

内蒙古白乃庙地区铜（金）和金矿床钼、 铈和铅同位素研究^①

聂凤军 裴荣富 吴良士

（中国地质科学院矿床地质研究所，北京）

Arne Bjorlykke

（挪威奥斯陆大学地质系，挪威奥斯陆）

提 要：内蒙古白乃庙地区产出有白乃庙铜（金）矿床（南、北矿带）、白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带，是华北陆台北缘金属成矿带的重要组成部分。笔者测定和解释了上述三个矿床的钼、铈和铅同位素比值和变化特征。研究认为：白乃庙铜（金）矿床南、北矿带在成矿时代、成矿物质来源和形成过程方面存在明显差异，南矿带条带状、块状硫化物矿石的形成作用始于 1130×10^6 a前的基性火山喷发活动。相比之下，北矿带细脉浸染状和脉状铜-钼-金矿石与加里东期（ 440×10^6 a）花岗闪长斑岩的侵位和结晶分异密切相关。白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带是岩浆热液、大气降水混合，并且对基底岩层或绿片岩围岩进行淋滤、萃取的结果。白乃庙地区铜（金）矿床和金矿床（点）成矿物质来源和形成机制的厘定，对于了解华北地台北缘内蒙古中段金属成矿带的形成与演化具有重要意义。

主题词：内蒙古白乃庙 铜金矿床 钼、铈和铅同位素

1 地质背景

研究区位于华北地台北缘白乃庙地体一岩浆带内，其南、北两侧分别以温都尔庙和徐尼乌苏深大断裂为界^[1]。区内出露的地层单元主要为中元古界白银都西群变质岩（ 1394×10^6 a）^②，白乃庙群变质基性火山岩（ 1130×10^6 a）^[2]，中志留统徐尼乌苏组类复理石建造和中、上石炭统一二叠统沉积岩。白乃庙群绿片岩是铜（金）矿床和金矿床的重要容矿围岩，该套岩层的东部和东北侧与白银都西群变质岩呈断层接触，南侧为徐尼乌苏组不整合覆盖。局部地段，绿片岩为加里东期花岗闪长斑岩侵入。聂凤军等^[3]（1993）和陈琦等（1992）^[1]研究认为：白乃庙群绿片岩大体可划分为上、中和下三个岩性段，下部 and 上部岩性段主要为绿泥斜长片岩、角闪斜长片岩和绿泥残玢变岩，而中部岩性段为绿片岩、长英片岩和绢云石英片岩。绿片岩的原岩为中元古代海相中基性火山岩。此外，在徐尼乌苏断裂带以南分布有中元古界白云鄂博群火山岩沉积岩，局部地段见其不整合于“五台群变质岩”之上^[1]，故可

① 国家青年自然科学基金（4900004）和内蒙古地质矿产局联合资助项目

聂凤军，男，37岁，副研究员。长期从事铜、金矿床地质和岩石学研究。邮政编码：100037
1993-12-25收稿 1994-2-18修改回

② 聂凤军等，1994，内蒙古白银都西群变质火山岩的钼、铈同位素研究 地质论评（待刊稿）

推断本区中元古界岩层之下存在有与华北板块相同的结晶基底。

1.1 白乃庙铜(金)矿床

白乃庙铜(金)矿床是一个以铜为主兼含金、钼、锌、银和硫的多金属矿床。整个矿床可划分为南、北两个矿带, 12个矿段和百余个矿体, 其主要地质特征归纳如下: (1) 南矿带各矿体主要在绿片岩内产出, 并且以规模大和品位高为特点。北矿带各矿体大都在加里东期花岗闪长斑岩内部及其与绿片岩接触带上产出, 规模相对较小和品位较低。南、北矿带重要矿体上部均见有风化淋滤形成的氧化带。(2) 南矿带各矿体与围岩产状一致, 呈层状或似层状分布, 矿体的延伸深度均大于走向长度, 部分矿体在700m深处仍无收敛和尖灭之势。北矿带各矿体大都呈不连续透镜体状产出, 走向和倾向延伸较小, 呈单斜叠瓦状或雁行状排列。(3) 南矿带铜(金)矿石以条带状、块状和细脉浸染状为主, 北矿带为细脉浸染状、网脉状、脉状和胶状。交代溶蚀、压碎和揉皱构造在南、北矿带各矿体中均可见及。(4) 铜(金)矿石主要金属矿物有: 黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿和磁铁矿, 次要矿物为磁黄铁

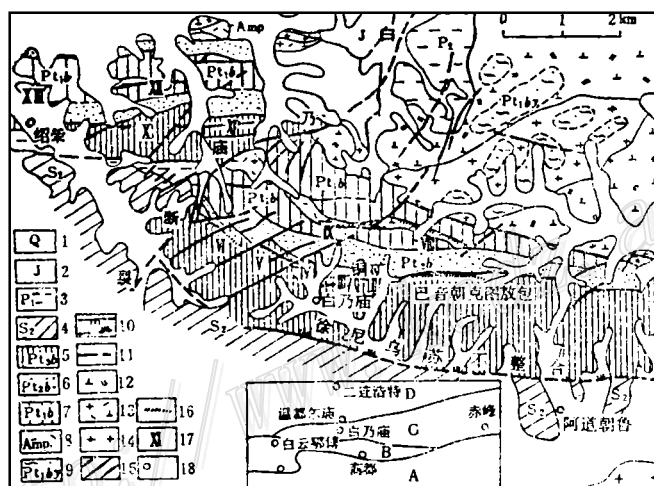


图1 内蒙古白乃庙铜(金)和金矿区地质略图

1—第四系; 2—侏罗系火山岩; 3—下二叠统三面井组沉积岩; 4—中志留统徐尼乌苏组类复理石建造; 5—白乃庙群上部岩性段; 6—白乃庙群中部岩性段; 7—白乃庙群下部岩性段; 8—斜长角闪岩; 9—中元古界白银都西群变质岩; 10—断层; 11—推测断层; 12—晚元古代石英闪长岩; 13—早古生代花岗闪长斑岩; 14—晚古生代花岗岩类; 15—含金石英脉; 16—铜(金)矿化带; 17—铜(金)矿体编号; 18—居民点; A—华北克拉通区(具 2.5×10^3 a 结晶基底); B—中元古代大陆裂谷—被动陆缘; C—晚元古—早古生代地体岩浆弧带; D—晚古生代构造带

Fig.1. Simplified geological map of the Bainaimiao copper (gold) mineralized district, Inner Mongolia.

1—Quaternary sediments; 2—Jurassic volcanic rocks; 3—Lower Permian sediments of Sanmianjing Formation; 4—Middle Silurian flysch of Xuniwusu Formation; 5—Upper lithological section of Bainaimiao Group; 6—Middle lithological section of the Bainaimiao Group; 7—Lower lithological section of Bainaimiao Group; 8—Middle Proterozoic amphibolite; 9—Middle Proterozoic metamorphic rocks of Baiyinduixi Group; 10—Faults; 11—Inferred fault; 12—Late Proterozoic quartz diorite; 13—Early Paleozoic granodiorite porphyry; 14—Late Paleozoic granitoids; 15—Auriferous quartz veins; 16—Copper (gold) mineralized zones; 17—Number of copper (gold) body; 18—Villages; A—North China Platform including 2500Ma old crystalline basement; B—Middle Proterozoic continent rift; C—Late Proterozoic-Early Paleozoic terrain-magmatic arc belt; D—Late Paleozoic tectonic belt.

矿、闪锌矿、方铅矿、斑铜矿、辉钴矿和自然金,部分矿石中尚见有孔雀石、褐铁矿和自然铜。脉石矿物有石英、方解石和黑云母,次为绢云母、绿泥石和绿帘石等。(5)南矿带铜(金)矿石铜含量为0.39%~1.0%,金含量为0.81g/t~2g/t,而钼含量为 $(20\sim60)\times 10^{-6}$ 。相比之下,北矿带铜(金)矿石铜含量变化范围为0.38%~0.55%,金含量为0.03g/t,钼含量大于 100×10^{-6} 。(6)鉴于南、北矿带矿体围岩岩性不同,热液蚀变类型亦存在一定差异,从矿体中心向外,南矿带各矿体向外依次为硅化带→绿泥石-绿帘石化带→碳酸盐化带→绿片岩。北矿带各矿体则为黑云母化带→硅化-绢云母化带→绿泥石-绿帘石化带→碳酸盐化带→花岗闪长斑岩。

1.2 白乃庙石英脉金矿床

位于白乃庙铜(金)矿床北矿带北侧约2.0km处,成矿围岩为白乃庙群绿片岩和绢云长英片岩。矿床由41条含金石英脉及两侧的含金蚀变岩构成,其中能够圈定出工业矿体的有10、17、20、21和26号脉。26号脉金矿体以规模大和品位高为特点,约占整个金矿床储量的50%。金矿床主要地质特征为:(1)金矿床中95%的含金石英脉或蚀变岩受北东向断裂及次一级构造控制,其中部分含金脉体直接位于断层内部。含金石英脉多呈膨胀、收缩相间的平行复合脉或斜交复合脉,具有成群或呈带分布。另外,金矿体多集中分布在距地表60m处,金含量高达630g/t。(2)富矿体多呈蜂窝状产出,金含量沿走向或倾向变化幅度较大,变化系数可达233%。矿石类型主要有石英脉和蚀变岩两大类:前者由石英、绢云母、方解石、黄铁矿和褐铁矿组成,次为黄铜矿、斑铜矿、自然金和银金矿;后者由石英、绢云母、更-钠长石、黄铁矿和褐铁矿组成,次为自然金和银金矿。矿石构造类型有浸染状、细脉状和网脉状构造,粒状、残余、碎裂和包裹结构。(3)自然金和银金矿大都呈片状、树枝状和不规则粒状与黄铁矿或褐铁矿密切共生。黄铁矿Au含量为 $(0.71\sim3700)\times 10^{-6}$,平均值为 700×10^{-6} ,Co/Ni和S/Se比值变化范围分别为0.91~5.18,平均值1.57和 $(0.08\sim1.65)\times 10^4$,平均值 0.39×10^4 。(4)围岩蚀变:从金矿体中心向外,围岩热液蚀变依次可划分为硅化-绢云母化带→高岭石化带(或泥化带)→绿泥石-绿帘石化带→绿片岩。野外地质和岩相学研究表明:各蚀变带相互叠加,界限较难划定,其中硅化和绢云母化带与金矿化关系最为密切。

1.3 徐尼乌苏金矿化带

在白乃庙铜(金)矿床南侧,白乃庙群绿片岩为中、上志留统徐尼乌苏组类复理石建造不整合覆盖,构成一东西长约10km的不整合面。不整合面之下为白乃庙群(Pt_2b^3)绿片岩,向上变化到成分繁杂,厚约170m的底砾岩带。砾石主要由绿片岩,花岗岩类、混合岩和硅质岩团块组成,胶结物为泥质、粉砂质和凝灰质岩类。底砾岩带之上为中、上志留统徐尼乌苏组类复理石。沿不整合面,金矿点分布广泛,十分发育,并且构成一宽窄不等的金矿化带。整个金矿化带大体可划分为三个矿化区段,即,北段、中段和南段,各矿化区段长约2~6km,宽约80~100m^[4]。金矿化产出的方式主要为含金石英脉和蚀变岩,前者多呈透镜状、脉状和串珠状在韧性变形强烈部位产出,而后者主要呈透镜体沿灰岩与晶屑凝灰岩接触带分布。主要金属矿物有黄铁矿、褐铁矿和赤铁矿,闪锌矿、方铅矿和自然金亦可见及。脉石矿物有石英、方解石、绢云母、绿泥石和绿帘石。矿石主要构造为蜂窝形、团块状、角砾状和细脉状,半自形粒状、碎裂和残余结构。

2 样品及分析方法

笔者对白乃庙铜(金)矿床、白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带矿石和硫化物样品进行了Sm-Nd, Rb-Sr和Pb同位素测定。供同位素分析的样品是在对野外采取的各类样经室内薄片鉴定和微量元素分析数据对比后选取的,黄铁矿和方铅矿是采用常规技术方法分离得到的。

所有样品同位素分析均是本文第一作者在挪威国家矿物-地质博物馆同位素实验室完成的。Sm、Nd、Rb和Sr同位素分析采用HF和超纯浓HNO₃溶样和阴离子分离技术分离与提纯,由VG354质谱仪测定。详细的化学分析流程和质谱测定技术请参阅Mearns (1986)^[6]的文献。Nd同位素比值测定以¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219为标准化值,对BCR-1和Johnson-Mathey Nd₂O₃测定的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd值分别为0.512650±20(2σ)和0.511125±8(2σ)。全实验室流程的空白本底为0.1 ng。Sr同位素比值测定采用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194进行质量分馏校正,对Sr同位素标准NBS 987测定的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值是0.70227±2(2σ),全实验流程Sr的空白本底小于0.1 ng。

硫化物(黄铁矿和方铅矿)是利用2NHCl溶解的,铅的化学提取采用氢溴酸式阴离子交换法。实验室流程本底对铅小于10 ng,对铀小于1 ng。质谱分析采用硼硅胶法,在VGM 30质谱仪上完成。对NBS981国际标准30次的测定结果表明:质谱分析精度对²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb分别为0.07%、0.09%和0.10%,对²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb为0.04%,各件样品测定的内部精度均好于0.001%。详细的铅同位素化学处理和质谱分析过程可参阅Birkeland (1990)^[7]的文献,数据计算采用Ludwig (1990)^[8]计算机软件。

3 结果和讨论

3.1 Nd同位素

白乃庙铜(金)矿床(南、北矿带),白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带铜、金矿石Sm-Nd同位素分析结果和特征值列于表1。各样品的初始钕同位素比值和模式年龄分别按下述公式计算:

$$t_{DM} = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_{DM} - (\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_s}{(\frac{^{147}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_{DM} - (\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}})_s} + 1 \right]$$

$$\epsilon_{Nd}(t) = \left[\frac{(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_s^t}{(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_{CHUR}^t} - 1 \right] \times 10^4$$

其中 $(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_s^t = (\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_s - (\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}})_s(e^{\lambda_{Sm}t} - 1)$; $(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_{CHUR}^t = (\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_{CHUR} - (\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}})_{CHUR}(e^{\lambda_{Sm}t} - 1)$; $(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}})_{DM} = 0.2137$; $(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_{DM} = 0.51315$ ($\epsilon_{Nd}(0) = +10$); t 代表白乃庙群绿片岩($1130 \times 10^6\text{a}$)和花岗闪长斑岩($440 \times 10^6\text{a}$)成岩时代; $(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}})_s$ 和 $(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_s$ 为样品实测比值; $(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}})_{CHUR} = 0.1967$; $(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_{CHUR} = 0.512638$ 。

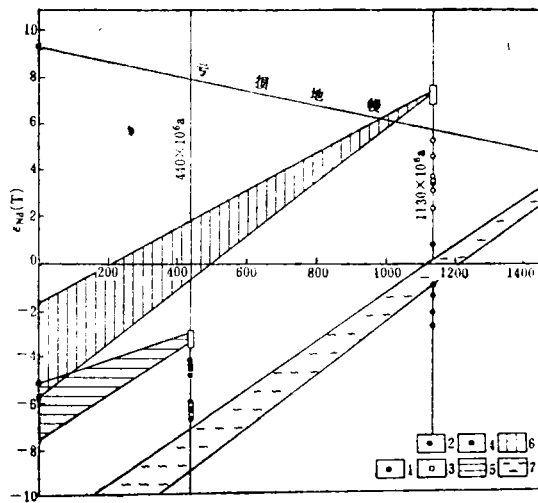
本次研究对白乃庙铜(金)矿床南矿带7件铜(金)硫化物矿石进行了Nd同位素测定。

表 1 内蒙古白乃庙铜(金)矿、金矿和徐尼乌苏金矿化带矿石Sm-Nd同位素分析
Table 1. Sm-Nd isotopic analyses of whole ore samples from the Bainaimiao copper(gold) deposit,
Bainaimiao gold deposit and Xuniwusu gold mineralized zone

样品编号	产 状	矿物组合	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	ϵNd		年龄 ($\times 10^6\text{a}$)
								$1130 \times 10^6\text{a}$	$440 \times 10^6\text{a}$	
白 乃 庙 铜 (金) 矿 床 北 矿 带	块状、条带状、 层状和透镜体状 铜(金)矿石, 与绿片岩呈整合 接触。	黄铁矿、黄铜 矿、方铅矿、闪 锌矿、辉钼矿、斑 铜矿、自然金和 银金矿	0.6 0.5 0.4 0.6 0.5 0.2	2.8 2.0 1.7 3.3 2.8 1.3	0.1375 0.1347 0.1329 0.1162 0.1049 0.1132	0.512384 0.512353 0.512399 0.512307 0.512141 0.512173	10 12 10 12 12 10	3.6 3.4 4.6 5.2 3.6 3.0	-1.6 -2.0 -1.0 -1.9 -4.5 -4.3	1306 1319 1206 1144 1256 1310
BNM77	细网脉状	同上	0.3	1.8	0.1085	0.512102	10	2.3	-5.4	1354
白 乃 庙 铜 (金) 矿 床 南 矿 带	细脉浸染状, 网脉状,脉状和 透镜体状,穿切 围岩	黄铁矿、黄铜 矿、斑铜矿、辉 钼矿、自然金和 银金矿	0.6 0.4 0.4 0.4 0.2	2.2 1.5 1.8 1.5 1.1	0.1633 0.1801 0.1368 0.1432 0.1178	0.512321 0.512373 0.512143 0.512136 0.512099	12 10 12 12 10	-1.4 -2.8 -0.9 -2.1 0.9	-4.3 -4.2 -6.3 -6.8 -6.0	2167 3125 1767 1944 1488
白 乃 庙 金 矿 床	脉状,网脉状 和块状	黄铁矿、褐矿 矿、自然金	0.2 0.2	0.7 0.8	0.1346 0.1405	0.512124 0.512164	12 12		-6.5 -6.1	1754 1813
徐 尼 乌 苏 矿 化 带	脉状,网脉状 和块状	黄铁矿、褐铁 矿、自然金	0.2 0.2	0.2 0.2	0.1136 0.1089	0.512150 0.512147	10 12		-4.8 -4.6	1350 1294

$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值变化分别为0.1085~0.1375, 和0.512102~0.512399, 并且不具任何线性关系, 无法计算Sm-Nd同位素等时线年龄。很明显, 矿石Sm-Nd同位素体系受到严重干扰。7件矿石样品 ϵ_{Nd} ($1130 \times 10^6\text{a}$) 均为正值, 变化范围为2.3~5.2, 介于白乃庙群绿片岩与古陆壳片麻岩Nd演化线之间(图2), 反映了成矿物质来源与幔源绿片岩和壳源片麻岩的密切成因联系。一般来讲, 在岩浆结晶分异或矿石沉淀过程中, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值的改变主要同下述因素有关, 其一, 成矿溶液起源于轻稀土元素亏损程度不同的源区; 其二,

图2 白乃庙铜(金)和金矿区矿石 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 对 t 图



1—白乃庙铜(金)矿床南矿带铜(金)矿石; 2—白乃庙铜(金)矿床北矿带铜(金)矿石; 3—白乃庙金矿床金矿石; 4—徐尼乌苏金矿化带金矿石; 5—早古生代花岗闪长斑岩; 6—白乃庙群绿片岩; 7—太古代到早元古代片麻岩。亏损地幔(DM) $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 演化线引自Depaolo (1981)^[13]。

Fig. 2. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ versus t plot of ores from the Bainaimiao copper (gold) mineralized district, Inner Mongolia.

1—Copper (gold) ore from south ore zone of the Bainaimiao copper (gold) deposit; 2—Copper(gold) ore from north ore zone of the Bainaimiao copper (gold) deposit; 3—Gold ore from the Bainaimiao gold deposit; 4—Gold ore from the Xuniwusu gold mineralized zone; 5—Early Paleozoic granodiorite porphyry; 6—Greenschist of Bainaimiao Group; 7—Archean-Early Proterozoic gneiss. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ growth of DM from Depaolo (1981)^[13].

来自同一源区的成矿溶液在演化与沉淀过程中受到地壳物质不同程度的混染。由于所测定的7件矿石样品产自同一矿体的不同部位, 具有相似的矿物组成、结构构造和微量元素特征, 因而上述第一种可能性可以排除。笔者认为: 铜(金)矿石 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的变化主要归因于成矿溶液演化过程中受到地壳物质混染, 主要依据有: (1) 样品数据点均不同程度地偏离了亏损地幔演化线和绿片岩Nd线; (2) 相对于亏损地幔计算的矿石钨模式年龄($t_{\text{DM}} = (1144 - 1354) \times 10^6\text{a}$)均大于绿片岩形成时代($1130 \times 10^6\text{a}$)。如果矿石形成过程中没有外来物质混入, 它们的 t_{DM} 应与绿片岩的形成时代相同或相似。BNM77样品产自矿体边缘部位, 矿石热液蚀变和交代结构发育, 矿物组合为黄铁矿、黄铜矿、石英、方解石和绢云母。样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值最低(2.3)和钨模式年龄最大($1354 \times 10^6\text{a}$), 反映了混染的地壳物质较其它样品多。相比之下, 随着矿石样品中地壳混染物质的减少, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 t_{DM} 趋向于与绿片岩一致。

白乃庙铜(金)矿床北矿带5件铜(金)矿石样品 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值变化范围相对较大, 不具任何相关关系, 很难求得Sm-Nd同位素等时线年龄。各样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值是按 $440 \times 10^6\text{a}$ 计算的, 主要地质依据有: (1) 北矿带铜(金)矿体大都在花岗闪长斑岩体内部及其与绿片岩的接触带上产出, 铜(金)矿化与斑岩体具密切时、空分布关系。斑岩体Sm-Nd同位素等时线年龄为 $440 \times 10^6\text{a}$ ^{①②}; (2) 以 $1130 \times 10^6\text{a}$ (绿片岩成岩时代)为参照

①② 聂凤军等, 1994, 内蒙古白乃庙地区绿片岩和花岗闪长斑岩Nd和Sr同位素研究, 中国地质科学院院报(待刊稿)

值计算得到的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值, 除样品 BNM15 外, 其余均低于当时古陆壳值 ($-0.69 \sim 0.24$)。如果承认铜(金)矿床成矿物质来自地幔或地壳源, 那么则很难解释矿石样品的 ϵ_{Nd} (1130×10^6 a) 值, 由此可以推测: 这些矿石样品的形成时代为 440×10^6 a 而不是 1130×10^6 a。由表 1 可见, 北矿带 5 件样品 ϵ_{Nd} (440×10^6 a) 值变化范围为 $-6.8 \sim -4.2$ 明显低于花岗闪长斑岩 ($\epsilon_{Nd}(t) = -3.19$), 而高于本区古陆壳 ($\epsilon_{Nd}(t) = -8.82 \sim -6.99$) 值。聂凤军等 (1994)^① 将白乃庙花岗闪长斑岩的形成过程分为三个阶段, 即绿片岩与古陆壳岩层物理混合、混合物质重熔和岩浆结晶分异。含矿岩浆热流体同围岩的相互作用可造成成矿过程中混染组份增加, 从而致使矿石样品 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值降低和钨模式年龄增高。

白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带金矿石样品 ϵ_{Nd} (440×10^6 a) 值变化范围分别是 $-6.1 \sim -6.5$ 和 $-4.6 \sim -4.8$, 钨模式年龄分别为 $(1754 \sim 1813) \times 10^6$ a 和 $(1294 \sim 1350) \times 10^6$ a。在 $\epsilon_{Nd}(t)$ 对时间图中 (图 2), 金矿石样品数据点与北矿带铜(金)矿石重叠, 反映了它们在成矿物质来源和形成过程方面的一致性, 因此, 金矿石样品 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和钨模式年龄的解释与北矿带铜(金)矿石相同, 这里不再赘述。

3.2 Sr 同位素

白乃庙铜(金)矿床、白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带矿石样品 Rb-Sr 同位素分析结果列于表 2, 初始铈同位素组成以 I_{Sr} 和 $\epsilon_{Sr}(t)$ 表示:

$$\epsilon_{Sr}(t) = \left[\frac{(^{87}Sr/^{86}Sr)_s^t}{(^{87}Sr/^{86}Sr)_{UR}^t} - 1 \right] \times 10^4$$

其中: $(^{87}Sr/^{86}Sr)_s^t = (^{87}Sr/^{86}Sr)_s - (^{87}Rb/^{86}Sr)_s (e^{\lambda_{Rb}t} - 1)$; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_{UR}^t = (^{87}Sr/^{86}Sr)_{UR} - (^{87}Rb/^{86}Sr)_{UR} (e^{\lambda_{Rb}t} - 1)$; t 分别代表绿片岩 (1130×10^6 a) 和花岗闪长斑岩 (440×10^6 a) 形成时代; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_s$ 和 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_s$ 为样品现今测定值; $(^{87}Rb/^{86}Sr)_{UR} = 0.0816$; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_{UR} = 0.7045$; $\lambda_{Rb} = 1.42 \times 10^{-11} a^{-1}$ 。

从表 2 所列数据可见, 白乃庙铜(金)矿床南矿带 7 件矿石样品 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值变化范围相当大, 但不具任何线性相关关系, 无法求得 Rb-Sr 等时线年龄。很明显, Rb-Sr 同位素体系遭受到严重干扰和破坏。铜(金)矿石样品 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和 $\epsilon_{Sr}(t)$ 值变化范围分别为 $0.70606 \sim 0.70985$ 和 $22.1 \sim 75.9$, 其投绘点 $\epsilon_{Sr}(t)$ 对时间图 (图 3) 中明显偏离亏损地幔演化线。这反映了成矿过程中壳源物质的混入。鉴于研究区附近古陆壳岩石具有较高的 $\epsilon_{Sr}(t)$ 值 ($91.6 \sim 138.3$)^②, 我们推测: 幔源火山热液与古陆壳岩石之间的 Sr 同位素交换是致使矿石样品 $\epsilon_{Nd}(t)$ 增高的主要原因。

白乃庙铜(金)矿床北矿带, 白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带矿石样品 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值变化范围大, 且很分散, 不存在任何相关关系。上述三个矿带(床)的 ϵ_{Sr} (440×10^6 a) 值分别为 $40.9 \sim 97.6$, $85.2 \sim 97.2$ 和 $75.9 \sim 79.9$ (表 2), 高于绿片岩 ($\epsilon_{Sr}(t) = -5.8 \sim 34$) 和花岗闪长斑岩 ($\epsilon_{Sr}(t) = 42.7 \sim 59.9$), 而低于古陆壳岩石 ($\epsilon_{Sr}(t) = 87.4 \sim 126.9$) 相应值。Sr 同位素特征同样表明: 白乃庙铜(金)矿床北矿带、白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带的成矿物质起源于花岗闪长斑岩, 含矿岩浆热液与古陆壳岩石的相互

① 聂凤军等, 1994, 内蒙古白乃庙地区绿片岩和花岗闪长斑岩 Nd 和 Sr 同位素研究 中国地质科学院院报 (待刊稿)

② 聂凤军等, 1994, 地质论评 (未刊稿)

表 2 内蒙古白乃庙铜(金)矿床、白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带Rb-Sr同位素分析
Table 2. Rb-Sr isotopic analyses of whole ore samples from the Bainaimiao copper(gold) deposit,
Bainaimiao gold deposit and Xuniwusu gold mineralized zone

样品编号	产 状	矿物组合	Rb (10^{-6})	Sr (10^{-6})	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	ϵ_{Sr} ($1130 \times 10^6 \text{a}$)	ϵ_{Sr} ($440 \times 10^6 \text{a}$)	ϵ_{Sr} (10^6a)	t_{DM} (10^6a)
白乃庙铜(金)矿床南矿带	块状、条带状、层状和透镜体状铜(金)矿石与绿片岩呈整合接触	黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉钼矿、斑铜矿、自然金和银金矿	10.9 8.2 8.3 8.3 4.6 8.6	67.1 86.2 75.7 58.2 62.5 60.2	0.4726 0.2743 0.3178 0.4132 0.2135 0.4137	0.70606 0.70943 0.70738 0.70838 0.70835 0.70805	12 16 18 18 20 12	-67.8 25.8 -13.6 -21.1 24.4 -25.9	-13.1 52.6 19.5 25.2 42.8 20.5	22.1 69.9 40.9 55.1 54.7 50.4	378 1911 994 921 2200 852
白乃庙铜(金)矿床北矿带	细网脉状	同上	1.2	32.1	0.1059	0.70985	14	70.5	73.8	75.9	11888
白乃庙铜(金)矿床	细脉浸染状、网脉状、脉状和透镜体状、穿切围岩	黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿、自然金和银金矿	3.1 0.6 7.1 0.6 3.8	85.6 92.4 96.2 87.4 80.6	0.1043 0.0183 0.2144 0.0194 0.1376	0.70995 0.71055 0.70823 0.71098 0.71093	20 18 14 16 18	72.3 100.6 22.5 106.4 78.6	75.4 91.7 40.9 97.6 86.3	77.4 85.9 52.9 91.9 91.3	12648 -9008 2128 -9882 7329
白乃庙金矿床	脉状、网脉状和块状	黄铁矿、褐铁矿、自然金	2.3 2.2	46.6 53.5	0.1416 0.1216	0.71088 0.71160	18 16		85.2 97.2	90.6 100.8	6872 10465
徐尼乌苏金矿化带	脉状、网脉状和块状	黄铁矿、褐铁矿、自然金	3.9 4.6	50.0 48.4	0.2246 0.2746	0.71103 0.71070	18 18		79.9 75.9	92.8 93.3	3245 2340

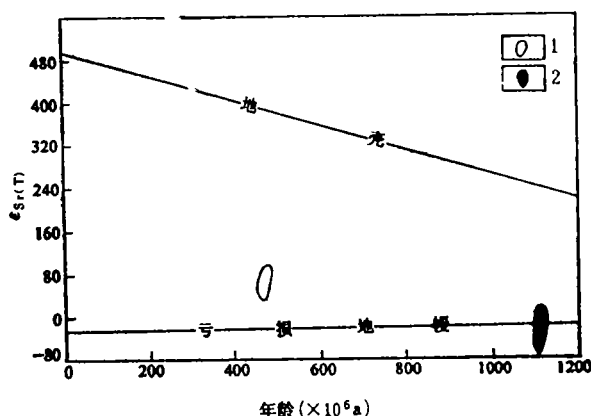


图3 白乃庙铜（金）和金矿区矿石 $\epsilon Sr(t)$ 对 t 图

1—白乃庙铜（金）矿床南矿带；2—白乃庙铜（金）矿床北矿带、白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带。
($\epsilon Sr(t)$ 增长线引自 Nobda, 1984)^[14]

Fig. 3. $\epsilon Sr(t)$ versus t plot of ore samples from the Bainaimiao copper (gold) mineralized district, Inner Mongolia.

1—South ore zone of the Bainaimiao copper (gold) deposit; 2—North ore zone of the Bainaimiao copper (gold) deposit; 3—Bainaimiao gold deposit and Xuniwusu gold mineralized zone. $\epsilon Sr(t)$ growth curves from Nobda (1984)^[14].

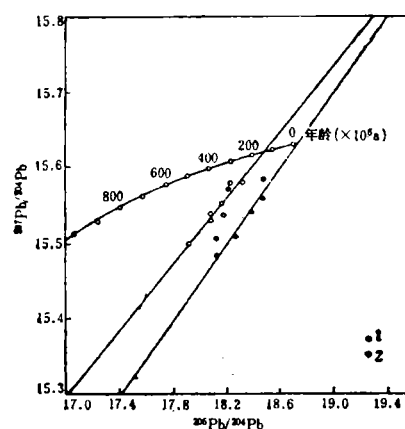


图4 白乃庙铜（金）矿床 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 对 $^{203}Pb/^{204}Pb$ 图

1—白乃庙铜（金）矿床南矿带硫化物；2—白乃庙铜（金）矿床北矿带硫化物；SK-Stacey-Kramers 铅两阶段演化曲线^[10]

Fig. 4. $^{207}Pb/^{204}Pb$ versus $^{203}Pb/^{204}Pb$ plot of sulfides from the Bainaimiao copper (gold) deposit, Inner Mongolia.

1—Sulfides from south ore zone of the Bainaimiao copper (gold) deposit; 2—Sulfides from north ore zone of the Bainaimiao copper (gold) deposit; SK-Rb-two stage evolutionary curves of Stacey and Kramers^[10].

作用致使矿石样品 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值升高。

3.3 铅同位素

白乃庙铜（金）矿床南矿带 8 件硫化物（黄铁矿和方铅矿）铅同位素数据和特征列于表 3。 $^{206}Pb/^{204}Pb=17.929\sim 18.321$ ； $^{207}Pb/^{204}Pb=15.496\sim 15.579$ ； $^{208}Pb/^{204}Pb=37.892\sim 38.157$ 。按照 Doe^[9] 参数计算的单阶段模式年龄为 $(185\sim 312)\times 10^6a$ ， μ 值变化范围为 9.2~9.6。8 个数据点获得的最佳直线方程为 $y=0.2374x+11.24$ ，Pb-Pb 同位素年龄为 $(2791\pm 520)\times 10^6a$ ，这一比值远大于绿片岩成岩年龄 (1130×10^6a) 。

白乃庙铜（金）矿床北矿带 6 件硫化物（黄铁矿和方铅矿）的 $^{206}Pb/^{204}Pb=18.129\sim 18.486$ ； $^{207}Pb/^{204}Pb=15.482\sim 15.587$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb=37.846\sim 38.343$ 。单阶段铅模式年龄变化范围 $(12\sim 174)\times 10^6a$ ， μ 值为 9.2~9.6。在 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 对 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 坐标图中（图 4），可以看出数据点存在线性分布趋势。去掉偏离直线的点 Nb-03，按 5 个数据点获得的最佳直线为 $y=0.2620x+10.72$ ，Pb-Pb 年龄为 $(3169\pm 750)\times 10^6a$ ，远高于绿片岩和花岗闪长斑岩。一般来讲，硫化物 Pb-Pb 年龄可解释为成矿年龄，来源物质年龄或成矿后铀或钍成因铅污染的时间，其地质意义必须结合具体地质情况慎重对待。就白乃庙铜（金）矿床南、北矿带而言，上述二条 Pb-Pb 线的 MSWD 值分别为 15.6 和 6.2，应属假等时线（errorchron）。因此，我们认为：白乃庙铜（金）矿床 Pb-Pb 年龄不能代表成矿年龄，而是反映了成矿来源物质年龄，即铅和其它金属元素起源于古老陆壳（含幔源火山岩）。此外，两条 Pb-Pb 线具有不同的斜率和 Pb 初始比，反映了南、北矿带成矿物质来源和形成作用方面的差异，这同前

表3 白乃庙铜(金)矿床、金矿床和徐尼乌苏金矿化带硫化物铅同位素分析

Table 3. Lead isotopic analyses of pyrite, galena and native gold from the Bainaimiao copper(gold) deposit, Bainaimiao gold deposit and Xuniwusu gold mineralized zone

样品编号		样品产状和矿物组合	矿 物	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	模式年龄 ($\times 10^6 \text{a}$)	μ
白乃庙铜(金)矿床南矿带	ZK1003 ^①	块状、条带状、层状和透镜体状铜(金)矿石。矿物组合: 黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉钼矿、斑铜矿、自然金和银金矿	方铅矿	18.236	15.576	38.128	243	9.6
	Nb-04 ^①		方铅矿	18.225	15.569	37.934	237	9.6
	BNM05		方铅矿	17.929	15.496	37.893	312	9.2
	BNM06		方铅矿	18.086	15.528	37.943	257	9.4
	BNM07		黄铁矿	18.093	15.535	37.892	267	9.5
	BNM08		黄铁矿	18.179	15.535	37.929	200	9.4
	BNM09		黄铁矿	18.171	15.551	37.993	240	9.5
	BNM10		黄铁矿	18.321	15.579	38.157	185	9.6
白乃庙铜(金)矿床北矿带	Nb-01 ^①	细脉浸染状、网脉状、脉状和透镜体状, 穿切围岩。矿物组成与南矿带相似	方铅矿	18.136	15.482	37.846	117	9.2
	Nb-03 ^①		方铅矿	18.129	15.505	37.882	174	9.3
	BNM11		方铅矿	18.271	15.507	38.007	66	9.3
	BNM12		方铅矿	18.399	15.539	38.257	37	9.4
	BNM13		黄铁矿	18.479	15.556	38.257	12	9.5
	BNM14		黄铁矿	18.486	15.581	38.343	62	9.6
白乃庙金矿床	Jb4197 ^①	脉状、网脉状含金石英脉、块状或条带状含金蚀变岩。矿物组成: 黄铁矿、褐铁矿、赤铁矿、斑铜矿、自然金、银金矿, 局部地段可见方铅矿	黄铁矿	18.799	15.676	39.063	30	9.9
	Jb4200 ^①		黄铁矿	18.593	15.700	38.656	231	10.1
	Jb4201 ^①		黄铁矿	18.882	15.630	38.766	-134	9.7
	Jb4202 ^①		黄铁矿	18.776	15.627	38.978	-60	9.7
	Jb4169 ^①		自然金	18.700	15.775	38.913	302	10.4
	BNM79		黄铁矿	18.794	15.642	38.893	-40	9.8
	BNM80		黄铁矿	18.721	15.794	38.902	323	10.5
	TCP19 ^①		黄铁矿	18.706	15.574	38.624	-125	9.5
	K1 ^①		黄铁矿	18.764	15.579	38.732	-159	9.5
	ZC4 ^①		黄铁矿	17.854	15.531	38.155	443	9.5
	ZK3401 ^①		黄铁矿	17.895	15.519	38.160	387	9.5
	BNM15		黄铁矿	18.557	15.567	38.636	-24	9.5
	BNM16		黄铁矿	18.600	15.589	38.557	-9	9.6
	BNM17		黄铁矿	18.664	15.602	38.636	-29	9.6
	BNM18		黄铁矿	18.864	15.656	38.871	-63	9.8
	BNM19		黄铁矿	18.914	15.670	38.907	-70	9.9
徐尼乌苏金矿化带	Jb4119 ^①	脉状、网脉状含金石英脉和块状透镜体状含金蚀变岩。矿物组合: 黄铁矿、褐铁矿、闪锌矿、自然金和银金矿	黄铁矿	18.446	15.604	38.552	142	9.7
	Jb4280 ^①		方铅矿	18.656	15.635	38.776	49	9.8
	BM81		黄铁矿	18.325	15.611	38.375	249	9.7
	BM82		黄铁矿	18.511	15.625	38.475	138	9.7
	XNW20		黄铁矿	18.589	15.639	38.499	108	9.8
	XNW21		黄铁矿	18.649	15.663	38.721	114	9.9
	XNW22		黄铁矿	18.743	15.654	38.579	25	9.8
	XNW23		黄铁矿	18.749	15.674	38.771	63	9.9

① 为长春地质学院同位素实验室测定值

述 Nd 和 Sr 同位素研究所获结论一致。

白乃庙金矿床 15 件黄铁矿和 1 件自然金的铅同位素组成变化明显, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.854\sim 18.914$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.519\sim 15.794$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.155\sim 39.063$, 单阶段铅模式年龄 $(-159\sim 443)\times 10^6\text{a}$, μ 值变化范围大, 为 $9.5\sim 10.5$ 。在铅同位素演化图(图 5)中, 数据点既有落在正常铅演化线之下的, 也有落在该曲线附近或其上面的, 数据投绘点极为分散。这种线性关系不好的“异常铅”显然是多来源的, 它们是在不同 μ 值环境中演化, 不同时间形成的混合铅。徐尼乌苏金矿化带 8 件硫化物(方铅矿和黄铁矿)的 Pb 同位素组成呈现出一定程度变化: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.325\sim 18.749$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.604\sim 15.674$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.375\sim 38.776$ 。单阶段铅模式年龄为 $(25\sim 249)\times 10^6\text{a}$, μ 值变化范围 $9.7\sim 9.9$ 。在铅同位素演化图中(图 5), 除 1 件样品外, 其余样品投绘点均位于正常铅演化线之上, 表现出高 μ 值上地壳铅或以地壳 Pb 为主的壳幔混合铅特征。鉴于在 Pb 同位素演化图(图 5A 和图 5B)上, 白乃庙金矿和徐尼乌苏金矿化带样品数据点极为分散, 并且不具任何线性关系, 所以无法计算 Pb-Pb 等时线年龄或多阶段年龄。

一般来讲, 金属矿床铅同位素示踪研究的目的是确定铅及有关金属物质来源(幔源、壳源或是壳幔混合源), 铅同位素演化史和致使 Pb 同位素组成变化的地质因素, 进而讨论矿床成因。此外, 在特定情况下, Pb 同位素数据亦可提供成矿时代方面的信息。在铅同位素演化图中, 白乃庙铜矿床南矿带硫化物数据点均落在 SK 演化曲线之下(图 4)和造山带与地幔铅线之间(图 5A)暗示了壳、幔源铅的混合作用。在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图 5B)中, 数据点沿造山带铅演化线分布, 同样反映了壳、幔源混合特点。据此, 推测南矿带铅和铜及有关组分主要是通过火山作用从深部(上地幔)带来的, 成矿热液在围岩中的对流循环致使地壳高 μ 值铅的叠加混入。

同南矿带硫化物相比, 北矿带、白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带硫化物的形成时代较晚, 并且以富 ^{206}Pb 或 ^{207}Pb 为特点。陈好寿等^[5]认为: 矿石铅同位素组成变化除了与形成时代有关, 如果矿石铀含量高于钍, 那么 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 含量就相应地多于 ^{208}Pb 。尽管在上述三个矿带(床)中尚未发现含铀矿物, 但是硫化物的高 ^{206}Pb 和 ^{207}Pb 含量暗示了成矿物质来自 U 含量相对高的源区。我们认为: 北矿带、白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带是花岗闪长斑岩侵位过程中, 含 U、Pb 和 Au 成矿流体与古陆壳岩层或绿片岩相互作用的结果。从南矿带经北矿带到白乃庙金矿和徐尼乌苏金矿化带, 放射性成因铅呈逐渐增加趋势, 反映了铜(金)和金矿成矿作用的继承发展关系。

3.4 铜(金)和金矿床成矿机制

野外地质特征, 岩(矿)石化学和上述 Nd-Sr-Pb 同位素数据均可证实: 早一中元古代, 白乃庙地区位于距华北地台北缘不远的洋壳内, 所处地质环境与古洋岛弧张裂盆地相似。强烈的海底火山喷发沉积作用不仅形成了中元古代白乃庙群钙-碱火山岩, 而且来自上地幔的 Cu、Au、Pb 和 S 等成矿元素可借助火山作用进入海底, 进而形成以层状和透镜状矿体。在距火山喷口较远部位则形成星散状和豆荚状含矿岩层进而构成本区铜、金矿源层。

加里东期, 受南北挤压应力影响, 白乃庙群火山岩层褶皱隆起, 并且发生绿片岩变质。花岗闪长斑岩的侵位和岩浆分异作用为北矿带矿体的形成提供了物质、热和动力来源。与此同时, 岩浆热液对围岩的淋滤与萃取致使成矿流体中金属元素含量大幅度增高, 进而在构造

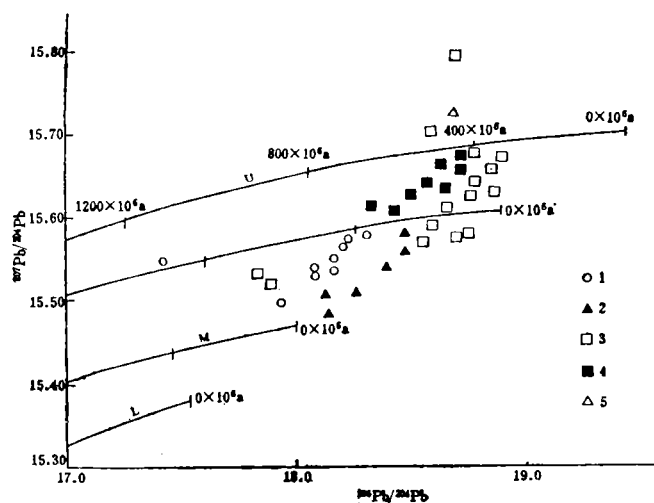


图 5A 白乃庙铜(金)矿床、白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图

1—白乃庙铜(金)矿床南矿带硫化物; 2—白乃庙铜(金)矿床北矿带硫化物; 3—白乃庙金矿床硫化物; 4—徐尼乌苏金矿化带; 5—白乃庙金矿床自然金; U—上地壳铅演化线; O—造山带铅演化线; M—地幔铅演化线; L—下地壳铅演化线⁽¹²⁾

Fig. 5A. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ plot of the Bainaimiao copper (gold) deposit, Bainaimiao gold deposit and the Xuniwusu gold mineralized zone.

1—Sulfides from south ore zone of the Bainaimiao copper (gold) deposit; 2—Sulfides from north ore zone of the Bainaimiao copper (gold) deposit; 3—Sulfides from the Bainaimiao gold deposit; 4—Xuniwusu gold mineralized zone; 5—Native gold from the Bainaimiao gold deposit; U—Lead growth curve of the upper crust; O—Lead growth curve of the orogenic belt; M—Lead growth curve of the mantle; L—Lead growth curve of the lower crust⁽¹²⁾.

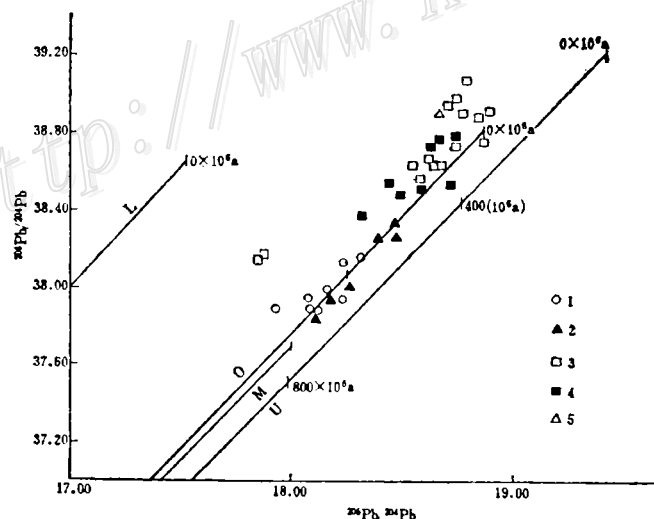


图 5B 白乃庙铜(金)矿床、白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图

图例与图 5A 相同

Fig. 5B. $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ plot of the Bainaimiao copper (gold) deposit, Bainaimiao gold deposit and Xuniwusu gold mineralized zone, Inner Mongolia.

Symbols as for Fig. 5A.

有利部位形成脉状或网脉状铜-钼-金矿石。研究结果表明:白乃庙金矿床和徐尼乌苏金矿化带亦是岩浆热液与大气降水混合以及与围岩相互作用的产物。构造和岩浆作用所产生的热使岩浆水、埋藏水和部分大气降水混合为一体,并且对地层易“萃取”金属元素(如铜、金、铁和铅等)进行淋滤,进而形成含矿流体。当这种流体在远离岩体的地层中,向低压膨胀带的层间裂隙和其它构造裂隙部位运移富集,就形成了大量含金脉体。

4 结 语

(1) 根据Nd和Pb同位素数据及地质与地球化学资料,白乃庙铜(金)矿床南矿带成矿物质来源同中元古代海底幔源火山活动有关,成矿过程中有部分陆壳物质混入,矿床应属块状硫化物矿床。

(2) 白乃庙铜(金)矿床北矿带的形成过程主要同加里东期花岗闪长斑岩侵位和岩浆分异作用有关,含矿岩浆热液对围岩中成矿元素的淋滤与萃取致使矿石具壳、幔混源特征。同南矿带相比,北矿带含有较多的陆壳成份。

(3) 白乃庙金矿和徐尼乌苏金矿化带是岩浆热液、大气降水混合及其对围岩淋滤的结果,成矿物质来自绿片岩、基底岩层和花岗岩类侵入岩。随着陆壳物质组分增多, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值降低,而放射性成因铅含量明显增高。

(4) 在上述矿床(带)成矿过程中,由于壳、幔源物质的混合作用,所有矿石样品的Rb-Sr同位素体系均遭受到不同程度干扰破坏,掩盖了其原始同位素特征,从而使其地质意义不清。

本文野外地质工作得到韩杰和樊建廷帮助,室内研究得到Toril Enger女士和Arne Stable先生协助,在此一并致以真诚的感谢。

参 考 文 献

- 1 陈琦,仇甘霖,杜玉申等.白乃庙—温都尔庙区域构造及华北北缘古板块构造演化.长春地质学院学报(内蒙古白乃庙地质专辑),1992,22: 119~129
- 2 聂凤军,张洪涛,陈琦等.内蒙古白乃庙群变质基性火山岩锆石铀-铅年龄.科学通报,1991,35(13): 1012~1015
- 3 聂凤军,裴荣富,吴良士等.内蒙古白乃庙地区岩浆活动与金属成矿作用.北京:北京科学技术出版社,1993.
- 4 聂凤军,景德武.内蒙古白乃庙地区不整合面金矿化带的发现及其找矿意义.矿产与勘查,(3): 17~19
- 5 陈好寿,冉崇英.康滇地轴铜矿床同位素地球化学.北京:地质出版社,1992.
- 6 Mearns E W. Sm-Nd ages for Norwegian garnet peridotite. Lithos, 1986, 19: 269~278
- 7 Birkeland A. Pb-isotope analysis of sulfides and K-feldspars, a short introduction to analytical techniques and evaluation of results. Internal Bulletin series, 1990, (15): 1~30
- 8 Ludwig K R. A. Plotting and regression programs for radiogenic isotope data for IBM-PC compatible computer, Version 2.11. U. S. Geological Survey, 1990, 85~557.
- 9 Doe B R, Stacey J S. The application of lead isotopes to the problems of ore genesis and ore prospect evaluation: A review. Econ. Geol., 1974, 69: 757~767
- 10 Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model. Earth and Planet Sci. Lett., 1975, 36: 207~221
- 12 Zartman R E, Haines S M. The plumbotectonic model for Pb-isotope systematics among major terrestrial reservoir—A case for bi-directional transport. Geochim. Cosmochim. Acta, 1988, 52: 1327~1339
- 13 Depaolo D. J. Nd in the Colorado Front Range and implications for crust formation and mantle evolution in the Proterozoic. Nature, 1981, 291: 193~196
- 14 Nobda S. Classification of island arcs by Nd-Sr isotopic data. Geochem. J. 1984, 18: 1~9

Nd, Sr AND Pb ISOTOPIC STUDY OF COPPER (GOLD) AND GOLD DEPOSITS IN BAINAIMIAO AREA, INNER MONGOLIA

Nie Fengjun, Pei Rongfu and Wu Liangshi

(*Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037*)

Arne Bjorlykke

(*Department of Geology, University of Oslo, Norway*)

Key words: Bainaimiao of Inner Mongolia, copper-gold deposit, Rb, Sr and Pb isotopes

Abstract

Sm-Nd, Rb-Sr and Pb isotopic data on ore samples from the Bainaimiao copper (gold) deposit (composed of south ore zone and north ore zone), the Bainaimiao gold deposit and the Xuniwusu gold mineralized zone are presented in this paper. ϵ_{Nd} (1130×10^6) and ϵ_{Sr} (1130×10^6) values of seven whole ore samples from the south ore zone consisting of mainly massive sulfide copper (gold) ores range from 2.3 to 5.2 and from -67.8 to 70.5, respectively. Pb isotope data show $^{206}Pb/^{204}Pb=17.929\sim18.321$, $^{207}Pb/^{204}Pb=15.496\sim15.579$ and $^{208}Pb/^{204}Pb=37.892\sim38.157$. Copper (gold) mineralization of the north ore zone is spatially and temporally related to the granodiorite porphyry with Sm-Nd isochron age of 440×10^6 . Five disseminated-veinlet sulfide ore samples give ϵ_{Nd} (440×10^6) of $-6.8\sim4.2$ and ϵ_{Sr} (440×10^6) of $40.9\sim97.6$. The Pb isotopic ratios of five galena and pyrite are as follows: $^{206}Pb/^{204}Pb=18.129\sim18.486$; $^{207}Pb/^{204}Pb=15.482\sim15.581$ and $^{208}Pb/^{204}Pb=37.846\sim38.343$. Pb isotope data show that sulfide copper (gold) ore of the north ore zone contains higher ^{206}Pb content than that of the south ore zone. The Bainaimiao gold deposit and the Xuniwusu gold mineralized zone have similar ϵ_{Nd} (440×10^6) values ranging from -4.6 to -6.5 and ϵ_{Sr} (440×10^6) from 75.9 to 97.2. The Pb isotope analyses of 23 sulfide (pyrite and galena) and 1 native gold samples show $^{206}Pb/^{204}Pb=17.854\sim18.914$, $^{207}Pb/^{204}Pb=15.519\sim15.794$ and $^{208}Pb/^{204}Pb=38.155\sim39.063$. Most of these Pb isotope data lie on or above the upper crust Pb isotope evolutionary curve, and show obvious increase in ^{207}Pb and ^{208}Pb content compared with the data from the Bainaimiao copper (gold) deposit. Sr isotopic feature suggests that the Rb-Sr isotopic system of copper (gold) and gold ores has been strongly disturbed. This is consistent with petrographic and tectonic studies, which indicate that all these ore deposits (or the ore zone) have undergone intense metamorphism and tectonism. Based on the Nd-Pb isotopic characteristics and available geochemical data, it is believed that ore fluid of the south ore zone was originally derived from a depleted mantle source, but slightly contaminated by crustal materials. In contrast, the north ore zone, the Bainaimiao gold deposit and the Xuniwusu gold mineralized zone were formed by a mixed ore fluid consisting mainly of magmatic water related to Caledonian granodiorite porphyry, meteoric water and metamorphic fluid.