

## 离子型稀土矿含量高光谱定量反演研究

成 功<sup>1,2</sup>, 李嘉璇<sup>1,2</sup>, 王朝鹏<sup>3</sup>, 胡振光<sup>3</sup>, 宁庆坤<sup>3</sup>

1. 有色金属成矿预测与地质环境检测教育部重点实验室(中南大学), 湖南 长沙 410083
2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083
3. 中铝广西有色崇左稀土开发有限公司, 广西 崇左 532299

**摘 要** 运用光谱测量技术来测量土壤、矿物、植物的光谱吸收特征,并将其用于物质成分的分析中,是高光谱遥感技术近些年来一个新的发展方向,具有速度快、效率高、费用低、损耗少的优点。稀土是战略元素,因具有特殊的物理化学性质,在多个领域都能发挥其独特的作用。近年来对稀土资源需求量的不断增加使得稀土价值不断提高,使得如何快速大面积探测稀土资源,合理对稀土矿进行布设开采成为了当前社会面临解决的重要科学问题。通过对稀土矿物进行光谱采集与分析从而对稀土元素及其化学特征之间的相关性进行研究分析展开了一系列的工作。在研究过程中,实地采集了广西崇左市六汤稀土矿区内的12个稀土矿样,并在实验室控制环境内使用 SVC HR1024I 便携式地物波谱仪测得其对应的反射光谱数据。对所测得的矿样波谱特征进行了连续统去除处理,并对凸显的特征吸收波段进行相对吸收深度的计算分析,从而运用其波谱特征建立起波谱与矿样稀土总含量、各稀土元素含量间的线性关系。通过实验发现,稀土元素的五个特征吸收波段在可见光和近红外波长分别为 370, 950, 1 400, 1 900 和 2 200 nm。这五个吸收带的强度与总稀土含量呈线性相关,  $R^2$  达到 0.69, 同时发现稀土含量值与可见光波段相关性较大,对可见光波段与样本稀土总含量进行相关分析,提取出部分可见光波段中与稀土总含量建模相关性最强的 10 个波段,分别为 340, 350, 360, 370, 390, 400, 420, 480, 550 和 760 nm。运用线性回归的方法得到上述波段处的反射率值与样本总稀土含量值的预测模型精度较高,  $R^2$  大于 0.95。运用可见光波段与 15 种稀土元素含量值也进行了线性建模,相关系数均可以达到 0.89 以上,表明各单一稀土元素与可见光波段之间的相关性同样较好。通过研究稀土矿样的光谱特性及化学分析,通过 5 个稀土特征吸收波段和可见光波段与矿样的稀土总含量、15 种稀土元素含量进行回归建模,得到了矿样稀土含量的定量预测模型,对稀土矿快速定量-半定量评估具有一定参考价值,同时为进行稀土矿物及其元素高光谱遥感信息提取研究提供了科学启发,为最终实现对稀土资源高效开采的基础上,从源头上降低消耗和生产成本,减少对环境的破坏和污染,为促进中重稀土资源的战略开发和使用提供了科学有效的理论依据。

**关键词** 离子型稀土矿; 高光谱; 定量反演; 线性回归

**中图分类号:** P627 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)05-1571-08

### 引 言

离子吸附型稀土矿是一种重要矿产资源,我国离子吸附型稀土矿富含铈、铽、镱,成为了我国特有的矿种<sup>[1]</sup>。它的形成是包含稀土的原岩经过长时间风化形成黏土矿物,稀土元素在化学、生物作用下解离为离子后附着于矿物内,当离子相稀土含量达到 0.03% 以上时,就会成为离子吸附型稀土矿床<sup>[2]</sup>。近年来,对于稀土矿的化学特征研究采用了光谱测

量技术,通过对矿物在可见光和近红外波段范围内的光谱反射特征进行分析,为获取矿物化学成分信息提供了一种快速而廉价的手段<sup>[3]</sup>。早期的研究主要是利用扫描电子显微镜和电子探针对于稀土的光学吸收特征进行研究<sup>[4]</sup>,在可见光-近红外光谱范围内由于物质里微粒的电子跃迁和振动作用,一些阳离子呈现波谱吸收特征<sup>[5]</sup>。稀土元素的吸收特征是由于三价镧系元素的  $4f-4f$  层内电子跃迁引起的<sup>[6-7]</sup>。章钦瑜等人对高岭土、绿泥石和绢云母在 ASTER 数据的可见光到短波红外波段的光谱特征进行分析,从而初步构建起了离子

收稿日期: 2018-03-01, 修订日期: 2018-08-20

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0601503)资助

作者简介: 成 功, 1972 年生, 中南大学地球科学与信息物理学院讲师 e-mail: chenggongx@126.com

吸附型稀土矿遥感找矿评价模型<sup>[8]</sup>,代晶晶的团队对于不同浓度的稀土溶液的反射波谱进行了一系列特征研究,运用便携式地物波谱仪和等离子质谱仪分别获取了其波谱特征和稀土总浓度,研究结果表明稀土溶液呈现出水体和稀土氧化物的混合波谱特性,在可见光和近红外波段有 6 个稀土特征吸收谷,利用相对深度特征建立了溶液中稀土浓度的定量评估模型(见本刊 2014 年 34 卷 5 期 1158 页)。尽管前期研究对稀土矿定量评价有所探索,但是对于原矿稀土含量及其反射光谱特征的相关研究还比较少。

传统开采离子吸附型稀土矿产资源的方法主要是池浸、堆浸,目前出于环境保护的要求,国家逐渐开始禁止使用池浸法并逐步减少堆浸,主要推行原地浸出的方法进行开发。原地浸出工艺可以降低开采开发费用,对地表的破坏程度变小,同时提高资源回收效率,使得一些低品位矿也得到有效的利用<sup>[9]</sup>。因此,希望通过对矿样稀土含量与其波谱反射率之间的关系进行研究,找出相关规律,从而为通过遥感的方法在大尺度范围内估算稀土含量值,进一步为合理布设稀土原地浸出工程提供有效依据。

## 1 实验部分

### 1.1 采样区概况

采样区域位于广西崇左市西北的六汤稀土矿区,距崇左市约 17 km。该处稀土矿由富含稀土元素的酸性火山流纹岩在风化作用下,分解形成风化壳,风化壳顶部的稀土离子随着地表水逐渐下渗迁移,在风化壳的中下部被粘土矿物所吸附而形成稀土矿床。稀土矿体主要分布在风化壳中下部,矿体的岩性上部为含粘性土粉砂(粘土化熔岩),下部为含砂粘性土(砂质粘土化熔岩),呈过渡关系。在研究矿区内选取四个不同地点,分为原岩、风化层、表土三层,一共 12 个样本,分别用密封袋装好,并做好标记带回。将带回的样品分为两部分,一部分送至长沙矿冶研究院进行化学分析,得到样品的稀土元素含量,另一部分用于在实验室内进行光谱反射率的测量。

### 1.2 样本光谱反射率测量和预处理

稀土样本实测光谱数据利用 SVC HR1024I 便携式地物波谱仪测得,该仪器的光谱范围为 350~2 500 nm,共 1 024 个波段。350~1 000 nm 光谱分辨率 $\leq 3.5$  nm; 1 000~1 850 nm 光谱分辨率 $\leq 9.5$  nm; 1 850~2 500 nm 光谱分辨率 $\leq 6.5$  nm,该仪器线阵列探测器由 512 通道的 Si、256 通道的 InGaAs 以及 256 通道的扩展 InGaAs 三部分组成。将含稀土元素的土样经过自然风干后,加工研磨成直径为 0.1~0.25 mm 的样本,分别放入 60 mm 左右的透明培养皿中,将土样表面进行平整,土样厚度约为 2 cm。在实验室内进行光谱测量,使用 1 台能够提供平行光的卤光灯作为光源,垂直对准土样间隔大约 15 cm。探头视场角为 5°左右。每个矿样采集 5 次光谱曲线。

表 1 样本编号表

Table 1 Number of various samples

	1#	2#	25#	55#
表土	A1	B1	C1	D1
风化层	A2	B2	C2	D2
原岩	A3	B3	C3	D3

对光谱数据的预处理是通过 SVC HR1024I 所配备的客户端软件进行的。主要分为四个步骤。第一步将所有光谱曲线进行叠加匹配,第二步对光谱数据进行平滑处理,第三步对光谱数据进行重采样,重采样波段范围为 350~2 500 nm,采样间隔为 10 nm。第四步将每个样品的 5 条光谱曲线取平均值融合为一条新的光谱曲线。最后得到 12 个样品所对应的的光谱曲线,共含有 216 个波段信息。

对于稀土矿物的光谱曲线分析是通过连续统去除的方法进行的<sup>[10]</sup>。这种方法可以进一步有效地凸显光谱曲线的吸收和反射特征信息。包络线中的吸收峰值是指波谱吸收处的值,是描述光谱吸收特征的一个重要参数,与物质的性质、纯度、颗粒大小等特征以及背景噪音的大小等因素都有着重要的关系。

表 2 样本稀土元素含量表

Table 2 Concentrations of REE in mineral samples analyzed

样品 编号	稀土元素/ $10^{-6}$															$\sum$ REE
	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Lu	Nd	Pr	Sm	Tb	Tm	Y	Yb	
A1	138.0	15.5	9.2	3.1	17.1	3.1	80.6	1.2	70.1	18.2	14.4	2.8	1.2	82.7	8.2	465.3
A2	157.0	34.6	20.3	5.4	38.2	6.8	181.0	2.4	15.5	39.7	31.7	6.2	2.6	196.0	17.0	754.4
A3	121.0	12.3	7.6	2.4	13.6	2.5	590.0	1.0	53.9	13.7	10.2	2.2	1.0	66.7	6.9	374.0
B1	130.0	13.1	7.8	2.2	8.1	2.6	83.0	1.0	73.4	18.9	13.5	2.5	1.0	62.3	6.9	426.4
B2	71.6	10.4	6.5	2.4	11.7	2.1	56.9	0.9	50.2	12.8	9.2	1.9	0.9	54.5	6.0	298.0
B3	196.0	17.2	9.5	3.4	20.2	3.2	83.3	1.2	82.7	21.2	17.2	3.2	1.3	75.8	8.4	543.7
C1	118.0	10.2	6.6	2.0	11.9	2.1	69.7	0.9	51.9	14.0	8.1	1.8	0.9	61.6	5.8	365.4
C2	86.7	34.6	20.0	5.4	32.4	6.8	141.0	2.4	122.0	31.6	23.6	5.9	2.6	191.0	16.4	722.3
C3	120.0	42.5	23.3	7.2	41.9	8.0	152.0	2.7	167.0	41.9	37.3	7.6	3.0	198.0	19.3	871.7
D1	171.0	110.0	61.8	16.2	106.0	21.4	146.0	6.9	407.0	105.0	90.1	19.0	7.8	193.0	49.2	1 510.3
D2	211.0	12.2	7.3	2.2	16.1	2.4	72.9	1.0	65.8	16.9	12.4	2.3	1.0	60.1	6.6	490.1
D3	104.0	10.7	6.6	2.1	11.5	2.1	50.5	0.9	47.8	12.1	8.8	1.9	0.9	52.7	6.0	318.6

### 1.3 化学分析

稀土矿样具体的元素含量测试在长沙矿冶研究院分析检测中心进行, 分别得到了 12 个矿样的 Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Sm, Tb, Tm, Y 和 Yb 等 15 种稀土元素的含量, 并计算得出了 12 个矿样的稀土总含量。

### 1.4 统计分析

在研究中, 对样品稀土总含量与样品在可见光波段的反射率进行了相关性分析, 用 Pearson 相关系数进行评价, 皮尔森相关系数是一种线性相关系数, 可以体现两个变量之间线性相关的程度的统计量, 同时进行显著性检验, 用 sig 值表示, 如果该值 < 0.05, 就可以说明两个变量之间具有显著的正相关性。回归分析是通过建立模型来研究变量间的相关分析, 利用线性回归建模的方法研究了可见光波段与 15 个单一稀土元素含量之间的关系, 并建立了相关的模型, 选择决定性系数 ( $R^2$ ) 作为判断模型精度的指标。当  $0.66 \leq R^2 \leq 0.80$  时, 预测结果较好; 当  $0.81 \leq R^2 \leq 0.90$  时, 预测结果

很好; 当  $R^2 \geq 0.90$  时, 预测结果极好。

## 2 结果与讨论

### 2.1 样本光谱特征分析

图 1(a) 为样本在可见光-近红外-短波红外波段内 (350 ~ 2 500 nm) 的反射光谱曲线, 虽然不同含量的稀土矿样的实际反射率值不尽相同, 但是所有样本的光谱曲线趋势基本一致。在可见光范围内, 所有矿样的反射率基本偏低, 在 370 nm 左右形成一个较深的特征吸收谷后, 在 400 ~ 650 nm 之间反射率急剧上升, 形成一个“陡坡”, 之后在近红外波段范围内反射率值较高, 并且波动较大, 形成了几个较为明显的吸收谷。在 2 100 nm 后曲线开始波动下降, 反射率逐渐减低。在矿样的实测光谱数据的基础上做连续统去除处理之后, 稀土特征吸收被进一步凸显, 如图 1(b) 所示, 可以看出形成了 370, 950, 1 400, 1 900, 2 200 nm 五个明显的特征吸收谷。

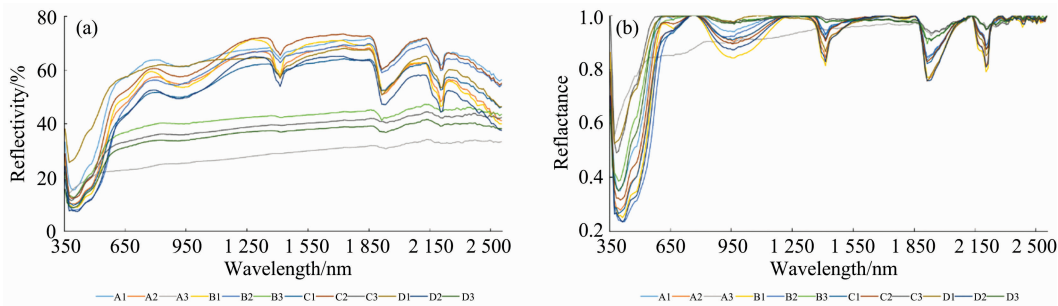


图 1 12 个样本的光谱曲线

(a): 原始光谱曲线; (b): 连续统去除后的光谱曲线

Fig. 1 The spectra of 12 samples

(a): Raw spectral curve; (b): Continuum removed spectral curve

### 2.2 吸收特征光谱分析

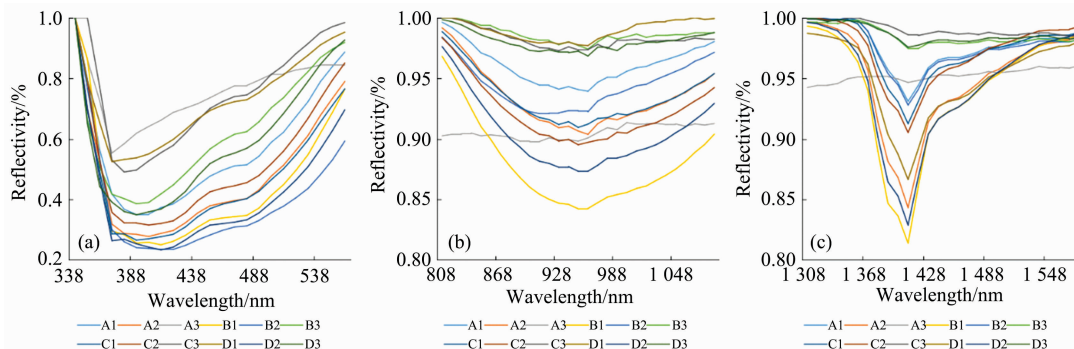
对样本的原始反射光谱曲线和进行连续统去除后的反射光谱曲线进行对比分析, 突出的吸收特征波段主要有 5 处, 即 370, 950, 1 400, 1 900 和 2 200 nm 处, 这些吸收谷与滇缅地区的稀土矿基本一致<sup>[11]</sup>。在 12 个样品的去连续统的结果基础上, 对该 5 个特征吸收谷计算其相对吸收深度来衡量其波谱特征。

$$R'H(\lambda) = 1 - R(\lambda)$$

其中  $R'H(\lambda)$  为波谱相对吸收深度,  $R(\lambda)$  为第  $\lambda$  波段所对应的反射率值。

从相对吸收深度的结果中, 5 个特征吸收谷中处于可见光波段中的 370 nm 处尤为突出, 相对吸收深度较其他波段更为明显, 可以看出样本的反射光谱在可见光范围内含有丰富的信息。

波谱相对吸收深度的计算公式为



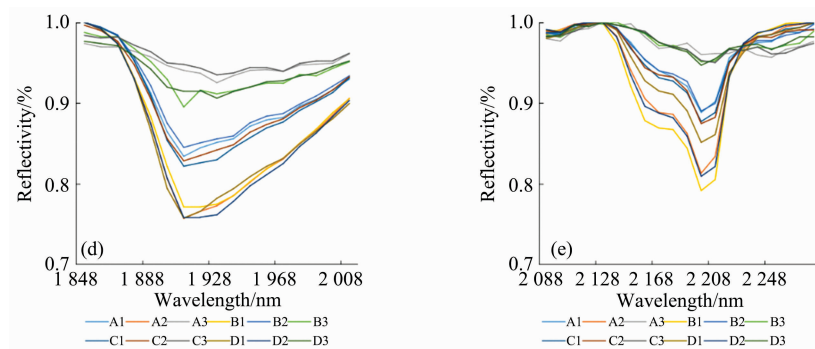


图 2 5 个特征吸收谷的反射率

(a): 相对吸收深度(370 nm); (b): 相对吸收深度(950 nm); (c): 相对吸收深度(1 400 nm);  
(d): 相对吸收深度(1 900 nm); (e): 相对吸收深度(2 200 nm)

Fig. 2 The relative reflectance and depth at the five diagnostic absorption wavelengths

(a): Relative absorption depth 370 nm; (b): Relative absorption depth 950 nm; (c): Relative absorption depth 1 400 nm;  
(d): Relative absorption depth 1 900 nm; (e): Relative absorption depth 2 200 nm

表 3 每个样品的 5 个特征吸收带的相对深度

Table 3 The corresponding depths of five diagnostic absorption features

波长/nm	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
370	0.583	0.682	0.447	0.704	0.700	0.583	0.714	0.643	0.470	0.476	0.737	0.609
950	0.059	0.094	0.102	0.158	0.077	0.023	0.091	0.105	0.027	0.022	0.127	0.028
1 400	0.069	0.157	0.053	0.186	0.072	0.025	0.088	0.095	0.014	0.134	0.171	0.024
1 900	0.166	0.243	0.060	0.229	0.155	0.105	0.178	0.172	0.052	0.243	0.242	0.085
2 200	0.112	0.187	0.040	0.209	0.110	0.049	0.123	0.126	0.047	0.149	0.191	0.053

2.3 总稀土含量的定量分析

2.3.1 样本总稀土含量与特征吸收谷建模

对于稀土矿样光谱的定量建模采用了多元线性回归分析的方法,通过数学模型来定量描述光谱特征与物质含量之间的相关关系。基于 5 个特征波段(370, 950, 1 400, 1 900, 2 200 nm)的波段值,运用线性回归方法建立了稀土浓度的定量反演模型。

$$REE(\beta) = 37.67b_1 + 35.962b_2 - 14.122b_{108} - 15.888b_{158} - 7.649b_{187} + 251.699 \quad (1)$$

其中,  $b_1, b_2, b_{108}, b_{158}$  和  $b_{187}$  分别代表稀土样品光谱波段为 370, 950, 1 400, 1 900 和 2 200 nm 处的反射率。

将样品实测稀土浓度值与预测值对比[图 3(a)]可以看出,  $R^2$  为 0.69。该模型精度不是很高,可能是样品测试时受到了背景的干扰,也可能是受矿样中高岭土的影响。

2.3.2 样本总稀土含量与可见光波段建模

当稀土元素以 RE3+ 存在于化合物或溶液中时,通常会在可见光-近红外光谱范围内产生特征吸收波段。受到成分含量、结构组成及光学角度等外界影响,样本光谱曲线呈现不同分布状态。前期通过对稀土样品的光谱分析,也发现在可见光范围内富含了大量有效信息,对可见光波段与样本总稀土含量进行相关性分析,用 Pearson 相关系数进行衡量,并进行了显著性检验。结果表明,可见光范围内的 340, 350, 360, 370, 390, 400, 420, 480, 550 和 760 nm 处的反射率值与样本总稀土含量值有较强的线性关系,且显著性检验的相伴概率均小于 0.05,证明两变量具有显著的相关性。

运用上述 10 个波段处样本的实测反射值与总稀土含量值建立线性模型。得到了线性模型

$$REE(\beta) = -95.024b_1 - 122.845b_2 + 234.09b_3 - 164.173b_4 + 382.442b_5 + 347.366b_6 - 0.285b_7 - 738.256b_9 + 209.76b_{15} + 48.7b_{22} \quad (2)$$

其中  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_9, b_{15}, b_{22}$  分别代表 340, 350, 360, 370, 390, 400, 420, 480, 550 和 760 nm 处的反射率。

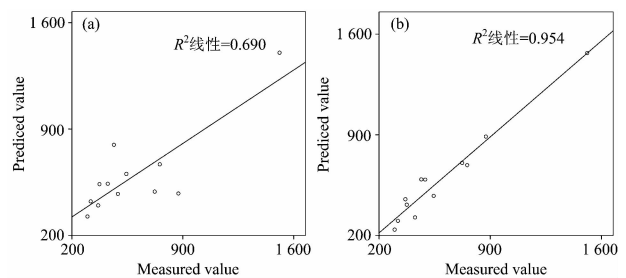


图 3 REE 含量的实测值与预测值散点图

(a): 特征吸收谱建模; (b): 可见光特征谱建模

Fig. 3 Scatter diagram of measured values and predicted values of REE content

(a): Modeling by characteristic absorption spectrum;  
(b): Modeling by visible light spectrum

将样品实测稀土含量值与预测值对比[图 3(b)]可以看出,该模型效果较好,  $R^2$  可达到了 0.954。

表 4 可见光部分波段与样品总稀土含量间的 Pearson 相关性

Table 4 Pearson Correlation between visible bands and total rare earths content of samples

	Pearson 相关性 Sig. (单侧)		Pearson 相关性 Sig. (单侧)	
	REE	REE	REE	REE
$b_1$	0.559	0.030	$b_6$	0.784 0.001
$b_2$	0.638	0.013	$b_7$	0.782 0.001
$b_3$	0.760	0.002	$b_9$	0.784 0.001
$b_4$	0.763	0.002	$b_{15}$	0.811 0.001
$b_5$	0.774	0.001	$b_{22}$	0.734 0.003

2.3.3 样本各稀土元素含量与可见光波段建模

稀土元素是指元素周期表中 III B 族中原子序数从 57 到

71 的 15 种元素, 分别为: 镧 (La)、铈 (Ce)、镨 (Pr)、钕 (Nd)、钷 (Pm)、钐 (Sm)、铕 (Eu)、钆 (Gd)、铽 (Tb)、镝 (Dy)、钬 (Ho)、铒 (Er)、铥 (Tm)、镱 (Yb)、镱 (Lu), 又被称为镧系元素。通过前人实验中发现稀土元素在可见光波段存在大量特征吸收, 如 Nd, Pr, Er 和 Ho 在可见光波段吸收特征最为显著。利用上述的线性回归方法分析了每个单一元素的含量与可见光波谱范围内波段反射率之间的相关性。由决定系数结果表明, 15 种稀土元素与可见光波段所建立的模型  $R^2$  均大于 0.9(表 5), 可见, 利用可见光波段基于线性回归方法建立的稀土元素估测模型反演效果很好, 实测值与预测值散点图较好的分布在直线两侧,  $R^2$  均大于 0.89(图 4)。

表 5 15 种单一稀土元素含量与部分可见光波段反射率之间的线性模型

Table 5 Linear model between 15 rare earth elements and partial visible band reflectance

稀土元素	模型	$R^2$
Ce	$Ce = 0.704b_1 + 6.378b_2 - 20.519b_3 - 49.348b_4 + 73.099b_6 - 242.832b_7 + 240.329b_9 - 28.969b_{15} - 4.838b_{22} + 8.362b_{43} + 110.292$	0.918
Dy	$Dy = -2.724b_1 - 7.431b_2 + 6.24b_3 - 8.176b_4 - 6.878b_6 + 36.744b_7 - 27.379b_9 + 11.335b_{15} + 0.197b_{22} + 2.512b_{43} - 59.286$	0.968
Er	$Er = -1.454b_1 - 4.366b_2 + 3.69b_3 - 4.228b_4 - 4.277b_6 + 22.064b_7 - 16.329b_9 + 5.909b_{15} + 0.305b_{22} + 1.341b_{43} - 32.302$	0.968
Eu	$Eu = -0.414b_1 - 1.021b_2 + 0.93b_3 - 1.085b_4 - 0.867b_6 + 4.682b_7 - 3.764b_9 + 1.847b_{15} - 0.072b_{22} + 0.365b_{43} - 7.605$	0.971
Gd	$Gd = -2.621b_1 - 8.579b_2 + 7.954b_3 - 7.545b_4 - 1.476b_6 + 28.42b_7 - 25.476b_9 + 11.028b_{15} + 0.233b_{22} + 2.385b_{43} - 50.165$	0.979
Ho	$Ho = -0.509b_1 - 1.488b_2 + 1.253b_3 - 1.509b_4 - 1.43b_6 + 7.584b_7 - 5.682b_9 + 2.143b_{15} + 0.076b_{22} + 0.471b_{43} - 11.506$	0.968
La	$La = -11.397b_1 - 16.795b_2 + 39.862b_3 - 20.888b_4 + 93.294b_6 - 59.929b_7 - 42.301b_9 + 11.823b_{15} + 11.865b_{22} - 1.333b_{43} + 62.588$	0.893
Lu	$Lu = -0.165b_1 - 4.82b_2 + 0.417b_3 - 0.439b_4 - 0.405b_6 + 2.351b_7 - 1.8b_9 + 0.64b_{15} + 0.035b_{22} + 0.145b_{43} - 3.273$	0.967
Nd	$Nd = -5.578b_1 + 6.747b_2 - 22.035b_3 - 49.299b_4 - 49.36b_6 + 121.975b_7 - 66.795b_9 + 78.109b_{15} - 21.305b_{22} + 12.533b_{43} - 295.626$	0.967
Pr	$Pr = -2.211b_1 - 7.383b_2 + 5.549b_3 - 8.715b_4 - 10.977b_6 + 28.827b_7 - 11.498b_9 + 6.39b_{15} + 0.566b_{22} + 2.716b_{43} - 50.869$	0.966
Sm	$Sm = -2.223b_1 - 6.489b_2 + 4.733b_3 - 6.998b_4 - 10.656b_6 + 23.408b_7 + 5.513b_{15} + 0.248b_{22} + 2.565b_{43} - 44.431$	0.970
Tb	$Tb = -0.477b_1 - 1.268b_2 + 1.048b_3 - 1.499b_4 - 1.221b_6 + 5.796b_7 - 3.991b_9 + 1.836b_{15} + 0.026b_{22} + 0.456b_{43} - 9.978$	0.968
Tm	$Tm = -0.184b_1 - 0.546b_2 + 0.465b_3 - 0.514b_4 - 0.534b_6 + 2.764b_7 - 2.064b_9 + 0.742b_{15} + 0.039b_{22} + 0.166b_{43} - 3.914$	0.968
Y	$Y = -18.266b_1 - 22.022b_2 + 58.129b_3 - 20.679b_4 + 150.274b_6 - 35.118b_7 - 154.173b_9 + 44.41b_{15} + 13.739b_{22} - 3.895b_{43} + 50.766$	0.915
Yb	$Yb = -1.181b_1 - 3.483b_2 + 2.957b_3 - 3.178b_4 - 3.262b_6 + 16.85b_7 - 12.417b_9 + 4.477b_{15} + 0.269b_{22} + 1.061b_{43} - 23.861$	0.967

注:  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_6, b_7, b_9, b_{15}, b_{22}, b_{43}$  分别代表稀土样品光谱波段为 340, 350, 360, 370, 390, 400, 420, 480, 550 和 760 nm 处的反射率

Note:  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_6, b_7, b_9, b_{15}, b_{22}, b_{43}$  are the reflectivities at the wavelength of 340, 350, 360, 370, 390, 400, 420, 480, 550 and 760 nm, respectively

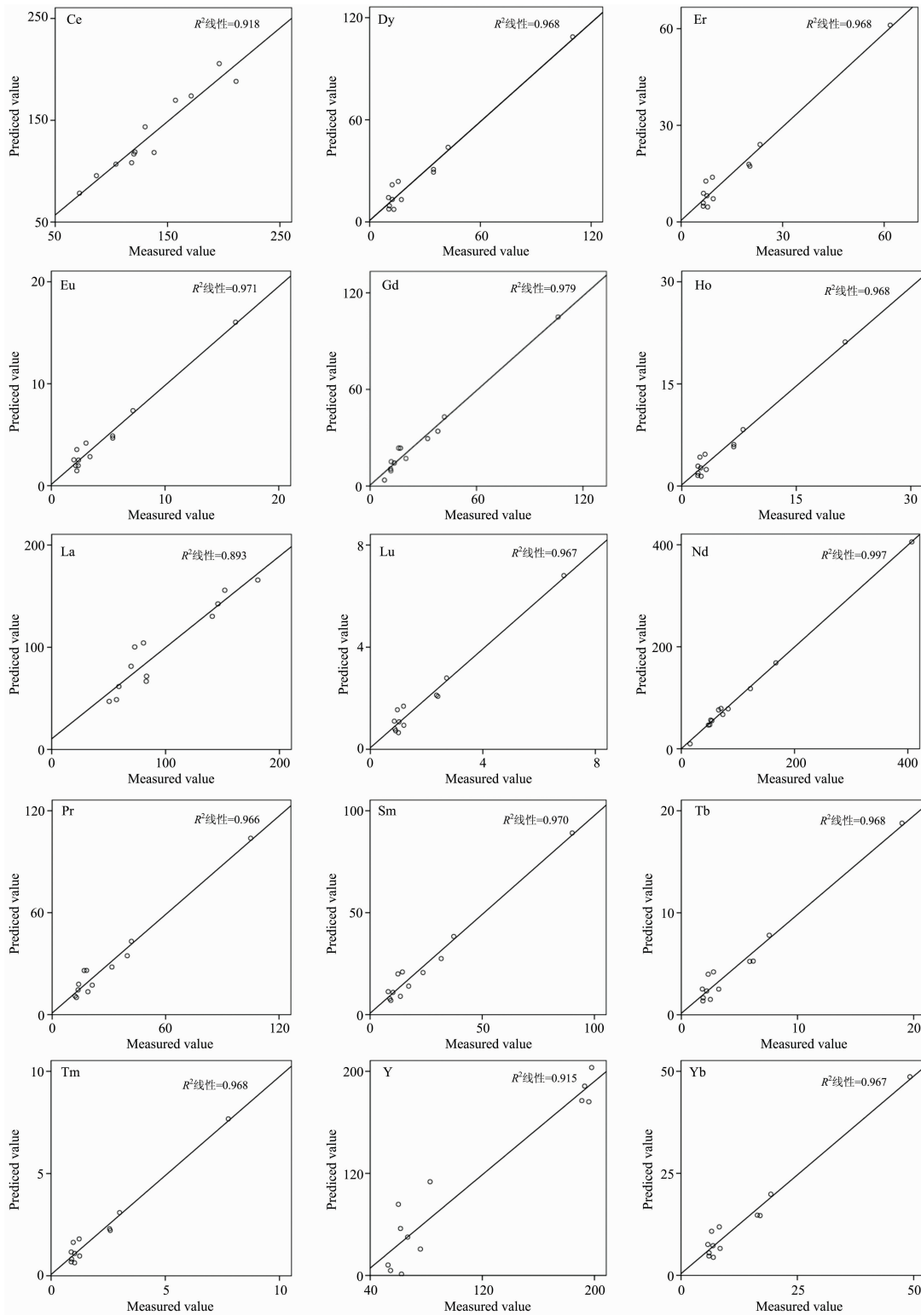


图 4 15 种稀土元素含量实测值与预测值散点图

Fig. 4 Scatter diagram of measured and predicted values of 15 rare earth elements

### 3 结 论

利用12个稀土矿样15种元素含量与光谱反射率之间的相关关系,通过多元线性回归分析方法建立反演模型,取得了较好的反演效果。

(1)通过对稀土矿样测量的波谱特征分析,在可见-近红外波段内发现了370, 950, 1 400, 1 900和2 200 nm等5个较为明显的稀土元素特征吸收谷,并利用这些波段建立了稀土总含量的线性模型,相关系数达到了0.69,表明运用特征吸收谷进行稀土总含量反演有一定的可行性。

(2)利用可见光波段与样本稀土总含量进行相关分析,选出相关性最强的10个波段:340, 350, 360, 370, 390, 400, 420, 480, 550和760 nm,基于上述波段建立稀土总含量的反演模型, $R^2$ 可达到0.95以上,表明可见光波段对稀土总含量有较好的估测潜力。

(3)利用10个可见光波段分别建立了15种稀土元素含量反演模型, $R^2$ 也达到0.89以上,表明可见光波段对各稀土元素含量也有较好的估测潜力。

本研究主要解决了通过实测反射光谱数据建立矿样稀土含量的定量评估预测模型问题,弥补了对风化壳或岩石中稀土含量定量一半定量研究的不足,也为进行其他介质中稀土含量的估测研究提供了启发,另外也对运用航空及航天高光谱遥感进行稀土含量的评估提供了理论基础,但是本研究也存在一定的问题:

(1)虽然研究中样本的光谱特性与稀土总含量及稀土元素含量都呈现出较好的线性相关性,但本次研究是基于少数样本,对加大样本量后是否还存在类似的线性相关,有待进一步验证;

(2)研究采用线性回归方法进行建模,效果较好,采用其他建模方法是否可以取得相似效果,也有待更多实验检验,或许可以建立更加精确可靠的模型。

### References

- [1] WANG Deng-hong, ZHAO Zhi, YU Yang, et al(王登红, 赵 芝, 于 扬, 等). Acta Geoscientica Sinica(地球学报), 2017, 38(3): 317.
- [2] HE Yao, CHENG Liu, LI Yi(何 耀, 程 柳, 李 毅). Chinese Rare Earths(稀土), 2015, 36(4): 98.
- [3] Meer F V D. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2004, 5(1): 55.
- [4] Turner D J, Rivard B, Groat L A. American Mineralogist, 2016, 101(10): 2264.
- [5] Van Der Meer F D. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2004, 5(1): 55.
- [6] Ardanova L I, Getman E I, Loboda S N, et al. Inorganic Chemistry, 2010, 49: 10687.
- [7] Dai J, Wang D, Wang R, et al. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(1): 073513.
- [8] ZHANG Qin-yu, ZHANG Deng-rong, HUANG Guo-cheng, et al(章钦瑜, 张登荣, 黄国成, 等). Remote Sensing for Land & Resources(国土资源遥感), 2012, (1): 120.
- [9] DAI Jing-jing, WANG Deng-hong, CHEN Zhen-hui, et al(代晶晶, 王登红, 陈郑辉, 等). Acta Geoscientica Sinica(地球学报), 2013, (3): 354.
- [10] ZHAO Heng-qian, ZHAO Xue-sheng, CEN Yi, et al(赵恒谦, 赵学胜, 岑 奕, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(3): 869.
- [11] ZHAO Ting, WANG Deng-hong, WANG Zhao-zhao, et al(赵 汀, 王登红, 王钊钊, 等). Mineral Deposits(矿床地质), 2014, (s1): 1205.

## Study on Hyperspectral Quantitative Inversion of Ionic Rare Earth Ores

CHENG Gong<sup>1,2</sup>, LI Jia-xuan<sup>1,2</sup>, WANG Chao-peng<sup>3</sup>, HU Zhen-guang<sup>3</sup>, NING Qing-kun<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring(Central South University), Ministry of Education, Changsha 410083, China
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China
3. Chinalco Guangxi Zhuang Chongzuo Rare Earth Development Co., Ltd., Chongzuo 532299, China

**Abstract** Spectral absorption characteristics are used in the analysis of soil, mineral and plant material composition with spectral measurement technology, which is a hyperspectral remote sensing technology developed in recent years. It has many advantages, such as fast speed, high efficiency, low cost, low loss and so on. Rare earth is a strategic element with rich and unique physical and chemical properties, such as magnetic, optical, electrical, etc., which is widely used in aerospace, electronics, petrochemical, metallurgy, machinery, energy, agriculture and other fields. It is indispensable strategic material for the development of high-tech and cutting-edge national defense technology and the transformation of traditional industries in the world today. In recent years, As a result of the increasing demand and the enhancing value of rare earth resources, it has become an important research area to discover how to detect rare earth resources rapidly in large area and implement rare earth mining properly. Through spectral collection and analysis of rare earth minerals, this study carried out a series of researches on the correlation between rare earth elements and their chemical features. During the study, 12 rare earth mineral samples were collected from Liutang rare earth ore area of Chongzuo City, Guangxi, and the corresponding reflectance spectrum data were measured by using SVC HR1024I portable ground object wave spectrometer in laboratory. Continuous dispatch is implemented for the measured spectral features of the samples, and relative absorption analysis is carried out for prominent diagnostic absorption wavelength. Thus the linear relationship between the spectrum and the total content of rare earth elements and the contents of rare earth elements in ore samples was established according to its spectral characteristics. The results reveal that the five characteristic absorption bands of rare earth elements are 370, 950, 1 400, 1 900 and 2 200 nm in visible light and near infrared, respectively. The intensity of the five absorption band is related to the total rare earth content linearly, with  $R^2$  reaching 0.69, also discovered that the correlation between rare earth content and the visible light band is larger, and the correlation analysis between the visible light wave band and the total rare earth content of the sample was carried out. The 10 bands which have the strongest correlation with the total content of rare earth are 340, 350, 360, 370, 390, 400, 420, 480, 550 and 760 nm, respectively. The linear regression method is used to get the prediction model of the reflectance value and the total sample content of visible bands with high accuracy with  $R^2$  greater than 0.95. Also linear modeling is established by using the visible light wave band and 15 rare earth elements content values, with the correlation coefficient may reach above 0.9, which also shows that each single rare earth element has a strong correlation with the visible light wave region. By studying the spectral characteristics and chemical analysis of rare earth mineral samples, a linear regression analysis was carried out for 5 diagnostic absorption wavelengths and the visible band and the total rare earth element content of the samples, and for 15 kinds of rare earth element contents. The quantitative evaluation model of rare earth content in ore samples is established, which has certain reference value for rapid quantification-semi-quantitative evaluation of rare earth ores, and lays a theoretical foundation for extracting mineral information from hyperspectral remote sensing of rare earth ores and elements. It provides a scientific and effective theoretical basis for the ultimate realization of efficient exploitation of rare earth resources, reducing consumption and production costs at the source, reducing environmental damage and pollution, and promoting the strategic development and utilization of medium-heavy rare earth resources.

**Keywords** Ionic rare earth ores; Hyperspectral; Quantitative inversion; Linear regression

(Received Mar. 1, 2018; accepted Aug. 20, 2018)