

# 西藏林芝苹果花期与气象条件的关系及预测模型

杜军<sup>1,2</sup>, 次旺<sup>3</sup>, 白宇轩<sup>4</sup>, 索朗旺堆<sup>1</sup>, 王挺<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>西藏高原大气环境科学研究所·西藏高原大气环境研究开放实验室, 拉萨 850001; <sup>2</sup>中国气象局墨脱大气水分循环综合观测野外科学试验基地, 西藏墨脱 860700; <sup>3</sup>西藏自治区气候中心, 拉萨 850001; <sup>4</sup>西藏自治区林芝市气象局, 西藏林芝 860000)

**摘要:**【目的】西藏是中国气候资源最多样与果树资源最丰富的区域之一, 分析西藏最适宜栽培区——林芝的苹果花期与气象条件的关系及其对气候变化的响应, 选取主导影响气候因子, 构建花期预测回归模型, 为当地应对气候变化和开展苹果花期气象服务提供科技支撑。【方法】利用2001—2021年林芝苹果花期物候和逐日平均气温( $T_m$ )、最高气温( $T_{max}$ )、最低气温( $T_{min}$ )、相对湿度( $RH$ )、降水量( $P$ )、日照时数( $S$ )和 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温( $\sum T_0$ )等数据, 采用线性倾向估计法、Pearson相关系数和逐步回归方法等, 分析苹果花期物候及其长度的变化趋势, 以及气候因子、晚霜冻对苹果花期的影响, 并开展苹果花期预测, 构建花期预测回归模型。【结果】2001—2021年林芝苹果各花期以 $0.884\sim 1.132\text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度呈推迟趋势, 以花芽膨大期推迟的最多, 开花始期次之, 为 $1.058\text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 。花期长度为显著缩短趋势, 平均每年缩短 $0.471\text{ d}$ 。花期生长期内 $T_m$ 、 $T_{max}$ 、 $T_{min}$ 均趋于升高,  $T_{min}$ 升幅大于 $T_{max}$ 升幅;  $DTR$ 、 $S$ 、 $RH$ 趋于减少。始花期之前,  $P$ 为增加趋势, 之后 $P$ 趋于减少。花期长度生长期内, 只有 $T_m$ 、 $T_{min}$ 表现为上升趋势, 其他要素均趋于下降, 以 $\sum T_0$ 减幅最为明显。【结论】上年10月 $P$ 是影响林芝苹果始花期、盛花期变化的主导气候因子, 若上年10月 $P$ 每增加(减少) $10\text{ mm}$ , 苹果始花期和盛花期将分别提前(推迟) $2.47\text{ d}$ 和 $2.17\text{ d}$ 。花期晚霜冻日趋于提前, 且低温降低, 但开花期明显推迟, 花期霜冻的气候风险变小。基于旬、月气候要素的统计模型, 预测苹果花期精准度为 $95.8\%\sim 97.1\%$ 。

**关键词:** 苹果; 西藏林芝; 花期; 变化; 气候影响因子; 预测模型

中图分类号: S661.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2023)05-1013-11

## Relationship between apple's flowering phase and meteorological conditions and prediction model in Nyingchi of Tibet

DU Jun<sup>1,2</sup>, Tgewang<sup>3</sup>, BAI Yuxuan<sup>4</sup>, Sonam Wangdoi<sup>1</sup>, WANG Ting<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science Research/Tibet Open Laboratory of Plateau Atmospheric and Environmental Research, Lhasa 850001, Tibet, China; <sup>2</sup>Field Science Experiment Base for Comprehensive Observation of Atmospheric Water Cycle in Mèdog County, CMA, Mèdog 860700, Tibet, China; <sup>3</sup>Tibet Autonomous Region Climate Centre, Lhasa 850001, Tibet, China; <sup>4</sup>Nyingchi Meteorological Service of Tibet, Nyingchi 860000, Tibet, China)

**Abstract:** 【Objective】Tibet has one of the most diverse climatic resources and the richest fruit tree resources in China. Nyingchi is the most suitable cultivation area for the growth of fruit trees. This study aimed to establish a regression model for flowering prediction with the leading climatic factors influencing apple growth in Nyingchi, through analysis of the relationship between the apple flowering phases and meteorological conditions and its response to climate change, in order to provide scientific and technological support for adaptation of apple production to climate change, together with prediction services for apple flowering phases over the Tibetan Plateau. 【Methods】Both phenology and meteorological data were collected in Nyingchi station from 2001 to 2021. The apple's flowering phases included the flower bud enlargement date (FED), flower bud opening date (FOD), initial flowering date (IFD), full blooming date (FBD) and terminal flowering date (TFD), while the meteorological data included daily

收稿日期: 2022-06-20

接受日期: 2022-12-22

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0106); 中国气象科学研究院青藏高原与极地气象科学研究所开放课题(ITPP2021K03); 西藏自治区科技创新基地自主研究项目(XZ2021JR0001G); 西藏自治区科技重点研发计划项目(XZ202001ZY0023N)

作者简介: 杜军, 正研级高级工程师, 主要从事高原气候与气候变化、生态与农牧业气象科研工作。Tel: 0891-6322565, E-mail: dujun0891@163.com

average temperature ( $T_m$ ), maximum temperature ( $T_{max}$ ), minimum temperature ( $T_{min}$ ), relative humidity (RH), precipitation ( $P_r$ ), sunshine hours (S) and  $\geq 0$  °C cumulative temperature ( $\sum T_0$ ) etc.. The trends of apple flowering and the influences of climatic factors on the flowering phases were revealed with relevant statistical methods, including the linear propensity estimation method, the Pearson correlation coefficient, and the stepwise regression method, and the apple flowering prediction were carried out accordingly. **【Results】** (1) The apple flowering phases had been delayed at a rate of 0.884–1.132 d · a<sup>-1</sup> in Nyingchi of Tibet from 2001 to 2021, among them the flower bud enlargement dates were delayed the most, followed by IFD at a rate of 1.058 d · a<sup>-1</sup> ( $p < 0.01$ ), and TFD the least. The length of flowering period was shortened significantly by a rate of 0.471 d · a<sup>-1</sup> ( $p < 0.05$ ). While the IFD advanced significantly in the main apple producing areas in China such as Xinjiang, Loess Plateau and Bohai Gulf, the IFD postponed prominently in Nyingchi of Tibet. The main reason for this difference was that apple requirement for cold temperature in winter could always be met even under warming conditions, while the increased temperature could accelerate the apple growth rate in the other regions. In contrast, apple requirement for cold temperature in winter would not be met successfully over the Tibetan Plateau under the warming context, meaning that the additional temperatures lower than 7.2 °C in spring had to be used for accumulation of low temperature to meet the chilling requirement, which inevitably led to the postponed flowering phase in Nyingchi of Tibet. (2) During the flowering periods, all temperature items, including  $T_m$ ,  $T_{max}$ , and  $T_{min}$ , presented the increasing trends by a rate of 0.050–0.125 °C · a<sup>-1</sup>, among them  $T_{min}$  exhibited a greater increasing rate than  $T_{max}$ . In contrast, all the other meteorological factors such as DTR, S, and RH decreased with a rate of 0.024–0.125 °C · a<sup>-1</sup>, 0.099–3.495 h · a<sup>-1</sup>, and 0.014–0.153% · a<sup>-1</sup>, respectively. (3) The  $P_r$  before IFD showed an increasing trend with a rate of 0.045–0.131 mm · a<sup>-1</sup>, and tended to decrease afterwards by a rate of 0.094–0.627 mm · a<sup>-1</sup>. (4) The  $\sum T_0$  tended to increase from flower bud opening date to IFD and from IFD to FBD, but decreased from FBD to TFD with a rate of -4.695 °C · d · a<sup>-1</sup>. (5) During the flowering length growth period, only  $T_m$  and  $T_{min}$  showed an increasing trend, while the other elements exhibited the decreasing trends with the most obvious in  $\sum T_0$  by a rate of -3.748 °C · d · a<sup>-1</sup>. (6) The RH, S and  $\sum T_0$  during the flowering length growth period had fluctuated greatly in the last 21 years. These fluctuations showed a three-curve trend, the RH presented a general “down-up-down” pattern, and the change rate in the phases of 2001 to 2006, 2006 to 2017 and 2017 to 2021 was -1.12% · a<sup>-1</sup>, 1.42% · a<sup>-1</sup> ( $p < 0.01$ ) and -4.25% · a<sup>-1</sup>, respectively. In contrast, the S and  $\sum T_0$  showed an “increase-decrease-increase” trend, among them the S changed with a rate of 21.66 h · a<sup>-1</sup> ( $p < 0.05$ ), -11.14 h · a<sup>-1</sup> ( $p < 0.05$ ) and 7.98 h · a<sup>-1</sup> in 2001 to 2006, 2006 to 2017 and 2017 to 2021, and the  $\sum T_0$  changed with a rate of 35.78, -17.25 and 17.20 °C · d · a<sup>-1</sup> in the same period, respectively. The  $P_r$  showed a quadratic curve variation of increasing and then decreased, with an increasing trend of 2.91 mm · 10 a<sup>-1</sup> in the first ten years of the 21st century and an decreasing rate of -1.53 mm · 10 a<sup>-1</sup> during 2011 to 2021. **【Conclusion】** (1) The temperature, especially in winter time, has increased significantly in Nyingchi of Tibet in the recent 60 years, which resulted in the insufficient cold demand for apples in the winter and delaying the process of breaking of bud dormancy, and delaying the dates. (2) The  $P_r$  in October of the previous year was identified as the dominant climatic factor influencing the change of IFD and FBD. In addition, the average ground temperature under 10 cm in March mainly affected the TFD. (3) Only individual flowering phase and growing period lengths were negatively correlated with the  $T_m$  significantly, while apple flowering phase was positively correlated with the ten-day  $T_g$  (5, 10, and 20 cm), and the contribution of ground temperature was greater than that of air temperature in the flowering prediction regression model. (4) Both the and RH had significant ef-

fects on apple flowering phases, mainly negative effects. The also showed a negative correlation with the flowering phase, but the effect of the S on the flowering phase was less than that of P. (5) Although the late frost tended to advance during apple flowering phase and its  $T_{\min}$  decreased, the flowering were significantly delayed, so the climatic risk of the frost for apple's FD would become less. (6) Based on the climatic elements at decadal and monthly scales, the established statistical model could achieve an accuracy ranging from 95.8% to 97.1%, which seems to be possible to provide practical information on the prediction of the apple flowering phase in Nyingchi of Tibet.

**Key words:** *Malus pumila*; Nyingchi, Tibet; Flowering phase; Change; Climatic influence factor; Prediction model

植物物候常被认为是反映气候与环境变化的重要指标<sup>[1-2]</sup>,也被视为全球气候变化的“诊断指纹”<sup>[3]</sup>。苹果始花期是表征苹果果实开始生长的重要指示物候期<sup>[4]</sup>,直接影响到苹果品质和产量的形成<sup>[5-6]</sup>。因而,开展苹果花期与气象条件的关系及其对气候变化响应的研究,以及花期预测,对指导当地苹果生产具有十分重要的意义。

Chmielewski等<sup>[7]</sup>、Grab等<sup>[8]</sup>分别发现德国和南非的苹果开花期平均每10 a(年)提前2.1 d和4.3 d, Mariko等<sup>[9]</sup>也指出1980—2010年日本长野的苹果开花期提前6.3 d,这些主要与春季气温的升高有关。刘璐等<sup>[10-11]</sup>研究发现,中国北方主产地苹果始花期以 $2.3 \text{ d} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 的速率提前,并与时段内平均气温和平均地温存在显著的负相关关系。在苹果花期预报方法方面,国内学者做了大量研究工作<sup>[11-17]</sup>,方法各异,邬定荣等<sup>[12]</sup>采用机制性物候模型预测苹果花期;冯建设等<sup>[13]</sup>采用逐步回归方法,建立具有生物学意义的动态预报模型;李美荣等<sup>[14]</sup>应用统计学方法建立基于平均气温和日照时数的苹果始花期预测模型;张兴伟等<sup>[15]</sup>采用多元线性回归方法和组合方法,建立山西省吉县苹果果树始花期的预测模型。但大部分学者采用不同时间尺度(日、旬和月)气候要素与始花期之间建立统计回归模型,虽然未考虑苹果树的生理生态过程,但该方法简单易行,能较准确地预测苹果花期。

受苹果物候期观测数据较少的限制,西藏苹果物候期研究鲜见报道,尤其花期预测更是空白。为此笔者在本研究中选取西藏最适宜的栽培区——林芝的苹果长期连续物候期观测和气象数据,采用Pearson相关系数、逐步回归等方法,分析旬和月日照、温度、降水量等气候因子对苹果花期的影响,判定影响花期的主要气候因子,在此基础上构建花期预测模型,同

时还分析了花期晚霜冻的变化特征,以期科学有效开展西藏苹果花期气象服务提供科技支撑。

## 1 数据来源和研究方法

### 1.1 研究区概况

西藏自治区林芝市巴宜区(E 93°27'~95°17', N 29°21'~30°15')地处青藏高原念青唐古拉山东南麓,位于西藏东南部,属高原温带季风半湿润气候。年太阳总辐射 $4\ 224.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,年日照时数 $2\ 022.0 \text{ h}$ ;年平均气温 $9.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,气温年较差 $15.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年极端最高气温 $30.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年极端最低气温 $-13.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\geq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 $3\ 319.9 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ ;年降水量 $692.7 \text{ mm}$ ,年平均相对湿度 $64\%$ ,年无霜期 $173 \text{ d}$ 。

苹果是西藏主要经济林果之一,在自治区果业生产中占有举足轻重的地位。西藏林芝为苹果的主要栽培区,不仅苹果产量高,而且色、香、味俱佳,是西藏最适宜的苹果栽培区<sup>[18]</sup>。2020年全自治区苹果种植面积为 $1670 \text{ hm}^2$ ,总产量达 $7959 \text{ t}$ <sup>[9]</sup>,其中林芝市苹果种植面积为 $557 \text{ hm}^2$ ,总产量为 $4506 \text{ t}$ ,分别占全自治区种植面积和总产量的 $33.4\%$ 和 $56.6\%$ 。

### 1.2 数据来源和处理

苹果花期物候资料来源于西藏自治区林芝农业气象观测站,观测依据和标准按照中国气象局《农业气象观测规范》<sup>[20]</sup>。选取2001—2021年林芝苹果花芽膨大期、花芽开放期、始花期、盛花期和末花期。花期长度为始花期与末花期之间的天数。

气象要素来源于西藏自治区气象信息中心,选取同时段的逐日平均气温( $T_m, \text{ }^{\circ}\text{C}$ )、最高气温( $T_{\max}, \text{ }^{\circ}\text{C}$ )、最低气温( $T_{\min}, \text{ }^{\circ}\text{C}$ )、气温日较差( $DTR, \text{ }^{\circ}\text{C}$ )、相对湿度( $RH, \%$ )、降水量( $P, \text{ mm}$ )、日照时数( $S, \text{ h}$ )和逐旬平均 $5 \text{ cm}$ 地温( $Tg5, \text{ }^{\circ}\text{C}$ )、 $10 \text{ cm}$ 地温( $Tg10, \text{ }^{\circ}\text{C}$ )和 $20 \text{ cm}$ 地温( $Tg20, \text{ }^{\circ}\text{C}$ )等数据。

### 1.3 方法

苹果花期及长度、气象要素的变化趋势均利用线性倾向估计法,并采用  $F$  检验法对其显著性进行检验( $p < 0.05$  和  $p < 0.01$ )。

花期霜冻:以百叶箱内日最低气温  $\leq 0$  °C 为霜冻指标,分析花期晚霜冻的变化特征。

利用 Pearson 相关系数分析各气象要素与花期及长度的相关性,并采用逐步回归方法<sup>[21]</sup>建立花期的预测模型。

$$\text{预测精度} = \left( 1 - \frac{|\text{预测值} - \text{实测值}|}{\text{实测值}} \right) \times 100\%。$$

数据处理和绘图均采用 Excel 2007 软件完成,

并利用 DPS 数据处理系统<sup>[22]</sup>提供的逐步回归方法建立预测模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 花期及生育期长度的变化趋势

从近 21 年(2001—2021 年)西藏林芝苹果花期及生育期长度的变化趋势来看(表 1),苹果各花期均呈显著的推迟趋势,平均每年推迟 0.884~1.132 d ( $p < 0.05$ ),以花芽膨大期推迟的最多( $p < 0.01$ ),其次是始花期,为 1.058 d( $p < 0.01$ ),末花期推迟的最少。花期长度表现为显著的缩短趋势,平均每年缩短 0.471 d(图 1,  $p < 0.05$ )。

表 1 2001—2021 年西藏林芝苹果花期变化趋势

Table 1 Linear trend of apple flowering phase in Nyingchi of Tibet from 2001 to 2021

花期 Flowering phase	花芽膨大期 FED	花芽开放期 FOD	开花始期 IFD	开花盛期 FBD	开花末期 TFD	花期长度 FD
变化趋势 Linear trend/(d·a <sup>-1</sup> )	1.132**	0.884*	1.058**	1.017**	0.529*	-0.471*

注:FED、FOD、IFD、FBD、TFD、FD 分别表示花芽膨大期、花芽开放期、开花始期、开花盛期、开花末期和花期长度;\*,\*\*分别表示  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ 。下同。

Note: FED. Flower bud enlargement date; FOD. Flower bud opening date; IFD. Initial flowering date; FBD. Full bloom date; TFD. Terminal flowering date; FD. Flowering duration. \*,\*\* indicate significant difference at  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$  respectively. The same below.

### 2.2 花期间气候要素的变化趋势

表 2 给出了 2001—2021 年苹果各花期间气候要素的线性变化趋势,结果显示:(1)除开花盛期—开花末期的  $T_{\max}$  呈降低趋势外,其他花期  $T_m$ 、 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$  均趋于升高,升温率为 0.050~0.125 °C·a<sup>-1</sup>,其中  $T_{\min}$  升幅大于  $T_{\max}$  升幅;期间的  $DTR$  都呈现出减小趋势,为 0.024~0.125 °C·a<sup>-1</sup>, $S$  也表现为减少趋势,减幅为 0.099~3.495 h·a<sup>-1</sup>,以开花盛期—末期减少的最多,达 3.495 h·a<sup>-1</sup>( $p < 0.01$ )。(2) $RH$  在花芽膨大期—花

芽开放期上倾向于增加,在其他花期间均趋于减少,平均每年减少 0.014%~0.153%,以花芽开放期—开花始期减幅最为明显。(3)始花期之前, $P_t$  为增加趋势,增幅为 0.045~0.131 mm·a<sup>-1</sup>;之后  $P_t$  趋于减少,平均每年减少 0.094~0.627 mm。(4) $\geq 0$  °C 积温 ( $\sum T_0$ ) 在 4 个花期物候生长期中增减趋势各占一半,其中在花芽开放期—始花期、始花期—盛花期为增加趋势;盛花期—末花期  $\sum T_0$  减少趋势尤为明显,达 4.695 °C·d·a<sup>-1</sup>( $p < 0.05$ )。(5)在花期生长期内,只有

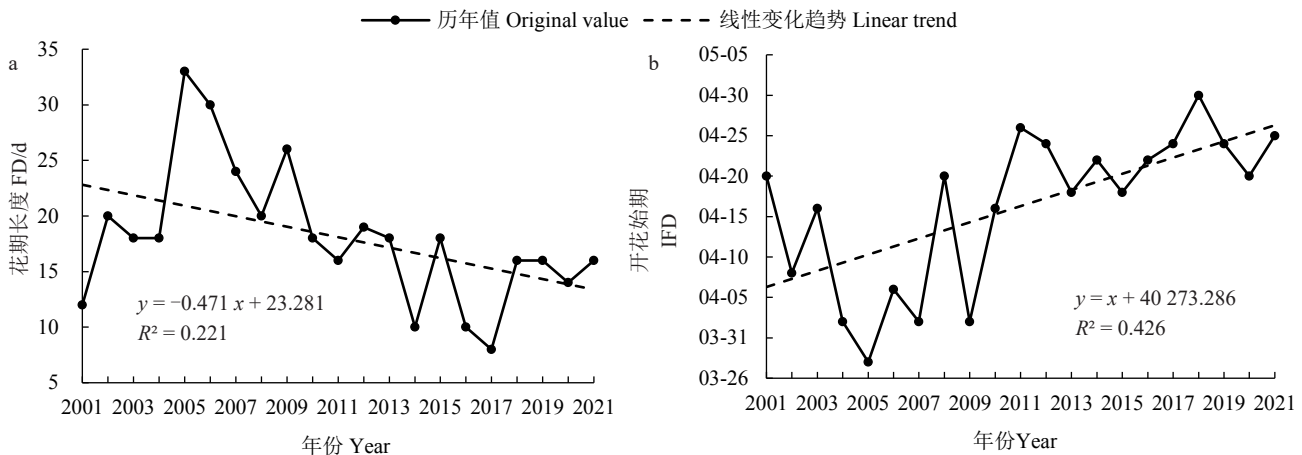


图 1 2001—2021 年西藏林芝苹果花期长度(a)和开花始期(b)的变化

Fig. 1 Change of apple's FD(a) and IFD(b) in Nyingchi of Tibet from 2001 to 2021

表 2 2001—2021 年西藏林芝苹果花期期间气候要素的变化趋势

Table 2 Linear trend of climatic elements at apple flowering phase in Nyingchi of Tibet from 2001 to 2021

气候要素 Climatic elements	FED-FOD	FOD-IFD	IFD-FBD	FBD-TFD	FD
$T_m$	0.099	0.081	0.099	0.053	0.055
$T_{max}$	0.094	0.050	0.071	-0.018	-0.016
$T_{min}$	0.121	0.092*	0.125**	0.107	0.093*
$DTR$	-0.024	-0.042	-0.054	-0.125*	-0.078*
$RH$	0.065	-0.153	-0.400	-0.128	-0.065
$P_r$	0.131	0.045	-0.094	-0.627	-0.761
$S$	-1.690	-0.571	-0.099	-3.495**	-3.609**
$\Sigma T_0$	-0.948	2.232	1.358	-4.695*	-3.748

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;  $RH$ . 相对湿度;  $P_r$ . 降水量;  $S$ . 日照时数;  $\Sigma T_0$ .  $\geq 0^\circ\text{C}$  积温; 下同.

Note:  $T_m$ . mean temperature;  $T_{max}$ . maximum temperature;  $T_{min}$ . minimum temperature;  $DTR$ . diurnal temperature range;  $RH$ . relative humidity;  $P_r$ . precipitation;  $S$ . sunshine duration;  $\Sigma T_0$ . accumulated temperature  $\geq 0^\circ\text{C}$ . The same below.

$T_m$ 、 $T_{min}$  表现为上升趋势, 其他要素均趋于下降, 其中  $\Sigma T_0$  减幅达  $3.748^\circ\text{C}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ .

此外, 还发现近 21 a 花期长度生长期内的  $RH$ 、 $S$  和  $\Sigma T_0$  波动较大, 表现为 3 次曲线变化趋势, 如图 2-a 所示,  $RH$  总体呈现为“降-升-降”的变化趋势, 在 2001—2006 年、2006—2017 年、2017—2021 年 3 个阶段的变幅分别为  $-1.12\% \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $1.42\% \cdot \text{a}^{-1}$  ( $p < 0.01$ ) 和  $-4.25\% \cdot \text{a}^{-1}$ 。而  $S$  和  $\Sigma T_0$  则表现为“升-降-升”的变化趋势(图 2-b、2-c),  $S$  在 2001—2006 年、2006—2017 年、2017—2021 年 3 个阶段的变幅依次为  $21.66$ 、 $-11.14$ 、 $7.98 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其中前 2 个时段  $p < 0.05$ ;  $\Sigma T_0$  在 2001—2006 年、2006—2017 年和 2017—2021 年 3 个时段分别以  $35.78$ 、 $-17.25$ 、 $17.20^\circ\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$  的速度变化, 其中前 2 个时段  $p < 0.05$ 。  $P_r$  表现出先升后降的二次曲线变化(图 2-d), 其中前 10 年呈增加趋势, 为  $2.91 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 后 11 年以  $-1.53 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  的速度趋于减少。

### 2.3 花期物候与气候因子的关系

#### 2.3.1 花期物候与旬尺度气候因子的关系

首先采用 Pearson 相关系数分析了上年 10 月上旬至当年 4 月下旬各旬气候要素与西藏林芝苹果花期物候的相关性, 从通过  $p < 0.05$  显著性检验的气候因子中(表 3), 再利用逐步回归方法求得的标准回归系数, 选取

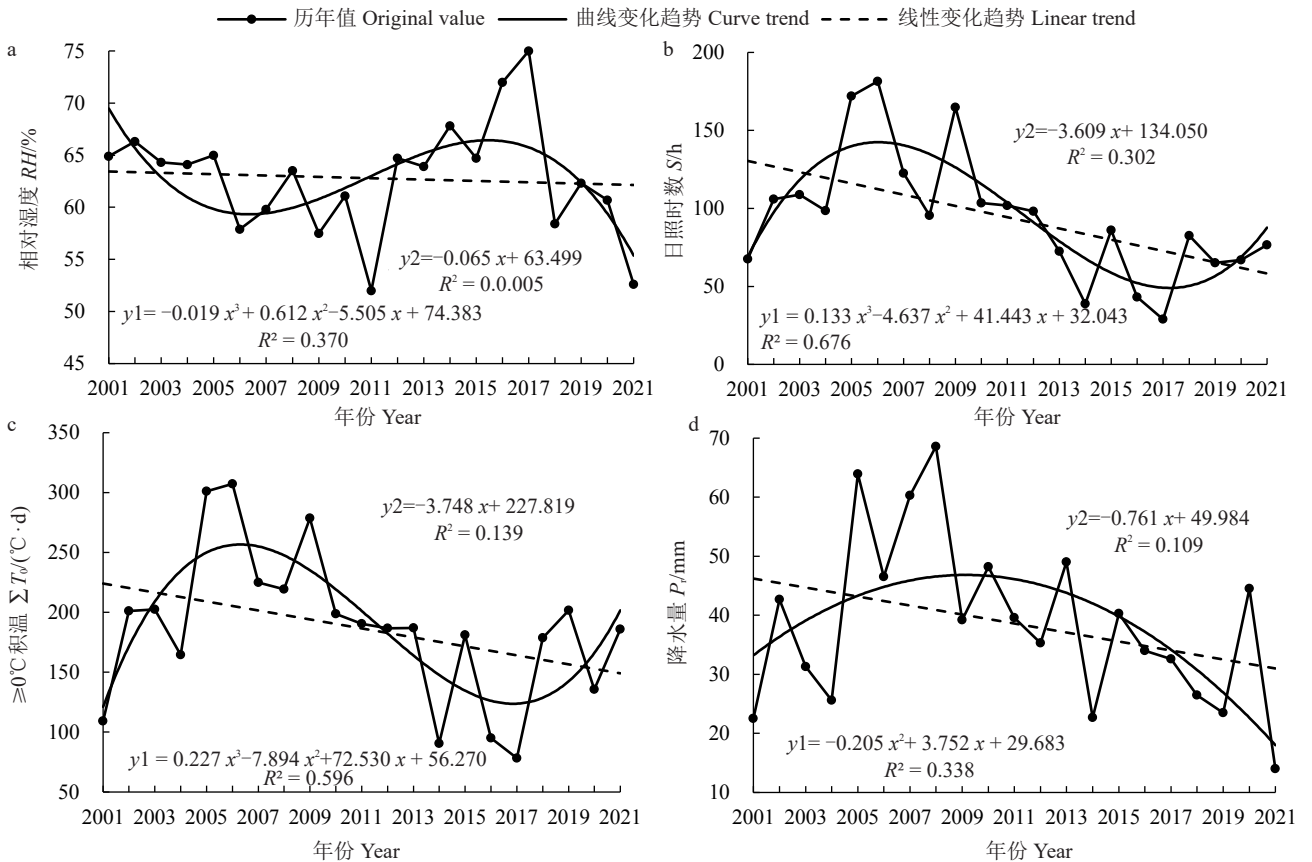


图 2 2001—2021 年西藏林芝苹果花期长度生长期内的气候要素变化  
Fig. 2 Change of climatic elements at apple's FD in Nyingchi of Tibet from 2001 to 2021

表 3 西藏林芝苹果花期物候的旬气候影响因子

Table 3 Climatic factors every ten days affecting the apple flowering phase in Nyingchi of Tibet

花期 Flowering phase	通过 $p < 0.05$ 显著性检验的气候因子 Climate factors passing significance test of $p < 0.05$	主导旬气候因子及相关系数 $R$ Dominant climate factors in ten days and correlation coefficients $R$
FED	$^{+}T_{\max 101} \setminus ^{+}T_{\min 102} \setminus ^{+}P_{r101} \setminus ^{+}S_{031} \setminus ^{+}S_{032} \setminus ^{+}T_{g5 103} \setminus ^{+}T_{g5 121} \setminus ^{+}T_{g5 122} \setminus$ $^{+}T_{g10 103} \setminus ^{+}T_{g10 121} \setminus ^{+}T_{g10 122} \setminus ^{+}T_{g20 103} \setminus ^{+}T_{g20 121} \setminus ^{+}T_{g20 122}$	$S_{031}, R = -0.630^{**}$
FOD	$^{+}T_{\max 122} \setminus ^{+}T_{\max 031} \setminus ^{+}P_{r101} \setminus ^{+}P_{r103} \setminus ^{+}S_{122} \setminus ^{+}S_{031} \setminus ^{+}S_{032} \setminus ^{+}RH_{101} \setminus ^{+}RH_{103} \setminus ^{+}RH_{023} \setminus$ $^{+}T_{g5 103} \setminus ^{+}T_{g5 031} \setminus ^{+}T_{g10 103} \setminus ^{+}T_{g10 031} \setminus ^{+}T_{g20 103}$	$T_{g5 031}, R = -0.436^{*}$
IFD	$^{+}T_{\max 031} \setminus ^{+}T_{\max 032} \setminus ^{+}P_{r101} \setminus ^{+}S_{031} \setminus ^{+}S_{032} \setminus ^{+}T_{g5 031} \setminus ^{+}T_{g10 031} \setminus$ $^{+}T_{g20 031} \setminus ^{+}T_{g20 032}$	$P_{r101}, R = -0.524^{*}$
FBD	$^{+}T_{\max 031} \setminus ^{+}P_{r101} \setminus ^{+}P_{r031} \setminus ^{+}S_{032} \setminus ^{+}RH_{101} \setminus ^{+}RH_{023} \setminus ^{+}T_{g5 031} \setminus$ $^{+}T_{g10 031} \setminus ^{+}T_{g20 031} \setminus ^{+}T_{g20 032}$	$P_{r101}, R = -0.519^{*}$
TFD	$^{+}T_{\min 042} \setminus ^{+}S_{051} \setminus ^{+}RH_{041} \setminus ^{+}T_{g20 032}$	$T_{g20 032}, R = -0.492^{*}$

注:气候因子下标数字:前 2 位为月份,最后 1 位为旬序,1、2、3 分别表示上旬、中旬和下旬。“+”“-”分别表示正相关和负相关。

Note: Subscript numbers of climate factor, the first 2 digits numbers indicates the month, the last number indicate the ten-day order, which that 1, 2, 3 indicate the first, middle and last respectively. “+”, “-” indicate positive and negative correlations, respectively.

绝对值最大者作为主导气候因子,结果发现:(1)影响花芽膨大期早晚的气候因子较多,上年 10 月上旬  $T_{\max}$ , 10 月中旬  $T_{\min}$ , 10 月下旬  $T_{g5}$ 、 $T_{g10}$ 、 $T_{g20}$ , 以及 12 月上中旬  $T_{g5}$ 、 $T_{g10}$ 、 $T_{g20}$  与其呈显著正相关,而与上年 10 月上旬  $P_r$ 、当年 3 月上中旬  $S$  呈显著负相关。这说明上年 10 月和 12 月的气温与地温越高,10 月上旬降水偏少,当年 3 月上中旬日照充足,苹果花芽膨大期就越早。经分析,3 月上旬  $S$  是主导因子,如图 3-a 所示,若 3 月上旬  $S$  每增加(减少)10 h,花芽膨大期将提前(推迟)6.50 d。(2)同样影响花芽开放期的气候因子也较多,只有上年 10 月下旬  $T_{g5}$ 、 $T_{g10}$ 、 $T_{g20}$  与其呈显著正相关;其他因子呈显著负相关,以 10 月上旬  $P_r$  的负相关系数最大,为  $-0.570$  ( $p < 0.01$ )。其中,3 月上旬  $T_{g5}$  是主导因子,从图 3-b 可知,若当年 3 月上旬  $T_{g5}$  每升高(降低)1 °C,花芽开放期将提前(推迟)4.28 d。(3)气候因子与始花期、盛花期的关系都是显著的负相关,表明上年 10 月上旬  $P_r$  越少、 $RH$  越小,来年苹果始花期和盛花期也越早;同样当年 3 月上中旬  $T_{\max}$ 、 $S$  和  $T_{g}$  越高,苹果开花始期和盛期越早。分析得知,10 月上旬  $P_r$  是始花期和盛花期的主导气候因子,若上年 10 月上旬  $P_r$  每增加(减少)10 mm,苹果始花期、盛花期将分别提前(推迟)3.10 d(图 3-c)和 3.11 d(图 3-d)。(4)影响开花末期变化的气候因子有 3 月中旬  $T_{g20}$ 、4 月中旬  $T_{\min}$ 、4 月上旬  $RH$  和 5 月上旬  $S$ , 其中 4 月中旬  $T_{\min}$  为正相关,其他气候因子为负相关,且 3 月中旬  $T_{g20}$  是主导因子,若当年 3 月上旬  $T_{g20}$  每升高(降低)1 °C,末花期将提前(推迟)3.37 d(图 3-e)。

### 2.3.2 花期物候与月气候因子的关系 同理分析

了上年 10 月至当年 4 月影响苹果花期物候的主导气候因子,结果(表 4)显示:(1)影响花芽膨大期早晚的主导气候因子是 3 月  $S$ , 两者相关系数为  $-0.578$  ( $p < 0.01$ )。经分析,若 3 月  $S$  每增加(减少)10 h,花芽膨大期将提前(推迟)3.17 d。(2)上年 10 月  $P_r$  是影响花芽开放期、开花始期和开花盛期的主导气候因子,其中  $P_r$  与花芽开放期的相关性达到极显著水平( $p < 0.01$ )。统计发现,若上年 10 月  $P_r$  每增加(减少)10 mm,当年苹果花芽开放期、始花期和盛花期将分别提前(推迟)2.91 d、2.47 d 和 2.17 d。(3)影响开花末期变化的主导因子为 3 月  $T_{g10}$ , 两者相关系数为  $-0.476$  ( $p < 0.05$ )。经计算分析,若当年 3 月  $T_{g10}$  每升高(降低)1 °C,开花末期将提前(推迟)4.28 d。

### 2.4 花期生长期长度与气候因子的关系

从西藏东南部苹果花期生长期长度与同期气候要素的相关系数(表 5)来看,各花期生长期长度与  $T_{\min}$  的相关性不显著;与  $S$ 、 $\geq 0$  °C 积温( $\sum T_0$ )呈极显著的正相关,相关系数大于 0.820 ( $p < 0.01$ );除花芽开放期—开花始期外,花期生长期长度与  $P_r$  存在显著的正相关,特别是盛花期—末花期长度,两者相关性达到极显著水平( $p < 0.01$ )。只有个别花期生长期长度与  $T_m$ 、 $T_{\max}$ 、 $DTR$  和  $RH$  存在显著的相关性,如花芽膨大期—花芽开放期长度与  $T_m$ 、 $T_{\max}$  呈显著的负相关;花期长度与  $DTR$  存在较显著的正相关; $RH$  与花芽开放期—始花期长度、始花期—盛花期长度,以及花期长度有着显著的负相关关系。同理分析了影响各花期生长期长度变化的主导气候因子都是  $\sum T_0$ 。

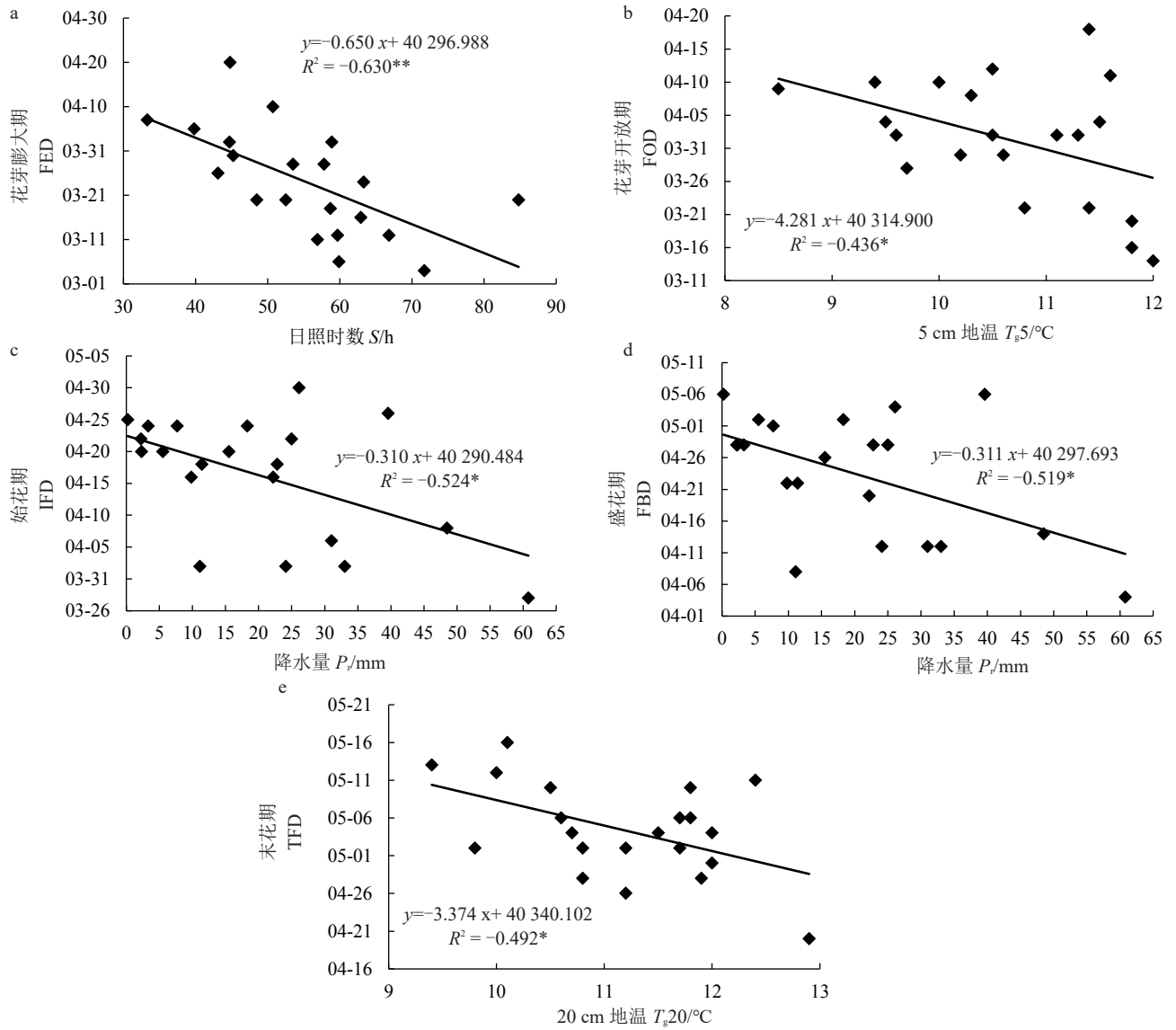


图3 2001—2021年西藏林芝苹果花期与主导旬气候因子的点聚图  
 Fig. 3 The relationship between major climatic factors of ten days and the apple flowering phase in Nyingchi of Tibet from 2001 to 2021

表4 影响西藏林芝苹果花期的月气候因子  
 Table 4 Monthly climatic factors affecting the apple flowering phase in Nyingchi of Tibet

花期 Flowering phase	通过 $p < 0.05$ 显著性检验的气候因子 Climate factors passing significance test of $p < 0.05$	主导月气候因子及相关系数 $R$ Dominant monthly climate factors and correlation coefficients $R$
FED	$+T_{m10} \sim +T_{max10} \sim +P_{r10} \sim +S_{03} \sim +T_g5_{10} \sim +T_g5_{12} \sim +T_g10_{10} \sim +T_g10_{12} \sim +T_g20_{10} \sim +T_g20_{12}$	$S_{03}, R = -0.578^{**}$
FOD	$-T_{max01} \sim -P_{r10} \sim -P_{r01} \sim -P_{r02} \sim S_{03}$	$P_{r10}, R = -0.715^{**}$
IFD	$-P_{r10} \sim S_{03}$	$P_{r10}, R = -0.599^{**}$
FBD	$-T_{max03} \sim -P_{r10} \sim -S_{03} \sim -T_g20_{03}$	$P_{r10}, R = -0.519^*$
TFD	$-T_{m03} \sim -T_{max03} \sim -S_{03} \sim -T_g5_{03} \sim -T_g10_{03} \sim -T_g20_{03}$	$T_g10_{03}, R = -0.476^*$

注: 气候因子下标数字为月份; “+”“-”分别表示正相关和负相关。  
 Note: Climate factor subscript numbers are the month; “+”, “-” indicate positive and negative correlations, respectively.

表5 2001—2021年西藏林芝苹果花期生育期长度与气象要素的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between the length of apple flowering phase and climatic elements in Nyingchi of Tibet from 2001 to 2021

气象要素 Climatic elements	FED- FOD	FOD- IFD	IFD- FBD	FBD- TFD	FD
$T_m$	-0.403	0.001	0.071	-0.164	-0.020
$T_{max}$	-0.506*	0.042	0.077	-0.021	0.141
$T_{min}$	-0.191	-0.066	-0.157	-0.288	-0.263
$DTR$	-0.177	0.116	0.197	0.265	0.408
$RH$	0.127	-0.464*	-0.398	-0.171	-0.387
$P_r$	0.389*	0.163	0.458*	0.666**	0.601**
$S$	0.900**	0.879**	0.822**	0.961**	0.958**
$\Sigma T_0$	0.936**	0.912**	0.920**	0.984**	0.960**

2.5 霜冻对花期的影响

苹果花期内不同程度的低温会对苹果生长发育产生不同的影响<sup>[23-24]</sup>。以日最低气温 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为霜冻指标,分析花期晚霜冻日及其最低气温的变化特征。经统计分析发现(表6),近21 a林芝苹果开花始期晚霜冻发生的概率为33.3%,平均约每3 a一遇;开花盛期出现晚霜冻的概率为19.0%,平均约5 a一遇;而开花末期晚霜冻发生概率为0,从未遭遇晚霜冻的危害。

从林芝苹果花期晚霜冻的变化趋势来看(图4-

表6 2001—2021年西藏林芝苹果花期晚霜冻发生概率  
Table 6 Probability of late frosts for apple flowering phase in Nyingchi of Tibet from 2001 to 2021

花期 Flowering phase	IFD	FBD	TFD
频次 Frequency	7.0	4.0	0
概率 Probability/%	33.3	19.0	0

a),近21 a晚霜冻日呈提前趋势,平均每年提前0.594 d(未通过显著性检验水平)。其对应的日最低气温却趋于降低(图4-b),降幅为 $0.016\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ (未通过显著性检验水平)。

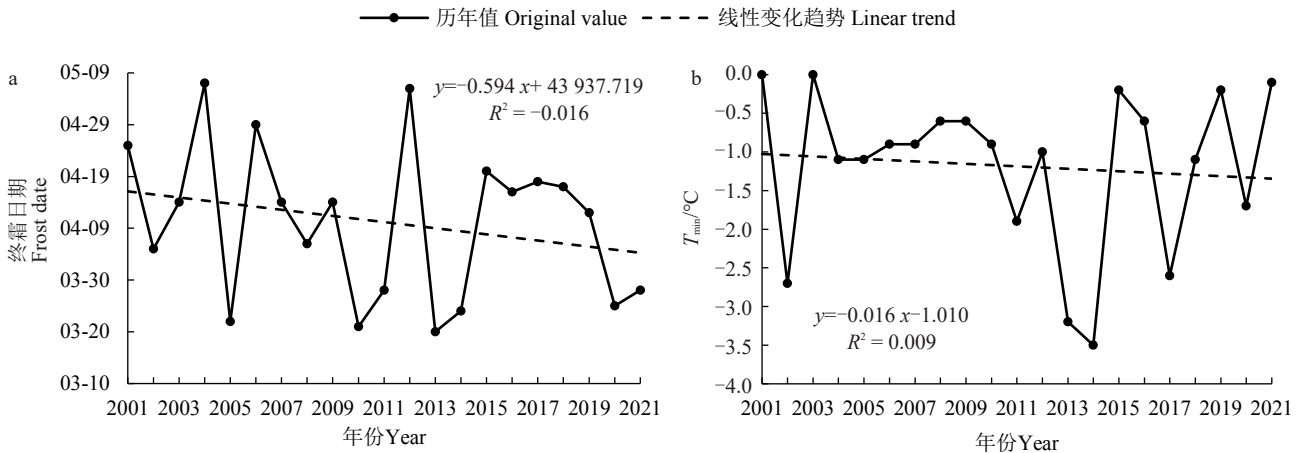


图4 2001—2021年西藏林芝苹果花期晚霜冻日(a)和最低气温(b)的变化

Fig. 4 Change of late frost date (a) and  $T_{\min}$  (b) for apple flowering phase in Nyingchi of Tibet from 2001 to 2021

以上分析表明,近21 a林芝苹果花期遭遇晚霜冻的时间趋于提前,且其最低气温有降低的趋势,但开花期均呈显著的推迟趋势,这说明林芝苹果花期晚霜冻的气候风险可能变小。

2.6 花期预报模型

利用2001—2021年西藏林芝苹果花期(开花始

期、盛期和末期)物候观测数据,以及表3和表4中影响苹果花期的主要气候因子,采用逐步回归方法,建立苹果花期统计回归预测模型(表7),预测模型均通过0.01显著性检验。并利用苹果花期实测值对模型进行精准度检验,发现21 a预测平均精准度为95.8%~97.1%,以开花末期最高,说明预测模型的可

表7 西藏林芝苹果花期预测模型及检验结果

Table 7 The forecasting models of the apple flowering phase and their test result in Nyingchi of Tibet

花期 Flowering phase	预测模型 Forecasting model	p 值 p value	平均精准度 Mean precision/%
开花始期 IFD	$DOY_{IFD} = 169.709 - 2.011T_{\max 031} - 0.176Pr_{101} - 0.0282P_{r10} - 0.195S_{03}$	0.003 8	95.8
开花盛期 FBD	$DOY_{FBD} = 288.481 - 0.859RH_{101} - 0.615RH_{023} - 4.110T_{g20_{031}} - 0.138S_{03}$	0.000 2	96.5
开花末期 TFD	$DOY_{TFD} = 165.899 + 2.099T_{\min 042} - 0.113S_{051} - 2.922T_{g20_{032}} - 0.0702S_{03}$	0.005 1	97.1

注:DOY 为花期儒略日;气候因子表述同上。

Note: DOY is the ordinal day from Jan.1; The climatic factors are expressed as above.

信度高。

3 讨 论

林芝市巴宜区属高原温带季风半湿润气候,日

照时数较长,辐射较强,热量水平高,雨热同季,农业气候资源较为丰富,是西藏最适宜的苹果栽培区<sup>[18]</sup>。由于西藏站点稀少,林芝市巴宜区的长时间序列观测资料只有林芝站,海拔高度2 991.8 m,其



能够代表该区域海拔2800~3100 m河谷地带的气候特征,与其邻近的米林站也属于同一气候区,气候条件适宜苹果的生长发育,这里不仅苹果产量高,而且色、香、味俱佳。

全球气候变暖,气温升高增加了果树生长发育所需热量,进而影响果树生长进程,其中开花期提前就是气候变暖的重要标志。目前,欧洲、美国东北部及亚洲的大部均发现苹果开花期提前<sup>[7-9, 25]</sup>。在中国新疆、黄土高原和渤海湾各苹果主产区,始花期均呈显著的提前趋势<sup>[26]</sup>。而本研究分析认为,西藏林芝苹果花期却表现为显著的推迟趋势,造成这种差异的主要原因可能是由于苹果正常开花需冬季低温能满足果树对低温需冷量的需求,同时春季升温又能满足果树开花对生物学积温的需求<sup>[27-28]</sup>。近60 a西藏林芝升温明显,特别是冬季<sup>[29]</sup>,造成苹果冬季低温需冷量不足,打破花芽休眠进程推迟,致使花期推迟。

温度作为影响果树物候期的主要气候因子是无可厚非的事实。已有的研究认为,在影响果树开花期的气候因子中,气温具有显著的负作用<sup>[5-7, 30-31]</sup>。在地温方面研究较少,刘璐等<sup>[11]</sup>指出中国北方苹果主产地始花期与平均地温均呈显著负相关关系。本研究发现,只有个别苹果花期及生长期长度与平均气温存在显著的负相关,但苹果花期与旬平均地温(5、10和20 cm)具有显著的相关性,且在花期预测回归模型中地温的贡献大于气温。

除温度外,降水、相对湿度和日照时数亦是影响果树物候期的重要气候因子。多数研究成果认为降水对果树始花期无显著影响<sup>[11, 32-33]</sup>;张艳艳等<sup>[34]</sup>研究指出,影响陇东苹果开花早晚的主要影响因素是热量因子,日照次之,降水影响最小。本研究分析得到,降水量和相对湿度对苹果花期均具有显著影响,以负作用为主;日照时数与花期也呈现出显著的负相关,但日照对苹果花期的影响程度小于降水,这在影响的主导月气候因子中可得以证实。

根据林芝苹果花期与气象条件的关系,花期主要有霜冻、干旱、冰雹等农业气象灾害<sup>[35]</sup>,其中以晚霜冻危害较大。做好霜冻的防御,一是在果树萌芽到开花前灌水1次,可降低地温,推迟开花;二是早春用涂白剂刷枝干,以减少辐射吸收,推迟或延长萌芽开花;三是根据当地气象部门预报,若晴空晚上气温降到0℃时,可通过燃烧麦秸、杂草等使其发烟,既可增加环境温度,也可减少辐射降温,提高果园气

温,防止晚霜冻对花期的影响。此外,可选育花期抗寒品种、开展不同苹果品种花期冻害调查并对不同层面的果树冻害机制的研究<sup>[36]</sup>,为品种推广及防霜技术的研发提供理论支撑。

## 4 结 论

2001—2021年西藏林芝苹果各花期以0.884~1.132 d·a<sup>-1</sup>的速度趋于推迟,以花芽膨大期推迟的最多;花期长度平均每年缩短0.471 d。大部分花期生长期中 $T_m$ 、 $T_{max}$ 、 $T_{min}$ 均趋于升高, $DTR$ 、 $S$ 、 $RH$ 趋于减少;始花期之前, $P_t$ 为增加趋势,之后 $P_t$ 趋于减少。10月上旬 $P_t$ 是影响始花期和盛花期的主导气候因子,而影响花期长度变化的主导气候因子却是 $\Sigma T_0$ 。花期晚霜冻日趋于提前,且低温降低,但开花期显著推迟,花期霜冻的气候风险变小。

## 参考文献 References:

- [1] 陆佩玲,于强,贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应[J]. 生态学报,2006,26(3):923-929.  
LU Peiling, YU Qiang, HE Qingtang. Responses of plant phenology to climatic change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 923-929.
- [2] 郑景云,葛全胜,赵会霞. 近40年中国植物物候对气候变化的响应研究[J]. 中国农业气象,2003,24(1):28-32.  
ZHENG Jingyun, GE Quansheng, ZHAO Huixia. Changes of plant phenological period and its response to climate change for the last 40 years in China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2003, 24(1):28-32.
- [3] ROOT T L, PRICE J T, HALL K R, SCHNEIDER S H, ROSEN-ZWEIG C, POUNDS J A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants[J]. Nature, 2003, 421(6918): 57-60.
- [4] 杜澍. 果树科学实用手册[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1986:121-123.  
DU Shu. Practical handbook of fruit tree science[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1986: 121-123.
- [5] 杨小利,江广胜. 陇东黄土高原典型站苹果生长对气候变化的响应[J]. 中国农业气象,2010,31(1):74-77.  
YANG Xiaoli, JIANG Guangsheng. Responses of apple trees growth to climate change in typical stations of Longdong Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(1): 74-77.
- [6] QU Z J, ZHOU G S. Possible impact of climate change on the quality of apples from the major producing areas of China[J]. Atmosphere, 2016, 7(9): 113.
- [7] CHMIELEWSKI F M, MÜLLER A, BRUNS E. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and fields crops in Germany, 1961—2000[J]. Agricultural and Forest Meteorology,

- 2004, 121(1/2):69-78.
- [8] GRAB S, CRAPARO A. Advance of apple and pear tree full bloom dates in response to climate change in the southwestern Cape, South Africa: 1973—2009[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(3):406-413.
- [9] MARIKO F, KAZUHIKO K. Apple phenology is advancing due to rising air temperature in northern Japan[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(10):2651-2660.
- [10] 刘璐, 郭梁, 王景红, 栾青, 傅玮东, 李曼华. 中国北方苹果主产地苹果物候期对气候变暖的响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3):845-852.
- LIU Lu, GUO Liang, WANG Jinghong, LUAN Qing, FU Weidong, LI Manhua. Phenological responses of apple tree to climate warming in the main apple production areas in northern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3):845-852.
- [11] 刘璐, 王景红, 傅玮东, 栾青, 李曼华. 中国北方主产地苹果始花期与气候要素的关系[J]. *中国农业气象*, 2020, 41(1):51-60.
- LIU Lu, WANG Jinghong, FU Weidong, LUAN Qing, LI Manhua. Relationship between apple's first flower and climate factors in the main producing areas of the Northern China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2020, 41(1):51-60.
- [12] 郭定荣, 霍治国, 王培娟, 王景红, 姜会飞, 柏秦凤, 杨建莹. 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 Dingrong, HUO Zhiguo, WANG Peijuan, WANG Jinghong, JIANG Huihui, BAI Qinfeng, YANG Jianying. 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.
- [13] 冯建设, 薛晓萍, 李曼华, 李楠. 苹果花期预报中的生物学机理及应用[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(3):618-624.
- FENG Jianshe, XUE Xiaoping, LI Manhua, LI Nan. Biological mechanism and its application in the prediction of apple flowering time[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(3):618-624.
- [14] 李美荣, 杜继稳, 李星敏, 柏秦凤. 陕西果区苹果始花期预测模型[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(3):417-420.
- LI Meirong, DU Jiwen, LI Xingmin, BAI Qinfeng. Prediction model for beginning of apple flowering period in fruit growing areas of Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(3):417-420.
- [15] 张兴伟, 陈超, 田姗, 付琳. 基于机器学习的苹果始花期预测[J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(10):93-100.
- ZHANG Xingwei, CHEN Chao, TIAN Shan, FU Lin. Prediction of apple initial flowering period based on machine learning[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(10):93-100.
- [16] 柏秦凤, 王景红, 屈振江, 李美荣, 张维敏. 陕西苹果花期预测模型研究[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(19):164-169.
- BAI Qinfeng, WANG Jinghong, QU Zhenjiang, LI Meirong, ZHANG Weimin. The research on shaanxi apple florescence prediction model[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(19):164-169.
- [17] 柏秦凤, 霍治国, 王景红, 梁轶. 中国富士系苹果主产区花期模拟与分布[J]. *中国农业气象*, 2020, 41(7):423-435.
- BAI Qinfeng, HUO Zhiguo, WANG Jinghong, LIANG Yi. Simulation and distribution of flower stage in main production areas of Fuji apple in China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2020, 41(7):423-435.
- [18] 宋善允, 王鹏祥, 杜军, 杨志刚, 假拉, 拉卓, 张晶. 西藏气候[M]. 北京:气象出版社, 2013:327-328.
- SONG Shanyun, WANG Pengxiang, DU Jun, YANG Zhigang, JIA La, LA Zhuo, ZHANG Jing. *Tibet climate*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013:327-328.
- [19] 西藏自治区统计局, 国家统计局西藏调查总队. 西藏统计年鉴-2021[M]. 北京:中国统计出版社, 2021:142-143.
- Tibet Autonomous Region Statistical Bureau, Tibet General Survey Team of National Statistics Bureau. *Tibet statistical yearbook-2021*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021:142-143.
- [20] 中国气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京:气象出版社, 1993:133-140.
- China Meteorological Administration. *Observation criterion of agricultural meteorology*[M]. Beijing: Meteorological Press, 1993:133-140.
- [21] 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 Fengying. *Statistics technology of diagnose and forecast of modern climate*[M]. 2nd ed. Beijing: Meteorological Press, 2007.
- [22] TANG Q Y, ZHANG C X. Data processing system (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data mining developed for use in entomological research[J]. *Insect Science*, 2013, 20(2):254-260.
- [23] 邱美娟, 刘布春, 刘园, 王珂依, 庞静漪, 张晓男, 贺金娜. 中国北方主产地苹果始花期模拟及晚霜冻风险预估[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(21):154-163.
- QIU Meijuan, LIU Buchun, LIU Yuan, WANG Keyi, PANG Jingyi, ZHANG Xiaonan, HE Jinna. 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.
- [24] 王景红, 刘璐, 高峰, 柏秦凤, 郭梁. 陕西富士系苹果花期霜冻灾害气象指标的修订[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(1):50-56.
- WANG Jinghong, LIU Lu, GAO Feng, BAI Qinfeng, GUO Liang. Revision on meteorological indices of florescence frost disaster for fuji apple in Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(1):50-56.
- [25] 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.

- [26] 刘璐,王景红,柏秦凤,张维敏,张焘. 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 Lu, WANG Jinghong, BAI Qinfeng, ZHANG Weimin, ZHANG Tao. 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.
- [27] 张震,刘璐,李艳莉. 果树物候期研究进展[J]. 果树学报, 2021,38(8):1381-1389.  
ZHANG Zhen, LIU Lu, LI Yanli. Advances in research on fruit tree phenology[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(8): 1381-1389.
- [28] GUO L, DAI J H, RANJITKAR S, XU J C, LUEDELING E. Response of chestnut phenology in China to climate variation and change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 180: 164-172.
- [29] 杜军,边多,黄晓清,石磊,扎西央宗. 西藏气候变化监测公报(2018)[M]. 北京:气象出版社,2019:8-10.  
DU Jun, BIAN Duo, HUANG Xiaqing, SHI Lei, Zhaxi Yangzong. Tibet climate change monitoring bulletin (2018)[M]. Beijing:China Meteorological Press, 2019:8-10.
- [30] 蒲金涌,姚小英,姚晓红,许彦平,王位泰. 气候变暖对甘肃黄土高原苹果物候期及生长的影响[J]. 中国农业气象,2008,29(2):181-183.  
PU Jinyong, YAO Xiaoying, YAO Xiaohong, XU Yanping, WANG Weitai. Impacts of climate warming on phenological period and growth of apple tree in Loess Plateau of Gansu province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2008,29(2):181-183.
- [31] 樊晓春,王位泰,杨晓华,吴颖娟. 六盘山东西两侧苹果物候期对气候变化的响应[J]. 生态学杂志,2010,29(1):50-54.  
FAN Xiaochun, WANG Weitai, YANG Xiaohua, WU Yingjuan. Responses of apple tree's phenology in east and west sides of Liupanshan Mountain to climate change[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010,29(1):50-54.
- [32] 白洁,葛全胜,戴君虎. 贵阳木本植物物候对气候变化的响应[J]. 地理研究,2009,28(6):1606-1614.  
BAI Jie, GE Quansheng, DAI Junhu. Response of woody plant phenophases to climate change for recent 30 years in Guiyang[J]. Geographical Research, 2009,28(6): 1606-1614.
- [33] 白洁,葛全胜,戴君虎,王英. 西安木本植物物候与气候要素的关系[J]. 植物生态学报,2010,34(11):1274-1282.  
BAI Jie, GE Quansheng, DAI Junhu, WANG Ying. Relationship between woody plants phenology and climate factors in Xi'an, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(11): 1274-1282.
- [34] 张艳艳,赵玮,高庆先,张谋草. 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 Yanyan, ZHAO Wei, GAO Qingxian, ZHANG Moucao. 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.
- [35] 杜军,杨志刚. 西藏自治区县级气候区划[M]. 北京:气象出版社,2011.  
DU Jun, YANG Zhigang. Climate zones of county in Tibet Autonomous Region[M]. Beijing: Meteorological Press, 2011.
- [36] 李晓龙,褚燕南,张磊,陈仁伟,张晓煜,岳海英,贾永华,王芳. 苹果花期抗寒能力判定指标解析[J]. 果树学报,2022,39(10):1935-1944.  
LI Xiaolong, CHU Yannan, ZHANG Lei, CHEN Renwei, ZHANG Xiaoyu, YUE Haiying, JIA Yonghua, WANG Fang. Analysis of evaluation indexes of cold resistance of apple trees at flowering stage[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(10): 1935-1944.