

文章编号 1004-924X(2015)08-2407-12

高光谱遥感岩矿识别的研究进展

张成业, 秦其明*, 陈 理, 王 楠, 赵姗姗
(北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要:分析与综述了当前高光谱遥感岩矿识别研究的进展。论述了岩矿光谱特征的作用机理以及岩矿光谱的特征测量与分析方法。归纳和总结了目前以及未来几年可用于岩矿识别的高光谱遥感探测器件和仪器的特点。对基于光谱吸收特征、完全波形匹配和混合像元分解的 3 类岩矿识别方法进行了归纳与对比, 重点介绍了近年来这类技术的重要成果以及研究热点。最后, 从理论、数据、方法以及应用 4 个方面对当前高光谱遥感岩矿识别面临的主要问题和发展趋势进行了剖析。作者认为, 高光谱遥感岩矿识别的整体发展趋势为定性识别向量化分析发展, 在此发展过程中, 混合光谱模型的建立与解混、面向岩矿识别的新型高光谱传感器的研制、岩矿信息提取的智能化以及复杂地质环境下的岩矿识别将成为研究的主要方向。

关键词:高光谱遥感; 岩矿识别; 光谱特征; 综述

中图分类号:TP751; P627 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152308.2407

Research and development of mineral identification utilizing hyperspectral remote sensing

ZHANG Cheng-ye, QIN Qi-ming*, Chen Li, Wang Nan, Zhao Shan-shan

(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

* Corresponding author, E-mail: qmqin@pku.edu.cn

Abstract: This paper reviews the current progress of mineral identification based on hyperspectral remote sensing. The physicochemical mechanisms of mineral spectra and their feature measurement and analysis are introduced. The properties of current and future main hyperspectral sensors are concluded. Then, three series of methods (based on spectral absorption feature, full spectral profile matching, and spectral unmixing, respectively) for mineral identification based on hyperspectral data sets are comparatively analyzed and summarized. Finally, the main problems of mineral identification by using hyperspectral data on theory, data sets, methods and applications, are analyzed and its developing trends are discussed. It points out that the trend will focus on the direction from the qualitative identification to the quantitative mineral analysis. During this trend, spectral unmixing, the design of new hyperspectral sensors for mineral identification, intellectualization of mineral information extraction, and mineral identification in a complex geological environment will be the main research focuses.

Key words: hyperspectral remote sensing; mineral identification; spectral feature; review

收稿日期: 2015-04-10; 修订日期: 2015-06-04.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (No. 2011ZX05034)

1 引 言

高光谱遥感技术(Hyperspectral Remote Sensing)又称成像光谱技术(Imaging Spectrometry)。高光谱遥感观测地球表层的概念最初由美国学者 Goetz A. 于 20 世纪 80 年代提出,并在地质领域取得成功应用^[1-2]。高光谱遥感能够在可见近红外、短波红外波谱内(350~2 500 nm)获取数百幅电磁波段非常狭窄的遥感影像,因此高光谱遥感影像能够提供每个像元的完整且连续的光谱曲线(光谱分辨率通常小于 10 nm)^[3-4]。通过地物光谱曲线上特有的光谱特征,高光谱遥感技术能够准确区分地物种类^[5-7],并且能够对地表物质成分实现定量分析^[8],是一种快速、大面积观测地表物质组成的重要技术手段^[9]。

与多光谱遥感相比,高光谱遥感能够以更高的光谱分辨率提取地物的诊断性光谱特征,这使得在多光谱遥感中不可区分的岩石和矿物光谱,可在高光谱遥感中得到精确识别。自高光谱遥感出现以来,岩矿识别与矿物填图始终是高光谱遥感在地质领域应用发展的主要动力之一^[9]。利用高光谱遥感识别岩矿,能够直接提供同矿床成矿和蚀变相关的矿物种类、分布以及丰度信息。基于这些岩矿信息,可以有效地圈定相关矿产资源的勘探范围,实现矿产资源大面积快速勘查^[10]。此外,高光谱遥感岩矿识别在火山监测、地质灾害调查、矿山尾矿监测等领域也有着广泛应用。

近年来,随着新型成像光谱仪的应用、计算机人工智能的发展以及高光谱遥感数据处理技术的不断进步,在高光谱遥感岩矿识别领域涌现出诸多研究成果。这些研究一方面说明了高光谱遥感在岩矿识别领域的应用前景广阔,另一方面也揭示了现有的高光谱遥感岩矿识别技术中面临着一些亟待解决的问题。在这种情况下,总结当前高光谱遥感岩矿识别发展中的成果和存在的问题,指出未来高光谱遥感岩矿识别的发展趋势显得尤为重要。本文从岩矿光谱特性测量与分析、高光谱数据及其岩矿识别应用、高光谱遥感岩矿识别方法 3 个方面归纳了当前高光谱遥感岩矿识别的研究进展,重点分析了近年来的典型研究成果和焦点问题。最后对高光谱遥感岩矿识别面临的主要问题和发展趋势进行了总结。

2 岩矿光谱特性测量与分析

根据电磁波与复杂地物相互作用的理论,岩石和矿物在 350~2 500 nm 内反射光谱的特性主要取决于岩矿的化学组分和物理结构。严格来说,岩矿是岩石与矿物的统称,其中矿物是具有相对固定的化学组成的单质和化合物,一般为内部质点排列有序的固体,它是组成矿石与岩石的基本单元。矿物的光谱特性包括光谱吸收位置、吸收深度、吸收宽度等特征参数,它与矿物内在的理化特性紧密相关。矿物光谱吸收特征在 400~1 300 nm 波长内,受到物体内部电子与晶体场相互作用的影响,主要表现为以下三个方面:晶体场效应和电荷转移(如铁、钴、镍、铬、铜、锰等过渡性金属元素的电子跃迁)、金属卤化物中的色心、半导体材料中的导带跃迁。而在 1 300~2 500 nm 波长内,矿物的光谱吸收特征主要受阴离子基团振动过程的影响,如组成矿物的水分子(H_2O)、羟基($-OH$)、碳酸根(CO_3^{2-})、硫酸根(SO_4^{2-})等基团的振动^[4,9]。因此,这些影响使矿物表现出独特的光谱特性。岩石是固结或不固结的矿物集合体,它由一种或两种以上矿物组成,这些影响使岩石光谱通常表现为与矿物不同的混合光谱特性。上述因素只是岩石和矿物光谱特性的决定性因素,还存在一些其他影响岩石光谱的因素,主要包括:温度、风化作用、岩石表面结构、岩石表面颜色、大气环境等。此外,在复杂地质环境下影响岩矿高光谱遥感响应规律的因素更多。由于高光谱成像光谱仪的瞬时视场角比较大,其像元空间分辨率一般比较低,于是在地形复杂的区域,阴影和地形起伏对光谱影响很大^[4]。在植被覆盖区,高光谱传感器接收到很多植被信息,岩矿混合光谱将更加复杂。

早期对高光谱遥感岩矿识别的研究主要集中在 20 世纪七八十年代的岩石和矿物反射光谱响应规律上。在此期间,学者们对大量典型岩石和矿物的光谱特征进行了测定与分析,包括:蒙脱石与黑碳颗粒混合物、无水碳酸盐、硅酸盐矿物等^[11-15]。此外,Clark(1990)还分析了典型矿物在不同光谱分辨率下所呈现的不同光谱特征^[16]。在国内,朱振海(1990)总结了油气烃类渗漏形成蚀变矿物的典型波谱特征^[17]。常青^[18]对甘肃北

山南带的岩矿波谱特征进行了初步研究。吴昫昭等人(2003)利用主成分分析的方法分析岩矿光谱在岩石学中的应用^[19]。这些关于岩矿光谱特性的测量与分析为高光谱遥感岩矿识别奠定了相关的研究基础。

近年来,针对岩石和矿物的光谱特性测量的研究主要是岩矿组分与光谱特征之间的定量分析。典型的研究包括:陈明(2010)基于分形理论对岩矿光谱模型进行了对比分析^[20]。Mulder 等人^[7]利用反射光谱以及地统计的方法对区域尺度的岩土矿物成分进行了分析。彭杰等人^[21]利用 200 多个土样的光谱数据,研究了氧化铁对有机质光谱特征及定量反演的影响。梁树能等人^[22]对绿泥石中矿物成分含量与光谱特征之间的关系进行了定量分析。Murphy 等人对铁矿物在 900 nm 附近的吸收特征参数进行了测量分析^[23]。这些定量研究为利用高光谱遥感定量提取岩矿信息提供了理论模型支撑。

3 高光谱数据及其岩矿识别应用

按照遥感平台的不同高光谱遥感数据可以分为地面数据、航空数据和星载数据。地面数据主要用于岩石矿物样本的光谱特性提取,并在此基础上建立用于岩矿识别的参考数据库。目前大多数用于岩矿识别的高光谱遥感数据主要来自于航空平台和卫星平台。目前国内外常用的航空高光谱载荷主要有:HyMap、AVIRIS、HYDICE、MIVIS、DAIS、CASI、Probe-1、PHI、OMIS 等^[24]。航空高光谱遥感数据的主要优势在于空间分辨率、光谱分辨率以及信噪比均较星载数据高,但是航空高光谱遥感数据的成本也非常高,而且数据获取受空域、天气的影响非常大。另外,由于航空数据不易获取,学者们在岩矿识别研究中往往优先考虑采用星载高光谱数据。表 1 列出了目前运行以及即将发射的常见高光谱遥感卫星或者载荷在可见近红外和短波红外波段的主要技术指标。

表 1 主要在轨及计划发射的高光谱卫星或载荷指标(可见近红外和短波红外范围内)^[4, 24-33]

Tab. 1 Features of hyperspectral remote sensing satellites or sensors in orbit or plan launching (During the VNIR and SWIR wavelength ranges)

名称	国家/地区	光谱/nm	波段数目	空间分辨率/m	状态
Hyperion	美国	357~2 576	220	30	在轨
CHRIS	欧盟	415~1 050	62/34/18	34/17	在轨
HJ-1A	中国	450~950	115	100	在轨
天宫一号	中国	400~2 500	128	20/30	在轨
HyspIRI	美国	380~2 500	213	60	计划中
EnMap	德国	420~2 450	242	30	计划中
HERO	加拿大	400~2 500	/	30	计划中
PRISMA	意大利	400~2 505	249	30	计划中

由表 1 可以看出,目前能够获取的民用星载高光谱影像只有 Hyperion 影像、CHRIS 高光谱数据、HJ-1A 高光谱数据以及天宫一号高光谱数据等。CHRIS 和 HJ-1A 的数据范围集中在可见近红外波段(VNIR),而大多数岩矿的诊断性特征集中在短波红外波段(SWIR),因此 CHRIS 和 HJ-1A 数据并不完全适用于岩矿识别。另外,HJ-1A 高光谱数据的空间分辨率较低(100 m),从而影响了岩矿识别精度。天宫一号数据现已开放申请,就目前数据获取能力来看,仅能够部分满足科研和应用需求。Hyperion 数据能够覆盖可

见近红外和短波红外波段,同时影像又相对容易获取,因此目前高光谱遥感岩矿识别中的星载数据仍以 Hyperion 为主。但是,Hyperion 传感器最初的设计寿命只有 12~18 个月,自 2000 年发射以来已经超期服役十余年,其数据坏线、垂直条纹严重,信噪比低(特别是用于岩矿识别的短波红外波段),数据质量比较差。

从即将发射的星载高光谱传感器来看,尽管空间分辨率基本保持不变,但是其光谱范围对可见近红外和短波红外波段进行全覆盖的同时,波段数目也有所增加。近年来已经有部分学者利用

模拟数据对这些载荷用于岩矿识别的能力进行了评估。典型的主要有: Kruse 等人(2011)利用 HypSIIRI 模拟数据评估了空间分辨率降低对岩矿识别的影响^[25]; Mielke 等人^[26]利用 EnMap 模拟数据对南非矿山尾矿的识别与监测进行了研究; Rogge 等人(2014)同样利用 EnMap 的模拟数据,并结合航空数据对加拿大努纳维克地区的超美铁质岩进行了识别^[27]。

4 高光谱遥感岩矿识别方法

在航空和航天高光谱传感器发展的基础上,自 20 世纪 90 年代起,研究热点逐渐由岩矿光谱响应特征规律转移到高光谱遥感岩矿识别技术,并在实践过程中形成了一些完整的高光谱遥感识别岩矿信息的流程,典型的有:美国 AIG 公司开发的一套方法^[34];最小噪声分离(MNF)、纯净像

元指数(PPI)、 n 维可视化分析以及光谱角制图(SAM)或者混合调制匹配滤波(MTMF);美国 USGS 和 JPL 开发的 Tetracorder 系统^[35]。这些方法大多采用如下思路:对高光谱遥感影像进行大气校正、几何校正以及噪声抑制等预处理以后,将参考光谱与影像像元光谱进行处理与分析,得到矿物的种类、组成成分或者丰度,从而实现岩矿的精确识别。

参考光谱与影像像元光谱的处理方法大致可以分为如下三种:基于光谱吸收特征参量的岩矿识别、基于完全波形的光谱匹配和光谱解混(如图 1 所示)。对于前两类岩矿识别方法的研究主要集中在上世纪 90 年代和本世纪初,之后的研究主要是对这两类岩矿识别方法的改进,而近几年的研究热点主要集中在利用混合像元分解的方法识别岩矿。

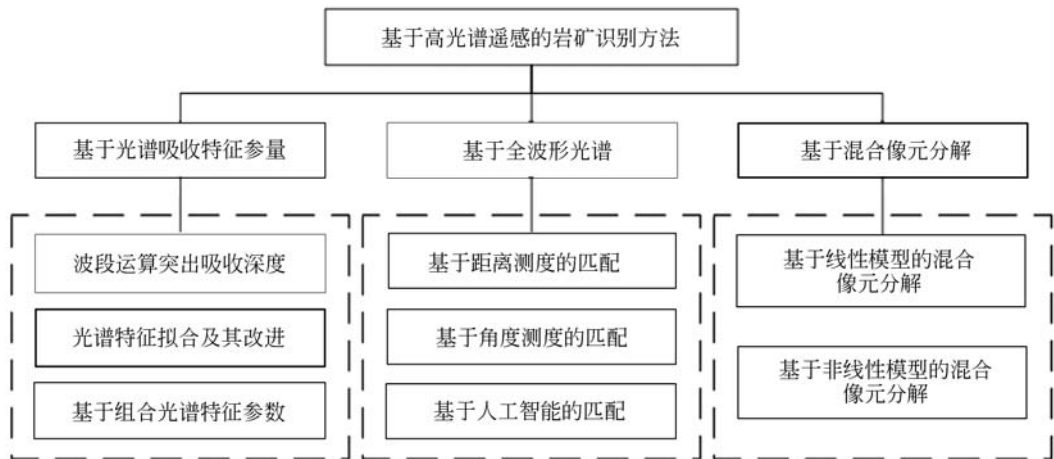


图 1 基于高光谱遥感的岩矿识别方法

Fig. 1 Classical methods for mineral identification using hyperspectral remote sensing

4.1 基于光谱吸收特征参量的岩矿识别

由于化学组成和物理结构的不同,不同矿物会出现不同的光谱吸收特征,因此,岩矿的诊断性光谱特征主要体现在特定波长位置的吸收谷。基于诊断性吸收特征的岩矿识别首先要提取不同岩矿的光谱吸收特征参量,目前常用的特征参数包括:吸收位置、吸收深度、吸收面积、吸收宽度、吸收对称性、光谱斜率、光谱导数、光谱吸收数目等^[4,36]。其中,吸收位置、吸收深度和吸收对称性三者结合能够基本表达出岩矿的诊断性吸收特征,因此三者在上述光谱特征参量中显得尤为重

要,在岩矿识别的应用也最为广泛。基于光谱吸收特征参量的岩矿识别技术可以概括为如下 3 类^[37]:

1、通过波段运算突出目标矿物的光谱吸收深度^[38]。Crowley 等人于 1989 年提出相对吸收深度(Relative Absorption-band-Depth, RBD)的方法,但是该方法只是利用了吸收位置和吸收深度信息,忽略了光谱吸收谷的形状特征,因此具有相似吸收位置的矿物极易造成混淆^[39]。例如,碳酸盐和含 Mg-OH 的黏土矿物在 2 300 nm 处均存在吸收特征,区别在于碳酸盐在 2 300 nm 处的吸

收特征具有不对称性。为了解决这一问题,王晋年等人于1996年,De Jong于1998年通过引入吸收特征的不对称性测度,分别提出了光谱吸收指数(SAI)和连续差值波段算法(CIBR)^[36]。王永^[40]基于波段比值,对龙门山前山带碳酸盐、黏土矿物和二价铁矿物等岩矿进行了识别。杨燕杰和赵英俊于2011年指出油气蚀变矿物信息提取主要采用的是波段比值的方法^[41]。

2、光谱特征拟合(SFF)及其改进算法。参考光谱和影像像元均经过包络线去除的基础上,基于目标矿物的光谱吸收位置和吸收深度等信息,利用最小二乘法对参考光谱和影像像元光谱进行对比计算,得出两者拟合的程度^[42]。光谱特征拟合具有突出目标岩矿弱吸收特征的优势,但是原本吸收谷形状不同的光谱在包络线去除以后可能出现相似的光谱吸收特征,造成矿物种类识别的误判^[43-44]。针对这一问题,许宁等人于2011年根据矿物特点,在原有算法的基础上通过增加其他光谱特征参量,计算光谱特征综合拟合值,从而在一定程度上提高了矿物识别精度^[44]。但是该方法需要根据不同矿物设置不同的光谱特征参量阈值,故仍需继续改进。

3、基于组合光谱特征参数的岩矿识别。鉴于单一光谱特征参数识别岩矿易出现误判的情况,学者们提出了综合多种因素的矿物识别规则。例如,张宗贵等人于2003年基于多个光谱吸收特征和多个吸收参数,对新疆东天山地区的岩矿进行了识别^[45]。甘甫平等人^[46]以美国Cuprite地区为例,建立了高光谱岩矿谱系识别规则。Clark等人^[35]开发的Tetracorder专家系统也是综合多种光谱特征和算法来提高岩矿识别的准确度。van der Meer^[37]综合利用吸收深度、吸收位置和吸收不对称性对碳酸盐和黏土矿物进行了识别,同时提出一种线性插值的方法用以解决影像光谱分辨率低的问题。车永飞等人于2014年提出一种基于主次光谱吸收组合特征的高光谱遥感矿物识别方法^[47]。贺金鑫等人于2014年提出了一种基于朴素贝叶斯分类器的高光谱矿物识别方法,获得了较高的分类识别准确率。该方法综合利用了吸收谷位置、吸收谷反射率、吸收深度、光谱斜率和吸收对称性等光谱特征参数^[48]。

4.2 基于全波形光谱的岩矿识别

岩矿化学组分混合造成的光谱漂移和变异对单个光谱吸收特征影响很大^[36],因此,基于光谱吸收特征参数的岩矿识别方法很容易产生误判。为了充分利用高光谱遥感影像提供的光谱信息,学者们提出了对完整的参考光谱和像元光谱进行对比分析,在一定程度上弥补了基于光谱吸收特征参数进行岩矿识别的劣势。基于全波形光谱的岩矿识别方法将参考光谱和像元光谱作为两个高维矢量(维数等于影像波段数目),然后计算两者的相似程度,可以分为如下3类方法:

1、基于距离测度的光谱匹配。最小距离法利用像元光谱与训练样本的平均光谱的欧氏距离进行岩矿分类,计算简单^[43]。Fenstermaker等于1994年基于欧氏距离提出相似指数(SI),对美国内华达地区潜在的矿山尾矿进行了识别。但是欧式距离存在一个明显缺点,即将对比双方的各个指标等权看待,这影响了对岩矿的准确识别^[49]。此外,燕守勋等人于2004年,刘汉湖等人于2013年分别对基于最大似然法、马氏距离、平行六面体、二值匹配、交叉相关光谱匹配以及主成分分析的高光谱遥感岩矿识别方法进行了总结,这些方法也都利用了完整的光谱波形信息^[50-51]。

2、基于角度测度的光谱匹配。光谱角制图(SAM)算法计算了参考光谱和像元光谱两个矢量的广义夹角,夹角越小说明像元光谱越接近参考光谱^[52]。SAM算法不受光谱反射率大小的影响,但是在实践过程中仍然存在一些问题。Carvalho等于2000年利用皮尔森相关系数对SAM法进行改进,解决了SAM算法正负相关系数的问题^[50]。为增加光谱可分性,何中海等于2011年提出基于权重光谱角制图的高光谱矿物填图方法^[53]。为了解决光谱多样性的问题,Xiya Zhang等于2014年耦合了平均光谱与平均光谱导数,并利用多元参考光谱信息,提出了两种参考光谱的确定方法^[54]。Molan于2014年利用“移动阈值法”解决了匹配滤波(MF)以后数据处理中的阈值设置问题^[55],这对光谱特征匹配(SFF)、光谱角制图(SAM)等算法中阈值的确定有一定的启发意义。

3、基于人工智能的岩矿识别。王润生等人于1999年基于神经网络,利用岩矿的完全波形光谱对岩矿进行识别^[36]。基于目标分解的神经网络

分类能在一定程度上解决高光谱遥感图像目标探测中同种地物被划分为两类的问题^[4]。Xianfeng Chen 等人于 2010 年利用一种基于规则 (rule-based) 的系统对美国内华达地区矿物进行了识别,并获得明显比 SAM、SFF、最小距离法和最大似然法更好的结果^[56]。Mountrakis 等人于 2011 年提出的支持向量机等常见机器学习算法也被用于高光谱遥感数据的光谱分析^[57]。张兵等人于 2011, 2013 年提出利用蚁群算法、离散粒子群优化算法以及改进的蚁群算法进行高光谱矿物端元提取,并在美国内华达地区的 AVIRIS 高光谱影像上取得成功应用^[58-60]。

4.3 基于混合像元分解的岩矿丰度制图

通过混合像元分解方法能够同时得到多种矿物在单个像元中所占的比例,从而得到待研究区地表矿物丰度图,这是目前高光谱遥感岩矿识别方法中的研究热点问题。SCIE 数据库的统计结果显示,近五年来关于光谱解混的研究成果呈现激增的趋势,出版的相关文献数量翻了一番(图 2)。根据光谱混合模型的不同,光谱解混可以分为线性光谱解混和非线性光谱解混。

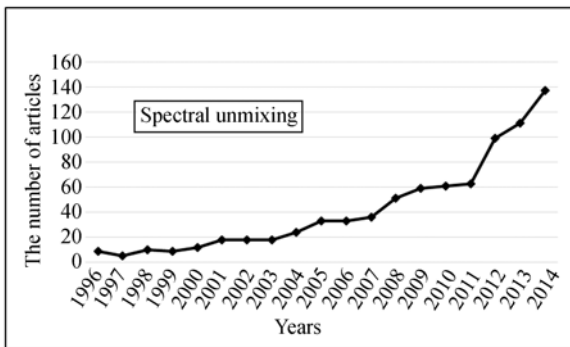


图 2 1996~2014 关于光谱解混的每年出版文献数目(数据来源: SCIE 数据库)

Fig. 2 Publications on spectral unmixing per year from 1996 to 2014 (data source: SCIE)

4.3.1 线性光谱解混

在线性光谱混合模型中,像元的光谱由组成该像元的各个端元的光谱进行线性叠加而成。经典的混合调制匹配滤波(MTMF)是基于线性光谱模型发展而来的^[50]。赵欣梅^[61]利用 MTMF 的方法对柴达木盆地油气蚀变矿物进行了识别。

线性光谱解混的主要过程就是对其光谱混合模型求得约束解的过程,时至今日仍然有很多学者提出线性光谱解混算法,并在美国 Cuprite 地

区的矿物识别过程中进行了算法验证。Neville 等^[62]利用约束线性光谱解混对基于 SFISI 和 AVIRIS 数据的矿物勘查进行了对比。Rogge^[63]提出一种基于迭代的 ISMA 线性光谱解混方法,取得了良好效果。Heylen 于 2011 年基于单一投影利用一种新的最小二乘法求解全约束条件下的线性光谱混合模型^[64]。刘凯等人于 2013 年针对高光谱遥感矿物识别,在线性光谱模型的基础上提出了一种基于 Fisher 权重分析的迭代光谱解混方法^[65]。张兵等于 2014 年基于粒子群算法对 NCM 模型进行了分析^[66]。

4.3.2 非线性光谱解混

事实上,针对自然界地物的混合光谱理论模型多数为非线性的,利用非线性光谱混合模型得到的结果要优于线性光谱混合模型^[4]。早在 1981 年, Hapke 就提出岩石双向反射率光谱模型^[36]。Poulet 等^[67]利用非线性光谱混合模型对实验室内矿物混合进行了定量分析。闫柏琨等于 2012 年提出统计月表土壤主要矿物组成的非线性光谱解混方法^[68]。Altmann 等于 2013 年提出基于多项式的后非线性解混模型,并利用 AVIRIS 高光谱影像进行了验证^[69]。Heylen 于 2014 年对非线性光谱解混进行了总结,指出线性光谱解混的研究已经过剩或将放弃,非线性光谱解混在未来将成为一个新的研究热点^[70]。

近年来,基于混合像元分解的岩矿识别出现了一个新的研究方向,即用硬件系统取代软件运算来减少光谱解混的运算时间并获得更好的丰度结果,这些方法也在美国 Cuprite 地区 AVIRIS 高光谱影像的岩矿识别上得到验证^[71-74]。另外,近年来,陈圣波等人于 2012 年,刘彦丽于 2013 年在植被覆盖区的高光谱遥感岩矿识别方面做出了有益的探索,但是仍然存在植被背景-岩矿目标分离的问题^[75-76]。

5 结论与展望

宫鹏于 2009 年指出遥感科学与技术理论方面遵循从定性到定量的发展规律^[77]。由本文对高光谱遥感岩矿识别的文献调研和总结也可看出;从 20 世纪七八十年代的岩矿样本实验室内光谱特征测量,到后来的基于光谱吸收特征和完全波形匹配的岩矿识别,再到当前的研究热点——

混合像元分解进行岩矿丰度制图,揭示了高光谱遥感岩矿信息提取从定性识别向量化分析发展的趋势。

作者认为,高光谱遥感岩矿识别的发展方向主要表现为以下方面:

从理论方面讲,利用高光谱遥感进行岩矿信息量化分析,首先需要解决矿石或岩石的混合光谱分解的问题。矿物的光谱特征主要取决于其化学成分和物理结构,而自然界中矿石和岩石的光谱则表现出不同矿物组分的光谱混合特征。因此,需要深入分析岩石和矿物的化学成分、物理结构以及混合光谱特征之间的相互关系,研究矿石和岩石混合光谱特征响应的物理机理,为高光谱遥感岩矿量化分析提供理论支撑。在此基础上,进一步研究不同种类和含量的矿物组分混合下的岩矿高光谱遥感物理模型,解决矿石或岩石的混合光谱解混的问题是改善高光谱遥感岩矿探测能力和提升高光谱遥感岩矿识别精度的关键。

从高光谱遥感岩矿识别的数据来源方面看,需要根据矿藏与矿物类型的光谱特性,有针对性地设计并研制新型成像光谱仪,解决高光谱遥感数据源短缺问题。Hyperion 传感器、CHRIS 高光谱数据、HJ-1A 高光谱数据以及天宫一号高光谱数据在数据质量、波段范围以及影像获取能力等方面各有不足。因此,当前面向岩矿识别的高光谱遥感面临着星载数据短缺的尴尬局面。在未来5年内将陆续有 HypSIRI、EnMap、HERO、PRISMA 以及中国的高分五号等高光谱遥感传感器发射。这些新型传感器虽然在数据质量、光谱分辨率以及幅宽等性能指标方面均有改善,其中部分传感器的模拟数据在岩矿识别中的能力也已经得到了评估,但是这些传感器并不是针对岩

矿识别与岩矿勘查而设计。因此,面向岩矿识别的新型成像光谱仪已成为遥感地质学者关注的一个主要方向。

从技术方法方面讲,岩矿混合光谱特征分离与提取,混合光谱模型构建与匹配以及岩矿目标识别趋于向智能化发展。高光谱遥感岩矿信息提取中的特征分离与提取、模型构建与匹配、岩矿目标识别等过程受先验知识、研究人员的工作基础和工作经验等人为因素的影响较大,这在一定程度上降低了岩矿识别的精度和速度。当前,计算机人工智能算法的发展趋向于精度更高、速度更快,其对人类思维过程和智能行为的模拟降低了数据处理过程中人为主观干扰的影响,通过借鉴并改进这些算法对岩矿混合光谱特征的分离与提取,混合光谱模型的构建与匹配以及岩矿目标的识别,有望解决高光谱岩矿识别中存在的端元光谱确定、光谱多样性以及混合模型求解等问题,并提高识别精度和运算速度。因此,伴随着计算机人工智能领域的不断发展,高光谱遥感岩矿信息提取的智能化将成为研究热点。

从实际应用上来看,利用高光谱遥感识别岩矿信息最主要的目的是矿产资源勘查。然而,目前大型裸露的矿床多数已经被发现,遥感找矿逐步面向植被覆盖区、高山峻岭等地质环境复杂的地区。因此,在高光谱遥感岩矿识别的实际应用中,从大噪声背景中提取微弱岩矿信息的应用技术已经成为应用方向。例如在植被覆盖区高光谱遥感找矿面临的如何克服植被强干扰的问题,在高山峻岭等地质环境复杂的地区面临的如何克服山体阴影与风化物光谱强干扰的问题,已经成为主要的关注方向。

参考文献:

- [1] GOETZ A F H. Spectroscopic remote-sensing for geological applications [C]. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, Los Angeles, USA: SPIE, 1981(268): 17-21.
- [2] GOETZ A. Imaging spectrometry for Earth remote sensing [J]. *Science*, 1985, 228(4704): 1147-1153.
- [3] MAGENDRAN T, SANJEEVI S. Hyperion image analysis and linear spectral unmixing to evaluate the grades of iron ores in parts of Noamundi, Eastern India [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 26: 413-426.
- [4] 童庆禧,张兵,郑兰芬. 高光谱遥感-原理、技术与应用[M]. 北京:高等教育出版社,2006: 19-289.
TONG Q X, ZHANG B, ZHENG L F. *Hyperspectral Remote Sensing* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [5] 黄鸿,杨媚,张满菊. 基于稀疏鉴别嵌入的高光谱遥感影像分类[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11):

- 2922-2930.
- HUANG H, YANG M, ZHANG M J. Hyperspectral remote sensing image classification based on SDE [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2922-2930. (in Chinese)
- [6] 刘嘉敏, 罗甫林, 黄鸿, 等. 应用相关近邻局部线性嵌入算法的高光谱遥感影像分类[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1668-1676.
- LIU J M, LUO F L, HUANG H, *et al.*. Classification of hyperspectral remote sensing images using correlation neighbor LLE [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1668-1676. (in Chinese)
- [7] 鲍一丹, 陈纳, 何勇, 等. 近红外高光谱成像技术快速鉴别国产咖啡豆品种[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 349-355.
- BAO Y D, CHEN N, HE Y, *et al.*. Rapid identification of coffee bean variety by near infrared hyperspectral imaging technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 349-355. (in Chinese)
- [8] MULDER V L, DE BRUIN S, WEYERMANN J, *et al.*. Characterizing regional soil mineral composition using spectroscopy and geostatistics [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 139: 415-429.
- [9] VAN DER MEER F D, VAN DER WERFF H M A, VAN RUITENBEEK F J A, *et al.*. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 14(1): 112-128.
- [10] 田丰. 全波段(0.35~25 μm)高光谱遥感矿物识别和定量反演技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- TIAN F. *Identification and quantitative retrieval of minerals information integrating VIS-NIR-MIR-TIR (0.35 ~ 25 μm) hyperspectral data* [D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2010. (in Chinese)
- [11] HUNT G R. Spectral signatures of particulate minerals in visible and near IR [J]. *Geophysics*, 1977, 42(3): 501-513.
- [12] HUNT G R. Near-infrared (1.3-2.4 μm -M) spectra of alteration minerals-potential for use in remote-sensing [J]. *Geophysics*, 1979, 44(12): 1974-1986.
- [13] CLARK R N. Spectral properties of mixture of montmorillonite and dark carbon grains: Implications for remote sensing minerals containing chemically and physically absorbed water [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88: 10635-10644.
- [14] GAFFEY S J. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 microns): anhydrous carbonate minerals [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92: 1429-1440.
- [15] 李小文, 刘素红. 遥感原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 231.
- LI X W, LIU S H. *Principle and Application of Remote Sensing* [M]. Beijing: Science Press, 2008: 231. (in Chinese)
- [16] CLARK R N, KING T V V, KLEJWA M, *et al.*. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets*, 1990, 95(B8): 12653-12680.
- [17] 朱振海, 王文彦, 彭希龄. 遥感技术直接探测烃类微渗漏的方法研究[J]. *科学通报*, 1990, 16: 1257-1260.
- ZHU ZH H, WANG W Y, PENG X L. Study on the direct detection of hydrocarbon microleakage using remote sensing [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 16: 1257-1260. (in Chinese)
- [18] 常青. 甘肃北山南带岩(矿)石波谱特征的初步研究[J]. *甘肃地质学报*, 1999, 8(1): 49-56.
- CHANG Q. Preliminary study on spectrum features of rocks (ores) from southern belt of beishan area in gansu province [J]. *Acta Geologica Gansu*, 1999, 8(1): 49-56. (in Chinese)
- [19] 吴昀昭, 田庆久, 陈骏, 等. 基于主成分分析的反射光谱在岩石学中的应用—以哈密地区为例[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4): 761-766.
- WU Y ZH, TIAN Q J, CHEN J, *et al.*. Application of rock laboratorial reflectance spectra in Hami area based on principal component analysis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4): 761-766. (in Chinese)
- [20] 陈明. 基于分形理论的岩矿光谱模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- CHEN M. *Study on the spectral model of rocks and minerals based on fractal* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [21] 彭杰, 李曦, 周清, 等. 氧化铁对有机质光谱特性的

- 影响分析[J]. 遥感学报, 2013, 17(6): 1396-1412.
- PENG J, LI X, ZHOU Q, *et al.*. Influence of iron oxide on the spectral characteristics of organic matter [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(6): 1396-1412. (in Chinese)
- [22] 梁树能, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 绿泥石矿物成分与光谱特征关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1763-1768.
- LIANG SH N, GAN F P, YAN B K, *et al.*. A study on the relationship between the comparison and spectral feature parameters in chlorite [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(7): 1763-1768. (in Chinese)
- [23] MURPHY R J, SCHNEIDER S, MONTEIRO S T. Consistency of measurements of wavelength position from hyperspectral imagery: use of the ferric iron crystal field absorption at similar to 900 nm as an indicator of mineralogy [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52: 2843-2857.
- [24] 周子勇. 高光谱遥感油气勘探进展[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 352-361.
- ZHOU Z Y. Progress in hyperspectral remote sensing for petroleum prospecting [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(2): 352-361. (in Chinese)
- [25] KRUSE F A, TARANIK J V, COOLBAUGH M, *et al.*. Effect of reduced spatial resolution on mineral mapping using imaging spectrometry-examples using hyperspectral infrared imager (hyspirci)-simulated data [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(8): 1584-1602.
- [26] MIELKE C, BOESCHE N K, ROGASS C, *et al.*. Spaceborne mine waste mineralogy monitoring in south africa, applications for modern pushbroom missions: Hyperion/OLI and EnMAP/Sentinel-2 [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 6790-6816.
- [27] ROGGE D, RIVARD B, SEGL K, *et al.*. Mapping of NiCu-PGE ore hosting ultramafic rocks using airborne and simulated EnMAP hyperspectral imagery, Nunavik, Canada [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 302-17.
- [28] EO-1 User Guide Version 2.3, USGS Earth Resources Observation System Data Centre EDC [EB], 2003. 7. 15.
- [29] 天宫一号空间应用推广服务平台[OL]. [2015-3-08] <http://www.msadc.cn/sjcp/>.
- [30] ROBERTS D A, QUATTROCHI D A, HULLEY G C, *et al.*. Synergies between VSWIR and TIR data for the urban environment: An evaluation of the potential for the Hyperspectral Infrared Imager (HyspIRI) Decadal Survey mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117(0): 83-101.
- [31] BERGERON M, HOLLINGER A, STAENZ K, *et al.*. Hyperspectral Environment and Resource Observer (HERO) mission [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2008, 34(1): S1-S11.
- [32] GALEAZZI C, SACCHETTI A, CISBANI A, *et al.*. The PRISMA program [C]. 2008 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Boston, MA, USA: IGARSS, 2008, 4(IV): 105-108.
- [33] LABATE D, CECCHERINI M, CISBANI A, *et al.*. The PRISMA payload optomechanical design, a high performance instrument for a new hyperspectral mission [J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65(9-10): 1429-1436.
- [34] KRUSE F A. Preliminary results-hyperspectral mapping of coral reef systems using EO-1 Hyperion Buck Island and U. S Virgin Islands [C]. *Proceedings of the 12th JPL Airborne Geoscience Workshop*, Pasadena, California, USA: JPL Publication, 2003, 04-6: 157-173.
- [35] CLARK R N, SWAYZE G A S, LIVO K E, *et al.*. Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and Expert Systems [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(E12): 5131.
- [36] 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: 1-119.
- GAN F P, WANG R SH. *Research of Information Extraction Foundation and Technical Methods for Remote Sensing Information* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [37] VAN DER MEER F D. Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2004, 5: 55-68.
- [38] 甘甫平, 王润生, 马蔼乃, 等. 光谱遥感岩矿识别基础与技术研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(3): 140-147.

- GAN F P, WANG R SH, MA A N, *et al.*. The development and tendency of both basis and techniques of discrimination for minerals and rocks using spectral remote sensing data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2002, 17(3): 140-147. (in Chinese)
- [39] CROWLEY J K, BRICKEY D W, ROWAN L C. Airborne imaging spectrometer data of the Ruby Mountains, Montana - mineral discrimination using relative absorption band-depth images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 29(2): 121-134.
- [40] 王永. 基于遥感技术的龙门山前带烃类微渗漏信息提取[J]. *中国煤炭地质*, 2010, 22(10): 10-16.
- WANG Y. Hydrocarbon microseepage information extracting through remote sensing technology in front range of longmenshan [J]. *Coal Geology of China*, 2010, 22(10): 10-16. (in Chinese)
- [41] 杨燕杰, 赵英俊. 高光谱在油气勘探中的国内外研究现状[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(6): 1290-1299.
- YANG Y J, ZHAO Y J. The hyperspectral research status at home and abroad in oil exploration [J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(6): 1290-1299. (in Chinese)
- [42] CLARK R N, GALLAGHER A J, SWAYZE G A. Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using the complete band shape least-squares algorithm simultaneously fit to multiple spectral features from multiple materials [C]. *Proceedings of the Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, JPL Publication*, 1990, 90-94: 176-186.
- [43] CHEN X, WARNER T A, CAMPAGNA D J. Integrating visible, near-infrared and short-wave infrared hyperspectral and multispectral thermal imagery for geological mapping at Cuprite, Nevada [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(3): 344-356.
- [44] 许宁, 胡玉新, 雷斌, 等. 基于改进光谱特征拟合算法的高光谱数据矿物信息提取[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(6): 1639-1643.
- XU N, HU Y X, LEI B, *et al.*. Mineral information extraction for hyperspectral image based on modified spectral feature fitting algorithm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1639-1643. (in Chinese)
- [45] 张宗贵, 王润生, 郭小方, 等. 基于地物光谱特征的成像光谱遥感矿物识别方法[J]. *地学前缘*, 2003, 10(2): 437-443.
- ZHANG Z G, WANG R SH, GUO X F, *et al.*. Mineral recognition method by spectrometry remote sensing based on material spectral characteristics [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(2): 437-443. (in Chinese)
- [46] 甘甫平, 王润生, 马蔼乃. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别[J]. *地学前缘*, 2003, 10(2): 445-454.
- GAN F P, WANG R SH, MA A N. Spectral identification tree(sit) for mineral extraction based on spectral characteristics of minerals [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(2): 445-454. (in Chinese)
- [47] 车永飞, 赵英俊, 伊丕源, 等. 基于光谱主次吸收谱带组合特征相似性测度的高光谱遥感矿物信息提取[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(34): 1-5.
- CHE Y F, ZHAO Y J, YI P Y, *et al.*. Hyperspectral remote sensing mineral information extraction based on the spectral primary and secondary absorption bands combination features of spectral similarity measure [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(34): 1-5. (in Chinese)
- [48] 贺金鑫, 陈圣波, 王阳, 等. 一种基于朴素贝叶斯分类模型的高光谱矿物精确识别方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(2): 505-509.
- HE J X, CHEN SH B, WANG Y, *et al.*. An accurate approach to hyperspectral mineral identification based naive Bayesian classification model [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(2): 505-509. (in Chinese)
- [49] FENSTERMAKER L K, MILLER J R. Identification of fluviially redistributed mill tailings using high-spectral-resolution aircraft data [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1994, 60(8): 989-995.
- [50] 燕守勋, 张兵, 赵永超, 等. 高光谱遥感岩矿识别填图的技术流程与主要技术方法综述[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(1): 52-63.
- YAN SH X, ZHANG B, ZHAO Y CH, *et al.*. Summarizing the technical flow and main approaches for discrimination and mapping of rocks and minerals using hyperspectral remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(1): 52-63. (in Chinese)

- [51] 刘汉湖, 杨武年, 杨容浩. 高光谱遥感岩矿识别方法对比研究[J]. *地质与勘探*, 2013, 49(2): 359-366.
- LIU H H, YANG W N, YANG R H. A comparative study on the mineral identification methods using hyperspectral remote sensing data [J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49(2): 359-366. (in Chinese)
- [52] KRUSE F A, LEFKOFF A B, DIETZ J B. Expert system-based mineral mapping in northern death-valley, californianevada, using the Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44: 309-336.
- [53] 何中海, 何彬彬. 基于权重光谱角制图的高光谱矿物填图方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(8): 2200-2204.
- HE ZH H, HE B B. Weight Spectral Angle Mapper (WSAM) method for hyperspectral mineral mapping [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(8): 2200-2204. (in Chinese)
- [54] ZHANG X Y, LI P J. Litho logical mapping from hyperspectral data by improved use of spectral angle mapper [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 31: 95-109.
- [55] MOLAN Y E, REFAHI D, TARASHTI A H. Mineral mapping in the Maherabad area, eastern Iran, using the HyMap remote sensing data [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 27(B): 117-127.
- [56] CHEN X, WARNER T A, CAMPAGNA D J. Integrating visible, near-infrared and short-wave infrared hyperspectral and multispectral thermal imagery for geological mapping at Cuprite, Nevada: a rule-based system [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(7): 1733-52.
- [57] MOUNTRAKIS G, IM J, OGOLE C. Support vector machines in remote sensing: A review [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(3): 247-259.
- [58] ZHANG B, SUN X, GAO L R, *et al.*. Endmember extraction of hyperspectral remote sensing images based on the Ant Colony Optimization (ACO) algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(7): 2635-2646.
- [59] ZHANG B, SUN X, GAO L R, *et al.*. Endmember extraction of hyperspectral remote sensing images based on the discrete particle swarm optimization algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(11): 4173-4176.
- [60] ZHANG B, GAO J W, GAO L R, *et al.*. Improvements in the ant colony optimization algorithm for endmember extraction from hyperspectral images [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(2SI2): 522-530.
- [61] 赵欣梅. 基于烃类微渗漏理论的高光谱遥感油气异常探测方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2007.
- ZHAO X M. *Study on using hyperspectral remote sensing to explore oil & gas resources based on hydrocarbon microseepage theory* [D]. Beijing: China University of Geoscience, 2007. (in Chinese)
- [62] NEVILLE R A, LEVESQUE J, STAENZ K, *et al.*. Spectral unmixing of hyperspectral imagery for mineral exploration; comparison of results from SFSI and AVIRIS [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 29(1): 99-110.
- [63] ROGGE D M, RIVARD B, ZHANG J K, *et al.*. Iterative spectral unmixing for optimizing per-pixel endmember sets [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(12): 3725-3736.
- [64] HEYLEN R, BURAZEROVIC D, SCHEUNDERS P. Fully constrained least squares spectral unmixing by simplex projection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(11SI1): 4112-4122.
- [65] 刘凯, 张立福, 覃环虎. 基于权重光谱解混方法的高光谱矿物填图[J]. *遥感学报*, 2013, 17(3): 609-625.
- LIU K, ZHANG L F, QIN H H. Weighted spectral unmixing method for hyperspectral mineral mapping [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(3): 609-625. (in Chinese)
- [66] ZHANG B, ZHUANG L N, GAO L R, *et al.*. PSO-EM: a hyperspectral unmixing algorithm based on normal compositional model [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(12): 7782-7792.
- [67] POULET F, ERARD S. Nonlinear spectral mixing: Quantitative analysis of laboratory mineral

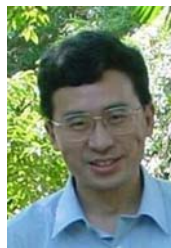
- mixtures [J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2004, 109(E0):E02009.
- [68] 闫柏琨, 李建忠, 甘甫平, 等. 一种月壤主要矿物组分含量反演的光谱解混方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3335-3340.
YAN B K, LI J ZH, GAN F P, *et al.*. A spectral unmixing method of estimating main minerals abundance of lunar soils [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3335-3340. (in Chinese)
- [69] ALTMANN Y, DOBIGEON N, TOURNERET J Y. Nonlinearity detection in hyperspectral images using a polynomial post-nonlinear mixing model [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(4): 1267-1276.
- [70] HEYLEN R, PARENTE M, GADER P. A review of nonlinear hyperspectral unmixing methods [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(6SD): 1844-1868.
- [71] CALLICO G M, LOPEZ S, AGUILAR B, *et al.*. Parallel implementation of the modified vertex component analysis algorithm for hyperspectral unmixing using OpenCL [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(8): 3650-3659.
- [72] BERNABE S, SANCHEZ S, PLAZA A, *et al.*. Hyperspectral unmixing on GPUs and multi-core processors: a comparison [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(3SD): 1386-1398.
- [73] GONZALEZ C, RESANO J, PLAZA A, *et al.*. FPGA implementation of abundance estimation for spectral unmixing of hyperspectral data using the image space reconstruction algorithm [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 5(1SI): 248-261.
- [74] SANCHEZ S, PAZ A, MARTIN G, *et al.*. Parallel unmixing of remotely sensed hyperspectral images on commodity graphics processing units [J]. *Concurrency and Computation-Practice & Experience*, 2011, 23(13): 1538-1557.
- [75] 陈圣波, 刘彦丽, 杨倩, 等. 植被覆盖区卫星高光谱遥感岩性分类[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2012(6): 1959-1965.
CHEN SH B, LIU Y L, YANG Q, *et al.*. Lithologic classification from hyperspectral data in dense vegetation cover area [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2012(6): 1959-1965. (in Chinese)
- [76] 刘彦丽. 植被覆盖区岩矿信息高光谱遥感提取方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
LIU Y L. *Study on hyperspectral remote sensing methods for rock classification and mineral identification in vegetation covered area* [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [77] 宫鹏. 遥感科学与技术中的一些前沿问题[J]. *遥感学报*, 2009, 13(1): 13-23.
GONG P. Some forefront problems on remote sensing science and technology [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(1): 13-23. (in Chinese)

作者简介:



张成业(1991—),男,山东淄博人,博士研究生,2013年于北京航空航天大学获得工学学士学位,主要从事高光谱遥感的研 究。E-mail: zhangchengye@pku.edu.cn

导师简介:



秦其明(1955—),男,江苏徐州人,博士,教授,博士生导师,1990年于北京大学获博士学位,1990年7月为北京大学数学系博士后,主要从事定量遥感与GIS方面的研 究。E-mail: qmqin@pku.edu.cn