

遥感岩性识别研究进展与展望*

Progress and Prospect of Study on Remote Sensing Lithologic Identification

刘超群¹, 马祖陆^{1,2}, 莫源富^{1,3}

LIU Chao-qun¹, MA Zu-lu^{1,2}, MO Yuan-fu^{1,3}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004; 2. 中国地质大学, 北京 100083;
3. 中南大学, 湖南长沙 410083)

(1. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi, 541004, China; 2. China University of Geosciences, Beijing, 100083, China; 3. Central South University, Changsha, Hunan, 410083, China)

摘要:综述遥感岩性识别的岩石光谱学机理与岩石光谱特征, 总结目前常用的遥感岩性信息提取方法。认为深入研究岩石矿物的光谱学机理, 不仅要测量单个矿物的光谱, 分析其诊断性特征, 建立和完善矿物的光谱库, 更重要的是测量和研究多种矿物、岩石组成的岩性地层单位的成分与光谱的相关性特征、规律及其诊断性特征。建议我国南方遥感岩性识别研究应开展不同岩性地层单位的岩石地球化学特征与其上部覆盖土壤化学特征和植被生物化学特征之间的相关分析, 寻找其对应的遥感光谱信息变化规律; 加强遥感信息与非遥感信息的综合分析, 探索对新的低空间分辨率、高光谱分辨率的其它遥感信息的岩性识别方法。

关键词:岩性识别 光谱特征 纹理 多光谱 高光谱

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2007)02-0120-05

Abstract: The paper summarizes rock spectroscopy mechanism and rock spectral features, and sums up the common methods of obtaining lithologic information from Remote Sensing data at present. Considering for lucubrating the spectroscopy mechanism of rocks and minerals, the paper intends to measure single mineral's spectrum, analyze the diagnosable features, establish and consummate the spectral database of minerals. And the most important thing is to measure and study the spectral correlative features, rules and diagnosable features of the lithologic stratum units which are composed of several minerals and rocks. The Remote Sensing lithologic identification study in South China should search the change rules of corresponding spectral information by analysing the correlation between rock geochemical features of different lithologic stratum units and chemic features of covered soils or biochemical features of covered vegetation. The authors suggest enhancing integrative analysis on RS and non-RS information, and exploring the remote sensing lithologic identification methods with new high spatial and hyperspectral remote sensing data.

Key words: lithologic identification, spectral feature, texture, multispectral, hyperspectral

收稿日期: 2006-11-10

修回日期: 2006-12-15

作者简介: 刘超群(1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事遥感信息提取与GIS研究。

* 中国地质调查局工作项目《西南岩溶区地下水与环境地质调查综合研究》(编号(水)[2005]011-01)资助。

遥感图像真实地记录了岩石光(波)谱辐射特征及其形态特征。不同地区由于区域地质背景条件的不同, 以及岩石风化程度和覆盖程度的差异, 使得岩石的光谱特征和形态特征有较大的变化, 所以识别岩石(地层)类型, 确定其形态和分布范围, 是遥感地质填图中一个重要而又难度较大的领域。遥感岩性

填图就是在对岩性填图地层单元岩性组合的遥感信息进行测试、分析的基础上,进行地层判读,通过具有某些固定判读标志的岩性界线来圈定岩石地层界线的方法。

传统的岩性判读方法是通过对光学成像式合成图像(航片、卫片)进行判读来完成的。自从1972年美国成功地发射第一颗陆地资源卫星(Landsat-1)以来,传感器技术的飞速发展,推动了遥感影像向更高的光谱分辨率、空间分辨率和时间分辨率的方向发展,如1999年4月美国发射的Landsat-7搭载的增强型专题绘图仪ETM+,在原来7个波段的基础上,增加了一个15m全色波段;随后于1999年12月18日,又成功地发射了Terra卫星,上面搭载了先进星载热发射与反射辐射仪(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer,简称Aster),涵盖了从可见光到热红外的14个波段,并且具有同一轨道的立体观测能力。2001年法国在发射的Spot5号卫星上搭载了1个2.5m分辨率的全色波段,3个10m分辨率和1个20m分辨率的多光谱波段,几乎能在同一时刻以同一辐射条件获取立体像对。机载和星载成像光谱仪如AVIRIS、PHI、Hyperion等,一般拥有几十到几百个波段,光谱分辨率在几纳米到20纳米之间,空间分辨率在几米到50米之间;侧视雷达卫星具有全天候和穿越部分植被覆盖的能力等等。所有这些都为遥感岩性识别奠定了数据基础。

岩石的光谱特征是运用遥感方法识别岩性的基础,遥感技术的飞速发展推动了对岩石学机理和岩石光谱特征的研究,岩石光谱特征的研究又促使遥感岩性识别技术得到深入的发展。最近十几年,国内外学者开展了大量遥感岩性识别试验,并探索出一系列遥感岩性和矿物信息识别与提取的技术方法,促进了遥感岩性识别的量化、精细化和智能化发展。本文综述遥感岩性识别的基本原理,总结目前常用的遥感岩性识别方法,引用了众多学者的研究成果,并对遥感岩性识别的发展方向提出了一些见解。

1 岩石光谱学机理与光谱特征研究

1.1 岩石光谱学机理

岩性光谱是岩石、矿物对特定波长范围的电磁波的反射、吸收和辐射的综合反映。Hunt^[1]研究指出,在可见-近红外光谱区(0.4~1.3 μm),岩石吸收光谱的产生机理,主要是内部金属阳离子的电子跃迁或振动过程;丁喧等^[2]研究指出在短波红外光谱

区(1.3~2.5 μm),吸收光谱由羟基、水分子和碳酸根等基团的分子振动引起。其中电子跃迁包括晶体场效应和电荷迁移,电子跃迁是产生吸收光谱最主要的原因,物质内部微粒的分裂以及离子的不同会产生明显不同的吸收。电荷迁移也能产生吸收光谱,通常电荷迁移产生矿物的诊断性吸收光谱。在分子和晶体晶格中,倍频和合频的影响使岩石的光谱更加复杂^[3]。

王润生等^[4]研究认为,视场几何关系仅影响岩石反射率大小,光谱的整体形态和吸收特征基本保持不变;岩石表面形态只会对谱带强度产生影响,谱带位置、偏倚度基本保持不变;风化作用的影响较复杂,由于风化作用过程中原岩石成分发生改变,导致谱带位置发生改变,但是,阴离子基团所对应的光谱特征较为稳定;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,强度与矿物的含量基本成线性关系。

因此,岩石的光谱特征取决于组成成分、内部结构和光照条件等因素,其中岩石组成成分是主导因素;外部环境和表面特征等因素只会导致岩石反射率高低的变化,而谱带位置、宽度、吸收深度和形态等特征一般比较稳定^[5]。

1.2 岩石光谱特征研究

对特定岩石矿物的光谱测试与特征分析始于20世纪60年代末与70年代初。为配合美国Landsat系列卫星资料的应用,以Hunt为代表的美国科学家对地球上各大岩类的岩石矿物成分、电子特征与光谱特征进行了详尽的研究;80年代中后期,随着多光谱到高光谱技术的开发,Clark等^[6~8]更深入地研究了岩石矿物的光谱特征与处理技术,并开发出相应的岩石矿物信息识别提取软件,促进了岩性定量研究。1993年,美国地质调查局(USGS)公布了在实验室测试的100多种矿物的反射光谱数据库资料^[9]。我国自1978年以来曾开展过多次遥感试验研究,其中1978~1980年的腾冲航空遥感试验对600多组地物光谱特征进行了测试,1982年5月在宁芜遥感试验场进行了多次地物光谱辐射特性测量^[10]。

对某些特定岩石或岩性地层的光谱研究也相继展开。如研究得出碳酸盐岩的光谱曲线在2.33 μm 和11.3 μm 附近存在由 CO_3^{2-} 基团引起的标型谱带特征,白云岩在2.30~2.35 μm 之间吸收谱带的中心波长位置(2.30 μm)相对于灰岩的中心波长位置(2.33 μm)有向短波长方向移动的特点,白云岩的发

射光谱在 $11.3\mu\text{m}$ 附近存在低发射谱带,灰岩和泥灰岩在 $11.3\mu\text{m}$ 附近存在由 CO_3^{2-} 基团引起的谱带特征^[11]。相对碳酸盐岩,碎屑岩的反射率较低,谱带特征少,无明显规律;碎屑岩的发射光谱曲线有典型的谱带特征,砂岩和粉砂岩在 $8.1\mu\text{m}$ 和 $9.2\mu\text{m}$ 附近存在由 Si—O 基团伸缩振动引起的二重低发射谱带。粘土质岩石(泥岩和页岩)在 $8.0\sim 10.0\mu\text{m}$ 之间存在由 Si—O 基团引起的谱带特征,谱带的中心波长位置相对砂岩、粉砂岩有向长波长方向移动的特点,在 $11.3\mu\text{m}$ 附近有 CO_3^{2-} 引起的谱带特征^[12]。

2 遥感岩性信息提取方法

2.1 多光谱遥感岩性信息提取方法

多光谱数据覆盖的光谱区间大,光谱分辨率低,不能够充分表现地物的光谱特征。多光谱遥感岩性识别主要基于图像的空间灰度特征,采用变换方法增强图像的色调、颜色和纹理的差异,以及提取纹理信息,或利用多源数据融合的方法,达到识别岩性的目的。

2.1.1 增强变换处理方法

采用增强变换处理方法提取色调信息,可以扩大不同岩性的灰度差别,突出目标信息和改善图像的效果,从而提高解译标志的判别能力。常用的遥感图像增强方法有反差扩展、去相关拉伸、彩色融合、运算增强、变换增强等。

Nahid 等^[13]利用 Aster731(RGB)波段组合和波段比值图像($\text{RGB}_{4/5-3/1-3/4}$)能较好的识别不同的岩性单元和结构。丑晓伟等^[14]认为经过波段比值增强处理的 $\text{TM}_{3/1}(\text{Y})$ 、 $2/3(\text{M})$ 、 $7/5(\text{C})$ 比值彩色合成图像,及经过去相关扩展增强处理的 $\text{TIMS}_{234}(\text{RGB})$ 彩色合成图像,对不同沉积岩石有较好的识别效果。金浩等^[15]对 TIMS 数据进行主成分分析,不同的地物,由于其辐射特性不同,将区别地表现在不同的主成分向量上,再将 PC134 分别与原始图像的 237 波段叠加并做去相关处理,增强了岩性细微发射率的差异。Mars^[16]运用相关波段吸收深度分析(RBD)技术,根据波段为 $2.20\mu\text{m}$ 和 $2.33\mu\text{m}$ 的强吸收特征光谱识别粘土矿物、碳酸盐矿物和 Mg—OH 矿物。Rowan 等^[17]利用 Aster 数据的可见光-近红外和短波红外波段,经过匹配滤波处理能够识别灰岩和白云岩;通过热红外波段,可以较容易的识别石英类岩石和碳酸盐岩。

2.1.2 纹理信息提取方法

每个岩性单元的灰度值具有各自不同的空间变

化特征是运用纹理进行岩性分类的基础。常用的纹理信息提取方法有灰度共生矩阵法、小波变换和傅立叶变换等。纹理图像作为新的波段参与岩性分类,许多学者的研究表明纹理信息参与分类对岩性识别和分类精度的提高具有显著作用。

黄颖端等^[18]运用经典变差函数计算 TM6 个波段的纹理信息,与多光谱波段一起进行分类,分类精度从仅采用多光谱波段时的 40.16% 提高到 72.66%。李培军^[19]利用 Aster 数据进行岩性分类,仅用原始图像分类就获得最高分类精度为 72.21%,用变差函数提取可见光-近红外波段的纹理与原始图像一起进行分类,精度可达 76.55%。赵建华等^[20]利用基于分形纹理进行岩性分类,取得了较好的效果。江平等^[21]建立了一套用 fBm(分数布朗运动)模型分析纹理的方法,能识别碳酸盐岩、碎屑粘土岩以及二者互层。

2.1.3 多源数据融合方法

多源数据融合方法是遥感信息提取的一种重要方法,其包括不同类型、不同精度及时相遥感数据之间的融合,以及遥感数据与非遥感数据(如 DEM 数据、坡度图像、地球化学数据、地球物探数据等)的融合,融合后的数据包含了多种数据的信息,有利于显示不同岩性的差异。

Rowan 等^[17]利用标准化彩色技术(CNT)将 Aster 数据和 Radarsat 数据融合,融合后的图像同时包含了 Aster 数据的光谱信息和 Radarsat 数据的地形形态特征,增强了岩性填图能力;并将 Aster 数据与 DEM 数据生成三维遥感图像,从而能有效的识别 Nile 峡谷的岩性单元。马超飞等^[22]利用多源数据提取高植被覆盖地区的岩性信息,先找出不同植被微量元素与光谱响应之间的关系,然后综合利用多种非遥感数据,建立成分、光谱与波段的关联进行合适的 TM 波段选择,最后应用遥感数据弱信息提取方法进行岩性划分,取得了较好的效果。张万良^[23]利用遥感与航空放射性信息集成进行岩性识别研究,综合利用了遥感图像中的光谱信息和空间纹理信息,以及放射性信息具有的岩性识别能谱标志。由此可见,多源数据融合方法拓宽了遥感应用领域,提高了遥感应用能力,具有广阔的前景。

2.2 高光谱遥感岩性信息提取方法

成像光谱仪在对目标地物空间特征成像的同时,对每个空间像元形成几十至几百个连续光谱覆盖的窄波段^[24]。在获得空间图像的同时获得了地物的连续光谱曲线及诊断性特征光谱,从而能够利用

光谱信息直接识别地物,并获取定量信息。高光谱对岩性的识别依赖于岩石的光谱特征,可以依据实测光谱、光谱库光谱或图像纯像元光谱对岩石类型进行识别并提取定量信息。高光谱数据具有很高的光谱分辨率,并包含丰富的纹理信息,有利于岩性识别。高光谱遥感岩性识别可分为基于单个诊断性吸收光谱特征、基于完全谱形特征以及基于光谱知识模型 3 种类型。

2.2.1 基于单个诊断性吸收光谱特征的信息提取方法

根据端元的单个诊断性吸收光谱特征(包括吸收的位置、深度、宽度、面积、对称性等),从高光谱数据中提取并增强这些信息,直接用于岩性识别^[25]。如 HIS 编码与吸收波段图将波段吸收中心位置图像、深度图像和半极值宽度图像分别赋予明度(H)、强度(I)和饱和度(S),然后变换到 RGB 空间,根据色调差异进行岩性矿物识别^[26]。

2.2.2 基于完全谱形特征的信息提取方法

基于完全谱形特征的识别技术是利用整条光谱曲线,在参考光谱和像元光谱二维空间中,评价二者的相似程度。光谱匹配(SM)计算图像像元光谱与参考光谱的差异大小来识别岩性;相似指数(SI)根据已知像元平均光谱与未知像元光谱的波段差值平方和的均值大小识别岩性;光谱角度填图(SAM)根据像元光谱与参考光谱之间的矢量夹角大小来识别岩性^[27]。由于光谱角度填图没有考虑非选择性吸收的相对强弱,因此难以区分谱形相似而亮度相差较大的岩类,为了改善这一不足,可以利用两幅均值图像与光谱角度图像进行彩色合成,合成图像既反映了岩性光谱的谱形信息,也包含了岩性的反射率信息^[28]。Rowan 等^[29]利用 HyMap 高光谱数据,运用匹配滤波处理方法识别超基性岩性及邻近岩性,取得较好的效果,并研究认为在风化地形区域进行岩性单元填图时,对可见光-近红外和短波红外波段的光谱形状和反射率进行分析与分析特征光谱同样重要。

利用整条光谱曲线进行岩性匹配识别,可以改善单个光谱特征的不确定性影响;其不足在于岩性光谱受各种因素的影响会产生变异,以及对光谱差异不大的岩性识别效果不理想。

2.2.3 基于光谱知识模型的信息提取方法

基于光谱知识模型的岩性信息提取方法能够在识别岩性的同时量化岩石的成分、含量和其它物理特征,是高光谱遥感岩性信息提取的发展方向,这类

方法依赖于光谱学和数理方法,在实际应用中难以确定特征参数和描述光谱模型,所以目前这类方法尚未成熟。但是,随着相关学科的发展,基于光谱知识模型的高光谱岩性信息提取方法的识别精度和量化能力会得到进一步提高。

此外,专家还探索出了一系列信息提取技术,有混合光谱分解、MNF 变换、NAPC (Noise-adjust Principal Components Transform)变换^[30]、基于主成分的对分析、光谱角度填图(SAM)、匹配滤波、相关波段吸收深度分析等,同时还开发了监督分类法、非监督分类法和决策树分类法等基于模式识别遥感信息提取方法,并且引入了神经网络方法、小波变换和专家知识系统等人工智能及数据挖掘领域的最新成果。

3 遥感岩性识别研究展望

岩石和矿物的光谱学研究是遥感岩性识别研究的基础,因此,今后要继续深入研究岩石矿物的光谱学机理,不仅要测量单个矿物的光谱并分析其诊断性特征,建立和完善矿物的光谱库,更重要的是测量和研究多种矿物、岩石组成的岩性地层单位的成分与光谱的相关性特征、规律及其诊断性特征。从岩性地质填图的角度看,以基本岩性地层单位为研究对象进行岩矿成分与光谱相关性测试与分析是今后遥感地质应用研究的发展趋势和重要研究方向。

目前国内外的遥感岩性识别研究集中在植被稀少、人为影响较弱、岩石裸露率高的地区,而很少在土壤植被较好、岩石露头少的地区开展岩性识别研究,如国内的遥感岩性识别研究多在北方地区进行,南方地区尚无成熟的遥感岩性识别方法。因此,如何在地形复杂、表层土壤厚、植被较好、岩石裸露率低的南方地区运用遥感方法进行岩性识别是今后研究的重点。我国广大的南方地区气候温暖湿润,岩石上部覆盖着较厚的土壤和茂密的植被,在影像上表现的通常是土壤和植被的信息,岩性信息很弱。遥感岩性识别的关键是寻找消除表层土壤和植被的影响直接提取岩性信息的方法;或者通过研究土壤、植被与岩性的关联达到识别岩性的目的。

我国南方地区遥感岩性识别研究的发展趋势有以下 3 个方面:(1)开展不同岩性地层单位的岩石地球化学特征与其上部覆盖土壤化学特征和植被生物化学特征之间的相关分析,寻找其对应的遥感光谱信息变化规律。(2)加强遥感信息与非遥感信息的综合分析,如将遥感信息与地球物理数据、地球化学数

据进行融合可以提高岩性判读的精度;放射性元素能谱测量数据不受土壤、植被的影响,可以较好地识别不同岩性信息等等。(3)探索对新的高空间分辨率、高光谱分辨率的其它遥感信息的岩性识别方法,如微波遥感、激光雷达遥感,这些遥感数据能部分穿越树林遮挡,直接获取真实地表的高精度三维能量分布信息。高光谱遥感具有极高的光谱分辨率、信息量大,能很好地区分南方碳酸盐岩类岩石中成分差异不大的岩性地层单元,虽然航空高光谱信息获取的成本高,但是,近年来高空间分辨率的星载高光谱数据平台开始得到发展,如美国 EO-1 卫星的高光谱成像仪(Hyperion)能够获取空间分辨率为 30m, 多达 220 个波段的数据。对星载高光谱数据开展应用方法研究将是今后研究的方向之一。

由于不同岩性组成成分及内部结构的不同,在物理性质和化学性质上存在差异,从而形成了各种各样的地形地貌,不同岩性的地层在坡度、高度以及起伏等方面存在着差异。为此,可以通过将研究区域的数字高程信息和遥感影像结合建立三维遥感信息模型,利用遥感三维可视技术,将岩性地层的空间分布、光谱变化与地形地貌综合形成可视化遥感地面实况模型,提高岩性的判读精度。

4 结束语

与常规的岩性填图方法相比,遥感岩性识别方法具有周期短、投入人力物力少的特点,有极大的推广应用价值。目前,国内学者在植被稀少、岩石裸露率高的西北干旱地区开展了大量遥感岩性识别方面的研究,并在该地区探索出了较成熟的多光谱和高光谱岩性信息提取方法。由于我国南方地区气候温暖湿润,土壤和植被发育,岩石露头少,给遥感岩性识别带来了很大的困难,目前在南方地区开展的遥感岩性识别研究较少,尚无成熟的方法可循。因此,在南方高植被覆盖地区开展遥感岩性识别研究,寻找有效的识别方法,将是今后研究的重点之一。

参考文献:

- [1] HUNT G R. Spectroscopic properties of rocks and minerals in handbook of physical properties of rocks; Volume 1 [M]. Boca Raton; CRC Press, 1982.
- [2] 丁喧,童庆禧,郑兰芬,等. 光谱遥感找矿理论与应用[J]. 地球化学, 1992(1): 1-8.
- [3] 甘甫平,王润生. 遥感岩矿信息提取基础与技术方法研究[M]. 北京:地质出版社, 2004.
- [4] 王润生,郭小方,王天兴,等. 成像光谱方法技术开发应用研究:国土资源部“九五”重点科研项目报告[R]. 北京:中国国土资源航空物探遥感中心, 1999.
- [5] 丑晓伟,傅碧宏. 干旱区 TM 图像岩石地层信息提取与分析方法研究[J]. 沉积学报, 1995, 13(supp): 164-170.
- [6] CLARK N R. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy [EB/OL]. (1999-06-25) [2006-11-08]. <http://speclab. Cr. usgs. gov>.
- [7] CLARK R N, ROUSH T L. Reflectance spectroscopy; quantitative analysis techniques for remote sensing applications[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B7): 6329-6340.
- [8] CLARK R N, SWAYZE G A, ERICLIVO K, et al. Imaging spectroscopy; earth and planetary remote sensing with USGS tetracorder and expert systems[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (E12): 5131.
- [9] CLARK R N, SWAYZE G A. Digital spectral library; version 1 (0. 2 ~ 3. 0um) [R]. Denver: US Geological Survey, 1993.
- [10] 国家科委国家遥感中心. 中国遥感大事记(1981~1996)[M]. 兰州:兰州大学出版社, 1996.
- [11] 傅碧宏. 遥感岩石学的研究及其进展[J]. 地球科学进展, 1996, 11(3): 252-258.
- [12] 丑晓伟,傅碧宏,郑建京. 干旱区热红外多光谱遥感岩石地层信息提取与分析方法研究[J]. 科学通报, 1994, 39(18): 1693-1695.
- [13] NAHID D S, MOHAMED G A. Remote sensing analysis of the gorge of the Nile, Ethiopia with emphasis on Dejen-Gohatsion region [J]. Journal of African Earth Sciences, 2006, 44(2): 135-150.
- [14] 丑晓伟,傅碧宏,郑建京. 沉积岩石信息的热红外多光谱遥感探测及有效性评价[J]. 遥感技术与应用, 1996, 11(1): 7-13.
- [15] 金浩,童庆禧,郑兰芬,等. 成像光谱和热红外多光谱技术地质制图研究[J]. 环境遥感, 1994(2): 138-144.
- [16] MARS J C. Geologic mapping of the Sierra San Jose mountain range, Mexico using ASTER data; a remote sensing tool to assist geologic mapping in the field [R]. The US Colorado Convention Center: Remotely Sensed Data for Geologic and Environmental Studies, 2002.
- [17] ROWAN L C, MARS J C. Lithologic mapping in the mountain pass, California area using ASTER data[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 350-366.

- [22] 赵忠添. 黄喉拟水龟“白眼病”治疗初报[J]. 科学养鱼, 2005(6): 69-70.
- [23] 何成伟, 江其杏, 宋旭权, 等. 黄喉拟水龟“腐壳病”的病原分离与鉴定[J]. 广西畜牧兽医, 2006, 15(4): 26-27.
- [24] 朱新平, 陈永乐, 刘毅辉, 等. 黄喉拟水龟含肉率及肌肉营养成分分析[J]. 湛江海洋大学学报, 2005, 25(3): 4-7.
- [25] 孙苏亚, 李发美. 黄喉拟水龟板中三种甾体化合物的分离和鉴定[J]. 中国中药杂志, 2000, 25(3): 165-166.

(责任编辑: 凌汉恩 邓大玉)

(上接第124页)

- [18] 黄颖端, 李培军, 李争晓. 基于地统计学的图像纹理在岩性分类中的应用[J]. 国土资源遥感, 2003(3): 45-49.
- [19] 李培军. 用 ASTER 图像和地统计学纹理进行岩性分类[J]. 矿物岩石, 2004, 24(3): 116-120.
- [20] 赵建华, 杨树锋, 陈汉林. 基于分形纹理的遥感图像岩性识别方法[J]. 遥感信息理论研究, 2004(2): 2-4.
- [21] 江平, 石世民. fBm 纹理分类模型及其在岩性识别中的应用[J]. 环境遥感, 1995, 10(1): 38-44.
- [22] 马超飞, 马建文, 韩秀珍, 等. 应用多源数据提取高植被覆盖地区岩性信息——以湖南黔阳地区为例[J]. 地质科学, 2002, 37(3): 365-371.
- [23] 张万良. 遥感岩性识别的发展趋势——遥感与航空放射性信息集成[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(1): 88-91.
- [24] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [25] CLARK R N, KING T V, GORELICK N S. Automatic continuum analysis of reflectance spectra; proceedings of the third airborne imaging spectrometer data analysis workshop [C]. [S. l.]: JPL, 1987: 87-142.
- [26] 王青华, 王润生, 郭小方. 高光谱遥感技术在岩石识别中的应用[J]. 国土资源遥感, 2000(4): 39-43.
- [27] KRUSE F A, LEFKOFF A B, BOARDMAN J W, et al. The spectral image processing system (SIPS) interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data [J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 44: 145-163.
- [28] 王志刚, 朱振海, 王红梅, 等. 光谱角度填图方法及其在岩性识别中的应用[J]. 遥感学报, 1999, 3(1): 60-65.
- [29] ROWAN L C, SIMPSON C J, MARS J C. Hyperspectral analysis of the ultramafic complex and adjacent lithologies at Mordant [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3/4): 419-431.
- [30] GREEN A A, BERMAN M, SWITZER B, et al. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(1): 65-74.

(责任编辑: 凌汉恩 邓大玉)