基于锦州春玉米田间试验的 WOFOST 模型参数的确定及性能评价

蔡 福[1] 米 娜[1] 纪瑞鹏[1] 明惠青[2] 冯 锐[1] 张淑杰[1] 张 慧[3] 赵先丽[1] 张玉书[1*]

([1]中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166; [2]辽宁省气象服务中心, 沈阳 110166; [3]锦州市生态与农业气象中心, 辽宁锦州 121000)

摘 要 利用2011—2015年在锦州地区开展的玉米分期播种试验资料,确定了玉米初始总干物量(TDWI)、比叶面积(SLA)、出苗时叶面积指数(LAIEM)及发育参数,并采用试错法确定出其他生理参数。利用相关系数、相对误差以及均方根误差验证模型对发育期、叶面积指数(LAI)和不同器官生物量的模拟性能来评价所确定参数的适应性。结果表明:80%花期的平均模拟误差为1.25 d,而75%成熟期的平均模拟误差为3.47 d,LAI和总地上生物量(TAGP)模拟值对实测值的解释能力分别达到0.8412和0.8945;模型模拟性能存在较明显的年际和播期差异,在干旱年较差,2012年(土壤水分适宜)和2015年(干旱)LAI和TAGP的均方根误差分别为0.38 $m^2 \cdot m^{-2}$、9.40 $kg \cdot hm^{-2}$和0.44 $m^2 \cdot m^{-2}$、22.65 $kg \cdot hm^{-2}$;模型性能随播期的偏离而下降,4月30日(适播期)与5月20日播期LAI和TAGP的均方根误差分别为0.30 $m^2 \cdot m^{-2}$、15.19 $kg \cdot hm^{-2}$和0.43 $m^2 \cdot m^{-2}$、25.66 $kg \cdot hm^{-2}$。本研究将为东北春玉米作物模型参数的确定提供重要参考。

关键词 东北; 春玉米; WOFOST模型; 作物参数; 性能评价; 田间试验

Determination of crop parameters for WOFOST model and its performance evaluation based on field experiment of spring maize in Jinzhou, Liaoning. CAI Fu[1], MI Na[1], JI Rui-peng[1], MING Hui-qing[2], FENG Rui[1], ZHANG Shu-jie[1], ZHANG Hui[3], ZHAO Xian-li[1], ZHANG Yu-shu[1*] ([1]*Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang* 110166, *China*; [2]*Liaoning Province Meteorological Service Center, Shenyang* 110166, *China*; [3]*Jinzhou Ecological and Agricultural Meteorology Center, Jinzhou* 121001, *Liaoning, China*).

Abstract: Correct parameters are the key prerequisite for the prediction of crop models. In this study, a series of important crop parameters including initial total crop dry weight (TDWI), specific leaf area (SLA), leaf area index at emergency (LAIEM), developing parameters and other physiological parameters were measured and determinated using the observation data and trial-and-error method based on the experiment of different sowing dates for maize in Jinzhou during 2011-2015. The adaptability of those parameters in WOFOST model was evaluated by testing the simulation accuracy of growth periods, leaf area index (LAI) and the biomass of different organs of maize with the methods of correlation coefficient, relative error (RE) and root mean square error (RMSE). The results showed that mean simulation errors for antheses and mature stages with 80% and 75% of the total samples were 1.25 and 3.47 days, respectively. The explanatory abilities of simulation to observation for LAI and total aboveground production (TAGP) were

中央级公益性科研院所基本科研业务费(2018SYIAEZD1和2018SYIAEHZ1)、国家自然科学基金项目(41775110,31701313)、辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划项目(2015060)、十三五国家重点研发计划"粮食丰产增效科技创新"课题(2018YFD0200809)、辽宁省科技厅重点计划指导计划项目(2017210001)、辽宁省自然科学基金指导计划(20180551206, 20180551169)和中国气象局气候变化专项(CCSF201609)资助。
收稿日期: 2018-07-01 接受日期: 2018-12-25
*通讯作者 E-mail: yushuzhang@126.com

0.8412 and 0.8945, respectively. Besides, there were obvious inter-annual and sowing date differences for the model performances in simulating above-mentioned variables and their simulation accuracy were lower in dry year. Specifically, the RMSEs of LAI and TAGP were 0.38 $m^2 \cdot m^{-2}$ and 9.40 $kg \cdot hm^{-2}$ in 2012 respectively when soil water content was under the suitable condition during the whole growing season, and were 0.44 $m^2 \cdot m^{-2}$ and 22.65 $kg \cdot hm^{-2}$ in 2015 when maize suffered long-term drought. Furthermore, the model performed worse when the sowing date was deviated from the normal range. The RMSEs of LAI and TAGP were 0.30 $m^2 \cdot m^{-2}$ and 15.19 $kg \cdot hm^{-2}$ for the optimum sowing date on 30 April and 0.43 $m^2 \cdot m^{-2}$ and 25.66 $kg \cdot hm^{-2}$ for the sowing date on 20 May. Our results provide an important reference for determining the crop model parameters of spring maize in northeast China.

Key words: northeast China; spring maize; WOFOST model; crop parameter; performance evaluation; field experiment.

玉米种植在保障中国粮食安全和国民经济发展方面发挥着举足轻重的作用(蔡福等,2017)。东北地区是我国春玉米主产区,玉米播种面积约占全国的 26.6%,年产量占全国的 30%,在中国的粮食生产中占据重要地位(张德来等,2018;Cheng *et al.*,2016)。20 世纪 90 年代以来,东北地区春旱和春夏连旱发生频繁且强度增加,对粮食生产与经济发展产生严重影响(赵锦等,2014;米娜等,2017;蔡福等,2018)。及时、定量、准确地评估气象条件及灾害对玉米生产状况及其产量的影响,是指导粮食生产、制定决策、保障国家粮食安全的重要前提和依据。长期以来,国内外学者围绕气象条件和灾害对玉米的影响开展了大量的研究(Bai *et al.*,2004;Zhang,2004)。在众多研究方法中,作物模型以温、土壤、光、水等条件为环境的驱动变量,运用计算机技术和物理数学方法,对作物整个生育期内光合、呼吸、蒸腾等过程及其与土壤、气象等环境条件以及施肥、灌溉等条件之间的关系进行定量描述与预测(米娜等,2016;张悦等,2017),机理性较强,能够对作物各种生长过程进行综合的数值模拟(陈思宁等,2013;曹阳等,2014),在农业气象灾害评估中可较好地反映作物生育进程、产量与环境因子的关系(栾庆祖等,2014)。随着对作物生理生态过程机理认识的不断深入和计算机技术的迅猛发展,作物模型得到了广泛应用。目前已经建立的作物模型多达百种,其中荷兰的 WOFOST 模型、美国的 DSSAT 系列模型(Jones *et al.*,2001, 2003)和澳大利亚的 APSIM 模型(Keating *et al.*,2003)是众多模型中的典型代表。其中,WOFOST 模型注重作物生长发育及产量形成的生理生态过程机制,对光合作用、呼吸作用、叶片生长等进行了比较深入的生理生态过程模拟,可针对潜在、水分限制和养分限制三种不同的生产水平模拟作物生长过程(Boogaard *et al.*,1998),应用十分广泛(张建平等,2015)。目前,一些学者已经将 WOFOST 模型应用于东北玉米的模拟研究中,主要包括分析未来不同气候变化情景下玉米生育期、实际和潜在产量变化情况(范志宣,2016),定量评估低温冷害对玉米生产的影响(张建平等,2012),玉米生长和产量对干旱及复水的响应及损失评估(张建平等,2015;方缘,2015;李莹莹,2017),确定玉米不同发育阶段气象适宜程度诊断指标(李秀芬等,2013),以及结合遥感信息进行估产(陈思宁等,2013)等。

尽管利用 WOFOST 模型针对东北玉米的研究已广泛开展,但以上研究中的一个共性问题是一些具有实际物理意义参数的确定缺乏实测数据支持,一些敏感参数被放大几倍,或原本动态变化的参数仅简单设置,与实际情况差别较大。刘维等(2017)研究证明,准确的比叶面积对于模型性能的改进具有重要作用。可见,一些敏感参数的准确设置是模型参数本地化过程的重要前提,它们的偏差将直接引起其他参数设置的不合理,即使模型对某些年玉米的生长过程模拟精度较高,也不代表其在一个地区具有适用性。此外,现有一些研究仅给出关键参数的设置,并未提供依据,也大大降低结论的可信度。准确的作物参数是作物模型模拟的基础,一些学者采用局部或全局参数优化的方法确定最优参数(Iizumi *et al.*,2009;van Oijen *et al.*,2011),该方法预先给定参数的范围,通过多次“试错”,最终确定数值(Tao *et al.*,2000;van Oijen *et al.*,2013),但其仍存在一定弊端,一些参数的初始范围较大,在全局优化情况下,取值范围因模型驱动变量的变化而发生改变,当品种或研究地域发生变化,参数还需重新优化。同时,每增加一个参数都会显著增大参数优化

的运算量。因此,对于物理意义明确、观测相对容易的参数,如能通过试验方法确定,将大幅降低参数优化过程的运算量,并有效降低模拟的不确定性。

本研究采用玉米分期播种实测资料对WOFOST模型的关键参数进行确定,在此基础上对其他参数采用"试错法"进行调整,并利用实测生物量、产量及叶面积资料对模型适应性进行分析,以期为建立一套合理的东北春玉米模型参数提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究分期播种试验于2011—2015年在辽宁省锦州市农业气象试验站内进行,试验场所在区域属典型温带季风型气候,年平均气温9.5 ℃,1月平均气温-8.0℃,7月平均气温24.4 ℃,年均降水量565.9 mm,主要作物玉米的生育期为5—9月,土壤为典型棕壤。试验供试品中为丹玉39,小区面积为6 m × 10 m,株、行距分别为0.4 m和0.6 m,每平方米施复合肥0.18 kg。每年分为4个播期,分别为4月20日、4月30日、5月10日和5月20日,试验完全在雨养条件下进行,其中2011—2012年5月20日及2011年5月10日播期的生物量和叶面积资料缺测,因此,可用于模型参数计算的生育期共20个,用于模型性能检验的生育期为17个。考虑到播种-出苗阶段持续日数在播期和年际间差异较大,因此模型起始模拟时间为出苗日期。

1.2 观测项目

1.2.1 作物数据 试验观测项目包括播种期、出苗期、七叶期、拔节期、抽雄期、开花期、乳熟期、成熟期出现日期;各发育期株高、茎粗、叶面积、生长量,其中叶面积指数(LAI)采用观测单位土地面积植株总叶面积的方式获得,计算公式如下:

$$LAI = 0.75\rho \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} L_{ij} \times W_{ij}}{m} \quad (1)$$

式中:0.75为玉米叶面积的校正系数,ρ为密度,m为测量株数,n为第i株的叶片数,L_{ij}和W_{ij}分别为第i株玉米第j片叶片的长度和最大宽度(麻雪艳等,2013)。本研究中以上项目进行3株重复观测。

玉米产量结构各分项,包括有效株数、植株高度、果穗长度、粗度、秃尖比,株籽粒重,百粒重,理论产量,茎秆重,籽粒与茎秆比(经济系数)等。上述观测方法严格按照《农业气象观测规范》(中国气象局,1993)执行。

1.2.2 气象数据 在玉米播种至成熟期间,观测日照时数,1.5 m高度的日最高、最低、平均气温、水汽压,2 m高风速和日降水量。

1.2.3 土壤数据 于2016年对当地0~100 cm土壤每隔10 cm的土壤水文常数进行观测,包括凋萎湿度(SMW)、田间持水量(SMFCF)、饱和含水量(SM0),具体数值见表2。这里各类参数依据《农业气象观测规范》(中国气象局,1993)中方法进行观测。采用土钻法每旬逢3日、8日观测土壤重量含水率,观测层次为10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm土壤深度,与田间持水量相除得到土壤相对湿度(SRWC)。

1.3 模型敏感参数的确定

1.3.1 发育参数 模型中的发育参数主要是完成不同发育阶段所需要的积温和光周期影响因子。这些参数与品种有关,相对比较稳定。研究证明(孙琳丽等,2016;刘维等,2017),出苗到开花的有效积温(TSUM1)、开花到成熟的有效积温(TSUM2)是影响玉米生长的高敏感参数,这里采用玉米生长气象条件适宜的年份资料确定。

1.3.2 生理参数 敏感性分析发现,初始总干物量(TDWI),最大CO_2同化速率(AMAXTB),35 ℃下叶片生存周期(SPAN),比叶面积(SLATB),贮存器官、叶、根、茎的同化物转换效率(CVO、CVL、CVR、CVS)及干物质分配系数(FOTB、FLTB、FRTB、FSTB),出苗时叶面积指数(LAIEM)等参数都是影响生物量和产量的敏感参数(孙琳丽等,2016;刘维等,2017;张宁等,2018)。其中,TDWI、SLATB、LAIEM可以通过试验直接观测,而其他参数观测难度都很大,模型敏感性较大的可通过"试错法"给出,敏感性偏弱的可直接设为模型默认值。

1.3.3 模型验证 利用最小二乘拟合相关系数(R^2)、相对误差(RE)和均方根误差(RMSE)作为模型性能指标对发育期、LAI、总地上生物量(TAGP)、不同器官干物重及产量的模拟精度进行评价。表达式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})(p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^{n}(p_i - \bar{p})^2}} \quad (2)$$

$$RE = \frac{p_i - o_i}{o_i} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中,o_i 和 p_i 是实测值和模拟值,$\bar{o}$ 和 $\bar{p}$ 实测值和模拟值的平均值。

2　结果与分析

2.1　模型参数确定或校准

由图 1 可以看出,2014 和 2015 年在玉米大部分生育期内土壤相对湿度(SRWC)都处于 60%以下,意味着遭遇干旱胁迫,而 2011—2013 年玉米生长期内 SRWC 基本都处于 60%以上,没有遭遇水分胁迫限制,因此利用这 3 年各播期两个阶段有效积温的平均值确定 TSUM1 和 TSUM2 分别为 866 ℃ · d 和 1090 ℃ · d。有效积温的计算以 8 ℃作为玉米生长期内的生物学下限温度。

本研究中,TDWI 通过在玉米出苗时采样 20 株进行干物质测量,经换算得到数值为 10.32 kg · hm^{-2},这与方缘(2015)、孙琳丽等(2016)给出的数值比较接近,而模型默认参数为 50 kg · hm^{-2},与实测值差异较大。LAIEM 经各播期实测数据平均得到数值为 0.0062 m^2 · m^{-2},与方缘(2015)、孙琳丽等(2016)所给出的数值较为接近。有研究表明,SLATB 是模拟春玉米生物量最为敏感的参数,随发育期变化而变化,它的真实赋值对模型模拟性能的改善作用明显(刘维等,2017)。通过对比 2011—2013 年各发育期平均值可以看出(表 1),SLATB 年际差异非常明显,3年平均的情况总体表现为拔节

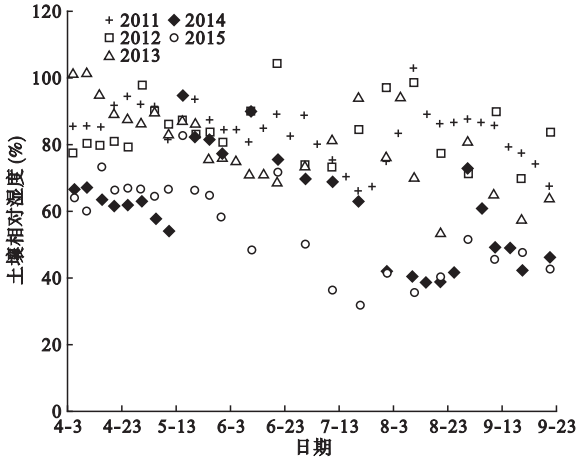


图 1　2011—2015 年玉米生长期内土壤湿度动态变化

Fig. 1　The variations of soil water contents during the maize growth period from 2011 to 2015

表 1　2011—2013 年不同发育进程 SLATB 值

Table 1　The SLATB values in different development stages of maize during 2011–2013

发育进程	SLATB(hm^2 · kg^{-1})			
	2011 年	2012 年	2013 年	年平均
0.00	0.0011	0.0009	0.0026	0.0015
0.25	0.0009	0.0033	0.0021	0.0021
0.63	0.0018	0.0023	0.0029	0.0023
1.00	0.0015	0.0022	0.0018	0.0018
1.60	0.0012	0.0017	0.0020	0.0016

期之前随玉米发育进程(DVS)逐渐增大,之后呈减小趋势。

分别利用试验资料换算、“试错法”以及模型默认值最终确定锦州地区 WOFOST 模型玉米主要参数及土壤参数的取值(表 2)。

表 2　WOFOST 模型中玉米主要作物参数及土壤参数

Table 2　The parameters of maize and soil in WOFOST model

参数	定义	单位	取值
TSUM1	出苗至抽雄有效积温	℃ · d	866
TSUM2	抽雄至成熟有效积温	℃ · d	1090
DTSMTB(T=0.0℃)	积温日增长函数	℃ · d	0
DTSMTB(T=8.0℃)			0
DTSMTB(T=30.0℃)			22
DTSMTB(T=35.0℃)			24
TDWI	初始地上总生物量	kg · hm^{-2}	10.32
LAIEM	出苗时叶面积指数	m^2 · m^{-2}	0.0062
RGRLAI	叶面积指数最大增长速率	m^2 · m^{-2} · d^{-1}	0.0294
SLATB(DVS=0.00)	比叶面积	hm^2 · kg^{-1}	0.0015
SLATB(DVS=0.25)			0.0021
SLATB(DVS=0.63)			0.0023
SLATB(DVS=1.00)			0.0018
SLATB(DVS=1.60)			0.0016
SLATB(DVS=2.00)			0.0000
SPAN	叶片衰老系数	d	42
TBASE	叶片生长下限温度	℃	8
AMAXTB(DVS=0.00)	最大 CO_2同化速率	hm^2 · hm^{-2} · h^{-1}	70
AMAXTB(DVS=1.25)			63
AMAXTB(DVS=1.50)			49
AMAXTB(DVS=1.75)			40
AMAXTB(DVS=2.00)			40
CVL	叶同化物转换效率	kg · kg^{-1}	0.680
CVO	贮存器官同化物转换效率	kg · kg^{-1}	0.600
CVR	根的同化物转换效率	kg · kg^{-1}	0.690
CVS	茎的同化物转换效率	kg · kg^{-1}	0.640
RML	叶相对维持呼吸速率	kg · CH_2O · kg^{-1} · d^{-1}	0.030
RMO	贮存器官相对维持呼吸速率	kg · CH_2O · kg^{-1} · d^{-1}	0.010
RMR	根相对维持呼吸速率	kg · CH_2O · kg^{-1} · d^{-1}	0.015
RMS	茎相对维持呼吸速率	kg · CH_2O · kg^{-1} · d^{-1}	0.015
SMW	凋萎湿度	cm^3 · cm^{-3}	0.105
SMFCF	田间持水量	cm^3 · cm^{-3}	0.361
SM0	饱和含水量	cm^3 · cm^{-3}	0.519

2.2 发育期模拟评价

由模型对玉米花期和成熟期出现日期的日序数模拟精度可以看出(图 2),模型对花期出现日期模拟性能明显高于成熟期,其中 80%花期模拟误差平均为 1.25 d,而 75%成熟期模拟误差平均为 3.47 d,通过对比发现,2014 和 2015 年干旱并没有对成熟期模拟产生直接影响。此外,模型对发育期模拟性能与播种日期也没有直接关系。

2.3 玉米 LAI 和 TAGP 的模型性能评价

2.3.1 总体评价 各年所有播期 LAI 和总地上生物量(TAGP)模拟的对比结果可以看出(图 3),模型对 LAI 总体略有高估,对 TAGP 略有低估,二者模拟值对实测值的解释能力分别达到 0.8412 和 0.8945,这一结果包含水分胁迫年份的情况,总的来看,模型在不同气象条件下的模拟能力比较令人满意。

2.3.2 模型性能的年际差异 为了反映模型对玉米生长过程模拟性能的年际差异性,对各年 LAI 和 TAGP模拟值和实测值进行比较发现(图4、图5、表 3),除 2013 年外,模型对 LAI 都有所高估,而 TAGP 模拟情况恰恰相反,除 2015 年外,大部分播期有所低估。总的来看,模型对 TAGP 的模拟精度明显高于 LAI,2011—2013 年模型模拟性能好于 2014 和 2015 年,其中 2012 年 TAGP 拟合精度最高,RMSE 仅为 9.4005 kg · hm^{-2},2015 年 LAI 和 TAGP 模拟精度最低,分别为 0.4419 m^2 · m^{-2}和 22.6577 kg · hm^{-2},分析原因发现 2012 年土壤相对湿度几乎始终处于75%以上,土壤水分供应充足,完全可满

表 3 LAI 和 TAGP 模拟误差的年际比较

Table 3 Interannual comparison of simulation errors of LAI and TAGP

年份	RMSE	
	LAI(m^2 · m^{-2})	TAGP(kg · hm^{-2})
2011	0.3188	17.2928
2012	0.3829	9.4005
2013	0.3435	15.6162
2014	0.3224	17.6715
2015	0.4419	22.6577

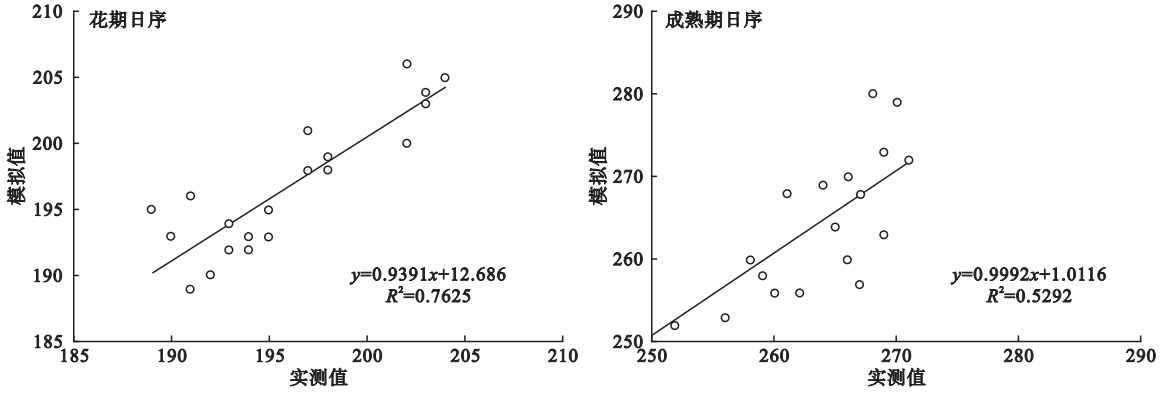


图 2 玉米花期(a)和成熟期(b)日序数实测值与模拟值的对比

Fig.2 Comparisons between the simulated and observed Julian calendar date of anthesis (a) and mature (b) stage of maize

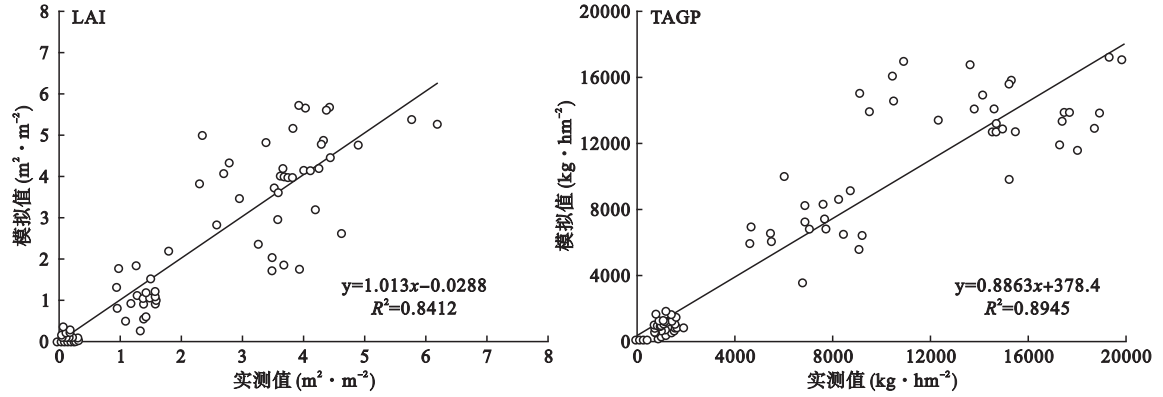


图 3 所有 LAI 和 TAGP 实测值与模拟值比较

Fig.3 Comparisons between the simulated and observed LAI and TAGP

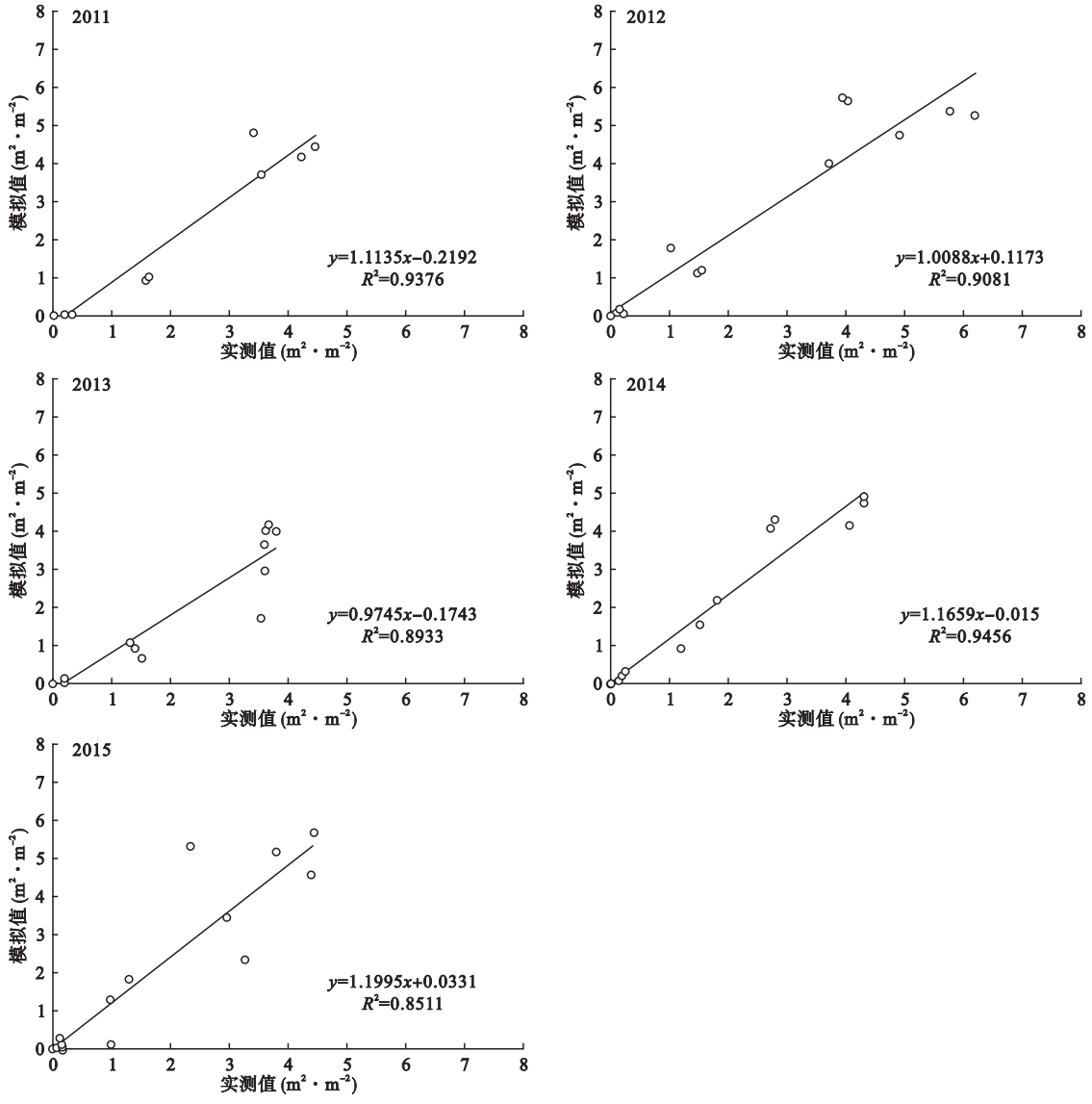


图 4　2011—2015 年 LAI 模拟与实测值对比

Fig.4　Comparisons between the simulated and observed LAIs during 2011-2015

足玉米耗水需求。而 2014 和 2015 年大部分时段土壤相对湿度都处于 60%以下,其中 2015 年 6 月初就开始发生干旱,表明作物模型对干旱过程的模拟能力较弱。

2.3.3　模型性能的播期差异　考虑到不同播期玉米生长发育会经历完全不同的环境条件,为了评价模型模拟性能在播期间的差异性,分别对不同年份各播期模拟精度进行比较(表 4)。4 月 20 日和 4 月 30 日播期模型对 LAI 和 TAGP 的模拟精度都较高,但从 5 月 10 日播期开始随着播期的延后模拟精度逐渐较小,表明模型性能与玉米所经历的环境条件关系密切,反映在参数赋值与实际情况的逼近程度上,说明现有模型参数更适合于 4 月 30 日播期所在环境条件,而当玉米生育期内所经历的环境因子的分布格局与最优播期偏离较大时,将降低模型模拟性能(图 6、图 7)。其中 5 月 20 日模拟精度明显小于其他 3 个播期,LAI 和 TAGP 的 RMSE 分别为 0.4351 $m^2 \cdot m^{-2}$和 25.6680 $kg \cdot hm^{-2}$(图 6、图 7)。

表 4　不同播期 LAI 和 TAGP 模拟误差比较

Table 4　Comparisons of simulation errors for LAI and TAGP among different sowing dates

播期	RMSE	
	LAI ($m^2 \cdot m^{-2}$)	TAGP ($mg \cdot hm^{-2}$)
4 月 20 日	0.3924	13.8279
4 月 30 日	0.3029	15.1939
5 月 10 日	0.3093	15.5238
5 月 20 日	0.4351	25.6680

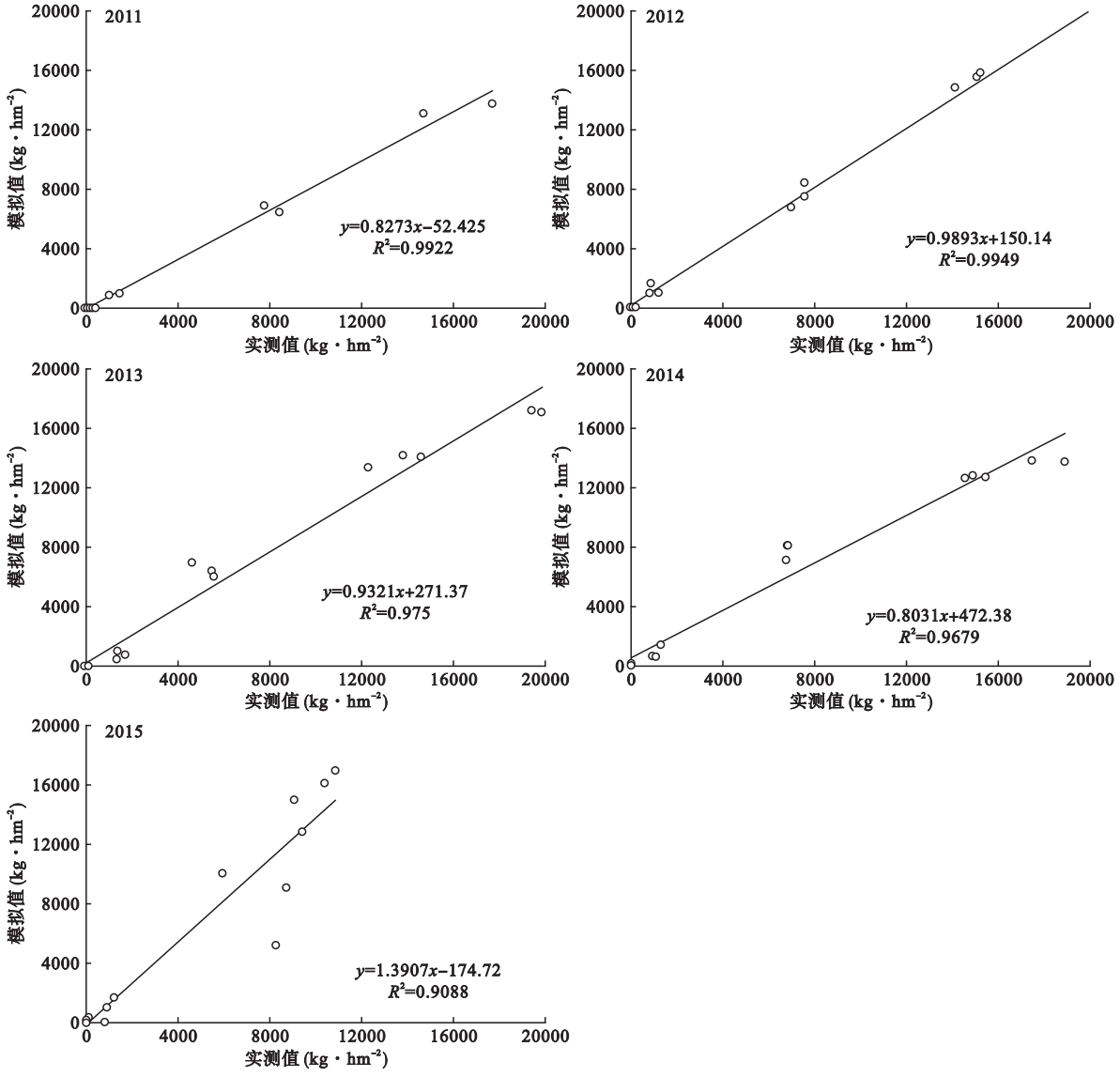


图 5 2011—2015 年 TAGP 模拟与实测值对比

Fig.5 Comparisons between the simulated and observed TAGPs during 2011−2015

2.4 玉米各器官生物量及 TAGP 的模型性能评价

为了进一步评价模型性能,对玉米叶、茎、贮藏器官生物量(TWLV、TWST,TWSO)及 TAGP 的模拟与实测值及其误差进行比较。由表 5 可以看出,在 2011—2013 年 4 月 20 日和 30 日播期玉米各器官生物量模拟精度明显高于 2014 和 2015 年,从叶和茎的明显高估,反映出模型识别干旱过程对玉米生长发育影响的能力较差。2014 和 2015 年 TWSO 的模拟结果表现出明显相反的情况,2014 年低估,2015 年高估,从 2 个播期开花-成熟期间有效积温对比发现,2015 年的有效积温明显高于 2014 年,这可能是在模型不能识别干旱影响的前提下,因更多热量导致贮藏器官干物重增大所产生的假象。2014 年实际 TWSO 并没有像 2015 年受到那么大的影响,这与其遭受干旱时间较短且偏晚有关,干旱前期营养器官已积累了较多的干物质,为产量形成过程中干物质再分配作用储备了物质基础,而模型对这一过程并未考虑,进而导致模拟值明显小于实测值。2014 和 2015 年两个干旱年 5 月 10 日和 20 日播期模拟误差小于 4 月 20 日和 30 日播期,可能的原因是模型模拟精度的下降在播期和干旱双重不利条件作用下被相互抵消,反而表现出较高的模拟精度,这很可能是一种假象。总体上,模型在非干旱年及合理的播期表现出较高模拟性能。

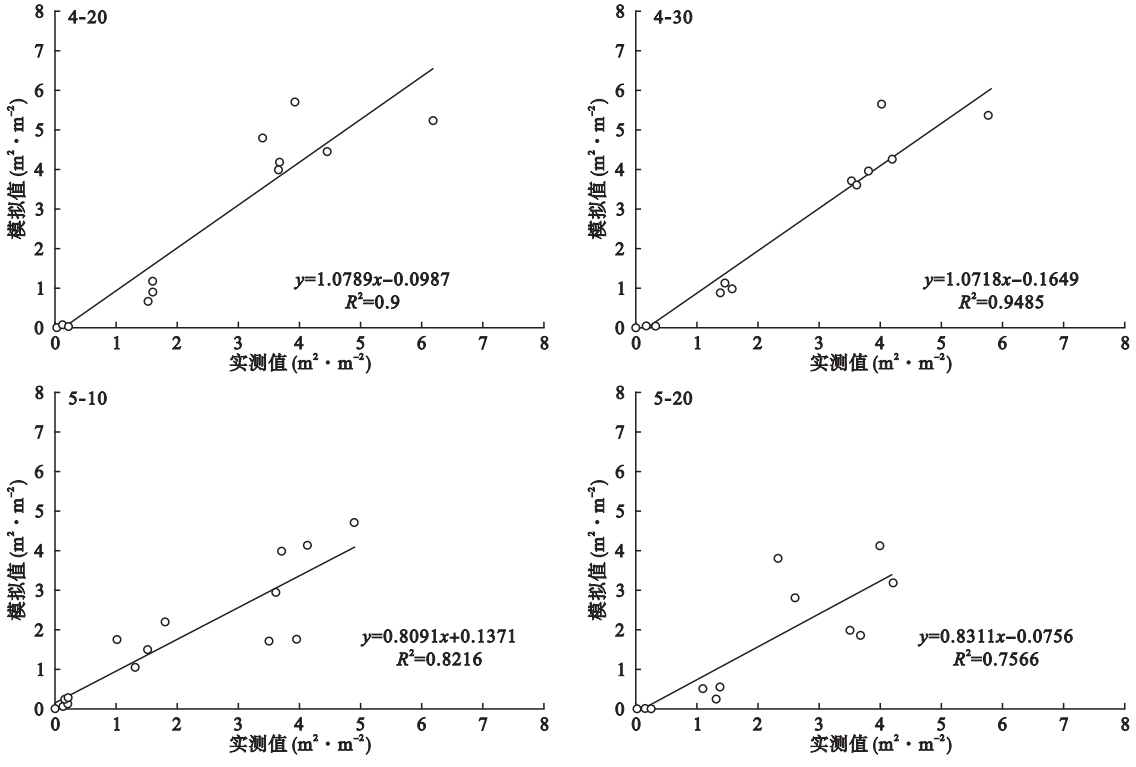


图 6　不同播期 LAI 模拟与实测值对比

Fig.6　Comparisons between the simulated and observed LAIS in different sowing dates

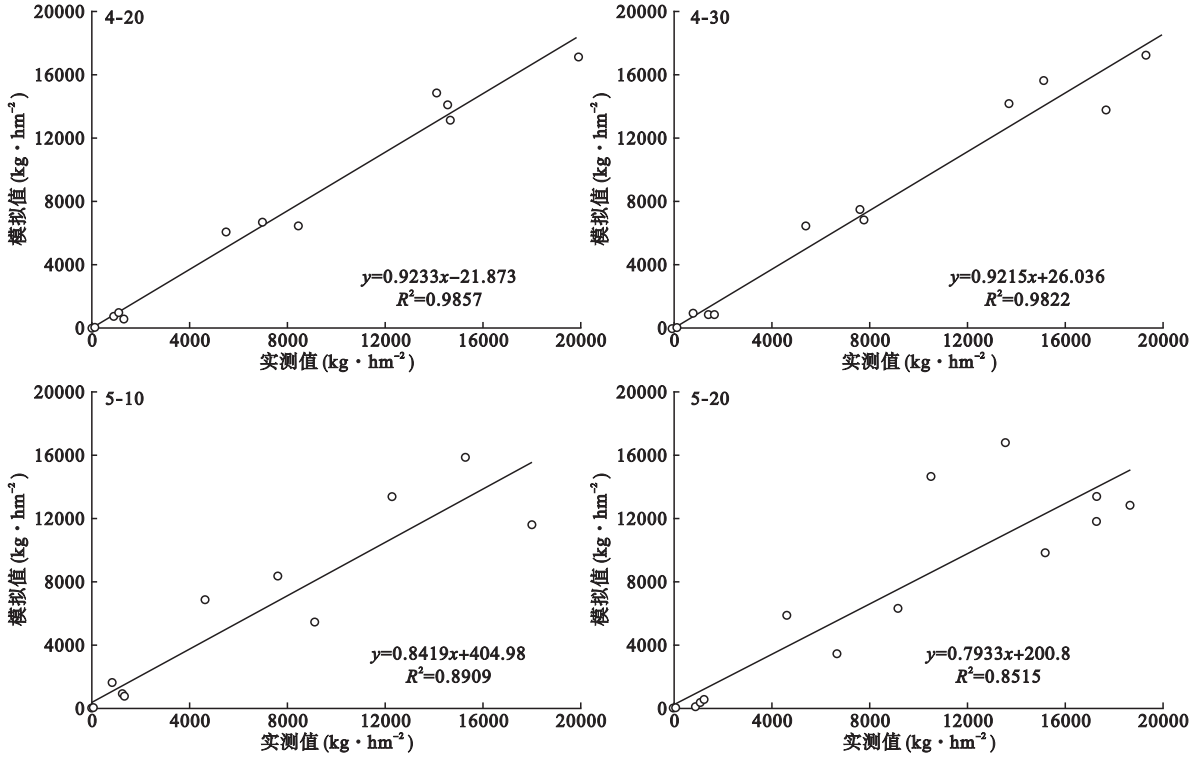


图 7　不同播期 TAGP 模拟与实测值对比

Fig.7　Comparisons between the simulated and observed TAGPS in different sowing dates

表 5 2011—2015 年不同播期玉米各器官模拟值、实测值及相对误差(%)

Table 5 The simulated and observed dry weights of different organs and their relative errors in different sowing dates during 2011-2015 (%)

播期	年份	TWLV			TWST			TWSO			TAGP		
		OBS	SIM	RE	OBS	SIM	RE	OBS	SIM	RE	OBS	SIM	RE
4 月 20 日	2011	2784	2419	−13.1	8080	6371	−21.2	9337	8696	−6.9	20201	17486	−13.4
	2012	2920	2955	1.2	7596	7346	−3.3	9701	10559	8.8	20218	20860	3.2
	2013	2045	2183	6.8	5544	5919	6.8	9495	9451	−0.5	17084	17553	2.7
	2014	1732	2485	43.5	5267	6403	21.6	7983	4988	−37.5	14982	13876	−7.4
	2015	1569	2812	79.2	4226	6968	64.9	4965	7211	45.2	10761	16991	57.9
4 月 30 日	2011	2752	2180	−20.8	7616	6011	−21.1	8729	8664	−0.7	19097	16855	−11.7
	2012	2920	2905	−0.5	7596	7301	−3.9	9647	10460	8.4	20164	20666	2.5
	2013	2045	2085	2.0	5040	5674	12.6	8996	9417	4.7	16081	17176	6.8
	2014	1821	2445	34.3	4430	6431	45.2	7008	4918	−29.8	13258	13794	4.0
	2015	1681	2819	67.6	5209	7027	34.9	3620	7086	95.8	10510	16932	61.1
5 月 10 日	2012	2669	2304	−13.7	7152	6269	−12.4	10520	11143	5.9	20342	19716	−3.1
	2013	1512	1433	−5.2	5040	4445	−11.8	9904	8961	−9.5	16456	14839	−9.8
	2014	1815	1960	8.0	5203	5494	5.6	6362	6178	−2.9	13380	13632	1.9
	2015	1681	2261	34.5	5209	5198	−0.2	6318	8161	29.2	13209	15620	18.3
5 月 20 日	2013	1784	1101	−38.3	7452	3609	−51.6	9364	8377	−10.5	18600	13087	−29.6
	2014	2016	1628	−19.2	6972	4754	−31.8	8049	7089	−11.9	17037	13471	−20.9
	2015	2058	2135	3.8	3921	5567	42.0	7603	9053	19.1	13582	16755	23.4

3 讨 论

本研究利用分期播种试验资料确定了 TDWI、SLATB、LAIEM 以及其他发育参数,针对丹玉 39 玉米品种提出一套模型参数,可为同类研究提供参考。对优化参数的适应性评价结果表明,除个别播期外,80%样本花期的平均模拟误差为 1.25 d,而 75%样本成熟期的平均模拟误差为 3.47 d,模拟精度与刘维等(2017)的研究结果基本一致。对于 LAI 和 TAGP,模拟值对实测值的解释能力分别达到 0.8412 和 0.8945,这一结果比孙琳丽等(2016)模拟精度略高,证明了优化参数对春玉米生长过程的模拟具有较好的适用性。

因不同年份和播期模型驱动气象条件具有较大差异,作物的发育和生理参数随之改变,进而导致模型模拟精度存在明显的年际和播期差异。本研究对比锦州地区玉米 4 个播期的模型模拟性能表明,采用新确定的模型参数对 4 月 20 日—5 月 10 日播期模拟的误差及差异较小,而 5 月 20 日模型误差明显增大,表明模型参数的适用能力具有较大的局限性,在适宜播期所确定参数的适用性会随着播期的偏离而逐渐下降。进一步对比发现,土壤湿度适宜的 2011—2013 年模型模拟精度高于发生持续干旱的 2014 和 2015 年,其中 2012 年整个发育期土壤湿度都处于较适宜状态,TAGP 的 RMSE 最小,仅为 9.4005 kg · hm^{-2},2015 年 LAI 和 TAGP 的 RMSE 最大,分别为 0.4419 m^2 · m^{-2}和 22.6577 kg · hm^{-2}。表明 WOFOST 模型对干旱胁迫下玉米生长模拟能力较差,反映出原模型水分平衡过程参数方案不合理,这也是现有主要作物模型共同的不足之处。本研究中,从 2014 和 2015 年 TWSO 的模拟结果可以看出,因 2015 年有效积温明显较高,干旱胁迫下 TWSO 有所高估,表明模型只考虑高热量促进干物质积累,而未考虑干旱胁迫的影响。此外,玉米产量形成过程除了接受光合产物的直接分配外,还依靠光合产物在器官间的再分配作用(Bonato *et al.*, 1999; Weiner *et al.*, 2009),干旱过程会对该过程产生抑制(Yang *et al.*, 2006),也是 2015 年 TWSO 实测值降低的重要原因。2014 年 TWSO 的实测值并未因干旱而发生显著降低,其原因在于该年玉米遭受干旱时间较短且偏晚使植株在干旱之前积累较多干物质,其过程完全不同于 2015 年长期持续干旱的情况,进一步证明了生理过程的干旱响应会因干旱发育阶段的不同而变化(纪瑞鹏等, 2012),而作物模型对干物质积累及其再分配过程的干旱响应都缺乏考虑。总的来看,现有作物模型对干旱这一复杂过程识别能力较差,需要不断完善。

本研究中,尽管通过实际观测可以获取一些参数的真实值,但它们不但随玉米发育期不断变化,同时也因玉米生长状况而发生改变,如 SLATB 参数不

同年份之间差异明显,直接受叶片含水量及其健康状况影响,在整个发育期只给出一个固定值显然与实际不符,可考虑建立其与环境条件及生理状况间的关系实现其动态参数化,但由于目前动态观测受试验条件限制而难以实现。可见,作物模型的完善需要不断改进试验观测手段及参数化方法。另外,导致模型对干旱模拟能力低下的原因仍有很多,如最大 CO_2同化速率、不同器官同化物转化效率等生理参数具有真实物理意义,同时也是敏感参数,目前关于此类参数观测的研究鲜有报道,现有研究中都是根据经验赋值或通过参数优化方法进行确定,给模拟结果带来不确定性。此外,现有模型没能考虑根系生长和吸水的动态过程。随着植株生长状态的变化,根系干物质分配系数也将发生变化,光合产物的分配格局随之改变,将直接影响产量的模拟,同时,作物模型对最大根系采用固定值的处理方式,违背了根系生长规律,可导致植株耗水过程不能被真实反映,是模型对干旱过程模拟能力低下的重要因素。可见,一些重要过程参数方案的完善是提高模型性能亟待解决的问题。

参考文献

蔡　福, 米　娜, 纪瑞鹏, 等. 2017. 关键发育期干旱及复水过程对春玉米主要生理参数的影响. 应用生态学报, **28**(11): 3643-3652.

蔡　福, 明惠青, 谢艳兵, 等. 2018. 东北地区春玉米关键生育期干旱对根系生长的影响. 气象与环境学报, **34**(2): 75-81.

曹　阳, 杨　婕, 熊　伟, 等. 2014. 1961—2010 年潜在干旱对我国夏玉米产量影响的模拟分析. 生态学报, **34**(2): 421-429.

陈思宁, 赵艳霞, 申双和, 等. 2013. 基于 PyWOFOST 作物模型的东北玉米估产及精度评估. 中国农业科学, **46**(14): 2880-2893.

范志宣. 2016. 气候变化背景下基于作物模型的吉林省玉米潜在产量模拟(硕士学位论文). 沈阳: 沈阳农业大学.

方　缘. 2015. 基于作物生长模型的玉米干旱损失评估(硕士学位论文). 沈阳: 沈阳农业大学.

何永坤, 唐余学, 张建平. 2014. 中国西南地区干旱对玉米产量影响评估方法. 农业工程学报, **30**(23): 185-191.

纪瑞鹏, 车宇胜, 朱永宁, 等. 2012. 干旱对东北春玉米生长发育和产量的影响. 应用生态学报, **23**(11): 3021-3026.

李秀芬, 马树庆, 宫丽娟. 2013. 基于 WOFOST 的东北地区玉米生育期气象条件适宜度评价. 中国农业气象, **34**(1): 43-49.

李莹莹. 2017. 不同水分条件及复水对吉林省春玉米生长发育影响的模拟研究(硕士学位论文). 南京: 南京信息工程大学.

刘　维, 侯英雨, 吴门新, 等. 2017. WOFOST 模型在东北春玉米产区的验证与适应性评价. 气象与环境科学, **40**(3): 7-13.

栾庆祖, 叶彩华, 莫志鸿, 等. 2014. 基于 WOFOST 模型的玉米干旱损失评估: 以北京为例. 中国农业气象, **35**(3): 311-316.

麻雪艳, 周广胜. 2013. 玉米叶面积指数动态模拟的最适野外观测资料. 应用生态学报, **24**(6): 1579-1585.

米　娜, 蔡　福, 张玉书, 等. 2017. 不同生育期持续干旱对玉米的影响及其与减产率的定量关系. 应用生态学报, **28**(5): 1563-1570.

米　娜, 张玉书, 蔡　福, 等. 2016. 土壤干旱胁迫对作物影响的模拟研究进展. 生态学杂志, **35**(9): 2519-2526.

孙琳丽, 侯　琼, 马玉平, 等. 2016. WOFOST 模型在内蒙古河套灌区模拟玉米生长全程的适应性. 生态学杂志, **35**(3): 800-807.

张德来, 蔡　福, 史奎桥, 等. 2018. 东北地区春玉米主要生理参数对拔节至灌浆期干旱的响应. 气象与环境学报, 34(4):134-138.

张建平, 何永坤, 王　靖, 等. 2015. 不同发育期干旱对玉米籽粒形成与产量的影响模拟. 中国农业气象, **36**(1): 43-49.

张建平, 王春乙, 赵艳霞, 等. 2012a. 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. 生态学报, **32**(13): 4132-4138.

张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 2012b. 不同发育期干旱对冬小麦灌浆和产量影响的模拟. 中国生态农业学报, **20**(9): 1158-1165.

张　宁, 张庆国, 于海敬, 等. 2018. 作物生长模拟模型的参数敏感性分析. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, **44**(1): 107-115.

张　悦, 邸万通, 王晶晶, 等. 2017. 北方农牧交错带间套作资源利用的研究进展. 生态学杂志, **36**(9): 2623-2632

赵　锦, 杨晓光, 刘志娟, 等. 2014. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响. X: 气候变化对东北三省春玉米气候适宜性的影响. 中国农业科学, **47**(16): 3143-3156.

中国气象局. 1993. 农业气象观测规范: 上卷. 北京: 气象出版社.

Bai LP, Sui FG, Sun ZH, *et al*. 2004. Effects of soil water stress on morphological development and yield of maize. *Acta Ecologica Sinica*, **24**: 1556-1560.

Bonato O, Schulthess IF, Baumgartner J. 1999. Simulation model for maize crop growth based on acquisition and allocation processes for carbohydrate and nitrogen. *Ecological Modelling*, **124**: 11-28.

Boogaard HL, van Diepen CA, Rotter RP, *et al*. 1998. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Wageningen: DLO Winand Staring Centre.

Cheng ZQ, Meng JH, Wang YM. 2016. Improving spring maize yield estimation at field scale by assimilating time-series HJ-1 CCD data into the Wofost model using a new method with fast algorithms. *Remote Sensing*, **8**: 303. doi: 10.

3390/rs8040303.

Iizumi T, Yokozawa M, Nishimori M. 2009. Parameter estimation and uncertainty analysis of a large-scale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, **149**: 333-348.

Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, *et al*. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, **18**: 235-265.

Jones JW, Keating BA, Porter CH. 2001. Approaches to modular model development. *Agricultural Systems*, **70**: 421-443.

Keating BA, Carberry PS, Hammer GL, *et al*. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, **18**: 267-288.

Tao F, Zhang Z, Liu J, *et al*. 2009. Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: A new process-based model development, optimization, and uncertainties analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, **149**: 831-850.

van Oijen M, Cameron DR, Butterbach-Bahl K, *et al*. 2011. A Bayesian framework for model calibration, comparison and analysis: Application to four models for the biogeochemistry of a Norway spruce forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **151**: 1609-1621.

van Oijen M, Reyer C, Bohn FJ, *et al*. 2013. Bayesian calibration, comparison and averaging of six forest models, using data from Scots pine stands across Europe. *Forest Ecology and Management*, **289**: 255-268.

Weiner J, Campbell LG, Pino J, *et al*. 2009. The allometry of reproduction within plant populations. *Journal of Ecology*, **97**: 1220-1233.

Yang JC, Zhang JH. 2006. Grain filling of cereals under soil drying. *New Phytologist*, **169**: 223-236.

Zhang JQ. 2004. Risk assessment of drought disaster in the maize growing region of Songliao Plain, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **102**: 133-153.

Zhang YH, Lü HQ, Li S. 2008. Applicability of crop water deficit index in agricultural drought monitoring. *Meteorological Science and Technology*, **36**: 596-600.

作者简介 蔡 福,男,1980年生,博士,研究员,从事农业气象灾害机理及作物模型模拟研究。E-mail: caifu_80@163.com

责任编辑 李凤芹