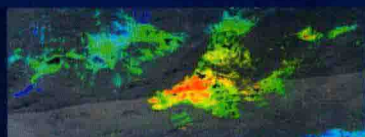
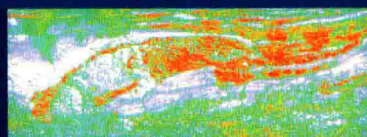
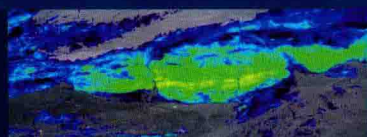


高光谱矿物填图及示范应用

甘甫平 熊盛青 王润生 闫柏琨 等 著



科学出版社

高光谱矿物填图及示范应用

甘甫平 熊盛青 王润生 闫柏琨 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对高光谱遥感技术在应用中存在的一些技术关键和工作方法问题,围绕矿物识别与地质应用这一核心内容,较为系统地研究了矿物尺度与岩石尺度上矿物光谱的可识别特征、岩矿中主导光谱特征以及主导特征光谱矿物,为高光谱像元尺度的矿物识别与高光谱地质应用技术奠定了试验与理论基础;针对不同的地貌景观,利用航空和航天高光谱数据开展了矿物识别、地质应用模型、矿化信息提取研究和高光谱数据处理系统开发;针对国土资源地质主业务,开展了高光谱面积性矿物填图、裸露区找矿应用和矿山环境污染调查应用示范研究,以及深空探测示范应用,建立了高光谱地质应用工作程式,编写了高光谱地质应用技术指南,从整体上推进了高光谱技术的产业化、工程化和业务化运行的进程。

本书可供从事相关专业的生产、教学和科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

高光谱矿物填图及示范应用/甘甫平等著. —北京:科学出版社, 2014. 10
ISBN 978-7-03-042246-0

I. ①高… II. ①甘… III. ①光谱分辨率-光学遥感-应用-矿物分析-地质填图 IV. ①P575.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 245546 号

责任编辑:杨 红 / 责任校对:胡小洁

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚德则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年10月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年10月第一次印刷 印张:16 7/8 插页:4

字数:425 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书编写人员名单

甘甫平 熊盛青 王润生 闫柏琨 刘圣伟
姚国清 张宗贵 周 强 杨苏明 王青华

前 言

高光谱技术的兴起和发展,实现了遥感利用地物细分光谱的“指纹效应”直接进行地物属性识别与信息量化提取的新局面,增强了遥感对地观测能力和对地物的鉴别能力,促使遥感由对地物的鉴别发展到可对地物或对地物组分进行直接识别,并使遥感的工作方法也相应发生了突破性的变化,可以基于地物谱特征实现利用宏观的手段对微观地物的识辨,定量分析地球表层生物物理化学过程。在国土资源调查中,高光谱以其对地物的精细识别而具有广泛的应用能力,它不仅在基础地质研究、矿产资源评价,土壤土质调查、土质退化(沙漠化和盐碱化)监测、矿山土地利用和环境监测,固体和水体的污染调查和监测等领域发挥重要作用,而且已经扩展到植被生态、海洋海岸水色、冰雪、土壤以及大气的研究与应用中。同时,高光谱在宇宙天体物质成分的研究和军事应用上也具有重要的地位。高光谱为国家经济发展规划快速并精确地提供基础信息与决策知识,确保国民经济的协调与稳健发展。

高光谱技术的发展,可以直接地识别出矿物种类、矿物相对含量和矿物组成成分,减少或降低传统地质工作中可能因地质路线或地质采样的部署等而漏掉的一些主要地质现象;并可从所提取的地质信息所蕴涵的矿物共生组合规律以及矿物自身的地质意义指示作用出发,反演地质因素之间的内在联系,再现地质成生环境,提高高光谱在地质应用中的分析能力和解决地质问题的效能。因此,高光谱技术的发展、矿物识别种类的增加,以及地质成因信息定量探测能力的提高、矿物识别精度的极大改善,将使高光谱遥感成为地质工作的重要和必要的技术手段。高光谱应用技术研究的深入发展,不仅为深化地质学的基础研究、推动遥感地质填图从岩性填图到矿物填图以至流体填图、提高矿产资源与地质环境遥感调查评价的精准度提供了新技术支持,而且有力地促进了高光谱技术在国土资源大调查和西部大开发中的推广应用,为全面提升高光谱遥感技术的应用能力和发展潜力,加速遥感地质实用化、智能化和产业化的进程奠定了良好基础。

本书针对高光谱在地质领域的全面推广应用的目标,以重要成矿区带中的典型矿床为主,以点带面,从矿物种类识别到面积性矿物填图,重点研究高光谱面积性填图技术方法,着重解决高光谱地质应用实用化中的一些技术关键和工作方法问题,系统总结高光谱地质信息提取与应用工作程式,将我国的高光谱技术由试验应用研究逐步推向实用,提升遥感地质的定量化水平,增强高光谱数据矿物识别的智能化、自动化、规模化以及批处理能力,实现高光谱技术的“高科技”开发、“低门槛”应用和“低风险”运行,为中西部、边远地区以及境外地区新一代的地质填图、矿产资源勘探以及地质环境监测等的开展提供高水平的遥感技术支撑。

为充分发挥高光谱对矿物信息的识别能力,实现高光谱遥感在地质领域的多层次应用,本书系统分析归纳了矿物光谱可识别特征,开展了矿物光谱和地质成因的关联分析,设计与发展了基于特征谱带的矿物分层谱系识别技术、基于混合组成的极大相关识别以及混合组成多端元的线性拟合识别方法,解决了一些常用技术方法中端元选取与鉴别的困难,开发了高光谱矿物识别系统,为高光谱矿物的定量识别提供了有用的新工具,基本实现了高光谱遥感技术矿物识别的自动识别和批处理能力。以矿物学信息为核心,建立了高光谱地质反演模

型；结合成矿理论和成矿系统，突破了以蚀变矿物种类找矿的单一手段，从矿物学信息综合的角度，建立了具有普遍意义的高光谱找矿预测模式，并利用该模式在西藏驱龙地区圈出了铜成矿远景区4处（已得到了实际的验证），在甘肃柳园圈定了8处远景区；并在不同的地理景观区（干旱裸露区——新疆东天山和甘肃柳园、高寒山区——西藏驱龙、植被高覆盖区——江西德兴）开展了示范应用，并拓展到月球和火星等深空探测领域。立足于高光谱应用技术集成，建立了高光谱地质应用工作程式，系统总结了一套完整的高光谱面积性矿物填图技术流程，编制了《航空高光谱地质勘查技术指南（试用稿）》，使高光谱技术初步具备了业务化和规模化应用的能力。

在研究中，尽可能地将科研以及科研成果的应用转化集于一体。对于技术方法的研究，不仅给出其原理，也给出了应用的具体过程和必要的步骤，并开发了实用的处理模块和应用系统软件，初步实现了矿物识别的流程化、批处理和智能化；对于找矿模式，不仅从成矿理论进行了讨论，更重要的是从高光谱地质信息反演的角度给出了详细的实施方案和必要的案例剖析，使其更加具有普遍意义；对于面积性矿物填图，不仅从数据预处理、影像制图与高光谱信息制图的角度进行分析，而且还从矿物识别的角度给出了必要的处理过程和可供选择的技术流程与方案，最终形成面积性矿物填图流程。总之，本书不仅注重基础理论研究，还强调应用技术方法的开发，使研究结果能及时地转化为生产，以推动我国高光谱技术地质应用的产业化和工程化进程。

本书共8章。其中前言、第一章第一节和第二节、第二章、第三章第一节和第二节、第四章第五节、第五章由甘甫平编写，第一章第三节、第四章第一节由王润生编写，第三章第三节、第六章第三、四节和第六节由闫柏琨编写，第三章第四节由刘圣伟编写，第七章由姚国清编写，第四章第二节和第三节由甘甫平和周强编写，第四章第四节、第六章第二节由甘甫平和王润生编写，第六章第一节由甘甫平、张宗贵、王青华、杨苏明等编写，第六章第五节由甘甫平和刘圣伟编写，第八章由熊盛青、甘甫平、王润生编写，附件由甘甫平、闫柏琨、王润生、张宗贵、杨苏明、王青华、周强编写，附图由杨苏明修饰完善。全书由甘甫平、熊盛青和王润生统编定稿。

本书是在国土资源部“十五”重点科技项目（资助号：2002206）、国家高新技术发展计划（资助号：2001AA136020-4、资助号：2006AA06A208-1）等研究成果的基础上编写而成的。在研究过程中，中国地质大学（北京）程伟涛硕士参与了第三章第二节的研究工作，中国地质科学院矿产资源研究所张作衡研究员和中国地质图书馆李万伦高级工程师提供了有关研究区的地质资料，中国地质大学（北京）刘肖姬硕士对参考文献进行了整理，在此一并表示衷心的感谢。

本书涉及研究内容较多，限于我们的研究水平，不足之处在所难免，敬请读者给予批评指正。

如需正文中的彩图，请发邮件至 dx@mail.sciencep.com 索取，或直接与作者联系 fpgan@aliyun.com。

作 者

2014年8月

目 录

前言	
第一章 高光谱地学应用的技术关键	1
第一节 高光谱技术应用发展趋势	1
第二节 高光谱识别与矿物填图技术方法	3
第三节 高光谱地质应用的技术关键	10
第二章 数据源及其特征	12
第一节 高光谱数据	12
第二节 地物光谱数据	14
第三章 矿物光谱可识别性特征研究	16
第一节 矿物光谱填图基础	16
第二节 岩石混合光谱主导性矿物研究	19
第三节 矿物光谱混合特性及光谱解混试验研究	25
第四节 岩矿光谱的矿物成因学分析	41
第四章 矿物填图技术方法研究	56
第一节 光谱端元的选择与提取	56
第二节 混合组成的极大相关识别	61
第三节 混合组成多端元的线性拟合	69
第四节 矿物谱系识别	73
第五节 矿物学信息提取	80
第五章 地质应用反演模型与应用模式	87
第一节 应用模型	87
第二节 高光谱找矿预测模式与流程	93
第三节 高光谱应用技术集成与工作程式	106
第六章 高光谱矿物填图应用示范	114
第一节 面积性矿物填图示范	114
第二节 西藏驱龙找矿应用示范	133
第三节 甘肃柳园找矿应用示范	143
第四节 新疆东天山土屋矿区成因分析应用示范	163
第五节 德兴铜矿矿山环境污染调查示范	183
第六节 深空探测应用示范	193
第七章 高光谱矿物识别系统开发与集成	209
第一节 系统架构与运行环境	209
第二节 功能开发	211
第三节 系统集成	220

第八章 结语与讨论.....	224
第一节 结论.....	224
第二节 存在的问题与不足.....	225
第三节 研究建议.....	226
参考文献.....	228
附件 航空高光谱地质勘查技术指南（建议稿）	237
附图	

第一章 高光谱地学应用的技术关键

第一节 高光谱技术应用发展趋势

高光谱技术是对地观测高技术之一，在地学领域具有广泛的应用前景。随着我国经济的高速增长，城市化水平的不断提高，资源枯竭、环境污染与破坏等问题也日趋严重，在这种条件下，高光谱技术将发挥重要的作用，并将带来显著的经济与社会效益。目前，该技术已开始应用到地质与矿产资源调查、环境污染与生态监测和防治、土地资源和水资源利用与管理等领域。高光谱技术的发展已使或正在使地学研究的范围、尺度、内容和研究方法发生革命性的变化，其与 GIS、GPS 技术的结合，为地学研究源源不断地提供高精度定位、高频率、多频谱不同级次的宏观影像，极大地拓宽了人类的视野和视觉能力，使人类真正能够从总体上把地球作为一个统一的系统加以分析，在不同级次上揭示地球各个圈层的相互联系和相互作用。归纳起来，目前高光谱技术应用发展存在五大趋势。

1. 遥感技术正朝高光谱与高空间分辨率以及大幅宽方向发展，促使遥感信息的精细识别以及遥感应用不断朝综合化、模型化方向发展

美国的科学家通过对 AVIRIS 数据所进行的一系列研究，包括低空和高空试验飞行后认为，20m/pixel 的空间分辨率能够对岩石矿物进行一定程度的识别，但是对更为精细信息（如植株信息）的探测却较为困难。同时，高光谱仪幅宽普遍较窄（含星载数据），以致重复飞行造成飞行成本较高。因此随着高光谱应用技术的不断深入，以及对地物精微特征探测的需求，传感器更加趋向于朝高光谱分辨率（光谱采样间隔达几纳米以至更小，波段数越来越多）、更高空间分辨率（可达 1m 乃至更小）以及更大幅宽的方向发展。

20 世纪 90 年代以来至 21 世纪初，高光谱技术已经由试验研究逐步走向商业化运营，其全球研究所需空间分辨率大致锁定在 30m/pixel。而军事和商业运营空间分辨率趋向几米以至更小，数据获取幅宽也极大地提高，光谱分辨率也呈线性增长（图 1.1）。利用高光谱仪所获取的海量数据，可以提供更为精细的地表信息，实现采用宏观手段对地表微观特征进行识别与研究，使人们可以在不同领域（如矿产资源探测、自然灾害、森林生态以及精准农业等）分别得到相关的、丰富的地物内在信息，从而从物质的内在本质进行宏观把控、可持续管理等；这样也促使地学研究将空间尺度的信息与地学机理有机结合，实现遥感地学应用的综合与模型化。

2. 高光谱传感器不断推陈出新，促使遥感技术不断向网络化、系统化与工程化发展

一些国家，尤其是一些发达国家（如美国）从 20 世纪 70 年代末至 80 年代初提出成像光谱遥感概念模型，并着手研制高光谱仪（成像光谱仪），目前已经形成涵盖不同空间以及不同光谱波段区域的立体网络化高光谱遥感技术体系。例如，美国以其雄厚的资金与技术，一直引领着世界成像光谱技术的发展，在各个领域均有所突破；拥有机载成像光谱仪 AVIRIS、Probe-1、MASTER、SEBASS 等，以及在轨运行的 EO-1 卫星中的 Hyperion、正在积极研制的星载 NEMO（COIS）和发射失败的 Orbview-4（Warfighter）的后续星等，相继形成覆盖不同光谱区域、不同高度的成像光谱遥感技术网络体系，促使高光谱遥感技术

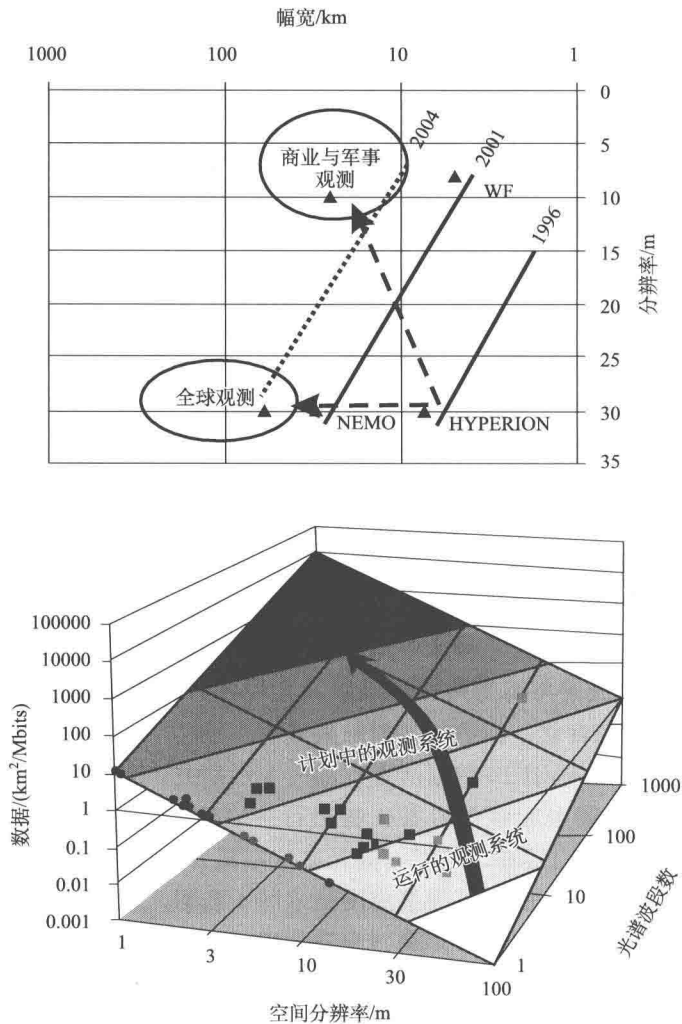


图 1.1 全球成像光谱技术发展趋势 (<http://col.gov>)

不断朝工程化、系统化与产业化方向深入发展，并充分为美国的社会安全、资源探测与评估、环境监测与治理等提供不同层次的成像光谱数据。其他一些国家也相继研制了各自的系统，如澳大利亚已成功运营的商业性机载 HyMap 和加拿大商业性机载 CASI (CASI-2)、德国正在研制的星载成像光谱仪 EnMAP 以及意大利的已经进行生产化的机载 MIVIS 等形成各自的特色。

3. 新的思维与技术方法不断涌现，促使遥感数据处理模块与软件的业务化、商业化

许多国家都做了大量航空飞行试验、方法研究和应用示范工作，在数据获取、辐射定标、光谱重建、数据处理、地物识别等方面取得了很大的进步，发展了多种辐射校正、光谱重建、波形分析、光谱识别、定量反演等方法；在地质制图、固体矿产和油气勘查、大气探测、植物长势监测和农业估产、环境监测、海水有机物探测等方面都取得了明显成效。近年来，各种新理论和新思维不断被引入到高光谱数据处理中：MIA 分析方法强调了多维数据的可视分析思想；证据推理及专家系统方法进一步强化了经验和知识在数据处理中的参与与应用；小波、分维、神经网络、并行处理等技术的应用研究也已广泛开展。所有这些都有力推动了数据处理和识别分类技术的不断发展。

在高分辨率遥感数据处理与分析软件开发方面,一些商业软件(如 ENVI 处理系统)具有专用的光谱分析工具包(ENVI spectral analyst),具有主组分变换、非监督神经网络分类、光谱角分类技术、亚像元分解算法以及亚像元目标检测算法、光谱匹配滤波等功能。ERDAS 在已有成像光谱图像处理功能的基础上,又增加了异常和目标探测、矿物填图和矿物识别等处理工具。AIG(analytical imaging and geophysics)已经开发完成了 HGPS 系统(hyperspectral product generation system),即以大规模成像光谱数据处理为目的的“流水线处理”。科罗拉多大学开发的 SIPS(光谱图像处理系统)软件,包括了如光谱角制图等方法进行图像光谱和参考光谱(可来源于光谱库、野外目标测量或图像光谱)的相似性填图。利用最小噪声分量(MNF)变换的矿物和植被制图,以及利用像元纯度指数(PPI)的空间数据缩减、端元选取和识别及混合谐波匹配滤波(MTMF)填图,现已被应用于如 HyMap 等高光谱遥感数据的处理。

4. 矿物识别技术手段与方法日趋实用化,在资源环境领域日益受到重视,经济效益日趋显著

在矿产与能源勘查领域,高光谱技术日益受到国外各大矿业公司的重视。其作用主要体现在以下两个方面:第一,随着矿产勘查难度的增大,高光谱技术正逐步进入勘查前期的主流流程,用以缩小找矿靶区,提高勘查效率和减低勘查风险。例如,利用 HyMap 数据在澳大利亚阿德莱德地槽白云岩地层中区分识别出了菱镁矿矿床(Keeling and Mauger, 1998);利用澳大利亚西部和南非金伯利南部 Pilbara 地区 HyMap 数据对与金矿化关系密切的叶蜡石进行了识别填图,并由此发现了新的矿化远景区,实地验证表明该地区确实存在 Au 元素异常($0.3\text{ppm}^{\text{①}}$)(Phil et al., 1999);在澳大利亚西部 Pilbara 地区 Zn-Cu 火山块状硫化物矿床利用 HyMap 数据进行了蚀变矿物填图,确定出热液流体运移模式,并以此可以确定热液流体中金属卸载部位并确定成矿远景区(Cudahy and Okada, 2004)。第二,普遍关注由采矿活动引起的环境污染问题,充分利用高光谱技术直接对矿山开发环境进行评估和监测。例如,利用 AVIRIS 数据对亚马孙河流域原生酸化物(acid-generate)与次生酸化物(acid-buffering)进行识别与制图(Dalton et al., 2000)。

5. 直接为不同层次用户提供终极产品

随着高光谱预处理技术与信息提取技术的进一步发展,将来的高光谱技术可以将算法与应用模型等嵌入传感器中,直接向不同应用层次的用户提供所需要的产品,及时快速满足用户的应用需求,为用户省去许多不必要的中间环节的处理与研究。例如,MODIS 的运行方式可以向不同的用户提供诸如云产品、气溶胶、温度产品以及海洋水色产品等,直接利用 ASTER 数据可以获取温度和高程数据产品等。这也是高光谱遥感未来的应用模式,直接为用户提供丰富多彩的信息产品,满足不同层次用户的需要。

第二节 高光谱识别与矿物填图技术方法

遥感矿物识别和矿物填图主要依赖于高光谱分辨率数据,即高光谱或成像光谱数据。岩石的光谱特征是矿物识别的理论基础。反射和吸收是岩石、矿物与电磁波相互作用的两种主要形式或过程,其本质上都可归结于与其物质组分、内部晶格结构等有关的电子过程或分子

^① $1\text{ppm}=10^{-6}$

振动过程,是岩矿物理化学性质的外在反映。

在可见-反射红外 ($0.4\sim 2.5\mu\text{m}$) 光谱区间,遥感探测的主要是岩矿的反射光谱,探测的光谱特征是矿物晶格的电子过程(包括晶体场效应、电荷转移、导带、色心等)或分子振动过程的倍频、合频和差频(Hunt, 1989),能识别的矿物有铁、锰等过渡元素的氧化物和氢氧化物,含羟基的硅酸盐矿物、碳酸盐矿物和部分水合硫酸盐矿物。

在中热红外 ($3\sim 40\mu\text{m}$) 区间,遥感探测的主要是岩矿的发射光谱,探测的光谱特征是矿物晶格分子振动过程的基频(Hunt, 1989),能识别氧化物、氢氧化物、架状硅酸盐、岛状硅酸盐、单链状硅酸盐、层状硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐等众多矿物种类。

1. 遥感矿物光谱识别方法分类

从岩矿信息提取的深度和定量化程度,遥感矿物光谱识别可分为三大层次:①矿物种类及矿物组合识别,即识别矿物的种类或矿物组合;②矿物丰度反演,即反演矿物的丰度或相对含量;③矿物成分反演,即反演矿物的化学成分。识别层次越高,识别越精细,定量化程度越高。

高光谱矿物识别的基本原理是高光谱遥感数据的重建光谱与矿物标准光谱或实测光谱的定量比对分析。从岩矿信息提取的角度分析,国内外发展的光谱识别方法从本质上可归纳为两大类型:①以重建光谱与标准光谱相似性度量为基础的光谱匹配方法;②以矿物学和矿物光谱知识为基础的智能识别方法。

光谱匹配是将重建光谱与参考光谱相比较,以某种测度函数度量它们之间的相似性或相关性程度,从而对矿物进行识别。相似性测度函数可以是距离函数(欧氏距离、马氏距离)、相似系数、相关系数、光谱信息散度、光谱矢量夹角等。参考光谱可以是光谱数据库中的标准光谱或典型光谱,或在野外和实验室实测的工作区岩矿光谱,也可以是从图像中提取的已知区的图像光谱。

按匹配时所利用的数据,光谱匹配可分为直接匹配和间接匹配两大类型。直接匹配是直接利用重建光谱与参考光谱数据进行匹配。间接匹配方法不直接使用原始光谱数据作匹配,而是对光谱数据作编码或变换,利用编码和变换后的数据作匹配,如光谱编码匹配(Jia and Richards, 1993)、光谱傅里叶频谱的振幅和相位(李旭文, 1992)、小波和分维数(李加宏和秦勇, 1996; Qiu et al., 1999)等匹配方法。

按所利用的光谱特征,光谱匹配可分为整体光谱匹配和局部光谱匹配。整体光谱匹配是指以全部光谱区间或某一光谱段的整体光谱相似性测度为基础的匹配,利用了光谱区间上光谱的整体特征,如光谱角填图、光谱相关填图等方法。整体光谱匹配利用了整个光谱的形状的特性,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,且对矿物光谱的微小差异不够敏感。局部光谱匹配仅使用诊断性光谱吸收谱带特征,以吸收谱带参量为基础,使用的特征包括谱带的形态、位置、宽度、深度和对称度等。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。

按所检测的目标,光谱匹配又有全像元匹配和亚像元匹配之分。全像元匹配以像元为单位,检测像元中是否存在目标物质(矿物)以及其与其他像元相比的相对含量;相应地,试图探测较像元尺寸小得多的物质在像元中的含量或在像元中所占比例的方法,则属于“亚像元方法”,代表性的方法有混合像元分解和光谱匹配滤波。

2. 常用的光谱相似性测度与整体光谱匹配算法

常用的光谱相似性测度和整体光谱匹配算法主要有：欧氏距离（Euclidian distance, ED）及基于欧氏距离的相似指数（similarity index, SI）方法（Fenstermaker and Miller, 1994）。欧氏距离以像元光谱与已知区光谱集群中心（平均值）在高维光谱空间中的距离作为光谱的相似性测度。欧氏距离与波谱强度的关系密切，地物波谱的强度本身变异性较大，且受照度、地形、环境因素的影响显著，稳定性较差。因而该法仅适用于与已知区像元光谱的比较，实际上是一种图像监督分类方法。

光谱角制图（spectral angle mapping, SAM）技术（Yuehas et al., 1992）以高维空间中像元光谱矢量与参考光谱矢量之间所张的角度作为相似性度量。当像元光谱与参考光谱矢量都为单位矢量时，光谱角与欧氏距离有关系： $ED = 2 \sin(SAM/2)$ ，因而光谱角实际上也是一种距离测度，它与欧氏距离的区别是仅考虑光谱形状或光谱特征的相似性，而不考虑光谱矢量长度，即光谱强度的影响，从而得到更普遍的使用。

SAM 使用光谱矢量的绝对值作匹配，不能区别正、负相关或相似性。为此，Carvalho Jr 等对 SAM 方法作了改进，以皮尔逊相关系数（Pearson's correlation coefficient）代替光谱角作为光谱的相似性测度，称为光谱相关填图（spectral correlation mapper, SCM）方法（Carvalho Jr and Menese, 2000）。SCM 的值域为 $[-1, +1]$ ，较 SAM 能更有效地压制阴影、照度等识别的影响，减少 SAM 因不能区分正、负相关而带来的误判。

光谱信息散度（spectral information divergence, SID）是基于光谱信息测度（spectral information measure, SIM）的以目标光谱与参考光谱之间光谱概率分布的距离表征光谱相似性的参量（Chang, 2000；Du et al., 2004；Van der Meer, 2006）。

交叉相关光谱匹配（cross correlogram spectral matching, CCSM）考虑到可能存在的光谱波段波长位置的漂移问题，通过光谱轴的相对平移，使像元光谱和参考光谱在不同光谱位置（波段位置）进行匹配，计算每个匹配位置上对应光谱段的线性相关系数（交叉相关系数），绘制交叉相关曲线图（correlogram），用 t 检验法检验其相关的显著性。以交叉相关系数的最大值、交叉相关曲线的偏度（skewness）作为相似性指标度量其相似性，识别端元矿物（Van der Meer and Bakker, 1997）。

Van der Meer (2006) 以浅成低温热液金矿床典型蚀变矿物明矾石、高岭石、蒙脱石、石英的光谱模拟生成的由内到外呈同心圆状分布的图像（601 个波段，光谱采样间隔 1~2nm）和 Cuprite 地区的 AVIRIS 图像为实验数据，以光谱识别概率（probability of spectral discrimination, PSD）和光谱识别能力（power of spectral discrimination, PWSD）作为评判的可分性指标，分析比较了 ED、SAM、SCM 和 SID 4 种光谱相似性测度对识别这四种矿物的有效性。

3. 基于诊断性光谱吸收谱带特征参量的局部光谱识别

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 ）、深度（ H ）、宽度（ W ）、斜率（ K ）、面积（ A ）、对称度（ S ），等等（Clark et al., 1990）。谱带的波长位置（ P ）是吸收谱带的谷底（极小值点）所对应的波长；波段深度（ H ）为谱带极小值点与谱带两侧肩部连线的距离；宽度（ W ）定义为吸收谱带半极值的宽度；斜率（ K ）定义为谱带两侧肩部连线的角度；面积（ A ）是指谱带曲线与两侧肩部连线所围图形的面积；对称度（ S ）为谱带左右两部分的对称程度的度量，可用左半部分面积与总面积 A 之比或左肩部距谷底的波长宽度与谷底波长之比表示。代表性的方法有光谱特征拟合

(spectral feature fitting, SFF)、光谱吸收指数 (spectral absorption index, SAI)、吸收谱带定位分析 (analysis of absorption band positioning, AABP) 等。

光谱特征拟合是选择包含目标矿物特定吸收谱带的光谱区间, 利用最小二乘拟合方法, 比较像元光谱与目标光谱吸收特征的整体形态和吸收深度 (Clark et al., 1990)。

光谱吸收指数定义为“非吸收基线”(谱带两肩部的连线)在谱带的波长位置处的反射强度与谱带谷底的反射强度之比(王晋年等, 1996)。SAI 实际上是谱带深度的另一种度量方式, 可称为“相对吸收深度”。它用谱带谷底的光谱强度对吸收深度作归一化, 因而减少了照度等的变化所带来的干扰, 增强了对地物的区分能力。

SFF、SAI 等方法都强调对单个吸收特征的分析, 但在实际应用中, 分离位置较接近的谱带一般比较困难, 特征相似的谱带有时也很难加以区分, 特别是由于混合光谱的影响, 一些谱带往往呈复合谱带或过渡状态出现, 在信噪比较低时, 单个谱带的特征更加难以识别。而谱带的光谱位置一般受影响较小。吸收谱带定位分析方法即是确定和提取各吸收谱带的较精确的位置, 形成相应谱带波长图像, 通过对谱带波长图像的分析, 识别和区分不同的矿物 (Junior et al., 2001)。

谱带特征分析方法一般都在分析之前先将波谱数据作连续统 (continuum) 去除, 然后从连续统去除后的数据中提取谱带参量, 进行矿物识别 (Clark and Roush, 1984; Kruse et al., 1985; Clark et al., 1995)。连续统是一个数学函数, 可以理解为是光谱曲线的包络线或外壳, 是连接光谱曲线上的局部最大值点外凸的曲线, 相当于与感兴趣的光谱吸收特征无关的背景。

4. 以矿物学和矿物光谱知识为基础的智能识别方法

智能识别方法是以矿物学和矿物光谱知识为基础, 选取合适的具有诊断性的光谱特征或具有鉴别能力的光谱参量, 建立识别规则, 对矿物进行识别。利用的光谱特征或参量可以是整个光谱的相似性测度, 如与标准光谱的匹配度或匹配率, 也可以是特定的谱带参量, 或两者同时使用 (Kruse and Lefkoff, 1993; Kruse et al., 1993)。识别规则一般取“if-and-then”的形式。规则可以有三种表达方式: ①唯一性判别 (存在性判别), 即某种条件满足时则可认为某种矿物存在; ②否定性判别, 即某个或某些特征出现时, 某种矿物一定不会出现; ③似然性判别, 根据条件确定待识别矿物出现的可能性。智能识别方法应用了全光谱匹配和特征谱带识别相结合的方法, 综合了上述两类方法的优点, 并结合专家系统方法建立识别规则, 提高了识别的可靠性和自动化程度。

智能识别系统最有代表性的是美国地质调查局提出和发展的 Tricorder 系统 (Clark et al., 2003), 它综合应用光谱特定谱带参量和光谱的相似性测度, 将去除连续统的参考光谱与重建光谱的特征谱带以最小二乘法作拟合和形状匹配, 以特征吸收谱带的拟合度、诊断吸收谱带处连续统的大小和坡度以及辅助光谱特征为判别指标进行综合判别, 识别矿物的种类和正确率都比较高, 可识别 40 余种矿物和植被、水体、冰雪等地物。

甘甫平和王润生 (2004) 分析了矿物光谱的变化规律, 评价了光谱参量的敏感性与稳定性, 认为现有的矿物识别方法将每种矿物都看成是彼此孤立互不联系的个体, 识别中对所有矿物又都应用同一种度量标准。实际上, 不同光谱特征参量对矿物的鉴别能力和敏感性是不同的, 光谱的主谱带和谱带组合特征是最重要的具有鉴别意义的特征。在矿物识别中, 应赋予这些参量以更大的权重。为此, 本书提出了建立矿物识别谱系的思想, 参照或借鉴矿物学的分类方法, 在可见-反射红外光谱区间, 分别以主要吸收谱带、谱带组合特征、谱带精细

特征和谱带变异特征为基础,对矿物依“类—族—种—亚种”逐层进行识别,构成实际判别决策过程的树状结构。在类—族—种—亚种的识别决策中,所使用的特征的精细程度越来越高,但其在光谱中表现的明显程度、稳定性和诊断性逐渐降低,类别越分越细,但识别的可信度也逐渐减小。这样,可将识别的不确定性和矿物的混淆基本限制在一定的层次上,从总体上提高了矿物识别的可信度,并提高了处理的自动化水平和批量处理能力(王润生和甘甫平,2004;王润生等,2005;甘甫平等,2003a)。

智能识别系统实现了自动或半自动化的矿物识别和填图。但由于某些矿物,特别是与成矿作用有关的热液蚀变矿物,本身的波谱特征差异较小,更受到岩石中矿物混合光谱的影响,对一些波谱特征相近的矿物会出现误判现象。例如,Crosta等(1998)在美国Bodie和Paramount地区利用AVIRIS航空高光谱数据进行矿物填图试验对比结果表明,Tricorder对高岭石、蒙脱石、伊利石、埃洛石等矿物会产生混淆和误判。新疆东天山土屋东—三岔口地区HyMap航空高光谱数据“矿物分层识别谱系”矿物填图地面查证结果也表明,对绿泥石与绿帘石、白云母与伊利石等成分与光谱特征都相近的矿物,仍会产生一定的混淆(王润生等,2005)。

5. 亚像元光谱识别

亚像元光谱识别是提高地物识别精度的重要方法,更是定量探测地物成分的有效途径。亚像元光谱识别包括混合像元分解和光谱匹配滤波。混合像元分解考虑了组成像元光谱的所有端元,属于“全混合光谱分解”(complete spectral unmixing),光谱匹配滤波仅考虑某种或某几种端元,可以在不知道其他端元光谱的情况下识别混合像元中指定的目标,被称为“部分混合分解”(partial unmixing)(Boardman et al., 1995)。

1) 全混合像元分解

自然界的地物几乎都是各种矿物的集合体,传感器接收的光谱都是各种矿物的混合光谱。混合像元分解是提高矿物识别精度的重要方法,更是提高矿物识别定量化程度的有效方法。混合像元分解的基本原理是将像元光谱表达为像元中各成分端元光谱和端元在像元中所占比例的某种函数,在像元光谱和另外一些参数(成分端元或端元比例)已知的情况下,反演未知参数的方法。一般情况下,都是先确定成分端元,反演各端元在像元中所占的比例。

Ichoku和Karnieli(1996)将国内外发展的混合像元分解模型归结为线性混合模型、概率混合模型、几何光学模型、随机几何模型和模糊混合模型五大类。

概率混合模型(the probabilistic model)假定混合像元中各成分端元呈多元正态分布,可以用近似最大似然方法估计它们所占的比例。几何光学模型(the geometric-optical model)主要用于描述地面地物(土壤、岩石等)和植物的混合光谱效应,将像元光谱描述为光照植冠、阴影植冠、光照背景(土壤、岩石等)和阴影背景的光谱面积线性加权和,各成分在像元中所占的面积取决于植物的高度、密度、植冠的形状与大小、地面的坡度与坡向、光照方向与观测方向等几何特征和几何关系。随机几何模型(the stochastic geometric model)是对几何模型的进一步发展,它将各种几何参数作为随机变量处理,以便更好地描述叶片面积与朝向、地面粗糙度、土壤水分和有机质等次级参数的影响。模糊模型(the fuzzy model)是根据模糊集理论,以归属于某种成分的“隶属度”表示该成分在像元中所占的比例。

线性混合模型认为像元的光谱是像元中各成分端元光谱的线性组合,各端元在像元中所占的比例即为该端元的权系数。实际应用中,一般根据事先确定的端元,建立线性方程组,

然后在各端元组分的含量比都为正数, 且和为 1 的约束条件下, 求解各端元的含量比。当端元数等于遥感图像的波段数或波段数加 1 (包括和为 1 的约束条件) 时, 方程有确定解; 端元数小于波段数时, 则用最小二乘法求解。

线性混合分解的输出是端元的光谱和端元的相对丰度。在某种意义上, 它也是一种仿射变换, 它将数据转换到具有物理意义的坐标系中。

线性混合是建立在光线仅被一种“最终单一物质”反射的假设基础上, 假设端元光谱是线性无关的。这对于较大尺度的混合, 如土壤、岩石、植被等不同类型地物的混合是适宜的。混合成分的尺度较小时, 如同一物质中不同组分的紧致混合 (intimate mixture), 入射光将被一种以上的端元多次散射, 混合光谱呈非线性。

自然界地质体都是由各种矿物组成的集合体, 遥感测量的光谱都是地质体中各种矿物的混合光谱。矿物之间光谱混合属于紧致混合, 即非线性混合 (Clark, 1999), 混合光谱为矿物粒度的非线性函数 (Hapke, 1981)。由于不同矿物之间的混合, 造成不同光谱波段间偏离线性的程度不同。“九五”期间, 我们通过实验室光谱模拟, 对矿物的混合光谱性状进行了研究。结果表明, 混合光谱与成分矿物的相对含量在反射红外谱段近似为线性关系, 朝短波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, 但与线性混合的最大误差不超过 10%。并且, 谱带位置的漂移、复合谱带的吸收强度与成分矿物相对含量更接近于线性变化, 线性相关系数都在 0.95 以上 (王润生等, 1999)。因而, 在矿物填图中, 目前一般都使用线性混合模型。

Tompkins 等 (1997) 提出修正的光谱混合分析 (modified spectral mixture analysis, MSMA) 方法, 将端元及它们的丰度都作为未知变量, 引入迭代算法, 对所处理的数据集之中的所有像元同时求解。算法对每一个像元按照线性分解模型建立一个线性方程组, 从一个包括端元光谱及端元丰度的起始模型开始, 采用阻尼最小二乘算法, 计算模型在每次迭代过程的变化, 直至剩余误差达到最小 (达到预先设置的误差限) 为止。起始模型可以根据先验知识、野外调查给出, 也可以用一般的线性模型求出。该方法利用虚拟端元, 根据一定的先验知识, 有效地并最终可以选择亚像端元进行光谱分解, 提高了 SMA 实用性。

能量约束最小模型 (constrained energy minimization, CEM) (Farrand and Seelos, 1996; Farrand and Harsanyi, 1997; Resmini et al., 1997) 是在成像光谱图像序列中, 运用一个目标区域或 ROI 区域 (region of interesting) 与像元光谱相关的权系数来描述像元光谱向量的数字值, 进行特征选择与分解, 进而识别地物成分及其丰度比例。与混合光谱分解模型不同的是, 该方法更多地依赖于目标区的统计特征, 因而可以取得更为精确的识别结果。

2) 部分混合分解

光谱匹配滤波 (matched filtering) 是指从光谱信息未知的背景中识别指定目标的方法。其基本思想是在 Q 均值空间将标准光谱数据库中的矿物光谱作为一个矢量, 根据图像像元光谱与参考光谱矢量的匹配程度建立滤波检测器, 对输入图像进行“滤波”, 使数据中目标的光谱响应达到最大化, 而同时压制其他端元的光谱响应, 使目标和背景的反差最大化, 达到最优匹配。然后选择合适的阈值, 分割出目标信息。

匹配滤波最初是为计算含量相对较少的物质的丰度而开发的, 因而当目标物质的含量并不很少时, 应用和对其结果的解释都需要慎重。

混合调制匹配滤波 (mixture tuned matched filtering, MTMF) 是指将线性混合分解与

匹配滤波相结合而形成的一种复合方法。它综合了匹配滤波不需要其他背景端元光谱的优点和线性混合分解中像元中各端元的含量为正且总和为1的约束条件,因而降低了矿物的检出限,能探测出其他方法不能检测出的岩石中微量矿物成分(Boardman, 1998)。

事实上,在岩矿信息提取中,矿物混合都是非线性混合,发展非线性混合端元选取算法应是未来的发展方向之一。

6. 矿物丰度识别

光谱矿物丰度识别即根据测量光谱的某些特征,定性或定量地反演矿物在地质体中的相对含量(丰度)。目前,反演地质体中矿物含量的依据和方法主要有:①依据光谱匹配度;②诊断吸收谱带的强度,即吸收谱带深度;③光谱混合分解。目前,影响矿物丰度反演的主要问题是矿物的混合效应和混合模型问题,主要表现在以下五个方面。

(1) 反射光吸收谱带的强度(intensity)是矿物的本征吸收强度(intrinsic absorption strength)、散射特性和矿物丰度的函数(Hapke, 1981)。实验表明(王润生等, 1999),混合光谱的光谱反射率近似为混合矿物光谱反射率的线性组合,特征谱带强度与矿物的百分含量基本呈线性相关,利用吸收谱带的强度变化可以近似估计矿物的相对含量。

但是由于对产于不同岩石中的同种矿物与其混合的矿物种类不同,谱带强度与矿物百分含量的关系也有不同;谱带深度还受光谱重建精度等因素的影响,带有较大的不确定性,会对分析结果造成较大的影响。

(2) 矿物之间光谱混合属于紧致混合,即非线性混合(Clark, 1999),混合光谱为矿物粒度的非线性函数(Hapke, 1981)。矿物粒度的变化,对谱带深度会有较大的影响。

(3) 岩石中矿物的混合光谱为矿物粒度的非线性函数(Hapke, 1981)。不同矿物之间的混合、不同波段偏离线性的程度都会有所不同。一般而言,波长越短,非线性越强。目前,不论是根据谱带强度,还是混合像元分解,都近似认为矿物光谱的混合为线性混合,不可避免地会带来一定的误差。Hapke (1981)、Johnson 等(1983)、Mustard 和 Pieters (1987)等研究认为,平均单散射反照率是成分端元单散射反照率(single-scattering albedos, SSA)以各成分在断面上的相对几何特征(面积比、密度、颗粒直径等)为权的线性组合,这样,通过单散射反照率转换,可将非线性混合“线性化”,再进行光谱分解。

(4) 由于反演的等效效应,混合光谱解混具有多解性,解混结果在很大程度上取决于所选取的端元。发展更准确的行之有效的端元选择方法,是提高矿物丰度反演精度的前提。

(5) 用混合光谱分解算法得到的矿物的“丰度”信息,是各端元光谱在混合光谱中所占的比例,是矿物的“光谱丰度”。目前,都是以矿物的光谱丰度作为该矿物的含量指标。但是实际上,矿物的光谱丰度并不等同于该矿物在岩石中所占的比例。第一,矿物的光谱丰度仅是该矿物占有可识别出的被选为端元的那些矿物的比例,在所使用的光谱区间中,非光谱活性的矿物并未考虑在内,因此,在这一意义上,端元的权系数之和并不等于1,而是小于1。第二,矿物光谱的线性混合并不等于矿物含量或质量的线性混合,矿物光谱除与矿物的含量有关外,更与岩石的反射面上矿物所占的表面积、密度、颗粒度等有关。所以,要反演出端元矿物在岩石中的丰度,还必须对“光谱丰度”作定标和转换。

7. 矿物成分识别

矿物成分识别主要是识别由于矿物的类质同象置换而引起的同种矿物金属离子含量的变化。矿物的类质同象是指矿物晶格中的金属离子被其他价键相似的金属离子所替代,而不改变矿物晶体结构的现象。类质同象置换与成岩成矿时的温压条件、岩浆组分浓度、氧逸度等