

FACE 水稻生育期模拟

孙成明¹, 庄恒扬¹, 杨连新¹, 杨洪建¹, 黄建晔¹, 董桂春¹, 朱建国², 王余龙^{1,*}

(1. 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 利用农田开放式空气 CO₂ 浓度增高 (FACE) 技术平台, 设置大气 CO₂ 浓度比对照高 200 μmol mol⁻¹ 的 FACE 处理和不同的施 N 量水平, 以水稻钟模型为基础, 构建了 FACE 水稻生育期模拟模型。通过不同年度试验数据的检验, 表明模型对 CK 及 FACE 条件下水稻不同生育期天数的预测性能好。不同生育期预测误差的根均方差 (RMSE) 最大为 2.64 d, 最小只有 0.15 d, 且相关系数均达到了极显著水平。说明 FACE 水稻生育期模型具有较高的预测性和适用性。

关键词 水稻; FACE; 生育期; 模拟模型

文章编号: 1000-0933 (2007) 02-0613-07 中图分类号: S314, S511 文献标识码: A

A simulation of growth duration in FACE rice

SUN Cheng-Ming¹, ZHUANG Heng-Yang¹, YANG Lian-Xin¹, YANG Hong-Jian¹, HUANG Jian-Ye¹, DONG Gui-Chun¹, ZHU Jian-Guo², WANG Yu-Long^{1,*}

1 Jiangsu Province Key Lab of Crop Genetics and Physiology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27 (2): 613 ~ 619.

Abstract: Global atmospheric CO₂ concentration ([CO₂]) was projected to reach levels of 650–780 μmol mol⁻¹ at the end of this century (IPCC, 2000). The increasing atmospheric [CO₂] and associated climate may greatly affect agricultural productivity worldwide. However, little was known about the effect of free-air CO₂ enrichment (FACE) on growth duration of rice. In order to predict the changes of growth duration of rice under FACE condition, we conducted a FACE experiment at Anzhen (31°37'N, 120°28'E), Wuxi, Jiangsu province, in 2001–2003.

The FACE facility consisted of three FACE rings (three repetitions) and five ambient rings, and the ambient rings were 90 m apart to avoid contamination of elevated CO₂. Rice were grown from transplanting to harvest under two levels of [CO₂] for three consecutive years (2001–2003), and the target [CO₂] of the FACE rings was 200 μmol mol⁻¹ above that in the ambient air. The annual mean temperature was about 16°C, the annual mean rainfall was 1150 mm and the annual sunshine hours were 2000 h in the experiment area.

The experiment was conducted in 3 years using the japonica cultivar Wuxiangjing 14. Seeds were sowed on 18 May and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30270777, 30471013), 国家自然科学基金重大国际合作研究资助项目 (40120140817), 中国科学院知识创新重要方向资助项目 (KZCX-2-408, KSCX3-SW-440)

收稿日期: 2005-12-06; 修订日期: 2006-04-20

作者简介: 孙成明 (1973 ~) 男, 江苏宿迁人, 博士, 主要从事作物栽培生理及其模拟系统研究. E-mail: zmsun@yzu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: ylwang@yzu.edu.cn

致谢: 本研究得到顾世梁教授的帮助, 特此致谢!

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30270777, 30471013), Great International Cooperation Research of National Natural Science Foundation of China (No. 40120140817) and Key Direction Research of Knowledge Innovation in Chinese Academy of Science (No. KZCX-2-408, KSCX3-SW-440)

Received date 2005-12-06; **Accepted date** 2006-04-20

Biography SUN Cheng-Ming, Ph. D. mainly engaged in crop cultivation and physiology and their simulations. E-mail: zmsun@yzu.edu.cn

seedlings were hand transplanted with 3 plants each hill on 13 June. Hills and rows were 16.7 and 30 cm apart, respectively (equivalent to 24 hill m^{-2}). Three levels of N application were :150 kg/hm^2 (low ,LN),250 kg/hm^2 (medium ,MN) and 350 kg/hm^2 (high ,HN). To calculate the days of main growth duration of rice in both ambient and FACE plots , 10 hills per experiment plot were selected and marked to investigate leaf age. Results showed that :the mean days from sowing to heading ,from heading to maturity and the whole growth duration of rice shortened 3—4.5 d (mean value 3.4 d) , 2—3 d (mean value 2.4 d) and 5—7.5 d (mean value 5.8 d) in FACE treatment compared with CK. Increasing of nitrogen application rate could weaken the effect of FACE on growth duration.

In order to describe these changes and predict the growth duration of rice , we developed a growth duration model of rice in FACE condition based on the “rice clock model ”. The factor of N contents in rice plants was introduced to adjust the growth duration model in FACE rice. The model was tested with different experimental data and the errors between simulated days and observed days in the CK and FACE conditions were small , with the RMSE in different growth duration from the biggest 2.64d to the smallest 0.15d. The results showed that the growth duration model in FACE rice was not only accurate but also applicable.

Key Words :rice ; free-air CO_2 enrichment ; growth duration ; simulation model

在作物生长模拟研究中 ,生育期的模拟尤为重要 ,它控制着作物生长模拟在不同发育阶段相应的子模型或模型参数^[1]。因此掌握不同水稻品种 (组合)在不同环境条件下生育期长短的变化规律 ,对水稻的栽培管理、引种、育种等有着重要的指导意义。在水稻生育期模拟中 ,比较有代表的是 “积温说 ”^[2~4]和 “水稻发育速率与温度呈非线性关系 ”等^[5,6] ,较好地描述了水稻发育速度随温度的变化过程。水稻是我国最主要的粮食作物 ,20 世纪 90 年代以来 ,水稻生育期模拟模型的研究有了很大的发展 ,水稻生育期的预测水平也有了较大的提高^[7~14]。特别是高亮之等^[10]提出的作物发育 “钟模型 ”以及曹卫星等^[15~17]提出的以生理发育时间为尺度预测作物发育进程的方法体系 ,进一步推动了水稻生育期模拟与预测研究的发展。但现有的水稻生育期模型还难以反映大气 CO_2 浓度变化对生育期的影响。地球大气中 CO_2 浓度迅速升高已是不争的事实 ,作物生长将逐步面临高 CO_2 浓度的大气环境。开放式空气 CO_2 浓度增高 (FACE)对水稻生育期具有明显的影响 ,Kobayashi 等^[18]报道 FACE 使水稻播种-抽穗期天数缩短了 2d ,黄建晔等^[19]分析了 FACE 对水稻播种—抽穗期、抽穗—成熟期以及全生育期天数的影响。但这些研究均未能模拟 FACE 对水稻生育期的影响。为此 ,本研究借助我国惟一的农田 FACE 系统平台 ,设置不同的施 N 量处理 ,对 FACE 条件下水稻生育期的变化进行了模拟研究 ,以期对未来大气 CO_2 浓度增高条件下我国稻作制度调整、水稻品种生育期选择及高产栽培技术措施等的制订提供相应的预测依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与设施

本研究的水稻 FACE 技术平台位于江苏省无锡市安镇镇年余农场 (31°37'N ,120°28'E)。土壤类型为黄泥土 ,年平均降水量 1150mm ,年平均温度约 16℃ ,年日照时间约 2000h ,年无霜期日数 230d。

FACE 技术平台共有 3 个 FACE 实验圈 (重复 3 次)和 5 个对照 (CK)圈。FACE 圈与 FACE 圈之间、FACE 圈与 CK 圈之间的间隔大于 90m ,以防止 CO_2 释放对其他圈 CO_2 的浓度造成影响。FACE 圈设计为正八角形 ,直径为 12m ,通过 FACE 圈周围的管道向 FACE 圈中心喷射纯 CO_2 气体 ,计算机控制 FACE 圈内 CO_2 浓度 ,使其全生育期 FACE 圈内的平均 CO_2 浓度保持在 570 $\mu\text{mol mol}^{-1}$,控制误差在 10% 以内。CK 田块没有安装 FACE 管道 ,环境条件与自然状态完全一致。

1.2 试验设计

试验 I 2001 年 ,大气 CO_2 浓度设 CK (370 $\mu\text{mol mol}^{-1}$)和比 CK 高 200 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 的 FACE 处理 (570

$\mu\text{mol mol}^{-1}$)2 个水平 ,施 N 量设 150kg/hm^2 (LN)、 250kg/hm^2 (MN)2 个水平 ,施 P 量设 35kg/hm^2 (LP)、 70kg/hm^2 (MP)2 个水平 ,共 8 个处理。

试验 II 2002 年 ,大气 CO_2 浓度设 CK ($370\mu\text{mol mol}^{-1}$)和比 CK 高 $200\mu\text{mol mol}^{-1}$ 的 FACE 处理 ($570\mu\text{mol mol}^{-1}$)2 个水平 ,施 N 量设 150kg/hm^2 (LN)、 250kg/hm^2 (MN)、 350kg/hm^2 (HN)3 个水平 ,施 P 量均为 70kg/hm^2 ,共 6 个处理。

试验 III 2003 年 ,大气 CO_2 浓度设 CK ($370\mu\text{mol mol}^{-1}$)和比 CK 高 $200\mu\text{mol mol}^{-1}$ 的 FACE 处理 ($570\mu\text{mol mol}^{-1}$)2 个水平 ,施 N 量设 150kg/hm^2 (LN)、 250kg/hm^2 (MN)、 350kg/hm^2 (HN)3 个水平 ,施 P 量均为 70kg/hm^2 ,共 6 个处理。

1.3 供试材料与栽培管理

供试品种为粳稻武香粳 14 号 3a 均为大田旱育秧 5 月 18 日播种 6 月 13 日人工移栽 ,行距为 25cm ,株距为 16.7cm ,每平方米 24 穴 ,每穴栽 3 苗。自移栽期起 ,大气 CO_2 浓度设 CK 和 FACE 处理 2 个水平。

2001 年施肥时间和施肥量为 6 月 12 日施基肥 (施 N 肥总量的 40%、P 肥总量的 65%) 6 月 18 日施分蘖肥 (施 N 肥总量的 20%、P 肥总量的 35%) 8 月 5 日施穗肥 (施 N 肥总量的 40%)。

2002、2003 年施肥时间和施肥量为 6 月 12 日施基肥 (HN 施 N 肥总量的 25.7%、MN 施 N 肥总量的 36%、LN 施 N 肥总量的 60%) 6 月 18 日施分蘖肥 (HN 施 N 肥总量的 34.3%、MN 施 N 肥总量的 24%、LN 不施 N 肥) 7 月 28 日施穗肥 (HN、MN、LN 各占 N 肥总量的 40%)。基肥和分蘖肥占施 N 肥总量的 60% ,穗肥占施肥总量的 40%。P 肥均作为基肥施用。

水分管理为 6 月 13 日~7 月 10 日保持浅水层 (约 5cm) 7 月 11 日~8 月 4 日进行多次轻搁田 8 月 5 日~收割前 7 日进行间隙灌溉。

适时进行病虫草害防治 ,水稻生长发育正常。

1.4 测定内容与方法

1.4.1 生育动态调查

移栽后每小区定点 10 穴 ,采用荧光彩色笔标记法每隔 5~7 日调查一次叶龄 ,记载播种期、移栽期、分蘖期、拔节期、抽穗期、抽穗后 15d、抽穗后 30d 和成熟期等主要生育时期 ,计算播种-抽穗期、抽穗-成熟期及全生育期的天数。

1.4.2 植株含 N 率的测定

分别在够苗期、拔节期、抽穗期每处理各取代表性植株 5 穴 ,测定地上部干重 ,然后用半微量蒸馏法测定植株含 N 率。

1.5 数据分析与验证

采用 EXCEL 等软件对有关基础数据进行归类、处理、作图等 ,用 Visual Basic 语言编制分析程序进行模型参数的校正和显著性分析。采用实测值与模拟值之间的根均方差 (RMSE) 表示模型的预测精度。

2 结果与分析

2.1 FACE 对水稻生育期的影响

FACE 对水稻不同生育时期天数的影响见表 1。由表 1 可知 ,在 2001、2002 及 2003 年的试验中 ,FACE 处理使水稻播种-抽穗期的平均天数分别比对照缩短 4.5、3.0、3.0d ,平均缩短了 3.4d ,使抽穗-成熟期的平均天数分别比对照缩短 3.0、2.7、2.0d ,平均缩短了 2.4d ,使全生育期的平均天数分别比对照缩短 7.5、5.5、5.0d ,平均缩短了 5.8d。另外 ,HN、MN、LN 条件下 ,FACE 处理使水稻播种-抽穗期的平均天数分别比对照缩短 3.0、3.3、3.7d ,使抽穗—成熟期的平均天数分别比对照缩短 1.0、2.0、4.0d ,使全生育期的平均天数分别比对照缩短 4.0、5.3、7.6d。增施 N 肥可以明显减缓 FACE 对水稻不同生育时期的缩短程度^[9]。

2.2 FACE 水稻生育期模拟模型

2.2.1 水稻基本生育期模型

本研究将水稻全生育期分为两个阶段 ,即 播种-抽穗期及抽穗-成熟期。模型以高亮之等^[10]的“水稻种

表 1 FACE 对水稻生育期的影响

| Table1 Effect on growth duration in FACE rice | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------------------------------|-------|-------|---------|----------------------------------|------|------|---------|------------------------------------|-------|-------|---------|--|
| N 处理 N treatment | CO ₂ 处理 CO ₂ treatment | 播种-抽穗期天数 | | | | 抽穗-成熟期天数 | | | | 全生育期天数 | | | | |
| | | Days from sowing to heading (d) | | | | Days from heading to mature (d) | | | | Days of whole growth duration (d) | | | | |
| | | 2001 | 2002 | 2003 | 平均 Mean | 2001 | 2002 | 2003 | 平均 Mean | 2001 | 2002 | 2003 | 平均 Mean | |
| HN | FACE | — | 101 | 100 | 100.5 | — | 58 | 60 | 59.0 | — | 159 | 160 | 159.5 | |
| | CK | — | 104 | 103 | 103.5 | — | 59 | 61 | 60.0 | — | 163 | 164 | 163.5 | |
| MN | FACE | 98 | 100 | 98 | 98.7 | 54 | 57 | 58 | 56.3 | 152 | 157 | 156 | 155.0 | |
| | CK | 102 | 103 | 101 | 102.0 | 56 | 59 | 60 | 58.3 | 158 | 162 | 161 | 160.3 | |
| LN | FACE | 96 | 99 | 97 | 97.3 | 52 | 53 | 55 | 53.3 | 148 | 152 | 152 | 150.7 | |
| | CK | 101 | 102 | 100 | 101.0 | 56 | 58 | 58 | 57.3 | 157 | 160 | 158 | 158.3 | |
| 平均 Mean | FACE | 97.0 | 100.0 | 98.3 | 98.8 | 53.0 | 56.0 | 57.7 | 56.2 | 150.0 | 156.0 | 156.0 | 155.1 | |
| | CK | 101.5 | 103.0 | 101.3 | 102.2 | 56.0 | 58.7 | 59.7 | 58.6 | 157.5 | 161.7 | 161.0 | 160.7 | |

HN 施氮量为 350 kg/hm² ;MN 施氮量为 250 kg/hm² ;LN 施氮量为 150kg/hm² Amount of nitrogen application was 350 kg/hm² ;MN :Amount of nitrogen application was 250 kg/hm² ;LN :Amount of nitrogen application was 150 kg/hm²

模型”为基础,参照甘维廉等^[11]的“水稻钟型”,对平均日照时数与临界日长的关系作了条件上的修改,不取原假设条件:当 $\bar{D} < D'$ 时令 $\bar{D} = D'$ 。根据于强等^[12]研究可知,抽穗前水稻对温、光均较敏感,因此抽穗前水稻发育速率的一般形式可表达如下:

$$R_1 = \frac{1}{V} = e^K \times \left(\frac{\bar{T} - T_L}{T_o - T_L} \right)^P \times \left(\frac{T_H - \bar{T}}{T_H - T_o} \right)^Q \times e^{G(\bar{D} - D')}$$

(1)

式中 R_1 为水稻抽穗前的发育速率; V 为特定生育期的天数; \bar{T} 为该生育期内的平均气温(℃); T_H 为水稻发育的上限温度(℃); T_L 为水稻发育的下限温度(℃); T_o 为水稻发育的最适温度(℃); \bar{D} 为该生育期内的平均日长(即日照时数的平均值); D' 为水稻发育临界日长。 K 、 P 、 Q 、 G 为模型的待定参数,其中 K 为基本营养性系数, P 为增温促进系数, Q 为高温抑制系数, G 为感光系数。

抽穗后水稻主要对温度敏感,日长的影响可以忽略^[12],因此抽穗后水稻发育速率的一般形式可用下式表示:

$$R_2 = \frac{1}{V} = e^K \times \left(\frac{\bar{T} - T_L}{T_o - T_L} \right)^P \times \left(\frac{T_H - \bar{T}}{T_H - T_o} \right)^Q$$

(2)

式中 R_2 为水稻抽穗后的发育速率。

2.2.2 FACE 对生育期影响的模拟

由表 1 可知,FACE 处理使水稻播种-抽穗期、抽穗-成熟期以及全生育期均明显缩短,这说明大气 CO₂ 浓度增高对水稻生育进程产生的是负效应。参照相关研究^[20~22],其影响函数表示如下:

$$F_{CO_2} = e^{\beta(Cx/C_o)}$$

(3)

式中 F_{CO_2} 为 CO₂对水稻生育期的影响因子; Cx 为变化后的大气 CO₂浓度; C_o 为对照的 CO₂浓度,即当前大气 CO₂浓度(370 μmol mol⁻¹); β 为方程系数。

2.2.3 施 N 量对生育期的影响

由表 1 可知,不同的 N 素处理对水稻生育期有一定的影响,常规条件下(CK)增施 N 肥使水稻的生育期延长,FACE 条件下增施 N 肥可以明显减缓 FACE 对水稻不同生育时期的缩短程度。在本研究条件下,FACE 处理使水稻生育期缩短与温度的变化无关,可能与植株体内 N 的含量变化有关。黄建晔等^[9]研究表明,水稻不同生育时期植株含 N 率与全生育期的天数均呈线性正相关,其中拔节期和抽穗期的相关系数均达到极显著水平。结合庄恒扬等^[23]作物生产系统氮磷养分平衡的定量模拟,假定实际施 N 量不超过作物最大产量施 N 量,将 N 素对生育期的影响表示如下:

$$F_N = 1 - 0.085 \times (NUP/NUP_{max})$$

(4)

$$NUP = NRC \times X_N + NUP_0 \tag{5}$$

式中 F_N 为施 N 量影响因子 , NUP 为水稻吸 N 量 , NUP_{max} 为水稻最大产量吸 N 量 , X_N 为施 N 量 ($g \cdot m^{-2}$) , NRC 为回收系数 (recovery coefficient) , NUP_0 为不施肥的吸 N 量。

2.3 模型参数的确定

在确定 K 、 P 、 Q 、 G 数值之前 ,先要对 T_H 、 T_L 、 T_O 和 D' 进行赋值。根据本研究所用品种 , $T_H = 40^{\circ}C$, $T_L = 10^{\circ}C$, $T_O = 28^{\circ}C$, $D' = 13h$ 。采用顾世梁等^[24]提出的非线性方程最优拟合的缩张算法以及迭代算法等 ,结合水稻品种抽穗前对温光均敏感、抽穗后只对温度敏感的特点 ,分阶段对本研究 2002 年的试验数据进行分析 ,所得参数值列于表 2 ,其中 NRC 在参照相关研究结果上得出^[25~27]。

表 2 FACE 水稻生育期模拟的参数值 (2002 年)

| Table 2 The parameter values of growth duration simulation in FACE rice (2002) | | | | | |
|---|-------|-------|--------|---------|-------|
| K | P | Q | G | β | NRC |
| -4.050 | 1.187 | 1.157 | -1.225 | 0.0272 | 0.350 |

2.4 模型的验证

选择 2001 年、2003 年的观测数据对 FACE 水稻生育期模拟模型的准确性进行验证 ,结果见表 3。由表 3 可以看出 ,CK 及 FACE 条件下不同 N 素处理生育期观测值与模拟值之间的 RMSE 均较小 ,最小为 0.15d ,最大为 2.64d ,平均为 1.26d。由相关分析可知 ,不同处理的模拟值与观测值之间的相对误差范围 2001 年在 $-0.02\% \sim 5.45\%$ 之间 ,平均为 1.59% 2003 年在 $-4.28\% \sim 1.20\%$ 之间 ,平均为 -0.60% 。两年的相关系数均在 0.99 以上 ,达到了极显著水平。这表明模型的模拟结果比较准确。

表 3 FACE 水稻不同生育时期实测与模拟天数的比较

| Table 3 Comparison between the observed and simulated days of different growth duration in FACE rice | | | | | | | |
|--|---------------------|---|---|--------|-------------------|-----------------------|------|
| 年份 Year | N 处理 N treatment | CO ₂ 处理 CO ₂ treatment | 不同生育时期天数 Days of different growth duration (d) | | | | RMSE |
| | | | 播种-抽穗 | | 抽穗-成熟 | 全生育期 | |
| | | | Sowing to heading | | Heading to mature | Whole growth duration | |
| 2001 | MN | CK | Observed | 102 | 56 | 158 | 2.64 |
| | | | Simulated | 102.02 | 59.23 | 161.25 | |
| | | FACE | Observed | 98 | 54 | 152 | 0.96 |
| | | | Simulated | 97.86 | 55.24 | 153.10 | |
| | LN | CK | Observed | 101 | 56 | 157 | 1.48 |
| | | | Simulated | 100.06 | 58.09 | 158.14 | |
| | | FACE | Observed | 96 | 52 | 148 | 1.77 |
| | | | Simulated | 95.98 | 54.18 | 150.15 | |
| 2003 | HN | CK | Observed | 103 | 61 | 164 | 0.71 |
| | | | Simulated | 103.59 | 60.00 | 163.59 | |
| | | FACE | Observed | 100 | 60 | 160 | 2.33 |
| | | | Simulated | 99.34 | 57.54 | 156.88 | |
| | MN | CK | Observed | 101 | 60 | 161 | 0.88 |
| | | | Simulated | 102.23 | 59.21 | 161.44 | |
| | | FACE | Observed | 98 | 58 | 156 | 0.98 |
| | | | Simulated | 98.04 | 56.78 | 154.82 | |
| | LN | CK | Observed | 100 | 58 | 158 | 0.15 |
| | | | Simulated | 100.17 | 58.02 | 158.19 | |
| | | FACE | Observed | 97 | 55 | 152 | 0.68 |
| | | | Simulated | 96.06 | 55.64 | 151.70 | |

3 结论与讨论

(1)关于大气 CO₂ 浓度增高对水稻生育期影响 ,Kim 等^[28]在温室条件下研究认为 ,CO₂ 浓度倍增处理使梗

稻品种秋光播种-抽穗的天数明显缩短,而且随着温度升高缩短的天数增加。Kobayashi 等^[18]研究认为,FACE 处理能使水稻开花期平均提前 2d。但 FACE 对水稻生育期影响的模拟研究却未见报道。本研究模拟了 FACE 条件下水稻生育期的变化情况,结果表明,模型对 CK 及 FACE 条件下水稻不同生育期天数的预测性能好,模拟天数与观测天数之间的误差较小。不同年度各生育期模拟值与观测值之间的 RMSE 最大为 2.64d,最小只有 0.15d。说明 FACE 水稻生育期模型具有较高的预测性和适用性。

(2)相关研究已经表明,随着大气中 CO₂ 浓度增高,水稻的生育期均有不同程度的缩短^[18,19,28]。因此准确模拟和预测大气 CO₂ 浓度的增高条件下水稻不同品种生育期的变化规律,对未来的稻作生产和粮食安全具有重要的理论和实践意义。本研究在“水稻钟模型”的基础上,引入了 CO₂ 及 N 素影响因子,比较全面地模拟了温度、日长、大气 CO₂ 浓度及施 N 量等对水稻生育期的影响,使模型更具代表性。

(3)本研究提出的 FACE 水稻生育期模拟模型具有一定的预测应用价值,但由于受到试验条件的限制,仅有一个地点的试验资料,加之相关的研究国内尚未见报道,因此预测的准确性还需作进一步的验证。此外,研究所用水稻品种单一(武香粳 14 为感光性较强的晚熟早粳品种),不能反映不同温光类型水稻品种的生育期对 FACE 的响应情况,这也是需要进一步研究的问题。

References :

[1] Zheng G Q. On the Simulation Model for Rice Development. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1999, 20 (2) 31—34.

[2] Russelle M P, Wilhelm W W, Olson R A. Growth analysis based on degree-days. *Crop Science*, 1984, 24 28—31.

[3] Thornley J H M, Johnson I R. *Plant and Crop Modeling — A Mathematical Approach to Plant and Crop Physiology*. Oxford :Clarendon Press. 66—193.

[4] McMaster G S, Wilhelm W W. Growing degree-days :One equation ,two interpretations. *Agric For Meteorol*, 1997, 877 291—300.

[5] Shen G Q. Nonlinear temperature module of effecting crop development rate. *Meteorology*, 1980, (6) 9—11.

[6] Yin X Y. A nonlinear model to quantify temperature effect on rice phenology and its application. *Acta Agronomica Sinica*, 1994, 20 (6) 692—700.

[7] Yin X Y, Kropff M J, Aggarwal P K, *et al.* Optimal preflowering phenology of irrigated rice for high yield potential in three Asian environments : a simulation study. *Field Crops Research*, 1997, 51 19—27.

[8] Yin X Y, Kropff M J, Horie T, *et al.* A model for photothermal responses of flowering in rice I. Model description and parameterization. *Field Crops Research*, 1997, 51 189—200.

[9] Yin X Y, Kropff M J, Nakagawa H, *et al.* A model for photothermal responses of flowering in rice II. Model evaluation. *Field Crops Research*, 1997, 51 201—211.

[10] Gao L Z, Jin Z Q, Huang Y, *et al.* Rice computer simulation model (RICESMOD) and its applications I :Rice clock model — A computer simulation model of rice development. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1989, 10 (3) 3—10.

[11] Gan W L, Li W, Chen L X, *et al.* The mathematic model and its application for different rice varieties during growth duration in Fujian. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1996, 17 (4) 1—7.

[12] Yu Q, Lu P L, Liu J D, Fu B P, Yao K M. Crop photo-temperature productivity model and numeric analysis of suitable growth season of rice in southern China. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14 (2) 163—168.

[13] Zhang J H, Li Y C, Yu X J. Numerical Study of Crop Phenological Law. *Acta Agronomic Sinica* 2000, 26 (5) 635—639.

[14] Liu T J, Yin X Y, Qi C H, *et al.* Relationships between climate change and rice development and its yield formation : A simulation study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (3) 486—490.

[15] Yan M C, Cao W Y, Luo W H, *et al.* A mechanistic model of phasic and phenological development of wheat I :assumption and description of the model. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2000, 11 (3) 355—359.

[16] Yan M C, Cao W X, Li C D, *et al.* Validation and evaluation of a mechanistic model of phasic and phenological development of wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33 (2) 43—50.

[17] Meng Y L, Cao W X, Zhou Z G, *et al.* A Process-based Model for Simulation Phasic Development and Phenology in Rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36 (11) 1362—1367.

[18] Kobayashi K, Lieffering M, Kim Y H. Growth and yield of paddy rice under free-air CO₂ enrichment. In :Shiyomi M, Koizumi H, eds. *Structure and Function in Agroecosystem Design and Management*. Boca Raton, Florida, USA :CRC Press, 2001. 371—395.

[19] Huang J Y , Yang L X , Yang H J , *et al.* Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on growth duration of rice (*Oryza sativa* L.) and its cause. *Acta Agronomica Sinica* 2005 ,31 (7) 882 — 887.

[20] Wang C Y , Guo J P , Wang X L , *et al.* The experimental study of the effects of CO₂ concentration enrichment on physiological feature of C3 and C4 crops. *Acta Agronomica Sinica* 2000 ,26 (6) 813 — 817.

[21] Guo J P , Gao S H. The experimental study on impacts of high temperature and high CO₂ concentration on crops. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* 2002 ,10 (1) :17 — 20.

[22] Liu J D , Liu W Q , Yu Q , *et al.* Numerical simulation of the impact of CO₂ and temperature changes on crop canopy photosynthesis. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* 2004 ,27 (1) :1 — 10.

[23] Zhuang H Y , Cao W X. Modeling nutrient balances affected by interactions of N , P and K in crop productionsystems. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture* 2003 ,19 (1) 71 — 74.

[24] Gu S L , Hui D F , Mo H D. The optimal fitting of the nonlinear equation with contraction-expansion algorithm. *Acta Agronomica Sinica* ,1998 ,24 (5) 513 — 519.

[25] Wang Y F , Li D P , Li A R. Comparison between the fertilizers efficiency and apparent efficiency of nitrogen of new-type N-fertilizers. *Eco-Agriculture Research* ,1997 ,7 (4) :17 — 19.

[26] Liu L J , Sang D Z , Liu C L , *et al.* Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency. *Scientia Agricultura Sinica* 2003 ,36 (12) :1456 — 1461.

[27] Li F M , Ai T C , Zhou S B , *et al.* Influence of slow-release nitrogen fertilizers on low land rice yield and nitrogen use efficiency. *Chinese Journal of Soil Science* 2004 ,35 (3) 311 — 315.

[28] Kim H Y , Horie T , Nakagawa H , *et al.* Effects of elevated CO₂ concentration and high temperature on growth and yield of rice. *Japanese Journal of Crop Science* ,1996 ,65 (4) 634 — 643.

参考文献：

[1] 郑国清. 浅论对水稻发育期模型的认识. *中国农业气象* ,1999 ,20 (2) 31 ~ 34.

[5] 沈国权. 影响作物发育速度的非线性温度模式. *气象* ,1980 , (6) 9 ~ 11.

[6] 殷新佑. 水稻发育温度效应的非线性模型及其应用. *作物学报* ,1994 ,20 (6) 692 ~ 700 .

[10] 高亮之 ,金之庆 ,黄耀 ,等. 水稻计算机模拟模型及其应用之一 :水稻钟模型——水稻发育动态的计算机模型. *中国农业气象* ,1989 ,10 (3) 3 ~ 10.

[11] 甘维廉 ,李文 ,陈丽璇 ,等. 福建省水稻品种生育期数学模型及其应用. *中国农业气象* ,1996 ,17 (4) :1 ~ 7.

[12] 于强 ,陆佩玲 ,刘建栋 ,傅抱璞 ,姚克敏. 作物光温生产力模型及南方水稻适宜生长长期的数值分析. *自然资源学报* ,1999 ,14 (2) :163 ~ 168.

[13] 张建华 ,李迎春 ,余行杰. 作物物候规律的模拟研究. *作物学报* 2000 ,26 (5) 635 ~ 639.

[14] 刘桃菊 ,殷新佑 ,戚昌瀚 ,等. 气候变化与水稻生长发育及产量形成关系的模拟研究. *应用生态学报* 2005 ,16 (3) :486 ~ 490.

[15] 严美春 ,曹卫星 ,罗卫红 ,等. 小麦发育过程及生育期机理模型的研究 I . 建模的基本设想与模型的描述. *应用生态学报* 2000 ,11 (3) : 355 ~ 359.

[16] 严美春 ,曹卫星 ,李存东 ,等. 小麦发育过程及生育期机理模型的检验和评价. *中国农业科学* 2000 ,33 (2) :43 ~ 50.

[17] 孟亚利 ,曹卫星 ,周治国 ,等. 基于生长过程的水稻阶段发育与物候期模拟模型. *中国农业科学* 2003 ,36 (11) :1362 ~ 1367.

[19] 黄建晔 ,杨连新 ,杨洪建 ,等. 开放式空气 CO₂ 浓度增加对水稻生育期的影响及其原因分析. *作物学报* 2005 ,31 (7) 882 ~ 887.

[20] 王春乙 ,郭建平 ,王修兰 ,等. CO₂ 浓度增加对 C3、C4 作物生理特性影响的实验研究. *作物学报* 2000 ,26 (6) 813 ~ 817.

[21] 郭建平 ,高素华. 高温、高 CO₂ 对农作物影响的试验研究. *中国生态农业学报* 2002 ,10 (1) :17 ~ 20.

[22] 刘建栋 ,刘文泉 ,于强 ,等. 大气 CO₂ 浓度升高及气候变化对作物冠层光合影响的数值模拟. *南京气象学院学报* 2004 ,27 (1) :1 ~ 10.

[23] 庄恒扬 ,曹卫星. 作物生产系统氮磷养分平衡的定量模拟. *农业系统科学与综合研究* 2003 ,19 (1) :71 ~ 74.

[24] 顾世梁 ,惠大丰 ,莫惠栋. 非线性方程最优化拟合的缩张算法. *作物学报* ,1998 ,24 (5) 513 ~ 519.

[25] 汪金舫 ,李德平 ,李阿荣. 新型氮肥肥料效应与氮素利用率对比研究. *生态农业研究* ,1999 ,7 (4) :17 ~ 19.

[26] 刘立军 ,桑大志 ,刘心翠莲 ,等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响. *中国农业科学* 2003 ,36 (12) :1456 ~ 1461.

[27] 李方敏 ,艾天成 ,周升波 ,等. 缓释氮肥对水稻的增产效果及其氮素利用率. *土壤通报* 2004 ,35 (3) 311 ~ 315.