

水稻生长动态模拟研究进展

严力蛟, 全为民

(浙江大学农业生态研究所, 杭州 310029)

摘要:在查阅了国内外水稻生长动态模拟研究领域大量文献的基础上, 主要就气候变化对水稻生长影响的模拟、水稻生产潜力的估算、生育期预测、氮肥的优化管理、水稻群体质量指标的模拟与优化以及水稻干物质生产模拟等 6 个方面的研究动态进行了综述; 提出了水稻生长动态模拟模型研究和应用中存在的建模方法、参数确定和生产应用等 3 个方面的问题; 最后对该领域今后的攻关内容进行了探讨, 认为进一步研制和完善包括营养元素、病虫害害在内的, 以作物生理生态为基础的水稻生产系统综合性模拟模型, 充分利用以信息技术为主体的现代科学技术, 组织全国范围的协作试验以建立水稻品种参数数据库和研制估算水稻品种参数的数学方法, 将水稻生长动态模拟模型和专家系统结合, 组建水稻生产优化管理决策支持系统, 是提高水稻生长动态模拟模型实用性的关键。

关键词:动态模拟; 模拟模型; 研究动态; 存在问题; 攻关内容; 水稻

Advances in Dynamic Simulation Research of Rice Growth

YAN Li-Jiao, QUAN Wei-Min (Agroecology Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China).
Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(7): 1143~1152.

Abstract: Based on an extensive review literature on dynamic simulation of rice (*Oryza sativa* L.) growth, the following six aspects of this plant growth are presented in this paper. ① Simulation of the effects of climate change on rice growth. The general result is that when the temperature increases, the production of rice improves in cold regions, while it decreases in warm regions, and that increase in CO₂ leads to higher productivity. ② Estimating the production potential of rice. Generally, it is theoretically possible to predict the production potential of rice by the simulation model. There are lots of case studies in which simulation models have been applied in the production, research and decision making for rice cultivation. ③ Prediction of growth duration. Usually rice models in other countries have been set up on the basis of tropic and *Indica* subspecies, but these models only consider rice growth sensitivity to temperature, while the crop's sensitivity to light has not been adequately studied by use of models. As Chinese territory is very wide, Chinese modelers usually consider rice growth sensitivity to both temperature and light, this has made the models have higher spatial and temporal adaptability. ④ Quantitative optimization of nitrogen application in rice production. As nitrogen cycle is quite complex in soil-crop-atmospheric system and no effective method in the study of nitrogen cycle is available at present, practical application cases of nitrogen models are very scarce. ⑤ Simulation and optimization of indexes of rice population quality. There have been a lot of research in the connotation and components of indexes of rice population quality, as well as its optimum value in different regions, manipulation technologies and correlations between rice population quality, spikelet rate and yield. But so far no unified and authoritative definitions and indexes system have been established. ⑥ Simulation of dry matter production. At present, the main problem in

基金项目:国家自然科学基金资助项目(69673044); 国家“九五”攻关资助项目(96-015-01-010); 国际水稻研究所 SARP 协作网资助项目

收稿日期:2001-09-01; **修订日期:**2002-02-08

作者简介:严力蛟(1959-), 男, 浙江省上虞市人, 硕士, 副教授。主要从事农业生态、作物生产的模拟与系统分析等教学和科学研究。

万方数据

simulation of dry matter production lies with the unsatisfactory spatial and temporal adaptability of the model, this is so because the amount of rice parameters do not reflect the different characteristics of different environments. In addition, the structure of the model lacks integrality, flexibility and versatility.

Finally this paper addresses the problems and issues encountered in the study of simulation models for rice growth dynamics, involving the establishment methods, parameters and applications of the model. The authors proposed further researches should be conducted in the following aspects: Firstly, future models should be set up on the basis of physiological and ecological theories, and more elements in the production of rice like nutrient management, plant diseases and pest control should be included in the model. Secondly, a database of rice variety parameters should be set up through information technology and national rice research team in field experiments. On the other hand it is necessary to establish the method of calculating the rice variety parameters. Thirdly, rice growth dynamic models and expert system should be combined into management optimization and decision support system for rice production, which is key to improved application of rice growth dynamic simulation model.

Key words: dynamic simulation; simulation model; research advance; existing problems; tackling key problem; rice

文章编号:1000-0933(2002)07-1143-10 中图分类号:S511.01 文献标识码:A

自 20 世纪 60 年代中叶荷兰的 de Wit 和美国的 Duncan^[1,2]首创作物生长的动态模拟以来,该领域在短短的 30 余年间,其发展速度之快,投入人员之广,研究成果之多,已叹为观止。模拟模型与经验模型的最大区别在于,前者不是单纯以寻求作物生长与环境间的简单数值关系为终极目的,而是尽可能地根据作物生长过程中的生理生态机制,把作物分为若干相对独立、互为因果的子系统所组成的有机整体,并分别定量地描述各个子系统随时间的变化过程以及各子系统间的相互关系。因此,所谓作物生长模拟就是应用系统分析和计算机技术,综合作物生理生态、农业气象、土壤和农学等学科研究成果,将作物与其生态环境因子作为一个整体进行动态的定量化分析和生产应用研究。

迄今为止,荷兰、美国、英国、日本、澳大利亚、以色列、国际水稻研究所(IRRI)和前苏联等国家及国际研究机构已对多种作物建立了模拟模型,这些作物包括棉花、水稻、大麦、小麦、黑麦、马铃薯、高粱、大豆、甜菜、苜蓿、向日葵和白菜等。研究的领域涉及到光合作用、呼吸作用、蒸腾作用、物质生产和分配、生育进程、形态建成、根系生长、土壤氮素运行和土壤水分状况等。本文拟就水稻生长模拟的研究动态、存在问题以及今后的研究方向作一综述。

1 研究动态

1.1 气候变化对水稻生长影响的模拟

温室气体大量排放造成的全球气候变化已引起人类极大的关注,特别是气候变化对水稻生长的影响更是成为 20 世纪 90 年代的热门研究领域^[3]。运用模型模拟气候变化对水稻生长的影响必须包括两类模型:一类是作物生长模拟模型,目前使用较为广泛是 ORYZA1、MACROS、SIMRIW、CERES-RICE、YIELD;另一类是气候变化预测模型,使用最为普遍的是三个通用循环模型(General Circulation Model),即 GFDL、GISS、UKMO 通用循环模型,其它的气候预测模型有美国农业技术转让决策支持系统(Decision Support System for Agrotechnology Transfer, DSSAT)的 WGEN 和 WMAK 模型^[4~6]。大多数研究是综合这两类模型来模拟气候变化对水稻生长的影响。最近几年,气候变化对水稻生长影响的模拟研究很多,但这些研究大多只局限于某一国家或地区之内,同时许多研究仅仅考虑了温度变化对水稻生长的影响,而没有考虑 CO₂ 浓度增加对水稻生长的影响,还有一些研究是基于统计回归模型。Yoshino 等人使用 GISS 通用循环模型模拟 CO₂ 倍增情况下,日本水稻可增产 9%。Solomon 和 Leemans 运用一个简单模型和长期月平均气象资料^[7]进行模拟,结果是全球水稻产量可增加 0.4%,而东亚的水稻主要分布区以北水稻产量却没有明显变化。Jansen 使用东亚地区 7 个地点的历史气象资料 and MACROS 模型预测气候变化对东亚地区

水稻生长的影响,当温度上升很小时,模拟产量增加,当 10a 间的温度上升值大于 0.8℃时,水稻将会减产,其中 10~35°N 地区水稻减产最为显著,水稻产量变化的原因是 CO₂ 浓度增加导致光合作用增强,温度上升促使水稻生育期缩短。Rosenzweig 等人^[4]与来自 22 个国家的合作人员一起使用国际农业推广网(International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer,IBSNAT)的一系列作物模型模拟作物生长(包括水稻),在低纬度地区作物产量可能会下降,而在中高纬度地区产量可能会增加;不同产量变化可能与目前各地区的水稻生长条件有关,在低纬度地区,作物的生长处在接近作物能够忍受的温度阈值的上限,温度进一步上升可能会增加温度对作物生长的压力;而在中高纬度地区,气候变暖有利于受低温制约的作物生长,同时缩短了作物生长期,避免了生长后期的低温影响^[4]。Matthews 等人^[4]使用 ORYZA1、SIMRIW 两个作物生长模拟模型与三个通用循环模型(GFDL、GISS、UKMO)模拟在 CO₂ 倍增条件下,气候变化对亚洲水稻生产的影响,模拟结果如表 1 所示。6 个模拟组试验结果表明,21 世纪亚洲地区水稻产量将平均下降 3.8%,用 GISS、UKMO 模型进行模拟发现,泰国、巴基斯坦和中国南部水稻将会减产,而印度尼西亚、马来西亚、中国与印度的部分地区却增产。Amien^[6]使用美国农业技术转让决策支持系统(DSSAT)作物模型和三个通用循环气候预测模型对印度尼西亚 JAVA 岛进行模拟预测,在 CO₂ 倍增情况下,即使太阳辐射增加 1.2%~2.1%,降雨量增加 20.5%~91.7%,而水稻产量仍将下降 1%。Luo^[7]综合 CERES-RICE 与 WGEN 或 WMAK 模拟了全球气温变化对水稻稻瘟病发生的影响,结果表明:在凉爽的亚热带地区如日本和中国北部,温度高于正常温度会导致稻瘟病大发生;在温暖潮湿的亚热带地区,气温上升并不会对稻瘟病发生产生任何影响,而在热带地区却正好相反,日气温降低 1~3℃就会导致稻瘟病大发生,而温度上升 1~3℃对稻瘟病发生不会产生影响。据模拟预测^[8,9],随着 CO₂ 浓度的提高,日本稻作东北地区以北将增产,而东北地区以南将减产。Jansen 用 MACROS 模型,对亚洲不同地区的气候变化和 水稻(品种为 IR36)产量的关系进行了研究,结果表明,随着 CO₂ 浓度的上升,温度升高,水稻产量却下降^[10]。Lu 等的模拟结果是:当 CO₂ 倍增时,我国不同地区水稻生长季节将增加 36~111d,但另一方面,高温将使水稻生育加快,提早成熟,抽穗期高温还会造成空秕粒增加和千粒重降低,从而导致减产^[11]。清野懿用 CERES 模型预测了温暖化对水稻的影响,得出了与堀江武相似的结果,即随着气温的上升,在现有栽培体系下,日本西南部尤其是九州地区,将导致水稻减产,减产的主要原因是生育期缩短^[12]。Rezaul Mahmood^[13]运用模型模拟了温度上升对水稻生产的影响,两个模型的模拟结果如表 2 所示,从模拟结果可以看出,随着温度上升水稻产量均有下降的趋势,且温度增加越多减产越显著。作者认为导致结果不同的原因在于两个模型计算干物质生产的方法不同,CERES-RICE 模型假设干物质生产是最大光合有效辐射(PAR)和叶面积系数(LAI)的函数,并且它受氮素和极端温度的影响。CERES-RICE 模型假设的是接近最适管理水平。而 YIELD 却适用于最适管理水平下。堀江武用模型模拟了 1957~1966 年和 1974~1983 年两个 10a 间日本札幌气温和日照时数年距平差变幅对水稻单产的影响,结果表明,模拟值与实测值较为一致,即水稻单产随温度的升高和日照时数的增加而提高;同时,他还用模型模拟了日本和美国不同地区水稻的气候生产力,发现模拟值和实测值之间具有很好的相关性,其相关系数(*r* 值)日本和美国分别达到 0.853 和 0.981^[14]。

综合各方面的研究结果,可以得出如下结论:温度上升使寒冷地区水稻产量增加,温暖地区水稻产量下降;CO₂ 浓度增加可增加水稻产量,其原因主要是 CO₂ 浓度增加,增大了细胞间的 CO₂/O₂,从而促进了碳的同化作用,且抑制了光呼吸^[15]。然而,模拟气候变化对水稻生产的影响仍有许多不完善的地方,导致这些模拟结果准确性不高,主要有 3 个方面的原因:一是历史数据不详细和长期的气象资料,气候变化预测的准确性不高;二是作物生长模拟模型的

表 1 模拟 CO₂ 倍增对亚洲水稻生产的影响

Table 1 Simulated impact of doubling CO₂ on rice production in Asia

模拟组 Units	水稻生长模型 Rice growth model	气候变化预测模型	
		General circulation model	模拟的产量变化 Change of rice production
1	ORYZA1	GFDL	+6.5%
2	ORYZA1	GISS	-4.4%
3	ORYZA1	UKMO	-5.6%
4	SIMRIW	GFDL	+4.2%
5	SIMRIW	GISS	-10.4%
6	SIMRIW	UKMO	-12.8%

准确性不高,特别是在雨养条件下;三是 CO₂ 浓度升高影响作物的生理机制仍不明确^[5,6,15]。

表 2 温度变化对不同地点水稻产量影响的模拟^[13]

Table 2 Percent change in rice productivity under temperature increase conditions as estimated by the CERES-RICE and YIELD models^[13]

高于正常温度(℃) Temperature above the normal	Mymensingh		Barisal	
	产量变化(%) Change in productivity		产量变化(%) Change in productivity	
	CERES-RICE	YIELD	CERES-RICE	YIELD
2	-9.70	-14.10	-7.30	-12.10
4	-22.70	-21.60	-17.00	-22.20

1.2 水稻生产潜力的估算

目前主要使用 ORYZA1 和 MACROS 两个模型来估算水稻的产量潜力。ORYZA1(Rice Growth Simulator at Production Level 1,即第一生产水平下的水稻生长模型)是在 MACROS(Modules of an Annual Crop Simulator,即 1 年生作物模拟模型)-L1D(Basic Crop Growth Module with One-day Time Periods,即 1 天时间步长的作物生长基本模块)和 SUCROS(Simple and Universal Crop Growth Simulator,即简单和通用的作物生长模型)的基础上,经国际水稻研究所进一步试验,不断完善后组建的,它主要用来模拟灌溉条件下、最适 N 肥供应水平和无病虫害下的水稻生产。MACROS 模型由 L1D、L2C(Module to Simulate Water Movement in Soils with Impeded Drainage at Production Level 2,即第 2 生产水平下模拟排水不良土壤水分运动的模块)和 L2SS(Module for Canopy Transpiration at Production Level 2,即第 2 生产水平下冠层蒸腾的模块)等 3 个模块组成,其中 L1D 主要用来模拟水稻的产量潜力,这个模型已经成功地被用来预测不同气候条件下的水稻生产潜力。Pannangpetch 使用 MACROS 模型来估算泰国东北部的水稻生产,模拟的产量水平大约是实际水平的两倍,其最适条件下的产量潜力比实际产量高出 2000kg/hm²。1976 年, Van Keulen 以 BACROS 模型为基础,建立了水稻潜在产量的预测模型;1993 年, Kropff 等研制了水稻产量潜力模型 ORYZA1^[16]。Kropff^[17]在国际水稻研究所运用 ORYZA1 探讨了热带地区水稻产量的上限和不同因子决定产量潜力的大小与范围(作物冠层持续期、碳水化合物从茎到籽粒的转运率、灌浆持续期和颖花密度),其研究结果显著地影响了国际水稻研究所设想的“超级稻”计划。黄耀等^[18]模拟了长江流域及毗邻地区不同水稻品种类型(作单季稻)的最适季节和光合产量,其结果是各品种类型的最适播期在 4 月 10 日至 5 月 20 日之间;各品种类型的产量分布,大体呈北高南低和沿海高内陆低的趋势,其中陕西西安地区和豫南地区为产量的高产区,四川盆地为低产区。潘德云等^[19]对连作早稻二九丰不同移栽期(5 月 1 日~7 月 25 日)的潜在产量进行了模拟,发现移栽时间越迟产量越低。严力蛟等^[20]利用经过修正的 L1D 模型,以浙江省嘉兴市郊区 1989 年的气象资料和秀水 620 品种(作连作晚稻)参数作为输入条件进行模拟,结果表明,当地该品种的农艺潜在产量为 13216kg/hm²。郑志明等^[21,22]通过模拟得出,浙江省金华县以 7 月 20 日移栽、35d 秧龄和 1.33×10⁶ 苗/hm² 的基本苗为杂交晚稻最佳栽培组合,其中协优 46 在该地区的潜在产量为 11000~13000kg/hm²。潘德云等^[23]用修正后的 L1D 模型得出,在单季稻区,产量潜力随纬度增高而增加;而在双季稻区,晚粳稻的产量潜力较高区在 28~20°N 一带。堀江武^[14]模拟了日本新、长野、富山、玉、冈山、爱知、鹿儿岛和美国加利福尼亚、密西西比、德克萨斯等的水稻气候生产力。

总体来说,利用模拟模型估算水稻的生产潜力,在理论上已比较成熟,并已在生产和科研(包括引种、育种、品种搭配和作物布局等)等领域得到了很好的应用,同时还在国民经济宏观调控和政府职能部门的决策等方面显示出越来越重要的作用。

1.3 生育期预测

水稻生育期预测是水稻生产系统模拟的基础,也是水稻其它要素模拟结果是否准确的关键所在。因此,国内外迄今有关生育期预测的报道很多。早在 1735 年,Reaumur 就提出了推测生育期的积温学说;200

多年后的 1973 年,Robertson 建立了比前者先进的“生物气象时间尺度”生育期预测模型^[24]。由于这两个模型分别存在考虑的因子单一和计算复杂、生物学意义不明确等问题,故其应用受到限制。自 20 世纪 70 年代以来,作物生育期的模拟研究获得了突破性进展。冯定原等^[25]以作物光合作用和呼吸作用为基础,把作物生长与环境条件有机地联系起来,对水稻生长过程进行了定量的数学描述。水稻钟模型是高亮之等研制的适用于水稻形态发育的一个模拟模型^[26]。它包括 3 个子模型,其中生育期模型用来模拟遗传特性(基本营养生长性、感温性和感光性)、逐日温度(考虑了上限、最适和下限温度在影响水稻发育中所起的不同作用)和日长对水稻发育的影响。郑志明等^[21]以 ORYZA1 为基础,建立了 HDRICE,并对灌溉水稻的生长发育进行了模拟。潘德云等^[19]和严力蛟等^[20,27,28]分别对籼稻和粳稻的开花期和成熟期进行了模拟,绝对误差仅为 1~2d。川方俊和等^[29]根据日长和水温建立了水稻的抽穗期预测模型。Rezaul Mahmood^[13]使用两个水稻生长模拟模型 YIELD 和 CERES-RICE 模拟高于正常温度下水稻生育期的变化,模拟结果如表 3 所示。从表中可以得出,YIELD 对两个地点水稻生长期的预测基本一致,并且温度上升值与生长期变化之间存在线性相关关系,而 CERES-RICE 预测生长期变化比 YIELD 要小些,存在这种不同预测值的原因在于 YIELD 设定的水稻临界温度比 CERES-RICE 模型设定值要高一些,同时假定植物表现型与气温之间存在一个相对简单的关系。

表 3 温度变化对不同地点水稻生育期影响的模拟^[13]

Table 3 Percent change in the duration of growing season under temperature increase conditions as estimated by the CERES-RICE and the YIELD model^[13]

高于正常温度(℃) Temperature above the normal	Mymensingh		Barisal	
	生长期变化(%)		生长期变化(%)	
	Change in length of growing season		Change in length of growing season	
	CERES-RICE	YIELD	CERES-RICE	YIELD
2	3.80	13.80	5.10	11.10
4	5.80	20.70	6.50	18.50

从国内外现有的水稻生育期预测模拟模型来看,由于国外研制的模型多数建立在热带条件下,且一般为籼稻亚种,所以在建模时对感温性考虑得较多,而对感光性往往未予考虑或考虑不足;因国内地域辽阔,气候类型多样,故研制的模型大多将感光性和感温性进行综合考虑,从而使模型具有较好的时空适应性。

1.4 氮肥的优化管理

氮肥的优化管理实际上是寻求 N 肥施用量与作物对 N 素需要量之间的平衡,从而减少 N 素损失量 and 提高作物对 N 肥的利用率。N 肥优化管理研究的前驱者当推 Kimura 和 Chiba,他们于 1943 年通过大量实验得出水稻最佳的 N 肥管理措施,表现最大产量或最大 N 肥利用率的处理为最适 N 肥管理措施。一些学者认为:当计算目标产量所需的 N 肥时必须考虑土壤供氮水平,Ueno 等人提出用作物需氮量与土壤供氮量之间的差值来决定施氮量,这种方法称之为“差值法”,在决定差值曲线时,他们把高产水稻的 N 肥吸收曲线作为作物 N 肥需要量,土壤供氮量则通过田间测试或理论计算来获得,然而,这种“差值法”仍有许多不足之处:①它只适用于接近最大的生产水平,大量化肥输入可以满足作物各个时期的 N 肥需要量;②没有反映化肥利用效率的时间变化,这种变化表明施用一定数量 N 肥的理想模式与差值法是有区别的;③差值法不能进行 N 肥利用的经济优化分析。对环境(气候、土壤)和栽培品种特性进行量化分析的数学模型能够克服这些缺点。第一个使用数学模型优化水稻 N 肥管理的是 Zacharias 等人,他们综合动态模型、水稻不同生育期植株内各组织的 N 素含量测定和线性回归分析来优化 N 肥管理。综合性模拟模型能够模拟土壤 N 素转化过程、作物 N 素吸收与作物 N 肥利用等过程,从而在理论上评估不同环境条件下 N 肥管理措施成为可能。最早使用综合性模型进行 N 肥优化管理的是 Augus 等人,然而由于输入条件的不确定性导致模型的适用性不强。实际上,迄今为止,经验优化仍是 N 肥优化的基础^[30]。Manage-N 是一个使用较为广泛的灌溉水稻产量数据肥管理的优化工具,它包括 3 个部分:一是作物动态生长模型 ORYZA-0;二是数学优化程序;三是用于读入当地气象、土壤和作物特性的用户界面。它最大的特点是能够决定任一施肥水平

下的最佳施肥时间,同时还允许进行经济优化分析。ten Berge^[31]使用 48 个水稻品种(N 肥施用量为 0、30~40、60~80、90~120kg 纯 N/hm²,肥料种类为尿素)实测与预测生物量对 Manage-N 模型进行测试,预测值与实测值之间的相关系数为 0.93。早在 1980 年,Augus 等就模拟了水稻生长与气候因子的关系及水分与氮的作用。ten Berge 等人^[31]还运用 ORYZA-0 模型和一个用于全球研究的数学优化程序来决定一定施氮水平下的最佳施氮方案,通过对不同氮肥输入水平进行优化,从而构建氮反应曲线,该曲线表明,对于水稻品种 IR72,在干季条件下总氮的 75% 必须在移栽后 40d 以内施用。Cassman 等人创建了一个 N 素供应和 N 肥需要量之间关系的概念模型,利用该模型模拟发现:高产水稻必须使土壤供氮能力与作物生长速率决定的最小氮吸收速率成比例。在印度中央水稻研究所,运用国际水稻研究所和荷兰合作项目 SARP (Simulation and System Analysis for Rice Production,即水稻生产的模拟与系统分析)开发的作物生长模型及作物吸 N 反应模式 ORYZA-0,进行了灌溉水稻的 N 肥运筹优化^[32]。其模拟分析结果表明,在干旱季节粘壤质地的水稻土上,最佳氮肥使用量为 120kg/hm²,使用时期为在小穗分化期前。采用模型所建议的 N 肥使用次数,在 120kg/hm² 氮肥施用量条件下,可以获得高的生物量、N 素吸收量和产量,这个结果高于目前在印度实际水稻生产中使用的氮肥量。

需要指出的是,由于氮循环是一个十分复杂的土壤-作物-大气系统,目前对之尚缺乏特别有效的研究方法和手段,故迄今为止的氮模型总体来说还很不成熟,应用于生产的就更少。就水稻氮肥优化模型而言,仍有许多不完善之处,如各种参数的获得很难而且准确性不高,特别是土壤参数。有待重点研究的方面:一是决定作物参数在不同环境条件下稳定性的主要因子有哪些;二是把如何通过实验将土壤参数分解为更多的土壤内部特性和物理化学过程的数量指标(目前不能进行深度分析的原因是尚缺乏详实的数据)^[33];三是进一步探明植物-土壤系统内各个子系统的运行机制^[34]。

1.5 水稻群体质量指标的模拟与优化

在作物育种中,育种家通常选用几个影响作物生长、发育和产量的形态特征来选育良种,理想株型就是根据与形态特征变化有关的生理和生化过程建立起来的。一个由生理学家、生物化学家、分子生物学家、农学家、土壤学家、基因学家和育种家组成的工作组已经列出了一系列提高作物产量的关键性状,这些性状包括:增加叶氮含量和单位叶氮的光合作用速率、优化光吸收模式、减小呼吸损失和延长灌浆后的衰老、提高生殖生长期内的作物生长速率、减小灌浆速率、延长灌浆期和增加库容量等。许多实验已经使用模型来决定水稻高产的关键性状。这些研究结果表明:只有当源的合成能力提高、库容增大和灌浆期延长同步时,才有可能提高作物的产量潜力^[35]。殷新佑等人^[36]认为水稻高产的一个关键性状是从播种到开花的时间长度,因此优化开花前期(从播种到开花)长度是提高水稻产量的一条重要途径。据此,利用随机数产生程序(Random Number Generator Programme)产生 808 组 3S-Beta 模型的参数值,每一参数组相当于一种假设的株型,然后使用 ORYZA1 模型模拟每一种株型在热带、亚热带和温带 3 种气候条件下的生产潜力,在任一环境条件下表现最高产量组的开花前期为最适开花前期(PFP, Optimal Preflowering Period)。模拟结果如表 4 所示。从种植制度观点来看,热带和亚热带环境下的 PFP 不符合实际。在热带,一旦水稻的开花期超过这个临界开花期,即使延长了开花前期的长度但并不能增加产量。开花前期可以分为 3 个连续的子过程:基本营养生长期(Basic Vegetative Phase, BVP)、光周期敏感期(Photoperiod-sensitive Phase, PSP)和光周期敏感后期(Post-PSP Phase, PPP)。3S-Beta 模型是一个描述水稻开花前期光温反应模式的量化模型,由于该模型用 Beta 函数来描述水稻在 PFP 三个子阶段的光温反应,所以称为 3S-Beta 模型。

Saseendran A. Saseendran 等人^[37]认为水稻的移栽期对水稻生长具有十分重要的影响,它决定后期气候条件如何影响水稻生长,他们通过两种途径确定水稻的最适移栽期:一是通过 ClimProb 模型来预测降雨的概率;二是用 CERES-RICE 模型来模拟目标产量,以此决定最适移栽期。在印度 Kerala 地区的模拟结果是:在雨养条件下,对于一年多熟种植制度来说,水稻最适移栽期是儒略历(即从新年第 1 天开始,按顺序计数,如 2 月 10 日儒略历为 41,3 月 5 日儒略历为 66,依次类推)第 23~26 周,而对于单熟种植系统来说,水稻最适移栽期是儒略历第 26~32 周。当气象资料可靠时,ClimProb 在其它地方也同样适用;当气象、土壤和作物参数确定以后,CERES-RICE 模型也可以决定不同地区的最适移栽期。基于概念模型、定性生

理模型和生长模拟模型以及基因研究的结果,国际水稻研究所提出了新的用于水稻直播生产的理想株型^[38,39]:低分蘖力每株 3~4 个小穗,没有无效分蘖,每小穗 200~250 粒,株高 90~100cm,茎秆强壮,根系发达,多抗性,生育期 110~130d,收获指数 0.6,产量潜力为 13~15t/hm²。

高亮之等^[40]通过模拟和优化,提出了水稻移栽期、分蘖盛期、拔节期、抽穗期和成熟期的最适叶面积,并对最适基本苗和最适穗数的确定也进行了讨论。郑志明等^[22]利用 HDRICE 模型优化协优 46 品种在浙江省金华县的移栽期、秧龄和基本苗的组合以及为取得高产所必须的茎数、叶面积发育动态等指标。据严力蛟等^[20,41,42]模拟研究,以浙江省嘉兴市郊区 1990 年的气象资料和粳稻品种秀水 620(作连晚栽培)为条件,得出模拟光温产量最高值(13545kg/hm²)的最佳移栽期、秧龄和基本苗分别为 7 月 15 日、41d 和 0.40×10⁶ 株/hm²;高产群体移栽期、拔节期、孕穗期、抽穗期、成熟期的最适叶面积系数为 0.09、5.15、8.40、8.29、3.83,最适茎蘖数为每 hm² 0.40×10⁶、6.63×10⁶、6.32×10⁶、6.19×10⁶、6.19×10⁶,最适单茎干物重为 0.17、0.59、1.51、1.78、3.25g,最适总粒数为 625×10⁶ 粒/hm²、最适实粒数为 517×10⁶ 粒/hm²、最适总粒数为 1.68 粒/叶(cm²)。

水稻群体质量指标是水稻科学工作者近几年来提出的一个新概念,也是水稻高产理论中正日趋成熟、集生理和生态特性于一体、能真实体现水稻生育状况优劣和产量高低的一组综合性数量性状^[42]。关于水稻群体质量指标的内涵、组成、不同地区的最佳值、调控技术以及水稻群体质量与成穗率、产量等关系的研究已颇多,但对水稻群体质量指标尚缺乏一个统一、权威的定义,指标体系也显得杂乱和缺乏系统性,这些均有待进一步的规范和细化。

1.6 水稻干物质生产模拟

水稻模拟模型 ORYZA1 是根据在温室下确定的 A_{max} (在饱和光下单叶最大净光合速率)与 N_a (每单位叶面积叶氮含量)之间的关系来预测水稻地上部分的干物质生产。由于在光量、光质、温度和湿度等方面,大田与温室差别很大,所以使用温室下确定的 A_{max} 与 N_a 之间的关系来预测水稻地上部分干物质生产显然不够准确,Shaobing Peng 等人^[43]试图用大田条件下测定的数据来确定 A_{max} 与 N_a 之间的关系,以此来改进 ORYZA1 模型,提高该模型预测干物质的准确性,结果发现:大田条件下 A_{max} 与 N_a 之间存在显著的相关关系($r^2=0.88$),当把大田条件下获得的 A_{max} 与 N_a 之间的关系用于 ORYZA1 模型时,可大大提高该模型预测干物质的准确性。冯定原^[25]对不同播期的水稻干物质积累和产量形成过程进行了模拟,结果模拟值和实测值比较接近,相对误差基本在允许范围以内。王信理^[44]利用经过修正的 Logistic 方程分别模拟了叶、茎、穗增重的动态过程,拟合效果良好,精度有所提高。李秉柏^[45]从农业气象角度,建立了水稻的光合生产模型,并对其实际产量进行了模拟,得到了比较满意的结果。黄耀等^[46]利用模型对 6 个供试水稻品种从移栽-抽穗-成熟进行逐日光合生产模拟,将最终获得的模拟产量与实测产量进行比较,两者趋势一致。堀江武等^[47]利用试验数据,对水稻干物质动态和产量的模拟结果进行了验证,发现拟合程度良好。严力蛟等^[48]在模型 L1D 和 JPRICE 的基础上,利用田间试验和文献资料,组建适合亚热带地区连作晚粳稻群体干物质生产和产量形成的模拟模型,验证结果显示,模型运行后不同时段干物质重、经济产量的模拟值与实测值基本一致,表明该模型能较好地反映水稻群体干物质生产和产量形成的动态变化。

根据可以查阅到的文献资料,表明水稻干物质生产模拟的研究不但起步较早,而且发表的科研论文数量众多,成果丰硕。介入该领域的,既有从事生理生态的科研工作者、气象学家、农学家,也有土壤肥料、植物保护、系统模拟和计算机工作者。目前,水稻干物质生产模拟存在的不足之处主要是,模型的时空适应性较差。其主要原因数据参数的量还远远不能满足其千变万化的环境,加之模型的结构缺乏完整性、灵活性和应变性。这些问题的解决还需要长期、艰苦和大量的基础性研究和试验数据的积累。

表 4 IR72 在 3 个地点不同季节的生育期模拟值

Table 4 The length of growing season as simulated by the 3S-Beta model

地点 Sites	季节 Season	播种-开花(d) Optimum PFP	播种-成熟(d) Total duration
杭州 Hangzhou	早季 Early season	84	115
	晚季 Late Season	86	135
	一季 one	103	145
东京 Tokyo		82	157
LOS BANOS	湿季 Wat season	85	113
	干季 Dry season		116

2 存在问题

迄今为止,虽已有许多包括上面诸个方面的水稻生产综合模拟模型问世,但总的来说,其实用性尚嫌不足,要在生产上大面积应用更有较大的距离。究其原因,概括起来,主要存在以下几个方面的问题。

2.1 在建模方法方面

目前尚无严格的建模方法论体系。如对现有的数学模型及其相关参数往往还缺乏严格的检验,从而导致水稻模型在可靠性验证与有效性检验两方面都存在一定困难,以至于常用模拟值和实测值是否一致这种模糊的概念来判断模型的优劣。迄今为止,模拟的研究重点仅局限于水稻生长发育、光合生产和器官建成等方面,而对水稻生产与营养元素、病虫害害、各种技术措施和经济因素等的关系,还缺乏较多的研究。另外,在田间土壤和水稻生长发育信息的获取上也缺乏简易、快速和有效的方法。

2.2 在参数确定方面

现有的机理性模拟模型均需要一整套和大量的水稻参数与土壤参数,而种质特性相异的不同品种参数不能通用,且某些参数由于囿于目前的科学技术水平,测定十分困难,或因测定方法不完善、操作误差等主客观原因,尚存在代表性差、重复性不理想等缺陷。加之,因局限于对水稻生理生态机理的了解程度不够和模拟技术的不完善,已建成的模型尚难包含全部的环境因素,因此在不同的生态区有可能参数不同,不同品种的参数也不同。故被引用的国外模型往往存在参数适宜性较差等问题。

2.3 在生产应用方面

多数模型是在生产水平 1(即作物生长发育只取决于气象条件和作物本身的遗传因素,而其他条件完全满足)或生产水平 2(即在生产水平 1 的基础上,还受到水分的限制)条件下组建的,而实际这种情况较少。如建立在肥水充足、无病虫害影响条件下(即生产水平 1)的模型,由于仅考虑温度、辐射对水稻生育的影响,与生产实际差距较大,难以起到指导生产的作用。新推出的一些氮素模型,尚存在机制未明确或不够明确,其定量指标也未达到较高的精度等问题。另一方面,由于简单的模型仅包括水稻生长的主要过程,所需参数相对较少,在某个地区和某个品种条件下应用效果较好,但适应性差;而复杂模型虽然详细地描述了水稻生产的机理性过程,但往往需要的参数多,故这种模型可以直接指导生产的为数较少,多数仍停留在完善阶段,或被用来说明和解释水稻的生长过程。

3 今后攻关内容

3.1 进一步研制和完善包括营养元素(氮、磷、钾、微量元素)、病虫害害在内的,以作物生理生态为基础的水稻生产系统综合性模拟模型。该模型要求能模拟在大田环境条件下以及控制条件下水稻生长发育的动态变化。这种机理性水稻生长发育模拟模型的组建将为正确制定水稻栽培技术措施提供理论依据和具体方法,并为水稻的高产高效奠定基础。

3.2 充分利用现代科学技术,如卫星、地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)、遥感(RS)、传感器以及田间快速测定器等,以便即时获得模拟所需的水稻生长发育与土壤肥力的信息,为正确、有效的决策提供依据。

3.3 通过申请国家重大课题和与国家攻关项目的挂钩,组织全国范围的协作试验,以建立不同类型、不同品种和熟期的标准化水稻参数数据库,并在此基础上研制出估算不同水稻品种参数的数学方法。该工作可以解决参数在品种间不能通用、每个品种需配备一组参数的问题,从而节省了大量的人力、财力,扩大了模型的应用范围。

3.4 根据我国国情,应用近几十年来在水稻科学研究中所取得的成果,将水稻模拟模型和专家系统结合,组建由预测、诊断和农艺措施联成一体的计算机优化管理决策、咨询支持系统,以扩大水稻模拟模型在生产中的应用。

参考文献

- [1] De Wit 万方数据 synthesis of leaf canopies, *Agricultural Research Report*, 1965, 663, 1~56.
[2] Duncan W G, Loomis R S, Williams W A, et al. A model for simulation photosynthesis in plant communities.

Hilgardia, 1967, 181~205.

- [3] Stockdale E A, Gaunt J L, Vox J. Soil-plant nitrogen dynamics; what concepts are required. *European Journal of Agronomy*, 1997, **7**: 145~159.
- [4] Matthews R B, Kropff M J, Horie T, *et al.* Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and Evaluating options for adaptation. *Agricultural systems*, 1997, **54**: 399~425.
- [5] Iglesias A, Lin E, Rosenzweig C. Climate change in Asia: a review of the vulnerability and adaptation of crop production. *Water, air, soil pollution*, 1996, **92**: 13~27.
- [6] Amien I, Rejekiingrum P, Pramudla A, *et al.* Effects of interannual climate variability and climate change on rice yield in Java, Indonesia. *Water, air, soil pollution*, 1996, **92**: 29~39.
- [7] Luo Y, Teng P S, Fabellar N G, *et al.* The effect of global temperature change on rice leaf blast epidemic: a simulation study in three agroecological zones. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1998, **68**: 187~196.
- [8] Horie T(堀江武). Earth environment variation and crop science. *Japanese Journal of Crop Science*(in Japanese)(日本作物学会紀事), 1991, **60**(3): 455~458.
- [9] Horie T(堀江武). The greenhouse effect on climate change and crop production. *Agriculture and Horticulture* (in Japanese)(农业および园艺), 1993, **68**(2): 28~33.
- [10] Jansen D M. Rice production potential in different Asia region in future. Cheng S H(程式华)translated. *Journal of Agriculture Science and Technology Translation* (in Chinese)(农业科技译丛), 1994, (4): 25~30.
- [11] Zhu D F, Min S K. Rice production in China under current and future climates. In: Matthews R B, Kropff M J, Bachelet D, *et al.* ed. *Modeling the impact of climate change on rice production in Asia*. CAB International and IRRI, 1993, 217~250.
- [12] Seino H(清野豁). The impacts of climatic warming on cereal crop production in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* (in Japanese)(农业气象), 1995, **51**(2): 131~138.
- [13] Rezaul Mahmood. Air temperature variations and rice productivity in Bangladesh: a comparative study of the performance of the YIELD and the CERES-Rice models. *Ecological modeling*, 1998, **106**: 201~212.
- [14] Horie T(堀江武). Meteorological predicting model for rice growth, development and its yield. *Agricultural systems*(in Japanese)(系统农业), 1988, (2): 1~9.
- [15] Melkomian J, Riha S J, Wilds D S. Simulation of elevated CO₂ effects on daily net canopy carbon assimilation and crop yield. *Agricultural systems*, 1998, **58**, 1: 87~106.
- [16] Yan L J(严力蛟), Shen X F(沈秀芬), Zhou X C(周煦朝), *et al.* General situation and prospect of research on crop simulation model. *System Science and Comprehensive Studies in Agriculture*(in Chinese)(农业系统科学与综合研究), 1998, **14**(2): 126~132, 137.
- [17] Kropff M J, Peng S. Quantitative understanding of rice yield potential. In: *Breaking the Yield Barrier*. eds. Cassman. IRRI, Philippines, 1994, 5~20.
- [18] Huang Y(黄耀), Gao L Z(高亮之), Li L(李林). Rice computer simulation model(RICEMOD) and its application IV the optimum growth season for rice and its corresponding photosynthetic yield in Yangtze River valley. *Agricultural Meteorology*(in Chinese)(中国农业气象), 1990, **11**(1): 16~21.
- [19] Pan D Y(潘德云), Wang Z Q(王兆骞), Xu Z B(徐照本), *et al.* Simulation of tiller and potential production of early mature Indica rice and the application of the model in rice production. *Acta Agriculture Universitatis Zhejiangensis, Special Issue on Simulation of Crop Production System and its Application* (in Chinese)(浙江农业大学学报作物生产系统模拟及其应用专辑), 1991, 1~10.
- [20] Yan L J(严力蛟), Wang Z Q(王兆骞), Lu Q H(陆其华), *et al.* A simulation study of potential production of late season Japonica rice and application of the model. *Acta Agriculture Universitatis Zhejiangensis, Special Issue on Simulation of Crop Production System and its Application* (in Chinese)(浙江农业大学学报作物生产系统模拟及其应用专辑), 1991, 54~65.
- [21] Zheng Z M(郑志明), Yan L J(严力蛟), Kropff M J, *et al.* Simulating model of growth and potential production for rice. *Journal of Biomathematics* (in Chinese)(生物数学学报), 1996, **11**(4): 139~145.
- [22] Zheng Z M(郑志明), Yan L J(严力蛟), Wang Z Q(王兆骞), *et al.* Simulation of potential production and studies on optimum population quality indexes. *Acta Agriculture Universitatis Zhejiangensis*(in Chinese)(浙江农业大学学报), 1997, **23**(1): 59~64.
- [23] Pan D Y(潘德云), Wang Z Q(王兆骞), Tao X M(陶秀明). Simulation of daylength sensitivity, growth duration and potential production of late mature Japonica rice in east China. *Acta Agriculture Universitatis Zhejiangensis*(浙江农业大学学报), *Special Issue on Simulation of Crop Production System and its Application* (in Chinese)(作物生产系统及其应用专辑), 1991, 30~36.
- [24] Gao L Z(高亮之), Huang Y(黄耀), Jin Z Q(金之庆), *et al.* Optimization and decision system of computer simulation for rice cultivation(in Chinese). Beijing: Chinese Agriculture Technique Press, 1992.
- [25] Feng D Y(冯定原), Xia H F(夏海峰). Mathematic model for rice growth and yield. *Journal of Nanjing Institute*

- OF Meteorology (in Chinese)(南京气象学院学报),1987,**10**(2):201~210.
- [26] Gao L Z(高亮之), Jin Z Q(金之庆), Huang Y(黄耀), et al. Rice computer simulation model(RICEMOD)and its application-part 1 Rice clock model-a computer simulation model for rice development. *Agricultural Meteorology* (in Chinese)(中国农业气象),1989,(2):3~10.
- [27] Yan Lijiao. Simulation of potential production of early-maturing japonica rice. *Case studies in crop growth simulation*. IRRI, Manila, Philippines, 1991. 177~188
- [28] Yan L J(严力蛟), Wang Z Q(王兆骞), Du J S(杜建生), et al. Study on dynamic simulation model for rice development. *Acta Agriculture Universitatis Zhejiangensis* (in Chinese)(浙江农业大学学报),1998,**24**(3):233~237.
- [29] Kawakata T(川方俊和), Kawakata T(矢岛正晴). Predicting heading of rice using day length and water temperature. *Journal of Agricultural Meteorology*(in Japanese)(农业气象),1993,**49**(1):3~9.
- [30] Ten Berge H F M, Thiagarajan T M, Shi Q H, et al. Numerical optimization of nitrogen to rice. Part I. Description of MANAGE-N. *Field crops research*,1997,**51**:29~42.
- [31] Ten Berge H F M, Qinghua Shi, Zheng Z M, et al. Numerical optimization of nitrogen application to rice, part II. field evaluations. *Field crops research*, 1997, **51**:43~54.
- [32] Dash R N, Rao K S. Optimization of nitrogen fertilizer application to irrigated rice. In:Kropff M J ed. *Application of Systems Approaches at the Field Level*. Manila: Kluwer Academic Publishers,1996.
- [33] Bouman B A M, Penning de Vries F W T, Riethoven J J M, et al. Application of simulation and systems analysis in rice-crop ping optimization. In: Bouman B A M, Van Laar H H, Wang Z Q ed. *SARP Research Proceeding: Agro-ecology of rice-based cropping systems*,1993.
- [34] Stockdale E A, Gaunt J L, Vox J. Soil-plant nitrogen dynamics: what concepts are required. *European Journal of Agronomy*,1997,**7**:145~159.
- [35] Aggarwal P K, Kropff M J, Cassman K G, et al. Simulation genotypic strategies for increasing rice yield potential in irrigated, tropical environments. *Field crops research*,1997,**51**:5~17.
- [36] Yin X Y, Martin J K, Pramod K A, et al. Optimal preflowering phenology of irrigated rice for high yield potential in three Asian environment; a simulation study. *Field crops research*, 1991, **51**:19~27.
- [37] Saseendran A, Kenneth G H, Kamalesh K S, et al. Optimum transplanting dates for rice in Kerala, India, determined using both CERES v3.0 and ClimProb. *Journal of Agronomy*,1998,**90**:185~190.
- [38] Dingkuhn M, Penning de Vries F W T. Concept for a new plant type for direct seeded flooded tropical rice. In: *Direct Seeded Flooded Rice in the Tropics*. Selected papers from the International Rice Research Institute, P.O. Box 933, Manila, Philippines,1991. 17~38.
- [39] Dingkuhn M, Penning de Vries F W T. Improvement of rice plant type concepts; System research enables interaction of physiology and breeding. In: Penning de Vries F W T, Teng P, et al. eds. *System Approaches for Sustainable Agricultural Development*. Manila: Kluwer Academic Publishers,1993.
- [40] Gao L Z(高亮之), Huang Y(黄耀), Jin Z Q(金之庆). Rice computer simulation model(RICEMOD)and its application-part 2 decision model for optimum canopies dynamic of rice. *Agricultural Meteorology* (in Chinese)(中国农业气象),1989,**10**(4):1~6.
- [41] Yan L J(严力蛟), Wang Z Q(王兆骞), Du J S(杜建生), et al. Establishment and validation of simulation model for rice production. *Journal of Biomathematics*(in Chinese)(生物数学学报),1998,**13**(2):223~229.
- [42] Yan L J(严力蛟), Wang Z Q(王兆骞), Cao W X(曹卫星), et al. Study on simulation and optimization of several indexes in rice population quality. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报),2000,**20**(4):678~684.
- [43] Peng S B, Kenneth G C, Martin J K. Relationship between leaf photosynthesis and nitrogen content of field-grown rice in tropics. *Crop Science*, 1995, **35**:1627~1630.
- [44] Wang Z L(王信理). How to use logistic equation in dynamic simulation of dry matter production. *Agricultural Meteorology* (in Chinese)(农业气象),1986,**7**(1):14~19.
- [45] Li B B(李秉柏). Preliminary analysis of simulating model for crop photosynthesis and yield. *Agricultural Meteorology*(in Chinese)(农业气象),1986,**7**(2):1~9.
- [46] Huang Y(黄耀), Gao L Z(高亮之), Jin Z Q(金之庆). Rice computer simulation model(RICEMOD)and its application III a dynamic computer model for simulating photosynthetic production of rice canopies. *Agricultural Meteorology*(in Chinese)(中国农业气象),1990,**11**(1):10~15.
- [47] Horie T(堀江武), Sakuratani T(櫻谷哲夫). Studies on crop-weather relationship model in rice(1) relation between absorbed solar radiation by the crop and the dry matter production. *Journal of Agricultural Meteorology* (in Japanese)(农业气象),1985,**40**(4):331~342.
- [48] Yan L J(严力蛟), Du J S(杜建生), Wang Z Q(王兆骞), et al. Study on simulation of dry matter production and yield of different rice population. *Journal of System Simulation*(in Chinese)(系统仿真学报),1998,**10**(4):25~31.