

Discusses the “Dolomite” Genesis According to Geological and Geochemical Characteristics at 12 Mining Area in Baiyun Obo Deposit^{*}

Tiegeng Liu^{1#}, Lin Ye¹, Nengping Shen¹, Zhanfeng Yang², Chengxin Li², Jing Hu¹, Jingping Bao¹

¹National Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang
²Baotou Pakistan Run Mining Limited Liability Company, Inner Mongolia Baotou Steel Group, Baotou
Email: [#]Liutiegeng1.Yahoo.com.cn

Received: Dec. 7th, 2012; revised: Dec. 24th, 2012; accepted: Dec. 29th, 2012

Abstract: Baiyun obo “dolomite” is the world’s largest rare earth deposit occurrence parent rock. It is also the carrier of large-large deposits, such as niobium, iron, scandium, thorium, etc. As long as “dolomite” is Niobium-Rare Earth Mine. The genesis of the “dolomite” is also the genesis of Nb-REE ore. Therefore, Baiyun Obo “dolomite” becomes a bright pearl, attracting many domestic and foreign geologists investigate and study. For genesis of the “dolomite” in put forward a lot of completely different views. According to the geological and geochemical characteristics at 12 mining area, we think Baiyun Obo “dolomite” may be magma carbonatite. Nb-REE ore is mineral deposits associated with carbonate rock.

Keywords: Baiyun Obo “Dolomite”; Geological and Geochemical Characteristics; Magmatic Carbonate

从白云鄂博矿床 12 矿段地质地球化学特征看“白云岩”成因^{*}

刘铁庚^{1#}, 叶霖¹, 沈能平¹, 杨占峰², 李称心², 胡静¹, 包敬萍¹

¹中国科学院矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳
²内蒙古包钢集团巴润矿业有限责任公司, 包头
Email: [#]Liutiegeng1.Yahoo.com.cn

收稿日期: 2012 年 12 月 7 日; 修回日期: 2012 年 12 月 24 日; 录用日期: 2012 年 12 月 29 日

摘 要: 白云鄂博“白云岩”是世界上最大稀土矿床赋存母岩, 也是铌、铁、钽和钍等大型 - 超大矿床的载体。只要是“白云岩”就是铌、稀土等矿, “白云岩”的成因就是铌、稀土矿成因。所以, 白云鄂博“白云岩”成为一颗灿烂的明珠, 吸引国内外许多地质工作者考察和研究。对“白云岩”的成因提出不少完全不同看法。本文根据 12 矿区地质地球化学特征认为白云鄂博“白云岩”可能为岩浆碳酸岩。铌、稀土铁矿是与碳酸岩有关的矿床。

关键词: 白云鄂博“白云岩”; 地质地球化学特征; 岩浆碳酸盐

1. 引言

白云鄂博“白云岩”是世界上最大的聚宝盆。它

除蕴藏着世界最大的稀土矿外, 还是铁、铌、钽、钨、锆、钛、磷和萤石等大型 - 超大型矿床母岩。只要是“白云岩”就是铌 - 稀土等矿, 反过来只要是铌 - 稀土矿, 就是“白云岩”。无论说“白云岩”, 或是说铌 - 稀土矿, 都是说的一个地质体。所以, 白云鄂博“白云岩”成为世界上地质界的一颗灿烂明珠, 吸引全世

^{*}项目基金: 中国科学院矿床地球化学国家重点实验室项目: 白云鄂博铌稀土铁矿床 12 号矿体两侧石英岩关系研究(项目编号: 2010001)
[#]通讯作者。

界成千上万的地质工作者前来考察和研究。自 1927 年丁道衡教授发现白云鄂博铁矿迄今已逾 87 年。此间除数百项研究专题对“白云岩”进行了专项研究外,还曾多次组织科研单位、大专院校和地质队参加的,多兵种的综合性考察和研究,获得了许多重要成果,对“白云岩”成因提出了不少完全不同认识。如孟庆润的沉积说^[1],王中刚,李绍炳^[2],中国科学院地球化学研究所^[3],J. D. Lawrence et al.^[4],张宗清等^[5],Chao et al.^[6,7],等的沉积加热液说,李士勤^[8]刘铁庚^[9-11],M. J. Le Bas et al.^[12],Chang Xu et al.^[13]等侵入碳酸岩说。白鹤,袁忠信^[14],郝梓国^[15],王凯怡等^[16],肖荣阁等^[17]等的火山碳酸岩说,章雨旭等、孙剑等^[18,19]提出微晶丘说。为什么会有如此多的不同认识?笔者认为除“白云岩”本身成分和结构构造的复杂性外,主要是岩露头不好,地质产状不清,与围岩的关系不明所致,加之有些地质工作者野外考察和研究基本集中在主、东矿采场,全面观察不够,特别是“白云岩”与围岩的关系研究更少。如 H4 石英砂岩在 12 矿体以东产于“白云岩”的北侧,12 号矿体以西却出露于“白云岩”南边。“白云岩”两边的 H4 石英砂岩是什么关系?它们与“白云岩”的关系又是如何?过去从未没人研究过。只是人为的作为自然尖灭处理。笔者认为这样处理非常不合适。

于 2010 年在中国科学院矿床地球化学国家重点实验资助下,并得到内蒙古包钢集团巴润矿业有限责任公司大力支持。重点考察了 12 号矿体附近“白云岩”两边的 H4 石英砂岩延伸情况以及其与“白云岩”的关系。分别沿“白云岩”两侧的石英砂岩走向考察了 3 条路线。为了解石英砂岩与“白云岩”的关系,考察路线采取折线型。第一条考察路线是沿“白云岩”南边的第二层(原认为第一层)石英砂岩走向,自 10 号矿体向东追踪。直追到主矿附近。该层石英砂岩都是连续出露。石英砂岩与“白云岩”之间在 12 号矿体以东出露的都是板岩,没见到石英砂岩露头。第二条路线是考察“白云岩”北边的石英砂岩。“白云岩”北边有两层石英砂岩。从主矿西沿石英砂岩走向西追踪。直追 8 号矿体附近。其中“白云岩”北侧的第一层石英砂岩在 12 号矿体以东与“白云岩”直接接触,追至 12 号矿体附近时突然消失,向西再没出露。而第二层石英砂岩自主矿西追到 8 号矿体附近都是连续出露。两层石英砂岩之间分布是板岩。第三条考察路线是追索“白云岩”南边的第一层石英砂岩(这是在考察“白云岩”北边石英砂岩的途中发现的)。考察路线从 10 号矿体开始向东追,追到 12 号矿体附近时也突然消失处,向东再没露头,并在此处,沿石英砂岩走向挖了一条近百米的探槽,却挖到“白云岩”中去(图 1)。

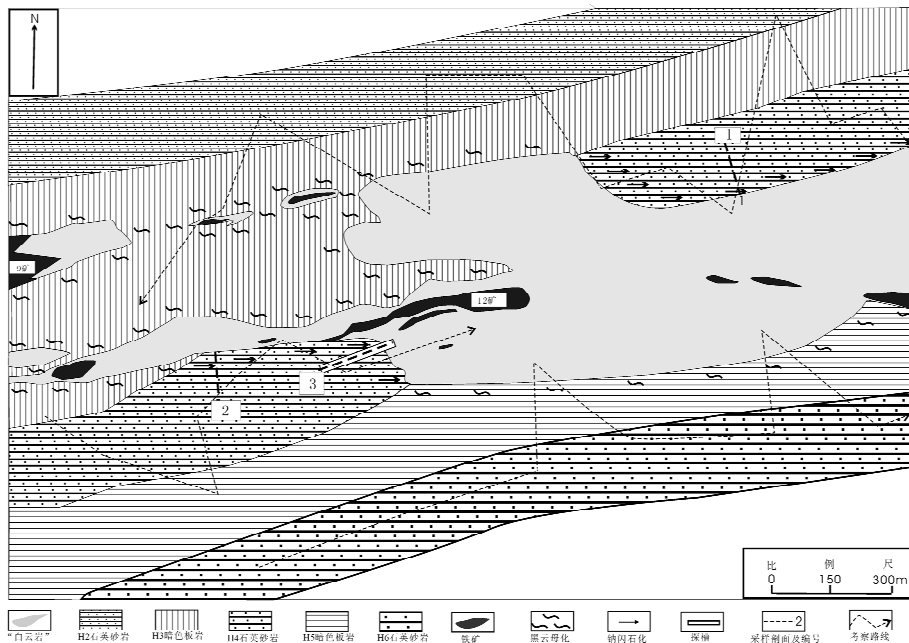


Figure 1. The geological sketch of 12 mine paragraph at Baiyun Obo (drawing according to the results of the examinations and the Baiyun Obo Tuan West Mine-Dulahala topographic and geologic map at 1:5000)
图 1. 白云鄂博 12 矿段地质草图(根据考察结果和 1:5000 白云鄂博西矿-都拉哈拉地形地质图绘制)

2. 12 矿段的地质特征

12 矿段位于主矿与西矿衔接地段(即 12 号矿体周围)。自北而南依次出露白云鄂博群的 H2 灰白色石英砂岩夹石英岩, H3 黑色炭质板岩(包括原 H9 板岩), H4 暗色石英砂岩, H5 灰黑色炭质板岩和 H6 棕褐色长石石英砂岩, 以及所谓白云鄂博群第八层(H8)的“白云岩”。“白云岩”在 12 矿体以东地区出露于 H4 石英砂岩的南侧, 并与 H4 石英砂岩直接接触。12 矿体以西出露于 H4 石英砂岩北边的 H3 黑色炭质板岩中(图 1)。

为什么将原 H9 板岩划归 H3 呢? 从图 1 可以看出“白云岩”不是连续的层状岩石, 而是数个透镜状岩体组成的“白云岩”带。岩体与岩体之间及其上下盘都是黑云母化板岩。岩性完全一样, 为连续的过度关系。岩体下盘的黑云母化板岩是大家公认的 H3, 那么岩体之间及其上盘的黑云母化板岩也应该是 H3, 不应该是 H9。

3. 白云岩两边的第一层石英砂岩同是 H4

出露 12 矿段的石英砂岩原有四层(实际是三层), “白云岩”两边各有两层。南边的第一层自西矿西端向东延伸到 12 号矿体附近突然消失。北边的第一层自主矿向西延伸到 12 号矿体附近也突然消失。过去普遍认为是自然尖灭。若是自然尖灭, 为什么这么凑巧, 北边的石英砂岩自主东矿向西至 12 矿体附近突然消失, 南边又猛然出现, 而且, 接着断续向西延伸呢?

在走向上“白云岩”两边的第一层石英砂岩是可以衔接起来呢。它们的岩性特征、矿物组成, 造岩元素、微量元素和稀土元素等含量及变化趋势都非常类似。“白云岩”两边的第一层石英砂岩均含有大量的钠闪石, 远离“白云岩”逐渐减少, 以至消失; 与“白云岩”接触的石英砂岩的造岩元素(特别是 Na_2O 和 MgO)、微量元素和稀土元素含量显著增加, 离开“白云岩”慢慢减少。如“白云岩”接触带上三个剖面石英砂岩的 Na_2O 含量分别为(2.23%、2.27%和 2.41%), MgO 含量分别为(0.81%、0.90%和 0.94%)。远离“白云岩”的 Na_2O 分别减少为(0.43%、0.87%和 0.13%)。 MgO 减少为(0.26%、0.31%和 0.60%)(表 1)。REE 总量, 靠近“白云岩”的为 $(46.2 - 57.8) \times 10^{-6}$ 。远离“白云岩”的为 $(27.8 - 49.2 \times 10^{-6})$ 。再如微量元素 Y, 靠

近“白云岩”的为 $(3.64 - 6.98) \times 10^{-6}$, 远离“白云岩”的为 $(2.99 - 3.61) \times 10^{-6}$ (表 2); 再如 Li 含量, 靠近“白云岩”的为 $(20.7 - 28.3) \times 10^{-6}$, 远离“白云岩”是 $(7.18 - 17.0 \times 10^{-6})$ 说明“白云岩”两边的第一层石英砂岩是同一层岩石, 即 H4, 由于“白云岩”的切割而分居两边的。

4. “白云岩”不是层状岩石

“白云岩”不是层状岩石, 既无明显的层理, 也无固定层位, 而呈现块状构造。章雨旭等(2009)^[18]也

Table 1. The Na, Mg, K and Ca contents of the quartz sandstones that locates both sides of “dolomites” relationship with the “dolomites”

表 1. “白云岩”两边石英砂岩的钠、镁、钾和钙含量与“白云岩”的关系(%)

剖面	No. 1			No. 2		No. 3		
样品号	V-1-1	V-3	V-5	II-4-1	II-4-4	V-6-5	V-6-3	V-6-0
距离(m)	2	20	80	1.5	100	1	30	80
Na_2O	2.23	1.96	0.43	2.41	0.87	2.27	1.36	1.30
MgO	0.81	0.67	0.26	0.9	0.31	0.94	0.65	0.60
K_2O	0.73	0.56	0.66	0.75	0.40	0.28	0.12	0.29
CaO	0.25	0.27	0.22	0.22	0.23	0.30	0.25	0.22

Table 2. The relationship between trace elements and REE contents at the quartz sandstones that locates both sides of the “dolomites” with “dolomites”

表 2. 两边第一层石英砂岩的微量元素含量和稀土总量一览表($\times 10^{-6}$)

剖面	No. 1			No. 2		No. 3		
样品号	V-1-1	V-3	V-5	II-4-1	II-4-4	V-6-5	V-6-3	V-6-0
距离(m)	2	20	80	1.5	100	1	30	80
REE	57.802	49.54	27.785	46.22	32.45	49.21	38.84	52.11
Li	28.3	10.2	7.18	20.7	11.7	21.8	19	17
Sr	27.5	11.2	11.1	30.2	16.7	23.9	16.8	22.1
V	20.6	20.4	7.46	21.0	8.25	23.1	14.2	16.4
Y	6.98	5.08	2.99	3.64	3.61	6.46	5.44	3.08
Ga	5.7	4.46	1.76	5.9	2.48	4.32	3.31	3.45
Co	3.86	2.99	2.22	2.45	1.98	4.19	3.8	4.83
Be	2.76	1.77	1.55	5.5	1.26	5.06	3.13	1.66
Sc	2.75	2.47	0	2.44	0.02	3.82	1.87	2.2
Th	2.69	2.37	1.79	0.839	1.25	2.17	1.34	2.11
Ge	1.81	1.41	1.11	18.9	2.67	21.7	14.73	21.64
Cd	1.21	0.772	0.655	0.713	2.42	0.868	0.553	0.487

认为“白云岩”不是层状岩石，并具块状构造。所谓的“白云岩”层是由大小不等、基本顺层侵入的、串珠状的碳酸岩体组成的“白云岩”带。仅在 12 矿段至少有五个“白云岩”小岩体。最大的一个岩体位于 12 号矿体以东地区。该岩体向东延伸主、东矿。向西分叉。南分枝为一个岩体。北分枝由三个小岩体组成。“白云岩”带在 12 号矿体以东出露于 H4 石英砂岩的上盘，12 号矿体以西分布于 H4 石英砂岩下盘 H3 板岩中(图 2)。

5. “白云岩”切割了 H4 石英砂岩

如前所述，在 12 号矿体以东 H4 石英砂岩分布“白云岩”北面，自主 - 东矿向西延伸到 12 号矿体附近突然消失。与此同时，在“白云岩”南边又突然出现 H4 石英砂岩，并接着继续向西延伸。我们在“白云岩”南边的 H4 石英砂岩突然出现地方，在其中向东挖了一条近百米的顺层探槽。却挖到“白云岩”中去(图 1)，证实“白云岩”切割了 H4 石英砂岩。若是“白云岩”两边的 H4 石英砂岩分别向东或向西自然尖灭。那么，为什么这么凑巧？“白云岩”北侧的 H4 石英砂岩突然消失，南边的却猛然出现，并接着断续向西延伸呢？假若“白云岩”两边的 H4 石英砂岩是自然尖灭，也不应该尖灭于“白云岩”中。因为认为自然的尖灭者将“白云岩”作为白云鄂博群的第八层(H8)。而石英砂岩是白云鄂博群的第四层，二者相距近千米；H4 石英砂岩沉积数十万年，又沉积了近千米的岩层后，“白云岩”才沉积。那么，H4 石英砂岩怎么会尖灭“白云岩”中呢？

6. “白云岩”引起围岩的强烈蚀变

“白云岩”四周的岩石无不发生围岩蚀变。石英砂岩的钠闪石化和重结晶现象。板岩的黑云母化。“白云岩”若是沉积岩，怎能引起围岩的蚀变？“白云岩”就是火山碳酸岩，也只能引起下盘围岩的蚀变，不会引起上盘围岩的蚀变，更不会引起相隔近千 H4 石英砂岩蚀变。

6.1. 围岩的矿物成分变化

与“白云岩”接触的岩石均产生不同程度的围岩蚀变。板岩的黑云母化。石英砂岩的钠闪石化和重结晶现象。与“白云岩”接着的板岩基本全由黑云母组



Figure 2. It is a trench that digging exposed quartz sandstone and dolomite of the relationship in pinchout place of the quartz sandstone (It is H4 quartz sandstone that Dark brown with white spots and on the bottom is white; Light yellow or brown is dolomite weathering products)

图 2. 挖掘“白云岩”与其南边第一层石英砂岩关系的探槽(探槽位置见图 1)(暗褐色带白色斑点的风化产物、槽底是白色的为 H4 石英砂岩；浅黄色或黄褐色的是“白云岩”风化产物)

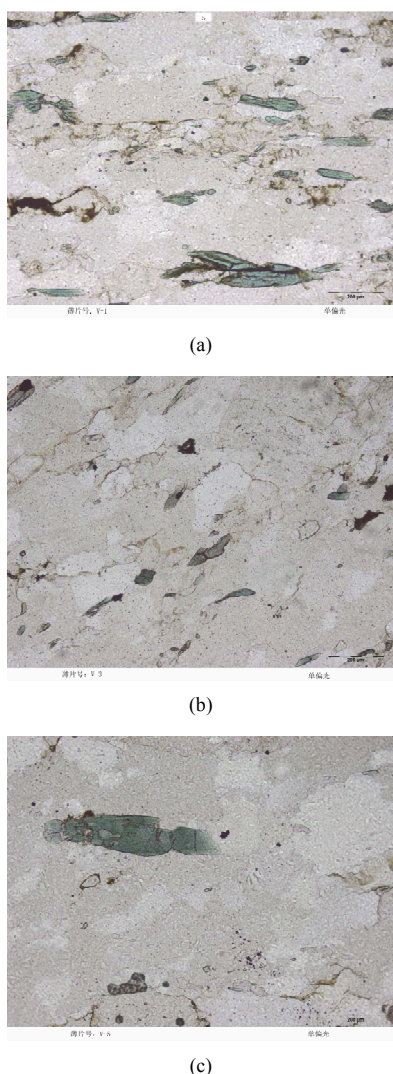
成并定向分布，形成黑云母片岩。远离“白云岩”黑云母含量依次减少，过度到黑云母片岩→含黑云母千枚岩→千枚岩→板岩^[20]。“白云岩”附近的石英砂岩含有大量的钠闪石，岩石呈现镶嵌构造，变为钠闪石石英岩。远离“白云岩”钠闪石依次减少，镶嵌构造逐渐被碎屑构造取代，依次变为含钠闪石变石英砂岩→石英砂岩(图 3(a)-(c))。

6.2. 与“白云岩”接触石英砂岩的钠、镁、钾和钙含量显著增加

我们采集了三条垂直“白云岩”接触带剖面的石英砂岩系统样品。其中一条剖面(No. 1)位于“白云岩”北侧。其余两条剖面(No. 2、No. 3)位于“白云岩”南侧。南边两条剖面中的一条垂直石英砂岩的走向(No. 2)。另一条平行石英砂岩走向(No. 3)。该条剖面上的样品不仅受垂直石英砂岩走向“白云岩”的影响，还受平行石英砂岩走向“白云岩”的影响。所以该剖面岩石成分变化规律不如另两条剖面强。采样位置见图 1。剖面 No. 1 和 No. 2 样品采自天然露头。剖面 No. 3 样品采自探槽中。

造元素钠、镁、钾和钙分析是在中国科学院矿床地球化学国家重点实验室完成。用原子吸收光谱仪和化学分析方法测试。由彭绍松高级工程师完成。

分析结果显示：靠近“白云岩”石英砂岩的 Na_2O 、 MgO 、 K_2O 和 CaO 含量明显增高，随远离“白云岩”



Figures 3. H4 quartz sandstone sodium flash petrochemical and recrystallization ((a) Riebeckite quartzite in the contact zone; (b) Riebeckite quartz sandstone away from the “dolomites”; (c) The quartz sandstone containing Riebeckite from farther “dolomites”) 图 3. H4 石英砂岩的钠闪石化和重结晶现象((a) 接触带上的钠闪石石英岩; (b) 远离“白云岩”的钠闪石化石英砂岩; (c) 离“白云岩”更远的含钠闪石石英砂岩)

含量逐渐降低(图 4)。如, No. 1 剖面中, 石英砂岩的 Na₂O 含量从接触带向远处依次为 2.23%→1.96%→0.43%。No. 2 剖面依次为 2.41%→0.87%。No. 3 剖面为 2.27%→1.36%→1.30%。MgO 含量, No. 1 剖面依次为 0.81%→0.67%→0.26%。No. 2 剖面为 0.9%→0.31%; No. 3 剖面为 0.94%→0.65%→0.60%。K₂O 和 CaO 含量的变化规律不如 Na₂O 和 MgO 明显, 因为“白云岩”相对钙和钾明显富镁和钠。位于“白云岩”不同方向和位置的石英砂岩三个剖面的变化规律如此相似, 表明钠、镁、钾和钙主要“白云岩”供给。

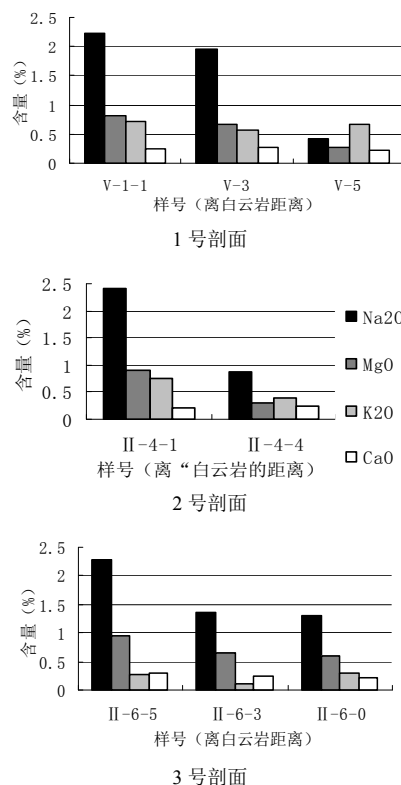


Figure 4. Histogram that the relationship of the Na₂O, MgO, K₂O and CaO content of the quartz sandstone with the “dolomites” (Note: Profile 1: a vertical the north contact zone with “dolomite”; Profile 2: a vertical the south contact zone with “dolomite”; Profile 3: a vertical the south contact zone with “dolomite” and along the direction of quartz sandstone)

图 4. H4 石英砂岩的 Na₂O、MgO、K₂O 和 CaO 含量与“白云岩”关系的柱状图(注: 剖面 1: 垂直“白云岩”北侧接触带; 剖面 2 垂直“白云岩”南侧接触带; 剖面 3 沿石英砂岩走向并垂直接触带)

6.3. 石英砂岩的微量元素含量与“白云岩”距离成反消长趋势

微量元素和稀土元素测试工作也是在中国科学院矿床地球化学国家重点实验室用 Q-ICP-MS 仪器完成的。由胡静高工和包敬萍工程师测试。给出 35 个微量元素和全部稀土元素分析结果, 其中 20 微量元素含量随远离“白云岩”依次降低。如, No. 1 剖面石英砂岩的 Li 含量从接触带向远处依次为(28.3→10.2→7.18)×10⁻⁶; Sr 含量依次是(27.5→11.2→11.1)×10⁻⁶; Y 含量依次为(6.98→5.08→2.99)×10⁻⁶; Sc 含量为(2.75→2.47→0.00)×10⁻⁶等等。不仅 No. 1 剖面如此, 而且, No. 2 剖面也完全如此。由于 No. 3 剖面的样品受两个方向“白云岩”的影响, 变化规律稍差, 但, 总的变化趋势是一致的(图 5), 表明这些元素来源与“白云岩”有一定的关系。

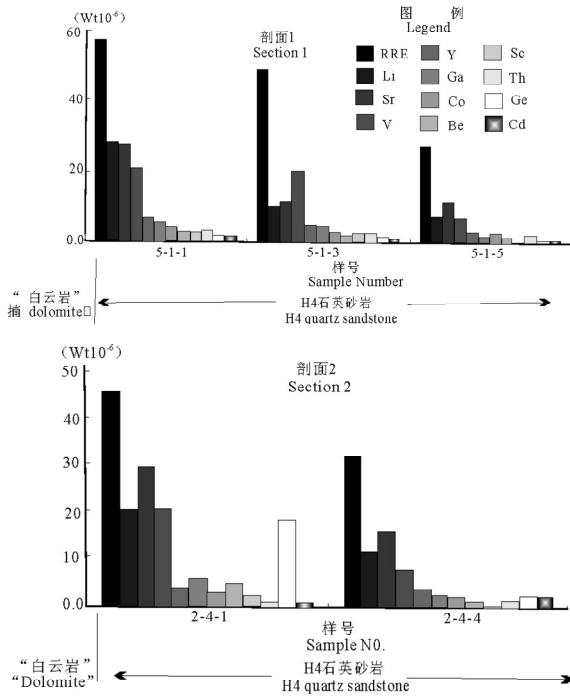


Figure 5. Histogram that the content of trace element at quartz sandstone with the “dolomite” relationship (Note with Figure 2)
图 5. H4 石英砂岩微量元素含量与“白云岩”关系的柱状图(注同图 2)

6.4. H4 石英砂岩的稀土含量及其配分模式都与“白云岩”关

与“白云岩”接触石英砂岩的稀土含量明显增加，远离“白云岩”含量依次减少。如剖面 1，接触带上的稀土总量为 61.4×10^{-6} ，远离“白云岩”依次是 $50.21 \times 10^{-6} \rightarrow 28.16 \times 10^{-6}$ 。剖面 2，接触带上稀土总量为 46.23×10^{-6} ，远离“白云岩”为 32.45×10^{-6} 。剖面 3 稀土含量变化趋势略微差一些。由近而远依次为 ($48.24 \rightarrow 34.92 \rightarrow 45.20$)。δEu 均为负异常，随远离“白云岩”δEu 异常越来越明显。如剖面 No. 1，δEu 值依次为 $0.80 \rightarrow 0.79 \rightarrow 0.71$ ；剖面 No. 2 为 $0.98 \rightarrow 0.63$ (图 6)。δCe 异常随远离接触带由负异常逐渐变为正异常。如 No. 1 剖面随远离“白云岩”依次为 $0.96 \rightarrow 0.90 \rightarrow 1.07$ ，No. 2 剖面依次为 $0.83 \rightarrow 0.93$ 。

7. “白云岩”北南两边第二层石英砂岩分别为 H2 和 H6

“白云岩”两边第二层石英砂岩的矿物组成，元素组合和微量元素特征既与第一层(H4)不同，彼此也有很大差别。

- 1) 第一层石英砂岩(H4)含大量的钠闪石，而第二层不含或偶见；
- 2) 北边第二层石英砂岩层中有石英岩夹层，南边第二层没有石英岩夹层；
- 3) 微量元素组合上也显然不同，南、北第一层(H4)是 Li、Be、Sc、Sr、Zr、Th 和 Y。北边第二层为 Nb、Ba、Sr 和 Zr 组合，南边第二层为 Li、Be、U、Zn、Cu、Y 和 Ba 组合；
- 4) 稀土含量及配分模式差异更明显：北、南边第一层(H4)RRE 为 $(46.24 \text{ 和 } 41.5) \times 10^{-6}$ ，LR/HR 为 10.70 和 11.15，δEu = 0.81 和 0.79。δCe 均等于 0.88。北边第二层 RRE = 30.96×10^{-6} ，LR/HR = 6.71，δEu = 0.77，δCe = 1.01，南边第二层 RRE = 35.18×10^{-6} ，LR/HR = 26.07，δEu = 0.98，δCe = 1.22(图 7)。表明“白云岩”南北两边的第二层石英砂岩不是 H4。北边第二层是大家公认的 H2 石英砂岩。依照层序“白云岩”南边的第二层应是 H6。

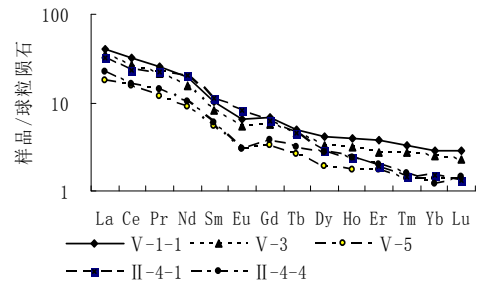


Figure 6. The relationship between the standard distribution curve of rare earth of the H4 quartz sandstone and the “dolomite” (The distribution curve from top to next that sample location is from near to far away from the contact zone)
图 6. H4 石英砂岩的稀土配分模式与“白云岩”的关系(配分曲线由上到下样品位置从近到远)

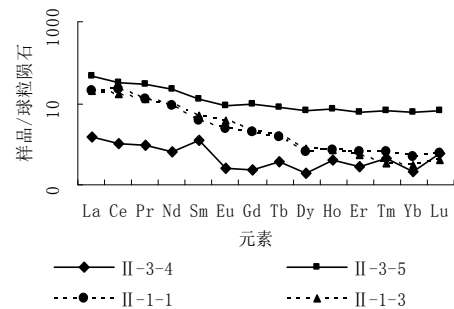


Figure 7. REE patterns of quartz sandstone of second layer of both sides of the “dolomite” (Note: II-3-4 and II-3-5 is the second layer of quartz sandstone in the north, that is H2; II-1-1 II-1-3 south of the second layer of quartz sandstone, that is H6)
图 7. “白云岩”两边第二层石英砂岩的稀土配分模式(注: II-3-4, II-3-5 是北边第二层石英砂岩, 即 H2; II-1-1, II-1-3 是南边第二层石英砂岩, 即 H6)

8. 结论

通过以上分析不难看出:

1) “白云岩”非沉积岩,而是岩浆碳酸岩。即没明显的层理,也无固定层位,而是一条大小不等岩体构成的“白云岩”带。并引起围岩强烈蚀变,石英砂岩的钠闪石化,板岩的黑云母化,并切穿了 H4 石英砂岩地层。说明“白云岩”不是沉积岩,也不是火山岩。因为沉积岩不会引起围岩蚀变,火山岩只能引起上盘岩石的蚀变,不会引起上复岩石的围岩蚀变。

2) “白云岩”两边第一层石英砂岩均为 H4。由于“白云岩”切割而分居“白云岩”两边的。

3) “白云岩”南北两边第二层石英砂岩北边的是 H2,南边的 H6。

9. 致谢

对内蒙古包钢集团巴润矿业有限责任公司的领导和全体职工表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- [1] 孟庆润. 论白云鄂博含矿围岩——白云岩的成因及其沉积环境分析[J]. 地质论评, 1982, 28(5): 430-439.
- [2] 王中刚, 李绍柄. 沉积变质 - 热液交代型稀土铁矿床[J]. 地球化学, 1973, 1: 5-11.
- [3] 中国科学院地球化学研究所. 白云鄂博矿床地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 42-59.
- [4] J. D. Lawrence, Q. R. Meng and W. J. Sun. The Bayan Obo iron-rare-earth-niobium deposits, Inner Mongolia, China. *Lithos*, 1990, 26(1-2): 43-65.
- [5] 张宗清, 唐索寒, 王进辉, 袁忠信, 白鸽. 白云鄂博矿床形成于不同时代的信息——矿床西矿体年龄和讨论[J]. 中国地质, 2003, 30(2): 130-137.
- [6] E. C. T. Chao, J. M. Back, J. A. Minkin and Y. C. Ren. Host-rock controlled epigenetic, hydrothermal metasomatic origin, of the Bayan Obo, REE-Fe-Nb ore deposit, Inner Mongolia, PRC. *Applied Geochemistry*, 1992, 7(5): 443-458.
- [7] E. C. T. Chao, J. M. Back, J. A. Minkin, M. Tatsumoto and J. Weng. The sedimentary carbonate-hosted giant Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit, Inner Mongolia, China, a cornerstone example, for giant polymetallic ore deposit of hydrothermal origin. *US Geological Survey Bulletin*, 1997, 10(2143): 1-65.
- [8] 李士勤. 再论内蒙古白云鄂博含有稀有金属碳酸岩及其铈、稀土、铁矿床成因[A]. 中国北方板块构造文集[C]. 北京: 地质出版社, 1982, 1: 156-182.
- [9] 刘铁庚. 白云鄂博白云碳酸岩地质地球化学特征——白云鄂博成因讨论[J]. 岩石学报, 1985, 1(3): 15-28.
- [10] 刘铁庚. 白云鄂博白云岩氧、碳同位素组成及其成因讨论[J]. 地质论评, 1986, 32(2): 151-159.
- [11] 刘铁庚, 张正伟, 叶霖, 沈能平, 杨占峰, 李称心, 冯建荣. 白云鄂博“白云岩”的地质地球特征及成因讨论[J]. 地质学报, 2012, 86(5): 723-733.
- [12] M. J. Le Bas, J. Keller, T. Kejie, F. Wall, C. T. Williams and Z. Peishan. Carbonatite Dykes at Bayan Obo, Inner Mongolia, China. *Mineralogy and Petrology*, 1992, 46: 195-228.
- [13] C. Xu, I. H. Campbell, J. Kynicky, C. M. Allen, Y. J. Chen, Z. L. Huang and L. Qi. Comparison of the Daluxiang and Maoniuping carbonatite REE deposits with Bayan Obo REE deposit, China. *Lith*, 2008, 106: 12-24.
- [14] 白鸽, 袁忠信. 碳酸岩地质及其矿产(矿床地质研究所科研成果)[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1985, 13: 107-135.
- [15] 郝梓国, 王希斌, 李震, 肖国望, 张台荣. 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[J]. 地质学报, 2002, 76(4): 525-540.
- [16] 王凯怡, 范宏瑞, 杨奎锋, 胡芳芳, 吴春明, 胡铺佑. 白云鄂博碳酸岩的方解石 - 白云石地质温度计[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1141-1149.
- [17] 肖荣阁, 费红彩, 安国英, 张汉成. 侯万荣内蒙古白云鄂博矿区白云岩岩石学及其成因研究[J]. 现代地质, 2003, 17(3): 286-293.
- [18] 章雨旭, 杨占峰, 张绮玲, 柳建勇, 吕洪波, 姬志勇等. 白云鄂博矿床及北京西山微晶丘地质地球化学研究[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 24-37.
- [19] 孙剑, 朱祥坤, 房楠, 陈岳龙. 白云鄂博多金属矿床铁同位素初步研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2011, 30(增刊): 508.
- [20] 刘铁庚, 丘聚田. 再论白云鄂博白云岩的成因[J]. 地质与勘探, 1986, 8: 35-40.