

国家自然科学基金资助项目

作物 模型原理

潘学标 著

ZUOWU
MOXING YUANLI



气象出版社

国家自然科学基金资助项目

作物模型原理

潘学标 著

气象出版社

内 容 简 介

作物模型是借助信息技术进行农业生产精准管理的基础,是农业生产和研究进步的标志之一。国外已发表了较多的作物模型,但国内独立开发的作物模型还不多。本书介绍了作物模型的发展和应用概况,系统地对作物生长发育模型中的发育与形态发生、碳平衡、水分平衡、氮素平衡等机理过程进行理论描述,重点结合由国家自然科学基金资助完成的棉花模型COTGROW进行具体建模过程阐述。此外还介绍了GOSSYM、DSSAT、APSIM、OZCOT等几个国外的典型作物模型。

本书适于从事农林业、气象、生态、自然地理等领域模型和信息技术研究的科技与教育工作者、研究生、大学高年级学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

作物模型原理/潘学标著. —北京:气象出版社,2003.6

ISBN 7-5029-3517-7

I. 作… II. 潘… III. 作物-模型-理论 IV.S3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 104352 号

责任编辑:崔晓军 终审:周诗健

封面设计:彭小秋 责任技编:刘祥玉 责任校对:曹继华

气象出版社出版

(北京市海淀区中关村南大街 46 号 邮编:100081)

网址: <http://cmp.cma.gov.cn> E-mail: qxchs@263.net

*

北京华正印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

*

开本:850×1168 1/32 印张:6.75 字数:175 千字

2003 年 6 月第一版 2003 年 6 月第一次印刷

ISBN 7-5029-3517-7/S·0409

印数:1~1000 定价:18.00 元

序

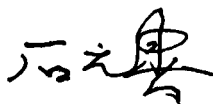
农业信息化、数字化是今后中国农业发展的一个方向。在信息技术已经高度发达的今天，农业信息化和数字化已成为各国农业进一步现代化的标志之一，信息技术在农业上的全面应用已经离我们不远。发达国家的农业信息化主要表现在农业信息网络、精确农业、农业智能化、农业专家系统、农业管理决策支持系统、作物模拟系统、虚拟作物和虚拟农场等方面。我国20世纪80年代起也先后开始农业资源遥感调查、农作物估产、农业专家系统、作物生产管理模拟与决策支持系统研究，90年代又开始了精确农业、虚拟作物等研究。农业信息网络更是方兴未艾，在农业科技信息交流、农产品交易中已起到重要作用。农业信息化今后在中国将会结出硕果。

作物模型是未来进行农业生产诊断管理的重要工具，也是相关农业科学研究的知识总结。建立一个好的作物模型，有利于帮助快速分析在不同地区作物生长发育和产量形成的规律，分析作物生产的气候和管理措施风险，为管理部门进行作物合理布局 and 农户进行实时诊断管理提供决策支持。中国在20世纪80年代已经开始作物模型研究，先后建立了水稻、棉花、小麦、玉米等作物的生长发育或栽培管理模型，一些园艺作物模型也在研究之中。这些模型有的已在生产或其他业务中应用，有的应用还不够广泛。与此同时，也引进过一些国外的作物模型在国内进行应用试验，主要是棉花模型、小麦模型和玉米模型。中国幅员辽阔，农作物种类很多，需要开发各种可信度高的作物模型应用到农业生产的各个方面。没有作物模型，精确农业的体系就不健全，农业信息化难于达到应有的效果。

作物模型研究是一个系统工程，是多种知识的集合，需要多学科协作，更需要模型建立的理论指导。目前国内作物模型研究的著作还不多见。

潘学标博士写作完成《作物模型原理》一书，为开发作物模型提供了一种思路和方法，值得对作物模型有兴趣的同仁参考。作者根据自己的体验综合了国内外作物模型方法，给出了作物模型建立较清晰的思路，结合作者建立棉花模型的经验给出了模型建立范例，并对一些国外典型大田作物模型进行了介绍。作者已从事作物模型研究十余年，有田间栽培和生理生态试验研究经验，熟悉作物生理生态、作物栽培、农业气象学等领域知识并发表了几十篇相关研究论文，多年前从余等完成以建立棉花模型COTGROW为核心的博士论文，后从事科研和教学工作，是国内棉花模型方面有影响的研究者之一。偶然在中国期刊网上全文检索COTGROW一词，发现出现该词的相关论文近30篇，足见一斑。相信本书倾注了作者的心血和智慧，定会对他人有所帮助，从而对中国农业信息化和数字化有帮助，是故乐于为之作序。

中国农业大学教授
中国科学院院士
中国工程院院士



(石元春)

2003年5月

前 言

数字化和信息化是当前农业进步的一个重要推动力，而作物模型是农业信息化管理的基础。作物模型的开发，是建立在对作物生产过程充分了解的基础上的。对作物生产过程理论的不断探索，其本身也是知识的创新和总结。

作物生长发育计算机模拟模型自20世纪60年代开始研究以来，得到了很大的发展，从人们不认识、难于理解到被广泛认同和应用，反映了系统科学、数学、计算机在农业领域应用的成功，反映了农业生产从定性管理向定量管理、从静态管理向动态管理的进步。

中国20世纪80年代才真正接触作物生产系统计算机模拟，在此之前多是用静态的数学方程来表达作物生产与环境或生产要素的简单关系。简单模型不能随着时间、地点等条件的变化而任意外延，适应性较差，而机理性的动态模拟模型正好克服了这一缺点，因而更有使用价值和发展前景。但动态的机理模型是非常复杂的，要建立一个经得起检验的动态模型绝非易事，它不仅要求开发者了解作物的生长发育规律，而且要了解土壤物理学、农业气象学、植物营养学、作物生理学、程序设计等，是广博知识的集成。国外的模型开发常常是组成团队分工进行，国内研究者通常缺乏合作条件或机制，多数人在自主开发模型软件面前知难而退或引进国外模型过把瘾，以致丧失了发展的机会。

实际上作物模型的研究和开发有很多未知空间可供探索，也有很多经努力后获得的成果令人回味，实在是苦中有乐的事。但要了解模型如何开发却不是一蹴而就的。几十年来国外已出版了很多与模型相关的著作，有了相当的知识储备，而中文论著除个别翻译版本外寥若晨星。这也是国内模型知识累积和传递慢的原因。作者愿集自己的经验，为愿意研究作物模型者投石引路，如有人从阅读中有所收获，则足以遂作者之心愿。

本书作者有幸较早参加作物模型研究工作。20世纪80年代末的

“七五”期间，参加了农业部的重点项目和自然科学基金项目工作，开始棉花栽培、生理生态研究和棉花模型的初步开发；“八五”期间主持国家自然科学基金项目和农业部重点项目的子专题，完成棉花模型COTGROW的开发；“九五”期间主持国家科技攻关的重中之重项目子专题，用模型评价气候变化对棉花生产的影响；“十五”期间主持自然科学基金项目，用模型评估棉花生产的气候风险。至今从事棉花模型研究已有十余年，恰逢1999年开始给中国农业大学气象学专业研究生讲授《农业气候信息系统》和后来给中国农业科学院研究生讲授《作物计算机模拟》课程，便开始对作物模型做了一些总结和拓展，作为研究生课程的一部分。几经讲授和修改，形成本书。

本书参考国内外文献资料，介绍了作物模型的发展过程、一般原理和方法，重点结合自己的研究以棉花模型为例给出如何进行模型表达的示例，最后介绍了几个国外的典型作物模型概况。其中棉花模型的研究得到国家自然科学基金的资助（批准号39170474、30170535）。在棉花模型的研究和开发过程中先后得到中国农业科学院棉花研究所蒋国柱研究员、中国农业大学石元春教授和韩湘玲教授的指导，在此深表谢意。

作者能完成本书，得益于作者的农业气象学专业本科与硕士、土壤学专业博士、地图学与地理信息系统专业博士后经历，加上十几年棉花田间试验研究的经验。在本书即将付印之际，衷心感谢曾在学业和工作上给予帮助的众位师长、同事和朋友们。

石元春院士非常关心信息技术在农业上的应用，愿在百忙中为本书作序，令作者非常感动与鼓舞。在本书编辑过程中，气象出版社崔晓军编辑付出许多心血，作者在此深表感谢。

本书如有不当之处，全因作者功力不足所致，愿闻过以便今后改之。

潘学标 于农大绿苑

2003年5月20日

目 录

1 作物模型发展与应用	(1)
1.1 作物模型的概念	(1)
1.2 作物生产系统与作物模型的建立	(2)
1.2.1 作物生产系统	(2)
1.2.2 作物模型的建立	(5)
1.2.3 作物模型的评价	(10)
1.3 作物模型的发展	(12)
1.4 作物模型的应用领域	(16)
1.4.1 作物模型建立的背景	(16)
1.4.2 作物模型在教学中的应用	(17)
1.4.3 作物模型在科研中的应用	(17)
1.4.4 作物模型在生产管理和规划中的应用	(19)
1.5 作物模型的发展方向	(20)
2 作物生长发育过程模拟	(22)
2.1 作物发育与形态发生过程及其模拟	(23)
2.1.1 作物的发育期及其模拟	(23)
2.1.2 形态发育	(32)
2.1.3 COTGROW 模型中的棉花发育与形态发生模块	(36)
2.2 碳平衡过程及其模拟	(44)
2.2.1 光合作用及光合产物运移	(44)
2.2.2 呼吸作用与作物生长	(54)

2.2.3	同化物分配与器官生长	(61)
2.2.4	COTGROW模型中的碳素平衡模块	(68)
2.3	水分平衡过程及其模拟	(82)
2.3.1	作物蒸腾与生长发育	(82)
2.3.2	土壤水分平衡	(86)
2.3.3	棉花模型COTGROW中的水分平衡子模块	(89)
2.4	氮素平衡过程及其模拟	(105)
2.4.1	氮素平衡模型原理	(105)
2.4.2	COTGROW模型中的氮平衡模块	(117)
2.5	管理措施影响的模拟	(133)
2.5.1	管理措施影响模拟原理	(133)
2.5.2	COTGROW棉花模型中的管理措施模块	(134)
2.6	模拟模型的输入与输出	(145)
2.6.1	一般作物模型的输入与输出	(145)
2.6.2	COTGROW模型的输入与输出	(146)
3	典型模型介绍	(155)
3.1	棉花模型GOSSYM	(155)
3.1.1	模拟模型的结构与功能	(155)
3.1.2	模型原理	(158)
3.2	DSSAT与农业环境地理信息系统AEGIS	(166)
3.2.1	DSSAT的发展现状	(166)
3.2.2	DSSAT与农业环境地理信息系统的结合	(169)
3.2.3	AEGIS/WIN的功能与应用领域	(172)
3.3	澳大利亚农业生产系统模拟模型APSIM概况	(176)
3.3.1	APSIM的研究背景	(176)
3.3.2	APSIM的结构与功能	(176)
3.3.3	APSIM开发的特点	(180)

3.3.4	APSIM的应用	(180)
3.4	澳大利亚棉花管理模型OZCOT	(181)
3.4.1	概况	(181)
3.4.2	OZCOT的结构与功能	(182)
3.4.3	OZCOT的原理与方法	(183)
3.4.4	OZCOT在棉花生产管理中的应用	(197)
	主要参考文献	(201)

1 作物模型发展与应用

作物生长发育模型研究是从20世纪60年代开始的。随着计算机应用的普及，作物模型得到了更广泛的研究和发展，且日趋成熟。作物模型作为新的研究方法和技术，建立在许多相关学科的基础上。它吸收了作物生理学、土壤学、农业气象学、作物栽培学、植物病理学等学科知识和计算机应用及信息技术，能迅速回答许多“If...Then”的问题。

1.1 作物模型的概念

模型是真实系统的简单表示。作物模型则是对作物生长发育过程的简单表示，可用于研究作物生长、发育及其对环境和措施的反应。作物模型可分为描述性模型和解释性模型。

描述性模型以简单的方式定义一个系统的行为。它不考虑行为的机理过程，类似于黑箱操作。这类模型多由一个或多个数学方程组成，建立和使用都较为简捷。利用这种方程，可以不经测定即可很快确定作物生长的结果，如用Logistic方程估计作物的干重等。但这类方程是在某一具体年份和条件下得到的回归方程，由于土壤、作物品种、管理措施、天气条件不同时，作物的生长速率也不同，不同年型和地点间的作物生长差异也很大，因此用同一个这种模型计算不同条件下的作物生长得出的结果与实际差异大。尽管回归模型的最大值、初始值和斜率等值是可以修改的，也有人试图通过修改这些参数或建立另外的回归模型得到这些参数值的时空变化，但因影响因素很多，试图通过估测这些参数用于其他年份和地块的作物生长预测常

常不能令人满意。从理论上讲可从精确的试验中导出所需的参数和方程,但影响因素多变,如品种和措施也在不断改进,很难做大量的试验来定量所有的变量。因此这类模型只有在描述当时条件下的生长情形时有用,难于外推应用。通过旋转回归设计进行的田间试验所得出的环境、措施与作物生长发育或产量间关系的方程组也属类似情况,尽管准确的试验对当地采取管理措施有参考价值。

解释性模型由引起系统行为的机理和过程的定量描述所组成,这些描述要清晰地表达科学理论和假设。建立解释性模型时,要对所模拟的系统进行分析,即将系统按过程分解成更小的子系统,分析各子系统间的相互联系,对其各个过程和机理进行量化。综合这些对系统的描述形成可在一定程度上反映系统的整体即是模拟模型。作物生长发育的解释性模型包括光合作用、呼吸作用、干物质分配、叶面积增长、分蘖或分枝等过程,作物生长是这些基本过程的综合结果。建立模型要对每个过程与辐射、温度等环境因子及作物生育状态的关系进行量化。由于解释性模型考虑环境和作物状态对具体过程的影响,其结果可随生长条件的改变而变化,因而这种模型有较好的适应性,可用于较大的范围。其模拟的精度取决于对各个过程的描述是否准确及综合描述是否合理。缺乏系统的机理研究常常制约着模型的开发和应用。

1.2 作物生产系统与作物模型的建立

1.2.1 作物生产系统

作物生产系统由农业生物、农业环境、农业技术和农业社会经济等要素组成。其中农业生物主要是作为生产对象的作物;农业环境包括气候(光、温、水、气等),土壤和地形地势,水文,影响作物的杂草、微生物和其他植物;农业技术包括耕作、灌溉、施肥等使环境适应于作物的措施,育种、播栽、密度和其

他使作物适应环境的管理措施，使作物产品更好地满足人们需要的技术，如适时收获、产后贮藏加工保鲜等，提高生产率 and 经济效益的措施，如机械化、自动化、科学管理等；农业社会经济包括农业投入，如劳力及化肥、农药等物资，农业管理政策，农产品经营，农业产出和人口等其他因素。目前的作物模型多数还仅涉及作物从播种到收获期间的作物与环境 and 措施的关系，即土壤、作物、大气 and 措施系统。要适应市场经济需要 and 用于区域发展研究，还需要考虑更多的因素。

由于作物生产系统是非常复杂的，在建立模型过程中需要对系统进行一些简化，减少对系统最终结果影响不大的过程，以使模型更加简明。荷兰学者de Wit曾提出根据生长限制因子对作物生产系统进行分类，并把作物生产系统分为4个水平(Penning de Vries等, 1989)。任一水平的作物生产系统，可以认为是一大类系统的组成部分。按照限制因子从少到多及产量递减的顺序，这些生产水平分别是：

第一生产水平：作物具有丰富的水分和营养条件且产量比其他任一生产水平高，作物的生长速率仅仅取决于当时的作物状态 and 当时的天气状况，尤其是辐射与温度。具有完整冠层的大田作物的生长速率一般为每公顷每天150~350kg干物质，这就是“潜在生长速率”，由此获得的产量就是“潜在产量”，亦即农业气候中通常所说的光温生产潜力。这些生长条件只有在非常精细耕作下 and 在西欧牧场或通常在人工控制温室里才能实现。

第二生产水平：至少在部分生长季节作物的生长速率仅受水分可利用性的限制。这种情况很少自然地出现，但在半干旱地区，施肥可能导致作物生长处于这个生产水平。在其他气候区集约耕作情况下也可能发生在某些轻质土壤上。

第三生产水平：至少在部分生长季节作物生长速率受氮素不足的制约，此外还受水分短缺或恶劣天气的影响。这种情况

在全世界各种农业系统中均较为常见。在非集约化施肥的作物中，氮素不足特别容易出现。在自然环境里，即使是氮素利用率很高的植物也不可能总是吸收到足够多的氮素。

第四生产水平：至少在部分生长季节里作物生长速率受土壤中磷和其他矿物元素含量低的限制。生长速率一般为每公顷每天10~50kg干物质，生长期往往不到100天。这种情况通常出现在不施肥的过度开发地区。

尽管实际上很少有完全符合以上任一种生产水平的情形，但作物生产系统的这种分析可使研究课题大大缩小，层次明显，有助于循序渐进地进行研究，可加快研究进程。这样，研究时可将注意力放在主要环境因子的动态变化和作物对其的反应上，那些没有限制效应的因子可以不考虑在内，因为它们不决定作物的生长速率，然而生长速率制约着非限制因子的吸收速率和利用效率。在以上4个生产情形中，病虫害和杂草都可进一步降低作物产量。

随着作物模型研究的发展，1993年荷兰学者Rabbinge又对生产系统重新进行了分类：

潜在生产水平：生产水平受大气CO₂浓度、太阳辐射、温度和作物特征(生理学、形态学、冠层结构等)的制约。各因子共同决定潜在的产量水平。

可达到的生产水平：生产水平由水分和营养(N、P)等限制产量的因子决定。此时需采取产量增加措施。

实际生产水平：生产水平由于受到诸如杂草、虫害、病害等降低产量的因子影响，产量在可达到的生产水平之下，宜采取产量保护措施。

除荷兰外，其他国家如美国、澳大利亚等进行作物模型研究时仅对所研究的对象进行简化，一般不区分为各种生产水平分别建立模型。

1.2.2 作物模型的建立

作物生产系统可以是一类作物的生产系统，也可以是单一作物的生产系统。在建立作物模型时，可以建立单一的作物模型，也可建立通用的作物模型，后者可通过作物参数来区分。对于目前的作物模型来说，需要考虑的重要过程不是很多，也不需要对这些过程的定量进行详细计算，如进行生物量的计算时，考虑生物量中各种主要化合物的平均值就够了，不必计算每种生化物质的合成效率；也不需将细胞生理学的动态问题纳入作物模型中，考虑过细并不见得会提高模型的精度。目前作物模型的解释水平为生理学和土壤物理学水平，在这一水平上，它们是描述性的还是再进一步分解为更详细的定量过程(如描述生化过程)是无关紧要的。要获得更详细的模拟结果，则模型需要包含更详细的内容和更多的解释过程。在一个模型中，需要有驱动变量、状态变量、速率变量和辅助变量等，还要考虑物质流和信息流的方向。

作物模型的驱动变量是天气。它可对作物产生重要的驱动或调节作用，而作物本身一般影响不了天气过程。驱动变量影响系统及其行为。系统行为是系统所有过程的综合，当系统的状态随时间而改变时，它是动态的；当动态的行为和状态变化相对较慢时，它是连续的，如作物的生长；当变化发生很快时，它是离散的，如机器从使用状态变为不使用状态。

当模型模拟系统的行为时，它是动态的。状态变量在不同模型中代表不同的量，它可能是实在的(如重量)，也可能是抽象的(如发育期)。速率变量表示状态变量的变化速率，如光合速率、呼吸速率、发育速率等。辅助变量作为一种状态影响速率变量的大小。物质流反映物质重量的流向，如呼吸作用使碳损失、水分吸收与蒸腾损失；信息流反映环境和生物状态对速率变量的影响，如温度、叶龄对光合作用的影响等。

在建立作物模型时，需要对系统进行分析，先建立概念模型，了解各个过程内部及与其他过程间的相互关系，绘出流程图，并用数学方程表达出来。然后综合这些关系，用一种计算机语言编写程序，在计算机上表达。作物模型主要描述生物生理生态、土壤物理、土壤化学、微气候、管理措施及它们之间的相互关系，循环计算的时间步长通常为1天。

根据以往的经验，模型的时间步长大致为0.1乘以时间系数。状态变量呈指数曲线变化，其时间系数等于状态变量增加或减少 e 倍(e 为自然对数的底，约为2.72)时所需的时间。呈指数生长的幼小作物大约每星期增重一倍，这样相应的时间系数为10天。因此时间步长为1天对作物生长发育模拟是足够精确的。在作物生长相对较慢的后期，步长也可大些。小型和大型模型都有用10天为步长取得成功的例子。模型中各变量的变化值为时间步长与速率变量的乘积，即在模型中假设时间步长内环境条件和生长速率变化不大。但一句内可能有些天过于干燥炎热使作物产生水分胁迫且光合速率下降，这样，用一较长时间内的平均温度模拟的光合速率可能会比逐日计算的要高。在某些情况下考虑少于1天的时间步长也许是必要的，如环境变化超出某些过程的临界值时，像温度日较差太大，不同温度条件下作物反应不同，用1天的平均值不能反映生育状况时；对白天积累淀粉使叶片光合速率下降的作物，时间步长小于1天也是必要的。而正常情况下步长为1天对许多作物是合理的，气象资料通常也按日输入，考虑作物在少于1天的时期内的状态变化通常没有意义。特殊情形可考虑针对不同过程采用不同的时间步长，如光合作用模拟可以1小时为步长，发育模拟可以1天为步长。

不同复杂程度的作物生产系统在建立作物模型时需考虑的因素也不同。

在第一生产水平，辐射强度、光的截取和植物利用能量的

效率是研究生长速率的关键因子。光是驱动变量，同化的碳水化合物通常以易利用的形式如淀粉储存下来，供以后的维持呼吸和生长用。温度影响生长速率和光合作用。在生长过程中，储存物以一种特殊效率转变为结构生物量。结构生物量由不再因维持或生长而分解的成分组成。生物量在根、茎、储藏器官间的分配与作物的生理年龄有关，而生理年龄本身又是温度的函数。其过程如图1.1所示。

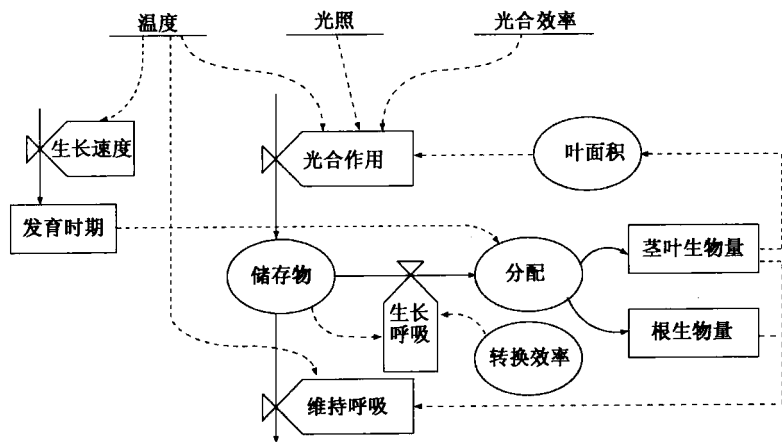


图1.1 第一生产水平系统关系图

(Penning de Vries等, 1989)

在第二生产水平，关键因子是土壤水分的适宜程度和作物对它的利用效率，缺水导致气孔关闭，同时 CO_2 同化量减少，蒸腾作用降低。水分利用效率是光合作用与蒸腾速率的比值。实际蒸腾速率与潜在蒸腾速率的比值反映了碳和水分平衡间的关系。土壤中的储水量是降水、毛管上升水与水分损失过程间的缓冲库。其缓冲能力以及同时发生的通过蒸腾和非生产性过程的水分损失，使作物生长速率仅间接地依赖于降水量。作物生