

# 过去30年气候变化对华北平原冬小麦物候的影响研究\*

肖登攀<sup>1,2</sup> 陶福禄<sup>1\*\*</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 全球变暖已成为全球共同关注的问题。作物物候对气候变化的响应是研究气候变化对农业生产影响的重要内容。本文选用1981—2009年华北平原16个农业气象观测站的冬小麦物候资料,利用统计方法分析了冬小麦物候的变化趋势。结果表明,过去30年华北平原冬小麦播种期、出苗期和越冬开始期推迟,而返青期、开花期和成熟期呈提前趋势。物候期的提前或推迟促使小麦不同生长发育阶段历时发生变化,出苗—越冬开始、越冬开始—返青、返青—开花等阶段呈缩短趋势,但开花—成熟阶段生育期却延长 $0.9\text{ d}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ ,整个生育期历时呈减少趋势,平均减少 $3.4\text{ d}\cdot 10\text{ a}^{-1}$ 。本文采用作物模型(CERES-Wheat)模拟固定小麦品种在气候变化背景下的物候变化趋势,以探讨冬小麦物候变化的主要驱动因子。模拟结果表明,过去30年小麦开花期和成熟期提前的主要驱动因素为气候变化,品种变换在一定程度上可减缓气候变化对物候的影响。

**关键词** 气候变化 物候 生育期 冬小麦 CERES-Wheat 模型 华北平原

**中图分类号:** S162.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)11-1539-07

## Impact of climate change in 1981—2009 on winter wheat phenology in the North China Plain

XIAO Deng-Pan<sup>1,2</sup>, TAO Fu-Lu<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** A warming climate trend in the last three decades has been well documented around the global and this trend have had a considerable impact on agricultural productivity. Phenology is a plant growth progress that is largely driven by meteorological conditions. Phenological changes are vital indicators for changes in climate and other environmental conditions. In this study, the trends in winter wheat phenology for 1981—2009 were investigated based on phenological dates from 16 agro-experimental stations in the North China Plain (NCP). The study showed that the dates of sowing, emergence and dormancy delayed. On the other hand, the dates of green-up, anthesis and maturity advanced in most of the stations. The advance or delay of winter wheat phenology resulted in corresponding changes in the durations of the different growth stages. In most of the investigated stations, the durations from emergence to dormancy, dormancy to green-up, green-up to anthesis and in the entire period from emergence to maturity of winter wheat shortened during 1981—2009. However, the duration of anthesis to maturity slightly prolonged on the average by 0.9 days per decade. Observed changes in winter wheat phenology were functions of both climate and management practices, especially that of cultivated cultivar shift. The effect of crop cultivar shift was isolated from that of climate change on winter wheat phenological changes by comparing field observed phenological events in four stations with those simulated by the CERES (Crop Environment Resource Synthesis)-Wheat model. The results suggested that climate warming played a dominant role in phenological changes in winter wheat in the NCP. However, the effect of cultivar shift on winter wheat phenological changes was not entirely negligible. Moreover, correlation analysis on the durations of green-up to anthesis and anthesis to maturity against mean temperatures for the growth periods showed that temperature increase by  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  shortened the durations of green-up to anthesis and anthesis to maturity by 3.8 and 1.2 days, respectively. Understanding the response of crop development and phenology to climate change was critical for not only building in-depth insights into the impacts of climate change on crop development and productivity, but also on

\* 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05090308)资助

\*\* 通讯作者: 陶福禄(1970—), 男, 博士, 研究员, 主要从事全球变化生态学和农林气象学研究。E-mail: taofl@igsrr.ac.cn

肖登攀(1982—), 男, 博士研究生, 研究方向为农林气象学。E-mail: xiaodp.10b@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2012-06-01 接受日期: 2012-07-26

food security for the millions of people in the region and beyond.

**Key words** Climate change, Phenology, Growth stage, Winter wheat, CERES-Wheat model, North China Plain

(Received Jun. 1, 2012; accepted Jul. 26, 2012)

近 100 年来, 全球平均表面温度上升约  $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。以气候变暖为主要标志的全球气候变化已成为人类必须面对的严峻挑战, 它正在对人类活动的各个方面产生深远的影响<sup>[2]</sup>, 其中包括人类赖以生存的农业生产<sup>[3]</sup>。物候现象与气候等环境因素息息相关, 研究表明过去几十年气候变化对生物物候产生了重要影响<sup>[4-7]</sup>。受环境(气候、水文、土壤)等影响而出现的以年为周期的自然现象, 都称为物候现象<sup>[8]</sup>。对植物而言, 物候具体指在一定生长环境下, 随着气候的季节性变化而发生的萌芽、出叶、开花及成熟、休眠等规律性变化的现象, 能够客观反映植物生长发育过程对外界环境条件的响应与适应性<sup>[9-10]</sup>。目前, 人们对物候的研究工作还主要集中在自然植被条件<sup>[11-12]</sup>, 关于作物物候对过去气候变化的响应研究还较少<sup>[9,13]</sup>。作物物候在一定程度上受人为因素的影响, 比如人们通过选择适合其生长的气候条件来决定播种时间<sup>[14]</sup>。不同的作物品种对气候变化的响应存在差异, 同一作物品种的生长发育过程主要受气候条件的影响, 最终导致年际间产量的差异<sup>[15]</sup>。作物物候对气候变化的响应已经成为研究气候变化对农业生产影响的重要内容。长时间序列的作物物候变化在一定程度上能够反映该时期内作物生长发育对气候变化的适应能力<sup>[16]</sup>。小麦是我国主要的粮食作物之一, 年播种面积和总产量仅次于水稻和玉米<sup>[17]</sup>。华北平原地区是我国主要的小麦生产基地,

其中以种植冬小麦为主<sup>[18]</sup>。由于冬小麦各生长发育阶段需要达到一定积温才能完成, 因此温度是决定其物候变化的重要环境因素<sup>[19-20]</sup>。此外, 冬小麦生长过程中还会受到春化作用、光周期等因素的影响<sup>[21]</sup>。有相关研究表明过去几十年气候变暖已经使得冬小麦开花期和成熟期提前, 从而导致整个生育期缩短, 最终对产量产生影响<sup>[13]</sup>, 然而目前对冬小麦物候变化的主要驱动因子的研究尚少。

本文选取位于我国华北平原的 16 个农业气象观测站, 通过详细分析物候观测资料, 来揭示过去 30 年气候变化背景下冬小麦物候的变化趋势, 并通过 CERES-Wheat 模型模拟在固定品种参数下冬小麦物候对历史气候变化的响应, 分析冬小麦物候变化的主要驱动因子。本研究通过深入分析我国华北平原冬小麦物候对历史气候变化的响应, 可以更加客观地理解气候变暖对该地区冬小麦生产的影响, 为冬小麦的安全生产和科学管理提供科学依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究站点

在我国冬小麦主产区选取具有详细物候观测资料的 16 个农业气象观测站, 站点信息见表 1。所选站点全部位于我国华北平原冬小麦种植区, 分布在河北、河南、山东和山西 4 省。种植制度为一年两熟, 以冬小麦-夏玉米轮作为主。

表 1 研究冬小麦物候变化的农业气象试验站点信息

Table 1 Information of agro-meteorological stations used in studying winter wheat phenology

省份 Province	站名 Station	经度 Longitude ( $^{\circ}\text{E}$ )	纬度 Latitude ( $^{\circ}\text{N}$ )	海拔 Altitude (m)	物候资料时间长度 Duration of phenological data
河北 Hebei	黄骅 Huanghua	117.35	38.37	6.6	1981—2009
	唐山 Tangshan	118.17	39.63	25.9	1981—2009
河南 Henan	遵化 Zunhua	117.95	40.20	54.9	1981—2009
	固始 Gushi	115.62	32.17	42.9	1981—2009
	卢氏县 Lushixian	111.03	34.05	568.8	1981—2009
	南阳 Nanyang	112.58	33.03	129.2	1981—2009
	商丘 Shangqiu	115.67	34.45	50.1	1981—2009
	新乡 Xinxiang	113.88	35.32	73.2	1981—2009
	信阳 Xinyang	114.08	32.12	77.7	1982—2009
	驻马店 Zhumadian	114.02	33.00	82.7	1981—2009
山东 Shandong	郑州 Zhengzhou	113.65	34.72	110.4	1981—2009
	惠民 Huimin	117.52	37.50	11.7	1981—2009
	莱阳 Laiyang	120.63	36.97	54.4	1981—2009
山西 Shanxi	潍坊 Weifang	119.18	36.75	22.2	1981—2009
	临汾 Linfen	111.50	36.07	449.5	1981—2009
	运城 Yuncheng	111.05	35.05	365.0	1982—2009

## 1.2 数据和研究方法

1981—2009 年各农业气象观测站冬小麦物候观测资料来自于国家气象信息中心气象资料室的农作物生育状况观测记录年报表。数据包括逐年冬小麦播种、出苗、越冬、返青、开花及成熟等关键生育期的详细记录。气象数据来自于国家气象信息中心气象资料室的中国地面气候资料数据集。数据包括逐日最高温度、最低温度、降水量及日照时数等, 其中辐射通过日照时数计算获得, 计算方法依据 Angstrom-Prescott 方程<sup>[22-23]</sup>。

对各个站点冬小麦播种期、出苗期、越冬开始期、返青期、开花期和成熟期的观测数据进行长时间序列趋势分析, 采用线性回归方法研究过去 30 年气候变化背景下冬小麦物候变化趋势。过去几十年, 随着遗传育种技术的成熟和发展, 小麦种植品种变换频繁。因此冬小麦的物候变化趋势受气候因素和品种变换的共同影响。本研究为分离气候变化和品种变换对冬小麦物候的影响, 选取唐山、驻马店、惠民和临汾 4 个代表性试验站(分别位于河北、河南、山东和山西省), 通过作物生长模型(CERES-Wheat)模拟在品种不变的情况下冬小麦物候对历史气候变化的响应。

## 1.3 作物模型

### 1.3.1 CERES-Wheat 模型简介

CERES(Crop Environment Resource Synthesis System)-Wheat 模型是由美国农业部开发, 并最具有代表性的小麦模型之一, 在国际上已得到广泛应用和研究。该模型也最早被纳入美国 DSSAT(Decision Support System for Agro-technology Transfer)系统<sup>[24]</sup>。CERES-Wheat 模型用于模拟和分析各种环境条件(气候和土壤条件)和田间管理(品种选择、种植方式、施肥和灌溉处理等)相互作用下小麦的逐日生长发育过程和产量结果。该模型采用“逐日温时”来模拟小麦整个发育过程, 不同品种在生长发育过程中具有不同的积温需求, 同时受到光周期和春化条件等因素的影响。这些因素在模型中通过设定不同的品种遗传参数来反映。CERES-Wheat 模型要较好地模拟小麦整个生长和发育过程, 需要对 7 大遗传参数进行校准<sup>[25]</sup>, 作物遗传参数由作物的生物特性决定, 包括春化作用系数( $P_1V$ )、光周期系数( $P_1D$ )、灌浆期系数( $P_5$ )、籽粒数/株重( $G_1$ )、籽粒的灌浆率( $G_2$ )、籽粒数修正系数( $G_3$ )和叶热间距( $PHINT$ )。模型要求输入气象资料以日为单位, 包括日最高温度、最低温度、降水和辐射。其他输入资料包括小麦种植地的土壤资料(土壤类型、质地、导水率和初始含水率等), 以及小麦的播种量、播种深度、播种日期、播种地

所处纬度等。如果模拟中包括灌溉或施肥等管理措施, 还需要输入灌溉/施肥时间、灌溉/施肥量以及灌溉/施肥方式。

### 1.3.2 模型校准与验证

首先对每个试验站在 1981—1983 年间选择某一常用冬小麦种植品种作为模拟品种, 利用试验站土壤资料和同期气象资料, 采用“试错法”在计算机上调试, 确定被选品种的作物遗传参数。然后利用 1981—1985 年间种植相同品种的物候资料对模型模拟结果进行验证。由于本研究主要针对冬小麦物候变化, 所以选择开花期和成熟期对模型模拟结果进行验证。

## 2 结果与分析

### 2.1 过去 30 年冬小麦物候变化趋势

研究结果(表 2)表明: 1981—2009 年间, 大部分试验站冬小麦播种日期呈现推迟趋势, 其中唐山、遵化、驻马店、惠民、莱阳和运城 6 个站点的播种期推迟趋势达到显著水平( $P < 0.05$ )。冬小麦的播种时间一般取决于气候条件和农民的决策。为保证能够安全越冬, 冬小麦需要在越冬之前完成一定的生长阶段并积累足够的生物量。华北平原地区主要种植方式为冬小麦-夏玉米轮作, 冬小麦一般选择在 9—10 月播种。因此, 冬小麦播种时间在一定程度上受夏玉米收获日期的影响。农民为了获得最高的经济效益, 往往选择最佳的夏玉米收获期而牺牲冬小麦的最适播种期。相关研究指出: 过去几十年里冬小麦播种日期推迟的主要原因可能是夏玉米收获期延迟造成的<sup>[26]</sup>。另外有研究却认为, 由于气候变暖导致冬前积温增加, 小麦出苗后易旺长, 消耗营养过多, 次年返青后麦苗较弱, 不利于丰产, 而适当推迟冬小麦播种期, 可以有效应对气候变暖带来的不利影响<sup>[27]</sup>。冬小麦出苗期主要受播种期和土壤湿度等因素决定。过去 30 年冬小麦出苗期与播种期的变化趋势相似, 在大部分站点呈现推迟趋势(表 2)。

由表 2 可知, 大部分试验站冬小麦越冬开始期推迟, 而返青期提前。冬小麦越冬开始期与返青期主要受外部环境条件的影响, 分析认为过去 30 年研究区气温升高可能是导致冬小麦越冬开始期延迟和返青期提前的主要原因。在全球变暖背景下, 过去几十年华北平原地区气温持续上升, 尤其在冬季, 上升幅度更为显著<sup>[28]</sup>。过去 30 年, 在所有试验站冬小麦开花期均呈提前趋势, 平均提前  $3.0 \text{ d} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ , 其中 11 个站点达到显著水平( $P < 0.05$ )(表 2)。成熟期的变化趋势与开花期相似, 但提前幅度没有开花期大, 平均提前  $2.1 \text{ d} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ (表 2)。

表 2 华北平原小麦种植区 1981—2009 年冬小麦物候变化趋势

Table 2 Changing trends of winter wheat phenology during 1981—2009 in different stations at winter wheat area of the North China Plain  $d \cdot 10a^{-1}$

站名 Station	物候期 Phenology										
	播种期 Sowing date	出苗期 Emergence date	越冬开始 Dormancy date	返青期 Green-up date	开花期 Anthesis date	成熟期 Maturity date	出苗—越冬 Duration of emergence to dormancy	越冬—返青 Duration of dormancy to green-up	返青—开花 Duration of green-up to anthesis	开花—成熟 Duration of anthesis to maturity	全生育期 Entire growth period
黄骅 Huanghua	1.8	1.6	3.7	-0.7	-1.6	-1.4	1.4	-4.4	-0.9	0.3	-3.1
唐山 Tangshan	4.1**	5.1**	4.3**	-2.8	-3.1**	-2.1**	-0.8	-7.2**	-0.3	1.1	-7.2**
遵化 Zunhua	2.5**	2.2*	0.2	-0.1	-1.4*	0.5	-2.0	-0.2	-1.3	1.9	-1.7
固始 Gushi	-1.9	-4.6	0.2	5.3*	-6.2**	-3.3**	3.8	5.2	-11.3**	2.9**	1.0
卢氏县 Lushixian	-1.4	-2.5	1.3	-6.2**	-3.2**	-2.9**	3.9	-7.6*	3.0	0.3	-0.4
南阳 Nanyang	-1.9	-1.1	0.6	1.1	-4.8**	-3.8**	3.2	0.9	-6.1*	1.0	-2.7
商丘 Shangqiu	0.2	0.4	2.4	0.9	-2.5**	-0.8	2.0	-1.5	-3.4*	1.7*	-1.2
新乡 Xinxiang	0.7	1.1	2.6	-1.6	-1.7	-1.3	1.2	-4.2	-0.1	0.4	-2.4
信阳 Xinyang	0.1	0.6	-0.5	0.4	-4.4**	-4.3**	-3.0	1.7	-4.6*	0.1	-4.9*
驻马店 Zhumadian	4.8*	5.5*	2.1	0.2	-5.7**	-3.6**	-3.4	-1.9	-5.3**	2.1*	-9.1**
郑州 Zhengzhou	-1.6	-2.1	-2.8	1.1	-3.7**	-2.5**	-0.5	3.9	-5.2**	1.3	-0.4
惠民 Huimin	3.3**	3.2**	2.2	-3.1*	-2.3*	-2.0**	-1.0	-5.3*	0.8	0.3	-5.2**
莱阳 Laiyang	4.5**	5.0**	2.1	-3.8*	-1.0	-1.6*	-2.9	-5.9*	2.9	-0.7	-6.6**
潍坊 Weifang	2.0	1.6	-0.5	1.5	-1.2	-1.3	-1.4	1.6	-2.7	-0.1	-2.8
临汾 Linfen	0.8	0.7	-1.8	0.2	-1.8	-1.2*	-2.5	4.0	-4.0	0.6	-1.9
运城 Yuncheng	3.1*	2.9*	-0.6	-1.1	-3.9**	-2.6*	-3.5	-0.5	-2.8	1.4	-5.4**
平均 Mean	1.3	1.2	1.0	-0.5	-3.0	-2.1	-0.3	-1.3	-2.6	0.9	-3.4
标准差 Standard deviation	2.3	2.8	2.0	2.6	1.6	1.3	2.6	4.1	3.6	0.9	2.8

表中正、负值分别表示物候期延迟和提前 Positive and negative values in the table show delay and in advance of the phenology, respectively. \*\*, \*分别表示在 1%和 5%水平上差异显著, 下同。\*\*, \* indicate significant difference at 1% and 5% levels, respectively. The same below.

综上所述表明: 1981—2009 年间研究区冬小麦播种期、出苗期和越冬开始期主要呈推迟趋势, 而返青期、开花期和成熟期呈提前趋势。由于物候期的变化使得冬小麦不同生长发育阶段时间长度发生变化。整体而言, 出苗—越冬开始、越冬开始—返青、返青—开花等阶段生长发育时间缩短, 然而由于成熟期提前幅度小于开花期, 使得开花—成熟阶段生育期延长  $0.9 d \cdot 10a^{-1}$ (表 2)。另外, 除固始试验站外, 过去 30 年所有观测站冬小麦整个生育期呈减少趋势, 其中唐山、信阳、驻马店、惠民、莱阳和运城 6 个站点减小趋势达到显著水平( $P < 0.05$ ), 所有试验站点冬小麦全生育期平均减少  $3.4 d \cdot 10a^{-1}$ (表 2)。

2.2 冬小麦物候变化驱动因素分析

过去 30 年冬小麦物候变化受到气候变化和品种更换因素的共同作用。为探讨冬小麦物候变化的主要驱动因子, 选择 4 个试验站点采用作物模型 (CERES-Wheat) 模拟固定小麦品种在气候变化下的物候变化趋势。对模型验证结果表明, 4 个试验站点 CERES-Wheat 模拟的小麦开花期和成熟期与观测值相比均小于 5 d(图 1), 表明该模型能较好地模拟研究区小麦物候。

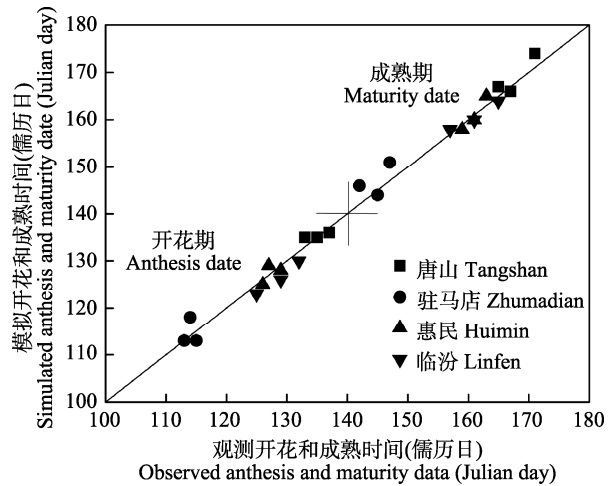


图 1 CERES-Wheat 模型模拟华北平原小麦种植区典型站点冬小麦开花期、成熟期验证

Fig. 1 Validation plot of CERES-Wheat model simulation with observed anthesis and maturity dates in different stations at winter wheat area of the North China Plain

图中十字线主要目的是区分开花期和成熟期, 右上部分是成熟期, 左下部分是开花期。Cross line in the figure is to distinguish the anthesis from maturity dates, the upper right part is maturity date, the lower left part is anthesis date.

由图 2 可知, 过去 30 年 4 个试验站点的冬小麦种植品种变换较为频繁。所选站点播种日期均显著推迟( $P < 0.05$ ), 推迟天数为  $2.8 \sim 4.5 d \cdot 10a^{-1}$ 。模型对

固定的小麦品种进行模拟, 因此模拟的冬小麦物候变化只受气候条件等外界因素的影响。1981—2009 年间模型模拟冬小麦开花期和成熟期与观测日期有相同的变化趋势(图 3、图 4)。模拟结果表明: 过去 30 年冬小麦开花期和成熟期提前主要驱动因素是气

候变化, 品种更换在一定程度上减缓了气候变化对物候的影响。另外, 在实际种植品种相同的年份, 观测的冬小麦开花期和成熟期表现出同样的提前趋势(图 3、图 4), 也反映了气候变化是物候变化的主要驱动因素。

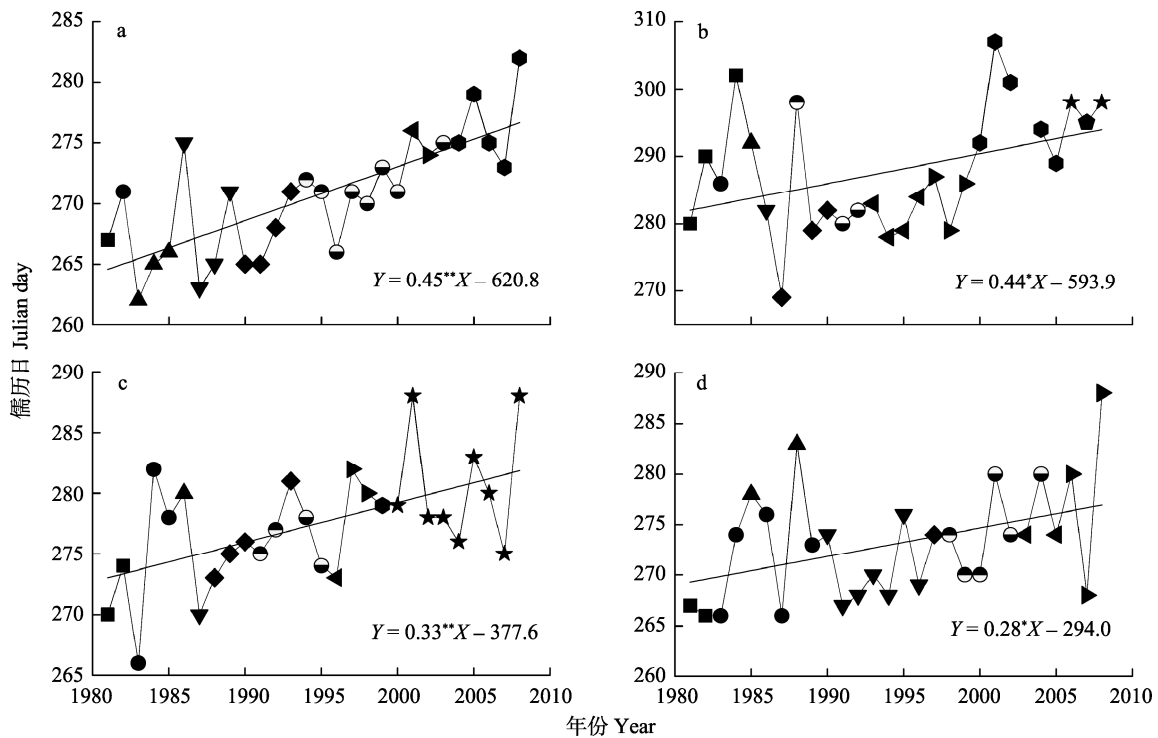


图 2 1981—2009 年冬小麦播种日期变化趋势(a: 唐山, b: 驻马店, c: 惠民, d: 临汾; 不同符号代表不同冬小麦品种)  
Fig. 2 Changing trends of sowing date of winter wheat during 1981—2009 at Tangshan (a), Zhumadian (b), Huimin (c) and Linfen (d) (Cultivars are represented by different symbols)

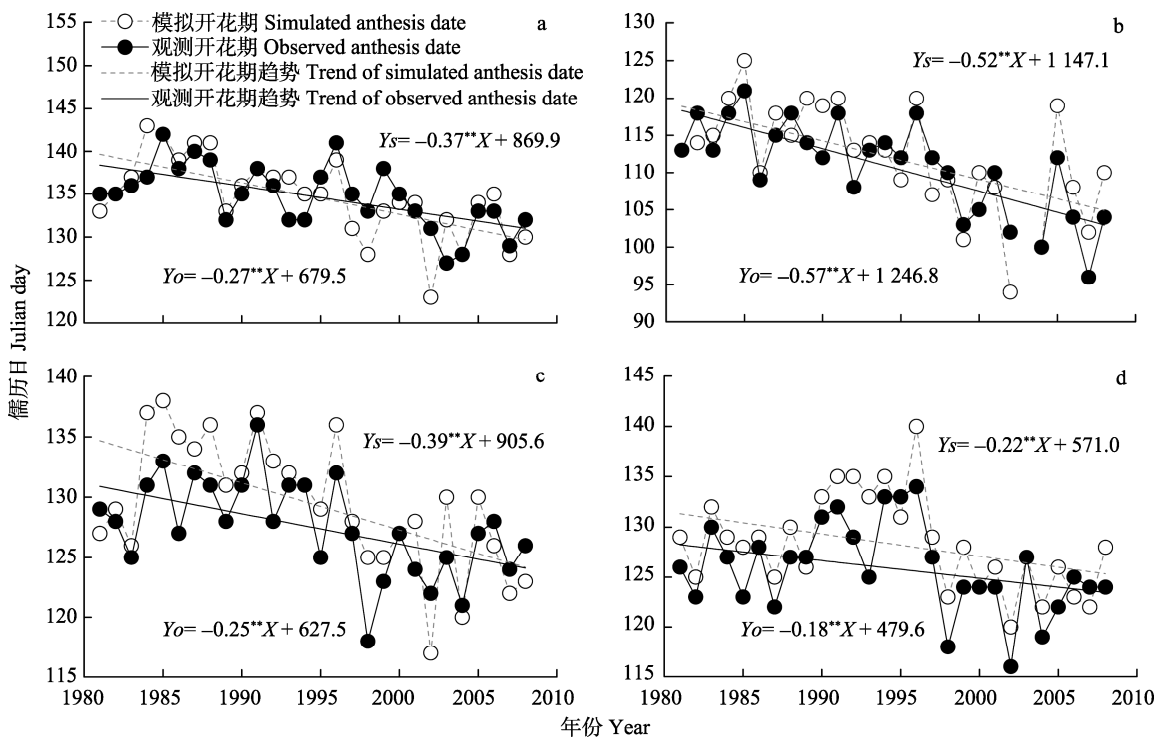


图 3 1981—2009 年模拟和观测冬小麦开花期变化趋势(a: 唐山, b: 驻马店, c: 惠民, d: 临汾)  
Fig. 3 Changing trends of simulated and observed anthesis date of winter wheat during 1981—2009 at Tangshan (a), Zhumadian (b), Huimin (c) and Linfen (d)

通过对 16 个试验站过去 30 年冬小麦返青—开花期和开花—成熟期生长日数与对应时期的平均温度进行相关性分析发现, 冬小麦返青—开花期、开花—成熟期日数与平均温度呈显著负相关关系(图 5)。气温升高使返青—开花期和开花—成熟期生育天数缩短, 从而导致开花和成熟期的提前。另外, 返青—开花期对平均温度的响应要远远大于开花—成熟期的响应。平均温度每升高 1 °C, 返青—开花期和开花—成熟期分别缩短 3.8 d 和 1.2 d(图 5)。

### 3 结论

本研究通过对华北平原 16 个农业气象试验站的冬小麦物候观测资料进行详细分析, 结合应用 CERES-Wheat 模型模拟冬小麦物候对过去气候变化的响应研究, 结果表明: (1)研究区冬小麦播种期、出苗期和越冬开始期推迟, 而返青期、开花期和成熟期提前。物候期的提前或推迟促使不同生长发育阶段历时发生变化, 出苗—越冬开始、越冬开始—返青、返青—开花等阶段呈缩短趋势, 然而开花—成

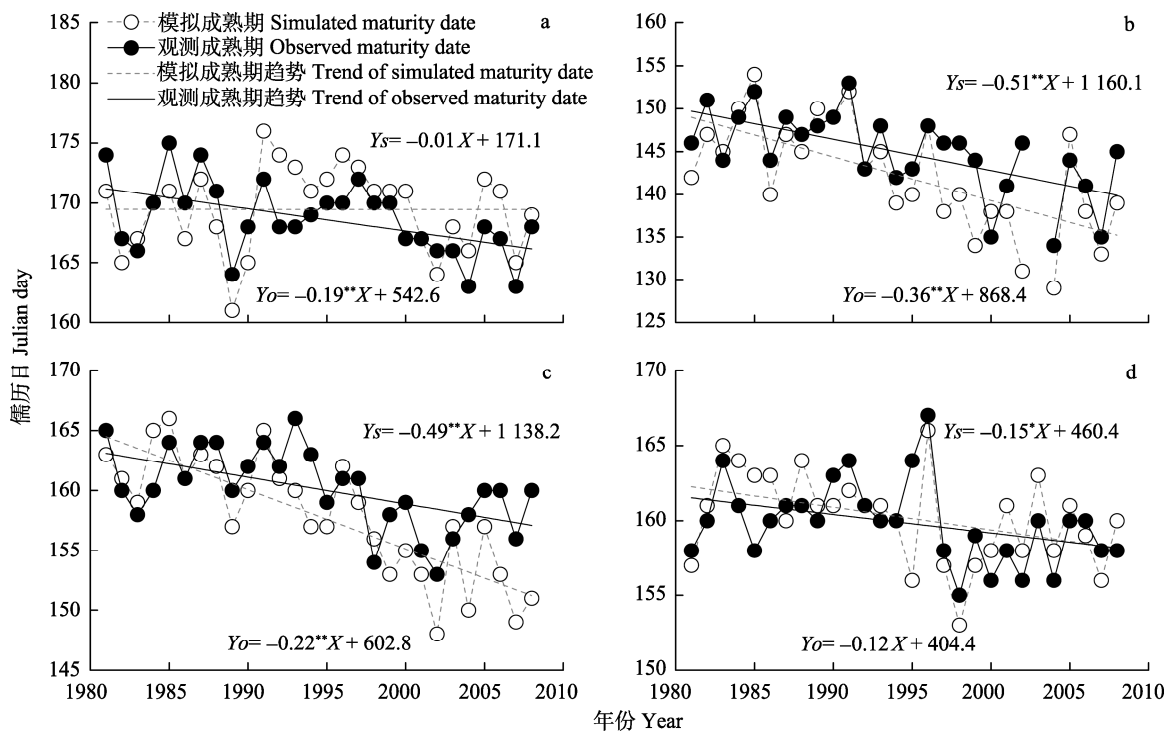


图 4 1981—2009 年模拟和观测冬小麦成熟期变化趋势(a: 唐山, b: 驻马店, c: 惠民, d: 临汾)  
Fig. 4 Changing trends of simulated and observed maturity date of winter wheat during 1981—2009 at Tangshan (a), Zhumadian (b), Huimin (c) and Linfen (d)

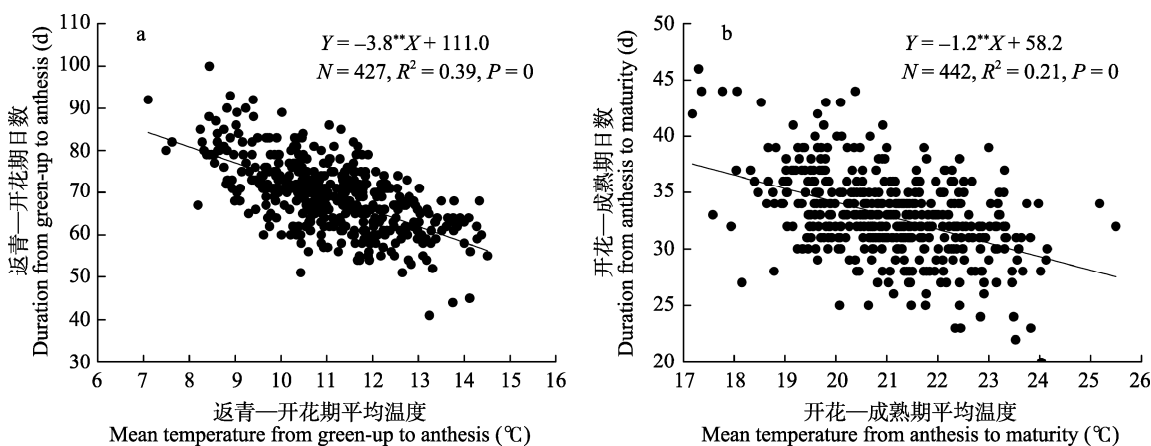


图 5 华北平原小麦区冬小麦返青—开花期(a)和开花—成熟期(b)天数与相应生育期平均温度相关关系  
Fig. 5 Relationship of mean temperature to duration from green-up to anthesis (a) and duration from anthesis to maturity (b) of winter wheat at winter wheat area of the North China Plain

熟阶段生育期却延长  $0.9 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 整个生育期历时呈减少趋势, 平均减少  $3.4 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。(2)采用作物模型 (CERES-Wheat) 模拟固定小麦品种在气候变化背景下的物候变化趋势。表明过去 30 年小麦开花期和成熟期的提前主要由气候变化所引起, 品种变换在一定程度上减缓气候变化对物候的影响。(3)冬小麦返青—开花期、开花—成熟期日数与相应时期的平均温度呈显著负相关关系。气温升高使返青—开花期和开花—成熟期生育天数缩短, 从而导致开花和成熟期的提前。

## 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis[M]//Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007
- [2] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告(II): 气候变化的影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(2): 51–56
- [3] 刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 905–910
- [4] 杨飞, 姚作芳, 宋佳, 等. 松嫩平原作物生长季气候和作物生育期的时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2012, 33(1): 18–26
- [5] Menzel A, Sparks T H, Estrella N, et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern[J]. Global Change Biology, 2006, 12(10): 1969–1976
- [6] Ma S X, Churkina G, Trusilova K. Investigating the impact of climate change on crop phenological events in Europe with a phenology model[J]. International Journal of Biometeorology, 2012, 56(4): 749–763
- [7] Zheng J Y, Ge Q S, Hao Z X. Impacts of climate warming on plants phenophases in China for the last 40 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(21): 1826–1831
- [8] 方修琦, 余卫红. 物候对全球变暖响应的研究综述[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 714–719
- [9] Craufurd P Q, Wheeler T R. Climate change and the flowering time of annual crops[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(9): 2529–2539
- [10] Diskin E, Proctor H, Jebb M, et al. The phenology of *Rubus fruticosus* in Ireland: herbarium specimens provide evidence for the response of phenophases to temperature, with implications for climate warming[J]. International Journal of Biometeorology, 2012, doi: 10.1007/s004840120524z
- [11] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe[J]. Nature, 1999, 397(6721): 659
- [12] 刘赫男, 刘玉莲, 朱红蕊, 等. 1998—2008 年黑龙江省木本植物物候期变化特征[J]. 中国农业气象, 2012, 33(1): 34–40
- [13] Tao F L, Yokozawa M, Xu Y L, et al. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China 1981—2000[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 2006, 138(1/4): 82–92
- [14] Stacks W J, Deryng D, Foley J A, et al. Crop planting dates: an analysis of global patterns[J]. Global Ecology Biogeography, 2010, 19: 607–620
- [15] Kelman W M, Dove H. Growth and phenology of winter wheat and oats in a dual-purpose management system[J]. Crop & Pasture Science, 2009, 60(10): 921–932
- [16] Challinor A J, Ewert F, Arnold S, et al. Crops and climate change: Progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(10): 2775–2789
- [17] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2011[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011
- [18] 杨晓琳, 宋振伟, 王宏, 等. 黄淮海农作区冬小麦需水量时空变化特征及气候影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 356–362
- [19] Porter J R, Gawith M. Temperatures and the growth and development of wheat: a review[J]. European Journal of Agronomy, 1999, 10(1): 23–36
- [20] 王力, 李凤霞, 徐维新, 等. 气候变化对柴达木灌区小麦生育期的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(增 1): 81–83
- [21] Batts G R, Wheeler T R, Morison J I L, et al. Developmental and tillering responses of winter wheat (*Triticum aestivum*) crops to CO<sub>2</sub> and temperature[J]. Journal of Agricultural Science, 1996, 127(1): 23–35
- [22] Angstrom A. Solar and terrestrial radiation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1924, 50: 121–126.
- [23] Prescott J A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation[J]. Transactions of the Royal Society of South Australia, 1940, 64: 114–118
- [24] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. Field Crop Research, 2003, 18(3/4): 235–265
- [25] Ritchie J T, Singh U, Godwin D C, et al. Ceres growth, development and yield[M]//Tsuji G Y, Hoogenboom G, Thornton P K, eds. Understanding options for agricultural production. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998: 79–98
- [26] 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[J]. 植物生态学报, 2011, 35(6): 623–631
- [27] 齐永青, 孙宏勇, 沈彦俊. 太行山山前平原近 50 年气候变暖特征及其对冬小麦—夏玉米作物系统的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1048–1053
- [28] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(1): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3–8