

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2021.09.002

王润红,茹晓雅,蒋腾聪,等.基于物候模型研究未来气候情景下陕西苹果花期的可能变化[J].中国农业气象,2021,42(9):729-745

基于物候模型研究未来气候情景下陕西苹果花期的可能变化*

王润红^{1,2,3}, 茹晓雅^{1,2}, 蒋腾聪^{1,2}, 王景红^{3,4}, 王 钊^{3,4}, 苏宝峰⁵, 张 东⁶, 于 强⁷,
冯 浩^{2,7}, 何建强^{1,2,3**}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100; 3. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 西安 710015; 4. 陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 西安 710015; 5. 西北农林科技大学农业农村部农业物联网重点实验室, 杨凌 712100; 6. 西北农林科技大学园艺学院, 杨凌 712100; 7. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 陕西苹果种植面积大、产量高, 但产量易受晚霜冻影响。冻害的发生与苹果花期和晚霜冻时间密切相关, 因此准确预测苹果花期, 研究苹果花期的变化规律对苹果生产防灾减灾具有重要意义。本研究利用物候模型(春暖模型、连续模型、重叠模型和平行模型)研究气候变化背景下陕西苹果花期(包括始花期和末花期)的变化规律。首先, 评价 4 种物候模型在陕西苹果产区模拟苹果花期的效果, 筛选出研究区最佳花期预测模型。然后, 基于所选最佳花期模型模拟历史(1980–2019 年)时期各代表站(洛川、白水、凤翔和长武)的苹果花期。最后, 基于 33 个全球气候模式(Global Climate Models, GCMs)生成的未来气象数据集, 利用所选最佳模型分别模拟 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情景下 2021–2100 年各代表站的苹果花期并研究花期时空变化规律。结果表明, 连续模型是模拟渭北东部和西部苹果花期的最佳模型, 而延安和关中西部苹果花期的最佳模型为平行模型。1980–2019 年各代表站始花期提前速率为 $3.4\sim 4.7\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$, 末花期提前速率为 $3.3\sim 4.6\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$, 空间分布上, 研究区苹果花期从东南到西北逐渐推迟, 年平均花期持续时间为 $10\sim 11\text{d}$ 。在 RCP4.5 情景下, 各代表站 2021–2100 年始花期提前速率为 $0.7\sim 0.9\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$, 末花期提前速率为 $0.6\sim 0.8\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$; 与 1980–2019 年相比, 各代表站 2021–2060 年平均始花期提前 $0\sim 4.4\text{d}$, 末花期提前 $0\sim 5.0\text{d}$, 各代表站 2061–2100 年平均始花期提前 $3.4\sim 7.6\text{d}$, 末花期提前 $2.6\sim 8.2\text{d}$ 。在 RCP8.5 情景下, 2021–2100 年各代表站始花期提前速率为 $1.3\sim 1.8\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$, 末花期提前速率为 $1.3\sim 1.6\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$; 与 1980–2019 年相比, 各代表站 2021–2060 年平均始花期提前 $1.3\sim 5.9\text{d}$, 末花期提前 $1.0\sim 6.1\text{d}$, 各代表站 2061–2100 年平均始花期提前 $6.7\sim 12.4\text{d}$, 末花期提前 $6.2\sim 12.3\text{d}$ 。未来气候条件下, 苹果花期空间分布与历史时期基本一致, 但花期持续时间略有缩短。本研究首次综合花期预测模型和未来气候数据研究陕西苹果产区苹果花期变化, 可为陕西苹果产区应对气候变化产生的花期冻害提供一定的理论依据。

关键词: 陕西苹果; 始花期; 末花期; 霜冻; 花期预测模型; 气候变化

Based on the Phenological Model to Study the Possible Changes of Apple Flowering Dates under Future Climate Scenarios in Shaanxi Province

WANG Run-hong^{1,2,3}, RU Xiao-ya^{1,2}, JIANG Teng-cong^{1,2}, WANG Jin-hong^{3,4}, WANG Zhao^{3,4},

* 收稿日期: 2021-01-20

基金项目: 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放研究基金课题(2019Z-5); 陕西省重点研发计划重点产业创新链(群)-农业领域项目(2019ZDLNY07-03); 国家自然科学基金项目(52079115); 高等学校学科创新引智计划(111计划)(B12007)

** 通讯作者: 何建强, 教授, 从事农业生态系统模拟研究, E-mail: jianqiang_he@nwsuaf.edu.cn

第一作者联系方式: 王润红, E-mail: wangrunhong@nwsuaf.edu.cn

SU Bao-feng⁵, ZHANG Dong⁶, YU Qiang⁷, FENG Hao^{2,7}, HE Jian-qiang^{1,2,3}

(1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Water-Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100; 3. Key Laboratory of Eco-Environmental Meteorology of Qinling Mountains and Loess Plateau, Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710015; 4. Shaanxi Meteorological Service Center of Agricultural Remote Sensing and Economic Crops, Xi'an 710015; 5. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northwest A&F University, Yangling 712100; 6. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling 712100; 7. State Key Laboratory of Soil erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling 712100)

Abstract: Shaanxi has large apple cultivation areas and high apple yields, but its yields are susceptible to late frost. The occurrence of freezing damage is closely related to the apple flowering date and the time of late frost. Therefore, accurate prediction of apple flowering date and research on the temporal and spatial changes of apple flowering date is of great significance to the disaster prevention and mitigation of apple production. In this study, the phenological models (e.g. Spring warming model, Sequential model, Overlap model, and Parallel model) were used to study the variations of apple flowering date (including both first flowering date and end flowering date) in Shaanxi Province under the background of climate change. Firstly, four phenological models were selected to evaluate the results of model simulation on apple flowering date in Shaanxi apple producing areas, and the optimal flowering prediction models in the study area needed to be screened out. Then, based on the selected optimal model, the apple flowering date of each representative station (e.g. Luochuan, Baishui, Fengxiang, and Changwu) during the historical period (1980–2019) was simulated. Finally, based on the future meteorological datasets generated by 33 Global Climate Models (GCMs), the selected model was used to simulate the apple flowering date at each representative station from 2021 to 2100 under the two scenarios of RCP4.5 and RCP8.5, and the temporal and spatial variations of flowering date were analyzed. The results showed that the Sequential model was the optimal model to simulate the apple flowering dates in the Eastern and Western area of Weibei, while the Parallel model was the optimal model for Yan'an and the Western area of Guanzhong. From 1980 to 2019, the first flowering date of representative stations was advanced by $3.4\text{--}4.7\text{d}\cdot 10\text{y}^{-1}$, and the end flowering date of representative stations was advanced $3.3\text{--}4.6\text{d}\cdot 10\text{y}^{-1}$. The apple flowering date in the study area was gradually delayed from southeast to northwest, and the average annual flowering duration was about 10–11 days. Under the RCP4.5 scenario, the advanced rate of first and end flowering date was $0.7\text{--}0.9\text{d}\cdot 10\text{y}^{-1}$ and $0.6\text{--}0.8\text{d}\cdot 10\text{y}^{-1}$ at representative stations from 2021 to 2100. Compared with 1980–2019, the average first and end flowering date for 2021 to 2060 were advanced 0–4.4 days and 0–5.0 days at representative stations, and the average first and end flowering date for 2061 to 2100 were advanced 3.4–7.6 days and 2.6–8.2 days at representative stations. Under the RCP8.5 scenario, the advanced rate of first and end flowering date were $1.3\text{--}1.8\text{d}\cdot 10\text{y}^{-1}$ and $1.3\text{--}1.6\text{d}\cdot 10\text{y}^{-1}$ at representative stations from 2021 to 2100. Compared with 1980–2019, the average first and end flowering date for 2021 to 2060 were advanced 1.3–5.9 days and 1.0–6.1 days at representative stations, and the average first and end flowering date for 2061 to 2100 were advanced 6.7–12.4 days and 6.2–12.3 days at representative stations. Under future climatic conditions, the spatial distribution of apple flowering date was basically the same as the historical period, but the duration of flowering date was slightly shortened. For the first time, this study combined the flowering date prediction model with future climate datasets to study the apple flowering date variations in Shaanxi apple producing areas, and it will provide some theoretical basis for coping with the freezing damage in flowering dates caused by climate change in Shaanxi apple producing area.

Key words: Shaanxi apple; First flowering; End flowering; Frost; Flowering prediction model; Climate change

近年来, 中国苹果 (*Malus domestica* Borkh.) 果园面积稳定在 190 万 hm^2 左右, 2019 年苹果产量超过 4200 万 t, 面积和产量均居世界首位, 而陕西苹果产量约占中国的 1/4 和世界的 1/7^[1-2]。苹果种植业已成为陕西省提升农业、富裕农民的支柱型产业。然而, 陕西苹果产区基本每年都会遭受不同程度的花期冻害, 且是否发生冻害与苹果花期和晚霜冻发生时间密切相关。如果开花日期早于晚霜冻发生的时间, 则发生冻害, 反之则不发生冻害^[3]。

为了减少晚霜冻造成的苹果产量损失, 就需要明确花期变化规律, 以便采取相应的预防措施。目前已有学者进行了相关研究, 李美荣等^[4]利用陕西省苹果产区 2000–2008 年气象资料和 6 个苹果物候观测站始花期资料, 应用统计学方法建立了基于平均气温和日照时数的苹果始花期预测模型; 柏秦凤等^[5]利用 SPSS 统计软件, 分析和筛选影响苹果花期的气象要素, 构建富士系苹果的花期模拟模型, 并研究中国富士系苹果主产区花期的时空分布; 刘璐等^[6]利用偏最小二乘法研究了北方主产地气象因子和始花期的关系, 表明随着温度升高, 始花期提前。相关统计方法虽然也能较为准确地预测苹果花期, 但没有考虑苹果树的生理生态过程。

物候模型则通过假设生物过程和环境因子之间的因果关系来推测物候期, 能在一定程度上反映物候变化的生理生态学机制。最初学者只考虑外休眠过程, 建立了春暖模型^[7-8], 之后同时考虑内休眠和外休眠过程, 建立了连续模型^[9-10]、重叠模型^[11-12]和平行模型^[13-14]。由于物候模型机理性较强的优点, 使其具有广泛的适用性。如邬定荣等^[15]基于陕西各果区代表站的始花期数据及同期气象数据修正了 4 种物候模型的参数, 利用内部检验和交叉验证方法, 评价模型在模拟始花期时的适用性; 王明昌等^[16]利用物候模型中的热时模型模拟礼泉和旬邑的花期, 并进行了冻害等级评价。现有研究都是针对始花期进行的, 然而末花期对于花期冻害具有同等重要的意义, 但目前还未见研究证明适用于始花期模拟的模型是否同样适用于末花期模拟, 也无报道未来气候变化条件下陕西苹果花期 (包括始花期和末花期) 的变化。

本研究利用物候模型探寻气候变化背景下陕西苹果产区苹果花期的变化规律。主要包括: (1) 利用已有物候观测数据估计模型参数, 选择适于模拟

陕西苹果花期的最佳模型; (2) 利用所选最佳模型模拟陕西苹果产区各代表站 (洛川、白水、凤翔和长武) 1980–2019 年的苹果花期, 研究陕西苹果花期的历史变化规律; (3) 基于 33 个全球气候模式 (Global Climate Models; GCMs) 生成的未来气象数据, 利用所选最佳模型研究未来气候条件下陕西苹果花期变化规律, 以为陕西苹果产业花期冻害防灾减灾和应对气候变化提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域和数据来源

研究区域为陕西苹果产区, 根据气候特点将整个区域划分为四个亚区, 即延安、渭北东部、关中西部和渭北西部^[17], 每个亚区各包含 2 个物候观测点 (图 1 和表 1)。研究对象为富士系苹果 (全文简称苹果)。苹果花期观测数据 (表 1) 和 1980–2019 年气象相关资料分别来源于陕西省农业遥感和经济作物中心和陕西省气象局, 将每个物候或气温观测值对应的时间转换为年日序 (Ordinal day from Jan. 1, DOY), 即距当年 1 月 1 日的累计天数。

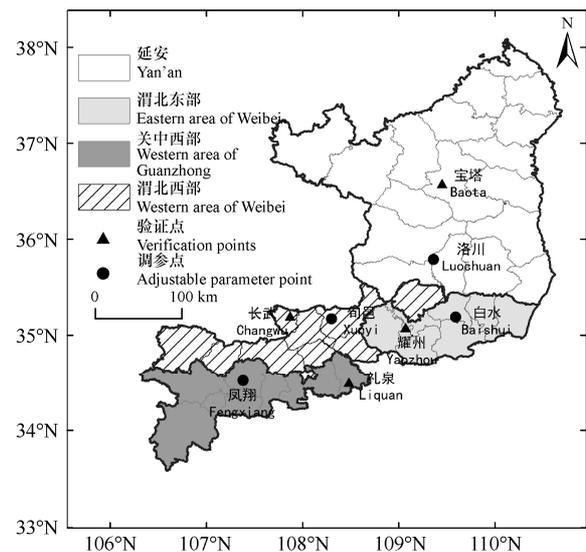


图 1 陕西苹果产区亚区划分及其代表性站点分布

Fig. 1 Sub-region division of apple producing areas in Shaanxi province and distribution of representative stations

RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下 2021–2060 年和 2061–2100 年的未来气象数据来源于 CMIP5 数据集 (<https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip5-dkrz>)。采用 NWA1-WG 统计降尺度方法实现 33 个 GCMs 下月尺度格点气象数据的空间降尺度和时间降尺度^[18], 获得站点日尺度的气象数据, 该方法已在全世界范

表 1 各区代表性站点苹果花期观测记录年份

Table 1 Observations years of apple flowering date at the representative stations in each sub-region

| 亚区 Sub-region | 站点 Station | 始花期观测年份 Observation years of apple first flowering date | 末花期观测年份 Observation years of apple end flowering date |
|--------------------------------|---------------|--|--|
| 延安 Yan'an | 洛川 Luochuan | 2001-2005, 2009, 2012-2018 | 2001-2005 |
| | 宝塔 Baota | 2001-2003, 2005, 2007, 2009, 2012, 2017-2018 | 2001-2003, 2005, 2007-2009 |
| 渭北东部 Eastern area of Weibei | 白水 Baishui | 2001-2004, 2006-2007, 2010-2011, 2016-2018 | 2001-2003, 2006-2008 |
| | 耀州 Yaozhou | 2001-2005, 2007-2009, 2012, 2016-2018 | 2001-2005, 2008-2009 |
| 关中西部 Western area of Guanzhong | 凤翔 Fengxiang | 2001-2005, 2007-2010, 2012-2013, 2016-2018 | 2001-2003, 2013-2014 |
| | 礼泉 Liquan | 2001-2005, 2007-2018 | 2001-2005, 2009, 2013 |
| 渭北西部 Western area of Weibei | 旬邑 Xunyi | 2004, 2007, 2009, 2012-2018 | 2004, 2006, 2013 |
| | 长武 Changwu | 2007-2009 | 2007-2008 |

围内广泛应用^[19-21]。

模型需要每小时的温度输入，利用 Linvill^[22]提出的正弦对数方程计算每小时温度，其计算式为

$$\text{白天: } T(t) = (T_{\max} - T_{\min}) \sin \frac{\pi t}{DL + 4} + T_{\min} \quad (1)$$

$$\text{夜晚: } T(t) = T_s - \frac{T_s - T_{\min}}{\ln(24 - DL)} \ln(t) \quad (2)$$

式中， $T(t)$ 在式（1）和式（2）中分别为日出后和日落后 t 时刻的温度（℃）； T_{\max} 是一日内最高温度（℃）， T_{\min} 是一日内最低温度（℃）； DL 是昼长（h），使用 Almorox 等^[23]描述的算法计算； T_s 是日落温度（℃）。

1.2 苹果花期预测模型

1.2.1 冷却和强迫子模型

苹果花期预测模型（物候模型可以预测果树物候的各个阶段，苹果花期预测模型特指用物候模型预测苹果花期）建立在冷却量和强迫量计算基础上，因此，首先需要确定冷却量和强迫量的计算模型。冷却和强迫子模型是将温度转换为打破休眠的冷却量和强迫量的计算模型，用于反映树木的休眠打破机制。冷却量计算模型选取动态模型^[24-25]，强迫量计算模型选取 GDH 模型^[26]。

（1）动态模型（Dynamic model）

动态模型是一种应用广泛的冷却子模型，其假定冬季寒冷的积累是一个两步过程，最初低温会形成一种中间产物，当中间产物积累到一定数量，就需要相对较高的温度将它转化为冷却量，其计算式为

$$x_i = \frac{e^{\frac{slp-tetmlt}{T_k} - \frac{T_k - tetmlt}{T_k}}}{1 + e^{\frac{slp-tetmlt}{T_k} - \frac{T_k - tetmlt}{T_k}}} \quad (3)$$

$$x_s = \frac{a_0}{a_1} e^{\frac{e_1 - e_0}{T_k}} \quad (4)$$

$$ak_1 = a_1 e^{\frac{e_1}{T_k}} \quad (5)$$

$$inter_E = x_s - (x_s - inter_s) e^{-ak_1} \quad (6)$$

$$inter_s = \begin{cases} t = t_0 : 0 \\ t > t_0^{inter_{E_{t-1}}} < 1 : inter_{E_{t-1}} \\ t > t_0^{inter_{E_{t-1}}} \geq 1 : inter_{E_{t-1}} (1 - x_i) \end{cases} \quad (7)$$

$$delt = \begin{cases} t = t_0 : 0 \\ t > t_0^{inter_E} < 1 : 0 \\ t > t_0^{inter_E} \geq 1 : inter_{E_t} x_i \end{cases} \quad (8)$$

$$CP_t = \begin{cases} t = t_0 : delt \\ t > t_0 : delt + CP_{t-1} \end{cases} \quad (9)$$

$$chill\ portions_t = \begin{cases} t = t_0 : delt \\ t \geq t_0 : delt + chill\ portions_{t-1} \end{cases} \quad (10)$$

式中， slp 、 $tetmlt$ 、 a_0 、 a_1 、 e_0 和 e_1 均为常数，分别取值 1.6、277、139500、 2.576×10^{18} 、12888.8 和 4153.5； $inter_s$ 为中间产物； $delt$ 为冷却部分； $chill\ portions_t$ 为冷却部分的积累（CP）； T_k 为每小时的开氏温度， $T_k = T(t) + 273$ ； t_0 为冷却积累的起始时间； t

为时间 (h)。

(2) GDH 模型 (GDH model)

GDH 模型是一种常用的强迫子模型, 形状是不对称的曲线, 能较准确地计算每日的强迫积累。

当 $T_b < T_h < T_u$ 时

$$GDH = \frac{T_u - T_b}{2} \left[1 + \cos \left(\pi + \pi \frac{T_h - T_b}{T_u - T_b} \right) \right] \quad (11)$$

当 $T_u < T_h < T_c$ 时

$$GDH = (T_u - T_b) \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \frac{T_h - T_u}{T_c - T_u} \right) \right] \quad (12)$$

式中, T_h 为每小时温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_u 为积温的最适温度, 即 25°C ; T_b 为积温的基础温度, 即 4°C ; T_c 为极限温度, 即 36°C 。

1.2.2 总体模型 (Overarching models)

以 9 月 1 日为起点计算多日冷却量的积累, 直到满足冷却和强迫要求时打破休眠。由于对休眠打破机制的理解不同, 苹果花期模型有多种, 选择有代表性的 4 种包括春暖模型^[7-8]、连续模型^[9-10]、重叠模型^[11-12]和平行模型^[13-14]进行对比, 以筛选出适宜陕西苹果主产区各亚区的花期预测模型。

(1) 春暖模型 (Spring warming model)

春暖模型只考虑果树休眠的强迫阶段, 当强迫量积累到满足始花期强迫要求时, 苹果树开花, 强迫积累继续增加到满足末花期强迫要求时, 苹果树开花结束。

$$FD = \sum_{j=1} HM_j \geq HR \quad (13)$$

式中, FD 为苹果树始花期 (末花期) 的年日序 (DOY); HM 为利用 GDH 模型计算的每日强迫量 (GDH); HR 为苹果树需要的强迫要求 (GDH); i 为时间步长 (d); j 为强迫阶段开始的年日序 (DOY)。

(2) 连续模型 (Sequential model)

连续模型包括果树休眠的冷却阶段和强迫阶段, 当冷却积累满足冷却要求后进入强迫阶段, 强迫积累满足始花期强迫要求时, 苹果树开花, 强迫积累继续增加到满足末花期强迫要求时, 苹果树开花结束。

$$CD = \sum_{1st\ Sep} CM_i \geq CR \quad (14)$$

$$FD = \sum_{j=CD} HM_j \geq HR \quad (15)$$

式中, CD 为达到冷却要求的年日序 (DOY);

CM 为动态模型计算的每日冷却量 (CP); CR 为苹果树需要的冷却要求 (CP); FD 为苹果树始花期 (末花期) 的年日序 (DOY); HM 为 GDH 模型计算的每日强迫量 (GDH); HR 是苹果树需要的强迫要求 (GDH); i 为时间步长 (d); j 为强迫积累开始的年日序 (DOY)。

(3) 重叠模型 (Overlap model)

重叠模型中果树休眠的冷却阶段和强迫阶段有一定比例的重叠, 其重叠率可以取 1%~100%, 本研究中重叠率取 25%、50%和 75%, 当冷却积累达到最小冷却要求时, 随后积累的冷却量可以降低强迫要求, 当强迫积累满足这种最低始花期强迫要求时苹果树开花, 强迫积累继续增加到满足末花期强迫要求时开花结束。

$$CD = \sum_{1st\ Sep} CM_i \geq CR_0 \quad (16)$$

$$HR = \beta_1 + \frac{\beta_2}{e^{(\beta_3 \times Ca)}} \quad (17)$$

$$FD = \sum_{j=CD} HM_j \geq HR \quad (18)$$

式中, CD 为达到冷却要求的年日序 (DOY); CM 为动态模型计算的每日冷却量 (CP); CR_0 为最小冷却要求, 其值为连续模型中冷却要求的 75%、50%和 25%; HR 为苹果树需要的强迫要求 (GDH); Ca 为最小冷却要求达到之后的冷却积累 (CP); β_1 为最小强迫要求 (GDH); β_2 为最大强迫要求 (GDH); β_3 为品种参数; FD 为苹果树始花期 (末花期) 的年日序 (DOY); HM 为 GDH 模型计算的每日强迫量 (GDH); i 为时间步长 (d); j 为强迫积累开始的年日序 (DOY)。

(4) 平行模型 (Parallel model)

平行模型表示冷却阶段和强迫阶段同时开始, 当同时达到冷却和始花期强迫要求时苹果树开花, 强迫积累继续增加到满足末花期强迫要求时开花结束。

$$CD^* = \sum_{1st\ Sep} CM_i \quad (19)$$

$$K = \begin{cases} K_{min} + \frac{1 - K_{min}}{CR} CD^*, & CD^* < CR \\ 1, & CD^* > CR \end{cases} \quad (20)$$

$$FD = \sum_{1st\ Sep} (HM_i \cdot K) \geq HR \quad (21)$$

式中, CD^* 为冷却积累量 (CP); CM 为动态模

型计算的每日冷却量 (CP); K 为未满足冷却要求时强迫积累的潜力; K_{min} 为未满足冷却要求时强迫积累的最小潜力; CR 为苹果树需要的冷却要求 (CP); FD 为苹果树始花期 (末花期) 的年日序 (DOY); HM 为 GDH 模型计算的每日强迫量 (GDH); HR 为苹果树需要的强迫要求 (GDH); i 为时间步长 (d)。

1.3 苹果花期模型参数率定和模型验证

利用 R 语言编写模型程序, 并采用模拟退火算法^[27]进行春暖模型 (j 和 HR)、连续模型 (CR 和 HR) 和平行模型 (CR、HR 和 K) 的参数估算。而重叠模型的冷却要求分别取连续模型冷却要求的 75%、50% 和 25%, 然后用模拟退火算法估算参数 β_1 、 β_2 和 β_3 , 并确定强迫要求 (式 17)。采用模拟和观测花期之间的均方根误差 (RMSE) 进行模型模拟精度评价。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (22)$$

式中, X_i 为花期实测值的年日序 (DOY); Y_i 为花期模拟值的年日序 (DOY); n 为样本的个数; RMSE 值越小, 说明模拟值与实测值之间偏差越小, 模拟效果越好。

在陕西苹果产区, 每个站点的苹果始花期观测年份均长于末花期观测年份 (表 1), 因此选用苹果始花期数据进行模型参数估计。将苹果始花期观测数据较长的站点作为模型校准站点 (洛川、白水、凤翔和旬邑), 校准站点 50% 的数据进行模型参数估算, 参数估算结果如表 2 所示。50% 的数据用于验证模型在该站点的模拟效果; 始花期观测数据较短的站点作为模型验证站点 (宝塔、耀州、礼泉和长武), 进一步验证模型在整个亚区模拟苹果始花期的可靠

性, 将整个亚区模拟与观测始花期之间的均方根误差作为模型选择的依据。

由于重叠模型的重叠率不同, 其结果也不同, 首先对比重叠率分别为 25%、50% 和 75% 的重叠模型在陕西苹果产区的始花期模拟结果, 选择其中最优化重叠率的模型和其它 3 种模型的模拟结果进行对比, 选择适合模拟陕西苹果产区苹果始花期的模型。然后, 依据末花期观测数据估计所选模型中与末花期相关的模型参数 (强迫要求), 并验证所选模型模拟末花期的精度。

1.4 线性倾向率

采用一元线性回归方法^[28]对陕西苹果花期进行趋势分析, 用斜率 (Slope) 反映花期的变化趋势, 计算式为

$$Slope = \frac{nf_{ci} \sum_{i=1}^n i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n f_{ci}}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (23)$$

式中, Slope 为趋势线的斜率; n 为观测时段的年数 (n=40); i 为观测的年份 (a); f_{ci} 为苹果始花期 (末花期) 第 i 年的年日序 (DOY)。

1.5 苹果花期历史和未来变化规律分析

在历史气候条件下, 首先选择洛川 (延安)、白水 (渭北东部)、凤翔 (关中西部) 和长武 (渭北西部) 为陕西苹果产区各亚区的代表站, 基于最佳模型模拟 1980–2019 年各代表站苹果花期; 然后, 通过一元线性回归方法分析花期时间变化规律; 最后, 分别计算每个站点的平均花期, 并研究花期的空间分布规律。

在未来气候变化条件下, 利用所选的最佳苹果

表 2 模型参数估算结果

Table 2 Estimation results of model parameters

| | j | CR (CP) | CR _o (CP) | HR (GDH) | β_1 (GDH) | β_2 (GDH) | β_3 | K_{min} |
|---------------------------|---|---------|----------------------|----------|-----------------|-----------------|-----------|-----------|
| 热时模型 Spring warming model | 1 | | | 5038.55 | | | | |
| 连续模型 Sequential model | | 76.60 | | 4556.00 | | | | |
| 25%重叠模型 25%Overlap model | | | 57.45 | | 4162.17 | 28880.27 | 0.03 | |
| 50%重叠模型 50%Overlap model | | | 38.30 | | 4383.76 | 25831.37 | 0.09 | |
| 75%重叠模型 75%Overlap model | | | 19.15 | | 3085.59 | 25468.08 | 0.07 | |
| 平行模型 Parallel model | | 117.96 | | 4785.14 | | | | 0.0001 |

注: 重叠率 25% 的重叠模型简称 25% 重叠模型; 重叠率 50% 的重叠模型简称 50% 重叠模型; 重叠率 75% 的重叠模型简称 75% 重叠模型。下同。

Note: The overlap model with 25% overlap rate is referred to as 25% overlap model, the overlap model with 50% overlap rate is referred to as 50% overlap model, the overlap model with 75% overlap rate is referred to as 75% overlap model. The same as below.

花期预测模型和 33 个 GCMs 生成的未来气象数据，模拟 RCP4.5 和 RCP8.5 两种排放情景下 2021–2060 年和 2061–2100 年各代表站苹果花期；然后，计算不同 GCMs 下各代表站 2021–2060 年和 2061–2100 年的平均花期，研究其相对于 1980–2019 年平均花期的变化规律，并利用 ArcGIS 绘制花期空间分布图，研究花期的空间分布规律；最后，以 33 个 GCMs 计算的平均值为每年的花期，通过一元线性回归方法分析花期的时间变化规律。

1.6 数据处理

用 R 语言编写花期预测模型和模拟退火算法程序，估算花期预测模型参数；用 excel 进行一元线性回归，计算花期线性倾向率；用 sigmaplot 和 ArcGIS

绘图，展示计算结果。

2 结果与分析

2.1 苹果花期预测模型筛选

2.1.1 重叠模型中重叠率的确定

对不同重叠率（25%、50%和 75%）的重叠模型模拟始花期的结果进行比较分析。由图 2 可见，在渭北东部，25%重叠模型表现最好（RMSE 为 3.57）；在延安和关中西部，50%重叠模型表现最好（RMSE 分别为 6.65 和 5.24）；在渭北西部，75%重叠模型表现最好（RMSE 为 3.95）。总体而言，由于 50%重叠模型在两个亚区的模拟结果较好，因此选择 50%重叠模型与其它 3 种苹果花期预测模型进行比较（图 2）。

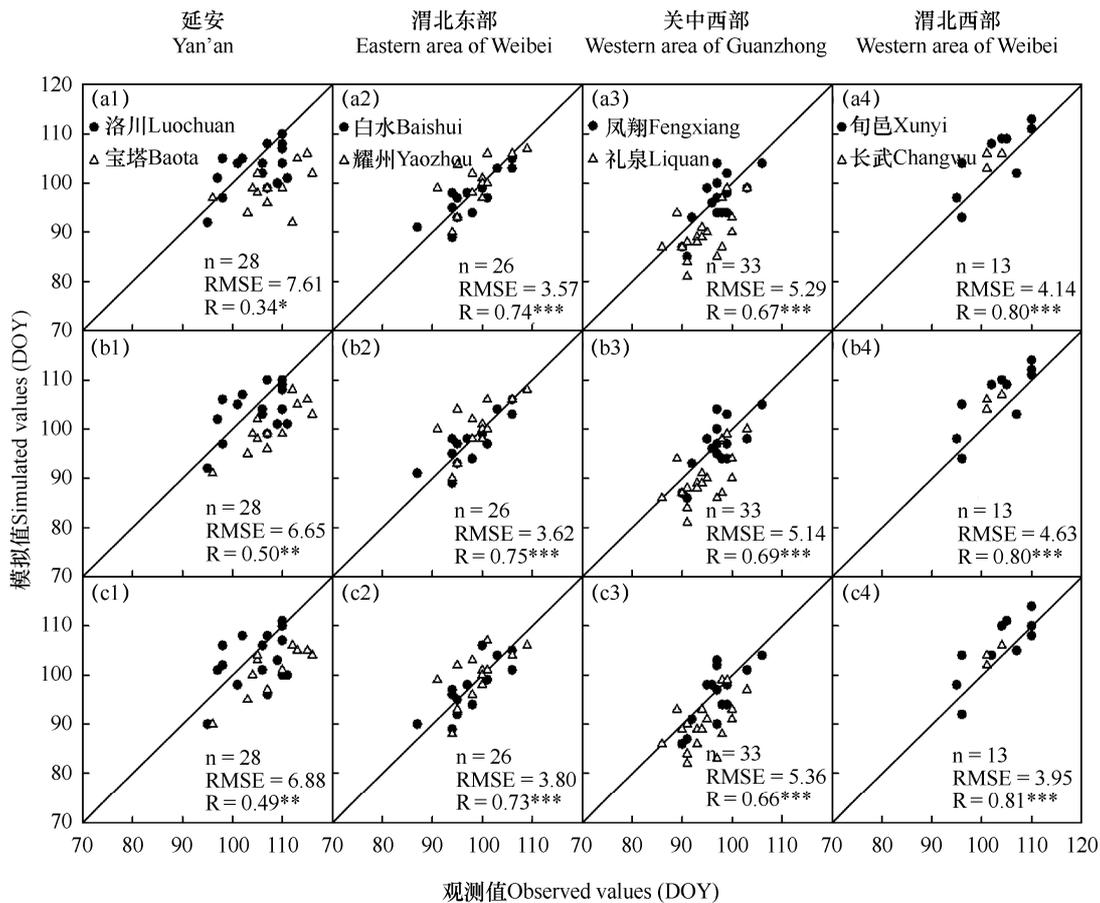


图 2 各代表站冷却和强迫重叠率分别为 25% (a)、50% (b) 和 75% (c) 时重叠模型对始花期模拟值与观测值的对比
 Fig. 2 Observed apple first flowering date of each representative station vs. simulated values by Overlap models when chilling and forced overlap rates are set to 25% (a), 50% (b) and 75% (c)

注：*、**、***分别表示相关系数通过 0.1、0.05、0.01 水平的显著性检验。下同。
 Note: * is P<0.1, ** is P<0.05, *** is P<0.01. DOY is the ordinal day from Jan.1. The same as below.

2.1.2 最佳模型确定

对比分析春暖模型、连续模型、50%重叠模型和平行模型对苹果始花期的模拟值与观测值，由图 3 可知，在延安亚区，平行模型表现最好（RMSE 为 6.64d），春暖模型、连续模型和 50%重叠模型的 RMSE 分别比平行模型高 0.74d、1.36d 和 0.01d。在渭北东部，连续模型表现最好（RMSE 为 3.36d），春暖模型、50%重叠模型和平行模型的 RMSE 分别比连续模型高 0.19d、0.26d 和 0.22d。在关中西部，平行模型表现最好（RMSE 为 4.64d），春暖模型、连续模型和 50%重叠模型的 RMSE 分别比平行模型高 1.34d、0.83d 和 0.50d。在渭北西部，连续模型表现最好（RMSE 为 3.04d），春暖模型、50%重叠模型和

平行模型的 RMSE 分别比连续模型高 0.77d、0.56d 和 0.41d。总体而言，连续模型适合渭北东部和渭北西部苹果始花期模拟，平行模型适合延安和关中西部苹果始花期模拟。

分别估算连续模型在渭北东部和渭北西部以及平行模型在延安和关中西部模拟苹果末花期的强迫要求（其它参数与模拟始花期时一致），其结果分别为 6831.86GDH 和 7078.01GDH。利用连续模型模拟渭北东部和西部，利用平行模型模拟延安和关中西部的苹果末花期，并与观测值进行比较，结果表明，4 个亚区 75% 的苹果末花期模拟值与观测值的 RMSE 小于 5d，其中旬邑和白水两个站点苹果末花期的 RMSE 小于 3d。可见连续模型和平行模型可以较为

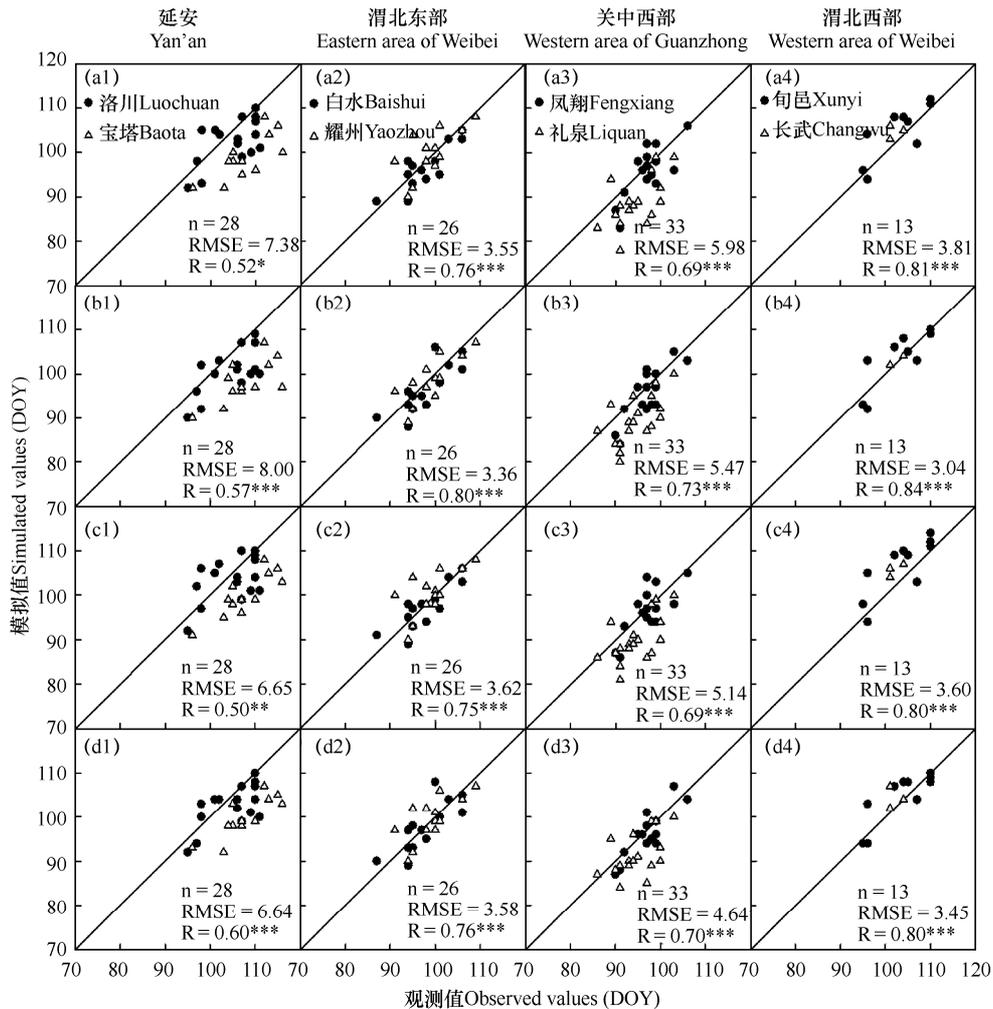


图 3 各代表站始花期观测值与春暖模型 (a)、连续模型 (b)、50%重叠模型 (c)，以及平行模型 (d) 模拟值的对比
 Fig. 3 Observed apple first flowering date of each representative station vs. simulated values by the Spring warming model (a), Sequential model (b), 50% Overlap model (c), and Parallel model (d)

准确地模拟陕西苹果产区苹果末花期。因此，连续模型是模拟渭北东部与西部苹果花期（包括始花期和末花期）的最佳模型，而平行模型则是延安和关中西部苹果花期（包括始花期和末花期）模拟的最佳模型。

2.2 最佳模型模拟的苹果花期历史变化

利用连续模型和平行模型模拟计算 1980–2019 年各代表站始花期和末花期，结果见图 4。由图可知，在研究区域内，各代表站苹果始花期和末花期模拟值存在一定差异。洛川的苹果始花期和末花期均值分别为 108DOY（最早 92，最晚 119）和 119DOY（最早 107，最晚 129），花期持续时间均值为 11d；白水的苹果始花期和末花期均值分别为 101DOY（最早 86，最晚 114）和 111DOY（最早 97，最晚 122），花期持续时间均值为 10d；凤翔的苹果始花期和末花期均值分别为 102DOY（最早 87，最晚 114）和 113DOY（最早 96，最晚 124），花期持续时间

均值为 11d；长武的苹果始花期和末花期均值分别为 109DOY（最早 90，最晚 122）和 120DOY（最早 101，最晚 133），花期持续时间均值为 11d。空间上，北部站点（洛川）的苹果始花期和末花期均值较南部站点（凤翔）晚 6d，西部站点（长武）的苹果始花期和末花期均值较东部站点（白水）分别晚 8d 和 9d。可见，研究区域内，花期持续时间基本相同，在空间上从东南向西北存在较为明显的推迟趋势。

利用连续模型和平行模型模拟计算 1980–2019 年各代表站（洛川、白水、凤翔和长武）苹果始花期和末花期，其年际变化见表 3。由表可见，长武苹果始花期和末花期提前速率最大，洛川苹果始花期和末花期提前速率最小，白水和凤翔苹果始花期和末花期提前速率相差不大。说明 4 个代表性站点苹果始花期和末花期均提前。

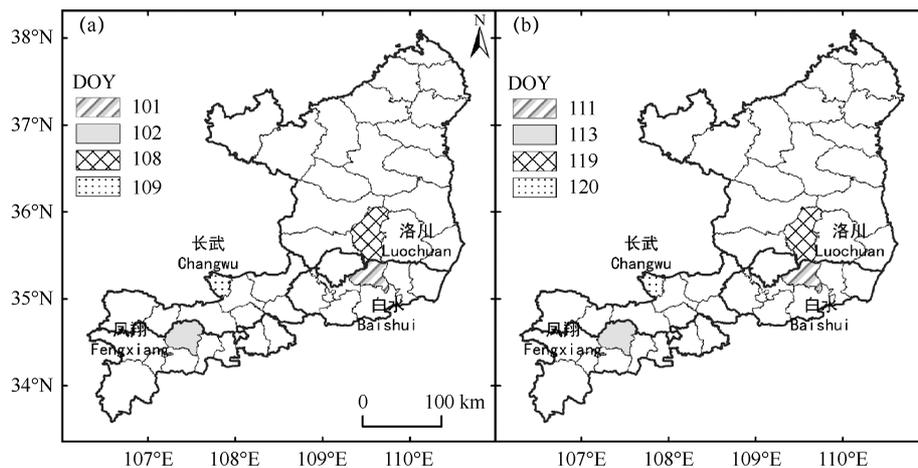


图 4 基于连续模型和平行模型模拟值的各代表站 1980–2019 年苹果平均始花期 (a) 和末花期 (b) 的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of average apple first flowering date (a) and end flowering date (b) from 1980 to 2019 at each representative station based on simulation values of Sequential model and Parallel model

表 3 基于连续模型和平行模型模拟值的各代表站 1980–2019 年苹果花期线性倾向率

Table 3 Linear trend rate of apple flowering date from 1980 to 2019 at each representative station based on the simulation values of Sequential model and Parallel model

| 亚区 Sub-region | 站点 Station | 始花期 (d·10a ⁻¹) First flowering date (d·10y ⁻¹) | 末花期 (d·10a ⁻¹) End flowering date (d·10y ⁻¹) |
|--------------------------------|---------------|---|---|
| 延安 Yan'an | 洛川 Luochuan | -3.4 ^{***} | -3.3 ^{***} |
| 渭北东部 Eastern area of Weibei | 白水 Baishui | -3.6 ^{***} | -3.7 ^{***} |
| 关中西部 Western area of Guanzhong | 凤翔 Fengxiang | -3.8 ^{***} | -3.8 ^{***} |
| 渭北西部 Western area of Weibei | 长武 Changwu | -4.7 ^{***} | -4.6 ^{***} |

2.3 最佳模型模拟的苹果花期未来可能变化

2.3.1 空间分布

利用连续模型和平行模型模拟计算 2021–2100 年各代表站始花期和末花期, 结果见图 5 和图 6。在 RCP4.5 情境下, 2021–2060 年洛川的苹果始花期和末花期平均值分别为 104DOY 和 115DOY, 花期持续时间平均值为 11d, 2061–2100 年分别为 101DOY 和 112DOY, 花期持续时间平均值为 11d; 同理, 2021–2060 年白水、凤翔和长武的花期平均值分别为 101–111DOY、97–109DOY 和 105–115DOY, 花期持续时间平均值分别为 10d、12d 和 10d, 2061–2100 年 3 站花期平均值分别为 98–1108DOY、94–107DOY 和 102–112DOY, 花期持续时间平均值分别为 11d、13d 和 10d。在 RCP8.5 情境下, 2021–2060 年各代表站花期平均值为 103–114DOY、100–110DOY、96–108DOY 和 104–114DOY, 2021–2060 年分别为 96–107DOY、94–105DOY、90–103DOY 和 98–108DOY,

各代表站花期持续时间与 RCP4.5 情景一致。空间上, 在 RCP4.5 情景下, 2021–2060 年北部站点(洛川)的苹果始花期和末花期平均值较南部站点(凤翔)分别晚 7d 和 6d, 西部站点(长武)较东部站点(白水)晚 4d; 2061–2100 年北部站点(洛川)的苹果始花期和末花期平均值较南部站点(凤翔)分别晚 7d 和 5d, 西部站点(长武)较东部站点(白水)分别晚 5d 和 4d。在 RCP8.5 情景下, 2021–2060 年北部站点(洛川)的苹果始花期和末花期平均值较南部站点(凤翔)分别晚 7d 和 6d, 西部站点(长武)较东部站点(白水)晚 4d; 2061–2100 年北部站点(洛川)的苹果始花期和末花期平均值较南部站点(凤翔)分别晚 6d 和 4d, 西部站点(长武)较东部站点(白水)分别晚 4d 和 3d。综上可知, 未来洛川和白水的苹果花期持续时间基本不变, 凤翔站略有延长, 长武站略有缩短, 花期在空间上从东南向西部逐渐推迟, 但空间差距略有缩小。

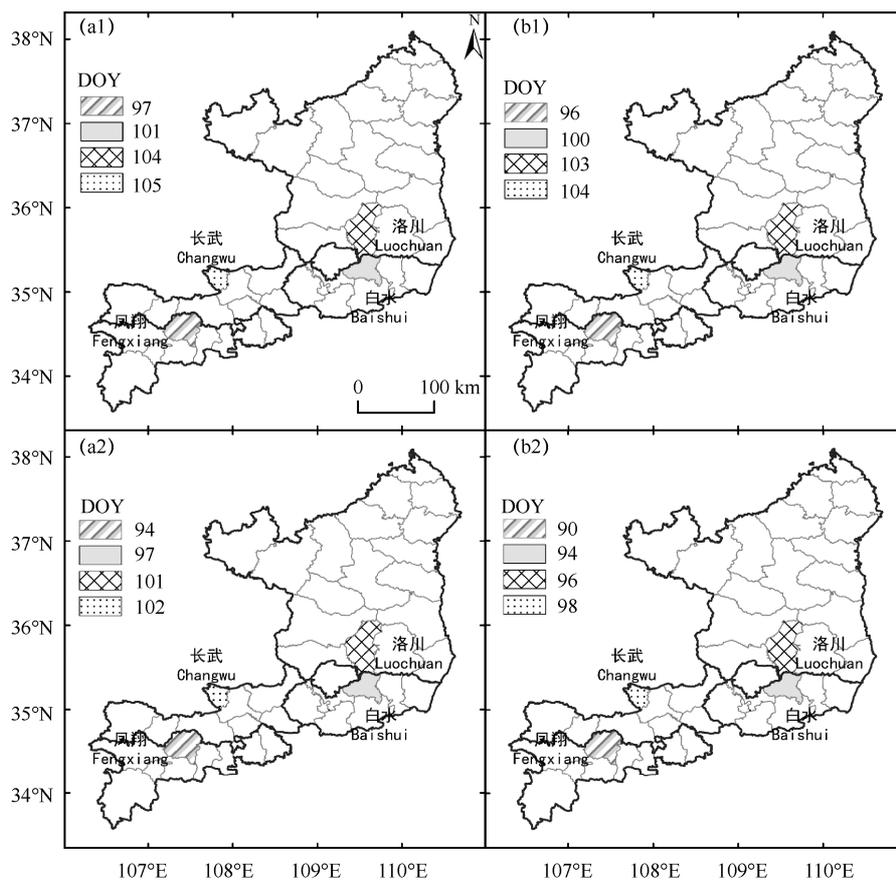


图 5 RCP4.5(a)和 RCP8.5(b)情境下基于连续模型和平行模型模拟值的各代表站未来 2021–2060 年(1)和 2061–2100 年(2)苹果平均始花期的空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of average apple first flowering date at each representative station for 2021–2060(1) and 2061–2100(2) based on the simulation values of Sequential model and Parallel model under RCP4.5(a) and RCP8.5(b) scenarios (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

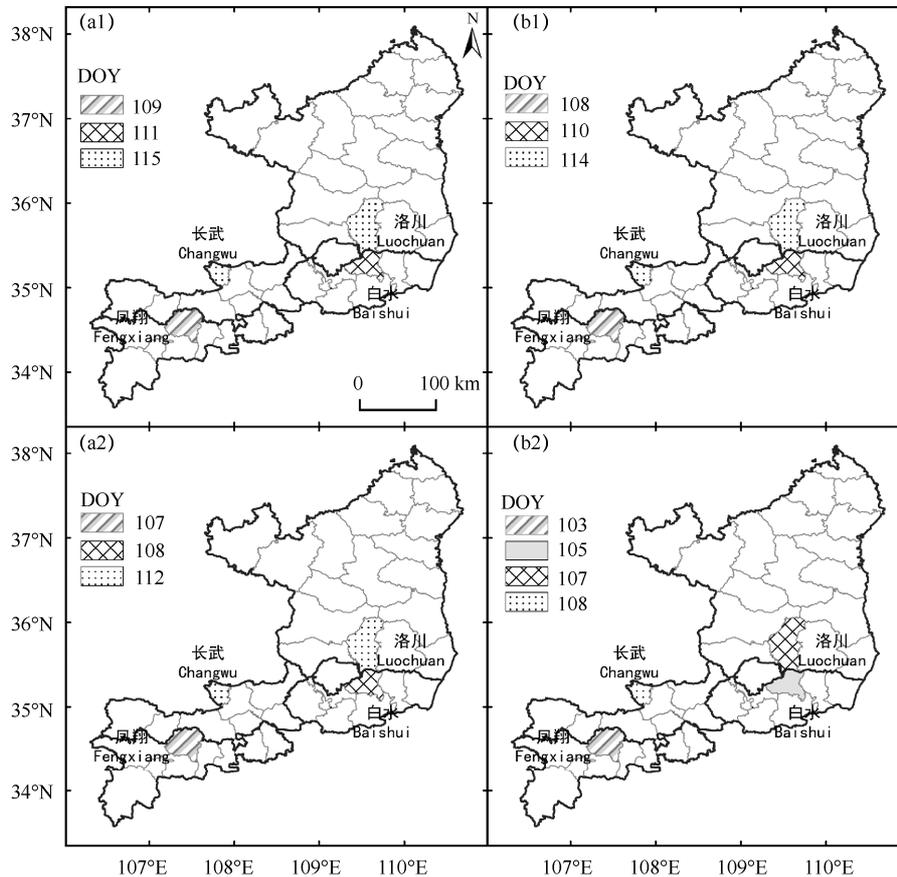


图 6 RCP4.5(a)和 RCP8.5(b)情境下基于连续模型和平行模型模拟值的各代表站未来 2021–2060 年(1)和 2061–2100 年(2)苹果平均末花期的空间分布

Fig.6 Spatial distributions of average apple end flowering date at each representative station for the two future periods of 2021–2060(1) and 2061–2100(2) based on the simulation values of Sequential model and Parallel model under RCP4.5(a) and RCP8.5(b) scenarios

2.3.2 时间变化趋势

在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，基于连续模型和平行模型预测 33 个 GCMs 下 2021–2100 年各代表站苹果始花期和末花期，计算不同 GCMs 下 2021–2060 年和 2061–2100 年的苹果始花期和末花期的平均值，结果见图 7 和图 8。由图可知，在 RCP4.5 情景下，2021–2060 年洛川、凤翔和长武苹果始花期相较于 1980–2019 年平均分别提前 3.6d、4.8d 和 4.4d，末花期平均分别提前 3.6d、3.7d 和 5.0d，而白水苹果始花期和末花期的均值不变；2061–2100 年洛川、白水、凤翔和长武的苹果始花期分别平均提前 6.6d、3.4d、7.6d 和 7.5d，末花期平均分别提前 6.7d、6.3d、2.6d 和 8.2d。在 RCP8.5 情景下，2021–2060 年洛川、白水、凤翔和长武的苹果始花期相较于 1980–2019 年平均分别提前 5.1d、1.3d、5.9d 和 5.4d，末花期平均分别提前 5.2d、

1.0d、4.6d 和 6.1d；2061–2100 年洛川、白水、凤翔和长武的苹果始花期平均分别提前 12.4d、6.7d、12.0d 和 11.4d，末花期平均分别提前 11.8d、6.2d、9.9d 和 12.3d。花期变化主要受温度影响，未来气候条件下在各代表站中，白水的平均温度变化值最小，相应的其苹果花期的变化也较小。

在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，基于连续模型和平行模型预测 33 个 GCMs 下 2021–2100 年各代表站苹果始花期和末花期，用 33 个 GCMs 预测结果的平均值代表每年的苹果始花期和末花期，以此为依据研究 2021–2100 年苹果始花期和末花期的年际变化规律，结果见图 9 和图 10。由图可知，各代表站苹果始花期和末花期均提前，但提前速率较 1980–2019 年小。具体表现为，在 RCP4.5 情景下，洛川和凤翔始花期提前速率最小 ($0.7d \cdot 10a^{-1}$)，白水始花期提前

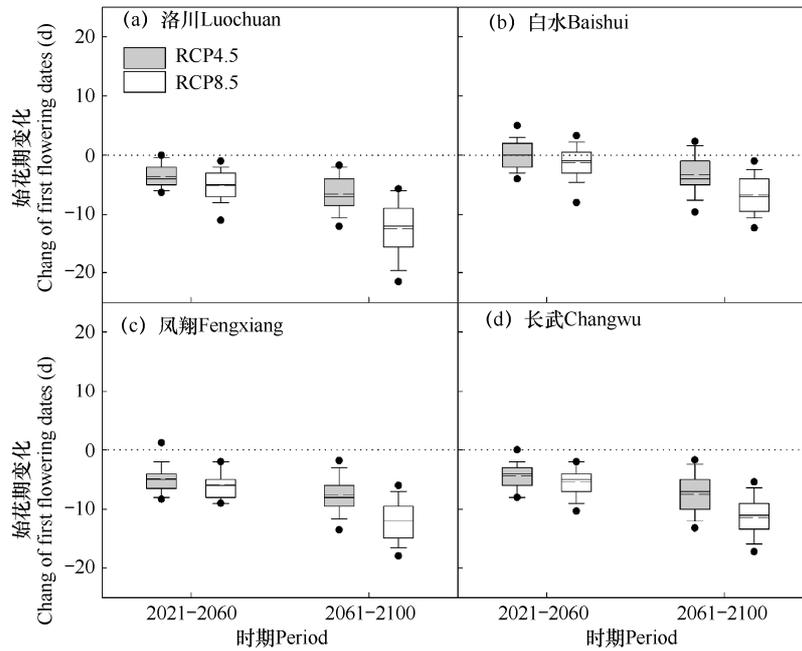


图 7 基于连续模型和平行模型模拟值的各代表站未来 2 个时期 (2021-2060 年和 2061-2100 年) 苹果始花期均值较 1980-2019 年的变化

Fig. 7 The change of average of apple first flowering date in the next 2 periods (2021-2060 and 2061-2100) at each representative station compared to 1980-2019 based on the simulation values of Sequential model and Parallel model

注：每个箱体包含 33 个 GCMs 的结果；箱体上、下限分别是数据的上四分位数和下四分位数，中间实线为数据的中位数；箱体中的虚线为数据平均值；箱体外的两条线是上边缘和下边缘，超出上下边缘的值为异常值。下同。

Note: Each box contains the results of 33 GCMs; the upper and lower limits of the box are the upper and lower quartiles of the data; the middle solid line of the box is the median of the data; the dotted line in the box is average of the data; the two lines outside the box are the upper and lower edges, the value beyond the upper and lower edges are an outlier. The same as below.

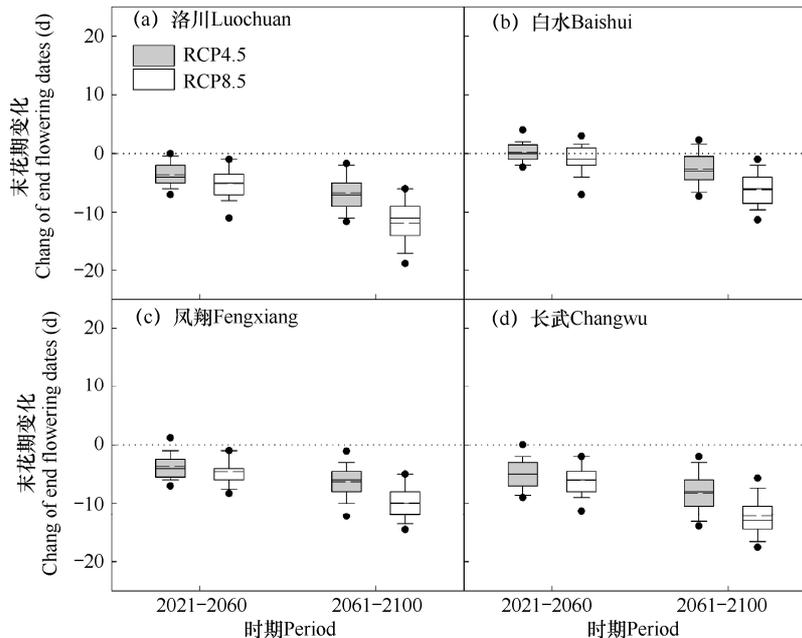


图 8 基于连续模型和平行模型模拟值的各代表站未来 2 个时期 (2021-2060 年和 2061-2100 年) 苹果末花期均值较 1980-2019 年的变化

Fig. 8 The change of average of apple end flowering date in the next 2 periods (2021-2060 and 2061-2100) at each representative station compared to 1980-2019 based on the simulation values of Sequential model and Parallel model

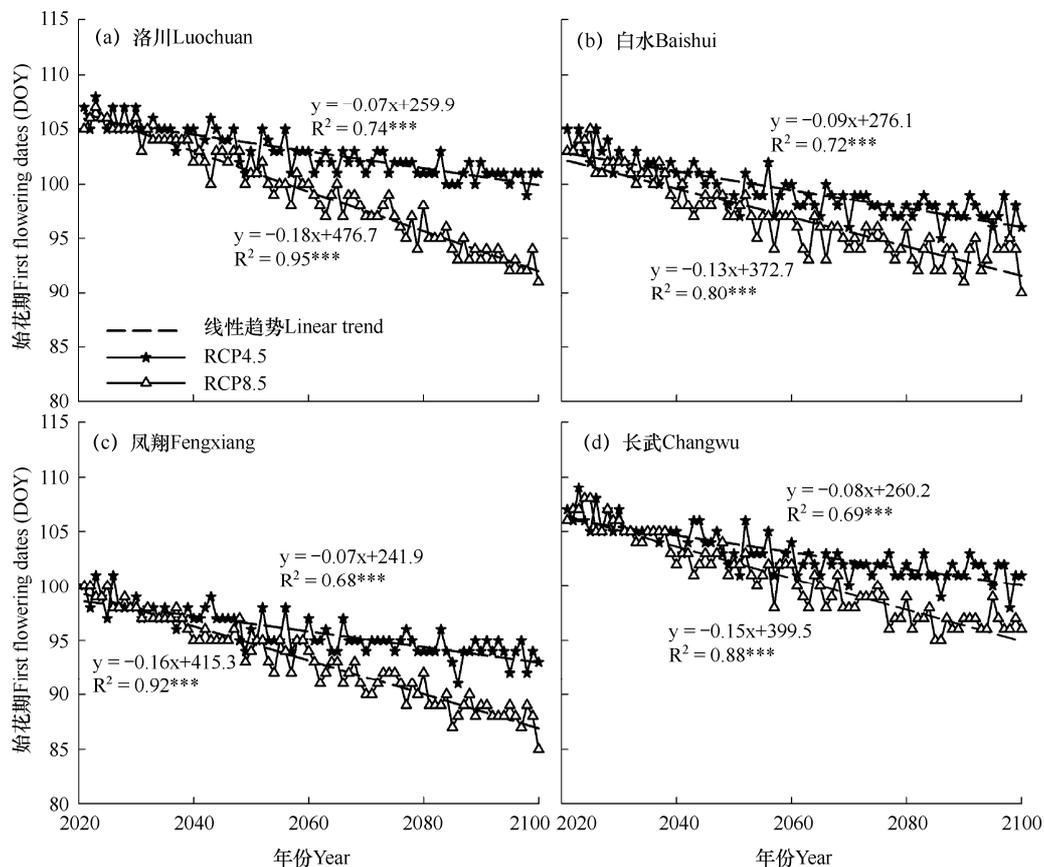


图9 基于连续模型和平行模型模拟值的各代表站 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 2021–2100 年苹果始花期年际变化

Fig. 9 Interannual change of apple first flowering date under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios at each representative station based on the simulation values of Sequential model and Parallel model

注：每年的始花期是 33 个 GCMs 结果的平均值。下同。

Note: The first flowering dates per year is the average of the results of 33 GCMs. The same as below.

速率最大 ($0.9\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$), 凤翔末花期提前速率最小 ($0.6\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$), 洛川长武末花期提前速率最大 ($0.8\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$); 在 RCP8.5 情景下, 白水始花期提前速率最小 ($1.3\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$), 洛川始花期提前速率最大 ($1.8\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$), 白水和凤翔末花期提前速率最小 ($1.3\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$), 洛川末花期提前速率最大 ($1.6\text{d}\cdot 10\text{a}^{-1}$)。总体上, RCP8.5 情景下苹果始花期和末花期的提前速率均大于 RCP4.5 情景。

3 结论与讨论

3.1 讨论

3.1.1 苹果花期模拟模型评价

柏秦凤等^[17]依据统计分析原理, 对陕西各苹果产区花期和花期前的各项气象因子进行详细的相关性分析, 基于分析结果分果区建立了陕西苹果的始花期预测模型, 并通过回代和预测对模型进行检验,

检验结果显示平均误差小于 3d, 但该研究并未考虑苹果的生理生态学过程。而考虑生理生态学过程的物候模拟模型, 并没有一个单一的模型能够准确地预测所有树种的物候期, 这一点已经被许多前期研究所证实, 因此, 必须尽可能多地对每个树种测试不同的物候模拟模型^[27]。邬定荣等^[15]使用遗传算法以 11 月 1 日为冷却积累起点进行物候模型参数评估, 对比了热时模型、连续模型、平行模型和深度休息模型在陕西苹果产区的表现。本研究以 9 月 1 日为冷却积累起点模拟陕西不同苹果产区的花期, 使用模拟退火算法进行模型参数估计, 同时考虑了子模型不同组合对模拟结果的影响^[29], 选择普适性较强的动态模型和 GDH 模型^[30-31], 发现连续模型在渭北西部和渭北东部, 平行模型在延安和关中西部模拟苹果花期的结果好于邬定荣等^[15]在陕西苹果产区的

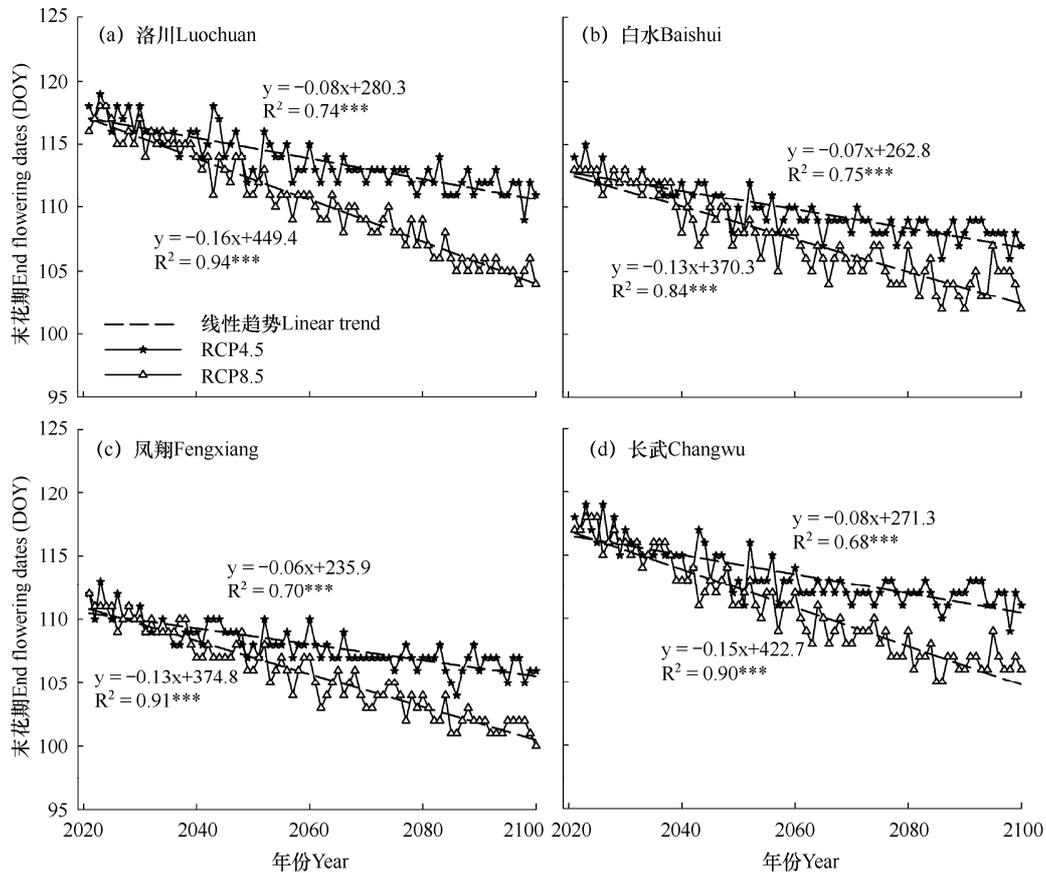


图 10 基于连续模型和平行模型模拟值的各代表站 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下 2021–2100 年苹果末花期年际变化

Fig. 10 Interannual change of apple end flowering date under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios at each representative station based on the simulation values of Sequential model and Parallel model

研究结果 (RMSE 在 3.53~9.08) 可以看出, 子模型组合的选择、冷却积累起点和参数估计方法都会对苹果花期的模拟结果产生较大影响。

连续模型是模拟渭北东部和西部苹果花期的最佳模型, 而平行模型则是模拟延安和关中西部苹果花期的最佳模型, 而延安和关中西部气候背景和开花期相距甚远, 这可能是由于平行模型在整个陕西苹果产区表现较好, 连续模型在渭北东部和西部的表现较平行模型好, 而在延安和关中西部的表现远不如平行模型, 是因为连续模型在温暖的冬季模拟结果偏早, 在寒冷的冬季结果偏晚^[32]。如果想在陕西苹果产区使用同一种模型预测苹果花期, 推荐使用平行模型。

本研究中, 4 个总体模型都是在动态模型和 GDH 模型的基础上进行冷却量和强迫量的计算, 但其对于花期的预测结果却有所不同, 这表明不同的休眠打破模拟机制对苹果花期的模拟结果有一定的影响,

但目前还没有研究可以证明哪一种模型对休眠打破机制的描述更为准确^[33]。本研究的不足之处还表现在 4 种花期预测模型都仅考虑了温度对花期的影响, 忽略了影响苹果花期的其它因素, 如光周期^[34]、降水量^[35]、相对湿度和日照时数^[6]等。想更准确地预测苹果花期, 不仅要考虑对休眠打破机制有更进一步的研究, 还需要考虑其它因素对苹果花期的影响。此外, Hanninen 等^[36]指出仅利用自然条件下的物候观测数据建模时, 模型模拟树木的真实生理过程的风险很高, 有必要引入实验研究物候, 这为后期研究提供了一种新思路。

3.1.2 陕西苹果产区花期变化

基于模型分析可知 1980–2019 年陕西苹果花期提前, 这与前人对陕西苹果花期的研究结果一致^[16, 37], 同时与前人对中国郑州桃子^[38]、欧洲的 6 种植物^[39]和西欧苹果^[40]物候期的研究结果也基本一致, 说明模型可以较为准确地模拟苹果花期的时间变化规

律。在研究区域内, 各代表站 1980–2019 年和 2021–2100 年的花期都提前, 但 2021–2100 年花期提前速率较 1980–2019 年小, 这可能是由于花期与温度并不是简单的线性关系, 不同阶段的温度对花期影响不同, 冷却阶段高温会增加满足冷却要求的时间, 强迫阶段高温会减少满足强迫要求的时间, 随着温度的持续升高, 强迫阶段的强迫要求很容易满足, 但需要更久的时间满足冷却要求, 使得花期提前的速率变小^[3]; 而 RCP8.5 情境下较 RCP4.5 情景下苹果花期提前值大, 可能是由于两种情景下温度变化有着相似的规律。空间上, 花期从东南向西部逐渐推迟, 这可能是由于无论是在 1980–2019 年还是 2021–2100 年, 温度在空间上的变化趋势都一致。

苹果是否发生冻害主要跟花期与晚霜冻的相对时间相关, 2021–2100 年随着温度升高, 洛川、白水和凤翔的花期提前了, 但晚霜冻提前更多, 不会发生冻害, 长武的苹果开花日期较晚霜冻早, 容易发生冻害, 以后要加强该地以及与其气候相似地区的花期冻害预防。目前仅进行了定性的判断, 今后的研究中将结合苹果冻害等级进一步精细化评价陕西地区冻害发生的等级以及造成的损失, 以期能通过预测冻害及时提醒果农采取适当的预防措施减少不必要的损失。

本研究相较于陕西地区苹果花期已有的研究, 首次建立了苹果末花期预测模型, 能较准确确定苹果花期, 便于研究花期冻害; 首次在该地区借助 GCMs 研究未来苹果花期的变化规律, 为预防花期冻害提供理论依据。未来气候条件下, 温度持续升高还可能导致陕西南部温暖苹果产区冷却阶段的冷却要求不能满足, 从而导致苹果树休眠无法打破。为了确保苹果树能正常开花, 建议苹果种植区逐渐向温度更低的高海拔地区以及向北扩张。最后, 春季灌水、施肥、种草等措施也会在一定程度上影响苹果花期, 但本研究模拟苹果花期时忽略了这些因素。因此, 后期有必要就果园管理技术对苹果开花的影响进一步研究。

3.2 结论

(1) 在陕西苹果产区的 4 个亚区(延安、渭北东部、关中西部和渭北西部)中, 连续模型为渭北东部和西部苹果花期模拟的最佳模型, 平行模型为延安和关中西部花期模拟的最佳模型。如果想在陕西苹果产区使用同一种模型预测苹果花期, 推荐使

用平行模型。

(2) 各代表站 1980–2019 年苹果花期均提前, 其中长武花期提前速率最大, 洛川花期提前速率最小。苹果花期持续时间约为 11d, 且苹果花期从东南向西北逐渐推迟。

(3) 未来气候条件下, 各代表站 2021–2060 年和 2061–2100 年苹果花期均值相较于 1980–2019 年提前, 其中 RCP8.5 较 RCP4.5 情景花期提前值大; 相同情景下, 2061–2100 年花期提前值大于 2021–2060 年。在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 各代表站 2021–2100 年苹果花期提前, 但其提前速率较 1980–2019 年小。陕西苹果花期空间变化同历史时期一致, 但花期持续时间略有变化。

参考文献 References

- [1] 傅文豪.陕西省苹果园土壤硝态氮累积特性研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
Fu W H.Studying the dynamics of nitrate accumulation in the soil profile of apple orchard in Shaanxi province[D].Yangling:Northwest Agriculture and Forestry University, 2019.(in Chinese)
- [2] 国家统计局.年度数据 [EB/OL].(2019)[2020-12-22].
<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
National Bureau of Statistics.Annual data[EB/OL].(2019)[2020-12-22]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>. (in Chinese)
- [3] Guo L,Wang J,Li M,et al.Distribution margins as natural laboratories to infer species' flowering responses to climate warming and implications for frost risk[J].Agricultural and Forest Meteorology,2019,268:299-307.
- [4] 李美荣,杜继稳,李星敏,等.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 M R,Du J W,Li X M,et al.Prediction model for beginning of apple flowering period in fruit growing[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2009,30(3):417-420. (in Chinese)
- [5] 柏秦凤,霍治国,王景红,等.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 Q F,Huo Z G,Wang J H,et al.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.(in Chinese)

- [6] 刘璐,王景红,傅玮东,等.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 L,Wang J H,Fu W D,et al.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.(in Chinese)
- [7] Cannell M G R,Smith R I.Thermal time,chill days and prediction of budburst in *Picea sitchensis*[J].Journal of Applied Ecology,1983,20(3):951-963.
- [8] Hunter A F,Lechowicz M J.Predicting the timing of budburst in temperate trees[J].Journal of Applied Ecology, 1992,29(3):597-604.
- [9] Hänninen H.Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions[M].Finland:The Society of Forestry in Finland-The Finnish Forest Research Institute, 1990:9-14.
- [10] Dai W,Jin H,Zhang Y,et al.Detecting temporal changes in the temperature sensitivity of spring phenology with global warming:application of machine learning in phenological model[J].Agricultural and Forest Meteorology,2019,279: 107702.
- [11] Pope K S,Da S D,Brown P H,et al.A biologically based approach to modeling spring phenology in temperate deciduous trees[J].Agricultural and Forest Meteorology, 2014,198-199:15-23.
- [12] Darbyshire R,Pope K,Goodwin I.An evaluation of the chill overlap model to predict flowering time in apple tree[J]. Scientia Horticulturae,2016,198:142-149.
- [13] Kramer K.Selecting a model to predict the onset of growth of *Fagus sylvatica*[J].Journal of Applied Ecology,1994, 31(1):172-181
- [14] Landsberg J J.Apple fruit bud development and growth, analysis and an empirical Model[J].Annals of Botany, 1974,38(5):1013-1023.
- [15] 郇定荣,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.(in Chinese)
- [16] 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 Liquan and Xunyi[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2020,41(6):381-392. (in Chinese)
- [17] 柏秦凤,王景红,屈振江,等.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 Q F,Wang J H,Qu Z J,et al.The research on Shaanxi apple florescence prediction model[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2013,29(19):164-169.(in Chinese)
- [18] Liu D L,Zuo H.Statistical downscaling of daily climate variables for climate change impact assessment over New South Wales,Australia[J].Climatic Change,2012,115(3-4): 629-666.
- [19] Liu D L,Zeleke K T,Wang B,et al.Crop residue incorporation can mitigate negative climate change impacts on crop yield and improve water use efficiency in a semiarid environment[J]. European Journal of Agronomy,2017,85:51-68.
- [20] Wang B,Liu D L,Asseng S,et al.Impact of climate change on wheat flowering time in eastern Australia[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2015,209-210:11-21.
- [21] Yang Y,Liu D L,Anwar M R,et al.Water use efficiency and crop water balance of rainfed wheat in a semi-arid environment:sensitivity of future changes to projected climate changes and soil type[J].Theoretical & Applied Climatology,2016,123(3-4):565-579.
- [22] Linvill D.Calculating chilling hours and chill units from daily maximum and minimum temperature observations[J]. Hortscience,1990,25(1):14-16.
- [23] Almorox J,Hontoria C,Benito M.Statistical validation of daylength definitions for estimation of global solar radiation in Toledo,Spain[J].Energy Conversion and Management, 2005,46(9-10):1465-1471.
- [24] Fishman S,Erez A,Couvillon G A.The temperature dependence of dormancy breaking in plants:computer simulation of processes studied under controlled temperatures[J]. Journal of Theoretical Biology,1987,126(3):309-321.
- [25] Erez A,Fishman S,Linsley-Noakes G,et al.The dynamic model for rest completion in peach buds[J].International Symposium on Computer Modelling in Fruit Research and Orchard Management,1990,276:165-174.
- [26] Anderson J L,Richardson E A,Kesner C D.Validation of chill unit and flower bud phenology models for

- 'montmorency' sour cherry[J].*Acta Horticulturae*,1986,184: 71-78.
- [27] Chuine I,Cour P,Rousseau D.Fitting models predicting dates of flowering of temperate-zone trees using simulated annealing[J].*Plant Cell and Environment*,1998,21(5):455-466.
- [28] 孙荣恒.应用数理统计(第三版)[M].北京:科学出版社,2014:204-206.
- Sun R H.Applied mathematical statistics(third edition) [M].Beijing:Science Press,2014:204-206.(in Chinese)
- [29] Darbyshire R,Farrera I,Martinez-Lüscher J,et al.A global evaluation of apple flowering phenology models for climate adaptation[J].*Agricultural and Forest Meteorology*, 2017,240-241:67-77.
- [30] Ruiz D,Campoy J A,Egea J.Chilling and heat requirements of apricot cultivars for flowering[J].*Environmental and Experimental Botany*,2007,61(3):254-263.
- [31] Elloumi O,Ghrab M,Chatti A,et al.Phenological performance of olive tree in a warm production area of central Tunisia[J].*Scientia Horticulturae*,2020,259:108759.
- [32] Olsson C,Jonsson A M.Process-based models not always better than empirical models for simulating budburst of Norway spruce and birch in Europe[J].*Glob Chang Biol*,2014,20(11):3492-507.
- [33] Chuine I.A unified model for budburst of trees[J].*J Theor Biol*,2000,207:337-347.
- [34] Calle Z,Schlumpberger B O,Piedrahita L,et al.Seasonal variation in daily insolation induces synchronous bud break and flowering in the tropics[J].*Trees*,2010,24:865-877.
- [35] Rawal D S,Kasel S,Keatley M R,et al.Climatic and photoperiodic effects on flowering phenology of select eucalypts from south-eastern Australia[J].*Agricultural and Forest Meteorology*,2015,214-215:231-242.
- [36] Hanninen H,Kramer K,Tanino K,et al.Experiments are necessary in process-based tree phenology modelling[J].*Trends Plant Sci*,2019,24(3):199-209.
- [37] 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.(in Chinese)
- [38] Li Y,Wang L,Zhu G,et al.Phenological response of peach to climate change exhibits a relatively dramatic trend in China,1983-2012[J].*Scientia Horticulturae*,2016,209:192-200.
- [39] Templ B,Templ M,Filzmoser P,et al.Phenological patterns of flowering across biogeographical regions of Europe[J].*Int J Biometeorol*,2017,61(7):1347-1358.
- [40] Legave J M,Blanke M,Christen D,et al.A comprehensive overview of the spatial and temporal variability of apple bud dormancy release and blooming phenology in Western Europe[J].*Int J Biometeorol*,2013,57(2):317-31