



农作物生长动态监测 与定量评价

—— 陈怀亮 唐世浩 俄有浩 等◎著

国家公益性行业(气象)专项(GYHY200906022)

“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD32B02)

资助

农作物生长动态监测与定量评价

陈怀亮 唐世浩 俄有浩 等 著
邹春辉 延昊 景元书

内容简介

本书是国家公益性行业(气象)专项“主要农作物生长动态监测与定量评价技术研究”(GYHY200906022)和“十二五”国家科技支撑计划项目“重大农业气象灾害预测预警关键技术研究”(2011BAD32B02)的研究成果。主要针对我国小麦、水稻和玉米等主要农作物生长动态监测与定量评价等研究领域,重点阐述了农作物生长基础参数与环境参数遥感定量优化反演、作物生长精细化遥感动态监测评估、遥感与作物生长模型结合的作物生长动态区域化模拟、作物生长状况综合定量评价与优化集成技术与业务流程,经凝练、整理和编辑,充分反映了农作物生长动态监测与定量评价领域最新进展和系统性研究成果,旨在为各级政府部门和生产单位实时了解和掌握作物生长动态信息、及时采取有效措施提供科学依据,为我国现代农业发展、现代农业气象业务服务发展提供技术支撑。

本书内容丰富,通俗易懂,可供农业、气象、遥感、生态以及作物生长模型等相关领域的广大科技人员、管理人员和业务人员阅读和参考,也可作为高等院校、培训机构相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

农作物生长动态监测与定量评价 / 陈怀亮等著. —

北京 : 气象出版社, 2016. 5

ISBN 978-7-5029-6213-5

I. ①农… II. ①陈… III. ①禾谷类作物-生长势-

监测-研究②禾谷类作物-生长势-定量-评价-研究

IV. ①S510. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 048951 号

Nongzuowu Shengzhang Dongtai Jiance yu Dingliang Pingjia

农作物生长动态监测与定量评价

陈怀亮 唐世浩 俄有浩 邹春辉 延 昊 景元书 等 著

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号 邮政编码: 100081

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68409198(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com> E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑: 吴庭芳 隋珂珂 终 审: 黄润恒

责任校对: 王丽梅 责任技编: 赵相宁

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16 印 张: 18

字 数: 460 千字 彩 插: 6

版 次: 2016 年 6 月第 1 版 印 次: 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 68.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等, 请与本社发行部联系调换。

《农作物生长动态监测与定量评价》

编写组名单

主 编：陈怀亮

副主编：唐世浩 俄有浩 邹春辉 延 昊 景元书

撰稿人：马玉平 董立新 吴门新 冯利平 孙 睿

黄淑娥 刘忠阳 郭建茂 马晓群 李春强

杨沈斌 李军玲 余卫东 李树岩 李 颖

张佳华 钱永兰 谢东辉 郭 鹏 朱 琳

张红卫 张里阳 王 靖 薛昌颖 代立芹

荀尚培 张 祎 孙琳丽 姚凤梅 黄文霖

张 弘 李彤霄 周正明 孙琳丽 李 根

序

农业是受天气气候影响最为敏感的行业之一,长期以来一直是气象服务的重点领域。随着现代气象观测技术的发展以及信息技术的广泛应用,地基观测和卫星遥感等多元资料越来越多地应用于农业气象服务中,推动了农业气象服务由传统的经验和定性技术为主向着客观和定量化方向发展。现代农业要求粮食生产更加注重优质高效,必将进一步推动农业气象服务向更加精准化的方向发展。

农作物长势与产量形成密切相关,根据气象和农情变化及时实施田间管理对保障粮食产量、提高粮食品质十分重要,也是气象为农服务的重要内容之一。长期以来,对农作物长势监测主要采用基于农田抽样统计调查的定性或半定性的评价方法,客观性、定量化水平很低,可用性差。卫星遥感技术的应用,使农作物长势的监测进入一个新的发展阶段,将遥感监测技术与作物生长模型技术相结合,发展建立对大范围农作物长势的动态监测和定量评估技术,是农业气象服务定量化发展的技术方向。

河南省气象科学研究所联合中国气象科学研究院、国家卫星气象中心、国家气象中心、南京信息工程大学等国内多所知名高校及部分省级气象科研机构,依托国家公益性行业(气象)专项支持,围绕卫星遥感定量反演、遥感与作物生长模型融合等技术难点,通过开展田间试验、对比观测、野外调查和数据分析,开展了一系列研究工作,针对我国三大主要农作物,发展建立了作物生长动态监测与定量评价技术,并在国家气象中心以及河南、河北、江西、安徽等省农业气象业务服务中进行了初步应用,均取得了较好的应用效果。该科研项目紧密围绕农业气象服务需求,着眼卫星遥感和作物模型等新技术的应用,形成了有实用价值的成果,推动了农业气象服务技术的定量化、客观化发展,成绩可嘉。



项目组的同志们总结凝练研究成果出版本书,有助于广大农业气象科技工作者和基层气象服务专家了解该技术成果,带动和促进各级气象部门发展和应用量化的作物长势监测和评估技术方法,提高农业气象服务的水平。衷心希望项目组的同志能继续关注本领域科学研究的新进展,持续深化项目研究,推动科研成果转化,不断形成气象服务应用的新效益,为支撑精细化农业气象服务发展多做贡献。

谨对该书的出版表示祝贺!

中国气象局副局长

2015年12月18日

前言

小麦、水稻和玉米是我国主要粮食作物,其高产、稳产事关国家粮食安全。及时了解作物长势变化信息并采取有针对性的科学管理措施,对保障粮食丰收具有重要意义。获取作物长势的传统方法是地面观测,而卫星遥感具有客观、宏观、快速等特点,对于监测大范围作物长势及动态变化情况具有更加突出的优势,从20世纪70年代以来在国内外得到迅速发展。目前对农作物生长动态监测多以1 km分辨率的极轨气象卫星资料为主,精细化程度不高,特别是对下垫面状况复杂区的水稻、玉米遥感监测尚不能业务实用,而资源卫星资料价格昂贵、时效性差,难以大范围业务化应用;产量预测大多以简单的统计方法为主,机理性不强,作物生长模拟模型多以单点应用为主,区域化应用局限性较多;气象条件评价的定量程度和动态跟踪能力不够,多以定性评述为主,为粮食“高产、优质、高效、安全、生态”提供气象保障的能力远不能满足需要。从2009年10月起,河南省气象科学研究所联合中国气象科学研究院、国家卫星气象中心、国家气象中心、南京信息工程大学、中国农业大学、北京师范大学,以及江西、河北、安徽省气象科学研究所等10个科研业务机构和大学,联合成功申报了国家公益性行业(气象)专项“主要农作物生长动态监测与定量评价技术研究”(项目编号:GYHY200906022)。经过三年多的研究和应用,以FY-3A、MODIS等极轨卫星250 m分辨率遥感资料为基础,将作物生长模拟和遥感、GIS等技术相结合,辅以地面农业气象观测与调查,研究了小麦、水稻和玉米等主要农作物生长基础参数遥感定量反演优化、作物生长精细化遥感动态监测评估、遥感与作物模型结合的作物生长动态区域化模拟、作物生长综合定量评价等技术,并在国家气象中心、河南、河北、江西、安徽等省的农业气象业务中进行了应用,提高了区域农作物生长发育动态监测精细化程度和实时性,增强了作物生长定量评价的客观性和准确性,促进了主要农作物田间科



学化管理,对确保主要农作物增产丰收起到了重要作用。

本书的主要内容来源于“主要农作物生长动态监测与定量评价技术研究”项目的研究成果,同时也是研究团队相关技术人员近年来在作物长势、种植面积遥感监测、作物生长模型应用以及作物生长气象评价等领域研究成果的阶段性总结。全书由陈怀亮、刘忠阳等统稿,其中第1章农作物长势遥感监测评价概述,执笔人主要有陈怀亮、李颖、张红卫、刘忠阳等;第2章农作物生长参数与环境参数遥感定量反演优化技术,执笔人主要有唐世浩、董立新、张佳华、朱琳、张里阳、姚凤梅、周正明等;第3章农作物生长遥感动态监测与评价技术,执笔人主要有邹春辉、延昊、刘忠阳、郭鹏、李军玲、张弘、李彤霄、薛昌颖等;第4章农作物种植区遥感识别和面积估算方法,执笔人主要有孙睿、杨沈斌、延昊、吴门新、景元书、谢东辉、李根等;第5章农作物生长动态区域模拟,执笔人主要有马玉平、冯利平、郭建茂、俄有浩、薛昌颖、张祎、孙琳丽、王靖等;第6章农作物生长定量评价技术,执笔人主要有邹春辉、马玉平、冯利平、黄淑娥、李春强、马晓群、景元书、余卫东、李树岩、钱永兰、代立芹、荀尚培、黄文霖等;第7章农作物长势综合监测业务服务流程,执笔人主要有邹春辉、刘忠阳、李颖、张弘、李彤霄、薛昌颖等。同时还有许多参与了本项目研究和技术工作总结的科技人员未出现在上述名单中,在此对他们的辛勤工作也表示深深的谢意。

由于项目研究周期不长,对相关的科学技术问题研究和认识还不够深入,尚有许多不足之处,敬请广大读者多提宝贵意见。

本书出版得到国家公益性行业(气象)专项“主要农作物生长动态监测与定量评价技术研究”(GYHY200906022)和“十二五”国家科技支撑计划项目“重大农业气象灾害预测预警关键技术研究”(2011BAD32B02)资助,在此表示感谢!

作者

2015年4月20日

目 录

序

前言

第 1 章 农作物长势遥感监测评价概述	1
1.1 农作物长势遥感监测评价基本原理	1
1.2 农作物长势遥感监测评价数据源	2
1.3 农作物长势监测评价发展历程	4
1.4 农作物长势监测评价技术发展趋势	7
第 2 章 农作物生长参数与环境参数遥感定量反演优化技术	9
2.1 作物生长参数遥感定量反演优化技术与真实性检验	9
2.1.1 植被指数(VI)反演与检验	9
2.1.2 叶面积指数(LAI)反演与检验	10
2.1.3 作物净初级生产力(NPP)估算与检验	15
2.2 作物环境参数遥感定量反演优化技术与真实性检验	18
2.2.1 农田地表温度反演与真实性检验	18
2.2.2 农田作物水分反演与真实性检验	22
2.3 作物生长参数和环境参数时间序列遥感数据集	31
2.3.1 长时间序列遥感数据集构建算法	31
2.3.2 数据集的构建与应用	34
第 3 章 农作物生长遥感动态监测与评价技术	35
3.1 作物生长地面样点调查方案设计	35
3.1.1 冬小麦、夏玉米生长地面样点调查方案设计	35
3.1.2 水稻生长地面样点调查方案设计	37
3.2 作物生长试验方案设计	39
3.2.1 冬小麦试验设计方案	39
3.2.2 夏玉米试验设计方案	43
3.2.3 水稻试验设计方案	45
3.3 基于遥感参数的作物长势评价	47
3.3.1 江淮水稻生长状况评价	47
3.3.2 河南省冬小麦生长状况评价	52
3.3.3 河南省夏玉米生长状况评价	55



3.4 基于遥感发育期的作物长势评价	57
3.4.1 作物发育期遥感识别方法	57
3.4.2 冬小麦发育期遥感识别	62
3.4.3 夏玉米发育期遥感识别	65
3.4.4 基于遥感作物发育期的作物长势评价——以冬小麦为例	69
第4章 农作物种植区遥感识别和面积估算方法	74
4.1 作物种植面积监测方法	74
4.1.1 监督分类法	74
4.1.2 非监督分类法	75
4.1.3 时间序列法	78
4.1.4 决策树分类法	78
4.1.5 混合像元分解法	79
4.1.6 支持向量机法(SVM)	85
4.2 作物遥感地面样区观测方案设计与样区布设	87
4.2.1 样区布设	87
4.2.2 观测方案	87
4.3 作物种植面积遥感估算	87
4.3.1 冬小麦种植面积遥感估算	87
4.3.2 玉米种植面积遥感估算	105
4.3.3 水稻种植面积遥感估算	108
第5章 农作物生长动态区域模拟	131
5.1 作物生长模型的适应性分析	131
5.1.1 WOFOST 玉米模型在华北区域的适应性分析	131
5.1.2 ORYZA2000 水稻模型在江淮区域的适应性分析	137
5.1.3 WheatSM 小麦模型在华北区域的适应性分析	145
5.2 基于遥感数据的作物生长区域模拟	155
5.2.1 基于遥感数据的华北夏玉米生长模拟	155
5.2.2 基于遥感数据的长江中下游水稻生长模拟	164
5.2.3 基于遥感数据的华北冬小麦生长模拟	179
第6章 农作物生长定量评价技术	187
6.1 基于遥感与作物生长模型的作物生长评价	187
6.1.1 华北夏玉米生长状况评价	187
6.1.2 黄淮平原冬小麦生长状况评价	190
6.2 基于数理统计的作物生长评价	193
6.2.1 基于气候适宜度的河南省冬小麦气象条件评价	193
6.2.2 基于气候适宜度的河北省冬小麦气象条件评价	202
6.2.3 基于气候适宜度的河南省夏玉米气象条件评价	208

6.2.4	基于气候适宜度的河北省夏玉米气象条件评价	216
6.2.5	基于气候和土壤水分综合适宜度的冬小麦产量动态预报模型	221
6.2.6	江西省双季稻生长气候适宜性评价模型	227
6.2.7	安徽省一季稻生长气候适宜度评价模型	233
6.2.8	江苏省一季稻生长气候适宜度评价模型	239
6.3	综合评价技术	244
6.3.1	基于数理统计的河南省冬小麦长势综合评价	244
6.3.2	基于遥感、气候及作物模型的作物长势综合评价	248
第7章	农作物长势综合监测业务服务流程	255
7.1	基于卫星遥感的作物长势监测与评价业务流程	255
7.1.1	资料来源	256
7.1.2	遥感数据处理	256
7.1.3	数据存储	257
7.1.4	遥感参数反演	258
7.1.5	发育期监测	258
7.1.6	长势监测模块	258
7.1.7	产品制作分发	260
7.2	基于气候适宜度的作物长势评价业务流程	260
7.2.1	气象资料与统计资料的收集整理	260
7.2.2	气象产量分析处理	261
7.2.3	气候适宜度模型	261
7.2.4	气候适宜度评价分析	262
7.2.5	产品制作分发	262
7.3	基于遥感—作物模型的作物长势监测与评价业务流程	262
7.3.1	农业气象控制试验资料收集与整理	264
7.3.2	实时与历史气象资料采集	264
7.3.3	区域性模型参数的调试与检验	264
7.3.4	作物模型运行与输出	264
7.3.5	作物长势监测与评价分析	264
7.3.6	产品制作分发	264
7.4	农作物长势综合监测与评估业务服务流程	265
参考文献		267

第1章 农作物长势遥感监测评价概述

1.1 农作物长势遥感监测评价基本原理

农作物长势是指农作物的生长状况与生长趋势。作物长势可以用个体和群体特征来描述,获取作物长势的传统方法是地面调查,现代农业生产中则主要利用遥感技术监测作物生长状况与趋势(杨邦杰等,2005)。作物长势参数是表征作物生长状态的重要指标,准确、快速获取作物长势信息对指导农业生产、预测粮食产量和制定粮食安全策略具有重要的实际意义(付元元,2015)。作物长势的遥感监测充分体现了遥感技术宏观、客观、及时、经济的特点,可为田间管理提供及时的决策支持信息,并为早期估测产量提供依据。随着遥感技术的日益成熟,特别是随着“3S”集成应用技术、高分辨率卫星资料 and 大数据计算技术等快速发展,该技术已经成为进行作物长势参数反演和监测、研究作物长势空间变异和进行相关决策支持的有效手段。

小麦、水稻和玉米等农作物是我国主要粮食作物,其高产稳产是保障国家粮食安全的关键。随着我国粮食消费需求刚性增长,耕地减少、水资源短缺、气候变化等对粮食生产的约束日益突显,我国粮食安全面临着严峻挑战。及时、准确、宏观、动态的农作物生长监测和长势定量评价技术可以为各级政府部门和广大农民提供重要的科学决策依据,促进农业生产科学管理,确保农作物增产丰收。国内外针对农作物长势的监测主要有地面观测、遥感监测和模型模拟等方法。地面人工或仪器观测是最直接和最基本的方法,经过近几十年的发展,尤其经过近二十多年来田间精密观测、试验和分析测量仪器的研发和应用,农作物生长发育地面观测取得了长足发展。但是,农作物生长发育的地面观测不但需要投入大量人力物力,而且只能获取单点或局地的结果,难以实现区域或大范围监测。

卫星遥感具有实时、宏观、动态等优点,是大范围作物长势监测和产量预测的有效手段。作物长势监测是农业遥感的重要研究领域,通常意义上的作物长势遥感监测是指对作物生长状况及其变化的宏观监测,可用于作物产量信息的预测预报。农作物和自然界中的其他物体一样,不断发射各种波长的电磁波,并对外界照射来的自然和人工电磁辐射发生一定的吸收和反射,具有其独特的反射光谱特征(张宏名,1994)。可见光波段的蓝光、红光反射率与作物长势呈负相关关系,即当作物生长状况愈好,蓝光、红光反射率愈低,而近红外波段反射率愈高。在中红外波段的水分吸收带内,反射率与植株含水率呈负相关趋势。在农作物冠层的红外发射光谱方面,在一定天气条件下,冠层温度指数变化与农田水分供应状况有关。农作物的这些光谱特征,使通过遥感技术对农作物长势进行快速、准确、大面积的动态监测成为可能。



植被指数是公认的能够准确反映作物生长状况的遥感监测指标。由于农作物的叶片对近红外波段有强烈的反射作用,通过该光谱波段的信息可以获得植被密度和叶面积指数信息,同时,作物的叶绿素在红光波段有很强的吸收作用,通过该波段减弱的信息可以了解叶绿素的浓度信息,通过这两个波段测值的不同组合可得到不同的植被指数(Vegetation Index, VI)。植被指数是主要反映植被在可见光、近红外波段反射率与土壤背景之间差异的指标,各种植被指数在一定条件下能用来定量反映植被的生长状况和作物产量,这是利用植被指数进行作物长势监测的物理基础。

作物生长模型遵循农业生态系统物质平衡、能量守恒及物质能量转换原理,是一种面向过程,机理性和动态性具强的模型。利用作物生长模型模拟作物长势的基本原理是以光、温、水、土壤等条件为环境驱动变量,运用数学物理方法和计算机技术,对作物生育期内光合、呼吸、蒸腾等重要生理生态过程及其与气象、土壤等环境条件的关系进行逐日动态数值模拟,再现农作物生长发育及产量形成过程。目前,作物模型正在从理论研究及单点试验向区域应用发展。作物生长模型的机理性和动态性均较强,当基于单点的作物生长模型应用到区域研究时,就会遇到宏观资料难以获取的困难,而模型参数本身也存在区域升尺度的问题。可将适用于大范围作物生长监测的遥感信息引入作物生长模型,优势互补,实现作物生长的区域动态监测和评价。

1.2 农作物长势遥感监测评价数据源

遥感数据源是指卫星遥感数据、航空遥感数据、地面遥感数据等,也可统称一切获取遥感数据的传感器采集到的数据为遥感数据源。遥感反演就是根据图像上的色彩和亮度来识别地物的,这是因为遥感图像上亮度和色彩都是目标物在相应波段内电磁辐射能力的反映;色彩取决于其记录的波段,灰亮度取决于记录的辐射强度,这样就可以为下垫面的反演提供不同的光谱数据信息。多光谱(Multi-Spectral)是指包含于可见光、近红外、中红外、远红外和超远红外内的多波段数据,多光谱图像是指由电磁波谱中所包含的所有波段电磁波所形成的图像。多光谱遥感影像虽然光谱分辨率较低,但时效性较好,因而在大面积作物长势监测中使用较多,其中以 NOAA/AVHRR、SPOT/VEGETATION、EOS/MODIS、FY 卫星数据应用最为广泛。如史定珊等(1992)利用 NOAA/AVHRR 通道 1 和通道 2 合成绿度比值模式和归一化模式监测小麦苗情;陈怀亮(1994)、张雪芬(1995)等利用 NOAA/AVHRR 比值植被指数(RVI)与归一化植被指数(NDVI)开展了河南省间作套种和丘陵岗区的小麦遥感苗情分析及相关服务系统开发;黄青等(2010, 2012)利用 MODIS NDVI 数据对多种作物进行长势监测;钱永兰等(2012)利用 SPOT/VEGETATION NDVI 和增强型植被指数(EVI)数据对美国玉米和印度水稻的长势状况进行监测。中高空间分辨率遥感影像亦被用于区域范围的作物长势监测,且可与低空间分辨率影像融合以提高长势监测的精度,此类数据主要包括 Landsat 卫星 MSS/TM/ETM/OLI 数据、HJ 卫星 CCD 数据、IRS 数据等,以及更高空间分辨率的 SPOT 影像、Quickbird 影像等。例如,丁美花等(2007)使用 MODIS 分辨率为 500 m 的红外和近红外光谱数据监测甘蔗长势,同时利用 ETM 资料的高空间分辨率优势提取地表特征,为甘蔗估产奠定



了基础;宋晓宇等(2009)利用 Quickbird 分辨率为 2.4 m 多光谱数据和 0.6 m 全色波段数据经过融合后合成多种植被指数对变量施肥条件下冬小麦长势及品质变异进行监测,发现光谱参数能够反映冬小麦不同施肥处理下的长势及品质变异;李花等(2006)利用分辨率为 30 m 的 HJ-1A/B 卫星 CCD 数据计算植被指数,能够进行水稻长势分级监测和制作能够直观反映水稻长势等级的遥感专题图;冯海宽(2010)利用 HJ 卫星 CCD 数据和热红外 IRS 数据计算垂直干旱植被指数(PDI)和温度植被干旱指数(TVDI)对冬小麦干旱进行监测,发现反演的 TVDI 和 PDI 空间分布与实际情况基本吻合,适用于作物长势和干旱的监测;谭昌伟等(2011)利用 Landsat TM 数据合成多种植被指数对冬小麦开花期主要长势参数进行监测,实现了主要长势参数空间分布量化表达。2008 年以后,我国 FY3-A/B/C 卫星的连续发射为此类研究提供了新的可选数据,在长势监测、估产、面积估算等方面的具体应用日益增多。高光谱分辨率在 $10^{-2}\lambda$ 数量级,这样的传感器在可见光和近红外区域有几十到数百个波段,光谱分辨率可达 nm 级。高光谱成像相对多光谱成像来说具有更丰富的图像和光谱信息。申广荣等(2001)研究表明高光谱反射率或植被指数与作物的多种生化、物理参数具有显著的相关关系,通过高光谱遥感技术反演作物长势农学参量可准确监测作物长势。受数据获取条件和获取成本的制约,高光谱遥感数据应用于大面积作物长势监测存在困难,但利用高光谱遥感数据反演作物生化组分含量、监测作物生长状况的研究仍受到持续关注。例如,王延颐等(1996)利用光谱分辨率为 4.5 nm 的地物光谱仪获取的高光谱数据研究不同波段反射率与水稻长势的相关性,发现不同发育阶段与 RVI、PVI 的相关度较高;王秀珍等(2003,2004)利用光谱分辨率为 3 nm 的 ASD 野外光谱仪获取的高光谱数据,建立了水稻地上鲜生物量和叶面积指数(LAI)的高光谱遥感估算模型,研究发现植被指数与地上鲜生物量和 LAI 之间相关性高;唐延林等(2004)利用 ASD 光谱仪获取的高光谱数据研究水稻不同发育时期色素含量的变化,结果表明不同供氮水平下水稻冠层光谱和叶片光谱差异明显;黄敬峰等(2010)对水稻的高光谱遥感实验研究表明,可以利用高光谱技术提取水稻生化参量;宋晓宇等(2004,2009)利用 PHI 航空成像光谱仪数据(光谱分辨率 <5 nm,光谱范围 411.9~832.8 nm,共 112 个波段)提取了反映冬小麦长势的高光谱特征参量;郑有飞等(2007)研究基于高光谱数据的小麦 LAI 监测结果发现 NDVI、RVI 是监测农作物长势的最佳植被指数;棉花 LAI 与生物量监测(金秀良等,2011)和叶绿素与含氮量监测(吴琼,2012)表明,高光谱参量与作物生物量及 LAI 之间存在较好的函数关系。微波遥感是传感器的工作波长在微波波谱区的遥感技术,利用传感器接受地物发射或者反射的微波信号,借以识别、分析地物,提取所需的地物信息。常用的微波波长范围为 0.8~30.0 cm,甚至更长。其中又细分为 K(1.11~1.67 cm)、Ku(1.67~2.50 cm)、X(2.50~3.75 cm)等波段。微波遥感的工作方式分主动式(有源)微波遥感和被动式(无源)微波遥感。微波遥感的突出优点是具全天候工作能力,不受云、雨、雾的影响,可在夜间工作,并能透过植被、冰雪和干沙土,以获得近地表以下的信息。利用航空、航天微波影像反演农作物的 LAI、生物量、含水量等农学指标,进行长势监测和产量预报的研究多有报道。例如,戈建军等(2002)研究了冬小麦的不同散射机理,得出冠层直接散射和地表散射在总散射中的贡献最大,为微波在冬小麦生长监测中的应用提供了理论支撑;LauraDente 等(2004)将微波数据与作物生长模型同化,将同化模型输出结果应用于作物长势监测,有效地拓展了作物长势监测的时空范围;



Chen C. 等(2006)使用 RadarSat 数据监测菲律宾水稻长势并进行产量预报;谭正等(2011)利用作物生长模型同化 SAR 数据模拟作物生物量时域变化特征,成功应用于作物生长状况评估;化国强(2011)利用全极化 SAR 数据反演玉米 LAI,进行大面积的玉米长势监测;贾明权(2013)对水稻微波散射特性进行研究,实现水稻参数反演和长势监测。微波遥感数据的业务化应用,有效弥补了多光谱和高光谱数据在时效性和全天候等方面的不足。

1.3 农作物长势监测评价发展历程

20 世纪 80 年代,美国农业部(USDA)、国家航空航天局(NASA)、国家海洋和大气管理局(NOAA)在 70 年代“大面积农作物估产试验(LACIE)”的基础上开展了“农业和资源的空间遥感调查计划(AGRISTARS)”,建立了全球尺度的农情监测运行系统,以两周合成的 NOAA/AVHRR NDVI 数据为主要数据源实现对美国 and 全球粮食主产国主要农作物的长势监测和产量预报,分级表达长势状况。进入 21 世纪以后,美国实施了一项新的农业遥感应用项目 Ag20/20,以对农业生产及其环境条件进行有效监测。欧盟农业局自 1988 年开始实施“遥感农业监测计划(MARS)”,开发了作物长势遥感监测系统 CGMS。该系统使用 NOAA/AVHRR 和 SPOT/VEGETATION 数据,将遥感数据与作物生长模型相结合进行作物长势监测,并通过农作物长势动态曲线描述农作物的长势过程。20 世纪 70 年代,联合国粮食和农业组织(FAO)建设了“全球粮食和农业信息及预警系统(GIEWS)”,使用 SPOT/VEGETATION 归一化植被指数(NDVI)数据进行全球农作物长势遥感监测,每旬开展一次监测,将该旬数据与历史该旬数据比较,分级反映长势变化。加拿大 20 世纪 90 年代启动了作物长势评估计划(CCAP),以 NOAA/AVHRR NDVI 为主要数据源进行作物长势监测,同时还开展了以 RADARSAT 雷达数据为主的农作物长势监测,利用不同极化组合的后向反射系数分级反映农作物的长势信息(杨邦杰等,2005)。俄罗斯农业部于 2003 年建设了全国农业监测系统,以 MODIS 为主要数据源,结合气象数据开展作物单产预测(吴炳方等,2010)。

作为农业大国,农情遥感监测是我国自“七五”(1985—1990 年)以来就持续关注重点研究方向,“十二五”(2011—2015 年)期间将“全球大宗作物遥感定量监测关键技术”和“旱区多遥感平台农田信息精确获取技术集成与应用”列入重点研究项目。在国家的大力支持下,国内作物长势遥感监测研究呈现出技术不断深入完善、业务化应用不断拓展的趋势。小麦、水稻和玉米是我国的大宗粮食作物,对我国的粮食安全起到至关重要的作用。同时,由于耕地少、人口多、资源相对匮乏、气象灾害多等原因,我国粮食安全面临着严峻挑战。为此,我国农业、气象、统计、粮食等部门科研业务人员,通过借鉴国外先进技术方法和自主研发,在利用卫星遥感技术对农作物生长状况进行监测评估研究与应用方面取得了长足进展,为保障粮食安全做出了重要贡献。如,自 20 世纪 80 年代中期开始,中国气象局使用 NOAA/AVHRR 和 FY 卫星的 NDVI 数据,通过 NDVI 等级判识、NDVI 距平、前后两年 NDVI 数据比较等方法,分级评价农作物长势(李郁竹,1993;魏文寿,2013);“八五”期间,中国科学院主持完成了国家重点科技攻关项目“重点产粮区主要农作物遥感估产”研究,随后建立了中国农情遥感速报系统,利用 NOAA/AVHRR NDVI 数据,通过前后两年数据的比较,分级反映农作物长势状况,并利用



SPOT/VEGETATION NDVI 时序数据,生成区域作物生长过程曲线,监测作物持续生长过程与上一年及其他年份间的差异(孙九林等,1996;吴炳方等,2004);2007年,国家统计局委托北京师范大学建立国家粮食主产区粮食作物种植面积遥感测量与估产业务系统,2010年通过验收;从1998年开始,农业部发展计划司实施了“全国农作物业务遥感估产”项目,陆续开展对全国冬小麦、水稻、玉米、棉花等作物的遥感监测工作(周清波,2004);农业部规划设计研究院建立了国家级的作物长势遥感监测系统,使用 EOS/MODIS 卫星、FY 卫星、SPOT/VEGETATION 等资料,通过前后两年 NDVI 值的比较,分级监测农作物长势状况,实现了较为稳定的业务运行(裴志远等,2009)。

目前业务中普遍使用的作物遥感监测方法是基于现有实验数据,研究作物长势的遥感和农学指标,建立基于农学指标的遥感指标,利用单因子或多因子遥感指标进行长势监测。随着作物模型技术的发展,逐步出现了以遥感反演因子(如叶面积指数、干物质重等)为纽带的数据融合技术,即利用遥感获取的作物生长数据进入作物模型系统,作为初始场量进行模拟运算,进而开展长势监测与评价。在确定某个遥感监测指标或综合指标之后,判断作物长势的方法主要有统计监测类、年际比较类和过程监测类三类。基于遥感指标的统计监测类方法主要是在遥感指标取值和作物长势因子(农学指标)取值之间建立相关关系,进行长势监测或长势诊断。目前较为常见的遥感指标有归一化植被指数(NDVI)、改进型归一化植被指数(GRNDVI)、植被状态指数(VCI)、垂直植被指数(PVI)等。例如,刘可群等(1997)利用 NOAA/AVHRR 合成的垂直植被指数(PVI)和有效积温估算大面积水稻长势监测;朱洪芬(2008)在作物生长监测与诊断中,利用 NDVI、RVI、EVI、VCI 等多种遥感指数对农学参数进行提取;利用 NOAA/AVHRR 数据对冬小麦的水分诊断和长势监测;李卫国等(2010)利用 Landsat/TM 合成 NDVI 反演 LAI 的冬小麦长势分级监测。基于遥感指标的影像监督/非监督分类方法也可归入此类方法范畴,如李剑萍(2002)曾利用比值植被指数 RVI 采用监督分类的方法判断作物苗情长势。基于遥感指标的年际比较类方法主要是在年际间遥感指标差值或比值计算的基础上判断当年作物长势状况。较为常用的方法有距平植被指数、旬差值植被指数、基于发育期识别的长势监测等。逐年比较或距平比较方法是国内外业务化作物长势监测系统使用最多的方法,相关应用研究诸多。如武建军等(2002)对相邻年份旬 AVHRR NDVI 值进行比值计算,根据比值大小将当年农作物长势划分为与前一年相比好、稍好、相当、稍差、差等 5 个等级;齐述华等(2004)选取长时间序列 AVHRR NDVI 数据,对植被状态偏离历年平均植被状态的程度进行归一化,作为植被生长状况评价指标取得了较满意的效果;冯美臣等(2009)对相邻年份冬小麦关键生育期 MODIS NDVI 值进行比值计算,根据比值的大小将冬小麦长势分为 5 个等级;孔令寅等(2012)用相邻年抽穗期 MODIS EVI 值比较方法对冬小麦长势进行遥感监测,这些都客观有效地提高了冬小麦长势监测精度,生物学与物理学意义也比较明确。基于遥感指标的过程监测类方法主要利用遥感指标构建作物生长曲线,对曲线特征进行年际对比分析,评价长势状况,常用的遥感指标包括 NDVI、EVI 等。如王延颐 and Malingreau (1990)对 AVHRR NDVI 随时间变化的曲线特征进行分析,对选定时间内 NDVI 的积分值进行计算,应用于作物生育期、长势状况和产量的宏观监测;吉书琴等(1997)分析了 AVHRR NDVI 变化曲线的特征,对大范围水稻生长状况进行动态监测;江东等(2002)分析了 AVHRR NDVI 时



间曲线的波动与作物生长发育阶段和长势的响应规律,探讨了 NDVI 在冬小麦各生育期内的积分值与单产的相关关系,结合作物物候历实现作物长势和产量遥感监测,可实现作物长势遥感监测和产量遥感估算;张明伟等(2007)研究了 MODIS EVI 曲线与冬小麦长势的互动关系,根据 EVI 曲线的变化特征推测作物的生长发育情况,EVI 曲线的积分值能综合反映作物整个生长发育过程;顾晓鹤等(2008)重构 SPOT/VEGETATION NDVI 时间序列,构建基于变化向量分析的长势监测模型,综合了 NDVI 时间序列曲线的大多数特征参数,对作物年际与年内长势变化进行时间和空间上的定量分析,实现以单一指标综合了 NDVI 时间序列的大多数变化特征,为农作物长势遥感提供了一种新的方法。

近年来,以作物生长模型与遥感结合进行作物长势监测、估产的研究以其机理性较强、动态性较好得到迅速发展,正在从理论研究及单点试验向区域实际应用发展。国际上已经发展了包括水稻、小麦、玉米在内的许多作物生长模型,如荷兰的 BACROS、SUCROS、MACROS 和 WOFOST 等系列作物生长模拟模型,美国的 CERES 系列作物生长模型。我国在学习、引进国外模型的基础上,依据自己的实验研究成果,消化并改进建立了小麦、水稻、玉米、棉花等作物生长模型,如 CCSODS 系列模型、WHEATSM、RICEMOD、ORYZA-0 等,部分模型已在区域作物长势监测与生长评价上得到初步应用。遥感数据与作物生长模型的结合可解决作物生长模型区域应用时输入参数和初始条件值获取困难的问题,提高作物生长模型的区域应用能力,面向长势监测和估产应用提高模型输出结果的精度。遥感数据与作物生长模型的结合策略主要有两种,一种是“驱动”策略,一种是“融合”策略。驱动策略是指直接利用遥感反演参数值作为作物生长模型初始参数值,或利用遥感反演参数值更新作物模型的输出参数值,作为下一阶段模拟的输入值。应用此类策略,Maas(1988)将遥感反演得到的 LAI 和水分胁迫系数值作为作物生长模型的输入值,有效地改善了作物生长模型对玉米地上生物量的模拟结果;沈掌泉等(1997)将利用 TM RVI 估测的 LAI 作为作物气候模型 YLDMOD 计算过程的校正值,对水稻的整个生长发育过程进行模拟,为准确、方便、有效、快速地遥感估产提供了一种新的方法;王东伟等(2010)利用作物生长模型同化 MODIS 反射率方法,将作物生长过程中 LAI 地面先验信息作为约束信息,成功地提取最优目标参数 LAI。融合策略是指通过调整作物生长模型初始值,使模型模拟值与相应遥感观测值或反演值的差异达到最小。近年来,融合策略的研究热度超过驱动策略。应用融合策略,Maas(1991)利用 Landsat/MSS 数据反演 LAI 值,调整作物生长模型 GRAMI 的输入参数,减小模型模拟 LAI 值与遥感反演 LAI 值的差异,提高作物生长模型的模拟精度;Clevers 和 van Leeuwen(1996)利用可见光和微波遥感反演甜菜的 LAI 值,通过减小模型模拟 LAI 值与遥感反演 LAI 值的差异,调整作物生长模型 SUCROS 的初始参数值,达到了提高模型输出结果的精度;Guerif 和 Duke(1998)将作物生长模型 SUCROS 与冠层辐射传输模型 SAIL 相结合,调整作物生长模型的初始参数值以最小化作物冠层模拟反射率和实际观测反射率,提高甜菜产量的预测精度;Weiss 等(2001)通过 LAI、叶绿素含量、干物重和相对水分含量等多参量将冠层辐射传输模型 SAIL 与作物生长模式相耦合,取得准确的作物生长模拟结果;马玉平等(2005)将作物生长模型 WOFOST 与冠层辐射传输模型(Sail-Prospect)嵌套,通过重新初始化作物生长模型,使嵌套模型模拟得到的冠层土壤调整植被指数和 MODIS 遥感数据合成值的差异最小化,提高模型模拟冬小麦生长过程的准