

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*

刘玉龙¹ 陈江峰¹ 李惠民² 钱卉¹ 肖国望³ 张台荣³

LIU YuLong¹, CHEN JiangFeng¹, LI HuiMin², Qian Hui¹, Xiao GuoWang³, Zhang TaiRong³

1. 中国科学技术大学地球物质循环实验室, 地球和空间科学学院, 230026 合肥

2. 天津地质矿产研究所, 300170 天津

3. 包头钢铁公司白云鄂博铁矿, 014000 包头

1. Earth Material Cycling Laboratory, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

3. Bayan Obo Iron Mine, Baotou Steel and Iron Co., Baotou 014000, China

2004-12-28 收稿, 2005-04-22 改回.

Liu YL, Chen JF, Li HM, Qian H, Xiao GW and Zhang TR. 2005. Single-grain U-Th-Pb-Sm-Nd dating of monazite from dolomite type ore of the Bayan Obo deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3) 881 – 888

Abstract To date monazite by combined U-Th-Pb-Sm-Nd dating technique, we used TRU Spec ion exchange resin to separate REE, U, Th, Pb and other elements, and further used anion exchange resin to purify Pb, HDEHP resin to separate and purify Sm and Nd. Sm, Nd, U and Pb concentrations were determined by the isotope dilution, while Th by ICP-MS. Isotopic ratios of Nd and Pb were measured on thermal ionization mass-spectrometer (TIMS). U-Th-Pb and Sm-Nd ages are obtained on the same sample using this method. The combined U-Th-Pb-Sm-Nd dating for 12 single grains of monazite from a dolomite type REE ore, Bayan Obo deposit, gives a Sm-Nd isochron age of 1008 ± 320 Ma and a Th-Pb isochron age of 1231 ± 200 Ma (8 grains). These two ages are similar when uncertainties are considered. These ages obtained from the same monazite samples indicate that REE mineralization might occur in the Meso-Proterozoic. The Th-Pb and Sm-Nd ages presented in this study differ significantly from the Caledonian Th-Pb ages of monazites reported formerly. This difference in dating results merits further investigation.

Key words Bayan Obo; Monazite; TRU Spec; Combined U-Th-Pb-Sm-Nd dating technique

摘要 使用交换树脂 TRU Spec 同时分离 REE、U、Th、Pb 及其他的元素, 然后用阴离子交换树脂纯化 Pb 并用萃淋树脂分离纯化 Sm 和 Nd, Sm、Nd、U 和 Pb 的定量测定借助同位素稀释法, Th 的定量测定则用 ICP-MS 分析, Nd 和 Pb 同位素组成分析用质谱法 (TIMS), 从而实现独居石 U-Th-Pb-Sm-Nd 联合定年。用这种方法可以在同一样品上, 同时得到 U-Th-Pb 和 Sm-Nd 同位素年龄记录。白云鄂博矿床白云石型稀土矿石中 12 个单颗粒独居石的 U-Th-Pb-Sm-Nd 同位素联合定年给出 Sm-Nd 等时线年龄为 1008 ± 320 Ma, 其中 8 个独居石的 Th-Pb 等时线年龄为 1231 ± 200 Ma, 此二年龄在误差范围内相似。在同一组独居石样品上得到一致的 Th-Pb 与 Sm-Nd 的中元古年龄, 表明白云鄂博在中元古代的稀土成矿作用是可能的。本文独居石的 Th-Pb 和 Sm-Nd 年龄与以前报道的独居石加里东期 Th-Pb 年龄差别很大, 此问题尚需进一步研究。

关键词 白云鄂博; 独居石; TRU Spec; U-Th-Pb-Sm-Nd 联合定年

中图法分类号 P597.3

元古代(张宗清等, 1994; 任英忱等, 1994; 张宗清等, 2001; Yuan *et al.*, 1992; 张宗清等, 2003), 中元古代有明显的岩浆活动(张宗清等, 1994; Zhai *et al.*, 2003)。然而独居石 Th-Pb 内部等时线年龄则分布在 398 ~ 555 Ma 之间(Wang *et al.*,

1 引言

在白云鄂博矿床的年代学结果中, Sm-Nd 年龄集中在中

* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(G199943201), 中国科学院合肥地区联合分析测试中心基金资助项目。

第一作者简介: 刘玉龙, 男, 1970 年生, 博士生, 地球化学专业, E-mail: ylliu@mail.ustc.edu.cn

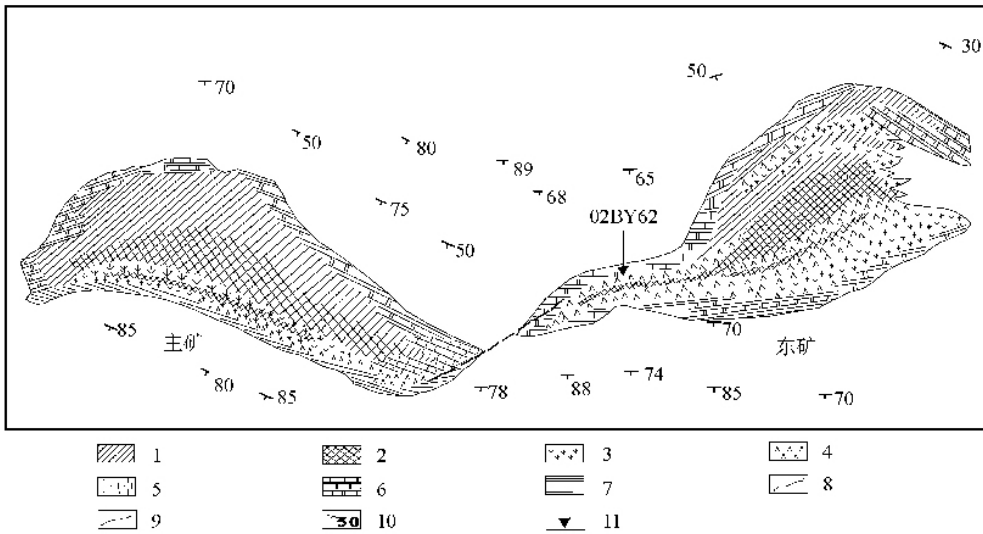


图1 白云鄂博矿区主矿和东矿地质图(引自中国科学院地球化学研究所,1988)

1. 条带状铌稀土铁矿石;2. 块状铌稀土铁矿石;3. 霓石型铌稀土铁矿石及霓石型铌稀土矿石;4. 钠闪石型铌稀土铁矿石;5. 白云石型铌稀土铁矿石;6. 白云石型铌稀土矿石;7. 云母化长石板岩;8. 矿体界限;9. 断层线;10. 产状;11. 采样点

Fig.1 Geological sketch of the main and east ore body in Bayan Obo(modified Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1998)

1. Banded Nb-REE-Fe ore, 2. Massive Nb-REE-Fe ore, 3. Aegirine Nb-REE-Fe ore and Aegirine Nb-REE ore, 4. Riebeckite Nb-REE-Fe ore, 5. Dolomite Nb-REE-Fe ore, 6. Dolomite Nb-REE ore, 7. Biotite bearing felspar-slate, 8. Boundary of ore body, 9. Fault, 10. Occurrence of the country rock, 11. Sample locality

1994;Chao *et al.*, 1997)。主矿下盘白云石型矿石中独居石 SHRIMP 分析给出 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 的平均年龄为 801Ma, $^{232}\text{Th}/^{208}\text{Pb}$ 的平均年龄为 498Ma;东部接触带独居石与之相似(裘愉卓,1997)。上述结果提示不同的同位素体系所给出的不同年龄可能记录了不同的地质事件,即 Sm-Nd 体系给出中元古代的成矿年龄,U-Pb 体系给出中-晚元古代的不完全重置年龄,而 Th-Pb 体系只保存了早古生代的扰动年龄。解决白云鄂博矿床形成年龄争论的最佳办法,是在同一样品上直接对比稀土矿物的 Sm-Nd 和 U-Pb、Th-Pb 年龄。为此,本文设计了一个实验流程,同时测定同一组独居石颗粒的 Sm-Nd 和 U-Th-Pb 年龄。

2 地质背景

白云鄂博矿床位于包头以北 150 公里,地理坐标约为 $\text{N}41^{\circ}47'50''$, $\text{E}109^{\circ}58'17''$ 。它是世界最大的轻稀土矿床,又是超大型铌矿和大型铁矿。白云鄂博矿的主采区是东矿和主矿矿段(图 1)。矿区内出露的主要地层为古元古界下白云鄂博群,是一套原岩为砂岩、粉砂岩、灰岩和白云岩组成的浅变质岩,按岩性分为 H1 至 H10 十个岩性段(中国科学院地球化学研究所,1988;王楫等,1989)。矿床主要围岩为 H8 白云石和 H9 板岩,主要稀土矿物为独居石、氟碳铈矿等,主要含铁矿物为磁铁矿和赤铁矿,主要含铌矿物为铌铁矿、

易解石等。

中国科学院地球化学研究所(1988)根据矿石的矿物共生组合和结构特征以及分布的广泛程度,将各矿段的矿石划分出九种主要的类型,即:①块状铌稀土铁矿石;②条带状铌稀土铁矿石;③霓石型铌稀土铁矿石;④钠闪石型铌稀土铁矿石;⑤白云石型铌稀土铁矿石;⑥黑云母型铌稀土铁矿石;⑦霓石型铌稀土矿石;⑧白云石型铌稀土矿石和⑨透辉石型铌矿石。其中白云石型铌稀土铁矿石是分布最广泛的矿石类型,该类型稀土矿石中大颗粒的独居石是本文的研究对象。

3 样品描述

从东矿采坑 1488 平台西端重约 200 kg 的白云石型稀土矿石(样号 02BY62)中选出独居石。重砂分离在河北省地矿局物探队中心实验室完成。矿石破碎至 80 目,用摇床分离出重砂,再经过磁选,从弱磁性部分筛选出大颗粒部分,然后在双目镜下挑出独居石。用中国科学技术大学工程科学学院扫描电镜的能谱分析其成分,以区别独居石和氟碳铈矿。电镜型号为 FEI XL30ESEM,能谱型号为 INCA。共选出 16 个独居石颗粒,图 2 为表面形态,表 1 为其中 12 个作分析样品的能谱分析结果。

由图 2 可见,独居石形态不规则,表面溶蚀明显。由表 1

表1 白云鄂博矿床独居石能谱成分分析结果

Table 1 Energy spectrometer data of monazite from the Bayan Obo deposit

样号	元素含量(wt%)															
	O	Si	Ca	Mg	Fe	Al	P	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Pb	Th	U
119	24.50	0.85	0	0	0	0	10.96	21.13	33.75	8.04	0	0	0	0.06	0.52	0.18
122	32.70	0	1.13	0	0	0	11.68	16.68	29.06	7.60	0	0	0	0.30	0.17	0.68
227	26.91	0	0.29	0	0	0.89	11.47	19.63	32.50	7.91	0	0	0	0.12	0.24	0.05
423	36.29	0	0	0	0	0	12.93	16.80	27.09	6.9	0	0	0	0	0	0.05
424	38.44	0.91	0.12	0.28	1.12	0	12.18	15.01	24.87	6.89	0	0	0	0	0.2	0.07
425	31.88	0.36	0.32	0.24	0	0	11.35	17.90	29.98	7.42	0	0	0	0.01	0.47	0.07
503	25.83	0	0	0	0	0	11.17	21.60	33.26	7.72	0	0	0	0	0.37	0.07
528	42.61	0	0	0	0	0	11.82	15.29	23.66	5.36	1.17	0	0	0	0.07	0.03
607	34.03	0	0	0	0	0.67	12.21	17.94	28.56	6.32	0	0	0	0.04	0.23	0
609	36.12	0	0	0	0	0.79	12.43	16.58	26.56	6.65	0.33	0	0	0	0.38	0.22
613	9.62	0.54	0.18	0	0	2.12	5.16	28.84	43.53	9.24	0.46	0	0	0.07	0.07	0
614	40.36	2.25	0.38	0.35	0	0.99	11.24	13.04	24.48	6.20	0.41	0	0	0	0.23	0.1

表中0处为该元素的含量未达到检出限,U、Th和Pb的含量太低,其能谱分析数据只有参考意义

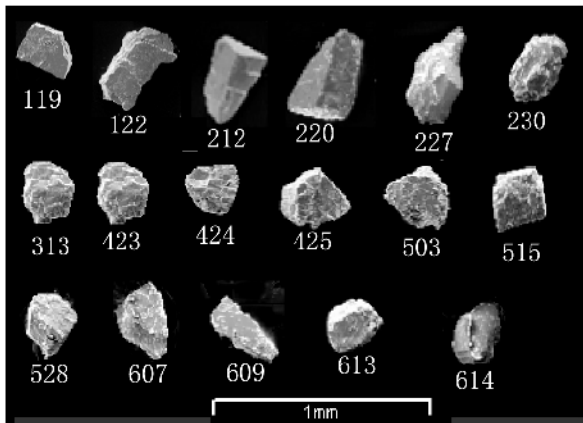


图2 白云鄂博矿床白云石型矿石中独居石形态的扫描电镜照片

Fig.2 SEM images of monazite from dolomite Nb-REE ore in the Bayan Obo ore deposit

可见613号样品的P含量低于6%,不是独居石,其它11个样品的P含量都高于10%,可确定为独居石。这12个样品进行U-Th-Pb和Sm-Nd定年。

4 独居石 Sm-Nd-U-Th-Pb 联合定年方法

4.1 原理

用专用树脂 TRU Spec(Pin *et al.*, 1994, 1997; Mellado *et al.*, 2001; Lee and Lee 2001)同时分离 REE、U、Th、Pb 及其他的元素,Sm、Nd、U、和 Pb 的浓度用同位素稀释法测定,

Nd 和 Pb 同位素组成用质谱法(TIMS)分析,由于没能得到²³⁰Th 稀释剂,Th 浓度用 ICP-MS 分析。

4.2 TRU Spec 离子交换柱的标定

交换柱内径约 3 mm,高约 30 mm,每次使用的树脂不足 0.1 g。标定 TRU Spec 的工作溶液由 Alfa 公司出品的试剂配制,其每毫升的化学组成接近(略高于)单颗粒独居石。根据 Pin *et al.*(1997)和 Huff and Huff(2003)的流程,采用 1 mol/L HNO₃ 分离 Ca、Fe、Sr、Al、Na、K、Mg、P 和 Pb 等原子序数小于镧系质量数的元素,用 4 mol/L HCl 淋洗稀土元素,用 1 mol/L HCl 淋洗 Th,用 0.1 mol/L HCl-0.1 mol/L HF 的混合酸淋洗 U。Pb、REE、Th 和 U 的淋洗曲线见图 3。

对比实验结果表明,Pb 的回收率达 85%,REE 的回收率高于 85%,Th 的回收率达到 100(±3)%,U 的回收率高于 90%,这样的结果可以满足同位素稀释法分析的要求。按上述分离流程,分离后的 La Jolla 标样的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511868,SRM981 标样的²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb = 0.058940,与推荐值一致,说明分离不影响 Nd 和 Pb 同位素组成。

4.3 单颗粒独居石的 U-Th-Pb-Sm-Nd 定年流程

在 0.3 mL Savillex 熔样坩埚中加入¹⁴⁷Sm、¹⁵⁰Nd 稀释剂和²⁰⁵Pb-²³⁵U 混合稀释剂,分别称重,80 °C 下浓缩混合稀释剂。加入二次亚沸的浓硝酸(最好再加一滴浓 HF,更容易将独居石溶解完全)至近坩埚口。在双目显微镜下将独居石颗粒放入坩埚中。将坩埚放置在电热板上,保持 80 °C 加热 48 小时溶解独居石,注意不能蒸干,不能加盖,否则会影响回收率。独居石样品溶解后,将溶液蒸至近干,转换成 1 mL

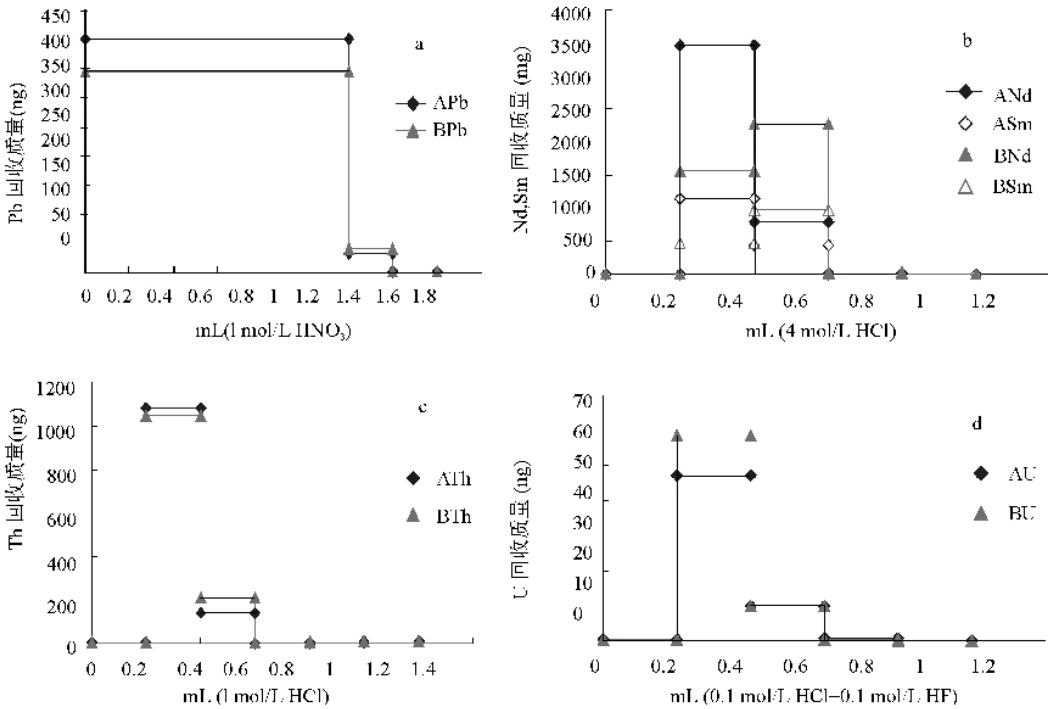


图3 TRU Spec 的淋洗曲线

a) Pb, b) Sm 和 Nd, c) Th, d) U A 和 B 分别代表两根离子交换柱

Fig. 3 Calibration of TRU Spec resin for Pb, Sm-Nd, Th and U separation

a) Pb, b) Sm 和 Nd, c) Th, d) U A and B represent two individual columns

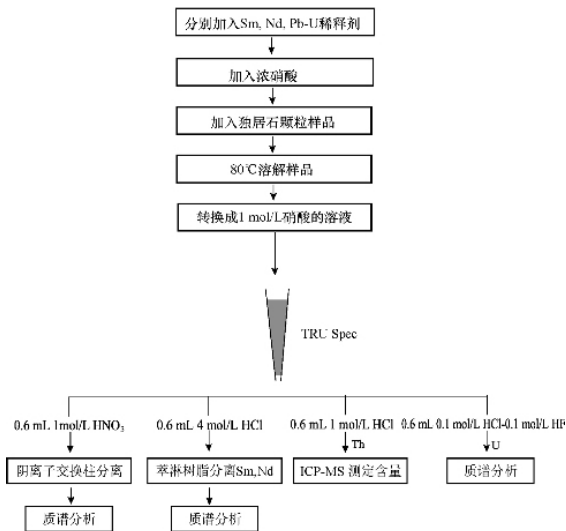


图4 独居石 U-Th-Pb-Sm-Nd 分析流程

Fig. 4 Procedure of U-Th-Pb-Sm-Nd analyses of monazite

1 mol/L HNO₃ 的溶液介质。将此溶液加入 TRU Spec 树脂柱, 用标定的流程分离 Pb、REE、Th 和 U。Pb 的淋洗液在 0.65 mol/L HBr + 1.5 mol/L HCl 介质中, 用 Cl⁻ 型阴离子交换树脂——AG 1 × 8(200-400 目) 分离 Pb。REE 的淋洗液用萃淋树脂(HDEHP)分离 Sm 和 Nd。将 U 的淋洗液蒸干。分别

用质谱计测定 U 及 Sm、Nd 和 Pb 的同位素比值。将 Th 的淋洗液定容至 10 mL 送 ICP-MS 分析 Th 的浓度。流程图见图 4。

化学分离和 Sm、Nd 含量和 Nd 同位素组成的测定在中国科学技术大学壳幔物质和环境重点实验室的 MAT 262 质谱计上完成, 由 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721900 对 Nd 同位素组成进行分馏校正, Sm 同位素的质谱分析精度好于 0.01%, Nd 的质谱分析精度好于 0.002%。U 和 Pb 的同位素组成在国土资源部天津地质矿产研究所 VG 354 质谱计上测定。U 的质谱分析精度好于 1%, Pb 的质谱分析精度好于 0.1%。Th 含量测定在中国科学技术大学结构分析重点实验室 ICP-MS(VG PQ3) 上完成, 两次重复测定的数据误差在 10% 以内。Sm 和 Nd 的全流程空白小于 100 pg, U 的全流程空白小于 16 pg, Pb 的全流程空白小于 100 pg, Th 的全流程空白低于 ICP-MS 的检出限。

5 独居石 U-Th-Pb-Sm-Nd 联合定年结果

单颗粒独居石的质量按 20 μg 估算, 对空白进行扣除后的 Sm-Nd 分析结果见表 2。12 个样品的 ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 值的范围是 0.0393 ~ 0.0475, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 值的范围是 0.511361 ~ 0.511426, 分析结果可以构成一条等时线(图 5), 年龄为 1008 ± 320 Ma, 初始 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511114 ± 0.000091, ε_{Nd}(t) = -4.3(MSWD = 0.87)。

表2 白云鄂博矿床独居石 Sm-Nd 同位素组成

Table 2 Sm-Nd data of monazite from the Bayan Obo deposit

样号	Sm(ppm)	Nd(ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	\pm
119	5815	88368	0.03977	0.511384	0.000011
122	6119	92499	0.03998	0.511361	0.000011
227	6073	93438	0.03928	0.511379	0.000012
423	3079	44128	0.04216	0.511400	0.000008
424	3030	42353	0.04323	0.511405	0.000023
425	4442	59757	0.04492	0.511424	0.000022
503	6973	90199	0.04672	0.511426	0.000008
528	7395	105835	0.04223	0.511385	0.000011
607	5863	88535	0.04002	0.511386	0.000006
609	6757	89254	0.04575	0.511413	0.000010
613	6174	78541	0.04751	0.511424	0.000007
614	6809	95734	0.04298	0.511388	0.000010

独居石 U、Th 和 Pb 的测定结果(表3)表明,U 的含量很低,为 2.6 ppm 到 23.0 ppm,Pb 的含量为 83.1 ppm 到 260.4 ppm,U/Pb 比为 0.01~0.15, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值范围为

表3 白云鄂博矿床白云石矿石独居石 U、Th 和 Pb 的含量及 Pb 同位素组成测定结果

Table 3 U, Th and Pb contents and Pb isotopic composition of monazite from the Bayan Obo deposit

样号	Pb(ppm)	\pm	U(ppm)	\pm	Th(ppm)	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	\pm	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	\pm	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	\pm	$^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$
119	125.3	3.7	6.9	0.4	1270	17.908	0.046	15.304	0.032	72.0	1.2	962
122	205.4	3.4	23.0	0.4	1218	17.566	0.025	15.200	0.025	62.72	0.49	511
227	114.7	4.11	3.6	0.4	866	17.993	0.059	15.350	0.037	86.0	2.0	809
423	83.1	3.1	3.7	0.4	218	17.842	0.061	15.224	0.036	67.5	1.5	238
424	99.0	3.1	9.0	0.4	154	17.943	0.049	15.348	0.033	53.27	0.60	122
425	260.4	3.2	18.5	0.4	1066	17.629	0.023	15.296	0.024	56.45	0.29	330
503	167.8	4.2	13.5	0.4	1288	18.176	0.049	15.365	0.031	90.6	1.5	859
528	146.7	4.6	3.8	0.4	1310	17.985	0.052	15.463	0.037	99.4	2.2	1070
607	136.8	3.2	17.4	0.6	545	17.478	0.029	14.886	0.024	56.34	0.52	319
609	245.4	3.3	2.6	0.4	1329	16.778	0.018	14.842	0.022	56.90	0.31	433
613	110.0	5.3	13.6	0.4	1370	18.57	0.11	15.294	0.044	124.6	4.8	1777
614	102.9	3.9	17.8	0.5	729	17.107	0.028	14.391	0.025	77.0	1.7	693

423、424 两个颗粒的 Th 含量太低,613 号样品不是独居石,这三个样品不参加计算。其余 9 个点中 119 号样品明显地落在相关线外,将该点去掉后的 8 个点的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 比值构成线性关系,用 ISOPLOT(Ludwig, 1994) 计算后得到等时线年龄为 1231 ± 200 Ma, 初始 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 33.7 ± 6.5 (MSWD = 5.7, 图6)。

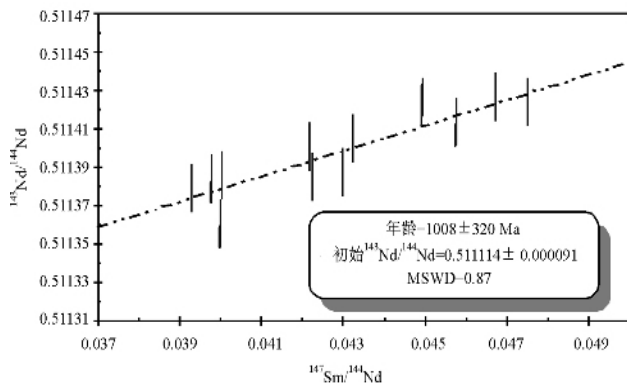


图5 白云石型矿石中独居石的 Sm-Nd 等时线

Fig. 5 Sm-Nd isochron of monazite from the dolomite type ore

16.78~18.57。Th 含量较高,为 154 ppm 到 1370 ppm, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值也较高,为 53.27 到 124.6。 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 的比值范围为 122~1777。本文的独居石的 U-Pb 数据不构成任何线性排列。由于 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的比值非常接近普通铅,独居石 U-Pb 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄没有实际意义。相比之下,高的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值使之有可能计算 Th-Pb 年龄。

6 讨论

白云鄂博矿床代表性的成矿 Sm-Nd 等时线年龄分别是 1592 ± 530 Ma、 1286 ± 91 Ma、 1313 ± 41 Ma、 1700 ± 480 Ma、 1273 ± 100 Ma、 1250 ± 210 Ma 和 1305 ± 78 Ma(Yuan *et al.* ,

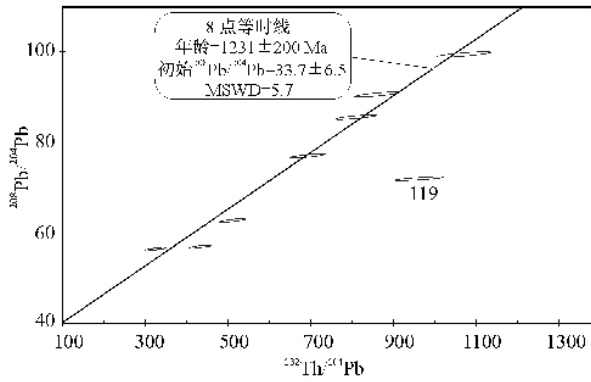


图6 白云石型矿石中独居石的Th-Pb等时线

Fig. 6 Th-Pb isochron of monazite from dolomite type ore of the Bayan Obo deposit

1992; 张宗清等, 1994; 任英忱等, 1994; 曹荣龙等, 1994; 张宗清等, 2001; 张宗清等, 2001; 张宗清等, 2003), 本文得到的Sm-Nd年龄与之基本一致。前人的等时线中全岩和矿物的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值的范围是0.0349~0.1069, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值的范围是0.511228~0.511893, 其中独居石的相应范围分别是0.02949~0.0714和0.511228~0.511893。本文独居石样品的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值范围(0.0393~0.0475)和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值范围(0.511361~0.511426)落在前人的范围内。

白云鄂博矿床的特点是轻稀土高度富集且Sm/Nd值很低(大部分样品低至0.05以下), 是导致大部分Sm-Nd定年结果误差较大、等时线的线性欠佳的原因。只有包括 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 较高的全岩和矿物(如萤石和含Nb矿物)的Sm-Nd年龄误差较小。但这些 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 高的样品是否与独居石同时形成和是否具有相同的初始比尚需验证。

Wang *et al.* (1994)和Chao *et al.* (1997)得到的白云鄂博独居石的U含量很低, 为0.1 ppm~15.1 ppm, Pb的含量为9.4 ppm~520.4 ppm, U/Pb比为0.002~0.052, 105个样品中大部分的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.457~19.214, 仅12个的比值为19.214~29.862。Th的含量较高, 为107 ppm到6164 ppm, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值也较高, 为46.135~4889。本文独居石U、Th、Pb的含量及Pb同位素比值与他们的结果有很大程度的重叠。这些分析结果表明, 白云鄂博矿床具有U含量低、U放射成因Pb很少、但Th含量和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值较高的区域地球化学特点。因此U-Pb年龄可靠性很差, 只可能进行Th-Pb体系定年。本文的独居石初始 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为33.7±6.5, 在误差范围内与Stacey and Kramers(1975)模式中1300 Ma的Pb同位素的比值($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.183$)一致。但是Wang *et al.* (1994)和Chao *et al.* (1997)的初始 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化非常大, 17条等时线的初始比的范围是16~72。

本文的独居石给出一致的中元古代Th-Pb与Sm-Nd年龄, 但是Wang *et al.* (1994)和Chao *et al.* (1997)的独居石Th-Pb年龄则为加里东期。任英忱等(1994)分析了他们的

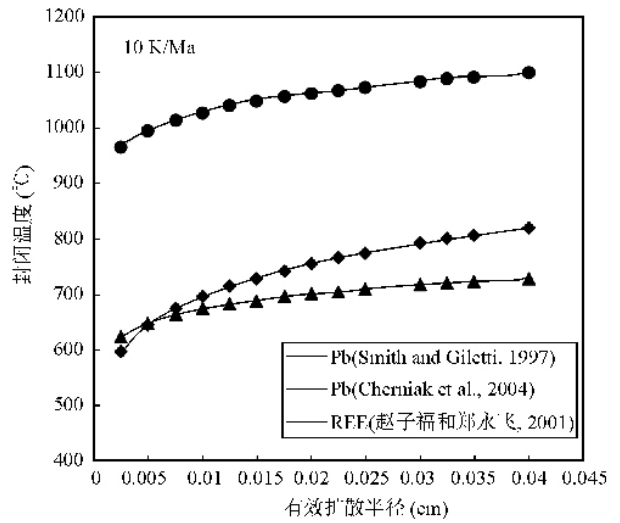


图7 Pb和REE在独居石中的封闭温度(冷却速率为-10 K/Ma)

Fig. 7 Closure temperatures of Pb and REE in monazite ($dT/dt = -10 \text{ K/Ma}$)

一个样品(8B7)的Sm-Nd同位素组成, 该样品落在 $1313 \pm 41 \text{ Ma}$ 的Sm-Nd等时线上。中国科学院地球化学研究所(1988)曾报道过一条4点独居石Th-Pb等时线, 其年龄为1683 Ma, 与本文的独居石Th-Pb年龄有所差别, 但还是中元古的年龄。综合本文和张宗清等(1994)、任英忱等(1994)及张宗清等(2001)的独居石定年结果, 可确认白云鄂博的稀土元素成矿是在中元古代。

除了分析方法不同外, 本文的独居石样品与Wang *et al.* (1994)和Chao *et al.* (1997)的也有较大差别。本文所用的独居石为单颗粒, 粒度大于 $200 \mu\text{m}$, 而Wang *et al.* (1994)和Chao *et al.* (1997)所用的独居石是集集体, 粒度为约 $50 \mu\text{m}$ 。矿物粒度是制约封闭温度的重要参数之一, 用Dodson(1973)公式计算了独居石的Pb和REE的封闭温度(设冷却速率为 -10 K/Ma), 用Smith and Gilotti(1997)的扩散系数计算的Pb封闭温度在 $600 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 以Cherniak *et al.* (2004)的参数计算的则接近 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, 用赵子福和郑永飞(2001)的参数计算的REE封闭温度在 $600 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间(图7)。总的来说, Pb的封闭温度比REE要高。在其它条件相同时, 扩散半径为0.02 cm的独居石的Pb封闭温度比0.005 cm的独居石的REE封闭温度高 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 因此Pb同位素体系重置时Sm-Nd同位素体系不能不受扰动。但Wang *et al.* (1994)和Chao *et al.* (1997)的一个给出古生代Th-Pb年龄的独居石样品落在中元古代的Sm-Nd等时线上(任英忱等, 1994), 这一观察结果与图7给出的封闭温度关系矛盾。显然封闭温度差别不足以解释观察到的细粒独居石Th-Pb年龄偏低的现象。白云鄂博矿床的成矿后热扰动事件发生在加里东期, 如钠闪石的 $^{39}\text{Ar} - ^{40}\text{Ar}$ 年龄为 $343 \sim 396 \text{ Ma}$ (Chao *et al.*, 1997), 辉钼矿的Re-Os年龄为 $439 \pm 8 \text{ Ma}$ (刘兰笙等, 1996)

及黄铁矿的 Re-Os 年龄为 439 ± 86 Ma (Liu *et al.*, 2005) 等。粗颗粒独居石发生重结晶(细粒化) 有可能使 Th-Pb 体系重置, 但这些地质作用能否使白云鄂博 Th-Pb 体系重置而 Sm-Nd 体系不受影响还难以判断。所以, Wang *et al.* (1994) 和 Chao *et al.* (1997) 的加里东期 Th-Pb 年龄的地质意义尚需进一步商榷。

7 结论

独居石 U-Th-Pb-Sm-Nd 的同时定年具有探索性。本方法的建立为深入研究白云鄂博稀土矿物成矿年代学和类似地质问题提供了新手段。对白云鄂博独居石的 U-Th-Pb-Sm-Nd 同时定年, 获得了较相似的中元古代 Th-Pb 和 Sm-Nd 年龄, 且与前人(张宗清等, 1994; 任英忱等, 1994; 张宗清等, 2001, 2003) 的 Sm-Nd 定年的结果(1286 ± 91 Ma, 1313 ± 41 Ma, 1273 ± 100 Ma, 1250 ± 210 Ma 和 1305 ± 78 Ma) 一致。前人的工作表明, 中元古代华北地块北缘经历明显沉降并接受沉积, 如什那干群(中国科学院地球化学研究所, 1988; 王楫等, 1989; 白鸽和袁忠信, 1996) 和黑脑包地区腮林忽洞组地层的沉积(高劭等, 1995; 乔秀夫等, 1997) , 这一地质事件有可能是一次地块边缘的裂谷或类裂谷活动。白云鄂博矿床的 Sm-Nd 年龄(张宗清等, 1994; 任英忱等, 1994; 张宗清等, 2001; Yuan *et al.*, 1992; 张宗清等, 2003) , 及本文独居石的 Sm-Nd 和 Th-Pb 年代学研究结果都反映了这一中元古代的稀土成矿事件。

致谢 本文得到国家重点基础研究发展规划(973) 项目(G199943201) 的资助, 分析样品的制备得到中国科学技术大学工程科学学院龚明副教授的帮助, U-Pb 同位素分析得到国土资源部天津地质矿产研究所的大力支持, 中国科学技术大学结构分析重点实验室陈树榆教授在 TRU Spec 标定过程中给予大力协助, 野外工作得到包头钢铁公司白云鄂博矿郭志亮工程师的大力协助, 在此表示真挚的感谢!

References

Bai Ge and Yuan Zhong Xin. 1996. Demonstration on the geological features and genesis of the Bayan Obo ore deposit. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 103 (in Chinese with English abstract)

Cao RL, Zhu SH and Wang JW. 1994. Source materials for the Bayan Obo Fe-REE-Nb ore deposit and problems of the genetic theory. Science in China (Series B), 24 :1298 - 1307(in Chinese)

Chao ECT, Back JM, Minkin JA, Tatsumoto M, Wang JW, Conrad JE, McKee EH, Hou ZL, Meng QR and Huang SG. 1997. The Sedimentary Carbonate-Hosted Giant Bayan Obo REE-Fe-Nb Ore Deposit of Inner Mongolia, China: A Cornerstone Example for Giant Polymetallic Ore Deposits of Hydrothermal Origin. U. S. Geological Survey Bulletin, 2143

Cherniak DJ, Watson EB, Grove M and Harrison TM. 2004. Pb diffusion in monazite: A combined RBS/SIMS study. Geochimica et Cosmochimica Acta, 68(4) :829 - 840

Dodson M. 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. Contributions to Mineralogy and Petrology, 40 : 259 - 274

Gao Mai, Qiao Xiufu, Liu Dunyi and Peng Yang. 1995. Direct determination of the Pb-Pb age of carbonate rocks of the Sailinhudong formation of Inner Mongolia. Regional Geology of China, 4 :348 - 352(in Chinese with English Abstract)

Huff E A, Huff D R. 2003. TRU Spec and RE Spec chromatography: Basic studies and applications. International report 1 - 29

Institutur de Geochemistry, Academia Sinica. 1988. The geochemistry of the Bayan Obo Ore deposit. Beijing: Science Press, 1 - 496 (in Chinese)

Lee MH and Lee CW. 2001. Radiochemical analysis of uranium isotopes in soil and sediment samples with extraction chromatography. Talanta, 54 :181 - 186

Liu LS, Gao X, Du AD and Sun YL. 1996. The Re-Os isotopic age of molybdenite from Bayan Obo REE ore deposit. Mineral Deposits, 15 (2) :188 - 191(in Chinese with English Abstract)

Liu YL, Yang G, Chen JF, Du AD, Xie Z. 2005. Re-Os dating of pyrite from Giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit. Chinese Science Bulletin, 49(24) :2627 - 2631

Ludwig K R. 1994. Isoplot—A plotting and regression program for radiogenic-isotope date. Version 2.75. U. S. Geol. Surv. Open-file Report, 91 - 445, 47pp

Mellado J, Llaurodo M, Rauret G. 2001. Determination of Pu, Am, U, Th and Sr in marine sediment by extraction chromatography. Analytica Chimica Acta, 443 :81 - 90

Pin C, Briot D, Bassin C and Poitrasson F. 1994. Concomitant separation of strontium and samarium-neodymium for isotopic analysis in silicate samples, based on specific extraction chromatography. Analytica Chimica Acta, 298 :209 - 217

Pin C and Zdzuegui JFS. 1997. Sequential separation of light rare-earth elements, thorium and uranium by miniaturized extraction chromatography: Application to isotopic analyses of silicate rocks. Analytica Chimica Acta, 339 :79 - 89

Qiao XF, Gao LZ, Peng Y and Zang YX. 1997. Composite stratigraphy of the Sailinhudong group and ore-bearing micrite mound in the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia. Acta Geologica Sinica, 71(3) : 202 - 211(in Chinese with English Abstract)

Qiu YZ. 1997. Thought of SHRIMP Dating of Bayan Obo monazite. Acta Geoscientia Sinica, 18(suppl) :211 - 213(in Chinese with English Abstract)

Ren YC, Zhang YC and Zhang ZQ. 1994. Study on heat events of ore-forming Bayan Obo deposit. Acta Geoscientia Sinica, 1 - 2 :95 - 101 (in Chinese with English abstract)

Smith HA and Giletti BJ. 1997. Lead diffusion in monazite. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61(5) :1047 - 1055

Stacey JS and Kramers JD. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. Earth and Planetary Science Letters, 26 :207 - 221

Wang J, Li SQ, Wang BL and Li JJ. 1989. The Langshang-Bayan Obo Rfrit System. Beijing: Science Press, 1 - 129 (in Chinese with English abstract)

- Wang JW, Tasumoto M, Li XB, Premo WR and Chao ECT. 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: 3155-3169
- Yuan ZX, Bai G, Wu CY, Zhang ZQ and Ye XJ. 1992. Geological features and genesis of the Bayan Obo REE ore deposit, Inner Mongolia, China. *Applied Geochemistry*, 7: 429-442
- Zhai MG, Shao JA, Hao J and Peng P. 2003. Geological signature and possible position of the north China Block in the supercontinent Rodinia. *Gondwana Research*, 6(2): 171-83
- Zhang ZQ, Tang SH, Wang JH, Yuan ZX and Bai G. 1994. New data for ore-forming age of the Bayan Obo REE ore deposit, Inner Mongolia. *Acta Geoscientia Sinica*, 1-2: 85-94 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ, Tang SH, Yuan ZX, Bai G and Wang JH. 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
- Zhang ZQ, Yuan ZX, Tang SH, Bai G and Wang JH. 2003. Age and Geochemistry of the Bayan Obo ore deposit. Beijing: Geological Publishing House, pp. 21-24
- Zhao ZF, Zheng YF. 2001. Lead, strontium and REE diffusion compensation and estimation of their diffusivity in minerals. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 69-94 (in Chinese with English abstract)
- 白鸽, 袁忠信. 1996. 白云鄂博矿床地质特征和成因论证. 北京: 地质出版社, 1-103
- 曹荣龙, 朱寿华, 王俊文. 1994. 白云鄂博铁-稀土矿床的物质来源和成因理论问题. *中国科学(B辑)*, 24(12): 1298-1307
- 高劭, 乔秀夫, 刘敦一, 彭阳. 1995. 直接测定内蒙古腮林忽洞组碳酸盐岩 Pb-Pb 同位素年龄. *中国区域地质*, 4: 348-352
- 刘兰笙, 高翔, 杜安道, 孙亚莉. 1996. 白云鄂博稀土矿床中辉钼矿的铼-钨同位素年龄. *矿床地质*, 15(2): 188-191
- 乔秀夫, 高林志, 彭阳, 章雨旭. 1997. 内蒙古腮林忽洞群综合地层和白云鄂博矿床赋矿微晶丘. *地质学报*, 71(3): 202-211
- 裘愉卓. 1997. 白云鄂博独居石 SHRIMP 定年的思考. *地球学报*, 18: 211-213
- 任英忱, 张英臣, 张宗清. 1994. 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. *地球学报*, (1-2): 95-101
- 王楫, 李双庆, 王宝良, 李家驹. 1989. 狼山-白云鄂博裂谷系. 北京: 北京大学出版社, 1-129
- 张宗清, 唐索寒, 王进辉, 袁忠信, 白鸽. 1994. 白云鄂博稀土矿床形成年龄的新数据. *地球学报*, (1-2): 85-94
- 张宗清, 唐索寒, 袁忠信, 白鸽, 王进辉. 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): 637-642
- 张宗清, 袁忠信, 唐索寒, 白鸽, 王进辉. 2003. 白云鄂博矿床年龄和地球化学. 北京: 地质出版社, 21-24
- 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, 1-496
- 赵子福, 郑永飞. 2001. Pb、Sr 和 REE 在矿物中的扩散补偿关系及其对扩散系数的预测. *岩石学报*, 17(1): 69-94

附中文参考文献

白鸽, 袁忠信. 1996. 白云鄂博矿床地质特征和成因论证. 北京: 地质