

张志薇,高苹,王宏斌,等,2019. 油菜花最佳观赏期变化及其对温度因子的响应[J]. 气象,45(5):667-675. Zhang Z W, Gao P, Wang H B, et al, 2019. Impact of temperature factors on full-bloom stage of rape petal[J]. Meteor Mon, 45(5):667-675 (in Chinese).

油菜花最佳观赏期变化及其对温度因子的响应^{*}

张志薇^{1,2} 高 苹² 王宏斌^{1,3} 艾文文² 孙家清² 鲍 婧² 徐 敏²

1 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210009

2 江苏省气象服务中心, 南京 210008

3 江苏省气象科学研究所, 南京 210009

提 要: 气温是各种气候因子中影响植物花期迟早最重要的因素之一。以高淳油菜花为研究对象,选取近 30 年(1986—2016 年)物候观测资料,分析了盛花期的变化特征和盛花期早晚年温度因子的特征;采用通径分析法,研究分析了三个表征温度的指标(平均气温 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的日数、积温和强冷空气日数)与油菜花盛花期关系,结果为预测高淳油菜花的最佳观赏期、做好相关旅游气象服务提供了理论依据。结果表明:高淳油菜花盛花期在 2001 年以前波动不大,但在 2001 年后,随年代际呈提早趋势;盛花期迟早年类型不同, T_a 稳定在 5°C 的日期也有差别,具体为盛花期偏早年 < 正常偏早年和正常偏晚年 < 正常年 < 偏晚年;盛花期偏晚年与 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的日数和积温关系也很显著,从冬至日开始,若 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的日数超过了 53 d 或者 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的积温超过 $137^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,则翌年油菜花盛花日期有可能出现在 4 月 4 日之后;若达到强冷空气级别的日数越多,则翌年高淳油菜花盛花期会有所推后。在三个表征温度的指标中,对油菜花盛花期影响最大的是 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温。

关键词: 油菜花,盛花期,冷空气,通径分析

中图分类号: P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.008

Impact of Temperature Factors on Full-Bloom Stage of Rape Petal

ZHANG Zhiwei^{1,2} GAO Ping² WANG Hongbin^{1,3} AI Wenwen²
SUN Jiaqing² BAO Jing² XU Min²

1 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210009

2 Jiangsu Meteorological Service Centre, Nanjing 210008

3 Jiangsu Institute of Meteorological Science, Nanjing 210009

Abstract: Temperature is one of most important climatic factors in the plant flowering time. Using phenology observed data of rape petal in Gaochun from 1986 to 2016, this paper analyzes the characteristics of full-bloom stage and temperature factors in different years. Path analysis method is used to analyze the effect of three temperature factors on full-bloom stage of rape petal. The three factors are days of mean air temperature lower than 5°C , accumulated temperature of mean air temperature lower than 5°C , and days with strong cold air. The results could provide theoretical foundation for the predicting of optimum viewing period and tourism meteorological services of rape petal in Gaochun. Finally, the results show that there is no fluctuation of full-bloom stage before 2001. However, along with the decadal variation, it shows an early trend obviously. The type of full-bloom stage changes with the average temperature stabilized at 5°C . Specifically, the early years of full-bloom stage are less than normal early years and normal

^{*} 江苏省自然科学基金项目(BK20161073)和江苏省气象局科研基金项目(KM201708)共同资助

2018 年 6 月 13 日收稿; 2019 年 3 月 1 日收修定稿

第一作者:张志薇,主要从事应用气象领域科研、业务和服务工作. Email: zhangzhiw09@163.com

通信作者:高苹,主要从事应用气象领域科研、业务和服务工作. Email: gaoping5268@126.com

late years, less than normal years, and less than later years. There is a significant correlation between full-bloom stage in late years and days of mean air temperature lower than 5°C ($T_a < 5^{\circ}\text{C}$). Beginning from the winter solstice, the full-bloom stage of rape petal next year would be later than April 4 if the $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ days are more than 53 d, or accumulated temperature of mean air temperature lower than 5°C ($T_a < 5^{\circ}\text{C}$) is more than $137^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$. Then, rape full-bloom stage next year would be pushed back with the more days reaching level of strong cold air. With three indice of low temperature, the largest factor impact on rape petal full-bloom stage is the accumulated temperature of mean air temperature lower than 5°C ($T_a < 5^{\circ}\text{C}$).

Key words: rape petal, full-bloom stage, cold air, path analysis

引 言

高淳位于南京市南端,在每年3—4月高淳都会举办油菜花节,当地称其为“金花节”。据高淳区政府官网统计,2017年收入达3.86亿元,增幅22.2%,人数达218.8万人次,增幅20.9%。至2018年,高淳金花旅游节已成功举办了十届,是南京乡村旅游的代表品牌,也是当地重要的特色农业旅游项目。分析影响油菜花盛花期迟早的主要气象因子,提前预测油菜花盛花期,即最佳观赏期,可为公众最大限度地踏青赏花和政府招商引资提供科学的指导信息,也可有效推动当地生态旅游发展。

气象条件是影响物候出现迟早的因素最重要的因素之一,其中温度是环境因素中最重要的条件,它与植物的生长状况、发育速度,甚至与植物的病虫害发生、发展有直接的联系(Snyder et al, 2001; 毛明策等, 2005; 王利琳等, 2002; 范雨娴等, 2018)。有研究表明,植物对气温反应在春季更敏感(吴瑞芬等, 2009)。张福春(1995)指出春季气温的波动是影响北京地区树木开花最主要的因子。随着春季温度因子的变化,主要表现为升温,植物开花日期有不同程度的提前(Sparks et al, 2000; Kramer et al, 2000)。陈效逖和张福春(2001)研究了近50年北京春季4种草本植物花期与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的初日、终日、积温等各温度指标之间的关系,认为春季的植物物候与当年春季气温相关性较高,同时与上一年的冬季气温,尤其是与 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的初日和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的初日等相关也较明显。作为特色农业旅游的重要的一部分,油菜花观赏时间备受各界关注,气温对油菜花期长短、始花期的影响尤为重要(汪如良等, 2015; 叶海龙和吴海镇, 2013)。一般来说,当全田半数以上的植株,三分之二的分枝花开放为油菜开花盛期(国家气象局, 1993),此时便进入油菜花的最佳观赏期,盛花期随着气象环境因子的变化而发生变化。

大多数研究都是关于作物物候期与高于界限温度($\geq 0^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$)指标的关系,甚至在很多花期预报的研究中,都以与这些界限温度的积温为因子建立花期预报模型(郭睿, 2016; 刘艳等, 2008; 张惠霞, 2013)。但是少有关于低于界限温度的指标对物候的影响研究。油菜越冬阶段大约是从冬至(12月下旬)至翌年立春(2月上旬),这段时间也是全年气温最低的时期,作为越冬作物的油菜,在发育过程中需要经历春化过程才能抽穗开花,也就是需要适当的低温才能进入下一个生育期;因此,与春化过程相关的低温条件就显得尤为重要(孙超才等, 1996)。一方面,负积温是 $< 0^{\circ}\text{C}$ 的日平均气温总和,能够表征冬季的寒冷程度,负积温越多,冬季越寒冷;另一方面,当气温 $< 5^{\circ}\text{C}$ 时,油菜花会停止生长。因此,当平均气温低于这个界限温度(5°C)的时间持续越长,则对油菜花花期的影响越大。当冷空气带来降温,则作物所处的环境温度更低,影响作物花期迟早(屈振江等, 2016)。

本文选取时间序列较长的高淳油菜花物候期观测资料,分析了近30年高淳油菜花盛花期的变化特征;结合前一年冬至日至盛花期的气象资料,对油菜花盛花期5种类型年的气温特点做了分析,进一步分析了油菜花生长有影响的温度阈值(0°C 和 5°C)指标的特征,冷空气活动的次数和强度与盛花期迟早年的关系;并采用通径分析方法,对表征温度的指标与盛花期关系进行了分析,为预测高淳油菜花的最佳观赏期,做好高淳油菜花节的旅游气象服务提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 物候资料与气象资料

物候资料为根据高淳区气象局的作物生育状况

观测记录年报表整理的 1986—2016 年弱冬性的甘蓝型油菜盛花期。由于每个物候期的开始日期与其前 2~3 个月的气温关系显著(Ahas et al, 2000), 因此所用的气象资料为 1985—2016 年高淳站冬至(12 月 22 日)至翌年 4 月 30 日逐日气象观测资料, 包括日平均气温、日最高气温和日最低气温等要素。

1.2 冷空气等级判定标准

依据高淳站 24、48 和 72 h 日最低气温降幅(ΔT_{24} 、 ΔT_{48} 、 ΔT_{72})和日最低气温(T_{\min})为指标确定该站冬至日至盛花日的冷空气活动次数和强度(中国气象局, 2014)。这是目前在国家级和省级气象部门气候监测业务工作中广泛应用的冷空气等级判断标准, 规定中对冷空气过程的开始、结束、强度等都进行了界定。冷空气过程强度可分为中等强度冷空气、强冷空气和寒潮三个等级(表 1)。其中, ΔT_{48} 、 ΔT_{72} 分别为前 48、72 h 内的日最低气温的最大值与当日的日最低气温之差。寒潮过程中 48、72 h 内的气温必须是连续下降的。

表 1 冷空气强度等级判定指标

Table 1 Grade division of cold air strength

冷空气强度等级	判定指标	
	降温幅度	日最低气温
中等强度冷空气	$8\text{C} > \Delta T_{48} \geq 6\text{C}$	—
强冷空气	$\Delta T_{48} \geq 8\text{C}$	—
寒潮	$\Delta T_{24} \geq 8\text{C}$ 或 $\Delta T_{48} \geq 10\text{C}$ 或 $\Delta T_{72} \geq 12\text{C}$	$\leq 4\text{C}$

1.3 通径分析法

在多变量的研究中, 通径分析能有效表示相关变量之间的主要因子, 比相关分析更加全面, 能反映多变量的综合作用效果。通径分析在多元回归的基础上将相关系数分解为直接通径系数和间接通径系数两部分, 直接通径反映了某一变量对因变量的直接作用效果, 间接通径表示某一变量通过其他变量对因变量的间接作用效果, 这种方法在多个相关变量间的关系研究中, 具有精确、直观等特点, 已在农业、环境等领域有成熟应用研究(黄世成等, 2012; 任义方等, 2010)。通径分析基本模型为:

$$\begin{cases} r_{11} p_{1y} + r_{12} p_{2y} + \dots + r_{1k} p_{ky} = r_{1y} \\ r_{21} p_{1y} + r_{22} p_{2y} + \dots + r_{2k} p_{ky} = r_{2y} \\ \vdots \\ r_{k1} p_{1y} + r_{k2} p_{2y} + \dots + r_{kk} p_{ky} = r_{ky} \end{cases} \quad (1)$$

设 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ 为 k 个自变量, 式(1)中, r_{ij} 为变量 x_i 与 x_j 的相关系数, r_{iy} 为自变量 x_i 与因变量 y 的偏相关系数, p_{ky} 为自变量 x_i 与因变量 y 标准化的偏相关系数, 即直接通径系数; $r_{ij} p_{ky}$ 为间接通径系数。

2 高淳油菜花最佳观赏期及迟早年变化

2.1 高淳油菜花最佳观赏期特征

1986—2016 年南京高淳油菜花的盛花期和南京入春日(图 1)表明, 近 30 年高淳油菜花盛花期基本在 3 月下旬至 4 月上旬, 平均盛花期为 3 月 29 日。趋势变化以 2001 年为界分为两部分: 1986—2001 年高淳油菜花盛花期多在 3 月 25 日至 4 月 5 日, 且波动不大, 除 1987、1990、1993 和 1995 年外, 其余年份盛花期都晚于平均盛花期。2001—2016 年, 盛花期明显提早, 大部分年份油菜花盛花期在 4 月 1 日之前, 最早出现在 3 月 18 日(2007 年), 只有 2003、2005 和 2012 年的盛花期在 4 月 1 日之后。

较节气而言, 大部分年份的盛花期处于春分和清明两个节气之间, 但 1986—2001 年, 高淳油菜花盛花期多接近清明节气, 2001—2016 年盛花期则更接近春分节气。

根据气象学定义, 入春日为滑动 5 d 平均气温(T_a)超过 10C 的初日。由图 1 可见, 入春日在 1999 年后有明显提早, 气候倾向率为 $5.8 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$; 1986—2000 年油菜花盛花期多数晚于入春日, 但相差不超 10 d; 2001—2016 年, 入春日本身就提早较多, 大部分年份盛花期晚于入春日 10 d 以上。入春

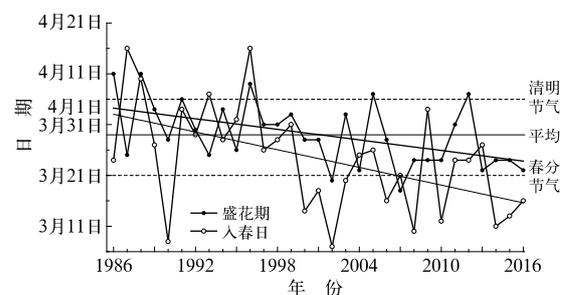


图 1 1986—2016 年高淳油菜花盛花期和入春日时间序列图

Fig. 1 Full-bloom stage days of rape petal and spring days in Gaochun during 1986—2016

时间最早出现在 2002 年(3 月 7 日),偏早于平均入春时间(3 月 24 日)半个月以上,当年盛花期早于春分节气;其次为 1990 年(3 月 8 日),但是当年盛花期并未提早,接近平均盛花期。

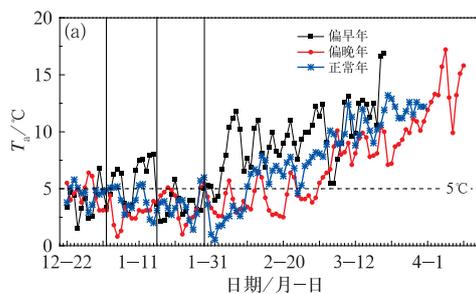
综上所述,以平均盛花期 ± 1 d 为定义油菜花盛花期正常年的标准,认为 1990、1992、2000、2001 和 2006 年为盛花期正常年;以盛花期早于春分节气(3 月 21 日)定义为偏早年,2002 和 2007 年盛花期较平均日期偏早 8 d 以上,认为是偏早年;以盛花期晚于清明节气(4 月 5 日)定义为偏晚年,认为 1986、1988、1996、2005 和 2012 年是盛花期偏晚年,其余 19 年盛花期均在春分节气至(平均日期-1 d),或(平均日期+1 d)至清明节气,分别定义为盛花期正常偏早年和正常偏晚年,详见表 2。

此外,高淳油菜花盛花期还表现出明显的年代际特征(图 2),1986—1996 年油菜花平均盛花日为 4 月 2 日,1997—2006 年平均盛花日在 3 月 29 日,2007—2016 年平均盛花日在 3 月 26 日。可以看出,油菜花盛花日呈年代际提早的变化趋势,气候倾向率为 $3 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

表 2 1986—2016 年高淳油菜花盛花期各类型年列表

Table 2 Full-bloom stage days of rape petal in Gaochun during 1986—2016

类型年	年份
偏早年	2002, 2007
正常偏早年	1987, 1993, 1995, 2004, 2008, 2009, 2010, 2013, 2014, 2015, 2016
正常年	1990, 1992, 2000, 2001, 2006
正常偏晚年	1989, 1991, 1994, 1997, 1998, 1999, 2003, 2011
偏晚年	1986, 1988, 1996, 2005, 2012



2.2 冬至日—盛花期平均气温特征

图 3 所示为油菜花盛花期不同类型年高淳的 T_a 日分布,图 3a 为正常年、偏早年 and 偏晚年的气温变化特征,由图可见,从冬至日至盛花期 T_a 分为四个阶段,第一阶段为上一年 12 月下旬,三个类型年的 T_a 无明显区别;第二阶段为 1 月 2—15 日,在这一阶段, T_a 出现差别,表现为偏早年 $>$ 正常年 $>$ 偏晚年;第三阶段为 1 月 16—29 日,三个类型年的 T_a 无明显区别;第四阶段为 1 月 30 日至盛花期,持续时间较长,为 T_a 。随着日期基本呈偏早年 $>$ 正常年 $>$ 偏晚年的趋势。

图 3b 所示为正常偏早年和正常偏晚年 T_a 日分布,可以看出正常偏早年 and 正常偏晚年 T_a 趋势较一致,均呈先降后升,在 1 月中旬至下旬达到最低值。

T_a 稳定在 5°C 以上的日期也因不同类型年而

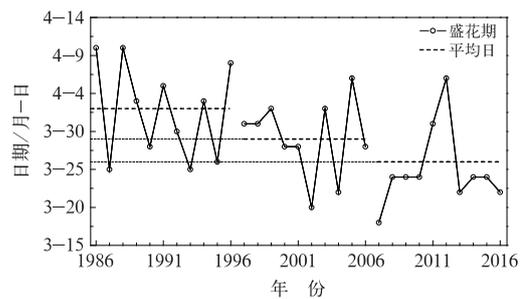


图 2 1986—2016 年高淳油菜花的盛花期年代际变化

Fig. 2 Interdecadal changes of full-bloom stage days of rape petal during 1986—2016

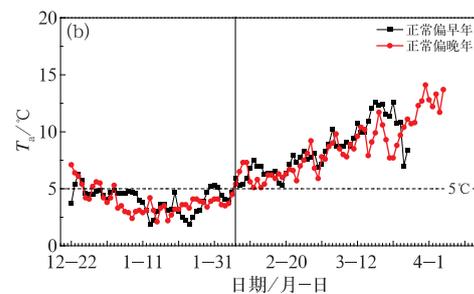


图 3 1986—2016 年高淳油菜花盛花期各类型年 T_a 日分布

(a) 偏早年、偏晚年和正常年, (b) 正常偏早年和正常偏晚年

Fig. 3 Time series of air temperature of full-bloom stage days of rape petal in Gaochun during 1986—2016

(a) early year, late years and normal years, (b) normal early years and normal late years

存在差异。盛花期偏早年最早, T_a 约在 2 月 3 日开始稳定在 5°C 以上。正常年、正常偏晚年和正常偏早年则约在 2 月 6 日(正常偏早年和正常偏晚年)和 2 月 10 日(正常年)。由图 3b 知, 正常偏早年和正常偏晚年虽然稳定到 5°C 的日期一样, 但是正常偏晚年在稳定到 5°C 后至盛花日期间气温波动较大, 因此花期正常偏晚。盛花期偏晚年稳定在 5°C 以上的日期为 3 月 2 日。综上所述, 不同类型年 T_a 稳定在 5°C 以上的日期为盛花期偏早年 < 正常偏早年和正常偏晚年 < 正常年 < 偏晚年。

3 油菜花最佳观赏期与温度指标的关系

3.1 负积温与 $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 的日数和积温

$T_a < 0^{\circ}\text{C}$ 的日数越多, 说明从冬至日至盛花日气温波动越大, 可以做表征天气寒冷程度的指标。从高淳油菜花负积温和 $T_a < 0^{\circ}\text{C}$ 的日数(图 4)结果可以看出, 1986—2016 年, 在偏早年(2002 和 2007 年)冬至日至盛花期间, $T_a < 0^{\circ}\text{C}$ 的日数较少, 2002 年只有 1 d, 当年负积温为 $-1.5^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$; 2007 年负积温为 $0^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。偏晚年(1986、1988、1996、2005 和 2012 年) $T_a < 0^{\circ}\text{C}$ 的日数基本不超过 5 d, 负积温不低於 $-7.6^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$; 盛花期分别与负积温和 $T_a < 0^{\circ}\text{C}$ 日数的相关系数均未通过显著性水平检验。

但是, 盛花日与 $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 的日数和积温关系较为明显。图 5 为 $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 的日数和 $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 的积温与高淳油菜花盛花日散点图, 结果表明 $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 的

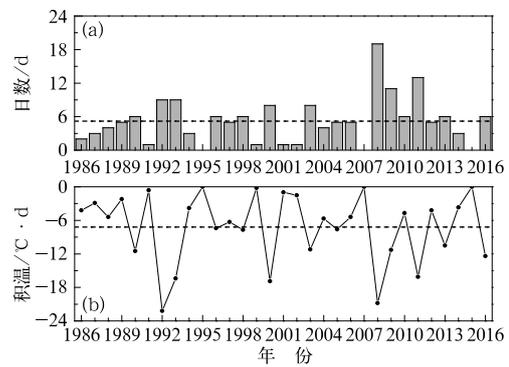


图 4 1986—2016 年高淳油菜花冬至日至盛花期 $T_a < 0^{\circ}\text{C}$ 的日数(a)和积温(b)

Fig. 4 Days (a) and accumulated temperature (b) less than 0°C ($T_a < 0^{\circ}\text{C}$) from winter solstice to full-bloom stage in Gaochun during 1986—2016

日数和积温与高淳油菜花盛花日关系密切。

从图 5a 中可以看出, 从冬至日开始, 随着 $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 的日数增加, 当年油菜花开放的时间出现偏晚的趋势, 两者相关系数达到了 0.609, 通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平检验; 结合图 6, 可以看出 $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 的日数最多的 5 年依次为 2005 年(64 d)、1986 年(55 d)、1996 年(54 d)、1988 年(54 d)和 2012 年(53 d), 即为盛花日偏晚的 5 年, 均超出 $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 的日数平均值(约为 41 d)12 d 以上; 而偏早年(2002 和 2007 年) $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 的日数分别为 28 和 33 d, 由表 3 可知盛花期偏晚年 $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 日数较多, 最小值为 53 d, 盛花日均在 4 月 4 日之后。

$T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 的积温与高淳油菜花盛花日的关系也很密切(图 5b), 油菜花盛花日随着 $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 的积温

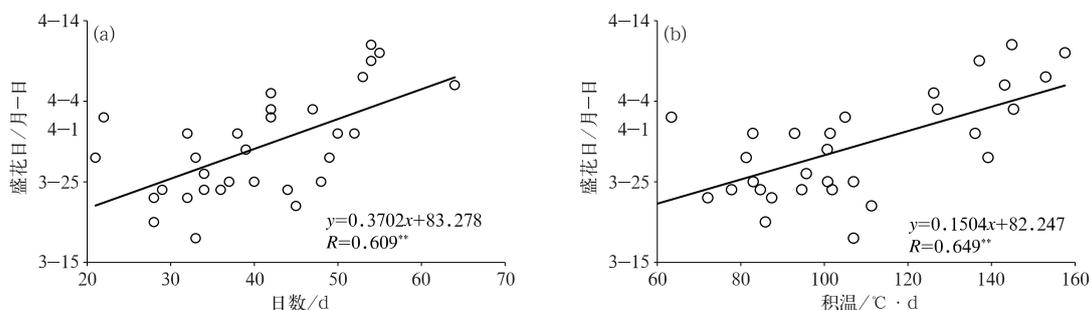


图 5 1986—2016 年高淳油菜花盛花期与 $T_a < 5^{\circ}\text{C}$ 的日数(a)和积温(b)的关系 (** : 通过 $\alpha = 0.01$ 显著性水平检验)

Fig. 5 Relationship between days (a) and accumulated temperature (b) lower than 5°C ($T_a < 5^{\circ}\text{C}$) of full-bloom stage in Gaochun during 1986—2016 (** : passing through the test at $\alpha = 0.01$ significance level)

增加而推迟,两者的相关系数达到 0.649,通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平检验。同样,对于偏晚年来说, $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的积温都在 $137^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 以上(表 3),结合图 6,有两年 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的积温超过了 $150^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,最高

达到 $157.6^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ (1986 年);盛花日正常年和偏早年与 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的积温并无明显关系。可知,当从冬至日开始, $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的积温超过 $137^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,则当年油菜花的盛花日出现较晚。

表 3 1986—2016 年高淳油菜花早晚年冬至日—盛花期日 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的日数和积温统计值

Table 3 Statistical value of days and accumulated temperature lower than 5°C ($T_a < 5^\circ\text{C}$) from winter solstice to full-bloom stage in each year in Gaochun during 1986—2016

年数/a			最小值	最大值	极差	中位数	平均值	标准差	方差
偏早年	2	日数	28 d	33 d	5 d	—	30.5 d	3.54	12.5
		积温	$85.9^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$107^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$21.1^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	—	$96.5^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	14.9	222.6
正常	11	日数	28 d	48 d	20 d	36 d	37 d	6.573	43.2
		积温	$72.1^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$111.3^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$39.2^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$94.6^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$92.4^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	12.42	154.5
正常年	5	日数	21 d	50 d	29 d	39 d	38.4 d	12.03	144.8
		积温	$59.4^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$139.2^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$79.8^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$100.7^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$103.3^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	34.6	1195.7
正常	8	日数	22 d	52 d	30 d	42 d	39.63 d	9.226	85.1
		积温	$63.4^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$145.3^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$81.9^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$103.2^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$105.5^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	26.5	705.4
偏晚年	5	日数	53 d	64 d	11 d	54 d	56 d	4.53	20.5
		积温	$137.1^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$157.6^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$20.5^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$144.9^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	$147.2^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	8.14	66.2

3.2 冷空气活动与盛花期关系

图 7 为 1986—2016 年高淳站各强度等级冷空气分布,1988、1998、1999、2009 和 2013 年冷空气总日数较多,但是只有 1988 年的油菜花盛花日偏晚;1988 年出现中等强度冷空气较多,为 7 d,出现寒潮日数只有 2 d,分别为 3 月 15、16 日,降温幅度分别为 13.5°C 、 15.4°C ,1988 年高淳油菜花盛花日为 4 月 10 日,较常年偏晚。1998 和 1999 年冷空气总日数最多,均为 10 d,由图可见,这两年的冷空气特点相似,均以中等强度冷空气为主,占冷空气总日数的 80% 以上;均出现 1 d 强冷空气,略有差异的是 1998 年出现 1 d 寒潮,而 1999 年并无寒潮日出现,但是 1998 和 1999 年油菜花盛花日分别为 3 月 31 日和 4

月 2 日,与平均盛花日相差在 5 d 以内,属正常略偏晚。两个偏早年冷空气特征却有明显差异,冷空气总日数分别为 3 d(2002 年)和 6 d(2007 年),差异体现在中等强度冷空气,2007 年为 2 d,2002 年为 0 d;寒潮日数相同,均为 2 d。此外,寒潮日数最多的是 1996 和 2010 年,均为 4 d,盛花期较常年偏晚近 10 d。

为进一步探析冷空气活动与油菜花盛花日的关系,统计各强度等级冷空气日数与盛花日的相关性(表 4)。结果表明,盛花日与从前一年冬至日开始计算起的强冷空气日数呈负相关,相关系数为 -0.384 (通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平检验),认为从冬至日开始,如果高淳冷空气最低气温 48 h 降幅超

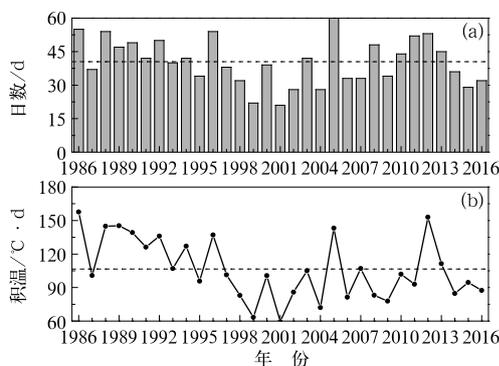


图 6 同图 4, 但为 $T_a < 5^\circ\text{C}$

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for $T_a < 5^\circ\text{C}$

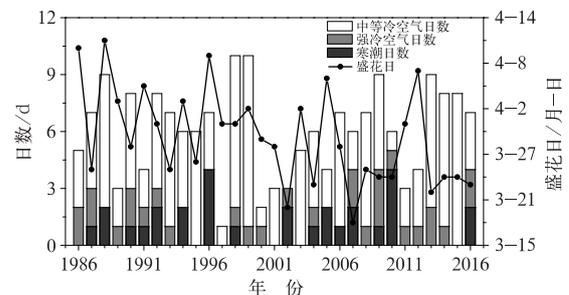


图 7 1986—2016 年高淳各强度等级冷空气日数

Fig. 7 Distribution of cold air in days of each strength grade in Gaochun during 1986—2016

过 8℃次数越多,则翌年油菜花盛花日时间会有所推后;但是盛花日时间与其余等级的冷空气次数并无明显关系,相关系数均未通过显著性水平检验。

表 4 1986—2016 年高淳各强度等级冷空气日数与盛花期相关性
Table 4 Relationship between full-bloom stage date and days of each strength grade in Gaochun during 1986—2016

	寒潮	强冷空气	中等冷空气	冷空气总次数
相关系数	-0.040	-0.384*	-0.037	-0.142
Sig. (2-tailed)	0.830	0.020	0.844	0.447

注: * 表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。

Note: * indicates passing through the test at $\alpha=0.05$ significance level.

3.3 最优方程的建立和显著性检验

综上所述,以强冷空气累计日数、 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的日数(从前一年冬至日算起)、 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的积温为表征温度因子的指标。盛花日与各指标密切程度如表 5

所示,与油菜花盛花期相关程度的大小依次为 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温($r=0.649$,通过 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验)、 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 日数($r=0.609$,通过 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验)、强冷空气日数($r=-0.384$,通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验)。

表 5 1986—2016 年各指标与高淳油菜花盛花日相关系数
Table 5 Correlation coefficient between full-bloom stage date of rape petal and temperature indice in Gaochun during 1986—2016

		盛花日	强冷空气累计日数	$T_a < 5^\circ\text{C}$ 日数	$T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温
强冷空气累计日数	相关系数	-0.384*	1	—	—
	Sig. (2-tailed)	0.033	—	—	—
$T_a < 5^\circ\text{C}$ 日数	相关系数	0.609**	-0.043	1	—
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.819	—	—
$T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温	相关系数	0.649**	-0.026	0.834**	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.889	0.000	—

注: * 和 ** 分别表示通过 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验(2-tailed)。

Note: * and ** indicate passing through the tests at $\alpha=0.05$ and $\alpha=0.01$ significance level, respectively.

因 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 日数与 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温相关性较高, $r=0.834$,通过 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验,如果两个指标同时出现在模型中,放大了低温的效应,因此选择与盛花期相关系数较高的 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温引入模型,利用回归分析,建立盛花期与 2 个指标的最优回归方程:

$$Y = 0.148X_1 - 2.860X_2 + 85.160$$

式中, X_1 为 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温(单位: $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$), X_2 为强冷空气累计日数(单位: d)。回归方程的系数为 $r=0.746$,经 F 检验, $F=17.538$, $P < 0.000$,回归效果显著。

3.4 通径分析

影响油菜花盛花期的温度因子很多,这些因子之间存在协同作用。通径系数是 Y 关于 X_1 、 X_2 的标准的偏回归系数(盖钧镒, 2000),通径系数=自变量的回归系数 \times (自变量的标准差/因变量的标准差)。结合表 6,计算各指标的直接和间接通径系数,结果如表 7 所示,温度指标对油菜花盛花期的直接通径系数大小(绝对值)为: $T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温大于强冷空气累计日数;其中, $T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温对油菜花盛花期的影响最大;在间接通径系数中,强冷空气累计日

表 6 高淳油菜花盛花期三个低温指标特征
Table 6 Three low temperature indice of full-bloom stage date in Gaochun

	最小值	最大值	均值	标准差	方差	偏度	峰度
强冷空气累积日数	0 d	3 d	0.94 d	0.814	0.662	0.519	-0.213
$T_a < 5^\circ\text{C}$ 日数	21 d	64 d	40.55 d	10.433	108.856	0.135	-0.492
$T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温	59.4 $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	157.6 $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	106.64 $^\circ\text{C} \cdot \text{d}$	27.367	748.934	0.299	-0.940

表 7 为高淳油菜花盛花期与各指标的通径系数

Table 7 Path coefficient between full-bloom stage date and temperature index in Gaochun

自变量	相关系数	间接通径		直接通径
		$T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温	强冷空气累计日数	
$T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温	0.649	—	0.009	0.640
强冷空气累计日数	-0.384	-0.021	—	-0.363

数通过 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温对油菜花盛花期造成影响。综上所述,两个低温指标: $T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温和强冷空气累计日数,以 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 积温对油菜花盛花期的影响最大。

4 结论与讨论

(1) 高淳油菜花盛花期一般在 3 月下旬至 4 月上旬,近 30 年平均盛花期为 3 月 29 日。盛花期在 2001 年后发生明显的趋势变化,具体表现为盛花期明显提早,2001 年以前盛花期波动不大,多在 3 月 25 日至 4 月 5 日;2001 年之后,大部分年份在 4 月 1 日之前,最早出现在 3 月 18 日(2007 年),且油菜花盛花期呈提前的趋势,变化率为 $3 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

(2) 虽然多数研究集中在 $T_a > 5^\circ\text{C}$ 的积温,但是 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的日数和 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的积温与盛花期关系也比较明显,相关系数分别为 0.609 和 0.649(均通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验)。从冬至日开始, $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的日数越多或者 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的积温超过 $137^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,则当年油菜花开放的时间越晚;若 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的日数超过了 53 d,则盛花日有可能出现在 4 月 4 日之后。

(3) 冷空气活动的频次和强度对高淳油菜花盛花期有一定的影响。从冬至日开始,如果冷空气过程中最低气温 48 h 降幅超过 8°C 的次数越多,即从冬至日起,降温强度如果达到强冷空气级别的日数越多,则翌年高淳油菜花盛花期会有所推后;但是油菜花盛花期与其他等级的冷空气活动,如寒潮、中等强度冷空气日数的关系并不显著。

(4) 在三个温度指标中,因 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的日数与 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的积温自相关较高,选取相关性较高的 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的积温加入回归模型,通径分析结果表明,影响油菜花盛花期最大的是 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的积温,通过分析间接通径系数,表明强冷空气累计日数通过影响 $T_a < 5^\circ\text{C}$ 的积温,最终对油菜花盛花期造成影响。

虽然温度是影响油菜花花期早晚的重要气象条件,但日照的多寡对油菜花的开花迟早也有重要影

响,体现在现蕾前到初花期的每个阶段,若日照时间长,则利于现蕾和开花;因此,后续研究中将考虑温度和日照对油菜花开花迟早的综合影响。另外,低温促进春化作用与油菜所处的发育阶段有关,因此,在分析冷空气活动频次和强度时,若能细化到油菜所处的生育阶段更能说明问题,后续将通过收集油菜各生育期资料,开展更深入的研究。

参考文献

- 陈效述,张福春,2001. 近 50 年北京春季物候的变化及其对气候变化的响应[J]. 中国农业气象,22(1):1-5. Chen X Q, Zhang F C, 2001. Spring phenological change in Beijing in the last 50 years and its response to the climatic changes[J]. Chin J Agrometeor, 22(1):1-5(in Chinese).
- 范雨娴,霍治国,杨宏毅,等,2018. 湖南省油菜春季涝渍过程灾变判别指标[J]. 应用气象学报,29(2):141-153. Fan Y X, Huo Z G, Yang H Y, et al, 2018. Catastrophe distinction index of oilseed rape vernal waterlogging in Hunan[J]. J Appl Meteor Sci, 29(2):141-153(in Chinese).
- 盖钧镒,2000. 试验统计方法[M]. 北京:中国农业出版社. Ge J Y, 2000. Test Statistical Method[M]. Beijing: China Agricultural Press(in Chinese).
- 郭睿,2016. 杨凌地区桃树花期预测模型研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学. Guo R, 2016. The research on Yangling peach florescence prediction model[D]. Yangling: Northwest A&F University(in Chinese).
- 国家气象局,1993. 农业气象观测规范[M]. 北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 1993. Agrometeorological Observation Specification[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 黄世成,徐春阳,周嘉陵,2012. 城市和森林空气负离子浓度与气象环境关系的通径分析[J]. 气象,38(11):1417-1422. Huang S C, Xu C Y, Zhou J L, 2012. Path analysis on negative air ion concentration and the meteorological environment in urban and forest zones[J]. Meteor Mon, 38(11):1417-1422(in Chinese).
- 刘艳,白玉荣,刘彬贤,2008. 天津市春季花粉高峰始期与积温关系研究[C]//中国颗粒学会第六届学术年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会论文集. 上海:中国颗粒学会. Liu Y, Bai Y R, Liu B X, 2008. The relationship between initial stage of spring pollen peak and accumulated temperature in Tianjin[C]//The 6th Annual Meeting of Chinese Society of Particology; Proceedings of Symposium on Particology Cross-Strait. Shanghai: Chinese Society of Particology(in Chinese).

- 毛明策,刘敏茹,姜创业,等,2005. 苹果初花期与温度的关系研究[J]. 中国农业气象,26(2):123-124,128. Mao M C, Liu M R, Jiang C Y, et al, 2005. A study on relationship between air temperature and early blooming time of malus[J]. Chin J Agrometeorol, 26(2):123-124,128(in Chinese).
- 屈振江,周广胜,魏钦平,2016. 苹果花期冻害气象指标和风险评估[J]. 应用气象学报,27(4):385-395. Qu Z J, Zhou G S, Wei Q P, 2016. Meteorological disaster index and risk assessment of frost injury during apple florescence[J]. J Appl Meteor Sci, 27(4):385-395(in Chinese).
- 任义方,高苹,王春乙,2010. 江苏高温热害对水稻的影响及成因分析[J]. 自然灾害学报,19(5):101-107. Ren Y F, Gao P, Wang C Y, 2010. High temperature damage to paddy rice in Jiangsu Province and its cause analysis[J]. J Nat Dis, 19(5):101-107(in Chinese).
- 孙超才,方光华,赵华,等,1996. 甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)的春化作用及其应用[J]. 上海农业学报,12(2):5-9. Sun C C, Fang G H, Zhao H, et al, 1996. Artificial vernalization in rapeseed(*Brassica napus* L.) and its utilization[J]. Acta Agri Shanghai, 12(2):5-9(in Chinese).
- 王利琳,庞基良,胡江琴,等,2002. 温度对植物成花的影响[J]. 植物学通报,19(2):176-183. Wang L L, Pang J L, Hu J Q, et al, 2002. Effect of temperature on flowering[J]. Chin Bull Botany, 19(2):176-183(in Chinese).
- 汪如良,邓德文,郭瑞鸽,等,2015. 鄱阳湖旅游地区油菜花花期的分析研究[J]. 江西科学,33(5):708-712. Wang R L, Deng D W, Guo R G, et al, 2015. An analysis of rape flower florescence in tourist area of Poyang Lake[J]. Jiangxi Sci, 33(5):708-712(in Chinese).
- 吴瑞芬,霍治国,曹艳芳,等,2009. 内蒙古典型草本植物春季物候变化及其对气候变暖的响应[J]. 生态学杂志,28(8):1470-1475. Wu R F, Huo Z G, Cao Y F, et al, 2009. Phenophase change of typical herbaceous plants in Inner Mongolia in spring and its response to climate warming[J]. Chin J Ecology, 28(8):1470-1475(in Chinese).
- 叶海龙,吴海镇,2013. 气象因子预测油菜盛花期的探讨[J]. 浙江农业科学,1(9):1080-1081. Ye H L, Wu H Z, 2013. Discussion on meteorological factors for predicting the flowering period of rape[J]. Zhejiang Agri Sci, 1(9):1080-1081(in Chinese).
- 张福春,1995. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响[J]. 地理学报,50(5):402-410. Zhang F C, 1995. Effects of global warming on plant phenological events in China. Acta Geographica Sin, 50(5):402-410(in Chinese).
- 张惠霞,2013. 桃树始花期与气象因子的相关分析及预报模型[J]. 安徽农业科学,41(10):4513-4515. Zhang H X, 2013. Correlation analysis and forecasting model of peach tree early flowering season and meteorological factors[J]. J Anhui Agri Sci, 41(10):4513-4515(in Chinese).
- 中国气象局,2014. 冷空气过程监测业务规定(试行)[C]. 北京:中国气象局. China Meteorological Administration. Cold Air Process Monitoring Business Regulations[C]. Beijing: China Meteorological Administration, 2014(in Chinese).
- Ahas R, Jaagus J, Aasa A, 2000. The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature[J]. Int J Biometeorol, 44(4):159-166.
- Kramer K, Leinonen I, Loustau D, 2000. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems; an overview[J]. Int J Biometeorol, 44(2):67-75.
- Snyder R L, Spano D, Duce P, et al, 2001. Temperature data for phenological models[J]. Int J Biometeorol, 45(4):178-183.
- Sparks T H, Jeffrey E P, Jeffrey C E, 2000. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phenological records from the UK[J]. Int J Biometeorol, 44(2):82-87.