

水稻群体生长过程和产量的动态模拟*

张俊平 陈常铭

(湖南农学院, 长沙)

摘 要

本文组建了水稻群体生长过程和产量的动态模拟模型。它从单叶光合强度的模拟入手, 然后逐日模拟群体光合产量、呼吸量、干物质积累量、叶面积指数、生育期及总茎数, 最后模拟了经济产量。有效性检验表明: 模拟结果与实测结果基本吻合。模型的普遍性较强, 同时易与害虫种群模型相耦联, 实施水稻与害虫控制的优化管理。

关键词: 水稻, 群体, 动态模拟。

组建作物生长模型是建立害虫科学管理体系的基础^[1]。植物生理学家和农学家已建立了多种不同类型的植物生长模型^[2-5]。Gutierrez et al(1975)^[6]最先从害虫管理的角度出发, 组建了棉花群体生长模型。而在国内, 这一领域的研究刚刚起步^[7]。我们于1987年研制了适于害虫综合治理的水稻群体生长模型, 旨在为建立控制水稻害虫优化管理系统奠定基础。

一、数 据 来 源

1. 大田试验 于1987年在本院农场进行, 试验田肥力水平属中等。供试品种为82-61-40。设5个施肥水平: 5, 9, 12.5, 15, 17.5 kg 纯氮·亩⁻¹; 另外施过磷酸钙 50 kg·亩⁻¹, 施钾 20 kg K₂O·亩⁻¹; 3次重复, 小区面积3×5 m², 播种期3月30日, 移栽期5月3日, 密度规格为 13.33×20 cm²。试验内容: (1)自秧田开始, 系统观察水稻基本生物学特性。(2)自移栽期开始, 每隔7天测定各器官干物质重量、比叶重、叶面积指数。(3)于不同生育期用碱解扩散法测定各小区大田叶片含氮量。(4)测定不同生育期水稻群体的消光系数。(5)成熟期考种测产。

2. 单叶光合强度的测定 用塑料桶栽插稻苗, 设5个与大田试验相同的施肥水平。用ASSA-1610型(日本)红外线CO₂分析仪测定活体叶的光合强度。测定项目包括: (1)在中等施肥水平(12.5 kg 纯氮·亩⁻¹)下, 测定不同光照强度下单叶的光合强度; (2)测定不同施肥水平下单叶的饱和光合强度及含氮量。用ZF-77型照度计测定光强, 并按 16.761 klx = 1 J·cm⁻²·min⁻¹近似地折算成辐射强度^[4]。

3. 有效积温资料 根据本研究系统观察和1986年湖南省品种区域化资料计算而来。

4. 大田验证试验 施肥水平 12.5 kg 纯氮·亩⁻¹。测定不同生育期的各器官干物质重量, 叶面积及总茎数。成熟期考种测产。

二、水稻生长发育过程的模型化

*国家自然科学基金资助项目。
本文于1988年12月9日收到。

1. 群体逐日光合产量的模拟 第 I 日群体光合产量 $A(I)$, 由单叶光合强度先对叶面积指数, 再对时间积分而得:

$$A(I) = \int_{O_1}^{O_2} \int_0^F \frac{aI_0 P_{max} e^{-kF}}{aI_0 \cdot e^{-kF} + P_{max}} dF dt \quad (1)$$

式中 O_1 、 O_2 分别为日照开始和结束时间; F 为叶面积指数; I_0 为群体上方水平面的光强; k 为群体消光系数; a 为光补偿点时的光合强度; P_{max} 为光饱和点时的光合强度。试验测得孕穗期以前 $k = 0.58$, 孕穗期以后 $k = 0.72$; $\alpha = 3.83(\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}) \cdot (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})^{-1}$; P_{max} 与叶片含氮量呈直线相关:

$$P_{max} = 15.69 + 6.81N \quad (r = 0.91, N \in (0, 6\%)) \quad (2)$$

这里 N 为叶片含氮量(%), 而全株叶片含氮量又随施肥水平和生育期而变化:

$$N = 3.246 - 0.0175T + 0.044X \quad (X \in (5, 17.5), \text{下同}) \quad (3)$$

式中 T 、 X 分别为移栽后天数和施氮水平(kg 纯氮 $\cdot$ 亩 $^{-1}$)。日照开始和结束时间, 是根据实照时数 A_1 并应用随机方法予以定义:

$$\begin{cases} O_1 = H_1 + (H_2 - H_1 - A_1) \cdot \text{RND}(1) \\ O_2 = O_1 + A_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\text{RND}(1)$ 为随机生成函数, 每次产生一个 0 到 1 之间的随机数, H_1 、 H_2 为当天的理论日出和日落时间, 可由天文学公式进行计算或由天文学表直接查得。一日中任意时刻群体上方光强 I_0 , 仿照李秉柏(1986)^[5] 的方法进行模拟。

2. 群体逐日呼吸量的模拟 呼吸作用可分为维持呼吸和生长呼吸两个部分^[2]。崛江武(1985)^[8] 测得 25°C 时水稻平均维持呼吸率为 $0.012 \text{g CH}_2\text{O} \cdot \text{g}$ 干重 $^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$, 温度系数 Q_{10} 在 10—35°C 时约为 1.78。那么任一温度 T_1 下的维持呼吸强度(R_s)为:

$$R_s = 0.012 \cdot Q_{10}^{\frac{T_1 - 25}{10}} \quad (5)$$

第 I 日维持呼吸总量 $G_0(I)$ 的计算公式如下:

$$G_0(I) = [E(I-1) - 0.5L(I-1)] \cdot R_s \quad (6)$$

式中 $E(I-1)$ 、 $L(I-1)$ 分别为第 $I-1$ 日结束时的干物质总量和叶片干物质重量, 乘数因子 0.5 是因为白天叶片的维持呼吸量在单叶光合强度计算中已被扣除。生长呼吸则在逐日干物质增量的计算中予以考虑。

3. 逐日干物质累积量及其分配的模拟 第 I 日干物质增量 $W(I)$ 可由下式求出:

$$W(I) = [0.68 \times A(I) - G_0(I)] \times (1 - RG) \quad (7)$$

式中 0.68 为 CH_2O 与 CO_2 的分子量之比; RG 为生长呼吸系数; $(1 - RG)$ 为水稻光合转换效率, 它是同化产物 CH_2O 转换成水稻组织干物质重量的比例系数, 崛江武(1985)^[8] 测得水稻光合转换效率为 0.7g 干重 $\cdot \text{gCH}_2\text{O}^{-1}$ 。各器官及总的干物质累积量的计算公式如下:

$$\begin{aligned} E(I) &= E(I-1) + W(I) - DT(I) & L(I) &= L(I-1) + W(I) \cdot V(I, 1) - DT(I) \\ S(I) &= S(I-1) + W(I) \cdot V(I, 2) \end{aligned} \quad (8)$$

$$C(I) = C(I-1) + W(I) \cdot V(I, 3) \quad D(I) = D(I-1) + W(I) \cdot V(I, 4)$$

式中 $E(I)$ 、 $L(I)$ 、 $S(I)$ 、 $C(I)$ 、 $D(I)$ 分别为第 I 日总的及叶、茎、根、穗的干物质累积量; $V(I, 1) - V(I, 4)$ 分别为第 I 日叶、茎、根、穗的分配系数, 随生育期和施肥水平而

异, 通过试验结果我们拟合了不同施肥水平下各时期的分配系数(部分结果见表 1), 在进行

表 1 干物质分配系数
Table 1 Distribution coefficient of dry matter

施肥水平 (kg 纯氮 ·亩 ⁻¹)	移栽后 天数 器官											
		3	9	16	23	30	37	44	51	58	65	72
5	叶 茎 根 穗	0.40	0.41	0.42	0.42	0.36	0.34	0.31	0.08	-0.02	-0.23	-0.01
		0.36	0.37	0.38	0.40	0.49	0.55	0.50	0.07	-0.03	-0.32	-0.03
		0.25	0.22	0.20	0.18	0.15	0.11	0.10	0	-0.01	-0.05	0
		0	0	0	0	0	0	0.09	0.85	1.05	1.60	1.04
12.5	叶 茎 根 穗	0.42	0.44	0.45	0.45	0.32	0.31	0.21	0.02	-0.08	-0.18	-0.05
		0.37	0.36	0.36	0.38	0.54	0.59	0.61	0.03	-0.17	-0.45	-0.10
		0.21	0.20	0.19	0.17	0.14	0.10	0.07	0	-0.05	-0.09	0
		0	0	0	0	0	0	0.11	0.95	1.30	1.72	1.15
17.5	叶 茎 根 穗	0.40	0.45	0.48	0.50	0.38	0.33	0.34	0.15	0.04	-0.07	0
		0.37	0.34	0.34	0.35	0.50	0.57	0.55	0.26	0.07	-0.10	-0.02
		0.23	0.21	0.18	0.15	0.12	0.10	0.07	0.01	0	-0.01	0
		0	0	0	0	0	0	0.04	0.58	0.89	1.18	1.02

计算机模拟时, 每天的分配系数由线性插值法求得; $W(I)$ 为第 I 日干物质增量; $DT(I)$ 为第 I 日的器官死亡量, 我们只考虑死亡的叶片重量, 若叶片寿命为 LO , 那么第 I 日死亡叶重就等于第 $I-LO$ 日的新增叶重。根据试验结果, 叶片寿命与叶位有关: 4—5 叶 25 天, 6—7 叶 30 天, 8—9 叶 37 天, 10—12 叶 42 天。

4. 叶面积指数的模拟 第 I 日叶面积指数 ($F(I)$) 可按下式求出:

$$F(I) = F(I-1) + G(I) - DTL(I) \quad (9)$$

式中 $DTL(I)$ 为由死亡叶片折算成的叶面积指数, $G(I)$ 为第 I 日新增叶面积指数。叶片干重与叶面积指数 (LAI) 之间的换算, 采用比叶重法, 即

$$LAI = WL/SLM \quad (10)$$

式中 WL 、 SLM 分别为叶片干重和比叶重。比叶重由试验测得, 随生育期而异, 拔节以前 $SLM = 2.711$, 拔节以后 $SLM = 3.250$ 。

5. 水稻发育进程的模拟 在长江流域, 一般早稻品种的感光性较弱, 属于纯感或弱感类型^[9]。所以根据有效积温便可预测发育进程。水稻发育起点温度为 10°C ^[9]。供试品种各生育期有效积温: 移栽期 44.3 日度, 分蘖始期 168.2 日度, 分蘖盛期 279.9 日度, 有效分蘖终止期 310.6 日度, 拔节期 355.5 日度, 孕穗期 472.4 日度, 始穗期 615.4 日度, 抽穗期 686.3 日度, 齐穗期 739.8 日度, 乳熟期 900.2 日度, 蜡熟期 1037.4 日度, 完熟期 1179.3 日度。

6. 总茎数模拟 总茎数包括主茎和分蘖两个部分。根据大田试验的结果, 可将其拟合成施肥水平和时间的函数。

$$Y = \begin{cases} 8 & T \leq 12 \\ 0.298 - 0.116X + 0.753T + 0.015X \cdot T - 0.0112T^2 & 12 < T \leq 58 \\ 6.295 + 0.754X & T > 58 \end{cases} \quad (11)$$

式中 Y 、 X 、 T 分别为每丛总茎数、施氮水平和移栽后天数。

7. 经济产量的模拟 仿照空秕率的概念, 定义经济产量比率和经济产量为:

$$\text{经济产量比率}(EY) = \frac{\text{实粒重}}{\text{实粒重} + \text{空秕粒重}}$$

经济产量 = 生育末期穗重 × 经济产量比率 大田试验表明经济产量比率与施氮水平(X)呈直线相关:

$$EY = 100.45 - 1.89X \quad (r = 0.94) \quad (12)$$

三、计算机模拟与有效性检验

水稻生长发育过程的计算机模拟, 是对各子模型进行耦联, 并输入初始条件进行运行的过程。模拟流程图见图1。

为了检验模型的有效性, 我们输入长沙地区的纬度 $28^{\circ}12'$, 1987年5—7月气象资料, 移栽期5月3日(距1月1日123天), 施肥水平 $12.5\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$, 初始叶面积指数0.25, 初始叶、茎、根、穗干重分别为5、5、2.5、0 $\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$ 。模拟结果全生育期为80天, 与1987年实际观察值相差一天, 经济产量为每亩 $351.01\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$, 而田间实测值为 $323.5\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$, 结果基本接近。叶、茎、根、穗干重及总的干物质重量的模拟值与大田实测值基本吻合(图2), 说明模型具有较好的有效性。但是, 各器官干重及总的干物质重量的模拟值常大于实测值, 主要原因可能是茎和根的死亡过程没有很好地考虑, 田间根重的测定值往往偏小, 灾害性天气条件没有纳入到模型中, 如1987年5月份的连续阴雨或雨暴直接影响早稻前期生长发育, 光合产量的计算中没有考虑温度的影响。

四、灵敏性分析

我们主要对温度、实照时数、辐射强度三个变量进行了灵敏性分析, 结果见表2。从表中可知, 模型对日辐射总量最灵敏, 其次是温度, 再次是实照时数。另外, 我们也模拟了施

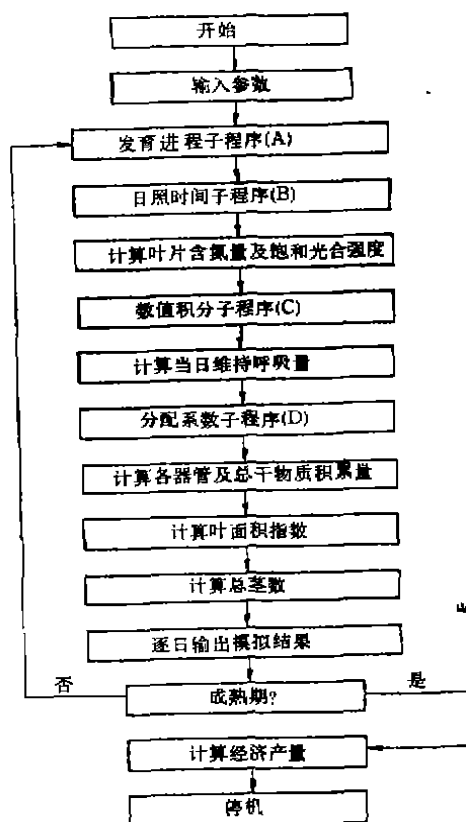


图1 水稻群体动态模拟流程图

输入参数: 输入移栽期、纬度、初始叶面积指数及各器官干重, 数据库调入气象数据、水稻各生育期有效积温、叶片寿命、比叶重及消光系数。

子程序(A)输出生育期。

子程序(B)输出日照开始和结束时间。

子程序(C)输出当日光合产量。

子程序(D)输出当日各器官的分配系数。

Fig. 1 Flow chart of dynamic simulation of rice population

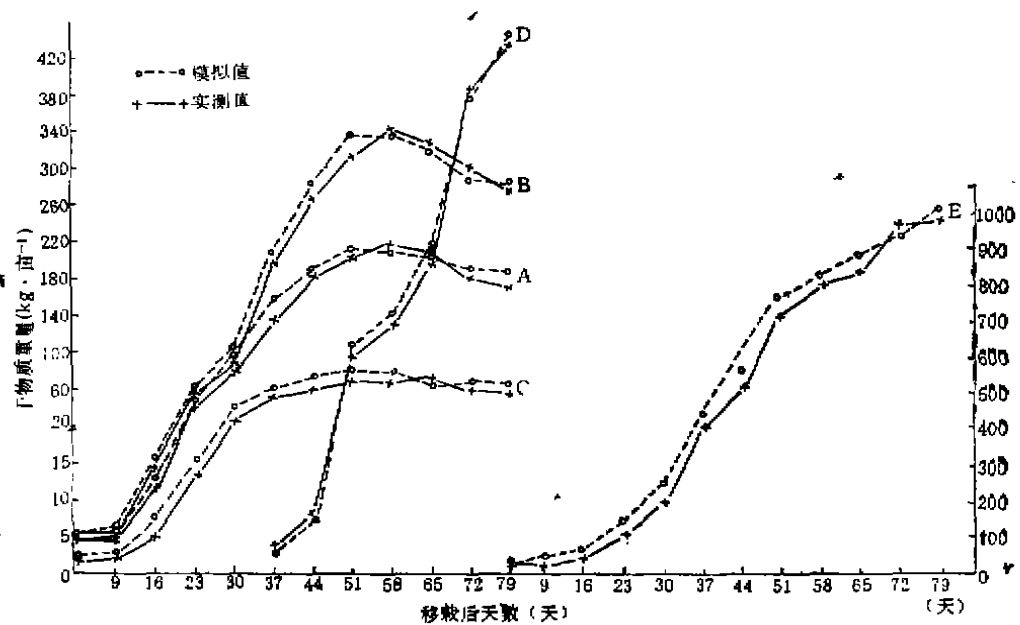


图 2 水稻群体逐日动态模拟值与田间实测值的比较

A、B、C、D、E 分别为叶、茎、根、穗及总的干物质重量。

Fig. 2 Comparison of observed values in the field with simulated values of daily dynamics of rice population

表 2 水稻群体模型对不同因子变化的灵敏性分析

Table 2 Sensitivity analysis of rice population model to changes of different factors

因子及其变化 (%)	全 生 育 期 (%)	干物质总量 (%)	孕穗期叶面积指数 (%)	经 济 产 量 (%)
温度				
+ 5	- 5	- 5	- 5.6	- 2.1
+ 10	- 10	- 8.5	- 9.2	- 4.5
- 2	+ 3.75	- 2.1	+ 0.4	- 0.9
实照时数				
+ 10	0	+ 5.8	+ 9.8	+ 3.2
+ 5	0	+ 3.1	+ 5.4	+ 1.67
- 5	0	- 3.2	- 6.2	- 1.75
- 10	0	- 7.5	- 10.0	- 3.7
日辐射总量				
+ 10	0	+ 5.0	+ 8.8	+ 5.21
+ 5	0	+ 3.1	+ 5.5	+ 2.65
- 5	0	- 3.2	- 5.7	- 2.9
- 10	0	- 6.5	- 10.6	- 6.7

肥水平对输出结果的影响, 结果表明施肥水平升高至纯氮 $17.5\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$ 时, 产量反而比施肥水平 $12.5\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$ 降低 15.0% ; 施肥水平降低至 $5\text{kg}\cdot\text{亩}^{-1}$, 产量下降 25.1% 。这说明偏施氮肥, 有可能反而造成减产。

五、讨 论

1. 本模型包含一定的经验性成分, 如干物质分配系数及经济产量比率与施肥水平的关系等, 但机理性成分占居重要地位, 所以模型具有较强的普遍性, 适用范围广, 易于同害虫种群模型相耦联。

2. 有效性检验表明, 模拟值与实测值基本上吻合, 说明模型的有效性较好, 具有一定的实用价值, 但同时也反应出模型仍存在许多有待改进之处。无效分蘖的死亡, 根的衰老与死亡, 有待进一步试验。灾害性天气条件对水稻生长发育的影响, 有待进一步研究。

3. 作物群体生长过程的模拟是随着电子计算机的推广而发展起来的, 它能在计算机上展现作物生长过程, 对于作物栽培、作物育种、农业区划、植物保护皆具有重要的指导意义, 值得深入研究。

参 考 文 献

- [1] Getz, W. M., et al, 1982, A perspective on systems analysis in crop production and insect pest management, *Ann. Rev. Entomol.* 27:447—66.
- [2] De Wit, C.T., et al, 1978, Simulation of assimilation and transpiration of crops, P. 1—100. Centre Agr. Publ. Doc. Wageningen, Holland.
- [3] Penning de Vries, F. W., et al, 1982, Simulation of plant growth and crop production, P. 1—200. Centre Agr. Publ. Doc. Wageningen, Holland.
- [4] 黄策、王天铎, 1986, 水稻群体物质生产过程的计算机模拟, *作物学报* 12(1):1—8.
- [5] 李秉柏, 1986, 作物的光合生产及实际产量模拟模式的初步分析, *农业气象* 7(4): 1—8.
- [6] Gutierrez, A. P., et al, 1976, An analysis of cotton production in California: A model for Acala cotton and the effects of defoliators on its yields, *Environ. Entomol.* 4: 125—136.
- [7] 吴国伟等, 1988, 棉花生长发育模拟模型的研究, *生态学报* 8(3):201—210.
- [8] 幅江武, 1985, 气象与作物光合成、蒸腾及生长量的生态系统研究, *国外农学——农业气象*, (1):12—16.
- [9] 梁光南, 1983, 《水稻生态学》第100—150页, 农业出版社。

SIMULATION OF THE DYNAMICS OF GROWTH PROCESS AND YIELD OF RICE POPULATION

Zhang Junping Chen Changming

(Hunan Agricultural College, Changsha)

In the paper, an attempt is made to develop a simulation model of the dynamica of growth process and yield of rice population. It begins with the simulation of photosynthesis rate of monoleaf. And then it simulates the amount of assimilation, respiration and the weight of dry matter, leaf area index, developmental stages and shoot numbers inricepopulation day by day. At last, economic yield is simulated. The simulation model gives a reasonable fit to the results from field observations. This model can be used widespreadly, and can be conpled easily with the population models of insect pests, because many of its submodels are ones with mechanism.

Key words: rice, population, dynamic simulation.