

再谈白云鄂博矿床的成矿时代和矿床成因

袁忠信

中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037

今年是丁道衡教授 1927 年发现白云鄂博铁矿的 85 周年, 值得纪念。本人在 1964~1966 年参加地质部 105 地质队从事矿床稀土勘探评价工作, 也对稀土矿的勘察及研究做过一点工作。回想当时, 吃住在矿山, 仅春节请假回家探亲。如遇冬天, 天寒地冻, 躲在室内不敢外出。所幸当时队上有岩矿显微镜, 干些室内鉴定工作, 尚不感寂寞。一到夏季, 主、东矿采矿及探槽是我常去的地方, 打标本、素描、采样, 了解许多矿床地质的实际情况。当时情景, 至今犹在脑中萦回。今年我已 80 高龄, 恐怕再也没有机会, 也不大可能再去那里看看。下面仅就我了解的一些情况, 对矿床的成矿和矿床的成因问题, 谈谈自己的看法。

白云鄂博矿床是世界知名的超大型稀土矿床, 根据 U—S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey; Mineral Commodity Summaries 2008 年报道, 2007 年中国稀土氧化物的储量和储量基础约为世界稀土氧化物的储量和储量基础的 49%。矿床又是大型 Th 和 Fe 矿床。矿床的 Nb 储量和 Th 储量分别位于世界的第二位(刘健等, 2009; 罗明标等, 2010)。这样大规模储量的多金属原生矿床, 自然引起人们的注意, 有多少中外学者纷纷前去研究。但直到今天, 也可能正因为大而复杂, 矿床的成矿时代和矿床成因问题仍众说纷纭, 认识不统一。下面只是笔者对这两个问题的某些方面做些讨论, 谈谈个人的看法。

1 矿床的成矿时代

白云鄂博 Fe-Nb-REE 矿床位于华北陆台北缘陆缘拗陷带内。区内出露最老地层为元古宙五台群, 见于矿区以北宽沟一带, 主要由斜长绿泥片岩, 角闪斜长片麻岩及混合岩组成。其上不整合覆盖中元古界白云鄂博群。白云鄂博矿床 Fe-Nb-REE 矿化赋存在宽沟背斜南翼的白云鄂博群白云大理岩及板岩等岩石中。主、东铁矿体见于白云大理岩与板岩的接触带附近。板岩又称硅质板岩、富钾板岩, 包括碱性粗面岩、碱性玄武岩等火山岩及有关的蚀变岩石——黑云

母岩等。板岩呈层状, 位于白云大理岩内, 构成宽沟背斜南翼的次级向斜核心。直到最近, 章雨旭等(2009)经过多年野外工作, 确定宽沟背斜南翼白云向斜的存在。

无论原地质部 241 地质队, 105 地质队, 以及后来出版的内蒙古地质志。都将白云鄂博群岩石归属于沉积变质岩, 时代定为中元古代。白云鄂博 Fe-Nb-REE 矿石整合地赋存于地层岩石中, 这是我们确定矿床成矿时代主要为中元古代的一个重要依据。

白云鄂博矿床的同位素年龄列于表 1。表 1 中共列出 34 个数据, 基本能包括或代表历年发表的年龄数据, 从表列数据看出, 白云鄂博矿床的同位素年龄大体可分为 3 组: ①中、新元古代, 共 13 个数据, 年龄 1360~789 Ma, 平均 116.75 Ma; ②加里东期, 共 15 个数据, 年龄 485~386 Ma, 平均 426.8 Ma; ③华力西期, 共 6 个数据, 277~255 Ma, 平均 266.6 Ma。中、新元古代的年龄多由 Sm-Nd 法测得, Sm-Nd 属稀土族元素, 用 Sm-Nd 法测稀土矿的成矿年龄, 二者能更好的结合。另外, 表中好些加里东期年龄样品, 不是取自晚期矿脉, 就是取自蚀变岩石, 或取自晚期矿物, 如黄河矿、易解石。矿石中的独居石明显有两种产状。一是与氟碳铈矿结合呈细晶条带产出, 另一是晚期较粗大的独居石晶体。表中加里东期年龄的独居石多半为晚期或后期矿物, 因为早期细晶独居石很难选出。

表 1 中由同一作者得出两个年龄, 分别是加里东期及中元古代, 即曹荣龙的 9 号和 10 号样品, 任英忱的 11 号和 12 号样品, 刘玉龙的 25 号和 26 号样品。清楚说明白云鄂博矿床有两次稀土成矿活动。另外, 刘玉龙在得出黄铁矿 Re-Os 年龄 439 Ma 时更明确指出加里东期不是白云鄂博矿床的主要成矿期(刘玉龙等, 2005b)。加里东期和华力西期的稀土成矿是在地区构造应力影响下或花岗岩浆侵入活动下热液活动的结果。加里东时期和华力西时期地区处于隆起的相对稳定阶段, 不大可能有大量稀土矿液或含稀土岩浆从深处带来。

表 1 白云鄂博矿床的同位素成矿年龄

序号	采样地点	赋矿岩石	测定对象	年龄(Ma)	测试方法	资料来源
1	主矿	白云岩板岩及矿石	全岩	485	Rb-Sr	白鸽等(1985)
2	主矿	矿石中的后期细脉	易解石	273	U-Th-Pb	中国科学院地球化学研究所(1988)
3	主、东矿	云母岩	金云母、铁镁云母	269.29	K-Ar	中国科学院地球化学研究所(1988)
4	东矿	黑云母岩	黑云母	277.4	K-Ar	中国科学院地球化学研究所(1988)
5	东矿	霓石脉	易解石、黄河矿	438.2±25.1	U-Th-Pb	赵景德等(1991)
6	东矿	矿石	独居石	423±13	U-Th-Pb	赵景德等(1991)
7	主、东矿	角闪石脉	角闪石	1260	Ar-Ar	Conrad 等(1992)
8	主、东矿	矿石	易解石、黄河矿	422	Th-Pb	Wang 等(1994)
9	主、东矿	矿石	易解石、黄河矿	402±18	Th-Pb	曹荣龙等(1994)
10	主、东矿	矿石	独居石	1060±420	U-Pb	曹荣龙等(1994)
11	主矿	矿石	独居石	461±62	U-Pb	任英忱等(1994)
12	主、东矿	矿石	独居石、氟碳铈矿	1313±41	U-Pb	任英忱等(1994)
13	都拉哈拉	矿化碳酸岩	碳酸岩	1223	Sm-Nd	张宗清等(1994)
14	主矿	矿化白云岩	矿石	404±14	Th-Pb	Chao 等(1997)
15	主矿	矿化白云岩	矿石	419±3.7	Th-Pb	Chao 等(1997)
16	主、东矿	碱性岩-碳酸岩	矿石	1378±88	Sm-Nd	张宗清等(2003)
17	主、东矿	矿化白云大理岩	全岩	1273±100	Sm-Nd	张宗清等(2003)
18	主、东矿	富钾板岩	全岩	1023±80	Sm-Nd	张宗清等(2003)
19	主、东矿	黑云母岩	全岩	1360±130	Sm-Nd	张宗清等(2003)
20	主、东矿	暗色板岩	全岩	1235±110	Sm-Nd	张宗清等(2003)
21	苏蒙图	矿化白云岩	全岩	1296±150	Sm-Nd	张宗清等(2003)
22	西矿	矿化白云岩	钠闪石	789±5	Ar-Ar	张宗清等(2003)
23	西矿	碱性岩-碳酸岩	矿石	809±80	Sm-Nd	张宗清等(2003)
24	主、东矿	晚期矿脉	钠闪石、黄河矿	420±46	Sm-Nd	张宗清等(2003)
26	东矿	矿石	独居石	1231±200	Sm-Nd	刘玉龙等(a)2005
25	主、东矿	后期矿脉	黄铁矿	439±86	Re-Os	刘玉龙等(b)2005
27	主矿	后期矿脉	钠闪石	427.5±4.0	K-Ar	裴瑜卓等(2009)
28	主矿	后期矿脉	硅镁钡石	398±5	Ar-Ar	裴瑜卓等(2009)
29	西矿	矿石	钠闪石	465±14	Sm-Nd	裴瑜卓等(2009)
30	东矿	钠闪石白云岩	全岩	385.7±3.9	K-Ar	裴瑜卓等(2009)
31	都拉哈拉	钠闪石岩	全岩	436.4±3.6	K-Ar	裴瑜卓等(2009)
32	西矿	黑云母岩	全岩	271.4±1.7	K-Ar	裴瑜卓等(2009)
33	主矿	浅色板岩	全岩	255.3±1.7	K-Ar	裴瑜卓等(2009)
34	东矿	暗色板岩	全岩	255.7±2.6	K-Ar	裴瑜卓等(2009)

因此,白云鄂博矿床的成矿年龄主要有 3 期。其中中元古代是最早期最主要的成矿年龄,加里东期和华力西期是后来补充的热液改造成矿年龄。

2 矿床成因问题

白云鄂博矿床成因有多种认识,主要有沉积变质说、热液交代说、喷流沉积说、碳酸岩岩浆说以及多成因说等。笔者承认沉积变质说、热液交代说、喷流沉积说都有成矿事实可以说明,均有这方面的成矿现象。但这些现象或认识不一定是白云鄂博矿床成矿的主导因素或关键因素。随着国内外许多稀土金属矿床成因上与碳酸岩有关的报道愈来愈多,接受碳酸岩岩浆成因说的学者也愈来愈多。碳酸岩岩浆成因说又可分出陆相侵入碳酸岩岩浆成矿说及海

相火山碳酸岩岩浆成矿说两种,对于白云鄂博矿床,本文笔者持后一种认识。

最早在 1975 年,笔者在《中国稀有金属矿床类型》一书中首次提出“变碳酸岩型矿床”一词。当时因保密原因,没有列出矿床名称,指的就是白云鄂博矿床。文中说明矿床的物质成分,特别是 Ce-Nb-Zr 等稀有稀土金属与一般碳酸岩型矿床十分类似。指出矿体从属于一定的沉积建造,与围岩整合产出,受到不同的交代作用和变质作用等。其后,在 1977 年笔者以地矿所稀有组的名义,在中国地质科学院地质矿产所内部刊物《地质矿产研究》1977 年第一期中发表“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”一文。文中详细论证矿床的成岩成矿分 3 个阶段:①含矿碳酸岩岩浆的火山喷发及矿石沉积阶段;②成岩固结及交代作

用阶段;③变质作用及后来的再次成矿阶段。更晚,在1978年中国地质科学院地质矿产所出版的专著《我国稀有稀土金属矿床地质特征及找矿方向》中再次明确提出“内蒙白云鄂博稀有金属火山沉积碳酸岩”。当时因保密原因,上述论述均做内部出版,可能很多同志都没有看到,有时还引出误解。

白云鄂博矿床成因与碳酸岩岩浆有关,更全面地说是与碱性岩-碳酸岩杂岩体的岩浆-热液活动有关。无论国外和国内,无论侵入碳酸岩和喷出碳酸岩型稀土金属矿床,均常伴有碱性岩,主要是正长岩类岩石,二者多为统一岩浆活动产物。在国外,这样的例子有美国加州的芒廷帕斯稀土矿床。在国内,在湖北庙垭、四川牦牛坪、福建洋墩、甘肃桃花拉山等地均见二者共同产出。

下面举出5条简要论证白云鄂博矿床的火山沉积碱性岩-碳酸岩型的矿床原因:

(1)含矿白云大理岩具有稳定延展的层位。矿层东西长18 km,南北宽从数十米到1 km,北侧与下伏石英砂岩或石英岩无明显的侵入接触关系。白云大理岩与富钾板岩构成清楚的互层,有的地方层厚数十厘米,延伸稳定。

(2)白云大理岩的岩石成分和岩相变化大。白云大理岩是白云石大理岩和方解石大理岩的总称,局部地段上钙质大理岩发育。两种碳酸盐岩石以及矿化蚀变杂岩混合,无岩相分带特征。岩石的结构构造变化也大。粗粒结构和细粒结构可同在一处见到,相互杂陈。这不是岩浆侵入碳酸岩,也不是沉积碳酸盐岩具有的特征。最近王凯怡著文指出,主、东矿下盘细粒白云大理岩具清楚的显微斑状结构,是火山岩的显著结构特征。白云大理岩的形成与喷出碳酸岩有关(Wang et al., 2010)。

(3)富钾板岩为明显的火山岩。主、东矿上盘富钾板岩,岩石具显微隐晶结构、板状构造。显微镜下可见到较大的晶屑和晶屑集合体,有时见到球粒结构的钾长石。岩石的主要组成矿物是微斜长石,含量达80%或更多。富钾板岩源岩应是粗面质火山碎屑岩或粗面质凝灰岩。

(4)王凯怡等(2010)最近获得主、东矿下盘白云质火山岩和尖山方解石-白云石火山岩中的方解石-白云石的平衡温度,分别为681℃和648℃,清楚指示白云鄂博碳酸岩具高温岩浆性质。

(5)矿床成矿年龄与地区。白云鄂博群地层年龄一致,均属中元古代,显示白云鄂博矿床具火山沉积成因。

白云鄂博矿床富集大量Nb、Fe、REE元素,CO₂、F、P、S等挥发份元素,以及K、Na等碱性元素。它们与世界上已知的碱性岩-碳酸岩型稀土矿床在成矿物质成分上十分相似。

张宗清等(2003)得出白云鄂博矿床矿石的Sr同位素初始值(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i=0.704,矿石的ε_{Nd}(t)=-0.14, I_{Nd}=0.510982。这样的Sr、Nd初始值是幔源岩石而不是地壳陆源岩石具有的同位素特征。同时得出矿石相对于球粒陨石的模式年龄T_{CHUR}=1217~1316 Ma,矿石相对于亏损地幔的模式年龄T_{DM}=1585~1789 Ma。矿床的成矿年龄与相对于球粒陨石的模式年龄相近,指示矿床中的稀有稀土元素等从球粒陨石地幔分出没有在地壳中停留,直接上升地表成矿。如和亏损地幔年龄相比,矿床的成矿年龄晚得多。是否稀有稀土元素等从亏损地幔分出后储留在地壳底层,到1278 Ma左右开始上升成矿,还是白云鄂博地区中元古代时的深部地幔就是球粒陨石地幔?这需要从区域更多的研究中找答案。

注 释

① 陶克洁,杨主明. 1996. 白云鄂博火成碳酸岩岩墙与稀土、铌矿化关系研究. 中国科学院地质研究所科研报告, 1~73.

参 考 文 献

- 白鸽,袁忠信. 1985. 碳酸岩地质及其矿产. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊. 北京:地质出版社, 107~135.
- 白鸽,袁忠信,吴澄宇,张宗清,郑立煊. 1996. 白云鄂博矿床地质特征和成因论证. 北京:地质出版社, 87~94.
- 曹荣龙,朱寿华,王俊文. 1994. 白云鄂博铁-稀土矿床的物质来源及成因理论问题. 中国科学(B辑), 24(12): 1298~1307.
- 丁梯平,蒋少涌,田世洪,等. 2005. 白云鄂博矿区赋矿白云质大理岩成因的稳定同位素证据. 地球学报, 24(6): 534~542.
- 郝梓国,王希斌,李震,等. 2002. 白云鄂博碳酸岩型REE-Nb-Fe矿床——一个罕见的中元古代破火山机构成岩成矿实例. 地质学报, 76(4): 525~540.
- 刘健,凌明星,李印,等. 2009. 白云鄂博超大型REE-Nb-Fe矿床的稀土成矿模式综述. 大地构造与成矿学, 33(2): 270~283.
- 刘铁庚. 1985. 白云鄂博碳酸岩地质及地球化学特征——白云鄂博白云岩成因讨论. 岩石学报, 1(3): 12~28.
- 刘铁庚. 1986. 白云鄂博白云岩,碳同位素组成及其成因讨论. 地质论评, 32(2): 150~159.
- 刘玉龙,陈江峰,李惠民,等. 2005a. 白云鄂博矿床中独居石单颗粒U-Th-Pb-Sm-Nd定年. 岩石学报, 21(3): 881~888.
- 刘玉龙,杨刚,陈江峰,等. 2005b. 白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床黄铁矿Re-Os定年. 科学通报, 50(2): 172~175.
- 裘愉卓,秦朝建,周国富,等. 2009. 白云鄂博矿床年代学新资料. 见: 第九届全国矿床会议论文集. 北京:地质出版社, 477~479.

- 任英忱,张英臣,张宗清. 1994. 白云鄂博超大型稀土矿床的成矿时代及其主要地质热事件. *地球学报*, (1~2): 95~101.
- 宋天锐,万渝生,陈振宇,等. 2005. 关于华北元古宙富钾、富稀土沉积岩是白云鄂博矿源层的讨论. *矿床地质*, 24(5): 543~552.
- 涂光炽,王凯怡. 1999. 白云鄂博超大型稀土-铁-铌矿床形成的制约因素. 见: 吴良士,李锦平主编. 21世纪能源矿产, 矿产资源, 矿床地质, 矿产经济学. 北京: 地质出版社, 245~249.
- 王凯怡,范宏瑞,杨奎峰,等. 2010. 白云鄂博碳酸岩的方解石-白云石地质温度计. *岩石学报*, 26(4): 1141~1149.
- 王希斌,郝梓国,李震,等. 2002. 白云鄂博——一个典型的碳酸岩杂岩体的厘定. *地质学报*, 74(4): 501~524.
- 王中刚,李绍炳,苏贤泽. 1973. 沉积变质-热液交代型稀土、铁矿床的成因特征. *地球化学*, (1): 5~11.
- 魏菊英,上官志冠. 1983. 白云鄂博铁围岩白云岩的氧、碳同位素组成及其成因. 见: 中国科学院地质研究所编. 岩石学研究(2). 北京: 地质出版社, 14~21.
- 肖荣阁,费红彩,安国英. 2003. 内蒙古白云鄂博矿区的白云岩岩石学及其成因研究. *现代地质*, 17(3): 287~293.
- 杨学明,杨晓勇,范宏瑞,等. 2000. 霓长岩岩石学特征及其地质意义评述. *地质评论*, 46(6): 481~490.
- 袁忠信,白鸽,吴澄宇,等. 1991. 内蒙古白云鄂博铌、稀土、铁矿床的成矿时代和矿床成因. *矿床地质*, 10(1): 59~70.
- 袁忠信,白鸽,吴澄宇,等. 1995. 内蒙古白云鄂博矿区 Hg 中火山岩岩石特征及其意义. *矿床地质*, 14(3): 197~205.
- 袁忠信,白鸽,张宗清. 2004. 白云鄂博矿床赋矿岩石的自交代现象及其意义. *岩石矿物学杂志*, 23(1): 19~25.
- 赵景德,任英忱. 1991. 以多种证据建立的白云鄂博稀土矿床成矿物质生成顺序. *地质找矿论丛*, (4): 1~17.
- 张宗清,唐索寒,王进辉,等. 1994. 白云鄂博稀土矿床形成年龄的新数据. *地球学报*, (Z1): 85~94.
- 张宗清,袁忠信,唐索寒,等. 2003. 白云鄂博矿床年龄和地球化学. 北京: 地质出版社, 18~55, 148~156.
- 章雨旭,杨占峰,张绮玲,等. 2009. 白云鄂博矿床及北京西山微晶丘地质、地球化学研究. 北京: 地质出版社, 27~34, 56~80.
- 周振玲. 1980. 内蒙古白云鄂博白云石碳酸岩的地质特征及其成因探讨. *地质评论*, 26(1): 35~41.
- 中国科学院地球化学研究所. 1988. 白云鄂博矿床地球化学. 北京: 科学出版社, 392~540.
- Chao E C T, Back J M, Minkin J A, et al. 1992. Host rock controlled epigenetic hydrothermal and metasomatic origin of the Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit, Inner Mongolia, PRC. *Applied Geochem.*, (7): 443~458.
- Chao E C T, Back J M, Minkin J A. 1997. The sedimentary carbonate-hosted giant Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit of Inner Mongolia, China: a cornerstone example for giant polymetallic ore deposit of hydrothermal origin. *U.S. Geological Survey Bulletin* 2143: 1~65.
- Conrad E J, Edwin H M. 1992. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of vein amphibolite from the Bayan Obo iron-REE-Nb, Inner Mongolia, China: constraints on mineralization and deposition of the Bayan Obo Group. *Economic Geology*, 87: 185~195.
- Lebas M J, Keller J, Tao Kejie, et al. 1992. Carbonatite dykes at Bayan Obo Inner Mongolia, China. *Mineralogy and Petrology*, 46: 195~228.
- Lebas M J, Spiro B, Yang Xueming. 1997. Oxygen, carbon and strontium isotope study of the carbonatitic dolomite host of the Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit, Inner Mongolia, N. China. *Mineralogical Magazine*, 61: 531~541.
- Phipotts J, Tasmoto M, Li X, Wang K Y. 1991. Some Nd and Sr isotopic systematics for the REE-enriched deposit at Bayan Obo, China. *Chemical Geology*, 177~188.
- Smith M P, Henderson P, Campbell L S. 2000. Fractionation of the REE during hydrothermal processes: constraints from the Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit, Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(18): 3141~3160.
- Wang J, Tatsumoto M, Li X, Premo W R, Chao E C T. 1994. A precise ^{232}Th - ^{208}Pb chronology of fine grained monazite: age of the Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(15): 3155~3169.
- Wang Kaiyi, Fan Hongrui, Yang Kuifeng, et al. 2010. Bayan Obo carbonatites: texture evidence from polyphase intrusive and extrusive carbonatites. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 1365~1376.
- Yang X M, Yang X Y, Zhang Y F, Le Bas M J. 2003. A rare earth element-rich carbonatite dyke at Bayan Obo, Inner Mongolia, North China. *Mineralogy and Petrology*, 78(1~2): 93~110.
- Yuan Zhongxin, Bai Ge, Wu Chengyu, et al. 1992. Geological features and genesis of the Bayan Obo REE ore deposit, Inner Mongolia. *Applied Geochemistry*, (7): 429~442.
- Yuan Zhongxin, Bai Ge, Zhang Zongqing. 2000. Trachytic rock and associated fenitization in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia related to a carbonatitic complex. *Acta Geologica Sinica*, 74(2): 148~153.