

国家自然科学基金项目 (40801167)

东北农业大学博士论丛

东北农业大学“黑土资源保护与可持续利用创新团队” (CXT003)

联合资助

Songnen pingyuan Turang Dingliang

Yaogan Yanjiu Yu Shijian

松嫩平原土壤定量 遥感研究与实践

刘焕军◎著

 中国农业出版社

国家自然科学基金项目(40801167)

东北农业大学博士论丛

联合资助

东北农业大学“黑土资源保护与可持续利用创新团队”(CXT003)

松嫩平原土壤定量遥感 研究与实践

刘焕军 著

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

松嫩平原土壤定量遥感研究与实践/刘焕军著.

—北京: 中国农业出版社, 2010.8

ISBN 978-7-109-14923-6

I. ①松… II. ①刘…②张… III. ①遥感技术—应用—土壤调查—松嫩平原 IV. ①S159-3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 164765 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100125)

责任编辑 殷 华

北京昌平环球印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月北京第 1 次印刷

开本: 850mm×1168mm 1/32 印张: 7.875

字数: 198 千字

定价: 28.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书系统介绍了松嫩平原及典型区概况，土壤遥感研究与数据处理方法；揭示了松嫩平原主要土壤的反射光谱特征及其影响因素；建立了基于地面土壤高光谱反射率、多光谱遥感影像的土壤理化参数光谱速测与遥感反演模型；基于反射光谱特征分析了松嫩平原主要土壤的土壤线参数特征，并分析了土壤线参数对植被指数反演作物生理参数的影响；列出了若干土壤遥感研究实例，包括基于反射光谱特征与遥感影像的土壤分类、土壤盐碱化遥感评价、土壤温度格局分析等。

本书可供从事遥感、土壤学、农业、生态学等研究领域科学工作者以及大专院校有关专业师生参考。

前 言

松嫩平原是我国玉米和大豆主产区，粮食商品率高达60%以上。同时，该区土壤侵蚀、土壤盐渍化、土壤荒漠化等土壤退化问题较严重，尤其是黑土退化问题引起广泛关注。此外，土壤属性影响大量的生态过程，如蒸腾作用、光合作用、生物地球化学循环过程等，是各种系统研究模型非常重要的输入量；陆地地表遥感、混合像元分解、植被定量遥感、遥感估产等遥感理论和应用研究需要准确的土壤背景信息。快速、准确掌握土壤时空信息，对于促进该地区的农业生产、可持续发展、相关研究具有重要意义。

土壤是一个时空连续的变异体，具有显著的时空异质性。传统土壤理化参数监测与测定方法是基于点测量的，无法揭示土壤的时空间异质性规律，不能满足农业、水文、气象等部门以及相关研究对土壤时空变异状况的要求。土壤的光谱特征是土壤理化参数的综合反映，土壤高光谱遥感利用土壤的反射光谱信息，可以实现土壤参数的快速测定；同时土壤光谱信息与遥感影像数据的结合，可以揭示土壤时空变异规律，真正实现对土壤数量与质量的动态监测。

然而，“严格地讲，没有一个通用的遥感模型适用于地表的各种环境，遥感分析模型需要足够的区域参数，才能逼近地球表层的客观存在。不能生搬硬套国外的模型和公式，需要联系中国地理环境，建立体现地域差异和特色的遥感模型”（陈述彭，1996）。不同类型土壤组分不同，相应反射光谱特

征不同；不同研究区域，选取的反射光谱波段也不尽相同。本书的主要目的在于揭示松嫩平原主要土壤反射光谱特征，建立具有地域特色的土壤遥感模型。

研究成果将被用于土壤理化参数的快速测定，并为相关速测仪器的研制、各种专家施肥指导系统与变量施肥技术的实用化提供理论基础；提高植被、作物生理参数、长势监测与反演精度；为土壤碳库估算提供科学准确的计算方法；为精准农业、变量施肥、作物估产、土壤侵蚀防治、陆地生态系统相关研究提供基础数据支持和改进研究方法，推动定量遥感及相关领域的发展。

在本书写作过程中，中国科学院东北地理与农业生态研究所的张柏研究员、刘殿伟研究员、王宗明研究员、宋开山副研究员等对本书的编写工作提供了许多帮助和指导。张新乐、胡言亮、汤娜、于晓静做了大量文字整理工作。在此一并表示诚挚的感谢！

本书由国家自然科学基金项目（40801167）、东北农业大学博士论丛、东北农业大学“黑土资源保护与可持续利用创新团队”（CXT003）联合资助。

本书是作者2003年开始研究生学习以来，从事7年土壤遥感研究的总结和归纳，期望能够为相关学科的发展献上绵薄之力，给从事相关研究的科学工作者以点滴帮助；更渴望得到专家学者与前辈们的指点。由于编者的水平有限，书中的缺点甚至错误在所难免，敬请指正！

作 者

2010年6月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 研究背景、目的及意义	1
第二节 国内外研究进展	4
第三节 现有研究存在的问题与发展趋势	20
第二章 研究区概况	24
第一节 松嫩平原概述	24
第二节 典型研究区概况	35
第三章 土壤遥感数据处理与研究方法	43
第一节 数据获取	43
第二节 数据处理与分析	54
第三节 研究内容、方法及技术路线	58
第四章 松嫩平原主要土壤反射光谱特征分析	61
第一节 土壤反射光谱特征描述	61
第二节 土壤反射光谱特征影响因素分析	66
第三节 黑土反射光谱曲线函数模拟	85
第五章 土壤理化参数定量遥感研究	96
第一节 土壤有机质含量高光谱模型	96
第二节 土壤含水量高光谱模型	111

第三节	土壤有机质与土壤水分综合预测	128
第四节	黑土有机质与含水量对土壤反射光谱特征 综合作用研究	133
第五节	土壤有机质含量遥感影像反演	140
第六章	基于反射光谱特征的土壤线研究	150
第一节	基于室内光谱反射率的土壤线影响 因素分析	150
第二节	基于 MODIS 影像的土壤线空间 变异规律研究	163
第七章	松嫩平原土壤遥感研究实例	171
第一节	基于地面光谱反射率的土壤分类研究	171
第二节	基于 RS 与 GIS 技术的黑龙江省黑土边界 提取	175
第三节	基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价	184
第四节	黑龙江省黑土区农田地温空间格局分析	193
第五节	不同深度含水量与黑土野外反射光谱 特征关系分析	207
参考文献		221

第三节	土壤有机质与土壤水分综合预测	128
第四节	黑土有机质与含水量对土壤反射光谱特征 综合作用研究	133
第五节	土壤有机质含量遥感影像反演	140
第六章	基于反射光谱特征的土壤线研究	150
第一节	基于室内光谱反射率的土壤线影响 因素分析	150
第二节	基于 MODIS 影像的土壤线空间 变异规律研究	163
第七章	松嫩平原土壤遥感研究实例	171
第一节	基于地面光谱反射率的土壤分类研究	171
第二节	基于 RS 与 GIS 技术的黑龙江省黑土边界 提取	175
第三节	基于反射光谱特征的土壤盐碱化评价	184
第四节	黑龙江省黑土区农田地温空间格局分析	193
第五节	不同深度含水量与黑土野外反射光谱 特征关系分析	207
参考文献		221

第一章 绪 论

第一节 研究背景、目的及意义

一、研究背景

(一) 农业生产与土壤退化问题要求土壤动态监测技术

松嫩平原黑土带土地资源丰富，黑土层较厚，肥力高，雨热同季，适宜农业生产。本区是我国著名的玉米和大豆生产区，粮食商品率高达 60% 以上，全国 10 个产粮大县有 8 个分布在本区（许显滨，2004）。快速准确掌握该地区的土壤信息，对农业生产与可持续发展有重要意义。此外，松嫩平原土壤侵蚀（风蚀、水蚀）、土壤盐渍化、土壤荒漠化、土壤重金属污染等土壤退化问题较严重（李取生，1998；郭观林等，2004；李晓军等，2005；林年丰等，2006），严重的土壤退化要求动态、实时、宏观、定量地对其进行监测，为保护土壤资源提供信息支持。

(二) 土壤属性具有时空异质性

土壤并非一个均质体，而是一个时空连续的变异体，具有高度的空间异质性（王政权，1999）。土壤理化参数的时空差异导致作物养分与生长状况的时空变异。传统的田间管理方式与施肥措施却没有考虑这种变异性，为追求最大产量，空间等量、最大量施肥。所以，我国化肥的当季利用率较低（汪仁等，2004）。当施入的氮肥等肥料超过作物需要量，多余部分将随水流失，导致水环境污染（如富营养化），既增加了农业生产成本又造成环境污染（Chen et al.，2000），而减少肥料的施入量可能又使作物减产并造成经济损失。为解决这一进退维谷的问题，需要准确

地评价土壤与作物养分含量及其时空变异规律。

(三) 陆地生态系统相关研究需要准确的土壤时空信息

研究陆地生态系统时,土壤属性是各种研究模型非常重要的输入量,因为土壤属性影响大量的生态过程,如蒸腾作用、光合作用、生物地球化学循环过程等(Palacios - Orueta, 1998)。因此,准确的土壤属性时空数据对于陆地生态系统相关研究具有重要意义。同时,陆地地表遥感、混合像元分解、植被定量遥感、遥感估产等遥感理论和应用研究需要准确的土壤背景信息。土壤背景对植被信息的遥感监测影响较大,而现有的植被指数很少考虑土壤背景的影响,难以实现植被遥感的定量化。

(四) 传统方法难以揭示土壤属性的时空异质性

尽管以上生产与研究需要土壤的时空信息,传统的土壤养分测定方法难以揭示土壤的时空异质性。一方面,传统方法主要基于土壤的实验室分析,这些方法普遍要求破坏土壤样本,并且需耗费大量的人力、物力和财力(Cambardella, 1992; Costa et al., 2001; Duru, 2002; Reeves et al., 2002);二是由于花费时间过长,测试结果不具有实时性;三是传统土壤参数测定与监测方法是基于点测量的方法,由于测点稀少、速度慢、范围有限(张金恒, 2003),无法揭示土壤的空间异质性规律,不能满足农业、水文、气象等部门以及相关研究对土壤时空变异状况的要求。

(五) 基于土壤反射光谱特性的高光谱遥感技术可以揭示土壤的时空异质性

土壤反射光谱特性是土壤的基本性质之一,是土壤理化参数的综合反映,土壤矿物、有机质、水分、土壤质地、粗糙度、表层结壳、秸秆残留物等均影响土壤的光谱反射率,基于土壤反射光谱特性的高光谱遥感技术可以揭示土壤的时空异质性(Martin et al., 2002; Fox et al., 2002; He et al., 2005)。

二、研究目的、意义

（一）改进土壤参数测定方法，揭示土壤时空变异规律，为精准农业及与土壤相关的研究服务

土壤的光谱特征是土壤理化参数的综合反映，土壤高光谱遥感利用土壤的反射光谱信息，可以实现土壤参数的快速测定；同时土壤光谱信息与遥感影像数据的结合应用，可以揭示土壤时空变异规律（Odlare et al., 2005），真正实现对土壤质量的动态监测，为精准农业和陆地生态系统相关研究提供支持。

（二）为合理利用土壤资源服务

传统的土壤监测方法，费时费力，从采样到结果输出的周期较长，难以对土壤进行实时、有效的监测。某些土壤属性如有机质和铁的含量与土壤侵蚀过程有紧密的联系，而且这些属性又适于遥感探测（Palacios - Orueta, 1998）；而重金属元素一般吸附于有机质、铁锰氧化物以及黏土矿物等具有明显光谱特征的主要土壤组分中，重金属与这些组分之间的相关关系可以用于土壤重金属污染监测（Kemper et al., 2002；Grzegorz et al., 2004；Wu et al., 2005；王璐等, 2007）。同时，土壤理化参数定量遥感的发展、土壤养分的遥感速测，将实现土壤性质空间变异性的宏观与微观评价，实现对土壤退化的定量监测与评价，为土壤肥力评价、平衡施肥、土地适宜性评价等提供信息，从而为合理利用土壤资源服务。

（三）为定量遥感提供准确的土壤背景信息

研究不同土壤的反射光谱特性是土壤遥感研究的一项基础工作，在土壤遥感波段的选择和图像解译上具有重要意义，为应用遥感信息进行土壤调查及理化性质的分析提供依据（尹殿奎等, 1998），并为高光谱影像的应用提供理论基础。同时，利用遥感手段确定土壤理化参数的空间分异特征，可以优化植被指数计算方法，提高植被指数监测植被生理参数的精度，提高遥感在各应

用领域的利用水平,提高遥感技术本身在定量化方面的进一步发展。

(四) 确定地域特色的土壤遥感模型

严格地讲,没有一个通用的遥感模型适用于地表的各种环境,遥感分析模型需要足够的区域参数,才能逼近地球表层的客观存在。不能生搬硬套国外的模型和公式,需要联系中国地理环境,建立体现地域差异和特色的遥感模型(陈述彭,1996)。不同类型土壤的光谱特征不同;不同研究区域,选取的反射光谱波段也不尽相同。尽管对于土壤有机质、土壤水分等属性的光谱反射率反演方法很多,但这些方法都具有一定的局限性,当用于不同区域或不同土壤类型时会出现较大的误差。

本研究分析松嫩平原主要土壤的反射光谱特征及可用于有机质、土壤水分等属性诊断的光谱波段和光谱指数,建立土壤理化参数与光谱指数间的函数关系,实现对土壤属性的遥感反演;基于土壤反射光谱特征进行土壤遥感分类与土壤线参数空间分布特征研究,计算与土壤线相关的植被指数;分析黑土区地表温度时空格局,为农业生产管理提供数据支持。研究成果将被用于土壤理化参数的快速测定,并为相关速测仪器的研制、各种专家施肥指导系统与变量施肥技术的实用化提供理论基础;提高植被、作物生理参数、长势监测与反演精度;为土壤碳库估算提供科学准确的方法;为精准农业、变量施肥、作物估产、土壤侵蚀防治、陆地生态系统相关研究提供基础数据支持、改进研究方法、推动定量遥感及相关领域的发展。

第二节 国内外研究进展

一、精准农业概述

精准农业是基于信息和知识管理复杂农业系统的集成技术体系(叶涛,2006)。这一技术体系思想应用于作物生产,可称之为

为“信息时代的现代农田精耕细作技术”（汪懋华，1999；刘爱民等，2000）。精准农业技术是 21 世纪农业的新模式，是农业发展的必然趋势。传统上在大片田地上平均灌溉、施用化肥和农药的做法，与农田内土壤水分、养分、病虫草害时空上明显的差异性不相匹配，既不能保证作物生产潜力的充分发挥，又导致过量施用造成的生产成本增长和农田水土污染等严重后果。精准农业通过定位的田间信息采集和调控技术，可确保在土壤水分、肥力、理化性状、苗情、病虫草害不同的每个农田小区，分别采取有针对性的定位、定量灌水、施肥、施药等措施，在产量增加的同时，减少农业用水、化肥和农药的浪费，将产生明显的经济和环境效益。在社会效益方面，精准农业的应用将引发传统农业经营技术思想和方法上的革命（汪懋华等，1998）。

精准农业的核心问题可叙述为信息获取、农田信息管理和分析、决策分析、决策的田间实施四大部分（赵春江等，2003）。其中农田基础信息（土壤理化性状、苗情、病虫草害）的获取和处理是实现精准农业的前提和基础。如果这个问题解决不好就很难真正的实施精准农业。传统土壤理化参数测试方法难以满足精准农业对土壤理化参数实时获取的要求，需要引入新技术。高光谱遥感技术在精准农业中也有很重要的应用，洪霞（2010）论述了高光谱在农作物遥感识别和分类、监测作物叶面积指数、生物量和叶绿素含量、监测作物养分及水分状况和农作物长势监测和估产等方面的应用。表明遥感技术将在精准农业实施过程中起到重要作用。

二、土壤遥感概述

遥感的物理基础是建立在电磁波理论上的，电磁波与物质间的相互作用会引起入射辐射在强度、方向、波长等方面的改变。高光谱遥感的物理基础就是准确地记录下电磁波与物质间的这种相互作用沿波长方向上的精细变化，它反映了不同地表物质与光

子间相互作用的差异,从而带有了丰富的地物信息,这种信息是由地物的宏观(形态)特性和微观(分子级)特性决定的。

不同遥感波段范围(可见光近红外波段、热红外、微波)均被应用于土壤遥感研究(Muller, 2000; Djepa, 2002; Quesney, 2000; Cashion et al., 2005; Zhai et al., 2006; Vivoni et al., 2008),任何波谱范围都有它的优点和局限性;然而反射波谱(可见光近红外波段)是最可行的,因为太阳能量主要集中在可见光近红外波段(Lobell, 2002);不同的传感器在该光谱范围有大量可用的不同空间分辨率的影像(Muller, 2000),而且光谱分辨率更高;另外,地表各种特性(如植被覆盖与密度等)主要在短波范围内研究,且这些特性受土壤背景的影响较大(Pinty, 1998)。因此,为了利用卫星传感器探测土壤及各种地表特性的差异,发展运用可见光近红外波段土壤反射光谱数据分析土壤属性具有重要意义(Daniel, 2004)。

三、土壤光谱分析与遥感反演

已有研究指出,影响土壤反射率的因子主要有:矿物组成、土壤水分、有机质、土壤质地、可溶性盐等(Palacios - Orueta, 1998; Singh, 2004);利用土壤反射光谱可以获取有机质、土壤水分、氧化铁含量、土壤质地、主导黏土矿物类型、氮、钾等多种有用信息(Malley et al., 1999; 徐彬彬, 2000; Chang et al., 2001; Dunn et al., 2002; Cozzolino et al., 2003; Maleki et al., 2006; He et al., 2007)。土壤光谱有6个光谱区域有明显的吸收特征和异变性(400~560、1000、1400、1900、2200、2300nm),509.3~558.7nm有一弯曲;大多数土样在421.4nm和440.8nm波段有弯曲,400nm和440nm也是关键波段(Palacios - Orueta, 1998)。Huete等(1991)发现540nm是土壤光谱的重要特征点。Palacios - Oruete(1998)发现实验室测定的野外土样光谱反射率和高光谱影像测量的土壤反射率相关

性高。土壤光谱的实验室控制测量对于描述土壤光谱特征、土壤分类、发生学和调查具有重要意义(浦瑞良等, 2000)。不同土壤理化参数的反射光谱响应特征不同, 已有大量研究对不同土壤理化参数的光谱特征做了大量分析, 并在光谱分析的基础上, 实现了土壤属性的遥感监测(Krishnan, 1980; Ben-Dor et al., 1990; Martin et al., 2002)。

(一) 土壤有机质

土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)是土壤的重要组成部分, 虽然含量很少, 但对土壤形成过程以及土壤的物理、化学、生物学性质影响很大; 是植物和微生物生命活动所必需的养分和能量的源泉(朱鹤健, 1992; Loveland et al., 2003)。SOM含量的多少被作为衡量土壤肥力高低的最重要的指标。因此探测土壤的有机质含量是了解土壤肥力的重要途径, 而SOM光谱特性的研究为利用光谱技术快速准确获取现代农业生产和管理所需的SOM相关信息提供了条件。

土壤有机质与土壤有机碳存在定量关系(前者是后者的1.724倍), 土壤有机质的遥感监测将有助于提高土壤有机碳库储量的估算。作为陆地生态系统中最大的碳库(Post et al., 1990; Lal, 2002), 土壤有机碳储量的研究受到广泛地关注(周涛, 2007)。受土壤有机碳分布的空间异质性影响, 当前估算的土壤有机碳储量的不确定性依然是最大的(Palmer, 2002)。而土壤光谱反射率可以用于揭示土壤属性的时空变异特征, 已被用于测定土壤有机碳含量(Dalal et al., 1986; Morra et al., 1991; Reeves III et al., 2001; Moro'n et al., 2002; Fystro et al., 2002; Cozzolino et al., 2006; Zimmermann et al., 2007)。

土壤有机质在可见光和近红外波段有独特的光谱特性(Henderson, 1992)。由于SOM成分复杂, 功能团多样, 因而其在近红外波段范围的光谱特性与其所含的功能团对应解释的难

度很大,一般体现为降低整个光谱曲线的反射率 (Al - Abbas, 1972; Chang, 2002); SOM 的成分不同土壤光谱特性也不一样 (Demattêet al., 1999; 牛灵安, 2001)。徐彬彬等 (1991) 对比去除有机质前后的光谱反射率发现: 去除有机质后, 土壤反射率明显增加; 土壤有机质的光谱影响范围主要是在可见光和近红外波段, 而影响最大的是在 600~800nm 之间。

土壤光谱反射率与 SOM 含量呈显著负相关, SOM 含量可以从土壤反射光谱中得到一定程度的反映 (Ben - dor et al., 1995; Mccarty, 2002)。研究表明, SOM 含量与可见光近红外波段光谱反射率呈线性或曲线关系 (Baumgardner, 1970; Shonk, 1991; Henderson, 1992); 但 SOM 含量不同, 其与光谱反射率的关系也不同: 当 $SOM > 6.03\%$ 时, 反射率与其含量为非线性关系, 需要对大于 6.03% 的有机质含量进行对数转换 (Udelhoven, 2003)。

Krishnan 等 (1980) 利用多元线性逐步回归和迭代方法, 通过对四种不同类型土壤的研究, 发现在近红外区域 (800~2 400nm) 没有因有机质引起的吸收峰, 用可见光波段预测 SOM 含量优于近红外波段, 并给出 623.6nm、564.4nm 两个最佳波段的反射值预测土壤有机质含量的回归模型。Galvao 等 (1998) 通过室内研究证实了土壤反射光谱在 550~700nm 处的吸收峰, 主要是由土壤有机质引起的, 并用 AVIRIS 图像高光谱资料分析了有机质与土壤反射光谱的关系, 二者结果一致。Kooistra 等 (2001) 基于土壤光谱反射率、利用偏最小二乘回归法估算土壤中有有机质和黏土矿物的含量以及与有机质、黏土矿物相关性很强的金属元素 (镉、锌) 的含量, 发现 700nm、1 050 nm、1 400nm、1 850nm、2 150nm、2 280nm、2 400nm 和 2 470nm 附近的反射光谱与这几种土壤组分的含量有密切关系。

由于 SOM 与土壤光谱反射率存在定量关系, 大量研究对 SOM 进行了遥感影像的反演, 影像数据主要以多光谱影像为主,