



中亚地区地球科学系列丛书

中亚地区高光谱遥感地物蚀变 信息识别与提取

周可法 孙莉 张楠楠 等著



地质出版社

**ZHONGYA DIQU
GAO GUANGPU YAOGAN DIWU SHIBIAN
XINXI SHIBIE YU TIQU**



ISBN 978-7-116-05844-6



9 787116 058446 >

定价: 60.00元



中亚地区地球科学系列丛书

中亚地区高光谱遥感地物 蚀变信息识别与提取

周可法 孙 莉 张楠楠 等著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

高光谱遥感应用于地质就是要为地质区调和找矿提供有用信息,各种矿物和岩石在电磁波谱上显示的诊断性光谱特征可以帮助我们识别不同矿物成分。本书从岩石矿物光谱特征知识入手,侧重于高光谱遥感地物光谱识别、地物信息提取技术以及模型集成,为资源评价提供理论基础与技术支持。

本书共有八章,主要内容包括:综述、岩矿遥感光谱特征研究、中亚地区矿床的遥感地质信息提取与特征分析、遥感信息提取与分类识别方法、遥感图像处理、研究区蚀变岩信息的提取、中亚综合遥感信息系统集成和遥感技术在地质找矿中的应用等。

本书可供从事地质遥感工作的生产、科研和教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

中亚地区高光谱遥感地物蚀变信息识别与提取 / 周可
法等著. —北京:地质出版社, 2008. 8
ISBN 978 - 7 - 116 - 05844 - 6

I. 中… II. 周… III. 光谱分辨率—光学遥感—地质勘
探 IV. P627

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 147150 号

组稿编辑: 白 铁 王大军
责任编辑: 白 铁 汪福新
责任校对: 李 玫
出版发行: 地质出版社
社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083
电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324579 (编辑室)
网 址: <http://www.gph.com.cn>
电子邮箱: zbs@gph.com.cn
传 真: (010) 82310759
印 刷: 北京地大彩印厂
开 本: 889mm×1194mm 1/16
印 张: 15.5 彩版: 12 面
字 数: 480 千字
印 数: 1—1000 册
版 次: 2008 年 8 月北京第 1 版·第 1 次印刷
定 价: 60.00 元
书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 05844 - 6

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

自 20 世纪 90 年代以来, 高光谱技术的研究与应用得到快速的发展。国际上许多发达国家都作了大量的航空飞行测试试验研究以及应用示范研究工作, 无论在空间数据的获取、辐射定标、光谱重建、数据处理等方面都取得了很大的进步与发展, 并且建立了各种数据处理与识别模型。如美国拥有机载成像光谱仪 AVIRIS, Probe-1, MASTER, SEBASS 等, 在地质、农业、生态与环境等方面开展了一系列的研究工作, 促进了高光谱技术与应用的深入发展, 使遥感从对地物的鉴别阶段发展到对地物直接识别阶段, 并使利用宏观的手段(遥感技术)进行微观(如矿物)的探测成为可能。

在未来几年内, 将陆续发射一系列搭载有高光谱仪的卫星。如 SIMAS 卫星搭载的 HIS, ARIES-1 卫星搭载的 ARES-1 以及 PRISM 卫星都将搭载高光谱仪等。这些光谱仪的光谱分辨率一般都在几纳米到 20 nm 之间, 空间分辨率在几米到 50 m 之间, 而且个别还具有全色波段。其数据特点完全适用于地质矿产与土地利用评价以及森林植被的动态变化监测等方面, 而且, 其数据基本都进入商业运营。目前, 我国正在研制的资源环境小卫星(1+2 星计划)也主要是采用高光谱成像仪。这些都将开创高光谱技术的航天时代, 并可能取代多光谱技术成为下一步应用的主流。

但无论是多光谱抑或高光谱, 均是以光谱成像, 其共同点是实现特征光谱线与物质成分、空间辐射特征与物体形状的一一对应。因此, 如何建立地物光谱特征与地物组成属性之间的关联以及如何利用它们之间的关联进行遥感信息分割与提取, 提高高光谱遥感技术的应用潜力, 为此, 本书从岩石矿物光谱特征知识入手, 侧重于高光谱遥感技术应用, 以开发地物光谱识别与信息定量提取技术为研究的核心, 具体研究高光谱遥感地物光谱识别、地物信息提取技术以及技术和模型集成, 为资源评价提供理论基础与技术支撑。

高光谱遥感应用于地质就是要为地质区调和找矿提供有用信息, 各种矿物和岩石在电磁波谱上显示的诊断性光谱特征可以帮助我们识别不同矿物成分。因此, 高光谱遥感地质信息的提取在过去、现在、直至将来都将是遥感地质的前沿研究领域。

本专著是国家基础研究计划 973 项目研究成果的一部分。研究区为中亚地区具有代表性的新疆哈密地区高光谱遥感试验场, 该区气候干燥、植被稀疏、基岩广泛出露、地质矿产研究程度相对较高。将该区美国陆地卫星 5 的专题制图仪(TM)数据和 1995 年获取的机载模块式成像光谱仪(MATS)数据作为数据源, 着重利用对应分析法、最优分割法和逻辑斯蒂法进行了哈密地区善郡南山金矿区含金蚀变带、山前钾化带信息的提取和色尔腾山岩石岩性的分类, 规范了它们在遥感图像中的表达, 并对它们进行了改进, 取得了良好的效果。

本书共包括八章, 第一章: 综述。本章概述了高光谱遥感岩性信息提取和分类方法研究方面的国内、外进展, 论述了研究遥感岩性信息提取和分类方法的意义, 给出了本书的主要研究内容。第二章: 岩矿遥感光谱特征研究。从遥感数据的光谱特征、遥感光谱数据的获取、岩石光谱特征的形成机理、矿岩基团和离子光谱的敏感性研究、影响岩石光谱特征的因素、岩石遥感光谱信息的干扰因素六部分进行了详细论证。第三章: 研究内容方法与技术路线。本章根据研究区背景、具体研究内容提出了研究的技术路线。第四章: 遥感信息提取与分类识别方法。本章详细介绍了遥感光谱信息提取、遥感信息分类、高光谱遥感在地质调查中的应用、研究区岩石理想光谱特性分析以及岩石光谱特征的遥感影像分析。第五章: 遥感图像处理。本章全面介绍了遥感图像的几何处理、遥感图像的变换处理以及遥感图像的增强处理的方法。第六章: 研究区蚀变岩信息的提取。本章实例介绍了研究区图像预处理

理、研究区矿化蚀变的遥感信息提取模型以及三种模型的效果比较。第七章：中亚综合遥感信息系统集成。此章是本书的重点部分，就系统设计的总体方案、系统支撑软件、应用系统建立三部分详细阐述了 RS 与 GIS 等先进技术在地质研究应用中的最新成果，尤其在中亚大型矿集区的遥感找矿预测方面，有一定的指导意义；第八章：遥感技术在地质找矿中的应用。本章就遥感技术地质找矿中的应用现状、遥感图像上的地质构造、遥感图像的岩性分类、遥感技术在中亚地质方面的应用四部分进行了阐述。本书可供从事地质遥感工作的生产、科研和教学人员参考。

本书是集体劳动的结晶，第一章、第二章、第七章由周可法完成，第四章、第五章、第八章由孙莉完成，第三章、第六章由张楠楠完成。

在本书的编写过程中，得到诸多方面的帮助与支持，在此一并表示真诚地谢意！

感谢新疆自然资源与生态环境研究中心的马映军研究员对本书编写工作的关心与支持，他在工作环境、时间安排、工作方法等许多方面给予了周密的照顾与指导；感谢中国科学院孙枢院士、肖序常院士，中国科学院地质与地球物理研究所肖文交研究员，新疆分院院长张小雷研究员，新疆生地所的陈曦研究员，新疆大学的张晓帆教授、孙宝生教授，新疆自然资源与生态环境研究中心的徐新研究员和王煜高级工程师，他们在本书的编写中提出了宝贵意见与建议；感谢徐元柳博士、陈川博士、赵同阳硕士、徐仕琪硕士、张清博士、张捷斌研究员、张海波高级工程师、万应彩工程师，他们在本书的编写工作中给予了多方协助；感谢参与研究中的硕士生与博士生们，感谢研究团队中的同事们，感谢所有给予我们支持和帮助的同仁！

感谢地质出版社的朋友们，由于他们的大力支持与辛勤劳动，使本书得以顺利出版！

由于作者水平有限，加之遥感技术在中亚地区地质方面应用的基础与经验相对不足，因此书中难免出现缺点与错误，诚挚地希望读者批评与指正。

作 者

2007 年 12 月于乌鲁木齐

目 次

前 言

第一章 综 述	(1)
第一节 地物光谱研究现状与趋势	(1)
一、国外遥感矿化蚀变信息提取的应用现状	(2)
二、国内遥感矿化蚀变信息提取的应用现状	(3)
第二节 地物岩石光谱学机理研究进展	(3)
一、地物光谱机理	(3)
二、地物光谱内部化学机制	(4)
三、矿物光谱外在物理机制	(4)
第三节 地物光谱特征及其变化规律	(7)
一、水体的波谱特征	(7)
二、植被的波谱特征	(7)
三、岩石的波谱特征	(8)
第四节 地物光谱应用基础研究进展	(10)
一、岩石矿物物化属性与光谱特征相关性分析	(10)
二、物理模型研究	(11)
第五节 遥感影像信息的提取研究方法研究进展	(12)
第六节 地物特征遥感信息提取和分类方法研究的意义与目的	(15)
第二章 岩矿遥感光谱特征研究	(17)
第一节 遥感数据的光谱特征	(17)
第二节 遥感光谱数据的获取	(18)
第三节 岩石光谱特征的形成机理	(20)
第四节 矿岩基团和离子光谱的灵敏性研究	(22)
一、基团和离子光谱特征	(22)
二、矿物多样性光谱特征	(31)
第五节 影响岩石光谱特征的因素	(34)
第六节 岩石遥感光谱信息的干扰因素	(35)
第七节 遥感图像分类法	(36)
第三章 中亚地区矿床的遥感地质信息提取与特征分析	(40)
第一节 研究区背景	(40)
一、中亚(型)成矿作用的特征初步概括	(40)
二、中亚地区地质矿产分布与成矿类型	(41)
第二节 中亚各国矿产资源现状	(41)
一、哈萨克斯坦	(42)
二、吉尔吉斯斯坦	(50)
三、乌兹别克斯坦	(58)
四、塔吉克斯坦	(60)

五、土库曼斯坦	(60)
六、俄罗斯南部	(60)
七、阿塞拜疆	(61)
第三节 研究实例—准噶尔-巴尔喀什褶皱系典型斑岩铜矿床为例	(61)
一、研究区概述	(61)
二、研究区大地构造背景	(62)
三、准噶尔-巴尔喀什褶皱系典型斑岩铜矿床分布	(63)
四、研究区的典型斑岩铜矿床的成矿地质特征	(64)
第四节 研究区斑岩铜矿的遥感地质信息提取及特征分析	(72)
一、研究技术路线	(72)
二、遥感数据的获取	(72)
三、遥感图像的数字处理	(73)
四、遥感影像的处理效果	(74)
五、ETM ⁺ 遥感图像中地质信息的提取	(79)
六、几种分类方法的应用效果	(80)
七、研究区内已知矿点遥感岩性信息提取图与效果评价	(82)
第五节 典型斑岩铜矿床的特征蚀变矿物及分带研究	(84)
第四章 遥感信息提取与分类识别方法	(94)
第一节 遥感光谱信息提取	(94)
第二节 遥感信息分类	(99)
一、相似系数聚类分析法	(99)
二、光谱角度填图法	(100)
三、逻辑斯蒂分类法	(100)
四、混合象元分类法	(101)
第三节 高光谱遥感在地质调查中的应用	(101)
一、光谱微分技术	(102)
二、光谱匹配技术	(102)
三、混合光谱分解技术	(103)
四、光谱分类技术	(103)
五、光谱特征提取方法	(105)
六、模型方法	(106)
七、高光谱分辨率遥感在地质中的应用前景	(107)
第五章 遥感图像处理	(108)
第一节 遥感图像的几何处理	(108)
一、遥感数字图像几何处理概述	(108)
二、遥感图像的几何变形误差的影响因素	(108)
第二节 遥感图像的变换处理	(113)
一、傅立叶变换	(113)
二、Hough 变换	(114)
三、K-L 变换	(115)
第三节 遥感图像的增强处理	(117)

一、遥感图像增强处理的目的与方法	(117)
二、遥感图像的灰度增强	(118)
三、遥感图像的边缘增强	(120)
四、遥感图像的彩色增强	(123)
第六章 研究区蚀变岩信息的提取	(129)
第一节 研究区图像预处理	(129)
一、几何校正	(129)
二、子区选取	(129)
三、彩色合成	(129)
第二节 研究区矿化蚀变的遥感信息提取模型	(130)
一、基于特征光谱的矿化蚀变信息增强提取模型	(132)
二、基于主分量门限化模型的蚀变信息提取	(134)
三、基于光谱矢量的矿化蚀变信息分类提取模型	(136)
第三节 三种模型的效果比较	(141)
一、应用效果对比	(141)
二、效果评价	(144)
第七章 中亚综合遥感信息系统集成	(145)
第一节 系统设计的总体方案	(145)
一、数据流程设计	(145)
二、总体技术方案	(145)
三、模块层次结构	(148)
第二节 系统支撑软件	(150)
一、数据库系统支撑软件	(151)
二、空间数据库引擎 ArcSDE	(151)
三、ENVI 遥感影像处理软件	(152)
四、ArcGIS MapObjects	(153)
第三节 应用系统建立	(155)
一、空间数据库建立	(155)
二、系统部分界面	(157)
第四节 中亚数字地质图数据库的建立和实现	(157)
一、基于 GIS 数字地质图数据库的组成	(159)
二、中亚地区空间数据库建库技术流程	(166)
三、中亚地区数字地质图数据库的建立	(171)
四、部分程序	(175)
第八章 遥感技术在地质找矿中的应用	(225)
第一节 遥感技术在地质找矿中的应用现状	(225)
第二节 遥感图像上的地质构造	(226)
第三节 遥感图像的岩性分类	(227)
第四节 遥感技术在中亚地区地质工作中的应用	(230)
参考文献及资料	(235)
彩图及说明	

第一章 综 述

现代遥感技术是指从远距离、高空以至外层空间的平台上,利用可见光、红外、微波等探测仪器,通过摄影或扫描方式,对电磁波辐射能量的感应、传输和处理,从而识别地面物体的性质和运动状态的现代化技术系统。其研究目标和对象可以是人类赖以生存的地球,包括岩石圈、水圈、生物圈和大气圈,即将地球作为一个整体系统在时间和空间尺度上进行研究;也可以是除地球之外的其他人类可知星体。它所获得的主要是目标物的光谱信息、空间信息和辐射信息,通过对这些信息进行加工、处理和分析,以研究地球上已发生的和正在发生的生物、物理、化学和地学的静态和动态过程,开展全球变化研究,为人类合理利用资源,保护生态环境,可持续发展服务。随着传感器技术、航空和航天平台技术、数据通讯技术的发展,现代遥感技术已经进入一个能够动态、快速、准确、多手段提供多种对地观测数据的新阶段。

以辐射反演理论、辐射与地物的相互作用机理、地球系统科学理论、航天航空对地观测技术为基础的遥感技术的发展,极大地拓展了人类的视野和观测角度,使人类能够真正从整体上将地球作为一个统一的系统加以研究和认识,从不同尺度和不同层次上,揭示地球各圈层的运动变化和相互作用。遥感技术已经成为国土资源调查和监测不可替代的高技术手段。随着传感器频谱范围的不断拓宽,空间频谱和时间分辨率的不断提高,信息处理、提取和综合技术的不断发展,对遥感信息的挖掘由“粗糙”到“精细”,解释由定性到定量,地物识别由间接到直接,不断推动人们对赖以生存的大气圈、水圈、地球圈认识的深化。遥感技术正向着观测系统化、技术一体化、应用模型化、反演量化和过程数字化方向发展。

地物的光谱特征研究是现代遥感技术的重要组成部分,它既是传感器波段选择和设计的重要依据,又是遥感数据分析解译的基础。遥感影像中的每个象元的亮度值代表的是该象元中地物的平均辐射值,它随地物的成分、纹理、状态、表面特征及所使用电磁波段的相异而不同。

第一节 地物光谱研究现状与趋势

前苏联是进行地物光谱特征研究最早的国家,美国在陆地卫星发射后,曾对各种地物光谱特征进行了七八年的研究。目前美国已对 1 000 多种岩石矿物、1 000 多种土壤和 3 000 余种植物以及 60 余种水体的反射、辐射和吸收进行了系统的测试分析,并建立了不同类型的地物光谱数据库。中国也对地物光谱开展了广泛的研究,并建立了一些基本的光谱数据集。另外,随着世界各国以及若干区域联盟的一些科技发展计划的实施,例如美国的“星球大战”以及“区域导弹防御计划(NMD)”,欧盟的“尤里卡”计划,前苏联的战略防御研究,日本的“科技立国”,中国的“863”计划等。地探测技术越来越扮演着重要的角色。而遥感技术又是对地观测技术中的“重中之重”,所以地物光谱的研究和发展都取得了一些进展。各国或各联盟都分别建立起本国或本区域的立体遥感网络体系,推动了遥感技术的不断发展与遥感信息处理方法的不断创新,增强了人类从小到一个亚象元或象元(几厘米)以及大到全球尺度的资源调查、制图和环境监测能力(Williams & Southworth, 1984; Gupta, 1991),使人类能够快速获取不同层次、不同角度的地球资源和环境信息,加速信息化或数字化进程,抢滩信息技术前缘。

美国 1972 年发射的第一颗地球资源技术卫星(ERTS-1)(后更名为 Landsat-1)标志着地球遥感新时代的开始(Gupta, 1991)。到了 20 世纪 80 年代初,传感器由 4 波段多光谱扫描仪(MSS,空间分辨率 80 m)发展到 7 波段专题制图仪(TM,空间分辨率除热红外 6 波段 120 m 外皆为 30 m),成

为遥感应用的主要数据源。90年代,法国发射的SPOT卫星上搭载有高分辨率传感器(HRV分辨率为20 m, 全色10 m)和印度发射的IRS资源卫星(多光谱分辨率25 m, 全色5 m)等也在遥感领域起着重要作用。1999年4月升空的Landsat-7所搭载的增强型专题制图仪ETM⁺,增加了15 m全色波段,热红外6波段空间分辨率增加为60 m。同年9月,美国光谱成像公司(Spectral Imaging Inc.)成功发射搭载有空间分辨率达1 m的IKONOS传感器的小卫星。这些都表明遥感应用对空间高分辨率的需求,并将进一步增强人们对地的观测能力。

成像光谱是遥感光谱高分辨率发展的结果。机载成像光谱遥感技术以美国的航空可见光/红外成像光谱仪(AVIRIS)和加拿大的小型机载成像光谱仪(CASI)最具影响力。尤其是AVIRIS,在不断的应用试验飞行中进行不断的技术改造以提高其技术水平,1995年其信噪比已达800以上,成为同行中的佼佼者。在国内,以上海技术物理研究所研制的MAIS, OMIS以及PHI为代表,还有长春光学机械研究所研制成功的“军民两用高分辨率成像光谱仪”,都不断跟踪国际先进水平,在地质找矿、油气勘查、海岸带调查、湿地生态环境研究、农业估产等方面都取得了一定的成功应用。

在航天成像光谱技术方面,搭载有中分辨率成像光谱仪MODIS以及反射辐射计ASTER的AM-I卫星已于1999年发射。MODIS在400~1450 nm光谱区内有选择性地设置了36个不连续波段,星下点地面分辨率250 m~1 km。2000年10月美国又成功发射搭载有高级大地成像光谱仪(Advance Land Imagers-ALI),高光谱成像(Hyperion)和大气校正仪(Atmospheric Corrector)等传感器的EO-1卫星。高光谱成像仪Hyperion,具有220波段,光谱分辨率100 m,空间分辨率30 m,幅宽7.5 km,光谱区间400~2500 nm。澳大利亚计划在2002年发射ARIES成像光谱仪,该光谱仪空间分辨率30 m,光谱区域为400~1100 nm与2000~2500 nm共64波段。这些都标志着成像光谱的应用高潮即将到来。遥感技术的飞速发展带动并刺激到对地物光谱特征的研究,两者相互依赖共同促进。

在20世纪60年代末70年代初,针对遥感应用,以Hunt和Salisbury为代表的研究人员对地球上各大岩类的光谱特征进行了详尽的研究(Hunt等,1978);80年代中后期,随着多光谱到成像光谱技术的开发与成像光谱仪的研制成功,以Clark(1999)和Clark等(1990)等为代表,更进一步深入地研究了岩石矿物的光谱特征与处理技术,开发出大量的岩矿信息识别与提取技术,促进了遥感的量化、精细化和智能化的发展。国外以美国地调局(USGS)和JPL为代表,在相关领域进行了一系列的开创性的工作,发展了最为典型的成像光谱信息提取软件Tetracord。中国国土资源航空物探遥感中心承担了原地质矿产部重点科研项目“成像光谱技术开发应用研究”,积累了大量可实用的技术方法,并开发了成像光谱数据分析处理系统ISDAPS,为成像光谱技术的地质应用的实用化与推广奠定了技术基础。

遥感技术是20世纪60年代发展起来的一门新兴的综合性科学技术,最早用于军事。自遥感对地观测技术问世以来,遥感数据种类多,数量巨大甚至冗繁,如何从各类遥感数据源中有效、准确地提取专题所需目标特征信息,一直是遥感界所努力探索的目标,国内外遥感工作者,都在不断地设计、研制和总结对这种遥感信息的提取和识别技术。

矿化蚀变信息是找矿的一个重要标志,而这些对找矿有指导意义的矿化蚀变信息,由于常常受其他地物信息的干扰和受遥感图像的波谱分辨率、空间分辨率的制约,往往表现得很微弱。因此,国内外学者也在不断尝试各种技术方法提取这种矿化蚀变弱信息。

一、国外遥感矿化蚀变信息提取的应用现状

早在1976年,戈茨利用短波红外波段的1.6 μm 和2.2 μm 波长两谱带反射比的比值定量划分蚀变岩和未蚀变岩。

艾布拉姆斯等人(1977)注意到陆地卫星多波段扫描(0.5~1.1 μm)光谱范围内含褐铁矿的蚀变岩石由于三价铁强吸收光谱而产生独特的反射光谱,并在内华达州金矿根据图像对褐铁矿蚀变岩石进行填图。

罗曼等人(1977)采用MSS 4/5, MSS 5/6和MSS 6/7比值图像对以次生粘土、氧化硅及褐铁矿

特征的热液蚀变区进行识别填图。

Ambrams (1984) 利用 TM 图像波段比值 + 主成分变换方法排除了植被覆盖因素干扰提取蚀变信息。

Crosta 和 Loughlin (1991) 利用 Landsat-5 TM 图像数据, 选择 4 个波段 (TM1, TM 3, TM5, TM7 或 TM1, TM4, TM5, TM7), 设计了主成分变换 + 特定主因子求反的方法填制巴西热带地区残积土壤中的三价铁和羟基蚀变岩信息图。

Rokos 等 (2000), 利用 TM, SPOT 数据、数字高程模型及地球化学信息等在 ER Mapper 系统下对爱琴海盆地中的 Quaternary 岛弧中的岛屿和弧后火山岩地区的低温热液型金矿进行研究, 用 5/7, 3/1 等比值和主成分分析等数学运算进行蚀变带的识别, 并结合提取的线性构造统计分析进行成矿预测。

Tangestani 和 Moore (2001), 利用三种主成分分析法对伊朗 Meiduk 地区斑铜矿蚀变区进行了对比分析。

Timothy 等 (2002), 利用 5/7, 5/1, 5/4 的假彩色合成及分析, 在阿拉伯-努比亚地质的干旱气候下提取金矿化蚀变信息。

二、国内遥感矿化蚀变信息提取的应用现状

国内地质矿产遥感信息提取技术的应用研究开始于 20 世纪 80 年代。刘燕君 (1983) 采用与矿产信息有关的特征地物亮度比值和色度学原则, 在 MSS 图像上, 先后在北京密云水库周围的丘陵区变质铁矿实验区和河北省迁安铁矿区, 成功地把矿化点含矿围岩强烈部位增强出来。

近十余年, 国内在遥感信息提取技术方面有较多研究, 如胡德永等 (1995) 通过对我国的内蒙古广旗山子、吉林夹皮沟等十几个金矿区的卫星遥感试验, 经过多年的实践和总结, 提出的“微差信息处理”这一直接提取矿化信息的基本思想, 取得了较显著的成效。赵元洪等 (1991) 针对浙江新昌地区的植被覆盖问题采用 TM 4/3 比值 + 主成分变换技术抑制植被干扰达到提取蚀变的目的; 马建文 (1997) 提出了 TM 掩膜 + 主成分变换 + 分类的识别提取矿产弱信息方法, 在辽宁二道沟金矿提取三价铁蚀变火山碎屑岩信息, 在河北华北地台北缘提取含金钾化带信息, 均取得较好的效果; 张远飞等 (1998), 利用混合象元分解法提取遥感数据中矿化蚀变信息的方法; 张玉君 (1998) 利用与矿化相关的蚀变岩的 TM 波段图像象元亮度值曲线的双峰特性 (TM3 和 TM5 高值), 提取蚀变岩信息; 刘素红等 (2000) 利用 Gramschmidt 投影方法在高山区提取了 TM 数据中的含矿蚀变带信息。刘成等 (2003) 利用混合象元线性分解模型提取了卧龙泉地区粘土蚀变信息。另外, 平仲良、张满郎、刘庆生、朱嘉伟等在金矿蚀变信息的识别和增强提取上也做了不少工作, 获得了不少新的认识。

王润生、甘甫平 (2001)、王永江等设计与发展了基于特征谱带的岩矿谱系识别技术, 并提出了基于单矿物和矿物混合光谱识别的地质分析模型等, 都取得较好的效果。

上述国内外地学工作者在采用图像处理技术提取与矿化蚀变信息的方法各有各的特点, 总体来看, 用得较多是“比值 + 主成分分析”; 本文虽然也采用了这种方法, 但鉴于这些方法普遍存在适应度不好的问题, 笔者结合本地区现状研究出适应度较高的矿化蚀变信息提取模型。

第二节 地物岩石光谱学机理研究进展

一、地物光谱机理

大量的理论和试验研究充分表明, 当一部分光进入物质内部时, 将产生吸收行为: 这种吸收行为是物质内部结构、微量元素以及具有指示物质类型的离子等的光谱表现。在可见和近红外光谱区, 产生地物的吸收光谱特征的机理, 主要是地物内部微粒的电子跃迁过程或振动过程 (Hunt, et al., 1971)。电子跃迁主要包括: 晶体场效应、电荷迁移、导带、色心。

1. 电子跃迁

(1) 晶体场效应

电子跃迁是产生吸收光谱最主要的原因。在晶体场理论中,元素的电子占据在一个个单独具有相同能量的轨道位置上(如S轨道等),在晶体场作用下,能级将发生分离。轨道能级的分离使电子从低能级轨道向高能级跃迁时,必须吸收与能级之差相匹配的能量,并产生相应的吸收光谱特征。能级的能量差由原子电价(如 Fe^{2+} , Fe^{3+})、配位数以及所占据晶体位置的对称性所决定。同时配位键组成、晶体位置的歪曲扩展、金属配位键内部原子间距等因素也控制着能级的能量差。晶体场随着元素的晶体结构而变化,这样,物质内部微粒的分裂以及离子的不同将产生明显不同的吸收。同时,组成的细微变化将导致光谱谱形的偏移,从而可能利用光谱对矿物进行鉴定。吸收波段不仅包含矿物种类的诊断性特征,也包含矿物内离子的内在特征。

(2) 电荷迁移

电荷迁移也能产生吸收波段。光子的吸收使电子在离子之间或离子与配位键之间移动;同时,电荷的迁移也出现在相同元素之间,例如 Fe^{2+} , Fe^{3+} 。一般的,通过电荷迁移产生的吸收波段是矿物的诊断性吸收波段,其强度是晶体场迁移的成千上万倍,但波段中心往往出现在紫外,吸收翼展布于可见光。电荷的迁移吸收是铁氧化物和氢氧化物产生红色的主要原因。也应该注意到,表面与体积比(颗粒大小)将影响吸收的强度,并导致波形的改变。

(3) 导带与价带

一些物质往往有两种能级:高能级称为“导带(Conduction Band)”,电子可以在整个晶格移动;而低能量区,称为“价带(Valence Band)”,电子被束缚在单个原子上。能级之间的差值称为能隙(Bandgap)。能隙在某些电子中非常小或根本不存在;而在一些电介(Dielectrics)中非常大。一些矿物的颜色往往由能隙产生,如硫的黄色。能隙具有指示矿物的作用。

(4) 色心

一些矿物显示颜色归因于色心的吸收。色心的产生主要是由于晶体缺陷的辐照度引起。晶体缺陷产生离散的能级,并使电子能级向其跃迁。电子向缺陷跃迁需要吸收光子能量,从而产生吸收特征。

2. 基团振动

在分子和晶体晶格中,键如附着于质量上的弹簧,使整个系统都能发生振动。振动的频率依赖于每一弹力(分子键)以及它们的质量(分子每个元素的质量)。如果一个分子有 N 个原子,则具有 $3N-6$ 个称之为基谱的简正模式。每一个振动也能出现于多个原始的基谱频率。单一基谱模式的振动称之为倍频,而不同模式振动的结合称之为合频。如果一个分子有三种基谱振动, ν_1 , ν_2 , ν_3 ,那么其倍频大约为 $2\nu_1$, $3\nu_1$, $2\nu_2$;合频大致为 $\nu_1 + \nu_2$, $\nu_2 + \nu_3$, $\nu_1 + \nu_2 + \nu_3$ 等。另外 $\nu_1 + \nu_3 - \nu_2$ 这种差模式也可能存在。每一个高的倍频或合频振动强度比其最近的基谱振动弱30~100倍,从而使矿物的光谱更加复杂。但在反射光谱学中,这些弱的吸收特征能够容易地测量到,而且其诊断性信息常常来自于第2和第3倍频和合频。晶体模式有时也被VT(迁移振动)和VR(旋转振动)以及与其他基谱振动相结合,从而导致光谱出现更精细的结构,这种振动出现在中红外波段。

二、地物光谱内部化学机制

植被是遥感影像反映最直接的信息,绿色植物体内的各种色素,尤其是叶绿素是控制植物在可见光波段光谱特性的主要因素。根据对大量岩石矿物光谱特征的研究,Hunt(1977)总结出电荷跃迁或元素、离子的运动或激活行为与波谱吸收在可见与近红外光谱区域的光谱特征标识图(图1-1);1982年,Hunt总结出硅酸盐岩石矿物中红外吸收光谱特征标识图(图1-2)。根据这些对应关系可以进行岩石矿物识别。

三、矿物光谱外在物理机制

水体反射光谱特征的物理机制的主要影响因素是水体本身的光学性质和水的状态。土壤的光谱特

征受环境变异影响较小,入射能量不是被吸收就是被反射,不存在投射作用。因此,大部分土壤的反射光谱曲线比较简单。除了水吸收带以外,土壤的反射率一般随波长的增加而增加,呈近似的单质递增关系,这种递增关系在可见和近红外波段尤其明显。岩矿光谱特征的产生主要是由于组成物质内部离子与基团的晶体场效应与基团振动的结果。但外在的物理因素往往也会影响着岩矿的光谱特征。下面分别从矿物颗粒大小、几何光学位置、矿物表面形态与风化作用、矿物或岩石的混合等与岩矿光谱特征的关系进行论述。分析光谱特征参量在各种外在条件下的稳定性,评价消除这些外在因素的可能技术途径。

1. 矿物颗粒效应

光子散射和吸收的数量依赖于颗粒大小。表面积与体积之比(SVR, surface-to-volume ratio)是颗粒大小的函数。颗粒愈大,内部光学路径愈大;根据贝尔定律,光子将被吸收。颗粒愈小,与内部光学路径比较,将成比例地增加表面反射。这样,在可见和近红外光谱区域,对多级散射,随着颗粒大小的增加,反射率也随之下降。Hunt等(20世纪70~80年代)、Clark等(1999)、王润生等(1999)等都分别对颗粒大小与岩石矿物光谱特征的相互关系进行了深入研究,并证实了这一规律。针对光谱的透明行为、不透明行为以及透明-不透明行为,王润生等(1999)研究认为,对于具有透明行为的矿物,光谱反射率与粒度之间存在近似的对数关系,随着颗粒的变小而增大;不透明行为的矿物光谱反射率随颗粒变小而稍有降低;对于透明-不透明行为的矿物反射率随粒度变小在透明的光谱区间而增大,而在不透明的光谱区却下降,从而不同粒度的光谱发生交叉。但是在中红外,吸收系数非常大以及衍射指数在christensen频率处剧烈变化时,第一表面的反射非常大,甚至被散射信号主宰。这种情况下颗粒大小的影响将是非常复杂,甚至与在短波区域的趋势相反。波段吸收深度与矿物丰度和矿物颗粒大小具有相关性。在两种矿物粒子组成的表面(其中一个具有吸收波段),随着第二个矿物丰度增加,第一个矿物的波段吸收深度随之下降。对纯粉末状矿物随着颗粒增加一个微小值,波段吸收深度首先开始增加,达到一个最大值,然后开始下降。随着颗粒愈来愈大,反射光谱将最终仅由第一表面反射组成。由于波段饱和(band saturation)效应,光谱反射率将永远不会为零。

2. 视场几何

视场几何包括入射光角度、反射光角度以及相位角(反射光与入射光之间的夹角)。由于地表粗糙度的影响,视场几何的变化将导致阴影的产生和光线传播距离的改变,第一表面的属性将转向多态散射。对于任何表面和任何波长,当多级散射处于支配地位时,波段吸收深度的变化将非常微小(Clark, 1999)。王润生等(1999)通过对地物、光源和仪器观测方向三者几何关系的变化研究认为,视场几何关系仅影响岩矿反射率波谱大小,而波谱整体形态和吸收特征都基本保持不变。

3. 矿物表面与风化效应

王润生等(1999)研究认为,岩石表面形态会对谱带强度产生影响,但谱带位置、偏奇度基本保持不变;风化效应的影响较为复杂。一般认为,随化学风化作用的加强,原岩成分会发生变化,如Fe氧化为 Fe^{3+} ,从而使铁离子谱带位置发生漂移,强度有所增减;但阴离子基团对应的谱带位置、波形和偏奇度均较稳定,风化生成的蚀变矿物会使羟基和水的谱带得到加强。莱昂(1996a, b)研究了风化及其他类荒漠表面对高光谱分辨率遥感的影响,认为由于风化层与其下伏岩层之间光谱特征有时并不完全相同,必须将“岩石内部”物质的光谱和它的“上、下表面”光谱区分开来。莱昂进一步研究认为,对于在SWIR光谱区域具有很强吸收特征的岩石,如含有滑石、绢云母等矿物的岩石与铁氧物质(LDK)表面层相比更能表现出其岩石的“真实”特性。

4. 矿物混合

一般的,自然界存在四种矿物混合类型(Clark, 1999):线性混合(Linear Mixture或Areal Mixture),紧致混合(Intimate Mixture),包裹(Coatings)与分子混合(Molecular Mixtures)。线性混合又称真实混合,各组成成分之间没有多极散射。紧致混合为非线性混合。在包裹混合物中,每一包裹层都是散射或反射层,它们的光学厚度随着矿物性质与波长而变化。分子混合出现在分子级水平,如两种液体或固液一起混合,这种混合能够使波长偏移。线形混合一般情况下能够简单地近似描述混合

光谱特征。

5. 矿物混合光谱的基本特征

1) 混合光谱的整体反射率一般介于参与混合的单矿物光谱反射率之间,且混合光谱反射率近似为混合单矿物光谱反射率的线形组合,特征谱带强度与矿物的百分含量基本呈线性关系。

2) 混合单矿物的吸收谱带特征在混合光谱中基本上都能有所反映,但明显程度随着源矿物的相对含量减少而降低;单矿物中一些独有的、较弱的吸收谱带可能会被掩匿以至无法检测或辨识。

3) 不同矿物的吸收谱带在混合光谱中会叠加为复合谱带,当混合矿物具相邻近的吸收谱带时,复合谱带的表现行为较复杂。如矿物间的吸收强度相差不大,复合谱带一般介于源矿物谱带之间;如矿物间的谱带差异较大,且矿物含量也有较大差异时,仍能从混合谱带中辨识出各自的谱带,但谱形会发生较大变化。

第三节 地物光谱特征及其变化规律

地物的电磁波谱是遥感的一种基本信息——波谱信息。物体在同一时间、空间条件下,其发射、反射、吸收和投射电磁波的特性是波长的函数。不同的物体由于其组成成分、内部结构和表面状态以及时间、空间环境的不同,电磁波的辐射性能也不尽相同,具有不同的波谱曲线形态。同种地物,一般来说,具有相近的波谱形态,因而,地物的波谱形态是遥感识别地物的主要依据。为了识别地物,必须牢固掌握各种地物波谱曲线的重要特征,如,曲线的形态、波峰和波谷所在的波长位置、波峰的深度、宽度、斜率等。

目前地物波谱在遥感技术中的应用主要有:反射波谱、发射波谱和微波波谱。其中可见光和近红外区的反射波谱特征应用最广,研究较深。

一、水体的波谱特征

对水体而言,水的光谱特征主要是由水本身的物质组成决定,同时,又受到各种水状态的影响。由于水体和陆地在水体在反射、透射、吸收特性上的差异,在遥感图像上水陆界线一般可以判别。在自然环境下,在非镜面反射角度,水体在可见光和近红外波段反射率均比较低,几乎吸收了所有的人射能量。水体的反射波谱主要受水的混浊度、微生物含量、叶绿素含量、水深及水波浪情况的影响,但总体来说水体的反射率比较低,它与周围地物相比色调反差很大。且这种特征不受地域、时间、时相的限制。在可见光波段 $0.6\mu\text{m}$ 之前,水的吸收和反射能力较弱,从而产生较多的透射。水体的可见光反射包含水表面反射、水体底部物质反射及水中悬浮物质的反射。水中的悬浮物质有:富浮游生物或叶绿素、泥沙及其他物质。对于清水,在蓝-绿光波段反射率为 $4\% \sim 5\%$ 。当在 $0.6\mu\text{m}$ 以下的红光部分反射率降到了 $2\% \sim 3\%$,在近红外、短波红外部分几乎吸收全部的人射能量,因此水体在这两个波段上反射能力很小。这也是水体与植被光谱特征的一个明显差异(图1-3)。

二、植被的波谱特征

植被是陆地上分布较广的一种地物,同时植被也是遥感图像反映的最直接的信息之一。由于植物与环境之间的相互作用,所以说,植被的覆盖范围和分布状况很大程度上反映了环境的状态。遥感图像上的植被信息,主要通过绿色植物叶子和植被冠层的光谱特征及其差异变化而反映的。不同光谱通道所获得的植被信息与植被的不同要素或某种特征状态有各种不同的相关性,如叶子光谱特征中,可见光谱段受叶子叶绿素含量的控制、近红外波段受叶内细胞结构的控制、短波红外波段受叶细胞内水分含量的控制。植物体中的叶绿体及植物细胞结构有特殊的光谱效应,因而植被在遥感图像上是有判别依据的。不同植物种类之间的光谱特征曲线的差异,同种植物由于健康状态的不同而引起的光谱特征差异,不同植物种类在不同波段图像上的差异等,都可以作为我们识别植被,分析植被覆盖、植被健康状况甚至是当地环境状态的重要依据。植物的基本波谱特征:在可见光绿波段 $0.6\mu\text{m}$ 附近有一

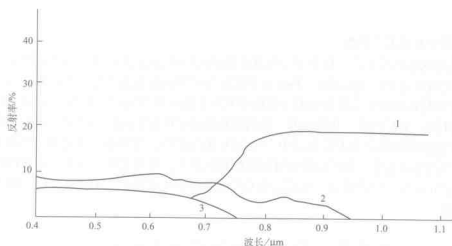


图 1-3 水体的反射波谱曲线
1—藻类浮游物；2—含沙水流；3—清水

个 4% ~ 6% 的吸收谷，近红外波段 0.8 ~ 1.3 μm 间有一 50% ~ 60% 的反射峰，在近红外 1.4 ~ 2.5 μm 波段波谱曲线呈下降趋势，其中在 1.5 μm 和 2.0 μm 附近有强烈吸收谷。产生这一变化是由于植物体内细胞液和细胞膜的水分子吸收造成的（图 1-4）。

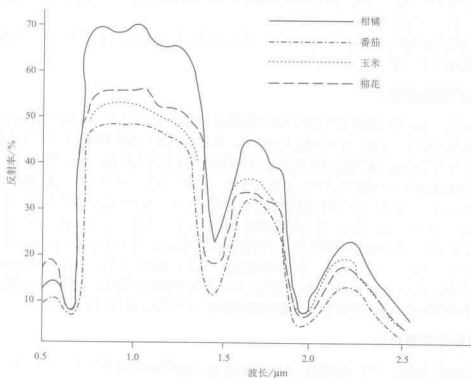


图 1-4 不同植物的光谱曲线的比较

三、岩石的波谱特征

岩石的波谱特征和植被、水体两大类完全不同。岩石是由矿物组成的集合体，其波谱特征与成分结构、构造、风化等因素相关。但是，不同的岩矿类型，将导致光谱反射曲线的形态发生许多变化，形成一些很有特色的谱段。因此，自身成分、结构的繁杂决定了岩石在遥感影像上鉴别的难度很大，