

利用光谱吸收深度定量反演碳酸盐矿物的影响因素及应用分析

翟文羽, 陈磊*, 徐艺轩, 孔祥玉

天津师范大学地理与环境科学学院, 天津 300387

摘要 光谱吸收特征是矿物识别与定量反演的重要指标。为提高利用光谱吸收特征定量反演矿物精度,以方解石为代表,以线性混合光谱模型与连续统去除方法为基础,以连续统去除吸收深度(CRBD)为分析对象,按端元光谱在 $2.33\ \mu\text{m}$ 附近有无吸收特征对光谱进行分类,并分析每类数据与方解石混合光谱CRBD随丰度、反射率以及光谱特征等影响因素的变化规律,进而非线性拟合其变化范围并提出一种新的矿物含量表示方法。研究表明,端元丰度对CRBD值影响较大,方解石丰度越大,吸收特征越明显,CRBD值越大。同样,混合端元反射率与光谱特征对混合光谱CRBD值影响也较明显,当混合端元光谱在 $2.33\ \mu\text{m}$ 附近为无特征时,端元光谱反射率越小,CRBD随碳酸盐丰度变化上凸越明显,为反射峰特征时,端元光谱反射率越大,下凹越明显;混合端元在 $2.33\ \mu\text{m}$ 附近为吸收谷特征时,CRBD随碳酸盐丰度接近线性变化。通过交叉分析与多端元混合光谱CRBD变化分析发现,混合光谱CRBD随碳酸盐矿物丰度及混合端元反射率变化受限于一定范围,其上拟合方程满足指数函数变化,下限拟合方程为三次多项式函数,且拟合精度较高, R^2 均高于0.99, RMSE低于0.005。为实现矿物含量的精确预测,根据拟合方程提出一种以变化范围替代定量值来表示碳酸盐矿物丰度分布的方法,实现碳酸盐矿物含量反演的范围表示。通过影响因素分析及范围表示法可为矿产监测、定量评估等提供新的表达方法,为建立具有普适性的地物定量反演模型提供理论参考。

关键词 连续统去除吸收深度(CRBD); 碳酸盐; 定量反演; 影响因素

中图分类号: P578.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)07-2226-07

引言

高光谱数据光谱分辨率高,能精细地刻画地物光谱特征,提高地物分类与识别的能力。不同地物具有不同组成成分、分子结构,从而使其在不同波长位置处具有不同的光谱特征,是高光谱数据识别地物类型的重要指标之一。光谱特征较明显的地物有植被在 $0.67\sim 0.76\ \mu\text{m}$ 附近的“红边”效应,水分在 1.40 和 $1.90\ \mu\text{m}$ 附近的吸收带以及粘土矿物、碳酸盐矿物在 2.20 和 $2.30\ \mu\text{m}$ 附近的吸收特征等。为分析这些特征与水分、叶绿素、矿物含量等之间的关系,倒数、对数、一阶微分、包络线去除等方法被用于处理光谱数据并建立相应元素定量反演模型^[1-2]。

包络线去除是众多光谱特征处理方法中凸显光谱吸收特征最常用的方法,最早由Clark等提出对光谱数据进行归一

化处理,增强光谱在特定波长位置处的吸收特征,提高遥感地物识别能力^[3]。经多年发展,连续统去除算法已相当成熟,并形成由吸收位置、深度、面积、对称度等不同的光谱吸收特征参数,在土壤成分含量、植被叶绿素含量反演等方面均得到了较高精度的应用。彭杰等^[4]分析了连续统去除曲线及其一阶微分曲线,发现以 $0.64\sim 0.70\ \mu\text{m}$ 波段连续统去除数据构建的偏最小二乘模型对水稻盐分含量具有很好的反演效果。彭小婷等^[5]等基于包络线去除与偏最小二乘法实现了土壤重金属的反演。张甜等^[6]根据阴影提取、连续统去除等提出了一种阴影像元的校正方法,有效提高有阴影的丘陵地区分类精度。郭超凡与郭道宇^[7]对湿地植被的叶片光谱进行包络线去除,建立吸收深度与叶绿素含量之间的回归模型。郑煜等^[8]基于采集的不同时期的油菜叶片高光谱数据,建立光谱反射率、连续统去除光谱、光谱吸收特征参数与叶片叶绿素之间的相关性模型,发现利用连续统去除光谱与吸

收稿日期: 2020-06-27, 修订日期: 2020-10-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41971306), 国家自然科学基金青年科学基金项目(41802246), 科技基础资源调查专项(2019FY202501), 天津师范大学博士基金项目(52XB1617)资助

作者简介: 翟文羽, 1999年生, 天津师范大学地理与环境科学学院本科生 e-mail: 1360034012@qq.com

* 通讯作者 e-mail: chenlei0106@126.com

收特征参数反演叶绿素的精度更高,连续统去除光谱特征波段结合最优吸收特征参数构建的偏最小二乘回归模型估算效果最佳。

上述反演模型在应用中大多基于线性回归分析实现地物参数的定量反演,而由于地物端元的复杂性,地物光谱特征受多种因素影响,随对应端元丰度变化大多不满足线性要求。张芳等^[2]基于吸收峰面积、对称度等发现不同岩石的特征变量与含水量的关系并不是线性变化。Chen 等^[9]基于室内试验证明与植被混合时,发现碳酸盐矿物吸收深度随矿物丰度满足三次多项式变化。因此,对地物光谱特征的分析,特别是光谱吸收深度的影响因素及变化规律分析对提高地物定量反演精度具有重要意义。

光谱吸收深度是目前应用最多的光谱吸收特征参数之一,常被用于线性或非线性的反演矿物丰度信息^[10-11]。由于地物类别的复杂性,利用吸收深度反演矿物含量受混合端元特征的影响较大。由于碳酸根离子的影响,碳酸盐矿物在 2.33 μm 附近具有明显的光谱吸收特征,使其成为碳酸盐矿物遥感识别及其丰度定量反演的重要指标。为分析光谱吸收深度的影响因素、提高利用光谱特征定量反演地物含量精度,以碳酸盐矿物为例,以连续统去除吸收深度(continuum removal band depth, CRBD)为分析特征,分析不同特征矿物与不同丰度方解石混合光谱吸收特征的变化规律,并以此为基础,求解方解石吸收深度变化范围,以含量范围代替定量值实现碳酸盐矿物含量的范围估计,为地物光谱特征分析提供理论基础,为建立具有普适性的地物定量反演模型提供理论依据。

1 实验部分

1.1 数据

1.1.1 光谱数据

为分析不同光谱特征对 CRBD 变化规律的影响,从光谱数据出发,以 2.10 与 2.40 μm 为左右肩部,根据光谱特征差异把地物光谱分为三类,即无特征:光谱曲线在 2.10~2.40 μm 范围内接近于平缓直线;反射峰特征:光谱曲线在 2.10~2.40 μm 范围内上凸且在 2.33 μm 处反射率高于左右肩部附近反射率;吸收谷特征:光谱曲线在 2.10~2.40 μm 范围内下凹且在 2.33 μm 处反射率明显低于左右肩部附近反射率。为满足光谱数据特征分析需求,从 USGS 光谱库中选择方铅矿(galena4)、发光沸石(mordenil)与斜帘石(czoisite)三条光谱分别代表具有无特征、反射峰特征、吸收谷特征的光谱数据。另外,选择含有碳酸根离子的方解石(calcite3)矿物光谱作为研究对象,光谱如图 1。为使反射率与 CRBD 的相关性具有普适性,选取的无特征光谱反射率在 2.33 μm 附近应偏低,而反射峰特征光谱反射率应偏高,galena4 与 mordenil 满足数据特征要求。

1.1.2 影像数据

为定量分析 CRBD 与碳酸盐矿物含量的关系,选择内华达州赤铜矿区高光谱数据为应用数据,数据可从喷气推进实验室下载(http://aviris.jpl.nasa.gov/data/free_data.html),

部分数据如图 2 所示。根据前期研究成果^[12-13],研究区有方解石、绿泥石、钠云母等多种矿物。由于碳酸根离子及粘土矿物的次级吸收影响,矿物在 2.33 μm 附近有明显吸收特征。以 USGS 光谱库数据为参考,按端元光谱在 2.33 μm 附近特征差异把赤铜矿区矿物光谱划分为三类,如表 1 所示。

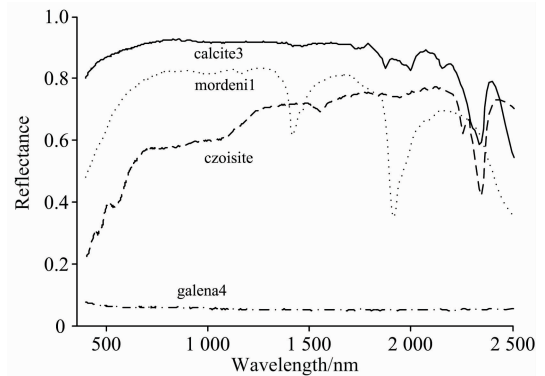


图 1 方解石光谱与 2.33 μm 附近具有不同特征的三种矿物光谱

Fig. 1 The spectra of calcite and three spectra with different feature types around 2.33 μm

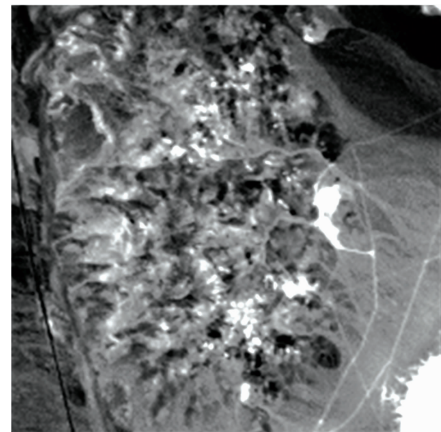


图 2 波段 207(波长位置 2.33 μm)

Fig. 2 The grey image of band 207 (Wavelength 2.33 μm)

表 1 按光谱特征赤铜矿区影像数据分组

Table 1 Group classification by spectral feature for cuprite image data

无特征光谱	吸收谷特征光谱	反射峰特征光谱
针铁矿, 赤铁矿, 蛋白石	方解石, 绿泥石, 钠云母, 二重高岭石, 绿脱石	明矾石, 水铍长石, 黄钾铁矾, 高岭石, 蒙脱石, 多水高岭石

1.2 方法

1.2.1 线性混合光谱模型

线性混合光谱模型是光谱数据处理与分析的常用方法^[14],以此为基础获取不同丰度、不同特征的混合光谱,模型表达式为

$$\begin{cases} R = \sum \alpha_i R_i + \epsilon \\ \sum \alpha_i = 1 \\ 0 \leq \alpha_i \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, R 为混合光谱, R_i 为第 i 个端元光谱, α_i 为第 i 个端元的丰度, ϵ 为误差项。

1.2.2 连续统去除法

通过线性模型获取不同矿物丰度下的混合光谱后, 以连续统去除法获取对应混合光谱的连续统去除值及 CRBD。连续统去除法是利用光谱反射率与光谱包络线对光谱吸收特征进行归一化并增强光谱吸收特征的方法^[3], 其计算公式为

$$S_{cr} = R/R_c \quad (2)$$

$$CRBD(i) = 1 - S_{cr}(i) \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, S_{cr} 是连续统去除值, R 是光谱反射率, R_c 是包络线值, $CRBD(i)$ 第 i 个波段的 CRBD 值, $S_{cr}(i)$ 为第 i 个波段的连续统去除值。实际应用中, 1.40 和 1.90 μm 附近有水汽吸收, 对算法影响较大, 研究中选择 2.00~2.50 μm 范围内的光谱进行连续统去除^[15]。

1.2.3 光谱曲线处理方法

为分析光谱反射率大小对 CRBD 的影响, 对 galena4、czoisite 与 mordenil 光谱分别处理, 从而得到不同反射率大小的光谱曲线并与方解石光谱线性混合。反射率处理步骤为:

(1) 设光谱反射率为 R , 经 $R+0.05$ 与 $R-0.05$ 处理得两条波形一致、反射率不同的光谱曲线;

(2) 计算 $R+0.05$ 光谱的最大值与 $R-0.05$ 光谱的最小值, 若最大值大于 1 或最小值小于 0, 则停止; 否则存储 $R \pm 0.05$ 光谱值并以 $R \pm 0.05$ 替代 R 继续执行步骤(1)。

2 结果与讨论

2.1 端元丰度影响分析

设置步长为 0.05, 以 galena4, czoisite 和 mordenil 分别与方解石光谱进行线性混合得到不同丰度下的混合光谱, 如图 3 所示。由图可知, 随方解石丰度增加, galena4, mordenil 与方解石混合光谱在 2.33 μm 附近的吸收特征越明显, 而 czoisite 与方解石的吸收特征相近, 混合光谱吸收特征在所有丰度范围内均较明显。对不同丰度混合光谱进行连续统去除, 并以 0.05 为间隔叠加显示连续统去除值, 分别如图 4 (a,b,c)所示, galena4 与 mordenil 光谱数据在 2.33 μm 处没有吸收特征, 其连续统去除曲线也基本趋于直线。随着混合光谱中方解石丰度的增加, 其吸收特征越明显。因 czoisite 光谱具有明显的吸收特征, 且其吸收深度大于方解石光谱, 当方解石丰度增加时, 其吸收深度有所减小, 但变化幅度较小。

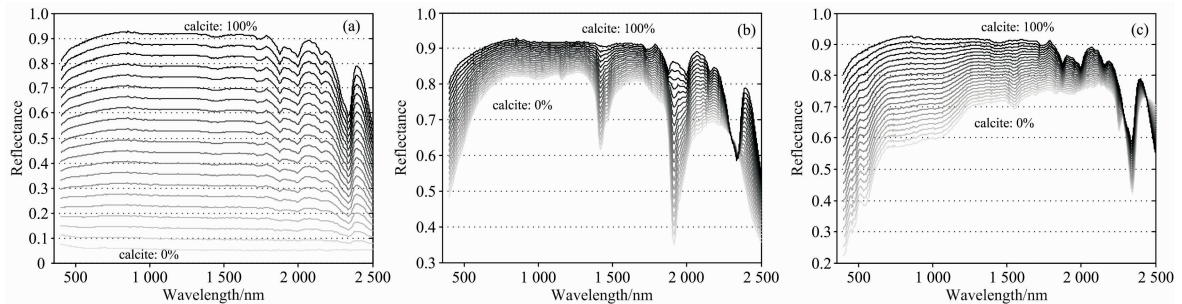


图 3 与不同丰度方解石混合的混合光谱

(a): galena4; (b): mordenil; (c): czoisite

Fig. 3 To mix with calcite under variable abundance

(a): galena4; (b): mordenil; (c): czoisite

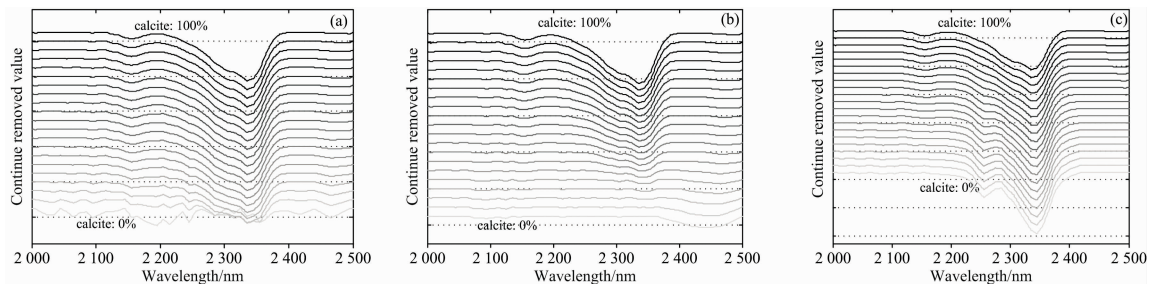


图 4 混合光谱连续统去除后光谱曲线

(a): galena4; (b): mordenil; (c): czoisite

Fig. 4 The spectral curve after continuum removal processing

(a): galena4; (b): mordenil; (c): czoisite

2.2 反射率大小影响分析

以 1.2.3 中方法对反射率数据处理,保持数据原有波形前提下改变光谱反射率,得到不同反射率大小的光谱数据,如图 5(a,b,c)所示。竖直线对应波长位置为 $2.33 \mu\text{m}$,虚线为原始光谱反射率,实线为 0.05 步长处理后反射率值。对图 5(a,b,c)中的每条曲线分别进行连续统去除得图 6(a,b,c),

对比两图可知,当曲线在 $2.33 \mu\text{m}$ 附近无特征或具有反射峰特征时,无论反射率大小,其吸收深度均不明显,但是反射率值的大小对曲线其他位置吸收特征影响较明显,如反射峰特征光谱在 $2.45 \mu\text{m}$ 附近的反射率及吸收深度,反射率值越小,吸收特征越明显;当反射率具有吸收谷特征时,反射率值越小,吸收深度值越大。

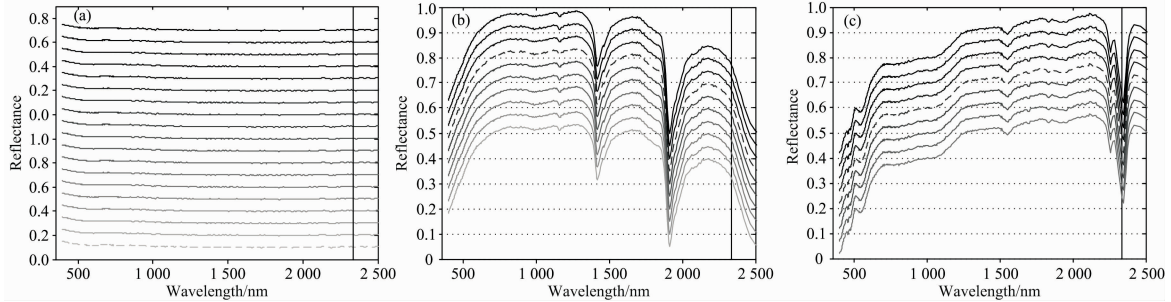


图 5 3 种端元光谱及不同反射率大小光谱曲线

(a): 无特征; (b): 反射峰特征; (c): 吸收谷特征

Fig. 5 Three endmember spectra and different reflectivity

(a): None feature; (b): Reflection feature; (c): Absorb feature

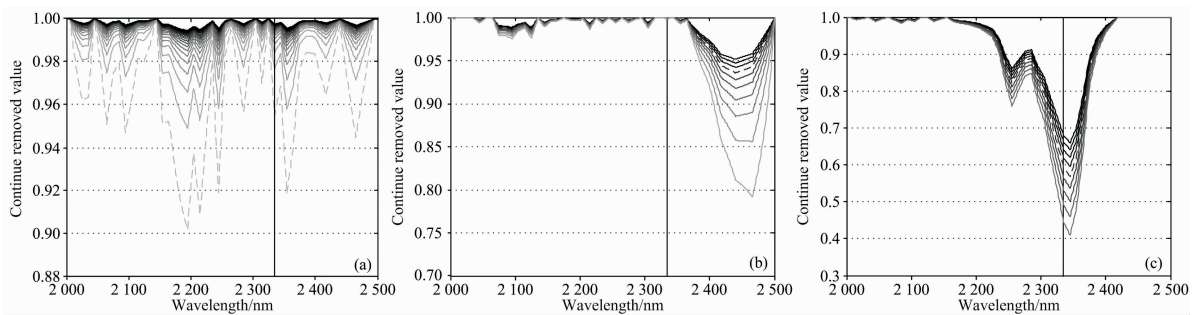


图 6 不同特征不同反射率大小的光谱连续统去除曲线

(a): 无特征; (b): 反射峰特征; (c): 吸收谷特征

Fig. 6 Continuum removed curve of spectra with different reflectivity under different features

(a): None feature; (b): Reflection feature; (c): Absorb feature

2.3 交叉影响分析

光谱反射率、端元丰度对 CRBD 均有较大影响。为实现以 CRBD 估算矿物含量,以 2.2 节中得到的不同光谱曲线与方解石光谱进行线性混合并计算对应 $2.33 \mu\text{m}$ 处 CRBD 值,生成不同混合光谱的 CRBD 随方解石丰度的变化曲线,如图 7(a,b,c)。由图 7(a)可知,当与方解石混合的端元光谱在 $2.33 \mu\text{m}$ 附近无特征时,端元光谱反射率越高,CRBD 越接近于线性变化,随反射率降低,CRBD 随方解石丰度增加上凸越明显。图 7(b)中显示的变化规律则正好相反,当与方解石混合的端元光谱在 $2.33 \mu\text{m}$ 附近具有反射峰特征时,端元光谱反射率越高,CRBD 随方解石丰度增加下凹越明显,随反射率降低,CRBD 越接近于线性变化。因方解石与 *czoisite* 的吸收特征较接近,其混合光谱 CRBD 接近线性变化。

2.4 多端元混合分析

以 0.02 为丰度变化步长,以 *galena4*, *mordenil* 与方解石进行不同丰度的线性混合,计算对应混合光谱在 $2.33 \mu\text{m}$ 附近的 CRBD 值,如图 8(a)所示,灰色图例代表 CRBD 值。

可以看出,CRBD 高值部分基本沿 *galena4* 丰度变化轴分布,侧面说明 *mordenil* 的丰度对 CRBD 值影响较小。为对比分析混合光谱 CRBD 与线性变化的差异,以方解石、*galena4*、*mordenil* 光谱的 CRBD 值线性插值结果为参考[图 8(b)],计算 CRBD 在此基础上的变化大小[图 8(c)]。 $2.00 \sim 2.50 \mu\text{m}$ 范围内 *galena4* 的平均反射率约为 0.051 6, *mordenil* 的平均反射率为 0.603 1。相对于 CRBD 线性变化,差异较明显的区域较接近横轴,最大差异约 0.133 2,间接说明混合端元反射率越小,对 CRBD 值影响越大。当混合光谱中 *mordenil* 丰度较大时,混合光谱的 CRBD 相对减小,最大减小幅度约 0.034 1。方解石、*galena4*、*mordenil* 三种矿物的混合光谱 CRBD 随丰度不同均有一定幅度变化,无特征光谱丰度越大,对 CRBD 影响越大。

2.5 矿物含量反演模型与应用

矿物丰度与 CRBD 值的相关性是利用 CRBD 定量反演矿物含量的重要依据。由于地物类型的多样性,不同地物具有不同成分、不同反射率,使得对应光谱的 CRBD 也不同。

对图 8(a)中数据进行统计,分析混合光谱的 CRBD 值随方解石丰度的变化规律,如图 9(a)所示,图例表示混合光谱中 galena4 光谱的丰度大小。可以看出,galena4 丰度大于 0.5 的点位于图的左上角,当碳酸盐矿物的丰度确定不变时,galena4 光谱的丰度越大, mordeni1 光谱的丰度越小, CRBD 值越大。根据图 7(a)与图 7(b)中 CRBD 变化规律(虚线)以及 galena4 与 mordeni1 的反射率大小,以图 9(a)中的上下边

界确定不同丰度碳酸盐矿物的混合光谱 CRBD 值范围,并以指数函数拟合上边界,以多项式函数拟合下边界得对应拟合方程,如图 9(b),两边界的拟合方程 R^2 均高于 0.998, RMSE 分别为 0.002 3 与 0.003 2,拟合效果较好。为与 CRBD 随方解石丰度线性变化规律比较,根据端元光谱的 CRBD 得方程 $F=0.276 6x$ 并进行线性插值用于对照参考。

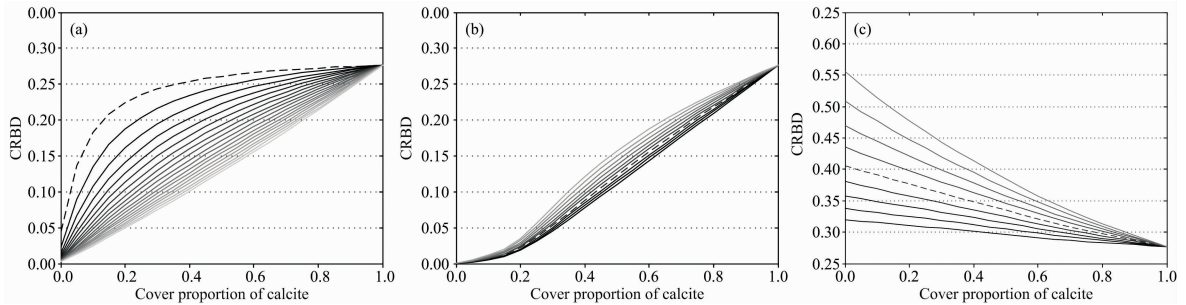


图 7 不同反射率大小、不同丰度条件下的 CRBD 变化规律

(a): 无特征; (b): 反射峰特征; (c): 吸收谷特征

Fig. 7 CRBD change with reflectivity and abundance fractions under different features

(a): None feature; (b): Reflection feature; (c): Absorb feature

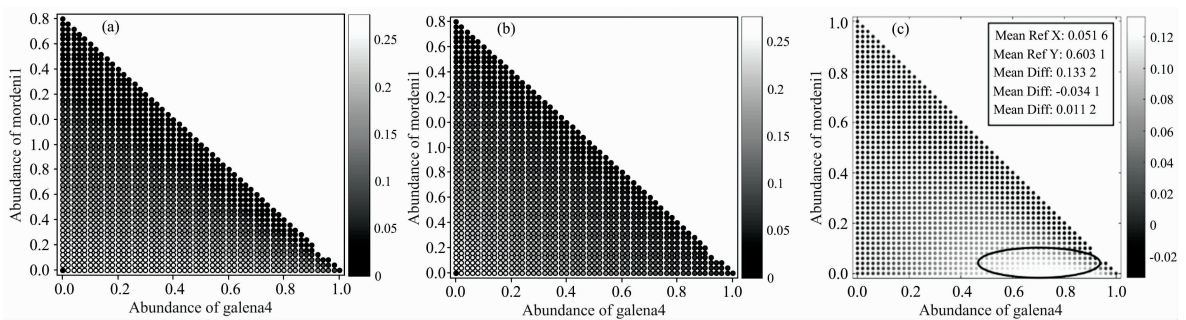


图 8 不同丰度下的 3 端元混合光谱 CRBD 变化规律

(a): 三端元混合光谱 CRBD; (b): 端元光谱 CRBD 的线性插值; (c): (a) 与 (b) 的差值

Fig. 8 CRBD variation of mixed spectra by three endmembers under different spectral abundance

(a): CRBD of mixed spectra by three endmembers; (b): Linear interpolation of CRBD of three endmembers; (c): Difference of (a) and (b)

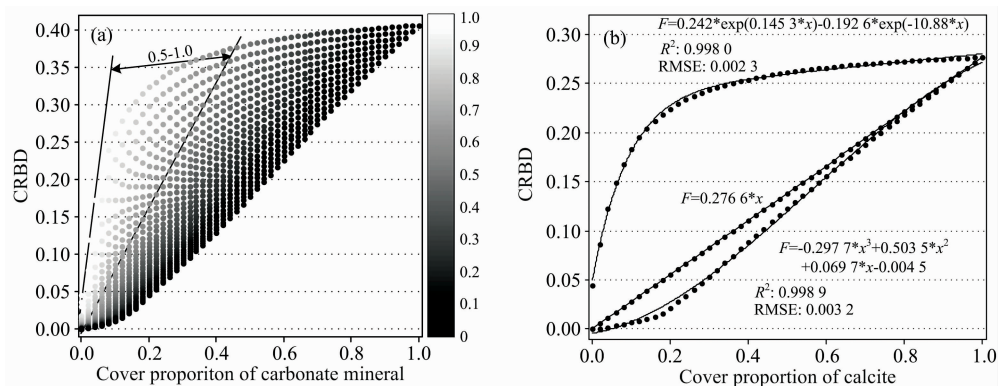


图 9 CRBD 随碳酸盐矿物丰度变化及拟合方程

(a): CRBD 随碳酸盐丰度变化规律; (b): 上/下限边界拟合方程

Fig. 9 CRBD change with carbonate mineral abundance and corresponding fitting equation

(a): CRBD variation with carbonate mineral abundance; (b): Fitting equation of CRBD variation boundary

因 galena4 与 mordenil 光谱与大多在 $2.33 \mu\text{m}$ 附近具有无特征、反射峰特征光谱特征相近,且 galena4 反射率较小,CRBD 随方解石丰度变化曲线基本处于上凸的极限,而 mordenil 反射率偏大,CRBD 随方解石丰度变化曲线接近下凹的极限。所以,图 9(b)中拟合方程上下边界基本代表含有碳酸盐矿物混合光谱 CRBD 值的范围。根据表 1 可以看出,cuprite 影像数据中包括有方解石、绿泥石、纳云母等碳酸盐及粘土矿物,以方解石的吸收深度作为所有在 $2.33 \mu\text{m}$ 处有吸收深度的矿物平均吸收深度参与反演。对影像数据进行连

续去除计算 CRBD,并应用于方程中定量反演碳酸盐矿物含量的变化范围。图 10(a)与图 10(c)为碳酸盐矿物反演的最小值与最大值,图 10(b)为线性变化方程 $F=0.2766x$ 反演的碳酸盐矿物分布结果。通过对比分析,CRBD 线性变化规律可近似反演碳酸盐矿物含量,而 CRBD 随方解石丰度变化曲线的上下界限范围可清晰表示碳酸盐矿物的含量范围。通过与已有研究成果^[10-11]对比发现,其反演碳酸盐的含量均处于碳酸盐含量定量反演范围内,侧面验证以碳酸盐矿物含量范围代替矿物含量定值反演具有一定可行性。

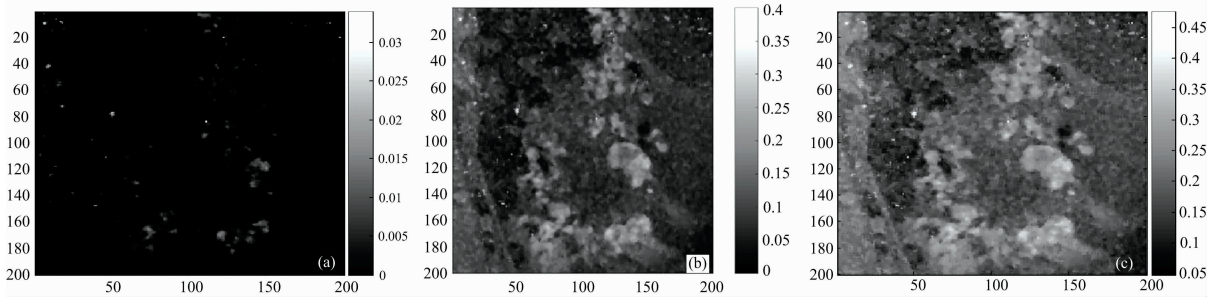


图 10 拟合方程反演碳酸盐矿物含量

(a): 上限拟合方程反演值; (b): 线性拟合方程反演值; (c): 下限拟合方程反演值

Fig. 10 The inversion results by the fitting equations

(a): Inversion by applying the high-value variation fitting equation; (b): Inversion by applying linear changing trend to image data;

(c): Inversion by applying the low-value variation fitting equation

3 结 论

矿物光谱在特定波段的吸收特征是定量估算矿物含量的重要指标之一。为分析碳酸盐类矿物光谱在 $2.33 \mu\text{m}$ 附近光谱吸收深度的影响因素及其在碳酸盐类矿物含量定量反演应用中的精度影响,以 galena4, mordenil 与 czoisite 三种矿物光谱代表三种具有不同特征的光谱曲线,以线性混合模型、连续统去除算法进行处理,分析不同特征混合光谱 CRBD 的变化规律。通过分析得出结论:(1)当与方解石混合的光谱

在 $2.33 \mu\text{m}$ 附近为反射峰或无特征时,混合光谱的 CRBD 随方解石丰度增加而增大;(2)当与方解石混合的光谱丰度确定时,端元光谱的反射率值越大,混合光谱的 CRBD 值越小;(3)混合光谱中无特征光谱反射率值越大,CRBD 随碳酸盐丰度变化上凸越明显且与线性变化差异越大,反射峰特征光谱反射率值越大,CRBD 随丰度变化下凹越明显,但总体下凹幅度较小;(4)指数与多项式函数可拟合不同丰度下混合光谱 CRBD 变化范围,并应用于反演影像数据碳酸盐矿物含量范围,以最大最小值范围来代替其定量变化,为矿产监测、定量评估等提供新的表达方法。

References

- [1] LIU Xiu-ying, WANG Li, CHANG Qing-rui, et al(刘秀英, 王力, 常庆瑞, 等). Geomatics and Information Science of Wuhan University(武汉大学学报:信息科学版), 2017, 42(5): 661.
- [2] ZHANG Fang, HU Zuo-le, WANG Dong-sheng, et al(张芳, 户佐乐, 王东升, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(3): 971.
- [3] Clark R N, Roush T L. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B7): 6329.
- [4] PENG Jie, CHI Chun-ming, XIANG Hong-ying, et al(彭杰, 迟春明, 向红英, 等). Acta Pedologica Sinica(土壤学报), 2014, 51(3): 459.
- [5] PENG Xiao-ting, GAO Wen-xiu, WANG Jun-jie(彭小婷, 高文秀, 王俊杰). Geomatics and Information Science of Wuhan University(武汉大学学报:信息科学版), 2014, 39(7): 862.
- [6] ZHANG Tian, LIAO He-ping, CUI Lin-lin, et al(张甜, 廖和平, 崔林林, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2017, 21(4): 604.
- [7] GUO Chao-fan, GUO Xiao-yu(郭超凡, 郭道宇). Acta Ecologica Sinica(生态学报), 2016, 36(20): 6538.
- [8] ZHENG Yu, CHANG Qing-rui, WANG Ting-ting, et al(郑煜, 常庆瑞, 王婷婷, 等). Journal of Northwest A&F University · Nature and Science Edition(西北农林科技大学学报·自然科学版), 2019, 47(8): 37.
- [9] Chen S, Chen L, Liu Y, et al. GIScience & Remote Sensing, 2013, 50(6): 690.

- [10] Gong Z, Kawamura K, Ishikawa N, et al. *Grassland Science*, 2016, 62(1): 45.
- [11] Vařát R, Kodeřová R, Borůvka L, et al. *Geoderma*, 2017, 303: 133.
- [12] Tong L, Zhou J, Qian B, et al. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 434.
- [13] Chen L, Chen S, Guo X. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2017, 83(4): 307.
- [14] Aliyu Ja'afar Abubakar, Hashim M, Pour A B. *Geocarto International*, 2019, 34(6): 597.
- [15] Goff J P. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(4): 2763.

Analysis of Impact Factors and Applications by Using Spectral Absorption Depth for Quantitative Inversion of Carbonate Mineral

ZHAI Wen-yu, CHEN Lei* , XU Yi-xuan, KONG Xiang-yu

School of Geographic and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract Spectral absorption feature is an essential indicator for mineral classification and quantitative inversion. This paper take calcite mineral to represent carbonate mineral, linear mixed spectral model and continuum removal method as basic algorithms and continuum removal band the depth (CRBD) as analysis object, to analyze the variation of CRBD mixed spectrum at $2.33 \mu\text{m}$ by mixing calcite and spectra of those three types under different spectral features, spectral abundance and spectral reflectivity. According to the spectral features near $2.33 \mu\text{m}$, the spectra are divided into three types. By analyzing the mixed spectral feature of calcite and spectra of three different types, a new expression is proposed by using distribution scope to instead quantitative value to demonstrate mineral abundance estimation. The results show that the mixed endmember abundance has an obvious influence on the CRBD value, and the higher the calcite abundance is, the more obvious the absorption characteristics are and the higher the CRBD value is. Similarly, the spectral reflectivity and spectral feature of mixed endmember greatly influence the CRBD of the mixed spectrum. When the mixed endmember is characterized by a non-characteristic or reflection peak near $2.33 \mu\text{m}$, the smaller the spectral reflectivity of the non-characteristic endmember is, the more prominent the CRBD is with the increase of carbonate abundance. The larger the spectral reflectivity of the reflection peak endmember is, the more concave the CRBD changes will be. When the mixed endmember with calcite has an absorption valley near $2.33 \mu\text{m}$, the CRBD variation meets the linear change rule. Through cross-analysis and CRBD of mixed spectra by multi-endmember, CRBD of mixed spectra changes with carbonate mineral abundance is limited by a certain space. The upper fitting equation satisfies exponential function variation, and the lower fitting equation is similar to the cubic polynomial function. Both have high fitting accuracy, R^2 are higher than 0.99, and the RMSE is lower than 0.005. In order to achieve the accurate prediction of mineral content, a new method, the distribution range of carbonate mineral content, is solved according to those fitting equations to express the distribution of carbonate mineral abundance by using a range instead of quantitative value to realize the accurate range expression of carbonate mineral content. The new expression of carbonate mineral content and impact factors analysis can provide a new way for mineral monitoring and quantitative evaluation and provide a theoretical reference for establishing a universal ground object quantitative inversion model.

Keywords Continuum removal band depth (CRBD); Carbonate mineral; Quantitative inversion; Impact factors

(Received Jun. 27, 2020; accepted Oct. 29, 2020)

* Corresponding author