

年际时间尺度上全球植被与大气相互作用的诊断分析

李伟平¹ 季劲钧² 董文杰¹ 刘新³

1 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085

摘 要 利用 NOAA AVHRR 得到的 19 年 (1982~2000) 全球月平均的叶面积指数 (LAI) 与 ERA40 近地面气温和 CMAP 降水进行时滞相关分析, 并研究了 LAI 的年际变化对后期温度、降水的反馈作用。结果表明, 大部分地区 LAI 与同期气温的相关性更好, 30°N 以北 (以南) 基本上为正 (负) 相关。LAI 滞后一个月时, 北半球中低纬度和 20°S 以南大部地区 LAI 与降水的正相关更强; 而在北半球中纬度大陆东部和南半球热带地区, LAI 与前一个月温度的关系更密切。LAI 与温度的相关性在春、秋季最明显, LAI 与降水的关系在雨季最密切。LAI 对气温比较显著的正反馈主要分布在北半球中高纬度地区; 20°S 以南大部地区为比较显著的负反馈。LAI 对降水比较显著的正反馈分散在北美大陆西北部、东欧平原南部、欧亚大陆东部和热带沿海地区。中高纬度 (尤其是北半球) 大部分地区 LAI 对气温、降水反馈部分的解释方差达到总方差的 20% 以上。

关键词 年际变化 植被-大气相互作用 时滞相关 反馈

文章编号 1006-9895 (2008) 01-0075-15

中图分类号 P461

文献标识码 A

Diagnosis of Global Vegetation – Atmosphere Interactions at the Interannual Time Scale

LI Wei-Ping¹, JI Jin-Jun², DONG Wen-Jie¹, and LIU Xin³

1 *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing* 100081

2 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029

3 *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085

Abstract Time-lag correlation between monthly leaf area index (LAI) derived from satellite remote sensing by NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), 2-m air temperature from ERA40 reanalysis and precipitation from Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation (CMAP) during the 19-year period (1982–2000) is analyzed for the whole year and four seasons. Self-correlations of LAI, temperature and precipitation are calculated. Feedback of LAI on later time temperature and precipitation is studied based on linear theory. By comparing the simultaneous LAI-temperature and LAI-precipitation correlations, it is found that LAI is more closely related to concurrent temperature than concurrent precipitation around most parts of the global continents, with generally positive (negative) LAI-temperature correlation coefficients to the north (south) of 30°N. As for the LAI-temperature or LAI-precipitation relationship with LAI lagging one month, LAI is more closely and positively correlated with antecedent precipitation in most parts of the mid-low latitudes of the Northern Hemisphere and southward

收稿日期 2006-09-05, 2006-10-18 收修定稿

资助项目 科技部科研院所社会公益研究专项资金 2002DIB20070, 国家重点基础研究发展规划项目 2005CB422000, 中国气象局数值模式创新重点项目“气候系统模式的评估与改进”

作者简介 李伟平, 男, 1967 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事陆面过程及陆气相互作用的诊断分析和数值模拟研究。

E-mail: liwp@cma.gov.cn

of 20°S; whereas LAI is more closely connected with one-month earlier temperature in the eastern mid-latitudes of the Northern Hemisphere and in the southern tropics, with positive correlation in the mid-latitudes of the Northern Hemisphere and southern tropical Africa and negative correlation in eastern Amazon and northern Australia. The aforementioned LAI-temperature correlations are most significant during spring and autumn, whereas LAI is more closely correlated with one-month earlier precipitation during rainy seasons, i. e. JJA (June, July, August) for the Northern Hemisphere and DJF (December, January, February) for the Southern Hemisphere.

Significant positive feedback of LAI on later surface temperature exists in the mid-high latitudes of North America, West Europe, and eastern Eurasian continent; whereas significant negative feedback on temperature occurs around most parts to the south of 20°S. The explained variance by the feedback of LAI on temperature can be as large as 20% of the total variance poleward of 20°S and 20°N. Significant positive feedback of LAI on precipitation occurs in northwestern Canada, southern East European plain, northeastern Eurasian continent, northern part of the Indo-China Peninsula, and coastal areas of the tropics, such as eastern Amazon plain, to the east of the East African Plateau and northwestern Australia; whereas most of the negative feedback of LAI on precipitation is not statistically significant. The explained variance by the feedback of LAI on precipitation can be as large as 20% of the total variance poleward of 20°N.

Key words interannual variation, vegetation-atmosphere interaction, time-lag correlation, feedback

1 引言

全球变化背景下地表植被与气候相互作用是当今地球科学领域的研究重点之一。理论分析和数值模拟的结果都表明,大气和植被生态及土壤系统水文过程存在复杂相互作用,具有鲜明的多时间尺度现象^[1]。一方面,全球植被覆盖的空间分布与气候条件密切相关,气候的变化会引起植被生长发育状况及植被分布格局的改变。另一方面,植被通过改变反照率影响大气下垫面的能量收支,通过粗糙度改变行星边界层湍流输送,通过蒸腾改变向大气的水分供应以及调节有效能量在地表感热和潜热之间的分配,从而对气候具有明显的反馈作用。近年来,随着遥感技术的发展,利用遥感信息研究大尺度范围植被参数的时空分布特征,揭示不同空间和时间分辨率下植被特征与气候的相互关系成为地学界的热门课题。

中国学者^[2, 3]用 1982~1993 年归一化植被指数 (NDVI) 资料和中国 152 个气象站的旬平均温度和降水数据,分析了温度、降水和植被指数第一特征向量时间系数之间不同滞后时间的相关,结果表明,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 2~3 旬,不同植被类型的响应存在差异。植被生长对温度和降水年际变化的关系在空间上表现为近乎相反的势态。赵茂盛等^[4]应用更多气象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。

龚道溢等^[5]利用 1982~2000 年的 NDVI 资料研究了北半球春季 NDVI 对温度变化响应的空间差异,发现 NDVI 和气温的相关性非常高。北半球最显著的 NDVI 响应中心在西西伯利亚,其次是北美大陆。这些 NDVI-温度的耦合模态受大尺度的大气环流系统的显著影响。

NDVI 反映植被特征有其局限性,例如 NDVI 在数值 0.7 附近趋于饱和,在植被生长期较长的地区有高估生长期的倾向。相对而言,叶面积指数 (LAI) 反映植被特征季节演变的变率更大,包含的信息比 NDVI 更丰富^[6]。LAI 的动态变化可以较好地反映植被的结构和数量特征的变化,从而更好地反映植被和气候的相互作用,已在农业、林业、地学等领域得到广泛应用^[7]。数值模拟结果指出,一般而言,LAI 增加会引起植被蒸腾增大,导致气温下降^[8, 9]。统计分析结果表明,最大的 LAI 与温度的距平正相关出现在东南亚南部、非洲 Sahel 地区和巴西东部等热带地区,而 LAI 与降水的距平负相关出现在西伯利亚、亚洲北部和北美西北部^[10]。

上述工作都是从植被对气候条件的响应来讨论,张井勇等^[11, 12]利用 1981~1994 年的 NDVI 资料和中国 160 个标准气象站的气温、降水资料,分析了我国不同区域前期 NDVI 对后期气温、降水

的影响。结果表明, 上年冬季 NDVI 与夏季降水的正相关以华中地区和青藏高原最明显, 而春季 NDVI 与夏季降水则以东部干旱-半干旱区和青藏高原的正相关更明显。相比之下, 前期 NDVI 与温度的相关比较复杂, 而且温度较之降水对植被的滞后响应更弱一些。

在统计分析中, 滞后自相关反映某一个量(温度、降水、LAI 等)异常的持续性, 但这仅仅是表象, 其异常持续性可能是由别的因素造成的。交叉滞后相关或许能反映一些因果联系。如果表面温度、降水超前 LAI 的相关较之与 LAI 的同期相关更好, 表明植被对气候条件的响应有一定的滞后性。本工作利用全球范围更长时间序列的 LAI 和气候资料, 区分不同季节、不同滞后时间长度进行深入细致的分析, 并从线性理论出发探讨了全球范围植被年际变化对气候异常的反馈作用, 以期对植被-大气相互作用获得一些新的认识。

2 资料与分析方法

本文所用资料包括根据 NOAA AVHRR 遥感资料反演得到的逐月平均的叶面积指数(LAI), ERA40 再分析资料逐月平均的近地面气温、短波辐射以及 CMAP 降水, 时间序列为 1982~2000 共 19 年, 空间分辨率为 2.5° 。其中 LAI 的分辨率从 0.5° 转换到 2.5° 以与其它资料保持一致, 同时也可以滤掉小尺度的扰动。

由于本工作的重点是讨论年际变化, 首先去除月平均资料的季节循环, 然后去掉了时间距平序列的线性趋势, 因为在北半球中高纬度地区植被指数有线性增长的趋势^[13~15]。所用统计方法为月平均资料的时滞自相关和交叉相关。除了对全年所有月份进行分析, 为揭示不同季节植被-大气相互作用的特征, 对 19 年中每个季度三个月份的时间距平所构成的子序列也进行时滞相关分析, 滞后的时间序列有可能顺延到下一个季度或年度。本文所用季度名称(如春季)是对北半球而言。

为探讨植被异常对后期气候条件的反馈, 借鉴 Liu 等^[16]的方法, 假定某时刻植被状态异常为 $V(t)$, 此后经过 dt 时刻大气状态变量异常 $A(t+dt)$ 可表示为对植被异常的线性响应加上大气内部噪音部分 $N(t+dt)$, 如公式(1)所示。两边同时乘以前期植被异常 $V(t-\tau)$, 并计算样本的集合平均

(即协方差, 以角括号 $\langle \rangle$ 表示, 见(2)式), 则噪音部分趋于零, 因为大气噪音不可能对前期植被异常造成影响。考虑到大气的响应时间比起植被异常的持续时间一般可忽略不计, 则植被异常对大气状态变量的反馈系数可用(3)式近似表示, 其中 τ 为植被异常超前大气状态变量的时间。为检验植被反馈的显著性, 随机打乱原来的时间序列(本文产生了 500 个这样的序列), 原序列计算得到的 λ_A 大于随机序列得到的 λ_A 的概率, 可认为是 λ_A 的显著水平。

$$A(t+dt) = \lambda_A V(t) + N(t+dt), \quad (1)$$

$$\langle V(t-\tau), A(t+dt) \rangle = \lambda_A \langle V(t-\tau), V(t) \rangle + \langle V(t-\tau), N(t+dt) \rangle, \quad (2)$$

$$\lambda_A = \langle V(t-\tau), A(t) \rangle / \langle V(t-\tau), V(t) \rangle \quad (\text{假设 } dt \approx 0), \quad (3)$$

植被反馈部分解释的方差百分比为

$$\sigma^2[\lambda_A V(t)] / \sigma^2[A(t)]. \quad (4)$$

3 结果分析

3.1 LAI 与表面温度、降水的同期交叉相关

决定植被长势的主要过程是光合作用、呼吸作用, 影响因素主要包括光照、温度和水分(降水)条件。图 1a 为全年各月份 LAI 与同期温度相关系数的分布。 30°N 以北基本上为正相关, 而 30°N 以南则以负相关为主, 除了中国的江南北部、南美洲西北部、巴西高原、非洲几内亚湾沿岸地区和刚果盆地为局部正相关。概言之, 在 30°N 以北的大多数地区, 温度偏高有利于植被生长; 而 30°N 以南情形相反。若区分不同季节来看(图 1b~e), 北半球中高纬度地区 LAI 与同期温度的正相关在春季最强, 分布范围也最广, 秋季稍弱; 而东欧平原的冬季、欧亚大陆东部的夏季、美国东南部的秋季甚至出现弱的负相关, 虽然这些地区全年平均而言是正相关。墨西哥高原的负相关一年四季都存在, 以夏季最强。印度半岛的负相关主要在春季, 秋季向北收缩, 夏季和冬季只是在西北部有小范围微弱负相关。中国东部 LAI 与同期温度相关的季节变化较大: 冬季东北地区 and 河套以南大部地区为显著正相关; 春季华北地区为较弱的负相关, 青藏高原东部为显著正相关; 夏季蒙古东部为显著负相关, 黄河与长江之间为正相关; 秋季青藏高原东部至长江中游为显著正相关。整个热带地区 LAI 与同期温

度的相关分布比较零散：巴西高原的正相关主要在冬季（当地夏季）；北半球热带非洲在春季是显著的负相关，其它三个季节非洲几内亚湾沿岸地区及刚果盆地为零散的正相关。热带以外的南半球大陆地区 LAI 与同期温度的负相关四季都显著，只是 20°S 以南地区的负相关在夏、秋季（当地冬、春季）相对较弱。

LAI 与地面接收到的太阳辐射的交叉相关的分布形势与图 1 非常一致（图略）。在北半球中高

纬度地区，正的相关系数意味着日照充足有利于植被生长；另一方面，在植被长势好的年份，反照率减小，地面接受的太阳辐射增加，导致中高纬度地区温度升高。对于 30°N 以南的负相关，可能是因为 LAI 增加导致降水、云量增多，从而使得地面接收到的太阳辐射减少，导致表面温度降低。另外，这些地区水分、光照条件相对较好，LAI 增加导致蒸腾增大，也会引起表面温度降低^[17, 18]。

降水与 LAI 的同期相关分布为： 60°N 以北及

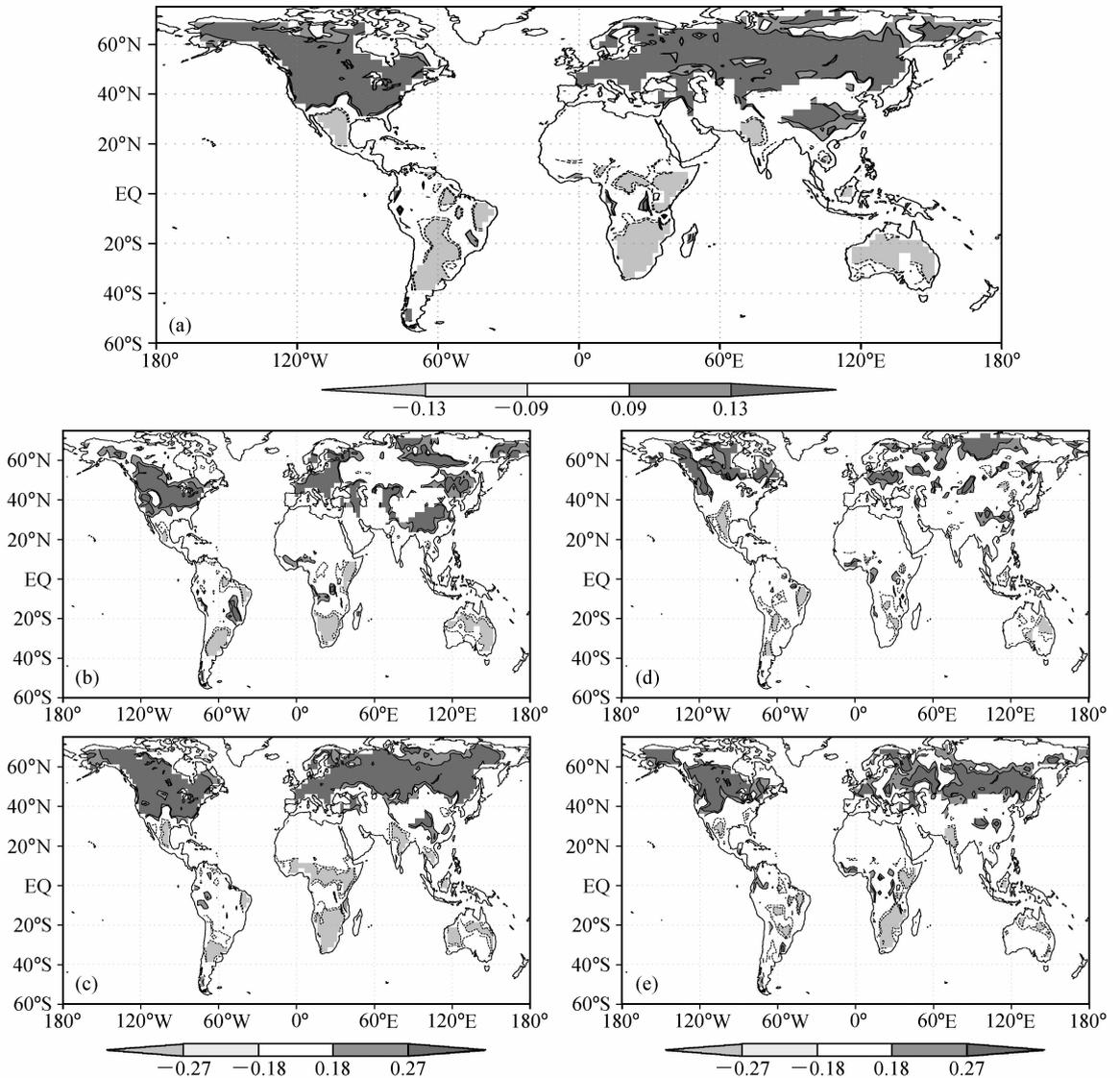


图 1 月平均 LAI 与表面气温的同期相关系数：(a) 全年；(b) 冬季；(c) 春季；(d) 夏季；(e) 秋季。实线、虚线分别表示正、负相关，同符号相关区内较浅、较深阴影分别表示相关系数的统计显著性达到 80%、95%（图 2, 4, 5, 7, 8 与此类似）

Fig. 1 Simultaneous correlation coefficient between the leaf area index (LAI) and 2-m air temperature: (a) The whole year; (b) DJF (Dec, Jan, Feb); (c) MAM (Mar, Apr, May); (d) JJA (Jun, Jul, Aug); (e) SON (Sep, Oct, Nov). Solid and dashed contours indicate positive and negative correlations, respectively. In the areas with the same sign of correlation coefficients, lighter and heavier shadings indicate the correlation is statistically significant at 80% and 95% confidence level, respectively (similar for Figs. 2, 4, 5, 7 and 8)

40°S~30°N 之间(中国东南部及南半球热带地区除外)基本上为正相关,即这些地区降水偏多有利于植被生长。而在 40°N~60°N 之间的中纬度大部分地区, LAI 与降水呈负相关,除了 45°N 附近的东欧平原南部、蒙古至中国东北大兴安岭地区为正相关(图 2a)。若按季节考查 LAI 与降水的同期相关(图 2b~e), 60°N 以北的正相关在冬季和夏季较强。40°N~60°N 之间大部分地区的负相关主要出现在春、秋季,只是北美大陆西部的负相关在冬季较强,东欧平原的负相关主要在夏季和冬季。对中国东部而言,河套至长江之间地区秋、冬季以负相关为主,春季为正相关,因而全年平均相关不显著;江南东部的负相关主要是在冬季。热带非洲

LAI 与降水的正相关主要在春季,其次是冬季,夏季赤道附近甚至为负相关。南半球大陆 LAI 与降水的正相关主要在秋、冬季(当地春、夏季)。澳大利亚大部地区在冬季(当地夏季)为显著正相关,而其中、西部在夏季(当地冬季)为显著的负相关。

3.2 LAI、表面温度和降水异常的持续性

在研究 LAI 与气温和降水的时滞相关之前,有必要首先检查各个量的持续性。较高的滞后自相关表明异常的持续性较好。LAI 滞后一个月的自相关在绝大多数陆地区域都是显著正相关,除了东欧平原的北部、60°N 附近的西伯利亚地区、亚马孙平原西南部(图 3a)。考查不同季节 LAI 滞后一个月的自相关性发现,欧亚大陆北部较弱的相关性

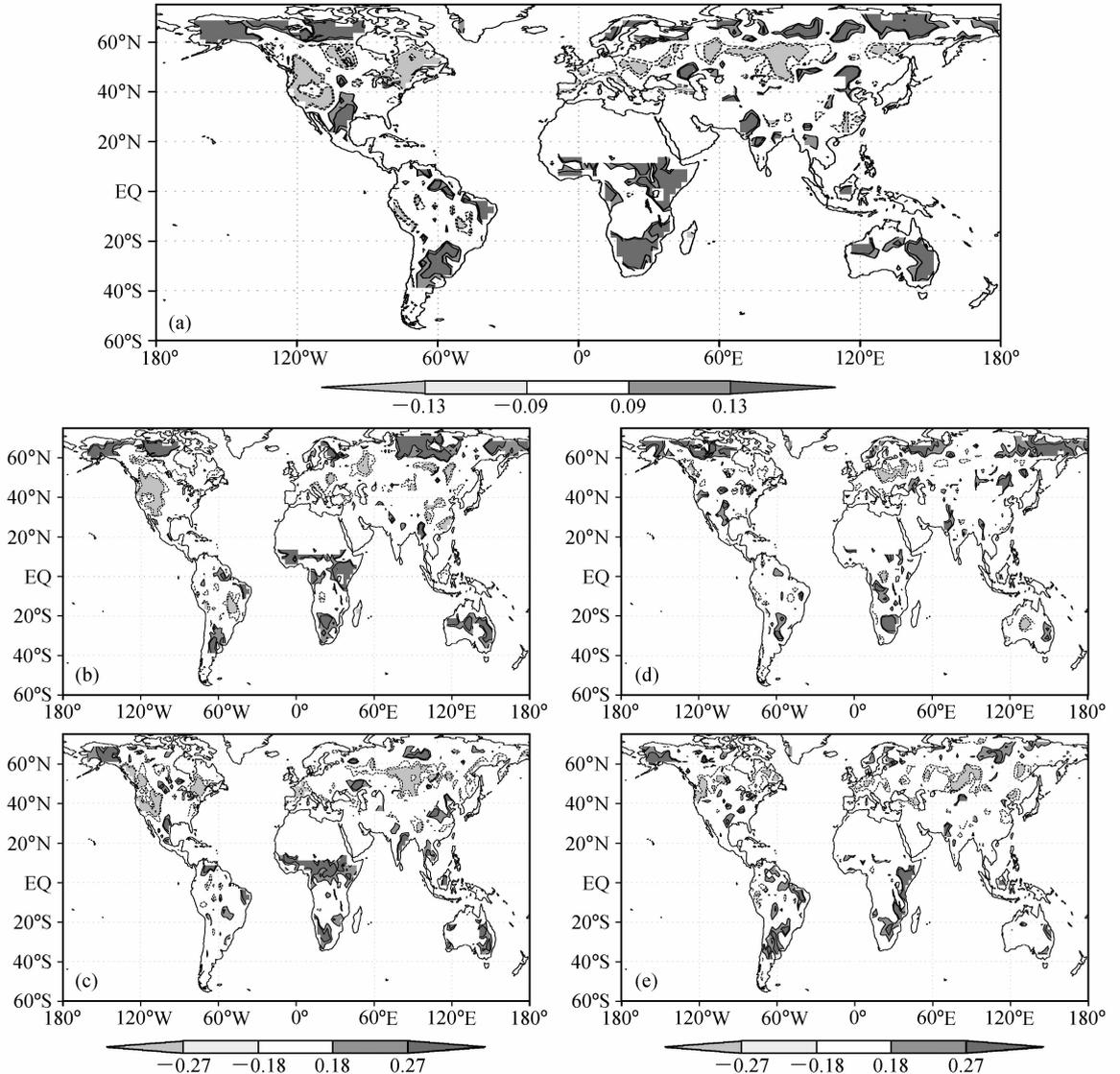


图 2 月平均 LAI 与降水的同期相关系数。其余同图 1

Fig. 2 The same as Fig. 1, but for the simultaneous correlation coefficient between LAI and precipitation

主要出现在春季、秋季(图略),分别是积雪融化和积雪开始的季节,而中国东部长江以北地区秋季 LAI 弱的自相关性则可能是农业活动造成的。LAI 滞后两个月的显著正相关区域缩小,尤其是加拿大东部以及 50°N 以北的欧亚大陆地区相关性很弱(图 3b)。LAI 滞后三个月的自相关进一步减弱,

40°N 以北主要的正相关区位于欧洲中西部、黑海与里海之间地区、西西伯利亚平原东南部向东至贝加尔湖地区,而中西伯利亚高原局部和欧亚大陆东北部变为负相关(图 3c)。LAI 滞后四个月的自相关进一步减弱,

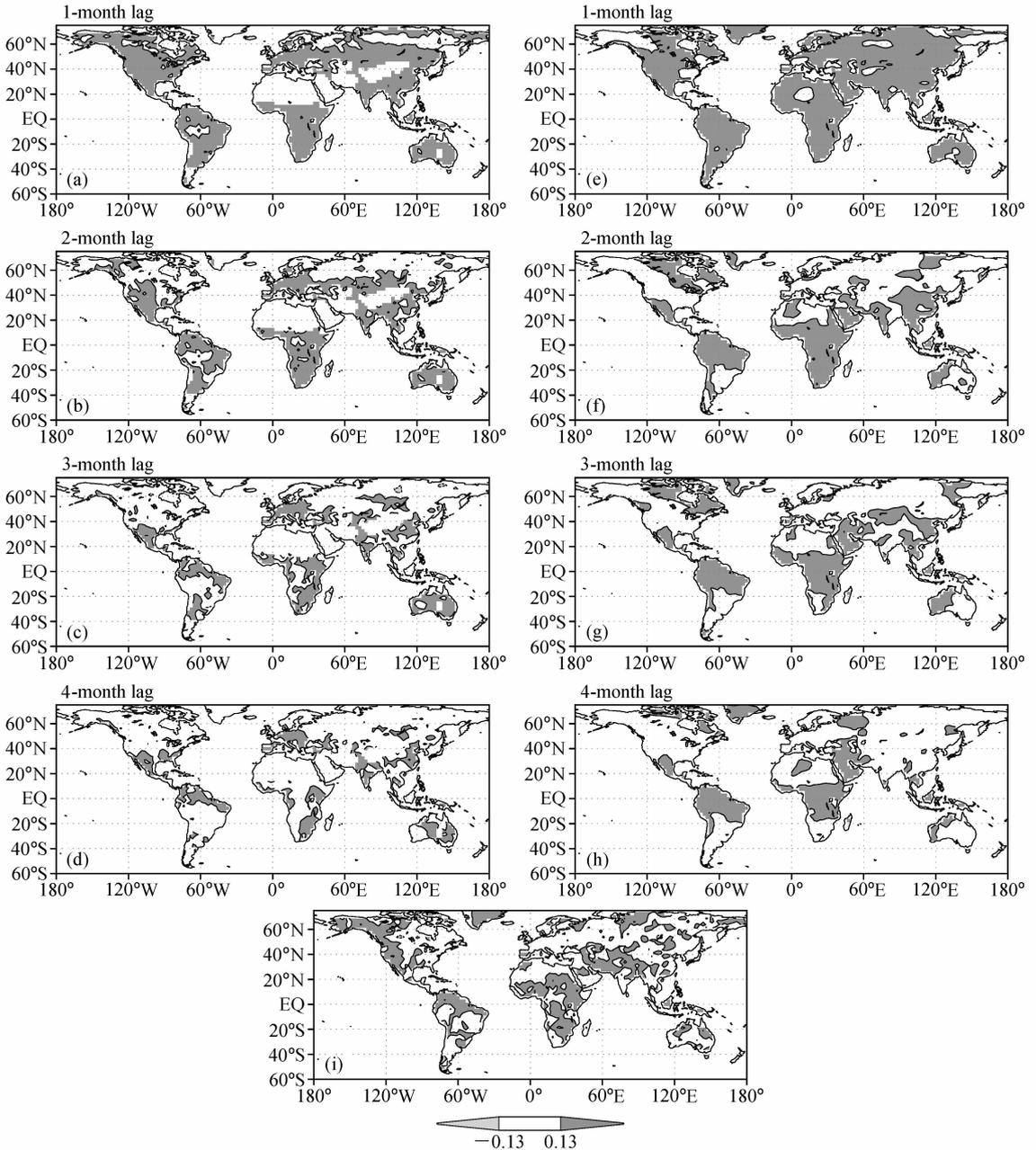


图 3 滞后自相关系数的分布: (a~d) LAI 滞后 1~4 个月; (e~h) 表面气温滞后 1~4 个月; (i) 降水滞后 1 个月。深阴影和浅阴影分别表示正相关和负相关系数的统计显著性达到 95%

Fig. 3 Geographical distribution of self-correlation coefficients: (a~d) LAI with time-lag of 1~4 months; (e~h) 2-m air temperature with time-lag of 1~4 months; (i) precipitation with time-lag of 1 month. Dark and light shading indicates the positive and negative correlations are statistically significant at 95% confidence level, respectively

南美洲北部、东非高原向南至非洲大陆的南部以及澳大利亚中东部, 表明这些地区植被异常的持续性很强(图 3d)。

全球绝大部分陆地表面气温滞后一个月的自相关是显著正相关(图 3e), 表明气温异常的持续性也较好。从正相关的季节性来看, 北美大陆主要在春、夏季; 欧洲中东部主要在冬季, 其次是夏季; 欧亚大陆东北部在秋季正相关最显著; 中国大陆东南部的正相关主要在冬季和夏季; 中低纬度其它地区温度滞后一个月自相关的季节变化不明显(图略)。北半球中高纬度大部分地区以及撒哈拉沙漠表面温度异常的持续性小于两个月, 除了北美大陆东北部、东欧平原东南部和贝加尔湖以北地区。南美大陆东南部和澳大利亚东部滞后两个月的自相关也变得不显著(图 3f)。温度滞后三个月的正相关区域进一步缩小, 尤其是 20°S 以南的地区(图 3g)。滞后四个月时, 正相关区域局限在东欧平原北部、外兴安岭地区、墨西哥高原、沙特阿拉伯半岛、南美洲和非洲大陆的热带地区以及澳大利亚西部(图 3h)。加拿大东北部拉布拉多半岛地区温度长达 4 个月的持续性可能与那里的冰雪过程有关而与植被关系不密切, 因为那里温度的滞后自相关主要出现在冬、春季积雪盛期, 而 LAI 的自相关在滞后两个月时就不明显了。欧洲中西部温度滞后两个月以上的自相关不明显, 而那里 LAI 的持续性很好(图 3a~d), 可见那里植被对温度的影响不大, 北大西洋海表温度异常对欧洲大陆气温的影响可能占主导地位。中国东部表面气温异常的持续性可达 3 个月, 热带地区更是长达 4 个月, 这与上述地区 LAI 具有很强的持续性有关。

因为降水的成因很复杂, 大气环流本身的“记忆”很短, 降水异常的持续性较短。大多数陆地上降水滞后一个月的自相关为正(图 3i), 可能是因为降水异常导致土壤湿度异常。土壤湿度(尤其是深层的土壤湿度)异常具有一定的持续性, 其正反馈于降水而导致降水异常的持续性。大部分陆地降水的自相关随着滞后时间的延长很快衰减。但是, 40°N 附近的北美大陆西部、赤道附近南美大陆的东、西沿岸地区和西非尼日尔河下游地区, 降水异常的持续性长达 4 个月(图略)。尼日尔河下游地区和南美大陆西北部降水异常的持续性可能与那里较高的再循环降水率有关^[19]。

3.3 LAI 滞后表面温度、降水异常的交叉相关分析

LAI 滞后温度一个月的相关与二者的同期相关类似, 只是滞后相关稍弱一些。从全年平均来看, $30^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 之间大多为显著正相关; 30°N 以南则基本上为显著负相关, 除了几个零散分布的正相关区域: 南美洲西北部、巴西南部、热带非洲的中西部(图 4a)。这与 Liu 等^[16]的结果相似, 但因为所用资料不尽相同而存在一些差异。北半球中高纬度地区的正相关主要出现在春季, 秋季次之, 美国中东部、欧洲大陆中西部在冬季也较强, 青藏高原东部至长江中游地区的正相关主要出现在冬季。但是北半球中纬度在夏季则是零散分布的负相关。 30°N 以南的负相关的季节变化不太明显, 总体上春季最强, 夏季最弱, 也有个别例外: 美国中部至墨西哥高原在夏季最强, 巴西中东部在秋季(当地春季)最强(图 4b~e)。LAI 滞后温度两个月的相关分布与图 4a 类似, 只是北半球的相关有所减弱: 北美大陆中部的大片正相关区域减弱为两块弱的正相关区(加拿大西部、五大湖区西北方), 贝加尔湖以西的正相关几乎消失, 印度半岛的负相关区退缩至西北部的印度河流域(图略)。LAI 滞后温度三、四个月的交叉相关进一步减弱, 只是南美大陆西北部和热带西非沿岸地区的正相关一直维持, 表明这些地区的温度对后期植被的影响很大。

图 5a 所示为 LAI 滞后降水一个月的交叉相关分布: 除了北美大陆西部、加拿大北部和 50°N 以北的欧亚大陆以及南半球热带地区有一些分散的负相关区, 其它地区均为显著正相关。从图 5e~h 可以看出, 50°N 以北地区的负相关主要出现在秋、冬季。至于其它广大地区的正相关, 北半球中纬度主要是在夏季, 春季稍弱; 印度半岛和中南半岛至中国东部四季都存在正相关, 只是中国东南部的正相关在秋、冬季较弱; 赤道以北热带非洲冬、春季强, 夏、秋季稍弱; 南美大陆东北沿岸地区主要在秋、冬季; 10°S 以南四季都存在正相关, 只是澳大利亚中西部在夏季(当地冬季)是负相关。LAI 滞后降水两个月的相关分布与图 5a 相似, 只是北半球的显著相关范围减小, 相关程度减弱, 尤其是北美、热带非洲、东南亚季风区减弱明显。LAI 滞后降水三、四个月的显著相关区域进一步缩小, 但是墨西哥高原北部、印度西北部、东非高原以及 $10^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}$

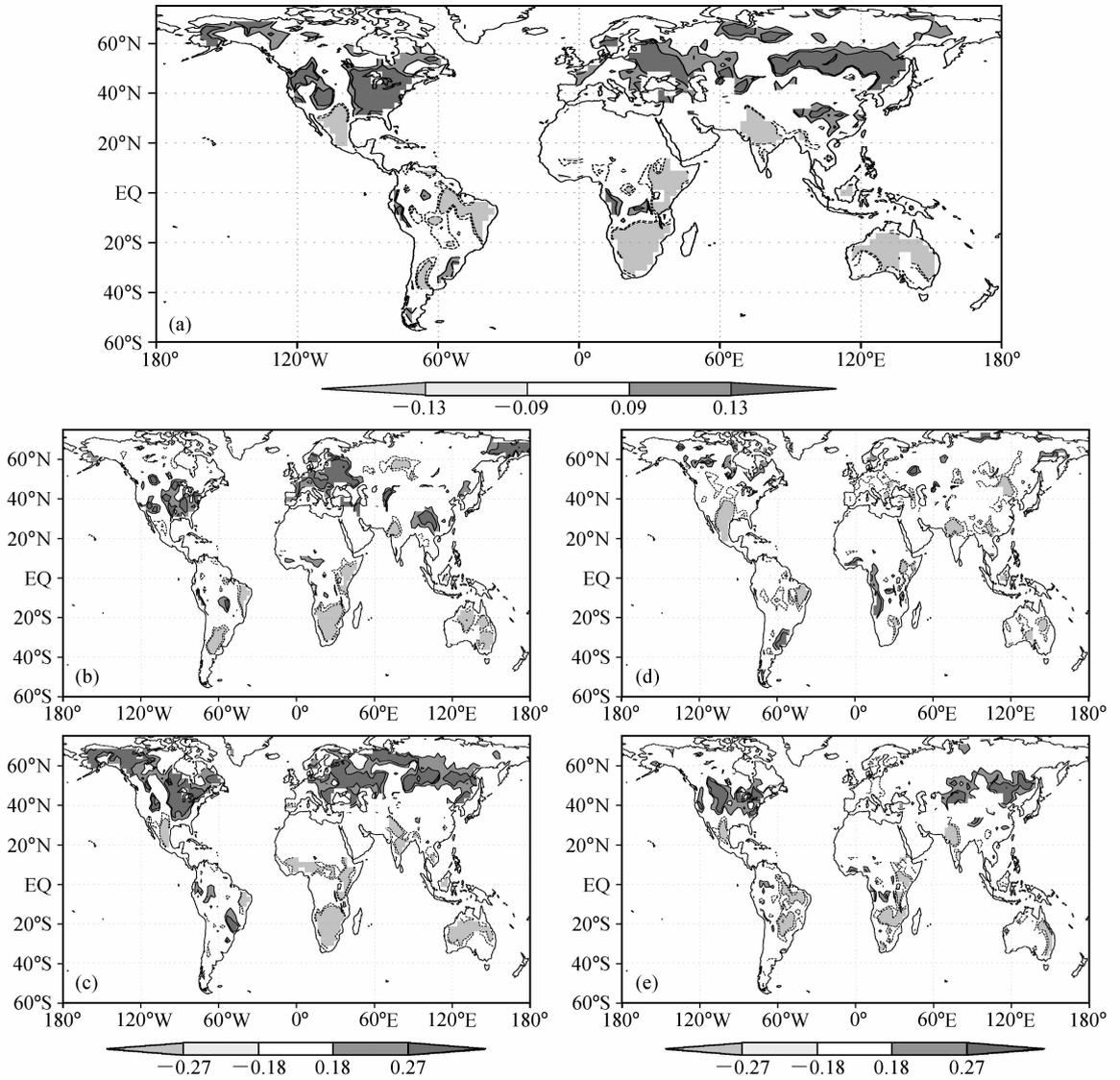


图4 LAI与前一个月气温的相关系数: (a) 全年; (b) 冬季; (c) 春季; (d) 夏季; (e) 秋季

Fig. 4 Correlation coefficient between LAI and one-month earlier 2-m air temperature: (a) The whole year; (b) DJF; (c) MAM; (d) JJA; (e) SON

S之间的地区仍为显著正相关(图略)。可能是因为这些副热带地区光照条件好,但是比较干旱,前期降水偏多有利于植被生长,反之亦然。

在影响植被生长的因素中,温度、降水哪个更重要?本文用相关系数绝对值的大小来近似反映相关的密切程度。若用LAI-降水相关系数的绝对值减去LAI-温度相关系数的绝对值,正值表示LAI与降水的关系更密切,负值则表明LAI与温度相关性更好。从同期相关的对比看,绝大部分地区LAI与温度的相关更密切(图6a)。对照图1a可知,正相关区主要位于 30°N 以北的中高纬度地区,

负相关区位于墨西哥高原、印度半岛西北部地区、南半球热带以外的大部地区。也就是说在这些地区,同期温度是影响植被生长的主要因素。而在阿拉斯加、加拿大北部、美国西南部、南美亚马孙河流域、热带非洲、 60°N 以北的东北亚地区、中国东北和东南部、澳大利亚东南部等局部地区,LAI与同期降水的正相关更密切(参照图2a)。当LAI滞后一个月时,北半球中低纬度和南半球热带外大部地区LAI与降水的正相关更强(图6b)。这些地区降水对后一个月植被生长的影响较大,这与以前针对中国区域的研究结果相似^[1, 2]。相对而言,北美

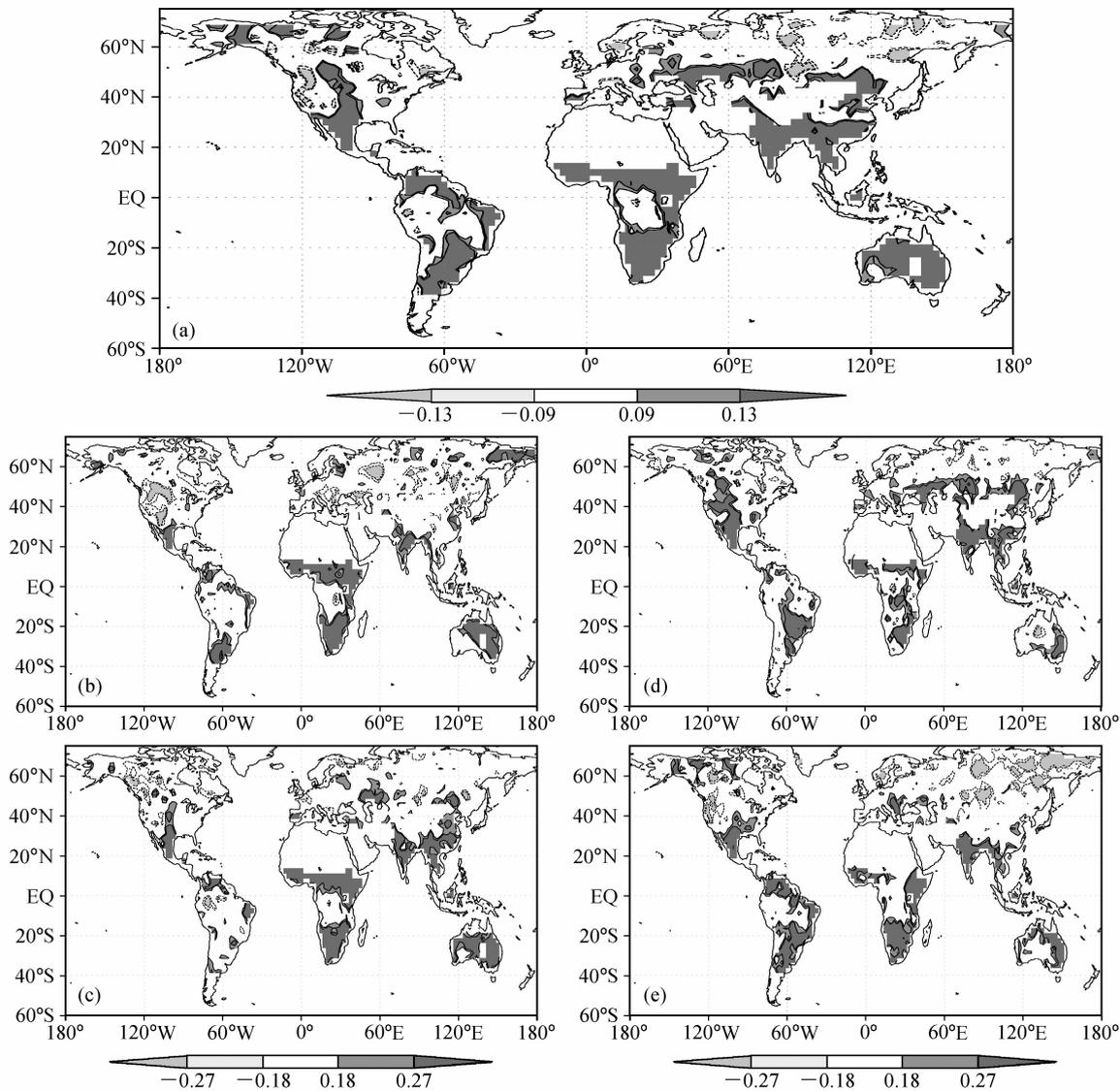


图 5 LAI 与前一个月降水的相关系数。其余同图 4

Fig. 5 The same as Fig. 4, but for the correlation coefficient between LAI and one-month earlier precipitation

大陆东部、东欧平原西部、贝加尔湖附近及其以东地区、中国河套南部至长江之间地区以及南半球热带地区，LAI 与前一个月温度的相关性更好。LAI 滞后两个月时，北半球温度、降水与 LAI 的相关差别不太明显，只是东欧平原温度的影响增大；南美洲南部、热带东非和非洲大陆南部、澳大利亚大部 LAI 与降水的关系更好，说明超前 LAI 两个月时，南半球降水对植被的影响明显大于温度的影响（图 6c）。

3.4 LAI 超前表面温度、降水异常的交叉相关分析

LAI 超前温度一个月的相关如图 7 所示。正相

关区位于 40°N~60°N 之间的中高纬度地区，包括北美大陆中北部（主要在春、夏季）、欧洲西部（主要在冬季）和欧亚大陆东部（主要在秋季）、青藏高原东部至四川盆地（主要在冬、春季）以及巴西高原（主要在秋季）、热带非洲中西部沿岸（主要在夏、秋季）。负相关区位于墨西哥高原（主要在夏季）、印度半岛西北部（主要在秋季）、亚马孙平原中部和东南部（主要在冬季）、热带非洲东岸（主要在秋、冬季）、20°S 以南的南美和非洲大陆南部地区（主要在冬、春季）以及澳大利亚中东部（主要在夏季）（图 7b~e）。LAI 超前温度 2 个月的相关分布与图 7a 类似，只是分布较零乱，尤其是北半球

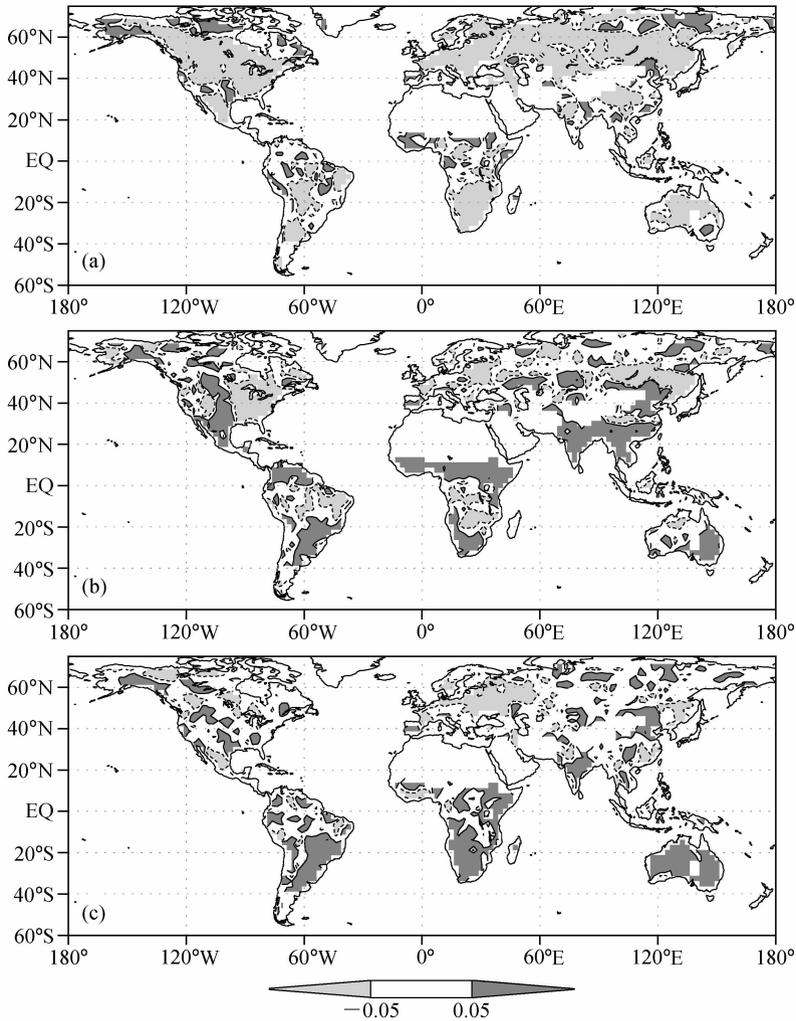


图6 LAI与降水、气温时滞相关系数绝对值之差:(a)同期;(b) LAI滞后1个月;(c) LAI滞后2个月。深、浅阴影分别表示LAI与降水、温度的相关性更强

Fig. 6 Difference between the absolute magnitudes of LAI-precipitation and LAI-temperature correlation coefficients with LAI lagging (a) 0 month, (b) 1 month, and (c) 2 months. Heavy and light shadings indicate LAI is more closely correlated with precipitation and temperature, respectively

中高纬度地区,可见植被异常对后期温度的影响随着时间推移而减弱。值得一提的是,贝加尔湖西南的蒙古高原地区、中国华北地区和非洲西部沿岸的正相关以及南美亚马孙平原东部和非洲大陆南端的负相关在LAI超前温度4个月时都比较显著(图略),表明这些地区植被对后期气温的影响相当大。

LAI超前降水一个月的正相关区零散分布在北美大陆西北部和中部(主要在秋、冬季)、欧亚大陆东北角(主要在春、夏季)、东欧平原南部(主要在春季)、呼伦贝尔高原和青藏高原东南部(主要在春季)、亚马孙平原东部沿岸(主要在冬季)、热带东非沿岸(主要在秋、冬季)和非洲南端(主要

在春季)。负相关区位于西西伯利亚平原的北部(主要在夏季)和南部(主要在春季)以及北西伯利亚平原(主要在夏季)。南美亚马孙平原东部在LAI超前降水4个月时都存在正相关,但是该地区LAI、降水滞后4个月时的自相关也很显著,其间的因果关系尚需要进一步研究。

LAI超前温度、降水的相关系数(图7、8)较之LAI滞后温度、降水的相关系数(图4、5)量值小,分布也比较零散,表明气候条件决定植被状况是第一位的,植被异常对气候的反馈作用是第二位的。

3.5 LAI异常对后期表面温度、降水的反馈

公式(3)表明植被异常对后期气候状况的反

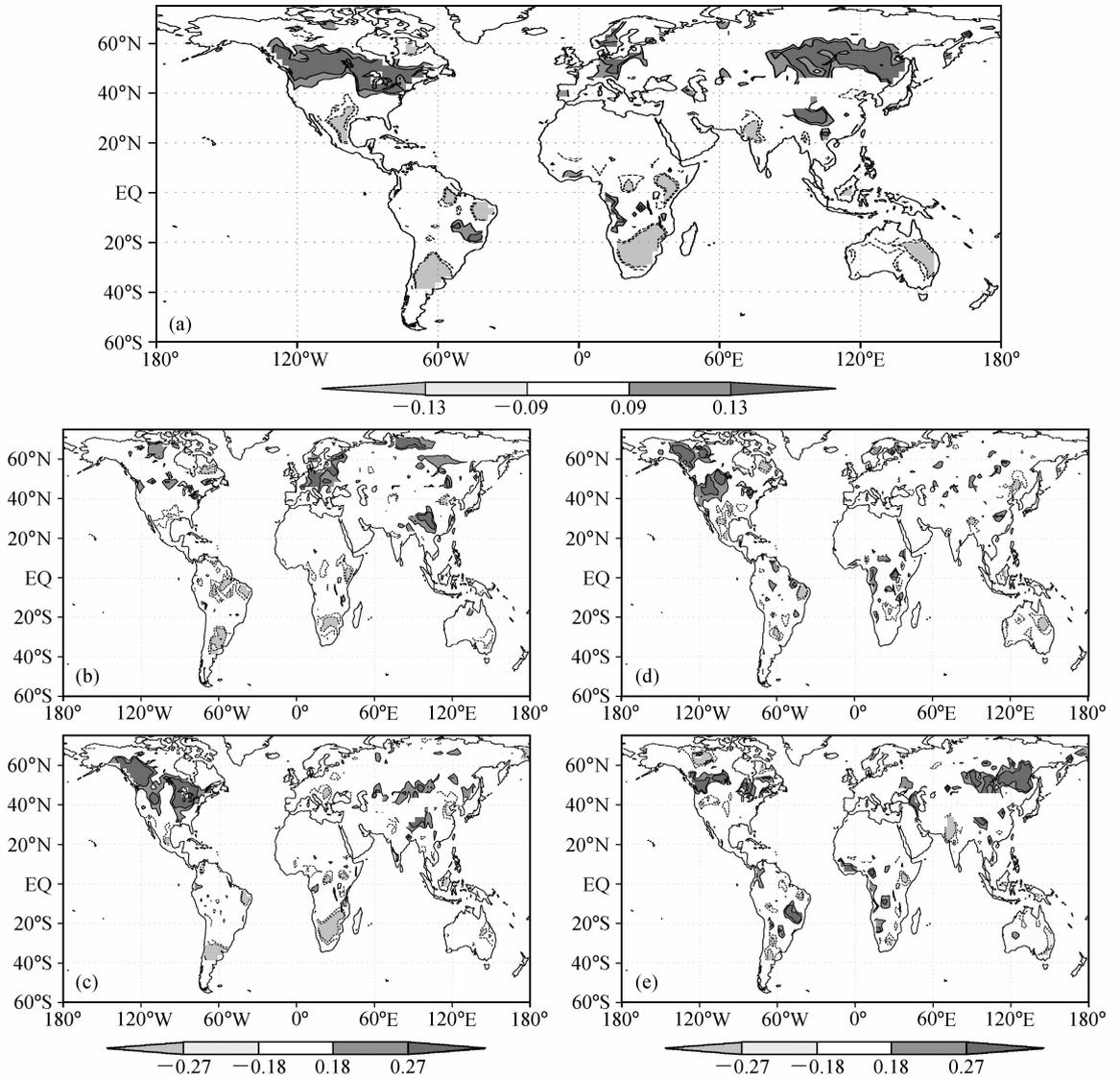


图 7 LAI 与后一个月气温的相关系数。其余同图 4

Fig. 7 The same as Fig. 4, but for the correlation coefficient between LAI and the following-month 2-m air temperature

馈系数与超前时间有关，但是分子、分母同时包含该因子而互相抵消。考虑到异常的持续性，本文取 LAI 超前气温或降水 1 个月、2 个月的反馈系数分别以 1 和 0.5 作为权重系数求其平均值。

LAI 对表面气温的正反馈作用主要表现在北半球大陆的中高纬度地区，尤其是北美大陆中部、欧亚大陆西部和东部以及中国大陆东部；巴西高原、南半球热带非洲中西部为弱的正反馈。加拿大北部、西西伯利亚平原南部、美国中南部至墨西哥高原、印度半岛西北部、赤道以北热带非洲东部、20°S 以南地区为负反馈 (图 9a)。这与 LAI 超前表

面气温的相关系数分布很相似。解释方差达到 20% 以上的地区包括北美大陆北部、45°N 以北的欧亚大陆大部、印度半岛西北部、中国河套南部至江南西部、南美洲大陆的东南部、非洲大陆的中南部，其符号与上述正 (负) 反馈系数的符号一致 (图 9b)。从统计意义上讲，LAI 对表面气温的反馈比较显著的地区是 40°N~60°N 之间的北美大陆局部、欧洲西部、贝加尔湖附近及外兴安岭至黑龙江流域、印度半岛西北部、青藏高原东部至四川盆地、南美洲大陆的亚马孙平原东部、巴拉圭河中下游地区，以及非洲大陆南部和澳大利亚东部 (图 9c)。

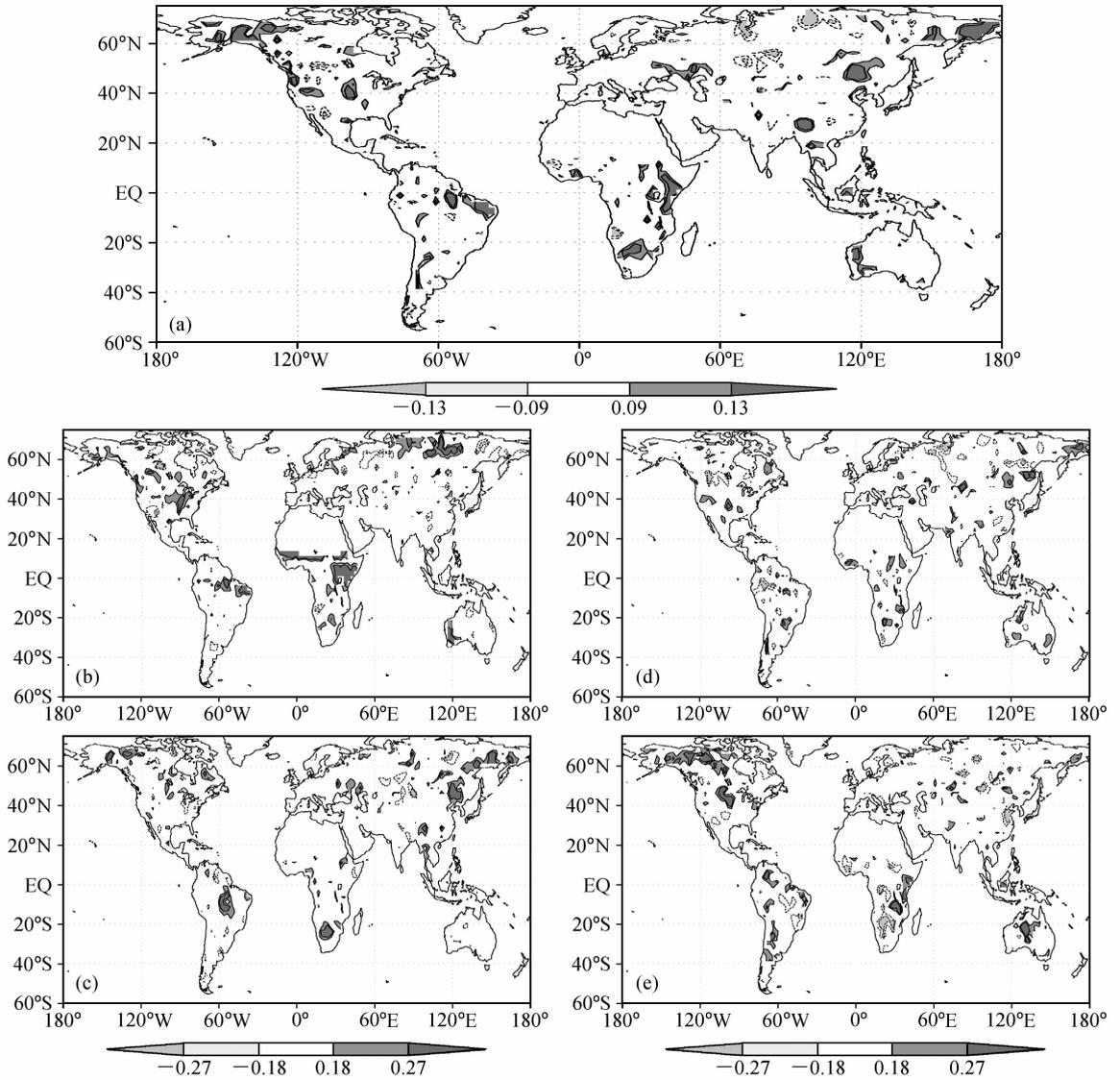


图 8 LAI 与后一个月降水的相关系数。其余同图 4

Fig. 8 The same as Fig. 4, but for the correlation coefficient between LAI and the following-month precipitation

热带地区表面温度的滞后自相关比 LAI 的自相关更强 (图 3), 这些地区 LAI 对气温的反馈系数不大, 表明热带地区植被对后期气温的影响不明显。欧洲地区 LAI 异常的持续性比表面温度更长, 但是 LAI 对气温的反馈系数并不大, 可能因为北大西洋海表温度异常引起的温度平流对欧洲大陆气温的影响干扰了植被对局地气温的影响。

LAI 对降水的反馈显得比较零乱 (图 10a), 40°N 以北的北美大陆大部分、北欧和欧亚大陆东部、青藏高原东南部至中南半岛、南美亚马孙平原东部和巴拉圭河中上游、非洲大陆东部和澳大利亚北部为正反馈。美国西南部和五大湖区、东欧平原

北部、西西伯利亚平原至贝加尔湖、中国的东南部、巴西高原、非洲刚果盆地及其以南的高原地区、澳大利亚南部为负反馈。其中 20°N 以北大部分地区的解释方差可达 20% (图 10b)。但是绝大部分地区 LAI 对降水的反馈并不显著, 比较显著的反馈区域零散分布在北美大陆西北部、东欧平原南部、贝加尔湖以东的外兴安岭地区、南美亚马孙平原东部、西非几内亚湾沿岸和东非索马里沿岸地区 (图 10c)。

对比图 9a 和图 10a 可见 LAI 对温度的反馈强于 LAI 对降水的反馈, 因为降水的成因比较复杂, 在局地再循环降水率比较高的地区, 植被异常通过

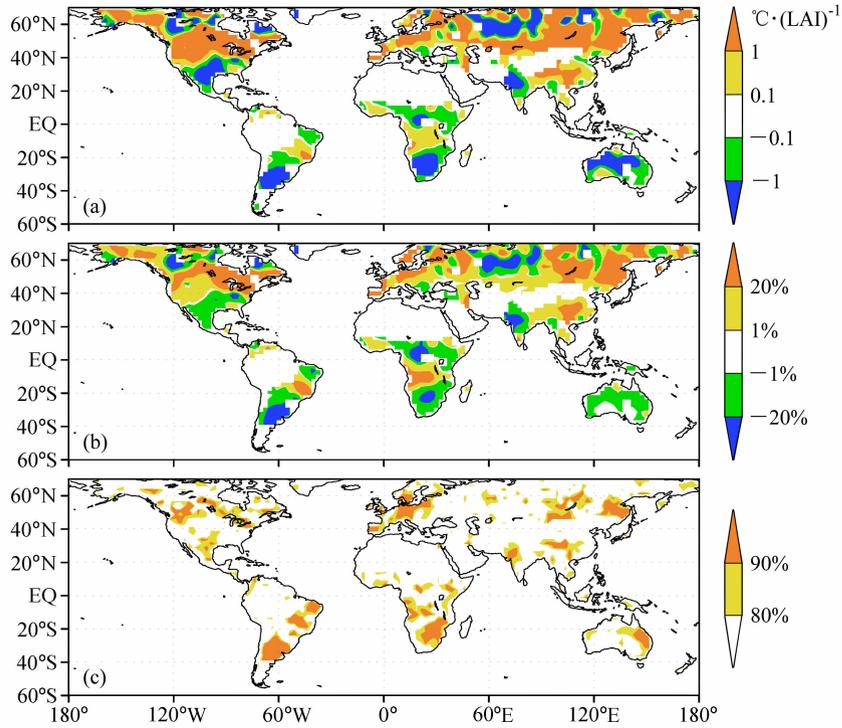


图 9 (a) 月平均 LAI 对后期月平均气温的反馈系数; (b) LAI 对后期气温反馈部分解释方差的百分比, 其符号与反馈系数相同; (c) LAI 对后期气温反馈的显著性。气温自相关系数很小的区域以空白表示

Fig. 9 (a) Feedback efficiency of monthly LAI on monthly temperature estimated using Eq. (3) on each grid box; (b) the explained variance (%) of the feedback induced temperature variability as the ratio of the variance of the feedback part and the total temperature variance; (c) statistical significance of the feedback parameter in (a). Regions with very small temperature auto-correlations are left blank

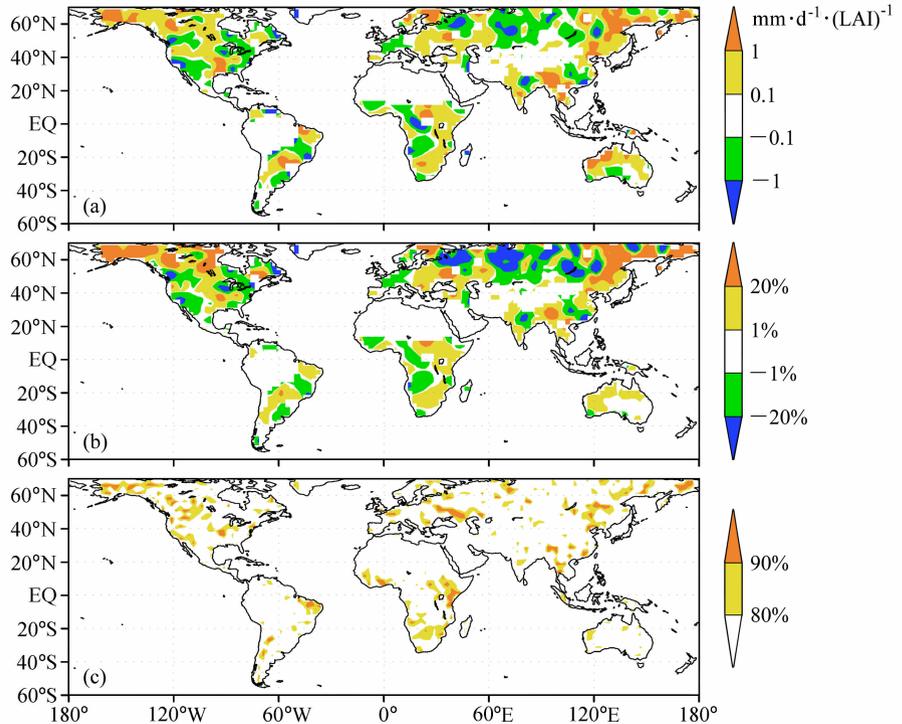


图 10 同图 9, 但表示月平均 LAI 对后期月平均降水的反馈

Fig. 10 As in Fig. 9, but for monthly LAI feedback on monthly precipitation

蒸腾对降水的反馈可能比较显著,或者通过水汽输送对下游地区的降水造成影响^[12]。

4 总结和讨论

本文利用 NOAA AVHRR 得到的 19 年 (1982~2000) 月平均的叶面积指数 (LAI) 与全球月平均的近地面气温、降水进行时滞相关分析,讨论了这种相关性的季节变化,并用线性理论研究了 LAI 的年际变化对后期温度、降水的反馈作用。结果表明,全球大多数地区 LAI 与同期温度的相关比 LAI 与同期降水的相关性好,正相关区位于北半球 30°N 以北的中高纬度地区、中国的江南北部以及南美洲西北部沿岸地区、巴西东南部、非洲的几内亚湾沿岸和刚果盆地;负相关区位于墨西哥高原、印度半岛西北部地区以及南半球除了热带雨林以外的大部地区。对比气温、降水与后一个月 LAI 的相关,在北半球中低纬度和 20°S 以南大部地区 LAI 与降水的正相关比 LAI 与温度的负相关更强;而在北美大陆东部、东欧平原西部、贝加尔湖附近及其以东地区、中国河套南部至长江之间地区以及南半球热带地区, LAI 与前一个月温度的相关性更好。

LAI 对气温具有比较显著正反馈作用的区域为北半球大陆的中高纬度地区;巴西高原、南半球热带非洲中西部为弱的正反馈。西西伯利亚平原南部、美国中南部至墨西哥高原、印度半岛西北部、北半球热带非洲东部、20°S 以南地区为比较显著的负反馈。LAI 对降水的正反馈分布在北美大陆西北部、北欧和欧亚大陆东部、青藏高原东南部至中南半岛、南美亚马孙平原东部和巴拉圭河中上游、非洲大陆东部和澳大利亚北部;美国西南部和五大湖区、东欧平原北部、西西伯利亚平原至贝加尔湖、中国的东南部、巴西高原、非洲刚果盆地及其以南的高原地区、澳大利亚南部为负反馈,绝大多数负反馈统计上不显著。热带外地区 LAI 对气温、降水(主要在北半球)反馈部分的解释方差可达气温、降水总方差的 20% 以上。

上述植被对气候反馈比较显著的地区即植被-大气相互作用的敏感区,本文只是给出了初步的统计结果。植被-大气相互作用的机制尚需更深入的分析工作。观测资料的诊断结果表明,植被对气候比较显著的反馈只是局限在个别地区,但是有些气

候模式模拟的植被的反馈作用非常显著^[16],可见现有气候模式中夸大了植被的作用。利用动态植被模型与大气环流模式的双向耦合来探讨植被异常对后期气候状况的反馈机制是值得进一步开展的工作。

气候条件与植被生长状况 (LAI) 的显著相关表明二者之间的密切联系,气候条件超前植被长势的相关显著大于植被长势超前温度、降水的相关,这意味着在植被-大气相互作用中,气候条件决定植被长势是第一位的,植被异常对后期气候状况的反馈作用是第二位的。本工作指出植被对后期温度的反馈作用大于对后期降水的影响,这与文献^[11]结论不同。可能因为所讨论的时空尺度不同,这里用的是月平均网格点资料,而文献^[11]分析的是季度平均和对中国气候分区的平均状况。

本工作着重讨论的是局地相互作用,没有考虑遥响应。在分析植被对气候的反馈作用时用到线性假设,而气候系统具有高度非线性特征。另外,单一因子分析也与包含复杂相互作用的实况有出入,这里的分析只是一种初步近似。值得指出的是,虽然卫星观测提供了全球范围的资料,便于从全局着手进行分析,但是基于卫星遥感反演的资料本身具有较大不确定性^[20]。利用卫星资料进行气候研究需慎重,必须结合场地观测资料加以检验。

致谢 中国科学院大气物理研究所吴国雄院士对本工作提出了许多中肯的建议,北京大学物理学院黄嘉佑教授提供了时间序列线性趋势的计算程序,ERA40 再分析资料由国家气候中心张芳提供,谨此一并致谢。

参考文献 (References)

- [1] 曾庆存,曾晓东,王爱慧. 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 Qingcun, Zeng Xiaodong, Wang Aihui. Some studies of the hydrological interactions in the atmosphere-ecosystem soil system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (1): 7~19
- [2] 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 Gang, Fu Congbin. 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
- [3] 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 Congbin, Wen Gang, Xie Li, et al. Diagnostic and modeling study on climate and ecosystem interaction in East Asian monsoon region. *J. Nanjing University* (Natural Sciences) (in Chinese), 2002, **38** (3): 281~294
- [4] 赵茂盛, 符淙斌, 延晓冬, 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 Maosheng, Fu Congbin, Yan Xiaodong, 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
- [5] 龚道溢, 史培军, 何学兆. 北半球春季植被 NDVI 对温度变化响应的区域差异. *地理学报*, 2002, **57** (5): 505~514
- Gong Daoyi, Shi Peijun, He Xuezhao. Spatial features of the coupling between spring NDVI and temperature over Northern Hemisphere. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2002, **57** (5): 505~514
- [6] Zhang P, Anderson B, Barlow M, et al. Climate-related vegetation characteristics derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) leaf area index and normalized difference vegetation index. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, D20105, doi:10.1029/2004JD004720
- [7] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展. *生态学杂志*, 2005, **24** (5): 537~541
- Wang Xiqun, Ma Luyi, Jia Zhongkui, et al. Study on leaf area index and progress in its application. *Chinese J. Ecology* (in Chinese), 2005, **24** (5): 537~541
- [8] Chase T N, Pielke R A, Timothy G, et al. Sensitivity of a general circulation model to global changes in Leaf Area Index. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 7393~7408
- [9] Buermann W, Dong J, Zeng X, et al. Evaluation of the utility of satellite-based vegetation leaf area index data for climate simulations. *J. Climate*, 2001, **14**: 3536~3550
- [10] 张佳华, 符淙斌, 延晓冬, 等. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究. *地球物理学报*, 2002, **45** (5): 631~637
- Zhang Jiahua, Fu Congbin, Yan Xiaodong, et al. Analysis of how global LAI responds to variations in surface air temperature and precipitation. *Chinese J. Geophysics* (in Chinese), 2002, **45** (5): 631~637
- [11] 张井勇, 董文杰, 叶笃正. 中国植被覆盖对夏季气候影响的新证据. *科学通报*, 2003, **48** (1): 91~95
- Zhang Jingyong, Dong Wenjie, Ye Duzheng. New evidence for effects of land cover in China on summer climate. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**: 401~405
- [12] Zhang Jingyong, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. The influence of vegetation cover on summer precipitation in China: A statistical analysis of NDVI and climate data. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20**: 1002~1006
- [13] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 - 1991. *Nature*, 1997, **386**: 698~702
- [14] Myneni R B, Tucker C J, Asar G, et al. Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103** (D6): 6145~6160
- [15] Zhou L M, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variation in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D17): 20069~20083
- [16] Liu Z, Notaro M, Kutzbach J, et al. Assessing global vegetation-climate feedbacks from observations. *J. Climate*, 2006, **19**: 787~814
- [17] Bounoua L, Collatz G J, Los S O, et al. Sensitivity of climate to changes in NDVI. *J. Climate*, 2000, **13**: 2277~2292
- [18] Los S O, Collatz G J, Bounoua L, et al. Global interannual variations in sea surface temperature and land surface vegetation, air temperature, and precipitation. *J. Climate*, 2001, **14** (7): 1535~1549
- [19] Trenberth K E. Atmospheric moisture recycling: Role of advection and local evaporation. *J. Climate*, 1999, **12**: 1368~1381
- [20] Kang H-S, Xue Y, Collatz G J. Impact assessment of satellite-derived Leaf Area Index datasets using a general circulation model. *J. Climate*, 2007, **20** (6): 993~1015