

# 中国北方主产地苹果冷热积累变化及其对始花期的影响

刘璐<sup>1</sup> 郭梁<sup>2\*</sup> 李曼华<sup>3</sup> 傅玮东<sup>4</sup> 栾青<sup>5</sup>

(<sup>1</sup>陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 西安 710014; <sup>2</sup>西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>3</sup>山东省气候中心, 济南 250031; <sup>4</sup>新疆农业气象台, 乌鲁木齐 830002; <sup>5</sup>山西省气候中心, 太原 030006)

**摘要** 开展气候变化背景下苹果冷热积累变化及其对始花期的影响研究, 对指导苹果种植及生产具有重要意义。本研究选取山东福山、山西万荣、甘肃西峰和新疆阿克苏代表中国北方苹果主产地, 利用1996—2018年红富士苹果的始花期观测资料和逐时气温数据, 采用动态模型、生长度小时模型分别计算逐日冷积累量(CP)和热积累量(GDH), 并利用偏最小二乘回归法, 对逐日冷、热积累量和各地苹果始花期进行相关分析, 以明确各地苹果冷、热积累起止日期和积累量, 以及冷、热积累期内温度变化对始花期的影响规律。结果表明: 我国北方主产地苹果冷积累时段集中于10月1日前后至2月中下旬或3月中旬, 积累量为74.1~89.3 CP; 热积累时段集中于1月下旬前后至始花期, 积累量为4010~5770 GDH。西峰和阿克苏冷积累期内平均气温每升高1℃, 冷积累量将分别增加3.8和5.0 CP; 各地热积累期内平均气温每升高1℃, 热积累量将增加725~967 GDH。与冷积累期内温度变化的影响效应相比, 热积累期内温度变化主控我国北方主产地苹果始花期, 且气候变暖总体有利于冷积累期内平均气温较低地区的苹果开花和生产。

**关键词** 红富士苹果; 需冷量; 需热量; 始花期

**Changes of chilling and heat accumulation of apple and their effects on the first flowering date in the main planting areas of northern China.** LIU Lu<sup>1</sup>, GUO Liang<sup>2\*</sup>, LI Man-hua<sup>3</sup>, FU Wei-dong<sup>4</sup>, LUAN Qing<sup>5</sup> (<sup>1</sup>Shaanxi Meteorological Service Center of Agricultural Remote Sensing and Economic Crops, Xi'an 710014, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>3</sup>Shandong Provincial Meteorological Center, Jinan 250031, China; <sup>4</sup>Xinjiang Agricultural Meteorological Station, Urumqi 830002, China; <sup>5</sup>Shanxi Provincial Meteorological Center, Taiyuan 030006, China).

**Abstract:** Studies on variations in chilling and heat accumulation in apple trees and their effects on first flowering date under climate change are important for guiding apple planting and productions. In this study, we carried out experiments in representative stations of apple planting areas in the northern China, including Fushan of Shandong, Wanrong of Shanxi, Xifeng of Gansu and Akesu of Xinjiang. The first flowering data and hourly temperature data during 1996–2018 were used to calculate the daily chilling and heat accumulation units by applying the dynamic model and growing degree hour model. Partial least squares regression (PLS) correlated daily chilling and heat units with the first flowering dates was used to identify the chilling and heat accumulation periods for apple flowering. We evaluated the impacts of temperatures during these periods on apples' flowering. Our results showed that the chilling accumulation period of apple trees in the examined sites started

本文由中亚大气科学研究基金项目(CAAS202004)资助 This work was supported by the Central Asia Atmospheric Science Research Fund (CAAS202004).

2019-11-28 Received, 2020-04-30 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoliang2014@nwsuaf.edu.cn

at October 1, ended in late February or mid-March, with chilling accumulations of 74.1–89.3 CP (chill portion). The heat accumulation periods were from late January to the first flowering dates with the heat accumulation of 4010–5770 GDH (growing degree hour). The chilling accumulation at Xifeng and Akesu was correlated positively with mean temperature during the respective accumulation period, with 3.8 and 5.0 CP enhancement following 1 °C increase during the accumulation period. Heat accumulation at all stations correlated positively with mean temperature during the respective accumulation period, with 725–967 GDH enhancement following a 1 °C increase during the accumulation period. Compared to the effects of chilling accumulation on tree flowering, the first flowering data of apples in the main planting areas were mainly affected by mean temperature during the heat accumulation period. Climate warming is beneficial for apple blossom and production in the areas with low mean temperature during the chilling accumulation period.

**Key words:** Fuji apple; chilling requirement; heat requirement; first flowering date.

果树开花期是果树生育期中的重要物候期,对果树授粉、坐果及产量和品质的形成具有重要影响<sup>[1]</sup>。近年来,气候变化对果树开花期的影响研究已成为全球气候变化和植物生态学研究热点,大量研究发现,气候变暖背景下果树开花期呈现提前且年际波动较大的特点<sup>[2]</sup>,造成这种现象的主要原因是气候变暖对果树休眠解除早晚的影响<sup>[3]</sup>。果树冷、热需求是决定果树完成休眠进入萌芽开花阶段的重要热量指标<sup>[4]</sup>,因此,在全球气候显著变暖背景下,开展果树冷、热积累变化及其对始花期的影响研究,对指导果树种植及生产具有重要意义。

在果树冷、热积累的定量化研究中,园艺学家提出并发展了许多模型。其中,常用的果树冷需求模型包括 0~7.2 °C 模型<sup>[5-6]</sup>、犹他模型(Utah model)<sup>[7-8]</sup>和动态模型(dynamic model)<sup>[9-11]</sup>。经过对多种落叶果树需冷量的计算和应用,大多数研究认为,动态模型考虑的因素多于其他模型,且在寒冷地区和温暖地区的重演性均较好<sup>[12]</sup>,对果树冷积累量的估算更准确,因此,在近期的研究中得到了广泛应用<sup>[13-15]</sup>。热积累量目前主要采用生长度小时模型(growing degree hour model)开展计算<sup>[16]</sup>。在计算果树冷、热积累量时,休眠结束日期的判定直接影响冷、热积累计算的准确性,而我国之前大部分的研究在定义及确定果树冷、热积累阶段时,通常采取室内水培试验统计萌芽出现时间<sup>[17-18]</sup>,或利用气温阈值为人为设定等方式<sup>[19-20]</sup>来确定冷、热积累的起止日期,其对果树冷、热需求量的计算容易产生偏差。近期研究发现,在果树长期物候期观测与当地温度记录均存在的情况下,应用偏最小二乘回归法(partial least squares regression, PLS)可反映历史气候背景下果树冷、热积累特征,并成功地运用在了对德国樱桃(*Cerasus avium*)和中国板栗(*Castanea mollis-*

*sima*)等果树的冷、热积累期判定和积累量变化的分析上<sup>[21-22]</sup>,这是对常规园艺学试验方法的有效补充。

苹果(*Malus domestica*)是在我国北方种植面积最广、经济产值最大的经济林果,且大多种植于我国温带地区,而该地区是我国受气候变暖影响最为显著的地区之一<sup>[23]</sup>。受全球变暖影响,我国苹果已出现明显的生长期延长和休眠期缩短的趋势<sup>[24]</sup>,气候变化对苹果产量和品质的影响正逐渐显现。然而,目前从气候学角度开展气候变化对我国苹果冷、热积累的影响,及其对苹果物候期影响的研究仍相对较少。因此,本研究拟利用动态模型和生长度小时模型,以及逐小时气温数据,计算我国北方4个主产地苹果的逐日冷、热积累量,进而与苹果始花期进行相关分析,从而确定各主产地苹果冷、热积累阶段及始花所需冷、热积累量,在此基础上,分析冷、热积累量的变化趋势,以及积累阶段内温度变化对苹果始花期的影响,以期明确气候变暖对中国北方苹果始花期的影响提供理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区域概况

在我国渤海湾、黄土高原和新疆苹果产区,选取气候背景及生产水平均具有代表性的福山、万荣、西峰和阿克苏作为研究地区。其中,福山位于渤海湾产区,属温带季风气候,年平均气温 13.4 °C、降水量 524.9 mm、日照时数 2488.9 h,水热资源充沛,且土壤以棕壤土为主,持水性较好,是我国红富士苹果最适宜种植区之一<sup>[25]</sup>。万荣和西峰分别位于黄土高原东、西部产区,其中万荣属暖温带半湿润大陆性季风气候,西峰属温带大陆性季风气候,两地年平均气温 9.9~13.3 °C、降水量 490~536.6 mm、日照时数 2142.0~2427.8 h。该地区光热资源整体较好,但水

分资源处于苹果生理需求下限,其中万荣通过引黄灌溉工程,已基本满足苹果生产需求<sup>[26]</sup>,而西峰果园基本无灌溉条件,是制约当地苹果产业发展的重要因素<sup>[27]</sup>。阿克苏位于新疆苹果种植的新优势区,属温带大陆性季风气候,年平均气温 11.5 °C、降水量 93 mm、日照时数 2859.0 h,是全国苹果种植区日照最长、昼夜温差最大的地区,该地区气候干燥、降水量少,但地处塔里木河腹地,灌溉水资源充沛,果园全部具有灌溉条件<sup>[28]</sup>。

## 1.2 研究数据

以红富士苹果 (*Malus pumila*) 为研究对象,选择 1996—2018 年各地始花期观测资料,该数据分别来源于山东福山、山西万荣、甘肃西峰及新疆阿克苏农业气象试验站。始花期的定义为约 10% 的苹果花开放的日期,同时,将逐年始花期出现日期转化为日序 (day of year, DOY),以得到始花期的时间序列。气象要素数据选取各站点所在县级气象站 1996—2018 年逐日逐小时气温,该数据来源于国家气象科学数据中心的国家地面气象站逐小时观测资料数据库<sup>[29]</sup>。

## 1.3 研究方法

本研究利用动态模型和生长度小时模型计算各主产地 1996—2018 年苹果逐日冷、热积累量。动态模型认为休眠完成的水平取决于休眠打破物质的累积水平,这个过程是通过两步来完成的。其中,第 1 步是一个可逆过程,主要是形成一种不稳定的休眠打破物质的前体,其累积速度系数遵循 Arrhenius 规则;第 2 个步骤是协同转变。该模型认为当第 1 步的前体物质形成后,就通过第 2 步的不可逆过程形成稳定的冷积累单元,只有冷积累达到植物所需的量时,才能完成冷积累过程。为了充分模拟落叶果树的休眠进程,该模型不仅考虑了不同温度对冷累积加权值的不同,还考虑了在一个循环中暴露在低温中的时间<sup>[12]</sup>。生长度小时模型假定果树热积累只能在一定下限与上限温度间进行,最快的积累发生在最佳温度环境下,其他温度范围内果树不进行热积累或热积累过程对休眠解除无效<sup>[16]</sup>。两个模型具体计算公式可参考文献 [16, 22, 30]。

本研究采用偏最小二乘回归法 (PLS) 对逐日冷、热积累量和始花期进行相关分析,从而确定各主产地苹果冷、热积累期及积累量。此统计方法主要产生变量重要性值 (VIP) 和标准化模型系数 2 个结果。本研究中, VIP 值反映冷、热积累变化对始花期影响的显著性,一般以 0.8 作为其判定标准;标准化

模型系数则表明影响的方向及强度,正标准化模型系数代表冷、热积累量的增加会推迟始花期,负标准化模型系数则表明冷、热积累量的增加对始花期有提前作用。另外,因各主产地始花期均发生在 4 月,故以上年 5 月 1 日至当年 4 月 30 日作为自变量起止日期,开展相关分析。本研究数据分析和制图均在 R 语言中进行,主要依赖目前已发展和应用成熟的“chillR”程序包。此外,本研究还对各主产地 1996—2018 年逐年苹果冷、热积累期内的平均气温和始花期进行了关联分析,以阐明不同产地冷、热积累时段内的温度变化对苹果始花期影响的相对重要性。

## 2 结果与分析

### 2.1 苹果始花期的变化特征

由表 1 可见,1996—2018 年间,我国北方苹果主产地始花期平均出现在第 106 天,即 4 月 16 日。其中万荣苹果始花期出现时间最早,为第 99 天,福山苹果始花期出现时间最晚,为第 110 天。23 年来,各主产地苹果始花期均有所提前,但变化趋势未达到显著水平。

### 2.2 苹果的冷、热积累期和积累量

以西峰地区统计结果为例,9 月 22 日至 3 月 19 日间,标准化模型系数大都为负且 VIP 值整体高于 0.8,表明此时段冷积累量增加使苹果始花期提前,是苹果的冷积累时段 (图 1a)。1 月 27 日至 4 月 19 日,标准化模型系数亦大都为负且 VIP 值大都大于 0.8,说明此阶段较高的热积累可使西峰苹果始花期提前,可定义为影响苹果开花的热积累时段 (图 1b)。值得注意的是,两个时段内均间断包含了几小段对苹果始花期影响较弱或起反作用的时段,这说明苹果的冷、热积累过程是不连续的,只有在适合的温度下,冷、热累积才能进行。利用上述方法分析得到各主产地苹果的冷、热积累时段,并计算其冷、

表 1 1996—2018 年中国北方主产地苹果始花期  
Table 1 Average date of first flowering in the main apple planting areas of the northern China from 1996 to 2018

| 地区<br>Area | 经度<br>Longitude<br>(E) | 纬度<br>Latitude<br>(N) | 海拔<br>Altitude<br>(m) | 平均始花期<br>Average<br>date of<br>first<br>flowering<br>(DOY) | 变化趋势<br>Tendency<br>( $d \cdot 10^{-1}$ ) |
|------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|--|---|
| 福山 Fushan  | 121°15′                | 37°30′                | 33.9                  | 110  | -2.0                                      |
| 万荣 Wanrong | 110°50′                | 35°24′                | 589.6                 | 99   | -2.7                                      |
| 西峰 Xifeng  | 107°63′                | 35°73′                | 1421.0                | 109  | -3.3                                      |
| 阿克苏 Akesu  | 80°14′                 | 41°10′                | 1105.3                | 104  | -2.1                                      |

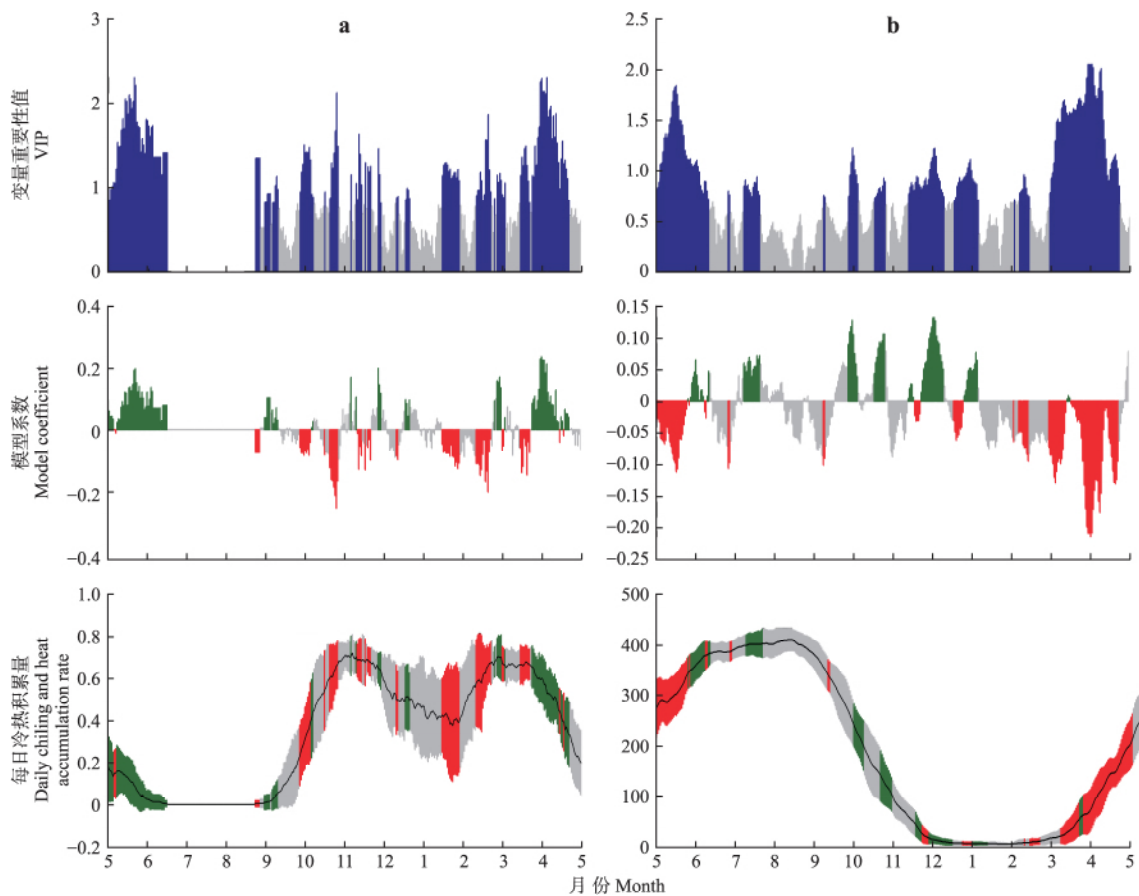


图 1 1996—2018 年西峰苹果始花期与每日冷积累值 (a) 和热积累值 (b) 的偏最小二乘回归 ( PLS) 分析

Fig.1 Results of partial least squares regression ( PLS) between daily chilling ( a) and heat accumulation rates ( b) and first flowering dates in Xifeng from 1996 to 2018.

上面小图蓝色代表变量重要性阈值 ( VIP) 大于 0.8; 中间小图为模型系数, 红色表示始花期与冷、热积累值为显著负相关, 绿色为显著正相关, 灰色无显著相关性; 下面小图黑线为每日冷、热积累的均值, 绿色、红色和灰色区域代表日尺度冷 (a)、热积累 (b) 的变化标准差 Blue bars in the top panel indicated the threshold for variable importance ( VIP) were greater than 0.8. In the middle panels, red and green bars represented negative and positive model coefficients, respectively, while the grey indicated no significant correlation. The black line in the bottom figure stood for the mean daily chilling and heat accumulation, bars showed the standard deviation, with colors following the same pattern as for the model coefficients.

热积累量 (表 2)。

由表 2 可见, 我国北方主产地苹果冷积累时段较热积累时段明显偏长且较为分散。总体上, 冷积累时段起始于 10 月 1 日前后, 并一直持续到 2 月中下旬或 3 月中旬, 持续 149~179 d, 积累量为 74.1~89.3 CP, 年际变化的标准差为 5.2~6.6 CP; 热积累时段则

统一集中在 1 月下旬前后至始花期, 持续 72~83 d, 积累量为 4010~5770 GDH, 年际变化的标准差为 1161~1368 GDH。各地在冷积累后期和热积累初期均存在一定时长的冷、热积累重叠期。经计算, 在热积累开始前, 福山、万荣、西峰和阿克苏苹果冷积累量平均分别完成 72.9%、88.5%、67.3% 和 56.6%。

表 2 1996—2018 年中国北方主产地苹果的冷热积累期、积累量及其标准差

Table 2 Estimates of the chilling and heat accumulation periods, accumulations, and their standard deviation ( SD) of apple in the main apple planting areas of the northern China from 1996 to 2018

| 地区<br>Area | 冷积累 Chilling accumulation   |                            | 热积累 Heat accumulation       |                             |
|------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|            | 积累时段<br>Accumulation period | 积累量±标准差<br>Amount±SD ( CP) | 积累时段<br>Accumulation period | 积累量±标准差<br>Amount±SD ( GDH) |
| 福山 Fushan  | 10-06—03-04                 | 79.8±5.6                   | 01/29-04/1001-29—04-10      | 4010±1161                   |
| 万荣 Wanrong | 09-24—02-19                 | 76.2±5.2                   | 02/06-04/0802-06—04-08      | 5770±1368                   |
| 西峰 Xifeng  | 09-22—03-19                 | 89.3±6.3                   | 01/27-04/1901-27—04-19      | 5303±1325                   |
| 阿克苏 Akesu  | 09-30—03-14                 | 74.1±6.6                   | 01/19-04/0701-19—04-07      | 4988±1276                   |

表 3 1996—2018 年中国北方主产地苹果始花期的冷、热积累量年际变化趋势及其对温度变化的响应

Table 3 Interannual trend of the chilling and heat accumulation of apple and its correlation to temperature variation during the chilling and heat periods in the main apple planting areas of the northern China from 1996 to 2018

| 地区<br>Area | 冷积累<br>Chilling accumulation                           |  | 热积累<br>Heat accumulation                                |   |
|------------|--|--|---|---|
|            | 变化趋势<br>Variation<br>tendency<br>( $CP \cdot a^{-1}$ ) | 与温度变化<br>的相关性<br>Correlation to<br>temperature<br>change<br>( $CP \cdot ^\circ C^{-1}$ ) | 变化趋势<br>Variation<br>tendency<br>( $GDH \cdot a^{-1}$ ) | 与温度变化<br>的相关性<br>Correlation to<br>temperature<br>change<br>( $GDH \cdot ^\circ C^{-1}$ ) |
|            | 福山 Fushan  | -0.1   | 2.7   | 39  |
| 万荣 Wanrong | 0.0  | 1.9  | 135   | 967***  |
| 西峰 Xifeng  | -0.1   | 3.8*   | 112**   | 9027***   |
| 阿克苏 Akesu  | -0.2   | 5.0*   | 121**   | 725***  |

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; \*\*\*  $P < 0.001$ .

### 2.3 冷、热积累年际变化及其对温度变化的响应

由表 3 可见,我国北方主产地苹果冷、热积累时段内,冷积累量的变化趋势均不显著,但西峰和阿克苏的热积累量则呈显著增加趋势,增加速率分别为每年 112 和 121 GDH。此外,冷、热积累时段内平均气温对积累量的影响不尽相同,其中冷积累时段内,平均气温上升仅增加了西峰和阿克苏的冷积累量,温度每上升  $1^\circ C$ ,苹果冷积累量分别增加 3.8 和 5.0 CP;而热积累时段内,各地热积累量与积累期内平均气温均呈显著正相关关系,积累期内温度每上升  $1^\circ C$ ,热积累量将增加 725~967 GDH。从冷、热积累量和温度相关性的显著性检验结果可见,冷、热积累时段内平均气温与热积累量的相关性高于冷积累量,说明热积累量受气温影响的程度大于冷积累量。

### 2.4 冷、热积累期平均气温对苹果始花期的影响

因为大部分主产地冷、热积累量对温度的变化十分敏感,故本研究利用 1996—2018 年各主产地苹果冷、热积累时段内的平均气温,分析冷、热积累对苹果始花期的影响。由图 2 所示,福山、万荣和西峰的苹果始花期响应线的斜率明显小于  $45^\circ$  且比较相近,说明三地苹果始花期主要受热积累期平均气温的影响,冷积累期的平均气温对其始花的影响相对较小;阿克苏苹果始花期响应线的斜率明显增大,说明其冷积累期的平均气温对其始花期的影响为各主产地中最大,但其响应线斜率也小于  $45^\circ$ ,说明其始花期亦主要受热积累期平均气温的影响。总体上,虽然冷积累期平均气温对我国苹果主产地始花期的影响呈现出从东到西逐渐增大的趋势,但热积累期的平均气温是影响各地苹果始花期的主要因子。

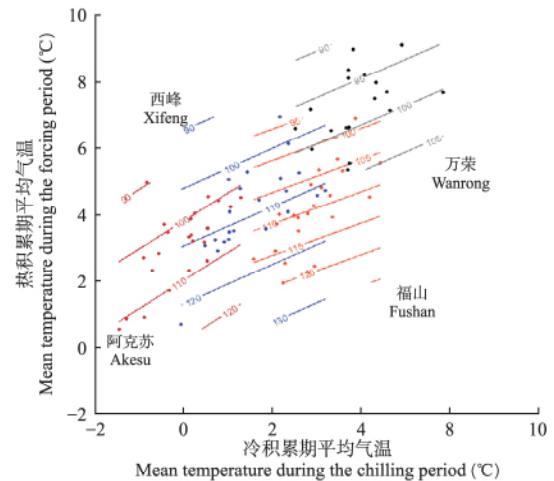


图 2 1996—2018 年冷、热积累期平均气温对中国北方主产地苹果始花期的影响

Fig.2 Influence of the mean temperature during the chilling and heat periods on the first flowering data in the main apple planting areas of the northern China from 1996 to 2018.

图中灰色、橙色、蓝色和红色分别代表福山、万荣、西峰和阿克苏。点表示各地冷、热积累期内平均气温的组合,线表示始花期的分布(日序),其斜率表示冷、热积累期内平均气温对始花期的相对影响 Gray, orange, blue and red in the picture represented Fushan, Wanrong, Xifeng and Aksu, respectively. The point represented the combination of the mean temperature in the chilling and heat accumulation periods, the line represented the distribution of the first flowering data (DOY), and the slope represented the relative influence of the mean temperature during the chilling and heat accumulation periods on the first flowering data.

## 3 讨论

### 3.1 中国北方苹果主产地苹果冷、热积累量及其对始花期的影响

本研究基于中国北方苹果主产地 1996—2018 年长时间序列的苹果始花期观测资料和气温数据,利用动态模型和生长度小时模型计算苹果树逐日冷热积累单元,进而与各地苹果始花期进行 PLS 分析,研究发现,主产地冷、热积累量地区差异较大,这与相关研究中果树冷、热需求量不是一个常数,且同一品种的树种在年际间和地区间均存在显著差异的观点相同<sup>[12]</sup>,反映了果树冷、热需求量与其自身的生态适应性有关<sup>[4]</sup>。其中,就冷积累量而言,福山、万荣和阿克苏苹果冷积累量为 74.1~79.8 CP,与 Parkes 等<sup>[31]</sup>在澳大利亚昆士兰地区测得的富士苹果芽冷需量为  $(77 \pm 1.5)$  CP 的值相近,说明利用本研究方法可以较客观地计算得到各地苹果花的冷积累量。Nasrabadi 等<sup>[32]</sup>对土壤含水量对石榴需冷量的影响研究中发现,同一品种的石榴,冷积累期土壤含水量越低,石榴的需冷量越高。本研究中,西峰位于黄土高原西部产区,冬春季降水量小且果园灌溉

不足,秋冬连旱或冬春连旱时常发生,这可能是导致西峰地区冷积累量显著偏高的原因之一。在各地苹果冷积累量基本满足冷需求的情况下,热积累量将影响苹果始花期发生的时间,热积累多的地区,其始花发生时间相对较早,而热积累少的地区,其始花期相对较晚<sup>[1]</sup>。在本研究中,福山的热积累量最少,其始花期最晚,万荣的热积累量最多,其始花期最早,较好地印证了这一理论。

### 3.2 积累期平均气温对冷、热积累量和始花期的影响

研究发现,西峰和阿克苏的冷积累量与积累期内平均气温呈显著正相关关系,这主要与积累期平均气温高低有关。福山和万荣冷积累期内平均气温分别为 4.09 和 4.32 °C,而西峰和阿克苏分别为 2.41 和 0.92 °C,说明较寒冷地区适度的升温可增加果树冷积累量<sup>[28-29]</sup>,且通过冷积累期平均气温对主产地苹果始花期的影响分析发现,阿克苏苹果始花期较其他三地更易受到冷积累期平均气温的影响,说明冷积累期温度升高可增加阿克苏苹果的冷积累量,从而促进苹果开花。此外,本研究发现,各主产地热积累量与积累期平均气温均呈显著正相关关系,且各地始花期均主要受热积累期平均气温的影响,这与冷、热积累对我国板栗始花期的影响的研究结论一致<sup>[21]</sup>。

### 3.3 气候变暖对苹果产业的影响

我国北方苹果主产地苹果始花期主要受热积累期平均气温的影响,在气候变暖背景下,我国苹果主产地均呈现出冬春升温快的特点,受其影响,西峰和阿克苏的苹果冷、热需求量更容易得到满足,有利于苹果的生长,而对福山和万荣,气候变暖将增加其冷积累不足的风险,虽然热积累可以部分补偿冷积累以减小因冷积累不足而导致的花期延迟<sup>[33]</sup>,但冷积累不足会影响果树展叶和开花的质量,并引起产量和品质的下降<sup>[31]</sup>,从而降低产业发展的经济效益。因此,各主产地需关注冷、热积累期气候变暖趋势,尤其对气温较高且变暖趋势显著的地区,应加大培育低需冷量品种,或通过改善土壤含水量等管理措施以应对气候变暖对苹果生产的负面影响,维持我国苹果稳产、优产及产业的高质量、可持续发展。

#### 参考文献

- [1] 罗国光. 果树词典. 北京: 中国农业出版社, 2007 [Luo G-G. Fruit Tree Dictionary. Beijing: China Agriculture Press, 2007]
- [2] 邬定荣, 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. 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 flower data on Shaanxi Province. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2019, 30 (5): 555-564]
- [3] Campoy JA, Ruiz D, Egea J. Dormancy in temperate fruit trees in a global warming context: A review. *Scientia Horticulturae*, 2011, 130: 357-372
- [4] 赵海亮, 赵文东, 高东升, 等. 落叶果树需冷量及其估算模型研究进展. 北方果树, 2007(6): 1-3 [Zhao H-L, Zhao W-D, Gao D-S, et al. Advance on chilling requirement and its chilling models in deciduous fruit crops. *Northern Fruits*, 2007(6): 1-3]
- [5] Darbyshire R, Webb L, Goodwin L, et al. Winter chilling trends for deciduous fruit trees in Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151: 1074-1085
- [6] Weiberger JH. Chilling requirements of peach varieties. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 1950, 56: 122-128
- [7] Richardson EA, Seeley SD, Walker DR. A model for estimating the completion of rest for "Redhaven" and "Elberta" peach trees. *HortScience*, 1974, 9: 331-332
- [8] Erez A, Couvillon GA, Hendershott CH. The effect of cycle length on chilling negation by high temperature in dormant peach leaf buds. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1979, 104: 573-576
- [9] Fishman S, Erez A, Couvillon GA. The temperature dependence of dormancy breaking in plants-computer-simulation of processes studied under controlled temperatures. *Journal of Theoretical Biology*, 1987, 126: 309-321
- [10] Erez A, Fishman S, Linsley-Noakes GC, et al. The dynamic model for rest completion in peach buds. *Acta Horticulturae*, 1990, 276: 165-174
- [11] Fishman S, Erez A, Couvillon GA. The temperature dependence of dormancy breaking in plants: Mathematical analysis of a two-step model involving a cooperative transition. *Journal of Theoretical Biology*, 1987, 124: 473-483
- [12] 庄维兵, 章镇, 侍婷, 等. 落叶果树需冷量及其估算模型研究进展. 果树学报, 2012, 29(3): 447-453 [Zhuang W-B, Zhang Z, Shi T, et al. Advance on chilling requirement and its chilling models in deciduous fruit crops. *Journal of Fruit Science*, 2012, 29(3): 447-453]
- [13] Lian P, Linsley-Noakes GC, Holcroft DM, et al. Kiwifruit research in a subtropical area. *Acta Horticulturae*, 1997, 444: 37-42
- [14] Ruiz D, Campoy JA, Egea J. Chilling requirements of apricot varieties. *Acta Horticulturae*, 2006, 717: 67-70
- [15] Perez FJ, Ormeno NJ, Reynaert B, et al. Use of the dynamic model for the assessment of winter chilling in a temperate and a subtropical climatic zone of Chile. *Chilean Journal of Agriculture Research*, 2008, 68: 198-206
- [16] Anderson JL, Richardson EA, Kesner CD. Validation of chill unit and flower bud phenology models for "Mont-

- morency" sour cherry. *Acta Horticulturae*, 1986, **184**: 71-78
- [17] 王西成, 钱亚明, 赵密珍, 等. 设施葡萄萌芽调控中需冷量和需热量及其相互关系. *植物生理学报*, 2014, **50**(3): 309-314 [Wang X-C, Qian Y-M, Zhao M-Z, et al. Chilling and heat requirements and their relationship in budburst regulation of *Vitis vinifera* L. for protected cultivation. *Plant Physiology Journal*, 2014, **50**(3): 309-314]
- [18] 赵丹丹, 赵辉, 吴自然, 等. 砧木对梨芽休眠的影响及其需冷量估算方法的统计评价. *西北农业学报*, 2015, **24**(6): 67-74 [Zhao D-D, Zhao H, Wu Z-R, et al. Effects of rootstocks on dormancy of pear leaf buds and statistic evaluation for estimating methods of chilling requirement. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, **24**(6): 67-74]
- [19] 伊兴凯, 徐义流, 张金云, 等. 黄河故道地区砀山酥梨需冷量的研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2013, **41**(9): 133-138 [Yi X-K, Xu Y-L, Zhang J-Y, et al. Measurement and evaluation of chilling requirement of Dangshan pear in the old course of the Yellow River area. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science*, 2013, **41**(9): 133-138]
- [20] 刘聪利, 赵改荣, 李明, 等. 66 个甜樱桃品种需冷量的评价与聚类分析. *果树学报*, 2017, **34**(4): 464-472 [Liu C-L, Zhao G-R, Li M, et al. Determination of chilling requirements and cluster analysis of 66 sweet cherry cultivars. *Journal of Fruit Science*, 2017, **34**(4): 464-472]
- [21] Luedeling E, Guo L, Dai LH, et al. Differential responses of trees to temperature variation during the chilling and forcing phases. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, **181**: 33-42
- [22] Luedeling E, Brown, PH. A global analysis of the comparability of winter chill models for fruit and nut trees. *International Journal of Biometeorology*, 2011, **55**: 411-421
- [23] 程存刚, 赵德英. 新形势下我国苹果产业的发展定位与趋势. *中国果树*, 2018(1): 1-7 [Cheng C-G, Zhao D-Y. Development orientation and trend of the apple industry under the new situation. *China Fruits*, 2018(1): 1-7]
- [24] 蒲金涌, 姚小英, 姚晓红, 等. 气候变暖对甘肃黄土高原苹果物候期及生长的影响. *中国农业气象*, 2008, **29**(2): 181-183 [Pu J-Y, Yao X-Y, Yao X-H, et al. Impacts of climate warming on phenological period and growth of apple tree in Loess Plateau of Gansu Province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, **29**(2): 181-183]
- [25] 屈振江, 周广胜. 中国富士苹果种植的气候适宜性研究. *气象学报*, 2016, **74**(3): 479-490 [Qu Z-J, Zhou G-S. Climate suitability for potential Fuji apple cultivation in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, **74**(3): 479-490]
- [26] 卫建礼. 山西省苹果园灌溉现状、问题及建议. *山西果树*, 2011(4): 31-33 [Wei J-L. Current situation, problems and suggestions of apple garden irrigation in Shanxi Province. *Shanxi Fruits*, 2011(4): 31-33]
- [27] 刘贤赵, 衣华鹏, 李世泰. 渭北旱塬苹果种植分区土壤水分特征. *应用生态学报*, 2004, **11**(15): 2055-2060 [Liu X-Z, Yi H-P, Li S-T. Soil moisture characteristics of apple-planting subarea in Weibei dry highland, Shaanxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **11**(15): 2055-2060]
- [28] 李东. 阿克苏地区农业节水发展规划的思考与建议. *水利规划与设计*, 2014(7): 23-25 [Li D. Thoughts and suggestions on agricultural water saving development planning in Aksu region. *Water Resources Planning and Design*, 2014(7): 23-25]
- [29] 国家气象科学数据中心. 中国地面气象站逐小时观测资料 [DB/OL]. <http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/A.0012.0001.html> [National Meteorological Information Center. Dataset of Hourly Surface Observation Values in China [DB/OL]. <http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/A.0012.0001.html>]
- [30] Guo L, Dai J, Ranjitkar S, et al. Chilling and heat requirements for flowering in temperate fruit trees. *International Journal of Biometeorology*, 2014, **58**: 1195-1206
- [31] Parkes H, Darbyshire R, White N. Chilling requirements of apple cultivars grown in mild Australian winter conditions. *Scientia Horticulturae*, 2020, **260**: 108858
- [32] Nasrabadi M, Ramezani A, Eshghi S, et al. Chilling and heat requirement of pomegranate (*Punica granatum* L.) trees grown under sustained deficit irrigation. *Scientia Horticulturae*, 2020, **263**: 109117
- [33] Ruiz D, Campoy JA, Egea J. Chilling requirements of apricot varieties for flowering. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, **61**: 254-263

作者简介 刘璐, 女, 1981 年生, 硕士, 高级工程师。主要从事气候变化对果树影响研究。E-mail: liululu128@163.com

责任编辑 张凤丽

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



刘璐, 郭梁, 李曼华, 等. 中国北方主产地苹果冷热积累变化及其对始花期的影响. *应用生态学报*, 2020, **31**(7): 2457-2463  
Liu L, Guo L, Li M-H, et al. Changes of chilling and heat accumulation of apple and their effects on the first flowering date in the main planting areas of northern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(7): 2457-2463