

中国 5 种暖温带木本植物叶全变色期数据集 (1963–2015)

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

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: 植物秋季物候受温度、湿度、光照等多种环境因素的共同影响, 其发生机制和变化过程存在很大不确定性, 在全球变化及资源环境领域研究中至关重要。本文利用中国物候观测网 1963–2015 年白蜡、垂柳、刺槐、榆树和杏树等 5 种木本植物的叶全变色期数据, 构建多元回归 (Multivariate Regression, MR)、温度光周期 (Temperature-photoperiod, TP) 和春季影响秋季 (Spring-influenced Autumn, SIA) 三种秋季物候模型, 经模拟和尺度拓展研制了过去 50 年各物种的叶全变色期 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格网数据。数据交叉验证结果表明叶全变色期的平均模拟误差约为 10–18 天。本数据集是表征中国近 50 年秋季物候时空格局及变化特征的基础数据, 数据集由头文件、物种物候期和物种分布范围三部分组成, 包括 3 个数据文件夹共计 541 个数据文件, 数据存储为 .txt、GEOTIFF 和 ArcGIS ASCII 格式, 数据量压缩前 26.8 MB (压缩后 4.86 MB)。

关键词: 暖温带; 木本植物; 叶全变色期; 秋季物候; 中国

DOI: 10.3974/geodp.2019.04.04

1 前言

植物秋季物候过程受到植物内部因素 (生长激素、生殖发育年龄等) 及多种外部环境因素 (温度、湿度、光照、营养缺失等) 的共同影响^[1]。相比于春季物候, 植物秋季物候的发生机制尚未明确, 变化过程更为复杂。在实际观测资料缺乏情况下, 利用秋季物候模型可以插补缺测的物候资料, 为植物地理和全球变化等综合研究提供数据支持^[2]。本文作者曾建立了中国三种木本植物叶全变色期的时空变化模型, 研究结果为更好地理解秋季物候过程及其对气候变化的响应提供了基础^[3]。目前中国秋季物候研究在变化观测、模型构建等方面仍存在很大不确定性。从观测方法上看, 观测人员对秋季叶变色程度识别的系统误差较大。从模型研究上看, 由于秋季物候与多种环境因素间存在复杂关系, 秋季物候模型的构建方法仍缺乏广泛彻底的验证^[4]。鉴于此, 本文评估了不同模型对 5 种木本植物的叶全变色期模拟及尺度拓展的适用性, 并系统出版中国木本植物叶全变色期时空分布格网

收稿日期: 2019-12-03; 修订日期: 2019-12-16; 出版日期: 2019-12-24

基金项目: 中国科学院项目 (XDA19020303); 中华人民共和国科学技术部 (2018YFA0606102); 国家自然科学基金 (41427805)

*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] 朱梦瑶, 戴君虎, 陶泽兴等. 中国 5 种暖温带木本植物叶全变色期数据集(1963–2015)[J]. 全球变化数据学报, 2019, 3(4): 336–342. DOI: 10.3974/geodp.2019.04.04.

[2] 朱梦瑶, 戴君虎, 刘浩龙等. 中国典型暖温带木本植物叶全变色期历年格网数据集[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2019. DOI: 10.3974/geodb.2019.06.06.V1.

数据集的研制方法和基本结果。

2 数据集元数据简介

《中国典型暖温带木本植物叶全变色期历年格网数据集》^[5]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 《中国典型暖温带木本植物叶全变色期历年格网数据集》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	中国典型暖温带木本植物叶全变色期历年格网数据集
数据集短名	AutumnPhenologyWTZChina
作者信息	朱梦瑶 AAA-7619-2019, 中国科学院地理科学与资源研究所, zhummy.16b@igsnr.ac.cn 戴君虎, 中国科学院地理科学与资源研究所, daijh@igsnr.ac.cn 刘浩龙, 中国科学院地理科学与资源研究所, liuhl@igsnr.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@igsnr.ac.cn 王焕炯 AAA-7674-2019, 中国科学院地理科学与资源研究所, wanghj@igsnr.ac.cn 董晓宇 AAF-9268-2019, 长安大学, dongxy@igsnr.ac.cn 胡植 AAE-4801-2019, 中国科学院地理科学与资源研究所, huz.18b@igsnr.ac.cn
地理区域	中国：18°N–54°N，72°E–136°E
时间分辨率	天
数据年代	1963–2015
数据格式	.txt、GEOTIFF 和 ArcGIS ASCII
数据集组成	数据集由头文件、物种物候期和物种分布范围 3 部分文件组成 物候期：叶全变色期；物种：白蜡、垂柳、刺槐、榆树和杏树
基金项目	中国科学院（XDA19020303）；中华人民共和国科学技术部（2018YFA0606102）；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 ARCGIS 计算平台 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 ^[6]
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

地面观测的叶全变色期数据来源于中国物候观测网（China Phenological Observation Network, CPON），从中提取观测记录丰富、代表性强的 5 种中国暖温带落叶阔叶林优势物种，包括白蜡（*Fraxinus chinensis*）、垂柳（*Salix babylonica*）、刺槐（*Robinia pseudoacacia*）、榆树（*Ulmus pumila*）和杏树（*Armeniaca vulgaris*）。物种分布数据来源于中国木本植物分

布图集^[7]。站点和格点日值气温数据来源于中国气象数据网 (data.cma.cn), 分别用于物候模型参数化和尺度拓展。

3.1 算法原理

现有秋季物候模型多建立在植物对温度、光周期等环境要素响应机理的不同假设上^[8]。相比于春季物候模型, 秋季物候模型加入了光周期、春季物候期等更多模型驱动因子, 参数估计过程更为复杂。本研究应用三种秋季叶变色模型: 考虑不同月份温度影响的多元回归 (Multivariate Regression, MR) 模型^[8]和考虑温度和光周期共同影响的温度光周期 (Temperature-photoperiod, TP) 模型^[9-10]和春季影响秋季 (Spring-influenced Autumn, SIA) 模型^[11]。不同模型中物候期与气象要素关系的函数形式和结构有所差异^[12]。

(1) MR 模型: 不同月份的温度对秋季叶变色的影响有所差别, 5、6 月温度升高可能会使叶变色期提前, 而 8、9 月温度升高可能导致叶变色期推迟^[8]。基于秋季叶变色期 (P_l) 和 5-9 月份平均气温 (T_5-T_9) 的相关关系 (R_5-R_9) 建立了一种多元回归模型 (式 1)。其中, a 、 b 、 c 、 d 、 e 是模型系数, ε 是常数项。

$$P_l = aT_5 + bT_6 + cT_7 + dT_8 + eT_9 + \varepsilon \quad \text{若 } |R_{5,6,7,8,9}| < 0.3 \quad a, b, c, d, e = 0 \quad (1)$$

(2) TP 模型: 假设秋季叶变色期受温度和光周期共同影响^[9]。当光周期 $P(d)$ 低于阈值 P_{start} 时, 寒冷状态 $CDD(d)$ 开始累积 (式 2)。当累积的寒冷程度 $iCDD(d)$ 超过阈值 Y_{crit} 的日期 d 即为叶变色开始时间 Y_{mod} (式 3)。每日的寒冷状态 $CDD(d)$ 由每日温度 $T(d)$ 和每日光周期 $P(d)$ 共同决定 (式 4, 5)。

$$iCDD(d) = \begin{cases} 0 & P(d) \geq P_{start} \\ CDD(d-1) + CDD(d) & P(d) < P_{start} \end{cases} \quad (2)$$

$$Y_{mod} = d, iCDD(d) \geq Y_{crit} \quad (3)$$

$$\text{若 } P(d) < P_{start}, CDD(d) = \begin{cases} 0 & T(d) \geq T_b \\ [T_b - T(d)]^x \times f[P(d)]^y & T(d) < T_b \end{cases} \quad (4)$$

$$f[P(d)] = \frac{P(d)}{P_{start}} \quad \text{或} \quad f[P(d)] = 1 - \frac{P(d)}{P_{start}} \quad (5)$$

模型含 P_{start} 、 Y_{crit} 、 T_b 、 x 、 y 共 5 个参数。其中, x 和 y 分别取 0、1、2。 $x=0$ 或 $y=0$ 表示叶变色过程与温度或光周期无关; $x=1$ 或 $y=1$ 表示叶变色过程与温度或光周期线性相关; $x=2$ 或 $y=2$ 表示与温度或光周期非线性相关。

(3) SIA 模型: 在 TP 模型基础上考虑了春季物候期对秋季物候期的影响^[11]。模型假设秋季叶变色开始时的阈值 Y_{crit} 与春季物候距平 S_a 呈线性相关关系 (式 6)。SIA 模型含 P_{start} 、 T_b 、 x 、 y 、 a 、 b 共 6 个参数。

$$Y_{crit} = (a + b \times S_a) \quad (6)$$

3.2 技术路线

本数据集研发步骤包括物候模型构建、模型比较选择和模拟及尺度拓展。利用中国物候观测网的地面观测叶全变色期数据, 以及中国气象数据网的对应站点气温数据构建秋季叶变色物候模型; 对三种模型分别用奇数年做内部检验, 偶数年做交叉检验, 选择交叉检验均方根误差 (RMSE) 最小的最优叶变色模型; 在中国气象数据网获取的格点气温数据基础上应用最优叶变色模型进行模拟和尺度扩展, 研发中国 5 种木本植物叶全变色期格网数据 (图 1)。

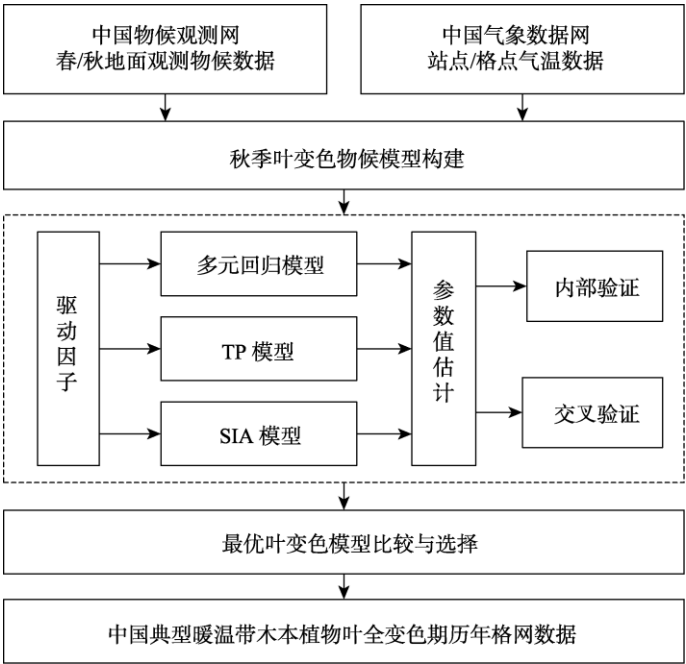


图 1 中国典型暖温带木本植物叶全变色期历年格网数据研发技术路线

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

《中国典型暖温带木本植物叶全变色期历年格网数据集》由格网数据头文件、物种物候期和物种分布范围 3 部分文件组成（表 2）。五个物种文件夹内各含 1963–2015 年共 106 个叶全变色期逐年文件。数据文件存储为可视化的 GEOTIFF 格式和 ArcGIS ASCII 标准格式。物种分布范围外的叶全变色期数据需要将其掩膜掉。

表 2 《中国典型暖温带木本植物叶全变色期历年格网数据集》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	格网数据列数、行数、经度、纬度、空间分辨率、空值	.txt	1	1.0 KB
物候期	物候期_物种_年	物候期以日序（DOY）表示；空值为 999	GEOTIFF	265	26.3 MB
			ArcGIS ASCII	265	
分布范围	Spatial_物种	有分布的地方值为 1；空值为 999	GEOTIFF	5	0.4 MB
			ArcGIS ASCII	5	

4.2 数据结果

秋季物候模拟结果表明，所有物种叶全变色期都呈现明显的纬度和海拔空间分异规律，最晚的叶变色期分布于东部和南部地区（图 2）。从时间分布来看，杏树（图 2e）平均叶全变色期相对较早，刺槐（图 2c）平均叶全变色期较晚。叶全变色期的时间范围也有所差异，白蜡、垂柳和榆树叶变色期的变化幅度较大，而刺槐和杏树的变化幅度较小。利用物候期和年的一元线性回归模型对叶全变色期进行时间变化趋势分析，结果表明，除榆树外其他

物种叶全变色期有 83.7%–99.5%像元推迟（表 3）。其中，刺槐和杏树推迟趋势最为明显，分别有 83.7%和 81.6%像元显著推迟（ $p<0.05$ ）。榆树的叶变色期有 70.8%像元提前，但仅有 3.2%显著提前（ $p<0.05$ ）。总体而言，除榆树（ $-0.4\text{ d}\cdot10\text{a}^{-1}$ ）外，过去 50 年所有物种的叶全变色期均呈现推迟趋势，平均每 10 年推迟 0.5–0.8 天。

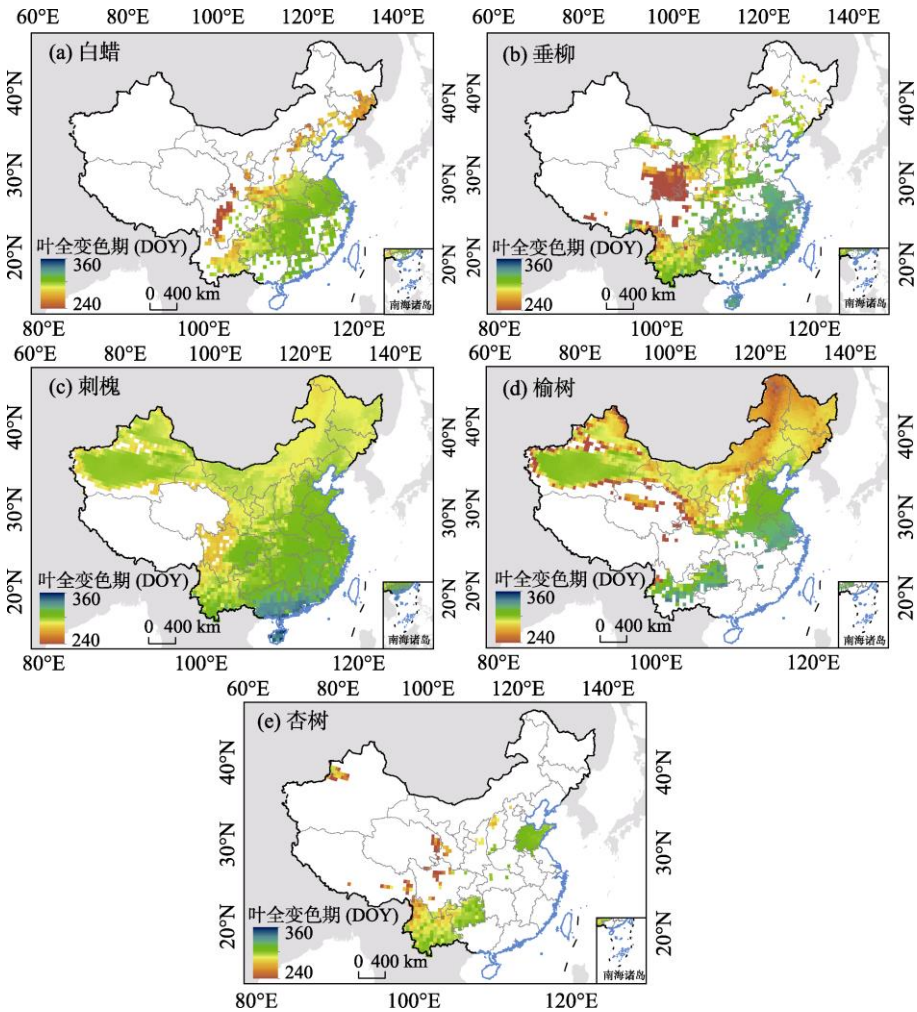


图 2 1963–2015 年中国 5 种典型暖温带落叶阔叶木本植物平均叶全变色期
注：本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1831 号的标准地图制作，底图无修改。

表 3 1963–2015 年中国典型暖温带木本植物叶全变色期时间变化趋势统计

物种	平均变化趋势 (d/10a)	提前 (%)	推迟 (%)	显著提前 (%)	显著推迟 (%)
白蜡	0.5	16.3	83.7	0.4	22.7
垂柳	0.7	8.3	91.7	1.4	54.0
刺槐	0.6	1.6	98.4	1.0	83.7
榆树	-0.4	70.8	29.2	3.2	8.3
杏树	0.8	0.5	99.5	0.0	81.6

4.3 数据结果验证

三种秋季叶变色物候模型的结果验证如图3所示。内部检验结果表明，MR模型对垂柳、刺槐和杏树的叶全变色期拟合效果更好， R^2 为0.34–0.51，RMSE为10.89–15.62天；而SIA模型更适用于白蜡和榆树， R^2 分别为0.52和0.64，RMSE分别为10.45和11.71天。交叉检验结果表明，MR模型对白蜡、垂柳和杏树的模拟精度更高，RMSE为9.76–18.23天；而SIA模型对刺槐和榆树叶全变色期的模拟效果更好，RMSE分别为11.49和11.05天。整体而言秋季物候数据的模拟精度不如春季物候^[13]，平均模拟误差约为10–18天。

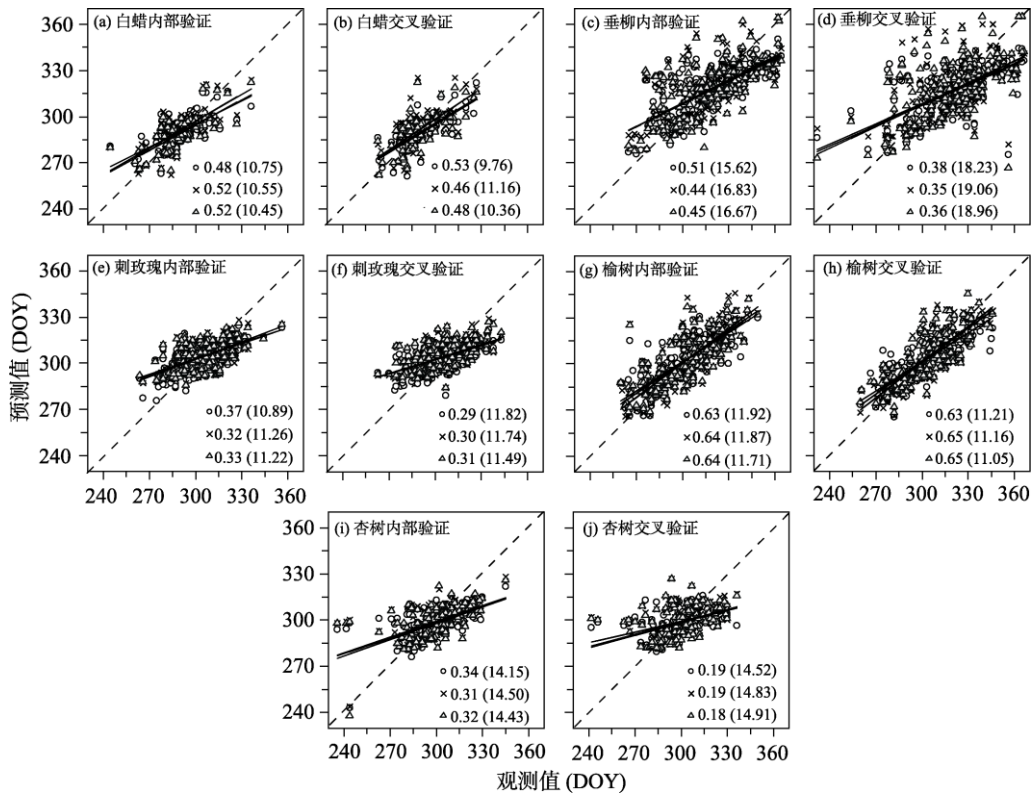


图3 三种物候模型对各物种叶全变色期模拟结果的内部验证和交叉验证

注：○、×和△分别代表MR、DM和SIA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。

5 讨论与结论

本文系统梳理了中国物候观测网地面观测秋季物候数据的方法和研制成果，评估了三种秋季物候模型对不同物种的适用性，并发布了5种典型暖温带落叶阔叶木本植物叶全变色期的时间序列数据集，数据年代为1963–2015年，时间分辨率为天，空间分辨率为0.5°。由于秋季低温会使植物叶片中水分冻结造成损伤，落叶木本植物通常在低温到来前停止对叶片的水分和养分供应，阻断叶片中叶绿素的合成，最终导致叶变色的发生。对比三种秋季叶变色模型的模拟结果发现，温度是决定植物秋季叶变色的主要因素。因此，只考虑秋

季温度的 MR 模型在白蜡、垂柳和杏树三个物种中表现较好,而同时考虑温度、光周期和春季物候期的 SIA 模型更适用于刺槐和榆树。全国范围内各物种秋季叶全变色期最优物候模型的平均模拟误差约为 10–18 天,次于春季展叶和开花的模拟效果^[13]。北美^[10]、欧洲^[9]和亚洲^[14]基于单站点物候观测数据构建的秋季模型模拟效果也存在较大差异,对不同物种而言,叶变色期模拟的绝对误差从 1 天到 13 天不等。因此,本数据集是现有测量范围内误差精度较好的秋季物候数据产品。本文所研发的木本植物叶全变色期数据进一步展现了中国木本植物秋季物候的时空分布及变化特征,丰富了以往较匮乏的秋季物候数据,为更好地发挥秋季物候在全球变化及资源环境研究领域中的作用,为评估全球变化生态影响、发展构建相关陆面模式及生态系统模型提供了数据基础。

作者分工: 戴君虎对数据集的开发做了总体设计;董晓宇、胡植采集和处理了秋季物候数据;陶泽兴、王焕炯设计了模型和算法;朱梦瑶、董晓宇做了数据验证;朱梦瑶、戴君虎撰写了数据论文等。

参考文献

- [1] Lim, P. O., Kim, H. J., Nam, H. G. Leaf senescence [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2007, 58: 115–136.
- [2] Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., *et al.* Shifting plant phenology in response to global change [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(7): 357–365.
- [3] Tao, Z. X., Wang, H. J., Dai, J. H., *et al.* Modeling spatiotemporal variations in leaf coloring date of three tree species across China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 310–318.
- [4] 戴君虎, 陶泽兴, 王焕炯等. 物候模型在气候定量重建中的应用[J]. 第四纪研究, 2016, 36(3): 703–710.
- [5] 朱梦瑶, 戴君虎, 刘浩龙等. 中国典型暖温带木本植物叶全变色期历年格网数据集[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2019. DOI: 10.3974/geodb.2019.06.06.V1.
- [6] 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).
- [7] 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.
- [8] Estrella, N., Menzel, A. Responses of leaf colouring in four deciduous tree species to climate and weather in Germany [J]. *Climate Research*, 2006, 32(3): 253–267.
- [9] Delpierre, N., Dufrene, E., Soudani, K., *et al.* Modelling interannual and spatial variability of leaf senescence for three deciduous tree species in France [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(6/7): 938–948.
- [10] Jeong, S. J., Medvigy, D. Macroscale prediction of autumn leaf coloration throughout the continental United States [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(11): 1245–1254.
- [11] Keenan, T. F., Richardson, A. D. The timing of autumn senescence is affected by the timing of spring phenology: implications for predictive models [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(7): 2634–2641.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Park, C. K., Ho, C. H., Jeong, S. J., *et al.* Spatial and temporal changes in leaf coloring date of *Acer palmatum* and *Ginkgo biloba* in response to temperature increases in South Korea [J]. *PLoS ONE*, 2017, 12(3): e0174390.