

DOI: 10.5846/stxb202203060531

林楠, 徐琳, 卢凡青, 王姝纯, 王森, 李秋月. 华北区域杨柳科树木春季物候期模拟. 生态学报, 2023, 43(6): 2452–2464.

Lin N, Xu L, Lu F Q, Wang S C, Wang M, Li Q Y. Simulation of spring phenology of *Salicaceae* trees in North China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(6): 2452–2464.

华北区域杨柳科树木春季物候期模拟

林楠¹, 徐琳¹, 卢凡青¹, 王姝纯¹, 王森¹, 李秋月^{2,*}

¹ 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

² 北京市气候中心, 北京 100089

摘要: 杨柳科树木是我国华北区域植树造林的主要树种, 但春季的杨柳飞絮问题既影响区域大气环境质量, 也对人体健康造成一定的危害, 因此准确预报杨柳科树木的春季物候期具有重要现实意义。基于中国气象局农业气象观测网和中国科学院地理科学与资源研究所中国物候观测网提供的华北区域 1963—2018 年 59 个站点的 4 种杨柳科树木 (垂柳、旱柳、加拿大杨、毛白杨) 的 4 个春季物候期 (开花始期、盛期、末期和果实或种子成熟期) 观测数据, 对 3 种基于逐日气温序列构建的春季物候过程模型 (简单积温模型、温度三基点模型和冷激-三基点模型) 进行了参数率定和优选, 分别对这 16 个基于物种-物候期的最优春季物候模型进行了外部检验。内部模拟结果表明, 各模型对同一物种-物候期模拟效果相差不大, 均方根误差 (RMSE) 介于 5.5—11.6d, 各模型对同一物种发生较早的物候期模拟效果相对更好。通过赤池信息准则 (AIC) 判定, 上述 16 个基于物种-物候期的最优春季物候模型中, 有 11 个选择简单积温模型, 有 5 个选择冷激-三基点模型, 其中, 垂柳和旱柳的最优春季物候模型都选择了简单积温模型, 加拿大杨的各春季物候期对 2 种物候模型均有选择, 毛白杨的各春季物候期则全部选择了冷激-三基点模型, 表明对于大多数物属树木的春季物候期的模拟只考虑春季气温即可, 而对于杨属树木的春季物候期则需考虑冷激过程的影响。研究可为华北区域乃至我国北方温带地区的杨柳飞絮预报业务化奠定基础。

关键词: 杨柳科; 春季物候; 物候模型; 积温; 冷激

Simulation of spring phenology of *Salicaceae* trees in North China

LIN Nan¹, XU Lin¹, LU Fanqing¹, WANG Shuchun¹, WANG Miao¹, LI Qiuyue^{2,*}

¹ College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

² Beijing Municipal Climate Centre, Beijing 100089, China

Abstract: *Salicaceae* trees are the main tree species for afforestation in North China region, but the spring poplar flocculation problem has an effect on the regional atmospheric quality and causes certain harm to human health. So it is of great practical importance to accurately forecast the spring phenological stages of *Salicaceae* trees. In this study, we used the observations of four spring phenological stages (beginning of flowering, full flowering, end of flowering, and fruiting) of four *Salicaceae* trees (*Salix babylonica* Linn., *Salix matsudana* Koidz., *Populus × canadensis* Moench, and *Populus tomentosa* Carrière) at 59 stations in North China in 1963—2018. The phenological data was provided by the Agricultural Meteorological Observation Network from China Meteorological Administration and Chinese Phenological Observation Network from Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research. Using the phenological data, three models of spring phenological processes based on daily temperature series (TT , PT , PT_c) were parameterized and selected. Finally, 16 optimal spring phenological models based on species-phenology were conducted for the external validation. The internal validation results showed that the three models based on temperature did not differ significantly in simulating the same species-phenology, with RMSE ranging from 5.5 to 11.6 days. Each model was relatively better in simulating the earlier phenological stages of the same species. According to Akaike information criterion (AIC), among the above 16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFA0606102); 北京市自然科学基金项目 (8194064)

收稿日期: 2022-03-06; **网络出版日期:** 2022-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qyli0905@163.com

models, 11 were *TT* models, and 5 were *PT_c* models. What's more, *Salix babylonica* Linn. and *Salix matsudana* Koidz. all selected *TT* model as the optimal for all the four phenological stages, *Populus×canadensis* Moench selected both *TT* and *PT_c* models, and *Populus tomentosa* Carrière selected *PT_c* model for all the four spring phenological stages. It is suggested that many spring phenological simulations of *Salix* trees could only consider spring temperature, while for *Poplar* trees, the influence of chilling should be considered. This study could lay the foundation for the operationalization of *Salicaceae* tree flutter forecasting in North China region and even in the northern temperate area of China.

Key Words: *Salicaceae*; spring phenology; phenological model; accumulated temperature; chilling

植物物候易受到气候变化的影响,物候的变化能客观地反映植物对气候变化的响应^[1]。研究植物物候不仅有助于增加当前植物对气候变化响应的理解,而且能够提高气候-植被系统之间物质与能量交换的模拟精度,对准确评估全球植被生产力及全球碳收支具有重要意义^[2]。

杨柳科(*Salicaceae*)树木喜光,根系发达,适应性强,在我国华北、东北、西北等地均有分布,是我国北方重要的防护林、用材林和绿化树种^[3]。每年春季3月下旬至5月上旬是杨柳树飞絮盛行时期,杨柳树飞絮主要来源于成年雌株的种毛,它不仅会在一定程度上带动地面灰尘,造成严重环境污染,还会影响人类身体健康,例如引起皮肤红肿、瘙痒等症状,甚至可刺激产生哮喘、慢性支气管炎等呼吸道疾病^[4-5]。因此对杨柳科树木春季物候期进行准确预报,可为杨柳飞絮防治工作提供技术支撑和决策服务。

植物物候模型是准确模拟和预测物候期的重要方法,它可用于补充缺失的物候数据以及推导全球气候变化背景下植被发展趋势^[6]。目前,国内外构建的物候模型大致可分为两类:一类是统计模型,它是通过数理统计方法建立植物物候期与气象要素间的关系^[7],这类模型易于构建但未考虑植物生长机制;另一类是过程模型,它是以植物的生理生态过程为基础,由模型参数间的相互作用决定植物每日生理效应累积,采用生理发育时间衡量植物的发育进程^[8]。研究发现,相对于经验物候模型,基于过程的物候模型模拟效果普遍较好并更为准确^[9],我国已有不少学者利用此类模型进行植物物候期的模拟和预测,例如王焕炯等^[10]利用 Unichill 模型对中国白蜡展叶始期进行模拟表明,近 60 年中国大部分地区的白蜡树展叶始期提前,且北方地区提前趋势更为明显;李秋月等^[11]利用所构建的冷激校正模型(*PT_c*)预测 A2 气候情景下到 2080 年,内蒙古羊草和针茅的生长期长度将分别缩短 7.8d 和 11.0d。其中,利用过程物候模型对杨柳科树木的物候期进行模拟研究也取得一定进展,例如于裴洋等^[12]利用 SW 模型对中国暖温带地区加拿大杨各春季物候进行模拟,结果表明该模型对展叶始期模拟效果最佳,模型交叉检验的均方根误差为 3.5d;李瑞英等^[13]利用 ForcTT 积温模型对鲁西南地区毛白杨和旱柳的春季物候进行模拟,结果表明毛白杨和旱柳开花始期的最佳积温累积开始日期为 2 月 1 日,模拟的绝对误差和均方根误差在 1.0—2.0d 之间;郑彦佳等^[14]利用最优花期物候模型重建中国温带地区旱柳开花日期时空格局,结果表明 1982—2011 年旱柳开花始期、盛期和末期均呈显著提前趋势($P < 0.05$),提前速率介于 2.10—2.30d/10a。

温度是影响植物物候的气象因子中最主要的一个,气温升高导致温带及寒带植物春季物候显著提前^[15-16],秋季物候推迟^[17-18],从而导致植物生长季延长。最新研究发现亚热带植物也需要冷激打破休眠期,冷激的增加会提高展叶数量并使展叶时间提前^[19]。研究表明,温度对春季物候的影响具有正反两方面的作用:一方面气候变暖导致冬季升温,冷激不足,使植物对积温需求增加,从而延迟春季物候的发生^[20];另一方面春季升温导致热量累积加快,更快速地满足植物对积温的需求,加快春季物候的发生,但是不恰当的冷激效应模型的使用可能会造成温度对植被物候期的过度评估^[21]。因此,温度影响物候是一个非线性过程^[15,22],需要考虑积温和冷激的共同作用。与此同时,植物物候对温度的响应存在着显著的品种差异^[23],主要原因在于不同物种积温和冷激的需求存在显著差异^[24]。因此,针对不同物种,比较基于气温驱动与冷激效应的不同模型对各物候期模拟效果的差异,可以进一步了解植物物候期对温度的响应机制。

目前,我国已有较多基于物候模型对植物物候期进行模拟和预测的研究,但同时考虑温度驱动与冷激作

用对杨柳科树木春季物候期的模拟尚有空白,因此本研究提出的科学问题是明确杨柳科树木春季物候期对温度的响应机制。根据这一科学问题,本研究以我国华北区域 4 个杨柳科树种(垂柳、旱柳、加拿大杨、毛白杨)为研究对象,通过分析北京、天津、河北、内蒙古、山西五个省份筛选出的 59 个站点的物候数据,针对各个树种 4 个主要春季物候期(开花始期、开花盛期、开花末期及果实或种子成熟期),对 3 种基于逐日气温序列构建的春季物候过程模型(简单积温模型、温度三基点模型和冷激-三基点模型)进行了参数率定和优选,最后分别对各物种-物候期的最优春季物候模型进行了外部检验,以期对模型优化及植物物候预测提供研究思路,同时为华北区域乃至我国北方温带地区的杨柳飞絮预报业务化奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域与物种选择

本文研究区域为华北区域,包括北京、天津、河北、内蒙古和山西五个省、市、自治区。其中,京津冀地区与山西省属于温带季风气候区,内蒙古属于温带大陆性季风气候区,气候特点均为夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,四季变化明显。据统计,近几十年来,研究区域年平均气温总体呈显著上升趋势,年降雨量总体呈显著减少趋势,年际之间存在波动^[25-27]。

树种选择为垂柳、旱柳、加拿大杨、毛白杨。它们都属于杨柳科(*Salicaceae*)植物,主要分布于北半球寒带至温带地区,在中国北方地区分布广泛,因此具有很好的代表性^[3]。其中,垂柳(*Salix babylonica* Linn.)属杨柳科(*Salicaceae*)柳属(*Salix*),落叶乔木,高达 18m,枝细长下垂,喜光,喜温暖湿润气候,以及潮湿深厚的酸性和中性土壤;较耐寒,极耐水湿,萌芽力强,根系发达,生长迅速^[28]。旱柳(*Salix matsudana* Koidz.)属杨柳科(*Salicaceae*)柳属(*Salix*),落叶乔木,喜光照,喜水湿,抗性强,耐干旱和寒冷;相比垂柳,旱柳对土壤要求不严,是中国温带地区常见树种和造林树种^[29]。加拿大杨(*Populus×canadensis* Moench)属杨柳科(*Salicaceae*)杨属(*Populus*),落叶乔木,高 30 多米,喜光,喜湿润气候,对土壤要求不高,多种土壤上都能生长,极耐旱,耐寒性较差,适宜在华北平原地区生长^[30]。毛白杨(*Populus tomentosa* Carrière)属杨柳科(*Salicaceae*)杨属(*Populus*),落叶乔木,高 30 多米,深根性,极耐旱,和加拿大杨一样,对土壤要求不高,各类土壤上均能生长,如粘土、壤土、沙壤土或低湿轻度盐碱土^[31]。

1.2 物候与气象数据

本文所用物候数据取自中国气象局农业气象观测网和中国科学院地理科学与资源研究所中国物候观测网,将与华北区域杨柳飞絮相关的 4 个春季物候期作为研究对象,根据《农业气象观测规范》^[32]和《中国物候观测方法》^[33],开花始期定义为“观测树上有一朵或同时几朵花的花瓣开始完全开放”;开花盛期定义为“在观测树上有一半以上的花蕾都展开花瓣或一半以上的茱萸花序散发出花粉”;开花末期定义为“观测树上的花瓣(茱萸花序)凋谢脱落留有极少数的花”;果实或种子成熟期定义为“观测的树木上有一半的果实或种子变为成熟的颜色”。根据这两个观测网的杨柳树春季物候观测资料,最终筛选出 1963—2018 年华北区域内 59 个站点(图 1)的杨柳科物候数据。将各个站点在某年对某种杨柳科树木某个春季物候期的记录计为 1 条观测记录,共得 3818 条春季物候观测记录。

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>),根据物候站点位置,选择了相近气象站点对应年份的逐日日均温数据作为物候模型输入数据。

1.3 物候模型

本文使用的物候模型为:应用最广的树木春季物候模型——简单积温模型(*TT*)、作物生育期模拟中常用的温度三基点模型(*PT*),以及在温度三基点模型基础上改进的考虑冷激效应的冷激-三基点模型(*PT_c*)。

(1) 简单积温模型(*TT*)

简单积温模型只考虑温度对植物生长发育的影响,也称热时模型、度日模型,是目前应用最广泛的树木物候模型^[9,34]。基本假设是生长状态与大于下限温度 T_b 时的温度 T 之间存在线性关系^[35-37], F^* 为温度累计需

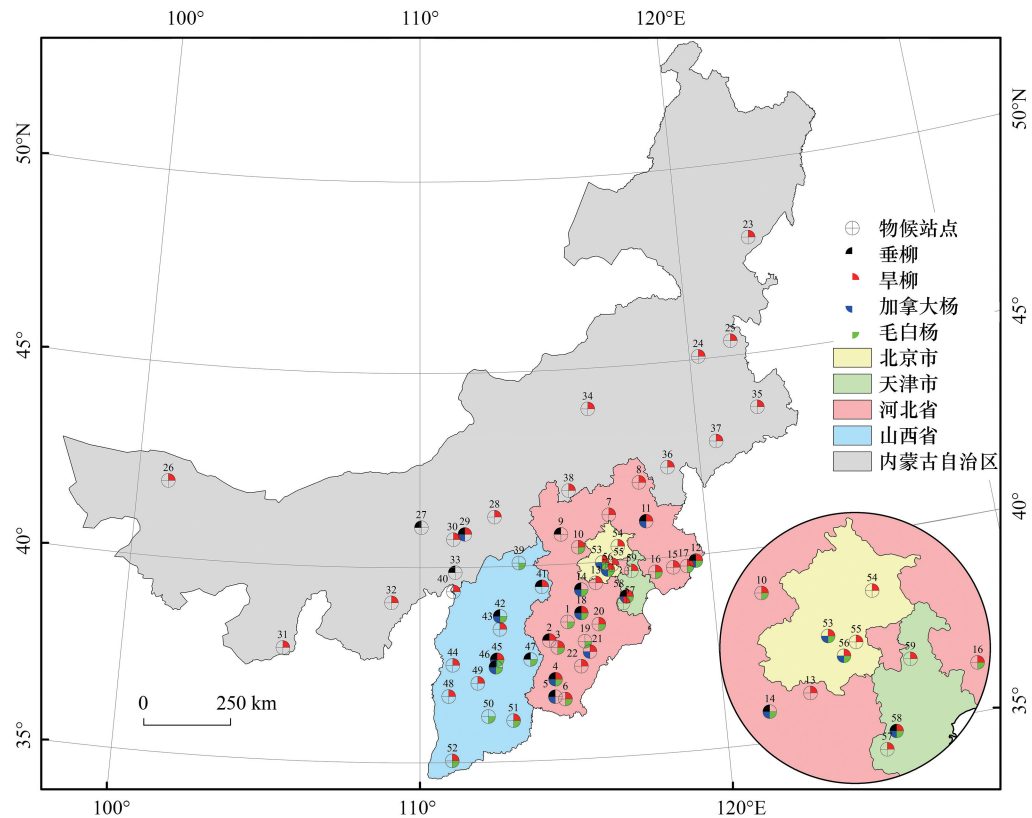


图1 4种杨柳科树木的物候观测站点分布图

Fig.1 Distribution of phenological observation sites for four species of *Salicaceae* trees
站点上方的数字为站点序号

求($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$),当累积发育速率满足临界阈值(F^*)时,物候现象发生,如公式1所示:

$$TT = \sum (T - T_b) \geq F^* \tag{1}$$

式中, T_b 为下限温度($^{\circ}\text{C}$), T 为某日平均气温($^{\circ}\text{C}$),温度 T 低于 T_b 时, TT 设为零。此模型中, T_b 、 F^* 为待定参数。

(2) 温度三基点模型(PT)

温度三基点模型认为植物生长速率受植物生长下限温度、最适温度和上限温度的影响。当累积发育速率 PT 满足临界阈值(F^*)时物候现象发生(公式2), PT 由每日平均温度生长速率 $f(T)$ 决定, $f(T)$ 的值介于0—1之间,如公式3所示^[38—39]:

$$PT = \int f(T) \times dt \geq F^* \tag{2}$$

$$f(T) = \begin{cases} 0 & T \leq T_b \\ \frac{T - T_b}{T_o - T_b} & T_b < T \leq T_o \\ \frac{T_m - T}{T_m - T_o} & T_o < T \leq T_m \\ 0 & T > T_m \end{cases} \tag{3}$$

式中, T_b 、 T_o 和 T_m 分别为下限温度($^{\circ}\text{C}$)、最适温度($^{\circ}\text{C}$)和上限温度($^{\circ}\text{C}$); T 为某日的平均气温($^{\circ}\text{C}$)。此模型中, T_b 、 T_o 、 T_m 、 F^* 为待定参数。

(3) 冷激-三基点模型(PT_c)

植物生长受到休眠期低温的影响,即需要满足一定的冷激需求(植物的芽或种子需要暴露在一定的低温(冰点温度以上)条件下),才能解除植物内在的生理抑制^[40-41]。因此,通过假设植物在休眠期缺乏低温,会延迟物候现象的发生,对温度三基点模型(PT)进行修改,得到冷激-三基点模型(PT_c)。修改后的模型(PT_c)既考虑了冷激效应(CC)也考虑了物候期发生的每日温度效应($f(T)$)^[11]。与其他 2 个模型相比,该模型结构复杂,待定参数多,即使模型假设不成立,也可能有很高的拟合精度。

假设低温冷激过程 $c(T)$ 受到冷激下限温度(T_{cb}),冷激最适温度(T_{co}),冷激上限温度(T_{cm})的影响。当温度介于冷激下限温度(T_{cb})和冷激最适温度(T_{co})之间时,或当温度介于冷激最适温度(T_{co})和冷激上限温度(T_{cm})之间时,它是一个简单的线性函数;当温度高于冷激上限温度(T_{cm})或低于冷激下限温度(T_{cb})时, $c(T)$ 为 0,不会产生冷激效应^[42],如公式 4 所示:

$$c(T) = \begin{cases} 0 & T < T_{cb} \text{ 或 } T > T_{cm} \\ \frac{T - T_{co}}{T_{cb} - T_{co}} & T_{cb} \leq T \leq T_{co} \\ \frac{T_{cm} - T}{T_{cm} - T_{co}} & T_{co} \leq T \leq T_{cm} \end{cases} \quad (4)$$

式中, T_{cb} 、 T_{co} 、 T_{cm} 分别为冷激下限温度(℃)、冷激最适温度(℃)和冷激上限温度(℃); T 为某日的平均气温(℃)。

植物物候发生受冷激效应(CC)的影响^[41],表示为冷激效应所需低温总量(CC_m)与低温冷激过程 $c(T)$ 的总和的比值(公式 5)。 CC 的最大值为 1^[11]。

$$CC = \frac{\sum c(T)}{CC_m} \quad (5)$$

冷激-三基点模型将每日温度效应($f(T)$)与低温冷激效应(CC)相结合, PT_c 模型(公式 6)可以得到最佳发育和冷激条件下所需的生理天数,如果冷激效应没有完成,植物的发育速率会大幅度降低;当植物的累积发育速率满足临界阈值(F^*)时物候现象发生。

$$PT_c = \int f(T) \times CC \times dt \geq F^* \quad (6)$$

TT 、 PT 和 PT_c 计算范围均是从每年 1 月 1 日开始到整个物候期完成; CC 是从前一年的 10 月 1 日开始计算的,包括叶芽和花芽的萌生^[43]。此模型中, T_b 、 T_o 、 T_m 、 T_{cb} 、 T_{co} 、 T_{cm} 、 F^* 均为待定参数。

1.4 模型参数估计与检验方法

利用时空混合样本中随机 80% 的样本序列进行模型的参数值估计,3 种模型的参数值估计均采用最小二乘法原则,即找到最优的一组参数组合使模拟值与观测值之间的误差最小,对于模型中出现的参数,采用模拟退火算法来求解。该算法是一种将固体退火原理应用于组合优化问题,避免局部最优的局限,对全局最优解进行随机搜索的现代智能优化算法,可以应用于各种组合优化问题,计算复杂度与时间复杂度相对较低,运行效果较好^[44],已广泛应用于物候模型参数估计中^[12,14]。3 种物候模型参数的取值范围如表 1 所示。

为验证所求物候模型的准确性,计算用于参数拟合的模拟值与观测值的相关系数(r)、均方根误差(RMSE)和赤池信息准则(AIC),此为内部模拟的结果;再计算未用于参数拟合的模拟值与观测值的 r 和 RMSE,此为外部检验的结果。其中,RMSE 用来衡量模型模拟的误差(公式 7);AIC 综合考虑了模型的参数个数、复杂程度和误差等,用于不同模型的比较,通过最低值来选择最优模型(公式 8)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{obs}_i - \text{pre}_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$AIC = n \times \ln\left(\frac{\sum_{i=1}^n (\text{obs}_i - \text{pre}_i)^2}{n}\right) + 2(k+1) \quad (8)$$

式中, obs_i 为第 i 个样本的观测值, pre_i 为第 i 个样本的模拟值; n 为样本个数; k 为待定参数的个数。

表 1 3 种物候模型参数在模拟退火算法中的取值范围

Table 1 Parameter ranges of three phenological models in simulated annealing algorithm

参数 Parameter	取值范围 Range	参数 Parameter	取值范围 Range
T_b	0—15℃	T_{co}	-5—5℃
T_o	5—35℃	T_{cm}	0—10℃
T_m	30—45℃	F^*	0—1000(℃·d)
T_{cb}	-10—0℃		

T_b : 下限温度 Base temperature; T_o : 最适温度 Optimal temperature; T_m : 上限温度 Maximum temperature; T_{cb} : 冷激下限温度 Base temperature for chilling effect; T_{co} : 冷激最适温度 Optimal temperature for chilling effect; T_{cm} : 冷激上限温度 Maximum temperature for chilling effect; F^* : 累计临界值 Cumulative threshold. $T_b < T_o < T_m$, $T_{cb} < T_{co} < T_{cm}$

2 结果与分析

2.1 杨柳科树木春季物候模型的参数率定与优选

为遵循同一植物同一物候期的生长下限温度相同的原则,以及更好地对 3 种模型模拟效果进行比较,本文将各物种的物候期在温度三基点模型和冷激-三基点模型中的下限温度(T_b)与简单积温模型中经过模拟退火算法得到的下限温度(T_b)保持统一,同时冷激-三基点模型中的最适温度(T_o)、上限温度(T_m)分别与温度三基点模型中经过模拟退火算法得到的最适温度(T_o)、上限温度(T_m)保持统一。最终得到 4 种杨柳科树木的开花始期、盛期、末期和果实或种子成熟期的 3 种基于气温构建的物候模型参数估计和内部模拟结果(表 2、表 3)。模型参数率定结果表明,各物种、各物候期发育的下限温度(T_b)在 0—5.3℃ 之间,这与大多数温带树木打破休眠的气温范围大致吻合(0—5℃)^[45]。内部模拟结果表明,3 种物候模型的模拟值与观测值之间均呈现出显著的正相关关系($P < 0.01$),RMSE 介于 5.5—11.6d。对于同一物种的同一物候期而言,3 种模型的模拟效果差别不大, RMSE 相差大多在 1d 以内。

柳属树木的春季物候期最优模型全部选择简单积温模型(表 2)。垂柳各物候期在不同模型的模拟下,模拟值与观测值之间的 r 介于 0.67—0.80, RMSE 介于 7.7—9.4d。根据 AIC 最小的判定标准,对垂柳各物候期来说,简单积温模型的表现均要好于温度三基点模型和冷激-三基点模型,温度三基点模型的表现要好于冷激-三基点模型。早柳各物候期在不同模型的模拟下,模拟值与观测值之间的 r 介于 0.71—0.86, RMSE 介于 7.1—9.0d。根据 AIC 最小的判定标准,简单积温模型在早柳各物候期中表现也均为最优,其次为温度三基点模型、冷激-三基点模型。

杨属树木的春季物候期最优模型则更多选择了冷激-三基点模型(表 3)。加拿大杨各物候期在不同模型的模拟下,模拟值与观测值之间的 r 介于 0.48—0.87, RMSE 介于 5.5—10.2d。根据 AIC 最小的判定标准,加拿大杨的开花始期($r = 0.80$, RMSE = 7.05)、盛期($r = 0.85$, RMSE = 5.88)和末期($r = 0.87$, RMSE = 5.50)的最优模型均为简单积温模型,而对于果实或种子成熟期,冷激-三基点模型模拟效果最佳($r = 0.55$, RMSE = 9.04)。毛白杨各物候期在不同模型的模拟下,模拟值与观测值之间的 r 介于 0.52—0.71, RMSE 介于 10.3—11.6d。根据 AIC 最小的判定标准,4 个物候期的最优模型均是冷激-三基点模型。因此,毛白杨各物候期的发育要充分考虑温度驱动与冷激的双重效应,响应机制更为复杂。

2.2 杨柳科树木春季物候最优模型的外部检验

上述优选出 16 个基于物种-物候期的春季物候模型中,有 11 个选择了简单积温模型,有 5 个选择了冷激-三基点模型,而温度三基点模型没有被选择。其中,垂柳和早柳的最优春季物候模型全部选择了简单积温模型,加拿大杨的各春季物候期对简单积温模型和冷激-三基点模型均有选择,毛白杨的各春季物候期则全部选择了冷激-三基点模型。

表 2 柳属树木春季物候模型参数估计和内部模拟
Table 2 Parameter estimation and internal validation of spring phenological stages of *Salix* trees under three phenological models

物种 Species	物候期 Phenological stage	样本数 Sample	模型 Model	参数 Parameter							r	RMSE/d	AIC
				T_b	T_o	T_m	T_{cb}	T_{co}	T_{cm}	F^*			
垂柳 <i>Salix babylonica</i> Linn.	开花始期	90	简单积温	0.6	-	-	-	-	-	238.7	0.69*	9.36	406.55
			温度-三基点	0.6	31.1	39.8	-	-	-	7.8	0.69*	9.36	410.55
			冷激-三基点	0.6	31.1	39.8	-9.4	-0.9	8.1	6.8	0.67*	9.38	416.89
	开花盛期	89	简单积温	4.2	-	-	-	-	-	138.5	0.77*	8.43	383.41
			温度-三基点	4.2	16.5	36.6	-	-	-	11.2	0.77*	8.40	386.77
			冷激-三基点	4.2	16.5	36.6	-9.3	-0.8	8.9	10.1	0.74*	8.78	400.64
早柳 <i>Salix matsudana</i> Koidz.	开花末期	85	简单积温	1.6	-	-	-	-	-	291.7	0.80*	8.17	361.01
			温度-三基点	1.6	32.5	37.2	-	-	-	9.5	0.80*	8.18	365.32
			冷激-三基点	1.6	32.5	37.2	-8.8	0.9	10.0	8.4	0.76*	8.77	383.07
	果实或种子成熟期	68	简单积温	4.1	-	-	-	-	-	301.2	0.73*	7.70	281.56
			温度-三基点	4.1	23.6	39.2	-	-	-	15.5	0.73*	7.70	285.56
			冷激-三基点	4.1	23.6	39.2	-9.6	-2.2	8.5	14.5	0.70*	7.95	296.02
	开花始期	350	简单积温	5.0	-	-	-	-	-	90.9	0.85*	7.16	1381.70
			温度-三基点	5.0	15.2	37.8	-	-	-	8.4	0.85*	7.13	1383.22
			冷激-三基点	5.0	15.2	37.8	-7.0	-0.4	9.8	7.8	0.85*	7.21	1397.22
	开花盛期	346	简单积温	4.7	-	-	-	-	-	121.8	0.86*	7.27	1376.59
			温度-三基点	4.7	13.9	38.6	-	-	-	12.2	0.86*	7.25	1378.92
			冷激-三基点	4.7	13.9	38.6	-8.0	0.8	9.0	11.0	0.86*	7.28	1387.40
	开花末期	332	简单积温	3.9	-	-	-	-	-	186.8	0.80*	7.87	1373.47
			温度-三基点	3.9	34.4	35.0	-	-	-	6.1	0.80*	7.87	1377.71
			冷激-三基点	3.9	34.4	35.0	-8.8	0.6	10.0	5.6	0.80*	7.89	1385.96
	果实或种子成熟期	235	简单积温	1.5	-	-	-	-	-	450.4	0.72*	8.78	1103.46
			温度-三基点	1.5	21.5	35.0	-	-	-	22.5	0.72*	8.78	1107.37
			冷激-三基点	1.5	21.5	35.0	-8.6	0.6	10.0	21.3	0.71*	8.99	1125.23

RMSE:均方根误差 Root Mean Squared Error; AIC:赤池信息准则 Akaike information criterion; *:相关系数显著性水平 $P<0.01$

表 3 杨属树木春季物候模型参数估计和内部模拟
Table 3 Parameter estimation and internal validation of spring phenological stages of *Poplar* trees under three phenological models

物种 Species	物候期 Phenological stage	样本数 Sample	模型 Model	参数 Parameter							r	RMSE/d	AIC
				T_b	T_o	T_m	T_{ob}	T_{co}	T_{cm}	F^*			
加拿大杨 <i>Populus×canadensis</i> Moench	开花始期	176	简单积温	4.2	-	-	-	-	-	50.6	0.80*	7.05	691.23
			温度三基点	4.2	12.8	42.6	-	-	-	5.8	0.80*	7.02	693.71
			冷激-三基点	4.2	12.8	42.6	-9.7	-4.3	8.6	5.7	0.79*	7.07	702.44
	开花盛期	175	简单积温	3.4	-	-	-	-	-	88.3	0.85*	5.88	624.15
			温度三基点	3.4	16.0	41.0	-	-	-	7.0	0.85*	5.88	628.17
			冷激-三基点	3.4	16.0	41.0	-10.0	-2.9	10.0	6.4	0.82*	6.26	656.17
毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> Carrière	开花末期	173	简单积温	2.8	-	-	-	-	-	142.2	0.87*	5.50	594.13
			温度三基点	2.8	16.0	35.3	-	-	-	10.8	0.87*	5.49	597.50
			冷激-三基点	2.8	16.0	35.3	-10.0	-2.8	9.5	9.6	0.86*	5.58	608.98
	果实或种子成熟期	44	简单积温	5.3	-	-	-	-	-	211.4	0.48*	10.16	208.03
			温度三基点	5.3	9.7	39.0	-	-	-	26.9	0.51*	9.72	208.09
			冷激-三基点	5.3	9.7	39.0	-9.8	0.7	9.9	25.2	0.55*	9.04	207.70
毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> Carrière	开花始期	238	简单积温	0.0	-	-	-	-	-	133.6	0.69*	10.99	1145.08
			温度三基点	0.0	15.4	39.4	-	-	-	8.4	0.69*	10.97	1148.23
			冷激-三基点	0.0	15.4	39.4	-3.9	-0.1	8.4	6.4	0.70*	10.78	1142.65
	开花盛期	238	简单积温	0.1	-	-	-	-	-	160.7	0.66*	11.61	1170.91
			温度三基点	0.1	10.4	39.2	-	-	-	15.5	0.67*	11.48	1169.72
			冷激-三基点	0.1	10.4	39.2	-6.5	-2.5	10.0	12.9	0.69*	11.10	1159.79
毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> Carrière	开花末期	234	简单积温	0.1	-	-	-	-	-	221.6	0.69*	10.52	1105.41
			温度三基点	0.1	13.1	36.0	-	-	-	16.3	0.70*	10.41	1104.61
			冷激-三基点	0.1	13.1	36.0	-6.1	1.3	9.3	13.0	0.71*	10.28	1104.46
	果实或种子成熟期	164	简单积温	0.4	-	-	-	-	-	371.8	0.52*	11.29	799.01
			温度三基点	0.4	15.4	39.9	-	-	-	24.5	0.53*	11.27	802.32
			冷激-三基点	0.4	15.4	39.9	-10.0	-2.4	9.0	21.5	0.52*	10.74	792.81

柳属树木各物候期最优模型外部检验的模拟值与观测值的 r 介于 0.54—0.88, 均通过显著性检验(图 2)。其中, 最优模型对垂柳和旱柳开花始期的外部检验模拟值与观测值接近于 1:1 线(图中黑色虚线), RMSE 都在 6.1d 左右; 而对垂柳和旱柳的种子或果实成熟期而言, 外部检验模拟值与观测值的 RMSE 分别为 9.3d 和 8.7d。

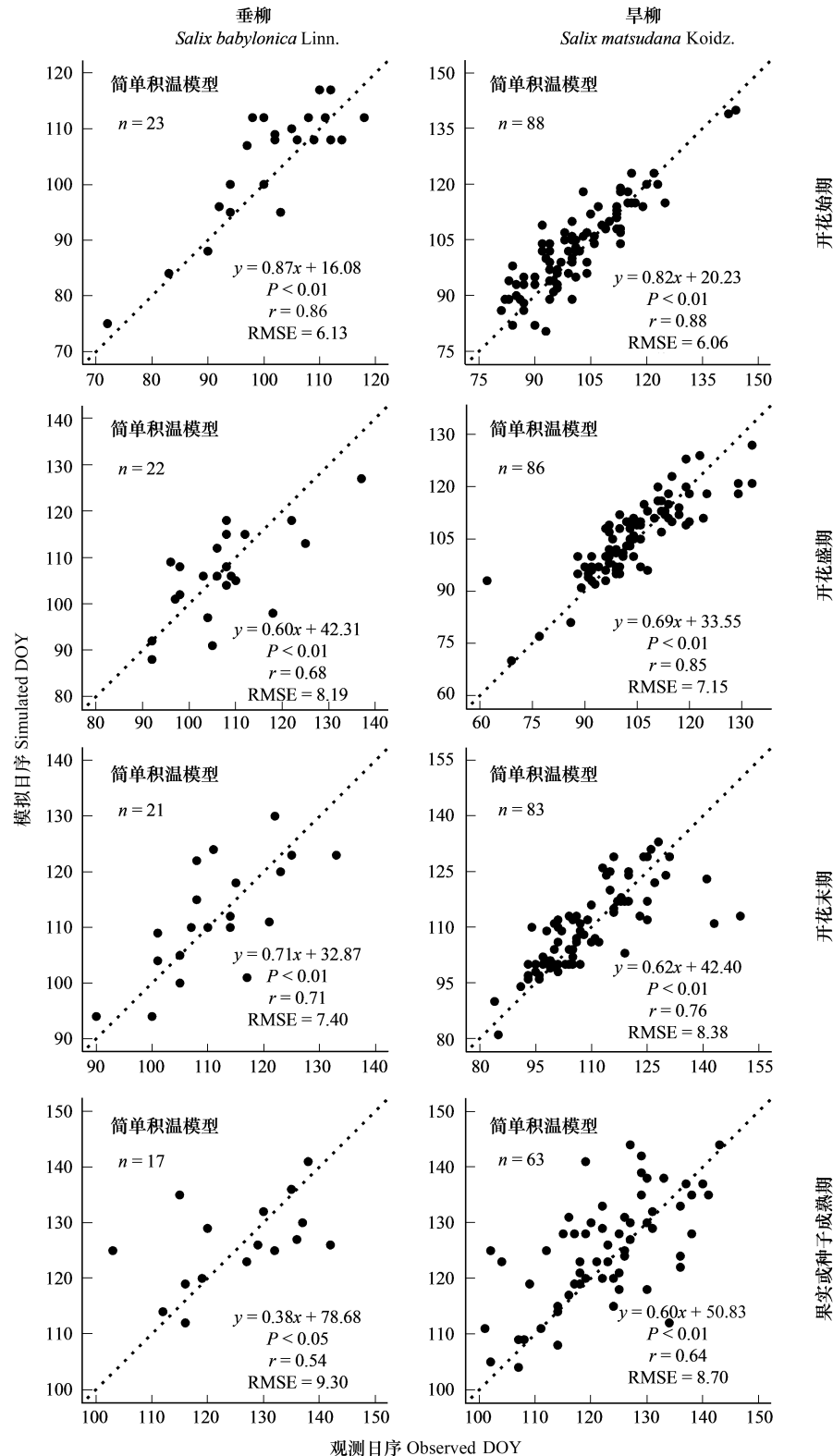


图 2 柳属树木最优春季物候模型外部检验效果

Fig.2 External validation of the optimal phenological models for *Salix* trees

杨属树木各物候期最优模型外部检验的模拟值与观测值的 r 介于 0.45—0.85(图 3)。加拿大杨开花末期外部检验的模拟值与观测值的 RMSE 较小,为 4.9d;但是种子或果实成熟期的模拟效果不显著($r = 0.45, P >$

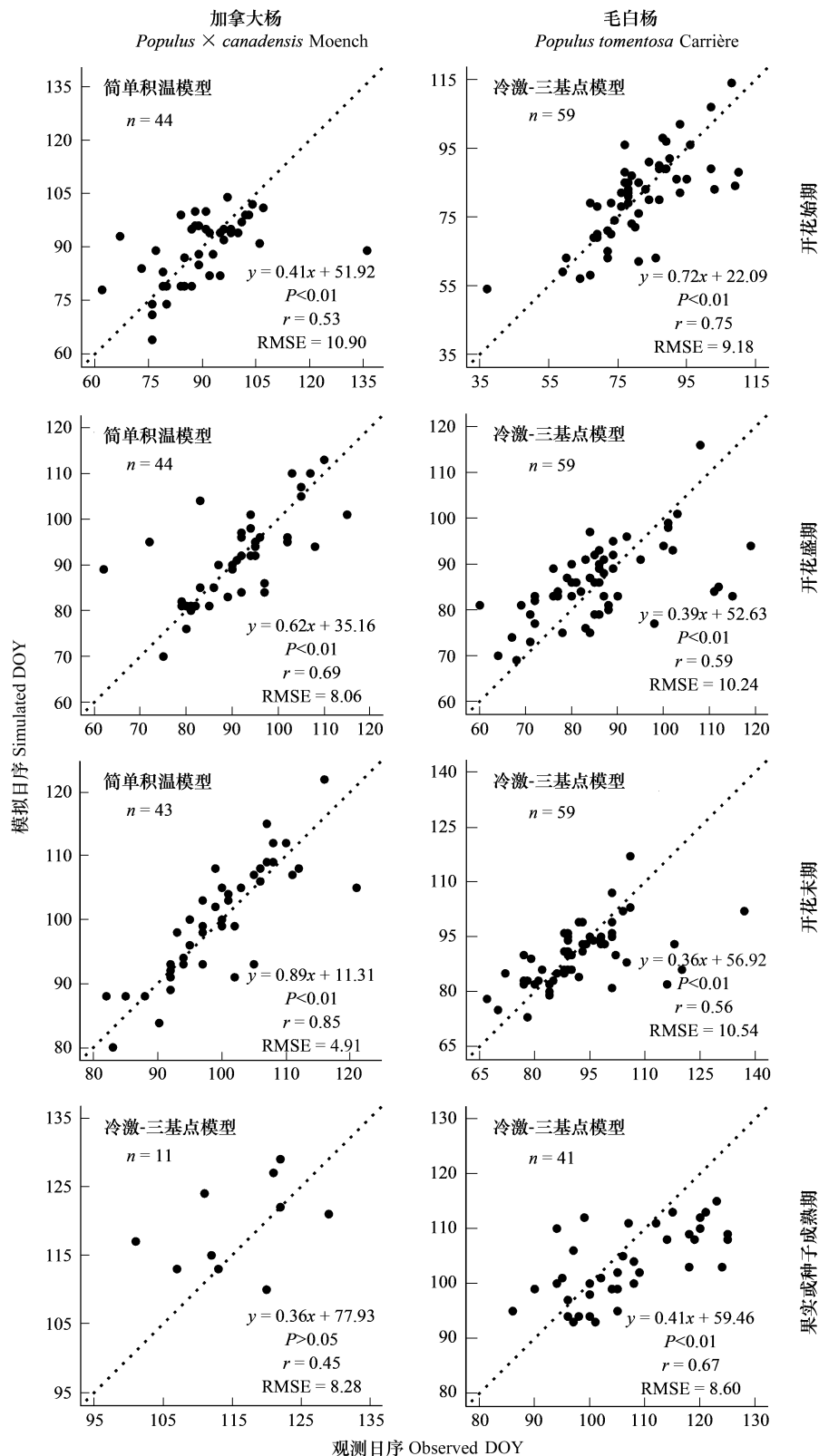


图 3 杨属树木最优春季物候模型外部检验效果

Fig.3 External validation of the optimal phenological models for Poplar trees

0.05),可能是由于该物候期外推样本过少(仅11个),导致模拟结果具有一定的不确定性。毛白杨的最优模型对各物候期的外部检验模拟值与观测值的RMSE总体偏大,例如开花盛期和末期的RMSE都大于10d,推测可能是由于其花期发生较早,除了温度驱动和冷激效应以外,光周期对花芽的生长发育影响也较大,而最优模型仅考虑温度的作用,导致模拟效果略偏差。

综上所述,16个基于物种-物候期的春季物候模型外部检验的模拟值与观测值普遍呈显著的正相关关系,其中由于杨属树木对气象因子响应机制较为复杂,仅考虑气温这一个因素对其各物候期的模拟效果相对偏差;对于同一物种而言,较早发生的物候期模拟效果相对更好。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究以中国华北区域垂柳、旱柳、加拿大杨、毛白杨为研究对象,结合气象数据与物候观测资料,对比简单积温模型(TT)、温度三基点模型(PT)和冷激-三基点模型(PT_c)对杨柳科树木开花始期、开花盛期、开花末期以及果实或种子成熟期的模拟效果。从内部模拟结果可以看出,简单积温模型仍有着较为良好的模拟效果,可作为绝大多数物候期模拟的最优模型。多位学者研究证实,温度在控制植物物候发生中起到决定性的作用,若基于较长的物候时间序列,仅考虑温度驱动的物候模型就可以合理地进行植物物候预测^[46]。

本研究所构建的冷激-三基点模型在模拟加拿大杨的果实或种子成熟期和毛白杨的开花始期、开花盛期、开花末期、果实或种子成熟期效果最好。这说明考虑了植物的冷激过程后,一定程度上能够提升温度模型对物候的模拟效果,低温需求的不满足可能对于上述树种物候期的开启有一定影响。已有研究表明,冷激过程对木本植物物候期的启动有着关键影响^[47],且冷激需求的不足会导致植物春季物候期对温度的感应程度降低^[48]。

通过外部检验结果来看,选择的最优模型对4个物种开花期的预测普遍较好,但对果实或种子成熟期的模拟预测效果相对偏差,说明仅考虑温度因素不足以对晚春物候期进行精确预测。一方面,有研究表明加入了光周期之后,光温耦合的物候模型表现优于仅考虑温度的模型^[11],尤其对低温敏感的植物来说更是如此,因此还需考虑光周期对植物物候发生的调控作用;另一方面,植物物候期的发生是以上一个物候时期发生为基础,虽然温度在整个物候期内起决定因素,但物候期的发生是各个气象因子综合作用的结果^[49],两个生育时期之间的关键气象因子可能各有侧重,例如春季物候期发生对土壤水分条件的依赖^[50],以及开花末期至果实或种子成熟期之间的日照时数对植物光合积累的影响等,故仅考虑温度因子的模型存在不能真实模拟植物物候发生的可能性,尤其是对于晚春物候期,可考虑耦合光周期、日照时数和降水等因子改进模型,以提高模型模拟的准确度。

近年来随着杨柳飞絮造成的环境污染、人群过敏等问题越来越受到关注,一些科研部门也在积极研究经济易行的杨柳飞絮治理技术,如更新杨柳雌株法、杨树雌花序疏除法、柳树高位嫁接法、树干注射抑花一号法等^[51]。不同杨柳科树种开花飞絮时间略有不同,而本研究对华北区域4种杨柳科树木开花期的预测精度普遍较高,因此未来可将杨柳树各物种-物候期最优模型作为飞絮治理技术的辅助手段,根据模型预测的花期时间开展相关防治:例如可在开花飞絮高发前,提前利用高压喷水车等专业车辆,将杨柳絮直接喷水打湿落地,控制飞絮;或者在杨柳树种植密度较大区域,于飞絮高发期前提前制定专项保洁方案,加派清扫车、保洁人员及时进行飞絮的清扫收集,防止复飞^[52]。杨柳树各春季物候期最优模型的应用有助于飞絮防治工作在时间、区域、树种上的精细化,提高防治效率,从而减少人力、物力、财力投入,切实让杨柳树飞絮防治工作更加高效、经济、可持续性开展。

3.2 结论

本文利用3种温度模型将不同时空样本混合,对中国华北区域59个站点1963—2018年4种杨柳科树木的4个春季物候期进行模拟对比,得出以下主要结论:

(1) 内部模拟结果表明,3 种物候模型对杨柳树各物候期的模拟值与观测值之间均呈现出显著的正相关关系($P<0.01$), r 介于 0.48—0.87, RMSE 介于 5.5—11.6d, 说明各模型均可取得较好的模拟效果;

(2) AIC 检验结果表明,16 个基于物种-物候期的春季最优物候模型中,有 11 个选择了简单积温模型,有 5 个选择了冷激-三基点模型,说明简单积温模型可以满足绝大多数杨柳科植物春季物候期的模拟;其中,所构建的冷激-三基点模型对加拿大杨的果实或种子成熟期和毛白杨的开花始期、开花盛期、开花末期、果实或种子成熟期模拟效果优于简单积温模型和温度三基点模型,因此对于杨属树木的春季物候期还需考虑冷激过程的影响;

(3) 外部检验结果表明,16 个基于物种-物候期的春季最优物候模型的外推模拟值与观测值的 RMSE 介于 5.5—11.1d,其中有 15 个最优模型的模拟值与观测值的相关系数通过显著性检验($P<0.05$)。各模型对果实或种子成熟期(晚春物候期)模拟效果相对偏差,因此在今后的研究中重点考虑关键物候期时段内光周期、日照时数和降水等因子的综合效应来进一步改进模型,以提高模拟精度。

参考文献 (References):

- [1] 葛全胜,戴君虎,郑景云. 物候学研究进展及中国现代物候学面临的挑战. 中国科学院院刊, 2010, 25(3): 310-316.
- [2] 李荣平,周广胜,刘景利,史奎桥,梁涛. 基于水热因子的玉米物候模拟. 气象与环境学报, 2009, 25(3): 19-23.
- [3] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志-第二十卷, 第二分册. 北京: 科学出版社, 1984: 1.
- [4] 乔建国,王晓媛. 杨柳树飞絮的治理措施. 河北林业科技, 2008(5): 46-47.
- [5] 吕盛虎,冯文丽. 杨柳树飘絮防治措施分析. 南方农业, 2019, 13(17): 42-44.
- [6] 李荣平,周广胜,阎巧玲. 植物物候模型研究. 中国农业气象, 2005, 26(4): 210-214.
- [7] Cleland E E, Chuine I, Menzel A, Mooney H A, Schwartz M D. Shifting plant phenology in response to global change. Trends in Ecology & Evolution, 2007, 22(7): 357-365.
- [8] Kramer K. A modelling analysis of the effects of climatic warming on the probability of spring frost damage to tree species in The Netherlands and Germany. Plant, Cell & Environment, 1994, 17(4): 367-377.
- [9] Hunter A F, Lechowicz M J. Predicting the timing of budburst in temperate trees. The Journal of Applied Ecology, 1992, 29(3): 597.
- [10] 王焕炯,戴君虎,葛全胜. 1952—2007 年中国白蜡树春季物候时空变化分析. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(5): 701-710.
- [11] Li Q Y, Xu L, Pan X B, Zhang L Z, Li C, Yang N, Qi J G. Modeling phenological responses of Inner Mongolia grassland species to regional climate change. Environmental Research Letters, 2016, 11(1): 015002.
- [12] 于裴洋,同小娟,李俊,张静茹,刘沛荣,解晗. 中国暖温带木本植物物候模拟分析. 北京林业大学学报, 2021, 43(11): 28-39.
- [13] 李瑞英,任崇勇,陈楠,江晓东. 鲁西南典型植物春季物候期的模拟研究. 干旱气象, 2015, 33(6): 1010-1016.
- [14] 郑彦佳,徐琳,于瑶. 光温耦合的中国温带地区早柳花期时空格局模拟. 生态学报, 2020, 40(17): 6147-6160.
- [15] 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. 中国农业气象, 2003, 24(1): 28-32.
- [16] Richardson A D, Bailey A S, Denny E G, Martin C W, O'Keefe J. Phenology of a northern hardwood forest canopy. Global Change Biology, 2006, 12(7): 1174-1188.
- [17] 陈效逖,喻蓉. 1982—1999 年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化. 地理学报, 2007, 62(1): 41-51.
- [18] Jeong S J, Ho C H, Gim H J, Brown M E. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982—2008. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2385-2399.
- [19] Song Z Q, Song X Q, Pan Y Q, Dai K, Shou J J, Chen Q, Huang J X, Tang X R, Huang Z L, Du Y J. Effects of winter chilling and photoperiod on leaf-out and flowering in a subtropical evergreen broadleaved forest in China. Forest Ecology and Management, 2020, 458: 117766.
- [20] 陶泽兴,葛全胜,王焕炯. 1963—2018 年中国垂柳和榆树开花始期积温需求的时空变化. 地理学报, 2020, 75(7): 1451-1464.
- [21] Wang H J, Wu C Y, Ciais P, Peñuelas J, Dai J H, Fu Y S, Ge Q S. Overestimation of the effect of climatic warming on spring phenology due to misrepresentation of chilling. Nature Communications, 2020, 11(1): 4945.
- [22] Chuine I. Why does phenology drive species distribution? Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 365(1555): 3149-3160.
- [23] Vitasse Y, Delzon S, Dufrêne E, Pontailier J Y, Louvet J M, Kremer A, Michalet R. Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: do within-species populations exhibit similar responses? Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(5): 735-744.
- [24] Vitasse Y, Bresson C C, Kremer A, Michalet R, Delzon S. Quantifying phenological plasticity to temperature in two temperate tree species.

- Functional Ecology, 2010, 24(6): 1211-1218.
- [25] 许成成, 陆垂裕, 王建华. 京津冀地区近 60 年来气候变化特征分析. 水利水电技术: 中英文, 2021, 52(6): 12-20.
- [26] 张丽花, 延军平, 刘栎杉. 山西气候变化特征与旱涝灾害趋势判断. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5): 120-125.
- [27] 王素仙, 张永领, 郭灵辉, 赖敏. 1981—2010 年内蒙古气温变化特征及未来趋势预估. 气象与环境科学, 2017, 40(4): 114-120.
- [28] 袁秀云, 郭利勇, 马杰, 张仙云. 垂柳的组织培养及植株再生体系研究. 河南科学, 2008, 26(1): 42-44.
- [29] 《中国森林》编辑委员会. 中国森林. 北京: 中国林业出版社, 2000: 1320-1322.
- [30] 陈章水. 东北华北关中地区杨树栽培新技术. 北京: 金盾出版社, 2014: 172-173.
- [31] 赵天榜, 袁雷生. 毛白杨良种介绍. 河南农林科技, 1980, 9(11): 29-31.
- [32] 国家气象局编定. 农业气象观测规范(上卷). 北京: 气象出版社, 1993: 140.
- [33] 宛敏渭, 刘秀珍. 中国物候观测方法. 北京: 科学出版社, 1979: 51-53.
- [34] Cannell M G R, Smith R I. Thermal time, chill days and prediction of budburst in *Picea sitchensis*. The Journal of Applied Ecology, 1983, 20(3): 951.
- [35] Monteith J L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences, 1977, 281(980): 277-294.
- [36] Bonhomme R. Bases and limits to using 'degree.day' units. European Journal of Agronomy, 2000, 13(1): 1-10.
- [37] Thompson R, Clark R M. Spatio-temporal modelling and assessment of within-species phenological variability using thermal time methods. International Journal of Biometeorology, 2006, 50(5): 312-322.
- [38] Hänninen H. Effects of climatic change on trees from cool and temperate regions: an ecophysiological approach to modelling of bud burst phenology. Canadian Journal of Botany, 1995, 73(2): 183-199.
- [39] Cao W, Moss D N. Modelling phasic development in wheat: a conceptual integration of physiological components. The Journal of Agricultural Science, 1997, 129(2): 163-172.
- [40] Luedeling E, Guo L, Dai J H, Leslie C, Blanke M M. Differential responses of trees to temperature variation during the chilling and forcing phases. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 181: 33-42.
- [41] Guo L, Dai J H, Wang M C, Xu J C, Luedeling E. Responses of spring phenology in temperate zone trees to climate warming: a case study of apricot flowering in China. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 201: 1-7.
- [42] Donald W W. Vernalization requirements for flowering of jointed goatgrass (*Aegilops cylindrica*). Weed Science, 1984, 32(5): 631-637.
- [43] Chen X Q, Li J, Xu L, Liu L, Ding D. Modeling greenup date of dominant grass species in the Inner Mongolian Grassland using air temperature and precipitation data. International Journal of Biometeorology, 2014, 58(4): 463-471.
- [44] 杨真真, 方秀男. 模拟退火算法及实例应用. 中国科技信息, 2021(15): 65-66.
- [45] Ma Q Q, Huang J G, Hänninen H, Berninger F. Reduced geographical variability in spring phenology of temperate trees with recent warming. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256/257: 526-533.
- [46] Basler D. Evaluating phenological models for the prediction of leaf-out dates in six temperate tree species across central Europe. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 217: 10-21.
- [47] Okie W R, Blackburn B. Increasing chilling reduces heat requirement for floral budbreak in peach. HortScience, 2011, 46(2): 245-252.
- [48] Yu H Y, Luedeling E, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(51): 22151-22156.
- [49] 邓晨晖, 白红英, 高山, 黄晓月, 孟清, 赵婷, 张扬, 苏凯, 郭少壮. 1964—2015 年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应. 地理学报, 2018, 73(5): 917-931.
- [50] Moore L M, Lauenroth W K, Bell D M, Schlaepfer D R. Soil water and temperature explain canopy phenology and onset of spring in a semiarid steppe. Great Plains Research, 2015, 25(2): 121-138.
- [51] 王建红, 车少臣, 邵金丽, 仇兰芬, 郭蕾. 北京杨柳飞絮治理现状、问题与展望 // 北京园林学会. 2010 北京园林绿化新起点. 北京: 中国林业出版社, 2011: 357-359.
- [52] 王佳良, 唐宇, 崔峻. 新增 10 处高清物候观测点紧盯杨柳飞絮 北京 10 种方法防治杨柳飞絮. 绿化与生活, 2021(4): 19-23.