

近 50 年北京植被对全球变暖的响应及其时效^{*}

——基于遥感数据和物候资料的分析

张学霞^{1**} 葛全胜² 郑景云²

(¹ 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; ² 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 植被对全球变暖的响应方式及其程度问题是全球变化研究的焦点之一。利用 1951 ~ 2000 年的气温、降水等气候资料、1982 ~ 2000 年的 NOAA/AVHRR 遥感数据和 1951 ~ 2002 年山桃始花的物候数据, 分析了北京各气候参量与生态系统植被在年际和年内时间尺度上的变化规律及其关系。结果表明, 北京近 20 年增温 1.2℃, 增温态势显著; 过去 50 年中, 降水的年际变化小于生长季内的波动幅度。年 NDVI 最大值 (VP)、平均值 (VM) 的年际变化曲线呈波动中缓慢上升的趋势, 表明植被的生长状况总体上在变好或生长季在延长。VP 出现日期 (VPD) 提前, 20 世纪 90 年代比 80 年代提前 4.5 d。山桃始花物候期的分析表明, 北京 1988 年以后春季开始日期提前 9.63 d。时间尺度不同, 各个气候指标对各植被指标的影响程度不同: 年际时间尺度, 年均温影响 VP、VM 的时效为 1 年; 月际水平上, 除温度影响 VM 的时效为 2 个月外, 各气候参量影响 VP、VM 的时效为 1 个月。年际尺度上, 温度影响山桃始花时效为 2 年; 月际尺度上, 2、3、4 月份温度影响山桃始花日期。

关键词 NDVI, 全球变暖, 山桃始花日期, 累积距平, 时滞, 互相关分析

中图分类号 Q948.12 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2005)02-0123-08

Impacts and lags of global warming on vegetation in Beijing for the last 50 years based on remotely sensed data and phenological information. ZHANG Xuexia¹, GE Quansheng², ZHENG Jingyun² (¹ College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ² Institute of Geographic Science and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(2): 123 ~ 130.

Global changes focus on the impacts and feedbacks of global warming on terrestrial ecosystem. Based on climate data (temperature, precipitation etc.) of 1951 ~ 2000, NOAA/AVHRR NDVI data of 1982 ~ 2000 and foliage phenology data of 1951 ~ 2002, impacts of short term seasonal and inter-annual climate changes on zonal ecosystem in Beijing were discussed. The results showed that climate changes presented increasing temperature and fluctuant precipitation in the past 50 years in the study area. Annual NDVI peak value and NDVI mean value could reflect preferably climate changes, and the trends of them appeared increased in some degree among oscillations in the past 20 years, which meant a better condition for vegetation growth or longer growing days in the study area. The VP date was earlier 4.5d in 1990s than that in 1980s. The advance of *Prunus davidiana* flowering phenophase showed that the spring came 9.63d ahead since 1988 in study region. Statistical analyses indicated that land surface temperature in Beijing has more significant relations with NDVI and the flowering phenophase than with precipitation as a whole. Different time scales led to different relations between climate indexes and growing conditions of plants. At the scale of a year, there were closer relations between AT, AP and NDVI; while at the scale of a month, there were closer relations between ET, EP and NDVI.

Key words NDVI, global warming, *Prunus davidiana* flowering phenophase, cumulate anomaly, time lags, cross-correlation analysis.

1 引言

植被是自然生态系统中最活跃的因子, 能够指示自然环境中的某些组成成分, 如大气、水、土壤、岩石的变化, 是景观生态环境变化的综合指示器^[15]。近几年, 随着人们对全球变暖等全球变化现象研究的深入, 植被对地理环境变化的响应方式及其程度

成为全球变化研究的热点^[8]。

NDVI(归一化植被指数)是目前国内外最常使用的遥感监测地面植被覆盖状况^[22]、监测作物长

*国家自然科学基金项目(40371019)、中国科学院研究生资助专项和中国科学院知识创新工程资助项目(KZCX3-SW-321和KZCX1-SW-01-09)。

**通讯作者

收稿日期: 2003-06-30 改回日期: 2004-05-08

势^[17]、植物物候变化^[20]、估算植被叶面积指数(LAI)^[24]、生物量和光合效率^[4]的指标,它能定量或定性表现植被活力,比用单波段来探测绿色植被更具灵敏性^[2],NDVI 对于表现地面植被覆盖状况,揭示植被绿度具有不可比拟的作用。

已有学者探讨 NDVI 和土地利用变化探测^[20,22]、植被密度覆盖评价、森林^[16]、农作物^[17]测定和生态系统生物量评估^[4]、叶面积指数^[24]、光合作用量^[10]等之间的关系,分析气候变化对 NDVI 的影响^[3,6,8,12,18,19,21,25],但是关于分析具有显著生态学意义的气候参量与 NDVI 之间的关系的论述较少。由于植物对气候变化具有累积效应,除了当时的气候状况影响植被变化外,前一段时间的气候状况对植被生长状况也会有影响^[8,18],但是气候状况影响植被生长的最长时效问题至今没人涉足。

目前,国内外的物候研究大多限于寻求植物物候期的时空变化规律、探讨气候变化和物候变化之间的关系问题^[5],而忽视比较具有生态学意义的各种气候参量对物候变化的影响及其时效问题的研究。以北京为例,利用多时相 NOAA/AVHRR NDVI 数据和山桃始花物候期数据,从植被生长态势和春季开始日期变化 2 个层面分析植被对气候变化的响应问题。在系统分析气候参量、植被指标多年变化态势的基础上,从年际、年内月际 2 个时间尺度,采用时滞互相关分析法探询气候条件影响植被生长(NDVI 指标和山桃始花物候期指标)的时效问题,为全球变化、植物生态学研究服务。

2 数据来源及处理方法

2.1 数据来源

研究所利用的遥感数据为 NOAA/AVHRR 的 NDVI 数字影像,来在美国 NASA 和 NOAA 的 EOS 计划所建立的地球资源观测系统(Earth Resources Observation System,EROS)数据中心的探路者数据集(Pathfinder Data Sets,PDS)。其空间分辨率为 8 km × 8 km,时间分辨率为 10 d。采用每旬一幅的叠加合成图像,即每旬 10 d(或 11 d)的图像资料剔除云和其他噪声的影响,通过叠加合成得到一幅基本无云和其他干扰的,主要反映植被生长状况的遥感图像。因此,资料完整的一年将有 36 幅经过处理的 AVHRR 遥感图像。使用的 AVHRR 遥感图像时间为 1981 年 7 月~2001 年 9 月(其中 1994 年 9 月中旬~12 月下旬资料缺)。

使用的气候数据为国家气象局记录的 1951~2000 年北京标准气象站的逐月气温、降水量及多年平均的月相对空气湿度。

研究所用的物候数据为北京颐和园的山桃始花日期,其中,1951~1962 年的始花日期来源于竺可桢先生的观测日记,1963~2002 年的始花日期资料来源于中国科学院地理研究所(现改名为中国科学院地理科学与资源研究所)的观测结果^[2]。

2.2 指标选取

2.2.1 代表性 NDVI 指标 选取以下 4 个指标衡量植被生长状况^[7]: 年 NDVI 最大值(VP),反映当年地表植被生长的最好状况; VP 出现日期(VPD),反映植被最高生产量达到的日期; NDVI 年极差值(VD),反映地表植被年内生长状况的变化; 年 NDVI 的均值(VM),代表当年植被的平均生长状况。

2.2.2 气候指标 植被对气候既有适应性又有反馈作用。一定气候条件下,生长相应的植被类型。不同的植被类型通过影响植被与大气之间的物质(如水和 CO₂ 等)和能量(如太阳辐射,动量和热量等)交换来影响气候,改变的气候又通过大气与植被之间的物质和能量的交换作用,对植被的生长产生影响,最终可能导致植被类型的变化。为了寻求气候和植被之间相互作用的规律,本文着重探讨温度和降水与植被生长、物候期之间的关系,光照因子不予考虑。生长季期间植物积极生长,该时段温度的高低、降水的多寡直接影响植物的生长、发育。因此本文除了选取年指标^[21]外,还选取了生长季指标^[18]进行分析,比较各气候指标与植被生长发育状况之间的关联程度。

温度。植物并非在一年中任何季节均可正常生长发育,只有在热量稳定地满足某一最低要求时,植物才能正常生长,因此对植物生长具有直接作用的热量指标是有效温度^[4]。为了更好地寻求真正具有生态学意义的热量变化规律,本文采用实际温度(AT)和有效温度(ET)两个热量指标。其中有效温度是参考日本吉良龙夫(1989)提出的“温暖指数”^[13]的积温指标,根据北京气候特点,在(k-n)时段内,将月均温 > 10 的月份的温度值减去 10 的生长有效温度后取其平均值。

$$ET = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^n (t_i - 10) \quad (1)$$

式中, ET 为有效温度 (); t_i 为 i 月份的平均温度 () 其中, $i = 1, 2, \dots, 12$;

降水。降水量是影响植被生长发育的最重要的要素之一。但对植被而言真正有意义的不是降水量本身, 而是供给植物根系的土壤水。由于土壤水的观测数据难以获取, 现有的大部分研究将降水量作为植被发育的气候条件之一。本文采用的水分指标是实际降水 (AP) 和有效降水 (EP), 其中 EP 的计算涉及可能蒸散量, 其计算方法如下。

在土壤水充足情况下的蒸散量为最大可能蒸散量。由于难以获得蒸散量的观测数据, 多采用其他能够观测的气候数据进行推测。最大可能蒸散量 (potential evaporation) 的计算很多, 如 Blaney Cridle 法、桑斯维特 (C. W. Thornthwaite) 法^[23]、彭曼 (H. L. Penman) 法、伊万诺夫 (Ivanov)^[13]。本文利用伊万诺夫 (Ivanov) 法。该方法通过月平均气温和月平均相对空气湿度计算最大蒸发量 E_0 。计算公式为:

$$E_0 = 0.18(t_i + 25)^2(1 - I_i/100) \quad (2)$$

式中, E_0 为可能蒸发量 (mm); t_i 为 i 月份的平均温度 (), 其中, $i = 1, 2, \dots, 12$; I_i 为 i 月份的平均相对空气湿度 (%), 其中, $i = 1, 2, \dots, 12$;

低温和干燥均是制约植被生长发育的重要原因。这两方面的原因可以用实际蒸散量一个指标来表示。在不考虑土壤水的前提下, 通过比较月可能蒸散量、月降水量定义有效降水量。月降水量大于月可能蒸散量 (湿润月), 则其差值 (多余的降水量) 对于植被而言是无效的。在这种情况下, 对植被生长发育有效的蒸散量是可能蒸散量。相反, 当月降水量小于月可能蒸散量 (干燥月) 的情况下, 蒸散量即为月降水量。通过上述方法定义的蒸散量是降水量中对植物生长发育有效的部分, 称之为有效降水量, 其计算方法如下:

$$EP = \begin{cases} AP & AP < E_0 \\ E_0 & AP \geq E_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, EP 为月有效降水量; AP 为月降水量; E_0 为月可能蒸散量。

基于以上考虑, 选取实际气温 (AT) 和有效温度 (ET) 2 个热量指标, 实际降水 (AP) 和有效降水 (EP) 2 个水分指标, 分别分析其年际和年内热量与水分的分配、变化规律及其与植被生长状况、植物物候期的关系。

2.2.3 物候指标 选取山桃 (*Prunus davidiana*)

始花物候期作为代表性物候指标与气候指标进行相关分析是基于以下 3 点: 山桃始花是北京春季开始的物候标志, 具有明显生态学意义; 山桃开花较明显, 易于观测, 资料获取的可实施性较强; 名人日记和笔记中多有记录, 数据来源广、获取途径多, 时间序列易于延长。

2.3 数据处理方法

2.3.1 累积距平算法 累积距平^[14]是一种常用的、由曲线直观判断变化趋势的方法。对于序列 x , 其某一时刻 t 的累积距平表示为:

$$\begin{aligned} x_i &= \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \\ \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^t x_i \\ (t &= 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, x_i 是 i 时间所对应的序列值。将 n 个时刻的累积距平全部算出, 即可绘出累积距平曲线进行趋势分析。

2.3.2 时滞互相关分析法^[11] 假定地理系统的时间序列 x_t 和 y_t 对任何时滞 k 都彼此相关, 则互相关系数的公式表作

$$r_k(x, y) = \frac{C_k(x, y)}{\sqrt{\hat{\sigma}_x^2 \hat{\sigma}_y^2}} \quad (5)$$

式中, 样本的协方差 $C_k(x, y)$ 和均方差 $\hat{\sigma}_x^2, \hat{\sigma}_y^2$ 分别表为

$$\begin{cases} C_k = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}_i)(y_{t+k} - \bar{y}_{t+k}) \\ \hat{\sigma}_x^2 = \left[\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}_i)^2 \right]^{1/2} \\ \hat{\sigma}_y^2 = \left[\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (y_{t+k} - \bar{y}_{t+k})^2 \right]^{1/2} \end{cases} \quad (6)$$

式中均值为

$$\begin{aligned} \bar{x}_i &= \frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} x_t \\ \bar{y}_{t+k} &= \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} y_{t+k} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, n 为序列 x_t, y_t 的样本数; $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

根据经验, 时滞 k 的绝对值应 $(n/4)$ 或 $(n - 10)$ 。

3 结果与分析

3.1 气候动态

3.1.1 气温动态 根据式 (1), 分别计算逐年和各

年份生长季内的实际均温和有效均温,由于北京生长季期间的温度均为有效温度,生长季内的有效温度和实际温度变化相同,所以本文只分析生长季均温、年均温、年有效均温的变动过程。从图1可知,尽管生长季均温、年均温和年有效均温的累积距平均为负值(图1b),但曲线的变化形态却直观、清晰地展示出近50年北京气温动态变动过程。以1980年为转折点,温度的变动趋势发生了根本性逆转。1980年以前,除了50年代末到60年代初有一显著升温外,总的趋势是温度下降。1980~2000年各指标均超过近50年的平均水平,气候增暖态势十分明显。其中50年中,80年代后和80年代前相比,年实际气温增加1.2℃、生长季气温增加0.9℃、年有效气温增加0.5℃。IPCC第三次评估报告指出:全球表面平均温度,在20世纪增加了0.6±0.2℃,而在未来50年中,气温可能会再提高2~5℃。这个变化相当于从上一个冰川期至今,即近1.8万年的温度变化速度。北半球的气温自工业革命以来上

升了约1.1℃,增幅大于全球平均水平^[9]。我国近百年的气温上升了0.4~0.5℃,略低于全球平均^[11]。北京近20年增温1.2℃,可见,全球、全国、北京的变暖态势显著。表示数据的离散程度的指标,主要有极差(R)、标准离差(S)、变异系数(CV)等^[14]。其中极差计算十分简单,仅适用于样本容量较小(即N<10)的情况;而标准偏差又称标准离差、标准差或称均方差,是反映样本数据的绝对波动状况;变异系数表示数据序列相对波动的大小。因此,采用更能反映样本数据的离散性的指标——变异系数比较样本的波动与离散程度。相比较而言,50年中,年均温和年有效均温变动幅度较大,生长季均温变动较为和缓(表1)。

表1 北京1951~2000年各项气候指标的变异系数
Tab.1 Differentiation coefficients of climate indexes in Beijing during 1951~2000

| 气候参量 | 年均温 | 年有效均温 | 生长季均温 | 年降水量 | 生长季降水量 | 年有效降水量 | 生长季有效降水量 |
|------|------|-------|-------|------|--------|--------|----------|
| 变异系数 | 0.07 | 0.07 | 0.03 | 0.35 | 0.38 | 0.21 | 0.38 |

注:变异系数 CV 为标准偏差 s 与算术平均值 \bar{x} 的比值。

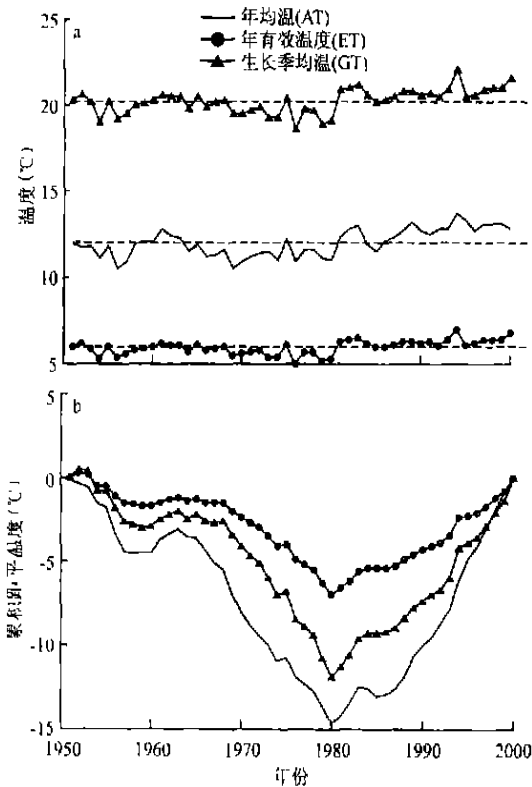


图1 北京1951~2000年生长季均温、年均温、年有效均温及其累积距平均动态变化

Fig.1 Changing trend curves of air temperature, effective temperature during a year or the growing days and cumulate anomaly curves in Beijing during 1951~2000

a:虚线为平均值,b:累积距平曲线经非参数统计检验,该变化趋势在0.05显著水平下显著。

3.1.2 降水动态 利用公式(2)、(3),测算北京1951~2000年的月最大可能蒸散量、有效降水量,据此,分别计算逐年和各年份生长季的降水总量、有效降水量(图2)。过去50年中,北京的多年平均、生长季的降水量、有效降水量呈现明显的波动变化(图2a、b、c、d)。从多年累积距平均图(图2e、f)可知,20世纪60年代以来,北京的年实际降水量和年有效降水量变化的总趋势是下降的,在这总趋势下,50年代~60年代初,降水量显著增加,80年代中期到90年代后期降水量略有增加。生长季内降水量的累积距平变动趋势与多年平均的变动趋势相同,表现为2个峰值、1个谷值。

近50年内降水量的多年平均指标与生长季指标相比,波动相对平缓一些;年、生长季的实际降水量比有效降水量的波动显著一些(表1)。

综合近50年温度和降水量的变动趋势,可以看出,二者基本的时间配置规律为:60~80年代温度、降水明显下降向冷干型方向发展,80年代以后,温度升高、降水减少向暖干型方向发展。在这一阶段,80年代中后期降水略有增加,同整个暖干型有所不同,又有暖湿的概念在内。以下着重分析北京温度升高、降水波动的情况下,NDVI和山桃始花物候是如何响应气候变化的。

3.2 NDVI动态

根据北京在过去19年的NDVI变化的特征记

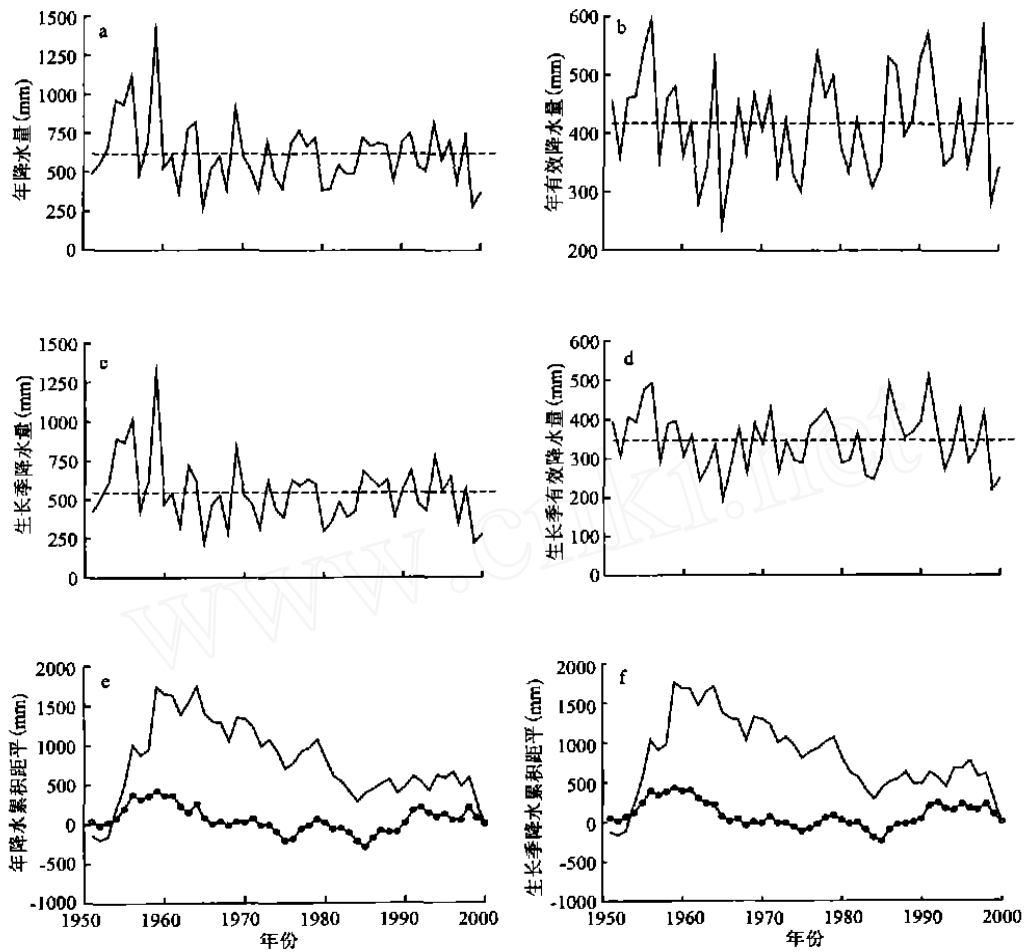


图 2 北京 1951 ~ 2000 年实际降水、有效降水的年总量、生长季总量及其累积距平动态

Fig. 2 Changing curves of actual precipitation, effective precipitation of annual or the growing days and cumulate anomaly curves in Beijing during 1951 ~ 2000

a ~ d: 虚线为平均值; e ~ f: 实线为实际降水, 带圈的线为有效降水, 累积距平曲线经非参数统计检验, 该变化趋势在 0.05 显著水平下显著。

录, 建立跨时间维的多时相的遥感影像特征参数 NDVI 离散时间序列, 采用年 NDVI 最大值 (VP)、生长季均值 (GVM)、年 NDVI 的均值 (VM)、NDVI 年极差值 (VD) 以及年 VP 出现日期 (VPD) 作为衡量北京 NDVI 变化的指标。从图 3 可知, 年 VM、GVM、VP (图 3a) 在 1982 ~ 2000 年近 20 年中整体在波动中缓慢上升, 90 年代比 80 年代分别增加 0.06、0.07、0.09, 这表明植被的生长状况总体上变好或者生长季的延长。但年 VPD (图 3b) 变化不很明显, 从另一个侧面验证了上述结论的正确性。根据对近 20 年 NDVI 时间序列的分析, VP 多出现在每年的 7 月末或者 8 月末, 部分年份出现在 9 月初或者 8 月初, 真实地反映出当年植被生长最旺盛的时期和生长的状况。从累积距平曲线的变动来看, VP 出现日期略有提前的趋向, 90 年代比 80 年代提前 4.5 d。

3.3 植物物候动态

山桃始花表征着北京春季的开始, 始花的早晚影响着其春季的长短。从图 4 可以看出, 除 1958 ~ 1967 年 10 年始花日期略有提前外, 直至 80 年代末大部分年份山桃始花日期呈不规则波动状况, 基本稳定在距 1 月 1 日约 85d 左右。此后, 始花日期明显提前, 1989 ~ 2002 年, 有 13 年呈正距平, 其中, 1995、1998 和 2002 年分别为 13.75、13.75 和 19.75 d 的高正距平值。累积距平曲线清晰地展示出 50 年来山桃花始花日期经历了一次显著的波动, 以 1988 年为转折点, 此前累积距平的绝对值为负增长, 北京山桃始花日期推迟; 此后, 累积距平的绝对值为正增长, 山桃花始花日期提前。其中近 50 年中, 1988 年之后的山桃始花日期平均比 1988 年之前的提前 9.63 d。

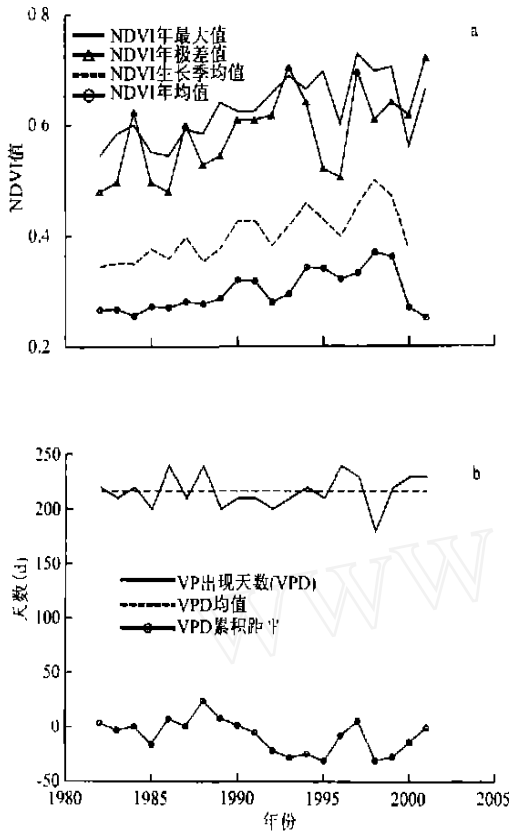


图3 北京1982~2000年各项NDVI指标累积距平的年际动态
 Fig.3 Changing curves of annual NDVI peak value, the mean value within growing days, annual NDVI mean value, annual NDVI difference, annual NDVI peak days and the cumulate anomaly curve of the peak days in Beijing during 1982~2000
 b: 累积距平曲线经非参数统计检验, 该变化趋势在0.05显著水平下显著.

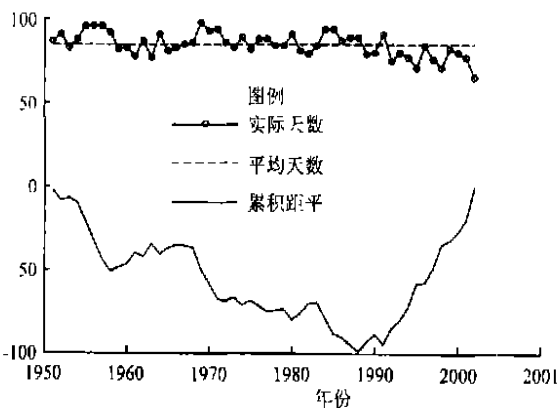


图4 北京1951~2002年山桃始花(春季开始)日期、距平和累积距平动态
 Fig.4 Changing curves and cumulate anomaly curves of Prunus davidiana flowering phenophase in Beijing during 1951~2000
 注: 日期提前为正值, 日期推后为负值。累积距平曲线经非参数统计检验, 该变化趋势在0.05显著水平上显著.

3.4 气候变化对北京植被的影响

3.4.1 气候变化与植被NDVI的关系 现有的大部分研究考虑的多为在零时滞的情况下, 气候变化对植被NDVI的影响^[6, 7, 12, 18, 19, 21, 25], 而在一定程度上忽略了植被对气候变化的累积作用, 影响植被生长状况的除了当时的气候条件外, 还有以前的气候状况。那么, 究竟以前多久的气候变化对当前植被生长的影响就可以忽略呢? 即当前的气候条件影响植被生长的最长的时效到底是多少?

因此, 参考时滞互相关分析法(式5)探讨气候参量影响植被NDVI的时效问题。其中 x_t 为气候参量序列; y_t 为植被指数序列; $k=0, 1, 2, \dots$

气候参量与VP。采用改进的互相关分析法从年际、月际2个时间尺度, 分别计算气温、降水各指标影响VP的时效问题。年际尺度上, 为同遥感影像的时段相对应, 气候变化的时段选择为1982~2000年。故 $N=19$, 因 $N/4=4, N-10=9$, 选择 $N=5$ 。月际尺度上, 以1982~2000年各气候指标不同月份的多年均值为基础数据计算一年内各月气温、降水各指标与月内植被指标的互相关系数。故 $N=12$, 因 $N/4=3, N-10=2$, 选择 $N=4$ 。

由于样本量 < 30 , 难以满足统计学中的大数定理, 故利用公式

$$r^* = r \left[1 + \frac{1-r^2}{2(n-4)} \right] \quad (8)$$

计算无偏互相关系数加以校正(表2、3)。

年际时间尺度, 年均温影响VP的时效为1年, 其它气候参量对VP的影响则没有通过显著性检验。月际水平上, 各气候参量影响VP的时效为1个月, 有效温度和有效降水的影响大于实际温度和实际降水(表3)。

气候参量与VM。采用同样方法从年际、月际2个时间尺度, 分别计算气温、降水各指标影响VM的时效问题(表4、5)。

表2 北京1982~2000年气温、降水年际变动与年VP的关系(无偏相关系数 r^*)

Tab.2 Relationship between annual changes of temperature, precipitation and NDVI peak values at the scale of a year in Beijing during 1982~2000

| 时滞(年) | 年实际均温 | 年有效温度 | 生长季均温 | 年实际降水量 | 年有效降水量 | 生长季降水量 | 生长季有效降水量 |
|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|----------|
| 0 | 0.63** | 0.18 | 0.18 | -0.22 | 0.03 | -0.26 | -0.04 |
| 1 | 0.51* | 0.44 | 0.33 | 0.28 | 0.21 | 0.23 | 0.15 |
| 2 | 0.26 | 0.4 | -0.16 | -0.01 | 0.12 | 0.02 | 0.2 |
| 3 | 0.34 | 0.33 | 0.06 | 0.37 | 0.22 | 0.41 | 0.33 |
| 4 | 0.26 | 0.19 | 0.14 | 0.16 | 0.14 | 0.19 | 0.22 |
| 5 | 0.05 | 0.36 | 0.09 | 0.13 | -0.02 | 0.11 | -0.05 |

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 下同.

表 3 北京 1982~2000 年气温、降水年内变动与月 VP 的关系(无偏相关系数 r^*)

Tab. 3 Relationship between monthly changes of temperature, precipitation and NDVI peak values at the scale of a month in Beijing during 1982~2000

| 时滞(月) | 月实际均温 | 月有效温度 | 月实际降水量 | 月有效降水量 |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0.91** | 0.94** | 0.85** | 0.92** |
| 1 | 0.53* | 0.53* | 0.55* | 0.56* |
| 2 | 0.01 | -0.21 | 0.08 | 0.03 |
| 3 | -0.43 | -0.48* | -0.37 | -0.44 |
| 4 | -0.59* | -0.65* | -0.55* | -0.61* |

表 4 北京 1982~2000 年气温、降水年际变动与年 VM 的关系(无偏相关系数 r^*)

Tab. 4 Relationship between annual changes of temperature, precipitation and VM at the scale of a year in Beijing during 1982~2000

| 时滞(年) | 年实际均温 | 年有效温度 | 生长季均温 | 年实际降水量 | 年有效降水量 | 生长季降水量 | 生长季有效降水量 |
|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|----------|
| 0 | 0.62** | 0.26 | 0.26 | 0.12 | 0.2 | 0.06 | 0.12 |
| 1 | 0.55** | 0.3 | 0.29 | 0.13 | 0.18 | 0.07 | 0.08 |
| 2 | 0.39 | 0.05 | 0.05 | -0.1 | -0.22 | -0.03 | -0.11 |
| 3 | 0.25 | -0.06 | -0.06 | 0.33 | 0.15 | 0.38 | 0.26 |
| 4 | 0.32 | 0.16 | 0.16 | 0.28 | 0.33 | 0.29 | 0.39 |
| 5 | 0.17 | 0.19 | 0.19 | 0.17 | -0.01 | 0.18 | 0.01 |

表 5 北京 1982~2000 年气温、降水月变化与月 VM 的关系(无偏相关系数 r^*)

Tab. 5 Relationship between monthly changes of temperature, precipitation and VM at the scale of a month in Beijing during 1982~2000

| 时滞(月) | 月实际均温 | 月有效温度 | 月实际降水量 | 月有效降水量 |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0.90** | 0.93** | 0.84** | 0.92** |
| 1 | 0.82** | 0.90** | 0.81** | 0.87** |
| 2 | 0.65* | 0.56* | 0.44 | 0.52 |
| 3 | 0.17 | 0.06 | -0.13 | -0.02 |
| 4 | -0.25 | -0.38 | -0.53 | -0.46 |

年际时间尺度,年均温影响 VM 的时效为 1 年,其它气候参量对 VM 的影响则没有通过显著性检验。月际水平上,温度影响 VM 的时效为 2 个月,降水影响 VM 的时效为 1 个月。无论年际,还是月际时间尺度上,温度对 VM 的影响均大于降水对其的影响。

表 6 北京 1951~2000 年温度、降水年际变化与山桃始花物候期之间关系

Tab. 6 Relationship between air temperature, precipitation and *P. davidiana* flowering phenophase at the scale of a year in Beijing during 1951~2000

| 时滞(年) | 年实际均温 | 年有效温度 | 年实际降水量 | 年有效降水量 |
|-------|---------|---------|--------|--------|
| 0 | -0.73** | -0.53** | 0.21 | 0.13 |
| 1 | -0.46** | -0.34** | 0.15 | 0.11 |
| 2 | -0.44** | -0.5** | 0.27* | 0.29* |
| 3 | -0.15 | -0.16 | 0.15 | 0.01 |
| 4 | -0.08 | -0.17 | 0.09 | 0.03 |
| 5 | -0.15 | -0.24 | 0.11 | -0.07 |
| 6 | 0.2 | -0.06 | -0.01 | 0 |
| 7 | -0.02 | -0.1 | 0.23 | 0.21 |
| 8 | -0.03 | -0.09 | 0.02 | -0.14 |
| 9 | 0.01 | 0 | -0.01 | -0.08 |
| 10 | -0.02 | 0 | -0.1 | -0.07 |
| 11 | 0.03 | 0.05 | -0.05 | -0.07 |
| 12 | -0.01 | 0.05 | -0.08 | -0.03 |

* $P < 0.10$; ** $P < 0.01$. 下同。

表 7 北京温度、降水 1951~2000 年月际变化与山桃始花物候期之间关系(无偏相关系数 r^*)

Tab. 7 Relationship between monthly changes of temperature, precipitation and *P. davidiana* flowering phenophase at the scale of a month in Beijing during 1951~2000

| 月份 | 月实际均温 | 月有效均温 | 月实际降水 | 月有效降水 |
|----|---------|--------|-------|-------|
| 6 | -0.35 | -0.38 | 0.19 | 0.19 |
| 7 | -0.34 | -0.34 | -0.26 | -0.17 |
| 8 | -0.4 | -0.43 | 0.39 | 0.04 |
| 9 | -0.23 | -0.23 | 0.16 | 0.14 |
| 10 | -0.23 | -0.230 | 0.01 | |
| 11 | -0.17 | -0.23 | 0.13 | 0.13 |
| 12 | -0.27 | -0.23 | -0.18 | -0.18 |
| 1 | -0.36 | 0 | -0.12 | -0.12 |
| 2 | -0.69** | 0 | -0.06 | -0.06 |
| 3 | -0.88** | 0 | 0.19 | 0.19 |
| 4 | -0.47* | -0.47* | 0 | -0.01 |
| 5 | -0.2 | -0.2 | -0.07 | -0.07 |

注:6~12 月是物候期发生的前一年,1~5 月是物候期发生的当年。

从表 4,5 可看出,在年际时间尺度上,有效温度、有效降水和气温、降水对植物 VP、VM 的影响差别不大;而在年内月际水平上,有效温度和有效降水同月内 VP、VM 的相互关系高于月均温、月降水量(表 3,5)。可见,时间尺度不同,温度、降水各气候指标对植被影响程度各异。

鉴于遥感数据仅为 1982~2000 年,对应于气候变暖时期,因此以上分析仅适用于气候变暖的情况,是否适用于气候变冷时期有待进一步分析。

3.4.2 气候变化与山桃始花日期的关系 张福春^[5]采用积分回归、相关系数等统计学方法研究表明,影响北京春季木本物候的关键因子是温度,影响的关键时期是春季。但气候参量影响植物物候期的时效问题的分析较少。因此,以北京的山桃始花(标志春季开始)物候期为例,采用互相关系数分析气候因子影响山桃始花物候期的时效问题。

如前所述,研究时段为 1951~2000 年,样本数 $n = 50$,选择时滞 $k = 12$ 。

年际尺度上,温度影响山桃始花时效为 2 年,降水基本无影响。月际尺度上,2~4 月份温度影响山桃始花日期,降水对始花日期的影响没有通过显著性检验。

而且,在年际时间尺度上,实际气温、实际降水与植物物候期的关系比有效温度、有效降水更密切。因此,在进行年际变化分析时,完全可以只讨论实际气温、实际降水指标与植物物候期之间的关系。

4 结论

4.1 北京在 20 世纪 80 年代以后气温和有效气温表现出上升的趋势,80 年代后 20 年与 80 年代前 30 年相比,年实际气温增加 1.2 ,全球变暖态势显

著。比较而言,过去 50 年中,温度的年际变化大于生长季内的年际变化。过去 50 年降水则表现为长期的波动状态,无明显升高或下降的变化,但实际降水波动较大。生长季内,实际降水和有效降水呈波动状况。

4.2 1982 ~ 2000 年,NDVI 年均值(VM)、生长季均值(GVM)、年最大值(VP)的年际变化曲线呈波动中缓慢上升的趋势,其中,VP 增幅最明显,90 年代比 80 年代增加 0.09,表明植被的生长状况总体上在变好,但 NDVI 年极差值(VD)变化不明显。VP 出现日期(VPD)提前,90 年代比 80 年代提前 4.5 d。

4.3 北京山桃始花日期在 1988 年以前呈不规则波动状况,之后始花日期明显提前。其中近 50 年中,1988 年之后的山桃始花日期平均比 1988 年之前的提前 9.63 d,说明 1988 年后平北京春季开始日期提前了 9.63 d。

4.4 年际时间尺度,年均温影响 VP 的时效为 1 年,月际水平上,各气候参量影响 VP 的时效为 1 个月。年际时间尺度,年均温影响 VM 的时效为 1 年,月际水平上,温度影响 VM 的时效为 2 个月,降水影响 VM 的时效为 1 个月。时间尺度不同,各个气候指标和植被生长状况的关系不同,年际尺度上,实际温度、实际降水和植被之间关系密切;年内月际尺度上,有效温度、有效降水与植被生长状况之间的关系更为密切。

4.5 年际尺度上,温度影响山桃始花时效为 2 年;月际尺度上,2 ~ 4 月份温度影响山桃始花日期。无论在年际尺度,还是月际尺度,温度和山桃始花物候期之间的关系远比和降水之间的密切。

此外,由于数据的限制,各气候参量影响 NDVI 变化情况只对应于气候变暖时期,其结论是否适用于气候变冷时期有待进一步研究。

参考文献

- [1] 丁一汇. 2002. 我国气候变暖以冬季和北方最明显[N]. 中国青年报.
- [2] 中国科学院地理研究所. 1965 ~ 1992. 中国动植物物候观测年报(第 1 ~ 11 号)[M]. 北京:地质出版社.
- [3] 朴世龙,方精云. 2001. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化[J]. 第四纪研究, 21(4): 294 ~ 302.
- [4] 江东,王乃斌,等. 2001. 植被指数 - 地面温度特征空间的生态学内涵及其应用[J]. 地理科学进展, 20(2): 146 ~ 152.
- [5] 张福春. 1995. 气候变化对中国木本植物物候的可能影响[J]. 地理学报, 50(5): 402 ~ 410.
- [6] 李本纲,陶澍. 2000. AVHRR NDVI 与气候因子的相关分析[J]. 生态学报, 20(5): 898 ~ 902.
- [7] 李晓兵,史培军. 2000. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析[J]. 植物生态学报, 24(3): 379 ~ 382.
- [8] 李晓兵,陈云浩,等. 2002. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响[J]. 地球科学进展, 17(2): 254 ~ 261.
- [9] 杜梨. 2001. 地球真的是越来越烫[N]. 中国环境报, 3 月 1 日.
- [10] 陈利军,刘高焕,等. 2002. 遥感在植被净第一性生产力研究中的应用[J]. 生态学报, 21(2): 53 ~ 57.
- [11] 陈彦光,刘继生. 2002. 基于引力模型的城市空间互相关和功率谱分析[J]. 地理研究, 21(6): 742 ~ 752.
- [12] 赵茂盛,符凉斌,等. 2001. 应用遥感数据研究中国植被生态系统与气候的关系[J]. 地理学报, 56(3): 287 ~ 296.
- [13] 潘树荣,伍光和,等. 1985. 自然地理学(第二版)[M]. 北京:人民教育出版社, 323 ~ 325.
- [14] 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京:气象出版社, 49 ~ 53.
- [15] F. 施奈勒. 1965. 植物物候学[M]. 北京:科学出版社, 46 ~ 50.
- [16] Alicia KB. 2001. NDVI and a simple model of deciduous forest seasonal dynamics[J]. *Ecol. Model.*, 143: 43 ~ 58.
- [17] Dalezios NR, Domenikiotis C, et al. 2001. Cotton yield estimation based on NOAA/AVHRR produced NDVI[J]. *Phys. Chem. Earth (B)*, 26(3): 247 ~ 251.
- [18] Kjell AH, Stein RK, et al. 2001. Climatic change impact on growing season in fennoscandia studied by a time series of NOAA AVHRR NDVI Data [EB/OL]. <http://www.itk.norut.no/~stein/dr/nordic/info/IGARSS2001.pdf>.
- [19] Limin Y, Bruce KW, et al. 1998. An Analysis of relationships among climate forcing and time-integrated NDVI of grasslands over the U. S. Northern and Central Great Plains[J]. *Remote Sens. Environ.*, 65: 25 ~ 37.
- [20] Senay GB, Elliott RL. 2000. Combining AVHRR-NDVI and landuse data to describe temporal and spatial dynamics of vegetation[J]. *For. Ecol. Man.*, 128: 83 ~ 91.
- [21] Shabanov V, Zhou L, et al. 2001. Analysis of interannual changes in northern vegetation activity observed in AVHRR data during 1981 to 1994[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40: 115 ~ 130.
- [22] Stephen JW, Thomas WC, et al. 2001. A multiscale analysis of LULC and NDVI variation in Nang Rong district, northeast Thailand[J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 85: 47 ~ 64.
- [23] Thornthwaite CW. 1948. An approach toward a rational classification of climate[J]. *Geogr. Rev.*, 38: 55 ~ 94.
- [24] Toby NC, David AR. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index[J]. *Remote Sens. Environ.*, 62: 241 ~ 252.
- [25] Tucker CJ, Slayback D, et al. 2001. Higher northern latitude NDVI and growing season trends from 1982 to 1999[J]. *Int. J. Biometeorol.*, 45: 184 ~ 190.

作者简介 张学霞,女,1975 年出生,博士。主要从事遥感应用与全球环境变化方面的研究。发表论文 20 余篇。
责任编辑 王伟