现代遥感技术在地质找矿中的应用

钱建平, 伍贵华, 陈宏毅

(桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 文章论述了现代遥感技术在地质找矿中的应用, 包括遥感岩性识别、矿化蚀变信息提取、地质构造信息提取和植被波谱特征的找矿应用等; 总结了遥感地质找矿技术的若干新发展, 即多光谱遥感蚀变信息提取技术、高光谱遥感技术、遥感生物地球化学技术, 以及它们在地质找矿应用中的新发展; 对遥感技术在地质找矿中的应用提出了几点认识及展望。

关键词: 遥感岩石矿物识别; 矿化蚀变信息提取; 地质构造信息提取; 植被波谱特征; 多光谱遥感技术; 高光谱遥感技术; 遥感生物地球化学技术; 地质找矿

中图分类号: P627; P622 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2012)03-0355-06

1 遥感技术在地质找矿中的应用

遥感地质找矿是遥感信息获取、含矿信息提取以及含矿信息成矿分析与应用的过程。遥感技术在地质找矿中的应用主要表现在以下几个方面。

1.1 遥感岩石矿物识别

一定的岩石类型和岩石组合是成矿的物质基础和赋存条件, 岩石在成矿作用中的重要性是不言而喻的。遥感岩石矿物信息提取技术的发展与地物光谱特征的研究密不可分。岩石、矿物的光谱特征研究是利用遥感数据提取岩性信息的基础。岩性识别主要是应用图像增强、图像变换和图像分析方法, 增强图像的色调、颜色以及纹理的差异, 以便能最大限度地区分不同岩相、划分不同岩石类型(沉积岩、岩浆岩、变质岩)或岩性组合。遥感岩石矿物识别在区域地质填图工作中能发挥重要的作用。通常, 适合研究岩石、矿物光谱特征的最佳大气窗口有 2 个: ① 0.4~2.5 μm , 为可见近红外—短波红外域, 主要反映岩石、矿物的反射光谱特征; ② 8~14 μm , 为热红外域, 主要反映岩石、矿物的发射光谱特征^[1]。

Kahle 最早成功地获取了 6 通道的热红外航空

遥感数据, 并利用这些数据对犹他州中部的 East Tintic Mountains 地区的岩石矿物信息进行提取和识别。结果表明: 1, 2, 4 波段经主成分旋转—高斯反差增强—反旋转后, 再假彩色合成的图像(BGR)对于区分岩石信息效果最佳^[2-3]。Gillespie 利用热红外多光谱(TIMIS)对死谷地区的冲积扇进行填图, 结果可以识别出冲积扇的成分和年代^[4]。二宫芳树在帕米尔东北缘地区, 利用 ASTER 热红外遥感方法, 成功提取了该试验区硅质岩、碳酸盐岩及硅酸盐岩的岩性信息^[5]。Crosta 针对研究区的地质情况和蚀变特征, 以 USGS 标准矿物光谱数据库为标准, 结合矿物在岩石中的光谱变异特征, 建立了单矿物识别的规则, 从机载可见红外成像光谱仪(AVIRIS)的图像中提取白云母、方解石、高岭石、明矾石、绿泥石和玉髓等矿物^[6]。遥感地物识别主要依赖于地物光谱和空间特征的差异。高光谱遥感成像技术具有高分辨率、超多波段、数据量大等特点, 近年来被应用于岩石矿物识别。高光谱的窄波段可有效地区别矿物的吸收特征, 通过地物光谱重建、光谱特征的量化与提取、混合象元的分解和定量分析及模型识别, 能成功地区分矿物岩石。应该指出, 目前国内外的遥感岩性识别主要集中在植被稀少、岩石裸露率高

收稿日期: 2011-10-25; 改回日期: 2012-03-02; 责任编辑: 赵庆

基金项目: 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室开放基金项目(200913)、有色及贵金属隐伏矿床勘查教育部工程研究中心和广西地质工程中心重点实验室基金项目联合资助。

作者简介: 钱建平(1953-), 男, 教授, 研究方向为成矿构造和构造地球化学。通信地址: 广西桂林, 桂林理工大学地球科学学院; 邮政编码: 541004; E-mail: jpqian@163.com

的地区,在土壤植被覆盖较好地区的应用研究很少。寻求更为成熟的多光谱和高光谱岩性信息提取方法将成为今后遥感岩性识别研究的重点。

1.2 矿化蚀变信息提取

岩石蚀变信息的提取是遥感地质信息提取中的一个重要方面。围岩蚀变是含矿热液与围岩相互作用的产物,围岩蚀变的类型与围岩的化学成分、相关的矿床类型关系密切。围岩蚀变的范围通常大于矿化的范围,围岩蚀变可作为有效的找矿标志。常见的围岩蚀变有硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化、高岭土化、云英岩化、青磐岩化、夕卡岩化和褐铁矿化等。

矿化蚀变岩石与其周围的正常岩石在矿物种类、结构、颜色等方面具有一定的差异,这些差异导致了岩石反射光谱特征的差异,特定蚀变岩石在特定的光谱波段形成光谱异常。光谱异常的存在为遥感图像异常信息的提取提供了依据^[7]。因此,可以通过遥感图像的异常识别,圈定矿化蚀变异常区和确定找矿靶区。

目前应用的数据源主为多光谱 TM, ETM+, ASTER 数据以及少量高光谱与微波遥感数据等,其中应用最多的是 ETM+ 数据源。王治华在新疆哈图地区,以 ETM 图像数据为信息源,采用基于单波段图像分类的生成彩色合成图像法,对该区内生金矿的矿化蚀变信息进行提取,成功圈定了综合遥感矿化蚀变信息异常,并通过野外验证,发现了托玛尔勒和喀尔色巴依克斯套 2 处金矿蚀变带^[8];王亚红在柴北缘地区,利用 ETM 数据,采用“图像掩膜→最佳变量组合→波段比值→主成分分析→阈值分割→多元数据综合分析及异常筛选”的方法和流程,提取了柴北缘成矿带的矿化蚀变异常信息^[9];梁伟超针对新疆野马井地区,应用 ETM+ 数据,在对图像进行几何精校正、大气校正等预处理后,利用 Crosta 法结合掩膜方法进行矿化蚀变信息提取,确定了 5 个成矿远景区,并发现多处铜、金矿点^[10]。

蚀变信息提取目前应用较多的是铁染和羟基的提取。韩玲利用 Landsat 7 ETM+ 卫星影像数据,对新疆西天山地区进行了铁染及羟基蚀变信息的提取,并通过实地检查发现,所做的蚀变信息图能较好地反映矿化蚀变的实际情况^[11]。陈建平在青海沱沱河地区,从 TM 多光谱影像中提取与金属矿化有关的铁染与羟基蚀变遥感信息异常,结合地质资料,区划成矿远景区并圈定了找矿靶区^[12]。陈三明等人在桂东南植被覆盖区开展了遥感地质找矿预测,发现羟基异常或“羟基+弱铁染组合异常”是 Au,

Ag, W, Mo, Sn 成矿有利区的有效指示标志,强铁染异常的形态和规模与燕山早期花岗岩体存在空间对应关系。“强铁染异常+弱羟基异常”组合模式与小型金矿、铁染-羟基综合异常与铅锌矿床、羟基蚀变强烈区与构造破碎强烈带等之间,均存在较为密切的空间对应关系^[13]。张国荣在甘肃省肃北县黑刺沟一带,利用 ETM+ 数据进行蚀变信息提取,研究表明,黑刺沟一带所圈定的铁染和黏土化蚀变异常与黑刺沟金矿及蚀变带相吻合^[14]。

矿化蚀变信息提取是一种快速经济的遥感找矿手段,尤其在我国西部地质工作程度较低的岩石裸露半裸露地区,提取矿化蚀变信息是指导找矿行之有效的办法。但矿化蚀变信息的提取也存在一定的局限性,如干扰因素多,矿化信息弱,单一的提取方法不能将蚀变信息有效地提取出来。因此,利用遥感数据提取矿化弱信息,需要不断探索新的方法。

1.3 地质构造信息提取

地质构造信息的提取是遥感地质信息提取中另一个重要方面。野外地质观察表明,矿化蚀变带总是沿一定的地质构造分布,构造是成矿的重要控制因素,对内生矿床尤为重要。地质构造信息的提取主要是线性影像和环形影像的解译。针对不同的成矿构造环境条件,可以提取不同的成矿构造信息。如,提取与区域性成矿构造(断裂带、节理带、破碎带等)相关的线状构造信息;提取与中酸性侵入体、火山盆地、深成岩浆、热液活动相关的环状构造信息;提取与矿源层、赋矿岩层相关的带状影像信息;提取与矿化、蚀变、接触带有关的色环、色带、色块异常信息^[15]。

成永生利用 TM 多波段数据,对广西铜聋山铜铅锌矿区的构造信息进行了综合解译,确定该区的主要成矿构造为 NE 向断裂,线环构造的交汇部位是成矿的最佳环境^[16]。赵少杰在桂东地区应用 ETM+ 遥感数据,进行了线性构造和环形构造解译,运用分形几何学的原理和方法对研究区的遥感线性构造进行定量分析,结果表明,本区环形构造、线性构造集中区与铁染羟基异常、地球化学异常区在空间上基本重合,且呈 NE 向、NW 向点阵式分布,最终确定了 3 个成矿远景区^[17]。朱小鸽提出一种多重主成分分析方法,应用于柴达木盆地西部山区提取地质构造信息,新发现了一个鼻状构造与弧形转折,此鼻状构造与其东北部的已知含油背斜圈闭有关^[18]。

遥感系统在成像过程中可能产生“模糊作用”,使研究区的线性形迹、纹理等信息变得不甚清晰。通过

对遥感影像进行有关处理,如边缘增强、灰度拉伸、方向滤波、比值分析、卷积运算等,可使构造信息突显出来^[19]。此外,高分辨率快鸟卫星数据(分辨率 0.61 m)的使用更能清晰地突显地质构造信息^[20]。通过对解译的线性和环形影像进行统计分析,结合地质、物探、化探等方面资料的综合分析,确定成矿构造的分布及其特征;并用数学地质的方法对解译出的线性构造进行分形统计分析,从而验证线性构造与内生金属矿产分布规律的关系,确定找矿靶区;还可以通过地表岩性、地质构造、山谷地貌、水系特征以及植被分布等特征,提取隐伏的构造信息。

1.4 植被波谱特征的找矿应用

微生物及地下水的的作用可引起地表矿化蚀变岩石成分和结构的变化,使其上方土壤层的成分发生变化。遥感生物地球化学找矿原理为:植物在生长过程中,吸收了附近土壤、岩石中的某些矿质元素。这些矿质元素进入植物体内的生物循环,组成植物的组织,影响植物体内酶的活性,调节植物的生命活动。当植物对某种重金属的积累超过一定的阈值,便会产生一定的毒化作用,即所谓的生物地球化学效应,同时抑制植物体对其他生命元素的吸收,使植物在生理、生态方面产生一系列的变异。这些变异导致绿色植物的叶面光谱反射率及波形呈现出异常变化,以致在遥感图像上表现为不同的灰度、色度和色彩特征,可利用遥感技术将其探测或提取出来^[21]。

Collinsetal 和 Chwalleretal 分别研究了金属矿物对植物生长发育及光谱特征的影响,结果表明,重金属元素会引起植物矮化、褪绿等病变,造成与重金属元素相关的植被红光边界光谱曲线向短波方向的“蓝移”^[22-23]。郭世忠通过二氧化硫在动、静态条件下,对大气污染和土壤中镉、铜、铅、锌、铬对农作物光谱辐射特性影响的盆栽模拟实验,揭示了当二氧化硫或土壤中重金属浓度达到一定值时,就会对植物产生“抑制”作用,造成地物波谱特性发生变化^[24]。

令人欣喜的是,矿区生物地球化学方法为在高植被覆盖区的地质找矿提供了新的途径。

2 遥感地质找矿技术的新发展

2.1 多光谱遥感蚀变信息提取技术

多光谱遥感技术是利用多光谱摄影系统或多光谱扫描系统,对电磁波谱不同谱段做同步摄影遥感,分别获得植被及其他地物在不同谱段上的影像的遥感技术。多光谱遥感不仅可以依据影像的形态和结

构的差异判别地物,还可以根据光谱特性的差异判别地物,扩大了遥感的信息量。

多光谱遥感技术以往采用的数据源主要是 MSS, TM, ETM+ 和 SPOT。由于受其波谱分辨率和空间分辨率的限制,这些数据源在矿产资源勘查领域的应用具有一定局限性。近年来, CBERS-02B, ASTER 和 ALOS 等新型多光谱遥感技术的出现,为多光谱遥感技术在国民经济各领域的应用提供了新的数据源。

CBERS-02/02B 多光谱数据的空间分布率为 19.5 m,几何配准效果较理想,主要应用于农业、绿地动态监测、地质灾害监测、制图等方面,目前在地质找矿方面应用较少,已有工作成果主要见于控矿断裂带和花岗岩型铀矿田的研究。张杰林在桃山花岗岩型铀矿田,利用 CBERS-02B 数据的彩色合成影像,发现桃山矿田形成于断裂构造夹持和交汇区,并划分了不同岩体,提取了 Fe^{3+} 蚀变信息。ALOS 遥感数据主要应用于测图、区域性观测、灾害监测、资源调查、技术发展等领域,目前尚未在地质找矿领域中得到应用^[25]。进入 21 世纪以来,在地质找矿中应用最为广泛的则是 ASTER 遥感影像数据。ASTER 数据具有波段更多、波段涵盖的光谱范围更窄、空间分辨率更高等优点,ASTER 数据较之 ETM+ 数据在矿化蚀变信息提取中具有更大的优势^[26]。耿新霞在新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿区,运用主成分分析法对试验区 ASTER 遥感图像进行蚀变信息提取,提取的蚀变异常与野外地质情况吻合性好^[27]。丛丽娟在内蒙古朱拉扎嘎金矿试验区,利用 ASTER 数据,采用主成分分析(PCA)方法进行蚀变信息提取,提取的矿化蚀变信息可靠^[28]。

值得注意的是,单一的数据源往往只能反映地物目标某些方面的特征,有时不能准确地识别地物,而通过多源数据的融合,既可去除无用信息,又可集中有用信息。数据的融合既可以是遥感数据间的融合(如多光谱数据与高光谱数据,多光谱数据与雷达技术),亦可以是遥感数据与非遥感数据间的融合(多光谱数据与物探、化探)。目前,多光谱与物探、化探的融合被广泛应用于遥感找矿,并已形成较为成熟的理论。与多光谱遥感相比,高光谱与雷达技术更能精确地进行地物识别,多光谱与高光谱、雷达技术进行融合,将大大增加对地表信息的识别能力。

2.2 高光谱遥感技术

高光谱遥感技术是在电磁波谱的可见光、近红外、中红外和热红外波段范围内,利用成像光谱仪获取许

多非常窄的光谱连续影像数据的技术。高光谱技术是多光谱技术的发展。高光谱遥感技术具有如下特点:①光谱波段多:成像光谱仪在可见光和近红外光谱区内有数十甚至数百个波段;②光谱分辨率高:成像光谱仪采样间隔小,一般为10 nm左右,其精细的光谱分辨率可以反映地物光谱的细微特征;③遥感数据量大:随着波段数的增加,数据量呈指数增加;④信息冗余度增加:由于相邻波段的相关性高,导致信息冗余度增加;⑤可提供空间域信息和光谱域信息(即“图谱合一”),由成像光谱仪得到的光谱曲线可与地面实测的同类地物光谱曲线相类比^[29]。

高光谱遥感具有许多不同于宽波段遥感的性质,不同矿物在电磁波谱上显示的诊断性光谱特征使得人们易于识别不同矿物和岩石成分。目前,高光谱遥感成功应用于许多地质研究领域,特别是在矿物识别、岩性填图、矿产资源勘探、矿业环境监测等方面取得了很好效果。

甘甫平利用新疆东天山航空高光谱 HyMap 数据进行矿物识别,识别的矿物有褐铁矿、富铝云母、白云母、贫铝云母、黑云母、蒙脱石、高岭石、绿泥石+绿帘石、绿泥石、绿帘石等;进行了1:50 000高光谱面积性矿物填图,对区域矿产的预测起到很大作用^[30]。王润生在新疆土屋东一三岔口试验区,用 HyMap 机载成像光谱数据填绘出10多种矿物,编制了全区和标准分幅矿物分布图,准确率高,并据此提出了若干找矿有利地段、靶区和找矿有利部位^[31]。

Noomen 通过室内实验、野外光谱测量和高光谱图像(Probe-1)分析,研究油气微渗漏对植被光谱的影响,试图通过发现植被异常寻找新的油气资源^[32]。J. R. Everett 利用成熟的高光谱数据处理技术,在美国加利福尼亚南部圣巴巴拉地区确定了因油气渗漏造成的植被异常区的范围^[33]。F. Marleen 通过研究油气渗漏对地表植被(小麦和玉米)在高光谱反射波段的变化,从高光谱影像(HyMap)上提取地表油气渗漏异常信息^[34]。

随着高光谱遥感地质应用的逐步发展和深入,高光谱遥感技术和方法亦在不断改进。如林志奎针对 EO-1 Hyperion 高光谱影像数据提出一种改进的独立成分分析方法(M-ICA),能更精确地提取地物信息^[35]。目前,由于遥感找矿技术普及率不够和数据较为昂贵,高光谱遥感技术在地质找矿方面总体上仍处于研究阶段。随着高光谱遥感技术方法的进一步发展及改进,高光谱遥感技术在地质找矿中的应用会越来越广泛。

2.3 遥感生物地球化学技术

遥感生物地球化学是遥感技术与生物地球化学相结合的一门新学科,旨在解决植被覆盖地区的隐伏矿床找矿问题。遥感生物地球化学技术具有视野广阔、快速准确等特点,能够进行大面积找矿预测。运用遥感生物地球化学方法在植被覆盖地区寻找隐伏矿藏和优选远景区能取得较好的应用效果。

R. Brooks, J. A. Erdman 利用植物地球化学法寻找金矿,并认为重金属矿物对植物的生长发育及光谱特征产生影响^[36-37]。赵志芳研究了南腊地区遥感影像图上植被的褪色现象与矿化的关系,认为遥感图像上的植被色彩异常现象与铅锌银等多金属矿化蚀变有很大关联性,已知的矿床(点)无一例外地落在植被色异常带中^[38]。刘福江利用植被指数和波段比值指数,结合主成分分析法,对植被异常进行监督分类与非监督分类,得出招远金矿区部分区域的植被异常综合解译图,通过野外验证,发现植被异常都与热液蚀变区域有关^[39]。刘志杰发现,黑龙江呼玛地区与金矿有关的植被遥感异常表现为 TM1, 2, 3, 5, 7 波段灰度值低于正常植被, TM6 波段灰度值高于正常植被。通过 TM6/TM2 波段比值分析,能有效地将与金矿有关的遥感蚀变信息凸显出来,呈现高亮度值区,从而很好地将正常植被与非正常植被区分开来^[40]。

在遥感图像上,植物对金属元素的吸收和积聚作用表现为异常植被与正常植被在灰度值和色彩上具有明显的差异。因此,在植被覆盖区可以通过提取异常植被信息的方法获得与多金属矿找矿有关的矿化信息。遥感生物地球化学技术为解决在高植被地区快速、经济、准确地获取矿化信息提供了现实可行的方法。应用遥感生物地球化学技术找矿时,还要综合考虑各种干扰因素的影响,如土壤的 pH 值、元素的赋存状态、元素间的相互作用,植物体的生态环境(降雨影响、排水条件等),矿体上覆围岩中断裂、裂隙、孔隙的发育程度等。

3 认识与展望

3.1 认识

通过对遥感地质找矿现状的系统分析和总结,得出以下初步认识:

(1)遥感岩矿识别技术非常适宜于植被稀少、基岩裸露区的区域性地质填图,其相对于常规的地质填图方法具有经济快捷、实用高效等优点,值得推广。

(2) 矿化蚀变信息提取技术对于地质工作程度低的西部地区,在一定程度上相当于区域化探扫面的功效。具体运用时应注意多种矿化蚀变信息提取方法的结合。如采用波段比值、主成分分析、光谱角填图相结合的方法,以便最大限度地把矿化蚀变信息提取出来。同时注意将地质构造信息有机地结合起来,高分辨率卫星数据能更好地反映地质构造信息。

(3) 高植被覆盖区遥感地质找矿可以结合植物光谱信息和植物地球化学方法来进行,实践证明对寻找隐伏矿床卓有成效,但目前仍主要处于研究阶段。

(4) 和其他找矿手段一样,遥感地质找矿也有一定的局限性:遥感影像反映的主要是地表信息或浅部信息,多光谱遥感技术属宽带光谱,光谱分辨率较低。这就要求在特定的区域内,根据实际情况,综合运用多种找矿手段并有机地加以结合,以图取得最佳的找矿效果;同时要加速高光谱遥感技术与高空间分辨率遥感技术的发展,以适应地质找矿技术发展的需要。

3.2 展望

目前,遥感地质找矿技术作为矿产勘查的一种辅助手段,取得了较好的成效。今后的发展趋势将主要体现在以下几个方面:

(1) 高光谱遥感技术。高光谱遥感技术起步晚,但发展迅速,是遥感技术找矿领域的后起之秀。目前,高光谱遥感技术发展呈现出以下趋势:成像光谱仪的光谱探测能力不断提高,获取影像的空间分辨率亦不断提高,正由航空遥感为主转为航空和航天遥感相结合的阶段,逐步从遥感定性分析阶段发展到定量分析阶段。高光谱遥感技术与高空间分辨率遥感技术的发展,可使遥感技术能更直接地应用于地质找矿。

(2) 遥感植物地球化学。在高植被覆盖区实现遥感波谱数据与矿致植物地球化学异常的有机融合,将会较好地推进遥感找矿技术在植被覆盖区的应用。

(3) 地物化遥的有机融合。矿床的形成是多种地质作用综合的结果,矿床形成后又经历后期的破坏或者叠加成矿作用,因此,任何一种单一的找矿手段都不可避免地遭遇地质多解性的困扰,实现地物化遥多种找矿方法与手段的有机融合,能有效地提高找矿效果,并从总体上降低找矿成本。目前,以遥感信息为主体,结合地质、地球物理、地球化学等多源地学数据的综合信息找矿法已经形成。

(4) 遥感数据处理技术。在遥感数据规模越来越大、精度越来越高的今天,高效的计算机数据处理技术显得越来越重要。遥感抗干扰信息的处理仍是当今研

究的难点和热点。基于对提高找矿过程及结果的人性化和真实可靠性,近些年发展起来的一些新兴技术将越来越被重视,如使用智能计算方法进行 RSI 分类、遗传算法、蚁群算法、基于粒子群智能的遥感找矿方法、基于支持向量机的遥感矿化蚀变信息提取方法、基于小波分析的遥感图像特征信息提取方法等,这方面进一步的研究具有很高的应用价值。

参考文献:

- [1] 唐兰兰,张晓帆,刘云华. 遥感岩性信息提取的基础和技术研究进展[J]. 矿业研究与开发,2006,26(3):68-73.
- [2] Kahle A B,Rowan L C. Middle infrared multispectral aircraft Scanner data:analysis for geological applications. Applied Optics,1980(19):2279-2290.
- [3] Kahle A B,Bowan L C. Evaluation of multispectral middle infrared aircraft images for Lithologic mapping in the East Tintic Mountains,Utah[J]. Geology,1980(8):234-239.
- [4] Gillespie A R,Kahle A B,Palluconi F D. Mapping alluvial fans in Death Valley, California, using multispectral thermal infrared images[J]. Geophys Res Lett, (11):1153-1156.
- [5] 二官芳树,傅碧宏. 帕米尔东北缘 ASTER 多光谱热红外遥感数据的岩性信息提取[J]. 新疆地质,2003,21(1):22-28.
- [6] Crosta A P,Sabine C,Tamnik J V. Hydrothermal alteration mapping at Bodie, California using WIRIS hyperspectral data [J]. Remote Sens Environ. 1998,65(3):309-319.
- [7] 荆凤,钱建平. 矿化蚀变信息的遥感提取方法综述[J]. 遥感信息,2005(2):62-65.
- [8] 王治华,张慧玉,王科强,等. ETM 图像数据中矿化蚀变信息的提取:以新疆哈图地区为例[J]. 黄金地质,2009,30(2):6-9.
- [9] 王亚红,王永,王辉,等. 利用 ETM 数据进行矿化蚀变信息提取的方法研究:以柴北缘地区为例[J]. 遥感信息,2009(6):68-71.
- [10] 梁伟超,刘磊,何晓刚,等. 新疆野马井地区矿化蚀变信息提取与找矿研究[J]. 西部探矿工程,2011(7):188-211.
- [11] 韩玲,谢秋昌. 利用遥感技术对新疆西天山地区矿化蚀变信息的提取[J]. 遥感信息,2007(6):49-52.
- [12] 钱建平,王倩,董庆吉,等. 青海沱沱河地区遥感蚀变信息提取[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2009,34(2):314-318.
- [13] 陈三明,钱建平,陈宏毅. 桂东南植被覆盖区的抗干扰遥感蚀变信息优化提取与找矿预测[J]. 桂林理工大学学报,2010,30(1):33-40.
- [14] 张国荣,芦青山,费一清. ETM+数据在甘肃省肃北县黑刺沟一带蚀变遥感异常信息提取中的应用[J]. 大地构造与成矿学,2010,34(3):386-390.
- [15] 耿新霞,杨建民,张玉君,等. 遥感技术在地质找矿中的应用及发展前景[J]. 地质找矿论丛,2008,23(2):89-93.
- [16] 成永生. 广西铜锣山铜铅锌矿床遥感地质信息研究[J]. 地质找矿论丛,2010,25(4):351-355.
- [17] 赵少杰,钱建平,陈宏毅. 遥感线性构造分形统计和蚀变信息提取在桂东地区金铅锌锡多金属成矿预测中的应用[J]. 大

- 地构造与成矿学, 2011, 35(3): 364-371.
- [18] 朱小鸽. 多重主成分分析及在地质构造信息提取中的应用[J]. 遥感学报, 2000, 4(4): 299-303.
- [19] 刘影. 地质遥感及其在找矿中的应用[J]. 西部探矿工程, 2011(8): 105-109.
- [20] 余勇, 钱建平. 高分辨率遥感线性构造分形特征及综合成矿预测[J]. 矿产与地质, 2005, 19(2): 209-213.
- [21] 马跃良. 遥感生物地球化学找金矿方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 521-526.
- [22] Collins W, Chang S H, Raines G, et al. Airborne biogeochemical mapping of hidden mineral deposits[J]. Econ Geol, 1983, 78(4): 737-749.
- [23] Schwaller M R, Tkach S J. Premature leaf senescence as: Remote-sensing detection and utility for geobotanical prospecting[J]. Econ Geol, 1985, 80: 250-255.
- [24] 郭世忠, 田国良, 汪水花. 二氧化硫和重金属镉、铜等物质对植物光谱特性的影响[J]. 环境科学, 1984, 5(6): 13-17.
- [25] 张杰林, 赵英俊, 张静波, 等. CBERS-02B 星数据质量评价及铀成矿要素解译应用研究[J]. 国土资源遥感, 2009(1): 69-73.
- [26] 叶发旺. ASTER 数据与 ETM 数据蚀变信息提取的对比研究: 以巴什布拉克铀矿区油气还原蚀变分析为例[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(3): 274-281.
- [27] 耿新霞, 杨建民, 张玉君, 等. ASTER 数据在浅覆盖区蚀变遥感异常信息提取中的应用: 以新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿岩体为例[J]. 地质论评, 2008, 54(2): 184-190.
- [28] 丛丽娟, 岑况, 朱所, 等. 利用 ASTER 数据提取蚀变异常方法研究: 以内蒙古朱拉扎嘎金矿为例[J]. 河南理工大学学报, 2007, 26(6): 652-663.
- [29] 杨国鹏, 余旭初, 冯伍法, 等. 高光谱遥感技术的发展与应用现状[J]. 测绘通报, 2008(10): 1-4.
- [30] 甘甫平, 王润生. 高光谱遥感技术在地质领域中的应用[J]. 国土资源遥感, 2007(4): 57-60.
- [31] 王润生, 丁谦, 张幼莹. 遥感异常分析的协同优化策略[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1999, 24(5): 498-502.
- [32] Noomen M F, Skidmore A K, Vander Meer F D. Detecting the influence of gas seepage on vegetation, using hyperspectral remote[C]// Sensing Proceedings of 3rd EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy. 2003: 252-256.
- [33] Everett J R, Staskowski R J, Jengo C. Remote sensing and GIS enable future exploration success[J]. Worldview, 2002, 223(11): 59-65.
- [34] Noomen M F. Hyperspectral reflectance of vegetation of vegetation affected by underground hydrocarbon gas seepage[C]// Enschede, the Netherlands: International Institute for Geo-information. Science & Earth Observation, 2007.
- [35] 林志全, 晏路明. 高光谱影像的 M-ICA 地物识别算法与应用[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(1): 126-131.
- [36] Brooks R. Biological methods of prospecting for gold[J]. J Geochem Explor, 1982, 1(7): 109-122.
- [37] Erdman J A, Olson J C. The use of plants in prospecting for gold: a brief overview with a selected bibliography and topic index[J]. Geochem Explor, 1985, 24(3): 281-304.
- [38] 赵志芳, 张折, 蒋成兴. 遥感图像植被色异常与矿化[J]. 云南地质, 2004, 23(1): 47-51.
- [39] 刘福江, 吴信才, 郭艳, 等. 招远金矿区植被异常及遥感找矿意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(3): 444-448.
- [40] 刘志杰, 刘荫椿. 植被遥感异常及金矿找矿意义[J]. 东华理工大学学报, 2008, 31(1): 50-53.

The application of modern remote sensing technology to geology and ore exploration

QIAN Jian-ping, WU Gui-hua, CHEN Hong-yi

(College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: The paper deals with the application of modern remote sensing technology to geology and ore exploration. The technology includes lithological discrimination, data extraction of mineralization and alteration, geological structure, and the mineralization-related vegetable spectral characteristics etc. Some new remote sensing technologies are summarized, such as mineralization and alteration extraction technology of multi-spectral remote sensing data, hyperspectral remote sensing technology, as well as their application to geological exploration. And some ideas and prospects of the application are put forward.

Key Words: remote sensing discrimination of rock and mineral; Information extraction of mineralization-alteration; information extraction of geological structure; spectral characteristics of vegetation; multispectral remote sensing technology; hyperspectral remote sensing technology; remote sensing biogeochemical technology; geology and ore exploration