



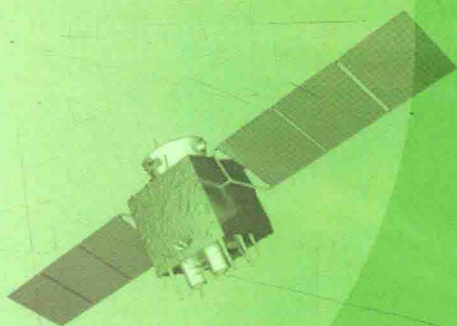
测绘地理信息科技出版资金资助

CEHUI DILI XINXI KEJI CHUBAN ZIJIN ZIZHU

Methods on Land Surface Soil Moisture Retrieval Based on
Intergrating Active and Passive Remote Sensing Data

余凡 翟亮 张承明 著

主被动遥感 协同反演 地表土壤水分方法



测绘出版社

测绘地理信息科技出版资金资助

主被动遥感协同反演地表土壤水分方法

Methods on Land Surface Soil Moisture Retrieval Based on
Intergrating Active and Passive Remote Sensing Data

余凡 翟亮 张承明 著

测绘出版社

• 北京 •

© 余凡 2016

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内容简介

光学遥感与 SAR 遥感是两种不同的土壤水分获取手段,各有优势与不足。若将两者结合起来进行土壤水分的协同反演,就能取长补短,提高土壤水分反演精度,这对于土壤水分的定量遥感反演研究是极具意义的。本书在讨论现有光学与 SAR 各自反演地表土壤水分机理的基础上,还对光学遥感与 SAR 协同遥感土壤水分的方法进行了较深入的研究与探索。

本书可以作为测绘、地理信息、遥感与对地观测、地理国情监测等相关领域的研究生、科研人员、教师和高年级本科生的研究与参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

主被动遥感协同反演地表土壤水分方法 / 余凡, 翟亮, 张承明著. — 北京: 测绘出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-5030-3872-3

I. ①主… II. ①余… ②翟… ③张… III. ①遥感技术—应用—土壤水—反演—方法研究 IV. ①S152.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 291253 号

责任编辑	田 力	执行编辑	侯杨杨		
封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍	责任印制	陈 超
出版发行	测绘出版社	电 话	010—83543956(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045		010—68531363(编辑部)		
电子邮箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司	经 销	新华书店		
成品规格	169mm×239mm				
印 张	10.5	字 数	212 千字		
版 次	2016 年 7 月第 1 版	印 次	2016 年 7 月第 1 次印刷		
印 数	001—800	定 价	48.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-3872-3

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

地表土壤水分是决定陆地与大气能量交换的关键因子,是全球水循环的重要组成部分,直接控制地表与大气之间水、热量的输送和平衡。土壤水分一直也是水文、气象、农业、生态、气候变化等研究的关键参数,它在地球科学研究中具有重要意义。土壤水分是主导农作物长势及产量的一个重要因素,也是干旱监测的一个重要指标。土壤供水不足会导致植被正常生长发育受阻,影响作物长势和产量,甚至作物由于干旱而绝收。从全球范围看,旱灾已经成为影响面最广、造成经济损失最大的因素,被认为是世界上最严重的自然灾害类型,也成为制约我国农业生产和经济发展的主要因素。土壤干旱缺水也将引起土壤沙化、盐渍化、植被退化、水土流失等生态环境恶化现象。因此,探讨一套客观、动态、实时的土壤水分监测与反演方法,具有重要的科学意义和现实意义。

传统土壤水分监测方法很难进行大范围、高效率 and 实时常规测量,而遥感技术由于其自身特点及潜力,已在地表土壤水分研究中蓬勃开展。目前,遥感技术已经进入一个能动态、快速、高效地提供多源对地观测数据的新阶段。多源遥感数据的协同观测能一定程度上克服各种单一遥感手段获取的图像数据在几何、光谱、时间和空间分辨率的局限性,对观测目标有一个更加全面、清晰、准确的理解与认识。

光学遥感与雷达遥感是两种不同的土壤水分获取手段,能从不同的角度反映地表的土壤水分情况。若能将两者结合起来协同反演土壤水分,取长补短,提高土壤水分反演精度,对于土壤水分的定量遥感反演研究是极具意义的。

本书共分为 10 章。第 1 章介绍了本项研究的目的、意义及遥感反演土壤水分相关研究现状和进展;第 2 章介绍了现有的光学遥感反演土壤水分方法;第 3 章对微波反演土壤水分的基本原理和方法进行了介绍;第 4 章介绍了两个裸露地表的微波散射模型,即双尺度微波散射模型和双极化反演土壤水分模型;第 5 章介绍了大区域地表土壤水分反演的云参数法,并利用 FY-2C 数据对全国的干旱状况进行了反演;第 6 章主要对实验和研究区进行说明,然后对本文遥感与地面观测数据及其预处理方法进行了简单介绍;第 7 章介绍了一种马尔可夫随机场和贝叶斯理论相结合的 optics 与 SAR 遥感数据协同分类方法;第 8 章主要探讨了一种先融合后分类的土壤水分提取方法,首先将 optics 和微波数据采取一定的算法融合,然后以融合的结果作为贝叶斯网络的输入,通过分类提取土壤水分信息;第 9 章介绍了利用 optics、雷达遥感模型耦合,协同反演土壤水分的方法,通过 optics 和微波模型的耦合,发展了一种反演植被覆盖区地表土壤水分的半经验模型,并对植被冠层重叠造成的

雷达阴影效应进行了验证;第 10 章从优化算法的角度,通过遗传神经网络模型,将光学和微波这两种表达土壤水分机理完全不同的遥感数据协同起来反演土壤水分,模型不仅能实现面上区域内土壤水分的反演,同时具有较高的精度。

本书是笔者近十余年来在光学遥感与雷达遥感协同反演地表土壤水分领域的研究工作的阶段总结,主要成果先后在国内外学术刊物上发表,也在部分国家项目中得到有意义的应用。本书的完成得到国家“973”项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”(2007CB714407)、“复杂地表遥感信息动态分析与建模”(2013CB733400),国家自然科学基金项目“光学与 SAR 遥感协同反演地表土壤水分方法研究”(41101321)、“全极化雷达反演地表土壤水分方法研究”(41471299),以及国家基础测绘项目的资助,在此表示衷心的感谢。

感谢中国科学院大学赵英时教授和宋小宁教授、国家测绘地理信息局燕琴研究员、中国测绘科学研究院李海涛研究员、广州地理研究所周霞研究员等,在本书的完成过程中所给予的诚恳建议和帮助。

由于笔者水平有限,书中错漏不足之处敬请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 本书的研究背景与意义	1
§ 1.2 遥感反演地表参数的主要过程	2
§ 1.3 遥感反演土壤水分研究进展	3
第 2 章 光学遥感反演地表土壤水分的方法	12
§ 2.1 热惯量法	12
§ 2.2 植被指数法	14
§ 2.3 温度指数法	17
§ 2.4 蒸散与作物缺水指数	17
§ 2.5 植被-温度空间	18
§ 2.6 高光谱法	22
§ 2.7 其他方法	22
第 3 章 SAR 遥感反演地表土壤水分的方法研究	24
§ 3.1 电磁学基础理论	24
§ 3.2 介电常数	25
§ 3.3 粗糙度	29
§ 3.4 裸露地表微波遥感反演地表土壤水分模型	31
§ 3.5 植被覆盖地表微波遥感反演土壤水分模型	35
§ 3.6 被动微波遥感反演土壤水分	38
第 4 章 裸露地表微波反演土壤水分方法的研究	40
§ 4.1 随机粗糙地表的双尺度微波散射模型研究	40
§ 4.2 SAR 反演裸露地表土壤水分的方法	50
第 5 章 基于云参数的大区域地表土壤水分反演方法研究	61
§ 5.1 中国气象卫星系列	62
§ 5.2 FY-2C 数据预处理研究	67
§ 5.3 模型简介	69
§ 5.4 模型中各参数的处理及确定	71
§ 5.5 大空间尺度下遥感旱情监测模型的改进	73
§ 5.6 实验与验证	75
§ 5.7 本章小结	80

第 6 章 地表土壤水分定量遥感实验设计及数据获取	82
§ 6.1 黑河定量遥感实验	82
§ 6.2 研究区概况	83
§ 6.3 数据采集及预处理	84
§ 6.4 地表土壤水分的观测方法	93
§ 6.5 地表粗糙度的观测	96
第 7 章 基于贝叶斯理论和马尔可夫随机场的主被动遥感数据协同分类 算法研究	99
§ 7.1 入射角归一化方法研究	100
§ 7.2 基于贝叶斯理论和 MRF 的分类器设计	104
§ 7.3 实 验	106
§ 7.4 结 论	110
第 8 章 基于数据融合的主被动遥感协同反演地表土壤水分	112
§ 8.1 光学遥感与雷达数据的融合	112
§ 8.2 贝叶斯网络分类	119
§ 8.3 贝叶斯分类提取土壤水分信息	121
§ 8.4 结果验证	122
§ 8.5 本章小结	123
第 9 章 基于模型耦合的主被动遥感协同反演地表土壤水分	125
§ 9.1 模型研究	126
§ 9.2 待定参数敏感性分析	131
§ 9.3 植被覆盖地表土壤水分反演实验	132
§ 9.4 结果验证	135
§ 9.5 本章小结	136
第 10 章 基于优化算法的主被动遥感协同反演地表土壤水分	137
§ 10.1 遗传-BP 神经网络算法研究	137
§ 10.2 优化算法的光学雷达遥感土壤水分反演实验	140
§ 10.3 结果验证	141
§ 10.4 本章小结	145
参考文献	146
附 录	157

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	1
§ 1.1	Background	1
§ 1.2	Main Process of Retrieval of Land Surface Parameters by Remote Sensing	2
§ 1.3	Current Situation of Soil Moisture Retrieval by Remote Sensing	3
Chapter 2	Soil Moisture Retrieval by Optical Remote Sensing	12
§ 2.1	Thermal Inertia Methods	12
§ 2.2	Vegetation Index	14
§ 2.3	Temperature Index	17
§ 2.4	Evapotranspiration and Crop Water Stress Index	17
§ 2.5	Vegetation-Temperature Space	18
§ 2.6	Hyperspectral Algorithms	22
§ 2.7	Other Algorithms	22
Chapter 3	Soil Moisture Retrieval by SAR Remote Sensing	24
§ 3.1	Fundamentals of Electromagnetic Theory	24
§ 3.2	Permittivity	25
§ 3.3	Roughness Parameters	29
§ 3.4	Soil Moisture Retrieval on Bare Surface	31
§ 3.5	Soil Moisture Retrieval on Vegetation Cover Area	35
§ 3.6	Soil Moisture Retrieval by Passive Microwave Remote Sensing	38
Chapter 4	Soil Moisture Retrieval by Microwave Remote Sensing on Bare Surface	40
§ 4.1	Microwave Two-Scale Scattering Model for Conducting Random Rough Surface	40
§ 4.2	Soil Moisture Retrieval by SAR on Bare Surface	50
Chapter 5	Soil Moisture Retrieval on Large Area Surface Based on Cloud Parameters	61
§ 5.1	Chinese Meteorological Satellite Series	62
§ 5.2	Data Preprocessing for FY-2C	67
§ 5.3	Drought Monitoring Model Introduction	69
§ 5.4	Parameters Processing of Drought Monitoring Model	71
§ 5.5	Model Improvement for Large Spatial Scales	73
§ 5.6	Experiment and Verification	75
§ 5.7	Chapter Summary	80

Chapter 6	Soil Moisture Experimental Design and Data Acquisition	82
§ 6.1	Quantitative Remote Sensing Experiment in Heihe River	82
§ 6.2	Study Area Introduction	83
§ 6.3	Data Collection and Pretreatment	84
§ 6.4	Observation Methods for Surface Soil Moisture	93
§ 6.5	Observation Methods for Surface Roughness	96
Chapter 7	Classification of Active Microwave and Passive Optical Data Based on Bayesian Theory and MRF	99
§ 7.1	Normalization of Incidence Angle	100
§ 7.2	Classifier Design Based on Bayesian Theory and MRF	104
§ 7.3	Experiment	106
§ 7.4	Chapter Summary	110
Chapter 8	Soil Moisture Information Extraction Based on Integration of Active and Passive Remote Sensing Data	112
§ 8.1	Fusion of Optical and Radar Data	112
§ 8.2	Classification by Bayesian Network	119
§ 8.3	Soil Moisture Information Extraction by Bayesian Network	121
§ 8.4	Verification	122
§ 8.5	Chapter Summary	123
Chapter 9	Soil Moisture Retrieval by Integrated Model in Vegetated Area	125
§ 9.1	Model Introduction	126
§ 9.2	Sensitivity Analysis for Undetermined Parameters	131
§ 9.3	Experiment of Soil Moisture Retrieval in Vegetated Area	132
§ 9.4	Verification	135
§ 9.5	Chapter Summary	136
Chapter 10	Soil Moisture Retrieval Based on Optimization Algorithm Using Active and Passive Remote Sensing Data	137
§ 10.1	Research on Genetic-BP Neural Networks Algorithm	137
§ 10.2	Experiment for Soil Moisture Retrieval by Optimization Algorithm	140
§ 10.3	Verification	141
§ 10.4	Chapter Summary	145
References		146
Appendix		157

第1章 绪 论

§ 1.1 本书的研究背景与意义

遥感,即遥远的感知,就是通过在接触物体的情况下,远距离地对目标进行量测、分析、判定,来获取有关地物目标、地区、现象的科学和技术。遥感技术自20世纪70年代开始发展以来,各种类型的高、中、低空、航天、卫星等遥感平台不断涌现,遥感数据的空间分辨率、光谱分辨率、时间分辨率不断提高,高光谱技术也在慢慢兴起。随着遥感软硬件的不断发展,遥感技术的应用也越来越广泛,在许多学科和行业有着重要的合作和应用,产生了很多交叉学科及应用方向,为气象、林业等学科提供了新的处理方法和理论。

随着遥感理论的不断发展,目前不仅是对观测目标的外表、性质、特点、发展变化等属性的定性分析,而是对这些属性展开定量的研究,即定量遥感,是指从对地观测电磁波信号中定量提取地表参数的技术和方法研究,其区别于仅依靠经验判读的定性识别地物的方法。它有两重含义:遥感信息在电磁波的不同波段内能给出地表物质的定量物理量和准确的空间位置;从这些定量的遥感信息中,通过实验或物理模型将遥感信息与地学参量联系起来,定量地反演或推算某些地学或生物学信息。

由于遥感观测独有的大区域、连续观测优势,地表参数的遥感反演越来越受重视,其中土壤水分遥感也蓬勃兴起。水是地球上最重要的资源,是人类生命存活的基本元素。全球水资源约有97.2%是海水,2.15%以冰的形式存在,另外0.63%为地下水,而存储在土壤空隙中的水分仅占0.02%(Strahler, 1996)。尽管土壤水分在全球水资源中所占的比例很小,但它是决定陆地-大气能量交换的关键因子,是全球水循环的重要组成部分,直接控制地表与大气之间的水和热量的输送与平衡。土壤水分也一直是水文、气象、农业、生态、气候变化等研究的关键参数,它在地球科学研究中具有重要意义(李纪人等,2003)。

土壤水分是主导农作物长势及产量的一个重要因素,也是干旱监测的一个重要指标。土壤供水不足会导致植被正常生长发育受阻,影响作物长势和产量,甚至作物由于干旱而绝收。从全球范围看,旱灾已经成为影响面最广、造成经济损失最大、被认为是世界上最严重的自然灾害类型,也成为制约我国农业生产和经济发展的主要因素。土壤干旱缺水也将引起土壤沙化、盐渍化、植被退化、水土流失等生

态环境恶化现象。因此,探讨一套客观、动态、实时的土壤水分监测与反演方法,具有重要的科学意义和现实意义。

传统土壤水分监测方法很难大范围、高效率、实时地进行常规测量。而遥感技术由于其自身特点及潜力,已在地表土壤水分研究中蓬勃发展。目前,遥感技术已经进入一个能动态、快速、高效地提供多源对地观测数据的新阶段。多源遥感数据的协同观测能一定程度上克服各种单一遥感手段获取的图像数据在几何、光谱、时间和空间分辨率的局限性,对观测目标有一个更加全面、清晰、准确的理解与认识。

光学遥感与雷达遥感是两种不同的土壤水分获取手段,能从不同的角度反映地表的土壤水分情况。若将两者结合起来协同反演土壤水分,就能取长补短,提高土壤水分反演精度,这对于土壤水分的定量遥感反演研究是极具意义的。

针对我国西部地区日趋严重的干旱缺水问题,综合考虑光学和雷达影像数据在土壤水分表达上的各自优势,在研究光学和雷达模型各自单独反演地表土壤水分算法的基础上,采取“数据融合”、“模型耦合”和“优化算法”三种形式对光学与雷达协同反演土壤水分的算法展开研究,以提高土壤水分反演的精度。

该研究是定量遥感反演土壤水分前沿的探索性研究,对于多源遥感协同反演其他地表参数(如地表温度、植被参数、地表蒸散发等)的算法研究也具有一定的启发和借鉴意义,有利于促进定量遥感反演应用研究的不断深入,以及西部干旱-半干旱区的环境监测,具有重要的科学和现实意义。

§ 1.2 遥感反演地表参数的主要过程

遥感主要是借助于电磁波敏感仪器,在不接触探测目标的情况下,记录目标物对电磁波的辐射、反射、散射等信息,并通过分析,揭示目标物的特征、本质及其变化。对于陆地地表参数的遥感反演,一般有遥感数据获取、数据处理分析、遥感反演建模、真实性检验等4个环节,这些环节组成了遥感反演地表参数的过程。具体说明如下:

(1)遥感数据获取。遥感是通过电磁波来感知物体,其中被动遥感主要利用太阳的辐射能量,通过地物的反射或自身发射的电磁波,抵达传感器入口。对于卫星等高空传感器平台获取的影像,需要考虑大气的影晌。大气中的微粒(如大气分子、气溶胶等)对电磁波有散射和吸收的作用,会使能量衰减。这种衰减主要与电磁波的波长有关,某些波长的散射会比较强,如蓝光。大气的这种散射和吸收作用会使某些波长甚至无法到达地面,只有某些波段范围内的电磁波才能到达地面被遥感所利用。这些大气吸收作用弱、透过率高的波段称为大气窗口。因此,遥感传感器的波段都设置在大气窗口范围内,以减弱大气的影晌。

(2)遥感数据的处理分析。主要是针对遥感数据在获取中存在的误差和丢失

信息进行处理,如影像中的条带、噪声等。同时,大气校正是遥感数据处理中可能需要考虑的一个步骤,以消除遥感影像中由大气散射引起的辐射误差。由于位置和地形数据在遥感地表参数的反演和验证中很重要,因此需要对遥感数据进行高精度的几何校正。在分析数据时,可能需要一些辅助数据的帮助,这些数据可能是野外实验站点采集的实测参数,也可能是各类专题数据,如土壤、土地利用、水文、地貌、地理区划等数据。

(3)遥感反演建模。遥感反演建模主要是对目标物的遥感反演过程进行建模,从抽取遥感专题信息的应用需要出发,对遥感信息形成过程进行模拟(统计、抽象或简化),最后用文字、数学公式或者其他符号系统地表达出来。定量遥感模型主要分为三类:物理模型、经验模型、半经验模型。物理模型是建立在物理学原理的基础上,模型中参数具有明确的物理意义,该类模型主要是对物理过程的一个精确的数学描述。物理模型需要的参数很多且方程非常复杂,实用性也较差。如遥感中较常见的辐射传输模型,就是建立在辐射传输的理论上,较完整地描述了电磁波大气传输的过程和与地物发生相互作用的过程,包括大气、地物的多次散射、吸收、透射和反射的作用过程。经验模型又叫统计模型,建模的思路是对一系列观测数据做经验性的统计描述或者进行相关分析,建立遥感参数与地面观测数据之间的回归方程。上述模型的优点是简单有效、实用性强、参数较少。弱点是理论基础不完善、缺乏对整个建模过程的物理机理描述、代表性差、受区域实用性影响强烈。半经验模型是物理模型和经验模型的混合,既考虑了模型的物理含义,又对某些比较复杂的物理过程进行经验的描述,如地表二向反射模型等半经验模型。

(4)真实性检验。真实性检验是指通过现场观测来检验遥感数据、遥感产品和遥感算法真实性的技术。真实性检验作为地表参数反演的一个关键环节,目前越来越受重视。在定量遥感反演地表参数过程中,遥感产品会产生一些不确定性,主要原因包括:①遥感观测数据只是地表目标表面的一个光谱反映,观测目标与遥感观测数据之间的关系是隐含的,这种关系带来了不确定性;②遥感观测数据只能反映当前时空条件下的真值,当转换到其他时空单元时,会存在较大的误差,如尺度效应的问题;③遥感反演模型的不确定性。任何模型只是对真实场景的数字化模拟,并不能完全代表真实场景的发生过程,必然会产生误差;④遥感的“病态反演”。遥感参数的反演变量总是多于观测量,越精确的模拟,需要输入的参数越多,因此需要发展新的反演策略,减小“病态反演”产生的不确定性。

§ 1.3 遥感反演土壤水分研究进展

区域大范围土壤水分的监测一直是土壤水分研究的重点和难题。传统的土壤水分监测方法是基于测站的点监测,只能获得少量点上的数据,再加上人力、物力、

财力等多种因素的制约,难以迅速而及时地获得大面积土壤水分,而且点上的数据并不能反映土壤水分在空间平面上的变化情况。而遥感监测方法则是基于面上的监测,具有大范围、实时、高效、费用低廉等优点。当今卫星遥感技术的迅速发展,使得快速、及时地动态监测与评估区域性的土壤水分状况成为可能。遥感技术是进行真正意义上定量化土壤水分监测最有潜力的方法。从传感器上划分,目前土壤水分的监测方法可以分为光学遥感和微波遥感两大类,国内外专家学者对其展开了大量的研究。

1.3.1 光学遥感反演土壤水分研究现状

光学遥感是目前发展最为成熟、各类模型探讨最为充分的一种遥感手段,能非常直观地获取地表大量光谱信息。在地表土壤水分信息提取时,虽然土壤水分含量的变化能影响地表土壤反射率的变化,但是这种变化很难定量描述,同时受影响的因素也较多,因此不能直接从地表土壤的反射光谱中提取土壤水分。人们研究发现,土壤水分的变化能较明显地影响地表的植被长势、温度变化、蒸散发量等。而植被长势、温度变化、蒸散发量等参数能通过光学遥感较精确地获取,于是人们通过地物反射辐射特征变化来模拟地表覆盖类型、地表温度、土壤热惯量及地表蒸散发与土壤含水量之间的经验关系(各种植被指数模型、温度指数模型、热惯量模型、蒸散发模型等),从而实现土壤水分的反演。目前研究方法主要有三种。

1. 基于热红外波段获取地表温度日变化幅度和热模型结合估测土壤湿度

20 世纪 70 年代初,Waston 等(1971)最早提出了一个利用地表温度日较差来推算热惯量的简单模型,后来 Pohn 等(1974)用气象卫星数据制作了热惯量的等值线图。Idso 等(1975)通过对裸露土壤表层土壤水分与温度日变幅的相关性研究,提出基于热惯量的能力平衡方程估算土壤水分的方法。Rosema 等(1977)更进一步地提出了计算热惯量和每日蒸发的模型。1978 年热容量制图卫星(HCMM)发射成功,随后具有较高分辨率的 TIROSS、NOAA 系列气象卫星相继投入使用,推动了土壤水分遥感监测方法的研究。Price(1977,1982,1985)通过系统的研究,阐述了热惯量的遥感成像原理,提出了表观热惯量的概念: $ATI = (1/A)/\Delta T$,其中 ΔT 为昼夜最高温度与最低温度之差,从而使采用卫星提供的热红外辐射温度差计算热惯量并估算出土壤水分成为可能。England 等(1992)提出了辐亮度热惯量(radio brightness thermal inertia,RTI),并认为 P_{RTI} 对土壤水分的敏感性要好于表观热惯量 P_{ATI} 。

国内利用热红外技术监测土壤水分始于 20 世纪 80 年代,主要是在国外模型的基础上做了一些应用研究。张向前等(1986)对经典的热传导方程给予一个简单的温度周期函数,为边界值求解热惯量,并用航空摄影数据制作了国内第一张热惯量图。田国良等(1990)利用 NOAA-AVHRR 数据,分别使用表观热惯量及蒸散

与农作物缺水指数法分析了土壤水分。马蔼乃等(1990)用 NOAA-AVHRR 数据且根据表观热惯量推导出真实热惯量,并利用与土壤含水量的关系计算出裸土的土壤含水量,其使用的是复合的指数模型。张仁华(1991)在热惯量模式的改进方面提出了一个现实克服显热、潜热输送干扰、适用于裸地的热惯量模式,提高了表观热惯量估算的精度。李杏朝(1996)和陈怀亮(1998)在地理信息系统支持下利用表观热惯量模型对不同类型的地理样本或不同质地的土壤进行了大量的实验,消除了土壤质地的影响,提高了监测精度。余涛等(1997)在 Price 工作的基础上通过改进求解土壤表层热惯量的方法,并考虑地表显热和潜热因子,直接从遥感图像上得到真实热惯量,在实验的基础上确定相关参量间的关系,从而实现反演监测土壤水分含量分布的目的。张可慧等(2002)构造了不同深度土壤含水量和 NOAA-AVHRR 数据的不同模型,并对精度进行了比较分析,建立了适合河北广大地区的土壤水分遥感模型。刘振华等(2006)考虑植被因素的影响,将热惯量模型的应用从裸土扩展到植被覆盖区,在植被覆盖区域使用双层模型中的土壤能量平衡方程,同时在热传导的边界条件中引入显热通量和潜热通量,通过利用一日中最大地表温度计算热惯量。

2. 基于用可见光和近红外遥感资料进行土壤水分监测

遥感的可见光和近红外波段能精确地提取地表植被指数,此类方法都是基于各种植被指数发展而来。而 NDVI 是应用最广的植被指数,在干旱监测和制图中具有优越性。Jakson 等(1983)使用 AVHRR 建立地表土壤湿度与 NDVI 之间的线性关系,来监测土壤水分,发现只有水分胁迫验证阻碍作物生长时才能引起植被指数的明显变化,此外 NDVI 也受到定标和仪器特性、云和云影、大气、双向反射和土壤背景等因素的影响。Prout 等(1984)用 NOAA-AVHRR 数据的 NDVI 与气象资料,预报加拿大东部地区的农田干旱,准确地预报了 1985 年的干旱对农业严重的影响。Tucker(1989)分别用 SMMR 数据与 AVHRR 数据反演土壤水分,并分析比较了两者反演土壤水分的优劣。20 世纪 90 年代初,Kogan(1990)提出了 VCI,依据植被的长势对干旱进行监测。

国内学者在此方面做了大量的研究,并有不少开创性的工作。为克服直接用 NDVI 监测干旱带来的较大误差,陈维英等(1994)通过多年遥感资料的积累,计算出常年旬植被指数与当年旬植被指数的差异,从而判断当年植被长势和土壤供水状况。Lei 等(2003)用 NDVI 与气象干旱指数 SPI(标准降水指数)建立干旱监测模型,得到区域干旱状况分布图,并认为其与当地的降水分布是一致的。詹志明等(2006)通过分析植被在红光(Red)和近红外(Nir)波段的光谱信息,提出一种垂直植被指数(perpendicular drought index, PDI),通过构建 Red-Nir 空间来反演土壤水分。Abduwasit 等(2007)使用该方法对北京顺义地区进行了土壤水分监测,取得非常好的效果。相对于传统植被指数方法,PDI 对地表覆盖类型、水热组合及气

候的动态变化都比较敏感,物理意义明确,没有传统植被指数监测干旱中的滞后问题。

3. 综合利用可见光、近红外和热红外资料进行土壤水分监测

在植被覆盖条件下,利用 NDVI 作为水分胁迫指标表现出一定的滞后性。因此结合植被指数和陆面温度的复合信息监测区域旱情更显合理。Nemani 等(1989)在研究植被的蒸散时,首次将温度和植被指数 NDVI 结合起来,研究它们与植物潜在蒸散量之间的关系。Nemani 在 1984 年利用 VI-Ts 研究蒸散以来,这方面的理论和应用研究发展迅速。Goetz 等(1997)认为温度作为水分胁迫指标有更高的时效性,在干旱方面更具优势。Carlson 等(1990)利用航空数据,根据 Ts-NDVI 的关系估测作物冠层和裸土温度,并利用边界层模型估测土壤含水量。Price(1990)则利用 NOAA-AVHRR 数据通过模拟地表温度与 NDVI 的关系,估测区域蒸散。后来 Kogan(1995)在前人的研究基础上提出植被供水指数(vegetation supply water index, VSWI)模型,表达式如下

$$VSWI = B \cdot \frac{NDVI}{T_s} \quad (1.1)$$

式中, B 为图像增强系数, T_s 为地表温度。

当作物供水正常时,遥感得到的植被指数在一定生长期内保持在一定的范围,作物冠层温度也保持在一定范围;当作物供水不足时,作物生长会受到影响,从而导致植被指数降低。Mcvicar 等(1992)发现在干旱发生期间 VSWI 增加,以月为单位的 VSWI 年累计量与年降水量的倒数呈显著相关关系,并将其用于干旱监测和食物缺乏评估。Carlson 等(1994)在不依靠气象数据的情况下利用 VI-Ts 空间建立了 SVAT(soil-vegetation-atmosphere-transfer)模型,研究土壤-植被-大气之间的能力传递与转化关系,并有效估算了土壤水分含量。Sandholt 等(2002)利用简化的 Ts-NDVI 特征空间提出了温度植被干旱指数(temperature vegetation drought index, TVDI),该指数简化了 Ts-NDVI 三角形、梯形特征空间,仅使用遥感数据就可以进行大范围的土壤水分监测,不需要其他的辅助数据。

国内学者在此基础上也做了大量的研究。刘良云等(2002)利用 Ts 与 NDVI 关系进行地物分类,提取了植被覆盖和土壤湿度的信息。齐述华等(2003)利用 NOAA-AVHRR 数据通过建立 Ts-NDVI 特征空间研究全国干旱分布。王鹏新等(2001)在利用条件植被指数、条件温度指数和距平植被指数监测年度间相对干旱的基础上,提出了条件植被温度指数(vegetation temperature condition index, VTCI),考虑了某一区域内归一化植被指数的变化,又考虑了在归一化植被指数值相同条件下的地表温度变化。孙威等(2006)利用 NOAA-AVHRR 数据对山西关中平原地区进行了干旱监测,并利用观测的降水量资料,对近 5 年来 5 月上旬的干旱监测结果进行验证,结果表明 VTCI 与降雨量密切相关,是一种近实时的干旱监

测方法。杨鹤松等(2007)应用 MODIS 多时段的数据计算 VTCI,利用 VTCI 对华北平原 2003—2006 年每年 5 月上旬的干旱进行了检测,并在时间和空间上分析了华北平原的干旱情况。

除了以上三种主要方法外,研究者也在别的方面做了很多探索,如基于蒸散模型的土壤水分监测方法(Nidson, 1990; Jackson et al, 1981)、归一化温度指数(Mcvicar et al, 1992)、云参数法等(刘良明, 2004; 余凡, 2007)。

光学遥感反演土壤水分方法较为成熟,但是由于光学遥感模型大多是经验模型,反演结果受地域、时间选择等人为因素影响较大,精度不够稳定。

1.3.2 微波遥感反演土壤水分研究现状

遥感应用于地球科学是 20 世纪 50—60 年代的事情。50 年代前期侧视机载雷达(SLSAR)的出现,大大提高了雷达遥感的分辨率;50 年代后期研制成功的合成孔径雷达(SAR)是雷达发展史上的一个里程碑,它解决了雷达设计中高分辨率要求与大天线、短波长之间的矛盾,使方向分辨率提高了几十到几百倍,出现了数量级的飞跃。1978 年 6 月美国发射的“海洋卫星一号”SAR,是第一个从空间对地球进行成像探测的合成孔径雷达系统,这个系统摄取了 1 亿多平方千米的海洋和陆地图像,显示了微波遥感的潜在经济价值,打开了从空间监视星球的遥感频谱新领域。进入 90 年代,世界范围内形成雷达遥感的高潮,欧洲空间局于 1991 年、1995 年相继发射了 ERS-1、ERS-2,并于 2002 年 3 月发射了 ENVISAT-ASAR, ASAR 传感器具有双重极化和多模式能力,可以提供 HH、VV、HV、VH 中任意两个极化组合数据,还可提供图像模式(image mode, IM)和可选极化模式(alternative polarization mode, APM),这些对于农作物研究具有重要意义。

1992 年,日本发射了 JERS-1,并于 2006 年发射了 ALOS 卫星,携带的 PALSAR 是一种非常先进的传感器,具有多模式、全极化的观测能力。目前,最为成功的商用遥感卫星 Radarsat-1 于 1995 年由加拿大空间局发射升空。后续卫星 Radarsat-2 于 2007 年发射升空,在超精细分辨率模式下,分辨率可以达到 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 。德国宇航研究院和欧洲阿斯特里姆公司联合研制的 TerraSar-X 于 2007 年 6 月发射升空,该卫星是目前分辨率最高的雷达卫星,达到了 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,可以生成空前高精度的数字高程模型。我国十分重视雷达遥感技术的发展。20 世纪 70 年代后期,中国科学院电子学研究所开始研制机载合成孔径雷达(SAR),经过十余年的不懈努力,在国家“六五”期间研制成功的单通道、单侧视方向 X 波段 SAR 的基础上,“七五”期间研制发展了我国第一部 L 波段成像雷达系统,这一成果不仅为我国提供了雷达的使用技术和操作经验,也为我国星载合成孔径雷达的发展奠定了重要的技术基础(郭华东, 2000)。

雷达遥感由于波长较长、能穿云透雾、不受天气影响,因此越来越受人们的重

视。不考虑系统参数的影响,雷达后向散射系数主要受到地表植被覆盖、地表粗糙度和土壤复介电常数的影响,可表达为

$$\sigma^{\circ} = f(Veg, Sr, \epsilon_m) \quad (1.2)$$

式中, σ° 是雷达后向散射系数, Veg 是植被参数, Sr 是地表粗糙度, ϵ_m 是土壤复介电常数。

对于体积含水量为 m_v 的土壤,在入射电磁波频率为 1~18 GHz 时,其复介电常数由下式给出

$$\epsilon_m^a = 1 + \frac{\rho_b}{\rho_s}(\epsilon_s^a - 1) + m_v^{\beta} \epsilon_{fw}^a - m_v \quad (1.3)$$

式中: a, β 是系数; m_v 是土壤体积含水量; ρ_b 是土壤体密度; ρ_s 是土壤中固态物质密度,对于不同类型土壤,其固态物质密度差别不大,一般取 $\rho_s = 2.66$; ϵ_s 是土壤固态物质介电常数,且 $\epsilon_s = (1.01 + 0.44\rho_s)^2 - 0.062 \approx 4.7$; ϵ_{fw} 是纯水的介电常数。由式(1.3)可知,土壤水分含量越大,地表的介电常数越大(通常状态下,水的介电常数为 80,而干燥土壤的只有 3 左右)。而雷达回波信号与地表的介电常数紧密相关,介电常数越大,则回波信号越强(赵英时等,2003)。因此可以从雷达信号中判断出土壤介电常数的大小,进而得到土壤水分含量。

由于雷达回波信号受地表覆盖类型影响较大,一般将裸地和植被覆盖地表分开进行研究。

1. 裸露地表雷达反演土壤水分研究

1) 经验-半经验模型

目前,大多数研究是建立地表散射计或者 SAR 实测数据(多波段、多极化、可变的入射角)与地表参数(介电常数、表面均方根高度、相关长度)间的相关关系,从而得到经验-半经验模型。这些模型具有一定的物理意义,同时又是建立在一定的统计规律上的,因此能获得较好的精度,如 Oh 模型(Oh et al, 1992)、Dubois 模型(Pascale et al, 1995)和 Shi 模型(Shi et al, 1997)等。其中,Shi 模型是建立在 L 波段不同极化组合后向散射系数与介电常数和地表粗糙度功率谱之间的相关关系之上的,实际应用效果较好。刘伟等(2005)简化了 Shi 模型,并利用美国艾奥瓦州的土壤水分试验(SMEX02)的多时相雷达数据估算了农作物覆盖地区的土壤水分,模型估算值与地表实测数据的相关系数在 0.85 以上。Zribi 等(2002)提出一种新的粗糙度参数 $Z_s = s^2/l$, 发现在固定入射角为 39° 和 23° 及土壤水分 m_v 为 0.35 时,后向散射系数与新的粗糙度参数存在非常好的对数关系,并建立了不同角度下的散射系数差与 Z_s 的经验关系,由此建立了反演土壤水分的经验模型,实现了多角度情况下土壤水分的反演。

2) 微波散射理论模型

微波散射理论模型是通过建立后向散射系数与地表物理和几何参数之间的数