

# 高光谱遥感土壤质量信息监测研究进展

魏娜<sup>1,2</sup>, 姚艳敏<sup>1,2</sup>, 陈佑启<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室, 北京 100081;

<sup>2</sup> 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 高光谱遥感具有波段多且光谱连续等特点, 在土壤质量信息的监测方面, 利用高光谱遥感数据, 能够实现对土壤特性的定量分析。总结了利用高光谱遥感技术获取土壤质量信息的方式和特点, 以及影响土壤光谱反射特性的主要因素, 回顾了国内外基于遥感的土壤质量信息提取的定量研究, 并对研究中的问题进行了分析和展望。

**关键词:** 高光谱遥感; 土壤有机质; 土壤含水量

**中图分类号:** S127 **文献标识码:** A

## The Advance of Soil Quality Information Monitoring By Hyperspectral Remote Sensing

Wei Na<sup>1,2</sup>, Yao Yanmin<sup>1,2</sup>, Chen Youqi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *The Lab of Resources Remote Sensing and Digital Agriculture Ministry of Agricultural.P.R.China, Beijing 100081;*

<sup>2</sup> *Chinese Academy of Agricultural Sciences Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Beijing 100081)*

**Abstract:** Hyperspectral remote sensing is characterized in multi and continuous spectrum, which can be used in the monitoring of soil quality information. The hyperspectral remote sensing data can be used to do the quantitative analysis of soil characteristics. This paper summarizes the mode and characteristic of extraction of soil quality information based on hyperspectral remote sensing technology, analyses the main factors that influenced the soil spectral reflection characteristic, reviews the studies of quantitative extraction of soil quality information based on hyperspectral remote sensing in domestic and abroad. Finally, analyses the problems and draws the prospect in the related areas.

**Key words:** hyperspectral remote sensing, soil organic matter, soil moisture content

## 0 引言

土壤是由矿物质、有机质、水分、空气等物质组成, 它们之间是相互联系、相互作用的有机整体。研究表明, 土壤的光谱特性与土壤的理化性质有着明显的关系, 不同的土壤有不同形态的反射特性曲线<sup>[1-4]</sup>, 比如, 土壤类型、成土母质、土壤有机质含量、土壤水分含量等因素的不同, 都会造成土壤光谱反射曲线的差异, 因此可以利用遥感技术, 建立土壤光谱与土壤理化性质之间的相关关系, 定量反演土壤质量状况。

而传统的宽波段遥感 (如 MSS 和 TM 等), 波段少、光谱分辨率低, 只能用于诸如土地类型面积变化的研究。而高光谱遥感的出现, 解决了常规遥感中出现的问题, 借助其光谱分辨率高、超多波段等特点, 应用于土壤各参数 (有机质含量、含水量等) 细微差异变化的研究, 使定量反演土壤质量状况成为可能<sup>[5]</sup>。

## 1 高光谱遥感技术的特点

20 世纪 80 年代, 成像光谱技术的出现使光学遥感进入一个崭新的阶段, 即高光谱遥感阶段。成像光谱

**基金项目:** 科技部科研院所社会公益研究专项“中国区域性耕地资源变化影响评价及其预警”(2004DIB3J092)。

**第一作者简介:** 魏娜, 女, 1982 年出生, 硕士, 农业遥感专业, 从事 3S 技术与土地利用研究。通信地址: 100081 北京市海淀区中关村南大街 12 号中国农业科学院资源区划所 6 楼 610 室 E-mail: checkland@sohu.com。

**通讯作者:** 姚艳敏, 女, 副研究员, 主要从事遥感、GIS、全球定位系统在土地利用 / 土地覆盖上的应用研究, 以及农业资源信息标准化研究。通信地址: 100081 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所。

**收稿日期:** 2008-06-04, **修回日期:** 2008-06-18。

技术是把传统的成像技术和光谱技术结合在一起,在电磁波谱的紫外、可见光、近红外和短波红外区域,从感兴趣的物体获取许多窄而且光谱连续的图像数据,它是人类在对地观测方面取得的重大技术突破之一。

相较于传统的多光谱遥感影像,光谱分辨率为100nm,在可见光和近红外光谱区域只有几个波段,例如TM卫星影像有7个波段,平均光谱分辨率为137nm。而高光谱遥感光谱分辨率为10nm,在可见光和近红外区域有几十甚至几百个光谱波段,可以形成连续的光谱曲线。研究表明许多地表物质(并不包括全部)的吸收特征在吸收峰深度(band depth)一半处的宽度为20~40nm<sup>[6]</sup>。因此,根据高光谱遥感光谱分辨率高,波段多的这一特点,许多在宽波段遥感中不可探测的地表物质光谱特性,都能运用高光谱遥感区分并探测出来。例如,在土壤质量信息的监测方面,利用高光谱遥感数据,能够实现对土壤特性的定量分析。

## 2 利用高光谱遥感获取土壤质量信息的方式和特点

土壤本身是一个综合而复杂的系统,在其发育过程中受到多种因素的影响,如母质、气候、地形、生物等成土环境以及成土时间长短的差异,再加上人类活动的影响,使土壤的理化特性,如有机质含量、粘土矿物类型、机械组成以及土壤孔隙度等有明显差异,这些差异使得各类土壤的光谱都具有自己的特点。

采用高光谱遥感获取土壤质量信息有三种方式:实验室地物光谱测量、野外便携式光谱仪测量以及航空成像光谱仪数据获取。非成像光谱仪是用于地面光谱测量的仪器,它主要在紫外到近红外(300~2500nm)光谱区域范围内获取地物的连续光谱曲线,主要应用于野外和实验室地物光谱信息的获取,帮助理解不同类型地物光谱特性和提高不同种类遥感数据的分析应用精度。此外,地面光谱测试,特别是实验室内光谱测试,能够较理想地控制光谱的影响因子,从而能更好地研究光谱与地物特性的内在规律性,是现阶段研究地物反射光谱特性的一个最常用的手段。

而成像光谱遥感技术不仅有几十甚至几百个光谱波段的海量数据,而且能将确定地物性质的光谱与其空间和几何特性的图像有机结合起来。在获取土壤质量信息过程中,结合野外和实验室获取的土壤特性光谱信息,运用多元统计分析等技术,基于地物光谱位置的分析等方法,对不同类型土壤光谱特征和理化特性进行相关分析,建立土壤质量的光谱指标模型,从而实现对土壤质量信息指标的快速、定量监测。

## 3 影响土壤光谱反射特征的主要因素

大量研究表明土壤理化性质中有机质含量、土壤

水分、铁的氧化物等许多因素对土壤光谱有明显的影

### 3.1 土壤有机质对土壤光谱反射特征的影响

有机质是土壤的重要组成部分,它包括两大类:第一类为非特殊性的土壤有机质,包括动植物残体的组成部分以及有机质分解的中间产物,占土壤有机质总量的10%~15%;第二类为土壤腐殖质,其主体是富里酸和胡敏酸,它占土壤有机质总量的85%~90%。土壤有机质不仅能为作物提供所需的各种营养元素(如氮、磷等),同时对土壤结构的形成、改善土壤物理性状,提高土壤的保肥能力和缓冲性能,有决定性作用。在一定限度内可以说土壤的肥沃程度,是土壤肥力的重要指标之一。

土壤有机质含量和有机质的组成对土壤反射率有着强烈影响。目前,已经有许多学者研究了土壤有机质含量与土壤反射率的关系。一般认为,土壤有机质的增加会导致土壤光谱反射率的下降。但是,Bower等人发现有机质的氧化作用增强了土壤的光谱反射率<sup>[7]</sup>。Baumgardner等人在研究印度土壤时发现当土壤有机质含量超过2%时,有机质就有可能掩盖其它因素对土壤光谱特征的影响;当小于2%时,随着有机质含量的降低,其掩盖其他成分(如铁、锰)的能力越来越弱,对土壤光谱的影响就很小<sup>[8]</sup>。

### 3.2 土壤含水量对土壤反射光谱特征的影响

土壤水分是土壤最重要的组成部分之一,土壤中水分含量的高低对热量平衡、土壤温度、农业墒情均有重要意义。土壤水分不仅在土壤形成过程中起着重要的作用,因为形成土壤剖面的土层内各种物质的运移,主要是以溶液的形式进行的,而且,它在很大程度上参与了土壤内进行的许多物质转化过程,如矿物质的风化、有机化合物的合成与分解等<sup>[9]</sup>。

许多学者研究表明,随着土壤含水量的提高,土壤光谱反射率会相应降低,干燥的土壤具有较高的反射率<sup>[10-13]</sup>。然而,土壤反射率还取决于土壤类型和田间持水量。例如,沙质土就比壤质土的反射率大。刘伟东和Baret研究表明土壤光谱反射率在一定的土壤水分临界值之下时,随土壤湿度的增加降低,当超过临界值后,随土壤水分的继续增加而增加,这个临界值通常大于田间持水量<sup>[14]</sup>。

### 3.3 氧化铁对土壤反射光谱特征的影响

土壤矿物是土壤的主要组成物质,占土壤固相部分重量的95%~98%左右。而铁是土壤矿物中的主要元素之一,在土壤中通常以氧化铁的形式存在,氧化铁是土壤赋色的重要成分,也是可见光谱中最活跃的因素。

不同形态的氧化铁可呈现不同的颜色。在旱作土壤中,一般为氧化铁,随结晶水的增加颜色也由红色变为黄色。当土壤处于还原状态时,铁也随之还原为亚铁,土壤呈蓝绿、灰蓝、蓝灰、灰等颜色<sup>[15]</sup>。因此,氧化铁含量对土壤光谱特性有重要的影响。

一般认为,铁的氧化物的存在会导致土壤在整个波谱范围内反射率下降,尤其土壤在可见光波段范围出现的多个吸收特征都是由铁的氧化物引起的。由于土壤中大量存在,几乎所有土壤的光谱反射率都朝着蓝波方向下降,并且这种下降可以扩展到紫外区域。

#### 3.4 土壤质地对土壤反射光谱特征的影响

土壤质地是指土壤中粘土、粉砂和沙颗粒所占的比例,许多研究表明,土壤质地对土壤反射光谱的影响不仅与土壤不同粒径组合及表面状况(糙度和阴影)有关,而且与不同粒径的化学组成也密切相关。Bowers和Hanks研究了机械组成对土壤反射能量的影响,结果显示土壤反射系数随土壤颗粒粒径的降低呈指数增长<sup>[16]</sup>。Al-Abbas研究发现土壤粘粒含量和土壤反射系数成负相关,因为随着土壤粘粒含量的提高,土壤水分含量增加,从而光谱反射系数降低<sup>[17]</sup>。Mathews等人认为土壤粉、砂组分中各种难风化的原生矿物的存在也明显影响土壤的反射系数<sup>[18]</sup>。同一类型土壤中,也可能因为其组分中含有的粉、砂粒的不同而反射系数不一样,例如土壤中钛铁矿和磁铁矿的存在能在很大程度上降低土壤的反射系数,而石英则增加土壤的反射系数<sup>[19]</sup>。

#### 4 国内外基于遥感的土壤质量光谱信息定量研究

自20世纪20年代以来,国内外学者一直致力于土壤光谱特性的研究,尤其高光谱遥感能够通过对土壤理化性质与土壤精细光谱信息的定量分析,进行土壤的特性参数评价。

##### 4.1 土壤有机质的反射光谱特征研究

国内外对于土壤有机质的光谱特征研究较多。Karneili等人发现土壤有机质吸收特征主要表现在1720nm、2180nm和2309nm处<sup>[20]</sup>。Krishnan等在实验室测定400~2400nm光谱范围内有机质含量变化的土壤光谱,并取反射光谱倒数的对数光谱形式,然后求其一阶和二阶微分值,再用逐步回归分析方法找出了预测土壤有机质含量的最佳波段为623.6nm和564.4nm<sup>[21]</sup>。徐彬彬、戴昌达通过对南疆土壤研究发现,土壤有机质与土壤光谱在600nm波段处的弓曲差(即土壤光谱反射曲线在550和650nm两个波段的光谱反射系数的平均值与600nm波段处的光谱反射系数的差值)呈极显著负相关: $\ln Y = 0.1271 - 1.08301nh$ ,相关

系数 $R = -0.81$ ,式中, $Y$ 为有机质含量(%), $h$ 为弓曲差<sup>[22]</sup>。彭玉魁等采用近红外光谱分析法,对中国黄土区土壤水分、有机质和总氮含量进行评价分析,认为土壤样品在近红外区域光谱特征的差异主要取决于土壤水分含量的不同,而有机质和总氮含量变化对其影响不大<sup>[23]</sup>。沙晋明等利用VF991地物光谱测量仪对8个不同环境条件下形成的土壤剖面上的各个土层进行反射光谱测量,研究发现在紫外区、可见光区和近红外区均存在着土壤有机质光谱响应<sup>[24]</sup>。谢伯承等通过ASD FR便携式光谱仪对132个风干土壤样品的光谱反射率进行了实验室测定,获得了褐潮土土壤剖面的不同诊断层反射光谱特征,并利用导数光谱方法建立了预测土壤有机质含量的方程,提出了预测北京地区褐潮土有机质含量的最佳波段。结果表明,在400~1200nm范围之间土壤有机质含量与土壤光谱反射率有较好的相关性;在波长447nm处采用反射率和A值(反射率倒数的对数)所建立的预测方程的预测精度较高;采用反射率的一阶微分建立的预测方程的最佳波段在516nm处;而A值一阶微分光谱在615nm处相关性最好;采用600~800nm波段范围内的特征吸收面积来评价与有机质的关系,相关性达到0.01显著水平,随着有机质含量的增加,特征吸收带的面积增大<sup>[25,26]</sup>。刘焕军等对黑龙江省黑土区土壤样品进行实验室黑土有机质高光谱反射曲线特征定量分析,发现有机质含量与归一化高光谱反射率间的相关系数在710nm附近达到最大,为-0.83;由于黑土有机质含量高,光谱多元线性逐步回归预测模型精度较高,稳定性好<sup>[27]</sup>。贺军亮等通过采用能量透射率较高的450~750nm可见光波段反射率均值 $\bar{R}_{450-750}$ 对原始反射率 $R$ 进行标准化比值处理获得有机质诊断指数(OII)  $R/\bar{R}_{450-470}$ 均值作为自变量建立了土壤有机质含量的简单线性反演模型<sup>[28]</sup>。周清通过试验证明,土壤反射光谱由成土母质及成土环境的差异而导致的土壤类型之间矿物组成及其土壤有机质组成差异性,使得不同土壤类型的光谱反射系数曲线随土壤有机质的变化遵循不同的规律<sup>[29]</sup>。卢艳丽通过反射率及其不同变换形式的光谱数据与土壤有机质的相关分析,确定反射率的对数光谱在820nm附近对不同土壤类型有机质均成良好的相关性,并利用 $\log R_{(820)}$ 建立了不同土壤类型有机质监测模型;另外对不同模型的同质性检验结果同样表明不同土壤类型很难通过同质性检验<sup>[30]</sup>。

##### 4.2 土壤水分与土壤反射光谱关系的研究

运用高光谱遥感技术监测土壤水分,多采用土壤

水分光谱法,从可见光到近红外波段范围内建立土壤水分与土壤反射率的关系。杜普大学在对三个水分吸收谱段 1430~1450nm、1620~1650nm 和 1920~1940nm 分析后表明,应用土壤反射率的量值能确定土壤水分含量<sup>[31]</sup>。Bowers 等人指出土壤水分含量与水分在吸收波段的吸收强度之间具有很好的线性相关关系<sup>[32]</sup>。Stoner 指出,土壤含水量与 2080~2320nm 波段的土壤反射率相关性非常高,但未指明其相关的形式<sup>[33]</sup>。朱永豪等人认为,同一土壤随含水量增加在各波长或波段上的光谱反射率并非是简单的线性变化,而是遵循二次回归方程<sup>[34]</sup>。刘卫东等通过使用相对反射率方法、一阶微分方法、差分方法对土壤表面湿度进行预测,结果表明,反射率倒数的对数的一阶微分与差分方法对土壤水分的预测能力较强;另外尝试了对高光谱遥感图像进行土壤表面湿度填图,建立了较为精细的土壤表面湿度空间分布图<sup>[35]</sup>。王静等根据衡山土壤实验室光谱数据,建立了土壤光谱在 1423nm、1524nm、1746nm 三个波段的预测土壤含水量的回归模型<sup>[36]</sup>。王昌佐等通过试验证明,在自然光照条件下,利用高光谱数据估测裸土的表层含水量时,进行土壤含水量反演的理想波段是 1950~2250nm<sup>[37]</sup>。何挺通过对吸收特征峰位置与土壤含水量相关性比较,得出在预测土壤含水量时,1450nm 吸收峰比 1925nm 吸收峰更为敏感、有效,前者相关系数为 0.862,后者为 0.64<sup>[38]</sup>。谢伯承通过对相对反射率、A 值(反射率倒数的对数)、以及相对反射率和 A 值的一阶微分等方法结果比较,得出 A 值的一阶微分在 1406nm 处具有很好的预测性能,尤其在土壤湿度水平较高时,土壤水分与土壤反射率之间的非线性关系表现非常明显<sup>[39]</sup>。这一结论与何挺的试验结果基本相同。

#### 4.3 土壤氧化铁的光谱反射特性研究

一般认为,土壤的氧化铁含量与土壤光谱反射特性之间存在一定的负相关。Baumgardner 等人指出 870nm 处的铁吸收峰极为明显,这是铁氧化物在土壤颗粒的表面覆着一层胶质膜所致,氧化铁含量越高,870nm 处的吸收峰就越宽,而且有机质的存在并不能掩盖铁对土壤反射率的影响<sup>[40]</sup>。Obhukhov 和 Orlov 指出在 500~640nm 光谱区域内,土壤中氧化铁含量增加,将导致反射率明显下降<sup>[41]</sup>。Montgomery 研究表明游离态氧化铁的存在对整个可见光和近红外区域的光谱都有很大影响<sup>[42]</sup>。季耿善和徐彬彬研究通过比较大量脱铁前后的曲线,认为土壤去铁后反射率明显增加,影响范围主要在 400~1100nm 波段内<sup>[43]</sup>。Stoner 还发现土壤反射率和铁氧化物含量在中远红外波段具有更强

的相关性<sup>[44]</sup>。彭杰等以湖南省两种主要成土母质发育的水田和旱地土壤为研究对象,通过对用将有 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 机质去除后的土壤和未去除有机质的土壤的光谱特性进行比较,发现去除有机质后,在 420nm、480nm、500~640nm 波段的光谱反射率与游离氧化铁、全 Fe、无定形氧化铁的相关性都有明显的提高,分别达到显著至极显著水平<sup>[45]</sup>。何挺等在实验室对所采集土样进行分析,指出利用红波段和蓝波段平均反射率的对数构成的土壤氧化铁指数对土壤氧化铁有较好的相关性(相关系数达 0.73)<sup>[46]</sup>。周萍试验证明 Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup> 吸收特征主要表现在可见光范围内,其中 Fe<sup>2+</sup> 吸收波长位置在 430nm、45nm、510nm、550nm 以及 1000~1100nm; Fe<sup>3+</sup> 的吸收位置在 400nm、450nm、490nm、700nm 以及 870nm;且光谱反射率对数的二阶微分变换是对土壤中氧化铁含量预测的最佳光谱指标<sup>[47]</sup>。

#### 5 土壤光谱研究中存在的问题

国内外有关学者对高光谱数据进行土壤反射特性研究取得了显著成绩,但还有许多问题需要深入研究。

首先,野外采集土壤光谱数据过程中,由于地表空间分布的不规则性和土壤水分、植被、人为等因素对土壤表面反射光谱的影响,使直接获取野外现时土壤光谱数据解译与土壤理化特性相对应的光谱参数还存在一定的问题。

其次,高光谱遥感波段多且窄,容易受到外界因素的影响,而实验室内在获取土壤光谱曲线的过程中尚没有统一标准,导致同一试验由于测试条件以及土样处理方式的不同,得到的光谱数据有很大差异,不仅影响试验的误差,而且限制了不同研究之间以及同一研究不同时间中获取光谱数据间的共享性。

第三,土壤是矿物质、有机质、水分、空气等物质相互联系、相互作用的有机整体,其光谱反射特性也是各种理化性状的综合反映。而在目前对土壤理化特性进行的研究中,大多只建立考虑单个因素的一元线性回归模型,较少涉及考虑多个参数的多元回归模型。

第四,以往的学者多以不同类型土壤为一个对象,进行土壤参数(如有机质)高光谱响应特性研究。但土壤的光谱反射率是土壤内在理化特性光谱行为的综合反应,不同类型的土壤,由于理化性质不同,其光谱特征也不同。例如,不同类型土壤有机质中胡敏酸和富里酸的光谱特性差异很大,在有机质含量相同的情况下,土壤反射光谱也可能不同。因此,通过研究不同类型土壤光谱特性得到的有机质含量预测模型,在预测某一特定类型土壤的有机质含量时,所得的结果与实际情况会有误差。

## 6 展望

基于以上存在的问题以及精准农业对新技术的要求,未来的土壤光谱研究将会朝着以下的方向发展。

首先,对野外原始地表非规则土壤表面反射规律的进一步研究,确定进行野外光谱测试中影响土壤反射光谱的主要因素,并建立相关模型。这是解决室内土壤光谱参数模型向室外拓延的关键,也是利用遥感数据源监测土壤肥力或进行土壤分类、分等级所面临的首要问题。

其次,室内土壤光谱测试过程的标准化,包括土壤样品前处理和测试条件的统一,以获取共享性较高的室内土壤光谱数据。

第三,研究土壤各种理化性质光谱表现的个体差异性,同时研究两个或两个以上主要影响土壤光谱的物质对土壤其它组成物质的光谱综合影响规律,例如同时考虑土壤有机质和土壤含水量两个因素对土壤反射光谱的影响。

第四,研究建立某个特定土壤的参数与土壤光谱特性预测模型,实际应用价值更大,数据精度更高。

## 参考文献

- [1] Condit H R. Application of characteristic vector analysis reflectance of American soils. *Appl. Dpt.*, 1972, 11:74-86.
- [2] 戴昌达.中国主要土壤光谱反射特性分类与数据处理的初步研究.见:遥感文集.北京:科学出版社,1981:315-323.
- [3] 王人潮,苏海萍,王深法.浙江省主要土壤光谱反射特性及其模糊分类在土壤分类中的应用研究. *浙江农业大学学报*,1986,12(4):464-471.
- [4] 黄应丰,刘腾辉.华南主要土壤类型的光谱特性与土壤分类. *土壤学报*,1995,32(1):58-68.
- [5] 高永光,胡振琪.高光谱遥感技术在土壤调查中的应用. *矿业研究与开发*,2006,26(1):44-46.
- [6] Hunt. G. R. Electromagnetic radiation: The communication link in remote sensing. In: *Remote Sensing in Geology*, Siegnal B, Gillespia A. Wiley New York, 1980:702
- [7] Bower S. A., R. J. Hanks. Reflectance of Radiant Energy from Soils. *Soil Sci. Am.J.*, 1965, 100(2):130-138.
- [8] Baumgardner, M. F. L. F. Silva, L. L. Biehl, et al. Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*, 1985,38:1-44.
- [9] 黄昌勇.土壤水.见:黄昌勇编.土壤学.北京:中国农业出版社,2001:98-112.
- [10] Angstrom,A. The Albedo of Various Surfaces of Ground. *Geograf. Ann.*, 1925, 7:323-342.
- [11] Bedidi A., Cervelle B., Madeira J.,et al. Moisture Effects on Visible Spectral Characteristics of Lateritic Soils. *Soil Sci*, 1992, 153:129-141.
- [12] Muller E, Decamps H. Modeling Soil Moisture Reflectance. *Remote Sens. Envir*, 2000, 76:173-180.
- [13] Bowers S A, Hanks R J. Reflection of radiant energy form soil. *Soil Science*, 1965, 100:130-138.
- [14] Liu Weidong, F Baret, et al. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sens. Environ*, 2002, 81(2-3),238-246.
- [15] Madeira Netto, J. Spectral reflectance properties of soils. *Photo-interpretation*, 1996, 2:59-76.
- [16] Bowers, S.A. Hanks, R.J. Reflection of Radiant Energy From Soils. *Soil Science*, 1965, 100(3):130-138.
- [17] Al-Abbas et al. Relating organic matter and clay content to mutispectral radiance of soils. *Soils Sci.*, 1972, 114:477-485.
- [18] Mathews H. R. Spectral reflectance of selected pennsylvania soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc*, 1973, 37:421-424.
- [19] Dematte, J. A. M., Garcia, G. J.. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63:327-342.
- [20] Karnieli, A., Verchovsky, I., Hall, J. K., et al. Geographic information system for semi-detailed mapping of soils in semi-arid region. *Geocarto International*, 1998, 13(3):29-43.
- [21] Krishnan P, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Sci. Soc Am. J.*, 1984, 44:1282-1285
- [22] 徐彬彬,戴昌达.新疆土壤光谱反射特性与有机质含量的相关分析. *科学通报*,1980,6:282-284.
- [23] 彭玉魁,张建新,何绪生,等.土壤水分、有机质和总氮含量的近红外光谱分析研究. *土壤学报*,1998,35:554-559.
- [24] 沙晋明,陈鹏程,陈松林.土壤有机质光谱响应特征研究. *水土保持研究*,2003,10(2):21-25.
- [25] 谢伯承,薛绪掌,王纪华,等.褐潮土的光谱特性及用土壤反射率估算有机质含量的研究. *土壤通报*,2004,35:391-395.
- [26] 谢伯承,薛绪掌,刘伟东,等.基于包络线法对土壤光谱特征的提取及其分析. *土壤学报*,2005,42:171-175.
- [27] 刘焕军,张柏,赵军,等.黑土有机质含量高光谱模型研究. *土壤学报*, 2007,44:27-32.
- [28] 贺军亮,蒋建军,周生路,等.土壤有机质含量的高光谱特性及其反演. *中国农业科学*,2007,40(3):638-643.
- [29] 周清. 土壤有机质含量高光谱预测模型及其差异性研究:[学位论文].浙江:浙江大学,2004:75-101.
- [30] 卢艳丽. 东北平原土壤有机质及主要养分高光谱定量反演:[学位论文].北京:中国农业科学院,2007:31-37.
- [31] 彭德福.农业资源光谱数据的分类识别.见:中国自然资源研究会编.自然资源研究的理论和方法.北京:科学出版社,1985.
- [32] Bowers S. A, Smith S. J. Spectrophotometric determination of soil water content. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1972, 36:978-980.
- [33] Stoner, E. R., Baumgardner, M. F. Physiochemical, site and bidirectional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils. LARS, Purdue University, USA, 1980.
- [34] 朱永豪,邓仁达,卢亚非,等.不同湿度条件下黄棕壤光谱反射率的变化特征及其遥感意义. *土壤学报*,1984,21(2):194-201.
- [35] 刘卫东,Fré dé ric Baret,张兵,等.高光谱遥感土壤湿度信息提取研究. *土壤学报*,2004,41(5):700-706.

- [36] 王静,何挺,李玉环.基于高光谱遥感技术的土地质量信息挖掘研究.遥感学报,2005,9(4):438-445.
- [37] 王昌佐,王纪华,王锦地,等.裸土表层含水量高光谱遥感的最佳波段选择.遥感信息,2003,4:33-36.
- [38] 何挺.土地质量高光谱遥感监测方法研究:[学位论文].武汉:武汉大学,2003:44-54.
- [39] 谢伯承.基于高光谱遥感不同发生层土壤的光谱信息的提取研究:[学位论文].陕西:西北农林科技大学,2004:30-47.
- [40] Baumgardner, M.F. L.F. Silva, L. L. Biehl, et al. Reflectance properties of soil. *Advances in Agronomy*, 1985, 38:1-44.
- [41] Obukhov, A. I., D. C. Orlov. Spectra reflectance of the major soil groups and the possibility of using diffuse reflection in soil investigations. *Sov. Soil Sci*, 1964, 2:174-184.
- [42] Montgomery, O. L.. An investigation of the relationship between spectral reflectance and the chemical, physical and genetic characteristics of soils. *Purdue University*, 1976.
- [43] 季耿善, 徐彬彬. 遥感波段的土壤解译特性. 土壤专报, 1987: 114-128.
- [44] Stoner, Baumgardner. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil. Sci. Soc. AM. J.*, 1981, 45:1161-1165.
- [45] 彭杰,张杨珠,周清,等.去除有机质对土壤光谱特性的影响.土壤, 2006,38(4):453-458.
- [46] 何挺,王静,程焱,等.土壤氧化铁光谱特征研究.地理与地理信息科学,2006,22(2):30-34
- [47] 周萍.高光谱土壤成分信息的量化反演:[学位论文].北京:中国地质大学,2006:65-71.