

# 1982~1999 年我国东部暖温带植被 生长季节的时空变化

陈效述, 喻 蓉

(北京大学环境学院资源与环境地理系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 利用 1982~1996 年 5 个站点的植物群落物候观测数据和物候累积频率拟合法, 划分各站逐年的植被物候季节, 并确定各季节初日对应的当地归一化差值植被指数 (NDVI) 阈值。在此基础上, 通过对物候站各年 NDVI 曲线的年型聚类分析和区内所有像元逐年 NDVI 曲线的空间聚类分析, 实现植被物候季节的时空外推估计, 从而得到我国暖温带落叶阔叶林地区 1982~1999 年植被物候季节初日和生长季节长度的时空格局。结果表明, 多年平均的植被物候季节初日和生长季节长度呈现出主要随纬度和海拔高度变化的时空格局。在这 18 年中, 整个区域的物候春季初日以提前为主, 且以华北平原提前的趋势最为显著; 夏季、秋季和冬季初日以推迟为主, 也以华北平原推迟的趋势比较显著; 因此, 华北平原植被生长季节呈显著延长的趋势。本文揭示的植被物候季节初日的趋势变化与华北地区各季节气温的趋势变化基本吻合; 植被生长季节的趋势变化特征与欧洲单种植物物候生长季节, 以及欧亚大陆和我国温带遥感植被生长季节的趋势变化基本一致, 但植被生长季节初、终日期和长度的趋势值明显大于后者, 表明该地区植物物候对于气候变暖的响应更加敏感。

**关键词:** 物候季节; 植被生长季节; 物候累积频率拟合; 归一化差值植被指数; 中国东部暖温带

由于物候现象是陆地生态系统对环境变化的最直观、最敏感和最综合的反映, 所以, 通常用来作为气候变化的生物指示器<sup>[1]</sup>。近年来, 分析植被物候季节和生长季节时空变化及其对全球气候变化的响应, 已成为物候学研究的热点, 研究结果表明, 在过去的四、五十年间, 欧洲和北美的一些植物有春季物候期提前、秋季物候期推迟和生长季节延长的趋势, 花期和展叶期平均每 10 年提前 1.2~3.8 天, 并且有 40% 以上的趋势通过了显著性检验<sup>[2-5]</sup>, 但个别长达一个世纪的时间序列显示, 在某些时段春季物候期有推迟的趋势<sup>[6]</sup>。在我国, 郑景云等<sup>[7]</sup>基于地面植物物候资料的研究指出, 20 世纪 80 年代以后华北地区的春季物候期提前; 朴世龙等<sup>[8]</sup>和 Piao 等<sup>[9]</sup>基于遥感资料的研究表明, 在 1982~1999 年期间, 我国温带地区的植被生长季节呈延长的趋势。

由于我国物候观测站较少, 物候数据也比较缺乏, 而遥感资料并不一定能反映地面植物物候变化的实况, 因此, 为了更为准确地揭示区域尺度上植被物候季节和生长季节的变化特征, 有必要利用有限的物候数据并辅以卫星遥感数据, 来估计植被物候季节和生长季节<sup>[10]</sup>。近年来, Chen 等系统提出划分植被生长季节的物候—遥感法<sup>[11, 12]</sup>, 从而实现了地面与遥感信息相结合, 利用较少地点的植物物候资料, 通过空间外推, 确定广大区域内较多地点的植被生长季节, 并揭示出我国东部温带地区植被生长季节的时空变化格局及其与气温变化的关系<sup>[13]</sup>。在上述单站植被生长季节空间外推研究的基础上, 本文拟在两个方面深化研究的内容, 一是实现样本站植被物候季节跨年度的时间外推; 二是以

收稿日期: 2006-02-21; 修订日期: 2006-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40371042)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40371042]

作者简介: 陈效述 (1958-), 男, 北京市人, 博士, 教授, 主要从事植物物候学和气候变化响应的研究。

E-mail: cxq@pku.edu.cn

遥感信息的像元为空间单位, 实现连续地理空间的植被物候季节的空间外推。为了实现上述目标, 首先, 提出物候累积频率拟合法, 用来比较客观地划分样本站 1982~1996 年的植被物候季节和生长季节, 并确定其归一化差值植被指数 (NDVI) 阈值; 其次, 利用 NDVI 阈值外推估计整个研究区域 1982~1999 年的植被物候季节和生长季节; 最后, 分析植被物候季节初日和生长季节长度的空间格局与线性趋势变化。

## 1 研究范围与资料

### 1.1 研究区域

本文的研究范围为我国植被区划上的暖温带落叶阔叶林区域<sup>[14]</sup>, 位于北纬  $32^{\circ}30' \sim 42^{\circ}30'$  和东经  $103^{\circ}30' \sim 124^{\circ}10'$  之间, 东部宽阔, 西部狭窄, 略呈三角形。地势西高东低, 明显地分为山地、丘陵和平原三个地形单元。山地分布在北部和西部, 丘陵分布在东部, 植被以次生和人工落叶阔叶林为主; 平原分布在西部山地和东部丘陵之间的广大地域, 植被主要为人工落叶阔叶树种和农作物<sup>[15]</sup>。本区气候的季节性与植物群落的季相变化均十分明显, 表现也丰富多样。按照观测植物种的丰富性、观测数据的准确性和时间序列的连续性等选取原则, 确定盖县 ( $40^{\circ}26'N$ ,  $122^{\circ}20'E$ , 45 m)、北京 ( $40^{\circ}01'N$ ,  $116^{\circ}20'E$ , 50 m)、邢台 ( $37^{\circ}04'N$ ,  $114^{\circ}30'E$ , 77 m)、洛阳 ( $34^{\circ}40'N$ ,  $112^{\circ}25'E$ , 155 m) 和西安 ( $34^{\circ}13'N$ ,  $108^{\circ}58'E$ , 438 m) 作为样本站。由于观测的木本植物物候现象的发生日期与其他森林树木、草本植物和农作物的相应物候现象发生日期具有显著的相关性<sup>[16, 17]</sup>, 所以, 观测的树木物候变化通常用来代表当地植物群落的生长发育状况, 并作为掌握农林牧业生产时宜的依据<sup>[18]</sup>。据此, 本文将上述站点所观测的植物种和物候期作为代表当地植物群落及其季节性的指示性物种和指示性物候现象。

### 1.2 物候数据及其预处理

上述物候站 1982~1988 年的树木物候期观测数据取自《中国动植物物候观测年报》<sup>[19-22]</sup>, 1989~1996 年的物候数据由中国科学院地理科学与资源研究所提供。统计分析中涉及的木本植物物候期包括芽始膨大期、芽开放期、展叶始期、展叶盛期、花序或花蕾出现期、开花始期、开花盛期、开花末期、果实成熟期、果实脱落开始期、果实脱落末期、叶始变色期、叶全变色期、开始落叶期和落叶末期 15 种关键物候期。

为了尽量保证数据的准确性, 对物候数据进行了严格的审查。首先, 根据物候现象发生的顺序性, 对数据进行审查, 剔除违反顺序性的记录; 其次, 剔除每个物候期时间序列中正负 1.5 倍标准差之外的异常记录; 最后, 为了保证同一地点不同年份的观测种和物候期具有相对一致性, 剔除观测数据时间序列小于 8 年的物候期。经过上述审查和剔除, 仍有 89% 的植物种和 72% 的物候期被保留下来, 从而保证了数据的准确性和代表性。

### 1.3 遥感数据及其预处理

本文所用的遥感数据取自美国地球观测系统分布式动态档案中心的探路者数据库, 采用的是逐旬归一化差值植被指数 (NDVI) 数字影像, 其空间分辨率为  $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ , 时间序列为 1982~1999 年。在遥感影像中, 由于仪器的故障等各种干扰会产生斑点, 这些斑点造成直接使用时的信息错误并导致不准确的结果, 因此, 在遥感影像处理时先将其消除, 具体步骤为: 判定所有像元值与其相邻的 8 个像元值平均值之差超过给定阈值  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 25$ ) 的像元, 并由 8 个相邻像元值的平均值代替其原值。此外, NDVI 影像时间序列中还存在着突跳点, 即出现某一旬或某几旬的 NDVI 值突然跳跃、明显异于其他值的情况, 对于这种情况, 以突跳点前后两旬的 NDVI 平均值替换此突跳点的 NDVI 值。在 NDVI 数据处理过程中, 数值缺失点均不参与计算。

尽管逐旬 NDVI 数据是由目前最为可靠且精确的数据处理过程获得的, 但是云、气

溶胶和水汽的影响使得 NDVI 数据仍然存在较大的噪声。NDVI 是反映地面植被状况的指数, 一般情况下会保持一个比较平稳并且连续的上升或下降的趋势, 而噪声的出现通常是由于连续的云雨天气影响了传感器对于地面反射辐射的接收。本文采用五点平滑方法来消除这种噪声, 具体做法是: 将第  $i$  旬的原始 NDVI 值与其前后各 2 旬的 NDVI 平均值比较, 取两者之中较大的值作为第  $i$  旬的值, 计算公式如下:

$$NDVI_i = \max \left[ NDVI_i, \frac{(NDVI_{i-2} + NDVI_{i-1} + NDVI_{i+1} + NDVI_{i+2})}{4} \right]$$

式中:  $i$  代表旬的序号,  $i = 1, 2, 3, \dots, 648$ , 这里是将每个像元 1982~1999 年的 648 旬作为一个时间序列统一处理的。上述对斑点和突跳点进行的处理, 避免了异常值对数据直接拟合造成的不利影响, 经验证, NDVI 时间序列在五点平滑处理之后, 保留了主要波动特征并消除了大部分噪声。

## 2 植被物候季节外推的步骤与方法

### 2.1 确定样本站的植被物候季节

样本站植被物候季节的划分是区域植被物候季节外推的基础<sup>[13]</sup>。本文采用物候累积频率拟合法来划分样本站的植被物候季节, 它通过对植物群落物候现象发生期的累积频率曲线进行两参数生长曲线拟合, 求曲线的曲率变化率最大点, 划分春、夏、秋、冬四季的初日。具体的步骤是: 首先, 将一个地点几十种代表性植物的物候现象发生期观测数据组成混合样本, 统计 15 年逐候 (5 天) 物候现象发生期的频率和累积频率, 绘制累积频率曲线<sup>[23]</sup>; 然后, 用生长曲线对其进行分段拟合, 并计算生长曲线的曲率变化率  $k'$  最大值, 该值对应的序日即为植被物候季节的初日。

采用生长曲线拟合并求取季节转折点是因为生长曲线可以较好地反映“休眠—爆发—孕育”的植物体生长过程和“孕育—爆发—休眠”的植物体衰亡过程。把曲率变化率最大的点定为季节的转折点, 主要考虑到转折点即状态改变最迅速的点, 而曲率是定义曲线弯曲程度的值, 曲率变化率最大的点即为曲线弯曲程度改变最大的点, 也就是物候现象发生期的累积频率改变最迅速的点。生长曲线的计算公式如下:

$$y(t) = \frac{1}{1 + e^{-a+bt}}$$

式中:  $t$  是以候为单位的时间,  $y(t)$  是第  $t$  候的物候累积频率值,  $a$  和  $b$  分别为拟合的参数。曲率变化率  $k'$  的计算公式如下:

$$k' = b^3 z \left\{ \frac{3z(1-z)(1+z)^3 [2(1+z)^3 + b^2 z]}{[(1+z)^4 + (bz)^2]^{\frac{5}{2}}} - \frac{(1+z)^2 (1+2z-5z^2)}{[(1+z)^4 + (bz)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\}$$

其中,  $z = e^{-a+bt}$ 。

### 2.2 确定样本站植被物候季节所对应的 NDVI 阈值

以各样本站每年的植被物候季节初日作为时间界限值, 便可以在样本站所在像元的 NDVI 曲线上直接确定各物候季节初日所在旬的 NDVI 阈值。例如, 1982 年北京的物候春季初日为 3 月 12 日, 属于第 8 旬, 在当地所在像元 1982 年的 NDVI 曲线上直接读出对应的阈值为 0.132。依此类推, 便可确定逐年每个样本站各物候季节初日对应的 NDVI 阈值 (图 1)。

结果显示, 物候春季、夏季和冬季初日的 NDVI 阈值一般南部站点大于北部站点, 物候秋季初日的 NDVI 阈值则北部站点大于南部站点, 与其他的研究结果基本一致<sup>[11-13]</sup>, 说明利用地面植被物候季节划分结果确定的 NDVI 阈值具有一定的客观性。NDVI 阈值的

标准差均小于 0.1, 表明作为指示地面植被物候季节开始的遥感指标, NDVI 阈值具有比较稳定的特点。由此可以认为, 站点的 NDVI 阈值具有较好的时空代表性, 可以用于外推研究区域内各地植被物候季节的初日。

2.3 区域植被物候季节的时空外推

首先, 采用欧氏距离, 对物候样本站所在像元 1982~1999 年的 NDVI 时间序列进行年型的聚类分析, 找出各站在 1982~1996 年与

1997~1999 年两个时段间 NDVI 曲线形态最为相似的年份组合; 其次, 利用某站 NDVI 曲线形态最为相似的年份组合中在 1982~1996 年期间某年的植被物候季节初日的 NDVI 阈值, 在该站 1997~1999 年期间某对应年的 NDVI 曲线上, 对各季节的初日进行时间外推, 据此, 得到各样本站 1997~1999 年的植被物候季节初日。为了评价样本站植被物候季节时间外推的效果, 对各站 1996 年的四季初日进行外推检验, 外推结果与统计划分结果误差在 1 旬以内的达到 85%以上, 从而, 肯定了时间外推的有效性。

空间外推与时间外推的原理相似。根据 Chen 等<sup>[13]</sup>提出的空间外推方法, 对研究区域内 14277 个像元, 按照其 18 年 NDVI 时间序列的波动相似性进行逐年的聚类分析。由此划分出与每个物候样本站所在像元 NDVI 曲线形态相似性较大的区域, 作为该样本站植被物候季节的空间外推区。本文确定最终聚类的距离系数为 0.8, 这样, 所有年份的样本站外推像元数都达到了像元总数的 85%以上, 并且有 12 年的外推像元数大于像元总数的 90%。由于外推区基本上覆盖了整个研究区域, 所以, 可以保证区域植被物候季节空间分析的有效性。同时, 由于外推区面积的年际波动很小, 从而保证了区域植被物候季节时间序列分析的可比性。在确定各物候站逐年的外推区之后, 利用物候站各植被物候季节初日的 NDVI 阈值就可以估计出外推区内所有像元的植被物候季节初日, 即从外推区内每一像元的 NDVI 曲线上找出与物候站各植被物候季节初日的 NDVI 阈值最为接近的 NDVI 值, 将其对应时间轴上某旬的第 5 天规定为该像元相应的植被物候季节初日。本文将植被生长季节定义为从植被物候春季开始到冬季开始之间的天数, 因此, 在得到各像元植被物候春季初日和冬季初日后, 便可以计算出植被生长季节的长度。

3 结果与讨论

3.1 植被物候季节和生长季节的空间格局

多年平均植被物候春季初日呈现出在平原区从南向北、从西向东, 以及从平原向丘陵、山地逐渐推迟的空间格局 (图 2a)。南部平原和河谷地区于 2 月中、下旬进入春季 (蓝色和浅蓝色区域), 面积占整个外推区域的 19.2%。3 月上、中旬, 丘陵区、中北部平原区和西部的山地低缓处 (绿色和浅绿色区域) 开始进入春季, 面积占 59.3%。3 月下旬至 4 月上旬, 海拔 500 m 以上的山区和渤海湾沿岸 (黄色和红色区域) 才进入春季, 面积占 21.5%。

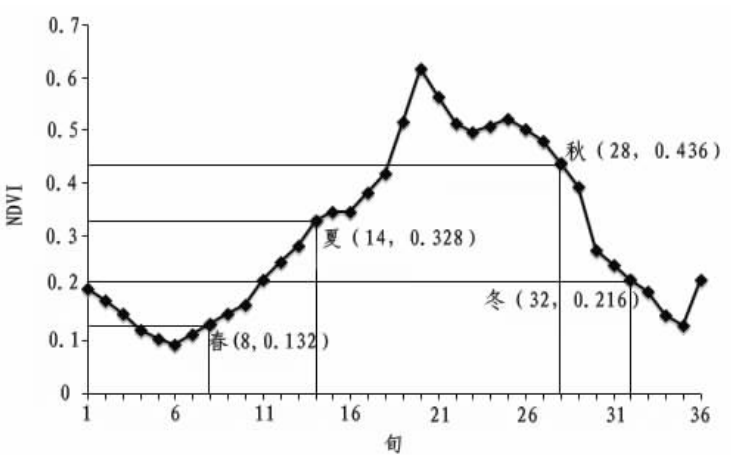


图 1 物候季节初日的 NDVI 阈值确定 (北京, 1982 年)  
Fig. 1 Determining threshold NDVI values at the beginning date of phenological seasons (Beijing, 1982)



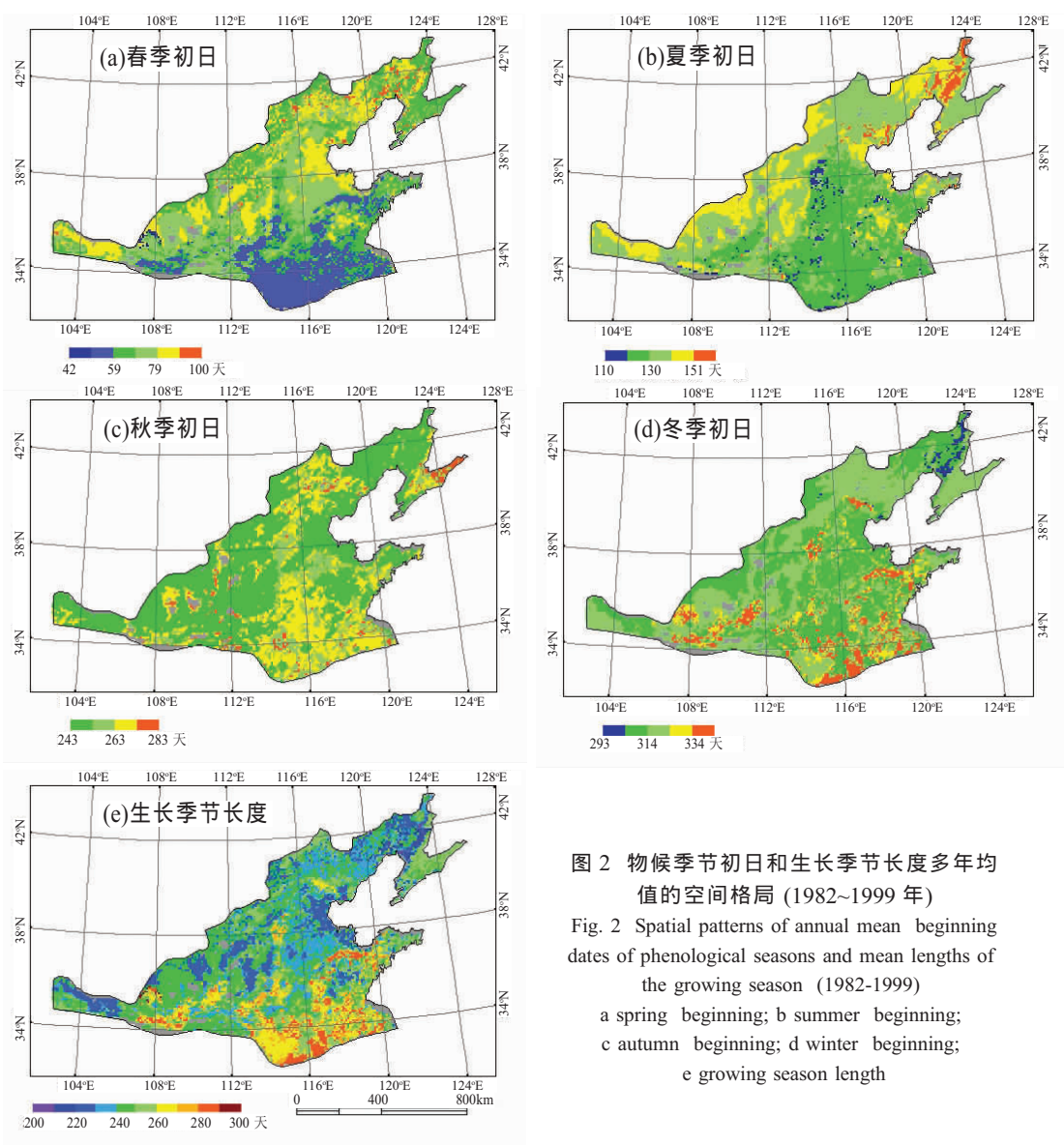


图 2 物候季节初日和生长季节长度多年均值的空间格局 (1982~1999 年)

Fig. 2 Spatial patterns of annual mean beginning dates of phenological seasons and mean lengths of the growing season (1982-1999)

a spring beginning; b summer beginning; c autumn beginning; d winter beginning; e growing season length

多年平均植被物候夏季初日的纬向和海陆向差异不如春季明显，且在空间上进展的速率较春季为快 (图 2b)。在 4 月下旬至 5 月上旬，中南部平原和河谷地区最早进入夏季 (蓝色和深绿色区域)，面积占整个外推区域的 31.2%。5 月中旬，夏季迅速推进到丘陵区 and 山地低缓处 (浅绿色区域)，面积占 46%。5 月下旬至 6 月上旬，山区和北部地区夏季开始 (黄色和红色区域)，面积占 22.8%。

由于秋季物候现象受多种环境因素的影响<sup>[24]</sup>，所以，空间分布格局比较复杂。整个区域进入植被物候秋季的过程非常迅速，历时不到 40 天，短于夏季和春季，大致呈现平原区从北向南，以及从高海拔向低海拔地区推进的特征 (图 2c)。在 9 月的上、中旬，山地、丘陵区和中北部平原开始进入秋季 (绿色和浅绿色区域)，占区域面积的 70%，南部平原局部地区较早进入秋季，可能与农作物的品种和耕作制有关。9 月下旬至 10 月上旬，平原中南部地区开始进入秋季 (黄色和红色区域)，占区域面积 30%。辽东、山东丘陵和冀北山地部分地区进入秋季较晚，可能与那里针叶树较多有关。

植被物候冬季初日在空间上的演进历时约 50 天,其空间格局比秋季规整,也大致呈现平原区从北向南,以及从高海拔向低海拔地区推进的特征。除东北部山地最早于 10 月下旬进入冬季以外(蓝色区域),北部和西部山区、以及平原区的大部分于 11 月上、中旬进入冬季(绿色和浅绿色区域),二者合计占区域面积的 84.6%。平原区南部、冀北山地和太行山地的山前平原、渭河谷地在 11 月下旬到 12 月上旬相继进入冬季(黄色和红色区域),占区域面积的 15.4%(图 2d)。

植被生长季节长度的空间格局大致呈平原区从北向南,以及从高海拔向低海拔地区逐渐变长的特征。长度在 200~240 天的区域占 31.1%,包括山地和中北部平原区(蓝色至紫色区域);长度在 241~260 天的区域占 49.3%,包括丘陵区、山地低缓处和中南部平原区(绿色和浅绿色区域);长度在 261~300 天的区域占 19.6%,主要分布于南部平原区和渭河谷地(黄色和红色区域)(图 2e)。

### 3.2 植被物候季节和生长季节的趋势变化

1982~1999 年植被物候季节的线性趋势变化表明,植被物候春季初日在华北平原地区呈明显的提前趋势( $-0.5\sim-2.5\text{d/a}$ ),且其中大部分地区的线性趋势达到了  $P < 0.05$  以上的显著性水平。平原区以外的其他大部分地区,植被物候春季初日存在不明显的提前趋势( $0\sim-0.5\text{d/a}$ ),北部、西部的部分山区和平原东南部的局部地区有推迟的趋势,但一般均不显著(图 3)。从整个外推区来看,70.7%的面积有提前的趋势,29.3%的面积有推迟的趋势。整个区域提前的趋势集中于  $0\sim-1.5\text{d/a}$  之间,占外推区面积的 69.2%;推迟的趋势集中于  $0\sim-0.5\text{d/a}$  之间,占外推区面积的 20.2%。

植被物候夏季初日在华北平原南部,以及冀北山地、辽西丘陵、太行—吕梁山地和渭河谷地以北的局部地区有明显的推迟趋势( $0.5\sim1.5\text{d/a}$ ),且部分地区的线性趋势显著性水平达到了  $P < 0.05$  以上;华北平原中、北部及广大低山丘陵区有不明显的提前趋势( $0\sim-0.5\text{d/a}$ ),其中,只有零星地区通过了  $P < 0.05$  的显著性检验(图 4)。从整个外推区来看,38.7%的面积有提前的趋势,61.3%的面积有推迟的趋势。整个区域提前的趋势集中于  $0\sim-0.5\text{d/a}$  之间,占外推区面积的 32.5%;推迟的趋势集中于  $0\sim-1\text{d/a}$  之间,占外推区面积的 57.5%。

植被物候秋季初日在华北平原北部、西部和南部有明显的推迟趋势( $0.5\sim1.5\text{d/a}$ ),且其中大部分地区的显著性水平达到了  $P < 0.05$  以上。其他地区以提前的趋势占优势( $0\sim-0.5\text{d/a}$ ),但只有零星的像元呈显著提前的趋势(图 5)。从整个外推区来看,25.9%的面积有提前的趋势,74.1%的面积有推迟的趋势。整个区域提前的趋势集中于  $0\sim-0.5\text{d/a}$  之间,占外推区面积的 21.9%;推迟的趋势集中于  $0\sim-1\text{d/a}$  之间,占外推区面积的 65.7%。

植被物候冬季初日在华北平原中部和南部有明显的推迟趋势( $0.5\sim1.5\text{d/a}$ ),范围大于秋季,但趋势达到  $P < 0.05$  以上显著性水平的区域却略小于秋季。北部和西部的山地、丘陵地区,以及山东和辽东半岛有较为明显的提前趋势( $0\sim-1\text{d/a}$ ),但通过显著性检验的地区零散且面积不大(图 6)。从整个外推区来看,39.6%的面积有提前的趋势,60.4%的面积有推迟的趋势。整个区域提前的趋势集中于  $0\sim-0.5\text{d/a}$  之间,占外推区面积的 30.2%;推迟的趋势集中于  $0\sim-1\text{d/a}$  之间,占外推区面积的 52.9%。

沙万英等<sup>[25]</sup>对 20 世纪 80 年代以来我国气候变暖的研究表明:华北地区春季增温;夏季其北部增温,南部和黄淮地区气温明显下降;秋季和冬季均增温明显。本文对于植被物候四季初日趋势变化的研究结果与华北地区这一气候变化的特点基本吻合,即春季升温,季节提前;夏季北部升温,季节提前,南部降温,季节推迟;秋、冬季升温,季节推迟。

植被生长季节长度的线性趋势分布显示,华北平原的大部分有明显的延长趋势( $1\sim3\text{d/a}$ ),且其中绝大部分地区的显著性水平达到了  $P < 0.05$  以上;北部和西部的山地、

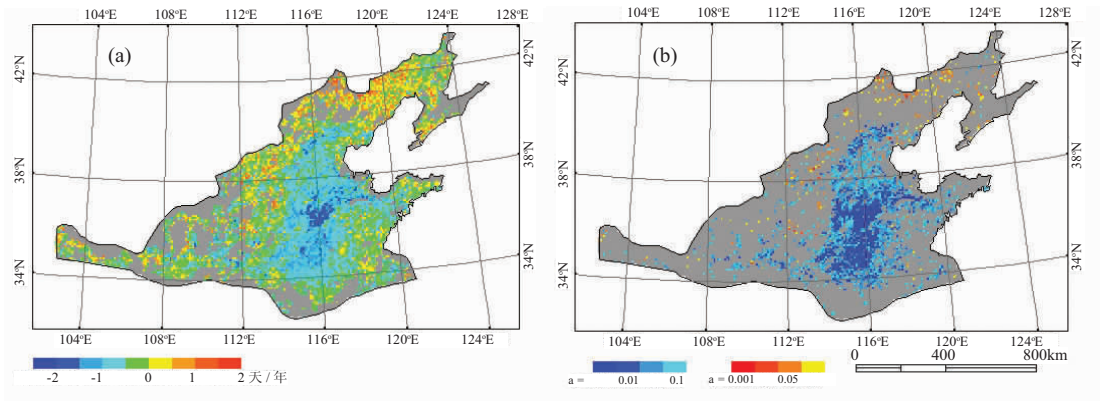


图 3 春季初日线性趋势 (a) 及其显著性水平 (b) 的空间格局  
Fig. 3 Spatial patterns of linear trends of spring beginning dates (a) and their significance levels (b)

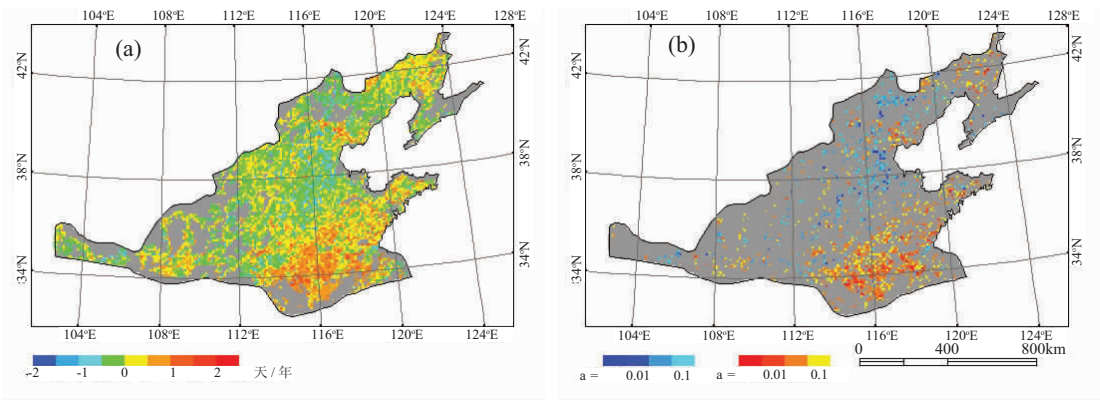


图 4 夏季初日线性趋势 (a) 及其显著性水平 (b) 的空间格局  
Fig. 4 Spatial patterns of linear trends of summer beginning dates (a) and their significance levels (b)

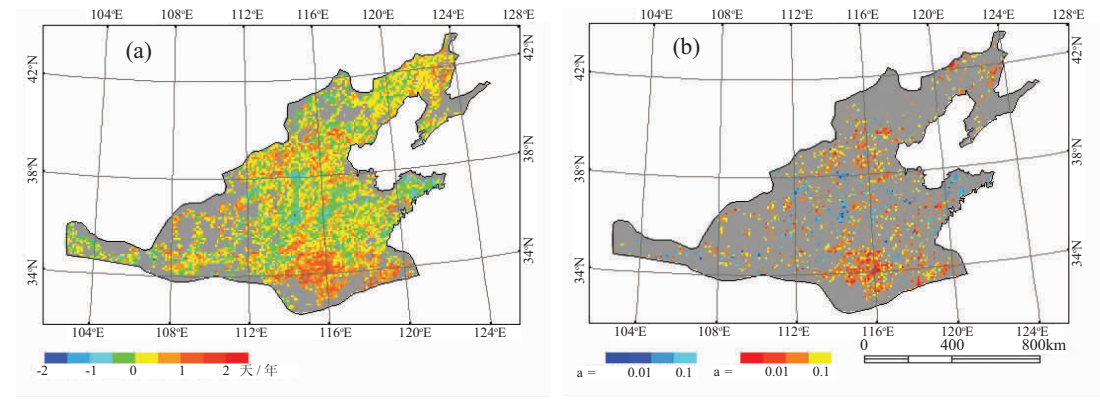


图 5 秋季初日线性趋势 (a) 及其显著性水平 (b) 的空间格局

Fig. 5 Spatial patterns of linear trends of autumn beginning dates (a) and their significance levels (b)

丘陵区有较为明显的缩短趋势 (0~2d/a)，但只有很少的地区通过了  $P < 0.05$  的显著性检验 (图 7)。从整个外推区来看，32.9%的面积生长季节缩短，67.1%的面积生长季节延长。整个区域生长季节缩短的趋势集中于 0~-1d/a 之间，占外推区面积的 28.4%；延长的趋势集中于 0~2d/a 之间，占外推区面积的 60.7%。

从上述对于植被物候季节初日和生长季节长度线性趋势变化的分析可知，在 1982~1999 年的 18 年中，我国东部暖温带落叶阔叶林区植被物候春季的开始日期提前。



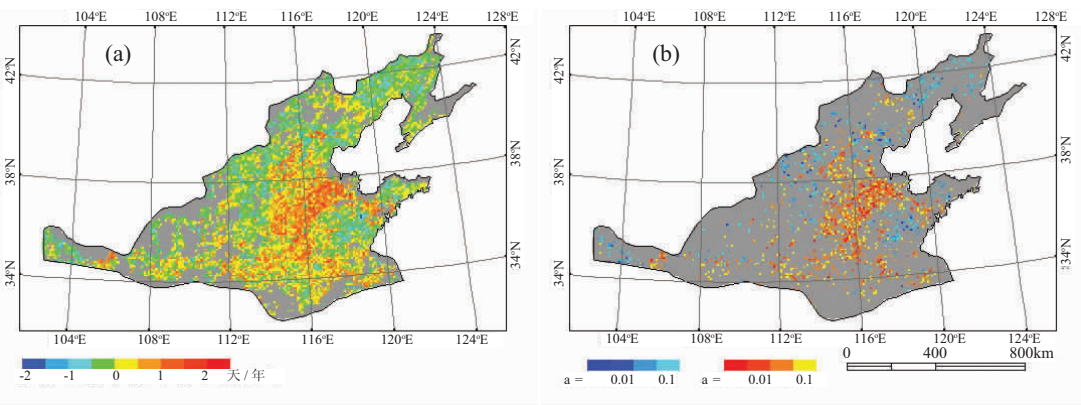


图 6 冬季初日线性趋势 (a) 及其显著性水平 (b) 的空间格局

Fig. 6 Spatial patterns of linear trends of winter beginning dates (a) and their significance levels (b)

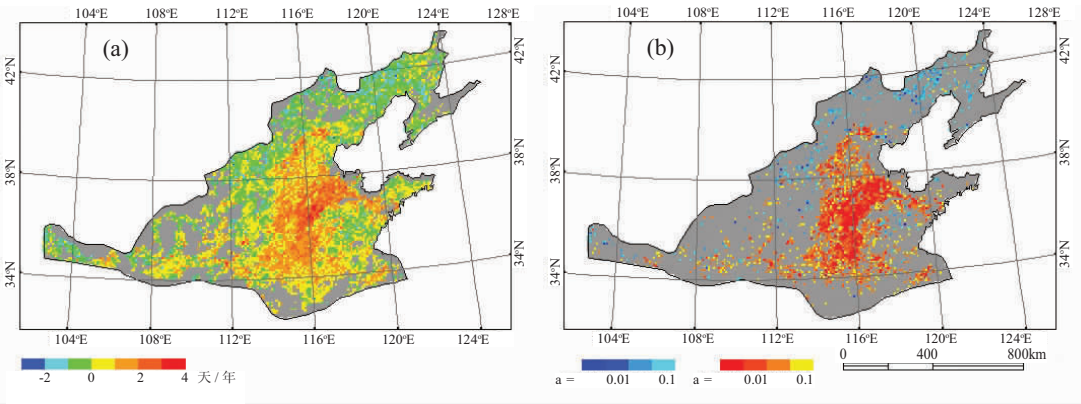


图 7 生长季节长度线性趋势 (a) 及其显著性水平 (b) 的空间格局

Fig. 7 Spatial patterns of linear trends of growing season lengths (a) and their significance levels (b)

冬季的开始日期推迟，使植被生长季节延长，这一结果与欧洲单种植物物候生长季节<sup>[4, 26]</sup>、欧亚大陆<sup>[27]</sup>和我国温带地区<sup>[9]</sup>遥感植被生长季节的研究结果基本一致，但华北平原植被生长季节初、终日期和长度的趋势值则明显大于上述其他区域，表明该地区植物物候对于气候变暖的响应更加敏感。

4 结 论

利用 5 个地面物候观测站 1982~1996 年间的数十种树木物候观测数据和物候累积频率拟合法，划分各站逐年的植被物候季节，并确定各季节初日的遥感 NDVI 阈值。根据每个物候站不同年份 NDVI 曲线的年型聚类分析，找出最相似的年份组合，进而估计各站 1997~1999 年的植被物候季节初日，实现植被物候季节的时间外推。在此基础上，根据各像元逐年 NDVI 曲线的空间聚类分析，确定每个物候站的空间外推区，分别计算出各外推像元 1982~1999 年间逐年的植被物候季节初日和生长季节长度，并对其进行了时空变化的分析。研究结果表明：

(1) 多年平均的植被物候季节初日和生长季节长度呈现出主要随纬度和海拔高度变化的空间格局。春季初日的空间演进从 2 月中旬开始到 4 月上旬结束，历时近 60 天；夏季初日的空间演进从 4 月下旬到 6 月上旬，历时约 50 天；秋季初日的空间演进最为迅速，



从 9 月上旬到 10 月上旬, 历时仅 40 天; 冬季初日的空间演进从 10 月下旬到 12 月上旬, 历时约 50 天; 而生长季节长度的空间演进则从 200 天到 300 天, 相差约 100 天。

(2) 植被物候季节初日和生长季节长度时间序列的线性趋势分析显示, 春季初日以提前为主, 且以华北平原地区提前的趋势最为显著, 平均速率为  $-0.5 \sim -2.5 \text{d/a}$ , 其中大部分地区的线性趋势达到了  $P < 0.05$  以上的显著性水平; 夏季初日以推迟为主, 在华北平原南部有明显的推迟趋势, 平均速率为  $0.5 \sim 1.5 \text{d/a}$ , 部分地区的线性趋势显著性水平达到了  $P < 0.05$  以上; 秋季初日以推迟为主, 且范围最大, 在华北平原北部、西部和南部均有明显的推迟趋势, 平均速率为  $0.5 \sim 1.5 \text{d/a}$ , 其中大部分地区的显著性水平达到了  $P < 0.05$  以上; 冬季初日也以推迟为主, 在华北平原中部和南部有明显的推迟趋势, 平均速率为  $0.5 \sim 1.5 \text{d/a}$ , 趋势达到  $P < 0.05$  以上显著性水平的区域略小于秋季; 植被生长季节长度以延长为主, 华北平原地区的延长趋势最为显著, 平均速率为  $1 \sim 3 \text{d/a}$ , 且其中绝大部分地区的显著性水平达到了  $P < 0.05$  以上。

(3) 本文揭示的我国东部暖温带植被物候季节初日的趋势变化与华北地区各季节气温的趋势变化基本吻合, 植被生长季节的趋势变化特征与欧洲单种植物物候生长季节, 以及欧亚大陆和我国温带遥感植被生长季节的趋势变化基本一致, 但变化速率明显大于后者。

致谢: 感谢中国科学院地理科学与资源研究所提供部分植物物候数据。

## 参考文献 (References)

- [1] VanVliet A J H, Schwartz M D. Editorial: Phenology and Climate: The timing of life cycle events as indicators of climatic variability and change. *International Journal of Climatology*, 2002, 22: 1713-1714.
- [2] Bradley N L, Leopold A C, Ross J et al. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. *Proceedings of National Academy of Sciences, USA. Ecology*, 1999, 96: 9701-9704.
- [3] Beaubien E G, Freeland H J. Spring phenology trends in Alberta, Canada: Links to ocean temperature. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44: 53-59.
- [4] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397: 659.
- [5] Fitter A H, Fitter R S R. Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, 2002, 296: 1689-1691.
- [6] Menzel A. Phenology: Its importance to the global change community. *Climatic Change*, 2002, 54: 379-385.
- [7] Zheng Jingyun, Ge Quansheng, Hao Zhixin. Climate change impacts on plant phenological changes in China in recent 40 years. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(20): 1582-1587. [郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候变暖对我国近 40 年植物物候变化的影响. *科学通报*, 2002, 47(20): 1582-1587.]
- [8] Piao Shilong, Fang Jingyun. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 119-125. [朴世龙, 方精云. 1982~1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异. *地理学报*, 2003, 58(1): 119-125.]
- [9] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 2006, 12: 672-685.
- [10] Chen X Q, Pan W F. Relationship among phenological growing season, time-integrated Normalized Difference Vegetation Index and climate forcing in the temperate region of eastern China. *International Journal of Climatology*, 2002, 22: 1781-1792.
- [11] Chen X Q, Tan Z J, Schwartz M D et al. Determining the growing season of land vegetation on the basis of plant phenology and satellite data in Northern China. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44: 97-101.
- [12] Chen X Q, Xu C X, Tan Z J. An analysis of relationships among plant community phenology and seasonal metrics of Normalized Difference Vegetation Index in the northern part of the monsoon region of China. *International Journal of Biometeorology*, 2001, 45: 170-177.
- [13] Chen X Q, Hu B, Yu R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1118-1130.
- [14] Editorial Board of the Vegetation Atlas of China, Chinese Academy of Sciences. *Vegetation Atlas of China 1: 1,000,000*. Beijing: Science Press, 2001. [中国科学院中国植被图编辑委员会. 1:1000000 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001.]

- [15] Editorial Board of the Vegetation of China. Vegetation of China. Beijing: Science Press, 1980. 788-799. [中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980. 788-799.]
- [16] Pfau R. Varianz- und korrelationsanalytische Untersuchungen an phäenologischen Phasen in Naturraum 06 (unterbayerisches Hügelland). Meteorologische Rundschau, 1964, 17: 113-122.
- [17] Chu Coching. Phenology and agricultural production. New Construction, 1964, (188-189): 142-149. [竺可桢. 物候学与农业生产. 新建设, 1964, (188-189): 142-149.]
- [18] Chu Coching, Wan Minwei. Phenology. Beijing: Science Press, 1973. 1-5. [竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 北京: 科学出版社, 1973. 1-5.]
- [19] Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Chinese Yearbook of Animal and Plant Phenological Observation, No.8. Beijing: Geology Press, 1988. [中国科学院地理研究所. 中国动植物物候观测年报第 8 号. 北京: 地质出版社, 1988.]
- [20] Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Chinese Yearbook of Animal and Plant Phenological Observation, No.9. Beijing: Geology Press, 1989. [中国科学院地理研究所. 中国动植物物候观测年报第 9 号. 北京: 地质出版社, 1989.]
- [21] Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Chinese Yearbook of Animal and Plant Phenological Observation, No.10. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1989. [中国科学院地理研究所. 中国动植物物候观测年报第 10 号. 北京: 测绘出版社, 1989.]
- [22] Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Chinese Yearbook of Animal and Plant Phenological Observation, No.11. Beijing: China Science and Technology Press, 1992. [中国科学院地理研究所. 中国动植物物候观测年报第 11 号. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.]
- [23] Chen Xiaoqiu, Cao Zhiping. Frequency distribution pattern of plant phenophases and its application to season determination. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(1): 21-27. [陈效逖, 曹志萍. 植物物候期的频率分布型及其在季节划分中的应用. 地理科学, 1999, 19(1): 21-27.]
- [24] Chen X Q. Untersuchung zur zeitlich-raeumlichen Aehnlichkeit von phäenologischen und klimatologischen Parametern in Westdeutschland und zum Einfluss geoökologischer Faktoren auf die phäenologische Entwicklung im Gebiet des Taunus. Offenbach: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 1994, 24-25.
- [25] Sha Wanying, Shao Xuemei, Huang Mei. Climate warming and its impact on natural regional boundaries in China in the 1980s. Science in China (Series D), 2002, 32(4): 317-326. [沙万英, 邵雪梅, 黄玫. 20 世纪 80 年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界限的影响. 中国科学(D), 2002, 32(4): 317-326.]
- [26] Chmielewski F M, Roetzer T. Response of tree phenology to climate change across Europe. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108: 101-112.
- [27] Zhou L, Tucker C J, Kaufmann R K et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2001, 106 (D17): 20069-20083.

## Spatial and Temporal Variations of the Vegetation Growing Season in Warm-temperate Eastern China during 1982 to 1999

CHEN Xiaoqiu, YU Rong

(Department of Geography, College of Environmental Sciences, MOE Laboratory for Earth Surface Processes, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Phenological observation data of plant communities from 1982 to 1996 at 5 sites and a method for phenological cumulative frequency modeling were used to determine the beginning dates of local phenological seasons and their corresponding threshold values of normalized difference vegetation index (NDVI) in each year. Then, a year-type cluster analysis of NDVI profiles at each phenological station during 1982 to 1999 and a spatial cluster analysis of NDVI profiles for all of the pixels within the study area year by year were employed to fulfill a spatial-temporal extrapolation of vegetation phenological seasons. Consequently, we obtained spatial-temporal patterns of the beginning date of vegetation

phenological seasons and the length of the vegetation growing season in the deciduous broad-leaved forest area of warm-temperate eastern China from 1982 to 1999. The results show that (1) the annual mean beginning dates of vegetation phenological seasons and the mean lengths of the vegetation growing season indicate changes of a spatial pattern mainly following latitude and altitude; (2) the beginning dates of the phenological spring dominate a significantly advanced trend over the entire area during 1982 to 1999, especially in North China Plain, whereas the beginning dates of the phenological summer, autumn and winter dominate a significantly delayed trend, also mainly in North China Plain, which causes a significant lengthening of the vegetation growing season in North China Plain; (3) linear trends of the beginning dates of vegetation phenological seasons are consistent with linear trends of seasonal air temperatures in North China; (4) the vegetation growing season lengthening revealed by the current study is consistent with the phenological growing season lengthening of the individual tree species in Europe, and the satellite-derived growing season lengthening in Eurasia and temperate China.

**Key words:** phenological season; vegetation growing season; phenological cumulative frequency modeling; NDVI; warm-temperate eastern China