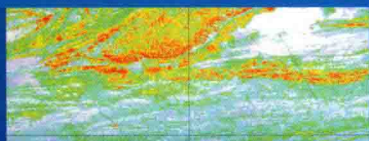
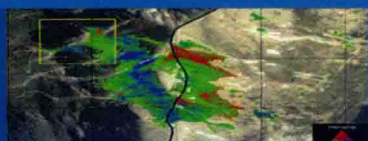


高光谱遥感地质作用 建模及应用

甘甫平 李万伦 闫柏琨 梁树能 董新丰 刘镭源 于峻川 编



科学出版社

高光谱遥感地质作用建模及应用

甘甫平 李万伦 闫柏琨 梁树能
董新丰 刘镕源 于峻川 编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以推动高光谱遥感精细应用为目的,在收集、整理国内外高光谱遥感地质应用代表性案例的基础上,介绍了(极)低级变质带划分、矿物成因与流体运移、矿床蚀变分带、区域找矿预测、矿山环境等五个方面的应用,希望能为推动高光谱遥感技术在地质领域的深入应用提供借鉴。

本书可作为地质与遥感专业研究生教材,也可供从事遥感地质技术开发与应用及相关专业的教学和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高光谱遥感地质作用建模及应用/甘甫平等编. —北京:科学出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-03-055165-8

I. ①高… II. ①甘… III. ①地质遥感—系统建模—应用 IV. ①P627

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 269959 号

责任编辑:杨 红 陈娇娇/责任校对:何艳萍

责任印制:吴兆东/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>

北京厚诚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

*

2017年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年11月第一次印刷 印张:17 1/2 插页:4

字数:435 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

这应该是一本“著”的书，然而却是一本“编”的书。

2001 年前后，应是国内外高光谱应用研究的“黄金时代”，相关的研究论文非常多，大家的思维非常活跃，也引起了我们对高光谱矿物流体信息探测与应用的兴趣。后来，我们申请到了国家自然科学基金，瞄准高光谱矿物微观信息提取的相关应用基础和技术方法研究。随后，在 2007 年的“遥感地质找矿”香山论坛上我们提出了“高光谱遥感矿床定位”研究的设想。但由于种种原因，这一方向的研究却未能深入下去，甚是遗憾。

但从 2001 年以来，我们基于对高光谱矿物微观信息探测及其应用的兴趣，收集了大量的相关文献。尤其是 2007 年以来澳大利亚以 Tom、Hstingtong 等为首的科学家在这一方面开展了许多开创性的工作，展示了高光谱遥感矿物微观信息在地质找矿、地质环境、土壤土质等方面的应用潜力；所收集的资料体现了这些科学家的远见和艰苦卓绝的工作。我们的工作与他们相比差距是非常明显的。假若在 2001 年以来我们也能一直开展这方面的研究，是否在该研究方面也有我们应有的位置？答案是不言而喻的。今天编写这本书，于我们是为了忘却的记忆，于读者是让大家了解国外在这一方面研究的现状、思路、方法及应用情况。

但是要编这一本书，非常不容易。尽管收集到上百篇相关资料，对相关资料进行了遴选、分类和组织编写。由于不可言说的原因，从 2008 年一直到现在，只能是一本编的书，有很多的想法应该体现但没有很好地编撰出来，最终呈现到读者面前还是有些许的遗憾。本书以推动高光谱遥感精细应用为目的，根据不同的研究地质对象及解决的问题，分为(极)低级变质带划分、矿物成因与流体运移、矿床蚀变分带、区域找矿预测、矿山环境等 5 个方面。对不同的应用对象，收集了国内外的代表性研究成果进行编译和评述，明确后续发展方向，为推动高光谱遥感技术在地质领域的深入应用提供借鉴。

本书共分七章：第一章、第二章由李万伦、甘甫平、闫柏琨编写，第三章由李万伦、闫柏琨、梁树能编写，第四章、第五章由李万伦、闫柏琨、刘镕源编写，第六章由闫柏琨、李万伦、董新丰编写，第七章由李万伦、甘甫平、闫柏琨编写。全书由甘甫平、闫柏琨统稿。

甘甫平 闫柏琨

2017 年 7 月

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 高光谱仪器研制发展现状	2
一、地面光谱仪	2
二、机载光谱仪	4
三、星载光谱仪	10
第二节 遥感地质勘查技术发展现状	11
一、校准和大气校正	12
二、光谱处理方法	13
三、处理过程——端元组分识别与特征选择	13
四、分类	14
五、光谱分解	15
六、新方法	17
第二章 高光谱地质作用建模与找矿预测的基础	20
第一节 地质基础——成矿作用、元素富集及矿物组合	20
一、矿床类型及成矿作用	20
二、元素富集的场所——地球化学界面	38
第二节 光谱基础——矿物光谱特征	40
一、矿物光谱特征	42
二、矿物成分与其光谱特征的对应分析	52
第三节 技术基础——矿物信息提取	70
一、高光谱矿物填图技术	70
二、在植被半覆盖区矿物吸收波长精确计算的方法——以白云母为例	76
三、数据及信息的真实性检验	84
第四节 方法基础——高光谱地质建模与找矿预测方法	88
一、基于特征谱带的地质反演分析模型	89
二、基于矿物集合体/矿物混合光谱的地质反演分析模型	90
三、基于单矿物共生组合的地质反演分析模型	92
四、高光谱找矿预测模式与流程	94
第三章 高光谱技术(极)低级变质分带建模	96
第一节 绿泥石类质同像信息探测及其在低级变质带划分中的应用	96
一、引言	96
二、光谱方法	97

三、XRD 方法	98
四、结果	99
五、讨论	103
六、结论	107
第二节 绢云母类质同像信息探测及其在低级变质带划分中的应用	107
一、引言	107
二、SWIR 方法	107
三、结果	108
四、讨论与结论	111
第三节 评述	112
第四章 高光谱技术矿物成因与流体运移建模	114
第一节 White Horse 明矾石矿床的岩浆成分证据高光谱探测	114
一、地质背景与前人工作	115
二、方法	118
三、遥感结果的实验室验证	121
四、矿物识别与矿物分带填图验证	123
五、成矿分析	128
六、总结和结论	131
第二节 西澳大利亚 Panorama 地区 VMS 矿床热液流体运移建模	131
一、地质背景	131
二、高光谱图像分类	133
三、地球化学方法	134
四、结果	134
五、结论	142
第三节 评述	142
第五章 高光谱技术在矿床蚀变分带中的应用	145
第一节 菲律宾 Mindanao 的 Co-O 低硫型金矿蚀变分带	145
一、引言	145
二、地质背景	145
三、矿物光谱	147
四、样品和分析方法	148
五、结果	151
六、讨论	157
七、结论	161
第二节 西藏驱龙铜矿蚀变分带中的应用	162
一、矿区地质概况	162
二、卫星高光谱 Hyperion 获取与预处理	162
三、矿物识别	163
四、综合分析	167

第三节 评述	168
第六章 高光谱技术在区域找矿预测中的应用	169
第一节 基于 ASTER 数据的西澳大利亚 Yilgarn 克拉通 Weld Range 绿岩带条带状 含铁建造中铁矿调查	169
一、引言	169
二、地质背景	170
三、方法	175
四、结果	177
五、讨论	180
六、结论	181
第二节 西澳大利亚 Pilbara 地区 HyMap 金矿化远景调查	181
一、引言	181
二、地质概况	181
三、数据获取与分析	183
四、HyMap 矿物填图	183
五、结论	186
第三节 评述	187
一、“矿物-蚀变矿物”信息提取与筛选方法	188
二、“蚀变矿物-找矿异常”的信息提取与筛选方法	189
第七章 高光谱技术在矿山环境中的应用	191
第一节 西班牙西南伊比利亚黄铁矿带 San Miguel 矿山短波红外光谱分析与含铁 水合硫酸盐矿物填图	191
一、引言	191
二、矿山地质与研究区概况	192
三、采样与分析步骤	196
四、结果与讨论	199
五、结论	212
第二节 利用光谱特征定量反演矿山 pH	213
一、引言	213
二、数据与方法	214
三、结果	219
四、讨论	225
五、结论	229
第三节 西班牙东南部 Rodalquilar 采矿区河流沉积物重金属污染填图	229
一、引言	229
二、重金属在矿物中的结合机理	230
三、研究区简介	231
四、数据与方法	231

五、结果与讨论	234
六、结论	243
第四节 评述	243
主要参考文献	245
彩图	

第一章 概 述

一般地,遥感可定义为在波长 300 nm~1 m 内对反射或辐射电磁波(electro magnetic radiation, EMR)进行测量的一门科学技术。地球遥感科学家根据相互作用的物理现象,将波长划分为若干测量区间。可见光-近红外(visible-near infrared, VNIR)波段区间反射的电磁辐射以能够产生宽幅吸收的电子过程为主。短波红外(short-wave infrared, SWIR)波段反射的电磁辐射以产生强吸收的分子振荡为主。热红外(thermal infrared, TIR)波段向外发射热辐射能量,同时也能反射少量辐射能量,辐射以分子振荡为主,同时产生宽幅和强烈的吸收谱。这些测量都将太阳作为一个能量源(TIR 实际上也是地球热能的一部分)。太阳光属于非相干电磁波,只能测量其振幅,无法测量其相位。雷达波长范围为 1 mm~1 m,它采用主动能量源,其振幅和相位均可测得。

在各种遥感测量过程中,人们关心的是地表物质反射出的能量有多少。朗伯反射体的反射率不随波长变化。所幸许多物体在特定波长时吸收能量,形成明显的光谱标志,并且可唯一识别。这些有选择的吸收区称为吸收特征。采用高光谱分辨率仪器,如高光谱成像仪(hyperspectral imager, HSI),可精确识别地表矿物。而光谱分辨率较低的多光谱成像仪(multispectral imager, MSI)可识别矿物或物体的大类。物体的光谱标志和颜色差不多,但可延伸到可见光之外的电磁波谱部分。正如地质学家根据颜色来识别矿物一样,人们也可利用极其精确测量的“颜色”来对矿物进行遥感识别。

在对矿化系统的遥感研究中,我们具有极为有利的条件:许多和热液蚀变有关的矿物都具有极为明显的光谱特征。因此,可利用遥感对裸露的热液蚀变矿物进行直接探测和填图。光学遥感的主要局限是地表穿透能力只有微米(μm)级,这就使得其主要适用于地球上的干旱和半干旱地区,因为那里的岩石和土壤都直接出露于地表。

因此,遥感成为地质在勘查过程中首先被使用的一种技术。现在已经很少有地质学家不先使用“Google-Earth”而直接到野外去工作的了。在勘查早期,只需要极低的成本,就可以通过 ASTER 图像对暴露地区可能的蚀变和蚀变分带有一个大致的了解。遥感技术是唯一的、可直接对大范围内与许多矿床有关的蚀变矿物进行填图的远距离勘查方法。从多方面来看,遥感等同于一个经验丰富的现代勘查家,它对蚀变和矿化的野外指示矿物具有良好的感知能力。更重要的是,遥感方法可以量化蚀变矿物组成,并在这些矿物中识别出关键的标志矿物及化学成分变化,而即使最有经验的勘查地质学家也看不到这些。

过去十多年来,遥感技术取得了极大进步。卫星系统已经可以提供更高空间分辨率与光谱分辨率的数据,而这对矿产勘查十分重要。亚米级卫片的出现使得人们在地球上任何一个地方都可获取与航空摄影质量相近的彩色图像。通过桌面获取图像,这在 20 世纪 90 年代是不可想象的,而现在通过服务器(如 Google Earth),基于网络对图像进行编辑已经实现。类似的航空照片拍摄和编辑本身则几乎完全被数字化摄影取代。通过 ASTER 卫星多光谱和机载高光谱图像,人们可以对矿物家族、矿物种类,以及个别矿物内部的化学置换进行填图。

对打印出来的卫片进行手工解译的方式已经被数据的数字化集成及采用基于 GIS 和统计学的分析和解译取代。

本章主要讨论过去十多年以来高光谱仪器研制及遥感数据处理两个方面的进展情况。数据处理侧重于遥感在地表矿物识别中的应用,重点放到从可见光到热红外传感器及适用该领域的数据处理方法。本章主要以 Milkereit 在第五届国际矿产勘查大会上的报告为基础,并根据近年来的最新资料补充和修改完成。

第一节 高光谱仪器研制发展现状

过去的十多年里,通过研制生产更好的传感器,遥感仪器在空间分辨率和光谱分辨率方面均取得了很大进步。信噪比的提高,使得矿物化学成分的微小改变现在都可以远距离成图。遥感数据的空间精度得益于 GPS 技术,以及雷达、激光和不同尺度遥感仪器的数字地形模型的发展。野外光谱测量的发展促进了遥感仪器的改进,反过来又推动了矿山、矿坑及钻孔岩心的详细光谱学分析,因而目前光谱遥感已经覆盖了从区域蚀变填图到钻孔岩心岩石学分析之间的所有层次。地面光谱仪取得的进展比较明显,推出了一代又一代新产品;机载光谱仪在推出新产品的同时,也在开展下一代产品的研制;星载光谱仪尽管近年来未曾取得突破,但目前正在研发新的产品。

一、地面光谱仪

地面遥感可以为地质遥感技术的发展提供重要支撑,野外便携式光谱仪必不可少。目前国内外都很重视便携式光谱仪的研制并取得了很大进展。地面光谱仪现正朝着快速、高精度与高分辨率及方便易用等方面发展。对高光谱遥感技术而言,这至少有两重意义。一是在缺乏高质量的高光谱遥感数据下,地面光谱仪获得的高光谱分辨率数据在一定程度上可以弥补这种缺口;二是高光谱仪光谱数据可与岩石学资料融合,尤其是通过岩心光谱测量与研究,可以获得三维立体地质信息,从而提高遥感技术在地质勘查中的实用价值。

1. PIMA

由澳大利亚 Integrated Spectronics 公司生产的便携式红外矿物分析仪(portable infrared mineral analyser,PIMA)是一种光栅扫描型光谱仪,早在 20 世纪 90 年代后期就得到了广泛应用。PIMA 作为一种野外热液蚀变填图的工具,由于它能从手工采集标本、土壤和岩石碎屑样品、钻孔岩屑和岩心获取光谱数据,给蚀变矿物组合的理解及关键蚀变矿物的化学成分变化(表现为红外光谱的细微变化)提供了重要信息,因而受到越来越多的欢迎。

PIMA 作为一种矿产勘查的野外工具对红外光谱学的发展,以及作为一种区域蚀变探测和填图工具对高光谱遥感的发展,都发挥了重要作用。但该仪器的缺点是波段范围较窄(1300~2500 nm),仅覆盖 SWIR 区间,光谱分辨率约 7 nm;数据获取相对较慢,读一次需要几分钟时间,用户每天只能作 200~300 次测量。这些因素限制了 PIMA 的应用。

2. FieldSpec 与 TerraSpec

这两种光谱仪出现的比 PIMA 晚,由美国 Analytical Spectral Device(ASD)公司研制。FieldSpec 光谱仪以 10 nm 的光谱分辨率采集 350~2500 nm 范围内的数据,并集成这些信息。它根据用户自定义的时间间隔每 100 ms 收集一次数据,因而每天可读数 1000 次以上。FieldSpec Pro FR 还能够利用太阳能,通过不同的前置光学设备进行远距离测量,这在需要实

时地面测量的遥感应用中十分有用,可支持航空调查数据进行精确的校准。目前该系列包括 Pro FR(全光谱)与 HandHeld(手持)两种便携式光谱仪。

TerraSpec 也是 ASD 公司推出的,于 2004 年上市,专门为矿业应用设计。它除了无源遥感以外,综合了 FieldSpec Pro FR 的所有特点,还将光谱分辨率提高到 5 nm。光谱分辨率的增强使得它能够识别某些关键蚀变矿物(如绿泥石)微小的波长变化,从而可用来指示矿化(图 1-1)。其第 4 代产品测量速度更快。在短波红外(SWIR)光谱范围内的性能也得到提高,尤其适用于深色矿物分析。这些增强的性能使该光谱仪可用于测量低密度和低反射率的矿物(如蛇纹石和绿泥石等含铁矿物),这些物质之前很难测量。凭借这些性能再加上更有效的数据获取能力,ASD 公司希望该仪器可取代 PIMA 成为最受欢迎的野外光谱工具,实际上它也促进了坑面和矿山填图仪器及岩心测井工具的研发进步。

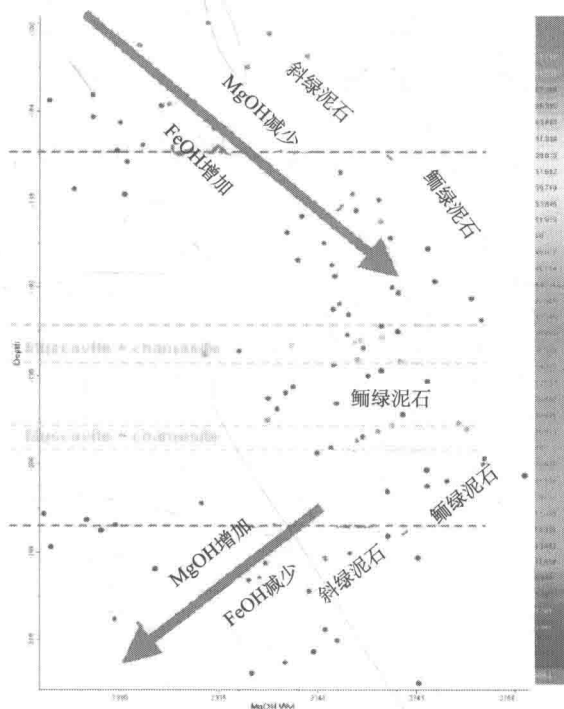


图 1-1 西澳大利亚 Jundee 金矿钻孔岩心的 ASD TerraSpec 分析

向矿化位置靠近,绿泥石吸收波长逐渐增加,因而 FeOH 含量也相对 MgOH 增加

3. SVC HR 系列

美国 SVC 公司研制的上一代光谱仪包括 GER 1500、GER 2600 和 GER 3700 等,新一代光谱仪改名为 SVC MR-768、SVC HR-768(S) 和 SVC HR-1024。新一代光谱仪不仅采用新式的设计,确保体积轻巧,便于野外携带使用,而且能够在整个 VIS-NIR-SWIR 光谱范围内获得高光谱分辨率的数据。该公司具有 20 年遥测领域的开发经验。新一代产品在内置存储容量、无线蓝牙数据传输及应用软件开发等多方面的功能均有很大提升。

4. OFS 2500 系列

英国海洋光学(Ocean Optics)公司是世界领先的光传感和光谱技术解决方案提供商。其研

制的 OFS2500 系列地物光谱仪具有精度高、便于携带、适合野外操作等特点。该产品广泛应用于高光谱地球遥感、农业、林业、海洋、环境监测等领域。波长覆盖 350~2500 nm，具有优异的全谱响应和高分辨率；也可根据特殊用户需要，光谱范围下限扩展至紫外 200 nm。

5. 岩心扫描系统

澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)根据 ASD 光谱仪开发了矿坑填图和岩心测井工具，并提供了半商业化的 HyLogger 和 HyChips 软件，目前已集成为 HyLogging 岩心光谱数据系统。该系统都利用 ASD 光谱仪，并综合了 2D 转换表和机器人技术，可给任何拥有 ASD 或类似光谱仪的组织使用。HyLogging™ 系统包括三套硬件设备，即 HyLogger™-2/3、HyChips™与 TIR-Logger™，分别具有不同的功能。HyLogger™-2/3 主要用于岩心、岩心矿片或粉末的自动化光谱扫描。其中第 2 代工作区间为可见光-近红外到短波红外，而第 3 代则可对波长为 6000~7000 nm 的热红外区间矿物进行识别。TIR-Logger™最初是 HyLogger™-3 的原型系统，可测量更长的波长范围，即 5000~14000 nm(TIR)。HyChips™的光谱范围及可识别矿物都与 HyLogger™相同，主要适用于岩屑扫描。

ASD 光谱仪能够以 3 nm 的光谱分辨率和 0.5 mm 的空间分辨率采集岩心高光谱图像数据，使得红外反射率光谱学几乎进入了岩石学的领域(图 1-2)。

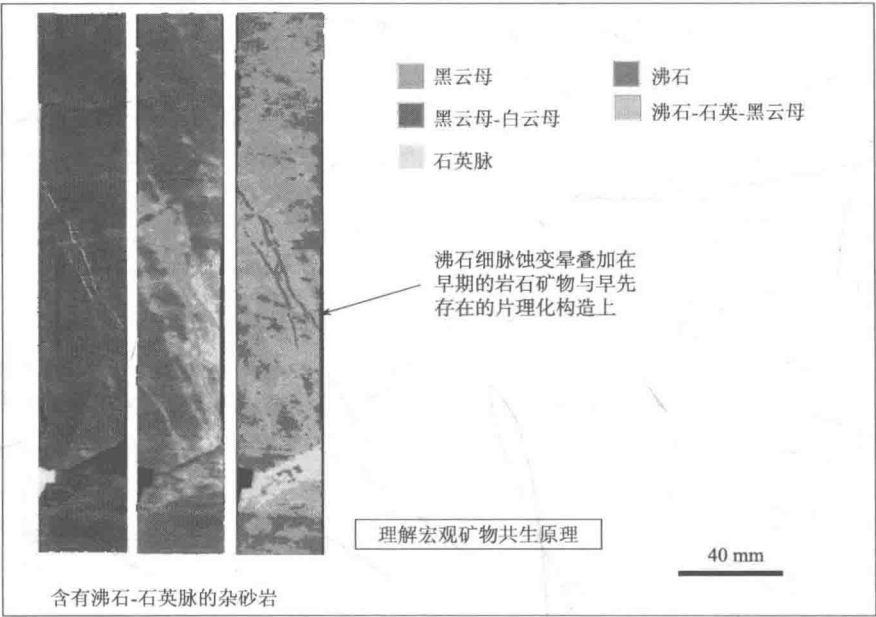


图 1-2 岩心光谱扫描了解蚀变矿物的共生关系(以 Anglo-American 公司的 TerraSpec 岩心成像系统为例)

二、机载光谱仪

机载光谱仪在获得遥感数据方面比地面遥感具有明显的空间优势，但相对而言，其研制的技术难度和要求更高。与需要庞大经费投入的卫星遥感系统相比，优先开发机载光谱仪也许是许多国家一种比较平衡的策略。随着可用传感器数量的增加，在地质矿产勘查中遥感技术可以使用具有较高空间分辨率与光谱分辨率的数据，从而取得更大的发展。

1. 机载高光谱成像光谱仪发展简史

最早的机载光谱仪 Geoscan AMSS MK I 和 MK II 传感器不仅可得到多光谱数据,也可获得高光谱数据。之后出现的是 AVIRIS 与 GER DAIS 63。前者只对科学研究有用,后者是唯一的商用传感器。然而 AVIRIS 要求安装在专用飞机上,GER DAIS 63 要求安装在纽约州 GER 平台的飞机上。这就意味着在美国或加拿大以外的地方使用这两种传感器进行调查,都必须同时移动传感器和飞机,给本来已经很高的移动费用增加了许多进口税和相关的成本。

Geoscan AMSS MK II 传感器有一个稳定旋转平台,在数据采集过程中可消除空气湍流的影响。此外,为便于对图像进行地学编码,在飞行过程中还记录了 GPS 数据。但是,不可能以三个坐标的方式记录下每一个像素的精确飞行方向,因此需要根据先存影像或图件,对数据进行手工的地理参考校正。与其他光谱数据产品(如蚀变矿物图)一样精确可能仅在光谱背景下成立,因为它们缺乏空间精度,尤其是机载数据由于其自身内在的几何扭曲变形,在地形起伏很大时就更加突出。

随着更精确的民用 GPS 和 IMS 技术的出现,以及更加复杂的稳定平台的建立,可精确记录传感器相对飞行器和地面的瞬时 3D 方向,有可能精确去除所有机载影像数据的几何失真和变形。由于仪器本身位置和方向的信息更加精确,再加上精确的高分辨率数字地形模型,因此对机载遥感影像进行精确的正交处理成为可能。由这些数据衍生的产品在 GIS 中更容易与其他不同类型的数据进行集成,从而大大增加了数据本身的价值和应用范围。

把遥感数据同其他信息进行集成的思想受到 Texaco 的高度重视,他与地球物理与环境研究集团(Geophysical and Environmental Research Corporation)签约开发了 Texaco 能源与环境多成像光谱仪(TEEMS)高光谱传感器。TEEMS 系统是航空遥感技术的一大重要进步,主要在于它能够获取电磁波谱上紫外光、可见光、近红外、短波红外和热红外波段的高光谱数据,从相同的平台上同时获取的还有合成孔径雷达(SAR)数据。SAR 数据为构造地质填图提供数字高程模型,并且使图像数据可以被正交处理。

尽管 VNIR 和 SWIR 具有的能力,其他新式传感器(如 HyMap)也有,但在 TEEMS 中综合高光谱 SWIR 和多光谱 TIR 数据,就可以对硅酸盐矿物、石英和石榴子石进行填图,尤其当其与其他蚀变矿物在一起时。以前虽然 GER DAIS 和 Geoscan AMSS 传感器都具有热红外模块,但只有 Geoscan 数据具有对硅石和夕卡岩矿物进行填图的能力。TIR 数据用于夕卡岩和硅酸盐填图的价值进一步得到 Cudahy 等(2000)的证明,他们使用空间增强波段阵列光谱摄影仪系统(SEBASS),该系统能够从 7.6~13.5 μm 一共 128 个通道中收集信息。

20 世纪 90 年代晚期,De Beers AMS 和随后的 Probe 及 HyMap 传感器的出现,才首次有了真正成为可商用的高光谱传感器。这些仪器很紧凑、重量也轻,可以与普通货物一样被搬运到其他地方,并安装在当地的航行器上。HyVista 公司开发的 Probe-1、Probe-2,以及他们自己的 HyMap 传感器,都采用“肯尼迪”或摆扫式设计,遵循早期传感器(如 Geoscan GER-DAIS63)的设计方式。

新传感器中,除 AVIRIS 外,都在上一代的基础上增加了光谱分辨率。其中 Geoscan 和 GER DAIS 传感器分别由 24 个和 63 个通道收集数据,而 HyVista 在相同波长范围内有 128 个光谱波段可记录信息。新仪器光谱分辨率的提高,使其与上一代机载和星载传感器相比,具有极大识别单一蚀变矿物和变体的能力。例如,不仅伊利石这样单独的矿物可以识别,伊利石的各种变种现在也可以识别(图 1-3)。这些新传感器与上一代多光谱传感器相比,另一

个重要进步是能在水汽和其他气体吸收波段获得数据。除 AVIRIS 外，早期传感器的主要光谱波段集中在大气窗口波段范围内，不具备在这些波长收集数据的能力。通过收集水汽吸收波长范围内的信息，就可以以像元为基础，利用 AVIRIS 和其他新传感器获得数据来测量单个像元的大气湿度，进而利用新建立的大气模型(已融入商用遥感软件包)精确地把辐射率数据转换成反射率。

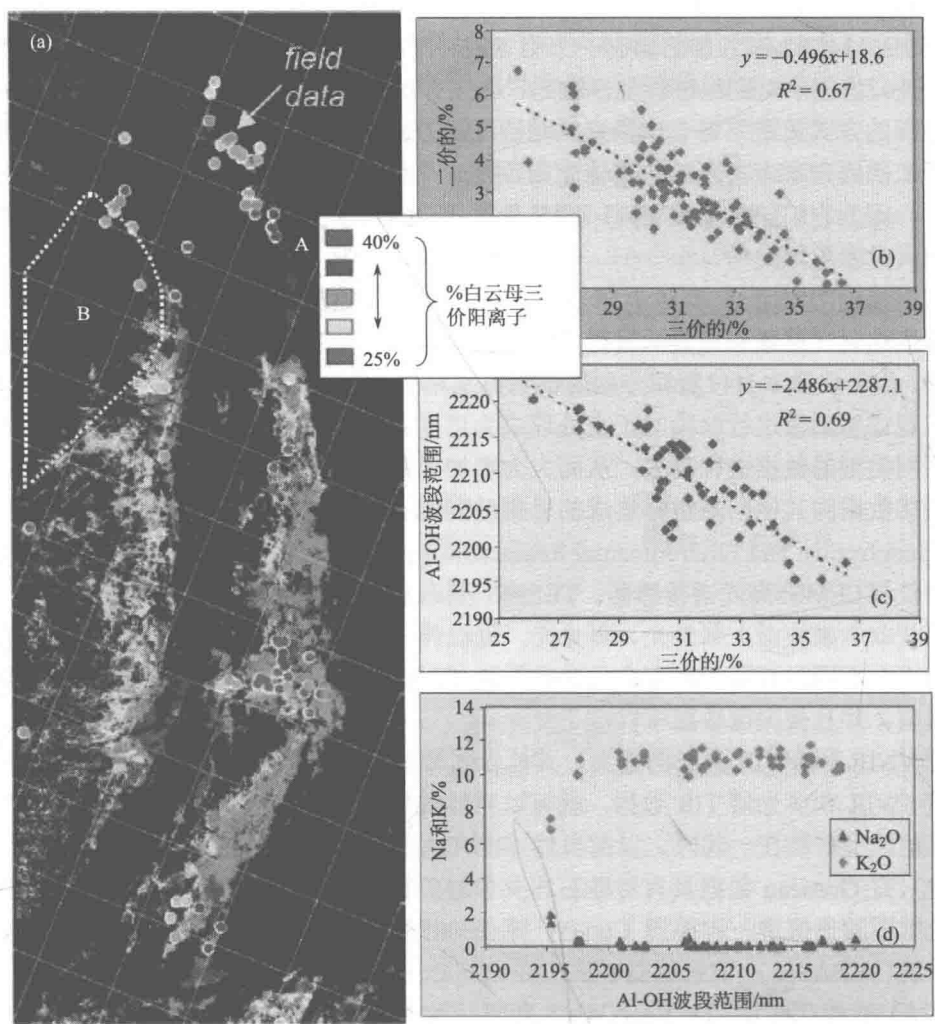


图 1-3 (a)白云母八面体层内三价阳离子所占百分比，根据 HyMap 数据和野外样品的 PIMA 数据所估计；样品(彩色圆圈)来自澳大利亚西部 Panorama 火山成因 Pb-Zn 矿床。(b)散点图：三价阳离子的电子显微探针白云母分析——二价阳离子。(c)散点图：八面体层内三价阳离子所占百分比的电子显微探针白云母分析——2200 nm 最小吸收波长。(d)散点图：2200 nm 最小吸收波长——K 和 Na 百分含量的电子显微探针白云母分析

此前，Geoscan 和 GER DAIS 传感器采用内部数据标准化过程将数据转换成视反射率，或者使用从大型均质目标采集的野外光谱信息，根据经验线性方法对这些数据进行校正并转

换成反射率。

所有上述应用于矿产勘查的传感器都采用摆扫式系统。摆扫式传感器的工作原理是通过镜片旋转,扫视一定刈幅宽度的地面,以固定角度瞬时视场角的方式来收集数据,以穿过飞行路径的像元 $\times$ 像元和平台推进时的线 $\times$ 线来构建图像。另外一种传感器为推扫式,它以线 $\times$ 线为基础来收集数据,每个穿过线的像元都有自己的探测阵列。

尽管摆扫式系统的数据质量随着时间的增长有显著的提高,但由于信噪比不好,摆扫式系统仍然排在推扫式传感器之后。早期传感器的推扫式系统受到当时可用的光学阵列的规模限制,还有阵列内部对每个探测器进行校准和使之水平的困扰。探测器性能的不一造成了坏的像素及图像条带,这些问题一直伴随着这类传感器,因而在数据处理中需要制定新的流程,开发能够减少这些问题影响的软件。

由加拿大 ITRES 公司开发的传感器——紧凑型航空光谱摄制成像仪(compact airborne spectrographic imager, CASI),仅采集可见光和近红外波长范围内的数据;其短波红外姊妹系统——SWIR 全光谱成像仪(SWIR full spectrum imager, SFSI)也颇有新意,它能够在一定波长范围内改变其数据采集时的光谱波段。不过,尽管这两个传感器都被成功地应用于矿产勘查,但它们的应用仍然受到限制,这在很大程度上是因为其刈幅宽度过窄(仅 2 km),大范围的勘查必须增加飞行次数,从而也增加了测量成本。另外一个限制是需要融合相互独立的 VNIR 和 SWIR 数据,由此带来不可忽视的航空摄影测量几何问题。

更新的推扫式传感器,如 Spectir Hyper SpecTIR (HST) 和 Spectir ProSpec TIR (AISA 双波段 VNIR/SWIR),光谱范围为 450~2450 nm,由 499 个光谱通道组成。HST 仪器既可以在地面静态-水平模式下工作,又可以在航空模式下工作。地面静态数据收集时的空间分辨率为 0.1~3 m,而航空数据收集时的空间分辨率为 0.25~5 m。这些能力使得它们在区域和矿区勘查及矿山和矿坑填图中可生成具有极高光谱分辨率和空间分辨率的数据产品。美国内华达州弗吉尼亚市运用 SpecTIR 数据取得了与其他数据相比特别好的结果。SpecTIR 已被证实是最好的航空和航天数据来源,仅具有 5 nm 光谱分辨率的野外光谱仪能够识别所有的蚀变矿物,可对三类差别明显的矿物(伊利石+地开石、高岭石和明矾石)进行填图(图 1-4)。

2. ARGUSTM 系统

ARGUSTM 系统创新性地把航空高光谱遥感与航空物探技术相结合,同时操作一个伽马能谱仪、一个铯磁力仪及三个独立的光谱仪。这三个独立的光谱仪分别为 VNIR(0.37~1.05 μm , 光谱分辨率为 0.005 μm)、SWIR(0.92~2.5 μm , 光谱分辨率为 0.01 μm)、TIR(7.8~13 μm , 光谱分辨率为 0.06 μm)。这个系统在三个波长范围内提供 400 个波段,空间分辨率约为 10 m。

该系统取得了一些技术上的成功,如在西澳大利亚进行了全景案例研究,不过并没有被广泛使用。其原因可能是航磁测量与辐射测量通常所起的作用不一样,它们都具有大范围的对地观测能力,但高光谱数据在地表覆盖少且出露良好的情况下效果更佳。此外,在空间上间隔较大的飞行线之间作光谱测量并不是一项比较划算的工作,仅需要地球物理资料的公司也不希望为这些额外的光谱数据支付另外的报酬。

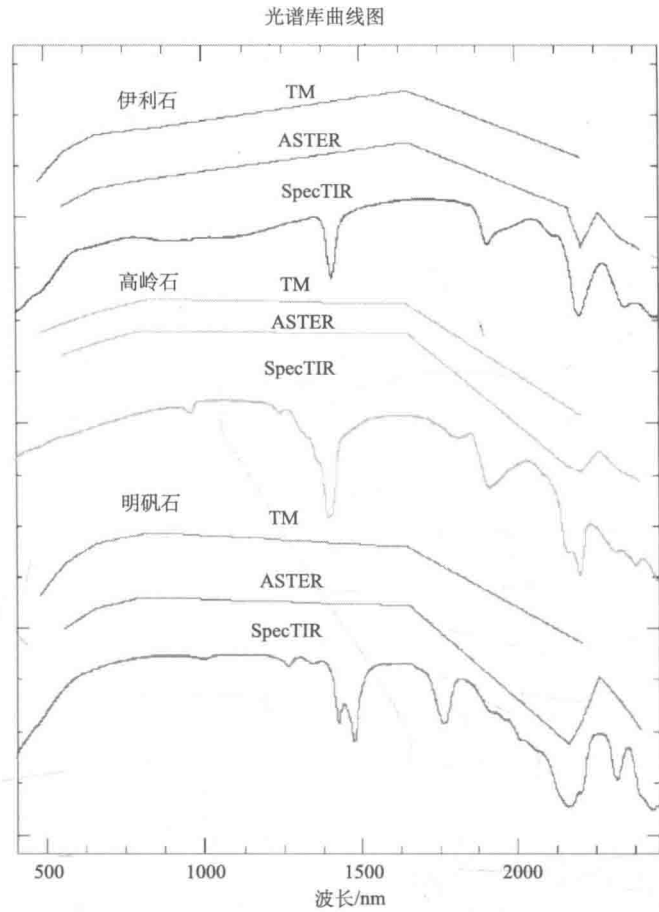


图 1-4 由 TM、ASTER 和 SpecTIR 测量的明矾石、高岭石和伊利石的光谱特征对比

3. 下一代机载成像光谱仪

2011 年在英国爱丁堡 (Edinburgh) 举行的第七届 EARSel 成像光谱 (IS) 专题研讨会上, 将 “下一代成像光谱传感器” 列为第一个分论坛主题。在该论坛上, 与会学者介绍了当时国际上主要的几种机载光谱仪的研发现状。

1) 长波红外高光谱成像仪

长波红外高光谱成像仪采用未冷却的热学相机和传统的 CI 分块干涉仪, Cabib 等在会议上介绍了该系统的设计和性能。

从 20 世纪 90 年代早期开始, CI 就被应用于 FTIR 高光谱成像仪的开发中, 后者采用 Sagnac 或类似的干涉仪。CI 开创了此类高光谱传感器商业化应用的先例。CI 先后有 CCD 可见光型、采用冷却的 InSb 照相机的 3~5 μ m 红外型, 目前已经研制出了采用未冷却的红外相机 (8~12 μ m) 的长波红外 (LWIR) 型。芬兰的 Holma 等在会议上介绍了这种高光谱 LWIR 推扫式成像仪的进展。

高光谱成像仪有两种设计方案, 都得到了广泛的发展。一种采用微探测器, 另一种采用 MCT FPA。两种成像仪均是使用具有透射光栅和同轴光学特征的推扫式成像光谱仪。高光谱成像仪的研发重点是开发具有良好成像质量和压缩比例的高性能仪器, 能适用于各种工业用

途和遥感用途。实现这些目标最大的一个挑战就是要控制仪器的辐射,这样就不需要对整个仪器进行极大的冷却。这个问题对高光谱成像仪尤其突出,因为来自目标的光学信号从光谱上覆盖数十个像元,而仪器辐射并没有分散。假如不经过任何压制,仪器的辐射可能超过来自目标辐射 1000 倍以上。

为了解决仪器辐射及其变化,在一种超导冷却 MCT 探测器中采用了 BMC 技术(芯片背景监测)、背景压制和仪器温度稳定方法。目前已经完成相关设计,并且在 8~12 μm 光谱区间高压压缩比成像仪中实现。2009 年,已经报道了基于微探测器阵列的第一种 LWIR 成像仪。现在这种成像仪的改善型也已经完成,其成像灵敏度提高了 3 个因子,SNR 提高了大约 15%。

2) SYSIPHE 航空高光谱成像系统

根据法国和挪威 MoD 签署的协议, SYSIPHE 航空高光谱成像系统正在法国的 ONERA 和挪威的 Norsk Elektro Optikk (NEO)、FFI 同时进行研发。该系统覆盖从可见光到长波红外之间的全部大气传播波段。该系统具有较好的光谱、空间和辐射分辨率,所有波段的地面分辨率好于 0.5 m。其传感器由两部分组成:一部分名为 HySpex2,由 NEO 研发,涵盖可见光、近红外和短波红外(SWIR)光谱范围;另一部分名为 SIELETERS,由 ONERA 研发,涵盖中波红外(MWIR)和长波红外(LWIR)范围。其集成处理系统名为 STAD,由 ONERA 研发,用于图像产品(如有地理坐标参考的光谱辐射率、光谱发射/反射系数和地表温度)的存储和发布。FFI 负责系统的实时图像处理能力。该系统将被集成到德国 DLR 操作的 DO-228 飞机上。SYSIPHE 将成为一个参考数据收集系统,旨在服务于各种军事应用方面的研究,但是也可以民用。

4. APEX 成像光谱仪

1) 第四代成像光谱仪 APEX 特点

APEX 是航空 Prism 实验的简称。它是一种弥散型的推扫式成像光谱仪,是第 4 代此类仪器的代表。它特别注意固体校正,包括从实验室校正、飞行过程校正到错位校正。它在数据处理环节采用了一个物理传感器模型,不但可以作辐射校正,还可以监测辐射量子的流动变化。

APEX 挑战现有模型和设备,并将其应用拓展到极致(如辐射传输规律、地面支持光谱仪等)。Schaepman 等(2011)在会议上提出了将来可能用到的处理极高光谱分辨率数据的方法,演示了各种各样的图像产品,包括固体各向异性校正和数据的多元分析及其在反演过程中的应用,还讨论了该系统的使用前景。

2) 研发现状

最近几年,APEX 传感器由一家瑞士/比利时跨国公司研制完成,并得到欧洲空间局(ESA)的 PRODEX 项目和 ESA-EO 的支持和批准。APEX 项目包含航空弥散型推扫式成像光谱仪(APEX)、专门的数据处理和存储系统(PAF),以及一个用于仪器校正用途的校正总部基地(CHB,属于 DLR)。高光谱传感器工作区间是 380~2500 nm 的太阳反射波长范围,包括两种弥散性光谱通道,它们部分共享光路。Meuleman 等在会议上描述了仪器校正和试验结果,并介绍了相应的优化校正和处理方法。

5. 新一代 AVIRIS 成像光谱仪的特征和研发现状

过去 20 年,美国国家航空航天局(NASA)的 AVIRIS 在成像领域中连续的光谱测量被广