

引用格式: 仲舒颖, 葛全胜, 戴君虎, 等. 中国典型观赏植物花期模型建立及过去花期变化模拟[J]. 资源科学, 2017, 39(11): 2116-2129. [Zhong S Y, Ge Q S, Dai J H, et al. Development of phenological models for simulating past flowering phenology of typical ornamental plants in China[J]. *Resources Science*, 2017, 39(11): 2116-2129.] DOI: 10.18402/resci.2017.11.10

中国典型观赏植物花期模型建立及过去花期变化模拟

仲舒颖, 葛全胜, 戴君虎, 王焕炯

(中国科学院地理科学与资源研究所地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 建立花期物候模型可实现观赏植物花期的精确预报, 为“樱花节”、“桃花节”等时令旅游活动的开展提供重要依据。本研究选择花期观赏价值高、分布范围广泛的四种典型观赏植物进行研究, 包括桃(*Amygdalus persica*)、杏(*Armeniaca vulgaris*)、紫荆(*Cercis chinensis*)和紫丁香(*Syringa oblata*)。利用这些植物在中国42个站点的始花期和末花期观测资料及对应的气象资料, 建立并检验了可模拟不同站点和年份始花期和末花期的时空物候模型, 并利用该模型重建了1962—2013年四种植物的始花期、末花期和花期长度序列, 分析了其时空变化特征。结果表明: ①时空物候模型能够较准确地模拟大区域和长时间的花期变化, 对始花期、末花期和花期长度模拟的均方根误差多在4~6d之间; ②模拟得到的花期物候存在一定的地理分布规律, 其中随纬度的变化最为显著。纬度每升高1°, 始花期和末花期推迟1.23~4.46d, 花期长度缩短0.07~1.47d; ③过去50年, 所有植物平均始花期、末花期均显著提前, 提前趋势在(0.95~1.61)d/10a之间。紫丁香始花期与末花期的提前趋势空间差异较小, 而其他三种植物的花期提前趋势在分布区北部明显强于南部; ④花期长度在过去50年间变化较弱, 除紫丁香表现出较强的延长趋势(0.20d/10a)外, 其他三种植物的花期长度变化趋势在(-0.01~0.07)d/10a之间, 且具有很强的空间异质性。这些研究结果为典型观赏植物花期物候模拟及对气候变化的响应评估提供了科学依据。

关键词: 花期物候; 典型观赏植物; 时空变化; 物候模型; 中国

DOI: 10.18402/resci.2017.11.10

1 引言

物候学是研究周期性生物事件发生时间、影响因素以及同种或不同种间物候期相互关系的科学^[1]。物候学最早应用于农时预报、气候变化重建等领域^[2]。由于物候期可敏感地指示全球变暖对生物物理系统的影响, 物候学在全球变化研究中发挥了巨大作用^[3]。许多研究发现, 在北半球温带地区, 受气候变化影响, 植物春季物候期(例如始花期、展叶始期等)在近几十年来普遍提前^[4-7]。这些物候变化对生态系统结构和功能产生了明显的影响, 例如霜冻风险变化^[8,9]、花期与传粉者活动时间的不匹配^[10,11]、物种分布变化^[12]、发育期变化^[13,14]等。另外, 物候变化还会通过物理反馈(地表反照度、粗糙度)和生物地

球化学反馈(碳循环等)影响到气候变化^[15]。

植物物候期的准确模拟具有重要意义。由于物候期可具体表征植物生长发育过程中的关键节点, 物候期的确定有助于辨识气候条件对植物不同发育阶段的可能影响, 例如在花期受到的霜冻害以及生长季的旱灾等^[16], 进而评估不同植物对未来气候变化的适应能力。另外, “樱花节”、“桃花节”等时令旅游活动的成功举行依赖于实际的开花时间^[17,18]。赏花活动的举办日期早于或晚于实际花期会影响游客满意度和旅游收入。因此, 近年来观赏植物花期的预测受到广泛关注。

物候模型是模拟和预测物候期的可靠手段。目前, 国内外利用多种物候模型模拟了过去物候变

收稿日期: 2017-03-08; 修订日期: 2017-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401071, 41601047); 国家重大科研仪器研制项目(41427805)。

作者简介: 仲舒颖, 女, 广西崇左人, 硕士, 工程师, 主要从事物候学与全球变化研究。E-mail: zhongsy@igsrr.ac.cn

通讯作者: 王焕炯, E-mail: wanghj@igsrr.ac.cn

2017年11月

化或预测了未来物候变化。例如,王焕炯等模拟了过去50年(1952—2007年)中国白蜡树(*Fraxinus chinensis*)展叶始期时空变化,发现白蜡树的展叶始期在绝大部分地区呈提前趋势^[19]。Gonsamo等模拟了加拿大19种植物1948年来的始花期距平变化^[5]。在未来预测方面,Morin等预测了未来100年北美22种木本植物展叶始期变化,发现不同情景下物候变化差异很大^[20]。在中国和韩国也有类似的工作开展^[21,22]。针对观赏植物花期预报,现有研究主要以樱花为主^[23-25],而对其他观赏植物的花期模拟研究仍较少。

有鉴于此,本研究以四种典型的赏花植物为研究对象,利用中国物候观测网多年的始花期、末花期观测资料,建立并检验了时空物候模型,模拟了1963—2012年四种植物花期物候的空间分布及变化格局。研究结果可用于评估气候变化对花期物候产生的实际影响。另外,本研究建立的物候模型也可用于预测未来花期变化,从而为景区管理者选择合适的花节开幕、结束日期以及游客选择赏花时间提供依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

物候数据来源于中国物候观测网(<http://www.cpon.ac.cn/>)。根据观测资料丰富、分布范围广、花期具有较高观赏价值的原则,选择了四种典型观赏

植物进行研究,包括桃(*Amygdalus persica*)、杏(*Armeniaca vulgaris*)、紫荆(*Cercis chinensis*)、紫丁香(*Syringa oblata*)。这些植物的始花期和末花期观测数据(1963—2012年)分散在23~42个站点(见表1,图1)。每个物种观测的样本量均在150个以上(每个站点的1条始花期或末花期观测记录为1个样本量),这有利于建立稳定的物候模型。另外,四种植物的野外分布区数据来源于中国木本植物分布图集^[26],用以确定花期模拟的空间范围。

气候数据下载于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。物候模型的拟合采用站点观测数据。各物候观测站的1961—2013年日平均气温数据取自中国地面气候资料日值数据集(V3.0)中最邻近的气象站资料。物候期时空模拟所需的格网气候数据取自中国地面气温日值格点数据集(V2.0)。该数据集是对站点资料空间插值处理的结果,含1961—2013年中国地面水平分辨率 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的逐日气温格点数据。

表1 研究物种及观测站点信息

学名	拉丁名	站点数	样本量
桃	<i>Amygdalus persica</i>	36	184
杏	<i>Armeniaca vulgaris</i>	42	198
紫荆	<i>Cercis chinensis</i>	25	190
紫丁香	<i>Syringa oblata</i>	23	159

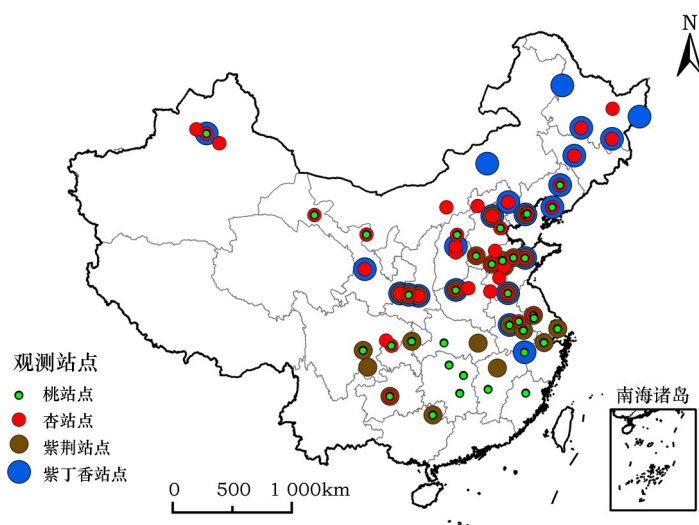


图1 本研究所采用的物候数据站点分布

Figure 1 Spatial distribution of phenological observation sites in this study

另外,本研究还采用DEM数据研究了物候期及物候变化趋势随高程的变化规律。该资料来源于NASA分发的SRTM(Shuttle Radar Topographic Mission)高程数据集。原数据分辨率为90m,为与气温格网数据相对应,本研究将其重采样至 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率。

2.2 时空物候模型建立及检验

本研究利用国内外广泛采用的GDD(Growing Degree Days)模型模拟花期变化^[27]。该模型的基本假设是植物芽的发育速率与GDD呈线性关系。具体公式为:

$$\sum_{t=t_0}^{t_{FFD}} \max(0, x_t - T_b) = GDD_{FFD} \quad (1)$$

$$\sum_{t=t_0}^{t_{EFD}} \max(0, x_t - T_b) = GDD_{EFD} \quad (2)$$

$$FD = t_{EFD} - t_{FFD} \quad (3)$$

式中 x_t 为第 t 天的日平均气温,当 x_t 大于植物发育的临界温度 T_b 时, GDD 为 $x_t - T_b$,否则 GDD 为0。从一年的第 t_0 天开始累积 GDD 。当累积的 GDD 达到阈值 GDD_{FFD} 时的时间 t_{FFD} 即为始花期(公式(1))。当累积 GDD 达到 GDD_{EFD} 时的时间 t_{EFD} 即为末花期(公式(2))。末花期与始花期间隔的天数即为花期长度 FD (公式(3))。

根据已有结果, GDD_{FFD} 与 GDD_{EFD} 在站点间和年份间存在一定的差异,这与植物在冬季经受的低温刺激不同有关^[28]。在前一年冬季气温更寒冷的地点或年份, GDD_{FFD} 与 GDD_{EFD} 需求较低^[29]。两者与冬季气温的关系可表达为指数函数^[21,30]:

$$GDD_{FFD} = d_1 + e_1 \times \exp(T_i/f_1) \quad (4)$$

$$GDD_{EFD} = d_2 + e_2 \times \exp(T_i/f_2) \quad (5)$$

式中 T_i 为站点 i 某年的冬季(前一年12月至当年2月)平均气温; d_1, e_1, f_1 为控制 GDD_{FFD} 对冬季气温响应的参数; d_2, e_2, f_2 为控制 GDD_{EFD} 对冬季气温响应的参数。至此,公式(1)-公式(5)构成了模拟植物花期的时空物候模型。其中始花期模型需要 t_0, T_b, d_1, e_1, f_1 5个参数(公式(1)和公式(4))。末花期模型同样需要5个参数 t_0, T_b, d_2, e_2, f_2 ,其中参数 t_0, T_b 与始花期模型相同。花期长度模拟则通

过始花期与末花期模型联合模拟来实现(公式(3))。

对于各植物,首先确定始花期时空物候模型的参数。参数拟合采用所有站点中奇数年的样本进行,其余样本用于交叉检验。参数拟合采用最小二乘法原则,即找到最优的一组 $[t_0, T_b, d_1, e_1, f_1]$,使得观测日期与模拟日期的误差平均和最小。最优参数的寻找采用模拟退火算法实现^[31]。其次,对末花期模型参数进行拟合。末花期模型的 t_0, T_b 直接设定为与始花期模型相同,而只对 d_2, e_2, f_2 采用模拟退火算法进行拟合。

参数拟合完成后,利用时空物候模型对原始物候资料中各站点和年份的始花期、末花期进行模拟。模型的内部检验通过奇数年模拟值与观测值的均方根误差(RMSE)和方差解释量(R^2)进行。交叉检验则利用偶数年模拟值与观测值的RMSE和 R^2 进行,用以衡量模型在数据独立情况下对物候期的模拟效果。

2.3 模拟与分析

在每种植物的野外分布范围内,将中国地面气温日值格点数据集提供的逐日均温数据输入上述物候模型,模拟1962—2013年四种植物逐年的始花期、末花期和花期长度变化,最终得到 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率的逐年物候期格网数据。在此基础上,计算各植物始花期、末花期和花期长度的多年平均值,用以研究物候期的空间分布,并采用多元回归模型研究物候期随地理因子的梯度变化,公式如下:

$$P = a \times lat + b \times lon + c \times ele + constant \quad (6)$$

式中 P 为各栅格点的平均物候期(始花期、末花期或花期长度); lat 、 lon 和 ele 分别表示对应格网的纬度、经度和高程; a, b 和 c 为回归系数,能反映物候期随纬度、经度和高程的变化大小; $constant$ 为回归模型的常数项。

另外,本研究对逐个栅格点利用线性回归方法计算了1962—2013年物候期(始花期、末花期与花期长度)随年份变化的斜率,用以表征物候期随时间的变化趋势。同时将公式(6)中的 P 变为物候变化趋势,用以检测物候变化趋势是否随地理因子有梯度变化。

2017年11月

3 结果及分析

3.1 模型建立与检验结果

时空物候模型参数拟合结果如表2所示。从中可知不同植物始花期发育的临界温度(T_b)不同(0.559~3.788℃),且开始累积积温的日期(t_0)也不同(1月5日—1月28日之间)。检验结果显示,模型能够准确地模拟不同站点和年份的始花期(图2)。四种植物始花期内部检验和交叉检验的 R^2 均在0.80以上, $RMSE$ 均在4~6d之间(表3)。对末花期模型而言,内部检验和交叉检验的 R^2 在0.67~0.94d之间; $RMSE$ 相对始花期模型有所增加,例如紫丁香末花期模拟的 $RMSE$ 比始花期增加了约3d(表3)。时空物候模型对花期长度模拟的 $RMSE$ 与始花期和末花期模拟相近,但拟合优度不高(R^2 在0.05~0.29

之间)。总之,本研究建立的时空物候模型能够在数据独立(模型拟合和检验为不同数据,则称独立;反之,拟合和检验均为一套数据,称不独立)的情况下准确地模拟不同站点和年份的始花期和末花期,但由于花期长度一般较短,且花期长度为末花期减始花期,这会造成误差叠加,故对花期长度的模拟结果相对较差。

3.2 花期物候格局

利用上述时空物候模型模拟的四种观赏植物花期物候格局(1962—2013年均值)如图3所示(见第2121页)。总体而言,四种植物的始花期和末花期显现出明显的空间差异。在桃的主要分布区内,西南和华南的始花期和末花期早于华东地区,花期长度长于华东地区(图3a,图3b,图3c)。杏在西南地区的始花期和末花期比华北地区要早20d以上(图3d,图3e),但花期长度差异不大,多介于9~12d之间(图3f)。紫荆主要分布于中国东南部地区,其分布区北部的始花期、末花期更晚,花期长度更短(图3g,图3h,图3i)。紫丁香的分布区比其他3种植物更靠北,主要集中在华北地区。在其分布区内,始花期、末花期从东南向西北逐渐变晚(图3j,图3k),花期长度由南到北逐渐缩短(图3l)。

以地理因子为自变量的多元回归模型能较准确地反映花期物候的空间格局(表4,见第2122页)。所有模型的 R^2 均显著($P<0.05$),绝大多数模

表2 研究区四种观赏植物花期物候模型参数估计结果

Table 2 Parameters estimates of flowering phenology model for four ornamental plants in study area

模型参数	桃	杏	紫荆	紫丁香
d_1	202.263	184.617	180.391	264.720
c_1	24.301	32.294	27.894	15.478
f	5.145	6.214	6.202	6.730
d_2	295.981	289.538	265.838	339.942
c_2	44.259	18.384	75.788	157.188
f_2	5.955	4.391	7.406	9.966
T_b	2.755	0.559	3.788	1.408
t_0	5	8	8	28

表3 研究区四种观赏植物花期物候模型检验结果

Table 3 Internal and external validity of flowering phenology model for four ornamental plants in study area

物种	物候期	内部检验			交叉检验		
		N	$RMSE/d$	R^2	N	$RMSE/d$	R^2
桃	始花期	184	5.99	0.90*	172	5.37	0.91*
	末花期	175	6.30	0.85*	163	5.81	0.87*
	花期长度	170	5.56	0.24*	162	5.16	0.26*
杏	始花期	198	4.35	0.94*	181	4.29	0.94*
	末花期	192	4.56	0.93*	176	3.83	0.94*
	花期长度	190	3.19	0.24*	174	3.20	0.19*
紫荆	始花期	190	6.11	0.84*	175	4.98	0.87*
	末花期	178	6.82	0.67*	170	4.95	0.79*
	花期长度	176	6.49	0.17*	166	5.66	0.29*
紫丁香	始花期	159	4.34	0.94*	150	4.34	0.95*
	末花期	151	7.60	0.86*	142	7.24	0.89*
	花期长度	151	7.80	0.05*	140	6.83	0.15*

注: N 为样本量;*: $P<0.05$ 。

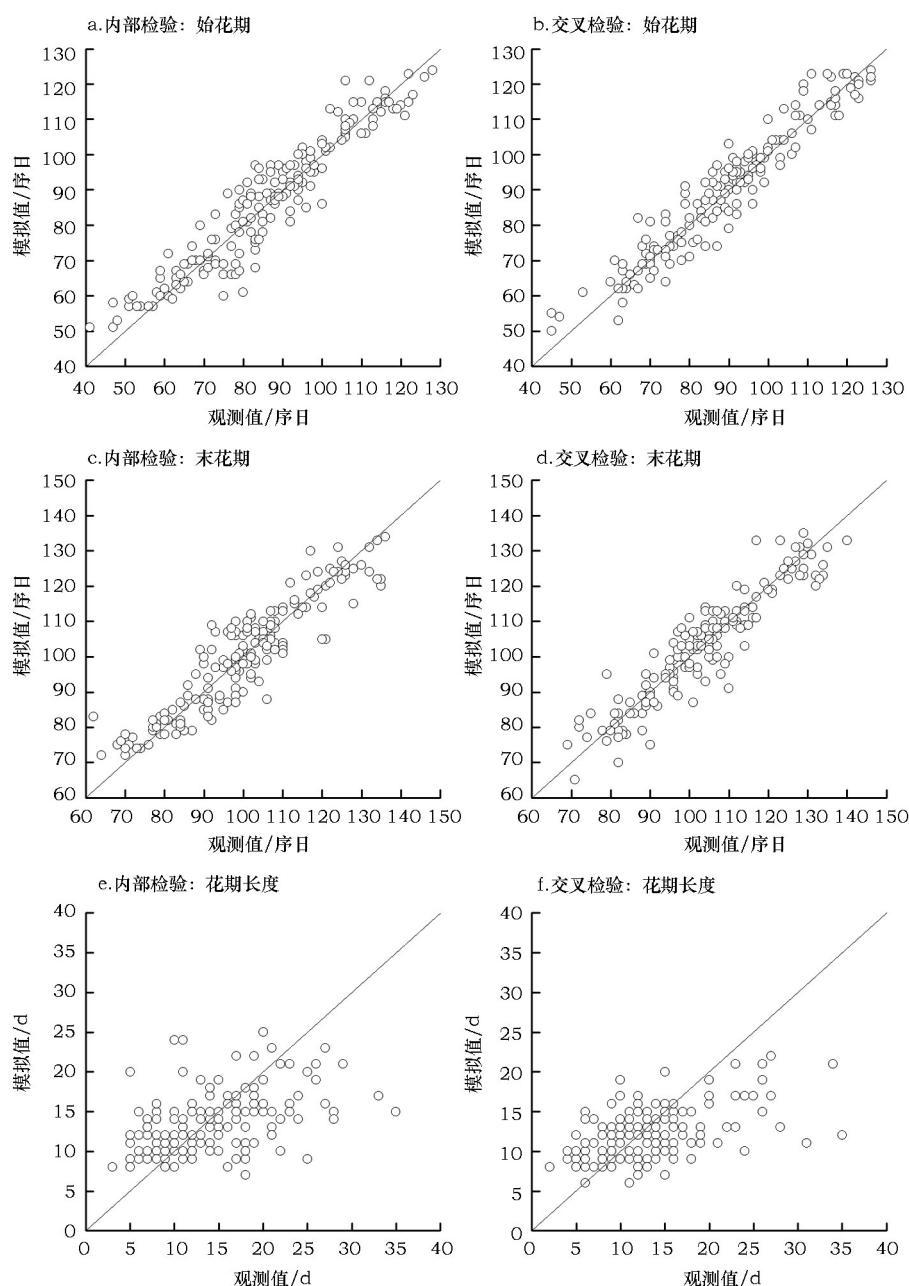


图2 研究区桃花期物候的实测值与模拟值对比

Figure 2 Comparison between observed and simulated flowering phenophases of *Amygdalus persica* in study area

型的 R^2 大于 0.60 (除桃、杏花期长度和紫丁香始花期、末花期外)。所有植物的始花期、末花期与纬度的回归系数均显著 ($P < 0.05$)。纬度每升高 1° , 始花期推迟 2.60~4.46d, 末花期推迟 1.23~4.37d。由于始花期随纬度的变化幅度强于末花期, 花期长度随纬度升高而缩短, 其中最明显的为紫丁香。纬度每升高 1° , 紫丁香花期长度缩短 1.47d。虽然在大多数情况下, 经度的回归系数在统计上是显著的, 但花

期物候随经度的变化相较于纬度较弱, 每 1° 经向变化造成的始花期、末花期和花期长度变化多小于 1d, 且变化的方向在种间不一致。经度越靠东, 桃和紫荆的始花期和末花期越晚, 而杏和紫丁香则得到相反的结论。高程同样对花期物候有显著影响。海拔每升高 100m, 始花期推迟 0.43~2.01d, 末花期推迟 0.36~2.03 d。高程对花期长度的影响较弱, 回归系数在 $(-0.05 \sim 0.12)$ d/100m 之间。

2017年11月

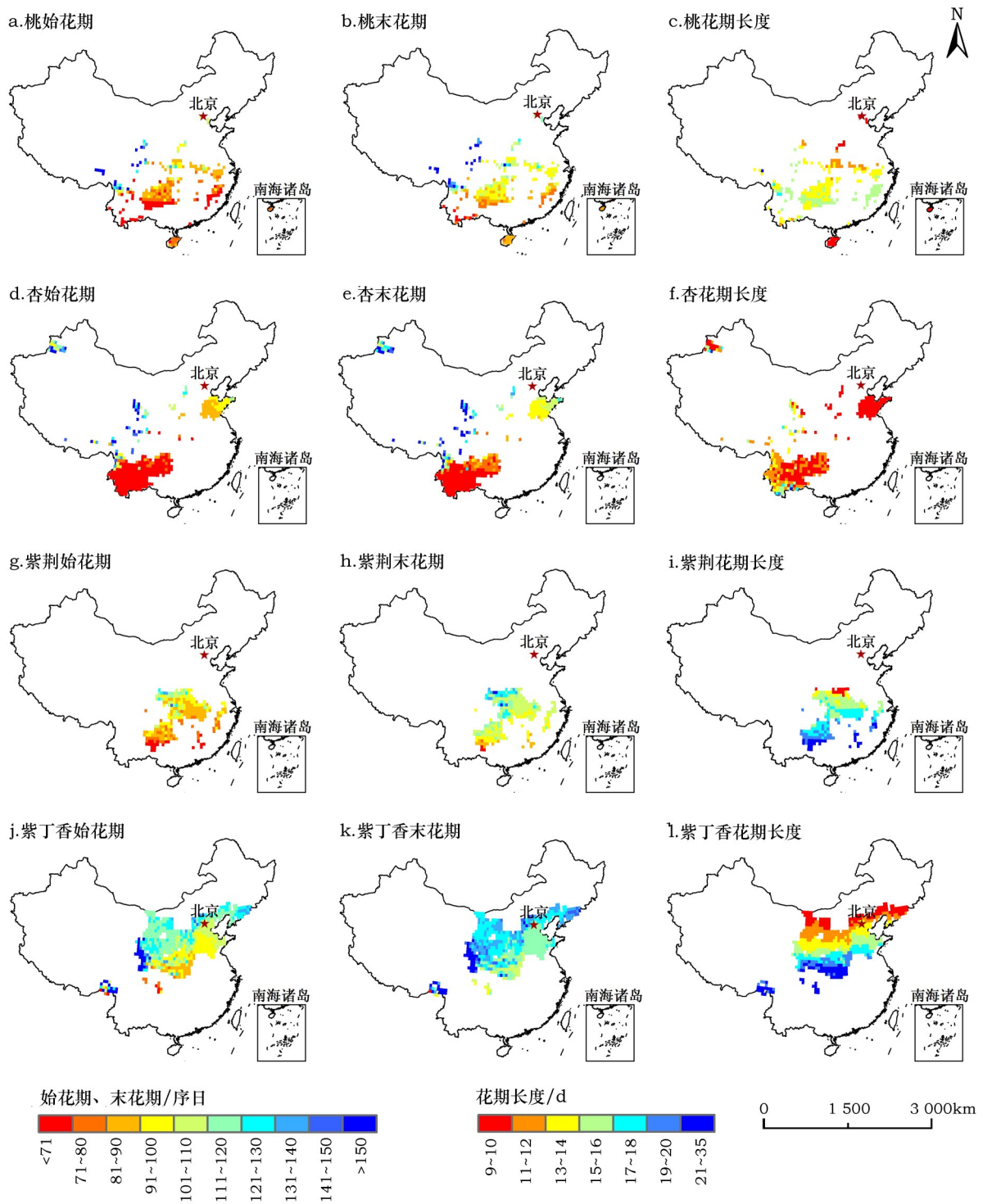


图3 研究区四种观赏植物平均始花期、末花期和花期长度的地理分布

Figure 3 Geographic pattern of mean first flowering date, end of flowering date and flowering duration in study area

注:四种植物的野外分布范围信息来源于中国木本植物分布图集^[26]。

3.3 花期物候变化模拟结果

图4(见第2123页)显示了模型模拟的1962—2013年平均始花期、末花期和花期长度逐年变化。四种植物的始花期、末花期除了早晚及变化幅度有

差别外,总体的年际变化比较一致。始花期均呈显著提前趋势,提前趋势在0.95d/10a(桃)至1.61d/10a(紫丁香)之间。末花期提前趋势在0.93d/10a(桃)至1.38d/10a之间(紫丁香)。从始花期、末花期年际

表4 研究区四种植物平均花期物候与地理因子的多元回归结果

Table 4 Multiple regression analysis between mean flowering phenophases and geographic factors for four plants in study area

物种	物候期	纬度/d	经度/d	高程/(d/100m)	常数项/d	R^2
桃	始花期	3.24*	0.70*	2.01*	-104.1*	0.68*
	末花期	3.06*	0.77*	2.03*	-92.9*	0.68*
	花期长度	-0.19*	0.13*	0.12*	4.2	0.25*
杏	始花期	4.46*	-0.25*	0.85*	-39.9*	0.62*
	末花期	4.37*	-0.36*	0.83*	-13.9	0.60*
	花期长度	-0.07*	-0.10*	0.03*	23.8*	0.31*
紫荆	始花期	4.01*	0.56*	1.44*	-102.5*	0.74*
	末花期	3.17*	0.58*	1.40*	-62.2*	0.70*
	花期长度	-0.84*	0.03	-0.05*	40.2*	0.85*
紫丁香	始花期	2.60*	-1.06*	0.43*	132.8*	0.26*
	末花期	1.23*	-0.92*	0.36*	183.1*	0.21*
	花期长度	-1.47*	0.11*	-0.03*	58.0*	0.89*

注:纬度、经度和高程的回归系数和常数项后的符号*表示在0.05显著性水平下与零有显著差别; R^2 后的符号*表示整个回归模型显著($P<0.05$)。

变化与参考时段(1981—2010年)¹⁾均值的对比来看,1997年是始花期、末花期变化的分界点(图5,见第2124页)。1997年前,大多数年份的始花期、末花期早于参考时段;1997年后,大多数年份的始花期、末花期晚于参考时段。桃的花期长度几乎无变化(-0.009d/10a),其他植物的花期长度表现出不显著的延长态势((0.03~0.20)d/10a),但总体上仍围绕多年平均值波动变化。不同植物花期长度的年际变幅不同,杏花期长度的变幅最小(2.2d),桃和紫丁香的变幅在5d左右,紫荆花期长度变幅最大,达9.3d。

过去50年花期物候变化趋势存在一定的空间差异(图5,见第2124页)。桃和紫荆的始花期和末花期在大多数区域提前,且在其分布区北部的提前趋势强于分布区南部。杏的始花期和末花期在西南地区出现了推迟趋势,其余地区则以提前为主。紫丁香的始花期和末花期在整个研究区都显著提前,没有明显的区域差异。就花期长度变化而言,桃和紫荆表现出较强的空间异质性,延长和缩短的趋势零散分布。杏的花期长度在西南地区以延长为主,其他地区则以缩短为主。紫丁香花期长度在华北地区东部的延长趋势强于华北地区西部。

以地理因子为自变量的多元回归模型能较准

确地反映花期物候变化的空间格局(表5,见第2125页)。所有模型的 R^2 均显著($P<0.05$),但只有桃、杏和紫荆始花期、末花期的 R^2 大于0.45。除紫丁香外,其他物种的始花期、末花期变化趋势与纬度的回归系数均显著($P<0.05$),且花期提前趋势随纬度的升高而增强。杏和紫丁香花期长度随纬度升高有延长趋势减弱直至缩短的态势。经度也与花期物候变化显著相关。经度越靠东,桃、杏和紫荆的始花期和末花期提前趋势越强,但紫丁香则得到相反的结论。另外,经度越靠东,紫荆和紫丁香花期长度的延长趋势越强。花期物候变化趋势同样受高程影响。桃、杏和紫丁香的始花期、末花期提前趋势随高程增加增强,紫荆则减弱。杏和紫丁香的花期长度随高程增加延长趋势减弱。

4 讨论

本研究建立的时空物候模型可较准确地模拟不同站点和年份观赏植物的始花期和末花期。与以往在单站点或特定区域建立的模型不同^[24,32,33],时空物候模型具有更强的区域适用性。特别是在没有实际物候观测资料的站点,只要有相关气温资料,即可模拟出当地植物的花期,为指导游客选择出行日期提供依据。另外,即使在有丰富物候资料、举办了多届花节的地区(例如北京玉渊潭樱花

1)考虑到气候学上一般用30年平均代表一个基本气候态势,且1981—2010年时段物候观测数据相对完整,故而选择1981—2010年为参考时段。

2017年11月

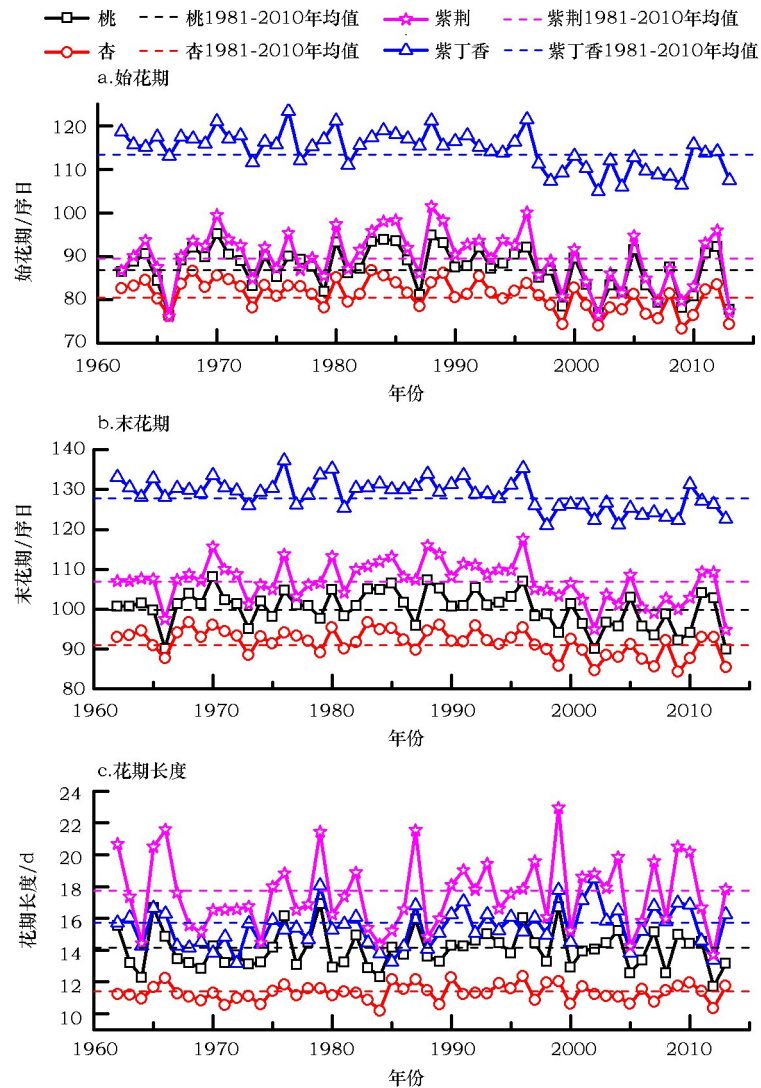


图4 1962—2013年研究区四种观赏植物平均始花期、末花期和花期长度的年际变化

Figure 4 Interannual changes in mean first flowering date, end of flowering date and flowering duration of four ornamental plants in study area from 1962 to 2013

节、景山公园牡丹节),由于气候存在很强的年际变化,下一年的物候期可能与当年差10d以上。利用本研究建立的物候模型,结合气象部门预测的未来气温资料,可提前一至两周估计出观赏植物的开花日期,为景区安排花节及相关娱乐休闲活动的时间提供参考。

本研究建立的模型在模拟花期物候时仍存在3~8d的误差。这可能与模型仅考虑温度这一影响因子,而未综合其他因子的影响有关。其他可能影响花期变化的环境因子包括光照^[34-36]和水分条件等^[37]。花期物候的进化是多个因素互相制约的结果,包括

生长,繁殖能力和与传粉者的活动时间匹配等^[38]。生物因子(种间对土壤、光和传粉者的竞争)也会影响花期物候^[39]。因此,未来仍需对生物因子与环境因子对花期物候的共同影响进行深入研究。

模型模拟花期物候格局具有重要的研究意义。日本气象部门根据每年樱花始花期前的气象数据和以往观测数据,预测樱花发芽、始花、盛花的时间,据此画出樱花花期由日本列岛南端向北的变化线,且及时更新花期预测结果。在中国,只有少数研究涉及了由南至北的花期监测和预报工作^[40]。本研究发现始花期随着纬度的升高逐渐推迟,因此

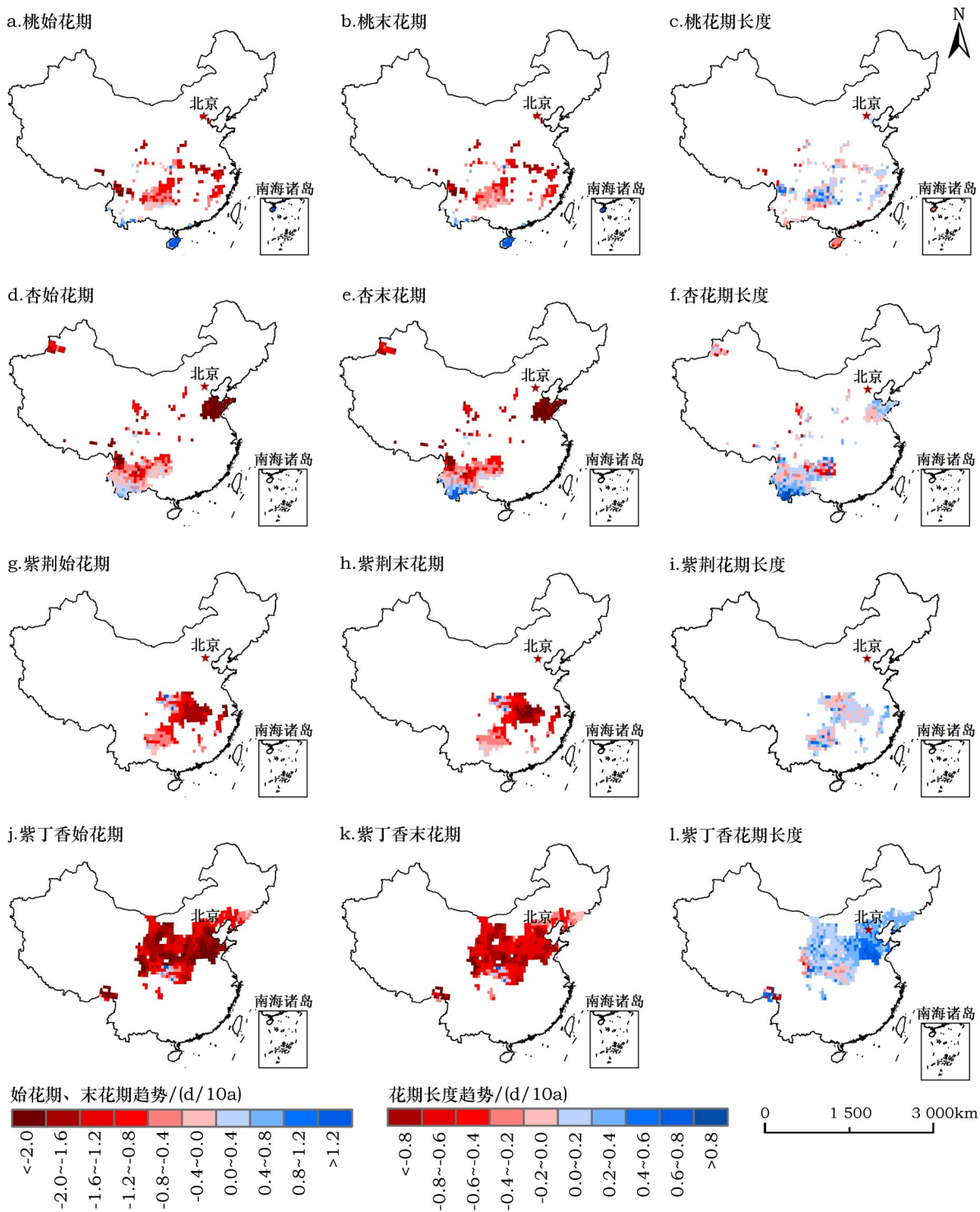


图5 1962—2013年研究区四种观赏植物始花期、末花期和花期长度变化趋势

Figure 5 Trends in mean first flowering date, end of flowering date and flowering duration of four ornamental plants in study area from 1962 to 2013

如果游客在春季按照由南向北的旅行路线,可沿途参与多个地区的赏花活动。另外,如果观测到了某地的花期,也可通过花期的地理分布规律对另一地花期进行粗略地估计。但是,花期长度随海拔高度

的变化规律不一致。只有紫丁香与紫荆随海拔升高缩短,其他两种植物则延长。这可能与紫丁香和紫荆分布相对集中,而桃和杏分布较为分散有关。如果分布范围中包含地形复杂的多个区域(如云贵

2017年11月

表5 研究区四种植物花期变化趋势与地理因子的多元回归结果

Table 5 Multiple regression analysis between flowering phenological trends and geographic factors for four plants in study area

物种	物候期	纬度/(d/(10a·°))	经度/(d/(10a·°))	高程/(d/(10a·100m))	常数项	R ²
桃	始花期	-0.138*	-0.055*	-0.059*	9.6*	0.50*
	末花期	-0.136*	-0.050*	-0.058*	9.0*	0.50*
	花期长度	0.003	0.001	-0.007	-0.1	0.05*
杏	始花期	-0.101*	-0.039*	-0.015*	6.3*	0.47*
	末花期	-0.120*	-0.039*	-0.017*	6.9*	0.54*
	花期长度	-0.020*	-0.001	-0.005*	0.8*	0.14*
紫荆	始花期	-0.037*	-0.052*	0.053*	5.5*	0.51*
	末花期	-0.052*	-0.041*	0.057*	4.7*	0.48*
	花期长度	-0.016*	0.011*	0.004	-0.8	0.06*
紫丁香	始花期	0.009	0.020*	-0.005*	-4.1*	0.08*
	末花期	0.006	0.034*	-0.006*	-5.4*	0.15*
	花期长度	0.002	0.015*	-0.002*	-1.5*	0.16*

注:纬度、经度和高程的回归系数和常数项后的符号*表示在0.05显著性水平下与零有显著差别;R²后的符号*表示整个回归模型显著(P<0.05)。

高原、四川盆地等),气温格网资料的分辨率(0.5°×0.5°)不足以反映局地地形影响,从而造成统计结果的不一致。

为验证物候模型模拟结果能否反映实际观测到的物候变化趋势,本研究对比了四种植物在代表性站点(观测年数最多)观测与模拟的物候变化趋势(图6)。结果表明,始花期、末花期模拟与观测到的变化趋势差异在(0.43~1.85)d/10a之间,而花期长度变化趋势的差异(模拟-观测)在(0.11~0.86)d/10a之间。尽管如此,所有植物观测与模拟的始花期、末花期均一致的提前,花期长度均一致延长或缩短。因此,虽然与实测值在幅度上存在一定的差异,模型模拟结果仍能在一定程度上反映花期物候变化的总体趋势。本研究发现的(0.95~1.61)d/10a的始花期提前趋势与以往的研究结果一致。例如,中国东部22个站点23种木本植物的始花期序列在1963—2006年的提前趋势为1.21d/10a^[41];中国华北和东北地区12种木本植物始花期和展叶始期在1963—2011年的提前趋势为1.7d/10a^[42]。利用荟萃分析对中国112个物种的物候变化趋势汇总发现,1960—2011年中国春夏季物候期以2.75d/10a的速率提前^[6]。这些研究得到的春季物候变化结果虽然均提前,但提前的程度有所差异,可能与研究区域、时段、物种和物候期选择的不同有关。

另外,本研究还发现在气候变暖背景下某些植

物的花期长度会延长,这将有利于延长赏花活动的时间,增加时令旅游收入。但花期长度随全球变暖延长^[43]和缩短^[44]的情形均有报道,仍需进一步研究。

5 结论

本研究建立了四种典型观赏植物(桃、杏、紫荆和紫丁香)的花期物候模型,并模拟了过去50年(1962—2013年)始花期、末花期和花期长度的空间格局及时间变化,得到以下结论:

(1)时空物候模型模拟始花期和末花期的R²在多数情况下高于0.8, RMSE约在4~6 d之间,表明该模型能够准确地模拟多个站点和年份的始花期、末花期变化,但对花期长度年际变化的模拟能力较差。

(2)模型模拟得到的始花期、末花期和花期长度呈现一定的空间格局。随纬度升高四种植物的始花期和末花期均推迟,花期长度均缩短。始花期推迟幅度在(2.60~4.46)d/度之间,末花期推迟幅度在(1.23~4.37)d/度之间,花期长度缩短幅度在(0.07~1.47)d/度之间;花期物候随经度变化较小,且在种间没有一致的规律;随海拔升高,四种植物的始花期与末花期均推迟。海拔高度每抬升100m,始花期推迟0.43~2.01d,末花期推迟0.36~2.03d。花期长度随海拔的变化较弱,且变化方向在种间不一致。

(3)所有植物的始花期、末花期在1962—2013

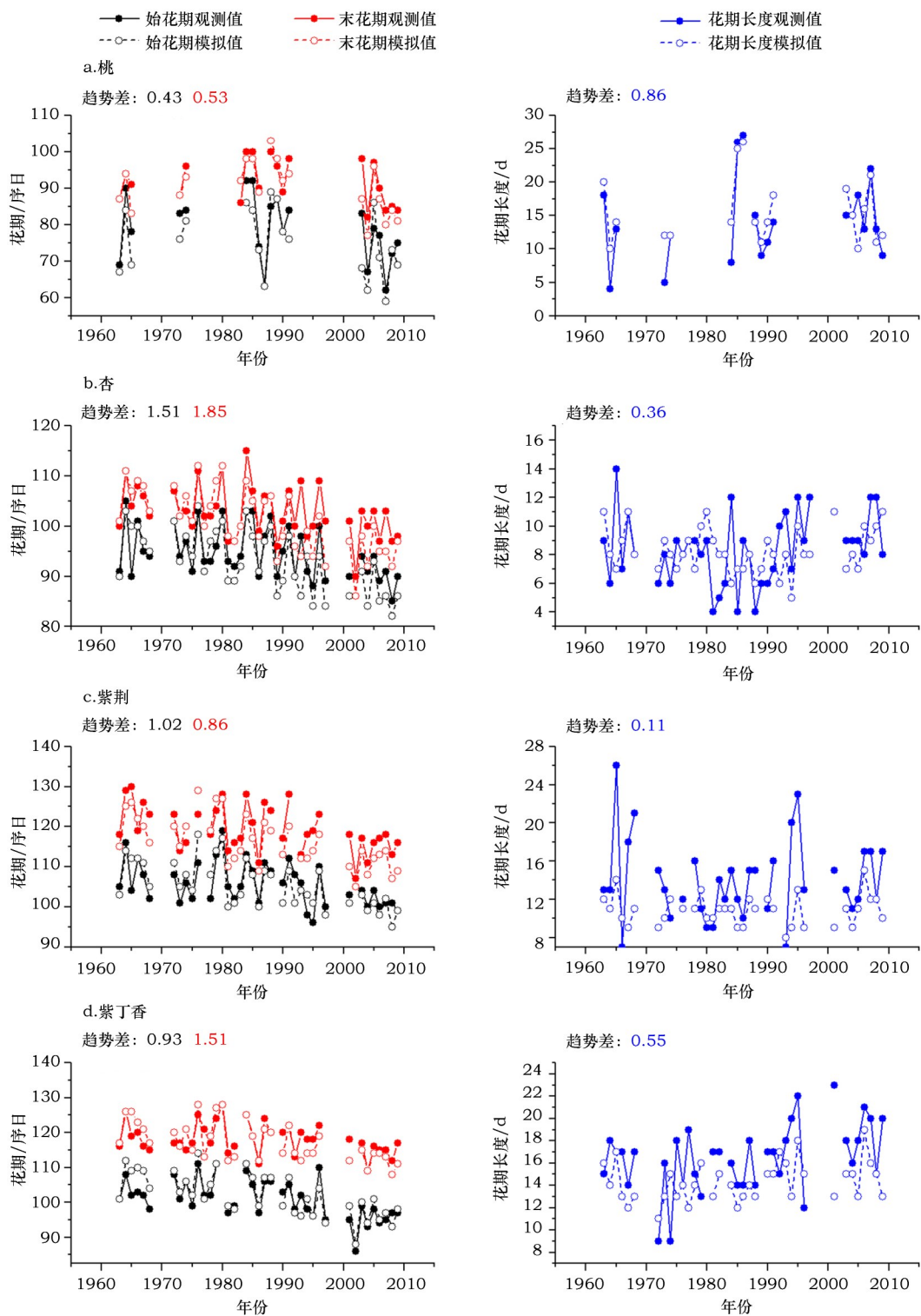


图 6 四种植物在典型站点实测与模拟的花期物候变化趋势对比

Figure 6 Observed and simulated flowering phenophases of four plants at typical sites

注:桃选择了观测资料最为丰富的长沙站,其他三种植物均采用了北京站数据;两者线性变化趋势的差异在图上标出,单位为d/10 a。

年间显著提前,紫丁香在其分布区内的提前趋势差异不明显,而其他植物的提前趋势在北方显著强于

南方。四种植物平均花期长度变化趋势均不显著,且具有较强的空间异质性。

2017年11月

参考文献(References):

- [1] Lieth H. Phenology and Seasonality Modelling[M]. Berlin: Springer, 1974.
- [2] 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[J]. 中国科学院院刊, 2010, 25(3): 310-316. [Ge Q S, Dai J H, Zheng J Y. The progress of phenology studies and challenges to modern phenology research in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2010, 25(3): 310-316.]
- [3] Rosenzweig C, Casassa G, Karoly D J, et al. Assessment of Observed Changes and Responses in Natural and Managed Systems[A]. Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Bolmgren K, Vanhoenacker D, Miller-Rushing A J. One man, 73 years, and 25 species. Evaluating phenological responses using a lifelong study of first flowering dates[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2013, 57(3): 367-375.
- [5] Gonsamo A, Chen J M, Wu C. Citizen science: linking the recent rapid advances of plant flowering in Canada with climate variability[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(2239): 1-5.
- [6] Ge Q, Wang H, Rutishauser T, et al. Phenological response to climate change in China: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 265-274.
- [7] Szabó B, Enik V, Czúcz B. Flowering phenological changes in relation to climate change in Hungary[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(9): 1347-1356.
- [8] Dai J, Wang H, Ge Q. The decreasing spring frost risks during the flowering period for woody plants in temperate area of eastern China over past 50 years[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(4): 641-652.
- [9] Menzel A, Helm R, Zang C. Patterns of late spring frost leaf damage and recovery in a European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in south-eastern Germany based on repeated digital photographs[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, DOI: 10.3389/fpls.2015.00110.
- [10] Delucia E H, Nabity P D, Zavala J A, et al. Climate change: resetting plant-insect interactions[J]. *Plant Physiology*, 2012, 160(4): 1677-1685.
- [11] Burkle L A, Marlin J C, Knight T M. Plantpollinator interactions over 120 years: loss of species, co-occurrence, and function[J]. *Science*, 2013, 339(6127): 1611-1615.
- [12] Chuine I. Why does phenology drive species distribution?[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1555): 3149-3160.
- [13] 刘普幸,杨泉. 敦煌绿洲1955年至2010年胡杨年生长季对气候变化的响应[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 566-571. [Liu P X, Yang Q. Response of the annual growing season of *Populus Euphratica* to climate change in Dunhuang Oasis from 1955 to 2010[J]. *Resources Science*, 2012, 34(3): 566-571.]
- [14] 张洪芬,韩涛,黄斌. 甘肃黄土高原春季气温变化对物候的影响[J]. 资源科学, 2007, 29(6): 10-15. [Zhang H F, Han T, Huang B. Influence of air temperature change on phenology spectrum in spring season in the Loess Plateau of Gansu[J]. *Resources Science*, 2007, 29(6): 10-15.]
- [15] Richardson A D, Keenan T F, Migliavacca M, et al. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169(3): 156-173.
- [16] Chuine I, Beaubien E G. Phenology is a major determinant of tree species range[J]. *Ecology Letters*, 2001, 4(5): 500-510.
- [17] 马丽,方修琦. 近20年气候变暖对北京时令旅游的影响:以北京市植物园桃花节为例[J]. 地球科学进展, 2006, 21(3): 313-319. [Ma L, Fang X Q. Effects of global warming on seasonal tourism for the last 20 years in Beijing: a case study on the Peach Flower Stanza of Beijing Botanical Garden[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(3): 313-319.]
- [18] 刘俊,李云云,刘浩龙,等. 气候变化对成都桃花观赏旅游的影响与人类适应行为[J]. 地理研究, 2016, 35(3): 504-512. [Liu J, Li Y Y, Liu H L, et al. Climate change and peach blossom viewing: impact and adaptation[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(3): 504-512.]
- [19] 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[J]. 中国科学:地球科学, 2012, 42(5): 701-705. [Wang H J, Dai J H, Ge Q S. The spatiotemporal characteristics of spring phenophase changes of *Fraxinus chinensis* in China from 1952 to 2007[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2012, 42(5): 701-705.]
- [20] Morin X, Lechowicz M I, Augspurger C, et al. Leaf phenology in 22 North American tree species during the 21st century[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(4): 961-975.
- [21] Ge Q, Wang H, Dai J. Simulating changes in the leaf unfolding time of 20 plant species in China over the twenty-first century [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 58(4): 473-484.
- [22] Hur J, Ahn J. Seasonal prediction of regional surface air temperature and first-flowering date over South Korea[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(15): 4791-4801.
- [23] Chung U, Mack L, Yun J I, et al. Predicting the timing of cherry blossoms in Washington, DC and Mid-Atlantic states in response to climate change[J]. *Plos One*, 2011, 6(11): e27439.

- [24] 张爱英,王焕炯,戴君虎,等. 物候模型在北京观赏植物开花期预测中的适用性[J]. 应用气象学报, 2014, 25(4): 483-492. [Zhang A, Wang H J, Dai J H, et al. Applicability analysis of phenological models in the flowering time prediction of ornamental plants in Beijing area[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, 25(4): 483-492.]
- [25] Aono Y. Cherry blossom phenological data since the seventeenth century for Edo (Tokyo), Japan, and their application to estimation of March temperatures[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2015, 59(4): 427-434.
- [26] 方精云,王志恒,唐志尧. 中国木本植物分布图集[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009. [Fang J Y, Wang Z H, Tang Z R. Atlas of Woody Plants in China[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.]
- [27] Hunter A F, Lechowicz M J. Predicting the timing of budburst in temperate trees[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1992, 29(3): 597-604.
- [28] Bennie J, Kubin E, Wiltshire A, et al. Predicting spatial and temporal patterns of bud-burst and spring frost risk in north-west Europe: the implications of local adaptation to climate[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(5): 1503-1514.
- [29] Murray M B, Cannell M, Smith R I. Date of budburst of fifteen tree species in Britain following climatic warming[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1989, 26(2): 693-700.
- [30] Chuine I. A unified model for budburst of trees[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2000, 207(3): 337-347.
- [31] Chuine I, Cour P, Rousseau D D. Fitting models predicting dates of flowering of temperate-zone trees using simulated annealing[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1998, 21(5): 455-466.
- [32] 李荣平,周广胜,郭春明,等. 1981-2005年中国东北榆树物候变化特征及模拟研究[J]. 气象与环境学报, 2008, 24(5): 20-24. [Li R P, Zhou G S, Guo C M, et al. Phenology characteristics of *Ulmus pumila* and its simulation from 1981 to 2005 in Northeast China[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2008, 24(5): 20-24.]
- [33] 王炳赞,范广洲,魏鸣,等. 基于温度影响因子的植物物候模型的应用研究[J]. 生物数学学报, 2015, 30(2): 253-262. [Wang B Y, Fan G Z, Wei M, et al. Application research of plant phenology based on temperature [J]. *Journal of Biomathematics*, 2015, 30(2): 253-262.]
- [34] Zhao J, Zhang Y, Song F, et al. Phenological response of tropical plants to regional climate change in Xishuangbanna, south-western China[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2013, 29(2): 161-172.
- [35] 张艳艳,赵玮,高庆先,等. 气候变化背景下陇东塬区‘红富士’苹果始花期研究[J]. 果树学报, 2017, 34(4): 427-434. [Zhang Y Y, Zhao W, Gao Q X, et al. The effect of climate change on the apple's initial flowering date in the eastern Gansu Province [J]. *Journal of Fruit Science*, 2017, 34(4): 427-434.]
- [36] 鲜小林,陈睿. 温度与光强对高山杜鹃催花期间花芽营养物质积累的影响[J]. 西北植物学报, 2015, 35(5): 991-997. [Xian X L, Chen R. Effects of different temperatures and light intensities on nutrients in *Rhododendron hybrides* forcing[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(5): 991-997.]
- [37] Vega Y, Marques I. Both biotic and abiotic factors influence floral longevity in three species of *Epidendrum* (Orchidaceae) [J]. *Plant Species Biology*, 2015, 30(3): 184-192.
- [38] Hafdahl C E, Craig T P. Flowering phenology in: Adaptive strategies against temporal variation in temperature[J]. *Journal of Plant Interactions*, 2014, 9(1): 122-127.
- [39] Wolkovich E M, Cook B I, Davies T J. Progress towards an interdisciplinary science of plant phenology: building predictions across space, time and species diversity[J]. *New Phytologist*, 2014, 201(4): 1156-1162.
- [40] 陶泽兴,葛全胜,王焕炯,等. 中国中东部植被景观观赏季划分的物候学基础[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 85-96. [Tao Z X, Ge Q S, Wang H J, et al. Phenological basis of determining tourism seasons for ornamental plants in central and eastern China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 85-96.]
- [41] Ge Q, Dai J, Zheng J, et al. Advances in first bloom dates and increased occurrences of yearly second blooms in eastern China since the 1960s: further phenological evidence of climate warming[J]. *Ecological Research*, 2011, 26(4): 713-723.
- [42] Ge Q, Wang H, Dai J. Shifts in spring phenophases, frost events and frost risk for woody plants in temperate China[J]. *Climate Research*, 2013, 57(3): 249-258.
- [43] Ziello C, Boeck A, Estrella N, et al. First flowering of wind-pollinated species with the greatest phenological advances in Europe[J]. *Ecography*, 2012, 35(11): 1017-1023.
- [44] Bock A, Sparks T H, Estrella N, et al. Changes in first flowering dates and flowering duration of 232 plant species on the island of Guernsey[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3508-3519.

Development of phenological models for simulating past flowering phenology of typical ornamental plants in China

ZHONG Shuying, GE Quansheng, DAI Junhu, WANG Huanjiong

(Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Developing flowering phenological models is conducive to the accurate simulation of flowering periods of ornamental plants and could provide basis for seasonal flowering tourism events. We investigated four widespread ornamental plants with high aesthetic value, namely, *Amygdalus persica*, *Armeniaca vulgaris*, *Cercis chinensis* and *Syringa oblata*. Using the first flowering date (FFD) and end of flowering date (EFD) data of these species and corresponding meteorological data at 42 sites, we developed and validated the spatiotemporal model of FFD and EFD and reconstructed data series of FFD, EFD and flowering duration (FD) of the four species over their distribution area from 1962 to 2013. At last, we analyzed spatiotemporal patterns of mean phenophases and phenological changes. The results showed that the spatiotemporal model was able to simulate the flowering phenology accurately on large spatial and temporal scales with root-mean-square-error of about 4–6 days. The simulated mean FFD, EFD and FD followed certain geographical gradients. Latitude was the major factor influencing flowering phenology. The FFD and EFD were delayed by 1.23–4.46 days and the FD was extended by 0.07–1.47 days per degree increase of latitude. Over the past 50 years, the mean FFD and EFD of all species became earlier with a rate of 0.95–1.61 days decade⁻¹. The advance of *S. oblata* FFD and EFD exhibited no obvious spatial pattern, while the changes of FFD and EFD for the other three species showed a noticeable spatial variation with clearer advance in the north than in the south. The FD of *S. oblata* extended by 0.20 days decade⁻¹, while the other three species showed very weak trends of -0.01–0.07 days decade⁻¹. The changes of FD showed strong spatial heterogeneity. These results provided a scientific basis for simulating flowering phenology of typical ornamental plants and assessing their phenological responses to climate change.

Key words: flowering phenology; typical ornamental plants; spatiotemporal variations; phenological model; China