

# 农田生态系统模型与 农业资源高效利用

研究员、博导 于 强<sup>1</sup>

研究员、博导 王天铎<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所禹城综合试验站, 北京 100101;

2. 中国科学院上海植物生理研究所光合作用研究室, 上海 200032)

**摘 要:**在过去的几十年中,系统分析方法在农业研究中的应用有了较大的发展。在各种不同领域使用系统分析方法的科学家发展了许多不同类型的模型,其中有概念的、综合性的和概化的。模型的意义是在不同尺度上整合多学科的研究结果。概化模型用于土地利用的定量评价和在更高的尺度上的资源管理研究。其它模型可以为政策制定者提供战略的和技术的决策支持。作为信息技术和地学方法在农业中的应用,作物生长模型的研发是面向农田生态系统中的资源管理。其目标是应用系统分析方法,以作物生长模型为核心,以区域资源环境数据库为基础,建立基于遥感和地理信息系统的决策支持系统和作物长势监测与产量预报系统。

**关键词:**作物生长模型 资源利用效率

## Agricultural Ecosystem Model and High Efficient Utilization of Resources

Professor YU Qiang<sup>1</sup>

Professor WANG Tianduo<sup>2</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101;

2. Shanghai Institute of Plant Physiology, CAS, Shanghai 200032)

**Abstract:** *The use of systems approaches in agricultural research has increased considerably during the last decades. In these approaches, scientists around the world have developed several different types of models. Conceptual, comprehensive, and summary models function to integrate multidisciplinary research at various levels. Summary models are also used in quantitative land evaluation, and may structure resource management research at high aggregation levels. Other models may help policy makers in their strategic and tactical decision making at various levels of integration and aggregation. As a way to use information technology and geoscience in agriculture, crop growth model aims at resources management in agricultural ecosystem. A decision support system and monitoring of growth status will be developed on the basis of system approach, crop growth model and regional resources database.*

**Key words:** *agricultural ecosystem model, agricultural resources*

## 一、农业生态系统中作物产量形成与模型

农业研究与生物学研究一样都是认识生物生产系统。生物学研究侧重于描述和认识基本过程,而农业研究则是在作物、耕作系统、农田系统的水平上,研究提高产量或产品品质的方法。农业系统的复杂性使得它不是在整体上进行研究而是划分成不同的综合水平:即区域、农场、耕作系统和作物水平;或者划分成次系统水平:土壤、植物等;以及次过程水平:水热传输过程、光合作用、能量平衡、种群增长或下降等。通过对作物生长过程进行系统分析,并将其参数化,可以用数学模型的方法研究系统内部各子系统和各过程之间的交互作用。用模拟模型将系统的各过程整合(即系统综合),分析农业投入的产出效率,以达到高产和高效为目的,避免农业资源过量和低效使用。

农业生态系统的复杂性在于其影响因子及其相互作用过程的交织。例如,在近一百多年来,农业的对比试验处理单德国就有上亿个,但是用这种试验方法并不能全面反映作物生长与环境之间交互作用,因而对新的组合的产量还是难以预见,还要再做对比试验。所以,在分析作物生产的投入与产出关系时,综合考虑作物生长过程的数学模型就显得非常必要。

农业的发展与其它学科或其它产业的发展相联系。历史上,农业的机械化和化肥农药的应用得益于物理和化学的进步以及工业的发展。在当今社会进入信息时代的背景下,遥感地理信息系统、决策支持系统的引入,可以使得这些技术应用于农业领域。可以预期它的直接作用是农业生态系统的监控,如干旱的监测,农业资源管理的定量化,以及在数据库基础上的、以作物生长模型为核心的决策支持系统。

农业资源的优化管理在于作物生产与环境因子的关系,即作物生长模型。水分动态与水肥耦合、作物生长与气象因子、农田蒸散等。农业系统的优化管理的理论方法是系统分析和模拟模型。农业生产系统模拟模型的建立需要有3个阶段,以达到其科学的和应用的的目的。建立概念阶段:目标的量化、系统限制的确定、系统的概化;综合模拟阶段:关系的量化、模型建立、模型验证;评价与应用阶段:验证、敏感性分析、可行性研究、简化和概化模型、建立决策和预报模型。

农田生态系统研究的一项重要内容是以作物光合作用、农田水热传输及其与碳氮之间的耦合过程模型为核心,以提高作物产量和水肥利用效率为目标的研究方向,采取田间试验与数学模型相结合的方法,研究站点和区域尺度的作物生产力形成和环境因子的关系。

作物的光合生产力是推动和支撑整个农田生态系统的原初动力。作物生长模型模拟的内容首先是光合生产形成的生物量,它描述作物生长与环境因子的数量关系,是农田生态系统生产力研究的核心。作物生长模型的重要性体现在以下几个方面:(1)它是计算全球或区域初级生产力(primary productivity)、评价作物生长和资源利用效率的基础模

型;(2)由于全球变化涉及作物生长所需要的基本要素,如 $\text{CO}_2$ 、温度和水分等,作物生长模型成为预测全球变化对农业影响的基本手段;(3)农田生态系统的 $\text{CO}_2$ 同化和冠层蒸散伴随一系列的物质能量传输,是地球表层能量物质迁移和生物地球化学循环(biogeochemical cycle)的重要组成部分。作物生长模型为这些研究提供了有力的工具;(4)在精准农业、信息农业和作物长势的遥感监测与产量预报中,作物生长模型提供了理论支持<sup>[1]</sup>。它还广泛应用于农田水肥管理、作物布局、适宜播种期预报等等。目前,欧美发达国家通过长期的、大量的人力、物力投入,开发了数百种用于各种目的的农田生态系统的模型。有些模型实现了商业化,在农业决策支持、生产管理与科学研究中发挥着巨大的作用。

以黄淮海平原为例,该地区是我国重要的粮食生产基地,水资源的短缺是制约该地区农业持续发展的主要因素。水分不足和水资源未能合理利用不但限制了作物产量的提高,还带来一些盐渍化等环境问题。要解决可用水量不足和利用效率低的问题,又要防止盐渍化、提高养分的利用效率、减少氮淋失对地下水的污染,就必须合理用水,加强地表水与地下水的联合调控。这就需要详尽了解农田生态系统中土壤-植物-大气连续体(SPAC)内水分运行、养分转化和盐分运移规律及其与作物生长和产量的关系,建立相关过程的模拟模型。同时,黄淮海地区与西北干旱地区相比,大气降水相对较多,加之有一定的引黄水的补充,在水资源优化配置中有较大的回旋余地,效果也会更加明显。因而这一地区成为资源优化研究的理想区域。

农业资源的优化管理和精准农业,是提高资源利用效率的有效途径。因此,研究农田生态系统与环境因子的作用机理,认识主要作物的生产力的限制因子,建立我国主要农业生产区的作物生长模型,提出资源优化管理模式是提高我国农业资源利用效率的一项迫切任务。

作物生长模型是农业资源优化管理的核心。然而,作为信息农业、精准农业的应用基础,我国作物生长模型的研究与应用十分薄弱,难以满足我国农业现代化、信息化和农业资源管理、调控的要求。提高作物生长模型的研究与应用水平成为当今我国生态学和资源环境科学研究的焦点。对我国主要农业生态区域作物生长模型和资源优化管理的研究,还可以为其它地区提供相应的模式和可资借鉴的方法。

## 二、国内外研究现状与分析

追溯作物生长模型的基础理论的发展过程,黄秉维先生(1978)较早地提出了光合生产潜力的概念<sup>[10]</sup>,即在其它因素适宜的条件下,由太阳辐射决定的作物生产潜力。这对于认识作物产量的限制因子,发现改善的途径有重要意义。荷兰学者进一步提出了作物产量按照影响因素划分的三个水平<sup>[8]</sup>:(1)潜在产量(potential yield):在适宜的土壤水肥条件下,只由太阳辐射和温度决定的最高作物产量;(2)可获得产量(obtainable yield):当土壤水肥资源有不同程度的短缺的时

候,而形成的作物产量;(3)实际产量(actual yield):受到病虫害和杂草等因素影响而形成的实际最终产量。对于这些因素的分析可以获得资源的投入与产出的数量关系。资源的优化就是基于在上述特征产量区间的资源利用效率的研究之上的。

在影响因子复杂和环境变化剧烈的条件下,用数学方法描述作物生长过程为一个概念模型(conceptual model)或动力模型(dynamic model)是分析作物生长机理的一个重要手段。自1968年第一个作物生长模型 ELCROS (Elementary Crop Growth Simulator) 问世以来,已发展了种类繁多、目的多样的农田生态系统模型。第一代作物生长模型倾向于整合各种来源的信息,以解释作物生长。它是作为研究的工具而不是预报和发现新的现象。它们成功地综合了光截获、微气象和作物与病虫害的交互作用。同样后来的概化模型(summary model),广泛应用于土地评价、水肥管理、病虫控制、世界粮食生产的研究和政策制定的支持,如 ELCROS, BACROS, SUCROS, WOFOST, ORYZA 等是著名的不同时代的作物模型的代表。以 de Wit 为代表的荷兰学派以模型的理论性著称,而以美国 Ritchie 等为代表的 CERES 系列作物模型则以实用性见长。作物生长模型的内涵最终取决于设计模型的目的。

基于过程(process-oriented model)的模型包含作物对环境响应的反馈机制,因而对环境变化有较强的适应性。作物生长模型正从较强的经验性模型走向基于过程的机理性模型。目前,作物生长模型发展的水平是机理框架下的半理论-半经验模型。作物生长模型无论从理论还是从应用方面都处于迅速发展的阶段。

由于作物生长或环境动态的某些过程建立在经验的关系之上,目前的生长模型都是局限于特定地区的(plot-specific),没有完全普适的模型。因而作物生长模型的种类繁多,目前国际上在农业生态系统模型注册库(CAMASE)<sup>[2]</sup>中已有数百种各类农业生态模型。这些模型都是根据研究目的的不同对所处理的过程有所侧重。如作物生长模型(SUCROS, CERES, AFRCWHEAT, CROPSIM, SINCLAIR, DEMETER, SOYMOD, SWHEAT, ECOSYS)<sup>[3,4,5,6,7,8]</sup>,用于农业环境评价的根际水质模型 RZWQM (Root Zone Water Quality Model)<sup>[9]</sup>,作物生长与资源管理模型(CERES)等。

近十余年来,我国的一些农学、生态学科学家也开始了作物生长模型的研究工作,如黄策和王天铎(1985)建立了水稻的作物生长模型<sup>[11]</sup>。高亮之等(1992)建立了水稻生长发育模型与管理决策系统<sup>[12]</sup>。于强等(1999)建立了作物光温生产潜力的数学模型,分析了我国南方稻区水稻的适宜生长期。刘建栋等(1999)建立了小麦和玉米的气候生产潜力模型,并分析了黄淮海地区作物的气候生产力分布<sup>[13]</sup>。但与国际同类研究相比,我国的作物生长模型研究起步较晚、总体水平较低、研究力量分散。存在的突出问题是模型重引进、轻验证。这一方面是受仪器设备和实验条件等客观因素的限制,另一方面是对模型的可靠性缺乏足够的重视。

例如,经验性的模型直接使用水肥的利用效率系数,而其它基于过程的模型则包括吸收和转换的过程,转换的效率则是模型的输出<sup>[9]</sup>。模型在应用时,首先需要证实他对环境变化的可预报性(predictability)。主要是说,它从生理上讲是否包含必需的反馈机制。

相对于生理过程而言,农田生态系统中的物理过程可以表达为适当的数学模型,其发展较为成熟。进入九十年代以来,植物的光合与蒸腾的模拟已经从经验模型发展到过程模型的时代。模型在分析生理生态过程的基础上,建立光合作用水热通量的参数化方法。在叶片水平上,以 Farquhar 的叶片光合作用的生化模型,Ball - Berry 的气孔导度模型等为基础。冠层模型是在 Ross 辐射传输理论的基础上,从叶片模型扩展而来。由于尺度扩展(scaling up)而带来考虑到的生理与环境的相互作用的反馈机制内容的变化,如何寻求在简化和机理的完善之间恰当的平衡,是目前生理生态模型研究的热点和难点。

目前在国际农学、生态学、地理学和气象学界已把农田生态系统中作物生长模型的综合研究与全球变化研究、精准农业发展紧密结合起来,形成了该领域的热点和前沿问题,但在作物生长模型研究中还存在着以下两方面的问题:

(1) 作物生长模型中描述环境物理过程的模型有较为明确的机理意义,地区的适应性较强。而目前的作物生理模型部分经验性较强,是限制模型普适性的重要因素,如叶面积指数动态、干物质分配和灌浆过程与环境条件的关系等。为此,需要着重探讨物理过程与生理过程的平衡(balance)问题。

(2) 现有的作物生长模型大多以农学模型为中心,有较强的针对性,也有很大的局限性。在研究资源与环境问题的作物生长模型方面,在综合的程度、考虑问题的全面性等方面仍然很不够,需要开展深入的研究。需要开展的工作是:(1) 针对作物生理模型经验性较强等薄弱环节,提出产量形成、光合产物在根-冠的分配等与水分关系的数学模型,研制以分析作物生长与资源利用为目的的综合模型;(2) 针对国内外精准农业研究发展迅速,但理论体系不尽完善,其中作物与环境关系停留在经验基础上的现状,以作物生长模型作为精准农业的物理基础,提出基于作物生长模型的资源管理决策系统。研究的目的是建立我国主要作物生长发育与水热过程和营养物质转化的模拟模型;建立我国的基于作物生长模型的资源管理决策系统。

### 三、模型的功能

作物的光合生产力是推动和支撑整个生态系统的原初动力。它是将太阳能转化成化学能的过程。冠层蒸散是与光合过程相伴的植物体及土壤的水分散失的过程。前者以生化过程为主,后者以物理过程为主。但两者是密切相连的。模拟光合生产力及蒸散,是评价全球和区域初级生产力(primary productivity)、模拟作物生长、研究陆面过程与气候的

相互作用和预测生态环境的变化等的重要手段;对研究地球表层能量输送和物质迁移、地球生物化学循环 (biogeochemical cycle) 等有重要意义。由此它涉及生态、地理、农业和气候等学科和领域。

用作物生长模型进行农业生产潜力的评价,可以作为国家和地区进行农业分区、制定作物产量计划和农业发展规划、确定投资方向及有关农业政策重要依据。农业生产力的动态研究揭示作物生长发育规律、产量形成与环境条件的相互作用机制,是定量分析气候、土壤及作物资源潜力利用程度、限制和影响产量的因子等的有效手段。

- 产量风险和年际产量变化;
- 不同土壤类型或农业水文条件引起的产量变化;
- 种类的差异;
- 生长确定因子的相对重要性;
- 播种期选择策略;
- 气候变化影响;
- 使用农业机械的关键期。

模型还用于产量预报和定量的土地评价,如:

- 在最大产量水平的作物生产潜力的区域评价
- 估计灌溉和施肥的最大效益;
- 通过模拟监测农业生长季节,鉴别不利的生长条件
- 区域产量预报。

如基于模型 WOFOST (Version 3.1) 的区域研究分析了粮食生产潜力通过在非洲国家提高肥料的施用提高粮食产量。研究表明粮食作物的产量可以通过增加施用肥料,在并不增加灌溉的情况下,维持在一定的水平上。

随着应用遥感和模拟技术监测农业生态资源,作物生长模型被用于产量估算的工具,作为粮食安全的预警系统的一部分。这个系统将地理信息系统和作物生长模型结合,并输入气象卫星资料。普适性较强的作物生长模型可以用于不同的作物,仅作物生长的参数有所不同。作物生长模型也可用于评价灌溉和节水措施,用于制订流域内水的合理调度。

作物生长模型应用于重新估价农田作物试验,作物的播种期的变化、肥料的试验和评价产量的危险对于特定地区,使用 GIS 技术评价区域的差异等。

在一些项目的支持下,建立气候土壤水温和作物土地利用的基础数据库是教育推广和研究的重要内容。作物生长模型已经同详细的土壤特性等数据库结合,发展了一个用户友好的界面,提供了数据库与应用之间的联系。

用于评价区域的作物生产潜力的作物生长模型,是土壤和气候条件的函数。在作物的数据库与模型结合中,作物生长模型与 GIS 结合促进了所需数据的产生和对整个区域的模型输出和综合评价。产生出来的资料用于确定作物生产的输入输出系数。这些系数用于土地利用的适宜性划分 (GOAL, General Optimum Allocation of Land use), 在此基础上,提出交互式的多目标线性规划模型 (Interactive Multiple Goal Linear Programming Model) 探讨农业土地利用方式的可行性。

此外作物生长模型用于评价气候变化对作物生长的作用,尤其是用于定量评价大气 CO<sub>2</sub>、温度、降水和太阳辐射变化对发育期、作物生长和作物水分利用的共同影响。当考虑它们的相互作用的时候,所有相关的过程的模拟是分别进行的,然后加以整合。

另外,作物生长模型与生态过程模型的整合扩展了模型的应用范围,例如作物生长模型与水文模型的结合,与农田水肥管理模型的结合可以用来分析作物的水分动态和养分动态,应用于水肥利用的优化管理。

目前作物生长模型可以作为水文模型的作物模块,整合模型模拟水分流动、溶质运移和作物生长在土壤-水-大气-植物环境中。

应该强调的是尽管作物生长模型理论上可以调用及详细的气象、土壤和地形等资料,它仍然是现实系统的简化。用户在从模拟结果中得出结论时应该小心当。注意模拟结果的精度不可能超过输入资料所允许的精度。一个模型仅仅说明用户观点和资料的结果。因此,小心地选择输入资料是最重要的。作为一个普遍的原则,在没有试验的情况下模拟作物的生长。

需要试验得到特定的参数和或者标定模型或者证实模拟的结果

在验证 (validation) 过程中,将模拟结果与观测到的作物生长情况进行对照,从而可以提供模型模拟适宜性的评估。当这种差别发生时,我们需要改变模型的参数或者对某一过程的参数化方案的修正。然后,模型应该再次使用独立的观测资料再次核对。这方面的一个问题是模型的参数有许许多多,但是一次只有调整少数参数。而且虽然标定可以改进模型对一个具体目标的模拟能力,但是如果这种调整是事后的,它会削弱模型的普适性。

作物生长模型的一个弱点是模型的一些参数是固定的,而事实上,它们随环境条件而变化。即一些与发育阶段和分配有关的参数。当较低一级的整合过程不太充分了解的时候就会出现这些问题。

#### 四、需要进一步开展的工作

目前生理生态模型存在的主要问题在于:

1. 在叶片水平上:模拟水分对生理过程的影响,处理得过于简单,甚至不包括水分的影响。因为 Ball - Berry 模型是以水分供给不是限制因子为前提的。而在自然条件下,多数植物在生长期内有相当长的时间生活在缺水的环境中。因而叶片生理模型的下一个重要进展将是扩充模型,使之包括土壤或叶片水势。

2. 在冠层水平上:现有模型侧重模拟植物对环境的响应,而忽视模拟植物对环境的适应。换句话说,就是不能模拟植物遇到环境变化尤其是逆境时调整自身状态以适应环境的现象。

比如:光合系统在较强光照下,量子效率下降( ),出现

光抑制;随着光照时间的增加,还会出现羧化能力( $V_{\text{cmax}}$ )的下降。这种响应是自然条件下,光合作用在中午出现降低(光合“午睡”)的原因之一。它是普遍存在的。在植物处于土壤干旱或贫瘠的条件下时,优先将光合产物分配给根系,而改变了冠根比,从而加强了根的吸水或吸肥能力和蒸腾与光合以至于能量平衡。所以在干旱地区,植物根系发达,根/冠比较大。这种差别非常明显。

这种适应表现在模型上是模型参数随环境条件而改变。生理过程与物理过程的这种差别,也反映在生理模型与模拟物理过程的模型之间的差别上。由于生理过程与物理过程的这种区别,生理模型也需要不同于物理模型。如果模型不具备模拟植物对环境适应的能力,也就无法准确模拟生态系统在环境变化时的响应。

作物生长模型是建立在作物与环境相互关系之上的,包含作物生理和环境物理,主要涉及作物栽培学、植物生理学、土壤物理学、微气象学等领域。学科发展水平存在着不平衡。例如,人类对物理过程的认识已较成熟,如大气边界层理论已建立一套完整的偏微分方程组。土壤的水热传输也符合一些动力学方程。相比之下,生理过程的机理复杂,在目前人类对生命现象的认识水平下,植物生理模型的经验性往往较强。现有的生理模型都是在一定理论框架基础上的简化。而在生理生态模型中,尚没有一个完全被接受的、适合各种生态类型的模型。如作物生长模型有数百种之多。这就使得生态模型具有显著的区域性。由于某些生理过程的不明确和模型的简化,模型在全球范围的普适性需要得到检验,以便发现问题和进一步改进。所以在我国这样一个有独特气候类型和丰富生态类型的区域,发展我国主要作物、草原、森林的生产力模型,是一个迫切的任务。它将在植物生产力分析、气候与生态系统相互作用等研究中发挥作用。

(1) 在站点尺度上,研制田间土壤-植物-大气系统模型。包括土壤水分和养分动态模型、根系吸水模型和冠层尺度上的光合作用-蒸散-冠层阻力的耦合模型等。

(2) 在我国,研制主要作物(小麦和玉米)的生长模型(如 NorthChina - Wheat, NorthChina - Maize),提出应用于区域尺度的简化模型。强化作物生理模型的研究:包括作物光合作用模型、干物质分配、叶面积动态、发育期预报和灌浆过程与土壤水分、养分关系等。

(3) 研制农田资源优化管理支持系统,包括设计一套基于作物生长模型的计算机资源管理软件和提出该地区的农田水肥优化管理模式。

(4) 在对历史资料和观测数据分析的基础上,使用我国自主开发的适合我国农业生态特征的作物生长模型,研究农业资源利用效率的区域分布。在农业水资源变化的情景下,提出农业可持续发展的对策和调控途径。

(5) 开展农田生态系统中作物生长与水肥资源利用的综合模型研究,包括农田生态系统水热传输、碳氮转化过程和作物生长的综合试验与模拟研究。研制综合考虑作物生长、

水热传输、碳氮转化等过程的农田生态系统模型,发展一套具有自主知识产权的模型软件,为进一步开展农业资源优化管理、农田碳循环、农田温室气体排放、气候变化对农业影响等研究打下基础。

以区域农田生态系统为对象,以田间尺度的机理模型为基础,以区域应用为目标的两个不同层次相结合的方法,研究农田生态系统产量形成的机理与模型,分析水分供应与资源利用效率的关系。在微观上应用理论建模方法,揭示作物生长和资源消耗的机理。在宏观上应用系统分析的方法,研究水肥资源的优化配置和决策策略。其中采用土壤水热、养分、微气象与植物生理因子平行观测的方法,需要将大气和土壤的物理过程与作物的生理过程结合起来,将实验观测与数学模拟结合起来。利用先进的实验仪器,测定农田生态系统水热传输和作物生长过程,建立作物光合作用、农田蒸散、土壤水分和养分动态、干物质积累与分配和叶面积指数等的机理性模型。使模型的参数具有坚实的实验依据。

使用系统分析方法,对不同的管理目标,如以提高水肥利用效率为目的的优化管理、以作物高产为目的的优化管理和以农业环境保护为目的的优化管理,在给定的限制阈值的前提下,研究优化方案。

建立基于过程的作物生长模型,使得模型的普适性远远高于不问过程的经验模型。模型的核心部分是:土壤-植物-大气系统能量平衡、水热传输和  $\text{CO}_2$  同化的耦合。具体内容可以考虑如下,建立模拟农田 SPAC (Soil - Plant - Atmosphere Continuum) 系统中土壤水分动态、蒸发蒸腾、光合作用与  $\text{CO}_2$  和水汽通量模型。模型包括土壤水流子模型,根系吸水子模型,蒸发蒸腾子模型,冠层阻力-光合作用- $\text{CO}_2$  通量子模型等几个组成部分。土壤水流子模型采用土壤水流的连续方程来描述;根系吸水子模型采用了根据 Feddes 模型改进得到的模型;蒸发蒸腾子模型采用 Shuttleworth - Wallace 公式;采用叶片水平的气孔阻力-光合作用模型并将其扩展到冠层尺度,来确定冠层阻力、光合作用速度以及叶片气孔下腔的  $\text{CO}_2$  浓度,并进而确定冠层的  $\text{CO}_2$  通量。本模型的特点是尽可能采用简便的处理方法来描述 SPAC 系统中的水、热、 $\text{CO}_2$  传输过程与光合作用过程,同时各个子模型又具有较强的机理性。

## 参考文献

- [1] 于强,谢贤群,王天铎等. 植物光合生产力和冠层蒸散的模拟研究进展. 生态学报, 1999, 19(5): 744 - 753
- [2] CAMASE register of agro - ecosystems models, version II, March, 1996, DLO Research Institute for Agrobiolgy and Soil Fertility, Wageningen
- [3] Porter GR 1993, AFRCWHEAT2: A model of the growth and development in wheat incorporating responses to water and nitrogen. , European Journal of Agronomy, 2, 69 - 82
- [4] Drenth H, ten Berg H F M, Riethoven JJM(1994), ORYZA simulation modules for potential and nitrogen - limited rice production. SARP Research Proceedings. Wageningen, the Netherlands: AB - DLO

- [5] Ritchie J T, Otter S, Description and performance of CERES - wheat : a user - oriented wheat yield model. USDA - ARS, ARS - 38, 1985, pp159 - 75
- [6] Van Diepen C A, Wolf J, Van Keulen H, Rappoldt C, WOFOST: a simulation model of crop production. Soil Use and Management, 1989, 5 (1) :16 - 24
- [7] Van Laar H H, van Keulen H, Goudriaan J, Simulation of crop growth for potential and water - limited production situation, as applied to spring wheat. Simulation Reports 27, Wageningen, the Netherlands: Wageningen Agricultural University/ AB - DLO
- [8] Goudriaan J, Predicting crop yield under global change, In: Walker B, Steffen W, Canadell J, et al (eds) The Terrestrial Biosphere and Global Change, Cambridge University Press, 1999
- [9] Ahuja, L. R., K. R. Rojas, J. D. Hanson, M. J. Shaffer, and L. Ma, Root Zone Water Quality Model - Modelling Management Effects on Water Quality and Crop Production, Water Resources Publications, LLC
- [10] 黄秉维. 自然条件与作物生产 - 光合潜力. 中国农业科学院情报所, 1978
- [11] 黄策, 王天铎. 水稻群体物质生产过程的计算机模拟. 作物学报, 1986, 12(1) 1 - 8
- [12] 高亮之, 金之庆, 黄耀, 等. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统 (RCSODS). 中国农业科技出版社, 1992, pp152
- [13] 刘建栋, 于强, 傅抱璞. 黄淮海地区冬小麦光温生产潜力数值模拟研究. 自然资源学报, 1999, 14(2) :169 - 173

## 作者简介



于强 (YU Qiang, 1962 ~), 男, 安徽人, 博士、研究员、博士生导师。1984 年获得南京气象学院农业气象专业学士学位; 1987 年获得北京农业大学农业气象专业硕士学位; 1994 年获得南京大学大气科学系博士学位; 1994 - 1996 年在中科院上海植物生理研究所光合作用研究室做博士后; 1997 - 1998 年任中科院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室副研究员; 1997 年入选中国科学院“百人计划”。现任中科院地理科学与资源所栾城试验站站长, 兼禹城试验站副站长。1999 年至 2000 年在荷兰瓦赫宁根大学做访问研究; 2000 年起兼任栾城农业生态试验站负责人。主要从事植物光合作用、农田蒸散模型、作物水分利用效率和作物生长模型等方面的研究。

王天铎 (WANG Tianduo, 1929 ~), 1951 年毕业于北京农业大学农业化学系。1951 年至今在中国科学院上海植物生理研究所工作。研究员、博士生导师、植物生理学报主编、Australian Journal of Plant Physiology 顾问。主要从事作物冠层光合作用的数学模拟, 以及作物水分利用效率、作物生长模型等研究。

(责任编辑: 曙光)

## 国外新闻

## 日本纳米技术专利激增

日经产业消费研究所最近公布的一项调查结果表明, 日本积极发展纳米技术的成绩显著, 2000 年申请专利 4900 项, 比 1995 年增加了 1 倍。

据该所对 1993 年 1 月至 2000 年 6 月间的专利申请数目所作统计, 在日本国内, 近年来, 超微细技术和原子能显微镜等有关纳米技术的专利申请数量呈急剧增加趋势: 1998 年 3900 项; 1999 年 4300 项; 2000 年达到 4900 项; 今年上半年已

超过 2850 项, 全年有可能逼近 6000 项。

调查结果还表明, 外国企业在日本的纳米技术专利申请数量也在迅速增加: 1995 年仅有 660 项, 但去年增加到大约 1550 项, 占当年日本纳米技术专利申请总数的 30% 以上。《日本经济新闻》说, 这表明, 外国企业在对日本发动“专利攻势”, 日本在纳米技术领域的优势正在消失。(新华社供本刊稿)