

中国 8 种暖温带木本植物展叶及开花始期数据集 (1963–2015)

戴君虎^{1,2*}, 朱梦瑶^{1,2}, 王焕炯¹, 陶泽兴¹, 胡植^{1,2}, 董晓宇³

1. 中国科学院地理科学与资源研究所中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054

摘要: 植物物候是评估全球变化影响, 研究生态系统结构和功能以及发展气候和陆面模式的重要基础。本文提取中国物候观测网 1963–2015 年白蜡、垂柳、刺槐、合欢、桑树、榆树、杏树和紫荆等 8 种木本植物的展叶始期和开花始期数据, 通过 Unified、UniChill 和时空耦合三种物候模型构建、相应参数值估计和模型检验的春季物候网格数据研发方法, 研发了过去 50 年上述物种在其分布区展叶始期和开花始期的 0.5°×0.5° 网格数据。数据验证结果表明展叶始期的平均模拟误差约为 5–9 天, 开花始期平均误差约为 5–12 天。本数据集的组成包括: (1) 头文件, 包括物种物候期和分布范围网格的头文件信息; (2) 物种物候期, 包括每个物种展叶始期和开花始期 1963–2015 年的逐年文件; (3) 物种分布范围, 包括每个物种的实际分布范围网格。数据集由 3 个数据文件夹共计 1,713 个数据文件组成, 数据存储为.txt, GEOTIFF 和 ArcGIS ASCII 格式, 数据量为 74.5 MB (压缩后为 8.84 MB)。

关键词: 暖温带; 木本植物; 春季物候; 展叶始期; 开花始期

DOI: 10.3974/geodp.2019.04.03

1 前言

植物物候是指植物受环境(包括气候、水文、土壤等)影响而出现的以年为准周期的自然季节现象^[1]。植物物候与环境因子之间存在密切相互作用, 对气候变化高度敏感, 已成为记录和评估全球变化对生态系统影响的重要指标^[2]。近几十年来, 北半球春季温度升高已经导致植物春季物候的显著提前, 并进一步对陆地生态系统碳、水循环及养分平衡产生实质性影响^[3]。因此, 植物物候数据对于指示全球变化影响、研究生态系统结构和功能、以及发展气候和路面模式等方面具有重要的应用价值和意义。本文作者曾基于中国物候观测网(简称物候网)长期观测资料研制并出版个别物种的春季物候网格数据^[4]。之后, 团队主要依托物候网的地面人工观测, 在中国物候时空格局变化及归因等方面取得具有较大

收稿日期: 2019-11-19; 修订日期: 2019-12-16; 出版日期: 2019-12-24

基金项目: 中华人民共和国科学技术部(2018YFA0606102); 中国科学院(XDA19020303); 国家自然科学基金(41771056)

*通讯作者: 戴君虎, 中国科学院地理科学与资源研究所, daijh@igsrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 戴君虎, 朱梦瑶, 王焕炯等. 中国 8 种暖温带木本植物展叶及开花始期数据集(1963–2015) [J]. 全球变化数据学报, 2019, 3(4): 326–335. DOI: 10.3974/geodp.2019.04.03.

[2] 戴君虎, 朱梦瑶, 王焕炯等. 中国暖温带木本植物展叶和开花始期历年网格数据集[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2019. DOI: 10.3974/geodb.2019.06.04.V1.

国内外影响的成果^[5-6]。选择分布范围较广的代表性物种，生产多物种格网数据产品，进一步在更大范围直观展现中国木本植物春季物候的时空变化特征，能够更好地发挥物候数据在全球变化及资源环境领域中的作用。由于中国物候数据产品也是地面监测数据汇聚与共享的重要部分，因此，团队研发了《中国暖温带木本植物展叶和开花始期历年格网数据集》。该数据集包含1963–2015年中国8种典型暖温带落叶阔叶木本植物的春季物候期（展叶始期和开花始期）格网数据，在中国区域内实现了站点物候到区域物候的尺度转换。

2 数据集元数据简介

《中国暖温带木本植物展叶和开花始期历年格网数据集》^[7]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表1。

表1 《中国暖温带木本植物展叶和开花始期历年格网数据集》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	中国暖温带木本植物展叶和开花始期历年格网数据集
数据集短名	SpringPhenologyWTZChina
作者信息	戴君虎, 中国科学院地理科学与资源研究所, daijh@igsrr.ac.cn 朱梦瑶 AAA-7619-2019, 中国科学院地理科学与资源研究所, zhummy.16b@igsrr.ac.cn 王焕炯 AAA-7674-2019, 中国科学院地理科学与资源研究所, wanghj@igsrr.ac.cn 陶泽兴 AAA-7688-2019, 中国科学院地理科学与资源研究所, taozx.12s@igsrr.ac.cn 胡植 AAE-4801-2019, 中国科学院地理科学与资源研究所, huz.18b@igsrr.ac.cn 董晓宇 AAF-9268-2019, 长安大学, dongxy@igsrr.ac.cn
地理区域	中国: 18°N–54°N, 72°E–136°E
空间分辨率	地理经纬度 0.5° 时间分辨率 天
数据年代	1963–2015
数据格式	.txt、GEOTIFF 和 ArcGIS ASCII 数据量 74.5 MB (压缩后 8.84 MB)
数据集组成	数据集由头文件、物种物候期、物种分布范围3部分文件组成 物候期: 展叶始期、开花始期 物种: 白蜡、垂柳、刺槐、合欢、桑树、榆树、杏树和紫荆
基金项目	中华人民共和国科学技术部(2018YFA0606102); 中国科学院(XDA19020303); 国家自然科学基金(41771056)
数据计算环境	MATLAB, 中国科学院地理科学与资源研究所内平台 ArcGIS, 中国科学院地理科学与资源研究所内平台
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲11号100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据(中英文)、实体数据(中英文)和通过《全球变化数据学报》(中英文)发表的数据论文。其共享政策如下:(1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载;(2)最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源;(3)增值服务用户或以任何形式散发和传播(包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》(中英文)编辑部签署书面协议, 获得许可;(4)摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循10%引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[8]
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSCD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS

3 数据研发方法

3.1 基础数据汇集

地面观测物候数据取自中国物候观测网 (China Phenological Observation Network) 1963–2015 年观测记录的 8 种木本植物展叶始期和开花始期数据, 包括白蜡 (*Fraxinus chinensis*)、垂柳 (*Salix babylonica*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、合欢 (*Albizia julibrissin*)、桑树 (*Morus alba*)、榆树 (*Ulmus pumila*)、杏树 (*Armeniaca vulgaris*) 和紫荆 (*Cercis chinensis*)。上述植物均为中国广布的暖温带落叶阔叶林典型物种^[9], 具有很好的代表性。本研究的气象数据来源于中国气象数据网 (data.cma.cn) “中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)” 中对应站点和时段的日平均气温数据, 用于物候模型的参数化; 从 “中国地面气温日值 0.5°×0.5°格点数据集 (V2.0)” 中得到格网日平均气温, 用于物候期模拟和尺度拓展。

3.2 算法原理

展叶和开花始期格网数据研发方法包括物候模型构建、参数值估计和模型检验三个步骤^[10]。在 Unichill 模型^[11]的基础上, 本文新增了 Unified 模型^[11]和一种基于春暖模型 (Spring Warming, SW) 的时空耦合模型 (Temporal-Spatial Coupling, TSC)^[12], 以提高物候期的模拟精度。根据三个春季物候模型交叉检验均方根误差 (RMSE) 最小原则选取最优物候模型来模拟各物种过去 50 年展叶始期和开花始期的时空格局^[13]。

(1) Unified 模型: 考虑芽开放过程中的休眠期和静止期两个阶段, 包含 9 个参数: a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 w 、 k 、 C^* 和 t_c 。其中, 参数 a 、 b 和 c 决定冷激单元对气温的响应函数 (式 1); 参数 d 和 e 决定驱动单元对气温的响应函数 (式 2); 参数 t_0 是冷激开始累积的时间, 决定了冷激单元累积和的阈值 C^* (式 3); 参数 w 、 k 和 t_c 决定了驱动单元累积和的阈值 F^* (式 4)。达到阈值的时间 t_b 就是展叶或开花的日期。

$$R_c(x_t) = \frac{1}{1 + e^{a(x_t - c)^2 + b(x_t - c)}} \quad (1)$$

$$R_f(x_t) = \frac{1}{1 + e^{d(x_t - e)}} \quad (2)$$

$$\sum_{t_0}^{t_1} R_c(x_t) = C^* \quad (3)$$

$$\sum_{t_1}^{t_b} R_f(x_t) = F^* \quad \text{其中 } F^* = w e^{k C_{tot}}, \quad C_{tot} = \sum_{t_0}^{t_c} R_c(x_t) \quad (4)$$

(2) UniChill 模型: 是 Unified 模型的简化形式, 包含 7 个参数: a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 C^* 和 F^* 。在 Unified 模型的基础上, UniChill 模型将驱动单元开始的时间 t_1 固定为前一年的 9 月 1 日, 并假设每年春季物候开始所需的驱动单元累积和 F^* 固定不变。

(3) 时空耦合模型: 在 SW 模型^[14] (式 5–6) 基础上建立的。模型用冬季平均气温来反映积温阈值的差异^[15] (式 7), 包含 6 个参数: T_{b1} 、 F^* 、 t_0 、 a 、 b 和 f 。其中, $R_f(x_t)$ 是驱动单元, x_t 是第 t 天的日平均气温 (°C), T_{b1} 是临界温度 (°C); F^* 是积温累积的阈值, 不同站点的积温阈值 F_i 由站点 i 冬季 (前一年 12 月到 2 月) 平均气温 \bar{T}^{WI} (°C) 和参数 a 、 b 、

f 决定； t_0 是驱动单元开始累积的时间，达到 F^* 的时间 y 就是展叶或开花的日期。

$$R_f(x_t) = \begin{cases} 0 & x \leq T_{b1} \\ x - T_{b1} & x \geq T_{b1} \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{t_0}^y R_f(x_t) = F^* \quad (6)$$

$$F_i = a + b \times e^{\frac{\bar{T}_i^{WI}}{f}} \quad (7)$$

3.3 技术路线

本数据集研发的主要步骤包括：获取中国物候观测网 45 个站点 1963–2015 年上述 8 种木本植物的地面物候观测数据；利用物种物候期时空混合样本以及对应站点年的气温数据建立 3 种春季物候模型并通过模拟退火算法（Simulated Annealing, SA）^[16] 进行参数值估计；比较 3 种模型内部检验及交叉检验的拟合优度（ R^2 ）和均方根误差（RMSE），选择物种最优物候模型；利用 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 空间分辨率的格点气温数据以及现状物种分布数据进行模拟和尺度扩展，形成 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 中国 8 种木本植物春季物候期格网数据，技术路线如图 1 所示。

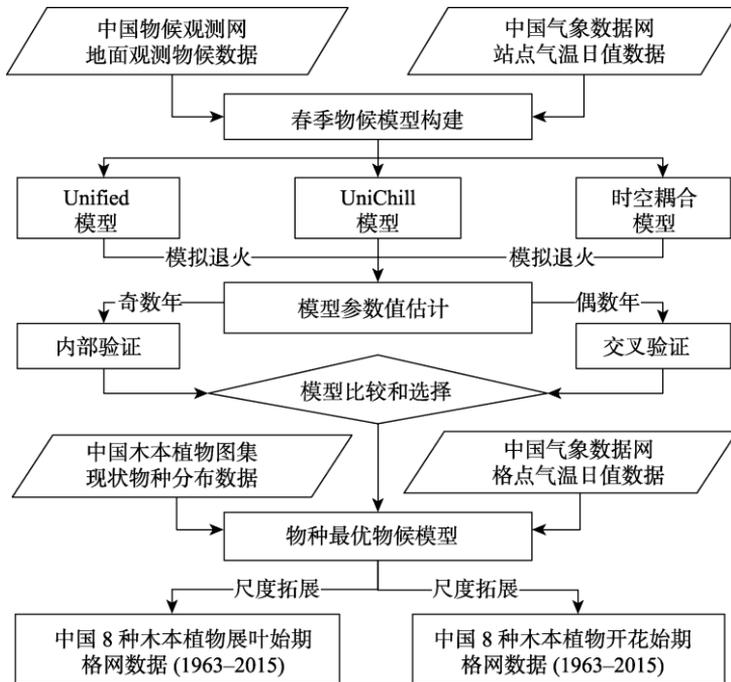


图 1 中国 8 种木本植物展叶和开花始期格网数据研发技术路线

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

《中国暖温带木本植物展叶和开花始期历年格网数据集》由头文件、物种物候期和物种分布范围三部分文件组成，数据集组成文件的命名方式、数据描述、数据格式、文件个

数及数据量等信息见表 2。

(1) 头文件：内含物种物候期和物种分布范围格网数据的头文件信息。

(2) 物种物候期：由“展叶始期”和“开花始期”两个物候期文件夹组成，每个物候期文件夹内含 8 个物种子文件夹，物种子文件夹内有两种格式 1963–2015 年共 106 个逐年物候期文件。数据文件以 ArcGIS ASCII 及 GEOTIFF 格式存储，在每一个 ArcGIS ASCII 物候期文件之前拷贝格网数据头文件后，可在 ArcMap 中利用“ASCII to Raster”工具转化为可视化的 GRID 格式。

(3) 物种分布范围：内含每个物种实际分布范围^[8]，分布范围外物候期数据用户需将其掩膜掉。数据文件以 ArcGIS ASCII 及 GEOTIFF 格式存储，拷贝头文件后亦可在 ArcMap 中转化为可视化的 GRID 格式。

表 2 《中国暖温带木本植物展叶和开花始期历年格网数据集》组成文件简表

组成文件	命名方式	数据描述	数据格式	文件数(个)	数据量
头文件	Headfile.txt	第一行：格网数据列数 64 第二行：格网数据行数 36 第三行：格网左下角经度 72 °E 第四行：格网左下角纬度 18 °N 第五行：格网空间分辨率 0.5 ° 第六行：空值为 999	.txt	1	1 KB
物候期	物候期_物种_年	物候期以日序 (DOY) 表示 空值为 999 投影方式为 WGS84 地理投影	ArcGIS ASCII GEOTIFF	848 848	73.8 MB
分布范围	Spatial_物种	有分布的地方值为 1 无分布的地方值为 999 投影方式为 WGS84 地理投影	ArcGIS ASCII GEOTIFF	8 8	0.7 MB

4.2 数据结果

(1) 展叶始期数据

各物种 1963–2015 年平均展叶始期的分布如图 2 所示。从空间分布格局上看，各物种展叶始期均有明显的纬度分异和海拔分异规律，呈现出南早北晚、东早西晚的分布特征。时间分布上，8 种木本植物中最早展叶的物种是杏树 (图 2g)，之后依次是垂柳、刺槐、榆树、白蜡、桑树和紫荆，最晚展叶的是合欢 (图 2d)。时间序列趋势分析表明，1963–2015 年各物种展叶始期总体呈提前趋势 (表 3)，平均每 10 年提前 0.9–3.4 天。其中 83.1%–99.7% 的栅格展叶始期提前，22.0%–79.8% 显著提前。

(2) 开花始期数据

1963–2015 年 8 种植物平均开花始期的模拟结果如图 3 所示。从空间分布格局上看，各物种开花始期的纬度分异现象没有展叶始期明显。合欢 (图 3d) 和紫荆 (图 3h) 的开花始期在空间上差异较小，而其他物种开花始期表现出较为明显差异。时间分布上，同一地区不同物种开花始期的先后次序也有所差异。最早开花的物种是榆树 (图 3f) 和杏树 (图 3g)，之后依次是垂柳、白蜡、桑树和紫荆，刺槐和合欢开花最晚。开花始期的时间变化趋势 (表 3) 表明过去 50 年中国 8 种木本植物的开花始期也呈现提前趋势，平均每 10 年提前 0.7–3.3 天。其中 77.1%–97.7% 栅格的开花始期提前，32.5%–79.7% 的显著提前。

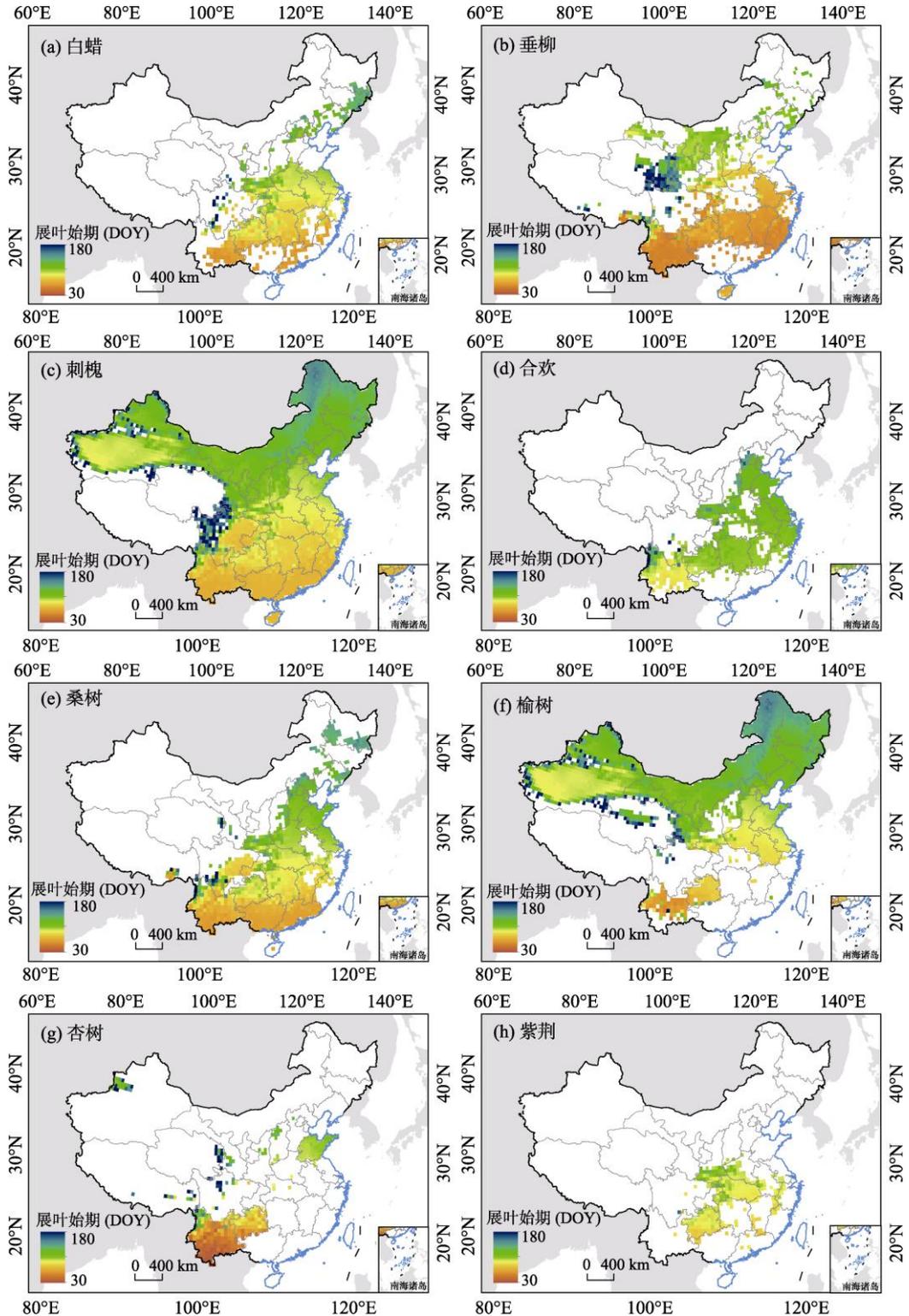


图 2 1963–2015 年中国 8 种暖温带落叶阔叶木本植物平均展叶始期

注：本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1831 号的标准地图制作，底图无修改，下同。

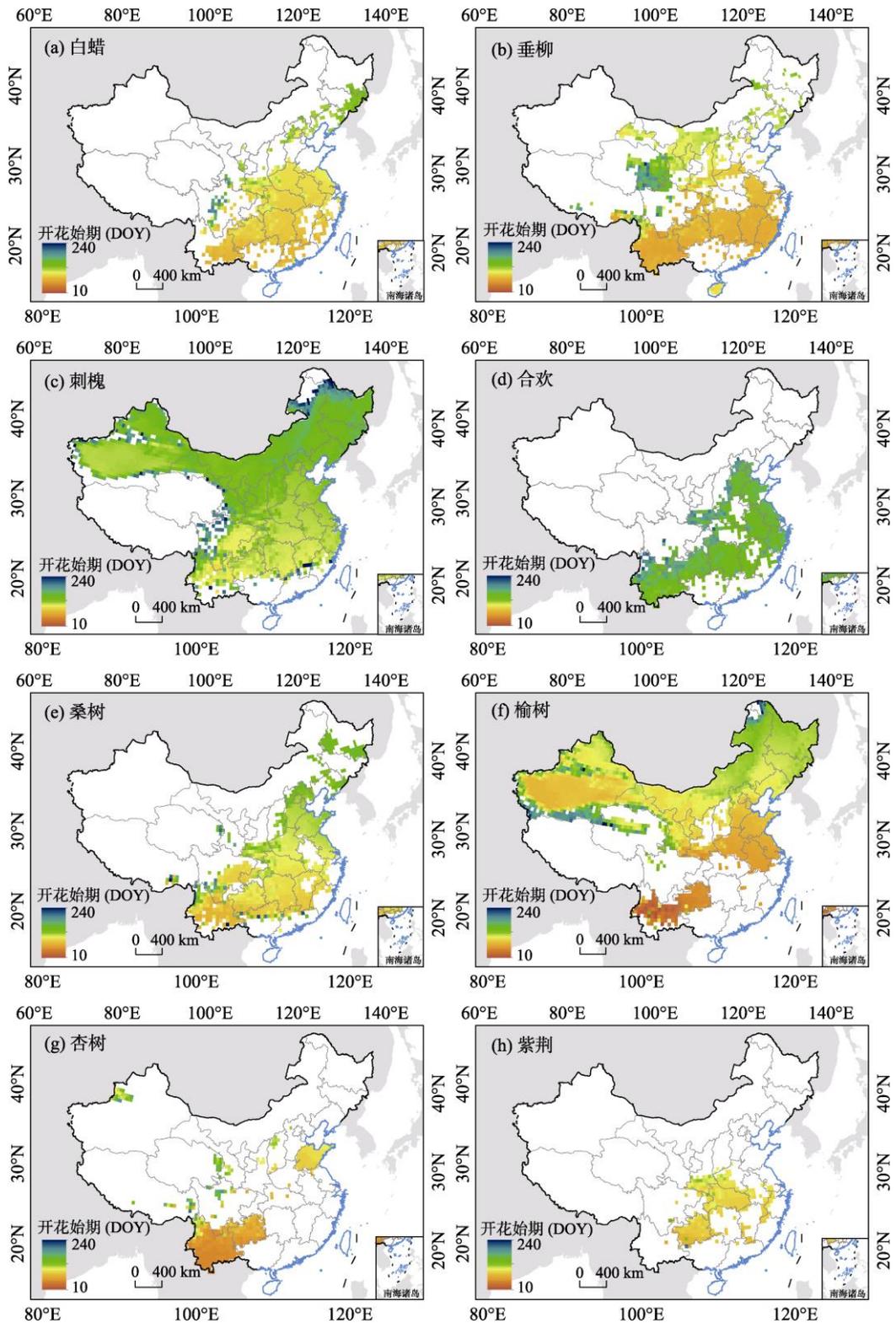


图3 1963–2015年中国8种暖温带落叶阔叶木本植物平均开花始期

表3 1963–2015年中国8种暖温带木本植物展叶及开花始期时间变化趋势统计

物候期	物种	平均变化趋势 (d/10a)	提前 (%)	推迟 (%)	显著提前 (%)	显著推迟 (%)
展叶 始期	白蜡	-1.0	90.3	9.7	43.7	0.5
	垂柳	-1.1	93.3	6.7	48.0	2.6
	刺槐	-1.1	94.1	5.9	62.4	0.4
	合欢	-3.3	99.7	0.3	66.6	0.0
	桑树	-0.9	86.6	13.4	43.6	0.3
	榆树	-3.4	97.5	2.5	79.8	0.3
	杏树	-1.4	98.1	1.9	64.3	0.0
	紫荆	-0.6	83.1	16.9	22.0	2.4
开花 始期	白蜡	-1.2	77.1	22.9	37.1	0.4
	垂柳	-0.7	78.8	21.2	44.2	6.5
	刺槐	-3.3	97.7	2.3	79.7	0.3
	合欢	-1.1	96.2	3.8	64.8	1.5
	桑树	-1.7	94.7	5.3	58.5	0.4
	榆树	-1.8	94.4	5.6	65.1	0.8
	杏树	-1.0	89.2	10.8	47.7	1.1
	紫荆	-0.8	89.3	10.7	32.5	0.7

4.3 数据结果验证

(1) 展叶始期结果验证

采用内部验证和交叉验证方法验证了展叶始期数据的可靠性（图4）。从模型内部验证结果来看，三种物候模型拟合效果均较好，除合欢（ $R^2=0.47, 0.51, 0.45$ ）和紫荆（ $R^2=0.51, 0.59, 0.53$ ）外其他物种三种模型 R^2 均在 0.81 以上。相对而言，UniChill 模型对大多数物种展叶始期的拟合结果最好，RMSE 为 5.07–9.90 天；时空耦合模型对垂柳和刺槐的拟合结果最好，RMSE 为 5.27–8.36 天；而 Unified 模型对所有物种拟合效果相对较差。从交叉验证结果看，UniChill 和时空耦合模型对大多数物种展叶始期的模拟效果很相近，除合欢（ $R^2=0.46, 0.50$ ）和紫荆（ $R^2=0.60, 0.64$ ）外，其他物种 R^2 为 0.84–0.91，RMSE 为 5.09–11.04 天；Unified 模型的模拟效果相对较差，RMSE 为 5.30–12.56 天。总体而言，交叉验证结果显示各物种展叶始期最优物候模型的模拟误差在 5.09–8.97 天之间。

(2) 开花始期结果验证

内部验证结果显示 8 种木本植物的拟合效果差别较大（图5）。除合欢（ $R^2=0.45$ ）外，最优模型拟合平均 R^2 为 0.68–0.92。其中，UniChill 模型对大多数物种开花始期的拟合精度最高，RMSE 为 5.05–11.34 天；而时空耦合模型对垂柳和刺槐的拟合精度优于其他模型，RMSE 为 5.26–13.48 天。交叉检验结果显示不同模型的模拟效果差别较大，UniChill 模型对半数物种开花始期的模拟精度更高，RMSE 为 4.78–8.38 天；时空耦合模型更适用于垂柳和刺槐，而 Unified 模型对白蜡和合欢更好。交叉验证结果显示最优物候模型对各物种开花始期的模拟结果次于展叶始期，误差在 4.78–12.35 天之间。

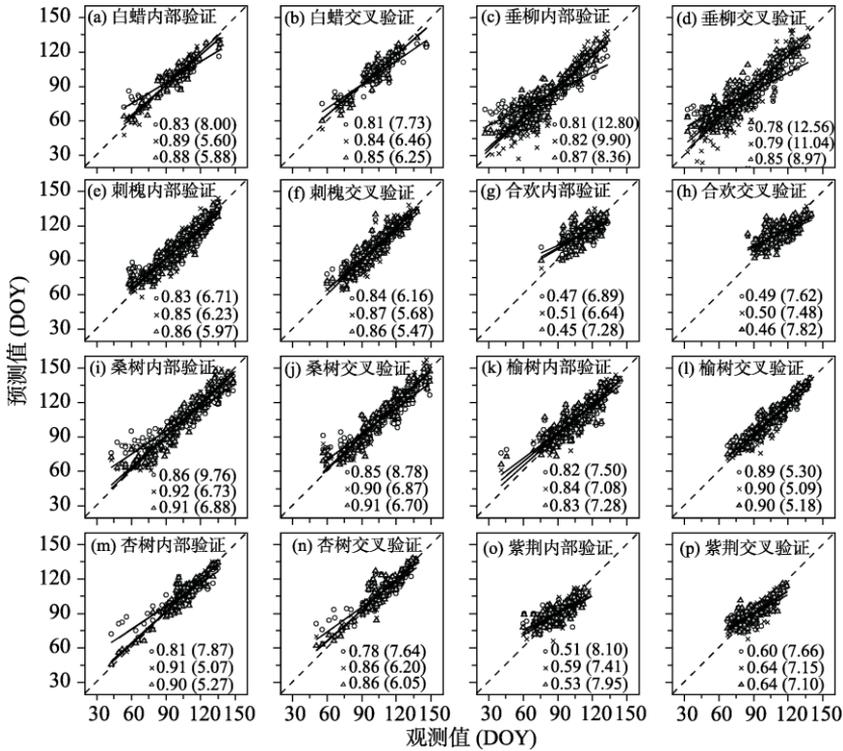


图 4 三种物候模型对各物种展叶始期模拟结果的内部验证和交叉验证

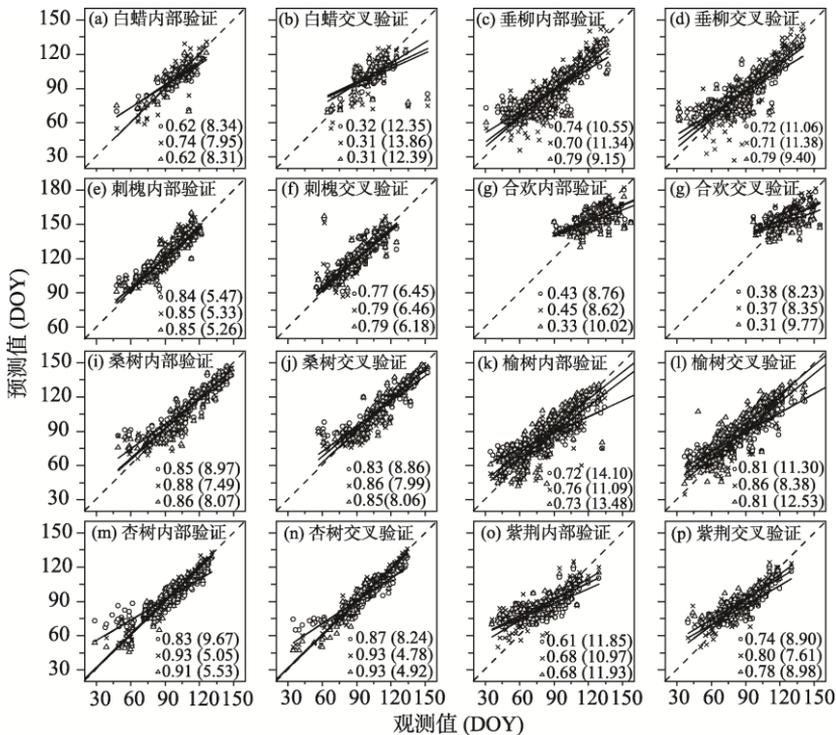


图 5 三种物候模型对各物种开花始期模拟结果的内部验证和交叉验证

注：○、×和△分别代表 Unified、UniChill 和时空耦合模型的模拟结果。实线是观测值和预测值的线性回归拟合曲线。符号后和括号中的数字分别表示模型的 R^2 和 RMSE。RMSE 最小值表示最优物候模型的模拟结果。

5 讨论与结论

本文利用中国物候观测网的地面物候观测数据和三种常见的春季物候模型，研发了中国典型暖温带落叶阔叶木本植物春季物候格网数据集。数据集包括8种典型暖温带落叶阔叶木本植物的展叶始期和开花始期格网数据，数据年代为1963–2015年，时间分辨率为天，空间分辨率为0.5°。其中，各物种展叶始期平均模拟误差约为5–9天，开花始期平均误差约为5–12天。该数据集表征了中国近50年植物物候的时空格局，可为全球变化、生态、自然资源、环境、旅游和人类健康等研究领域提供基础数据。

作者分工：戴君虎负责总体设计；胡植、董晓宇采集和处理原始物候数据；王焕炯、陶泽兴设计模型算法；朱梦瑶、胡植进行数据验证；朱梦瑶、戴君虎撰写了数据论文。

参考文献

- [1] Lieth, H. Phenology and seasonality modeling [J]. *Ecological Studies*, 1974, 120(6): 461.
- [2] 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: 156–173.
- [3] Piao, S. L., Liu, Q., Chen, A. P., *et al.* Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25: 1922–1940.
- [4] 葛全胜, 戴君虎, 王焕炯. 1952–2007年中国白蜡树春季物候格网数据[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2014. DOI: 10.3974/geodb.2014.01.09.V1.
- [5] Ge, Q. S., Wang, H. J., Rutishauser, T., *et al.* Phenological response to climate change in China: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 265–274.
- [6] Dai, J. H., Wang, H. J., Ge, Q. S. The spatial pattern of leaf phenology and its response to climate change in China [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2014, 58(4): 521–528.
- [7] 戴君虎, 朱梦瑶, 王焕炯等. 中国典型暖温带木本植物展叶和开花始期历年格网数据集[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2019. DOI: 10.3974/geodb.2019.06.04.V1.
- [8] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017年更新).
- [9] 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.
- [10] 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]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(6): 991–1000.
- [11] Chuine, I. A unified model for budburst of trees [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2000, 207(3): 337–347.
- [12] Ge, Q. S., Wang, H. J., Dai, J. H. 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.
- [13] 陶泽兴. 中国五种广布树种物候变化影响下的分布范围模拟[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2018.
- [14] Hunter, A. F., Lechowicz, M. J. Predicting the timing of budburst in temperate trees [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1992, 29(3): 597–604.
- [15] Wang, H. J., Ge, Q. S., Rutishauser, T., *et al.* Parameterization of temperature sensitivity of spring phenology and its application in explaining diverse phenological responses to temperature change [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8833.
- [16] Chuine, I., Cour, P., Rousseau, D. D. Fitting models predicting dates of flowering of temperate-zone trees using simulated annealing [J]. *Plant Cell and Environment*, 1998, 21(5): 455–466.