

# 国外作物模型区域应用研究进展

刘布春

王石立 马玉平

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要** 文章针对目前作物模拟模型从单点和田间尺度应用于更大区域尺度的问题,介绍了诸如模型数据标准化、模块化建模、作物模型和天气发生器结合、作物模拟和地理信息系统结合、作物模拟与遥感技术结合、区域升尺度连接、基于 Web 的建模等作物模型区域化应用中技术问题及当前作物模型区域应用的研究进展。

**关键词** 作物模拟模型 区域尺度应用 升尺度连接

## 引言

农业系统是一个包含非生物和生物因素之间大量相互作用的复杂系统。由于植物与天气变量和土壤变量等非生物因素之间,植物和其他各生物因子之间都存在相互作用,每个有机体本身又是一个非常复杂的系统,因此确定农业系统的整个响应是非常困难的。作物模拟模型作为一种系统分析方法,在帮助理解农业系统和天气、气候因子的相互作用方面起了很大作用。随着科学技术的发展和社会需求的加大,作物模拟无论在研究深度还是应用广泛方面都取得了显著的成就。本文重点就近年来国外方兴未艾的作物模型区域尺度应用方面的研究进展做一简要综述。

## 1 主要的作物模拟模型

荷兰人 de Wit 教授曾定义了从潜在产量到营养和病害限制产量的作物模拟四个水平或四个阶段。目前已经有至少 100 种不同的模拟模型,其中以小麦模型最多,其他如谷类、豆类、根茎类、块茎类作物以及特殊作物如蔬菜和水果等的模型数十分有限。还有许多作物没有模拟模型。

### 1.1 农业科技转换决策支持系统

农业科技转换决策支持系统(DSSAT)是目前

使用最广泛的模型系统之一,它的研制开发在农业科技转换国际 Benchmark 站网(IBSNAT)项目的赞助和指导下进行,由美国国际开发署授权夏威夷大学实施。DSSAT 目前由 17 种不同的作物模拟模型组成,包括禾本科作物组 CERES、豆科作物模型组 CROPGRO、马铃薯模型 SUBSTOR、甘蔗模型 CANEGRO、木薯模型 CROPSIM 和向日葵模型 OILCROP<sup>[1]</sup>。

### 1.2 Wageningen 模型

由荷兰 Wageningen 大学和研究中心开发的 SUCROS 模型组也在被广泛应用<sup>[2,3]</sup>。通过水稻产量模拟和系统分析(SARP)项目,荷兰政府资助与 IRRI 协作的水稻模型 ORYZA 已经在东南亚广泛验证<sup>[4]</sup>。SUCROS 模型系列中包括 MACROS 和 BACROS 模型以及被称为 WOFOST 的简化模型。

### 1.3 农业产量系统模拟

农业产量系统模拟(APSIM)主要在澳大利亚使用,由农业产量系统研究组研制,在当地农业部门得到了高度重视和支持<sup>[5]</sup>。用户友好的界面使非建模者如农民和农作物咨询部门在使用 APSIM 或在当地条件下应用该模型时变得非常容易<sup>[6,7]</sup>。

### 1.4 其他作物模型

侵蚀预报影响计算模型(EPIC)经常用于气候变化及对农业影响研究方面,在美国应用尤多。最

“十五”国家科技攻关项目“农林重大病虫害和农业气象灾害的预警及控制技术” - 13 课题资助

收稿日期:2002 年 5 月 16 日;定稿日期:2002 年 6 月 30 日

作者简介:刘布春,女,1968 年出生,硕士,从事应用气象研究工作

近更名为“环境政策集成气候”。另外如 PLANTGRO, CENTURY 和 CROPCYST 也是一些著名的作物模拟模型<sup>[8,9]</sup>。

全球变化陆地生态系统(GCTE)项目中已经计划建立一些由作物模型研制者和数据收集者参加的网络。GCTE 所建的小麦及其他作物网络是为使众多的同类作物模型规范化,可使用同一组模拟数据进行模型性能和效果的比对检验,进而明确模型的区域应用价值,包括可行性、局限性和准确性等<sup>[10]</sup>。

病虫害及其他大多数作物模型和模型系统模拟潜在、水分胁迫和氮素胁迫产量形成过程,而 DSSAT 以及 APSIM 的部分模型中加进了磷的胁迫。CROPGRO 还可以模拟 20 多种虫害的影响。GCTE 目前正在将病害动态模型与作物模拟模型相连接模拟病害与作物相互影响的研究。

## 2 作物模型区域应用中若干技术问题的研究进展

### 2.1 模型数据标准化

随着对作物模型应用兴趣的不断增加,许多非模型开发人员在使用和应用作物模拟模型。对这些应用而言,利用当地数据评估模型输出结果的信度是非常重要的。由于模拟模型数量不很多,因此,将模型输入和输出文件格式标准化,建立能够在模型研制人员之间交换的模块,从而集中资源是十分重要的。国际农业系统应用协会(ICASA)在为作物模拟模型制定数据标准和为模式开发者提供交换信息方面做了很多工作。ICASA 目前由 APSRU 模型组、Wagenigen 模型组和 DSSAT 模型组组成。在 ICASA 的网站(<http://ICASAnet.org>)上可以查看到为下一代作物模型制定的新的输入、输出数据标准的指南<sup>[11]</sup>。

### 2.2 模块化建模

ICASA 现在正在组织重建作物模拟模型源代码,并将该代码整理为文件。在这个过程中使用了模块化建模方法,由每一个模块处理本身的输入量、初始化、计算速率和状态变量以及部分输出量。这种创造性工作的一个目标是让其他科学家也能使用这些源代码,并且可以改进或取代一种或更多的模块。现在已经开发了物候期生长、土壤水分平衡、土壤氮平衡、日光合作用、小时光合作用、天气、土壤温度等的模块。可以从 ICASA 网站(<http://ICASAnet.org>)下载土壤水分模块<sup>[11]</sup>。需要指出的是重新

组织模型代码是有困难的。需要作物模拟团体共同约定,来开发并维护相应的模块结构。

### 2.3 作物模型和天气发生器结合

随机天气发生器是一种数值模型,它可以生成与实测数据统计特征十分相似的气候变量时间序列。主要的随机天气发生器为美国的 WGEN 和英国的 LARS - WG。目前,天气发生器与作物模拟模型结合已在农业上有多种应用。

作物模型和天气发生器结合形成农业生产决策系统。利用天气发生器生成足够长的天气时间序列资料,输入作物模拟模型,在农业影响评估中估计极端事件发生的可能性,促进了决策支持系统的发展。该方法可以分析和评估与天气变异有关的作物生产风险<sup>[12]</sup>。

作物模型和天气发生器结合进行作物生长发育实时模拟,使人们能够实时预测作物生长季内的生长发育状况。如果生长季前期使用实际天气资料而其余时段使用平均天气数据,有可能因实际天气偏离平均值而影响预测效果。Se menov 和 Porter<sup>[13]</sup>利用 AFRCWHEAT2 小麦模拟模型和 LARS - WG,在生长季前期使用实测数据,其余时段使用随机天气发生器生成数据,对所生成 30 个序列数据模拟的产量分布情况进行研究。结果表明,开花期模拟预测的产量最接近最终实际产量。当然,使用随机天气发生器不能绝对预测后段生长季的天气,但是,根据它生成的实测数据的延伸,利用 Monte Carlo 模拟方法可以预测作物产量的分布。在作物生长季利用的观测数据时段越长,最终产量的预测也越准确。

作物模型和天气发生器结合评估气候变化对作物产量和土地利用的影响,在气候变化影响研究中人们逐渐更加关注气候变率的影响。通过控制和改变随机天气发生器的参数可以生成具有不同变异特征的气候情景。已有人使用天气发生器和作物模型研究了气候变异对作物模型的影响,例如, CERES - WHEAT<sup>[14]</sup>, AFRE WHEAT<sup>[13,15]</sup>, SIRIUS<sup>[16]</sup> 和 EPIC<sup>[17]</sup>。其中 Se menov 和 Porter 选定英国的 Rothzamed 和法国的 Montellier,使用 AFRCWHEAT2 作物模拟模型和 LARS - WG 随机天气发生器,设定不同的逐日平均气温和方差变化情景,模拟对作物生长发育的影响。大多数研究证实气候变异的变化已经影响了谷物产量,其影响与平均气候的影响相同甚至更大。随机天气发生器还能生成

气候变化情景, GCMs 是用来构建气候变化情景的工具。由于计算能力的限制,多数 GCMs 都倾向于使用低空间分辨率。随机天气发生器可以生成具有高空间、高时间分辨率的气候变化情景<sup>[16,18]</sup>,然后结合 GCMs 试验的输出结果生成适合于农业影响评估的气候变化情景。Se menov 和 Barrow<sup>[16]</sup>使用 LARS - WG 和英国气象局的 GCM 瞬时试验——UKTR<sup>[19,20]</sup>构建气候变化情景。在没有其他方法将低分辨率的变异降到单点的情况下,直接使用 UKTRGCM 没有降维的数据。事先用具体地点的逐日观测气候数据对 LARS - WG 进行校正,再用 UKTR 产生的气候变化信息扰动 LARS - WG 的参数,根据扰动参数生成逐日情景,再输入到 SIRIUS 小麦模拟模型中<sup>[21]</sup>。

研究人员就欧、美、亚各大洲的不同天气区域对 WGEN 和 LARS - WG 做过比较<sup>[22]</sup>,发现 LARS - WG 生成的各地月平均最高、最低气温和降水量都比 WGEN 更好,特别是 LARS - WG 还可以生成太阳辐射分布。

天气发生器存在的一些问题限制了它的进一步应用。如天气发生器在一些地方会低估天气变量的年内变异,又如生成不同地点的天气时间序列在空间上是不相关的,而实际上分析有些天气变量如降水引起的洪涝问题时空间相关性非常重要。

#### 2.4 作物模拟与地理信息系统结合

区域尺度的作物监测和预测存在时间和空间两个关键问题。作物模拟模型是基于点的系统<sup>[23]</sup>,大部分输入数据也是针对具体地点的,因此在空间外推上很不理想<sup>[24]</sup>。随着地理信息系统管理空间数据能力的发展,人们研制了将 GIS 与作物模型结合的方法。目前作物模拟模型和 GIS 连接的方法有连接、结合和整合等三类。在连接方法中,用户通过各自的界面访问 GIS 和作物模拟模型,在不同操作环境下运行,但两个系统间有输入输出数据文件的交换。在结合方法中,用户可以通过同一界面访问两系统。整合为同一操作系统是最困难的一步,但从用户角度看,整合系统是无缝、最易操作的。

DASST 中的豆科作物模型 CROPGRO 和禾本科作物模型 CEREA5 已经和许多 GIS 软件系统连接。基于 Arc View 的农业和环境地理信息系统(AEGIS/ WIN)提供了一个易于操作的接口<sup>[25]</sup>,已经广泛运用于区域生产模拟和其他不同空间尺度的

应用。DSSATLINK 程序也是基于 Arc View 的系统,处理格点输入数据和作物模拟空间输出结果<sup>[26]</sup>。另外还有一个基于 ESRI 的 MapObjects 软件系统,它不需要任何 GIS 或昂贵的软件产品支持。其中空间决策支持引擎(DSSE)与气象实时观测数据链接<sup>[27]</sup>,可以集成自动气象站观测的当前天气数据和历史数据,对区域产量模拟提供了一个与作物模型的无缝接口。美国乔治亚州应用该系统,使用 85 个气象站的历史气象数据和国家土壤地理数据库土壤数据,做了 30 种模拟,对乔治亚州西南部花生主产区进行产量预报。至于作物模型和 GIS 的整合还需进一步研究。

使用作物模拟模型和 GIS 预测区域产量方面还有一些问题没有解决。其中与模型输入或输出数据的插值有关的技术问题以及所使用的插值方法类型非常重要(比如是 Thiessen 多边形,还是反距离法、Splines 法、Cokring 法或其他方法)。

#### 2.5 作物模拟与遥感技术结合

难以得到各地天气、土壤和作物状况妨碍了作物生长模型对区域尺度作物生长的监测。遥感对大范围作物生长信息的监测能力使作物模型从田块尺度扩大到区域尺度成为可能。

遥感信息可以通过经验统计和动力方法用于作物生长监测。利用辐射传输模型或经验关系,通过辐射观测信号与各种植被状态变量间的关系确定最终产量。但是经验关系只能用于局地。另有一种辐射测定与 Monteith(光合转化)效率模型相结合的方法,输入辐射数据,对植被状态和干物质质量进行估算,但是这种方法仍不能描述作物生长发育过程。作物机理模型尽管是动力模拟,但是一些过程如器官吸收分配仍为经验关系,系数的不准确可能导致生物量估计的误差。1986 年 Wiegand 等最早提出遥感测量可以和农业气象模型结合校正模型模拟<sup>[28]</sup>。近年有人根据短波辐射信号与植被结构的关系,使作物模型与辐射传输模型相结合来模拟辐射信号;另一方面,用最优过程最小化模拟反射和观测反射辐射之间的差异,再利用辐射信号校正作物生长模型。例如在既没有初始条件(播种数据)也没有一些重要的作物参数(作物定苗特征)的实际区域对作物参数和产量进行评估<sup>[29]</sup>。利用叶面积指数,将 SUCROS 甜菜模型与辐射传输模型相结合,模拟绿、红、近红外三个波段的光谱反射,然后使用最优

化软件将模拟反射率和实测反射率之间的差异最小化,重新准确估计被测试作物的定苗和早期生长参数及产量。在应用到区域时,对每个田块用高分辨率 SPOT 数据来校正作物模拟模型,用作物和土壤的先验知识估算 SAIL 参数<sup>[30]</sup>,并把它与植被指数合并,极大地改进了反演结果,从而减少了作物模型校准的误差。

## 2.6 作物模型区域化应用的升尺度连接问题

鉴于大量的环境变量(如天气、土壤)和管理变量的非均匀性,在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时,面临的最大问题是升尺度连接(scaling-up)。需要解决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问题。一些应用研究人员在这方面开展了深入研究<sup>[31]</sup>。

### 2.6.1 时空变异和完全归并

农业生产是在时间和空间变化的环境上进行的。作物模拟研究把天气、土壤和管理(包括品种特性)属性作为作物模拟模型最典型的输入变量,而这些输入变量是存在时空变化的。同时,植物、土壤、天气的相互作用使产量的空间(分布)形式也发生年际间变化。当分析区域作物响应变量的原因时,人们关心输入变量空间各点上的时间变异形式(或者称为输入变量时间变异的的空间分布形式);而当分析区域内作物响应的结果时,主要关注的则是气候变异条件下所研究区域总的或平均的结果。有人用空间上的“完全归并”法<sup>[32]</sup>计算这一结果。

Iwasa 等把“完全归并”定义为在给定地区环境变化范围内某些响应(如作物产量)的积分。归并的结果为空间上的总和或平均值。King<sup>[33]</sup>(式 1)和 Rastetter 等<sup>[34]</sup>(式 2)分别用地理场的平均和概率场的数学期望来归并作物对环境变量的平均响应结果。

$$\bar{Y}_t = A_t^{-1} \iint_{R_t} f(e_t(x, z)) dx dz \quad (1)$$

$$\bar{Y}_t = E[f(e_t)] = \int_{e_t} f(e_t) g(e_t) de_t \quad (2)$$

式中,  $f(e_t)$  函数表示  $t$  年实际产量对一组在空间上变化的环境变量(用  $e_t$  表示)的响应。因  $e_t$  在  $(x, z)$  空间上是变化的,所以  $f(e_t)$  也是空间变化的;  $\bar{Y}_t$  表示在给定  $t$  年,面积为  $A_t$  的二维区域  $R_t$  上的平均产量;  $g(e_t)$  表示变异的多元概率密度函数。研究

表明,如果  $f(e_t)$  和  $e_t(x, z)$  的描述是完全的,式(1)能得出真实的空间平均产量;假设  $f(e_t)$  是空间独立过程,则概率公式(式(2))等价于空间公式(式(1)),同样可以得出真实的空间平均产量。事实上,由于资料、计算量等的限制,模拟者不可能完全准确描述所有环境变量及其响应,相邻空间单元也存在相互作用,加上系统会出现新特性和新过程。因此,归并结果必然会产生空间和时间变异偏差。

### 2.6.2 归并产生的偏差

空间平均偏差是由于模拟研究通常用一个或几个代表站的环境变量  $e_t$  代表研究地区环境变量的平均值  $\bar{e}_t$  而产生的。即使这些站点真有代表性,由于用对平均环境变量  $\bar{e}_t$  的响应去估计对非均匀环境的非线性响应的平均值,也会产生归并误差。代表站点上的模拟产量不能完全代表地区产量的空间平均或年际变异。James W H 和 James W J<sup>[31]</sup>用 CROPGRO V3.5<sup>[35]</sup>模拟产量对种植密度的响应来说明空间平均偏差的存在。假设一均匀地块的一半群体密度较高,而另一半极低,这块地的“真实”平均产量是高密度条件下的产量和低密度条件下的产量的平均值。而忽略群体的非均匀性,模拟平均密度下的产量将比“真实”平均产量高 13%。

时间变异偏差是由于用一个或几个代表点模拟对空间非均匀环境的响应,导致高估年际间的变异而产生的。James W H 和 James W J<sup>[31]</sup>用 CRESE-Maize V3.5<sup>[36]</sup>分别模拟了湖城和奥卡拉两地 20 年的产量时间序列,并设区域(佛罗里达州)模拟产量为湖城和奥卡拉模拟产量的简单平均。研究表明,两个单点模拟产量的标准差均远远大于区域模拟产量的标准差。这说明如果以单点或几个点模拟序列代表区域状况时有夸大区域年际变异的趋势。

此外,所谓研究新特性和新过程而产生的偏差,是指研究中引入新内容(如人类和经济子系统)或系统相邻成分间相互作用(作物间的竞争),对各系统的新特性和新过程不能完全描述而产生的另一类偏差。

### 2.6.3 有效控制或减小误差的方法

根据对随空间尺度增大引起的误差本质和来源的理解,提出了通过合理化输入取样、进行区域校正、完善模型(未考虑新特性和新过程的模型)、处理不完善的资料等方法,来有效控制或减小作物模型区域化应用的误差<sup>[33,34,37]</sup>。

(1) 输入取样:指用不同输入样本组(能捕捉足够多的环境非均匀性信息)重复模拟一种响应。对于动态的、面向过程的作物模型来说,依靠地理场(式(1))或概率场(式(2))上的分步积分很难得到完全归并。因此输入取样方法只是完全归并法的数值近似。为了减少反复输入取样和模拟进行归并的资料量和计算量,可以用敏感性分析有效地确定可能对归并误差有贡献的变量。Rastetter 等<sup>[34]</sup>对期望范围输入变量的线性响应的分析和 Addiscott<sup>[38]</sup>对输入变量方差的平均响应的敏感性分析中提出,归并偏差是由于特定输入变量的非均匀性引起的。

输入取样分为地理场取样和概率场取样。地理场取样的依据是根据区域变量变异性的空间依赖把一个地区分成更小的、相对均匀的空间单元,并忽略不计空间单元内的变异<sup>[39]</sup>。目前普遍采用 GIS 工具进行地理场的取样。矢量格式的 GIS 具有进行不同输入变量的多边形叠加,从而产生综合变量新多边形的功能,可以处理土壤图、作物统计区和天气站泰森多边形的空间边界的不一致问题<sup>[40~42]</sup>。栅格格式的 GIS 多用于处理产量监测输出结果、遥感土地利用和气候资料,以及大气数值模式输出的综合结果<sup>[39,43,44]</sup>。

原则上说,对以概率分布表示空间变异的随机取样输入值进行重复模拟可以完成空间归并。James W H 和 James W J 指出,可以用 Monte Carlo 模拟方法有效地推导和分析模拟响应结果的分布。用无遗漏取样法处理种植日期等离散分布的管理变量。当涉及几种输入分布或有些分布是连续的,独立随机取样则是最通用的方法<sup>[31]</sup>。Iman、Conover 和 Owen 用拉丁超立方(Latin hypercube)取样方法大大降低了模拟运算次数,有效地减小了独立变量间的虚假相关,增加了联合分布变量间的相关<sup>[45,46]</sup>。Bouma 等用拉丁超立方取样法描述了作物模拟产量和  $\text{NO}_3$  淋溶的不确定性<sup>[47]</sup>。Luxmoore 等提出了作为有空间变异的作物和森林产量模拟的空间归并方法<sup>[37]</sup>。

(2) 模型校正:用所研究地区响应变量的历史资料,通过校正模型的输入和输出以描述和减小偏差。然而,用相同数据校正会影响针对预测值的验证,可以通过一组数据集校正,然后用其他子集的观测数据进行验证。James W H 和 James W J 针对前面所述种植密度空间变异问题,利用历史观测资料(如产

量),用一单调函数反推和校正输入变量(群体密度),使之能够代表整个研究地区。这样,模拟的对这一单变量的响应结果将会和田间观测的非均匀条件下所得的归并响应结果相一致<sup>[31]</sup>。Haskett 等、Russell 和 van Gardingen 用修正系数方法对模型输出结果——产量预报值进行修正,使预测结果的标准差按比例变化,但不会校正年际间的变异<sup>[48,49]</sup>。Rosenthal 等用最小二乘法线性调整,通过去掉它的系统成分,只留下非系统的或随机的误差,从而缩小了预报方差<sup>[42]</sup>。Meinke 和 Hammer 用另一种线性修正,重新生成观测序列的平均值和标准差,模拟数据和观测数据可在标准化的偏差上比较。虽然预报误差较高,但适用于保留年际间变异比减小预报误差更重要的风险研究<sup>[50]</sup>。

(3) 完善模型:把现有模型修改为考虑随研究空间范围的增大而产生的新限制条件或包含由于系统新成分的出现而产生的新过程模型。在这方面,有一种观点认为,模型的复杂性应随空间尺度的增大而增加。近年来研究者已着手进行磷动力<sup>[51]</sup>、排灌<sup>[52]</sup>对病虫害响应<sup>[53]</sup>以及限制根生长的各种土壤要素<sup>[54]</sup>的模拟。另一种观点认为,简化模型更适合高级系统层次和更大的空间尺度<sup>[38,55,56]</sup>。他们指出,对输入需求比较适度的简化模型将减小与输入变量不确定性有关的误差;减小产生归并偏差的非线性特性;滤掉大空间尺度上的高频信号从而减轻对时间常数很小的尺度(如细胞)过程的详细模拟的需求。实际上,二者兼顾的混合方法更为合适。另外,空间上的相互作用也是区域模型应完善的组成部分。如表层和次表层水文过程、作物间竞争和农田资源分配过程都能够改变作物产量。Jones 等、Sadler 和 Russell、Thornton 等指出模拟这些过程的方法是将现有的作物模式嵌入到高层次系统模型中<sup>[57~59]</sup>。

(4) 处理不完全资料:这是减小区域化应用误差的另一途径。获取质量可靠并有一定空间覆盖度的输入资料,是把作物模型应用到更大尺度上时最重要的前提条件。King 等认为“扩大模拟区域尺度必然意味着精度的损失和用于模型参数化的观测资料密度的损失,同时还会产生将模型应用到与开发时尺度不同区域时的适应性问题”<sup>[60]</sup>。一般而言,土壤和天气数据在空间上的依赖性,为估计数据(如空间插值)提供了可能。但空间依赖的正方差变异值

(positive nugget variance) 和限定的全距 (range) 则限制了插值的机会。模型区域应用所要求的资料密度迫使人们需要从少量测量数据或从比较容易获取的代用数据来估算数据。在有数据库的地方,要借助于 GIS 解决土壤、天气站点或气候模型网格点,以及作物统计上报行政区的空间覆盖和边界的不一致性。

就土壤数据而言,通常把土壤分布图单元处理成均匀区域,分别用单个的一组土壤参数值来描述。然而,图单元上的土壤属性会发生相当大的变化<sup>[61]</sup>。Lathrop 等人利用不同精度的土壤数据库对森林潜在蒸散的模拟表明,土壤图单元里的非均匀性对农业模拟模型的应用有重要影响<sup>[62]</sup>。使用高分辨率土壤图有可能减小与土壤属性差异有关的归并偏差。但是,这种图不能解释所有重要变异,而且常常很难得到。为此,人们采用了各种估计土壤属性空间变异的方法。如,从数字高程图和地形分析推断出一些关于小尺度上土壤属性空间变异的有用信息;由装备全球定位系统(GPS)和产量传感器的收割机绘制的产量图通过校正后,来估算重要的田间尺度上土壤参数空间变异;努力充实土壤数据库以得到图单元内有关参数变异的信息。Sadler 和 Russell<sup>[58]</sup>、Sharma<sup>[63]</sup>等认为土壤有效持水量可能是决定作物对天气变异响应最重要的土壤参数。因此,在土壤数据库中补充这一类重要的土壤参数可能是估算土壤空间变异的有效途径。

应用作物模型研究气候变异和气候预测的中心问题是观测、估算或预报的天气数据。对于距离测量资料站远的地点,或重要变量、时段缺测的站点,人们通常依靠估算的数据。最通用的估算方法是用邻近站点的资料代替。有人用泰森多边形自动识别任一地理点的最近站点并得到每一个站点面积权重系数<sup>[42,43]</sup>。遥感资料可以弥补地表测量的天气资料的不足<sup>[64]</sup>。用随机发生器产生天气数据序列也是近年来被广泛应用的方法之一。有时用空间平均和内插来估算逐日天气情况,然而,天气的许多过程是非线性的,对其进行空间平均会减小逐日时间序列资料的变异性。作物模型不仅对平均气候敏感,

而且对季节内和季节间的变异也是敏感的。空间平均容易影响模拟结果,例如在估算降水时,由于空间归并人为地增加了降水频率和降低了平均降水强度,对土壤水分有效性和作物产量产生了两种相反的效果<sup>[13,17,65,66]</sup>。James W H 和 James W J 用邻近站点插值得到 Gainesville 的天气数据和北佛罗里达 5 个站点(包括 Gainesville)观测的天气资料模拟了玉米产量,前者模拟的平均产量要高于后者,而年际间的变异小于后者;对每站模拟产量,用距离反比插值得到的 Gainesville 的产量比用 Gainesville 资料直接模拟的产量更接近实际的平均产量,但是标准差较低<sup>[31]</sup>。此外天气数据矩形格点的分辨率会影响产量模拟效果。Easterling 等发现格点从  $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$  分辨率提高到  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,美国大平原部分地区玉米和小麦产量(1984~1992 年)预报的 EPIC 误差减小。但当格点分辨率提高到  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  时,预报结果无进一步的改善<sup>[67]</sup>。这些例证强调,气候模型输出的时空非归并方法在保留模型预报意义的特征和历史逐日序列的统计属性方面是非常重要的。

作物管理的空间差异与归并偏差很有关系。由于一般得不到管理变量的空间状况,因此,在一个地区内通常采用典型的或推荐的管理方式。但是通过校正某项或某几项管理变量可以得到很好的产量预报结果。如使用一个或多个代表性品种,根据资料校正品种、采用几个播种日期等<sup>1,2)</sup>。Mone 等还采用通过改变管理输入项,把技术趋势项综合到模拟结果中的方法<sup>[68]</sup>。

## 2.7 基于 Web 的建模

随着计算机和通信技术特别是互联网的发展,以网络为基础发送信息将会成为模型应用的一个重要部分。与传统的以桌面为基础的模型相比,基于 Web 的模型和决策支持工具为人们带来了更大的利益<sup>[69]</sup>。通过 Internet,用户可以迅速而且不受限制地访问模型,存取数据,模型开发者也可以访问模型的操作代码,并根据需要更新或改变代码。这为研究人员特别是对发展中国家的科学家提供了新的机遇。在乔治亚自动化环境监测网络(AEM)的网站上已经有一些模型,包括简单的度日和寒冷时数

1) Villalobos R. Natl. Meteorol. Inst., 哥斯达黎加,个人通信,1998

2) Batchelor W D. Iowa State Univ., 个人通信,1999

的计算模块,以及通过计算累积降水量和潜在蒸散(利用 Priestley - Taylor 方法)来计算水分平衡的模块。作为试验应用,CROPGRO 和 CERES 作物模拟模型已在网上实施,人们可以通过 AEMN 的网站([Http://www.griffen.peaechnet.edu/dbe](http://www.griffen.peaechnet.edu/dbe))访问模型,利用乔治亚州的天气数据和用户选择的管理输入数据来运行<sup>[11]</sup>。

### 3 作物模拟模型的应用进展

#### 3.1 WOFOST 模式的区域应用

WOFOST 是世界粮食研究(World Food Studies)的缩写,目的是利用模拟技术,探索讨论与发展中国家日益增加的粮食安全有关的农业生产潜力问题。它是荷兰瓦赫宁根 de Wit C T 学派开发的系列作物模式(SUCROS, Arid, Crop, Spring, Wheat, MACROS 和 ORYZAI 等)中的一个成员。最初为世界粮食研究中心(CWFS)与瓦赫宁根农业大学理论生产生态系(WAU - TPE)、瓦赫宁根 DLO 农业生物研究中心(现为 AB - DLO)等合作的世界潜在粮食产量交叉研究的框架,由 Wolf 研制而成,旨在评估热带国家一年生作物的生产潜力<sup>[70~72]</sup>。1988 年 CWFS 撤消后,模式继续由 DLO Winard Staring 中心和 AB - DLO, WAU - TPE 共同研制开发。经过 10 多年的连续研究,新版本及其衍生物不断出现,已广泛应用于农业生产许多方面,如产量风险分析和产量年际变异,不同土壤类型、不同农业水文状况、不同作物品种的产量变化,生长关键因子的确定,播种日期决策,气候变化影响,农业机械使用关键期等。此外,WOFOST 还成功用于预测目的,如产量潜力、灌溉和施肥的产量效益估算、区域产量预测等。一些研究已将 WOFOST 用于森林、牧草的研究。

WOFOST 第一次用于区域性研究是 CWFS 应联合国粮农组织(FAO)要求,用 WOFOST V3.1 分析布基那法索、加纳、肯尼亚等非洲国家施肥可能引起的产量潜力的提高。1985 年 WOFOST V4.1 作为欧洲共同体联合研究中心(JRC)的农业遥感监测项目 MARS 中的预警系统产量估算工具,与 GIS、气象卫星资料结合,分析预测了赞比亚的玉米产量<sup>[73,74]</sup>。另外,还进行了秘鲁安第斯山脉小流域灌溉和水土保护的评估<sup>[75]</sup>。在 ISIRIS 和 UNEP 的国家土壤数据库项目(NASREC)(有 11 个国家参

加)中,发展了用户界面友好的 WOFOST V4.3,与 NASREC 数据库连接,开展了详细的土地/土壤特性等研究。WOFOST V4.4 经校正和检验,在肯尼亚进行玉米产量预测,精度为 15%。同时还结合 GIS 内插技术,评估区域内各点的产量风险。在 AGRISK 计划中,也用 WOFOST 开展了风险研究,对农民应对与土壤类型、作物及品种、播期、径流、地理位置等有关的干旱风险所采取的策略进行评估<sup>[76]</sup>。

待发展至 WOFOST V5.3 时,WOFOST 已经研制出一系列温带作物模式(小麦、玉米、油菜、马铃薯、甜菜)和牧草模式,并与 GIS 连接,可对区域内输入资料进行内插,对输出资料进行归并。此版本估算了欧洲共同体各国主要大田作物由土壤、气候决定的区域生产潜力<sup>[77]</sup>和各种种植制度的投入产出系数<sup>[78]</sup>,并利用投入产出系数,通过多目标线性规划考察分析欧盟各种土地利用的最佳配置(GOAL)和可行性方案。早在 1987 年,WOFOST 便开始用于评估气候变化(CO<sub>2</sub> 浓度、温度、降水、辐射)对作物生产(发育、生长、水分利用)的影响。

WOFOST V6.0 有质的飞跃和更明确的应用,即在 JRC 的 MAR 计划行动 3 中应用 WOFOST 为欧盟区域和国家尺度的作物生长状况监测及产量预测提供客观数据。该版本将 WOFOST 装入一个作物生长监测系统(CGMS),与 ORACLE 数据库和 ARC/INFO 软件相连,并可在 SUN - UNIX 系统上运行<sup>[79]</sup>。单独的 WOFOST V6.0 则可供使用者用于学习、演示、检验和校正。

WOFOST V7.1 是在 SYSNET 项目(System Research Network)框架上开发的,旨在用于亚洲热带地区可持续资源管理的生态区域土地规划的方法学系统。可以说,它是 WOFOST 发展道路上的一个新的里程碑。它成功地开发了一个快捷、方便、友好的图形用户界面 WOFOST 控制中心(WCC)来运行 WOFOST V7.1,有关作物、作物发育、土壤、地点的资料和参数均可通过 Tab 标签或一种专门的重运行表格格式(re-run)来修改。输出结果可用表格或时间为横轴的图形表示,也可自动转入 Excel 格式<sup>[80]</sup>。

以 WOFOST 为核心的 CGMS 已由 MARS 计划成功地用于日常业务。JRC 每月发布欧洲地区作物生长监测预测公报,包括欧盟 15 国各国及区域的气候概述、农业气象条件分析、卫星遥感监测和产量

预测,还附以大量图表,如作物生长状况模拟结果图(发育阶段、储存器官重、土壤水分)、植被指数图、预测结果表等,可谓图文并茂,为欧盟制定粮食进出口贸易计划等提供了丰富可靠的科学依据。

### 3.2 区域产量预报

由于农业生产建议和政策是在区域尺度上实施的,气候变化研究也旨在确定气候变化对粮食产量的影响及其适应性对策,所以人们对模拟区域产量越来越感兴趣。Shrikant S J 和 James W J<sup>[81]</sup>应用 CROPGRO 大豆模拟模型成功地进行了乔治亚州  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  格点上的大豆产量预报。其中重点研究了将田间尺度的 CROPGRO 大豆模型应用于区域产量预报时所面临的 3 个问题:①如何获得区域尺度下土壤、天气、生产系统、投入、农民的技术等输入变量的空间差异信息;②如何决定农民在品种、种植日期、控制胁迫上采取措施产生的年际间时间变异信息;③如何量化 CROPGRO 大豆模型未考虑到的减产因素,如病虫害、洪水、干旱、群体损失、收获损失等。此外,还根据乔治亚州大豆历史产量资料通过模型输出校正,大大改善了区域预报效果。

Shrikant S J 和 James W J 模拟所用的天气数据是从 VEMAP 数据库得到的  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  格点上的数据。环境、管理、土壤水分初始条件等数据由于存在输入不正确或取近似值会产生误差,研究中采用敏感性分析方法确定适宜取值。例如,通过敏感性分析,发现以潜在可吸收土壤水分(PESW)指标来表达该地区土壤的空间差异,得到了与用主导土壤类型相一致的结果,在不妨碍准确性的前提下节省了机时。土壤有效含水量(AW)与产量的敏感性分析表明,初始土壤水分少时(AW 为 1%~10%),种植日期推后 2 周以上,产量下降。因此把 1 月 1 日, PESW 的 50% 定为土壤水分初始条件。种植日期 - 产量的敏感性分析表明,5 月 25 日至 6 月 20 日为最佳种植期(有最低的协方差和最高产量)。Shrikant S J 和 James W J 具体模拟时设立 3 个播期选择。根据群体密度 - 产量的敏感性分析,产量对群体密度的差异不太敏感。模拟时采用了适中的群体密度 270000 株/公顷。模拟时选择适当的作物品种也很重要,当地有早、中、晚熟 3 种熟性品种,模拟了分期种植时不同熟性品种的成熟期和网格内的平均产量。该州大部分地区种植早熟或中熟均获得较高产量,而晚熟品种在北乔治亚州的产量较低。

对每一播期以及 1 个初始条件、1 种类型土壤、3 个品种,用 CROPGRO 模拟,得到 3 个大豆产量,进行平均。再对每一种植日期所占百分比加权,得到每个网格内的平均产量。

由于 CROPGRO 大豆模型不能模拟诸如病虫害、洪水、干旱、群体损失、收获损失等减产因素,因此研究中采用了输出校正以弥补这一缺陷。首先计算产量校正系数  $y_{cf}$ (当地统计产量  $y$  和模拟产量  $y'$  的比,  $0 < y_{cf} < 1$ )。当统计产量和校正的模拟产量的均方根误差(RMSE)最小时,取这一  $y_{cf}$  为产量校正系数  $y_c$ 。预报产量  $\hat{y} = y_c \cdot y'$ 。用  $F$  检验、 $t$  检验、一致性指标  $d$  和规定系数检验(PFT)<sup>[82]</sup>证实了模型的模拟和预报效果是好的。研究中用 1974~1990 年得到的  $y_c$  修正和预报 1991~1995 年的产量,并与统计产量进行了比较,均方根误差 RMSE 从 119% 减小到 20%,独立样本检验时为 14%,在乔治亚州环保局环保模型设定的误差范围之内。改进后的预报正确,预报出了历史最高和最低两个极端年,对商业应用非常有用。

研究结果最后指出,未来的模拟应集中研究提高动力作物生长模拟模型计算病、虫、草、洪水、干旱等造成损失的能力,提供准确的初始土壤水分条件和种植日期十分重要,必要时应进行输入和输出校正。另外,卫星遥感可能对这些方面有所改进。

### 4 结语

机理性的作物生长模拟模型作为一种工具,已经并且还将继续在环境、资源、可持续发展以及气候变化影响等研究中发挥作用。然而,把来自属性均匀小区上的动力作物生长模拟模型应用到更大区域,需要解决时空变异、升尺度连接等许多科学问题,还要借助地理信息系统、遥感网络等现代信息技术和数学方法,其中很多问题还有待于探讨和解决。

### 参考文献

- 1 Hoogenboom G, Wilkens P W and Tsuji G Y (eds). DSSAT v3 Volume 4. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 1999. 286
- 2 Bouman B A M, van Keulen, van Laar H H, et al. The School of de Wit crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. *Agricultural Systems*, 1996, 52(2-3): 171-198
- 3 Penning de Vries F W T, Jansen D M, ten Berge H F M, et al. Simulation of ecophysiological processes of growth of several annual

- crops. Simulation Monographs. Centre for Agricultural Publishing and Documentation ( Pudoc ). Wageningen, Netherlands, 1989
- 4 Kropff M J, van Laar H H and Matthews R. ORAZAI, An Ecophysiological Model for Irrigation Rice Production. SARP Research Proceedings. DLO Research Institute for Agrobiolgy and Soil Fertility. Wageningen, Netherlands, 1994. 110
  - 5 Meinke H, Hammer G L and Selvaraju R. Using seasonal climate forecasts in agriculture—the Australian experience. In: Sivakumar M V K, eds. Climate Prediction and Agriculture. Proceedings of the START/ WMO International Workshop held in Geneva, Switzerland, 27 - 29 September 1999. Washington, DC, USA, International START Secretariat, 2000. 195 - 214
  - 6 Keating B A, Hammer G L, Carberray P S, et al. APSIM's contribution to the simulation of agricultural systems. Agronomy Abstracts, 1997. 21
  - 7 Mc Cown R L, Hammer G L and Hargreaves J N G, et al. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 1996, 50 :255 - 271
  - 8 Cole C V, Paustian K, Elliott E T, et al. Analysis of agroecosystem carbon pools. *Water, Air and Soil Pollution*, 1993, 70 :357 - 371
  - 9 Stockle C O, Martin S A and Campbell G S. CropSyst, a Cropping Systems Simulation Model: Water/ Nitrogen Budgets and Crop Yield. *Agricultural Systems*, 1994, 46 :335 - 359
  - 10 Global Change and Terrestrial Ecosystems( GCTE ). GCTE Focus 3 Wheat Network:1993 model and experimental meta data. Report No.2. GCTE, Canberra, Australia.1994
  - 11 Gerrit Hoogenboom. The State of the Art in Crop Modeling. In: Sivakumar M V K, eds. Climate Prediction and Agriculture. Proceedings of the START/ WMO International Workshop held in Geneva, Switzerland, 27 - 29 September 1999. Washington, DC, USA, International START Secretariat, 2000. 69 - 75
  - 12 Tsuji G Y, Hoogenboom G and Thornton P K(eds). Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic, Dordrecht, 1998. 399
  - 13 Semenov M A and Porter J R. Climatic variability and the modeling of crop yields. *Agric. and Forest Meteor.*, 1995, 73 :265 - 283
  - 14 Mearns L O, Rosenzweig C and Goldberg R. Mean and variance change in climate scenarios: methods, agricultural applications, and measure of uncertainty. *Clim. Change*, 1997, 35 :367 - 396
  - 15 Wolf J L, Evans G, Semenov M A, et al. Comparison of wheat simulation models under climate change. II. Model calibration and sensitivity analysis. *Climate Res.*, 1996, 7 :253 - 270
  - 16 Semenov M A and Barrow E M. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Clim. Change*, 1997, 35 :397 - 414
  - 17 Riha S J, Wilks D S and Simoens P. Impact of temperature and precipitation variability on crop model predictions. *Clim. Change*, 1996, 32 :293 - 311
  - 18 Wilks D S. Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Clim. Change*, 1992, 22 :67 - 84
  - 19 Murphy J M. Transient response of the Hadley Centre coupled ocean - atmosphere model to increasing carbon dioxide. Part I: Control climate and flux adjustment. *J. Climate*, 1995, 8 :36 - 56
  - 20 Murphy J M and Mitchell J F B. Transient response of the Hadley Centre coupled ocean - atmosphere model to increasing carbon dioxide. Part II. Spatial and temporal structure of the response. *J. Climate*, 1995, 8 :57 - 80
  - 21 Jamieson P D, Semenov M A, Brooking I R, et al. Sirius a mechanistic model of wheat response to environmental variation. *European Journal of Agronomy*, 1998, 8 :161 - 179
  - 22 Semenov M A, Brooks R J, Barrow E M, et al. Comparison of the WGEN and LARS - WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Res.*, 1998, 10 :95 - 107
  - 23 Schulze R. Transcending scales of space and time in impact studies of climate and climate change on agrohydrological responses. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 82 :185 - 212
  - 24 Olesen J E, Bocher P K and Jensen T. Comparison of scales of climate and soil data for aggregating simulated yields of winter wheat in Denmark. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 82 :213 - 228
  - 25 Engel T, Hoogenboom G, Jones J W, et al. AEGIS/ WIN: A computer program for the application of crop simulation models across geographical areas. *Agronomy Journal*, 1997, 89 :919 - 928
  - 26 Hoogenboom G, Geogiev G A, Hartkamp A D, et al. Linking crop simulation models and geographic information systems for regional yield predictions. In: Crop Monitoring and Prediction at Regional Scales. Proceedings of the NIAES - STA International Workshop 2001 held in Tsukuba, Japan, 19 - 21 February 2001. National Institute of Agro - Environmental Sciences, Science and Technology Agency of Japan, The Japan International Science and Technology Exchange Center, 2001. 217 - 228
  - 27 Hoogenboom G. The Georgia Automated Environmental Monitoring Network. In: Preprints 24 - th Conference on Agricultural and Forest Meteorology. American Meteorological Society, Boston, Massachusetts. 2000. 24 - 25
  - 28 Wiegand C L, Richardson A J, Jackson R D, et al. Development of agrometeorological crop model inputs from remotely sensed information. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1986, GE, 24(1) : 90 - 97
  - 29 Gueri M, Laumay M and Duke C. Remote sensing as a tool enabling the spatial use of crop models for crop diagnosis and yield prediction. 2000, IGARSS2000, 24 - 28 July 2000, Hawaii, USA
  - 30 Guerif M and Duke C. Calibration of the SUCROS emergence and early growth module for sugarbeet using optical remote sensing data assimilation. *European Journal of Agronomy*. 1998, 9 :127 - 136
  - 31 James W H and James W J. Scaling - up Crop Models for Climate Prediction Applications. In: Sivakumar M V K, eds. Climate Pre-

- diction and Agriculture . Proceedings of the START/ WMO International Workshop held in Geneva , Switzerland , 27 - 29 September 1999 . Washington , DC , USA , International START Secretariat , 2000 . 77 - 117
- 32 Iwasa Y , Andreasen V and Levin S . Aggregation in model ecosystems . I . Perfect aggregation . *Ecological Modelling* , 1987 , 37 : 287 - 302
- 33 King A W . Translating models across scales in the landscape . In : Turner M G , et al . eds . Quantitative methods in landscape ecology : The Analysis and interpretation of Landscape heterogeneity . Springer - Verlag , New York . 1991 . 479 - 517
- 34 Rastetter E B , King A W , Cosby B J , et al . Aggregating fine - scale ecological knowledge to model coarser - scale attributes of ecosystems . *Ecological Applications* , 1992 , 2 : 55 - 70
- 35 Boote K J , Jones J W and Hoogenboom G , et al . The CROPGRO model for grain legumes . In : Tsuji G Y , Hoogenboom G , Thornton P K , eds . Understanding options for agricultural production . Kluwer , Dordrecht , Netherlands , 1998 . 99 - 128
- 36 Ritchie J T , Singh U , Godwin U C , et al . Cereal growth , development and yield . In : Tsuji G Y , Hoogenboom G and Thornton P K , eds . Understanding options for agricultural production . Kluwer , Dordrecht , Netherlands . 1998 . 79 - 98
- 37 Luxmoore R J , King A W and Thar M L . Approaches to scaling up physiologically based soil - plant models in space and time . *Tree Physiology* , 1991 , 9 : 281 - 292
- 38 Addiscott T M . Simulation modelling and soil behaviour . *Geoderma* , 1993 , 60 : 15 - 40
- 39 de Jager J M , Potgieter A B and van den Berg W J . Framework for forecasting the extent and severity of drought in maize in the Free State Province of South Africa . *Agricultural Systems* , 1998 , 57 : 351 - 365
- 40 van Lanen H A J , van Diepen C A , Reinds G J , et al . Physical land evaluation methods and GIS to explore the crop growth potential and its effects within the European communities . *Agricultural Systems* , 1992 , 39 : 307 - 328
- 41 Thornton P K , Sake A R , Singh U , et al . Application of a maize crop simulation model in the central region of Malawi . *Experimental Agriculture* , 1995 , 31 : 213 - 226
- 42 Rosenthal W D , Hammer G L and Butler D . Predicting regional grain sorghum production in Australia using spatial data and crop simulation modeling . *Agric . and Forest Meteorol .* , 1998 , 91 : 263 - 274
- 43 Carbone G J , Narumalai S and King M . Application of remote sensing and GIS technologies with physiological crop models . *PE & RS* , 1996 , 63 : 171 - 179
- 44 Thornton P K , Bowen W T , Ravelo A C , et al . Estimating millet production for famine early warning : an application of crop simulation modelling using satellite and ground - based data in Burkina Faso . *Agric . and Forest Meteorol .* , 1997 , 83 : 95 - 112
- 45 Iman R L and Conover W J . A distribution - free approach to inducing rank correlation among input variables for simulation studies . *Communications in Statistics* , 1982 , B11 : 311 - 334
- 46 Owen A B . Controlling correlations in Latin hypercube samples . *J . Am . Statistical Association* , 1994 , 89 : 1517 - 1522
- 47 Bouma J , Bootlink H W G and Finke P A . Use of soil survey data for modeling solute transport in the vadose zone . *J . Environ . Quality* , 1996 , 25 : 519 - 526
- 48 Haskett J D , Pachepsky Y A and Acock B . Estimation of soybean yields and county and state levels using GLYCI M : A case study for Iowa . *Agronomy Journal* , 1995 , 87 : 926 - 931
- 49 Russell G and van Gardingen P R . Problems with Using Models to Predict Regional Crop Production . In : van Gardingen P R , et al . eds . Scaling - up from Cell to Landscape . Cambridge : Cambridge Univ . Press , 1997 . 273 - 294
- 50 Meinke H and Hammer G L . Climatic risk to peanut production : a simulation study for Northern Australia . *Austr . J . Experimental Agric .* , 1995 , 35 : 777 - 780
- 51 Gerakis A , Daroub S , Ritchie J T , et al . Phosphorus simulation in the CERES models . In 1998 Agronomy abstracts . ASA , Madison , WI , USA . 1998
- 52 Shen J , Batchelor W D , Jones J W , et al . Incorporation of a subsurface tile drainage component into a soybean growth model . *Trans . Am . Soc . Agric . Engineers* , 1998 , 41 : 1305 - 1313
- 53 Teng P S , Batchelor W D , Pinnschmidt H O , et al . Simulation of pest effects on crops using coupled pest - crop models : the potential for decision support . In : Tsuji G Y , Hoogenboom G and Thornton P K , eds . Understanding options for agricultural production . Kluwer , Dordrecht , The Netherlands , 1998 . 221 - 266
- 54 Lizaso J I and Ritchie J T . A modification of CERES to predict the impact of soil water excess on maize crop growth and development . In : Kropff M J , Teng P S , Aggarwal P K et al . eds . Applications of system approaches and field level . Kluwer , Dordrecht , The Netherlands , 1997 . 153 - 167
- 55 Heuvelink G B M . Uncertainty analysis in environmental modeling under a change of spatial scale . *Nutrient Cycling in Agroecosystems* , 1998 , 50 : 255 - 264
- 56 Jansen M J W . Prediction error through modeling concepts and uncertainty from basic data . *Nutrient Cycling in Agroecosystems* , 1998 , 50 : 247 - 253
- 57 Jones J W , Thornton P K and Hansen J W . Opportunities for systems approaches at the farm scale . In : Teng P S , Kropff M J , Ten Berge H F M , et al . eds . Applications of system approaches at the farm and regional level . Kluwer , Dordrecht , Netherlands , 1997 . 1 - 29
- 58 Sadler E J and Russell G . Modeling crop yield for site - specific management . In : Pierce F J and Sadler E J eds . The state of site - specific management for agricultural systems . ASA - CSSA - SSSA , Madison , WI , USA . 1997 . 69 - 79
- 59 Thornton P K , Bootlink H W G and Stoerovogel J J . A computer program for geostatistical and spatial analysis of crop model out-

- puts. *Agronomy Journal*, 1997, 89: 620 - 627
- 60 King D, Fox D M, Daroussin J, et al. Upscaling a simple erosion model from small areas to a large region. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 50: 143 - 149
- 61 Warrick A W. Spatial variability. In: Hillel D, ed. *Environmental Soil Physics*. San Diego: Academic Press, CA, USA. 1998. 655 - 676
- 62 Lathrop R G Jr, Aber J D and Bognar J A. Spatial variability of digital soil maps and its impact on regional ecosystem modeling. *Ecological Modelling*, 1995, 82: 1 - 10
- 63 Sharma B D, Kar S and Sakar S. Calibration of a water uptake simulation model under varying soil moisture regime and nitrogen level for wheat crop. *Agric. and Forest Meteorol.*, 1997, 83: 135 - 146
- 64 Whitlock C H, Charlock T P, Staylor W F, et al. First global WCRP shortwave surface radiation budget dataset. *Bull. Am Meteor. Soc.*, 1995, 76: 905 - 922
- 65 Mearns L O, Giorgi F, McDaniel L, et al. Analysis of daily variability of precipitation in a nested regional climate model: comparison with observations and doubled CO<sub>2</sub> results. *Global and Planetary Change*, 1995, 10: 55 - 78
- 66 Mearns L O, Rosenzweig C and Goldberg R. The effects of changes in daily and interannual climatic variability on CERES - Wheat: sensitivity study. *Clim. Change*, 1996, 32: 257 - 292
- 67 Easterling W E, Weiss A, Haysl C J, et al. Spatial scales of climate information for simulating wheat and maize productivity: the case of the US Great Plains. *Agric. and Forest Meteorol.*, 1998, 90: 51 - 63
- 68 Mone T N, Kaiser H M and Riha S J. Regional yield estimation using a crop simulation model: concept, methods and validation. *Agricultural Systems*, 1994, 46: 79 - 92
- 69 Georgiev G A and Hoogenboom G. Near real - time agricultural simulations on the web. *Simulation*, 1999, 73(1): 22 - 28
- 70 van Keulen H, Wolf J (eds). *Modeling of agricultural production: weather, soils and crops*. Simulation Monographs, Pudoc. Wageningen, Netherlands, 1986. 478
- 71 van Diepen C A, Rappoldt C, Wolf J, et al. Crop growth simulation model WOFOST. Documentation version 4.1, Centre for World Food Studies, Wageningen, The Netherlands. 1988. 299
- 72 van Keulen H and Diepen C A. Crop growth models and agro - ecological characterization. In: Scaife A, ed. *Proceedings of the first congress of the European society of agronomy*, 5 - 7 December 1990, Paris. CEC, ESA, INRA. 1990. session 2: 1 - 16
- 73 Berkhout J A A, Huijgen J, Azzali S, et al. MARS definition study. Results of the preparatory phase. Main report. Report 17. SC - DLO, Wageningen, 1988. 111
- 74 Huygen eds. Simulation studies on the limitations to maize production in Zambia. Report 27. SC - DLO, Wageningen, 1990. 99
- 75 van der Zel H. Riego en la sierra, la experiencia de PRODERM. PRODERM, Cusco. 1989. 108
- 76 Mellaat E A R. Toepass van gewasgroei - simulatie modellen voor risico - studies in sahellanden (The application of crop - growth simulation models for risk studies in Sahelian - countries). In: Huijbeis C, et al. eds. *Informatica toepassingen in de agrarische sector, voordrachten VIAS - Symposium*. 1989. 141 - 154
- 77 de Koning G H J & van Diepen C A. Crop production potential of the rural areas within the European Communities. IV: Potential, water - limited and actual crop production. Technical working document W68. Netherlands Scientific council for government policy, The Hague. 1992. 83
- 78 de Koning G H J, van Keulen H, abbinge R R, et al. Determination of input and output coefficients of cropping systems in the European Community. 1994
- 79 Hooijer A A & van der Wal T. CGMS version 3.1, user manual. Technical document 15.1. SC - DLO, Wageningen, 1994. 17
- 80 Boogaard H L, van Diepen C A, Rotter R P, et al. WOFOST 7.1 User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Centre 1.5. Technical document 52. DLO Winand Staring Centre, Wageningen. 1998
- 81 Shrikant S J and James W J. Scaling - up crop models for regional yield and production estimation: A case - study of soybean production in the State of Georgia, USA. In: *Crop Monitoring and Prediction at Regional Scales*. Proceedings of the NIAES - STA International Workshop 2001 held in Tsukuba, Japan, 19 - 21 February 2001. National Institute of Agro - Environmental Sciences, Science and Technology Agency of Japan, The Japan International Science and Technology Exchange Center, 2001. 171 - 186
- 82 Parrish R S and Smith C N. A method for testing weather model predictions for fall within prescribed factor of true values, with an application to pesticide leaching. *Ecology. Model*, 1990, 51: 69 - 72