

## 基于构件化生长模型的作物管理决策支持系统

花登峰, 刘小军, 汤亮, 朱艳\*, 曹卫星

(南京农业大学江苏省信息农业高技术研究重点实验室, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 运用系统分析原理和数学建模技术, 通过分析不同作物生长模型的共性及其特点, 初步创建了基于通用算法框架的作物生长模型。并进一步结合气象生成模型、品种参数生成模型及策略分析评价模型, 以C#为编程语言, 应用面向对象的程序设计与软件组件技术, 建立了基于构件化生长模型的作物管理决策支持系统。系统实现了农作模拟预测、决策支持和人机交互技术的有机耦合, 具有农作信息管理、动态模拟、方案评估、因苗预测、时空分析及系统维护等功能。系统的建立可为通用性、综合性数字化作物管理决策支持系统的构建奠定基础。

**关键词:** 通用算法; 生长模型; 决策支持系统; 框架; 构件

中图分类号: S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-2030(2008)01-0017-06

## Growth model and component-based decision support system for crop management

HUA Deng-feng, LIU Xiao-jun, TANG Liang, ZHU Yan\*, CAO Wei-xing

(Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture of Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** By using system analysis theory and mathematics modeling method, and analyzing the commonness and character of different crop growth models, a crop growth model based on general algorithm framework was developed. By integrating weather generation model, variety parameter generation model and strategy evaluation model, with Visual C# as programming platform, and using the technology of object-oriented programming and software component, a growth model and component-based decision support system for crop management was developed. With the effective coupling of the crop simulating estimation, decision-making and alternating technology, the system realized the functions as farming information management, dynamic simulation, project assessment, real-time forecast, time and spatial analysis and system maintenance. This study provides a foundation for establishing general and digital crop management decision support system.

**Key words:** general algorithm; growth simulation model; decision support system; framework; component

作物生长模型利用系统分析方法和计算机模拟技术, 对作物生长发育规律及其与环境和技术动态关系进行定量描述和预测<sup>[1]</sup>, 以作物生理生态过程为基础, 克服传统作物栽培学研究中地域性和时空局限性的弱点, 为作物生产管理提供了新的研究方法和手段<sup>[2-5]</sup>。结合生长模型和决策支持技术建立的作物管理决策支持系统, 能充分发挥模拟模型的预测功能和决策支持系统的决策作用, 在生长模型模拟结果的基础上生成优化栽培方案, 辅助用户决策。目前, 国际上有关作物生长模型及决策支持系统的研究以美国、荷兰和澳大利亚最具代表性, 如 GOSSYM/COMAX<sup>[6]</sup>、DSSAT<sup>[7]</sup> 和 APSIM<sup>[8]</sup> 等模型系统, 国内有 RCSODS<sup>[9]</sup>、WCSODS<sup>[10]</sup>、COTGROW<sup>[11]</sup> 等模型系统。但现有的生长模型都是根据单个作物的生理生态规律进行构建与编译, 忽视了各作物间的共性, 导致代码冗余度大, 模块化程度不高, 与其他系统的接口类型不一致, 难以维护, 系统的性能和升级的可靠性得不到保障, 降低了软件生产率, 增加了开发成本, 这些都是传统软件开发的弊端。而现代软件开发强调的是软件的可复用性, 主要通过软件的可复用构件来实现, 它是提高软件生产效率与质量的有效途径, 已成为评价软件系统的重要指标。

本研究在课题组已有的作物生长模型研究的基础上<sup>[12-15]</sup>, 通过综合不同作物生长模型的共性及其设计开发的特点, 初步创建基于通用算法的作物生长模型构件框架, 并进一步结合气象生成模型、

收稿日期: 2007-01-31

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2006AA10A303, 2006AA10Z219); 江苏省高技术研究项目 (BG2004320)

作者简介: 花登峰, 硕士研究生。\* 通讯作者: 朱艳, 副教授, 主要从事作物模型与数字农作技术研究,

Tel: 025-84396565, E-mail: yanzhu@njau.edu.cn.

品种参数生成模型与策略分析评价模型,以 C#为编程语言,应用面向对象的程序设计与软构件技术,建立基于构件化生长模型的作物管理决策支持系统与开发框架,可实现农作模拟预测、决策支持和人机交互技术的有机耦合,为通用型、综合性数字化作物管理决策支持系统的构建奠定基础。

## 1 系统总体结构框架

本系统的设计思想是采用 C#语言和模型构件技术相结合的策略,由模型库、数据库、模型字典、人机接口和用户界面 5 部分组成(图 1)。其中,模型构件作为可安装部件加入到系统中,形成模型库;模型字典提供模型描述和数据抽象等接口信息,它是系统的核心也是与其他决策支持系统(如知识模型系统)关联的纽带。本系统基于数据库所提供的品种、气象、土壤、栽培管理措施数据等,根据模型字典动态生成模拟模型对象,为系统提供作物生长模拟功能。

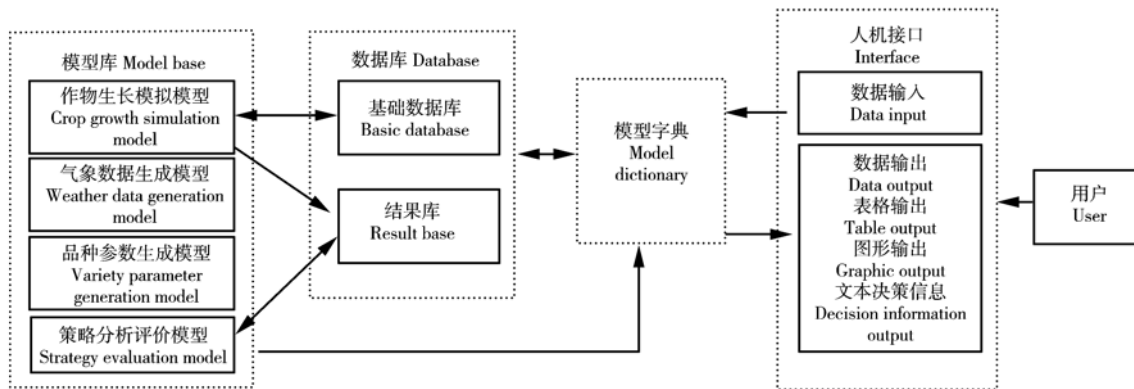


图 1 系统结构框架图

Fig. 1 Structure of the system

### 1.1 模型库构件的设计

本库包括作物(水稻、小麦、棉花、油菜)生长模型、气象数据生成模型、品种参数生成模型及策略分析评价模型,采用软构件技术建立模型构件,将其作为可安装部件加入到系统中,形成模型库。

**1.1.1 作物生长模型** 不同作物其生育特性不同,影响其生长的因素很多,在运行作物生长模型时,需输入大量数据和参数,涉及到土壤、气候、作物生长发育等。基于课题组建立的水稻<sup>[12]</sup>、小麦<sup>[13]</sup>、棉花<sup>[14]</sup>、油菜<sup>[15]</sup>生长模型,根据各作物生理生态过程的共性特征和软构件技术,建立基于通用算法的作物生长模型,可用于模拟不同的作物,该模型包括 5 个子模块:阶段发育子模块(生理发育时间、叶龄动态等)、干物质积累子模块(光合作用与呼吸作用)、干物质分配子模块(叶面积指数,叶、茎和根系质量,产量等)、土壤水分平衡模块与土壤养分平衡模块。模拟的基本过程如下:

(1) 作物一般都需经历 6 个生育期:种子休眠期、萌发期、出苗期、营养生长期、生殖生长期、衰老期。从一个生育期到另一个时期都要经历其生长所需的最低生理发育时间,同时受到水分、养分、温度等外界环境条件的影响<sup>[16]</sup>,但主要受温度、光周期的影响,故作物生长模型在逐日气象要素(太阳辐射,最高、最低气温,日照时数和降水量)的驱动下,构建以生理发育时间为尺度的生育期模型。

(2) 应用气象资料模拟计算太阳辐射转化为干物质的数量,涉及到估算光截获数量的叶面积变化动态,主要通过最大叶面积指数、叶面积变化的 S 形曲线形态参数等作物生长参数来确定。同时,光合产物转化受作物吸收的水分、养分及 CO<sub>2</sub> 浓度的影响。

(3) 叶面积的增长和变化与温度、水分、养分等作物生长因素密切相关。通过作物生长的三基点温度与作物生育进程计算温度对叶面积增长的影响效应。

(4) 通过计算根系分布层次的土壤水分和养分状况,估计水分和养分胁迫对叶面积增长、干物质合成的影响效应。计算分配到地上部和根系的干物质数量,估算根系分布深度和密度,进而计算作物根系对土壤水分和养分的吸收利用情况。而植株水分、氮素、磷素满足程度最终又影响干物质合成。

(5) 通过作物水分和养分临界期的亏缺状况估算实际收获指数,最后通过地上部生物量、各器官分配指数和收获指数计算可供收获的作物经济产量。

**1.1.2 气象数据生成模型** 采用已有的方法来构建模型<sup>[2]</sup>,降水因子模型中采用马尔可夫链(Markov

chain) 模拟逐日降雨量, 并作为单一的独立随机变量处理。日最高温度、最低温度和日照时数的模拟是利用波谱分析方法生成参数, 并将温度和太阳辐射的日变化过程视为弱平衡随机过程模拟。本模型可根据多年月平均资料, 方便、快捷、准确地自动生成一年逐日的气象数据 (包括最高气温、最低气温、平均气温、日照时数和降雨量等)。

**1.1.3 品种参数生成模型** 作物生长模型要在生产中得到广泛应用, 需适用于不同品种、不同地区。为准确模拟, 可依靠气象数据、土壤信息, 通过试验数据来调整, 从而建立某一特定品种的品种参数。

用户输入品种试验的播期、初花期和成熟期, 系统通过调用调试生育参数的组件输出结果。用户采用数据维护功能把输出结果添加到品种数据库中。该模型调试参数的原理主要运用均方和  $MSS$  (mean sum of squares), 不同地点、不同年份以及不同播期的作物生长时间的模拟值 ( $D_{mi}$ ) 与实际值 ( $D_{ei}$ ) 之间的差异平方和见方程 (1):

$$MSS = \sum_{i=1}^n (D_{mi} - D_{ei})^2 \quad (1)$$

式中  $n$  为不同模拟次数。输入每个参数的范围及步长, 运用多次循环的方式, 分别计算从播种到初花、初花到成熟的  $MSS$  值, 当 2 个  $MSS$  之和最小时, 计算模拟生长的参数并作为该品种的生育期参数。

**1.1.4 策略分析评价模型** 控制和解释系统的运行, 负责调用模型模拟结果和数据库。根据用户选择的目标 (产量、品质、水分效应或肥料效应) 对模拟结果进行计算、推理、求解, 通过综合评判及效应对比分析, 推荐适宜方案。

## 1.2 数据库

系统数据库由基础数据库和模型运行与分析评价结果库以及创建、查询、存取和维护数据库的数据库管理系统组成, 其中基础数据库包括气象数据、土壤数据、作物参数、品种参数、栽培管理数据等。

**气象数据:** 存储不同年份全年逐日气象数据。包括决策点的日最高气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )、日最低气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )、日照时数 (h) 或日辐射量 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )、日降雨量 (mm) 等。

**土壤数据:** 存储模型系统所需的分层土壤数据, 包括: 土层厚度 (cm)、物理性黏粒含量 (%), 体积质量 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )、田间持水量 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )、萎蔫含水量 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )、饱和含水量 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )、实际含水量 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )、饱和导水率 ( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 有机质 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、全氮 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、硝态氮 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、铵态氮 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、有效磷 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、速效钾 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、缓效钾 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、 $\text{CaCO}_3$  含量 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), pH 值等。

**作物参数数据:** 存储不同作物的特征参数, 包括临界日长 (h)、三基点温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )、生理年龄临界值、最大光合速率 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )、冠层反射率等。

**品种参数数据:** 存储不同作物 (水稻、小麦、棉花、油菜) 品种的遗传特征参数, 以水稻品种为例, 包括品种名称、基本早熟性、光敏感性、温度敏感性、灌浆因子、总叶片数、比叶面积、叶热间距、千粒重、收获指数、节间数、品种分蘖能力等参数。各作物的品种参数略有不同。

**栽培管理数据:** 存储作物常规栽培管理措施, 包括播种、灌溉、肥料运筹、秸秆还田等。

## 1.3 人机接口与用户界面

系统的人机交互界面由主窗口、子窗口、对话框和窗体控件组成。主窗口负责引导用户选择功能菜单; 子窗口用于接受用户信息输入和显示模型运行结果; 对话框主要提示用户系统运行中的出错信息; 窗体控件所提供的下拉菜单、表格和图形等可与用户进行交互, 用户可根据屏幕提示, 通过简单的鼠标点击或快捷键敲击进行菜单的选择, 即可完成系统界面的参数输入、模型运行结果与决策信息的生成。

## 2 系统的主要功能与技术原理

系统可进行不同地点、不同品种与不同栽培管理措施条件下作物生产过程的模拟预测与管理决策, 主要包括信息管理, 作物生长动态和土壤水肥动态的模拟、方案评估、因苗预测、时空分析, 以及系统维护与帮助等功能, 每一功能又包括若干子功能 (图 2)。

### 2.1 信息管理

信息管理主要包括作物参数查询、品种参数调试、气象数据生成、土壤数据查询、管理措施数据查询和数据维护等功能。基于数据库和相关模型, 用户可以生成所用品种的遗传特征参数、所需年份的逐

日气象数据,并存入临时数据表中。用户可以查询数据库中存储的气象、品种、土壤、栽培管理等数据,也可以实时输入这些数据,若其具有系统管理员权限,还可以对数据库原始数据进行更新与维护。

### 2.2 动态模拟

根据用户的界面输入,访问数据库获取必需的数据,运行构件化作物生长模型,实现水稻、小麦、棉花、油菜单作模拟,模拟结果保存于结果库,并可按照用户选择的功能模块进行分类,主要包括生育进程、器官生长、光合生产与分配、产量品质形成以及土壤水分与养分的动态变化等过程的模拟结果。

### 2.3 方案评估

针对水稻、小麦、棉花、油菜栽培管理过程中的决策问题,进行多种栽培策略方案的模拟试验,模拟试验主要包括品种试验、播期试验、水分试验及肥料试验。每个不同处理的模拟试验都调用一次作物生长模型,结果保存在数据库中,并根据用户选定的决策目标(产量、品质、水分效应或肥料效应),对各模拟试验结果进行单目标或多目标综合比较、分析与判定,帮助用户选择最佳栽培方案。

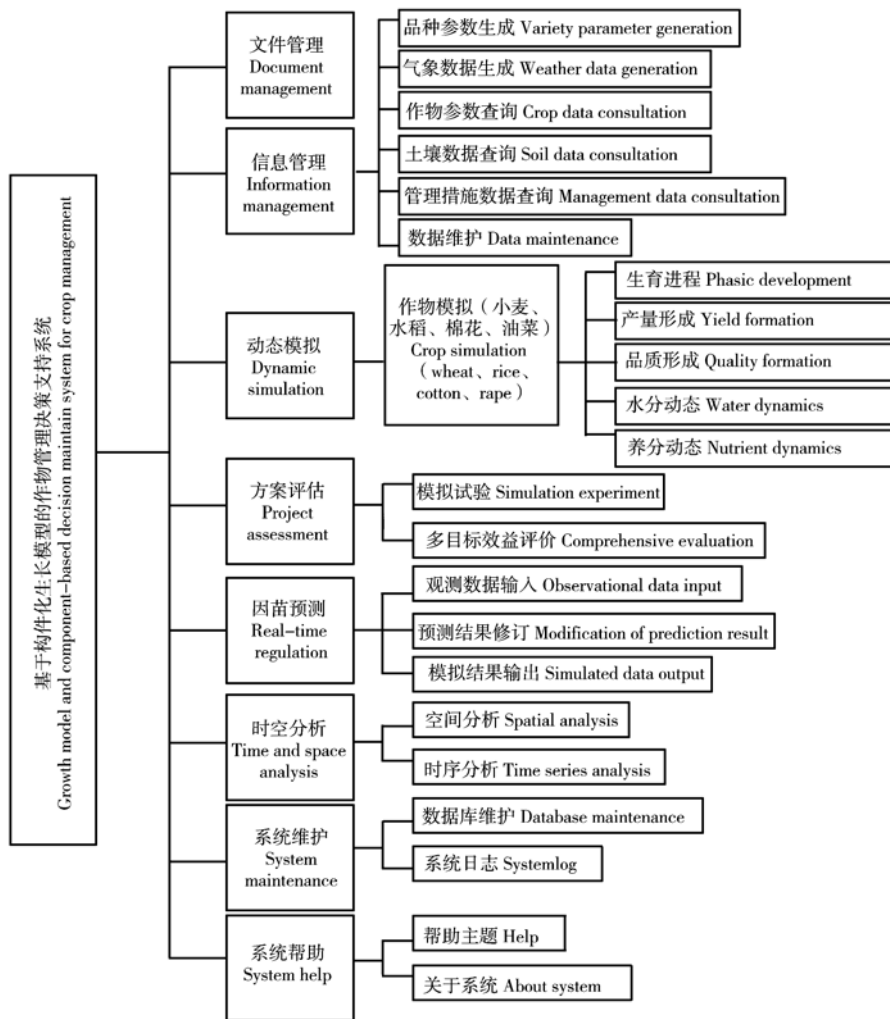


图 2 基于构件化生长模型的作物管理决策支持系统功能图

Fig. 2 Functions of growth model and component-based decision support system for crop management

### 2.4 因苗预测

在实时观测数据基础上对作物生长进行模拟预测。用户可通过田间观测或室内分析获取作物生长特定时期的实际状况,如叶面积指数、生物量、叶龄以及土壤的水分与养分观测值等。在模型运行过程中可实时中断,通过界面菜单输入观测数据并传递给模型,比较相应的用户输入值与模型预测值,若两者差异大于10%,则以用户输入值修订模型预测结果,模型在修订的基础上继续运行,最终输出修订后的模型结果与未修订的模型结果,并对二者进行比较。

### 2.5 时空分析

通过改变年份和地点来模拟作物生长,预测作物在不同年份和地点的生长变化动态。其中,时序分析和

空间分析分别是利用多年气象资料和多地点气象资料及与之相应的品种与土壤资料，循环调用作物生长模型，用表格与曲线图的形式输出产量和品质指标的模拟结果，这样可简单有效地找出不同年份、不同地点作物产量及品质的变化规律，并能预测未来年份的变化趋势，为基于空间差异的精确作物管理决策提供技术支持。

## 2.6 系统维护与帮助

主要实现系统数据库的维护，包括数据库的配置及初始化，限定数据输入的数值范围等。同时对系统的使用情况进行统计，并生成系统使用日志，以方便系统及时更新。对系统的使用提供帮助文档，指导用户正确操作与运行，并提供系统的开发研制单位与版权说明。

## 3 系统的开发与实现

### 3.1 模型构件化设计

根据本系统的特点和功能需求，将整个系统做成2个自动化软构件：生长模拟模型软构件和管理决策软构件。每个构件包含若干接口，而接口函数又包含若干内部函数。在软构件中，每一接口函数均包括数据的输入、输出和模型计算三部分。其中，数据的输入、输出均在接口上通过变体传递，模型的具体计算在接口函数内部进行。

构件的设计开发是基于面向对象的思想，将模型定义为类，当需要调用模型时，动态生成若干个模型对象来完成操作<sup>[17]</sup>。作物生长模型中各作物的功能结构相同，根据面向对象编程设计思想，首先定义作物生长模型基类，然后在模拟某种作物时继承该基类完成具体功能。定义基类为 GropModel，继承类分别为 RiceModel、WheatModel、CottonModel、RapeModel。在作物生长模型基类中包括多种通用函数算法，当运行模型时调用 RunModel () 函数，并将模型运行的界面数据和基础数据（气象数据、品种数据、土壤数据和栽培管理措施数据）作为参数传入，选择相应的作物模拟模型进行模型的运算，将结果输出至数据库或以文本、绘图的形式通过人机界面予以表达。

### 3.2 系统开发环境与工具

系统在 AMD Athlon XP 2500 +、1G 内存计算机、中文 Windows 2003 Server 操作平台上开发。采用 C# 设计作物生长模型模块组件、土壤水分与养分平衡模块组件以及数据库访问中间件。采用 C# 设计人机界面，MS-Access 2003 设计数据库结构，在 C#. net 开发平台上进行系统各模块功能的集成与完善。

### 3.3 系统应用

通过收集的部分地区的气象、土壤肥力、栽培管理数据及作物品种参数等建立属性数据（库），对系统中动态模拟、方案评估、因苗预测、时空分析等功能进行了模拟应用。应用结果表明，本系统采用构件化、模块化程序设计方法，将土壤-作物系统的各主要子模型封装成符合 COM 标准的 DLL 组件，组件间以接口函数进行数据交流，重用性好，运行效率高。

利用 2004 年江苏省农业科学院试验资料对模型进行检验，试验采用武香粳 9 号、日本晴、华粳 2 号 3 个水稻品种，设 3 个施氮水平，3 个重复，LAI、产量的 RMSE 值分别为 0.23、17.53，以 LAI、产量的模拟值和观测值作 1:1 关系图，结果表明，模拟值与观测值之间有较好的一致性（图 3）。

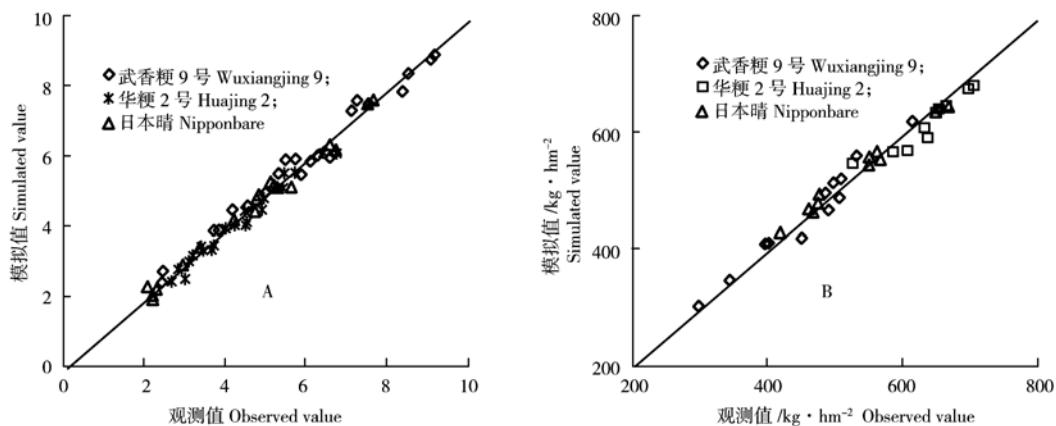


图3 不同施氮水平下武香粳9号、日本晴和华粳2号的 LAI (A) 和产量 (B) 的观测值与模拟值比较

Fig. 3 Comparison of simulated with observed LAI (A) and yield (B) at different nitrogen levels in Wuxiangjing 9, Nipponbare and Huajing 2

## 4 结论与讨论

本研究在总结作物生理生态规律及提炼课题组已有作物生长模型技术的基础上,通过综合不同作物生长模型的共性及软件设计和开发的特点,创建了基于通用算法的作物生长模型构件,其遵循了软件复用原则,能有效提高软件生产率和系统间的互操作性,优化了系统的结构框架,减少开发代价,为建立综合性和数字化作物管理决策支持系统提供了技术参考和软件框架。

系统具备较强的预测与决策功能,可以实现不同作物、不同品种、不同地点和不同栽培管理措施条件下作物生长的动态模拟,并基于模拟试验结果推荐适宜的农田管理方案,同时考虑了农田管理措施对作物生长影响的连续性,推荐的管理方案应该更具解释性和科学性。

同时应当指出,由于各个作物生长模型的个性差异以及土壤-作物系统本身的复杂性,本研究所构建的通用性作物生长模型还存在一些不足之处,如不能根据各作物生理、生态的差异进行科学有效的作物分类,今后应进一步修正和完善模拟模型。此外,系统的决策性和应用性也有待进一步改进,拟采用与作物管理知识模型、遥感及地理信息系统相耦合的策略,建立基于模型与 3S 技术的作物生产管理决策支持系统,提高系统的时空性和精确性,实现作物生产管理的数字化和精确化监测预测及设计调控。

### 参考文献:

- [1] 曹卫星,李存东,李旭,等. 基于作物模型的专家系统预测和决策功能的结合 [J]. 计算机与农业, 1998(2): 8-10
- [2] 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: 148-152
- [3] Timsina J, Humphreys E. Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat system: a review [J]. Agric Systems, 2006, 90: 5-31
- [4] Moriondo M, Maselli F, Bindi M. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data [J]. Europ J Agronomy, 2007, 26: 266-274
- [5] Bouman B A M, van Keulen H, van Laar H H, et al. The 'School of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview [J]. Agric Systems, 1996, 52: 171-198
- [6] Khorsandi F, Whisler F D. Validation of the soil-temperature model of GOSSYM-COMAX [J]. Agric Systems, 1996, 51: 131-146
- [7] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model [J]. Europ J Agronomy, 2003, 18: 235-265
- [8] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation [J]. Europ J Agronomy, 2003, 18: 267-288
- [9] 葛道阔,金之庆,高亮之,等. 水稻栽培模拟优化决策系统(RCSODS)中的水稻病虫害预测模型及其应用[J]. 江苏农业学报, 2003, 19(2): 70-74
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 孟亚利,曹卫星,周治国,等. 基于生长过程的水稻阶段发育与物候期模拟模型 [J]. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1362-1367
- [13] 严美春,曹卫星,罗卫红,等. 小麦地上部器官建成模拟模型的研究 [J]. 作物学报, 2001, 27(2): 222-229
- [14] 张立祯,曹卫星,张思平,等. 基于生理发育时间的棉花生育模拟模型 [J]. 棉花学报, 2003, 15(2): 97-103
- [15] 汤亮,朱艳,严定春,等. 冬油菜适宜绿色面积指数动态设计的知识模型 [J]. 南京农业大学学报, 2005, 28(3): 11-15
- [16] Yu Q, Saseendran S A, Ma L, et al. Modeling a wheat-maize double cropping system in China using two plant growth modules in RZWQM [J]. Agric Systems, 2006, 89: 457-477
- [17] 王冰, 琚春华. 面向对象 DSS 模型库设计 [J]. 计算机时代, 2005(6): 15-17

责任编辑: 沈 波