

doi: 10.6053/j.issn.1001-1412.2017.03.013

遥感植物地球化学方法的研究进展

崔世超^{1,2}, 周可法¹, 赵杰^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 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)

摘要: 近些年来随着遥感技术的不断发展,在植被覆盖区的金属矿床的探查中,遥感植物地球化学方法得到了越来越广泛的应用。文章从理论、技术和应用三个方面对遥感植物地球化学方法的发展进行阐述,并指出目前存在的问题。其中使用定量化的手段提取植物地球化学信息是未来的必由之路。然而在定量化的过程中,光谱尺度效应和空间尺度效应是两个重要的影响模型精度的因素。针对这个问题,文章提出两种解决方案来减小光谱尺度效应的影响,然而这两种方法的可操作性以及可靠性还需要进一步探讨。最后,文章对遥感植物地球化学方法的发展前景进行阐述,并指出在以后定量模型的建立中可以引入支持向量机、投影追踪等机器学习的方法。

关键词: 遥感植物地球化学;光谱尺度;空间尺度;支持向量机;投影追踪

中图分类号: P627;P632.4 **文献标识码:** A

0 引言

矿产资源是人类生存和发展的重要物质基础,据统计,目前社会生产所需要的80%左右的原材料、95%左右的能源、70%左右的农业生产资料来自于矿产资源,因此,矿产资源很大程度上决定社会生产力发展水平^[1]。但是,随着我国经济的快速发展,矿产资源的消耗量巨大,资源短缺的形势非常严峻,因此,加快矿产资源的勘探迫在眉睫。目前地表浅处或者出露的矿体日益减少,而在植被覆盖区仍然有发现新矿体的可能,这是目前一个重要的找矿方向^[2]。但是,在植被覆盖区,植被信息的干扰成为找矿的一道天然屏障,给找矿带来了巨大的困难。植被信息是否包含有用的找矿信息?针对这一问题,学者们做了大量的研究,并取得了一些丰硕的成果。

遥感作为一种以高空遥感器为平台的对地探测技术,具有快速大面积的对地扫描优势,在矿产勘察

过程中扮演了重要角色,并越来越受到地质学家的关注和青睐。相关研究表明,植被在生长过程中,通过根去吸收地下矿床的成矿元素,当过量的重金属元素聚集于植被体内时,使得植被的叶绿素含量、细胞结构以及含水量发生变化,致使植被生理生态特征以及光谱特征发生变化^[3]。因此,目前越来越多的学者尝试使用遥感植物地球化学方法来提取植被覆盖区下的化学异常区域,为隐伏矿床的探查提供理论依据。

遥感植物地球化学方法是遥感技术与生物地球化学的理论、技术方法相结合的新学科,当前着重解决了植被覆盖区探测隐伏金矿的难题。其主要研究目标是研究植被覆盖度下的金属、非金属和能源矿产以及蚀变带的矿物组合,对植物产生的毒害效应在遥感资料中的特征信息,并用这些特征信息与实测资料相互结合,建立理论、经验或者统计模型,将矿产资源遥感生物地球化学效应的特征信息与隐伏矿产资源建立一种定量或者半定量的关系^[4]。

目前,遥感植物地球化学方法得到越来越广泛

收稿日期: 2016-04-15; 责任编辑: 王传泰

基金项目: 国家自然科学基金(联合基金项目-重点支持项目编号:U1503291)、新疆维吾尔自治区国际科技合作计划项目(编号:20156017)联合资助。

作者简介: 崔世超(1991—),男,硕士研究生,研究方向遥感地质。通信地址:新疆乌鲁木齐北京南路818号,中国科学院新疆生态与地理研究所;邮政编码:830011;E-mail:1209048205@qq.com

的应用,并且从理论、技术以及应用三方面得到了长足的发展。本文拟从这三方面对遥感植物地球化学方法探矿原理、探矿方法、发展前景以及目前存在的问题进行阐述,旨在为植被覆盖区的矿床的寻找提供理论依据,以及为今后相关的研究提供一种参考。

1 理论依据

近些年来,在理论方面学者们主要从植物的生理生态特征、叶面波谱特征等方面展开了研究,为遥感植物地球化学法提供大量可靠的理论依据。

1.1 生理生态特征

由于植物吸收了过量的金属元素,破坏了植物体内的平衡,致使植物的生理生态特征如叶绿素含量、含水量、叶面温度等发生变化。因此,早期学者们往往是通过对比矿区植物和背景区植物进行对比分析,并且建立一系列生理生态参数的模型来进行异常植物的圈定,最终达到寻找隐伏矿床的目的。在这一时期学者们从成分效应、生理参数效应等方面对矿区的植物进行了全面的分析。

(1)成分效应方面

有学者研究表明,生长在矿区某些植物中的金属含量往往是背景区的几倍甚至几十倍。如杨永德研究小秦岭地区标志植物的含金量,结果发现金矿区植被的含金量远远大于矿区外的植被的含金量^[5];吴继友对山东招远地区的赤松林中Au与Ag含量金矿区是背景区域的6和18倍^[6]。因此,通过测定特定植物中的金属含量可以达到圈定金属矿床的目的。在这种圈定隐伏矿床的方法中,指示性植物的选择是至关重要的,合适地选择指示性植物可以有效且快速地提取地球化学异常区域,为隐伏矿床的探查提供理论依据。

在矿区或工作区内,植物群体密度大、分布均匀、且对欲找元素有较强富集能的植物我们称之为有效指示植物。自然界中并不是所有植物都可以作为探矿的指示性植物,只有非屏障或者是半屏障的植物可以作为有效的指示性植物。对于指示性植物的选择要遵循以下几个原则:1)在工作区域内普遍发育,采样方便;2)对矿质异常有明显的反映;3)所反映的地球化学异常受非成矿因素的影响较小。其中,生物集聚系数和衬度系数是选择最优指示性植物的判断标准^[7]。植物衬度系数是指矿区或者地球化学异常区域的植被中的金属含量和背景区域植物

金属含量的比值^[8]。元素的植物集聚系数是指植物吸收集聚某元素的含量与其生长地岩石或土壤中该元素含量之比^[9]。在理论上,只有那些集聚系数和衬度系数都大的植物才可以作为有效的指示性植物。然而在现实中集聚系数和衬度系数都大的植物很少存在。因此,在实际应用过程中,我们往往在衬度系数和集聚系数之间取折衷,一些元素集聚小,但是衬度系数大的植物依然可以作为指示性植物。

(2)生理生态参数方面

有学者研究表明,在矿区生长的植物由于吸收了过量的金属元素会使植物叶绿素含量、含水量以及叶面温度等参数发生变化。例如徐瑞松研究和建立了华南沿海资源效应遥感生物地球化学的理论、经验和统计模型,研究发现在矿区的色素含量比正常区域低10%~30%,叶片中的水含量比正常区域低10%~20%,叶面温度比正常区域低2%~3%^[4];马跃良以黑龙江地区为研究对象,发现在背景区域植被长势良好,呈绿色,而矿区以及异常区的植被相比于背景区的矮,分支多,颜色呈黄绿色^[10];马建伟在秦岭地区用遥感生物地球化学法优选靶区的时候发现,金矿区的无论是次生混交林,还是覆盖刺槐、灌木林或者是次生阔叶林,均呈黄色,而周围背景区的植被呈现青绿色,以此为基础可以圈定成矿靶区域^[3]。

1.2 叶片光谱特征

植物的叶片的反射光谱随着叶片结构、叶绿素含量、水分含量以及含氮量的不同,在不同的波段之间会形成不同的吸收谷和反射峰(图1)。

在可见光波段(400 nm—700 nm),是植被的强吸收波段,反射率和透射率比较低。此波段的反射

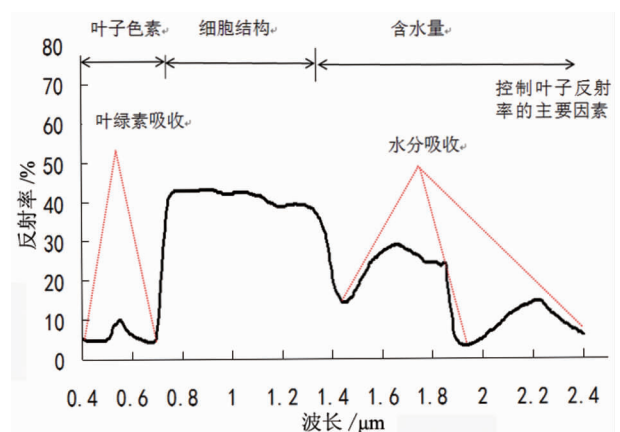


图1 健康植物的反射光谱曲线

Fig. 1 Reflectance spectral curve of healthy plants

率主要受叶绿素含量的影响,特别是叶绿素-*a*和叶绿素-*b*的强吸收,在450 nm和670 nm处形成两个吸收谷和一个反射峰(550 nm)。700 nm—780 nm波段是叶绿素在红光波段的强吸收到近红外高反射的过渡波段,又称为植被的“红边”。红边是植物营养状况、长势、水分等的指示性特征。当植被生物量大、生长好的时候,红边会向长波方向移动,俗称“红移”,而当植被发生病虫害、受到污染的时候,红边会向短波方向移动,俗称“蓝移”。

近红外波段(780 nm—1 350 nm),反射率光谱主要受叶片内部结构的影响。已经有研究表明,细胞层越多,光谱反射率越高;细胞形状、成分的各向差异越明显,光谱反射率越高。

中红外波段(1 350 nm—2 500 nm),叶片中的水分吸收是影响该波段反射率光谱的主要因素。由于水汽的吸收,在1 400 nm、1 900 nm、2 600 nm处形成三个吸收谷。

有研究表明,当植物中吸收过量的金属元素的时候会受到金属元素的毒害,使得植物的叶绿素含量大幅度减少,而叶黄素大量增加^[11-12];Au等元素高含量土壤中生长的植物的细胞,在电子显微镜下变异效应明显,主要表现细胞中出现大量电子高密度体物质或者内部组织的微结构遭受损伤^[13];随着金属含量不断增加,叶面的含水量不断地降低^[14]。因而,受到金属元素毒害的植物相比于健康植物,在光谱方面发生变化。这也是利用植物光谱圈定异常植物的理论依据。近些年越来越多的学者通过对矿区的植物光谱进行总结归纳,然后把总结的规律应用于相似环境下的金属矿床的探查。例如:Collins研究了金属元素对植物生长状况以及植被的反射光谱的影响,结果表明:金属会使植被矮化、褪绿等病变,可以用植被红边的“蓝移”作为矿化的指示^[15];Rock研究表明,当健康的植被受到毒害的时候,叶面的反射光谱蓝移5 nm,并用1.63 μm —1.66 μm 的反射率与1.23 μm —1.27 μm 的反射率的比值作为植被受毒害的一种指标^[16];Chang等人对高粱等农作物在Zn、Cu等重金属不同浓度下的植被原始光谱特征变化的研究发现,当农作物中的重金属含量超标的时候会造成红谷变浅以及红边蓝移等现象^[17];吕慧萍等以广东钨矿区为研究对象,发现钨矿区植被的光谱反射率与TM图像的灰度值均比对照区高,经过K-L变换的TM图像假彩色合成的图像上,矿区呈现的形状、色调均与对照区有明显的差别,此研究结果为植被覆盖区应用生物地球化学

方法探矿提供了理论依据^[18];徐瑞松研究和建立了华南沿海资源效应遥感生物地球化学的理论、经验和统计模型,研究发现:叶面反射率比正常区域低5%~30%,波形发生5 nm—25 nm的红移动或者蓝移,红端陡坡斜率比正常区域高0.1~0.4,TM灰度值比正常区域高10%~100%^[4]。

2 技术方面

在技术层面,学者们主要对传感器的研制以及如何建立定量和半定量的植物地球化学信息提取模型两个方面展开了研究。

2.1 传感器的研制

随着传感器技术的不断发展,美国、中国、加拿大、澳大利亚等国相继发射了一系列的高空间和高光谱分辨率的航空和航天的传感器,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美国的AIS、HYDICE、SEBASS和AVIRIS,加拿大的CASI/SFSI,澳大利亚的HyMap和我国的OMISI、MAIS等。这些星载和机载的高光谱数据极大满足了遥感植物地球化学方法模型的定量和动态研究。

2.2 模型建立

在研究的早期,学者们主要根据颜色异常、表面温度异常、亮度异常来圈定异常植被区域。建立的模型多是一种定性或半定量的模型,但这样的方法主要存在以下两个问题:一是在定性和半定量阶段,没有建立不同的金属元素与不同的植物种类、不同的植物光谱特征之间的定量关系,这样无法有效地估算矿产类型和矿产规模;二是在以前的研究过程中,建立的模型大多数是基于多光谱遥感的,没有充分地利用植物的光谱特征。

高光谱遥感由于光谱分辨率高,一般在可见光和近红外光谱区间内有几十甚至数百个波段,精细的光谱分辨率反映植被由于吸收过量的金属元素而造成的光谱异常。因此,高光谱遥感在植物地球化学信息提取方面有着得天独厚的优势。最近几年越来越多的学者尝试利用高光谱数据从定量的角度建立金属元素与植物光谱的关系,来提取地球化学异常区域,为植被覆盖区下的隐伏矿床的寻找提供理论依据。例如:Schuerger等通过归一化的植被指数(NDVI)等来反演生长在硅土中的白喜草的Zn含量^[19];李庆亭等人提出,随着叶片中Cu等金属元素

含量的增加,其产生的毒化效应的波谱特征越明显,其中红边特征、植被指数 NDVI 以及叶绿素浓度与叶片铜含量的关系显著^[20]; Lu 等^[21]利用 Hyperion 数据来探讨矿区生态胁迫下植物氮含量的定量反演;陈圣波等以黑龙江多宝山和铜山矿区为例,建立叶片重金属含量与波段吸收深度之间的多元回归分析,结果表明叶片中的 Co、Cu、Ni、Mo、Ag、Sb、W、Pb、As 的含量与其光谱吸收深度的相关系数在 0.75 以上,相关性强,为植被覆盖区利用高光谱数据遥感调查评价金属元素的分布和富集奠定基础^[22];王娟等以云南大理马厂箐铜矿区为研究对象,发现马尾松波谱的红边位置、红边蓝移量、叶绿素归一化指数与微量元素的吸收特征有一定的相关性,利用马尾松的波谱特征参数能够揭示植被覆盖区的地球化学异常,为寻找隐伏矿床提供依据^[23]。

2.3 存在的问题

使用高光谱数据以及定量方法来提取植物地球化学信息的过程中,光谱尺度效应和空间尺度效应是两个不可回避的问题。光谱尺度效应问题一直是定量遥感的一个关键问题,是指在某一个尺度上观测得到的性质或者是总结出的规律和原理,在另一个尺度上可能有效,也可能相似或者需要修订^[24-26]。当使用高光谱遥感图像来进行大面积、快速地提取地球化学异常的时候,由于地面数据和遥感数据在空间和光谱上具有不一致性。例如地面的 ASD 光谱仪测量的光谱分辨率为 3 nm,而航空平台的 Hyperion 数据的光谱分辨率是 10 nm,那么地面试验场建立的定量模型是否适合于遥感图像中?当把地面试验场建立的模型应用于遥感图像中,是否需要进行系数的改正来消除光谱分辨率的差异所带来的影响?而在空间尺度效应方面,如何有效地解决混合像元的问题也显得至关重要。近年来随着各种航空和航天传感器的不断开发和应用,探究遥感反演的尺度效应就显得越来越重要。

2.4 尺度效应解决方法

对于光谱尺度效应本文提出两种解决方法,针对这两种方法的可操作性在以后的研究中还需要进一步讨论。

(1)一般情况下,航空和航天平台数据的光谱分辨率低于地面数据。因此,可以把地面数据重采样成与航空和航天数据有相同的光谱分辨率,然后再把地面试验场建立的模型应用于遥感图像中,这样可以减少一部分光谱差异造成的影响。然而,当把地面试验场的数据进行重采样以后可能会丢失一部

分有用的光谱信息,如植物吸收某些金属元素形成的吸收谷和反射峰。因此,使用此方法建立的模型最好是基于植物指数,而不是基于光谱反射率。因为这样可以最大化地减少由于重采样造成的波峰和波谷信息的丢失。

(2)植被指数是指某些特定的波段和反射率的比值线性或者非线性组合,它的优点是简单、且可以消除一部分环境的影响。目前,以植物的光谱指数为自变量,利用植物冠层光谱的特征,通过建立植物生理参数与植被指数的关系来估算植物生理参数已经成为一种常用的方法。利用植物指数来反演植物生理参数的原理是利用高光谱数据波段窄而且连续的特点,根据植物生理参数与反射光谱的关系,寻找最优的波段组合构建光谱指数,达到可以有效去除外部环境的影响并且可以较高精度的提取植物生理参数的目的。而植物中的金属含量与叶绿素含量、细胞结构、含水量等植物生理参数有一定的相关性。因此,也可以使用植被指数来进行金属含量的估算。

目前也有一部分学者已经尝试使用植被指数来进行植物中金属含量的计算。如王正海以云南普朗铜矿区为研究对象,选择 EVI(植被指数)、CNDI(红边幅度)和 REPI(红边位置)三种植被指数进行主成分分析,然后对第一主成分进行密度分割来提取研究区域的 Au、Cu 等成矿元素的生物地球化学异常信息,并且绘制研究区域地球化学异常专题图^[27];Arie 等人提出 Vegetation Index considering Greenness and shortwave(VIGS)植被指数可以很好地用来监测由于金属元素造成的植被异常,结果表明该指数对 Cu 元素比较敏感,为以后植物异常监测提供了理论依据^[28]。因此,在构建植被指数进行植物中金属含量的估算的时候,所构建的植被指数应该受光谱分辨率的影响较小,这样建立的植被指数的模型才可以适用于不同光谱分辨率的多源数据联合反演。在这种解决方案中构建受光谱分辨率影响较小的植被指数就显得至关重要。对于光谱分辨率对植被指数的影响也有学者做了相关的研究,例如:姜海玲研究了光谱分辨率对 7 种常见的光谱指数的影响,结果表明,VIPUD 受光谱指数的影响较小,具有良好的反演能力,其在多源数据联合反演植被生理参数的研究中具有较好的前景^[29]。因此,在植物金属含量的估算中也可以构建受光谱分辨率影响较小的植被指数来建立定量关系,从定量的角度提取地球化学异常区域,最终为寻找隐伏矿床提供理论依据。

3 应用方面

目前,学者们把建立的半定量或者定量模型应用于我国广大的区域。如我国的徐瑞松、马跃良等人成功地在华南、秦岭、黑龙江、海南广大植被地区优选出 30 多个金矿远景区^[30-31];林树道分析了新疆北部阿勒泰地区植物对多种金属元素异常含量的敏感性,并以三个已知矿点位实验场,以 MSS 为主要的遥感数据源分析植被异常的影像特征,圈定处三个植被异常区域^[32];刘福江等对山东招远金矿区的植被异常进行了研究,发现在金矿区的植被与周围区域的植被存在着色调的差异,并以 ETM 数据为基础对异常植被进行主成分分析、植被指数与波段比值计算以及非监督分类完成遥感解译与分类,结果表明这是一种行之有效的综合性植被异常找矿方法;通过验证,实验结果与已知 74 个矿点的吻合率为 100%^[33]。

4 展望

随着遥感技术的发展,利用高光谱数据以及定量方法来提取植物地球化学信息成为必然的趋势。然而遥感植物地球化学方法在理论和实践挑战依然艰巨,在机理、模型的建立以及尺度效应等方面的研究仍然有待深入。

(1)在机理方面,深入研究不同的金属元素对植物生理生态特征以及光谱特征的影响。寻找不同金属元素对植物影响的敏感波段,为定量模型的建立提供理论依据。

(2)在模型建立方面,目前主要是利用单元统计或者多元统计建立植物光谱与金属元素含量之间的关系^[34-38]。近些年随着机器学习方法的兴起,其在地学领域有了越来越广泛的应用^[39-43];其中支持向量机^[44-45]、投影追踪法^[46]都是比较典型的机器学习的方法。支持向量机是一种基于统计的学习方法,其具有出色的学习能力尤其是泛化能力,它可以较好地模拟不同变量之间的非线性关系。而投影追踪算法的基本思想是把高维数据通过某种组合投影到低维子空间上,对于投影到的构形,采用投影指标函数来衡量投影暴露某种结构的可能性大小,寻找出使投影指标函数达到最优(即能反映高维数据结构

或特征)的投影值。因此,在未来的研究过程中可以使用支持向量机、投影追踪等机器学习的方法来建立植物中金属含量与植物光谱之间的关系。这样可以较好地模拟不同元素之间的非线性关系。

(3)尺度效应一直是遥感应用领域的难题。如何有效地消减尺度效应对模型的影响显得至关重要。在遥感植物地球化学方法中,不仅空间尺度效应还存在光谱尺度效应。然而目前对光谱尺度效应的研究较少,如何有效地消除不同数据间由于光谱尺度造成的影响还有待深入。而对于空间尺度效应,在今后的研究中还需要定量的分析尺度效应的特征变化规律,并且要建立更具有普适性的空间尺度转换模型。

参考文献:

- [1] 姚凤良,孙丰月. 矿床学教程[M]. 北京:地质出版社,2006: 1-2.
- [2] 姜涛. 黑龙江多宝山铜矿区植物地球化学特征及找矿指标研究[D]. 北京:中国矿业大学,2011.
- [3] 马建伟,徐瑞松,奥和会. 秦岭金矿区植被景观异常遥感影响特征及影响植物反射光谱变异原因的初步分析[J]. 国土资源遥感,1996(4): 23-29.
- [4] 徐瑞松. 华南沿海资源效应遥感生物地球化学模型[D]. 广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所),2005.
- [5] 杨永德. 利用植被与微量元素探索小秦岭金矿的成矿标志[J]. 黄金科技动态,1989(5): 14-28.
- [6] 吴继友,倪健,冯素萍,等. 山东省招远金矿区春季赤松林的植物地球化学和反射光谱特征[J]. 环境遥感,1994,9(2): 113-121.
- [7] 宋慈安,雷良奇,杨仲平. 屏障效应对生物地球化学异常形成的影响及找矿有效指示作物的选择[J]. 地质科技情报,2012, 31(1): 1-8.
- [8] 胡西顺,孟广路. 植物地球化学测量方法的实验效果[J]. 矿产与地质,2005,19(6): 610-616.
- [9] 胡西顺. 关于植物地球化学测量中有效指示作物判定标准的讨论[J]. 国外地质勘探技术,1995(4): 14-22.
- [10] 马跃良,徐瑞松,魏东原. 生物地球化学遥感技术在金矿成矿预测中的应用研究——黑龙江省乌拉嘎地区为例[J]. 地球化学,1997,26(1): 93-102.
- [11] 马跃良,徐瑞松,吕惠萍,等. 金矿生物地球化学效应及遥感信息提取[J]. 遥感技术与应用,1998,13(1): 11-20.
- [12] Hoque E, Huntzler J S. Spectral blue shift of read edge monitors damages class of beech trees [J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 39: 81-84.
- [13] 宋慈安,宋玮,王拓,等. 广西佛子冲铅锌矿植物和土壤地球化学找矿的对比实验研究[J]. 矿产勘查,2015,6(4): 420-428.
- [14] 王正海. 植被覆盖区遥感生物地球化学异常信息提取技术方法[C]//IAMG 中国国家委员会,等. 地球资源环境定量化理

- 论与应用——2009年全国数学地球科学与地学信息学术会议论文集, 2009: 313-317.
- [15] Collins W, Chang S H, Raines G, et al. Airborne biogeochemical mapping of hidden mineral deposits [J]. *Econ Geol*, 1983, 78(4): 737-749.
- [16] Rock B N, Hoshizaki T, Miller J R. Comparison of in situ and air borne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline [J]. *Remote Sensing Environ*, 1988 (24): 109-127.
- [17] Chang S H, Collins W. Confirmation of the airborne biogeochemical mineral exploration technique using Laboratory method [J]. *Economic Geology*, 1983, 78: 723-736.
- [18] 吕惠萍, 徐瑞松, 徐火盛. 广东鼎湖铜矿区的生物地球化学效应[J]. *环境遥感*, 1994(1): 22-28.
- [19] Schuerger A C, Capelle G A, Di Benedetto J A, et al. Comparison of two hyperspectral imaging and two laser-induced fluorescence instruments for the detection of zinc stress and chlorophyll concentration in Bahia grass [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84: 572-588.
- [20] 李庆亨, 杨锋杰, 张兵, 等. 重金属污染胁迫下的盐肤木的生化效应及波谱特征[J]. *遥感学报*, 2008, 12(2): 284-289.
- [21] Lu X, Hu Z Q, Guo L, et al. Quantitative inverse modeling of nitrogen content from Hyperion data under stress of exhausted coal mining sites [J]. *Mining Science and Technology*, 2009, 19(1): 31-35.
- [22] 陈圣波, 周超, 王晋年. 黑龙江多金属矿床植被胁迫光谱与金属元素含量关系研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(5): 1310-1315.
- [23] 王娟, 王正海, 陈勇敢, 等. 马厂箐铜矿马尾松微量元素特征与波谱响应[J]. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 47(6): 863-867.
- [24] 范闻捷, 盖颖颖, 徐希孺, 等. 遥感反演离散植被有效叶面积指数的空间尺度效应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013(2): 280-286.
- [25] 李小文, 王祎婷. 定量遥感尺度效应当议[J]. *地理学报*, 2013(9): 1163-1169.
- [26] 刘良云. 叶面积指数遥感尺度效应与尺度纠正[J]. *遥感学报*, 2014(6): 1158-1168.
- [27] 王正海, 王磊, 胡光道. 植被覆盖区遥感生物地球化学异常信息提取技术方法[J]. *国土资源科技管理*, 2012, 29(6): 51-58.
- [28] Hede A N H, Kashiwaya K, Koike K, et al. A new vegetation Index for detecting vegetation anomalies due to mineral deposits with application to tropical forest area [J]. *Remote Sensing of the Environment*, 2015, 171: 83-97.
- [29] 姜海玲, 张立福, 杨杭, 等. 植被叶片叶绿素含量反演的光谱尺度效应研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016(1): 169-176.
- [30] 马跃良, 徐瑞松. 遥感生物地球化学在找矿探查中应用及效果[J]. *地质与勘探*, 1999, 35(5): 39-43.
- [31] 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.
- [32] 林树道. 遥感找矿的生物地球化学信息[J]. *国土资源遥感*, 1991(4): 13-19.
- [33] 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): 444-449, 456.
- [34] 李娜. 重金属胁迫下矿区植物波谱异常与图像特征研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2007.
- [35] 陈圣波, 周超, 王晋年. 黑龙江多金属矿区植物胁迫光谱及其与金属元素含量关系研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012(5): 1310-1315.
- [36] 路明亮. 铜胁迫下植物光谱变化规律及铜含量估算模型研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- [37] 周广柱. 铜矿区植物光谱特征与信息提取[D]. 济南: 山东科技大学, 2007.
- [38] 林婷. 水稻锌污染高光谱遥感监测模型研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [39] 张玉超, 钱新, 钱瑜, 等. 支持向量机在太湖叶绿素-a非线性反演中的应用[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(1): 78-83.
- [40] 许吉仁, 董霏红, 谭琨, 等. 基于支持向量机的矿区复垦农田土壤—小麦镉含量高光谱估算[J]. *光子学报*, 2014, 43(5): 1-8.
- [41] 吕杰. 基于支持向量机的作物叶绿素含量反演模型[J]. *测绘科学*, 2015, 40(9): 88-91.
- [42] 田骅, 沈润平, 丁国香. 支持向量机在土壤镁含量高光谱估算中的应用[J]. *土壤*, 2015, 47(3): 602-607.
- [43] 蔡东全, 吴泉源, 曹学江, 等. 基于 HJ1A-HSI 的龙口污染灌溉区土壤重金属含量反演[J]. *安全与环境工程*, 2015, 22(5): 33-39.
- [44] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. *电子科技大学学报*, 2011(1): 2-10.
- [45] 常甜甜. 支持向量机学习算法若干问题的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [46] Friedman J H, Turkey J W. A projection pursuit algorithm for placatory data analysis [J]. *IEEE Transaction on Computers*, 1974, 23(9): 881-889.

Progress of research on remote sensing plant geochemical methods

CUI Shichao^{1,2}, ZHOU Kefa¹, ZHAO Jie^{1,2}

(1. *Xinjiang Research Center for Mineral Resources, Xinjiang Institute of Ecology and Geography,*

Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. University of Chinese academy of sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With development of remote sensing technology in recent years remote sensing plant geochemical method has been widely used in the exploration of metallic deposits in the area with vegetation. In this paper is mainly expounded the development of remote sensing of plant geochemistry from three aspects of theory, technology and application and pointed out the existing problems. Quantitative extraction of plant geochemical information is the only way to take for remote sensing plant geochemistry in the future. However, in the process of quantification, the scale effect of spectrum and space are two important factors to influence accuracy of the model. To solve the problem, this paper proposes two solutions to reduce influence of the spectral scale effect while the two methods' operability and reliability need to be further explored. Finally, this paper expounds the development prospects of the remote sensing plant geochemical method, and points out that in the future, support vector machine, projection machine, and other machine learning methods can be introduced for the quantitative model building.

Key Words: remote sensing plant geochemistry; spectral scale; spatial scale; support vector machine; projection pursuit