

土壤遥感监测研究进展

徐金鸿^{1,2}, 徐瑞松¹, 夏 斌¹, 朱照宇¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 对土壤光谱遥感监测的国内外发展情况进行了回顾, 简单总结了影响土壤光谱的原因、土壤光谱的类型、土壤遥感的最佳波段、土壤的遥感分类以及土壤遥感的定量研究。重点对土壤水分遥感监测的方法和原理进行了详细的论述。最后对土壤遥感监测的发展趋势进行了分析和展望。

关键词: 土壤; 遥感; 土壤水分

中图分类号: S152.7; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)02-0017-04

Research Advances on Soil Monitoring by Remote Sensing

XU Jin-hong^{1,2}, XU Rui-song¹, XIA Bin¹, ZHU Zhao-yu¹

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: After reviewing the national and international developments on remote sensing monitoring soil, influenced factor of soil reflectance values, soil spectra curve, best detecting band of soil and soil classification using remote sensing are simply summarized. It makes an emphasis on the detailed discussion on the methods and theories of soil moisture monitoring by remote sensing. Analyzes and forecast the development tendency of remote sensing monitoring soil.

Key words: soil; remote sensing; soil moisture

前 言

土壤是由矿物质、有机质、水分、空气等物质组成, 它们之间是相联系、相互转化、相互作用的有机整体。土壤反射光谱特性是土壤的基本特征之一, 它与土壤的物理性质有着密切的关系。国内外学者对土壤光谱辐射特征做过大量的研究工作, . . . 在 1947 年就发表了包括土壤在内的地物光谱反射特性的专著。而 . . . (1959, 1960, 1968) 则完整地研究了苏联地带性土壤的反射光谱特性, 并指出腐殖质、氧化铁、湿度、机械组成、矿物成分、盐分和表土结构等是影响土壤反射光谱特性的基本因素。H. R. Condit (1970) 研究出一种简化测定土壤反射光谱曲线的方法, 即通过应用特征向量法分析土壤反射光谱数据后得出, 只需测定几个波长处的土壤光谱反射率值, 就可用公式计算出 320~1 000 nm 波段内任意波长处的土壤光谱反射值。我国学者戴昌达^[1], 朱永豪^[2], 汪周伟^[3], 徐彬彬^[4], 冯云山^[5,6]等都对土壤光谱特性做过大量的研究工作。而许多学者还研究了土壤成分与土壤光谱特性之间的关系。如 Hunt 和 Salisbury 指出土壤中一些矿物质在近红外区具有清晰的光谱纹迹^[7], Bowers 和 Hanks, Al-Abbas 等分别研究发现土壤有机质在近红外区具有与有机化合物几种官能团相关的特征纹迹^[8,9], Morra 等研究红外法预测较均质土壤有机碳和总氮的能力^[10], Etienne Muller 等^[11] (2000) 建立了土壤光谱与土壤含水量的关系模型。我国一些学者也在这方面做了大量的工作, 将在文中详细论述。本文在前人研究的基础上系统归纳了土壤的遥感研究。

1 影响土壤反射光谱特性的主要因素

1.1 有机质含量的影响

在同一类土壤中, 通常有机质含量愈高, 其光谱反射率就愈低, 反之亦然。有研究表明, 当土壤有机质含量为 1% 时, 其光谱反射率可达 55%; 当土壤有机质含量为 5% 时, 其光谱反射率为 25%, 还不到有机质含量为 1% 时的一半。就同一类型的土壤而言, 有机质含量的高低与土壤颜色的深浅有直接关系。有机质含量高时, 土壤呈深褐色至黑色; 有机质含量低时土壤呈浅褐色至灰色。通常颜色愈深的土壤, 其光谱反射率愈低, 而其相对肥力则愈高。一般可由二个光谱特征指标来比较有机质含量的高低: 其一是 400~1 100 nm (特别是 620~660 nm) 平均反射率的高低, 有机质含量越高, 反射率越低; 其二是光谱曲线在 600 nm 处的形态, 即 600 nm 处光谱曲线的“弓曲差”的大小。有机质含量越高, “弓曲差”越小, 曲线越平直。反之亦然, 在含量 0.5%~5% 时, 估测精度较高^[12,13]。

1.2 氧化铁含量的影响

通常土壤中氧化铁的含量愈高, 其光谱反射率则愈低, 反之亦然。这与氧化铁能强烈吸收太阳能有关。分析 0.5~0.64 μm 波长的土壤反射光谱数据可以看出, 当氧化铁含量为 12% 时, 其光谱反射率稍高于 30%, 而当氧化铁含量只有 2% 时, 其光谱反射率却高达 70%。氧化铁主要影响土壤反射光谱的 400~1 100 nm 波段。其中 500~640 nm 波段平均反射率与土壤中氧化铁含量的相关性较好, 呈线性负相关。

1.3 土壤质地和黏粒含量的影响

收稿日期: 2005-05-31

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专项(2003CCA00100); 中科院创新项目(GIGCX-04-01)的联合资助

作者简介: 徐金鸿(1976-), 男, 江西新干人, 博士研究生, 主要从事地理信息系统与遥感方面的研究。

由于土壤质地对反射光谱的影响不仅与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。因此,不能笼统地说,土壤颗粒越细,反射率越高。因为当颗粒细至黏粒时,使土壤持水能力增加,反而会降低反射率。但是,有一点可肯定,即不同粒径土壤的光谱差异随波长的增加而变大,所以可用 2 000~ 2 500 nm 光谱段来区别土壤质地差异。

利用土壤黏粒在常温下风干后依然能吸附水分的持水特性,可以应用反射光谱 1 900 nm 处水分吸收峰的强弱来估计土壤中黏粒含量的多少。黏粒含量越多,该波长上的吸收峰越强,反射率越低^[7,8]。

1.4 土壤水分含量的影响

只有用野外实测的土壤反射光谱才能估测土壤含水量。研究表明,随着土壤含水量的增加,无论在哪个波长上的反射率均会降低,而且其差异随波长的增加而加大。因此,尽可能应用近红外波段来估计土壤水分含量。由于各种土壤的持水能力有差异,所以反射率变化对应于湿度变化的灵敏度范围也不同。一般含水量在 10%~ 25%,反射率变化显著。而持水性差的土壤,其灵敏度范围可能少于 10%。当超过田间持水量时,由于土壤表面膜水层形成镜面反射,反而会提高反射率。

2 我国土壤反射光谱曲线的基本类型

戴昌达等^[1](1981)测定了我国 23 类主要土壤类型(包括 100 个样品)的反射光谱曲线,所用仪器为 DM R-22 型分光光度计,其波长范围在 0.36~ 2.5 μm 之间。根据测得的 100 条土壤反射光谱曲线的形状特征和斜率变化情况,将它们归纳为以下四种:

(1)平直型。凡有机质含量高、颜色深暗的土壤多形成平直型曲线,在可见光波段其斜率小并且变化不大,接近于一条直线,而在红外波段曲线稍有抬升或下降,但变幅一般不大。云南腾冲的泥炭土即属于这种类型。这种泥炭土的有机质含量高达 70%,其光谱反射率很低,在 0.36 μm 处为 4.9%,在 0.62 μm 处也仅有 7.3%。

(2)缓斜型。这种类型的曲线具有缓缓抬升,形成一条斜线的特点,其在 0.45~ 0.62 μm 波段的斜率为 0.1 左右,明显地高于平直型。但在 0.62 μm 以上的波段,其斜率则稍有降低。水稻土即属于这种类型。

(3)陡坎型。这种类型的曲线在可见光波段上升很快,形状陡峻,斜率剧增,但斜率变化不均匀,形成几个波折。在 0.48~ 0.62 μm 波段,斜率增高最快,形似陡坎;在 0.62~ 0.74 μm 波段斜率变小,曲线更趋平缓;在 2.3~ 2.5 μm 波段曲线则有缓缓下降的趋势。曲线在 0.9, 1.1, 1.4, 1.9, 2.2 μm 波长附近有程度不等的吸收谷,其形成与土壤中含有铁的氧化物及高岭土类黏土矿物中的 OH 有关。南方湿热地区的红壤、黄壤和砖红壤的反射光谱曲线均属于陡坎型。

(4)波浪型。这种类型的曲线在 0.36~ 0.60 μm 波段上升迅速,形状陡峻,斜率达 0.1 左右;在 0.6~ 2.3 μm 波段斜率迅速下降,有时出现负值,形成一条与 X 轴近于平行的似波浪形的曲线,其波谷一般宽而浅平;2.3~ 2.5 μm 波段,斜率上升较明显。干旱沙漠地区的棕漠土、风沙土、盐土、龟裂性土和绿洲耕作土的反射光谱曲线陡属于波浪型。

3 土壤光谱遥感最佳波段

已有的研究表明^[14,17],450 nm 波段的光谱值与土壤水分含量有关;500~ 640 nm 波段与土壤中的氧化铁有关;620~ 660 nm 波段与土壤有机质含量呈负相关。Stoner 等认为 750~ 1 300 nm 波段的反射率低是与土壤中含大量的铁和黏重

的质地有关^[14]。戴昌达认为 600~ 680 nm 波段是土壤遥感的最佳波段^[1]。徐彬彬^[18]等在研究宁夏地区土壤遥感资料之后,初步确认宜于土壤遥感的最佳工作波段组合为 400~ 500, 580~ 690, 730~ 800, 820~ 920, 1 080~ 1 200, 1 540~ 1 700, 2 050~ 2 300 nm。王昌佐^[19]等对自然状况下裸土表层含水量的高光谱遥感研究,得出 1 950~ 2 250 nm 波段的光谱反射率估测土壤含水量效果较好。而 Etienne Muller^[20](2000)认为 P 波段(波长 68 cm)对土壤水分监测效果显著。

4 土壤遥感分类

土壤的光谱反射率是土壤内在的理化特性之光谱行为的综合反应,所以研究土壤光谱特性有可能为土壤分类提供判别指标。黄应丰^[20]等对华南主要土壤类型的光谱特性与土壤分类,结果表明运用主组元分析,提取到的 10 个光谱特征作为区分我国华南地区主要土壤的土壤光谱特征指标是有效的。综合应用土壤特征指标及其它分类指标对土壤分类,其结果与按中国土壤系统分类是相一致的,可将华南地区主要土壤划分为砖红壤(赤红壤)、红壤、黄壤、水稻土和火山灰土等土类。特别是按土壤光谱特征指标的分类结果与按代表性土属的划分具有相当高的符合性,符合率达 83% 以上。

5 土壤反射光谱定量研究

5.1 土壤有机质光谱响应特性

土壤有机质是土壤重要的组成物质,对土壤肥力有着非常重要的作用。不同土壤类型有机质含量差异很大,高者可达 200 g/kg 以上,低者在 5 g/kg 以下。因此探测土壤的有机质含量是了解土壤肥力的重要途径。Dalal 和 Henry 用近红外光谱法预测了澳大利亚土壤的水分、有机碳和总氮,他们预测的土壤有机质含量变幅在 0%~ 2.6% 的范围内,而在有机质含量较高或较低的情况下,近红外法预测值存在偏差^[21]。Den-Dor 和 Banin^[22]研究发现有机质含量分别为 0%~ 4% 和 4%~ 14% 的两组土壤样本间,近红外光谱法的预测效果并不一致,存在着明显的偏差,他们认为通过分析土壤有机质的 C/N 比率来了解土壤有机质的分解阶段,从而改进近红外光谱法预测土壤有机质的准确度。沙晋明^[23]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样本剖面上的各个土层进行光谱测量,得到各个土层的反射率光谱曲线,并测出各个土层的有机质含量。通过研究土壤的有机质含量与土壤反射光谱间的相关性分析,发行有机质含量与土壤光谱在 376 795 nm 波段、616 506 nm 波段和 724 0975 nm 波段相关系数分别为 -0.63、-0.64 和 -0.64。彭玉魁^[24]等采用近红外光谱分析法对我国黄土区土壤的有机质含量进行评价分析,52 份样品定标结果有机质的复合相关系数为 0.938,标准差为 0.23,74 份样品的检验结果有机质的相关系数为 0.921,估测标准误差为 0.28,达到了与实验室化学分析相似的水平。

5.2 土壤中黏土矿物定量分析

土壤的黏土矿物化和高岭石富集是烃类微渗漏的显著特征之一,研究土壤中的主要黏土矿物的含量与其反射光谱的定量关系对利用成像光谱技术进行油气资源勘查具有实用意义。张华安^[25]等(1994)根据中国土壤黏土矿物分布图,采集了全国 24 种主要土壤类型的 45 个样品作为标本,研究了土壤的近红外反射光谱与土壤中主要的黏土矿物,特别是高岭石的丰度关系,选取相关系数在 0.8 以上的光谱特征,用最小二乘法进行回归拟合,得到土壤中高岭石、蒙脱石和伊利石含量的回归方程,它们的相关系数分别为 0.89, 0.87 和 0.92。

5.3 土壤中氮含量的估算

氮的测定,在土壤分析中具有重要的意义,常见的方法是将

试样处理后, 蒸馏, 再采用滴定法、扩散法或光度计法等测定。张平^[26]等运用反射光谱法测定土壤中的氮, 选择波段为 470 nm 发现含氮量在 1~8 ug/ml 范围内与其光谱反射率呈线性关系。徐永明^[27]等利用可见光/近红外反射光谱估算土壤中的总氮含量。通过对光谱曲线的去包络分析强化吸收特征, 提取土壤的主要吸收带, 利用土壤光谱反射率的变化[(-阶导数 FDR、倒数 1/R、倒数的对数 $\log(1/R)$ 和波段深度 Depth)], 其中 FDR 与 $\log(1/R)$ 的回归精度和验证精度很高, 1/R 的回归精度很高, 但验证精度很低, 不够稳定; Depth 的回归精度稍低。

5.4 土壤水分遥感监测

土壤水分(即土壤湿度、土壤含水量), 作为陆面水资源形成、转化、消耗过程研究中的基本参数, 是联系地表水与地下水的纽带, 也是研究地表能量交换的基本要素, 并对气候变化起着非常重要的作用。由于土壤水分资料对农业、水文、气象等具有很高的应用价值, 因而在该领域的研究一直比较活跃。监测土壤中水分含量用以预报旱涝是卫星遥感的一个重要课题。许多研究人员都做了大量的研究工作, 提出了许多监测土壤水分的方法。下面按照波段来对国内外土壤水分遥感监测的情况进行阐述。

5.4.1 可见光—近红外遥感监测土壤水分

可见光—近红外方法的原理是利用土壤及土壤上覆植被的光谱反射特性来估算土壤水分。土壤反射率的高低反映了土壤表面干湿程度。土壤水分也一定程度的影响到植被冠层的光谱。当光照、温度条件变化不大时, 植被生长状况主要与水分有关。而植被胁迫状况(即缺水状况)可以通过不同的遥感植被指数来表征, 因此可以通过植被指数间接估算土壤水分。常用距平植被指数法和植被供水指数法, 距平植被指数法是通过多年遥感资料累积, 计算出常年旬平均植被指数, 然后由当年旬植被指数与常年值的差异程度来判断当年植被长势和干旱程度。距平植被指数 $A\ TNDVI$ 定义为:

$$A\ TNDVI = (TNDVI - \overline{TNDVI})$$

$$TNDVI = \max(NDVI(t)), t = 1, 2, 3, \dots, 10$$

式中: \overline{TNDVI} ——同旬各年的归一化植被指数的平均值;
t——天数, $NDVI(t)$ 是第 t 天的植被指数; $TNDVI$ ——当年该旬的植被指数, 也是 10 d 内最大的 $NDVI$ 值。

植被供水指数定义为:

$$VSWI = T_s / NDVI$$

式中: T_s ——植被的冠层温度; $NDVI$ ——归一化植被指数。当供水不足时, 植被生长受到影响, 植被指数降低, 另一方面植被冠层温度升高。从而导致 $VSWI$ 增大。这两种方法都涉及到植被, 因而仅适用于植被覆盖度高的区域。

为了克服计算植被指数时忽略的植被月、旬、季节的变化, 张仁华^[28]采用将表面温度归一化处理, 土壤表面温度经过归一化处理能中和掉一些误差, 是一种表达土壤含水量信息的遥感指标。陈怀亮^[29](1998)考虑到地表温度和植被对土壤水分影响较大, 用归一化植被指数 $NDVI$ 和 $AVHRR4$ 通道亮温直接与土壤水分建立回归方程。

5.4.2 微波遥感监测土壤水分

微波遥感全天时、全天候、多极化、高分辨率、穿透性及对水分含量的敏感反应等优势, 是目前监测土壤水分的一种很有效的手段。微波遥感监测土壤水分的物理基础是土壤的介电特征和它与土壤的含水量有密切关系, 可分为主动和被动微波遥感两种。

被动微波监测土壤水分, 主要依靠于用微波辐射计对土壤本身的微波发射和亮度温度进行测量。在微波波段, 土壤的比辐射率从湿土的 0.6 (30% 体积土壤湿度) 到干土的 0.9

(8%) 之间变化^[30], 利于土壤湿度的反演。国内外学者围绕微波亮度温度与土壤湿度 (W)、田间持水能力 (FC)、前期降雨指数 (API) 之间的关系, 以及相关的影响因子(植被盖层、地表粗糙度、土壤纹理结构、土壤分层等)进行了大量的理论和实验研究。研究表明: 微波辐射测量土壤湿度的有效采样深度约为 2~5 cm, 且选择较长波段更为有利。金亚秋(1998)^[31]运用星载微波 SSM/I 的 7 个通道辐射亮温数据研究中国东北、华北农田的土壤水分, 提出用微波数据生成的散射指数与极化指数来分析农田微波辐射特征及其随季节的变化, 它可以被用来监测农作物生长和平原土壤湿度变化。

主动微波主要利用土壤的介电特性和它的水分含量间的密切关系。土壤水分含量不同, 介电特性不同, 回波信号就不一样。许多国内外学者对雷达后向散射系数和土壤水分的关系进行系统研究。A. Weimann^[32]过 ERS-1 的 SAR 图像与地面土壤水分实测值的对比分析, 发现在一定条件下, 土壤含水量与雷达后向散射系数间呈线性关系。人们根据土壤后向散射系数依赖于土壤介电常数, 而土壤介电常数与土壤水分间密切相关的关系, 通过面散射理论模型与介电常数模型, 从理论上建立后向散射系数与土壤水分之间的定量关系。研究结果表明, C 波段(约 5 GHz)、入射角 10~20° 的雷达系统, 估计 0~5 cm 厚的土壤水分可达到较好的精度, 且 HV 极化比 HH 极化效果更好。田国良等^[33]讨论了 X 波段(波长 30 cm)微波散射计对 20 块裸地的不同极化方式, 及后向散射系数随入射角的变化与土壤水分的关系, 指出对于监测土壤水分交叉极化比同极化好。 HV 极化在 48° 入射角时, 相关系数最高; 后向散射系数与地表粗糙度存在着函数关系; 并利用 X 波段机载合成孔径雷达水平极化 (HH) 图像进行河南封丘县麦田土壤含水量监测, 分出了 8 个土壤水分等级。

5.4.3 热红外遥感监测土壤水分

热红外遥感监测土壤水分依赖于土壤表面发射率与表面温度, 常采用热惯量法。土壤热惯量是土壤的一种热特性, 它是引起土壤表层温度变化的内在因素之一, 与土壤含水量之间存在一定的相关性。人们根据地表热量平衡方程和热传导方程, 建立了各种热惯量模式。一般情况下, 地表热惯量可以近似表示为地面温度的线性函数。地表热惯量可以通过对土壤反照率和反映周日温度变化的日最大、最小的测量来获得。Price^[34, 36]等在能量平衡方程的基础上, 简化潜热蒸发(散)形式, 引入地表综合参数的概念, 系统地阐述了热惯量方法及热惯量的成像机理, 并提出表观热惯量的概念, 利用卫星热红外辐射温度差计算热惯量, 然后估算土壤水分。此法简便易行得到普遍认可。余涛^[37]等提出一种改进的求解土壤表层热惯量的方法, 发展了地表能力平衡方程的一种新的化简方法, 可从遥感图像数据直接得到热惯量值, 进而得到土壤水分含量分布。田国良、余涛^[38]等对黄淮海平原 5 种不同土类(褐土、潮土、盐化潮土、滨海盐土、砂姜黑土)的土壤含水量与其热惯量关系所做的实验表明, 土壤含水量与其热惯量之间存在着良好的线性关系。土壤类型和土壤质地对热惯量与水分含量关系均有直接影响, 且影响程度处于同一量级上。遥感热惯量法仅能监测土壤表层水分的分布。在裸土或低覆盖区采用热惯量法。

6 展望

随着高光谱、高几何分辨率、高灵敏度、多角度、多类型遥感器的研制和运行, 对土壤监测的可行性和实用精度将得到不断提高。随着高光谱遥感的发展, 必将向定量获取土壤地球化学组分的方向发展。综合利用各种遥感资料(微波、可

见光、近红外和热红外)和一些辅助资料,可以避免出现大的偏差,提高监测精度。微波遥感具有全天候、穿透性强、高精

度等优势,是土壤水分遥感监测的重要方向。此外土壤遥感监测的理论方法还需要做进一步研究。

参考文献:

- [1] 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[A] 遥感文选[C] 北京: 科学出版社, 1981. 315- 323
- [2] 朱永豪 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[J] 土壤学报, 1984, 21(2): 194- 202
- [3] 汪周伟 东北主要土壤的光谱特征[J] 土壤专报, 1986, (1): 86- 92
- [4] 徐彬彬 土壤光谱反射特征研究及其应用[J] 土壤学进展, 1987, (1): 39- 42
- [5] 冯云山 吉林省主要土壤光谱特征的研究[J] 吉林农业大学学报, 1988, 10(4): 42- 46
- [6] 冯云山 土壤反射光谱特性的研究[J] 吉林农业大学学报, 1989, 11(2): 73- 76
- [7] Hunt G R, Salisbury J W. V isible and near infrared spectra of m inerals and rocks, I Silicate M inerals[J] Mod Geol , 1970, 1: 283- 300
- [8] Bowers S A, Hanks R T. Reflection of radiant energy from soil[J] Soil Sci , 1965, 100: 130- 138
- [9] A l- Abbas, Swain H H, Baumgardner M F. Relating organic matter and clay content to the multispectral radiance of soil [J] Soil Sci , 1972, 114: 477- 485
- [10] Morra M J, Hall M H, Freeborn L L. Carbon and nitrogen analysis of soil fractions using near-infrared reflectance spectroscopy[J] Soil Sci Soc Am. J. , 1991, 55: 288- 291.
- [11] Etienne M uller, Henri Decamps Modeling soil moisture reflectance[J] Remote Sensing of Environment, 2000, 76: 173 - 180
- [12] Swain P H, Davis S M. Remote Sensing: The Quantitative Approach [M] McGRAW HLL International Book Company, 1978 153- 160
- [13] 徐彬彬 土壤光谱反射特性与理化性状的相关分析[A] 宁芜土壤遥感研究专辑[M] 北京: 科学出版社, 1980
- [14] Stoner, E. R. , et al Characteristic variations in reflectance of surface soils[J] Am. J. Soil Sci , 1981, 45: 116- 1165
- [15] Condit, H R. The spectral reflectance of American soils[J] Eng Photogram, 1970, 36: 955- 966
- [16] Condit, H R. Application of characteristic vector analysis reflectance of American soils[J] Appl Dpt , 1972, 11: 74- 86
- [17] Cipra J, E, et al Measuring radiance characteristics of soil with a field spectroradiometer[J] Am. J. Soil Sci , 1971, 6: 477- 485
- [18] 徐彬彬, 季耿善 宜于识别我国土壤的最佳波段组合[A] 中国科学院空间科学技术中心 中国地球资源光谱信息及其应用论文集[C] 北京: 能源出版社, 1986 147- 156
- [19] 王昌佐, 王纪华, 王锦地, 等 裸土表层含水量高光谱遥感地最佳波段选择[J] 遥感信息, 2003, (4): 33- 36
- [20] 黄应丰, 刘腾辉 华南主要土壤类型的光谱特性与土壤分类[J] 土壤学报, 1995, 32(1): 58- 68
- [21] Dalal R C, Henry R J. Simultaneous detemination of moisture, organic carbon and total nitrogen by near infrared reflectance spectroscopy[J] Soil Sci Soc Am. J. , 1986, 50: 120- 123
- [22] Ben- Dor E, Banin A. Near- infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties[J] Soil Sci Soc Am. J. , 1995, 59: 364- 372
- [23] 沙晋明, 陈鹏程, 陈松林 土壤有机质光谱响应特性研究[J] 水土保持研究, 2003, 10(2): 21- 24
- [24] 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[J] 土壤学报, 1998, 35(4): 553- 559
- [25] 张华安, 朱永豪 土壤中黏土矿物的反射光谱定量分析[J] 国土资源遥感, 1994, (2): 52- 54
- [26] 张平, 闫宏涛 反射光谱法测定土壤和作物中氮[J] 仪器仪表与分析监测, 1999, (1): 37- 39
- [27] 徐永明, 蔺启忠, 黄秀华, 等 利用可见光/近红外反射光谱估算土壤总氮含量的实验研究[J] 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 19- 22
- [28] 张仁华 实验遥感模型及地面基础[M] 北京: 科学出版社, 1996
- [29] 陈怀亮 麦田土壤水分 NOAA /AVHRR 遥感监测方法研究[J] 遥感技术与应用, 1998, 13(4): 27- 35
- [30] Jackson T J, P E O'eill Salinity effects on the microw ave emission of soil[J] IEEE Trans Geosci Remote Sens , 1987, 25: 214- 220
- [31] 金亚秋 星载微波 SSM /I 遥感在中国东北华北农田地辐射特征分析[J] 遥感学报, 1998, 2(1): 19- 25
- [32] Weimann A, et al Soil moisture with ERS- 1 SAR data in the East- Geman loess soil area[J] Int J. , Remote Sens , 1998, 19(2): 237- 243
- [33] 田国良, 耿淮滨, 李生平 微波后向散射系数和土壤水分及地表粗糙度地关系[A] 黄河流域典型地区遥感动态研究 [M] 北京: 科学出版社, 1990
- [34] Price J C. The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation[J] Water Resources Research, 1980, 16(4): 787- 795
- [35] Price J C. On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales[J] Journal of Application Meteorology, 1982, 21: 1111- 1122
- [36] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent thermal inertia[J] Remote sensing of Environment, 1985, 18: 59- 73
- [37] 余涛, 田国良 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究[J] 遥感学报, 1997, 1(1): 24- 31
- [38] 田国良, 余涛 土壤水分的热惯量模型[A] 重大自然灾害遥感监测与评价研究进展[M] 北京: 中国科学技术出版社, 1993