

郑州植物物候对气候变化的响应

柳 晶¹, 郑有飞^{1,*}, 赵国强², 陈怀亮²

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044 2. 河南省气象局, 450003)

摘要 利用统计和突变分析方法,对郑州气候(1956~2003年)和4种乔木物候(1986~2003年)的趋势变化特征进行了分析,并探讨了植物物候期与平均温度、日照的相关性以及温度变化的响应趋势。分析发现:(1)郑州近50a来在冬、春季升温现象明显;日照在夏季下降最为显著,冬季其次,但在2~4月份历年呈弱上升趋势。(2)物候期变化趋势表现在展叶、开花、果熟期(除楝树外)呈提前趋势,落叶期略有推迟,绿叶期延长,特别是在20世纪90年代中后期,春季物候期(除垂柳外)提前10d左右。(3)平均温度是影响物候期最为显著的气候因子,温度每升高1℃,春季物候平均提前6d左右,绿叶期延长9.5~18.6d,物候期突变一般发生在温度突变之后。以上分析说明植物物候对气候变化响应比较敏感,通过分析和掌握气候和物候变化规律,了解其对当地植物物候的可能影响,可为农业生产、生态环境监测和评估等提供一些理论依据。

关键词 物候期;气候变化;Mann-Kendall方法;温度

文章编号:1000-0933(2007)04-1471-09 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Responses of phenology to climate change in Zhengzhou area

LIU Jing¹, ZHENG You-Fei^{1,*}, ZHAO Guo-Qiang², CHEN Huai-Liang²

1 School of Environmental Science & Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Henan Provincial Bureau of Meteorology, Zhengzhou 450003

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (4) 1471 ~ 1479.

Abstract :Statistic and abrupt analysis methods are applied to investigate tendencies of climate change during 1956 – 2003 and phenology of four kinds of trees in 1986 – 2003 , as well as the correlations with mean temperature and sunshine duration , and afterwards , are discussed the tendencies of the responses of phenological events to temperature change , together with their differences in abrupt change in tendencies and linkage. Results show that (1) 1956 – 2003 temperature in the study area has risen significantly in spring and winter , in contrast to the summer equivalent that has dropped somewhat ; sunshine duration has declined most appreciably in summer , next being that in winter , as opposed to the weak rise occurring from February to April during this period ; (2) the occurrence of phenological events (Leaf spreading and Flowering) is advanced markedly and so is the Fruit ripening except *Melia azedarach* , as opposed to a little delay of leaf fall time but the leaf growing stage is prolonged and particularly from the mid 1990s , spring events (except *Salix babylonica* L.) are about 10 days in advance and leaf greening is kept longer some 15 days ; (3) average temperature is a climate factor greatly affecting the phenology but sunshine duration plays a minor role except during the autumn when leaves begin falling. On a phenological basis , it is found that a about 6-day interval in advance that leads to the extension of green leaves

基金项目:中国气象局预测减灾应用技术开发推广资助项目;国家自然科学基金资助项目(40175029)

收稿日期:2006-03-15;修订日期:2006-12-13

作者简介:柳晶(1978~),女,山西人,博士生,主要从事气候变化和环境研究。E-mail:shunying0309@163.com

通讯作者 Corresponding author. E-mail:zhengyf@jlonline.com

Foundation item The project was financially supported by Forecasting and Disaster Mitigation Project of China Meteorological Administration ; National Natural Science Foundation of China (No.40175029)

Received date 2006-03-15 ; **Accepted date** 2006-12-13

Biography LIU Jing , Ph. D. candidate , mainly engaged in climate change and environment. E-mail shunying0309@163.com

by 9.5 – 18.6 days occurs for every 1℃ rise in spring. Generally , the sudden change in phenology appears after that in temperature , and the curve after abrupt point shows temperature rise for spring phenological events happening in advance and longer green-leaf stage. As a result , the phenological response to climate change is remarkable and through study to understand the relations between climate and phenology , it is likely to provide some theoretical basis for agricultural practice and the monitoring and assessment of ecological environment.

Key Words : phenological events ; climate change ; Mann-Kendall method ; temperature

植物物候是季节节奏宏观、综合的体现 ,其变化特征反映了过去一段时间气候条件的积累对植物生长、发育的综合影响。目前由于全球变暖带来的气温、降水、光照等气候要素变化 ,对植物物候期已造成显著影响^[1~4] ,而由气候驱动的植物动态变化将影响物种之间的相互作用 ,最终导致生态系统的组成和结构发生改变^[5~8] ,如在生态学方面 ,会引起物种竞争 ,害虫与疾病^[9] ,鸟类迁徙与繁殖^[10]等等。目前植物物候对气候的响应研究主要集中在春秋季物候和生长季对气候变化的响应方面^[11~13] ,考虑的气象要素有温度、水分和日照等 ,其中以温度讨论居多 ,研究结果不尽相同 ,张福春等^[14]等^[1]认为温度升高 ,开花期推迟 ,而许多文献讨论结果为展叶、开花等物候期提前 ,落叶期推迟 ,整个生长季延长^[15~18]。

郑州地处中原 ,位于南北气候过渡带 ,属于北亚热带向暖温带气候过渡的大陆性季风气候 ,研究其区域气候和植物物候的变化规律 ,对评估气候变化对我国中原地区植物的可能影响 ,指导当地的农业生产 ,监测生态环境变化等具有一定的理论价值。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所选的郑州气候资料 (1956 ~ 2003 年)和木本植物物候资料 (1986 ~ 2003 年)均来自河南省气象局。郑州气象站位于 34. 72°N ,113. 65°E ,气候是逐旬资料 ,包括降水 (R)、日照 (S)、平均气温 (T)。季节划分按照 12、1、2 月份为冬季 ,3、4、5 月份为春季 ,6、7、8 月份为夏季 ,9、10、11 月份为秋季。物候观测以气象站附近的植物群落为观测对象 ,选取了当地具有代表性的毛白杨 (*Populus tomentosa* Carr.) (W1)、垂柳 (*Salix babylonica*) (W2)、楝树 (*Melia azedarach*) (W3)、刺槐 (*Robinia pseudoacaria* L.) (W4) 4 种木本植物 ,从 1986 年开始进行连续观测。本文选取了 5 个主要物候期 ,依次为展叶盛期 (P1)、开花盛期 (P2)、果熟期 (P3)、落叶末期 (P4)、绿叶期 (P5) ,因在 1988 年垂柳开花盛期、刺槐果熟期、落叶末期和绿叶期缺测 ,其样本数为 17 个 ,其余植物物候期的样本数都为 18 个。为计算方便 ,将各个物候期转换为距离同年 1 月 1 日的天数 (d)。

1.2 方法简介

(1)线性倾向估计方法 本文用一次线性方程来定量描述各个物理量的变化趋势 :

$$y = a_0 + a_1x$$
(1)

则趋势变率方程为 $dy/dx = a_1$,把 a_1 称作倾向率 ,方程中的系数可用最小二乘法或经验正交多项式来确定 ,本文用最小二乘法来确定系数。

(2) Mann-Kendall 检测方法 (以下简称 M-K 方法) 是一种非参数统计检验方法。其优点是不需要样本遵从一定的分布 ,也不受少数异常值的干扰 ,更适用于类型变量和顺序变量 ,计算也比较简单。

假设所讨论的样本序列是平稳随机序列 ,其序列值必须是独立的 ,且概率分布亦应相同。给定一个时间序列 x_i ($1 \leq i \leq N$)

概率 $\alpha_1 = P[|U| < |U(d_N)|]$ (2)

$\alpha_1 > \alpha_0$ (α_0 一般给定为 0.05) ,其中 $U(d_N)$ 为检验的标准化值。

$$U(d_N) = [d_N - E(d_N)] / \sqrt{Var(d_N)}$$
(3)

$$d_N = \sum_{i=1}^N m_i$$
 m_i 是 1 至 i 之间 ,小于 x_i 的总个数。

在零假设条件下 d_N 的分布为渐近正态 ,其中期望值和方差分别是

$$E(d_N) = N(N-1)/4 \tag{4}$$

$$\text{Var}(d_N) = N(N-1)Q_N/72 \tag{5}$$

如果零假设被拒绝 ,也就说明在时间序列内确实存在着变化 ,表示该序列在某时刻发生突变。根据 $U(d_N)$ 的符号 ,还可以确定变化的方向。当 $U(d_N) > 1.96$ 时 ,序列是朝着增加的方向变化 ; $U(d_N) < -1.96$ 时 ,序列是朝着减小的方向变化。

利用这种简单的客观方法 ,将连续统计的 $U(d_N)$ ($1 \leq i \leq N$) 值沿时间轴点绘成曲线 UF ,而后 ,将序列反向统计 $U'(d_N)$ 值 ,在同一张图上绘成曲线 UB ,若曲线 UF 与 UB 的交叉点位于 ± 1.96 临界值的置信区间内 (信度水平为 0.05) ,此点则为突变点 ,以此判断该序列的突变。更进一步 ,如果交叉后两曲线位于置信水平 0.05 检验值以上 (>0 的一侧) ,则序列存在一个趋势的变化。这种非参数检验既方便又客观^[19]。

2 结果分析

2.1 气候与物候年季变化趋势

为了便于各个物理量之间的比较 ,将气候和物候资料通过标准化转为无量纲的参数 ,然后用线性倾向估计方法分析了各自的变化趋势特征。

气候变化趋势 (表 1) 表明了年平均温度呈上升趋势 ,降水、日照时数呈下降趋势 ,其中日照变化最为显著 (从倾向率绝对值可看出) ,每年下降 0.052 ,是降水的 7 倍左右。平均温度除在夏季呈现减小趋势外 ,其余季节都呈上升趋势 ;以冬、春两季最为显著。降水除冬季略有增加以外 ,其余为弱下降趋势 ;日照四季都为一致下降趋势 ,且其变化趋势除春季比温度的趋势小以外 ,其余季节都比温度的变化程度大。温度、降水的年际变化与全国各地气候变化基本相一致 ,表现为温度在近几十年呈上升趋势^[20] ,降水呈略减小趋势 ,但冬季降水增多 ,其他季节减少^[21] ;日照时数整体呈下降趋势 ,而黄河流域其他的一些地区呈上升趋势^[22] 。这说明郑州气候变化趋势在全球气候变化的大背景下 ,有其一致性 ,也有其局地特殊性。

表 1 各气象要素变化趋势倾向率 (1956 ~ 2003 年)

Table 1 Tendency rate of meteorological factors during 1956 ~ 2003

项目 Item	年 Annual	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
温度 Temperature	0.032 ***	0.027 ***	-0.006 ***	0.019 ***	0.032 ***
降水 Precipitation	-0.007 ***	-0.004 ***	-0.007 ***	-0.004 ***	0.009 ***
日照时数 Sunshine hours	-0.052 ***	-0.024 ***	-0.045 ***	-0.031 ***	-0.042 ***

*** 表示线性倾向率通过 0.005 信度检验 The linear trend tests are significant ($p < 0.005$, ***)

在当前气候背景下 ,木本植物各个物候期都发生了不同程度的变化。对 4 种植物的展叶盛期开花盛期、果熟期、落叶末期、绿叶期进行了趋势倾向率分析 (表 2) ,为了更直观的了解物候期变化趋势 ,给出了 4 种植物展叶和绿叶期随时间变化的距平图 (图 1) 。分析发现 :展叶盛期明显提前且趋势比较一致 ,趋势倾向率为 0.09 ~ 0.1 ,开花盛期趋势倾向率的变化幅度比展叶盛期要大一些 ,变化趋势最大为 0.13 (垂柳) ,除楝树果实成熟期略有推迟外 ,其它 3 种植物果实成熟期都呈现提前趋势 ,且刺槐提前趋势达到 0.2 ,比展叶、开花期的提前趋势更为明显 ,落叶期一致推迟 ,刺槐推迟趋势达到 0.1 ,其余都不明显 ,整个绿叶期延长明显 ,由于秋季落叶期推迟的趋势不明显 ,这就说明绿叶期延长主要取决于展叶期的变化。从图 1 中也可看出 ,展叶盛期在近几年 ,一直处于提前趋势 ,平均提前天数在 10d 左右 ,绿叶期延长天数在 15d 左右。这与许多研究结论是一致的 ,即 :春季物候事件变化最为显著 ,表现为一致的提前趋势 ,秋季落叶期略有推迟 ,生长季相对延长^[14-18]。

2.2 植物物候与气候变化的相关分析

大量研究表明 ,植物物候期变化与一定时间内气象条件密切相关^[12] ,如在中纬度地区 ,植物的春季物候 (如发芽、展叶、开花期) 主要取决于气温的高低 ,日照时数其次 ,降水对植物物候期的影响有滞后作用 ,对物候期影响没有温度显著等。

表 2 4 种木本植物物候期变化趋势 (1986 ~ 2003 年)

Table 2 Phenological events variation for four kinds of woody plants during 1986 ~ 2003

	项目 Item	P1	P2	P3	P4	P5
W1	平均日期 Average date	98	61	67	333	240
	标准差 Standard deviation	7.38	5.71	5.10	4.85	10.42
	倾向率 Trend	-0.10 ***	-0.06	-0.02 *	0.09 ***	0.14 ***
W2	平均日期 Average date	73	82	98	342	276
	标准差 Standard deviation	10.34	10.29	14.37	8.61	12.44
	倾向率 Trend	-0.09 ***	-0.13 ***	-0.09 ***	0.05 ***	0.12 ***
W3	平均日期 Average date	109	124	284	314	211
	标准差 Standard deviation	5.99	6.37	13.81	5.76	9.38
	倾向率 Trend	-0.10 ***	-0.10 ***	0.03 *	0.01	0.09 ***
W4	平均日期 Average date	101	116	248	326	228
	标准差 Standard deviation	7.79	6.33	11.09	10.44	16.06
	倾向率 Trend	-0.10 ***	-0.10 ***	-0.20 ***	0.10 ***	0.15 ***

W1 毛白杨 *Populus tomentosa* Carr. ,W2 垂柳 *Salix babylonica* L. ,W3 楝树 *melia azedarach* ,W4 刺槐 *Robinia pseudoacacia* L. ;P1 :展叶盛期 leaf spreading ,P2 :开花盛期 full flowering ,P3 :果实成熟期 fruit ripping ,P4 :落叶末期 leaf shedding ,P5 :绿叶期 leaf green phase ;下同 the same below ; * ,* * ,* * * 分别表示相关系数通过 0.05 0.01 0.005 信度检验 The correlation coefficients are significant with $p < 0.05$ (*) , $p < 0.01$ (* *) , $p < 0.005$ (* * *)

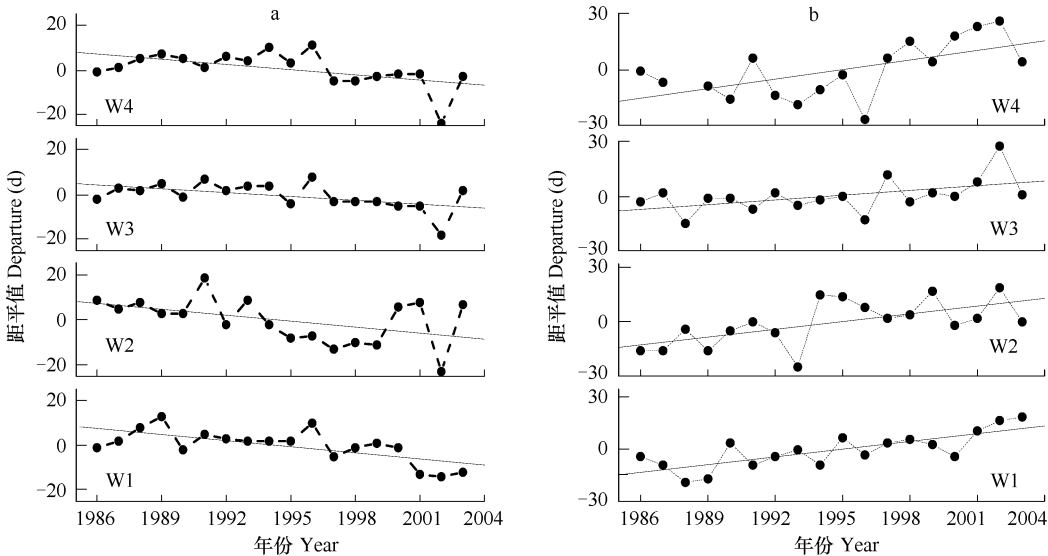


图 1 4 种木本植物的展叶盛期 (a)、绿叶期 (b)距平值随时间变化趋势

Fig.1 Departures of leaf spreading (a) and full flowering phase (b) for four kinds of wood plants from 1986 to 2003

斜线是趋势线 (都通过了 0.05 的信度检验),图中从下到上依次是毛白杨 (W1)、垂柳 (W2)、楝树 (W3)、刺槐 (W4)The oblique lines represent the trends and all of them are significant at a level of 0.05 ; W1 to W4 are same as table 2

根据前面郑州气候趋势变化特征的分析,在近 50 年,气温和日照时数变化比较显著,降水趋势基本无变化,因此基于各个物候期与其发生时和发生前 2 ~ 3 个月的气象条件相关比较显著^[23],对前 1 个月、前 3 个月 (相对于物候期而言)的平均温度、日照时数与植物各个物候期的相关性进行了分析。因绿叶期是展叶始期到落叶末期这一生长季的时间段,时间跨度从春季一直到秋季,所以仅分析了与当年气象要素的相关。具体结果见表 3。

从表 3 看出 :①开花盛期、展叶盛期与前 1 月和前 3 月温度相关性非常显著,且呈一致负相关,反映了温度升高,春季物候期提前这一现象;毛白杨、垂柳果熟期与两个阶段的温度相关性较好,但楝树、刺槐对温度的

反应并不敏感,这可能由于前两种植物的果熟期是在春季,而后两种植物的果熟期出现在 9~10 月份,属于秋季物候,影响其发育成熟的环境因素因时间较长而变得复杂,落叶末期基本都未通过显著性检验,说明对平均温度反映不敏感,为了分析其原因,同时计算了落叶末期与同期极端最低温度的相关系数,发现相关程度要好一些,但未能通过 0.05 的信度检验,说明秋季落叶期可能与同期冷空气活动的强弱有关^[24],绿叶期与当年温度相关显著,且为正相关,反映了温度升高,可使植物绿叶期延长。②无论哪个时段,物候期与日照都无明显相关,但开花盛期、绿叶期与日照趋势呈一致负相关,为探其原因,按照各个物候期的平均时段,对其时段前的日照按旬作了趋势分析,发现在 2 月到 4 月份这个时期的日照趋势不但没有减少,而且呈微弱的上升趋势,而在这个时段,正是许多植物开始从休眠到复苏的过渡阶段,这说明日照对植物物候还是有一定影响,特别是在春季,日照增加,物候期提前,但影响没有温度显著。

表 3 气象要素与四种木本植物各个物候期的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between meteorological factors and phenological phases of four kinds of wood plants

气象要素 Meteorological factors	物 种 Species	P1	P2	P3	P4	P5
T1	W1	-0.71 ***	-0.83 ***	-0.64 ***	0.16	
	W2	-0.62 ***	-0.76 ***	-0.56 *	-0.00	
	W3	-0.84 ***	-0.72 ***	0.17	0.12	
	W4	-0.68 ***	-0.83 ***	-0.15	0.35	
T3	W1	-0.62 ***	-0.66 ***	-0.52 *	0.26	
	W2	-0.72 ***	-0.82 ***	-0.74 ***	0.36	
	W3	-0.81 ***	-0.79 ***	0.43	0.18	
	W4	-0.83 ***	-0.87 ***	-0.25	0.45	
T1 - 12	W1					0.518 *
	W2					0.713 ***
	W3					0.572 ***
	W4					0.682 ***
S1	W1	-0.19	-0.27	-0.45 *	-0.26	
	W2	-0.42	-0.58 *	0.00	0.34	
	W3	-0.40	-0.19	0.08	0.49	
	W4	-0.09	-0.30	0.44	-0.37	
S3	W1	-0.07	-0.30	-0.52 *	-0.69	
	W2	0.22	-0.39	-0.37	-0.07	
	W3	-0.46 *	-0.11	0.07	0.54 *	
	W4	0.07	-0.09	0.42	-0.08	
S1 - 12	W1					-0.45 *
	W2					-0.18
	W3					-0.08
	W4					-0.19

T1、T3、T1 - 12 分别表示物候期的前 1 月、前 3 月、年平均温度;日照时数(S)表示方法与温度相同 T1 and T3 are average temperatures of the one and three months before the phenophases respectively; T1 - 12: Annual mean temperature; Sunshine hours (S) is represented in the same way as temperature; 下同 the same below

2.3 物候期对温度变化的响应

从对 48a 温度的分析来看,在冬季和次年春季升温显著,而对中纬度地区,这个阶段,大部分植物正处于从休眠到复苏的阶段,而且从前面对各物候期与气象要素的相关分析来看,物候对温度的反映最为敏感,且展叶盛期,开花盛期、绿叶期的年际变化都通过了 0.01 信度检验,因此利用其与对应时段温度两者的距平之比来计算物候期对温度响应的幅度大小(表 4)。计算公式为:

$\Delta d = \Delta P / \Delta T$,单位 d/℃;其中 Δd 为变化天数, ΔP 为物候期距平, ΔT 为温度距平。

当前 1 月平均温度升高 1℃,展叶、开花盛期分别提前 2.6~3.6d 2.7~4.6d,物种之间变化幅度在 0.8d~1.9d 之间,而前 3 月平均温度升高 1℃,展叶、开花盛期分别提前 3.6~7.9d 3.9~9.0d,物种之间变化幅

度从 3.3d 到 5.1d ,春季物候对前 3 月平均温度的响应趋势明显比前 1 个月大 ,这说明春季物候对近期 3 个月平均温度响应都比较敏感。若当年平均温度升高 1℃ ,绿叶期延长 9.5 ~ 18.6d ,棟树响应趋势最小 ,刺槐最大。无论春季物候还是整个绿叶期 ,因植物物种的不同 ,导致对温度变化的敏感性变化幅度也不同 ,说明对区域气候的变化 ,植物适应程度不尽相同 ,从植物生理角度来看 ,如果有些植物不能及时适应当地气候的变化 ,将会使植物群落的整体结构改变 ,进而给周围生态环境带来较为严重的一系列连锁反应^[5-10]。

2.4 物候对温度突变的响应

气候突变是从一种稳定态 (或稳定持续的变化趋势)跳跃式地转变到另一种稳定态 (或稳定持续地变化趋势)的现象 ,表现为气候在时空上从一个统计特性到另一个统计特性的急剧变化^[19]。在这里 ,将气象上常用的 M-K 突变方法引入物候学中 ,并依据前面结论 ,对展叶、开花盛期和前 1 月、前 3 月温度 ,绿叶期和年平均温度的变化趋势进行了突变检验 ,UF、UV 表示序列正向和反向变化趋势 ,两者之间交点为突变点。

因各个物候期不同 ,相对应时段的温度所在的月份也不同 ,所以在此仅绘出了绿叶期与年温度突变曲线 (图 2) ,其余列在表 5 中。从图 2 中可看出 ,年平均温度在 1993 年后开始逐步上升 ,突变发生在 1994 ~ 1995 年之间 ,而许多文献中所讨论的温度升温是在 80 年代初 ,突变发生在中后期^[25,26] ,相比之下 ,郑州温度变化略有滞后 ,在同期 ,植物绿叶期也发生了变化 ,首先是在温度发生突变以后 ,植物绿叶期都表现出了较为一致的延长趋势 ,另外除垂柳外 ,突变点都发生在温度突变以后 ,毛白杨在 1994 ~ 1995 年 ,垂柳在 1989 年左右 ,棟树、刺槐都在 1997 年左右。展叶、开花盛期的突变点一般都发生在前 1 月或前 3 月温度突变之后 ,展叶盛期与前 1 月的温度突变联系比较紧密 ,基本上温度突变发生的一两年之内 ,物候期就出现了突变点 (表 5)。

表 5 展叶 (开花)盛期与前 1 月、前 3 月温度的突变点

Table 5 Jump points of leaf spreading , full flowering and temperatures in the former one and three months						
	<i>T</i> 1 (<i>P</i> 1)	<i>T</i> 1 - 3 (<i>P</i> 1)	<i>P</i> 1	<i>T</i> 1 (<i>P</i> 2)	<i>T</i> 1 - 3 (<i>P</i> 2)	<i>P</i> 2
W1	1998	1994	2000	1993 ,1995	1992	1994 ,1997 ,2001
W2	1993 ,1995	1992	1993	1993 ,1995	1992	1992
W3	1998	1994	1999	1990	1995	2000
W4	1998	1994	2000	1998	1994	1997

*T*1 (*P*1) , *T*1 - 3 (*P*1)表示展叶盛期 (*P*1)所对应的前 1 月、3 月温度的突变点 ;*T*1 (*P*2) , *T*1 - 3 (*P*2)为开花盛期 (*P*2)所对应的前 1 月、3 月温度的突变点 *T*1 (*P*1) , *T*1 - 3 (*P*1) represent the jump points of temperature in one and three months before leaf spreading phase ; *T*1 (*P*2) , *T*1 - 3 (*P*2) are those before full flowering phase

从上面分析看出 ,物候期发生突变一般都出现在温度突变之后 ,而且都是紧随其后 ,从另一个角度说明 ,物候期对气候变化的响应比较敏感 ,能对同期或前一段时间气候变化做出相应的反应 ,因此可作为评估区域气候变化的一个衡量指标 ,但还应根据植物特性分门别类进行考虑。

3 讨论

在当地气候变化的影响下 ,1986 ~ 2003 年郑州植物物候期都发生了不同程度的变化 ,虽然本文物候资料观测时间较短 ,但仍得出春季物候提前 ,果实期提前 ,落叶期推迟 ,绿叶期延长的结论 ,与 Kramer^[11]、Frank^[18]、徐雨晴^[27]等对春秋季节物候及生长季的研究结论基本相一致 ,主要原因可能是因该地区温度上升趋

表 4 物候随温度的变化趋势

Table 4 The change tendency of phenophases according with air temperature (d/℃)

物种 Species		<i>P</i> 1	<i>P</i> 2	<i>P</i> 5
T1	W1	-2.8 ***	-2.7 ***	
	W2	-3.6 ***	-4.6 ***	
	W3	-2.6 ***	-2.4 ***	
	W4	-2.8 ***	-2.8 ***	
T3	W1	-3.6 ***	-4.0 ***	
	W2	-7.9 ***	-9.0 ***	
	W3	-3.8 ***	-3.9 ***	
	W4	-5.1 ***	-4.3 ***	
T1 - 12	W1			9.6 ***
	W2			15.7 ***
	W3			9.5 ***
	W4			18.6 ***

势在 20 世纪 90 年代以后比较显著。

对春季物候而言,在本研究中发现冬季气温升高,开花盛期提前,这与 Sparks^[28]等研究显示冬季气温升高,能加速花芽发育,从而使开花期提前的结论相一致,而张福春^[15]、陈效速等^[29]认为冬季气温偏高不利于冬季芽的休眠,使开花期推迟。春季物候与前 1 月和前 3 月的温度显著相关,进一步证实了 Ahas^[30]、徐雨晴等^[27]研究发现的春季物候开始时期与该物候前 2~3 个月之间的温度相关性很强的结论。当前 3 月平均温度升高 1℃,展叶、开花盛期分别提前 3.6~7.9d、3.9~9.0d,变化幅度比一些研究结果的要大一些,如 Frank 等^[18]发现 2~4 月的平均温度升高 1℃,德国果树物候始花期提前 5d 左右,张福春认为春季物候提前 1~3d。

楝树果熟期并未因为温度的升高而提前,相反是推后,与落叶期趋势表现一致,但与温度无明显的相关性,这可能由于楝树的果熟期是在秋季,而影响秋季物候的因素比较复杂^[15],不能只单纯考虑温度因素。

分析物候期和温度突变之间的区别与联系发现,物候突变与温度突变有很好的对应关系,都差不多在同时或邻近几年出现突变点,也就是说当气候从一稳定态向另一稳定态跳跃时,物候也发生了类似的现象,说明物候与气候在某种程度上确实存在着许多联系,不同物候期对气候变化会做出不同的响应。

4 小结

(1) 1956~2003 年的气候变化以温度上升和日照时数下降为主要代表,升温现象在冬季、春季表现最为明显,夏季温度略有下降,年平均温度突变点在 90 年代初期,之后呈一致上升趋势;日照在夏季下降最为显著,冬季其次,但在 2~4 月历年日照呈弱上升趋势,降水历年变化趋势不明显。

(2) 展叶、开花期提前明显,果熟期除楝树外呈提前趋势,落叶期略有推迟,绿叶期延长,特别是在 90 年中后期,春季物候期基本都提前 10d 左右(除垂柳外),绿叶期推迟半个月左右。

(3) 春季物候期变化幅度比秋季明显,可能是由于是冬季平均温度的升幅最大,而影响了次年春季物候;春季物候对前段时期(季、月时间尺度)的温度状况反应敏感,而植物绿叶期则可反映年际尺度上的温度状况。日照对植物物候还是有一定影响,特别是在春季,日照增加,物候期提前,但影响没有温度显著。

(4) 物候期对温度变化响应最为敏感,春季主要是前 1~3 月温度的影响,温度每升高 1℃,物候提前 2.8~7.9d、2.7~9.0d;对于绿叶期,每上升 1℃,物候期延长 9.5~18.6d。不同物种之间的物候期虽对温度响应趋势比较一致,但是变化天数差异很大。

(5) 物候期突变点一般都出现在温度突变之后,而且都是紧随其后,表明物候期对气候变化的响应比较敏感,可作为评估区域气候变化的一个衡量指标,但因其对气候响应差别较大,须对各种植物特性深入了解。

References :

[1] Lu P L, Yu Q, He Q T. Responses of plant phenology to climatic change. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (6) : 923-929.

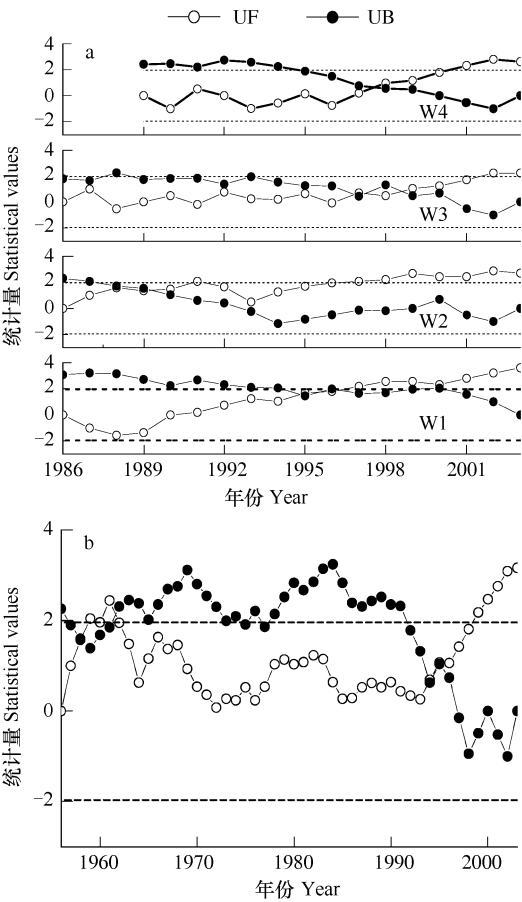


图 2 a、b 图分别为绿叶期和年平均气温 M-K 统计量曲线
Fig. 2 M-K statistic curves for leaf green phase and annual average temperature are shown in a and b
UF、UV 表示序列正向和反向变化趋势, W1、W2、W3、W4 代表的物理量与表 2 相同 UF, UV are their positive and negative variable tendency, respectively; W1 to W4 are same as Table 2

[2] Yang G D , Chen X Q. On the seasonal rhythm of natural landscape. *Acta Ecologica Sinica* ,1998 ,18 (3) :234 – 240.

[3] Penuelas J , Filella I. Phenology-Responses to a warming world. *Science* ,2001 ,294 (5543) :793 – 794.

[4] Wang M , Li Y , Gao R Q , *et al.* The effects of climate warming on the alpine vegetation of the Qinghai-Tibetan Plateau hinterland. *Acta Ecologica Sinica* ,2005 ,25 (6) :1275 – 1281.

[5] Schwarz M D , Reiter B E. Changes in North American spring. *International Journal of Biometeorology* ,2000 ,20 (8) :929 – 932.

[6] Crick H Q , Sparks T H. Climate change related to egg-laying trends. *Nature* ,1999 ,399 :423 – 424.

[7] Roy D B , Sparks T H. Phenology of British butterflies and climate change. *Global Change Biology* ,2000 ,6 (10) :407 – 416.

[8] Walther G R , Post E , Convey P. Ecological responses to recent climate changes. *Nature* ,2002 ,416 :389 – 395.

[9] Pauley S M. Lighting for the human circadian clock :Recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Medical Hypotheses* ,2004 ,63 :588 – 596.

[10] Sparks T , Crick. Phenology and the changing pattern of bird migration in Britain. *International Journal of Biometeorology* ,1999 ,42 (3) ,134 – 138.

[11] Kramer K , Leinonen I , Loustau D. The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal temperate and Mediterranean forests ecosystems :an overview. *International Journal of Biometeorology* ,2000 ,44 (2) :67 – 75.

[12] Neil K , Wu J G. Effects of urbanization on plant flowering phenology :A review. *Urban Ecosyst* ,2006 ,9 (3) :243 – 257.

[13] Wei G , Fu C B. Large scale features for Season phenological response to the monsoon climate in East China. *Climate & Environment research* ,2001 ,6 (1) :1 – 10.

[14] Zhang F C. Effects of global warming on plant phenological events in china. *Acta Geographica Sinica* ,1995 ,50 (5) :403 – 408.

[15] Zheng J Y , Ge Q S , Hao Z X. Effects of global warming on plant phenology in last 40 years. *Science Report* ,2002 ,47 (20) :1582 – 1587.

[16] Peñuelas J , Filella I. Phenology :Responses to a warming world. *Science* ,2001 ,294 (5543) :793 – 795.

[17] Beaubien E G , Freeland H J. Spring phenology trends in Alberta , Canada :links to ocean temperature. *International Journal of Biometeorology* ,2000 ,44 :53 – 59.

[18] Frank M , Chmielewski , Antje M , *et al.* Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany ,1961 – 2000. *Agricultural and Forest Meteorology* ,2004 ,121 (1) :69 – 78.

[19] Fu C B , Wang Q. The definition and detection of the abrupt climatic change. *Scientia Atmospherica Sinica* ,1992 ,16 (4) :482 – 493.

[20] Wand Z Y , Ding Y H , He J H. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica* ,2004 ,62 (2) :228 – 236.

[21] Chen L X , Shao Y N , Zhang Q F. Preliminary analysis of climate change during the last 39 years in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorolgy* ,1991 ,2 (2) :164 – 173.

[22] Xu Z X , Zhao F F. Variation of sunlight radiation duration in the Yellow River Basin. *Resource Science* ,2005 ,27 (5) :153 – 159.

[23] Menzel A , Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature* ,1999 ,397 :659.

[24] Zhang F C. Statistic analysis to spring trees phenology and meteorological factors in Beijing. *Geographic Research* ,1983 ,2 (2) :55 – 64.

[25] Yan M H , Deng W , Chen P Q. Analysis of Climate Jumps in the Sanjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica* ,2003 ,23 (6) :671 – 677.

[26] Zhao F F , Xu Z Y. Long term trend and jump change for major climate processes over the upper Yellow River Basin. *Acta Meteorologic Sinica* ,2006 ,64 (2) :727 – 736.

[27] Xu Y Q , Lu P L , Yu Q. Impacts of climate change on the first-flowering dates of *Robinica pseudoacacia* L. and *Syringa amurensis* Rupr. in China. *Journal of Beijing Forestry University* ,2004 ,26 (6) 94 – 97.

[28] Sparks T H , Carey P K , Combes J. First leafing dates of trees in Surrey between 1947 and 1996. *Lond Nat* ,1997 ,76 :15 – 20.

[29] Chen X Q , Zhang F C. Spring phonological change in Beijing in the last 50 years and its response to the climatic changes. *Chinese Journal of Agrometeorology* ,2001 ,22 (1) :1 – 5.

[30] Ahas R , J aagus J , Aasa A1. The phonological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature. *International Journal of Biometeorology* ,2000 ,44 (4) :159 – 161.

参考文献：

[1] 陆佩玲 , 于强. 植物物候对气候变化的响应. *生态学报* ,2006 ,26 (6) :923 ~ 929.

[2] 杨国栋 , 陈效逖. 论自然景观的季节节奏. *生态学报* ,1998 ,18 (3) :234 ~ 240.

[4] 王谋 , 李勇 , 黄润秋 , 等. 气候变暖对青藏高原腹地高寒植被的影响. *生态学报* ,2005 ,25 (6) :1275 ~ 1281.

[13] 温刚 , 符淙斌. 中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的大尺度特征. *气候与环境研究* ,2001 ,6 (1) :1 ~ 10.

[14] 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 (5) :403 ~ 408.

[15] 郑景云,葛全胜,郝志新. 气候增暖对我国近 40 年植物物候变化的影响. 科学通报,2002 47 (20):1582~1587.

[19] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学,1992 16 (4):482~493.

[20] 王遵娅,丁一汇,何金海. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报,2004 62 (2):228~236.

[21] 陈隆勋,邵永宁,张清芬,等. 近四十年来中国气候变化的初步分析. 应用气象学报,1991 2 (2):164~173.

[22] 徐宗学,赵芳芳. 黄河流域日照时数变化趋势分析. 资源科学,2005 27 (5):153~159.

[24] 张福春. 北京春季的树木物候与气象因子的统计学分析. 地理研究,1983 2 (2):55~64.

[25] 闫敏华,邓伟,陈泮勤. 三江平原气候突变分析. 地理科学,2003 23 (6):671~677.

[26] 赵芳芳,徐宗学. 黄河兰州以上气候要素长期变化趋势和突变特征分析. 气象学报,2006 64 (2):727~736.

[27] 徐雨晴,陆佩玲,于强. 气候变化对我国刺槐、紫丁香始花期的影响. 北京林业大学学报,2004 26 (6):94~97.

[29] 陈效述,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 (1):1~51.