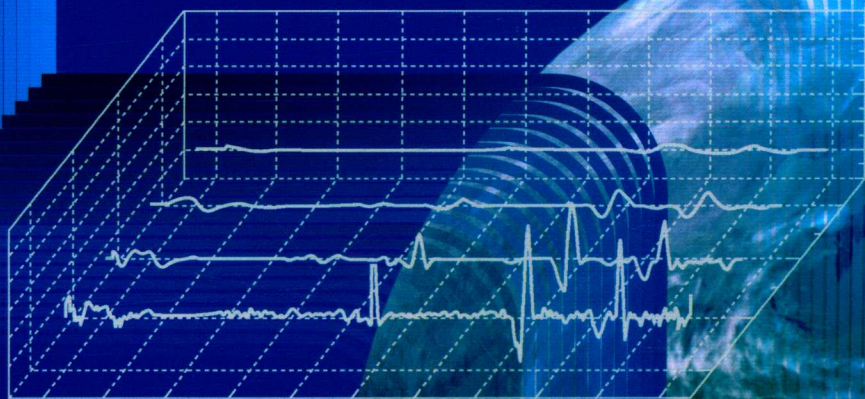


GAO GUANG PU YAO GAN YUAN LI YU FANG FA

# 高光谱遥感原理 与方法

李西灿 朱西存 编著



石油工业出版社

山东省自然科学基金项目资助(项目号 ZR2016DM03)

GAO GUANG PU YAO GAN YUAN LI YU FANG FA

# 高光谱遥感原理 与方法

李西灿 朱西存 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要内容包括：高光谱遥感的概念、特点、数据表达及其发展概况；高光谱遥感机理和光谱仪；地物光谱数据获取与预处理；地物光谱分析与特征提取；高光谱定量估测建模技术；高光谱遥感技术的应用。

本书力求系统完整、便于自学，突出新方法、新技术和实用性，可作为普通高等学校研究生、本科生测绘课程的教材，也可作为工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

高光谱遥感原理与方法 / 李西灿, 朱西存编著. —  
北京: 化学工业出版社, 2019. 6  
ISBN 978-7-122-34144-0

I. ①高… II. ①李… ②朱… III. ①遥感图像—图  
象处理 IV. ①TP751

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 052914 号

---

责任编辑: 王文峡  
责任校对: 杜杏然

文字编辑: 李 瑾  
装帧设计: 王晓宇

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 装: 三河市延凤印装有限公司  
787mm × 1092mm 1/16 印张 11 字数 265 千字 2019 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

售后服务: 010-64518899

---

定 价: 42.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

## Preface

高光谱遥感技术是20世纪80年代初出现的新型对地观测综合技术,现已成为地物识别、地球环境动态变化监测、遥感定量反演等遥感应用的前沿技术之一。因其具有光谱分辨率高、波段窄而多、图谱合一、信息丰富等特点,使本来在宽波段遥感中不可探测的物质,在高光谱遥感中能被探测。目前高光谱遥感已在地质调查、植被监测、精细农业、土壤养分监测、环境质量监测、农产品质量检测以及在医学医药、化学化工和国防安全等领域得到广泛应用。

遥感传感器研发、高光谱遥感理论研究和数据挖掘应用是高光谱遥感技术发展的三个重要环节。近年来,国内外实用化的高光谱遥感载荷研制步伐大大加快,高光谱遥感技术理论研究和应用也得到了快速发展,在各领域的应用成果不断涌现。目前越来越多的科技工作者参与高光谱遥感技术研究和应用,又极大推进了高光谱遥感技术的发展。本书编写以高光谱遥感信息获取、处理、建模和应用为主线,并结合作者多年来的教学经验和研究成果,以满足广大科技工作者学习、研究和应用高光谱遥感技术的需求。

本书主要包括:高光谱遥感的概念、特点、数据表达及其发展概况;高光谱遥感机理和光谱仪;地物光谱数据获取与预处理;地物光谱分析与特征提取;高光谱定量估测建模技术;高光谱遥感技术在植被监测、精细农业等方面的应用。本书力求系统完整、便于自学,突出新方法、新技术和实用性,可作为普通高等教育研究生、本科生的教材,也可作为工程技术人员的参考书。

本书共分6章,其中朱西存执笔第1~第3章,李西灿执笔第4~第6章。本书由李西灿总体策划和统一定稿。本书编著参阅了大量已出版与发表的著作、教材和论文,引用了许多高光谱遥感技术的应用实例,在此谨向各位作者表示诚挚的谢意!感谢化学工业出版社所做的辛勤工作!

由于编者水平有限,书中疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2019年2月

- 1.1 高光谱遥感的概念 /001
- 1.2 高光谱遥感的特点 /002
- 1.3 高光谱数据表达方式 /002
  - 1.3.1 图像立方体 /002
  - 1.3.2 光谱曲线 /004
  - 1.3.3 光谱曲面 /004
- 1.4 高光谱遥感的发展概况 /005
  - 1.4.1 高光谱遥感的仪器研制 /005
  - 1.4.2 高光谱数据的分析技术 /005
  - 1.4.3 高光谱遥感的应用 /007
  
- 2.1 高光谱遥感物理基础 /009
  - 2.1.1 电磁波与电磁辐射 /009
  - 2.1.2 基本电磁辐射定律 /011
  - 2.1.3 太阳辐射与物质的相互作用 /013
- 2.2 高光谱非成像光谱仪 /017
  - 2.2.1 地面地物光谱仪 /017
  - 2.2.2 地面地物光谱仪的作用 /022
- 2.3 高光谱遥感机理 /022
  - 2.3.1 基本概念 /022
  - 2.3.2 高光谱遥感成像关键技术 /023
  - 2.3.3 成像光谱仪光谱成像原理 /025
  - 2.3.4 成像光谱仪空间成像方式 /030
  - 2.3.5 成像光谱仪系统简介 /032

## 第 1 章 绪 论

001

## 第 2 章

### 高光谱遥感机理和光谱仪

009

# 第 3 章

## 地物光谱数据获取与预处理

038

### 3.1 地物非成像高光谱数据获取

#### 方法 /038

3.1.1 光谱数据获取的基本步骤 /038

3.1.2 光谱数据获取的注意事项 /041

### 3.2 地物高光谱图像数据获取

#### 方法 /042

3.2.1 SOC710 红外成像光谱仪  
简介 /043

3.2.2 SOC710 红外成像光谱仪的  
操作步骤 /044

### 3.3 高光谱数据预处理 /044

3.3.1 非成像高光谱数据的处理 /044

3.3.2 成像高光谱数据的处理 /046

### 3.4 异常光谱数据的剔除 /047

3.4.1 标准偏差法 /048

3.4.2 主成分分析法 /048

3.4.3 马氏距离 /049

3.4.4 箱形图 /049

### 3.5 典型地物的光谱特征 /050

3.5.1 植被的光谱特征 /050

3.5.2 水体的光谱特征 /054

3.5.3 土壤的光谱特征 /056

3.5.4 岩石与矿物的光谱特征 /057

- 4.1 地物光谱特性分析 /060
  - 4.1.1 地物光谱特性分析的目的 /060
  - 4.1.2 地物光谱特性分析的基本方法 /060
- 4.2 地物光谱数据变换方法 /067
  - 4.2.1 初等变换 /067
  - 4.2.2 光谱微分技术 /068
  - 4.2.3 光谱连续统去除 /070
  - 4.2.4 小波变换 /071
- 4.3 地物光谱特征选择 /078
  - 4.3.1 光谱特征选择的必要性 /078
  - 4.3.2 光谱特征选择的准则 /079
  - 4.3.3 光谱特征选择方法 /084
- 4.4 地物光谱特征提取 /089
  - 4.4.1 主成分分析 /089
  - 4.4.2 最小噪声分离变换 /091
  - 4.4.3 基于光谱重排的特征提取 /092
  - 4.4.4 光谱吸收特征提取 /092
  - 4.4.5 光谱斜率和坡向的特征提取 /093
  - 4.4.6 基于光谱积分的特征提取 /094
  - 4.4.7 基于二值编码的特征提取 /094
  - 4.4.8 基于重要程度的特征提取 /095
- 4.5 地物光谱特征规范化处理 /098
  - 4.5.1 数据中心化 /098
  - 4.5.2 数据标准化 /099
  - 4.5.3 数据区间化 /099
  - 4.5.4 数据均值化 /099

## 第 4 章

### 地物光谱分析与特征提取

060

# 第 5 章

## 高光谱定量估测建模技术

100

- 5.1 概述 /100
  - 5.1.1 高光谱的定性分析 /100
  - 5.1.2 高光谱的定量分析 /101
  - 5.1.3 精度评定指标 /102
- 5.2 回归分析法 /103
  - 5.2.1 线性回归分析法 /104
  - 5.2.2 非线性回归分析法 /107
- 5.3 主成分回归法 /109
- 5.4 偏最小二乘法 /110
- 5.5 模式识别法 /111
  - 5.5.1 模糊模式识别 /112
  - 5.5.2 灰色关联模式识别 /114
- 5.6 人工神经网络法 /118
  - 5.6.1 神经网络基础 /118
  - 5.6.2 神经网络模型 /122
  - 5.6.3 神经网络的应用 /125
- 5.7 支持向量机法 /126
  - 5.7.1 支持向量机的基本原理 /126
  - 5.7.2 支持向量机的特点及应用 /129
- 5.8 权重自反馈的模糊综合预测法 /131
  - 5.8.1 基于样本特征值模糊划分的预测模型 /132
  - 5.8.2 基于预测因子加权综合值模糊划分的预测模型 /134
- 5.9 可变模糊识别预测法 /137
  - 5.9.1 相对隶属函数与相对差异函数 /137
  - 5.9.2 可变模糊识别预测模型 /138
  - 5.9.3 应用实例 /140

- 6.1 高光谱遥感技术在植被监测中的应用 /143
- 6.2 高光谱遥感技术在精细农业中的应用 /145
- 6.3 高光谱遥感技术在土壤性状监测中的应用 /146
- 6.4 高光谱遥感技术在环境质量监测中的应用 /147
- 6.5 高光谱遥感技术在农产品检测中的应用 /148
- 6.6 高光谱遥感技术在地质调查中的应用 /150
- 6.7 高光谱遥感技术在医学医药中的应用 /151
- 6.8 高光谱遥感技术在化学与化工中的应用 /152
- 6.9 高光谱遥感技术在国防安全中的应用 /152

参考文献 /155

## 第 6 章

### 高光谱遥感技术的应用

143

# 第 1 章 绪 论

本章主要介绍高光谱遥感的概念、特点和数据表达方式,以及高光谱遥感的发展概况。

## 1.1 高光谱遥感的概念

遥感(remote sensing, RS)是 20 世纪 60 年代发展起来的对地观测综合性技术。它是运用现代光学、电子学探测仪器,在不与目标物相接触的情况下,从远距离把目标物的电磁波特性记录下来,通过分析、解译,来揭示目标物本身的特征、性质及其变化规律。因其具有大面积的同步观测、时效性、数据的综合性和可比性强、经济效益和社会效益高等特点,在农业、林业、地质、海洋、气象、水文、军事、环保等领域得到了广泛应用。

遥感的发展经历了由从全色(黑白)、彩色摄影到多光谱扫描成像之后,随着 20 世纪 80 年代成像光谱技术的出现,遥感进入了高光谱遥感(hyperspectral remote sensing)阶段。高光谱遥感是高光谱分辨率遥感的简称,其光谱分辨率为纳米级。高光谱遥感技术把遥感波段从几个、几十个推向数百个、上千个,使得高光谱遥感数据每个像元可以提供几乎连续的地物光谱曲线,如图 1-1 所示,将表征地物属性特征的光谱信息与表征地物几何位置关系的空间信息有机结合起来,使得地物的精准定量分析与细节提取成为可能。

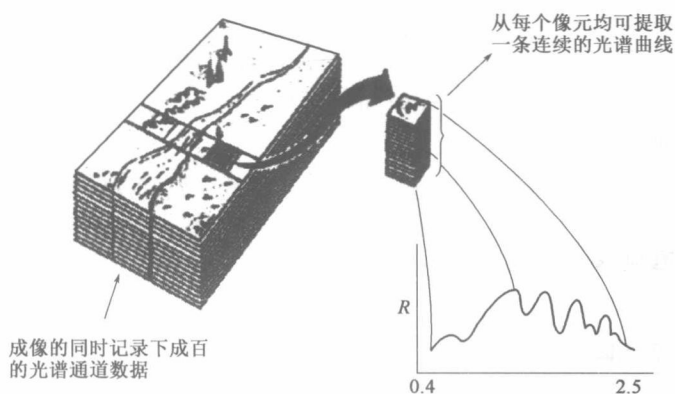


图 1-1 高光谱遥感示意图

高光谱遥感是指利用很多很窄的电磁波波段(通常小于 10nm),从感兴趣的物体获取有关数据,利用“图谱合一”的特点,研究地表物质的成分、含量、存在状态和动态变化与光谱反射率之间的对应关系的科学。高光谱遥感研究的光谱波长范围包括:可见光、近红外(VIS-

NIR)、短波红外(SWIR)、中热红外(MIR)和热红外波段(MIR-TIR)。

高光谱遥感是建立在航空航天、传感器、计算机等技术上的一门新兴的交叉学科,涉及电磁波理论、光谱学与色度学、物理/几何光学、固体理论、电子工程、信息学、地理学、地质学、大气科学、林学、农学、海洋学等多门学科。其中电磁波理论是遥感最重要的物理基础,电磁波与(地表)物质的相互作用机理、电磁波在不同介质中的传输模型和对其进行接收、分析是凝聚各门学科和技术的核心。高光谱遥感已成为国际遥感技术研究的热门课题和光电遥感的最主要手段。

## 1.2 高光谱遥感的特点

高光谱遥感具有不同于传统遥感的新特点,主要表现在以下方面。

① 波段多,可以为每个像元提供几十、数百甚至上千个波段。将图像上每个像元的灰度值按波长排列,可以得到一条波谱曲线,如果再加上时间维,每一个像元就可以定义为一个波谱曲面。

② 光谱分辨率高,光谱范围窄,一般小于10nm。

③ 波段连续,有些传感器可以在350~2500nm的太阳光谱范围内,提供几乎连续的地物光谱。

④ 数据量大,随着波段数的增加,数据量呈指数增加。

⑤ 信息冗余增加,由于相邻波段高度相关,信息冗余也相对增加。

因此,一些针对传统遥感数据的图像处理算法和技术,如特征选择与提取、图像分类等技术面临挑战,而用于特征提取的主分量分析方法、用于分类的最大似然法、用于求植被指数的归一化指数算法等,不能简单地直接应用于高光谱数据。

高光谱遥感信息的分析与处理,侧重于从光谱维的角度对遥感图像信息进行展开和定量分析,其图像处理模式的关键技术如下。

① 超多维光谱图像信息的显示,如图像立方体的生成。

② 光谱重建,即通过成像光谱数据的定标、量化并基于大气纠正的模型与算法,实现成像光谱信息的图像-光谱转换。

③ 光谱编码,尤其指光谱吸收位置、深度、对称性等光谱特征参数的算法。

④ 基于光谱数据库的地物光谱匹配识别算法。

⑤ 混合光谱分解模型。

⑥ 基于光谱模型的地表生物物理化学过程与参数的识别和反演算法。

## 1.3 高光谱数据表达方式

### 1.3.1 图像立方体

高光谱遥感是将成像技术和光谱技术相结合的多维信息获取技术。高光谱遥感能够同时获取目标区域的二维几何空间信息与一维光谱信息,因此高光谱数据具有“图像立方体”的形式和结构,如图1-2所示,其图像空间用于表述地物的空间分布,而光谱空间则用于表述每个像素的光谱属性,体现出“图谱合一”的特点和优势。

成像光谱技术集成像与光谱于一体,它以纳米级超高光谱分辨率,几十至数百个波段对地

物同时成像,在获得地面二维空间图像信息的同时,还获取地物的连续光谱信息。

光谱图像立方体,其获取的数据形成一个三维数据集,可表达成数据立方体的形式, $(X, Y)$ 维组成图像所覆盖的地面空间,第三维为光谱维,由光谱空间的若干波段组成。对光谱图像立方体作多维切面,可得到不同类型的光谱特征,如任意像元点处的光谱特征、任意空间剖面线上某一光谱区间的光谱变化、光谱维上任意波段的空间图像等。这样既可以在空间切面上依据图像特征对地物做图像分析和鉴别,又可在光谱维上依据光谱特征对地物做光谱特征分析,直接识别地物的种类、组分和含量。

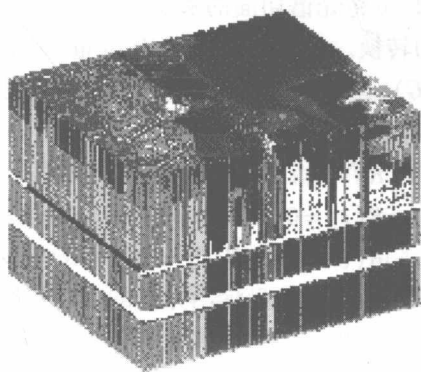


图 1-2 光谱图像立方体

成像光谱图像相对于其他遥感图像的主要优势是它除了拥有二维的平面图像外,还包含了光谱维,从而蕴涵了丰富的图像及光谱信息。但是如何表达这些信息,就成为成像光谱应用中的一个重要问题。人们希望能尽量把这些信息转化为可视的图像,这样既可以给用户以直观、形象的认识,也可以发挥人眼对图像的细节分辨能力及对图像的总体特征的概括能力,更好地进行数据分析。

在通常二维图像信息的基础上添加光谱维,就可以形成三维的坐标空间。如果把成像光谱图像的每个波段数据都看成是一个层面,将成像光谱数据整体表达达到该坐标空间,就会形成一个拥有多个层面、按波段顺序迭合构成的数据(图像)立方体。由于在现实中只有二维显示设备,因而需要利用人眼的特性,将三维的图形图像信息通过视图变换的方法显示到二维设备上,以达到三维的视觉效果。

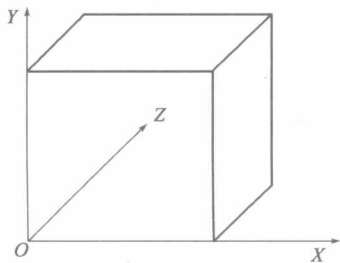


图 1-3 图像立方体构成坐标系

若设图像灰度值为  $DN$ ,则可以简单定义构成成像光谱图像立方体的三维:空间方向维  $X$ ,空间方向维  $Y$ ,光谱波段维  $Z$ ,其构成坐标系如图 1-3 所示。

为了简化处理,假设图像立方体的各个层面是“不透明”的,只能看到立方体的表面。图像立方体共有六个表面,最多只有三个可以同时看见。这六个表面又可分成两类:

①空间直线  $X$  与空间直线  $Y$  决定的空间平面,即  $OXY$

②空间维与波段维构成的平面,即  $OXZ, OYZ$  平面。

其中, $OXY$ 平面的图像与传统的图像是相同的。它可以是黑白灰度图像,反映某一个波段的信息;或者是三个波段的彩色合成图像,表达三个波段的合成信息,这时三个波段可以根据需要任意选择以突出某方面的信息。

$OXZ, OYZ$ 平面的图像则与传统图像不尽相同,它反映的不是地物特征的二维空间分布,而是某一条直线上的地物光谱信息。从直观上说,是成像光谱数据立方体在光谱维上的切面。因为图像立方体是“不透明”的,不能看见立方体内部,所以在系统实现时可以增加选择功能,由用户任意选择立方体内部的任意切面来显示。

成像光谱切面是一单色平面,该切面数据反映了各波段的辐射能量,不能显示出图像的光谱特征。考虑到人对彩色的敏感程度更高,采用密度分割的方法,给各灰度级赋予不同的色彩

值,可将光谱切面的灰度图转换成彩色图,再用一个 256 级的彩色转化表来完成  $DN$  值到彩色的转换。为了使彩色值有尽量大的动态范围,可以在彩色表中尽量均匀地分布红( $R$ )、绿( $G$ )、蓝( $B$ )三色的取值范围。彩色表如下:

设彩色表的第  $i$  项为  $R(i)$ 、 $G(i)$ 、 $B(i)$ ,则有

$$R(i) = i \times 3, G(i) = B(i) = 0, i = 0, 1, \dots, 85$$

$$R(i) = 0, G(i) = (i - 86) \times 3, B(i) = 0, i = 86, 87, \dots, 172$$

$$R(i) = 225, B(i) = (i - 173) \times 3, G(i) = 0, i = 173, 174, \dots, 225$$

为更好地显示出光谱的吸收特征,必须将光谱切面数据进行相对反射率转换,即将  $DN$  值转换为相对反射率值  $r$ ,即  $DN(i, j, b) \rightarrow r(i, j, b)$ ;再对  $r$  做包络线消除,得  $r'$  的取值范围为  $0 \sim 1.0$ ;为了显示的需要,将  $r'$  线性拉伸到  $0 \sim 255$ ,得到  $r''$ ,即  $r''(i, j, b) \rightarrow 225r'(i, j, b)$ 。

显示  $r''(i, j, b)$  能够直接反映出光谱的吸收特征。

### 1.3.2 光谱曲线

对于某一点的光谱特征最直观的表达方式就是二维的光谱曲线。如果已知某一点的反射率数据为  $r(i)$ ,  $i$  为光谱的波段序号,对应每一波段有光谱的波长数据  $\lambda(i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ 。用直角坐标系表示光谱数据,横轴表示波长,纵轴表示反射率,则光谱的吸收特征可以从曲线的极小值获得。在显示曲线时,必须将波段序号转换到光谱波长值,映射到水平轴上。如图 1-4 所示。

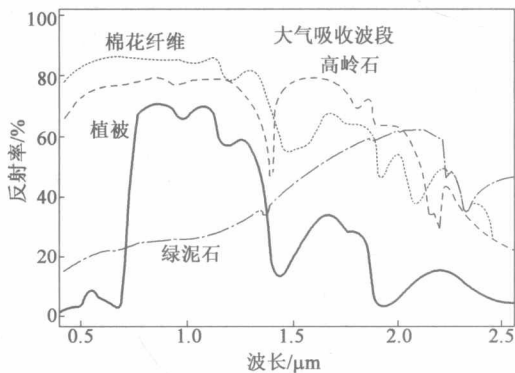


图 1-4 地物光谱曲线

由于成像光谱图像的波段数有限,光谱曲线只是一些离散的样点,通过这些样点再现光谱曲线需进行插值。最简单也最常用的插值方法是线性插值,即用折线连接样点构成光谱曲线。然而,这样连成的曲线不够光滑,特别是在波段数较少时尤为明显,如果要获得光滑的曲线就要采用三次样条插值或其他方法。

### 1.3.3 光谱曲面

二维光谱图只能表示某一像元地物的特征,反映的信息量较少,不利于对整个成像光谱、图像光谱特征的整体表达。为了同时表达出更多的光谱信息,选取一簇光谱曲线,构成三维空间的曲面,用投影方式显示在二维平面上,形成三维光谱曲面图。

三维光谱曲面用一般函数表示为:

$$r = f(x, \lambda) \quad (1-1)$$

式中  $x$ ——空间轴,例如沿扫描线方向或飞行方向;

$\lambda$ ——波长轴,对应于图像的波段;

$r$ ——反射率,可用  $DN$  值经反射率转换获得。

实际上  $f$  不是一个连续函数,只知道光谱曲面上的一些离散的点,即光谱曲面上的一些网格点,可用简单的线性插值法计算曲面上网格点以外的点。

在显示光谱曲面时,用直线段连接相邻的网格点就可以表达出光谱曲面的形状。为了在二维显示设备上表达三维的光谱曲面图,还需进行二维视图变换以及隐藏线、隐藏面消除等处理。

## 1.4 高光谱遥感的发展概况

### 1.4.1 高光谱遥感的仪器研制

1983年,世界上第一台成像光谱仪 AIS-1 (aero imaging spectrometer-1) 在美国喷气推进实验室研制成功,并在矿物填图、植被、化学等方面的应用中取得了成功,显示了成像光谱仪的巨大潜力。此后,先后研制的航空成像光谱仪有美国的机载可见光红外成像光谱仪 (AVIRIS)、加拿大的荧光成像光谱仪 (FLI) 和在此基础上发展的小型机载成像光谱仪 (AIS)、美国 Deadalus 公司的 MIVIS、美国 GER 公司的 79 波段机载成像光谱仪 (DAIS-7915)、芬兰的机载多用成像光谱仪 (DAISA)、德国的反射式成像光谱仪 (ROSI-10 和 ROSI-22)、美国海军研究所实验室的超光谱数字图像采集试验仪 (HYDICE) 等。其中, AVIRIS 的影响最大,是一台具有革命性意义的成像光谱仪,极大地推动了高光谱遥感技术及其应用的发展。

近年来,世界上一些有条件的国家竞相投入到成像光谱仪的研制和应用中来。而在航空高光谱成像仪的家族中,新的成员仍不断崭露头角。这些高光谱系统均基于新一代技术成就之上,因而在稳定性、探测效率及综合技术性能方面均有很大提高。其中,具有代表性的有澳大利亚的 HyMap、美国的 Probe、加拿大 ITRES 公司的系列产品以及美国 GER 公司为德士古 (TEXACO) 石油公司专门研制的 TEEMS 系统等。

中国成像光谱仪的发展也取得了长足的进步。研制的专题应用扫描仪有红外与紫外 (IR/UV) 扫描仪,可见光、中红外与红外 (VIS/MIR/IR) 三波段扫描仪;71 波段模块化航空成像光谱仪 MAIS;224 波段推扫式高光谱成像仪 PHI;128 波段的机载实用型模块化成像光谱仪 OMIS;中分辨率成像光谱仪 CMODIS;HJ-1-A 搭载的超成像光谱仪 HIS 等。

### 1.4.2 高光谱数据的分析技术

常见的高光谱数据的分析技术主要包括以下 6 个方面。

#### (1) 光谱微分分析技术

光谱微分分析技术包括对反射光谱进行数学模拟和计算不同阶数的微分值,以迅速地确定光谱弯曲点及最大最小反射率的波长位置。光谱的一阶、二阶和高阶微分可以消除背景噪声、分辨重叠光谱。

光谱微分分析技术主要用来消除大气的影 响,如程辐射(路径辐射)、大气透过率和太阳辐照度随波长的变化量等。通过对初始光谱微分,使这些量的影响趋于零,从而可以消除或抑

制它们对光谱带来的影响。

光谱微分分析技术可以用来提取植被生物化学成分信息。光谱微分除整数阶微分外,还可采用分数阶微分计算。

## (2) 光谱匹配技术

光谱匹配技术是对地物光谱和实验室测量的参考光谱进行匹配或地物光谱与参考光谱数据库比较,求得它们之间的相似性或差异性,以达到识别的目的。光谱匹配是遥感影像识别地物的一种方法,通过研究两个光谱曲线的相似度来判断地物的归属类别。两种光谱曲线的相似性常用计算的交叉相关系数及绘制交叉相关曲线图来确定。有时也采用编码匹配技术粗略识别岩石矿物的光谱。常用方法有以下几种。

### ① 二值编码匹配。

② 光谱角度匹配(spectral angle match, SAM):通过计算一个测量光谱(像元光谱)与一个参考光谱之间的“角度”来确定它们两者之间的相似性。

③ 交叉相关光谱匹配:通过计算一个测试光谱(像元光谱)和一个参考光谱(实验室或像元光谱)在不同的匹配位置的相关系数,来判断两光谱之间的相似程度。测试光谱和参考光谱在每个匹配位置(假设有  $m$  个波段)的交叉相关系数等于两光谱之间的协方差除以它们各自方差的积。

### ④ 聚类分析技术。

## (3) 混合光谱分解技术

混合像元分解指从实际光谱数据(一般为多地物光谱混合的数据)中提取各种地物成分(端元)以及各成分所占的比例(丰度)的方法。端元提取和丰度估计是混合像元分解的两个重要的过程。传统的混合像元分解方法,常用的有纯净像元指数法(pixel purity index, PPI)、N-FINDR、凸锥分析法(convex cone analysis, CCA)、顶点组分分析法(vertex component analysis, VAC)、最小二乘法等。

## (4) 光谱分类技术

光谱分类技术在高光谱遥感中是有效的识别方法之一。光谱分类技术常用的方法有最大似然法(MLC)、人工神经网络法(ANN)和高光谱角度制图法(spectral angle masppwe, SAM)。

## (5) 光谱维特征提取技术

特征提取是指对原始的光谱空间特征进行重新组合和优化,提取出最适合当前应用需求的新特征。因为高光谱数据具有波段多、波段间相关性高及数据冗余度高等特点,所以对高光谱遥感数据的特征提取具有特殊意义。遥感图像特征提取包含的内容非常广泛,提取方法也很多,光谱维特征提取和空间维特征提取是表现图像特征提取的两种主要方法。

特征是对象所表现出来的各种属性与特点。在遥感图像分析中,特征提取可以从两个意义上来实施:一种是按照一定的准则直接从原始空间中选出一个子集(即子空间),实践中的波段选择即属于此类;另一类是在原始特征空间和新特征空间之间找到某种映射关系  $P, P: X \rightarrow Y$ , 将原始特征空间  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  映射到维数降低了的特征空间  $Y$  中去,  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ ,  $m < n$ 。对于用于分类目的的特征提取,好的特征提取方法能使同类物质样本的分布具有密集性,即类内具有较好的紧致性,而不同类物质的样本在特征空间中能够隔离分布,即类间具有较好的分离性,从而为进一步分类打下良好的基础。

## (6) 模型方法

模型方法包括基于矿物和岩石的散射和吸收光谱性质模拟反射光谱的各种模型方法。因为成像光谱测量数据可以提供连续的光谱抽样信息以产生细微的光谱特征,故这种模型方法可以是确定性的而不是统计性的方法。高斯改进模型(MGM)是最近几年为分析反射光谱而发展起来的一种分析技术。这种分析技术与其他曲线拟合模型相比,算法上有扎实的理论基础,因而能提供更有效更可靠的分析结果。

### 1.4.3 高光谱遥感的应用

由于高光谱图像具有很高的光谱分辨率,因而能够提供更为丰富的地物细节,有利于地物的物理化学特性反演。高光谱遥感已经在各方面显示出巨大的应用潜力,已受到国内外专家学者的广泛关注,今后必将在以下诸多领域发挥越来越重要的作用。

#### (1) 海洋遥感

由于中分辨率成像光谱仪具有光谱覆盖范围广、分辨率高和波段多等许多优点,因此已成为海洋水色、水温的有效探测工具。它不仅可用于海水中叶绿素浓度、悬浮泥沙含量、某些污染物和表层水温的探测,也可用于海水、海岸带等的探测。

由于海洋光谱特征是海洋遥感的一项重要研究内容,各国在发射海洋遥感卫星前后都开展了海洋波谱特征的研究,包括大量的海洋光谱特征测量研究。早期的海洋遥感应应用,所使用的传感器波段少,已满足不了现代定量遥感应用研究的需要。随着中分辨率成像光谱仪的应用,不仅促进了高维数据分析方法的研究,也将促进海洋高光谱特性研究的发展。它可以使人们更准确地了解海洋光谱结构,识别在海水中不同物质成分的光谱特征,掌握近岸水域光学参数的分布、变化规律,为海洋遥感应用和海洋光学遥感器的评价提供可靠的依据。

① 赤潮监测。陆源污染物大量排入海,造成海水的富营养化,在一定的水温、盐度条件下,引起海水表面浮游生物的大量繁殖和聚集,从而引发赤潮。赤潮水体与正常海水的光谱都包含两个反射峰(570~590nm、680~720nm)和一个吸收峰(650~670nm),分析成像光谱数据,可以排除大气干扰,区分和探测特定藻类的色素,识别赤潮生物优势物种,对海洋灾害(如赤潮、海面溢油、河口污染等)进行监测。已有实验结果表明,成像光谱技术在海洋灾害和环境监测等方面具有广泛的应用前景。

② 绿潮监测。自2007年以来,黄海海域每年都会发生绿潮灾害,2008年青岛爆发的绿潮灾害更是严重影响了第29届国际帆船赛的顺利进行。绿潮的大规模爆发会遮挡阳光,消耗海水中的氧气、阻塞海上航道、导致水体恶化,还会影响观光旅游业、造成环境次生灾害等,导致一系列生态问题。王宁等(2013)以MODIS光学影像,利用两个阈值的方法对绿潮覆盖面积进行提取;辛蕾等(2014)以空间分辨率30m的环境卫星数据提取的覆盖面积为“真值”,建立与MODIS混合像元分解所提取覆盖面积相关的模型,为绿潮监测提供了技术参考。

#### (2) 植被研究

植被中的非光合作用组分用传统宽带光谱无法测量,而用高光谱对植被组分中的非光合作用组分进行测量和分离则较容易实现。因此,可以通过高光谱遥感定量分析植被冠层的化学成分,监测由于大气和环境变化引起的植物功能的变化。植被应用方面还有许多成功的实例,如作物类型识别、森林树种识别、植被荒漠化研究、植被水分含量、植被光合色素、植物碳氮比、植被氮磷钾含量等。

#### (3) 精准农业

土壤的水分含量、有机质含量、土壤粗糙度等特性是精准农业中重要的信息,而传统遥感

技术无法提供这些信息。高光谱遥感凭借其极高的光谱分辨率为精细农业的发展提供了技术保障和数据来源。高光谱遥应用于精准农业已经有许多成功的例子,如刘卫东(2002)利用高光谱提取了土壤信息。利用高光谱遥感技术,可以快速精确地获取作物生长状态及环境胁迫下的各种信息,从而相应调整投入物质的施入量,达到减少浪费、增加产量、保护农业资源和环境质量的目。高光谱遥感是未来精准农业和农业可持续发展的重要手段(张良培,2011)。赵春江等(2001,2002a,2002b,2003a,2003b)对不同品种、水肥条件下的冬小麦作了专项研究,研究了光谱红边位置与叶面积指数、叶绿素、叶片氮含量的关系,分析了水、氮肥条件变化对不同生长阶段小麦的影响,尤其是对小麦籽粒中蛋白质的影响,利用红边振幅推算叶片全氮含量或叶绿素总量,探索预测小麦粗蛋白含量的方法,在小麦按质收购方面具有应用价值。刘云良等(2004)应用高光谱数据反演小麦的生化组分,诊断小麦的营养状况,也为精细农业研究奠定了基础。张凤丽等开展环青草湖草场生态质量监测研究,系统分析了天然和人工草场的最佳分类时相、最佳分类方法以及最佳波段。

#### (4) 地质调查

地质是高光谱遥感应用中最成功的一个领域。例如,利用航空高光谱数据进行地质填图和岩石鉴别,可以识别出地表不同矿物质的诊断特性。因为一般矿物质的光谱吸收峰宽度为30nm左右,只有利用光谱分辨率小于30nm的传感器才能够识别出来。高光谱遥感已经在地质领域扮演着重要角色。王青华等仔细分析了用国产光谱仪MAIS获取的河北省张家口地区的高光谱遥感数据,指出可以借助高光谱丰富的光谱信息,依据实测的岩石矿物波谱特征,对不同岩石类型进行直接识别,达到直接提取岩性的目的。

#### (5) 大气与环境遥感

大气中的分子和粒子成分在太阳反射光谱中有强烈反应,这些成分包括水汽、二氧化碳、氧气、云和气溶胶等。常规宽波段遥感方法无法识别出由于大气成分的变化而引起的光谱差异,高光谱由于波段很窄,因此能够识别出光谱曲线的细微差异。

#### (6) 城市下垫面特征与环境研究

由于人类活动,城市下垫面特征与环境显得异常复杂,同物异谱、同谱异物及混合像元现象也非常严重;而高光谱遥感的发展使得人们有能力对城市地物的光谱特性进行深入研究,可以通过对高光谱数据进行处理,得到城市地物的光谱成分,为城市遥感分析及制图提供基础。

#### (7) 军事侦察与识别伪装

根据目标光谱与伪装材料光谱特征的不同,利用高光谱技术可以从伪装的物体中自动发现目标。在调查武器生产方面,超光谱成像光谱仪不但可探测目标的光谱特性、存在状况,甚至可以分析其物质成分。根据工厂产生烟雾的光谱特性,直接识别其物质成分,从而可以判定工厂生产武器的种类,特别是攻击性武器。

#### (8) 其他方面

诸如自然灾害监测、林业遥感、宇宙和天文学等领域,高光谱遥感都有着广阔的应用前景。随着科学技术的不断进步,高光谱遥感的应用领域将会进一步拓宽,在各个领域的影响也会进一步扩大。