

白云鄂博矿区赋矿“白云质大理岩” 成因的稳定同位素证据

P61 A

丁悌平^{1,2)} 蒋少涌^{2,3)} 田世洪^{1,2)} 万德芳^{1,2)} 白瑞梅¹⁾

(1)中国地质科学院矿产资源研究所,北京,100037;2)国土资源部同位素地质重点实验室,
北京,100037;3)南京大学地球科学系,江苏 南京,210093)

摘 要 内蒙古白云鄂博铁、稀土、铌矿床是举世闻名的超大型稀土矿床。其矿床地质特征和成矿地质环境十分独特,在国内外引起广泛注意。关于矿床的成因争论很多,其中,赋矿“白云质大理岩”的成因最为人们所关注,成为争论的焦点。

本文在前人工作的基础上补充了S、C、O同位素研究。综合现有资料得出:“白云质大理岩”的高REE和Nb含量,REE分布型式,低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值和接近岩浆岩的Si同位素组成,为其岩浆成因提供了证据。“白云质大理岩”中碳酸盐和硅酸盐矿物的高 $\delta^{18}\text{O}$ 值及全岩和重晶石硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值表明,岩石与海水发生过明显的交换作用,进一步为岩石的海底火山成因提供了证据。“白云质大理岩”中碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也可以用碳酸岩受到海水碳酸盐混染加以解释。由此看来,“白云质大理岩”很可能是中元古代碳酸岩火山岩。

关键词 白云鄂博矿床 “白云质大理岩” 稳定同位素 稀土 岩石成因

The Genesis of the Ore Hosting “Dolomitic Marble” in the Bayan Obo Deposit, Inner Mongolia, China: Constrained by Isotopic Results

DING Tiping^{1,2)} JIANG Shaoyong^{2,3)} TIAN Shihong^{1,2)} WAN Defang^{1,2)} BAI Ruimei¹⁾

(1) Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037; 2) Key Laboratory of Isotope Geology, CAGS, Beijing, 100037;

3) Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu, 210093)

Abstract The Bayan Obo Fe-REE-Nb ore deposit, Inner Mongolia, China is a super large REE deposit. This deposit attracts attentions of many geologists and geochemists for its unique geological characters and geotectonic background. However, there are quite a number of controversies on various aspects of its genesis, such as when the ore deposit was formed, where the ore forming materials came from and what conditions and geotectonic environment the deposit was formed. Among them, the genesis of ore bearing “dolomitic marble” is a focus point of debating.

Isotopic methods are important tools for study on ore deposits. Therefore, supplemental stable isotope investigation was undertaken in this study to reach more information on the forming conditions of “dolomitic marble”. The high contents of REE and Nb, the REE distribution pattern, the low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and low $\delta^{30}\text{Si}$ values of trace silica in “dolomitic marble” all indicate its magmatic origin. The high $\delta^{18}\text{O}$ values of carbonate and silicate minerals, and the relatively high $\delta^{34}\text{S}$ values indicate that this rock had experienced isotopic exchange with sea water, implying their submarine volcanic origin. The $\delta^{13}\text{C}$ values observed in carbonate and silicate minerals can also be explained by carbonatite assimilated by oceanic carbonate. Therefore, based on its isotopic characters, the “dolomitic marble” is more likely of volcanic carbonatite rock formed during middle Proterozoic era.

Key words Bayan Obo deposit “dolomitic marble” stable isotopes REE genesis of rocks

中国内蒙古白云鄂博铁、稀土、铌矿床是举世闻名的超大型稀土矿床,其稀土储量占世界现有储量的75%。这一巨型矿床的矿床地质特征和成矿地

质环境十分独特,在国内外引起广泛注意。1927年,丁道衡首次考察了白云鄂博铁矿(Ding Dao-heng, 1933)。之后,何作霖(1935)等对白云鄂博矿

本文为国家“973”项目(G1999043200)的研究成果。

责任编辑:宫月莹。

第一作者:丁悌平,男,1941年生,研究员,长期从事同位素地球化学和矿床学研究。

进行了矿物学和矿床研究工作。新中国建立以后,各有关地质队对矿床的地质、矿物、岩石情况进行了全面、系统的研究,掌握了矿床基本特征,积累了大量资料。与此同时,许多国内外地质学家对矿床开展了多方面的研究(魏菊英等,1983;白鸽等,1981;Tu等,1985,1998;刘铁庚,1986;陈辉等,1987;杨晓勇等,2000;Drew等,1990;Chao等,1992,1997;Yuan等,1992;张宗清等,1994,1997;Bühn等,1995,2002;Yang等,1995;Ding等,1996;Le Bas等,1997;Campbell等,1997;Smith等,2000)。但由于矿床的复杂性和独特性,关于矿床的成因仍然有许多争论。特别是赋矿“白云质大理岩”的成因最为人们所关注,成为争论的焦点。

稳定同位素研究是矿床成因研究的重要手段。为探讨“白云质大理岩”的成因,前人已做过矿石和岩石的C、O、S、Sr、Si等同位素研究(杨凤筠,1979;姜传武,1982;魏菊英等,1983;刘铁庚,1986;陈辉,1993;Le Bas等,1992,1997;丁悌平等,1994;曹云龙,1994,1995;杨晓勇等,2000)。此次在前人工作的基础上补充了S、C、O同位素研究。这里,依据原有的和新获得的同位素数据对“白云质大理岩”的成因加以讨论。

1 地质背景

白云鄂博矿床位于内蒙古自治区,包头以北150 km处。地质构造上,矿床位于内蒙地台北缘的白云鄂博向斜中(图1)。

1.1 矿区地层

矿区出露的地层有早元古代色尔腾山群和中元古白云鄂博群。白云鄂博群是含矿地层,在矿区广泛出露。该地层由下至上又可分为:H₁-含砾粗粒长石石英砂岩;H₂-石英岩和石英砂岩;H₃-碳质板岩和铁锰质板岩,与砂岩互层;H₄-石英岩和长石石英岩,与板岩互层;H₅-碳质板岩夹石英砂岩和灰岩透镜体;H₆-长石石英砂岩夹灰岩和板岩;H₇-灰岩和石英砂岩互层;H₈-“白云岩”、“白云质灰岩”,含铁-稀土矿石;H₉-“钾质板岩”、“硅质板岩”和“钙质板岩”,局部夹白云岩透镜体。

对于H₁-H₇组地层的正常沉积性质是没有疑问的。但是对于H₈组和H₉组地层的性质则存在不同看法。

1.2 侵入岩

矿区的主要侵入岩体大约形成于250 Ma的海西期花岗岩岩基,花岗岩长岩岩株与辉长岩岩株(张

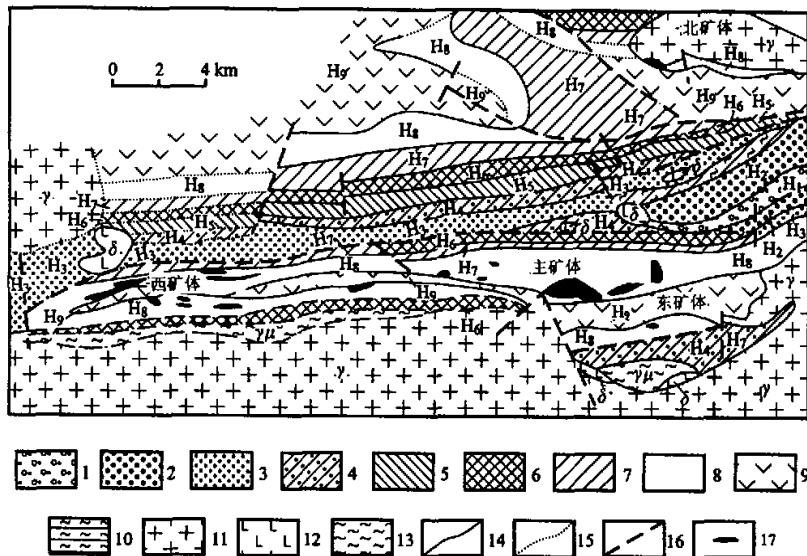


图1 白云鄂博矿区地质略图(据241地质队,1955修改)

Fig.1 The geological map of the Bayan Obo mining area (after 241 Geological team,1955)

1-H₁;2-H₂;3-H₃;4-H₄;5-H₅;6-H₆;7-H₇;8-H₈;9-H₉;10-色尔腾山片麻岩;11-花岗岩;

12-辉长岩与闪长岩;13-混合岩化花岗岩;14-地质界线;15-推断的地质界线;16-断层;17-矿体;(H₁-H₉之说明见正文)

1-H₁;2-H₂;3-H₃;4-H₄;5-H₅;6-H₆;7-H₇;8-H₈;9-H₉;10-Selentshan compound gneiss;11-granite;12-gabbro and diorite;

13-migmatitic granite;14-geological boundary;15-inferred geological boundary;16-fault;17-ore body

宗清等,2003)。此外,矿区还有碳酸岩、钠长岩、霓长岩、钠辉石岩和正长岩岩墙。

1.3 矿区构造

矿区构造以EW向紧密褶皱及伴生断裂为主。由北往南有北矿背斜、文果乞果-比鲁特向斜、宽沟背斜、白云鄂博矿区向斜、白云鄂博矿区南背斜、苏木图向斜、白云镇南背斜。伴生断裂主要为EW向逆断层和韧性剪切带,如宽沟断裂。另有NE向和NW向断层。

1.4 矿床

白云鄂博矿区长约18 km,宽0.5~5 km。矿区分为4段:东接触带、东矿体、主矿体与西矿体。其中主矿体和东矿体更为重要。

矿床中产出的矿石类型有:块状Nb-REE-Fe矿石、条带状Nb-REE-Fe矿石、霓石型Nb-REE-Fe矿石、钠辉石型Nb-REE-Fe矿石、白云石型Nb-REE-Fe矿石、黑云母型Nb-REE-Fe矿石、钠闪石型Nb-REE矿石、白云石型Nb-REE矿石和白云石型Nb-Fe矿石。

在主矿体和东矿体均可观察到相似的矿石分布趋势,即由底部向上,矿石从萤石型Nb-REE-Fe矿石变为块状Nb-REE-Fe矿石,霓石型Nb-REE-Fe矿石,钠辉石型Nb-REE-Fe矿石,黑云母型Nb-REE-Fe矿石。

白云鄂博矿床的矿物组成十分复杂,已发现矿物一百多种。其中主要矿物有磁铁矿、假象赤铁矿、针铁矿、褐铁矿、烧绿石、易解石、独居石、褐钇铋矿、铈铁矿和氟碳铈矿。脉石矿物主要有方解石、白云石、石英、燧石、铁白云石、菱铁矿、菱镁矿、钠闪石、钠辉石、黑云母、萤石、重晶石和褐帘石。微量矿物有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、粘土矿物和一些重矿物。

关于矿床的成因可归纳为3类主要观点。

第1类观点将白云鄂博矿床归为与花岗岩有关的热液交代矿床。持这种观点的人认为:在海西期或加里东期(Chao等,1993)的花岗岩侵入到元古宙沉积碳酸盐岩石中时,通过热液交代作用形成白云鄂博矿床。

第2类观点将白云鄂博矿床归为与碳酸岩杂岩体有关的矿床。持这种观点的人中,一部分认为(周振玲等,1980;李士勤,1983;刘铁庚,1986)白云鄂博矿床的赋矿“白云质大理岩”为加里东期的碳酸岩侵入体。白鸽(1983)和王希斌等(2002)认为“白云质大理岩”是元古宙碳酸岩侵入体。Yuan等(1991,

1992)则认为“白云质大理岩”是元古宙喷出的碳酸岩火山岩。侯宗林(1989)和涂光炽(2000)认为:“白云质大理岩”是沉积碳酸盐岩石,受与碳酸岩岩浆活动有关的海底喷气热液的影响而成矿。

第3类观点将白云鄂博矿床归为“多阶段、多成因”矿床。郭成基(1979),曹云龙(1994)认为矿床由元古宙沉积作用和与海西期花岗岩有关热液活动所形成。乔秀夫等(1997)认为矿床由早古生代与微晶丘形成相关的生物作用,加上热液活动所形成。

根据以上情况,有关白云鄂博矿床成因争论的焦点集中在矿石和赋矿“白云质大理岩”的形成时代、形成地质环境和方式上。

2 同位素分析方法和结果

2.1 同位素分析方法

本文对白云鄂博矿床的岩石、矿石和矿物的化学组成和S、C、O同位素组成进行了研究。同位素分析全部在中国地质科学院矿产资源研究所同位素地质实验室用MAT-251EM气体同位素质谱计完成。

前人对矿石和岩石中硫化矿物的S同位素组成做过不少测定(杨凤筠等,1979;姜传武,1982;曹云龙,1995)。因此,本研究只测量了重晶石和全岩样品的S同位素组成。采用SO₂法。样品硫(用Eschka试剂法)先转化为硫酸根,沉淀为BaSO₄,然后与V₂O₅在真空石英管中在980℃温度下反应生成SO₂,再送质谱测量。结果用相对于V-CDT的 $\delta^{34}\text{S}$ 表示,分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

碳酸盐岩石和矿物的C、O同位素用磷酸法分析(McCrea, 1950)。方解石是在25℃条件下与100%正磷酸反应4 h。白云石则在50℃条件下与100%正磷酸反应24 h。C同位素结果用相对于V-PDB的 $\delta^{13}\text{C}$ 表示,分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。O同位素结果用相对于V-SMOW的 $\delta^{18}\text{O}$ 表示,分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

2.2 S同位素分析结果

此次对14个样品做了S同位素分析,其中包括5个重晶石和9个全岩硫。其结果见表1和图2。2个采自矿石中的重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为13.1‰和23.7‰。3个脉重晶石样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为10.0‰、10.9‰和14.6‰。9个全岩硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在-2.1‰~12.7‰范围内,平均为7.36‰。以上结果表明,海水硫酸盐是矿石中硫的重要来源。

表 1 重晶石矿物和全岩样品的 S 同位素组成
Table 1 Sulfur isotope composition of
barite mineral and whole rock

样号	样品	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	备注
B-2000	重晶石矿物	10.0	脉中
B-2002	重晶石矿物	13.1	矿石中
B-2010	重晶石矿物	10.9	脉中
B-2021	重晶石矿物	14.6	脉中
B-2027	重晶石矿物	23.7	矿石中
B-2007	全岩	0	矿石
B-2009	全岩	-2.1	矿石
B-2022	全岩	9.0	矿石
B-2023	全岩	10.7	矿石
B-2016	全岩	12.7	矿石
B-2029	全岩	11.2	矿石
B-2039	全岩	11.1	矿石
B-2058	全岩	7.3	矿石
B-2083	全岩	6.3	矿石

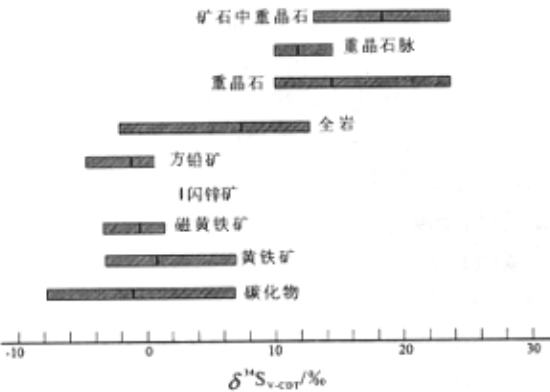


图 2 白云鄂博矿床重晶石、硫化物和全岩样品的 S 同位素组成分布图

Fig.2 Sulfur isotope distribution of barite, sulfides and bulk of ore from Bayan Obo deposit
其中,硫化物范围按杨凤筠等(1979)、姜传武(1982)和曹云龙(1995)的数据绘制

The ranges of sulfide minerals are based on the data of Yang et al. (1979), Jiang (1982) and Cao (1995)

2.3 碳酸盐岩石的 C、O 同位素组成

对 14 个碳酸盐岩石样品做了 C、O 同位素组成分析,取得 50 个新数据(表 2)。3 个大理岩的 $\delta^{13}\text{C}$

值为 $-0.5\text{‰} \sim -2.9\text{‰}$,平均为 -3.63‰ ;其 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $21.1\text{‰} \sim 21.5\text{‰}$,平均为 21.27‰ 。11 个白云质大理岩中方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-4.0\text{‰} \sim -0.7\text{‰}$,平均为 -2.61‰ ;其 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $11.7\text{‰} \sim 21.0\text{‰}$,平均为 15.87‰ 。11 个白云质大理岩中白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-4.1\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$,平均为 -2.65‰ ;其 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $9.1\text{‰} \sim 14.7\text{‰}$,平均为 11.59‰ 。根据此次研究和杨晓勇等(2000)的数据作的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 关系图(图 3)。

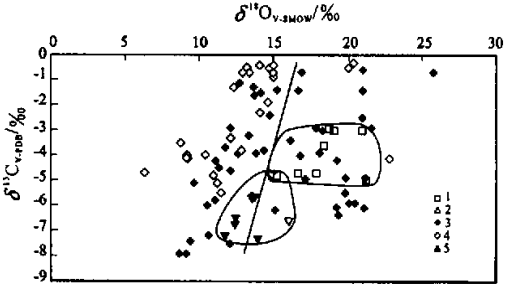


图 3 白云鄂博矿床“H₈白云质大理岩”
 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 关系图

Fig.3 The $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ plot

for “H₈ dolomitic marble” in the Bayan Obo deposit

除本次获得的数据外,包括杨晓勇等(2000)的数据;

1-大理岩;2-碳酸岩脉中的方解石;3-白云岩中的方解石;

4-白云岩中的白云石;5-碳酸岩脉中的白云石

Data based on this study and that of Yang et al., 2000;

1-marble;2-Cc in carbonatite dike;3-Cc in dolostone;

4-dol in dolostone;5-dol in carbonatite dike

3 讨论

“H₈白云质大理岩”是白云鄂博矿床最重要的赋矿主岩。研究其形成条件对探讨矿床成因十分关键。目前对“H₈白云质大理岩”的形成主要有 2 种看法:①认为它的主体是正常沉积碳酸盐岩石(李毓英,1959;魏菊英等,1983;Chao 等,1993);②认为它的主体是岩浆碳酸岩。后者又分侵入岩(周振玲,1980;李士勤,1983;刘铁庚,1986;白鸽,1983;王希斌等,2002)和喷出岩(Yuan 等,1992)。另外乔秀夫等(1997)提出的“生物微晶丘”的说法。下面就各种看法的依据和问题加以讨论。

3.1 “H₈白云质大理岩”是不是正常沉积碳酸盐岩

认为“白云质大理岩”是正常沉积碳酸盐岩石的人们主要根据有两点:①“H₈白云质大理岩”有明显层状构造;②该岩层夹在下伏的碎屑沉积岩和上复

表 2 白云鄂博矿床碳酸盐岩石中方解石、白云石的 C、O 同位素组成
Table 2 Carbon and oxygen isotope compositions of calcite and dolomite in carbonate rocks from Bayan Obo deposit

样号	样品	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$		$\Delta^{13}\text{C}_{\text{Cal-Dol}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$		$\Delta^{18}\text{O}_{\text{Cal-Dol}}$	备注
		Cal	Dol		Cal	Dol		
BY99106	大理岩	-5.0	—	—	21.2	—	—	—
BY99107	大理岩	-3.0	—	—	21.1	—	—	—
BY99109	“白云质大理岩”	-4.0	-4.1	0.1	16.8	9.3	7.5	—
BY99114	“白云质大理岩”	-3.9	-4.0	0.1	12.7	9.2	3.5	—
BY99115	“白云质大理岩”	-3.2	-4.1	0.9	13.3	9.2	4.1	—
BY99117	“白云质大理岩”	-3.9	-3.8	-0.1	18.1	12.8	5.3	—
BY99118	“白云质大理岩”	-3.7	-4.1	0.4	11.7	9.1	2.6	—
BY99119	“白云质大理岩”	-2.9	-4.0	1.1	17.8	10.4	7.4	高 REE
BY99120	“白云质大理岩”	-3.0	-1.9	-1.1	18.0	14.5	3.5	高 REE
BY99122	大理岩	-2.9	—	—	21.5	—	—	高 REE
BY99123	“白云质大理岩”	-0.7	-0.7	0	16.8	13.3	3.5	高 REE
BY99124	“白云质大理岩”	-1.4	-0.5	-0.9	21.0	14.7	6.3	高 REE
BY99125	“白云质大理岩”	-0.7	-0.7	0	14.9	12.8	2.1	高 REE
BY99126	“白云质大理岩”	-1.3	-1.3	0	13.5	12.2	1.3	高 REE

注:沿主矿体西北边的一条 NE—SW(15°~195°)向剖面采样。

的板岩之间,显示典型的沉积序列。魏菊英等(1983)和魏菊英(1998)指出:70%以上的“白云质大理岩”的 $\delta^{18}\text{O}$ 值高于10‰, $\delta^{13}\text{C}$ 值高于-4‰;仅有不到30%“白云质大理岩”的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于10‰, $\delta^{13}\text{C}$ 值低于-4‰。而这些岩石有明显的矿化或重结晶现象。他们将“白云质大理岩”与俄罗斯西伯利亚的鞑靼地区及福建的碳酸岩进行了对比,发现“白云质大理岩”的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 比鞑靼地区及福建的碳酸岩高,且变化范围大得多,由此证明“白云质大理岩”为正常沉积碳酸盐岩石。但是,这种观点对有些现象难以解释。首先,“白云质大理岩”的REE和Nb含量高。本次所测样品的最低REE含量(779.94×10^{-6})比Faure(1991)所列正常沉积碳酸盐岩石平均REE含量(23.74×10^{-6})高30倍。另外,“白云质大理岩”的REE分布为从左向右倾斜的型式,与正常沉积碳酸盐岩石的近水平分布大不相同(图4)。

Si同位素数据不支持这一观点。“白云质大理岩”样品中微量硅的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值范围为-0.8‰~-0.3‰,平均为-0.53‰;与正常沉积碳酸盐岩石中燧石层和微量硅的值(Ding等,1996)差别明显

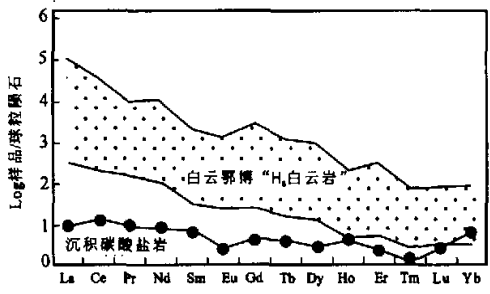


图 4 白云鄂博矿床“H₈白云质大理岩”REE 分布模式
Fig.4 The REE distribution pattern of “dolomitic marble”

(图5),而落在玄武岩、安山岩和英安岩范围内。
“白云质大理岩”的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值(0.70127~0.70590)与碳酸岩岩墙的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值(0.70290~0.70592)相近,而与矿区地层中灰岩和石英砂岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值(0.71542~0.71935)相差悬殊(张宗清等,2001)。这些都表明“H₈白云质大理岩”的非正常沉积成因。

其实,“白云质大理岩”的C、O同位素组成也不一定象魏菊英等(1997)认为的那样,可证明它是正

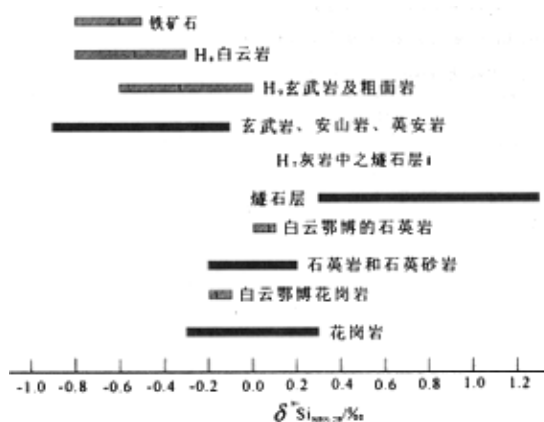


图5 白云鄂博矿床岩石和矿石 Si 同位素分布图
(据 Ding 等, 1996)

Fig. 5 Si isotope compositions of rocks and ore
from Bayan Obo deposit (after Ding et al., 1996)

常沉积形成的。这类 C、O 同位素组成不但在形成于封闭、半封闭盆地的沉积碳酸盐岩石中可以见到, 在受同化混染的碳酸岩中和热液碳酸盐岩石中也屡见不鲜。

因此“白云质大理岩”为正常沉积碳酸盐岩石的说法不能使人信服。

3.2 “H₀ 白云质大理岩”是不是侵入碳酸岩

针对“正常沉积碳酸盐岩石”论的问题, 周振玲 (1980)、李士勤 (1983)、刘铁庚 (1986)、白鸽 (1983) 和王希斌等 (2002) 提出“白云质大理岩”其实是岩浆碳酸岩侵入岩的看法。这种看法的主要依据是: ①“白云质大理岩”的 REE 和 Nb 含量高。其 REE 分布为由左向右倾斜的型式, 与典型岩浆碳酸岩和当地碳酸岩墙相似; ②“白云质大理岩”的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值 (0.70127~0.70590) 与碳酸岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值 (0.70290~0.70592) 相近; ③“白云质大理岩”的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化于 $-0.7\text{‰} \sim -8.0\text{‰}$ 之间, 可用经同化混染的岩浆碳酸岩加以解释。但是, 这种观点也有一些解释不通的地方。如“白云质大理岩”有明显层状构造, 并与上下地层一起形成一种典型的沉积序列, 用岩浆碳酸岩侵入岩就不大好解释。又如本研究测得“白云质大理岩”的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $11.7\text{‰} \sim 21.5\text{‰}$, 其中大于 15‰ 的样品占到 60% 以上, 远远高于侵入碳酸岩的常见值 ($5.0\text{‰} \sim 7.0\text{‰}$)。另外, 赋存于“白云质大理岩”的铁矿石中的全硫 $\delta^{34}\text{S}$ 值 ($-2.1\text{‰} \sim 12.7\text{‰}$, 平均为 7.36‰) 也不支持其为深源岩浆侵入岩的看法。由此看来, 岩浆碳酸岩

侵入岩的看法也值得商榷。

3.3 “H₀ 白云质大理岩”是不是碳酸岩喷出岩

Yuan 等 (1992) 发现, 复盖在“白云质大理岩”之上的“H₀ 钾质板岩”中夹有玄武岩, “钾质板岩”本身具有粗面岩的成分和地质特征。由此, 提出“钾质板岩”实为粗面岩的看法。根据这一发现, 结合“白云质大理岩”的地质和地球化学特征, 他们提出“白云质大理岩”应为碳酸岩火山岩。这一看法与“白云质大理岩”的地层学特征相一致, 又与其高 REE、Nb 含量和低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值相符合。岩石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值、 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{30}\text{Si}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ 值也能用与海水的交换和混合得到解释。因此, 这一看法吸纳了前两种看法的合理部分, 而避开其主要问题, 相对更有说服力。这一看法需要完善的地方是查明 H₀ 层位是否有同期的正常沉积碳酸盐岩石, 并进一步弄清两种岩石的关系。

3.4 “H₀ 白云质大理岩”是不是“生物微晶丘”

乔秀夫等 (1997) 根据与矿区外围腮林忽洞微晶丘的类比, 提出“H₀ 白云质大理岩”是早古生代形成的“微晶丘”的看法。但按王希斌等 (2002) 的看法: 除了岩层的形状之外, 腮林忽洞微晶丘与矿区内的“白云质大理岩”在地球化学特征上并不一致。此外, “白云质大理岩”是早古生代形成的“微晶丘”的看法与“正常沉积碳酸盐”的看法在化学和同位素组成方面都面临同样的问题。

4 结论

根据以上讨论, 可以认为“白云质大理岩”是中元古碳酸岩火山岩的看法依据比较充分, 而问题比较少。

张宗清等 (1994, 1997, 2001) 测得“白云质大理岩”的 Sm-Nd 等时线年龄为 $1\,273 \pm 100\text{ Ma}$, Nb-REE-Fe 矿石的 Sm-Nd 等时线年龄为 $1\,305 \pm 78\text{ Ma}$, 碳酸岩墙的 Sm-Nd 等时线年龄为 $1\,240 \pm 94\text{ Ma}$, 为“白云质大理岩”形成于中元古代提供了可靠证据。

“白云质大理岩”的高 REE 和 Nb 含量, REE 分布型式, 低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值和所含微量硅的接近岩浆岩的 Si 同位素组成, 为其岩浆成因提供了证据。

“白云质大理岩”中的碳酸盐和硅酸盐矿物的高 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 矿石全样硫和所含重晶石硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值表明岩石与海水发生过明显的交换作用, 为其海底火山成因提供了证据。

“白云质大理岩”中碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以受到海水碳酸盐混染的碳酸岩来解释,虽然不能排除海水沉积碳酸盐部分存在的可能性。

因此,从同位素组成看来,“白云质大理岩”是中元古代碳酸岩火山岩的看法比较可信。确定这一认识,对研究白云鄂博矿床的成因和分布规律将会产生重要的影响。

致谢 野外研究过程中得到侯增谦、章雨旭、郝梓国的帮助。袁忠信、白鸽、张宗清等对本研究的完成给予了很有效的支持。

参 考 文 献

- 白鸽,袁忠信.1983.白云鄂博矿床成因分析.中国地质科学院矿床地质研究所刊,(4):1~15.
- 曹云龙,朱寿华,王俊文.1994.白云鄂博铁-稀土矿床物质来源和成因理论问题.中国科学(B辑),24(12):1298~1307.
- 陈辉,邵治安.1987.白云鄂博地区碳酸岩的形成方式及构造背景.中国北方板块构造论文集.北京:地质出版社,73~79.
- 陈辉.1993.白云鄂博矿床氢、氧、碳同位素特征及其成因意义.第五届全国矿床会议论文集.北京:地质出版社,561~562.
- 郝治国,王希斌,李震等.2002.白云鄂博碳酸岩型 REE-Nb-Fe 矿床——一个罕见的中元古破火山机构成矿实例.地质学报,76(4):525~540.
- 何作霖.1935.绥远白云鄂博铁矿报告.中国地质学会会志,(2):279~282.
- 侯宗林.1989.白云鄂博铁-稀土矿床成矿模式及成矿作用.地质与勘探,(7):1~5.
- 姜传武,张任祐,潘均等.1982.白云鄂博矿床同位素地质研究.地质科学,(2):270~276.
- 李士勤.1983.再论内蒙古白云鄂博含稀有金属碳酸岩及其钕、稀土、铁矿床成因.中国北方板块构造论文集,(1).北京:地质出版社,156~185.
- 李毓英.1959.白云鄂博铁地质与勘探.北京:地质出版社,13~44.
- 刘铁庚.1986.白云鄂博白云岩氧、碳同位素组成及其成因讨论.地质论评,32(2):481~489.
- 孟庆昌.1981.白云鄂博碳酸岩矿床的成因特征.地质与勘探,(3):15~28.
- 乔秀夫,高林志,彭阳.1997.内蒙鄂林忽洞综合的层和白云鄂博矿床赋矿微晶丘.地质学报,71(3):202~211.
- 涂光炽.1998.试论非常规超大型矿床的物质组成、地质背景、形成机制的某些独特性——初论非常规超大型矿床.中国科学,28(增刊):1~6.
- 王希斌,郝治国,李震等.2002.白云鄂博——一个典型的碱性-碳酸岩杂岩的厘定.地质学报,76(4):501~524.
- 魏菊英,上官志冠.1983.白云鄂博铁-钨-白云岩的氧碳同位素组成及其应用.岩石学研究(第二集).北京:地质出版社,14~21.
- 魏菊英.1997.铁矿床同位素地球化学.于津生主编.中国同位素地球化学研究.北京:科学出版社,344~373.
- 杨凤筠.1979.内蒙古白云鄂博稀土稀有铁矿床同位素地质的初步

研究.白云鄂博地质科学学术讨论会资料汇编(下册).北京:地质出版社,56~69.

- 杨晓勇,章雨旭,郑水飞等.2000.白云鄂博赋矿白云岩与微晶丘和碳酸岩墙的碳氧同位素对比研究.地质学报,74(2):169~180.
- 张宗清,叶笑江,袁忠信.1994.白云鄂博稀土矿床性形成年龄的新数据.地球学报,(1~2):85~93.
- 张宗清,唐素寒,陈启桐等.1997.白云鄂博矿区 H_0 变质岩的 Sm-Nd 年龄,成因及与成矿的关系.地球学报,18(3):267~274.
- 张宗清,唐素寒,袁忠信等.2001.白云鄂博矿床白云岩的 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素体系.岩石学报,17(4):673~642.
- 周振玲,李功元,宋同云等.1980.内蒙白云鄂博白云石碳酸岩的地质特征及其成因探讨.地质论评,26(1):35~41.

References

- Bai Ge, Yuan Zhongxin. 1983. On genesis of Bayan Obo deposit. Bull. Inst. Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, (4):1~15(in Chinese).
- Campbell L S, Henderson P. 1997. Apatite paragenesis in the Bayan Obo REE-Nb-Fe ore deposit, Inner Mongolia, China. Lithos, 42(1~2):89~103.
- Cao Yunlong, Zhu Shouhua, Wang Junwe. 1994. Source of ore-forming substances and theoretical problems of metallogeny relevant to... Science in China. Series B. 24(12):1298~1307(in Chinese).
- Chao E C T, Back J M, Minkin J A. 1992. Host-rock controlled epigenetic, hydrothermal metasomatic origin of the Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit, Inner Mongolia. P. R. C. Appl. 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 examples for giant polymetallic ore deposits of hydrothermal origin. USGS Bulletin 2143:65.
- Chen Hui, Shao Jian. 1987. Genesis and tectonic setting of carbonatite in Bayan Obo. In "Contributions to Plate Tectonics in Northern China, No. 2. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Chen Hui. 1993. Hydrogen, oxygen and carbon isotope characters of Bayan Obo deposit and their genetic implications. In "Contributions to the Fifth national conference on ore deposits". Beijing: Geological Publishing House, 561~562(in Chinese).
- Ding D H. 1933. A report on Bayan Obo iron ore deposit, Suiyuan. Geological Report of Geological Survey of China. 23.
- Ding T P, Jiang S Y, Wan D F et al. 1996. Silicon isotope geochemistry. Beijing: Geological Publishing House.
- Drew L J, Meng Q, Sun W. 1990. The Bayan Obo iron-rare-earth-niobium deposits, Inner Mongolia, China. Lithos, 26:43~65.
- Hao Ziguang, Wang Xibin, Li Zhen et al. 2002. Bayan Obo carbonatite REE-Nb-Fe deposit: A rare example of neoproterozoic lithogeny and metallogeny of a damaged volcanic edifice. Acta Geologica Sinica, 76(4):525~540 (in Chinese with English abstract).
- He Zuolin. 1935. Preliminary study on Bayan Obo iron ore deposit, Suiyuan. Bulletin of the Geological Society of China, 14(2):279~282 (in Chinese).

- Hou Zonglin. 1989. The genetic model and ore forming process of Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit. *Geology and Exploration*, (7): 1 ~ 5 (in Chinese).
- Jiang Chuangyong, Zhang Renhu, Pan Jun et al. 1982. Studies on isotope geology of Bayan Obo deposit. *Geologica Sciences*, (2): 270 ~ 276 (in Chinese).
- Le Bas M J, Keller J, Kejie T et al. 1992. Carbonatite dykes at Bayan Obo, Inner Mongolia, China. *Mineral Petrol.*, 46: 195 ~ 228.
- Le Bas M J, Spiro B, Yang X M. 1997. Oxygen, carbon and strontium isotope study of the carbonatitic dolomite host of the Bayan Obo Fe-Nb-REE ore deposit, Inner Mongolia, N China. *Mineralogical Magazine*, 61: 531 ~ 541.
- Li S Q. 1983. Second discussion on genesis of Bayan Obo Nb-REE-Fe deposit, Inner Mongolia. In "Contributions to Plate Tectonics in Northern China, No. 1. Beijing: Geological Publishing House, 156 ~ 185 (in Chinese).
- Li Yuying. 1959. *Geology and exploration of Bayan Obo Fe deposit*. Beijing: Geological Publishing House, 13 ~ 44 (in Chinese).
- Liu Tiegeng. 1986. A discussion on the genesis of dolomite in Bayan Obo, Inner Mongolia-with emphasis on the composition of oxygen and carbon isotopes. *Geol. Rev.*, 32: 150 ~ 159 (in Chinese).
- Meng Qingchang. 1981. The genetic characters of Bayan Obo carbonatite deposit. *Geology and Exploration*, (3): 15 ~ 28 (in Chinese).
- Qiao Xiufu, Gao Linzhi, Peng Yang et al. 1997. Composite stratigraphy of the Sailinhuodong Group and ore-bearing micrite mounds in the Bayan Obo deposits, Inner Mongolia, China. *Acta Geologica Sinica*, 71(3): 202 ~ 211 (in Chinese with English abstract).
- Smith M P, Henderson P, Campbell L S. 2000. Fractionation of the REE during hydrothermal processes: constraints from the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(18): 3141 ~ 3160.
- Tu Guangzhi. 1998. On material composition, geological background and forming mechanisms of super large deposits. *Science in China*, 28 (Sup.) 1 ~ 6 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xibin, Hao Ziguo, Li Zhen et al. 2002. A typical alkaline rock-carbonatite complex in Bayan Obo, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 501 ~ 524 (in Chinese with English abstract).
- Wei Juying, Shangguan Zhiguan. 1983. Oxygen and carbon isotope compositions and its genesis of dolomite country rocks in Bayan Obo Fe ore deposit. *Research of Petrology*, (2): 14 ~ 21 (in Chinese).
- Wei Juying. 1997. Isotope geochemistry of Fe deposits. In "Studies of isotope geochemistry in China" Yu J. S. ed. Beijing: Scientific Publishing House, 344 ~ 373 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fengjun. 1979. Preliminary study on sulfur isotope geology of Bayan Obo rare earth, rare element and Fe deposits. *Proc. of Symposium on geology of Bayan Obo Deposit (2)*, Beijing: Geological Publishing House. 56 ~ 69 (in Chinese).
- Yang X M, Zhang P S, Tao K J. 1995. Rb-Sr isotope dating on fenites from Bayan Obo, Inner Mongolia, China and their geological implication. *Scientia Geologica Sinica*, 3(4): 457 ~ 467.
- Yang Xiaoyong, Zhang Yuxu, Zheng Yongfei et al. 2000. Carbon and oxygen isotope compositions of ore-bearing dolostone in the Bayan Obo deposits as well as two typical micrite mounds and a carbonatite dyke. *Acta Geologica Sinica*, 74(2): 169 ~ 180 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Z, Bai G, Wu C. 1992. Geological features and genesis of the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China. *Appl. Geochem*, 7: 429 ~ 442.
- Tu G Z, Zhao Z, Qiu Y. 1985. Evolution of Precambrian REE mineralization. *Precamb. Research*, 27: 131 ~ 151.
- Zhang Zongqing, Tang Souhan, Yuan Zhongxin. 1994. New data of the ore-forming age of the Bayan Obo deposit. *Acta Geoscientia Sinica*. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 15(1~2): 85 ~ 93 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing, Tang Souhan, Chen Qitong et al. 1997. Sm-Nd ages and origins of metamorphic rocks for the H9 formation in the Bayan Obo ore district, and relationship to ore-forming event. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(3): 267 ~ 274 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing, Tang Souhan, Yuan Zhongxin et al. 2001. The Sm-Nd and Rb-Sr isotopic systems of the dolomites in the Bayan Obo ore deposit, Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 637 ~ 642 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenling, Li Gongyuan, Song Tongyun. 1980. On geological characters and genesis of dolomitic carbonatite of Bayan Obo, Inner Mongolia. *Geological Review*, 26(1): 35 ~ 41 (in Chinese).