

王芳, 邬定荣, 王春乙. 两种参数化方案下冬小麦品种对发育期的影响. 应用气象学报, 2017, 28(4): 493-503.

DOI: 10.11898/1001-7313.20170410

## 两种参数化方案下冬小麦品种对发育期的影响

王芳 邬定荣\* 王春乙

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

### 摘 要

利用华北平原 47 个农业气象观测站 1986—2010 年冬小麦的品种、发育期观测资料和同期气象数据, 基于常用的发育期模型, 对两种参数化方案下品种变化对发育期影响的特征进行研究。其中参数化方案 1 采用固定的三基点温度, 参数化方案 2 通过循环优化得到三基点温度。结果表明: 在华北平原冬小麦品种变化频繁的情况下, 两种参数化方案均能较好地模拟返青-抽穗期与抽穗-成熟期的模拟过程进行参数化; 两种参数化方案均认为品种变化使返青-抽穗期和抽穗-成熟期日数有延长趋势, 但不同参数化方案的趋势值存在较大差异, 且参数化方案 1 模拟的趋势值总是高于参数化方案 2。此外, 不同的参数化方案也会使模拟的趋势值在区域上的分布规律发生变化。研究表明: 不同参数化方案的使用会对模拟结果产生明显影响, 因此, 在量化品种变化对发育期影响时, 需关注不同参数化方案对结果的影响, 以及由此带来的不确定性。

**关键词:** 品种变化; 发育期; 参数化方案; 不确定性

### 引 言

作物发育期的变化会直接影响作物干物质的积累过程, 进而影响产量<sup>[1]</sup>。为了保证农业生产的稳定发展, 需要对未来气候变化背景下作物发育期的变化进行准确评估<sup>[2]</sup>。品种变化通过改变作物发育速率对环境因子的响应关系影响发育期, 是作物发育期变化的内因。为准确评估未来情景下作物发育期变化, 品种变化对发育期的影响及其定量模拟逐渐成为许多研究关注的热点<sup>[3-10]</sup>。

利用不同机理、不同参数化方案的发育期模型, 国内外学者量化了多种作物的品种变化对发育期的影响<sup>[11]</sup>。如利用农业生态系统模型 Agro-IBIS, Sacks 等<sup>[8]</sup>发现品种变化使美国玉米在 1981—2005 年的生殖生长日数显著延长, 速率达 0.67 d/(10 a)。基于数理统计模型, 国内学者发现品种变化使中国晚稻生长日数缩短, 而早稻与单季稻生育期延长<sup>[4-5]</sup>。He 等<sup>[6]</sup>研究黄土高原冬小麦后发现, 品种

变化使冬小麦对温度的敏感性从  $-8.09$  d/°C 降到  $-5.29$  d/°C, 这种降低主要发生在营养生长阶段。Li 等<sup>[9]</sup>使用 APSIM-Wheat 模型发现华北平原冬小麦新品种使播种-成熟期日数延长了 0.3~3.8 d/(10 a)。Mo 等<sup>[10]</sup>使用一系列发育期模型模拟品种变化对黄土高原春小麦、玉米发育期的影响后, 发现品种变化对两种作物的生殖生长阶段与全生长期日数均有延长作用。Liu 等<sup>[12]</sup>研究发现, 品种变化使得气候变化背景下华北平原冬小麦和夏玉米生长季长度保持稳定。Tao 等<sup>[13]</sup>利用 CERES-Maize 模型研究表明: 品种变化使中国玉米抽穗期和成熟期推后, 并延长了生长季长度, 速率分别是 1.5, 6.5, 6.5 d/(10 a)。

在这些基于模型的研究中, 模拟结果的可靠性往往取决于发育期模型的模拟能力, 尤其是模型在模拟气候条件变化下的发育期时, 对模型描述能力的准确性要求更高。已有研究表明: 在变化的气候条件下, 模型模拟结果会产生较大偏差<sup>[14]</sup>。此外, 模拟结果还受模型机理与参数值设置的双重影

2017-03-16 收到, 2017-05-15 收到再改稿。

资助项目: 中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2016Y009), 河北省科技计划项目(15227609D)

\* 通信作者, email: wudr@camsema.cn

响<sup>[14-17]</sup>。但目前基于作物模型对品种变化与发育期关系的研究基本仅给出一个定值,很少考虑不同参数化方案对模拟结果的影响。因此,上述模拟结果可能存在不确定性<sup>[18-19]</sup>。然而,目前对这种不确定性的关注还较少。

本文拟利用作物模型中得到广泛使用的双线性发育期模型<sup>[20-21]</sup>,以华北平原冬小麦为研究对象,设置两种参数化方案模拟冬小麦的返青-抽穗期和抽穗-成熟期,以此量化品种变化对华北平原冬小麦主要发育期的影响,分析不同参数化方案下模拟结果的变化特征,为未来气候变化背景下作物发育期响应研究提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区域概况

华北平原地处中纬度地区,跨越京、津、冀、鲁、

豫五省市,属温带大陆性季风区。本区光热资源丰富,日照时数为 1700~3000 h/a<sup>[22]</sup>,年平均气温为 11~13℃,大于等于 0℃ 活动积温为 4500~5000℃·d<sup>[23]</sup>;降水量年际变化大且多集中于夏季,年降水量为 500~900 mm。华北平原地区为我国冬小麦最大的产区,近 5 年,冬小麦年平均播种面积为  $1.3 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,年产量达到  $7.7 \times 10^7$  t 以上<sup>[24]</sup>。根据气候与地域不同,该区域冬小麦采用冬性、半冬性、弱冬性品种,种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟为主。气候变化背景下,华北地区升温幅度达到 0.25℃/(10 a),高于全国平均值<sup>[23]</sup>。为了适应和应对气候变化给冬小麦种植带来的复杂影响,培育并使用新品种<sup>[11]</sup>及调整播期等适应措施<sup>[25]</sup>已成为应对气候变化的主要农业技术和策略。

本研究选用华北平原 47 个农业气象观测站,其中天津 1 个站,河北 7 个站,河南 25 个站,山东 14 个站(图 1)。

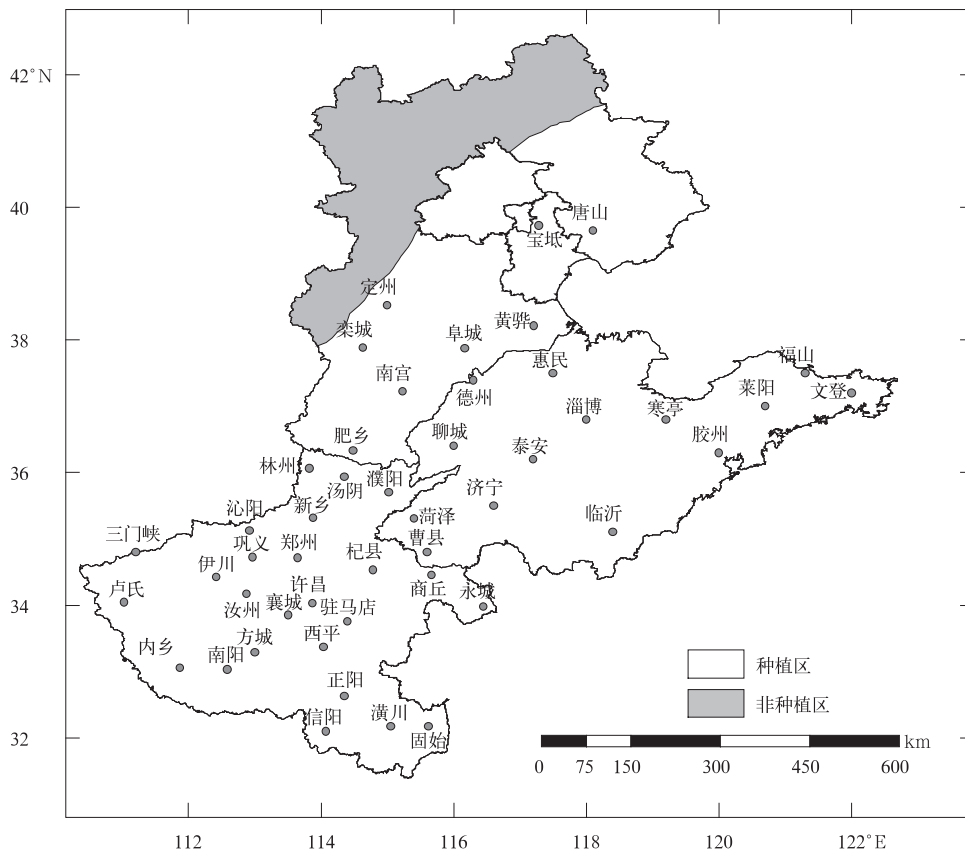


图 1 研究区农业气象观测站分布

Fig. 1 Location of agricultural meteorological stations in the study area

### 1.2 资料来源与处理方法

冬小麦资料为上述农业气象观测站连续观测 25 年(1986—2010 年)的冬小麦品种名称和 3 个发

育期(返青期、抽穗期、成熟期)的盛期日期;气象资料为与冬小麦发育期资料同期的逐日平均气温资料。资料均来自国家气象信息中心。按照冬小麦品

种中文名称进行品种使用数量、品种更替频次的统计,发育期日期序列采用日序进行定义,即将每年的1月1日记为1,1月2日记为2,以此类推。如某站1986年冬小麦抽穗期为5月10日,则该年的抽穗期日序记为130。

## 2 冬小麦品种变化对发育期影响的模拟

### 2.1 发育期模型

作物生长发育速率对温度的响应,存在下限温度、上限温度和最适温度。一般地,低于下限温度或高于上限温度,发育速率为0;低于和高于最适温度发育速率都将减慢<sup>[26-28]</sup>。发育速率对温度的响应是非线性的<sup>[26]</sup>,然而非线性模型参数复杂,区域应用时由于所需参数过多难以获取准确数值,或参数调试困难等问题而使结果存在较大不确定性<sup>[19,29]</sup>。在线性响应模型中,双线性模型是对非线性响应的简单近似。因其计算简单,所需参数较少且参数均具有明确的生物学意义,双线性模型在发育期模拟研究中得到广泛应用<sup>[30]</sup>。因此,本文拟采用日尺度的双线性模型<sup>[31]</sup>,其计算公式为

$$T = \begin{cases} 0, & T_d \leq T_b \text{ 或 } T_d \geq T_{\max}; \\ T_d - T_b, & T_b < T_d < T_{\text{opt}}; \\ \frac{(T_{\max} - T_d) \times (T_{\text{opt}} - T_b)}{T_{\max} - T_{\text{opt}}}, & T_{\text{opt}} \leq T_d < T_{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $T_d$ 为逐日平均气温, $T_b$ 为生长下限温度, $T_{\text{opt}}$ 为最适温度, $T_{\max}$ 为上限温度(单位均为 $^{\circ}\text{C}$ ), $T$ 为该日累积积温(单位为 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ )。当逐日积温累加

达到完成该发育阶段所需积温值后,视为该发育阶段完成。

### 2.2 发育期模拟方案

为了得到各站25年冬小麦品种变化情况,统计各站使用的冬小麦品种名称及其种植年数,并计算25年内各种植品种的总数量。

分别对两个发育阶段进行模拟,以量化品种变化对两个发育期的影响。第1阶段是返青-抽穗期,该阶段是冬小麦主要的营养生长阶段。对于这一阶段,每年均从实际观测的返青期开始,模拟抽穗期。第2阶段是抽穗-成熟期,即生殖生长阶段,每年均从实际观测的抽穗期开始,模拟成熟期。

设置两种参数化方案对双线性模型进行参数化。通过两种参数化方案获得冬小麦的遗传参数(三基点温度和所需积温)后,假定品种不变(即遗传参数不变),对所有观测年份(1986—2010年)的发育期进行模拟。

#### 2.2.1 参数化方案1

在参数化方案1中,所有站点均采用相同的三基点温度。根据段若溪等<sup>[32]</sup>统计的冬小麦三基点温度以及Porter等<sup>[33]</sup>综述的不同地区、不同品种的冬小麦三基点温度,本文采用下限温度( $T_b$ )为 $3^{\circ}\text{C}$ ,最适温度( $T_{\text{opt}}$ )为 $22^{\circ}\text{C}$ ,上限温度( $T_{\max}$ )为 $32^{\circ}\text{C}$ 的三基点温度组合。各发育阶段所需积温的取值以1986—1988年的平均品种状态来确定,即取1986—1988年模拟发育阶段内积温的平均值。逐日的积温计算方法如图2所示,当积温的累加值达到指定的积温值(即前面确定的1986—1988年积温的平均

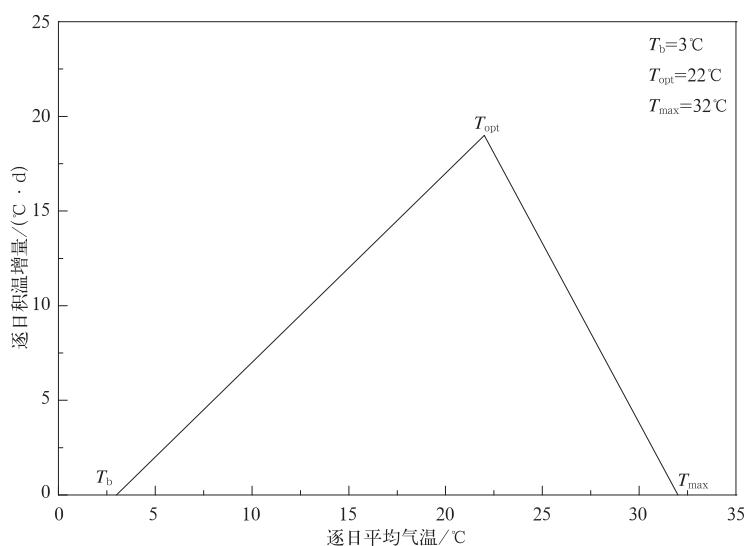


图2 参数化方案1中逐日积温增量的计算方法

Fig. 2 Calculation method of daily accumulated temperature in Method 1

值)后,该日期为模拟的发育期日期。

2.2.2 参数化方案2

在参数化方案2中,采用循环寻优的方法确定逐站的最优三基点温度,即在三基点温度寻优区间内( $T_b$ 为 $0\sim 6^\circ\text{C}$ , $T_{opt}$ 为 $18\sim 24^\circ\text{C}$ , $T_{max}$ 为 $26\sim 40^\circ\text{C}$ ,循环步长均为 $0.1^\circ\text{C}$ ),利用前3年发育期数

据(1986—1988年),根据均方根误差最小化原则<sup>[16,34]</sup>确定最优三基点温度的组合。逐日的积温计算方法见图3,其中斜线阴影部分表示各三基点温度取值的可能组合区域。积温的计算方法和各发育阶段所需积温的取值方法均和参数化方案1相同。

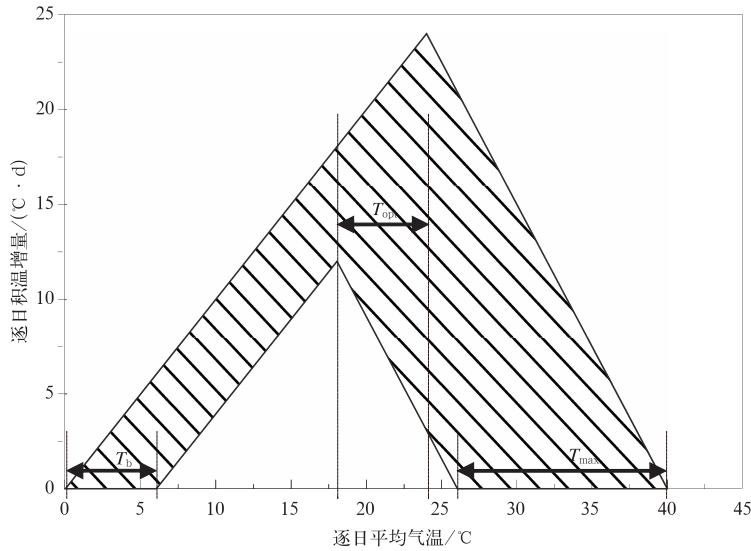


图3 参数化方案2中逐日积温增量的计算方法

(阴影为参数化方案2中某站所有三基点组合的可能区域,通过均方根误差最小化原则确定最优三基点组合)

Fig.3 Calculation method of daily accumulated temperature in Method 2

(the shaded denotes all possible sets of 3 cardinal temperatures for one station, the optimum set is optimized by minimizing root mean square error)

2.2.3 参数化结果的比较

利用3种评价方法,对两种参数化方案得到的1986—1988年发育期的模拟误差进行比较。这3种评价指标分别是相对误差 $E_R$ 、平均绝对偏差 $E_{MA}$ 和均方根误差。其中,相对误差与平均绝对偏差计算方法<sup>[35-36]</sup>分别为

$$E_R = \frac{S_i - O_i}{O_i} \times 100\%, \quad (2)$$

$$E_{MA} = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{n} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, $O_i$ 为实测值, $S_i$ 为模拟值, $n$ 为样本量,平均绝对偏差单位为d。

表1是对两种参数化方案模拟结果的比较。对于返青-抽穗期的模拟,均方根误差变化范围为2.04~2.69 d,而对抽穗-成熟期的模拟,均方根误差变化范围为1.24~2.41 d。可见,两种参数化方案均能较好模拟这3年的发育期,其中,两参数化方案对于抽穗-成熟期的模拟均比返青-抽穗期效果更优。

由于参数化方案2基于参数化方案1进行优化,因此,3种评价指标均表明参数化方案2的拟合

表1 两种参数化方案对不同发育阶段模拟结果的比较

Table 1 Comparisons of simulated results of different development stage under two methods

发育阶段	参数化方案	相对误差范围/%	平均绝对偏差/d	均方根误差/d
返青-抽穗期	1	-5.10~7.27	2.11	2.69
	2	-4.24~5.31	1.48	2.04
抽穗-成熟期	1	-3.12~4.37	1.89	2.41
	2	-2.48~3.12	0.79	1.24

效果优于参数化方案1。参数化方案1虽然模拟效果次于参数化方案2,但由于采用了统一的具有普适意义的三基点温度,利于区域中站点之间的比较,因而更具有区域应用意义,适合大尺度模拟。参数化方案2的拟合效果虽然优于参数化方案1,但在区域尺度模拟应用时存在显著缺点,因为参数化方案2中循环优化的过程会导致不同站点间三基点温度的取值差异很大,从而降低模拟结果在不同站点间的可比性。此外,优化过程中产生的过度拟合现象也会降低模拟结果的可靠性。因此,两种参数化方案虽各有优缺点,但在不同研究中均有广泛应用。

### 2.3 品种变化对发育期影响的分析方法

实测发育期受气候变化与品种变化双重的影响,而模拟的发育期为品种不变的情况下,变化的气候条件决定的发育期。实测值与模拟值的差异被认为主要由各种非气候要素引起,如品种变化、水肥管理以及政策改进等的影响。但有研究显示品种变化所起作用最大<sup>[3,12]</sup>。因此,为与其他研究保持一致,本文假定实测值与模拟值的差异(定义为模拟误差)为品种变化对发育期的影响。模拟误差为正,表示实际发育期晚于模拟值,说明品种变化使该发育阶段日数延长,积温需求增加,负值则相反。

利用 ArcGIS 的反距离权重法(IDW)对各站发育期模拟误差随时间的变化趋势进行空间插值,得到模拟误差随时间变化趋势的区域分布图,进而分析品种变化对不同发育期的影响以及这种影响的区域差异。

## 3 结果分析

### 3.1 品种变化的主要特征

图4是华北平原1986—2010年冬小麦品种变化频数的站点数统计与空间分布。这25年大部分站品种更替较为频繁。在研究时段内,整个区域总共使用了347个品种,每站平均使用了11个品种,即大概2~3年更换1次;多数站使用的品种数量为5~15个,但有8个站使用数量达到15~19个,有3个站使用20个以上。区域分布上,除山东东部的文登、福山使用的品种较少外,大部分区域使用的品种数量均在5个以上。其中山东中部和西部,以及河南大部分地区(除东南部)使用品种的数量普遍在10个以上。山东泰安在25年内使用21个冬小麦品种是品种变化最频繁的站点。

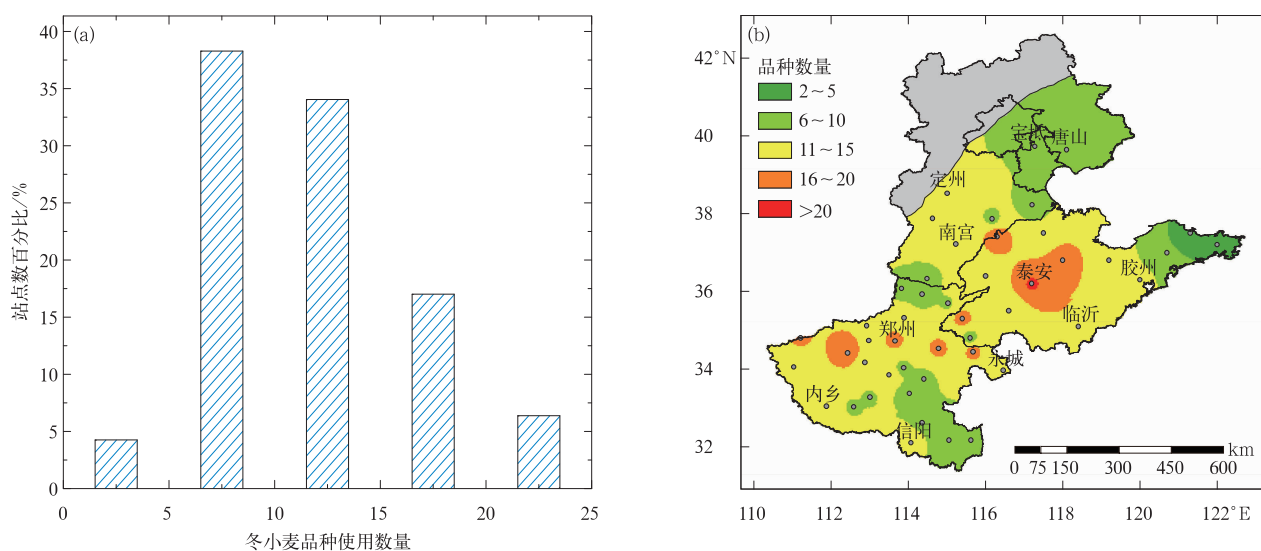


图4 1986—2010年华北平原冬小麦品种使用频数的站点数百分比统计(a)及空间分布(b)

Fig. 4 The percentage of station number(a) and spatial distribution(b) in number of winter wheat cultivars used in North China Plain from 1986 to 2010

### 3.2 主要发育期的变化趋势

受气候变化与品种变化的影响,华北平原冬小麦主要发育期已发生不同程度的变化,且同一发育

期随区域不同表现出不同的变化趋势。由表2可以看到,区域冬小麦返青期平均推迟速率为0.33 d/(10 a)。47个站中25个站(53.19%)呈推迟趋势,

另外 22 个站 (46.81%) 表现为提前, 但较少站通过显著性水平检验。大部分地区的抽穗期 (45 个站)、成熟期 (39 个站) 均呈提前趋势, 其中一部分站的提前趋势通过了显著性检验 (抽穗期有 28 个站, 成熟期有 16 个站)。抽穗期和成熟期提前速率平均为 3.13 d/(10 a) 和 1.45 d/(10 a)。抽穗期的显著提

前造成了返青-抽穗期的明显缩短, 平均缩短 3.46 d/(10 a), 不到一半地区有显著缩短趋势 (21 个站)。由于成熟期的提前幅度小于抽穗期, 抽穗-成熟期在大部分地区表现出显著延长的趋势 (24 个站), 延长速率平均为 1.68 d/(10 a)。

表 2 1986—2010 年华北平原冬小麦主要发育期随时间的变化趋势

发育阶段	负趋势占比/%	显著负趋势占比/%	正趋势占比/%	显著正趋势占比/%	平均趋势/(d/(10 a))
返青期	46.81	6.38*	53.19	8.51*	0.33
抽穗期	95.74	59.57*	4.26	0.00*	-3.13
成熟期	82.98	34.04*	17.02	2.13*	-1.45
返青-抽穗期	89.36	44.68*	10.64	2.13*	-3.46
抽穗-成熟期	17.02	0.00*	82.98	51.06*	1.68

注: \* 表示达到 0.05 显著性水平。

### 3.3 两种参数化方案下品种变化对发育期的影响

#### 3.3.1 区域平均

两种参数化方案模拟的抽穗期随年份均呈提前趋势, 其中参数化方案 1 模拟的提前趋势略高于参数化方案 2, 二者的趋势值分别为 -4.13 d/(10 a) 和 -3.79 d/(10 a)。而抽穗期观测值的趋势值为 -3.12 d/(10 a)。因此, 模拟值的提前趋势均高于实测值, 表明品种变化起到了推迟抽穗期的作用 (图 5a)。与抽穗期类似, 成熟期的模拟值也随年份有提前趋势, 两种参数化方案模拟的趋势值分别为 -3.34 d/(10 a) 和 -3.16 d/(10 a), 而实际成熟期变化的趋势值为 -1.43 d/(10 a), 模拟值的提前趋势高于实测值, 表明品种变化也使成熟期推后 (图 5b)。

从发育阶段日数看, 两种参数化方案模拟的返青-抽穗期日数随年份均有缩短趋势, 模拟的趋势值分别为 -4.48 d/(10 a) 和 -4.14 d/(10 a), 而同期观测值的趋势值为 -3.46 d/(10 a)。因此, 品种变化使返青-抽穗期日数延长 (图 5c)。与返青-抽穗期日数显著不同的是, 实测抽穗-成熟期日数有延长的趋势 (1.69 d/(10 a)), 但两种参数化方案模拟的日数都呈缩短的趋势, 虽然缩短的值很小 (分别为

0.23 d/(10 a) 和 0.04 d/(10 a)。但这也表明品种变化使抽穗-成熟期日数延长 (图 5d)。

将各站逐年模拟误差统计区域平均后, 并计算其随年份的变化趋势, 可量化得到两种参数化方案下品种变化对整个区域冬小麦不同发育期的影响值 (表 3)。虽然两种参数化方案都认为品种变化延长了发育期日数, 但二者的趋势值存在较大差异, 其中参数化方案 1 模拟出品种变化使得返青-抽穗期日数延长的速率为 1.02 d/(10 a), 而参数化方案 2 对应数值为 0.68 d/(10 a), 二者相差 0.34 d/(10 a)。在抽穗-成熟期, 两种参数化方案模拟结果都认为品种变化使生殖生长阶段日数显著增加, 且趋势值差异不大, 分别为 1.91 d/(10 a) 和 1.73 d/(10 a), 仅相差 0.18 d/(10 a)。可见参数化方案 1 对两个阶段模拟的影响值都高于参数化方案 2, 因此, 两阶段所受品种变化影响的总和也必然高于参数化方案 2, 影响值分别为 2.93 d/(10 a) 和 2.41 d/(10 a) (表 3)。由表 3 还可以看到, 虽然两方案都认为品种变化对抽穗-成熟期日数的影响高于对返青-抽穗期日数的影响, 然而参数化方案 1 的占比为 65.2%, 而参数化方案 2 的占比更高, 达 71.8%。

表 3 两种参数化方案下品种变化对不同发育阶段日数的影响

参数化方案	返青-抽穗期		抽穗-成熟期		总影响/(d/(10 a))
	影响值/(d/(10 a))	影响占比/%	影响值/(d/(10 a))	影响占比/%	
1	1.02*	34.8	1.91**	65.2	2.93
2	0.68	28.2	1.73**	71.8	2.41

注: \*\*, \* 分别表示达到 0.01 和 0.05 显著性水平。

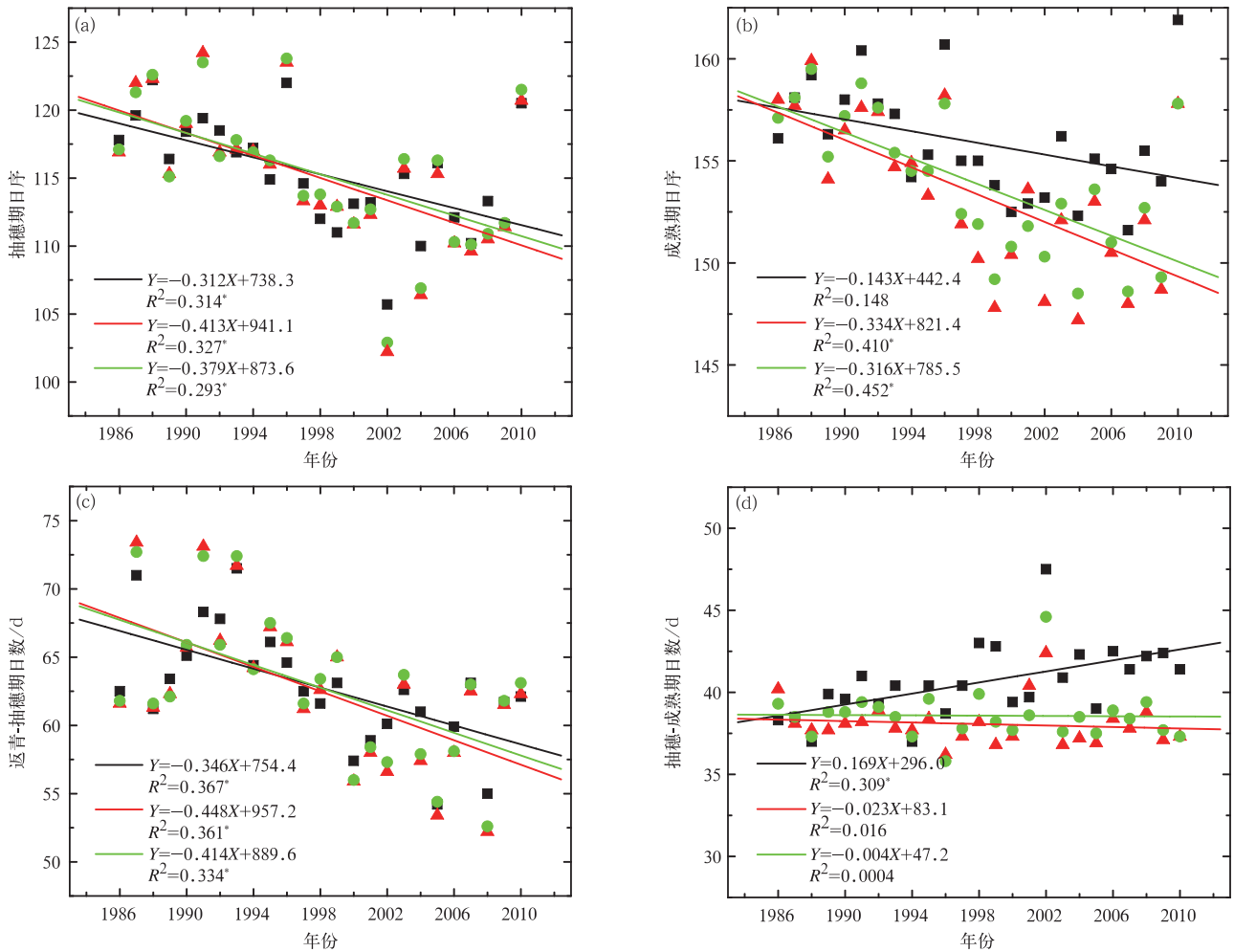


图 5 1986—2010 年华北平原冬小麦抽穗期日期(a),成熟期日期(b),返青-抽穗期日数(c),抽穗-成熟期日数(d)

观测值和两种参数化方案下模拟值的区域平均值及变化趋势

(■、▲和●分别为实测值、参数化方案 1 和参数化方案 2 模拟值;—、—和—分别为实测值、参数化方案 1 和参数化方案 2 模拟值随时间变化趋势; \* 表示达到 0.01 显著性水平)

Fig. 5 Regional mean and trends of observed and simulated heading date(a), maturity date(b), length of turning green to heading(c), heading to maturity(d) of winter wheat in North China Plain under two methods from 1986 to 2010

(■, ▲ and ● indicate observed and simulated value of Method 1 and Method 2; —, — and — indicate trends of observed and simulated value of Method 1 and Method 2;

\* denotes passing the test of 0.01 level)

### 3.3.2 区域分布

不同的参数化方案对模拟值的影响,除了体现在区域平均值上,在影响的区域分布上也有体现(图 6),且不同发育阶段有不同的区域分布规律。对于返青-抽穗期日数,两种参数化方案模拟的影响值的区域分布较为一致(图 6a,图 6c)。正趋势值在中部地区最大,向南北两端分别递减,在京津冀地区北部及河南南部这种趋势转变为负值,此外,山东东部沿海地区表现出显著的正趋势。京津冀地区北部以及河南南部品种改变使返青-抽穗期日数缩短,但缩短

趋势表现不显著。两种参数化方案计算出的趋势值区域分布较为一致,表明模型对该发育阶段的模拟稳定性较好。对于抽穗-成熟期日数,两种参数化方案的影响值分布差别较明显,其中参数化方案 1 模拟的影响值(图 6b)在河南中南部地区、山东西南部地区表现较大的显著正趋势。而方案 2 模拟的影响值(图 6d)除河南中部之外,京津冀地区中部也表现出较大的显著正趋势。

图 7 是对两种参数化方案模拟误差的时间趋势值的统计。对于返青-抽穗期的模拟,两参数化方案

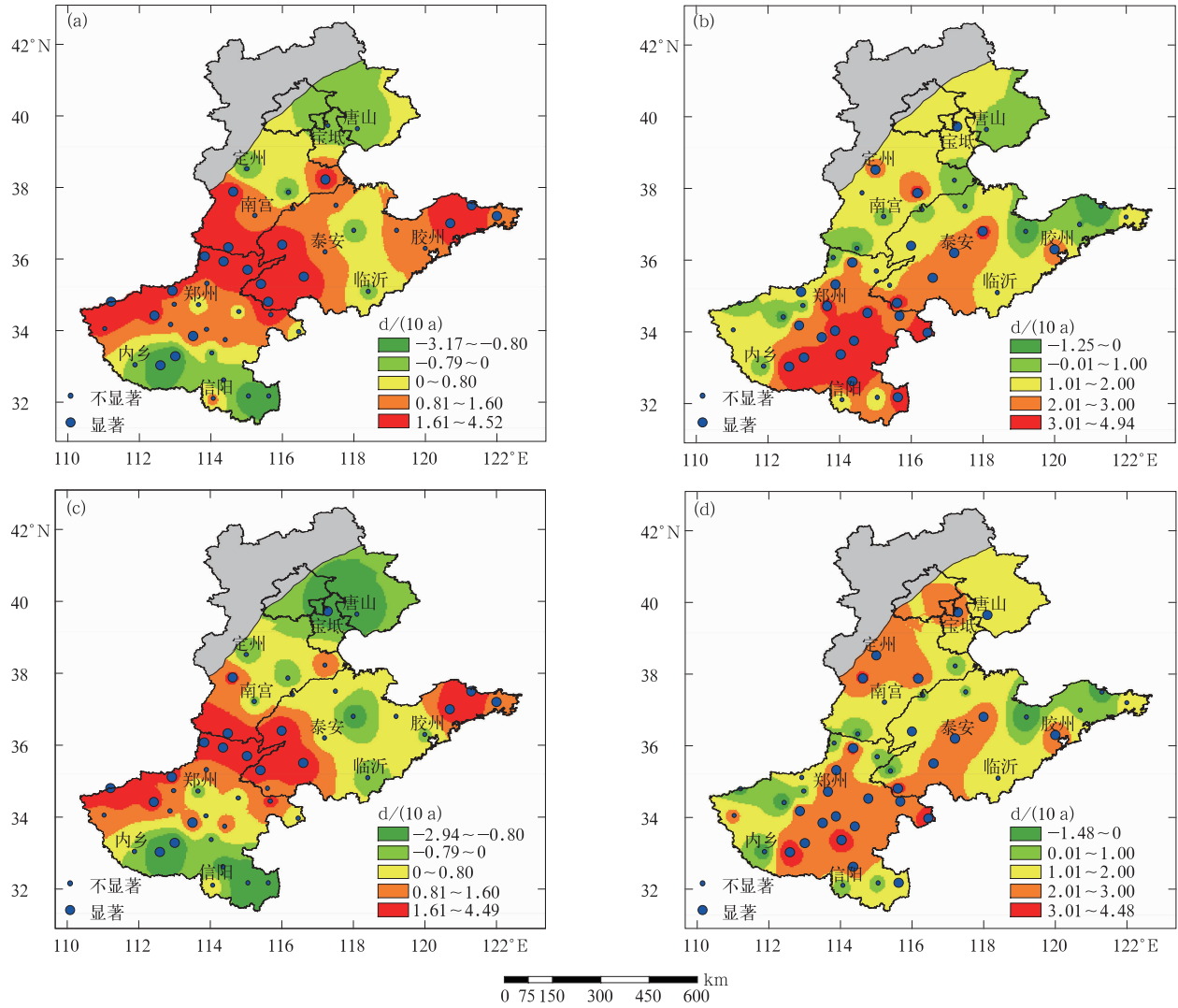


图6 两种参数化方案下1986—2010年冬小麦模拟误差的时间趋势的空间分布  
 (a)参数化方案1,返青-抽穗期,(b)参数化方案1,抽穗-成熟期,  
 (c)参数化方案2,返青-抽穗期,(d)参数化方案2,抽穗-成熟期

Fig. 6 Spatial distribution of trends of winter wheat simulated error from 1986 to 2010 under two methods  
 (a)Method 1,turning green to heading,(b)Method 1,heading to maturity,  
 (c)Method 2,turning green to heading,(d)Method 2,heading to maturity

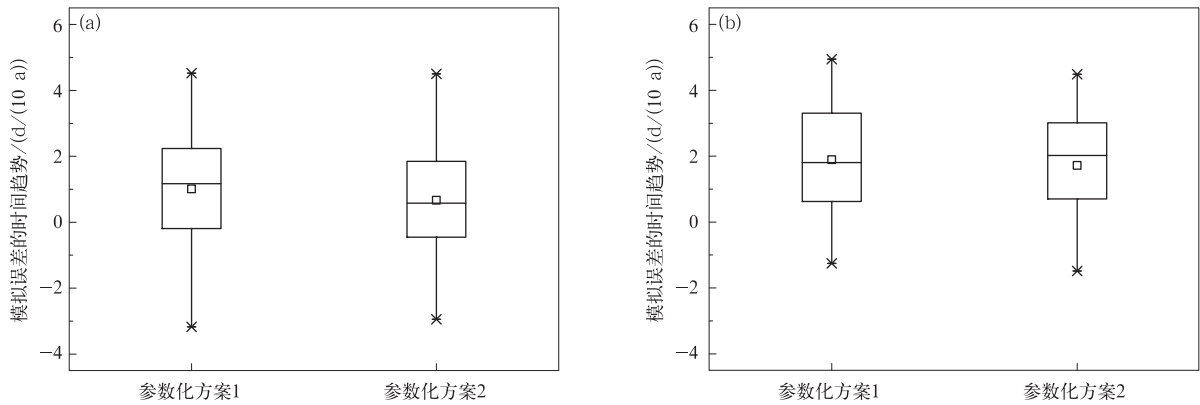


图7 两种参数化方案下1986—2010年冬小麦返青-抽穗期(a)、抽穗-成熟期(b)模拟误差时间趋势区域统计  
 Fig. 7 Regional statistics of trends of winter wheat simulated error of length of turning green to heading(a)  
 and heading to maturity(b) from 1986 to 2010 under two methods



模拟的趋势的极值相差不大,只是在平均值上,参数化方案1模拟的影响高于参数化方案2。对于抽穗-成熟期的模拟,参数化方案2模拟的趋势值在不同站点之间的波动略小于参数化方案1。可见,不同参数化方案,除了影响模拟的趋势值的区域分布格局外,也对模拟值的频率分布有较大影响。

#### 4 结论与讨论

本文在对华北平原冬小麦品种变化以及发育期变化统计的基础上,利用双线性发育期模型,通过设置两种参数化方案量化了品种变化对发育期的影响,并比较了两种参数化方案对模拟结果的影响。研究表明:

1) 1986—2010年华北平原大部分地区冬小麦品种变化频繁。在气候变化和品种变化的双重影响下,冬小麦主要发育期已发生了明显变化,其中抽穗期、成熟期显著提前,返青-抽穗期日数缩短明显,而抽穗-成熟期日数显著延长。

2) 两种参数化方案均认为品种变化使返青-抽穗期日数延长,这种延长部分抵消了气候变暖使发育期提前效应。另外,品种变化也使抽穗-成熟期日数延长,这种效应使气候变暖背景下抽穗-成熟期实际日数呈增加趋势。

3) 两种参数化方案均认为品种变化对抽穗-成熟期的影响大于返青-抽穗期,但不同参数化方案对研究结果有较大影响。其中参数化方案1模拟的品种变化对发育期的影响始终大于参数化方案2。两种参数化方案模拟的差异,在返青-抽穗期大于抽穗-成熟期。不同参数化方案对模拟结果的影响,除体现在具体数值上外,还体现在数值的区域分布上,尤其在抽穗-成熟期。在此阶段,两种参数化方案模拟的区域分布相差较大。

品种变化延长了冬小麦发育期日数,这在一定程度上可以减缓气候变暖给作物带来的不利影响,使作物发育期长度保持相对稳定,这为充分利用气候变化对产量的正效应提供了可能<sup>[10,12]</sup>,因此,品种变化成为了农业应对气候变化重要的适应性措施之一<sup>[11,25]</sup>。但在评估气候变化对作物发育期影响时,对这种适应性措施给发育期带来的影响考虑较少<sup>[37-39]</sup>。且在评估作物产量对未来气候变化的响应

时,往往采用单一的参数化方案进行模拟<sup>[40-42]</sup>,很少考虑不同参数化方案对模拟结果的影响,势必使得产量评估结果存在偏差<sup>[19,43]</sup>。本文采用的两种参数化方案在作物模拟研究中被广泛应用<sup>[19,29]</sup>,参数化方案1中采用固定三基点温度进行模拟,能够有效避免区域内的空间异质性,体现该地区代表性品种发育期的变化情况,但各站原有品种特性未考虑全面。而参数化方案2采用均方根误差最小化循环寻优的方法确定逐站参数,较为准确地获得品种变化下冬小麦发育期变化的区域分布情况,但由于各站参数不同,在一定程度上降低了各站间的可比性。因此,两种参数化方法适用于不同目的的实践研究。此外,除本研究考虑的两种参数化方案外,还有其他方法,如熊伟等<sup>[44]</sup>利用平均值法等。随着更多参数化方法的引入,模拟结果的差异可能会进一步增大,但目前对此研究还较少。

基于本文结果认为,在研究品种变化对发育期影响时,需要考虑不同参数化方案对模拟结果的影响。此外,不同发育期模型机理对结果可能也有影响。在以后的研究中需要同时考虑不同机理以及相同机理不同参数化方案对模拟结果的影响,使结果更具参考意义。另外,本文采用的发育期模型仅考虑温度对发育速率的影响,未考虑日照时数、土壤和水分状况等其他环境因素的影响<sup>[9,12,45]</sup>,模拟结果仅供参考。

#### 参考文献

- [1] Fu Y S H, Zhao H F, Piao S L, et al. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 2015, 526(7571): 104-107.
- [2] 穆佳, 赵俊芳, 郭建平. 近30年东北春玉米发育期对气候变化的响应. *应用气象学报*, 2014, 25(6): 680-689.
- [3] Garciamozo H, Galan C, Alcazar P, et al. Trends in grass pollen season in southern Spain. *Aerobiologia*, 2010, 26(2): 157-169.
- [4] Tao F L, Zhang Z, Shi W J, et al. Single rice growth period was prolonged by cultivars shifts, but yield was damaged by climate change during 1981—2009 in China, and late rice was just opposite. *Global Change Biology*, 2013, 19: 3200-3209.
- [5] Zhang T Y, Huang Y, Yang X G. Climate warming over the past three decades has shortened rice growth duration in China and cultivar shifts have further accelerated the process for late rice. *Global Change Biology*, 2013, 19(2): 563-570.
- [6] He L, Asseng S, Zhao G, et al. Impacts of recent climate war-

- ming, cultivar changes, and crop management on winter wheat phenology across the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200: 135-143.
- [7] Holzkämper A, Calanca P, Honti M, et al. Projecting climate change impacts on grain maize based on three different crop model approaches. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 214-215: 219-230.
- [8] Sacks W J, Kucharik C J. Crop management and phenology trends in the U. S. Corn Belt: Impacts on yields, evapotranspiration and energy balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 882-894.
- [9] Li K N, Yang X G, Tian H Q, et al. Effects of changing climate and cultivar on the phenology and yield of winter wheat in the North China Plain. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60: 21-32.
- [10] Mo F, Sun M, Liu X Y, et al. Phenological responses of spring wheat and maize to changes in crop management and rising temperatures from 1992 to 2013 across the Loess Plateau. *Field Crops Research*, 2016, 196: 337-347.
- [11] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 1-11.
- [12] Liu Y, Wang E L, Yang X G, et al. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s. *Global Change Biology*, 2010, 16(8): 2287-2299.
- [13] Tao F L, Zhang S, Zhang Z, et al. Maize growing duration was prolonged across China in the past three decades under the combined effects of temperature, agronomic management, and cultivar shift. *Global Change Biology*, 2014, 20(12): 3686-3699.
- [14] Kumudini S, Andrade F H, Boote K J, et al. Predicting maize phenology: Intercomparison of functions for developmental response to temperature. *Agronomy Journal*, 2014, 106(6): 2087-2097.
- [15] Bonhomme R, Derieux M, Edmeades G O. Flowering of diverse maize cultivars in relation to temperature and photoperiod in multilocation field trials. *Crop Science*, 1994, 34(1): 156-164.
- [16] Wang N, Wang J, Wang E, et al. Increased uncertainty in simulated maize phenology with more frequent supra-optimal temperature under climate warming. *European Journal of Agronomy*, 2015, 71: 19-33.
- [17] 帅细强, 陆魁东, 黄晚华. 不同方法在湖南省早稻产量动态预报中的比较. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 103-111.
- [18] 杨建莹, 梅旭荣, 刘勤, 等. 气候变化背景下华北地区冬小麦生育期的变化特征. *植物生态学报*, 2011, 35(6): 623-631.
- [19] 姚凤梅, 秦鹏程, 张佳华, 等. 基于模型模拟气候变化对农业影响评估的不确定性及其处理方法. *科学通报*, 2011, 56(8): 547-555.
- [20] Supit I, Hooijer A A, Van Diepen C A. System Description of the WOFOST 6.0 Crop Growth Simulation Model. Joint Research Center, Commission of the European Communities, 1994.
- [21] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18: 235-265.
- [22] 马洁华, 刘园, 杨晓光, 等. 全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势. *生态学报*, 2010, 30(14): 3818-3827.
- [23] 谭方颖, 王建林, 宋迎波, 等. 华北平原近 45 年农业气候资源变化特征分析. *中国农业气象*, 2009, 30(1): 19-24.
- [24] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴—2015. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [25] 周广胜, 何奇瑾, 汲玉河. 适应气候变化的国际行动和农业措施研究进展. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 527-533.
- [26] 殷新佑. 对预测作物发育的积温法的评价. *作物学报*, 1999, 25(4): 474-482.
- [27] Aiken R M. Applying thermal time scales to sunflower development. *Agronomy Journal*, 2005, 97(3): 746-754.
- [28] 姜会飞, 温德永. 基于线性生长假设利用极端温度计算日积温的方法. *中国农业大学学报*, 2013, 18(1): 82-87.
- [29] 杨月, 刘兵, 刘小军, 等. 小麦生育期模拟模型比较研究. *南京农业大学学报*, 2014, 37(1): 6-14.
- [30] 张帅, 陶福祿. 水稻发育期模型研究进展. *地理科学进展*, 2012, 31(11): 1485-1491.
- [31] Supit I, van der Goot E. Updated system description of the WOFOST crop growth simulation model as implemented in the Crop Growth Monitoring System applied by the European Commission. [2017-01-01]. <http://www.supit.net/>.
- [32] 段若溪, 姜会飞. *农业气象学*. 北京: 气象出版社, 2002: 80-81.
- [33] Porter J R, Gawith M. Temperatures and the growth and development of wheat: A review. *European Journal of Agronomy*, 1999, 10(1): 23-36.
- [34] Torrión J, Setiyono T D, Cassman K, et al. Soybean phenology simulation in the North-Central United States. *Agronomy Journal*, 2011, 103(6): 1661-1667.
- [35] 曹秀霞, 安开忠, 蔡伟, 等. CERES-Rice 模型在江汉平原的验证与适应性评价. *中国农业气象*, 2013, 34(4): 447-454.
- [36] 段春锋, 曹雯, 黄勇, 等. 气象要素时间分辨率对参考作物蒸散估算的影响. *农业工程学报*, 2015, 31(14): 158-164.
- [37] Li Z G, Yang P, Tang H J, et al. Response of maize phenology to climate warming in Northeast China between 1990 and 2012. *Regional Environmental Change*, 2014, 14: 39-48.
- [38] Xiao D P, Qi Y Q, Shen Y J, et al. Impact of warming climate and cultivar change on maize phenology in the last three decades in North China Plain. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 124(3-4): 1-9.
- [39] 肖登攀, 陶福祿. 过去 30 年气候变化对华北平原冬小麦物候的影响研究. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1539-1545.
- [40] 邱美娟, 宋迎波, 王建林, 等. 山东省冬小麦产量动态集成预报

- 方法. 应用气象学报, 2016, 27(2):191-200.
- [41] 秦鹏程, 刘敏, 万素琴, 等. 不完整气象资料下基于作物模型的产量预报方法. 应用气象学报, 2016, 27(4):407-416.
- [42] 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. 应用气象学报, 2014, 25(3):284-292.
- [43] 姚凤梅, 秦鹏程, 张佳华, 等. 基于模型模拟气候变化对农业影响评估的不确定性及其处理方法. 科学通报, 2011, 56(8):547-555.
- [44] 熊伟, 林而达, 杨婕, 等. 作物模型区域应用两种参数校准方法的比较. 生态学报, 2008, 28(5):2140-2147.
- [45] 熊伟. CERES-Wheat 模型在我国小麦区的应用效果及误差来源. 应用气象学报, 2009, 20(1):88-94.

## Effects of Cultivar Shifts on Winter Wheat Phenology Under Two Parameterization Methods

Wang Fang Wu Dingrong Wang Chunyi

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

Phenology and growth duration of crops have been significantly changed by the combined effects of climate change and cultivar shifts. For the need of accurately evaluating the response of crops phenology to future climate changes, effects of cultivar shift on phenology and its quantitative simulation has become a research hotspot. However, most recent studies are based on the single parameterization method, with less attention paid to effects of different parameterization methods, leading to a certain degree of assessment uncertainty.

Winter wheat phenology data and daily meteorological data in 47 agrometeorological observation stations in North China Plain during 1986—2010 are collected. Based on these datasets, a most commonly used phenology model is used to quantize effects of cultivar shifts on phenology, and effects of two parameterization methods on simulated results are also analyzed. The first method uses fixed three cardinal temperatures (Method 1), while in the second method (Method 2) three cardinal temperatures are obtained by minimizing the root mean square error of simulated phenology.

Results show that winter wheat critical phenology in North China Plain changes significantly under the frequently change of cultivar during study period. Both two methods perform well in parameterizing the simulation of durations from turning green to heading and from heading to maturity in the winter wheat simulation. The growth duration is prolonged by cultivar shift in the duration from turning green to heading and the duration from heading to maturity, though values given by Method 1 are higher. Both methods indicate effects of cultivar shifts on the duration from heading to maturity is higher than those on the duration from turning green to heading. In addition, the range of simulated trends and their regional distribution are also affected by the different parameterization method used. Among them, the difference of simulation results between two methods in the duration from turning green to heading is higher than the duration from heading to maturity. In the regional distribution, the difference of simulation results between two methods is bigger in the duration from heading to maturity. It verifies that simulation results are potentially affected by parameterization method. Therefore, the selection of parameterization methods and uncertainties introduced by different methods should be carefully considered.

**Key words:** cultivar shifts; phenology; parameterization method; uncertainty