

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

作物系统模拟及智能管理

*Crop System Simulation
and Intelligent Management*

曹卫星 罗卫红

高等教育出版社

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

作物系统模拟及智能管理

Crop System Simulation
and Intelligent Management

曹卫星 罗卫红

高等教育出版社

内容简介

本书综合运用系统原理和信息技术,以技术-环境-生长的动态关系为主线,介绍有关作物模拟模型及决策支持系统的基本原理、方法和技术,注重以结构性途径建立基于生理生态过程的综合性作物生长模型,以生长模型和知识模型为基础建立智能化管理决策支持系统,为作物生产管理的精确化、信息化和科学化奠定基础。在内容编排及结构体系上兼顾研究性与应用性,机理性与知识性,参考性与学习性。

本书主要面向有关种植业领域的农业教育、科技、管理人员及高校农学类的研究生和高年级本科生,特别适于作为作物信息技术方面的教学、科研参考书或教科书。

图书在版编目(CIP)数据

作物系统模拟及智能管理/曹卫星,罗卫红. —北京:高等教育出版社,2003.2

ISBN 7-04-011756-8

I. 作… II. ①曹…②罗… III. ①作物-生长发育-模拟②作物-生长发育-建立模型-管理决策系统 IV. S3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 092494 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街 55 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100009	网 址	http://www.hep.edu.cn
传 真	010-64014048		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷 北京地质印刷厂

开 本	787 × 960 1/16	版 次	2003 年 2 月第 1 版
印 张	14.25	印 次	2003 年 2 月第 1 次印刷
字 数	230 000	定 价	20.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

作者简介

曹卫星,男,1958年8月27日生于江苏通州。1982年江苏农学院农学系获学士学位,1985年南京农业大学农学系获硕士学位,1989年美国俄勒冈州立大学作物科学系获哲学博士学位,随后在美国威斯康星大学做博士后及科学家,于1994年回南京农业大学工作,任教授、博士生导师。1996年以来先后任农学系副主任,校长助理、农学系主任,农学院院长,南京农业大学副校长。担任农业信息工程技术中心主任,农业部作物生长调控重点开放实验室主任,中国农学会计算机农业应用分会副理事长,全国农业知识工程专业委员会副理事长,全国作物栽培专业委员会副主任,中国作物学会理事,国务院学位委员会农业推广专业硕士学位教育指导委员会委员,国家自然科学基金委二审专家,江苏省自然科学基金委农业学科组组长,江苏省小麦专业委员会主任,民盟中央委员,民盟江苏省委主委。主要研究领域为作物生理生态、作物栽培管理、信息农学等。着重阐明了小麦花粒发育与品质形成的生理机制及调优栽培原理,为区域化、标准化、优质专用小麦的生产奠定了技术基础;建立了小麦、水稻、棉花等作物的生长模拟模型、栽培知识模型及精确作物管理的智能决策支持系统,为信息农业和现代农业的发展提供了应用平台。已发表学术论文160多篇(重要期刊论文100余篇和SCI论文30多篇);出版著作两部。获得1996年度国家教委科技进步二等奖。入选国家杰出青年科学基金、国家教委跨世纪优秀人才、国家人事部百千万人才工程、国务院政府特殊津贴、全国优秀教师、农业部有突出贡献中青年专家、江苏省普通高校跨世纪学术带头人及中期考核优秀、省333工程培养对象、省优秀学科带头人、省劳动模范和省优秀科技工作者等。

罗卫红,女,1962年10月4日生于湖南江永。1983年毕业于南京气象学院农业气象专业,获学士学位。1986年毕业于南京农业大学植保系农业气象专业,获硕士学位。1996年毕业于荷兰瓦赫宁根农业大学理论生产生态系,获博士学位。1997年回国工作。现任南京农业大学农学系教授,博士生导师,南京农业大学农业信息工程技术中心信息技术在

设施农业中的应用研究方向学术带头人。主要从事作物生态、作物生产系统的模拟、设施环境调控及农业气象领域的科研和教学工作,在农田微气象生态模拟研究及作物生长的系统分析与模拟方面有十多年的工作积累。近年来,将作物生长模拟模型和作物微气象模拟模型应用于设施环境优化调控和作物标准化栽培管理的研究。针对温室环境调控面对的是不断生长变化的作物这一特点,提出了基于温室小气候和作物模拟模型的南方现代温室环境优化调控机制和途径;建立了基于温室小气候模型和作物茬口安排的南方现代温室能耗预测系统并提出了温室基础能耗的概念,为从能耗角度优化温室结构设计和温室生产投资风险评估提供了理论依据;研制了基于小气候模拟模型的温室塑料大棚黄瓜霜霉病和白粉病计算机预警和管理系统。在国内外核心期刊上发表学术论文二十多篇,出版学术专著两部。

前 言

农业信息技术是随着信息科学的快速发展和农业知识的丰富积累而建立起来的新兴的交叉学科领域,正在对传统的农业科技和农业生产产生深刻和广泛的影响。20世纪90年代以来,国外、国内有关农业信息技术的研究工作已经取得了重大的进展,并在生产上获得了成功的应用,促进了持续农业和精确农业的发展。其中,作物生长系统模型及作物生产决策支持系统作为农业信息技术的核心内容和基础成分,是农业信息技术成功的突出代表,已经在国内外获得广泛的认可,并继续显示出强大的生命力和发展态势。

在作物模拟及信息农学快速发展的进程中,我国的农业教育与科技人员及相关学科专业的学生迫切需要了解 and 掌握有关农业系统特别是作物生产系统的模拟模型及管理决策方面的基本原理、方法和技术,而国内至今还没有这方面的专著或教科书。本书的编写和出版旨在推动我国作物生长模拟及管理决策系统的研究和应用,推进作物智能栽培学的发展,实现作物生产系统的信息化和精确化。

本书综合运用系统原理和信息技术,以作物生长的技术—环境—产量动态关系为主线,介绍有关作物模拟模型及决策支持系统的基本原理、方法和技术,注重以结构性途径建立基于生理生态过程的综合性作物生长模型,以生长模型和知识模型为基础建立管理决策支持系统,为作物生产管理的精确化、信息化和科学化奠定基础。在内容编排及结构体系上兼顾研究性与应用性,机理性与知识性,参考性与学习性。主要面向有关种植业领域的农业教育、科技、管理人员及高校农学类的研究生和高年级本科生,特别适用为作物学技术方面教学、科研参考书籍或教科书。

在本书的准备和编写过程中,南京农业大学作物生态研究室的教师、博士后和研究生给予了大力支持和帮助,并提出了宝贵的建议和意见。特别是王绍华、朱艳、庄恒阳、刘铁梅、严美春等同志直接参与了部分章节的材料准备工作。除了所注明的参考文献外,书中所用素材主要来自于本实验室近年来在作物生长模拟及智能决策系统研究领域的学术论文、工作积累和认识体会等,这些工作主要得到国家教委跨世纪优秀人才基金、国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金(重点项目和面上项目)、国家“九五”和“十五”、863计划的资助。此外,本书曾在“华夏英才基金

会”的全额资助下于 2000 年第一次出版。2001 年入选教育部“研究生教学用书”。为此,在第一版的基础上,作者结合有关学科的最新发展和自己的最新研究成果,对书中内容作了进一步充实和修改,由高等教育出版社出版。作者一并表示衷心的感谢。

最后,由于作者水平有限,书中缺点、不足及错误之处在所难免,敬请读者提出宝贵建议和指正。

编者

2002 年 5 月

序

农业新科技革命以生物技术和信息技术为先锋和主体,正在使农业生产提高到一个新的高度,实现新的突破。其中,农业信息技术是在信息科学和农业科学不断发展的推动下建立起来的新兴交叉学科领域,正在对传统的农业进行改造和提高,并引发人类进入一个新的精确农业和信息农业时代。

农业生产受到土地、气候、技术、作物等诸方面的影响,表现为时空变异大、经验性和地域性强、定量化和规范化程度低。计算机和信息技术的出现,可以对复杂的农业生产成分进行系统的分析和综合,建立动态的模拟模型和管理决策系统,实现农业生产的科学决策和革命性变化,从而全面改善弱势的传统农业。因此,农业信息技术的研究、开发和应用必将形成一个新的农业技术和产业体系,实现农业生产的模型化、信息化、知识化和智能化。

20世纪90年代以来,国外、国内有关农业信息技术的研究工作已经取得了重大的进展,并在生产上获得了成功的应用,促进了持续农业和精确农业的发展。特别是作物生长模型及基于模型的管理决策支持系统具有较高的学术性和应用性,是作物信息技术研究的突出代表。在作物模拟及信息农学快速发展的进程中,广大农业教育与科技人员及高校学生迫切需要了解和掌握有关农业系统模拟与管理决策方面的基本原理、方法和技术。然而,国外已有的有关作物生长模拟及管理决策的书籍,或者偏重于作物生长的数学分析和理论模型,或者偏重于作物生长系统的某些方面,缺少系统性、完整性和适用性。国内至今还没有专门论述有关作物生长模拟及决策系统基本原理和技术的专著或教科书。

本书着重将系统原理和信息技术应用于作物生长发育的研究,以作物生长的技术-环境-产量动态关系为主线,结合作者多年来在作物信息技术领域的科研成果和学术积累,综合介绍有关作物系统分析和建模及基于模型的管理决策系统的基本理论、知识、方法和技术。在内容和结构上体现了较好的研究性与应用性,机理性与知识性,参考性与学习性,是适用于农学类教学和科研的重要参考书籍或教科书。它的出版对于推动我国作物生产系统与农业信息技术的研究和应用,加速作物智能栽培

学及信息农学的建立,促进作物生产管理的科学化、信息化和智能化等具有重大的学术意义和应用价值。

汪懋华 院士

2002年5月

目 录

第一章 作物模拟模型的定义和作用	1
一、作物模拟模型的定义和类型	1
二、作物模拟模型的发展历程与特点	2
三、作物模拟模型的作用	5
第二章 作物系统水平与模型特征	7
一、作物生产系统的等级性和水平	7
二、作物模拟模型的特点	9
第三章 作物模拟原理与技术	12
一、作物模拟的原理	12
二、作物模拟的基本技术	14
三、作物模型发展的程序	16
四、作物生长系统的表示	18
第四章 作物阶段发育的模拟	22
一、阶段发育与器官发育的关系	22
二、阶段发育的模式	23
三、作物温光反应的模拟	24
四、生理发育时间与阶段预测	31
第五章 作物器官发育的模拟	34
一、器官发育模式	34
二、顶端原基的分化	35
三、叶片的出现与叶面积	37
四、分蘖动态与成穗	41
五、根系与茎秆的生长	43
六、籽粒发育与衰老	45
第六章 碳同化和物质积累的模拟	49
一、绿色面积指数	49
二、光能分布和截获	51
三、叶片和冠层光合作用	53
四、呼吸作用	60
五、同化物积累与生物量	62
第七章 同化物分配与产品形成的模拟	64

一、同化物分配与产量形成	64
二、氮分配与品质形成	70
第八章 作物与水分关系	72
一、土壤—植物—大气系统水分传输	72
二、土壤水分平衡	73
三、水分效应因子	80
第九章 作物养分效应的模拟	83
一、土壤氮素动力学	83
二、土壤磷素的动态模拟	92
三、土壤钾素动态模拟	95
四、养分吸收与分配	97
五、N、P、K 关系及养分效应因子	108
第十章 作物气象环境的模拟	112
一、气象要素的日变化	112
二、作物冠层辐射平衡日总量	116
三、土温变化	116
四、基于历史资料的每日气象资料生成	117
第十一章 基于模型的作物管理决策支持系统	121
一、决策支持系统的定义和类型	121
二、基于生长模型的作物管理决策支持系统	123
三、基于知识规则的作物管理决策支持系统	125
四、基于知识模型的作物管理决策支持系统	129
五、基于知识模型和生长模型的作物管理决策支持系统	133
第十二章 基于 3S 的作物生产空间信息系统	140
一、RS、GIS、GPS 的定义、特征与作用	141
二、基于 3S 的生产信息系统	146
三、3S 与模型的结合	148
第十三章 精确农作支持系统	153
一、精确农作的定义与特点	153
二、精确农作的支持技术	155
三、国外精确农作应用实践	159
四、国内精确农作应用前景	161
第十四章 作物智能栽培学的形成与发展	165
一、作物智能栽培学的形成和定义	165
二、作物智能栽培学的基本特征	166
三、作物智能栽培学的主要内容	167
四、作物智能栽培学发展前景	174
符号(缩写)说明表	180

参考文献	193
主题索引	211

第一章 作物模拟模型的 定义和作用

农业信息技术是随着信息技术及农业科学的发展而出现的一个新兴学科领域,作物系统模拟则是农业信息技术领域的研究热点。近 20 年来,作物模拟研究获得了重大发展,并已成功地应用于生产实践。本章首先介绍作物模拟模型的发展历程、定义和作用,为了解作物模拟模型的基本特点及技术原理奠定基础。

一、作物模拟模型的定义和类型

1. 作物模拟的定义

系统是一组相关成分的集合体。系统模型是对系统成分及其相互关系的一种简化的数学表达。作物模拟模型着重利用系统分析方法和计算机模拟技术,对作物生长发育过程及其与环境和技术动态关系进行定量描述和预测。因此作物模型以作物生育的内在规律为基础,综合作物遗传潜力、环境效应、技术调控之间的因果关系,是一种面向作物生育过程的生长模型或过程模型。

作物模型的建立即建模是指作物模型研制的过程,模拟主要是指解析作物系统的结构、功能和行为,并进行模型运作的过程。因此广义的模拟包括模型建立和模拟试验两个主要内容。

作物生长模型具有较强的机理性、系统性和通用性,作物模型的成功开发和应用促进了对作物生育规律由定性描述向定量分析的转化过程,为作物生产决策系统的开发与应用奠定了很好的基础,特别是为持续农业和精确农业的研究提供了科学的工具。

2. 作物模拟的类型

作物模型按不同的功能特征可分为经验模型与机理模型,描述模型与解释模型,统计模型与过程模型,应用模型与研究模型,单一模型与综合模型等。其中,前一类模型相对简单一些,经验性的成分多一些,注重模型的预测性和应用性。另一类模型则要复杂一些,机理性的成分多一

些,强调模型的解释性和研究性。但总体上,所有模型从更微观的层次看都可认为是经验性模型,或者从更宏观的层次看是机理性模型。

二、作物模拟模型的发展历程与特点

1. 作物模拟的发展历程

作物模拟的发展经历了从定性的概念模型到定量的模拟模型的过程。从数量植物生理学中的生理生态过程模拟慢慢发展成为综合的作物生长模拟模型。20 世纪 60 年代以来,随着系统科学和计算机技术的发展及作物学知识的积累,作物模拟研究获得了很大的发展,作物生产系统的综合分析和科学决策也成为现实。作物模型发展的动力主要来源于计算机信息技术的发展,作物学的知识积累,管理决策的定量要求,农业推广中的技术转移,以及作物生产系统固有的独特性和变异性。

国际上有关作物模拟研究的发展可以概括为以下四个主要阶段。

(1) 幼年期:20 世纪 50~60 年代,生理生态过程的数量分析与模拟研究的诞生。这期间,作物生理生态研究取得了显著进展,计算机技术亦取得了快速进步,因此作物模拟研究的兴起是作物生理研究深化与计算机软硬件发展的共同产物。60 年代,荷兰和美国首先开始了作物生长模拟研究,荷兰的 de Wit(1965)及美国的 Duncan(1967)等人相继发表了冠层光能截获与群体光合作用的模型,成为作物生理生态过程模拟的经典之作。de Wit 和 Duncan 有关植物冠层光能截获和光合作用的数学模拟,是国际上最早的两个用完整程序编写、能在计算机上模拟作物群体生产过程的模型。他们的开拓性工作在国际上产生了重大影响。在此之前,一些重要的作物生理过程及其与环境的数量关系已得到了阐明,其中较具代表性的有 Monsi 与 Saeki(1953)有关作物群体内光分布规律的研究, Hesketh(1963)有关不同植物或作物的光合作用与光强关系的研究。

(2) 少年期:20 世纪 70~80 年代,作物模拟研究迅速发展,进一步趋向于系统化、机理化,从不同生育过程的模拟到完整的生长模型,作物模拟在深度与广度上同时得到了发展。科学家对一些重要作物生理过程的数量化研究日趋深入,如 Thornley(1970、1971、1977)关于作物呼吸过程模拟的研究, Chanter(1976)关于生长曲线的概括性研究, Charles - Edwards(1976)关于作物干物重分配模型的研究,以及 Ritchie(1972)关于蒸发模型的研究等。关于作物生长与产量模型的研究,以荷兰和美国为代表,特别是在 80 年代提出的 CERES、GOSSYM、SOYGRO、SUCROS 等

作物模型都能完整地描述和预测作物生长及产量形成的全过程。

荷兰作物模拟研究的特点是强调作物生长的机理性。如 1970 年瓦赫宁根农业大学 de Wit 等人提出的作物模拟模型 ELCROS, 可以根据作物的基本物理、生理、化学特性及常规气象资料来计算作物营养生长阶段的总生物量, 并首次模拟了作物的呼吸作用。1978 年, 他们提出了 BACROS 模型, 加强了理论性和综合性。1982 年, Van Koulén 在 BACROS 模型的基础上建立了 SUCROS 模型, 该模型以太阳辐射作为影响生长的主要因子, 以 CO_2 同化物向植株各器官的分配为基本生物学概念, 模拟了小麦叶、茎、根、粒的潜在干物质生产。此后 Penning de Vries 等(1989)又研制成 MACROS(modules for annual crop simulation, 即一年生作物的模拟模型)。荷兰的这些模拟模型多偏重于理论研究和假设模拟, 对生理生态过程具有较好的解释性和研究性。

美国研制的作物模型注重模型的综合性 and 预测性。例如, 由密西根州立大学 Ritchie 教授等在 20 世纪 80 年代初建立的 CERES(作物-环境-资源综合系统)系列模型, 在综合性与应用性方面都有所加强。它们不仅能模拟作物生长与发育的主要过程, 还能模拟土壤养分平衡(矿化、硝化、反硝化、固氮、淋溶、吸收和利用等)与水分平衡(有效降水、径流、蒸发、蒸腾、土壤水分的垂直流动与渗漏等)。之后, CERES 模型在美国以外的许多国家, 特别是在发展中国家, 得到了广泛的验证, 并被用于农业技术推广和咨询指导, 成为目前世界上检验和应用最广泛的作物模型之一。

在这一时期, 我国科学家也开始了作物模拟模型方面的研究工作, 虽然起步较晚, 但 80 年代以来进展很快, 在植物生理生态过程的模拟方面取得了可喜的成绩, 并初步提出了水稻等作物的产量模型。

(3) 青春期: 20 世纪 80 年代后期到 90 年代初, 作物模拟进一步向机理性和应用性方向发展。随着模型数量的增加, 一方面对系统进行不断的分解和细化, 另一方面强调系统的通用性与可靠性, 因此对系统的机理性与通用性之间的矛盾表现了一定的困惑和失望。虽然在美、荷、英、澳、日和前苏联等国家, 已研制成许多种作物的模拟模型及特定作物的不同模拟模型, 并开始应用于实践, 但有些生长模型不断扩展和细化, 过分偏重于理论或假说对生长发育和产量形成等生理过程的解释而缺少必要的验证。

(4) 成熟期: 20 世纪 90 年代中期始, 模型被视为一种启发式的工具, 因而对其应用价值和局限性有了比较客观的认识。同时出现了模型的持续改良与示范应用, 在指导作物管理、育种、施肥、灌溉等方面获得了成功的实践。另外, 90 年代以来, 许多研究利用作物模型来探索全球气候变

化的影响及农业生产可持续发展的策略等。作物模型还开始与其他信息技术如遥感、地理信息系统、网络技术等相结合,在信息农业中发挥出更大的作用。

2. 不同学派的发展特点

国际上的作物模拟研究可以概括为三个学派,分别以荷兰、美国、中国为不同学派的突出代表,特别是荷兰和美国的作物模拟研究在国际上奠定了良好的学术地位,并获得了较大范围的评价和应用。然而,近年来不同学派及不同国家的作物模拟研究逐步表现为相互合作、渗透、借鉴与综合。

20世纪60年代,以de Wit为首的荷兰学者提出了作物生长动力学学说,并研制出第一个完整的作物生长模型 ELCROS,极大地推动了世界作物模拟研究的发展。荷兰的作物模拟研究注重模型的机理性、研究性、数学化,因此模型多偏重于理论研究。典型性的模拟研究一般利用现有理论或假说构造生理生态过程模型或子模型,然后将数学模拟结果与有关实验数据相比较,评价现有理论或假说对生长发育和产量形成等生理过程的解释性。同时模型的研制者还可对现有理论或假说进行修改、补充,直至最后提出新的理论、假说或见解。

美国的作物生长模型几乎是与荷兰的工作同步发展起来的,但美国科学家提出的模型更强调模型的系统性、预测性、通用性。尤以小麦、水稻、棉花等作物的生长模型为主导。充分考虑不同作物类型的个性特征,综合量化作物生长发育过程及其与环境因子的动态关系。既有地上部的生长发育和产量形成,又有地下部的根系生长以及氮素、水分的吸收和利用;既有较微观的过程模块,又有较宏观的产量预测和技术评价。模型的运作不受地点、时间、品种和技术等因子的限制,具有广泛的实用性。然而大多数模型需要进一步提高作物系统的解释性和机理性,强化系统合成知识的功能。

中国科学家在作物生育模拟及优化决策的不同方面,也已取得了较好的研究进展,先后提出了水稻、小麦、玉米和棉花等作物模拟模型及优化栽培系统。例如江苏省农科院高亮之等提出的水稻栽培计算机优化决策系统(RCSODS)将水稻生长模型与栽培优化决策相结合,在水稻作物模拟及栽培管理方面,有一定的特色和应用价值。中国的模型一般注重实用性和预测性,因此具有较强的地域性和经验性。另外有些系统的功能比较单一,往往侧重于作物生育的某些方面,难以定量描述和预测作物生长发育的综合关系。

三、作物模拟模型的作用

1. 模型的意义

作物模型最重要的意义是对整个作物生育系统的知识进行综合,并量化生理生态过程及其相互关系,即综合知识和量化关系。作物模型是利用计算机强大的信息处理和计算功能,对不同生育过程进行系统分析和合成,其实质上相当于所研究系统的最新知识的积累和综合。在这种知识合成的过程中,还能鉴定知识空缺,从而明确新的研究方向。同时,作物模拟研究在理解作物生理生态过程及其变量间关系的基础上,进行量化分析和数理模拟,从而促进了对作物生育规律由定性描述向定量分析的转化过程,深化了对作物生育过程的定量认识。

2. 模型的功能

成功的作物模型之所以受到作物科学家的肯定和重视,是因为模拟模型具有其他研究手段不可替代的功能:理解、预测、调控。作物模型能够帮助人们理解和认识作物生育过程的基本规律和量化关系,并对作物生长系统的动态行为和最后产量进行预测,从而辅助进行对作物生长和生产系统的适时合理调控,实现高产、优质、高效和持续发展的目标。

3. 模型的应用

作物模型的主要应用有四个方面,即教学、研究、管理、评估。较理想的作物生长模型,不仅具有良好的机理性和预测性,并且以其较强的通用性和灵活性而适用于不同的生态地区和各种层次的用户。

(1) 应用作物模型开展作物学的辅助教学和科技推广活动,提供有关作物生物学过程及其与环境和技术关系的直观动态教学及科普工具。

(2) 利用作物模型在计算机上进行假设测验和模拟试验,研究数量生理生态过程的反应模式、栽培管理的技术途径及品种改良的目标性状等,已成为作物学科的一种有效的研究手段。这样可以成功地避免实验研究中干扰因素多、周期长、费用高等不足。例如,表 1.1 列出不同灌溉条件下不同叶型棉花品种产量水平的模拟试验结果,表现为显著的灌溉水平与基因型的互作。

(3) 在作物模型的基础上,建立作物管理决策支持系统及智能化专家系统等,可进行栽培方案的设计,并在生长过程中确定适宜的管理调控