

论内蒙古白云鄂博群和白云鄂博超大型 稀土-铈-铁矿床成矿的年代

章雨旭¹ 江少卿¹ 张绮玲² 赖晓东³ 彭 阳¹ 杨晓勇³

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3. 中国科学技术大学地球与空间科学系, 安徽 合肥 230026)

摘要:白云鄂博稀土铈铁矿床具十分独特的地质、地球化学特征,所以多时代成矿是难以置信的。白云鄂博矿床成矿时间势必晚于赋矿白云岩及其下伏地层,而较多的地层古生物证据表明白云鄂博群形成于震旦纪至奥陶纪之间。基于赋矿白云岩是热水沉积形成,碳酸盐脉是同源热液交代变质岩或砂岩等形成的认识,笔者等认为,碳酸盐脉中的锆石可能是变质岩或砂岩中的锆石,它们虽被热液改造,其 U-Pb 年龄仍可能老于成矿年龄。已报道的白云鄂博矿床 Sm-Nd 等时线年龄虽然主要集中在 1.2~1.6 Ga,但也有多个分别为 0.4~0.5 Ga、0.8~0.9 Ga 和 1.0~1.1 Ga 的年龄值。笔者等收集了所有已发表的 98 件白云鄂博矿床矿石、矿物及碳酸岩墙和上覆板岩的 Sm-Nd 年龄分析数据,用 Isoplot 程序计算,发现这些数据,除两件异常外,可以拟合成一条直线,相关系数 $R=0.96325$,求得等时线年龄 $t=1125.8\pm 32.5$ Ma, $\varepsilon_{Nd}=-3.02$ 。这一结果表明在 1125.8±32.5 Ma 白云鄂博 Sm-Nd 同位素时钟启动,且未再受后来的地质作用扰动,指示成矿作用应晚于或等于 1.1 Ga,但地质意义尚待研究。若假定 Sm-Nd 同位素时钟不易被一般地质作用重置,则可以采信白云鄂博矿床辉钼矿的 Re-Os 模式年龄(439±8 Ma)或黄铁矿 Re-Os 等时线年龄(439±86 Ma)为白云鄂博的成矿年龄,这与赋矿地层的古生物化石年代相符。

关键词:白云鄂博群;白云鄂博稀土铈铁矿床;同位素年龄;Sm-Nd 测年;内蒙古

中图分类号: P618.7;79.31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)06-1129-09

白云鄂博矿床的赋矿围岩为白云鄂博群中部的白云岩,除非矿体及整个赋矿白云岩是飞来物,则白云鄂博成矿年龄必定晚于白云鄂博群赋矿白云岩及其下伏岩层的年龄——无论矿床是热水沉积、火山喷发、沉积改造还是岩浆侵入成因。

虽然姚德等^[1]提出了白云鄂博矿床形成与陨石有关,但并未提供新的证据,且认为是陨石与海水作用形成了白云岩,即并未说矿体整体是外来块体。而且,在矿体下伏的砂岩中,可见明显的碳酸盐脉(墙),切穿地层,而碳酸盐脉(墙)两侧具有明显的霓长岩化,且具有与主矿体相似的地球化学特征^[2-6],表明主矿体与碳酸盐脉(墙)是同源产物,外来岩块的可能性不存在。

长期以来,地质、古生物学家的证据表明白云鄂博群不早于震旦纪,可能是震旦纪至奥陶纪^[7-10]。而地球化学家及同位素年代学家得到的同位素年龄却自古元古代至奥陶纪均有,且多数集中于中元古代。

另一方面,白云鄂博的成矿作用极其特殊,有明显的、十分独特的地球化学特性,如极高的 Nb、稀土、F⁻、CO₂ 流体(热液或岩浆),由于地质环境、大地构造属性等是随着时间变化的,因此,很难想象不同地质时代在同一地点能够发生性质极为特殊的同一种成矿作用,显然,白云鄂博矿床多时代成矿观点是难以置信的。

本文旨在运用矿床学和地质学研究的辩证、系统思想^[11-15],甄别白云鄂博矿床已有同位素年龄的

涵义,探讨最基本的成矿时代问题。

1 白云鄂博群的年代

白云鄂博群主要分布于白云鄂博铁矿区东西一线,向东可达锡林郭勒盟南部化德县即河北省所称化德群,向西可达达尔罕茂明安联合旗熊包子等地。自下而上划分 6 个岩组, 15 个层,即 $H_1\sim H_{15}$,分别为都拉哈拉岩组($H_1\sim H_3$)、尖山岩组($H_4\sim H_5$)、哈拉霍疙特岩组($H_6\sim H_8$)、比鲁特岩组($H_9\sim H_{10}$)、白音宝拉格岩组($H_{11}\sim H_{12}$)、呼吉尔图岩组($H_{13}\sim H_{15}$)。此外,上部还有阿牙登岩组、阿勒呼都格岩组、呼和艾力更岩组亦曾划归白云鄂博群。内蒙古自治区区域地质志^[9]将最上边的阿勒呼都格岩组、呼和艾力更岩组划分出去,归入中、上奥陶统包尔汉图群;取消第 7 岩组阿牙登岩组,将其归入第 6 岩组即呼吉尔图组上部。

白云鄂博地区只有下部 6 个岩组,分为 15 个层,即 $H_1\sim H_{15}$ 。较多文献认为赋矿白云岩相当于 H_8 ,但张鹏远等^[9]详细研究后认为相当于 H_5 。

白云鄂博群的地质时代长期存在争议,且多次变动:① 1957 年李毓英等建群时,将其划归古元古界滹沱系;② 1964 年内蒙古区测一队在进行 1:20 万区调时根据地层中的 *Favositidae* 化石(有争议的蜂巢珊瑚科化石)划归寒武纪—早志留世;③ 1966 年 1:20 万区调在商都幅白云鄂博群阿牙登组(呼吉尔图组之上)发现头足、腕足及腹足类化石,改为寒武纪—奥陶纪;④ 内蒙古自治区地质矿产局^[10]将白云鄂博群顶部两组划归中奥陶统,其余岩组均划归中元古界长城系,取消第 7 岩组阿牙登岩组,将其归入第六岩组即呼吉尔图组上部;⑤ 1994 年在进行地层清理时,将 1~6 岩组归入中—新元古界长城系—青白口系;⑥ 重新将阿牙登组恢复,将都拉哈拉组和尖山组归入中元古界长城系;中部哈拉霍疙特组和比鲁特组划归中元古界蓟县系;上部白音宝拉格组、呼吉尔图组和阿牙登组归入新元古界青白口系^①。

孙淑芬^[7]、张鹏远等^[9]在白云鄂博群尖山组($H_4\sim H_5$)共发现微古植物共计 10 属 33 种,其组合特征以刺球藻群(*Acanthomorphida*)的分子为主,球藻群(*Sphaeromorphida*)分子次之。在刺球藻群中以

Baltisphaeridium 属和 *Michrhystridium* 属的分子占绝对优势。微古植物个体一般为 $10\sim 30\mu\text{m}$ 。除 3 个新种 4 个未定种之外,其中有 9 个种见于云南昆明筇竹寺关山剖面下寒武统,6 个种见于苏格兰、格陵兰、挪威、加拿大、俄罗斯的下寒武统;6 个种见于中国青白口纪以晚,5 个种最初发现于俄罗斯的奥陶系。所以,孙淑芬^[7]认为,“白云鄂博群尖山组微古植物分布于下寒武统和继承性的分子二者可约达 81%,层位较高的分子只占极少数;因此,白云鄂博群尖山组与中国云南昆明下寒武统以及欧洲、北美一些地区的下寒武统在微古植物组合面貌上可以对比”。张鹏远等^[9]即将白云鄂博群置于寒武系—奥陶系。

谭励可等^[10]在商都阿贵图车站西五道湾北山剖面阿牙登组下部第 4 层发现梅树村动物群分子 8 属 8 种(含 1 相似种、2 未定种):软舌螺类:弯管锥管螺 *Conotheca subcurvata*;似软舌螺类:剑形原赫兹刺 *Protohertzina unguiformis*;小托尔管(未定种) *Torellella* sp.;棱管壳类:棱管壳(未定种) *Siphogonuchitites* sp.,宽扁壳 *Lopochites latazonalis*;齿形壳类:反向寒武钉(相似种) *Cambroclavus cf.antis*,长刺甘洛刺 *Ganloudina longispina*;卡门壳类:多孔唐努乌拉壳 *Tannuolina multifora* 及大量海绵骨针(3 属):原始海绵(未定种) *Protospongia* sp.,湖南海绵(未定种) *Huananospongia* sp.,玻璃海绵(未定种) *Calihexactina* sp.(上述化石均由云南省地质矿产厅蒋志文教授级高工鉴定)。因此认为,阿牙登组中、下部属寒武纪无疑,阿牙登组底部可视为震旦系—寒武系界线,其下呼吉尔图组与阿牙登组整合接触,应视为震旦纪地层。上部 6~7 层(北山剖面 8~9 号)属奥陶纪,其中 6 层中曾发现早奥陶世头足类、腕足类和腹足类化石。

包括本文第一、五作者在内的研究组^[9]依地质特征对比认为白云鄂博南东 20 余千米的原腮林忽洞组与白云鄂博群的下部相当,并改腮林忽洞组为腮林忽洞群。在腮林忽洞群顶部发现微晶丘,其特征与白云鄂博赋矿白云岩的宏观特征十分相似,认为二者可能等时。即腮林忽洞群相当于白云鄂博群的 $H_1\sim H_5$ 。同时在腮林忽洞群中发现三叶虫碎片、微古植物化石和几丁虫。① 在腮林忽洞剖面第 10 层上部,即 DS1 顶部的含石英砂微晶灰岩薄片,发现有十几粒

① 内蒙古区调研究院一、二分队十幅联测区域地质调查报告(1:5 万),阿尔乎都格庙幅、满都拉苏木幅、白音珠日和幅、达尔扎幅、乌兰布卡格幅、白云鄂博幅、白云敖包幅、白音敖包幅、上和沙图幅、塔村官幅、达尔罕茂明安联合旗幅,1996。

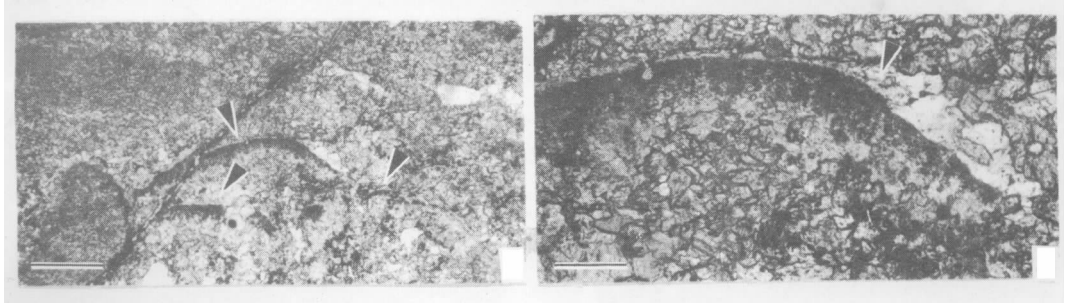


图 1 在腮林忽洞群中发现的三叶虫碎屑^[6]

左:岩石薄片中小小的三叶虫屑(箭头所指),图中可见到细裂缝切断三叶虫碎片。单偏光,比例棒长 0.15 mm

右:三叶虫屑,具玻纤结构,暗色部分为混染的泥、铁质杂质。单偏光,比例棒长 0.52 mm

Fig. 1 The fragments of Trilobite found in the Sailinhuodong Group^[6]

Left: fine fragment of Trilobite (pointed by an arrow). Single polar light, scale bar 0.15 mm

Right: fragment of Trilobite, glass-fibre structure; the dark part is muddy and/or ironic foreign substances. Single polar light, scale bar 0.52 mm

细小生物碎片颗粒呈弧形,个别为波浪形,并在碎屑的一侧外壳上有暗色粉末状铁质镶边,在周围灰泥已结晶为细微晶体时仍保持了生物的原始玻纤结构,在正交偏光下呈追踪式消光,这种结构构造是典型的三叶虫碎屑的特征(图 1)。^② 在近底部的板岩夹层中,发现微古植物和几丁虫化石: *Lophospheraidium* sp., *Leiopsophosphaera simplex* Sin., *Leiopsophosphaera* sp., *Michystridium* sp., *Zonosphaeridium* sp., *Taeniatum simplex* Sin. 属于寒武系的分子。^③ 在下部黑色纹理灰岩中有: *Michystridium* sp.1, *Michystridium* sp.2, *Michystridium conifrum* Downia, *Lophospheraidium* sp., *Microconcentrica* sp., *Goniosphaeridia* sp., *Goniosphaeridia* sp., *Baltisphaeridium solidum* (Sin 1962) Fu, *Ancyrochitina* sp., *Rbadochitina* sp., *Cyathochitina* sp.。^④ 在中部黑色纹理灰岩中有: *Rbadochitina* sp., *Goniosphaeridia* sp., *Leiopsophosphaera* sp.。下部和中部的具刺疑源类和几丁虫则应属早奥陶世分子。

综上所述,将白云鄂博群归为中元古代依据的仅是成矿作用同位素年龄。然而对这几份古生物证据是难以回避的。

2 成矿作用同位素年龄

2.1 锆石 SHRIMP 和 D-TMS U-Pb 法

范宏瑞等^[7]同位素稀释质谱法(D-TMS)测得白云鄂博矿区菠萝头山南侧碳酸盐脉 5 颗锆石 U-Pb 等时线年龄值为(2070±33)Ma,认为它应代表了锆石的结晶年龄,即碳酸岩墙的侵位年龄。范宏瑞等^[8]

用同位素稀释质谱法(D-TMS)测定了 Wu-dyke 碳酸岩墙 3 颗锆石 U-Pb 等时线年龄值为(1416±77)Ma,另外一颗锆石表面年龄为(1925±8)Ma。范宏瑞等认为,较老的年龄(1925±8)Ma 应该代表了来自围岩的捕获锆石年龄,并修订范宏瑞等^[7]获得的(2070±33)Ma 年龄也是来自围岩的捕获锆石年龄,而碳酸岩墙的侵位时代可能为 1400 Ma 左右。

刘玉龙等^[8]测得 4 个碳酸盐脉(作者称为碳酸岩墙)年龄:① 锆石的 SHRIMP U-Pb 下交点年龄为(1984±180)Ma,其 D-TMS 上交点年龄为(2085±330)Ma;② 锆石 SHRIMP 的上交点年龄为(2035±51)Ma;③ 锆石的 D-TMS 上交点年龄为(1934±64)Ma。④ 碳酸盐脉全岩 Pb-Pb 等时线年龄为(1236±300)Ma。认为 2.0 Ga 左右的年龄代表碳酸盐脉的形成,而(1236±300)Ma 代表裂谷的活化。

2.2 Sm-Nd 年龄

已知各文献表明年龄相差还是相当大的^[19-28](表 1),虽然主要集中在 1.2~1.6 Ga,但也有多个分别为 0.4~0.5 Ga、0.8~0.9 Ga 和 1.0~1.1 Ga 的值。

曹荣龙等^[23]给出 3 条等时线,其中两条平行且很接近;另一条只是这两条线外的两个点(很接近)加上线上的两点构成,而线上两点的选择作者也未给出理由,所以事实上可以说这是一个过唯一一点的线,应当取消这条线。

张宗清等^[24]推论,稀土来源是约 1670 Ma 由变质(交代)亏损地幔分离出来强烈富 CO₂、F、碱金属和稀土元素的流体,在 1298 Ma 左右上升成矿。

表 1 白云鄂博矿床成矿年龄 Sm-Nd 法测试结果表
Table 1 Sm-Nd isotopic analytical results of ore-forming time of the Bayan Obo ore deposit

样品来源(类别)	样品 数量	等时线 年龄/Ma	T_{Nd}	$\epsilon_{Nd}(t)$	平均 t_{Chur}	平均 t_{DM}	资料来源
全岩(矿石)	6	1580±36	0.51090±0.00012	+6.1±2.4		1610±20	[19, 20]
主、东矿 ^① 矿石	13	1286±91	0.51098±0.00004	-0.06±0.78	1298±31	1671±57	[21]
H ₂ 中碳酸盐脉	3	1223±65	0.510926±0.000035	-2.63±0.68			[21]
东矿体脉内矿物 ^①	5	422±18	0.511263±0.000013	-16.3±0.2			[21]
主东矿 ^① 独居石、 氟碳铈矿	7	1313±41	0.510919±0.000013	-0.5±0.3			[22]
单矿物 ^②	5	402±18	0.511252	-16.9			[23]
单矿物 ^②	5	424±91	0.511278	-15.9			[23]
主、东矿 ^① 富钾板岩(H ₃)	12	1035±83	0.51104±0.00005	-5.1±1.1	1454±97	1978±251	[24]
暗色板岩(H ₃)	5	1208±123	0.51102±0.00010	-1.1±1.9	1321±42	1883±147	[24]
变基性火岩岩(H ₃)	8	1337±86	0.51091±0.00006	-0.06±1.13	1316±78	1909±186	[24]
主、东矿 ^① 白云岩	16	1273±100	0.510919±0.000036	-1.4			[25]
矿石及其中单矿物 ^③	5	1250±210	0.510914±0.000077				[25]
西矿 ^① 矿石、白云岩	6+4	809±80	0.511182±0.000032		1261±96	1627±136	[26]
东矿 ^① 独居石	12	1008±320	0.511114±0.000091	-4.3			[27]

注: ①黄河矿、钠长石、钠闪石及钠长石岩。②独居石、氟碳铈矿、黄河矿、易解石、褐帘石、钠闪石、霓石、磷灰石共 10 件, 另有 4 个样品的数据来自 Nakai et al.^[28]。作者给出 3 条等时线, 其中两条平行且很接近; 另一条只是这两条线外的两个点(很接近)加上线上的两点构成, 事实上仅是一个两点连线, 应将线外两点作异常点取消, 从而取消这条线, 故只列出两条线。③全岩、白云石、萤石、磷灰石、独居石。

2.3 Re-Os 年龄

刘兰笙等^[28]测得辉钼矿的 Re-Os 模式年龄为 (439±8)Ma, 作者依照流行观点, 认为这代表晚期成矿年龄。

刘玉龙等^[30]测得了黄铁矿 Re-Os 等时线年龄亦为 (439±86) Ma, 也解释为晚期年龄。

2.4 其他年龄

刘玉龙等^[31]对宽沟北 H₈ 石灰岩进行了 U-Pb 和 Pb-Pb 定年, 结果由于体系中铀显著过剩, U-Pb 体系不能给出等时线年龄, 而 Pb-Pb 等时线年龄误差很大, 且随着数据取舍之不同, 可得两个年龄: (1500±400) Ma 和 (820±370) Ma, 可信度较差。

刘玉龙等^[27]对白云鄂博矿床白云石型稀土矿石中 12 个单颗粒独居石尝试了 U-Th-Pb-Sm-Nd 同位素联合定年, U 含量太低, U-Pb 体系, 不能给出等时线; 其中的 8 个独居石 Th-Pb 体系给出一等时线年龄为 (1231±200) Ma。

赵景德等^[32]测得 10 件碱性闪石的 K-Ar 或 Ar-Ar 年龄为 820~396±4 Ma; 10 件独居石等稀土矿物的 Th-Pb 模式年龄、矿物等时线或内部等时线和年龄为 (596±3) Ma~(407±12) Ma。

3 讨论

3.1 生物地层

从地层古生物学看, 白云鄂博群的年代应在震旦纪至奥陶纪。

3.2 U-Pb 年龄

从上述文献可以看出, 用于锆石 U-Pb 年龄测定的锆石均是采于碳酸盐脉中, 且除范宏瑞等^[17]样品所在的碳酸岩脉是发育于 H₃ 板岩中外, 其他样品所在的碳酸盐脉均产于白云鄂博群下伏的变质岩或 H₁~H₄ 砂岩中, 尽管它们可能有岩浆锆石的特征, 但难以排除它们是来源于砂岩或变质岩中的。众所周知, 白云鄂博矿床的矿体中很少见到锆石, 且富钍而贫铀, 碳酸盐脉与矿体具有相同的地球化学特征, 其中富产锆石是困难的。笔者等认为, 赋矿白云岩是热水沉积形成, 碳酸盐脉是同源热液交代变质岩或砂岩等形成^[3], 碳酸盐脉中的锆石就是变质岩或砂岩中的锆石, 它们可能被热水改造, 其年龄老于赋矿白云岩的年龄是正常的。现在测得的年龄能否代表成矿热液作用对锆石的改造时间, 恐怕还得寻找旁证支持。

3.3 Sm-Nd 年龄

已经报道的 Sm-Nd 模式年龄较为集中, t_{DM} 均大于 1.6 Ga, t_{Chur} 均大于 1.2 Ga; 而等时线年龄变化范围很大, 自 1.7 Ga 至 0.4 Ga, 且同一作者张宗清先生的数据也从近 1.6 Ga 至 0.8 Ga。而且, 许多等时线年龄本身的误差就很大(表 1)。

刘玉龙等^[27]指出, 白云鄂博矿床的特点是轻稀土高度富集, Sm/Nd 值很低, 大部分样品低至 0.05 以下, 是导致大部分定年结果误差较大、等时线性欠佳的原因。查阅这些 Sm-Nd 定年的原始数据可以发现, 绝大多数样品的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值小于 8%, 来自赋矿白云岩或矿石的 70 件样品中, 只有 7 件样品的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 大于 8% (分别为 3 件磷灰石、1 件易解石、2 件矿石和 1 件钠闪石); 许多小于 5% (图 2-b)。再加上 ^{147}Sm 的半衰期很长——106.0 Ga, 故由 ^{147}Sm 衰变而成的 ^{143}Nd 与非放射成因的 ^{143}Nd 相比, 所占份额极小^①。所以, 大的误差, 不可避免。

笔者等基于白云鄂博是单一一次成矿的认识, 可以假定, 白云鄂博矿床的 Sm、Nd 均是同源、同时的, 所以尝试收集了所有的原始数据 98 件, 其中来自赋矿白云岩或矿体的 70 件, 上覆板岩的 25 件, 下伏碳酸盐脉的 3 件。并将其混合在一起用 Isoplot 程序计算, 其中 1 件有笔误(源自张宗清等^[24], 一暗色板岩样品, $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$ 在数据表中为 0.01134, 但在等时线图上位于 0.1134 附近。分析可知后者合理)作了校正, 另两件离线较远(均来自曹荣龙等^[29], 分别为易解石和磷灰石)弃用。96 个 Sm-Nd 数据可以拟合成一条直线, $R=0.96325$, 斜率=0.00739, 可求得年龄 $t=1125.8\pm 32.5$ Ma ($\lambda=6.54\times 10^{-12}\text{a}^{-1}$), $\varepsilon_{Nd}=-3.02$ (图 2-a)。

若仅用其中的 70 件赋矿白云岩或矿石全岩或其中的独居石、氟碳铈矿、黄河矿等含稀土矿物, 则 2 件样品远离等时线, 其余 68 件拟合成一条直线, $R=0.88631$, 斜率=0.00700, 年龄 $t=1066.6\pm 68.8$ Ma ($\lambda=6.54\times 10^{-12}\text{a}^{-1}$), $\varepsilon_{Nd}=-4.13$ (图 2-b)。

若仅用 25 件板岩(全岩)样品的结果, 则 $R=$

0.96642, 斜率=0.00809, 年龄 $t=1232.0\pm 68.5$ Ma ($\lambda=6.54\times 10^{-12}\text{a}^{-1}$), $\varepsilon_{Nd}=-1.89$, 参与计算的 25 件样品均在等时线附近(图 2-c)。

从图 2-a 中可见, 所有的数据点近于一条直线(两个异常样品除外)。

而将数据分开成为赋矿白云岩(图 2-b)和上覆板岩(图 2-c)两组计算, 则上覆板岩早于下伏白云岩或矿体了, 这与地质事实明显不符; 若白云岩和矿体为热水沉积或海底火山沉积, 则板岩必定明显晚于白云岩和矿体; 若白云岩和矿体为岩浆侵入或热液交代, 则上覆板岩中的稀土应与之同源、同时。所以, 这可能是误差较大所致。同时笔者注意到, 张宗清等^[24]将他们的 25 个数据按富钾板岩、暗色板岩和变基性火山岩分成 3 组, 所得 3 个年龄值相互差和本身误差也均较大。

但无论如何, 这种多样品混合计算揭示了一个事实, 即 Sm-Nd 同位素时钟只启动了一次, 以后没有再被重置。启动的时间在 1.1 Ga 年左右。

所以, 可以认为: 在 $t=(1125.8\pm 32.5)$ Ma 时 Sm-Nd 同位素时钟启动, 后面的地质作用, 无论是岩浆作用还是热液(水)作用都不再扰动 Sm-Nd 同位素时钟。即 (1125.8 ± 32.5) Ma 仅是 Sm-Nd 源区分离的时间, 与后面的成矿过程无关。但这是一个怎样强烈的地质作用还难以解释。著名 Sm-Nd 同位素专家张宗清等^[24]曾“倾向认为, 稀土可能是在 1670 Ma 左右, 由变质(交代)亏损地幔分离出来的强烈富 CO_2 、F、碱金属和稀土元素的流体, 在 1298 Ma 左右上升成矿”, 似乎可以修改后移植到本文, 即这次导致 Sm-Nd 时钟启动的作用并不是后来的流体上升成矿过程, 而可能是一个地幔过程。但是, 笔者 3 种算法的 ε_{Nd} 值均为负值却说明, 稀土的初始源区可能是地壳, 这还需专家解释。

3.4 Re-Os 年龄

两篇文献的 Re-Os 年龄, 一个是辉钼矿模式年龄, 一个是黄铁矿的等时线年龄, 却是异常的巧合, 均为 439 Ma, 仅是误差不同^[29,30]。而这一年龄与古生物

① 已知 $\lambda(^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd})=6.54\times 10^{-12}\text{a}^{-1}$, 经过 1.53 Ga, 衰变而形成的 $n(\text{Nd}^*)=n(^{147}\text{Sm})(e^{1/100}-1)\approx n(^{147}\text{Sm})/100$ 。由于现今 ^{143}Nd 占 Nd 总量的 12.18%, ^{144}Nd 占 Nd 总量的 23.8%, 故 $n(^{143}\text{Nd}^*)/n(^{143}\text{Nd}_{\text{普通}})\approx \{n(^{147}\text{Sm})/100\}/n(^{143}\text{Nd}_{\text{普通}})=\frac{1}{100}\cdot \frac{n(^{147}\text{Sm})}{n(^{144}\text{Nd})\cdot 12.18\%/23.8\%}\approx \frac{2}{100}\cdot \frac{n(^{147}\text{Sm})}{n(^{144}\text{Nd})}$ 。由于, 绝大多数样品的 $n(^{147}\text{Sm})/n(^{144}\text{Nd})<0.08$, 所以, 即使假定白云鄂博成矿于 15 亿年前, 现在测年的大多数样品中的放射成因 $^{143}\text{Nd}^*$ 也仅占全部 ^{143}Nd 的 16/10000 以下。

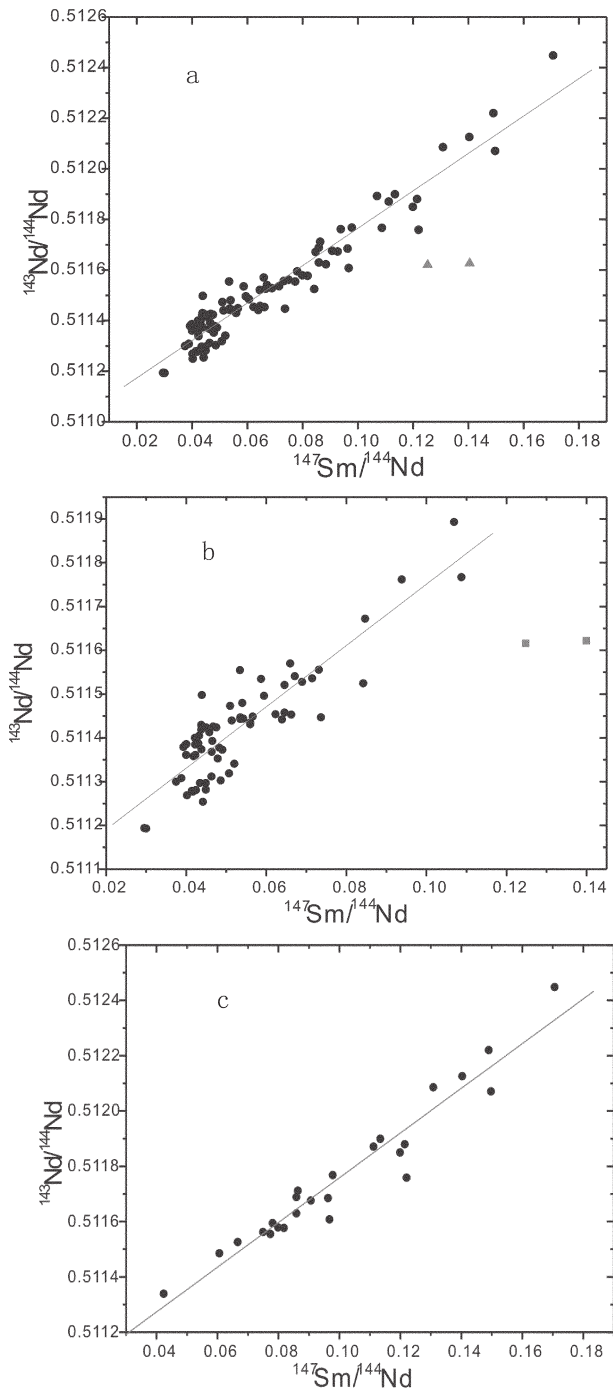


图2 据各已发表的白云鄂博 Sm-Nd 年龄原始数据所作的等时线图

a—所有 98 个数据;b—70 个来自赋矿白云岩或矿体的全岩、矿石或单矿物数据;c—25 个来自上覆板岩的全岩数据
a 中的 ▲ 和 b 中的 ■ 为异常数据,未参加等时线计算

Fig.2 Isochron diagrams of Sm-Nd data cited from the published papers about Bayan Obo deposit

a—all of the 98 data;b—70 data of whole-rocks,ores or single minerals from the ore-bearing dolostone;c—25 data of whole-rocks from the overlying plate. The ▲ in figure a, ■ in (b) are abnormal data, excluded from isochron line calculation

化石证据表明的年龄较为吻合,尽管作者们均认为是成矿后期年龄,但它却很可能是真正的成矿年龄。

刘兰笙等^[29]描述“辉钼矿采自白云鄂博矿区东矿采场,含辉钼矿的矿石矿物有白云石、萤石、钠长石、易解石、锆石、辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿。此矿石似属于白云石型铌稀土矿石类型,从镜下观察辉钼矿……呈片状产于萤石及白云石矿物的周围及其裂隙中”。可以看出,这并无晚期特征,是与萤石、白云石等共生的成矿期矿物,事实上,在白云鄂博有相当多的硫化物与稀土、铌、铁矿物共生,包括辉钼矿。

刘玉龙等^[30]在样品描述中指出:“在白云鄂博矿床共观察到 3 种黄铁矿:① 呈浸染状弥散分布于各类矿石中的黄铁矿;② 与磁黄铁矿共生的黄铁矿;③ 与重晶石共生的块状黄铁矿”。作者采集的是与重晶石共生的黄铁矿,重晶石呈块状,与黄铁矿紧密接触,共生的尚有霓辉石和磁铁矿,还有脉状产出的氟碳铈矿、独居石和磁铁矿、萤石,黄铁矿亦呈细脉;与黄铁矿一起呈脉状产出的同样有稀土矿物和磁铁矿,而成矿不可能是多期的(见本文首节)。而且,白云鄂博矿床的矿物组合有一重要特点,即下部为赤铁矿-重晶石等高氧化条件组合,上部为高还原条件的磁铁矿-硫化物组合,两种组合是连续过渡的。作者的样品中,重晶石与磁铁矿、硫化物等共生,仍是白云鄂博矿床的典型组合。作者将该年龄解释为主成矿期后地壳成因的热扰动事件,是不符合一般规律的,这事实上仍是成矿年龄。

4 结论

(1) 收集已发表的各项 Sm-Nd 同位素年龄原始数据并合并重新计算,70 件样品得到赋矿白云岩形成或成矿作用的时间为 (1066.6 ± 68.8) Ma ($R=0.88631$);25 件样品得到上覆板岩的形成时间为 (1232.0 ± 68.5) Ma ($R=0.96642$)。但这对数据本身就相互矛盾,也得不到其他证据的支持,应当放弃。

(2) 综上所述,白云鄂博矿床的成矿年龄应当晚于或等于 (1125.8 ± 32.5) Ma (Sm-Nd 同位素时钟启动),早于或等于 (439 ± 86) Ma (矿体中硫化物形成)。若结合古生物证据,且假定 Sm-Nd 同位素时钟“十分坚牢”不易重置的话,则可以采信成矿年龄为 (439 ± 86) Ma^[30] (或乐观地采信 439 ± 8 Ma^[29])。存在问题就是 (1125.8 ± 32.5) Ma 代表什么地质意义,是什么

地质作用导致在这一时刻 Sm-Nd 同位素时钟启动。

致谢: 本文第一、第三作者是胡受奚教授的忠实学生,矿床学知识正是胡教授亲自启蒙。值此庆祝胡受奚老师 80 华诞之际,希望以此文作为我们学习地质学 30 年后交给老师的一份答卷。

参考文献 (References):

- [1] 姚德, 张丽洁, Wiltshire J, 等. 中国内蒙古白云鄂博 Fe-Nb-REE 矿床地质特征与陨石撞击成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(4):87-96.
Yao De, Zhang Lijie, Wiltshire J, et al. Geology and meteorite impact origin of Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit, Inner Mongolia, China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1998, 18(4):87-96(in Chinese with English abstract).
- [2] 章雨旭, 彭阳, 乔秀夫, 等. 白云鄂博赋矿微晶丘的论证 [J]. 矿床地质, 1998, 17(增刊):691-696.
Zhang Yuxu, Peng Yang, Qiao Xiufu, et al. Demonstration for the ore-hosted dolostone in the Bayan Obo deposit being a mud-mound[J]. Mineral Geology, 1998, 17(supp.):691-696(in Chinese with English abstract).
- [3] 杨晓勇, 章雨旭, 郑永飞, 等. 白云鄂博赋矿白云岩与典型微晶丘碳氧同位素对比研究[J]. 地质学报, 2000, 74(2):169-180.
Yang Xiaoyong, Zhang Yuxu, Zheng Yongfei, et al. Carbon and oxygen Isotope compositions of ore-bearing dolostone in the Bayan Obo deposit as well as two typical micrite mounds and a carbonatite dyke [J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74 (2):169-180 (in Chinese with English abstract).
- [4] 倪培, Rankin A H, 周进. 白云鄂博地区碳酸岩墙及岩墙旁侧石英岩中的包裹体研究[J]. 岩石学报, 2003, 19(2):297-306.
Ni Pei, Rankin A H, Zhou Jin. Fluid inclusion studies on carbonatite dyke and associated quartzite in Bayan Obo, Inner Mongolia, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(2):297-306 (in Chinese with English abstract).
- [5] Yang Xueming, Michael J, Le Bas. Chemical compositions of carbonate minerals from Bayan Obo, Inner Mongolia, China: implications for petrogenesis[J]. Lithos, 2004, 72:97-116.
- [6] 范宏瑞, 胡芳芳, 陈福坤, 等. 白云鄂博超大型 REE-Nb-Fe 矿区碳酸岩墙的侵位年龄——兼答 Le Bas 博士的质疑 [J]. 岩石学报, 2006, 22(2):519-520.
Fan Hongrui, Hu Fangfang, Chen Fukun, et al. Intrusive age of No. 1 carbonatite dyke from Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolia; with answers to comment of Dr. Le Bas [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (2):519-520 (in Chinese with English abstract).
- [7] 孙淑芬. 内蒙古白云鄂博群尖山组微古植物新发现[J]. 地质论评, 1992, 38(5):474-480.
Sun Shufen. The new discovery of fossil microplants in the Jianshan Formation of the Bayan Obo Group, Inner Mongolia[J]. Geological Review, 1992, 38(5):474-480(in Chinese with English abstract).
- [8] 张鹏远, 牛绍武, 王长尧, 等. 白云鄂博地区地质构造特征[C]//中国地质科学院天津地质研究所所刊(第 28 号). 北京:地质出版社, 1993:1-86.
Zhang Pengyuan, Niu Shaowu, Wang Changyao, et al. The geologico-tectonic characteristics of the Bayan Obo region[C]// Bulletin of the Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS, (28). Beijing: Geological Publishing House, 1993:1-86(in Chinese).
- [9] 乔秀夫, 高林志, 彭阳, 等. 内蒙古隄林忽洞群综合地层和白云鄂博矿床赋矿微晶丘[J]. 地质学报, 1997, 71(3):202-211.
Qiao Xiufu, Gao Linzhi, Peng Yang, et al. Composite stratigraphy of the Sailinhudong Group and ore-bearing micrite mounds in the Bayan Obo deposits, Inner Mongolia, China [J]. Acta Geologica Sinica, 1997, 71(3):202-211(in Chinese with English abstract).
- [10] 谭励可, 石铁铮. 内蒙古商都白云鄂博群小壳化石的发现及其意义[J]. 地质论评, 2000, 46(6):573-583.
Tan Like, Shi Tiezheng. Discovery and significance of small shelly fossils in the Bayan Obo Group in Shangdu, Inner Mongolia [J]. Geological Review, 2000, 46(6):573-583(in Chinese with English abstract).
- [11] 胡受奚. 花岗岩类成矿的某些基本问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1983, 1(3):17-20.
Hu Shouxi. Some basic problems about metallogene of granitoids [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 1983, 1 (3):17-20(in Chinese).
- [12] 胡受奚. 有关中国东部中、新生代活动大陆边缘构造-岩浆作用演化问题沉思录[J]. 地球科学, 1992, 17(增刊):40-46.
Hu Shouxi. Ponderation on problems about evolution of Mesozoic-Cenozoic tectono-magmatism of active continental margin in east China [J]. Earth Science—Journal of China University of Geological Sciences, 1992, 17 (Supp.):40-46 (in Chinese with English abstract).
- [13] 胡受奚, 郭继春, 胡志宏. 中国东部中、新生代岩浆岩特征、演化及其与构造环境演化的联系[J]. 江苏地质, 1992, 16(3/4):129-136.
Hu Shouxi, Guo Jichun, Hu Zhihong. Evolution and development of plate tectonics and magmatism at the active continental margin of east China during Mesozoic and Cenozoic Eras [J]. Geology of Jiangsu, 1992, 16(3/4):129-136(in Chinese).
- [14] 胡受奚, 叶瑛. 对“华夏古陆”、“华夏地块”及“扬子-华夏古陆统一体”等观点的质疑[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4):432-439.
Hu Shouxi, Ye Ying. Questions to “Cathaysia Old Land”, “Cathaysia Block” and “United Yantze-Cathaysia Old Land” of South China[J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12 (4):432-439(in Chinese with English abstract).
- [15] 章雨旭. 地质学研究中常见逻辑方面的问题分析[J]. 高校地质学报, 2006, 12(1):147-152.
Zhang Yuxu. An analysis for common logical mistakes in geological studies [J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(1):147-152(in Chinese with English abstract).

- [16] 内蒙古地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志[M]//北京:地质出版社, 1991.
Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration of Inner Mongolia. Regional Geological Report of Inner Mongolia[M]//Beijing: Geological Publishing House, 1991(in Chinese).
- [17] 范宏瑞, 陈福坤, 王凯怡, 等. 白云鄂博 REE-Fe-Nb 矿床碳酸岩墙锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 363-368.
Fan Hongrui, Chen Fukun, Wang Kaiyi, et al. Zircon U-Pb age of a carbonatite dyke from Bayan Obo REE-Fe-Nb deposit, Inner Mongolia and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica, 18(3):363-368(in Chinese with English abstract).
- [18] 刘玉龙, 陈江峰, 李惠民, 等. 白云鄂博矿田碳酸岩墙年代学再研究[J]. 地质论评, 2006, 52(3):415-422.
Liu Yulong, Chen Jiangfeng, Li Huimin, et al. Geochronology of the carbonatite dykes in the Bayan Obo orefield: revisit [J]. Geological Review, 2006, 52(3):415-422(in Chinese with English abstract).
- [19] 张宗清, 叶笑江, 袁忠信, 等. 白云鄂博稀土矿床的形成年代: Sm-Nd 同位素数据[J]. 岩石矿物学杂志, 1991, (1):80-83.
Zhang Zongqing, Ye Xiaojiang, Yuan Zhongxin, et al. Age of the Baiyun Obo Nb-REE-Fe deposits in Inner Mongolia: the Sm-Nd Isotopic data[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1991, 10(1): 80-83(in Chinese with English abstract).
- [20] 袁忠信, 白鸽, 吴澄宇, 等. 内蒙白云鄂博铋、稀土、铁矿床的成矿时代和矿床成因[J]. 矿床地质, 1991, 10(1):59-70.
Yuan Zhongxin, Bai Ge, Wu Chengyu, et al. Metallogenic epoch and genesis of the Bayan Obo Ni-REE-Fe deposit, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 1991, 10(1):59-70(in Chinese with English abstract).
- [21] 张宗清, 唐索寒, 王进辉, 等. 白云鄂博稀土矿床形成年龄的新数据[J]. 地球学报, 1994, 15(1/2):85-93.
Zhang Zongqing, Tang Suohan, Wang Jinhui, et al. New Data for ore-forming age of the Bayan Obo REE deposit, Inner Mongolia [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1994, 15(1/2):85-93(in Chinese with English abstract).
- [22] 任英忱, 张英臣, 张宗清. 白云鄂博稀土超大型矿床的成矿时代及其主要地质热事件[J]. 地球学报, 1994, (1/2):95-101.
Ren Yingchen, Zhang Yingchen, Zhang Zongqing. Study on heat events of ore-forming Bayan Obo deposit [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1994, (1/2):95-101(in Chinese with English abstract).
- [23] 曹荣龙, 朱寿华, 王俊文. 白云鄂博铁-稀土矿床的物质来源和成因理论问题[J]. 中国科学(B), 1994, 24(12):2198-1307.
Cao Ronglong, Zhu Shouhua, Wang Junwen. Origin and Genesis of the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China [J]. Science in China (B), 1994, 24(12):2198-1307(in Chinese).
- [24] 张宗清, 唐索寒, 陈启桐, 等. 白云鄂博矿区 H9 变质岩的 Sm-Nd 年龄、成因及与成矿关系[J]. 地球学报, 1997, 18(3):267-274.
Zhang Zongqing, Tang Suohan, Chen Qitong, et al. Sm-Nd ages and origins of metamorphic rocks for the H9 Formation in the Bayan Obo ore district, and relationship with the ore forming event[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18(3):267-274(in Chinese with English abstract).
- [25] 张宗清, 唐索寒, 袁忠信, 等. 白云鄂博矿床白云岩的 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素体系[J]. 岩石学报, 2001, 17(4):637-642.
Zhang Zongqing, Tang Suohan, Yuan Zhongxin, et al. The Sm-Nd and Rb-Sr isotopic systems of the dolomites in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4):637-642(in Chinese with English abstract).
- [26] 张宗清, 唐索寒, 王进辉, 等. 白云鄂博矿床形成于不同时代的信息——矿床西矿体的年龄和讨论 [J]. 中国地质, 2003, 30(2): 130-137.
Zhang Zongqing, Tang Suohan, Wang Jinhui, et al. Information about ore deposit formation in different epochs: age of the west orebodies of the Bayan Obo deposit with a discussion [J]. Geology in China, 2003, 30(2):130-137(in Chinese with English abstract).
- [27] 刘玉龙, 陈江峰, 李惠民, 等. 白云鄂博矿床白云石型矿石中独居石单颗粒 U-Th-Pb-Sm-Nd 定年[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 881-888.
Liu Yulong, Chen Jiangfeng, Li Huimin, et al. Single grain U-Th-Pb-Sm-Nd dating of monazite from dolomite type ore of the Bayan Obo deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(3):881-888.
- [28] Nakai S, Masuda A, Shimizu H, et al. La-Ba dating and Nd and Sr isotope studies on Bayan Obo rare earth element ore deposit, Inner Mongolia, China[J]. Economic Geology, 1989, 84:2296-2299.
- [29] 刘兰笙, 高翎, 杜安道, 等. 白云鄂博稀土矿床中辉钨矿的铼-钨同位素年龄[J]. 矿床地质, 1996, 15(2):188-192.
Liu Lansheng, Gao Ling, Du Andao, et al. The Re-Os isotopic age of molybdenite from the Bayan Obo REE ore deposits [J]. Mineral Deposits, 1996, 15(2):188-192(in Chinese with English abstract).
- [30] 刘玉龙, 杨刚, 陈江峰, 等. 白云鄂博超大型稀土-铋-铁矿床黄铁矿 Re-Os 定年[J]. 科学通报, 2005, 50(2):172-175.
Liu Yulong, Yang Gang, Chen Jiangfeng, et al. Re-Os Dating of the pyrite in Bayan Obo Nb-REE-Fe Ore Deposit [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(2):172-175(in Chinese).
- [31] 刘玉龙, 彭谷洋, 张巽, 等. 白云鄂博赋矿地层 H₈ 白云岩的 U-Pb 和 Pb-Pb 定年[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4):274-277.
Liu Yulong, Peng Guyang, Zhang Xun, et al. U-Pb and Pb-Pb Dating of the Host Rock -H₈ Dolomite in Bayan Obo Ore Deposit [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2001, 20(4):274-277(in Chinese with English abstract).
- [32] 赵景德, 任英忱, Mitsunobu Tatsumoto, 等. 以多种证据建立的白云鄂博稀土矿床成矿物质的生成顺序 [J]. 地质找矿论丛, 1991, 6(4):1-17.
Chao Jingde, Ren Yingchen, Mitsunobu Tatsumoto, et al. Multiple lines of evidence for establishing the mineral paragenetic sequence of the Bayan Obo rare earths ore deposits [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1991, 6 (4):1-17 (in Chinese with English abstract).

A discussion on forming time of the Bayan Obo Group and ore-forming time of the Bayan Obo giant REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolia

ZHANG Yu-xu¹, JIANG Shao-qing¹, ZHANG Qi-ling²,
LAI Xiao-dong³, PENG Yang¹, YANG Xiao-yong³

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037 China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037 China; 3. Institute of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of Hefei Anhui, 230026 China)

Abstract: Mineralization of the Bayan Obo REE-Nb-Fe ore deposit presents very special geochemical characteristics, suggesting the multi-stage mineralization incredible. The forming age of dolomite as the major ore-bearing stratum must be no later than the mineralization of the Bayan Obo ore deposit. Geological age of Bayan Obo Group has been in dispute in long-term period, and changed many times, but abundant paleontological evidences prove that the age of the Bayan Obo Group is between Sinian and Ordovician. The dolomite is a hydrothermal sedimentary formation and the carbonate veins are formed from hydrothermal replacement of the metamorphic rock or sandstone, and consequently, the zircons from the carbonate veins must be originated from the zircons of metamorphic rock or sandstone. Even though these zircons are reformed by the hydrothermal fluid, it is reasonable that the calculated U-Pb ages of these zircons are older than the ore-forming age. Huge amounts of Sm-Nd isochron ages of the Bayan Obo deposit have been reported. Though they mainly concentrate in the range of 1.2–1.6 Ga, some of them are ~400 Ma, ~800 Ma, and ~1000 Ma, and most of them have large inaccuracy. Considering that the Bayan Obo deposit is formed in a single mineralization period, all the 98 Sm-Nd data from published papers about Bayan Obo are calculated by Isoplot program. 98 data can be synthesized in a straight line (only 2 data are far from the isochron line) with correlation coefficient $R=0.96325$, and yield $t=1125.8\pm 32.5$ Ma ($\lambda=6.54\times 10^{-12}\text{a}^{-1}$), $\epsilon_{\text{Nd}}=-3.02$, which shows that the Sm-Nd isotope clock after the onset of 1125.8 ± 32.5 Ma has never been disturbed by subsequent geological events. Therefore the ore-forming age of the Bayan Obo deposit should be no earlier than 1125.8 ± 32.5 Ma. The molybdenite Re-Os model age and the pyrite Re-Os isochron age of 439 ± 8 Ma and 439 ± 86 Ma respectively, which is consistent with the age of paleomicroplant fossils. Assuming that Sm-Nd isotopic clock is very perseverant and difficult to be reset by general geological events, the ore-forming age of 439 Ma is admissible.

Key words: Bayan Obo Group; Rare earth-Niobium-Iron deposit; Sm-Nd age; Bayan Obo, Inner Mongolia

About the first author: ZHANG Yu-xu, male, born in 1960, professor, mainly engages in the study of mineral deposits and sedimentology; E-mail: zhangyuxugeo@sina.com.