

WOFOST 模型对江淮地区水稻生长发育模拟的适应性评价

伍露¹ 张皓² 杨霏云¹ 郭尔静¹ 斯林林³ 曹凯³ 程陈⁴

(1 中国气象局气象干部培训学院, 100081, 北京; 2 上海市生态气象和卫星遥感中心, 200030, 上海;

3 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 310021, 浙江杭州; 4 丽水学院生态学院, 323000, 浙江丽水)

摘要 通过收集 2006–2012 年江淮地区水稻生长发育和气象资料, 对 WOFOST 模型进行调参验证, 确定了关键发育阶段内所需积温、比叶面积、分配系数和枯萎速率等作物参数, 并评价了模型在江淮地区的适应性。结果表明, WOFOST 模型可以较好地模拟江淮地区水稻生长发育动态变化过程, 开花期、成熟期、叶面积指数 (LAI)、叶干物质量、茎干物质量、穗干物质量、地上干物质量和产量观测值与模拟值的 RMSE 分别为 1.73~4.66 d、1.94~4.42 d、0.39~2.51、 $(0.43\sim0.86)\times10^3\text{ kg/hm}^2$ 、 $(0.86\sim1.52)\times10^3\text{ kg/hm}^2$ 、 $(0.52\sim1.21)\times10^3\text{ kg/hm}^2$ 、 $(1.38\sim1.96)\times10^3\text{ kg/hm}^2$ 和 $(0.45\sim1.33)\times10^3\text{ kg/hm}^2$; NRMSE 分别为 0.75%~1.96%、0.74%~1.49%、8.74%~43.40%、14.94%~30.55%、18.16%~28.84%、9.44%~22.81%、11.33%~15.89% 和 5.49%~13.43%, 其中合肥水稻发育期, 叶、茎、穗和地上部干物质量, 镇江水稻 LAI 和荆州水稻产量模拟效果最优。水稻 LAI、叶和茎干物质量随移栽天数增加呈现先上升后下降的变化趋势, 而穗和地上部干物质量随移栽天数增加呈现逐渐上升的趋势。

关键词 WOFOST 模型; 江淮地区; 水稻; 生长发育; 适应性

作物生产的目标是提高光温资源利用效率和提升作物品种生产潜力, 而光温的季节性变化是影响作物生产力^[1]和品质形成过程^[2]的主要环境因素, 何强等^[3]通过 12 种人工控制光温组合处理、短日遮光处理以及分期播种试验, 探究了不同水稻品种的育性光温特性, 并提出了光温双因子互作量化的光温效应联动假设。但田间试验往往存在时空限制性, 而作物模型将光、温、水及土壤等条件作为环境的驱动变量, 精细模拟了作物生理生态过程以弥补大田研究的不足^[1,4]。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通用性作物生长模拟模型^[5], 以日为步长动态定量模拟小麦^[6-7]、玉米^[8-9]及水稻^[10-11]等多种大田作物生长发育过程。目前, 国内外利用 WOFOST 模型在土壤状况^[12]、作物品种^[13]和耕作制度^[14]等对产量的影响评估方面已得到了广泛应用, 提高了试验结果的外推性。黄健熙等^[6]在冬小麦主产区分区的基础上, 以 2012–2015 年气象数据驱动 WOFOST 模型, 重点优化 WOFOST 模型中与品种相关的积温参数, 并在站点尺度进行冬小麦物候期、叶面积指数 (LAI) 和单产动态模

拟和精度分析。Roberto 等^[11]利用 1989–2004 年 6 个地点不同灌溉条件下水稻作物数据, 比较分析了 WOFOST 模型对生物量分配、小穗不育性、水肥管理和土壤水文等方面的模型参数敏感性。目前, 应用 WOFOST 模型对我国同一地区内单一水稻品种生长发育过程的适应性研究较多, 但忽略了各省份不同水稻品种的适应性^[4,15]。此外, 在全球气候变暖导致极端天气频发的背景下, 水稻生长季后期遭受高温损伤愈发严重^[16], 这就要求在应用作物模型评估气候变化对水稻生长发育和产量的影响之前, 应先通过调参验证来检验模型的准确性和普适性获得适用于该地区不同水稻品种的模型参数, 继而评估模型在该地区的适应性。

本研究以江淮地区多省份为研究对象, 通过收集分析 2006–2012 年水稻生长发育和气象数据, 对 WOFOST 模型进行调参验证, 确定了关键发育阶段内所需积温、比叶面积、分配系数和枯萎速率等作物遗传参数, 并评价了模型在江淮地区的适应性。研究结果为利用 WOFOST 模型评估气候变化对江淮地区水稻生产力的影响提供理论基础和数据支撑。

作者简介: 伍露, 主要从事农业资源高效利用研究, E-mail: duyulu5566@163.com

程陈为通信作者, 主要从事作物模型与环境调控、专家决策系统开发与应用研究, E-mail: chengsir1993@lsu.edu.cn
基金项目: 国家自然科学基金 (32101294); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2022J053); 丽水学院人才启动基金项目 (6604CC01Z)

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2024-05-08; 网络出版日期: 2024-09-29

1 材料与方法

1.1 试验材料

以江淮地区为研究区域，选取安徽合肥，湖北荆州、武汉，江苏兴化、徐州和镇江作为调查点，收集了 2006–2012 年各站点的逐日气象资料（数据来源：中国气象局 <https://www.cma.gov.cn>），主要包括日最高气温、日最低气温、日降水量、日照时间、风速和相对湿度等气象要素，水稻生长发育、土壤理化性质、田间管理措施资料来源于各省市气象局农业气象试验站。

1.2 WOFOST 模型水稻生长发育模块的遗传参数

WOFOST 模型是一个动态的解释性模型，该模型的模拟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^[15,17]。将各站点水稻田间观测资料分为调参组和验证组，且 2 组数据相互独立。本研究根据当地种植模式，设置模型初始发育期（developmental stage of initial, DVSI）和初始总干物质质量（total dry weight of initial, TDWI）模型初始参数（表 1），其中出苗期 DVSI 为 0，开花期 DVSI 为 1，成熟期

DVSI 为 2，并采用试错法调试 WOFOST 模型水稻生长发育参数，包括控制水稻发育期的出苗期—开花期和开花期—成熟期所需积温模型关键参数（TSUM1 和 TSUM2）（表 1）和控制水稻叶面积指数（leaf area index, LAI）、地上部生物量和产量的比叶面积（specific leaf area, SLA）、叶分配系数（fraction of leaf, FL）、茎分配系数（fraction of stem, FS）、穗分配系数（fraction of storage organ, FO）和枯萎速率（reduction factor of senescence, RFSE）模型关键参数（表 2）。

表 1 江淮地区 WOFOST 模型水稻发育期模块的遗传参数
Table 1 Genetic parameters of the WOFOST model rice development module in the Jianghuai region

站点 Station	初始发育期 DVSI	初始总干物质质量 TDWI (kg/hm ²)	出苗期—开花期 所需积温 TSUM1 (°C·d)	开花期—成熟期 所需积温 TSUM2 (°C·d)
合肥 Hefei	0.30	350	1482	435
荆州 Jingzhou	0.23	330	1345	405
武汉 Wuhan	0.28	110	1350	440
兴华 Xinghua	0.00	310	1210	455
徐州 Xuzhou	0.35	180	1610	505
镇江 Zhenjiang	0.33	130	1490	610

表 2 江淮地区 WOFOST 模型水稻生长模块的遗传参数
Table 2 Genetic parameters of the WOFOST model rice growth module in the Jianghuai region

站点 Station	发育阶段 Developmental stage	比叶面积 SLA (hm ² /kg)	发育阶段 Developmental stage	叶分配系数 FL (kg/kg)	茎分配系数 FS (kg/kg)	穗分配系数 FO (kg/kg)	发育阶段 Developmental stage	枯萎速率 RFSE
合肥 Hefei	0.10	0.0027	0.00	0.40	0.60	0.00	0.00	0.45
	0.70	0.0029	0.50	0.45	0.55	0.00	2.00	0.50
	0.98	0.0020	0.71	0.58	0.42	0.60		
	1.30	0.0029	0.95	0.10	0.30	0.80		
	1.40	0.0010	1.00	0.00	0.20	1.00		
	2.00	0.0010	2.00	0.00	0.00	1.00		
荆州 Jingzhou	0.10	0.0017	0.00	0.40	0.60	0.00	0.00	0.30
	0.58	0.0019	0.58	0.52	0.48	0.00	2.00	0.40
	0.86	0.0020	0.80	0.38	0.62	0.00		
	1.10	0.0015	0.85	0.00	0.00	1.00		
	1.40	0.0015	0.90	0.00	0.00	1.00		
	2.00	0.0010	1.00	0.00	0.00	1.00		
武汉 Wuhan			2.00	0.00	0.00	1.00		
	0.10	0.0025	0.00	0.55	0.46	0.00	0.00	0.50
	0.66	0.0030	0.25	0.58	0.42	0.00	2.00	0.60
	0.90	0.0027	0.50	0.45	0.55	0.00		
	1.30	0.0018	0.72	0.51	0.49	0.00		
	1.40	0.0010	0.90	0.05	0.28	0.67		
	2.00	0.0010	1.00	0.00	0.01	0.99		
			2.00	0.00	0.00	1.00		

续表 2 Table 2 (continued)

站点 Station	发育阶段 Developmental stage	比叶面积 SLA (hm ² /kg)	发育阶段 Developmental stage	叶分配系数 FL (kg/kg)	茎分配系数 FS (kg/kg)	穗分配系数 FO (kg/kg)	发育阶段 Developmental stage	枯萎速率 RFSE
兴华 Xinghua	0.00	0.0020	0.00	0.40	0.60	0.00	0.00	0.60
	0.60	0.0026	0.50	0.55	0.45	0.00	2.00	0.60
	0.90	0.0032	0.70	0.35	0.65	0.00		
	1.00	0.0022	0.90	0.30	0.15	0.55		
	2.00	0.0022	1.00	0.00	0.15	0.85		
			1.10	0.00	0.00	1.00		
徐州 Xuzhou	0.10	0.0017	0.00	0.40	0.60	0.00	0.00	0.50
	0.70	0.0019	0.50	0.45	0.55	0.00	2.00	0.40
	0.95	0.0024	0.85	0.38	0.62	0.00		
	1.10	0.0015	0.90	0.10	0.55	0.35		
	1.40	0.0015	1.00	0.00	0.20	0.80		
	2.00	0.0010	2.00	0.00	0.00	1.00		
镇江 Zhenjiang	0.10	0.0017	0.00	0.40	0.60	0.00	0.00	0.30
	0.58	0.0019	0.58	0.52	0.48	0.00	2.00	0.40
	0.86	0.0020	0.80	0.38	0.62	0.00		
	1.10	0.0015	0.85	0.00	0.40	0.60		
	1.40	0.0015	0.90	0.00	0.00	1.00		
	2.00	0.0010	1.00	0.00	0.00	1.00		
			2.00	0.00	0.00	1.00		

对 WOFOST 模型模拟的关键发育期（开花期和成熟期）、LAI、器官生物量和地上部总生物量和产量的模拟效果进行评价。模型验证的统计判据主要包括均值（ \bar{X} ）、标准差（ SD ）、平均绝对误差（mean absolute error, MAE ）、均方根误差（root mean square error, $RMSE$ ）、归一化均方根误差（normalized root mean square error, $NRMSE$ ）^[18]和符合度指数（ D ）^[19]。

$$MAE=\frac{\sum |X_{obs}-X_{sim}|}{N}$$
(1)

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum (X_{obs}-X_{sim})^2}{N}}$$
(2)

$$NRMSE=100\times\frac{RMSE}{\bar{X}_{obs}}$$
(3)

$$D=1-\frac{\sum (X_{obs}-X_{sim})^2}{\sum [|X_{obs}-\bar{X}_{obs}|+|X_{sim}-\bar{X}_{obs}|]^2}$$
(4)

式中， X_{obs} 为观测值， X_{sim} 为模拟值， \bar{X}_{obs} 为观测值平均值。

2 结果与分析

2.1 发育期验证

图 1 为基于 WOFOST 模型的江淮地区水稻开花期（图 1a）和成熟期（图 1b）验证图，由图 1 可知，WOFOST 模型对江淮地区水稻开花期和成熟期观测值与模拟值之间的 MAE 为 2.83~3.13 d， $RMSE$ 为 3.43~3.59 d， $NRMSE$ 为 1.25%~1.52%， D 值为 0.97~0.99。

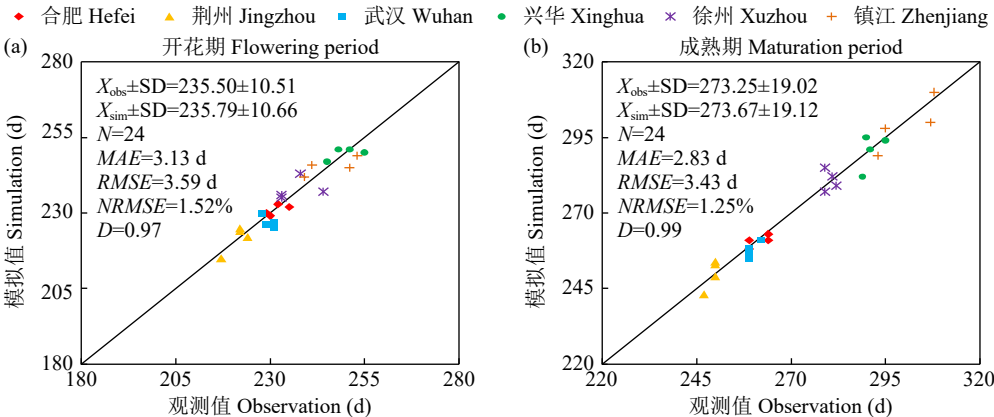


图 1 基于 WOFOST 模型的江淮地区水稻关键发育期验证
Fig.1 Validation of rice key development period in the Jianghuai region based on the WOFOST model

由图 1a 可知, WOFOST 模型模拟江淮地区各站点水稻开花期的观测值与模拟值之间 MAE 为 1.50~4.50 d, $RMSE$ 为 1.73~4.66 d, $NRMSE$ 为 0.75%~1.96%, 其中荆州水稻开花期最早 (221.50 d), 兴华水稻开花期最晚 (249.75 d), 由 $NRMSE$ 可知, 各站点水稻开花期模拟精度大小依次是合肥、荆州、兴华、武汉、徐州、镇江。由图 1b 可知, WOFOST 模型模拟江淮地区各站点水稻成熟期的观测值与模拟值之间 MAE 为 1.75~4.00 d, $RMSE$ 为 1.94~4.42 d, $NRMSE$ 为 0.74%~1.49%, 其中荆州水稻成熟期最早 (249.75 d), 镇江水稻成熟期最晚 (299.25 d)。由 $NRMSE$ 可知, 各站点水稻成熟期模拟精度大小依次是合肥、武汉、徐州、荆

州、镇江、兴华。综上所述, 说明 WOFOST 模型可以很好地模拟江淮地区水稻发育期, 其中合肥水稻发育期模拟效果最优。

2.2 生长指标验证

由图 2 可知, WOFOST 模型对江淮地区水稻 LAI 观测值与模拟值之间的 MAE 为 1.30, $RMSE$ 为 1.78, $NRMSE$ 为 31.88%, D 值为 0.86; 对江淮地区水稻器官干物质质量观测值与模拟值之间的 MAE 为 $(0.72\sim1.35) \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $RMSE$ 为 $(0.92\sim1.78) \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE$ 为 13.67%~22.92%, D 值为 0.85~0.98; 对江淮地区水稻产量观测值与模拟值之间的 MAE 为 $0.74 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $RMSE$ 为 $0.88 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE$ 为 9.15%, D 值为 0.81。

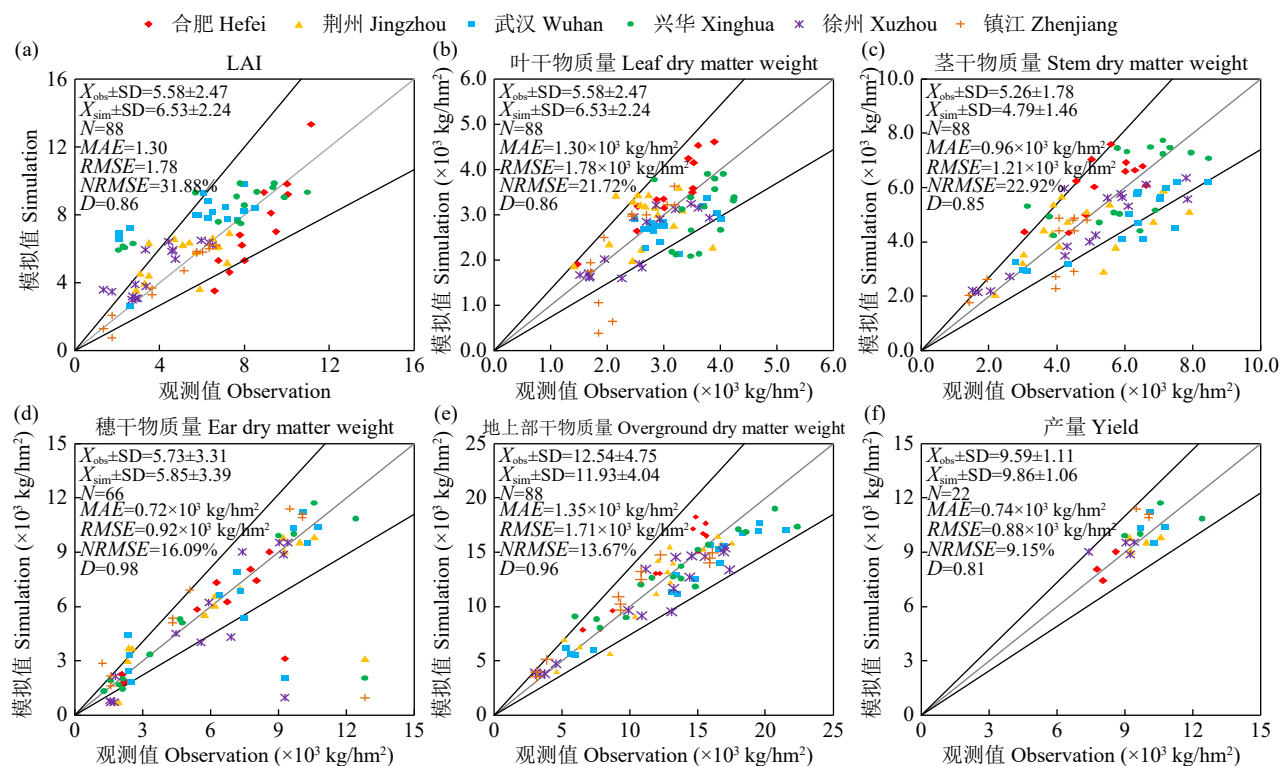


图 2 基于 WOFOST 模型的江淮地区水稻生长过程验证图

Fig.2 Validation of rice growth process in the Jianghuai region based on the WOFOST model

由图 2a 和图 3a 可知, WOFOST 模型对江淮地区各站点水稻 LAI 观测值与模拟值的 MAE 为 0.29~1.95, $RMSE$ 为 0.39~2.51, $NRMSE$ 为 8.74%~43.40%, 其中徐州水稻 LAI 最小 (3.83), 合肥水稻 LAI 最大 (7.37)。由 $NRMSE$ 可知, 各站点水稻 LAI 模拟精度大小依次是镇江、荆州、合肥、徐州、兴华、武汉, 且水稻 LAI 随移栽天数增加呈现先上升后下降的变化趋势。

由图 2b 和图 3b 可知, WOFOST 模型对江淮

地区各站点水稻叶干物质质量观测值与模拟值的 MAE 为 $(0.32\sim0.72) \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $RMSE$ 为 $(0.43\sim0.86) \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE$ 为 14.94%~30.55%, 其中镇江水稻叶干物质质量最小 $(2.35 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2)$, 兴华水稻叶干物质质量最大 $(3.66 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2)$ 。由 $NRMSE$ 可知, 各站点水稻叶干物质质量模拟精度大小依次是合肥、徐州、武汉、兴华、荆州、镇江, 且水稻叶干物质质量随移栽天数增加呈现先上升后下降的变化趋势。

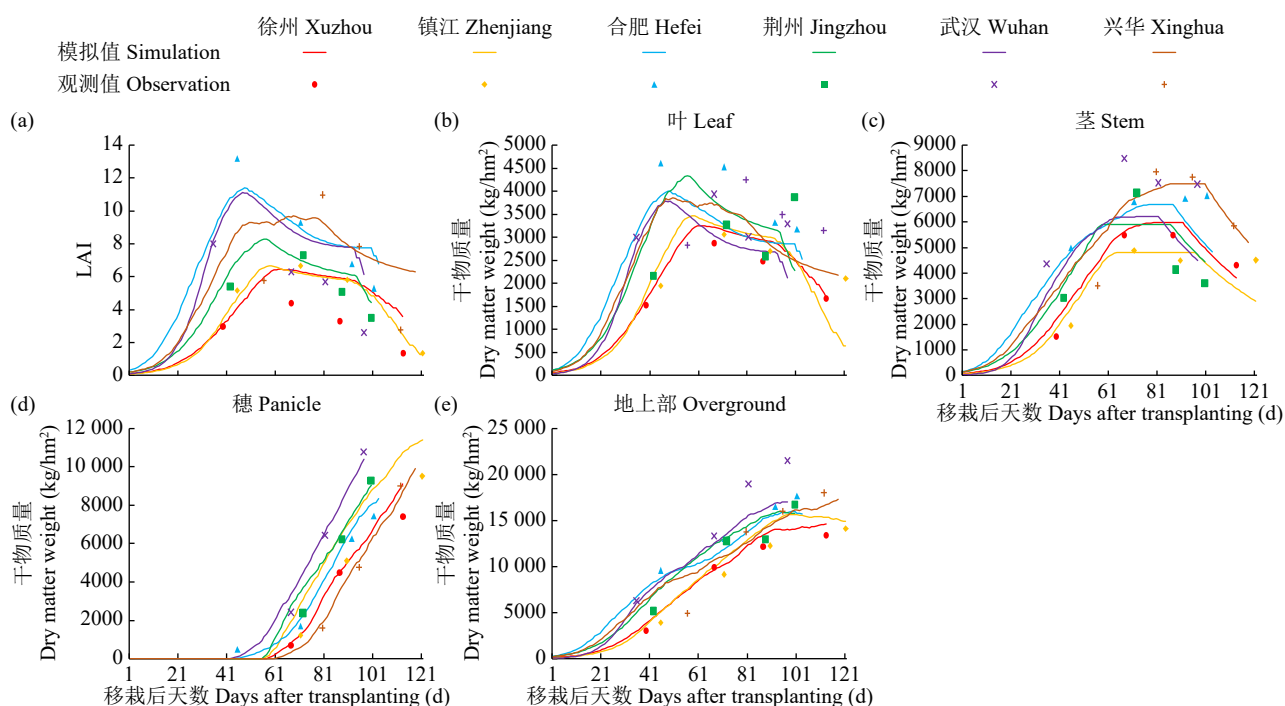


图 3 基于 WOFOST 模型的江淮地区水稻生长指标动态模拟过程

Fig.3 Dynamic simulation process of rice growth indicators in the Jianghuai region based on the WOFOST model

由图 2c 和图 3c 可知, WOFOST 模型对江淮地区各站点水稻茎干物质质量观测值与模拟值的 MAE 为 $(0.68\sim 1.30) \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $RMSE$ 为 $(0.86\sim 1.52) \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE$ 为 $18.16\%\sim 28.84\%$, 其中镇江水稻茎干物质质量最小 $(3.65 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2)$, 合肥水稻茎干物质质量最大 $(6.13 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2)$ 。由 $NRMSE$ 可知, 各站点水稻茎干物质质量模拟精度大小依次是合肥、兴华、徐州、镇江、武汉、荆州, 且水稻茎干物质质量随移栽天数增加呈现先上升后下降的变化趋势。

由图 2d 和图 3d 可知, WOFOST 模型对江淮地区各站点水稻穗干物质质量观测值与模拟值的 MAE 为 $(0.46\sim 1.06) \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $RMSE$ 为 $(0.52\sim 1.21) \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE$ 为 $9.44\%\sim 22.81\%$, 其中兴华水稻穗干物质质量最小 $(5.30 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2)$, 武汉水稻穗干物质质量最大 $(6.58 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2)$ 。由 $NRMSE$ 可知, 各站点水稻穗干物质质量模拟精度大小依次是合肥、荆州、兴华、武汉、徐州、镇江, 且水稻穗干物质质量随移栽天数增加呈现先上升后下降的变化趋势。

由图 2e 和图 3e 可知, WOFOST 模型对江淮地区各站点水稻地上部干物质质量观测值与模拟值的 MAE 为 $(1.07\sim 1.62) \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $RMSE$ 为 $(1.38\sim 1.96) \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE$ 为 $11.33\%\sim$

15.89% , 其中镇江水稻地上部干物质质量最小 $(9.99 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2)$, 武汉水稻地上部干物质质量最大 $(14.01 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2)$ 。由 $NRMSE$ 可知, 各站点水稻地上部干物质质量模拟精度大小依次是合肥、荆州、兴华、武汉、镇江、徐州, 且水稻地上部干物质质量随移栽天数增加呈现先上升后下降的变化趋势。

由图 2f 可知, WOFOST 模型对江淮地区各站点水稻产量观测值与模拟值的 MAE 为 $(0.43\sim 1.25) \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $RMSE$ 为 $(0.45\sim 1.33) \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$, $NRMSE$ 为 $5.49\%\sim 13.43\%$, 其中合肥水稻产量最小 $(8.16 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2)$, 兴华水稻产量最大 $(10.43 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2)$ 。由 $NRMSE$ 可知, 各站点水稻产量模拟精度大小依次是荆州、合肥、武汉、徐州、兴华、镇江。

综上所述, 说明 WOFOST 模型可以较好地模拟江淮地区水稻生长指标动态变化过程, 并具有较高的模拟精度, 其中镇江水稻 LAI, 合肥水稻叶、茎、穗和地上部干物质质量, 荆州水稻产量模拟效果最优。

3 讨论

本研究通过收集 2006~2012 年江淮地区水稻生长发育和气象资料, 对 WOFOST 模型进行调参验

证, 确定了关键发育阶段内所需积温、比叶面积、分配系数和叶枯萎速率等作物参数, 并评价了模型在江淮地区的适应性, 结果表明 WOFOST 模型可以较好地动态模拟由江淮地区光热条件和种植品种导致的水稻生长发育差异, 模拟精度与前人^[20-22]研究相近, 本研究进一步确定了模型区域适应性, 结果表明合肥水稻发育期、叶、茎、穗和地上部干物质质量, 镇江水稻 LAI 和荆州水稻产量模拟效果最优。

今后研究需要考虑 WOFOST 模型敏感参数 (TDWI 和 SPAN 等) 的空间变异性^[6]、水肥管理^[23-24]和病虫害胁迫^[25]等因素对水稻生长发育的影响, 并通过模型算法比较和集成^[18,26], 以提高模型普适性和准确性, 还需要将 WOFOST 模型与遥感技术相结合^[27], 进一步获得关键模型参数的空间分布优化值, 以提高作物模型在大区域的模拟能力, 为明确不同区域限制水稻高产稳产性的主要农业气象灾害及探究气候变化背景下江淮地区水稻气候生产潜力高产稳产性区域分布及其变化特征等方面提供技术支撑和科学参考。

4 结论

WOFOST 模型可以较好地模拟江淮地区水稻生长发育动态变化过程, 开花期、成熟期、LAI、叶干物质质量、茎干物质质量、穗干物质质量、地上干物质质量和产量观测值与模拟值的 *RMSE* 分别为 1.73~4.66 d、1.94~4.42 d、0.39~2.51、 $(0.43\sim0.86)\times 10^3\text{ kg/hm}^2$ 、 $(0.86\sim1.52)\times 10^3\text{ kg/hm}^2$ 、 $(0.52\sim1.21)\times 10^3\text{ kg/hm}^2$ 、 $(1.38\sim1.96)\times 10^3\text{ kg/hm}^2$ 和 $(0.45\sim1.33)\times 10^3\text{ kg/hm}^2$; *NRMSE* 分别为 0.75%~1.96%、0.74%~1.49%、8.74%~43.40%、14.94%~30.55%、18.16%~28.84%、9.44%~22.81%、11.33%~15.89% 和 5.49%~13.43%, 其中合肥水稻发育期、叶、茎、穗和地上部干物质质量, 镇江水稻 LAI 和荆州水稻产量模拟效果最优。水稻 LAI、叶和茎干物质质量随移栽天数增加呈现先上升后下降的变化趋势, 而穗和地上部干物质质量随移栽天数增加呈现逐渐上升的趋势。

参考文献

- [1] 程陈, 冯利平, 薛庆禹, 等. 日光温室黄瓜生长发育模拟模型. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3491-3500.
- [2] 程陈, 董朝阳, 黎贞发, 等. 日光温室芹菜外观形态及干物质积累分配模拟模型. 农业工程学报, 2021, 37(10): 142-151.
- [3] 何强, 陈立云, 邓华凤, 等. 水稻 C⁸¹⁵S 及其同源株系的育性光温特性. 作物学报, 2007, 33(2): 262-268.
- [4] Qiu R, Li L, Liu C, et al. Evapotranspiration estimation using a modified crop coefficient model in a rotated rice-winter wheat system. Agricultural Water Management, 2022, 264: 107501.
- [5] Paleari L, Movedi E, Zoli M, et al. Sensitivity analysis using Morris: Just screening or an effective ranking method?. Ecological Modelling, 2021, 455(6): 109648.
- [6] 黄健熙, 贾世灵, 马鸿元, 等. 基于 WOFOST 模型的中国主产区冬小麦生长过程动态模拟. 农业工程学报, 2017, 33(10): 222-228.
- [7] Wu L, Feng L P, Zhang Y, et al. Comparison of five wheat models simulating phenology under different sowing dates and varieties. Agronomy Journal, 2017, 109(4): 1280-1293.
- [8] 李秀芬, 马树庆, 赵慧颖, 等. 基于 WOFOST 模型的内蒙古河套灌区玉米低温冷害评价. 中国农业气象, 2016, 37(3): 352-360.
- [9] 董智强, 王萌萌, 李鸿怡, 等. WOFOST 模型对山东省夏玉米发育期与产量模拟的适用性评价. 作物杂志, 2019(5): 159-165.
- [10] Mongiano G, Titone P, Tamborini L, et al. Advancing crop modelling capabilities through cultivar-specific parameters sets for the Italian rice germplasm. Field Crops Research, 2019, 240: 44-54.
- [11] Roberto C, Marco A, Gianni B, et al. Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. Ecological Modelling, 2009, 220(11): 1395-1410.
- [12] Eitzinger J, Trnka M, Hosch J, et al. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. Ecological Modelling, 2004, 171(3): 223-246.
- [13] Gardner A S, Maclean I M D, Gaston K J, et al. Forecasting future crop suitability with microclimate data. Agricultural Systems, 2021, 190: 103084.
- [14] Singh V, Chaudhari R, Kumar N, et al. Simulation of wheat (*Triticum aestivum* L.) yield using WOFOST model under different management levels. AkiNik Publications, 2018, 7(5): 1425-1428.
- [15] 谢文霞, 严力蛟, 王光火. 运用 WOFOST 模型对浙江水稻潜在生长过程的模拟与验证. 中国水稻科学, 2006, 20(3): 319-323.
- [16] 谢晓金, 李秉柏, 李映雪, 等. 长江流域近 55 年水稻花期高温热害初探. 江苏农业学报, 2009, 25(1): 28-32.
- [17] 魏瑞江, 郑昌玲, 王鑫, 等. WOFOST 作物生长模型在国内应用研究进展. 气象科学, 2023, 43(3): 402-411.
- [18] 程陈, 李春, 李文明, 等. 园艺作物发育期和采收期模拟模型的最优模拟路径. 农业工程学报, 2023, 39(12): 158-167.
- [19] Cheng C, Feng L P, Barcena J F B, et al. A growth model based on standardized growing degree days for hydroponic fresh cut tulip in solar greenhouses. European Journal of Horticultural Science, 2022, 87(4): 1-13.
- [20] 何亮, 侯英雨, 赵刚, 等. 基于全局敏感性分析和贝叶斯方法的 WOFOST 作物模型参数优化. 农业工程学报, 2016, 32(2): 169-179.
- [21] 陈艳玲, 顾晓鹤, 宫阿都, 等. 基于遥感信息和 WOFOST 模型参数同化的冬小麦单产估算方法研究. 麦类作物学报, 2018, 38(9): 1127-1136.
- [22] 秦格霞, 吴静, 李纯斌, 等. 不同草地类型 WOFOST 模型参数敏感性分析. 草业学报, 2022, 31(5): 13-25.
- [23] Jiang G Y, Zhang W J, Xu M G, et al. Manure and mineral fertilizer effects on crop yield and soil carbon sequestration: a

- meta-analysis and modeling across China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32(11): 1659-1672.
- [24] Liu X, Li M, Guo P, et al. Optimization of water and fertilizer coupling system based on rice grain quality. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 34-46.
- [25] Yang J H, Liu H X, Zhu G M, et al. Diversity analysis of antagonists from rice-associated bacteria and their application in biocontrol of rice diseases. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, 104(1): 91-104.
- [26] Mustafa S M T, Nossent J, Ghysels G, et al. Integrated Bayesian Multi-model approach to quantify input, parameter and conceptual model structure uncertainty in groundwater modeling. *Environmental Modelling & Software*, 2020, 126: 104654.
- [27] 许伟, 秦其明, 张添源, 等. SCE 标定结合 EnKF 同化遥感和 WOFOST 模型模拟冬小麦时序 LAI. *农业工程学报*, 2019, 35(14): 166-173.

Adaptability Assessment of WOFOST Model for Simulating Rice Growth and Development in the Jianghuai Region

Wu Lu¹, Zhang Hao², Yang Feiyan¹, Guo Erjing¹, Si Linlin³, Cao Kai³, Cheng Chen⁴

(¹China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China;

²Shanghai Ecological Meteorology and Satellite Remote Sensing Center, Shanghai 200030, China;

³Institute of Environment and Resource & Soil Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, Zhejiang, China; ⁴College of Ecology, Lishui University, Lishui 323000, Zhejiang, China)

Abstract This study collected rice growth and meteorological data from 2006 to 2012 in the Jianghuai region and validated the WOFOST model by adjusting plant genetic parameters. The following crop parameters for determining development stages and rice growth, such as accumulated temperature, specific leaf area, distribution coefficient and leaf senescence rate, were calibrated, and the adaptability of the model in the Jianghuai region was evaluated. The results showed that the WOFOST model can effectively simulate the dynamic changes in rice growth and development in the Jianghuai region. The *RMSE* of the measured and simulated values for flowering period, maturity period, leaf area index (LAI), leaf dry matter weight, stem dry matter weight, panicle dry matter weight, aboveground dry matter weight, and yield were 1.73-4.66 d, 1.94-4.42 d, 0.39-2.51, (0.43-0.86)×10³ kg/ha, (0.86-1.52)×10³ kg/ha, (0.52-1.21)×10³ kg/ha, (1.38-1.96)×10³ kg/ha, and (0.45-1.33)×10³ kg/ha, respectively and the *NRMSE* were 0.75%-1.96%, 0.74%-1.49%, 8.74%-43.40%, 14.94%-30.55%, 18.16%-28.84%, 9.44%-22.81%, 11.33%-15.89%, and 5.49%-13.43%, respectively. Among different study stations, rice development stage, dry matter weight of leaves, stems, panicles, and aboveground in Hefei, LAI in Zhenjiang, and yield in Jingzhou presented the most accurate simulation results. The LAI, leaf and stem dry matter weight of rice first increased and then decreased with the increase of transplanting days, while the dry matter weight of panicles and aboveground parts showed a gradually increasing trend with the increase of transplanting days.

Key words WOFOST model; Jianghuai region; Rice; Growth and development; Adaptability