

中国区域 1960 ~ 2000 年活动积温年代变化 和地表植被的适应性调整

徐兴奎^{1,*}, 王小桃^{1,2}, 金晓青^{1,2}

(1. 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100049)

摘要:一年多季农业耕作区域的布局和植被物候变化是长期气候适应的结果。随着 20 世纪 80 年代中期之后全球气候的持续变暖, 以活动积温和天数为综合指标的各种级别的气候区域边界发生变化, 中国北方地区一年两季农业耕作区域和植被物候也发生了适应性调整。其中 20 世纪 60 ~ 80 年代, 活动积温和天数空间分布相对比较平稳, 边界没有发生明显的拓展和收缩, 但随着气温升高, 20 世纪 90 年代活动积温边界发生改变, 各量级的活动积温和天数综合指标边界明显向北推进。对应于气候的持续变暖, 来自遥感数据的谐波分析和物候监测结果显示, 90 年代北方地区一年两季耕作面积增加, 范围向北扩展; 同时植被物候也发生明显改变, 80 年代和 90 年代的物候变化比较显示, 1995 年之后植被生长期比 1985 年之前普遍提前约 10d 左右, 在一年两季耕作区域, 植被生长期提前将近 20d 左右。

关键词: 气候变暖; 叶面积指数; 物候; 归一化植被指数

文章编号: 1000-0933(2009)11-6042-09 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Vegetation response to active accumulated temperature patterns from 1960 — 2000 in China

XU Xing-Kui^{1,*}, WANG Xiao-Tao^{1,2}, JIN Xiao-Qing^{1,2}

1 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 College of Earth Science, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 6042 ~ 6050.

Abstract: The land surface-atmosphere interaction accounts for regional distribution of multi-rotational cropping and phenological patterns of vegetations. In response to the global warming, boundaries categorized with active accumulated temperature and degree days have been changing since 1980s. Correspondently, the area with two crops per annum and phenological patterns of vegetations in northern China has changed, and the boundaries for most categories of active accumulated temperature and degree days therein have expanded to the north. Meanwhile, the magnitudes of the categorized active accumulated temperature has increased significantly in 1990s relative to the period from 1960s-1980s, during which the contours of active accumulated temperature were overall constant without noticeable expand or shrinkage. Consistent with these changes, the area with two crops per annum, which is estimated from Discrete Fourier transform investigation by applying the LAI data set on a per pixel basis, has expanded northward. The increase in accumulative active temperature and degree days generally set the vegetations growth during 1990-1995 ahead by ten days compared with during 1980-1985 in the northern region of China, and those with two crops per annum by about 20 days.

Key Words: climate warming; leaf area index; phenology; NDVI

基金项目: 中国科学院创新资助项目 (KZCX2-YW-219); 国家重点基础研究发展规划 (973) 资助项目 (2006CB403607); 国家自然科学基金资助项目 (40675047)

收稿日期: 2008-05-28; 修订日期: 2009-05-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xkxu@mail.iap.ac.cn

气候系统与陆表在长期相互作用、相互适应过程中,逐渐形成相对稳定的半封闭系统。然而气候并非绝对稳定的系统,全球气候变化总是由一系列过程和现象各异区域变化构成^[1]。气候系统的非均匀性,造成地表覆盖特征的多元性。气候的温湿调整,直接影响到陆表物种分布、农业耕作制度和植被的物候变化。同时,陆表覆盖特征亦通过陆表反照率、水文、植被覆盖等变化,影响湍流交换和云覆盖等大气边界层物理过程^[2],最终影响气候系统中各要素的时空分布^[3~6]。

中国大部分地区属季风性气候,在陆-气长期相互作用和相互适应过程中,形成了相对稳定的气候区划、陆表覆盖类型和植被生态群落。农业布局也依据当地气候状况形成区域性的物种分布和耕作制度。近年来在全球气候变暖大背景下,从 20 世纪 80 年代中期以后,中国区域气温显著地上升。温度的变化一方面影响气候带的南北分布;同时物种分布和植被物候将随之发生适应性调整。与此同时,20 世纪 80 年代以来,中国人口数量剧增、经济高速发展,人类活动对地表的影响强度日益增加。现代科技的应用也造成农业物种的气候适应性增强,区域农业耕作习惯和物种布局发生很大变化。畜牧业、城市化等更加速改变陆表覆盖类型的自然布局,在部分地区已经远远超过自然因素对陆表的作用,导致人类活动在区域、全球气候变化中的影响权重越来越显著^[7~11],陆-气之间自然关系受到高强度干扰,陆-气间固有的自然平衡随之打破,植被格局发生改变^[12]。

植被生态系统是脆弱型地表覆盖类型,整个生命过程涵盖植被自身生理过程和气候响应两个方面^[13,14]。气候变暖最直接的结果是造成各类气候区划边界的变动,其次是地表生态系统的快速响应过程,所产生的环境和农业粮食安全等问题是非常重要的研究课题。而由气候变暖引发的气候和环境进一步的连锁反应更加未知。本文从气候环境应用角度出发,利用 1960~2000 年气象站资料,重点研究了气候变暖大背景下中国区域活动积温的空间分布和变化;通过 NOAA-AVHRR 遥感卫星数据,从气候尺度上分析了气候变暖所造成的一年两季农业耕作布局的变化、以及区域尺度植被物候的适应性调整。

1 数据源和分析方法

1.1 数据源

本文所使用的气象数据全部来自气象观测台站,共收集整理了 1960~2000 年 730 个台站数据。其中,1960~1969 年期间具有连续完整日气温观测资料的台站共 669 个,1970~1979 年 683 个台站,1980~1989 年 700 个台站,1990~1999 年 712 个。使用的遥感资料源于 NOAA-AVHRR 卫星数据,分辨率为 8 km×8 km,时间序列从 1981~2000 年,NOAA-AVHRR 资料经过了除云和大气订正。

1.2 研究方法

一年两季农业耕作区域的分布提取是根据波谱分析原理^[15]。植被叶面积指数 $LAI(t)$ 的季节变化可以通过 k 个谐波来近似的描述:

$$LAI(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi k}{T} t + b_k \sin \frac{2\pi k}{T} t \right) \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} LAI(t) dt \\ a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} LAI(t) \cos \omega_k t dt \\ b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} LAI(t) \sin \omega_k t dt \end{cases} \quad (2)$$

式中, k 为波数; ω_k 为圆频率; t 为时间。

由于一年两季植被的叶面积季节变化具有显著的 3 波数特征,可以通过 F 分布鉴别 3 波数显著区域分布:

$$F = \frac{\frac{1}{2}(a_k^2 + b_k^2)/2}{(s^2 - \frac{1}{2}a_k^2 - \frac{1}{2}b_k^2)/(n - 2 - 1)} \tag{3}$$

式中, s^2 为时间序列的方差。在某显著水平时,如果 $F > Fa$ 临界值,认为该谐波是显著的,相应的周期也就是 $LAI(t)$ 存在的显著周期。

2 活动积温年代变化及对农业耕作制度的影响

2.1 活动积温的年代空间分布变化

在全球气候变暖背景下,中国区域大部分地区气温年变化都呈上升趋势。从理论上而言,植被的物候规律也将发生适应性调整。然而对植被生命过程有意义的却是活动温度。活动温度是植被生长所需的下限日平均气温值,就绝大多数植被而言,活动气温的下限为 10℃。年累积活动气温(活动积温)和活动气温天数是影响植被物候和植被物种分布的两项重要的能量要素。活动积温高、活动气温天数长意味着植被生长期相对较长,因此植被的适应性调整实际上是活动积温和天数的综合作用结果。本文参考气候区划的研究成果,采用中国气象局气候区划中的两项关键指标:(1) ≥10℃ 年活动积温大小,(2) 活动积温天数作为判据,分析气候变暖趋势下,活动积温和天数的综合年代变化。其中各项指标的界限与中国气象局气候区划标准相同,划分标准如表 1 所示^[16]。

表 1 活动积温和天数区间划分标准
Table 1 Division criterion based on active accumulated temperature and days

区间代码	≥10℃ 年积温(℃)	≥10℃ 天数(d)
I	<1600 ~ 1700	< 100
II	1600 ~ 1700 至 3100 ~ 3400	100 ~ 160
III	3100 ~ 3400 至 4250 ~ 4500	160 ~ 220
IV	4250 ~ 4500 至 5000 ~ 5300	220 ~ 240
V	5000 ~ 5300 至 6500 5000 ~ 5300 至 6000	240 ~ 300 240 ~ 300
VI	6500 至 8000 6000 至 7500	300 ~ 365 300 ~ 350
VII	8000 至 9000 > 7500	365 350 ~ 365
H	<2000	< 100

根据表 1 划分标准,分别计算了每个气象台站在各年代所属空间区域,并以 1990 ~ 1999 年计算结果作为参照标准,绘制了各种级别的活动积温和天数综合作用的区域边界,叠加在其它各年代计算结果分布图上,作为衡量对比 4 个年代活动积温和天数综合变化的标准。其中高原地区(H)由于观测台站有限,自然因素复杂,所以仍然采用中国气象局的划分结果。计算结果显示,自 20 世纪 60 年代至 80 年代,各级别的活动积温和天数边界位置相对稳定,范围的增减并不明显(图 1a,b,c)。90 年代随着气温的显著上升,各级别活动积温和天数边界分布发生明显变化。区域 II 南部边界 90 年代北进、区域 III 整体向北扩展、区域 IV 东部沿海区域向北方推进;在华南沿海地区,90 年代区域 VII 范围也明显向北扩展(图 1d)。同时在 4 个年代中,判断因子没有满足区域 I 的条件。

事实上,各类气候区划在 20 世纪 90 年发生的调整,与近年来气候的持续变暖密切相关^[17,18]。自 20 世纪 60 年代以来,中国青藏高原地区(图 2a)、淮河以北地区(图 2b)、淮河以南地区(图 2c)降水量年变化相对比较平稳,并没有显著的增减趋势。但 3 个区域的年平均气温却共同表现为增加趋势,气温上升最显著的时段发生在 20 世纪 80 年代中期以后。气温的增高导致区域范围活动积温和天数增加,导致区域干旱加剧,植被生长更加依赖于地表水。同时积温的增加意味着地表植被生长期延长,植被的物候活动规律会发生调整。

2.2 气候变暖对区域农业耕作制度的影响

地表覆盖类型的空间分布是区域性气候适应的结果,无论年变化还是季节变化,都与区域气候具有高度

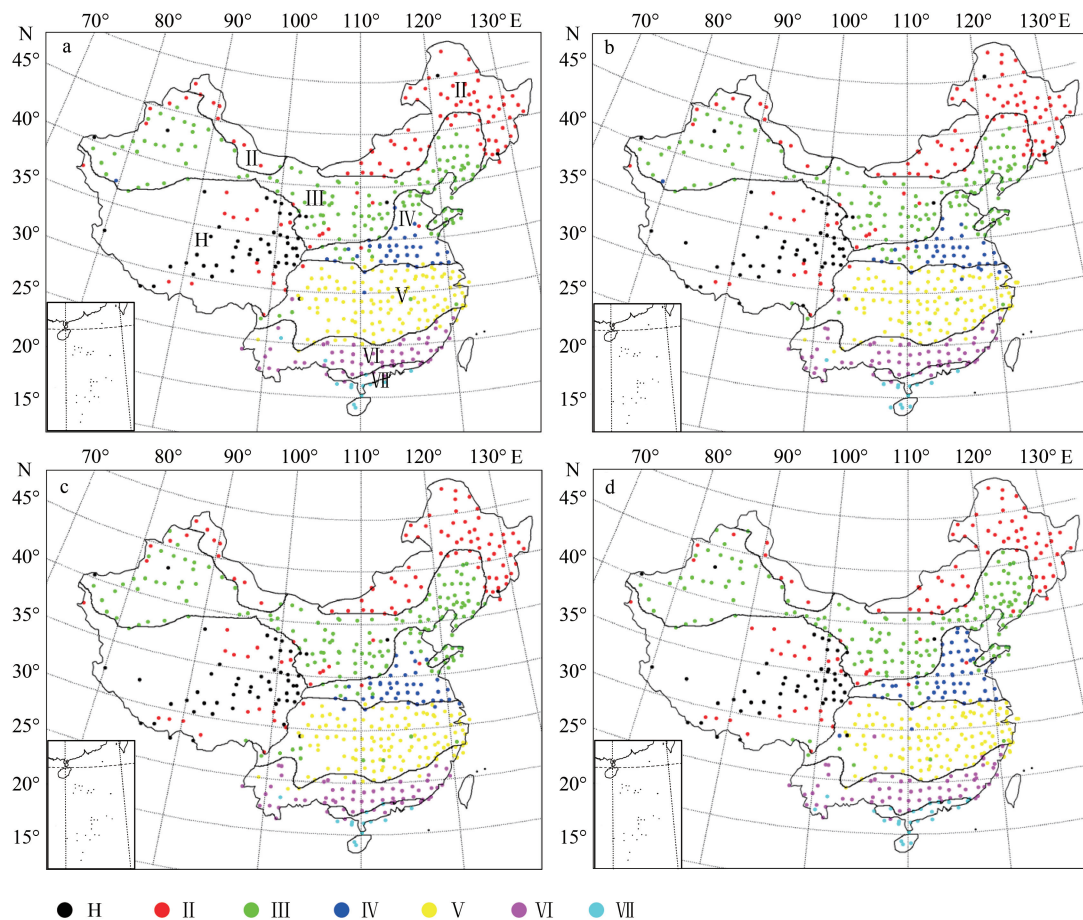


图1 活动积温和天数区间范围分布

Fig. 1 Distribution of active accumulated temperature and days division

a:1960~1969 年;b:1970~1979 年;c:1980~1989 年;d:1990~1999 年

的相关性。在自然状况下,通过遥感信息能够很好的监测植被的物候和覆盖周期变化^[19~24]。然而人类活动却使地表特征的变化与自然状况下明显不同,在很大程度上打破了植被~大气间相互作用和相互适应关系。由于人口压力,中国历来就是农业耕种大国,近年来人口数量的激增,在区域气候许可的条件下,农业用地的种植效率得到大幅度提高。其中能够反映气候变化又能反映人为作用的是一年两季农业用地面积的变化。一年两季农业用地面积的增减,一方面反映出人为的影响强度,另一方面也反映出随着气候变暖、活动积温和活动积温天数的增加,适合一年两季耕作的气候区域变化。

一年两季农作物的生长特性具有独特的波谱特征。比如我国华北平原地区,气候温暖、植被的生长期相对较长,在历史上就是一年两季耕作地区。比较典型的耕作制度是9月下旬冬小麦播种、10月下旬冬小麦分蘖,植被叶面积接近第一个峰值,之后随着冬季来临,冬小麦停止生长,春季4月上旬至5月下旬冬小麦进入拔节和抽穗期,叶面积达到第二个峰值,6月上旬冬小麦成熟收割,后期植被以旱作或水作为主,植被叶面积出现第三个峰值^[25]。

叶面积指数是遥感反演数据中能够代表植被覆盖信息的物理参数。 LAI 具有清晰的物理含义,可以突出植被信息、消除遥感信号中各类非植被信息。 LAI 反演采用 Sellers 等^[26] 提出的基于全球植被波谱统计结果的反演方法,这种方法对于相同的象元点,反演结果稳定,适合植被覆盖年变化和季节变化分析。根据一年两季种植区域植被的季节变化特征,应用波谱分析方法,在显著水平为 0.01,当 $F > 4.49$,该谐波是显著的,对应的周期也就是 $LAI(t)$ 存在的显著周期。

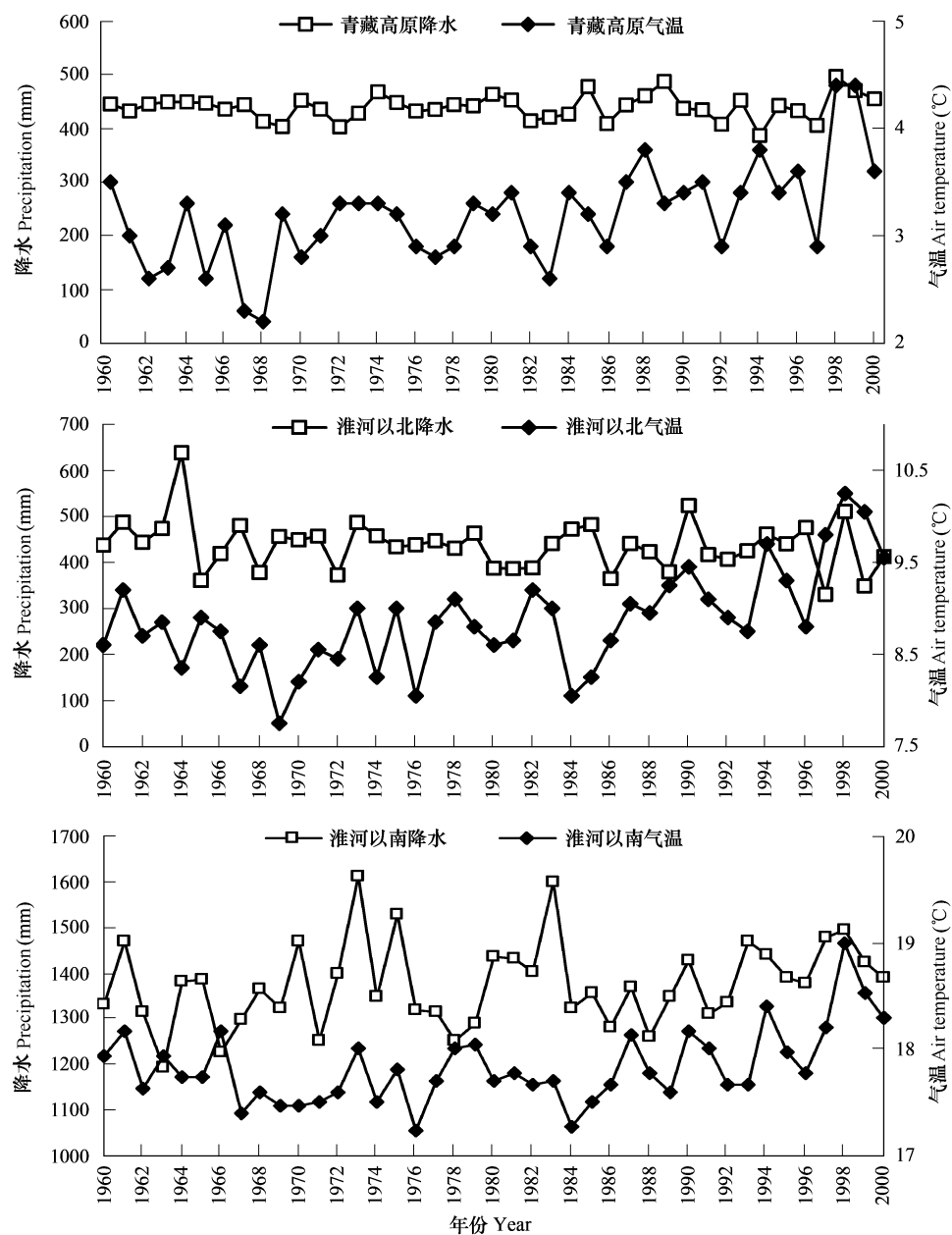


图2 1960~2000年中国青藏高原、淮河以北和淮河以南地区年降水和年平均气温变化

Fig. 2 Annual precipitation and annual average temperature in Qinghai-Tibet Plateau, Northern regions of the Huaihe River and Southern regions of the Huaihe River

中国南北横跨温带、亚热带和热带3个气候带,降水量和气温季节差异巨大,但总体上为季风性气候,从南到北降水和温度都具有明显的季节变化。降水和温度的震荡周期近似为12个月,唯一的差异是波动幅度不同。与气候相适应,地表植被的生长过程呈现同步的物候和生命周期。人为因素的干扰会在一定程度上破坏植被-大气间固有的自然关系。旬最大 *LAI* 谐波分析结果显示:在以华北平原为中心的IV区域,存在大范围的波数为3的谐波显著区域,即这些区域是一年两季农业物主要分布区域。20世纪80~90年代两个阶段,一年两季耕作区域面积存在明显差异。80年代一年两季耕作区域主要集中于华北平原及以南方部分区域,北界在40°N附近(图3)。90年代后一年两季耕作区域面积扩大的同时,耕作区域也向北拓展,最远已达到42°N,即沈阳周边地区(图3)。资源普查历史数据可以间接证实卫星分析结果的可靠性。解放初期、我国复

种北界(100%等复种指数线)沿辽南、长城、青藏高原东缘一线通过,至 90 年代东端移至吉林北部^[27],90 年代中期时 20 世纪末,辽宁省复种指数一直保持上升趋势^[28]。

一年两季作物耕地面积的扩展和北进,首先反映的是科技发展导致的物种适应能力的提高以及随之而来的耕作制度变化,但耕作制度改变的前提是气候条件的许可。因此一年两季耕作区域面积的拓展也与近年来北方地区气候变暖有关。90 年代活动积温和天数综合指标边界的北进,能够合理解释一年两季耕作区域的北拓。

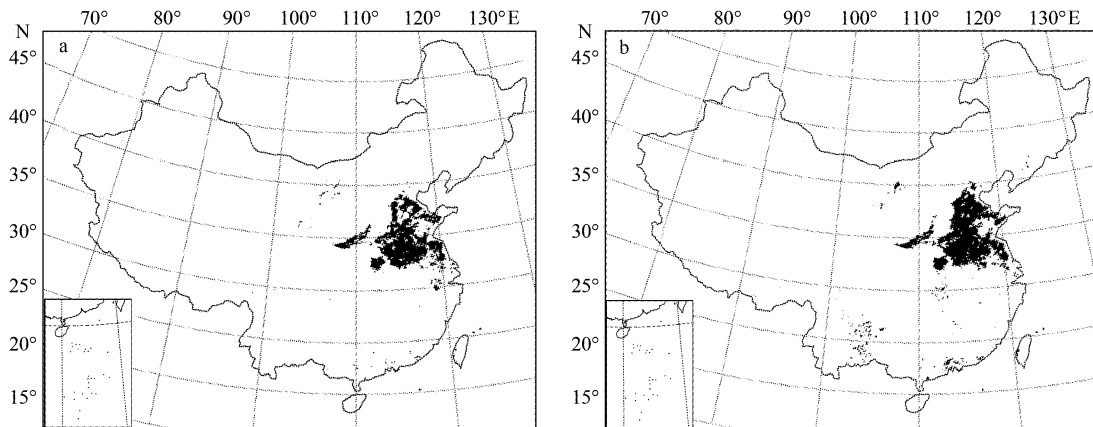


图3 20 世纪 80 年代(a)与 90 年代(b)一年两季农业耕作显著区域面积对比

Fig. 3 Area change of two crops annually with significant F distribution in 1980s(a) and 1990s(b)

3 气候变暖对区域植被物候变化的影响

中国区域气温升高主要发生在 80 代中期以后,之前年平均气温没有显著的线性趋势变化。气温上升和活动积温天数的增加除造成气候区划发生调整、农业用地复种指数增加外,另一个重要的影响是导致植被物候发生改变,即植被开始生长的时间提前、生长期结束的时间延长。在区域尺度内,气温升高引发的植被物候变化对自然植被和农业植被同样适合^[29~31]。描述植被的物候变化需要遥感监测的参数对植被变化极为敏感。由于反演技术的制约, LAI 不具有这种高度的敏感特征。归一化植被指数($NDVI$)是直接源自遥感信息、对地表植被变化十分敏感的参数之一。它包含了气候因素和人为因素对地表覆盖特征作用的综合信息。与 LAI 仅仅代表植被信息不同,对于非植被覆盖区域, $NDVI$ 同样也有意义,是描述区域内植被物候变化的理想参数。由于气温是在 80 年代中期之后开始持续上升,1985 年之前 $NDVI$ 旬变化可以代表气温升高前植被物候的季节变化。因此以 5a 为时间单位,统计分析 1981~2000 年期间每个气候区划内 4 个时段的 $NDVI$ 的旬变化。

在本文绘制的 7 个量级的活动积温和天数综合指标区域内, $NDVI$ 的旬平均变化结果显示,除 IV 区域由于一年两季农业耕作 $NDVI$ 存在季节性不连续变化外(图 4c),其它 6 个区域 $NDVI$ 波动与区域内降水和气温都存在不同程度的准同步变化特征。在气温季节变化幅度较大的 II 区域(图 4a)和高原地区(图 4g), $NDVI$ 波谱周期与区域气温变化基本一致,呈现为 12 个月的主周期。由于活动积温和天数综合指标边界以 90 年代为标准,因此 II 区域内植被物候相对稳定,呈现为 4 月中下旬植被生长期开始时,4 个时段旬 $NDVI$ 分布接近(图 4a)。III 区域由于向北方拓展,覆盖区域扩大,植被物候波动开始出现变化。在 4 月份植被生长开始的季节,90 年代两个时段 $NDVI$ 大于 80 年代两个时段的 $NDVI$,表示植被生长期开始提前,尤其是 1985 年之后,随着气温显著的上升,与 1985 年之前相比物候相位明显提前大约一句的时间(图 4b)。物候相位提前的现象在 IV 区域,即一年多季植被分布区域最明显,层次也更加清晰。1986~1990 年比 1981~1985 年提前大概一句左右,而 1996~2000 年比 1981~1985 年大约提前 2 旬左右(图 4c),对冬季农作物而言代表返青期提前。随着气候区域的向南分布,80 年代中期以后植被生长期逐时段提前的层次越来越模糊。原因在于这些区域范

围相对稳定,且年活动积温和活动积温天数原本就很高。但与气温平稳的 1985 年之前比较,生长期还是提前大概一句左右(图 4d,e,f)。青藏高原地区气温 80 年代中期之后上升也十分显著,就整个区域而言,1985 年之后 3 个时段植被生长期较之前提前约一句左右,但 1985 年之后 3 个时段 NDVI 层次不是很明显(图 4g)。

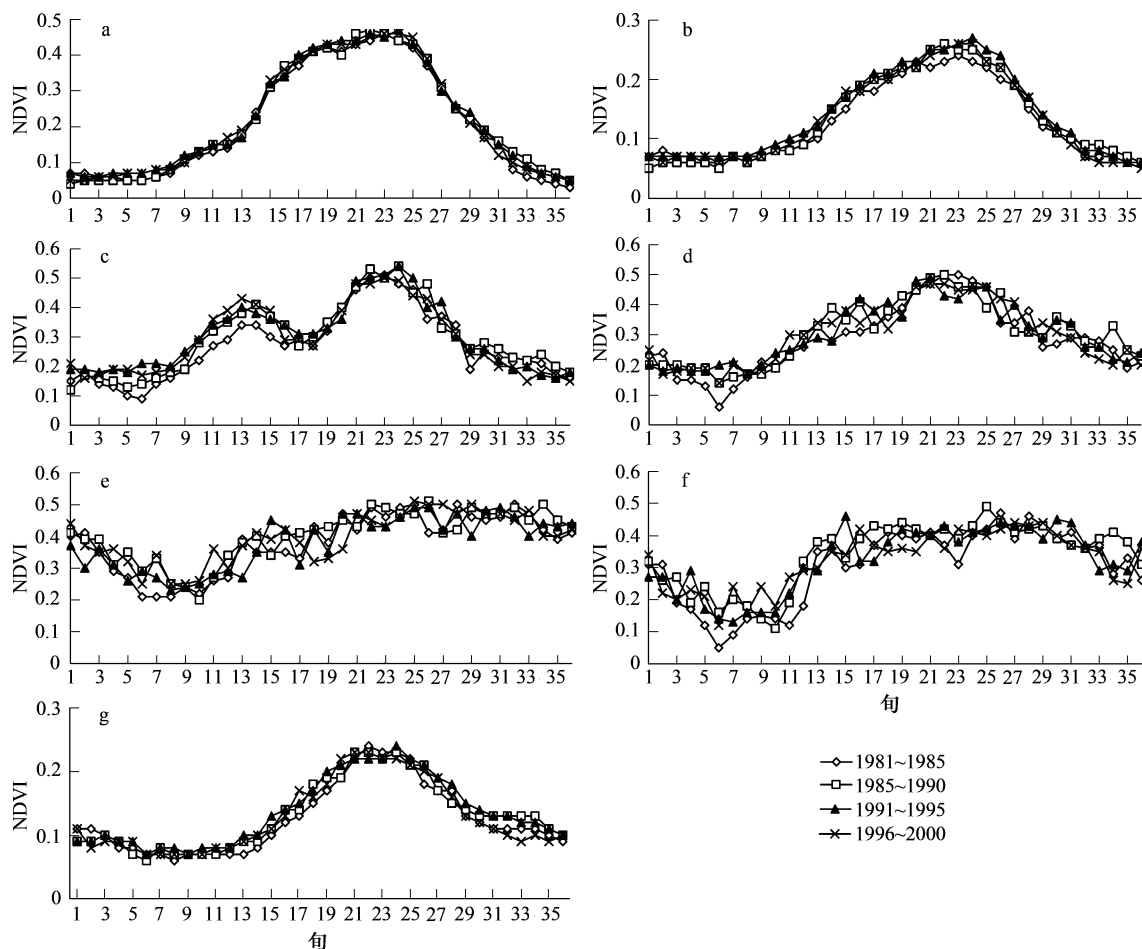


图 4 1981~2000 年 4 个时段平均 NDVI 旬变化。(a): II;(b) III;(c) IV;(d) V;(e) VI;(f) VII;(g) H

Fig. 4 Change of average NDVI every 5 years in ten days interval 1981—2000. (a): II (b) III; (c) IV; (d) V; (e) VI; (f) VII; (g) H

上述结果虽然仅仅来自于 NDVI 一种参数,而且对植被而言,该指数反映的情况有一定的不确定性,但来自遥感信息的其它参数,包括植被生理参数却不具有 NDVI 的高度敏感性。NDVI 数据能够在一定程度上反映出植被物候提前的趋势,国内外最新物候进展也主要依靠类似的遥感分析技术^[32,33]。就全球范围而言,近年来各地实际观测也显示出植被物候期提前现象,如欧洲中西部地区,区域尺度的物候观测资料显示,气温升高使现在的春季物候比 50a 前提前 10~20d^[34,35]。我国部分城市和地区观测资料也显示出物候提前现象。北京地区 1988 年之后山桃始花物候期比之前提前 9.63 d^[36];郑州地区木本植被物候期变化趋势表现在展叶、开花、果熟期呈提前趋势,20 世纪 90 年代中后期,各类木本植被春季物候期提前 10d 左右,南京地区也基本保持同样的趋势^[37]。青海省 8 个农气观测站草本植物物候观测资料显示,草本植物物候对气温上升响应强烈,与 80 年代末相比,90 年代后期全省绝大部分地区草本植物物候期提早 2~12 d,生长期延长 3~13 d^[38]。

4 讨论和结论

20 世纪 80 年代中期之后全球气候变暖大背景下,中国区域活动积温和天数综合指标边界发生调整,调整显著地发生在 90 年代。作为地球系统的重要组成部分,地表生态系统适应性调整过程中,人为作用引起的植被生态系统的被动性调整非常突出。在中国区域,一年两季耕作范围十分广泛,然而,自然地理因素等使得

长江流域及以南地区地表自然植被覆盖率很高,农田面积比重远低于北方地区,同时复种指数也接近饱和,因此在区域尺度,波谱分析结果显示一年多季耕作显著区域并不明显。相反,北方地区是中国农业用地主要分布区域,存在大范围的一年两季和一年一季耕作区,波谱分析结果证实,气候变暖导致一年两季耕作范围呈现向北延展趋势。

与一年一季相比,一年两季耕作区域植被的几何形态、地表物理属性变化与同区域自然植被存在极大的差异。几何形态的改变引起的粗糙度波动,可以造成边界层风速变化,引发边界层水汽水平辐合、海-陆降水分布改变,直接影响地面日温度、行星边界层的能量和动量的相对分布^[39,40]。因此一年两季作物面积的拓展和缩减不但包含对区域性气候的适应性,同时也间接反映了人为作用对区域气候的影响强度信息。80 年代中期后气温持续上升使得适合一年两季耕作区域向北扩展,部分区域农业耕作制度也将发生调整,由此引发的地表几何形态的强烈变化、以及区域物候波动相位与区域气候的非同步变化,将通过不同形式的途径对区域气候施加影响。

气候变暖也造成生态系统的主动性适应调整。80 年代中期后气温的持续上升、积温和天数的增加,植被生长期随之提前。变化最明显、时间层次分明地发生在我国南温带和北亚热带气候区。其它区域与 1985 年气温升高前相比,植被生长期都存在不同程度的提前现象。气温的升高仅仅是植被生长期提前的必要条件,生长期提前的幅度还受区域内物种分布、降水等其它条件的制约。因此气温的持续升高,并不意味着区域内植被生长期也持续地同步提前,但对积温较低、积温天数较少的北方地区,气温上升对植被物候的影响将更加突出。

References:

- [1] Houghton J H, Ding Y, Griggs D J, *et al.* IPCC. Climate Change, the scientific basis, contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. United Kingdom: Cambridge University Press, 2001. 769.
- [2] Kasabara A, Liou K N, Xue Y K. Investigation of biogeophysical feedback on the African climate using a two-dimensional model. *Journal of Climate*, 1990, 3: 337—532.
- [3] O'Brien K L. Upscaling tropical deforestation: Implications for climate change. *Climatic Change*, 2000, 44: 311—329.
- [4] Pielke S R A, Marland G, Betts R A, *et al.* The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 2002, 360: 1—15.
- [5] Kabat P, Claussen M, Dirmeyer P A, *et al.* Vegetation, water, humans and the climate-A new perspective on an interactive system. Heidelberg, Springer Verlag, 2004.
- [6] Pielke S R A. Land use and climate change. *Science*, 2005, 310: 1625—1626.
- [7] Zhang P Y, Ge Q S, Lu M, *et al.* Human dimension in the global environment change. *Earth Science Frontiers*, 1997, 14(1): 1—2.
- [8] Ge Q S, Chen P Q, Fang X Q, *et al.* Adaptation to global change: challenge and research strategy. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(4): 516—524.
- [9] Zhang H, Fan Z L. The impacts of climate change and human activity on evolution of oasis in tarim basin. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(4): 308—313.
- [10] Matthews H D, Weaver A J, Meissner K J, *et al.* Natural and anthropogenic climate change: incorporating historical land cover change, vegetation dynamics and the global carbon cycle. *Climate Dynamics*, 2004, 22: 461—479.
- [11] Pitman A J, Narisma G T. The role of land surface processes in regional climate change: a case study of future land cover change over South Western Australia. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2005, 89: 235—249.
- [12] Fu C B, Dong W J, Wen G, *et al.* Regional response and adaptation to global change. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 61(2): 245—250.
- [13] Gritti E S, Smith B, Sykes M T. Vulnerability of Mediterranean basin ecosystems to climate change and invasion by exotic plant species. *Journal of Biogeography*, 2006, 33: 145—157.
- [14] Hély C, Bremond L, Alleaume S, *et al.* Sensitivity of African biomes to changes in the precipitation regime. *Global Ecology and Biogeography*, 2006, 15: 258—270.
- [15] Huang J Y. Statistic analysis and forecast method in meteorology. Beijing: China Meteorological Press, 2000. 1—298.
- [16] Compilation of China natural geography. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1984. 1—200.
- [17] Zhao X Y, Zhang H Y, Wan J. The impact of climatic change on the climate zones in the Qinghai Tibetan Plateau. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(2): 190—195.
- [18] Huang Z Z, Zhang J H, Shi X J, *et al.* Global warming and climate changes in the climatic zones of Guangdong Province. *Tropical Geography*, 2008, 28(4): 302—305.
- [19] Duchemin B, Goubier J, Courrier G. Monitoring phenological key stages and cycle duration of temperature deciduous forest ecosystem with NOAA/AVHRR Data. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67: 68—82.
- [20] Duchemin B, Guyon D, Lagouarde J P. Potential and limits of NOAA-AVHRR temperal composite data for phenology and water stress monitoring

- of temperate forest ecosystem. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(5): 895–917.
- [21] Moody A, Johnson D M. Land-surface phonologies from AVHRR using the discrete fourier transform. *Remote sensing of Environment*, 2001, 75, 305–323.
- [22] Bonfiglio, Cuomo V, Lanfred M, *et al.* Interfacing NOAA/AVHRR NDVI and soil truth maps for monitoring vegetation phenology at a local scale in a heterogeneous landscape of Southern Italy. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(20): 4181–4195.
- [23] Zhang X X, Ge Q S, Zheng J Y. Overview on the vegetation phenology using the remote sensing. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 4(4): 47–57.
- [24] Li S Q, Zhang F C. Phenological informationalizing and phenological spatio-temporal change analysis. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 18(4): 352–359.
- [25] Zhang F C, Wang D H, Qiu B J. The phenology in China. Beijing: Science Press, 1987. 1–202.
- [26] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, *et al.* A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of Atmospheric Science*, 1986, 43: 505–531.
- [27] Guo B L. The analysis for the change Of multiple cropping index in China. *Economic Geography*, 1997, 17(3): 8–13.
- [28] Zhu H Y, Li X B, Xin L J. Intensity change in cultivated land use in China and its policy implications. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(6): 907–915.
- [29] Ma Y L, Yu W H, Fang X Q. Change of grass growth in the Hulun Buir Steppe in response to global warming. *Arid Land Geography*, 2004, 27(1): 29–34.
- [30] Zhu X X, Fang X Q, Wang Y. Responses of corn and rice planting Area to temperature changes based on RS in the West of Heilongjiang Province. *Scienia Geographica Sinica*, 2008, 28(1): 66–71.
- [31] Ma L, Fang X Q. Effects of global warming on seasonal tourism for the last 20 years in Beijing-A case study on the peach flower stanza of Beijing botanical garden. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(3): 313–319.
- [32] Lu P L, Yu Q, He Q T. Responses of plant phenology to climatic change. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 923–929.
- [33] Li R P, Zhou G S, Zhang H L. Research advances in plant phenology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3): 541–544.
- [34] Menzel A, Estrella N, Fabian P. Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951–1996. *Global Change Biology*, 2001, 7: 657–666.
- [35] Menzel A. Plant phenological anomalies in Germany and their relation to air temperature and NAO. *Climatic Change*, 2003, 57: 243–263.
- [36] Zhang X X, Ge Q S, Zheng J Y. Impacts and lags of global warming on vegetation in Beijing for the last 50 years based on remotely sensed data and phonological information. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(2): 123–130.
- [37] Liu J, Zheng Y F, Zhao G Q, *et al.* Responses of phenology to climate change in Zhengzhou area. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1471–1479.
- [38] Qi R Y, Wang Q L, Sheng H Y. Analysis of phenological-phase variation of herbage plants over Qinghai and impact of meteorological conditions. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(3): 306–310.
- [39] Sud Y C, Smith M J. Influence of local land-surface processes on the Indian Monsoon: A numerical study. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1985, 24, 1015–1036.
- [40] Sud Y C, Smith M J. The influence of surface roughness of deserts on the July circulation — A numerical study. *Bound-Layer Meteor*, 1985, 33: 1–35.

参考文献:

- [7] 张丕远, 葛全胜, 吕明, 等. 全球环境变化中的人文因素. *地学前缘*, 1997, 14(1): 1–2.
- [8] 葛全胜, 陈泮勤, 方修琦, 等. 全球变化的区域适应研究: 挑战与研究对策. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 516–524.
- [9] 张宏, 樊自立. 气候变化和人类活动对塔里木盆地绿洲演化的影响. *中国沙漠*, 1998, 18(4): 308–313.
- [12] 符淙斌, 董文杰, 温刚, 等. 全球变化的区域响应和适应. *气象学报*, 2003, 61(2): 245–250.
- [15] 黄嘉佑. *气象统计分析与预报方法*. 北京: 气象出版社, 2000. 1–298.
- [16] 中国自然地理图集. 北京: 地图出版社, 1984. 1–200.
- [17] 赵昕奕, 张惠远, 万军. 青藏高原气候变化对气候带的影响. *地理科学*, 2002, 22(2): 190–195.
- [18] 黄珍珠, 张锦华, 时小军, 等. 全球变暖与广东气候带变化. *热带地理*, 2008, 28(4): 302–305.
- [23] 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 遥感技术在植物物候研究中的应用综述. *地球科学进展*, 2003, 4(4): 47–57.
- [24] 李胜强, 张福春. 物候信息化及物候时空变化分析. *地理科学进展*, 1999, 18(4): 352–359.
- [25] 张福春, 王德辉, 丘宝剑. *中国农业物候图集*. 北京: 科学出版社, 1987. 1–202.
- [27] 郭柏林. 我国复种指数变化特征、效益和潜力. *经济地理*, 1997, 17(3): 8–13.
- [28] 朱会义, 李秀彬, 辛良杰. 现阶段我国耕地利用集约度变化及其政策启示. *自然资源学报*, 2007, 22(6): 907–915.
- [29] 马玉玲, 余卫红, 方修琦. 呼伦贝尔草原对全球变暖的响应. *干旱区地理*, 2004, 27(1): 29–34.
- [30] 朱晓禧, 方修琦, 王媛. 基于遥感的黑龙江省西部水稻、玉米种植范围对温度变化的响应. *地理科学*, 2008, 28(1): 66–71.
- [31] 马丽, 方修琦. 近年气候变暖对北京市时令旅游的影响以北京市植物园桃花节为例. *地球科学进展*, 2006, 21(3): 313–319.
- [32] 陆佩玲, 于强, 贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应. *生态学报*, 2006, 26(3): 923–929.
- [33] 李荣平, 周广胜, 张慧玲. 植物物候研究进展. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 541–544.
- [36] 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 近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. *生态学杂志*, 2005, 24(2): 123–130.
- [37] 柳晶, 郑有飞, 赵国强, 等. 郑州植物物候对气候变化的响应. *生态学报*, 2007, 27(4): 1471–1479.
- [38] 祁如英, 王启兰, 申红艳. 青海草本植物物候期变化与气象条件影响分析. *气象科技*, 2006, 34(3): 306–310.