

运用 WOFOST 模型对浙江水稻潜在生长过程的模拟与验证

谢文霞¹ 严力蛟² 王光火¹

(¹浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310029; ²浙江大学 农业生态研究所, 浙江 杭州 310029)

Simulation and Validation of Rice Potential Growth Process in Zhejiang by Utilizing WOFOST Model

XIE Wen-xia¹, YAN Li-jiao², WANG Guang-huo¹

(¹College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; ²Agroecology Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: A crop growth model of WOFOST was calibrated and validated through rice field experiments conducted from 2001 to 2004 in Jinhua and Hangzhou, Zhejiang Province. For the late rice variety Xiushui 11 and hybrid rice Xieyou 46, the model was calibrated to obtain parameter values using the experimental data of years 2001 and 2002, then the parameters were validated by the data of 2003. For single cropping hybrid rice Liangyoupeijiu, data of 2004 and 2003 were used for calibration and validation, respectively. WOFOST model was good in simulating rice potential growth process in Zhejiang. It can be used to analyze the process of rice growth and yield potential. The potential yield obtained from WOFOST was about 8100 kg/hm² for late rice and 9300 kg/hm² for single cropping rice. The current average yield is only about 78% (late rice) and 70% (single cropping rice) of their potential yields. The results also showed that the current practice of management at the middle and late growth stages of rice should be reexamined and improved to reach optimal rice growth.

Key words: simulation; calibration; model; rice; yield; crop growth process

摘 要: 通过 2001~2003 年在金华市和 2004 年在杭州市的水稻田试验,应用 WOFOST 模型对浙江水稻潜在生长进行了模拟和验证。对于常规晚稻秀水 11 和杂交晚稻协优 46,用 2001 年和 2002 年的试验数据作参数校正,得到一套参数后,用 2003 年试验数据作模型验证;对于单季稻两优培九,则以 2004 年试验数据用于校正,2003 年的用于验证。通过对几种水稻品种模拟结果的综合分析,主要结论如下:WOFOST 模型可以成功地用于浙江主要水稻品种潜在生长过程的模拟,可以较好地分析浙江水稻的生长过程和产量潜力。由 WOFOST 模型计算得到浙江中部地区连作晚稻的生产潜力为 8100 kg/hm²左右,中稻为 9300 kg/hm²左右。目前两种水稻的实际平均产量分别为模拟产量的 78%和 70%。判断结果表明,有必要对目前水稻中、后期的田间管理措施进行重新审视。

关键词: 模拟; 验证; 模型; 水稻; 产量; 作物生长过程

中图分类号: S126; S511

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2006)03-0319-05

作物生长模拟是从 20 世纪 60 年代发展起来的一门新兴学科,它综合了计算机技术、作物生理学、作物生态学、农业气象学、土壤学、农艺学和系统学等多学科的知识,将作物及其生态环境因子作为一个整体,定量描述作物生长、发育、产量形成及其与环境和技术之间的动态关系^[1]。

WOFOST 模型是荷兰瓦赫宁根大学和世界粮食研究中心共同开发研制的作物生长模拟模型^[2],自面世以来得到了很大的发展,模型已从 WOFOST 3.1 发展到 WOFOST7.1 并在国外的许多地区得到了应用,但在国内仅有邬定荣等利用冬小麦验证了它在华北平原的适用性^[3]。

在浙江省的粮食生产中,水稻占有举足轻重的地位。从历年统计数据看,浙江省水稻播种面积和产量分别占粮食作物播种面积、总产的 70%和 83%左右,约 95%的居民以稻米为主要口粮。因此全面分析浙江水稻生产潜力,对推进浙江水稻生产、促

进稻农增收和保障粮食安全具有重要意义。

近年来,浙江水稻种植的内部结构发生明显变化^[4]。早稻、单季稻、连作晚稻播种面积占水稻总播种面积的百分比,1998 年分别为 37.3%、20.4%和 42.3%,2002 年已调整为 18.8%、58.1%和 23.1%。单季稻已经成为水稻生产的主体。

本研究运用 WOFOST7.1 模型中作物潜在生长模拟的原理和技术,对浙江地区单季稻和连作晚稻的生长过程和产量潜力进行模拟验证,得出适合于浙江水稻的有关参数,通过水稻模拟生长和潜在产量与实际生长过程和产量对比分析,为下一步利用 WOFOST 模型来分析浙江农村现行水稻田间施肥管理的不足之处提供依据。

收稿日期: 2005-08-16; 修改稿收到日期: 2005-12-23。

基金项目: 欧共体国际合作资助项目(ICA4-CT-2001-10055)。

第一作者简介: 谢文霞(1978-),女,博士研究生。

1 材料与方法

1.1 水稻田间试验

1.1.1 田间试验设计

2001—2003 年试验在浙江省金华市农业科学研究所试验场(28°32'N, 119°1'E)进行。供试品种分别为常规晚稻秀水 11, 杂交晚稻协优 46 和中稻两优培九。其中秀水 11 和协优 46 进行了 3 年(2001—2003 年)连续试验而两优培九只在 2003 年进行了试验。小区面积 30 m², 4 次重复, 完全随机区组排列。2 个氮肥水平: 不施 N(N₀)和施 N(N₁) 180 kg/hm², 氮磷钾化肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。氮肥基肥施 40%, 移栽后 5~7 d 以及幼穗分化期取样后分别施 30%; 磷肥 23 kg/hm² (纯 P)和钾肥 100 kg/hm² (纯 K)全部作基肥。秀水 11 和协优 46 分别于 6 月下旬和 6 月中旬播种, 7 月下旬移栽, 10 月下旬收获。两优培九于 2003 年 5 月 25 日播种, 6 月 20 日移栽, 10 月上旬收获。

2004 年田间试验在浙江大学华家池校区试验农场(30°14'N, 120°10'E)进行。供试品种为两优培九。小区面积 16 m², 3 次重复, 完全随机排列。施肥处理同 2001—2003 年试验。行株距为 20 cm × 20 cm。于 2004 年 5 月 20 日播种, 6 月 17 日移栽, 10 月 14 日收获。

田间管理均采取浅水淹灌, 中期不晒田, 控制病虫害和杂草。

1.1.2 作物要素测定

对于 2001—2003 年试验, 每隔 7~10 d 在每个小区选择生长均匀处平土收割 5 丛, 立即带回实验室, 将整株分为叶、茎+叶鞘+叶耳、穗(抽穗后)三部分, 分别放入烘箱内, 70℃ 下烘至恒重, 在烘箱内放凉后称量。成熟期在每个小区收割 125 丛(5 m²), 测产。叶面积通过叶干质量换算得来。两优培九的换算系数通过 2004 年的试验获得, 而秀水 11 和协优 46 采用郑志明等的数据^[5]。

对于 2004 年试验分别于移栽期、分蘖中期、幼穗分化期、抽穗期、灌浆中期、生理成熟期以及各生育期之间每隔 7~10 d 取样 1 次, 分离后的叶片迅速放入扫描仪扫描, 然后通过专用的计算机软件计算叶面积。扫描后的叶片、茎+叶鞘+叶耳以及穗分别放入烘箱内, 70℃ 条件下烘至恒重, 在烘箱内放凉后称量。成熟期测产同上。

1.1.3 气象要素收集

根据模型需要收集的气象数据包括日最高气温、日最低气温、太阳总辐射、湿度、降雨量、风速。

气象资料分别来自金华气象站和杭州气象站。

1.2 模型描述

WOFOST 模型是一个动态的解释性模型。它描述作物的基本生理过程, 如光合作用、呼吸作用等, 并描述这些过程如何受环境的影响。该模型在特定的土壤和气候条件下对一年生作物进行生长模拟, 模拟的基础是作物生理生态过程, 主要包括同化作用、呼吸作用、蒸腾作用和干物质的分配等。

该模型可以模拟潜在生长、水分限制和养分限制 3 种水平下的作物生长, 潜在生长条件是保证营养元素和水分等能有最佳的供应, 作物产量由辐射、温度和作物特性决定; 水分限制生产条件, 假设营养元素的供给仍然是最佳的, 但要考虑土壤有效水对蒸发和作物产量的影响; 养分限制条件要考虑 N、P、K 三种大量元素对作物产量的影响。结合本研究目的, 这里只对模型潜在生长条件下的模拟进行分析。

潜在生长条件下, WOFOST 中通过考虑当地的大气透射系数、直射光和漫射光、冠层对光的反射和散射以及光的吸收等来详细地描述冠层对光的截获^[6]。方程(1)给出了冠层不同层面截获光有效辐射的计算公式。

$$R_{p,1} = R_p(1 - \rho)e^{(-k \cdot L)}; \tag{1}$$

式中, R_{p,1} 为 I 层截获的光合有效辐射[J/(m² · s)], R_p 为冠层顶部的光合有效辐射[J/(m² · s)], ρ 为冠层的反射系数, k 为消光系数, L 为 I 层的叶面积系数(m²/m²)。

总同化速率的计算如方程(2)所示。

$$A = A_M[1 - e^{(-\epsilon \cdot R_{p,1}/A_M)}]; \tag{2}$$

其中, A 为总同化速率[以同化的 CO₂ 计, kg/(hm² · h)], A_M 为光饱和时的总同化速率[以同化的 CO₂ 计, kg/(hm² · h)], ε 为吸收光的初始利用效率[以同化的 CO₂ 计, (kg · hm⁻² h⁻¹)/(J · m⁻² s⁻¹)]。

发育阶段由积温或日长计算。温度对作物发育阶段的影响, 可以用方程(3)进行计算; 日长对发育阶段的影响可以用方程(4)、(5)进行计算。

$$D = \frac{\int T_e}{T_{req}}; \tag{3}$$

$$F_{pr} = \frac{P - P_c}{P_o - P_c}; 0 \leq F_{pr} \leq 1; \tag{4}$$

$$D = F_{pr} \cdot \frac{\int T_e}{T_{req}}; \tag{5}$$

其中, D 代表作物的发育阶段, T_e 代表每天作物生长的有效积温, T_{req} 代表营养生长和生殖生长分别所需的积温总和, P 代表日长, P_o 代表最佳日

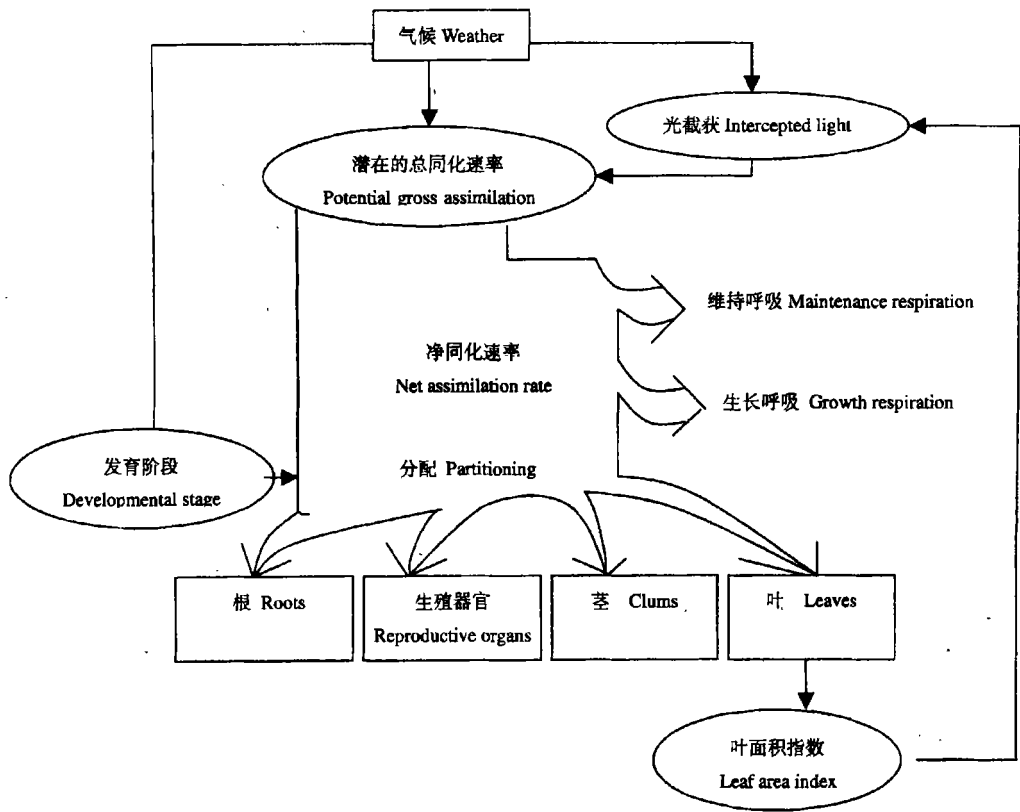


图 1 WOFOST 模型中作物潜在生长的简化结构

Fig. 1. Simplified general structure of a dynamic, explanatory crop growth model at potential level of WOFOST.

长, P_c 代表临界日长, F_{pr} 代表日长降低因子。

作物生产的总同化物中部分被用于维持呼吸而消耗,剩下的则转化成结构干物质,在转化过程中又通过生长呼吸作用消耗一部分,剩余产生的干物质在根、茎、叶和贮存器官中进行分配,分配系数随发育阶段的不同而不同。叶片又按日龄分组,在作物的发育阶段中,有一些叶片由于老化而死亡。各器官的总量通过对每日的总同化量进行积分得到。流程图如图 1。

2 结果与分析

WOFOST 模型用 FST (Fortran Simulation Translator) 语言编写。模型规定,用 $DVS=0、1、2$ 分别表示播种、抽穗和成熟,其中 $DVS=0\sim1$ 为营养生长, $DVS=1\sim2$ 为生殖生长。模拟在 Windows 环境下运行。

2.1 修正后的模型参数

本研究中作物参数除了参考 WOFOST 模型作物文件中自带的部分参数值以及查阅有关文献资料外^[5-12],主要通过田间和室内试验对不同品种的水稻特征参数进行了相应的测定。2001 年和 2002 年的试验数据(秀水 11 和协优 46)以及 2004 年数据

(两优培九)用于参数校正。模型中经过修正的参数和生成元函数分别列于表 1 和表 2。在表 1 中, TSUM1 为出苗到开花的积温; TSUM2 为开花到成熟的积温; DVS1 为开始模拟时的发育阶段; TDWI 为初始作物总干质量; LAIT 为移栽时的叶面积指数; RGRLAI 为叶面积指数的最大日增量。表 2 中 SLATB、FRTB、FLTB、FSTB、AMAXTB、KDIFTB 分别为比叶面积、根干物质的积累、叶干物质的积累、茎干物质的积累、最大 CO_2 同化速率以及散射光的消光系数对发育阶段(DVS)的生成元函数; EFFTB 为单叶光能利用率对日均温的生成元函数。

2.2 模型的验证及分析

将经过修正后的参数输入模型,经模拟得到输出结果,将模拟结果与田间实际测定结果相比较。3 个品种均用 2003 年的试验数据进行验证。

2.2.1 水稻生长过程

3 个品种的叶面积系数、茎质量、穗质量和地上部分干物质质量的模拟值和实测值的比较如图 2 所示。从图中可以看出,3 个品种的模拟值高于实测值,但模拟值与实测值的变化趋势基本一致,表明该模型能较好地模拟水稻生长过程的动态变化,且模拟的潜在产量也与近年来高产记录接近。因此可以

表 1 经过修正的参数

Table 1. Revised parameters.

取值 Value	出苗到开花 的积温 TSUM1 /(℃·d)	开花到成熟 的积温 TSUM2 /(℃·d)	开始模拟时的 发育阶段 DVSI	初始总干质量 TDWI /(kg·hm ⁻²)	移栽时叶面积指数 LAIT	叶面积指数最大日增量 RGRLAI /(hm ² ·hm ⁻² ℃ ⁻¹ d ⁻¹)
A	1730	530	0.38	100	0.01	0.0080
B	1640	480	0.38	100	0.01	0.0070
C	1800	750	0.23	40	0.01	0.0070

注: A 代表秀水 11, B 代表协优 46, C 代表两优培九。表 2 同。
Note: A, B, C stand for Xiushui 11, Xieyou 46, Liangyoupei9, respectively. The same as in Table 2.
TSUM1, Temperature sum from emergence to flowering; TSUM2, Temperature sum from flowering to maturity; DVSI, Developmental stage at simulation initialization; TDWI, Total dry weight at initialization; LAIT, LAI at transplanting; RGRLAI, Maximum relative increase in LAI.

表 2 经过修改的生成元函数

Table 2. Revised functions.

函数 Function	数值 Value
比叶面积对发育阶段 SLATB	A:0.00, 0.0030, 0.61, 0.0030, 0.80, 0.0029, 1.00, 0.0025, 1.55, 0.0025, 2.00, 0.0018 B:0.00, 0.0037, 0.43, 0.0037, 0.74, 0.0030, 0.84, 0.0030, 1.00, 0.0029, 2.10, 0.0021 C:0.00, 0.0075, 0.18, 0.0075, 0.65, 0.0024, 1.00, 0.0024, 1.55, 0.0023, 2.00,0.0019
根干物质积累对发育阶段 FRTB	A:0.00, 0.45, 0.43, 0.45, 0.80, 0.35, 0.85, 0.00, 1.00, 0.00, 2.00, 0.00 B:0.00, 0.50, 0.43, 0.35, 0.65, 0.50, 0.80, 0.25, 0.85, 0.05, 0.99, 0.05, 1.00, 0.00, 2.00, 0.00 C:0.00, 0.40, 0.25, 0.20, 0.40, 0.20, 0.50, 0.50, 0.70, 0.40, 0.72, 0.00, 1.00, 0.00, 2.00, 0.00
叶干物质积累对发育阶段 FLTB	A:0.00, 0.65, 0.50, 0.62, 0.60, 0.57, 0.70, 0.57, 0.80, 0.38, 1.00, 0.00, 2.10, 0.00 B:0.00, 0.65, 0.50, 0.62, 0.60, 0.57, 0.70, 0.57, 0.80, 0.40, 0.85, 0.13, 1.00, 0.00, 2.10, 0.00 C:0.00, 0.65, 0.31, 0.65, 0.53, 0.57, 0.80, 0.35, 0.94, 0.20, 1.00, 0.15, 1.13, 0.00, 2.00, 0.00
茎干物质积累对发育阶段 FSTB	A:0.00, 0.35, 0.50, 0.38, 0.60, 0.43, 0.70, 0.43, 0.80, 0.62, 1.00, 0.40, 1.20, 0.00, 2.10, 0.00 B:0.00, 0.35, 0.50, 0.38, 0.60, 0.43, 0.80, 0.60, 0.85, 0.35, 1.00, 0.30, 1.20, 0.00, 2.10, 0.00 C:0.00, 0.35, 0.53, 0.43, 0.80, 0.65, 0.94, 0.50, 1.00, 0.15, 1.13, 0.00, 1.20, 0.00, 2.00, 0.00
最大 CO ₂ 同化率对发育阶段 AMAXTB	A:0.00, 40, 1.00, 40, 1.90, 40, 2.00, 40 B:0.00, 40, 0.75, 50, 0.85, 50, 1.00, 35, 1.90, 35, 2.00, 35 C:0.00, 50, 0.20, 45, 0.35, 40, 0.70, 40, 0.80, 50, 2.00, 50
散射光消光系数对发育阶段 KDIFTB	A: 0.00, 0.40, 0.65, 0.40, 1.00, 0.60, 2.00, 0.60 B: 0.00, 0.40, 0.65, 0.40, 1.00, 0.60, 2.00, 0.60 C: 0.00, 0.40, 0.65, 0.40, 1.00, 0.60, 2.00, 0.60
单叶光能利用率对日均温 EFFTB	A:10, 0.54, 40, 0.36 B:10, 0.54, 40, 0.36 C:10, 0.54, 40, 0.36

SLATB, Specific leaf area as a function of developmental stages; FRTB, Fraction of total dry matter to roots as a function of developmental stages; FLTB, Fraction of aboveground dry matter to leaves as a function of developmental stages; FSTB, Fraction of aboveground dry matter to culms as a function of developmental stages; AMAXTB, Maximum leaf CO₂ assimilation rate as a function of developmental stages; KDIFTB, Extinction coefficient for diffuse visible light as a functional of developmental stages; EFFTB, Light use efficiency for single leaf as a function of daily mean temperature.

说 WOFOST 模型基本适合于浙江金华地区水稻的模拟研究。

模拟值和实测值的差距是由于试验田除气候以外的生产条件还未达到最佳,水稻产量还有很大潜力可挖。但是水稻一直处于浅水淹灌状态,应该无水分享问题,亦无明显病虫害问题。因此造成这种差异的主要原因可能是在实际的田间管理过程中仍存在许多需要改善的地方,比如养分供应不平衡、中后期出现 N 素供应不足等^[11]。

2.2.2 水稻产量

应用 2001—2004 的试验数据,WOFOST 模拟所得的产量秀水 11 为 8000 kg/hm²,协优 46 为 8100 kg/hm²,两优培九为 9300 kg/hm²,这与当地

的一些高产记录相符。金华市农业局的统计资料表明,1998—2002 年 5 年间金华地区晚稻的平均单产约为 6300 kg/hm²,中稻约为 6500 kg/hm²。考虑到协优 46 和两优培九均为该地区的当家品种,现行晚稻和中稻的平均产量分别约相当于其模拟产量的 78%和 70%,实际产量和模拟产量的差距较大。因此有必要对现行的栽培措施,特别是对水稻生长中后期的田间管理措施进行重新审视,通过优化水肥管理,改善水稻生长环境,可望较大幅度地提高水稻单位面积的产量,特别是中稻。

3 讨论

通过本研究可以看出,WOFOST 模型对金华

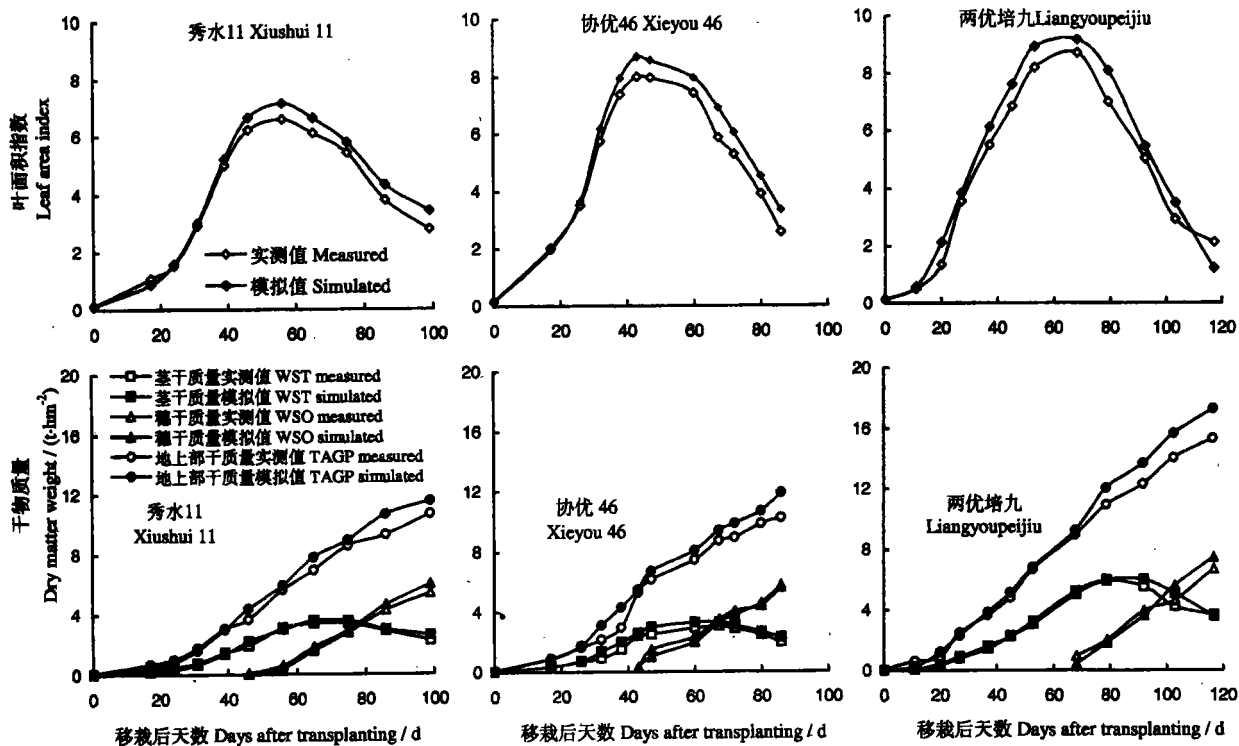


图 2 水稻生产过程中模拟值和实测值的比较(2003 年)

Fig. 2. Comparison of simulated results and measured values for rices (2003).

图中 WST、WSO 和 TAGP 分别为茎干质量、穗干质量和植株地上部干质量。

WST, WSO and TAGP are dry weight of living culms, living storage organs and total above-ground production, respectively.

地区几种水稻的潜在动态生长过程模拟较好,用于浙江地区水稻的生长模拟分析是基本适合的。

WOFOST 模型计算结果表明,金华地区连作晚稻和中稻的平均产量分别相当于它们潜在产量的 78% 和 70%,因此,较大幅度地提高该地区的水稻单位面积产量,特别是单季中稻产量,是有可能的。

田间试验的水稻与理想状况存在差异,即在生长过程中可能受到胁迫,这是可以肯定的。这在水稻实测值偏离(低于)水稻潜在生长曲线中得到体现。水稻一直处于浅水淹灌状态,应该无水分亏缺问题,亦无明显病虫害问题,这种差异的产生可能与养分管理不善有关。这种偏离在水稻生育中后期比较明显的原因可能是水稻中后期养分供给不能满足水稻的生理需求。有研究表明^[12],当地农民施肥重前期、轻中后期的现象十分普遍,水稻生育前期往往养分供应充足,中后期则供应不足,特别是氮素供应不足。这也是我们准备进一步利用 WOFOST 模型进行探讨的问题。

参考文献：

[1] 杜华平. 作物生长模型浅析. 上海农业科技, 1999(3): 2-4.
[2] Boogaard H L, van Diepen C A, Rotter R P. et al. User's

Guide for the WOFOST7. 1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center. DLO Wageningen; Winand Staring Centre, 1998: 1-40.

[3] 郭定荣, 欧阳竹, 赵晓敏. 作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究. 植物生态学报, 2003, 27(5): 594-602.
[4] 方福平, 章福福, 王丹英. 浙江省水稻生产潜力及科技对策探讨. 浙江农业科学, 2004(5): 237-239.
[5] 郑志明, 严力蛟, 陈进红, 等. 未来 CO₂ 浓度增加和相应增温对水稻产量影响的模拟——以浙江省为例. 应用生态学报, 1998, 9(1): 79-83.
[6] Supit I, Hooijer A A, van Diepen C A, et al. System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented in CGMS. Brussels: Jont Research Centre EC, 1994: 144-145.
[7] 王秀珍, 黄敬峰, 李云梅. 水稻叶面积指数的多光谱遥感估算模型研究. 遥感技术与应用, 2003, 18(2): 57-65.
[8] 严力蛟, 王兆骞, 杜建生, 等. 水稻生长模拟模型的组建与验证. 生物数学学报, 1998, 13(2): 223-229.
[9] 郑志明, 严力蛟, Kropff M J, 等. 灌溉水稻生长发育和潜力产量的模拟模型. 生物数学学报, 1996, 11(4): 140-145.
[10] Diepen C A, Rappoldt C. Crop growth simulation model WOFOST. Documentation Version 4.1. Wageningen; Centre for World Food Studies, 1988.
[11] 吕川根, 邹江石. 两系法亚种间杂交稻两优培九的选育与应用. 杂交水稻, 2000, 15(2): 4-5.
[12] Wang G H, Dobermann A, Witt C, et al. Performance of site-specific nutrient management for irrigated rice in Southeast China. Agron J, 2001, 93: 869-878.