

中国小麦生长模拟模型研究概述

姚桃峰¹, 王润元², 王 燕¹

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘 要:伴随着系统科学和计算机技术的发展, 作物生长模拟模型研究从20世纪60年代开始迅速发展起来, 目前已成为当今农业科学中一个新的研究领域。在简要总结作物模拟技术的特征及分类的基础上, 介绍了我国小麦生长模拟模型与其应用的研究状况, 并对模拟研究中遇到的问题及今后应开展的工作进行了阐述。

关键词:小麦; 生长模拟; 模型; 进展

中图分类号: S11⁺3

文献标识码: A

引 言

根据作物生产和科学研究的需要, 运用数学方法描述、生态环境模拟和计算机数值试验等技术途径, 人为地再现作物生长发育演变全过程, 简称为作物生长模拟或作物生长动力(态)模拟。作物生长模拟技术是数值模拟技术40多年来在作物生长与环境关系研究中获得成功应用和发展的新领域, 也是农业气象科学基础研究的新拓展^[1]。从模型建立的历史来看, 从早期偏重于解释一些作物生理生态过程或现象(如作物生理过程和生长发育过程等)到逐渐考虑了环境、基因型、病虫害、田间管理等因子, 从而对农业生产有一定的咨询价值。在涉及作物种类上从一种到多种, 研究地区从创始国到多国, 并且在应用模拟模型来研究引起系统行为的机理及过程(如作物冠层结构分布、气孔行为、光合作用、叶面积增长、干物质积累等)方面更为细致和深入, 具有较高的理论水平, 对气候、土壤与作物生长发育间的模拟研究弥补了经验统计模型的不足^[2]。

1 作物模拟模型的特征与分类

1.1 作物模拟模型的特征

从本质上来说, 作物模拟模型着重对作物生长

发育过程及其与环境的关系进行定量描述和预测。因此作物模型是以作物的内在生育规律为基础, 综合了作物遗传潜力、环境效应之间的因果关系, 是一种以作物过程为对象的生长模型和过程模型^[3]。较理想的作物生长模拟模型应具有以下8个特征^[4]: (1) 系统性, 对模型的不同成分或过程进行系统的、全面的分析与描绘; (2) 动态性, 包括时间过程的变化及不同成分间的动态关系; (3) 机制性, 在经验性或描述性的基础上, 提供对主要生理过程的理解或解释, 即具有一定的模拟水平; (4) 预测性, 对不同系统提供可靠的定量描述; (5) 通用性, 适用于任何地点、时间和品种; (6) 使用性, 可为非专家操纵应用, 可用一般的气候、土壤及作物资料; (7) 灵活性, 可容易进行修改、扩充; (8) 研究性, 除了应用性外, 还可用于生理生态的研究、探讨。

从作物生长模型的结构来看, 它包括了作物生长发育的一些主要过程: 光合作用过程、养分摄取(地下根系的生长动态)、同化产物分配、蒸腾作用过程、生长和呼吸作用、叶片的生长与扩展和形态发育与衰老过程^[5]。大多数模型都结合了上述所列的主要过程, 并以多种方式来处理这些过程^[6]。1982年 de Wit 和 Penning de Vries 将作物生长模拟划分为4个层次水平^[7]: (1) 潜在生产(只考虑辐射与温度的影响); (2) 水分限制下的生产(作物生

收稿日期: 2008-12-04; 改回日期: 2009-01-12

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项“西北地区旱作农业对气候变暖的响应特征及其预警和应对技术研究(GYHY200806021)”资助

作者简介: 姚桃峰(1984-), 男, 江西萍乡人, 在读硕士研究生。主要从事作物模拟模型方面的研究。E-mail: yaoyao323433@163.com

长过程中部分时期受到水分短缺的影响,但养分充足);(3) N 素限制下的生产(作物生长过程中部分时期受到 N 素短缺的影响,其它时期受到水分与气候因子的影响);(4) 养分限制下的生产(作物生长过程中部分时期受到 P 素或其他矿物元素短缺的影响,其余时期受到 N 素、水分和气候因子的影响)。目前研究与开发的作物生长模型主要是在第一、第二、第三生产水平上较多,而在第四水平的作物生长模型则仍在研究开发中。

1.2 作物模拟模型的分类

建模的目的从理论上来说就是要寻求模式背后所隐藏的发生在不同的时间、空间或生物组织层次尺度上的内在过程^[8]。作物生长模型根据研究的具体问题可进行多种形式的分类,讨论这一问题对于我们认识和理解有关模型的用途、内涵及使用范围十分必要^[9]。

根据模型的研究层次或尺度,模型可分为微观模型和宏观模型。前者是在组织、细胞或分子的水平上对植物进行分析研究;后者则以植物整体或组织器官(如根、茎、叶、花、果等)为研究尺度建模。而且就宏观模型而言,又可进一步分为植株个体模型与植被群体模型 2 种类型。

按照模型模拟的功能和过程,可将植物生长模型分为生长机理模型和可视化模型。所谓生长机理模型,是根据已知的植物体初始信息、数据及环境因素计算出植物生长过程的各种参数或数据。因此,该模型可以理解为由形态发生与生理生态 2 个模型组成。前者主要提供植物的形态信息,后者包括许多具体的生长机理模型,如光合作用模型、干物质积累与分配模型、呼吸作用模型等。可视化模型是借助图形学知识实现作物生长的二维或三维可视化,利用这种方法可以很好地模拟作物连续生长的情况^[9]。

根据建模的不同方法又可将植物生长模型分为经验式模型和因果式模型 2 大类^[10]。经验式模型适用性广、方法简单、计算速度快,可是一般不能做预测,而只是模拟或拟合植物的生长。因果式模型则不然,它能够在一定程度上解释植物的内在生长机理,适于预测研究对象、验证假设、合成知识和加深对复杂系统内在规律的理解。

2 中国小麦生长模拟模型的研究状况

发展一个小麦生长模型是一项复杂的系统工

程。生长模型的成功需要有系统分析、数学及计算机语言程序的知识与技术,还要有作物生理、农业气象和土壤科学的训练及其数据库。模型建立的过程主要包括模拟系统的定义与分析,资料的获得与处理,模型的建立与程序编写,模型的校正与核实^[11-12]。

中国大陆的作物模拟研究起步较晚,比国外晚近 20 a,研究主要集中在水稻、小麦、棉花、玉米等作物上^[13]。20 世纪 70 年代初期农业气象学科率先将统计学方法应用于植物与环境相关性的研究中。80 年代初模式化栽培在我国得到较大发展。此间主要是引进、修改和验证国外的作物模型^[14]。20 世纪 80 年代末才出现我国自主研发的比较系统的作物模拟模型。

我国的小麦生长模拟研究又比水稻稍晚,最早出现在 20 世纪 90 年代初。以王石立、王馥堂的春小麦简化生长模型^[15]和张宇、陶炳炎的冬小麦生长发育模型^[16]为开始,我国的小麦生长模拟研究逐渐发展并成熟。尤其进入 21 世纪后,在小麦的阶段发育、形态发育、物质积累和产量形成、田间土壤水分和养分效应、作物模型可视化与决策系统的建立等方面开展了系统研究,并在生产实际中得到初步应用。现从以下 3 个方面简要概括我国小麦生长模拟模型研究的发展。

2.1 小麦生长机理模型的研究

包括 2 方面的内容:阶段发育、形态发生模型(如生长过程模型,组织、器官等形态发生发展,种子(繁殖器官)的形成等模型)和生理生态模型(如叶的光合作用,群体的光合作用,呼吸作用,光合物质的生产、分配、转移模型以及温度、太阳辐射,冠层微气候,作物水分、土壤水分,作物营养、土壤养分等模型)。

近 20 a 来,我国已经建立了小麦从第一到第三生产水平上的比较实用的生长发育模型。如涂修亮等^[17]利用物候发育的普适模型模拟了温度对小麦物候发育进程的影响;冯利平等^[18]研究了不同类型小麦品种的发育与温、光等主要环境因子的数量关系;郑有飞等^[19]在小麦生长发育的数值模拟研究的基础上,将小麦生育期划分为 4 个阶段,分别制定了数学模型和子程序,确定模型的参数,模拟出每一阶段的生育期天数,并且就每一阶段的温光条件对生育期各阶段的影响给出了分析和决策。而王修兰^[20],周晓东^[21-22],刘建栋^[23]等开始考虑建立了

CO₂、O₃甚至太阳光谱变化影响下的小麦生长模型。周晓东等根据国内外小麦生长模拟研究成果,从作物生长的主要生理过程入手,综合考虑气候变暖与大气中 CO₂浓度增加等因素对作物生长发育和产量形成的影响,修正了在一级生产水平下冬小麦生长模拟模式。将 CO₂浓度作为输入变量,模拟估算了 CO₂浓度增加对冬小麦光合作用的直接影响。形态发生模型方面,严美春等^[24-25]对小麦植株地上部器官形成过程进行了较为系统、全面的模拟研究,建立了包括叶片、节间和分蘖的解释性动态模型以及叶原基分化、小穗原基分化和小花原基分化、退化、败育、受精结实及籽粒生长的子模型。陈国庆等^[26]构建了小麦叶鞘和节间生长过程的动态模拟模型。

姜青珍等^[27]构建了水分影响小麦光合物质生产的模拟模型。刘铁梅等^[28]采用高斯积分法模拟小麦冠层每日的总光合同化量,并经呼吸消耗与物质转化形成生物量。同时考虑了温度、水分、CO₂浓度、生理年龄和 N 素丰缺对光合作用的影响。建立了植株临界 N 浓度、最小 N 浓度和生理发育时间的曲线关系。为修正冬小麦生长模型中的干物质分配,乔玉辉等^[29]对冬小麦干物质累积和在不同器官中的分配进行了描述。对冬小麦光合产物在各器官中的分配和转移系数的计算方法进行了探讨,并建立了函数表。刘铁梅等^[30]建立了小麦一生中各器官分配指数随生育进程连续变化的动态关系,并以收获指数作为遗传参数调节不同品种穗部的分配比例,从而预测不同品种各器官的物质增长动态。模型的检验结果表明,模拟值与观察值之间具有较高的符合度,平均相对误差 < 8%。曹宏鑫等^[31]根据土壤水平衡原理建立了适宜于长江中下游地区小麦生长期 0~40 cm 土层土壤水分模型。他们同时还根据土壤氮素平衡原理对小麦生长期 0~40 cm 土层有效氮含量进行了模拟^[32],并用试验资料对模型进行了检验。经相关分析,模拟值与预测值显著相关。王桂玲等^[33]以实测的土壤水分资料为基础,借鉴并吸收 Ceres - Wheat 的土壤水分平衡思想,建立了冬小麦田间土壤水分平衡动态模拟模型。王康等^[34]建立了冬小麦生长根系吸氮耦合模拟模型。模拟结果表明该模型能够较好地反映冬小麦生长动态、叶面积指数变化及作物吸氮过程。土壤中矿质态氮动态变化是秸秆还田管理决策的重要依据,庄恒扬等^[35]研究建立了土壤有机氮矿化及还田有机物分解氮素释放的模拟模型,以指数函数反映有机

氮分解温度效应,以分段线性函数反映水分效应,以标准天反映温度与水分的综合影响,该模型所需参数少,且易通过试验获得,从而增强了模型的实用性。

2.2 小麦生长可视化模型与决策支持系统的研究

中国农业大学还利用虚拟现实技术进行作物的形态和株型模拟,进一步增强了作物生理生态和生长模拟结果的可视化表达^[36]。王美丽等^[37]结合生长方程和 L 系统规则,以 VC++6.0 为平台,采用 OPENGL 开发,借助图形学知识实现了小麦根系生长的三维可视化模拟。利用这种方法可以很好地模拟小麦根系连续生长情况。刘炳成等^[38]根据冬小麦根系分布的试验测量参数与生长规律,综合考虑根系生长的生理生态模型和虚拟植物模型,构造了描述小麦根系生长的动态模型。在已建立的根系生长模型基础上,运用分形几何理论与计算机图形学技术,对耕作土壤环境下冬小麦根系构型进行了三维仿真模拟。

近年来,高亮之等建立了基于“作物—环境—技术”关系的小麦生长模拟模型,提出了适用于不同时空环境的小麦生育调控指标及栽培管理的动态知识模型,将小麦生长模型的预测功能与知识模型的决策功能相结合,建立了小麦生产智能化决策支持系统^[39]。朱艳等^[40]将系统分析方法和数学建模技术应用于小麦管理知识表达体系,通过解析和提炼小麦生育及管理指标与环境因子及生产水平之间的基础性关系和定量化算法,创建了小麦管理动态知识模型 WheatKnow;充分利用软构件的技术特点,在 Visual C++ 和 Visual Basic 平台上研制了数字化和组件化小麦管理动态知识模型系统,实现了播前栽培方案的设计和产中适宜调控指标动态的预测 2 大功能。

2.3 小麦生长模拟模型的应用研究

作物模拟技术如何在大面积生产中发挥作用,是一个值得深入讨论的问题。模型的应用领域主要有:田间作物生产管理;基于模型的专家系统开发;研究和预测气候对农业生产的影响;农场经营管理和农业政策制订^[41]等。目前,将作物模拟模型与天气发生器、地理信息系统、遥感系统等结合,在评估气候变化影响、预测气候灾害风险以及农业气象灾害预警、农业气象业务服务等方面,作物模型都得到广泛的应用。例如:江敏、金之庆^[42]等利用我国冬小麦主产区 13 个点的作物资料及同期天气资料对

CERES - Wheat 模型在中国的适用性及合理性进行了广泛性验证。结果表明,此模型在我国北方冬麦区比较适用,但在比较湿润的长江流域,模拟结果不符合生产实际。江敏等^[43]利用小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS)对徐州地区冬小麦种植的常年决策进行了模拟分析,得出此系统对生育期和产量的模拟效果较好。

在小麦生长模拟模型与地理信息系统、遥感技术等结合应用方面,杨鹏等^[44]探讨了将作物模型与多时相叶面积指数(LAI)遥感影像同化以改善区域单产估测的方法。此方法前提是要通过地理信息系统将美国农业部开发的“考虑气候的作物环境决策模型”(EPIC模型),扩展为空间模型,因此,这是将作物模型、地理信息系统、遥感技术三者结合应用的典型例子。另有闫岩等^[45]以LAI作为结合点,讨论了利用复合型混合演化(SCE-UA)算法实现CERES—Wheat模型与遥感数据同化的可行性。

小麦生长模拟模型在评估气候环境变化对作物生产影响方面,王石立^[46]利用生长模式得到实际水分条件下的干物重减少率,进行了干旱影响实时评估的尝试。并分别在返青、拔节后和成熟前展望了干旱对最终生物量的可能影响。石春林等^[47]在WCSODS(小麦模拟优化决策系统)中增加了过量土壤水对小麦光合作用、干物质分配、叶片衰老等影响模块,实现了渍害条件下对冬小麦生长和产量的模拟。孙宁等^[48]以北京地区冬小麦生产为例,介绍了2种作物生长模型:小麦生长模拟模型WheatSM和农业生产模拟系统(小麦模型)APSIM—Wheat在作物生产气候风险评估中的应用研究。

小麦生长模拟模型在农业气象灾害预报中的应用研究方面,刘建栋等^[49]对华北地区冬小麦进行了水分胁迫实验,确定了冬小麦光合作用速率对水分胁迫的响应曲线,提出了农业干旱指数和农业干旱预警指数2个基本概念,在此基础上建立了具有明确生物学机理的华北农业干旱预测数值模式。赵艳霞等^[50]将作物生长模式引入冬小麦干旱识别和预测中,充分考虑冬小麦对水分消耗利用的影响和冬小麦对水分的需求以及不同发育期对水分的敏感性,是一种识别和预测干旱的新思路。经验证该冬小麦干旱识别和预测模型具有较好的识别和预测能力。

作物模型在农业气象业务中的应用研究方面,王石立等^[51]基于国外作物生长模拟模型的应用进

展以及我国农业气象业务的现状,简要分析了农业气象业务中应用作物生长模拟模型的必要性和紧迫性。介绍了近年来我国气象系统农业气象科研和业务部门在推进作物生长模拟模型在农业气象业务应用方面所做的工作。刘布春、刘文萍等^[52]在简要介绍了国外作物生长模型的核心模块、主要功能和应用现状的基础上,分析了我国现行气象业务可为开展作物生长模型应用提供的技术支持,存在的问题以及解决方案。指出作物生长模型在拓展当前我国农业气象业务领域和提升农业气象服务水平等方面前景广阔。

其它方面的应用研究还有刘占锋等^[53]在田间试验和前人研究的基础上,以比较成熟的CERES—Wheat模型为研究工具,以我国的主要作物小麦为研究材料,探讨了作物模型在区域试验和良种评价方面的潜在应用;曹宏鑫等^[54]将作物模拟技术与小麦栽培学相结合,阐述了作物模拟技术的内容及其在小麦栽培中的应用,分析了小麦栽培模拟优化决策系统中常年决策、当年决策的功能与机理;杨京平等^[55]提出了利用作物生长模型建立作物种植制度的模拟模型与决策支持系统的构想与模型框架结构;熊伟等^[56]利用最新温室气体和SO₂排放方案,即政府间气候变化委员会(IPCC)排放情景特别报告(SRES)的A2和B2方案,通过区域气候模式和区域作物模型模拟未来(2071~2100)我国小麦产量变化。

在模型的应用过程中,鉴于大量的环境变量(如天气、土壤)和管理变量的非均匀性,将假设环境均匀的小区水平的作物动力模型应用于更大空间尺度和更高级系统水平,就会遇到升尺度连接这个问题^[57]。需要解决的问题有:环境信息的时空变异,响应变量的空间归并,以及由于空间平均、时间变异和现有模型未考虑的新特性和新过程时所产生的偏差等。

根据对模型随空间尺度增大引起的误差本质和来源理解,通过诸如合理化输入取样、进行区域校正、完善模型、处理不完善的资料等方法,可以有效控制或减少作物模型区域化应用的误差。

3 小麦模拟研究中存在的问题及今后设想

3.1 存在的问题

模型用于生产实际的有效性与可靠性程度不

足^[2]。如何实现作物生长模拟模型与作物栽培管理有机结合是作物模拟模型发展的方向,同时也是作物栽培科学发展迫切需要解决的科学问题。国外的作物模拟研究多偏重于作物生长的实况模拟,绝大多数模型结构复杂,参数众多,而忽视了将作物生长模拟与作物栽培的优化原理结合起来,对应用于生产管理的优化农艺措施决策考虑较少,因此难以解决作物生产中的一些实际问题。

作物生长模拟模型的开发尚无统一的方法和标准。各种模型对作物生理生态过程的量化描述繁简不一,参数取值差别较大,许多模型中采用了一系列的假设来描述未知的生理生态过程,使得模型模拟的精度下降。另外,由于模型运行所需大量的气候、土壤和作物特性资料不易得到,增加了模型应用的难度。

现有的作物模拟模型中许多部分的经验性强,如生育期、同化物分配、形态发育维持呼吸等过程的量化,均待进一步改善。应促进模拟模型与专家系统、运筹学等其它领域结合,通过计算机反复试验进行决策,逐步使作物模型运行时实行“人—机”对话,从而提高实际应用价值。

荷兰的作物模拟研究注重模型的机理性、研究性、数学性,因此模型多偏重于理论研究。对于基本生理过程,从生理生化的角度进行深入研究,对于环境条件,遵循从理论到实际的研究程序。荷兰作物模拟的研究还强调作物的共性,只要输入所需要的统一参数和数据,模型可适合大多数作物。因此在应用于评价农业生态系统生产力和农场决策方面的研究工作较深入。美国所建立的作物模拟模型主要强调作物的特性,建立模型的主要目的是解决作物栽培和管理中的一些实际问题,为作物生长管理决策提供依据。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。模型的运作不受地点、时间、品种、技术等因子的限制,具有广泛的实用性。中国的模型一般注重实用性、简洁性和预测性。但是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,需要在引进国外先进模型的同时,加以修正和完善^[58]。

虽然近年来我国作物模拟模型的研究得到了良好的发展,取得了很好的成就,但不足之处还是相当明显的^[59],例如:基础领域的研究比较薄弱,研究主

要参考国外的有关文献资料,建立的模型大多数是对国外相应模型的修改或组装;我国作物模型的研究力量不足而且比较分散,缺乏沟通与协作,造成人力、物力以及财力上的浪费,而且低水平、低层次上的工作多;作物模拟研究中某些方面研究过多,以至于研究成果重复,出现过热的现象,而又有一些方面研究偏少,出现过冷的现象;研究比较表面,没有开展系统、持续、深入的研究,以至于研究成果应用价值不高。

3.2 今后应开展的工作

纵观小麦生长模拟模型的研究和应用,有关模型的基本原理和各种作物模型的建立研究较多,而模型的应用研究较少,这是因为模型的复杂性及要求输入大量参数,限制了作物生长模型的应用。鉴此,今后可在以下几方面展开研究^[60]:

(1) 研制和完善包括主要营养元素、病虫害等在内的综合动态模拟模型;

(2) 根据模型的要求和各地的自然条件,建立模型所需的标准化参数数据库;

(3) 作物生长模拟模型与3S技术(遥感技术(RS)、地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS))相结合,建立更完善的作物生产计算机决策管理系统;

(4) 在麦类作物生产和管理中最突出的问题有倒伏、高产优质、生产效益、资源利用与可持续发展等问题。将作物模拟技术应用于麦类作物栽培,形成以麦类作物模拟模型为核心,同麦类作物栽培优化原理和专家知识相结合的智能管理决策系统;

(5) 大麦在我国的播种面积和总产量仅次于水稻、小麦、玉米,在国民经济中占有重要地位。它的形态结构、生物学特性及生长发育对环境的要求,与小麦既有共性,又有区别。因此,有必要在小麦生长模拟研究的基础上,系统地研究大麦生长的模型,并应用到生产实际中去,以解决多年来一直困扰大麦生产的倒伏、低产等问题^[61]。

参考文献:

- [1] 王馥棠. 中国气象科学研究院农业气象研究50年进展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 778-785.
- [2] 孙成明, 王余龙. 作物模拟技术的研究现状及其发展对策探讨[J]. 中国农学通报, 2005, 21(3): 131-134.
- [3] 戚昌翰. 作物生产系统的模拟模型研究进展[J]. 湖南农学院学报, 1993, 19(增刊): 1-6.
- [4] 曹卫星. 国外小麦生长模拟研究的进展[J]. 南京农业大学农业与生命科学学院, 1995, 18(1): 10-14.

- [5] J. 法朗士, J. H. M. 索恩利. 金之庆等译. 农业中的数学模型 [M]. 北京: 农业出版社, 1991.
- [6] 杨京平, 王兆骞. 作物生长模拟模型及其应用 [J]. 应用生态学报, 1999, 10(4): 501-505.
- [7] F. W. T. 彭宁德弗里斯等著. 王馥棠等译. 植物生长与作物生产的模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 1988. 10-45.
- [8] 张大勇. 理论生态学研究 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 5-10.
- [9] 张彩琴, 杨持. 植物生长模拟与数学模型研究 [J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2006, 37(4): 435-440.
- [10] Thornley J H M, Johnson I R. Plant and Crop Modeling: A Mathematical Approach to plant and Crop Physiology [M]. New York: Oxford University Press, 1990. 34-50.
- [11] Penning de Vries F W T, Jansen D M, Ten Berge H F M, et al. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops [M]. Wageningen, The Netherlands; Pudoc, 1989. 1-204.
- [12] Whisler F D, Acock B, Baker D N, et al. Crop simulation models in agronomic systems [J]. Advances in Agronomy, 1986, 49: 141-208.
- [13] 廖柱平, 官春云, 黄璜. 作物生长模拟模型研究概述 [J]. 作物研究, 1998(3): 45-48.
- [14] 刘其永. 作物生长模拟模型的现状及发展趋势 [J]. 福建电脑, 2008(7): 54-56.
- [15] 王石立, 王馥棠, 李友文. 春小麦生长简化模拟模式研究 [J]. 应用气象学报, 1991, 8(3): 294-300.
- [16] 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): 113-120.
- [17] 涂修亮, 胡秉民. 小麦物候发育的模拟研究 [J]. 湖北农业科学, 1999(3): 13-14.
- [18] 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): 418-422.
- [19] 郑有飞, 万长建, 宗雪梅, 等. 小麦生育期计算机模拟系统初步研究 [J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(3): 377-382.
- [20] 王修兰. CO₂——作物生长模拟实验及光合模型 [J]. 气象学报, 2000, 58(6): 10-15.
- [21] 周晓东. 二氧化碳浓度增加对冬小麦生产直接影响和间接影响的数值模拟初步研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 1999.
- [22] 周晓东, 王馥棠, 朱启疆. 二氧化碳浓度增加对冬小麦生长发育影响的数值模拟 [J]. 气象学报, 2002, 2(1): 54-59.
- [23] 刘建栋, 周秀骥, 于强. O₃, CO₂ 浓度变化及太阳光谱变化对作物光合作用影响的数值模拟研究 [J]. 气象学报, 2002, 60(16): 715-721.
- [24] 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.
- [25] 严美春, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦茎顶端原基发育模拟模型的研究 [J]. 作物学报, 2001, 27(3): 356-362.
- [26] 陈国庆, 朱艳, 曹卫星. 小麦叶鞘和节间生产过程的模拟研究 [J]. 麦类作物学报, 2005, 25(1): 71-74.
- [27] 姜青珍, 张建平, 李雁鸣. 水分影响小麦光合物质生产模拟模型的初步研究 [J]. 河北农业大学学报, 1999, 22(2): 27-31.
- [28] 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦器官间干物质分配动态的定量模拟 [J]. 麦类作物学报, 2001, 21(1): 25-31.
- [29] 乔玉辉, 宇振荣. 冬小麦干物质在各器官中的累积和分配规律研究 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 543-546.
- [30] 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, 21(3): 26-31.
- [31] 曹宏鑫, 孙立荣, 高亮之, 等. 长江下游地区小麦生长期土壤水分动态的模拟 [J]. 南京农业大学学报, 1998, 21(5): 25-30.
- [32] 曹宏鑫, 孙立荣, 高亮之, 等. 长江下游地区马肝土小麦生长期土壤氮素动态的模拟 [J]. 中国农业气象, 1999, 20(2): 35-38.
- [33] 王桂玲, 高亮之. 冬小麦出间土壤水分平衡动态模拟模型的研究 [J]. 江苏农业学报, 1998, 14(1): 36-41.
- [34] 王康, 沈荣开, 王富庆. 冬小麦生长及根系吸氮的动态模拟研究 [J]. 灌溉排水, 2002, 21(1): 6-11.
- [35] 庄恒扬, 曹卫星, 任正龙, 等. 土壤有机氮矿化与有机物氮素释放的动态模拟 [J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2002, 23(2): 63-67.
- [36] 张弦, 严衍录. 用图形图像技术处理作物图像提供作物形态信息 [J]. 中国农业科学, 1996, 29(5): 251-254.
- [37] 王美丽, 何东健. 基于 L 系统的小麦根系可视化模拟研究 [J]. 农机化研究, 2008(3): 36-39.
- [38] 刘炳成, 刘伟, 刘俐华, 等. 冬小麦根系生长的三维仿真模拟 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(9): 65-67.
- [39] 高亮之, 金之庆, 郑国清. 小麦栽培模拟优化决策系统(WC-SODS) [J]. 江苏农业学报, 2000, 16(2): 65-72.
- [40] 朱艳, 曹卫星, 姚霞. 小麦栽培管理动态知识模型的构建与检验 [J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 283-289.
- [41] 李晓明, 孙红敏. 作物生长模拟模型的研究与应用 [J]. 东北农业大学学报, 2005, 36(6): 812-815.
- [42] 江敏, 金之庆, 葛道阔, 等. CERES - Wheat 模型在我国冬小麦主产区的适用性验证及订正 [J]. 江苏农学院学报, 1998, 19(3): 64-67.
- [43] 江敏, 易杰忠. WCSODS 模型在徐州地区冬小麦种植常年决策中的应用 [J]. 徐州师范大学学报, 2004, 22(4): 54-58.
- [44] 杨鹏, 吴文斌, 周清波, 等. 基于作物模型与叶面积指数遥感影像同化的区域单产估测研究 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 130-136.
- [45] 闫岩, 柳钦火, 刘强, 等. 基于遥感数据与作物生长模型同化的冬小麦长势监测与估产方法研究 [J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 804-811.
- [46] 王石立. 冬小麦生长模式及其在干旱影响评估中的应用 [J]. 应用气象学报, 1998, 9(1): 15-23.
- [47] 石春林, 金之庆. 基于 WCSODS 的小麦渍害模型及其在灾害预警上的应用 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(4): 462-468.
- [48] 孙宁, 冯利平. 利用冬小麦作物生长模型对产量气候风险的评估 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 106-110.
- [49] 刘建栋, 王馥棠, 于强, 等. 华北地区冬小麦干旱预测模型及其应用研究 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 593-604.
- [50] 赵艳霞, 王馥棠. 冬小麦干旱识别和预测模型研究 [J]. 应用气象学报, 2001, 12(2): 234-241.
- [51] 王石立, 马玉平. 作物生长模拟模型在我国农业气象业务中的应用研究进展及思考 [J]. 气象, 2008, 34(6): 3-10.
- [52] 刘布春, 刘文萍, 梅旭荣, 等. 我国农业气象业务引入作物生长

- 模型的前景[J]. 气象, 2006, 32(12): 10-15.
- [53] 刘占锋, 于兵, 张建平. 利用作物模拟模型辅助决策小麦新品种推广初探[J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(5): 12-16.
- [54] 曹宏鑫, 董玉红, 孙立荣, 等. 作物模拟技术在小麦栽培中应用的研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(3): 342-348.
- [55] 杨京平. 作物种植制度计算机模型与系统分析的研究动态与现状[J]. 生态学杂志, 1995, 14(6): 57-62.
- [56] 熊伟, 居辉, 许吟隆, 等. 气候变化下我国小麦产量变化区域模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 164-167.
- [57] 刘布春, 王石立, 马玉平, 等. 国外作物模型区域应用研究进展[J]. 气象科技, 2002, 30(4): 193-203.
- [58] 王向东, 张建平, 马海莲. 作物模拟模型的研究概况及展望[J]. 河北农业大学学报, 2003, 26(增刊): 20-23.
- [59] 杨宝祝, 赵春江. 作物生长发育模拟模型研究进展与存在的问题[J]. 北京农业科学, 1995(6): 45-49.
- [60] 徐寿军, 顾小莉, 王志刚. 我国主要作物生长模拟模型研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2005, 20(4): 415-421.
- [61] 徐寿军, 顾小莉, 庄恒扬. 我国麦类作物生长模拟研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2006, 21(3): 288-293.

Research Advance About Growth Simulation Models of Wheat Crops in China

YAO Taofeng¹, WANG Runyuan², WANG Yan¹

(1. College of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: With the development of system and computer sciences, crop growth simulation modeling was developed faster, and it is commonly accepted as a new research field in agricultural science at present. On the basis of summarizing the characteristics and classification of crop simulation technology, this paper discusses the studies on growth simulation models of wheat crops and application status in China, also it suggests the problems and future approaches in simulation models development.

Key words: wheat; growth simulation; model; advances

欢迎订阅 2009 年《干旱气象》

《干旱气象》是中国气象局兰州干旱气象研究所、中国气象学会干旱气象学委员会主办的专业学术期刊, 国内外公开发行人。《干旱气象》辟有研究论文、短论、应用技术报告、研究综述和学术争鸣等栏目, 主要刊登有关干旱气象的最新研究成果、发展动向和趋势; 气象科学各学科具有创造性的论文; 有推广价值的技术经验; 有关国内外气象科技的新理论、新技术、新方法等方面的短论和研究综述。《干旱气象》已被《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版 CAJ-CD)》、万方数据-数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库全文收录。

《干旱气象》内容丰富、信息量大、研读性强, 适合广大气象科研业务工作者、各相关专业技术人员、大专院校师生阅读。并从 2009 年起, 《干旱气象》过刊文章全文上网 (<http://www.chinaam.com.cn>), 免费查询, 欢迎广大读者阅读。

《干旱气象》为季刊, 2009 年正刊 4 期, 每期定价 16 元, 全年 64 元。欢迎订阅, 并可以随时邮局款汇购买, 款到开正式发票。

编辑部地址: 甘肃省兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所《干旱气象》编辑部
邮政编码: 730020 联系电话: 0931-4670216-2270

电子信箱: gsqx@chinajournal.net.cn

银行汇款: 兰州市工商银行拱星墩分理处

户 名: 中国气象局兰州干旱气象研究所

帐 号: 2703001509026401376

邮 汇: 兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所《干旱气象》编辑部