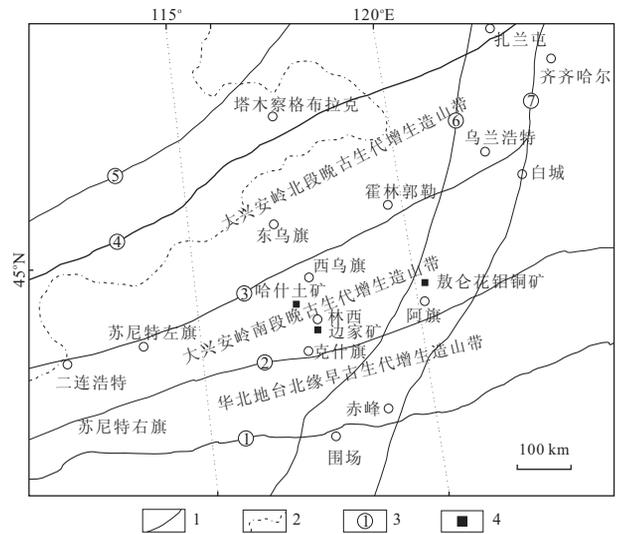


图 1 大兴安岭南段及邻区构造简图(据刘建明等, 2004 绘改)  
Fig. 1 Simplified tectonic map of the southern Da Hinggan Mountains and their adjacent area

1. 主要断裂; 2. 国界; 3. 断裂编号; 4. 斑岩型矿床; ①华北地台北缘深断裂; ②西拉木伦河断裂; ③二连-贺根山深断裂; ④乌怒尔鄂伦春断裂; ⑤德尔布干断裂; ⑥大兴安岭主脊断裂; ⑦嫩江断裂

中区域(图 1).敖仑花斑岩铜钼矿床位于内蒙古阿鲁科尔沁旗和扎鲁特旗交界处,地理坐标为东经  $120^{\circ}12'00'' \sim 120^{\circ}15'30''$ ,北纬  $44^{\circ}31'00'' \sim 44^{\circ}34'00''$ .敖仑花矿床所处兴蒙造山带是中亚造山带的东段部分,记录了古生代以来西伯利亚地台和华北克拉通多期碰撞、拼合和中生代时期滨西太平洋构造域叠加深化的演化历史(任纪舜等, 1992;陈斌等, 2001;Xiao *et al.*, 2003;刘建明等, 2004;李锦轶等, 2007;Chen *et al.*, 2009),是古大陆边缘地体拼接带(聂凤军等, 2007).区内构造以断裂为主,近东西向西拉木伦河断裂是重要的构造分界线. NNE 向大兴安岭主脊断裂、嫩江断裂是区内最重要的区域性构造(图 1).区域内岩浆活动极为频繁,从加里东期、华力西期、印支期、燕山期到新生代各个时期均有岩浆活动,其中又以燕山期岩浆活动规模最大,而且与成矿关系密切(内蒙古自治区地质矿产局, 1991).

## 2 矿床地质特征

敖仑花钼矿区内出露地层简单(图 2),主要为上二叠统林西组( $P_2l$ )、上侏罗统满克头鄂博组( $J_3m$ )和第四系.上二叠统林西组( $P_2l$ )以砂岩为主,在岩体接触带普遍角岩化.上侏罗统满克头鄂博组分布在矿区东北部,与下伏林西组( $P_2l$ )呈假整合关

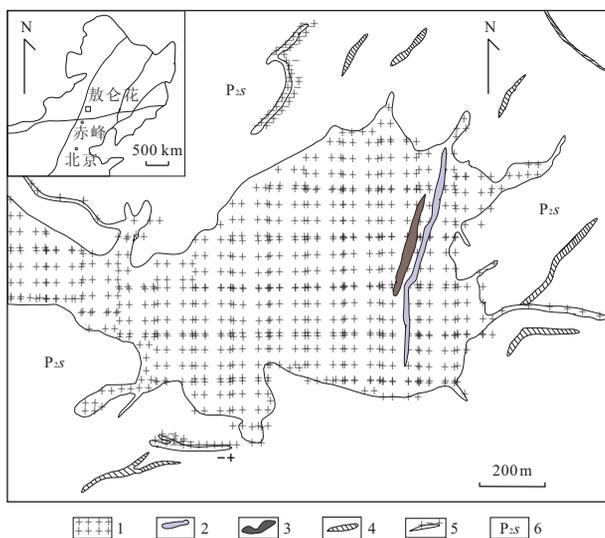


图2 敖仑花钼铜矿床矿区地质简图(据徐巧等,2010 绘改)  
Fig. 2 Simplified geologicmap of the Aolunhua Mo-Cu deposit Inner Mongolia

1. 花岗斑岩体;2. 英安斑岩;3. 石英闪长玢岩;4. 石英斑岩;5. 其他脉岩;6. 二叠系索伦组

系. 矿区褶皱构造和断裂构造不发育,受区域构造和斑岩体上拱侵位影响,矿区内节理裂隙非常发育,热液充填后形成网脉状石英脉(徐巧等,2010),为敖仑花铜钼矿提供了足够的容矿空间,斑岩体内部节理裂隙与外接触带存在明显差异,外接触带受成矿前断裂构造和片麻理影响,多形成沿片麻理方向或陡

立的节理,斑岩体内主要为网脉状石英脉充填为主.

矿体赋存于敖仑花斑岩体内、外接触带中,钼和铜是主要的成矿元素.其中斑岩体内的钼工业矿体占到总储量的绝大部分,在斑岩体顶部尤为富集,矿体整体保存较好,呈似层状透镜体,初步探测显示存在上、下2个矿体;赋存在外接触带中的矿体主要以含石英脉的形式存在,主要受节理和裂隙控制,以辉钼矿化和少量铜的次生氧化富集为主,钼品位变化较大.

主要的矿石矿物为辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿和毒砂,次要矿物有斑铜矿、闪锌矿、方铅矿等,脉石矿物主要是石英、长石、方解石、绿泥石和高岭石.矿石主要为粒状结构、包含结构、镶嵌结构、交代残余结构、乳浊状结构、斑状结构和假象结构,构造包括浸染状、脉状、网脉状和条带状构造等(马星华等,2009).围岩蚀变有钾化、硅化、青磐岩化、绢英岩化和泥化,其中与成矿关系密切的蚀变主要是钾化和硅化.

### 3 样品特征与室内工作方法

#### 3.1 样品特征

该区赋矿围岩总体称为花岗斑岩(但按粒度还可细分出占主体的细粒斑状花岗闪长岩和少量稍粗一点的花岗岩,二者呈渐变关系),岩石样品(编号

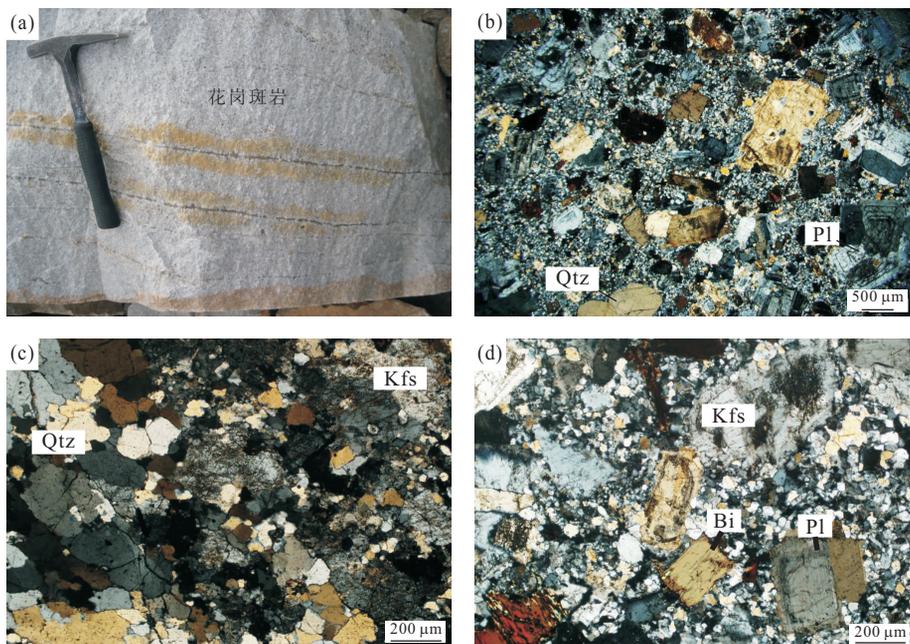


图3 敖仑花矿床花岗斑岩野外产出特征和镜下矿物组成

Fig. 3 Occurrence and mineral compositions of the granite in the Aolunhua deposit  
Qtz. 石英;Kfs. 钾长石;Pl. 斜长石;Bi. 黑云母

表 1 敖仑花钼矿床花岗斑岩的常量元素(%)、微量元素( $10^{-6}$ )的含量Table 1 The component of macroelements (%) and trace elements( $10^{-6}$ ) of granites from Aolunhua deposit

| 岩性                             | 花岗岩   | 细粒斑状花岗闪长岩 | 花岗岩   | 细粒斑状花岗闪长岩 | 细粒斑状花岗闪长岩 |
|--------------------------------|-------|-----------|-------|-----------|-----------|
| 样号                             | AL01  | AL03      | AL05  | AL03-01   | AL03-02   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.87 | 13.30     | 12.93 | 10.64     | 12.21     |
| SiO <sub>2</sub>               | 73.03 | 71.04     | 70.00 | 77.05     | 74.41     |
| CaO                            | 1.55  | 2.24      | 2.72  | 1.08      | 1.54      |
| K <sub>2</sub> O               | 4.37  | 4.19      | 4.04  | 4.76      | 4.48      |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.30  | 0.42      | 0.42  | 0.26      | 0.34      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.30  | 2.95      | 3.23  | 1.05      | 1.47      |
| MgO                            | 0.61  | 0.81      | 0.78  | 0.51      | 0.69      |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.92  | 4.37      | 3.04  | 2.98      | 3.56      |
| MnO                            | 0.031 | 0.038     | 0.032 | 0.028     | 0.022     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.18  | 0.18      | 0.16  | 0.09      | 0.12      |
| 烧失量                            | 0.58  | 0.24      | 2.32  | 1.23      | 0.91      |
| FeO                            | 0.90  | 2.10      | 1.90  | 0.65      | 1.20      |
| Li                             | 9.93  | 13.2      | 21.7  | 8.47      | 9.01      |
| Be                             | 2.22  | 1.90      | 1.28  | 1.99      | 2.03      |
| Sc                             | 7.14  | 7.25      | 4.42  | 2.59      | 3.17      |
| V                              | 29.6  | 33.0      | 32.6  | 26.7      | 34.8      |
| Cr                             | 4.19  | 4.56      | 5.89  | 8.36      | 8.17      |
| Co                             | 3.54  | 4.06      | 7.27  | 1.63      | 2.48      |
| Ni                             | 2.46  | 29.60     | 3.10  | 0.928     | 1.30      |
| Cu                             | 275   | 7069      | 2852  | 142       | 221       |
| Zn                             | 114.0 | 5339.0    | 212.0 | 52.3      | 31.3      |
| Ga                             | 17.6  | 18.7      | 17.6  | 16.5      | 17.1      |
| Rb                             | 116.0 | 97.1      | 125.0 | 113.0     | 115.0     |
| Sr                             | 466   | 431       | 233   | 409       | 453       |
| Zr                             | 66.4  | 72.8      | 63.0  | 56.1      | 65.8      |
| Nb                             | 4.20  | 5.32      | 5.49  | 4.84      | 5.34      |
| Hf                             | 2.21  | 2.66      | 2.43  | 1.68      | 2.02      |
| Ta                             | 0.402 | 0.438     | 0.416 | 0.361     | 0.401     |
| W                              | 25.1  | 3.10      | 15.8  | 12.4      | 11.4      |
| Re                             | 0.043 | 0.018     | 1.950 | 0.578     | 0.187     |
| Tl                             | 0.672 | 0.526     | 0.884 | 0.596     | 0.504     |
| Pb                             | 37.30 | 229.00    | 36.50 | 21.00     | 9.74      |
| Bi                             | 1.33  | 1.19      | 19.70 | 2.53      | 1.04      |
| Th                             | 5.46  | 6.61      | 5.34  | 4.12      | 4.61      |
| U                              | 0.990 | 7.15      | 1.58  | 2.28      | 1.73      |
| Dy                             | 1.66  | 1.66      | 1.87  | 1.56      | 1.48      |
| Ho                             | 0.296 | 0.296     | 0.311 | 0.249     | 0.273     |
| Er                             | 0.816 | 0.880     | 0.855 | 0.685     | 0.762     |
| Tm                             | 0.135 | 0.129     | 0.135 | 0.118     | 0.136     |
| Yb                             | 0.815 | 0.871     | 0.839 | 0.724     | 0.714     |
| Lu                             | 0.141 | 0.131     | 0.135 | 0.106     | 0.111     |
| Y                              | 9.00  | 8.73      | 9.16  | 8.40      | 8.31      |
| B                              | 2.40  | 1.27      | 4.39  | 2.06      | 2.26      |

AL03)采集点为敖仑花钼矿床采场,岩石样品总体呈灰白色(图 3a),斑状结构(图 3b),基质具花岗结构(图 3c),局部文象结构,块状构造(图 3a)。斑晶主要为斜长石,少量石英、黑云母和角闪石,均呈自形晶,晶体边缘呈不规则状,斜长石斑晶呈自形板状,具明显的环带构造(图 3b),石英斑晶呈粒状,黑云母斑晶呈自形叶片状(图 3d),角闪石斑晶呈自形柱状,斑晶粒度在 0.5~1.0 mm。岩石主要由斜长石(35%~40%)、钾长石(20%~25%)、石英(20%~25%)、角闪石(2%~3%)和黑云母(5%~7%)等组

成,分布均匀,斑晶约占岩石总量的 15%~20%。基质中斜长石部分呈自形一半自形板状,多呈他形板状,钾长石呈他形板状,石英呈他形粒状,构成岩石的花岗结构,局部钾长石石英交生形成文象结构,黑云母呈半自形—他形叶片状,角闪石呈他形短柱状,分布均匀,基质粒度 0.2~1.0 mm 为主。

### 3.2 测试方法

**3.2.1 锆石的挑选及测年方法** 将样品人工破碎后,按常规重力和磁选方法分选出锆石,然后在双目镜下挑选。将分选出纯净的锆石颗粒和标样一同置

于环氧树脂制成靶,然后用于透射光、反射光及阴极发光研究。

锆石 LA-ICP-MS 测试分析在中国地质大学(北京)科学研究院 LA-ICP-MS 实验室完成。分析使用的激光器型号为美国 New Wave 公司 UP193SS 型激光器,激光波长为 193 nm,束斑直径为 36  $\mu\text{m}$ ,激光频率为 10 Hz;预剥蚀时间和剥蚀时间分别为 5 s 和 45 s。实验过程使用 He 作为载气,流速为 0.8 L/min。等离子质谱(ICP-MS)型号为美国 Agilent 公司生产的 7500a 型质谱仪;元素积分时间 U、Th、Pb 为 20 ms, Si、Zr 为 6 ms,其他元素为 10 ms。数据处理软件使用 Glitter 4.4.1。年龄计算时以标准锆石 TEM 为外标进行同位素比值校正,标准锆石 91500 和 Qinghu 为监控盲样。元素含量以国际标样 NIST610 为外标, Si 为内标计算, NIST612 和 NIST614 做监控盲样,<sup>204</sup>Pb 校正方法同 Andersen(2002)。

**3.2.2 常量元素、微量元素测试方法与结果** 常量元素的测定依据与方法为 GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法为 X 射线荧光光谱法测定其

主、次元素,测试仪器为飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪;微量元素测试方法为 DZ/T0223-2001(电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则,测试仪器为 Finnigan MAT 制造,HR-ICP-MS(Element I),测定单位均为核工业地质研究院分析测试研究中心。测试结果见表 1。

## 4 锆石 U-Pb 定年及微量元素特征

### 4.1 锆石定年

选出的锆石为无色透明或浅黄色,结晶较好,呈典型的长柱状晶形(图 4)。锆石的 Th/U 比值均大于 0.1(表 2),属于典型的岩浆成因锆石(Belousova *et al.*, 1998)。锆石的阴极发光图像表明所有锆石均具有典型的岩浆振荡环带(图 4),不具有核-幔结构,无后期变质壳,表明这些锆石是岩浆形成后一次结晶形成的,锆石的形成年龄可代表岩浆结晶冷却的年龄。锆石中 Th 和 U 的含量变化较大,分别为  $18.46 \times 10^{-6} \sim 467.96 \times 10^{-6}$  和  $28.96 \times 10^{-6} \sim$

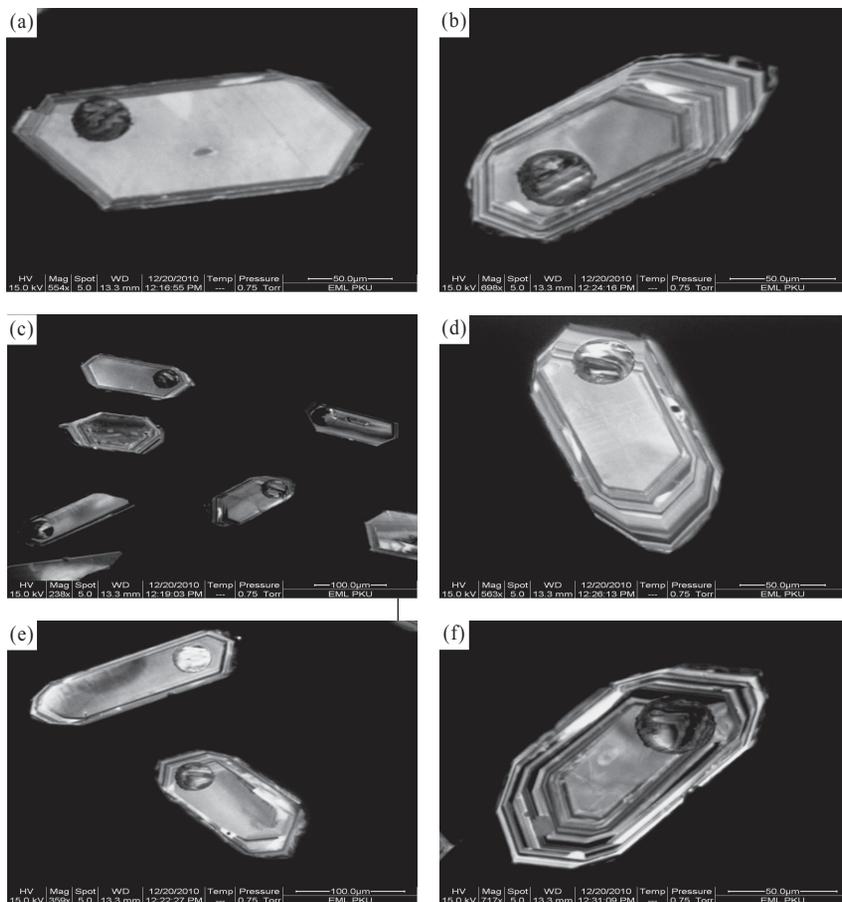


图 4 敖仑花钼矿床花岗岩斑岩锆石阴极发光图像

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons of the granite from the Aolunhua Mo deposit

表 2 敖仑花(Al03)号样品中单颗粒锆石 U-Pb 同位素测定结果  
Table 2 The dating results of U-Pb isotopes for single zircon in sample Al03 of Aolunhua

| 样号      | 组成( $\mu\text{g/g}$ ) |                   |                   |                   |                  |                                   |                                  | 比值                               |                                  |                                   |                                   |                                  |                                  |                                   | Th/U |
|---------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------|
|         | $^{206}\text{Pb}$     | $^{207}\text{Pb}$ | $^{208}\text{Pb}$ | $^{232}\text{Th}$ | $^{238}\text{U}$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ |      |
| AL03-01 | 29.49                 | 1.620             | 1.831             | 149.73            | 346.53           | 0.04862                           | 0.14482                          | 0.02107                          | 0.00697                          | 188                               | 137                               | 134                              | 140                              | 0.43                              |      |
| AL03-02 | 30.56                 | 1.604             | 2.191             | 177.31            | 357.54           | 0.04873                           | 0.13898                          | 0.02116                          | 0.00705                          | 81                                | 132                               | 135                              | 142                              | 0.50                              |      |
| AL03-03 | 35.75                 | 1.920             | 2.640             | 211.88            | 418.38           | 0.04729                           | 0.14184                          | 0.02116                          | 0.00712                          | 129                               | 135                               | 135                              | 143                              | 0.51                              |      |
| AL03-04 | 39.41                 | 2.140             | 3.060             | 258.55            | 463.67           | 0.05230                           | 0.14286                          | 0.02105                          | 0.00677                          | 158                               | 136                               | 134                              | 136                              | 0.56                              |      |
| AL03-05 | 24.90                 | 1.339             | 1.292             | 106.04            | 289.12           | 0.04896                           | 0.14352                          | 0.02133                          | 0.00696                          | 138                               | 136                               | 136                              | 140                              | 0.37                              |      |
| AL03-06 | 34.34                 | 1.841             | 3.880             | 313.88            | 406.58           | 0.04883                           | 0.14033                          | 0.02093                          | 0.00705                          | 130                               | 133                               | 134                              | 142                              | 0.77                              |      |
| AL03-07 | 30.08                 | 1.616             | 2.086             | 164.92            | 351.59           | 0.04885                           | 0.14247                          | 0.02120                          | 0.00722                          | 135                               | 135                               | 135                              | 145                              | 0.47                              |      |
| AL03-08 | 37.76                 | 1.969             | 1.412             | 113.42            | 442.43           | 0.04878                           | 0.13795                          | 0.02115                          | 0.00711                          | 64                                | 131                               | 135                              | 143                              | 0.26                              |      |
| AL03-09 | 47.40                 | 2.790             | 4.440             | 364.70            | 569.44           | 0.04895                           | 0.14962                          | 0.02074                          | 0.00692                          | 299                               | 142                               | 132                              | 139                              | 0.64                              |      |
| AL03-10 | 30.25                 | 1.633             | 1.833             | 149.59            | 351.61           | 0.04971                           | 0.14399                          | 0.02132                          | 0.00700                          | 146                               | 137                               | 136                              | 141                              | 0.43                              |      |
| AL03-11 | 18.91                 | 1.028             | 1.393             | 86.78             | 190.36           | 0.04899                           | 0.14421                          | 0.02141                          | 0.00777                          | 140                               | 137                               | 137                              | 156                              | 0.46                              |      |
| AL03-12 | 50.45                 | 2.720             | 4.110             | 333.74            | 579.63           | 0.04858                           | 0.14541                          | 0.02158                          | 0.00704                          | 141                               | 138                               | 138                              | 142                              | 0.57                              |      |
| AL03-13 | 32.05                 | 1.724             | 2.079             | 169.46            | 377.09           | 0.04720                           | 0.14180                          | 0.02108                          | 0.00701                          | 137                               | 135                               | 134                              | 141                              | 0.45                              |      |
| AL03-15 | 23.66                 | 1.294             | 0.551             | 46.05             | 290.51           | 0.04734                           | 0.14554                          | 0.02123                          | 0.00702                          | 181                               | 138                               | 135                              | 141                              | 0.16                              |      |
| AL03-16 | 45.95                 | 2.470             | 4.860             | 415.08            | 555.05           | 0.04852                           | 0.13892                          | 0.02056                          | 0.00667                          | 147                               | 132                               | 131                              | 134                              | 0.75                              |      |
| AL03-17 | 49.49                 | 2.600             | 3.810             | 319.27            | 595.90           | 0.04863                           | 0.13985                          | 0.02088                          | 0.00656                          | 128                               | 133                               | 133                              | 132                              | 0.53                              |      |
| AL03-18 | 62.73                 | 3.280             | 5.610             | 467.96            | 768.17           | 0.04963                           | 0.13379                          | 0.02055                          | 0.00665                          | 59                                | 127                               | 131                              | 134                              | 0.61                              |      |
| AL03-20 | 44.42                 | 2.360             | 8.480             | 710.61            | 542.18           | 0.04938                           | 0.13466                          | 0.02063                          | 0.00677                          | 66                                | 128                               | 132                              | 136                              | 0.76                              |      |
| AL03-21 | 2.49                  | 0.133             | 0.226             | 18.46             | 28.96            | 0.04852                           | 0.14290                          | 0.02136                          | 0.00700                          | 125                               | 136                               | 136                              | 141                              | 0.64                              |      |
| AL03-22 | 18.43                 | 0.994             | 1.616             | 124.12            | 204.18           | 0.04859                           | 0.14766                          | 0.02202                          | 0.00733                          | 130                               | 140                               | 140                              | 148                              | 0.61                              |      |
| AL03-23 | 29.89                 | 1.637             | 3.410             | 249.50            | 340.75           | 0.04859                           | 0.14914                          | 0.02179                          | 0.00782                          | 178                               | 141                               | 139                              | 157                              | 0.73                              |      |
| AL03-24 | 20.96                 | 1.119             | 2.221             | 179.22            | 253.51           | 0.04888                           | 0.13845                          | 0.02060                          | 0.00696                          | 135                               | 132                               | 131                              | 140                              | 0.71                              |      |
| AL03-26 | 36.54                 | 1.960             | 2.850             | 232.71            | 425.82           | 0.04862                           | 0.14275                          | 0.02133                          | 0.00703                          | 125                               | 135                               | 136                              | 142                              | 0.55                              |      |
| AL03-27 | 41.41                 | 2.220             | 2.550             | 204.12            | 486.42           | 0.04873                           | 0.14181                          | 0.02116                          | 0.00718                          | 128                               | 135                               | 135                              | 145                              | 0.42                              |      |
| AL03-28 | 30.19                 | 1.620             | 2.122             | 166.71            | 343.07           | 0.04729                           | 0.14662                          | 0.02188                          | 0.00730                          | 128                               | 139                               | 140                              | 147                              | 0.49                              |      |
| AL03-29 | 10.18                 | 0.549             | 0.725             | 55.00             | 117.34           | 0.05230                           | 0.14542                          | 0.02157                          | 0.00757                          | 142                               | 138                               | 138                              | 152                              | 0.47                              |      |
| AL03-30 | 47.22                 | 2.520             | 4.700             | 399.45            | 560.76           | 0.04896                           | 0.13933                          | 0.02094                          | 0.00676                          | 111                               | 132                               | 134                              | 136                              | 0.71                              |      |

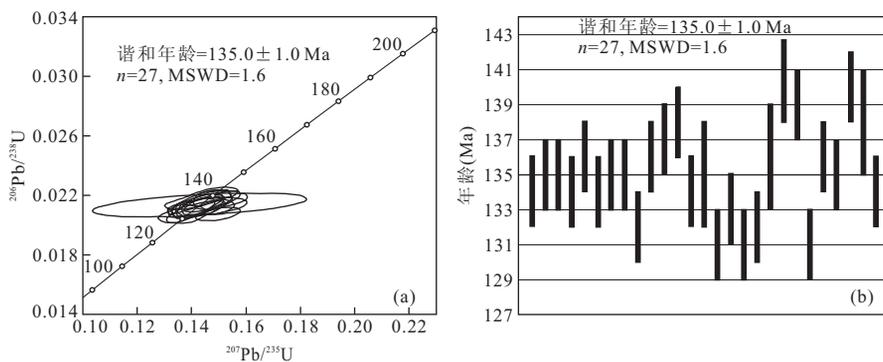


图5 细粒斑状花岗闪长岩(样号 AL03)样品锆石的 LA-ICP-MS 法 U-Pb 年龄谐和图(a)与加权平均年龄图(b)

Fig. 5 LA-ICP-MS U-Pb Concordia (a) and histogram diagram (b) of zircons of fine grain porphyritic granodiorite (sample AL03)

$768.17 \times 10^{-6}$ . 花岗斑岩 27 颗锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 数据结果列于表 2, 结果表明锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 131~140 Ma 之间, 加权平均年龄为  $135.0 \pm 1.0$  Ma ( $\text{MSWD}=1.6$ ,  $n=27$ ) (图 5a). 在 U-Pb 年龄谐和图上所有数据点均在谐和线上或其附近(图 5b), 显示很好的谐和性, 没有 U 或 Pb 同位素的明显丢失或加入, 测试结果可代表花岗斑岩真实的结晶年龄. 锆石 U-Pb 年龄结果显示与敖仑花钼矿床关系密切的花岗斑岩属于燕山期早白垩世岩浆活动的产物.

#### 4.2 锆石微量元素特征

采用 Wang *et al.* (2012) 方式, 排除 3 件花岗闪长岩样品锆石微量元素数据异常测点后, 共剩余 30 个测点的锆石微量元素数据(表 3). 敖仑花花岗斑岩锆石的微量元素含量见表 3, 由其分布情况(图 6a)可见锆石中富集大离子亲石元素 Th、Zr、Hf, 而 La、Nd、Ti 则呈现较强的负异常. 在锆石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 6b)中, 所有锆石测试点具有典型的岩浆锆石稀土元素配分模式, 在球粒陨石标准化图中呈轻稀土亏损、重稀土逐步富集, 且敖仑花花岗闪长岩锆石样品均显示明显的 Ce 正异常( $\text{Ce}^*$  为 1.72~188.71)和明显的 Eu 负异常( $\text{Eu}^*$  为 0.05~0.57), 原岩锆石稀土总量高( $299.02 \times 10^{-6} \sim 2548.68 \times 10^{-6}$ ), 变化较大, 显示明显的岩浆锆石成分特征(Hoskin and Schaltegger, 2003).

### 5 花岗斑岩地球化学特征

#### 5.1 主量元素

从敖仑花钼矿床花岗斑岩的常量元素和微量元素分析结果(表 1)中可看出, 敖仑花岗斑岩(AL01,

AL03, AL05, AL03-01, AL03-02)样品的  $\text{SiO}_2$  含量介于 70.00%~77.05% 间, 为酸性岩. 各类岩石样品中,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量为 10.64%~13.30%,  $\text{K}_2\text{O}$  的含量为 4.04%~4.76%,  $\text{Na}_2\text{O}$  的含量为 2.98%~4.37%, 显示为富钾的特征. 铝过饱和指数(A/CNK)变化于 0.838~0.916, 在敖仑花矿床岩石样品的 A/CNK-A/NK 图解(图 7a)中该区岩石主要为准铝质系列, 是 I 型花岗斑岩所具有的特征之一. 在反映造山带构造演化阶段的 R1-R2 图中, 基本位于同碰撞期区域(图 7b).

#### 5.2 微量元素

敖仑花矿区中花岗斑岩(AL01, AL03, AL05, AL03-01, AL03-02)的微量元素含量见表 1, 花岗斑岩突出的特点是富集 Rb、Th 等元素, Rb 的变化范围为  $97.1 \times 10^{-6} \sim 125 \times 10^{-6}$ , Th 的变化范围为  $4.12 \times 10^{-6} \sim 6.61 \times 10^{-6}$ , 低 Hf、Y、Yb, Hf 的变化范围为  $1.68 \times 10^{-6} \sim 2.66 \times 10^{-6}$ , Y 的变化范围为  $8.31 \times 10^{-6} \sim 9.16 \times 10^{-6}$ , Yb 的变化范围为  $0.714 \times 10^{-6} \sim 0.871 \times 10^{-6}$ .

### 6 讨论

#### 6.1 成岩时代

精确厘定矿床的成岩时代对于认识矿床的成因起到至关重要的作用, 采用锆石的 U-Pb 同位素体系来获得成岩年龄是非常可靠的办法, 这是因为它们的封闭温度都比较高(前者约为  $750^\circ\text{C}$ ; 后者约为  $430^\circ\text{C}$ , McInnes *et al.*, 2005), 受后期热液、变质和构造事件影响较小(Stein *et al.*, 2001), 相对获得的结果更为可靠. 本次研究获得的敖仑花斑岩体中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 结晶年龄为  $135.0 \pm 1.0$  Ma. 从成矿空间角度来讲, 矿床矿体直接产于

表 3 敖伦花钼矿床细粒斑状花岗岩中锆石微量元素分析结果( $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{176}\text{Hf}$  为%, 其余为  $10^{-6}$ )  
 Table 3 Trace element analyses of zircons from fine grain porphyritic granite of Aolunhua deposit ( $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{176}\text{Hf}$  %, others  $10^{-6}$ )

|                   | AL03-01   | AL03-02   | AL03-03   | AL03-04   | AL03-05   | AL03-06   | AL03-07   | AL03-08   | AL03-09   | AL03-10   | AL03-11   | AL03-12   | AL03-13   | AL03-14   | AL03-15   |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $^{49}\text{Ti}$  | 3.03      | 2.87      | 3.32      | 2.42      | 2.15      | 2.60      | 7.32      | 2.49      | 2.82      | 2.74      | 10.91     | 2.94      | 2.73      | 6.95      | 3.63      |
| $^{89}\text{Y}$   | 1 100.39  | 1 328.41  | 1 134.30  | 1 165.77  | 796.49    | 1 541.33  | 1 431.76  | 471.55    | 1 038.42  | 1 136.44  | 1 020.77  | 1 436.96  | 1 058.42  | 1 277.40  | 373.79    |
| $^{90}\text{Zr}$  | 491 255.6 | 482 274.2 | 492 333.3 | 481 478.9 | 475 668.9 | 479 458.5 | 469 524.2 | 476 759.6 | 479 104.1 | 471 036.4 | 475 740.5 | 460 816.8 | 472 844.2 | 475 096.9 | 469 188.0 |
| $^{93}\text{Nb}$  | 4.030     | 4.830     | 5.330     | 5.720     | 2.500     | 3.090     | 2.610     | 1.210     | 4.600     | 2.790     | 2.600     | 7.030     | 2.710     | 1.000     | 0.954     |
| $^{139}\text{La}$ | 0.778 0   | 0.044 7   | 4.200 0   | 0.119 0   | 0.033 3   | 0.021 8   | 0.046 9   | 0.012 0   | 2.160 0   | 0.29 70   | 0.032 0   | 0.129 0   | 0.295 0   | 0.979 0   | 1.250 0   |
| $^{140}\text{Ce}$ | 26.44     | 33.11     | 43.62     | 31.86     | 19.09     | 48.33     | 16.23     | 13.42     | 41.95     | 21.66     | 19.30     | 38.28     | 23.80     | 7.37      | 5.90      |
| $^{141}\text{Pr}$ | 0.184 0   | 0.099 7   | 1.570 0   | 0.080 0   | 0.034 7   | 0.154 0   | 0.285 0   | 0.046 0   | 0.672 0   | 0.174 0   | 0.061 0   | 0.102 0   | 0.161 0   | 0.628 0   | 0.516 0   |
| $^{146}\text{Nd}$ | 1.720     | 1.900     | 8.600     | 1.230     | 0.684     | 4.130     | 5.720     | 0.436     | 4.900     | 1.620     | 1.580     | 1.610     | 1.950     | 6.670     | 2.900     |
| $^{147}\text{Sm}$ | 3.16      | 5.59      | 5.11      | 3.90      | 2.03      | 9.76      | 13.41     | 1.08      | 4.99      | 3.98      | 4.11      | 4.73      | 3.94      | 9.55      | 3.07      |
| $^{153}\text{Eu}$ | 0.877     | 1.380     | 1.327     | 1.275     | 0.731     | 2.880     | 3.590     | 0.608     | 1.384     | 1.100     | 1.147     | 1.298     | 1.235     | 1.830     | 0.399     |
| $^{157}\text{Gd}$ | 18.61     | 27.05     | 20.60     | 24.13     | 13.06     | 48.99     | 52.29     | 6.87      | 21.40     | 21.71     | 20.16     | 27.66     | 21.20     | 40.91     | 13.90     |
| $^{159}\text{Tb}$ | 7.24      | 9.88      | 7.77      | 8.75      | 5.12      | 15.69     | 16.39     | 2.67      | 7.41      | 8.34      | 7.47      | 10.73     | 7.90      | 13.03     | 4.65      |
| $^{163}\text{Dy}$ | 97.01     | 122.36    | 100.91    | 109.67    | 65.72     | 168.49    | 170.15    | 35.16     | 92.18     | 106.92    | 93.12     | 136.33    | 98.45     | 146.38    | 45.11     |
| $^{165}\text{Ho}$ | 37.69     | 45.96     | 38.61     | 41.41     | 26.82     | 54.48     | 52.26     | 14.07     | 34.58     | 40.59     | 34.92     | 50.65     | 37.46     | 49.19     | 12.19     |
| $^{166}\text{Er}$ | 172.27    | 203.10    | 176.73    | 184.69    | 124.45    | 214.97    | 194.73    | 69.62     | 161.81    | 180.72    | 155.47    | 218.66    | 164.39    | 194.64    | 46.24     |
| $^{166}\text{Tm}$ | 45.13     | 51.88     | 45.97     | 46.79     | 33.33     | 51.10     | 43.99     | 20.24     | 41.67     | 45.44     | 40.38     | 55.47     | 42.11     | 45.06     | 10.90     |
| $^{172}\text{Yb}$ | 535.18    | 617.11    | 551.00    | 547.79    | 422.97    | 581.25    | 475.64    | 283.62    | 512.19    | 528.58    | 477.09    | 637.11    | 492.08    | 485.27    | 128.23    |
| $^{175}\text{Lu}$ | 100.05    | 114.43    | 102.37    | 101.96    | 84.01     | 105.86    | 78.24     | 65.12     | 101.36    | 95.48     | 88.44     | 117.67    | 90.63     | 87.80     | 23.77     |
| $^{178}\text{Hf}$ | 9 334.11  | 9 017.03  | 10 056.96 | 9 951.02  | 9 356.05  | 9 261.37  | 8 263.11  | 9 917.20  | 9 748.66  | 8 998.79  | 7 946.22  | 10 054.13 | 9 209.08  | 6 019.05  | 8 618.70  |
| $^{181}\text{Ta}$ | 1.108     | 1.211     | 1.500     | 1.61      | 0.734     | 0.674     | 0.798     | 0.397     | 1.250     | 0.926     | 0.762     | 1.740     | 0.877     | 0.424     | 0.480     |
| $^{232}\text{Th}$ | 149.73    | 177.31    | 211.88    | 258.55    | 106.04    | 313.88    | 164.92    | 113.42    | 364.70    | 149.59    | 86.78     | 333.74    | 169.46    | 67.59     | 46.05     |
| $^{238}\text{U}$  | 346.53    | 357.54    | 418.38    | 463.67    | 289.12    | 406.58    | 351.59    | 442.43    | 569.44    | 351.61    | 190.36    | 579.63    | 377.09    | 139.77    | 290.51    |
| Ce*               | 16.04     | 81.34     | 3.99      | 73.43     | 116.01    | 85.12     | 15.32     | 75.95     | 8.16      | 21.81     | 75.67     | 73.07     | 25.19     | 2.11      | 1.72      |
| Eu*               | 0.28      | 0.29      | 0.35      | 0.31      | 0.38      | 0.33      | 0.37      | 0.52      | 0.35      | 0.29      | 0.32      | 0.27      | 0.33      | 0.24      | 0.16      |

续表 3

|                   | AL03-16   | AL03-17   | AL03-18   | AL03-19   | AL03-20   | AL03-21   | AL03-22   | AL03-23   | AL03-24   | AL03-25   | AL03-26   | AL03-27   | AL03-28   | AL03-29   | AL03-30   |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <sup>49</sup> Ti  | 3.72      | 3.83      | 3.32      | 12.42     | 7.05      | 11.01     | 11.40     | 2.63      | 2.03      | 2.33      | 3.88      | 3.57      | 2.90      | 6.13      | 3.92      |
| <sup>89</sup> Y   | 1 420.71  | 1 651.60  | 1 985.24  | 808.60    | 3 286.52  | 721.15    | 1 569.56  | 934.91    | 570.98    | 1 084.91  | 1 359.21  | 1 516.20  | 980.03    | 973.57    | 1 396.37  |
| <sup>90</sup> Zr  | 465 131.3 | 460 473.9 | 462 432.5 | 467 410.5 | 463 055.8 | 476 714.8 | 469 992.5 | 466 770.8 | 463 436.1 | 462 163.6 | 478 752.2 | 468 543.7 | 482 700.4 | 486 641.5 | 489 760.7 |
| <sup>93</sup> Nb  | 5.250     | 8.460     | 9.950     | 0.677     | 4.260     | 0.831     | 3.100     | 3.740     | 2.240     | 4.290     | 5.550     | 7.800     | 3.510     | 2.630     | 5.980     |
| <sup>139</sup> La | 1.490 0   | 0.270 0   | 0.117 0   | 1.130 0   | 0.076 0   | 0.017 4   | 0.541 0   | 0.052 2   | 0.072 0   | 0.011 1   | 0.039 0   | 0.022 8   | 1.370 0   | 0.019 5   | 0.883 0   |
| <sup>140</sup> Ce | 41.10     | 41.18     | 55.61     | 9.51      | 67.41     | 5.99      | 22.16     | 30.18     | 23.38     | 12.34     | 39.94     | 35.97     | 32.66     | 12.05     | 41.58     |
| <sup>141</sup> Pr | 0.319 0   | 0.145 0   | 0.110 0   | 0.638 0   | 0.826 0   | 0.082 0   | 0.285 0   | 0.038 0   | 0.036 1   | 0.063 3   | 0.067 0   | 0.046 0   | 0.370 0   | 0.067 0   | 0.273 0   |
| <sup>146</sup> Nd | 3.24      | 1.97      | 2.30      | 5.68      | 15.06     | 1.40      | 3.24      | 1.18      | 0.799     | 1.32      | 1.56      | 0.97      | 2.26      | 1.51      | 2.84      |
| <sup>147</sup> Sm | 6.10      | 5.47      | 7.57      | 7.83      | 30.49     | 3.42      | 7.15      | 3.21      | 2.30      | 3.87      | 4.86      | 3.90      | 3.04      | 4.46      | 5.26      |
| <sup>153</sup> Eu | 1.920     | 1.610     | 2.360     | 2.800     | 8.160     | 1.590     | 2.600     | 1.269     | 0.882     | 0.199     | 1.630     | 1.205     | 1.124     | 0.953     | 1.590     |
| <sup>157</sup> Gd | 32.30     | 34.50     | 43.97     | 29.60     | 115.02    | 15.54     | 36.74     | 17.36     | 13.01     | 22.44     | 28.33     | 23.40     | 17.49     | 21.28     | 28.99     |
| <sup>159</sup> Tb | 11.38     | 12.89     | 16.55     | 8.64      | 35.21     | 5.64      | 13.34     | 6.40      | 4.44      | 8.56      | 10.37     | 9.96      | 6.69      | 8.03      | 10.59     |
| <sup>163</sup> Dy | 138.56    | 163.86    | 202.52    | 90.63     | 371.49    | 68.59     | 157.20    | 82.55     | 53.64     | 110.33    | 129.74    | 132.80    | 85.17     | 96.29     | 130.07    |
| <sup>165</sup> Ho | 50.40     | 59.37     | 73.14     | 30.23     | 118.31    | 25.66     | 56.19     | 31.52     | 20.04     | 41.38     | 47.63     | 51.92     | 32.94     | 35.80     | 48.71     |
| <sup>166</sup> Er | 216.57    | 254.55    | 303.76    | 119.21    | 449.70    | 113.19    | 233.53    | 142.86    | 88.65     | 176.82    | 208.86    | 240.48    | 151.89    | 155.34    | 215.35    |
| <sup>166</sup> Tm | 54.05     | 63.27     | 73.96     | 28.19     | 99.14     | 28.36     | 56.42     | 37.61     | 22.57     | 42.27     | 51.69     | 62.62     | 41.24     | 37.72     | 54.59     |
| <sup>172</sup> Yb | 644.15    | 708.51    | 817.84    | 313.02    | 1 065.86  | 327.56    | 622.93    | 465.45    | 281.64    | 468.54    | 602.31    | 747.83    | 509.66    | 426.10    | 637.30    |
| <sup>175</sup> Lu | 118.93    | 121.39    | 136.34    | 57.87     | 171.93    | 61.99     | 111.33    | 91.36     | 53.03     | 81.36     | 107.05    | 139.08    | 103.82    | 77.49     | 119.44    |
| <sup>178</sup> Hf | 9 204.88  | 9 583.04  | 9 201.58  | 6 589.12  | 7 582.62  | 6 711.38  | 7 167.53  | 9 346.73  | 9 878.15  | 9 320.66  | 9 328.82  | 9 310.72  | 9 502.13  | 8 372.76  | 9 474.74  |
| <sup>181</sup> Ta | 1.160     | 2.350     | 2.550     | 0.150     | 0.975     | 0.187     | 0.736     | 0.845     | 0.684     | 1.500     | 1.550     | 1.950     | 0.795     | 0.673     | 1.490     |
| <sup>232</sup> Th | 415.08    | 319.27    | 467.96    | 35.43     | 710.61    | 18.46     | 124.12    | 249.5     | 179.22    | 107.43    | 232.71    | 204.12    | 166.71    | 55.00     | 399.45    |
| <sup>238</sup> U  | 555.05    | 595.90    | 768.17    | 27.25     | 542.18    | 28.96     | 204.18    | 340.75    | 253.51    | 279.21    | 425.82    | 486.42    | 343.07    | 117.34    | 560.76    |
| Ce*               | 13.52     | 48.08     | 91.94     | 2.57      | 22.53     | 19.33     | 13.06     | 150.50    | 106.55    | 52.26     | 140.08    | 188.71    | 10.66     | 46.35     | 19.84     |
| Eu*               | 0.34      | 0.28      | 0.31      | 0.50      | 0.37      | 0.57      | 0.40      | 0.42      | 0.39      | 0.05      | 0.34      | 0.30      | 0.37      | 0.25      | 0.32      |

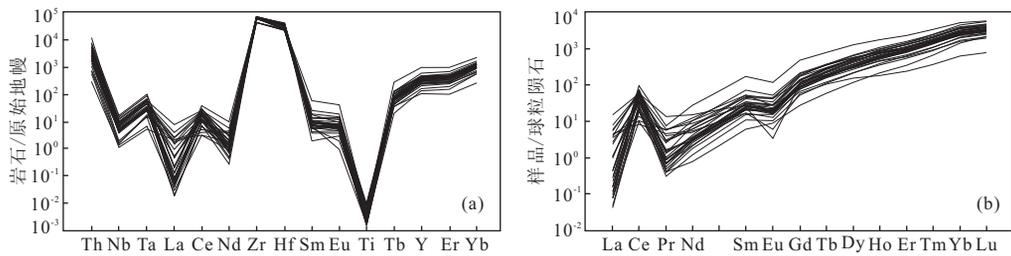


图 6 敖仑花花岗岩闪长岩中样品的原始地幔标准化微量元素蜘蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(b)  
Fig. 6 The spider diagrams (a) and the Chondrite-normalized REE patterns (b) of samples in Aolunhua deposits

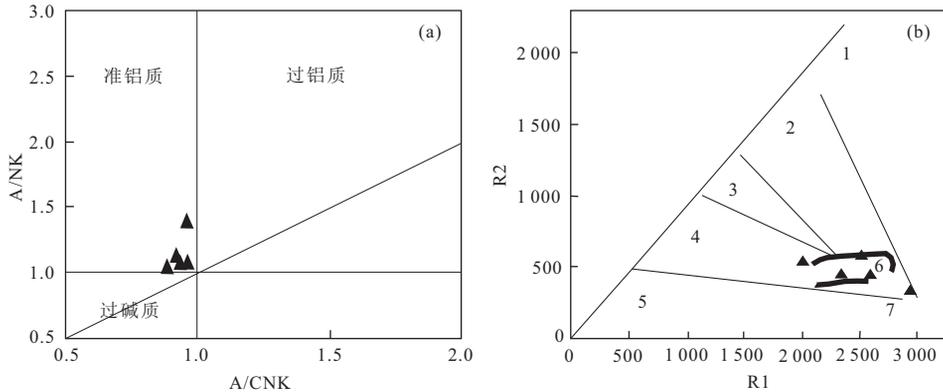


图 7 敖仑花 A/CNK-A/NK(a)与 R1-R2(b)图解

Fig. 7 The A/CNK-A/NK(a) and R1-R2 (b) diagrams for rock samples in Aolunhua deposit

1. 地幔分异期; 2. 板块碰撞前期; 3. 碰撞后抬升期; 4. 造山晚期; 5. 非造山期; 6. 同碰撞期; 7. 造山后

花岗斑岩体和围岩接触带,与花岗斑岩的空间关系紧密.因此,通过矿床地质特征及成岩年代学研究,认为敖仑花钼矿床是燕山期中酸性岩浆热液活动的产物.

本次研究所获得的敖仑花含矿斑岩体的结晶年龄为  $135.0 \pm 1.0$  Ma,与马星华等(2009)获得的成矿岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $134 \pm 4$  Ma 基本一致,表明岩浆作用发生在 130 Ma 左右,而距敖仑花钼矿南西约 50 km 处的半拉山钼矿,其花岗斑岩成岩年龄在  $132.1 \pm 1.8$  Ma(曾庆栋和刘建明,2010),与敖仑花钼矿床的成岩时间也比较相近,说明 2 个矿床皆属于早白垩世时期强烈构造—岩浆活动的产物,印证了大兴安岭以及中国东部大规模岩浆—流体—成矿事件发生在 130 Ma 的认识(祁进平等,2005).

此外,敖仑花钼矿的大地构造位置处于西拉木伦河深大断裂以北,其与邻区半拉山钼矿床的发现进一步说明大兴安岭南段除蕴含大量以铜、锡、铅、锌为主的矿床外,在寻找以钼为主成矿元素的金属矿床方面亦具有较大的前景,对未来该地区的钼矿资源勘查具有重要的意义.

## 6.2 锆石微量元素特征示踪意义

锆石中微量元素组成对于正确认识锆石和寄主岩的成因有重要示踪意义.敖仑花含矿花岗斑岩的锆石微量元素含量见表 3,锆石的 Th 含量为  $18.46 \times 10^{-6} \sim 710.61 \times 10^{-6}$ ,U 含量为  $27.25 \times 10^{-6} \sim 768.17 \times 10^{-6}$ ,相应的 Th/U 比值范围为  $0.16 \sim 0.76$ (均大于 0.10),为岩浆成因(Corfu *et al.*, 2003).局部测试点位 U 的异常高值,据 Chakoumakos *et al.* (1987)研究 Sri Lankan 锆石时发现,蛻晶化锆石区域具有异常高的 U 含量,U 含量平均值为  $3\,000 \times 10^{-6}$ .Valley *et al.* (1994)对 Adirondack 地体中不同样晶锆石研究后得出,高磁性蛻晶作用强的锆石比低磁性蛻晶化作用弱的锆石 U 含量普遍偏高.这些研究结果表明,发生蛻晶化作用的锆石区域会有高的 U 含量.

敖仑花含矿花岗斑岩的锆石稀土配分模式见图 6b,其稀土总量较高,且变化范围较大.为  $299.02 \times 10^{-6} \sim 2\,548.68 \times 10^{-6}$ ,且所有锆石的分析点都具有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常(图 6b),且变化范围较大(Ce\* 为  $1.72 \times 10^{-6} \sim 188.71 \times 10^{-6}$ ,Eu\* 为  $0.05 \times 10^{-6} \sim 0.57 \times 10^{-6}$ ),落入壳源锆石的 Ce 正

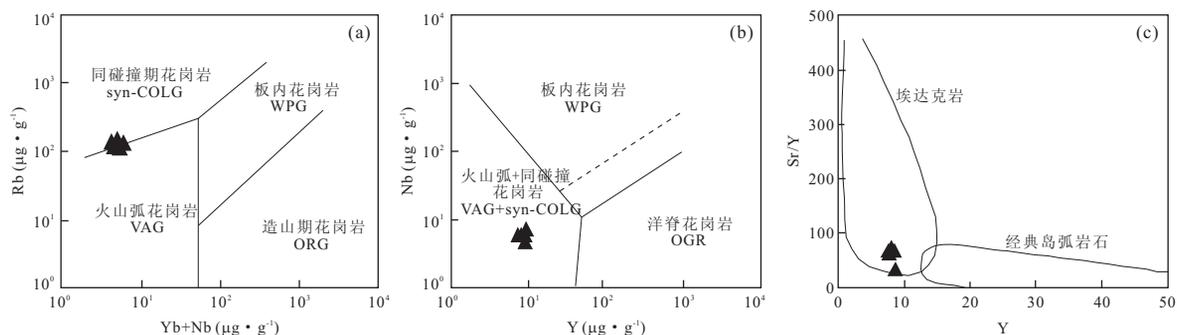


图 8 敖仑花矿床花岗斑岩(Yb+Nb)-Rb(a)、Y-Nb(b)与 Y-Sr/Y(c)图解

Fig. 8 The (Yb+Nb)-Rb (a), Y-Nb (b) and Y-Sr/Y (c) diagrams for rock samples in Aolunhua deposit

异常和 Eu 负异常变化范围(Li *et al.*, 2000). 锆石中 Ce 正异常是  $Ce^{4+}$  优先进入锆石晶格的结果, 又由于长石强烈富集 Eu, 所以锆石中 Eu 的负异常通常被认为是锆石与长石平衡生长的结果(Rubatto and Gebauer, 2000), 从而可以得出敖仑花锆石中明显的 Eu 负异常, 表明这些锆石在形成过程中伴有长石的形成。

同时, 所有测试点都具有轻稀土(LREE)亏损、重稀土(HREE)富集的特征(图 6b), 据 Hoskin and Black(2000)研究认为, 重结晶锆石轻稀土的变化范围明显大于重稀土, 并解释为轻稀土在锆石中更不稳定的结果, 表现为锆石在重结晶过程中, 轻稀土更易被逐出锆石的晶格, 导致其含量降低, 而 La 和 Pr 含量很低, Ce 有正异常, 为壳源岩浆锆石的稀土元素特征。

### 6.3 含矿岩体形成环境

敖仑花矿区的主要赋矿岩浆岩为细粒斑状花岗闪长岩。年代学研究表明, 斑状花岗闪长岩的锆石年龄为  $135.0 \pm 1.0$  Ma。岩石化学分析数据和相关参数值表明, 敖仑花钼矿床斑状花岗闪长岩为准钙质, 在 R1-R2 构造判别图上(图 7b)处于同碰撞期区, 而在(Yb+Nb)-Rb、Y-Nb(图 8a, 8b)图解中, 敖仑花赋矿岩体均位于典型的火山弧+同碰撞花岗斑岩范围内, 在 Y-Sr/Y(图 8c)图解中则位于埃达克岩范围之内。

已有学者研究表明, 大兴安岭造山带南段经历了华北地台与西伯利亚古陆之间的古亚洲洋消减和陆陆软碰撞形成兴蒙造山带的过程(张永北等, 2006)。近年来, 更多学者则认同西伯利亚与中朝板块碰撞可能发生在二叠纪中晚期, 并可能持续到二叠纪中期(李锦轶, 1998; 石玉若等, 2004; 张炯飞等, 2004), 晚侏罗世(150 Ma)蒙古-鄂霍次克洋的洋盆西段已闭合, 西段的大陆碰撞也已经结束, 大兴安

岭南段进入滨西太平洋构造域演化阶段的时间应该从早白垩世早、中期开始, 晚三叠世-早白垩世中期应为古亚洲洋构造域与滨西太平洋构造域叠加期(张炯飞等, 2000)。

大兴安岭碰撞造山结束以后, 大兴安岭南段地壳逐渐向伸展环境过渡。在 R1-R2 构造判别图上, 敖仑花矿床斑状花岗斑岩基本位于同碰撞期, 而在 Y-Sr/Y 图中落在埃达克岩区域内, 显示其成岩环境压力较大, 结合本文所得到的岩体成岩年龄( $135.0 \pm 1.0$  Ma), 可能暗示矿区岩浆岩为挤压造山环境向伸展环境过渡的产物。同时, 王京彬和徐新(2006)认为块体边缘与缝合线是大规模成矿的有利地带, 造山带的挤压向伸展的过渡期是大规模成矿的有利时期。所以, 综合认为敖仑花钼矿床赋矿岩体是在挤压造山向碰撞伸展过渡时期的岩浆活动产物。

## 7 结论

(1) 内蒙古敖仑花矿床花岗斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为  $135.0 \pm 1.0$  Ma, 表明花岗斑岩为早白垩世岩浆活动的产物; (2) 矿床含矿岩体锆石 Th/U 比值大于 0.1, 具明显的 Ce 正异常( $Ce^*$  为  $1.72 \times 10^{-6} \sim 188.71 \times 10^{-6}$ ) 和 Eu 负异常( $Eu^*$  为  $0.05 \times 10^{-6} \sim 0.57 \times 10^{-6}$ ), 为典型的岩浆锆石。轻稀土(LREE)亏损, 重稀土(HREE)富集, La 和 Pr 含量很低, 而 Ce 正异常, 显示为壳源岩浆锆石的特征; (3) 敖仑花矿床赋矿岩体形成于西拉木伦河断裂北岸铜钼成矿带 140 Ma 左右的多金属成矿高峰期, 构成了林西-天山斑岩型钼铜矿床带, 为挤压造山向碰撞伸展过渡时期的岩浆活动产物。

致谢: 锆石阴极发光得到了北京大学物理学院

陈莉老师的帮助,野外工作得到了教仑花钼矿生产技术部人员的配合,作者一并深表谢意。

## References

- Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192 (1–2): 59–79. doi:10.1016/S009–2541(02)00195–X
- Belousova, E. A., Griffin, W. L., Pearson, N. J., 1998. Trace element composition and cathodoluminescence properties of southern African kimberlitic zircons. *Mineralogical Magazine*, 62 (3): 355–366. doi:10.1180/002646198547747
- Chakoumakos, B. C., Murakami, T., Lumpkin, G. R., et al., 1987. Alpha-decay induced fracturing in zircon: the transition from the crystalline to the metamict state. *Science*, 235(4808): 1556–1559. doi:10.1126/science.236.4808.1556
- Chen, B., Jahn, B. M., Tian, W., 2009. Evolution of the Solonker suture zone: constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction and collision-related magmas and forearc sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34 (3): 245–257. doi:10.1016/j.jsease.2008.05.007
- Chen, B., Zhao, G. C., Wilde, S., 2001. Subduction and collision related granitoids from southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: isotopic ages and tectonic implication. *Geological Review*, 47(4): 361–367(in Chinese with English abstract).
- Corfu, F., Hanchar, J. M., Hoskin, P. W. O., et al., 2003. Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469–500. doi:10.2113/0530469
- Guo, L. J., Xie, Y. L., Hou, Z. Q., et al., 2009. Geology and ore fluid characteristics of the Bairendaba silver polymetallic deposit in Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(1): 26–36(in Chinese with English abstract).
- Hoskin, P. W. O., Black, L. P., 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *J. Metamorphic Geol.*, 18(4): 423–439. doi:10.1046/j.1525–1314.2000.00266.x
- Hoskin, P. W. O., Schaltegger, U., 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62. doi:10.2113/0530027
- Li, J. Y., 1998. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas. *Geological Review*, 44(4): 339–347 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Gao, L. M., Sun, G. H., et al., 2007. Shuangjingzi Middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Silberian and Sino-Korean paleo-plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (3): 565–582 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Liang, X. R., Sun, M., et al., 2000. Geochronology and geochemistry of single-grain zircons: simultaneous in-situ analysis of U-Pb age and trace elements by LAM-ICP-MS. *Eur. J. Mineral.*, 12(5): 1015–1024. doi:10.1127/0935–1221/2000/0012–1015
- Liu, J. J., Xing, Y. L., Wang, J. P., et al., 2010. Discovery of falkmanite from the Bairendaba superlarge Ag-Pb-Zn polymetallic deposit, Inner Mongolia and its origin significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40 (3): 565–572(in Chinese with English abstract).
- Liu, J. M., Zhang, R., Zhang, Q. Z., 2004. The regional metallogeny of Da Hingganling, China. *Earth Science Frontiers*, 11 (1): 269–277 (in Chinese with English abstract).
- Lv, Z. C., Duan, G. Z., Liu, C. Q., et al., 2000. Silver deposit type, metallogenic series and metallogenic geochemical characteristics in Da Hingganling area. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(4): 305–309(in Chinese).
- Ma, X. H., Chen, B., Lai, Y., et al., 2009. Petrogenesis and mineralization chronology study on the Aolunhua porphyry Mo deposit, Inner Mongolia, and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (11): 2939–2950(in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Wang, Y. T., Zhang, Z. H., et al., 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas. *Science in China (Series D)*, 46(8): 838–851. doi:10.1007/BF02879527
- McInnes, B. A., Evans, N. J., Fu, F. Q., et al., 2005. Application of thermochronology to hydrothermal ore deposits. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 58(1): 467–498. doi:10.2138/rmg.2005.58.18
- Nie, F. J., Zhang, W. Y., Du, A. D., et al., 2007. Re-Os isotopic dating on molybdenite separates from the Xiaodonggou porphyry Mo deposit, Hexigten Qi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 898–905((in Chinese with English abstract).
- People's Republic of China Ministry of Geology and Mineral Resources Geological Memoirs, 1991. Geological House, Beijing, 128–651 (in Chinese).
- Qi, J. P., Chen, Y. J., Pirajno, F., 2005. Geological characteristics and tectonic setting of the epithermal deposits in the Northeast China. *J. Mineral Petrol.*, 25(2): 47–59(in Chinese with English abstract).

- Ren, J. S., Chen, T. Y., Niu, B. G., et al., 1992. Tectonic evolution of the continental lithosphere and metallogeny in eastern China and adjacent areas. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Rubatto, D., Gebauer, D., 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe: some examples from the western Alps. Cathodoluminescence in Geoscience, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 373—400
- Shi, Y. R., Liu, D. Y., Zhang, Q., et al., 2004. SHRIMP dating of diorites and granites in southern Suzuopi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 789—799 (in Chinese with English abstract).
- Shu, Q. H., Jiang, L., Lai, Y., et al., 2009. Geochronology and fluid inclusion study of the Aolunhua porphyry Cu-Mo deposit in Arhorqin area, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2601—2614 (in Chinese with English abstract).
- Stein, H. J., Markey, R. J., Morgan, J. W., et al. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: how and why it works. *Terra Nova*, 13(6): 479—486. doi: 10.1046/j.1365-3121.2001.00395.x
- Sun, X. G., Liu, J. M., Qin, F., et al., 2008. The new progress on polymetallic studies in Daxinganling—the revelation of the southern bank Xilamulun River Molybdenum polymetallic belt. *China Mining Magazine*, 17(2): 75—78 (in Chinese with English abstract).
- Valley, J. W., Chiarenzelli, J. R., McLelland, J. M., 1994. Oxygen isotope geochemistry of zircon. *Earth Plane. Sci. Lett.*, 126(4): 187—206. doi: 10.1016/0012-821X(94)90106-6
- Wang, J. B., Wang, Y. W., Wang, L. J., 2000. Copper metallogenic setting and prospecting potential in the middle-southern part of Da Hinggan Mountains. *Geology and Prospecting*, 36(5): 1—4 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. B., Xu, X., 2006. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 23—31 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. J., Hidehiko, S., Wang, J. B., et al., 2001. Ore-forming fluid and mineralization of the Huanggangliang skarn Fe-Sn deposit, Inner Mongolia. *Science in China (Ser. D)*, 31(7): 553—562 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhu, D. C., Zhao, Z. D., et al., 2012. Magmatic zircons from F-, S- and A-type granitoids in Tibet: trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 59—66. doi: 10.1016/j.jseas.2011.07.027
- Xia, X. H., Zhao, Y. H., Yuan, J. Z., et al., 2002. Geology and mineralizing regularity of polymetallic sulfide deposits in Linxi-Tianshan district of Inner Mongolia. *Geology of Chemical Minerals*, 24(4): 198—206 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J., et al. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22: 1069—1089. doi: 10.1029/2002TC001484
- Xu, Q., Fu, S. X., Yuan, J. M., et al., 2010. Geological characteristics and prospecting marks of the Aolunhua porphyry Mo-Cu deposit, Inner Mongolia. *Geology and Exploration*, 46(6): 1019—1028 (in Chinese with English abstract).
- Xue, H. M., Guo, L. J., Hou, Z. Q., et al., 2010. SHRIMP zircon U-Pb ages of the Middle Neopaleozoic unmetamorphosed magmatic rocks in the southwestern slope of the Da Hinggan Mountains, Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 811—823 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Q. D., Liu, J. M., 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geological significance of the granite porphyry from Banlashan porphyry molybdenum deposit in Xilamulun molybdenum metallogenic belt. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4): 828—834 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. F., Li, Z. T., Jin, C. M., 2004. Adakites in northeastern China and their mineralized implications. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 361—368 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. F., Quan, H., Wu, G., et al., 2000. Tectonic setting of Mesozoic volcanic rocks in Northeast China. *Journal of Precious Metallic Geology*, 9(1): 33—38 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K., Nie, F. J., Hou, W. R., et al., 2012. Re-Os isotopic age dating of molybdenite separates from Hashitu Mo deposit in Linxi County of Inner Mongolia and its geological significance. *Mineral Deposits*, 31(1): 129—138 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Wu, H. Y., Chen, Z. G., et al., 2009. The metallogenic regularity and herent property of metallugens for Cu-Au-Mo deposits between south and north edges of NCC. *Acta Mineralogica Sinica*, (S1): 39—40 (in Chinese).
- Zhang, M., Zhai, Y. S., Shen, C. L., et al., 2011. Metallogenic system of copper polymetallic deposits in the middle-southern part of Da Hinggan Mountains, China. *Geoscience*, 25(5): 819—831 (in Chinese with English ab-

stract).

Zhang, Y. B., Sun, S. H., Mao, Q., 2006. Mesozoic O-type adakitic volcanic rocks and its petrogenesis, paleo-tectonic dynamic and mineralization significance of the eastern side of southern Da Hinggan, China. *Acta Petrological Sinica*, 22(9): 2289—2304 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y. M., 1997. Metallogeny and prospective evaluation of copper-polymetallic deposits in the Da Hinggan Mountains and its adjacent regions. Earthquake Publishing House, Beijing (in Chinese).

Zhou, Z. H., Liu, H. W., Chang, G. X., et al., 2011. Mineralogical characteristics of skarns in the Huanggang Sn-Fe deposit of Inner Mongolia and their metallogenic indicating significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(1): 97—112 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

陈斌, 赵国春, Wilde, S., 2001. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义. *地质论评*, 47(4): 361—367.

郭利军, 谢玉玲, 侯增谦, 等, 2009. 内蒙古拜仁达坝银多金属矿床地质及成矿流体特征. *岩石矿物学杂志*, 28(1): 26—36.

李锦轶, 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识. *地质论评*, 44(4): 339—347.

李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等, 2007. 内蒙古东部双井子中三叠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. *岩石学报*, 23(3): 565—582.

刘家军, 邢永亮, 王建平, 等, 2010. 内蒙拜仁达坝超大型 Ag-Pb-Zn 多金属矿床中针硫铅矿的发现与成因意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(3): 565—572.

刘建明, 张锐, 张庆洲, 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征. *地质学前沿*, 11(1): 269—277.

吕志成, 段国正, 刘丛强, 等, 2000. 大兴安岭地区银矿床类型、成矿系列及成矿地球化学特征. *矿物岩石地球化学通报*, 19(4): 305—309.

马星华, 陈斌, 赖勇, 等, 2009. 内蒙古敖伦花斑岩铜矿床成矿年代学及地质意义. *岩石学报*, 25(11): 2939—2950.

聂凤军, 张万益, 杜安道, 等, 2007. 内蒙古小东沟斑岩型铜矿床辉钼矿铼—钨同位素年龄及地质意义. *地质学报*, 81(7): 898—905.

内蒙古自治区地质矿产局, 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 128—651.

祁进平, 陈衍景, Pirajno, F., 2005. 东北地区浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景. *矿物岩石*, 25(2): 47—59.

任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等, 1992. 中国东部及邻区大陆岩石

圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社.

石玉若, 刘敦一, 张旗, 等, 2004. 内蒙古苏左旗地区闪长—花岗岩类 SHRIMP 年代学. *地质学报*, 78(6): 789—799.

舒启海, 蒋林, 赖勇, 等, 2009. 内蒙古阿鲁科尔沁旗敖伦花斑岩铜矿床成矿时代和流体包裹体研究. *岩石学报*, 25(10): 2601—2614.

孙兴国; 刘建明; 覃锋, 等, 2008. 大兴安岭成矿研究新进展——西拉木伦河南岸 Mo 多金属成矿带的发现. *中国矿业*, 17(2): 75—78.

王京彬, 王玉往, 王莉娟, 2000. 大兴安岭中南段铜矿成矿背景及找矿潜力. *地质与勘探*, 36(5): 1—4.

王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿. *地质学报*, 80(1): 23—31.

王莉娟, 岛崎英彦, 王京彬, 等, 2001. 黄岗梁砂卡岩型铁锡矿床成矿流体及成矿作用. *中国科学(D辑)*, 31(7): 553—562.

夏学惠, 赵玉海, 袁家忠, 等, 2002. 内蒙古林西—天山地区多金属硫化物矿床地质及成矿规律. *化工矿产地质*, 24(4): 198—206.

徐巧, 付水兴, 袁继明, 等, 2010. 赤峰敖伦花斑岩铜矿床地质特征及找矿标志. *地质与勘探*, 46(6): 1019—1028.

薛怀民, 郭利军, 侯增谦, 等, 2010. 大兴安岭西南坡成矿带晚古生代中期未变质岩浆岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 811—823.

曾庆栋, 刘建明, 2010. 西拉木伦铜矿带半拉山斑岩铜矿床花岗岩斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(4): 828—834.

张炯飞, 李之彤, 金成沫, 2004. 中国东北部地区埃达克岩及其成矿意义. *岩石学报*, 20(2): 361—368.

张炯飞, 权恒, 武广, 等, 2000. 东北地区中生代火山岩形成的构造环境. *贵金属地质*, 9(1): 33—38.

张可, 聂凤军, 侯万荣, 等, 2012. 内蒙古林西县哈什吐铜矿床辉钼矿铼—钨年龄及其地质意义. *矿床地质*, 31(1): 129—138.

张连昌, 吴华英, 陈志广, 等, 2009. 华北地台北缘斑岩型铜金矿床成矿规律与专属性研究. *矿物学报*, (S1): 39—40.

张梅, 翟裕生, 沈存利, 等, 2011. 大兴安岭中南段铜多金属矿床成矿系统. *现代地质*, 25(5): 819—831.

张永北, 孙世华, 毛骞, 2006. 大兴安岭南段东麓中生代 O 型埃达克质火山岩及其成因、古构造环境和找矿意义. *岩石学报*, 22(9): 2289—2304.

赵一鸣, 1997. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价. 北京: 地震出版社.

周振华, 刘宏伟, 常帼雄, 等, 2011. 内蒙古黄岗锡铁矿床夕卡岩矿物学特征及其成矿指示意义. *岩石矿物学杂志*, 30(1): 97—112.