

昆阳磷矿中稀土元素赋存状态研究

梁永忠¹, 苏妤芸², 苏秀珠², 池荷婷²

(1. 云南磷化集团有限公司, 云南 昆明 650600; 2. 厦门紫金矿冶技术有限公司, 福建 厦门 361101)

摘要: 对昆阳磷矿中稀土元素的赋存状态进行了系统研究, 结果表明矿体中稀土元素总量在 $50 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$ 之间, 以轻稀土元素富集、重稀土元素亏损为特征, Y 含量在 $30 \times 10^{-6} \sim 155 \times 10^{-6}$ 之间, 稀土元素总量与胶磷矿含量呈正相关关系。重砂矿物查找结果显示, 昆阳磷矿中缺乏独立的稀土矿物。物相分析结果表明, 稀土元素主要赋存在胶磷矿中, 碳酸盐相和硅酸盐相中稀土元素含量极低。LA-ICPMS 测试结果表明, 胶磷矿单矿物中稀土元素总量在 $280 \times 10^{-6} \sim 420 \times 10^{-6}$ 之间, 而白云石单矿物中的稀土元素总量均低于 10×10^{-6} 。综合分析结果表明, 昆阳磷矿中的稀土元素应主要以类质同像的形式存在于胶磷矿中。

关键词: 稀土元素; 赋存状态; 胶磷矿; 昆阳磷矿

中图分类号: P595; P618.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)06-0959-08

Modes of occurrence of rare earth elements in Kunyang phosphorite deposit, Yunnan Province

LIANG Yong-zhong¹, SU Yu-yun², SU Xiu-zhu² and CHI He-ting²

(1. Yunnan Phosphate Chemical Group Co. Ltd., Kunming 650600, China; 2. Xiamen Zijin Mining and Metallurgy Technology Co. Ltd., Xiamen 361101, China)

Abstract: The study of modes of occurrence of rare earth elements in the Kunyang phosphorite deposit shows that $\sum \text{REE}$ values of the orebody vary between 50×10^{-6} and 250×10^{-6} , characterized by relatively abundant HREE and less LREE. The content of Y is between 30×10^{-6} and 155×10^{-6} . The content of $\sum \text{REE}$ is positively correlated with the content of colophane. Heavy minerals prospecting results show that there is a lack of independent rare earth minerals in the Kunyang phosphorite deposit. Chemical phase analysis shows that rare earth elements mainly exist in the phosphate, and are extremely low in carbonate and silicate. LA-ICPMS results show that the values of rare earth elements in colophane are in the range of $280 \times 10^{-6} \sim 420 \times 10^{-6}$, and those in dolomite is less than 10×10^{-6} . Therefore, the rare earth elements should mainly exist in colophane as a result of isomorphous replacement of Ca.

Key words: rare earth elements; modes of occurrence; colophane; Kunyang phosphorite deposit

磷矿中常伴生有稀土元素等十几种有价元素, 是一种潜在的稀土资源, 在目前独立稀土矿床数量不多的情况下, 开展磷矿中稀土的综合开发具有重要意义。我国的磷矿基本都含有稀土(金会心等, 2007; 龙志奇等, 2009; 陈吉艳等, 2010)。昆阳磷矿作为中国非常重要的磷资源矿床, 其伴生稀土特征尚未有深入研究, 仅有少量文献中提到矿床中不

同矿层的稀土品位在 $46 \times 10^{-6} \sim 335 \times 10^{-6}$ 之间(杨卫东等, 1995; 杨帆等, 2011; 徐林刚等, 2014)。本文通过系统的采样分析, 综合扫描电镜、MLA(矿物自动分析系统)(王俊萍等, 2015)、化学物相、LA-ICPMS 检测, 以查明昆阳磷矿中稀土元素的赋存状态, 为可能开展的磷矿中稀土综合回收提供依据。

收稿日期: 2018-04-13; 接受日期: 2018-09-08

作者简介: 梁永忠(1967-), 男, 高级工程师, 从事磷矿地质工作, E-mail: 1195799639@qq.com。

1 昆阳磷矿地质特征及样品情况

昆阳磷矿位于扬子古地块西南缘香条冲背斜南翼的下寒武统地层中,是典型的海相沉积大型磷矿床(杨帆等,2011)。矿体赋存在下寒武统渔户村组中谊段中,分为上矿层和下矿层,中间夹灰白色凝灰质粘土页岩层。上矿层的顶板为硅质白云岩,下矿层的底板为白云岩及夹硅质条带白云岩。矿体主要是磷块岩,可细分为磷块岩富矿、白云质磷块岩、硅质磷块岩、白云质硅质磷块岩和硅质白云质磷块岩。

磷块岩中的主要矿物为胶磷矿、微-细晶磷灰石、白云石、石英、玉髓和少量的黄铁矿、褐铁矿、金红石、水云母、粘土矿物、长石以及微量黄铜矿、重晶石等其它矿物。胶磷矿常呈粒屑状、结核状、鲕状,在成岩及成岩期后有时重结晶成自形的微细晶磷灰石。

本研究取样包含矿体顶板至底板的一整套自然类型样品,分别是上层矿顶板、上层矿不同层位矿样、夹层样、下层矿不同层位矿样、下层矿底板。

2 样品含稀土元素特征

在福建紫金矿冶测试技术有限公司采用 ICP-MS 仪器(美国 ThermoFisher X series 2)对样品进行了稀土元素含量测试,分析结果见表 1。由表 1 可

见,矿体顶底板混合样的稀土元素总量为 51.86×10^{-6} ,夹层混合样的稀土元素总量为 149.70×10^{-6} 。5 个矿体样品的稀土总量在 $50 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$ 之间,KS-1 样品 P_2O_5 的含量低,稀土元素总量也低(54.06×10^{-6}),KS-3、KX-1、KS-H、KX-H 的 P_2O_5 含量较高,稀土元素总量也明显较高($180 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$),稀土元素总量表现出随着磷含量的高低而变化的趋势。这与贵州早寒武世沉积型磷矿中稀土元素特征相似(高慧等,2005; Li *et al.*, 2007; 陈吉艳等,2010)。Y 的含量在 $30 \times 10^{-6} \sim 155 \times 10^{-6}$ 之间,与稀土元素总量也呈正相关关系。经球粒陨石标准化之后,样品的稀土元素配分曲线向右倾斜(图 1),属于轻稀土元素富集型。

LREE/HREE 在一定程度上反映样品轻、重稀土元素的分异程度,该值越大,则轻稀土元素越富集。昆阳磷矿顶底板混合样、夹层样及矿体样的 LREE/HREE 值在 2.5~5.5 之间,最高 5.22,平均 4.3,体现了轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特征。

(La/Yb)_N 比值除 KS-3 样品较低(0.54)外,其余 7 个样品均大于 1,最高 11.45,也说明岩石中富集轻稀土元素,亏损重稀土元素。

Ce 异常不明显, Eu 负异常明显,这与我国西南地区沉积磷矿稀土元素配分模式(杨卫东等,1995;

表 1 昆阳磷矿样品的稀土元素分析结果

$w_B/10^{-6}$

Table 1 Analytical result of rare earth elements of the Kunyang phosphorite deposit

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
KSD + KXD	14.66	11.73	2.59	10.55	1.90	0.44	2.72	0.41	2.65	0.65	1.93	0.24	1.22	0.17	38.45
KS-1	14.35	9.46	2.58	11.38	2.16	0.55	3.35	0.52	3.56	0.90	2.72	0.34	1.92	0.27	46.26
KS-3	2.56	110.70	14.61	59.73	10.71	2.11	14.23	1.91	11.10	2.45	6.59	0.72	3.39	0.42	133.80
KX-1	17.02	101.30	13.43	53.31	9.26	1.83	12.68	1.74	10.31	2.33	6.25	0.68	3.19	0.40	128.30
KJ	24.72	54.32	6.79	24.76	5.36	2.97	5.92	1.06	7.36	1.76	6.01	0.99	6.68	1.00	45.64
KS-H	47.74	50.08	9.38	37.89	6.75	1.35	9.27	1.35	8.25	1.90	5.44	0.61	2.99	0.39	103.68
KX-H	25.23	72.15	15.28	63.85	13.21	2.25	16.27	2.49	14.56	3.04	7.90	0.85	3.89	0.49	151.02
样品	$P_2O_5/\%$	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δEu	δCe							
KSD + KXD	6.00	51.86	41.87	9.99	4.19	8.62	0.59	0.43							
KS-1	6.51	54.06	40.48	13.58	2.98	5.36	0.62	0.35							
KS-3	29.73	241.23	200.42	40.81	4.91	0.54	0.52	2.20							
KX-1	33.81	233.73	196.15	37.58	5.22	3.83	0.52	1.55							
KJ	0.93	149.70	118.92	30.78	3.86	2.65	1.60	1.01							
KS-H	20.57	183.39	153.19	30.20	5.07	11.45	0.52	0.55							
KX-H	25.29	241.46	191.97	49.49	3.88	4.65	0.47	0.88							

KSD + KXD—矿体顶板和矿体底板的混合样; KS-1—上矿层白云质磷块岩; KS-3—上矿层白云质磷块岩; KX-1—下矿层硅质磷块岩; KJ—夹层; KS-H—上矿层混合样; KX-H—下矿层混合样。

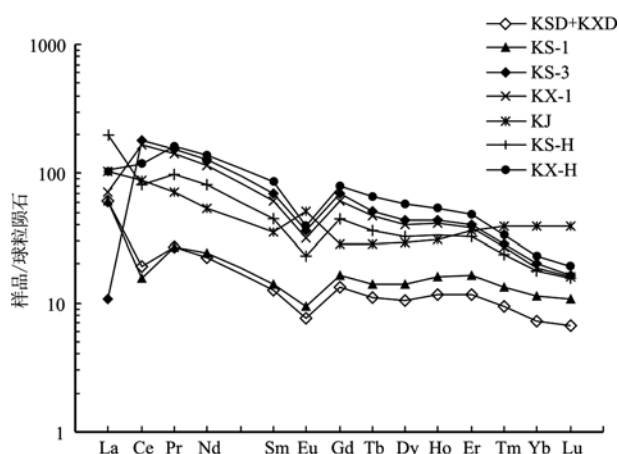


图1 昆阳磷矿样品的稀土元素球粒陨石标准化配分图
Fig.1 Distributing graph of chondrite-normalized REE of Kunyang phosphorite deposit

杨帆等, 2011)一致。

3 矿体中稀土单矿物特征

针对矿体样品,采用重选方法富集重砂矿物,通过体视镜下查找、重砂精矿制成光片后用 MLA 查找,均未发现独立的稀土矿物,说明昆阳磷矿床中极少存在独立的稀土矿物。前人的研究成果表明,我国的沉积型磷矿中也极少找到独立的稀土矿物(陈吉艳等, 2010),目前只是在贵州织金新华磷矿中发现过独立稀土矿物方铈矿(刘世荣等, 2006),在川西什邡马槽滩磷矿中发现有独立稀土矿物独居石(欧洋, 2015)。独立的稀土矿物在矿床中非常少见,说明它不是稀土元素的主要存在形式,沉积型磷矿中的稀土元素主要不以独立矿物形式存在。

4 稀土分相结果

4.1 分相实验探索

化学物相分析可以查明目标元素在不同矿物相中的分配情况。地质上,化学物相分析与岩矿鉴定配合,可以比较准确地确定有用元素在矿石中的赋存状态,确定各种状态(独立矿物、类质同像、离子吸附等)的含量(王道隆等, 1992)。

为查明稀土元素在不同矿物相中的分布情况,对昆阳磷矿 KS-3、KS-H、KX-H 3 个矿体样品进行了稀土分相研究。样品经破碎、磨矿加工至 200 目,根据显微镜观察及 MLA 对砂样分析,发现 3 个样品中

的主要矿物是胶磷矿(少量磷灰石)、白云石及石英(玉髓),其余矿物如褐铁矿、水云母、长石、金红石等的含量均很低(合计 <2%)(表 2)。根据矿物组成,通过物相方法可将样品分为磷酸盐相(胶磷矿、磷灰石)、碳酸盐相(白云石)、硅酸盐相(石英、玉髓、水云母、长石等)3 个矿物相,测定了稀土元素在这 3 个矿物相中的配分。在实验过程中,由于胶磷矿和白云石都是属于多种酸可溶物质,分相难度较大,经过大量的实验条件探索,最终确定乙酸+水浴+硝酸的分相条件,获得了较为理想的分相效果。

表 2 矿体样品的矿物组成 $w_B/\%$
Table 2 Mineralogy of ore body samples

矿物	KS-3	KS-H	KX-H
胶磷矿(磷灰石)	72.9	48.6	60.8
白云石	19.6	44.9	19.8
石英	6.2	4.9	17.4
少量水云母、钾长石、褐铁矿,微量 黄铁矿、重晶石、金红石、海绿石	1.3	1.6	2.0
合计	100.0	100.0	100.0

以样品 KS-H 为例,对分相效果进行监测。将分相完成之后的各相溶液的水分蒸干,获得结晶物,通过对结晶物质进行能谱成分分析判断浸出效果。碳酸盐相的主要组成元素是 Ca、Mg(图 2),P、Si、Al 含量极低,说明主要浸出矿物是白云石,胶磷矿、硅酸盐极少浸出;磷酸盐相的主要组成元素是 Ca、P(图 3),Mg 含量极低,Si 未见,说明主要浸出矿物是胶磷矿(磷灰石),白云石极少浸出;碳酸盐及磷酸盐浸完后的渣为硅酸盐相,主要组成元素是 Si、O,有少量的 Al、Mg、K、Fe(图 4),说明白云石和胶磷矿已基本浸完,渣中主要是硅酸盐矿物。整个实验过程达到了理想的 3 个相分离效果。

4.2 稀土元素在各相中的分布

分相之后,分别对各相的稀土元素含量进行检测,结果(表 3)显示,样品 KS-H、KX-H、KS-3 中碳酸盐相和硅酸盐相中的稀土元素含量均非常低, ΣREE 均小于 1×10^{-6} ,而磷酸盐相中的 ΣREE 分别是 73.77×10^{-6} 、 114.45×10^{-6} 、 169.29×10^{-6} ,Y 含量分别是 39.78×10^{-6} 、 48.94×10^{-6} 、 111.62×10^{-6} ,可见稀土元素在磷酸盐相中富集的特征非常明显。这 3 个样品的 LREE/HREE 值在 3.45 ~ 5.43 之间,同样具有轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特征。

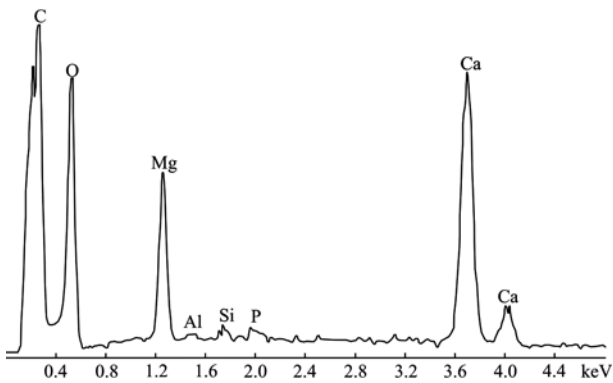


图2 样品 KS-H 碳酸盐相的主要组成元素
Fig. 2 Elements of carbonate in sample KS-H

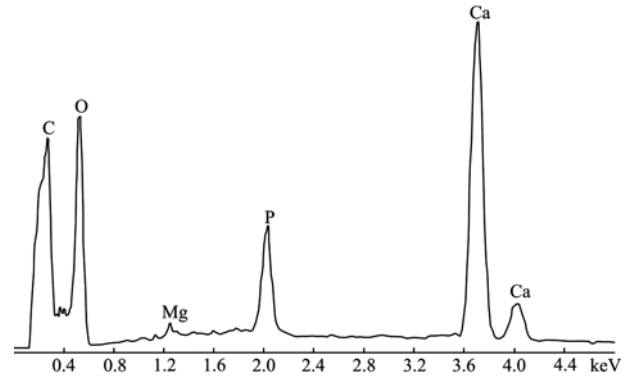


图3 样品 KS-H 磷酸盐相的主要组成元素
Fig. 3 Elements of phosphate in sample KS-H

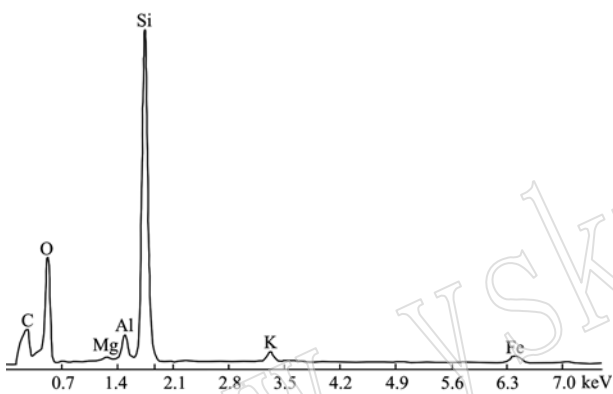


图4 样品 KS-H 硅酸盐相的主要组成元素
Fig. 4 Elements of silicate in sample KS-H

5 单矿物含稀土元素特征

激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICPMS)可以对矿物中微量元素含量进行几到几十个微米级尺度范围内的原位测定(Jackson *et al.*, 1992; 王岚等, 2012)。对昆阳磷矿的主要矿物胶磷矿(图5)和白云石进行了原位稀土元素分析,以查明不同矿物含稀土元素特征。样品在南京聚谱检测科技有限公司采用193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统(Teledyne Cetac Technologies, 型号为Analyte Excite)和四极杆型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(安捷伦科技, 型号为Agilent 7700x)进行了原位稀土元素检测,结果见表4。

两个白云石单矿物的 ΣREE 仅为 1.05×10^{-6} 、 2.96×10^{-6} ,而4个胶磷矿单矿物中 ΣREE 在 $280 \times 10^{-6} \sim 420 \times 10^{-6}$ 之间,Y的含量在 $140 \times 10^{-6} \sim 190 \times 10^{-6}$ 之间,4个胶磷矿的稀土元素球粒陨石标准化

曲线趋势基本一致(图6),向右倾斜,属于轻稀土元素富集型。LREE/HREE值在6.6~7.6之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值在20~27之间,都表现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的特征。Ce异常不明显,Eu的负异常明显,与4个矿体样品的特征一致。LA-ICPMS结果显示,胶磷矿中稀土元素含量比白云石高出许多,说明稀土元素与胶磷矿有着密切的成因关系。

6 讨论

从上述分析可看出,胶磷矿中稀土元素含量较高,而白云石和硅质矿物中稀土元素含量极低,基本上可忽略不计,而整个矿石中,又基本上找不到独立的稀土矿物,由此判断昆阳磷矿中稀土元素主要赋存于胶磷矿中。

胶磷矿中 Ca^{2+} 的离子半径为 1.06 \AA ,稀土元素 La^{3+} 、 Ce^{3+} (Ce^{4+})、 Nd^{3+} 、 Y^{3+} 的离子半径分别是 1.22 、 1.18 (1.02)、 1.15 和 1.06 \AA ,与钙离子半径的相对差值最大只有15%,远小于类质同像替换的限度(不超过30%),所以稀土元素极易以类质同像的方式进入胶磷矿中(Fulit *et al.*, 1984)。而对白云石来说,虽然也存在钙离子,但因分层排列的镁离子半径只有 0.66 \AA ,与稀土元素离子相差较大,因而产生对稀土元素的排他性,使稀土元素不易大量进入,导致白云石中稀土元素无法富集。因此,胶磷矿中的稀土元素应是以类质同像的方式存在的。

昆阳磷矿是我国大型的海相沉积磷块岩矿床,整个磷块岩矿中稀土元素总量虽然只有 $100 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ (含Y),但胶磷矿单矿物中稀土元素总

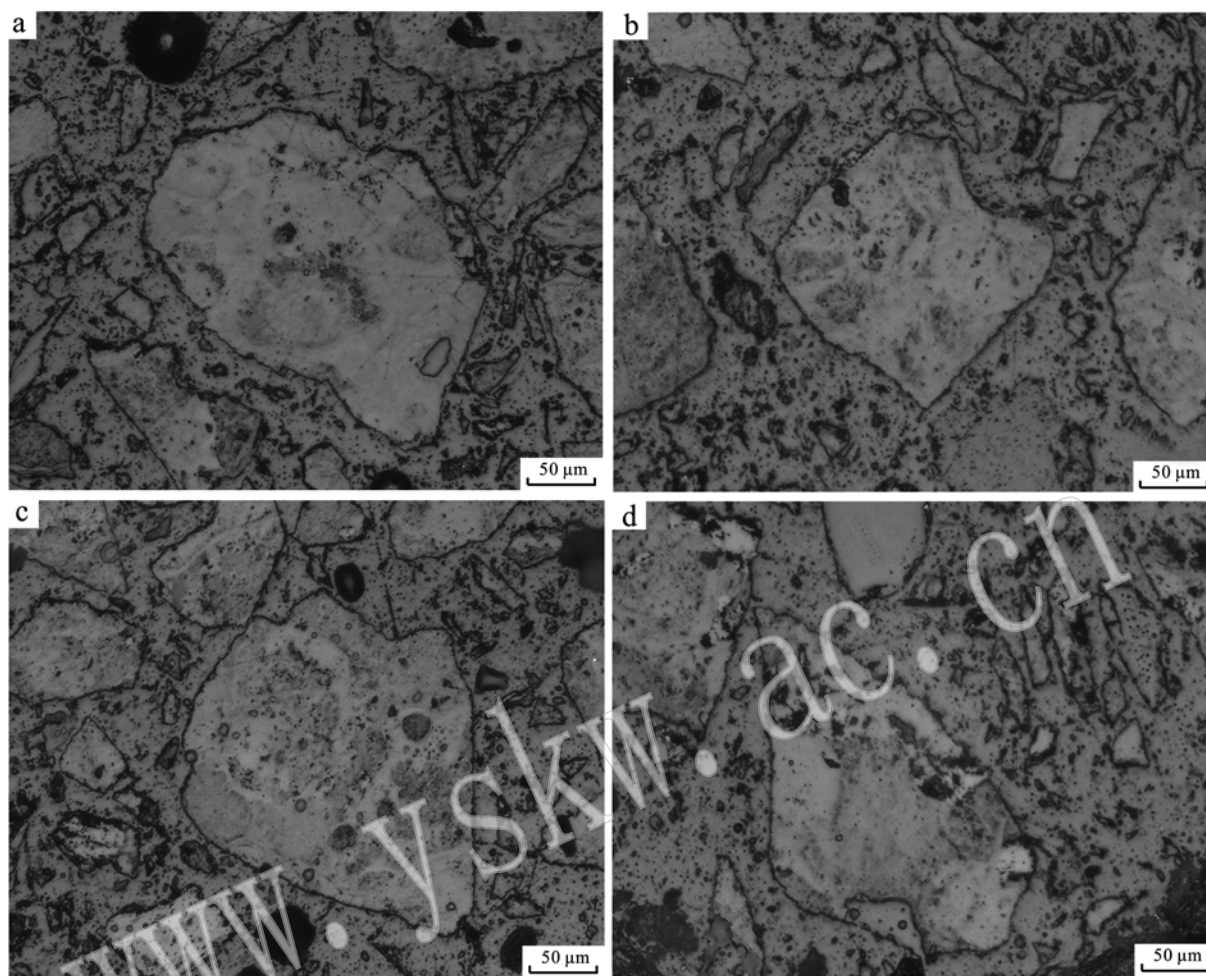


图 5 用于 LA-ICPMS 分析的胶磷矿颗粒

Fig. 5 Collophane for LA-ICPMS analysis

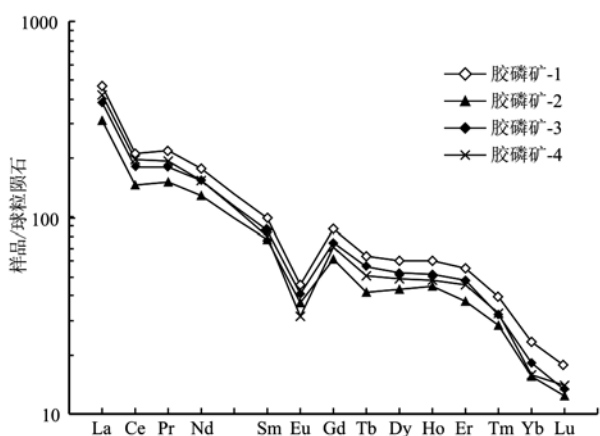


图 6 胶磷矿中的稀土元素球粒陨石标准配分图

Fig. 6 Distributing graph of chondrite-normalized REE of collophane

量可达到 $420 \times 10^{-6} \sim 610 \times 10^{-6}$ (含 Y) 左右。矿石储量如按 1 亿吨 (真实储量比此大), 稀土元素平均含量按 300×10^{-6} (含 Y) 估算, 则伴生有稀土 3 万吨。从目前掌握的情况看, 基本上沉积的磷块岩都会含有微量稀土元素, 如按我国滇、黔、川、湘等地磷矿资源储量约 30 亿吨以上, 伴生稀土资源量巨大, 可见磷矿中的稀土是一种极其重要的资源, 对其中的稀土进行回收, 不但能加强矿产的综合利用, 也可为企业增加新的经济来源。

在磷矿石的选矿过程中, 可通过矿物富集的方式实现稀土元素的相对富集, 从而提高稀土品位。从选矿得到的磷精矿中进一步提取稀土元素, 由于稀土与磷价值相当, 通常是在湿法磷酸中综合回收 (龙志奇等, 2009; 刘勇等, 2013; 郑凯等, 2017)。

表3 样品中稀土元素在各相中分布特征
Table 3 The distribution of REE in different phases of the three samples

样品	矿物相	ΣREE	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
KS-H	碳酸盐相	0.05	0.02	0.02	0.00	0.01		0.00	0.00		0.00						0.04
	磷酸盐相	73.77	19.27	21.00	3.65	15.11	2.71	0.55	3.61	0.49	3.07	0.71	2.15	0.22	1.09	0.14	39.78
	硅酸盐相	0.31	0.07	0.11	0.01	0.06	0.01		0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00
KX-H	碳酸盐相	0.01						0.01									
	磷酸盐相	114.45	27.70	33.07	5.70	23.83	5.15	0.82	6.12	0.90	5.27	1.09	2.96	0.30	1.38	0.16	48.94
	硅酸盐相	0.62	0.12	0.19	0.03	0.11	0.02	0.00	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.00	0.04	0.01	0.27
KS-3	碳酸盐相	0.13	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
	磷酸盐相	169.29	3.57	48.13	13.15	54.39	10.09	1.94	12.90	1.72	10.23	2.25	6.82	0.66	3.06	0.38	111.62
	硅酸盐相	0.73	0.12	0.35	0.02	0.08	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.01	0.03	0.01	0.04	0.01	0.22

表4 昆阳磷矿中单矿物的LA-ICP-MS 稀土元素测试数据
Table 4 LA-ICP-MS result of rare earth elements of colophane and dolomite in the Kunyang phosphorite deposit

序号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
1	91.05	110.83	17.22	71.50	13.17	2.38	15.45	2.13	13.31	2.93	7.90	0.82	3.08	0.34	161.62
2	74.61	88.66	14.26	60.22	11.84	2.14	12.72	1.56	11.03	2.52	6.22	0.73	2.65	0.31	140.24
3	111.91	130.07	20.72	82.20	15.24	2.62	17.94	2.38	15.29	3.42	9.16	1.01	3.98	0.44	189.12
4	100.33	121.38	18.42	72.58	12.34	1.83	14.53	1.89	12.40	2.70	7.60	0.83	2.68	0.36	151.54
5	0.27	0.18	0.03	0.17	0.00	0.01	0.07	0.01	0.04	0.01	0.08	0.03	0.14	0.02	1.40
6	0.76	0.67	0.12	0.50	0.14	0.02	0.19	0.02	0.22	0.06	0.05	0.02	0.16	0.03	2.13
样品	ΣREE	LREE	LREE	HREE	(La/Yb) _N	δEu									
1	352.11	306.15	45.95	6.66	21.20	0.51									
2	289.47	251.74	37.73	6.67	20.20	0.53									
3	416.38	362.76	53.62	6.77	20.16	0.48									
4	369.87	326.88	42.99	7.60	26.81	0.42									
5	1.05	2.22	0.73	3.03	3.34	0.41									
6	2.96	2.22	0.73	3.03	3.34	0.41									

因此,对昆阳磷矿中的稀土进行回收,先进行胶磷矿选矿富集,然后再从湿法磷酸过程综合回收才是较经济可靠的办法。目前现状,从磷矿中提取稀土虽在技术上可行,却普遍存在稀土回收率不高、无法实现大规模工业化应用等问题。因此,要实现磷矿中稀土的综合回收,有待于技术的进一步完善及工业化应用的普及。

7 结论

(1) 昆阳磷矿矿石含稀土元素总量在 $100 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 之间,以轻稀土元素富集、重稀土元素亏损为特征,稀土元素总量与样品中 P 的含量基本呈正相关关系。稀土元素主要以类质同像的形式赋存于胶磷矿中。

(2) 自然界的稀土元素除了赋存于各种稀土矿物中外,还有相当大的一部分与磷灰石和磷块岩矿共生,磷矿中的稀土作为一种潜在的资源,开展综合回收的研究具有重要意义。

References

- Chen Jiyan, Yang Ruidong and Zhang Jie. 2010. Mode of occurrence of rare earth elements in Phosphorite in Zhijin County, Guizhou Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 30(1): 123 ~ 129 (in Chinese with English abstract).
- Fulit A J. 1984. Geochemistry of REEs on water and sediments[A]. Henderson P. *Rare Earth Elements Geochemistry* [C]. 343 ~ 369.
- Gao Hui and Yang Ruidong. 2005. Geochemistry and genesis of the Early Cambrian phosphorites in Zhijin, Guizhou[J]. *Earth and Environment*, 33(1): 33 ~ 42 (in Chinese with English abstract).
- Jackson S E, Longrich H P, Dunning G R, *et al.* 1992. The application of laser ablation microprobe-inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) to in situ trace element determinations in minerals[J]. *Canadian Mineralogist*, 30: 1 049 ~ 1 064.
- Li J Q, Jin H X, Chen Y, *et al.* 2007. Rare-earth elements in Zhi Jing phosphorite and distribution in two-stage flotation process[J]. *Journal of Rare-Earths*, 25: 85.
- Jin Huixin, Wang Hua and Li Junqi. 2007. Research status on phosphorite resources and extracting of rare earths from phosphorite[J]. *Hydrometallurgy*, 26(104): 179 ~ 183 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yong, Liu Zhenzhen and Liu Mudan. 2013. Study of rare separation from rare earth bearing apatite concentrates[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 12: 28 ~ 30 (in Chinese with English abstract).
- Long Zhiqi, Wang Liangshi, Huang Xiaowei, *et al.* 2009. Progress in extraction technique for trace rare earths from Phosphorite[J]. *Rare Metals*, 33(3): 434 ~ 441 (in Chinese with English abstract).
- Ou Yang. 2015. The Research of Occurrence State of Rare Earth Element in Typical Western Sichuan Phosphate Ore Deposit[D]. Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Wang Daolong, Ding Changxing, Wang Jiahong, *et al.* 1992. *Chemical Phase Analysis of Ore and Industrial Products*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press (in Chinese).
- Wang Junping, Wu Huimin and Wang Ling. 2015. Application of MLA in the study of silver occurrence status[J]. *Mining & Metallurgy*, 24(1): 77 ~ 80 (in Chinese with English abstract).
- Wang Lan, Yang Liqin, Wang Yaping, *et al.* 2012. Developments of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) in microanalysis[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(4): 637 ~ 645 (in Chinese with English abstract).
- Xu Lingang, Lehmann B, Zhang Xigui, *et al.* 2014. Trace element distribution in black shales from the Kunyang phosphorite deposit and its geological significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1 817 ~ 1 827 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fan, Xiao Rongge and Xia Xuehui. 2011. Sedimentary environment and geochemistry of the Kunyang Phosphorite Deposit in eastern Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 47(2): 294 ~ 303 (in Chinese with English abstract).
- Yang Weidong, Qi Liang and Lu Xiaoying. 1995. Geochemical characteristics and origin of phosphoric sedimentary formation REE in Early Cambrian in the eastern Yunnan[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 12(4): 224 ~ 227 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Kai, Xia Yong, Wen Xiaoying, *et al.* 2017. Development of concentration and extraction of rare earth from rare earth-containing Phosphorite[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 5: 93 ~ 98 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈吉艳, 杨瑞东, 张杰. 2010. 贵州织金含磷矿床稀土元素赋存状态研究[J]. 矿物学报, 30(1): 123~129.
- 高慧, 杨瑞东. 2005. 早寒武世早期贵州织金含磷岩系地球化学特征与成磷作用[J]. 地球与环境, 33(1): 34~42.
- 金会心, 王华, 李军旗. 2007. 磷矿资源及从磷矿中提取稀土的研究现状[J]. 湿法冶金, 26(104): 179~183.
- 刘世荣, 胡瑞忠, 姚林波, 等. 2006. 贵州织金新华磷矿床首次发现独立的稀土矿物[J]. 矿物学报, 26(1): 118.
- 刘勇, 刘珍珍, 刘牡丹. 2013. 含磷石灰精矿中稀土的分离研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 12: 28~30.
- 龙志奇, 王良士, 黄小卫, 等. 2009. 磷矿中微量稀土提取技术研究进展[J]. 稀有金属, 33(3): 434~441.
- 欧洋. 2015. 川西典型磷矿床中稀土元素的赋存状态研究[D]. 成都理工大学.
- 王岚, 杨理勤, 王亚平, 等. 2012. 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱微区分析进展评述[J]. 地质通报, 31(4): 637~645.
- 王道隆, 丁长兴, 王家洪. 1992. 矿石和工业产品化学物相分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1~360.
- 王俊萍, 武慧敏, 王玲. 2015. MLA在银的赋存状态研究中的应用[J]. 矿冶, 24(1): 77~80.
- 徐林刚, Lehmann B, 张锡贵, 等. 2014. 云南昆阳磷矿黑色页岩微量元素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(6): 1817~1827.
- 杨帆, 肖荣阁, 夏学惠. 2011. 昆阳磷矿沉积环境与矿床地球化学[J]. 地质与勘探, 47(2): 294~303.
- 杨卫东, 漆亮, 鲁晓莺. 1995. 滇东早寒武世含磷岩系稀土元素地球化学特征及成因[J]. 矿物岩石地球化学通报, 12(4): 224~227.
- 郑凯, 夏勇, 温小英, 等. 2017. 从伴生稀土磷矿中富集与提取稀土元素的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 5: 93~98.

2017年度部分地质学类期刊主要计量指标一览表

序号	刊名	影响因子	总被引频次数	他引率	序号	刊名	影响因子	总被引频次数	他引率
1	地质论评	2.354	3285	0.87	18	地球化学	0.814	1921	0.96
2	地质学报	2.253	6162	0.85	19	矿物岩石地球化学通报	0.794	1171	0.87
3	地学前缘	2.253	4952	0.92	20	高校地质学报	0.732	1612	0.97
4	地球科学	1.890	3144	0.82	21	地质通报	0.708	3677	0.91
5	地球科学进展	1.464	3628	0.94	22	岩石矿物学杂志	0.673	1298	0.93
6	岩石学报	1.459	9034	0.82	23	地球与环境	0.668	1077	0.94
7	地球学报	1.376	2143	0.86	24	地质科技情报	0.634	1615	0.81
8	中国科学 地球科学	1.156	4861	0.95	25	矿物岩石	0.628	915	0.92
9	沉积学报	1.202	3451	0.94	26	矿物学报	0.591	1000	0.96
10	地质与勘探	1.201	1886	0.73	27	地质科学	0.585	1521	0.94
11	矿床地质	1.101	2566	0.88	28	地质力学学报	0.451	556	0.76
12	中国地质	1.061	2632	0.91	29	西北地质	0.322	746	0.87
13	吉林大学学报地球科学版	1.050	2359	0.87	30	新疆地质	0.303	792	0.89
14	现代地质	1.000	2133	0.86	31	矿产勘查	0.273	399	0.88
15	地层学杂志	0.941	734	0.84	32	矿产与地质	0.255	687	0.81
16	岩矿测试	0.848	1183	0.88	33	地质找矿论丛	0.216	416	0.91
17	大地构造与成矿学	0.817	1369	0.92	34	地质与资源	0.208	431	0.88

本表数据引自《2018年版中国科技期刊引证报告(核心版)》(中国科学技术信息研究所编)。