

张佩,高苹,钱忠海,等,2020.油菜花期物候主要限制因子分析及预报模型的构建[J].气象,46(2):234-244. Zhang P, Gao P, Qian Z H, et al, 2020. Analysis on limiting factors and construction of prediction model of oilseed rape flowering phenology[J]. Meteor Mon, 46(2): 234-244 (in Chinese).

## 油菜花期物候主要限制因子分析及预报模型的构建<sup>\*</sup>

张 佩<sup>1</sup> 高 苹<sup>1</sup> 钱忠海<sup>2</sup> 吴洪颜<sup>3</sup> 江海东<sup>4</sup>

1 江苏省气象局,南京 210008

2 江苏省农药总站,南京 210036

3 江苏省气象台,南京 210008

4 南京农业大学农业部南方作物生理生态重点开放实验室/现代作物生产协同创新中心,南京 210095

**提 要:**以油菜开花开始时间(即始花期)为研究对象,利用 1980—2016 年江苏省油菜发育期观测资料和同步气象数据,分析油菜始花期的时空变化趋势。结合油菜生理特性,筛选与油菜始花期显著相关的气象因子。以高淳站为例,采用通径分析明确各气象因子对油菜始花期的作用并评估因子敏感性,最后构建油菜始花期的回归预报模型。结果表明:在气候变化背景下江苏地区油菜始花期呈逐年提前趋势,淮河以南地区平均提前 3 d 以上;上年日平均气温稳定通过 0℃终日( $X_1$ )、当年日平均气温稳定通过 5℃初日( $X_2$ )、现蕾至开花前时段内分别大于 0℃、5℃和 10℃的有效积温( $X_3$ 、 $X_4$ 和 $X_5$ )、最低气温分别小于 0 和 5℃的日数( $X_6$ 和 $X_7$ )及平均最低气温( $X_8$ )等 8 个因子与油菜始花期相关性达极显著水平;其中 2 月上旬至 3 月上旬的平均最低气温( $X_8$ )、日最低气温小于 5℃日数( $X_7$ )、大于 5℃有效积温( $X_4$ )对油菜始花期的直接影响位列 8 个因子的前三位,且这 3 个因子两两共同对油菜始花期的相对影响程度也排在各因子对回归方程  $R^2$  总贡献率的前三位;其余 5 个因子直接效应普遍小于间接效应,且它们主要通过  $X_4$ 、 $X_7$ 、 $X_8$  对油菜始花期产生影响,而  $X_1$ 、 $X_3$ 、 $X_5$  也通过这 5 个因子产生一定影响;去掉任何一个因子,都会引起其他某些因子对油菜始花期的直接、间接作用发生变化;基于这 8 个因子构建的回归模型可解释 68.48% 的油菜始花期变化,并具有区域适用性。因此,就江苏地区而言,光照和降水对油菜开花早晚影响较小,热量条件才是江苏油菜开花早晚的主要限制因子,所构建的始花期预报模型可较好反映油菜开花时间早晚与相关热量因子变化的规律。

**关键词:**花期物候,预报模型,限制因子,油菜

中图分类号: S16,P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.02.009

## Analysis on Limiting Factors and Construction of Prediction Model of Oilseed Rape Flowering Phenology

ZHANG Pei<sup>1</sup> GAO Ping<sup>1</sup> QIAN Zhonghai<sup>2</sup> WU Hongyan<sup>3</sup> JIANG Haidong<sup>4</sup>

1 Jiangsu Meteorological Service, Nanjing 210008

2 Jiangsu Institute for the Control of Agrochemicals, Nanjing 210036

3 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

4 Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology in Southern China, Ministry of Agriculture/Jiangsu Collaborative Innovation Center for Modern Crop Production, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095

**Abstract:** Taking the beginning dates of flowering (BDF) as the research object, this paper analyzed the spatio-temporal variation trend of the BDF in Jiangsu Province from 1980 to 2016 by using the observation data and synchronous meteorological data. Combined with physiological characteristics of oilseed rape, the

<sup>\*</sup> 公益性行业(农业)科研专项(201403039)、国家自然科学基金项目(41371412/D010702)及江苏省气象局科技项目(KM201703)共同资助  
2018 年 12 月 4 日收稿; 2019 年 12 月 28 日收修定稿

第一作者:张佩,主要从事作物逆境生理及农业气象灾害研究. Email:78073954@qq.com

通讯作者:高苹,主要从事应用气象研究. Email:571086340@qq.com

meteorological factors significantly related to the initial flowering period were selected, and the effect and sensitivity of meteorological factors were defined by path analysis. Moreover, the regression prediction model of initial flowering period was constructed. The results showed that under the background of climate change, the BDF shows a tendency of advancing year by year, with an average advance of more than three days in regions south of the Huaihe River. There are eight factors, that are significantly positively correlated to the BDF, which include: the beginning date of the daily average temperature (DAT) above 0°C stably in previous year ( $X_1$ ), the ending date of the DAT above 5°C stably ( $X_2$ ), the effective accumulated temperature above 0, 5 and 10°C ( $X_3$ ,  $X_4$  and  $X_5$ ), the number of days with daily minimum temperature below 0 or 5°C ( $X_6$  and  $X_7$ ) and average minimum temperature ( $X_8$ ) between budding stage and flowering stage (from early February to early March) in current year. The directly effects of  $X_8$ ,  $X_7$  and  $X_4$  rank the top three, and the relative determination degree of these three factors to the initial flowering period of rape is also ranked among the top three factors to the total contribution rate (TCR) of all factors to the  $R^2$  of the regression prediction model, while the direct effect of the remaining five factors are generally weaker than the indirect effect. And the remaining five factors mainly affect the BDF through  $X_4$ ,  $X_7$ ,  $X_8$ , while  $X_4$ ,  $X_7$ ,  $X_8$  also exert some influence through these 5 factors. Removing any factor would change the direct and indirect effects on the BDF. In addition, the regression prediction model constructed by the above eight factors can explain 68.48% of the changes of the BDF (e.g. Gaochun Region), which is also suitable for some other regions. As far as Jiangsu Province is concerned, light and precipitation have little influence on the BDF, while heat condition is the main limiting factor. In a word, the prediction model of the BDF constructed in this paper can better reflect the rule of the BDF and the change of related heat factors.

**Key words:** flowering phenology, prediction model, limiting factor, oilseed rape

## 引 言

植物物候是植物与外界环境长期共同作用的结果,它的变化可直接促使整个生态系统包括物种分布区域(Chaine, 2010)、物种间相互关系(Elzinga et al, 2007; Zohner and Renner, 2014),甚至碳循环(Walther et al, 2002; Cleland et al, 2007)等发生相应变化。因此,植物物候的研究已受到越来越多的关注。而花期物候对于植物的一生至关重要,进入此阶段植物即由营养生长向生殖生长转变(罗睿和郭建军, 2010)。已有大量的研究表明,植物花期物候与气象环境关系密切,它已成为表征气候变化的重要指标之一(张宝成和白艳芬, 2015)。温度是花期物候的重要影响因子,花期气温变化对植物的花期物候均有显著影响(French and Schultz, 1982),温度升高引起植物生长发育速度加快、花期普遍提前(Wang et al, 2008; Kalbarczyk, 2009; Tao et al, 2006; 吴荣军等, 2009; 张学霞等, 2005),以早花植物表现更为明显(Sherry et al, 2007),而最低温度升高,对花期的影响更加显著(Wang et al, 2015),杨

永龙等(2012)指出河西走廊高海拔地区春油菜开花期与稳定通过 5°C 积温显著相关;降水量的变化同样会影响植物的花期物候, Ludwig and Asseng (2010)、Chaine(2010)和 Jentsch et al(2009)通过研究均得到气候干旱可导致植物花期物候提前结论,李美荣(2008)研究指出,花前适量降雨提高了空气湿度,利于苹果树开花,但若雨量过大或连续降雨,反而推迟开花。在因子研究的基础上,构建花期预测模型,主要包括积温模型(车少静等, 2004; 张增信等, 2014)和统计模型(覃文更等, 2012)。积温模型是基于植物生理生态过程,计算达到植物开花所需积温的日数以预测花期;统计模型则普遍是单纯的将花期物候与气象因子进行简单统计。

油菜是我国重要的植物油来源作物(吴利红等, 2011; 汪雷等, 2015),其种植面积位列世界第一(张树杰和王汉中, 2012; Zhang et al, 2011),在很多省份均有种植。油菜花期物候主要由开花开始时间及开花持续时间组成(罗睿和郭建军, 2010),开花时间的早晚决定了油菜生殖生长的阶段和发育质量(史卫东, 2006),是否在适宜的时期内开花对于油菜避开不利的气象条件和籽粒顺利充实成熟并保证高品

质显得尤为重要(柳海东,2015;黄吉祥等,2016)。另一方面,近年来,由于油菜开花期呈现的独特风景,油菜花海旅游也已成为乡村旅游产业重要的一部分,具有特点鲜明的美学及经济价值,如江苏泰州兴化和溱湖,苏州同里、三山岛,南京高淳已形成自己的油菜旅游品牌,并带动了其他相关行业的积极发展。据统计,2015年以来南京高淳区油菜花旅游节期间收入历年增幅均在20%以上。因此,开展油菜花期物候研究对油菜相关经济发展意义重大。

本文以油菜开花开始时间(即始花期)为研究对象。首先基于观测资料较完整的淮安、镇江、金坛、高淳、昆山5个站的油菜开花期观测资料,统计分析江苏省油菜播种至始花期的基本特征及其变化趋势。分析历年油菜始花期资料可看出,在品种及相关农业技术水平等相近的情况下,油菜始花期年际波动仍较大,这主要是由气象条件的差异造成的。因此,本文结合油菜自身的生理特性,选择与油菜始花期有密切联系的气象因子,通过分析油菜始花期与各因子的关系,确定油菜开花早晚的主要气象限制因子;采用通径分析法进一步探讨各主要气象限制因子对油菜始花期影响的相对重要性,并评估各因子的敏感性;基于各主要气象限制因子,构建油菜始花期回归预报模型。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

江苏省油菜农业气象观测普遍从20世纪80年代初至80年代中后期开始。开展观测较早的站点有:淮安、镇江、金坛、高淳、昆山和射阳6个站。由于江苏省油菜种植区域由北向南缩减,油菜的农业气象观测站点也相应进行了调整,2000年起射阳站停止观测,2011年起淮安、镇江和昆山3个站停止观测,并新增了如皋站。目前仅高淳、金坛站的油菜观测一直保留未变更。因此本研究选用观测资料较完整的淮安、镇江、金坛、高淳、昆山5个站的油菜农业气象观测资料进行油菜始花期时空变化特征分析。

油菜农业气象观测站对应的气象观测资料来自江苏省气象局气象观测站的1980—2016年9月中旬至3月上旬逐日观测资料,主要气象因素包括平均气温、最低气温、降水量和日照时数等。

### 1.2 因子选择

江苏油菜生产选用的普遍为半冬性甘蓝型品种,一般只需日最低温度在5~15℃达20~30d即可完成春化,而江苏省冬季的气温条件完全满足这一要求,因此无需考虑与春化过程相关的因子。

江苏省油菜一般于2月上旬前后现蕾,生长加快,3月中旬开花,油菜开花时间早晚主要取决于前期气象条件,杨文钰等(2003)的研究表明:当越冬期温度低于0℃,油菜即停止生长;冬油菜一般于初春后气温高于5℃时现蕾,当温度达到10℃以上时迅速抽薹。因此,本文以油菜生长的关键温度0.5和10℃为节点,统计了上年日平均温度稳定通过0℃终日;播种至现蕾前(上年9月中旬至当年1月下旬)的大于0℃积温、总日时数及累积降水量;当年日平均温度稳定通过5℃初日;现蕾至开花前(2月上旬至3月上旬)的分别大于0.5和10℃的有效积温,日最低气温分别小于0.5和10℃日数,平均最低气温,以及总日照时数及累积降水量。分析这些因子与油菜始花期的相关性。

### 1.3 资料处理与分析

首先,为了精确地分析油菜始花期的变化趋势,尽量避免由于播期的变化导致开花期具体出现日期发生改变,统计了播种至始花期的长度。采用线性倾向估计法、相关分析法分析油菜播种—始花期长度的变化及油菜始花期与各气象因子的关系。以油菜播种—始花期长度与年序之间线性回归的斜率表征有油菜农业气象观测记录以来始花期的变化趋势。

为研究各因子对油菜始花期影响的相对重要性,对与油菜始花期相关的气象因子进行通径分析。首先,确定各因子是否符合通径分析的数据要求,若符合,则构建油菜始花期与各因子的多元回归方程:

$$f = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i \quad (1)$$

式中: $f$ 为油菜始花期, $b_0$ 为常数项, $x_i$ 为与油菜始花期相关的因子, $b_i$ 为 $f$ 对因子 $x_i$ 的偏回归系数, $i$ 为因子序号, $m$ 为因子总个数。

然后,计算各因子 $x_i$ 对油菜始花期的直接效应和间接效应,并且通过直接效应可得到因子的决定系数及各因子对多元回归方程可靠程度 $R^2$ 的总贡献率:

$$DE_{f_i} = b_i \frac{S_{x_i}}{S_f} \quad (2)$$

$$IE_{f_{ij}} = DE_{f_i} r_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ j = 1, 2, \dots, m, i < j \quad (3)$$

$$d_{f_i} = DE_{f_i}^2 \quad (4)$$

$$df_{ij} = 2DE_{f_i} DE_{f_j} r_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ j = 1, 2, \dots, m, i < j \quad (5)$$

$$TCR_i = r_{f_i} DE_{f_i} \quad (6)$$

式中:  $DE_{f_i}$ 、 $DE_{f_j}$  分别为因子  $x_i$ 、 $x_j$  对油菜始花期的直接效应,  $IE_{f_{ij}}$  为因子  $x_i$  通过  $x_j$  对油菜始花期产生的间接效应,  $d_{f_i}$  为因子  $x_i$  对油菜始花期的决定系数,  $df_{ij}$  为因子  $x_i$ 、 $x_j$  对油菜始花期的共同决定系数,  $TCR_i$  为因子  $x_i$  对多元回归方程可靠程度  $R^2$  的总贡献率,  $S_{x_i}$  为  $x_i$  的标准差,  $S_f$  为油菜始花期的标准差,  $r_{ij}$  为因子  $x_i$ 、 $x_j$  间的相关系数,  $r_{f_i}$  为因子  $x_i$ 、 $f$  间的相关系数,  $j$  为因子序号。

最后, 分别减少某一因子, 分析其余因子对油菜始花期直接、间接效应的影响变化, 以进行因子的敏感性分析。

基于最小二乘法构建油菜始花期( $f$ )的多元回归预报模型; 利用 MATLAB 百分位法(BoxPlot 函数)确定模型预测区间; 利用 SPSS 做配对  $t$  检验以检测模型的预测值与始花期实际值是否有显著差

异, 最终确定模型的预测精度。以预测值占实际值的百分比作为模型预测准确度的表征值。

## 2 结果与分析

### 2.1 油菜始花期的基本特征及变化趋势

由表 1 可看出, 播种—始花期长度总体上自北向南呈缩短趋势, 最长(淮安, 198 d)与最短(金坛, 180 d)相差 18 d; 从变化趋势来看, 各站点播种—始花期的长度均呈缩短趋势, 5 个站点缩短了 2.73~8.07  $d \cdot (10 a)^{-1}$  ( $P < 0.01$ )。

1880—2012 年, 全球平均地表温度上升(翟盘茂等, 2017), 张佩等(2015)也利用 M-K 法明确了江苏省各站点油菜全生育期积温的突变特征, 以确定气候变化的拐点, 结果发现, 江苏淮北地区冬季积温突变开始年基本在 1988—1992 年, 淮河以南地区则普遍在 1990—1994 年。本研究统一选取 1987—1994 年及 1995—2010 年 2 个时段对比分析气候变化前后 5 个农业气象观测站油菜播种—始花期长度, 结果发现: 气候变暖后, 开花明显提前, 5 个站点播种—始花期长度缩短了 3~14 d。

表 1 油菜始花期的基本特征及变化趋势

Table 1 Basic characteristics and change trends of the initial flowering of oilseed rape

播种—始花期	淮安	镇江	金坛	高淳	昆山
长度/d	198	192	180	183	190
趋势/ $[d \cdot (10 a)^{-1}]$	-6.42***	-3.52***	-8.07***	-2.73***	-4.24***
长度(1987—1994 年)/d	205	196	190	185	190
长度(1995—2010 年)/d	195	191	176	182	187
变化/d	-10	-5	-14	-3	-3

注: “-”表示播种至始花期的长度随时间逐渐缩短, \*、\*\*、\*\*\* 分别表示变化趋势通过 0.1、0.05 和 0.01 显著性水平检验, 下同。

Note: “-” means that the length from sowing to flowering gradually decreases with time, \*, \*\*, \*\*\* mean that the change trend passes the significance level tests of 0.1, 0.05 and 0.01 respectively, the same as below.

### 2.2 油菜始花期与可能影响因子的相关性分析

统计油菜始花期与播期的相关关系发现, 油菜始花期与播期相关性均未通过显著性水平检验。通过对典型年份普查发现, 2013 年高淳站油菜播种期为 9 月 17 日, 始花期为 2014 年 3 月 20 日; 2014 年油菜播种期为 10 月 5 日, 始花期为 2015 年 3 月 18 日。虽然 2014 年油菜播种期较 2013 年延后 18 d, 但其始花期却较 2013 年提前 2 d。同样, 金坛站 2004 年和 2005 年油菜播种期均为 9 月 27 日, 但对

应的始花期分别为 4 月 2 日(2005 年)、3 月 26 日(2006 年), 相差 7 d。本文统计 5 个油菜农业气象观测站的油菜播种期均未出现异常偏早或偏迟年份, 普遍处在适宜播栽期内(9 月中旬至 10 月下旬)。这可以初步说明只要油菜在适宜播栽期内顺利播栽, 其开花时间早晚与播期关系不大, 即播期早晚不是油菜开花时间早晚的限制因子。

由表 2 可看出, 上年日平均气温稳定通过  $0^{\circ}\text{C}$  终日、上年 9 月中旬至当年 1 月下旬大于  $0^{\circ}\text{C}$  有效积温与油菜始花期均显著负相关, 说明上年日平均

气温稳定通过 0℃ 终日越晚,前期热量条件越好,当年油菜开花越早出现;当年日平均气温稳定通过 5℃ 初日与油菜始花期显著正相关,2 月上旬至 3 月上旬分别大于 0、5 和 10℃ 的有效积温与油菜始花期显著负相关,说明当春后日平均气温通过 5℃ 初日越早,当年气温回升后到开花前热量条件越充足,油菜开花也相应提早;2 月上旬至 3 月上旬日最低气温分别小于 0、5 和 10℃ 日数与油菜始花期普遍呈显著正相关,2 月上旬至 3 月上旬日平均最低气温与油菜始花期显著负相关,说明当年气温回升后到开花前平均最低气温越低,开花期越推迟;上年 9 月中旬至当年 1 月下旬、2 月上旬至 3 月上旬两个时段的总日照时数和累计降水量与油菜始花期存在一定的关系,但普遍未通过显著性水平检验。这说

明光照和降水对油菜开花影响较小,热量条件才是开花时间早晚的主要限制因子。

综合来看,与油菜始花期相关程度较高的代表热量因子是:2 月上旬至 3 月上旬大于 0℃ 有效积温、2 月上旬至 3 月上旬大于 5℃ 有效积温、2 月上旬至 3 月上旬日最低气温小于 5℃ 日数、2 月上旬至 3 月上旬平均最低气温、2 月上旬至 3 月上旬大于 10℃ 有效积温、当年日平均气温稳定通过 5℃ 初日、上年日平均气温稳定通过 0℃ 终日、2 月上旬至 3 月上旬日最低气温小于 0℃ 日数,其中高淳站与油菜始花期极显著相关因子数为 8 个,昆山为 7 个,金坛为 7 个。因此,选择高淳站作为本研究中的模型构建对象。

表 2 各因子与油菜始花期的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between the factors and the BDF of oilseed rape

因子	高淳	昆山	金坛	
播期	0.1427	0.2302	-0.0402	
上年日平均温度稳定通过 0℃ 终日	-0.5298***	-0.3299*	-0.4304**	
当年日平均温度稳定通过 5℃ 初日	0.5692***	0.4402**	0.4900***	
上年 9 月中旬至 当年 1 月下旬	大于 0℃ 有效积温	-0.3085*	-0.5685***	-0.3232*
	总日照时数	0.2992	0.4667**	-0.2139
	累计降水量	-0.0501	-0.0971	-0.0808
当年 2 月上旬至 3 月上旬	大于 0℃ 有效积温	-0.7122***	-0.7859***	-0.7339***
	大于 5℃ 有效积温	-0.7403***	-0.7411***	-0.7136***
	大于 10℃ 有效积温	-0.5398***	-0.4766***	-0.5104***
	日最低气温小于 0℃ 日数	0.3595**	0.5264***	0.3790**
	日最低气温小于 5℃ 日数	0.6898***	0.6658***	0.5847***
	日最低气温小于 10℃ 日数	0.5193***	-0.0835	0.4639***
	平均最低气温	-0.6152***	-0.6567***	-0.5906***
	总日照时数	-0.0443	-0.0359	-0.3404*
累计降水量	-0.0499	-0.0454	0.0921	

### 2.3 油菜始花期主要气象限制因子的通径分析

通过对主要气象限制因子和油菜始花期之间的相关分解以得到各气象限制因子对油菜始花期影响的相对重要性。选择与油菜始花期极显著相关因子数最多的高淳站为例,对 8 个主要热量因子:上年日平均气温稳定通过 0℃ 终日( $X_1$ )、当年日平均气温稳定通过 5℃ 初日( $X_2$ )、2 月上旬至 3 月上旬大于 0℃ 有效积温( $X_3$ )、2 月上旬至 3 月上旬大于 5℃ 有效积温( $X_4$ )、2 月上旬至 3 月上旬大于 10℃ 有效积温( $X_5$ )、2 月上旬至 3 月上旬日最低气温小于 0℃ 日数( $X_6$ )、2 月上旬至 3 月上旬日最低气温小于 5℃ 日数( $X_7$ )、2 月上旬至 3 月上旬平均最低气温

( $X_8$ )进行通径分析。首先,从表 3 的简单数理统计结果来看,供分析的各数据偏度很小,说明它们近似满足正态分布要求,可以进行回归和通径分析。然后,分析各因子对油菜始花期的直接效应和间接效应,结果见表 4。同时,计算各因子对油菜始花期相对的决定程度(即决定系数),并分析每个因子对建立的多元回归方程可靠程度( $R^2$ )的总贡献率(表 5)。

从表 4 的通径分析结果可以看出: $X_4$ 、 $X_3$ 、 $X_7$ 、 $X_8$  与油菜始花期相关性最高;在直接效应方面, $X_8$ 、 $X_7$ 、 $X_4$  影响较大;而在间接效应方面, $X_8$ 、 $X_3$  效应最大;综合以上分析可以看出,2 月上旬至 3 月上旬大于 0℃ 有效积温及大于 5℃ 有效积温越多,开

花越早;2月上旬至3月上旬日最低气温小于5℃日数越少、平均最低气温越高,开花越早。其中,分效应来看,以2月上旬至3月上旬的平均最低气温为

影响油菜始花期的主要因子,在直接、间接效应方面都有最大的影响;而综合影响方面,以2月上旬至3月上旬大于5℃有效积温为最大。

表 3 高淳站 8 个主要热量因子和油菜始花期的简单数理统计

Table 3 Simple statistics of 8 main heat factors and the BDF of oilseed rape at Gaochun Station

项目	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	2月上旬至3月上旬						始花期
			X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	
平均值	362.0000 d	56.0000 d	250.8032 ℃·d	90.8452 ℃·d	18.0903 ℃·d	8.0323 d	26.7419 d	3.1258 C	81.5806 d
标准误差	1.3066 d	2.4247 d	9.2933 ℃·d	6.6578 ℃·d	2.4746 ℃·d	0.8039 d	0.9549 d	0.2294 C	1.1291 d
标准差	7.2748	13.5003	51.7429	37.0693	13.7779	4.4757	5.3164	1.2770	6.2864
方差	52.9226	182.2581	2677.3303	1374.1306	189.8302	20.0323	28.2645	1.6306	39.5183
偏度	-3.1249	-0.0928	0.0988	0.2120	0.7686	0.6855	-0.3028	-0.2560	0.2503

表 4 高淳站 8 个主要热量因子对油菜始花期的直接效应和间接效应

Table 4 The direct and indirect effects of 8 main heat factors on the BDF of oilseed rape at Gaochun Station

因子	相关系数	直接效应	间接效应								
			总间接效应	通过 X <sub>1</sub>	通过 X <sub>2</sub>	通过 X <sub>3</sub>	通过 X <sub>4</sub>	通过 X <sub>5</sub>	通过 X <sub>6</sub>	通过 X <sub>7</sub>	通过 X <sub>8</sub>
X <sub>1</sub>	-0.5298	-0.2421	-0.2877		-0.0809	0.1057	-0.2641	-0.0169	-0.0662	-0.3354	0.3701
X <sub>2</sub>	0.5692	0.2320	0.3372	0.0844		-0.1491	0.3746	0.0181	0.0440	0.2923	-0.3270
X <sub>3</sub>	-0.7122	0.2564	-0.9687	-0.0998	-0.1349		-0.6412	-0.0421	-0.1085	-0.5877	0.6456
X <sub>4</sub>	-0.7403	-0.6653	-0.0749	-0.0961	-0.1306	0.2471		-0.0509	-0.0772	-0.5561	0.5889
X <sub>5</sub>	-0.5398	-0.0631	-0.4767	-0.0650	-0.0665	0.1711	-0.5369		-0.0097	-0.3297	0.3600
X <sub>6</sub>	0.3595	0.1809	0.1786	0.0886	0.0564	-0.1539	0.2841	0.0034		0.4852	-0.5852
X <sub>7</sub>	0.6898	0.6761	0.0137	0.1201	0.1003	-0.2229	0.5472	0.0308	0.1298		-0.6915
X <sub>8</sub>	-0.6152	0.7328	-1.3481	-0.1223	-0.1035	0.2259	-0.5347	-0.0310	-0.1444	-0.6380	

从 8 个因子对油菜始花期的决定系数来看(表 5),X<sub>7</sub> 和 X<sub>8</sub> 的共同作用是影响始花期的主要因素,而 X<sub>4</sub> 与 X<sub>8</sub>、X<sub>7</sub> 的共同作用是影响始花期的次主要因素;结合因子对 R<sup>2</sup> 的总贡献率可以看出,X<sub>4</sub>、X<sub>7</sub>、X<sub>8</sub> 贡献率最高,而 X<sub>3</sub> 贡献率只有-0.1827,综合表 4 数据可得,2月上旬至3月上旬

大于0℃有效积温包含了大于5℃有效积温和大于10℃有效积温两个区间,而 X<sub>3</sub> 通过 X<sub>4</sub> 的间接效应为-0.6412,说明 X<sub>3</sub> 主要通过 X<sub>4</sub> 实现对始花期的影响。综上所述,2月上旬至3月上旬大于5℃有效积温、2月上旬至3月上旬日最低气温小于5℃日数及2月上旬至3月上旬平均最低气温是构成始花期多元回归方程的主要因子。

表 5 高淳站 8 个主要热量因子对油菜开花期的决定系数和对多元回归方程可靠程度 R<sup>2</sup> 贡献率

Table 5 The decision coefficient to the BDF of oilseed rape and the TCR to R<sup>2</sup> of the regression prediction model of 8 main heat factors at Gaochun Station

序号	决定系数		因子对 R <sup>2</sup> 的总贡献率	
1	d <sub>f<sub>78</sub></sub>	-0.9351	TCR <sub>1</sub>	0.1283
2	d <sub>f<sub>48</sub></sub>	-0.7837	TCR <sub>2</sub>	0.1321
3	d <sub>f<sub>47</sub></sub>	0.7399	TCR <sub>3</sub>	-0.1827
4	d <sub>f<sub>8</sub></sub>	0.5370	TCR <sub>4</sub>	0.4925
5	d <sub>f<sub>7</sub></sub>	0.4571	TCR <sub>5</sub>	0.0341
6	d <sub>f<sub>4</sub></sub>	0.4427	TCR <sub>6</sub>	0.0650
7	d <sub>f<sub>38</sub></sub>	0.3311	TCR <sub>7</sub>	0.4664
误差项	d <sub>f<sub>e</sub></sub>	0.3152	TCR <sub>8</sub>	-0.4509

## 2.4 油菜始花期主要气象限制因子敏感性分析

简单地采用一元线性回归模型会造成因变量数量太少,导致信息缺失及模型的识别率降低。通过通径分析及相关分析可以看出,8 个因子与油菜始花期普遍呈现显著相关(表 2),虽然 X<sub>4</sub>、X<sub>7</sub>、X<sub>8</sub> 及 X<sub>3</sub> 对 R<sup>2</sup> 的总贡献率较高,但为提升模型预测的准确性及因子的可靠性,进一步对 8 个因子的敏感度进行分析。即在分别去除某一因子后,分析其余因子对油菜始花期的直接效应和间接效应的变化(表 6)。

与 8 个因子的通径分析结果比较,去除 X<sub>1</sub> 导致 X<sub>3</sub>、X<sub>7</sub>、X<sub>8</sub> 的直接、间接作用发生较大变化;去

除  $X_2$  导致  $X_4$ 、 $X_5$  和  $X_7$  的直接、间接作用发生较大变化;去除  $X_3$  导致  $X_4$  的直接、间接作用发生较大变化,还引起  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$  的间接作用发生较大变化;去除  $X_5$  仅引起  $X_4$  的直接、间接作用发生较大变化;去除  $X_6$  导致  $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_8$  的直接、间接作用发生较大变化。分别去除  $X_4$ 、 $X_7$ 、 $X_8$  则会引起较多因子的直接、间接作用发生较大变化,其中去除  $X_4$  后  $X_3$ 、 $X_5$ 、 $X_7$ 、 $X_8$  的直接、间接作用变化大,同时  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_6$  的间接作用也发生较大变化;去除  $X_7$  引起  $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_8$  的直接、间接作用发生较大变化;去除  $X_8$  后则  $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$  5 个因子的直接、间接作用均发生较大变化。

结合因子对  $R^2$  的总贡献率的变化来看(表 7),去除  $X_1$  导致  $X_3$ 、 $X_7$ 、 $X_8$  对  $R^2$  的贡献率发生较大

变化;去除  $X_2$  导致  $X_4$ 、 $X_5$  和  $X_7$  对  $R^2$  的贡献率发生较大变化;分别去除  $X_3$ 、 $X_5$  均仅引起  $X_4$  对  $R^2$  的贡献率发生较大变化;去除  $X_4$  导致  $X_3$ 、 $X_5$ 、 $X_7$  对  $R^2$  的贡献率发生较大变化;去除  $X_6$  导致  $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_8$  对  $R^2$  的贡献率发生较大变化;分别去除  $X_7$ 、 $X_8$  对应的也引起较多因子对  $R^2$  的贡献率发生较大变化,其中去除  $X_7$  引起  $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_8$  对  $R^2$  的贡献率发生较大变化,去除  $X_8$  引起  $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$  5 个因子对  $R^2$  的贡献率均发生较大变化。因此,通过因子敏感性分析后可以看出,增减因子都会对模型精度造成较大影响,为保证模型的准确性和可靠性,将 8 个因子均作为多元回归方程的自变量进行分析。

表 6 分别减少每个因子对油菜始花期的直接间接效应影响分析  
Table 6 Impact analysis of removing each factor on the direct and indirect effects of the BDF of oilseed rape

去除因子	$X_1$		$X_2$		$X_3$		$X_4$		$X_5$		$X_6$		$X_7$		$X_8$	
	$r_{f_1} = -0.530$		$r_{f_2} = 0.569$		$r_{f_3} = -0.712$		$r_{f_4} = -0.740$		$r_{f_5} = -0.540$		$r_{f_6} = 0.359$		$r_{f_7} = 0.690$		$r_{f_8} = -0.615$	
	直接	总间接	直接	总间接	直接	总间接	直接	总间接	直接	总间接	直接	总间接	直接	总间接	直接	总间接
不去除	-0.242	-0.288	0.232	0.337	0.256	-0.967	-0.665	-0.075	-0.063	-0.477	0.181	0.179	0.676	0.014	0.733	-1.348
去 $X_1$			0.303	0.266	<b>0.380</b>	<b>-1.092</b>	-0.623	-0.117	-0.122	-0.418	0.182	0.178	<b>0.767</b>	<b>-0.077</b>	<b>0.615</b>	<b>-1.230</b>
去 $X_2$	-0.292	-0.238			0.271	-0.983	<b>-1.042</b>	<b>0.302</b>	<b>0.135</b>	<b>-0.675</b>	0.130	0.229	<b>0.502</b>	<b>0.188</b>	0.642	-1.258
去 $X_3$	-0.245	<b>-0.530</b>	0.233	<b>0.569</b>			<b>-0.384</b>	<b>-0.740</b>	-0.119	-0.54	0.145	<b>0.359</b>	0.727	<b>0.690</b>	0.782	<b>-0.615</b>
去 $X_4$	-0.240	<b>-0.530</b>	0.257	<b>0.569</b>	<b>-0.249</b>	<b>-0.712</b>			<b>-0.229</b>	<b>-0.540</b>	0.109	<b>0.359</b>	<b>0.828</b>	<b>0.690</b>	<b>0.821</b>	<b>-0.615</b>
去 $X_5$	-0.245	-0.285	0.220	0.349	0.351	-1.063	<b>-0.821</b>	<b>0.081</b>			0.179	0.180	0.632	0.058	0.697	-1.312
去 $X_6$	-0.242	-0.288	0.219	0.350	<b>0.012</b>	<b>-0.724</b>	<b>-0.391</b>	<b>-0.349</b>	-0.057	-0.483			0.695	-0.005	<b>0.592</b>	<b>-1.208</b>
去 $X_7$	-0.267	-0.263	0.164	0.405	<b>0.804</b>	<b>-1.516</b>	<b>-1.569</b>	<b>0.828</b>	<b>0.218</b>	<b>-0.758</b>	0.211	0.149			<b>0.206</b>	<b>-0.821</b>
去 $X_8$	-0.216	-0.314	0.203	0.366	<b>0.682</b>	<b>-1.394</b>	<b>-1.093</b>	<b>0.353</b>	<b>0.124</b>	<b>-0.664</b>	<b>0.003</b>	<b>0.357</b>	<b>0.248</b>	<b>0.442</b>		

注:表中加粗字体表示去除某因子后引起其他因子直接或总间接作用发生较大变化,下同。

Note: The bold font in the table indicates that the direct or total indirect effects of other factors change greatly after removing some factor, the same as below.

表 7 分别减少每个因子对通径分析中各因子对  $R^2$  的总贡献率影响分析  
Table 7 Impact analysis of removing each factor on the TCR to  $R^2$  of the regression prediction model of other factors

去除因子	因子对 $R^2$ 的总贡献率							
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
不去除	0.128	0.132	-0.183	0.493	0.034	0.065	0.466	-0.451
去 $X_1$		0.172	<b>-0.271</b>	0.461	0.066	0.065	<b>0.529</b>	<b>-0.378</b>
去 $X_2$	0.155		-0.193	<b>0.771</b>	<b>-0.073</b>	0.047	<b>0.346</b>	-0.395
去 $X_3$	0.130	0.132		<b>0.284</b>	0.064	0.052	0.502	-0.481
去 $X_4$	0.127	0.146	<b>0.178</b>		<b>0.124</b>	0.039	<b>0.571</b>	-0.505
去 $X_5$	0.130	0.125	-0.250	<b>0.608</b>		0.064	0.436	-0.429
去 $X_6$	0.128	0.125	<b>-0.009</b>	<b>0.289</b>	0.031		0.480	<b>-0.364</b>
去 $X_7$	0.141	0.093	<b>-0.572</b>	<b>1.161</b>	<b>-0.118</b>	0.076		<b>-0.127</b>
去 $X_8$	0.114	0.116	<b>0.486</b>	<b>0.809</b>	<b>-0.067</b>	<b>0.001</b>	<b>0.171</b>	

### 2.5 油菜始花期预报方程的建立及效果检验

基于  $X_1 \sim X_8$ , 采用最小二乘法开展油菜始花期( $f$ )的多元回归分析, 得到预报模型的方程:

$$f = -0.2092X_1 + 0.1080X_2 + 0.0312X_3 - 0.1128X_4 - 0.0288X_5 + 0.2541X_6 + 0.7995X_7 + 3.6076X_8 + 119.3803$$

对模型精度进行检验发现, 油菜始花期预报回归方程的多元决定系数  $R^2$  为 0.6848, 说明这 8 个因子可解释油菜始花期变化的 68.48%。经  $F$  检验,  $F=0.0004 < 0.01$ , 达到极显著水平, 说明这 8 个主要热量因子对油菜始花期( $f$ )的回归显著, 可基于它们开展油菜始花期的预报。为进一步验证该模型的预测准确性, 利用模型对邻近区域的金坛、昆山站历年的油菜始花期进行模拟预报。

采用百分位数法对模型预测准确度进行分析。从图 1 和表 8 可以看出, 所构建的模型对金坛的预测准确度在 98%~106%, 而昆山在 99%~107%, 说明该模型能够较好地预测金坛、昆山两地的油菜始花期; 同时, 对金坛、昆山两个区域的油菜始花期观测值和预测值进行配对  $t$  检验, 从表 8 可以看出, 金坛双尾显著性为  $0.132 > 0.05$ , 说明观测

值与预测值之间没有显著性差异, 基于高淳区域所构建的油菜始花期回归预报模型可以较好地预测金坛地区的油菜始花期; 而昆山的  $t$  检验结果为 0.000, 说明观测值和预测值存在显著差异。综合地理区位分析可得到, 金坛与高淳的直线距离、纬度差分别为昆山与高淳的 39.93% 和 574.7%, 由于在一定的区域范围内存在相对一致的局部小气候, 因此, 本文建立的模型具有区域适用性, 能够较好地模拟以高淳为中心, 周边 100 km 左右半径的平原地带的油菜始花期, 而超过一定范围, 就应当对参数进行调整。

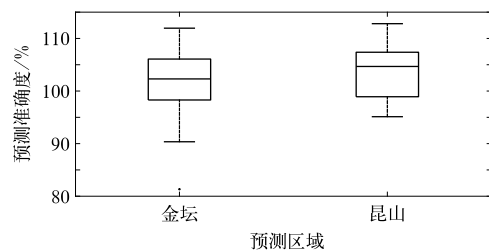


图 1 模型预测油菜始花期准确度分析  
Fig. 1 Predictive accuracy analysis of the regression prediction model of the BDF of oilseed rape

表 8 油菜始花期观测值和预测值的配对  $t$  检验分析

Table 8 Pair  $t$  test analysis on observed value and predicted value to the BDF of oilseed rape

区域	与高淳空间 直线距离/km	与高淳纬度差/(°)	百分位数区间			$t$ 检验 双尾显著性
			第 75 百分位	第 50 百分位	第 25 百分位	
金坛	113	0.3833	106%	102%	0.98%	0.132
昆山	283	0.0667	107%	105%	0.99%	0.000

### 3 结论与讨论

气候变化背景下江苏省油菜始花期呈提前趋势, 这一研究结果与 Badeeck et al(2004) 和 Zheng et al(2006) 研究得出的中国春季物候呈提前趋势的观点一致。这可能是由于在气候变化背景下, 江苏地区冬前温度偏高(黄毓华等, 2000), 越冬期推迟, 翌年春季回温时间逐渐提前, 且温度回升迅速, 使油菜冬季和初春的生长量增加, 油菜开花前营养积累的时间缩短, 则开花也相应提前。

由于品种特性差异, 不同植物的生长发育对气象条件的要求不同, 加之不同植物对气候变化的适应程度、能力各异, 造成不同植物对同一气象要素变

化的响应不同(Wang et al, 2015)。因此, 本文在研究油菜始花期的影响因子时, 结合了油菜自身的生理特性, 挑选了与油菜始花期可能相关的因子参与分析, 避免了统计模型对植物的生理生态过程较少考虑的情况。参与统计的 5 个油菜农业气象观测站历年油菜均在适宜播种期内播栽, 在此前提下统计播期与始花期的相关性发现, 播期早晚对油菜开花时间早晚影响不大。气象因子的光照和降水与油菜始花期相关性也不大, 这可能是由于江苏省油菜种植品种多为冬性或半冬性, 为弱感光型品种, 开花前光照需求较强感光型油菜低, 江苏省常年该时段的日照时数均能满足开花需求; 同时, 该地区春季降水量充足, 可满足现蕾前后到开花前油菜不断增大的水分需求。因此, 就江苏地区而言, 光照和降水不是



制约油菜开花早晚的因子。这与一些学者在其他作物花期上的研究结果一致(张学霞等,2005;覃文更等,2012;史纪安等,2009)。

环境温度是开花时间早晚的主要影响因素(Samach and Wigge, 2005; Balasubramanian et al, 2006),且开花前 2~3 个月的气温对植物始花日期影响最大(Ahas et al, 2000; 徐雨晴等, 2005; 祁如英, 2006; 祁如英和王启兰, 2007)。本文研究结果也显示热量才是江苏地区油菜开花早晚的主要限制因素,且现蕾至开花前的各热量因子对开花时间影响较突出,上年日平均气温稳定通过 0℃ 终日、当年日平均气温稳定通过 5℃ 初日、快速生长至开花前(2 月上旬至 3 月上旬)时段内分别大于 0、5 和 10℃ 的有效积温,最低气温分别小于 0 和 5℃ 的日数,平均最低气温等 8 个因子与油菜始花期相关性均达极显著水平。由于油菜始花期与 8 个主要热量因子的简单相关系数仅表达了某一因子在其余因子都发生变化时其与油菜始花期的关联度,无法准确表达因子间的详细关系,而通径分析作为一种专业因子分析方法,可较准确反映各因子对油菜始花期的直接、间接影响。研究结果表明,2 月上旬至 3 月上旬平均最低气温( $X_8$ )、2 月上旬至 3 月上旬日最低气温小于 5℃ 日数( $X_7$ )、2 月上旬至 3 月上旬大于 5℃ 有效积温( $X_4$ )对油菜始花期的直接影响位列 8 个因子的前三位,且这 3 个因子两两共同对油菜始花期的相对决定程度也排在各因子对回归方程  $R^2$  总贡献率的前三位,加上三者两两之间高相关,易同向或反向达到高值。其余 5 个因子直接效应普遍小于间接效应,且它们主要通过  $X_4$ 、 $X_7$ 、 $X_8$  对油菜始花期产生影响,而  $X_4$ 、 $X_7$ 、 $X_8$  也通过这 5 个因子产生一定影响。另外,采用分别减少某一因子分析其对因变量的直接、间接效应的影响以进行因子敏感性分析也得到,去掉任何一个因子,都会引起某些因子对油菜始花期的直接、间接作用发生变化,并最终影响模型精度,降低模型的准确性和可靠性。因此,在预报油菜始花期时,需要同时关注这 8 个热量因子,而基于这 8 个主要热量因子构建的回归模型也确实解释了 68.48% 的油菜始花期变化(以高淳为例),且模型具有较好的区域适用性,可较好地模拟以高淳为中心,周边 100 km 左右半径的平原地带的油菜始花期,为该地开展油菜始花期预报服务提供依据。同时,仍有 31.52% 始花期的变化未得到解释,从通径分析中误差项对油菜始花期的相对决定系数也可

看出,虽然其位列所有决定系数的第九位,但它的直接效应达 0.5614,这说明一方面可能是由于油菜始花期判断具有主观性,导致观测存在误差,另一方面,可能仍有对油菜始花期影响较大的因子未被考虑到,如江苏地区春季涝渍害频发(吴洪颜等,2017),对油菜生长产生较大影响,另外,农田的土壤、农业管理措施等其他重要因素也可能影响油菜的开花。

本文确定了油菜始花期出现时间的主要限制影响因子,并在此基础上,构建了油菜始花期回归预报模型,尝试开展油菜开花期预报,可为农业生产者和农业管理决策部门有效地安排油菜花期各项农田肥水管理及病虫害防控管措施提供科学依据,同时,也对油菜花海旅游部门提前安排各项工作及公众合理安排赏花出行具有非常重要的决策意义。另外,本文仅就开花开始时间做了研究,对于花期物候来说,开花持续时间也占有重要地位。因此,将来在进一步探究油菜花期物候变化机制时,需综合考虑开花持续时间等影响因素。

## 参考文献

- 车少静,赵士林,智利辉,2004. 迎春始花期预报方法的研究[J]. 中国农业气象,25(3):70-73. Che S J, Zhao S L, Zhi L H, 2004. Forecast of beginning of flowering period of winter jasmine (*Jasminum nudiflorum* L.) [J]. *Agric Meteor*, 25(3):70-73 (in Chinese).
- 黄吉祥,熊化鑫,潘兵,等,2016. 油菜开花期 QTL 定位及与粒重的遗传关联性[J]. 中国农业科学,49(16):3073-3083. Huang J X, Xiong H X, Pan B, et al, 2016. Mapping QTL of flowering time and their genetic relationships with seed weight in *Brassica napus* [J]. *Sci Agric Sin*, 49(16):3073-3083 (in Chinese).
- 黄毓华,高苹,徐萌,等,2000. 气候变暖对江苏省冬麦苗期的影响及对策的研究[J]. 气象,26(9):43-46. Huang Y H, Gao P, Xu M, et al, 2000. Study on the influence of climate warming on winter wheat seedling and countermeasures in Jiangsu Province [J]. *Meteor Mon*, 26(9):43-46 (in Chinese).
- 李美荣,2008. 陕西省果区气候变化及苹果花期冻害风险分析与区划[D]. 兰州:兰州大学. Li M R, 2008. Climatic change and apple risk analysis and regionalization of the freeze injury in florescence of Shaanxi fruit region [D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese).
- 柳海东,2015. 春性甘蓝型油菜遗传连锁图谱构建及开花时间的 QTL 定位分析[D]. 西宁:青海大学. Liu H D, 2015. Construction of genetic linkage map and identification of quantitative trait loci (QTL) for days to flowering in spring rapeseed (*Brassica napus* L.) [D]. Xining: Qinghai University (in Chinese).
- 罗睿,郭建军,2010. 植物开花时间:自然变异与遗传分化[J]. 植物学报,45(1):109-118. Luo R, Guo J J, 2010. Plant flowering time:

- natural variation in the field and its role in determining genetic differentiation[J]. *Chin Bull Bot*, 45(1):109-118(in Chinese).
- 祁如英, 2006. 木本植物物候变化及其对气候变化的响应[J]. *青海气象*, (2): 27-31. Qi R Y, 2006. Phenological changes of woody plant and its response to climate change[J]. *J Qinghai Meteor*, (2): 27-31(in Chinese).
- 祁如英, 王启兰, 2007. 自然物候观测中存在的问题及解决方法[J]. *气象科技*, 35(2): 249-251. Qi R Y, Wang Q L, 2007. Common errors in observation of natural phenology and solutions[J]. *Meteor Sci Technol*, 35(2): 249-251(in Chinese).
- 覃文更, 覃国兵, 覃文渊, 等, 2012. 单性木兰开花物候与气象因子的相关性分析[J]. *西部林业科学*, 41(5): 100-103. Qin W G, Qin G B, Qin W Y, et al, 2012. Correlation analysis of flowering phenology of *Kmeria septentrionalis* and meteorological factors[J]. *J West China Forest Sci*, 41(5): 100-103(in Chinese).
- 史纪安, 刘玉华, 韩清芳, 等, 2009. 紫花苜蓿物候期与热量条件的关系[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 37(6): 39-46. Shi J A, Liu Y H, Han Q F, et al, 2009. Relationship between phenological phase and thermal conditions for alfalfa[J]. *J Northwest A&F Univ (Nat Sci Ed)*, 37(6): 39-46(in Chinese).
- 史卫东, 2006. 油菜开花时间变异分析和拟南芥晚开花突变体鉴定与基因克隆[D]. 北京: 中国农业科学院. Shi W D, 2006. Analysis of oilseed rape flowering time variation and cloning of *arabidopsis* late flowering time gene [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences(in Chinese).
- 汪雷, 刘瑶, 丁一娟, 等, 2015. 油菜菌核病研究进展[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 43(10): 85-93. Wang L, Liu Y, Ding Y J, et al, 2015. Advance in *Sclerotinia* stem rot of rapeseed[J]. *J Northwest A&F Univ (Nat Sci Ed)*, 43(10): 85-93(in Chinese).
- 吴洪颜, 高苹, 谢志清, 等, 2017. 基于春季阴雨过程的冬小麦涝渍指数模型构建与应用[J]. *气象*, 43(3): 373-377. Wu H Y, Gao P, Xie Z Q, et al, 2017. Construction and application of waterlogging index model of winter wheat based on spring rainy weather [J]. *Meteor Mon*, 43(3): 373-377(in Chinese).
- 吴利红, 娄伟平, 柳苗, 等, 2011. 油菜花期降水适宜度变化趋势及风险评估[J]. *中国农业科学*, 44(3): 620-626. Wu L H, Lou W P, Liu M, et al, 2011. Changes of precipitation suitability and assessment of yield loss risk of cole at flowering period[J]. *Sci Agric Sin*, 44(3): 620-626(in Chinese).
- 吴荣军, 郑有飞, 赵国强, 等, 2009. 郑州主要植物春季物候变化及其对气温变化的响应[J]. *生态学杂志*, 28(6): 1049-1054. Wu R J, Zheng Y F, Zhao G Q, et al, 2009. Spring phenophase changes of dominant plants in Zhengzhou and their responses to air temperature change[J]. *Chin J Ecol*, 28(6): 1049-1054(in Chinese).
- 徐雨晴, 陆佩玲, 于强, 2005. 近50年北京树木物候对气候变化的响应[J]. *地理研究*, 24(3): 412-420. Xu Y Q, Lu P L, Yu Q, 2005. Response of tree phenology to climate change for recent 50 years in Beijing[J]. *Geogr Res*, 24(3): 412-420(in Chinese).
- 杨文钰, 屠乃美, 2003. 作物栽培学各论[M]. 北京: 中国农业出版社: 197-219. Yang W Y, Tu N M, 2003. Individual Introduction to Crop Production[M]. Beijing: China Agricultural Press: 197-219(in Chinese).
- 杨永龙, 王润元, 刘明春, 等, 2012. 高海拔山区油菜生育期对积温的响应及其在区划中的应用[J]. *江苏农业科学*, 40(5): 55-58. Yang Y L, Wang R Y, Liu M C, et al, 2012. The response of oilseed rape growth period to cumulative temperature and its application to division in high altitude mountains[J]. *Jiangsu Agric Sci*, 40(5): 55-58(in Chinese).
- 翟盘茂, 廖圳, 陈阳, 等, 2017. 气候变暖背景下降水持续性性与相态变化的研究综述[J]. *气象学报*, 75(4): 527-538. Zhai P M, Liao Z, Chen Y, et al, 2017. A review on changes in precipitation persistence and phase under the background of global warming[J]. *Acta Meteor Sin*, 75(4): 527-538(in Chinese).
- 张宝成, 白艳芬, 2015. 花期物候对气候变化的响应进展[J]. *北方园艺*, (22): 190-194. Zhang B C, Bai Y F, 2015. Flowering phenology response to climate change[J]. *Northern Hortic*, (22): 190-194(in Chinese).
- 张佩, 吴田, 姚薇, 等, 2015. 江苏省油菜全生育期气候特征的变化分析[J]. *江苏农业科学*, 43(9): 118-121. Zhang P, Wu T, Yao W, et al, 2015. The analysis of climate characteristics change over the whole growth period in *Brassica napus* in Jiangsu[J]. *Jiangsu Agric Sci*, 43(9): 118-121(in Chinese).
- 张树杰, 王汉中, 2012. 我国油菜生产应对气候变化的对策和措施分析[J]. *中国油料作物学报*, 34(1): 114-122. Zhang S J, Wang H Z, 2012. Policies and strategies analyses of rapeseed production response to climate change in China[J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 34(1): 114-122(in Chinese).
- 张学霞, 葛全胜, 郑景云, 等, 2005. 近150年北京春季物候对气候变化的响应[J]. *中国农业气象*, 26(4): 263-267. Zhang X X, Ge Q S, Zheng J Y, et al, 2005. Responses of spring phenology to climate changes in Beijing in last 150 years[J]. *Chin J Agrometeor*, 26(4): 263-267(in Chinese).
- 张增信, 王鑫鑫, 杨艳蓉, 等, 2014. 南京地区8种常见观赏树木花期可预报研究[J]. *生态科学*, 33(4): 642-648. Zhang Z X, Wang Y X, Yang Y R, et al, 2014. Changes and prediction of florescence of ligneous plants in Nanjing[J]. *Ecol Sci*, 33(4): 642-648(in Chinese).
- Ahas R, Jaagus J, Aasa A, 2000. The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature[J]. *Int J Biometeor*, 44(4): 159-166.
- Badeck F W, Bondeau A, Böttcher K, et al, 2004. Responses of spring phenology to climate change[J]. *New Phytol*, 162(2): 295-309.
- Balasubramanian S, Sureshkumar S, Lempe J, et al, 2006. Potent induction of *Arabidopsis thaliana* flowering by elevated growth temperature[J]. *PLoS Genet*, 2(7): e106.
- Chuine I, 2010. Why does phenology drive species distribution? [J]. *Philos Trans R Soc B; Biol Sci*, 365(1555): 3149-3160.
- Cleland E E, Chuine I, Menzel A, et al, 2007. Shifting plant phenology in response to global change[J]. *Trends Ecol Evol*, 22(7): 357-365.
- Elzinga J A, Atlan A, Biere A, et al, 2007. Time after time: flowering

- phenology and biotic interactions[J]. *Trends Ecol Evol*, 22(8): 432-439.
- French R J, Schultz J E, 1982. The phenology of eight cereal, grain legume, and oilseed crops in South Australia[J]. *Aust J Exp Agric*, 22(115): 67-75.
- Jentsch A, Kreyling J, Boettcher-Treschkow J, et al, 2009. Beyond gradual warming, extreme weather events alter flower phenology of European grassland and heath species[J]. *Global Change Biol*, 15(4): 837-849.
- Kalbarczyk R, 2009. Air temperature changes and phenological phases of field cucumber (*Cucumis sativus* L.) in Poland, 1966—2005[J]. *Hort Sci (Prague)*, 36(2): 75-83.
- Ludwig F, Asseng S, 2010. Potential benefits of early vigor and changes in phenology in wheat to adapt to warmer and drier climates [J]. *Agric Syst*, 103(3): 127-136.
- Samach A, Wigge P A, 2005. Ambient temperature perception in plants[J]. *Curr Opin Plant Biol*, 8(5): 483-486.
- Sherry R A, Zhou X H, Gu S L, et al, 2007. Divergence of reproductive phenology under climate warming[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 104(1): 198-202.
- Tao F L, Yokozawa M, Xu Y L, et al, 2006. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981—2000[J]. *Agric Forest Meteor*, 138(1/2/3/4): 82-92.
- Walther G R, Post E, Convey P, et al, 2002. Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature*, 416(6879): 389-395.
- Wang H L, Gan Y T, Wang R Y, et al, 2008. Phenological trends in winter wheat and spring cotton in response to climate changes in northwest China [J]. *Agric Forest Meteor*, 2008, 148(8/9): 1242-1251.
- Wang H J, Ge Q S, Dai J H, et al, 2015. Geographical pattern in first bloom variability and its relation to temperature sensitivity in the USA and China[J]. *Int J Biometeor*, 59(8): 961-969.
- Zhang S J, Li L, Li G M, et al, 2011. Influences of 5-ALA application on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) growth before winter[J]. *Agric Sci Technol*, 12(3): 324-329.
- Zheng J Y, Ge Q S, Hao Z X, et al, 2006. Spring phenophases in recent decades over eastern China and its possible link to climate changes[J]. *Climatic Change*, 77(3/4): 449-462.
- Zohner C M, Renner S S, 2014. Common garden comparison of the leaf-out phenology of woody species from different native climates, combined with herbarium records, forecasts long-term change[J]. *Ecol Lett*, 17(8): 1016-1025.