

# 成像光谱遥感技术及其图像光谱信息提取的分析研究\*

郑兰芬 王晋年

(中国科学院遥感应用研究所)

1991年3月30日收稿

## 摘 要

成像光谱技术是80年代发展起来的最新遥感方法。本文对其原理、理论基础及图像光谱信息提取的方法进行了探讨,并在红外细分光谱(FIMS)金矿蚀变带信息提取分析研究的基础上,通过对可见光细分19波段AMSS、澳大利亚的24波段GEOSCAN、MKII AMSS及美国GER64通道成像光谱数据的初步处理,发展和形成了一些针对超多波段成像光谱数据的图像处理和分析及光谱信息提取的方法。

成像光谱信息提取的方法,主要包括图像光谱反射率转换技术、图像光谱曲线显示、光谱特征参数测度(光谱吸收特征的波长位置、宽度、深度)、图像地物光谱曲线与地物光谱数据库的信息匹配以及地物光谱识别专家系统。本文以红外细分光谱图像在金矿蚀变带信息提取分析中的应用为例,讨论了成像光谱图像的一种处理分析技术及其发展前景。

**关键词** 成像光谱 高光谱分辨率遥感 光谱吸收特征参数 超多波段图像处理

## 一、前 言

80年代遥感技术的最大成就之一是成像光谱遥感技术的兴起。在成像光谱概念形成的初期,美国地球物理环境研究公司(GER)的W. Collins和张圣辉博士的航空光谱研究和美国喷气推进实验室(JPL)A. Goetz所主持的航天飞机多光谱红外辐射计(SMIRR)实验研究均发挥了重要作用。GER的航空光谱仪成功地检测了金属离子胁迫作用形成的植物光谱红边“蓝移效应”<sup>[1]</sup>,10波段的SMIRR则首次从空间轨道上直接鉴别了粘土矿物和碳酸盐矿物<sup>[2]</sup>。

1983年,由美国NASA投资、JPL研制的第一台高分辨率航空成像光谱仪(AIS-1)问世。它是一种在1.2—2.4 $\mu\text{m}$ 范围共分为128个波段的全新遥感仪器<sup>[3]</sup>。尽管它的探测范围十分狭窄,仅3.7°,限制了其应用价值,但它开创了高光谱分辨率和高空间分辨率兼有、光谱和图像合一的成像光谱遥感技术的新时代。

1987年,先进的224波段的航空可见红外成像光谱仪(AVIRIS)研制成功<sup>[4]</sup>。它以近10nm的光谱取样间隔覆盖0.4—2.45 $\mu\text{m}$ 光谱范围,视场角30°,瞬时视场1mrad,它是目前高光谱分辨率图像的主要来源。作为美国地球观测系统(EOS)计划的一部分,1991年NASA将研制成功第一台192波段航天成像光谱实验系统(SISEX),并计划于

\* 本文蒙重庆禧研究员指导,在此志谢。

1995 年推出航天中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 和高分辨率的成像光谱仪 (HIRIS)<sup>[5]</sup>。

随着应用的需要,特别是地质遥感应用的要求,另一类实用型成像光谱仪已由 GER 于 1987 年研制成功,它在 0.4—2.5 $\mu\text{m}$  范围内具有 64 波段以及实用性的宽视场角(90°)。

中国科学院上海技术物理研究所(下称上海技物所)在多光谱扫描仪、红外细分光谱扫描仪 (FIMS) 研制成功的基础之上,又陆续研制成功了热红外多光谱扫描仪 (TIMS) 和 19 波段多光谱扫描仪 (AMSS), 并即将推出 71 波段的航空成像光谱仪 (AIS)。

新一代的高光谱分辨率的传感器具有超多波段和大量光谱图像信息,这在数据传输、处理、分析及应用方面提出了许多新的课题。这就需要发展一些不同于陆地卫星 MSS、TM 图像处理的信息提取方法,以便有效地分析成像光谱数据。

从 1988 年开始,中国科学院遥感应应用研究所与日本地球科学综合研究所 (JGI) 合作利用我院上海技物所的多光谱系列专题扫描仪进行了石油地质遥感研究。1990 年又利用 GER 的扫描仪,首次在新疆获取了 64 波段成像光谱数据。在几年的研究中,特别是在开展黄金遥感找矿过程中,我们对各种类型的多光谱、超多波段光谱数据进行了处理分析,并发展了成像光谱、细分光谱数据的光谱信息提取模型<sup>[6,7]</sup>。

## 二、成像光谱的概念及光谱基础

成像光谱仪可以同时获取可见和红外几十、数百个波段的图像。现以一实用型的成像光谱图像为例来说明成像光谱的概念。如图 1 所示,左上图是利用美国 GER64 通道

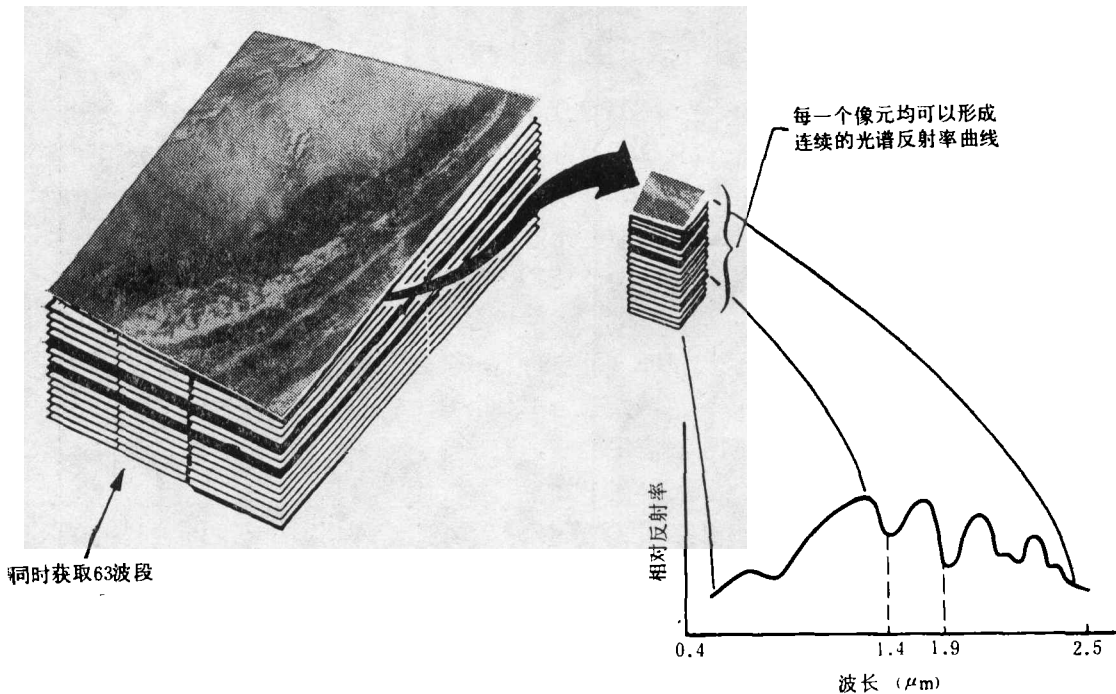


图 1 成像光谱概念图

Fig. 1 Imaging Spectrometry Concept

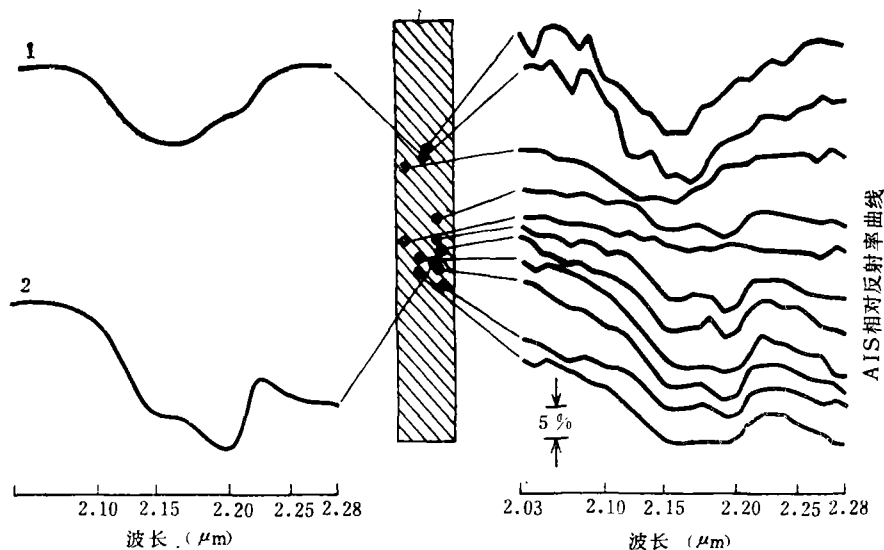


图 2 美国内华达州 Cuprite 矿区 AIS 图像及其光谱曲线显示<sup>[1]</sup>

1——实验室测得的明矾石反射率曲线， 2——实验室测得的高岭石反射率曲线

Fig. 2 AIS Image from Cuprite, Nevada, USA, Showing AIS Spectra and Laboratory Spectra (After Goetz 1985)

航空成像光谱仪，于 1990 年 10 月在新疆阿克苏地区取得的图像。航高 5 000m，像元几何分辨率 23m，光谱分辨率 16nm，取一幅从左到右含 512 个像元的图像。光谱覆盖 0.4—2.45 $\mu\text{m}$ ，共 63 个光谱波段，有 63 幅图像。1.4 与 1.9 $\mu\text{m}$  是大气水汽吸收波段。

成像光谱仪的光谱分析基础是，同时获取 0.4—2.5 $\mu\text{m}$  或更长的光谱覆盖范围内大量连续的、窄波段的光谱波段图像，其中每一个像元都可以形成一条反射率光谱曲线。经过辐射规正化处理，成像光谱曲线与实验室光谱曲线匹配，直接识别地物。图 2 显示了美国内华达州 Cuprite 矿区某蚀变带的航空成像光谱仪图像 (AIS)，规正化后的 AIS 成像光谱曲线清晰地显示了高岭土矿物在波长 2.16 和 2.20  $\mu\text{m}$  的双吸收特征和明矾石在 2.17 $\mu\text{m}$  的光谱吸收特征。这与实验室测量的明矾石、高岭石光谱曲线十分吻合<sup>[3]</sup>。

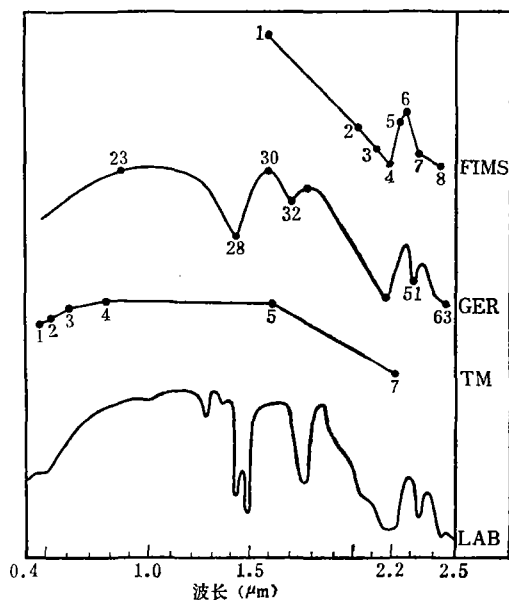


图 3 明矾石的 FIMS, TM, GER 图像光谱曲线与实验室光谱曲线的比较

Fig. 3 Compared with Laboratory Spectrum of Alunite and It's Image Spectra from TM, FIMS and GER

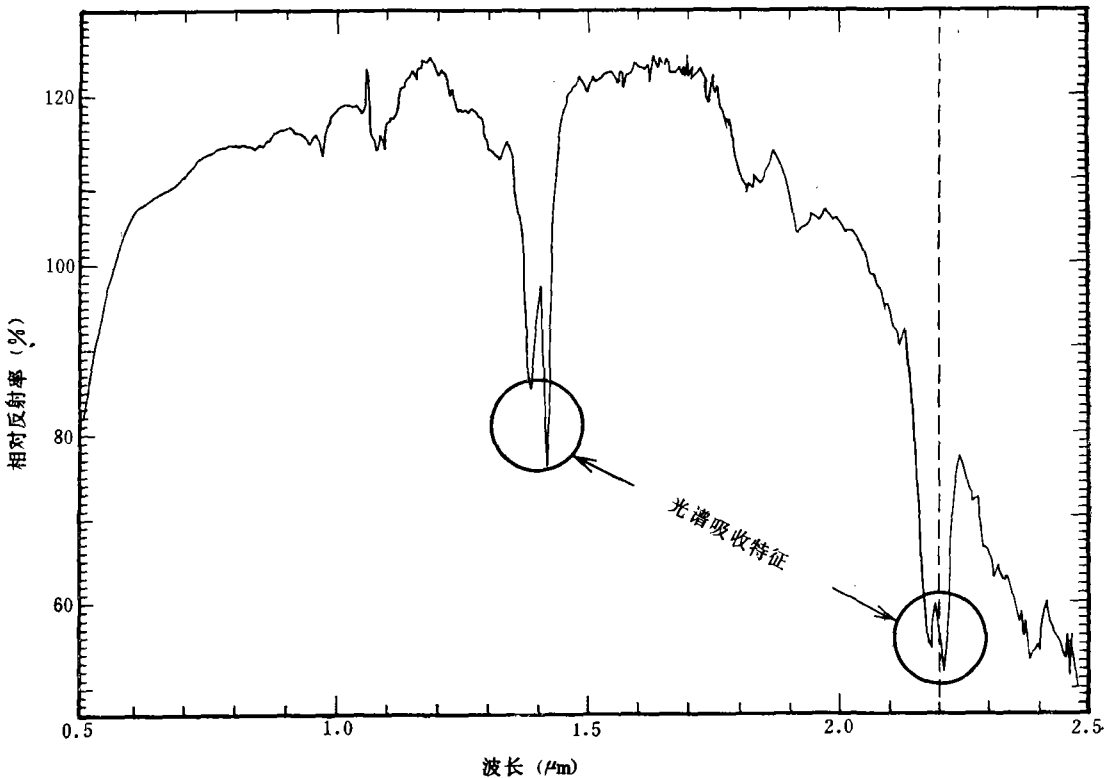


图 4 高岭土的光谱反射率曲线

Fig. 4 Reflectance Spectra of Kaolinite Showing Spectral Absorption Features

宽波段的遥感系统,如陆地卫星 MSS 和 TM 及 SPOT 只能得到少量的、宽波段离散式的光谱信息。根据在新疆获取的 GER 成像光谱数据,我们比较了 TM, FIMS, GER 的波谱和实验室测量的波谱(图 3),结果表明,成像光谱数据可以较大程度地拟合地物的实验室光谱波形形态。进而可根据地物光谱形态特征,判断岩石矿物成分、生物地球化学过程和地表景观参数。

目前发展的成像光谱仪图像识别地物的光谱基础有以下两个方面。

### 1. 地物光谱吸收特征

岩石矿物,尤其是蚀变矿物,在可见、近红外、短波红外光谱范围内,由于过渡元素的电子跃迁和羟基、水分子、碳酸根、硫酸根等分子团的分子振动,存在着精细的光谱吸收特征<sup>[6]</sup>(图 4),这些光谱吸收特征可用下述波形参数进行定量描述:吸收峰的波长位置(P),吸收峰的深度(H),吸收峰的宽度(W),吸收峰的斜率(K)和吸收峰的对称度(S)。P, H, W, K, S 的定量分析是对成像光谱仪图像进行岩石矿物信息提取的主要方法之一。大多数岩石矿物的光谱吸收宽度(W)比较窄,典型的W值为 20—40nm<sup>[6]</sup>, 高光谱分辨率的成像光谱图像提供了识别 P, W, H, K, S 的可能性。

不同矿物的吸收特征参数差异识别它们的光谱依据。图 5 是用 GER 的 IRIS 光谱仪测量的叶腊石反射率光谱曲线及其光谱吸收的波长位置、深度的参数值。这一基本数

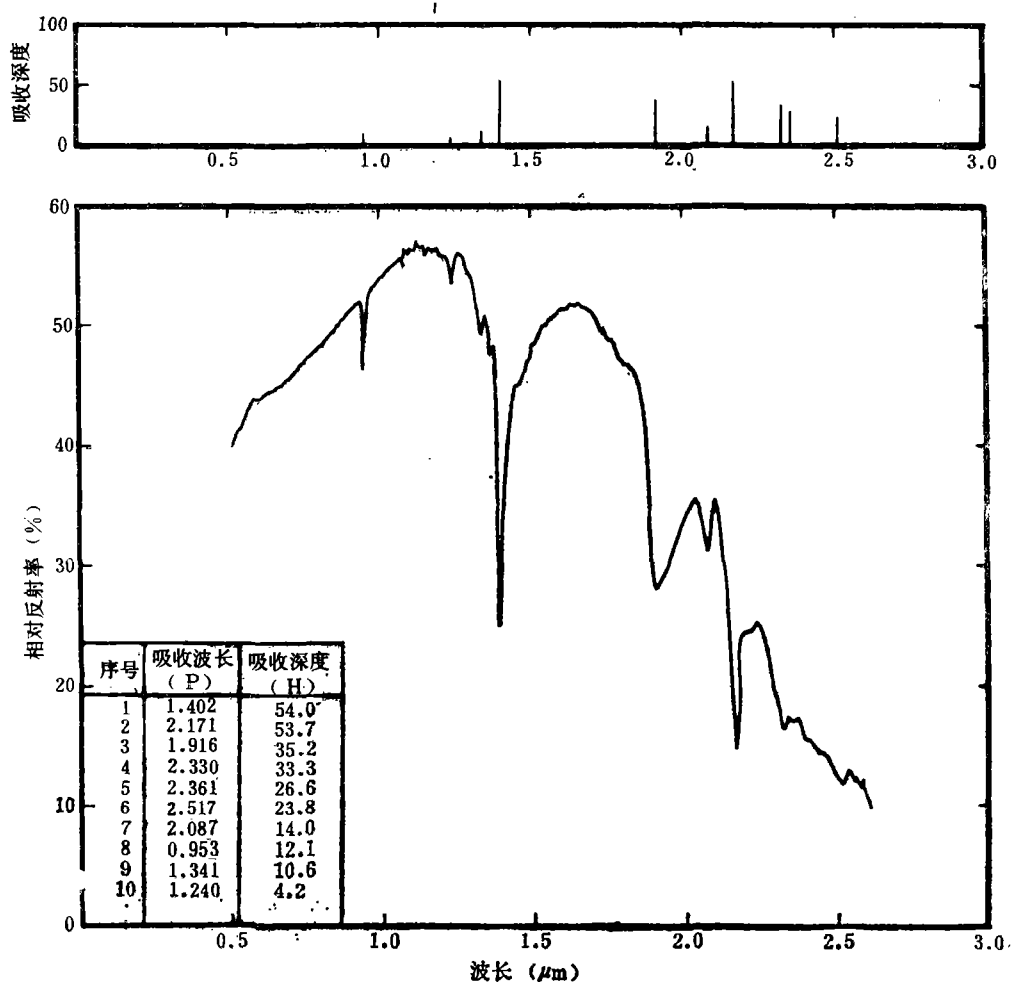


图 5 叶腊石相对反射率曲线及其光谱吸收波长位置 (P)、吸收深度 (H) 等光谱吸收特征参数值

Fig. 5 Reflectance Spectra of Pyrophyllite, Shown are the parameters of Spectral Characteristics, Such as Spectral Absorption Position (P) and Depth (H)

据的建立是成像光谱信息提取的基础。

## 2. 叶绿素红边“蓝移”

由于地质矿藏、元素迁移等生物地球化学效应, 植被光谱的叶绿素红边 (在  $0.55\text{--}0.75\mu\text{m}$  范围) 向较短波长方向位移约  $10\text{--}40\text{nm}$  (图 6)。检测这种植被光谱异常, 需要高光谱分辨率。W. Collins 用 512 通道的航空光谱仪成功地检测了“蓝移”效应<sup>[4]</sup>。Rock B. N 用成像光谱仪研究了酸雨造成的植被光谱异常<sup>[9]</sup>。最近, 我们研究了广东某金矿与这种光谱位移之间的相关性。

## 三、成像光谱仪数据分析方法

成像光谱仪数据以超多波段、巨额数据的特点向我们提出了挑战。信息量大是成像

光谱数据的最主要特征之一。以航空 64 通道成像光谱仪为例,当仪器以 300rpm 的低速

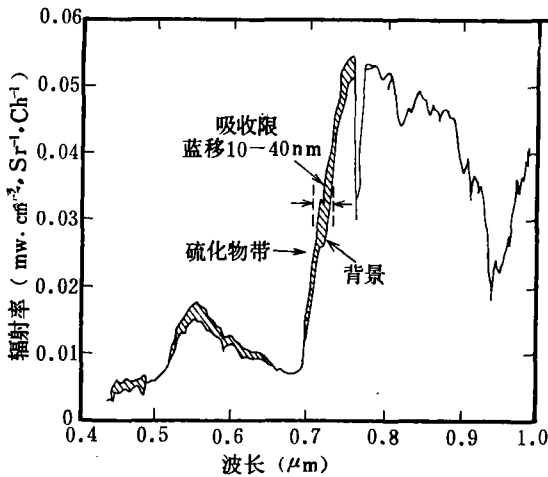


图 6 植被叶绿素红边“蓝移”  
Fig. 6 “Blue shift” in the Chlorophyll Red Edge of Vegetation

扫描时,每飞行一个小时的信息量仍高达 1 024 (像元)×18 000(行)×64(波段) = 1 180MB。而美国将于 90 年代中期研制完成的高分辨率成像光谱仪 (HIRIS) 的信息量竟高达 300—500MB/s。

对 64 波段的成像光谱仪的信息处理,如果仍采用普通适用于陆地卫星的三波段组合式处理方法,则其组合数将高达  $C_{64}^3 = 41 664$  组,如将各波段的颜色配赋一并考虑,则组合数将高达 249 984 组,这是常规方法无法处理的, JPL 的实践也证实了这一点。JPL 的 Wun, C. Chiou, Sr 在 IMB 370/158 计算机

上,模拟处理了一景 128 个波段 1 000 × 1 000 像元大小的 AIS 图像, CPU 所需时间,主成分变换为 1 000h,平行六面体分类为 1 125h,贝叶斯分类为 2 500h。所以,美国 JPL 实验室专门发展了一些处理 AIS 数据的新的模式识别技术,其中主要有 SPAM 软件包<sup>[10]</sup>和光谱分析 SPECTRUM 专家系统<sup>[11]</sup>。它们的一个共同特点是利用地物的波谱信息,对光谱波形形态进行编码匹配识别。我们也进行了尝试,图 7 为其流程图。

### 1. 反射率图像转换

原始的成像光谱数据除了包含地物光谱辐射率信息外,也包含着传感器漂移、辐射传输效应及地形效应的影响,剔除这些干扰因素,将原始成像光谱数据转换为反射率图像是很重要的。变换的方法很多,现仅举两种。

#### (1) 统计模型

这种方法简单易行,也是常用的方法之一。

设图像光谱与野外反射率之间具有线性关系<sup>[12]</sup>,则回归统计方程即为相对反射率转换方程:

$$\rho_b = \sum F_i \cdot R_{i,b} = aDN_{i,b} + C$$

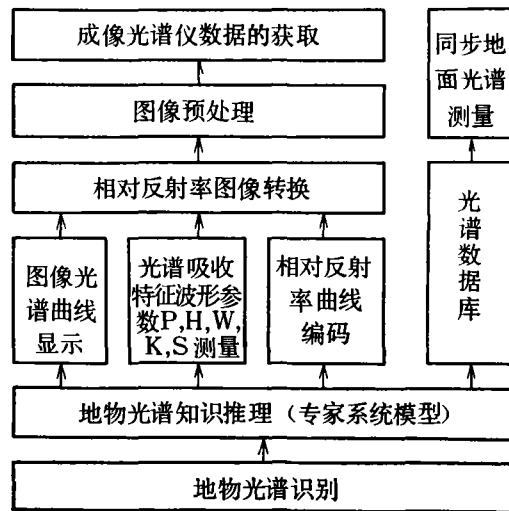


图 7 成像光谱仪数据光谱信息提取流程图  
Fig. 7 Flow Diagram of Spectral Information Extraction from Imaging Spectrometry

其中:  $\rho_b$  为相对反射率;  $DN_{i,b}$  为图像灰度值;  $R_{e,b}$  为波段  $b$  范围内  $e$  波长点光谱反射率值;  $F_e$  是与传感器光谱响应函数有关的加权系数,  $\sum F_e = 1$ ;  $a$ ,  $c$  为斜率和截距。

## (2) 对数残差模型

用光谱矢量的几何平均值 ( $S$ ) 和空间灰度平均值 ( $D$ ) 对图像数据进行归一化处理, 以获得相对反射率图像<sup>[12]</sup>, 即

$$\log R_{ij} = \log DN_{ij} - \log S - \log D + b$$

其中  $R_{ij}$  为相对反射率值,  $DN_{ij}$  为图像灰度值,  $b$  为偏差系数。

图 8 显示了对数残差反射率转换模型的概念与原理。

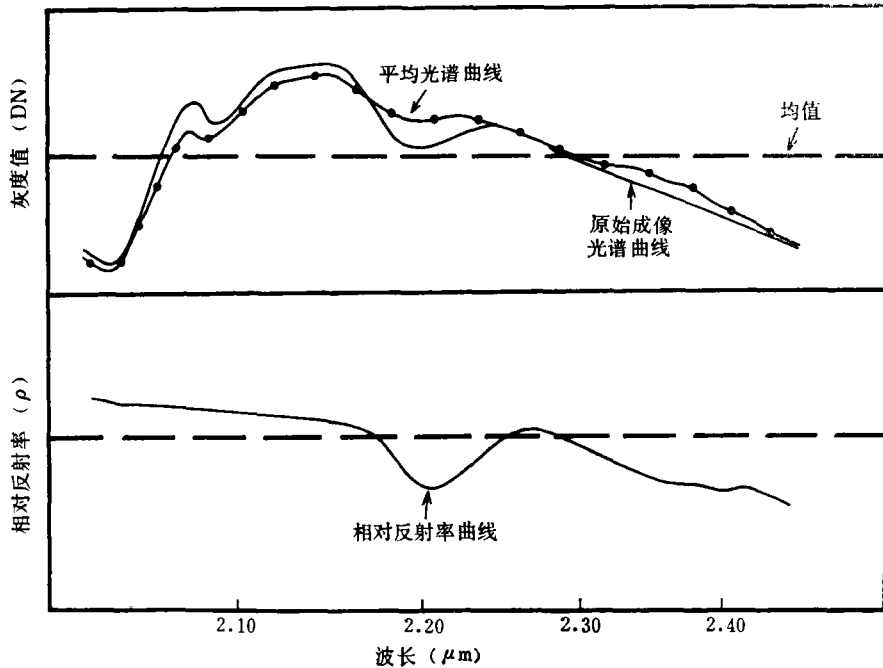


图 8 对数残差模型原理图

Fig. 8 The Concept of Logarithmic Residuals Model.

## 2. 成像光谱图像的光谱曲线提取

成像光谱仪可以同时获取目标图像和多维光谱信息, 这种图谱合一的特点, 要求在图像上能显示特定像元的光谱信息, 以便于目视分析和最佳波段选择, 并根据光谱特征快速分类。该技术包括: (1) 显示图像在光谱方面的波段范围和相对反射率坐标; (2) 显示光标任意指定像元的光谱曲线或特定区域的平均光谱曲线; (3) 快速确定具有相同或相似光谱特征的像元; (4) 可从光谱数据库中鉴别显示出特定目标的地物光谱曲线; (5) 同时显示从成像光谱数据提取的地物光谱曲线和实验室或野外地面测量的光谱数据库光谱曲线, 以便于比较, 进行地物类型识别和分类。这是一种新的遥感图像目视判读方法。

## 3. 光谱吸收特征参数的测度

光谱吸收峰的存在是识别地物尤其是蚀变矿物的理论依据。因此对光谱吸收特征参数, 即吸收峰的波长位置 ( $P$ )、宽度 ( $W$ )、深度 ( $H$ )、斜率 ( $K$ ) 及对称度 ( $S$ ) 的描

述,是确定地物特征的重要方法。在细分光谱研究中,我们将矿物光谱吸收峰的深度表征为矿物光谱吸收指数(MAI),成功地进行了热液蚀变矿物的填图<sup>[6,7]</sup>。图版 I 是新疆托里地区的 FIMS 图像运用矿物吸收指数识别蚀变矿物的结果。图中红色调区为新发现的博孜阿特金矿靶区,金矿蚀变带以碳酸盐化、绿泥化为主,光谱吸收峰在  $2.30\mu\text{m}$  附近。

利用高光谱分辨率成像光谱数据提取的地物光谱曲线能够获取光谱吸收波形形态参数信息。

#### (1) 吸收峰的波长位置(P)

应用“Hull-quotient”原则<sup>[12]</sup>对成像光谱曲线进行处理形成“Hull-quotient”曲线,长波长方向为正斜率、短波长方向为负斜率的点即为吸收谱带的波长位置(P)。

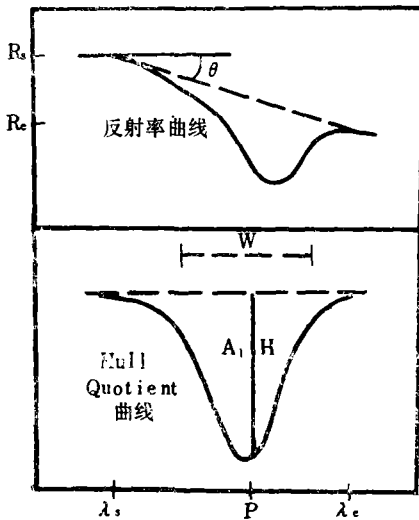


图 9 地物光谱吸收特征参数示意图  
Fig. 9 The Diagram of Spectral Absorption Parameters

#### (2) 吸收峰的宽度(W)

吸收峰的宽度可简单定义为  $(\lambda_e - \lambda_s)$ , 其中  $\lambda_s$  是吸收峰的起始点,  $\lambda_e$  是光谱吸收峰的终点。

Clark 将光谱吸收宽度定义为 FWHM<sup>[8]</sup>, 即吸收峰深度一半处的吸收波段的整体宽度。

#### (3) 吸收峰的深度(H)

光谱吸收波长点的“Hull-quotient”值即为光谱吸收峰的相对深度(H),

#### (4) 吸收谱带的斜率(K)

用角度  $\theta$  表示这一参数:

$$\theta = \tan^{-1}\{(R_e - R_s)/(\lambda_e - \lambda_s)\}$$

其中:  $R_e$  为吸收终点的反射率值,  $R_s$  为吸收起点的反射率值。

#### (5) 吸收峰的对称度(S)

$$S = A_L/A_s$$

其中:  $A_L$  为吸收峰左半端的面积,  $A_s$  为吸收峰整体面积。

以上参数如图 9 所示。P, H, W, S, K 参数图像的彩色编码可直观地显示地物成分的分布, 尤其是蚀变矿物类型与蚀变强度。

### 4. 成像光谱图像信息与光谱数据的编码匹配

成像光谱仪所提供的高光谱分辨率图像, 使我们有可能精确地拟合地物连续的光谱曲线, 并直接利用光谱数据库进行图像信息提取, 即进行图像信息与光谱曲线的编码匹配识别, 对成像光谱图像中每一个像元的光谱曲线产生一个二值编码矢量, 并保持波形形态的重要参数: 吸收特征波长位置(P)和吸收峰宽度(W)。图 10 为高岭土与明矾石的光谱二值编码结果。这种编码将提高成像光谱仪图像数据分析处理的效率和速度。

## 四、展 望

从 80 年代初开始, 成像光谱仪从概念的提出到技术系统的发展, 经近 10 年的研究,

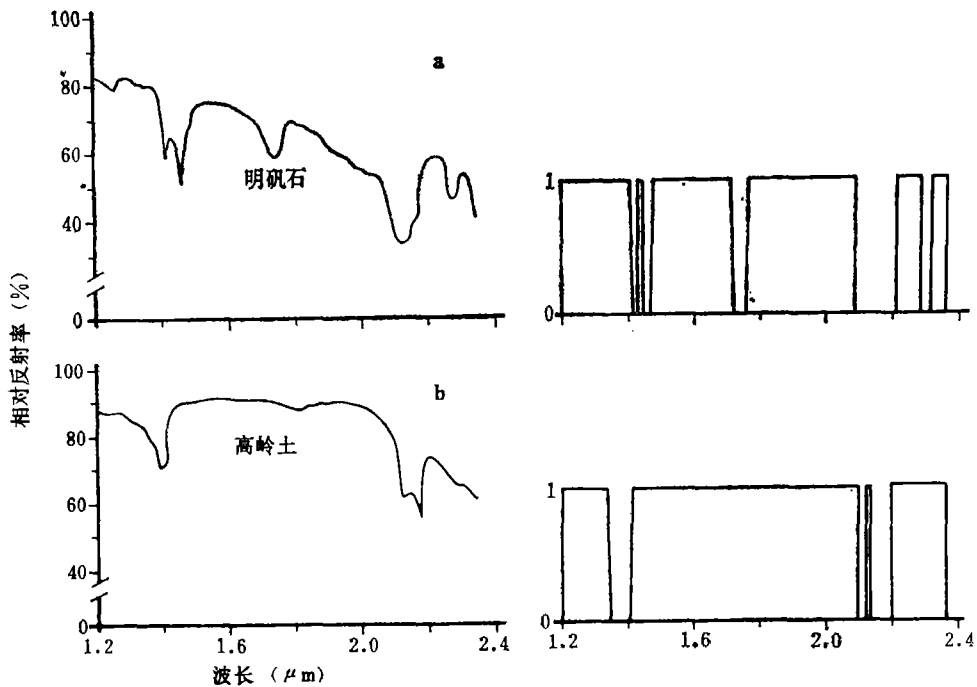
图 10 两种矿物光谱曲线的二值编码<sup>[13]</sup>

Fig. 10 Binary Encoding Scheme for Reflectance Spectra of Two Minerals

取得了重大突破。成像光谱仪技术的发展引起了遥感地学应用科学家的兴趣, 90 年代美国遥感发展的一个主要计划即地球观测系统 (EOS), 它的重要仪器之一就是 HIRIS。其很高的光谱分辨率为根据地物光谱特征直接鉴别和区分地物提供了可能性, 使遥感在一些重要的领域, 如地质、植被、海洋、环境保护等方面的应用进入了一个崭新的境界。可以认为, 成像光谱仪技术的地质应用是遥感应用的又一里程碑。其特点与含义有三: (1) 它将图像判读从空间形态的识别 (如地质构造等) 深化到了根据地物光谱特征直接识别地物类型和成分; (2) 成像光谱仪技术的发展, 为遥感的基础研究, 即地物、图像与光谱的内在联系的研究提供了有力的手段。经过数据辐射纠正, 可以从成像光谱图像上直接测量到任意地物像元的地物光谱曲线, 这意味着从一幅  $1024 \times 1024$  图像上, 可以获得  $10^6$  条地物的像元光谱曲线, 显然, 这对地面光谱测量而言是一个飞跃; (3) 成像光谱仪数据和波段之多、信息量之大, 使遥感应应用分析方法更多地从目视判读向基于光谱数据库的计算机分析判读发展。为此应加强航空成像光谱仪超多波段遥感图像信息获取技术的研究; 发展超多波段图像处理分析技术, 尤其是从成像光谱仪图像中提取分析地物光谱信息的技术; 发展成像光谱信息地物目标分析判读技术, 选定应用目标 (如地质找矿), 建立光谱数据库和光谱分析专家系统。成像光谱仪的发展为遥感应应用提出了许多新课题, 应尽早开展新的分析判读理论和新的计算机处理技术的研究以迎接 90 年代遥感信息的挑战。

## 参 考 文 献

[1] Collins, W., S. H. Chang, G. Raines, Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral depo-

- sits, *Eco, Geol.* 78:737—749, 1983.
- [2] Goetz, A. F. H. et al., Mineral identification from orbit: Initial results from the Shuttle Multispectral Infrared Radiometer *Science* 218: 1020—1024, 1982.
- [3] Goetz, A. F. H. et al., Imaging spectrometry for Earth remote sensing, *Science* 228: 1147—1153, 1985.
- [4] Vane, G., AVIRIS: A Description of the Sensor Ground Data Processing Facility, Laboratory Calibration and Preliminary Results, JPL Publ. 87—38, J. P. L, Pasadena, California, 1987.
- [5] Goetz A. F. H et al. High resolution imaging spectrometer science opportunities for the 1990s. In *Earth Observing System, Vol. IIC, Instrum, Panel Rep. NASA, Washington, D. C.*
- [6] Zhen Lanfen, et al., Study on Mineral Exploration by Infrared Multispectral Approach, in the Proceedings of the 11th Asian Conference on Remote Sensing Vol II Q-29, 1990.
- [7] Zhen Lanfen Tong Qing Xi et al., Mineral exploration by use of infrared multispectral remote sensing in China. In the Conference "Remote sensing: an operational technology for the mining and petroleum industries" London, 1990.
- [8] Clark, R. N, et al., High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals, *J. Gophys. Res.* 1989.
- [9] Rock, B. N. et al., Remote sensing of forest damage, *Biosci* 36. 439, 1986.
- [10] Mazer As. et al., Image processing software for image spectrometry data analysis, *Remote sensing Environ.* Vol. 24, 1988.
- [11] Borhardt G. C., Hybrid organization in SPECTRUM a system for the analysis of imaging spectrometer data Proc. AAAI workshop coupling symbolic Numer. Comput. knowledge-Based Syst. July. 1987.
- [12] Green A. A, Graig, M. D.: Analysis of Aircraft spectrometer Data with Logarithmic Residuals Proceeding of the Airborne Imaging spectrometer Data Analysis workshop pp. 111—119, 1985.

## A study on Imaging Spectrometry and Its Extraction of Image Spectral Information

Zheng Lanfen Wang Jinnian

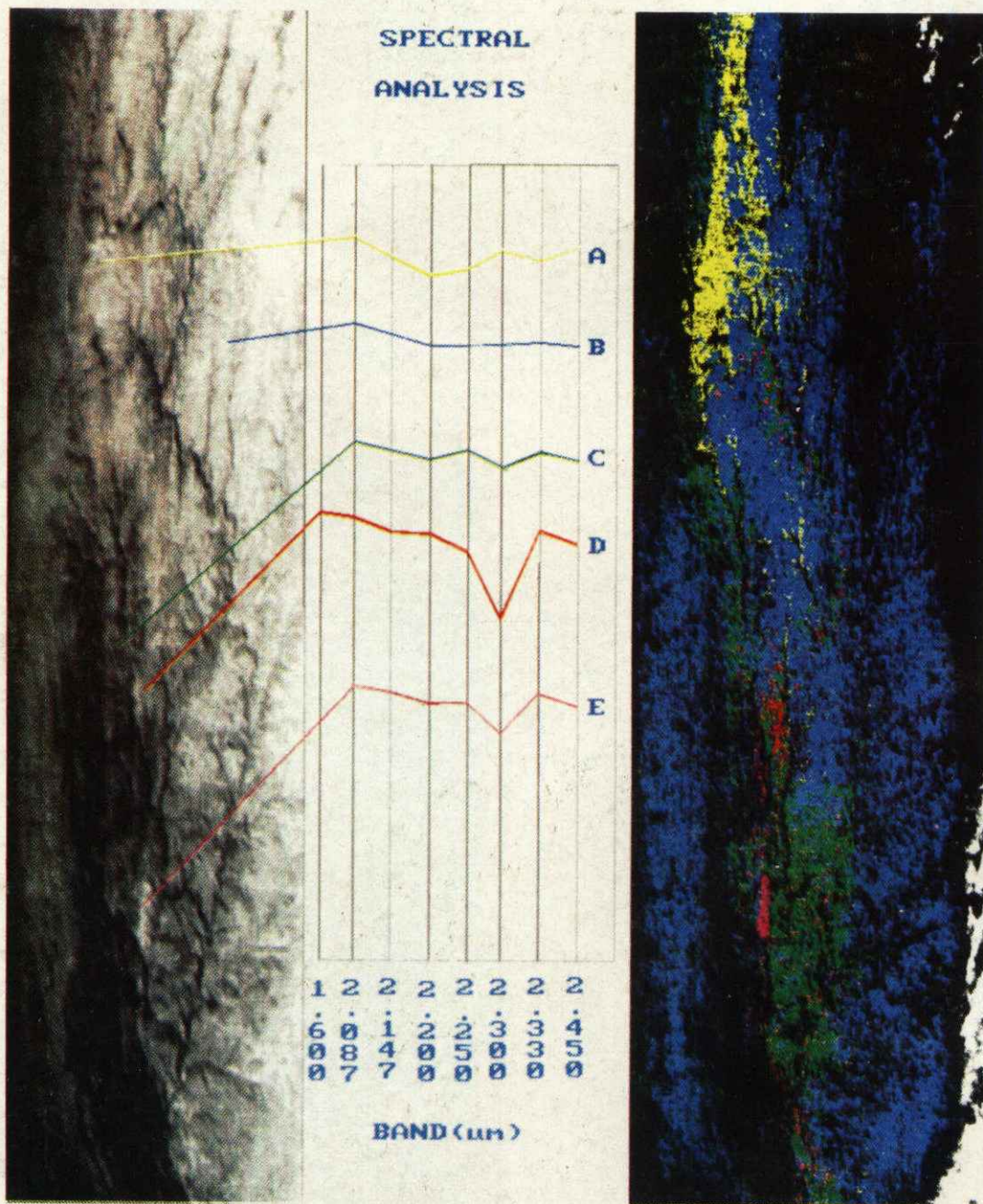
(*Institute of Remote Sensing Application Chinese of Academy of Science*)

### Abstract

In the 1980's a new type of remote sensing technology, so called imaging spectrometry, had developed. In this paper, the concept of imaging spectrometry, its theoretical basis and analytical methods of extraction for spectral information have been discussed. Based upon extraction of spectral information for the gold-bearing alteration zone by Fine-split Infrared Multi-spectral Scanner (FIMS), and data-processing of the 19-Band AMSS, Geoscan MKII AMSS and GER 64-Band imaging spectrometer, some methods of data-processing and analysing of Imaging Spectrometers Information had been tested and developed.

The procedures are approximately included as follows: (1) Transformation of raw image to reflectance one; (2) Displaying of imaging spectral curves of imaging spectrometer; (3) The parameter-measuring of spectral absorption band; (4) The algorithm-matching spectra for a library of lab. spectra with spectra-extracted from the imaging spectrometers data each other, ect.

**Key words** Image spectrometry High-resolution remote sensing spectral absorption parameter image processing



新疆托里地区红外细分图像 (FIMS) 运用矿物吸收指数 (MAI) 进行金矿化蚀变填图