

内蒙白云鄂博铈、稀土、铁 矿床的成矿时代和矿床成因

袁忠信、白鸽、吴澄宇

(中国地质科学院矿床地质研究所)

张宗清、叶笑江

(中国地质科学院地质研究所)

内容提要: 藉助于Sm-Nd同位素研究, 得出白云鄂博矿床主矿体 Sm-Nd全岩(全矿)等时线年龄为1.58Ga, Sm-Nd模式年龄为1.61Ga, $\epsilon_{Nd}(t) = +6.1$ 。结合矿床地质地球化学特征, 氧、锶、硫等同位素研究, 作者认为, 白云鄂博铈稀土铁矿床主要成矿于元古代, 成矿物质来自地幔, 是通过火山喷气沉积而形成。在加里东时期, 随着碳酸岩(carbonatite)及碱性辉长岩的侵入, 有一些成矿物质从深部带来, 并引起广泛的交代作用。在海西时期, 随着矿区南部花岗岩的侵入, 矿床受到改造, 交代作用进一步发育。此时没有多少成矿物质从深部或外部带入矿体。白云鄂博矿床成因上应属于碱性-碳酸岩杂岩型铈稀土铁矿床。

关键词: 白云鄂博矿床 成矿时代 矿床成因 Sm-Nd同位素

内蒙白云鄂博矿床是世界上最大的稀土金属矿床。它同时又是一个大型铁矿床, 铁矿石储量约6亿吨。此外, 磷灰石、萤石、重晶石, 以及金属铈和钽等可供综合利用。有关该矿床的地质特征、成矿作用及矿床类型, 为国内外地质学家所瞩目, 有大量的论文及专著发表。在1977年, 本文作者经过10多年的研究, 发表了《内蒙及湖北等地稀有金属矿床——火山沉积稀有金属碳酸岩的成因分析》的论文^①, 提出白云鄂博铈稀土铁矿床属于碱性-碳酸岩杂岩稀有金属矿床类型, 主要成矿时期为元古代, 矿石是通过海底火山喷气或喷溢作用沉积而成。其后, 于1985年在《碳酸岩地质及其矿产》中又再次确认了这一认识^[1]。近来, 在国内外重视超大型矿床研究的春风下, 作者再度分析了矿床地质地球化学研究中的矛盾, 针对问题进一步开展工作, 取得一些新的信息, 得出与以前大致相同的认识。纵观地学史, 某些矿床或岩石的成因研究, 难度较大, 有的讨论了一、二百年, 至今认识仍不能统一。像白云鄂博这样复杂的矿床, 成因讨论恐怕也要经历相当长一段的时期。但毋庸置疑的是, 在这种不断工作与自由讨论的过程中, 认识不断深化, 而且趋于接近。希望本文有助于对这一超大型矿床的认识深入一步。

一、矿床地质地球化学特征

在这里, 不准备对矿床的地质地球化学特征作全面介绍, 仅就与成因认识有关的而且以前很少论证的问题作一简要描述。

大地构造上, 白云鄂博矿床位于华北地台的北部边缘。根据最近孟庆润的研究, 元古代白云鄂博群形成于一裂谷环境^[9]。众所周知, 这一构造环境十分有利于碱性-碳酸岩杂岩(Alkali-Carbonatite Complex)的

① 袁忠信等, 1977, 地质矿产研究, 第1期

形成。另据中国科学院贵阳地球化学研究所资料,白云鄂博矿床往北约10km处有一大致作东西向延展的深断裂带(图1)⁽²⁾。从物探资料及地质事实判断,该深断裂带东西延展约300km,最晚形成于加里东时期。深断裂的存在为成矿物质从深部带来提供了可能的通道。

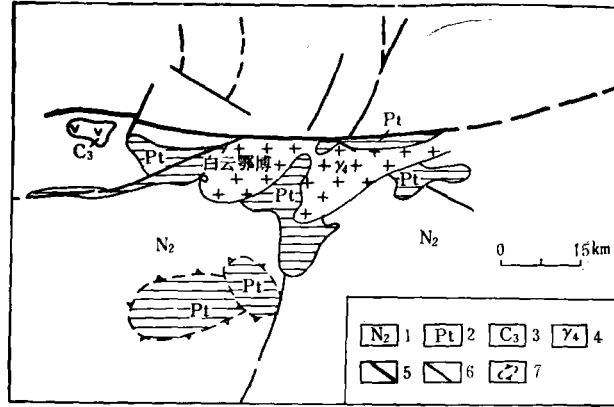


图1 白云鄂博地区卫星照片断裂构造解译示意图

(根据中国科学院贵阳地球化学研究所,1988⁽²⁾)

1—第三纪粉砂岩; 2—元古界白云鄂博群; 3—加里东期中基性岩; 4—海西期花岗岩; 5—深断裂; 6—区域断裂; 7—隐伏穹隆

Fig. 1 Schematic interpretational map of fault structures in satellite image of Bayan Obo area.
1. Tertiary siltstone; 2—Proterozoic Bayan Obo Group; 3—Caledonian intermediate-basic rock; 4—Hercynian granite; 5—Deep faults; 6—Regional faults; 7—Concealed dome.

表1 白云鄂博白云岩和石灰岩的平均化学成分(%)⁽¹⁾

Table 1. Average chemical composition of dolomite and limestone from Bayan Obo (in percentage)

	白云鄂博白云岩 (40)		世界碳酸岩 (128)		石灰岩	
	范围	平均	范围	平均	白云鄂博(8)	世界平均值 ⁽¹⁾
SiO ₂	2—27	10	0.1—49.65	9.58	10	5.19
TiO ₂	0.04—2.57	0.42	0—5.2	0.65	0.03	0.06
Al ₂ O ₃	0.1—5	2	0.2—18.2	2.9	0.77	0.81
TFeO ⁽²⁾	8—25	15	0—83	8.7	0.8	0.54
MnO	0.5—3.3	1.3	0—8.6	0.72	0.04	
MgO	5—20	12	0.1—42.68	6.69	6	7.89
CaO	5—33	24	0.83—64.04	34.06	42	42.57
K ₂ O	0.1—3.5	0.9	0.01—12.8	1.47	0.28	0.33
Na ₂ O	0.1—3.2	0.7	0.01—2.3	1.02	0.1	0.05
P ₂ O ₅	0.2—3.66	0.95	0.1—11.56	1.86	0.08	0.04
F	0.1—17	1	0.02—39.72	0.73	0.04	
BaO	0.05—11.75	0.5	0.05—10	0.26	0.03	1.13
SrO			0.05—4.76	0.40		
RE ₂ O ₃	0.1—5	2.5	0.04—0.4 ⁽³⁾	0.15 ⁽³⁾	0.07	
Nb ₂ O ₅	0.02—1	0.08	0.3—7	0.08	0.002	
S	0.02—5	0.6	0.01—20	0.61		

① 根据Clarke F. 1924, 括号中为样品数

② FeO + Fe₂O₃

③ 东非裂谷带10个碳酸岩19个分析值

白云鄂博矿床位于宽沟以南的白云向斜内。向斜两翼由白云岩或白云大理岩构成, 向斜轴部由钾长石岩、黑云母岩, 以及黑云母板岩构成。这几种岩石是白云鄂博铁、铌稀土矿化赋存的主岩, 在成矿作用研究方面很有意义。

矿区白云岩东西延展18km, 南北宽从数十米到1km, 呈一中间宽厚两端减薄的长形纺锤体。与其下部的长石石英砂岩及石英岩, 以及与其上部的钾长石岩、黑云母板岩等呈渐变过渡关系。白云岩中常夹有钾长石岩、黑云母岩等岩石条带, 有时白云岩与长石岩、板岩, 以及砂岩等呈互层产出, 岩石具清楚的沉积特征。白云岩具中细粒结构、块状和条带状构造, 主要由白云石组成, 含少量方解石、长石、石英、钠透闪石、金云母、磷灰石、萤石、重晶石及磁铁矿等, 稀有稀土矿物有独居石、氟碳铈矿、铌铁矿及烧绿石等。白云岩从东到西铌及稀土的矿化普遍发育, 局部构成白云岩型铌、稀土矿体。

40个白云岩的平均化学成分列于表1。表1中同时列入世界上128个碳酸岩的平均化学成分, 以及白云鄂博地区石灰岩和世界石灰岩的化学成分, 由所列资料看出, 矿区白云岩与矿区石灰岩及世界石灰岩相比具有较高含量的 K_2O 、 Na_2O 、 P_2O_5 及F, 尤其是 RE_2O_3 的含量很高, 在化学成分上, 以及在矿物成分上与世界碳酸岩的十分近似。

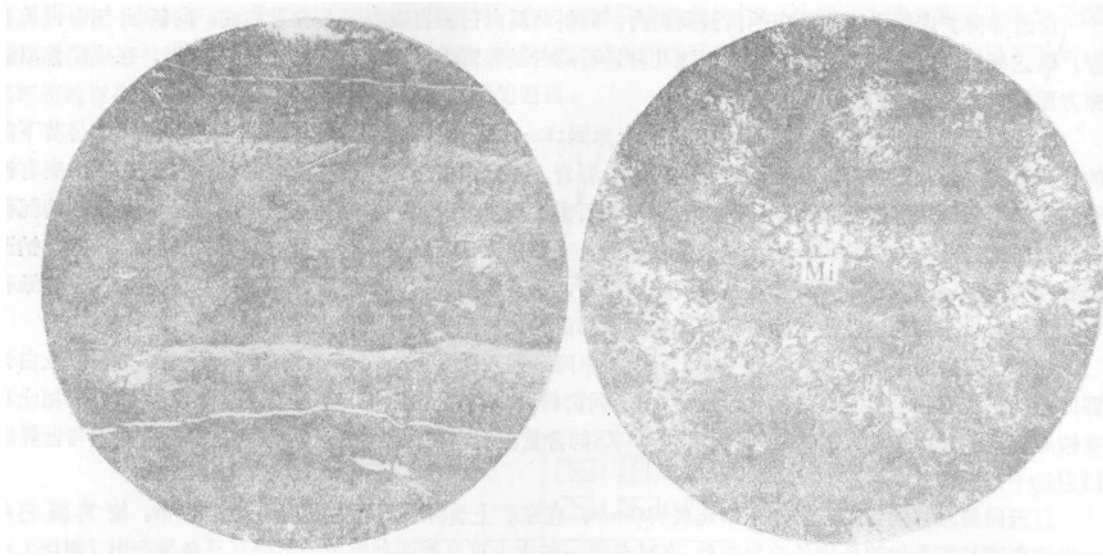
白云向斜轴部的钾长石岩, 东西延展约10km, 在东矿上盘钾长石岩的厚度增大到500m。按其颜色可分出浅色钾长石岩和暗色钾长石岩两种, 有时在同一标本上可见到两种颜色长石岩互呈条带产出(照片1)。岩石致密坚硬, 具显微隐晶结构、板状构造。这种岩石的矿物颗粒十分细小, 仅在高倍显微镜下略显光性, 前人称它们为板岩。岩石中的主要矿物是微斜长石, 含量可达80%, 少量和微量矿物有石英、钠闪石、霓石、黑云母、磁铁矿、方解石、磷灰石、黄铁矿及重晶石等, 稀有稀土矿物有独居石、易解石, 以及氟碳铈矿。由于碳质含量不同区分出两种不同颜色的钾长石岩。钾长石岩遭到不同程度的晚期蚀交代作用, 如钠闪石化、霓石化、长石化(照片2)、黑云母化等。蚀变作用强烈时, 在局部地段形成这些矿物的近单矿物岩石(照片3、4)。在钾长石岩中常可见到较大的晚期蚀变矿物晶体。有时, 长石岩中见到呈斑晶产出的微斜长石(照片5)及呈晶屑产出的石英(照片6)。4个钾长石岩样品的化学成分列于表2。由表2资料看出, 这种岩石的 K_2O 含量高达15.75%。

表2 白云鄂博钾长石岩的化学成分(%)

Table 2 Chemical composition of K-feldspar rock from Bayan Obo (in percentage)

	浅色长石岩		暗色长石岩	
	1	2	1	2
SiO ₂	60.95	63.93	61.97	63.46
TiO ₂		0.04	0.60	0.04
Al ₂ O ₃	17.28	18.14	17.37	17.84
Fe ₂ O ₃	3.94	0.49	1.16	0.27
FeO	1.47	0.27	3.31	0.48
MnO	0.11		0.04	0.03
MgO	0.11	0.14	1.54	0.17
CaO	0.68	0.05	0.28	0.10
Na ₂ O	0.80	0.66	4.33	0.63
K ₂ O	15.04	15.75	7.13	15.75
P ₂ O ₅	0.07	0.01	0.06	0.03
烧失	0.05	0.49	1.77	0.66
总计	100.50	99.97	99.56	99.46

在国外, 在许多碱性-碳酸岩杂岩体发育地区见到这一类岩石, 它们有很多名称, 如钾长石岩、正长石岩、钾粗面岩、假粗面岩、侵入角砾岩等。它们或产在碳酸岩杂岩体内, 或产在离杂岩体一定距离的围岩



照片1 钾长石岩，条带状构造
标本号 R40，单偏 3.2×10

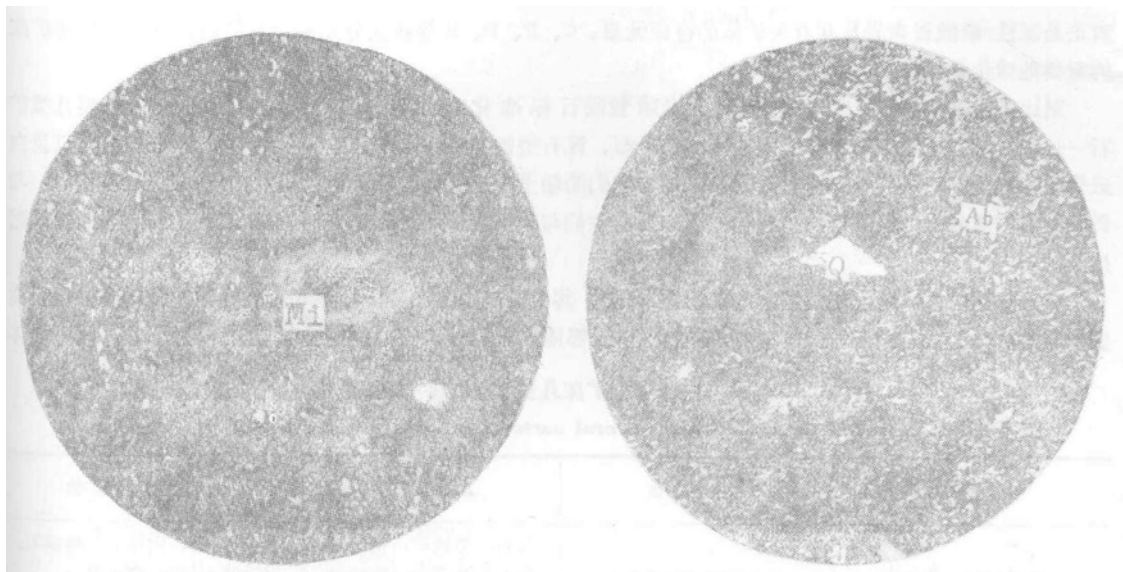
照片2 微斜长石化钾长石岩，基体由钾长石组成，微斜长石(Mi)呈晚期似脉状集合体，标本号 H70，正交 6×10



照片3 黑云母近单矿物岩，黑云母(Bi)呈自形片状集合体，标本号 BT15，单偏 6×10

照片4 钠闪石近单矿物岩，钠闪石(Ri)近于定向相连，标本号 H49，单偏 3.2×10

中。岩石主要由三斜度很大，钠长石分子很少的钾长石组成，岩石具似粗面状结构，有时具似花岗状结构及角砾碎屑构造，与白云鄂博矿区的钾长石岩相似。有的学者，如E.Wm.Heinrich认为这类岩石是由钾质喷气或溶液交代原岩而成^[10]。有的学者，如D.S.Sutherland，认为在强烈的钾质喷气或溶液作用下，一开始可引起围岩的长霓岩化，但在深处作用较强的情况下能导致岩石重熔，出现深熔流动作用，形成这种钾长石岩^[11]。在乌干达的布库苏，J.W.Baldock把该地的他命名为钾粗面岩的岩石，看作是在钾质喷气作用下由岩石经深熔流动而形成^[12]。此外，在马拉维的奇尔瓦岛也见到由长霓岩化角砾岩逐渐过渡为粗面状正长岩的现象^[1]。白云鄂博矿区的钾长石岩很有可能也是钾质喷气作用的结果。从岩石中有斑晶及晶屑产出的情况看，当岩石形成时，可能已有一部分呈凝灰岩或熔岩形式存在，说明当时深处岩石可能已达熔融流动状态。



照片5 钾长石岩中的微斜长石斑晶，四周有一圈反应边钾长石，标本号 H71，正交 6×10

照片6 钾长石岩中的石英晶屑(Q)和钠长石晶屑(Ab)，标本号 H74，正交 6×10

刘铁庚等于1982年在白云鄂博西矿发现了石英安粗质角砾凝灰熔岩及英安质熔结角砾岩和英安岩⁽²⁾。李继亮和徐志平等也证实粗面凝灰岩的存在⁽³⁾。白云鄂博矿区确有碱性火山岩浆活动。

矿区内除钾长石岩、黑云母岩、霓石岩、长霓岩等世界碱性-碳酸岩杂岩体所特有的一套岩石组合外，还产出碳酸岩及碱性辉长岩。其中碳酸岩呈岩墙或岩脉产出，具有与矿区白云岩相近似的化学成分和矿物成分。取样分析得知，碳酸岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr(i) = 0.706, Rb-Sr法等时线年龄 433Ma, 意味着矿区确有碱性碳酸岩岩浆活动，而且延续时间很长，在加里东时期仍有显示。

到目前为止，白云鄂博矿床内已查明的元素约71种。从白云鄂博矿床元素周期表(图2)上可以看出，矿床内含量显著大于克拉克值的有Na、K、Mg、Ca、Sr、Ba、Sc、Mn、Fe、Nb，以及ΣCe、ΣY。这些元

	IA																		VIA	VIIA	O		
1	H	IIA																	III A	IV A	V A		
2	Li	Be																	B	C	N	O	F
3	Na	Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B		IB	II B	Al	Si	P	S	Cl							
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se							
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo					Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te							
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re				Au		Hg	Pb	Bi							Rn	
7		Ra																					

镧系	La	Ce	Pr	Nd		Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
铀系		Th		U											

Co ≧ Clarke Tj ≈ Clarke Be ≪ Clarke

图2 白云鄂博矿床元素周期表
Fig. 2. Periodic table for the Bayan Obo ore deposit.

素正是碱性-碳酸岩杂岩及其有关矿床的特征元素。C、F、P、S 等挥发分元素含量很高，是白云鄂博矿床的重要地球化学特征。

对比区内几类矿石和岩石的稀土元素球粒陨石标准化曲线(图3)可以看出，矿床内主要几类矿石——块状铈稀土铁矿石、萤石型铈稀土铁矿石、霓石型铈稀土铁矿石、钠闪石型铈稀土铁矿石，以及白云岩型铈稀土矿石(含铈稀土白云岩)，尽管它们的稀土含量有高低，但它们的曲线形态彼此相似，与钾长石岩和碳酸岩的曲线形态也很相似。相反，它们与矿区南部的黑云母花岗岩和北部的石灰岩的曲线迥然不同。

白云鄂博矿床内已发现或确定的矿物约131种，其中铈矿物约20种，稀土元素矿物约20种。几种主要类型矿石的矿物组成总结示于表3。由表3看出，白云鄂博矿床的一套矿物共生组合与国外碱性-碳酸岩杂岩体

表3 白云鄂博矿床几类矿石的矿物组成

Table 3. Mineral constituents of several sorts of ore in the Bayan Obo ore deposit

矿石类型	主要矿物	次要矿物	稀有稀土元素矿物
块状铈稀土铁矿石	磁铁矿	萤石，赤铁矿，钠闪石，霓石，金云母，氟碳铈矿，独居石	铈金红石，铈铁矿，烧绿石，易解石，氟碳钙铈矿
萤石型铈稀土铁矿石	萤石，赤铁矿，氟碳铈矿，独居石	磁铁矿，重晶石，磷灰石，白云石	铈金红石，铈铁矿，烧绿石，铈钙矿，氟碳钙铈矿，易解石，包头矿
霓石型铈稀土铁矿石	霓石，磁铁矿	赤铁矿，萤石，磷灰石，氟碳钙铈矿，独居石，石英	易解石，铈钙矿，烧绿石，铈铁矿，黄河矿，钍石，锆石
钠闪石型铈稀土铁矿石	钠闪石，磁铁矿	萤石，金云母，黄铁矿，独居石，氟碳铈矿	易解石，烧绿石，锆石，铈铁矿
白云岩型铈稀土矿石	白云石，磁铁矿	钠闪石，金云母，萤石，磷灰石，重晶石，独居石	氟碳铈矿，易解石，铈铁矿，包头矿

有关的矿床的矿物共生组合完全一致。

二、矿床的Sm-Nd同位素特征

为探求稀土的成矿时代和矿床成因，选择Sm-Nd同位素研究，因为Sm、Nd本身就是稀土元素，它们的形成年龄就是成矿年龄。鉴于白云鄂博矿区以前已发表过一些单矿物的年龄资料，如独居石和易解石。这些矿物有的可能遭到后来的交代蚀变作用，有的本身可能就是交代作用产物，从它们得出的年龄不一定能代表矿石的形成年龄。本次工作在白云鄂博最大的一个矿体——主矿，按不同类型矿石——块状铈稀土铁矿石、萤石型铈稀土铁矿石、霓石型铈稀土铁矿石、钠闪石型铈稀土铁矿石、白云岩型铈稀土矿石、黑云母型铈稀土矿石，以及钾长石岩型铈稀土矿石，分别采集全岩样品(全矿石样品)。采样位置示于图4。

实验在中国地质科学院地质研究所Sm-Nd同位素年代学实验室完成。方法已由张宗清和叶笑江报导^(4,5)。MAT-261固体同位素质谱计测定，双(Re)带，M⁺离子形式，可调多法拉第筒接收器接收。质量分

图3 白云鄂博矿石及岩石的稀土元素球粒陨石标准化曲线

1—萤石型铌稀土铁矿石; 2—霓石型铌稀土铁矿石; 3—钠闪石型铌稀土铁矿石; 4—白云岩型铌稀土矿石; 5—块状铌稀土铁矿石; 6—碳酸岩; 7—钾长石岩; 8—碳酸岩中的磁铁矿带; 9—碳酸岩中的长石带; 10—黑云母花岗岩; 11—石灰岩

Fig. 3. Chondrite-normalized REE patterns of ores and rocks from the Bayan Obo deposit.

1—Fluorite type niobium-REE iron ore; 2—Aegirine type niobium-REE iron ore; 3—Riebeckite type niobium-REE iron ore; 4—Dolomite type niobium-REE ore; 5—Massive niobium-REE iron ore; 6—Carbonatite; 7—K-feldspar rock; 8—Magnetite zone in carbonatite; 9—Feldspar zone in carbonatite; 10—Biotite granite; 11—Limestone.

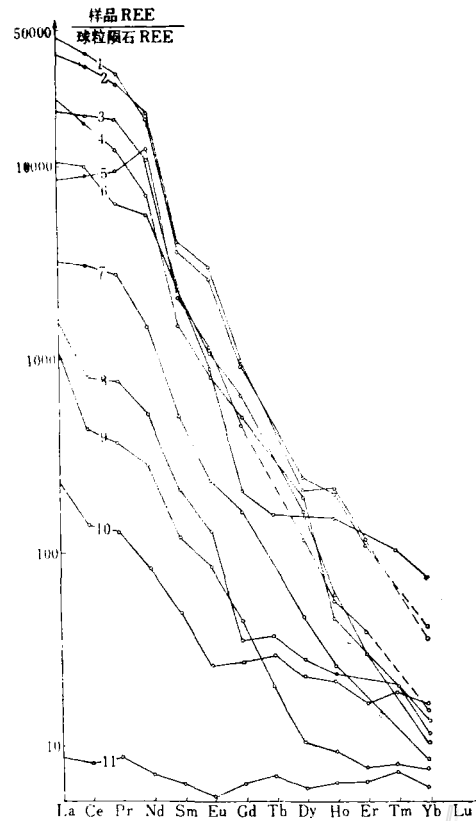


表4 Sm-Nd 同位素成分

Table 4. Sm-Nd isotopic composition of the Bayan Obo ore deposit

样品号	矿石类型	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ ①	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ② $\pm 2\sigma$	t_{Dm} ③ (Ma)	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ ④	$\epsilon_{\text{Nd}(o)}$ ⑤
By-1	黑云母型铌稀土矿石	3.391×10^2	3.110×10^3	0.06596	0.511570	13	1627	-20.9
By-2	萤石型铌稀土铁矿石	7.740×10^2	1.250×10^4	0.03746	0.511300	9	1597	-26.1
By-4	霓石型铌稀土铁矿石	1.072×10^3	1.345×10^4	0.04821	0.511378	13	1629	-24.6
By-5	钠闪石型铌稀土铁矿石	1.194×10^2	1.231×10^3	0.05867	0.511535	11	1585	-21.6
By-9	块状铌稀土铁矿石	2.551×10	2.859×10^2	0.05397	0.511480	8	1590	-22.6
By-14	白云岩型铌稀土矿石	2.986×10^2	3.687×10^3	0.04899	0.511373	13	1641	-24.7

① 误差 0.1%; ② 采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 标准化;

$$\textcircled{3} \quad t_{\text{Dm}} = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s - 0.51315}{(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s - 0.2137} + 1 \right], \text{ S 代表样品, 下同;}$$

$$\textcircled{4} \quad f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = \frac{(\text{Sm}/\text{Nd})_s}{(\text{Sm}/\text{Nd})_{\text{CHUR}}} - 1 = \frac{(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s}{0.1967} - 1;$$

$$\textcircled{5} \quad \epsilon_{\text{Nd}(o)} = \left[\frac{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s}{0.51264} - 1 \right] \times 10^4$$

镱用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 改正。J. M. Nd₂O₃(NO. JMC 321)标准测定结果

$$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511125 \pm 8(2\sigma), \quad \text{BCR} - 1^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512643 \pm 12(2\sigma).$$

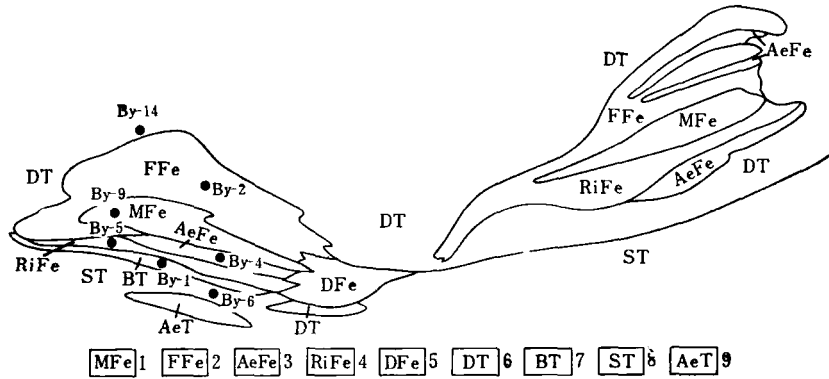


图 4 Sm-Nd同位素研究采样位置图

1—块状铌稀土铁矿石；2—萤石型铌稀土铁矿石；3—霓石型铌稀土铁矿石；4—钠闪石型铌稀土铁矿石；5—白云石型铌稀土铁矿石；6—白云岩型铌稀土矿石；7—黑云母型铌稀土矿石；8—钾长石岩型铌稀土矿石；9—霓石型稀土矿石。By-2—样品编号。

Fig. 4. Map showing sampling location for Sm-Nd isotopic study.

1—Massive niobium-REE iron ore; 2—Fluorite type niobium-REE iron ore; 3—Aegirine type niobium-REE iron ore; 4—R'checkite type niobium-REE iron ore; 5—Dolomite type niobium-REE iron ore; 6—Dolomite type niobium-REE ore; 7—Biotite type niobium-REE ore; 8—K-feldspar type niobium-REE ore; 9—Aegirine type REE ore. By-2—Serial number of sample.

年龄计算采用York回归分析法^[8]。衰变常数 $\lambda(^{147}\text{Sm}) = 6.54 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$ 。

样品分析结果列于表4。图5指示白云鄂博矿床Sm-Nd等时线年龄，图6为白云鄂博矿床Nd同位素随时间的演化图。

等时年龄 $t = 1.58 \pm 0.36 (2\sigma) \text{Ga}$; $I_{\text{Nd}} = 0.51088 \pm 12 (2\sigma)$; $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +6.1 \pm 2.4$ 。

由所列资料看出，白云鄂博矿床的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +6.1$ ，意味着稀土成矿物质来自地幔。从图6看出，Nd同位素以亏损上地幔为原点呈一簇发散的射线，说明自1.58Ga以后未见有Nd同位素被改造的迹象，自亏损地幔分出后保持到今。另根据小的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 比值，指示稀土分馏较强，意味着稀土元素在地幔曾受到变质或改造，白云鄂博稀土成矿物质最可能来自富含稀土、铌和大量挥发分，如 CO_2 、F、P等的地幔流体。

矿床的Sm-Nd等时年龄1.58Ga指示稀土成矿于中元古代，这正是区域白云鄂博群的沉积时代。稀土元素的成矿时代与地层的沉积时代相同，意味着稀土是随沉积作用而成矿的。稀土矿床是沉积成因矿床，这与地质事实相符。矿床的Sm-Nd模式年龄从1585Ma到1641Ma，平均1612Ma，模式年龄与等时年龄相近，意味着稀土元素自地幔分出后直接沉积成矿，保存着稀土物质直接来自地幔的完好指示。这在后面矿床的氧同位素、硫同位素及铍同位素特征上，表现也很明显，这正是—般稀土金属碳酸岩型矿床的重要特征。

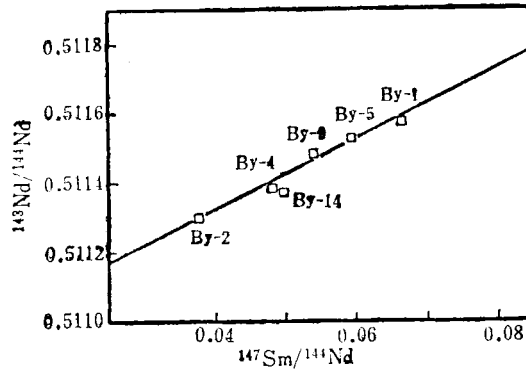


图 5 白云鄂博矿床Sm-Nd等时年龄

Fig. 5. Sm-Nd whole rock isochron diagram of the Bayan Obo ore deposit.

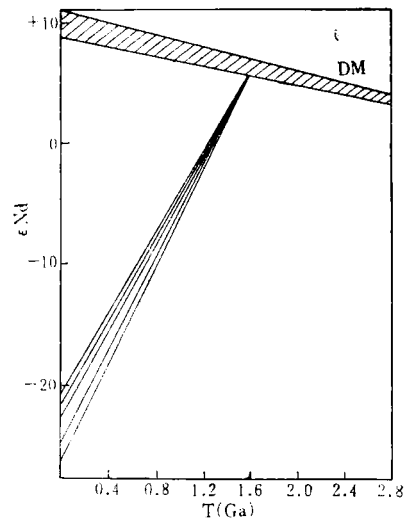


图 6 白云鄂博矿床Nd同位素随时间演化图

(图中分别应为 ϵ_{Nd} 和 t (Ga))

斜线区表示亏损地幔(DM)Nd同位素的演化区
放射线表示白云鄂博矿床Nd同位素的演化线

Fig. 6. Nd isotope evolution with time for the Bayan Obo ore deposit.

Oblique line area represents Nd isotope evolution area of deficiency mantle (DM); radiate lines stand for Nd isotope evolution lines of the Bayan Obo ore deposit.

三、成矿时代及矿床成因分析

有关白云鄂博矿床的成矿时代,除本次工作取得的Sm-Nd全岩等时线年龄外,还有如下三组资料:

第一组具有元古代的年龄,包括:1.白云岩中方铅矿的铅同位素模式年龄——14358Ma^[2]; 2.白云岩中独居石的Th-Pb年龄——1672.26Ma^[2]; 3.白云岩中磷灰石的U-Pb年龄——1574.95Ma^[2]。上述几个年龄值表示矿区白云岩或其中的矿物形成于元古代。白云岩中的独居石是稀土矿床中的主要稀土矿物,其年龄值能说明稀土的形成时代,但以其为单矿物,年龄值有多种解释,以致这一从50年代就确定下来的年龄值^[1]没有引起足够的重视。4.稀土铁矿体的Sm-Nd模式年龄——1400Ma^[13]; 5.独居石和氟碳钙铈矿等的La-Ba,Sm-Nd年龄——1400Ma^[14]。这后一年龄值最近发表于《Economic Geology》上,是本文作者在本文完成后见到补充进来的。

第二组具有海西期年龄,包括:1.矿区3个黑云母K-Ar平均年龄——273Ma^[6]; 2.矿区6个易解石的Th-Pb平均年龄——219Ma^[2]; 3.矿区2个暗色钾长石岩的K-Ar平均年龄——242Ma^[6]; 4.矿区南部黑云母花岗岩Rb-Sr等时线年龄——255.18Ma^[2]。

根据第二组年龄,有的学者认为白云鄂博矿床的成矿时代为海西期,并将矿床的形成与矿区南部的花岗岩浆活动相联系,通过花岗岩浆的岩浆期后气体-热液作用而导致成矿。

第三组年龄是有关加里东时期的,包括:1.矿区钾长石岩Rb-Sr等时线年龄——354.20Ma^[2]; 2.宽沟碳酸岩岩脉的Rb-Sr等时线年龄——433Ma^[1]。

这第三组年龄值表示在加里东时期本区有一次岩浆侵入活动或热事件发生。目前,国内外普遍认为,稀土和铈的内生矿化与碱性-碳酸岩杂岩体关系密切。本区碳酸岩含有的稀土量很高,在加里东时期很可能存在一次稀土的矿化作用。除上述三组年龄数据外,还有一些数据,如主矿上盘的黑云母岩的Rb-Sr等时

线年龄 $314.9\text{Ma}^{(7)}$ 。这些数据或可归入海西期,或可归入加里东期,在大的方面上列三组数据可以概括,在此不一一例举。

在上述年龄数据中,从用于年龄测定的样品的代表性,测定方法的精度及可信度,尤其是从地质产状及地球化学特征分析可以认为,白云鄂博矿床,尤其是其中稀土的成矿主要发生在中元古代,约在 $1400-1600\text{Ma}$ 之间。矿石是通过沉积方式形成的。在加里东时期,伴随着碱性碳酸岩岩浆,以及可能某些碱性辉长岩岩浆的侵入,导致稀土第二次成矿。鉴于碳酸岩及碱性辉长岩等在矿区内的分布有限,由它们带来的成矿物质也有限。在海西期,伴随着矿区南部花岗岩浆的侵入,原沉积的矿石受到一次改造,有新的晚期

表 5 白云鄂博矿床黄铁矿和方铅矿的硫同位素成分

Table 5. Sulfur isotopic composition of pyrite and galena from the Bayan Obo ore deposit

	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)		资料来源
	范围	平均	
西矿	-4.2—+4	+0.52 (99)	杨凤筠 (1979)
主矿和东矿	-2.7—+7.8	+2.39 (31)	杨凤筠 (1979)

括号中为样品数

表 6 白云鄂博矿床磁铁矿的氧同位素成分

Table 6. Oxygen isotopic composition of magnetite from the Bayan Obo ore deposit

	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)		资料来源
	范围	平均	
块状铈稀土铁矿石	-2.99—+3.55	-0.09 (9)	本文作者 ⁽¹⁾
钠闪石型铈稀土铁矿石	+0.76—+1.92	+1.69 (5)	本文作者 ⁽¹⁾
块状铈稀土铁矿石	-1.1—+1.3	+0.2 (7)	魏菊英等 (1983)
萤石型铈稀土铁矿石	-0.5—+3.6	+1.8 (4)	魏菊英等 (1983)
霓石型铈稀土铁矿石	-1.4—+0.7	-0.3 (4)	魏菊英等 (1983)
钠闪石型铈稀土铁矿石	+0.5—+3.0	+1.8 (5)	魏菊英等 (1983)
白云石型铈稀土铁矿石	0.0—+3.6	+1.3 (28)	魏菊英等 (1983)
黑云母型铈稀土铁矿石	+1.3—+4.2	+2.9 (6)	魏菊英等 (1983)
全部矿石总计	-2.99—+4.2	+1.145 (68)	

括号中为样品数

阶段的稀土矿物形成。鉴于白云鄂博稀土金属是如此巨大,花岗岩的含矿性与矿床含矿性质明显不同,在海西期很可能没有多少稀土元素从深部或从外部带来。

有关矿床成矿物质来源,除本次工作得出的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的重要信息外,还有列于表5、6、7的资料。

由所列各种同位素资料看出,白云鄂博矿床的成矿物质多来自地幔。最近,日本中井先生和增田教授在研究白云鄂博几个稀土矿物的Sm-Nd及Rb-Sr同位素成分后指出:“白云鄂博矿床的成矿物质来自以幔源为主的流体,大量来自古老地壳物质的可能性可以排除”⁽¹⁴⁾。

从上述矿床地质地球化学特征,Sm-Nd同位素特征,以及成矿年代、物质来源等的讨论可以得出结论认为,白云鄂博铈稀土铁矿床成因上应属于碱性碳酸岩型矿床。至于矿床的成矿机理,一些问题仍不清楚,需进一步研究。根据矿体具沉积产状、矿石量极巨大、矿体中挥发分元素及碱性元素强烈发育、矿区内有火山岩及可能为喷气成因岩石的存在,以及交代作用的广泛发育等可以设想在元古代时期,成矿元素主要是通过裂谷带内沿断裂出现的火山喷气作用沉淀的,绝大量的稀土、铈和铁,以及挥发分等是在这一时期

表 7 白云鄂博矿床磷灰石等的锶初始值

Table 7. Initial strontium values of apatite, dolomite and carbonatite rock from the Bayan Obo area

	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$	资料来源
碳酸岩脉	0.706 (4)	本文作者 ^[1]
白云岩及铁矿	0.704 (4)	本文作者 ^[2]
主矿磷灰石	0.7041 (3)	魏明秀
西矿磷灰石	0.7036 (3)	魏明秀

括号中为样品数

以这种方式从地幔带上来的。在加里东及海西时期，稀土元素的成矿方式以气体-热液交代作用为主。

宋叔和教授对本项研究工作给以一贯关心和鼓励，并最后审查全文，特致衷心地感谢。

参 考 文 献

- [1] 白鸽、袁忠信 1985 碳酸岩地质及其矿产 地质出版社 107—140页
- [2] 中国科学院地球化学研究所 1988 白云鄂博矿床地球化学 科学出版社
- [3] 李继亮 1983 白云鄂博群的酸性火山岩 地质科学 No.1
- [4] 张宗清、叶笑江 1987 稀土元素的质谱同位素稀释分析和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值的精确测定方法 中国地质科学院地质研究所所刊 No.17 108—128页
- [5] 叶笑江、张宗清 1990 Nd比值测定中的Sm、Nd分离——HDEHP分离法 分析测试通报 No.3 6—9页
- [6] 肖仲洋 1979 白云鄂博矿区同位素年龄数据的讨论 全国同位素地质会议论文集 No.2 地质出版社 22—28页
- [7] 姜传武 1982 白云鄂博矿床同位素地质研究 地质科学 No.2 270—276页
- [8] York, D., 1969, Least squares fitting of a straight line with correlated errors. Earth and Planet. Sci. Lett., 5, p. 320—324.
- [9] Meng Qingrun, 1988, On the structure control of iron ore deposit in the Proterozoic ore-bearing carbonate formation on the northern margin of the North China platform—taking for example the Bayan Obo iron deposit, Inner Mongolia. Progress in Geosciences of China(1955—1958) p. 157—160.
- [10] Hainrich, E. Wm. and Moore, D. G., 1970, Metasomatic potash feldspar rocks associated with igneous alkaline complex. The Canadian Mineralogist, Vol. 10, Part 3, p. 571—584.
- [11] Sutherland, D. S., 1965, Potash-trachyte and ultrapotassic rocks associated with the carbonatite complex of the Toror Hills, Uganda. Mineralogical magazine, Vol. 35, No. 270 p, 363—378.
- [12] Baldock, J. W., 1973, Potassic fenitization, trachytes and agglomerates at the Bukusu carbonatite complex, Uganda. Overseas Geology and Mineral Resources, No. 42, p. 1—24.
- [13] Philpotts, J. A., 1988, On the petrography, chemistry, age and origin of the Bayan Obo rare-earth iron deposit and resulting insight on the Midproterozoic Era. Am. Geophys. Union Trans. Vol. 69. p. 517.
- [14] Nakai, S., Masuda, A., Shimizu, H., and Qi Lu, 1989, La-Ba dating and Nd and Sr isotope studies on the Bayan Obo rare earth element ore deposits, Inner Mongolia, China. Econ. Geol. Vol. 84, No. 8. p. 2296—2299.

METALLOGENIC EPOCH AND GENESIS OF THE BAYAN OBO NIOBIUM-REE-IRON DEPOSIT, INNER MONGOLIA

Yuan Zhongxin, Bai Ge and Wu Chenyu

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

Zhang Zhongqin and Ye Xiaojiang

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing)

Abstract

Geotectonically, the Bayan Obo deposit is located on the northern margin of the North China platform. When the Proterozoic Bayan Obo Group was formed, the area was likely a rift tectonic environment. Dolomite, the main wall rock (or host rock) of the orebody of the Bayan Obo ore deposit, shows distinct stratified structure and is remarkably similar to REE- and Nb-rich carbonatite rocks in other parts of the world in mineral constituents, petrochemical composition and RE as well as REE composition. K-feldspatite, another host rock of the orebody, might have been formed as a result of volcanic exhalation, and is unlikely a common slate.

The Sm-Nd whole rock (whole ore) isochron age of the principal orebody of the Bayan Obo deposit is 1.58 Ga, and the Sm-Nd model age is 1.61 Ga, with $\epsilon_{Nd}(t)$ being +6.1. The data suggest that the ore deposit was formed in middle Proterozoic, and the ore-forming material came from the mantle. Middle Proterozoic seems to be the time when Bayan Obo Group was deposited, and the REE metallization occurred together with the deposition of the strata. The isochron age is close to the model age, implying that the ore-forming material was precipitated to form the ore deposit immediately after its separation from the mantle, without much contamination by the crustal substances.

Besides the metallogenic age of middle Proterozoic, the ages of Caledonian period and Hercynian period have also been recorded; for the former period, the Rb-Sr isochron age of Kuangou carbonatite vein determined by the authors is 433 Ma with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$ being 0.706; for the latter period, the Th-Pb age of eschynite from the ore deposit and the Rb-Sr isochron age of biotite granite from the southern part of the ore district were already determined by previous workers. These data indicate that the ore-forming process was of polyphases. In addition, $\delta^{18}\text{O}_{\text{magnetic}}$ values of massive iron ore are -2.99 — $+3.55\%$, and $\delta^{18}\text{O}_{\text{magnetic}}$ values of kaersulite type iron ore are $+0.76$ — $+1.92\%$. These values, together with the sulfur isotopic data obtained by previous workers, also suggest that the ore-forming material for the ore deposit was derived from deep sources.

(下接58页 to be continued on p.58)

- 〔6〕 黎彤、倪守斌 1990 地球和地壳的化学元素丰度 地质出版社
- 〔7〕 孙大中主编 1984 冀东早前寒武纪地质 天津科技出版社
- 〔8〕 黎彤 1977 鞍山式铁矿的成矿地球化学背景问题 地质与勘探 第5期 第4—11页
- 〔9〕 黎彤 1977 前寒武纪游离氧的生成和大气氧的积累 地质与勘探 第7期 第6—11页
- 〔10〕 宋叔和 1990 国外矿床地质学的一些发展趋势 矿床地质 第9卷 第2期 第183—190页

SEDIMENTARY EVOLUTION AND MINEROGENIC BACKGROUND OF PROTEROZOIC ERA IN NORTH CHINA

Li Tong

(University of Science and Technology, Beijing)

Abstract

Proterozoic is an important minerogenic epoch and also a turning period of the global minerogenic background in geological history.

In North China, lots of mineral resources occurred in Proterozoic, and their minerogenic processes were controlled by both the global background and the regional or local conditions. The analytical results of the sedimentation evolution, the chemical characteristics, and the types of mineral deposits all point to the conclusion that in North China the abruptly turning point of the global minerogenic background of Proterozoic might have mainly occurred just before and after Luliang orogeny (1850Ma). To cite two examples: during that time, the chemical composition of the atmosphere changed from $\text{CO}_2\text{-N}_2$ type to $\text{N}_2\text{-CO}_2\text{-O}_2$ type, and the pH of the sea water changed from acidic to alkaline.

(上接70页 continued from p.70)

It might be considered that the ore-forming process of the Bayan Obo deposit was of polyphases, but the major metallization took place in middle Proterozoic. The ore-forming material was brought upward in the form of volcanic exhalation from the mantle and then through sedimentation formed ore deposit which was genetically of alkalic rock-carbonatite rock type. In Caledonian period, with the intrusion of carbonatite veins, small amounts of ore-forming material might have been brought upward from the depth and led to extensive metasomatism. In Hercynian period, with the intrusion of granite from the south, the ore deposit was transformed and the metasomatism was further developed, nevertheless, little ore-forming material was brought into the orebody from the depth or the outside at that time.