遥感地质勘查技术与应用研究

王润生，熊盛青，聂洪峰，梁树能，齐泽荣，杨金中，闫柏琨，赵福岳，范景辉，童立强，林键，甘甫平，陈微，杨苏明，张瑞江，葛大庆，张晓坤，张振华，王品清，郭小方，李丽
中国国土资源航空物探遥感中心，北京，100083

内容提要：遥感的发展极大地拓宽了人类的视野和视觉能力，以其宏观性、综合性、多尺度、多层次的特点，已成为地质研究和地质勘查不可缺少的技术手段，在地质调查、矿产勘查、地质环境评价、地质灾害监测和基础地质研究等方面都发挥了越来越大的作用。随着传感器分辨率（空间、光谱、时间、辐射）的不断提高，特别是高光谱和干涉雷达技术的发展，不仅极大地提高了遥感的观测尺度、对地物的分辨本领和识别的精细程度，而且使遥感地质发生了由宏观探测到微观探测，由定性解译到定量反演的质的飞跃，将遥感地质和应用都推向一个新的高度。本文首先简要介绍了遥感技术的发展及其意义，遥感地质找矿的原理、方法和遥感找矿模型，然后分别从岩矿波谱、遥感图像处理、多光谱蚀变异常提取、高光谱矿物识别与填图、InSAR地表形变调查与监测、遥感找矿模型、遥感地质灾害调查与监测7个方面介绍了遥感的基本原理、主要的技术方法、技术特点和技术关键、主要的应用领域，以及取得的一些研究成果和应用实例。

关键词：遥感地质；岩矿光谱；遥感图像处理；遥感异常；高光谱矿物识别；遥感找矿模式；雷达干涉；地质灾害监测

遥感是利用遥感器从空中（飞机、卫星等）通过探测物体与特定谱段电磁波的相互作用（辐射、反射、散射、极化等）特性，识别地物及其物、化性质的技术，而有别于探测力场（重力、磁力）、弹性波等特性的地球物理方法。遥感是在航空摄影的基础上发展起来的，1972年美国搭载多光谱扫描仪（MSS）的陆地卫星（LANDSAT）发射成功，标志着遥感作为一门新型技术学科的确立。目前遥感常用的谱段为可见—短波红外（0.38～2.50μm）、中红外（3～5μm）、热红外（8～14μm）和微波（0.8～30cm）谱段。

遥感的发展极大地拓宽了人类的视野和视觉能力，以其宏观性、综合性、多尺度、多层次的特点，已成为人类研究地球表层系统有力工具，也成为地质研究和地质勘查不可缺少的技术手段，在地质调查、矿产勘查、地质环境评价、地质灾害监测和基础地质研究等方面都发挥了越来越大的作用。

遥感经过几十年的发展，各种类型对地观测卫星的升空，新型传感器的不断推出，小卫星系统、无人机系统、艇基技术的发展，促进对地观测向整体化、系列化和国际化的方向发展，多平台、多尺度、多层次、多传感器的立体对地观测体系正在逐步形成。随着传感器频谱范围的不断拓宽，分辨率（空间、光谱、时间、辐射）的不断提高，不仅极大地提高了遥感的观测尺度、对地物的分辨本领和识别的精细程度，而且使遥感的数据处理、信息提取和工作方法都发生一些质的变化和飞跃，将遥感技术和应用都推向一个新的高度（王润生，2008）。

目前民用卫星图像的空间分辨率已达到厘米级。空间分辨率不断提高使地物精细的空间特征，包括地物的大小、形状、阴影、空间分布、纹理结构、

注：本文为中国地质调查局科研项目“矿产资源评价中遥感新方法新技术应用研究”（编号 DK9902062），“遥感地质资源评价应用综合实验场研究”（编号 1212010786002），“重要成矿带遥感地质调查综合研究”（编号 1212011087106），“中热红外多/高光谱矿物填图及遥感异常信息提取技术研究”（编号 1212010660601），305项目“加速查明新疆优势金属矿产资源及大型矿产的综合研究”（编号 96-915-05-06B），国土资源部公益性行业科研专项项目“地质灾害干涉雷达监测预警技术系统研究”（编号 200811053），国土资源大调查项目“喜马拉雅山地区重大地质灾害遥感调查”（编号 1212010818007），航遥中心青年创新基金项目（编号 2010YFL10）等项目资助的成果。
收稿日期：2010-04-11；改回日期：2011-08-20；责任编辑：郝梓国。
作者简介：王润生，男，1944年生。教授级高工，博士生导师。遥感地质专业。通讯地址：100083，北京市海淀区学院路31号航遥中心；Email：agrsw2010@163.com。
DOI：CNKI：11-1951/P.20111025.0834.009 网络出版时间：2011-10-25 8:34
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20111025.0834.009.html

与其它地物的空间关系等,在遥感图像上一览无余。地物的空间特征在地物识别中越来越占据主导的地位。

时间分辨率的提高细化了遥感动态监测的时间粒度,使遥感变化检测研究发展到对地物或现象演化过程的研究,序列图像分析方法会逐渐成为新的研究热点。

高光谱技术的兴起与发展,使遥感可以依据获得和重建的像元光谱,直接识别地物类型、地物组成、以致地物的成分,反演地物的物理、化学参量,使遥感发生了由宏观到微观探测的质的飞跃,并使遥感应用逐渐摆脱"看图识字"的阶段,而越来越依赖于对地物波谱特征的定量分析和理解。

高光谱、高分辨率、热红外多/高光谱、雷达干涉(InSAR)、激光雷达(Lidar)等技术的兴起和发展,使遥感地质学继表层遥感应用领域之后,逐渐步入了定量化发展阶段。

遥感地质定量化主要包括(王润生,2008):①地质体几何参数及其变化的定量量测或量化估计,如地质体或地质构造产状(Berger Z et al., 1992; Bilotti F et al., 2000),滑坡滑动方向、滑动距离和滑动体积(王治华, 2007),地表形变量和形变速率等 (葛大庆等,2007);②地质体成分,主要是组成岩石的基本成分——矿物的丰度和化学成分的定量反演(Baygh W M et al., 1998; Jones S, et al., 2005; Pieters C M et al., 2003; Kirland L et al., 2002; Crouvi O et al., 2006);③以遥感信息为主要信息源的遥感地质定量应用模型,如岩性岩相的划分与地质制图模型(Harris J R et al., 2006)、成矿模型(Brown A J et al., 2006; Mars J C et al., 2006)、找矿预测模型(Herrmann W et al., 2001; 甘甫平等,2003)、矿产资源评价模型(杨武年等[1])、矿山环境监测模型(Williams D J et al., 2002; 刘圣伟等,2003)、地质环境评价模型(和正民等,2007)。

遥感地质找矿是从遥感图像或遥感数据中,发现和提取成矿地质背景、成矿地质条件和成矿地质形迹等与成矿地质作用有关的成矿、控矿和找矿信息,建立遥感找矿模型。包括矿源层信息;成矿母岩;控矿、导矿、容矿等构造信息;火山机构、隐伏岩体等热动力信息;矿化蚀变等成矿作用信息以及成矿后期剥蚀和破坏信息等(杨日红等,2004)。

地质异常找矿理论认为,矿床的形成是各种地质因素发生变化的结果,并又使一些地质因素发生改变,找矿过程就是寻找有别于地质背景的异常的过程。遥感异常是重要的地质异常之一(王润生,1996)。广义的遥感异常包括由"线"、"环"、"块"、"色"等图像特征以及它们之间的相互关系所反映的成矿地质背景、地质条件和成矿作用信息。狭义遥感异常专指遥感矿化蚀变信息。

遥感地质找矿模型的建立使遥感地质由图像和信息层面上升到知识和规则层面。遥感地质工作者通过对多年实践经验的总结,形成了不同类型、不同风格的以遥感信息为主导的遥感找矿模型或找矿方法,代表性的有五要素找矿预测法(于学政,2003;杨日红等,2004)、矿源场-成矿节-遥感信息异常找矿模式(赵福岳,2000 年)、综合信息找矿预测、以及以蚀变异常为核心的遥感综合找矿模式等。

五要素找矿预测法将遥感地质信息归纳为"线"——控矿、导矿、容矿等构造信息;"环"——火山机构、侵入体等信息;"带"——矿源层信息;"块"——构造岩块信息;"色"—色块、色晕、色斑、色带等热液蚀变信息,通过对这些信息的提取、分析及其相互关系的研究,优选找矿靶区。矿源场-成矿节-遥感信息异常找矿模式中,矿源场指矿源层、成矿母岩体、控矿导矿构造等成矿背景信息;成矿节指矿源场各要素的空间展布和空间组合型式;遥感信息异常包括遥感色调异常以及线、环构造。综合信息找矿预测则是将遥感提取和解译出的遥感地质特征和遥感异常作为独立的特征变量,与地质、地球物理、地球化学等变量一起作为模型的输入,根据地质成矿理论或对已知矿床(点)特征的分析和统计,确定各个变量的权重,圈定找矿有利地段或找矿靶区。

金属矿化作用和油气微渗漏作用常伴随或引起周围岩石、上覆土壤以至于植被中的矿物或化学成分、地球化学场、自然景观及它们相应的波谱特性发生变化,在遥感图像上形成与周围物质或景观不同的光谱或色调特征,称之为"遥感色调异常(王润生等,1999)"或"遥感找矿异常(杨金中等,2003)"。应用图像处理方法,从多光谱图像中,增强、识别和提取这些异常信息,是遥感找矿的重要途径之一,自 20 世纪 70 年代起即成为遥感地质工作者的热点研究问题之一。经过几十年的发展,形成了以光谱比值和主成分分析为核心的遥感色调异常提取多方法协同工作模式(王润生等,1999);总结了一套面积性遥感找矿异常提取、分析、筛选和解释的标准化的处理程式(杨金中等,2003);发展了基于逐步分离背景干扰信息的"遥感信息多层次分离定量提取技术"(

吴德文等,2007)和“背景”、“干扰”、“异常”光谱空间结构分析方法(张远飞等,2009)。这些成果将异常提取推进到一个新的发展阶段。

矿化蚀变是成矿成岩作用的直接产物,而被认为是找矿的一种直接指示标志。以蚀变异常提取为核心的遥感找矿模式是在蚀变异常提取的基础上,通过对所提取异常的分类、分级、解释、评价和查证,结合线、环、带、块异常和其它地质、物化探资料,研究蚀变异常地质构造位置和成矿地质条件,排除区域变质、地表风化等所形成的非矿异常或干扰,优选矿化异常。以蚀变异常提取为核心的遥感综合找矿模式是一种更直接的遥感找矿方法。

TM/ETM$^+$图像是遥感地质使用最多的数据,其光谱分辨率较低,在对地质最有用的短波红外谱段设置了两个波段,即 TM/ETM$^+$ 5(1.57～1.78μm)和 TM/ETM$^+$7(2.10～2.35μm),波段带宽都在 200nm 以上。蚀变岩石与背景岩石的波谱差异由于宽波段的平均效应而显著弱化,不同类型和不同强度的蚀变在 TM 等宽波段图像上一般都表现为一种综合效应,加之地表岩石漆、地衣、土壤、植物等的影响,从 TM/ETM$^+$图像中一般仅能识别铁染异常和羟基异常(包括泥化和碳酸盐化)两大类蚀变信息(杨金中等,2003;毛晓长等,2005)。ASTER 由于在相当于 TM7 的短波红外光谱区间设置了 5 个细分波段,光谱区间分别为 2.145～2.185μm、2.185～2.225μm、2.235～2.285μm、2.295～2.365μm、2.360～2.430μm,光谱带宽为 40～70nm。可有效地划分绢英岩化、青盘岩化、泥化等不同的蚀变带,识别和区分 Al-OH 矿物、Mg-OH 矿物、碳酸盐矿物(Mars J C et al., 2006;毛晓长等,2005)。ASTER 还在热红外区光谱区间设置了 5 个光谱波段,可用于定量反演岩石中 SiO_2 含量(闫柏琨等,2006)。闫柏琨等成功地从 ASTER 数据中提取了铁氧化物、硅酸盐铁、全铁、明矾石、方解石/白云石、绿泥石/绿帘石、高岭石、白云母/蒙脱石、二氧化硅 9 大种类矿物或成分❷。

高光谱不仅能识别蚀变异常,还能识别单矿物以至矿物的化学成分及晶体结构,定量或半定量估计蚀变强度和蚀变矿物相对含量(王润生等,2007)。在可见—短波红外谱段,识别的矿物主要为 Fe、Mn 等过渡元素的氧化物和氢氧化物、含羟基矿物、碳酸盐矿物以及部分水合硫酸盐矿物,可识别的矿物可达近 40 种(Clark R N et al., 2003),包括绝大多数蚀变矿物。分析蚀变矿物组合和蚀变分带,判定蚀变类型,追索矿化热液蚀变中心,圈定找矿靶区以至成矿的有利部位(Berger B R et al., 2003; Kruse F A et al., 1991;甘甫平等, 2002);或通过识别与成矿密切相关的指示矿物或标志性岩石,寻找同种类型的矿床(Bierwirth et al.,2002);或检测植被金属中毒和油气微渗漏引起的地植物异常(Li L S L et al., 2005)。还可根据矿物的空间分带、典型矿物或标志矿物的成分及结构变化,推断成岩成矿作用的温压条件、热动力过程、热液运移和岩浆分异的时空演化,恢复成岩成矿历史(Van Ruitenbeek F J A et al., 2005; Bowen B B et al., 2007),建立不同矿床的成矿模型和找矿模型(甘甫平等, 2002; Brown A J et al., 2006; Herrmann W et al., 2001)。使用中—热红外谱段,更有可能识别绝大多数的矿物类型(Cooper B L et al., 2002;闫柏琨等,2005)。矿物填图技术的发展使遥感地质找矿进入一个新的历史发展阶段。

雷达干涉技术(InSAR)是最近 30 余年来发展起来的一项新的对地观测技术,它不仅探测雷达波的后向散射,还探测雷达波的相位信息。利用不同位置探测的雷达波的相位差,反演地表三维空间位置(Graham L C,1974)及其微小变化(Wright T J et al., 2004),而被广泛应用于地面沉降(Ferretti A et al., 2000)、矿区沉陷、滑坡(Fan Jinghui et al., 2010)、构造活动、火山活动、冰川活动及地震形变等地表形变的调查和监测 Gabriel A K et al., 1989;范景辉等, 2007)。理论上,差分 InSAR 技术能够探测毫米级地表形变,实际应用中,在气候与地理环境状况适合的地区,测量误差可低于 5mm(范景辉等,2007)。

下面分别从岩矿波谱、遥感图像处理、多光谱蚀变异常提取、高光谱矿物识别与填图、InSAR 地表形变调查与监测、遥感找矿模型、遥感地质灾害调查与监测 7 个方面介绍了遥感的基本原理、主要的技术方法技术特点和技术关键、主要应用领域,以及所取得的一些研究和应用成果。(注:本节执笔人王润生)。

1 岩矿光谱测试技术研究

地物光谱是遥感地物识别的基础。地物的反射光谱是地物对不同波长入射光的选择性吸收、反射、透射和散射的综合响应。而岩矿波谱测试的基础是测谱学。测谱学早在 20 世纪初就被用于识别分子和原子结构。20 世纪 80 年代遥感技术发展的最大

成就之一就是开始建立和发展了成像光谱学(张宗贵,2004)。随着便携式波谱仪的推广,岩矿光谱测试工作正逐渐为大多数遥感地质工作者所熟悉,并形成除航天遥感、航空遥感之外的"近感"遥感(李兴国等. 2009),并由此将岩矿光谱的应用扩大引向更为广阔的领域,如钻孔岩心光谱测量及其在矿床勘探中的应用、矿业选冶等方面推广应用等。

本节结合实际应用,主要介绍遥感波谱野外和室内测试的原理、技术方法,简要分析岩矿波谱测试影响因素,以及在地矿方面的一些典型应用。

1.1 岩矿光谱的作用

自遥感地质发展以来,无论是多光谱还是高光谱,岩矿光谱一直是遥感地质应用技术的理论基础,是多光谱蚀变信息提取、岩性识别和高光谱矿物识别的依据,是遥感地质学的主要研究内容之一(甘甫平等, 2002; 2004)。

多光谱技术应用于地质领域相对较早,广泛地应用于遥感地质解译和信息提取。对于岩石类型的识别以及蚀变矿物信息提取,岩矿光谱特征都是重要的基础依据。但由于多光谱的光谱分辨率低,岩矿的光谱特征表现不充分,多光谱岩矿信息的识别主要是基于图像灰度特征,即主要是基于岩矿的反射率强度的差异。

而在高光谱地学应用中,岩矿光谱特征是地物信息直接提取的基础,高光谱纳米级超高光谱分辨率,数十至成百个波段对地物成像,在获取地物空间信息的同时获取地物连续光谱信息,可以根据地物诊断波谱等特性,直接识别地物类型及其组分。光谱识别是高光谱区别于多光谱的主要特征,也是高光谱的优势所在。岩矿光谱特征是高光谱矿物识别、以及区域矿物填图的依据和标准,依据岩矿光谱特征,有可能直接识别出岩矿类型,特别是识别出与成矿作用密切相关的蚀变矿物,圈定热液矿化蚀变带,分析蚀变矿物组合,定量或半定量地估计相对含量及蚀变强度,为矿产勘探提供技术支持。

1.2 岩矿波谱测试的原理

1.2.1 岩矿光谱特征形成机理

在 0.4~2.5 μm 光谱区间内,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,当太阳光或相当的光波辐射照射在物体表面时,光波粒子与物质中原子、分子互相作用后,某些物质原子、分子中的电子吸收与其能级差相匹配波长的能量在可见光、近红外波长(0.4~1.0μm)上产生电子能级跃迁,形成特征波带;在短波红外上(1.0~2.50 μm)某些具有选率作用的原子/分子中的电合藕合级性就要发生变化,从而导致原子/分子产生振动而形成特征谱带。

矿物的吸收谱带都源于矿物晶体中电子过程和原子基团的振动过程,其光谱特征主要受其物质组成成分、内部晶体结构、物化特征等所制约。岩矿的内部结构、化学成分的改变会使光谱反射强度和谱带位置、吸收深度都发生相应的变化,并会由于矿物中离子的替代或新矿物的生成而出现新的特征谱带。外在环境、岩矿表面状态和物理风化等外在条件因素也会对波谱产生一定的影响,但除了化学风化外,一般仅会引起岩石反射率大小的变化,而对光谱整体形状和吸收谱带特征的影响不大(甘甫平等, 2002;童庆禧等,2006)。

(1)岩矿光谱特征的内在机制。在 0.4~2.5 μm 光谱区间内,矿物的吸收谱带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原子基团振动过程的合频与倍频(Hunt G R, 1977)。电子过程是原子或离子中的电子从一个能态跃迁到另一个能态,或电子在离子之间、或离子与配位基之间的迁移,其谱带特征取决于离子的价态、配位数及位置对称性、配位基的类型、配位基的原子间距以及金属离子位置的畸变;振动过程是矿物晶体中原子基团受键力作用在平衡位置附近所发生的振动,或基团整体相对于整个晶格的振动,振动光谱受振动的频率(决定谱带位置)、强度(决定谱带强度)和激发过程(产生基频的倍频和合频)的控制,取决于基团中原子的数量和质量、原子的几何排布、原子间的结合力等。因此,矿物光谱吸收谱带的数量、位置(波长)、深度、主次序列关系、以及波形特征直接反映了矿物的组成和晶体结构。Hunt(1977)等总结出了电荷跃迁和离子振动或激活行为等在可见、近红外光谱区域的光谱特征标识图(图 1)。

(2) 岩矿光谱特征的外在机制。影响岩矿光谱特征的外在因素主要有矿物颗粒度、几何光学位置、矿物表面状态和风化作用等。

矿物颗粒度对岩矿光谱特征的影响。Hunt 等(1972)、Clark(1999)、王润生等[❸]分别对矿物颗粒度与岩矿光谱特征的相互关系进行了较深入的研究,研究表明在组成岩石的矿物成分基本一致的情况下,矿物粒度的减小增大了反射表面积而导致光谱反射强度的增强;粒度尺寸相似的情况下,矿物颗粒的形状、空间分布和排列形式也会对岩石的光谱特征产生影响。

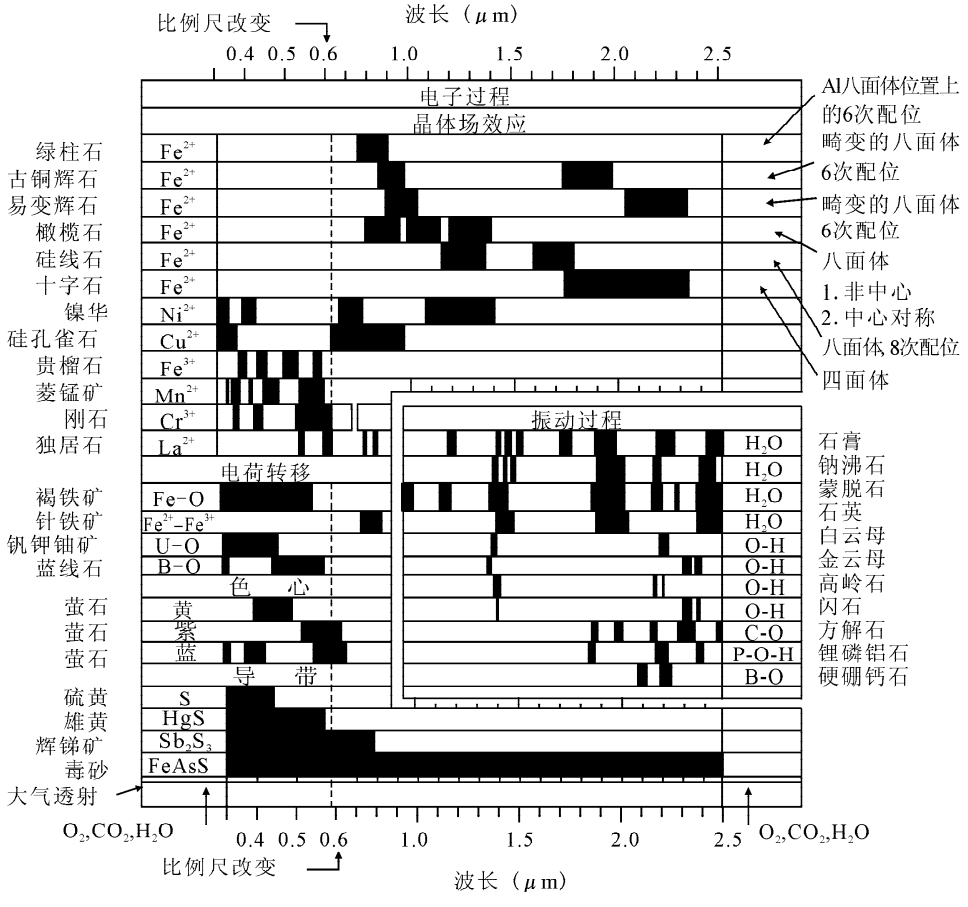

图 1 岩矿可见—近红外光谱特征标识图,黑色标尺宽度表示吸收谱带的相对宽度(Hunt G R,1977)

Fig. 1 VNIR spectral signature diagram of rocks and minerals. The widths of the black bars indicate the ralative widths of absorption bands(From Hunt G R,1977)

视场几何指地物、光源和观测方向三者的几何关系,即光的入射角、观测角和相位角(入射方向与观测方向之间的夹角)对光谱的影响。视场几何对光谱的影响主要缘于地物的非朗伯特性。研究表明,视场几何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]。

在没有异物产生或存在的情况下,如岩石漆、外来沙土等,岩石表面形态与物理风化主要影响谱带强度,但对谱带位置、偏倚度等特征影响不大。化学风化作用会改变原岩成分和矿物组成,而使谱带位置和谱带特征都发生改变,并出现新矿物的相应谱带,如 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+},从而使铁离子谱带位置发生相应的变化,强度有所增减[3]。

1.2.2 岩矿波谱测试原理

波谱测试包括野外测试和室内测试,下面分别介绍其测试原理。

(1) 野外岩矿波谱测试,在野外自然条件下,太阳光以一定的入射角直接照射到地面目标上。在忽略散射光的情况下,太阳、地物、仪器的几何关系如图 2 所示。入射到目标上的能量和目标反射到传感器的能量可看作是限制在两个细长锥体之中。当立体角足够小时,目标的二向反射分布函数(BRDF)定义为:

$$f(\theta_i,\varphi_i,\theta_r,\varphi_r)=\frac{dL(\theta_r,\varphi_r)}{dE(\theta_i,\varphi_i)}$$

上式中,$f(\theta_i,\varphi_i,\theta_r,\varphi_r)$ 为目标的二向反射分布函数,sr^{-1};$dL(\theta_r,\varphi_r)$ 为目标辐射亮度,$W/(m^2\cdot sr)$;$dE(\theta_i,\varphi_i)$ 为目标辐照度,W/m^2;θ_i 为入射天顶角,(°);φ_i 为入射方位角,(°);θ_r 为观测天顶角,(°);φ_r 观测方位角,(°)。

实际工作中,BRDF 很难测量,一般测量的是目标二向反射因子(BRF),其定义为在相同的照度和观测条件下目标反射的辐射亮度和理想全反射朗伯反射体反射的辐射亮度之比:

$$R(\theta_i,\varphi_i,\theta_r,\varphi_r)=\frac{L_t(\theta_i,\varphi_i,\theta_r,\varphi_r)}{L_p(\theta_i,\varphi_i,\theta_r,\varphi_r)}$$

式中:$R(\theta_i,\varphi_i,\theta_r,\varphi_r)$ 为目标的二向反射因子;$L_t(\theta_i,$

$\varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$为目标反射的辐射亮度，单位 $W/(m^2 \cdot sr)$；$L_p(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$为理想朗伯反射体，单位 $W/(m^2 \cdot sr)$。

实际测量中，以经过漫反射特性和反射比标定后的标准板作为标准，在相同的照度和观测条件下测量目标和标准板的反射辐射亮度，由于标准板一般不是完全反射体，即反射比不等于 1，目标的二向反射因子用下式计算：

$$R(\lambda)=\frac{L_t(\lambda)}{L_p(\lambda)} \cdot \rho_p(\lambda)$$

式中：$R(\lambda)$为目标的二向反射因子；$L_t(\lambda)$为目标反射的辐射亮度；$L_p(\lambda)$为测量的标准板的辐射亮度；$\rho_p(\lambda)$为标准板的反射率。

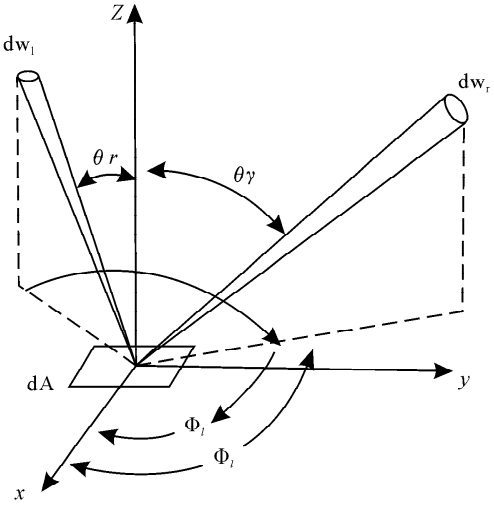

图 2 野外环境条件下的辐射几何关系
（据 Hunt G R et al.，1972）

Fig. 2 Radiation geomitry in field enviroment
(from Hunt G R et al., 1972)

（2）室内波谱测试原理。与野外测试最主要的不同之处是室内测试采用人工光源，使用积分球进行测量。

积分球的基本结构是一个内部空心的球壳。在球壳内表面均匀地涂抹着一定厚度的朗伯漫反射涂层。对于半径为 R 的积分球，球壁涂覆的朗伯漫射层的反射系数为 ρ，射入积分球的辐射通量为 φ，那么球壳上任意一点的辐照度为：

$$E=E_0+E_1+E_2\cdots=E_0+\sum_{i=1}^{n}E_i$$

E 为积分球壳表面上任意一点的幅照度，E_0 为入射通量直接照射形成的辐照度；E_i 为入射通量在球壳内表面经过 i 次反射后在被考察点形成的辐照度。

根据积分球理论可得出：

$$\sum_{i=1}^{n}E_i=\frac{\phi}{4\pi R^2}\frac{\rho}{1-\rho}$$

因此由上两式可得出：

$$E=E_0+\frac{\phi}{4\pi R^2}\frac{\rho}{1-\rho}$$

式中第一项 E_0 为入射通量直接照射形成的幅照度，随入射辐射的分布情况变化，但第二项却只随入射通量 ϕ 的大小而变化，与入射幅射的分布无关。因此，如果在积分球表面，使被考察点不受入射光直接照射的影响，则有：

$$E=\frac{\phi}{4\pi R^2}\frac{\rho}{1-\rho}(E_0=0)$$

因此对于一定反射系数 ρ 的涂层、一定半径 R 的球壳，被考察点的辐照度 E 与球壳上的具体位置无关，而且与入射辐射通量 ϕ 成线性关系。如果球壳上开一个半径为 r 的采样小孔，相对于球壳来说，小孔面积很小，通过小孔的辐射通量 ϕ_r 为球面上任一点的辐照度 E 与小孔面积的乘积：

$$\phi_r=E \cdot \pi r^2=\frac{\pi r^2 \phi}{4\pi R^2}\frac{\rho}{1-\rho}$$

由于 ρ 和 R 是球的特征常数，因此通过小孔的辐射通量与入射通量成正比。只要测得小孔上的照度，就可测得光源的光通量。

在典型的积分球系统中，样品置于积分球的一个开孔中，探测器置于另一个开孔中。入射光束通过透镜、光阑、滤光器等变为辐射通量为 ϕ 的单色光，再由转动机构依次垂直地投射在反射率为 ρ_r 的标准样品和反射率 ρ_s 的被测样品上，样品反射光被积分球收集，探测器测量被积分球漫反射后的光辐射通量，将测得的样品反射辐射通量 φ_s 与标准样品的反射辐射通量 φ_r 相比较即可得到样品的反射率 ρ_s：

$$\rho_s=\rho_r(\varphi_s/\varphi_r)$$

由这种方法测量得到的实际上应是样品的定向入射反射亮度因子，即假定标本在上半空间方向上为漫反射时的二向反射亮度因子。

1.3 岩矿波谱测试的影响因素

影响岩矿光谱测试的因素很多，同种岩石不同部位成分的变化、测试面状态（新鲜面、风化面、颗粒度、颜色、岩石漆等）、赋存状态（岩层产状、坡度、坡向）等自身属性的差异都会影响测试结果的代表性，仪器性能（光谱分辨率、信噪比、一致性等）、光照条件（照度、入射角、阴影）、测试方式（观测方向、观测视场、仪器高度）、气象条件（云、风、大气成分、能见度）和环境因素（背景地物）等也会对测试结果产生不同程度的影响。因此岩矿波谱测试必须综合考虑

各种影响因素,按照测试规范要求,选择合适的测试条件和正确的测试方法,以保证测试结果的代表性和可靠性。

(1) 围绕测试点采用多点测试、小剖面测试、沿岩层走向追踪测试等方法,既测试自然表面,又测试风化面、新鲜面,以保证所测结果的代表性。

(2) 大气和气象条件测试的影响主要表现为云、大气成分、能见度等对照度的影响以及风力所造成的大气扰动对光线传播的影响。野外测试应选择在晴朗少云的天气开展,一般要求太阳周围 90°立体角范围内无卷云和浓积云,淡积云量小于 2 %;大气能见度大于 15km;风力小于 4 级。

(3)测试要求有稳定的光照条件和足够的光照强度,以保证获取较高信噪比的波谱测试数据。野外测试一般要求太阳高度角大于 45°,测量时间一般应控制在地方时 10:00～14:00 左右,夏季及低纬度区可适当延长,冬季及高纬度区则应酌情缩短。

(4) 在对岩石露头进行测试时,由岩石产状(倾向、倾角)和地形(坡度、坡向)造成的测试面产状的变化会使测试面与水平面相比光线的入射角和出射角发生改变,从而改变测试面上的光照度和反射辐射亮度。应选择法线与太阳光线的夹角(入射角)尽量小的面作为测试面,并可垂直测试面方向进行观测,以使测试面获得足够的光照,并减小测试面的非朗伯特性对测试的影响。

(5) 背景地物和周围的植被、山体、以至操作人员的杂散光(散射和折射光)也会对岩矿光谱测试形成干扰,测试时应尽量与周围地物保持一定的距离,测试面和样品的尺寸至少应为仪器视场的 3 倍,以减少背景地物和周围地物的影响。

总之,岩矿光谱测试时,要求有足够强的光照强度,有较稳定的大气环境条件,能见度良好,周围环境条件较简单、避免其它地物的影响。

1.4　岩矿波谱的应用

地物波谱是研究遥感成像机理、仪器谱段设置、最佳波段或波段组合选择、遥感图像分析、信息提取、目标识别、异常检测的重要依据。岩矿波谱不仅在遥感地质领域得到了越来越广泛的应用,在农业地质、采矿业以及矿石选冶等方面也越来越发挥其独特的作用。

1.4.1　矿物及其成分的快速鉴别

根据矿物的光谱特征,可以快速识别出组成岩石的矿物类型(Clark R N et al.,1990)(图 3)、矿物化学成分及其含量的变化(Clark R N,1999; 王润生等, 2010)。例如白云母中铝含量的细微变化会使其光谱特征产生明显的变化(Swayze G A,1999)(图 4);同种物质成分因结晶程度的不同而具有不同的形态特征(图 5)。

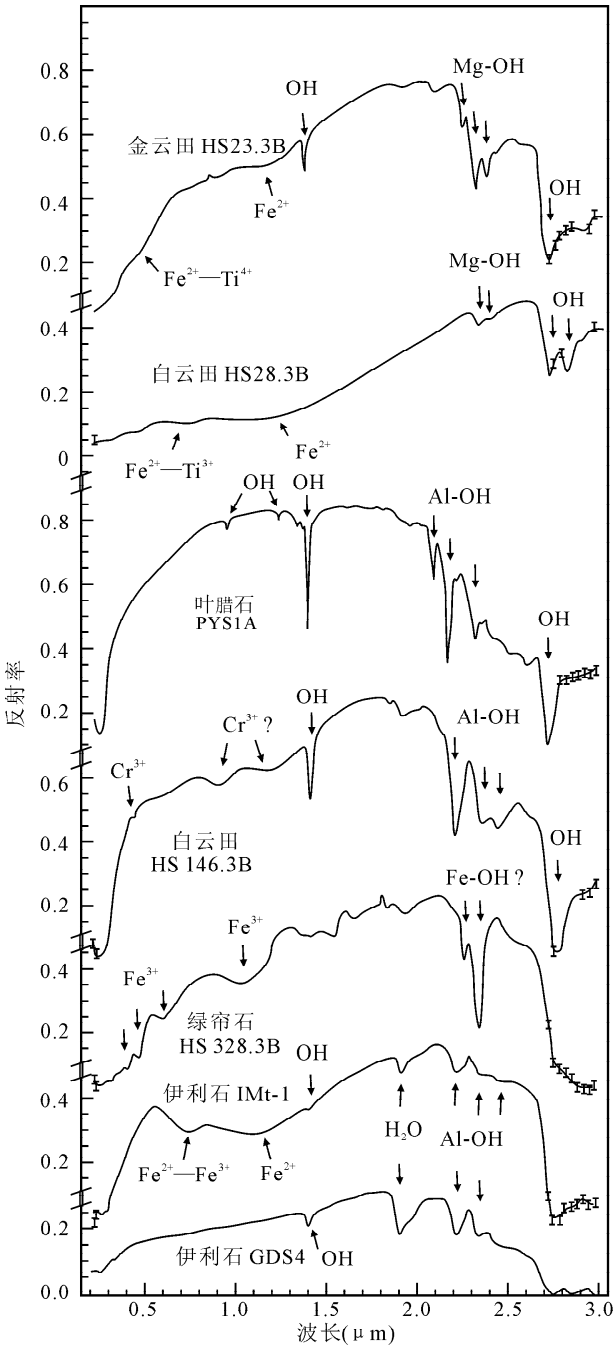

图 3　一些含 OH-矿物的光谱曲线(据 Clark R N,1999)

Fig. 3　Reflectance spectra of minerals (from Clark R N.,1999)

1.4.2　支撑成像光谱矿物填图与地质作用过程研究

依据岩矿的光谱特征,可以建立成像(高)光谱

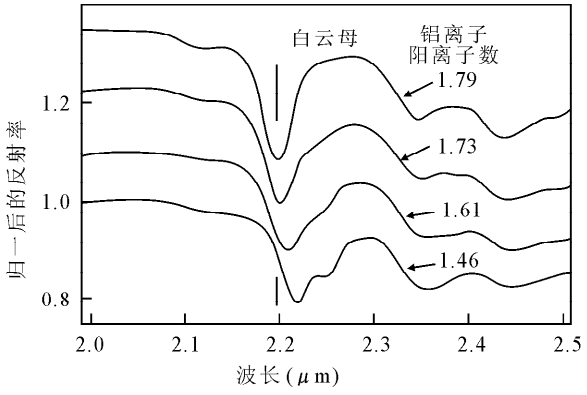

图 4·Al 含量对白云母矿物光谱的影响
(据 Swayze G A,1999)

Fig. 4·Band shifts of reflectance spectra of muscovite with the Al composition (from Swayze G A,1999)

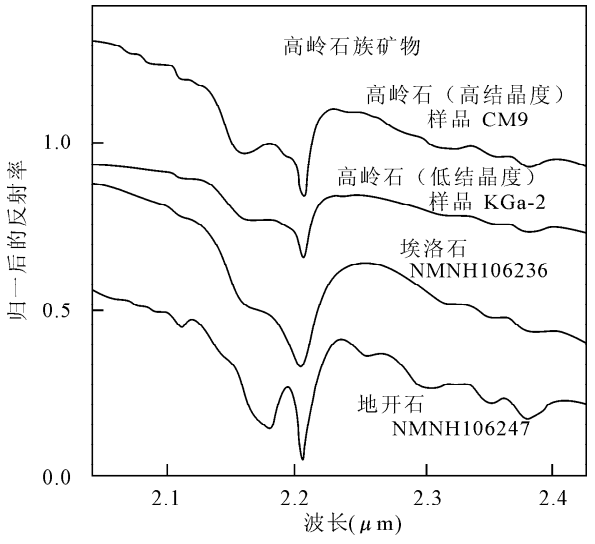

图 5·不同结晶程度的高岭石族矿物光谱曲线
(据 Clark R N,1999)

Fig. 5·Spectral differences of kaolinite group minerals with crystallinity (from Clark R N,1999)

遥感矿物识别的规则和相应的技术流程,实现高光谱面积性矿物填图,识别岩石中的矿物组成,反演矿物丰度。矿物填图是高光谱技术最成功的应用,也是最能发挥其优势的应用领域,它使得传统的遥感地质发生了质的变化,从识别岩性发展到识别单矿物以及矿物的化学成分及晶体结构(Pieter C M et al.,1993)。2003 年,中国国土资源航空物探遥感中心在新疆土屋东—三岔口地区,应用 HyMap 机载成像光谱数据填绘出了白云母(高铝白云母、贫铝白云母)、绿泥石、绿帘石、绿泥石和绿帘石组合、高岭石、蒙脱石、透闪石、蛇纹石、褐铁矿、方解石等 10 多种矿物种类(图 6),经野外查证(图 7),矿物识别率达 82%,准确率达 90 以上[3]。

同时,依据岩矿光谱特征的一些细微差别,可以探测一些蚀变矿物和一些造岩矿物的矿物组成成分的变化及结构特征(Kruse F A et al.,1991; Bowen B B et al.,2007),用于分析或恢复矿物成生的地质环境,分析地质作用过程(甘甫平等,2004; Bowen B B et al.,2007)。

1.4.3·岩芯光谱扫描及深部资源探测

澳大利亚联邦科工研制出了数字化岩芯扫描及解译系统 Hylogging System(Geotz et al, 2009b),该系统是面向对象、多层次的岩芯矿物分析编录系统。系统能够沿岩芯方向连续获取矿物反射光谱及高分辨率彩色影像,分析和识别多种地质单元和热液蚀变聚合物,包括层状硅酸盐、碳酸盐、水合硫酸

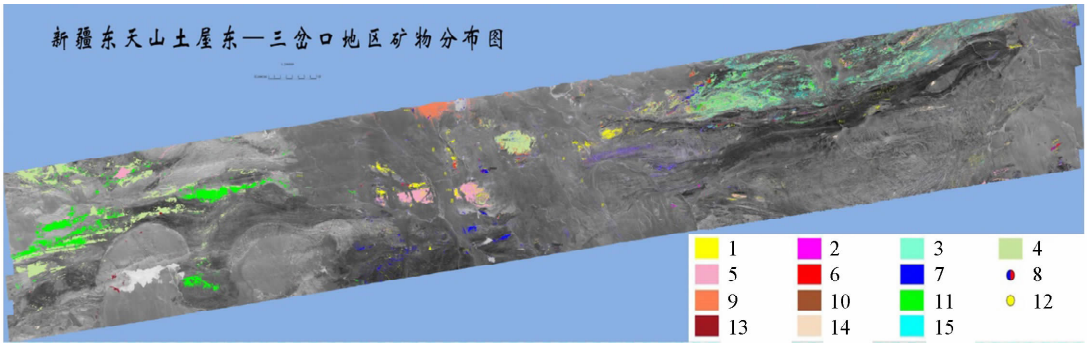

图 6·新疆土屋东—三岔口地区矿物分布图[3]

Fig. 6·Mineral map of Tuwodong-Sanchakou area in Xingjiang

1—富铝白云母类;2—高岭石; 3—滑石;4—绿帘石; 5—贫铝白云母; 6—方解石; 7—蛇纹石; 8—铅镍矿(点); 9—高 Fe-Mg 白云母; 10—褐铁矿化; 11—绿泥石; 12—金矿(点); 13—蒙脱石; 14—盐碱化; 15—绿泥石+蛇纹石化

1—High Al muscovite;2—kaolinite; 3—talc;4—epidote;5—low Al muscovite;6—calcite;7—serpentine;8—Lead nickel deposit;9—High Fe-Mg muscovite;10—limonite;11—chlorite;12—gold deposit;13—montmorillonite;14—Salinization;15—chlorite and serpetine



图 7 野外岩矿光谱测量(新疆东天山地区)

Fig. 7 Spectral measurement in field at eastern Tianshan Mountain Area, Xingjiang

盐、氧化铁等矿物,为地质矿产资源的深部探测和三维立体探测提供了一种非常便利的技术手段。

1.4.4 基于光谱特征的矿业选冶监测

ASD 公司 Goetz 等人近期研发的新一代高光谱系统,主要用于选矿厂矿石传输带上矿石杂质成分实时监测(Geotz et al, 2009b)。该系统利用模拟的太阳光源(相当于 20 个太阳强度),从目标上方"700mm"("近感")近距离地监测矿石选冶中杂质成分的变化(图 8)。

1.4.5 遥感载荷指标设置与应用潜力评估

随着对于地物精细特征的探测与识别需求的不断加深,对于遥感载荷指标及应用潜力提出了更高的要求,促使遥感传感器不断地趋于向高空间分辨率、高光谱分辨率以及更大幅宽方向发展。

因此从遥感地质的实际应用需求出发,基于基础地物光谱特征及分析,对空间传感器的设计、最佳遥感波段的选择、卫星遥感数据的大气校正、图像数字处理方法的选择、参数的确定以及应用解译标志的确定等方面都具有极其重要的意义(甘甫平等,2009;张宗贵等,2004)。

1.5 小结

(1)岩矿波谱测试受到众多因素的影响和限制,测试时要充分结合实际情况以便获取具有代表性和可比性的岩矿光谱数据。

(2)利用岩石或矿物的光谱特征,可以快速识别出岩石中的矿物组成,反演矿物丰度。

(3)岩矿波谱测试为各种机载、星载数据提取和识别矿物信息提供了相对基础和真实的本底资料。

(4)基于基础地物光谱特征分析,能为遥感载荷性能指标设置提供基础依据。

(注:本节执笔人梁树能,甘甫平,张振华)

2 遥感图像处理技术研究

2.1 遥感图像处理技术简介

遥感图像处理是对遥感图像进行辐射校正、几何纠正、图像镶嵌、图像增强、特征提取、图像分类、专题信息提取、以及图像整饰、影像地图制作等处理

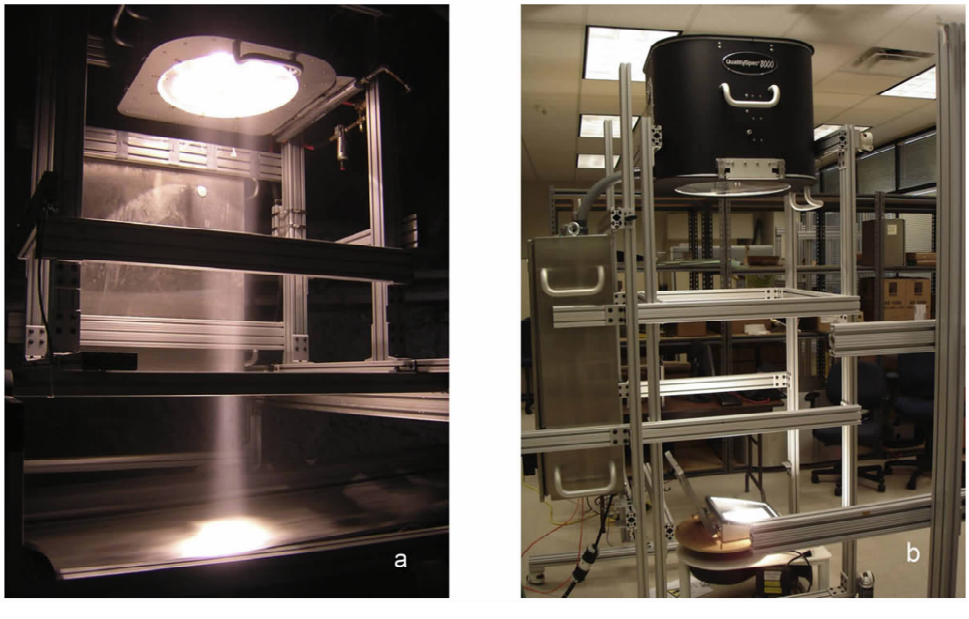

图 8 基于光谱测试的选矿厂矿石传输带上矿石杂质成分实时监测系统(Geotz et al, 2009b)

Fig. 8 The rapid gangue mineral monitoring system based on spectral measurement(from Geotz et al, 2009b)

方法。早期曾利用光学、照相等方法对遥感模拟图像(照片、底片)进行处理,简称为光学处理。利用计算机对遥感数字图像进行操作,从而获得某种预期结果的技术,称为遥感数字图像处理。随着计算机技术的发展,光学图像处理已基本不用,目前遥感图像处理一般都指的是遥感数字图像处理。

按图像处理功能划分,可以将遥感图像处理技术分为图像恢复、图像增强、信息提取及影像地图制作四大部分。

2.1.1 图像恢复处理

图像恢复一般包括两个方面的内容:恢复图像光谱信息的辐射校正和恢复图像空间位置的几何校正。

2.1.1.1 辐射校正

地表地物接受太阳照射后反射的光谱辐射信号,经过大气层的吸收和散射,为传感器所接受。成像过程中,成像系统响应函数引起的图象退化、大气的吸收和散射、探测器响应的非一致性和非线性、光照条件的差异和成像几何的变化、成像和传输过程中引入的噪声等,都会使传感器所接受的辐射信息和光谱信息发生畸变和失真,损失了一部分目标信息,同时又附加了一部分非目标信息。具体表现为图像模糊,空间分辨率下降,反差降低,出现坏线、条带,以及迭加随机噪声等。针对辐射畸变进行的误差校正称之为辐射校正(John R,2005;Sabins F F,1996;汤国安等,2005)。辐射校正包括传感器辐射校正,大气校正和噪声消除(去噪)。

(1)传感器辐射校正。一般又称为辐射校准,主要消除传感器探测系统性能差异,如光学系统或不同探测元件在灵敏度、光谱响应和透光性能上的差异。通过对各个传感器的增益和漂移进行校准(辐射定标),或采用数据归一化的方法来实现。

(2)大气校正。主要消除大气层的吸收、散射造成的辐射和光谱信息失真。一般采用大气辐射传输模型方法,或通过实测地面反射辐射通量和影像亮度,通过空、地回归分析来进行校正。

(3)噪声消除。常采用物理或数学方法,如空间滤波、平滑滤波,校正疵点、条纹、信号缺失、热噪声等各种形式的系统噪声和随机噪声。

2.1.1.2 几何校正

遥感成像时,由于飞行器的姿态、高度、速度、传感器扫描速度不稳定以及地球自转、地形高差变化等因素,造成图像相对于地面目标发生几何畸变,表现为像元相对于地面目标的实际位置发生挤压、扭曲、伸展和偏移等。针对几何畸变进行的误差校正称为几何校正(John R,2005;Sabins F F,1996;汤国安等,2005)。几何校正一般分为:几何粗校正、几何精校正、正射校正、图像镶嵌。

(1)几何粗校正。又称为系统校正,主要针对卫星运行和成像过程中引起的系统几何畸变进行的校正,根据已知的仪器参数及遥感卫星轨道和姿态参数对图像进行系统校正。

(2)几何精校正。主要解决图像经过几何粗校正处理后残存的几何误差,通过地面控制点建立图像空间与地理空间或地形图之间的准确对应关系,消除图像中的几何误差,同时将遥感图像由图像坐标系转换到地图坐标系。

(3)正射校正。主要消除地形起伏引起的图像变形(投影差),根据已知的仪器参数及遥感卫星轨道和姿态参数,再加上一些测量高程点和 DEM 对图像进行正射校正处理。

(4)图像镶嵌。实际工作中时常需要将多幅图像拼接在一起,便于更好地统一处理、解译、分析和制图。图像镶嵌就是将这些互为相邻并有一定重叠的遥感数字图像通过彼此间的去重叠和色调调整等处理,生成一个在几何形态上和色调分布上协调一致、统一为一个整体的新的数字图像。

地面接收站向用户提供的遥感数据,一般都作了传感器辐射校正和系统几何校正。这种辐射校正和系统几何校正,需要有关卫星和传感器等系统的相关参数,按照相应的模型进行校正。在实际工作中,一般用户只需要考虑大气校正、去噪、图像镶嵌、几何精纠正、正射校正等图像恢复处理,按照应用需求,选择校正项。

2.1.2 图像增强处理

通过对图像的变换或运算,调整图像的灰度分布、频率分布、色调特征或信息结构,扩大不同影像单元之间的特征差别,突出目标信息,压制背景信息和干扰噪声的图像处理方法。图像增强处理可提高图像的对比度,改善图像质量,压制图像噪声,使原来不清晰的图像变得清晰,或强调某些关注的目标特征,抑制背景或非关注的特征,提高图像判读和识别效果。

图像增强处理包括反差增强、空间增强(空间域、频率域)、彩色增强、图像运算和多波段增强等(John R,2005;Sabins F F,1996;汤国安等,2005)。

2.1.2.1 反差增强

通过改变图像的灰度分布或动态范围,扩大图

像的对比度,增强不同物体之间或目标与背景之间的灰度差别。常用的反差增强方法有线性增强、分段线性增强、等概率分布增强、对数增强、指数增强、自适应灰度增强和直方图变换方法。

(1)线性增强,将像元的灰度值线性地按比例扩展到指定的最小和最大灰度值之间。

(2)分段线性增强,把像元的灰度值分成几个区间,将每一区间的灰度值线性地变换到另一指定的灰度区间。

(3)等概率分布增强,使像元灰度的累积概率分布函数接近直线的变换,又称为直方图均衡化。

(4)对数增强,以对数函数为变换函数对图像值作变换,扩展了灰度值小的像元的灰度范围,压缩灰度值大的像元的灰度范围。

(5)指数增强,以指数函数为变换函数对图像值作变换,扩展灰度值大的和压缩灰度值小的像元的灰度范围。

(6)自适应灰度增强。根据图像的局部灰度分布情况进行灰度增强,使图像的每一部分都能有尽可能丰富的层次。

(7)直方图变换,通过改变和调整图像的灰度直方图改变图象值的分布和结构关系的反差增强方法。常用的直方图变换方法主要有将图像直方图调整为事先规定形式的直方图规定化、使变换后图像的直方图呈均匀分布的直方图均衡化、将图像直方图以参考图像的直方图为标准作变换的直方图匹配等。

在以上反差增强方法中,以线性增强和自适应灰度增强最为常用,处理效果较好,可以突出不同地物之间波谱特征的差别,有利于识别不同的地质体、岩石类型及地质异常,如矿化蚀变带、热异常等。

2.1.2.2 空间增强

空间增强是为了增强图像上的某些空间特征,如边缘、线性地物或纹理信息;或者去除图像上的某些噪声,压制图像的细节差别或局部变异,增强图象的背景特征或整体特征。图像像元的灰度随着位置变化的频繁程度用空间频率来表示。对于边缘、线条、地物的细节、噪声等,如地质构造、线性体、地貌形态、地物边界、差异较大的地表覆盖交界处等具有高的空间频率,即在较短的像元距离内灰度值变化的频率大;而均匀分布的地物、大面积的稳定结构、背景或总体特征,如植被类型一致的平原,大面积的沙漠、海面等具有低的空间频率,即在较长的像元距离内灰度值变化频率小,表现为低频特征。空间增强即是用图像滤波方法,用高通或低通滤波器,选择性地增强图像中的高频或低频成分,而相应地压制图像中的低频或高频成分。滤波既可在空间域中实现,也可在频率域中进行。

空间域中,滤波用空间卷积方法实现,滤波器一般为"权矩阵"形式,称为卷积核、算子或模板。常用的方法有平滑滤波、锐化滤波、方向滤波等:

(1)平滑滤波。平滑滤波是低频增强的空间域滤波技术,常用于弱化或压制图像的细节或除去图像上的噪声,提高图像的信噪比,突出背景或总体信息。常用的方法有邻域平均法和中值滤波,前者就是求邻近像元点的平均亮度值;后者则是以卷积窗口中像元的中值取代中心像元的值。

(3)锐化滤波。锐化滤波是高频增强的空间域滤波技术,常用于增强图像的细节、目标的边缘或线性特征,以突出空间形态特征、边缘及结构(纹理)特征等。一般采用微分方法进行,即求邻近像元点之间的灰度差值组合。常用的算子主要有梯度算子和拉普拉斯算子。

(2)方向滤波。方向滤波对特定方向的边缘、线性体或线性构造进行选择性的增强处理,以突出图像上特定方向的线性特征。一般采用特定方向邻近像元之间的灰度差值来实现的。常用的算子有普里维特算子、苏贝尔算子、罗盘梯度算子、各项均匀算子等。

频率域增强是通过傅里叶变换,将图像由空间域变换到频率域,在频率域中对图像做滤波处理,然后反变换回空间域中。频率域增强方法有高通滤波和低通滤波,常用的滤波器有高斯滤波器、指数滤波器、巴特沃斯滤波器。

(1)高通滤波,保留图像的高频部分而抑制低频部分。

(2)低通滤波,保留图像的低频部分而抑制高频部分。

2.1.2.3 彩色增强

常用的彩色增强方法有彩色合成、伪彩色增强、彩色变换等。

(1)彩色合成。根据红、绿、蓝 3 基色加色合成原理,将 3 个波段黑白图像分别赋予 R(红)、G(绿)、B(蓝)3 种颜色,合成为彩色图像的处理技术。

(2)伪彩色增强。伪彩色增强是把一幅黑白图像的不同灰度级或灰度区间按照一定的函数关系分别映射为不同的色彩,将图像变换成一幅彩色图像的方法。

(3)彩色变换。又称彩色坐标变换或彩色空间变换,指不同彩色系统之间的转换。遥感常用的表色系统主要有用 R、G、B 三基色定义的色彩坐标系统,称为 RGB 系统或 RGB 模型,和用 I(亮度)、H(色度)、S(饱和度)色彩 3 要素定义的颜色系统,称为 IHS 系统或模型。IHS 模型不是基于色光混合来定义和再现颜色的,它可以更准确地描述颜色的视觉特性和物理特征。遥感中的彩色变换主要指 RGB 和 IHS 色彩模式之间的互相转换,常简称为 IHS 变换。

彩色合成和彩色变换方法是遥感图像处理方法中最为常用的重要方法之一。彩色合成可以将 3 波段黑白图像通过彩色合成方法转换成彩色图像,使在一幅图像上显示了多个波段图像以及波段之间差别的信息;彩色变换处理,在 HIS 空间可以更好地控制图像的色彩变化,并且 I、H、S 作为独立的物理量,可直接用于区分或识别地物。IHS 变换还是一种常用的图像融合方法,用于融合不同类型的图像,或用以将某些特定信息,如物化探、地质信息,添加到遥感图像上,便于分析和解释。

2.1.2.4 多波段处理

常用的多波段处理方法有波段之间的代数运算、数据融合和图像变换。

(1)代数运算。对两波段或多波段图像进行加、减、乘、除运算。其中以图像差值(减运算)和图像比值(除运算)最为常用。差值图像主要用于作变化检测;图像比值可以用来压缩地形信息、突出地物的光谱梯度特征,对岩性识别具有重要作用,也是蚀变信息提取的常用方法。

(2)数据融合。将不同传感器、不同空间分辨率和光谱分辨率、不同时相的图像按照某种数学方法运算生成一种新的图像,以达到信息互补的目的。最常用是将低分辨率的多光谱图像和高分辨率的单波段图像融合,使在尽可能保持多光谱光谱信息的前提下,提高图像的空间分辨率。常用的数据融合方法有 IHS 变换法、主成分分析法、高通滤波法、小波变换法、基于能量不变原则的光谱保真融合方法等(Hunt G R et al.,1977)。

(3)主成分分析。主成分分析是一种数学正交变换方法,又称为 KL 变换。遥感图像的主成分分析是用各波段图像数据的协方差矩阵或相关矩阵的特征向量矩阵为变换矩阵的正交线性变换,变换后的图像称为主成分或主组分图像,它们之间互不相关。变换后图像的总方差保持不变,即变换不损失图像的信息,而只是将信息在新的主成分图像中重新分配。主成分按照方差依次递减的顺序排列。一变量具有最大的方差,称为第一主成分,第二变量的方差次大,并且和第一变量不相关,称为第二主成分,依次类推。N 个变量就有 N 个主成分,前面几个主成分包含了绝大部分信息。

主成分分析常用于数据压缩和减维、信息提取和变化检测,以突出主要信息,压制噪声。主成分分析是多光谱蚀变信息提取最常用的方法之一。

(2)缨帽变换。缨帽变换是根据对多波段遥感图像数据中土壤、植被等信息在多维光谱空间中信息分布结构的分析而确定的一种经验性线性正交变换。早期研究 MSS 图像农作物或植被生长过程的数据特征发现,在 MSS 四个波段构成的四维光谱空间中,不同类型土壤的点群与反映植被发育过程的点群分布的空间形态象一顶带有缨子的帽子,反映植被成长的"绿色"方向、植被枯萎的"黄色"方向和土壤线三者互相垂直,从而可以通过正交线性交换将它们变换到由这三个轴和另一个轴组成的新的特征空间中,而将它们分开,因而将具有这种数据分布结构的线性变换称之为缨帽变换。随后发现 TM 数据也有类似特征,根据实例研究,得出 TM 图像 6 个波段(不含热红外波段)的缨帽变换经验系数。变换后的第一特征变量称为亮度,第二特征变量称为绿度,第三特征变量称为湿度,分别反映了土壤岩石、植被、土壤和植被中的水分信息。其它变量还没有命名,其代表的信息特征还有待进一步研究。

2.1.3 图像信息提取

2.1.3.1 图像分类

不同地物在遥感图像上通常以两种信息表现形式来显示:①反映地物波谱特征的亮度信息;②空间结构信息。图像分类处理技术,就是根据不同地物的光谱亮度差异和空间结构差异,按照某种规则,将像元划分为若干类别,每一类像元具有类似光谱特征和空间特征。

图像分类方法分为监督分类和非监督分类两大类(John R,2005;Sabins F F, 1996)。

(1)监督分类法。根据待分类别的先验知识和已知的类别模型对图像分类的方法,一般是根据已知地物、选择各类别的训练区,进行训练和学习,根据与已知区的相似程度,对图像进行分类。最常用的方法有最小距离法和最大似然率法。最小距离法是根据与类别中心的距离确定像元的归类,计算各训练区内像元的平均灰度值,以此作为类别中心并

计算其协方差矩阵。对于图像各未知像元,则计算它们和各类别中心的距离。当与某类别中心的距离最近并且不超过预先给定的距离阈值时,此像元即被归入这一类别。当距离超过给定阈值时,将该像元归入未知类别。最大似然率法是以像元对于各类别的似然比确定像元的归类,即通过计算像元属于各类别的概率,将像元划分到概率最大的那一类中。

(2)非监督分类法。非监督分类是在无有关类别先验知识的条件下,根据图像本身的统计特性、点群分布建立分类函数,进行分类的过程。非监督分类一般使用动态聚类法,给定初始分类中心,按选定的相似性度量将样品分到各初始类中,采用迭代算法,按确定的准则调整类别中心,使按确定的准则达到最好的聚类结果为止。常用的算法有 K 均值和 ISODATA。K 均值算法是根据各波段图像像元灰度分布的统计量,设定 N 个均值平均分布的类别中心。计算每个像元与各类别中心的距离,并把它归入距离最近的一类。所有像元经计算归类后算出新的类别中心,然后再计算各个像元离开新类别中心的距离,并把它们分别归入离开新类别中心最近的一类。所有像元都重新计算归类完毕后,又产生新的类别中心。这样迭代若干次,直到前后两次得到的类别中心之间的距离小于给定阈值为止。

还有一些比较复杂的图像分类方法,如模糊分类、专家系统分类等,这些方法需要比较专门的图像处理知识和经验,以及有关应用领域的背景知识等。

2.1.3.2 专题信息提取

专题信息提取是指对研究工作中某些特定信息进行专门提取,例如岩性、岩体、构造、矿化蚀变信息,以及水体、植被等。

2.1.4 影像地图制作

影像地图是在经过处理的遥感图像上加绘图廓、坐标网、比例尺等要素和必要的地理信息,如行政界线,铁路、公路等,按指定的颜色、线宽、透明程度、线型等方式,叠加到遥感图像上,形成一种带有地理信息显示的图件,便于宏观展示和图像解释。标准分幅影像地图是按标准地形图的实际范围裁剪遥感影像,加上图廓、坐标网、比例尺等地形图图饰和必要的地理要素形成的图件,其具有严格的数学基础和规范的图面整饰,符合地形图几何精度要求,可以作为遥感地质解译的用图和绘制主题图件的工作底图,供野外及室内使用(齐泽荣等,2009)。

高光谱数据、雷达数据有其自身的特点,除前面的方法外,还有专门适合各自特点的图像处理方法,例如,高光谱图像的光谱匹配和光谱识别,雷达图像的雷达干涉和极化分解等。

2.2 技术特点

遥感技术是利用来自地面目标物的电磁波信息,探测和研究目标物的性质和运动状态。与其它探测手段相比,遥感技术为地学研究提供前所未有的宏观性、综合性和直观性的基础资料,具有从"面"到"点"的特征。遥感图像处理技术具有以下的主要技术特点:

2.2.1 需要高速度、大存储容量的计算机

遥感图像数据的一个重要特点是其数据量大,一景 5 号陆地卫星 TM 遥感图像 7 个波段数据大约为 240M。对于大范围的工作区,会涉及多景遥感图像,其数据量会更大。高光谱数据(波段多达 200 以上)、高空间分辨率数据(空间分辨率达亚米级),在同样地面范围内,比目前常用的 TM 数据要大很多倍。因此,图像处理需要高运行速度、大存储容量的计算机。

2.2.2 图像处理需要多学科知识

图像处理涉及计算机图形学、数学、物理学、视觉、心理学以及相关应用学科知识等。这些学科相互关联、相互交叉,综合使用多学科知识,才能达到好的图像处理效果。

2.2.3 遥感图像处理会产生一定的信息损失

图像的增强处理,一般是要以牺牲非目标信息为代价,在突出目标信息的同时,压制和弱化了背景和非目标的信息。图像的校正、滤波、去噪、运算等处理也会造成一定的信息损失,如几何校正的重采样会对图像产生一定的平滑效应;低通滤波和去噪在弱化噪声的同时也压制了与噪声频率特性相类似的一些高频信息;比值增强了波段间光谱的变化梯度信息,但也弱化了地物间辐射亮度的差异。。

2.2.4 遥感图像具有一定的不确定性

图像处理的绝大多数方法都是以图像亮度值为基础,图像像元亮度不仅取决于地物的物理特性,还取决于地物的表面状况(如表面含水量、粗糙度、色泽等)和照度,如地表的地形起伏对太阳辐射照度的调制作用而引起的不同坡面太阳照射明亮程度的变化和地形阴影。地物表面状态和地形调制作用等的影响,将直接导致不同地物具有相同图像亮度(同谱异质)与相同地物具有不同图像亮度(同质异谱)现象,造成图像信息的不确定性,给地物信息识别、提取和解释带来一定的困难。遥感数据的空间分辨率和光谱分辨率的局限,图像处理和信息提取算法的

敏感性和适应性，参数反演本身的多解性，处理或解译人员的专业素质和专业背景等，也都会给遥感信息带来一定的模糊性和不确定性。例如，不同方法提取的矿化蚀变信息会有一定的差异，图像分辨率的局限和图像退化会导致图像上地质体的界线表现为一种渐变性和模糊性，给岩性识别，特别是对地质体界线的圈定，带来一定的不确定性。

2.3 使用范围

遥感图像具有宏观、客观、综合、实时、动态、快速等特点，为地球资源调查与开发、国土整治、环境监测、以及全球变化研究，提供了一种新的探测手段，广泛用于测绘、国土与环境的动态监测、资源调查、灾害调查与防治、军事侦查等与地球有关的领域以及行星和宇宙的探测。应用遥感图像处理技术，可以恢复遥感图像固有的辐射信息、光谱信息、空间信息和地理几何位置信息；可以用来提高遥感图像的分辨效果和可解性，增强特定地物信息的区分和识别能力，自动或半自动识别目标或异常信息，对遥感图像的分析、解释和信息提取，具有十分重要的作用，是遥感信息客观真实性的技术保障，是遥感技术的重要组成部分和必要技术手段。遥感图像处理贯穿遥感技术应用研究工作的全过程。

2.4 遥感图像的选择

2.4.1 对遥感图像基本要求

(1)应选用云、雪遮挡工作区重要目标物较少的遥感影像资料。一般云、雪分布面积应小于图面的5%，特殊情况下可放宽到10%。

(2)需要进行图像恢复处理时，例如辐射校正、正射校正等，遥感图像需要带有卫星轨道姿态等参数数据。

(3)应选用影像层次丰富、图像清晰、色调均匀、反差适中的遥感图像资料。

(4)需要多景图像镶嵌时，应尽量选用成像季节相同或相近的遥感图像。相邻图像之间一般应有大于100个图像像元的重叠，特殊情况下应不小于20个图像像元的重叠。

2.4.2 图像光谱波段

目前，有多种类别的商业遥感图像，光谱段一般包括可见光到近红外波段(0.4～2,5μm)，陆地卫星TM图像、ASTER图像、中巴卫星CBERS图像等还设置有对植被、岩性比较敏感的中红外波段(3～5μm)，及与地物的热变化特征(温度、发射率、热惯量等)比较敏感的热红外波段(8～14μm)。中、高分辨率卫星图像(SPOT、IKONOS、QuickBird等)一般只有可见光到近红外波段的长波波段(0.4～1.0μm)。不同地物在不同光谱波段上的光谱反射能力是不相同的。不同的应用研究目的对遥感图像波段有不同的要求，例如，可见光到长波近红外波段遥感图像可以满足测绘制图及地质灾害调查等；对于地质岩性识别、蚀变信息提取、矿物识别、矿产调查等，最好选择有短波红外(1.1～2.5μm)以至中、热红外波段的遥感图像。

2.4.3 图像空间分辨率

图像空间分辨率的选择主要取决于工作比例尺。按照制图要求，同比例尺地图平面精度要求为图面0.5mm，在一般情况下人的肉眼分辨率为0.3mm，为了保证图像平面精度并考虑人的肉眼可分辨能力，以平面精度要求的一半(0.25mm)作为对遥感图像地面分辨率的要求。在这种情况下，制作一般地理底图使用的遥感图像，如果工作比例尺为1∶50 000，其遥感图像地面分辨率应不低于12.5m；工作比例尺为1∶250 000，其遥感图像地面分辨率应不低于62.5m。在国土资源调查工作中，一般选用大一个级次比例尺图像或图件，作为工作基础图件，因此，上述要求的遥感图像地面分辨率均应该加倍，即工作比例尺1∶50 000，要求遥感图像地面分辨率应不低于6.25m；工作比例尺1∶250 000，要求遥感图像地面分辨率应不低于31.25m[8]。在不要求按地形图制图规范精确制图时，可根据具体应用目的对图像的信息量和可解性的需求选择合适空间分辨率的图像。

2.4.4 图像时相

不同时间获取的卫星遥感图像，其光谱特征差别较大，对于地质应用，应避开云雨天气或积雪时期的图像。南方气候湿润，多雨多云，接收的图像往往会有大量的云彩，影响图像解释，应选择少云天气的遥感图像；北方和高原地区冬天寒冷，常有积雪，应选择无雪或积雪较少时期的遥感图像。

不同应用研究，也是影响图像时相选择的因素之一，例如，对于岩性识别、地质找矿工作，应选择植被发育较少季节的遥感图像；对于农业、林业应用研究，则应该根据研究目标，选择植被发育较好季节或选择不同生长期的遥感图像。

多时相的遥感图像，可以反映不同的地表景观，有时能提供多于单一时相所能显示的地质信息。对于地质灾害调查与监测、地质环境调查等应用，都需要应用多个时相的数据。

2.5 应用效果和实例

遥感图像处理技术在遥感应用研究中发挥了重要作用,这里仅展示两例图像校正与增强、影像图制作的应用实例,更多的应用实例请参见以下各节。

几何校正和图像增强处理是最常用的图像处理方法之一。图 9 左边图像为一景经过辐射校正和几何粗校正处理的 3 波段彩色合成陆地卫星原始 TM 图像(波段图像 TM7、TM4、TM1 分别赋予红、绿、蓝),右边为左边图像经过几何精校正和线性增强处理生成的图像,其中右下角为图像中白色方框中的子区图像。直观上看,左右两图像相对旋转一个角度,实际上两图像之间存在一定程度的缩放和变形。经过几何精校正处理的图像,与地形图具有相同的坐标系,在地理位置上相互对应,便于对比分析解释和最终成果图件的制作。右边图像比左边图像具有更丰富的信息,能够清晰显示多种层次的影像,说明线性增强能够突出不同地物之间的差别,便于图像分析解释,子区图像更能清楚显示这种处理效果。

视立体地质图是由数字地质图和数字高程模型(DEM)通过图像融合处理和模拟光照生成的一种新的图示形式的平面地质图(齐泽荣, 2010)。图 10 为视立体地质图和其中一个子区。图中显示正立体地形效果,地形起伏变化直观,视觉上犹如野外实际观察地表景观。这种地质图不仅便于非地质专业人员读图,而且为地质工作者进行地质体识别、地质构造分析、野外检查、定位以及图面测量等工作提供极大的方便,具有非常强的实用价值。视立体地质图具有丰富的地形地貌信息,它有效地将地质图信息和地形地貌特征结合在一起,是地质图的一种新的表现形式,可以作为地质图件的一种补充。

2.6 问题讨论

(1) 图像处理信息丢失问题。要完成最终成果图像,往往需要利用若干图像处理方法,经过一系列图像处理。每经过一次图像处理,特别是几何变换(校正、投影变换、镶嵌、缩放等)和去噪,都有可能会造成一些信息的损失,带来一些新的误差源。因此,应该选用最佳的方法组合,尽量减少图像处理的中间环节,减少处理过程中的信息损失。

(2) 图像镶嵌中的色彩匹配问题。图像镶嵌常见的做法是要通过彩色自动匹配,将涉及到的不同景卫星遥感图像镶嵌到一起,最终形成一张全区统一的卫星遥感镶嵌图像,作为地质解释的基础图像资料,提供地质工作者使用。计算机图像镶嵌处理过程中,若刻意追求色彩的一致性和无缝镶嵌效果,可能人为地破坏了遥感图像本身所显示的光谱信息的客观性;另一方面,相邻不同景的卫星图像,由于时相差异较大,以及受计算机图像镶嵌处理技术的限制,可能在镶嵌图像上,存在一些镶嵌接缝。这两种现象,都会影响图像的地质解译,造成一些漏判或错判。

2.7 小结

遥感图像处理技术,可以用来恢复遥感图像的地物原始光谱信息和地理空间信息,是遥感信息客观真实性的技术保障;可以用来提高遥感图像的分辨效果,增强对目标地物的识别和信息提取的能力,对遥感图像的分析、解释,具有十分重要的作用。图像处理的效果和质量会直接影响遥感图像应用和研究的效果。

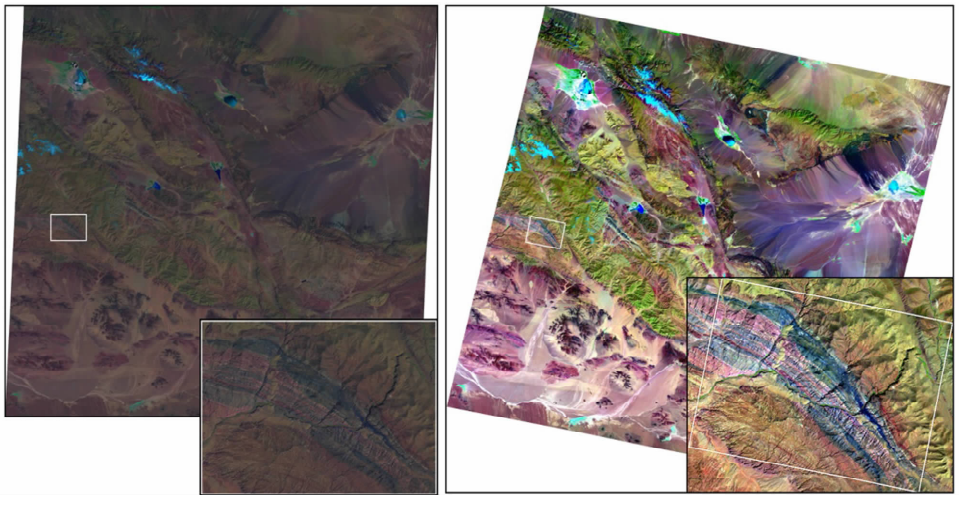

图 9 图像辐射校正、几何校正和图像增强处理

Fig. 9 Image radiometric, geometric correction and image enhancement

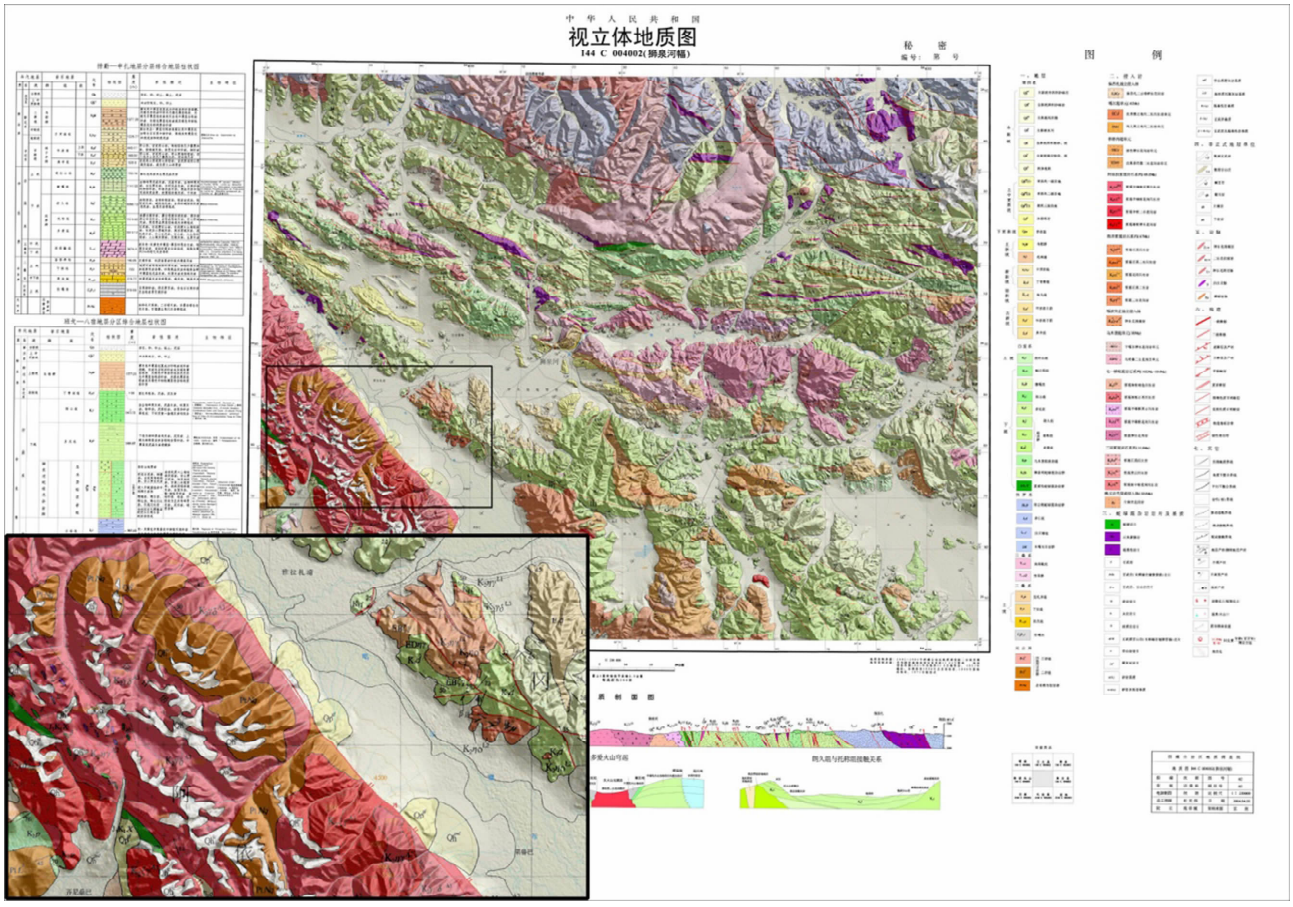

图 10 视立体地质图

Fig. 10 An apparent 3D geological map

(注:本节执笔人齐泽荣)。

3 遥感异常提取技术研究

3.1 技术发展概况简述

遥感异常一般是指从遥感数据中提取的、可能与成矿围岩蚀变矿物有关的一种量化遥感找矿信息。在过去十几年中,遥感异常信息提取技术有了很大的发展,国内外相关研究中相继将图像比值、主成分分析、图像归一化、彩色空间变换等技术用于遥感找矿中的异常信息提取(陈毓川,1999; Crosta A P et al., 2003; Lough W P, 1991; 刘燕君等, 1993; 张玉君等,2003; 赵元洪等,1994; 马建文, 1997; 张远飞等,1999; 王晓鹏等, 2002; 马建文等, 1994; 马建文等, 1994; 刘素红等, 2000; 杨金中等,2003; 甘甫平等,2000)。马建文提出了"TM掩模+主成分变换+分类识别"提取矿化弱信息方法(马建文,1997)。张远飞等(1999)提出"多元数据分析+比值+主成分变换+掩膜+分类(分割)"识别提取"矿化弱信息"的方法。王晓鹏等采用特征波段比值、主成分分析、彩色空间变换等方法进行增强处理,对西昆仑塔什库尔干地区,进行遥感找矿异常的提取(王晓鹏等, 2002)。这些方法应用于不同地质和成矿背景,使用不同的遥感数据源,对遥感找矿产生了实际的推动作用。

2004~2006 年,通过完成地质大调查项目"西部重要成矿区带遥感找矿异常提取及应用研究"和"多光谱遥感异常提取方法技术研究",我们建立了一套适合我国干旱-半干旱地区遥感异常提取的方法技术体系——"去干扰-主分量分析-异常筛选"技术方法。该方法发展和综合应用了大量前人研究成果(陈毓川, 1999; Crosta A P et al., 2003; Lough W P, 1991; 刘燕君等,1993; 张玉君等, 2003; 赵元洪等,1994; 马建文,1997; 张远飞等, 1999; 王晓鹏等, 2002; 马建文等, 1994; 马建文等, 1994; 刘素红等, 2000; 杨金中等,2003; 甘甫平等,2000),在战略性矿产远景调查工作中得到了推广应用。

3.2 基本原理和技术特点

3.2.1　基本原理

围岩蚀变现象作为找矿标志已有数百年的历史,只要有热液型矿床产出的地方,或多或少均存在一定的近矿围岩蚀变;在一些大型-特大型内生矿床周围一般均产出强烈且范围较广的围岩蚀变。岩石中常见的蚀变类型主要为:云英岩化、青盘岩化、绿泥石化、绢云母化、高岭土化、褐铁矿化、黄铁矿化等,其主要蚀变矿物中均含有 Fe^{2+}、Fe^{3+} 离子或者 OH^-、CO_3^{2-} 离子。含有这些离子基团的矿物与硅、铝、镁和氧形成的主要造岩矿物相比,在目前多光谱遥感常用的光谱区间(0.45～2.35(m)上存在有明显的吸收特征谱带(Hunt G R,1977;刘燕君等,1993),而在陆地卫星 TM、ASTER 等图像上表现出与周围岩石不同的色调或光谱特征。遥感找矿异常提取的目的就是要探测和圈定与成矿密切有关的蚀变矿物、蚀变岩带和矿体表生氧化带(铁帽)(刘燕君等,1993;杨金中等,2003)。其中,铁化和泥化是目前 TM 图像蚀变信息提取的主要目标。通过对卫星数据不同波段组合的增强处理可圈定出蚀变异常的范围和相对强度,而围岩蚀变异常的范围与强度常常与矿化强度有一定的相关性,且一定类型的蚀变岩矿物常可指示一定矿种的存在,因此,提取的遥感异常常可成为地质找矿的重要参数。

3.2.2　技术特点

"去干扰-主分量分析-异常筛选"技术体系包括数据预处理、干扰去除、异常提取、异常后处理、异常筛选与推荐五大步骤(图 11)。

(1)数据预处理:利用线性回归、太阳高度角和日地距离的调整等计算,将太阳辐射校正、日地距离校正、太阳高度角校正等方法成功地应用在数据预处理过程中,基本解决了不同数据中的同类遥感异常的趋同性问题。

(2)干扰去除:利用比值切割、高端切割和低端切割等多种方法,去除阴影区、植被、白泥地(盐碱地)、云(包括厚云、薄云和雾)、水体、沼泽地等对异常提取的干扰,进一步突出了"目标"信息(张玉君等,2003;杨金中等,2003)。其中,利用(TM1/TM7)>1 作为判据,消除阴影区、冰雪、水体等的影像;利用(TM5/TM4)≤1 消除植被干扰;用 TM3 或 TM4 的高端切割,消除盐碱地的干扰。

(3)异常提取:以主成分分析为主,比值分析和光谱角分析为辅提取蚀变异常。方法强化了数字图像处理技术与矿产地质调查工作的结合,提出了以成矿地质背景为基础,进行区域典型矿化蚀变信息

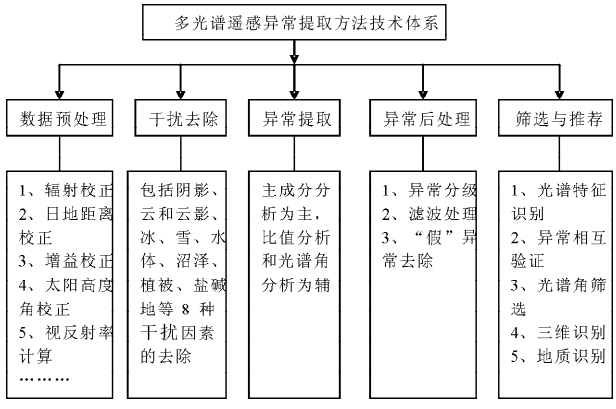

图 11　多光谱遥感异常提取方法技术体系框架

Fig. 11　The framework of technology architecture for multispectral anomalies extracting

提取的遥感异常分区提取方法,强调了异常提取方法的目的性和实用性。不同的成矿区域,岩性不同、蚀变类型不同,利用整景图像数据进行异常提取,往往难以突显不同地质背景下作为"弱信息"的各类遥感异常,通过地质背景、成矿条件的划分,进行分区遥感异常提取,往往更能突显有限目标。

(4)异常后处理,对异常进行分级和分类:采用以异常强度的方差 σ 做为尺度,用数倍 σ 值做为阈值的异常分级表现方法(张玉君等,2003;杨金中等,2003);将光谱角方法应用到多光谱遥感领域,建立了"光谱筛选"、"地质环境背景筛选"等多种遥感异常筛选方法组合。实现了遥感异常的分级和分类,并将遥感找矿异常从遥感异常中遴选出来,提高了遥感找矿异常信息的可信度。遥感异常是基于遥感数据形成的统计学异常,只有与区域找矿的目的结合起来,筛选出的与区域典型蚀变带相似的遥感找矿异常,才具有真正的应用意义。

(5)异常筛选与推荐:在筛选后的每一张遥感异常图上,均附有一张遥感异常优先检查点位坐标推荐表,在进行野外异常检查时,可以利用表中提供的数据,在全球定位仪(GPS)引导下,较准确地进入异常点,进行异常查证工作。

该方法体系主要适用我国干旱-半干旱地区和高寒山区羟基遥感异常和铁染遥感异常提取工作。本方法提取遥感异常的检出限优于二万分之一,在一个像元中,只要植被不超出 50%,均可提取出遥感异常。

3.3　推广应用情况及效果

该技术方法已经在我国天山—北山、昆仑山、冈底斯山、青藏铁路沿线等西部重要成矿带、120 万平

方公里的国土面积上成功应用，完成遥感数据处理174景，制作1∶25万标准分幅遥感异常图97幅、1∶10万标准分幅遥感异常图200幅、1∶5万标准分幅遥感异常图127幅，推荐遥感异常检查点3900多个。在已经检查的273个推荐异常中，新发现矿点、矿化点57处。目前，该方法已经被中国地质调查局确定为战略性矿产远景调查工作中必须采用的遥感技术方法，在局系统推广，并在战略性矿产远景调查、全国矿产远景评价以及我国重要成矿区带的遥感异常提取工作中发挥了重要作用。

以西藏驱龙铜矿为例。该矿床位于冈底斯陆缘火山—岩浆弧东段，区内出露地层为中侏罗统叶巴组中酸性熔岩及火山碎屑岩夹碳酸盐岩、砂岩及砂板岩，第三系丁那组流纹质英安岩、粗面岩等。岩浆活动发育，主要岩石类型为二长花岗岩和花岗闪长斑岩等。其中花岗闪长斑岩为含矿斑岩，呈小岩株侵入于流纹英安岩及二长花岗岩中，地表出露面积0.6km^2。主要矿化有黄铜矿化和辉钼矿化，呈脉状或浸染状产出。区内蚀变强烈，常见硅化、钾化、绢云母化、高岭石化、青盘岩化等，空间上显现出“中心式”面型蚀变分带特征，含矿斑岩体由内向外表现为：石英绢云母化带（局部黑云母钾长石化）、高岭石硅化绢云母化带、青盘岩化带（局部矽卡岩化）。其中石英绢云母化带分布于斑岩体内，带内矿化明显，矿石以细脉浸染状为主。区内目前发现斑岩型的CuMo矿（化）体4处，在其南侧，分布有顺层产于叶巴组火山岩地层中的层矽长岩型（喷流型）铜多金属矿（化）体5条。我们利用TM/ETM图像对驱龙、甲马地区的遥感异常进行了提取，提取结果（图12）表明，驱龙矿区的遥感异常基本与区域化探异常的分布基本一致，但与区域化探资料相比，遥感异常更直接地反映出可能的蚀变中心位置。野外验证发现驱龙、甲马两矿区的遥感异常与矿化带的分布基本一致；在驱龙矿区西侧的乃浦异常点为绢云母化、高岭石化、青盘岩化蚀变带，局部见有孔雀石化等矿化迹象；在甲马矿区西南侧的象背山遥感异常带上，多数异常与区域出露的小岩体相对应，见有铜矿（化）体。上述工作为区域找矿提供了新的资料。

3.4 问题与讨论

（1）多光谱遥感异常提取方法体系主要针对的是由内生成矿作用，如热液成矿作用等引起的蚀变岩石的光谱异常提取工作，如提取斑岩型、蚀变岩型、矽卡岩型等矿产的围岩蚀变。该方法一般不适用于外生成矿作用，也不适用于大面积的植被覆盖区，如大兴安岭地区。

（2）由于不同的成矿区带、甚至同一成矿带的不同岩性之间光谱特征差异较大、地貌景观也会有一定差异，因此，遥感异常提取工作应在综合分析区域成矿条件和遥感异常可提取程度的基础上，划分不同的地貌景观区、不同成矿带或成矿区，分别进行异常提取工作，即遥感异常分区提取策略。

（3）在遥感异常图上，各遥感异常之间可能是背景值区，也可能是作为干扰去除的没有经过异常提取的空白地带。因此在检查、评价异常或利用异常

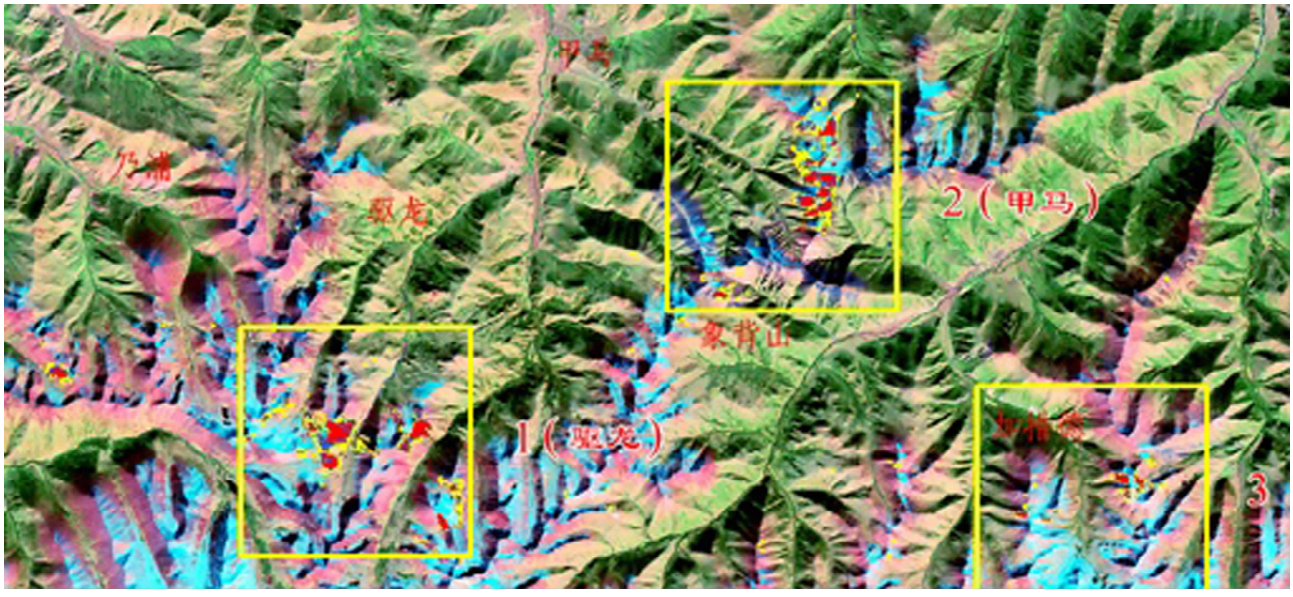

图12 驱龙—甲马地区羟基遥感异常图

Fig. 12 OH^{-1} anomaly in Qulong-Jiama Area, Tibet

进行矿床预测时,应分清异常之间的不连续现象是与自然背景有关,还是由于人为掩模处理造成的。绝不能将空白区简单地视为背景值区。

(4)遥感异常图除了被筛选过的异常外,还有相当数量的遥感异常点、异常带或异常区。这些异常的找矿意义与被推荐的异常是完全相当的。之所以这些异常没有被优先推荐,除了对异常的认识水平还有待深化外,还与蚀变岩石异常被区域异常掩盖、蚀变体的出露面积较小、蚀变体次生分散范围有限以及异常筛选者的研究水平有关。在野外检查和异常评价工作中,不应忽视那些未被圈定的遥感异常点、异常带或异常区的存在和价值。

(5)遥感异常具有多解性,区域变质作用形成的绿泥石、绢云母,表生沉积物中的石膏、芒硝、高岭土、粘土、碳酸盐、硼砂、褐铁矿、针铁矿等,均可以引起遥感异常。因此,对遥感异常的内涵认识,还有待于实际应用中的知识积累和深化研究。

3.6 小结

遥感异常作为地质找矿的重要参数之一,近年来被广泛重视。遥感异常的提取,应根据研究区地貌、景观、地质条件等的差异,以提取特定的蚀变信息为条件,探索不同的干扰去除方法和异常提取方法组合。能否对工作区成矿地质条件进行准确的分析和概括,有针对性地确定提取目标和筛选方法,是遥感异常提取工作成败的关键。

(注:本节执笔人杨金中,陈微)。

4 高光谱遥感技术及地质应用研究

高光谱遥感通常指光谱分辨率很高(达到λ^{-2}),可获取地物连续且完整的光谱曲线的遥感技术(Vane and Goetz, 1993),对于成像的高光谱遥感,又称为成像光谱遥感,最早由 Goetz(Goetz et al., 1985)在讨论成像光谱仪初期成果时提出。目前高光谱遥感使用的光谱段主要为可见光/近红外/短波红外(0.35～2.5μm)谱段,中/热红外(2.5～25μm)谱段可识别更丰富、更精细的岩石、矿物信息,识别和区分可见/近红外/短波红外谱段无法识别的造岩矿物,具有广阔的应用前景,目前主要用于行星和深空探测(Milm et al., 2010)。

世界上最早的成像光谱仪 AIS-1(Airborne Imaging Spectrometer)问世于 1983 年,由美国喷气推进实验室研制(Vane et al., 1984)。至目前为止,世界各国研发了数种高光谱仪。代表性的有美国 AVIRIS(Goetz, 2009a)、澳大利亚 HyMap(Kruse et al., 2000)、加拿大的 CASI/SASI(http://www.itres.com/)等机载高光谱仪和美国 EO-1 对地观测卫星搭载的 Hyperion 星载高光谱仪(Ungar et al., 2003)。

目前,成像光谱遥感数据的处理以及在地质领域的应用方法已逐步成熟(Gao et al., 2009; Clark et al., 2003),而数据获取难度与成本高是制约技术广泛应用的主要瓶颈。

4.1 方法简介

高光谱遥感识别地表岩矿物质成分信息的基本原理在于每种矿物由于晶体结构、化学成分的差异,反射与发射光谱曲线均表现出特有的谱形特征,称之为诊断性光谱特征,根据这些特征,可利用获取的地物的光谱谱形进行矿物的识别。数据处理主要包括数据预处理、大气校正和光谱重建、数据降维、端元光谱提取、光谱识别等主要环节。

数据预处理包括辐射畸变校正、辐射定标、波长定标与几何校正。辐射畸变校正的目的修复或抑制坏线、条带噪声与随机噪声,提高数据质量。坏线主要利用坏线两侧的正常像元数据内插修复;条带噪声主要因传感器光电响应元件的不一致所致的间隔不等、明暗相间的条纹,常用的修复方法为直方图匹配法,以某行数据为基准,其余数据与其进行直方图匹配;随机噪声的去除主要采用光谱维的窗口平滑法。辐射定标是利用传感器的辐射定标系数将无量纲的图像数据转换为辐射亮度数据。波长定标是利用传感器的波长定标系数对每个波段的波长进行校正。几何校正由基于 POS/IMU 系统的几何校正与基于控制点的几何校正组成,基于 POS/IMU 系统的几何校正主要根据数据获取时飞行平台的地理位置、(经度、纬度、高程)姿态参数(俯仰角、侧滚角、偏航角)以及像元点地面高程(对于地形起伏较大的地区,需要工作区 DEM 数据),实现高光谱数据的几何校正;基于控制点的几何校正是利用影像中特征地物点的已知的地理位置通过多项式拟合实现,其中控制点可通过野外采集,也可以采自经过几何精校正的航天影像与地形图。

大气校正是抑制和消除大气对电磁波选择性吸收和散射的影响。目前常用的方法主要为基于 6S、MODTRAN 大气辐射传输模型的方法(Gao et al., 2009)。首先利用 820nm、940nm 与 1135nm 的大气水气吸收强度逐像元反演大气水气含量,利用暗地物的 660nm 与 2200nm 的比值反演气溶胶光学厚度,将反演结果输入大气辐射传输模型完成大气校

正,将经过辐射定标后的辐射亮度数据转换为反射光谱数据,即光谱重建。

数据降维的目的是将数据中的有用信息压缩至有限的波段中,减小数据冗余与相关,减小后续端元光谱提取的计算量,并提高计算精度。常用的方法为最小噪声分量变换法(MNF:Manimum Noise Fraction Transformation)(Green et al., 1988)。MNF 变换之后,变换分量图像按照特征值由大至小排序,特征值越小,信噪比越小,原始数据的信息集中分布在少量特征值较大的分量图像上,以此达到降维的目的。一般,MNF 变换可将数以百计的高光谱数据的维数降低至 10~20。

端元光谱提取是通过数学方法提取影像数据中的"纯"像元光谱,并认为所有影像光谱均可看作由不同比例的端元光谱混合而成。常用的方法有像元纯度指数(PPI:Pixel Purity Index)(Boardman, 1993)、顶点分量分析(VCA:Vertex Component Analysis)(Nascimento et al., 2005)、最小体积变换(MVT:Minimum Volume Transform)(Craig, 1994)等。PPI 是将像元光谱向量反复投影到一个随机向量上,通过统计像元投影于随机向量两端的次数,次数越高,像元光谱纯度越高。PPI 方法物理意义简单直观,效果较好,应用较广泛,但只能从众多图像光谱中识别出纯度较高的像元,而无法直接确定端元光谱,需要在 PPI 计算的基础上,利用 N-维可视化交互式或利用最小体积变换等方法自动提取。上述数学方法提取的端元光谱往往存在冗余,即多条端元光谱代表的可能是一种矿物。端元提取方法将同种矿物在不同地形、混合等因素影响下的光谱识别为不同的端元,需要利用光谱专家知识人工合并或剔除冗余的端元,确保每个端元光谱均代表了不同的矿物成分。

高光谱遥感地表物质成分信息的识别的关键是光谱特征的识别。识别方法主要有两大类:一是基于光谱相似性的识别方法;二是基于光谱特征参量的识别方法。前者是通过计算端元光谱与获取的图像光谱之间的相似性,两个光谱之间的相似性越高,是同一种矿物的可能性越大。例如,一组端元光谱库中包括高岭石、白云母、白云石等光谱,与获取的光谱之间的相似性计算结果表明高岭石的相似性远大于白云母、白云石等其它端元,则可判断该图像光谱就是高岭石。相似性计算的方法较多,有欧氏距离(Fenstermaker et al., 1994)、光谱角(Yuhas et al., 1992; Kruse et al., 1993)、相关系数(Van der Meer and Bakker, 1997)、信息散度(Van der Meer and Bakker, 1997)、匹配滤波(Harsanyi and Chang, 1994)、混合调制匹配滤波(Boardman, 1998)、特征拟合(Clark et al., 2003)、光谱分解(Yan et al., 2010)等。2000 年,Chang C. L. 对欧氏距离、光谱角、信息散度、相关系数四种光谱相似性测度进行了对比分析,用 Cuprite 地区的 AVIRIS 数据,比较它们对明矾石、高岭石、蒙脱石和石英 4 种矿物的识别能力,认为信息散度识别效果相对较好(Chang, 2000)。基于光谱特征参量的识别方法就是首先计算图像光谱的吸收谷的吸收位置、吸收面积等特征参量,根据专家知识完成矿物的识别(甘甫平等,2003)。例如,通过计算发现某一图像光谱 2210nm 存在一个吸收谷,则可识别为 Al-OH 矿物(白云母、高岭石、蒙脱石),在 Al-OH 矿物识别的基础上,如果存在 2165nm 处的次级吸收谷,则可判断该光谱为高岭石光谱。光谱相似性识别方法对一些光谱精细特征敏感性低,识别能力较弱,但抗噪声能力较强,一般用于数据质量较差、地形起伏较大的地区,而基于光谱特征参量的方法相反,一般用于数据质量较高、地形起伏较小的地区。

4.2 技术特点

与传统的多光谱遥感(光谱分辨率一般大于 100nm)相比,高光谱遥感能够获取地物上百个波段的连续光谱,且每个图像像元均可以提取一条光谱曲线。可根据一些精细的光谱特征识别多光谱遥感无法识别的地物,如图 13 中,根据所示像元光谱中的 2210nm 的主吸收特征与 2265nm 的次级吸收特征,可以判别该像元岩石中含有高岭石矿物。相对于多光谱遥感,高光谱遥感在信息提取的种类、可靠性、定量化程度等方面均有显著提高。在地质勘查与地质环境监测领域,高光谱遥感主要用于识别地表矿物或矿物组合的种类、成分与含量信息,作为地质研究与地质工程部署的依据。目前,在反射光谱段,高光谱遥感技术可识别 30~40 种矿物的种类、成分以及含量信息。

4.3 使用范围

高光谱遥感技术可识别 Fe、Mn 等过渡金属的氧化物和氢氧化物(褐铁矿、赤铁矿等)、含 OH^- 矿物(蒙脱石、高岭石、绢云母、绿泥石、绿帘石、透闪石、蛇纹石等)、碳酸盐矿物(白云石、方解石)与水合硫酸盐矿物(黄钾铁矾、明矾石等)。地质应用中,可以通过利用航空/航天/地面的光谱数据识别矿物的三维空间分布、组合特征来识别地质体的空间分布