

# 作物模型研究进展\*

杨靖民<sup>1</sup>, 杨靖一<sup>2</sup>, 姜旭<sup>1</sup>, 张忠庆<sup>1</sup>

1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2. 加拿大农业与食品部温室与加工作物研究中心, 安大略省, NOR1G0

**摘要:** 作物模型是用来模拟作物生长、发育和产量形成的动态生长过程的计算机软件。自 20 世纪 60 年代以来, 作物模型已从幼年期发展到成熟期, 目前已成为各国农业科学研究中最有力的工具之一。文中对作物模型的研究历程和进展进行了综述, 并总结了我国在作物生长模型研究方面的经验和不足, 为今后的模型研究和应用提供参考。

**关键词:** 作物模型; 统计模型; 机理模型; 专家系统

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1000-5684(2012)

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20120508.1546.003.html>

## Progress of Crop Model Research

YANG Jing-min<sup>1</sup>, YANG Jing-yi<sup>2</sup>, JIANG Xu<sup>1</sup>, ZHANG Zhong-qing<sup>1</sup>

1. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun, 130118, China;

2. Greenhouse & Processing Crops Research Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, 2585 County Road 20, Harrow, Ontario, Canada NOR1G0

**Abstract:** Crop growth model is a computer program designed to simulate dynamic processes of crop growth, development and yield. Since the 1960s, crop model has been developed from his infancy to its maturity at present age, and it become one of the most important research tools globally. This paper presented summaries of crop model development and history, and also summarized modelling experiences and problems in our country. The paper provides valuable information for the future modelling researches and application.

**Key words:** crop growth model; statistical model; dynamic model; decision support system

### 1 作物模型的概念

作物生长模拟模型现已成为农业科学研究中最有力的工具之一, 在作物栽培管理、可持续农业和政府决策中所起的作用已逐渐被人们所认识, 其应用的领域也正在不断扩大。科学家对作物生长模拟模型的认识, 是随着研究的深入而有不同的理解。不论怎样理解, 一个基本的共识是作物模型应尽可能用数学公式描述其作物生长动态过程, 以代替用黑箱方法进行的最优估计<sup>[1]</sup>。后来的学者都有类似的定义, 例如 Edwards 认为作物生长模型是指用数学关系表达作物的生长过程<sup>[2]</sup>。Sinclair 和 Montieth 提出作物模型是用计算机模拟方法, 对作物生长过程进行综合的数值模拟, 通过给定一系列生物系数和相应的环境变量, 用来预测作物的生长发育和产量的定量模拟系统<sup>[3]</sup>。

国内学者对作物模型的概念也有类似的认识。戚昌瀚认为作物模型是从作物生理生态的机理出发, 对作物生长的过程进行数量描述, 通过试验找出作物生育过程与环境因素间的动态关系来预测产量, 并且能够通过作物生育过程对产量出现的差异提供解释<sup>[4]</sup>。曹卫星认为作物生长模拟是将作物及影响作物生长发育的环境和技术因子作为一个整体, 对作物的生理过程及其与环境和技术动态关系用数学模型描述, 并用计算机编程与系统集成技术进行作物生长系统的动态模拟和预测<sup>[5]</sup>。

上述各种概念表述尽管不尽相同, 但归纳起来可定义为作物模型是借助于数值模拟手段对作物生长发育的生物学过程进行动态模拟。具体来说, 作物模型是以作物生理和生态过程为基础, 对作物的生长发育和生物量、产量的形成过程及其环境影响因子进行动态模拟的一系列数学公式的综合表达, 借助于计算机

\* 基金项目: 国家“973”项目(2011CB10053)

作者简介: 杨靖民, 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 作物生长模型与模拟技术。

收稿日期: 2011-12-26

网络出版时间: 2012-05-08 15:46

编程手段实现这种模拟过程。目前所称作物生长模型多指后者。无论研究者的定义有何区别,其实质都是反映了作物生长模型研究方法的发展历程,即从环境因子对作物生长的状态变量(干物质积累、养分和水分吸收等)的综合模拟分析,到生长机制(如光合作用、呼吸过程等)的模拟。

作物模型根据研究的程度和考虑的因素不同,有简单模型和复杂模型之分。简单模型可以利用一个生长公式模拟作物生长,而复杂模型应用很多数量关系模拟作物生长和器官发育,需要的输入参数多,提供的输出也多。

## 2 模型分类

在农业系统中,建立模型包括2个关键学科:生态学和数学<sup>[6]</sup>;在计算机计算方面,一个模拟模型可作为代表现实世界物理和数学的抽象过程以及计算机程序的设计<sup>[7]</sup>。

有许多类型的模拟模型,并且有不同的分类方法,如曹宏鑫等根据建模目的、采用的方法以及所用资料可靠性等的不同可将模型分为(1)经验性模型和机理性模型;(2)描述性模型和解释性模型;(3)统计模型和过程模型;(4)应用模型和研究模型<sup>[8]</sup>。黄金龙把模型分为两大类:(1)描述性模型或统计性模型;(2)解释性模型或动力学模型<sup>[9]</sup>。France和Brown等根据数学基础给出分类:(1)实验模型和机理模型;(2)非动态模型和动态模型;(3)确定性模型和随机模型<sup>[10-11]</sup>。无论按哪一种方法分类,都可以归结为以下三类。

### 2.1 统计模型

经验性模型、描述性模型、实验模型、非动态模型等实际上都是应用统计方法建立的回归模型,着重建立输入和输出变量之间的相互关系,而引起变化的机理较少或根本不予反映(或称黑箱,即把所有变量放在一起考虑),偏重于应用。因此,从数学原理方面,可以将这些模型都归纳为统计性模型。一般情况下,该类模型不包括日时间变化,多数以年为步长,因而被称为是静态模型。例如作物产量与某种肥料施用量间的一元二次通用模型: $Y=a+bX+cX^2$ ,其中 $Y$ 为某一种作物产量, $X$ 为某一种肥料施用量, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为系数。 $X$ 在某一用量下时,对应 $Y$ 就有一个产量结果。需要通过田间试验,计算出某一气候条件下、某一地区的 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 系数。系数确定后,可以描述 $Y$ 与 $X$ 的关系,但无法模拟 $Y$ 随 $X$ 在生长期的变化过程。同时也未考虑环境条件变化对系数的影响。

### 2.2 机理模型

解释性模型、动力学(动态)模型等则是对引

起系统变化的过程和机理作“定量”描述,由1个或1组数量关系所组成。这类模型具有解释性,着重解释输入输出变量间的过程机理,以实现了对系统过程的理论假设进行定量化描述。因此,可以将这类模型归结为机理模型。该类模型都把时间 $t$ 作为变量,以天或者小时为步长,因而具有动态性。

例如,由英国土壤学家建立的作物生长模型,用微分方程描述的最简单作物生长率动态模型如下<sup>[12-13]</sup>: $dW/dT=(K_2W)/(K_1+W)$   $T_0 \leq W \leq T_k$ ,其中 $W$ 为蔬菜作物的干物质重, $T$ 为时间变量, $dW/dT$ 为每天增长率, $K_1$ 、 $K_2$ 为生长系数,由田间试验数据求得, $T_0$ 为开始时间, $T_k$ 为结束时间。当确定了不同作物的 $K_1$ 和 $K_2$ 参数后,该方程被成功用于英国和欧洲的20多种大田蔬菜作物、小麦和马铃薯的N肥预报等。目前该生长模型一直被广泛应用于英国和西欧国家的农业研究和推广部门。

复杂的作物生长机理模型已充分考虑了作物品种、器官发育、生长阶段和积温。与土壤水分运动模型、土壤有机碳氮模型一起,进行模拟和预报作物生长和产量,建立一个复杂的机理模型,增加了模型所需要的参数和输入变量。由于这类模型的数量关系复杂,每个作物都写成计算机子程序软件。例如CERES-Maize和CROPGRW-Soybean是玉米和大豆机理模型<sup>[14]</sup>等。

### 2.3 专家系统

专家系统是基于回归模型、机理模型和数据库发展起来的另外一类模型。专家系统的特点是强调对作物生长和农业生产的综合管理,依赖现有的土壤、肥料、植物保护等相关数据库和专家经验,进行预报。如陈桂芬等的玉米精准施肥专家系统是为解决玉米产量预测和精准施肥两大问题,以养分平衡法数学模型为核心,与地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)、和遥感系统(RS)技术(简称“3S”技术)、传统施肥技术和专家的经验相结合,利用微软公司提供的动态网络服务技术(ASP.NET)和2005数据库平台(SQL SERVER)而开发的施肥决策系统<sup>[15-17]</sup>。但是,该专家系统没有考虑玉米生长过程中环境变化和栽培方式、耕作方式等对施肥及产量的影响。农业技术转化决策系统(Decision Support System for Agrotechnology Transfer,简称DSSAT)可以被看做是北美有影响的作物生长决策系统之一,其中包括20多个作物系统模型(Cropping System Models)、公共调用土地利用模型、土壤模型和土壤水分模型<sup>[14, 18]</sup>。

## 3 作物模型研究进展

### 3.1 国外研究进展

作物生长模型与模拟技术是近半个世纪来农业数

量研究的一个新的方向，是目前国际最为活跃的农业前沿性研究领域之一。自20世纪50年代开始，作物模型以简单的模拟作物生长率（日光合产物）、呼吸作用和水分蒸腾为起始<sup>[19-20]</sup>，逐渐扩大到应用日天气数据计算积温、生长阶段、光合产物再分配，根、茎、叶等器官模拟，到影响作物生长因子的模拟（水、密度、土壤条件、养分和温度）<sup>[1]</sup>。进入20世纪80年代中期，作物模型发展、研究和应用方面都向深度和广度发展，其重要标志推出了一批有代表性的作物模型，例如禾谷类作物模型（CERES）<sup>[21]</sup>、豆科作物模型（SOYGROW）<sup>[22]</sup>和棉花模型（GOSSYM）<sup>[23]</sup>，并在理论研究和指导农业生产等方面得到了广泛的认同和肯定。纵观国外模型发展，大致可以分为如下4个阶段。

**3.1.1 模型萌芽阶段（1960年以前）** 作物生长动态模拟是借助于积温理论，最早追溯到1735年法国学者Reaumur提出的积温学说，即不同生态带的植被的生长（阶段）受累积日平均温度的影响。这一理论被许多学者所引用，标志着作物生长与温度的数量关系的开始<sup>[24-25]</sup>。随后，不同学者从植物生理、能量平衡等方面提出了相应的理论，如Gasparin于1844年提出5℃为作物有效温度的起点，后来的研究者对这个结论提出了许多完善和修正。Blackman提出作物生长率遵循复利理论，即干物质积累和干物质成正比，据此建立了作物生长净同化率模型<sup>[26]</sup>。1921年Fisher总结两人的思想提出了作物相对生长率模型<sup>[27]</sup>。

1924年英国统计学家Fisher提出积分回归方法并用于天气对小麦产量影响的研究，表明作物生长静态模型研究的开始<sup>[28]</sup>。从20世纪50年代起相关分析与回归分析方法广泛地用于作物产量预报模型、冬作越冬条件的评价模型及热量保证率模型等<sup>[29]</sup>。英国农业生态学家Watson将作物生长分析法进一步完善，建立作物叶面积指数模型，并于1958年改进了作物净同化率模型<sup>[30]</sup>。光合利用率（Radiation Use Efficiency，简称RUE）是作物模型模拟的起点，关于生长率和光合利用率的研究，Sinclair和Muchow<sup>[31]</sup>总结了20世纪以来研究者对RUE在近10种大田作物上的主要研究成果，去粗取精，辨析误区，指出：在生育期内周期性取植物样本和回归分析仍然是最经典的计算RUE的方法。他们的研究对数量模拟研究提供了宝贵的资料和结论<sup>[32]</sup>。

关于水分从植被、土壤表面和水面的蒸发计算，是作物生长模型—水分运动模型的基础。著名的彭曼蒸散公式是英国学者Penman<sup>[33]</sup>提出并建立在能量平衡和空气动力学理论基础上的计算公式，一直被许多模型应用至今，为精确模拟农田水分蒸发量奠定了基础<sup>[34]</sup>。美国学者Rabinowitch<sup>[35]</sup>根据叶片

光合机理，推导出了单位叶面积上的非直角光合模型，模拟了叶片的光合作用，并且被许多后来学者引用<sup>[36]</sup>。日本生态学家Monsi和Saeki首次提出了植被群体光合作用模型<sup>[37]</sup>，被认为是第一个作物生长群体光合作用模型，后来学者对他们的理论及其发展做了全面的总结报道<sup>[38]</sup>；认为该理论对光合作用和建立在其基础上的干物质积累和产量的形成奠定了基础，同时也是—些作物生长动力学机理模型的基础<sup>[38-39]</sup>。随着植物生理生态研究的不断深入，使得动态地模拟作物的生长发育过程及其与环境条件的关系成为可能。

**3.1.2 模型基础研制阶段（1961—1980）** 随着日本学者Monsi和Saeki提出植被冠层截光理论后，许多学者都对这一理论提出过修正，对这个领域的发展Hirose进行了全面的综述<sup>[38]</sup>，冠层太阳辐射截获理论被认为是作物生长模型研究开始的标志。Loomis和Williams<sup>[40]</sup>提出了一个比较简单的估算作物冠层最大太阳辐射截获量和光合作用的方法，开辟了通向以机理过程为基础、定量估算作物最大生长速率的道路。在此期间，荷兰的De wit<sup>[41]</sup>研究了玉米冠层的光合速率，并在计算机上进行了模拟。以此为基础，De wit<sup>[42]</sup>发表了第一个作物生长动力学模型ELCROS（Elementary Crop Simulator），20世纪70年代后期，在ELCROS基础上，发展形成更为复杂的BACROS（Basic Crop Growth Simulator，基本作物生长模拟器），模拟大田作物的生长和蒸腾作用<sup>[43]</sup>。Van Keulen借鉴ELCROS和BACROS模型的概念，研制了ARIDCROP模型，模拟地中海半干旱地区施肥自然草场植被生长和水分利用。该模型成功地与水分平衡模型相耦合，从而模拟水分胁迫条件下的植物生长；后来ARIDCROP模型又被成功地嵌入半干旱地区畜牧生产模型中，从此标志着作物生育模型应用时期的到来<sup>[44]</sup>。美国的Duncan等<sup>[45]</sup>发表了玉米叶面积与叶片角度对群体光合作用影响的模拟模型。Duncan等<sup>[46]</sup>以叶片冠层光合作用理论为基础，研制了玉米模型（SIMAIZ）。Splinter和他的学生Chen等<sup>[47]</sup>从作物生长的生物、物理和化学原理出发，研制了以小时为模拟步长的作物模型，将植物生长表示为光合作用和呼吸作用的函数。Stapleton和Meyers<sup>[48]</sup>则从系统的观点，模拟了棉花的生长过程。Splinter等<sup>[49]</sup>则根据植物生长过程中叶面积增长与叶面积的指数关系，建立了简单的作物生长模型。但是，上述模型主要都是从作物的生长机理出发，描述作物自身的生理过程，并没有考虑外界环境因子的胁迫作用。20世纪70年代末期，作物模型的发展开始考虑到更多的环境因素。例如Childs等<sup>[50]</sup>基于许多同时期的研究成果，建立以小时为步长的玉米生长模型。其中模拟植物生长是基于Chen<sup>[47]</sup>，Penning de Vires<sup>[43]</sup>和Splinter<sup>[49]</sup>的模型，同时引入了水分平衡过程和潜在、实际蒸散模型。此



外,还考虑了气孔阻力、根系生长对水分吸收、土壤湿度、渗透和传导上升过程等的影响。而且涉及的参数能够从试验获得,因此它与后来发展起来的基于过程的作物模型十分接近。

**3.1.3 模型开发校验阶段(1981—1990)** 自20世纪80年代以来,随着计算机的普及和编程语言的发展,作物模型研究方向转向于实际应用。一些被称为基于过程(Process-based)的动力学或生理学模型和其他模型互相耦合的复杂模型迅速发展起来,构成了系统模拟模型。这个阶段的目标是既要使模型的数量关系有理论依据,又能够用试验数据进行校验。在计算机编程方面实现模块化,参数和输入数据容易获得,在实际中易于应用。这类作物模型中,最有代表性的如CERES(Crop Environment Resource Synthesis;作物环境资源综合系统)系列作物模型。首先发表的是CERES-玉米模型<sup>[51]</sup>,此后CERES-小麦<sup>[52]</sup>、CERES-高粱等模型相继问世。这些模型已被广泛应用于不同环境条件下的作物估产、干旱评价、作物品种培育等。其他作物如大豆、棉花、向日葵等模型也相继发展起来。Wilkerson等<sup>[53]</sup>建立了大豆模型(SOYGRO)。

在此阶段,荷兰的模型SUCROS(Simple and Universal Crop Growth Simulator)<sup>[44]</sup>,是一个以日为步长的模型,基本框架源于过程模型BACROS,适用性较强,只需通过调整作物参数,即可适用于不同的作物。随后,以SUCROS为基础,发展了WOFOST(World Food Studies)模型。Penning de Vries等<sup>[54]</sup>研制了MACROS模块(Modules of an Annual Crop Simulator),模拟热带半湿润地区作物生长。

**3.1.4 模型综合应用阶段(1990年以后)** 进入20世纪90年代,随着多学科研究的深入,为了解决地区、国家和世界的农业综合发展对提高粮食产量,降低农业活动对环境污染的影响,许多研究项目都开始应用作物模型为模拟工具,进一步促进了模型发展的系统化、机理化和软件化。例如从单一作物模型到多作物模型,从不同生育过程的模拟到完整的作物生长模型,从简单的模型到带有用户指导的软件系统。作物生长模型的应用从产量预报到经济效益分析、政策模拟,可持续增长 and 环境保护等多元化方向发展;比较典型的应用包括作物模型在不同农业生态带的应用研究,应用作物模型对区域产量进行预测,对气候变化进行模拟,在不同土壤类型和耕作下的应用等。因此,作物生长模型研究开始侧重于现有模型的完善,而非进行新模型的研制,主要包括:模型适用性、准确性、易操作性等的研究。Sinclair发表的论文《作物模型:从幼年到成熟》,

标志着这一阶段的到来<sup>[31]</sup>。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系统(RS)、地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)、农业专家系统(AES)、网络技术、决策支持系统(DSS)等相结合,在信息农业中发挥出更大的作用,其中典型的模型有:

美国的Hybird-Maize模型是一个很好的模型综合应用开发的范例,由内布拉斯加州林肯大学的科研团队开发<sup>[55]</sup>。该模型在玉米专用模型CERES-Maize基础上,综合作物通用模型INTERCOM和WOFOST的生长阶段优点并加入了一些实用的新模块而开发的玉米过程模型,使玉米生长模型的品种参数简化,便于用户收集参数,更适合于预报长期气候变化对玉米生产力的影响,适合农业推广部门应用<sup>[56]</sup>。

美国的COSSYM/COMAX棉花生产管理系统是作物生长模型与专家系统相结合的棉花生产管理软件<sup>[23]</sup>。该模型和知识库、推理机、数据库(包括品种参数、土壤参数、假定的天气数据和农艺措施等)组成,构成棉花优化管理决策系统,向用户推荐作物管理措施方案。

DSSAT(Decision Support Systems for Agrotechnology Transfer),是由美国,加拿大多所大学和研究所共同研究的农业技术转移决策系统,20世纪90年代主要是DSSAT 3.0~3.5版本<sup>[57-58]</sup>,2003年推出WINDOW 4.0版本<sup>[59-60]</sup>,目前正在推出DSSAT 4.5版本。经过20多年的改进和发展,DSSAT作物模型(例如CERES-小麦、CERES-玉米)已成为一批较成熟的作物系统模型,并在全世界得到广泛推广和应用<sup>[61]</sup>。为此,DSSAT又建成了高粱、水稻、谷子和大麦等作物模型,与小麦、玉米模型一起构成了CERES禾谷类作物模型。与此同时,还增加了CROPGROW豆科作物模型(例如CROPGROW-大豆、花生)和SUBSTOR块根作物模型(例如SUBSTOR-马铃薯)。科学家们在这些工作的基础上将作物系统模型、土壤模型,水分模型,标准输入输出模型和土地管理模型用现代编程方法有机地结合在一起,使DSSAT模型可以用于长期定位的连续模拟(SEQUENCE),不同区域的空间模拟(SPETIAL)和不同气候变化的循环模拟(SEASONAL)等多项功能。并且具有和其他软件同样的用户帮助和支持软件,推动了DSSAT模型在世界上许多国家和地区进行推广应用,使作物模型不断改进和完善<sup>[59,61]</sup>。

蔬菜作物氮肥模型,N-ABLE,是英国著名土壤学家Greenwood博士用尽半生精力研究的,集20种大田蔬菜、小麦和马铃薯于一体的作物土壤N模拟模型<sup>[62-63]</sup>。该模型在英国农业技术推广部门、教学以及在欧洲都有广泛的应用,目前的版本集合了N、P、K为

一体，在科学研究和实际应用中发挥着重要作用<sup>[64]</sup>。

澳大利亚学者研究开发的作物模型APSIM(the Agricultural Production Systems Simulator)<sup>[65]</sup>是一个成功的旱田作物系统模型，容许多个其他同类模型连接到它的系统中去模拟不同作物系统<sup>[66]</sup>。APSIM目前已扩展到能够模拟林业系统<sup>[67]</sup>，农—林混合系统<sup>[68]</sup>和草地系统<sup>[69]</sup>。

法国学者开发的STICS (Simulateur mul TIdisciplinaire pour les Cultures Standard)模型也是一个具有相似功能的模块结构的作物系统模型<sup>[70]</sup>。该模型成功地应用于模拟禾本科、豆科作物、草地、藤蔓作物生长，以及土壤水和氮循环<sup>[71]</sup>。

美国的EPIC模型，是以土壤侵蚀预报为核心的动态模型<sup>[72-74]</sup>。该模型应用一个基本生长函数主模型，通过调整作物参数，即可模拟20多种作物和牧草的生长过程，经过不断改版，不仅可以用于单独地块长期模拟，还可以与GIS结合，进行区域水土流失和C、N循环及土地资源管理。而且可以进行全球变化影响评价，为农业生产管理提供决策依据<sup>[71]</sup>。

在这个时期，关于作物—土壤模型和GIS连接，有许多应用。例如，美国佛罗里达大学研制了AEGIS/WIN模型，将DSSAT中作物系统模型与GIS相连接的农业和环境地理信息系统的决策支持系统<sup>[75]</sup>，成功地应用到巴西模拟土壤农田水分管理预算模拟<sup>[76]</sup>。“3S”技术的应用，能够快速准确地获取农业生产系统的多维信息，综合地管理和处理空间数据和属性数据<sup>[77]</sup>。

这个时期的作物模型都发展到一定的复杂结构，但是大多数模型都不能以较高模拟精度通过试验校验，往往使科学家感到气馁。在多模型的比较校验中，往往得到简单模型比复杂模型模拟结果好的结论。在深入总结了这些模型发展历程之后，Sinclair等<sup>[31]</sup>总结如下：作物模型是作物生长的高度简化，不可避免地存在模拟失真和错误，我们应该把作物模型作为对作物生长的“启发式”工具(Heuristic tools)，去检验我们对模拟生长所做的假设，以辨别哪些是错误的和薄弱的假设。这个时期，作物模型是一个很好的教学工具，引导年轻科学家去求解一系列有关环境条件影响作物生长的问题。目前在国际上农业生态系统模型注册库中已有200余种。虽然作物模型是一个具有潜在应用价值的技术工具，其发展前景十分广阔，但它不是万能的。因此，在应用模型时，要注意其假设和限制条件。

### 3.2 国内研究进展

我国的动态作物模拟研究起步较晚，约在20世纪80年代以后。在充分吸收国外模型发展的经验，积极参与国际间交流与合作，引进荷兰和美国的模型及建模的思想基础上，取得了较大的发展，逐渐

形成了具有中国特色的作物生长模拟模型和专家系统。

20世纪80年代较早的研究是应用回归分析方法建立的静态作物产量预报模型。如：汤志成的作物产量预报系统，是使用多种回归分析、聚类分析、判别分析等数理统计方法建立的产量预报模型，利用本系统可以方便地建立产量预报统计模型，实现作物产量的预报<sup>[78]</sup>。机理模型研究开始于20世纪80年代末期，如张宇等根据冬小麦生长发育及其与环境条件关系的机理研究，建立了模拟冬小麦发育阶段和各器官生物量变化的动态模型<sup>[79]</sup>。黄耀等依据作物、栽培技术、天气和土壤4个方面的因素，对水稻茎蘖消长进行了动态模拟<sup>[80]</sup>。1999—2000年，尚宗波等对玉米生育综合动力模拟模式进行研究，建立了“玉米生长生理生态学模拟模型(MPESM)”<sup>[81]</sup>。李自珍等依据生物力学的理论与方法，探讨了在多种环境因子(光照、温度、土壤、水分与养分等)作用下的作物生长动力学机制，研究了生长速率对外力条件变化的反应与生物量饱和值的变化<sup>[82]</sup>。

我国的专家系统和动态模型研究相比起步较早，这可能与专家系统的研究特点有关。例如，有些判别关系是基于(Y)和否(N)及质量性状进行分类，这样使许多难于建立的确定性数量关系有了可以模拟的基础。

高亮之是最早开展在作物模拟方面研究的学者之一，主要研究了中国不同类型水稻生育期的农业气象生态模式，用播期、纬度和温度3个因子建立了水稻生育期的温光模型<sup>[83]</sup>，于1989年又提出水稻钟模型(RCSODS)<sup>[84]</sup>。后经多年不断完善和发展，继RCSODS之后，又推出小麦栽培模拟优化决策系统WCSODS，并在我国小麦产区得到示范应用<sup>[85]</sup>。2000年后，WCSODS模型又扩展了天气、土壤、品种、栽培与病虫害等子模型使该决策系统在模拟栽培、优化、与专家知识三结合上获得创新，决策方案更符合实际。2004年，又推出了玉米栽培管理信息系统(MCMIS)，该系统能够用于评价气候变化对玉米生长的影响<sup>[86]</sup>。

曹卫星等自2000年以来，致力于作物管理决策信息系统的研究，也颇具成果。他们把作物生长模型和知识模型相结合，推出了许多具有特色的作物管理决策系统，在江苏省和其他地区水稻、小麦、油菜等大田作物得到广泛的示范应用。该研究组相继又开发了小麦生长模拟与管理决策支持系统(GMDSSWMW)<sup>[87-88]</sup>、油菜管理决策支持系统(GMDSSRSM)<sup>[89]</sup>，和棉花管理决策支持系统(KMDSSCM)<sup>[90]</sup>等。

其他相似研究还很多：赵春江等主持完成了小麦栽培管理计算机专家决策系统(ESWCM)<sup>[91]</sup>，基于知识模型与网络GIS结合的精准农业智能系统<sup>[92]</sup>，玉



米栽培管理知识模型系统等大量研究与开发工作<sup>[93]</sup>。戚昌瀚<sup>[94]</sup>、殷新佑<sup>[95]</sup>等建立了水稻生长日历模拟模型(RICAM)。潘学标等开发了棉花生长发育模拟模型—COTGROW<sup>[96]</sup>。孙忠富等<sup>[97]</sup>、杜克明等<sup>[98]</sup>建立了温室番茄生长发育动态模型和蔬菜精准施肥温室作物模拟系统。

近年来,随着我国对外国模型的引进和吸收及其研究生教育,有一批新的模型专家从事模型研究工作,这是一个非常可喜的开端。目前关于模型研究的报道很多,已发表了许多有关模型研究和进展的文章。这批年轻的模型专家必将在不久的将来使我国的作物模型研究和应用与世界接轨。

#### 4 我国作物模型存在的不足及发展方向

虽然我国的作物模型研究取得了很大进展,但是建立模型的技术与先进国家相比还有很大差距。总结起来,我国的农业专家系统研究取得了许多独创成果;多因素静态回归预报模型研究的成果较多,单因素动态配参模型研究的较少,在机理模型的独立建模方面还很落后,大多数是在引进和修改国外的作物模型,大多数模型的计算机程序代码不能完全公开。在联合研究方面,各学科的相互协作配合的不够,主要表现在气象数据和土壤普查数据不能共享,土壤剖面数据不够准确。这样就会大大影响模型模拟的准确性和研究工作进程。所以建议我国的模型研究发展方向是(1)对机理模型研究和国际合作引进校验应加大资金支持力度,博采众长并加强横向联合;(2)在气象数据方面建立数据库共享网络;(3)在国家重点科学研究项目上应加大模型研究资金支持力度并建立重点实验室;(4)在大学和研究生教育开设计算机模拟和农业模型课程。这样才能会使我国的作物模拟技术体系在短时间内赶上发达国家水平。

#### 参考文献:

[1] Curry R B ,Chen H L. Dynamic simulation of plant growth, I. Development of a model [J]. ASAET Trans, 1971, 14(5): 946-959.  
 [2] Edwards D, Hamson M. Guide to mathematical modeling [M]// Boca Raton, Florida, U S: CRC Press,Inc.1990.  
 [3] Sinclair T R, Seligman N G. Crop modeling: from infancy to maturity[J]. Agro J, 1996, 88: 698-704.  
 [4] 戚昌瀚, 殷新佑. 作物生长模拟的研究进展[J]. 作物杂志, 1994,4:1-2.  
 [5] 曹卫星. 国外小麦生长模拟研究的进展[J]. 南京农业大学学报, 1995, 18(1): 10-14.  
 [6] France J, Mathematical modelling in agricultural sciences[J]. Weed Research, 1988:28,419-423.  
 [7] Knepell P L, Arangno D C, Simulation validation: a confidence assessment methodology [M]. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos,California, 1993:123-131.

[8] 曹宏鑫,任德昌,王旭清,等. 作物生长发育过程的计算机模拟决策研究概述[J]. 山东农业科学, 2001(3):51-54.  
 [9] 黄金龙. 小麦生产系统研究[M]. 北京农业大学出版社, 1994:18-19.  
 [10] France J, Thornley J H M. Mathematical model in agriculture [J]. Butterworth and Co Ltd,Kent, 1984.  
 [11] Brown D, Rothery P. Models in biology: mathematics, statistics and computing[J]. John Wiley & Sons,Chichester, 1993.  
 [12] Greenwood D J, Ckeaver T J . Turner M K. Fertilizer requirements of vegetable crops[J]. Fert Soc,1974,(146):5-31.  
 [13] Yang J, Wadsworth G A, Rowell D L,et al. Evaluating a crop nitrogen simulation model, N\_ABLE, using a field experiment with lettuce[J]. Nutr Cycl Agroecosyst, 1999, 55: 221-230.  
 [14] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model [J]. Eur J Agron, 2003, 18:235-265.  
 [15] 陈桂芬,王越,王国伟. 玉米精准施肥专家系统的研究与应用[J]. 吉林农业大学学报, 2006, 28(5): 586-590.  
 [16] 苏恒强,陈桂芬,朱春晓. 基于熵值法的玉米产量组合预测模型[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(1): 125-127.  
 [17] 苏恒强,朱春晓,温长吉.组合预测方法在玉米施肥预测中的应用[J]. 吉林农业大学学报,2010,32(1):312-315.  
 [18] Porter C H, Jones J W, Adiku S, et al. Modeling organic carbon and carbon-mediated soil processes in DSSAT v4.5[J]. Oper Res, 2010, 10(3): 247-278.  
 [19] Loomis R S, Williams S W A. Maximum crop productivity: An estimate[J]. Crop Science, 1963, 3: 67-72.  
 [20] De wit C T. Photosynthesis of leaf canopies[J].Agric Res Report,1965, 42: 663-671.  
 [21] Ritchie J T. A User Oriented Model of the Soil Water Balance in Wheat[M]// Wheat Growth and Modeling. Eds Day, W and Atykin, R K. Plenum Press, 1985.  
 [22] Wilkerson G G, Jones J W, Boote K J,et al. Modeling soybean growth for crop management [J]. ASAE Trans, 1983, 26: 63-73.  
 [23] Whisler F D, Acocck B, Baker D N,et al. Crop simulation models in agronomic systems. Adv Agron,1986, 40:141-208.  
 [24] Chuine I, Kramer K, Hanninen H.Plant Development Models. In Schwarts M D, Phenology: an integrative environmental science. Tasks for vegetation science), Dordrecht, etc. Kluwer. 2003,39:217-235.  
 [25] 贡复俊. 积温的度量[J].江苏农学院学报, 1984, 5(1): 23-27.  
 [26] Blackman V H. The compound interest law and plant growth[J]. Annals of Botany, 1919(33): 570-581.  
 [27] 邹应斌. 作物模拟研究与模拟模型[J]. 农业现代化研究, 1989, 10(2): 43-46.  
 [28] 于忠义. 简明统计学学术史纲要[J].统计研究, 2009, 26(6): 102-111.  
 [29] 廖桂平, 官春云, 黄璜. 作物生长模拟模型研究概述[J]. 作物研究, 1998,3: 45-47.  
 [30] Watson D J. The physiological basis of variation in yield[M]// Advances in Agronomy (Norman A G, ed).New York:Academic Press, 1952:101-145  
 [31] Sinclair T R, Muchow C M. Radiation use efficiency[J]. Advance in Agronomy, 65 :215-265.  
 [32] Waldir Cintra de Jesus Jr, Franciosco Xavier do Vale ,Reginaldo Resende Coeldo, et al. Comparison of two methods for estimating leaf area index on common bean[J]. Agro J, 2001, 93: 989-991.  
 [33] Penman H L. Nature evaporation from open water, bare soil and grass[M].Proc of Roy Soc of London. A.1948,193: 120-145.  
 [34] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算方法的现状及发展[J]. 气象科技, 1985(2): 69-74.  
 [35] Rabinowitch E I. Photosynthesis and related process [J]. Interscience,

- 1951, 2(1): 831-1191.
- [36] Marshall B, Sedgley R H, Biscoe P V. Effects of a water stress on the photosynthesis and respiration of wheat ears[J]. Aust J Agric Res, 1980, 31: 857-71.
- [37] Monsi M, Saeki T. Uber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die Stoffproduktion[J]. Jpn J Bot, 1953, 14: 22-52.
- [38] Hirose. Development of the monsi-saeki theory on canopy structure and function[J]. Annals of Botany, 2005, 95: 483-494.
- [39] 门司正三, 左伯敏郎. 植物群体光的因素及其对植物生长的作用. 光合作用与作物生产译丛[M]. 北京: 中国农业出版社, 1980.
- [40] Loomis R S, Williams S W A. Maximum crop productivity: an estimate[J]. Crop Science, 1963, 3: 67-72.
- [41] De wit C T. Photosynthesis of leaf canopies[J]. Agric Res Report, 1965, 42: 663-671.
- [42] De wit C T. Dynamic concepts in biology[C]//Prediction and management of photosynthetic productivity. proceedings international biological program plant production technical meeting [J]. Wageningen, Netherlands: PUDOC, 1970: 17-23.
- [43] Penning de Vries F W T, van Laar H H. Simulation of Plant Growth and Crop Production Simulation Monographs[M]. Wageningen, PUDOC, 1982, 308.
- [44] van Keulen H. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Simulation Monographs[M]. Wageningen the Netherlands: PUDOC, 1975: 176.
- [45] Duncan W G, Hesketh J D. Net photosynthetic rates, relative leaf growth rates, and leaf numbers of 22 races of maize grown at eight temperatures [J]. Crop Sci, 1968, 670-674.
- [46] Duncan W G, Loomis R S, Williams W A & Hanau R. A model for simulating photosynthesis in plant communities[J]. Hilgardia, 1967, 38: 181-205.
- [47] Chen L H, Huang G K, Splinter W E. Developing a physical-chemical model for a plant growth system[J]. ASAE Trans, 1969, 12: 698-702.
- [48] Stapleton H N, Meyers R P. Modeling subsystems for cotton plant simulation [J]. ASAE Trans, 1971, 14 (5): 950-953.
- [49] Splinter W E. Modeling of plant growth for yield prediction [J]. Agri Met, 1974, 14: 243-253.
- [50] Childs S W, Gilley J R, Splinter W E. A simplified model of corn growth under moisture stress [J]. ASAE Trans, 1977, 20: 858-865.
- [51] Jones C A, Kiniry J R. CERES2 Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development[M]. College Station, US: Texas A&M Univ. Press, 1986.
- [52] Ritchie J T. A User Oriented Model of the Soil Water Balance in Wheat[M]// Wheat Growth and Modeling. Eds Day, W and Atykin, R K. Plenum Press, 1985.
- [53] Wilkerson G G, Jones J W, Boote K J, et al. Modeling soybean growth for crop management [J]. ASAE Trans, 1983, 26: 63-73.
- [54] Penning de Vries F W T, Jansen D M T, ten Berge H F M, et al. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Simulation Monographs 29 [M]. Wageningen, Netherlands: PUDOC, 1989: 271.
- [55] Yang H S, Dobermann A, Cassman K G, et al. Features, applications, and limitations of the Hybrid-Maize simulation model[J]. Agron J, 2006, 98: 737-748.
- [56] Yang, H S, Dobermann A, Lindquist J L, et al. Hybrid-Maize - a maize simulation model that combines two crop modeling approaches[J]. Field Crops Res, 2004, 87: 131-154.
- [57] Tsuji G Y, Uehara G, Balas S. DSSAT v3[M]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 1994.
- [58] Hoogenboom G, Wilkens P W, Tsuji G Y. Chapter three: laboratory method, DSSAT v3[M]. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 1999(4): 257-270.
- [59] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. Eur J Agron, 2003, 18: 235-265.
- [60] Gijsman A J, Hoogenboom G, Parton W J, et al. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter-residue module from century[J]. Agron J, 2002, 94: 462-474.
- [61] Sarkar R. Use of DSSAT to model cropping systems[J]. CAB Reviews: perspectives in agriculture, veterinary science, nutrition and natural resources, 2009, 4, 25: 1-12.
- [62] Greenwood D J, Rahn C R, Draycott, A, et al. Modelling and measurement of the effects of fertiliser-N and crop residue incorporation on N-dynamics in vegetable cropping[J]. Soil Use and Management, 1996, 12: 13-24.
- [63] Yang J, Greenwood D J, Rowell D L. Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model, N-ABLE [J]. Agri Syst, 2000, 64 (1), 37-53.
- [64] Zhang K, Greenwood D J, White P J, et al. A dynamic model for the combined effects of N, P and K fertilizers on yield and mineral composition; description and experimental test[J]. Plant and Soil, 2007, 298: 81-98.
- [65] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. Eur J Agron, 2003, 18: 267-288.
- [66] Moore A D, Holzworth D P, Herrmann N, et al. The Common Modelling Protocol: A hierarchical framework for simulation of agricultural and environmental systems [J]. Agri Syst, 2007, 95: 37-48.
- [67] Paydar Z, Huth N, Snow V. Modelling irrigated Eucalyptus for salinity control on shallow water tables[J]. Austr J Soil Res, 2005, 43: 587-597.
- [68] Huth N I, Carberry P S, Poulton P L, et al. A framework for simulating agroforestry options for the low rainfall areas of Australia using APSIM[J]. Euro J Agron, 2002, 18: 171-185.
- [69] Snow V O, Houlbrooke D J, Huth N I. Predicting soil water, tile drainage and runoff in a mole-tile rained soil[J]. New Zealand J Agri Res, 2007, 50: 13-24.
- [70] Brisson N, Mary B, Ripoche D, et al. STICS a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances I. Theory and parameterisation applied to wheat and maize[J]. Agronomie, 1998, 18: 311-346.
- [71] Brisson N, Ruget F, Gate P, et al. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance II. Model validation for wheat and maize[J]. Agronomie, 2002, 22: 69-93.
- [72] Williams J R, Nearing M, Nick A, et al. Using soil erosion models for global change studies [J]. J Soil Water Cons, 1996, 381-385.
- [73] Kiniry J R, Blanchet R, William S J W, et al. Sunflower simulation using the EPIC and ALMANAC models [J]. Field Crops Res, 1992, 30: 403-423.
- [74] Kiniry J R, Sanderson M A, Williams J R, et al. Simulating alamo switch grass with the ALMANAC model [J]. Agron J, 1996, 88: 602-606.
- [75] Engel T, Hoogenboom G, Jones J W, Wilkens P W. AEGIS/WIN: a computer program for the application of crop simulation models across geographic areas. Agri J, 1997, 89: 919-928.
- [76] Heinemann A B, Hoogenboom G, Daria R T. Determination of spatial water requirements at county and regional levels using crop models and GIS: An example for the State of Parana, Brazil[J]. Agricultural Water Management, 2002, 52: 177-196.
- [77] 谢云, James R, Kiniry. 国外作物生长模型发展综述[J]. 作物学报,

- 2002, 28(2):190-195.
- [78] 汤志成, 王苹. 作物产量预报系统[J]. 中国农业气象, 1996, 17(2):49-52.
- [79] 张宇, 陶炳炎. 冬小麦生长发育的模拟研究[J]. 南京气象学院学报, 1991, 14(1):113-121.
- [80] 黄耀, 高亮之. 水稻群体茎蘖动态的计算机模型[J]. 生态学杂志, 1994, 13(4):27-32.
- [81] 尚宗波, 杨继武, 殷红, 等. 玉米生长生理生态学模拟模型[J]. 植物学报, 2000, 42(2):184-194.
- [82] 李自珍, 王万雄. 多种环境外力作用下作物生长系统的动力学模型及过程数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2003, 24(6): 644-652.
- [83] 高亮之, 金之庆. 中国不同类型水稻生育期的农业气象生态模式及其应用[J]. 农业气象, 1982, 8(2):1-8.
- [84] 高亮之, 金之庆, 黄耀, 等. 水稻计算机模拟模型及其应用之一: 水稻钟模型——水稻发育的计算机模型[J]. 中国农业气象, 1989, 10(2):3-10.
- [94] 戚昌瀚, 殷新佑, 刘桃菊, 等. 水稻生长日历模拟模型(RICAM)的调控决策系统(RICOS)研究[J]. 江西农业大学学报, 1994, 16(4):323-327.
- [95] 殷新佑, 戚昌瀚. 水稻生长日历模拟模型及应用研究[J]. 作物学报, 1994, 20(3):339-346.
- [96] 潘学标, 韩湘玲, 石元春. 一个可用于栽培管理的棉花生长发育模拟模型COTGROW[J]. 中国农业科学, 1996, 29(1):94.
- [97] 孙忠富, 张希星, 蒋卫杰, 等. 蔬菜精准施肥专家系统的设计和实现[J]. 农业网络信息, 2005(8):15-17.
- [98] 杜克明, 孙忠富, 王迎春, 等. 基于Web的温室作物模拟系统的实现[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8):256-259.
- [85] 高亮之, 金之庆, 郑国清, 等. 小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS)[J]. 江苏农业学报, 2000, 16(2):65-72.
- [86] 郑国清, 段韶芬, 张瑞玲, 等. 基于模拟模型的玉米栽培管理信息系统[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4):619-624.
- [87] 曹卫星, 潘洁, 朱艳, 等. 基于生长模型与Web应用的小麦管理决策支持系统[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1):133-138.
- [88] 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦物质生产与积累的模拟模型[J]. 麦类作物学报, 2001, 23(3):26-31.
- [89] 汤亮, 曹卫星, 朱艳. 基于生长模型的油菜管理决策支持系统[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11):160-164.
- [90] 张怀志, 朱艳, 曹卫星, 等. 基于知识模型的棉花管理决策支持系统[J]. 棉花学报, 2005, 17(4):201-206. [91] 赵春江, 诸德辉, 李鸿祥, 等. 小麦栽培管理计算机专家系统的应用[J]. 中国农业科学, 1997, 30(5):42-49.
- [92] 陈云坪, 赵春江, 王秀, 等. 基于知识模型与WebGIS的精准农业处方智能生成系统研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(6):1190-1197.
- [93] 郭银巧, 郭新宇, 赵春江, 等. 玉米栽培管理知识模型系统的设计与实现[J]. 玉米科学, 2005, 13(2):112-115.