

# 水稻生长模拟模式的研究<sup>\*</sup>

李春强<sup>\*\*</sup> 王馥棠

(中国气象科学研究院,北京 100081)

## 提 要

根据 1989 和 1990 年的田间试验资料,建立晚稻南梗 34 生长和产量形成的模拟模式.着重考虑光合作用、呼吸作用和生长等生物学过程.光合受辐射、温度和叶面积等因素影响,呼吸包括生长呼吸、维持呼吸和光呼吸,生长以净光合产物的分配转移模拟,产量形成以净光合产物积累模拟.结果表明,模拟值与实测值较为一致.

**关键词:**水稻;模拟模式;光合作用;呼吸作用.

## 1 引 言

近年来,作物生长模拟研究受到了普遍重视.70年代以来,国外对水稻等作物进行了研究,并建立了模拟模式<sup>[1-4]</sup>.我国从80年代始,陆续从植物生理学、农学、农业气象学等方面做了探索<sup>[5-8]</sup>.本文在前人工作的基础上,根据田间试验资料,采用系统分析方法,建立晚稻生长的模拟模式.

## 2 试验方法

试验于 1989 和 1990 年在南京气象学院农业气象试验站进行,采用分期播种移栽法,每年分早、中、晚三期.移栽期分别为:1989 年 6 月 1 日、16 日和 7 月 1 日;1990 年因天凉延为 6 月 4 日、19 日和 7 月 4 日;秧龄期一个月.品种为南梗 34.栽培密度 33 穴/米<sup>2</sup>,在试验过程中根据田间状况,及时灌水、施肥、除草和防治病虫害.

### (1)生物学观测

根据《农业气象观测规范》进行如下物候期观测:播种,移栽,返青,分蘖,孕穗,抽穗和成熟.

自返青起,每候按随机方法取样一次,每次 10 穴,连根挖出并洗净,测量叶面积、植株

1992 年 6 月 10 日收到,9 月 7 日收到修改稿.

- 国家自然科学基金资助项目.
- 现在山西省农业气象中心.

高度和株茎数。叶面积用 LI-3000 型叶面积仪测定。将根、茎、叶和穗剪下分别烘干并称重。成熟后,取  $2\text{m}^2$  样本风干烤种。

### (2) 环境条件观测

采用国产 ST-80 型数字式照度计测定水稻群体的辐射,高度分别为 20、40、60、80、100、120 和 150cm。温度和日照等在本试验站地面气象观测站进行。

## 3 模式描述

本模式以物质能量平衡为基础,信息流控制能量流,环境条件及系统的状态构成信息,并形成反馈,示意图如下(图 1)。

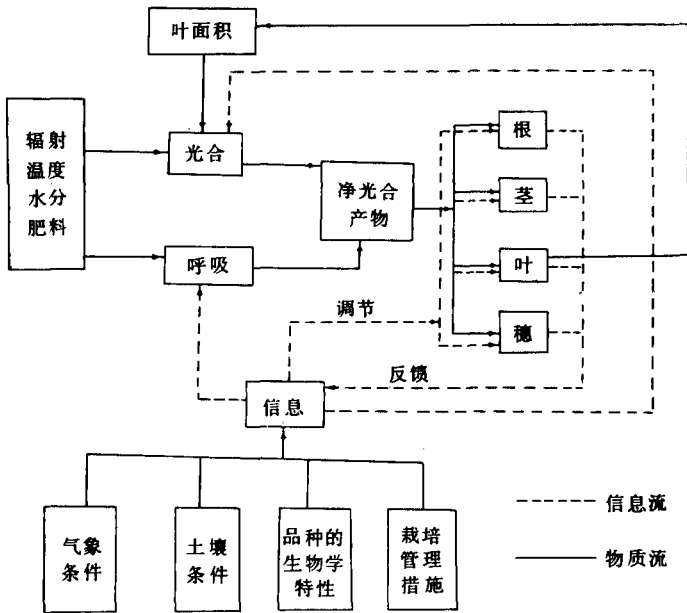


图 1 物质流信息流示意图

影响水稻生产力的主要环境因素为:辐射、温度、水分和矿质营养等。本试验在水肥不受限制条件下进行,故模式主要考虑辐射和温度对水稻生长过程的影响。

模式主要包括构成水稻生长的生理过程,即光合作用、呼吸作用、生长和产量形成及叶面积等。

### (1) 光合作用子模式

光合作用采用文献[9]的经验公式,即直角双曲线函数

$$P = \frac{P_{\max} AI}{P_{\max} + AI} \quad (1)$$

式中, $P$ :单叶光合作用速率, $P_{\max}$ :饱和光强下的最大光合速率, $I$ :光合有效辐射, $A$ :低光强下的  $P-I$  曲线斜率,即初始光能利用率。

根据文献[1,10],水稻最大光合速率  $P_{\max}$  取为  $3.0\text{g} \cdot \text{CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,初始光能利用率  $A$  取  $1.1 \times 10^{-5}\text{g}/\text{J}$ .

光在水稻群体中,基本服从指数分布规律.若考虑叶片的透射率( $m$ ),则有<sup>[1]</sup>:

$$I = KI_0 \exp(-K \cdot LAI)/(1 - m) \quad (2)$$

式中, $K$ :群体消光系数, $LAI$ :叶面积指数, $I_0$ :到达植被上方的光强, $I$ :到达植被内部的光强,消光系数( $K$ )根据试验资料和文献[7],确定为0.45,透射率( $m$ )取0.1.

光合作用是一种酶反应过程,与温度有关.温度对光合作用的影响采用文献[8]中的梗稻订正式,即

$$TF = -0.623 + 0.1147T - 0.00203T^2 \quad (3)$$

式中, $T$ :日平均气温, $TF$ :订正系数.故一天的光合作用为

$$P = \frac{1}{K} TF \cdot P_{\max} \cdot D(t) \ln \frac{P_{\max} + AKI_0/(1 - m)}{P_{\max} + AKI_0 \exp(-K \cdot LAI)/(1 - m)} \quad (4)$$

式中  $D(t)$  为日长.

在计算光合作用时,以观测日的辐射作为候平均.对于阴天,则根据日照时数的多少与观测日的日照时数比较后进行订正.

#### (2) 叶面积子模式

叶片是光合的主要器官,其生长变化受作物特性和环境条件的影响.一般情况下,干物质累积量起主导作用.本文根据试验资料,采用比叶重法模拟,即

$$LAI(t+1) = LAI(t) + \frac{L(t+1) - L(t)}{SLW(t)} \quad (5)$$

$$SLW(t) = 14.8 \times (5t)^{0.287} \quad (6)$$

式中, $SLW(t)$ :比叶重( $\text{g}/\text{m}^2$ ), $L(t+1)$ 、 $L(t)$ :分别是  $t+1$  候和  $t$  候的叶重( $\text{g}/\text{m}^2$ ), $LAI(t+1)$ 、 $LAI(t)$ :分别是  $t+1$  候和  $t$  候的叶面积指数.

植株下部叶片随时间衰老死亡,特别在抽穗之后,绿叶面积减少,叶片干重下降,故抽穗后

$$LAI(t+1) = LAI(t) + \frac{L(t+1) - L(t)}{kSLW(t)} \quad (7)$$

$k$  表示叶片内活物质减少的临界值,据文献[11]和本试验资料,确定  $k$  为0.26.

#### (3) 呼吸作用子模式

呼吸是与光合相反的生理过程,一般分为建造躯体结构的生长呼吸和维持代谢的维持呼吸.生长呼吸与同化物积累有关,维持呼吸与温度有关.因此

$$R = R_0 WF(t) + R_g \frac{dW}{dt} \quad (8)$$

$$F(t) = Q^{(T-25)/10} \quad (9)$$

式中, $R$ :暗呼吸, $R_0$ :维持呼吸系数,抽穗前取0.017,抽穗后取0.012, $R_g$ :生长呼吸系数,取0.3, $W$ :植株总生物量, $F(t)$ :温度影响函数, $T$ :温度, $Q$ :温度系数,取2.0.

水稻是  $C_3$  类作物,还有光呼吸作用,据文献[12]等研究,光呼吸一般占总光合作用的0.25—0.35,随光强而变,本文取0.30.

#### (4) 生长子模式

根据上述光合、呼吸模式,可知单位时间内的净光合产物为

$$\frac{dW}{dt} = P(1 - R_t) - R \quad (10)$$

即

$$\frac{dW}{dt} = \frac{P(1 - R_t) - R_0 W F(t)}{1 + R_g} \quad (11)$$

式中  $R_t$  为光呼吸系数。

净光合产物根据植株生长的需求,分配给根、茎、叶和穗等器官,分配比例随发育期不同而变化,同时也与外界环境条件有关。在拔节以前的生长阶段,同化物主要在根、茎和叶等营养器官中分配;在拔节—抽穗的过渡阶段,同化物同时向根、茎和叶等营养器官和穗部生殖器官分配;在抽穗开花后的生殖阶段,同化物主要分配给穗部生殖器官,而且原来贮存在根、茎和叶等营养器官中的同化物也开始向穗部转移。故用下式表示水稻的生长过程:

$$\begin{cases} W_i^{j+1} = W_i^j + \alpha_i^j \Delta W - \beta_i^j W_i^j \\ W_e^{j+1} = W_e^j + \alpha_e^j \Delta W + \sum_{i \in l, s, r} \beta_i^j W_i^j \end{cases} \quad (12)$$

$i \in l, s, r$

对上式且有

$$\begin{cases} \alpha_l^j + \alpha_s^j + \alpha_r^j + \alpha_e^j = 1 \\ \alpha_i^j \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$i \in l, s, r, e$

式中,  $j, j+1$ : 分别表示当前和下一时间,  $W_i$ : 表示根( $W_r$ )、茎( $W_s$ )、叶( $W_l$ )和穗( $W_e$ )的生物量,  $\Delta W$ : 植株在  $j, j+1$  时段的净增干物质量,  $\alpha_i, \beta_i$ : 分别是分配和转移系数。

分配和转移系数的确定主要是根据水稻生理特点,按照净同化产物 ① 优化供应当时的生长中心, ② 叶层分工, 就近运输。同时在各个生长中心之间, 竞争光合产物的能力又有强弱之分, 一般生殖器官大于营养器官, 地上部分大于根系。抽穗前贮藏在根、茎和叶等营养器官中的同化物在开花后一周内可大量转移到穗中。故根据试验资料及文献 [13, 14] 确定经验分配系数(表 1)。对于不同移栽期, 可用信息流调整分配转移系数。

表 1 1990 年第 2 期光合产物分配转移系数

候 序	$\alpha_r$	$\alpha_s$	$\alpha_l$	$\alpha_e$	$\beta_r$	$\beta_s$	$\beta_l$
1	0.21	0.36	0.43				
3	0.18	0.42	0.40				
5	0.16	0.45	0.39				
7	0.14	0.53	0.33				
9	0.12	0.56	0.32				
11	0.08	0.55	0.10	0.27			
13				1.00	0.05	0.01	0.03
15				1.00	0.20	0.04	0.05
17				1.00	0.10	0.02	0.02

### (5) 产量形成子模式

在上述各模式的基础上,可计算出水稻的根、茎、叶和穗等器官的生物量.水稻产量一般指籽粒收获量,产量高低与每亩穗数、每穗粒数和千粒重有关.本模式因没有考虑水稻群体密度变化动态,故采用经济系数换算,即地上部分生物量与经济系数之积.

## 4 结果与分析

根据南京气象学院农试站的气象观测资料和同期的水稻田间试验资料,以候为步长.在IBM微机上对1989和1990两年共6期进行模拟,结果如图2所示(因篇幅所限,仅给出1990年第1期的结果).

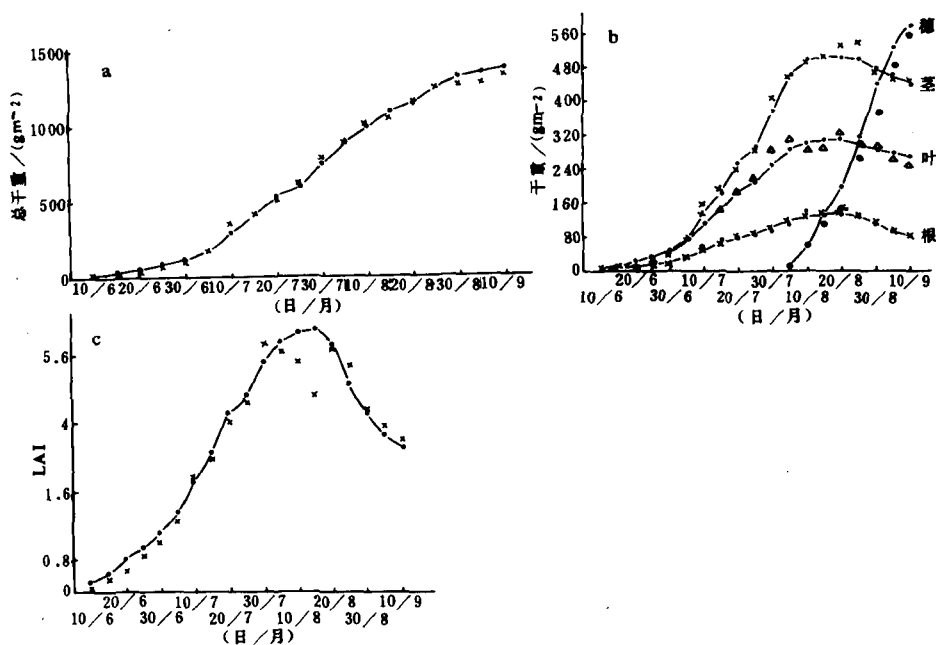


图2 1990年第1期模拟与实测(a)生物量(b)器官干重(c)叶面积指数

(· 模拟,其它符号均为实测)

由图可知,模拟与实测变化趋势一致.总干物质积累曲线分三个阶段,即缓慢生长阶段、线性生长阶段和生长停滞阶段.从净同化产物分配来看,1989年各期基本反映了各器官的生长趋势,在前期和中期效果较好,后期可能是受分配转移的影响,产生偏差.1990年各期就单个器官而论,地上部分的叶、茎和穗的模拟值与实测值误差较小,地下部分根的模拟值与实测值差异较大,这是因为根的取样难以保证不受损失之故.就1990年3期比较来看,第3期误差大于前两期,原因可能是移栽晚,发育速度较快;各发育期的气象条件与前两期不同,而使分配系数变化较大之故.从生物学角度分析,第3期与前两期干物质相差较大,可能是秧苗弱,群体稀疏(最大LAI约4.68,而前两期均超过6.00),有效分蘖少之因.

模拟叶面积与实测叶面积(图2c)趋势一致,一般在抽穗前,二者相差较小,峰值(即

最大值)接近。但抽穗后,误差相对增大,这可能是由于叶面积指数模式经验性较强,对叶片的衰老机理描述能力较差之故。

表 2 给出了 1989 和 1990 年两年各期成熟时的模拟与实测的结果。从总体上看,相对误差一般都在 10% 以下;比较而言,1990 年产量误差较大,可能与烤种取样有关。

表 2 1989、1990 年水稻模拟与实测生物量比较(成熟期)

	总干物质(g/m <sup>2</sup> )			穗重(g/m <sup>2</sup> )			产量(kg/10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )		
	模拟	实测	相对误差(%)	模拟	实测	相对误差(%)	模拟	实测	相对误差(%)
1989 第 1 期	1268.7	1197.4	6.0	612.6	568.3	7.8	6011.7	5981.7	0.5
1989 第 2 期	1263.5	1273.5	-0.8	611.1	599.7	1.9	6061.2	6224.7	-2.6
1989 第 3 期	1213.6	1154.1	5.2	597.5	582.3	2.6	5839.2	5705.7	5.0
1990 第 1 期	1375.0	1317.6	4.4	581.2	555.0	4.7	6458.7	5473.2	17.9
1990 第 2 期	1231.6	1249.8	-1.5	540.6	570.1	-5.2	5833.2	5293.2	10.2
1990 第 3 期	912.4	954.6	-4.4	461.8	467.7	-1.3	4393.3	4817.8	-8.8

## 5 讨 论

本模式以水稻的生物学特性为依据,根据物质能量平衡原理,建立水稻生长和产量形成的模拟模式。经田间试验资料验证,模拟值与实测值基本符合,说明模式性能较好。

受试验条件及仪器的限制,本模式中的同化物分配转移系数,比叶重的变化及阴晴天的订正等仍有经验性,是否合理还有待于进一步研究。

## 参 考 文 献

- 1 岩诚英夫. 水稻营养生长的计算机模拟. 自然资源译丛, 1983, No. 1, 72—81.
- 2 Keulen H. Van. A calculation method for potential rice production. *Contr. Centr. Res. Znst. Bogor.*, 1976, No. 21, pp26.
- 3 Takeshi Horie. Studies on photosynthesis and primary production of rice plants in relation to meteorological environments, *J. Agr. Met.*, 1978, 34(3):125—136.
- 4 Ritchie et al. IBSNAT and the CERES-rice model. *Weather and Rice. IRRI*, 1987.
- 5 黄策等. 水稻群体物质生产过程的计算机模拟. 作物学报, 1986, 10(1):1—8.
- 6 冯定原等. 水稻生长和产量形成的数值模式. 南京气象学院学报, 1987, 10(2):201—211.
- 7 詹习武. 水稻生长产量形成的数值模拟研究. 南京气象学院学报, 1989, 12(2):137—145.
- 8 黄耀等. 水稻群体光合生产的动态模拟模型. 中国农业气象, 1990, 11(1):10—15.
- 9 王天铎等译. 植物生理的数学模型. 北京: 科学出版社, 1983. 108—115.
- 10 F. W. T. Penning de Vries et al. Simulation of Plant Growth and Crop Production. Wageningen. Pudoc, 1982.
- 11 朱振武译. 农作物产量动态统计预报方法. 国外农学——农业气象, 1983, No. 1, 13—18.
- 12 高煜珠等. 关于光呼吸与光合作用关系的研究. 作物学报, 1985, 11(2):81—88.
- 13 吴光南, 邹江石主编. 水稻栽培理论与技术. 北京: 农业出版社, 1981. 150—260.
- 14 张建新等. 生长期一定时一年生植物群体光合产物的最优分配策略的理论分析. 生态学报, 1990, 10(3):243—247.

# A STUDY ON THE SIMULATION MODEL OF RICE GROWTH

Li Chunqiang Wang Futang

(The Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

## Abstract

A simulation model of late-sown rice growth and yield formation was built by using the field experimental data in 1989 and 1990. In this model, the biological processes such as photosynthesis, respiration and growth are considered. Photosynthesis is affected by radiation, temperature and leaf area index. Respiration includes growth respiration and maintenance respiration, as well as photo-respiration. Growth is modeled using net assimilation partition, and yield formation using net assimilation accumulation. The result shows that the simulation model gives a good agreement with the observations from field test.

**Key words:** Rice; Simulation model; Photosynthesis; Respiration.



## 更正:

第4卷第3期364页第8行补表1,原文表1—表4顺延;图2与图4图题调换.

表1 环流中心指数

环流中心与浓密云区的相对位置	指数 A1
位于浓密云区之外	0.5
位于浓密云区边缘	1.0
位于浓密云区内部,距边缘* < 1.0 纬距	1.5
位于浓密云区内部,距边缘 > 1.0 纬距	2.0
位于浓密云区中心	3.0

\* 浓密云区界限是指增强温度达到( $< -33^{\circ}\text{C}$ )的云的边界.