

李悦悦, 黄玫, 季劲钧, 等. 2015. 中国季风区植被净初级生产力对东亚夏季风的响应机理研究 [J]. 气候与环境研究, 20 (5): 544–554. Li Yueyue, Huang Mei, Ji Jinjun, et al. 2015. Studies on the response mechanisms of vegetation net primary productivity in Chinese monsoon region to the variations of East Asian summer monsoon [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (5): 544–554, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15016.

中国季风区植被净初级生产力对东亚夏季风的响应机理研究

李悦悦^{1,2} 黄玫¹ 季劲钧^{1,3} 巩贺⁴

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

4 南京信息工程大学, 南京 210044

摘 要 东亚夏季风可显著影响中国季风区气候变化, 但是季风区植被净初级生产力 (NPP) 对夏季风气候变化的响应机理尚不明确。利用大气—植被相互作用模型 (AVIM2) 模拟了中国季风区植被 NPP, 分析了其与夏季风指数的相关关系, 探讨了其对夏季风变化的响应机理。研究发现, 我国南、北方植被对夏季风强度变化的响应方式和机理并不相同。强夏季风年北方植被 NPP 增加, 而南方植被 NPP 减少。东亚夏季风对中国华北平原植被生长季 NPP 的作用主要是通过影响该地降水量实现的; 京、津、冀地区植被 NPP 受东亚夏季风带来的气温和降水量变化的叠加影响, 因而成为北方对夏季风变化最敏感的区域。东亚夏季风对我国南方江苏、安徽、湖南、湖北、江西植被 NPP 的作用是通过影响太阳辐射实现的, 强夏季风导致太阳辐射减弱, 从而使各省植被 NPP 减少。南方沿海的浙江和福建, 强季风年带来的弱太阳辐射和低温是该地植被 NPP 减少的原因。广东、台湾植被 NPP 则主要受强夏季风带来的低温影响。

关键词 大气—植被相互作用模型 净初级生产力 中国 东亚夏季风 植被

文章编号 1006-9585 (2015) 05-0544-11

中图分类号 P461.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15016

Studies on the Response Mechanisms of Vegetation Net Primary Productivity in the Chinese Monsoon Region to the Variations of East Asian Summer Monsoon

LI Yueyue^{1,2}, HUANG Mei², JI Jinjun^{1,3}, and GONG He⁴

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract The East Asian summer monsoon has a significant impact on climate change in the Chinese monsoon region, but the responses and mechanisms of the terrestrial net primary productivity (NPP) to summer monsoon climate change

收稿日期 2014-01-22; **网络出版日期** 2015-03-31

资助项目 国家自然科学基金项目 41271118, 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05050209

作者简介 李悦悦, 男, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆地生态系统模拟和全球变化方向的研究。E-mail: bene1989@126.com

通讯作者 黄玫, E-mail: huangm@igsnrr.ac.cn

are still not clear. In this paper, an atmosphere–vegetation interaction model (AVIM2) is used to simulate the NPP in the Chinese monsoon region. The correlation between NPP and summer monsoon index is analyzed, and the response mechanisms of NPP to the variations of summer monsoon are discussed. It is found that the vegetation responses and mechanisms to the variations of the summer monsoon are very different in North China and South China. Corresponding to strong summer monsoon years, the NPP in North China increases, while the NPP in South China decreases. The East Asian summer monsoon can affect precipitation over the North China Plain during vegetation growing seasons, and thus also affects the local NPP. Due to the superimposed effect of temperature and precipitation on NPP, Beijing, Tianjin, and Hebei become the most sensitive areas to the variations of the summer monsoon in the North China Plain region. During strong East Asian summer monsoon years, the NPP in South China decreases, and the main impact factors correlated to a strong East Asian summer monsoon are different: In Jiangsu, Anhui, Hubei, Hunan, and Jiangxi provinces, it is the reduced solar radiation; in Guangdong and Taiwan provinces, it is the lower temperature; and in Zhejiang and Fujian provinces, the major factor is the superimposed effect of reduced solar radiation and lower temperature.

Keywords Atmosphere–vegetation interaction model, Net primary productivity, China, East Asian summer monsoon, Vegetation

1 前言

季风气候可显著影响全球中低纬度一半以上区域 (Li and Zeng, 2003), 中国季风区因其所在地理位置特殊而最有代表性 (熊平生和谢世友, 2008)。过去研究表明, 东亚夏季风可显著影响中国东部降水, 如长江和淮河流域降水的准两年振荡周期与东亚夏季风的年际周期振荡密切相关 (Huang et al., 2007)。在年代际尺度, 东亚夏季风从 20 世纪 70 年代中后期起明显变弱 (郭其蕴等, 2004; 黄荣辉等, 2008), 与此对应, 中国季风区长江中下游区域夏季风降水增多, 而华北地区夏季风降水减少 (王遵娅等, 2004)。多项研究表明, 降水是影响植被生长的重要因子 (赵茂盛等, 2001; 谢力等, 2002; 张佳华等, 2002)。植被净初级生产力 (NPP) 是衡量植被净碳吸收能力的指标之一, 是研究植被如何响应气候变化的重要依据, 季风变化必然影响季风区植被净初级生产力。

目前有关中国植被对东亚季风响应的研究主要基于遥感反演数据开展。符淙斌和曾昭美 (1997)、符淙斌等 (2002) 发现季风区内降水变化率在各种时间尺度上都要远大于非季风区, 并在进一步研究归一化植被指数 (NDVI) 与亚洲地区降水的关系后指出, 季风气候变率是驱动东亚陆地生态系统变化的重要因子。温刚和符淙斌 (2000) 曾在季节尺度上使用 NDVI 研究气候变化对中国季风区植被生长的影响, 发现在所有时段温度都可同步影响植被生长, 在多数时段降水对植被生长的显著作用需滞后 20~30 d 才会体现。张佳华和符淙斌

(2002) 曾选用叶面积指数 (LAI) 分别在季节和年际尺度研究中国季风区植被与东亚夏季风的关系, 研究发现东亚季风的季节进程可显著影响其所在地区植被 LAI 的季节变化, 高、低 LAI 年分别与强、弱季风年相对应, 证明东亚季风确实可驱动中国季风区陆地生态系统。由于可用的遥感数据始于 20 世纪 80 年代初, 故通过遥感反演产品无法在长时间序列上研究中国东部季风区植被对东亚季风的响应特征。

作为模型驱动数据的气候变量的时间序列要远长于遥感反演产品, 因而可以利用该类生态系统过程模型研究 NPP 在较长时段上的变化特征。我国不少学者曾利用生态系统模型研究过气候变化对植被 NPP 的影响。部分研究曾在不同气候情景下模拟生态系统 NPP, 以分析不同地域内不同植被类型对特定气候变化的响应特征 (孙睿和朱启疆, 2001; 许红梅等, 2006; 赵俊芳等, 2008)。更多研究关注的是已有气候变化与特定区域 NPP 的相关关系, 研究区域包括西双版纳 (刘文杰, 2000)、西南地区 (谷晓平等, 2007)、江西 (曾慧卿等, 2008)、青藏高原 (黄玫等, 2008)、内蒙古 (闫伟兄等, 2009)、新疆 (张山清等, 2010) 等。在整个中国区域对植被 NPP 的研究也未涉及季风气候变化的特有影响 (朱文泉等, 2007; 黄钰, 2011)。值得一提的是姜超等 (2013) 用经验正交函数分解 (EOF) 方法分析了东亚季风区夏季陆地生态系统碳循环对东亚夏季风的响应, 得出强季风年华南地区 NPP 偏高, 江淮流域地区 NPP 偏低的结论。姜超等 (2013) 对季风影响 NPP 的机理解释是通过解释季风影响生态系统总初级生产力 (GPP) 和植被呼吸

的角度展开的。

本研究从控制植被 NPP 变化的气候因子的角度进行深入研究。选择 (20°N~45°N, 106°E~123°E) 作为中国季风区的范围, 利用大气植被相互作用模型 (AVIM2) 模拟 1948~2010 年中国季风区植被生长季 (4~9 月) NPP。从影响植被 NPP 的基本三要素 (气温、降水量和太阳辐射) 出发, 分析中国季风区内不同区域植被 NPP 控制因素的空间分布, 在此基础上研究东亚夏季风变化对植被生长季 NPP 的影响。此研究可进一步加深我们对季风气候变化影响中国陆地生态系统机理的理解, 并可为植被生产力相关研究提供参考。

2 数据与方法

2.1 数据来源

模型气象驱动数据采用普林斯顿大学发布的全球 1° (纬度) × 1° (经度) 空间分辨率陆面气象数据集, 该气象数据集包括每日 8 次的气温、降水、长波辐射、短波辐射、地表面气压、相对湿度和风速 (Sheffield et al., 2006)。气象输入数据通过反距离权重插值法统一插值到 0.1° (纬度) × 0.1° (经度) 的经纬度网格上。驱动数据中的逐年大气 CO₂ 浓度数据使用澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (CSIRO) 的冰芯记录值 (Etheridge et al., 1996) 和美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的实测值。模型中所用土壤质地数据是由多种土壤资料融合而成的 (张时煌等, 2004), 植被底图选用全球土地覆盖数据集 (GLC2000) 中国子集。

2.2 模型简介

大气—植被相互作用模型 (AVIM) (Ji and Hu, 1989; Ji, 1995) 是在对陆面物理传输过程和植被生理生态过程参数化的基础上建立的耦合模型, 它可以在各种时空分辨率上模拟大气、植被与土壤之间的水、热、CO₂ 交换。该模型包括 2 个模块: 描述植被—大气—土壤之间辐射、水、热交换过程的陆面物理过程模块和基于植被生态生理过程 (如光合、呼吸、光合同化物的分配、物候等) 的植被生理生长模块。AVIM2 是 AVIM 的新版本, AVIM2 较原有模式增加了土壤有机碳的转化和分解模块, 实现了大气—植被—土壤三者的动态耦合 (黄玫, 2006)。

AVIM2 模型中植被净初级生产力 (N_{pp}) 的计

算公式为

$$N_{pp} = G_{pp} - R_m - R_g, \quad (1)$$

其中, G_{pp} 为总初级生产力, R_m 为维持呼吸, R_g 为生长呼吸。总初级生产力 G_{pp} 的计算公式为

$$G_{pp} = \frac{1 - e^{-kL_{AI}}}{K} A, \quad (2)$$

其中, K 为冠层消光系数, L_{AI} 为叶面积指数, k 为反照率在冠层的衰减参数, A 为叶片的光合速率。叶片的光合速率 A 的计算公式为

$$A = \frac{1}{1.65P_s} (C_a - C_i)(g - g_b), \quad (3)$$

其中, P_s 为地面气压, C_a 为大气 CO₂ 浓度, C_i 为叶子内部 CO₂ 浓度, g 和 g_b 分别是气孔导度及其最小值。

叶面积指数 L_{AI} 的计算公式为

$$\frac{dL_{AI}}{dt} = \frac{1}{\rho_f} \frac{dM_f}{dt}, \quad (4)$$

其中, ρ_f 是植被的叶面积密度, M_f 是叶丛的生物量, t 是植物生长时间。

(1) 式中, 维持呼吸 R_m 的计算公式为

$$R_m = \sum_i R_{mi25} 2.0^{0.1(T_i - 25)} M_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

其中, R_{mi25} 是在 25 °C 时单位生物量的呼吸速率, T_i 是冠层温度 (对叶、茎) 或土壤温度 (对根), M_i 是器官生物量, $i = 1, 2, 3$ 分别代表叶、茎和根。

(1) 式中, 生长呼吸 R_g 的计算公式为

$$R_g = \sum_i \eta_i \frac{dM_i}{dt}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (6)$$

其中, η_i 是分配系数, $\sum_i \eta_i = 1$, dM_i/dt 是器官生物量的增长速率, 当 $dM_i/dt < 0$ 时, $R_{gi} = 0$ 。

植被各器官生物量的变化为

$$\frac{dM_i}{dt} = \eta_i (1 - \sigma_i) (A - R_m) - L_{oss_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (7)$$

其中, σ_i 是生长呼吸系数; η_i 为对各器官 (叶、茎、根) 的分配比例系数; L_{oss_i} 为植被的凋落率, 茎跟根的凋落率与生物量成正比, 叶子的凋落率与叶丛的生物量和植物的物候期有关; $i = 1, 2, 3$ 分别代表叶、茎、根。

本研究中, 模型在 1948~1952 年循环运行 300 次后取这 5 年的平均初始场作为 1948 年初始场然后开始模拟 1948~2010 年中国季风区植被 NPP。

2.3 夏季风指数的计算

本研究采用郭其蕴 (1983) 提出的夏季风指数

定义方法来表征夏季风的强度, 具体计算方法: 首先计算每年 6~8 月 20°N~50°N 每 10 度纬圈上 110°E 与 160°E 之间海平面气压差 $\Delta p \leq -5$ hPa 的累计和 $\sum \Delta p$, 再除以 1948~2010 年该累积和 63 年的平均值, 即可得逐年夏季风强度指数。比值愈大, 说明这一年夏季风愈强; 反之比值愈小, 说明夏季风愈弱。

2.4 连续功率谱分析方法

连续功率谱分析 (黄嘉佑, 1982) 的基本原理是傅里叶变换, 可将研究要素的时间序列在频率域上展开, 得到不同频率对应的可表征其方差贡献的振幅或功率, 如果该谱峰能通过非噪声的显著性检验, 则可认定此谱值对应的周期是该时间序列的主要周期。经过 Hanning 平滑后的连续功率谱估计可从下式中计算:

$$S_l = B_l \frac{1}{m} \left[r(0) + \sum_{\tau=1}^{m-1} r(\tau) \left(1 + \cos \frac{\pi \tau}{m} \right) \cos \frac{l \pi \tau}{m} \right],$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

其中, S_l 为 l 波数的功率谱值; m 为最大落后长度, 通常 m 取 $n/4 \sim n/10$; $r(\tau)$ 为落后自相关系数, τ 为落后长度;

$$B_l = \begin{cases} 1/2 & l = 0, m \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$r(\tau) = \frac{1}{n - \tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} \frac{(x_i - \bar{x})(x_{i+\tau} - \bar{x})}{S}, \quad (10)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (11)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (12)$$

做功率谱图时, 以波数 l 或频率 $\omega_l = \pi l / m$ 或周期 $T_l = 2m / l$ 做横坐标, 以功率谱值为纵坐标。

2.5 其他统计方法

本研究用到的其他统计方法包括相关分析法和 5 点滑动平均法, 均通过 Fortran 程序语言编程实现。

3 结果与讨论

3.1 东亚夏季风变化特征

图 1a 为本研究计算的东亚夏季风指数距平及其 5 年滑动平均, 由图可见 1948~1966 年夏季风指数皆为正距平, 为强夏季风年; 1967~1977 年东

亚夏季风为强弱转换的过渡时期, 距平指数有负有正; 1978~2006 年夏季风指数皆为负距平, 为弱夏季风年; 2006 年以后夏季风距平转为正。本研究计算的夏季风指数与郭其蕴等 (2004) 计算的相同时段内的夏季风指数基本一致。

郭其蕴等 (2004) 计算的夏季风指数通过功率谱分析检测到微弱的 2.35 年的周期, 其计算时段为 1873~2000 年, 研究样本达到 128 年。本研究时段较短, 仅为 63 年。我们通过连续功率谱分析检测到在研究时段内夏季风指数存在准 3 年周期 (图 1b)。

3.2 东亚夏季风指数与季风区植被 NPP 相关系数的空间分布

图 2 展示了中国季风区植被生长季 NPP 与夏季风指数相关系数的空间分布。对于样本量为 63 的时间序列来说, 通过 95% 置信水平检验的相关系数值为 0.25。由图 2a 可见, 通过 95% 置信度水平检验的正相关区主要分布于河北、山东、山西以及内蒙古、陕西和宁夏的部分区域, 最高相关值位于河北。即随着季风强度的增加上述区域植被 NPP 增加。当季风强度减弱时, 以上区域植被 NPP 减少。长江流域沿线及以南的江苏、安徽、湖南、湖北、江西、广东、浙江、福建、台湾大部分区域植被 NPP 与季风指数有较高的负相关关系, 即当季风减弱时, 区域植被生长季 NPP 增加。

为了消除 5 年以内像 ENSO、准两年周期振荡等短振荡周期气候波动对研究结果的影响, 本研究对植被 NPP 序列和东亚季风指数都进行了 5 点平滑, 图 2b 为二者平滑以后空间相关图。由图可见, 在年代际尺度季风与植被 NPP 的关系与年际尺度的结果是基本一致的, 即在我国北方为正相关, 南方为负相关。相关系数的高值区基本重合, 空间格局也是一致, 但年代际尺度上季风指数与植被 NPP 的相关系数比年际尺度的相关系数更高, 表明在年代际尺度上, 中国植被受到季风的影响更大。由于年代际尺度的相关关系更显著, 以下将在此时间尺度上研究季风气候影响季风区植被 NPP 的机理。

3.3 东亚夏季风指数与季风区气温、降水量和太阳辐射的空间相关

从生长季气温、降水量和太阳辐射与夏季风指数相关系数的空间分布图 (图 3) 可以看到, 夏季风指数与生长季气温除在湖南省为显著正相关以外, 其余区域大都为显著负相关, 高相关区主要集

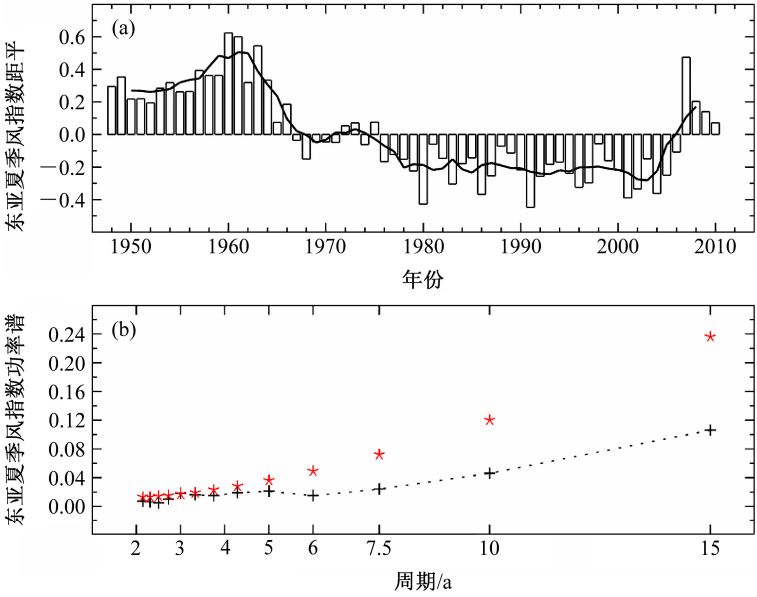


图 1 1948~2010 年东亚夏季风指数序列及其周期检测图：(a) 夏季风指数距平及其 5 年滑动平均；(b) 连续功率谱分析图，“+”为周期对应的功率谱值，“*”为周期对应的置信水平 95% 的临界功率谱值

Fig. 1 Time series of East Asian summer index and its interannual variation in period detection picture during 1948–2010: (a) Inter-annual departure time series of East Asian summer monsoon index (solid line shows its five-year running mean); (b) continuous power spectrum (plus signs indicate power spectrum values corresponding to different periods; red asterisks indicate critical power spectrum values whose statistical significance at the 95% confidence level corresponding to different periods)

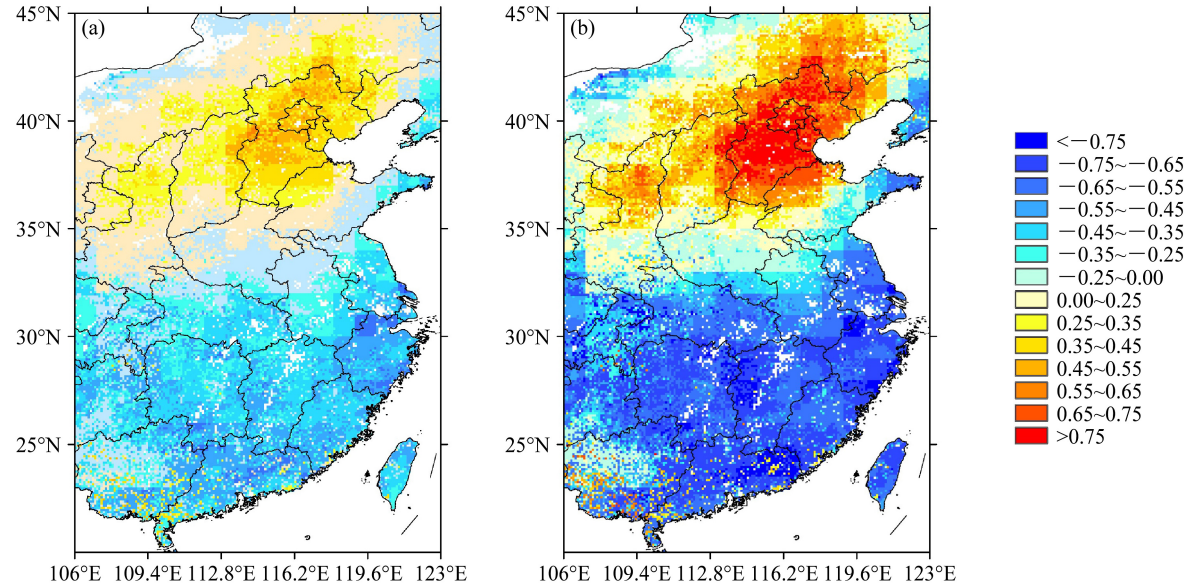


图 2 1948~2010 年中国季风区植被 NPP 与夏季风指数在生长季期间的相关系数 r 空间分布：(a) 年际相关， $|r| \geq 0.25$ 区域通过置信水平 95% 的 t 检验；(b) 5 年滑动平均后相关， $|r| \geq 0.26$ 区域通过置信水平 95% 的 t 检验

Fig. 2 Distributions of the correlation coefficients between NPP (Net Primary Productivity) and summer monsoon index during growing seasons: (a) Inter-annual correlation coefficients, $|r| \geq 0.25$ indicates statistical significance at the greater than 95% confidence level; (b) correlation coefficients after five-years smoothing, $|r| \geq 0.26$ indicates statistical significance at the greater than 95% confidence level

中在黄河以北的区域以及沿海的浙江、福建、台湾以及广西（图 3a）。夏季风指数与降水量在研究区域主要呈正相关关系，相关系数高值区与气温的高

相关区域基本对应（图 3b）。即强季风年对应黄河以北区域及浙江和福建省的降水量增加，气温降低。季风气候系统与生长季气温和降水量的相关关

系是可以理解的，即降水量增加会导致气温降低。

一般来讲，气候系统影响太阳辐射的变化主要通过影响云量实现的。季风区太阳辐射与夏季风指数

浙江、河南、湖北、湖南和广西等地（图 3c）。

3.4 中国季风区植被 NPP 与气候因子的空间相关

上节讨论了夏季风对季风区气温、降水量和太阳辐射的影响。以下将探讨这些气候因子与植被 NPP 的关系。图 4a 展示了中国季风区植被生长季

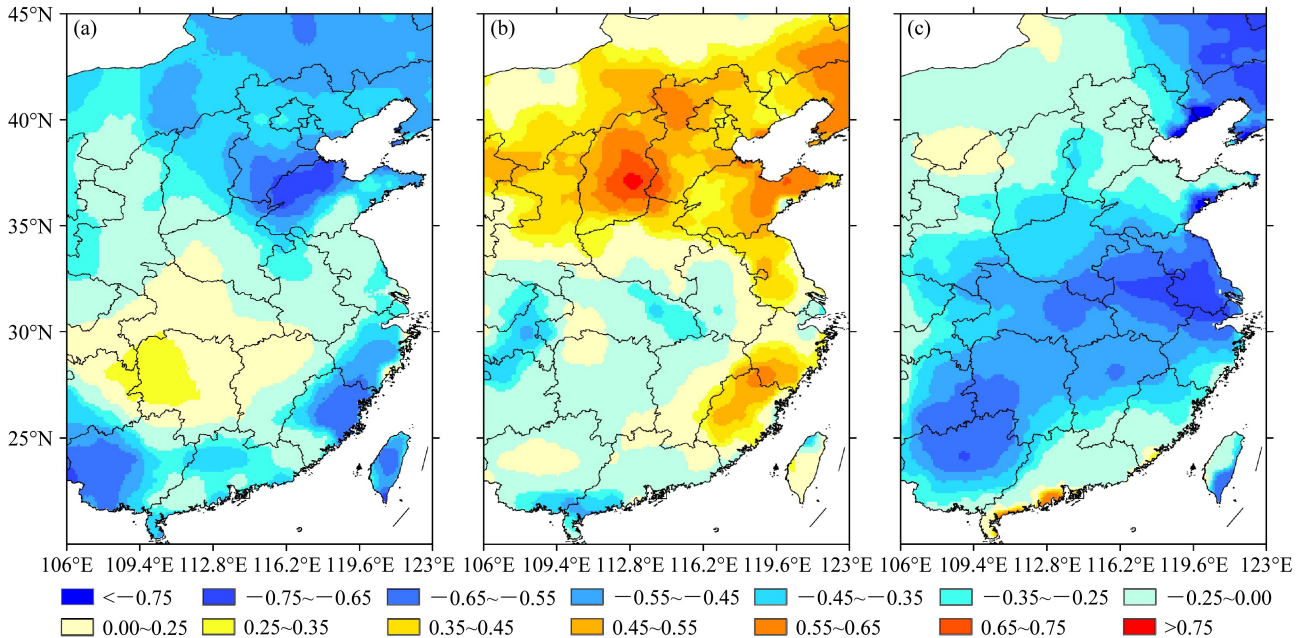


图 3 1948~2010 年夏季风指数与气候因子在生长季期间的相关系数空间分布 ($|r| \geq 0.26$ 区域通过置信水平 95% 的 t 检验): (a) 气温; (b) 降水量; (c) 太阳辐射

Fig. 3 Distributions of the correlation coefficients between summer monsoon index and climatic factors during growing seasons ($|r| \geq 0.26$ indicates statistical significance at the greater than 95% confidence level): (a) Temperature; (b) precipitation; (c) solar radiation

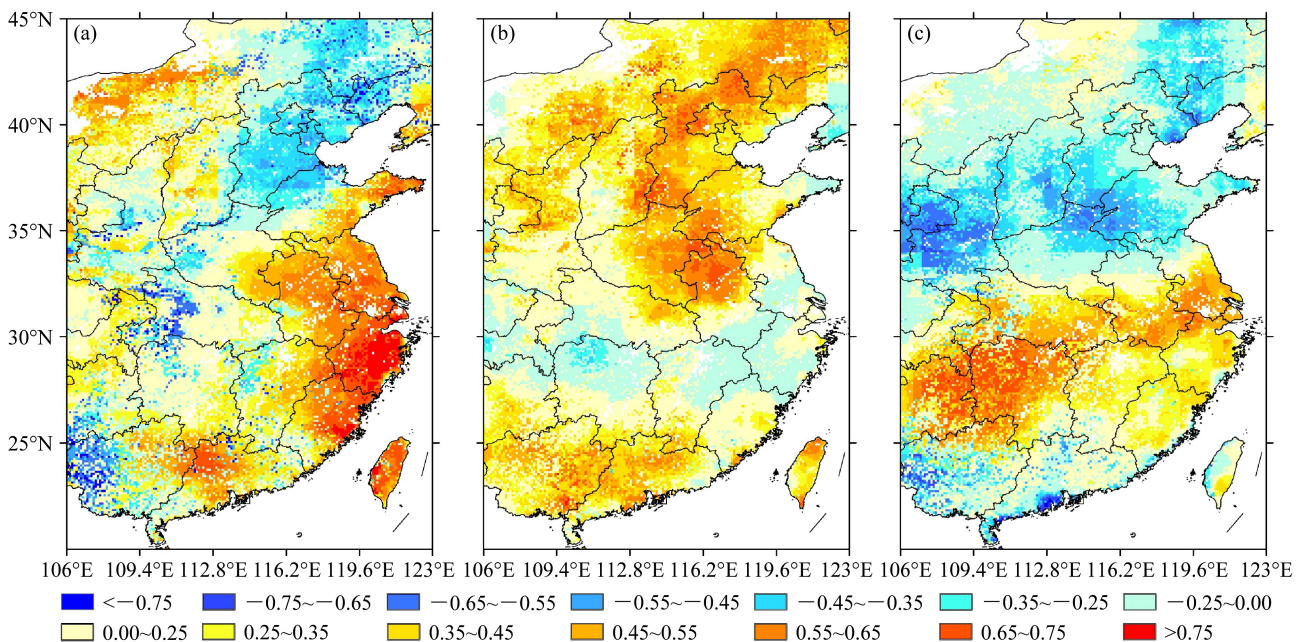


图 4 1948~2010 年中国季风区植被 NPP 与气候因子在生长季期间的相关系数空间分布 ($|r| \geq 0.26$ 区域通过置信水平 95% 的 t 检验): (a) 气温; (b) 降水量; (c) 太阳辐射

Fig. 4 Distributions of the correlation coefficients between NPP and climatic factors during growing seasons ($|r| \geq 0.26$ indicates statistical significance at the greater than 95% confidence level): (a) Temperature; (b) precipitation; (c) solar radiation

NPP 与气温相关系数的空间分布,由此看到,气温与植被 NPP 的关系具有很大的区域差异。在河北、山东、山西、陕西及广西的部分区域,植被 NPP 与气温呈显著负相关,即气温越高,这些区域植被 NPP 越低。但是在沿海地区,如山东的沿海区域、江苏、安徽、浙江、福建、广东及台湾,气温与 NPP 呈显著正相关,即气温越高,植被 NPP 越高。

中国季风区植被 NPP 与降水量的相关总的来看以正相关为主,即降水量越大,植被 NPP 越高。但是在长江流域以南各省,如浙江、福建、江西、湖南和四川等,植被 NPP 与降水量的相关性并不显著(图 4b)。

季风区植被 NPP 与太阳辐射的相关系数在 30°N 以北的地区以及广东和广西为负相关,在江苏、安徽、湖北、湖南和贵州等为正相关(图 4c)。一般来讲,太阳辐射增加会使光合作用增强,从而使 NPP 增加。北方太阳辐射增加使得 NPP 减少的可能原因是北方植被是受降水量限制的生态系统,太阳辐射增强一方面加强了植被光合作用,但另一方面却增加了植被和土壤蒸发,降低了土壤湿度,使得植被 NPP 减少。

3.5 南、北方季风区区域平均植被 NPP 及气候控制因子的时间变化特征

为了比较我国南、北方季风区植被 NPP 及其气候控制因子的时间变化特征,本研究分别大致以黄河以北和长江以南代表我国的北方和南方,在空间上取研究区中 35°N 以北和 30°N 以南的区域计算了以上两个区域平均的生长季气温、降水量、太阳辐射和植被 NPP(图 5)。

北方季风区(35°N~45°N, 106°E~123°E)生长季区域平均气温在 1948~2010 年以每 10 年 0.19 °C 的趋势增加,信度达到 99.9%;平均降水量以每 10 年 19 mm 的趋势减少,信度达到 95%;平均太阳辐射和植被 NPP 没有明显变化趋势(图 5a)。北方季风区区域平均 NPP 与气温相关不显著,但与平均降水量有很好的对应关系,二者之间的相关系数达到 0.62,即降水量可以解释 62%的 NPP 变化;该地区平均 NPP 与太阳辐射也有显著负相关关系,相关系数达到-0.45。做连续功率谱分析后发现,北方季风区在生长季期间的区域平均植被 NPP 有准 3 年周期,与东亚夏季风指数的周期一致,但该地区平均气温、降水量和太阳辐射均没有检测到达 95%信度的周期(图略)。

南方季风区(20°N~30°N, 106°E~123°E)生长季区域平均气温在 1948~2010 年以每 10 年 0.05 °C 的趋势增加,信度达到 95%,增加趋势远小于北方平均气温;平均降水量没有明显变化趋势;平均太阳辐射以每 10 年 1.6 W m⁻² 的速率增加,信度超过 99%;平均 NPP 以每 10 年 6 g C m⁻² 的趋势增加,且信度达到 99.9%(图 5b)。南方季风区区域平均 NPP 与降水量相关系数为 0.27,达到 95%置信度;虽然平均 NPP 与同年气温和太阳辐射的相关都不显著,但是平均气温和太阳辐射与 NPP 的落后一年相关系数却分别高达 0.36、0.32,皆达到 95%置信度。连续功率谱分析的结果与北方区域一致,即南方季风区在生长季期间的区域平均植被 NPP 有准 3 年周期,但是平均气温、降水量和太阳辐射均没有检测到显著周期(图略)。

总的来讲,南北方季风区在生长季期间的区域平均气候因子和植被 NPP 的变化趋势并不不同:北方平均气温增速大于南方;北方平均降水量呈下降趋势,而南方平均降水量没有明显变化趋势;北方平均太阳辐射没有明显变化趋势,而南方平均太阳辐射呈明显增加趋势;北方平均植被 NPP 没有明显变化趋势,但南方平均植被 NPP 增加趋势明显。但是有一点南北方植被是一致的,即南、北方区域平均植被 NPP 都检测到与夏季风指数相同的准 3 年周期。

3.6 中国季风区植被 NPP 对东亚夏季风的响应机理

通过以上空间和时间序列的相关分析以及功率谱周期分析,我们看到夏季风与季风区植被有密切的关系。以下我们试图解释季风区植被对东亚夏季风的响应机理。由图 2 的相关系数空间分布可知,夏季风与我国北方主要是京、津、冀及周边地区植被有显著的正相关关系。即强季风年将导致该区域植被 NPP 增加。其机理解释如下:由于我国京、津、冀地区降水量是植被的主要控制因子,降水量增加则植被 NPP 增加(图 4b),而降水量的增加正是夏季风变强造成的(图 3b),因此夏季风与植被 NPP 为显著正相关关系。京、津、冀地区除了降水量与植被 NPP 有较高的正相关以外,气温与 NPP 也有较高的负相关,也就是说气温和降水量同时控制植被 NPP,而这两个控制因子的作用是叠加的,即强夏季风带来的降水量增加和气温降低都有利于植被 NPP 增加,因此在京、津、冀地区植被 NPP 与夏季风指数有更高的正相关系数。

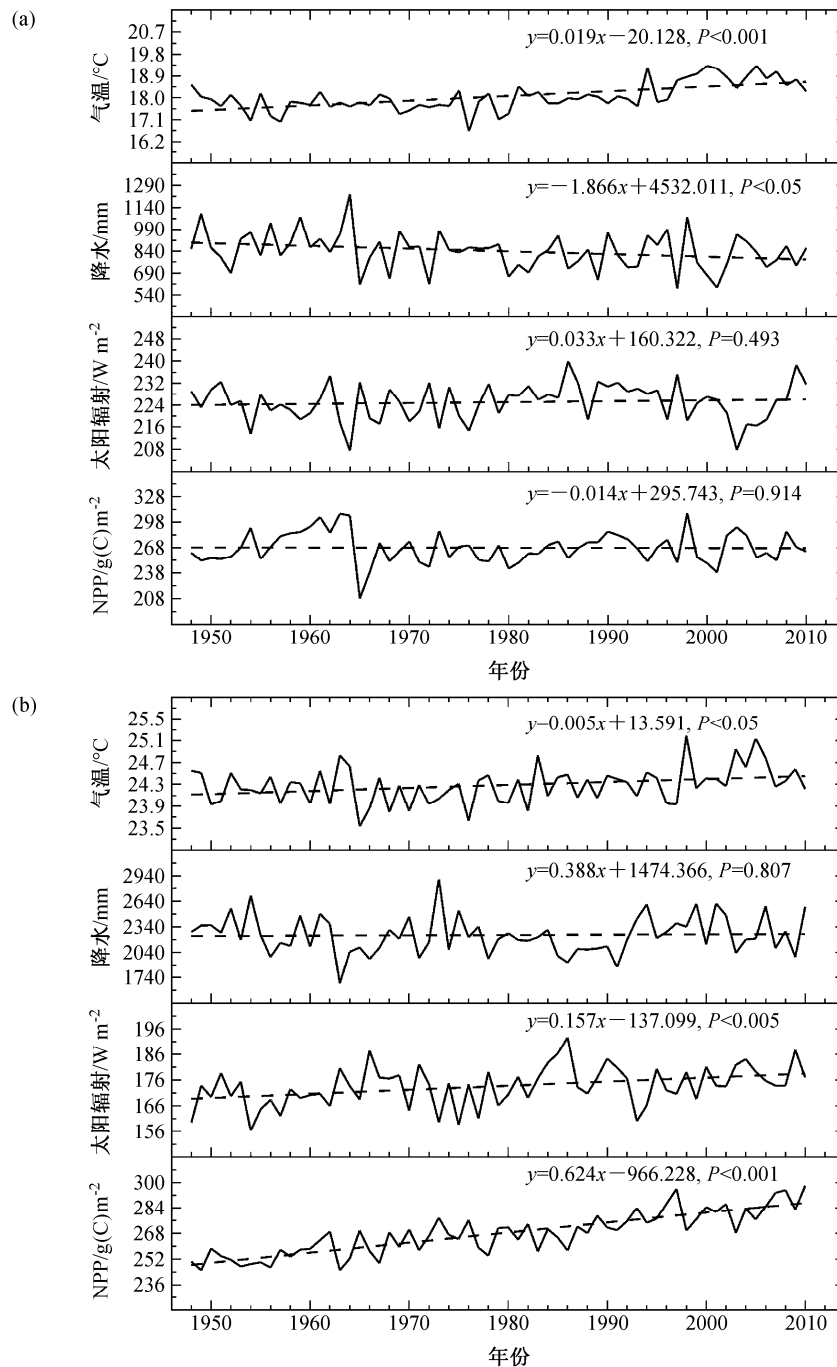


图5 1948~2010年中国季风区区域平均气温、降水量、太阳辐射和植被NPP在生长期期间的年际变化及其线性趋势：(a) 35°N以北区域；(b) 30°N以南区域

Fig. 5 Interannual variations and linear trends of temperature, precipitation, solar radiation, and NPP during growing seasons in the Chinese monsoon region: (a) Region to the north of 35°N; (b) region to the south of 30°N

我国南方的江苏、安徽、浙江、福建、湖南、湖北、江西、广东、台湾等省植被NPP与季风指数有很高的负相关关系，即强季风年对应各省植被NPP减少（图2）。南方以上各省气候因子与季风和植被NPP的关系比较复杂，我们总结了图3和图4

所揭示的季风增强和植被NPP减少时各省所对应的气温、降水量和太阳辐射的变化（表1）。如果相关系数显著的区域面积占一个省的面积不大，在表1中则认为是相关不显著。表1说明季风增强时，广东、浙江和福建的气温降低，而NPP减少也对应

气温降低,因此气温降低是该地区导致 NPP 减少的原因之一。季风增强对应的降水量变化在各省都不能解释 NPP 减少的原因。除广东、台湾以外,各省强季风年对应的太阳辐射减少与植被 NPP 减少对应的太阳辐射减少一致,因此强季风造成的太阳辐射减少是这些省份植被 NPP 减少的原因之一。

表 1 南方各省夏季风变强和 NPP 减少时对应的气温、降水量和太阳辐射的变化

Table 1 Changes of temperature, precipitation, and solar radiation under the situation of strengthened East Asian Summer monsoon and reduced NPP in southern provinces

	夏季风变强对应			NPP 减少对应		
	气温变化	降水量变化	太阳辐射变化	气温变化	降水量变化	太阳辐射变化
江苏	—	增加	减少	—	减少	减少
安徽	—	—	减少	下降	减少	减少
湖南	上升	—	减少	—	—	减少
湖北	—	—	减少	—	—	减少
江西	—	—	减少	—	—	减少
广东	下降	—	—	下降	减少	—
浙江	下降	增加	减少	下降	—	减少
福建	下降	增加	减少	下降	减少	减少
台湾	下降	—	—	下降	减少	—

注: —表示变化相关不显著。

总之,南方各省植被 NPP 对夏季风的响应有一定差异,夏季风增强时所造成的南方江苏、安徽、湖南、湖北、江西太阳辐射减少是其 NPP 减少的原因;而在浙江和福建,植被 NPP 减少的原因是强夏季风造成的辐射减少和气温降低的叠加作用;广东、台湾植被 NPP 减少的原因则只是强夏季风导致的气温降低。

4 结论

本文利用大气植被相互作用模型模拟了中国季风区植被 NPP,结合计算的季风指数序列,研究了夏季风影响中国季风区植被 NPP 的机理。得出如下结论:

(1) 1948~2010 年,我国南、北方季风区在生长季期间的区域平均植被 NPP 和气候控制因子具有不同的变化趋势:北方平均气温增速大于南方平均气温;北方平均降水量呈下降趋势,而南方平均降水量没有明显变化趋势;北方平均太阳辐射没有明显变化趋势,而南方平均太阳辐射增加趋势明显;北方平均植被 NPP 没有明显变化趋势,但南方

植被平均 NPP 增加趋势明显。在年际和年代际尺度,我国季风区植被 NPP 与夏季风指数都有明显的相关关系,在年代际尺度尤其显著;强夏季风年对应北方植被高 NPP 年和南方植被低 NPP 年;且南北方区域平均植被 NPP 都具有与夏季风指数相同的准 3 年周期。

(2) 夏季风影响北方京、津、冀及周边区域植被 NPP 的机理是通过影响其生长季降水量和气温实现的,由于强季风年对应北方季风区生长季强降水量和低温,而这两个因子都有利于北方植被生长,因而强夏季风年北方植被 NPP 是增加的。

(3) 夏季风影响我国南方江苏、安徽、湖南、湖北、江西植被 NPP 是通过影响太阳辐射实现的,影响浙江和福建 NPP 是通过辐射和气温的共同作用,影响广东、台湾植被 NPP 则是通过影响气温造成的。强季风年对应南方弱的太阳辐射和低温,因而南方大部分地区植被 NPP 减少。

参考文献 (References)

Etheridge D M, Steele L P, Langenfelds R L, et al. 1996. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn [J]. J. Geophys. Res., 101 (D2): 4115–4128, doi: 10.1029/95JD03410.

符淙斌, 曾昭美. 1997. 季风区—全球降水变化率最大的地区 [J]. 科学通报, 42 (21): 2306–2310. Fu Congbin, Zeng Zhaomei. 1997. Monsoon region—where the precipitation change rate is maximum in the world[J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 42 (21): 2306–2310.

符淙斌, 温刚, 谢力, 等. 2002. 东亚季风区气候和生态系统相互作用的诊断和模拟研究 [J]. 南京大学学报(自然科学), 38 (3): 281–294. Fu Congbin, Wen Gang, Xie Li, et al. 2002. The diagnosis and simulation studies on climate and ecosystem interactions in East Asia monsoon region [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 38 (3): 281–294.

谷晓平, 黄玫, 季劲钧, 等. 2007. 近 20 年气候变化对西南地区植被净初级生产力的影响 [J]. 自然资源学报, 22 (2): 251–259. Gu Xiaoping, Huang Mei, Ji Jinjun, et al. 2007. The influence of climate change on vegetation net primary productivity in Southwestern China during recent 20 years period [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 22 (2): 251–259.

郭其蕴. 1983. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析 [J]. 地理学报, 38 (3): 207–217. Guo Qiyun. 1983. The summer monsoon intensity index in East Asia and its variation [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 38 (3): 207–217.

郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 2004. 1873~2000 年东亚夏季风变化的研究 [J]. 大气科学, 28 (2): 206–215. Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei, et al. 2004. Studies on the variations of East-Asian summer monsoon during AD 1873–2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric

- Sciences (in Chinese), 28 (2): 206–215.
- 黄嘉佑. 1982. 谱分析在气象中的应用 [J]. 气象科技, (3): 13–16. Huang Jiayou. 1982. Application of spectrum analysis in meteorology [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), (3): 13–16.
- 黄玫. 2006. 中国陆地生态系统水、热通量和碳循环模拟研究 [D]. 中国科学院地理科学与资源研究所博士学位论文, 137pp. Huang Mei. 2006. The simulation research on the water, heat flux and carbon cycle of terrestrial ecosystems in China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 137pp.
- 黄玫, 季劲钧, 彭莉莉. 2008. 青藏高原 1981~2000 年植被净初级生产力对气候变化的响应 [J]. 气候与环境研究, 13 (5): 608–616. Huang Mei, Ji Jinjun, Peng Lili. 2008. The response of vegetation net primary productivity to climate change during 1981–2000 in the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (5): 608–616.
- Huang R H, Chen J L, Huang G. 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (6): 993–1023, doi: 10.1007/s00376-007-0993-x.
- 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 2008. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 691–719. Huang Ronghui, Gu Lei, Chen Jilong, et al. 2008. Recent progresses in studies of the temporal-spatial variations of the East Asian monsoon system and their impacts on climate anomalies in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 691–719.
- 黄钰. 2011. 中国陆地植被 NPP 对气候变化响应及其敏感性分析 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 61pp. Huang Yu. 2011. Response of vegetation net primary productivity (NPP) to climate change in China and sensitivity experiments [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 61pp.
- 姜超, 徐永福, 季劲钧. 2013. 东亚季风区夏季陆地生态系统碳循环对东亚夏季风的响应 [J]. 气候与环境研究, 18 (3): 329–341. Jiang Chao, Xu Yongfu, Ji Jinjun. 2013. Response of the summer terrestrial carbon cycle in the East Asian monsoon region to East Asian monsoon [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 329–341, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11062.
- Ji J J, Hu Y C. 1989. A simple land surface process model for use in climate study [J]. Acta Meteorologica Sinica, 3 (3): 342–351.
- Ji J J. 1995. A climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface [J]. Journal of Biogeography, 22 (2–3): 445–451, doi: 10.2307/2845941.
- Li J P, Zeng Q C. 2003. A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 20 (2): 299–302, doi: 10.1007/s00376-003-0016-5.
- 刘文杰. 2000. 西双版纳近 40 年气候变化对自然植被净第一性生产力的影响 [J]. 山地学报, 18 (4): 296–300. Liu Wenjie. 2000. Impact of climatic variation on net primary productivity of natural vegetation in Xishuangbanna in recent 40 years [J]. Journal of Mountain Science (in Chinese), 18 (4): 296–300.
- Sheffield J, Goteti G, Wood E F. 2006. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. J. Climate, 19 (13): 3088–3111, doi: 10.1175/JCLI3790.1.
- 孙睿, 朱启疆. 2001. 气候变化对中国陆地植被净第一性生产力影响的初步研究 [J]. 遥感学报, 5 (1): 58–61. Sun Rui, Zhu Qijiang. 2001. Effect of climate change of terrestrial net primary productivity in China [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 5 (1): 58–61.
- 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. 气象学报, 62 (2): 228–236. Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (2): 228–236.
- 温刚, 符淙斌. 2000. 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, 24 (5): 676–682. Wen Gang, Fu Congbin. 2000. Large scale features of the seasonal phenological responses to the monsoon climate in East China: Multi-year average results [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (5): 676–682.
- 谢力, 温刚, 符淙斌. 2002. 中国植被覆盖季节变化和空间分布对气候的响应——多年平均结果 [J]. 气象学报, 60 (2): 181–187. Xie Li, Wen Gang, Fu Congbin. 2002. The response of the vegetation seasonal variability and its spatial pattern to climate variation in China: Multi-year average [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (2): 181–187.
- 熊平生, 谢世友. 2008. 中国全球变化研究优势领域及进展 [J]. 地理与地理信息科学, 24 (3): 86–89, 95. Xiong Pingsheng, Xie Shiyu. 2008. Superiority regions and progress of global change research in China [J]. Geography and Geo-Information Science (in Chinese), 24 (3): 86–89, 95.
- 许红梅, 高清竹, 黄永梅, 等. 2006. 气候变化对黄土丘陵沟壑区植被净第一性生产力的影响模拟 [J]. 生态学报, 26 (9): 2939–2947. Xu Hongmei, Gao Qingzhu, Huang Yongmei, et al. 2006. Simulated the impact of climate change on net primary production in Hilly Area of Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 26 (9): 2939–2947.
- 闫伟兄, 陈素华, 乌兰巴特尔, 等. 2009. 内蒙古典型草原区植被 NPP 对气候变化的响应 [J]. 自然资源学报, 24 (9): 1625–1634. Yan Weixiong, Chen Suhua, Wulan Bater, et al. 2009. Net primary production in response to climate changes in Inner Mongolia steppe [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 24 (9): 1625–1634.
- 曾慧卿, 刘琪琛, 殷剑敏, 等. 2008. 近 40 年气候变化对江西自然植被净第一性生产力的影响 [J]. 长江流域资源与环境, 17 (2): 227–231. Zeng Huiqing, Liu Qijing, Yin Jianmin, et al. 2008. Impact of climatic variation on net primary productivity of natural vegetation in Jiangxi in recent 40 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 17 (2): 227–231.
- 张佳华, 符淙斌. 2002. 利用遥感反演的叶面积指数研究中国东部生态系统对东亚季风的响应 [J]. 自然科学进展, 12 (10): 1098–1100. Zhang Jiahua, Fu Congbin. 2002. Research on the response of China eastern ecosystem to East Asian monsoon by using leaf area index through remote sensing inversion [J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 12 (10): 1098–1100.
- 张佳华, 符淙斌, 延晓冬, 等. 2002. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究 [J]. 地球物理学报, 45 (5): 631–637. Zhang Jiahua, Fu Congbin, Yan Xiaodong, et al. 2002. Global response analysis of LAI versus surface air temperature and precipitation variations [J]. Chinese

- Journal of Geophysics (in Chinese), 45 (5): 631–637.
- 张山清, 普宗朝, 伏晓慧, 等. 2010. 气候变化对新疆自然植被净第一性生产力的影响 [J]. 干旱区研究, 27 (6): 905–914. Zhang Shanqing, Pu Zongchao, Fu Xiaohui, et al. 2010. Effect of climate change on NPP of natural vegetation in Xinjiang [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 27 (6): 905–914.
- 张时煌, 彭公炳, 黄玫. 2004. 基于地理信息系统技术的土壤质地分类特征提取与数据融合 [J]. 气候与环境研究, 9 (1): 65–79. Zhang Shihuang, Peng Gongbing, Huang Mei. 2004. The feature extraction and data fusion of regional soil textures based on GIS techniques [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (1): 65–79.
- 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 2008. 东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应 [J]. 生态学报, 28 (1): 92–102. Zhao Junfang, Yan Xiaodong, Jia Gensuo. 2008. Simulating the responses of forest net primary productivity and carbon budget to climate change in Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 28 (1): 92–102.
- 赵茂盛, 符淙斌, 延晓冬, 等. 2001. 应用遥感数据研究中国植被生态系统与气候的关系 [J]. 地理学报, 56 (3): 287–296. Zhao Maosheng, Fu Congbin, Yan Xiaodong, et al. 2001. Study on the relationship between different ecosystems and climate in China using NOAA/AVHRR data [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 56 (3): 287–296.
- 朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 等. 2007. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析 [J]. 科学通报, 52 (21): 2535–2541. Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Yang Xiaoqiong, et al. 2007. Analysis of the affection of climate change on China terrestrial vegetation net primary production [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (21): 2535–2541.