

## ICP-MS 测定新类型沉积稀土矿中关键稀土元素方法研究

刘淑君，赵朝辉，龚大兴

（中国地质科学院矿产综合利用研究所，中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心，四川省稀土技术创新中心，四川 成都 610041）

**摘要：**这是一篇矿物分析领域的论文。近年来我国地质科研人员在滇、黔地区发现了一种新型沉积型稀土矿，它既不同于氟碳铈矿和独居石矿，也不同于南方离子型稀土矿，而是赋存于黏土岩中一种独特的稀土矿。本文通过对滇黔相邻区的不同矿点，不同品位的两个稀土样品的溶矿方法进行对比研究，并详细研究了关键稀土元素（Pr、Nd、Tb、Dy）配分、仪器参数的优化及关键稀土元素测定方法的准确度和精密度。结果表明采用密闭消解四酸溶矿体系为该新型沉积稀土矿的较佳溶矿方式，而 ICP-MS 为准确、高效的测定方法，并具有良好的精密度和准确度。

**关键词：**矿物分析；沉积型；关键稀土元素；密闭酸溶；ICP-MS

doi:[10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.029)

中图分类号：TD983; P575 文献标志码：A 文章编号：1000-6532 (2023) 04-0188-06

稀土作为不可再生的稀缺性战略资源，广泛应用于电子信息、石油化工、冶金、机械、能源等行业，更因其在导弹、智能武器、导航仪、喷气发动机等军事高新技术上的应用而备受关注<sup>[1-3]</sup>。

自然界中稀土矿石有多种不同的类型，不同类型稀土矿石中稀土元素的赋存形式不同<sup>[4]</sup>。通常元素的赋存形式对准确分析测定有很大的影响，对于难以打开矿物结构的样品采用强酸、高压条件消解法或碱熔法进行处理<sup>[5-6]</sup>。我国的稀土矿主要有两大类，分别为南方离子吸附型中、重稀土矿和北方矿物晶格型轻稀土矿。对于南方离子吸附型中、重稀土矿通常采用酸溶法处理样品，而北方矿物晶格型轻稀土矿主要采用碱熔法。

目前国内相关专家学者在滇黔相邻区发现了一种新类型稀土矿，该稀土矿既不同于深海沉积型稀土<sup>[7-9]</sup>，也不同于南方离子型稀土<sup>[10-12]</sup>，而是一种赋存于黏土矿物中的独特矿物<sup>[13-15]</sup>。

本研究以滇黔相邻区的稀土黏土岩为主要研究对象，对不同矿点，不同品位的两个稀土样品（DQ-001、DQ-002）进行研究，详细研究了两个

稀土样品的溶矿方式、稀土配分及 ICP-MS 在测定关键稀土元素仪器参数的优化及方法的准确度和精密度，为快速准确地进行新类型沉积稀土矿的全岩性分析、稀土矿产储量的统计及后期对该类稀土矿石的高效利用提供关键数据支撑。

### 1 实验部分

#### 1.1 仪器和试剂

NexION350X 型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS)；盐酸 (HCl)、硝酸 (HNO<sub>3</sub>)、氢氟酸 (HF)、高氯酸 (HClO<sub>4</sub>)、硫酸 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 均为优级纯，高纯氦 (He) 与高纯氩 (Ar) 纯度均大于 99.99%，所用水均为超纯水。

#### 1.2 仪器工作参数的优化

实验工作在 350X 型 ICP-MS 质谱仪上进行，由于仪器炬管位置、仪器灵敏度、雾化器流量、等离子体功率、双电荷产率、氧化物产率等仪器参数设置对仪器性能有重要影响，检测前以 10 ng/mL Li、Be、In、U、Ba、Ce 的混合溶液对系统进行优化调试。

收稿日期：2022-09-04

基金项目：中国地质调查局地质大调查项目 (DD20221697)

作者简介：刘淑君（1984-），女，工程师，硕士，主要从事岩矿分析测试方法研究。

### 1.3 样品前处理

在ICP-MS多元素分析中,选用合适的样品前处理方式,使样品中待测元素完全分解溶出,且被测元素不会挥发损失是十分重要的。本文尝试不同方案对样品进行前处理。

#### 1.3.1 四酸敞开消解溶矿体系步骤

取样品0.1000 g置于聚四氟乙烯坩埚中,加入HCl、HNO<sub>3</sub>、HF、HClO<sub>4</sub>按照一定配制比例的混合酸10 mL(若四酸加硫酸体系中加入1 mL(1+1) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>即可),于250 °C电热板上溶矿,直至冒烟近干,取下,用(1+2)王水15 mL提取,定容至100 mL容量瓶中,摇匀备测。随同实验做2份空白。

#### 1.3.2 五酸(四酸+硫酸)敞开消解溶矿体系步骤

取样品0.1000 g置于聚四氟乙烯坩埚中,加入HCl、HNO<sub>3</sub>、HF、HClO<sub>4</sub>按照一定配制比例的混合酸10 mL,再加入1 mL(1+1) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,于250 °C电热板上溶矿,直至冒烟近干,取下,用(1+2)王水15 mL提取,定容至100 mL容量瓶中,摇匀备测。随同实验做2份空白。

#### 1.3.3 四酸密闭消解溶矿体系

取样品0.1000 g于密闭消解罐中的聚四氟乙烯内衬中,加入与1.3.1敞开体系中等同的混合酸,于250 °C电热板上密闭消解5 h,断开电源,

密闭罐自然冷却,并放置过夜。次日于250 °C电热板上溶矿,直至冒烟近干,取下,用(1+2)王水15 mL提取,定容至100 mL容量瓶中,摇匀备测,随同实验做2份空白。

#### 1.3.4 五酸(四酸+硫酸)密闭消解溶矿体系

取样品0.1000 g于密闭消解罐中的聚四氟乙烯内衬中,加入与1.3.2中敞开体系中等同的混合酸于250 °C电热板上密闭消解5 h,断开电源,密闭罐自然冷却,并放置过夜。次日于250 °C电热板上溶矿,直至冒烟近干,取下,用(1+2)王水15 mL提取,定容至100 mL容量瓶中,摇匀备测随同实验做2份空白。

#### 1.3.5 碱熔体系步骤

取样品0.5000 g于刚玉坩埚中,加入约3 g的过氧化钠,搅匀,并在上层覆盖一薄层过氧化钠。于750 °C马弗炉中熔融15 min,取出,冷却。用热水浸提,洗出坩埚,加入20 mL HCl,搅拌至固体溶解完全,冷却,定容100 mL容量瓶中,稀释10倍后待测,随同实验做2份空白。

实验室采用不同溶矿方式对滇黔地区采集的两种不同矿点、不同品位的稀土综合原矿(下文中分别以DQ-001、DQ-002表示)的稀土总量及关键稀土含量的结果对比见表1。

表1 不同体系下稀土总量及关键稀土元素的测定值/(g/t)  
Table 1 Determination values of total rare earth elements and key rare earth elements in different systems

元素	四酸敞开体系		(四酸+硫酸)敞开体系		四酸密闭体系		(四酸+硫酸)密闭体系		碱熔体系		碱熔体系	
	DQ-001	DQ-002	DQ-001	DQ-002	DQ-001	DQ-002	DQ-001	DQ-002	DQ-001	DQ-002	DQ-001	DQ-002
TREO	2481	2244	2738	2156	3047	2474	2870	2284	2957	2382	2957	2382
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	115	110	132	108	145	126	140	116	142	119	142	119
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	360	403	387	408	424	443	374	391	381	405	381	405
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.6	8.8	6.8	8.5	9.35	10.7	9.0	9.2	9.6	11.2	9.6	11.2
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40.7	46.3	41.4	45.4	53.8	53.1	49.9	49.0	57.0	56.4	57.0	56.4

## 2 结果与讨论

### 2.1 内标元素的选择

ICP-MS作为超痕量分析技术,在对复杂样品进行多元素分析时,基线漂移会对结果造成影响,因此需要采取内标校正法多元素分析时,常常考虑分组选择内标元素,以达到更理想的结果。由于稀土元素<sup>89</sup>Y的质量数与<sup>103</sup>Rh接近,其余元素的质量数都与<sup>185</sup>Re接近,且电离势能处于同

一水平,故本研究选用<sup>103</sup>Rh和<sup>185</sup>Re作为较佳内标元素来克服基线漂移和部分基体干扰。

### 2.2 同位素选择及质谱干扰

测定稀土元素选择同位素时具有一定条件,应尽量避开同量异位素,尽可能选择丰度高且稀土元素的氧化物、氢氧化物产生的同位素干扰少的同位素。在测定新类型稀土矿中关键稀土元素的同位素及干扰见表2。

表 2 关键稀土元素同位素及干扰  
Table 2 Selection and interference of key rare earth elements isotopes

分析项	Mass(amu)	校正	潜在干扰项	模式 (*)	电解槽气体A
Pr	141			KED	5.0
Nd	146		BaO	KED	5.0
Nd	142	-0.125653*Ce 140	Ce	KED	5.0
Nd	144	-0.204803*Sm 147	Sm	KED	5.0
Nd	143			KED	5.0
Nd	145			KED	5.0
Tb	159		NdO、PrO	KED	5.0
Dy	163		NdO、SmO	KED	5.0
Dy	164	-0.047902*Er 166	Er、NdO、SmO	KED	5.0
Dy	156	-1.307908*Gd 157	Gd、CeO、BaO、LaO	KED	5.0
Dy	158	-1.587220*Gd 157	Gd、NdO、PrO、CeO	KED	5.0
Dy	160	-1.396805*Gd 157	Gd、NdO、CeO、SmO	KED	5.0
Dy	162	-0.004165*Er 166	Er、NdO	KED	5.0
Dy	161		NdO	KED	5.0
Dy	165		SmO	KED	5.0

通过对比发现,  $^{141}\text{Pr}$ 、 $^{159}\text{Tb}$  只存在一种测定质量数, 在实际测量过程中, 其他元素对其的测定影响可忽略。而 Nd、Dy 的测定干扰元素, 如  $^{130}\text{Ba}^{16}\text{O}$  会对  $^{146}\text{Nd}$  的干扰,  $^{140}\text{Ce}$  会对  $^{142}\text{Nd}$  产生干扰,  $^{147}\text{Sm}$  对  $^{144}\text{Nd}$  产生干扰,  $^{147}\text{Sm}^{16}\text{O}$  对  $^{164}\text{Dy}$  的干扰,  $^{156}\text{Dy}$ 、 $^{158}\text{Dy}$ 、 $^{160}\text{Dy}$  主要受  $^{157}\text{Gd}$  影响, 且影响因子较大,  $^{161}\text{Dy}$ 、 $^{165}\text{Dy}$  虽然受其他元素的干扰较小, 但是测量丰度值太低, 综合考虑,  $^{163}\text{Dy}$ 、 $^{143}\text{Nd}$  为较佳测定质量数。

### 2.3 不同体系下溶矿方式的对比研究

通过表 1 不同溶矿方式的对比发现, 在敞开酸溶体系下, (四酸+硫酸) 五酸敞开酸溶法的测定结果要高于四酸敞开酸溶法。分析原因, 可能四酸敞开酸溶体系在消解过程中少量的稀土以难溶氟化物存在, 并未进入溶液中。而五酸敞开酸溶体系中, 由于引入少量硫酸(这里只加入了很少量的硫酸, 过多的硫酸可能会导致上机时雾化效率降低, 且对镍锥损伤很大。建议在使用  $\text{H}_2\text{SO}_4$  赶酸时使用配备铂锥仪器测试), 硫酸的沸点( $338^\circ\text{C}$ )远高于高氯酸( $203^\circ\text{C}$ ), 有效地提高赶酸过程的温度, 有利于难溶性氟化稀土物分解。

而在密闭酸溶体系下, 四酸密闭酸溶体系的测定结果要略高于五酸(四酸+硫酸)密闭酸溶体系, 这是因为, 在密闭体系下, 高温高压溶样, 能保证大多数难溶元素的完全分解, 有利于样品及其生成的副产物全部分解, 而硫酸的加入, 虽

然能改变体系的溶样温度、使得部分样品的溶出率有所提高, 但同时也会使得溶液基体变得复杂多变而不利于全岩性稀土总量及关键稀土元素的准确测定。

碱熔体系下, 稀土及关键稀土元素的值反而略低于四酸密闭酸溶体系, 这是因为碱熔体系下, 虽然能保证样品的完全溶解, 然而在碱熔过程中引入了大量的碱, 使得样品在测定过程中存在较强的离子效应, 而使基体升高, 干扰分析元素的测定, 这也是如果酸溶能分解完全选择酸溶而不选择碱熔的原因。

通过对密闭酸溶体系、敞开酸溶体系和碱熔体系的测定结果发现, 对于此类难溶稀土矿样品, 密闭酸溶体系明显优于敞开酸溶体系和碱熔体系, 稀土结果提高  $10\% \sim 20\%$  左右, 其他稀土元素也提高  $10\% \sim 30\%$  不等, 同时封闭压力酸溶过程中酸不挥发, 而在系统内反复回流, 很少量的酸即可完成样品分解, 同时易挥发元素在密封条件下不会损失, 对环境污染大大降低。采用四酸密闭体系对样品进行增温加压, 很好地解决了此类难溶稀土矿样品溶矿难题。

### 2.4 不同样品的稀土配分情况

两种综合稀土原矿的关键稀土元素配分结果见表 3、4。通过表 3、4 发现, 该类沉积型稀土矿关键稀土元素(镨、钕、铽、镝)占比较高, 仅次于深海富稀土软泥, 具有较高的开发利用价值。

表3 DQ-001 稀土配分结果  
Table 3 Rare earth partitioning results of DQ-001

名称	TREO	LREE	HREE	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
含量/(g/t)	3047	2638	403	701	1300	145	424	61.7	6.97
配分/%	100.00	86.78	13.22	23.01	42.66	4.76	13.92	2.02	0.23
名称	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
含量/(g/t)	52.0	9.35	53.8	10.8	31.2	4.45	27.4	3.99	215
配分/%	1.71	0.31	1.77	0.35	1.02	0.15	0.90	0.13	7.06

表4 DQ-002 稀土配分结果  
Table 4 Rare earth partitioning results of DQ-002

名称	TREO	LREE	HREE	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
含量/(g/t)	2474	2099	375	519	905	126	443	91.4	14.7
配分/%	100.00	85.00	15.00	20.98	36.56	5.09	17.91	3.69	0.59
名称	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
含量/(g/t)	70.1	10.7	53.1	9.35	24.3	3.16	19.1	2.65	182
配分/%	2.83	0.43	2.15	0.38	0.98	0.13	0.77	0.11	7.36

## 2.5 准确度实验

由于目前尚没有新类型沉积稀土矿的行业标准及国家标准物质,因此本研究通过加标回收实验来验证方法的准确度(表5),加标回收率在96%~106%之间,方法准确可行。

## 2.6 精密度实验

将两种稀土综合原矿样品,按照DZ/T 0130.2-2006的要求进行制样,样品粒度为0.075 mm。平行称取6份,按照实验方法进行操作,计算RSD,从而分析方法精密度,结果见表6。从表6中可以看出关键稀土元素的RSD值在1.27%~4.89%之间,方法精密度良好。

表5 两种沉积型稀土原矿中关键稀土元素的测定结果

Table 5 Determination results of key rare earth elements in two sedimentary rare earth ore types

元素	测定值/(mg/t)	加标量/(mg/t)	测定总量/(mg/t)	回收率/%
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	143.54	500	630.82	97.45
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	425.43	1000	1390.53	96.51
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.43	100	107.33	97.90
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	54.10	100	158.56	104.46
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	125.71	500	608.96	96.65
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	442.43	1000	1411.24	96.88
Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	10.93	100	115.11	104.18
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	53.41	100	158.60	105.19

表6 两种综合原矿中关键稀土元素的方法精密度实验

Table 6 Precision test of two methods for synthesizing key rare earth elements in raw ore

元素	DQ-001				DQ-002			
	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
测定值	144.97	427.43	9.35	54.32	131.58	461.74	9.92	54.37
	142.71	422.34	9.62	53.55	126.18	445.14	10.87	53.45
	136.80	421.69	8.89	53.47	123.25	442.48	11.35	51.41
	147.87	435.97	9.34	55.41	133.54	450.57	11.14	53.87
	145.57	430.79	10.09	54.62	128.71	444.04	10.39	54.51
	139.54	425.17	9.38	53.54	124.75	451.33	10.55	52.43
平均值	142.91	427.23	9.44	54.15	128.00	449.21	10.70	53.34
RSD/%	2.88	1.27	4.18	1.44	3.13	1.58	4.89	2.26

## 3 结论

(1)ICP-MS法测定沉积型稀土矿中稀土元素时,采用<sup>185</sup>Re-<sup>103</sup>Rh双内标校正法抑制信号漂移,降低了基体效应。

(2)ICP-MS测定新类型沉积稀土元素含量时,

会受到一些质谱干扰和非质谱干扰,这会影响实验结果的准确性与精确性,选择适合的仪器参数,选择其他不受干扰的同位素,采取基体匹配法,内标法,标准加入法等能够有效地解决这一问题。

(3)ICP-MS法测定沉积型稀土矿中稀土元素含量的研究时比较了不同溶矿方式的影响,发现高压

密闭消解具有消解完全，酸用量少，损失少等优点。

(4) 通过对两种综合原矿中关键稀土元素测定方法的准确度和精密度实验发现，关键稀土元素加标回收率在 96%~106% 之间，且 RSD 值在 1.27%~4.89% 之间，方法的准确度及精密度良好。

## 参考文献：

- [1] Anne H Osborne, Ed C Hathorne, Johan Schijf, et al. The potential of sedimentary foraminiferal rare earth element patterns to trace water masses in the past[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, 2017, 18(4):1550-1568.
- [2] 季根源, 张洪平, 李秋玲, 等. 中国稀土矿产资源现状及其可持续发展对策[J]. *中国矿业*, 2018, 27(8):9-16.
- JI G Y, ZHANG H P, LI Q L, et al. Current status of rare earth resources in China and strategies for its sustainable development[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(8):9-16.
- [3] 李潇雨, 惠博, 熊文良. 白云鄂博稀土资源综合利用现状概述[J]. *矿产综合利用*, 2021(5):17-24.
- LI X Y, HUI B, XIONG W L. Overview of comprehensive utilization of rare earth resources in Bayan Obo[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(5):17-24.
- [4] 朱爱美, 刘季花, 张辉, 等. 东海内陆架泥质区表层沉积物稀土元素的分布特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(1):1-10.
- ZHU A M, LIU J H, ZHANG H, et al. Distribution pattern of REES in the inner-shelf mud area of east China sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(1):1-10.
- [5] 孙思瑶, 张婷婷, 周婷, 等. 碳酸盐岩中粘土的去除及碳酸盐矿物稀土元素的测定方法[J]. *浙江化工*, 2016, 47(10):49-54.
- SUN S Y, ZHANG T T, ZHOU T, et al. The methods of removing clays from carbonate rocks and determination of rare[J]. *Zhejiang Chemical Industry*, 2016, 47(10):49-54.
- [6] 吴石头, 王亚平, 孙德忠, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定稀土矿石中 15 种稀土元素—四种前处理方法的比较[J]. *岩矿测试*, 2014, 33(1):12-19.
- WU S T, WANG Y P, SUN D Z, et al. Determination of rare earth elements in rare earth ores by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry: a comparison of four different pretreatment methods[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2014, 33(1):12-19.
- [7] 石学法, 毕东杰, 黄牧, 等. 深海稀土分布规律与成矿作用[J]. *地质通报*, 2021, 40(C1):195-208.
- SHI X F, BI D J, HUANG M, et al. Distribution and metallogenesis of deep-sea rare earth elements[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(C1):195-208.
- [8] 邓善芝, 邓杰, 熊文良, 等. 深海沉积物中稀土资源特征及开发利用现状[J]. *矿产综合利用*, 2018(4):17-22.
- DENG S Z, DENG J, XIONG W L, et al. Mineral features and current utilization situation of the rare earth resource in the deep-sea sediments[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(4):17-22.
- [9] 徐力, 曾令熙, 熊文良, 等. 西太平洋深海底泥中稀土元素赋存状态[J]. *矿产综合利用*, 2022(1):195-199.
- XU L, ZENG L X, XIONG W L, et al. Occurrence of rare earth elements in deep-sea mud from the Western Pacific Ocean[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(1):195-199.
- [10] 丁嘉榆, 邓国庆. 现行离子型稀土勘查规范存在的主要问题与修订建议[J]. *有色金属科学与工程*, 2013, 4(4):96-102.
- DING J Y, DENG G Q. Main problems in the current ionic adsorption rare earth exploration specifications and their amendment proposals[J]. *Nonferrous Metal Science and Engineering*, 2013, 4(4):96-102.
- [11] 黄万抚, 邹志强, 钟祥熙, 等. 不同风化程度离子型稀土矿赋存特征及浸出规律研究[J]. *中国稀土学报*, 35(2): 253-261.
- HUANG W F, ZOU Z Q, ZHONG X X, et al. Occurrence characteristics and leaching rules of different weathering rare earth ores[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 35(2): 253-261.
- [12] 程丽娅. 离子型稀土矿中离子稀土的 ICP-AES 测定方法研究[J]. *安徽地质*, 2017, 27(2):147-149.
- CHENG L Y. Study on determination of rare earth ions in ion-absorbed rare earth mineral using ICP-AES[J]. *Geology of Anhui*, 2017, 27(2):147-149.
- [13] 田恩源, 龚大兴, 赖杨, 等. 贵州威宁地区沉积型稀土含矿岩系成因与富集规律[J]. *地球科学*, 2021, 46(8):2711-2731.
- TIAN E Y, GONG D X, LAI Y, et al. Genesis and enrichment of sedimentary rare earth in Weining Area, Guizhou Province[J]. *Earth Science*, 2021, 46(8):2711-2731.
- [14] 蒋晓丽, 龚大兴, 周家云, 等. 滇黔相邻区二叠系宣威组富稀土黏土岩综合研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2022(1):32-41.
- JIANG X L, GONG D X, ZHOU J Y, et al. The research progress and problems of rare earth elements of rare earth rich clay rock permian Xuanwei Formation in the Yunnan-Guizhou Border Region[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(1):32-41.
- [15] 王晓慧, 颜世强, 梁友伟. 黔西北地区沉积型稀土资源回收稀土研究现状及选矿实验探讨[J]. *矿产综合利用*, 2022(2):135-141.
- WANG X H, YAN S Q, LIANG Y W, et al. Research status of rare earth recovery from sedimentary rare earth ore and discussion on beneficiation test in Northwest Guizhou[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(2):135-141.

## Determination of Rare Earth Elements in a New Type of Sedimentary Rare Earth Ore by ICP-MS

Liu Shujun, Zhao Chaohui, Gong Daxing

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Rare Earth Resources Application Technology Innovation Center of China Geological Survey, Sichuan Rare Earth Technology Innovation Center, Chengdu, Sichuan, China)

**Abstract:** This is an essay in the field of mineral analysis. In recent years, Chinese geological researchers have discovered a new type of sedimentary rare earth ore in Yunnan and Guizhou regions, which is not only different from bastnaesite and monazite, but also different from ionic rare earth ore in south of China, but a unique rare earth ore in clay rocks. In this paper, the ore dissolution methods of two rare earth samples with different grade from different mineral sites in adjacent areas of Yunnan and Guizhou are compared, and the distribution of key rare earth elements (Pr, Nd, Tb, Dy), the optimization of instrument parameters and the accuracy and precision of the determination method of key rare earth elements are studied in detail. The results show that the closed digestion system is the best method for the new deposit of rare earth ore, and ICP-MS is an accurate and efficient determination method with good precision and accuracy.

**Keywords:** Mineral analysis; Sedimentary type; Key rare earth elements; Closed digestion; ICP-MS

(上接第 176 页)

- [16] Schilling J, Marks M, Wenzel T, et al. Reconstruction of magmatic to subsolidus processes in an agpaitic system using eudialyte textures and composition: a case study from Tamazeght, Morocco[J]. *Can. Mineral.*, 2009, 47:351-365.  
[17] Kramm U, Kogarko L N. Nd and Sr isotope signatures of the Khibina und Lovozerö agpaitic centres, Kola Alkaline Province, Russia[J]. *Lithos*, 1994, 32:225-242.  
[18] Mitchell R H, Liferovich R P. Subsolidus deuterium/hydrothermal alteration of eudialyte in lujavrite from the Pilansberg alkaline complex, South Africa[J]. *Lithos*, 2006, 91:352-372.  
[19] Hatch G P. TMR advanced rare-earth projects index. Technology Metal Research. March 2014. Available online: <http://www.techmetalsresearch.com/metrics-indices/tmr-advanced-rare-earth-projects-index> (accessed on 24 July 2017)

[20] 冯雪茹, 刘述平, 李超, 等. 由低浓度稀土溶液萃取回收稀土的研究[J]. 矿产综合利用, 2018, 39(1):17-21.

FENG X R, LIU S P, LI C, et al. Study on the extraction and recovery of rare earth from low concentration rare earth solution[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018, 39(1):17-21.

[21] 文伟, 陈福林, 余新文, 等. 某含硫萤石重晶石共伴生氟碳铈稀土矿硫脱除必要性及回收试验[J]. 矿产综合利用, 2019, 40(6):45-48.

WEN W, CHEN F L, YU X W, et al. Experimental study on the necessity and recovery of sulfur removal from a fluorocarbon-cerium rare earth ore associated with fluorite barite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019, 40(6):45-48.

## A Special Rare-earth Mineral—Eudialyte

Chen Wei, Zhou Jiayun

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Technology Innovation Center of Rare Earth Resources Development and Utilization, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan, China)

**Abstract:** This is an essay in the field of earth science, which mainly reviews the basic characteristics of eudialyte, a rare earth-containing mineral in alkaline rocks. Eudialyte is a common accessory mineral and hydrothermal mineral of magmatic rock, which is vulnerable to weathering and oxidation and other epigenetic effects. It can better record and preserve the original information of magma and hydrothermal activities, so it is a common tracer mineral for studying magma and/or hydrothermal processes. Through the review of the article, we hope to provide a more comprehensive basic understanding for deepening the Mineralogy and geochemical research of Eudialyte, strengthening the prospecting work of Eudialyte REE deposit, and widely carrying out the discussion of geological problems related to Eudialyte.

**Keywords:** Earth science; REE; Eudialyte; Geochemical; Mineralogy