

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

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 NDVI 数据集, 在中国东部植被生长的不同阶段(全年、植被生长季、植被生长季的增长阶段和衰退阶段), 对植被季节生长对气候响应的年际变化进行了分析, 发现: (1) 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; (2) 逐年来看, 植被季节性生长对降水的响应也是存在的, 但相关关系和相关的滞后关系具有年际差异。通过定量地分析中国东部植被季节生长对季风气候响应的年际变化, 有助于对陆面过程模式中的有关部分进行改进, 从而提高对中国东部区域年际气候变化的模拟能力。

关键词: 中国东部; 植被物候; 季节变化; 年际变化; 气候

1 引言

在陆气相互作用研究中, 有关植被的季节性物候特征及其对气候响应的研究是一个基础性部分。在中国东部季风区, 现在使用的陆面过程模式^[1,2]对这部分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出发点。

借助 NOAA 极轨气象卫星上携带改进的甚高分辨率辐射计 (AVHRR)^[3], 人们可以直接在区域尺度以至全球尺度上观察植被生态特征。根据植被的反射光谱特征^[4], 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 (I_{ndv}):

$$I_{ndv} = (R_{nir} - R_{vis}) / (R_{nir} + R_{vis}) \quad (1)$$

其中, R_{vis} 是可见光通道观测到的地面反射率, R_{nir} 是近红外通道的反射率^[5]。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^[6~8]。我们曾利用 1982~1993 年 NOAA/NASA Pathfinder AVHRR 陆地数据集中的 NDVI 数据集, 对中国东部植被季节生长的阶段性进行了划分, 并在此基础上, 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, 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,并且在多数时段,中国东部植被生长与降水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^[9]。通过该文的分析,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一个定量化的表达,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。

植被生态学研究表明,气候的季节变化是形成植被季节生长变化特征的关键控制因素之一^[10]。我们已经对植被季节生长对气候响应的多年平均状况有了一定的量化认识,但对其年际变异情况仍然缺少了解。

本文的目的是要在已有研究^[9]的基础上,通过对卫星遥感数据的分析,量化地分析植被物候的大尺度特征,了解中国东部植被季节生长对季风气候响应的年际变异,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年际气候变化的模拟能力。

2 研究区域

研究区域选定在(20~45°N, 110~123°E)的范围内。从气候方面考虑,它位于中国东部,是季风气候影响的主要地区;从植被生态方面考虑,这里的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),是植被分布及其物候表现具有典型的纬向变化特征的地区。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具有普遍意义。

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^[11]中的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”(每个月的第1个10天,第2个10天和剩余天数)。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,以保留30'网格内植被物候的共性特征,压抑了局地特征。对新数据集的生成处理,只对陆地地点进行,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。

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。

为了从时空特征方面了解植被物候季节变化对气候响应的年际差异,对上述逐年的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,然后进行结果对比。

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

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

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, 依照特征值从大到小的次序, A 中主分量顺序排放。通过 (2) 式, 可以计算出矩阵 X 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数值指出这种时间演变特征在每个空间点上表现的强弱, 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, 具体请参见文献 [12]。

4 结果和讨论

对 1982~1993 年的逐年 NDVI、温度和降水年变化数据集进行 EOF 分解后, 各自第 1 主分量 (EOF1) 的方差贡献列于表 1。图 1 显示了这些 EOF1 时间演变曲线。图 2 和图 3 分别表现逐年 NDVI EOF1 和降水 EOF1 时间演变特征对应的空间场。逐年温度 EOF1 时间演变特征对应的空间场与其多年平均状况非常相似, 在此不再给出。

表 1 1982~1993 年逐年 NDVI、温度和降水 EOF1 方差贡献 (%)

年份	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	平均
NDVI	83.03	85.91	85.21	84.57	91.03	83.96	83.39	85.72	88.67	85.94	83.73	83.02	92.51
温度	93.19	93.58	92.30	91.26	91.65	91.73	92.23	93.92	93.61	92.61	93.30	92.46	93.36
降水	54.75	57.69	58.68	56.52	58.79	58.01	55.22	57.62	54.17	54.27	61.93	58.41	85.36

注: 表中的“平均”指利用多年平均的年变化数据集获得的结果

表 1 显示逐年 NDVI、温度和降水 EOF1 的方差贡献分别对各自的 EOF 主分量方差贡献具有绝对优势 (NDVI 和温度) 或较大优势 (降水), 说明每年的 EOF1 提取了相应年份数据集中的主要时空特征, 但其中只有逐年温度的 EOF1 方差贡献非常稳定, 同多年平均意义的年变化数据集的计算结果近似。

逐年 NDVI EOF1 的方差贡献一般位于 83% 至 86% 之间, 低于多年平均的状况 (92.51%)。图 1 和图 2 显示的逐年植被季节性物候状况表现出一定的年际变化。即使

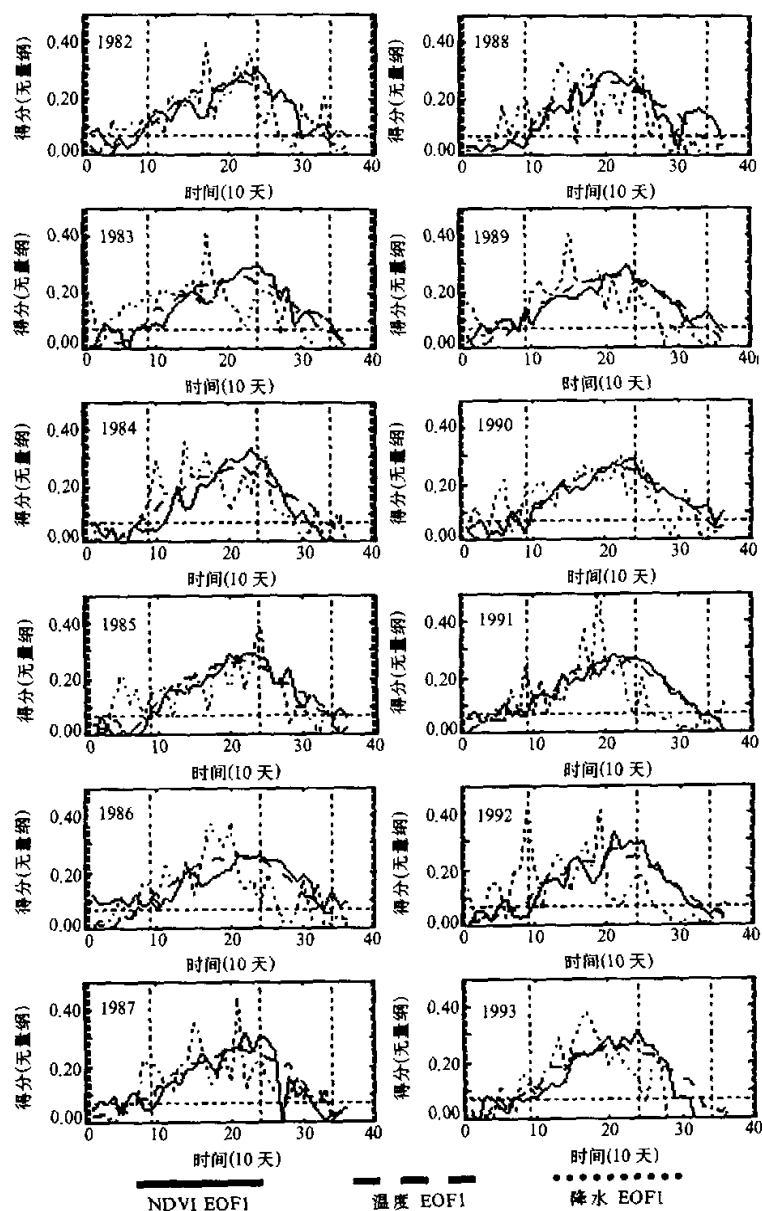


图1 1982~1993年逐年NDVI、温度和降水年变化的EOF第1主分量时间演变曲线

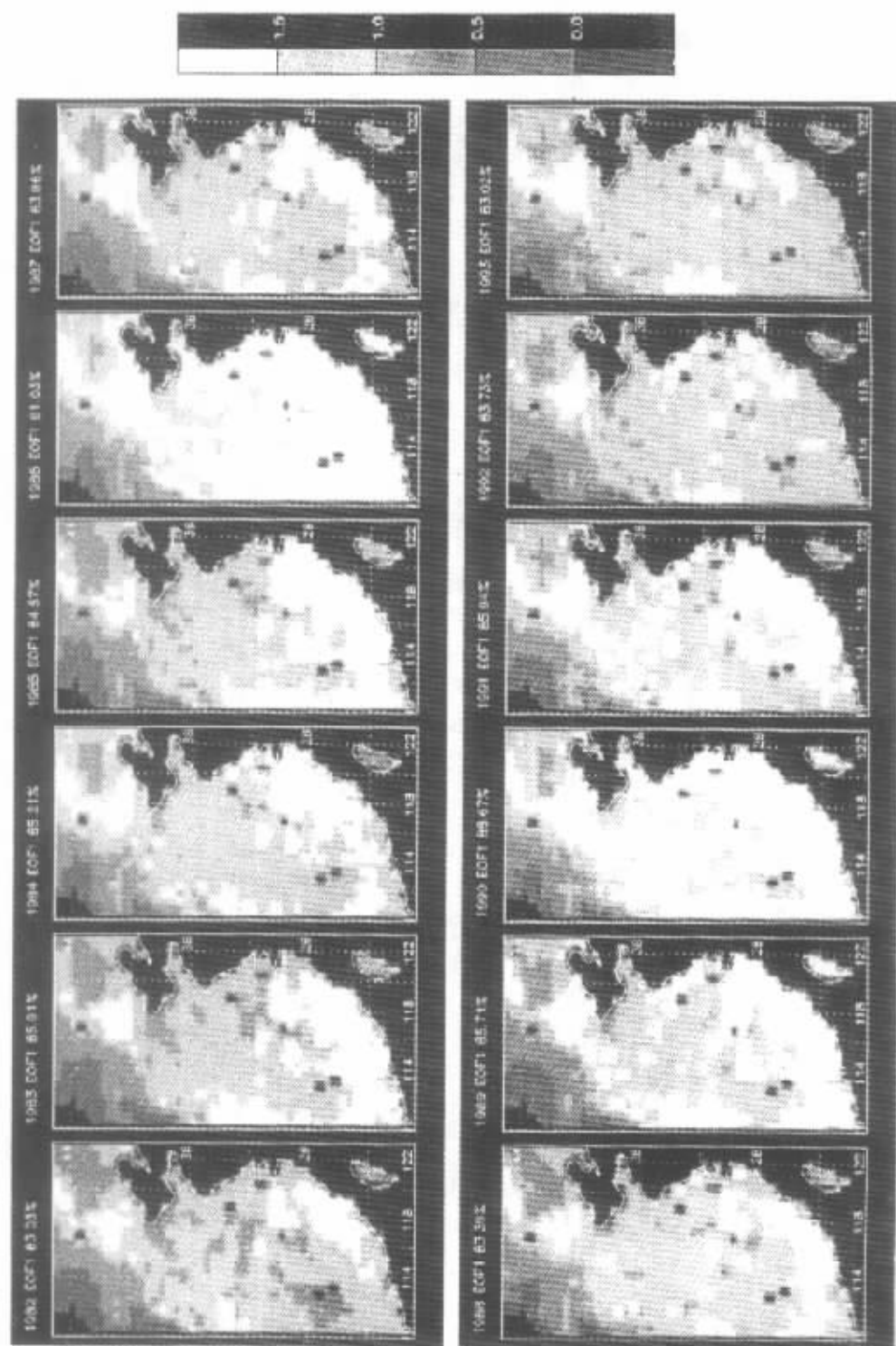


图2 1982~1993年逐年NDVI EOF第1主分量对应空间图

年际差异存在, 逐年植被季节性物候仍然具有与多年平均状况近似的时空特征。中国东部植被物候的时间演变具有类似正弦波的波形, 并表现出不同时段上的植被生长特征差异。EOF1 时间演变特征在各空间点上的强度表现为: 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 的年变幅大; 在华北、华东和华中的广大平原地区上, 数值比前者要低, 这里是中国主要农业区, 植被以农业植被为主, EOF1 时间演变特征的表现比较接近。

逐年降水 EOF1 方差贡献一般低于 60%, 显著低于多年平均状况 (85.36%)。图 1 和图 3 显示的逐年降水季节变化表现出较大的年际变化。有关这方面的研究很多, 此处不再赘述。

利用已经建立的中国东部植被季节生长的阶段性划分^[9] (见表 2), 我们对植被季节生长对气候响应的年际变化情况进行分析, 并与其多年平均状况^[9]进行比较。为说明方便, 将第 9 个和第 33 个“准 10 天”之间的时段 (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) 称为中国东部植被生长季, 第 9~24 个“准 10 天”称为植被生长季的增长阶段, 第 24~33 个“准 10 天”的阶段称为植被生长季的衰退阶段。

表 2 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^[9]

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

首先来看植被季节生长对温度季节变化的响应。检查表 3、表 4、表 5 和表 6, 在全年、植被生长季、植被生长季的增长阶段和衰退阶段等 4 个时段上, NDVI 与温度的相关系数基本上在 0.7 以上, 多数达到 0.9 以上, 相关关系基本上是同期的, 相关信度超过 99%。这说明, 不论在多年平均意义上, 还是逐年来看, 植被季节生长对温度季节变化的响应非常稳定, 年际变异很小。另外, 线性相关关系也说明, 温度季节变化对植被季节生长产生稳定的线性驱动。为什么植被季节生长对温度的响应在每一年都是稳定的呢? 最关键的是, 作为植被生长驱动力, 温度的季节变化的年际变异很小, 表现在表 1 上的逐年温度 EOF1 的方差贡献稳定在 90% 以上, 在图 1 上各年温度曲线同多年平均状况非常相似。从区域整体特征来看, 各纬度上温度随时间的变化主要受到当地太阳辐射强度变化的控制, 与太阳位置的季节移动有关。与之相比, 其他因子的影响要小得多。在 1982~1993 年的 12 年时间区间内, 可以认为太阳位置的季节移动具有逐年相同的特征。因此容易解释上述线性驱动关系的年际稳定性。

再看植被季节生长对降水季节变化的响应。图 1 中的 NDVI 曲线和降水曲线波型的年际变动都比较大, 特别是降水。那么, 植被季节性生长的年际变化是否对应于降水的年际变化呢?

先看时空分布情况。以几年的对比作为例子。(1) 与多年平均特征相比较, 在 1983 年整个中国东部季风区的年降水较多, 植被生长季增长期内, 降水具有平缓的时间变化特征; 1992 年的年降水在 30°N 以南较多, 30°N 以北较少, 南北差异比 1983 年

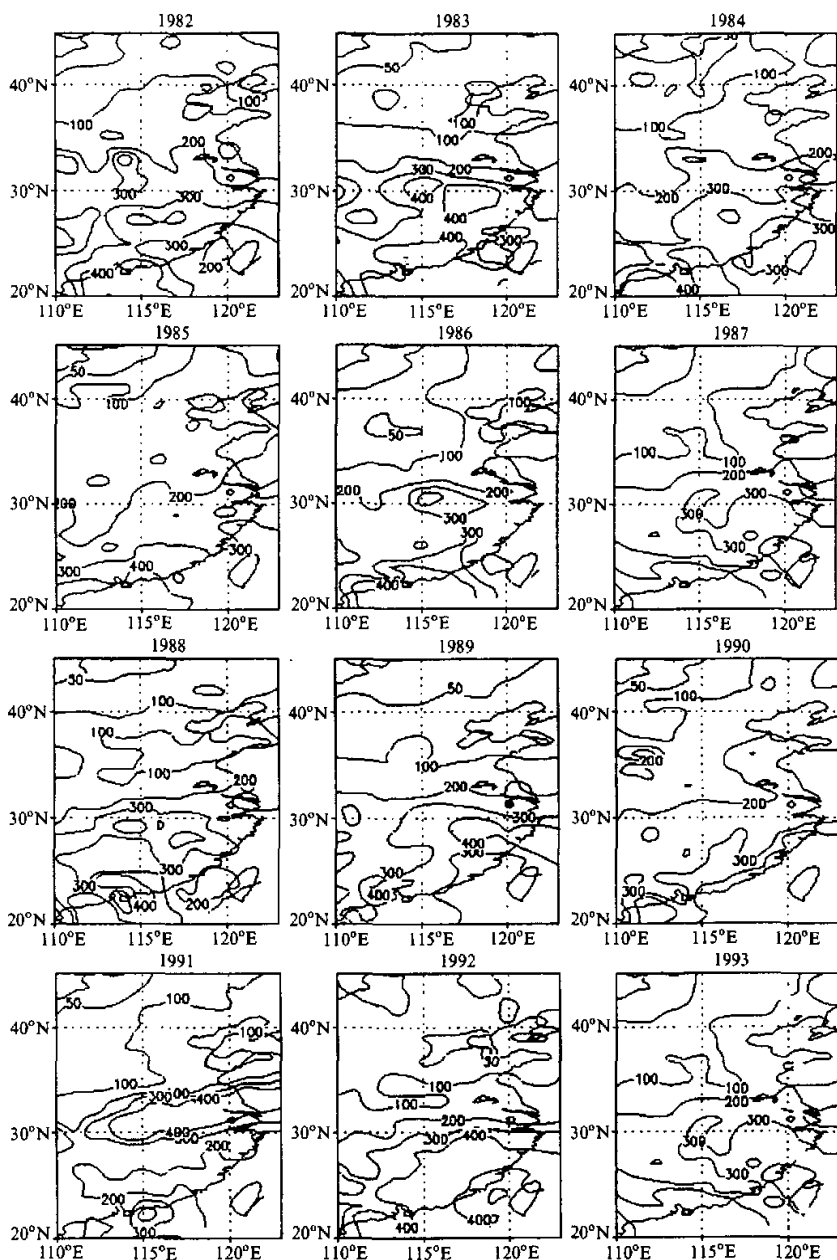


图3 1982~1993年逐年降水 EOF 第1主分量对应空间场

表3 全年植被生长与温度和降水的相关及滞后关系

年份		1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	平均
温度	相关	0.856	0.900	0.885	0.923	0.834	0.851	0.857	0.912	0.914	0.948	0.932	0.910	0.954
	滞后	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
	信度	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
降水	相关	0.659	0.465	0.723	0.590	0.702	0.656	0.526	0.597	0.650	0.664	0.477	0.746	0.788
	滞后	2	2	2	1	5	1	2	2	2	3	4	3	3
	信度	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%

注:表中“滞后”的单位为10 d

表4 植被生长季(第9~33个“准10天”)内植被生长与温度和降水的相关及滞后关系

年份		1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	平均
温度	相关	0.766	0.822	0.922	0.878	0.773	0.866	0.780	0.878	0.898	0.932	0.910	0.944	0.945
	滞后	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	信度	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
降水	相关	0.613	0.230	0.495	0.644	0.552	0.595	0.446	0.468	0.481	0.567	0.363	0.628	0.626
	滞后	2	2	2	1	5	1	1	3	3	3	3	1	3
	信度	99%	—	95%	99%	99%	99%	95%	95%	95%	99%	—	99%	99%

注:表中“滞后”的单位为10 d

表5 植被生长季增长阶段(第9~24个“准10天”)植被生长与温度和降水的相关及滞后关系

年份		1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	多年平
温 度	相关	0.718	0.924	0.911	0.918	0.879	0.930	0.935	0.853	0.924	0.931	0.895	0.947	0.948
	滞后	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	信度	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
降 水	相关	0.477	0.334	0.263	0.454	0.514	0.396	0.342	0.311	0.328	0.429	0.200	0.575	0.445
	滞后	1	4	5	-1	3	1	-1	5	1	1	4	3	2
	信度	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注:表中“滞后”的单位为10 d

表6 植被生长季衰退阶段(第24~33个“准10天”)植被生长与温度和降水的相关及滞后关系

年份		1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	平均
温度	相关	0.845	0.822	0.954	0.873	0.919	0.801	0.602	0.930	0.920	0.970	0.977	0.953	0.968
	滞后	-1	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0
	信度	99%	99%	99%	99%	99%	99%	—	99%	99%	99%	99%	99%	99%
降水	相关	0.409	0.760	0.843	0.745	0.353	0.677	0.576	0.674	0.605	0.612	0.866	0.709	0.917
	滞后	2	2	2	1	5	1	1	3	3	3	3	1	3
	信度	—	99%	99%	99%	—	95%	—	95%	—	—	99%	95%	95%

注:表中“滞后”的单位为10 d

情形要大,同时在时间特征上出现了较强的阶段性。这两年的植被状况是,1983年中进入植被快速生长阶段的时间比1992年中的对应时间有所提前;在空间特征方面,

1983 年的空间特征接近多年平均状况, 但 1992 年全区域的响应特征趋于一致, 山地森林植被的响应数值接近农业植被的响应数值。(2) 1984 年和 1986 年, NDVI 和降水的空间场的分布型相似, 两年的降水空间场数值相似, 但 1986 年植被的空间场数值却显著高于 1984 年; 在时间特征方面, 在 1984 年植被生长季的增长期内的降水比 1986 年同期降水多, 但是 1984 年中进入植被快速生长阶段的时间落后于 1986 年中的对应时间。(3) 1989 年和 1991 年, 植被空间场的分布特征非常相似, 但在时间演变方面, 1991 年中进入植被快速生长阶段的时间早于 1989 年中的对应时间, 增长趋势也平缓得多; 在降水空间场方面, 1989 年的降水偏于华南, 1991 年则显然集中在长江流域地区。类似的比较还可进行下去, 仍无法找到有关植被生长和降水驱动年际变化的明确对应关系。

植被和降水季节变化时空分布的年际差异, 对中国东部季风区的植被季节性生长和降水的相关关系会产生什么影响呢? 表 3 说明, 在全年时段上, 1982~1993 年各年植被季节性生长和降水的 EOF1 相关系数在 0.456 和 0.746 之间, 都通过了 99% 的信度检验。所以, 从全年来看, 植被季节性生长对降水的显著响应关系在每一年都是存在的。如果把观察时段缩小, 这种显著响应关系就不是在每一年都存在。从表 4、表 5 和表 6 可以看到, 在整个植被生长季, 1982~1993 年间有 6 年的相关关系具有 99% 的信度, 4 年的相关关系达到 95% 的信度, 另两年的相关没有通过 95% 信度检验。如果把观察时段进一步缩短, 相关关系的表现更差: 在植被生长季衰退阶段, 相关关系通过 99% 信度检验的年数下降为 5 个, 未达到 95% 信度的年数上升为 5 个; 在植被生长季增长阶段, 各年的相关关系都没有通过 95% 信度的检验。这些结果说明, 随着所在时段降水变率的增加, 植被季节性生长对降水季节变化的逐年相关关系降低。

在表 3、表 4、表 5 和表 6 中, 植被对降水季节变化的相关滞后关系也是逐年变化的, 从超前 1 个到滞后 5 个“准 10 天”, 滞后关系占据绝对优势, 主要表现为滞后 1~3 个“准 10 天”。

对于植被生长的季节变化和降水的相关关系, 在其多年平均状况和年际变异之间存在着什么样的联系呢? 通过多年平均滤去年际差异, 降水季节变化的多年平均时空特征就可以表现出来。正是这种多年平均意义上的降水时空特征构成了对植被季节性生长的一种“稳定”驱动, 长期“稳定”的驱动力控制着植被季节性生长特征的形成。是谁在过滤降水季节变化的年际差异呢? 植被生物体通过自身的季节性生长发育过程, 扮演这种滤波器的角色: 从逐年相异的降水季节变化中提取出“稳定”的季节性驱动。在“稳定”的季节性降水驱动作用下, 每一年的植被生长都具有类似多年平均状况的季节演变基本波型特征。植被季节性生长对降水年际变异的滤波, 是通过植被对气候环境及其变化的适应来实现的。在适应范围内, 植被生长的基本特征不会发生改变。另一方面, 植被生长的季节演变也存在着年际变化, 说明伴随气候驱动力的年际变化, 逐年的植被季节性物候特征会出现一定程度的改变。但从全面分析结果来看, 逐年的植被季节性物候特征对其基本特征不会有大的偏离, 除非植被生长已无法适应气候环境的变化。

在现有知识范围内, 对植被的季节性物候特征和气候环境的季节演变特征, 我们还无法说明在它们的年际变化方面存在怎样一种确定的和定量的关系: 一方面, 植被需要适应的自然环境因素有许多种; 另一方面, 为适应自然环境因素的年际变化, 植被生物

体将产生复杂的生理调整过程。所以, 根据气候环境的年际变化, 植被季节性物候的年际调整表现出简单线性响应的可能性不大。

5 结论

本文利用卫星遥感数据, 在中国东部植被季节生长的不同阶段, 对植被季节生长对气候响应的年际变化进行了分析。

(1) 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。

(2) 逐年来看, 植被季节性生长对降水的响应也是存在的, 但相关关系和相关的滞后关系具有年际差异, 植被生长滞后于降水变化的变化范围一般在 10~30 天之间。

通过对中国东部植被季节生长对季风气候响应的年际变异的定量化分析, 有助于对陆面过程模式中有关部分进行改进, 从而提高对中国东部区域年际气候变化的模拟能力。

我们将继续在年际尺度上, 对中国东部植被物候的连续演变过程及其对气候的响应进行分析。

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, NCAR/TN-275+STR, 1986.
- 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*, 1996, 9, 706~737.
- 3 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.
- 4 Knippling, E. B., Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation, *Remote Sens. Environ.*, 1970, 1, 155~159.
- 5 Tucker, C. J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sens. Environ.*, 1979, 8, 127~146.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 温刚、符琮斌, 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, *大气科学*, 2000, 24(5), 676~682.
- 10 《中国植被》编写委员会, 中国植被, 北京: 科学出版社, 1980.

- 11 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.
- 12 黄嘉佑编著, 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: Interannual Variations

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 annual variations in different phases (the whole year, growing season, the increasing and declining parts of growing season) of the phenological responses to climate change in East China were determined with the normalized difference vegetation index (NDVI) data set of the NOAA / NASA Pathfinder AVHRR data sets from 1982 to 1993. Two results were obtained from the analyses. (1) Either in multi-year average or in each year, the variations of seasonal phenology and those of temperature were synchronous, the latter stably driving the former. (2) In each year, the response of seasonal phenological growing to rainfall change existed, though there were variations in the correlations and the relevant lag between them. The quantitative analyses of such responses will be conducive to improving the vegetation growing description in land surface process models, and therefore enhancing the capability to simulate the interannual climate variations in East China.

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