

基于比值导数光谱法的强线性波段特征分析

赵恒谦^{1,2}, 张立福¹, 岑奕¹, 吴太夏¹, 王晋年^{1*}

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:对固体矿物和粉末矿物反射光谱进行了比较分析,并基于比值导数光谱法对石膏与绿帘石粉末混合物进行了光谱定量反演,提取出端元矿物的强线性波段,结合矿物特征吸收谱带信息,从反射率光谱、比值光谱及比值导数光谱等不同角度总结强线性波段的分布特征,初步判定强线性波段分布于端元矿物特征吸收谷附近的陡坡以及反射率光谱交点处。

关键词:光谱解混;强线性波段;比值导数法;矿物定量分析

中图分类号:P575.4 **文献标识码:**A

Research on the characteristics of strong linearly related bands based on derivative of ratio spectroscopy

ZHAO Heng-Qian^{1,2}, ZHANG Li-Fu¹, CEN Yi¹, WU Tai-Xia¹, WANG Jin-Nian^{1*}

(1. The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The spectra of mineral powder and mineral rock were compared and analyzed. A quantitative inversion based on DRS was performed on powder mixtures of plaster and allochite to extract the strong linear bands of each component separately. Combining with the absorption characteristics of endmember minerals, the distribution characteristics of strong linear bands on the reflectance spectra, the ratio spectra and the derivative of ratio spectra were discussed.

Key words: spectral unmixing, strong linear bands, derivative of ratio spectroscopy, quantitative analysis of minerals

PACS: 07.07.Df

引言

高光谱技术是遥感前沿科技中的重要组成,它可以基于光谱特征提取岩石和矿物信息^[1],但是矿物丰度含量的精确分析仍然是一个难题.岩石中不同矿物成分的混合属于紧致混合,其混合光谱并非各端元矿物成分反射率光谱的线性组合^[2].当混合成分的尺度很小时,如岩石中组分矿物的入射光被一种以上的端元多次散射,混合光谱呈非线性^[3]. Mustard 等人的研究表明,矿物粉末的单次散射反照率(Single Scattering Albedo, SSA)更接近于线性混

合,对其进行矿物含量反演能得到更高的精度^[4].目前,比较成熟的岩矿定量光谱分析思路是基于辐射传输模型将反射率转换为单次散射反照率,继而进行线性解混^[5-6].但是,这种矿物光谱解混方法依赖于较为复杂的岩矿辐射传输模型^[7-9],需要矿物粒度分布,散射相函数等较难获取的先验参数,实验条件复杂,实际应用有较大困难.并且,目前已有的岩矿辐射传输模型主要针对矿物粉末,真实岩矿样品的研究还很少^[10].

目前为止,线性光谱混合模型仍是国内外研究最深入、应用最广泛的混合像元分类模型^[11].线性

收稿日期:2012-08-09,修回日期:2013-04-08

Received date: 2012-08-09, revised date: 2013-04-08

基金项目:国家自然科学基金(41272364);国家公益性行业专项(2011467071)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41272364), and Special Research Funding for the public benefits (2011467071)

作者简介 (Biography): 赵恒谦(1986-),男,河北涿州人,博士研究生,主要从事高光谱解混、矿物成分光谱分析等研究. E-mail: zhaohq@irsa.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jwang@irsa.ac.cn

光谱混合模型简单高效,物理意义明确,而且准确性比较高.王润生等通过实验室光谱模拟,对矿物的混合光谱性状作了研究,结果表明,混合光谱与端元矿物的相对含量在短波红外波段可近似为线性关系,向可见光方向非线性特征逐渐加强,在可见光谱段非线性特征较为明显^[12].在可见-短波红外波段识别的矿物主要为含羟基矿物,碳酸盐矿物以及部分水合硫酸盐矿物等多达近40种^[13].因此,在该波段范围内选取线性特征较为明显的波段进行线性模型解混具有较高的实际应用价值.矿物混合光谱的整体反射率一般介于参与混合的单矿物光谱反射率之间,混合物的反射率光谱是由组成的矿物所共同决定的,这就给研究混合物光谱与单个矿物的线性关系带来了一定困难.比值导数光谱法是一种特殊的光谱处理方法^[14-15],它可以消除混合物中其它物质的影响而直接得到目标物含量与混合光谱变化之间的对应关系,提取出对于目标信息较为敏感的波段,即强线性波段.采用强线性波段进行线性解混求解某种矿物成分含量,将可以很大程度消除非线性混合因素的影响,提高求解精度.本文首先对矿物粉末光谱和固体矿物光谱进行了比较分析,然后设计实验将石膏与绿帘石粉末按照不同比例进行混合并测量其反射率光谱,利用比值导数法的解混结果提取出矿物成分的强线性波段,对其特征从不同角度进行了分析.

1 实验方案

1.1 矿物粉末与固体光谱比较分析

固体矿物样品与粉末矿物的光谱存在一定差异^[16].为明确两者之间的差异,分别采用地面光谱仪获取相同矿物在粉末状态和固体状态的光谱,如图1所示.整体来看,固体矿物光谱和粉末矿物光谱的变化趋势基本一致,但区别较为明显.首先,固体矿物样品的反射率要明显低于粉末矿物;其次,不同矿物的吸收特征有着不同的变化.石膏吸收特征的深度变化较为复杂,有些较粉末光谱变深,如在1000 nm左右的吸收谷显著加深,而有些吸收特征则变弱甚至消失,如在1450 nm及1940 nm的吸收特征都趋于平缓.相比较而言,绿帘石的粉末光谱和固体矿物光谱吸收特征保持基本一致.这说明,固体岩石光谱特征的影响因素较为复杂,可能与晶体形态,岩石结构,矿物成分等都有关系.目前已有的岩矿辐射传输模型和光谱库基本都是针对矿物粉末颗粒的,固体矿物光谱特性的研究还不很成熟,与精确

定量分析还有一定距离.而且,矿物粉末利于充分混合和精确计量,在实际岩矿分析中亦可较为方便地获取不同粒径粉末,所以本文接下来的实验也将针对矿物粉末进行混合实验.

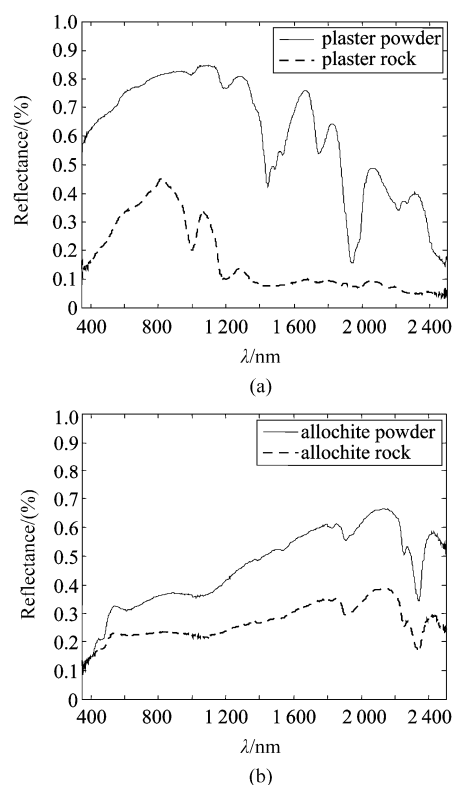


图1 矿物粉末与固体矿物光谱比较 (a) 石膏; (b) 绿帘石
Fig. 1 Comparison of the spectral of mineral powder and solid rocks (a) plaster, (b) allochite

1.2 矿物粉末光谱获取

设计了两组矿物粉末混合方案,如表1所示.矿物粉末均采用高纯度的石膏和绿帘石矿石,采用相同装置进行研磨,经过40目筛网筛选获得,矿物粉末粒度分布相同.将石膏粉末和绿帘石粉末按照不同比例进行精确配比混合(见表1).利用美国Spectra Vista公司生产的SVC HR1024便携式野外光谱仪测量矿物粉末端元及混合物光谱,使用光谱仪自带的软件进行去除重叠区域、反射率反演、光谱重采样(重采样后光谱区间为350~2500 nm,光谱分辨率为1 nm)等预处理操作,并将每组样本测量5条光谱,平均获得最终的反射率光谱,如图2所示.

石膏(Plaster)是典型的硫酸盐矿物,分子式为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,在1449 nm、1490 nm、1535 nm处有连续三个水吸收特征,在1750 nm处有诊断性硫酸盐吸收特征,在1948 nm处有极强的水吸收特征.

表 1 矿物混合物配比方案

Table 1 Mixing formula of mineral mixtures

矿物	混合物 1	混合物 2	混合物 3	混合物 4	混合物 5	混合物 6	混合物 7
石膏	5%	10%	30%	50%	70%	90%	95%
绿帘石	95%	90%	70%	50%	30%	10%	5%

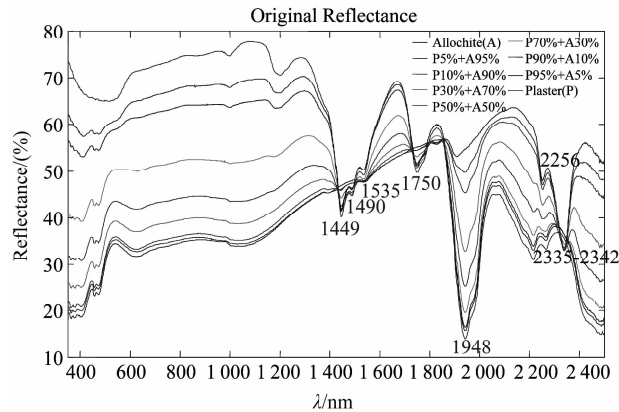


图 2 端元与混合物反射率光谱(正常:石膏的主要吸收特征;粗体:绿帘石的主要吸收特征)

Fig. 2 Reflectance spectral of endmember and mixtures (normal: main absorption characteristics of plaster; bold: main absorption characteristics of allochite)

绿帘石 (Allochite) 属于钙质硅酸盐, 分子式为 $\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2\text{O} \cdot \text{OH} \cdot \text{Si}_2\text{O}_7 \cdot \text{SiO}_4$, 在 2 256 nm 处有 FeOH 的吸收特征, 在 2 335 ~ 2 342 nm 处有诊断性地强烈吸收特征. 通过比较可以看出, 二元混合物光谱介于两者光谱之间, 随着矿物成分比例的变化其特征逐渐向所占比例更高的矿物光谱特征靠拢.

1.3 数据处理方法

矿物粉末混合光谱整体上属于非线性光谱混合, 但是在部分波段其反射率与某种矿物组分含量有较强的线性相关性, 这些波段就是该矿物的强线性波段. 基于实验获取的光谱数据, 采用比值导数光谱解混算法在各波段分别计算矿物丰度, 然后计算各波段所求丰度与实际矿物丰度之间的均方根误差 (RMSE), 选取出相关系数最高的波段.

1.3.1 比值导数混合光谱解混算法

比值导数光谱法是一种特殊的光谱处理方法, 它是指首先将两条连续光谱逐波段进行比值运算, 得到一条比值光谱, 然后对这条比值光谱进行微分处理, 得到比值导数光谱曲线. 比值导数混合光谱解混算法是基于线性混合模型, 利用比值导数法来获取不同组分丰度的混合光谱分析方法. 当混合物仅包含两种矿物组分, 在不考虑误差项时, 线性光谱混合模型可简化为

$$r(\lambda) = F_1 \times r_1(\lambda) + F_2 \times r_2(\lambda) \quad (1)$$

当在式(1)两侧同时除以第二种组分的光谱, 等式变为

$$\frac{r(\lambda)}{r_2(\lambda)} = F_2 + \frac{F_1 \times r_1(\lambda)}{r_2(\lambda)} \quad (2)$$

式(2)两边对求导, 则有

$$\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{r(\lambda)}{r_2(\lambda)} \right) = F_1 \times \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{r_1(\lambda)}{r_2(\lambda)} \right) \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 此时导数光谱已经与第二种组分 F_2 的含量无关. 也就是说, 求导之后的光谱值只与一种组分的丰度线性相关, 而与作为除数的组分丰度无关. 两侧都除以 $\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{r_1(\lambda)}{r_2(\lambda)} \right)$, 则有

$$F_1 = \frac{\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{r(\lambda)}{r_2(\lambda)} \right)}{\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{r_1(\lambda)}{r_2(\lambda)} \right)} \quad (4)$$

任取一波段 λ_i 即可求解出第一种组分的含量:

$$F_{1\lambda_i} = \frac{\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{r(\lambda_i)}{r_2(\lambda_i)} \right)}{\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{r_1(\lambda_i)}{r_2(\lambda_i)} \right)} \quad (5)$$

同理, 采用同样的处理方式可得到 F_2 . 当选择某一波段 λ_j (λ_i 与 λ_j 不一定相同) 就可以得到第二种组分的含量:

$$F_{2\lambda_j} = \frac{\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{r(\lambda_j)}{r_1(\lambda_j)} \right)}{\frac{d}{d\lambda} \left(\frac{r_2(\lambda_j)}{r_1(\lambda_j)} \right)} \quad (6)$$

1.3.2 强线性波段提取

实际数据处理当中, 各个波段并不都符合线性混合模型, 在非线性特性较强的波段, 利用比值导数法求解出的丰度就会和实际矿物含量有较大误差. 而强线性波段是光谱反射率值与矿物含量线性关系较强的波段, 采用这样的波段进行比值导数法处理之后, 其比值导数光谱值就会与某种矿物丰度含量严格线性相关, 由式(5)或式(6)计算得到的反演结果就会相对更为精确. 因此, 反演得到的矿物丰度与实际矿物丰度之间的误差非常小的波段, 就可以判断为强线性波段.

评价各波段矿物丰度反演精度时, 采用均方根误差 (RMSE) 进行评价, 公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c'_i - c_i)^2}{n}} \quad (7)$$

其中 c'_i 是采用某一波段反演出的某种矿物的丰度,

c_i 是该矿物在各混合物中的实际丰度, n 是指混合物的数目.

计算各波段求解出的丰度与实际丰度的 RMSE, 按照从低到高进行排序, 得到解混精度最高的 20 个波段, 如表 2 所示.

2 强线性波段特征分析

比值导数光谱法处理过程中, 混合物中的两种端元光谱均有所参与, 所以强线性波段是由两种端元物质共同决定的, 与二者的反射率光谱息息相关. 综合分析表 2 发现, 石膏强线性波段集中在 1 435 ~ 1 445 nm, 1 735 ~ 1 745 nm, 而绿帘石强线性波段集中在 1 432 ~ 1 437 nm, 1 500 ~ 1 510 nm, 1 735 ~ 1 740 nm. 为了更直观地分析提取出的强线性波段分布有何规律, 将这些波段分别在原始反射率光谱、比值光谱、比值导数光谱上标记显示, 分别进行分析.

在原始光谱图中(见图 3), 石膏和绿帘石的强线性波段集中在两种矿物的特征吸收谷附近, 如 1 432 ~ 1 445 nm 区间位于石膏 1 449 nm 水吸收特征谷的左侧, 1 500 ~ 1 510 nm 位于石膏 1 490 nm 水特征吸收谷的右侧, 1 735 ~ 1 745 nm 位于石膏 1 750 nm 硫酸盐典型吸收特征的左侧, 2 354 nm 位于绿帘石 2 335 ~ 2 342 nm 诊断性吸收特征的右侧. 在比值光谱中(见图 4), 石膏和绿帘石的强线性波段大都集中在比值为 1 的基线附近, 与原始光谱图比照发现位于两条矿物光谱曲线交点附近. 由于光谱曲线相交是由于两种矿物光谱的变化趋势不一致导致, 所以交点附近两种矿物的变化趋势差异, 及导数光谱差异较为明显, 区分度较高, 所以采用比值导数法可以获得较高的解混精度. 在比值导数光谱中(见图 5), 这两种矿物的强线性波段大多位于比值导数光谱波峰或者波谷附近位置, 例如 1432 ~

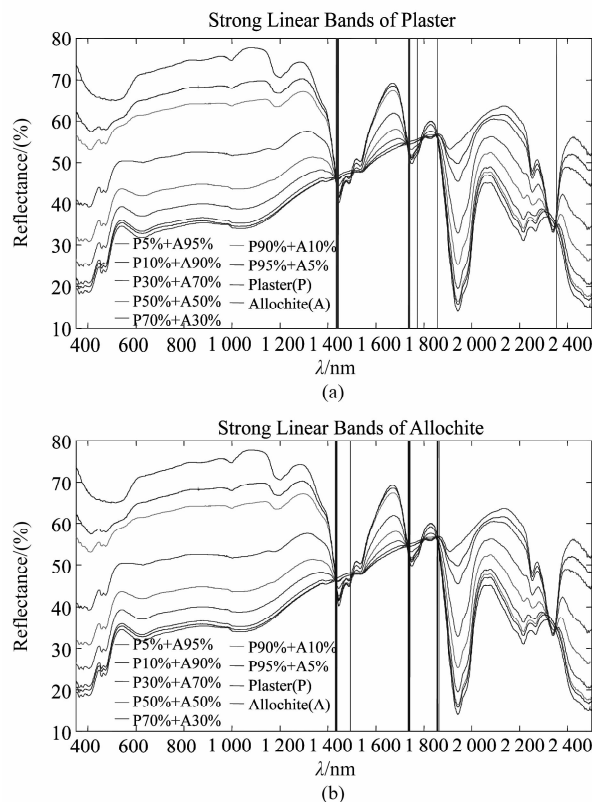


图 3 强线性波段在反射率光谱上的分布 (a) 石膏的强线性波段, (b) 绿帘石的强线性波段

Fig. 3 Strong linear bands on original reflectance spectral (a) strong linear bands of plaster, (b) strong linear bands of allochite

1 445 nm 位于绿帘石 1 436 nm 波谷附近以及石膏 1 436 nm 波峰附近, 1 500 ~ 1 510 nm 位于石膏 1 500 nm 波峰以及绿帘石 1 500 nm 波谷附近, 1 735 ~ 1 745 nm 位于石膏 1 730 nm 波峰以及绿帘石 1 730 nm 波谷附近, 2 354 nm 位于石膏 2 352 nm 波谷和绿帘石 2 352 nm 波峰附近. 很明显石膏和绿帘石的比值导数光谱波峰波谷是相反的, 即石膏的比

表 2 石膏与绿帘石混合物提取出的强线性波段

Table 2 Strong linear bands derived from mixture of plaster and allochite

Plaster	Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Wavelength/nm	1437	1436	1438	1739	1738	1435	1439	1740	1741	1445
RMSE	0.00825	0.00869	0.00904	0.01001	0.01026	0.01073	0.01093	0.01112	0.01117	0.01150	
Allochite	Rank	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	Wavelength/nm	1857	2354	1774	1856	1434	1444	1440	1737	1441	1442
RMSE	0.01223	0.01230	0.01315	0.01324	0.01331	0.01336	0.01337	0.01357	0.01358	0.01385	

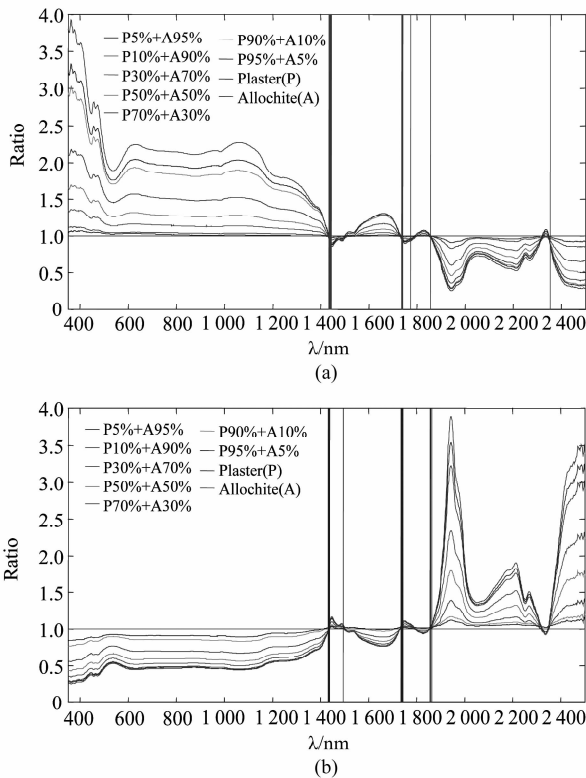


图 4 强线性波段在比值光谱上的分布 (a) 石膏的强线性波段, (b) 绿帘石的强线性波段
Fig. 4 Strong linear bands on ratio spectral (a) strong linear bands of plaster, (b) strong linear bands of allochite

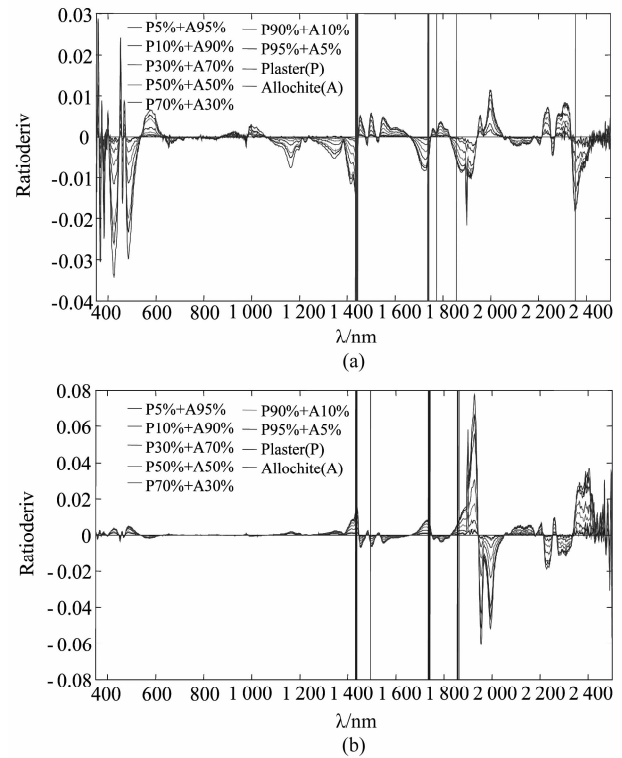


图 5 强线性波段在比值导数光谱上的分布 (a) 石膏的强线性波段, (b) 绿帘石的强线性波段
Fig. 5 Strong linear bands on derivative of ratio spectral (a) strong linear bands of plaster, (b) strong linear bands of allochite

值导数波峰是绿帘石的波谷, 而绿帘石的波峰是石膏的波谷. 这是由于石膏的比值光谱与绿帘石的比值光谱是倒数的关系, 而倒数的一阶微分函数与原函数关系如下式:

$$\left(\frac{1}{f}\right)' = -\frac{f'}{f^2} \quad (8)$$

其中 f 为原函数, f' 为原函数的导数, $\left(\frac{1}{f}\right)'$ 为原函数倒数的一阶导数. 可以看出, 倒数的一阶微分与原函数一阶微分的符号相反, 而值的大小与原函数一阶微分正相关. 因此, 石膏的比值导数光谱与绿帘石的比值导数光谱符号相反, 且极值点位置相同.

石膏与绿帘石的强线性波段区间的光谱特征总

结如下表所示:

综合以上分析结果, 矿物特征吸收谷附近的反射率陡坡位置强线性波段分布最为集中, 体现在比值导数光谱中位于特征吸收谷导致的零值两侧紧邻的波峰和波谷, 而 Salinas 等人在药物溶液透过率光谱比值导数法分析研究中所采用的波段也恰好满足这一要求^[15]; 同时, 位于矿物特征吸收谷附近的矿物端元光谱交点, 也是强线性波段的显著特征. 总之, 矿物特征吸收谷两侧是矿物强线性波段较为集中的区域. 由于采用的矿物组合有限, 不同类别矿物混合其强线性波段是否具有相同特征仍有待进一步研究.

表 3 石膏与绿帘石混合物提取出的强线性波段特征

Table3 Characteristics of strong linear bands derived from mixture of plaster and allochite

Linear Band Range	Character of Original Reflectance		Character of Ratio Spectra		Character of Ratio - derivative spectra		
	Plaster	Allochite	Plaster	Allochite	Plaster	Allochite	
Plaster	1 435 ~ 1 445 nm	Near Absorption Valley	Smooth area	Sharp decrease, near 1	Sharp increase, near 1	Valley, negative	Peak, positive
	1 735 ~ 1 745 nm	Near Absorption Valley	Smooth area	Steadily increase, near 1	Steadily decrease, near 1	Increase, negative	Decrease, positive
Allochite	1 430 ~ 1 435 nm	Sharp decrease	Smooth area	Sharp decrease, near 1	Sharp increase, near 1	Near valley, negative	Near peak, positive
	1 500 ~ 1 510 nm	Steady increase	Smooth area	Steadily increase, near 1	Steadily decrease, near 1	Peak, positive	Valley, negative
	1 735 ~ 1 740 nm	Steady decrease	Smooth area	Steadily decrease, near 1	Steadily increase, near 1	Increase, negative	Decrease, positive

王润生等人指出,矿物光谱吸收谱带的出现和强弱反映了相应矿物的存在与相对含量(矿物丰度),具有诊断性特征,并且基于吸收谱带的深度对物质成分进行定量反演是高光谱定量反演的重要方法之一^[17]。但由于混合光谱的影响,同种成分在不同种类的地物中,其谱带强度与成分百分含量的关系也会有所不同,因此一般反演的是成分的相对含量。而比值导数法能够去除混合光谱中其它物质的影响,可采用强线性波段直接反演物质成分的绝对含量,实现了基于吸收谱带物质成分定量反演方法由相对定量到绝对定量的突破。随着矿物混合光谱强线性波段特征的进一步研究,矿物成分定量反演精度和效率有望得到显著提高。

3 结论

对于固体矿物和粉末矿物反射光谱的进行了比较分析,并基于比值导数光谱法对石膏与绿帘石粉末混合物进行光谱定量反演,提取出端元矿物的强线性波段,结合矿物特征吸收谱带信息,从反射率光谱、比值光谱以及比值导数光谱等不同角度总结强线性波段的分布特征,并初步分析了其原因,结论为:

(1) 固体岩石光谱吸收特征变化较为复杂,与相同成分粉末矿物光谱相比有些吸收特征加强,而有些特征削弱,需要进一步研究其光谱特征变化机理才能实现固体矿物光谱定量分析;

(2) 利用比值导数法能够利用各个波段独立反演端元矿物含量,并通过与实际含量误差的分析提取出强线性波段;

(3) 矿物混合光谱中,强线性波段分布于端元矿物特征吸收谷附近的陡坡以及反射率光谱交点处,在这些波段矿物混合光谱对矿物含量敏感性较高;

(4) 采用强线性波段可以直接反演物质成分的绝对含量,实现了基于吸收谱带物质成分定量反演方法由相对定量到绝对定量的突破。

由于所采用的矿物组合较为有限,还需要进一步对不同类型矿物混合的强线性波段特征进行分析,从而充实和完善矿物强线性特征理论。矿物特征吸收谱带是矿物高光谱定量反演的研究重点,随着矿物混合光谱强线性波段特征的进一步研究,矿物成分定量反演精度和效率有望得到进一步提高。此外,固体矿物反射率光谱混合模型及其吸收特征也将做进一步研究。

REFERENCES

[1] van der Meero F, Bakker W. Cross correlogram spectral

matching: Application to surface mineralogical mapping by using AVIRIS data from Cuprite, Nevada[J]. *Remote Sensing of Environment*. 1997, **61**(3): 371-382.

- [2] Johnson P E, Smith M O, Taylor-George S, et al. A semiempirical method for analysis of the reflectance spectra of binary mineral mixtures[J]. *Journal of Geophysical Research*. 1983, **88**(B4): 3557-3561.
- [3] Mustard J F, Li L, He G. Nonlinear spectral mixture modeling of lunar multispectral data: Implications for lateral transport[J]. *Journal of Geophysical Research*. 1998, **103**: 19419-19426.
- [4] Mustard J F, Pieters C M. Quantitative abundance estimates from bidirectional reflectance measurements[J]. *J. Geophys. Res.* 1987, **92**: E617-E626.
- [5] Yan B K, Liu S W, Wang R S, et al. Experiment study on quantitative retrieval of mineral abundances from reflectance spectra[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2008, **7123**:712303.
- [6] Nascimento J M P, Bioucas-Dias J M. Unmixing hyperspectral intimate mixtures[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2010, **7830**:78300C.
- [7] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy:1. Theory [J]. *Journal of Geophysical Research*. 1981, **86**(B4): 3039-3054.
- [8] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 5. The coherent backscatter opposition effect and anisotropic scattering[J]. *Icarus*. 2002, **157**(2): 523-534.
- [9] Hapke B. *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005:181-216.
- [10] YAN Bo-Kun. Study on mechanism of spectrums of rocks and minerals and information extraction method in thermal remote sensing geology[D]. China University of Geosciences, (Beijing), (闫柏琨. 热红外遥感岩矿波谱机理及信息提取技术方法研究. (北京)中国地质大学). 2006.
- [11] Ichoku C, Karnieli A. A review of mixture modeling techniques for sub-pixel land cover estimation[J]. *Remote Sensing Reviews*. 1996, **13**(3-4): 161-186.
- [12] WANG Run-Sheng, YANG Su-Ming, YAN Bo-Kun. A review of mineral spectral identification methods and models with imaging spectrometer[J]. *Remote Sensing For Land & Resources*(王润生,杨苏明,闫柏琨. 成像光谱矿物识别方法与识别模型评述. *国土资源遥感*), 2007, **1**: 1-9.
- [13] WANG Run-Sheng, GAN Fu-Ping, YAN Bo-Kun, et al. Hyperspectral mineral mapping and its application[J]. *Remote Sensing For Land & Resources*(王润生,甘甫平,闫柏琨,等. 高光谱矿物填图技术与应用研究. *国土资源遥感*), 2010, **1**: 1-13.
- [14] Nevado J J, Cabanillas C G, Salinas F. Spectrophotometric resolution of ternary mixtures of salicylaldehyde, 3-hydroxybenzaldehyde and 4-hydroxybenzaldehyde by the derivative ratio spectrum-zero crossing method[J]. *Talanta*. 1992, **39**(5): 547-553.
- [15] Salinas F, Nevado J J, Mansilla A E. A new spectrophotometric method for quantitative multicomponent analysis resolution of mixtures of salicylic and salicylic acids[J]. *Talanta*. 1990, **37**(3): 347-351.
- [16] Cooper B L, Salisbury J W, Killen R M, et al. Midinfrared spectral features of rocks and their powders[J]. *Journal of geophysical research*. 2002, **107**(E4): 5017-5035.
- [17] WANG Run-Sheng. Spectral Identification and Inversion of Composition and Component of Objects with Hyperspectral Remote Sensing[J]. *Journal of Geo-information Science*(王润生. 高光谱遥感的物质组分和物质成分反演的应用分析. *地球信息科学学报*), 2009, **11**(3): 261-267.