

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2015.04.012

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

## 气候变化对河南省夏玉米主栽品种发育期的影响模拟\*

李树岩<sup>1</sup>, 王靖<sup>1,2</sup>, 余卫东<sup>1</sup>, 陈忠民<sup>1</sup>

(1. 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, 郑州 450003; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:** 为模拟气候变化对夏玉米发育期影响, 本文将河南省划分为 4 个夏玉米主栽区, 分区进行主栽品种遗传参数调试验证, 确定各区域品种平均遗传参数。将未来气候变化情景(A2 和 B2)下, 2020s、2050s 和 2080s 各时段的温度和降水增量加上基准值, 模拟未来气候变化对河南省夏玉米发育期的影响。模型调参验证结果表明: 各区域品种遗传参数存在一定差异, 豫西地区当前种植品种播种-开花所需积温高于其它地区, 而豫北和豫东当前种植品种开花-成熟所需积温高于其它地区; 各区开花期调参和验证误差 RMSE 为 2~4d, 相对误差 NRMSE 均小于 10%; 各区域成熟期调参误差 RMSE 均小于 4d, 验证误差 RMSE 为 3~7d, 除豫西区外, 各区域调参及验证期间的成熟期相对误差 NRMSE 均小于 10%。表明 CERES-Maize 模型对河南省各区域夏玉米发育期模拟精度均较高。未来气候变化影响模拟结果表明: A2 和 B2 情景下, 夏玉米营养生长期平均缩短 4.7d 和 3.1d, 全生育期平均缩短 12.9d 和 8.6d。夏玉米生育期缩短日数与各时段增温幅度趋势一致, 全省 4 个区域中豫西区生育期日数缩短最多。

**关键词:** CERES-Maize 模型; 气候变化; 发育期; 夏玉米; 模拟

## Modelling the Impacts of Climate Change on Phenology of Representative Maize Varieties in Henan Province

LI Shu-yan<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1,2</sup>, YU Wei-dong<sup>1</sup>, CHEN Zhong-min<sup>1</sup>

(1. China Meteorological Administration/Henan Provincial Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique/Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193)

**Abstract:** The study aimed to model the impacts of climate change on maize phenology. Henan province was divided into four agro-climatic zones and the genetic parameters of representative maize varieties in each zone were determined by calibrate and validate CERES-Maize model. Thereafter, the impact of future climate change on maize phenology was modeled based on future climate change scenarios (A2 and B2) for 2020s, 2050s and 2080s by adding the temperature and precipitation increments simulated by regional climate model (PRECIS) to the baseline (1961-1990). The study results showed that there were large spatial differences between genetic parameters of representative maize varieties in four zones. Required thermal time from sowing to flowering of maize varieties in western Henan was higher than other zones. However, required thermal time from flowering to maturity of maize varieties in northern and eastern Henan was higher than other two zones. Days from sowing to flowering were accurately simulated with RMSE <4.0d and NRMSE <10% for both the calibration and validation periods. RMSE between simulated and observed maturing date was lower than 4d for calibration period and 3-7d for validation period. NRMSE between simulated and observed maturing date was lower than 10% in all the zones except for

\* 收稿日期: 2014-11-07

基金项目: 中国气象局/河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放研究基金项目(AMF201203); 中国气象局气候变化专项(CCSF201408)

作者简介: 李树岩 (1979-), 女, 河北唐山人, 硕士, 高级工程师, 从事农业气象灾害、作物模型应用等研究。

E-mail: lsy\_126com@126.com

western Henan. Simulated vegetative growth period and whole growth period of summer maize shortened by 4.7d and 12.9d on average under A2 scenario, and 3.1d and 8.6d on average under B2 scenario, respectively. The decrease in the length of maize growing period was in accordance with the increase in growing period temperature in different regions in Henan province, with the longest decrease in western Henan.

**Key words:** CERES-Maize model; Climate change; Phenology; Summer maize; Simulation

作物发育期模拟是对作物发育进程的一种时间标识,也是作物干物质积累与分配、养分吸收与转移、产量和品质等模拟的基础<sup>[1-2]</sup>。准确模拟和预测作物发育期,可为作物各发育阶段的农业气象条件评估和产量预报等提供依据。在发育期模拟研究中,积温学说被广泛采用,随着对作物发育的影响机理的深入理解,考虑多因素对作物发育影响的线性或非线性模式<sup>[3-5]</sup>以及基于作物生理发育日数的模拟方法也得到不断发展<sup>[6-8]</sup>。作物生长模型是用数学方程描述作物、气候、土壤之间的相互作用过程,可动态模拟作物生长发育和产量形成,具有较强的机理性<sup>[9-10]</sup>。生长发育过程是作物生长模型的核心模块<sup>[11]</sup>,发育期控制着作物生长模型在不同发育阶段的生长参数,直接影响模型模拟结果的准确性<sup>[12-14]</sup>。作物生长模型的研究和发展,为作物发育期模拟提供了更灵活有力的方法。当前,作物生长模型中的发育期模块主要考虑不同发育期对温度和光照的敏感性,如 CERES 系列模型、WOFOST 模型和 CROPGRO 等<sup>[15]</sup>。

近百年来,全球增温约 0.70℃,中国约 0.44℃,而全球降水呈微弱上升趋势,对农业生产已产生重大影响<sup>[16]</sup>。在全球气候变化的大背景下,准确评估夏玉米发育期变化是气候变化影响研究的重要方面,对调整生产布局,农艺措施制定和作物品种选育等具有重要意义。前人应用 CERES-Maize 模型在华北平原进行了发育期和产量的模拟研究<sup>[17-20]</sup>,但大多选择典型站点进行调参和验证,缺乏分区域验证工作。本文利用河南省夏玉米主产区 18 个农业气象观测站的发育期资料和气象资料,建立 CERES-Maize 模型的区域化参数并进行调试和验证,应用调试和验证后的 CERES-Maize 模型模拟在 A2 和 B2 情景下,未来 3 个时段(2020s、2050s 和 2080s)的夏玉米发育期变化,为开展作物生长模型区域应用及气候变化影响评估提供研究基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 CERES-Maize 模型

CERES-Maize 是 DSSAT4.0 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。该模型用累积生长度日(GDD)来描述夏玉米发育进程,分为开花前和开花后两段模拟,发育期共分为 8 个阶段,主要引入 3 个遗传参数即基本营养生长期和籽粒灌浆期所需 GDD(P1 和 P5)、光敏感期的日长效应系数(P2)来控制发育进程<sup>[11,21]</sup>。

### 1.2 资料收集与处理

#### 1.2.1 气象数据

气象数据包括河南省 18 个农业气象观测站相应年份的逐日气象资料,包括日照时数、最高气温、最低气温和降水量,由于太阳辐射量没有观测数据,利用埃斯屈朗(Angstrom)<sup>[22]</sup>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 个农业气象观测站发育期资料和气象资料进行模型参数调试和验证,以 1961–1990 年逐日平均气象数据作为基准数据进行气候变化影响分析。

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,不能用单一品种参数代表区域作物属性。因此,本文根据河南省气候特点和夏玉米生产品种布局将全省划分为 5 个区,分别在区域内选择多点进行模型调参与验证(图 1),图中各区获得一套代表区域平均状态的品种遗传参数。各农业气象观测站拥有完整的玉米品种、发育期、逐日气象、土壤以及耕作管理的资料,除个别站点外,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。

#### 1.2.2 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%<sup>[23]</sup>,由于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<sup>[24]</sup>建立相应的土壤类型文件。

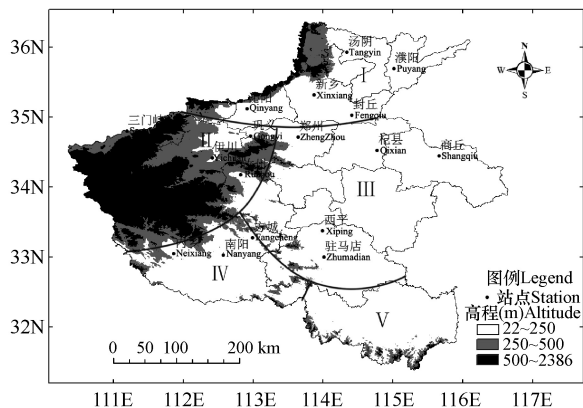


图 1 河南省分区示意图

Fig. 1 Agro-climatic zoning map of Henan province

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: The zone I-IV is main summer maize production area and the zone V is not in the scope of the study area because there mainly produces rice

1.2.3 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确定。

1.3 夏玉米品种遗传参数的确定

按照全省夏玉米农业气象观测站点分区，选择各区有代表性的品种连续 3a 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。

1.4 模型调参验证评价指标

对模型模拟的主要发育期（开花和成熟期）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 和 NRMSE 反应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应。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% 范围内时，表示模型模拟结果好；当 NRMSE 在 20%~30% 范围内时，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不能接受。

1.5 未来气候变化情景

IPCC 报告中提出与中国国情最相符的是 A2（中-高排放情景）和 B2（中-低排放情景）温室气体排放情景。本文以两种情景作为区域气候模式 RCM-PRECIS 的外部驱动模拟两种情景下的未来气候数据。PRECIS 的逐日模拟结果已在中国进行了广泛的修正与验证<sup>[25]</sup>。采用时间降尺度方法将未来气候数据划分为 3 个时段，分别为近期（2020s，2011-2040 年），中期（2050s，2041-2070 年）和远期（2080s，2071-2100 年），各时段气候情景对应的年平均温度和降水量变化见表 1<sup>[26]</sup>。

表 1 PRECIS 模拟的地面气温、降水变化量（相对于气候基准时段 1961-1990 年）

Table 1 The increments of daily average temperature and precipitation simulated by PRECIS relative to the baseline(1961-1990)

时段 Stage	A2 情景 A2 scenarios		B2 情景 B2 scenarios	
	ΔT(℃)	ΔP (%)	ΔT(℃)	ΔP (%)
2020s	1.4	3.3	0.9	3.7
2050s	2.6	7.0	1.5	7.0
2080s	3.9	12.9	2.0	10.2

A2 和 B2 情景下未来（2020s、2050s 和 2080s）3 个时段内河南省温度和降水量均有不同程度的增加。根据 RCM-PRECIS 区域气候情景模拟值，设定在 CO<sub>2</sub> 浓度不变条件下，根据表 1 中不同情景和时段温度增量、降水增幅情况，增加到基准值各气象要素上，利用修改后的逐日气象数据驱动物物模型，模拟 A2 和 B2 情景下未来 3 个时段的夏玉米发育期变化。利用式（1）计算发育期的变化值，分析不同情景下温度和降水变化对夏玉米发育期的影响。模型运行所需品种参数、土壤参数为全省各分区的代表类型，播种密度和播种时间等数据采用多年平均值。

$$\Delta G = G - G_{\text{base}} \tag{1}$$

式中，ΔG 为生育期变化，G 为模拟的生育期日数，G<sub>base</sub> 为环境条件改变之前的生育期日数，以 1961-1990 年逐日平均气象数据模拟值作为 Baseline。

2 结果与分析

2.1 各区主栽夏玉米品种遗传参数的调试结果

分区域对夏玉米品种遗传参数进行调试验证，结果见表 2。由表可知，各区域品种遗传参数存在一定差异，P1 参数主要影响播种-开花期日数，除 II 区（豫西）外其它地区差别不大，豫西地区当前种植品种播种-开花所需积温要高于其它地区。P5 参数主要

影响开花-成熟日数, I 区(豫北)最高, III 区(豫东)次之, II 区和 IV 区最低, 豫北和豫东当前种植

品种开花-成熟所需积温高于其它地区。不同参数相互作用, 共同影响发育进程。

表 2 各区域品种遗传参数及代表性品种

Table 2 The representative maize varieties and their genetic parameters for CERES-Maize model in each zone

区域 Zone	遗传参数 Genetic parameters			代表性品种 Variety
	P1 (°C·d)	P2	P5 (°C·d)	
I	210	0.65	820	浚单 20 Xundan 20、郑单 958 Zhengdan 958、中科 11 Zhongke 11
II	232	0.65	710	洛单 6 号 Luodan 6、豫玉 22 Yuyu 22、鲁单 981 Ludan 981
III	210	0.65	780	伟科 702 Weike 702、郑单 958 Zhengdan 958、浚单 20 Xundan 20
IV	210	0.60	700	登海 605 Denghai 605、隆平 206 Longping 206、中单 868 Zhongdan 868

## 2.2 各区主栽夏玉米品种的主要发育期模拟结果

### 2.2.1 开花期

由图 2 可见, 利用 2003-2005 年或 2004-2006 年的农作物观测资料调试参数过程中得到的开花期模拟值与实测值散点基本在 1:1 线附近(图 2a), 利用 2006-2010 年或 2007-2010 年的试验资料进行验证时得到的开花期模拟值与实测值散点基本也在 1:1 线附近(图 2b), 变化范围均不超过±5%误差线值。图中显示, 由于各区夏玉米品种特性不同, 开花期日序变化范围有一定差异, I 区和 III 区开花期变化范围为第 200~220 天, 相对集中, II 区和 IV 区开花期在第 200~240 天均有分布。

由表 3 可见, 各区域模型调试与验证结果的 RMSE 均为 2~4d, NRMSE 均在 10%以内, 表明模型模拟精度较高, 可以用来模拟夏玉米开花期。各区实测值与模拟值间相关系数  $r$  有一定区别。总体上 I 区和 III 区实测值与模拟值间相关系数较小, 模型调试和验证结果中  $r$  平均为 0.707 和 0.693, II 区和 IV 区较大, 模型调试和验证结果中  $r$  平均为 0.890 和 0.896。这主要是由于 I 区和 III 区以平原为主, 区

域内气候条件差异不大, 各站常年的播种期、开花期均较接近, 开花期日序的实测值与模拟值之间变化趋势的一致性稍差, 相关系数较小。II 区和 IV 区为山地和丘陵, 站点间和年际间差异较大, 开花期日序变化范围更大, 实测值与模拟值之间变化趋势一致性更好。

### 2.2.2 成熟期

模型对夏玉米成熟期调参验证结果如图 3 所示, 由图可见, 模拟值较好地匹配了实测值, 二者基本在 1:1 线和±5%的误差线附近, 且偏离度较小。由调参和验证评价指标(表 4)可知, 模型参数调试结果中, 各区域 RMSE 均小于 4d, I 区最小仅为 0.7d, 模型验证结果 RMSE 较调参结果稍大, 在 3~7d 内变化, 其中 RMSE 最大的是豫西 II 区, 为 6.9d。由模型调参和验证的两组相关系数  $r$  值可知, 参数调试结果中除豫东 III 区的  $r$  最小, 为 0.7 以外, 其它地区均在 0.9 以上, 表明模拟值与实测值变化的一致性很好。验证结果中 I 区和 III 区的相关系数  $r$  分别为 0.618 和 0.692, 小于 II 区和 IV 区, 模拟结果与开花期类似。验证结果的 NRMSE 除豫西 II 区为 10.3%

表 3 夏玉米开花期参数调试和验证评价指标

Table 3 The evaluation indices of simulated and observed flowering dates for calibration and validation periods in each zone

区域 Zone	模型调试结果 Calibration			模型验证结果 Validation		
	RMSE (d)	NRMSE (%)	$r$	RMSE (d)	NRMSE (%)	$r$
I	2.2	3.6	0.712	3.7	6.1	0.701
II	3.2	4.8	0.843	3.2	4.9	0.908
III	2.7	4.5	0.702	3.3	5.4	0.684
IV	3.8	5.8	0.937	3.8	6.1	0.885

注: “模型调试结果”指各站利用 2003-2005 年(驻马店和西平站为 2004-2006 年)田间资料进行模型参数调试过程中所得到的发育期模拟结果与实测值的比较, “模型验证结果”指各站利用 2006-2010 年(驻马店和西平站为 2007-2010 年)田间实测资料进行模型验证时所得到的发育期模拟结果与实测值的比较。RMSE 为模拟值与观测值的均方根误差, NRMSE 为归一化均方根误差,  $r$  为两者间的相关系数。下同。

Note: “Calibration” is the compare results of growth stage between observed and simulated in parameter testing processes (2003-2005); “Validation” is the compare results of growth stage between observed and simulated in model validation (2006-2010). RMSE is root mean square error between observed and simulated growth stage, NRMSE is normalized root mean square error,  $r$  is their correlation coefficient. The same as below.

外，其它区域调参及验证结果的 NRMSE 均小于 10%，表明模型对成熟期的模拟精度也较高。

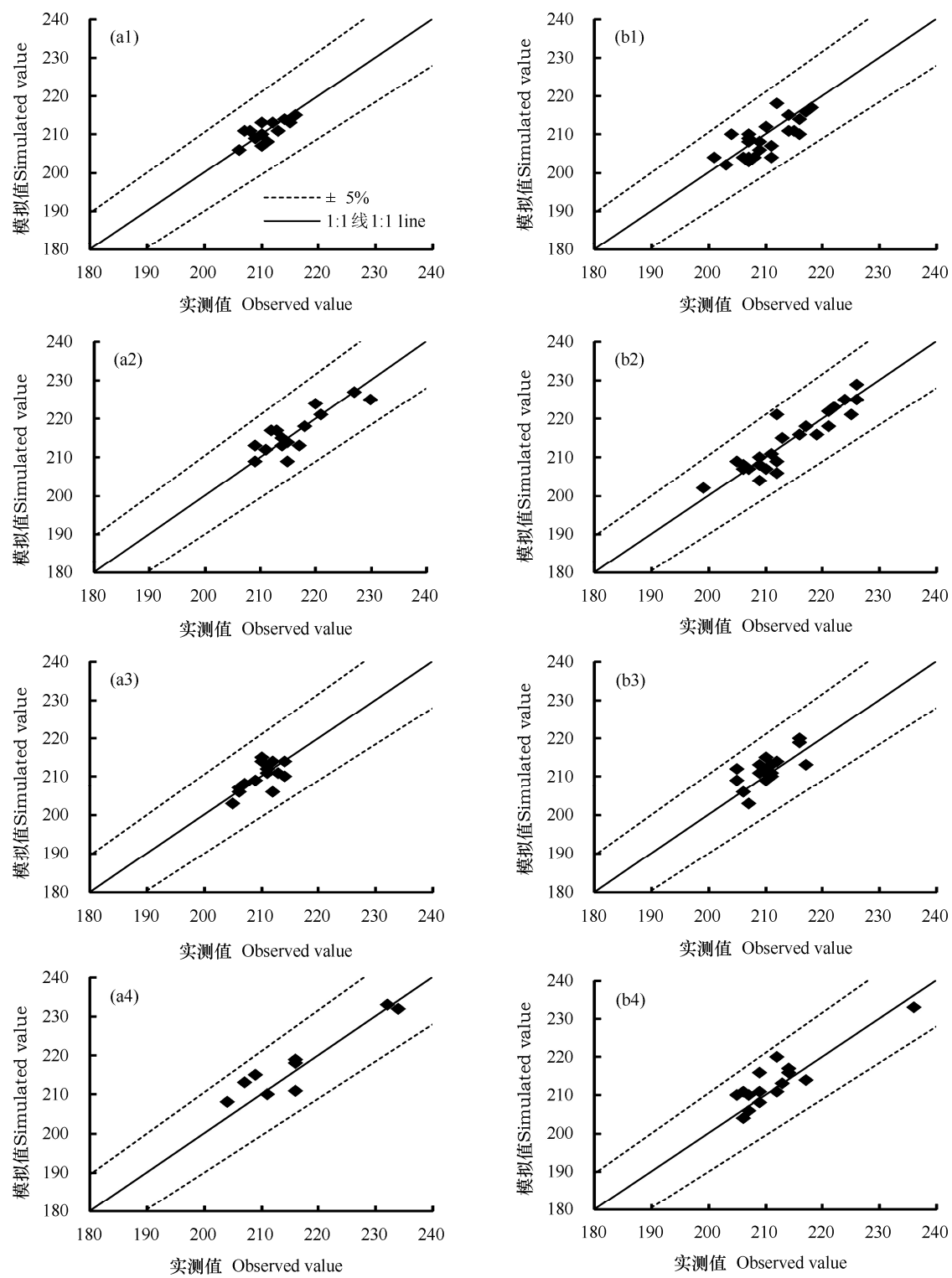


图 2 各区域模型参数调试 (a) 和验证 (b) 结果中夏玉米开花期模拟值与观测值的比较

**Fig. 2 Comparison between simulated and observed flowering dates of summer maize for calibration (a) and validation (b) in 4 zones**

注：图中数值均为日序，以 1 月 1 日为 1。(a1)-(a4): I-IV 区调试。(b1)-(b4): I-IV 区验证。下同  
Note: Simulated and observed flowering dates are the ordinal day of a year from 1<sup>st</sup> Jan. (a<sub>1</sub>)-(a<sub>4</sub>): Calibration for I-IV zone; (b<sub>1</sub>)-(b<sub>4</sub>): Validation for I-IV zone. The same as below

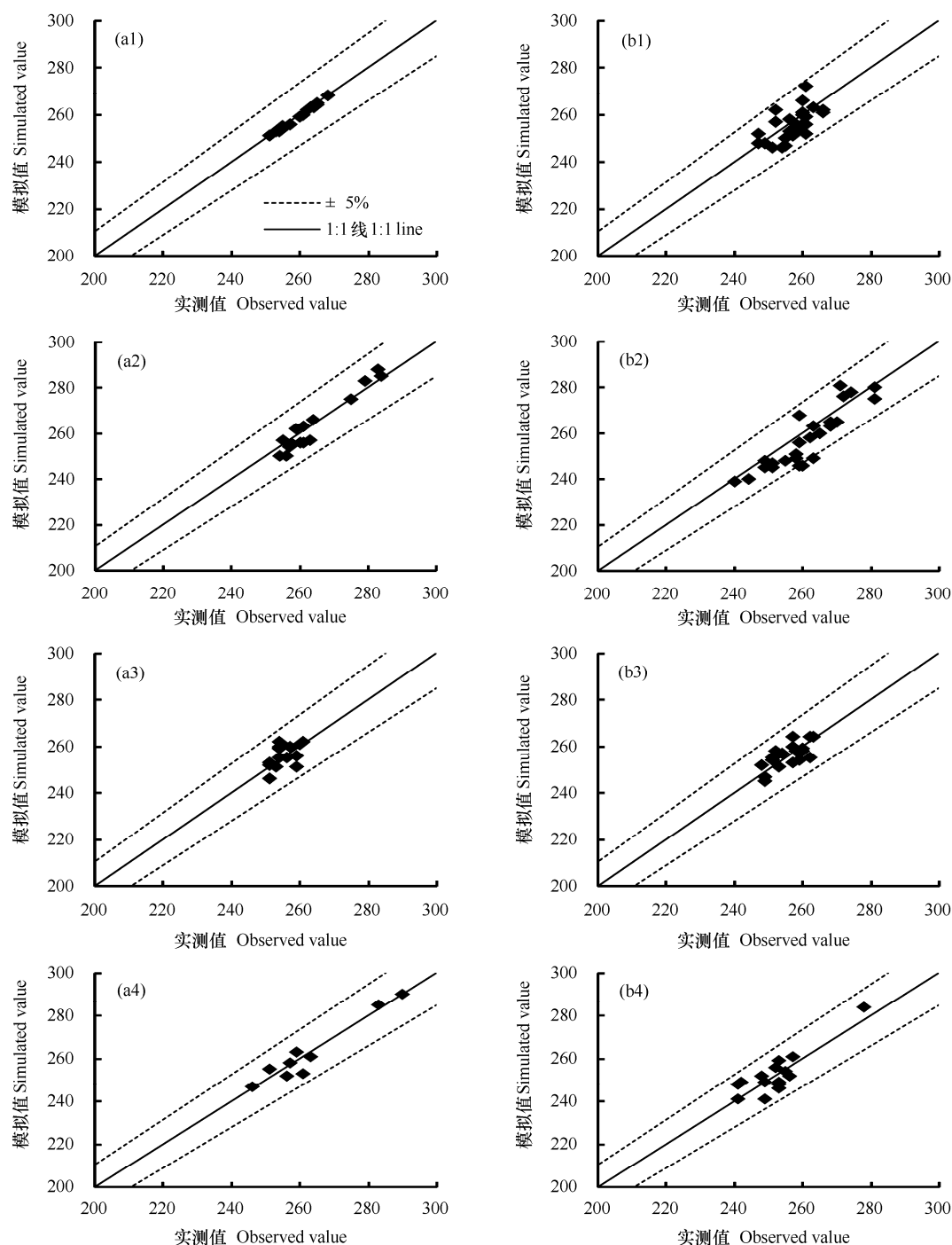


图 3 各区域模型参数调试 (a) 和验证 (b) 结果中夏玉米成熟期模拟值与观测值的比较

Fig. 3 Comparison between simulated and observed maturing dates of summer maize for calibration (a) and validation (b) in 4 zones

表 4 夏玉米成熟期参数调试和验证评价指标

Table 4 The evaluation indices of simulated and observed maturing dates for calibration and validation periods in each zone

区域 Zone	模型调试结果 Calibration			模型验证结果 Validation		
	RMSE (d)	NRMSE (%)	r	RMSE (d)	NRMSE (%)	r
I	0.7	1.1	0.995	5.4	8.6	0.618
II	3.7	5.4	0.970	6.9	10.3	0.893
III	4.0	6.4	0.700	3.8	6.1	0.692
IV	3.7	5.4	0.965	5.1	8.0	0.863

## 2.3 未来气候变化对夏玉米发育期的影响

### 2.3.1 开花期

由图4可见,在不改变当前种植模式、品种及其它环境因子的条件下,A2和B2情景下各区未来夏玉米开花期均明显缩短,A2情景缩短2~7d,B2情景缩短2~5d,且未来随时间推移缩短日数增加。从全省平均值看,A2情景下2020s、2050s和2080s模拟的夏玉米开花期将缩短2.8、4.6和6.7d,平均为4.7d,B2情景下分别将缩短2.0、3.1和4.2d,平均为3.1d。可见,由于A2情景较B2情景增温幅度更大,未来夏玉米的开花期缩短将更明显。

不同区域夏玉米生长对未来温度、降水量变化的响应程度也有区别。图4显示,A2情景下,2020s和2050s阶段豫西II区开花期日数较其它地区缩短更明显。B2情景下,2050s和2080s豫西II区开花所需日数较其它地区缩短明显,其中2050s为4.0d,显著高于其它地区(2.4~3.0d)( $P<0.05$ )。由表2各区域品种参数可知,II区播种至开花期所需积温较其它区域多,受气候变化影响最敏感,开花期提前更多。

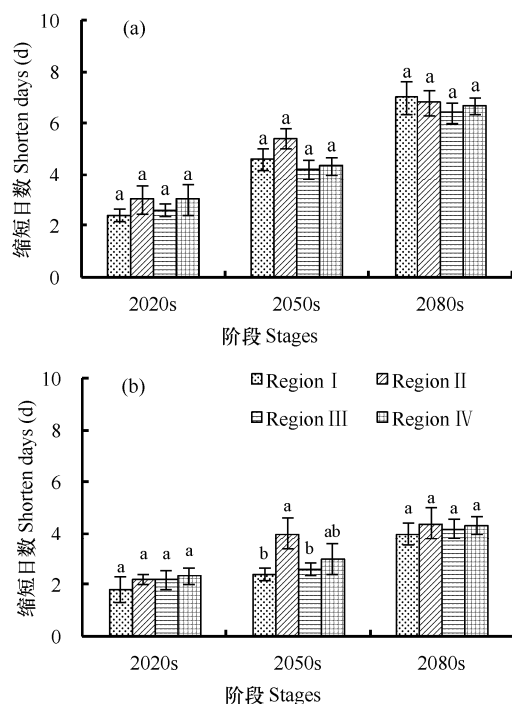


图4 A2(a)和B2(b)情景下未来不同时段夏玉米开花期的变化

Fig. 4 The change amount of simulated flowering dates of summer maize under A2(a) and B2(b) scenarios

注:小写字母表示区域间在0.05水平上的差异显著性。下同

Note: Lowercase indicates the significant difference among zones at 0.05 level. The same as below

### 2.3.2 成熟期

在不同气候变化情景下,夏玉米成熟期均呈明显的缩短趋势,如图5所示。全省平均来看,A2情景下3个时段成熟所需日数平均分别缩短8.2、13.5和18.1d,平均为12.9d,B2情景下3个阶段平均分别缩短5.9、8.8和11.7d,平均8.6d。两情景下成熟期日数均随着时段推移而缩短,与各阶段增温幅度趋势一致。A2情景属中-高排放情景,温度和降水增幅均大于B2情景,其成熟期缩短日数更明显。

比较各区域成熟期日数变化,两个情景下I区与III区、II区与IV区各阶段成熟期日数缩短程度均无显著差异,这与表2中P5参数值的差异表现较一致。除A2情景下2080s阶段外,其它情景及时段II区的成熟期缩短日数均显著大于I区。A2情景下豫西II区各阶段平均缩短13.9d,其它地区为12.1~13.2d。B2情景下豫西II区各阶段成熟期日数平均缩短10.0d,显著高于其它地区。

由上分析可知,豫西II区夏玉米发育期缩短较其它区域显著。分析原因,II区原有夏玉米生育期较长,经统计开花期较其它地区偏长2~3d,成熟期偏长4~9d,温度升高后更敏感,其各生育时期生长日数缩短也更多。

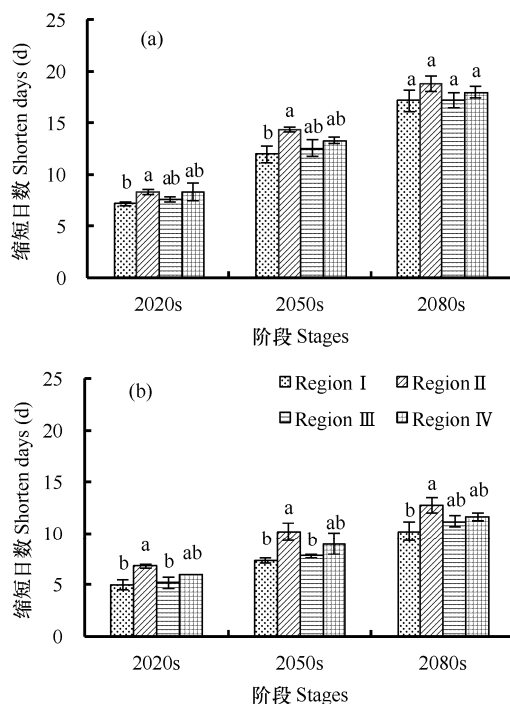


图5 A2(a)和B2(b)情景下未来不同时段夏玉米成熟期的变化

Fig. 5 The change amount of simulated maturing dates of summer maize under A2 (a) and B2 (b) scenarios

### 3 结论与讨论

本研究将河南夏玉米主产区划分为 4 个区域,对 CERES-Maize 模型进行参数调试和验证,获得代表各区域平均状态的 4 套模型参数。调参结果开花期误差 RMSE 为 2~4d,验证数据开花期误差 RMSE 为 3~4d,所有区域调参及验证数据开花期实测值与模拟值的 NRMSE 均小于 10%。各区域调参期间成熟期误差 RMSE 小于 4d,验证期间 RMSE 为 3~7d,除 II 区(豫西)成熟期实测值与模拟值的 NRMSE 为 10.3%外,其它区域 NRMSE 均小于 10%,表明 CERES-Maize 模型对夏玉米发育期模拟精度较高。

模型调参验证结果表明各区域品种遗传参数存在一定差异,豫西地区当前种植品种播种-开花所需积温高于其它地区,而豫北和豫东当前种植品种开花-成熟所需积温高于其它地区。当前豫北和豫东种植品种相近,一般偏晚熟,开花-成熟所需积温较多,虽然豫北热量资源较豫东、豫南稍差,但当地大多采用与小麦套种方式,弥补了热量条件的不足。豫西为丘陵山区,豫西南主要为南阳盆地,光热资源稍差<sup>[27]</sup>,多种植偏早熟品种。另一方面,品种的选择还受降水条件影响,如豫南降水偏多,容易产生涝渍和病害等衍生灾害,豫西少雨易受干旱影响,虽然新品种不断推出,但老牌品种如郑单 958 仍有大面积种植。多种因素影响导致当前种植的夏玉米品种复杂多样,不能用单一品种参数代表整个地区的作物属性,因此分区建立品种遗传参数文件,综合区域内几个代表性品种的特性作为区域平均参数,可使模型模拟结果更具有针对性和准确性。

根据 A2 和 B2 两情景下 3 个时段(2020s、2050s、2080s)温度和降水变幅,模拟未来气候变化对夏玉米发育期影响,受增温影响夏玉米播种-开花期平均缩短 4.7d (A2) 和 3.1d (B2),全生育期平均缩短 12.9d (A2) 和 8.6d (B2)。生育期缩短日数与各时段增温幅度趋势一致,全省 4 个区域中豫西 II 区生育期日数缩短最多,受气候变化影响最敏感。生育期变化与品种熟性关系密切,袁东敏等<sup>[28]</sup>研究东北春玉米在 B2 情景下未来 40a 生育期变化发现,中早熟玉米其生育期变化最明显,缩短 3~6d,偏晚熟品种则维持原有生育期长度。在未来增温条件下,种植偏晚熟品种,将更利于气候资源利用,减少因生育期缩短带来的产量损失。

温度是影响作物发育进程的主要限制因子,但玉米作为短日照作物对光周期较为敏感<sup>[1]</sup>,日长效应

也需要考虑。本文气候变化对夏玉米发育期影响分析仅考虑了温度增加的效应,不能完全代表未来气候变化对夏玉米发育期的影响,因此模拟结果还有待进一步验证。

进行气候变化对夏玉米发育期变化的模拟时,未来气候数据是依据未来时段与基准时段相比的温度和降水的增幅来确定,而没有应用实际逐日情景数据来驱动模型,可能对模拟误差有一定影响。另外,随着区域气候模式的发展和新的气体排放情景的提出,以最新的气候变化情景数据来驱动作物生长模型,可使模型模拟结果更具有时效性和代表性,相关研究有待深入进行。

### 参考文献 References

- [1]郑国清,高亮之. 玉米发育期动态模拟模型[J]. 江苏农业学报, 2000, 16(1): 15-21.  
Zheng G Q, Gao L Z. Simulation model of maize phenology[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2000, 16(1): 15-21. (in Chinese)
- [2]徐寿军,林美荫,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.  
Xu S J, Lin M Y, Xu Z W. Advance on dynamic simulation model for crop development[J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities, 2009, 24(2): 167-171. (in Chinese)
- [3]施泽平,郭世荣,康云艳,等. 基于生长度日的温室甜瓜发育模拟模型的研究[J]. 南京农业大学学报, 2005, 28(2): 129-132.  
Shi Z P, Guo S R, Kang Y Y, et al. Simulation of greenhouse muskmelon development based on growing degree days[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2005, 28(2): 129-132. (in Chinese)
- [4]钱栓,陈晖,王良宇. 全国棉花发育期业务预报方法研究[J]. 应用气象学报, 2007, 18(4): 539-547.  
Qian S, Chen H, Wang L Y. Operational prediction method of nationwide cotton development stages[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(4): 539-547. (in Chinese)
- [5]吕贞龙,徐寿军,庄恒扬. 作物发育温度非线性效应 Beta 模型的特征分析[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3737-3743.  
Lv Z L, Xu S J, Zhuang H Y. Characteristics of the Beta function for nonlinear effects of temperature on crop phenological development[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3737-3743. (in Chinese)
- [6]张立祯,曹卫星,张思平,等. 基于生理发育时间的棉花生育模拟模型[J]. 棉花学报, 2003, 15(2): 97-103.  
Zhang L Z, Cao W X, Zhang S P, et al. Simulation model for cotton development stages based on physiological development



- time[J]. *Cotton Science*, 2003, 15(2): 97-103. (in Chinese)
- [7] 马富裕, 曹卫星, 张立桢. 棉花生育时期及蕾铃发生发育模拟模型研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(4): 626-630.
- Ma F Y, Cao W X, Zhang L Z, et al. A physiological development time-based simulation model for cotton development stages and square-and boll formation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4): 626-630. (in Chinese)
- [8] 严美春, 曹卫星, 李存东, 等. 小麦发育过程及生育期机理模型的检验和评价[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(2): 43-50.
- Yan M C, Cao W X, Li C D, et al. Validation and evaluation of a mechanistic model of phasic and phenological development of wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2): 43-50. (in Chinese)
- [9] 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.
- Lin Z H, Mo X G, Xiang Y Q. Research advances on crop growth models[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(5): 750-758. (in Chinese)
- [10] 冯利平, 高亮之, 金之庆, 等. 小麦发育期动态模拟模型的研究[J]. *作物学报*, 1997, 23(4): 418-424.
- Feng L P, Gao L Z, Jin Z Q, et al. Studies on the simulation model for wheat phenology[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(4): 418-424. (in Chinese)
- [11] 潘学标. 作物模型原理[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 22-23.
- Pan X B. Crop model theory[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 22-23. (in Chinese)
- [12] 张帅, 陶福祿. 水稻发育模型研究进展[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(11): 1485-1491.
- Zhang S, Tao F L. Review of research on rice phenology models[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(11): 1485-1491. (in Chinese)
- [13] Andrej C, Zalika C, Lucka K, et al. The simulation of phenological development in dynamic crop model the Bayesian comparison of different methods[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(1): 101-115.
- [14] Zhang T Y, Zhu J, Yang X G. Non-stationary thermal time accumulation reduces the predictability of climate change effects on agriculture[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1412-1418.
- [15] 李荣平, 周广胜, 王笑影, 等. 不同物候模型对东北地区作物发育期模拟对比分析[J]. *气象与环境学报*, 2012, 28(3): 25-30.
- Li R P, Zhou G S, Wang X Y, et al. Comparative analysis of simulation on crop development stage using different phenological models in Northeast China[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2012, 28(3): 25-30. (in Chinese)
- [16] 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.
- Deng Z Y, Wang Q, Zhang Q, et al. Impact of climate warming and drying on food crops in northern China and the countermeasures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6278-6288. (in Chinese)
- [17] 陈怀亮, 冯定原, 毛留喜, 等. CERES-玉米模拟模式的数值试验及应用[J]. *南京气象学院学报*, 1997, 20(4): 522-528.
- Chen H L, Feng D Y, Mao L X, et al. CERES-Maize model experiment with its application in Henan Province[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1997, 20(4): 522-528. (in Chinese)
- [18] 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.
- Hu Y N, Chai S Z, Xu Y L, et al. Validation of CERES-Maize model in main maize planting regions in China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(4): 383-386. (in Chinese)
- [19] 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.
- Li S Y, Liu R H, Cheng L. Simulation and analysis of water shortage in different stages of summer maize in Huanghuai region based on the CERES-Maize model[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(5): 151-156. (in Chinese)
- [20] 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.
- Liu Y L, Chen X G, Xiao Y Q. Study on establishing maize variety parameters in the CERES-Maize simulation model[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(6): 127-129. (in Chinese)
- [21] Gordon Y T, Goro U, Sharon B. (Eds.) DSSAT version 3 Volume 2[M]. Honolulu, Hawaii: International Bench Mark Sites Network for Agrotechnology Transfer, University of Hawaii, 1994: 197-201.
- [22] Angström, A. Solar and terrestrial radiation[J]. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 1924, 50: 121-125.
- [23] 魏克循. 河南土壤地理[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1995: 734.
- Wei K X. Henan soil geography[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1995: 734. (in Chinese)
- [24] 河南省土壤肥料工作站, 河南省土壤普查办公室. 河南土壤志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 58, 99-100, 290-300.
- Soil Fertilizer Workstation of Henan Province, Soil Survey Office of Henan Province. Henan soil resources[M]. Beijing:

- China Agriculture Press, 1995: 58, 99-100, 290-300. (in Chinese)
- [25] 许吟隆, Richard J. 利用 ECMWF 再分析数据验证 PRECIS 对中国区域气候的模拟能力[J]. 中国农业气象, 2004, 25(1): 5-9.
- Xun Y L, Richard J. Validating PRECIS with ECMWF reanalysis data over China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2004, 25(1): 5-9. (in Chinese)
- [26] 熊伟, 杨婕, 林而达, 等. 未来不同气候变化情景下我国玉米产量的初步预测[J]. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1092-1191.
- Xiong W, Yang J, Lin E D, et al. The projection of maize yield in China under climate change scenarios[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(10): 1092-1191. (in Chinese)
- [27] 李树岩, 方文松, 马志红. 河南省夏玉米生长季农业气候资源变化分析[J]. 河南农业科学, 2012, 41(7): 21-26.
- Li S Y, Fang W S, Ma Z H. Changes of agricultural climate resources in Henan Province during summer maize growing season[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2012, 41(7): 21-26. (in Chinese)
- [28] 袁东敏, 尹志聪, 郭建平. SRES B2 气候情景下东北玉米产量变化数值模拟[J]. 应用气象学报, 2014, 25(3): 284-292.
- Yuan D M, Yin Z C, Guo J P. Numerical simulation of maize yield variation in Northeast China under B2 climate change scenario[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(3): 284-292. (in Chinese)