

李宁,白蕤,伍露,等. 基于气象灾害的 ORYZA(V3)模型对双季稻发育期模拟的适应性评价[J]. 干旱气象,2017,35(4):559-566, [LI Ning, BAI Rui, WU Lu, et al. Adaptability Evaluation of ORYZA(V3) Model to Simulation of Development Stage of Double Cropping Rice Based on Meteorological Disaster[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(4):559-566], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0559

## 基于气象灾害的 ORYZA(V3)模型对 双季稻发育期模拟的适应性评价

李宁<sup>1,2</sup>,白蕤<sup>3</sup>,伍露<sup>4</sup>,高嘉辰<sup>4</sup>,易克贤<sup>1</sup>,李玮<sup>1,2</sup>

(1. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所,海南 海口 571101;

2. 农业部儋州农业环境科学观测实验站,海南 儋州 571737;

3. 海南省气象科学研究所,海南 海口 570203;4. 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193)

**摘要:**为评价 ORYZA(V3)模型在海南岛双季稻发育期模拟的适应性,利用2005—2014年海南岛双季稻区4个站点(海口、儋州、乐东、琼海)的逐日气象数据、气象灾害资料、土壤、水稻发育期等观测资料,对模型进行调参与验证,本地化不同品种水稻发育期参数;统计双季稻各个发育期出现的气象灾害及其次数,筛选出各个发育期内出现次数较多的气象灾害。以单独的气象灾害为背景,对各个发育期的模拟与实测结果进行对比验证。结果表明:ORYZA(V3)模型对海南岛双季稻发育期的模拟精度较高,决定系数 $R^2 > 0.90$ ,归一化均方根误差 NRMSE 为 3.97%~9.80%;双季稻发育期内出现的气象灾害次数由多到少依次为:高温、台风、干旱;ORYZA(V3)模型对气象灾害的敏感性从大到小依次为:台风、高温、干旱。在台风背景下,仅晚稻开花期的 $R^2$ 为0.90,NRMSE为3.90%,其他发育期的模拟均在误差范围外;在高温背景下,早稻的 $R^2$ 为0.87~0.89,晚稻的 $R^2$ 为0.18~0.61,双季稻的 NRMSE 为 3.49%~5.71%;在干旱背景下, $R^2 > 0.87$ ,NRMSE 为 3.11%~9.73%。评价结果在模型应用和优化方面具有一定的参考价值。

**关键词:**ORYZA(V3)模型;气象灾害;双季稻;海南岛

**文章编号:**1006-7639(2017)-04-0559-08 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0559

**中图分类号:**S11+9

**文献标识码:**A

### 引言

海南岛(18°10'N—20°10'N、108°37'E—111°03'E)位于热带地区,属热带季风气候,全年阳光充足,气候温暖,雨量充沛,自然条件十分优渥,为水稻提供了良好的生长环境,种植制度可一年三熟,双季稻是主要稻作模式<sup>[1]</sup>。但是海南岛四周环海,易遭受形成于菲律宾东部太平洋洋面和南海海面上热带气旋的影响,是自然灾害多发区。干旱、高温、台风、暴雨和病虫害等灾害严重影响海南岛双季稻的生产。利用作物模型对水稻发育期进行预测,可帮助农业人员及时调控水稻生长,合理进行农事安排等工作,达到提高水稻产量、应对极端天气变化和防灾减灾等目的。

作物模型能够帮助人们理解和认识作物生长发育过程的基本规律和动态变化,对产量形成和环境因子的变化进行动态预测,提供作物生长过程的管理和决策支持,从而实现高产、优产目标<sup>[2]</sup>。水稻模型 ORYZA<sup>[3]</sup>引进我国已有十多年之久,相关研究报道也屡见不鲜<sup>[4-7]</sup>,这些研究以播种至成熟整个生育期为单位,评价该模型在我国温带地区的适应性。而关于该模型在气象灾害条件下的适应性和在我国热带地区的研究报道几乎没有。因此,针对海南岛独有的热带环境,以连续多年田间观测数据为基础,调试并验证 ORYZA(V3)模型中的相关参数,将 ORYZA(V3)模型本地化;在此基础上,选取对海南岛双季稻影响最为严重的干旱、高温、台风3种气象灾害,以单独的气象灾害为背景,将独立的发育期

收稿日期:2017-02-22;改回日期:2017-03-30

基金项目:海南自然科学基金面上项目(317236)资助

作者简介:李宁(1989—),研究实习员,主要从事作物模型与气候资源利用研究. E-mail:n.li@catas.cn

通讯作者:白蕤,E-mail:bairui\_118@163.com

作为单位进行模拟验证,评价 ORYZA (V3) 模型在气象灾害背景下对发育期的模拟效果,以期为使用该模型在我国热带地区进一步开展产量模拟及预测、气候变化、资源利用等研究提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 ORYZA (V3) 模型简介

ORYZA 系列水稻模型可用于模拟潜在及不同水分、氮素限制条件下水稻生长发育及产量形成过程<sup>[8-9]</sup>。当前最新版本为 ORYZA (V3),其在 ORYZA2000 的基础上优化升级,新增大尺度模拟、自动调参、碳氮循环、温室气体对气候变化的影响等功能,并完善灌溉一体化管理。

ORYZA (V3) 运行前,用户需将气象、土壤、作物、管理等数据文件按照规定格式存放,并设置检索这些文件的路径。

### 1.2 数据资料及来源

#### 1.2.1 气象数据

2005—2014 年各观测站点逐日气象数据,包括:日照时数(单位:h)、最低气温(单位:℃)、最高气温(单位:℃)、水汽压(单位:kPa)、平均风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、降水量(单位:mm)等,均来自海南省气象局。

#### 1.2.2 灾害资料

2005—2014 年气象灾害资料,包括:干旱、台风、高温等灾害资料,均来自海南省气象局。选用综合气象干旱指数 CI (compound index)<sup>[10]</sup> 作为干旱指标,当日 CI 只要达轻旱及以上等级,就认为发生 1 次干旱;按照热带气旋等级<sup>[11]</sup>,当日热带气旋只要达热带低压及以上等级,就认为出现 1 次台风。由于水稻发育过程中以抽穗开花期对高温最为敏感,其次为灌浆结实期和孕穗期,结合已有研究成果<sup>[12-13]</sup>,将日平均气温大于等于 30 ℃ 或连续 3 d 日最高气温大于等于 35 ℃ 的累积天数作为 1 个高温热害过程。

#### 1.2.3 土壤参数

土壤理化性状数据主要有各土层土壤质地、有机质含量等资料,引自热带作物科学数据分中心海南土壤养分数据库<sup>[14]</sup>,并通过 ORYZA (V3) 模型自带的估算土壤水文参数工具 (SoilHydrau. exe) 计算土壤容重、饱和含水量、田间持水量、萎蔫系数、饱和导水率等参数。

#### 1.2.4 水稻作物资料

海口 (20°02'N、110°15'E) 代表北部地区,儋州 (19°30'N、109°35'E) 代表中西部地区,乐东 (18°45'N、

109°10'E) 代表西南部地区,琼海 (19°14'N、110°28'E) 代表中东部地区。早稻品种有:II 优 128、科 13;晚稻品种有:博 II 优 15、博优 225,均属杂交籼稻。

### 1.2.5 水稻发育期观测数据

2005—2014 年水稻发育期观测数据包括:播种期、出苗期、三叶期、移栽期、分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、成熟期等,管理措施同当地常规大田,资料来自 4 个地区的农业气象观测站。

### 1.3 模型的评价方法

选用目前国际上常用方法和指标对 ORYZA (V3) 模型模拟的海南岛双季稻的生长发育期进行评价<sup>[15-16]</sup>。通过图形的直观效果来比较模拟值与实测值之间的吻合程度,并计算实测平均值 ( $X_{\text{obs}}$ )、模拟平均值 ( $X_{\text{sim}}$ )、标准差 (SD)、模拟结果与实测结果的线性回归系数 ( $\alpha$ )、截距 ( $\beta$ )、决定系数 ( $R^2$ )、不等方差 Student's-t 检验值 ( $P(t^*)$ )、均方根误差 (RMSE)、归一化均方根误差 (NRMSE)。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (1)$$

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{Y}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $X_i$  和  $Y_i$  分别为模拟值和实测值; $N$  为样本数; $\bar{Y}$  为实测平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型的参数校准和验证

ORYZA (V3) 应用的作物参数大部分是根据大量试验结果分析得出的,具有适普性<sup>[9]</sup>,只有 10% 左右的作物参数需要根据当地的试验结果进行调试,包括:发育速率、干物质分配系数、比叶面积、茎同化物转移系数、最大穗粒重等。选取 2006—2008 年双季稻田间观测数据对 ORYZA (V3) 中的发育速率参数进行调整,具体步骤为通过 ORYZA (V3) 自带的自动调参工具 (AutoCalibration (v2). exe) 进行参数调试,并在此基础上运用“试错法”进行微调,使模拟值与实测值之间的误差尽可能小。调整后,利用 2009—2011 年的数据进行验证。

ORYZA (V3) 中水稻发育过程被划分为 4 个阶段:出苗期、穗分化期、开花期、成熟期,4 个阶段所对应的 DVS (developmental stage) 值分别是:0、0.65、1、2。需要调整的发育速率参数包括营养生长期 (DVRJ) 参数、光周期敏感期 (DVRI) 参数、穗分化期 (DVRP) 参数和生殖生长期 (DVRR) 参数,使作物参数本地化,能代表当地品种,以提高发育期的模拟精度。表 1 为调整后的发育期参数。

表 1 双季稻发育速率参数校正值

Tab.1 Calibrated parameters of development rate for double cropping rice

发育速率参数	早稻		晚稻	
	II 优 128	科 13	博 II 优 15	博优 225
DVRJ	0.000 868	0.000 683	0.000 753	0.000 753
DVRI	0.000 598	0.000 422	0.000 667	0.000 682
DVRP	0.000 749	0.000 731	0.000 491	0.000 576
DVRR	0.002 143	0.002 428	0.001 758	0.001 948

统计验证结果表明,穗分化期、开花期和成熟期的模拟平均值依次为 46.6 d、75.4 d、104.5 d,实测平均值依次为 49.2 d、75.3 d、105.9 d。3 个发育期模拟值和实测值的  $R^2 > 0.90$ ,NRMSE 为 3.97% ~ 9.80% (图 1),表明模拟和实测的发育期有很好的—致性。可知 ORYZA(V3)模型对海南岛双季稻发育期的模

拟具有较高精度。

### 2.2 气象灾害在水稻不同发育期出现的次数

统计分析 2005—2014 年气象数据、气象灾害资料和双季稻发育期资料,筛选海南岛常见的 3 种气象灾害(干旱、高温、台风),统计它们在双季稻各个生育期出现的次数(图 2)。干旱灾害主要出现在早

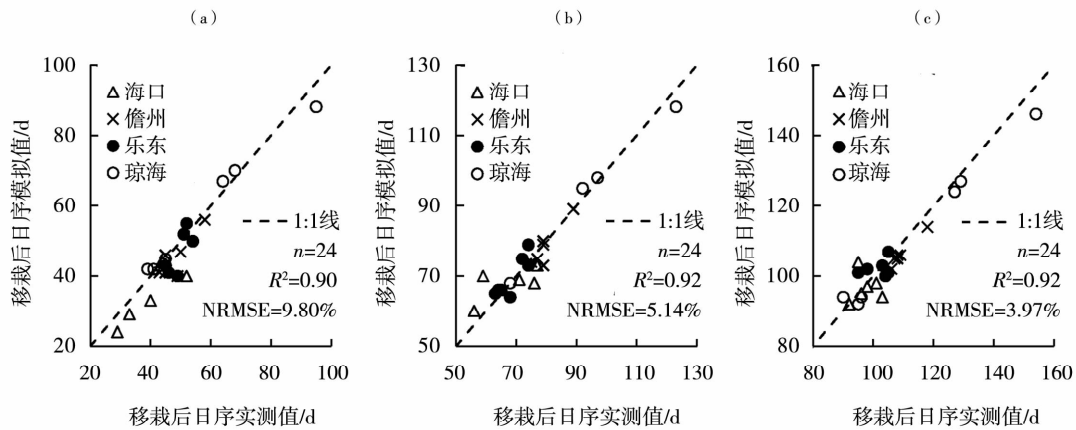


图 1 海南岛双季稻移栽后穗分化期(a)、开花期(b)和成熟期(c)日序模拟值和实测值的对比验证  
Fig.1 Validation on the simulated and measured day sequence of panicle initiation stage (a), flowering stage (b) and maturity stage (c) after transplanting of double cropping rice in Hainan island

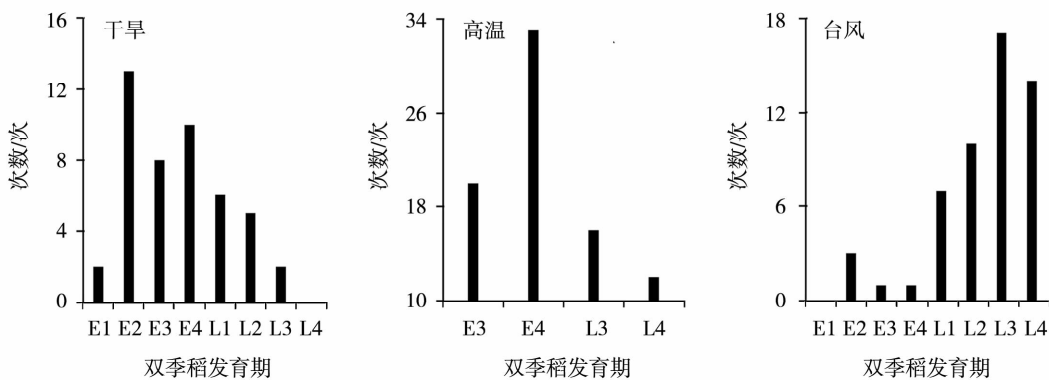


图 2 气象灾害在双季稻不同发育期出现次数统计

(E 表示早稻,L 表示晚稻;1、2、3、4 分别表示出苗—移栽期、移栽—穗分化期、穗分化—开花期、开花—成熟期)

Fig.2 Statistics of occurrence frequency of meteorological disasters in different development stages of double cropping rice (E represents early rice, L represents late rice; 1, 2, 3, 4 represent emergence and transplanting stages, transplanting and panicle initiation stages, panicle initiation and flowering stages, flowering and maturity stages, respectively)

稻移栽—穗分化期、穗分化期—开花期、开花期—成熟期,次数依次为 13、8、10 次,晚稻出苗—移栽、移栽—穗分化期出现次数分别为 6、5 次;考虑水稻发育的高温敏感期,仅统计穗分化—成熟期出现高温的次数,高温热害出现在早稻穗分化期—开花期、开花期—成熟期的次数依次为 20、33 次,晚稻穗分化期—开花期、开花期—成熟期分别出现 16、12 次;台风主要出现在晚稻的整个生育期,分别出现 7、10、17、14 次。以这 3 种气象灾害出现次数较多的发育阶段为例,在模拟 2005—2014 年海南岛双季稻发育

期的基础上,挑选出 3 种气象灾害下发育期的模拟值与实测值进行对比验证,针对性地评价 ORYZA (V3) 模型在单独气象灾害背景下对水稻发育期的模拟效果。

2.3 不同气象灾害背景下双季稻发育期模拟效果

2.3.1 干旱背景下双季稻发育期模拟效果

海南岛干旱主要发生在 11 月至次年 4 月<sup>[17]</sup>,在干旱背景下,海南岛双季稻各发育期模拟值与实测值的对比结果如图 3 所示,各项评价参数值列于表 2。可以看出,不同发育阶段的模拟值与实测值

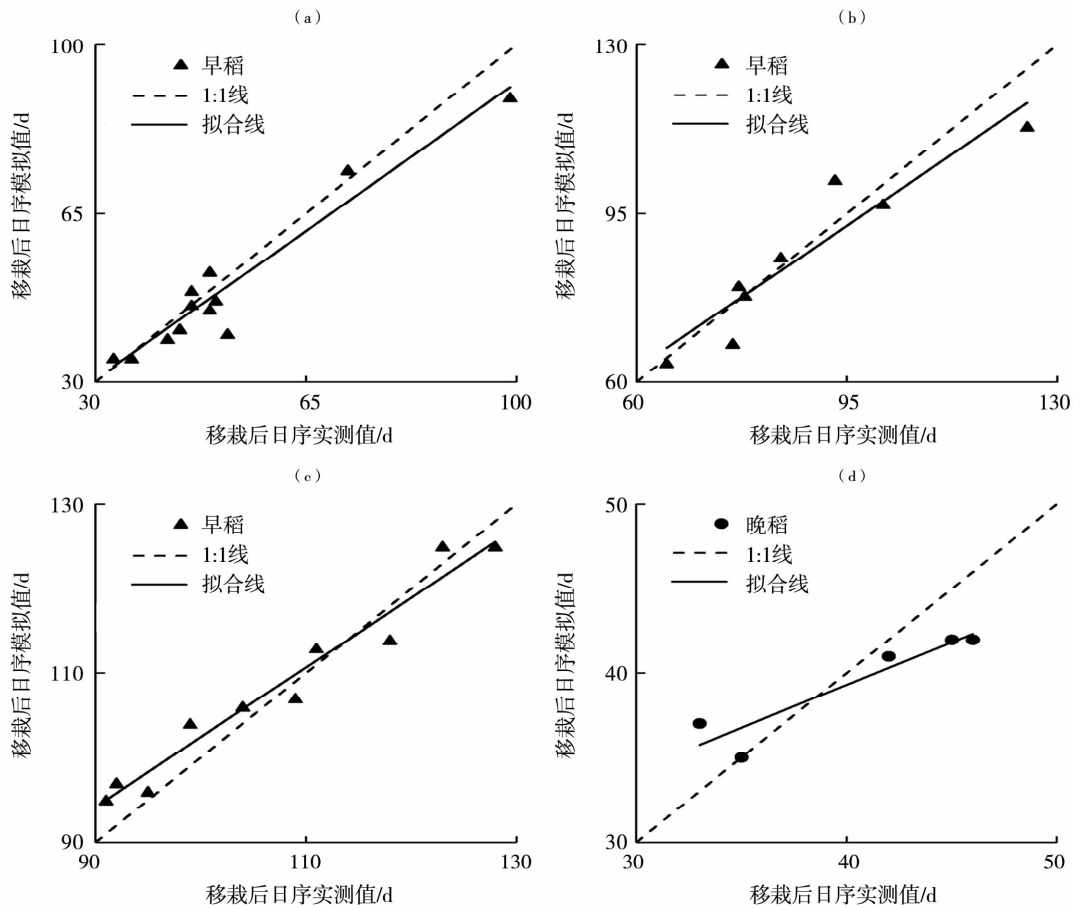


图 3 干旱背景下早稻穗分化期(a)、开花期(b)、成熟期(c)和晚稻穗分化期(d)模拟值与实测值的对比验证

Fig. 3 Validation on the simulated and measured day sequence after transplanting for panicle initiation stage (a), flowering stage (b), maturity stage (c) of early rice and panicle initiation stage of late rice (d) in Hainan island under drought condition

表 2 干旱背景下双季稻发育期模拟结果的各项评价参数

Tab. 2 Evaluation indices of simulated development stages for double cropping rice under drought condition

类型	<i>N</i>	$X_{obs}(SD)/d$	$X_{sim}(SD)/d$	$P(t^*)$	$\alpha$	$\beta$	$R^2$	RMSE	NRMSE/%
早稻穗分化期	13	51.1(16.4)	49.2(15.0)	0.38	0.877	4.38	0.925	4.97	9.73
早稻开花期	8	87.4(17.6)	86.0(15.9)	0.44	0.846	12.06	0.878	6.31	7.23
早稻成熟期	10	107.0(12.4)	108.2(10.5)	0.41	0.826	19.87	0.957	3.33	3.11
晚稻穗分化期	5	40.2(5.3)	39.4(2.9)	0.40	0.509	18.95	0.872	2.90	7.21

吻合程度较高,在 1:1 线两侧均匀分布,仅个别点的差别稍大。各发育期的模拟平均值与实测平均值差值小于 2 d,模拟值与实测值没有显著性差异( $p > 0.05$ ),仅晚稻穗分化期的  $\alpha$  与 1 相差较大,其余发育期的  $\alpha$  均在 0.80 以上较接近于 1; $\beta$  的绝对值较小; $R^2 > 0.87$ ;RMSE 和 NRMSE 均较小。各项指标显示早稻的模拟误差在合理范围内,表明早稻模拟结果对干旱的敏感性较小;晚稻穗分化期的  $\alpha$  值在合理误差范围外,对干旱的敏感性较大。

2.3.2 高温背景下双季稻发育期模拟效果

海南岛高温主要出现在 5—8 月<sup>[18]</sup>,影响水稻生产的热害也多在这一时段发生。在高温条件下,去除个别直接播种年份的数据,双季稻开花期和成熟期的模拟值与实测值的对比结果如图 4 所示,各项评价参数值列于表 3。图 4 中,早稻模拟值与实测值吻合程度高,在 1:1 线两侧均匀分布;晚稻的吻合程度相对较低,且各点的离散程度大。各发育期的模拟平均值与实测平均值差值小于 1.2 d,模拟值与实测值没有显著性差异( $p > 0.05$ )。早稻的  $\alpha$  在

0.85 以上,且  $\beta$  的绝对值较小, $R^2$  在 0.87 以上。晚稻的  $\alpha$  为 0.21 ~ 0.51,且  $\beta$  的绝对值相对较大, $R^2$  为 0.18 ~ 0.61,在合理误差范围外。RMSE 和 NRMSE 均较小。各项指标显示早稻模拟误差在合理的范围内,表明早稻模拟结果对高温的敏感性较小;晚稻的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $R^2$  均在合理误差范围外,对高温的敏感性较大。

2.3.3 台风背景下的双季稻发育期模拟效果

台风是影响海南岛最为严重的气象灾害之一,主要集中在 7 月中旬至 10 月上旬<sup>[1]</sup>,并伴有大风、暴雨、洪涝等灾害出现。台风背景下,海南岛双季稻各发育期模拟值与实测值的对比结果如图 5 所示,各项评价参数值列于表 4。可以看出,晚稻穗分化期模拟值与实测值各点在 1:1 线下侧分布较多,即模拟值早于实测值进入穗分化期,这与台风使晚稻生长发育受阻,延长了穗分化期的时间有关<sup>[19]</sup>;晚稻开花期模拟值与实测值各点在 1:1 线两侧分布较均匀;晚稻成熟期模拟值与实测值各点在 1:1 线两侧均有分布,但离散程度大,这与灾前抢收和灾后受损有

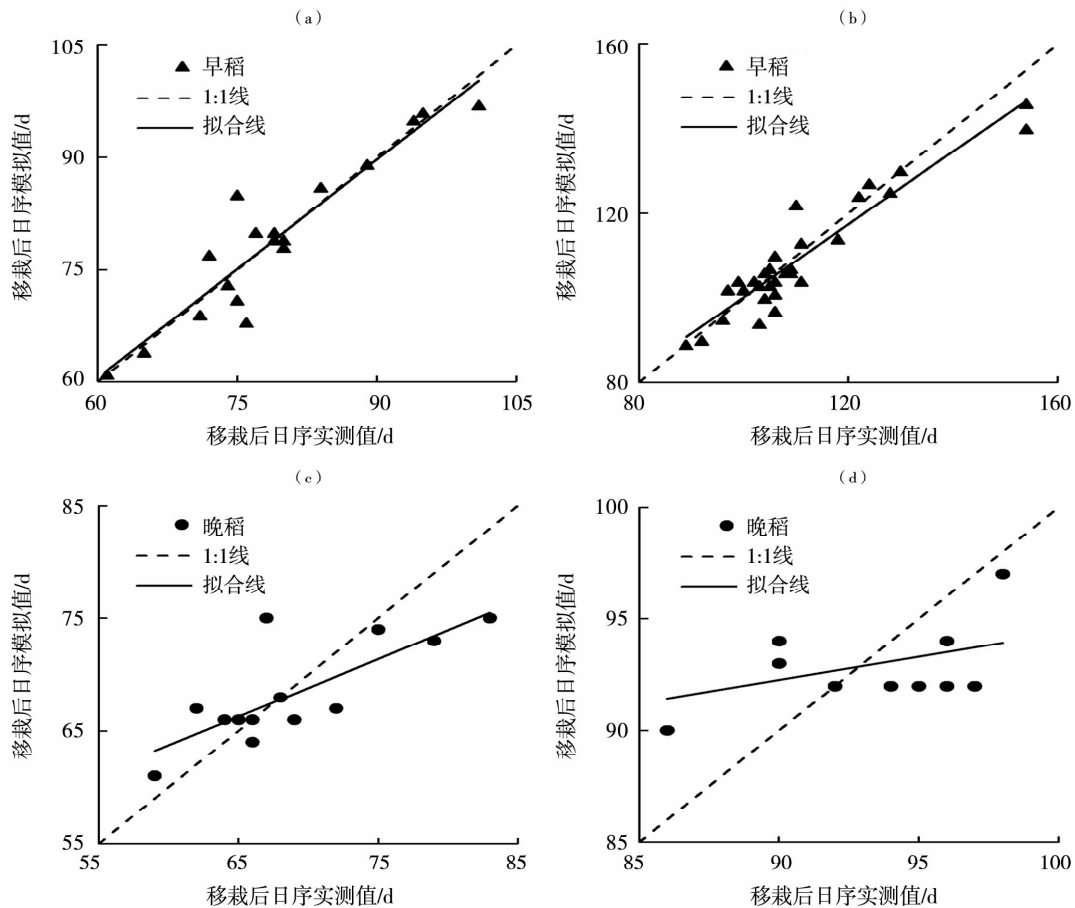


图 4 高温背景下早稻开花期(a)、成熟期(b)和晚稻开花期(c)、成熟期(d)模拟值与实测值的对比验证

Fig. 4 Validation on the simulated and measured day sequence after transplanting for flowering stage (a), maturity stage (b) of early rice and flowering stage (c) and maturity stage (d) of late rice in Hainan island under high temperature condition

表3 高温背景下双季稻发育期模拟结果的各项评价参数

Tab.3 Evaluation indices of simulated development stages for double cropping rice under high temperature condition

类型	<i>N</i>	$\bar{X}_{obs}(SD)/d$	$\bar{X}_{sim}(SD)/d$	$P(t^*)$	$\alpha$	$\beta$	$R^2$	RMSE	NRMSE/%
早稻开花期	18	79.3(10.0)	79.3(10.4)	0.50	0.969	2.48	0.872	3.71	4.68
早稻成熟期	30	110.4(14.9)	109.2(13.6)	0.38	0.858	14.50	0.887	5.20	4.71
晚稻开花期	16	68.1(6.1)	67.9(4.0)	0.45	0.511	33.08	0.608	3.89	5.71
晚稻成熟期	11	93.1(3.6)	92.9(1.7)	0.44	0.206	73.69	0.182	3.25	3.49

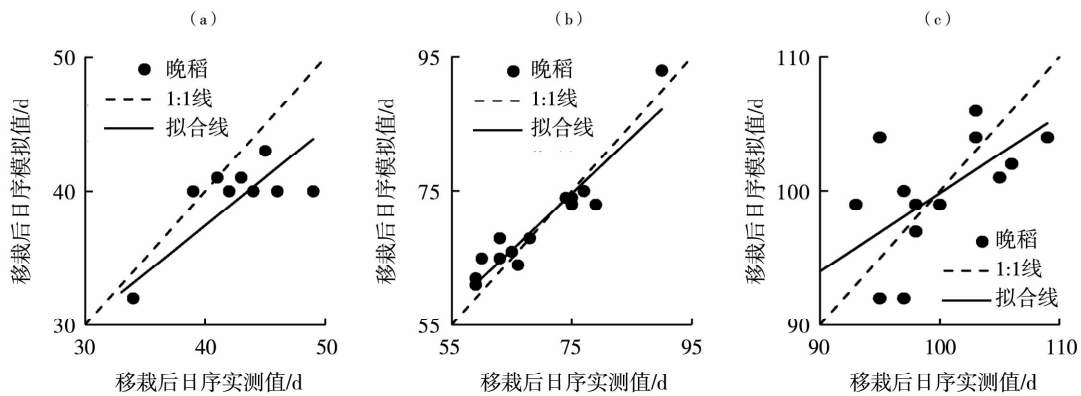


图5 台风背景下晚稻穗分化期(a)、开花期(b)、成熟期(c)模拟值与实测值的对比验证

Fig.5 Validation on the simulated and measured day sequence after transplanting for panicle initiation stage (a), flowering stage(b) and maturity stage(c) of late rice in Hainan island under typhoon condition

表4 台风背景下双季稻发育期模拟结果的各项评价参数

Tab.4 Evaluation indices of simulated development stages for double cropping rice under typhoon condition

类型	<i>N</i>	$\bar{X}_{obs}(SD)/d$	$\bar{X}_{sim}(SD)/d$	$P(t^*)$	$\alpha$	$\beta$	$R^2$	RMSE	NRMSE/%
晚稻穗分化期	10	41.6(4.8)	38.6(4.2)	0.09	0.716	8.81	0.675	4.07	9.79
晚稻开花期	17	69.3(8.2)	69.8(7.3)	0.42	0.841	11.56	0.895	2.70	3.90
晚稻成熟期	14	98.9(5.8)	99.2(4.8)	0.45	0.581	41.72	0.490	4.19	4.24

关。各发育期模拟平均值与实测平均值差值小于3 d;模拟值与实测值没有显著性差异( $p > 0.05$ );晚稻穗分化期的 $\alpha$ 和 $R^2$ ,晚稻成熟期的 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $R^2$ 在合理误差范围外;晚稻开花期的 $\alpha$ 均在0.8以上较接近于1, $\beta$ 的绝对值较小, $R^2 > 0.89$ ;RMSE和NRMSE均较小。各项指标显示台风严重影响ORYZA(V3)模型的模拟效果,仅晚稻开花期的敏感性较小,晚稻穗分化期和晚稻成熟期的敏感性较大。

## 2.4 不同气象灾害背景下双季稻发育期模拟效果的讨论

温度是水稻生长发育的驱动力,在ORYZA(V3)模型中,发育期模块主要受温度和光照的影响。

(1)在干旱条件下,水稻开花期对缺水最敏感,成熟期的敏感性较小<sup>[20]</sup>,ORYZA(V3)模型认为营养生长阶段的干旱会延迟开花<sup>[21-22]</sup>,在开花期前添加了干旱延迟系数DVEW:

$$DVEW = \begin{cases} LESTRS + (DVS \times (1 - LESTRS)), & DVS < 1 \\ 1, & DVS \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中:DVEW值介于0~1,当DVEW=0时,水稻受干旱胁迫影响最严重,发育进程终止;当DVEW=1

时,水分供应充足,水稻生长不受水分因子限制。LESTRS为延缓叶片伸展的干旱胁迫因子,其值介

于0~1,当LESTRS=0时,水稻受干旱影响严重,叶片停止伸展;当LESTRS=1时,叶片正常伸展,不受干旱的影响。因此,早稻穗分化期至成熟期的模拟对干旱的敏感性较小,模拟效果好。冯利平<sup>[23]</sup>与薛颖<sup>[24]</sup>等利用该模型分别在湖南和华北地区进行水稻干旱研究,均取得较好的研究效果。分析气象数据发现,晚稻穗分化期同时受到干旱和高温的影响,海口、琼海等地多次出现连续3 d大于35℃高温,导致晚稻生长发育推迟,模拟效果相对不好。

(2)在ORYZA(V3)模型中水稻的三基点温度的初始化值分别为8℃、30℃、42℃<sup>[25]</sup>,当环境温度低于最低温度或高于最高温度时,水稻的发育速率降为0。在高温背景下,早稻模拟的敏感性较小,具有较好的模拟结果,刘伟昌等<sup>[26]</sup>在衡阳地区使用该模型进行高温热害的研究,可有效节约投入成本和田间试验耗时,且研究结果具有一定实际应用价值。但晚稻模拟的敏感性较大,其原因与晚稻发育过程多处于台风频发期有关,同时受高温和台风的双重影响。

(3)由于ORYZA(V3)模型发育期模块没有涉及到大风、暴雨等由台风带来的一系列影响因子,因此模型对台风的敏感性大,模拟效果不好。台风致灾因子有大风、暴雨、风暴潮及其引发的一系列次生灾害,每个稻田的环境如海拔高度、坡度、土壤质地等都存在一定的差异,因此在模型中添加台风模块比较困难。可将台风对水稻影响的主要致灾因子大风、暴雨等分解出来,分别考虑风速、降水等气象因子对发育期带来的影响,这些模块的添加将会有助于降低模型对台风的敏感性。

### 3 结论与讨论

(1)ORYZA(V3)模型对海南岛双季稻发育期的模拟具有较高精度。

(2)在海南岛双季稻发育期中出现次数由多到少的气象灾害依次为:高温、台风、干旱,其中高温主要出现在早稻穗分化至成熟期,台风主要出现在晚稻整个发育期,干旱主要出现在早稻移栽期至晚稻穗分化期。

(3)ORYZA(V3)模型对干旱有一定的敏感性,可有效模拟出干旱对早稻生长发育的影响,但晚稻穗分化期的模拟效果相对较差;对高温的敏感性出现较大差异,表现为早稻的敏感性小,模拟精度高,晚稻的敏感性大,模拟精度低;对台风的敏感性较大,仅晚稻开花期模拟效果在合理误差范围内,晚稻穗分化期和成熟期的模拟效果均不理想。

除台风外,模型能够较好地模拟单独气象灾害对早稻发育期的影响,但晚稻易受多种气象灾害同时影响,模拟效果不理想。这些气象灾害以干旱和高温、高温和台风等组合为主,其影响并不是2种单独影响的简单相加,而是会相互作用进而激活更多的影响<sup>[27]</sup>。由于本文中的这些组合气象灾害样本总数偏少,容易导致模拟误差偏大。因此在以后的工作中可扩大研究时间范围,进一步分析组合气象灾害背景下模型的模拟效果。此外,由于农业系统、环境、地形和管理方式等因素的复杂性,作物模型还不能完全反映作物生长的全过程,模拟结果与实测结果存在一定的偏差。本文仅用3 a观测结果对ORYZA(V3)模型进行参数校正,可能导致模拟结果存在一定的不稳定性,同时受数据资料的限制,尚无法完成在叶面积、生物量和产量等多方面情况下评价ORYZA(V3)模型在气象灾害条件下的适应性,还需进一步的研究和检验。

### 参考文献

- [1] 王春乙. 海南气候[M]. 北京:气象出版社,2014.
- [2] 高亮之. 数字农业与我国农业发展[J]. 计算机与农业,2001(9):1-3.
- [3] CASANOVA D, GOUDRIAAN J, BOSCH A D. Testing the performance of ORYZA1, an explanatory model for rice growth simulation, for Mediterranean conditions[J]. European Journal of Agronomy, 2000,12(3-4):175-189.
- [4] 薛颖,杨晓光,BOUMAN B A M,等. ORYZA2000模型模拟北京地区早稻的适应性初探[J]. 作物学报,2005,31(12):1567-1571.
- [5] FENG L, BOUMAN B A M, TUONG T P, et al. Exploring options to grow rice using less water in northern China using a modelling approach: I. Field experiments and model evaluation[J]. Agricultural Water Management, 2007,88(1-3):1-13.
- [6] 莫志鸿,冯利平,邹海平,等. 水稻模型 ORYZA2000 在湖南双季稻区的验证与适应性评价[J]. 生态学报,2011,31(16):4628-4637.
- [7] 韩湘云,景元书,浩宇,等. 基于田间试验的水稻模型 ORYZA2000 区域参数比较[J]. 干旱气象,2013,31(1):37-42.
- [8] BOUMAN B A M, KROPFF M J, TUONG T P, et al. ORYZA2000: modeling lowland rice[M]. Los Baos: International Rice Research Institute, and Wageningen: Wageningen University and Research Centre, 2001.
- [9] BOUMAN B A M, VAN LAAR H H. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions[J]. Agricultural Systems, 2006,87(3):249-273.
- [10] 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级:GB/T 20481-2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 热带气旋等级:GB/T 19201-2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [12] 陈端生,龚绍先. 农业气象灾害[M]. 北京:北京农业大学出版

- 社,1990.
- [13] 高素华,王培娟. 长江中下游高温热害及对水稻的影响[M]. 北京:气象出版社,2009.
- [14] 热带作物科学数据分中心. 海南土壤养分数据库[DB/OL]. (2016-02-22). <http://trop.agridata.cn/A05/ShowClass.asp?ClassID=775>.
- [15] CATON B P, FOIN T C, HILL J E. A plant growth model for integrated weed management in direct-seeded rice. III. Interspecific competition for light[J]. *Field Crops Research*, 1999,63(1):47-61.
- [16] GAUCH JR. H G, HWANG J T. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values[J]. *Agronomy Journal*, 2003,95(6):1442-1446.
- [17] 李伟光,易雪,车秀芬,等. 海南岛干湿概况与干旱发生特征[J]. *气象研究与应用*,2011,32(增刊2):53-54.
- [18] 许祖清. 海南高温分布特征[J]. *气象研究与应用*,2008,29(3):12-13.
- [19] 云勇,严小微,唐清杰,等. 海南台风暴雨对水稻的危害及灾后补救措施[J]. *杂交水稻*,2014,29(1):44-45.
- [20] 宋丽莉,王春林,董永春. 水稻干旱动态模拟及干旱损失评估[J]. *应用气象学报*,2001,12(2):226-233.
- [21] PUCKRIDGE D W, O'TOOLE J C. Dry matter and grain production of rice, using a line source sprinkler in drought studies[J]. *Field Crops Research*, 1980,3:303-319.
- [22] WOPEREIS M C S, KROPFF M J, MALIGAYA A R, et al. Drought-stress responses of two lowland rice cultivars to soil water status[J]. *Field Crops Research*, 1996,46(1-3):21-39.
- [23] 冯利平,莫志鸿,黄晚华,等. 湖南省季节性干旱对双季稻生长及产量影响的模拟研究[J]. *作物学报*,2011,37(5):895-902.
- [24] 薛昌颖,胡程达. 基于 ORYZA2000 模型的华北地区旱稻干旱风险评估[J]. *干旱地区农业研究*,2016,34(3):179-185.
- [25] GAO L Z, JIN Z Q, HUANG Y, et al. Rice clock model—a computer model to simulate rice development[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992,60(1-2):1-16.
- [26] 刘伟昌,张雪芬,余卫东,等. 水稻高温热害风险评估方法研究[J]. *气象与环境科学*,2009,32(1):33-38.
- [27] 赵鸿,王润元,尚艳,等. 粮食作物对高温干旱胁迫的响应及其阈值研究进展与展望[J]. *干旱气象*,2016,34(1):1-12.

## Adaptability Evaluation of ORYZA(V3) Model to Simulation of Development Stage of Double Cropping Rice Based on Meteorological Disaster

LI Ning<sup>1,2</sup>, BAI Rui<sup>3</sup>, WU Lu<sup>4</sup>, GAO Jiachen<sup>4</sup>, YI Kexian<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>

(1. *Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China*;  
2. *Danzhou Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Danzhou 571737, China*;  
3. *Hainan Institute of Meteorological Science, Haikou 570203, China*; 4. *College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China*)

**Abstract:** To evaluate the simulation accuracy of the ORYZA(V3) model for development stage of the double cropping rice in Hainan Province, the parameters of the ORYZA(V3) model were calibrated and validated based on daily meteorological observations, meteorological disaster data, soil properties and observed rice phenology data from four typical experiment sites (Haikou, Danzhou, Ledong and Qionghai) in the double cropping rice planting area during 2005-2014. Different types of meteorological disasters and their frequencies during the development stages of the double cropping rice were counted, and the disasters with the highest frequency in each growing phase were selected. Then the simulation accuracy of the model was evaluated based on each single meteorological disaster. The results show that the ORYZA(V3) model could reproduce the development stages of the double cropping rice in Hainan island well, the deciding coefficient  $R^2$  was more than 0.90 and NRMSE (normalized root mean square error) ranged from 3.97% to 9.80%. High temperature occurred most frequently during the development stages of double cropping rice, followed by typhoon and drought disaster. Under typhoon condition, the simulation accuracy for flowering stage of the late rice was good with  $R^2 = 0.90$  and NRMSE = 3.90%, while it was unacceptable for other growing stages. Under high temperature condition,  $R^2$  ranged from 0.87 to 0.89 for early rice and from 0.18 to 0.61 for late rice, and NRMSE ranged from 3.49% to 5.71% for the double cropping rice. The  $R^2$  was larger than 0.87 under drought condition with NRMSE ranging from 3.11% to 9.73%. The evaluation results can be valuable for better application and optimization of the model in the future.

**Key words:** ORYZA(V3) crop growth simulation model; meteorological disaster; double cropping rice; Hainan island