

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^{*}

温 刚 符淙斌

(中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029)

摘 要 利用 1982~1993 年 NOAA / NASA Pathfinder AVHRR 陆地数据集中的归一化植被指数 (NDVI) 数据集, 对中国东部植被季节生长的阶段性进行了划分。在此基础上, 对植被季节生长对气候响应的多年平均状况进行了分析, 发现在多年平均意义上, (1) 中国东部植被生长在各生长阶段都同步响应于温度的季节变化; (2) 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。通过本文的研究, 在中国东部季风区, 有关植被季节生长对气候响应大尺度特征的多年平均状况的定性认识得到量化的表达, 为改进陆面过程描述、提高对中国东部区域气候的长期模拟能力提供了一定的依据。

关键词: 中国东部; 植被物候; 季节变化; 气候

1 引言

正确地描述植被生长的时空特征, 是区域尺度上陆面过程的模式化的重要内容之一。现在使用的陆面过程模式^[1,2]中, 植被生长的时空特征主要通过有关叶面积指数的季节分布数据集和植被覆盖度计算过程表现出来。在中国东部季风区, 这些内容表现得尚不合理, 对中国东部区域气候的长期模拟可能会产生一定影响。根据事实来改进陆面过程模式中有关植被生长时空特征的描述, 是提高区域气候模拟能力的一个重要方面。建立有关大尺度植被物候对气候响应的定量认识, 可以作为这项工作的一个出发点。

植被生态学研究表明, 气候的季节变化是控制植被季节生长特征的一个重要因素^[3]。在以局地观测为基础的传统生态研究及其研究结果中存在一个不足: 在区域尺度以至全球尺度上, 只有关于植被生长季节变化对气候响应的定性认识, 缺少定量的认识。

借助卫星遥感技术, 人们已经可以直接在区域尺度以及全球尺度上观察植被生态特征。因为通过卫星遥感获得的结果是以量化的数据反映地表状况, 所以, 在关于植被生长季节变化对气候响应的研究中, 就有可能采用量化的研究方法, 并得到量化的研究结果。NOAA 极轨气象卫星上携带改进的甚高分辨率辐射计 (AVHRR)^[4], 根据植被的反射光谱特征^[5], 可以利用 AVHRR 通道的光谱观测数据衍生出植被指数, 作为提取和表现植被特征的工具。通常使用的植被指数是归一化植被指数 (Normalized

Difference Vegetation Index, 简称 NDVI), 表现为

$$I = \frac{N - R}{N + R}, \quad (1)$$

其中, I 为 NDVI, R 是可见光通道观测到的地面反射率, N 是近红外通道观测到的地面反射率^[6]。AVHRR NDVI 数据集的重要应用之一是揭示植被物候与气候因子之间的关系。例如, 对非洲植被生长和降水之间的关系的研究, 不仅可以确定不同地区的植被生长和降水之间的相关关系, 还可以知道在相关关系中存在的滞后特征^[7,8]。有关中国的植被季节生长对降水的响应关系, 在过去的工作^[9]中, 也曾有对个别年份情形的分析。但对植被季节生长对气候响应的一般状况和年际变异仍然缺少认识。

中国东部是中国植被的主要分布地区, 也是植被生长受到季风气候影响最为显著的地区。本文的目的, 是要通过对卫星遥感数据的分析, 定量认识中国东部植被季节生长对季风气候响应的大尺度特征, 以利于陆面过程模式中有关部分的改进, 从而提高对中国东部区域气候的模拟能力。

2 研究区域

研究区域为中国东部, 限定在 (20~45°N, 110~123°E)。从气候角度看, 它是中国受到季风影响的主要地区; 从植被生态角度看, 它是季风气候区植被分布及其物候表现具有典型的纬向变化特征的地区, 自然植被地带自北向南依次分布着温带草原区森林草原地带 (季风气候影响的边缘区)、暖温带落叶阔叶林带和亚热带常绿阔叶林带 (北亚热带落叶与常绿阔叶混交林亚带、中亚热带常绿阔叶林亚带、南亚热带季风常绿阔叶林亚带)。所以, 在这一区域上进行的植被物候季节变化对气候响应的大尺度特征研究, 对中国东部季风区是具有普遍意义的。

3 数据集的建立和分析方法

本文使用的卫星遥感数据生成于 1982~1993 年 NOAA/NASA Pathfinder AVHRR 陆地数据集^[10]中的归一化植被指数 (NDVI) 数据集部分。原数据集的空间分辨率为 8 km, 时间分辨率为“准 10 天” (每个月的 1~10 日、11~20 日及当月剩余天数)。在一个区域内, 研究中使用的数据集的空间分辨率越高, 需要分析的空间点就会越多, 植被物候的局地特征也会更多地表现出来, 不利于展示植被物候的大尺度共性特征。所以, 为确定植被物候的大尺度共性特征, 适当降低数据集的空间分辨率是有利的 (另文讨论)。新生成的数据集采取 30' 的分辨率, 投影于经纬网格上, 每一个数据是 30' 经纬网格内原 8 km 分辨率数据的平均值。空间平均计算相当于一种滤波处理, 保留了 30' 网格内植被物候的共性特征信号, 压抑了局地特征。对新数据集的生成处理, 只对陆地点进行, 所有标识为水体 (如海洋、湖泊) 的点均排除在外。通过以上处理, 建立了针对研究区域的“准 10 天”时间分辨率和 30' 空间分辨率的 1982~1993 年 NDVI 数据集。为考察植被物候季节变化在多年平均状况, 对 12 年的 NDVI 数据集进行时间

平均计算,建立了多年平均意义的 NDVI 年变化数据集。

气候数据集汇集了研究区域内 152 个气象台站的旬温度和降水数据,通过对 1982~1993 年逐年的气候旬统计数据整理得到,旬温度是旬均温,旬降水是旬积累降水。然后,对 12 年的数据进行时间平均计算,分别建立多年平均意义的温度和降水年变化数据集。

为了从时空特征方面了解植被物候季节变化对气候的响应,对上述 NDVI、温度和降水变化数据集进行经验正交函数(EOF)分析和相关分析。EOF 分析是压缩和提取要素场演变的时空特征的有效方法。如果分析地域共有 n 个空间点,每一时间点上某要素在分析地域上的分布可以表达为一个向量,这个向量由该要素在这 n 个空间点上的数值按空间顺序排列构成。如果需要分析的时段中有 m 个时间点,则这个时段内某要素在分析地域上的分布状况可以按时间顺序排列到矩阵 X 中。矩阵 X 按照 EOF 可以展开成时空两个部分,即

$$X = A Y, \quad (2)$$

其中, A 是 $X X^T$ 的特征向量(或主分量)矩阵,包括了 m 个主分量,每个主分量表现矩阵 X 中的一种时间演变特征(m 个时间点),根据特征值计算出每个主分量的方差贡献,衡量这种时间演变特征的重要性。因此, A 实际上是矩阵 X 展开中的时间部分。为便于分析, A 中主分量依照其各自对应的特征值从大到小的次序排放。通过关系(2),可以计算出矩阵 A 展开中的空间部分 Y 。对于 A 中某个主分量确定的时间演变特征, Y 中相应空间向量通过其数值指出这种时间演变特征在每个空间点上的强弱表现,获得其空间分布。因此, Y 中的 m 个空间向量也可视为 m 种空间权重场。

由于 EOF 分析是一种已被熟知和广泛使用的多元分析方法,在此不再介绍更多细节,具体情况参见文献[11]。

4 结果和讨论

对多年平均意义的 NDVI 年变化数据集进行 EOF 分解后,第一主分量(EOF1)的方差贡献是 92.51%,在各 EOF 主分量方差贡献中占有显著优势,说明 EOF1 提取了原数据集中的主要时间演变特征。图 1 中的实线是 NDVI EOF1 的时间演变曲线,主要反映了植被物候的连续性和阶段性:在连续性方面,中国东部季风区植被物候的时间演变具有类似正弦波的波形;在阶段性方面,植被物候的时间演变表现出不同时段上的植被生长特征差异。图 2a 是对应 EOF1 的空间场,表现 EOF1 时间演变特征在各空间点上的强度。图 2a 中的高数值主要出现在山地地区,如南岭、武夷山、东南丘陵、太行山、燕山等,这里森林植被分布集中,一年中长期保持较高 NDVI,同时 NDVI

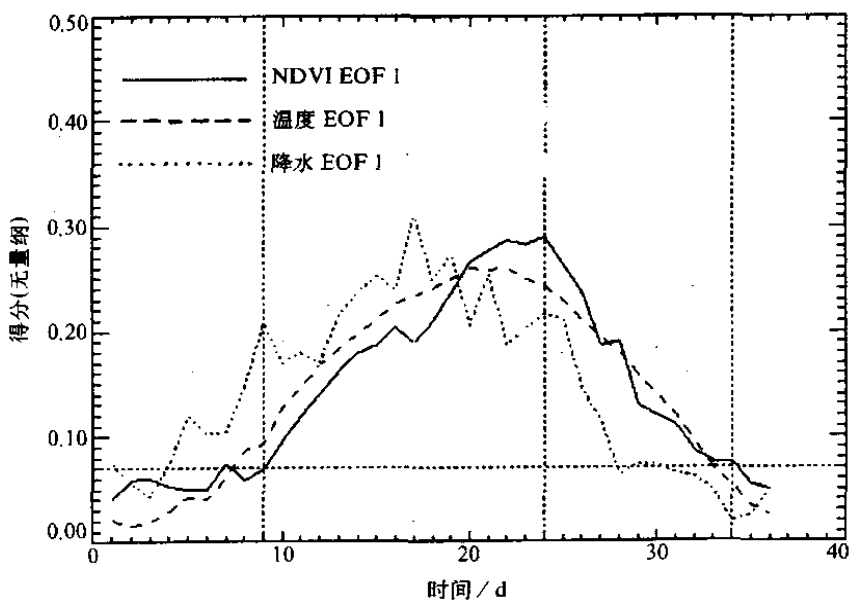


图 1 多年平均意义上的 NDVI、温度和降水年变化的 EOF1 时间演变特征

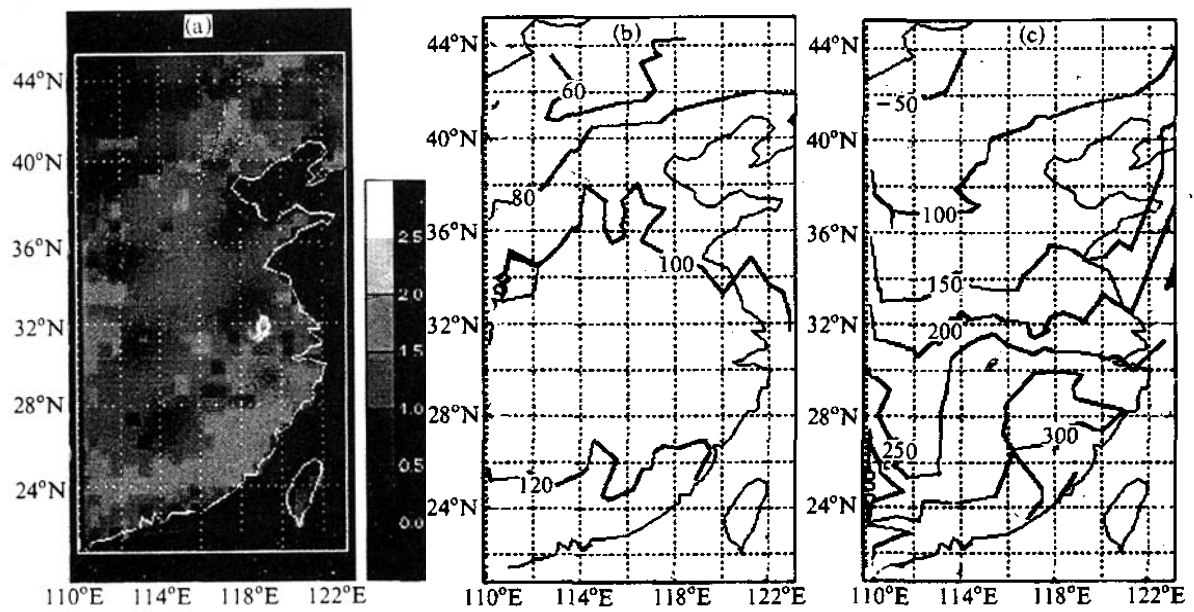


图 2 与图 1 的 EOF1 时间演变特征对应的空间场
(a) NDVI; (b) 温度; (c) 降水

的年变幅大。在华北、华东和华中的广大平原地区上，图 2a 中的数值比前者要低。这里是我国主要农业区，植被以农业植被为主，EOF1 时间演变特征的表现非常接近，是图 2a 中的最显著的空间分布特征。

多年平均意义的温度和降水年变化数据集进行 EOF 分解后，各自 EOF1 的方差贡献分别为 93.36% 和 85.36%，它们都提取了各自原数据集中的主要时间演变特征。温度 EOF1 的方差贡献对温度各 EOF 主分量方差贡献中占有显著优势，降水 EOF1 的方

差贡献对降水各 EOF 主分量方差贡献的优势则逊色一些。造成这种情况的主要原因是: 在各纬度上, 温度变化的控制规律基本相同, 主要表现为受太阳位置的季节性移动影响; 对降水进行控制的因素则要复杂得多, 虽然中国东部降水的整体规律是季节性南北进退, 但在各地的具体表现时空差异很大。在图 1 中, 以虚线和点线分别绘出温度和降水的 EOF1 时间演变曲线。图 2b 和图 2c 分别是对应于温度和降水 EOF1 时间演变特征的空间场, 基本显示了各自年平均状况的空间分布型, 具有从南向北数值递减的空间分布特征。

(1) 植被生长季节的划分

首先, 希望利用 NDVI EOF1 时间曲线进行中国东部季风区的区域尺度的植被生长季阶段划分。可以注意到, 在植被物候的年变化中, NDVI EOF1 时间曲线存在一些转折点。为此, 在排除了月尺度以下的短波干扰后, 对 NDVI EOF1 时间曲线进行速度变化分析: 一次导数表明了物候的变化速度, 二次导数表明物候变化速度的变化状况(加速度)。

NDVI EOF1 时间曲线在第 9 个“准 10 天”位置出现二次导数正极大值, 表明此时植被生长的速度发生了显著的增长。第 9 个“准 10 天”(3 月下旬)的时间, 对应于华东和华中广大地区的日均温达到了 10°C , 而日均温 10°C 正是植被进入活跃生长季的界限温度, 表明华东和华中地区开始进入植被活跃生长季; 同时, 华北地区的日均温恢复到 0°C 以上, 植被复苏, 进入生长状态。与第 9 个“准 10 天”的曲线数值位置对应, 相同的曲线数值还出现在第 34 个“准 10 天”位置上。第 34 个“准 10 天”(12 月上旬)是日均温 10°C 在武夷山—南岭一带终止的时间, 华东和华中的广大地区的日均温 10°C 终止日出现在第 33 个“准 10 天”(11 月下旬), 表明华东和华中地区结束了植被活跃生长季; 同时, 华北地区的日均温开始达到 0°C 以下, 植被进入休眠状态, 或结束生长。所以, 在中国东部, 第 9 个和第 33 个“准 10 天”之间的时段可以被确定为华东和华中地区的植被活跃生长季和华北地区的植被生长季。

在中国东部, 只有武夷山—南岭以南地区四季植被常绿。从武夷山—南岭向北, 常绿植被的分布越来越少, 季节性植被(主要指季节落叶植被)越来越多; 至淮河流域, 已经没有常绿植被的分布。因此, 上面确定的植被生长季, 在更多意义上是针对季节性植被而言的。

在第 24 个“准 10 天”位置(8 月下旬), NDVI EOF1 时间曲线出现一次导数为零, 是曲线驻点。同时, 在这个时间位置上, 曲线二次导数出现负极大值, 表明存在植被生长从增长到衰落的转变。此前, 处于生长季特别是活跃生长季的植被达到最大的面积, 同时达到一年中的 NDVI 最大值; 此后, 处于生长季特别是活跃生长季的植被所占有的面积愈来愈少, NDVI 数值也愈来愈小。所以可把第 9~24 个“准 10 天”确定为植被生长季的增长阶段, 第 24~33 个“准 10 天”的阶段确定为植被生长季的衰退阶段。

把上述植被季节性物候的阶段划分点列于表 1。

(2) 植被物候季节变化对气候响应的多年平均状况

为在多年平均意义上考察中国东部植被物候季节变化对温度和降水的响应, 对图 1 上的 NDVI、温度和降水年变化 EOF1 时间演变曲线进行相关分析。

植被物候季节变化与温度的相关系数, 在全年时段、植被生长季时段、植被生长季

表 1 多年平均意义上的中国东部植被季节性物候的阶段划分点

阶段划分点	3 月下旬	8 月下旬	11 月下旬
意 义	华东和华中地区开始进入植被活跃生长季；华北地区植被复苏，进入生长状态	植被生长的增长阶段结束，进入衰退阶段	华东和华中地区结束植被活跃生长季；华北地区植被进入休眠状态，或结束生长

的增长阶段和衰退阶段，数值分别为 0.954、0.945、0.958 和 0.968，都通过了 99% 信度的检验，而且以“准 10 天”时间分辨率来看，这些相关是同步的。因此，中国东部植被的生长在各个生长阶段都同步响应于温度变化。

植被物候季节变化与降水的相关系数，在全年时段、植被生长季时段、植被生长季的增长阶段和衰退阶段，数值分别为 0.788、0.626、0.445 和 0.917。在植被生长季的增长阶段，相关系数未通过 95% 信度检验，但在其余三个时段的相关都通过了 99% 信度的检验。在植被生长季的增长阶段，降水的时空变率非常大，经历了华南前汛期、江淮流域梅雨和华北夏季降水的雨带跳跃式移动；而植被生长更多地表现出连续性的时空特征，特别是在中国东部，农业植被是植被的主体，人对农业植被的管理（如灌溉）也会降低降水对农业植被的控制程度。这些可能是在该时段相关系数未通过 95% 信度检验的原因。在植被生长季的衰退阶段，雨带快速南移，过程的连续性强，使植被生长对降水的相关大大提高。虽然存在阶段性的差异，在整个植被生长季和全年，植被生长和降水的相关关系仍然是非常好的。从相关关系表现出的植被生长对降水的响应具有滞后性，植被生长滞后于降水变化的时间为 2 到 3 个“准 10 天”，或 20 至 30 天。

5 结论

在本工作中，利用卫星遥感数据，对中国东部植被季节生长的阶段性进行了划分。在此基础上对植被季节生长对气候响应的多年平均状况进行了分析，得到结论如下：

- (1) 在多年平均意义上，中国东部植被的生长在各生长阶段都同步响应于温度的季节变化；
- (2) 在多年平均意义上，在全年、植被生长季和植被生长季的衰退阶段，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 至 30 天。但在植被生长季的增长阶段，不具有这种显著的相关关系，其原因可能是这一时期中国东部降水的时空变率很大。

通过本文的研究，在中国东部季风区，有关植被季节生长对气候响应大尺度特征的多年平均状况的定性认识得到量化的表达。

为了在陆面强迫过程中引入正确的植被物候对季风气候的响应，我们认为，把上述结论引入陆面过程的大尺度特征描述中，有利于产生比较合理的陆面强迫，有利于中国东部区域气候模拟中的气候整体特征的合理表现。

致谢：美国国家航空航天局（NASA）哥达德空间飞行中心数据信息中心提供了 NOAA / NASA Pathfinder AVHRR 陆地数据集，特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Dickinson, R. E., A Henderson-Sellers, P. J. Kennedy and M. F. Wilson, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model, NCAR Technical Note, 1986, NCAR/TN-275+STR.
- 2 Sellers, P. J., S. O. Los, C. J. Tucker, C. O. Justice, D. A. Dazlich, G. J. Collatz and D. A. Randall, A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: the generation of global fields of Terrestrial biospherical parameters from satellite data, *J. Climate*, 1996b, 9, 706~737.
- 3 中国植被, 中国植被编写委员会, 北京: 科学出版社, 1980.
- 4 Townshend, J. R. G., Global data sets for land applications from the Advanced Very High Resolution Radiometer: an introduction, *Int. J. Remote Sens.*, 1994, 15, 3319~3332.
- 5 Knipling, E. B., Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation, *Remote Sens. Environ.*, 1970, 1, 155~159.
- 6 Tucker, C. J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sens. Environ.*, 1979, 8, 127~146.
- 7 Malo, A. and S. E. Nicholson, A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using normalized difference vegetation index, *J. Arid Environ.*, 1990, 19, 1~24.
- 8 Nicholson, S. E., M. L. Davenport and A. Malo, A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East African using normalized difference vegetation index, *Climate Change*, 1990, 17, 209~241.
- 9 Fu Congbin and Wen Gang, Variation of ecosystems over East Asia in association with seasonal interannual and decadal monsoon climate variability, *Climate Change*, 1999, 43, 477~494.
- 10 James, M. E. and S. N. V. Kalluri, The Pathfinder AVHRR land data set: An improved coarse resolution data set for terrestrial monitoring, *Int. J. Remote Sens.*, 1994, 15, 3347~3364.
- 11 黄嘉佑, 气象统计分析与预报方法, 北京: 气象出版社, 1990.

Large Scale Features of the Seasonal Phenological Responses to the Monsoon Climate in East China: Multi-Year Average Results

Wen Gang and Fu Congbin

(Global Change Research Center for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The phases of the seasonal phenology in East China were determined with the normalized difference vegetation index (NDVI) data set in the NOAA / NASA Pathfinder AVHRR data sets from 1982 to 1993. Based on such a determination, the large scale features of the seasonal phenological responses to the monsoon climate in East China were analyzed. (1) In multi-year average, the seasonal phenology keeps the significant simultaneous correlation with temperature variation in all the phases. (2) In multi-year average, in most phases, the seasonal phenology and the precipitation variation have their significant correlation with the time lags from 20 to 30 days. The above two results improve the qualitative knowledge before by quantifying the large scale features of the seasonal phenological responses to monsoon climate in East China. The results are potential in the modification of the descriptions of the land surface processes for the capacity of long-term numerical modeling of regional climate in East China.

Key words: East China; phenology; seasonal change; climate