

寒冷地区梨品种花期对气候变化的响应及 模型预测

赵滢,张茂君,胡明玥,卢明艳,闫兴凯,武春昊,王强

(吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心)果树研究所,吉林 公主岭 136100)

【摘要】【目的】构建抗寒梨品种花期预报模型,为寒冷地区梨树开花期间晚霜气象灾害预测和科学防御提供理论依据。【方法】以公主岭市 2011—2020 年气象数据和 4 个抗寒梨品种花期物候资料为基础,利用线性回归、相关性分析和偏最小二乘回归等方法,分析了梨花期物候对气候变化的响应趋势,明确了影响梨花期的主效气象因子,构建了花期预报回归模型。【结果】2011—2020 年公主岭地区气候呈暖湿化发展趋势,4 个梨品种的始花期和盛花期也随之提前;但末花期只有‘苹果梨’以 0.3 d/10 a 微弱趋势推迟,其余 3 个梨品种的末花期均呈提前趋势;反之,花期长度则以 1.5~6.7 d/10 a 呈延长趋势。梨花期物候与提前 3 个月(1—3 月)和提前 1 个月(4 月)的逐日平均气温及逐日平均最高气温呈显著负相关,而与降水量和日照时数的相关性不显著;提前 1 个月(4 月)的平均日最高气温是影响该地区梨始花期和盛花期的主导气象因子,说明随着此阶段气温的升高,且高于往年时可能加速花期提前。基于主要气象要素的统计模型预报的梨各花期预测日期与实际日期相符率在 98.2%~99.0% ($P<0.01$)。晚霜发生时间以 3.1 d/10 a 呈波动下降趋势,10 年间晚霜霜冻日平均缩短了 3 d。2021—2022 年统计结果显示,4 个梨品种花朵受冻率在 14.8%~31.4%。【结论】随着梨品种始花期和盛花期的提前,以及晚霜霜冻日的缩短,导致寒冷地区抗寒梨品种花期霜冻的风险增大。

【关键词】 梨;花期;寒冷地区;气候变化响应;花期预测模型

【中图分类号】 S661.2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2027)03-0022-09

Response to climate change and model prediction for flowering phenology of pear cultivars in cold region

Zhao Ying, Zhang Maojun, Hu Mingyue, Lu Mingyan, Yan Xingkai,
Wu Chunhao, Wang Qiang

(Pomology Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences(Northeast Agricultural Research Center of China),
Gongzhuling, Jilin 136100, China)

Abstract: 【Objective】 This study aims to construct a flowering prediction model for cold-resistant pear cultivars, providing a theoretical basis for forecasting and scientifically mitigating late frost damage during flowering in cold regions. 【Method】 Based on meteorological records during 2011—2020 and flowering phenology observations of four cold-resistant pear cultivars in Gongzhuling, linear regression, correlation analysis, and partial least squares regression were adopted to analyze the response of pear flowering phenology to climate change, identify the key meteorological factors affecting flowering, and construct a regression model for flowering predic-

【收稿日期】 2026-01-04 【修回日期】 2026-03-31

【基金项目】 吉林省科技发展计划项目(20250402002ZP)

【作者简介】 赵滢(1981—),女,吉林吉林人,副研究员,博士,硕士生导师,主要从事梨种质资源评价与利用研究。
E-mail: zhaoying8107@163.com

【通信作者】 王强(1975—),男,吉林梨树人,研究员,硕士,硕士生导师,主要从事抗寒梨新品种选育及配套栽培技术研究。
E-mail: wangq7505@163.com

tion. 【Result】 The climate in Gongzhuling presented a warming and wetting trend during 2011—2020. For the four pear cultivars, both initial flowering and full bloom dates advanced accordingly. Only the final flowering date of ‘Pingguoli’ was slightly delayed at a rate of 0.3 d/10 a, whereas those of the other three cultivars advanced. On the contrary, flowering duration increased by 1.5—6.7 d/10 a. Pear flowering phenology was significantly negatively correlated with daily mean temperature and maximum temperature in the preceding three months (January—March) and one month (April), but showed no significant correlation with precipitation or sunshine duration. Moreover, the daily mean maximum temperature one month in advance (April) was identified as the dominant meteorological factor affecting the initial and full flowering dates of pears in this region, indicating that higher temperature during this period, especially when exceeding the historical average, is likely to advance flowering. The statistical models based on key meteorological factors predicted pear flowering dates with an accuracy of 98.2%—99.0% ($P < 0.01$). The occurrence of late frost showed a fluctuating decreasing trend at a rate of 3.1 d/10 a, with the average number of late frost days decreasing by 3 days over the decade. Statistical results during 2021—2022 revealed that flower frost rates of the four pear cultivars ranged from 14.8% to 31.4%. 【Conclusion】 The advancement of initial flowering and full bloom dates of pear cultivars, coupled with the shortening of late frost days, increased the risk of frost damage during flowering to cold-resistant pear cultivars in cold regions.

Key words: pear; flowering phenology; cold regions; response to climate change; flowering prediction model

中国东北地区地域辽阔,自南向北涵盖辽宁、吉林、黑龙江三省,区域内南北气候差异显著,冬季严寒漫长,夏季温热短促,还呈现出典型的“三寒四温”气候特点^[1]。地处该区域的松辽平原中部(吉林省境内),是我国重要的抗寒梨生产基地。据统计,该地区现有梨栽培面积约1.2万 hm^2 ,年产值约2.5亿元,在我国寒地梨生产中占有举足轻重的地位^[2]。但近些年来由于气候变化的明显改变,导致寒冷地区农业气象灾害频发^[3],特别是多年生果树花期遭受晚霜伤害时有发生,损失严重^[4-6]。因此气候变化对寒地梨产业发展带来巨大挑战。

公主岭市因其所处纬度及独特地貌,是研究吉林省松辽平原中部气候变化对抗寒梨物候响应的理想区域^[7]。但目前关于吉林松辽平原中部植物物候变化的影响因素分析,主要以温度、降水等单一气象因子的影响为主,且研究多集中于一年生粮食作物^[8-11]。此外,由于植物对气候变化的响应具有滞后性^[12],仅进行相关性分析会忽略气候因子对物候影响的时间变化^[13-15]。利用偏最小二乘回归分析可以克服预测变量相关导致的多元共线性问题,物候期预测结果较为准确可靠^[16-18]。花期作为果树营养生长期和果实形成期的重要指示物候期^[19-21],直接影响果实产量和品质,甚至树体抗寒性的形成^[6,22-23]。开展花期对气象因子的响应研究,以及花期预测,对于指导当地果树安全生产具有十分重要的意义。为此,本研究以公主岭市为代表区域,基

于该市2011—2020年气象资料及梨花期物候资料,分析了4个抗寒梨品种始花期、盛花期、末花期和花期长度的变化趋势,使用相关性分析探讨了气温、降水量和日照时数与梨品种花期物候的关系,并通过偏最小二乘回归分析来解析气象因子变量对花期物候的综合影响;最终明确关键气候因子影响花期物候的主要时段,构建了花期预测模型,以期科学有效地开展抗寒梨花期预报气象服务提供科技支撑,从而减轻晚霜霜冻带来的低温伤害。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验区概况

本试验试验区设于吉林省公主岭市松辽平原中部(124.02°E—125.18°E, 43.11°N—44.09°N)吉林省农业科学院果树研究所梨试验园,该区域属温带大陆性季风气候,四季分明,园区土壤类型为暗棕壤土。供试梨树树龄统一、田间栽培管理措施保持一致。供试品种为‘延边大香水’(*Pyrus ussuriensis* ‘Yanbiandaxiangshui’)、‘苹果梨’(*P. bretschneideri* ‘Pingguoli’)、‘苹香梨’(*P. ussuriensis* ‘Pingxiangli’)和‘寒香梨’(*P. ussuriensis* ‘Hanxiangli’)。

2011—2020年连续10年定点观测上述4个梨品种的始花期、盛花期和末花期物候数据,花期观测资料均来源于本团队梨育种圃田间定位调查记录,花期长度以始花期至末花期时间跨度计算;同

期区域气象数据由吉林省气象科学研究所整编提供。

1.2 研究方法

梨始花期、盛花期和末花期参考曹玉芬^[24]的描述标准。始花期是梨树 5% 花朵开放日期,盛花期是梨树 50% 花朵开放日期,末花期是梨树 70%~80% 花朵开放日期。

晚霜霜冻依据杜军等^[25]的方法,以日最低气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 为霜冻指标,用以分析花期晚霜的变化趋势。

花期预测精准度 $= (1 - |\text{预测值} - \text{实测值}| \div \text{实测值}) \times 100\%$ ^[25]。花期观测日期及终霜日期均采用儒略日换算方法进行换算(1月1日为1年中第1天)^[26]。

对气象因子及 4 个梨品种花期及花期长度的年际变化趋势进行线性回归分析,并采用 F 检验法对其显著性进行检验($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。利用 Pearson 相关系数分析花期、花期长度与气象因子之间的关系^[27]。采用偏最小二乘回归法(PLS)分析影响花期变化的主要因素,并建立花期预测模型^[28-29]。

本研究数据分析采用 SAS 9.0 软件完成,绘图采用 Sigmaplot 10.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 2011—2020 年公主岭气象因子的变化趋势

从图 1 可以看出,2011—2020 年公主岭市的年均气温以 $1.69^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率呈波动上升趋势,温度在 $5.8\sim 7.9^{\circ}\text{C}$,其中 2012 年的年均气温最低,为 5.8°C ,2019 年的年均气温最高,为 7.9°C ;年降水量以 $206.09\text{mm}/10\text{a}$ 的速率呈显著大幅增加趋势,降水量在 $346.6\sim 802.6\text{mm}$,其中 2011 年的降水量最低,为 346.6mm ,2013 年的降水量最高,为 802.6mm ;年日照时数以 $86.13\text{h}/10\text{a}$ 的速率呈明显上升趋势,日照时数在 $2\,555.2\sim 3\,410.8\text{h}$,其中 2019 年的日照时数最低,为 $2\,555.2\text{h}$,2020 年的日照时数最高,为 $3\,410.8\text{h}$ 。总体而言,近 10 年来(2011—2020 年)公主岭市气候呈现暖湿化的变化趋势。

2.2 梨品种花期及花期长度的变化趋势

由表 1 可以看出,4 个梨品种始花期均呈提前趋势,其中‘延边大香水’提前的趋势显著($P < 0.05$),其始花期最早,且以 $8.5\text{d}/10\text{a}$ 的速率大幅提前($P < 0.05$);‘苹果梨’和‘寒香梨’的始花期最晚,其

中‘寒香梨’始花期提前趋势最小,提前速率为 $6.1\text{d}/10\text{a}$ 。4 个梨品种盛花期均有提前趋势,其中仅‘苹香梨’的提前趋势显著($P < 0.05$);但‘延边大香水’提前的平均速率最大,为 $8.3\text{d}/10\text{a}$;‘苹果梨’提前的平均速率最小,为 $4.7\text{d}/10\text{a}$ 。在末花期,除‘苹果梨’以 $0.3\text{d}/10\text{a}$ 的微弱趋势推迟外,其余 3 个梨品种均呈提前趋势,其中仅‘延边大香水’提前趋势显著($P < 0.05$);而 4 个梨品种仍是‘延边大香水’末花期开始最早,变幅最小,提前趋势最多。

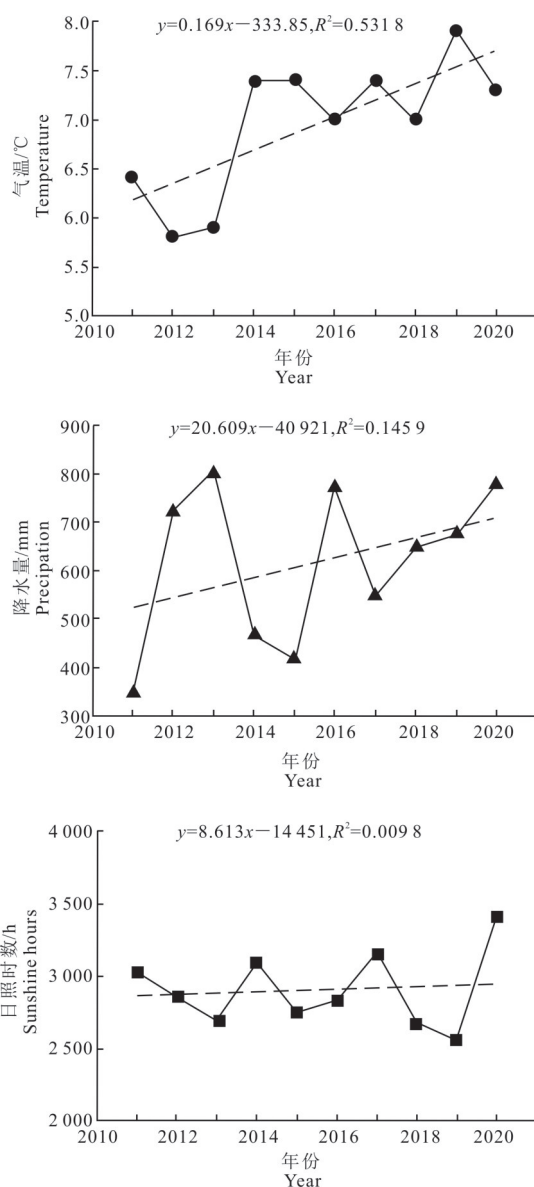


图 1 2011—2020 年吉林公主岭年均气温、降水量和日照时数的变化

Fig. 1 Changes in annual mean temperature, precipitation and sunshine duration in Gongzhuling, Jilin Province during 2011—2020

表1 2011—2020年吉林公主岭地区4个梨品种花期的变化趋势
Table 1 Flowering phenology trends of four pear cultivars in Gongzhuling, Jilin Province during 2011—2020

花期 Flowering phenology	梨品种 Pear cultivar	最早日期 Earliest date (儒 略日/d Julian date)	最晚日期 Latest date (儒略日/d Julian date)	平均日期 Average date (儒略日/d Julian date)	变幅/d Range	标准偏差 Standard deviation	变化趋势/ (d·10 a ⁻¹) Trend	P值 P value
始花期 Initial flowering date	延边大香水 Yanbiandaxiangshui	04-23(113)	05-10(130)	04-31(120)	17	5.7	—8.5	0.028*
	苹果梨 Pingguoli	04-26(116)	05-15(135)	05-05(126)	19	6.1	—7.1	0.189
	苹香梨 Pingxiangli	04-25(115)	05-15(135)	05-04(125)	20	6.8	—6.3	0.225
	寒香梨 Hanxiangli	04-25(115)	05-15(135)	05-05(126)	20	6.4	—6.1	0.186
盛花期 Full bloom date	延边大香水 Yanbiandaxiangshui	04-24(114)	05-12(132)	05-02(123)	18	5.8	—8.3	0.268
	苹果梨 Pingguoli	04-27(117)	05-16(136)	05-06(127)	19	6.2	—4.7	0.374
	苹香梨 Pingxiangli	04-26(116)	05-16(136)	05-06(127)	20	6.5	—5.6	0.048*
	寒香梨 Hanxiangli	04-26(116)	05-16(136)	05-06(127)	20	6.6	—6.1	0.264
末花期 Final flowering date	延边大香水 Yanbiandaxiangshui	05-02(122)	05-17(137)	05-07(128)	15	5.3	—6.9	0.014*
	苹果梨 Pingguoli	05-01(121)	05-20(140)	05-13(133)	19	5.3	0.3	0.328
	苹香梨 Pingxiangli	05-05(125)	05-21(141)	05-12(132)	16	4.6	—2.5	0.693
	寒香梨 Hanxiangli	05-03(123)	05-21(141)	05-12(132)	18	5.0	—1.5	0.573

注:*和**表示在0.05和0.01水平上差异显著。下同。
Note:* and ** indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

由图2可以看出,对于花期长度而言,4个梨品种的花期长度均表现为一定程度的延长趋势,延长速率在1.5~6.7 d/10 a。其中‘延边大香水’花期的延长速率最小,其次是‘寒香梨’和‘苹香梨’,‘苹果梨’的延长速率最大。‘寒香梨’作为‘延边大香水’(母本)与‘苹香梨’(父本)的杂交后代,其花期及花期长度更趋向于父本。

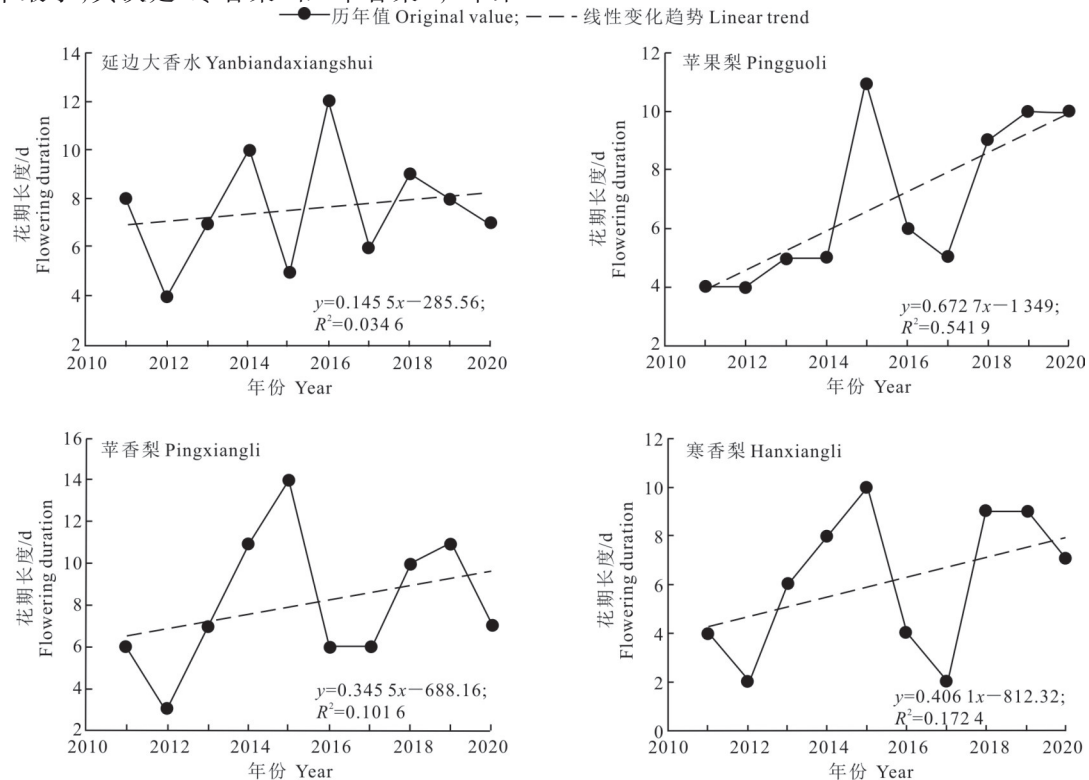


图2 2011—2020年吉林公主岭4个梨品种花期长度的变化趋势

Fig. 2 Trends in flowering duration of four pear cultivars in Gongzhuling, Jilin Province during 2011—2020

2.3 气象因子对梨品种花期及花期长度的影响

通过分析气象因子与梨花期的相关性,结果(表2)发现,仅气温与梨花期关系显著;降水量和日照时数对梨各花期影响较小,相关性均不显著。由

表2可知,4个梨品种始花期、盛花期和末花期与提前3个月和提前1个月的逐日平均气温和逐日平均最高气温均呈极显著负相关($P<0.01$)。

表 2 梨品种花期及花期长度与气象因子的相关性

Table 2 Correlations between flowering phenology and duration of pear cultivars and meteorological factors

梨品种 Pear cultivar	物候期 Phenophase	T_m			T_{max}		
		M3	M1	M	M3	M1	M
延边大香水 Yanbiandaxiangshui	始花期 Initial flowering date	-0.899**	-0.864**	0.333	-0.877**	-0.909**	0.193
	盛花期 Full bloom date	-0.868**	-0.881**	0.380	-0.851**	-0.921**	0.245
	末花期 Final flowering date	-0.841**	-0.871**	0.230	-0.836**	-0.897**	0.084
	花期长度 Flowering duration	0.272	0.130	-0.276	0.234	0.178	-0.264
	始花期 Initial flowering date	-0.797*	-0.842**	0.465	-0.844**	-0.896**	0.323
苹果梨 Pingguoli	盛花期 Full bloom date	-0.745*	-0.854**	0.411	-0.796*	-0.892**	0.242
	末花期 Final flowering date	-0.510	-0.839**	0.511	-0.574	-0.840**	0.412
	花期长度 Flowering duration	0.747*	0.227	-0.034	0.727*	0.338	0.082
	始花期 Initial flowering date	-0.777*	-0.868**	0.384	-0.799*	-0.901**	0.212
	盛花期 Full bloom date	-0.757*	-0.867**	0.408	-0.790*	-0.901**	0.246
苹香梨 Pingxiangli	末花期 Final flowering date	-0.666	-0.948**	0.365	-0.650	-0.930**	0.279
	花期长度 Flowering duration	0.648	0.445	-0.270	0.711*	0.537	-0.045
	始花期 Initial flowering date	-0.761*	-0.849**	0.419	-0.806*	-0.890**	0.267
	盛花期 Full bloom date	-0.734*	-0.833*	0.371	-0.781*	-0.867**	0.226
	末花期 Final flowering date	-0.612	-0.928**	0.432	-0.627	-0.915**	0.343
寒香梨 Hanxiangli	花期长度 Flowering duration	0.671	0.287	-0.190	0.753*	0.409	0.006

注： T_m ·平均气温； T_{max} ·最高气温； T_{min} ·最低气温；DTR·气温日较差。M3. 提前3个月(1—3月份)；M1. 提前1个月(4月份)；M. 当月(5月份)。下同。

Note: T_m · Mean temperature; T_{max} · Maximum temperature; T_{min} · Minimum temperature; DTR· Diurnal temperature range. M3. Three months in advance (January to March); M1. One month in advance (April); M. Current month (May). The same below.

变量重要性值(VIP)对梨花期有影响。一般情况下, $VIP \geq 1$, 说明自变量对因变量具有显著影响; $0.8 < VIP < 1$, 自变量对因变量的影响程度中等; $VIP \leq 0.8$, 则自变量对因变量基本不具有影响^[30]。气温对梨花期综合影响的VIP值见表3。

表 3 气温对梨花期综合影响的VIP值

Table 3 VIP values of comprehensive impacts of air temperature on pear flowering phenology

花期 Flowering phenology	T_m			T_{max}			T_{min}			DTR		
	M3	M1	M	M3	M1	M	M3	M1	M	M3	M1	M
始花期 Initial flowering date	1.16	1.26	0.67	1.20	1.31	0.57	1.01	0.99	0.65	1.11	1.12	0.45
盛花期 Full bloom date	1.18	1.33	0.60	1.39	0.36	0.98	1.23	1.06	0.54	1.10	1.14	0.09
末花期 Final flowering date	1.05	1.36	0.71	1.05	1.34	0.62	0.95	1.25	0.72	0.98	0.98	0.62

由表3可以看出, 提前1个月(4月份)的逐日平均最高气温对梨始花期时间起主要控制作用, 其次是提前1个月(4月份)的逐日平均气温。对梨盛花期分析发现, $VIP \geq 1$ 排名前3位的气象因子分别为: 提前3个月的逐日平均最高气温 > 提前1个月的逐日平均气温 > 提前3个月的逐日平均最低气温。对梨末花期分析发现, $VIP \geq 1$ 排名前3位的气象因子分别为: 提前1个月的逐日平均气温 > 提

前 1 个月的逐日平均最高气温>提前 1 个月的平均最长气温。

由表 2 可知,4 个梨品种花期长度受提前 3 个月逐日平均最高气温影响较大,其中‘苹果梨’、‘苹香梨’和‘寒香梨’的花期长度与提前 3 个月逐日平均最高气温呈显著正相关($P<0.05$);‘苹果梨’花期长度还与提前 3 个月逐日平均气温呈显著正相关($P<0.05$)。

2.4 晚霜霜冻对梨品种花期的影响

花期内不同低温会对梨树生长发育产生不同

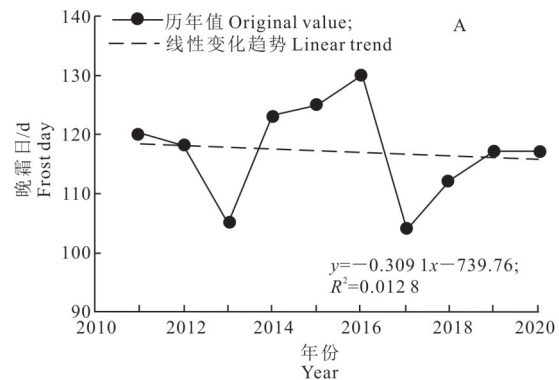


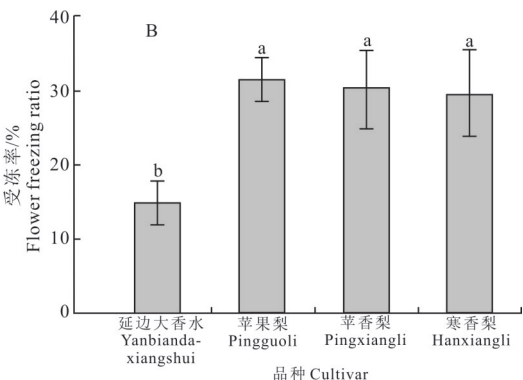
图 3 上不同小写字母表示不同梨品种间受冻率差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences in flower frost rate among pear cultivars($P<0.05$).

图 3 2011—2020 年吉林公主岭市晚霜日的变化趋势(A)及 2021 年花期冻害比较(B)

Fig. 3 Trend of late frost days in Gongzhuling, Jilin Province during 2011—2020 (A) and comparison of frost damage during flowering in 2021 (B)

程度的影响。通过对晚霜日发生趋势分析发现,近 10 年来晚霜发生时间以 3.1 d/10 a 的速率呈波动下降趋势,晚霜日在 105~125 d,平均为 118 d,一般每年 4 月 28 日可能发生晚霜(图 3-A)。因此随着花期的逐渐提前,梨树遭遇花期晚霜霜冻的风险加大,在 2021—2022 年梨花朵受冻统计结果(图 3-B)显示,在花期内 4 个抗寒梨品种花朵均遭受不同程度晚霜冻害,‘延边大香水’、‘苹果梨’、‘苹香梨’和‘寒香梨’的受冻率分别为 14.8%,31.4%,30.4%和 29.5%。



2.5 梨品种花期预报模型

利用 2011—2020 年吉林公主岭地区 4 个梨品种花期观测数据及相关性和 VIP 值结果,采用偏最小二乘回归方法建立梨花期统计回归预测模型,结

果见表 4。由表 4 可以看出,预测模型均通过 0.01 显著性检验。梨各花期预测平均精准度在 98.2%~99.0%,以始花期精准度最高,说明该花期预测模型的可信度较高。

表 4 吉林公主岭地区梨花期预测模型及检验结果

Table 4 Flowering phenology prediction models and validation results for pear cultivars in Gongzhuling, Jilin Province

花期 Flowering phenology	预测模型 Prediction model	P 值 P value	平均精准度/% Mean accuracy
始花期 Initial flowering date	$Y=158.965-0.410X_1-0.488X_2+0.068X_3-0.416X_4-0.415X_5-0.149X_6-0.292X_7-0.528X_8+0.010X_9-1.551X_{10}-0.493X_{11}-0.624X_{12}$	0.004 8	99.0
盛花期 Full bloom date	$Y=126.565-0.375X_1-0.409X_2+0.380X_3-0.359X_4-0.360X_5+0.172X_6-0.341X_7-0.400X_8+0.412X_9-0.886X_{10}-0.506X_{11}+0.091X_{12}$	0.003 3	98.2
末花期 Final flowering date	$Y=168.374-0.084X_1-0.645X_2+0.105X_3-0.104X_4-0.463X_5+0.001X_6+0.161X_7-0.889X_8+0.487X_9-1.548X_{10}-0.150X_{11}-0.923X_{12}$	0.002 7	98.6

注: X_1 . 平均气温(提前 3 个月(1—3 月份)); X_2 . 平均气温(提前 1 个月(4 月份)); X_3 . 平均气温(当月(5 月份)); X_4 . 最高气温(提前 3 个月(1—3 月份)); X_5 . 最高气温(提前 1 个月(4 月份)); X_6 . 最高气温(当月(5 月份)); X_7 . 最低气温(提前 3 个月(1—3 月份)); X_8 . 最低气温(提前 1 个月(4 月份)); X_9 . 最低气温(当月(5 月份)); X_{10} . 气温日较差(提前 3 个月(1—3 月份)); X_{11} . 气温日较差(提前 1 个月(4 月份)); X_{12} . 气温日较差(当月(5 月份))。

Note: X_1 . $T_m(M3)$; X_2 . $T_m(M1)$; X_3 . $T_m(M)$; X_4 . $T_{max}(M3)$; X_5 . $T_{max}(M1)$; X_6 . $T_{max}(M)$; X_7 . $T_{min}(M3)$; X_8 . $T_{min}(M1)$; X_9 . $T_{min}(M)$; X_{10} . $DTR(M3)$; X_{11} . $DTR(M1)$; X_{12} . $DTR(M)$.

3 讨 论

植物与环境之间存在紧密联系,环境中的温

度、光照、水分等多种气候因子共同作用影响着植物的物候期^[30]。开花期是梨树重要的物候期之一,了解梨资源物候期对花期预测、人工授粉、疏花疏

果、品种选育等科研与生产工作具有重要的指导作用^[31]。本研究通过对公主岭地区气候及梨花期物候连续 10 年(2011—2020 年)的监测发现,梨树花期与气温呈显著负相关,但受降水量和日照时数的影响较小,说明在该地区降水量和日照时数不是制约梨树开花迟早及花期长度的关键气象因子,这在明确影响梨树花期的主导月气候因子中得到证实。

随着气候变暖加速,公主岭地区梨品种的始花期和盛花期也随之提前。在全球变暖的大背景下,开花期提前是气候变暖的重要标志,欧洲、美国东北部及亚洲大部的果树开花期均表现出提前趋势^[32-36];但有些地区如我国西藏林芝地区种植的苹果,其始花期则随冬季和春季气温的升高而推迟^[25]。说明除气温外,越冬植物开花早晚还与需冷量有关。若需冷量不足,休眠不能被完全解除,植物也无法按时开花。有研究指出,梨树的需冷量相对较低,寒冷地区气候变暖对其休眠期延长的影响较小^[37],所以气温是梨花期物候的决定因素。

开花期提前导致梨花期遭受春季冻害风险增加。春季是植物物候的重要时期,也是气象灾害的多发及频发时期。本研究通过连续 2 年(2021—2022 年)的调查发现,4 个抗寒梨品种花期内花朵均遭受了不同程度的晚霜冻害。因此本研究根据 10 年监测数据建立了梨花期物候预测模型,田间验证表明该模型以始花期精准度最高,这对优化种植管理、减少灾害损失、提高梨产量和品质具有重要意义。但植物的物候期除受气候要素影响外,还与土壤类型、土壤温湿度、水肥状况、地形地貌、植物生长状况等多种因素密切相关^[38]。未来可调整增加模型参数,以进一步提升梨花期物候预测的精度。

在实际生产中,还应做好霜冻防御措施^[39],包括春季梨树萌芽前的树干涂白;萌芽至开花前喷施 0.3% 磷酸二氢钾+1% 红糖液或灌 1 次防冻水;花期喷 0.1% 硼砂+0.2% 尿素;霜冻前在果园上风口设置熏烟堆,在气温降至 2℃ 时点燃等措施均可减轻晚霜对花期的影响。此外,可选育花期抗冻品种、开展花期冻害机制等研究,为梨品种的栽培推广及防霜技术研发提供理论支撑。

4 结 论

近 10 年间公主岭市气候总体呈“暖湿化”变化趋势,在气候变化背景下,梨品种的始花期和盛花期均提前,而末花期除‘苹果梨’略微延迟外,其他

品种的末花期也提前,但梨品种的花期长度均延长。梨品种花期受不同气象因子的影响不同,对温度因子更敏感。4 月份逐日平均最高气温是影响梨品种始花期和盛花期的主导气象因子,该阶段逐日平均最高气温越高,花期越提前。但 10 年间公主岭市晚霜霜冻日提前了 3 d,梨品种开花期也明显提前,导致该区域梨花期遭受霜冻的风险增大。

【参考文献】

- [1] 张绍铃,谢智华. 我国梨产业发展现状、趋势、存在问题与对策建议[J]. 果树学报, 2019, 36(8): 1067-1072.
Zhang S L, Xie Z H. Current status, trends, main problems and the suggestions on development of pear industry in China[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(8): 1067-1072.
- [2] 胡明玥,闫兴凯,王强,等. 吉林省中东部地区梨品种叶片光合特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 32-38.
Hu M Y, Yan X K, Wang Q, et al. Photosynthetic characteristics of pear varieties in central and eastern Jilin[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2022, 50(9): 32-38.
- [3] 邱美娟,刘布春,刘园,等. 中国北方主产地苹果始花期模拟及晚霜冻风险评估[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 154-163.
Qiu M J, Liu B C, Liu Y, et al. Simulation of first flowering date for apple and risk assessment of late frost in main producing areas of northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(21): 154-163.
- [4] 李瑞英,孙东宝,江晓东. 鲁西南木本植物物候期对气候变暖的响应[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 135-140.
Li R Y, Sun D B, Jiang X D. Response of typical woody plants phenology to climate warming in southwestern Shandong Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(2): 135-140.
- [5] 常兆丰,韩福贵,仲生年. 甘肃民勤荒漠区 18 种乔木物候与气温变化的关系[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2): 311-319.
Chang Z F, Han F G, Zhong S N. Relationships between phenology of 18 tree species and air temperature change in the Minqin desert area of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(2): 311-319.
- [6] 王明昌,刘布春,刘园,等. 陕西苹果主产区花期冻害风险评估[J]. 中国农业气象, 2020, 41(6): 381-392.
Wang M C, Liu B C, Liu Y, et al. Assessment on the freezing injury risk during apple flowering in Liqun and Xunyi[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2020, 41(6): 381-392.
- [7] Zhao Y, Hu M Y, Wang Q, et al. Climate variation and its influence on the cold tolerance and phenology periods of pear cultivars in Jilin, China[J]. International Journal of Fruit Science, 2023, 23(1): 165-180.
- [8] 尹小刚,刘武仁,郑洪兵,等. 松辽平原中部地区应对气候干旱变化的土壤耕作技术[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22):

- 123-131.
- Yin X G, Liu W R, Zheng H B, et al. Soil tillage practices coping with drought climate change in central region of Songliao Plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 123-131.
- [9] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2199-2206.
- Liu Z J, Yang X G, Wang W F, et al. Characteristics of agricultural climate resources in three provinces of Northeast China under global climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2199-2206.
- [10] 贾建英, 郭建平. 东北地区近46年气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(10): 109-115.
- Jia J Y, Guo J P. Characteristics of climate change in Northeast China for last 46 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(10): 109-115.
- [11] Zhang J Q. Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao Plain, China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, 102(2): 133-153.
- [12] Garonna I, de Jong R, de Wit A J W, et al. Strong contribution of autumn phenology to changes in satellite-derived growing season length estimates across Europe (1982 - 2011) [J]. Global Change Biology, 2014, 20(11): 3457-3470.
- [13] 张晓男, 刘布春, 刘园, 等. 基于多因素模型重构陕西苹果主要物候数据序列[J]. 中国农业气象, 2022, 43(9): 732-748.
- Zhang X N, Liu B C, Liu Y, et al. Reconstruct the main phenological periods of Shaanxi apple by constructing the multi-factor models [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(9): 732-748.
- [14] 冯敏玉, 孔萍, 胡萍, 等. 基于花前物候利用灰色关联分析法建立油菜花期预报模型[J]. 中国农业气象, 2021, 42(11): 929-938.
- Feng M Y, Kong P, Hu P, et al. Prediction model of flowering date of rape established by using grey relational analysis method based on pre-flowering phenology [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(11): 929-938.
- [15] 付永硕, 李昕熹, 周轩成, 等. 全球变化背景下的植物物候模型研究进展与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(9): 1206-1218.
- Fu Y S, Li X X, Zhou X C, et al. Progress in plant phenology modeling under global climate change [J]. Science China Earth Sciences, 2020, 50(9): 1206-1218.
- [16] 杨琪, 李书恒, 李家豪, 等. 西安4种落叶乔木物候期对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1462-1473.
- Yang Q, Li S H, Li J H, et al. Response of phenology phases of four deciduous trees to climate change in Xi'an [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1462-1473.
- [17] 刘璐, 王景红, 柏秦凤, 等. 气候变化对黄土高原苹果主产地物候期的影响[J]. 果树学报, 2020, 37(3): 330-338.
- Liu L, Wang J H, Bai Q F, et al. Impact of climate changes on apple's phenophases in the main producing areas of the Loess Plateau in China [J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(3): 330-338.
- [18] 乔灿灿, 贾铎, 程昌秀. 祁连山不同类型植被物候变化及其对温度的响应[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(1): 168-177.
- Qiao C C, Jia D, Cheng C X. Vegetation phenology change and response to temperature in the Qilian Mountains from 1982 to 2014 [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2022, 58(1): 168-177.
- [19] 张艳艳, 赵玮, 高庆先, 等. 气候变化背景下陇东塬区‘红富士’苹果始花期研究[J]. 果树学报, 2017, 34(4): 427-434.
- Zhang Y Y, Zhao W, Gao Q X, et al. The effect of climate change on the apple's initial flowering date in the eastern Gansu Province [J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(4): 427-434.
- [20] 邹定荣, 霍治国, 王培娟, 等. 陕西苹果花期机理性预报模型的适用性评价[J]. 应用气象学报, 2019, 30(5): 555-564.
- Wu D R, Huo Z G, Wang P J, et al. The applicability of mechanism phenology models to simulating apple flowering date in Shaanxi Province [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2019, 30(5): 555-564.
- [21] Peñuelas J, Rutishauser T, Filella I. Phenology feedbacks on climate change [J]. Science, 2009, 324(5929): 887-888.
- [22] 王金晨, 张琪, 董航宇, 等. 京津冀地区梨始花期模拟及花期冻害特征分析[J]. 中国农业资源与区划, 2024, 45(1): 84-93.
- Wang J C, Zhang Q, Dong H Y, et al. Simulation of first flowering date for pear and analysis on the characteristics of frozen damage during flowering in Jing-Jin-Ji region [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2024, 45(1): 84-93.
- [23] 李莹, 郭伟珍, 秦素洁, 等. 晚霜对13个梨品种(系)幼果发育及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(6): 901-910.
- Li Y, Guo W Z, Qin S J, et al. Effects of spring frost on young fruit development and fruit quality in 13 pear varieties (strains) [J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(6): 901-910.
- [24] 曹玉芬. 梨种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 76.
- Cao Y F. Descriptors and data standard for pear (*Pyrus* spp.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 76.
- [25] 杜军, 次旺, 白宇轩, 等. 西藏林芝苹果花期与气象条件的关系及预测模型[J]. 果树学报, 2023, 40(5): 1013-1023.
- Du J, Ci W, Bai Y X, et al. Relationship between apple's flowering phase and meteorological conditions and prediction model in Nyingchi of Tibet [J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(5): 1013-1023.
- [26] 徐维新, 辛元春, 张娟, 等. 近20年青藏高原东北部禾本科牧草生育期变化特征[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1781-1793.
- Xu W X, Xin Y C, Zhang J, et al. Phenological variation of alpine grasses (Gramineae) in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China during the last 20 years [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(7): 1781-1793.

- [27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京:气象出版社, 2007.
- Wei F Y. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [28] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 1964—2015年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 917-931.
- Deng C H, Bai H Y, Gao S, et al. Comprehensive effect of climatic factors on plant phenology in Qinling Mountains region during 1964—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 917-931.
- [29] Pérez-Enciso M, Tenenhaus M. Prediction of clinical outcome with microarray data: a partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) approach[J]. Human Genetics, 2003, 112(5): 581-592.
- [30] Darbyshire R, Webb L, Goodwin I, et al. Challenges in predicting climate change impacts on pome fruit phenology[J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58(6): 1119-1133.
- [31] 郭瑞, 曹玉芬, 张莹, 等. 不同梨资源开花及叶片生长特性比较分析[J]. 果树资源学报, 2022, 3(2): 5-12.
- Guo R, Cao Y F, Zhang Y, et al. Comparative analysis of flowering and leaf growth characteristics form different germplasm resources of pear[J]. Journal of Fruit Resources, 2022, 3(2): 5-12.
- [32] Guédon Y, Legave J M. Analyzing the time-course variation of apple and pear tree dates of flowering stages in the global warming context[J]. Ecological Modelling, 2008, 219(1/2): 189-199.
- [33] Fujisawa M, Kobayashi K. Apple (*Malus pumila* var. *domestica*) phenology is advancing due to rising air temperature in northern Japan[J]. Global Change Biology, 2010, 16(10): 2651-2660.
- [34] Guo L, Dai J H, Wang M C, et al. Responses of spring phenology in temperate zone trees to climate warming: a case study of apricot flowering in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 201: 1-7.
- [35] Chmielewski F M, Müller A, Bruns E. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961—2000[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 121(1/2): 69-78.
- [36] Fitchett J M, Grab S W, Thompson D I, et al. Increasing frost risk associated with advanced *Citrus* flowering dates in Kerman and Shiraz, Iran: 1960—2010[J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58(8): 1811-1815.
- [37] Atkinson C J, Taylor L. The influence of autumn temperature on flowering time and cropping of *Pyrus communis* cv. Conference[J]. Journal of Horticultural Science, 1994, 69(6): 1067-1075.
- [38] 张玉星. 果树栽培学总论[M]. 4版. 北京: 中国农业出版社, 2011: 45-142.
- Zhang Y X. General introduction of fruit tree cultivation[M]. 4th ed. Beijing: China Agriculture Press, 2011: 45-142.
- [39] 贾春霞, 张小珍, 马春晖. 梨园春季晚霜冻害发生与预防技术[J]. 北方园艺, 2013(11): 197-200.
- Jia C X, Zhang X Z, Ma C H. Causes and preventing techniques of frost injury in the pear orchard[J]. Northern Horticulture, 2013(11): 197-200.

(责任编辑: 屈李纯)