

杨波, 杨莉, 孟文祥. 电子探针技术探究钪在白云鄂博矿床不同矿物中的赋存特征[J]. 岩矿测试, 2022, 41(2): 185 - 198.

YANG Bo, YANG Li, MENG Wenxiang. Application of Electron Probe Microanalyzer in Exploring the Occurrence Characteristics of Scandium in Different Minerals of the Bayan Obo Deposit[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(2): 185 - 198.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202110140150】

电子探针技术探究钪在白云鄂博矿床不同矿物中的赋存特征

杨波, 杨莉, 孟文祥

(包钢集团矿山研究院, 内蒙古 包头 014030)

摘要: 随着对钪资源需求的不断增加, 世界各国近年陆续开展钪成矿机理研究及找矿工作, 核心内容之一是厘清钪的赋存特征。据前人研究, 各类钪矿床中钪主要以类质同象、离子吸附形式存在, 目前发现的含钪矿物种类已逾 800 种。对于白云鄂博矿床, 钪资源储量较大, 无独立钪矿物产出, 钪以类质同象形式进入其他矿物, 分布分散、含量低。囿于测试技术及取样限制, 目前尚无利用精确定量技术系统探究钪在白云鄂博矿床不同矿物中赋存特征, 因而主要富钪矿物查明程度不够, 难以进一步探讨钪在矿床中富集机制, 亦不利于下一步钪资源的利用和勘查找矿。为了解决这一问题, 本文利用电子探针技术, 对白云鄂博矿床 34 种矿物进行系统测定。测试结果表明, 6 种矿物中钪(Sc_2O_3) 平均含量大于 0.100%, 从高到低为铈钪矿(2.485%)、铈铁矿(1.263%)、铈锰矿(0.251%)、黑紫色萤石(0.181%)、方钪石(0.145%)、富钪易解石(0.124%), 其中铈钪矿是各矿物中单点钪含量最高的矿物(3.093%); 16 种矿物中钪含量介于 0.004% ~ 0.067%, 分别为褐钪铈矿(0.067%)、碱性角闪石(0.062%)、铁钪石(0.060%)、黄绿石(0.049%)、铈钙矿(0.031%)、氟碳铈矿(0.028%)、磷灰石(0.028%)、铈硅磷灰石(0.025%)、独居石(0.023%)、霓石(0.02%)、黑云母(0.019%)、硅镁石(0.011%)、褐钪铈矿(0.008%)、钾长石(0.007%)、磁铁矿(0.005%)、钠长石(0.004%); 12 种矿物未检出钪。通过分析发现: ①本次研究矿区钪含量最高的矿物为铈钪矿, 主要 6 种富钪矿物为铈钪矿、铈铁矿、铈锰矿、黑紫色萤石、方钪石、富钪易解石; ②34 种矿物中, 22 种矿物钪含量高于电子探针检出限, 钪呈稀疏分布; ③钪的赋存与铈、钇及钪有关, 钪与铈、钇、钪的相关系数分别为 0.869、0.835、0.720。主要分布在铈、铁、钪稀有氧化物、黑紫色萤石、铈钪酸盐的复杂氧化物和链状硅酸盐中, 进入矿物时与矿物晶体结构可能有相关性; ④钪与铈铁矿、铈钙矿、铈锰矿、富钪易解石等铈矿物关系密切, 可考虑将钪资源与铈资源同时综合利用。

关键词: 电子探针; 白云鄂博; 钪; 赋存特征; 综合利用

要点:

- (1) 利用电子探针技术系统测定白云鄂博矿床 34 种矿物中钪含量。
- (2) 白云鄂博矿床主要富钪矿物为铈钪矿、铈铁矿、铈锰矿、黑紫色萤石、方钪石、富钪易解石。
- (3) 白云鄂博矿床中的钪资源与铈资源进可考虑同时综合利用。

中图分类号: P57

文献标识码: A

钪元素是最轻的过渡金属元素, 广泛应用于军工、航天、集成电路、半导体等关键领域^[1-3]。世界各国对钪资源格外青睐, 陆续将其列入本国关键矿产, 中国也将钪收入国家战略性矿产资源名录^[4-5]。

钪在地壳中丰度值约为 22×10^{-6} ^[6], 全球钪资源储量约 2×10^6 t(Sc_2O_3), 分布在独联体国家、美国、中国、马达加斯加、挪威、澳大利亚等地^[7-8]。其中中国钪资源储量约占全球三分之一, 居世界首位^[7-8]。

收稿日期: 2021-10-14; 修回日期: 2021-11-09; 接受日期: 2021-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41802029)

作者简介: 杨波, 硕士, 工程师, 地质学专业。E-mail: yangbocugb@163.com。

钪的富集成矿与内生成矿作用和外生成矿作用密切相关。内生成矿主要形成与岩浆和热液有关的花岗伟晶岩型、基性-超基性岩型、碱性-超基性岩型、碳酸岩型、矽卡岩型等类型矿床;外生成矿主要形成沉积型和风化淋滤型矿床^[4,7-10]。在不同类型矿床中,钪的赋存形式各不相同,总体是以独立矿物、类质同象、离子吸附的形式赋存^[8-10]。自然界中钪的独立矿物主要为钪钇石、硅钪钇矿、硅磷钪石、钠钪辉石等少数10余种,但含钪的矿物达800余种^[4],以类质同象赋存形式较为普遍,广泛存在于稀土矿物、硅酸盐矿物、铁矿物、磷灰石中^[4,7-10]。开展钪赋存特征研究,有利于确定主要工艺矿物,更好地利用钪资源,也有利于总结钪在成矿过程中的地球化学行为、分布规律,进而探讨钪富集成矿机制,推进勘查找矿。

近些年,学者们对钪资源日益重视,相应赋存特征及机理的研究也陆续开展。肖军辉等^[11]利用化学分析、电子探针(EPMA)、显微镜、能谱(EDS)等手段对中国川西含钪稀土矿钪的赋存状态进行研究,发现矿床中无独立钪矿物,磁铁矿中 Sc_2O_3 含量为0.00324%,角闪石中 Sc_2O_3 含量为0.031%,斜长石中 Sc_2O_3 含量仅为0.005%,透辉石中 Sc_2O_3 含量为0.021%,氟磷灰石中 Sc_2O_3 含量为0.152%;黏土矿物泥质中 Sc_2O_3 含量为0.098%。认为矿区64.25%的钪以离子吸附形式分布于黏土矿物,类质同象形式分布的钪以角闪石为主。郭彩莲等^[12]利用显微镜、工艺矿物学参数自动测试系统(MLA)、EPMA、化学分析等手段对陕西省洋县毕机沟钒钛磁铁矿的钪赋存状态进行研究。矿床中同样无独立钪矿物,辉石中 Sc_2O_3 含量为0.021%,角闪石中 Sc_2O_3 含量为0.027%,阳起石-纤闪石中 Sc_2O_3 含量为0.016%,磁铁矿中 Sc_2O_3 含量为0.002%,钛铁矿中 Sc_2O_3 含量为0.004%,认为钪主要以类质同象形式分布于普通辉石和闪石为主的非金属矿物中,分布率占84.36%。

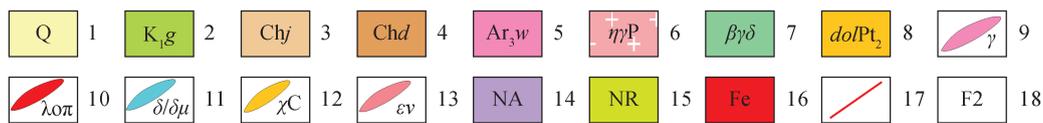
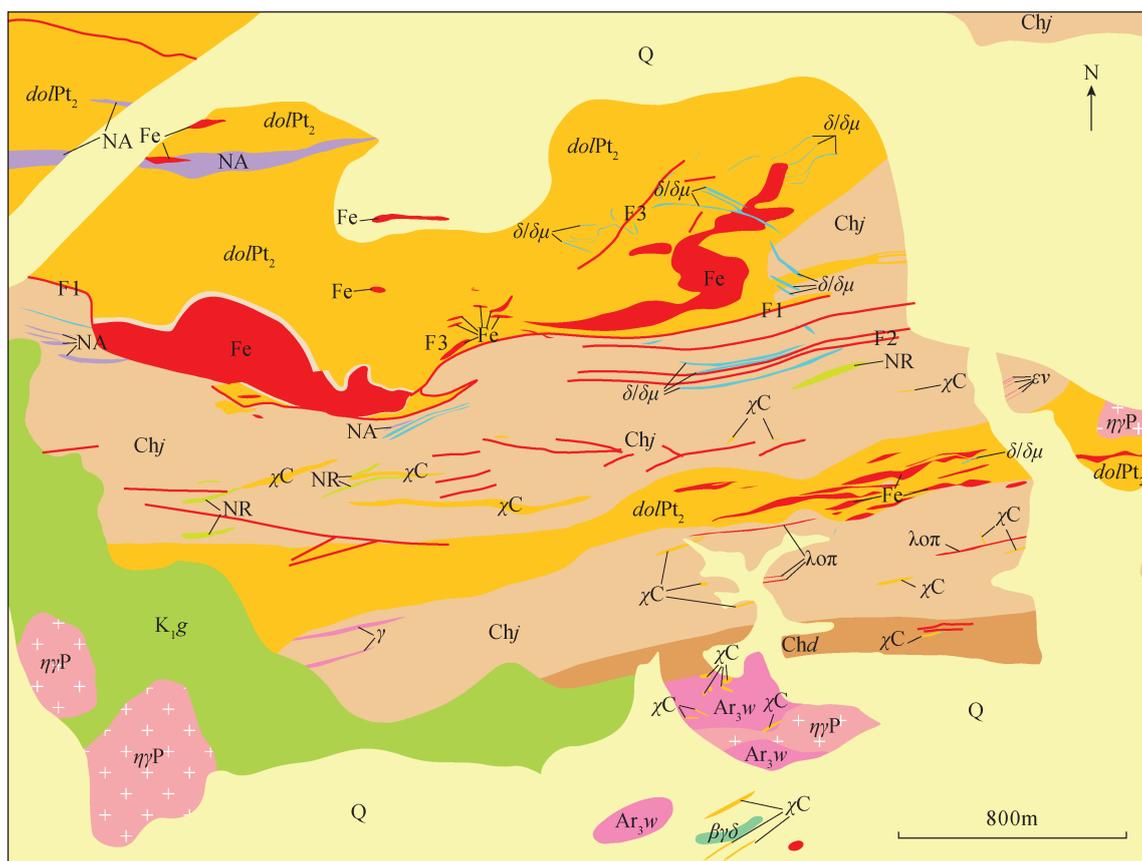
自2013年起,中国钪产量已不能满足国内需求。面对这种情况,中国应在利用国外钪资源的同时提升国内钪资源利用程度,保证国民经济健康发展^[4]。白云鄂博矿床素以稀土闻名,并以利用镧、铈、镨、钕等元素为主。矿床中钪资源储量较大,平均品位低^[13]。一直以来钪作为伴生资源利用,但开发程度较低^[13-15],主要原因就是矿床中钪赋存特征不明。目前,白云鄂博矿床钪赋存特征研究的主要成果集中于20世纪80年代^[16-18]。梁有彬^[16]、

赵长有^[17]认为矿床中钪以类质同象形式进入不同矿物,含钪最高的矿物为硅钪钇石(Sc_2O_3 含量为2.1%);金属矿物中含钪最高者为铈铁金红石(Sc_2O_3 含量为0.154%);钠闪石、霓石、金云母、稀土矿物、磁铁矿、赤铁矿、碳酸盐矿物也含微量钪^[16-19]。可见矿物中钪含量很低,需要采用精确的分析手段来进行测试。近些年随着EPMA技术的不断进步,科研人员可以对样品进行更为精确、微区的定量分析^[20-24],该技术非常适合寻找关键金属元素的赋存矿物以及分析其赋存形式^[21]。王芳等^[22]利用EPMA对某矿床元铈、稀土元素赋存状态进行研究,查明铈主要赋存于铈铁矿和含铈金红石(Nb_2O_5 平均含量分别为78.26%、5.26%)中;氟碳铈矿稀土总量(REO)平均为70.61%,氟碳钙铈矿稀土总量(REO)平均为57.52%,独居石稀土总量(REO)平均为64.84%。万建军等^[24]利用EPMA准确测定了陕西华阳川铈稀有多金属矿床中褐帘石、磷铈镧矿、磷钇矿、氟碳铈镧矿、褐钇铈矿等5种稀土矿物的化学组成。Shimazaki等^[19]利用EPMA对白云鄂博矿床霓石、钛硅铈矿、铈铁矿三种矿物中的钪进行分析,测得霓石中 Sc_2O_3 平均含量为0.02%,钛硅铈矿中 Sc_2O_3 平均含量为3.26%,两件不同样品铈铁矿中 Sc_2O_3 平均含量分别为0.22%和0.67%,其中钛硅铈矿单点最高含量为3.64%。为了进一步探究钪在白云鄂博矿床不同矿物中的赋存特征,总结钪的地球化学行为及成矿机理,同时明确主要含钪矿物的共生矿物组合、嵌布关系,亟需利用传统岩矿鉴定方法结合精确定量手段开展系统性研究。因而,本文通过系统采集白云鄂博矿床不同矿物,经显微镜鉴定后圈定测试区域,使用EPMA手段来测定不同矿物中钪含量,进而探讨钪在白云鄂博矿床各矿物中的赋存特征。

1 矿床地质特征

白云鄂博矿床南距内蒙古包头市150km。图1为矿床主、东矿区地质简图,从大地构造位置来看,矿床位于华北克拉通北缘,北靠兴安造山带,属不同大地构造单元结合处^[25-31]。矿区出露新太古界、中新元古界、新生界的地层,其中中新元古界的白云鄂博群(下部)为矿区最主要出露地层。矿区内广泛发育褶皱和断裂构造,同时发育较多侵入岩(图1)。白云鄂博矿区从西到东主要划分西矿、主矿、东矿、东介勒格勒及东部接触带等矿体。

通过对矿区外围各类岩石的光谱半定量分析,



1—第四系; 2—白垩系固阳组; 3—长城系尖山组; 4—长城系都拉哈组; 5—新太古界乌拉山群; 6—二叠纪二长花岗岩; 7—黑云母花岗闪长岩; 8—中元古代白云石碳酸岩; 9—花岗岩脉; 10—石英斑岩脉; 11—闪长岩/闪长玢岩脉; 12—碳酸岩脉; 13—碱性岩脉; 14—钠闪石岩脉; 15—钠辉石、钠闪石碱性岩脉; 16—铁矿化体; 17—实测或推测性质不明断层; 18—断层序号。

图 1 白云鄂博主、东矿区地质及构造分布图(据文献[27]修改)

Fig. 1 Geological and structural map of the main and east orebodies in the Bayan Obo deposit (Modified after Reference [27])

钕分布无明显异常^[18]。矿区岩石、矿石中 Sc₂O₃ 含量变化范围为 10 × 10⁻⁶ ~ 200 × 10⁻⁶, 多数在 50 × 10⁻⁶ ~ 150 × 10⁻⁶ 之间, 相比于地壳, 钕富集系数为 3 ~ 10^[18]。所有矿区内各类矿石中 Sc₂O₃ 的算术平均值为 85 × 10⁻⁶, 大约是克拉克值的 4 倍。相比于矿区中的铈和其他稀土元素, 钕的富集程度显得更为微弱^[18]。不过钕的富集可能与铈和稀土的矿化有一定关系, 如在主矿下盘白云岩中, 从远矿到近矿, 钕与稀土、铈均表现为越来越富集^[18]。

2 实验部分

2.1 样品采集与制备

从白云鄂博矿床西矿、主矿、东矿、东部接触带采集岩石样品, 在河北省区域地质矿产调查研究所

所进行切片及探针片制备工作, 切片方向主要以切到尽可能多矿物的方向为主, 再利用显微镜对探针片进行岩矿鉴定。按照矿物学分类, 整理出白云鄂博常见 13 类矿物, 在显微镜下用导电碳笔圈出各类矿物中的常见矿物。优先选择颗粒较大、结晶较好的矿物颗粒, 总计圈出不同矿物 34 种。利用高温喷碳仪对探针片进行喷碳处理, 保证样品表面镀碳均匀且导电性良好。

2.2 仪器及工作条件

EPMA 测试工作在中国地质科学院矿产资源研究所和河北省区域地质矿产调查研究所共同完成。

中国地质科学院矿产资源研究所 EPMA 仪器型号为 JXA - iHP200F (日本电子), 束流稳定度为 ±0.5 × 10⁻³/h、±3 × 10⁻³/12h。分光晶体为自动交换, 交换时间少于 1.5s, 晶体可在谱仪扫描区间

任何位置交换,交换后无需重新聚焦,光学显微镜分辨率为 $1\mu\text{m}$ 。真空系统为磁悬浮分子泵抽气系统,样品室极限真空度好于 $8 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 。测试时加速电压 15kV ,束流 $2 \times 10^{-8}\text{A}$,采用点分析。

河北省区域地质矿产调查研究所 EPMA 仪器型号为 JEOL EPMA 8230 (日本电子),加速电压 15kV ,束流 $2 \times 10^{-8}\text{A}$,束斑直径 $5\mu\text{m}$,所用标准样品为美国 SPI 矿物标样。

3 结果与讨论

3.1 不同矿物中钪赋存特征

考虑到钪在白云鄂博矿区不同矿物大类、不同

矿物种中可能有不同的赋存特征^[16-19],以不同矿物中 Sc_2O_3 平均含量,按照矿物学分类制作表1。分别对各种矿物进行测定,统计同一种矿物中及同一矿物大类中钪的平均含量,将测试及统计结果列入表1。同时,为直观地表现矿床不同矿物中钪含量相对大小,绘制柱状图如图2所示。从图中明显看出钪在34种矿物中总体含量很低,铈钪矿、铈铁矿、铈锰矿、黑紫色萤石、方钍石、富钪易解石等6种矿物钪含量较高(Sc_2O_3 含量 $>0.100\%$)。这6种相对富钪矿物的 EPMA 测试结果列于表2。

从表1、表2测试结果可以看出,本次工作中各矿物中钪平均含量最高为2.485%,单点最高含量

表1 不同矿物中 Sc_2O_3 平均含量

Table 1 Average content of Sc_2O_3 in different minerals

矿物种类	序号	矿物名称	采样位置	测试点数量 (个)	Sc_2O_3 平均含量 (%)	同一矿物大类中 Sc_2O_3 平均含量
卤化物	1	黑紫色萤石	主矿	7	0.181	0.181
铁、锰氧化物	2	磁铁矿	东矿	3	0.005	0.001
	3	赤铁矿	主矿	3	ND	
	4	钛铁矿	主矿	3	ND	
	5	红钛锰矿	主矿	3	ND	
普通氧化物	6	金红石	主矿	3	ND	ND
	7	石英	西矿	3	ND	
铈铁钍稀有氧化物	8	方钍石	东部接触带	3	0.145	1.036
	9	铈铁矿	主矿	5	1.263	
	10	铈钪矿	主矿	3	2.485	
	11	铈锰矿	主矿	5	0.251	
钛铈酸盐的 复杂氧化物	12	褐钪铈矿	东矿	4	0.067	0.047
	13	褐钪铈矿	东矿	7	0.008	
	14	易解石	主矿	9	ND	
	15	富钪易解石	主矿	3	0.124	
	16	铈钙矿	东部接触带	6	0.031	
	17	黄绿石	东部接触带	4	0.049	
氟碳酸盐	18	氟碳铈矿	主矿	9	0.028	0.014
	19	氟碳钙铈矿	主矿	3	ND	
磷酸盐	20	独居石	主矿	10	0.023	0.025
	21	磷灰石	主矿	6	0.028	
	22	铈硅磷灰石	东矿	15	0.025	
岛状硅酸盐	23	铁钍石	主矿	3	0.060	0.024
	24	硅镁石	东部接触带	10	0.011	
	25	楣石	东部接触带	4	ND	
硅氧四面体 硅酸盐	26	钼铁钛石	西矿	4	ND	ND
	27	硅钛铈矿	主矿	4	ND	ND
	28	褐帘石	主矿	4	ND	ND
环状硅酸盐	29	包头矿	西矿	4	ND	ND
链状硅酸盐	30	霓石	主矿	7	0.020	0.041
	31	碱性角闪石	东矿	4	0.062	
层状硅酸盐	32	黑云母	主矿	5	0.019	0.019
架状硅酸盐	33	钾长石	东部接触带	3	0.007	0.006
	34	钠长石	东部接触带	3	0.004	

注:表中“ND”表示未检出。

表 2 6 种主要富钪矿物 EPMA 测试结果
Table 2 EPMA data of six minerals riched in Sc

元素	钆钽矿 (%)	铁铁矿 (%)	钽铁矿 (%)	铈锰矿 (%)	黑色萤石 (%)	方钍石 (%)	富钆易解石 (%)																				
Sc ₂ O ₃	3.093	2.158	2.205	1.696	1.614	1.471	1.443	0.089	0.145	0.193	0.187	0.235	0.496	0.294	0.271	0.053	0.307	0.289	0.043	0.011	0.195	0.173	0.067	0.110	0.116	0.147	
F	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46.508	47.021	47.833	47.046	48.334	48.121	47.950	0.061	0.011	0.152	ND	ND	ND	0.002
SnO	ND	ND	ND	0.035	0.012	0.022	ND	1.985	ND	ND	ND	ND	ND	0.266	0.101	0.088	0.051	0.155	0.222	0.176	ND	ND	ND*	ND	0.026	ND	
SiO ₂	0.095	0.178	0.394	1.335	1.282	1.032	1.377	1.058	0.025	0.027	0.016	0.030	0.030	0.033	0.010	0.012	ND	ND	ND	ND	0.032	0.017	0.027	5.475	5.316	3.139	
Al ₂ O ₃	ND	ND	ND	0.166	0.277	0.395	0.167	0.015	ND	0.011	ND	ND	ND	0.006	0.021	ND	0.05	0.022	0.024	ND	0.057	0.101	0.077	ND	ND	ND	
La ₂ O ₃	0.103	0.063	ND	0.079	0.053	ND	0.043	0.744	ND	ND	ND	ND	ND	67.641	69.074	68.337	68.08	67.907	68.621	69.336	ND	0.023	0.055	3.618	3.417	3.607	
CaO	0.573	0.642	0.912	1.816	1.647	0.928	1.413	1.383	0.058	0.070	0.037	0.113	0.057	0.869	0.175	0.088	0.069	0.079	0.097	0.064	0.016	ND	ND	ND	4.644	4.808	4.597
Y ₂ O ₃	12.587	13.778	12.102	4.107	2.418	4.322	4.703	0.059	0.665	0.614	0.285	0.314	0.480	0.029	0.042	0.012	0.009	0.036	0.017	0.012	0.019	0.007	0.046	0.233	0.198	0.234	
P ₂ O ₅	0.031	0.036	0.079	0.130	0.105	0.207	0.079	0.011	ND	0.013	ND	ND	ND	0.022	ND	0.052	ND	ND	ND	ND	0.053	ND	-	0.826	0.555	0.797	
Eu ₂ O ₃	0.466	0.073	0.255	0.575	0.196	0.398	0.514	0.212	0.585	0.403	0.494	0.468	0.435	0.089	0.014	ND	ND	0.004	0.068	0.016	ND	ND	ND	3.698	4.542	3.858	
Dy ₂ O ₃	ND	ND	ND	1.885	1.376	1.607	1.787	1.203	ND	ND	ND	ND	ND	0.025	ND	0.052	ND	0.011	ND	ND	ND	ND	-	0.176	0.857	0.723	
Er ₂ O ₃	0.769	0.844	0.782	0.422	0.289	0.428	0.485	ND	ND	0.178	0.104	0.031	0.155	ND	0.005	ND	25.795	31.437	38.709								
Nb ₂ O ₅	55.088	57.545	59.185	59.065	59.477	57.858	57.995	67.419	76.193	75.348	75.776	75.768	76.076	0.005	0.001	ND	ND	ND	ND	0.027	ND	0.023	0.059	-	2.566	0.096	0.026
K ₂ O	-	ND	0.002	ND	0.033	0.022	0.012	0.008	0.019	0.005	0.001	0.011	0.023	0.406	0.624	ND	0.224	ND	ND	0.027	ND	ND	ND	0.568	0.554	0.330	
BaO	0.811	0.604	0.761	1.151	1.312	0.913	1.034	0.575	0.097	0.030	0.469	0.329	0.109	0.978	0.200	ND	0.158	0.031	ND	0.003	0.461	0.865	0.578	4.532	2.763	7.801	
Ce ₂ O ₃	0.854	0.457	0.446	0.766	0.678	1.123	1.397	2.302	0.319	0.319	ND	0.088	ND	0.285	0.168	0.091	ND	0.013	0.051	0.245	0.350	0.175	-	0.083	ND	ND	
Tb ₂ O ₃	ND	ND	ND	ND	0.047	ND	0.012	ND	ND	0.012	ND	ND	0.058	0.016	0.023	0.110	0.106	ND	0.058	0.010	0.008	ND	ND	4.928	5.598	4.207	
FeO	11.094	12.145	12.006	15.200	15.557	19.306	17.114	6.153	5.686	6.404	8.509	4.910	5.914	0.015	ND	ND	ND	0.018	0.018	0.026	ND	ND	-	0.055	0.109	0.152	
MnO	0.094	0.143	0.274	1.174	1.426	0.694	0.845	3.390	13.639	13.309	11.545	15.717	13.364	ND	0.083	ND	0.071	0.035	ND	ND	ND	ND	-	17.029	17.529	13.936	
TiO ₂	1.974	1.307	1.601	2.510	2.105	1.418	1.601	0.648	1.902	2.094	1.938	0.935	1.480	ND	0.066	ND	ND	ND	0.087	ND	0.021	0.159	-	0.344	0.852	0.496	
Lu ₂ O ₃	0.495	0.434	0.182	0.086	0.238	ND	0.158	ND	0.059	ND	0.118	ND	ND	0.108	0.094	0.087	0.058	ND	ND	ND	ND	ND	-	0.387	0.387	0.246	
Yb ₂ O ₃	0.100	0.206	0.142	ND	ND	ND	0.013	ND	ND	ND	ND	0.182	ND	0.008	ND	ND	ND	0.008	ND	ND	ND	ND	-	0.816	1.021	1.006	
Ho ₂ O ₃	1.102	1.249	0.841	0.270	0.021	0.261	0.417	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.242	0.014	ND	ND	0.049	ND	0.016	ND	ND	-	ND	ND	ND	
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ND	0.019	0.009	0.033	ND	ND	0.020	ND	ND	-	0.037	0.04	0.004	
MgO	ND	ND	ND	0.145	0.224	0.06	0.096	3.467	0.385	0.453	0.562	0.411	0.332	ND	0.006	ND	-	0.172	ND	ND							
Tm ₂ O ₃	0.084	0	0.087	ND	0.106	ND	ND	ND	ND	0.104	ND	0.098	0.059	0.056	-	0.913	0.972	2.478									
Nd ₂ O ₃	1.361	0.579	0.566	ND	ND	0.169	0.039	ND	0.047	0.033	0.031	ND	ND	0.161	ND	0.081	0.166	0.098	0.305								
Pr ₂ O ₃	0.105	0.086	0.119	ND	0.059	ND	ND	0.219	ND	ND	0.053	0.054	ND	ND	0.032	ND	ND	0.028	ND	ND	0.064	0.071	0.035	1.162	1.226	1.870	
Sm ₂ O ₃	1.578	1.301	0.898	0.108	ND	0.377	0.372	0.018	0.013	0.074	0.117	0.058	ND	0.045	ND	ND	ND	ND	ND	0.049	0.064	0.071	0.035	0.064	0.071	0.035	
Gd ₂ O ₃	2.070	2.038	1.618	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.059	0.021	0.093	ND	ND	ND	0.001	ND	ND	-	1.309	1.519	1.696	
UO ₂	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.113	ND	1.626	1.588	1.342	2.739	ND	ND												
ThO ₂	0.444	0.287	0.549	1.112	1.262	1.390	1.570	0.150	ND	ND	ND	0.058	ND	ND	ND	0.001	0.006	0.034	ND	0.004	97.507	97.221	98.723	3.422	3.218	1.678	
PbO	ND	ND	ND	0.686	1.441	1.052	0.789	ND	0.034	0.001	ND	0.008	0.004	0.007	0.207	0.226	-	0.139	0.257	0.322							
Ta ₂ O ₅	0.051	0.017	ND	ND	ND	0.022	0.006	0.141	0.044	0.055	0.098	0.098	0.005	0.138	ND	0.022	0.027	ND	0.016	ND	ND	0.092	-	ND	ND	ND	
Cl	-	0.012	0.013	0.014	0.01	0.005	ND	0.001	0.009	ND	0.007	0.004	0.004	0.001	0.006	0.003	0.003	ND	0.003	0.004	ND	ND	-	ND	ND	0.004	
总计	95.02	96.18	96.02	94.53	93.27	95.48	95.48	92.36	99.84	99.71	100.31	99.63	99.20	118.09	118.12	116.94	116.35	117.07	117.52	117.96	100.96	100.97	101.24	86.00	87.56	92.47	

注:表中“ND”表示未检出;“-”表示未检;标注“*”的一列数据在河北省区域地质矿产调查研究所测得,其余数据均在中国地质科学院矿产资源研究所测得。

为 3.093%。不同矿物中钪含量差别较大,多数矿物中 $Sc_2O_3 < 0.100\%$ (图 2)。34 种矿物中仅有 6 种矿物钪含量大于 0.100%,按钪含量从高到低依次为:铈钇矿、铈铁矿、铈锰矿、黑紫色萤石、方钍石、富钇易解石(图 2)。16 种矿物的钪含量介于 0.004% ~ 0.067%,按钪含量从高到低排序为:褐钇铈矿、碱性角闪石、铁钍石、黄绿石、氟碳铈矿、磷灰石、铈硅磷灰石、独居石、霓石、黑云母、硅镁石、褐钇铈矿、钾长石、磁铁矿、钠长石。12 种矿物未检出钪,分别为:赤铁矿、钛铁矿、红钛锰矿、金红石、石英、易解石、氟碳钙铈矿、榍石、钽铁钛石、硅钽铈矿、褐帘石、包头矿。总体来看,钪元素在白云鄂博矿床中分布分散、含量很低,这与前人的认识一致^[16-19]。不同于前人的工作是:①本次工作中含钪最高的矿物为铈钇矿,单点最高含量为 3.093%。铈钇矿虽非新矿物,但在白鄂博矿区属首次发现^[32-34]。②铈铁矿与前人认识一致,表现为相对富钪,不过钪平均含量为 1.263%,要高于前人测得的 0.22% 和 0.67%^[19]。③新发现的铈锰矿也相对富钪,钪平均含量为 0.251%。④前人认为金属矿物中含钪最高者为铈铁金红石^[16],而本次工作中金红石中未检出钪。⑤前人认为霓石是硅酸盐中最富钪的矿物^[13],而本次工作中碱性角闪石中钪含量(0.062%)明显高于霓石中钪含量(0.020%)。可见,即便在同种矿物中,钪的分布仍会有一定变化,这可能与矿物的形成条件有关。

此外,前人主要是从单一矿物种中探讨钪的赋存,尚未从矿物大类角度对钪的赋存特点形成认识^[16-19]。从矿物学分类来讲^[32],本次工作共划分 13 类矿物:①卤化物为黑紫色萤石,钪平均含量为 0.181%;②铁、锰的简单氧化物除磁铁矿(钪平均含量 0.005%)外,赤铁矿、钛铁矿、红钛锰矿均未检出钪;③普通氧化物(金红石、石英)均未检出钪;④铈、铁、钍稀有氧化物与钪的关系较为密切,方钍石、铈铁矿、铈钇矿、铈锰矿检出较高含量的钪(>0.100%),同时 4 种矿物的钪平均含量高达 1.036%;⑤钛铈酸盐的复杂氧化物与钪的关系亦较为紧密,钪平均含量为 0.047%,褐钇铈矿的钪含量为 0.008%,富钇易解石中钪含量最高(最高为 0.124%,而普通易解石中未检出钪);⑥氟碳酸盐矿物中,氟碳铈矿的钪含量为 0.028%,氟碳钙铈矿中未检出钪;⑦磷酸盐(独居石、磷灰石、铈硅磷灰石)表现出较为一致的钪含量,均在 0.025% 左右;⑧岛状硅酸盐的钪平均含量为 0.024%,但硅镁石的钪含量很低(0.011%),榍石未检出钪,而铁钍石的钪含量相对较高(0.060%);⑨硅氧双四面体硅酸盐(钽铁钛石、硅钽铈矿、褐帘石)未检出钪;⑩环状硅酸盐(包头矿)未检出钪;⑪链状硅酸盐(霓石、碱性角闪石)的钪平均含量为 0.041%;⑫层状硅酸盐黑云母的钪平均含量为 0.019%;⑬架状硅酸盐(钾长石、钠长石)的钪平均含量仅为 0.006%。

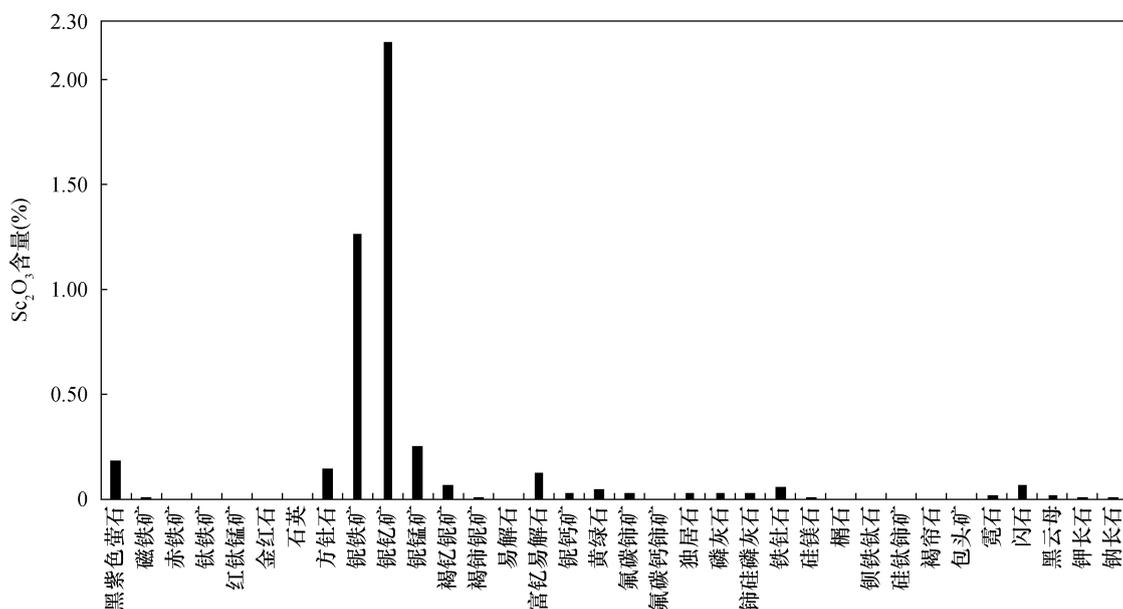


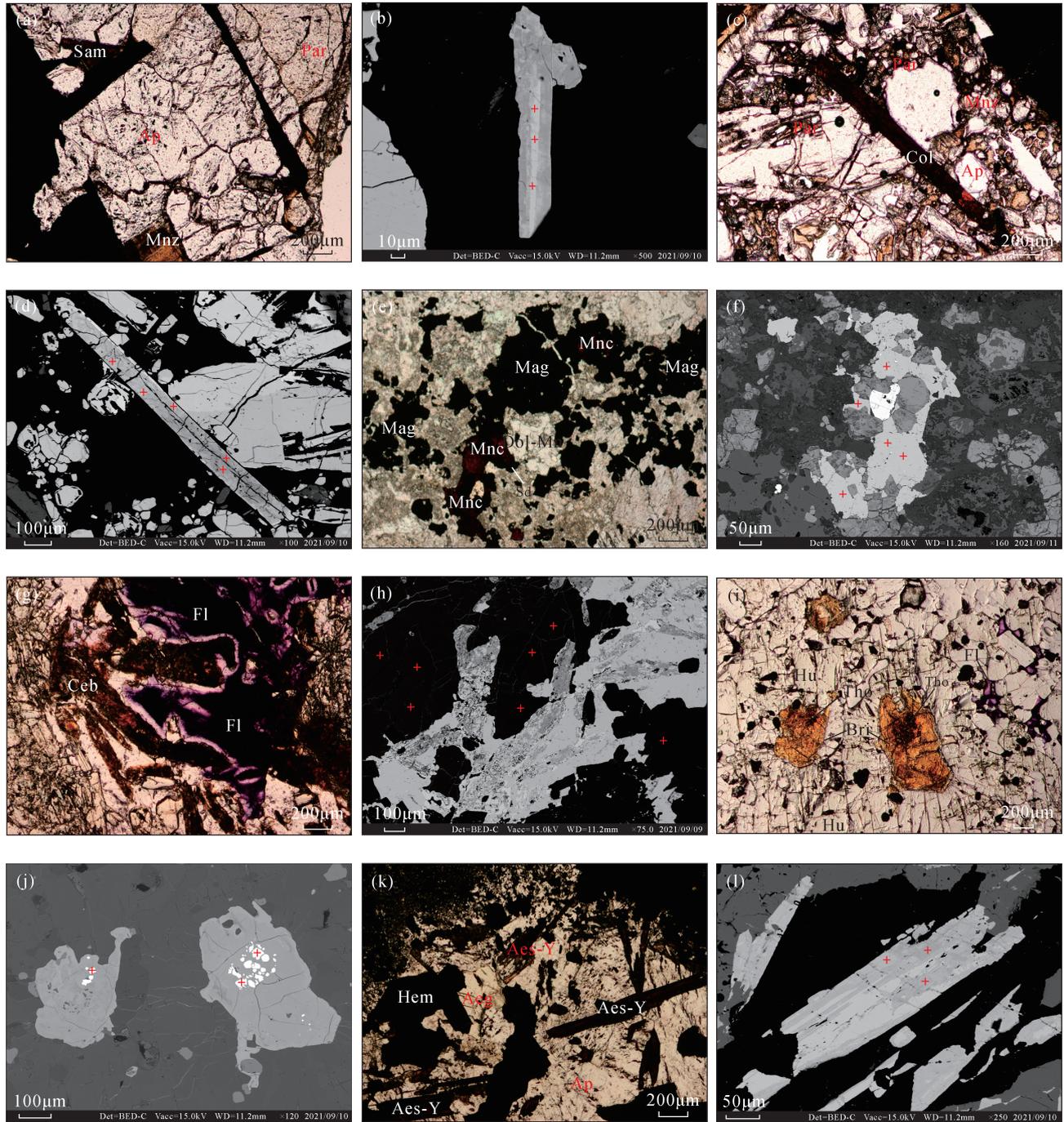
图 2 钪在不同矿物中含量分布

Fig. 2 Scandium content in different minerals

从 EPMA 测试数据来看,白云鄂博矿床中的钨主要分布在铌、铁、钍稀有氧化物矿物、黑紫色萤石、钛铌酸盐的复杂氧化物矿物和链状硅酸盐矿物等 4 类矿物中。

3.2 主要载钨矿物特征

矿物的鉴定特征及矿物共生组合等内容对于研究矿物成因、元素地球化学行为及后续工业利用十分必要^[35-36]。根据 EPMA 测试结果统计出 6 种主



a, b 分别为与独居石、氟碳铈钨矿、磷灰石共生的板柱状铌钨矿及对应测试点; c, d 为与独居石、氟碳铈钨矿、磷灰石共生的针柱状铌钨矿及对应测试点; e, f 为富锰环境下的铌钨矿及对应测试点; g, h 为与霓石、氟碳铈钨矿共生的黑紫色萤石及对应测试点; i, j 为包裹于铈磷灰石中的方钍石及对应测试点; k, l 为针柱状富铌易解石及对应测试点。

Ap—磷灰石; Aeg—霓石; Aes—Y - 富铌易解石; Bri—铈磷灰石; Ceb—氟碳铈钨矿; Col—铌铁矿; Dol—Mn - 锰白云石; Fl—萤石; Hem—赤铁矿; Hu—硅铈石; Mag—磁铁矿; Mnz—独居石; Par—氟碳铈钨矿; Sam—铌钨矿; Sd—菱铁矿; Tho—方钍石。

图 3 矿物单偏光下图片及 EPMA 测试点位置

Fig. 3 Pictures of minerals under single polarized light and location of EPMA test points

要富钪矿物,分别利用显微镜和 EPMA 背散射模式进行拍照并在背散射图像上标明测试点(图3),进而总结其显微镜下特征,以期为下一步矿物学及钪资源工艺矿物学研究提供依据。

(1) 钪铁钪矿及钪钪矿。产出于钪稀土矿石,取自白云鄂博主矿。二者显微镜下无明显差别,呈板状、细长柱状分布于氟碳钙铈矿、独居石、磷灰石等矿物间隙中。矿物颗粒细长,深棕红色,反射光下内反射为棕红色(图3中a,c);测试点位置如图3中b和d所示。主要共生矿物为氟碳钙铈矿、独居石、磷灰石、赤铁矿、石英。

(2) 钪钪矿。产出于白云石型钪稀土铁矿石,取自白云鄂博主矿。矿物颗粒分布于磁铁矿及锰白云石、菱铁矿、菱铁镁矿、菱镁钪矿等矿物间隙,整体矿石环境表现富钪特点。钪钪矿呈棕红色不规则粒状,粒径0.05~0.30mm(图3e);测试点位置如图3f所示。主要共生矿物为白云石、锰白云石、磁铁矿、褐钪钪矿、菱铁矿、菱铁镁矿、菱镁钪矿、独居石、钪铁矿、钪钪矿、钪镁钠闪石、黄铁矿、闪锌矿、氟碳铈矿、独居石。

(3) 黑紫色萤石。产出于萤石型稀土矿石,取自白云鄂博主矿。矿物呈不规则粒状与萤石相间分布,颗粒粗大,沿某一方向与萤石构成不连续条带。粒径一般为0.40~1.00mm,部分细小颗粒或充填于萤石矿物间,或以细粒集合体形式分布。部分大颗粒萤石表面有很多细脉穿过(图3g);测试点位置如图3h所示。主要共生矿物为铁钪石、氟碳铈钪矿、萤石、重晶石、钠闪石、方解石。

(4) 方钪石。产出于透辉石型稀土矿石,取自东部接触带。矿物呈暗棕到棕褐色,以微细粒集合体状被包裹于铈磷灰石中。颗粒细小,呈均质性,高突起,粒径约为0.01~0.02mm(图3i);测试点位置如图3j所示。共生矿物主要为透辉石、硅镁石、铈磷灰石、黑云母、萤石、方解石。

(5) 富钪易解石。产出于钪稀土铁矿石,取自白云鄂博主矿。矿物呈放射状、板状或不规则粒状分布,暗红色到棕红色,粒径在0.10~1.00mm不等(图3k);测试点位置如图3l所示。共生矿物为氟碳钙铈矿、氟碳铈矿、独居石、磷灰石、赤铁矿、钪铁钪矿等。

3.3 白云鄂博矿床钪的地球化学行为

自然界中钪多以三价形式存在,广泛稀散分布于各种矿物^[37-40]。本次工作中,白云鄂博矿床钪的赋存与不同矿物种类有一定联系,可能与稀土、放射性元素也有一定相关性。

3.3.1 钪与不同矿物种类的关系

按照系统矿物学分类,将不同矿物种类中钪的含量进行投图,绘制图4。图中显示钪在钪铁钪稀有氧化物中含量最高,其次为黑紫色萤石(卤化物)、钪钪酸盐的复杂氧化物、链状硅酸盐。

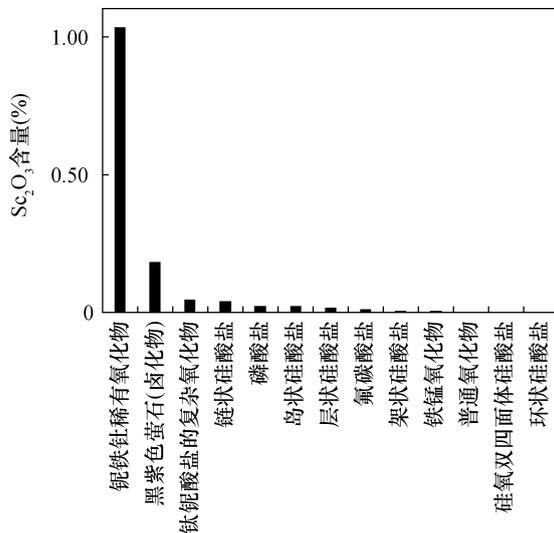


图4 不同种类矿物中钪的含量

Fig.4 Scandium content in different mineral groups

在白云鄂博矿区,钪可能以 $Sc^{3+} + Ti \rightarrow Fe(Mn)^{2+} + Nb^{5+}$ 的类质同象方式进入钪铁钪、钪钪矿晶格^[16,41-42]。因而在矿床中,钪在钪铁的稀有氧化物如钪铁钪、钪钪矿中赋存较多,同时钪钪矿、烧绿石中也含有钪,钪含量分别为0.031%和0.049%。

钪钪酸盐的复杂氧化物化学成分复杂,钪进入矿物的方式暂不明确。在这一类矿物中,钪含量从高到低为:褐钪钪矿(0.067%)、黄绿石(0.049%)、钪钪矿(0.031%)、富钪易解石(0.124%)、褐钪钪矿(0.008%)、易解石(未检出)。特别地,褐钪钪矿与褐钪钪矿和富钪易解石与易解石正好形成两组对比,似乎钪含量增高时钪含量也会增高。

在硅酸盐矿物中,钪的亲铁特性使得其可以部分进入含铁硅酸盐矿物^[37-42]。如在碱性角闪石、黑云母中均检出一定量的钪,但仅有碱性角闪石中的钪含量超过0.05%。虽然钪铁钪石、褐帘石、硅钪钪矿、包头矿中亦含有一定的铁,却并未检出钪。这说明钪要进入硅酸盐矿物可能与矿物的晶体结构有关,钪表现得更容易进入链状硅酸盐矿物中。

虽然钪有亲铁的地球化学倾向^[37-42],但是在铁钪氧化物中,仅磁铁矿中含有极少量的钪(0.005%),

其余矿物未检出。可见钪想要进入铁矿物应有特别的条件限制。

3.3.2 钪与不同元素的关系

对 34 种矿物中各元素间的相关系数进行计算,结果列于表 3。钪与钛的相关系数最高,为 0.869,可能与二者 $\text{Sc}^{3+} + \text{Ti} \rightarrow \text{Fe}(\text{Mn})^{2+} + \text{Nb}^{5+}$ 的对类质同象有关。

特别地,钪虽然作为稀土元素,但其赋存量的多少与矿物中稀土总量并无明显联系^[38],两者相关系数仅为 -0.596。本次工作中,氟碳铈矿、独居石虽含有大量稀土(稀土总量在 70% 左右),却未出现钪的特别富集;褐钇铈矿虽然富含重稀土,其钪含量也并非很高(0.067%)。整体来看,钪仅与钇的相关性相对较强,相关系数为 0.835。当矿物中富含钇时,对钪的赋存有积极作用。本次工作中,铈钇矿富含钇,其钪含量可达 2% 以上;普通易解石中未检出钪,而当易解石富含钇时,钪的含量明显增加,可达到 0.1%;褐钇铈矿的钪平均含量仅有 0.008%,而在褐钇铈矿中却可以达到 0.067%。这种现象或与钪和钇的类质同象替代有关,钇的增加有利于更多

的钪进入矿物晶格。但二者也并未呈现出严格的正相关,故而钪的赋存机制并非简单二元关系,钪的富集仅是有利条件而非决定条件。

此外,钪的赋存与矿区放射性元素可能有一定相关性,钪与钍的相关系数为 0.720。本次工作选择的萤石为黑紫色萤石。萤石致色机理多样^[43-45],不过在白云鄂博矿区这类萤石的颜色往往是受辐射所致^[46-48],检测发现钪含量较高。另外,方钍石、铁钍石中分别含有 0.145% 和 0.060% 的钪,相对其他矿物已属富集。钪与放射性元素的相关性仍需进一步探讨。

4 结论

本次工作利用 EPMA 技术,系统地对白云鄂博矿床 34 种矿物进行测定,进而统计了钪在不同矿物中的赋存特征。结果表明钪在矿床中分布分散,易进入铈铁矿、硅酸盐,这与前人结论基本一致。本次新发现测试样品中钪含最高的矿物为铈钇矿,钪最高含量为 3.093%。通过矿物分类,发现钪易进入铈、铁、钍稀有氧化物、黑紫色萤石、钪铈酸盐的复杂

表 3 34 种矿物中各元素相关系数

Table 3 Correlation coefficients of correlation of elements in 34 minerals

组分	Sc ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	ThO ₂	FeO	ΣREE	F	SrO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	K ₂ O	BaO	MnO	TiO ₂	Na ₂ O	MgO	Nb ₂ O ₅	UO ₂	PbO	Ta ₂ O ₅	Cl	
Sc ₂ O ₃	1																						
Y ₂ O ₃	0.835	1																					
ThO ₂	0.720	0.953	1																				
FeO	-0.095	-0.406	-0.424	1																			
ΣREE	-0.596	-0.519	-0.547	-0.524	1																		
F	0.748	0.965	0.997	-0.454	-0.519	1																	
SrO	0.530	0.885	0.881	-0.715	-0.168	0.894	1																
SiO ₂	-0.025	-0.303	-0.377	0.920	-0.474	-0.410	-0.631	1															
Al ₂ O ₃	-0.612	-0.605	-0.576	-0.441	0.953	-0.556	-0.307	-0.419	1														
CaO	0.731	0.960	0.998	-0.455	-0.519	1	0.897	-0.411	-0.556	1													
P ₂ O ₅	-0.606	-0.528	-0.550	-0.497	0.977	-0.523	-0.198	-0.457	0.947	-0.523	1												
K ₂ O	-0.613	-0.510	-0.588	-0.424	0.943	-0.559	-0.171	-0.374	0.831	-0.557	0.953	1											
BaO	0.026	0.508	0.693	-0.318	-0.341	0.647	0.639	-0.301	-0.350	0.668	-0.322	-0.356	1										
MnO	-0.622	-0.556	-0.576	-0.495	0.999	-0.549	-0.208	-0.457	0.962	-0.548	0.977	0.937	-0.353	1									
TiO ₂	0.869	0.972	0.959	-0.412	-0.527	0.975	0.840	-0.368	-0.561	0.968	-0.535	-0.569	0.462	-0.558	1								
Na ₂ O	0.711	0.954	0.999	-0.457	-0.516	0.998	0.899	-0.412	-0.553	0.999	-0.520	-0.556	0.691	-0.546	0.960	1							
MgO	-0.051	-0.334	-0.368	0.946	-0.509	-0.405	-0.654	0.983	-0.429	-0.406	-0.512	-0.450	-0.266	-0.487	-0.372	-0.405	1						
Nb ₂ O ₅	0.716	0.956	0.999	-0.455	-0.519	0.999	0.898	-0.411	-0.556	1	-0.523	-0.557	0.686	-0.548	0.962	1	-0.404	1					
UO ₂	0.109	0.530	0.724	-0.535	-0.172	0.693	0.662	-0.505	-0.116	0.708	-0.123	-0.259	0.909	-0.185	0.541	0.726	-0.482	0.721	1				
PbO	-0.400	-0.478	-0.388	-0.253	0.609	-0.386	-0.376	-0.228	0.797	-0.387	0.694	0.463	-0.217	0.625	-0.384	-0.384	-0.245	-0.386	0.121	1			
Ta ₂ O ₅	-0.337	-0.508	-0.452	0.495	-0.077	-0.447	-0.519	0.147	-0.040	-0.447	-0.01	0.044	-0.295	-0.043	-0.424	-0.451	0.195	-0.447	-0.389	-0.044	1		
Cl	0.238	-0.038	-0.009	0.509	-0.510	0.004	-0.238	0.176	-0.454	-0.005	-0.483	-0.450	-0.228	-0.485	0.087	-0.018	0.251	-0.012	-0.310	-0.343	0.804	1	

氧化物和链状硅酸盐。钪在进入矿物时除了与矿物种类有关,与矿物晶体结构、形成条件、钪、钇及放射性元素亦有相关性,如与钪的相关系数为0.869,与钇的相关系数为0.835,与钪的相关系数为0.720。矿区内钪的赋存应受多种条件影响。此外,鉴于钪与铈铁矿、铈钙矿、铈锰矿、富钪易解石等铈矿物关系密切,综合利用钪资源时可考虑与铈资源同时利用。

本次工作精确、系统地测定了白云鄂博矿床中钪的含量,初步总结出钪的赋存特征,为下一步研究钪在矿床中的地球化学行为、赋存机理奠定了基础。工作中发现钪的赋存除了与矿物种类有关外,可能亦受矿物形成环境、晶体结构等因素的影响,在下一步工作中有必要综合考虑各个因素,更深入地研究其赋存机理。

5 参考文献

- [1] 朱凯,王祝堂. 钪的研究进展及其在铝合金中的应用[J]. 轻合金加工技术,2021,49(2):1-10.
Zhu K, Wang Z T. Research progress of Sc and its application in aluminum alloys [J]. Light Alloy Fabrication Technology,2021,49(2):1-10.
- [2] 李力,姜锋,李汉广. 新世纪钪的应用开发和科技发展前景[J]. 稀有金属与硬质合金,2002(3):38-41.
Li L, Jiang F, Li H G. The trend of application and development of scandium in the new century [J]. Rare Metals and Cemented Carbides,2002(3):38-41.
- [3] 董方,高利坤,陈龙,等. 钪的资源及回收提取技术发展现状[J]. 矿产综合利用,2016(4):21-26.
Dong F, Gao L K, Chen L, et al. Scandium resources and status of scandium extraction and recycling technology [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2016(4):21-26.
- [4] 赵宏军,陈秀法,李娜,等. 全球钪资源供需分析及对策建议[J]. 中国矿业,2019,28(4):57-62.
Zhao H J, Chen X F, Li N, et al. Analysis of global distribution of scandium resources supply and demand status and suggestions [J]. China Mining Magazine, 2019,28(4):57-62.
- [5] Giovanni M, Roberto B, Erwan G, et al. Geochemistry of the apulian allochthonous karst bauxite, southern Italy: Distribution of critical elements and constraints on Late Cretaceous Peri-Tethyan palaeogeography [J]. Ore Geology Reviews,2016,77:246-259.
- [6] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust, in Turekian and Holland [M]. Oxford: Elsevier, 2014: 1-51.
- [7] Williams - Jones A E, Vasyukova O V. The economic geology of scandium, the runt of the rare earth element litter [J]. Economic Geology,2018,113(4):973-988.
- [8] 陶旭云,王佳新,孙嘉,等. 钪矿床主要类型与成矿机制[J]. 矿床地质,2019,38(5):1023-1038.
Tao X Y, Wang J X, Sun J, et al. Main types and metallogenic mechanism of scandium deposits [J]. Mineral Deposits,2019,38(5):1023-1038.
- [9] Wang Z C, Li M Y L, Liu Z R, et al. Scandium: Ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration [J]. Ore Geology Reviews,2021,128:103906.
- [10] 王佳媛,郭静粉,袁志宝. 各类钪矿床中钪的赋存特征与研究前景[J]. 中国资源综合利用,2019,37(6):71-73.
Wang J Y, Guo J F, Yuan Z B. Occurrence characteristics and research prospects of scandium in various types of scandium deposits [J]. China Resources Comprehensive Utilization,2019,37(6):71-73.
- [11] 肖军辉,王进明,王振. 川西含钪稀土矿中钪的赋存状态研究[J]. 稀土,2018,39(2):40-47.
Xiao J H, Wang J M, Wang Z. Study on occurrence state of scandium of scandium - containing rare earth ore in western of Sichuan Province [J]. Chinese Rare Earths, 2018,39(2):40-47.
- [12] 郭彩莲,成来顺,宁新霞,等. 陕西省洋县毕机沟钪钽磁铁矿中钪的赋存状态研究[J]. 矿产保护与利用,2020,40(5):54-61.
Guo C L, Cheng L S, Ning X X, et al. Study on the occurrence state of scandium in Bijigou vanadium - titanium magnetite in Yang County, Shaanxi Province [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020,40(5):54-61.
- [13] 李春龙,李小钢,徐广尧. 白云鄂博共生矿资源综合利用技术开发与产业化[J]. 稀土,2015,36(5):151-158.
Li C L, Li X G, Xu G Y. Technology development and industrialization of resources comprehensive utilization of intergrowth and associated ore in Baiyun Obo [J]. Chinese Rare Earths,2015,36(5):151-158.
- [14] 刘璞,卢虎生,王路,等. 稀土资源投资决策研究——以白云鄂博氧化钪为例[J]. 稀土,2021,42(4):148-158.
Liu P, Lu H S, Wang L. Research on investment decisions of rare earth resources - taking scandium oxide of Bayan Obo mine as an example [J]. Chinese Rare Earths,2021,42(4):148-158.

- [15] Li B W, Deng L B, Zhang X F, et al. Structure and performance of glass - ceramics obtained by Bayan Obo tailing and fly ash [J]. *Journal of Non - Crystalline Solids*, 2013, 380: 103 - 108.
- [16] 梁有彬. 白云鄂博矿床中钪的分布特征及综合利用问题[J]. *稀土*, 1986, 7(6): 54 - 56.
- Liang Y B. Distribution characteristics and comprehensive utilization of scandium in Bayan Obo deposit [J]. *Chinese Rare Earths*, 1986, 7(6): 54 - 56.
- [17] 赵长有. 白云鄂博钪[J]. *包钢科技*, 1987(4): 1 - 4.
- Zhao C Y. Scandium in Bayan Obo [J]. *Science & Technology of Baotou Steel*, 1987(4): 1 - 4.
- [18] 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: 316 - 320.
- Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. *Geochemistry of Bayan Obo deposit* [M]. Beijing: Science Press, 1988: 316 - 320.
- [19] Shimazaki H, Yang Z M, Miyawaki R, et al. Scandium - bearing minerals in the Bayan Obo Nb - REE - Fe deposit, Inner Mongolia, China [J]. *Resource Geology*, 2008, 58(1): 80 - 86.
- [20] 张迪, 陈意, 毛骞, 等. 电子探针分析技术进展及面临的挑战[J]. *岩石学报*, 2019, 35(1): 261 - 274.
- Zhang D, Chen Y, Mao Q, et al. Progress and challenge of electron probe microanalysis technique [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(1): 261 - 274.
- [21] 李超, 王登红, 屈文俊, 等. 关键金属元素分析测试技术方法应用进展 [J]. *岩矿测试*, 2020, 39(5): 658 - 669.
- Li C, Wang D H, Qu W J, et al. A review perspective on analytical methods of critical metal elements [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(5): 658 - 669.
- [22] 王芳, 朱丹, 鲁力, 等. 应用电子探针分析技术研究某铌 - 稀土矿中铌和稀土元素的赋存状态[J]. *岩矿测试*, 2021, 40(5): 670 - 679.
- Wang F, Zhu D, Lu L, et al. Occurrence of niobium and rare earth elements in related ores by electron microprobe [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(5): 670 - 679.
- [23] 李小犁, 陶仁彪, 李清云, 等. 石榴子石 Fe^{3+} 含量电子探针原位分析: Flank Method 方法的实例应用[J]. *岩石学报*, 2019, 35(4): 1058 - 1070.
- Li X L, Tao R B, Li Q Y, et al. Microprobe analysis of ferric iron in garnet: The Flank Method and case application [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(4): 1058 - 1070.
- [24] 万建军, 潘春蓉, 严杰, 等. 应用电子探针 - 扫描电镜研究陕西华阳川铀稀有多金属矿床稀土矿物特征[J]. *岩矿测试*, 2021, 40(1): 145 - 155.
- Wan J J, Pan C R, Yan J, et al. EPMA - SEM study on the rare earth minerals from the Huayangchuan uranium rare polymetallic deposit, Shaanxi Province [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(1): 145 - 155.
- [25] 章雨旭, 吕洪波, 王俊, 等. 白云鄂博矿床成矿构造环境分析[J]. *地质学报*, 2012, 86(5): 767 - 774.
- Zhang Y X, Lyu H B, Wang J, et al. Analysis of ore - forming tectonic settings of the Bayan Obo REE deposit [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(5): 764 - 774.
- [26] Smith M P, Campbell L S, Kynicky J. A review of the genesis of the world class Bayan Obo Fe - REE - Nb deposits, Inner Mongolia, China: Multistage processes and outstanding questions [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 64: 459 - 476.
- [27] 柯昌辉, 孙盛, 赵永岗, 等. 内蒙古白云鄂博超大型稀土 - 铌 - 铁矿床控矿构造特征及深部找矿方向[J]. *地质通报*, 2021, 40(1): 95 - 109.
- Ke C H, Sun S, Zhao Y G, et al. Ore - controlling structure and deep prospecting of the Bayan Obo large - sized REE - Nb - Fe ore deposit, Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(1): 95 - 109.
- [28] Zhai M G, Santosh M, Zhang L. Precambrian geology and tectonic evolution of the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(1): 1 - 5.
- [29] 谢玉玲, 曲云伟, 杨占峰, 等. 白云鄂博铁、铌、稀土矿床: 研究进展、存在问题和新认识 [J]. *矿床地质*, 2019, 38(5): 983 - 1003.
- Xie Y L, Qu Y W, Yang Z F, et al. Giant Bayan Obo Fe - Nb - REE deposit: Progresses, controversies and new understandings [J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(5): 983 - 1003.
- [30] 刘敬国, 柳建勇. 论白云鄂博铁矿资源潜力与今后地质工作方向[J]. *包钢科技*, 2007(4): 9 - 14.
- Liu J G, Liu J Y. Discussion on the resources potential of Baiyunebo iron mine and the future work direction [J]. *Science & Technology of Baotou Steel*, 2007(4): 9 - 14.
- [31] 王凯怡, 张继恩, 方爱民, 等. 白云鄂博矿床成因——矿体内霓长岩化成矿作用与赋矿白云岩的联系[J]. *岩石学报*, 2018, 34(3): 785 - 798.
- Wang K Y, Zhang J E, Fang A M, et al. Genesis of the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia: The fenitized mineralization in the ore bodies and its relation to the ore - bearing dolomite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(3): 785 - 798.
- [32] 张培善, 陶克捷. 白云鄂博矿物学[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 3 - 37.
- Zhang P S, Tao K J. *Mineralogy of Bayan Obo* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 3 - 37.

- [33] 张培善,陶克捷,杨主明,等. 中国稀土矿物学[M]. 北京:科学出版社,1998:1-19.
Zhang P S, Tao K J, Yang Z M, et al. Rare earth mineralogy in China[M]. Beijing: Science Press, 1998:1-19.
- [34] 徐金沙,李国武,沈致富. 首次在白云鄂博铁矿发现的矿物种述评[J]. 地质学报, 2012, 86(5): 842-848.
Xu J S, Li G W, Shen G F. Commentary on mineral species first found in the Bayan Obo iron mine[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 186(5): 842-848.
- [35] 段威,唐文春,熊观,等. 川北硅质岩型铼多金属矿床的赋存状态[J]. 矿物学报, 2021, 41(3): 271-276.
Duan W, Tang W C, Xiong G, et al. A study on the occurrence of rhenium in the siliceous rock-type Re polymetallic deposit in the northern Sichuan, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2021, 41(3): 271-276.
- [36] 曾广圣,欧乐明. X射线衍射-扫描电镜等技术研究秘鲁铜硫矿石选矿工艺矿物学特征[J]. 岩矿测试, 2019, 38(2): 160-168.
Zeng G S, Ou L M. Study on mineralogical characteristics of Peru copper-sulphur ore dressing process by X-ray diffraction and scanning electron microscope[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(2): 160-168.
- [37] 李东育. 红格钒钛磁铁矿中钪的地球化学特征——兼论选矿流程中钪的分布[D]. 成都:成都理工大学, 2017:1-5.
Li D Y. Geochemical characteristics of scandium in Hongge vanadium titanium magnetite-distribution of scandium in beneficiation progress[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017:1-5.
- [38] 李军敏,丁俊,尹福光,等. 渝南申基坪铝土矿矿区钪的分布规律及地球化学特征研究[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 909-918.
Li J M, Ding J, Yin F G, et al. Regularities of distribution and geochemical characteristics of Sc in bauxite of Shenjiping mine, southern Chongqing[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(5): 909-918.
- [39] 惠博,陈晓青,赵开乐,等. 某斑岩型铜矿中Sc的赋存状态及对选矿工艺的影响[J]. 矿物学报, 2016, 36(3): 423-428.
Hui B, Chen X Q, Zhao K L, et al. A study on occurrence state of scandium in a porphyry copper ore and its influence on the mineral processing technology[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2016, 36(3): 423-428.
- [40] 范亚洲,周伟,王子玺,等. 稀散元素Sc的矿床类型及找矿前景[J]. 西北地质, 2014, 47(1): 234-243.
Fan Y Z, Zhou W, Wang Z X, et al. The types of rare and disperse scandium deposits and prospecting potential[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(1): 234-243.
- [41] 许延辉. 包头白云鄂博资源中铌、钽提取技术取得突破[J]. 稀土信息, 2012(3): 29.
Xu Y H. Breakthrough in extraction technology of niobium and scandium from Bayan Obo resources in Baotou[J]. Rare Earth Information, 2012(3): 29.
- [42] 赵昉,胡振琪,车丽萍. 乳状液膜法提取白云鄂博矿床中钪的试验研究[J]. 稀土, 2010, 31(2): 89-92.
Zhao F, Hu Z Q, Che L P. Extracting Sc³⁺ using liquid membrane emulsion technology[J]. Chinese Rare Earths, 2010, 31(2): 89-92.
- [43] 马媛. 萤石标型及其对不同成矿作用的标识[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2018:1-9.
Ma Y. Typomorphic characteristics of the fluorite as indicators of different mineralizations[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018:1-9.
- [44] 杨育富. 湖南香花岭矽卡岩中不同颜色萤石的特征及成因[D]. 桂林:桂林理工大学, 2019:15-16.
Yang Y F. Characteristics and origin of the fluorite with different colors in Xiangkaling skarn, Hunan[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2019:15-16.
- [45] 于俊芳. 白云鄂博含萤石矿石类型及萤石纯净度分析[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2020:1-4, 29-44.
Yu J F. Different ore types and analysis of fluorite purity in Bayan Obo[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020:1-4, 29-44.
- [46] 刘铁庚,赵云龙,李新安. 辐射损伤与萤石颜色的初步研究[J]. 矿物学报, 1983(4): 300-303, 326.
Liu T G, Zhao Y L, Li X A. Preliminary study of the relationship between irradiation damage and fluorite colour[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1983(4): 300-303, 326.
- [47] 李丹煜,杨莉,王金龙,等. 白云鄂博萤石分布特征及放射性钍元素的影响[J]. 包钢科技, 2020, 46(3): 6-9.
Li D Y, Yang L, Wang J L, et al. Distribution characteristics of fluorite and effects of radioactive element thorium in Bayan Obo deposit[J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2020, 46(3): 6-9.
- [48] 杨莉,王昭静,杨波,等. 白云鄂博矿床钪的赋存状态及其对周边矿物的影响[J]. 稀土, 2021, 42(4): 52-62.
Yang L, Wang Z J, Yang B, et al. Occurrence state of thorium and its influence on surrounding minerals in Bayan Obo deposit[J]. Chinese Rare Earths, 2021, 42(4): 52-62.

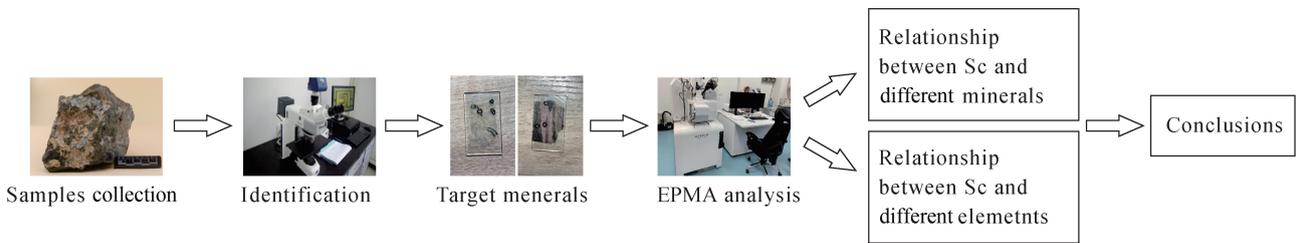
Application of Electron Probe Microanalyzer in Exploring the Occurrence Characteristics of Scandium in Different Minerals of the Bayan Obo Deposit

YANG Bo, YANG Li, MENG Wenxiang

(Mining and Metallurgy Research Institute, Baotou Iron and Steel (Group) Co., Baotou 014030, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The content of scandium in 34 minerals of the Bayan Obo deposit was systematically determined by electron probe microanalyzer.
- (2) The main scandium – bearing minerals of the Bayan Obo Deposit are samarskite, columbite, manganocolumbite, dark purple fluorite, thorianite and Y – rich aeschynite.
- (3) The scandium and niobium resources in the Bayan Obo deposit can be utilized simultaneously.



ABSTRACT

BACKGROUND: With the increasing demand for scandium resources, countries around the world have carried out scandium metallogenic mechanism research and prospecting in recent years. One of the key research contents is to clarify the occurrence characteristics of scandium. According to previous studies, scandium mainly exists in the form of isomorphism and ion adsorption in various scandium deposits. At present, more than 800 kinds of scandium – bearing minerals have been found. The scandium resource of the Bayan Obo deposit is large, which has the characteristics of dispersed distribution and low content. Scandium enters other minerals in the form of isomorphism and no independent scandium mineral is found. Due to the limitation of testing technology and sampling, there is no accurate quantitative research to systematically explore the occurrence characteristics of scandium in different minerals in the Bayan Obo deposit. Therefore, the identification of the main scandium – bearing minerals is insufficient, which is not conducive to further exploration of the enrichment mechanism of scandium and the utilization of scandium resources in the deposit.

OBJECTIVES: To understand the occurrence of Sc in different minerals of the Bayan Obo deposit.

METHODS: 34 kinds of minerals in the Bayan Obo deposit were systematically determined by electron probe microanalyzer (EPMA) technology.

RESULTS: The test results showed that the average scandium content (Sc_2O_3) in 6 minerals was more than 0.100%. They were samarskite (with average Sc_2O_3 content of 2.485%), columbite (1.263%), manganocolumbite (0.251%), dark purple fluorite (0.181%), thorianite (0.145%) and Y-rich aeschynite (0.124%) from high to low. Samarskite had the highest scandium content (3.093%). The content of scandium in 16 minerals ranged from 0.004% to 0.067%, which were fergusonite (with average Sc_2O_3 content of 0.067%), alkaline amphibole (0.062%), ferrotorite (0.060%), pyrochlore (0.049%), fersmite (0.031%), bastnaesite (0.028%), apatite (0.028%), britholite (0.025%), monazite (0.023%), aegirine (0.02%), biotite (0.019%), humite (0.011%), fergusonite - (Ce) (0.008%), feldspar (0.007%), magnetite (0.005%), albite (0.004%). Scandium was not detected in the other 12 minerals.

CONCLUSIONS: Samarskite has the highest scandium content in the deposit, and the 6 main scandium-bearing minerals are samarskite, columbite, manganocolumbite, dark purple fluorite, thorianite and Y-rich aeschynite. Among the 34 minerals, the content of scandium in 22 minerals is higher than the detection limit of EPMA, and scandium is distributed in a dilute manner. The occurrence of scandium is related to titanium, yttrium and thorium, and the correlation coefficients are 0.869, 0.835 and 0.720, respectively. Scandium is closely related to niobium minerals such as columbite, manganocolumbite, fersmite and Y-rich aeschynite. It can be considered to comprehensively utilize scandium and niobium resources at the same time.

KEY WORDS: electron probe microanalyzer; Bayan Obo; scandium; occurrence characteristics; comprehensive utilization

中国地质学会百年华诞庆典活动标识

2022年是中国地质学会成立100周年。为进一步扩大百年华诞庆典活动的影响力,中国地质学会于2021年6月向社会公开征集活动标识。经遴选,启用下述标识作为中国地质学会百年华诞庆典活动唯一指定标识。



1922—2022
中国地质学会
GEOLOGICAL SOCIETY OF CHINA

标识设计有以下几方面要素:图案以抽象的汉字“百”有机地变化为昂扬腾跃的巨龙伴随绚丽的彩带环绕着学会会徽,突出中国地质学会百年华诞庆典活动主题;抽象的汉字“百”体现中国地质学会百年的悠久历史和厚重的文化积淀;昂扬腾跃的巨龙象征中国地质学会百年来飞速的发展步伐和广阔的发展前景,彰显与时俱进、锐意创新的时代精神;绚丽的彩带烘托出中国地质学会百年华诞庆典活动隆重、喜庆的氛围,同时也将全体会员紧密地团结在一起,共同回顾光辉历史、共创美好未来。中间的学会会徽突出百年华诞庆典活动标识的专属唯一性。

1922年2月3日,中国地质学会在北京正式成立,自此以后,我国地质工作者有了自己的学术组织,标志着近代地质学在华夏大地上开始扎根生长。

(中国地质学会)