

河南省不同生态区 CERES – Maize 模型 参数确定及精度验证

李树岩, 余卫东

(中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室/河南省气象科学研究所, 河南 郑州 450003)

摘要: 本研究将河南夏玉米主产区划分为 4 个生态区, 利用全省 18 个站近十余年农气观测资料对 CERES – Maize 模型进行参数调试和验证, 其中 2003—2005 年为模型调参年份, 2006—2010 年为模型验证年份。根据各生态区的多站点调参验证的平均状态, 获得 4 套模型区域品种参数。由各生态区夏玉米品种遗传参数可知, I 区全生育期所需积温最多, 其次是 III 区和 IV 区; 单穗潜在最大籽粒数 I 区最高, III 区次之, IV 区最低; 灌浆速率参数 III 区略小, 其他地区较相近。各生态区生物量和产量的模拟和验证结果表明, 归一化均方根误差 NRMSE 均小于 20%, 模型对各生态区生物量和产量模拟能力较强。但各生态区模拟效果有一定差异, 其中生物量调试结果中观测值与模拟值均值较接近, 验证结果中实测值较模拟值普遍偏大, 尤其是 I 区和 II 区。在产量验证中, I 区和 II 区模拟值略低于观测值, 而 III 区和 IV 区模拟值略高于观测值。I – III 区生物量和产量的观测值和模拟值相关系数 r 均通过显著检验, 模型对于这些地区生物量及产量增减的变化趋势模拟较好。对生物量和叶面积指数的动态模拟及验证结果表明, 地上部总生物量动态增长的拟合效果较好。叶面积指数观测值略滞后于模拟值, 但总体趋势吻合度较好。

关键词: CERES – Maize; 作物模型; 调参验证; 夏玉米

中图分类号: S314 **文献标志码:** A

Applicability analysis of CERES – Maize model in different agro-ecological zone of Henan

LI Shu-yan, YU Wei-dong

(China Meteorological Administration/Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied
Technique in Henan Province /Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou, He'nan 450003, China)

Abstract: The main production region of summer maize in Henan Province was divided into four agro-ecological zones. The genetic parameters of representative maize varieties in each zone were determined to calibrate and validate CERES – Maize model by using data from 18 agro – meteorological stations in recently ten years. The data from 2003 to 2005 were used for calibration and from 2006 to 2010 for validation. According to the mean values of calibration and validation in different zones, four sets of zonal variety parameters for modeling were gotten. From the genetic parameters of maize in different zones, it was found that the accumulated temperature in zone I was the largest, followed by zone III and IV; the potential maximum number of kernels per ear was the largest in zone I, followed by zone III, and it was the lowest in zone IV; the kernel filling rate was relatively low in zone III, and it was similar in other zones. The calibration and validation results of biomass and yield in different zones showed that the normalized root mean square error (NRMSE) was lower than 20%. The ability of CERES – Maize model was strong in simulating biomass and yield in different zones, but there were some spatial differences in simulating effect. The observed value was close to the simulated value in calibration period of biomass, but it was generally greater than the simulated value in validation period, especially for zone I and II. In validation period of yield, the simulated value was lower than the observed value in zone I and II, but greater in zone III and IV. The correlation coefficients between observed value and simulated value of biomass and yield in zone I to III wholly passed the significance test, so the simulating effect of biomass and yield was good in these zones. Ac-

收稿日期: 2015-12-20

基金项目: 中国气象局气候变化专项 (CCSF201408)

作者简介: 李树岩 (1979—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事农业气象灾害、作物模型应用等研究。E-mail: lsy-126com@126.com。

according to the calibration and validation results of biomass and leaf area index, it was found that the simulating effect of above-ground biomass was good. The observed value of leaf area index slightly lagged behind the simulated value, but their overall trend coincided quite well.

Keywords: CERES-Maize; crop model; calibration and validation; summer maize

作物生长模型是用数学方程描述作物、气候、土壤之间的作用过程,可以较为精确地描述光、温、水存在状况对作物生长发育的影响,具有通用性强、覆盖面广、方法简单等特点。在气候变化对农业的影响评估、粮食产量预测、灾害风险评估等研究领域作物模型的应用受到越来越广泛的重视^[1-3]。作物模型的研究国内外都有很大进展^[4-5],模拟玉米生长发育的作物模型也较多,其中美国密歇根州立大学研发的 CERES-Maize 是较为成熟的模型之一^[6-7],最早被纳入美国 DSSAT 系统^[8]。由于 CERES-Maize 的应用不限于特定的地点、品种、气候、土壤和栽培方法,已在世界主要的玉米生产国得到了广泛的验证^[9-11],我国学者在模型应用方面也做了大量的工作^[12-16]。模型的校准与验证是保证作物模型模拟精度和可靠性的必要前提^[17-18],如胡亚楠等^[19]利用全国主要玉米种植区域 70 站的观测数据,对玉米生育期和产量的模拟能力进行验证。张艳红^[20]利用单个曲周实验站的资料对玉米模型进行了本地化验证分析,居辉等^[21]以寿阳试验站为例,验证了模型的模拟能力等。近年来基于作物生长模型的遥感信息同化成为国内外研究的一个热点^[22-24]。作物模型与遥感信息耦合首先需要考虑模型“本地化”和“区域化”问题^[25]。

随着遗传育种工作的发展,作物品种更替加快,一方面某一特定品种长序列的定位观测数据较难获得,另一方面使用年代较早的品种观测数据调试验证模型参数,对当前玉米生产的指导意义不大。因此,选择最近年代的观测数据,不拘泥于某一具体品种对模型进行较大范围的调试验证,获取区域代表性的模型参数可为模型的大范围应用奠定基础。在气候变化背景下,作物品种变化与气候条件的变化越来越紧密,作物模型的区域适用性也需要进一步验证^[26]。

夏玉米是河南最主要的秋粮作物,至 2013 年全省播种面积 320.3 万 hm^2 ,总产 1 796.5 万 t ^[27],在保障全国粮食安全中发挥了重要作用。应用作物模型开展河南省夏玉米生产管理决策等研究是未来的发展重要方向之一。进行模型参数的本地化调试与验证,提高参数率定的准确率,是利用作物模型开展各项研究的基础。因此,本研究首先根据河南省气候、

地形、土壤等特征将全省划分为 4 个不同生态区,利用近 10 余年的农气观测资料分别进行模型参数的调试验证,以不同生态区的多点平均状态作为“区域品种”参数,消除单点数据的空间波动性。从生育期长度、地上部生物量、叶面积指数动态变化和产量等方面,对模型的适用性进行分区评估,为 CERES-Maize 模型在河南的进一步应用提供研究基础。

1 材料与方法

1.1 CERES-Maize 模型

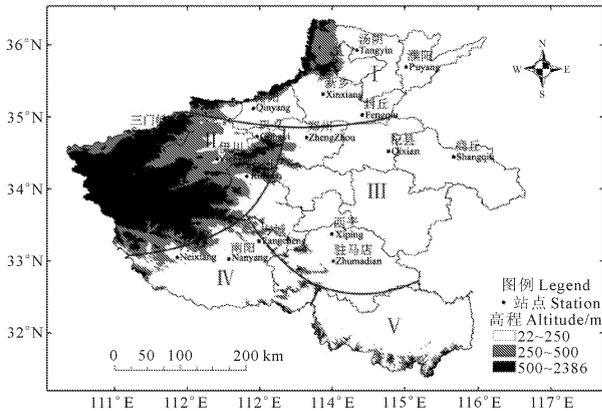
CERES-Maize 是 DSSAT4.5 中的玉米模型,该模型以日为步长,可模拟作物品种特性、耕作措施、土壤水分及养分状况对作物生长发育和产量形成过程的影响^[8]。CERES 模型包括土壤水分平衡、发育时段、作物生长等,用积温模拟发育时段,根据叶片数、叶面积增长、光的截获及其利用、干物质在各个器官中的分配等模拟作物生长,被广泛应用于不同环境条件下的作物估产、作物品种培育、农业优化管理措施的决策、气候变化对农业的影响方面的评价。模型通过 6 个品种特性参数来控制发育期进程及产量形成的模拟,包括:P1 幼苗期生长特性参数,P2 光周期敏感系数,P5 灌浆期特征参数,G2 单株潜在的最大穗粒数,G3 潜在灌浆速率参数,PHINT 指出叶间隔特性参数。

1.2 资料收集与处理

1.2.1 气象数据 CERES-Maize 模型运行所需最小气象资料集包括:逐日太阳辐射,最高、最低气温和降水量四个要素。由于太阳辐射量没有观测数据,利用埃斯屈朗(Angstrom)^[28]方程将日照时数转换为太阳辐射量。选取河南省夏玉米主产区 2003—2010 年 18 个农业气象观测站气象资料进行模型参数调试和验证。

夏玉米品种多且更新较快,相同的品种在不同气候条件下表现也不一致。因此,本文根据河南省地形、气候等特点和夏玉米生产品种布局将全省划分为 5 个区(图 1),各生态区的代表站点如表 1 所示,其中 V 区以水稻种植为主不作为研究区域。已有研究表明,利用足水足肥处理数据估计模型参数,用其他处理的数据来进行模型验证,能获得较高的模拟精度^[29],经统计 2003—2005 年为降水丰沛年

型,因此大多数站点均利用 2003—2005 年的农气观测资料进行模型参数调试,利用 2006—2010 年的资料进行模型验证。第 III 区的驻马店和西平两个站点由于 2003 年降水过多造成大面积洪涝灾害,导致夏玉米严重减产,但 CERES - Maize 模型没有考虑洪涝灾害对作物生长发育的影响,因此相应站点选择 2004—2006 年为调参年份,2007—2010 年为验证年份。



注:I-IV 区为夏玉米主产区,V 区以水稻为主,不作为研究区域

Note: I - IV are the main summer maize production areas and V is not in the scope of study areas because it is mainly used for rice production.

图 1 河南省分区示意图

Fig. 1 Agro-climatic zoning map of Henan Province

表 1 各生态区调参代表站

Table 1 The representative stations in different zones

区域 Zone	代表站点 Station
I	沁阳、封丘、新乡、汤阴、濮阳 Qinyang, Fengqiu, Xinxiang, Tangyin, Puyang
II	三门峡、卢氏、伊川、汝州、巩义 Sanmenxia, Lushi, Yichuan, Ruzhou, Gongyi
III	郑州、杞县、驻马店、西平、商丘 Zhengzhou, Qixian, Zhumadian, Xiping, Shangqiu
IV	内乡、南阳、方城 Neixiang, Nanyang, Fangcheng

1.2.2 作物数据 作物数据选取河南省夏玉米主产区 2003—2010 年 18 个农业气象观测站农气观测资料,主要包括发育期,理论产量及产量结构要素(百粒重、穗粒重)等。郑州农试站在常规农气观测内容的基础上又增加了生物量、叶面积生长动态观测,在出苗、七叶、拔节、抽雄、乳熟、成熟六个发育期取样测定。

为使模型模拟的产量接近大田水平,需要对理论产量进行换算,即实际产量 = 理论产量 * 0.85, 0.85 为换算系数^[30]。同理,计算地上部总生物量也需要对茎秆重进行换算。即,地上部总生物量 = (茎

秆重 + 理论产量) * 0.85。

1.2.3 土壤数据 土壤数据来源于《河南土壤地理》和《河南土种志》,经统计,潮土、褐土、黄褐土、砂浆黑土和水稻土 5 种土壤类型土壤占全省耕地面积的 94.9%^[31],由于河南水稻土上少有夏玉米种植,最终选择潮土、褐土、黄褐土、砂浆黑土作为河南省夏玉米主产区典型地段土壤类型。参考各土壤类型的主要理化参数^[32]建立相应的土壤类型文件。

1.2.4 田间管理措施 田间管理措施主要包括播种密度、深度、播种日期、灌溉时间及灌溉量、施肥时间及施肥量等,参考农业气象观测数据的田间工作记载。

1.3 品种遗传参数的调试验证方法

各生态区选择连续 3 a 的农业气象观测资料及平行气象和土壤剖面资料,采用“试错法”对各品种的遗传参数进行调试。首先通过调整 P1 和 P2 参数确定开花期,在此基础上调整 P5 参数确定成熟期。PHINT 为出叶间隔特性参数,对生育期的长度也有影响。调整 G2 和 G3 值确定最大穗粒数和潜在灌浆速率,使穗粒数和成熟期粒重与观测值相吻合。利用初步确定的参数运行作物模型,然后对参数进行适度微调,使模型模拟的发育期、生物量、产量及产量结构要素等最大限度的接近于实测值,均方根误差(RMSE)达到最小为最佳参数标准。

1.4 模型调参验证评价指标

对模型模拟的生物量和产量进行验证,选择模拟值与观测值的均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(NRMSE)和相关系数(r)作为模型的验证指标。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$NRMSE = 100 \frac{RMSE}{M} \% \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (3)$$

式中, M_i 和 S_i 分别代表实测值和模拟值; \bar{M} 和 \bar{S} 分别为实测值和模拟值的平均值; n 为样本数。RMSE 和 NRMSE 反映模拟值与实测值的绝对误差和相对误差,另外,模型模拟的准确性也受观测误差的影响,实测数据结果的稳定性用标准误差和变异系数来反映。当 RMSE 接近标准误差时,表明模型模拟精度高。当 NRMSE < 10%,表示模型模拟结果很好;当 NRMSE 在 10% ~ 20% 范围内,表示模型模拟

结果好;当 NRMSE 在 20% ~ 30% 范围内,表示模型模拟结果是可以接受的;NRMSE > 30% 则表示模型模拟结果较差不能接受。相关系数 r 表示模拟值与实测值变化的一致性,越接近于 1 相关性越好。

2 结果分析

2.1 各生态区夏玉米品种遗传参数的调试结果

模型调试验证后的品种遗传参数如表 1 所示,调整 P1 和 P2 主要影响开花期长度,II 区完成开花期所需的积温较其他地区偏多,P2 为光周期敏感系数,各个区域品种间差异不大。P5 主要控制开花至成熟期的长度,I 区和 III 区开花 - 成熟所需积温较接近,大于 II 区和 IV 区。综合可知 I 区品种偏晚熟,全生育所需积温最多,自播种至成熟需要 $1\ 030\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ (P1 + P5),其次是 III 区全生育期所需积温为 $990\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ (P1 + P5),II 区和 IV 区偏早熟。根据实测数据也可知 I 区和 II 区从播种到成熟期分别为 107 d 和 106 d,生育期持续日数基本一致,但 II 区热量条件差,表明品种熟性差别较大。PHINT 表征出叶间隔所光热条件,II 区稍大为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,其它地区为 $48\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

穗粒数和粒重构成夏玉米产量的两个主要要素。单穗潜在最大籽粒数 G2 参数是 I 区最高,其次是 III 区,IV 区最低。灌浆特性参数 G3 主要影响灌浆速率,决定最终粒重,各区域中 III 区略小,其他三个地区较相近。综合两个参数取值分析,I 区的产量水平最高。

2.2 发育期调试和验证

发育期模拟验证结果见文献[33]。开花期和成熟期模型模拟值均较好地匹配了实测值,二者基本在 1:1 线和 $\pm 5\%$ 的误差线附近,且偏离度较小。开花期各区域模型调试与验证结果的 RMSE 均为 2 ~ 4 d,成熟期模型参数调试结果各区域 RMSE 均小于 4 d,模型验证结果 RMSE 在 3 ~ 7 d 内变化。主要发育期参数调试和验证结果的 NRMSE 均在 10% 以内,表明模拟精度较高。

表 2 各生态区夏玉米品种遗传参数

Table 2 Genetic parameters of summer maize varieties in different zones

品种参数 Parameter	参数值 Parameter value			
	I	II	III	IV
P1/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$)	210	232	210	210
P2	0.65	0.60	0.65	0.65
P5/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$)	820	710	780	700
PHINT/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$)	48	50	48	48
G2/(no. · stem $^{-1}$)	980	860	900	820
G3/(mg · day $^{-1}$)	7.9	7.9	7.6	8.0

2.3 地上部总生物量调试和验证

图 2 显示模型调参和验证结果中地上部总生物量的模拟值和观测值比较,调参结果图显示,大部分数据分布在 1:1 线附近,在 $\pm 20\%$ 误差线之内,且偏离度较小,表明模型模拟地上部生物量效果较好。验证结果图显示,第 I ~ III 区大部分点虽然较接近 1:1 线,但位于下方点较多,表明模型验证结果模拟值较实测值略偏低。由表 2 模型调试结果可知,实测值和模拟值的平均值 X_{obs} 和 X_{sim} 差距不大,I 区的 NRMSE 为 7.7% 模拟效果最好,其地区也都在 10% ~ 20% 之间,表明模型模拟结果较好。相关系数 r 的分析表明,除 IV 区外,模拟值与实测值的相关系数分别通过 0.01 和 0.05 水平的显著检验。在参数验证结果的统计表中, X_{obs} 和 X_{sim} 也较为接近,但模拟值较实测值略偏低。模型验证结果 RMSE 为 $1\ 354 \sim 2\ 392\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,高于调试结果的 $945 \sim 1\ 493\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,验证结果精度稍差一些,但模型验证结果的 NRMSE 也都在 10% ~ 20% 之间,是可以接受的。I ~ III 区模拟值与实测值的相关系数 r 均达到 0.01 的显著水平,表明验证结果中模拟生物量与实测生物量变化的一致性较好。以上分析表明虽然验证年份模型对生物量的模拟精度略偏低,但整体上对夏玉米生物量的模拟效果较好。

表 3 夏玉米地上部总生物量参数调试和验证评价指标

Table 3 Evaluation indexes of biomass for calibration and validation periods in different zones

区域 Zone	模型调试结果 Calibration result					模型验证结果 Validation result				
	X_{obs} /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	X_{sim} /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	RMSE /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	NRMSE /%	r	X_{obs} /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	X_{sim} /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	RMSE /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	NRMSE /%	r
I	12216	12040	945	7.7	0.907**	13393	11692	2243	16.7	0.799**
II	9510	9546	1493	15.7	0.721**	13407	11700	2392	17.8	0.802**
III	11389	11127	1197	10.5	0.566*	12698	11697	1546	12.2	0.613**
IV	9730	9547	1217	12.5	0.557	10435	10146	1354	13.0	0.427

注: ** 和 * 表示相关系数通过 0.01 和 0.05 的显著水平,下同。

Note: ** and * indicate significance at $P < 0.01$ and $P < 0.05$, respectively, the same below.

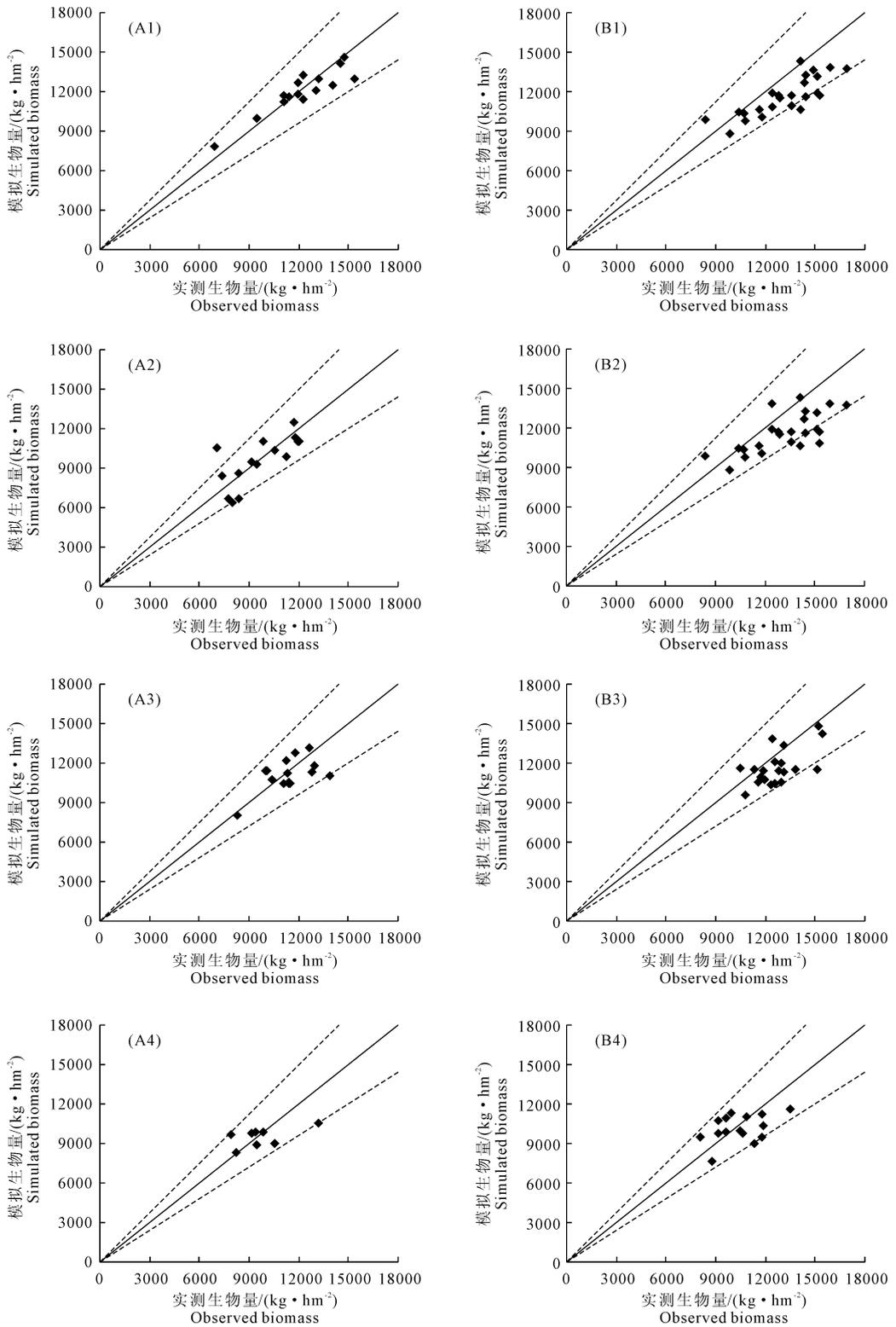


图 2 各区域模型参数调试(A)与验证(B)结果中夏玉米生物量模拟值和实测值比较

Fig.2 Comparison between simulated and observed biomass of summer maize for calibration (A) and validation (B) in different zones

2.4 产量调试和验证

通过夏玉米产量由模拟值和实测值图形比较(图 3),可以直观反映模型对于产量的模拟效果,大部分数据点分布在 1:1 线附近,在 $\pm 20\%$ 误差线之

内,且离散度较小。夏玉米产量参数调试结果各区域模拟值和实测值的平均 X_{obs} 与 X_{sim} 较为接近。除 I 区 RMSE 为 $1\ 099\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 外,其他区域 RMSE 均小于 $1\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,各区的 NRMSE 也均小于 20% ,

由相关系数 r 的分析可知, I 区和 II 区相关系数 r 通过 0.01 显著性检验, III 区和 IV 区均达到 0.05 的显著性水平, 表明模型参数调试结果较好。夏玉米产量参数验证结果中, 各区域 RMSE 均小于 1 000 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 归一化均方根误差 NRMSE 也均小于 20%,

除 IV 区外, 其他生态区相关系数 r 均通过显著性检验, 表明模型验证结果较好。总体上模型对夏玉米产量的模拟精度较高。由 X_{obs} 与 X_{sim} 也可知, I 区的产量水平最高, 其次是 III 区, II 区和 IV 区的产量最低。

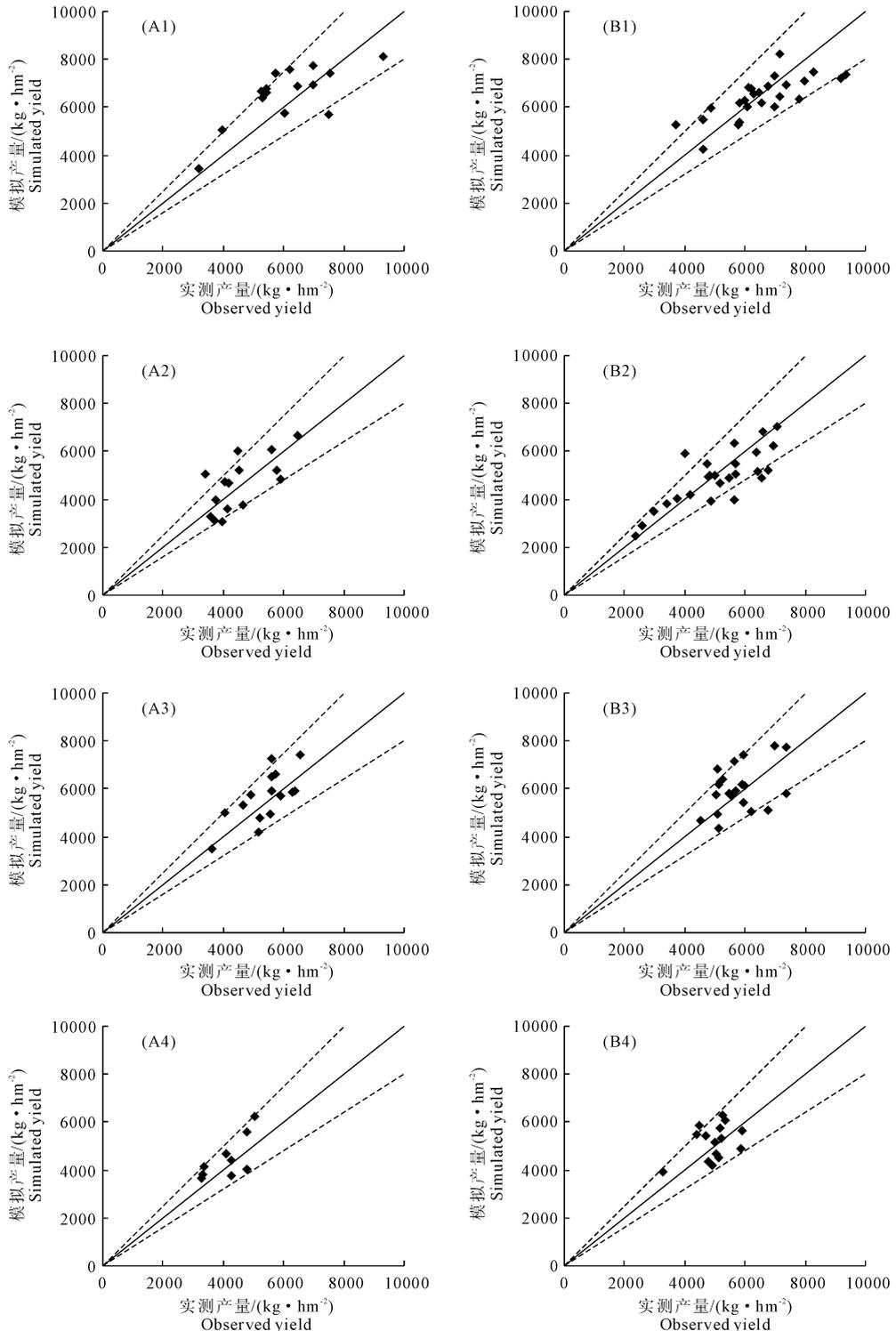


图 3 各区域模型参数调试(A)与验证(B)结果中夏玉米产量模拟值和观测值比较

Fig.3 Comparison between simulated and observed yield of summer maize for calibration (A) and validation (B) in different zones

表 4 夏玉米产量参数调试和验证评价指标

Table 4 Evaluation indexes of yield for calibration and validation periods in different zones

区域 Zone	模型调试结果 Calibration result					模型验证结果 Validation result				
	X_{obs} /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	X_{sim} /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	RMSE /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	NRMSE /%	r	X_{obs} /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	X_{sim} /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	RMSE /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	NRMSE /%	r
I	6089	6268	1099	18.0	0.735**	6556	6413	903	13.8	0.752**
II	4546	4622	830	18.3	0.675**	5101	4920	831	16.3	0.702**
III	5392	5650	785	14.6	0.506*	5809	6023	971	16.7	0.415*
IV	4129	4485	694	16.8	0.705*	4969	5170	743	14.9	0.403

2.5 地上部生物量与叶面积指数动态模拟

图 4 为郑州农试站 2004 年和 2007 年各器官生物量增长动态模拟,2004 年为模型调试年份,2007 年为模型验证年份。2004 年开花期和成熟期日序分别为 209 d 和 255 d,2007 年开花期和成熟期日序分别为 204 d 和 245 d。模型模拟叶片干物质积累前期增加迅速,在开花期达到最大值,开花期之前模拟值均高于实测值,但开花之后模型模拟值的叶片衰减速度较快,叶片干重低于实测值。由模型对茎秆的模拟结果可知,开花前茎秆的模拟值快速增加高

于实测值,开花期过后茎秆干重模拟值稳定在一个水平,一直到成熟均不再变化,但实测值在达到峰值后略有降低。在穗的模拟中,果穗干重呈线性增长,与实测值总体趋势一致,但到后期穗重模拟值增长到一定水平后保持稳定,没有达到实测值的最高值。模型对地上部总干重的模拟总体较好,前期实测值略滞后于模拟值,成熟时实测值又高于模拟值。总体上两个年份模型均较好的模拟了玉米生物量动态生长的变化趋势。

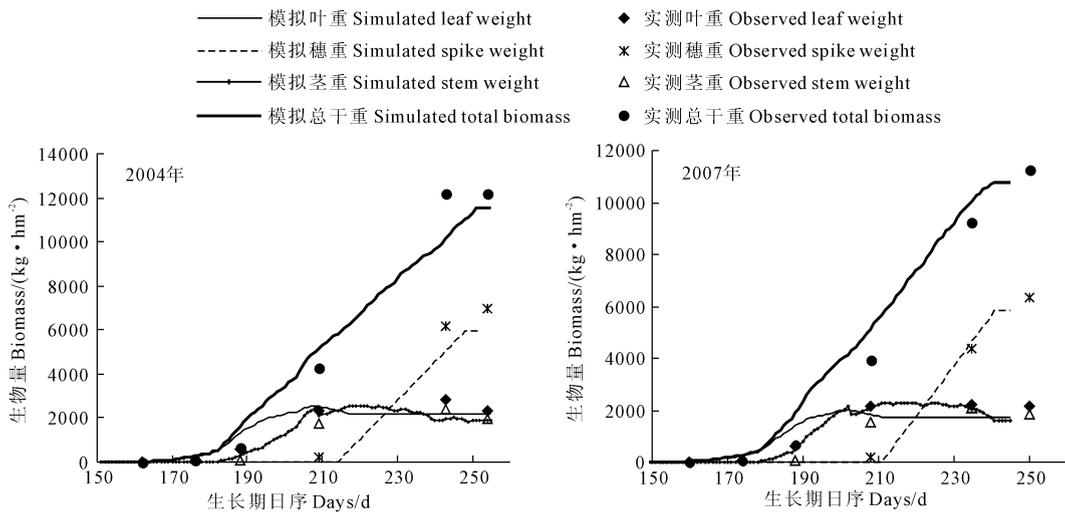


图 4 郑州站生物量增长动态模拟调试(2004 年)与验证(2007 年)结果

Fig.4 Dynamic simulation of biomass of summer maize for calibration (2004a) and validation (2007a) in Zhengzhou

图 5 为郑州农试站 2004 年(调参年份)和 2007 年(验证年份)叶面积指数增长的动态模拟结果。模型模拟的叶面积指数明显低于实测值,但是模拟值与实测值的变化趋势拟合较好。考虑是由于模型自身叶面积指数计算方法引起的,已有研究结果也存在同样问题(Ben Nouna 2000),因此可以通过系统误差调整,来模拟判定叶面积增长动态的趋势变化。从两个年份的拟合情况可知,实测叶面积指数的增长总体略滞后于模拟值,但观测值与模拟值的总体变化趋势的吻合度是可接受的。

3 结论与讨论

考虑地形、土壤和气候资源特点将河南夏玉米主产区划分为 4 个生态区,各生态区选择近十余年农气观测站资料对 CERES - Maize 模型进行参数调试和验证,获得代表各区域夏玉米品种特性的 4 套模型参数。由各生态区模型多点模拟和验证的结果表明,生物量和产量的归一化均方根误差 NRMSE 均小于 20% 模型模拟结果较好,通过对生物量和叶面积指数的动态模拟及验证,表明观测值与模拟值的

增长趋势也有较好的吻合度。

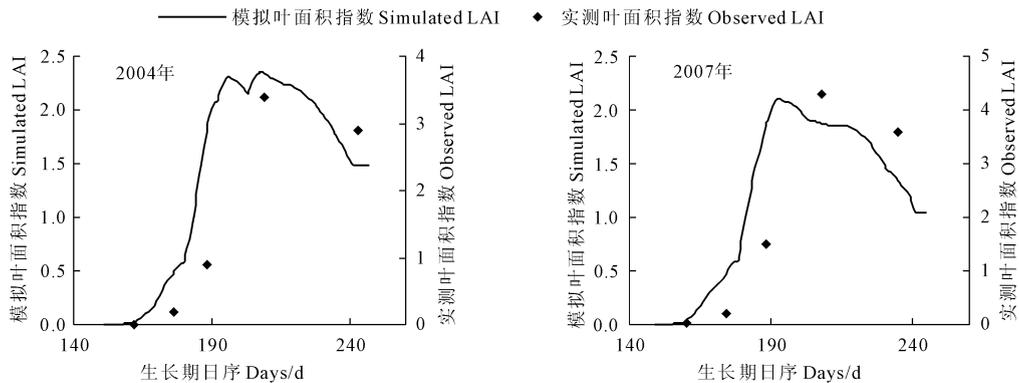


图 5 郑州站叶面积指数增长动态模拟调试(2004 年)与验证(2007 年)结果

Fig.5 Dynamic simulation of leaf area index of summer maize for calibration (2004a) and validation (2007a) in Zhengzhou

总体上 CERES - Maize 模型可用来在河南各生态区进行夏玉米生长模拟,但不同生态区模拟结果也存在差异,分析其误差来源,生物量验证结果中生物量模拟值普遍偏低,尤其是 I 区和 II 区,平均偏差 12.7%,是造成生物量模拟误差的主要来源。在产量的调试结果中各区域模拟值较观测值略偏高,验证结果中, I 区和 II 区观测值略高于模拟值,而 III 和 IV 区则是略低于模拟值。由 III、IV 区生物量和产量的模拟结果可知,无论是调参还是验证,生物量为观测值高于模拟值,而产量是模拟值高于观测值,这可能与模型干物质在各个器官的分配系数有关。由相关系数 r 的变化也可知, I 区和 II 区生物量和产量的观测值和模拟值均为极显著相关 ($P < 0.01$),模型对于这两个地区生物量及产量增减的变化趋势模拟较好。IV 区仅产量调试结果中观测值和模拟值呈显著相关,生物量调参验证结果和产量验证结果的 r 均未达到显著水平。

模型的模拟过程与实际情况也不完全相符,如对叶面积的动态模拟中,由于后期没有叶面积指数的实测值,叶面积指数最终的衰减程度没有做比较。但一般在大田试验人工测量当玉米达收获时,植株死亡叶片基本变黄,叶面积指数为零。而模拟值后期的叶面积指数稳定在一定水平,没有达到零值。

夏玉米品种繁多,如仅以单一某一个品种特性作为调参依据,参数调试后的结果难以在大范围推广,将河南全省夏玉米主产区划分为 4 个生态区,用多点数据进行各生态区模型参数的综合调参验证,分别建立代表各生态区平均状态的“区域品种”模型参数。较以往以单点调参结果在大范围区域进行应用研究,在参数精度上有了一定提高,增强了模型应用的准确度和可信度,有助于今后种植制度调整、农业生产管理决策等研究的开展。但对于能与遥感资

料相结合的参数精度要求还有差距,需要进一步提升参数的空间分辨率。

参考文献:

- [1] 谢云, James R K. 国外作物生长模型发展综述[J]. 作物学报, 2002, 28(2): 190-195.
- [2] 潘学标. 作物模型原理[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 22-23.
- [3] 孙宁, 冯利平. 利用冬小麦作物生长模型对产量气候风险的评估[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 106-110.
- [4] 徐寿军, 林美茵, 徐志伟. 作物生育期模拟研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2009, 24(2): 167-171.
- [5] 刘布春, 王石立, 马玉平. 国外作物模型区域应用研究进展[J]. 气象科技, 2002, 30(4): 194-203.
- [6] 林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 作物生长模型研究综述[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 750-758.
- [7] 王亚莉, 贺立源. 作物生长模拟模型研究和应用综述[J]. 华中农业大学学报, 2005, 24(5): 529-535.
- [8] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal Agronomy, 2003, (18): 235-265.
- [9] Francisco X L, Kenneth J B, Benigno R N, et al. Testing CERES - Maize versions to estimate maize production in a cool environment[J]. European Journal Agronomy, 2005, (23): 89-102.
- [10] Monte R O, Jane R F, Daniel R E. Use of CERES - Maize to study effect of spatial precipitation variability on yield[J]. Agricultural Systems, 2002, (73): 205-225.
- [11] Samuhel P, Šiška B. Parameterization of crop simulation model "Ceres - Maize" in Nitra - Dolný Malanta[J]. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, 2007, (15): 25-30.
- [12] 戴明宏, 陶洪斌, 廖树华, 等. 基于 CERES - Maize 模型的华北平原玉米生产潜力的估算与分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 30-37.
- [13] 张艳红. 基于 CERES 玉米模型的黄淮海夏玉米水肥管理技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [14] 尹志芳. CERES - Wheat, Maize 模型的实验研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2005.
- [15] 熊伟, 林而达. CERES - Maize 区域应用效果分析[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 3-7.

- 究中的应用[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(3): 361-364.
- [13] 杜晓燕, 张玉霞, 谭巍巍, 等. PEG 胁迫对芦笋种子萌发的影响[J]. 内蒙古大学学报, 2008, 23(1): 51-54.
- [14] 荣秀连, 王波, 刘刊, 等. PEG-6000 模拟干旱胁迫对冷季型草坪种子萌发特性影响[J]. 北方园艺, 2010, (8): 80-82.
- [15] 时丽冉, 吕亚慈, 刘贵波, 等. 不同小黑麦品种萌发期抗盐性的比较[J]. 种子, 2008, 27(10): 101-105.
- [16] 周琳, 牛明功, 陈龙. 盐胁迫对黑麦、硬粒小麦和小黑麦发芽的影响[J]. 河南农业科学, 2010, (1): 8-10.
- [17] 兰巨生, 胡福顺. 作物抗旱指数的概念和统计方法[J]. 华北农学报, 1990, 5(2): 20-25.
- [18] 孙彩霞, 沈秀瑛, 郝宪彬, 等. 根系和地上部生长指标与玉米基因型抗旱性的灰色关联度分析[J]. 玉米科学, 2000, 8(1): 31-33.
- [19] 李禄军, 蒋志荣, 李正平, 等. 3 树种抗旱性的综合评价及其抗旱指标的选取[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 253-254, 259.
- [20] 常青华. 甘蓝萌发期和苗期抗旱性鉴定[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [21] 李贵全, 张海燕, 季兰, 等. 不同大豆品种抗旱性综合评价[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2408-2412.
- [22] 孙景宽, 张文辉, 张洁明, 等. 种子萌发期 4 种植物对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(9): 1811-1818.
- [23] 李威. PEG 胁迫下 6 种裸燕麦品种种子萌发期的抗旱性研究[J]. 种子, 2014, 33(5): 38-41.
- [24] Abraham Blum. Plant breeding for stress environments[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1988: 26-27.
- [25] 杨建昌, 王志琴, 朱庆森. 水稻品种的抗旱性及生理特性的研究[J]. 中国农业科学, 1995, 28(5): 65-72.
- [26] 陈爱国, 陈进红. 胚芽鞘的伸长机理和生理生态响应[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2002, 33(4): 438-441, 447.
- [27] 李会芬, 时丽冉, 崔兴国, 等. 不同品种小黑麦萌发期耐旱性比较[J]. 种子, 2011, 30(8): 23-25.
- [28] 李春艳, 李诚, 艾尼瓦尔, 等. 春性饲草型小黑麦抗旱性的综合评价[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(6): 1080-1085.
- [29] 王曙光, 孙黛珍, 周福平, 等. 六倍体小黑麦萌发期抗旱性分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1403-1408.
- [30] 刘佳, 徐昌旭, 曹卫东, 等. PEG 胁迫下 15 份紫云英种质材料萌发期的抗旱性鉴定[J]. 中国草地学报, 2012, 34(6): 18-25.
- [31] Wu S-J. Study on Physiological and Morphology Selecting Targets in Drought-resistant breeding of soybean[D]. Taiyu: Shanxi Agricultural University. 2003: 8-10(in Chinese).

(上接第 8 页)

- [16] 李树岩, 刘荣花, 成林. 基于 CERES - Maize 的黄淮平原夏玉米阶段缺水模拟分析[J]. 玉米科学, 2013, 21(5): 151-156.
- [17] 崔巧娟, 许吟隆. 利用田间试验资料检验 CERES - Maize 模型在中国区域的模拟能力[J]. 中国农业气象, 2005, 26(增刊): 37-41.
- [18] 刘玉兰, 陈晓光, 肖云清. CERES - Maize 模型中遗传参数确定方法的研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(6): 127-129.
- [19] 胡亚南, 柴绍忠, 许吟隆, 等. CERES - Maize 模型在中国主要玉米种植区域的适用性[J]. 中国农业气象, 2008, 29(4): 383-386.
- [20] 张艳红, 廖树华, 马永良. 基于 CERES - MAIZE 模型的夏玉米生产水肥优化管理技术方法与应用研究[J]. 玉米科学, 2006, 14(增刊): 81-89.
- [21] 居辉, 李三爱, 严昌荣, 等. 北方旱农区玉米自然降水生产潜力研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4): 632-637.
- [22] Dente L, Satalino G, Mattia F, et al. Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES Wheat model to map wheat yield[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1395-1407.
- [23] Ma Yuping, Wang Shili, Li Zhang, et al. Monitoring winter wheat growth in north china by combining a crop model and remote sensing data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(4): 426-437.
- [24] Hongliang Fang, Shunlin Liang, Hoogenboom G, et al. Integration of MODIS LAI and vegetation index products with the CSM-CERES-Maize model for corn yield estimation[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(4): 1039-1065.
- [25] 罗毅, 郭伟. 作物模型研究与应用中存在的问题[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 307-312.
- [26] 邓振镛, 王强, 张强, 等. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6278-6288.
- [27] 河南省统计局, 国家统计局河南调查总队. 河南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [28] Angström A. Solar and terrestrial radiation[J]. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 1924, 50: 121-125.
- [29] 姚宁, 周元刚, 宋利兵, 等. 不同水分胁迫条件下 DSSAT-CERES-Wheat 模型的调参与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 138-140.
- [30] 玉米测产方法[EB]. 百度文库, [2015-12-25]. <http://wenku.baidu.com/view/fb6d41dcce2f0066f5332276.html?re=view>.
- [31] 魏克循. 河南土壤地理[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1995: 734.
- [32] 河南省土壤肥料工作站, 河南省土壤普查办公室. 河南土种志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 58, 99-100, 290-300.
- [33] 李树岩, 王靖, 余卫东, 等. 气候变化对河南省夏玉米主栽品种发育期的影响模拟[J]. 中国农业气象, 2015, 36(4): 479-488.