

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2018.04.20

高光谱遥感定量反演成矿元素含量的研究进展

马秀梅^{1,2,3}, 周可法^{1,3}, 王金林^{1,3}, 崔世超^{1,2,3}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 中国科学院新疆矿产资源研究中心, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 新疆矿产资源与数字地质重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 随着遥感技术的不断发展, 高光谱遥感也相应取得了较大的进步, 而其应用于找矿方面也越来越广阔。在有土壤覆盖物的多金属矿区, 遥感土壤地球化学方法也相应地取得了较大的发展。多金属矿区土壤覆盖物的重金属元素含量测量是判断矿区成矿元素地球化学异常的标志, 同时为找矿预测打下基础。使用遥感手段定量化的提取矿区表层覆盖物(土壤)中地球化学信息是找矿预测的必经之路。文章从理论、技术及定量化反演方法三个方面对高光谱遥感应用于土壤地球化学研究取得的新进展进行归纳和总结, 并展望遥感土壤地球化学的应用前景。

关键词: 高光谱遥感; 土壤地球化学; 定量反演; 多金属矿区

中图分类号: P627 **文献标识码:** A

0 引言

矿产资源的匮乏是我国以及世界所面临的一大问题, 然而矿产资源关系到生活的方方面面, 其重要性不可忽略。矿产资源关系到国家命运的方方面面, 不仅是一个政治战略问题的根本、国家经济发展的基础, 也是国防安全的保证^[1]。但是矿产资源属于不可再生物资, 随着经济发展, 资源消耗也越来越快, 因此加快矿产资源的探测与开发, 是目前迫切解决的问题^[2]。

随着找矿难度及找矿成本的增加, 已经基本告别浅部矿床的开发时代, 人们关注度逐渐转移到隐伏矿床的探查^[3]。目前隐伏矿床的探测方法有很多种, 其中主要包括模型找矿预测法、物理探测方法、化学探测方法等等, 但是随着高分辨率遥感技术的逐步发展, 这项技术也在找矿预测中得到广泛应用^[4]。隐伏矿床, 即矿体上方具有覆盖层, 通过探测

覆盖层来预测下部隐伏矿体。覆盖层包括各种成因的松散堆积物、沉积物、土壤、植被等等^[5]。目前利用覆盖层间接找矿的方法有土壤地球化学、遥感植被地球化学等, 这些都是目前研究的热点也是难点问题。土壤也是为人类生存提供必要条件的物质之一, 土壤类科学也逐渐发展成为各科的先导科学。随着高光谱遥感技术的全方位发展, 逐步将高光谱遥感与土壤地球科学进行了结合, 因此发展了高光谱遥感土壤地球化学这一新兴学科。

单就土壤地球化学这门学科来说, 要通过一定的采样方法系统连续地采集地表疏松土壤覆盖物样品, 分析矿区土壤覆盖物样品中的金属成矿元素含量及其它地球化学特征, 结合各种特征来发现地球化学异常区域, 达到矿产勘查与成矿预测的目的^[6]。但是土壤地球化学采用的仍然是传统的采样方法, 在野外确定取样间距及取样点线, 将样品拿回实验室做成分分析, 从而来确定元素异常地区^[7]。这种传统的地球化学方法虽然会很精确地测量出异常地区, 但是存在耗时、耗力、花费大等缺点, 并且也只能

收稿日期: 2018-04-11; 改回日期: 2018-07-13; 责任编辑: 王传泰

基金项目: 中国科学院“一带一路”团队数学地质与成矿预测项目(编号:2017-XBZG-BR-002)、基于高精度成像高光谱的矿物蚀变信息识别新方法研究项目(编号:U1503291)联合资助。

作者简介: 马秀梅(1994—), 女, 硕士研究生, 遥感地质研究方向。通信地址: 新疆乌鲁木齐市北京南路818号, 中国科学院新疆生态与地理研究所; 邮政编码: 830011; E-mail: 1476291156@qq.com

测出点状数据。随着高分辨率成像光谱技术的快速发展,将成像光谱与土壤地球化学相结合来研究,这一发展使得大面积、全方位、快时效地提取矿区土壤覆盖物的地球化学元素特征参数成为现实^[8~9]。目前,越来越多的学者将高光谱遥感技术与土壤地球化学技术结合起来探测土壤覆盖区下的化学元素异常区域,为隐伏矿床的探查提供一定的理论依据。土壤反射光谱测量快速、简便,并且在不破坏样品的前提下,能够迅速获取土壤的地球化学信息,将元素异常信息大面积成图显示,帮助在未开发的有覆盖土层的隐伏矿床探测或在已开发矿区外围寻找隐伏矿床及扩大成矿带规模。遥感土壤地球化学是将高分辨率遥感与土壤地球化学结合起来的学科,可以用来探测矿体土层覆盖区的成矿元素异常,辅助背景值资料,建立理论、经验或者统计模型,将遥感土壤地球化学元素异常信息与成矿预测建立一定的定量关系,为以后能利用遥感技术快速、大面积预测成矿区打下基础。

本文将针对高光谱遥感应用于土壤地球化学方面,进行理论方面、技术层面以及方法研究进展方面的阐述,并对这一应用提出目前存在的问题以及进行前景展望,为后续研究提供一定的依据。

1 土壤重金属反演理论基础

近年来,许多学者针对遥感土壤测量进行了大量研究,包括土壤地球化学测量的应用、土壤光谱特征两方面的阐述,为遥感土壤地球化学提供了大量的可靠依据。

1.1 土壤测量的应用

关于土壤地球化学测量应用于矿产预测的研究已经有了很大的进展^[10~14],胡长征^[15]较系统地介绍了土壤地球化学测量在地质找矿中的应用,包括地质普查找矿、区域地质调查和矿区环境评价等方面,并且在文中也详细介绍了土壤测量可以用来解决的一些问题:1)在矿区土壤覆盖层上取样测量,将测量结果结合物探及地质方法在地质图上进行填图,根据异常范围可以大概圈定矿体所在范围;2)查明区域含矿远景地段;3)直接找寻浮土掩盖下的隐伏矿体。

另外,王子正、唐菊兴等^[7]对土壤地化测量的应用也做了一定的描述,土壤地球化学方法的选择极其重要,这决定了找矿的难易程度。根据土壤地球

化学大面积测量结果,找出地球化学特征及成矿元素异常之处,圈出矿化蚀变带,识别异常区域,并结合相关的物化探资料及地质特征,为精确提供钻孔的方位打下基础。

1.2 土壤光谱特征

在多金属矿区的土壤覆盖层中由于元素运移机理,使得其中含有大量成矿金属元素,提取出矿区土壤覆盖层中 Pb、Zn、Cu、Cd 等重金属成矿元素,并建模反演元素含量,进行地质填图圈定元素异常区域,为今后区域地质找矿预测提供依据。多金属矿区土层覆盖物的重金属元素含量测量是判断矿区成矿元素地球化学异常的标志,同时为找矿预测打下基础。

矿区土壤覆盖层是由气相、液相、固相组合而成的复合机体,因此其对应的反射光谱特征也比较复杂。土壤内部各种性质都会由反射光谱所表现出来,包括其有机质含量、颜色、各种金属元素、以及物化性质等对土壤光谱都有一定的影响^[16]。国内外许多学者^[17~21]对不同类型的土壤光谱特征进行测量分析,对土壤光谱进行了相应的算法处理,然后根据土壤金属元素光谱是否出现吸收波段、斜率变化以及曲线特征等因素来划分土壤光谱曲线类型。Stoner 和 Baumgardner^[22]对美国境内 485 种土壤进行了光谱分析,并按照光谱曲线特征分为五种主要类型,如图 1 所示。五种主要类型分别为:1)有机质控制类型;2)最小改变类型;3)铁影响类型;4)有机质影响类型;5)铁控制类型。而 K D Shepherd 等^[23]在 2002 年建立了土壤光谱库。这些研究都为后续遥感土壤科学做了铺垫。

遥感识别各类地物的依据主要是根据地物光谱特征的差异,这也为开展矿区土壤覆盖物的重金属元素评价奠定了理论基础。目前针对矿区土壤覆盖物金属元素含量的高分辨率遥感反演预测研究主要有两个方向^[24]:一是通过植被间接反演。在植被覆盖区的矿区,可根据重金属元素在植被内部聚集,使得植被叶绿素等光谱特征发生变化,根据变化特征来建立起植被光谱响应函数,从而反演预测土壤覆盖物中的重金属元素含量。二是土壤直接监测。通过重金属元素产生的土壤波谱曲线特征变化来反演预测土壤重金属含量变化。李淑敏等^[25]则针对北京农业土壤中的重金属含量进行了光谱分析,反演出了土壤中 8 种重金属元素 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg 的含量。对重金属元素的光谱特征进行分析,然后建立金属元素回归分析模型,反演出重金属

含量,为以后研究土壤金属元素含量打下基础。宋练等^[26]用 ASD 光谱仪对重庆市万盛采矿区进行土壤样测定,采集 40 个土壤样,一部分样品用作光谱分析反演元素含量,一部分样品用作化学分析验证反演精度。结果显示所建反演模型对 As、Cd、Zn 三种金属元素有精确结果,这为以后遥感技术反演土壤中这三种元素含量提供一定反演方法。

目前国内外高分辨率遥感土壤中重金属含量监测的研究模型,主要针对中红外漫反射波谱、可见光-近红外波谱波段。对土壤的反射光谱进行特征参数提取变换,反演土壤成分里的有机物、金属、铁氧化物等。有些土壤覆盖区中重金属元素含量达不到其能反演精度的要求,因此在高分辨率遥感技术应用于反演土壤重金属元素含量方面的研究还不全面,这也成为了研究热点问题。

2 土壤重金属反演的数据获取

2.1 地面波谱测量仪器

波谱采集的目的决定了地面波谱仪器的选择。当采集数据是为了光谱数据重建,或者大面积应用于航天航空影像的解译,则地面波谱仪器的指标精确度应不低于航空仪器,这些指标包括预测的精确度、波长区间范围、采样点分隔区间、光谱分辨率等等。

不同的测试仪器有不同的使用条件,对于地面波谱的测量,目前最常用的仪器是美国 ASD 公司 (Analytica Spectra Devices, Inc) 生产的产品。常用的 Field Spec 3-Hi-Res 光谱仪,而 ASD Feldspec FR 光谱仪比较适合在野外测量。目前 ASD 公司研发了一款最新光谱仪为:FieldSpec4 Hi-Res 便携式地物波谱仪,这款产品适用于从事地物的波谱测量,

各类矿物勘查识别,进行森林研究,农作物长势监测和海洋学研究的各方面应用;这款产品操作比较简单,而软件所包含的各种功能较强大。这款仪器可以用来测量辐照度、反射率、辐射、透射率和 CIE 颜色。

随着科技的发展,地面波谱测量仪器也逐渐多样化,精度、功能等都极大地满足了基于地面实测反射光谱对土壤中重金属含量进行建模反演的需求,也为将来航空航天遥感大面积反演预测土壤重金属含量打下基础。

2.2 机载、星载遥感测量波谱

随着各国传感器技术的不断发展,中国、美国、澳大利亚、加拿大等国相继发射了一系列的高空间和高分辨率的机载和星载的传感器,如美国星载的 Hyperion、中国星载的环境卫星以及航空成像光谱仪,包括中国的 OMISI、MAIS,美国的 AIS、HYDICE、SEBASS 和 AVIRIS,以及澳大利亚的 HyMap、加拿大的 CASI/SFSI 等。这些机载、星载遥感的发展,将极大地促进航空遥感大面积反演土壤重金属含量。

2.3 反演模型建立

在建立土壤估算模型之前,首先必须选择最佳反演波段。选择土壤重金属反演建模的最佳波段时具有较大的差异性,则是由于土壤中重金属吸附物及其自身理化性质的不同。综合前人研究,预测土壤覆盖区重金属元素最常用的是可见光-近红外反射光谱,但也有人利用紫外、中红外及热红外光谱来预测其含量。李淑敏等^[25]利用热红外光谱为可见光-近红外光谱做辅助手段来建立预测模型,计算重金属含量,大大提高了预测的精度,这为利用高分辨率遥感大面积预测土壤重金属含量提供了科学依据。据统计,利用可见光-近红外光谱特征来预测土壤重金属含量是最常使用的手段。例如 Dong 等^[27]发现在预测 Cu、Pb、Zn、As、Cr 等重金属元素时,可见光-近红外光谱比中红外光谱预测精度更高。但是,郭登巍等^[28]在分析南京城郊农田土壤重金属含量的高光谱数据时,则认为中红外漫反射光谱比可见光-近红外光谱预测精度高。目前看来,针对不同类型土壤,用来反演的最佳波段也不同。

由于土壤组成极其复杂,土壤光谱是土壤内部各类活性成分光谱特征的非线性混合,使得直接建立土壤光谱特征与土壤中各金属元素种类、含量等的预测模型非常困难^[29]。目前针对基于反射、辐射来预测土壤重金属含量的预测模型一般都是采用经

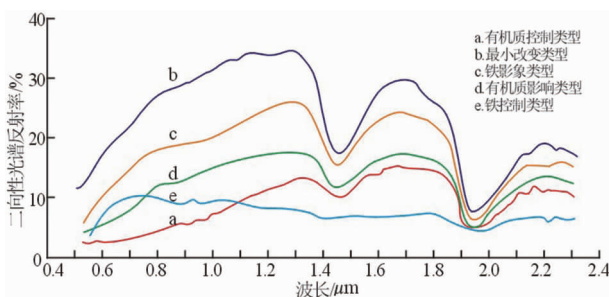


图1 五种土壤光谱曲线类型

Fig. 1 Five types of soil spectral curves

验统计的方法,主要包括主成分回归、单变量回归^[30]、偏最小二乘回归^[31-32]和多元线性回归^[33]等方法。李民赞^[34]指出由于高光谱波段多且复杂,主成分回归和多元线性方法都不是最佳反演模型,而偏最小二乘回归法能够解决由于高光谱多波段而产生的严重自相关问题,然后进行回归分析建立模型,这种方法能够进行连续光谱的分析,并且解决了多重共线性这一问题。张东等^[35]利用偏最小二乘回归对五彩湾矿区进行建模,并对不同模型的反演精度进行比较,这一方法开辟了将整数阶微分扩展,发展到分数阶,将分数阶微分应用于高光谱遥感反演预测土壤中重金属元素含量。曾远文等^[36]利用研究区高光谱遥感影像的各波段反射率,对其进行各种变换,将反射率进行对数、倒数等的变化,然后将反射率变化结果进行回归分析,建立土壤有机质反演模型。而后对模型进行预报能力、稳定性、预测精度等进行检验。用决定系数 R^2 检验模型的稳定性时,其数值越大模型越稳定;用总均方根差 RMSE 来检验模型的预报能力时, RMSE 越小,该模型精度和预报能力越强。这些前人模型的建立及预测精度的方法,都为预测矿区土壤重金属含量打下基础,为寻找隐伏矿床提供依据。

3 土壤重金属含量反演的方法

针对矿区土壤覆盖物地球化学元素的探测原理是,测定土壤的光谱数据时是采用室内分析方法,对特征光谱进行宽化处理以及标准化的比值计算,将地球化学元素的含量与各变量之间经线性分析或非线性分析方法建立反演预测模型,通过这种方法来定量反演矿区土壤覆盖物中的重金属元素含量,一般应用于植被覆盖较少的地区^[23]。国内外许多学者利用高光谱遥感技术在土壤地球化学元素分析中已经取得了一定成果,其主要元素反演的方法分为直接方法、间接方法两种。

3.1 直接方法

将高光谱遥感应用于土壤重金属元素含量反演的直接方法是针对不同金属元素的反射光谱特征建立相对应的分析预测模型来反演出金属含量。

Thomas Kemper 等^[37]针对西班牙 Aznalcóllar 矿区选矿厂尾矿库溃坝污染事件,在其进行土壤重金属元素含量监测中利用非线性人工神经网络(ANN)方法和多元线性回归分析(MLR)方法,然

后利用化学分析等各种手段对土壤中重金属元素含量进行监测,结果表明化学分析和特征光谱分析这两种手段对 Hg、As、Fe、Sb、Pb、S 这六种元素监测有较高的相似度。这些方法的验证为相似环境的矿区土壤金属元素含量监测开辟了新途径。这一研究同时表明,可能铁与铁氧化物对重金属的吸附性会使土壤光谱特征波段产生影响,这一发现为利用间接方法预测土壤中重金属元素的成分与含量打下了基础。

吴昀昭等^[38]利用中红外反射光谱,对南京江宁八卦洲地区土壤中重金属含量进行预测,偏最小二乘回归(PLSR)方法实现 Ni、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 元素的预测。杨雪等^[39]分析土壤元素的光谱特征,提取元素潜在光谱特征,之后与送检分析土样分析结果进行相关分析,可以得到 Cd、Zn 和 As 的光谱特征参数,实现这三种元素的含量反演。Siebielec 等^[40]利用 NIRS 预测污染土壤 Fe、Cd、N、Zn、Pb 含量,模型决定系数 R 分别为 0.93、0.77、0.76、0.71 和 0.72,波段 1 100 nm—2 498 nm 预测结果较好。Diane 和 Malley 等^[41]用 NIRS 预测加拿大风干土样的 P、K、Ca、Mn、Fe 和 Mg,相关系数超过 0.95, S、Na 相关系数在 0.89 以上。

3.2 间接方法

在土壤中,有些元素含量会相对较低,含量达不到使光谱特征产生明显变化的要求,甚至不会有任何的影响^[28]。针对这种情况的土壤,若利用金属元素的光谱特征直接建立模型进行预测其含量会比较困难。因此,除了直接方法之外,还可以通过研究影响重金属元素光谱特征的其它因素,例如有机质、黏土矿物等,利用它们与重金属元素之间的吸附性表征来间接预测重金属元素含量。

龚绍琦^[42]针对土壤中的重金属元素(Ni、Cr、Cu)的光谱特征进行了分析,并探索出其光谱特征与碳酸盐类、铁锰氧化物以及黏土矿物之间存在相互影响关系。结果显示重金属 Cr、Cu、Ni 与波长 429 nm、470 nm、490 nm、1 430 nm、2 398 nm、2 455 nm 处光谱变量具有很好的相关性,且以一阶微分处理的模型精度最高。乔璐^[43]结合 MODIS 影像发现了土壤中有有机质 SOM 以及土壤碱度等对土壤重金属反演预测的精度会有一定的影响。利用可见光-近红外波段的高光谱数据,王璐等^[44]通过对可见光-近红外、短波红外光谱数据利用偏最小二乘方法,对土壤的光谱参数进行了分析检测,例如一阶微分值、光谱反射率等;在对天津南部地区的土壤重金

属含量进行反演预测中,其结果发现了又一光谱指标——反射率倒数也可以反演土壤中重金属元素含量,同时表明了重金属元素与土壤中的铁氧化物、黏土矿物及有机质之间的吸附关系,利用这一特点可对土壤中的金属元素含量进行高光谱遥感技术间接反演。

Kooistra等^[45]用高光谱成功反演预测了莱茵河流域土壤中镉、锌元素含量,而其分析方法用的也是最小二乘回归法,也运用到了与有机质和黏土矿物的相关性。吴昀昭等^[46]成功预测了南京土壤中的Hg含量,主要根据实验室模拟光谱法,并且发现Hg的最佳预测波段是与铁及铁氧化物吸收特征波段一致。贺军亮等^[47]针对所在研究区土壤中不同重金属元素与有机质的吸附强度进行了排序,Cu和Pb的影响强度最大,相关性最大,因此对这两个元素建立光谱反演模型来预测其含量,这从一定程度上印证了间接反演预测重金属元素含量可以通过金属元素与有机质的吸附性这一特征。这也为高光谱遥感间接反演矿区土壤覆盖区中重金属的含量提供了指导性意义。

地面实测光谱的发展,为今后利用高光谱遥感技术大范围制图,快速圈定矿区地球化学异常区域提供了实质性的理论依据,以及为以后高光谱地面遥感技术结合航天航空遥感技术的各种应用打下基础。

4 土壤重金属含量反演问题与前景

遥感地球化学是一门复杂的学科,其综合性很强,近年来遥感技术的飞速发展,利用遥感技术与地球化学理论相结合来调查矿区地球化学元素异常,这为隐伏及深部找矿预测提供了新思路新方法,也为高光谱遥感应用于大面积勘查土壤覆盖区的金属元素异常提供理论依据。将高光谱遥感应用于土壤覆盖区重金属元素监测方面,就反演机理与建模方法来说都处于探索阶段,在将遥感科学应用于矿区土壤重金属调查方面,在理论与实践方面都面临着巨大的挑战,也是当前遥感地球化学在应用方面所面临的难点之一。

(1) 机理方面

李学恒等^[48]介绍了关于土壤科学所面临的挑战,同理,土壤科学所面临的一些挑战,也是遥感土壤地球化学所面临的挑战。对于土壤矿物成分的结

晶成长、溶解反应、离子之间的交换机理等等都必须充分研究;对土壤中有有机质的深入研究,也能帮助研究土壤中的矿物,将土壤有机质里的各种方法进行综合利用,包括质谱、化学胶体的化学方法、X射线等方法,这些都促进了土壤矿物学与有机质化学的应用。充分了解土壤中金属形态的类型,可为遥感应用于土壤地球化学打下坚实的理论基础。

(2) 模型建立方面

目前应用较多的是线性数学分析方法,包括主成分回归、多元线性回归、偏最小二乘回归和单变量回归方法等。目前要多开发利用一些非线性数学分析方法,如支持向量机、遗传算法和神经网络技术法;非线性方法在一定程度上可以弥补线性方法的不足,以提高模型的预测精度。除此之外,应探索将线性与非线性方法相结合,来探索其在土壤中金属含量的预测。

(3) 方法监测方面

对于直接探测方法,土壤光谱反映了其内部各种成分的光谱响应,需要对土壤光谱特征做详细了解。如能根据不同成分的光谱响应参数进行土壤光谱成分混合分解模拟计算,不仅对土壤重金属的含量预测有重大意义,更对土壤成分的研究有着重要意义。

对于间接探测方法,需要在前人的基础上,深入了解土壤各成分光谱与重金属光谱之间的关系,通过探索其相互影响关系,可针对一些含量少或不足以引起光谱变化的金属元素做相关定量或者半定量分析。目前重金属含量的定量反演研究主要是通过一些吸附物与不同重金属之间的内部相关性,对于其吸附物的光谱特征,来间接反演土壤重金属含量。

参考文献:

- [1] 许颖杰,王磊. 矿产资源的重要性[J]. 科技传播, 2011(19): 62+83.
- [2] 伍良端. 论开发利用矿产资源的重要性及对策[J]. 有色金属设计, 1997(4): 9-11.
- [3] 曹新志,张旺生,孙华山. 我国深部找矿研究进展综述[J]. 地质科技情报, 2009, 28(2): 104-109.
- [4] 戈金明. 隐伏矿的找矿标志及预测方法探讨[J/OL]. 西部资源, 2017(4): 27-28.
- [5] 成秋明. 覆盖区矿产综合预测思路与方法[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012, 37(6): 1109-1125.
- [6] 范文琦. GPS和GIS技术在1:1万土壤地球化学测量中的应用[J]. 中国科技信息, 2008(23): 40-41.
- [7] 王子正,唐菊兴,郎新海. 土壤地球化学测量在隐伏矿体勘探中的应用[J]. 西部探矿工程, 2007(3): 92-95.

- [8] Galvão L S, Pizarro M A. Variations in Reflectance of Tropical Soils-Spectral-Chemical Composition Relationships from AVIRIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 75(2): 245-255.
- [9] Palaciosoruela A, Ustin S L. Remote sensing of soil properties in the Santa Monica Mountains I. Spectral analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 65(2): 170-183.
- [10] 吕军, 王建民, 王洪波, 等. 土壤地球化学测量在三道湾子金矿床的应用[J]. *物探与化探*, 2005, 29(6): 515-518.
- [11] 刁理品, 韩润生, 方维萱. 沟系土壤地球化学测量在贵州普晴锦金矿勘查区应用与找矿效果[J]. *地质与勘探*, 2010, 46(1): 120-127.
- [12] 张国义, 张连发. 土壤地球化学测量在山东蓬莱地区普查找金的效果[J]. *地质找矿论丛*, 2004, 18(s1): 141-145.
- [13] 张广平, 赵海良, 赵晓斌, 等. 土壤地球化学测量在新疆西准吉尔吾沙克金矿勘查工作中的应用[J/OL]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(4): 472-476.
- [14] 潘寅. 浅谈地球化学土壤测量在找矿中技术应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2012, 33(13): 27.
- [15] 胡长征. 地球化学土壤测量在找矿中的应用[J]. *科技创新导报*, 2010(24): 88-88.
- [16] 汪善勤, 舒宁. 土壤定量遥感技术研究进展[J]. *遥感信息*, 2007(6): 89-93.
- [17] 曾桂香, 戴军. 土壤理化性状的高光谱定量反演研究进展[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(24): 63-67.
- [18] 王宇, 高敏华, 吉别克·哈力克巴义. 基于高光谱遥感的干旱区土壤光谱特征分析[J]. *资源与人居环境*, 2014(3): 35-36.
- [19] 夏学齐, 季峻峰, 陈骏, 等. 土壤理化参数的反射光谱分析[J]. *地学前缘*, 2009(4): 354-362.
- [20] 徐彬彬, 李耿善. 土壤光谱反射特性研究及其应用[J]. *土壤学进展*, 1987, 15(1): 3-11.
- [21] Bogrekeci I, Lee W S. Spectral Soil Signatures and sensing Phosphorus [J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 92(4): 527-533.
- [22] Stoner E R, Baumgardner M F. Characteristic variations in reflectance of surface soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(6): 1161-1165.
- [23] Shepherd K D, Walsh M G. Development of Reflectance Spectral Libraries for Characterization of Soil Properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(3): 988-998.
- [24] 刘海利, 刘欢. 遥感技术在矿区土壤重金属污染评价中的应用[J]. *西部资源*, 2016(5): 139-141.
- [25] 李淑敏, 李红, 孙丹峰, 等. 基于热红外特征光谱的土壤重金属含量估算模型研究[J]. *红外*, 2010, 31(7): 33-38.
- [26] 宋练, 简季, 谭德军, 等. 万盛采矿区土壤 As, Cd, Zn 重金属含量光谱测量与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(3): 812-817.
- [27] DONG, Yi Wei, YANG, et al. Determination of Soil Parameters in Apple-Growing Regions by Near-and Mid-Infrared Spectroscopy [J]. *PEDOSPHERE*, 2011, 21(5): 591-602.
- [28] Wu D W, Wu Y Z, Ma H R. Study on the Prediction of Soil Heavy Metal Elements Content Based on Mid-Infrared Diffuse Reflectance Spectra [J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2010, 30(6): 1498-1502.
- [29] 贺军亮, 张淑媛, 查勇, 等. 高光谱遥感反演土壤重金属含量研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2015, 30(3): 407-412.
- [30] Xia X Q, Mao Y Q, Ji J F, et al. Reflectance spectroscopy study of Cd contamination in the sediments of the Changjiang River, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(10): 3449-3454.
- [31] Xie X L, Pan X Z, Bo S. Visible and Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Properties near a Copper Smelter [J]. *PEDOSPHERE*, 2012, 22(3): 351-366.
- [32] 温健婷, 张霞, 张兵, 等. 土壤铅含量高光谱遥感反演中波段选择方法研究[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(6): 625-629.
- [33] Choe E, Meer F V D, Ruitenbeek F V, et al. Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(7): 3222-3233.
- [34] 李民赞. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [35] 张东, 塔甫甫拉提·特依拜, 张飞, 等. 分数阶微分在高光谱数据估算矿区土壤砷含量中的应用[J]. *中国矿业*, 2015(11): 71-76.
- [36] 曾远文, 陈浮, 王雨辰, 等. 采煤矿区表层土壤有机质含量遥感反演[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(2): 169-172.
- [37] Kemper T, Sommer S. Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(12): 2742-2747.
- [38] 吴昉昭. 南京城郊农业土壤重金属污染的遥感地球化学基础研究[D]. 南京: 南京大学, 2005.
- [39] 杨雪, 谢洪斌, 罗真富, 等. 基于实测光谱的矿业开发集中区土壤元素含量反演[J]. *环境监测管理与技术*, 2016, 28(4): 10-14.
- [40] Siebielec Grzegorz, Mccarty Gregory, Stuczynski T, et al. Predicting the metal contents of diverse soils using NIRS analysis [C]. *American Society of Agronomy Meetings*, 2002.
- [41] Diane F Malley, Laila Yesmin, David Wray, et al. Application of near - infrared spectroscopy in analysis of soil mineral nutrients [J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1999, 30(7-8): 999-1012.
- [42] 龚绍琦, 王鑫, 沈润平, 等. 滨海盐土重金属含量高光谱遥感研究[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(2): 169-177.
- [43] 乔璐. 基于高光谱数据和 MODIS 影像的土壤特性的定量估算[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [44] 王璐, 蔺启忠, 贾东, 等. 基于反射光谱预测土壤重金属元素含量的研究[J]. *遥感学报*, 2007, 11(6): 906-913.
- [45] Kooistra L, Wehrens R, Leuven R S E W, et al. Possibilities

- of visible-near-infrared spectroscopy for the assessment of soil contamination in river floodplains [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2001, 446(1-2): 97-105.
- [46] Wu Y, Chen J, Wu X, et al. Possibilities of reflectance spectroscopy for the assessment of contaminant elements in suburban soils [J]. *Applied Geochemistry*, 2005, 20(6): 1051-1059.
- [47] 贺军亮, 蒋建军, 孙中伟, 等. 土壤重金属含量光谱估算模型的初步研究[J]. *农机化研究*, 2009, 31(9): 22-25.
- [48] 李学垣. 当今土壤科学面临的挑战与土壤化学基础研究侧重点和前沿[C]//中国土壤学会海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会, 2004.

Hyperspectral remote sensing quantitative inversion of ore-forming element content

MA Xiumei^{1,2,3}, ZHOU Kefa^{1,3}, WANG Jinlin^{1,3}, CUI Shichao^{1,2,3}

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Xinjiang Mineral Resources Research Center, Chinese Academy of Sciences, Wulumuqi 830011, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
3. *Xinjiang Key Laboratory of Mineral Resources and Digital Geology, Wulumuqi 830011, China*)

Abstract: With continuous development of remote sensing technology hyperspectral remote sensing has made considerable progress in recent years and is widely used in prospecting. Also remote sensing soil geochemistry made considerable progress in polymetallic ore areas with soil cover. The measurement of heavy metal elements in the soil cover of the polymetallic mining area is a mark to judge the geochemical anomaly of ore-forming elements in the ore area, and lays the foundation for prospecting prediction. The use of remote sensing to quantitative extraction of geochemical information is a effective method for prospecting in the areas. This paper mainly elaborates the application of hyperspectral remote sensing in soil geochemistry from the aspects of theory, technique and quantitative inversion and summarizes the latest progress and prospects its application in future.

Key Words: hyperspectral remote sensing; geochemical soil; quantitative retrieval; multi-metal mine