

文章编号: 0254-5357(2013)05-0810-07

四川稀土精矿的稀土元素和微量元素地球化学特征及开发利用意义

赵芝¹, 付小方², 任希杰³, 方一平⁴, 侯立玮², 王登红¹, 刘丽君⁵

(1. 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
2. 四川省地质调查院, 四川 成都 610081; 3. 攀西地质大队, 四川 西昌 615000;
4. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 5. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 四川省是我国轻稀土的重要产地, 开采近二十年来生产了大量稀土精矿, 精矿的稀土品位及其他有用元素组成对矿山资源评价及企业生存至关重要。本文对 A、B、C 三个稀土矿区稀土精矿的稀土元素和微量元素组成特征进行了研究。结果表明: 不同矿区、不同选矿方法、不同企业生产的精矿, 其稀土元素和微量元素含量存在显著差异; A 矿区浮选精矿的稀土含量最低 ($\Sigma\text{REEs} = 41.57\%$), 而 C 矿区精矿的稀土含量最高 ($\Sigma\text{REEs} = 55.83\%$); A 矿区磁选精矿的稀土含量 ($\Sigma\text{REEs} = 49.96\%$) 高于浮选精矿 ($\Sigma\text{REEs} = 41.57\%$); B 矿区甲公司 ($\Sigma\text{REEs} = 48.35\%$) 精矿产品的稀土含量高于乙公司精矿产品 ($\Sigma\text{REEs} = 42.92\%$)。精矿的稀土元素配分特征继承了原矿石的同时普遍亏损 Tb 和 Yb, 推测是选矿过程导致了元素的亏损。精矿中除了富集稀土元素, Mo、Bi、Pb、Ga、Th、U、W 等有用元素也发生了不同程度的富集, 综合利用价值高, 尤其是 Mo (0.56%) 和 Ga (0.036%) 的含量已达到现行边界品位。本文提出, 今后在提高精矿稀土品位的同时, 需对富集的元素采取恰当的方式加以综合回收。

关键词: 四川省稀土精矿; 稀土元素; 微量元素; 资源合理利用

中图分类号: P618.7; O614.33 **文献标识码:** A

四川省是我国轻稀土的重要产地, 自 20 世纪 80 年代末以来, 一直在不同程度地被开发利用, 生产了大量精矿。近些年来, 四川开采利用的主要稀土矿山企业有冕宁县的牦牛坪、木洛、三岔河、羊房沟稀土矿及德昌县的大陆槽稀土矿^[1]。各矿山经历了多次治理整顿, 不断改进采、选、冶技术的复杂过程。2011 年 11 月起, 我国“三稀”矿产资源战略调查项目组会同四川课题组多次对四川省多个稀土矿区开展野外调查, 采集了风化壳、原矿、精矿和尾砂样品, 并对不同类型样品的稀土元素和相关有用元素组成特征进行研究, 对各稀土矿区原矿、精矿及尾砂的稀土资源及其他有用元素进行综合评价。本文报道了 A、B、C 三个稀土矿山精矿产品的稀土元素及微量元素研究成果, 旨在查明各矿山不同企业、不同选矿方式生产的稀土精矿品位及成分特征, 为合理利用和充分回收稀土资源提供科学依据。

1 地质概况

扬子陆块西缘陆缘拗陷带稀土原生矿矿集区位于四川西部, 北起冕宁三岔河, 向南经牦牛坪、木洛、麦地、里庄, 直至德昌大陆槽矿床以南, 全长 150 km 以上, 宽约 10 km, 呈一 SN 向延长的狭窄长带, 是迄今全球发现的最为年轻的内生碱性岩型稀土成矿区^[2-6] (牦牛坪成矿时代变化于 40.3 ~ 12.2 Ma), 形成于新生代陆内造山的构造背景之下^[4]。扬子陆块西缘台缘拗陷内已发现两个大型稀土矿床、1 个中型及 5 个小型矿床, 是我国稀土资源的重要基地^[7], 也是我国重要的稀土一级成矿远景区^[6]。

牦牛坪、三岔河、羊房沟、大陆槽稀土矿区均属于碱性岩型稀土矿床^[8-9], 地质特征极其相似, 受安宁河深断裂及更次一级断裂控制, 呈南北向分布^[9]。牦牛坪稀土矿的矿石组合为氟碳铈矿、硅铈矿、烧绿石、

收稿日期: 2013-07-26; 接受日期: 2013-08-05

基金项目: 中国地质大调查项目——我国“三稀”资源战略调查研究项目(201200010063), 我国离子吸附型稀土战略调查及研究项目(1212011220804), 我国重要矿产和区域成矿规律研究项目(1212010633903)

作者简介: 赵芝, 助理研究员, 从事岩石、矿床地球化学研究。E-mail: zhaozhi_sun@163.com。

辉钼矿,矿种组合为轻稀土元素(LREEs)、Nb、Mo,稀土品位在1%~8%(稀土氧化物,REO),稀土成矿以英碱正长岩(12 Ma)有关的NNE向氟碳铈矿-重晶石碳酸岩脉侵入英碱正长岩和碱性花岗岩为特征。三岔河稀土矿的成分以氟碳铈矿石英脉为主,次为氟碳铈矿萤石脉型,稀土成矿作用与钠长钾长花岗岩有关。羊房沟稀土矿,以氟碳铈矿-萤石-方解石脉为主,产于霓石碱性花岗岩与砂板岩残留体的接触带^[10]。大陆槽稀土矿的矿石组合为氟碳铈矿、独居石、重晶石、天青石,矿种组合为轻稀土元素,稀土品位(REO含量)介于4.52%~4.88%,稀土成矿以霓辉正长岩有关的霓辉石-萤石-钽天青石碳酸岩脉为特征^[3,11];天青石(SrSO_4)品位可达25%~27%,值得综合回收^[1,12];矿石杂质含量低,质量好。至2009年底,四川保有稀土资源储量为氧化物(REO)227.46万吨,其中牦牛坪保有量179.4万吨,大陆槽保有量64万吨^[1]。

2 样品采集及元素分析方法

本次研究所用的8件样品采自A、B、C三个矿区,涉及多家矿山企业。其中,样品A-1jk(磁)采自A矿区的新磁选精矿粉库(图1),A-2jk(浮)采自A矿区的新浮选精矿粉库;B-甲-1jka(精)采自B矿区甲公司的精矿粉库,B-甲-1jkb(粗)采自B矿区甲公司的粗选精矿;B-乙-jkb(精)采自B矿区乙公司的精矿粉库,B-乙-jka(粗)采自B矿区乙公司的粗精矿;C-jk(精)采自C矿区的精矿粉库,C-jk(Fe)采自C矿区的铁精矿库。每件样品质量约3 kg,取样时间为2011年10月13日~16日。本文研究的精矿粉是2011年11月新产生的,不代表采矿初期的精矿粉。

对于稀土精矿,因为其含量远远超过1%,已经不再是“微量”级别,因此不能直接称取粉末样品(尽管其本身已经是粉末)进行电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定,而用X射线荧光光谱测定稀土精矿中的稀土元素含量是完全可行的^[13]。本研究的稀土精矿由国家地质实验测试中心利用X射线荧光光谱测定稀土元素的含量,ICP-MS测定微量元素的含量。

3 稀土元素特征

3.1 稀土元素含量特征

由稀土元素的测定结果(表1)可见,四川稀土精矿粉在成分上有所差异。



(a) 原矿特征



(b) 磁选精矿

图1 A稀土矿区的原矿特征和磁选精矿

Fig. 1 Characteristics of rare earth ores and magnetic concentrates in the A REE deposit

(1)不同矿区稀土精矿的稀土含量不同。稀土含量最高的是C矿区稀土矿的产品,稀土元素总量(ΣREEs)为55.83%;最低的出现在A矿区,其浮选精矿的 ΣREEs 含量为41.57%,与C矿区相差达14.26%。

(2)同一矿区、不同选矿方式得到的精矿粉,其稀土含量有一定的差异。A矿区浮选的氟碳铈矿精矿粉的稀土总量($\Sigma\text{REEs} = 41.57\%$)低于磁选精矿($\Sigma\text{REEs} = 49.96\%$);浮选产品较磁选产品的稀土总量低8.38%,说明磁选产品的稀土纯度相对较高。

(3)同一矿区、不同企业生产的精矿粉,其稀土含量也有差异。例如,B矿区的两组样品,乙公司粗精矿[B-乙-jka(粗)]的 ΣREEs 为11.37%,甲公司粗选精矿[B-甲-1jkb(粗)]的 ΣREEs 为12.45%;对于成品精矿,乙公司精矿[B-乙-jkb(精)]的 ΣREEs 为42.92%,甲公司精矿[B-甲-1jka(精)]的 ΣREEs 为48.35%,即乙公司的精矿稀土含量低于甲公司。

表1 四川省A、B、C稀土矿精矿的稀土元素含量

Table 1 REE contents of samples from the A, B and C REE deposit in Sichuan Province

样品编号	w/%															
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Sc
A-1jk(磁)	17.49	25.06	1.47	5.04	0.34	0.079	0.22	<0.005	0.11	0.0082	0.037	0.0055	0.0005	0.0004	0.080	0.016
A-2jk(浮)	14.64	20.79	1.35	4.12	0.27	0.054	0.17	<0.005	0.08	0.0065	0.026	0.0049	<0.0001	0.0004	0.057	0.013
B-甲-1jka(精)	16.80	24.76	1.39	4.69	0.25	0.064	0.18	<0.005	0.09	0.0075	0.029	0.0049	0.0002	0.0003	0.063	0.017
B-甲-1jkb(粗)	4.35	6.22	0.47	1.20	0.07	0.018	0.05	<0.005	0.04	0.0019	0.009	0.0009	0.0002	0.0001	0.019	0.004
B-乙-jka(粗)	3.51	5.79	0.48	1.30	0.11	0.026	0.07	<0.005	0.04	0.0020	0.011	0.0011	0.0004	0.0002	0.029	0.004
B-乙-jkb(精)	13.59	22.33	1.26	4.80	0.37	0.085	0.22	<0.005	0.12	0.0076	0.034	0.0047	0.0001	0.0003	0.080	0.015
C-jk(精)	18.81	28.70	1.44	5.99	0.34	0.081	0.23	<0.005	0.12	0.0085	0.036	0.0062	0.0001	0.0003	0.052	0.019
C-jk(Fe)	0.097	0.15	0.019	0.033	0.001	0.004	0.01	0.008	0.01	0.0003	0.001	0.0004	0.0017	0.0019	0.001	<0.004
牦牛坪160	8876	13927	1333	4594	377	70.1	199.07	36.8	64.6	15.41	18.52	12.36	15.5	2.17	219.3	

注：牦牛坪160指的是矿区160件原生矿石样品的平均值，单位为 10^{-6} [14]。Tb的含量在精矿粉中均为 $<50 \times 10^{-6}$ ，在原矿石中为 37×10^{-6} 。

3.2 稀土元素配分曲线特征

稀土元素配分曲线如图2所示。由图2a可见，除了B矿区的甲公司和乙公司的初级产品之外，A、B和C三个矿区的精矿粉，其各个稀土元素的配分关系基本一致，总体上表现为：①轻稀土显著富集；②Eu相对富集；③重稀土中Tb、Ho和Yb呈明显亏损趋势，但Ho的亏损可能是继承性的（即原矿石中就相对亏损Ho），而Tb和Yb的亏损可能是技术性的，即在选矿过程中亏损。

从C矿区磁选副产品铁精粉中明显富集Tb的特点看，Tb可能赋存在磁选矿物中。Yb在精矿中的含量甚至低于其地壳丰度，原因待查明；④C矿区铁精粉中，相对富集的元素除了Eu之外，还有Tb、Tm和Lu，说明可能存在独立重稀土矿物，可利用不同的磁性特点在磁选过程中加以选别。

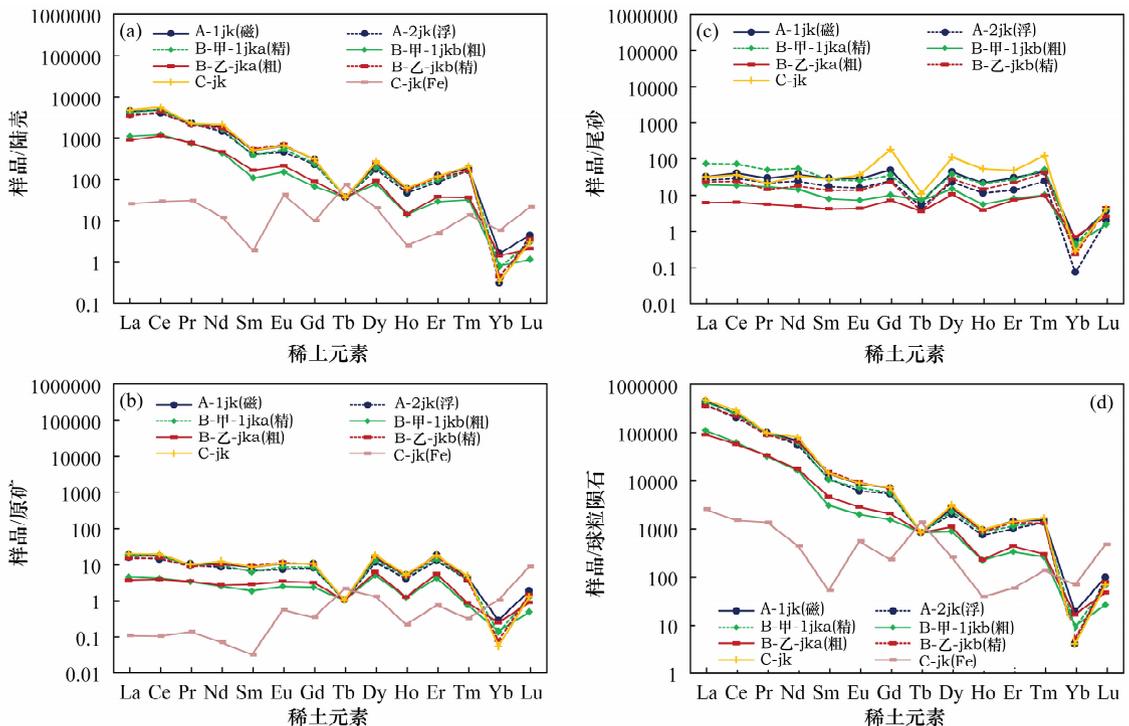


图2 四川部分稀土矿区精矿样品的稀土配分曲线

Fig. 2 REE patterns of rare earth concentrate samples from REE deposits in Sichuan province

a—陆壳标准化(标准化数据引自文献[15])；b—原矿标准化(标准化数据引自文献[14])；c—各矿区尾砂标准化；

d—球粒陨石标准化(标准化数据引自文献[16])。

相对于原矿石来说(见图2b),La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu与Gd在标准化曲线上几乎同步变化,显示精矿粉与原矿石一致的配分关系,说明轻稀土基本上富集于精矿中。但是,重稀土却显示复杂的情况,Tb、Ho、Tm、Yb明显亏损。其中,Ho和Tm及Lu在成品精矿粉中的绝对含量要高于原矿石,但无论是粗精矿还是精矿成品,Yb的含量均低于原矿石。那么,Yb去了何处?这是需要进一步调查的。B矿区粗精矿中Tm和Lu也低于原矿石,但成品精矿中Tm和Lu得以富集。相对于尾砂来说(图2c),精矿中Tb、Yb也明显亏损;而相对于球粒陨石,尾砂中Tb和Yb并不显示正异常,可见在选矿过程中Tb和Yb并没有残留在尾砂中。

相对于球粒陨石来说(见图2d),Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu六个元素在原矿石和精矿粉中的配分曲线基本上呈现镜像关系,即原矿石中富集的元素,在精矿粉中反而呈亏损的态势。这有两方面的原因:一是测试误差,即重稀土含量的测试结果可能未反映实际情况;二是可能存在独立的重稀土矿物,这些矿物未能在选矿过程中得以回收。

通过对比矿区原矿、尾砂、精矿粉的轻稀土和重稀土含量比值(LREEs/HREEs)可见,原矿的LREEs/HREEs=50,尾砂为76,精矿粉为117,说明在选矿过程中轻稀土发生了显著富集,而重稀土富集程度相对

低,除了Tb、Yb亏损外,Lu富集程度也很低。

4 微量元素特征

从表2和图3a明显可见,相对于大陆地壳丰度^[15]而言,3个稀土矿的精矿粉中微量元素含量有以下特征。

(1)不同矿区的精矿,微量元素组成有所差异。元素Ga、Th、U、Mo、W、Ag、Cd、Sn、Pb、Bi等均不同程度富集,其中以下元素显著富集:Ga平均富集20倍,Mo平均富集4000多倍,Ag平均富集近100倍,Pb平均富集150多倍,Th平均富集200多倍,U平均富集55倍,Bi平均富集15000倍。A矿区精矿中以下元素富集程度最高:Ga(0.0467%),Mo(浮选高达3.7%),W(0.0014%),Pb(0.5%),Bi(0.0164%)。C矿区中Ag(27 μg/g)、Th(0.3%)、U(0.0217%)最为富集。

(2)同一矿区不同选矿方法的精矿,微量元素的含量亦存在显著差异。例如,A矿区磁选精矿中Be、Ti、Co、Ni、Mn、Cu、Zn、Nb、Sn、Ta、Tl、U等元素的含量明显高于浮选精矿,尤其是磁选精矿中Mn相对地壳富集9倍,而浮选中明显亏损;磁选精矿中Co、Ni含量也比浮选精矿分别高14倍、5倍。而浮选精矿中Mo、Ag、Pb的富集倍数显著高于磁选精矿,分别是48倍、13倍、6倍。

表2 四川A、B和C稀土矿精矿粉中微量元素含量

Table 2 Trace element contents of samples from the A, B and C REE deposit in Sichuan Province

样品编号	$w/10^{-6}$											
	Li	Be	Ti	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Nb	Mo	Ag
A-1jk(磁)	67	5.4	1228	11729	15.0	5.5	279	686	498	187	776	1
A-2jk(浮)	50	0.6	252	313	0.3	0.2	27	93	436	48	37288	17
B-甲-1jka(精)	36	10.5	1455	342	33.5	20.2	101	943	188	18	127	3
B-甲-1jkb(粗)	74	5.1	2306	547	19.3	13.5	121	397	386	33	34	1
B-乙-1jka(粗)	49	3.0	1966	277	7.6	5.8	33	176	441	116	79	2
B-乙-1jkb(精)	14	3.3	685	166	3.6	7.6	35	125	160	41	430	2
C-jk(精)	26	0.2	788	151	9.2	5.0	36	83	409	20	719	27
C-jk(Fe)	2	0.7	1365	913	22.7	46.8	56	331	10	6	46	1
样品编号	Cd	In	Sn	Sb	Cs	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
A-1jk(磁)	1.4	0.04	6.3	0.6	0.3	3.1	12.6	0.8	1444	176	1230	100
A-2jk(浮)	0.4	0.06	3.1	0.5	0.1	0.8	14.7	0.1	8473	153	907	23
B-甲-1jka(精)	1.7	0.03	3.2	3.8	0.7	0.3	5.9	0.3	131	0.8	391	68
B-甲-1jkb(粗)	0.7	0.02	3.1	1.7	1.1	0.8	9.2	0.3	1625	0.3	1122	154
B-乙-1jka(粗)	0.5	0.01	3.3	1.8	0.3	0.9	9.5	0.1	55	0.6	1062	78
B-乙-1jkb(精)	0.4	0.01	3.0	2.7	0.2	0.3	3.6	0.1	208	1.1	371	28
C-jk(精)	0.5	0.02	3.1	0.4	0.3	1.1	1.8	0.3	1411	98.1	3301	217
C-jk(Fe)	0.1	0.04	3.7	0.5	0.2	0.3	2.2	0.0	191	8.4	49	8

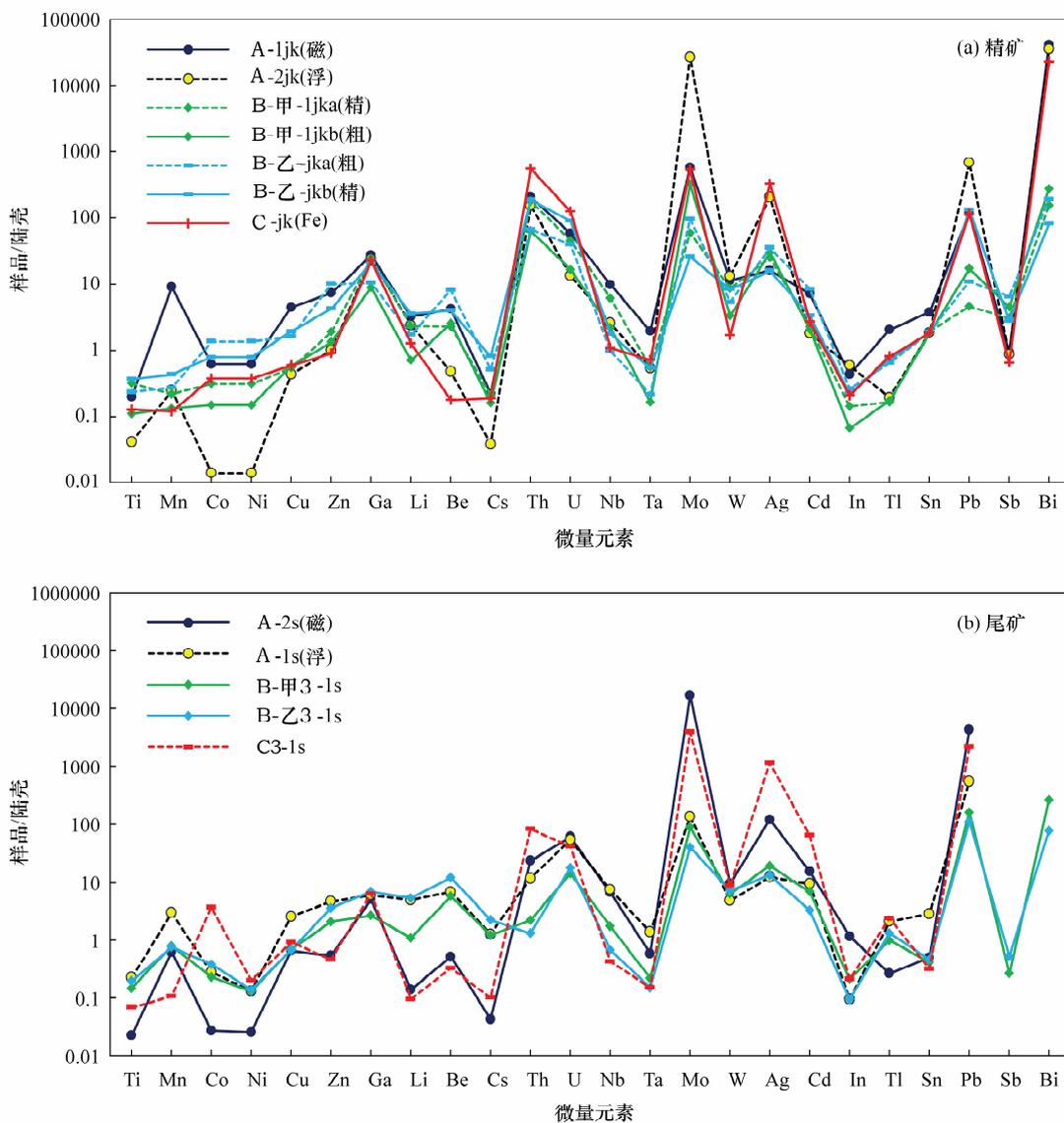


图3 四川稀土矿区精矿和尾砂中微量元素的陆壳标准化配分图解(陆壳数据引自文献[15])
Fig.3 Crust-normalized trace element diagrams of rare earth concentrate and tailings samples from REE deposit in Sichuan Province (Crust data from the literature [15])

(3)同一矿区不同企业生产的精矿,微量元素的含量存在差异。如B矿区甲公司的精矿中Be、Co、Ni、Cu、Zn、Cs含量显著高于乙公司,而乙公司的精矿中Nb、Mo含量稍高于甲公司。B矿区的粗精矿和精矿粉中微量元素也存在差异,粗精矿中Ti、Mn、Th、U含量显著高于精矿粉。

(4)各矿区尾砂中富集的元素在精矿中同样富集,但各元素的富集程度不同。例如,精矿中Ga、Th、U等元素的相对地壳富集程度明显高于尾砂,而精矿中Pb、Ag等元素的相对地壳富集程度明显低于尾砂。

5 精矿的稀土品位及综合回收利用

稀土精矿是指含稀土的原矿石经过选矿后所得到的高稀土品位的产品^[17]。因此,精矿的物质组成一方面取决于原矿石的地球化学特征,另一方面也受选矿方法的影响。四川稀土矿是单一的氟碳铈矿,伴生矿物为重晶石、长石、石英、方解石等。目前,稀土矿区不同程度地采用了重选、浮选和磁选工艺流程,稀土精矿中除了氟碳铈矿外还有重晶石、萤石等矿物,化学成分以稀土氧化物、BaO、CaO及F为主^[18]。牦牛坪不同矿段采选回收率不同,某些矿段仅36%,尾砂中稀土氧化物含量高达0.78%~

2.12%^[19-20]。长期以来缺乏对各矿山不同选矿方法、不同企业生产的精矿的稀土含量和其他有用组成特征方面的研究。

从本次采样调查的结果看,四川精矿产品的 REEs 含量平均为 47.71% (REO 平均为 57%), 高于包头混合型精矿的 REO 含量^[18]。各矿区、不同生产方式、不同企业生产的精矿产品 REO 含量存在较大差异, C 矿区产品的 REO 含量达到 67%, 而 A 矿区浮选精矿的 REO 含量仅为 50%, 即使 C 矿区精矿的稀土含量最高, 其尾砂的稀土含量仍较高 (REO 含量 1.79%)^[20]。A 矿区磁选产品的稀土纯度高于浮选产品; B 矿区乙公司精矿产品的稀土含量低。可见, 造成不同矿区精矿中稀土含量差异较大的原因, 除了各矿区原矿的稀土品位存在差异之外, 生产方式和不同企业生产质量都影响精矿的稀土品位。值得说明的是, 该结果仅代表 2011 年 10 月采样时各矿区精矿的稀土品位情况, 早期精矿品位可能更低, 这也从早期尾砂中 REO 高含量 (2.01%) 的特征得到佐证^[20]。

本次研究结果表明, 精矿中除了含有稀土元素, 还存在大量的共伴生组分, 可以综合利用, 如 Mo (含量 0.56%)、Ga (平均含量 0.036%)、Pb (A 矿区浮选尾砂中铅含量 0.8%) 等元素达到现行工业指标的边界品位。与尾砂中微量元素含量进行对比发现, 尾砂中富集的微量元素在精矿中显著富集, Bi、Th、U、Nb、Cu、Zn 等元素也值得综合利用。

四川氟碳铈矿精矿与白云鄂博氟碳铈矿-独居石混合型精矿相比, 选矿方法简单, 稀土品位稍高; 与美国芒廷帕斯氟碳铈矿精矿相比^[18], 中、重稀土含量较高。四川稀土精矿的综合利用价值高, 伴生有 Mo、Pb、Ga 等有益组分, 可以综合利用, 在氟碳铈矿型精矿中占有重要地位。

6 结语

四川省 A、B、C 三矿区稀土矿精矿产品的稀土元素和微量元素研究表明, 2011 年 11 月四川三个矿区、不同企业生产的精矿产品, 其稀土元素、微量元素含量均存在差异。由于各矿山原矿的稀土品位存在差异, 以及选矿方法和生产企业不同, 精矿的稀土品位存在较大差异, 最高的是 C 矿区的产品 (REO 含量 67%), 最低的是 A 矿区浮选精矿 (REO 含量 50%)。A 矿区磁选精矿的稀土品位 (REO 含量 60%) 高于浮选精矿 (REO 含量 50%), B 矿区甲

公司精矿的稀土品位 (REO 含量 58%) 高于乙公司 (REO 含量 52%)。精矿中 Ga、Th、U、Mo、W、Ag、Cd、Sn、Pb、Bi 等元素均不同程度富集, Mo (含量 0.56%)、Ga (平均含量 0.036%) 和 Pb (A 矿区浮选尾砂铅含量 0.8%) 已达边界品位, Bi、Th、U、Nb、Cu、Zn 等元素也值得综合利用。

本文对于四川稀土精矿的稀土元素及微量元素研究, 取得了初步资料, 为下一步工作积累了经验。但总体上, 科学地布置样品、准确地确定资源评价指标、合理地提出稀土综合利用方案还有很多工作需要开展。

7 参考文献

- [1] 中国地质科学院矿产综合利用研究所. 四川冕宁稀土资源开发利用现状和进展[R] // 我国三稀矿产资源战略调查阶段性成果(第一辑). 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所, 2011.
- [2] 袁忠信, 白鸽. 四川冕宁牦牛坪稀土矿床[M]. 北京: 地震出版社, 1996: 1-159.
- [3] 袁忠信, 李建康, 王登红, 郑国栋, 姜德波, 陈郑辉, 赵芝, 于扬. 中国稀土矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-116.
- [4] 王登红, 杨建民, 阎升好, 徐珏, 陈毓川, 薛春纪, 骆耀南, 应汉龙. 西南三江新生代矿集区的分布格局及找矿前景[J]. 地球学报, 2002, 23(2): 135-140.
- [5] 侯宗林. 浅谈我国稀土资源与地质科学研究[J]. 稀土信息, 2003(10): 7-10.
- [6] 袁忠信, 白鸽, 丁孝石. 四川冕宁牦牛坪碱性花岗岩锆石铀-铅同位素年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 1993, 12(2): 189-192.
- [7] Wang D H, Yang J M, Yan S H, Xu J, Chen Y C, Pu G P, Luo Y N. A special orogenic-type rare earth element deposit in Maoniuping, Sichuan, China: Geology and geochemistry [J]. *Resource Geology*, 2001, 51(3): 177-188.
- [8] 张培善. 中国稀土矿床成因类型[J]. 地质科学, 1989(1): 26-32.
- [9] 袁忠信, 白鸽. 中国内生稀有稀土矿床的时空分布[J]. 矿床地质, 2001, 20(4): 347-354.
- [10] 李小渝, 何庆. 攀西地区稀土成矿带成矿地质特征[J]. 四川地质学报, 2000, 20(1): 50-57.
- [11] 邹天人, 李庆昌. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-284.
- [12] 李小渝. 四川德昌大陆槽稀土矿床中伴生镱矿的特征及开发利用意义[J]. 四川稀土, 2006(2): 26-29.
- [13] 逯义. X 射线荧光光谱法测定稀土精矿中的稀土元素分量[J]. 岩矿测试, 2012, 31(2): 277-281.

- [14] 四川稀土行业协会,四川109地质队.四川稀土资源及开发利用[R].1999.
- [15] 黎彤,袁怀雨.大洋岩石圈和大陆岩石圈的元素丰度[J].地球化学,2011,40(1):1-5.
- [16] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell Science Publishing, 1985: 330.
- [17] 钱九红,李国平.中国稀土发展现状[J].稀有金属,2003,27(6):183-188.
- [18] 吴文远,边雪.稀土冶金技术[M].北京:科学出版社,2012:1-277.
- [19] 王登红,王瑞江,李建康,赵芝,于扬,代晶晶,陈郑辉,李德先,屈文俊,邓茂春,付小方,孙艳,郑国栋.中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述[J].中国地质,2013,40(2):361-370.
- [20] 刘丽君,赵芝,付小方,任希杰,方一平,侯立玮,王登红.四川稀土尾砂中稀土、微量元素的初步研究及其意义[J].岩矿测试,2013,32(5):817-824.

Geochemistry of Rare Earth and Trace Elements in Rare Earth Concentrate from Sichuan Province and the Significance of the Exploitation and Utilization

ZHAO Zhi¹, FU Xiao-fang², REN Xi-jie³, FANG Yi-ping⁴, HOU Li-wei²,
WANG Deng-hong¹, LIU Li-jun⁵

- (1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
2. Sichuan Geological Survey, Chengdu 610081, China; 3. Panxi Geological Team, Xichang 615000, China;
4. Development and Research Center, Geological Survey of China, Beijing 100037, China;
5. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Sichuan Province is one of the most important provinces in China for light rare earth element (LREE) resources, where has been produced a large amount of rare earth concentrate in the past 20 years. Rare earth elements (Σ REEs) and other useful elements in rare earth concentrates are very important for resource evaluation and enterprise survival. In this paper, geochemistry of rare earth elements (REEs) and trace elements in samples from the A, B and C REE deposits has been studied. The results show that the content of REEs and trace elements in rare earth concentrate samples are changed in different deposit, enterprise and different mineral dressing process. The lowest level of Σ REEs is from A (Σ REEs = 41.96%), the highest level is from C (Σ REEs = 55.83%). Σ REEs of magnetic concentrate (Σ REEs = 49.96%) is higher than flotation concentrate (Σ REEs = 41.57%), and Σ REEs from Jia Company (Σ REEs = 48.35%) is higher than from Yi Company (Σ REEs = 42.92%). The REE distribution patterns of concentrate sample are inherited from rare earth ores while Tb and Yb are depleted, indicating that the mineral dressing process may lead to loss of these elements. REEs are enriched in concentrate sample, and Mo, Bi, Pb, Ga, Th, U, W are also enriched. Especially, Mo and Ga are in cut-off grade. These results indicate that it is necessary to increase REE grade of rare earth concentrate, and to take appropriate measures to reclaim higher concentration elements.

Key words: rare earth concentrate in Sichuan Province; rare earth elements; trace elements; rational use of resources