

应用 ORYZA2000 模型模拟水稻产量及吸氮量^①张俊^{1,3}, 徐绍辉², 刘建立¹, 张佳宝¹, 范晓晖¹

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 青岛大学环境科学与工程系, 山东青岛 266071;

3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 通过田间实验, 对模拟水稻生长的作物生长模型 ORYZA2000 的参数进行了校正。然后, 应用 ORYZA2000 模型对不同施 N 水平下水稻的生物量、产量及地上部分吸 N 量进行了模拟。结果表明, 生物量、产量及吸 N 量的模拟值和实测值均呈明显的正相关, 相关系数分别为 0.9638、0.9511 和 0.8791, 模型较好地模拟了水稻的生物量和产量。但是, 在穗分化-抽穗期地上部分吸 N 量的模拟结果欠佳, 需要进一步改进。

关键词: ORYZA2000; 水稻; 氮肥

中图分类号: S152.7

随着人口的增长, 耕地的减少, 对粮食的需求不断增加。水稻作为我国的主要粮食作物其产量日益受到人们的重视。N 素是影响水稻产量的一个重要因子, 为满足日益增长的人口对食物的需求, 增加 N 肥的投入是不可缺少的^[1]。然而, N 肥过多地投入不仅引起肥料 N 的大量浪费, 造成经济上的损失, 而且也影响环境质量^[2]。因此, 如何节省用肥, 提高单产, 减少污染是迫切需要解决的一个重要科学技术问题^[3]。与农业研究的传统方法(经验方法和统计方法)相比, 作物生长模型具有机理性、效益性和先进性等优点^[4]。随着计算机的普及和系统分析方法的应用, 运用作物生长模型进行作物 N 素调控已有长足发展^[5-7]。近 20 多年来, 国外陆续推出了 CERES、GOSSYM、MACROS、GLYCIM、SIMRIW、ORYZA 等作物模拟模型^[8]。ORYZA2000 是荷兰瓦格宁根大学和 International Rice Research Institute 共同开发的水稻生长模型。该模型对于水稻的生长过程作了详细的描述, 具有很强的机理性。本文通过田间实验数据, 应用 ORYZA2000 模型对不同施 N 水平下的水稻生物量、产量和吸 N 量进行模拟, 以验证其适应性和实用性, 以期对水稻生产 N 肥运用和调控提供新的方法和手段。

1 材料与方 法

1.1 模型基本原理

ORYZA2000 模型假设在整个生育期内, 水稻的生长只受气候条件、品种特性、水分状况和 N 肥状况的影响, 而不受其他养分、病虫害和杂草等因素的影响。

模型主要分为 4 个模块: 蒸腾模块、作物生长模块、水分模块和 N 素模块。模型输入主要包括: 作物生长特性参数(生长速率, 叶面积变化, 维持呼吸和生长呼吸参数, 生物量的分配系数等), 水分参数(灌溉量, 土壤水力性质, 地下水水位等), 每日气象参数(最低、最高温度, 平均风速, 降雨量, 辐射等), N 素参数(施 N 量, 土壤供 N 量, 作物各器官含 N 量等)。本研究只考虑 N 素限制条件下作物生长, 所以只对作物生长和 N 素模块原理作简要介绍。

1.1.1 作物生长模拟 作物生长是通过光合作用吸收 CO₂ 转化为碳水化合物的过程。作物生长模拟主要有 3 个部分。

第一部分主要模拟水稻的物候学生长。ORYZA2000 用量化的常数把水稻生长分为 4 个时期, 0~0.4 为营养生长期, 0.4~0.65 为光周期敏感期, 0.65~1.0 为穗形成期, 1.0~2.0 为灌浆成熟期。分别对应于我国水稻的秧苗-拔节期, 拔节-穗分化期, 穗分化-抽穗期, 抽穗-成熟期。每个生育期的生长速率通过完成该阶段的有效积温来计算。

第二部分主要模拟作物吸收 CO₂ 的速率, 是整个作物生长模型中最核心的部分, 也是最复杂的部分, 这里只列出了最基本的公式。其基本假设是作物吸收 CO₂ 的速率与辐射和叶面积有关, 可用下式表达:

$$A_d = A_m(1 - \exp(-eI_a A_m)) \times GAI \quad (1)$$

式中, A_d 表示作物吸收 CO₂ 的速率 (CO₂ kg/(hm²·d)), A_m 表示单位面积叶上 CO₂ 的最大吸收速率 (CO₂ kg/

①基金项目: 国家自然科学基金重大项目(30390080)资助。

作者简介: 张俊(1978—), 男, 贵州贵阳人, 博士研究生, 主要从事多孔介质中溶质和数值模拟的研究。E-mail: Zh-jun78@yahoo.com.cn

($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$)), ϵ 是光利用效率, 是输入参数, I_a 是吸收的辐射, GAI 是叶面积指数和茎面积指数之和。在 ORYZA2000 中 A_m 是温度和叶片含 N 量的函数。对吸收的辐射 I_a , 模型考虑了顶部叶片吸收的辐射和被遮蔽的叶片吸收的辐射。 GAI 通过模型计算得到。

第三部分模拟作物呼吸作用和生长速率。作物的维持呼吸与器官重呈线性关系, 由下式计算:

$$R_m = mlv \times WLV + mst \times WST + mrt \times WRT + mso \times WSO \quad (2)$$

式中, R_m 表示维持呼吸所消耗碳水化合物的速率 (碳水化合物 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$), ALV 、 WST 、 WRT 和 WSO 分别表示叶重、茎重、根重和储存器官重 (干物质 kg/hm^2), mlv 、 mst 、 mrt 和 mso 分别表示叶、茎、根和储存器官的维持呼吸系数 (碳水化合物 kg/kg 干物质), 分别为 0.02、0.015、0.01 和 0.003。

作物生长呼吸中每千克干物质形成所吸收的碳水化合物由下式计算:

$$Q = FSH \times (glv \times FLV + gst \times FST + gso \times FSO) + grt \times FRT \quad (3)$$

式中, Q 表示每千克干物质形成所需要的碳水化合物量 (碳水化合物 kg/kg 干物质), FSH 、 FLV 、 FST 、 FSO 和 FRT 分别表示地上部分分配系数、叶分配系数、茎分配系数、储存器官分配系数和根分配系数, 是输入参数。 glv 、 gst 、 gso 和 grt 分别表示叶、茎、根和储存器官的碳水化合物系数 (碳水化合物 kg/kg 干物质)。根据 Penning de Vries^[5] 的研究, 叶、茎和根的值都为 1.326, 储存器官的值为 1.426。

作物的总生长速率由下式计算:

$$G_p = (A_d \times (30/44) - R_m + R_i) / Q \quad (4)$$

式中, G_p 表示作物的增长速率 (干物质 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$), A_d 由式 (1) 给出, 比例 30/44 表示每千克 CO_2 转化为碳水化合物的数量, R_m 由式 (2) 给出, R_i 表示茎储存物损失对作物生长的贡献 (碳水化合物 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$), Q 由式 (3) 给出。然后根据分配系数计算各个器官的生长速率。

1.1.2 作物 N 素动态模拟 ORYZA2000 模型中没有考虑地下部分即根系的吸 N 速率, 而只考虑了地上部分的吸 N 速率。地上部分的吸 N 速率是叶、茎和籽粒 3 个器官的吸 N 速率之和。

$$NCR = NUPP \times fn \quad (5)$$

式中, NCR 表示某器官的吸 N 速率 (kg/hm^2), $NUPP$ 表示每日能够从土壤中吸收的 N 量 ($\text{N kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$),

fn 表示该器官对 N 的相对吸收系数, 其与该器官的最大 N 素需求量和该器官的 N 素分配速率有关。

$$NUPP = \min [NMAXUP, TNSOIL] \quad (6)$$

式中 $NMAXUP$ 表示每日最大吸 N 速率 ($\text{N kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$), $TNSOIL$ 表示植物可获得的 N 量 ($\text{N kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$), 其值是肥料 N 和土壤供 N 量之和。在 ORYZA2000 模型中, 没有考虑 N 素在土壤中的转化过程, 并且模型假定作物的 N 需求首先由土壤供 N 量满足, 然后再由肥料 N 提供。

1.2 实验设计与处理

试验于 2004 年 5—10 月在江苏省常熟市王庄进行。供试土壤为普通铁渗水耕人为水稻土 (黄泥土)。土壤全 N、有机质含量分别为 1.42 g/kg 和 24.19 g/kg, 速效 P、K 分别为 8.8 mg/kg 和 72.1 mg/kg。供试水稻品种为武育 5021。5 月 27 日播种, 6 月 27 日移栽, 10 月 24 日收割。设施纯 N 0、100、200、300 kg/hm^2 4 个处理 (分别用 N0、N1、N2、N3 表示), 每个处理 3 个重复。试验期间 N 肥分 3 次施用, 其比例为基肥: 分蘖肥: 穗肥 = 4:2:4, 分别于 6 月 27 日, 7 月 6 日和 8 月 18 日施入。小区面积 30 m^2 , 栽插 22 × 26 穴, 每穴 4 株。分别于 5 个返青期、分蘖期、幼穗分化期、抽穗开花期、乳熟期采集植物样品, 观测叶面积指数、各器官干物质重、各器官含 N 量。本研究所采用的气象资料, 包括水稻生长季节内每日的最高、最低气温, 太阳辐射 (日照时数)、降雨量的多年气象资料, 均由中国科学院常熟农业生态实验站提供。

2 结果与讨论

2.1 模型参数校正

尽管作物生长模型中参数众多, 但是一些作物参数对水稻来说是通用的, 可以直接采用 ORYZA2000 数据库中的值^[9]。其他参数可以通过 ORYZA2000 提供的 DRATE 和 PARAM 两个子程序和田间实验求得。表 1 列出了部分主要参数。其中各生育期的生长速率通过气象数据由 DRATE 子程序获得。分配系数通过各生育期的器官干重由 PARAM 子程序获得。每日最大吸 N 速率由高 N 实验处理的吸 N 量除以整个生育期的天数确定; 土壤供 N 量是通过不施 N 实验获得的吸 N 量除以生育期确定。

2.2 不同施 N 水平的水稻生物量和产量模拟

应用 OYZA2000 对水稻的生物量的模拟结果表明, 随着施 N 量的增加, 水稻的生物量也增加, 这与实测值的总体趋势是一致的 (表 2)。由表 2 可以看出, 模型对水稻生长前期模拟较好, 但在收割时模拟

值普遍偏大,这可能是由于采样过程中没有把水稻生长后期落在地上的茎、叶收集起来,造成实测值偏低。相关性分析表明,水稻生育期内模拟的生物量和实测生物量呈直线正相关(图 1),相关系数 $R^2 = 0.9638$ 。

通过比较实测产量和模拟产量的结果,发现 4 个施 N 量处理的水稻产量的模拟值与实测值也呈线性正相关(图 1),相关系数 $R^2 = 0.9511$ 。表明模型可以较好地模拟水稻在不同施 N 水平下产量的变化情况。

表 1 模型参数校正值

Table 1 Calibrated parameters in ORYZA 2000 model

生长速率($^{\circ}\text{C}/\text{d}$)		分配系数				最大吸 N 速率	土壤供 N 量
生育期	生长速率	生育期	叶	茎	谷粒	($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$)	($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$)
0~0.4	0.000518	0.00	0.60	0.40	0.00	2.28	0.97
0.4~0.65	0.000723	0.50	0.60	0.40	0.00		
0.65~1.0	0.000735	0.75	0.30	0.70	0.00		
1.0~2.0	0.001562	1.00	0.00	0.40	0.60		
		1.50	0.00	0.00	1.00		
		2.00	0.00	0.00	1.00		

表 2 不同施 N 水平的水稻生物量实测值和模拟值比较 (kg/hm^2)

Table 2 Comparison between treatments different in N rate in simulated and measured biomass of rice

日期 (月/日)	N0		N1		N2		N3	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值
7/26	1816	1113	2128	2137	2246	3910	2303	2172
8/10	4569	3540	5110	5261	5506	5342	6394	5915
8/26	7065	6366	8505	8302	9615	10141	10287	9331
9/9	7857	8794	9328	10872	11232	12614	9977	11924
9/23	10952	10779	13740	13200	16701	15006	18772	14282
10/8	12422	12704	14624	15953	16765	17326	17806	17832
10/24	13891	13780	15857	17493	18058	19623	17812	20454

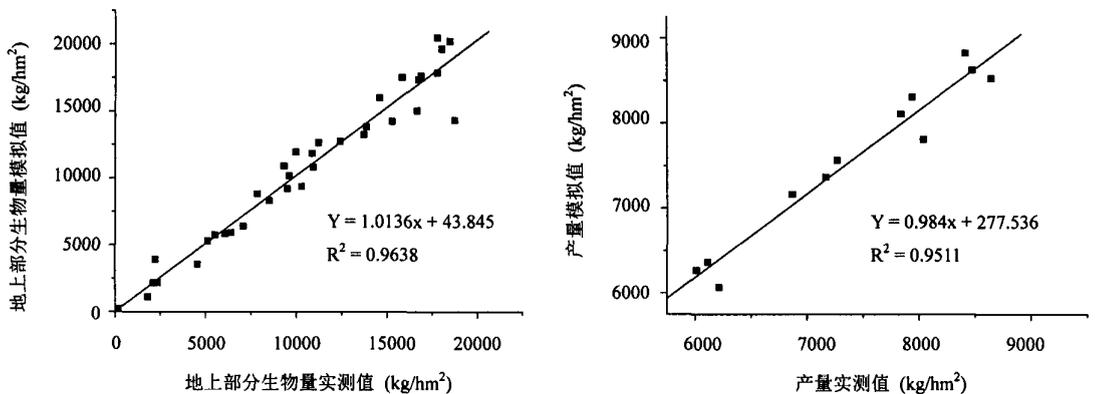


图 1 水稻生物量和产量模拟值与实测值相关性

Fig. 1 Correlation between simulated and observed values of biomass and yield of rice

2.3 不同施 N 水平水稻地上部分吸 N 量模拟

不同施 N 水平水稻地上部分吸 N 量的实测值值和模拟值如图 2 所示。其中实测值为各重复的平均值。尽管在收获时模型模拟的地上部分吸 N 量与实测

值比较接近,但是收获前各时期的模拟值低于实测值,特别在穗分化-抽穗期(8月13—28日),模拟值的增加较为缓慢,而实测值增加迅速。田间实验表明,水稻在穗分化-抽穗期是生长旺盛时期,也是吸收肥料的高

峰期，而模型模拟值没有反映出该时期吸 N 量的变化。实测值与模拟值的相关分析 (图 3) 也表明，模拟值未能较好反映水稻地上部分吸 N 量的动态变化，相关系数 $R^2 = 0.8791$ 。产生这一差距的原因是模型中对每日最大吸 N 速率和土壤供 N 量作了简单处理：作

为输入参数的每日最大吸 N 速率和土壤供 N 量，采用了整个生育期的平均值；而田间实验表明各个生育期的每日最大吸 N 速率和土壤供 N 量是不同的，特别在穗分化-抽穗期，每日最大吸 N 速率和土壤供 N 量大于整个生育期的平均值 (表 3)。

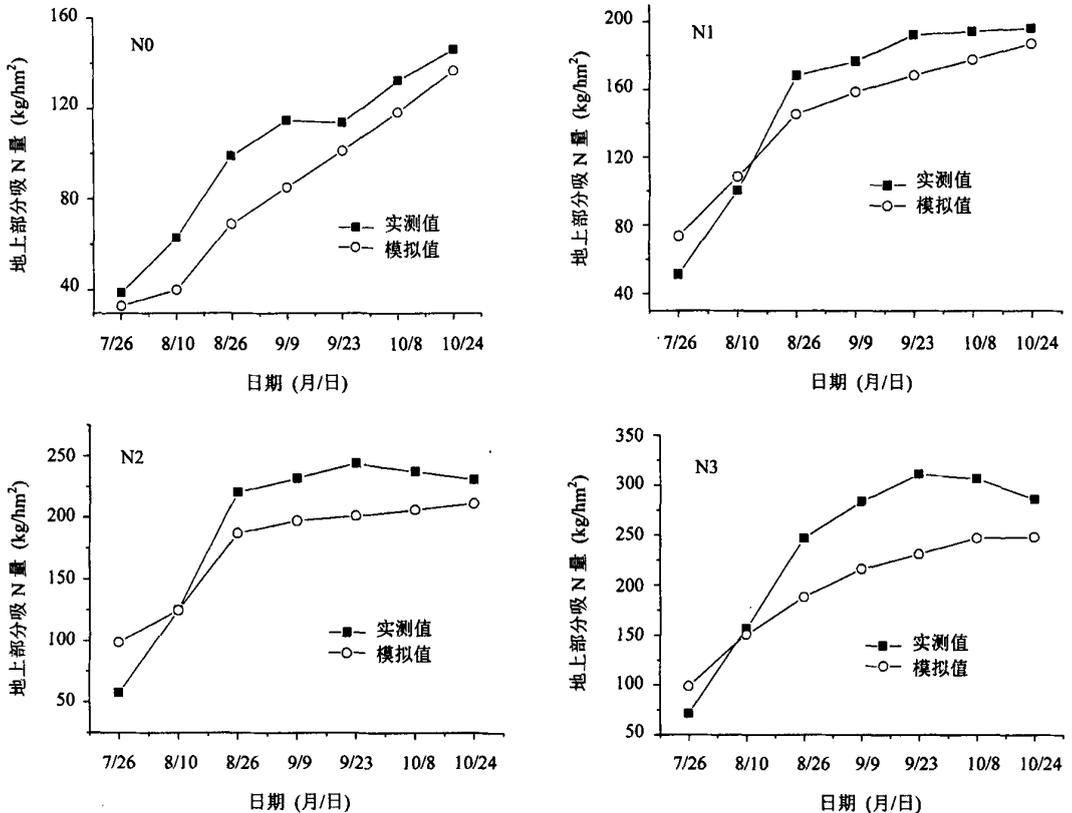


图 2 不同施 N 水平水稻地上部分吸 N 量动态变化

Fig. 2 Dynamics of N uptake by aerial parts of rice plants different in N application rate

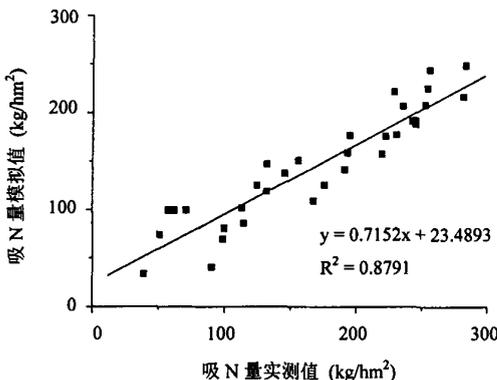


图3 水稻地上部分吸 N 量模拟值与观测值相关性

Fig. 3 Correlation between simulated and observed values of N uptake by rice

表 3 不同生育期水稻的最大吸 N 速率和土壤供 N 量

Table 3 Maximal N uptake rates of rice at different development stages and indigenous soil N supply

生育期	最大吸 N 速率 (kg/(hm ² ·d))	土壤供 N 量 (kg/(hm ² ·d))
秧苗-拔节期	1.18	0.65
拔节-穗分化期	5.67	1.63
穗分化-抽穗期	6.14	2.40
抽穗-成熟期	1.36	0.77
	2.28*	0.97*

注：* 表示生育期内的平均值。

3 结论

(1) ORYZA2000 模型能较好地反映不同施 N 水平下水稻的产量和生物量的动态变化。相关分析表明, 生物量和产量的模拟值和实测值之间明显呈线形相关, 相关方程及相关系数分别为, 生物量: $y = 1.0136x + 43.845$, $R^2 = 0.9638$; 产量: $y = 0.984x + 277.536$, $R^2 = 0.9511$ 。

(2) 尽管水稻地上部分吸 N 量的模拟值和实测值在收获时比较接近, 但模型未能较好反映出穗分化-抽穗期植株吸 N 的动态特征。与生物量和产量相比, 地上部分吸 N 量的模拟值和实测值的相关系数较低。表明模型在模拟 N 素动态方面有待于改进。

(3) 本文只用了 1 年数据对 1 个品种进行了模拟, 因此, 就模型的推广应用还有待进一步验证。

参考文献:

- [1] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境, 2000, 9 (1): 1-6
- [2] 金学霞, 范晓晖, 蔡贵信. 菜地土氮素的主要转化过程及其损失. 土壤, 2005, 37 (5): 492-499
- [3] 凌启鸿, 张洪程, 黄丕生, 凌励, 戴其根. 水稻高产氮肥合理施用的运筹新探索. 土壤学报, 2002, 39 (增刊): 26-39
- [4] 高亮之. 农业模型学基础. 香港: 天马图书有限公司, 2004: 23-29
- [5] Penning de Vries FMT, Jansen DM, ten Berge HMF, Bakema A. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Wageningen: Pudoc, 1989: 1-24
- [6] 李保国, 龚元石, 左强, 等. 农田土壤水的动态模型及应用. 北京: 科学出版社, 2000: 148-153
- [7] 杨京平. 国内外作物种植制度的计算机模拟与系统分析的研究动态与现状. 生态学杂志, 1995, 14 (6): 57-62
- [8] 严力蛟, 杜建生, 郑志明, 徐照本, 楼余产. 作物生产动态模拟模型的研究与应用. 作物研究, 1996, 10 (2): 1-5
- [9] Bouman BAM, Kropff MJ, van Laar HH. ORYZA2000: Modeling Lowland Rice. Philippines: International Rice Research Institute, 2004: 230-235

Simulation of Yield and Nitrogen Uptake of Rice Using ORYZA 2000 Model

ZHANG Jun^{1,3}, XU Shao-hui², LIU Jian-li¹, ZHANG Jia-bao¹, FAN Xiao-hui¹

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 Department of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China; 3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the experiment data, calibration of ORYZA2000 model was done for simulation of rice growth. Then, the model was used to simulate biomass, yields and nitrogen uptake of rice. Results showed that the simulated values were in significantly linear correlation with the measured ones with coefficients R^2 being 0.9638, 0.9511 and 0.8791, respectively. The modeling results showed reasonable fitness with the measured ones in biomass and yield. However, the simulation of nitrogen uptake by rice was not good enough, especially during the panicle formation phase, and more research needed to be done.

Key words: ORYZA2000, Rice, Nitrogen fertilizer