



论文

1952~2007 年中国白蜡树春季物候时空变化分析

王焕炯^{①②}, 戴君虎^{①*}, 葛全胜^①

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: daijh@igsnrr.ac.cn

收稿日期: 2011-08-22; 接受日期: 2011-11-14

国家自然科学基金(批准号: 41030101, 40871033)和中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA05090301)资助

摘要 为研究植物物候期的地理分布及其形成原因, 揭示中国物候变化的时空格局, 选取中国境内分布较为广泛、观测比较充分的白蜡树(*Fraxinus chinensis* Roxb.)为研究对象, 以“中国物候观测网”12 个站点的白蜡树展叶始期资料 and 对应气象资料为数据源, 建立并检验了模拟白蜡树展叶始期的春季物候过程模型. 利用该模型, 重建了 1952~2007 年间研究区白蜡树完整的展叶始期序列, 分析了白蜡展叶始期的时空变化规律. 结果表明: 过程模型考虑了芽发育速率在休眠期和静止期对气温的不同响应, 反映了植物的生理机制, 在大区域和长时间尺度均能够准确地模拟白蜡树展叶始期; 在温带地区植物春季物候期的地理分布由日平均气温的空间格局决定; 1952~2007 年, 白蜡树的展叶始期在绝大部分地区呈提前趋势, 只有极小部分区域呈推迟趋势, 其总体的平均趋势为 $-1.1 \text{ d}/10 \text{ a}$, 该结果与北半球其他地区春季物候的提前趋势一致; 白蜡树展叶始期变化存在明显的区域分异, 呈现“北高南低”的区域格局, 华北地区有最大的 $-2.0 \text{ d}/10 \text{ a}$ 的显著提前趋势($p<0.01$), 东北和华北地区提前趋势分别为 $-1.5 \text{ d}/10 \text{ a}$ 和 $-1.4 \text{ d}/10 \text{ a}$ ($p<0.01$), 华东和华中地区的平均提前趋势较小, 平均仅 $-1.0 \text{ d}/10 \text{ a}$ ($p<0.05$), 西南和华南地区呈最小的不显著提前趋势.

关键词
物候期
物候模型
展叶始期
白蜡树

物候学作为研究自然界动植物和环境条件的周期变化之间相互关系的科学^[1,2], 在近年来全球变化研究成为热点的背景下, 又重新受到学术界的广泛重视. 物候现象能反映气候变化对生物物理系统的影响^[3], 是全球变化的诊断指纹^[4]. 此外, 物候观测资料与气象和水文等仪器观测数据及遥感影像数据相独立, 是综合反映环境变化的独立证据^[2]. 气候变化影响着植物物候, 进而对生态系统产生很多重要影响, 不断增强的物候变化可能会影响树种的分布

范围^[5]以及生产力^[6], 进一步影响到陆地生态系统碳储量^[7]. 因此, 准确重建过去物候变化对于评估气候变化对陆地生态系统的影响至关重要.

物候模型是在实际观测资料缺乏的情况下, 唯一能够预测未来和重建过去物候变化的方法^[8]. 近年来国内外在物候模型研究上取得了重要进展. 常见的物候模型分为三种类型: 理论、统计和过程模型^[8]. 理论模型主要是通过权衡叶片生产的成本-收益以优化资源的获取^[9,10]. 理论模型的设计是用来说明树叶

寿命策略的进化过程,而不是植物物候的年际变化.统计模型主要是建立物候期与气候因子的统计关系,但是缺少机理性的解释^[11,12].过程模型通常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,属于一种半机理性的模型,在一定程度上反映了植物物候变化的生理生态学机制.过程模型最初只考虑静止期(quiescence),即休眠期(dormancy)打破后,芽的发育受外界因子(通常是气温)驱动的时期.春暖(Spring Warming)模型就是只考虑静止期的典型例子^[13].实验表明,休眠期是木本植物适应寒冷气候的一个重要特征,是植物发育的一个重要阶段^[14],因而在后来的物候模型构建时,很多模型均已考虑到植物休眠过程,如交互(Alternating)模型^[15]等.截至目前,过程模型已被成功地用于利用历史物候序列重建过去气候变化^[16]、预测树种分布范围变化^[17]以及预测 21 世纪的物候变化^[18]等方面.因此利用物候模型研究中国物候变化及其机理的条件已经具备.

基于上述分析,本文以“中国物候观测网”的观测数据为数据源,采用物候过程模型,以白蜡树为代表性树种,在可靠性检验的基础上,重建了其过去 50 年逐年的展叶始期,并由此探究中国代表性树种的物候时空变化形式,以期揭示宏观尺度植物物候空间格局的形成机制以及对气候变化的定量响应特征.

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 选种依据

本研究所选的代表性树种为白蜡树(*Fraxinus chinensis* Roxb.).白蜡树为落叶乔木,主要经济用途为放养白蜡虫生产白蜡,尤以西南各省栽培最盛,耐瘠薄干旱,在轻度盐碱地也能生长.植株萌发力强,材理通直,生长迅速,柔软坚韧,供编制各种用具,并有较高药用价值^[19].本文选此种的依据为:1)白蜡树的生态幅宽,分布范围极广,其分布区北至东北中部,南至广东和广西,东南可至福建,西至甘肃,因而能够在大范围内反映物候的变化.2)白蜡树在我国栽培历史悠久,是我国重要的乡土树种^[19],是暖温带落叶阔叶林中的典型树种之一,对研究区的物候变化有较好的代表作用.3)中国物候观测网对于白蜡树的观测站点较多,资料比较完备.

1.1.2 物候数据来源

本文的物候数据来自于中国科学院地理科学与资源研究所组织的“中国物候观测网”.该观测网严格按照统一观测规范^[20]积累了中国范围内从 1963 年至今多个站点的物候数据.这套数据集具有可靠性高、观测时间长和观测较系统等特点,已经在近年的物候学和气候变化研究中发挥了重要作用.

本文针对春季一个重要的物候期,即展叶始期进行研究.展叶始期定义为观测树木上的芽从芽苞中发出卷曲着的或按叶脉褶叠着的小叶,出现第一批叶片平展的日期^[20].本文共选择了分布于中国东部 23°~45°N 的 12 个站点的白蜡树展叶始期数据来建模.由于被观测树木遇到霜冻和虫害等因素死亡,以及观测人员偶尔的漏测,每个站点观测起止年和样本数(总观测年数)不同(表 1).

1.1.3 气象数据来源

气象数据均来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>).单站点气象数据包括表 1 内 12 个站点 1952~2010 年日平均气温数据.另外,区域气象数据使用了该网站提供的中国地面气温日值格点数据集产品.该数据集以各个气象站数据和数字高程模型数据为资料来源,利用改进的克里格插值方法对中国 1951 年 1 月 1 日~2007 年 12 月 31 日的气温资料进行空间插值处理而来.其空间分辨率为 1°×1°,适合宏观尺度的研究.

表 1 白蜡树展叶始期数据情况

地点	位置	开始年	结束年	样本数
哈尔滨	45°45'N, 126°40'E	1983	1986	4
承德	40°59'N, 117°57'E	1987	1996	8
呼和浩特	40°49'N, 111°41'E	1991	1996	6
北京	40°00'N, 116°16'E	1963	2009	36
德州	37°27'N, 116°18'E	1976	1990	5
邢台	37°04'N, 114°30'E	1988	1995	8
聊城	36°26'N, 115°58'E	1971	1984	12
西安	34°13'N, 108°58'E	1965	2008	26
南昌	28°39'N, 115°55'E	1985	1991	6
长沙	28°13'N, 112°56'E	2004	2009	6
贵阳	26°25'N, 106°40'E	1981	2009	20
佛山	23°03'N, 113°08'E	1968	1979	7

1.2 研究方法

1.2.1 物候模型

本文选取的模型是 Chuine^[21]开发的 UniChill 模型, 它是由 Unified 模型简化而来, 属过程模型. 该模型考虑了植物芽发育过程的两个阶段, 即休眠期和静止期. 休眠期是指即使在有利的外界条件下, 植物的发育和细胞生长仍被内在因子抑制的时期^[8]. 休眠期只有通过一定时间的低温刺激才能到静止期. 静止期是休眠期打破后, 发育和生长受外界因子(通常是气温)驱动的时期. 研究表明温带地区木本植物的春季物候主要是由气温决定的, 与降水的相关性不显著^[8]. 部分研究证明光周期在树木物候中起一定作用^[22,23], 但还没有普遍的结论. 基于这些考虑, 该物候模型仅涉及日平均气温 x_t , 其公式表达如下:

$$S_c = \sum_{t_0}^{t_1} R_c(x_t) = C^*, \quad (1)$$

$$S_f = \sum_{t_1}^{t_b} R_f(x_t) = F^*, \quad (2)$$

$$R_c(x_t) = \frac{1}{1 + e^{a(x_t - c)^2 + b(x_t - c)}}, \quad (3)$$

$$R_f(x_t) = \frac{1}{1 + e^{d(x_t - e)}}, \quad (4)$$

其中, t_0 设定为前一年的 9 月 1 日. 该模型共有 7 个参

数: $a \sim e$, C^* 和 F^* . 参数 $a \sim c$ 确定了低温促使休眠期打破的过程中, 冷激速度对日平均气温的响应函数 $R_c(x_t)$ (也称冷激单元, Chilling Units). 冷激单元的累积和代表着芽目前的冷激进度 (S_c). 当冷激进度达到阈值 C^* 时的日期 t_1 即为休眠期被打破的日期 (式(1), 图 1). 参数 d 和 e 确定了静止期发育速度对日平均气温的响应函数 $R_f(x_t)$ (也称驱动单元, Forcing Units). 驱动单元的累积和代表当前的驱动进度 (S_f). 当驱动进度达到阈值 F^* 时的日期 t_b 就是展叶始期 (式(2), 图 1). 这些参数都要根据实际观测数据拟合来确定.

1.2.2 模型参数值估计

本文借鉴欧美将单站点的物候模型扩展到区域以重建或预测物候序列的成功经验^[24-27], 利用中国多个站点展叶始期的时空混合样本拟合建立统一的物候模型. 不同时空样本共同拟合有一个前提条件是所观测树种的基因没有发生显著的变异. 在本文中, 大多数站点的白蜡树是无性繁殖的, 可假设基因没有显著变化. 为了便于验证模型, 只使用各站点所有样本中奇数年的展叶始期共 74 个样本进行参数值估计 (剩余 70 个样本用于验证模型准确性). 参数值估计采用最小二乘法原则, 用公式表示为

$$f(x) = \sum_i [r_i(x)]^2, \quad (5)$$

其中, x 代表参数空间, 即 $x = [a, b, c, d, e, C^*, F^*]$,

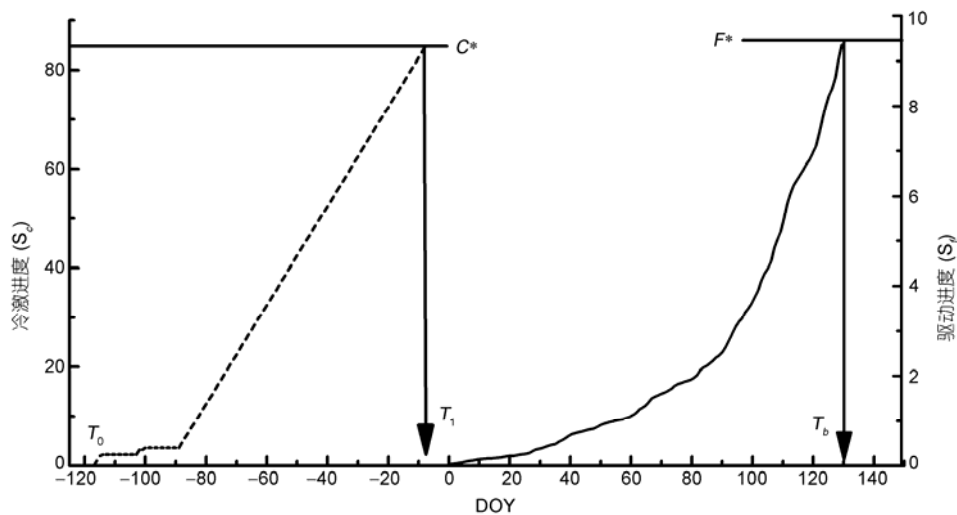


图 1 UniChill 模型原理示意图

虚线为冷激进度 S_c 累积过程; 实线为驱动进度 S_f 累积过程; DOY 为 Day of Year, 用当年的第几天所表示的日期, 如 2 表示当年的 1 月 2 日, DOY 为负时指当年 1 月 1 日之前的日期, 如 -1 表示前一年 12 月 30 日

$r_i(x)=d_i(x)-d_{iobs}$, $d_i(x)$ 和 d_{iobs} 分别代表第 i 个样本用参数空间 x 确定的模型预测日期和实际观测日期. 使 $f(x)$ 最小的模型参数值即为最优的参数. 本文选取模拟退火算法(Simulated Annealing)^[15]实现最佳参数的估计. 模拟退火算法是一种通用的优化算法, 来源于与热力学理论中固体(例如金属)冷却和退火过程的类比. 将固体加热至充分高温, 在冷却的过程中粒子渐趋有序, 在每个温度都达到平衡态, 最后在常温时达到基态, 内能减为最小. 类似的, 模拟退火算法从某一较高初温出发, 伴随温度参数的不断下降, 结合概率突跳特性, 在解空间中随机寻找使目标函数最小的全局最优解. 在本例中目标函数就是 $f(x)$. Chuine 等^[15]已评估了模拟退火算法在物候模型参数值求解中的稳定性和收敛性, 更多细节见文献[15].

1.2.3 物候模型的检验

利用确定了参数的物候模型模拟出各样本对应站点对应年份的展叶始期. 用来拟合模型参数值的奇数年观测值与预测值做回归分析, 计算方差解释量(R^2)和显著度. 同时计算均方根误差(RMSE, 式(6)), 作为内部检验结果. 而与模型建立无关的偶数年的观测值与对应年的预测值相比较, 同样计算 R^2 和 RMSE, 作为交叉检验结果.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [d_i(x) - d_{iobs}]^2}{n}}. \quad (6)$$

1.2.4 物候变化趋势分析

将逐日平均气温数据作为物候模型的输入参数, 对每个白蜡树分布范围内的 $1^\circ \times 1^\circ$ 栅格, 计算并模拟出各栅格 1952~2007 逐年完整的展叶始期序列. 其次, 通过展叶始期与年份的最小二乘拟合求出每个栅格展叶始期变化的线性趋势和变化天数. 最后分析同一年物候期的地理分布以及多年物候变化趋势的时空格局.

2 模型建立与检验

2.1 模型建立

通过模拟退火算法拟合, 得到模拟白蜡树展叶始期的最优模型参数为: $a=0.081083$, $b=4.3421$, $c=18.645$, $d=-0.17665$, $e=19.001$, $C^*=84.413$ 和 $F^*=9.0455$. 根据式(3)和(4)分别绘制白蜡树的驱动单元和冷激单元对温度的响应图(图2). 图2表明, 白蜡的冷激单元在日平均气温 $-35 \sim 20^\circ\text{C}$ 的区间内, 约等于 1, 这意味着在这个温度区间内, 休眠芽的冷激速度最快. 因为树种的冷激响应有一定的温度上限, 所以 UniChill 模型只适用于分布在温带和亚热带地区的树种, 例如本文的白蜡树. 分布在热带地区的落叶树由于终年高温, 很难满足冷激需求, 它们的生长和休眠可能通过其他因素控制; 在静止期, 日平均气温在 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 时, 白蜡树芽发育速度随平均气温的增加近似于线性增加. 超过 40°C 时, 发育速度将不再增

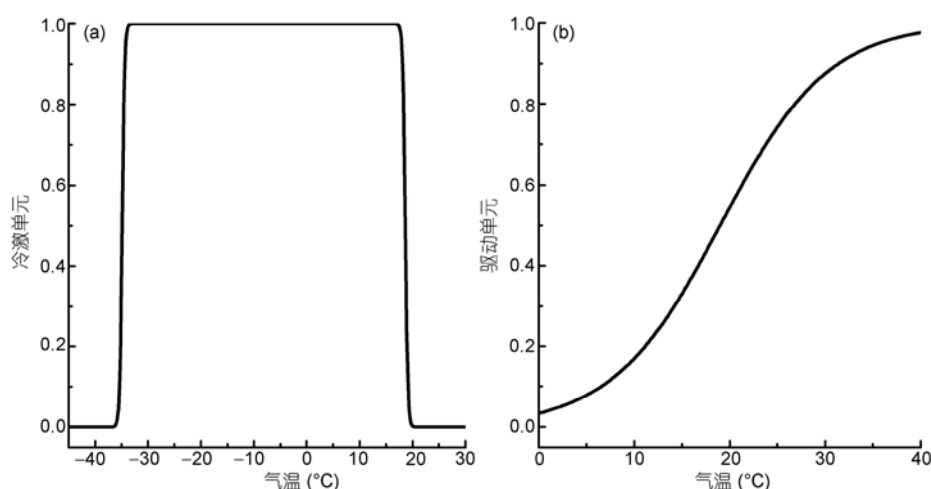


图2 白蜡树冷激单元(a)和驱动单元(b)对气温的响应

加. 实际上, 发育速度会随着温度的进一步升高下降, 但是在温带地区很少有超过生长最适温度的情况, 因而本文并未考虑极端高温的作用.

2.2 模型检验

将以上参数与相应气温数据输入 UniChill 模型模拟各样本对应站点和年份的展叶始期. 用来建模的 74 个样本的观测值与预测值的线性回归曲线极其接近于 $y=x$ 的基准线, R^2 为 0.873 ($p<0.0001$) (图 3(a)); $RMSE$ 为 6.1. 这表明 UniChill 模型很好地拟合了样本数据. 用于验证的 70 个样本的观测值与预测值的线性回归曲线也同样极其接近于 $y=x$ 的基准线 (图 3(b)), 两者的 R^2 为 0.879 ($p<0.0001$); $RMSE$ 为 6.1. 由此可见, UniChill 模型能够独立地准确模拟广泛分布的 12 个站点的白蜡树展叶始期, 适用性较强.

以上检验结果充分证明, 该过程模型对白蜡树展叶始期的预测具有非常高的准确性和可靠性. 物候过程模型对木本植物春季物候期的有效预测也在其他研究中得到了验证^[15,27]. 这进一步说明在温带地区气温对春季物候起到了决定性作用. 环境温度从两方面影响着植物的发育速度: 在静止期芽的发育速度随气温升高而加快; 而冬季一定程度的低温可以促进芽打破休眠期. 因此, 气候变暖对于春季物候的影响具有两种效应: 升高的春季温度对春季物候的到来具有促进的作用, 但升高的冬季温度会降低冷激效应, 从而在一定程度抑制春季物候期的

提前, 春季物候期实际到来时间是两种效应综合作用的结果^[28].

3 过去 50 年白蜡树展叶始期变化格局

3.1 白蜡树展叶始期的地理分布

在上述基础上, 利用 UniChill 模型模拟白蜡树展叶始期的地理分布. 研究区域依照文献[29]给出的白蜡树分布范围. 模拟结果表明, 在中国东部的大部分地区, 白蜡树的展叶始期随纬度增加而推迟 (图 4). 受地形的影响以及数据空间分辨率限制, 物候期的东西差异并不明显 (图 4). 白蜡树在其分布最北界 ($45^{\circ}\sim 46^{\circ}\text{N}$) 在第 134~139 天开始展叶, 而在其分布范围南界 ($22^{\circ}\sim 23^{\circ}\text{N}$) 在第 59~63 天开始展叶. 此外, 受大气环流和海拔高度影响, 在川西高原的展叶始期最迟, 而云南东南部的展叶始期最早. 将白蜡树同时展叶的地点连接成线等候线 (图 4), 结果表明, 等候线的间隔在纬度方向并非线性均匀的变化. 在国内, 龚高法和简慰民^[30]曾建立了全国性多种植物春季物候期与地理位置 (经纬度和海拔高度) 的线性方程. 该方法与本文的模型方法在机理上是有联系的, 即地理位置与气温高低的总体格局直接相关, 气温的空间格局控制了植物物候期的地理分布.

3.2 白蜡树展叶始期变化时空格局

1952~2007 年的 55 年间, 白蜡展叶始期在我国

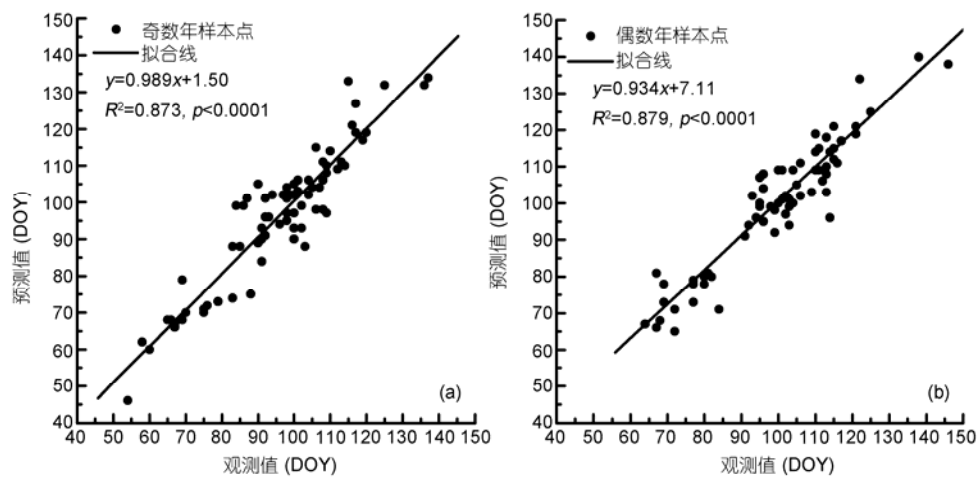


图 3 模拟白蜡树展叶始期的 UniChill 模型的可靠性检验

(a) 内部检验; (b) 外部检验

绝大部分地区提前, 其提前程度呈现“北高南低”的格局(图 5): 30°N 以北的大多数地区均提前了 8~16 天, 以南的多数地区仅提前了 0~6 天. 值得注意的是, 白蜡树展叶始期在其分布范围的南界以及四川盆地

和云贵高原的少量栅格出现了微弱的推迟趋势. 该物候变化格局与其他研究成果的结论基本吻合^[31,32].

再按照地理位置分区讨论白蜡树的平均展叶始

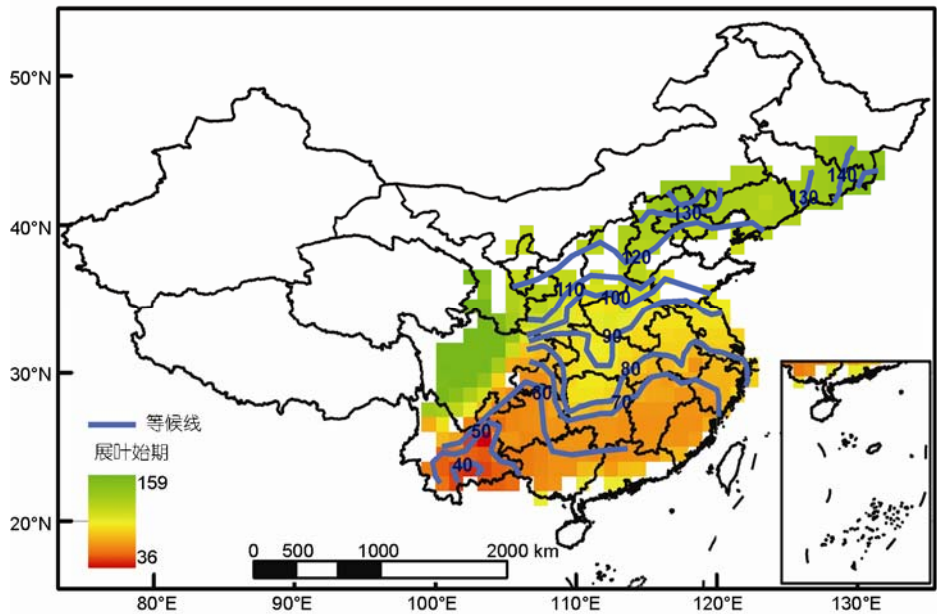


图 4 2007 年白蜡树展叶始期的地理分布

展叶始期用 DOY 的数值表示; 白蜡树分布范围按照文献[29]

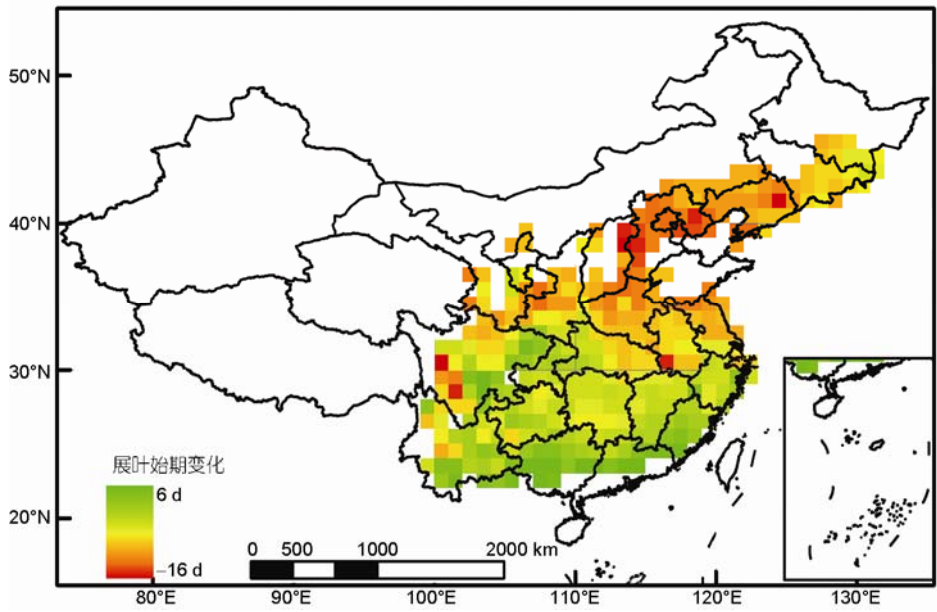


图 5 1952~2007 年 55 年间白蜡树展叶始期变化天数

负值代表提前的天数, 正值代表推迟的天数, 分布范围数据与图 4 相同

期变化的区域差异(图 6). 结果表明, 在所有地区白蜡树的展叶始期年际变化都较大, 但在全国范围有平均 -0.11 d/a 的整体提前趋势. 其中, 东北地区(辽宁、吉林和黑龙江)的平均趋势为 -1.5 d/10 a ($p<0.01$); 华北地区(北京、天津、河北、山西和山东)的平均趋势为 -2.0 d/10 a ($p<0.01$); 西北地区(包括宁夏、陕西和甘肃)的平均趋势为 -1.4 d/10 a ($p<0.01$); 华东地区(包括江苏、安徽、江西、浙江、福建和上海)的平均趋势均为 -0.9 d/10 a ($p<0.05$); 华中地区(包括湖北、湖南和河南)的平均趋势为 -1.1 d/10 a ($p<0.01$); 华南地区(包括广西和广东北部)的平均趋势为 -0.3 d/10 a (未通过显著性检验); 西南地区(包括四川、云南、贵州和重庆)的平均趋势为 -0.6 d/10 a (未通过显著性检验). 总之, 中国物候变化的区域差异非常明显: 华北地区是白蜡树展叶始期变化最显著的地区, 其次是东北和西北地区, 而华中和华东地区的变化较小, 华南和西南地区几乎没有变化.

4 讨论和结论

4.1 讨论

4.1.1 秋冬季变暖对展叶始期的影响分析

一些学者认为, 气温偏高不利于冬季的休眠, 反而使树木的开花期推迟, 适当的低温有利于树木打破休眠期, 对物候现象的提前到来有利^[33,34]. 除了开花, 展叶也同样要经过休眠期. 为定量探讨休眠期打破的日期推后最终对展叶始期的影响, 选取北京作为代表站点, 利用 UniChill 模型重建了北京白蜡树

1952~2010 年逐年的休眠期打破日期和展叶始期. 气象观测资料表明, 北京 9~12 月平均气温自 1952 年以来以 $0.38^{\circ}\text{C}/10$ 年的趋势显著增加. 秋冬季温度的显著升高促使白蜡树休眠期打破期以 1.69 d/10 a 的速度推迟了 9.8 天. 与此同时, 白蜡树展叶始期以 -2.00 d/10 a 的速度提前了 11.6 天(图 7(a)).

假设在只考虑静止期的情况下, 将 UniChill 模型简化为式(2)和(4), 即不考虑休眠期的作用, 将 t_1 设定为固定值(白蜡树休眠期打破时间的历年均值), 重建出白蜡树逐年的展叶始期(图 7(b)). 结果表明, 在休眠期打破期恒定的情况下, 重建的白蜡树展叶始期以 -2.16 d/10 a 的趋势推迟了 12.5 天. 这说明过去 58 年间, 白蜡树休眠期打破的日期推迟 9.8 天仅仅使得展叶始期少提前了 0.9 天. 由此可见, 秋冬季温度的升高对白蜡树展叶始期的影响在目前可以忽略. 这与休眠期打破期左右的气温很低, 驱动单元很小, 芽的发育进度增加很小有关. 但冬季温度继续持续变暖可能会显著地影响到白蜡树展叶始期. 至于秋冬季变暖能否显著影响其他树种的春季物候, 还需要进一步的研究.

4.1.2 物候变化趋势的区域对比

物候观测数据证明了不同植物间的春季物候具有同步性(即不同植物的物候在同一地点同样的气候条件下通常会同步提前或推迟)^[35], 因而在同一地点单种的物候变化也能在一定程度上代表多个种的整体变化. 例如, Matsumoto 等^[36]根据日本 60 个站点的物候观测数据, 证明银杏(*Ginkgo biloba* L.)展叶始期自 1953 年以来以 0.9 d/10 a 的速度提前. Fitter 和 Fitter^[37]研究表明英国 385 种植物 20 世纪 90 年代的平均开花日期比之前的 40 年提前了 4.5 天, 其平均趋势约为 -1.1 d/10 a. 这与本文的研究结果几乎一致. 另外, 除了单种的物候变化外, 多个种在大区域的整体变化趋势也备受学术界的关注. Menzel 等^[38]利用“荟萃分析”(Meta-Analysis)方法得出 1971~2000 年整个欧洲 21 个国家 542 种植物和 19 种动物的春季物候变化的平均趋势为 -2.5 d/10 a; 另一项针对全球的研究表明近几十年来春季物候提前趋势为 -2.3 d/10 a^[39]. Schwartz 等^[40]利用春季指数(Spring Index)模型表明, 北半球的展叶始期以 -1.2 d/10 a 的趋势提前. 本文结果(-1.1 d/10 a)以及 Ge 等^[41]针对中国 22 个站点的 23 种木本植物的始花期研究得到的 -1.2 d/10 a 的提前

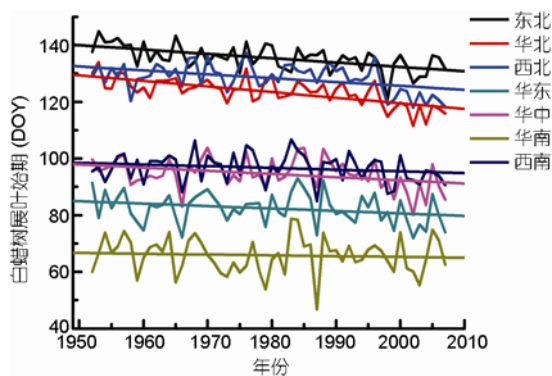


图 6 1952~2007 年中国不同地区白蜡树平均展叶始期的年际变化

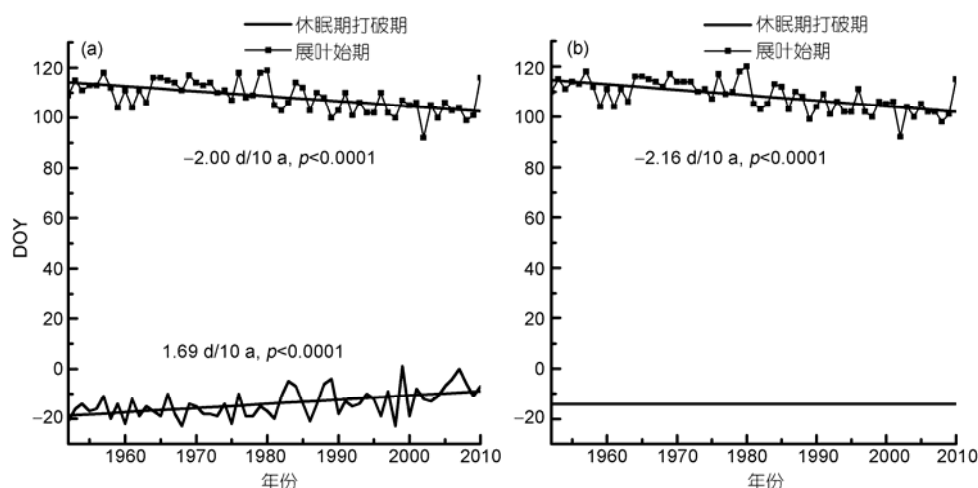


图7 模型重建的1952~2010年的北京白蜡树休眠期打破期和展叶始期

(a) 完整的 Unichill 模型模拟结果; (b) 不考虑休眠的 Unichill 模型模拟结果

趋势, 与 Schwartz 结果接近, 却明显小于其他结果. 多项研究结果的数值差异除了源于实际物候变化的区域差别, 也可能与数据采样方法、物候期的定义以及所选研究站点的分布有关. 总之, 中国与世界其他地区的春季物候变化均呈现一致的提前趋势, 但提前的程度是否与其他区域有显著差别还需要进一步研究.

4.1.3 物候模型的应用展望

正如前文介绍, 我们假定白蜡树的物候相关基因没有发生显著变化, 良好的时空检验结果也恰好印证了这一点. 如果同一树种在不同的自然种群中长期处在当地的气候条件下而产生了本地适应性, 发生了遗传变异, 那么同一模型参数值在不同区域将不能通用^[27]. 这为研究树种的本地适应性提供了新的思路^[26]. 除了物候模型方法, 遥感在站点物候到区域物候的尺度转换中也起到了重要作用. 目前, NDVI数据已经成为区域到全球尺度生长季研究的重要信息源, 但对遥感物候和地面物候间的联系还有待分析. 因此, 将地面物候观测数据和区域模型模拟结果与 NDVI 反应的物候相互对照和验证也是本文进一步的工作方向, 物候模型还有更多的应用潜力. 在全球气候模型中, 通常要以大气-植被-土壤中的水和 CO₂ 等的传输机制为基础并结合动态全球植被模型, 而物候模型可作为此模型的组成部分发挥重要

作用^[42,43]. 气候是植物物候、生理以及分布的主要决定因素, 受气候变化影响, 植物的行为、分布以及种间作用在过去 50 年已经发生了明显变化^[44]. 将大气环流模式(例如 HadAM3)^[45]、物候模型和物种分布范围模型(例如 PHENOFIT 模型^[46])相耦合, 评估未来气候变化对生态系统的影响是今后的研究热点.

4.2 结论

以日平均气温为输入参数的物候过程模型能够准确地模拟宏观区域长时间尺度白蜡树的展叶始期. 这是因为本文所采用的物候过程模型具有可靠的生理生态学理论基础: 气温通过控制植物芽在休眠期和静止期的发育速度从而影响植物的展叶始期. 气温是驱动白蜡树展叶的主要气象因子. 在温带和亚热带地区日平均气温的空间格局决定了植物春季物候期的地理分布.

物候模型研究结果表明, 过去 60 年间, 在中国绝大部分地区的白蜡树展叶始期提前, 其提前程度整体上“北高南低”, 区域差异明显. 华北地区具有 -2.0 d/10 a 的显著提前趋势($p < 0.01$); 其次分别为东北、西北、华东和华中, 这 4 个地区的负线性趋势均通过了 $p < 0.05$ 的显著性检验; 西南和华南地区的提前趋势最小, 且不显著. 与全球其他地区对比来看, 我国的春季物候变化与北半球大部分地区的提前趋势基本一致.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

- 1 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 北京: 科学出版社, 1973
- 2 Schwartz M D. Phenology: An Integrative Environmental Science. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. 3–7
- 3 Zwiers F, Hegerl G. Climate change: Attributing cause and effect. *Nature*, 2008, 453: 296–297
- 4 Root T L, Price J T, Hall K R, et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421: 57–60
- 5 Chuine I. Why does phenology drive species distribution? *Philos T R Soc B*, 2010, 365: 3149–3620
- 6 Loustau D, Bosc A, Colin A, et al. Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. *Tree Physiol*, 2005, 25: 813–820
- 7 Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biol*, 2003, 9: 161–185
- 8 Cleland E E, Chuine I, Menzel A, et al. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol Evol*, 2007, 22: 357–365
- 9 Kikuzawa K. A cost-benefit analysis of leaf habit and leaf longevity of trees and their geographical pattern. *Am Nat*, 1991, 5: 1250–1263
- 10 Kikuzawa K. Geographical distribution of leaf life span and species diversity of trees simulated by a leaf-longevity model. *Plant Ecol*, 1996, 122: 61–67
- 11 Schwartz M D. Advancing to full bloom: Planning phenological research for the 21st century. *Int J Biometeorol*, 1999, 42: 113–118
- 12 Emberlin J, Detandt M, Gehrig R, et al. Responses in the start of *Betula* (birch) pollen seasons to recent changes in spring temperatures across Europe. *Int J Biometeorol*, 2002, 46: 159–170
- 13 Hunter A F, Lechowicz M J. Predicting the timing of budburst in temperate trees. *J Appl Ecol*, 1992, 2: 597–604
- 14 Taiz L, Zeiger E. *Plant Physiology*. 4th ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2006. 1–700
- 15 Chuine I, Cour P, Rousseau D D. Fitting models predicting dates of flowering of temperate-zone trees using simulated annealing. *Plant Cell Environ*, 1998, 21: 455–466
- 16 Chuine I, Yiou P, Viovy N, et al. Historical phenology: Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, 2004, 432: 289
- 17 Morin X, Viner D, Chuine I. Tree species range shifts at a continental scale: New predictive insights from a process-based model. *J Ecol*, 2008, 96: 784–794
- 18 Morin X, Lechowicz M J, Augspurger C, et al. Leaf phenology in 22 North American tree species during the 21st century. *Global Change Biol*, 2009, 15: 961–975
- 19 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第六十一卷). 北京: 科学出版社, 1992. 30–32
- 20 宛敏渭, 刘秀珍. 中国物候观测方法. 北京: 科学出版社, 1979. 1–136
- 21 Chuine I. A unified model for budburst of trees. *J Theor Biol*, 2000, 207: 337–347
- 22 Kramer K. Selecting a model to predict the onset of growth of *Fagus sylvatica*. *J Appl Ecol*, 1994, 31: 172–181
- 23 Partanen J, Koski V, Hänninen H. Effects of photoperiod and temperature on the timing of bud burst in Norway spruce (*Picea abies*). *Tree Physiol*, 1998, 18: 811–816
- 24 Schwartz M D, Marotz G A. An approach to examining regional atmosphere-plant interactions with phenological data. *J Biogeogr*, 1986, 13: 551–560
- 25 Schwartz M D, Marotz G A. Synoptic events and spring phenology. *Phys Geogr*, 1988, 9: 151–161
- 26 Chuine I, Belmonte J, Mignot A. A modelling analysis of the genetic variation of phenology between tree populations. *J Ecol*, 2000, 88: 561–570
- 27 Chuine I, Cambon G, Comtois P. Scaling phenology from the local to the regional level: Advances from species-specific phenological models. *Global Change Biol*, 2000, 6: 943–952
- 28 Wilczek A M, Burghardt L T, Cobb A R, et al. Genetic and physiological bases for phenological responses to current and predicted climates. *Philos T R Soc B*, 2010, 365: 3129
- 29 方精云, 王志恒, 唐志尧. 中国木本植物分布图集. 北京: 高等教育出版社, 2009. 1–2020
- 30 龚高法, 简慰民. 我国植物物候期的地理分布. *地理学报*, 1983, 38: 33–40
- 31 葛全胜, 郑景云, 张学霞, 等. 过去 40 年中国气候与物候的变化研究. *自然科学进展*, 2003, 13: 1048–1053
- 32 Zheng J, Ge Q, Hao Z, et al. Spring phenophases in recent decades over eastern China and its possible link to climate changes. *Clim Change*, 2006, 77: 449–462

- 33 张福春. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响. 地理学报, 1995, 50: 402–410
- 34 李荣平, 周广胜. 1980-2005 年中国东北木本植物物候特征及其对气温的响应. 生态学杂志, 2010, 29: 2317–2326
- 35 陈效迷, 张福春. 近 50 年北京春季物候的变化及其对气候变化的响应. 中国农业气象, 2001, 22: 2–6
- 36 Matsumoto K, Ohta T, Irasawa M, et al. Climate change and extension of the *Ginkgo biloba* L. growing season in Japan. Global Change Biol, 2003, 9: 1634–1642
- 37 Fitter A H, Fitter R. Rapid changes in flowering time in British plants. Science, 2002, 296: 1689–1691
- 38 Menzel A, Sparks T H, Estrella N, et al. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biol, 2006, 12: 1969–1976
- 39 Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature, 2003, 421: 37–42
- 40 Schwartz M D, Ahas R, Aasa A. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. Global Change Biol, 2006, 12: 343–351
- 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. Ecol Res, 2011, 26: 713–723
- 42 Picard G, Quegan S, Delbart N, et al. Bud-burst modelling in Siberia and its impact on quantifying the carbon budget. Global Change Biol, 2005, 11: 2164–2176
- 43 Kucharik C J, Barford C C, Maayar M E, et al. A multiyear evaluation of a Dynamic Global Vegetation Model at three AmeriFlux forest sites: Vegetation structure, phenology, soil temperature, and CO₂ and H₂O vapor exchange. Ecol Model, 2006, 196: 1–31
- 44 Walther G R. Plants in a warmer world. Perspect Plant Ecol Evol Syst, 2003, 6: 169–185
- 45 Pope V D, Gallani M L, Rowntree P R, et al. The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. Clim Dynam, 2000, 16: 123–146
- 46 Chuine I, Beaubien E G. Phenology is a major determinant of tree species range. Ecol Lett, 2001, 4: 500–510