

文章编号: 0254 - 5357(2013)05 - 0817 - 08

四川稀土矿尾砂的稀土元素和微量元素地球化学特征及开发利用意义

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

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;

2. 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;

3. 四川省地质调查院, 四川 成都 610081; 4. 攀西地质大队, 四川 西昌 615000;

5. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘要: 四川是我国轻稀土的重要产地, 稀土开采至今已有二十多年的历史, 积存了大量尾砂。尾砂中仍然有丰富的稀土资源, 但这部分资源究竟有多大的量、能不能再次回收, 如何回收, 则是当务之急。为查明稀土尾砂中各类元素的分布特征, 本文对 A、B、C、D 四个稀土矿山的尾砂开展了稀土元素和微量元素地球化学特征的初步研究。结果表明: 尾砂中稀土元素配分特征继承了原矿石, 稀土氧化物含量普遍偏高(0.78% ~ 2.12%), 均超过了现行工业指标的边界品位(0.5% ~ 1.0%), 且老尾砂的稀土含量高于新尾砂; 除了富集稀土元素之外, A 矿区尾砂中 Ba 含量可达 1.8%, B 矿区尾砂中 Sr 含量超过 10%, C 矿区尾砂中 Sr 含量为 2.7%。同时, 不同矿区的尾砂中 Mo、Bi、Pb、Ag 等有用元素发生了不同程度地富集(值得综合回收利用), 尤其是 Mo 达到了边界品位(磁选后的尾砂 Mo 含量达到 2.275%)。本文提出, 今后不仅要加强保护四川稀土尾砂, 而且需对富集的有用元素采取恰当的方式加以综合回收。

关键词: 四川省稀土矿尾砂; 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

四川的稀土矿自 20 世纪 80 年代末以来, 一直在不同程度地开发利用, 积存了大量的尾砂。由于稀土回收技术不过关、私挖乱采^[1-2]、矿物组合复杂^[3]等种种原因, 尾砂中还不同程度地含有稀土资源, 不少专家和单位对此也提出了加强回收利用的建议^[4]。但针对尾砂中究竟含有大量的稀土资源、含量多高、可否再次回收利用等问题, 只有笼统的概念而缺乏具体的数据。2011 年 11 月起, 中国地质大调查“我国三稀金属资源战略调查”项目组会同四川课题组, 多次对四川省多个稀土矿开展了野外调查, 采集了风化壳、原矿、精矿和尾砂样品, 利用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)等先进的技术手段, 对其中的稀土元素和相关有用元素进行了分析测试, 获得了一批新数据, 为科学管理、合理利用

和充分回收稀土资源提供依据。本文报道了 A、B、C、D 四个稀土矿山尾砂样品的稀土元素及微量元素研究成果。

1 地质概况

攀西是我国新生代重要的稀土矿产区^[3,5-8], 该区发育两个大型稀土矿床, 以及一些中型、小型矿床。牦牛坪稀土矿区位于冕宁县城 240°方向平距约 22 km 的森荣乡境内。矿带呈北北东向, 长 2600 m, 由复杂脉状及网脉状稀土矿脉组成。初步圈定矿体 64 个, 矿体一般长 200 ~ 700 m, 最长 1000 余米; 一般厚 5 ~ 30 m, 最厚部位达 100.57 m; 沿倾斜延深数十米至 400 余米, 稀土氧化物(REO)平均含量为 1.07% ~ 5.77%^[9]。牦牛坪矿区的稀土矿石

收稿日期: 2013 - 05 - 23; 接受日期: 2013 - 07 - 10

基金项目: 中国地质大调查项目——我国“三稀”资源战略调查及综合项目(1212011220803), 我国离子吸附型稀土战略调查及研究项目(1212011220804), 四川“三稀”资源综合研究与重点评价项目(12120112208014)

作者简介: 刘丽君, 本科生, 地质矿产专业。E-mail: 774240156@qq.com。

通讯作者: 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。

自然类型有碱性伟晶岩型、细网脉浸染型、方解石碳酸岩型三大类,已发现各类矿物 85 种,其中稀有、稀土及铀钍矿物 16 种。矿石中 75%~96% 的稀土元素呈独立矿物产出,以氟碳铈矿为最主要的工业矿物。矿石中伴生有益组分有 Pb、Ag、Mo、Nb、Th 及萤石、重晶石等,Fe、P、Ca 等有害杂质含量低。

三岔河矿区位于牦牛坪稀土矿的北部,成矿作用与钠长钾长花岗岩有关,以氟碳铈石英脉为主,次为氟碳铈矿萤石脉型,小型规模^[10]。羊房沟稀土矿,产于霓石碱性花岗岩与砂板岩残留体的接触带,以氟碳铈矿萤石方解石脉为主^[11]。大陆槽矿区位于四川省德昌县城南西 223°,平距 32 km 的大陆乡原乡政府所在地,面积 2 km²。稀土矿石矿物成分较简单,氟碳铈矿是唯一的工业稀土矿物,其他可利用的工业矿物有方铅矿、锑重晶石、钡天青石、萤石;脉石矿物主要有霓辉石、方解石、毒重石、云母、长石、石英等。稀土氧化物(REO)品位一般在 2%~5%,天青石(SrSO₄)品位可达 25%~27%,Th 含量仅 0.002%。杂质含量低,矿石质量好。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^[12]。

2 样品采集及元素分析方法

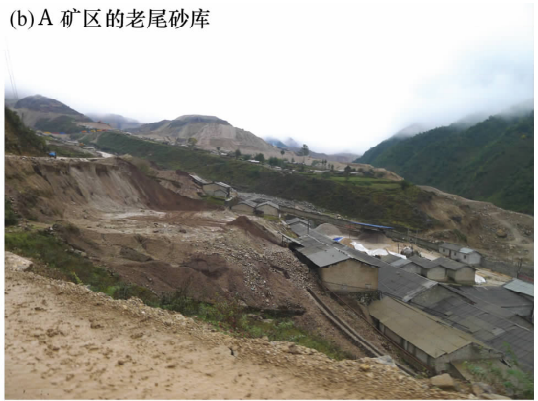
本次研究所用的 7 件样品采自 A、B、C 和 D 四个矿区,涉及多家矿山企业,如图 1 所示。其中,样品 A4-1s 采自 A 矿区新近形成的主要由浮选形成的尾砂库,A4-2s 采自 A 矿区新形成的主要由磁选形成的尾砂库,A3-1s 采自 A 矿区外围无名老尾砂库,D-1s 采自 D 矿区尾砂库(已经经过二次回收),B-甲-1s 采自 B 矿区甲公司的尾砂库,B-乙-1s 采自 B 矿区乙公司的尾砂库,C-1s 采自 C 矿区尾砂库。每件样品质量约 3 kg,取自各尾砂库距表层约 50 cm 深度,取样时间 2011 年 10 月 13 日~16 日。鉴于采样手段的限制,各个尾砂库底部的样品未能采集,也就是说本文研究的尾砂是近年来新产生的,不代表采矿初期的尾砂。一般来说,采矿初期的原矿品位偏高而综合回收程度偏低,会导致尾矿库底部样品中的有益元素的含量较上部更高。

样品的分析测试工作在国家地质实验测试中心利用 ICP-MS 完成。

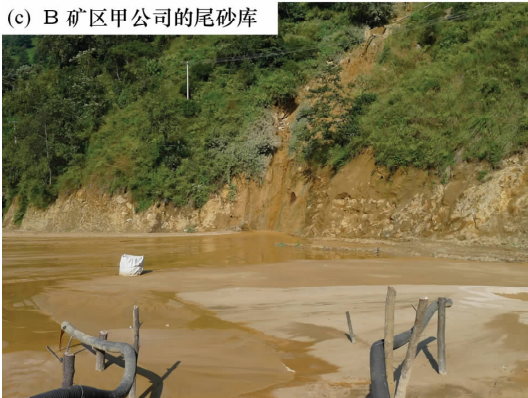
(a) A 矿区的新尾砂库



(b) A 矿区的老尾砂库



(c) B 矿区甲公司的尾砂库



(d) B 矿区乙公司的尾砂库



图 1 四川省 A 和 B 稀土矿区的尾矿库

Fig. 1 Tailing dams of the A and B REE deposits in Sichuan Province

3 尾砂中稀土元素和微量元素特征

尾砂中稀土元素和微量元素的分析结果见表1和表2。

为具体查明不同类型样品中稀土元素和微量元

素的含量特征及其赋存状态,探讨稀土资源充分回收利用的有效途径,有必要从元素地球化学的角度对表1和表2的测试结果进行综合分析。

表1 四川A、B、C和D稀土矿尾砂中稀土元素含量

Table 1 REE contents of tailings from the A, B, C and D REE deposits in Sichuan Province

样品编号	$w/10^{-6}$														
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
A4-1s	5219	6625	569	1562	147	32.5	62.24	8.01	33.1	5.41	17.8	1.86	12.2	1.83	162
A4-2s	4995	5784	456	1265	108	25.4	42.36	5.73	22.4	3.47	11.3	1.16	7.49	1.04	110
A3-1s	6382	8000	661	1728	134	23.8	27.44	5.60	22.2	3.46	12.6	1.17	7.64	1.08	113
D-1s1	3758	4824	396	1119	103	18.5	42.51	5.76	24.3	3.92	12.5	1.33	8.64	1.23	143
B-甲-1s	2106	3175	259	796	87.4	23.8	45.79	5.19	22.3	3.33	9.85	0.89	5.14	0.62	90.0
B-乙-1s	5420	8655	838	2553	261	58.4	87.83	11.0	38.3	4.99	14.5	1.06	5.58	0.68	140
C-1s	5440	7368	627	1633	115	21.0	11.47	3.45	10.6	1.48	6.94	0.48	3.46	0.62	38.6
英碱正长岩	102	138	15	45	7	1.6	4.35	0.58	2.4	0.49	1.24	0.17	1.02	0.15	16.6
矿化英碱正长岩	808	1090	117	323	32	6.1	16.34	1.89	6.2	1.50	2.71	0.40	1.88	0.25	33.3
矿化碱长花岗岩	854	1517	158	490	57	11.1	27.82	3.11	9.6	2.04	3.39	0.54	2.45	0.34	32.5
煌斑岩	3236	6002	588	1908	215	35.9	87.10	10.58	26.0	5.34	10.32	1.65	8.36	1.16	110.3
碳酸岩	729	1288	147	504	67	16.0	41.94	5.22	21.8	4.17	9.33	1.23	6.40	0.83	92.2
牦牛坪160	8876	13927	1333	4594	377	70.1	199.07	36.80	64.6	15.41	18.52	12.36	15.50	2.17	219.3

注:英碱正长岩、矿化英碱正长岩、矿化碱长花岗岩、煌斑岩和碳酸岩均属于牦牛坪的岩石样品平均值,原始资料见文献[5-7]。

牦牛坪160指的是矿区160件原生矿石样品的平均值,据四川稀土行业协会和四川109地质队合编的资料^[13]。

表2 四川A、B、C和D稀土矿尾砂中微量元素含量

Table 2 Trace element contents of tailings from the A, B, C and D REE deposits in Sichuan Province

样品编号	产地	$w/10^{-6}$										
		Li	Be	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge
A4-1s	A	100.2	8.7	1362	27.1	3751	6.7	11.1	155.5	425	105.3	3.8
A4-2s	A	2.8	0.6	137	10.4	785	0.7	2.2	40.2	48.5	87.8	2.9
A3-1s	A	111.0	5.7	2217	25.6	1340	5.2	10.3	61.6	267	133.8	4.6
D-1s1	D	153.1	8.1	2124	34.6	684	8.5	17.3	21.9	217	106.5	5.3
B-甲-1s	B	22.1	7.3	891	15.3	991	5.5	10.9	42.2	188	46.4	1.7
B-乙-1s	B	108.3	15.4	1181	17.5	955	9.1	11.7	41.2	326	121.5	2.6
C-1s	C	1.9	0.4	417	9.0	132	89.1	16.8	55.8	41.6	110.9	3.6
样品编号	Sr	Rb	Hf	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Ba
A4-1s	1012	154.4	6.9	167.1	138.4	177.1	1.0	1.9	0.0	4.7	<0.1	14510
A4-2s	830	5.0	11.2	316.8	124.1	22750	9.6	3.0	0.1	0.8	<0.1	3626
A3-1s	2371	150.8	12.4	382.9	103.6	368	0.7	2.0	0.0	5.8	0.2	18030
D-1s1	90.1	244.3	7.6	195.2	26.9	43.0	0.4	0.4	0.1	5.3	<0.1	1185
B-甲-1s	107400	58.6	2.3	61.8	32.0	114	1.5	1.4	0.0	0.7	0.2	3290
B-乙-1s	106200	65.8	1.6	40.8	12.4	51.7	1.0	0.6	0.0	0.8	0.3	1513
C-1s	27000	10.1	40.7	1587	7.8	5232	94.6	12.7	0.0	0.5	<0.1	255
样品编号	Cs	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U	Te	As	Rb	Sc
A4-1s	1.7	2.1	5.1	0.8	6702	136.1	67.0	90.4	0.9	9.8	154.4	4.7
A4-2s	0.1	0.9	10.2	0.1	52710	297.0	134.8	101.6	3.9	12.0	5.0	0.8
A3-1s	2.0	2.9	5.2	0.6	2468	23.8	151.7	49.7	0.4	18.4	150.8	5.5
D-1s1	6.4	2.3	2.8	0.9	483	12.3	57.6	25.7	0.3	11.4	244.3	8.4
B-甲-1s	1.7	0.3	6.8	0.4	1949	1.1	12.3	23.7	0.7	6.9	58.6	4.8
B-乙-1s	3.0	0.2	7.8	0.5	1314	0.3	7.3	29.8	0.5	12.1	65.8	8.0
C-1s	0.1	0.2	9.4	0.9	26820	580.9	473.2	69.7	13.3	14.5	10.1	1.9

3.1 稀土元素特征

各稀土矿区尾砂中稀土元素具有以下特征(见图2~图4)。

(1)四川稀土矿区尾砂中稀土元素的球粒陨石配分曲线与牦牛坪矿区的岩石和矿石样品基本一致,均为轻稀土型,表明尾砂中稀土元素的地球化学特征对于原矿石具有继承性。

(2)同一矿区不同生产年份形成的尾砂,其中稀土元素的含量差异很大。如A矿区20世纪90年代形成的老尾砂中稀土元素含量高达 17122.95×10^{-6} (样品号A3-1s),远高于近年来的新尾砂。老尾砂经过二次选矿后可明显降低尾砂中的稀土含量,如D矿区尾砂(10461.76×10^{-6})与老尾砂相比,其稀土总量要低39%,相当于回收率又提高了1/3以上。

(3)同一矿区、相同年份但不同企业产生的尾砂,稀土元素的含量差异较大。例如,B矿区乙公司尾砂中稀土元素总量达到 18087.85×10^{-6} ,即1.8%,而同一矿区甲公司的尾砂中稀土元素含量为 6630.84×10^{-6} ,即0.66%,后者约相当于前者的1/3。

(4)同一矿区,不同选矿方式产生的尾砂中,稀土元素的含量差异不是太大。例如,A矿区浮选尾砂中的稀土元素含量为 14458.99×10^{-6} ,磁选尾砂为 12837.51×10^{-6} ;同一方法不同矿区尾砂中的稀土元素含量也无明显的差异,如A矿区磁选尾砂为 12837.51×10^{-6} ,而C矿区磁选尾砂为 15280.47×10^{-6} 。

(5)同一矿区,由于采用的选矿方法不同,轻重稀土在尾砂中的残留程度可能发生变化。例如,A矿区浮选尾砂和磁选尾砂中轻稀土的含量与配分模式非常一致,但重稀土在浮选尾砂中明显富集,这可能是由于存在重稀土矿物,重稀土矿物不宜通过浮选回收、以至于更多地残留在尾砂中,而磁选正好可以回收具有一定磁性的重稀土矿物。

根据行业标准《稀土矿产地质勘查规范》(DZ/T 0204—2002),原生矿的边界品位为0.5%~1.0%(REO),最低工业品位为1.5%~2.0%(REO),上述7个尾砂样品的REO含量变化于0.777%~2.119%,除了B矿区甲公司尾砂REO含量低于1%之外,其他尾砂的REO含量也均高于或接近于最低工业品位(1.5%~2.0%)。即便是B矿区甲公司的尾砂,其稀土元素的含量也高于边界品位(0.5%~1.0%)。

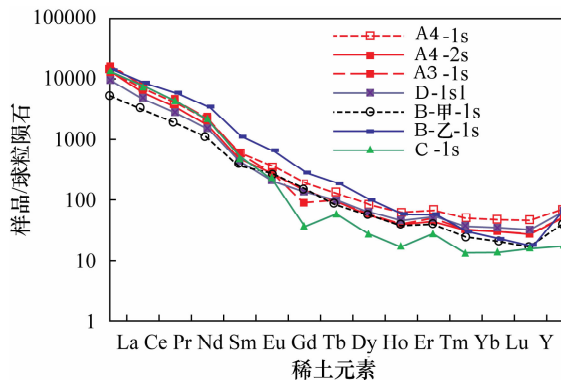


图2 四川主要稀土矿区尾砂样品的稀土配分曲线
Fig.2 Chondrite-normalized REE patterns of tailings from the main REE deposits in Sichuan Province

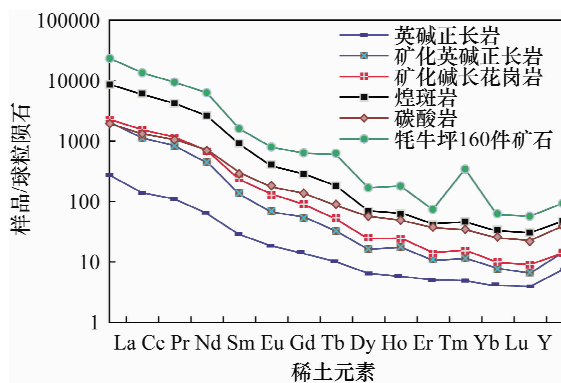


图3 四川牦牛坪矿区岩、矿石的稀土配分曲线
Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns of rocks and ores from the main REE deposits in Sichuan Province

3.2 微量元素特征

从表2和图5明显可见,相对于大陆地壳丰度^[14],微量元素具有以下特征。

(1)不同微量元素在尾砂中的富集程度明显不同。其中,富集程度在10万倍以上的有Bi(C矿区),1万倍以上的有Mo(A矿区磁选尾砂)、Bi(A矿区浮选尾砂超过3万倍,磁选尾砂超过7万倍)和Te(C矿区尾砂),1000倍以上的有Pb(A矿区磁选尾砂为陆壳的4055倍,C矿区为2063倍)、Ag(C矿区)和Te(A和B矿区),100倍以上的有Sr(B矿区)和REEs(A和B矿区的部分尾砂),10倍以上的有U(所有尾砂,但A矿区最高)、Th(C矿区高达73倍)、Hf(C矿区)、Ba(A矿区老尾砂及浮选尾砂)、Cd(C矿区高达91倍)、Zr(C矿区)和Be(B矿区)。

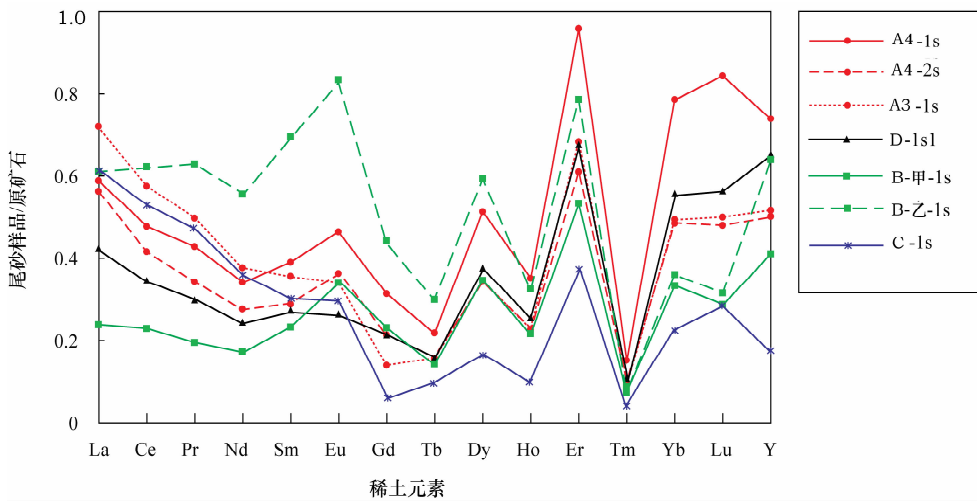


图4 四川稀土矿区尾砂中稀土元素相对于原矿石的富集程度

Fig.4 Ore-normalized REE patterns of tailings from REE deposits in Sichuan Province

(2)各个尾砂库中大部分微量元素均不同程度地富集,只有 Sc、Ti、Cr、Mn、Co、Ni 等铁族元素在各个矿区的尾砂中低于大陆地壳丰度。这可能是由于这几个稀土矿在成因上与酸性的碱性岩浆岩密切相关,以至于尾砂中也记录下了其成因信息。C 矿区虽然存在基性岩浆活动,但因为采用磁选,亲铁组分可能随铁精粉而带走,导致尾砂中铁族元素亏损。这从其 Li、Be、Rb、Cs 等碱性元素的亏损特征也得以佐证。

(3)不同选矿方法对尾矿中有益元素的富集程度有明显的影响。在元素周期表中位于稀土元素之前、之上的元素富集在浮选之后的尾砂中,而位于元

素周期表右下部位的重元素则富集在磁选后的尾砂中。如 A 矿区磁选尾砂相对于浮选尾砂明显富集 Mo、Bi、Pb、Ag 等亲硫元素及其中伴生的稀散元素,如 In、Te 等(但 Cu、Zn 在浮选尾砂中反而偏高,原因待查)。因此,对磁选后的尾砂补充浮选手段有可能回收部分有色金属,尤其是 A 矿区磁选后尾砂中 Mo 含量达 2.275%,相当于钼矿原生矿石最低工业品位的 38 倍,也就是说尾砂就是一个富钼矿。

(4)尾砂中除稀土以外的微量元素含量,与原矿类型、尾砂形成时间、采用的选矿方式以及所属企业之间似无必然的联系,即不一定早期形成的尾砂中有益金属元素含量高、回收价值就大。如, A 矿

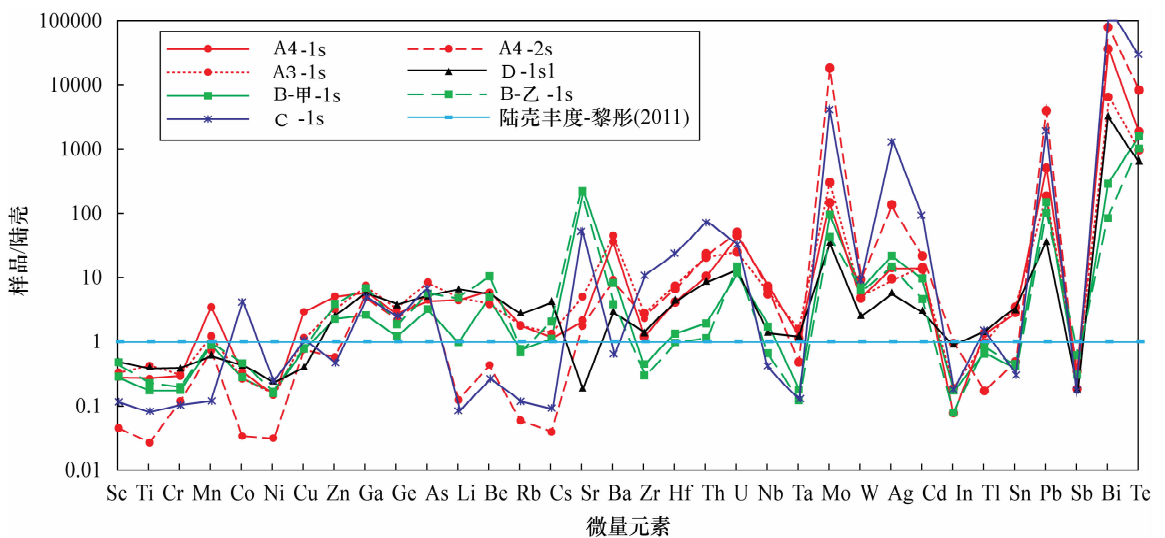


图5 四川稀土矿区尾砂中微量元素相对于陆壳的配分曲线

Fig.5 Crust-normalized trace element diagram of tailings from REE deposits in Sichuan Province

区老尾砂中 Mo 的含量为 0.038% (已达到原生矿边界品位), 低于近期磁选后的尾砂 (2.275%), 但高于近期浮选尾砂 (0.0177%); Pb 含量则是新尾砂明显高于老尾砂。

以现行工业指标为参考, 已达边界品位的除了稀土元素和 Mo 之外, 还有 Sr (B 矿区两个尾砂样品中含铈均超过 10%, 说明铈重晶石、钡天青石之类的矿物没有充分回收, 见图 6 和图 7)、Ag (C 矿区达 94.57×10^{-6}) 和 Pb (A 矿区磁选尾砂 Pb 含量 5.27%, 浮选尾砂 Pb 含量 0.67%, C 矿区尾砂 Pb 含量 2.68%), Bi、Th、U、Te、Nb、Zr、Cu、Zn 等元素也值得综合回收利用。

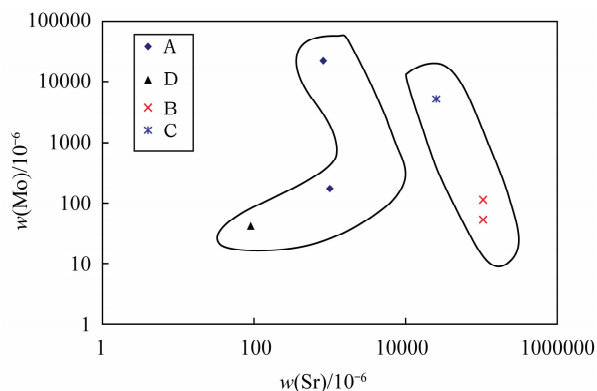


图 6 四川稀土尾砂中 Sr 与 Mo 的含量及相关性
Fig. 6 Sr vs. Mo correlation diagram of tailings from REE deposits in Sichuan Province

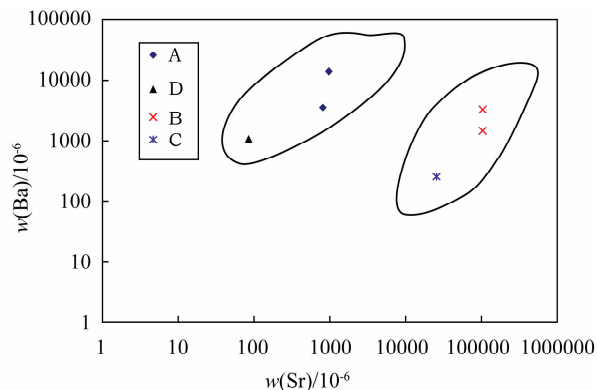


图 7 四川稀土尾砂中 Sr 与 Ba 的含量及相关性
Fig. 7 Sr vs. Ba correlation diagram of tailings from REE deposits in Sichuan Province

5 尾砂矿的稀土品位及综合回收利用

尾砂是原矿石经过物理、化学方法处理、有用组分被提取之后的产物, 因此, 尾砂的物质组成一方面

取决于原矿石的地球化学特征, 另一方面受到选矿方法的制约, 同时也受到矿业政策的影响。因此, 对尾砂中稀土元素及相关微量元素的地球化学研究, 可以为回收再利用提供依据。

四川稀土矿的开采始于 1989 年, 以牦牛坪为首的矿山经历了由小到大、由少到多、由点到面、一哄而上、群采群挖、弃贫采富的混乱局面。同时又经历多次治理整顿, 不断改进采、选、冶技术的复杂过程。目前, 稀土矿区不同程度地采用了重、浮、磁选工艺流程, 综合回收率有所提高, 但尾砂尤其是早期尾砂中积存的稀土资源相当可观, 主要富集于浮选中矿和尾矿中铈重晶石、毒重晶石及萤石绝大部分没有回收利用。鉴于四川牦牛坪某些矿段的采选回收率仅 36%^[15], 近年来国家下达给四川的年开采总量指标为 24400 吨, 以原矿品位平均 2.5% 估算每年产生的尾砂量约 280 万吨。

本次采样调查的结果显示, A 稀土矿区尾砂的 REO 含量为 1.50% ~ 1.69%, 老尾砂更是高达 2.01%, 而经过二次选矿的尾砂的 REO 含量则降低到 1.23%。堆存于 D 矿区的尾砂, 由于经过了二次利用, 其稀土元素含量较堆存于 A 矿区的老尾砂要低 39%。B 矿区甲公司尾砂的 REO 含量为 0.78%, 但同一矿区乙公司尾砂的 REO 含量则达 2.12%, C 矿区尾砂的 REO 含量为 1.79%。以每年新增 280 万吨尾砂计, 其中稀土含量至少 3 万吨。所有尾砂均高于边界品位, 甚至超过现行最低工业品位。从经济成本核算的角度考虑, 尾砂再利用过程中采矿成本已经很低, 但选矿成本可能较高, 因此如何给出一个尾砂矿再利用的边界品位或工业品位, 值得进一步研究。显然, 原矿品位与尾砂品位应该有所区别。在尚难以回收利用或者没有成熟方案之前, 这部分尾砂也应该作为资源考虑, 不能挪作他用, 如修路时铺洒在路面上, 或者制作空心砖之类的利用方式应禁止。

除了稀土元素之外, 尾砂中还存在大量的共生组分可以回收利用。本次取样测试结果表明, Sr、Ba、Mo、Pb、Ag 等元素的含量在各个矿区的尾砂中均不同程度地富集, 值得考虑综合回收。其中, A 矿区磁选后尾砂中 Mo、Pb 的含量均超过 2%, 因此, 尽管磁选尾砂中稀土含量低于浮选尾砂, 但其中的 Mo、Pb 应该加以回收。

6 结语

通过对四川目前正在开采的 A、B 等稀土矿区

尾砂的调查、取样分析,结果表明:①近期产生的尾砂中稀土元素的含量均超过现行原矿工业指标边界品位,其本身也相当于稀土矿床。因此,对其中的稀土元素要加以保护,在选矿技术方法得以改进、市场需求旺盛等条件具备的情况下,完全可以再利用。②尾砂中除了稀土元素之外,Mo、Bi、Pb、Ag等有用元素在不同的矿区均不同程度地富集,需要采取恰当的方式加以综合回收。这部分亲硫元素以及与之相伴生的其他分散元素(如Te、Cd、As等),如果不及时回收利用,也会对环境产生负面影响;③Sr和Ba在不同矿区的尾砂中存在明显不同的富集方式,B矿区尾砂Sr含量>10%,C矿区也达到2.7%,而A矿区的尾砂则富集Ba。A矿区浮选尾砂中Li、Be、Nb、Ta、Rb、Cs等碱性的亲石元素明显富集,而C矿区则贫化这些元素。因此,尾砂中受选矿方法影响比较小或不受其影响的元素,其地球化学特征可作为判断原矿石类型和成因的辅助手段。

值得指出的是,本文对于四川稀土尾砂资源的调查研究,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的指标、合理地提出综合回收的方案还有很多工作需要开展。

7 参考文献

- [1] 涂铭旌. 充分利用四川丰产稀土资源,促进稀土工业持续发展[J]. 世界科技研究与发展,2003,25(1): 1-5.
- [2] 程建忠,车丽萍. 中国稀土资源开采现状及发展趋势[J]. 稀土,2010,31(2): 65-85.
- [3] 袁忠信,李建康,王登红,郑国栋,娄德波,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,2012: 116.
- [4] 王国祥,周建英,涂明泉. 四川省冕宁县牦牛坪稀土尾矿综合利用探讨[J]. 资源环境与工程,2007,21(5): 624-628.
- [5] 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.
- [6] 王登红,杨建民,闫升好,陈毓川,徐珏. 四川牦牛坪碳酸岩的同位素地球化学及其成矿动力学[J]. 成都理工大学学报,2002,39(5): 539-544.
- [7] 王登红,陈毓川,徐珏,邹天人,薛春纪,罗君烈,骆耀南,伍广宇,李志伟,余金杰,闫升好,杨建民,傅旭杰,付小方,傅德明,楚萤石,魏琳,李晓焰. 中国新生代成矿作用[M]. 北京:地质出版社,2005: 853.
- [8] 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.
- [9] 中国矿床发现史·四川卷编委会. 中国矿床发现史·四川卷[M]. 北京:地质出版社,1996: 223.
- [10] 秦震. 攀西地区碱性岩类稀有、稀土矿成矿条件及找矿前景[J]. 四川地质学报,1995,15(2): 101-113.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.

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

LIU Li-jun¹, ZHAO Zhi^{2*}, FU Xiao-fang³, REN Xi-jie⁴, FANG Yi-ping⁵,
HOU Li-wei³, WANG Deng-hong²

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources,
Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Sichuan Institute of Geological Survey, Chengdu 610081, China;

4. Panxi Geological Team, Xichang 615000, China;

5. Development and Research Center, Geological Survey of China, Beijing 100037, China)

Abstract: Sichuan Province is one of the most important provinces in China for light rare earth element (LREE) resources, where they have been mined for more than 20 years. There is now a large volume of tailings present in the mines still containing an abundance of rare earth resources. It would be beneficial to the mine owners to recover the REEs in the tailings so an estimate of the amount would be extremely beneficial. Preliminary research has already been undertaken on the geochemistry of trace and rare earth elements in tailing samples from the A, B, C and D REE deposits. The results show that the REE distribution patterns of tailing samples are inherited from rare earth ores in REE deposits. The contents of rare earth oxides (REO) in samples are higher than the current cut-off grade (0.5% – 1.0%), and the old tailings are higher than the new. In addition to the enrichment of REEs, samples of B (Sr 10%) and C (Sr 2.7%) are also rich in Sr while A samples are rich in Ba (1.8%). Mo, Bi, Pb and Ag are enriched in different degrees in all samples and in particular, the Mo content reached its cut-off grade, at 2.275% in the tailings of magnetic separation. It is evident from these results that it is necessary to protect tailings in rare earth mines in Sichuan Province, and to take appropriate measures to reclaim higher concentration elements.

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