

利用遥感监测长江三角洲森林植被物候对气候变化的响应

金佳鑫^①, 江洪^{①②}, 张秀英^①, 王跃启^①

(^① 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093;

^② 浙江省国际空间生态与生态系统生态研究中心, 浙江农林大学, 杭州 311300)

摘要: 植物的物候与气候等环境因素息息相关, 是指示气候与自然环境变化对生态影响的重要指标。目前, 气候变暖日益为人所关注, 使用遥感技术研究植物物候与气候变化之间的关系具有重要的意义。监测人口密度高和城市经济发达地区的植物物候对气候变暖的响应, 可以揭示区域热环境变化及其产生的生态效应。本研究选取长江三角洲地区为研究区域, 使用 SPOT 卫星 VGT 传感器的长时间 NDVI 数据序列, 对经济发达区域森林植被的 NDVI 序列进行非对称性高斯函数拟合法平滑处理, 并提取与研究其物候特征, 发现 ①NDVI 与气温具有较强相关性, 随气候变暖, 森林植被 NDVI 年均值有增加趋势; ②森林植被生长活跃期起始日期提前, 终止日期延后, 时长有明显的延长趋势, 生长活跃期内 NDVI 有所增加; ③森林植被 NDVI 极大值与极小值出现日期均明显提前, NDVI 极大值有增大趋势, 而极小值呈下降趋势, 年内极差增加, NDVI 增长期缩短, 衰落期延长; ④森林植被在春、夏两季 NDVI 均值有所增长, 秋季无明显变化, 冬季略有降低。

关键词: 物候; 气候变化; 森林植被; 长江三角洲; NDVI

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.02.014

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)114-0079-07

Monitoring the Respond of Forest Vegetation Phenology to the Climate Changing in Yangtze Delta Region Using Remote Sensing

JIN Jiaxin^①, JIANG Hong^{①②}, ZHANG Xiuying^①, WANG Yueqi^①

(^① International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093;

^② International Center of Spatial Ecology and Ecosystem Ecology, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300)

Abstract: The vegetation phenological changes are closely linked with the ecological process and agriculture, forestry and environmental changes. Recently, the phenological responding to climate changing has been becoming a new hot research point. These studies showed that vegetation index (VI) could indicate the characters of each phenophase, and most of them were conducted by remote sensing technique. To reveal the effects of global warming on the biological phenomena in the high density populated and economically developed regions, inter annual and seasonal variability of NDVI for phenological characteristics of forest in the Yangtze delta region and its correlations with climatic variables are analyzed for the time period 1998-2008, using a dataset of 10 days averaged SPOT/VGT NDVI and local climatic data. A smoothing algorithm based on an asymmetric Gaussian function was firstly applied to the NDVI dataset to minimize the effects of anomalous values caused by atmospheric haze and cloud contamination. The result showed that (1) either in multi year average or in each year, the variations of seasonal phenolo-

收稿日期: 2010-01-29

基金项目: 科技部 973 项目 (2005CB422208)、国家自然科学基金项目 (40671132)、科技部数据共享平台建设项目 (2005DKA32306 和 2006DKA32308)、科技部国际合作项目 (20073819)、科技部重大科技基础项目 (2007FY110300)、浙江省重大科技专项项目 (2008C13G2100010)。

作者简介: 金佳鑫 (1986~), 男, 硕士, 研究方向为资源环境遥感。

E-mail: hongjiang.china@gmail.com

gy and those of temperatures were synchronous, and the latter stably drove the former. The NDVI of forest has an increasing trend with the global warming from 1998 to 2008. (2) Forest had an earlier start of active growing season, later end of active growing season, longer active growing season and larger NDVI in the active growing season, with the time going. (3) For forest, an advancing of the time of maximum NDVI and a delaying of time of minimum NDVI are obvious. The maximum NDVI value had an increasing trend while the minimum NDVI value decreased, the difference of maximal and minimal NDVI in a year became larger, and the NDVI of forest had a shorter growing season but a longer senescence season. (4) The NDVI value of forest increased both in spring and summer, decreased in winter, and there is no significant change in the autumn.

Key words: phenology; climate change; forest vegetation; Yangtze river delta region; NDVI

1 引言

陆地植被作为联结土壤、水体和大气之间的物质和能量交换的关键环节,其物候现象是环境条件季节和年际变化最直观、最敏感的生物指示器。植被变化与气候变化是相互作用的,水热条件是决定植被空间分布及其变化的主要非生物因素^[1]。很多学者应用 NOAA/AVHRR、可见光—近红外航空影像(the Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS)等数据分析生长季始末时间及长度(Benoit Duchemin 等^[2]; Birky^[3])。研究表明,全球变暖导致植物春季物候期提前、秋季物候期推迟,生长季延长^[4]。Thomas R 9 tzer 等^[5]应用地面观测数据绘制欧洲物候图,并发现物候现象和地理位置相关性较高。Liming Zhou 等^[6]分析了欧亚大陆、北美大陆 1981 年—1999 年之间生长季 NDVI 指数以及活动生长季的变化。Myneni 等^[7]利用 NDVI 对北半球高纬度地区 1981 年—1991 年植被生长进行研究,认为温度的增加使植被生长季延长。温刚^[8]利用 AVHRR 植被指数数据集分析中国东部季风区的物候特征,进行了区域差异的研究。齐晔^[9]基于 AVHRR 数据研究了北半球高纬度地区气候变化对植被的影响途径和机制,结果表明在北半球高纬度地区,NDVI 的年最大值以及该值出现的时间与温度之间存在着密切的相关性。陈效速等^[10]利用植物物候和遥感资料对中国北方生长季节进行了研究,认为 NDVI 作为指示地面生长季节开始和结束的遥感指标具有比较稳定的特点。

由前面的研究可以看出,应用遥感监测植物 NDVI 以分析物候变化,并结合地理条件,在农业、植气候因子相应等方面对物候进行了逐步深入的研究,并取得了一定的成果,其中以农作物监测、整体植被对气候因子的物候响应居多。但由于农作物受人为影响较大,多类型植被对气象因子响应有所差异等原因,其 NDVI 均值变化对气候变化的物候反映并不具有较高的自然性、均一性和稳定性。本研

究选取前人所研究物候反映气候时序变化相对较少、社会经济较为发达的长江三角洲地区为研究区域,以受人类影响相对较小、植被类别较为均一、对自然因子变化响应较为一致的森林植被作为研究对象,使用长时序、高分辨率的 SOPT 卫星的 NDVI 数据,分析长江三角洲地区森林的物候变化对气候变化的响应,为农业林业部门对森林管理、监察、病虫害防治、开发利用等与物候息息相关的工作提供信息支持。

2 研究区域概况

长江三角洲地区(29.04°—33.41°N, 118.33°—122.95°E)包括上海市、浙江省和江苏省,面积约 10.1 万 km²,人口约 7600 万。该区属亚热带湿润季风气候,年均气温 15℃~17℃,年均降水量 1000mm~1800mm^[11]。研究区内森林植被主要有落叶阔叶林、落叶常绿阔叶混交林和常绿阔叶林,其中以森林常绿林为表象植被^[12-17]。自 20 世纪 80 年代以来,长三角地区的年平均气温也在持续升高,特别是 20 世纪 80 年代中期开始,变暖趋势越加明显,20 世纪 90 年代年平均气温较 60 年代大多升温在 0.5℃以上,上海和宁波达 1.2℃和 1.0℃^[18]。

3 研究方法

3.1 数据来源

本研究所使用的 1998 年—2008 年 NDVI 时间序列数据源自 SPOT 卫星的 VGT 传感器,空间分辨率为 1km×1km,时间分辨率为 10 天。VGT 传感器专门用于区域和全球尺度植被覆盖动态的观测研究,为大、中尺度的环境监测提供了一种新型的、高质量的遥感数据源^[19]。由于发布的 VGT 数据具有高精度的几何校正效果,特别适用于时间按序列分析^[20]。数据来自国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)。其 NDVI 真实值需由图像灰度值(DN)计算得到,其公式为 NDVI=DN×0.004-0.1。

本研究使用的 2000 年全国土地利用数据来自中国资源环境数据库 1km 栅格数据集。该数据是由覆盖全国的分辨率为 30m 的 Landsat TM/ETM 数据,通过采用人工交互式图像解译制作的 1:10 万土地利用图栅格化后得到的^[21]。森林的土地利用属性较为稳定,变更程度低,因此可利用土地利用图的森林数据层提取出长江三角洲地区森林区域范围内 1998 年至 2008 年的 NDVI 数据进行分析。另外,本研究所使用的气温和降水数据,是由长江三角洲区域内 38 个气象站点实测气温和降水数据经过 Anuspline 插值得到,分辨率为 1km。

3.2 NDVI 数据平滑

传感器在获取地面信息时,云和大气等自然因素所产生的信号噪声对数据质量有很大影响,使得 NDVI 时序数据呈锯齿状的不规则波动变化,曲线季节变化趋势不明显,不适合直接用于各种趋势分析和物候信息提取^[22]。因此,对 NDVI 时间序列数据做进一步去除噪声处理,重建平滑的 NDVI 时序曲线,以便更好地描述林地季节变化过程。

本文使用非对称性高斯函数拟合方法^[23~24]对长时序 NDVI 曲线进行平滑处理,使得重建的 NDVI 时序曲线可以较好地描述 NDVI 数据中复杂的和微小的变化。根据 NDVI 时序数据,得到数据的谷值和峰值;对位于谷值和峰值之间的 NDVI 时序数据进行两次局部拟合,使得最优化拟合函数可以很好地描述 NDVI 数据的上包络曲线,局部拟合公式为:

$$f(t) = f(tc_1, c_2, a_1, \dots, a_5) \\ = c_1 + c_2 g(tc_1, \dots, a_5) \quad (1)$$

$$g(tc_1, \dots, a_5) = \begin{cases} \exp[-(\frac{t-a_2}{a_2})^2] & t > a_2 \\ \exp[-(\frac{a_2-t}{a_4})^2] & t < a_2 \end{cases} \quad (2)$$

公式(1)和(2)中, c_1 和 c_2 为定义基线和振幅的线性参数, $g(t; a_1, \dots, a_5)$ 是高斯函数,其中, a_1 是对应时间变量 t 的峰值或谷值的位置参数,参数 a_2 和 a_3 决定函数曲线右半部分的宽度和平度,相应地参数 a_4 和 a_5 决定函数曲线左半部分的宽度和平度。这些参数可以通过优化函数计算得到。

利用局部拟合函数构建整体拟合函数,将各局部拟合函数的特征加以综合,较好地描述整个植被生长期的 NDVI 变化过程。整体拟合函数为:

$$F(t) = \begin{cases} \alpha(t)f_L(t) + [1-\alpha(t)]f_C(t) & t_L < 0 \\ \beta(t)f_C(t) + [1-\beta(t)]f_R(t) & t_C < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $[t_L, t_R]$ 区间是 NDVI 整个变化区间; f_L

$(t), f_C(t), f_R(t)$ 分别代表 $[t_L, t_R]$ 区间内左边谷值、中间峰值及右边谷值所对应的局部函数; $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 为位于 $[0, 1]$ 之间的剪切系数。NDVI 数据序列平滑结果如图 1 所示。

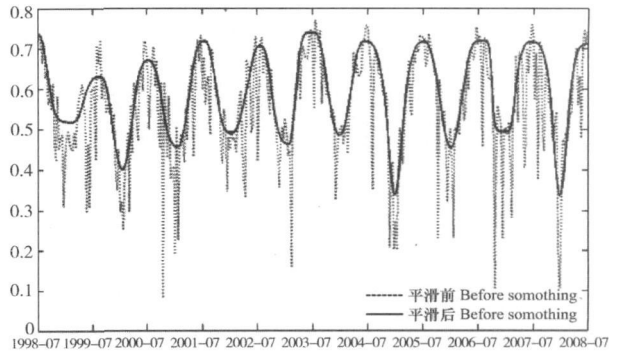


图 1 NDVI 时间序列数据平滑处理前后比较

3.3 植被物候指标的计算

(1) 生长活跃期与平稳期

本研究区内森林以常绿植被为主,并不存在明显的叶片长落的生长期与休眠期。因此,根据国内研究人员基于遥感数据对我国植被物候,特别是东部季风区植被物候季节变化研究的成果^[8, 11, 25~27],我们将本研究中植被生长期分为生长活跃期与平稳期,定义如下:

NDVI 时间曲线的一次导数表明了物候的变化速度^[26],对平滑后的 NDVI 时序数据曲线进行一阶求导,在各年中,选取一阶导数最大值的相应日期为生长活跃期起始日期,以一阶导数最小值的相应日期为生长活跃的终止点;同一年中,活跃期起始点与终止点之间的时间即为生长活跃期,其余时间为生长平稳期。

(2) NDVI 年内极差

NDVI 年内极差指年内 NDVI 的极大值与极小值之差,也称 NDVI 振幅,它可以反映植被的生长活动强弱、初级生产力(NPP)、碳交换能力的强弱^[11]。

(3) NDVI 变差系数

通过变差系数^[28]研究不同时间尺度上 NDVI 数据序列变化的程度,变差系数用式(4)计算:

$$c = (\text{std}(y) / \text{mean}(y)) \quad (4)$$

式中: c 表示 NDVI 数据序列的变差系数, $\text{std}(y)$ 表示 NDVI 数据序列的标准差, $\text{mean}(y)$ 表示 NDVI 数据序列的平均值。变差系数数值大,说明该 NDVI 数据序列波动较明显,变化强烈;变差系数数值小,则说明 NDVI 数据序列数值相差不大,变化稳定。

(5) 距平值分析

计算NDVI数据序列的统计参数-距平值,分析各研究对象数据序列内NDVI数值变化的波动程度与稳定性,并根据其变化程度预测NDVI的发展趋势。

4 结果与分析

本研究所使用的NDVI数据序列为1998年4月至2008年7月,气温与降水数据序列为1998年至2006年,为保证数据时间匹配,各分析中选用的数据时间范围会有所差异。

4.1 NDVI与气温年际比较及相关性分析

在研究区域内,将1999年至2006年“准10天”NDVI数据序列、气温数据、降水数据做逐月平均,得到森林NDVI与气象数据多年月均值,如表1所示。长三角地区森林NDVI值在1月份为全年最小值3.9636,随气温回升,降水量增加,NDVI值逐渐增加,在7月份时达到最大值6.7085,后随气温下降逐步回落,降水量逐步减少,在12月份回到与年初水平基本一致,具有明显的物候特征。无论在多年平均意义上还是逐年来看,中国东部季风区植被季节性生长状况对温度的响应在各个生长阶段都是近于同步的,温度对于植被生长季节变化的驱动关系非常稳定;在多数时段,中国东部植被生长与降水的季节变化存在显著相关关系,植被生长滞后于降水变化,滞后时间为20~30天^[26-27]。

对NDVI和气温进行相关性分析,得到两者相关系数,NDVI与气温相关系数分别为0.994;以降水为控制变量,对NDVI和气温做偏相关分析,得到二者间相关系数高达0.978,可见气温与NDVI相关性极强,是长三角地区NDVI变化的主要驱动因素。

表1 NDVI、气温、降水多年月平均值关系

月份	NDVI	气温(°C)	降水(cm)
1	0.3964	4.1215	2.2404
2	0.4101	6.1323	2.3956
3	0.4557	10.0814	3.1478
4	0.5346	16.1676	3.9492
5	0.5978	20.2679	4.6523
6	0.5857	24.0467	8.2562
7	0.6709	27.4267	5.8197
8	0.6505	26.6660	5.9919
9	0.6525	23.1682	3.0765
10	0.6082	18.3191	1.8082
11	0.5406	12.4722	1.9246
12	0.4952	6.3822	1.4528

利用NDVI“准10天”数据与气温数据,计算1999年至2006年的NDVI与气温年均值,其中2003年NDVI均值最高,2000年最低,NDVI年均值波动范围为0.5084~0.5947,变差系数为0.0526,表明年NDVI值变化较大;1999年气温最低,2006年最高,气温波动范围为15.82°C~16.70°C,变差系数为0.0182,波动并不明显。对NDVI与气温年均值序列进行距平值分析,如图2所示,发现NDVI年均值有增长趋势,增长趋势线斜率为0.006,而气温增长相对明显,线性增长趋势线斜率为0.076。

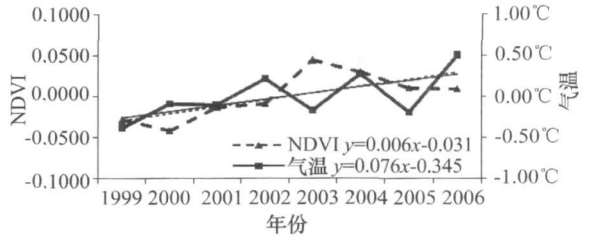


图2 NDVI与气温距平值年际变化及线性趋势

4.2 生长活跃期与平稳期

由于1998年和2008年NDVI数据序列并不是全年数据,本研究中仅使用1999年至2007年9个完整年份NDVI数据序列进行分析。对NDVI数据序列进行一阶求导,得到各年中一阶导数最值并根据各点时间轴坐标换算得到该点在相应年中对应的“准10天”的序列数。如图3所示,在1999年至2007年9个完整的生长活跃期内,起始点日期有较大幅度提前,线性趋势线斜率达到-0.583,生长活跃期起始日期提前的趋势较为明显;终止点日期有所延后,但变化幅度相对较小,线性趋势线斜率为0.25。由于生长活跃期起始日期提前而终止日期延后,造成长三角地区森林生长活跃期延长,线性趋势线斜率达到0.833,延长趋势明显。这一结论与葛全胜^[29]结论相一致。由于植被NDVI与气温具有高度相关性,因此生长期起始日期提前、生长期延长都是植被对气候变暖明显响应,这也成为区域气候变暖化的一项有力证据。

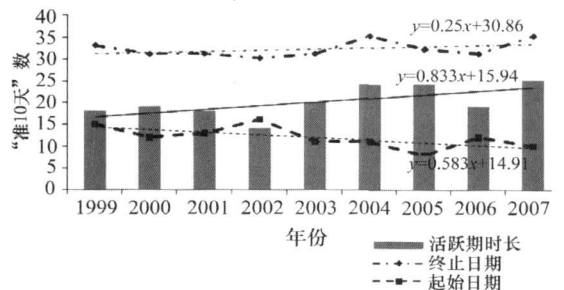


图3 生长活跃期起始、终止日期和活跃期时长年际变化及线性趋势

根据森林生长活跃期时长,计算其在生长活跃期与平稳期内 NDVI 均值,如图 4 所示。在生长活跃期内森林 NDVI 均值波动范围是 0.5532 ~ 0.6701,其 NDVI 数值序列变差系数为 0.0556,变化波动较小,趋势较为稳定;对生长活跃期 NDVI 序列做距平分析,发现 NDVI 均值有所增长,增长趋势线斜率为 0.006。生长平稳期 NDVI 均值波动范围是 0.4014~ 0.4892,其数值序列变差系数为 0.0678,波动并不明显,变化较为稳定;对其 NDVI 序列做距平分析,发现其均值有所降低,下降趋势线斜率仅为 0.001,趋势并不明显。

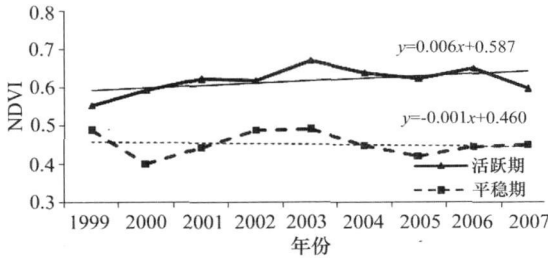


图 4 生长活跃期与平稳期 NDVI 均值年际变化及线性趋势

4.3 NDVI 年内极差

在经过平滑处理后的 NDVI 曲线中提取 s 各年中 NDVI 的极大值与极小值,得到 NDVI 极大值与极小值数据序列;计算极大值与极小值之差,得到极差数据序列;计算各序列 NDVI 值的变差系数,分析各序列变化程度强弱;依据 NDVI 极大值与极小值的时间序列坐标,得到各极值点在相应年内出现时相对应的“准 10 天”个数,并分别计算 NDVI 增长期与衰落期持续的“准 10 天”数目。

如图 5 所示,1999 年至 2007 年间,NDVI 极大值略有增加,增长趋势线斜率为 0.008,NDVI 波动范围是 0.6301~ 0.7387,变差系数为 0.0470,增长率相对稳定;NDVI 极小值略有下降,降低趋势线斜率为- 0.005,NDVI 波动范围是 0.3364~ 0.4948,变差系数为 0.1434,降低波动性较为明显;年内 NDVI 极差上升趋势较为明显,增长趋势线斜率为 0.014,NDVI 波动范围是 0.2130~ 0.3800,变差系数达到 0.2473,增长波动性显著。

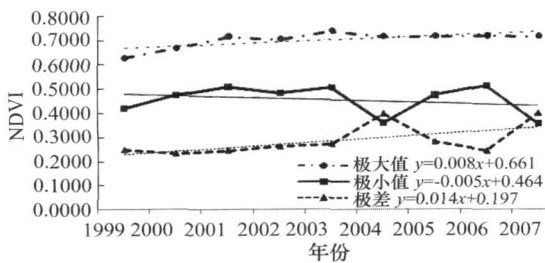


图 5 NDVI 极值和极差年际变化及线性趋势

如图 6 所示,NDVI 极大值点出现的“准 10 天”日期数明显减小,下降线性趋势线斜率达到- 0.45,NDVI 极大值出现日期显著提前;NDVI 极小值出现的“准 10 天”日期数同样有所减小,下降线性趋势线斜率为- 0.333,其出现日期同样提前,但提前幅度小于极大值。

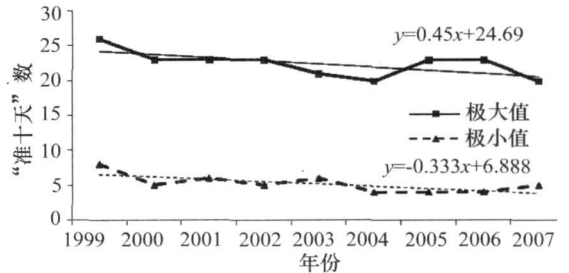


图 6 出现 NDVI 极值的“准十天”日期年际变化及线性趋势

由于 NDVI 极大值与极小值出现日期提前幅度不同,造成 NDVI 曲线上升阶段与下降阶段持续的日期时长及时长变化率有所差异:如图 7 所示,NDVI 上升阶段日期有逐渐变短的趋势,其间“准 10 天”数目有所减少,其减少的线性趋势线斜率为- 0.116,而 NDVI 下降阶段的时长有延长的趋势,其间“准 10 天”数目略有增加,其增加的线性趋势线斜率为 0.2。

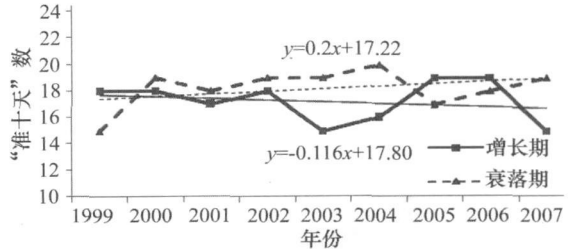


图 7 NDVI 增长期与衰落期持续时间长度年际变化及线性趋势

上述数据表明,随着长三角地区气候变暖,区域内森林生长活动有所增强,NDVI 值极差的增大,森林 NPP 有所增强,NDVI 极值出现日期均有所提前,植物 NDVI 增长期缩短,衰落期延长,物候变化明显。

4.4 季相分析

根据长江三角洲地区的气候特点,将 3、4、5 月划分为春季,6、7、8 月为夏季,9、10、11 为秋季,12 月、次年 1、2 月为冬季。由“准 10 天”NDVI 数据计算 1998 年至 2008 年各季节 NDVI 均值,得到 NDVI 季相统计结果:如图 8 所示,长江三角洲地区森林在春、夏、秋、冬四季 NDVI 均值分别为 0.5294、0.6357、0.6005、0.4339,各季 NDVI 波动范围分别为 0.4753~ 0.5772、0.4884~ 0.7000、0.5458~ 0.6511、0.3534~ 0.4809。为了有效地分析对比各

季节 NDVI 变化幅度及变化趋势, 分别计算各季节 NDVI 数据序列的变差系数和距平值, 结果显示: 1998 年至 2008 年内, 夏季和冬季 NDVI 均值变化较为强烈, 变差系数分别达到 0.1037 和 0.0984, 而春秋两季 NDVI 均值变化不大, 较为稳定, 变差系数分别为 0.0629 和 0.0509。由距平值分析来看, 春季和夏季 NDVI 均值都略有增加, 趋势线斜率分别为 0.008 和 0.014, 秋季 NDVI 均值变化趋势基本保持不变, 冬季 NDVI 略有下降趋势, 变化趋势线斜率为 -0.001。

通过对 1998 年至 2006 年气象数据按季节统计分析, 发现春、夏、秋三季气温均有所增加, 增长线性趋势线斜率分别为 0.141、0.356 和 0.036, 以夏季增长最为明显, 而冬季气温有所降低, 降低线性趋势线斜率为 -0.293。上述 NDVI 与气温变化趋势关系表明, 随着长三角地区气候变化, 森林各季节响应有所差异, 其 NDVI 值在春夏两季随气温增加而有所增加, 秋季基本保持不变, 而冬季有所降低; 夏冬两季森林对气候变暖响应的程度更为强烈, 春秋两季变化相对稳定。

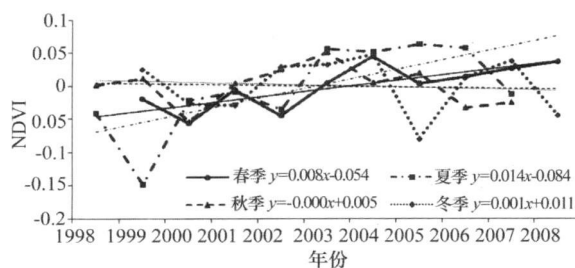


图 8 四季 NDVI 距平值年际变化及线性趋势

5 结束语

目前, 气候变暖日益为人所关注, 国内外越来越多的研究人员使用遥感技术研究植物物候与气候变化之间的关系。随着近年气温的升高, 植物生长季延长、春季物候期提前、秋季物候期推迟成为一种全球趋势^[4]。本研究通过对长江三角洲地区森林 NDVI 长时间数据序列进行物候特征的研究表明, NDVI 与气温具有较强相关性, 随气温升高, 森林植被年 NDVI 均值有增加趋势; 森林植被生长活跃期起始日期提前, 终止日期延后, 生长活跃期内 NDVI 有所增加, 时间长度有明显的延长趋势; 森林植被 NDVI 极大值与极小值出现日期均明显提前, 极大值有增大趋势, 而极小值呈降低趋势, 年内极差增加, NDVI 增长期缩短, 衰落期延长; 森林植被在春、夏两季 NDVI 均值有所增长, 秋季无明显变化, 冬季略有降低。以上结论可以证明研究区内森林随气候变暖, 物候期发生明显变化, 对气候变化响应明显。

影响植被生长的因素有很多, 除自然界气温与降水因素外, 还受地形、植被种类、城市热岛效应、酸雨、病虫害等。而利用 NDVI 数据指示植被生长情况又会受到数据平滑、时间分辨率、空间分辨率、混合像元光谱等技术条件的限制, 会造成对物候变化的细致信息的缺失。另外, 本研究需要实际物候观测数据进行进一步验证, 使得动态阈值确定物候信息更充分, 避免研究结果具有局限性。

参考文献

- [1] 陈效述, 王林海. 遥感物候学研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(1): 33-40.
- [2] Benoît Duchemin, Jérôme Goubier, Gaston Courrier. Monitoring phenological key stages and cycle duration of temperate deciduous forest ecosystems with NOAA/AVHRR data[J]. Remote Sensing of Environment, 1999(67): 68-82.
- [3] Alicia K Birky. NDVI and a simple model of deciduous forest seasonal dynamics[J]. Ecological Modelling, 2001(143): 43-58.
- [4] 徐雨晴, 陆佩玲, 于强. 气候变化对植物物候影响的研究进展[J]. 资源科学, 2004, 26(1): 129-136.
- [5] Thomas Rötzer, Frank M Chmielewski. Phenological maps of Europe [C]// Agrarmeteorologische Schriften. Landwirtschaftliche Fakultät Institute für Pflanzenbauwissenschaften. Heft 06/2000.
- [6] Zhou Liming, Compton J Tucker, Robert K Kaufmann, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D17): 20 069-20 083.
- [7] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991[J]. Nature, 1997(386): 698-702.
- [8] 温刚. 利用 AVHRR 植被指数数据集分析中国东部季风区的物候季节特征[J]. 遥感学报, 1998, 2(4): 270-275.
- [9] 齐晔. 北半球高纬度地区气候变化对植被地影响途径和机制[J]. 生态学报, 1999, 19(4): 474-477.
- [10] Mark D Schwartz, Chen Xiaoqiu. Examining the onset of spring in China[J]. Climate Research, 2002(12): 157-164.
- [11] 韩贵锋, 徐建华, 袁兴中. 城市化对长三角地区主要城市植被物候的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1803-1809.

- [12] 刘昉勋,黄致远.江苏省地带性植被的基本特点与分布规律[J].植物生态学报,1982,6(3):236-245.
- [13] 刘昉勋,黄致远.江苏省植被区划[J].植物生态学报.1987,11(3):226-233.
- [14] 周秀佳.上海的主要自然植被类型及其分布[J].植物生态学报,1984,8(3):189-197.
- [15] 高峻.上海自然植被的特征、分区与保护[J].地理研究,1997,16(3):82-88.
- [16] 刘其霞,常杰,江波.浙江省常绿阔叶生态公益林生物量[J].生态学报,2005,25(9):2139-2144.
- [17] 袁位高,沈爱华,江波,等.浙江省常绿阔叶林凋落物特征研究[J].浙江林业科技,2009,29(3):1-4.
- [18] 陈春根,史军.长江三角洲地区人类活动与气候环境变化[J].干旱气象,2008,26(1):28-34.
- [19] Xu W-T, Wu B-F, Yan G-Z, et al. China land cover 2000 using SPOT VGT S10 data[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(2): 204-214.
- [20] Griguolo S, Mazzanti M. Using a feed-forward neural network to simulate missing values in SPOT/VEGETATION NDVI images[C]//Proceedings of the 2nd International VEGETATION User Conference, Antwerp, 2004: 63-70.
- [21] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, Zhang Z X, Deng X Z. Study on spatial pattern of land use change in China during 1995-2000[J]. Science in China(Series D), 2003, 46(4): 373-384.
- [22] 吴文斌,杨鹏,唐华俊,等.基于NDVI数据的华北地区耕地物候空间格局[J].中国农业科学,2009,42(2):552-560.
- [23] Jönsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time series of satellite sensor data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002(40): 1824-1932.
- [24] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT—a program for analyzing time series of satellite sensor data[J]. Computers and Geosciences, 2004(30): 833-845.
- [25] 于信芳,庄大方.基于MODIS NDVI数据的东北森林物候期监测[J].资源科学,2006,28(4):111-117.
- [26] 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:多年平均结果[J].大气科学,2000,24(5):676-682.
- [27] 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:年际比较[J].气候与环境研究,2001,6(1):1-10.
- [28] 罗洪群.统计学原理[M].成都:电子科技大学出版社,2005.
- [29] 葛全胜,郑景云,张学霞.过去40年中国气候与物候的变化研究[J].自然科学进展,2003,13(10):1048-1053.

(上接第25页)

- [16] Khorram S, Chheshire H M. Remote sensing of water quality in the neusc river Estuary, Rorth Carolina[J]. Photogramm, Eng. Remote sens, 1985, 51(1): 53-62.
- [17] 李铁芳.浅海水下地形地貌遥感信息提取与应用[J].环境遥感,1991(2):22-30.
- [18] Tripathi N K, RAO A M. Bathymetric mapping in Kakinada Bay, India, using RS ID LISS-III data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(6): 1013-1025.
- [19] 胡雯,杨世植,翟武全,等.NOAA卫星监测巢湖蓝藻水华的实验分析[J].环境科学与技术,2002(1):16-19.
- [20] 汪溪远,师庆东,潘晓玲,等.遥感技术在西部干旱区湖泊水质环境监测中的应用[J].农业科学研究,2005(3):71-75.
- [21] 陈晓玲,袁中智,李毓湘,等.基于遥感反演结果的悬浮泥沙时空动态规律研究——以珠江河口及邻近海域为例[J].武汉大学学报信息科学版,2005(8):677-681.
- [22] 方圣辉,张加晋.不同泥沙含量水体光谱特性分析[J].测绘信息与工程,2007,32(6):47-49.
- [23] 刘茜,David G Rossiter.基于高光谱数据和MODIS影像的鄱阳湖悬浮泥沙浓度估算[J].遥感技术与应用,2008(2):7-12.
- [24] 宋晓宇,王纪华,刘良云,等.基于高光谱遥感影像的大气纠正:用AVIRIS数据评价大气纠正模块FLAASH[J].遥感技术与应用,2005(8):393-398.
- [25] 吕凤军,郝跃生,李川平,等.基于FLAASH模块的遥感数据大气校正应用研究[J].河北地质,2007(2):23-26.
- [26] 顾海燕,李海涛,杨景辉.基于最小噪声分离变换的遥感影像融合方法[J].国土资源遥感,2007(2):53-55.
- [27] 杜博,张良培,李平湘,等.基于最小噪声分离的约束能量最小化[J].中国图象图形学报,2009,14(9):1850-1857.
- [28] 李小娟,宫兆宁,刘晓萌,等.ENVI遥感影像处理教程[M].中国环境科学出版社,2007,2.
- [29] 邬伦,刘瑜,张晶,等著.地理信息系统——原理、方法和应用[M],科学出版社,2005,1.
- [30] 高歌,龚乐冰,赵珊珊,等.日降水量空间插值方法研究[J].应用气象学报,2007(10):732-736.