

甘甫平^{1,2} 董新丰^{1,2} 闫柏琨^{1,2} 梁树能^{1,2}

光谱地质遥感研究进展

摘要

地质遥感是最能体现与发挥光谱遥感技术特点与优势的应用领域之一.本文从矿物岩石光谱模拟、矿物岩石光谱特征分析、遥感光谱仪技术指标的优化设计、辐射定标与数据辐射校正、地表光谱反演、信息提取、信息产品验证、地质应用8个方面总结了最新的研究进展,并对目前光谱遥感地质应用存在的问题和发展趋势进行了深入的论述.

关键词

地质遥感;找矿预测;光谱模拟;信息提取

中图分类号 TP79;P627

文献标志码 A

收稿日期 2017-11-24

资助项目 重大科学仪器设备开发专项(2012YQ05025006);国防科工局高分专项(04-Y20A35-9001-15/17);国家自然科学基金(41102208);中国地质调查局项目(DD20160068)

作者简介

甘甫平,男,博士,研究员,主要从事国产卫星国土资源应用综合论证、高光谱遥感技术方法研究和地学应用工作.fpgan@aliyun.com

1 中国国土资源航空物探遥感中心,北京,100083

2 国土资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室,北京,100083

0 引言

自20世纪80年代成像光谱遥感(Imaging Spectral Remote Sensing)概念出现以来,成像光谱仪快速发展,每个像元均可获取数十至数百个谱段(光谱分辨率达到 $\lambda/100$ 甚至更高),组成一条近连续的光谱曲线,进而可根据地物光谱精细特征进行信息提取与反演^[1],使遥感地物识别能力大幅提升,同时促进了数据处理技术的发展.由于光谱分辨率较高,也称为高光谱.成像光谱技术的兴起与发展,极大地增强了遥感对地观测能力和对地物的鉴别能力,使遥感从鉴别(discrimination)发展到对地物的直接识别(identification),使遥感工作方法由图像分析转变为以谱分析为主的图谱结合模式,也使遥感应用逐渐摆脱“看图识字”的阶段,而越来越依赖于对地物波谱特征的定量分析和理解.

光谱地质遥感的主要研究内容有矿物岩石光谱模拟、矿物岩石光谱特征分析、遥感光谱仪技术指标的优化设计、辐射定标与数据辐射校正、地表光谱反演、信息提取、信息产品验证、应用研究8个方面(图1).地表光谱反演是消除大气、地表温度获得地表反射/发射光谱的过程,不同的谱段方法不同,在热红外谱段包括大气校正与温度-发射率分离,在中红外谱段包括反射-发射分离,本文统称为地表光谱反演.本文从矿物岩石光谱模拟、地表光谱反演、信息提取、信息产品验证、应用研究等方面对研究进展进行了分析,最后从上述8个方面对目前进展、存在问题及发展趋势进行了讨论,提出一家之见,以资参考.

1 矿物岩石光谱模拟

地物波谱谱形和特征与地表物质成分、物理状态(如粗糙度、阴影等)、观测几何条件(光源-地物-探测器的相互几何关系)等因素有关,了解这些因素如何影响地物波谱特征变化是开展遥感信息提取及应用的重要基础.长期以来对这些知识的获取主要依靠大量的波谱测试,进而进行归纳总结.随着遥感技术定量化、精细化的不断发展,数值模拟技术逐渐成为人们深入了解光线与传输介质(陆地、水体、大气等)相互作用机理的有力工具,发展了针对不同行业应用的多种模型,如大气辐射传输模型、植被辐射传输模型、几何光学模型等.针对粉末状岩矿反射光谱模型最常用的是辐射传输模型,其中 Hapke

模型最有代表性^[2],但模型应用、参数求解仍不十分明确

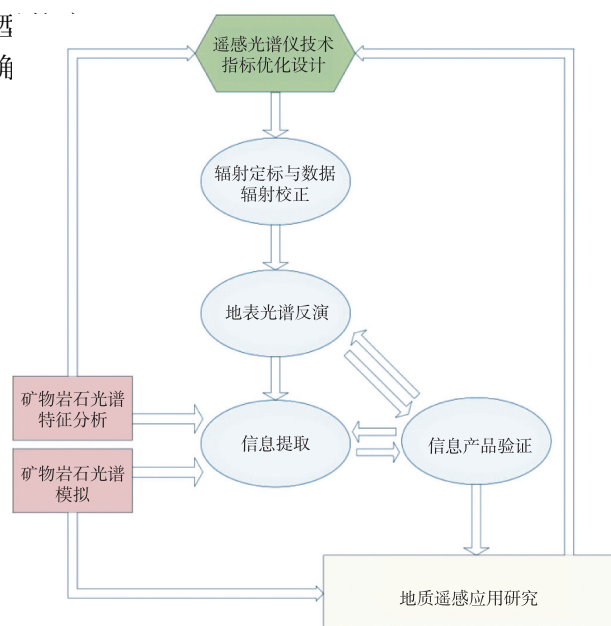


图1 光谱地质遥感主要研究内容及相互关系

Fig. 1 Main contents of spectral geological remote sensing and relationships among them

文献[3]以LSCC月壤作为光谱模拟分析的试验样品,进行了光谱模拟试验.选择月壤的原因有:1)月壤的矿物组成复杂,特别是空间风化形成的单质铁含量少,对光谱的影响大,模拟难度大,可更彻底地检验模型的模拟能力;2)LSCC样品测试分析条件严格,数据齐全,测试科目包括光谱、矿物组成及含量、粒度等.运用Hapke各向异性的多次散射近似(AMSA)辐射传输模型,反演各个矿物端元的光学常数.光学常数作为矿物成分的函数不可以认为在任何情况下都是确定不变的,它依赖于模型的质量以及粒子样本的选择.在反演矿物光学常数时,让矿物粒径在实测粒径范围内迭代,考虑光学常数符合一定光学意义以及反演误差尽可能低,筛选得到最优的粒径及矿物光学常数.同时,采用蒙特卡罗的思想,反演矿物光学常数时在一定约束条件内随机设置反演初值并进行优化求解,找到所有优化结果中的最优解,进一步克服了模型优化中陷入局部最优解的问题,提高了利用Hapke模型反演光学常数的准确性.

利用反演得到的矿物端元的光学常数,模拟了不同粒径、观测条件及矿物混合比例下的月壤光谱数据集.模拟的数据在光谱、矿物含量、粒径3个方面与实测数据吻合度很高,足以说明上述模拟思路可实现矿物光谱的高精度模拟.光谱的模拟误差为0.003~0.005(均值为0.004,图2),矿物含量模拟

复相关系数为0.81~0.99(均值为0.94,图3),单质铁的含量模拟相关系数为0.61~0.66,粒度范围为0~45 μm ,与实测值一致.

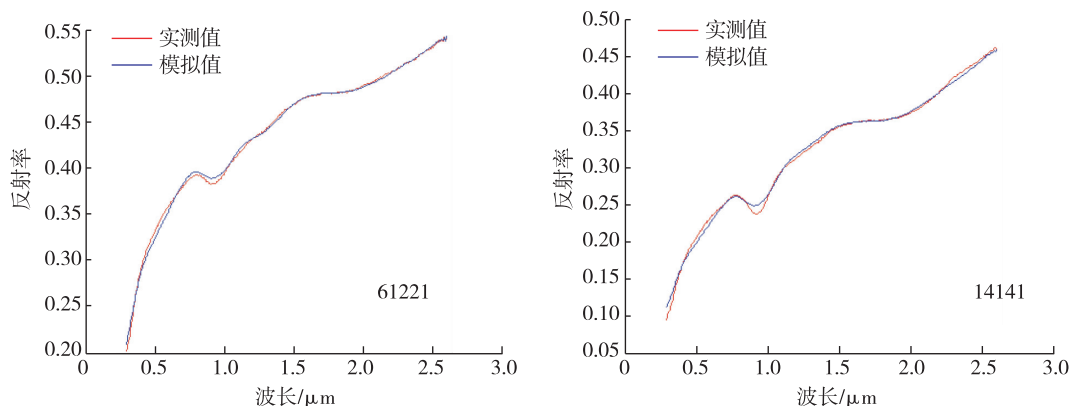
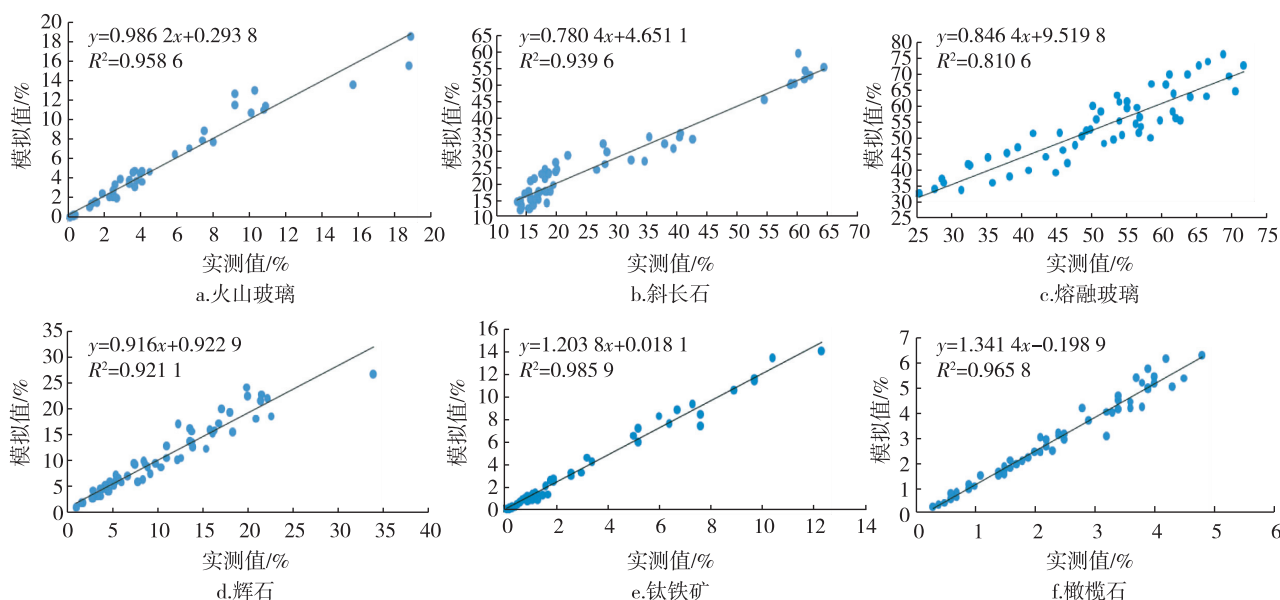
2 地表光谱反演

2.1 可见-短波红外反射率反演

国内外针对可见光-短波红外谱段(0.35~2.5 μm)的大气校正方法,归纳起来大致可分为以下3大类:1)根据图像统计特征对图像辐射值作归一化处理的相对辐射校正方法,如暗目标法;2)利用地面实测波谱的地空回归分析方法;3)基于大气辐射传输模型的方法.前2种方法普适性、可推广性、精度较低,支撑业务化应用的主要是第3种方法.

大气水汽时空变化大,对光谱的影响大、范围宽,是在可见光-短波红外谱段大气校正中需考虑的主要因素.对于高光谱数据,可利用820、940、1135 nm附近的大气水汽吸收谱带进行大气水汽分布反演,进而最大程度地消除大气影响^[4];对于多光谱数据,特别是水汽吸收谱带处未设置谱段的数据,大气校正难度较大,需要借助一定的地面光谱先验知识、数据,大致估算整景影像内的大气水汽值^[5].

大气校正模块HATCH(High-accuracy Atmospheric Correction for Hyperspectral Data)中除应用更高精度的大气辐射传输模型外^[6],还改变了以往采用的3波段比值法,而采用“光谱平滑度”法进

图2 矿物粉末集合体(月壤)模拟与实测光谱对比^[3]Fig. 2 Comparisons between simulated and measured spectra of mineral powder aggregate (lunar soil)^[3]图3 LSCC月壤样本模拟与实测矿物丰度对比^[3]Fig. 3 Comparisons between simulated and measured mineral abundance of LSCC samples^[3]

行大气水汽含量提取,可避免 1 135 nm 等大气水汽吸收谱段地物光谱的影响。

2.2 中红外谱段反射率反演

中红外谱段信息传输原理示意如图 4 所示.传感器接收到的辐射信息包括 5 个部分,其中 L_1 代表大气程辐射, L_2 表示大气反射太阳辐射, L_3 表示地表反射辐射经大气传输到达传感器的辐亮度, L_4 表示地表发射辐射经大气辐射传输到达传感器的辐亮度, L_5 表示临近地物的辐射经大气传输到达传感器的辐亮度.可见,全谱段相机的中红外谱段数据其实同时包含了目标地物的发射信息和反射信息,这就造成了中红外波段数据发射率反演的复杂性.目前针对中红外谱段大气校正和发射率反演技术相对其

他谱段研究较少,但基本原理清晰.

根据图 4,中热红外谱段辐射传输公式为

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 = \\ L_1 + L_2 + (E_1 + E_2)(1 - \varepsilon) / \pi + \\ P(T) \varepsilon \tau + L_d(1 - \varepsilon),$$

其中 L_1 、 L_2 、 $E_1 + E_2$ 、 τ 、 L_d 、 $P(T)$ 、 ε 分别为大气程辐射、大气反射太阳辐射、地表的太阳辐照度(包括直接辐射与大气散射辐射)、大气透过率、大气下行辐射、黑体辐射亮度、地表发射率.前 5 个参数可基于大气辐射传输模型计算得出,黑体辐射亮度可基于热红外谱段得到的地表温度,再根据普朗克定律计算得到.得到这些参数后,可利用上式计算得到地表发射率.

综合上述分析,在地质遥感中,中红外谱段的反射、发射分离,进行反射光谱反演,必须有热红外谱段,并可以用地表温度数据作辅助。

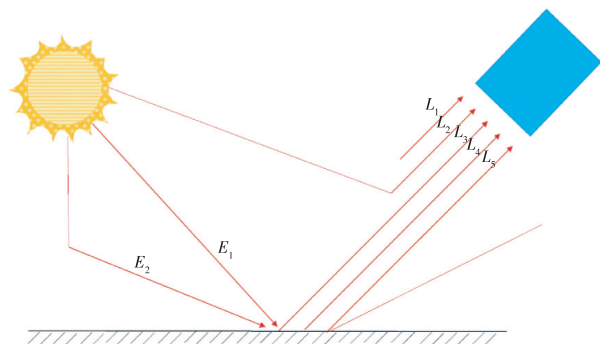


图4 中红外谱段信息传输原理

Fig. 4 Schematic diagram of information transmission in the middle infrared spectrum

2.3 热红外谱段发射率反演

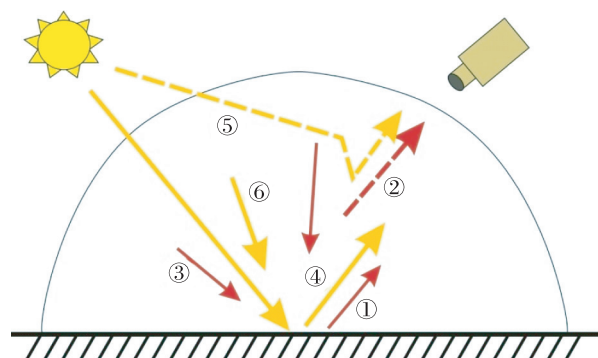
2.3.1 大气辐射传输

热红外窗口,传感器接收总辐射能的包括6个部分(图5):地表热辐射能、程辐射能(大气上行辐射能)、反射的大气热辐射能(大气下行辐射)、反射的太阳直射辐射能、散射太阳辐射能和反射太阳散射辐射能,公式表示如下^[7]:

$$L(\lambda, \mu) = t_1(\lambda, \mu) \times \varepsilon(\lambda, \mu) \times B(\lambda, T_s) + L_a(\lambda, \mu) + L_s(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi_0) + t_2(\lambda, \mu, \mu_0) \times \mu_0 \times E_0(\lambda) \times f_r(\mu, \mu_0, \varphi) + \int_0^{2\pi} \int_0^1 \mu' \times f_r(\mu, \mu', \phi') \times [t_3(\lambda, \mu) \times L_d(\lambda, -\mu', \phi') + t_4(\lambda, \mu) \times L_i(\lambda, -\mu', \phi')] d\mu' d\phi',$$

式中 μ 为观测天顶角的余弦, μ_0 为太阳天顶角的余弦, $B(\lambda, T_s)$ 是地表温度为 T_s 的黑体辐射值, φ_0 为观测方位与太阳入射方位之间的相对方位角, $\varepsilon(\lambda, \mu)$ 为地表发射率, $L(\lambda, \mu)$ 为传感器接收总辐射能, $L_a(\lambda, \mu)$ 为程辐射能, $L_s(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi_0)$ 为散射的大气热辐射能, $E_0(\lambda)$ 为大气顶层的太阳总辐射, $f_r(\mu, \mu_0, \varphi)$ 为双向反射率分布函数, $L_d(\lambda, -\mu', \phi')$ 为向下太阳漫射辐射能, $L_i(\lambda, -\mu', \phi')$ 为大气下行辐射能,入射方向为 $-\mu', \phi'$, $t_i(i=1,2,3,4)$ 为相应的传递函数。

在热红外大气窗口内,太阳辐射可以忽略,即忽略反射的太阳直射辐射、散射的太阳辐射、反射的太阳散射辐射。传感器接收的总辐射能主要包括3部分:地表热辐射能、大气下行辐射能、大气上行辐射能。在基于地表朗伯体的假设下,结合基尔霍夫定



①地表热辐射;②大气上行辐射;③反射的大气热辐射;④反射的太阳直射辐射;⑤散射的太阳辐射;⑥反射的太阳散射辐射

图5 传感器接收辐射能

Fig. 5 Schematic diagram of sensor receiving radiation energy

律,可知地表反射率 $\rho(\lambda) = 1 - \varepsilon(\lambda)$,因此传感器接收的总辐射能可以表示为

$L(\lambda) = \tau(\lambda)(\varepsilon(\lambda)B(\lambda, T) + (1 - \varepsilon(\lambda))L_{\text{down}}) + L_{\text{up}}$, 式中, λ 为对应的波长, $L(\lambda)$ 为传感器记录的目标地物辐亮度值, $B(\lambda, T)$ 为温度为 T 时的黑体辐亮度, $\tau(\lambda)$ 为大气透过率, L_{down} 为大气下行辐射, L_{up} 为大气上行辐射.可用 $L_{\text{grd}} = \varepsilon(\lambda)B(\lambda, T) + (1 - \varepsilon(\lambda))L_{\text{down}}$ 表示为地表出射辐射能.同时大气辐射传输公式也说明热红外探测是一个地-气耦合的体系。

2.3.2 大气校正

大气校正的主要任务就是反演大气上行辐射、大气下行辐射和透过率^[8](图6).目前,热红外谱段常用的大气校正方法包括:基于图像自身的大气校正、基于辐射传输模型的大气校正.基于图像自身的大气校正假设整景影像内大气条件均一,以及影像内有接近于黑体的地物(水体、植被)存在,并且在校正中忽略大气下行辐射的影响.首先,计算每个像元的亮温(假设发射率为1),然后在亮温-卫星辐射亮度值散点图的基础上进行线性拟合,其斜率就是大气透过率,截距就是大气上行辐射^[9].该方法简单易行,但难以大面积推广应用,在大多数情况下可能校正效果很差.基于辐射传输模型的大气校正一般用MODTRAN计算出大气透过率、大气上行辐射、大气下行辐射等大气校正参数,之后利用这些参数实现大气校正.大气温度廓线、湿度廓线、臭氧等大气状态参数是大气校正参数能否准确计算的关键.同步大气温度廓线、湿度廓线可利用MODIS数据及气象数据反演得到。

在以往的研究中,对于岩矿信息提取而言,采用

标准大气廓线进行大气校正同样可以得到令人满意的效果,初步模拟试验也表明大气廓线误差主要影响温度信息提取,对于发射率谱形影响相对较小.因此,在地质遥感中,利用其他遥感数据同步反演大气廓线并进行热红外数据大气校正是长远的发展趋势,但基于标准大气模式廓线进行大气校正可能会在今后相当一段时间内是主流方法.

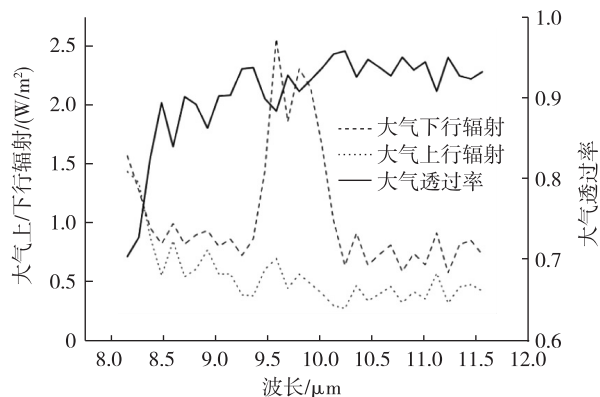


图6 MODTRAN 反演得到的与 TASI 波段对应的大气上下行辐射和透过率^[8]

Fig. 6 The upwelling path radiance, down-welling sky radiance, and atmospheric transmittance from the MODTRAN software for the TASI data^[8]

2.3.3 温度发射率分离

热红外波段温度发射率分离方法有模式发射率法、昼夜法、灰体发射率法、比值法、发射率归一化法、温度-发射率分离法等.其中发射率归一化法在地质遥感中应用普遍,该方法允许最大发射率 $\varepsilon_{\max}$ 波长随像元而改变. $\varepsilon_{\max}$ 最大值是固定的,然而不关心是哪一个通道.由于该算法允许对应 $\varepsilon_{\max}$ 的波长改变,因此将比简单的模型发射率算法有更小的误差. ASTER 热红外数据温度发射率迭代分离方法是在

发射率归一化法的基础上发展而来的,可同时反演地表温度与发射率.数值模拟研究表明^[10], ASTER 热红外数据 TES 反演温度误差一般小于 1.5 K,发射率误差一般小于 0.015,精度分别为 0.4 K 与 0.03.

基于上述温度-发射率分离算法,进行了机载 TASI 数据(核工业北京地质研究院获取)温度发射率分离^[8](图 7、8).

3 信息提取

3.1 传统信息提取方法及问题

国内外发展的矿物信息提取方法有基于光谱相似性与基于光谱特征参量的 2 大类.基于光谱相似性就是将重建光谱与参考光谱相比较,在某种光谱相似性测度(光谱距离、光谱角等)下计算端元光谱与像元光谱相似性来完成矿物信息识别.常用的光谱匹配方法有距离法(欧式、马氏距离)^[11]、光谱角^[12]、匹配滤波、光谱信息散度^[13-14]、混合调制匹配滤波等方法.光谱匹配又可分为整体光谱匹配和局部光谱匹配.整体匹配利用了整体光谱的形状特性,受照度、光谱定标和光谱重建精度等的影响较小,但受矿物光谱的不确定性影响较大,对矿物光谱的微小差异不够敏感,容易受地形、背景等外界干扰,且无法突出光谱吸收谷谱形在相似性计算中的重要性;局部匹配方法对矿物光谱的微小差异比较敏感,但仅利用了特定的一些特征,受图像的信噪比、光谱定标和光谱重建精度等因素的影响较大^[15].

基于光谱特征参量信息提取是以诊断性光谱吸收谱带的特征参量为基础的局部光谱识别方法.光谱吸收谱带的特征可以用一些特征参数来度量,这些参数有谱带的波长位置(P)、波段深度(H)、宽度(W)、斜率(K)、面积(A)及对称度(S)等^[16].代表性



图7 TASI 数据 Band32/22/11 波段假彩色合成图像^[8]

Fig. 7 False color composite image of TASI data (R:band 32, G:band 22, B:band 11)

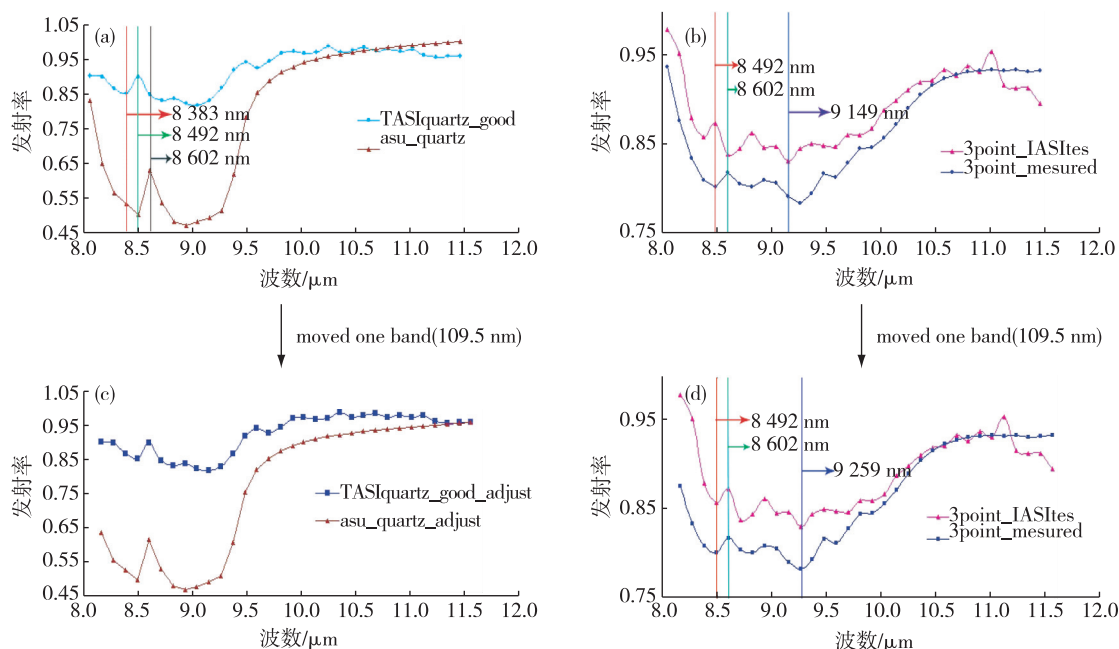


图8 通过 TES 方法反演的石英、花岗岩发射率波谱曲线与 ASU 光谱库中两者重采样自 TASI 波谱范围的波谱曲线对比,
(a) 石英,(b)花岗岩,(c)石英移动一个波段,(d) 花岗岩移动一个波段^[8]

Fig. 8 Comparisons between the quartz and granite emissivity spectral curves retrieved from TASI data
by the TES method and their spectral curves in the ASU spectrum resampled from the spectrum range of TASI,
(a) quartz,(b) granite,(c) quartz after moving one band,and (d) granite after moving one band^[8]

的方法有光谱特征拟合 (SFF, Spectral Feature Fitting)、光谱吸收指数 (SAI, Spectral Absorption Index) 和吸收谱带定位分析 (AABP, Analysis of Absorption Band Positioning) 等. 甘甫平等^[17] 提出了基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别方法, 该方法根据矿物诊断性吸收谱带特征、多谱带组合特征的相似性和稳定性以及不同具体矿物谱带特征的变异性, 初步建立了“矿物大类-族-种-亚种”的矿物识别分层谱系. 基于光谱特征参量法相对于光谱匹配法, 增强了对地物的区分能力, 但在实际应用中, 易受光谱信噪比、矿物混合影响^[15].

如果在光谱匹配结果的基础上, 再运用光谱特征参量法, 将会极大地提高光谱特征参量法的优势, 但这需要以准确的匹配结果为基础.

3.2 现有光谱匹配度识别能力分析

基于模拟的混合光谱, 对光谱角、信息散度、相关系数、特征拟合、匹配滤波等常用的光谱匹配度识别算法的识别能力进行分析. 各识别指数对矿物的识别能力的评价方法为, 计算识别指数与待识别矿物含量的相关系数, 相同矿物(端元与待识别矿物相同)的相关系数越大, 不同矿物(端元与待识别矿物不同)的相

关系系数越小, 说明该识别指数的识别能力越强. 如, 将高 Al 白云母作为端元计算与模拟的混合光谱之间的光谱角, 得到的光谱角与高 Al 白云母含量的相关性越大, 说明光谱角对矿物的识别能力较高, 与其他矿物含量之间的相关性越小, 说明光谱角的抗误识别能力较高. 据此, 提出了如下表征光谱相似性指数区分识别不同矿物的能力的误识别指数:

$$I = \text{abs} \left(E_{ii} - \frac{\sum_{k=1, k \neq i}^n E_{ik}}{n} \right),$$

式中, I 为判别指数, E_{ik} 为 i 端元矿物与 k 矿物相似性指数与其 k 矿物含量的相关系数. 误识别指数越大, 抗误识别能力越强. 用所有矿物相似性识别指数与含量相关系数的绝对值作为相似性算法的识别指数, 识别指数越大, 对矿物的识别能力越强.

混合光谱模拟计算流程如图 9 所示. 从 USGS 光谱库中选取所需的端元光谱, 运用 Hapke 模型进行随机非线性混合, 生成地面随机混合光谱. 之后, 所有光谱乘以一个随机乘性因子, 用于模拟地形对光谱的影响. 最后, 加入随机加性噪声, 用于模拟仪器与大气噪声, 生成模拟光谱库. 真实的成像光谱数据获取时, 地面与大气之间有多次散射作用, 模拟难度

较大,该试验利用一个随机乘性因子模拟地形影响而忽略了这一复杂的物理过程.对于仪器噪声,采用加性噪声模拟.大气对光谱的影响以大气水汽影响为主,水汽校正误差较大时会在光谱中加入锯齿状的噪声,试验中同样运用随机加性噪声模拟.

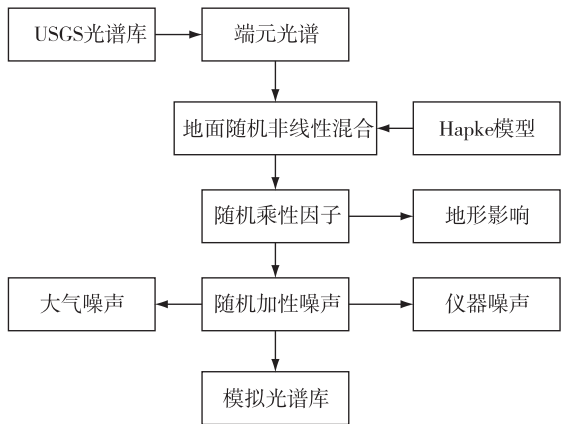


图 9 混合光谱模拟计算流程
Fig. 9 Simulation process of mixed spectrum

基于上述模拟流程,模拟计算了黄铁绢英岩化、青盘岩化、铁染 3 种常见的金属矿床蚀变类型的反射光谱(400~2 500 nm)(表 1).在黄铁绢英岩化、青盘岩化、铁染 3 种蚀变岩性光谱模拟中,均加入了黄铁矿与石英,目的是更好地模拟在可见光-短波红外无吸收特征的矿物对光谱特征的影响,使模拟结果更接近于真实情况.

根据最后的识别指数统计结果,识别能力排序为匹配滤波、相关系数、光谱角、信息散度、光谱特征拟合(表 2).

通过分析认为上述匹配度识别能力低的原因有 2 方面:1)匹配度容易受光谱背景干扰;2)匹配度容

易受光谱特征强度的影响.

表 1 混合光谱端元列表

蚀变岩性	混合端元矿物
黄铁绢英岩化	高铝白云母、中铝云母、低铝白云母、高岭石、高铝蒙脱石、低铝蒙脱石、地开石、埃洛石、伊利石、石英、黄铁矿
青盘岩化	绿泥石、绿帘石、方解石、白云石、石英、黄铁矿、蛇纹石、透闪石
铁染	褐铁矿、针铁矿、赤铁矿、黄钾铁矾、石英、黄铁矿、绿泥石、绿帘石

表 2 矿物误识别指数统计

	光谱角	信息散度	相关系数	匹配滤波	光谱特征拟合
识别指数	0. 41	0. 39	0. 45	0. 59	0. 177

3.3 基于光谱特征增强的匹配度算法

在上述分析的基础上,我们提出了基于光谱特征增强的匹配度算法.光谱特征增强匹配的核心步骤(图 10)有:1)参考光谱与影像光谱均应首先去连续统;2)对影像光谱进行增强之后计算匹配度.匹配度以所有波段反射率(去连续统后)之差的绝对值之和除以波段数.光谱特征增强的基本原理是,假设光谱是反射率值为 1 的端元光谱与光谱自身的线性混合,通过调整二者的混合比例(比例可以为负),直至参考光谱最小位置处参考光谱与影像光谱重合.

以 Cuprite 地区的 AVIRIS 高光谱数据为例,分别用匹配滤波方法和光谱特征增强匹配度法对明矾石进行匹配识别.将 USGS 光谱库中的明矾石光谱重采样到 AVIRIS 影像光谱,依据明矾石的光谱谱形特征,选取 2. 08~2. 25 μm 谱段进行匹配(图 11).从匹配结果上看(图 12),基于光谱特征增强匹配法识别

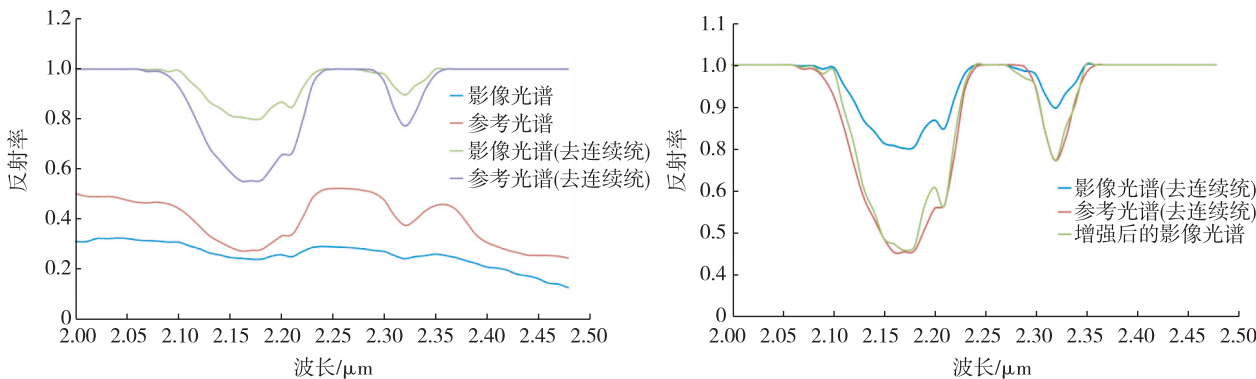


图 10 光谱特征增强匹配度概念图
Fig. 10 Conceptual map of spectral feature enhancement matching degree

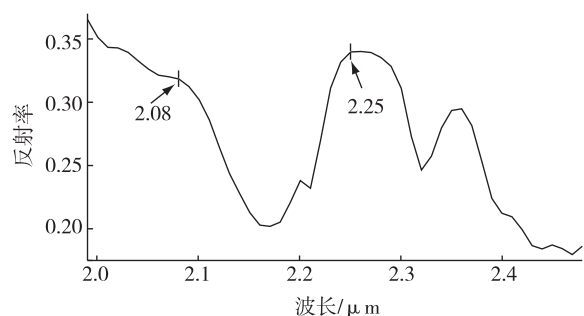


图 11 重采样至 AVIRIS 影像的明矾石光谱

Fig. 11 Alunite spectra resampled from USGS to AVIRIS images

的明矾石范围明显要比匹配滤波法广泛.根据匹配结果,对影像光谱进行检查,在图 12 中点 1 匹配滤波没有识别出明矾石信息,但影像光谱检查发现该点确实含有明矾石(图 13,左图).同时,从图 12 中还可明显发现,在点 2 和点 3 匹配滤波方法识别出了明矾石信息,而光谱特征增强匹配法并没有识别出明矾石.通过检查影像光谱发现,点 2、3 处没有明矾石信息,可能为绢云母信息(图 13).从整体上看,用匹配滤波方法识别出的明矾石像元数约为 15 000 个(含误识别像元),而光谱特征增强匹配度法识别出

的明矾石像元数约为 65 000 个,这大约是匹配滤波方法矿物识别检出率的 4~5 倍.随机选择了 50 个验证点,对 2 种方法的正确率进行了估算,其中匹配滤波发现 10 个验证点识别错误,而光谱特征增强匹配度法有 2 个验证点被认为可能识别有误,因此,光谱特征增强匹配度法相对于匹配滤波法明矾石的识别正确率由大约 80%左右提升到了 95%以上.

由此可见,光谱特征增强匹配法要比匹配滤波法识别矿物信息的检出限更低,正确率更高.

用光谱特征增强匹配法对矿物混合体识别检出率进行了实验,以福建紫金山金铜矿样品为试验对象进行了分析.紫金山金铜矿样品主要矿物组合为明矾石、地开石、石英和少量的黄铁矿,共 65 件粉末样品.明矾石和地开石在主要特征谱带重合度相对较高,对两者混合样开展识别检出率试验具有一定的代表性.但受样品数量、样品中矿物种类所限,该分析结果仅作为参考.依据明矾石和地开石矿物的谱形特征,选取相对容易区分其他矿物的光谱段进行匹配,明矾石在 1 380~1 540 nm 光谱段的匹配结果显示,当样品低于 6%时,匹配结果会出现误识别,样品中含有明矾石的,均含有地开石;当样品含有明

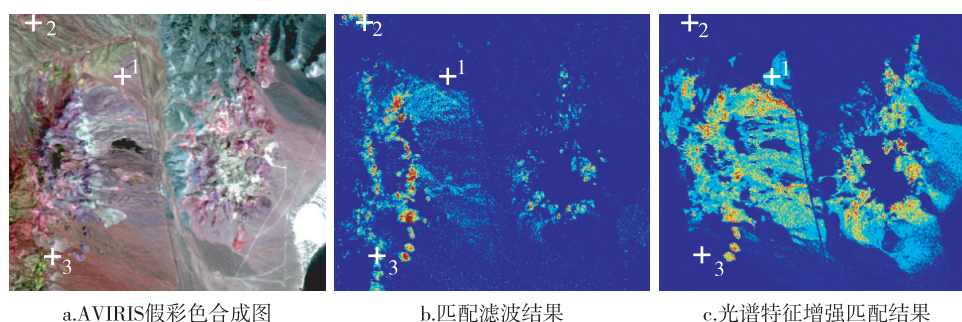


图 12 明矾石匹配结果

Fig. 12 Matching results of alunite. The AVIRIS false color composite image(a), the matched filtering results(b), and spectral feature enhancement matching results(c)

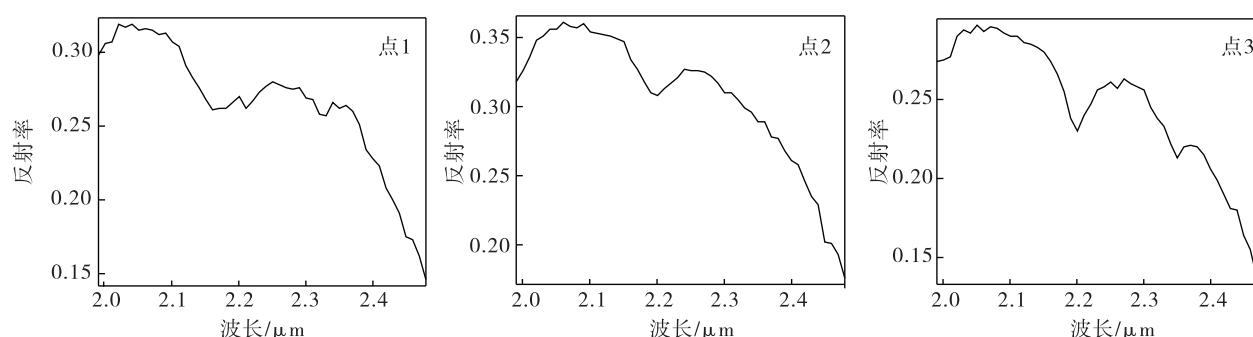


图 13 检查点影像光谱

Fig. 13 Image spectra of checkpoints

矾石时(大于4%), 无论是否含有地开石, 其匹配值均在0.053以上. 地开石在2 130~2 240 nm 光谱段的匹配结果显示, 当样品中地开石含量低于4%, 同时含有明矾石矿物时, 匹配结果低于0.07时, 会出现误识别; 当样品中不含明矾石时, 石英含量为99%、地开石为1%时, 匹配值为0.1(表3).

表3 实验室矿物混合体识别检出率			
Table 3 Detection rates of mineral mixture identification			
序号	矿物	谱段/nm	识别检出率/%
1	明矾石(含地开石)	1 380~1 540	6
	地开石(不含明矾石)	2 130~2 240	1
2	地开石(含明矾石)	2 130~2 240	4

3.4 基于全约束光谱分解矿物含量半定量提取方法

一种基于全约束光谱分解的矿物含量半定量提取方法——矿物含量/丰度反演方法流程见图14. 第1步: 端元选择, 可基于先验知识的端元选择, 也可基于图像的端元选择, 运用高光谱遥感端元提取的方法提取端元. 端元的光谱在USGS光谱库中选取. 第2步: 运用Hapke模型计算随机混合光谱, 端元光谱除第1步选取的光谱之外, 应加如一些造岩矿物

或金属矿物光谱, 随机混合光谱的计算方法为运用Hapke将各端元光谱转换为单次散射反照率, 运用线性混合原理计算随机混合的单次散射反照率, 再运用Hapke模型将随机混合的单次散射反照率转换为混合反射率. 第3步: 对随机混合的反射光谱进行去连续统分解, 分解前对端元光谱与混合光谱去连续统, 在端元光谱中加入所有谱段均为“1”的光谱代表光谱不活跃的端元, 建立光谱分解的丰度与光谱随机混合时随机设定的丰度之间的统计关系. 第4步: 对高光谱数据进行去连续统分解, 得到光谱分解丰度, 根据第3步建立的统计关系, 将光谱分解丰度转换为矿物丰度.

同样以福建紫金山金铜矿样品为试验对象, 对该方法进行了测试. 端元选择根据样品XRD(X射线衍射分析)测试结果, 选取了地开石、明矾石、伊利石、石英. 采用图14的方法与流程进行了矿物丰度的反演. 运用Hapke模型建立了各种矿物光谱分解丰度与真实丰度的统计关系, 用于修正光谱非线性混合效应所致的误差. 从图15可看出, 反演的地开石含量与样品XRD测试结果相关性很高, R^2 达到0.762, 线性关系基本接近“ $y=x$ ”, 计算反演值与实测值的均方根值(RMS)为12.4%.

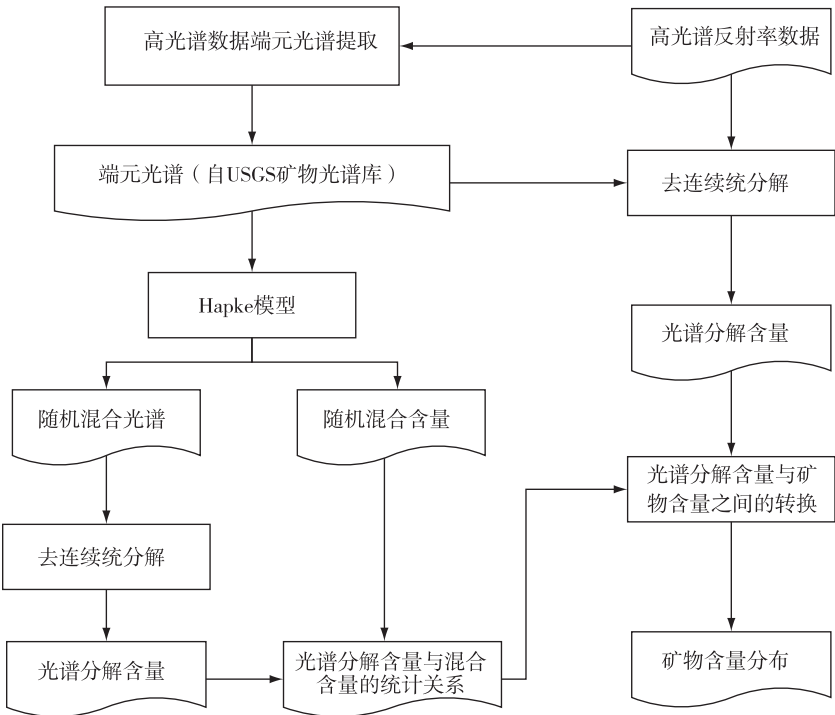


图14 高光谱矿物丰度反演方法流程

Fig. 14 Process of hyperspectral mineral abundance inversion

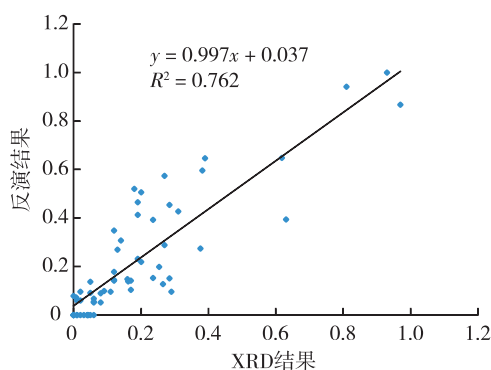


图 15 地开石反演含量与 XRD 测试结果散点图

Fig. 15 Dickite inversion content and XRD test result

4 信息产品验证

4.1 光谱重建产品验证

光谱重建产品验证一般通过对图像和实地同一位置的地物特征光谱波长进行比较,来评价图像光谱的失真度,通常选择具有特征光谱吸收峰的矿物为对象.该方法对地物选择要求较高,需要地形平坦、物质成分均一、波谱特征稳定,且面积较大(不得小于 5×5 个像元)的地方.以可见-短波红外光谱为例,检测的方法是:将具有特征光谱的已知点上影像的反射光谱特征吸收峰波长位置与该点地面实测光谱的特征吸收峰波长位置逐个进行比对,分析影像光谱相对于地面光谱的特征吸收峰波长位置偏移量.由于地面光谱仪的光谱

分辨率可达到 $1 \sim 2 \text{ nm}$,因此在分析偏移量时要根据成像光谱仪光谱分辨率和谱带宽特点,判断其是否在一个合理的光谱区间.如偏移量在一个合理的光谱区间内,则图像光谱代表了实际地物的光谱特征;如差异性较大,则需重新进行辐射校正等一系列的处理.

4.2 遥感地质产品验证

对由经过验证的反射率/发射率数据获得的地质信息产品的检验,主要验证方法有影像光谱检查、实地对应点光谱检查、实地对应点样品的 X 射线衍射分析(XRD)、扫描电子显微镜(包括元素分析)、矿物化学数据的电子显微镜分析等.根据验证目的不同,方法有所不同.针对矿物种类识别信息的验证,以影像光谱验证和野外实地光谱对比验证为主;针对矿物含量的验证除室内光谱和野外实地光谱对比验证外,能结合对应点样品的 X 射线衍射分析(XRD)最佳;矿物精细成分信息、结构信息验证除光谱验证外,多以样品测试分析为主.

矿物含量一般用特征吸收位置的深度来反映.Cudahy 等^[18]以 2200 nm 吸收特征的深度来表示 Al-粘土的含量,通过对机载 HyMap 反射率数据 4 次拟合多项式计算了 Al-粘土(包括高岭土、白云母和 Al-蒙皂石矿物族)的含量.将图像上 33 个验证点的 2200D (2200 nm 处的吸收深度值)与野外同点 ASD 光谱的 2200D 对比,结果显示两者具有很高的相关性(图 16).

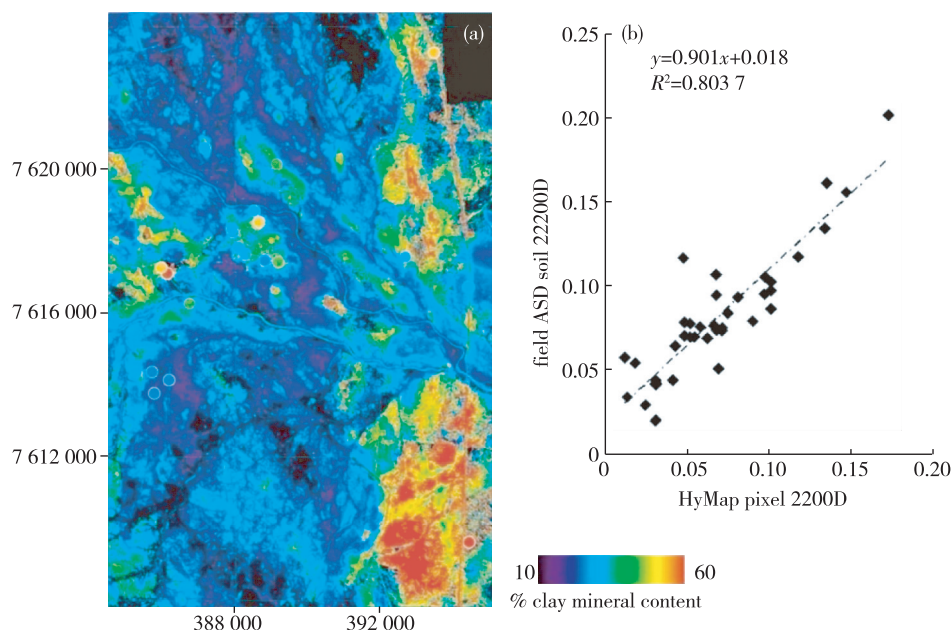
图 16 (a) Al-粘土含量分布图;(b) HyMap 光谱 2200D 与地面同点 ASD 光谱 2200D 散点图^[18]

Fig. 16 (a) Al-clay content map of the Tick Hill area, derived from HyMap reflectance data together with field ASD spectra of soil samples from 33 sites (coloured circles). (b) Scattergram for the predicted AL-clay based on the depth of the 2200 nm absorption feature (2200D) from the HyMap ROI's versus the soil sample spectral data from the same area/site

Doublier 等^[19]对采自法国南部 Montagne Noire 地区不同变质条件下的 41 件样品用 SWIR 光谱(光谱分辨率约 8 nm)建立了 4 种绿泥石光谱指数(CSI(H_2O)、CSI(H_2O)_{sum}、CSI(2250)和 CSI_{sum}),并将其与由样品 XRD 测试结果建立的 Kubler 指数(KI)^[20]进行对比分析.结果显示,全部 41 个样品的 $R^2 = 0.545 \sim 0.674$ (图 17),排除由 ÁI^[21]和 KI 方法得出不同变质级别的 5 个样品(图 17,灰色符号)后,其相关性也大大提高($R^2 = 0.704 \sim 0.769$).采用样品内部方差法对所有绿泥石光谱参数的可再现性进行检验,样品内部方差^[22]介于 3.34% (CSI(2250)) ~ 2.31% (CSI(H_2O)_{sum})之间,表明所有参数都具有良好的可再现性.

5 应用研究

5.1 区域性矿产资源调查

初步总结了一套“矿物—蚀变异常—找矿蚀变异常”的 2 级信息筛选找矿预测方法.为了更好地服务地质调查工作,聚焦地质调查与找矿预测需求,本工作结合高光谱遥感技术特征,总结出了一套高光

谱遥感地质调查产品体系,包括基础信息产品与综合分析信息产品 2 大类.基础信息产品包括影像图、矿物种类分布图、矿物丰度分布图、矿物成分信息分布图;综合分析信息产品包括岩性-构造解译图、找矿预测图.目前已在西部重要成矿带中编制了甘肃柳园、青海纳赤台、新疆阿尔金等 5 个调查区的影像图、矿物分布图、单矿物丰度图、蚀变异常图、找矿预测图等 5 大类图件.图 18—20 为 2010 年调查区的部分图件,图件中不同航带间信息一致性高,矿物信息检出率高(除第 4 系覆盖的区域外,80%以上的区域识别出了矿物)^[23].

在 2010、2012、2013 年甘肃柳园、青海纳赤台、新疆阿尔金高光谱遥感调查区中(面积约 6 700 km²),共圈定找矿有利区 60 余处,经野外不完全查证,在 15 处有利区中发现了 Au、Ag、Cu、Ni 等矿化异常,其中部分有利区内成矿元素丰度接近或超过边界品位,显示出较好的找矿潜力.特别是在 2010 年调查区内,根据高光谱信息异常发现了多处 Au、Ag 矿化异常,野外验证均为石英脉型矿化,石英脉地表出露多为宽约 1~3 m,延长约 100~1 000 m,大

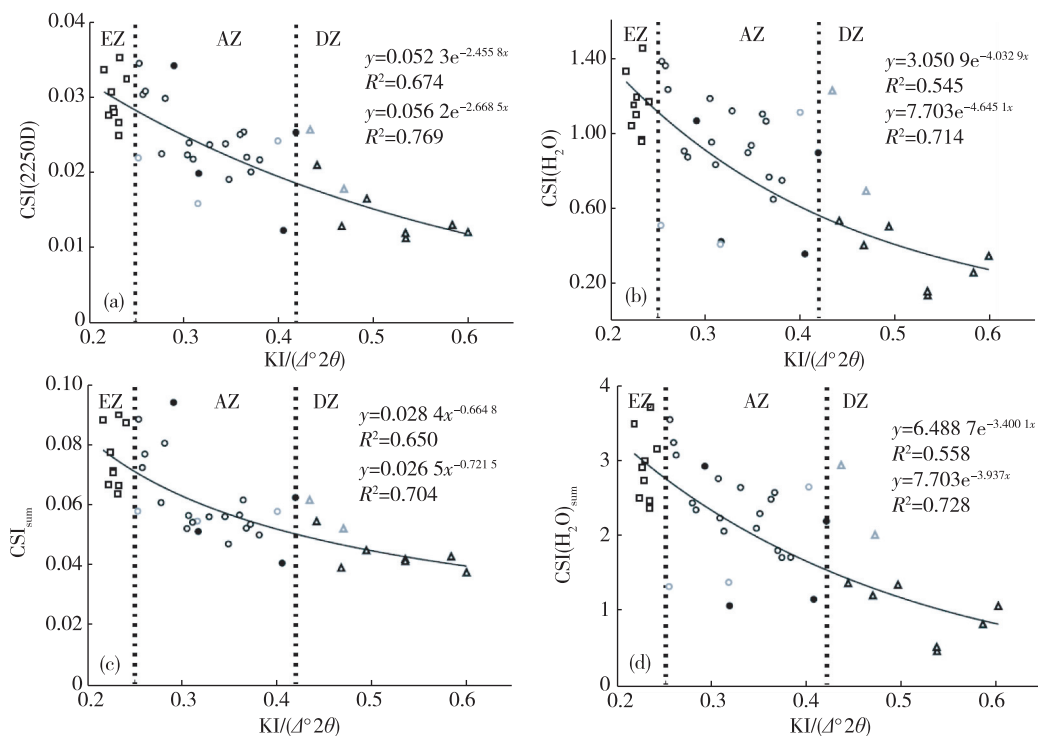
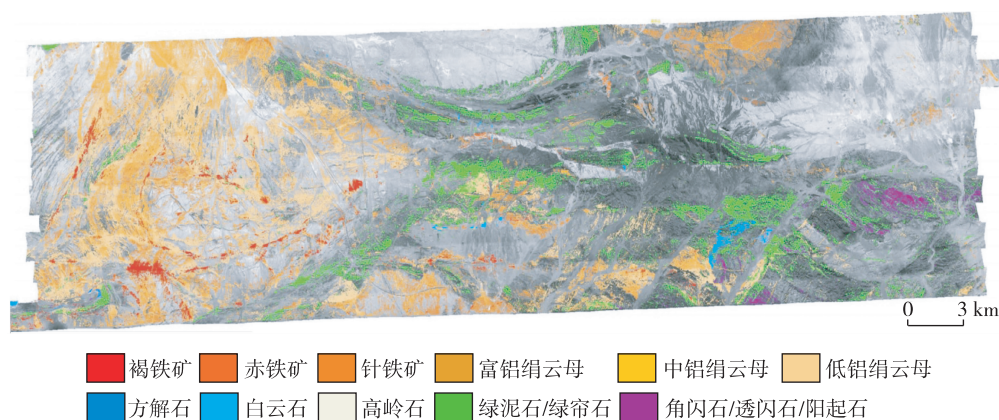
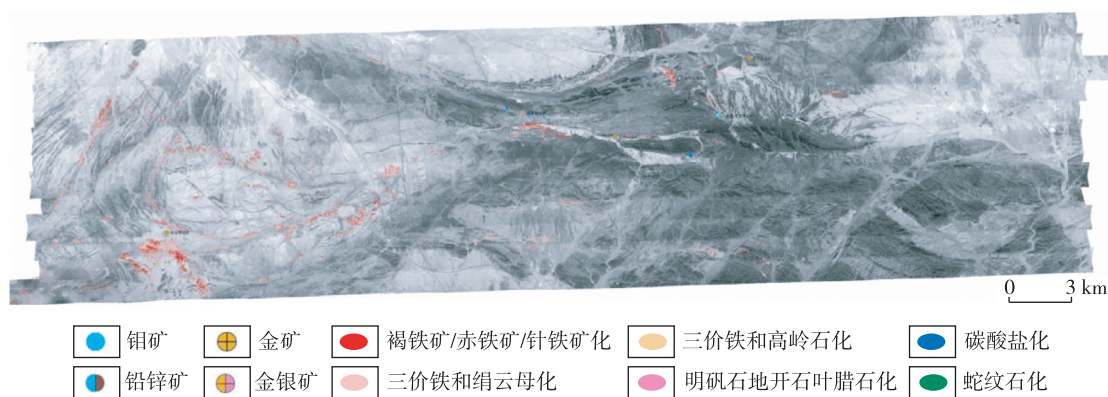


图 17 绿泥石光谱指数 CSI 与 KI 指数关系(EZ、AZ、DZ 分别为浅变质带、近变质带、成岩带)^[19]

Fig. 17 Correlation between CSI and KI(in $\Delta^\circ 2\theta$). (a) reflectance 2250D index, (b) reflectance 2250D/1900D index, (c) reflectance $2350D+2250D \times 1.7$ index, and (d) reflectance $(2350D+2250D \times 1.7)/1900D$ index. Samples are coded according to KI; EZ—epizoe, AZ—anchizone, DZ—diagenetic zone. For the five samples in grey XRD based ÁI and KI indicate different metamorphic conditions. The grey formula represents the correlation without these five samples^[19]

图 18 航空 CASI_SASI 高光谱遥感矿物分布^[23]Fig. 18 The mineral distribution map of aero CASI_SASI hyperspectral remote sensing^[23]图 19 航空 CASI_SASI 高光谱遥感蚀变异常分布^[23]Fig. 19 The alteration anomaly distribution map of aero CASI_SASI hyperspectral remote sensing^[23]

量的地表组合样品的金品位为 0.14~1.04 g/t;1 处砂卡岩型预测区内 Au 品位为 0.32~1.74 g/t.此外,在 2014 年甘肃祁连山调查区内,除发现多处沉积变质型铁矿外,还发现 1 处 Au 矿点,通过地表连续采样化学分析,认为有进一步进行地面勘查工程控制的必要,这也为该地区除寻找铁铜矿外,提供了新的找矿方向.

5.2 成矿地质环境分析

成矿地质环境分析是根据矿物种类、组成、类质同像替换信息对温度、压力、酸碱度等成矿条件进行推断分析.在热液成矿系统中,不同的蚀变矿物组合对应着一定的温压条件和 pH 值范围(表 4、图 21).常见的蚀变组合有泥化、高级泥化、绢英岩化、青磐岩化、外/次青磐岩化、钾化及砂卡岩化.泥化蚀变矿物形成于热液系统冷却退化的低温(<250℃)阶段^[24],或外生流体混入程度增加的环境,在中低 pH

(大约 4~5)、相对低温(<200~250℃)条件下,以低温高岭石和蒙脱石为主,含少量的伊利石组矿物;高级泥化反映较强的酸性环境,形成于低 pH(≤4)条件,发育有石英、高温粘土(如地开石或叶腊石)、水铝石及明矾石等矿物,明矾石含量越高,酸性越强.绢英岩化形成于与泥化蚀变相似的 pH 范围和较高温(>200~250℃)条件,酸性流体致使长石类矿物发生水解,以绢云母/云母出现为特征,可含少量石英、绿泥石等矿物^[25].青磐岩化形成于近中性到碱性条件,为循环对流的大气水流体与围岩反应发生弱氢交代,以绿泥石/绿帘石的出现为特征,次生角闪石(一般为阳起石)一般出现在高温条件(>280~300℃),是内青磐岩化蚀变特征.在相对低温条件(<200~250℃)沸石替代绿帘石而占主导,被称为外/次青磐岩化^[25].钾化一般形成于中性到碱性,高温(一般为 500~600℃)条件,由高温流体的钾质交代与水解作用形成,以黑云母或钾长石出现为特征.



图 20 航空 CASI_SASI 高光谱遥感找矿预测^[23]

Fig. 20 The prospecting prediction map of aero CASI_SASI hyperspectral remote sensing ^[23]

表 4 成矿环境与矿物组成的关系

Table 4 Relationship between metallogenic environment and minerals composition

矿物信息		成矿环境
矿物组合	见图 21	
矿物成分	绢云母/伊利石:四面体位 Al/Si 以及八面体位 Al/(Fe+Mg 等)类质替换	1) 主要受流体温度、压力、pH 值影响;2) 在造山型金矿环境下,温度是主要影响因素,温度越高越富 Si;3) 在斑岩型、浅成低温热液等岩浆流体中,温度、pH 值是主要影响因素,温度越高越富 Si,pH 值影响相反;4) 在变质矿床环境中,温度、压力是主要影响因素,温度、压力越高越富 Si
	明矾石:K/Na 类质替换	1) 主要受流体温度影响;2) 温度越高越富 Na
	绿泥石:Fe/Mg 类质替换	1) 主要受流体温度影响;2) 温度越高越富 Mg
矿物结构	高岭石/地开石结晶度	1) 结晶度越好,形成温度越高;2) 原地型高岭石/地开石的结晶度高于搬运型

矽卡岩化出现于与钾化相似条件,当同富钙质围岩接触发生汽水热液交代作用,形成钙石榴石、单斜辉石和透闪石等钙硅酸盐矿物^[25-26]。

通过矿物的类质同像分析,可推测其形成时的物理化学条件,为成矿地质环境分析提供指示信息。如绢云母受四面体位 Al/Si 以及八面体位 Al/(Fe+Mg) 等类质替换影响,其特征吸收位置在 2 195~2 225 nm 之间变化,向长波方向,Al 含量减少;明矾石的 K/Na 类质替换主要表现在 1 480 nm 处吸收位置的变化,向长波方向,Na 含量增加,反之,K 含量增加;绿泥石的 Fe/Mg 类质替换主要表现在 2 246~2 262 nm 变化,向长波方向,Fe 含量增加,反之,Mg 含量增加。绢云母的类质同像主要受流体温度、压力、pH 值影响,但是在不同的地质背景中,三者对其影响权重有所不同。明矾石的类质同像主要受温度

影响,温度越高越富 Na。绿泥石的 Fe/Mg 类质替换同样主要受流体温度影响,温度越高越富 Mg。

另外通过矿物光谱的精细特征变化,还可对矿物的晶体结构进行分析,如高岭石结晶度。当高岭石结晶度由高变低时,次级吸收特征位置由 2 160 nm 向 2 180 nm 漂移,且吸收深度逐渐变浅。高岭石结晶度一般受形成温度影响,温度越高,结晶度越好。

5.3 矿山环境监测

矿山的开采、选冶、尾矿库、矿渣堆放等,均可被酸溶出含重金属离子的矿山酸性废水,随着矿山排水和降雨使之带入水环境(如河流等)或直接进入土壤,造成土壤、水体、植被等重金属污染和 pH 值变化。目前针对矿山环境监测主要有矿区次生矿物识别、利用次生矿物或水体对 pH 值估算、对土壤等重

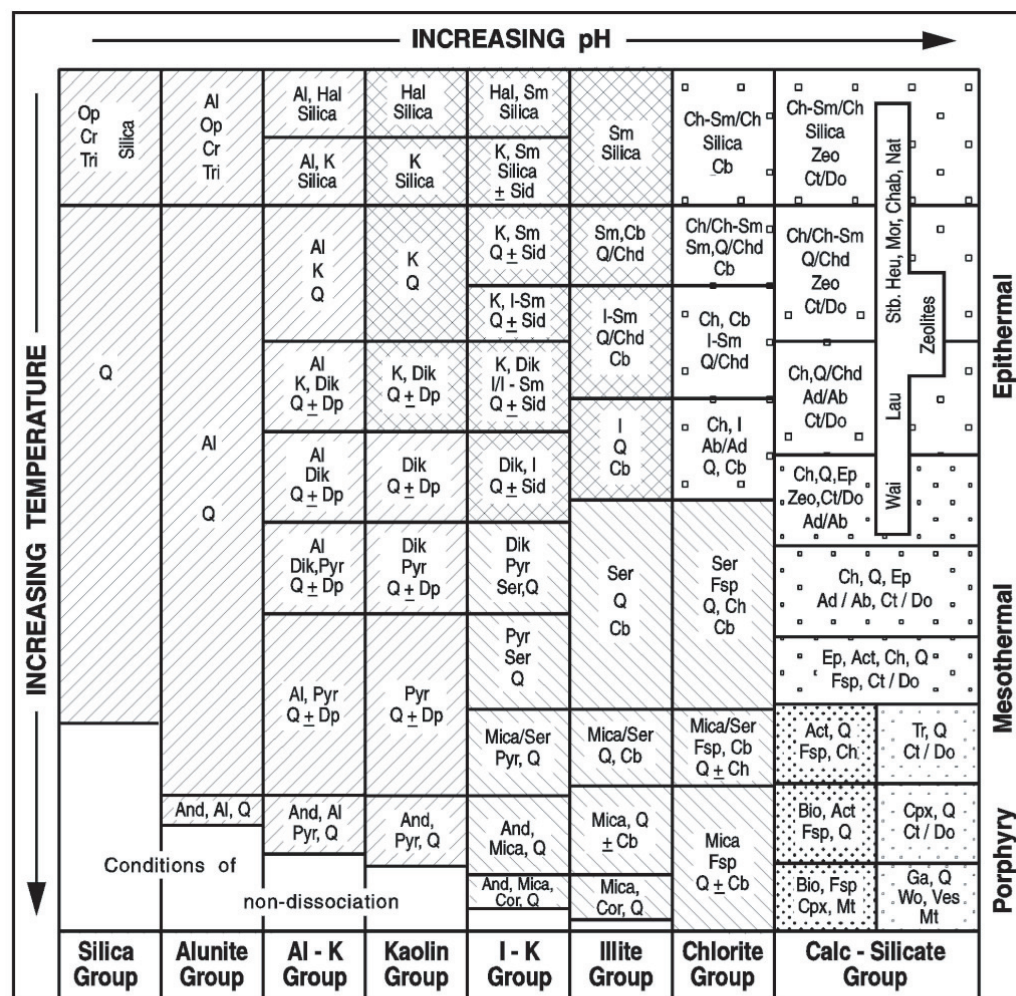


图 21 热液系统中常见的蚀变矿物^[25]

Fig. 21 Common alteration minerals in the hydrothermal system^[25]

金属成分含量反演、矿区污染植被信息提取等,以及在此基础上的矿山环境动态变化监测。

矿山活动中,在不同的环境条件下,会产生一系列次生矿物或矿物组合。对次生矿物识别可对其形成的地球化学条件和演化规律进行指示,进而对矿

山环境进行评估^[27-28]。不同次生矿物,特别是含铁矿物的生成对应着一定的 pH 值范围^[29-30]。Kopačková 等^[31]在对捷克 Sokolov 褐煤矿山 pH 环境研究中,发现当 pH<3.0 时有黄铁矿、黄钾铁矾或褐煤等存在,无论是单独存在,还是混合分布;当黄钾铁矾与针铁

矿伴生时, pH 值升高 (3.0~6.5); 而在针铁矿单独存在时, pH 值为中性或较高 (>6.5). 以多范围光谱特征拟合 (Multi Range Spectral Feature Fitting, MRS-FF) 技术, 对上述矿物进行了识别和填图, 并据此对矿区及外围地表 pH 值进行了估算 (图 22). 甘甫平等^[32]在江西德兴铜矿区利用水体在 600 nm 附近的光谱吸收特征差异, 区分出了尾矿区水体中的酸性水、碱性水和中性水 (图 23).

目前主要以矿区水系沉积物、土壤等地物中的重金属成分含量与地面反射光谱特征参量之间建立统计模型来反演重金属含量^[33-34], 该方法在不同的矿区环境中特征参数也不尽相同. 利用光谱技术开

展重金属成分含量反演大多还处于探索研究阶段, 进一步的研究工作仍有待深入.

植被的长势理化特征, 如植被光谱特征“红移”、“蓝移”等主要吸收特征参数的变化等能够很好地反映矿山环境特征^[35-36]. 但是, 由于矿山污染情况复杂, 除了研究植被反射率受矿山污染的影响之外, 还需研究矿山污染物对植被生长过程的影响机制等问题, 了解一年之中植被光谱反射率随着植被生长而出现的动态变化特征, 然后再通过遥感异常信息提取技术, 可以有效可靠地提取出由矿山不同类型的污染所引起的植被异常^[37].

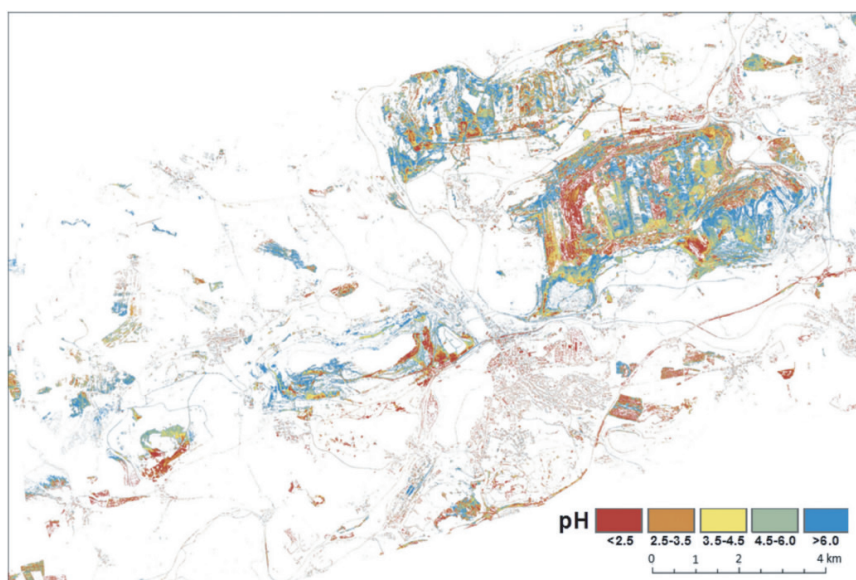


图 22 Sokolov 褐煤盆地 pH 估算值^[31]

Fig. 22 The Sokolov lignite basin; estimated pH^[31]

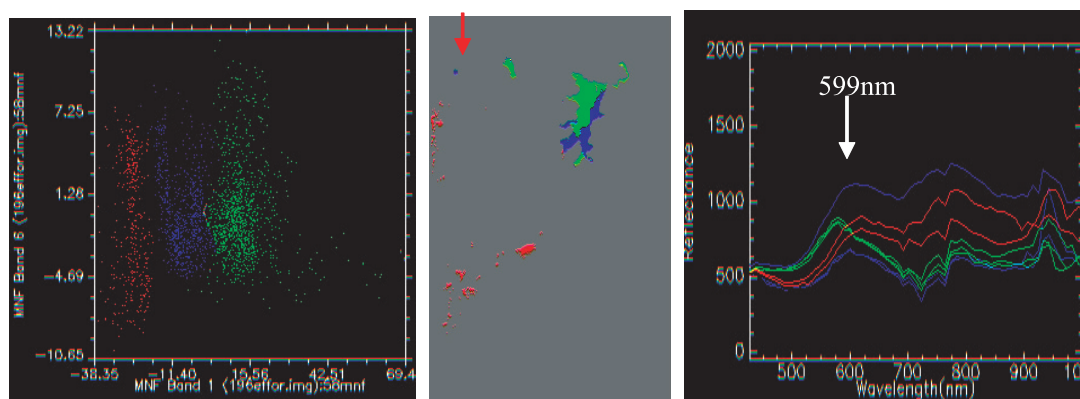


图 23 MNF B1 与 MNF B6 散点图 (左)、水体酸碱度信息 (中) 与水体影像光谱 (右)^[32]

Fig. 23 Relative pH information segmenting of water; scatter plot between MNF B1 and MNF B6 (left); relative pH for various water (middle), red shows relative low pH, blue shows relative middle pH, and green shows relative high pH; and spectra corresponding to different pH water (right)^[32]

5.4 (成像)光谱矿床三维建模

利用(成像)光谱技术对矿区岩芯进行光谱采集、分析,深入挖掘海量岩芯数据中隐含的矿物信息及示矿信息,已逐渐应用到资源勘查、深部找矿预测工作中^[38].通过岩芯(成像)光谱数据不仅可对矿物识别,还可研究矿物成分与含量.如图24所示,根据岩芯光谱扫描仪可快速、准确、无损地识别出岩芯中的蚀变矿物种类及含量.将识别和提取的各钻孔岩芯光谱矿物类型信息、含量信息、矿物光谱特征参量等信息作为基础分析数据,再结合钻孔点位、钻孔编录信息、各测点深度等信息,利用3D Mine、Vulcan等三维软件,以主要蚀变带、勘探线为单元,可构建钻孔岩芯光谱矿物信息三维建模(图25),将不同矿物信息的空间展布特征直观地展示出来.

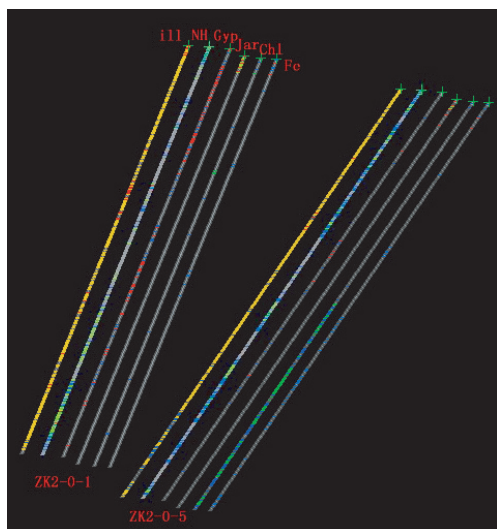


图24 新疆绿源矿区2个钻孔蚀变矿物组合及丰度图
(ill-伊利石;NH-含 NH_4 矿物;Gyp-石膏;
Jar-黄钾铁矾;Chl-绿泥石;Fe-含铁氧化物)

Fig. 24 The alteration mineral assemblage and abundance map of two drill holes (ill—illite;NH— NH_4 bearing minerals; Gyp—Gypsum; Jar—Jarosite; Chl—Chlorite; Fe—iron oxide)

结合矿床地质背景,从三维空间分析其蚀变矿物类型、组合特征和分布规律,为矿床蚀变特征分析、找矿预测提供了重要参考依据.同时矿物成分信息可对成矿环境进行约束,进而为成矿流体物理化学条件、流体运移以及矿床成因机制研究提供科学支撑.

6 讨论

6.1 基础理论与方法

目前的矿物岩石光谱模拟精度已达比较高的程

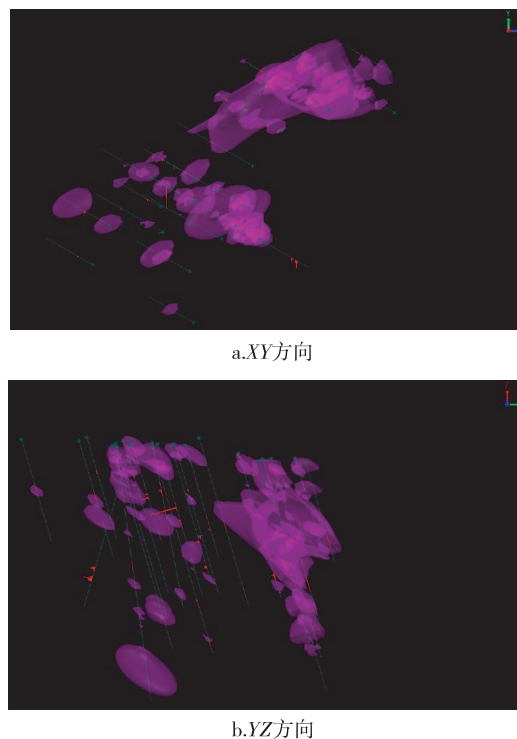


图25 新疆绿源矿区含 NH_4 蚀变矿物丰度三维分布

Fig. 25 The 3-D distribution maps of NH_4 bearing minerals abundances in XY direction (above) and YZ direction (below)

度,模拟精度可能不再是需要关注的主要问题,实现全光谱谱段的模拟,融合地形、大气、传感器噪声的全链路模拟以及应用是发展方向.最重要的潜在应用方向可能是传感器技术指标的优化设计.

对矿物光谱的认识,特别是光谱特征的指派主要20世纪80年代总结的成果^[39],这也是目前高光谱地质遥感的主要理论基础.但随着遥感技术定量化、精细化的不断发展,对矿物光谱认识的精度程度、全面程度需要进一步的提升,主要表现在3个方面:一是矿物光谱特征的成因指派方法未得到应有的重视,未形成系统的测试、分析方法;二是矿物的类质同像等微观成分与结构对光谱的影响认识还不够全面;三是中红外、热红外谱段光谱特征的指派有待突破.

光谱仪技术指标的优化设计是应用的基础,关键是根据需求、探测对象特性,合理优化谱段组合、光谱分辨率、空间分辨率、信噪比、幅宽指标,使其综合性能最大化.严密可行的优化设计技术有待形成.

辐射定标与辐射校正仪器研制、数据预处理的难点,尤其是机上、星上定标,定标源包括太阳、月球、定标场、人工光源.从光路的完整讲,包括全光谱

与半光路定标.辐射定标方案多样,到底如何更精确跟踪遥感器在室内、运输、发射、运行过程中的辐射特性变化并加以校正仍需进一步明确.

6.2 数据处理与信息提取技术

目前的辐射传输模型法在可见-短波红外波段,在大气条件好、地形平坦的地区应用效果很好,但面向全球应用的效果评价方法改进仍有待深入.

信息提取主要分为光谱特征参量、光谱匹配度2大类,二者各有优缺点,在实现高精度、自动化、高效率时表现均不能令人满意.以分层谱系的理念为基础,综合光谱特征增强匹配算法和特征参量,开发提取软件,可能是较好的解决方案.此外,光谱遥感与影像遥感采用的信息提取技术相差很大,互无借鉴,充分融合机器学习算法与光谱识别算法研究的成果,可能是形成高度自动化、可支撑业务化与大区域应用的遥感信息提取、识别、分类、变化检测技术体系的关键.

理想情况下,对所有产品都应当作定量误差分析,但受混合像元、野外实地采样点的代表性的影响,目前验证多为定性或半定量验证.

6.3 应用研究

在成矿环境分析应用方面难度较大,应加强研究.但其应用尺度、研究对象、方法与区域性找矿预测完全不同,不可简单套用.光谱在成矿环境分析应用中,隐含一个基本的地质前提条件,就是研究的对象必须是一个(接近)独立、封闭的成矿系统,岩芯光谱扫描技术可发挥更大作用.

矿区次生矿物识别和矿区及外围土壤、水体、植被等目标中重金属反演是矿山开发活动、矿山环境监测的重要手段,但多处于探索研究阶段,进一步的研究工作仍有待深入,技术体系有待建立.主要表现在2个方面:1)不同矿区次生矿物种类及其成因认识还不全面,相应矿物光谱库不够完善;2)矿区及外围土壤等目标中重金属在光谱上的响应机制仍不是很清晰,基于统计方法建立的地面光谱与重金属之间的部分统计关系,由于样本数量不足,其可靠性缺乏一定的说服力,影响了技术的进一步推广应用.

(成像)光谱矿床三维建模与传统的地质三维建模有所不同,依据的是识别出的矿物信息,而非传统的地质体,其空间展布特征、发育情况相对地质体要复杂得多,因此需要对传统的三维建模思路进一步改进和完善,使(成像)光谱矿床三维建模更符合

实际地质情况.

另外,盐渍化类型识别、土地沙化半定量提取可能也是发挥光谱优势的应用领域.土地质量监测需求与发展潜力很大,目前的研究几乎完全是基于各种统计算法,以特定样品为对象进行的反演试验,其效果、可靠性、推广性、重现性、可对比性等方面在支撑业务化应用上还有差距,需要进一步深入研究.

7 结论

成像光谱遥感在信息提取、区域性找矿预测方面得到了快速发展,取得很好的应用效果.但在光谱仪技术指标的优化设计、辐射定标上,需要与应用更好的结合,为应用提供综合性能指标最高的、“最好用的”数据源.信息提取软件有待开发,应对大区域,甚至全球化的数据处理,才能发挥光谱遥感兼具宏观、快速、精细的优势.促进光谱遥感与影像遥感技术的融合,改变各自为战的局面,可能是成像光谱遥感面临的最大问题,也是光学遥感面临的最大问题.

参考文献

References

- [1] Vane G, Goetz A F H. Terrestrial imaging spectrometry: Current status, future trends[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 44(2/3): 117-126
- [2] Hapke B. Theory of reflectance and emittance spectroscopy [M]. New York: Cambridge University Press, 2005
- [3] 赵哲,周萍,闫柏琨,等.基于Hapke辐射传输模型的月壤光谱模拟[J].地学前缘, 2015, 23(3): 1-13
ZHAO Zhe, ZHOU Ping, YAN Bokun, et al. Spectra simulation of lunar regolith based on the Hapke radiative transfer model[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 23(3): 1-13
- [4] Gao B C, Montes M J, Davis C O, et al. Atmospheric correction algorithms for hyperspectral remote sensing data of land and ocean[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(9): S17-S24
- [5] Cui J, Yan B K, Wang R S, et al. Regional-scale mineral mapping using ASTER VNIR/SWIR data and validation of reflectance and mineral map products using airborne hyperspectral CASI/SASI data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 33(1): 127-141
- [6] Qu Z, Kindel B C, Goetz A F H. The high accuracy atmospheric correction for hyperspectral data (HATCH) model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1223-1231
- [7] Wan Z M, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4): 980-996

- [8] Cui J, Yan B K, Dong X F, et al. Temperature and emissivity separation and mineral mapping based on airborne TASI hyperspectral thermal infrared data [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 40: 19-28
- [9] Vaughan R G, Calvin W M, Taranik J V. SEBASS hyperspectral thermal infrared data: Surface emissivity measurement and mineral mapping [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(1): 48-63
- [10] Gillespie A R, Rokungawa S, Matsunaga T, et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4): 1113-1126
- [11] Fenstermaker L K, Miller J R. Identification of fluvially redistribute mill tailings using high spectral resolution aircraft data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1994, 60(8): 989-995
- [12] Yuhas R H, Geotz F H A, Boardman J W. Discrimination among semi-arid landscape endmembers using the Spectral Angle Mapper (SAM) algorithm [C] // Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, 1992: 147-149
- [13] Chang C I. An information-theoretic approach to spectral variability, similarity, and discrimination for hyperspectral image [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(5): 1927-1932
- [14] Van der Meer F. The effectiveness of spectral similarity measures for the analysis of hyperspectral imagery [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2006, 8(1): 3-17
- [15] 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 [J]. 国土资源遥感, 2007, 19(1): 1-9
WANG Runsheng, YANG Suming, YAN Bokun. A review of mineral spectral identification methods and models with imaging spectrometer [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007, 19(1): 1-9
- [16] Clark R N, King T V V, Klejwa M, et al. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(B8): 12653-12680
- [17] 甘甫平, 王润生, 马蔼乃. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别 [J]. 地学前缘, 2003, 10(2): 445-454
GAN Fuping, WANG Runsheng, MA Ainai. Spectral identification tree (SIT) for mineral extraction based on spectral characteristics of minerals [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(2): 445-454
- [18] Cudahy T, Jones M, Thomas M, et al. Next generation mineral mapping: Queensland airborne HyMap and satellite ASTER surveys 2006-2008 [R]. CSIRO report P2007/364, 2008, DOI: 10.13140/RG.2.1.2828.1844
- [19] Doublier M P, Roache T, Potel S, et al. Short-wavelength infrared spectroscopy of chlorite can be used to determine very low metamorphic grades [J]. European Journal of Mineralogy, 2012, 24(24): 891-902
- [20] Guggenheim S, Bain D C, Bergaya F, et al. Report of the Association Internationale pour l'Étude Des Argiles (AIPEA) nomenclature committee for 2001: Order, disorder and crystallinity in phyllosilicates and the use of the "crystallinity index" [J]. Clays and Clay Minerals, 2002, 50(3): 406-409
- [21] Árkai P. Chlorite crystallinity: An empirical approach and correlation with illite crystallinity, coal rank and mineral facies as exemplified by Palaeozoic and Mesozoic rocks of northeast Hungary [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1991, 9(6): 723-734
- [22] Robinson D, Warr L N, Bevins R E. The illite "crystallinity" technique: A critical appraisal of its precision [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1990, 8: 333-344
- [23] 闫柏琨, 董新丰, 王喆, 等. 航空高光谱遥感矿物信息提取技术及其应用进展: 以中国西部成矿带调查为例 [J]. 中国地质调查, 2016, 3(4): 55-62
YAN Bokun, DONG Xinfeng, WANG Zhe, et al. Mineral information extraction technology by airborne hyperspectral remote sensing and its application progress: An example of mineralization belts of western China [J]. Geological Survey of China, 2016, 3(4): 55-62
- [24] Fournier R O. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment [J]. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 1999, 94(8): 1193-1211
- [25] Corbett G J, Leach T M. Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration and mineralization [M]. Special Publications of Society of Economic Geologist, 1998: 1-236
- [26] Tosdal R M, Dilles J H, Cooke D R. From source to sinks in auriferous magmatic-hydrothermal porphyry and epithermal deposits [J]. Elements, 2009, 5(5): 289-295
- [27] Riaz A, Ong B C, Müller C A. Dehydration and oxidation of pyrite mud and potential acid mine drainage using hyperspectral DAIS 7915 data (Aznalcollar, Spain) [C] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006, 34, Part XXX
- [28] Shang J L, Morris B, Howarth P, et al. Mapping mine tailing surface mineralogy using hyperspectral remote sensing [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2009, 35(sup 1): 126-141
- [29] Jönsson J. Phase transformation and surface chemistry of secondary iron minerals formed from acid mine drainage [D]. Swedish: Ume University, 2003
- [30] Bigham J M, Schwertmann U, Pfab G. Influence of pH on mineral speciation in a bioreactor simulating acid mine drainage [J]. Applied Geochemistry, 1996, 11(6): 845-849
- [31] Kopačková V. Using multiple spectral feature analysis for quantitative pH mapping in a mining environment [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 28(1): 28-42
- [32] 甘甫平, 刘圣伟, 周强. 德兴铜矿矿山污染高光谱遥感直接识别研究 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2004, 29(1): 119-126
GAN Fuping, LIU Shengwei, ZHOU Qiang. Identification of mining pollution using hyperion data at Dexing copper

- mine in Jiangxi province, China [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(1):119-126
- [33] Choe E, van der Meer F, van Ruitenbeek F, et al. Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(7):3222-3233
- [34] Kemper T, Sommer S. Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy [J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36(12):2742-2747
- [35] 刘圣伟,甘甫平,王润生.用卫星高光谱数据提取德兴铜矿区植被污染信息[J].国土资源遥感, 2004, 16(1):6-10
LIU Shengwei, GAN Fuping, WANG Runsheng. The application of hyperion data to extracting contamination information of vegetation in the dexing copper mine, jiangxi province, China [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2004, 16(1):6-10
- [36] Noomen M F. Hyperspectral reflectance of vegetation affected by underground hydrocarbon gas seepage [D]. Enschede: International Institute for Geo-information Science & Earth Observation, 2007:145
- [37] 李万伦,甘甫平.矿山环境高光谱遥感监测研究进展[J].国土资源遥感, 2016, 28(2):1-7
LI Wanlun, GAN Fuping. Progress in hyperspectral research and monitoring in mine environment [J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2016, 28(2):1-7
- [38] 修连存,郑志忠,殷靓,等.岩芯扫描仪光谱数据质量评估方法研究[J].光谱学与光谱分析, 2015, 35(8):2352-2356
XIU Liancun, ZHENG Zhizhong, YIN Liang, et al. Research on assessment methods of spectrum data quality of core scan [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(8):2352-2356
- [39] Hunt G R. Spectroscopic properties of rock and minerals [M]// Carmichael R S. Handbook of Physical Properties of Rocks. Boca Raton: CRC Press, 1982:295-385

Research progress of spectrometry geological remote sensing

GAN Fuping^{1,2} DONG Xinfeng^{1,2} YAN Bokun^{1,2} LIANG Shuneng^{1,2}

1 China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083

2 Key Laboratory of Aero Geophysics and Remote Sensing Geology of China Ministry of Land and Resources, Beijing 100083

Abstract Geological remote sensing is one of the most important application fields that can reflect and exploit the characteristics and advantages of spectral remote sensing technology. In this paper, the latest research progress of spectrometry geological remote sensing, including spectral simulation and characteristics analysis for minerals and rocks, technical parameter optimization design of spectrometer, radiometric calibration and correction, derivation of surface spectra, information extraction, information product validation and geological application are summarized. On the basis of the above work, the progress, problems and development of the spectrometry geological remote sensing are discussed.

Key words geological remote sensing; ore-prospecting; spectra simulation; information extraction