

WOFOST 模型在河南省夏玉米主产区的校准与验证

张素青¹, 张建涛², 李继蕊¹, 程永政², 李国强^{2*}

(1. 河南职业技术学院 信息工程系, 河南 郑州 450046; 2. 河南省农业科学院 农业经济与信息研究所, 河南 郑州 450002)

摘要: 为检验 WOFOST 模型在河南夏玉米主产区的适用性, 通过大田试验数据, 对 WOFOST 进行参数校准, 并利用独立数据, 对夏玉米叶面积指数、生物量、产量的模拟结果进行验证。结果表明, 校准后的 WOFOST 对叶面积指数、生物量和产量的模拟效果较好。在整个生育期内, 叶面积指数模拟值与观测值的归一化均方根误差 (NRMSE) 为 20.7%, 茎、叶、籽粒各器官干物质质量及地上部生物量模拟值与观测值的 NRMSE 分别为 10.6%、18.3%、21.3%、17.7%, 夏玉米收获产量模拟值与观测值的 NRMSE 为 6.1%。校准后的 WOFOST 可较准确地模拟夏玉米生长动态及生物量积累动态, 适用于河南夏玉米主产区夏玉米生长模拟和产量预测。

关键词: 夏玉米; WOFOST 模型; 校准; 验证; 河南省

中图分类号: S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2014)08-0152-05

Calibration and Validation of WOFOST in Main Maize-Producing Regions in Henan

ZHANG Su-qing¹, ZHANG Jian-tao², LI Ji-rui¹, CHENG Yong-zheng², LI Guo-qiang^{2*}

(1. Department of Information Engineering, Henan Polytechnic College, Zhengzhou 450046, China;

2. Agricultural Economy & Information Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To test applicability of WOFOST model in main maize-producing regions in Henan province, WOFOST model was firstly calibrated by the field data collected in 2007, and then the simulated and measured values of leaf area index (LAI), total biomass, and grain yield were compared in Zhengzhou, Xinxiang and Xuchang of Henan province, to evaluate the simulation performance of WOFOST. The results showed that the model could simulate well the leaf area index, total aboveground dry matter, and yield. In the whole growth period, the normalized root mean square error (NRMSE) for LAI was 20.7%, and the NRMSE for dry weight of stems, leaves, grains, and total aboveground part were 10.6%, 18.3%, 21.3%, 17.7% respectively. The NRMSE for grain yield at harvest was 6.1%. The calibrated model can satisfactorily simulate the dynamical process of growth and development of summer maize, and is suitable for simulation of maize growth and prediction of maize yield in Henan province.

Key words: summer maize; WOFOST model; calibration; validation; Henan province

河南省是我国玉米单产、总产及种植面积较大的省份之一, 常年种植面积在 300 万 hm^2 左右^[1]。玉米单产与其他粮食作物相比, 年际间波动的幅度更大^[2], 因而准确预测夏玉米产量, 对确保国家粮食

安全、指导和调控宏观种植结构有重要的意义^[3]。作物模型以作物生理生态原理为基础^[4], 能预测作物的生长发育动态及籽粒产量, 为作物产量估计和预测提供了新途径。WOFOST 是由瓦赫宁根农业

收稿日期: 2014-04-10

基金项目: 国家高分辨率对地观测系统重大专项 (09-Y30B03-9001-13/15); 河南省重大科技专项 (121100110900); 河南省超级产粮大省奖励资金扶持农业科研项目 [豫财农 (2011) 140 号]

作者简介: 张素青 (1968-), 女, 河南温县人, 副教授, 硕士, 主要从事算法设计、数据库系统设计与应用等研究。

E-mail: 280946342@qq.com

* 通讯作者: 李国强 (1984-), 男, 河南林州人, 助理研究员, 博士, 主要从事农业信息技术研究。E-mail: guoqiangli@ymail.com

大学和瓦赫宁根农业生物研究中心联合研制,模拟特定土壤和气候条件下1年生作物生长的动态解释性模型。模型以同化作用、呼吸作用、蒸腾作用和干物质分配等作物生理生态过程为基础,主要包括潜在生长条件、水分限制条件和养分限制条件下作物生长的模拟^[5]。WOFOST已成功应用于作物对低温冷害^[6]和干旱^[7]的响应、未来气候变化对作物的影响^[8]、作物产量估计和预测^[9]研究。在国内,一些学者已在东北地区和华北平原开展了WOFOST的验证与适用性分析研究,并利用该模型模拟小麦^[10-11]、玉米^[12]和水稻^[13]生产情况,而该模型在河南省夏玉米主产区的适用性分析尚未见报道。为此,本研究基于河南省3个地点(郑州、新乡、许昌)资料,对WOFOST模拟夏玉米生长发育、叶面积指数、生物量和产量的效果进行分析,以期为该地区夏玉米生产提供技术指导。

1 材料和方法

1.1 数据收集及整理

1.1.1 气象数据 气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网^[14]。根据Angstron(埃斯屈朗)公式^[15],将日照时数转换为太阳总辐射:

$$R_s = R_{max} (a_s + b_s \frac{n}{N}) \quad (1)$$

式中, R_s 为太阳总辐射(MJ/m^2); R_{max} 为天文辐射,即晴天太阳辐射量(MJ/m^2); a_s 、 b_s 为经验常数,河南属温带地区,取 a_s 为0.18, b_s 为0.55; n 为逐日太阳日照时数(h), N 为逐日日照时数,即最大时长(h)。

1.1.2 作物数据 根据郑州、新乡、许昌1985—2012年夏玉米的生育期资料和同期逐日气象资料,对夏玉米主要生育阶段(播种—出苗、出苗—开花、开花—成熟)的有效积温进行统计,并计算3个生育阶段的有效积温。

1.1.3 土壤数据 参照河南省1:200 000分县土壤类型图(1988年)和河南省1:1 500 000农业资源、土壤背景数据库(1988年)以及《河南土壤》^[16],详细土壤参数见表1。

表1 研究区土壤质地及参数

地点	土壤质地	凋萎湿度/ (cm^3/cm^3)	田间持水量/ (cm^3/cm^3)	饱和含水量/ (cm^3/cm^3)	饱和导水率/ (cm/d)
郑州	砂壤土	0.066 2	0.308	0.483	16.5
新乡	砂土	0.065 2	0.315	0.500	50.0
许昌	壤土	0.106 0	0.332	0.463	5.0

1.2 试验设计及测定项目

1.2.1 试验设计 试验1(郑州):于2007年和2008

年在河南农业大学科教园区($\text{E}113^{\circ}36'$, $\text{N}34^{\circ}38'$)进行。宽窄行种植,宽行80 cm,窄行40 cm,株距30 cm,密度为6.75万株/ hm^2 。小区面积24 m^2 ,按照纯N:P₂O₅:K₂O=350 kg:150 kg:180 kg施肥。供试品种为浚单20,2 a均为6月10日播种,9月27日收获。详见文献^[17]。

试验2(新乡):于2013年在新乡延津县原种场试验地($\text{E}114^{\circ}12'$, $\text{N}35^{\circ}11'$)进行。供试品种为浚单20,密度为6.75万株/ hm^2 。6月15日播种,9月25日收获。施肥量同试验1,其他管理同高产田。

试验3(许昌):于2013年在许昌禹州褚河镇新庄村($\text{E}113^{\circ}58'$, $\text{N}34^{\circ}10'$)进行。供试品种为浚单20,密度为6.75万株/ hm^2 。6月10日播种,9月25日收获。施肥量同试验1,其他管理同高产田。

1.2.2 测定项目 于玉米各生育时期,选取生长均一的植株,按叶片、茎鞘、穗、籽粒分开,105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青30 min后,80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,称得干质量。采用比叶重法计算叶面积指数。成熟期每小区收获3株进行室内考种,同时收获10 m^2 实收测产。

1.3 模型验证

采用模拟值与观测值的线性回归系数(a)、截距(b)、决定系数(R^2)、一致性指数(D)、均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(NRMSE)对模拟结果进行定量评价。公式如下:

$$D = 1 - \frac{\sum (s_i - o_i)^2}{\sum (|s_i - o| + |o_i - o|)^2} \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$\text{NRMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - s_i)^2}{n}} \times \frac{100\%}{O} \quad (4)$$

式中, O_i 为观测值, S_i 为模拟值, O 为观测平均值, n 为样本数。 $\text{NRMSE} \leq 10\%$,为极好; $10\% < \text{NRMSE} \leq 20\%$,为好; $20\% < \text{NRMSE} \leq 30\%$,为中等; $\text{NRMSE} > 30\%$,为差。 D 和 R^2 值越接近1,说明模拟值和观测值一致性越好。

2 结果与分析

2.1 模型参数校准

不敏感的生长参数或敏感性较高但取值变化范围较小的生长参数,结合WOFOST模型默认值通过查阅文献获取;对于敏感性较高且与品种有关的生长参数,查阅文献获得参数取值范围,再通过“试错法”调整。选择试验1(郑州)2007年结果调整模型中作物参数,进行模型校准,直到模拟值与观测值最为接近。部分校准后的模型参数见表2。

表 2 WOFOST 模型部分参数校准结果

参数	含义	单位	取值
TSUM1	出苗—开花有效积温	℃	950
TSUM2	开花—成熟有效积温	℃	921
RML	叶片相对维持呼吸速率	kg/(kg·d)	0.03
RMO	储藏器官相对维持呼吸速率	kg/(kg·d)	0.01
RMR	根相对维持呼吸速率	kg/(kg·d)	0.01
RMS	茎相对维持呼吸速率	kg/(kg·d)	0.015
SPAN	35℃环境下叶生存周期	d	45
TDWI	初始总干物质质量	kg/hm ²	12

注:各器官相对维持呼吸速率表示每天每千克鲜质量消耗的碳水化合物质量。

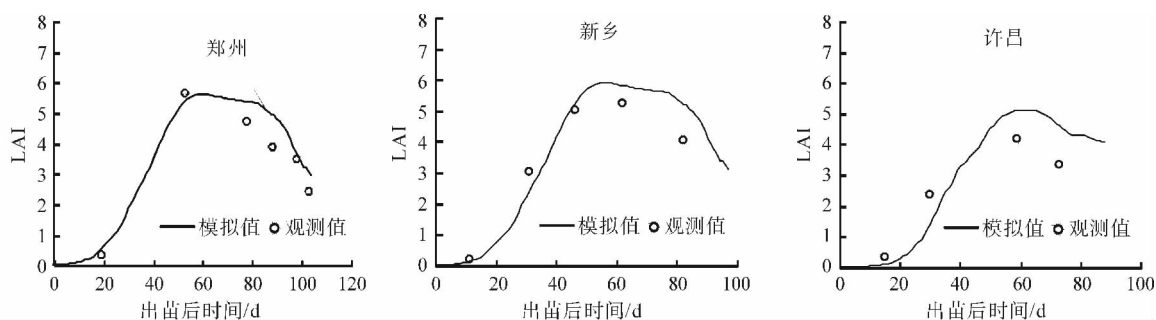


图 1 夏玉米 LAI 动态模拟值与观测值比较

表 3 河南省夏玉米主产区 LAI、生物量和产量模拟值与观测值统计分析

项目	<i>n</i>	<i>O(sd)</i>	<i>S(sd)</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>RMSE</i>	<i>NRMSE</i> /%	<i>D</i>
LAI	15	3.2 (1.7)	3.6 (2.0)	1.122 7	-0.045 6	0.929 4	0.67	20.7	0.967
茎干质量/(t/hm ²)	18	4.0 (2.4)	4.1 (2.4)	1.002 9	0.129 3	0.972 7	0.42	10.6	0.992
叶干质量/(t/hm ²)	18	2.3 (1.2)	2.2 (1.1)	0.893 5	0.122 7	0.882 8	0.42	18.3	0.966
籽粒干质量/(t/hm ²)	12	6.1 (3.7)	7.1 (4.2)	1.103 3	0.360 8	0.968 9	1.30	21.3	0.974
地上部总干质量/(t/hm ²)	18	10.3 (7.1)	11.6 (8.0)	1.125 1	-0.070 8	0.983 1	1.83	17.7	0.985
收获产量/(t/hm ²)	3	9.7 (1.0)	10.8 (1.8)	1.055 9	-4.316 8	0.803 9	0.60	6.1	0.756

注:*O*、*S* 分别为观测、模拟平均值;*sd* 为标准差。

2.3 夏玉米干物质积累验证

在郑州、新乡和许昌,夏玉米茎、叶、籽粒和地上部总干质量的模拟值与观测值变化趋势一致(图 2)。整个生育期,郑州和新乡夏玉米茎干质量的模拟值与观测值非常接近,而从出苗后 60 d 起,许昌夏玉米茎干质量的模拟值大于观测值。郑州和新乡夏玉米叶干质量模拟值与观测值非常接近,而许昌夏玉米大部分生育时期叶干质量模拟值比观测值高。新乡夏玉米籽粒干质量的模拟值大于观测值,郑州和许昌的籽粒干质量模拟值与观测值非常接近。从地上部植株总干质量的模拟效果来看,WOFOST 在新乡的模拟效果比郑州和许昌的模拟效果好。

2.2 夏玉米叶面积指数(LAI)验证

由图 1 可知,郑州、新乡、许昌夏玉米 LAI 的模拟值和观测值变化趋势一致,均表现为先增加后降低的趋势。从出苗至出苗后约 50 d,3 个地点 LAI 的模拟值比观测值低,而从出苗后 50 d 至成熟,3 个地点夏玉米 LAI 模拟值均比观测值高,其中许昌夏玉米 LAI 模拟值与观测值差异最大。

为检验 WOFOST 模型在郑州、新乡、许昌 3 个地点的模拟精度,对模拟值与观测值进行统计分析。3 个地点夏玉米 LAI 模拟的 *R*² 为 0.929 4,*D* 指数为 0.967,*NRMSE* 为 20.7%(表 3),表明 WOFOST 对整个生育期玉米 LAI 动态的模拟精度较好。

从表 3 可知,3 个地点夏玉米茎干质量模拟的 *R*² 为 0.972 7,*NRMSE* 为 10.6%,*D* 指数为 0.992;叶干质量模拟的 *R*² 为 0.882 8,*NRMSE* 为 18.3%,*D* 指数为 0.966;籽粒干质量模拟的 *R*² 为 0.968 9,*NRMSE* 为 21.3%,*D* 指数为 0.974。这表明,WOFOST 对玉米整个生育期茎、叶、籽粒干物质积累动态的模拟精度较好。

2.4 夏玉米产量验证

由表 3 可知,3 个地区夏玉米收获产量模拟值均值与观测值均值较接近,相差 1.1 t/hm²。*a* 接近于 1,*R*² 为 0.803 9,*NRMSE* 和 *D* 指数分别为 6.1%和 0.756,可知 WOFOST 在河南夏玉米主产区的模拟精度和性能均较好。

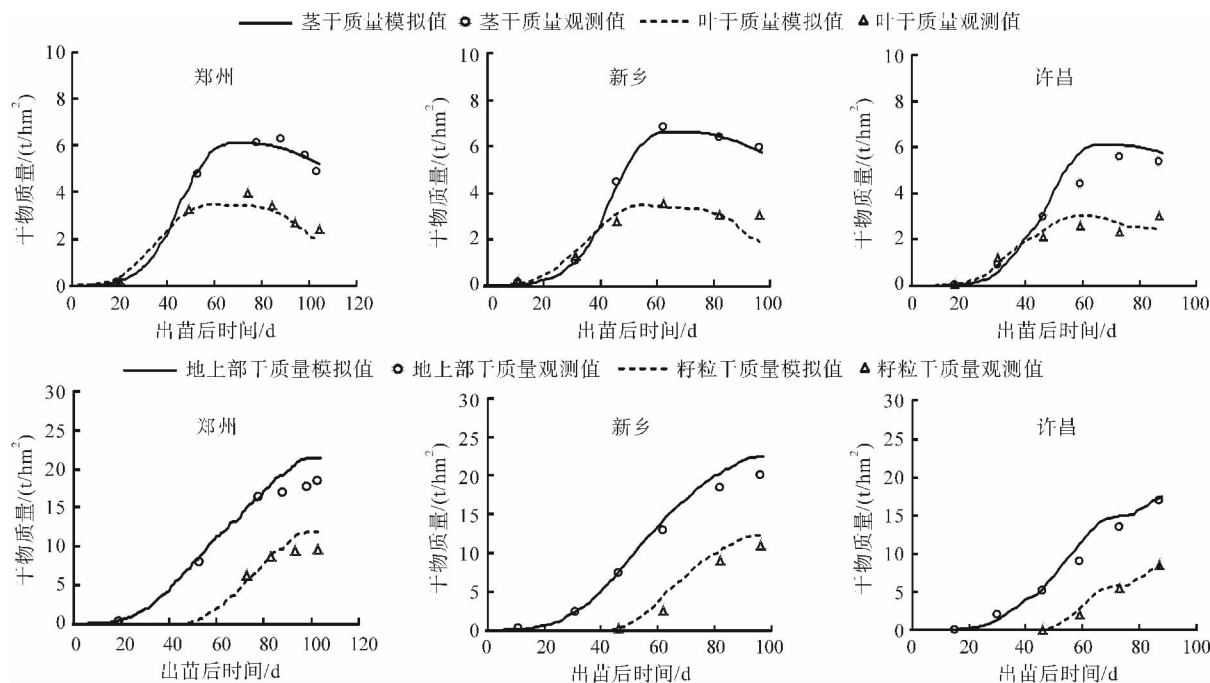


图2 夏玉米生物量积累动态模拟值与观测值比较

3 结论与讨论

模型验证的主要目的是使模型参数适应当地环境条件(如土壤类型和气象条件)和作物品种,从而使模拟值与观测值达到较好的符合度。因此,作物模型的验证与适应性评价对于模型引进及应用至关重要^[18-19]。本研究基于河南省3个地点的观测资料、当地土壤资料和逐日气象数据,对WOFOST模拟夏玉米生长的效果进行验证。结果表明,模拟结果与观测结果基本一致,WOFOST可较为准确地模拟夏玉米生长发育及其生物量的动态累积过程。夏玉米叶面积指数的NRMSE为20.7%,地上部干物质量的NRMSE为17.7%,产量的NRMSE为6.1%。Kassie等^[20]利用埃塞俄比亚中部地区夏玉米试验数据对WOFOST进行验证,结果表明,玉米潜在产量的模拟值与观测值相差0.2 t/hm²。Ghanbari等^[21]利用伊朗2001—2004年小麦生长资料对WOFOST进行验证,校准后的WOFOST模拟小麦产量的NRMSE为15%,地上部干物质量的NRMSE为14%。与以上验证结果相比,本研究校准后的WOFOST对籽粒产量的模拟效果有明显提高,对地上部干物质量的模拟效果也在合理范围内。

本研究利用河南夏玉米主产区夏玉米田间试验资料,对WOFOST模型在模拟夏玉米生长发育和产量形成方面作了初步检验。表明WOFOST模型能够比较准确地模拟夏玉米生物量、叶面积指数及最终产量,尤其在模拟收获产量上具有较高的准确性。

参考文献:

- [1] 王振华,张新,唐保军,等. 河南省玉米育种研究进展、问题与对策[J]. 河南农业科学, 2005(1): 17-18, 30.
- [2] 黄绍敏,杨先明,皇甫湘荣,等. 不同栽培因子对河南玉米产量的影响程度[J]. 玉米科学, 2006, 14(3): 116-119.
- [3] 陈思宁,赵艳霞,申双和,等. 基于PyWOFOST作物模型的东北玉米估产及精度评估[J]. 中国农业科学, 2013, 46(14): 2880-2893.
- [4] 郑国清,李国强,冯晓,等. 基于模型的冬小麦—夏玉米两熟数字化种植设计系统构建[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(2): 284-289.
- [5] 杨妍辰,王建林,宋迎波. WOFOST作物模型机理及使用介绍[J]. 气象科技进展, 2013, 3(5): 29-35.
- [6] 张建平,王春乙,赵艳霞,等. 基于作物模型的低温冷害对我国东北三省玉米产量影响评估[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4132-4138.
- [7] Kroes J G, Supit I. Impact analysis of drought, water excess and salinity on grass production in the Netherlands using historical and future climate data[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 144(1): 370-381.
- [8] 米娜,张玉书,蔡福,等. 未来气候变化对东北地区玉米单产影响的模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(8): 117-123.
- [9] 刘玲,刘建栋,邬定荣,等. 华北平原夏玉米生产潜力数值模拟及其自然正交分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(33): 85-93.

- [10] 马玉平,王石立,张黎. 针对华北小麦越冬的 WO-FOST 模型改进[J]. 中国农业气象,2005,26(3):145-149.
- [11] 邬定荣,刘建栋,刘玲,等. 华北地区冬小麦生产潜力数值模拟[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(5):7-14.
- [12] 陈振林,张建平,王春乙,等. 应用 WOFOST 模型模拟低温与干旱对玉米产量的综合影响[J]. 中国农业气象,2007,28(4):440-442.
- [13] 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[J]. 中国水稻科学,2006,20(3):319-323.
- [14] 中国气象科学数据共享服务网. 中国地面气候资料日值数据集[DB/OL]. (2004-08-17) [2014-04-12] <http://cdc.cma.gov.cn/home.do>.
- [15] 王文佳,冯浩. 基于 CROPWAT-DSSAT 关中地区冬小麦需水规律及灌溉制度研究[J]. 中国生态农业学报,2012,20(6):795-802.
- [16] 河南省土壤普查办公室. 河南土壤[M]. 北京:中国农业出版社,2004.
- [17] 杨春收. 磷肥及施用位置对夏玉米生长发育及产量的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2009.
- [18] 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.
- [19] van Ittersum M K, Leffelaar P A, van Keulen H, *et al*. On approaches and applications of the Wageningen crop models [J]. European Journal of Agronomy, 2003,18(3/4):201-234.
- [20] Kassie B T, Van Ittersum M K, Hengsdijk H, *et al*. Climate-induced yield variability and yield gaps of maize (*Zea mays* L.) in the Central Rift Valley of Ethiopia [J]. Field Crops Research,2014,160(1):41-53.
- [21] Ghanbari A, Taei-Semiromi J. New approach for regional crop yield gap analysis in the Borujen Plain, Iran [J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11 (23):6367-6368.

(上接第 151 页)

- [4] Hyman D H. Method of making DNA ladders; US, 5939293[P]. 1999-08-17.
- [5] Hartley J L. Nucleic acid marker ladder for estimating mass;US,7132520[P]. 2006-11-07.
- [6] Hu A L W, Hartley J L, Jordan H J. Nucleic acid ladders;US,6924098[P]. 2005-08-02.
- [7] 刘慧娟,冯志国,何光源. 利用 PCR 技术快速制备 DNA 分子量标准物[J]. 生物技术,2008,18(2):38-39.
- [8] 乔宁,李美芹,郭宝太,等. 山东寿光地区番茄黄化曲叶病毒外壳蛋白基因克隆及其在大肠杆菌中的表达[J]. 中国蔬菜,2012(6):35-40.
- [9] 张守峰,邱薇,扈荣良. 1 个新的 DNA 分子量标准物[J]. 中国兽医学报,2000,20(3):227-229.