

文章编号:0258-7106(2005)05-0543-10

关于华北元古宙富钾、富稀土沉积岩是白云鄂博大型稀土矿床矿源层的讨论*

宋天锐¹, 万渝生¹, 陈振宇²

(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)

摘要 文章对大连、北京元古宙沉积岩及白云鄂博稀土矿围岩的岩石化学成分、独居石形态和稀土元素特征等进行了分析与总结, 结果显示三者特征相似。因此认为白云鄂博的稀土矿不是来自地幔岩而是源于大陆增生, 华北元古宙富钾、富稀土沉积岩可能是白云鄂博巨型稀土矿的矿源层。文章还提出了一个白云鄂博稀土矿的理想大陆增生成矿模式图。

关键词 地质学; 元古宙; 大陆增生成矿; 沉积岩; 矿源层; REE; 白云鄂博

中图分类号: P618.7

文献标识码: A

内蒙古白云鄂博稀土矿床是世界上最大的稀土元素矿床, 对于该矿床的成因有多种不同的观点, 包括: 岩浆成因说(Drew et al., 1990; 白鸽等, 1996)、地幔成因说(张宗清等, 2004; 袁忠信等, 1997)、生物丘成因说(乔秀夫, 1997; 章雨旭等, 1998)及热水沉积成因说(肖荣阁等, 2003a)。季克俭等(1989)根据中国南方若干热液矿床的研究成果, 首次提出了“矿源、水源和热源”的三源成矿理论, 认为分散在岩石中的成矿物质可成为矿源, 在岩浆活动、构造运动等热水源作用下, 分散的矿质元素可富集成为矿床。胡云中等也持类似观点(胡云中等, 1990)。北京十三陵中元古代常州沟组和串岭沟组中稀土元素异常丰富(宋天锐等, 1991), 笔者曾提出相应层位可能为白云鄂博稀土矿的矿源层问题(宋天锐, 1999; 宋天锐等, 2003a)。本文对大连、北京和白云鄂博的主要稀土矿物独居石的形态和成分, 赋存岩石的化学组成和稀土元素含量, 特别是轻、重稀土元素比值(LREE/HREE)等以及矿物、岩石的“指纹”进行对比研究后, 认为华北元古宙富钾、富稀土沉积岩与白云鄂博稀土矿围岩特征基本一致。

1 自生独居石特征

自生独居石首次发现于大连金石滩震旦系十三

里台组的泥岩中(宋天锐, 1999), 这一发现受到了自生方铅矿在泥岩中的 w_{Pb} 大于 100×10^{-6} 的启发, 在含独居石泥岩中测出的 w_{Ce} 大于 139×10^{-6} (宋天锐等, 1992; 乔秀夫等, 1996)。

1.1 形态特征

在岩浆岩、变质岩和沉积物中碎屑独居石和其他稀有放射性矿物屡见不鲜, 但是在泥岩和泥质粉砂岩中发现自生独居石和生长在碎屑锆石边缘的磷钇矿确系首次。大连震旦系十三里台组泥岩中的 w_{Ce} 达 139×10^{-6} , 并在其中用电子探针背散射法找到了大量直径为 $2 \sim 60 \mu m$ 、形态不规则的细小自生独居石, 同时在白云鄂博稀土矿围岩——富钾板岩中也发现了形态奇特的自生独居石。当与北京十三陵大红峪组中的碎屑独居石对比时, 明显可看出两者的区别。另外在北京十三陵中元古代常州沟组中除发现了自生独居石外, 还发现有再生长在碎屑锆石外缘的磷钇矿。据此对于沉积岩中稀土矿物自生范围之广有了更进一步的认识。

前述 3 种采自大连、北京和内蒙古元古宙沉积岩中的自生独居石(图 1a、1b、1c)及 1 种采自北京大红峪组的碎屑独居石(图 1d), 虽然形态各异, 但电子探针能谱分析表明, 它们都以 P, Ce, La, Nd, Th 为主要造矿元素, 反映了标准独居石矿物的基本化学

* 本文得到国家自然科学基金项目(40172044)的资助

第一作者简介 宋天锐, 男, 1931 年生, 研究员, 从事矿物学、岩石学、沉积学研究。E-mail: songtianrui@cags.net.cn

收稿日期 2005-02-17; 改回日期 2005-04-27。李岩编辑。

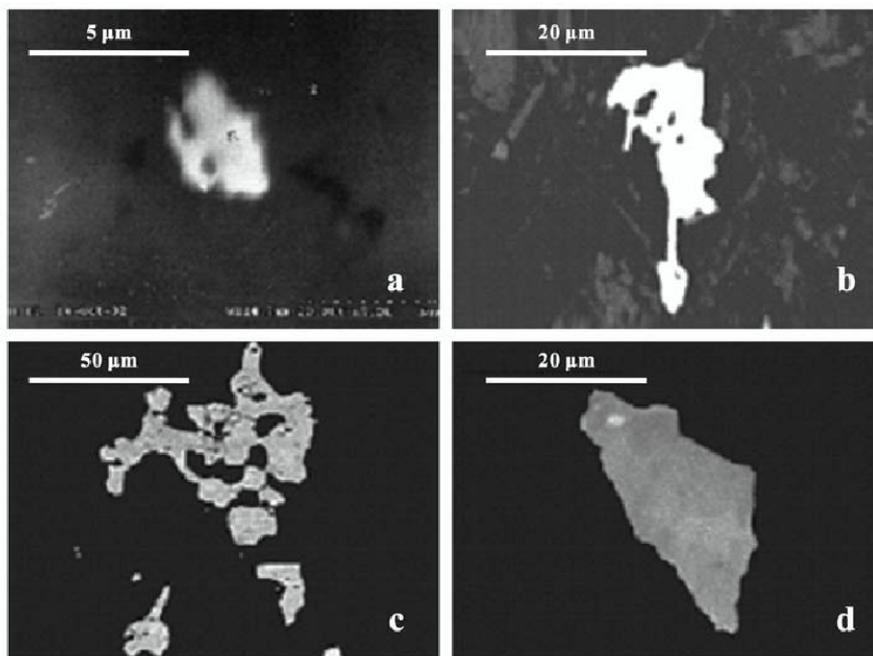


图1 独居石的电子探针背散射形态

a. 北京十三陵中元古代串岭沟组泥岩中的自生独居石(Chch-3); b. 大连震旦系十三里台组泥岩中的自生独居石(DL-417); c. 白云鄂博矿床围岩——富钾板岩中的自生独居石(B-13); d. 北京十三陵大红峪组粉砂岩中的碎屑独居石(Rc-7)。测试仪器型号:

JEOL SUPER PROBE JXA-8800A;测试人:陈振宇

Fig.1 Electron microprobe backscattered shapes of monazite

a. Authigenic monazite from mudstone in Proterozoic Chuanlingguo Formation, Beijing (Chch-3); b. Authigenic monazite from mudstone in Sinian Shisanlantai Formation, Dalian (DL-417); c. Authigenic monazite from host slate in the Bayan Obo ore deposits (B-13); d. Clastic monazite from siltstone of Dahongyu Formation, Ming Tombs, Beijing (Rc-7) (Instrument: JEOL SUPER PROBE JXA-8800A, tested by Chen Z Y)

组成(Ce, La, Nd, Th)PO₄。

大连震旦系十三里台组泥岩中的自生独居石(图1b)和内蒙古白云鄂博群板岩中的独居石(图1c)形态都极不规则,但发现于北京十三陵长城系大红峪组粉砂岩中的碎屑独居石(图1d)具有明显的颗粒破碎特征。常沟组中磷钇矿再生长在碎屑锆石之上,突破了以前关于磷钇矿只能在变质岩中产生的认识(宋天锐等,2004)。

1.2 化学成分特征

上述3种不同地点采集的样品经过电子探针波谱分析对比后,可以看出大连震旦系泥岩中的自生独居石(DL-417)与内蒙古白云鄂博群板岩中的独居石(B-13)非常类似,而与北京十三陵大红峪组的碎屑独居石(Rc-7)截然不同(表1)。

由表1看出自生独居石 $w(\text{ThO}_2)$ 1.82% ~ 2.58%,但是碎屑独居石的 $w(\text{ThO}_2)$ 则为7.44%,此外碎屑独居石中 La_2O_3 相对较高, Nd_2O_3 和 Pr_2O_3 相对较低。

2 含独居石沉积岩的岩性特征

大连十三里台组泥岩(DL-417)、内蒙古白云鄂博群富钾板岩(EK-5)和北京十三陵大红峪组粉砂岩(Da-2)都是富钾、富稀土的沉积岩。DL-417样品经偏光显微镜鉴定和X射线分析,认为其造岩矿物以绢云母化伊利石或多硅白云母为主(宋天锐等,2003b);EK-5样品是以微斜长石为主的钾长石板岩,其中含有萤石(肖荣阁等,2003a);Da-2呈碎屑结构,其所赋存的岩层为数层约5cm厚的黑板状粗粉砂岩,分选均匀,成熟度较好,岩石表面出现干裂痕,说明为浅水环境下沉积(宋天锐等,2000),岩层内部的错动构造和泄水脉是流体活动的证据。

2.1 岩石化学成分

岩石化学成分资料除包括上述DL-417、EK-5和Da-2外,还包括十三陵常州沟组富钾粉砂质泥岩(Cha-8+9)(表2)。过去对常州沟组的地质年代没

有定论,最近按碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 测年结果及其他资料,确定其形成于 17.5 ~ 18 Ga 期间(万渝生等,2003)。

由表 2 可以看出,样品 DL-417、Da-2、Cha-8 + 9 的 $w(K_2O)$ 都近 12%;EK-5 的 $w(K_2O)$ 为 8%,总体是一致的。

表 1 独居石电子探针波谱分析结果

Table 1 Comparison of monazite analyzed by electron microprobe wave

成分	$w(B) / \%$		
	自生独居石(DL-417) 震旦系,大连,~600 Ma	自生独居石(B-13) 白云鄂博群,内蒙古,~1305 Ma	碎屑独居石(Rc-7) 大红峪组,北京十三陵,~1600 Ma
La ₂ O ₃	11.09	16.81	19.92
Ce ₂ O ₃	33.03	38.28	31.92
Nd ₂ O ₃	16.04	11.53	7.55
ThO ₂	2.58	1.82	7.44
P ₂ O ₅	26.01	26.96	25.79
Y ₂ O ₃	0.67	0.32	0.82
Sm ₂ O ₃	2.57	0.29	0.56
Pr ₂ O ₃	3.17	2.30	1.17
Eu ₂ O ₃	1.18	0.46	0.53
Gd ₂ O ₃	0.14	0.10	0.91
U ₂ O ₅	0.15	0.06	0.00
PbO	1.15	0.00	0.47
SiO ₂	0.07	0.47	1.32
Al ₂ O ₃	0.00	0.07	0.10
K ₂ O	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.29	0.00	0.00
CaO	0.00	0.17	0.00
ZrO ₂	0.84	0.00	0.75
FeO	0.00	0.10	0.00
MgO	0.00	0.00	0.20
TiO ₂	0.00	0.00	0.00
MnO	0.10	0.00	0.00
SO ₂	0.10	0.13	0.00
总计	99.56	99.97	99.95

仪器型号:JEOL SUPER PROBE JXA-8800A。测试人:陈振宇。

表 2 沉积岩岩石化学成分

Table 2 Composition of sedimentary rocks

	$w(B) / \%$			
	泥岩(DL-417) 大连,震旦系,~600 Ma	富钾板岩(EK-5) 内蒙古,白云鄂博群,~1300 Ma	粉砂岩(Da-2) 十三陵,大红峪组,~1600 Ma	粉砂质泥岩(Cha-8+9) 十三陵,常州沟组,~1800 Ma
SiO ₂	61.91	55.68	66.01	64.17
Al ₂ O ₃	16.47	14.84	15.29	17.94
Fe ₂ O ₃	4.33	3.93	0.81	0.41
FeO	2.25	4.56	1.94	0.48
TiO ₂	1.06	0.13	0.36	1.26
P ₂ O ₅	0.07	0.13	0.12	0.14
CaO	0.04	1.88	0.18	0.52
MgO	0.71	3.12	1.17	0.66
K ₂ O	11.94	8.06	12.71	11.58
Na ₂ O	0.38	2.74	0.30	0.26
MnO	0.03	0.14	0.05	0.02
H ₂ O	0.88	4.60	0.50	1.58
CO ₂	0.13	-	0.28	0.44
总计	100.30	99.81	99.72	99.50
资料来源	宋天锐等,2003	肖荣阁等,2003b	宋天锐等,2000	万渝生等,2003

2.2 岩石稀土成分

本文强调稀土元素并非来自地幔,因此,岩石中的稀土元素特征是问题的关键。要讨论白云鄂博大型稀土矿床的矿源层,首先需了解稀土元素的来源。表3列出了大连、北京及白云鄂博元古宙富钾、富稀土沉积岩和蛇绿岩的稀土元素含量。

2.2.1 大连、十三陵富稀土沉积岩对比

大连震旦系十三里台组泥岩(DL-417)、北京十三陵长城系大红峪组粉砂岩(Da-2)以及常州沟组粉砂质泥岩(Cha-8+9)的 ΣREE 为 $(222 \sim 360) \times 10^{-6}$;轻重稀土含量之比值(LREE/HREE)为10~14。

2.2.2 十三陵常州沟组泥岩提纯物对比

北京十三陵常州沟组和串岭沟组中细碎屑沉积岩含轻稀土普遍异常高是一个重要特点(宋天锐等,1991)。经过对常州沟组泥岩(Chz-B-5)进行粘土提

纯($< 2 \mu\text{m}$),然后再做稀土元素全分析,发现 ΣREE 比未提纯的原岩高出很多,从平均 364×10^{-6} 增加至 519×10^{-6} ,同时可看出轻稀土元素在提纯的粘土中更富集(LREE/HREE由18.19增至26.85)。

2.2.3 大连、十三陵沉积岩与白云鄂博群富钾板岩对比

白云鄂博群富钾板岩经肖荣阁等(2003a)研究,平均 ΣREE 为 368.7×10^{-6} ,其中最高值(EK-5)为 901.1×10^{-6} (表3),是大连、北京十三陵元古宙沉积岩的3~4倍左右,而且其LREE/HREE可达44.8,也超出华北富稀土沉积岩近一倍。本文认为,这些分析数据反映了华北元古宙富钾、富稀土沉积岩可作为白云鄂博矿床的矿源层。而热源和水源不仅来自加里东期和海西期板块俯冲带的岩浆活动(曹生儒等,2002),且含矿泥岩和褐铁矿中都含有大量水分,也可以作为一种水源。

表3 沉积岩和蛇绿岩的稀土元素含量对比表

Table 3 A comparison of REE contents of sedimentary rocks and ophiolites

	$w_B/10^{-6}$					蛇绿岩	
	沉积岩			富钾板岩		蛇绿岩套玄武岩 ^①	贺根山蛇绿岩 ^②
	泥岩(DL-417) 大连,震旦系	粉砂岩(Da-2) 十三陵,大红 峪组	粉砂质泥岩 (Cha-8+9)十三 陵,常州沟组	泥岩提纯物 (Chz-B-5)十三 陵,常州沟组	(EK-5)内蒙古, 白云鄂博群	早古生代,东昆南	泥盆纪,内蒙古
La	57.22	49.18	71.2	118(84.82)	218	22.04	8.42
Ce	139.8	94.28	149	255(174.20)	436	42.25	21.01
Pr	13.05	9.84	20.8		52.9	5.67	2.46
Nd	54.21	42.95	77.3	104(78.23)	157	22.51	12.36
Sm	8.89	8.17	14.6	19.8(8.69)	15	5.01	3.7
Eu	1.99	1.60	2.79	4.02(-)	2.50	0.97	1.30
Gd	7.30	6.96	8.13	9.85(9.85)	11.60	5.21	4.39
Tb	1.29	-	1.17	1.14(-)	0.97	0.77	0.73
Dy	6.56	3.82	6.39	5.17(5.17)	4.40	5.12	3.82
Ho	1.23	0.80	1.14	-	0.37	1.09	0.92
Er	3.55	2.28	3.29	-	1.65	2.94	1.30
Tm	0.51	0.29	0.47	-	0.10	0.46	0.41
Yb	3.30	1.80	3.00	2.19(2.00)	0.54	2.74	2.30
Lu	0.46	0.22	0.45	0.30(2.00)	0.03	0.41	0.56
ΣREE	290.36	222.19	359.70	519.47(364.96)	901.10	117.19	63.68
LREE/HREE	10.10	12.75	13.96	26.85(18.19)	44.80	5.25	3.41
资料来源	宋天锐,1999	宋天锐等,2000	万渝生等,2003	宋天锐等,1991, (括号为原岩)	肖荣阁等,2003a	肖序常,1996	白文吉等,1986

注:“-”为未测。

① 肖序常,1996. 中国的蛇绿岩. 中国地质科学院(院士讲稿).

② 白文吉,李行. 1986. 内蒙古锡盟贺根山地区蛇绿岩的岩石学、矿物学和铬铁矿. 地质矿产部地质研究所,内蒙古自治区地质矿产局. 内部科研报告.

3 矿物岩石的“指纹”对比

本文引用肖序常院士^①和白文吉等^②的数据与前述富稀土岩石进行了对比(表 3),说明来自地幔的岩石中稀土元素很少,不可能成为白云鄂博稀土矿床的物质来源。东昆南蛇绿岩套中玄武岩等 11 个样品的 ΣREE 为 117.19×10^{-6} , LREE/HREE 为 5.25;内蒙古贺根山蛇绿岩套中辉石橄榄岩 ΣREE 为 63.68×10^{-6} , LREE/HREE 为 3.41。这些数值比沉积岩小一倍至近十倍。

3.1 自生与碎屑独居石稀土元素特征对比

在大连震旦系十三里台组 and 北京十三陵中元古代常州沟组和串岭沟组中都先后发现了自生独居石。根据多个单矿物 31 个测点的电子探针波谱分析结果与大红峪组中碎屑独居石比较,可以看出如下特点:自生独居石的 Ce_2O_3 含量和碎屑独居石相差不多; La_2O_3 和 ThO_2 在碎屑独居石中含量较高; Nd_2O_3 , Pr_2O_3 和 U_2O_5 在碎屑独居石中含量相对较低。

将表 1 中的 3 个独居石成分数据绘制成柱状图(图 2),从中可以看出它们的变化趋势。

3.2 不同地区沉积岩中 ΣREE 及 Ce 含量对比

中国北方包括华北和辽宁一带,其元古宙泥质岩中 ΣREE 和 Ce 含量很高(图 3),远远超过了世界

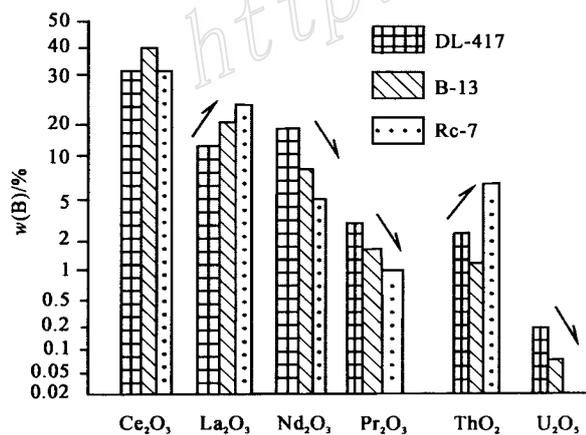


图 2 独居石成分柱状图(数据见表 1)

Fig. 2 Column shows the comparison of monazite compositions(see table 1)

公认的泥岩产地的标准,例如澳大利亚后太古代页岩(PAAS)、北美页岩(NASC)和欧洲页岩(ES)。首次发现自生独居石的震旦系十三里台组泥岩(DL-417)中, ΣREE 达 290.36×10^{-6} , w_{Ce} 达 139.50×10^{-6} , 大大高于 PAAS、NASC 和 ES 的稀土元素含量。值得指出的是北京十三陵常州沟组泥岩经过粘土提纯后,粒度 $< 2\mu\text{m}$ 的细泥中 ΣREE 达 $519.47 \times$

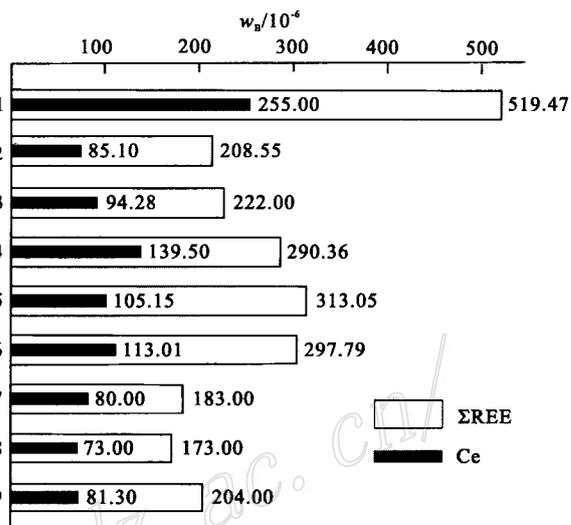


图 3 中国北方元古宙泥岩和世界标准页岩稀土元素含量对比图

1—常州沟组泥岩提纯物(粒径 $< 2\mu\text{m}$, Chz-B-5)(宋天锐等, 1991); 2—串岭沟组泥岩(宋天锐等, 1991); 3—大红峪组粉砂岩(Rc-7)(宋天锐等, 2000); 4—十三里台组泥岩(宋天锐, 1999); 5—辽南元古宙泥岩(和政军, 1988); 6—辽西元古宙泥岩(和政军, 1988); 7—澳大利亚后太古代页岩(PAAS)(Taylor et al., 1985); 8—北美页岩(NASC)(Taylor et al., 1985); 9—欧洲页岩(ES)(Taylor et al., 1985)

Fig. 3 A REE comparison of Proterozoic mudstones of north China with standard shales of the world

1—Treated clay mineral ($< 2\mu\text{m}$) from mudstone (Chz-B-5) of Changzhougou Formation, the Ming Tombs, Beijing (Song et al., 1991); 2—Mudstone of Chuanlinggou Formation, the Ming Tombs (Song et al., 1991); 3—Siltstone (Rc-7) of Dahongyu Formation (Song et al., 2000); 4—Mudstone (DL-417) of Shisanlitai Formation, Dalian (Song, 1999); 5—Average of Proterozoic mudstones in southern Liaoning Province (He, 1988); 6—Average of Proterozoic mudstones in western Liaoning Province (He, 1988); 7—Post-Archean Shales of Australia (PAAS) (Taylor et al., 1985); 8—North American Shales (NASC) (Taylor et al., 1985); 9—European Shales (ES) (Taylor et al., 1985)

① 肖序常. 1996. 中国的蛇绿岩. 中国地质科学院(院士讲稿).

② 白文吉, 李行. 1986. 内蒙古锡盟贺根山地区蛇绿岩的岩石学、矿物学和铬铁矿. 地质矿产部地质研究所, 内蒙古自治区地质矿产局. 内部科研报告.

10^{-6} , w_{Ce} 可达 255×10^{-6} , 仅 w_{Ce} 一项就超过了世界标准泥岩的 ΣREE 。此外,在辽南和辽西的元古宙泥岩中以及宣化和蓟县等地,都发现了富稀土元素的泥岩,就此本文提出了中国北方元古宙泥岩几个层位都可能包含自生独居石,不仅可做 SHRIMP U、Th-Pb 测年,而且有可能是白云鄂博稀土矿床的矿源层。

3.3 球粒陨石、蛇绿岩和沉积岩对比

有一种假说认为白云鄂博稀土矿床中的稀土元素来自地幔,事实上蛇绿岩套中的岩石被认为来自地幔,球粒陨石来自地核,但是已有数据表明后者中含稀土元素很少(肖序常,1996^①;白文吉等,1986^②;Taylor et al.,1985),特别是含轻稀土元素非常少;相反陆地沉积岩中轻稀土元素很丰富,尤其是 La-Ce 族元素。本文以 Ce 含量为纵座标, LREE/HREE 为横座标统计若干已有数据,说明球粒陨石和蛇绿岩套岩石都集中在“远陆区”(FC);而沉积岩则广泛分布在“近陆区”(NC)(图4)。值得指出的是,白云鄂博矿区已有的研究数据很有说服力,例如,碳酸盐化橄榄岩的 LREE/HREE 为 3.22, w_{Ce} 为 3.95×10^{-6} (王希斌等,2002),与球粒陨石(Taylor et al.,1985)和蛇绿岩(肖序常,1996^①;白文吉等,1986^②)甚相接近;而角砾橄榄岩的 LREE/HREE 为 9.82, w_{Ce} 为 10.56×10^{-6} (王希斌等,2002),虽然 Ce 含量稍大一些,但仍比蛇绿岩和内蒙古蛇纹岩少得多,而这一区域接近“近陆区”,可能是角砾化发生在近地壳上部。北京十三陵中元古代常州沟组、串岭沟组和大红峪组以及内蒙古白云鄂博铁矿的围岩——富钾板岩等都落入“近陆区”,甚至包括世界上公认的澳大利亚后太古代页岩(PAAS)、北美页岩(NASC)和欧洲页岩(ES)也都是“近陆区”产物,这就进一步说明了稀土元素,特别是轻稀土元素不是来自“远陆区”的地幔,而是在“近陆区”就地取材。内蒙古巨大的独居石矿床只能是取自邻近的富含钾和稀土元素的元古宙地层,事实上与白云鄂博邻近的元古宙地层中稀土矿物也是很丰富的,而且还有磷矿床为独居石矿的形成提供了足够的矿源层。

3.4 (La + Ce + Nd)-(Sm + Gd + Dy)-(Yb + Y) 三端员对比

轻、重稀土比例和 Ce 含量已经反映出了“近陆

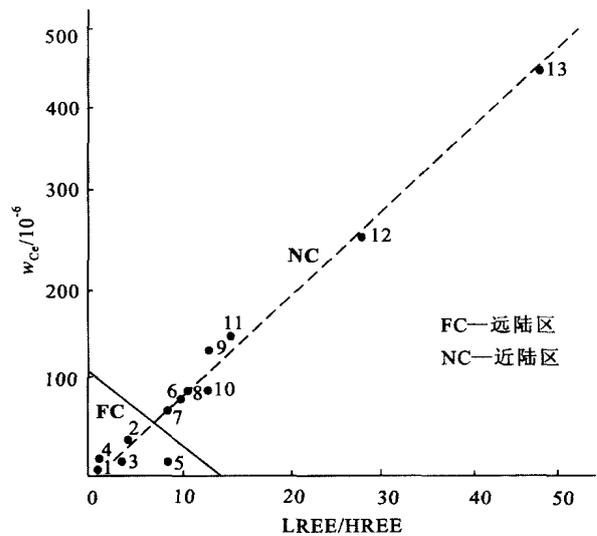


图4 “远陆区”和“近陆区”的 LREE/HREE- w_{Ce} 对比图

1—球粒陨石(Taylor et al.,1985);2—东昆南蛇绿岩套(包括火山岩)(肖序常,1996);3—内蒙古蛇纹岩(白文吉等,1986);4—白云鄂博碳酸盐化蛇纹岩(王希斌等,2002);5—白云鄂博角砾橄榄岩(王希斌等,2002);6—澳大利亚后太古代页岩(PAAS)(Taylor et al.,1985);7—北美页岩(NASC)(Taylor et al.,1985);8—欧洲页岩(ES)(Taylor et al.,1985);9—大连震旦系含自生独居石泥岩(DL-417)(宋天锐,1999);10—北京十三陵中元古代大红峪红粉砂岩(Da-2)(宋天锐等,2000);11—十三陵常州沟组泥岩(Cha-8+9)(万渝生等,2003);12—十三陵常州沟组泥岩(Chz-B-5)提纯物($< 2 \mu m$)(宋天锐等,1991);13—白云鄂博铁矿围岩——富钾板岩(EK-5)(肖荣阁等,2003a)。(数据见表3)

Fig.4 A comparison of LREE/HREE ratios and Ce contents between “far-off continent” (FC) and “near continent” (NC) 1—Chondrite (Taylor et al., 1985); 2—Ophiolites (including volcanic rocks) of south-east Kunlun (Xiao, 1966); 3—Ophiolites of Inner Mongolia (Bai, 1986); 4—Carbonatized serpentinite of Bayan Obo (Wang et al., 2000); 5—Brecciated olivinite of Bayan Obo (Wang et al., 2000); 6—PAAS (Taylor et al., 1985); 7—NASC (Taylor et al., 1985); 8—ES (Taylor et al., 1985); 9—Sinian authigenic monazite-bearing mudstone (DL-417), Dalian (Song, 1999); 10—Siltstone (Da-2) of Middle Proterozoic Dahongyu Formation, the Ming Tombs, Beijing (Song et al., 2000); 11—Mudstone (Cha-8+9) of Changzhougou Formation, the Ming Tombs, Beijing (Wan et al., 2003); 12—Treated clay ($< 2 \mu m$) mineral from mudstone (Chz-B-5) of Changzhougou Formation, the Ming Tombs, Beijing (Song et al., 1991); 13—Host rock of the Bayn Obo iron mine, K-rich slate (EK-5) (Xiao et al., 2003) (see Tables 3.)

区”和“远陆区”的某些差异,如果按照(La + Ce + Nd)-(Sm + Gd + Dy)-(Yb + Y)三端员对比(图5),

① 肖序常. 1996. 中国的蛇绿岩. 中国地质科学院(院士讲稿).

② 白文吉, 李行. 1986. 内蒙古锡盟贺根山地区蛇绿岩的岩石学、矿物学和铬铁矿. 地质矿产部地质研究所, 内蒙古自治区地质矿产局. 内部科研报告.

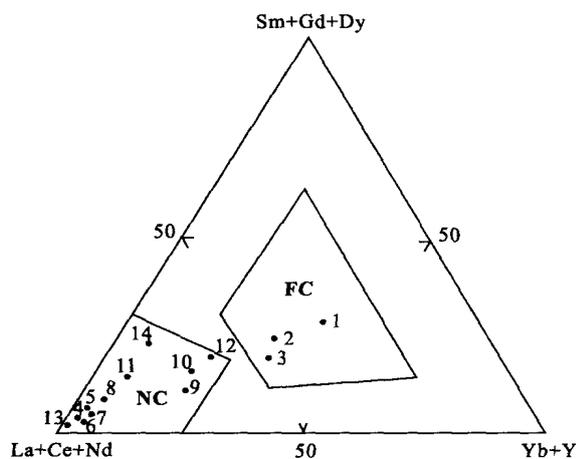


图 5 (La + Ce + Nd) - (Sm + Gd + Dy) - (Yb + Y) 三端员分布图
1—球粒陨石; 2—东昆南蛇绿岩套; 3—白云鄂博碳酸盐化蛇纹岩;
4—PAAS; 5—NASC; 6~11 为北京十三陵各组: 6—常州沟组;
7—串岭沟组; 8—杨庄组; 9—洪水庄组; 10—下马岭组; 11—长龙山组;
12—宣化铁矿化叠层石(李想, 2000); 13—白云鄂博富稀土白云岩(肖荣阁等, 2003b); 14—大连震旦系含自生独居石泥岩(DL-417)(数据参见表 3 及有关文献)

Fig. 5 Three end-members distribution diagram

1—Chondrite; 2—Ophiolite of south-east Kunlun; 3—Carbonized serpentinite of Bayan Obo; 4—PAAS; 5—NASC; 6~11: Average values of Changzhougou, Chuanlinggou, Yanzhuang, Hongshuizhuang, Xiaomaling, Changlongshan Formations, the Ming Tombs, Beijing; 12—Ferrostromatolite, Xuanhua, Hebei (Li, 2000); 13—REE-bearing dolomite, Bayan Obo, Inner Mongolia (Xiao et al., 2003); 14—Sinian mudstone (DL-417) containing authigenic monazite, Dalian (see Table 3 and related references)

“近陆区”和“远陆区”的分区性则更加明显。由图 5 可以看出:北京十三陵中元古代的常州沟组、串岭沟组等都属于“近陆区”,甚至 PAAS、NASC 都接近 La + Ce + Nd 的端点。但是白云鄂博的碳酸盐化蛇纹岩和东昆南蛇绿岩套及球粒陨石却属于“远陆区”,尤其是白云鄂博的富稀土白云岩,其中的 w_{Ce} 可达 10.914×10^{-6} ,但是在三端员图表中却落入“近陆区”。据肖荣阁等(2003b)对 6 个样品的统计,包括白云岩和凝灰白云岩在内, w_{Ce} 最高可达 16.548×10^{-6} ,说明稀土矿化过程中包含了陆壳熔化的富稀土凝灰成分。

4 白云鄂博稀土矿床成因

有关白云鄂博稀土矿床的成因存在很多争论,张宗清等(2003)已详细评说。本文新提出了以下论点供读者参考。

4.1 华北地台北部中元古代富稀土沉积岩是矿源层

华北地台北部中、新元古代沉积岩富含稀土元

素,特别是轻稀土元素大大超过克拉克值,白云鄂博富钾板岩与北京十三陵富钾沉积岩的稀土元素特征极其类似。以稀土元素 La + Ce + Nd, Sm + Ge + Dy, Yb + Y 三项指标统计,近陆源区在 La + Ce + Nd 端点趋于集中,而地幔来源物质恰恰是贫轻稀土,远离 La + Ce + Nd 端点(宋天锐等,1991)。花岗岩、辉长岩作为矿源已被否定(张宗清等,2004),因此只有富钾富稀土沉积岩可以作为矿源层。有人相信一种倍受争议的观点,即:上地幔以下有所谓的“非亏损地幔”,一种想象中的地幔柱可以把稀土和放射性元素带到地面(赵海玲,2004),事实上富含 U、Th、REE 等正是陆壳的特征。也有人认为碱性岩就是“地幔柱”,笔者等曾经在北京十三陵定陵附近采集了一个二长岩大样,做人工重砂分析,但没有找到独居石和磷钇矿。况且内蒙古地区也没有发现类似“地幔柱”的富稀土碱性岩(内蒙古自治区地质矿产局,1991),反而 REE 含量在华北富稀土沉积岩中很高。

4.2 白云鄂博稀土矿理想成矿模式

陈志勇等(2004)通过对内蒙古境内区域地质填图得出结论,认为中元古界渣尔泰群和白云鄂博群在大地构造位置上属于华北板块。曹生儒等(2002)所编“内蒙古自治区地质”(板块构造演化图)中,标示出 Pt_2 华北板块前缘包括渣尔泰山和白云鄂博,在加里东期和海西期受锡林浩特地块向南俯冲的影响,渣尔泰山和白云鄂博中元古界产生强烈褶皱并伴有大量岩浆活动,因此,白云鄂博矿床实际上是华北地台北缘大陆增生生成矿的一个例子。

本文根据季克俭等(1989)的三源成矿理论,提出白云鄂博稀土矿床的大陆增生生成矿理想模式示意图(图 6)。其成矿机理的理想步骤如下:

(1) 华北地台北缘中元古界(Pt_2)的沉积铁矿(“孪生”的宣龙式铁矿)主要由赤铁矿和部分褐铁矿(含水)组成,围岩由伊利石(含水)页岩、粉砂岩和砂岩组成,其上存在大量白云岩层,在热源作用下白云岩成为矿源层的熔剂,页岩和粉砂岩含稀土,总体构成了矿源层。

(2) 加里东和海西构造运动时期,西伯利亚板块由北向南推动,锡林浩特地块向华北板块北缘下部俯冲,大陆增生产生的岩浆活动构成了热源,华北地台北缘富含稀土的页岩、粉砂岩、沉积铁矿和白云岩形成混合熔融体,白云岩起到了熔剂的作用。

(3) 富钾、富稀土沉积岩中的分散矿物和造岩矿物产生了钾长石化(脱水伊利石),同时加入了岩

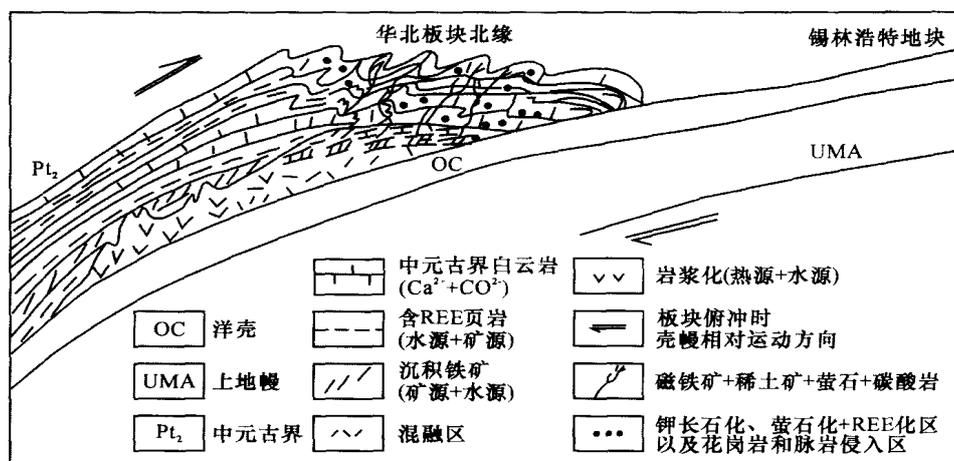


图6 白云鄂博稀土矿床的大陆增生矿理想成矿模式示意图

Fig.6 Idealized continental accretion metallogenic model for the Bayan Obo rare earth mineral deposits

浆带来的挥发性气体,尤其是氟加速了硅酸盐矿物的分解,并在围岩中(包括白云岩和富钾板岩)产生了大量萤石;同时也出现花岗岩体和火山岩脉以及碳酸岩。

(4) 在 Pt_2 岩层褶皱-断裂的过程中,富含稀土的矿物在磁铁矿矿体及围岩内集中而形成稀土矿床。也有一种观点认为是裂谷产生了岩浆白云岩(肖荣阁等,2003b),实际上也就是在受变质的白云岩层内形成了规模巨大的碳酸岩型稀土矿床。有关白云鄂博群中矿质元素的变化可参见张宗清等(2003)和肖荣阁等(2003a)的论著。

4.3 白云鄂博稀土矿床的成矿时代

张宗清等(2004)根据大量同位素分析资料对比,将白云鄂博稀土矿物的形成时代确定为(1 305 ± 78) Ma,并指出:“原划铁矿上部 H9 富钾板岩、暗色板岩、黑云母岩与矿床关系密切”,这是一个非常重要的结论,由此证明了华北元古宙富钾、富稀土沉积岩就是白云鄂博大型稀土矿床的矿源层,所测得的同位素地质年龄正是自生独居石等稀土矿物同生沉积的年龄。但是,问题在于 Pt_2 沉积时,正是华北板块—锡林浩特地块—西伯利亚板块的扩张时期,华北板块北缘没有产生大量岩浆活动的条件,即使产生少量裂谷型岩浆活动,岩浆中稀土元素也非常少(内蒙古自治区地质矿产局,1991)。因此,本文认为白云鄂博稀土矿床形成时的“三源”条件(矿源、热源、水源),只有在加里东期和海西期板块碰撞俯冲时才有可能产生。

5 讨论和存疑

5.1 讨论

华北地台北缘大型-超大型矿床的成因问题历来争论颇多,本文根据华北元古宙富钾、富稀土沉积岩比较普遍,而且其中多处发现自生独居石等资料,提出其可能为白云鄂博稀土矿床矿源层的论点。而对于华北地台北缘铁矿和铅锌矿床的成因,本文则认为其矿源都与华北中元古代地层有关。前已述及,大连十三里台组中的自生独居石是在富钾、富稀土泥岩中的赤铁矿纹层脉中首次被发现的,那么,宣龙铁矿的围岩是否也富含稀土元素呢?这里列举李想(2000)的测试资料(表4)予以说明。

由表4可以看出,宣龙铁矿层(属于中元古代串岭沟组)中的叠层石赤铁矿比其上、下层位中的叠层石富集了更大量的稀土元素,比十三陵串岭沟组富稀土沉积岩中的稀土元素含量高出一倍。虽然 LREE/HREE 值都较小,但是由(La + Ce + Nd)-(Sm + Gd + Dy)-(Yb + Y)三端员投点分析,还是可以看出它们属于近陆源的沉积物。由此推断白云鄂博一带已消融的赤铁矿层可能更加富集稀土元素,并因此导致稀土矿与富磁铁矿共生。

5.2 存疑

(1) 白云鄂博富钾岩石分布有限,仅限于小范围内,能否提供巨量矿物质,是否还有其他来源或其他成矿作用参与?

表 4 宣龙铁矿中叠层石和叠层石赤铁矿中稀土元素对比(据李想, 2000)
Table 4 Comparison of rare earth elements between stromatolite and stromatolitic hematite
in the Xuanlong iron mine (after Li, 2000)

样品	$w_B/10^{-6}$															LREE	
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Ym	Yb	Lu	Y	Σ REE	/HREE
叠层石	19.46	52.72	6.51	27.29	6.09	1.36	6.66	1.05	6.31	1.45	3.62	0.50	3.24	0.18	33.23	136.44	4.9
叠层石赤铁矿	62.13	207.48	23.83	98.07	21.83	5.23	21.10	2.35	10.88	2.03	5.18	0.71	4.32	0.59	50.16	459.73	8.8

(2) 中国元古代沉积岩普遍富钾、富稀土, 不同于一般的沉积岩, 是否此期间有特殊的沉积作用?

(3) 现代地球结构中, 稀土尤其是轻稀土是壳源元素, 不可能源于地幔, 但是元古代或地球演化初期的元素分配规律怎样, 是否可以现代的元素分配规律解决早期的元素分布问题, 尚有待探讨。

致 谢 周剑雄研究员指导电子针探分析, 季克俭教授审阅本文初稿, 肖序常院士和白文吉研究员提供了未发表的数据, 国家地质实验测试中心完成化学分析, 在此一并致谢!

References

- Bai G and Yun Z X. 1996. Investigation of geological features and origin of Baiyun Obo mineral deposits[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 36 ~ 38(in Chinese) .
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia Autonomous Region. 1991. Regional geology of Inner Mongolia Autonomous Region[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 308 ~ 643(in Chinese) .
- Cao S R, Guo X Z, Wu Z L et al. 2002. Geological map of Inner Mongolia Autonomous Region[A]. In: Ma L F, Qiao X F, Min L R, et al., ed. Atlas of the Palaeogeography of China[C]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 348(in Chinese and English) .
- Chen Z Y, Yang S S, Meng E G, et al. 2004. Revision of Precambrian stratigraphic units in the Bayan Nuru area, Alxa Zuoqi, Inner Mongolia[J]. Geol. Bull. China, 23 (4) : 345 ~ 351 (in Chinese with English abstract) .
- Drew L J, Qing R M and Wei J S. 1990. Baiyan Obo iron-rare earth-niobium deposits, Inner Mongolia, China[J]. Lithos, 26 : 43 ~ 65 .
- He Z J. 1988. REE geochemistry of middle Proterozoic-Mesozoic pelites in Liaoning Province[J]. Geochem., (2) : 129 ~ 135 (in Chinese with English abstract) .
- Hu Y Z, Deng J, Yuan N, et al. 1990. Geochemistry of the strata and the tin-metallogenic belts in Northern Guangxi[M]. Beijing: Beijing Sci. & Technol. Pub. House. 1 ~ 122(in Chinese with English abstract) .
- Ji K J, Wu X Z and Zhang G B. 1989. Ore source, water source and heat source for hydrothermal deposits and regularity of their distribution[M]. Beijing: Beijing Sci. & Technol. Pub. House. 1 ~ 131(in Chinese and English) .
- Li X. 2000. Minerogenetic process study on Xuanlong iron deposit: Ore-bearing rock series [Dissertation for Doctor degree][D]. Tutor: Ye L J. Institute of Geology and Geophysics, CAS(in Chinese with English abstract) .
- Qiao X F, Song T R, Li H B, et al. 1996. Genetic stratigraphy of the Sinian and Lower Cambrian strata in south Liaoning Province: Guide

- book of national scenic area of Jinshitan Beach[M]. Beijing: Sci. Press. 108 ~ 127(in Chinese with English abstract) .
- Qiao X F, Gao L Z, Peng Y, et al. 1997. Compositic stratigraphy of the Salinghudong Group and ore-bearing micritic mounds in the Bayan Obo deposits, Inner Mongolia, China[J]. Acta Geologica Sinica, 71 (3) : 202 ~ 211(in Chinese with English abstract) .
- Song T R, Zhao Z, Wang C Y, et al. 1991. Proterozoic sedimentary rocks in north China[M]. Beijing: Beijing Sci. & Technol. Pub. House. 1 ~ 193(in Chinese with English abstract) .
- Song T R and Qiao X F. 1992. A trace of biomineralization in the Early Cambrian of Jinxian County, Liaoning Province[J]. Mineral Deposits, 11(4) : 359 ~ 366(in Chinese with English abstract) .
- Song T R. 1999. Discovery of authigenic rare earth mineral-monazite of Dalian area and its significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 17 (Supp.) : 663 ~ 667(in Chinese with English abstract) .
- Song T R, He Z J, Ding X Z, et al. 2000. A study of event message-bearing sedimentary rocks of the Dahongyu Formation from the Ming Tombs district, Beijing area[J]. Petrologica et Mineralogica Sinica, 19 (4) : 321 ~ 332(in Chinese with English abstract) .
- Song T R, He Z Y, Wan Y S, et al. 2003a. Discovery of authigenic monazite in Precambrian sedimentary rocks and its significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 21 (1) : 118 ~ 124 (in Chinese with English abstract) .
- Song T R, Zhang Q D and Wan Y S. 2003b. A K and REE rich authigenic monazite bearing phengite mudstone[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 21(3) : 428 ~ 433(in Chinese with English abstract) .
- Song T R, Wan Y S, Chen Z Y, et al. 2004. Characteristics of REE minerals from Proterozoic sedimentary rocks of Northern China and their significance: Case studies of Beijing and Dalian areas[J]. Acta Geologica Sinica, 78(5) : 822 ~ 828(in Chinese with English abstract) .
- Taylor S R and Mellenans M. 1985. The continent crust: Its composition and evolution[M]. London: Blackwell Scientific Publication. 9 ~ 140 .
- Wan Y S, Zhang Q D and Song T R. 2003. SHRIMP ages of detrital zircons from the Changcheng system in the Ming Tombs area, Beijing: Constraints on the Protolith nature and maximum depositional age of the Mesoproterozoic cover of the North China Craton[J]. Chinese Sci. Bull., 48 (22) : 2500 ~ 2506(in Chinese) .
- Wang X B, Hao Z G, Li Z, et al. 2002. A typical alkaline rock-carbonate complex in Bayan Obo, Inner Mongolia[J]. Acta Geologica Sinica, 76 (4) : 501 ~ 524(in Chinese with English abstract) .
- Xiao R G, Shi S L, An G Y, et al. 2003a. Genetic characteristic of hydrothermal sedimentation of K-rich slate in Baiyan Obo mine, Inner Mongolia[J]. Geosci., 17(3) : 281 ~ 286(in Chinese with English abstract) .
- Xiao R G, Fei H Ci, An G Y, et al. 2003b. Lithology and genesis of dolomite in Baiyan Obo mine, Inner Mongolia[J]. Geosci., 17(3) : 287 ~ 293(in Chinese with English abstract) .
- Zhang Y X, Peng Y, Qiao X F, et al. 1998. New evidence for the ore-bearing micrite mound in the Bayan Obo deposits, Inner Mongolia,

- China[J]. Mineral Deposits, 7 (Supp.): 691 ~ 696] (in Chinese with English abstract) .
- Zhang Z Q, Yuan Z X, Tang S H, et al. 2004. Age and geochemistry of the Bayan Obo ore deposit[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 222 (in Chinese with English abstract) .
- Zhao H L, Di Y J, Liu Z W, et al. 2004. Cenozoic volcanism and mantle plume along southeast coast of China[J]. Acta Geologica Sinica, 78(6): 781 ~ 788(in Chinese with English abstract) .

附中文参考文献

- 白 鸽, 袁忠信. 1996. 白云鄂博铁矿床地质特征和成因论证[M]. 北京: 地质出版社. 36 ~ 38 .
- 曹生儒, 郭喜珠, 吴之理, 等. 2002. 内蒙古自治区地质[A]. 见: 马丽芳, 乔秀夫, 闵隆瑞, 等, 编. 中国地质图集[C]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 348 .
- 陈志勇, 杨帅师, 孟二根, 等. 2004. 内蒙古阿拉善左旗巴音诺日公地区前寒武系的厘定[J]. 地质通报, 23(4): 345 ~ 351 .
- 和政军. 1988. 辽宁中元古代-中生代泥质岩稀土元素地球化学[J]. 地球化学, (2): 129 ~ 135 .
- 胡云中, 邓 坚, 袁 宁, 等. 1990. 桂北地区地层及锡矿带地球化学[M]. 北京科学技术出版社. 1 ~ 122 .
- 季克俭, 吴学汉, 张国柄. 1989. 热液矿床的矿源、水源和热源及矿床分布规律[M]. 北京: 北京科学技术出版社. 1 ~ 131 .
- 李 想. 2000. 宣龙赤铁矿含矿岩系的成矿过程研究[博士论文] [D]. 导师: 叶连俊. 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社. 380 ~ 643 .
- 乔秀夫, 宋天锐, 李海兵, 等. 1996. 辽宁半岛南部震旦系-下寒武统成因地层——附大连金石滩海岸国家级风景区旅游导游[M]. 北京: 科学出版社. 108 ~ 127 .
- 乔秀夫, 高林志, 彭 阳, 等. 1997. 内蒙古腮林忽洞群综合地层和白云鄂博矿床富矿微晶丘[J]. 地质学报, 71(3): 202 ~ 211 .
- 宋天锐, 赵 震, 王长尧, 等. 1991. 华北元古宙沉积岩[M]. 北京: 北京科学技术出版社. 1 ~ 193 .
- 宋天锐, 乔秀夫. 1992. 辽宁金县寒武纪早期生物矿化迹象[J]. 矿床地质, 11(4): 359 ~ 366 .
- 宋天锐. 1999. 大连地区前寒武纪沉积岩中发现自生独居石及其意义[J]. 沉积学报, 17(增刊): 663 ~ 667 .
- 宋天锐, 和政军, 丁孝忠, 等. 2000. 北京十三陵元古宙大红峪组含事件信息的沉积岩[J]. 岩石矿物学杂志, 10(4): 823 ~ 832 .
- 宋天锐, 和政军, 万渝生, 等. 2003a. 前寒武纪沉积岩中自生独居石的发现及其意义[J]. 沉积学报, 21(1): 118 ~ 124 .
- 宋天锐, 张巧大, 万渝生. 2003b. 一种含自生独居石富钾、富稀土的多硅白云母泥岩[J]. 沉积学报, 21(3): 428 ~ 433 .
- 宋天锐, 万渝生, 陈振宇, 等. 2004. 中国北方元古宙沉积岩中自生稀土矿物特征及其意义——以北京、大连地区为例[J]. 地质学报, 78(5): 822 ~ 828 .
- 万渝生, 张巧大, 宋天锐. 2003. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄, 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限定[J]. 科学通报, 48(22): 2500 ~ 2506 .
- 王希斌, 郝梓国, 李 震, 等. 2002. 白云鄂博——一个典型的碱性碳酸岩杂岩的厘定[J]. 地质学报, 76(4): 501 ~ 524 .
- 肖荣阁, 史淑玲, 安国英, 等. 2003a. 内蒙古白云鄂博矿区富钾板岩的热液沉积特征[J]. 现代地质, 17(3): 281 ~ 286 .
- 肖荣阁, 黄红彩, 安国英, 等. 2003b. 内蒙古白云鄂博矿区的白云岩岩石学及其成因研究[J]. 现代地质, 17(3): 287 ~ 293 .
- 章雨旭, 彭 阳, 乔秀夫, 等. 1998. 白云鄂博富矿微晶丘的论证[J]. 矿床地质, 17(增刊): 691 ~ 696 .
- 张宗清, 袁忠信, 唐索寒, 等. 2004. 白云鄂博矿床年龄和地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 222 .
- 赵海玲, 狄水军, 振 文, 等. 2004. 东南沿海地区新生代火山作用和地幔柱[J]. 地质学报, 78(6): 781 ~ 788 .

Discussion on Proterozoic K- and REE-rich sedimentary rocks in North China as source of Bayan Obo rare earth deposits

SONG Tian-rui¹, WAN Yu-sheng¹ and CHEN Zhen-yu²

(1 Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

A new point of view is suggested in this paper which holds that the Proterozoic K- and REE-rich sedimentary rocks in North China might be the ore source of the huge Bayan Obo REE deposits in Inner Mongolia. And this can also serve as an example of continental accretion mineralization. The authors agree with Ji Kejie's "three-sources (i.e., ore source, water source and heat source) mineralization theory". A series of figures and tables given in this paper demonstrate that there exist similarities between Proterozoic sedimentary rocks in Beijing and Dalian and host rocks of the Bayan Obo REE deposits in Inner Mongolia in such aspects as monazite shapes, chemical compositions, and REE contents. Based on a comparison of chemical compositions and REE contents between Proterozoic sedimentary rocks as well as host rocks of the Bayan Obo deposits and ophiolite and chondrite, the authors consider that the Bayan Obo REE deposits must have resulted from continental accretion mineralization instead of being derived from the mantle. An idealized continental accretion mineralization model is put forward in this paper for the Bayan Obo deposits.

Key words: geology, Proterozoic, continental accretion mineralization, sedimentary rocks, ore source, REE, Bayan Obo