

水稻群体质量若干指标的模拟及其优化研究

严力蛟¹, 王兆骞², 曹卫星¹, 杜建生², 杨京平², 陈 杰²

(1. 南京农业大学农业部作物生长调控重点开放实验室, 南京 210095 2. 浙江大学农业生态研究所, 杭州 310029)

摘要 借鉴 C. T. de Wit 和 F. W. T. Penning de Vries 的建模思想和 MACROS 中 LID、TIL 的基本框架, 通过田间试验和文献资料的收集, 组建了适合本地土壤条件、气候状况和品种特性的水稻群体质量指标动态模拟模型。利用该模型实时模拟, 并以产量的高低作为标准进行优化, 获得了秧龄、移栽期和基本苗的最优组合以及相对应的水稻群体质量若干优化指标。

关键词 水稻, 群体质量指标, 模拟模型, 模拟, 优化

Study on simulation and optimizing of several indexes in rice population quality

YAN Li-Jiao¹, WANG Zhao-Qian², CAO Wei-Xing¹, DU Jian-Sheng², YANG Jing-Ping², CHEN Jie²

(1. MOA Key Laboratory of Crop Growth Regulation, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China 2. Agroecology Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310029)

Abstract Based on C. T. de Wit & F. W. T. Penning de Vries's modelling methodology and fundamental frame of LID and TIL modules of MACROS, a dynamic simulation model of quality indexes in rice population suitable to local soil, climate and other varietal characters was conducted according through field trials and documental data. By running the model, the optimum combinations of seedling age, transplanting date and the number of transplanted seedlings with corresponding optimum indexes of rice population quality were obtained.

Key words rice, population quality index, simulation model, simulate, optimum

文章编号: 1000-093X(2000)02-0177-07 中图分类号: Q143 文献标识码: A

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。关于水稻群体质量指标的涵义、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^[1~5]。但同时对于水稻多个群体质量指标进行系统建模国内外尚鲜有报道,尤其是动态模拟和优化技术在群体质量指标研究中的应用则更少。本研究是作者在前期工作的基础上^[6,7],借鉴了 C. T. de Wit、F. W. T. Penning de Vries 的建模思想^[8~10]和 MACROS (Modules for Annual Crop Simulation, 即 1 年生作物模拟模块)中 LID、TIL 的基本框架^[9],通过田间试验和文献资料的收集,旨在组建适合本地土壤条件、气候状况和品种特性的水稻群体质量指标动态模拟模型。该模型的建立,对于确定最佳的秧龄、移栽期和基本苗,正确界定水稻的群体质量指标优化值,制定规范化栽培技术体系,实现水稻的高产高效等都具有重要的理论价值和实用价值。

1 材料与与方法

1.1 田间试验

基金项目 国家自然科学基金、浙江省自然科学基金和国际水稻研究所 SARP 协作网资助项目

收稿日期: 1998-02-26, 修订日期: 1998-11-27

作者简介 严力蛟 (1959~) 男, 浙江省上虞市人, 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研工作。

试验于 1989~1990 年在嘉兴市郊区净湘乡和新丰镇实施。其中 1989 年为参数试验,1990 年为验证试验。供试品种为嘉兴市农科所育成的中熟晚粳秀水 620。土壤类型为黄心青紫泥,肥力条件较好(见表 1)。设 7 个氮肥水平(0、120、142.5、165、187.5、210、232.5kg N/hm²),其中 60% 作基肥,40% 在移栽后 7d 施。过磷酸钙 375kg/hm²,氯化钾 150kg/hm²(P、K 施用量以能满足水稻生长发育需要为度),作基肥 1 次施下。不施有机肥。密度 16.67cm×13.33cm,每丛 5 样本。4 次重复,其中 1 个重复取样用,其它 3 个重复用于考种测产。小区面积 16m²。随机排列。田间管理同常规大田生产。每隔 7d 取 1 次植株样本,并调查分蘖动态。植株 3 点取样,每点取 5 丛。

1.2 室内工作 植株样本经清洗后,置 105℃ 烘箱中杀青 15min,然后在 80℃ 下烘干至恒重。主要测定项目有不同时期、不同氮肥水平的叶面积指数,单位叶面积重(比叶重),单位茎表面积重(比茎重),茎(包括叶鞘)绿叶、黄叶、穗的干重,有效穗数、每穗粒数、空秕率、粒重、理论产量和实测产量。其中,叶面积指数、比叶重、比茎重用重量法。

1.3 气象数据 输入模型的气象数据包括日最高气温、日最低气温和日照时数。由浙江省气象台提供。同时输入的还有纬度、经度和海拔高度。

1.4 文献资料 为获取参数和组建模型,本研究引用了许多专著、学术论文、研究报告等文献资料。

2 模型的组建

本研究采用 F.W.T.Penning de Vries 等 1989 年研制的 LID 和 TIL 模型为基本框架,并结合作者前期的工作,根据土壤、气候、品种和栽培技术等差异,参照了大量的田间试验数据及文献资料,通过原模型结构语句和作物参数的修正和补充,完成了水稻群体质量指标动态模拟模型的组建。

模型以 C.T.de Wit 等提出的作物第一生产水平^[8~10]为条件,即假设在整个生育期间,没有病虫、杂草的影响,肥水充足,水稻的生长发育只取决于气象条件和品种的遗传特性。

模型用 CSMP 语言编程。模型规定,用 $DS = 0, 1, 2$ 分别表示播种、抽穗和成熟,其中 $DS = 0 \sim 1$ 为营养生长, $DS = 1 \sim 2$ 为生殖生长,模拟的时间步长为 1d,模拟过程以 $DS = 2$ 或者碳水化合物日积累量累计有 3d 小于或等于 0 时结束。全部模拟分析均在 IBM/PC 微型计算机上完成。

因为模型较为庞大,限于篇幅,本文仅列出新加入或经过修改的语句和参数,详细的程序结构、参数及其建模原理请参见参考文献[9]。

2.1 新加入或经过修改的语句

2.1.1 日平均气温 $TPAV = ((TPLI(IDATE) + TPHT(IDATE)) / 2) - 1$ 。

式中,TPAV 为日平均气温,TPLI 为日最低气温,IDATE 为儒略历日期,TPHT 为日最高气温。

2.1.2 光合面积

$$ALVI = WLVI / (SLC \cdot AFGEN(SLT, DSI)) + ASTI$$

$$ASTI = 0.5 \times WSTI / (SSC \cdot AFGEN(SST, DSI))$$

$$AST = INTGRL(ASTI, GSA)$$

$$GSA = 0.5 \cdot GST / SSN$$

$$SSN = SSC \cdot AFGEN(SST, DS)$$

$$ALVR = ALV - AST$$

式中,ALVI 和 ASTI 分别为叶面积和茎表面积的初始值;WLVI 和 WSTI 分别为初始叶重和初始茎重;SLC 和 SSC 分别为比叶重常数和比茎重常数;AFGEN 为任意线性内插函数,其数学表达式:

$$y = f(x)$$

SLT 和 SST 分别为 DS 对 SLC 和 SSC 的影响系数(比叶重系数和比茎重系数);DSI 为初始 DS 值;AST 为茎表面积,INTGRL 为积分算子,其数学表达式:

表 1 供试土壤的肥力条件

Table 1 Fertilizer conditions of soil

| 地点 Sites | 有机质 Organic matter (%) | 全氮 Total N (%) | 碱解氮 Available N ($\times 10^{-6}$) | 速效磷 Available P ($\times 10^{-6}$) | 速效钾 Available K ($\times 10^{-6}$) |
|-------------|---------------------------------|-------------------------|---|---|---|
| 嘉兴净湘 | 3.41 | 0.169 | 176 | 5.50 | 109 |
| 嘉兴新丰 | 3.78 | 0.195 | 163 | 7.63 | 123 |

$$y(t) = \int_0^t x dt + y(t_0)$$

其中 t_0 为开始时间, t 为时间; GSA 为茎表面积增长速率; GST 为茎生长速率; SSN 为单位新茎实测表面积重; $ALVR$ 为叶面积指数; ALV 为光合面积; DS 为生育阶段。

2.1.3 生育期

$$\begin{aligned} DRV &= DRCV \cdot EFGJ \cdot EFGH \cdot AFGEN(DRVTT, TPAV) \\ EFGJ &= INSW((DS - 0.25)(0.56 - DS)) \cdot 1. \cdot DRED \\ EFGH &= INSW((DS - 0.56)(0.67 - DS)) \cdot 1. \cdot DRZD \\ DRZD &= AFGEN(DRDZ, DLP) \end{aligned}$$

式中, $INSW$ 为开关函数, 其数学表达式:

$$\begin{aligned} y &= x_2 \text{ 如果 } x_1 < 0 \\ y &= x_3 \text{ 如果 } x_1 \geq 0 \end{aligned}$$

DRV 为营养生长发育速度; $DRCV$ 为营养生长期发育常数; $EFGJ$ 为幼穗分化前日长对感光性条件语句; $EFGH$ 为幼穗分化后对感光性条件语句; $DRVTT$ 为 $TPAV$ 对 $DRCV$ 的影响系数; 0.25 为感光始期的 DS 值; 0.56 为幼穗分化期的 DS 值; $DRED$ 为感光始期至幼穗分化的感光值; DLP 为光周期有效日长, 由模型根据经纬度等自动产生; 0.67 为感光终止期的 DS 值; $DRZD$ 为幼穗分化至感光终止的感光值; $DRDZ$ 为幼穗分化至感光终止日长对生育期进程的影响系数。

2.1.4 分蘖

$$\begin{aligned} NTH &= INTGRI(NTH) \cdot (GNTH - LNTI) \\ DSTF &= NOR(DSI + 0.03 - DS, DS - DST2) \\ DSTD &= NOR(DSI + 0.03 - DS, DS - (DST2 + 0.15)) \end{aligned}$$

式中, NTH 为茎蘖数; $NTHI$ 为初始茎蘖数; $GNTH$ 和 $LNTI$ 分别为茎蘖增长速率和茎蘖死亡速率; $DSTF$ 为茎蘖增长的起迄 DS 值; 0.03 为移栽至移栽后 5d 的 DS 值; $DST2$ 为茎蘖停止增长的 DS 值, 其值为 0.75; $DSTD$ 为茎蘖死亡的起迄 DS 值; NOR 为 0.1 选择函数, 其数学表达式:

$$\begin{aligned} y &= 1 \text{ 如果 } x_1 \leq 0, x_2 \leq 0 \\ y &= 0 \text{ 其它情况} \end{aligned}$$

2.1.5 谷粒产量

$$\begin{aligned} WGY &= WDCY/0.86 \\ WDCY &= WSO \cdot (AFGEN(FGT, TAT) + 0.15) \\ TTT &= INTGRI(0, INSW((DS - 0.93)(1.15 - DS)) \cdot 0. \cdot TPAV + 1. \cdot) \\ TAT &= TTT/INSW((DS - 1.9)) \cdot 1. \cdot TND \\ TND &= INTGRI(0, INSW((DS - 0.93)(1.15 - DS)) \cdot 0. \cdot 1. \cdot) \end{aligned}$$

式中, WGY 为谷粒重; $WDCY$ 为谷粒干重; 0.86 为谷粒中干物质的比率; WSO 为穗干重; FGT 为 TAT 所对应的结实率; TAT 为抽前后共 10d 的平均气温; 0.15 为非温度因素所引起的空秕率; TTT 为抽穗前后共 10d 的日平均气温之和; 0.93 为抽穗前 4d 的 DS 值; 1.15 为抽穗后 5d 的 DS 值; TND 为 $DS = 0.93 \sim 1.15$ 的累计天数。

2.1.6 总粒数

$$NGR = INTGRI(0, GNGR)$$

式中, NGR 为总粒数; $GNGR$ 为籽粒数增长速率。

2.1.7 光合效率

$$PLEA = PLEI \cdot AFGEN(PLETT, TPAV) \cdot AFGEN(PT, DS)$$

式中, $PLEA$ 为光合作用效率; $PLEI$ 为初始光合作用效率; $PLETT$ 为 $TPAV$ 对 $PLEI$ 的影响系数; $TPAV$ 为昼平均气温; PT 为 DS 对 $PLEA$ 的影响系数(光合效率系数)。

2.2 新加入或修改的参数 新加入或经过修改的参数包括生成元函数、常数和初始值(表 2、表 3)。

在表 2、表 3 中, $CALVT$ 为随 DS 而变化的 $CAGLV/CAGCR$ 的比率(即光合产物在叶中的分配比率); $CASST$ 为随 DS 而变化的 $CAGST/CAGSS$ 的比率(即光合产物在茎中的分配比率); $CASST$ 为随 DS 而变化的 $CAGSS/CAGCR$ 的比率(即光合产物在地上部的分配比率); $LLVT$ 为随 DS 而变化的 LLV/WLV 的比率(即叶片老化系数); $CNTIT$ 为形成并维持一个分蘖所需要的碳水化合物量; $DRDT$ 为感光始期至幼穗分化日长对生育期进程的影响系数; $WDCY$ 为生殖生长期发育常数; WTH 为初始单茎叶重。

表 2 新加入或经过修改的生成元函数(品种秀水 620)
Table 2 Adopted functions (vc. Xiushui 620)

| 生成元函数名 Function name | 数值 Value |
|-------------------------|---|
| <i>CALVT</i> | 0.0 0.55 0.49 0.5 0.65 0.3 0.75 0.1 0.99 0.0 , ... 1.1 0.0 1.2 0.0 2.1 0.0 |
| <i>CASTT</i> | 0.0 0.45 0.49 0.5 0.65 0.7 0.75 0.8 0.99 0.4 , ... 1.1 0.0 1.2 0.0 2.1 0.0 |
| <i>CASST</i> | 0.0 0.3 0.38 0.88 0.381 0.4 0.6 0.88 0.7 0.95 , ... 0.8 0.94 1.0 1.0 1.1 1.0 2.5 1.0 |
| <i>LLVT</i> | 0.0 0.0 0.43 0.00023 0.49 0.0003 0.54 0.0005 , ... 0.63 0.0008 0.75 0.0012 0.88 0.002 1.0 0.004 , ... 2.1 0.027 |
| <i>CNTIT</i> | 0.0 5.E-6 0.41 16.E-6 0.71 70.E-6 1.0 38.E-6 , ... 2.1 38.E-6 |
| <i>DRDT</i> | 0.0 1.0 11.5 1.0 11.83 0.98 12.17 0.95 12.5 , ... 0.9 12.83 0.83 13.17 0.58 13.5 0.47 13.83 0.45 , ... 14.17 0.28 15.0 0.13 24.0 0.0 |
| <i>DRDZ</i> | 0.0 1.0 11.5 1.0 13.0 0.76 13.5 0.5 24.0 0.0 |
| <i>SLT</i> | 0.0 0.68 0.38 0.68 0.43 0.73 0.49 0.76 0.54 0.8 , ... 0.63 0.86 0.75 0.92 0.88 0.95 1.0 0.97 1.2 0.99 , ... 1.37 1.0 1.53 1.0 1.69 1.0 1.84 0.99 2.1 0.98 |
| <i>SST</i> | 0.0 0.51 0.38 0.51 0.49 0.57 0.54 0.64 0.75 0.98 , ... 0.88 1.1 1.0 0.82 1.53 0.69 2.1 0.61 |
| <i>FGT</i> | 0.0 0.0 17.0 0.0 18.0 0.06 19.0 0.17 20.0 0.26 , ... 21.0 0.66 22.0 0.79 23.0 0.76 24.0 0.83 25.0 , ... 0.83 26.0 0.84 27.0 0.85 28.0 0.77 29.0 0.80 , ... 31.0 0.75 32.0 0.57 |
| <i>PT</i> | 0.0 1.0 0.379 1.0 0.38 0.01 0.41 1.0 2.1 1.0 |

3 模型的验证

根据嘉兴 1990 年的田间试验数据和气象资料对模型进行了验证。结果显示,不同播期(6 月 20 日、6 月 24 日、6 月 27 日、6 月 30 日)生育期的模拟值与实测值吻合良好(见表 4),说明该模型能较好地预测不同气候条件下的生育天数;在秧龄 41d、移栽期 8 月 2 日、基本苗 $2.85 \times 10^6/\text{hm}^2$ 条件下,茎干重(*WSTR*)、叶干重(*WLV*)、地上部干重(*WLVSO*)、穗干重(*WSO*)、叶面积指数(*ALVR*)和茎蘖数(*NTI*)的模拟值与实测值也基本一致(图 1~图 6),但穗干重

(*WSO*)和地上部总干物质重(*WLVSO*)模拟值均明显高于实测值,说明试验田除气候以外的生产条件还未达到最佳,秀水 620 的产量尚有很大潜力可挖。从总体来说,该模型较好地反映了水稻生长过程的动态变化,对生产实践具有指导意义。

4 模拟和优化

4.1 移栽期、秧龄和基本苗最佳组合的模拟和优化 利用嘉兴 1990 年的气象资料和粳稻品种秀水 620 对移栽期、秧龄和基本苗的最佳组合进行了模拟和优化。步骤如下:①先设置 4 个移栽期(7 月 23 日、7 月 28 日、8 月 2 日和 8 月 7 日)3 个秧龄(30d、40d 和 50d)和 3 个基本苗(0.69×10^6 个/ hm^2 、 2.07×10^6 个/ hm^2 和 3.45×10^6 个/ hm^2)共 36 个不同组合进行计算机模拟。其模拟结果是:以早栽(7 月 23 日)、适宜秧龄(40d)、较少的基本苗(0.69×10^6 个/ hm^2)产量最高(13216kg/ hm^2)、迟栽(8 月 7 日)、短秧龄(30d)和较多的基本苗(3.45×10^6 个/ hm^2)产量最低,且不同组合之间趋势基本一致(见表 5)。②进一步以 0.69×10^6 个/ hm^2 基本苗、40d 秧龄和 7 月 23 日移栽期为中心,以单位面积产量为目标作多种组合的模拟(考虑到浙江省连作晚稻最早的移栽期为 7 月 15 日左右,故 7 月 15 日以前不纳入模拟优化区间),得出模拟产量最高值(13545kg/ hm^2)的最佳移

表 3 新加入或经过修改的常数和初始值(品种秀水 620)

| Table 3 Adopted constants and initializations (vc. Xiushui 620) | | | |
|--|-------------|-----------------------------|-------------|
| 常数名 Constant name | 数值 Value | 初始值名 Initialization name | 数值 Value |
| <i>DRCV</i> | 0.0188 | <i>WLVI</i> | 380 |
| <i>DRCR</i> | 0.031 | <i>WSTI</i> | 290 |
| <i>SLC</i> | 450 | <i>WTI</i> | 1.69E-4 |
| <i>SSC</i> | 1200 | <i>DSI</i> | 0.38 |

栽期、秧龄和基本苗分别为7月15日、41d和 0.40×10^6 个/hm²。

表4 生育期模拟值与实测值的比较(嘉兴,1990,品种秀水620,单位:d)

Table 4 Comparison of simulated and observed development stages (vc. Xiushui 620, Jiaxing, 1990)

| 播种期 Sowing date (月/日) (month/date) | 播种 ~ 齐穗 Sowing-heading | | 齐穗 ~ 成熟 Heading-maturity | | 播种 ~ 成熟 Sowing-maturity | |
|---|---------------------------|------|-----------------------------|------|----------------------------|------|
| | 模拟值 | 实测值 | 模拟值 | 实测值 | 模拟值 | 实测值 |
| | Sim. | Obs. | Sim. | Obs. | Sim. | Obs. |
| 6/20 | 90 | 99 | 46 | 48 | 136 | 136 |
| 6/24 | 88 | 89 | 46 | 45 | 134 | 134 |
| 6/27 | 86 | 87 | 46 | 46 | 132 | 133 |
| 6/30 | 84 | 84 | 46 | 46 | 130 | 130 |

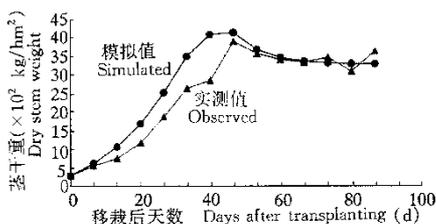


图1 茎干重模拟值与实测值的比较(嘉兴,1990,品种秀水620)

Fig.1 Comparison of simulated and observed dry stem weight (vc. Xiushui 620, Jiaxing, 1990)

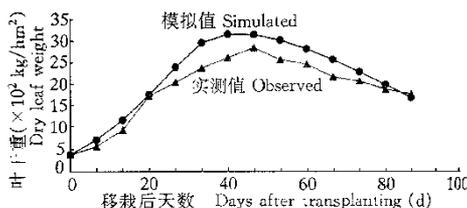


图2 叶干重模拟值与实测值的比较(嘉兴,1990,品种秀水620)

Fig.2 Comparison of simulated and observed dry leaf weight (vc. Xiushui 620, Jiaxing, 1990)

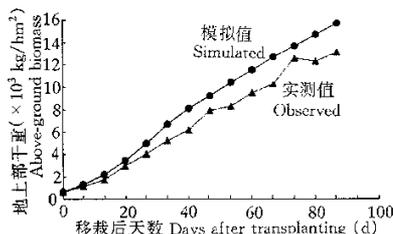


图3 地上部干重模拟值与实测值的比较(嘉兴,1990,品种秀水620)

Fig.3 Comparison of simulated and observed dry weight of above-ground biomass

(vc. Xiushui 620, Jiaxing, 1990)

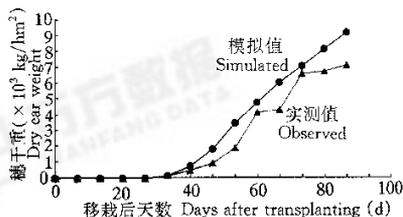


图4 穗干重模拟值与实测值的比较(嘉兴,1990,品种秀水620)

Fig.4 Comparison of simulated and observed dry ear weight (vc. Xiushui 620, Jiaxing, 1990)

4.2 水稻群体质量若干指标的模拟优化值 根据上述模拟的最高产量所对应的相关输出值,即可获得水稻群体质量若干指标的模拟优化值(见表6和表7)。

5 结语

本文以机理性系列模型 MACROS 中的 LID 和 TIL 为基本框架,运用国外先进的建模思想,通过田间试验和文献资料的收集,组建了水稻群体质量指标动态模拟模型。验证结果显示,模型运行后生育期的模拟值与实测值吻合良好,干物重、叶面积指数和分蘖数的模拟值和实测值其趋势也基本一致,表明该模型能较好地模拟水稻生长过程的动态变化。但由于本研究仅在一个品种(秀水620)和只设置一年试验的条件下对模型进行了验证,且对模拟及其优化结果也缺乏生产实际的检验,故该模型尚有待多品种、多年的重复试验和大

田实践加以进一步检证和完善。此外,由于该模型是建立在水稻生长发育生理生态基础上的一种解释性模型,模型在模拟运行时需要很多的土壤参数、作物品种参数和生成元函数值,因此,如何建立一整套不同土壤类型和品种类型的参数库和生成元函数值库与之相配套,对于模型能否大面积应用至关重要。相应地,如何通过数学方法,来快速、简易地估算各种参数值,将成为该领域今后的一个重要课题。

表 5 不同移栽期、秧龄和基本苗的最高苗数、有效穗数和产量(嘉兴,1990,品种秀水 620)

Table 5 Maximum seedlings, productive ears and grain yield for different transplanting dates, seedling ages and transplanting seedlings (vc. Xiushui 620 Jiaying, 1990)

| 移栽期 Transplanting date (月/日) (month/date) | 秧龄(d) Seedling ages | 基本苗 Transplanting seedlings ($\times 10^6/\text{hm}^2$) | 最高苗数 Maximum seedlings ($\times 10^6/\text{hm}^2$) | 有效穗数 Productive ears ($\times 10^6/\text{hm}^2$) | 产量 Grain yield (kg/hm^2) |
|---|---------------------------|--|---|---|--|
| 7/23 | 30 | 0.69 | 10.52 | 6.75 | 12412 |
| | | 2.07 | 13.04 | 7.71 | 12022 |
| | | 3.45 | 13.52 | 7.75 | 11830 |
| | 40 | 0.69 | 7.48 | 6.04 | 13216 |
| | | 2.07 | 9.75 | 7.33 | 12817 |
| | | 3.45 | 10.69 | 7.57 | 12568 |
| | 50 | 0.69 | 6.43 | 6.13 | 12128 |
| | | 2.07 | 7.94 | 6.74 | 11920 |
| | | 3.45 | 8.36 | 6.92 | 11744 |
| 7/28 | 30 | 0.69 | 10.15 | 6.90 | 10560 |
| | | 2.07 | 12.57 | 7.73 | 10234 |
| | | 3.45 | 13.10 | 7.80 | 10072 |
| | 40 | 0.69 | 7.44 | 5.76 | 12143 |
| | | 2.07 | 9.45 | 6.81 | 11813 |
| | | 3.45 | 10.42 | 7.15 | 11598 |
| | 50 | 0.69 | 6.15 | 5.72 | 11478 |
| | | 2.07 | 7.50 | 6.08 | 11332 |
| | | 3.45 | 8.02 | 6.23 | 11189 |
| 8/2 | 30 | 0.69 | 8.72 | 5.29 | 8102 |
| | | 2.07 | 11.10 | 6.95 | 7868 |
| | | 3.45 | 12.03 | 7.34 | 7739 |
| | 40 | 0.69 | 6.45 | 5.37 | 10782 |
| | | 2.07 | 8.50 | 5.72 | 10554 |
| | | 3.45 | 9.38 | 6.02 | 10387 |
| | 50 | 0.69 | 5.65 | 5.26 | 10114 |
| | | 2.07 | 6.89 | 5.79 | 10258 |
| | | 3.45 | 7.31 | 5.86 | 9977 |
| 8/7 | 30 | 0.69 | 7.13 | 4.70 | 3265 |
| | | 2.07 | 9.59 | 6.23 | 3185 |
| | | 3.45 | 10.61 | 6.95 | 3132 |
| | 40 | 0.69 | 6.00 | 5.15 | 9498 |
| | | 2.07 | 8.23 | 5.27 | 9328 |
| | | 3.45 | 9.14 | 5.66 | 9196 |
| | 50 | 0.69 | 4.98 | 4.82 | 9698 |
| | | 2.07 | 6.64 | 5.64 | 9771 |
| | | 3.45 | 7.18 | 5.81 | 9757 |

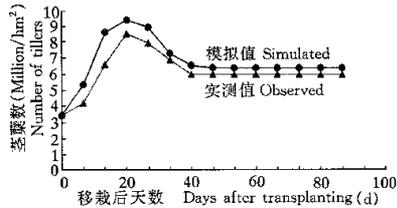
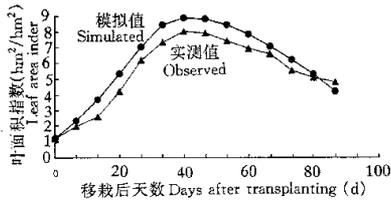


图5 叶面积指数模拟值与实测值的比较(嘉兴,1990,品种秀水620)

图6 茎蘖数模拟值与实测值的比较(嘉兴,1990,品种秀水620)

Fig.5 Comparison of simulated and observed leaf area index (vc. Xiushui 620, Jiaxing, 1990)

Fig.6 Comparison of simulated and observed number of tillers (vc. Xiushui 620, Jiaxing, 1990)

表6 高产群体各生育期的最适叶面积指数、单位面积茎蘖数、单茎干物质重和单茎叶面积(嘉兴,1990,品种秀水620)

Table 6 Optimum leaf area index, tillers, single stem's dry weight and single stem's leaf area in different development stages of high yield population (vc. Xiushui 620, Jiaxing, 1990)

| 生育期 Development stages | DS 值 DS values | 最适叶面积指数 Optimum leaf area index (hm ² /hm ²) | 最适茎蘖数 Optimum number of tillers (× 10 ⁶ 个/hm ²) | 最适单茎干物质质量 Optimum dry weight per stem (g) | 最适单茎叶面积 Optimum leaf area per stem (cm ²) |
|---------------------------|-------------------|--|---|--|--|
| 移栽期 ^① | 0.38 | 0.09 | 0.40 | 0.17 | 22.50 |
| 拔节期 ^② | 0.63 | 5.15 | 6.63 | 0.59 | 77.68 |
| 孕穗期 ^③ | 0.93 | 8.40 | 6.32 | 1.51 | 132.91 |
| 抽穗期 ^④ | 1.00 | 8.29 | 6.19 | 1.78 | 133.93 |
| 成熟期 ^⑤ | 2.00 | 3.83 | 6.19 | 3.25 | 61.87 |

①Transplanting stage ②Jointing stage ③Boot stage ④Heading stage ⑤Maturity stage

表7 高产群体成熟期的最适单位面积粒数、结实率、单茎粒数和粒叶比(嘉兴,1990,品种秀水620)

Table 7 Optimum grains per aera, bearing percentage, grains per stem and ratio of grains to leaf area in maturity stage of high yield population (vc. Xiushui 620, Jiaxing, 1990)

| 最适总粒数 Optimum total grains (× 10 ⁶ 粒/hm ²) | 最适实粒数 Optimum filled grains (× 10 ⁶ 粒/hm ²) | 结实率 Bearing percentage (%) | 最适单茎总粒数 Optimum total grains per stem | 最适单茎实粒数 Optimum filled grains per stem | 最适总数粒数 Optimum total grains per leaf area (粒/cm ²) | 最适实粒数 Optimum filled grains per leaf area (粒/cm ²) |
|--|---|-------------------------------|--|---|---|---|
| 625 | 517 | 82.24 | 100.97 | 83.52 | 1.63 | 1.35 |

参考文献

[1] 凌 励. 水稻高产群体质量指标及其调控技术与应用. 见: 凌启鸿主编. 水稻群体质量理论与实践. 北京: 中国农业出版社, 1995. 10 ~ 21.

[2] 凌启鸿, 张洪程, 蔡建中, 等. 水稻高产群体质量指标及其优化控制探讨. 见: 凌启鸿主编. 水稻群体质量理论与实践. 北京: 中国农业出版社, 1995. 34 ~ 46.

[3] 凌启鸿, 苏祖芳, 张海泉. 水稻成穗率与群体质量的关系及其影响因素的研究. 见: 凌启鸿主编. 水稻群体质量理论与实践. 北京: 中国农业出版社, 1995. 45 ~ 61.

[4] 孙永飞, 王兴槐, 杨和兴, 等. 从华南华中稻作区气候生态分析水稻超高产障碍因子、限制因子及突破途径. 见: 严力蛟, 等主编. 生态研究与探索. 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 98 ~ 99.

[5] 高亮之, 黄 耀, 金之庆. 水稻计算机模拟模型及其应用之二——水稻最适群体结构动态的决策模型. 中国农业气象, 1989, 10(4): 1 ~ 6.

[6] Yan Lijiao. Simulation of potential production of early-maturing japonica rice. In: IRRI ed. Case studies in crop growth simulation. Manila: IRRI, 1991. 177 ~ 188.

[7] 严力蛟, 王兆骞, 陆其华, 等. 连作晚粳稻生产潜力的模拟及其应用研究. 浙江农业大学学报, 1991(增刊7): 54 ~ 65.

[8] 德威 C T, 等著. 农作物同化、呼吸和蒸腾的模拟. 裴鑫德, 等译. 北京: 科学出版社, 1987.

[9] Penning de Vries F W T, Jansen D M, ten Berge H F M, et al. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Wageningen: Indoc, 1989.

[10] 彭宁德, 弗里 F W T, 拉文 H H, 等著. 植物生长与作物生产的模拟. 王馥棠, 等译. 北京: 科学技术出版社, 1988.