

唐健, 汤剑平. 基于植被光合有效辐射资料研究中国地区植被大气反馈作用. 地球物理学报, 2012, 55(6): 1804-1816, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.06.002.

Tang J, Tang J P. Investigations of vegetation-atmosphere feedback in China using satellite-based FPAR data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(6): 1804-1816, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.06.002.

基于植被光合有效辐射资料研究中国地区 植被大气反馈作用

唐 健, 汤剑平*

南京大学大气科学学院, 南京 210093

摘 要 本文采用中国地区基于卫星观测的植被光合有效辐射资料(FPAR)和月平均气候数据(1982—2000年)来分析中国区域陆面植被与气温、降水的反馈作用。通过计算和分析超前滞后相关系数和反馈系数发现:春、夏季 FPAR 超前气温一个月相关系数在全国大部分地区为负值,反映出植被生长旺盛,可以降低局地气温。春、秋两季气温与 FPAR 的同期相关系数较大。夏季降水超前 FPAR 一个月的正相关性反映出夏季降水对于植被生长存在促进作用。在中国长江流域以南区域,植被对于气温的反馈系数为一致正值,可达 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$;在 30°N 以北区域显示出一致的负反馈,可达 $-0.42\text{ }^{\circ}\text{C}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$ 。FPAR 对降水全年反馈系数全国区域平均可达 $-2.12\text{ cm month}^{-1}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$ 。不同植被类型、不同季节的植被反馈效应也存在差异。植被反馈系数可以用来验证动态植被模式计算的植被大气反馈作用。

关键词 植被光合有效辐射, 植被大气相互作用, 相关性, 去相关时间, 反馈系数

doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.06.002

中图分类号 P467

收稿日期 2011-01-03, 2011-11-10 收修定稿

Investigations of vegetation-atmosphere feedback in China using satellite-based FPAR data

TANG Jian, TANG Jian-Ping*

School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract Satellite-based fraction of PAR (Photosynthetically Active Radiation) absorbed by vegetation canopy and monthly climatology data (1982—2000) are used to investigate possible feedbacks between surface air temperature, precipitation and vegetation. The results show that correlation in spring and summer with FPAR leading temperature for one month is negative in most regions of China, which may indicate the more prosper the vegetation is, the more positive influence the vegetation may have on lowering local temperature. The instantaneous correlation between temperature and FPAR is more promising in spring and autumn. The positive correlation with summer precipitation leading FPAR for one month shows the possible positive impact of precipitation on vegetation. The feedback parameter between FPAR and temperature is all positive on the south of Yangtze River Basin (up to $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$) and is negative on the

基金项目 国家自然科学基金(40705029, 40830639), 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB428500, 2011CB952000)共同资助。

作者简介 唐健, 男, 1985年生, 博士研究生, 从事陆-气相互作用研究. E-mail: tanguy2200@gmail.com

* **通讯作者** 汤剑平, 男, 1974年生, 副教授, 2004年博士毕业于南京大学大气科学系, 主要从事气候变化、区域气候模式、陆气相互作用、风能等方面研究. E-mail: jptang@nju.edu.cn

north of 30°N latitude (up to $-0.42\text{ }^{\circ}\text{C} (0.1\text{ FPAR})^{-1}$). The spatial distribution of feedback parameter between FPAR and precipitation is not homogeneous. The feedback parameter is also varying with different vegetation types and different seasons. The feedback parameters should be a nice basis of vegetation-atmosphere feedback for dynamic vegetation model validation.

Keywords FPAR, Vegetation-atmosphere feedback, Correlation coefficient and decorrelation time, Feedback parameter

1 引言

气候变化研究已经成为当前热门的科研领域,影响气候变化的因子很多,其中生物圈植被大气相互作用是陆气系统相互作用中的一个重要组成部分. 植被在全球和区域气候变化中起到重要作用^[1-5]. 太阳辐射、气温和降水等气候条件对植被生长有很大的影响:太阳辐射可以直接影响到植物光合作用,温度在控制植被生长周期中起决定性作用^[6],而降水量很大程度上决定表层土壤含水量;植被对于气候的影响也是多方面的:植被蒸腾作用通过控制叶面气孔开合来决定进入大气的水分和二氧化碳,地表植被覆盖种类差异、植被叶面积指数(LAI, Leaf Area Index)以及是否存在植被覆盖将导致不同地表反照率和蒸散量的不同,而由于植被的存在对于地表粗糙度的改变,会影响地表风速、水汽输送、湍流以及边界层高度.

早期由于缺乏对植被变化的观测资料,研究植被大气相互作用主要通过数值模式的模拟试验和发展复杂陆面过程模式展开的. 如通过大气环流模式来研究热带地区森林被大量砍伐对于气候的影响^[7],改变区域气候模式(如 MM5, The Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model)中植被分布来研究不同季节植被分布对于降水的影响^[8],通过陆面过程模式比较不同植被资料输入对于地表反照率的影响^[9]. 近年来,随着卫星监测的全球植被资料的广泛应用,使得采用观测资料来衡量大尺度植被反馈过程成为可能. WANG 等(2006, 2007)^[10-12]首先采用统计 Granger 因果法等来分析夏季北美草地带对夏季气候的反馈作用. 也有学者采用滞后-超前相关系数和反馈系数^[13-15]计算了基于卫星资料的植被光合有效辐射(FPAR)和气温降水的反馈关系,估计了全球范围植被对于气温和降水反馈^[13]. Notaro 等人(2006)^[16]采用气候和植被观测资料重点定量分析了美国地区局地气温和降水与植被相互作用.

中国地域广阔,地形复杂,植被种类繁多,中国

学者对于大气植被相互作用也进行过一系列研究,如符淙斌等^[17-18]用归一化植被指数(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)和旬平均温度和降水数据在不同滞后时间尺度上进行交叉相关分析得出植被对温度变化的响应几乎是同时的,而植被对降水变化的响应则滞后二至三旬,不同植被类型的响应存在差异. 赵茂盛等^[19]应用更多气象台站数据的分析结果大致相同,并进一步指出在植被的生长期,我国南方和北方的植被生态系统对温度和降水的响应方式相反. 李晓兵等^[20]对中国 NDVI 的动态变化和与气温、降水同期相关分析的结果显示,NDVI 与气候要素的相关系数和纬度有关. 丹利等(2007)^[21]采用基于卫星资料反演的叶面积指数(LAI)和全球生态模式的植被净初级生产力(NPP)分析了新疆地区 1982—2000 年植被时空变化对于气温、降水的响应,结果显示新疆地区 LAI 和 NPP 空间分布受水分影响较大,与气温呈负相关. 智海等(2009)^[22]用全球海洋大气陆面模式(GOALS)和大气植被模式(AVIM)耦合的 GOALS-AVIM 模式来研究东亚大气循环和生态系统之间的相互作用,结果显示东亚季风的强弱与 NPP 的时空分布有关.

本文在前人研究的基础上分析了中国区域卫星观测的植被光合有效辐射资料和气象要素资料(气温和降水)的关系. 试图通过观测资料,着重从季节变化尺度到年际变化尺度上量化植被大气相互作用的大小,定量给出中国地区植被大气反馈的大小. 第二部分将给出本文采用的资料和方法,第三部分将讨论分析中国区域植被覆盖和 FPAR 分布的平均态、变率和持续性等特征. 第四部分将分别计算 FPAR 和气温及其和降水的同期、超前、滞后相关系数. 第五部分将讨论植被大气反馈系数.

2 资料与方法

2.1 资料

植被资料采用美国海洋和大气管理局(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)

极轨气象卫星上携带的改进甚高分辨率辐射计(AVHRR, Advanced Very High Resolution Radiometer)、根据植被反射光谱特征和数据所反演计算得到的植物光合有效辐射率资料(FPAR, Fraction of Photosynthetically Active Radiation),即植被的绿色部分吸收太阳的“光合有效”辐射比率,能够衡量植被活动的强弱, FPAR 资料是由卫星测量的 NDVI 资料进一步演算获得. 该资料的空间分辨率为 0.5° , 时间分辨率为月, 时间序列从 1982 年 1 月到 2000 年 12 月^[23].

月平均地面气温资料采用美国国家环境预报中心(NCEP)/美国国家大气研究中心(NCAR)再分析资料^[24]的地面气温场, 资料水平分辨率为 2.5° . 月平均降水资料采用美国气候预报中心(CPC, Climate Prediction Center)的集合分析降水资料集^[25], 资料空间分辨率为 0.5° , 时间分辨率为月, 时间序列从 1982 年 1 月到 2000 年 12 月.

在计算相关系数和反馈系数前, 将资料用双线性插值方法插值到 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的格点上, 并通过去年循环(对每个格点上逐年的月数据减去气候月统计数据得到)和去线性趋势(对每个格点上去年循环后的时间序列作去线性趋势处理得到)转化成月距平资料.

2.2 方法

去相关时间(decorrelation-time)可以表征单个物理量时间序列连续但不相关的记录之间所间隔的时间长度, 这个量比较了此物理量时间中相关部分和不相关部分之间的相互关系, 通过计算 FPAR 的去相关时间, 可以反映出 FPAR 记忆尺度(记忆时间)^[26-27]. 去相关时间可以表示为

$$T_d = \frac{1 + \alpha_1}{1 - \alpha_1}, \quad (1)$$

式中 α_1 为落后一个月自相关系数.

反馈系数可以用来定量反映植被大气相互作用. 该系数是由 Frankignoul 和 Hasselmann (1977)^[14]提出并首先应用于研究海平面气温和大气-海洋热通量的研究^[15]. FPAR 与海平面气温(SST)类似, 比大气要素具有更长的记忆时间尺度, 应用此反馈系数可以诊断植被大气间相互作用的反馈作用^[13]. 气象要素(如气温、降水)的变化可以表示为由以下两部分组成:

$$A(t + dt_a) = \lambda_A V(t) + N(t + dt_a), \quad (2)$$

式中 $A(t)$ 和 $V(t)$ 分别表示在 t 时刻的气象要素和 FPAR, λ_A 是反馈系数, dt_a 是气象要素的响应时间

(一周左右), $N(t)$ 是大气内部过程产生的气候噪声并且独立于 FPAR 变化之外. 气象要素对于 FPAR 变化的响应由 $\lambda_A V(t)$ 来表示, $N(t + dt_a)$ 是气象要素的自身变化. 反馈系数可以表示为

$$\lambda_A = \frac{\text{cov}[A(t), V(t - \tau)]}{\text{cov}[V(t), V(t - \tau)]}, \quad (3)$$

式中 τ 是滞后时间, 这个时间要比大气内部变化的时间尺度要长. 反馈系数即为大气要素滞后植被变化的协方差与植被自身变化的滞后协方差之比. 计算季节反馈系数时, 采用类似季节相关系数平均方法, 先计算季节内各月反馈系数后取平均值. FPAR 对于气温的反馈系数 λ_T 的单位是 $^\circ\text{C} (0.1 \text{ FPAR})^{-1}$, 表示 FPAR 月平均值每增加 0.1 可能因此引起温度发生变化的大小; 同样地, FPAR 对降水反馈系数 λ_P 的单位是 $\text{cm month}^{-1} (0.1 \text{ FPAR})^{-1}$, 表示 FPAR 月平均值每增加 0.1 可能引起降水变化的大小. 通过计算月平均 FPAR 对于月平均大气要素(气温和降水)反馈系数的大小来定量地衡量在中国地区植被在全年和不同季节对于大气影响的大小.

在计算反馈系数的同时用解释方差比来表征由植被变化可能导致的气象要素的变化比例, 用植被反馈造成气象要素变化部分的方差与气象要素变化的总方差之比来作为解释方差比, 即 $\frac{\sigma^2(\lambda_A \text{ FPAR})}{\sigma^2(A)}$, 其中 λ_A 为式(3)中的反馈系数, A 为气象要素(气温或者降水).

3 中国植被覆盖与 FPAR 概况

3.1 中国地区陆地植被覆盖状况

中国地区植被分类十分复杂, 从中国地区植被覆盖(取自国际地圈生物圈计划 International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP 植被覆盖数据)分布图(图 1)可以看出, 由于中国大陆地区纬度横跨超过 30° , 海拔从西向东呈由高到低分布, 植被分布特征大致成西北东南向阶梯分布, 新疆、内蒙古、甘肃、青海、西藏等地区植被类型多为草地和灌木混合分布, 东北三省地区多为混合林和落叶林, 华东地区植被类型以作物带占多数, 华南地区以常绿林为主. 中国地区不但植被分布多样化, 而且同一地区植被分布十分复杂, 往往是多种植被类型混合分布.

3.2 FPAR 和气候变量均值、季节方差和年际变化

从季节平均的 FPAR、温度和降水分布可以发现(图 2), 冬季 FPAR 最大值出现在华南的常绿林

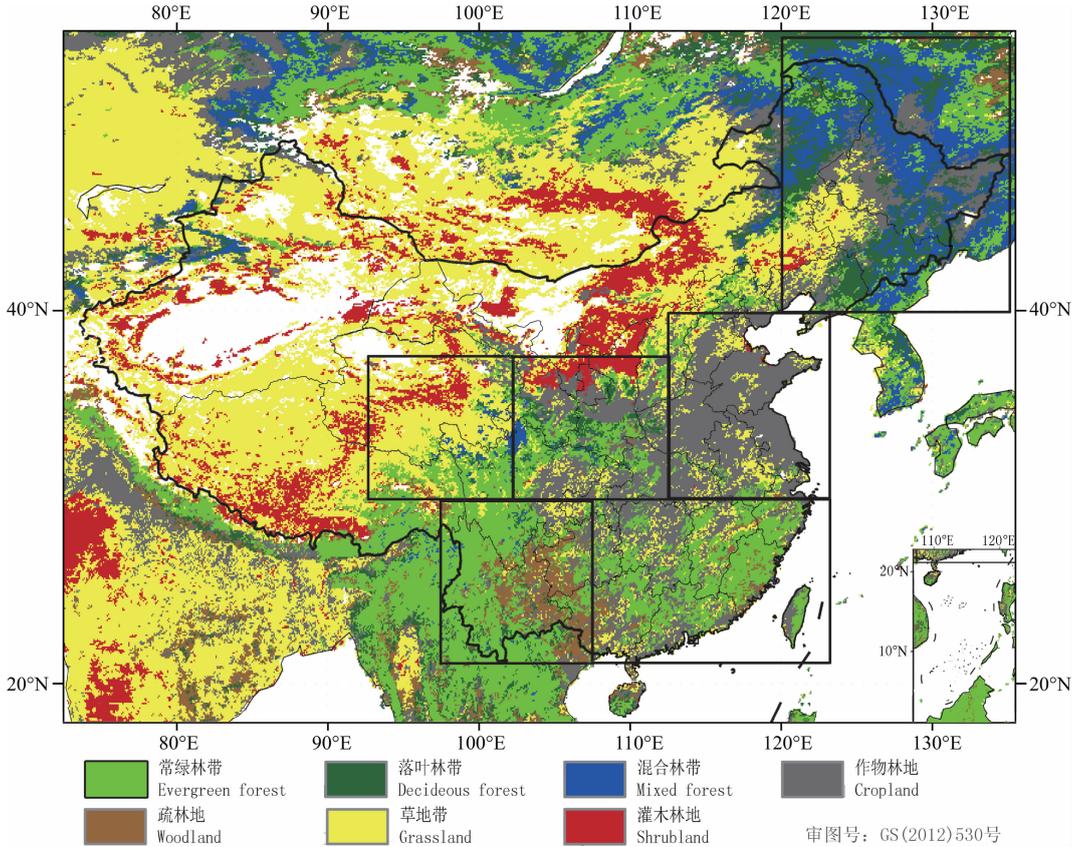


图 1 中国植被种类分布图,植被种类数据来自 AVHRR 资料同时采用 IGBP 陆地覆盖分类法,并简化归并成七种植被类型方框中显示区域为表 1 中划分的六个区域.

Fig. 1 Vegetation classification in China is derived from EROS Data Center's Global Land Cover Classification dataset, which was derived from AVHRR data from 1992-1993. Classifications are merged into seven categories for simplification Boxes indicate the six regions in Table 1.

带,可达 0.75 以上;夏季 FPAR 最大值出现在中国华南、西南常绿林带和东北落叶林带(0.75~0.9),东南季风以及西南急流带来的充沛水汽可以保障华南常绿林带的生长.在中国北部地区,由于冬季日照时间减小,且又是高纬度地区气温较低,导致 FPAR 值较小.中国 30°N 以北区域 FPAR 值均在夏季达到最大值.在中国西南季风区域,FPAR 值在秋季最高,季节变化较小.中国地区气温总体分布趋势从南向北递减,夏季最高气温中心在山东、安徽、江西一线.秋冬季节降水偏少,秋季降水中心在四川盆地地区,春夏长江以南区域降水十分充沛,春季降水最大区域在华南地区,而云贵高原降水较少.

图 3a 为 FPAR 月均值的年平均结果,在华南地区存在高值中心,全国范围内从南向北递减;从东向西也存在梯度变化,尤其是沿海和内陆存在较大差异.图 3b 为用 FPAR 季节平均值的标准差来表征的 FPAR 季节循环,在黑龙江和内蒙古的北部地区超过 0.3,该地区在冬春的气温差异和变率也是

相当大的.当去除 FPAR 季节循环(去除 FPAR 季节气候态得到其月距平值)后(图 3c),其标准差在中国大部分地区小于 0.09,最大值出现在 40°N 以北的东北地区,该地区的温度季节差异较大;还有一部分高值区位于青藏高原的东北部地区,该地区降水季节差异较为明显;另一部分高值区出现在贵州、四川东部、江西北部、安徽北部及其以北的华东地区,这些地区植被多为农作物以及草地覆盖,降水季节差异较大,温度季节差异相对东北地区较小.比较图 3b 和图 3c 可以发现,FPAR 月距平标准差的量级远小于图 3b,而高值中心与图 3b 较为吻合.

从 FPAR 月距平的标准差与 FPAR 月平均的标准差的比值分布图(图 3d)可以发现,在华北平原和华南沿海地区尤其是广东中北部、江西南部的常绿林带比值较大,反映该地区 FPAR 值季节变率中非季节循环部分占比较大;而在长江中下游地区、东北地区该比值较小,反映 FPAR 较大的季节变率中季节循环所占比重较大.

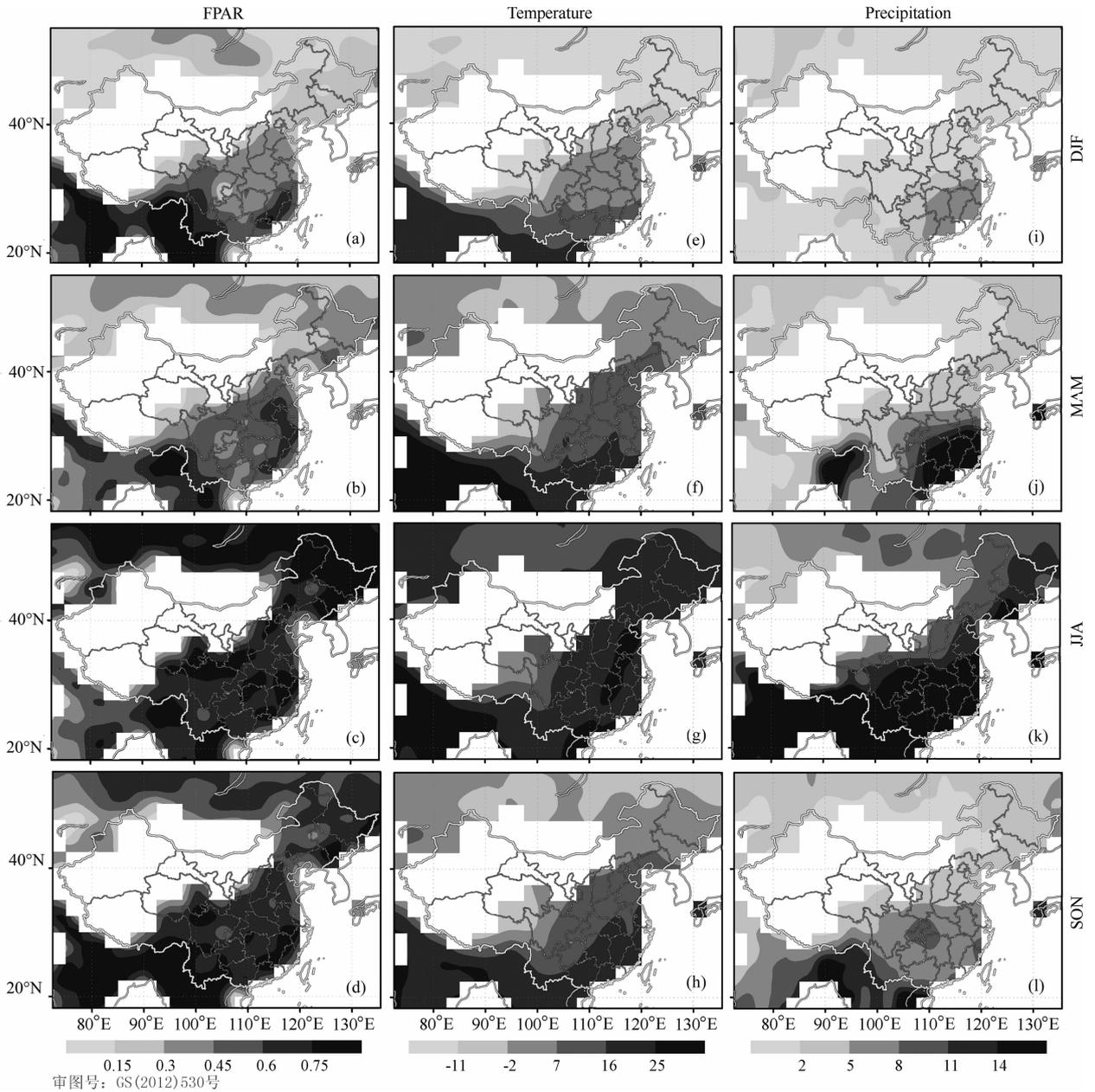


图 2 中国部分地区季节平均 FPAR (a)—(d)、地表气温(°C) (e)—(h) 和降水(i)—(l)

DJF 表示冬季平均(12,1,2 月份),MAM 表示春季平均(3,4,5 月份),

JJA 表示夏季平均(6,7,8 月份),SON 表示秋季平均(9,10,11 月份)。

Fig. 2 Seasonal average FPAR (a)—(d), surface air temperature (e)—(h) and precipitation (i)—(l)

DJF includes December, January and February, MAM includes March, April and May, JJA includes June,

July and August, and SON includes September, October and November.

3.3 FPAR 和气象要素的持续性

去相关时间和自相关系数可以用来表征 FPAR 的记忆时间尺度(持续性)^[27]. 从去相关时间的空间分布图(图 4)可以看到,在东北地区混合林带、内蒙古东北地区和青藏高原东北部的草地带和灌木林带 FPAR 距平的去相关时间可以达到 2 到 3.5 个月,滞后一个月的自相关系数可达 0.4 以上;而在华东地区的作物带、华南地区的常绿林带和西南地区的

常绿林带其去相关时间普遍低于 2 个月. 表 1 中 FPAR、气温和降水的滞后一个月自相关系数是中国地区六区域(根据中国区域植被分布类型和地形特征划分,见图 1)的区域平均结果,而表 1 中记忆性是根据分别计算各个区域滞后一到十个月的自相关系数后,将通过显著性检验(90%)的最长的滞后月作为该区域的记忆尺度. 从表 1 中可以看出,气温和降水的记忆时间可达 1—2 个月左右,同时其滞后

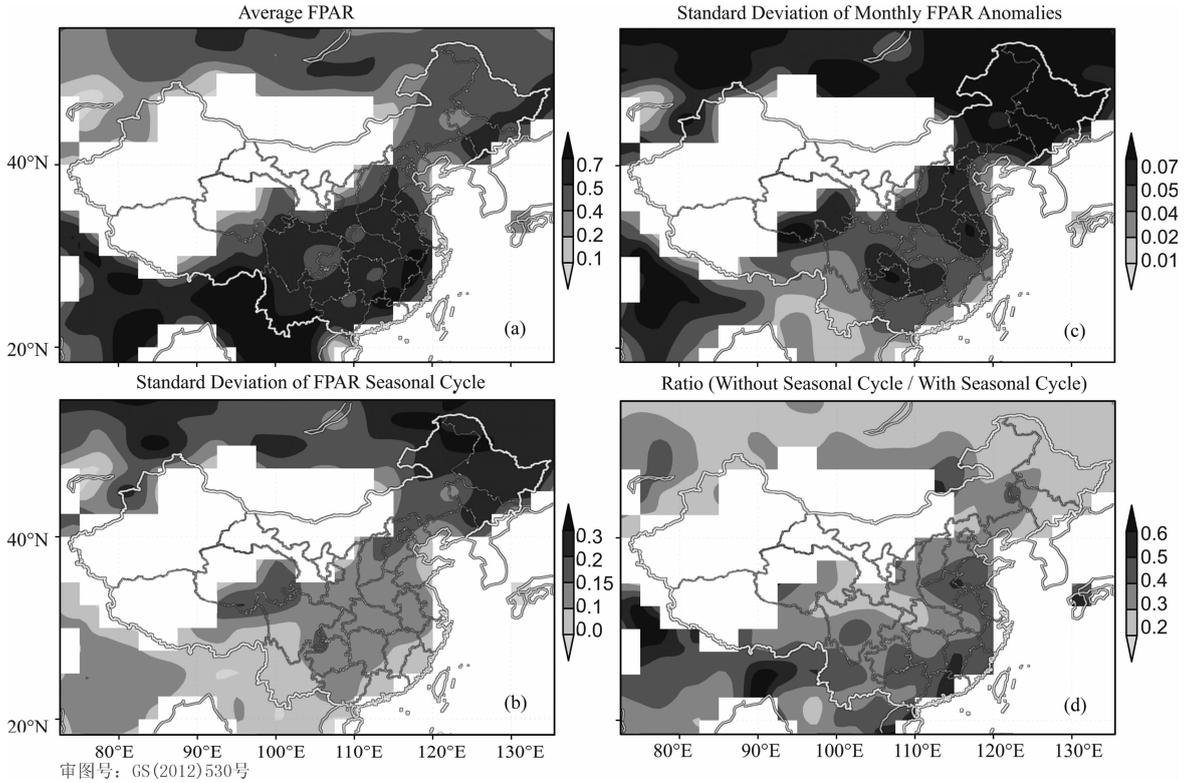


图 3 (a)年平均 FPAR, (b)FPAR 季节循环的标准差, (c)除去季节变化气候态的 FPAR 季节平均的标准差, (b)和(c)可以比较出 FPAR 季节循环和其固有变化的各自所占比重. (d) FPAR 季节平均(除去季节循环)的标准差和季节循环的比率
 Fig. 3 (a) Average annual FPAR, (b) Standard deviation of seasonal FPAR, (c) Standard deviation of seasonal FPAR (seasonal climatology removed), (d) The ratio of standard deviation of seasonal FPAR and seasonal FPAR after removed seasonal climatology, by comparing the strength of seasonal FPAR (seasonal climatology removed) to the seasonal FPAR with seasonal cycle.

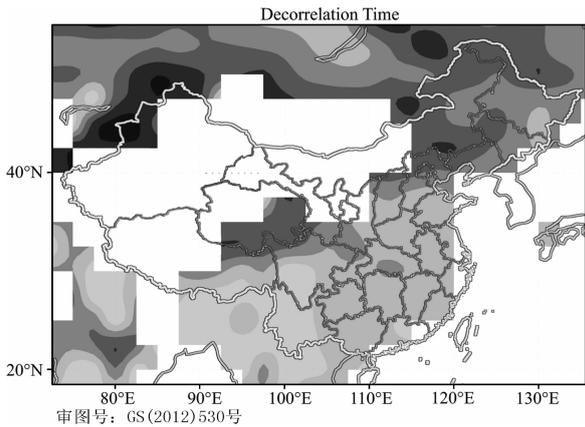


图 4 中国部分地区去相关时间分布图

去相关时间的计算方法是按照 2.2 节中的公式来计算的.

Fig. 4 The spatial distribution of decorrelation time in China

The method of calculating decorrelation is presented in Section 2.2.

一个月自相关系数较低, 分别为从 0.06 到 0.29 和从 -0.018 到 0.15. 而 FPAR 比气象要素具有更长的记忆时间, 滞后一个月自相关系数在通过显著性检验的最低值位于西南常绿林带(0.30), 最高值在

东北混合林带, 可达 0.63; 而在华东作物带和华南、西南常绿林带存在最低值. FPAR 在华南地区的记忆时间长度至少达到 4 个月, 西部和东北的植被记忆时间长度较短(2 个月左右).

表 1 通过自相关系数(AC)对于中国六个区域中 FPAR、气温和降水记忆时间尺度的估计

Table 1 Estimations of observed FPAR, surface air temperature and precipitation memory in six regions of China by calculating one-month autocorrelation curve for each variable

Region	FPAR		Temperature		Precipitation	
	Memory	AC	Memory	AC	Memory	AC
华南	4	0.36	1	0.15	0	0.10
西部	2	0.60	2	0.29	1	0.12
东北	2	0.63	1	0.20	0	-0.18
华东	3	0.41	3	0.21	0	0.08
华中	2	0.54	0	0.06	2	0.15
西南	2	0.30	2	0.24	0	0.05

注: 表中提供了每一变量在自相关曲线中通过 90% 显著性检验的最大滞后时间(月)以及滞后一个月自相关系数. 用粗体表示了一月自相关系数通过 90% 显著性检验. 六个区域的划分显示在图 1 中.

4 FPAR 与大气要素之间的关系

植被与大气相互作用可以通过其交叉相关系数得到反映,相关性的强弱可以帮助理解植被大气相互作用的机制和特点.图 5 给出了 FPAR 分别超前气温、降水一个月的相关系数来诊断植被变化对于气候可能的影响.全年 FPAR 超前气温一个月相关系数在四川东南部和贵州西北部地区为正且显著,在山东北部和河北中南部为显著负相关.如果一个地区存在较高的 FPAR 则表示该地区植被生长较为旺盛,意味着植被可以通过增加潜热通量或增加局地水汽(增加蒸散)来增加降水,从而降低局地气温^[13],这可以解释在植被生长旺盛的春季和夏季,植被与气温呈负相关、与降水呈正相关这一现象(如春季华东地区和夏季全国大部分地区).春季 FPAR 和气温的正相关出现在内蒙古北部、青藏高原东部、四川和长江下游地区,仅在长江三角洲地区通过显著性检验;负值区出现在华东作物带;其他季节少有通过显著性检验区域.全年 FPAR 超前降水一个月的相关系数区域分布特征如下:在东北、华东、华南地区存在显著正相关,在华北和西南地区相关系数为负.季节相关系数通过显著性检验的区域较少,仅在冬季陕西地区存在较强的负相关;春季华东农作物带存在 FPAR 和降水的正相关,然而并未通过显著性检验.

气象要素超前 FPAR 一个月相关系数中,降水超前 FPAR 的全年相关和季节相关都要比温度与 FPAR 的相关高(图略).春季四川东北部、陕西南部、山西南部以及山东中部到江苏北部区域降水超前 FPAR 一月存在较强的正相关;夏季降水超前 FPAR 一月相关系数较大,广西西部存在较强正相关(>0.4),反映出在夏季降水相对于气温对植被生长有较强影响,另一方面,降水主要影响土壤含水量,土壤含水量不仅取决于当期降水,也与前期降水量有关,这可以解释降水超前正相关对于植被生长的影响^[13].气温超前 FPAR 一月的季节相关系数仅在春季东北地区存在通过显著性检验的区域.全年降水超前 FPAR 相关系数在中国大部分区域均大于 0.1,可以通过显著性检验,在内蒙古中北部和广西南部区域较大;温度超前 FPAR 一月相关系数仅在华东地区超过 0.1.

FPAR 和气温同期相关系数的正值区出现在冬季贵州北部和重庆南部地区(>0.4)、春季的青海南

部地区(>0.3)以及夏季东北地区混合林带(>0.2),反映在温度较低的地区,植被主要受气温影响较大^[28];其他季节中国大部分地区可达 0.1 以上.华南地区季节和全年气温 FPAR 同期相关均较小,在夏季达最低,可能是由于夏季气温往往高于植被生长所必需的温度,且华南地区植被季节变率较小,因此夏季气温变化对植被的影响较小.全年相关系数最高的地区在四川省东部的作物带(>0.2 且通过显著性检验).FPAR 与降水的同期相关系数普遍低于其与气温的同期相关系数,且多为负值,同期降水增加意味云量增加,因此可以通过减少太阳辐射影响植被生长.降水和 FPAR 全年同期相关系数较弱,春季在四川盆地存在显著负相关区域(>0.38).

对区域相关系数较大且通过显著性检验较多的四个区域进行区域相关分析,分别是华南常绿林带、西部草地带、东北混合林带以及华东作物带.华东地区($112.5^{\circ}\text{E}-122.5^{\circ}\text{E}, 30^{\circ}\text{N}-40^{\circ}\text{N}$)的植被类型以农作物为主,全年相关系数最高值为气温和 FPAR 同期相关和气温超前 FPAR 一个月的相关系数,均能达到 0.2;而气温超前 FPAR 二至五个月的相关系数都在 0.1 左右,可以通过显著性检验(如图 6).从相关系数季节分布上来看,在春季除五月的气温和 FPAR 的同期相关系数为负值外,植被和气温的同期相关均为一致的正值;三月、四月、五月和七月的气温均与二月份的 FPAR 存在强相关,相关系数可达 0.4 以上,可能存在这样的反馈机制,由于植被具有较低的反照率(0.05~0.25),可以吸收较多的太阳辐射(可见光部分)即吸收更多能量使得地面气温升高^[29].全年的 FPAR 超前气温相关系数多为负值,最大负相关出现在 FPAR 超前气温四个月,超前气温二至四个月相关系数均可通过 90%显著性检验.全年降水和 FPAR 相关系数最大值出现在降水超前 FPAR 一个月时,可达 0.2 以上.降水与 FPAR 相关系数季节分布和气温与 FPAR 的类似,春季 FPAR 超前降水的相关系数多为正,秋季降水超前 FPAR 的相关系数多为负值,这可能是由于一旦降水超过植物所必须的条件,反而不利于植被生长,因为降水的存在意味着云量覆盖增加,太阳辐射减少从而导致植被光合作用减少.七、八月降水与六月的植被存在较强正相关,五、六月的降水与四月植被存在较强正相关,从而得出该地区在春夏季 FPAR 对于降水的强迫所需要的时间较短,两个月以内反馈作用可能最为强烈,可能与该地区 FPAR 去相关时间在二个月以下有关.华南地区($107.5^{\circ}\text{E}-$

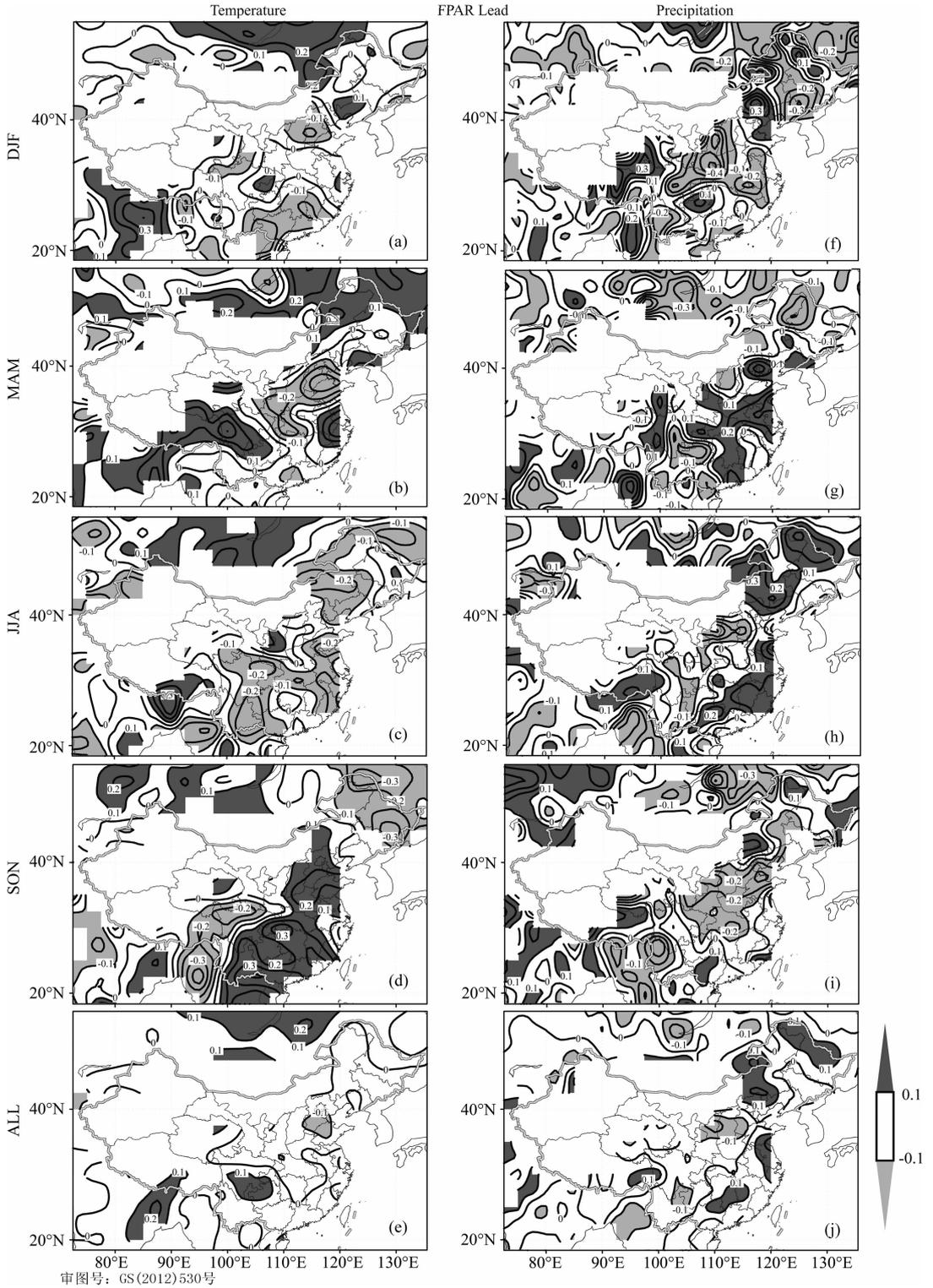


图 5 FPAR 月距平超前气温距平(a)–(e)以及降水(f)–(j)一个月的相关系数
 相关系数分别为(a),(f)冬季平均 DJF;(b),(g)春季平均 MAM;(c),(h)夏季平均 JJA;(d),(i)秋季平均 SON;(e),(j)全年。例如,在每个格点上夏季(JJA)FPAR与气温相关系数的计算是基于三个相关系数的平均值:五月 FPAR 和六月气温,六月 FPAR 和七月气温,七月 FPAR 和八月气温,反映 FPAR 对气象要素的强迫。

Fig. 5 Monthly FPAR anomalies leads by one month monthly anomalies of (a)–(e) surface air temperature and (f)–(j) precipitation

Correlation coefficients are shown for (a), (f) average through winter, DJF; (b), (g) average through spring, MAM; (c), (h) average through summer, JJA; (d), (i) average through autumn, SON; and (e), (j) all months. For example, for each grid point the MAM coefficients for precipitation are computed as the average of three correlation coefficients: February FPAR vs. March precipitation, April FPAR vs. March precipitation, and May FPAR vs. April precipitation.

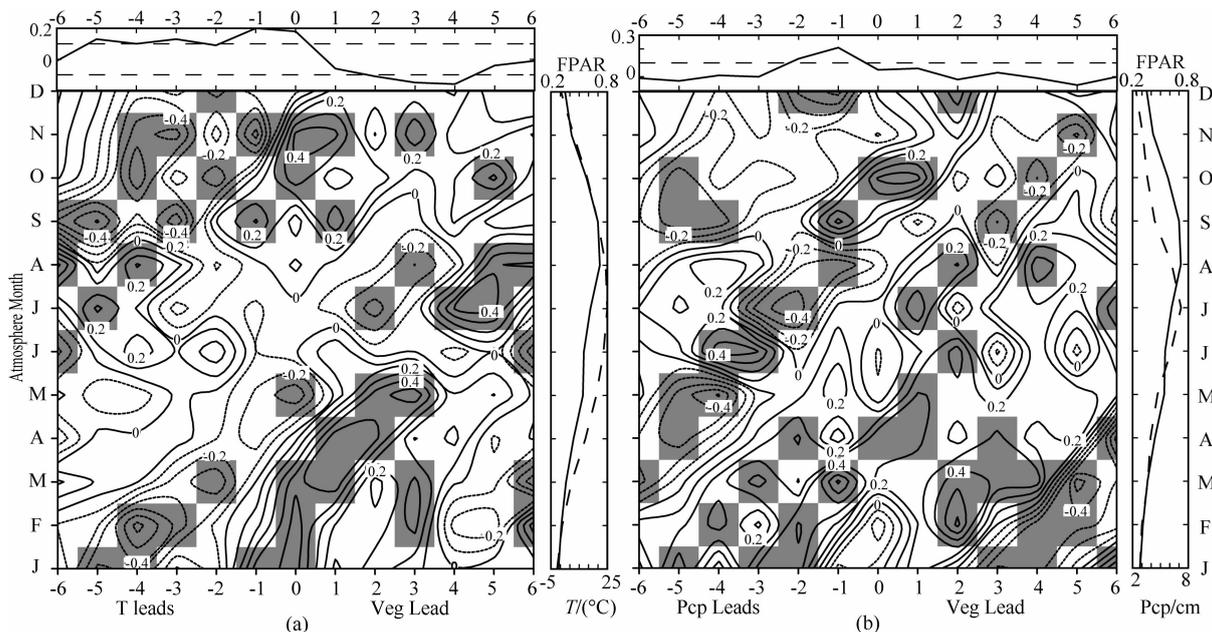


图 6 (a) FPAR 和气温的月距平的滞后相关系数图, 区域范围为华东地区 ($112.4^{\circ}\text{E}-122.5^{\circ}\text{E}, 30^{\circ}\text{N}-40^{\circ}\text{N}$), 时间为 1982—2000. (顶部图) 年平均的 FPAR-气温滞后相关图, 负值区为气温领先 FPAR, 正值区为 FPAR 领先气温, 虚线表示通过 90% 的显著性检验. (下左) 滞后相关系数的季节分布图, y 轴表示气温所在月份, 阴影区域表示通过 90% 显著性检验 (下右) 区域平均的 FPAR (实线) 和气温 (虚线) 的气候平均值. (b) 图与 (a) 图类似, 不同的是 FPAR 与降水的滞后相关系数 Fig. 6 (a) Lagged correlations between monthly anomalies of FPAR and surface air temperature in East China Region ($112.4^{\circ}\text{E}-122.5^{\circ}\text{E}, 30^{\circ}\text{N}-40^{\circ}\text{N}$) for 1982—2000. The annual mean of the FPAR-temperature lagged correlation with negative (positive) lags for temperature (FPAR) leading (top). The dash line indicates the 90% significance level. The seasonal evolution of the lagged correlation, with the months on the y-axis designating the month for temperature (bottom left). The shading indicates the 90% significance level. The area-averaged climatological annual cycles of FPAR (solid) and temperature (dash) are also shown on the right panel. (b) As in (a) except for precipitation

$122.5^{\circ}\text{E}, 20^{\circ}\text{N}-30^{\circ}\text{N}$ 植被类型以常绿阔叶林为主, 在其西北部分布一些草地和农作物带, 气温超前 FPAR 相关系数通过显著性检验的区域较多, 反映出气温对于植被的强迫在该地区比较明显. 秋季植被变化超前气温两个月相关系数最高, 而春季植被超前降水一到三个月同样具有较高的相关系数 (图略). 西南地区 ($92.5^{\circ}\text{E}-102.5^{\circ}\text{E}, 30^{\circ}\text{N}-37.5^{\circ}\text{N}$) 植被类型以常绿林带为主, 气温与 FPAR 的同期相关系数在三类交叉相关系数中最高且通过显著性检验 (图略), 超前和滞后相关系数均没有能够通过检验; FPAR 超前降水一至两个月存在显著正相关. 东北地区 ($112.5^{\circ}\text{E}-122.5^{\circ}\text{E}, 40^{\circ}\text{N}-55^{\circ}\text{N}$) 的植被以混合林带为主, 植被类型还包括一些作物带和草地. 全年气温和 FPAR 三类交叉相关系数通过显著性检验月份的并不多, 相关系数最大值出现在气温超前 FPAR 三个月左右 (图略). 东北地区二月 FPAR 与三至七月气温、八月 FPAR 与九至十一月降水有着强相关, 相关系数均可达 0.4 以上.

5 反馈系数

从植被 FPAR 对于气温的反馈系数图 (图 7) 中可以看到, 全国地区 FPAR 对气温反馈系数平均值达到 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}(0.1\text{FPAR})^{-1}$. 整个中国区域被划分成正负反馈两个区域, 在 30°N 以南区域反馈系数一致为正, 在 30°N 以北区域存在一致的负反馈系数, 在广东北部以及云贵高原的部分地区, 反馈系数达到最大值, 可以超过 $3\text{ }^{\circ}\text{C}(0.1\text{FPAR})^{-1}$, 而 30°N 以南区域还存在较小的负值区域, 对应植被类型为林地, 大小在 $0.05\sim 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}(0.1\text{FPAR})^{-1}$. 华东地区的 FPAR 对于气温的反馈系数可达 -0.2 到 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}(0.1\text{FPAR})^{-1}$, 该地区的植被类型以作物带为主; 负值绝对值最大区在围绕渤海湾一带 (山东、河北、辽宁一带), 植被覆盖同样为作物带, 反馈系数可以达到 -1 到 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}(0.1\text{FPAR})^{-1}$; 东北地区的反馈系数相对较小, 40°N 以北区域反馈系数在 -0.05

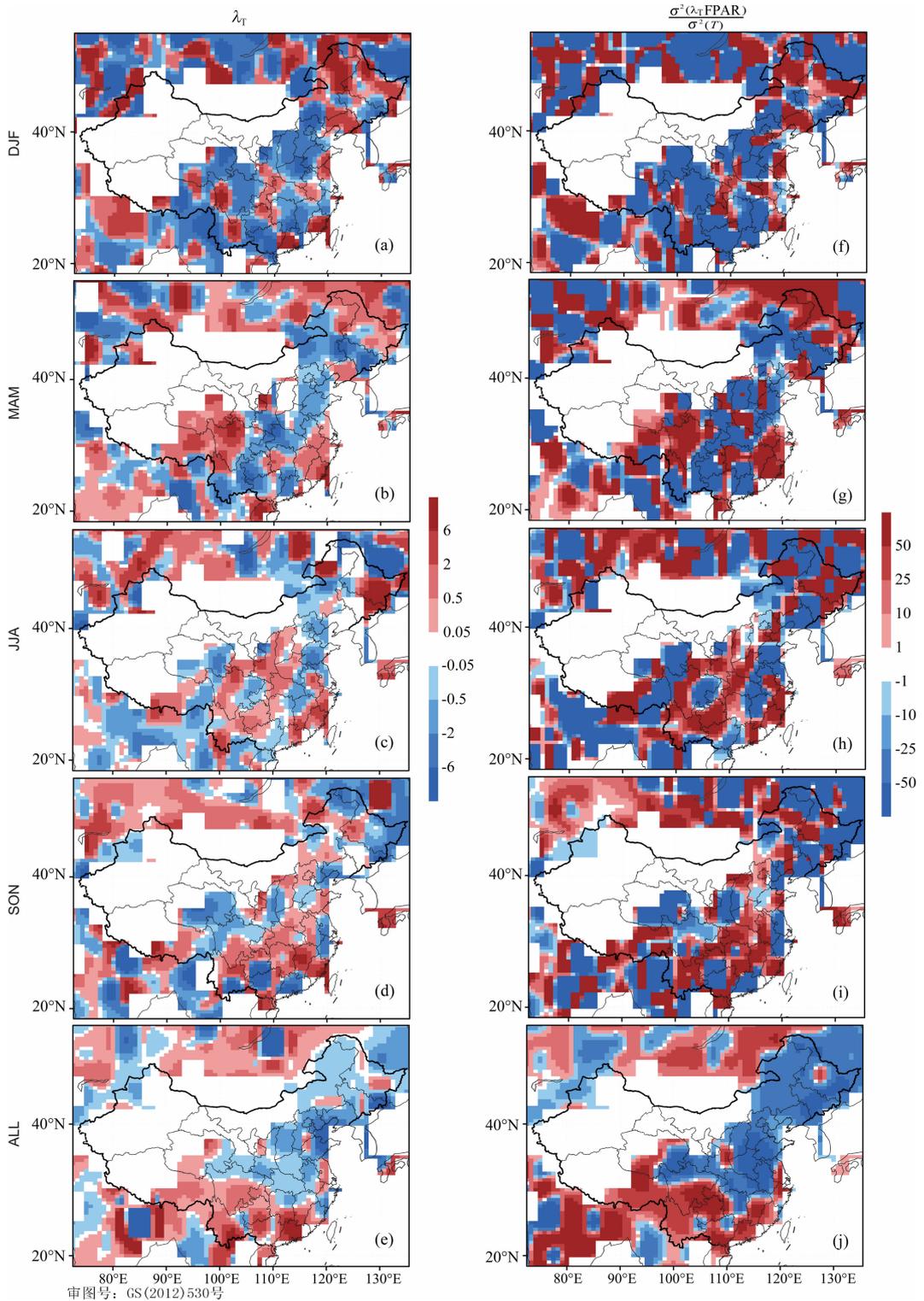


图 7 (a)–(e)为植被对于气温的反馈系数(单位 $^{\circ}\text{C} (0.1\text{ FPAR})^{-1}$), (f)–(j)为植被变化导致气温变化的解释方差比(计算了全年和各个季节的值)

Fig. 7 (a)–(e) Vegetation feedback parameter ($^{\circ}\text{C} (0.1\text{ FPAR})^{-1}$) for monthly temperature anomalies and (f)–(j) the explained variance (%) of the feedback-induced variability (computed as the ratio of the variance of the feedback to the total temperature variance), both by season and for all month. Regions with very small temperature autocorrelations are masked out

到 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C} (0.1\text{ FPAR})^{-1}$ 左右, 不同的季节反馈系数又存在着显著差异, 春季华南、四川中西部、青藏

高原东部以及东北北部地区(黑龙江省)为正反馈区, 其他区域均为负反馈区。四川盆地植被覆盖

以作物带为主,与其周围常绿林带相异,该地区夏季反馈系数为负值(达到 -0.2 到 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$),与其周围正反馈区域形成反差,其原因可能由于植被类型不同所导致;夏季华南地区存在正反馈区. FPAR 对于温度强迫的方差贡献显示在图 7f 和 7j 中;所有月份的反馈系数的解释方差比例在 30°N 以南地区可以达到 25% 以上,在四川东南部和贵州大部分地区解释方差比例可以达到 50% 以上. 30°N 以北区域解释方差稍小,可达 10% 以上;华东和华北地区(作物带)解释方差在 25% 到 50% 之间.

从植被 FPAR 对于降水的反馈系数图上(图 8)可以发现,FPAR 对降水全年反馈系数全国平均可达 $-2.12\text{ cm month}^{-1}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$. 全年 FPAR 对于降水的反馈系数的大值区出现在华南、华东沿海和东北地区,华南地区反馈系数最高值可达 $6\text{ cm month}^{-1}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$. 在华东、华北以及东北地区大部分作物带,春季植被生长对于降水的反馈系数可以达到 $0.5\text{ cm month}^{-1}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$ 以上,而华南和西南地区的反馈系数却呈现出弱的负值, -0.5 到 $2\text{ cm month}^{-1}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$ 左右;夏季青藏高原东北部的草地带和江西、湖北、湖南三省区域的反馈系数为正值,均可以达到 $0.5\text{ cm month}^{-1}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$ 以上,东北北部地区(黑龙江)可以达到 $6\text{ cm month}^{-1}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$ 以上. 所有月份 FPAR 对于降水反馈系数的解释方差比较大,在 30°N 以北区域达到 50% 以上; 30°N 以南区域最大值出现在青藏高原东部的草地带,达到 50% 以上;华南地区常绿林带的解释方差比都在 10% 以上,在江西省达到 25% 以上. 从解释方差比的季节分布上来看,FPAR 的方差对于降水变化的解释方差比都很大,在冬季全国大部分地区都可以达到 25% 以上;而反馈系数较大的区域,其解释方差比也相应的较大.

6 结 论

植被作为大气下垫面的重要组成部分,直接影响大气陆面过程,也可以通过一系列反馈机制影响与大气产生相互作用. 本文计算了 FPAR 的去相关时间发现在中国地区 FPAR 比气象要素显示出更长的记忆时间: FPAR 去相关时间超过两个月的地区有东北混合林带、内蒙古东北部和青藏高原东北部的草地带和灌木林带,而华东地区的农作物带、华南地区的常绿林带和西南地区的常绿林带其去相关时间普遍低于 2 个月. 通过计算植被和气温、降水的

三类交叉相关系数,初步研究了 FPAR 与气温、降水之间的相互关系,其中春、夏季全国大部分地区植被超前气温一个月的相关系数为负值,反映出植被生长可以降低局地气温;而全年 FPAR 超前降水一个月相关系数在我国东北地区、江淮流域以及华南地区存在显著正相关,在华北和西南地区相关系数为负. 由于植被具有较低的反照率,因此可以通过增加吸收太阳辐射从而提高局地气温,而由于植被的光合作用以及蒸散(腾)作用的加剧,使得其潜热通量增加又可以使局地气温得到降低;同时,植被的存在和生长可以增加降水,也对降低气温有一定作用. 而由于影响降水的因素较多,局地水汽支持是其成因之一,而长距离水汽输送也可能是局地降水的原因之一,并且植被局地由于蒸散作用增加的水汽可能被输送到其他区域,因此 FPAR 与降水的相关性可能并不局限于 FPAR 提前降水一个月,植被对于降水作用的时间尺度相比于其对气温的影响更长. 这也可能是植被与降水季节相关性不显著的原因之一.

进一步分析不同区域、不同滞后(超前)时间的 FPAR 与气象要素的相关性发现,秋季华南地区植被变化超前气温两个月相关系数最高,而春季植被超前降水一到三个月具有较高相关性;西南常绿林带气温与 FPAR 同期相关性最高,而秋季 FPAR 超前降水一至两个月存在显著正相关.

采用反馈系数来定量分析 FPAR 对气温、降水的反馈作用: 全国地区 FPAR 对气温反馈系数平均值达到 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$,对降水全年反馈系数全国平均可达 $-2.12\text{ cm month}^{-1}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$. FPAR 对气温、降水的反馈作用还存在空间、季节差异: 30°N 以南中国地区区域全年 FPAR 对气温反馈系数平均值可达 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$,而 30°N 以北区域平均可达 $-0.42\text{ }^{\circ}\text{C}(0.1\text{ FPAR})^{-1}$;在 40°N 以南区域全年 FPAR 对于降水的反馈系数有沿海地区为正、内陆地区为负的分布,在东北地区存在正-负-正的带状分布,与该地区植被分布较一致;四川盆地区域夏季 FPAR 对气温存在负反馈不同于周边其他地区正反馈,可能与该地区植被类型有关(盆地区为作物带,不同于其周围常绿林带).

植被大气间反馈作用的研究结果不仅可以验证动态植被模式中植被大气相互作用结果,而且可以为气候变化研究和气候模式的发展带来帮助. 中国区域植被种类繁多,分布复杂,不同植被类型与气候要素的相互作用背后的深刻机理是值得继续深入研究的内容,有待另文详细探讨.

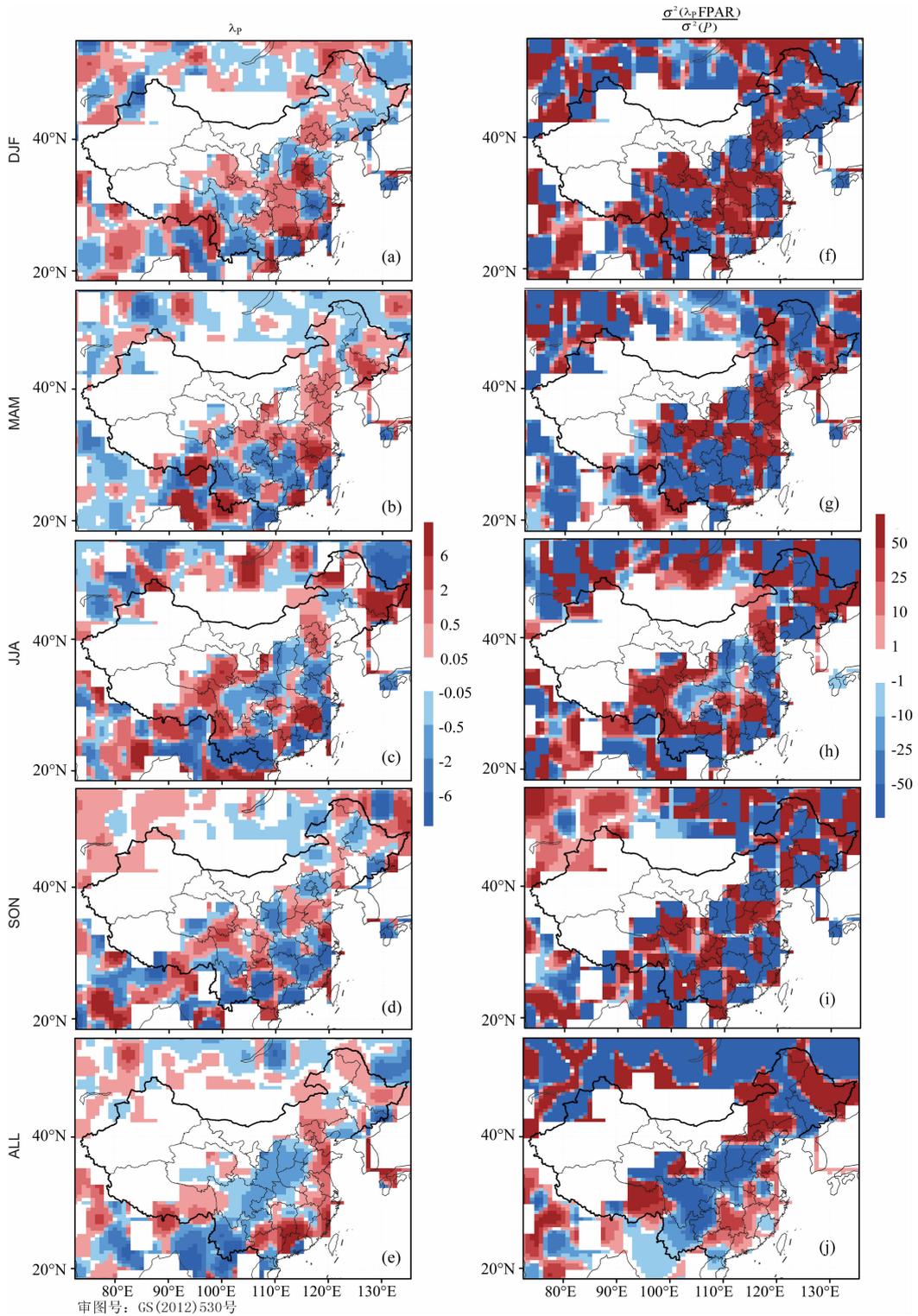


图 8 (a) — (e) 为植被对于降水的反馈系数(单位 $\text{cm month}^{-1} (0.1 \text{ FPAR})^{-1}$), (f) — (j) 为植被变化导致降水变化的解释方差比(计算了全年和各个季节的值)

Fig. 8 As in Fig. 6 but for precipitation; units of the feedback parameters in (a) — (e) are $\text{cm month}^{-1} (0.1 \text{ FPAR})^{-1}$

参考文献 (References)

[1] Robinson D A, Kukla G. Maximum surface albedo of seasonally snow-covered lands in the Northern Hemisphere.

J. Climate Appl. Meteor., 1985, 24(5): 402-411.
 [2] Henderson-Sellers A, McGuffie K. A Climate Modelling Primer. New York: John Wiley, 1987.
 [3] Bonan G. Ecological Climatology: Concepts and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

- [4] Collatz G J, Ball J T, Grivet C, et al. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agric. For. Meteorol.*, 1991, 54(2-4): 107-136.
- [5] 曾庆存, 曾晓东, 王爱慧等. 大气和植被生态及土壤系统水文过程相互作用的一些研究. *大气科学*, 2005, 29(1): 7-19. Zeng Q C, Zeng X D, Wang A H, et al. Some studies of the hydrological interactions in the Atmosphere-Ecosystem-Soil System. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, 29(1): 7-19.
- [6] Schwartz M D, Karl T R. Spring phenology: nature's experiment to detect the effect of "green-up" on surface maximum temperature. *Monthly Weather Review*, 1990, 118(4): 883-890.
- [7] Dickinson R E, Henderson-Sellers A. Modelling tropical deforestation: a study of GCM land-surface parametrizations. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 1988, 114(480): 439-462.
- [8] Nobre C A, Sellers P J, Shukla J. Amazonian deforestation and regional climate change. *J. Climate*, 1991, 4(10): 957-988.
- [9] Tian Y, Dickinson R E, Zhou L, et al. Comparison of seasonal and spatial variations of leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Common Land Model. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109: D01103, doi: 10.1029/2003JD003777.
- [10] Wang W L, Anderson B T, Phillips N, et al. Feedbacks of vegetation on summertime climate variability over the North American grasslands. Part I: Statistical analysis. *Earth Interaction*, 2006, 10(17): 1-27.
- [11] Wang W L, Anderson B T, Entekhabi D, et al. Feedbacks of vegetation on summertime climate variability over the North American grasslands. Part II: a coupled stochastic model. *Earth Interaction*, 2006, 10(16): 1-30.
- [12] Wang W L, Anderson B T, Entekhabi D, et al. Intraseasonal interactions between temperature and vegetation over the boreal forests. *Earth Interactions*, 2007, 11(18): 1-30.
- [13] Liu Z Y, Notaro M, Kutzbach J, et al. Assessing global vegetation-climate feedbacks from observations. *J. Climate*, 2006, 19(5): 787-814.
- [14] Frankignoul C, Hasselmann K. Stochastic climate models. Part II: Application to sea-surface temperature anomalies and thermocline variability. *Tellus*, 1977, 29(4): 289-305.
- [15] Frankignoul C, Czaja A, L'Heveder B. Air-sea feedback in the North Atlantic and surface boundary conditions for ocean models. *J. Climate*, 1998, 11(9): 2310-2324.
- [16] Notaro M, Liu Z Y, Williams J W. Observed vegetation-climate feedbacks in the United States. *J. Climate*, 2006, 19(5): 763-786.
- [17] 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. *大气科学*, 2000, 24(5): 676-682. Wen G, Fu C B. Large scale features of the seasonal phenological responses to the monsoon climate in East China: multi-year average results. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, 24(5): 676-682.
- [18] 符淙斌, 温刚, 谢力等. 东亚季风区气候和生态系统相互作用的诊断和模拟研究. *南京大学学报(自然科学)*, 2002, 38(3): 281-294. Fu C B, Wen G, Xie L, et al. The diagnosis and simulation studies on climate and ecosystem interactions in East Asia monsoon region. *Journal of Nanjing University (Natural Science)* (in Chinese), 2002, 38(3): 281-294.
- [19] 赵茂盛, 符淙斌, 延晓东等. 应用遥感数据研究中国植被生态系统与气候的关系. *地理学报*, 2001, 56(3): 287-296. Zhao M S, Fu C B, Yan X D, et al. Study on the relationship between different ecosystems and climate in China using NOAA/AVHRR data. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2001, 56(3): 287-296.
- [20] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 379-382. Li X B, Shi P J. Sensitivity analysis of variation in NDVI, temperature and precipitation in typical vegetation types across China. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 2000, 24(3): 379-382.
- [21] 丹利, 季劲钧, 马柱国. 新疆植被生产力与叶面积指数的变化及其对气候的响应. *生态学报*, 2007, 27(9): 3582-3592. Dan L, Ji J J, Ma Z G. The variation of net primary production and leaf area index over Xinjiang Autonomous Region and its response to climate change. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 2007, 27(9): 3582-3592.
- [22] Zhi H, Wang P X, Dan L, et al. Climate-vegetation interannual variability in a coupled atmosphere-ocean-land model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2009, 26(3): 599-612.
- [23] Myneni R N, Ramakrishna R, Nemani R, et al. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, 35(6): 1380-1393.
- [24] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, 77(3): 437-471.
- [25] Xie P P, Arkin P A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, 71(11): 2539-2558.
- [26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007: 106-124. Wei F Y. Climatic Statistical Diagnosis and Forecasting Methods (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2007: 106-124.
- [27] von Storch H, Zwiers F W. Statistical Analysis in Climate Research. Melbourne: Cambridge University Press, 1999: 371-373.
- [28] Schultz P A, Halpert M S. Global correlation of temperature, NDVI and precipitation. *Adv. Space. Res.*, 1993, 13(5): 277-280.
- [29] Brovkin V. Climate-vegetation interaction. *J. Phys.*, 2002, 12(10): 57-72.