

# 作物生长模拟模型研究进展

薛 林<sup>1</sup>, 郑国清<sup>2\*</sup>, 戴廷波<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学 农学院, 江苏 南京 210095; 2. 河南省农业科学院 农业经济与信息研究中心, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 作物生长模拟模型是对作物生长发育过程及其与环境条件、栽培管理技术的动态关系进行的定量描述和预测, 模型的研究有利于农业科学成就的综合集成, 同时也是作物种植管理决策现代化的基础。为此, 较系统阐述了作物生长模拟模型的定义、发展、特点及建模原理。分析了目前国内外取得的成果及存在的问题。在此基础上指出作物生长模拟模型研究应趋于微观和宏观研究, 应加强宏观研究与微观研究的沟通。

**关键词:** 作物模型; 生长模型; 定量描述

**中图分类号:** S126      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-3268(2011)03-0019-06

## A Review on the Research of Crop Simulation Model

XUE Lin<sup>1</sup>, ZHENG Guo-qing<sup>2\*</sup>, DAI Ting-bo<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Agricultural Economy & Information, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Crop growth simulation model is used for quantitative description and prediction the dynamic relationship of crop growth and development process, environmental conditions, cultivation and management, as well as the basis for crop management in a modern way. The simulation model also could be conducive to the comprehensive integration of scientific achievements. This paper has described the definition of crop growth model, development and characteristics, the principle of establishing model and achievements and problems from the domestic and abroad. On the basis of crop growth simulation model, the future work should be tended to micro and macro study, strengthen communication between macro and micro studies.

**Key words:** Simulation model; Growth model; Quantitative description

### 1 作物模型的定义及特点

作物生长模拟模型简称作物模型, 是作物科学中引进系统分析方法和应用计算机后兴起的新型研究领域<sup>[1]</sup>。它将作物、环境和栽培技术作为一个整体系统, 应用系统分析的原理和方法, 综合大量的作物遗传学、植物生理学、生态学、农业气象学、农学、土壤肥料学等学科的理论 and 研究成果, 对作物生长发育、光合生产、器官建成和产量形成等生理过程及其与环境和技术的关系加以理论概括和数量分析, 建立相应的

数学模型, 然后在计算机上进行动态的定量化分析和作物生长过程的模拟研究<sup>[2-4]</sup>。作物模型的建成有利于科学研究成果的综合集成利用, 同时也是作物种植管理决策现代化的基础, 对农业生产和作物管理具有重要意义<sup>[5]</sup>。目前, 许多国家已经对水稻、小麦、玉米、棉花、花生、番茄、大豆、苜蓿等多种作物建立了模拟模型。据不完全统计, 现有的作物专用模型有 30 多种, 多作物通用模拟模型有 10 余种。

作物生长模型是对作物生长发育生理生态过程基本规律及其相互关系的量化表达, 因此具有基础

收稿日期: 2010-09-13  
基金项目: 河南省科技攻关计划重点项目(029102110042); 河南省农业科学院科技发展专项资金项目(豫农科管(2007)12号)  
作者简介: 薛 林(1985-), 男, 甘肃兰州人, 在读硕士研究生, 研究方向: 农业信息技术。E-mail: xue\_lin852@126.com  
\* 通讯作者: 郑国清(1964-), 男, 河南淅川人, 研究员, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事农业信息技术、数字农业研究。  
E-mail: zgqx@hnagri.org.cn

性、量化性及一般性的特征。比较理想的作物生长模型应该具有系统性、动态性、机制性、预测性、通用性、易用性、灵活性、研究性、应用前景广泛等特征。其中系统性和预测性是其最显著的 2 个特征。

2 作物模型的发展历史

自 20 世纪 60 年代由荷兰的 De Wit 和美国的 Duncan 开创作物生长模拟研究以来,随着计算机技术和系统科学的发展以及作物学知识的累积,作物模型研究发展十分迅速。目前,国际上作物模型可以概括为 3 个学派<sup>[2,5]</sup>,分别以荷兰、美国和中国为代表。荷兰和美国的作物模拟研究在国际上具有良好的学术地位和较大的影响力,并获得了较大范围的应用。

Bouman 等<sup>[9]</sup>将荷兰作物模拟研究的发展分为 3 个阶段,即早期、中期和近期。Sinclair 等<sup>[2]</sup>将美国作物生长模拟的发展比喻为一个生命过程:经历了从婴儿期到成熟期的过程。在模型研究的侧重点上,2 个国家也有所不同。荷兰的作物模拟模型研究主要强调作物的机制性和共性。1970 年 de Wit 等开创了作物生长动力学理论,开发了著名作物生产模拟系统 ELCROS (Elementary Crop Growth Simulator)。它可以模拟作物生长的一系列基本过程,包括农田小气候、光合作用、呼吸消耗、水分平衡和生长发育。1987 年建立的 BACROS (Basic Crop Growth Simulator)综合模型,对作物蒸腾作用碳素平衡过程进行了详细描述,后来又在此基础上建立了 1a 生作物的概括性模型 MACROS (Modules for Annual Crop Simulation)和小麦模型 SUCROS (Simple and Universal Crop Simulator)。美国作物模型的显著特点是实用性和综合性。如 20 世纪 80 年代初,由美国农业部农业研究署主持完成的棉花生长模拟模型 GOSSYM (Gossypium Simulation Models)<sup>[7]</sup>、大豆生长模拟模型 GLYCIM<sup>[8]</sup>,以及 Ritchie 等<sup>[9]</sup>研制的禾本科作物生长模型 CERES (Crop Environment Resource Synthesis)系列,这些模型在生产中都有较多的应用。

我国作物生长模拟模型的研究起步较晚,但是发展很快。目前,已经在作物生育期模拟模型及优化决策支持系统的不同方面取得了一些成绩。如高亮等<sup>[10]</sup>建立了水稻“钟模型”模型,并将作物模拟与水稻栽培优化原理结合,研制水稻栽培模拟优化决策系统 RCSODS (Rice Cultivation — Simulation — Optimization Decision Making System)<sup>[11]</sup>;冯利平等<sup>[12]</sup>建立了小麦发育期动态模拟模型;潘学标等<sup>[13-15]</sup>研制了棉花生长发育模拟模型 COTGROW (Cotton Growth and Development Simulation Model);郑国清等<sup>[16]</sup>建立了玉米发育期动态模拟模型;汤亮等<sup>[17]</sup>建立油菜生育期模拟模型。我国模型一般注重实用性和预测性,在研究环境和作物关系时引入许多统计模型,虽然解决实际问题时较实用,但在机制上比较欠缺。

随着科技进步,各种先进仪器相继应用于模型研究中,作物模拟模型资料获取方法日益成熟,准确性日益提高,模型与计算机技术的结合应用更加紧密。在此基础上,出现了一系列关于提高作物模型预测性和监测性的报道。如颜春燕等<sup>[18]</sup>利用 PROSPECT 模型和实测的玉米叶片光谱数据,得出了叶肉结构参数 N,进而在理论上模拟了植被单叶光谱特性;赵巧丽等<sup>[19]</sup>、冯晓等<sup>[20]</sup>利用冠层反射光谱建立夏玉米 LAI 估算模型和干物质估测模型;常丽英等<sup>[21]</sup>利用 SPAD 仪测定水稻叶绿素含量建立水稻叶色变化动态模拟模型;冯伟等<sup>[22]</sup>、黄芬等<sup>[23]</sup>利用高光谱遥感建立了小麦产量预测模型;胡昊等<sup>[24]</sup>利用可见光—近红外光谱对冬小麦进行氮素营养诊断与生长检测;郭建茂等<sup>[25]</sup>利用遥感对冬小麦生长模拟进行了研究;王幼奇等<sup>[26]</sup>利用 LARS-WG 天气发生器模拟产生黄土高原地区日气象资料以应用于作物研究。作物模拟模型研究虽然取得了一定的成果,但仍然处于探索阶段,研究方法相对陈旧,没有取得突破性进展。

国外主要从事作物模拟模型研究的学者和国内主要相关科研单位如表 1 所示,建立的有代表性的模拟模型见表 2<sup>[27-33]</sup>。

表 1 国外主要从事植物模拟模型研究的学者和国内主要相关科研单位

国外学者	国内从事植物生长模拟研究的主要单位
de Wit, Goudrian, Penning de Vries, Van Koulens	中国科学院、中国农业科学院、江苏省农业科学院、河南省农业科学院、
Duncan, Ritchie, Jones, Curry, Arkin, Fick, Godwin,	北京市农林科学院、山东省农业科学院、浙江大学、中国农业大学、
Rickman, Sinclair, Seligman, Bouman, et al.	南京农业大学、华南农业大学、河南农业大学、江西农业大学等

表 2 国内外建立的有代表性的模拟模型

国外较有影响的模型	国内较有影响的模型
CERES(Crop Environment Resource Synthesis)	水稻“钟模型” <sup>[10]</sup> (Rice Clock Model)
GOSSYM(Gossypium Simulation Models)	RCSODS <sup>[11]</sup> (Rice Cultivation—Simulation—Optimization Decision Making System)
SOYGR(Soybean Growth)	CCSODS <sup>[12-28]</sup> (Crop Cultivation—Simulation—Optimization Decision Making System)
SUCROS(Simple and Universal Crop Simulator)	RSM <sup>[29]</sup> (Rice Simulation Model)
SIMCOT(Simulation of Cotton)	CGSM <sup>[30]</sup> (Cotton Growth Simulation Model)
ELCROS(Elementary Crop Growth Simulator)	作物知识模型 <sup>[28-30]</sup> (Crop Knowledge Models)
BACROS(Basic Crop Growth Simulator)	玉米发育期动态模拟模型 <sup>[16]</sup> (Simulation Model of Maize Phenology)
MACROS(Modules for Annual Crop Simulation)	COTGROW <sup>[13-15]</sup> (Cotton Growth and Development Simulation Model)
EPIC(Erosion-productivity Impact Calculator)	油菜生育期模型 <sup>[32]</sup> (A Process-Based Model for Simulating Phenological Development in Rapeseed)
COMAX(Crop Management Expert)	RICAM(Rice Growth Calendar Model)
APSIM(Agricultural Production System Simulator)	
WOFOST(World Food Studies)	
SIMCOY(Simulation of Corn Yield)	

3 作物模拟模型建立的原理及技术路线

作物模拟模型建立原理如下: 假设作物生产系统状态在任何时刻都能够定量表达, 该状态中各种物理、化学和生理机制的变化可以用各种数学方程加以描述; 且作物在较短时间间隔内物理、化学和生

理过程不发生较大的变化。这样则可以对一系列的过程(如光合、呼吸、蒸腾、生长等)进行估算, 并逐时累加为日过程, 再逐日累加为生长季, 最后计算出整个生长期的干物质产量或可收获的作物产量<sup>[34]</sup>。建立模型技术路线如图 1 所示。

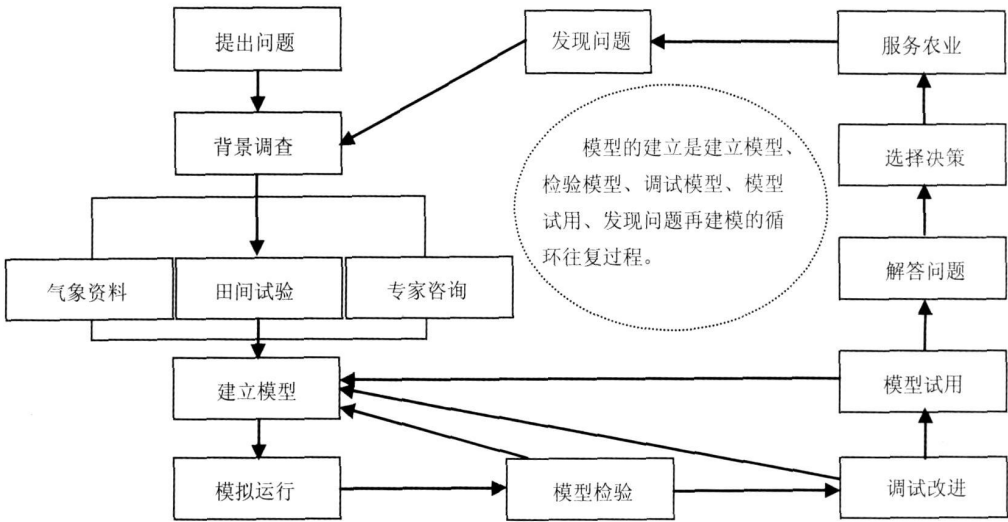


图 1 作物生长模型子模型的建立、调试及应用

Solomon 等<sup>[35]</sup> 将模型的建立分为 3 个水平, 即对温度和辐射有响应的仅含有基本生理过程模拟模块、作物光温水生产潜力模拟、作物光温水营养生产潜力模拟。作物模拟模型的建立及利用应在第三水平的基础上, 建立覆盖面更加宽广、适用性更加简洁明了, 程序设计更加完善的智能模拟模型系统。智能模拟模型系统建立及输出如图 2。

建立作物模型时, 将整个植株分割成不同部分分别进行模拟。一般将作物分成植株、器官、组织、根系、基因调控子模型, 然后将这些不同的子模型进

行整合建立智能型模型。下面就植物株形、组织和器官、基因调控网络 3 个方面进行介绍。

3.1 作物株形模拟

植物株型的模拟是在生态环境下将植物生长过程划分为不同的阶段, 并建立半自动模拟模块, 将这些模拟模块整合对植株生长进行描述<sup>[36]</sup>。植物株型数学模拟表达原理 L-系统, 是将模型分割成不同类型以模拟复杂的作物生长<sup>[37]</sup>。近年来, 在 L-系统基础上对株型的模拟得到了快速发展, 如 Fourcaud<sup>[38]</sup> 等利用树木分支生长受重力的机械影响

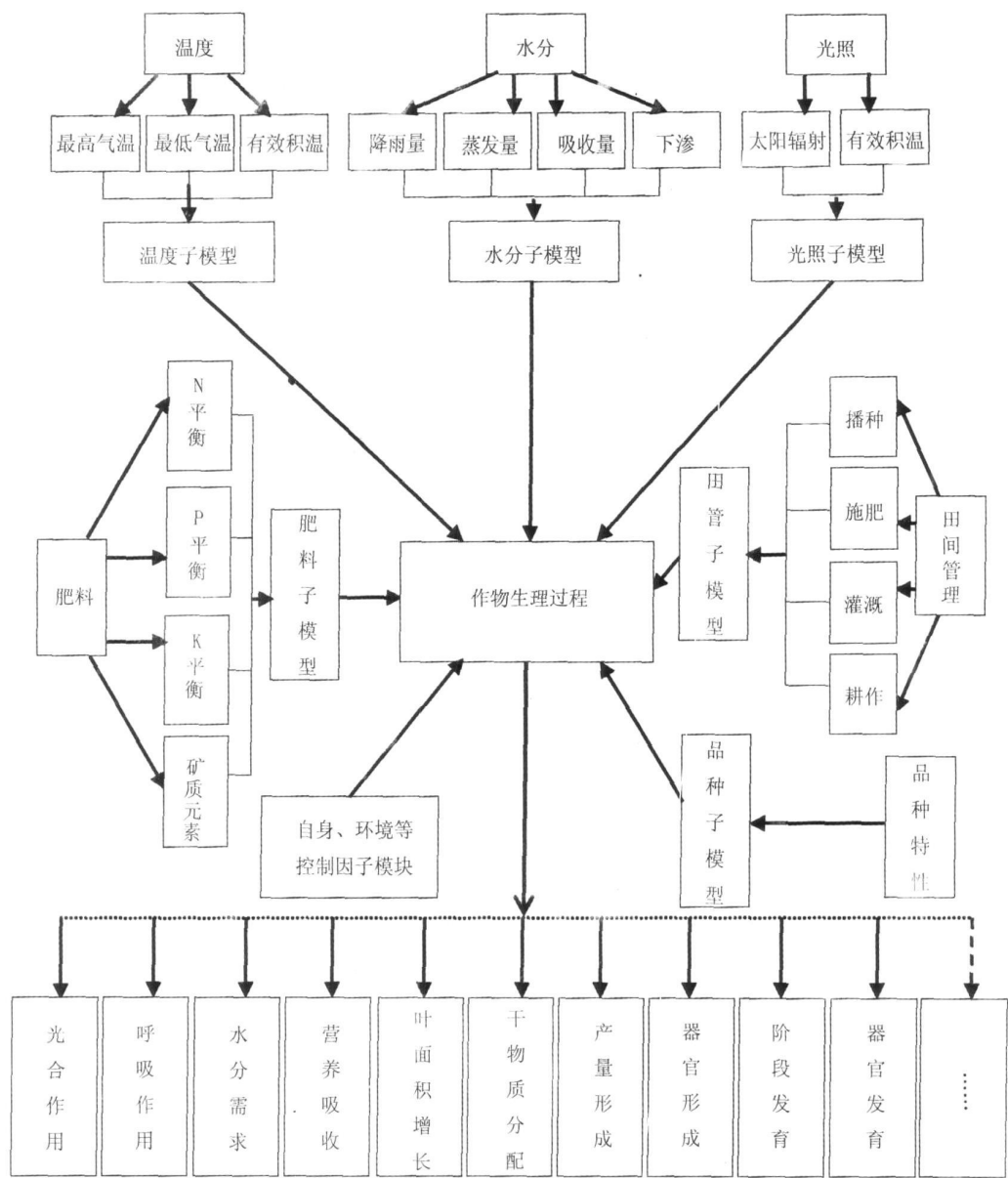


图 2 作物生长模型建立及输出技术路线

模拟了树枝形状的发展。Soler 等<sup>[39]</sup>模拟了植物冠层太阳辐射的转换模型。

3.2 植物组织和器官模拟

植物组织和器官通常以外观表现或者体积增长进行离散和连续描述,这个描述比起植物株型模型需要更多数学通用公式,并且至今未得出一个通用模型<sup>[40]</sup>。近几年通过物理试验、数学分析和计算机模拟已经证明叶片和花瓣形状的皱缩是突发现象,但并不是直接由基因控制<sup>[41]</sup>;在一个更具体的个体中,利用连续和离散的试验分析方法重塑模型证明了局部生长速率决定金鱼草花瓣的形状<sup>[42]</sup>,组织器官生长决定了植物生长。因此,模拟植物组织和器官的生长将在以后的研究中处于重要的地位。

3.3 结合基因调控网络的模拟

在几何和机械限制范围内,植物发展模式 and 生长形式最终是由基因决定。为此, Mendoza 等<sup>[43]</sup>综合众多试验数据得到基因调控网络。这个网络系统被描述成一个类似于电脑系统的逻辑电路,它控制着植物芽分化和拟南芥植物的开花。近年来,基因调控网络模拟模型由于一些技术原因没有得到进一步发展,但若在一些遗传因素得到发展和突破后,基因模拟软件将在植物生长发育研究中起到重要作用。

随着计算机多媒体技术、网络技术、3S 技术、基因图谱的克隆发展,基因网络调控与宏观调控技术作为作物栽培管理计算机模拟研究注入了新的活力。

## 4 作物模拟模型研究中存在的问题及解决办法

随着计算机和模拟技术的发展,作物模拟模型得到了长足发展,但由于作物模拟模型的建立是一个系统工程,受到各种条件和因素的影响,存在许多局限性和不足,主要表现在以下5个方面:

(1)模型参数与生态因子机制性弱<sup>[44]</sup>。现有模型参数的确定方法,大多数来自文献及实际试验结果,缺乏生理学机制及生态学物质循环的逻辑推断。

(2)模型多是半经验半机制性<sup>[45]</sup>。大多数作物模型仅限于几个因素限制的生产水平,并没有考虑全部的限制因子对模型的影响,模型的准确性不够。

(3)模型的通用性较差<sup>[46]</sup>。很多模型仅是对作物在某个区域生产过程的模拟,推广范围窄。

(4)模型开发至今没有统一的方法与标准。各种模型对作物生长过程的量化描述各不相同,各类参数取值差别很大。

(5)模型不够简洁实用。作物模拟模型最终目的是面向用户,简洁实用必不可少,但现在的模型由于科学性强,普适性差,操作复杂,使用不便。

鉴于模型研究中出现的问题,在后续模型研究中应向全面综合化、生产实践化、网络化、智能化、系统化方向发展,并且做到与现代仪器、计算机技术进一步结合,增强模型的适用性、扩大应用范围,并且开展多学科联合研究和推广网络化应用,形成多学科、多组织的协同合作,进而建立更加完善的作物计算机管理系统,为农业可持续发展服务。

## 5 作物生长模拟模型研究展望

作物模拟模型的研究正处于发展阶段。随着计算机技术不断更新和植物生理学、生态学、气象学等学科研究不断进步,作物内部机制逐渐明确,模型研究必然经历由对温度和辐射有响应的,仅含有基本生理过程模拟模块,到作物光温水生产潜力模拟,再到作物光温水营养生产潜力模拟,最终到包括各种条件在内的智能型模拟。在现有模型研究中,第一、第二和第三这3个水平已经得到发展,未来模型的发展趋势将以建立智能型模拟模型为重点<sup>[1,5]</sup>。

智能型模拟模型的研究将朝着宏观和微观2个方向发展,且做到微观和宏观相互反馈、互补发展,而植物生长模型起到联接微观和宏观的桥梁作用。微观上,作物模拟模型的研究进一步具体化、机制化,对作物品种、个体、器官、组织、细胞以及生理生化过程进行模拟,甚至可以微观到分子,进而提高育

种工作效率;宏观上,模拟模型与新型技术结合<sup>[46-47]</sup>,使得作物模型生长信息的检测能力从田块尺度扩展到了区域尺度;在模型建立及应用上,要做好微观与宏观的结合,使得作物模拟模型成为微观检测和宏观发展的桥梁,宏观发展建立模型为微观发展提供方向,微观发展中遇到问题反馈于宏观调控,进而改进模型,发展模型,完善模型。

### 参考文献:

- [1] 高亮之. 农业模型学基础[M]. 香港: 天马图书有限公司, 2004.
- [2] Sinclair T R, Seligman N G. Crop modeling: from infancy to maturity[J]. *Agronomy Journal*, 1996, 88: 698-764.
- [3] 曹卫星. 国外小麦生长模拟研究进展[J]. *南京农业大学学报*, 1995, 18(1): 10-14.
- [4] 李存东, 曹卫星, 李旭, 等. 论作物信息技术及其发展战略[J]. *农业现代化研究*, 1998, 19(1): 17-20.
- [5] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [6] Bouman B A M, Keulen H van, Laar H H van. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview[J]. *Agricultural Systems*, 1996, 52: 171-198.
- [7] Reddy V R, Baker D N, Jenkins J N. Validation of GOSSYM Part II. Mississippi conditions[J]. *Agricultural systems*, 1985, 3(17): 133-154.
- [8] Reynolds J F, Acock B. Predicting the response of plants to increasing carbon dioxide: A critique of plant growth models[J]. *Ecological Modelling*, 1985, 29(1-4): 107-129.
- [9] Ritchie J T, Alcocilja E C, Singh U. IBSNAT and the CERES-Rice Model[C]. *Weather and Rice IRRRI Philippines*, 1987.
- [10] 高亮之, 金之庆. 水稻计算机模拟模型及其应用之一[J]. *中国农业气象*, 1989, 10(3): 8-10.
- [11] 高亮之, 金之庆. RCSODS——水稻栽培计算机模拟优化决策系统[M]. *计算机农业应用*, 1993(3): 14-20.
- [12] 冯利平, 高亮之, 金之庆, 等. 小麦发育期动态模拟模型的研究[J]. *作物学报*, 1997, 23(4): 419-424.
- [13] 潘学标, 韩湘玲, 石元春. COTGROW: 棉花生长发育模拟模型[J]. *棉花学报*, 1996, 8(4): 180-188.
- [14] 潘学标, 韩湘玲, 董占山, 等. 棉花生长发育模拟模型 COTGROW 的建立 I 光合作用和干物质生产与分配[J]. *棉花学报*, 1997, 9(3): 132-141.
- [15] 潘学标, 韩湘玲, 王延琴, 等. 棉花生长发育模拟模型 COTGROW 的建立 II 发育与形态发生[J]. *棉花学报*, 1999, 11(4): 174-181.
- [16] 郑国清, 高亮之. 玉米发育期动态模拟模型[J]. *江苏*

- 农业学报, 2000, 16(1): 15-21.
- [ 17 ] 汤亮, 朱艳, 刘铁梅, 等. 油菜生育期模拟模型研究[ J ]. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2493-2498.
- [ 18 ] 颜春燕, 蒋耿明, 王成, 等. 植被单叶光谱特性的理论模拟[ J ]. 遥感学报, 2003, 7(2): 81-85.
- [ 19 ] 赵巧丽, 郑国清, 戴廷波, 等. 基于冠层反射光谱的玉米 LAI 和地上干物质估测研究[ J ]. 华北农学报, 2008, 23(1): 219-222.
- [ 20 ] 冯晓, 郑国清, 乔淑, 等. 基于冠层反射光谱的夏玉米 LAI 估算模型研究[ J ]. 玉米科学, 2008, 16(6): 86-89.
- [ 21 ] 常丽英, 朱艳, 曹卫星, 等. 水稻叶色变化动态的模拟模型研究[ J ]. 作物学报, 2007, 33(7): 1108-1115.
- [ 22 ] 冯伟, 朱艳, 曹卫星, 等. 基于高光谱遥感的小麦籽粒产量预测模型研究[ J ]. 麦类作物学报, 2007, 27(6): 1076-1084.
- [ 23 ] 黄芬, 朱艳, 曹卫星, 等. 基于模型与 GIS 的小麦籽粒品质空间差异分析[ J ]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3087-3095.
- [ 24 ] 胡昊. 基于可见光—近红外光谱的冬小麦氮素营养诊断与生长检测[ D ]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- [ 25 ] 郭建茂. 基于遥感与作物生长模型的冬小麦生长模拟研究[ D ]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [ 26 ] 王幼奇, 樊军, 邵明安. LA RS—WG 天气发生器在黄土高原的适应性研究[ J ]. 中国水土保持科学, 2007, 5(3): 24-27.
- [ 27 ] 曹宏鑫. 小麦群体与土壤水分及氮动态的模拟优化决策研究[ D ]. 南京: 南京农业大学, 1997.
- [ 28 ] Karin W, John D H. Plant growth modeling for resource management[ M ]. Boca Raton: CRC Press, 1994.
- [ 29 ] 骆世明, 郑华, 陈春焕, 等. 水稻高产栽培中应用计算机模拟的研究[ J ]. 广东农业科学, 1990(3): 4-16.
- [ 30 ] 马新明. 棉花蕾铃发育及产量形成的模拟模型(COT-MOD)[ D ]. 南京: 南京农业大学, 1996.
- [ 31 ] 朱艳, 曹卫星, 戴廷波, 等. 小麦栽培氮肥运筹的动态知识模型[ J ]. 中国农业科学, 2003, 36(9): 1006-1013.
- [ 32 ] 朱艳, 曹卫星, 戴廷波, 等. 小麦目标产量设计及适宜品种选择的动态知识模型[ J ]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 231-236.
- [ 33 ] 朱艳, 曹卫星, 周治国, 等. 冬小麦生长适宜动态指标的知识模型[ J ]. 中国农业科学, 2004, 37(1): 43-50.
- [ 34 ] 李军. 作物生长模拟模型的开发应用进展[ J ]. 西北农业大学学报, 1997, 25(4): 102-107.
- [ 35 ] Solomon K H, Hoffman G J, Howell T A. Management of farm irrigation systems[ M ]. American Society of Agricultural Engineers, 1992.
- [ 36 ] Prusinkiewicz P. A review: Modeling of spatial structure and development of plants[ J ]. Sci Hort, 1998, 74: 113-149.
- [ 37 ] Prusinkiewicz P. A look at the visual modeling of plants using L-systems[ J ]. Agnomie, 1999, 19: 211-224.
- [ 38 ] Fourcaud T, Lac P. Numerical modelling of shape regulation and growth stresses in trees—I: An incremental static finite element formulation[ J ]. Trees, 2003, 17: 23-30.
- [ 39 ] Soler C, Sillon F, Blaise F, *et al.* An efficient instantiation algorithm for simulating radiant energy transfer in plant models[ J ]. ACM Trans Graph, 2003, 22: 204-233.
- [ 40 ] Przemyslaw P. Modeling plant growth and development[ J ]. Current opinion in plant biology, 2004, 7(1): 79-83.
- [ 41 ] Marder M, Sharon E, Smith S, *et al.* Theory of edges of leaves[ J ]. Europhys Lett, 2003, 62: 498-503.
- [ 42 ] Rolland-Lagan A G, Bangham J A, Coen E. Growth dynamics underlying petal shape and asymmetry[ J ]. Nature, 2003, 422: 161-163.
- [ 43 ] Mendoza L, Alvarez-Buylla E R. A network model: Genetic regulation of root hair development in *Arabidopsis thaliana*[ J ]. Theor Biol, 2000, 204: 311-326.
- [ 44 ] 邱建军, 肖茛南. 作物生长模拟模型参数校正与有效化的理论和实践[ J ]. 应用生态学报, 1999, 10(6): 679-682.
- [ 45 ] 花登峰, 曹卫星. 基于构件化生长模型的作物管理决策支持系统[ D ]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [ 46 ] 魏俊凯, 温暖, 郑国清. 我国玉米模型的研究进展[ J ]. 玉米科学, 2009, 17(3): 130-133.
- [ 47 ] 姜海燕, 朱艳, 曹卫星, 等. 作物模型资源构造平台(CM RCP)的构建研究[ J ]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 170-175.