

内蒙古敖尔盖铜矿中-酸性侵入岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年与岩石地球化学特征研究

郭志军¹ 周振华¹ 李贵涛² 李进文¹
武新丽³ 欧阳荷根³ 王挨顺⁴ 向安平¹ 董旭舟³

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 内蒙古地质矿产勘查开发局, 内蒙古呼和浩特 010020;
3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古呼和浩特 010020)

摘要:敖尔盖铜矿位于内蒙古巴林右旗幸福之路苏木,大地构造归属大兴安岭南段晚古生代增生造山带。本次研究所采样品为矿区大面积出露的中-酸性侵入岩体。锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果表明,岩体的成岩年龄为(245.4±1.8) Ma (MSWD=1.4),为该区印支早期岩浆活动的产物。岩石地球化学特征显示敖尔盖中-酸性侵入岩体具有与埃达克岩类似的地球化学特征,其 $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ (65.03%~70.11%), $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ (14.45%~15.49%), $\text{MgO} < 3\%$ (1.18%~1.61%), $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$ (5.85×10^{-6} ~ 6.83×10^{-6}), $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$ (0.416×10^{-6} ~ 0.637×10^{-6}), $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$ (380×10^{-6} ~ 642×10^{-6}), $\text{LREE}/\text{HREE} = 11.60 \sim 12.24$, $\delta \text{Eu} = 1.00 \sim 1.18$ 。说明其来源较深,形成压力较大。 Sr-Nd 同位素结果表明岩体的 $\epsilon \text{Nd}(t)$ 值(+3.9~+4.4)较高,同时($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值(0.70380~0.70412)较低,且 Nd 同位素模式年龄(T_{DM})较年轻,为 578~657 Ma,指示源岩物质可能来源于新元古代形成的亏损地幔。结合区域构造背景综合分析认为,古亚洲洋在本区消失后,该岩体是在挤压构造背景下,由新元古代亏损地幔部分熔融形成。同时通过对比区域岩浆活动并结合大地构造研究认为,大兴安岭南段印支期岩体随着年龄由老到新,其形成构造环境从挤压转为伸展。

关键词:SHRIMP U-Pb 定年;地球化学;Sr-Nd 同位素特征;埃达克岩;印支期;敖尔盖铜矿;大兴安岭南段
中图分类号:P618.41;P597 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)06-1486-15

1 引言

敖尔盖铜矿位于内蒙古巴林右旗幸福之路苏木,处于 NE 向黄岗梁—甘珠尔庙铜多金属成矿带东侧,大地构造归属大兴安岭南段晚古生代增生造山带(图 1-a)。从新元古代到印支早期,大兴安岭南段兴蒙造山带经历了中、小块体(中亚蒙古地块、兴安地块、松嫩地块、锡林浩特地块和佳木斯地块)之间地块的拼合,以及由此构成的板块与华北板块的构造对接过程^[1]。这一过程最终导致华北板块和西伯利亚板块之间古亚洲洋的消失^[2]。在此期间,本区

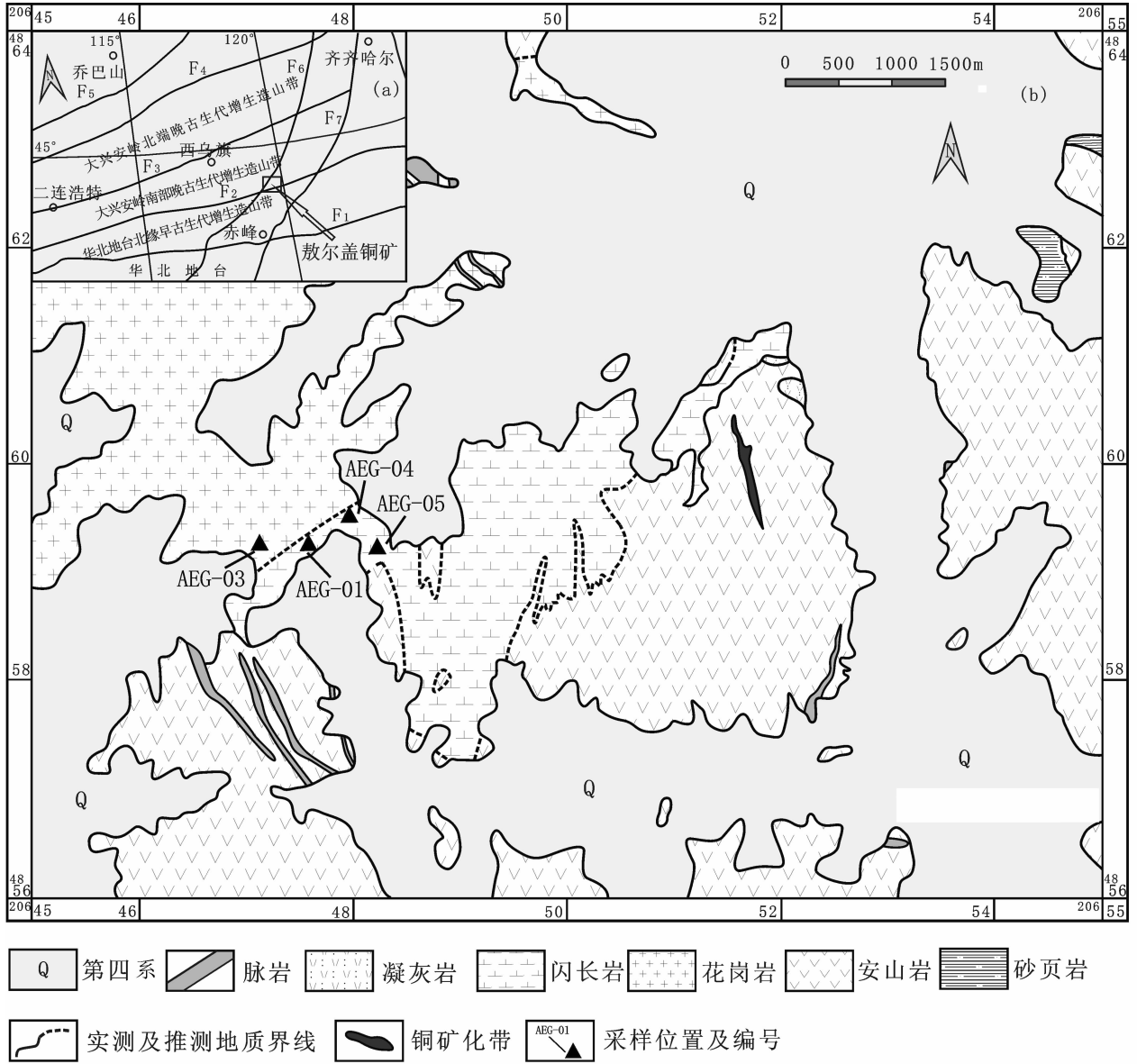
构造-岩浆活动频繁,形成了一系列的花岗岩体^[3]和多金属矿床^[4]。目前,对于本区印支期花岗岩浆的成因和构造背景研究,存在着两种不同的观点:一种观点认为是与古亚洲洋洋壳消失后的陆内持续俯冲、地壳缩短增厚有关^[5];另一种观点认为是由于古亚洲构造域造山后的伸展作用下的张性构造环境^[6-8]。本文对大兴安岭南段成矿带上的敖尔盖铜矿中的中-酸性侵入岩体进行了系统的年代学、岩石地球化学和同位素地球化学特征研究,探讨了岩体的形成时代、成因及大地构造意义,以丰富对大兴安岭地区中生代构造-岩浆活动的认识。

收稿日期:2012-11-06; 改回日期:2012-11-16

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(1212011085260)和内蒙古重要矿产资源潜力评价及区域成矿规律研究项目(2006-02-YS01)联合资助。

作者简介:郭志军,男,1988年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业;E-mail:GHN_07@163.com。

通讯作者:周振华,男,1981年生,助理研究员,矿物学、岩石学、矿床学专业,主要从事矿床学研究;E-mail:zhzhou@cags.ac.cn。



F₁—华北地台北缘断裂; F₂—西拉木伦河断裂; F₃—二连-贺根山断裂; F₄—乌努尔-鄂伦春断裂; F₅—德尔布干断裂; F₆—大兴安岭主脊断裂; F₇—嫩江断裂

图 1 内蒙古巴林右旗敖尔盖铜矿地质简图(图 a 据任纪舜等,1999^①修改,图 b 据内蒙古地质局昭乌达盟队资料,1962^①修改)

Fig.1 Simplified geological map of the Aoergai copper deposit in Bairin Right Banner, Inner Mongolia (after Ju Ud League Geological Party of Inner Mongolia Bureau of Geology)

2 研究区地质概况及岩体特征

研究区位于大兴安岭多金属成矿带南段,华北板块北缘,兴蒙造山带中东段。矿区古生代以前地层不发育,仅零星见几处晚古生代砂页岩地层。区内火

成岩大面积出露,按其岩石类型可分为喷出岩、侵入岩和脉岩(图 1-b)。喷出岩主要为安山岩,分布在矿区东南部。敖尔盖铜矿床就赋存在安山岩中。侵入岩主要为中-酸性岩,位于矿区西北部,其中可见安山岩捕虏体,说明侵入岩体形成于火山喷发作用之后。

① 内蒙古地质局昭乌达盟队.内蒙[昭乌达盟]巴林右旗敖尔盖铜矿区地质普查报告.1962.

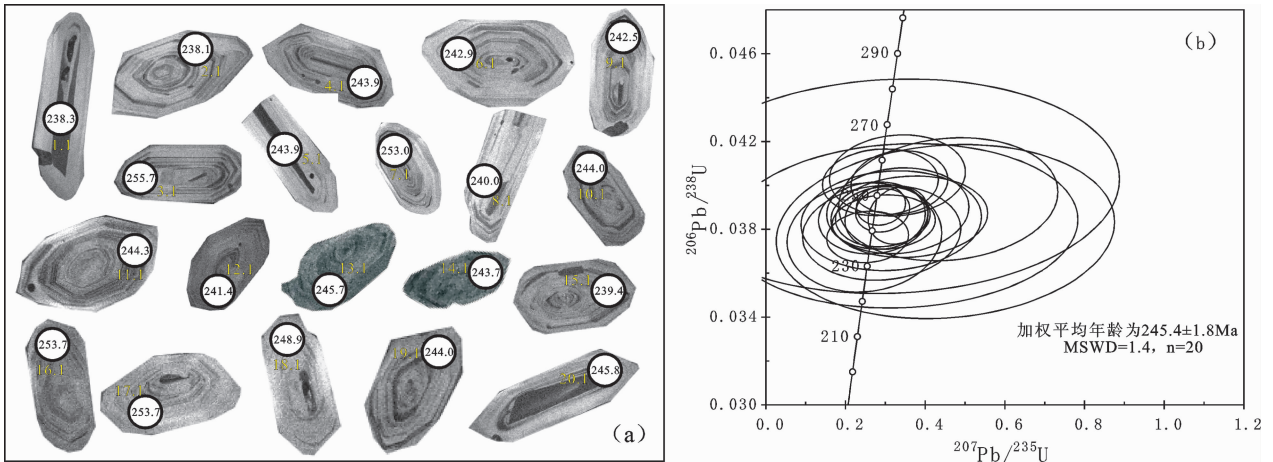


图2 敖尔盖铜矿花岗闪长岩锆石测点 CL 图像(a)和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄谐和图(b)

Fig. 2 CL images of selected zircons (a) and SHRIMP zircon U-Pb concordia diagram (b) of samples from granodiorite in the Aoergai copper deposit

脉岩同时见于喷出岩和侵入岩中,为最晚期岩浆活动的产物。

本文研究对象为矿区大面积出露的中-酸性侵入岩体。该侵入岩体的中心相为花岗岩,边缘相为闪长岩。花岗岩和闪长岩呈渐变过渡关系,且其中均可见铜矿赋存。本次研究用样品为花岗岩与闪长岩的过渡相——花岗闪长岩,样品采集位置见图 1-b。花岗闪长岩样品灰肉红色,细粒花岗结构,块状构造,矿物颗粒大小 1~2 mm,可见星点状黄铜矿,伴生黄铁矿,粒径 1~3 mm。主要矿物组成为石英(20%~25%)、微斜长石(25%~30%)、钠质斜长石(35%~40%),含少量黑云母(1%~2%)、角闪石(1%~3%)等。

3 分析方法

SHRIMP 锆石 U-Pb 测年样品采自敖尔盖铜矿中的花岗闪长岩,采用常规重选法选出重砂矿物,在双目镜下挑选至锆石纯度>99.5%。大多数锆石呈现浅棕褐色短柱状,透明度高,晶形较完整,表面较光滑;少数锆石呈深棕褐色粒状或短柱状,透明度低,晶形不完整,表面发育熔蚀凹坑。

锆石的制靶、显微镜照相、阴极发光(CL)图像分析在中国地质科学院北京离子探针中心完成,同位素测定在中国地质科学院北京离子探针中心 SHRIMP 实验室完成。待测锆石和标准锆石 TEM(年龄为 417 Ma)在玻璃板上用环氧树脂固定,抛光到暴露出锆石的中心面,用反射光和透射光照相,然后镀金,进行阴极发光(CL)照相,以检查锆石的内

部结构。根据锆石的光学图像和 CL 图像,避开裂隙和包裹体,选择合适的测点位置。同位素测定所用仪器为 SHRIMP-II,所用标准锆石为 M257(561.3 Ma, $U=840 \times 10^{-6}$)和 TEM,分别用于测定 U、Th 和 Pb 含量和校正元素间分馏和年龄,具体实验原理和流程参见文献 [10-11]。束斑直径约为 30 μm ,在 SHRIMP 分析过程中,对同一测点均连续进行 5 次扫描分析,并以这 5 次分析的加权平均值作为该测点的年龄分析值。数据处理采用实测 ^{206}Pb 校正锆石中的普通铅,年龄计算采用 Ludwig 编写 ISOPLOT2.49 和 SQUID1.02^[12-13],单个测点的分析误差为 1 σ 。

岩体主量元素、稀土元素、微量元素以及 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。其中主量元素分析仪器型号为飞利浦 PW2404 X 射线荧光光谱仪,采用 GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法 X 射线荧光光谱法分析测定;稀土元素和微量元素分析仪器型号为 Finnigan MAT 制造,HR-ICP-MS (Element I),测试方法和依据参照 DZ/T0223-2001(电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则,实验过程中温度 20 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 30%;Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析仪器型号为 ISOPROBE-T 热电质谱仪,测试方法和依据参照 EJ/T 692-92 岩石矿物铷锶等时年龄测定和 GB/T17672-1999《岩石中铅铷锶同位素测定方法》,实验过程中温度 20 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 27%,Rb-Sr、Sm-Nd 同位素比值误差以 2 σ 计。

4 分析结果

4.1 年代学

对敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品 AEG-05 中的 20 颗锆石的 20 个点进行了 SHRIMP U-Pb 年龄测试,分析结果见表 1 和图 2。样品中锆石结晶较好,呈典型的长柱状晶形,具有典型的岩浆震荡环带,指示其主体为岩浆结晶的产物。由锆石的阴极发光图像可以看出(图 2-a),几乎所有锆石均具有清晰的单期生长的同心环带,个别锆石晶体内含暗色矿物包体,表面有小凹坑,晶棱有弯曲现象。样品 AEG-05 的 U 和 Th 含量分别为 $53 \times 10^{-6} \sim 358 \times 10^{-6}$ 和 $26 \times 10^{-6} \sim 949 \times 10^{-6}$, Th/U=0.49~2.90,平均值为 0.90。上述特征表明,敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品中的锆石符合岩浆成因锆石的特征^[14-15],这与锆石在 CL 图像上呈现的典型的岩浆震荡环带的特征是一致的。

对于相对年轻的锆石(<1 Ga),由于其一般无铅丢失且 ^{207}Pb 积累比较少,因此,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄代表其形成时代^[16]。锆石 SHRIMP U-Pb 年龄结果显示,样品 AEG-05 中 20 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化范围为 238.1~253.7 Ma,其加权平均值为 $(245.4 \pm 1.8)\text{Ma}$, MSWD=1.4(图 2-b),代表该花岗闪长岩的岩浆结晶年龄。

4.2 岩石地球化学

4.2.1 主量元素

从敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品的主量元素、稀土元素和微量元素分析结果(表 2)可以看出,样品 SiO_2 含量为 65.03%~70.11% (均值为 66.37%),属于中酸性火成岩。在 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解上,敖尔盖样品落在花岗闪长岩的范围内(图 3-a)。 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解(图 3-b)上,样品点主要落入高钾钙碱性系列范围内。样品的分异指数(DI)为 73.26~78.06,固结指数(SI)为 9.92~12.10,反映岩石经历了较高的分异演化作用。

敖尔盖样品 A/CNK(0.91~1.03)显示其属于准铝质到弱过铝质的特征。里特曼指数(σ)变化范围在 1.53~2.25,全碱(ALK)质量分数值较高(6.44%~7.07%),碱度率(AR)在 2.12~2.27, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值在 0.34~0.75(均值为 0.61),变化范围较小。 MgO 含量为 1.18%~1.61%。

4.2.2 稀土元素

敖尔盖样品的 ΣREE 值变化范围很小,为

$56.07 \times 10^{-6} \sim 61.72 \times 10^{-6}$ (均值为 59.10×10^{-6})与区域上的铜成矿岩体的 ΣREE 值^[18] ($34.06 \times 10^{-6} \sim 195.65 \times 10^{-6}$)接近。样品的 LREE/HREE 和 $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 变化范围均不大,分别为 11.60~12.24 (均值为 11.95)和 13.85~21.21(均值为 17.37),说明稀土元素分异明显,属于轻稀土富集型。低 HREE 指示它们的岩浆源区可能残留有富集重稀土元素的石榴子石和角闪石^[18]。

球粒陨石标准化^[20]配分曲线上,敖尔盖样品呈右倾轻稀土富集型, δCe 值为 0.95~0.97, δEu 值介于 1.00~1.18,铈为无异常到弱的正异常(图 4-a),指示岩浆源区可能残留有石榴子石和角闪石且无斜长石^[21],或岩浆演化过程中有角闪石的分离结晶。

4.2.3 微量元素

敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品的微量元素特征(表 2)显示,大离子亲石元素 Rb($46.7 \times 10^{-6} \sim 87.1 \times 10^{-6}$)含量较低,Sr($380 \times 10^{-6} \sim 642 \times 10^{-6}$)和 Ba($536 \times 10^{-6} \sim 797 \times 10^{-6}$)含量较高。按照 Sr=400 $\times 10^{-6}$ 和 Yb=2 $\times 10^{-6}$ 为标志,敖尔盖样品属于高 Sr 低 Yb 的埃达克型花岗岩 (Sr=380 $\times 10^{-6} \sim 642 \times 10^{-6}$, Yb=0.416 $\times 10^{-6} \sim 0.637 \times 10^{-6}$),与其平衡的是石榴子石和辉石,说明形成的压力较高(>0.8~1.0 GPa)^[21]。放射性元素 U、Th 含量较低,分别为 $0.726 \times 10^{-6} \sim 0.85 \times 10^{-6}$ 和 $2.1 \times 10^{-6} \sim 2.47 \times 10^{-6}$ 。Nb/Ta 比值在 14.52~17.11,与幔源岩浆 Nb/Ta=17 ± 1 的比值^[22-23]接近。

在微量元素原始地幔标准化^[19]图解中(图 4-b),Nb、Ta、Th、U 等高场强元素具有明显的负异常,而大离子亲石元素 Rb、K、Ba、Sr 等元素具有正异常。这种富 Ba 贫 Th 的特征指示岩石为 I 型花岗岩^[24]。Sr、Ba、K 的富集说明斜长石和黑云母未发生明显分离作用,或是母岩浆本身就富集这些组分^[2]。Nb、Ta 的亏损说明源区可能残留有金红石。微量元素蛛网图曲线整体呈右倾斜趋势,反映微量元素含量与其相容程度呈同步降低,指示岩体经历了结晶分异的演化。

4.2.4 Sr-Nd 同位素特征

从敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品的 Sr-Nd 同位素组成(表 3)可以看出:敖尔盖样品具有较高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (均值为 0.5127)值和高的 Nd 同位素初始值($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i (均值为 0.5125);同时样品具有较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(均值为 0.7052)和低的 Sr 同位素初始值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (均值为 0.7039)。 $\epsilon\text{Nd}(t)=+3.9 \sim +4.4$ ($t=245.4\text{ Ma}$), $\epsilon\text{Sr}(t)=-1.2 \sim -5.9$ ($t=245.4\text{ Ma}$),Nd 同位

表 1 敖尔盖铜矿花岗岩闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果
Table 1 SHRIMP U-Pb dating results of zircon from granodiorite in the Aoergai copper deposit

点号	$^{206}\text{Pb}/\%$	$\text{U}/10^{-6}$	$\text{Th}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	误差 $\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	误差 $\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	误差 $\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma
AEg-05-1.1	3.38	338	949	2.90	11.3	0.0492	16	0.256	16	0.03765	1.3	238.3 \pm 3.0
AEg-05-2.1	6.43	139	91	0.68	4.82	0.0480	32	0.247	32	0.03760	2.7	238.1 \pm 6.3
AEg-05-3.1	4.78	168	118	0.73	6.13	0.0590	21	0.330	21	0.04046	1.9	255.7 \pm 4.7
AEg-05-4.1	2.44	208	183	0.91	7.05	0.0564	14	0.300	14	0.03856	1.5	243.9 \pm 3.7
AEg-05-5.1	1.93	464	613	1.37	15.90	0.0537	8.6	0.289	8.7	0.03909	0.94	247.2 \pm 2.3
AEg-05-6.1	6.64	106	72	0.70	3.75	0.0590	29	0.315	29	0.03839	2.4	242.9 \pm 5.8
AEg-05-7.1	14.69	53	26	0.50	2.14	0.0580	72	0.320	73	0.04000	5.0	253.0 \pm 12.0
AEg-05-8.1	13.04	68	34	0.51	2.56	0.0860	38	0.450	38	0.03790	4.3	240.0 \pm 10.0
AEg-05-9.1	3.41	266	262	1.02	9.05	0.0560	18	0.296	18	0.03833	1.3	242.5 \pm 3.1
AEg-05-10.1	2.30	203	196	1.00	6.87	0.0552	16	0.294	17	0.03857	1.5	244.0 \pm 3.5
AEg-05-11.1	2.83	225	188	0.86	7.69	0.0624	9.1	0.332	9.2	0.03863	1.4	244.3 \pm 3.3
AEg-05-12.1	13.56	73	35	0.49	2.77	0.0650	52	0.340	53	0.03820	4.0	241.4 \pm 9.5
AEg-05-13.1	5.74	139	74	0.55	4.93	0.0620	22	0.331	22	0.03884	2.1	245.7 \pm 5.0
AEg-05-14.1	4.72	172	115	0.69	5.99	0.0510	21	0.270	21	0.03852	1.7	243.7 \pm 4.2
AEg-05-15.1	6.63	128	76	0.61	4.46	0.0560	28	0.291	28	0.03784	2.3	239.4 \pm 5.5
AEg-05-16.1	3.63	202	159	0.82	7.22	0.0520	21	0.288	21	0.04014	1.5	253.7 \pm 3.8
AEg-05-17.1	4.18	220	229	1.08	7.93	0.0606	15	0.335	15	0.04014	1.5	253.7 \pm 3.7
AEg-05-18.1	7.22	87	50	0.60	3.16	0.0840	24	0.460	25	0.03940	2.9	248.9 \pm 7.1
AEg-05-19.1	5.10	174	132	0.78	6.09	0.0680	22	0.360	22	0.03858	2.0	244.0 \pm 4.7
AEg-05-20.1	2.06	358	437	1.26	12.20	0.0547	9.4	0.293	9.5	0.03886	1.0	245.8 \pm 2.5

注:误差为 1σ , Pb_c 和 Pb^* 分别代表普通铅和放射成因铅。

表 2 敖尔盖铜矿花岗岩闪长岩的主量元素(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)组成
 Table 2 Major element (%) and trace element ($\mu\text{g/g}$) compositions of granodiorite
 in the Aoergai copper deposit

	AEG-01	AEG-03	AEG-04	AEG-05		AEG-01	AEG-03	AEG-04	AEG-05
SiO ₂	65.09	70.11	65.24	65.03	Rb	87.1	46.7	75	80.8
TiO ₂	0.41	0.35	0.41	0.41	Sr	380	642	459	464
Al ₂ O ₃	15.47	14.45	14.87	15.49	Zr	149	112	134	149
Fe ₂ O ₃	2.96	2.67	2.85	2.94	Nb	2.42	1.56	2.07	2.28
FeO	1.65	1.60	1.50	1.75	Mo	1.05	0.19	0.518	0.773
MnO	0.077	0.025	0.068	0.066	W	2.24	0.561	1.6	2.11
MgO	1.59	1.18	1.46	1.61	Cs	9.38	1.65	5.23	4.91
CaO	2.93	3.44	3.33	3.06	Ba	725	536	649	797
Na ₂ O	3.97	4.81	4.34	4.05	Hf	3.77	3.01	3.19	3.7
K ₂ O	2.97	1.63	2.73	2.97	Ta	0.155	0.096	0.121	0.157
P ₂ O ₅	0.14	0.13	0.13	0.14	Pb	7.3	5.54	3.46	12.9
LOI	4.21	1.13	4.35	4.02	Bi	0.553	0.335	0.285	4.45
TOTAL	101.47	101.53	101.28	101.54	Th	2.44	2.47	2.1	2.26
La	12.3	12.3	11.8	12.8	U	0.85	0.73	0.726	0.841
Ce	25.3	24.0	23.3	25.8	ΣREE	61.24	57.37	56.07	61.72
Pr	3.18	2.90	2.89	3.14	LREE/HREE	11.60	12.24	12.23	11.74
Nd	12.4	11.1	11.2	12.1	(La/Yb) _n	13.85	21.21	17.78	16.63
Sm	2.46	2.10	2.00	2.24	?Eu	1.05	1.00	1.07	1.18
Eu	0.743	0.634	0.641	0.793	?Ce	0.97	0.95	0.95	0.97
Gd	1.69	1.69	1.57	1.76	Nb/Ta	15.61	16.25	17.11	14.52
Tb	0.274	0.243	0.235	0.257	Nb/La	0.20	0.13	0.18	0.18
Dy	1.34	1.15	1.12	1.34	Th/U	2.87	3.38	2.89	2.69
Ho	0.215	0.183	0.182	0.199	Rb/Sr	0.23	0.07	0.16	0.17
Er	0.547	0.508	0.506	0.579	Rb/Ba	0.12	0.09	0.12	0.10
Tm	0.079	0.083	0.081	0.083	Y/Nb	2.82	3.75	2.85	2.87
Yb	0.637	0.416	0.476	0.552	Rb/Nb	35.99	29.94	36.23	35.44
Lu	0.079	0.060	0.067	0.074	σ	2.18	1.53	2.25	2.24
Y	6.83	5.85	5.90	6.54	DI	73.49	78.06	74.02	73.26
Sc	6.19	4.8	5.53	5.84	SI	12.10	9.92	11.34	12.09
Cr	40.7	16.7	36.4	44.6	AR	2.21	2.12	2.27	2.22
Co	9.55	6.61	8.56	9.07	ALK	6.94	6.44	7.07	7.02
Ni	26.6	9.03	24.6	26.7	A/CNK	1.03	0.91	0.92	1.00
Cu	225	6.75	84.7	72.5	A/MF	1.53	1.67	1.57	1.5
Zn	53.4	16.7	44.7	48.3	C/MF	0.53	0.72	0.64	0.54
Ga	19.7	19.0	18.2	19.1					

注: 分异指数(DI)=Qz+Or+Ab+Ne+Lc+Kp; 固结指数(SI)=MgO×100/(MgO+FeO+Fe₂O₃+Na₂O+K₂O)(wt%); 碱度率(AR)=[Al₂O₃+CaO+(Na₂O+K₂O)]/[Al₂O₃+CaO-(Na₂O+K₂O)](wt%); 里特曼指数 σ=(K₂O+Na₂O)²/(SiO₂-43), 其中 K₂O、Na₂O、SiO₂ 均为氧化物质量百分数; ALK= Na₂O+K₂O(wt%); A/CNK=n(Al₂O₃)/[n(CaO)+n(Na₂O)+n(K₂O)](摩尔比); A/MF=Al₂O₃/(TFeO+MgO)(mol); C/MF=CaO/(TFeO+MgO)(mol)。

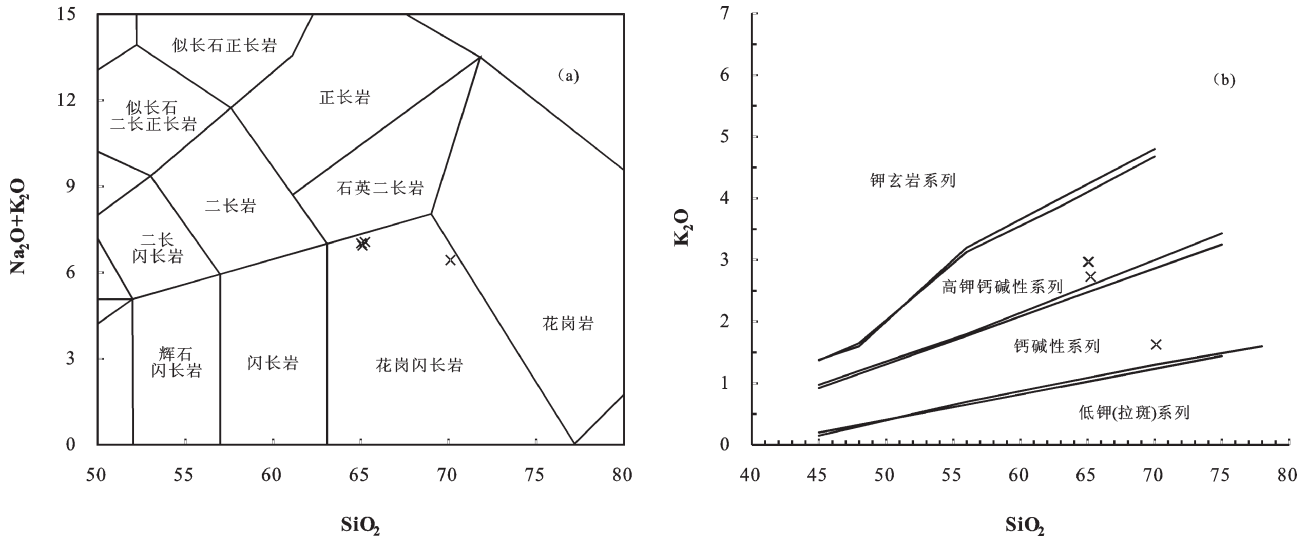


图 3 敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品 SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解(a)和 SiO_2 - K_2O 图解(b)
Fig.3 SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ diagram (a) and SiO_2 - K_2O diagram (b) of granodiorites in the Aoergai copper deposit

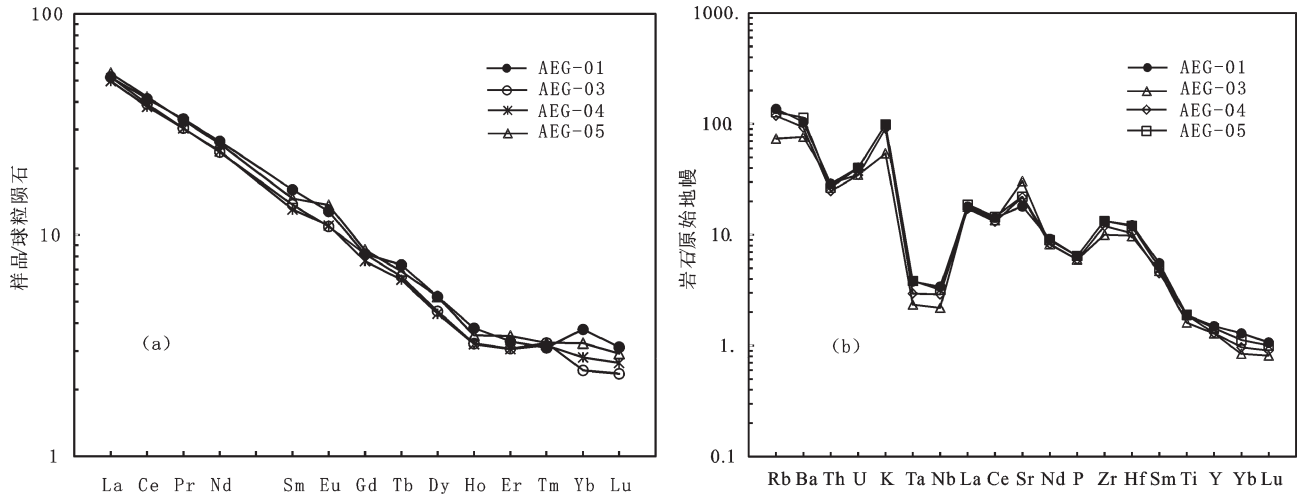


图 4 敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品 REE 配分图解^[19](a)和微量元素蛛网图^[19](b)
Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of granodiorites (a) and primitive mantle-normalized spider diagram of granodiorites (b) in the Aoergai copper deposit

素模式年龄 $T_{DM}=578\sim 657$ Ma(均值为 623.75 Ma)。

5 讨论

5.1 岩浆源区特征

研究表明,与花岗岩有关的内生金属矿床的成矿作用是一个复杂的构造-岩浆演化过程,成矿动力学过程与岩浆动力学过程是密切相关的,成矿作用的本身就是岩浆作用过程的一部分,是岩浆演化的阶段或最终产物^[25]。在 K_2O - Na_2O 花岗岩判别图

解上(图 5-a),敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品落入 I 型花岗岩区域,在 C/MF - A/MF 图解上(图 5-b),敖尔盖样品落入基性岩部分熔融区域内,说明了其原岩为基性火成岩^[26-27]。

埃达克岩(adakite)是指一套具有如下地球化学特征的中酸性岩石^[28-30]: $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, $\text{MgO} < 3\%$, $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$, $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, LREE 强烈富集, HREE 强烈亏损,无负 Eu 异常。敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品具有与埃达克岩相似的地

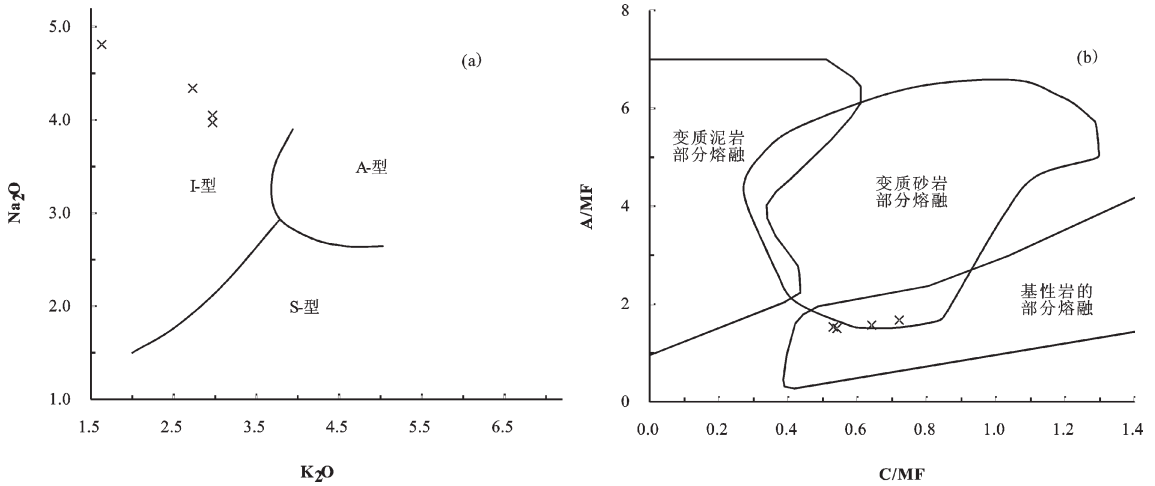


图 5 敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品 K_2O-Na_2O 判别图解^[39](a)和 $C/MF-A/MF$ 判别图解^[40](b)
 Fig.5 K_2O-Na_2O diagram (a) and $C/MF-A/MF$ diagram (b) of granodiorites in the Aoergai copper deposit

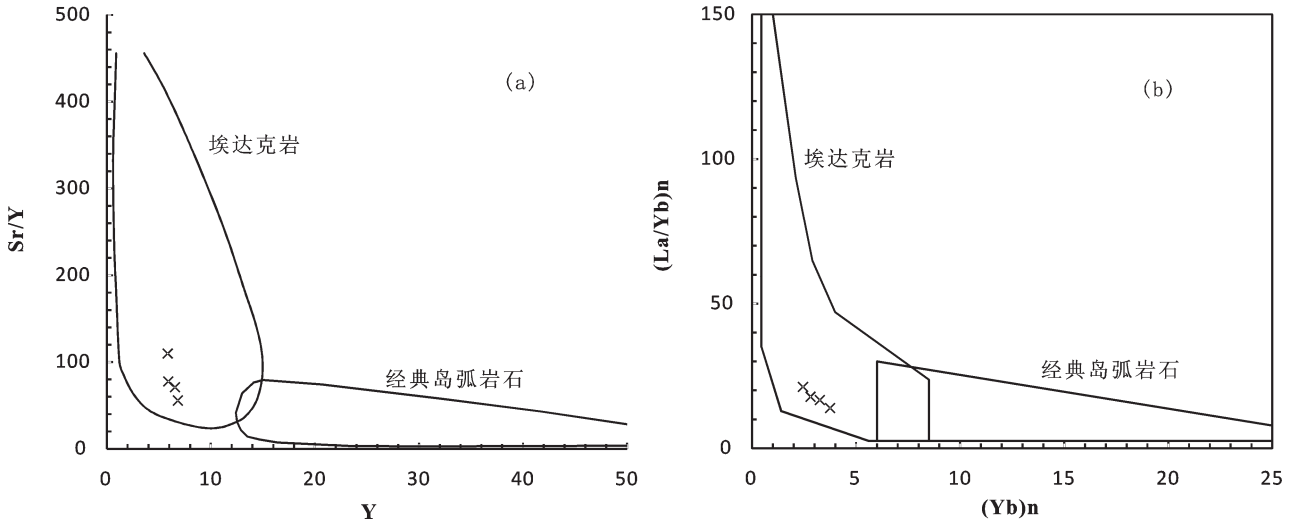


图 6 敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品 $Y-Sr/Y$ (a)、 $(Yb)_n-(La/Yb)_n$ (b)判别图解^[41]
 Fig.6 $Y-Sr/Y$ diagram (a) and $(Yb)_n-(La/Yb)_n$ diagram (b) of granodiorites in the Aoergai copper deposit

球化学特征,除了部分样品的 Al_2O_3 (14.45%~15.49%)和 Sr ($380 \times 10^{-6} \sim 642 \times 10^{-6}$)含量略低(表 2)。在 $Y-Sr/Y$ 、 $(Yb)_n-(La/Yb)_n$ 判别图解上(图 6-a, b),敖尔盖花岗闪长岩样品均落入埃达克岩区域,由此可以看出其应属埃达克质花岗闪长岩,指示其源岩来源较深。

敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品 $Sr-Nd$ 同位素特征显示其具有低的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值和高的 $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ 值。在 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i-\epsilon Nd(t)$ 图解(图 7)中,样品处在亏损地幔(DM)和华北板块陆壳之间,且偏向亏损地幔,落入主地幔趋势线上。说明源岩岩浆物质可能来源

于亏损地幔,在上升成岩的过程中只遭受了少量的地壳物质混染。敖尔盖样品的 $f_{Sm/Nd}$ 值为 $-0.456 \sim -0.451$, 指示源岩没有发生过明显的 $Sm-Nd$ 稀土元素分馏,因此计算得出的 Nd 同位素模式年龄是可靠的^[31]。从样品中得到的 Nd 同位素模式年龄(T_{DM})为 578~657 Ma,说明花岗岩的源岩物质是从新元古代地幔中产生的新生地壳。前人对大兴安岭地区花岗岩的研究也认为新元古代的地壳增生决定了后续花岗岩的物质来源基础^[3,7,31-33]。

因此,敖尔盖铜矿花岗闪长岩体可能是从新元古代亏损地幔中产生的基性火成岩部分熔融形成的。

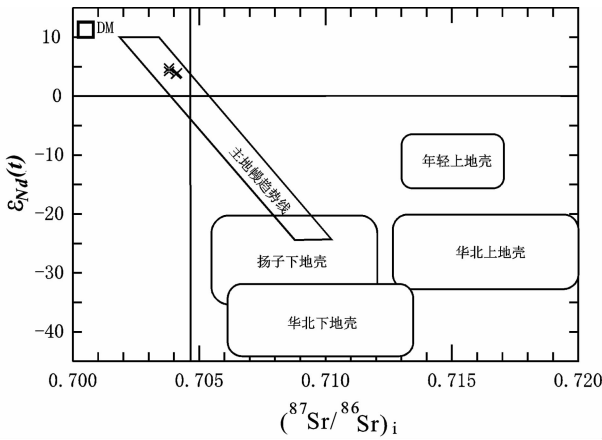


图7 敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-εNd(t)图解
(据 Zindler and Hart (1986)^[35-36]修改)
Fig.7 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-εNd(t)plot for granodiorite samples in
the Aoergai copper deposit

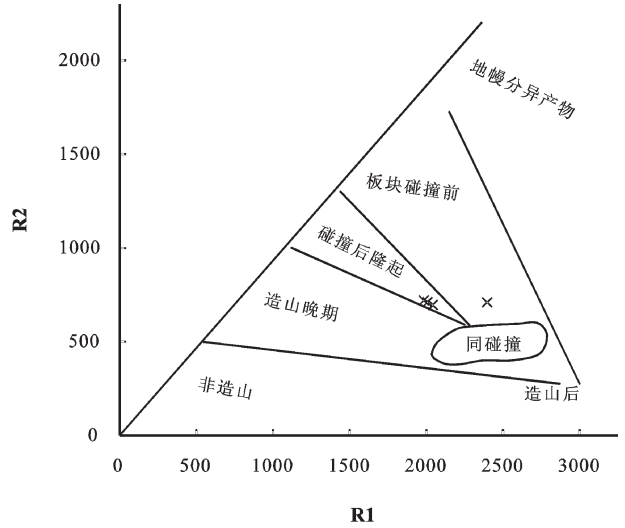


图8 敖尔盖铜矿花岗闪长岩样品 R1-R2 判别图解
Fig.8 R1-R2 discrimination diagram of granodiorites in
the Aoergai copper deposit

5.2 构造背景

埃达克质岩石是高压下形成的岩浆岩，较高的压力下，当压力超过 1 GPa 时，残留相有石榴子石，将会使岩浆亏损 Y、Yb；当压力大于 1.5 GPa 时，残留相有金红石，将造成 Nb、Ta 在熔融的中酸性岩浆中的亏损^[34]。因此利用 Pearce 花岗岩构造环境图解并不能准确判别其构造环境^[37-38](在此判别图上样品几乎全部落入火山弧花岗岩)，但是利用主量元素阳离子特征来构建的 R1-R2 因子判别图解^[39]来判断构造环境是可行的。在 R1-R2 因子判别图解上(图 8) 敖尔盖铜矿花岗闪长岩落入破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)的构造环境和板块碰撞后隆起的构造环境，表明岩浆形成环境复杂，但以碰撞后隆起环境为主。说明该岩体形成于板块碰撞后的挤压环境。

近年来，由于岩石定年技术的发展，在大兴安岭南段及其邻区相继获得了印支期岩浆活动的精确年龄。这些岩浆岩的年龄及其形成的构造背景特征对

于揭示本区构造环境的演化具有重要的意义。将岩浆活动形成的岩体按照其形成时代由老到新列于表 4，从中可以看出，大兴安岭南段兴蒙造山带印支期岩浆活动广泛，贯穿整个印支期，主要集中在 220~250 Ma。前已述及，大兴安岭南段兴蒙造山带经历了中、小块体之间地块的拼合以及由此构成的板块与华北板块的构造对接过程，这一过程最终导致华北板块和西伯利亚板块间古亚洲洋的消失。由于多级序拼合^[1]过程的复杂性，关于华北板块与西伯利亚板块间碰撞缝合的位置和时间，学术界一直有着不同的认识。对于两大板块碰撞缝合的位置，前人的研究基本上支持位于索伦—西拉木伦—长春—延吉一线^[1,2,40-43]。最终碰撞拼贴的时间，大部分学者认为是在二叠纪晚期^[1,2,7,31,43-48]。结合区域地质研究背景以及岩体形成的构造环境，认为该区印支期岩体的形

表 3 敖尔盖铜矿花岗闪长岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素数据及参数
Table 3 Rb - Sr, Sm - Nd isotopic data and some major parameters from
granodiorite in the Aoergai copper deposit

样号	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	f _{SmNd}	ε Sr(t)	ε Nd(t)	T _{DM} /Ma
AEG-01	0.705721	0.000011	0.70380	0.512718	0.000006	0.51255	-0.456	-5.9	+4.4	620
AEG-03	0.704364	0.000011	0.70380	0.512747	0.000008	0.51258	-0.456	-5.9	+4.9	578
AEG-04	0.705317	0.000013	0.70407	0.512696	0.000011	0.51252	-0.451	-2.0	+3.9	657
AEG-05	0.705525	0.000011	0.70412	0.512707	0.000008	0.51253	-0.452	-1.2	+4.1	640

注： $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{CHUR}}^0=0.7045$ ， $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{CHUR}}^0=0.0827$ ， $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}^0=0.1967$ ， $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}^0=0.512638$ ； $\lambda_{\text{Rb}}=1.42\times 10^{-11}/\text{a}$ ， $\lambda_{\text{Sm}}=6.5\times 10^{-12}/\text{a}$ ， $t=245.4\text{ Ma}$ 。

表 4 大兴安岭南段印支期岩浆活动及其构造背景
Table 4 Indosinian plutons in the southern segment of the Da Hingan Mountains and their tectonic settings

位置	岩体名称	定年结果	定年方法	岩体形成环境	资料来源
内蒙古苏尼特左旗	巴音乌拉埃达克质花岗岩长岩	(256.1±0.9)Ma	单颗粒锆石U-Pb年龄	熔融深度75~85 km	张玉清, 2009 ^[49]
吉林	大玉山花岗岩体	(248±4)Ma	TIMS颗粒锆石U-Pb年龄	板块碰撞拼合的产物	孙德有等, 2004 ^[2]
内蒙古中部锡林浩特—西乌旗	A型酸性火山岩	(245.7±1.8)Ma&(242.7±4.0)Ma	K-Ar全岩年龄	造山后阶段产物	张晓晖等, 2006 ^[44]
内蒙古巴林右旗	埃达克质花岗岩长岩	(245.4±1.8)Ma (MSWD=1.4)	SHRIMP锆石U-Pb年龄	碰撞后隆起	本文, 2012
内蒙古林西地区	高镁埃达克质安山岩	(244±2)Ma	LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄	埃达克质岩石	王冬兵等, 2009 ^[50]
内蒙古大井矿区外围	大四段似斑状黑云母二长花岗岩	242.8Ma	LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年龄	挤压构造环境	江思宏等, 2012 ^[51]
内蒙古中部四子王旗地区	布龙二长花岗岩	(239±4)Ma	LA-ICP-MS锆石 U-Pb年龄		柳长峰等, 2010 ^[52]
	格尔图白云母正长花岗岩	(238±6)Ma~(224±8)Ma			
内蒙古查干敖包	石英闪长岩	(237±6)Ma	SHRIMP锆石U-Pb年龄	拉伸构造环境的产物	张万益等, 2008 ^[53]
大兴安岭中部乌兰浩特—索伦地区	花岗岩	(235~225)Ma	激光ICP-MS锆石U-Pb年龄	与岩石圈伸展体制有关	葛文春等, 2005 ^[54]
内蒙古东部西拉木伦河以北	双井子花岗岩	(229.2±4.1)Ma&(237.5±2.7)Ma	SHRIMP锆石U-Pb年龄	伸展构造背景	李锦钦等, 2007 ^[55]
内蒙古苏尼特左旗地区	A型花岗岩	(222±4)Ma	SHRIMP锆石U-Pb年龄	与岩石圈伸展作用有关	石玉岩等, 2007 ^[56]
华北陆块北缘内蒙古中部	一系列花岗岩	227~207 Ma	锆石U-Pb表面年龄	碰撞后构造环境	陶继雄等, 2004 ^[57]
内蒙古苏左旗	包尔汗喇嘛庙岩体	222~204 Ma	LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb年龄	岩石圈折沉事件	石玉岩等, 2004 ^[58]
内蒙古东南部	羊角林高勒二长花岗岩	(216.6±0.8)Ma	单颗粒锆石U-Pb年龄		鲍庆中等, 2007 ^[59]
吉林省中部	三道河正长花岗岩	(216±3)Ma	锆石LA-ICPMS年龄	岩石圈伸展作用	孙德有等, 2005 ^[60]

成可能是在古亚洲洋闭合后,且随着岩体年龄的由老到新,其形成的构造环境可能由挤压转为伸展。

因此,敖尔盖铜矿花岗闪长岩体可能是印支早期古亚洲洋在本区消失后,在板块碰撞引起的挤压环境下形成的。同时,印支早期本区岩浆岩形成的构造背景可能为挤压环境,而到中晚期则可能为伸展环境。

6 结 论

(1) 锆石 U-Pb 定年结果表明,敖尔盖铜矿中-酸性侵入岩体的成岩年龄分别为 $(245.4 \pm 1.8)\text{Ma}$ (MSWD=1.4),为大兴安岭南段印支早期岩浆活动的产物。

(2) 敖尔盖铜矿中-酸性侵入岩体具有和埃达克岩相似的地球化学特征,结合 Sr-Nd 同位素以及构造环境特征,指示该岩体可能是印支早期古亚洲洋在本区消失后,在板块碰撞引起的挤压环境下,由新元古代亏损地幔中产生的基性火成岩的部分熔融形成的。

(3) 大兴安岭南段印支期岩浆岩体的年龄及形成的构造背景暗示该区印支早期的构造背景可能为挤压环境,而演化到中晚期则可能为伸展环境。

致谢:野外地质工作期间得到了内蒙古地质调查院的大力支持和帮助,北京离子探针中心杜利林副研究员在论文试验中给予了大力帮助,审稿专家给论文提出了许多建设性的意义,特致谢忱!

参考文献(References):

- [1] 李双林, 欧阳自远. 兴安造山带及邻区的构造格局与构造演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(3):45-54.
Li Shuanglin, Ouyang Ziyuan. Tectonic framework and evolution of Xing'anling-Mongolian Orogenic Belt (XMOB) and its adjacent region [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1998, 18(3): 45-54 (in Chinese with English abstract).
- [2] 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 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, 2004, 34(2):174-181.
Sun Deyou, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, et al. The final closing time of the west Lamulun River-Changchun-yanji plate suture zone—Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(2):174-181 (in Chinese with English abstract).
- [3] 林强, 葛文春, 吴福元, 等. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学 [J]. 岩石学报, 2004, 20(3):403-412.
Lin Qiang, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, et al. Geochemistry of Mesozoic granites in Da Hinggan Ling ranges [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004,20(3):403-412(in Chinese with English abstract).
- [4] 郝立波, 段国正, 李殿超, 等. 大兴安岭东南缘中酸性浅成侵入体地质地球化学特征与铜矿化[J]. 地质找矿论丛, 2001, 16(1):19-23.
Hao Libo, Duan Guozheng, Li Dianchao, et al. Geological and geochemical characteristics of intermediate-acid hypabyssal intrusive rocks and their relations to copper metallogenesis in the southeast of the Da Xing'an Ling mountains [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2001, 16 (1):19-23 (in Chinese with English abstract).
- [5] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993:437-438.
Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Heilongjiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993:437-438(in Chinese with English abstract).
- [6] 邵济安, 牟保磊, 何国琦, 等. 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), 1997, 27(5):390-394.
Shao Ji'an, Mu Baolei, He Guoqi, et al. The geological processes of northern part of North China during the Paleasian and Pacific tectonics [J]. Science in China (Series D), 1997, 27(5):390-394(in Chinese).
- [7] 吴福元, 孙德有, 林强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生 [J]. 岩石学报, 1999, 15(002):181-189.
Wu Fuyuan, Sun Deyou, Lin Qiang. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(002):181-189(in Chinese with English abstract).
- [8] 王万军, 孙振家, 胡祥昭. 内蒙古前进场花岗岩体的地质特征及其构造环境 [J]. 地质与勘探, 2005, 41(2):35-40.
Wang Wanjun, Sun Zhenjia, Hu Xiangzhao. Geological characters and tectonic setting of Qianjinchang granite in Inner Mongolia [J]. Geology and Prospecting, 2005, 41 (2):35-40 (in Chinese with English abstract).
- [9] 任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用 [J]. 地质前缘, 1999,6(3):85-93.
Ren Jishun, Niu Baogui, Liu Zhigang. Soft collision superposition orogeny polycyclic suturing [J]. Earth Sciences Frontiers, 1999, 6 (3):85-93(in Chinese with English abstract).
- [10] Compston W, Williams I, Meyer C. U-Pb geochronology of zircons from lunar Breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe [J]. J. Geophys. Res., 1984, 89(Supp): 525-534.
- [11] Williams I, Claesson S. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides [J]. Contributions to mineralogy and petrology, 1987, 97(2):205-217.
- [12] KR L. ISOPLOT/EX Version 2.49: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkley Geochronological Centre Special Publication, No.1a, 2001a.

- [13] KR L.SQUID Version 1.02: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkley Geochronological Centre Special Publication, No.2, 2001.
- [14] Claesson S, Vetrin V, Bayanova T, et al. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia; a record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic [J]. *Lithos*, 2000, 51(1/2):95-108.
- [15] Hoskin P, Black L. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. *Journal of metamorphic Geology*, 2000, 18(4):423-439.
- [16] Griffin W, Belousova E, Shee S, et al. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons [J]. *Precambrian Research*, 2004, 131(3):231-282.
- [17] 高进路, 肖成东, 阎国翰. 东蒙地区燕山期三类成矿岩体地质地球化学特征 [J]. *地质找矿论丛*, 2002, 17(3):152-160.
Gao Jinlu, Xiao Chengdong, Yan Guohan. Geological and geochemical characteristics of three types of Yanshanian metallogenetic plutons in eastern Inner Mongolia [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2002, 17(3):152-160 (in Chinese with English abstract).
- [18] Douce A E P, Beard J S. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(3):707-738.
- [19] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1):313-345.
- [20] 张旗, 赵太平, 王焰, 等. 中国东部燕山期岩浆活动的几个问题 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(3):273-280.
Zhang Qi, Zhao Taiping, Wang Yan, et al. A discussion on the Yanshanian magmatism in eastern China [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2001, 20(3):273-280 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(9):2249-2269.
Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, et al. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(9):2249-2269 (in Chinese with English abstract).
- [22] Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90(3):297-314.
- [23] Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3-4):347-359.
- [24] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992:109.
Li Changnian. *Trace Element Petrology of Igneous Rocks* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992:109 (in Chinese with English abstract).
- [25] Clemens J. Granites and granitic magmas: strange phenomena and new perspectives on some old problems [J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2005, 116(1):9-16.
- [26] Collins W, Beams S, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. *Contributions to mineralogy and petrology*, 1982, 80(2):189-200.
- [27] Altherr R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 2000, 50(1/3):51-73.
- [28] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347(6294):662-665.
- [29] 张旗, 王焰, 刘伟, 等. 埃达克岩的特征及其意义 [J]. *地质通报*, 2002, 21(7):431-435.
Zhang Qi, Wang Yan, Liu Wei, et al. Adakite: Its characteristics and implications [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(7):431-435 (in Chinese with English abstract).
- [30] 张旗, 王焰, 王元龙. 埃达克岩与构造环境 [J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(2):101-108.
Zhang Qi, Wang Yan, Wang Yuanlong. On the relationship between adakite and its tectonic setting [J]. *Geotectonica et metallogenia*, 2003, 27(2):101-108 (in Chinese with English abstract).
- [31] 吴福元, 江博明, 林强. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义 [J]. *科学通报*, 1997, 42(20):2188-2192.
Wu Fuyuan, Jahn Borming, Lin Qiang. Isotopic characteristics of the post-orogenic granite in orogenic belt of northeastern China and their implications in crustal growth [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(20):2188-2192 (in Chinese with English abstract).
- [32] 洪大卫, 谢锡林. 兴蒙造山带正 ϵ (Nd, t) 值花岗岩的成因和大陆地壳生长 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(2):441-456.
Hong Dawei, Xie Xilin. Genesis of positive ϵ (Nd, t) granitoids in the Da Hinggan MTS. -Mongolia orogenic belt and growth continental crust [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(2):441-456 (in Chinese with English abstract).
- [33] 邵济安, 洪大卫, 张履桥. 内蒙古火成岩 Sr-Nd 同位素特征及成因 [J]. *地质通报*, 2002, 21(12):817-822.
Shao Ji'an, Hong Dawei, Zhang Lvqiao. Genesis of Sr-Nd isotopic characteristics of igneous rocks in Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(12):817-822 (in Chinese with English abstract).
- [34] Xiong X, Adam J, Green T. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis [J]. *Chemical Geology*, 2005, 218(3):339-359.
- [35] Zhou Z H, Mao J W, Lyckberg P. Geochronology and isotopic geochemistry of the A-type granites from the Huanggang Sn-Fe deposit, southern Great Hinggan Range, NE China: Implication

- for their origin and tectonic setting [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012.
- [36] Zindler A, Hart S. Chemical geodynamics [J]. *Annual review of earth and planetary sciences*, 1986, 14:493-571.
- [37] 张旗, 金惟俊, 熊小林, 等. 中国不同时代 O 型埃达克岩的特征及其意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(3):432-447.
Zhang Qi, Jin Weijun, Xiong Xiaolin, et al. Characteristics and implication of O-type adakite in China during different geological periods [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(3):432-447(in Chinese with English abstract).
- [38] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6):1217-1238.
Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, et al. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6):1217-1238(in Chinese with English abstract).
- [39] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. *Chemical Geology*, 1985, 48(1/4):43-55.
- [40] 朱绅玉, 杨继贤. 内蒙古北部地槽区的板块构造遗迹及其演化历史[J]. *中国区域地质*, 1991(4):335-341.
Zhu Shenyu, Yang Jixian. The remains and history of evolution of the plate tectonics in the geosynclinal region in the northern part of Inner Mongolia [J]. *Regional Geology of China*, 1991(4):335-341 (in Chinese with English abstract).
- [41] 曹生儒. 对内蒙古板块构造轮廓的新认识 [J]. *中国区域地质*, 1993, 3:211-215.
Cao Shengru. The framework of plate tectonics of Inner Mongolia [J]. *Regional Geology of China*, 1993, 3:211-215(in Chinese with English abstract).
- [42] 童英, 洪大卫, 王涛, 等. 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*, 2010, 31(3):395-412.
Tong Ying, Hong Dawei, Wang Tao, et al. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the Sino - Mongolian border and its tectonic and Metallogenic implications [J]. *Acta Geoscience Sinica*, 2010, 31(3):395-412(in Chinese with English abstract).
- [43] 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. *岩石学报*, 2009, 25(11):2695-2726.
Chen Yanjing, Zhai Mingguo, Jiang Shaoyong. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (11):2695 -2726 (in Chinese with English abstract).
- [44] 张晓晖, 张宏福, 汤艳杰, 等. 内蒙古中部锡林浩特—西乌旗早三叠世 A 型酸性火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(11):2769-2780.
Zhang Xiaohui, Zhang Hongfu, Tang Yanjie, et al. Early Triassic A-type felsic volcanism in the Xilinhaote-Xiwuqi, central Inner Mongolia: Age, geochemistry and tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (11):2769-2780 (in Chinese with English abstract).
- abstract).
- [45] 王荃. 内蒙古中部中朝与西伯利亚古板块间缝合线的确定[J]. *地质学报*, 1986, 60(1):31-41.
Wang Quan. Recongnition of the suture between the Sino-korean and Siberian Paleoplates in the middle part of Inner Mongolia [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1986, 60(1):31-41(in Chinese with English abstract).
- [46] 和政军, 刘淑文, 任纪舜, 等. 内蒙古林西地区晚二叠世—早三叠世沉积演化及构造背景[J]. *中国区域地质*, 1997, 16(4):403-409.
He Zhengjun, Liu Shuwen, Ren Jishun, et al. Late Permian-early Triassic sedimentary evolution and tectonic setting of the Linxi region, Inner Mongolia [J]. *Regional Geology of China*, 1997, 16 (4):403-409(in Chinese with English abstract).
- [47] Seng r A, Burtman V. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364:299-307.
- [48] 尚庆华. 北方造山带内内蒙古中、东部地区二叠纪放射虫的发现及意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(24):2574-2579.
Shang Qinghua. The discovery and significance of Permian radiolarians in the northern and middle Inner Mongolia, Northern orogenic belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (24):2574-2579(in Chinese).
- [49] 张玉清. 内蒙古苏尼特左旗巴音乌拉二叠纪埃达克质花岗岩类地球化学特征及其地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2009, 28(4):329-338.
Zhang Yuqing. Geochemical characteristics of Permian adakitic granodiorite in Bayinwula of Sonid Left Banner, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2009, 28(4):329-338(in Chinese with English abstract).
- [50] 王冬兵, 刘勇胜, 宗克清, 等. 内蒙古林西早中生代 O 型高镁埃达克质安山岩的发现及其意义 [J]. *地质科技情报*, 2009, 28(006):31-38.
Wang Dongbing, Liu Yongsheng, Zong Keqing, et al. Early Mesozoic O-type high-Mg adakitic Andesites from Linxi area, Inner Mongolia and its implication [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28 (006):31-38 (in Chinese with English abstract).
- [51] 江思宏, 梁清玲, 刘翼飞, 等. 内蒙古大井矿区及外围岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时间的约束 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(2):495-513.
Jiang Sihong, Liang Qingling, Liu Yifei, et al. Zircon U-Pb ages of the magmatic rocks occurring in and around the Dajing Cu-Ag-Sn polymetallic deposit of Inner Mongolia and constrains to the ore-forming age [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(2):495-513(in Chinese with English abstract).
- [52] 柳长峰, 杨帅师, 武将伟, 等. 内蒙古中部四子王旗地区晚二叠—早三叠世过铝花岗岩定年及成因 [J]. *地质学报*, 2010, 84(7):1002-1016.
Liu Changfeng, Yang Shuashi, Wu Jiangwei, et al. Dating and petrogenesis of late Permian-early Triassic peraluminous granites in

- the Siziwangqi area, Inner Mongolia [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(7):1002-1016(in Chinese with English abstract).
- [53] 张万益, 聂凤军, 江思宏, 等. 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*, 2008, 27(3):177-184.
- Zhang Wanyi, Nei Fengjun, Jiang Sihong, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age of quartz diorite in Qagan Obo of Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2008, 27(3):177-184(in Chinese with English abstract).
- [54] 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 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*, 2005, 21(3):749-762.
- Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, et al. Zircon U-Pb ages and its significance of the Mesozoic granites in the Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3):749-762(in Chinese with English abstract).
- [55] 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中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*, 2007, 23(3):565-582.
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, et al. 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*, 2007, 23(3):565-582(in Chinese with English abstract).
- [56] 石玉若, 刘敦一, 张旗, 等. 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*, 2007, 26(2):183-189.
- Shi Yuruo, Liu Dunyi, Zhang Qi, et al. 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*, 2007, 26(2):183-189 (in Chinese with English abstract).
- [57] 陶继雄, 胡凤翔, 陈志勇. 华北陆块北缘印支期 S 型花岗岩带特征及其构造环境 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2004, 22(2):112-118.
- Tao Jixiong, Hu Fengxiang, Chen Zhiyong. Characteristics and tectonic setting of Indosinian S-type granites in the northern margin of North China landmass [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2004, 22(2):112-118 (in Chinese with English abstract).
- [58] 石玉若, 刘敦一, 张旗, 等. 内蒙古苏左旗地区闪长-花岗岩类 SHRIMP 年代学 [J]. *地质学报*, 2004, 78(6):789-799.
- Shi Yuruo, Liu Dunyi, Zhang Qi, et al. SHRIMP dating of diorites and granites in southern Suzuoqi, Inner Mongolia [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(6):789-799 (in Chinese with English abstract).
- [59] 鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 等. 内蒙古东南部晚古生代裂谷区花岗岩质岩石锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义 [J]. *中国地质*, 2007, 34(5):790-798.
- Bao Qingzhong, Zhang Changjie, Wu Zhili, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granitoids in a Late Paleozoic rift area, southern Inner Mongolia, and its implications [J]. *Geology in China*, 2007, 34(5):790-798(in Chinese with English abstract).
- [60] 孙德有, 吴福元, 高山, 等. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(002):263-275.
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Gao Shan, et al. Confirmation of two episodes of A-type granite emplacement during Late Triassic and Early Jurassic in the central Jilin Province, and their constraints on the structural pattern of Jilin-Heilongjiang Area, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(002):263-275(in Chinese).

SHRIMP U–Pb zircon dating and petrogeochemical characteristics of the intermediate–acid intrusive rocks in the Aoergai copper deposit of Inner Mongolia

GUO Zhi–jun¹, ZHOU Zhen–hua¹, LI Gui–tao², LI Jin–wen¹, WU Xin–li³,
OUYANG He–gen³, WANG Ai–shun⁴, XIANG An–ping¹, DONG Xu–zhou³

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Geology and Mineral Resources Development Bureau of Inner Mongolia, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China; 3. School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract: The Aoergai copper deposit is located in Xingfuzhilusumu area of Bairin Right Banner in Inner Mongolia, and its tectonic setting is Late Paleozoic accretion orogenic belt of southern Da Hinggan Mountains. The samples collected in this study were intermediate–acid intrusive rocks. Zircon SHRIMP U–Pb dating results show that the granodiorites were formed at 245.4 ± 1.8 Ma (MSWD=1.4), being the product of magmatism in early Indosinian period. The granodiorites in the Aoergai copper deposit have similar petrogeochemical characteristics to adakite. The granodiorites yielded the following data: $\text{SiO}_2 \geq 56$ wt.% (65.03~70.11 wt.%), $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15$ wt.% (14.45~15.49 wt.%), $\text{MgO} < 3$ wt.% (1.18~1.61 wt.%), $\text{Y} < 18 \mu\text{g/g}$ (5.85~6.83 $\mu\text{g/g}$), $\text{Yb} \leq 1.9 \mu\text{g/g}$ (0.416~0.637 $\mu\text{g/g}$), $\text{Sr} > 400 \mu\text{g/g}$ (380~642 $\mu\text{g/g}$), $\text{LREE/HREE} = 11.60 \sim 12.24$, and $\delta \text{Eu} = 1.00 \sim 1.18$, indicating that they were formed at a great depth and under strong stress. The granodiorites have high $\epsilon \text{Nd} (t)$ values (+3.9~+4.4), low $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ values (0.70380~0.70412), and young Nd model ages (578~657Ma), suggesting that the magma might have been derived from a depleted mantle source in Neoproterozoic. Based on regional tectonic settings, the authors consider that the granodiorites in the Aoergai copper deposit were most likely derived from partial melting of mafic materials in the depleted mantle in a compression tectonic setting after the disappearance of the Paleo–Asian Ocean. Based on regional analysis, the authors suggest that the tectonic setting of the plutons was an environment of conversion from compression to extension in Indosinian period.

Key words: SHRIMP U–Pb dating; petrogeochemistry; Sr and Nd isotopic compositions; adakite; early Indosinian; Aoergai copper deposit; southern segment of the Da Hinggan Mountains

About the first author: GUO Zhi–jun, male, born in 1988, master candidate, majors in mineralogy petrology, and deposit geology; E–mail: GHN_07@163.com.