

1982—1999年珠江流域归一化植被指数与降水年际变化分析*

王银霞^{1,2,3,4}, 施平^{1,2}, 曾丽丽², 谢强², 王东晓²

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 国家海洋局南海海洋工程勘察与环境研究院, 广东 广州 510310

摘要: 利用 1982—1999 年月平均归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和降水资料, 采用经验正交函数(EOF)方法分别研究了珠江流域的 NDVI 和降水在年和年际尺度上的异常关系, 并分析了 NDVI 与降水及其他一些气象因子的相关关系。研究发现流域 NDVI 和降水在年内异常上具有较好的空间一致性, 在时间上具有 1—2 个月的滞后; 年际尺度上两者异常空间差异明显, 流域东部(下游)异常为负相关, 西部(上游)异常为正相关。NDVI 和各气候因子的相关关系存在明显的空间和季节差异: 流域东部 NDVI 和降水负相关明显, 和温度及太阳短波辐射正相关明显; 流域西部 NDVI 和降水滞后正相关明显, 和温度相关不明显; NDVI 在夏季和降水呈显著负相关, 在春、秋季季节滞后于降水, 呈明显正相关, 且滞后 3 个月正相关最为明显。

关键词: 珠江流域; NDVI; 降水; 年际变化

中图分类号: P732 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)04-0044-07

Interannual variation of vegetation and precipitation in Pearl River Basin during 1982–1999

WANG Yin-xia^{1,2,3,4}, SHI Ping^{1,2}, ZENG Li-li², XIE Qiang², WANG Dong-xiao²

1. *Yantai Institute of Coastal Zone Research, CAS, Yantai 264003, China;* 2. *State Key Laboratory of Tropical Oceanography (South China Sea Institute of Oceanology, CAS), Guangzhou 510301, China;* 3. *Graduate University of CAS, Beijing 100049, China;* 4. *South China Sea Marine Engineering and Environment Institute of State Oceanic Administration, Guangzhou, Guangzhou, 510300, China*

Abstract: Based on the monthly normalized difference vegetation index (NDVI) and precipitation data in the Pearl River Basin from 1982 to 1999, the relationship between NDVI and precipitation anomaly on the annual and interannual time scales are analyzed using empirical orthogonal function (EOF) method. Correlation coefficients between NDVI, precipitation, and other climatic factors are also analyzed. There is a good spatial coincidence between the variation of NDVI and that of precipitation anomaly in terms of annual variability, with NDVI lags one month. The interannual anomalies of NDVI and precipitation have obvious difference in their spatial distributions. Positive correlation is found in the west of the Pearl River Basin, while negative correlation is found in the east. The relationships between NDVI and climate factors are different in different seasons and different domains. The correlation coefficient between NDVI and precipitation is negative in the east and positive in the west. The relationship between NDVI and temperature is positive in the east and not significant in the west; same for the relationship between NDVI and solar radiation. In summer, the NDVI and precipitation have negative relationship, which reverses in spring and fall.

Key words: Pearl River Basin; normalized difference vegetation index (NDVI); precipitation; interannual variability

气候变化被认为是引发地表植被覆盖变化的主要原因之一^[1]。归一化植被指数(normalized differ-

收稿日期: 2010-04-10; 修订日期: 2010-05-17。孙淑杰编辑

基金项目: 中国科学院近海海洋观测研究网络 - 西沙海洋观测研究站建设项目(KZCX2-YW-Y202); 国家自然科学基金委-广东联合基金重点项目(U0733002); 国家杰出青年基金项目(40625017); 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403504); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-QN203)

作者简介: 王银霞(1981—), 女, 山东省菏泽市人, 硕士, 主要从事海岸带环境和气候研究。E-mail: yinxia19841227@yahoo.cn

通信作者: 施平。E-mail: pshi@yic.ac.cn

*感谢程旭华博士、邢前国博士在论文修改过程中给予的宝贵意见和帮助。

ence vegetation index, NDVI)被定义为近红外波段与可见光红光波段反射率之差和这 2 个波段反射率之和的比值,是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子,它特别适用于植被动态监测^[2]。

影响植被指数的气候变量主要有降水、气温和日照^[2]。国内外对 NDVI 与气候因子的相互关系展开了较多研究,但研究区域及研究结果存在一定的差异。如 Schultz 等^[3]认为其相关性不显著;WANG 等^[4]发现美国中部大草原地区在植被生长期 NDVI 和气候因子存在较好的相关性;陈云浩等^[5]和 LI 等^[6]研究认为 NDVI 和气候因子的相关性存在明显的地域性,不同地区差别较大。国内的研究大都针对全国整体区域或北方地区,且各地区差异也较大。

珠江流域位于 102°14′—115°53′E、21°31′—26°49′N 之间,地势总体为西北高、东南低。上游地区主要为亚热带、热带常绿针叶林植被,珠江干流沿岸和三角洲平原等地主要为栽培植被,山地区域主要为稀树灌木草原,流域植被生产力在中国植被生产力中占有重要地位^[7]。从图 1 中可以看到,流域 NDVI 的年际方差较全国来说为大值区,即流域 NDVI 年际变化较大,且存在较好的空间差异性。流域属于热带、亚热带季风气候,温和多雨,多年平均气温在 14—22℃ 之间,多年平均降雨量为 1200—2200mm,降雨量空间分布明显呈由东向西逐步减少的态势,降雨季节分配不均,地区差异和年际变化较大。开展珠江流域 NDVI 与气候因子尤其是降水的关系的研究,能够为深入了解华南地区植被生长状况、森林植被保护决策和农作物种植方式调整提供科学依据,也方便下一步对南北不同气

候区的植被和气候因子的相关性作详细对比研究。

本文利用 1982—1999 年 NDVI、降水和温度等月平均资料,从年内和年际尺度分析了珠江流域 NDVI 和降水及其他气候因子的年际相关,并分区域分季节对 NDVI 和降水的滞后相关进行了分析。

1 数据和方法

1.1 数据来源

本文采用的 NDVI 数据是由 Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) 提供的 1982—1999 年共 216 个月的月平均数据。该数据集由搭载在 NOAA 系列卫星(NOAA 7、9、11 和 14)上的高分辨率辐射计(advanced very high resolution radiometer, AVHRR)数据计算得到^[8],采用经验模态分解方法(empirical mode decomposition, EMD),消除了由于大气校正、视角几何以及其他一些会引起植被不真实变化的因素^[9]。该数据集记录完整,没有出现断层现象,适合研究中长期的植被变化,被国内外许多学者用来研究植被及生态环境,结果可靠^[10-11]。该数据集提供了 3 种空间分辨率数据下载,本文采用数据的空间分辨率为 0.25°×0.25°。

本文采用的降水和温度资料是美国特拉华大学 1982—1999 年共 216 个月的月平均降水格点资料(http://apdrc.soest.hawaii.edu:80/dods/public_data/Interpolated_precipitation/UDel_prec_airT)^[12],分辨率为 0.5°×0.5°。

采用的短波辐射数据是 1982—1999 年共 216 个月的月平均数据(http://apdrc.Soest.hawaii.edu/dapper/aggregations/www.cdc.noaa.gov/Datasets/ncep.reanalysis2.derived/gaussian_grid.nc),空间分辨率为 2.5°×2.5°。

1.2 数据处理与方法

经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)分析是大气科学领域常用的时空分析方法,它既能保留原始数据提供的绝大部分信息,又能起到降维的作用。由于它实现了时空分离,物理意义明确,可将要素场的主要特征浓缩在前几个特征向量和时间系数上,在提取物理量场时空变化的信息方面具有更细致、明显的优点,几十年来一直成为气象学家进行资料分析的重要方法和手段^[13]。

本文从全球资料中提取出珠江流域的 NDVI 及各气象因子的数据,通过线性内插法将降水、温度和短波辐射数据插值为与 NDVI 同样的分辨率(0.25°×0.25°)。将 NDVI、降水数据处理成年平均及

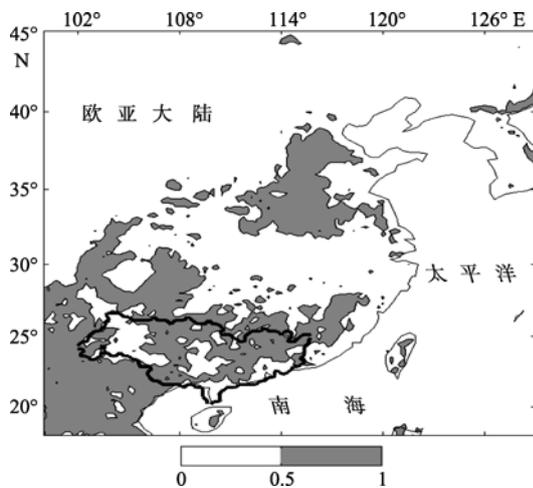


图 1 我国大部分区域及珠江流域(图上粗黑线条勾出的区域)NDVI 各月的年际方差之和

Fig. 1 Root mean square of NDVI in most areas of China and the Pearl River Basin (denoted by bold line)

年际方差资料,分析珠江流域 NDVI 和降水的空间分布及年际变化情况;对年内 NDVI 和降水资料进行 EOF 分析,获得两变量的年内异常及其相关;对年际 NDVI 和降水资料进行联合 EOF 分析,获得两变量的年际异常及其相关。通过求各月 NDVI 与气候因子的相关系数和滞后相关系数的纬向平均来分析它们在不同季节不同经度的年际相关。

2 珠江流域 NDVI 和降水的年内及年际异常分析

2.1 珠江流域 NDVI 和降水的多年平均值及方差分析

图 2 为流域 NDVI 和降水的多年平均值及年际方差。从图 2a 中可以看出,流域 NDVI 基本上在 0.36—0.6 之间,空间分布格局和王兆礼等^[7]的结果一致,在北盘江上游山区较低,在右江上游山区和珠江三角洲热带常绿阔叶林地区较高。降水分布与 NDVI 有较好的对应关系,呈现东部沿海较西部内陆多、南部较北部多的趋势。

相对于气候态月平均值差异,年际方差表示多年变化的振荡幅度。由图 2b 和图 2c 可以看到,NDVI 的方差在空间上呈经向条带状分布,东西差异大;在时间上具有季节差异性,大部分地区均遵循 2、3、4 月(春季)及 6、7、8 月(夏季)年际方差较大,其他月份方差较小的规律。110°E 以东地区降水和 NDVI 的年际方差变化均呈多峰分布且对应较好,均主要分布在春季和夏季,正好对应珠江流域的前汛期降水和夏季降水以及珠江流域水稻种植的 2 个季节;110°E 以西降水呈单峰而 NDVI 呈多峰,两者分布不一致。

2.2 NDVI 和降水年内异常

对 1982—1999 年气候态平均的降水和 NDVI 数据采取标准化处理后,进行 EOF 分析。从表 1 可知,NDVI 和降水第 1 模态的方差贡献率分别达到 90%和 87.2%,因此两者 EOF 的第 1 模态均提取了其年内变化的主要信息。

图 3 是 NDVI 和降水 EOF 分析第 1 模态的空间分布以及时间系数。NDVI 和降水在空间上均为正值,由中部向西北和东北减小,说明流域 NDVI 和降水的年内异常具有空间一致性,中部地区较西北和东北地区的年内异常更为明显。

从图 3b 中可以看到,降水异常以广东省沿岸为大值中心,向东北、西北递减。这是由于珠江流域地区的降水主要集中在前汛期和夏季,而前汛期和

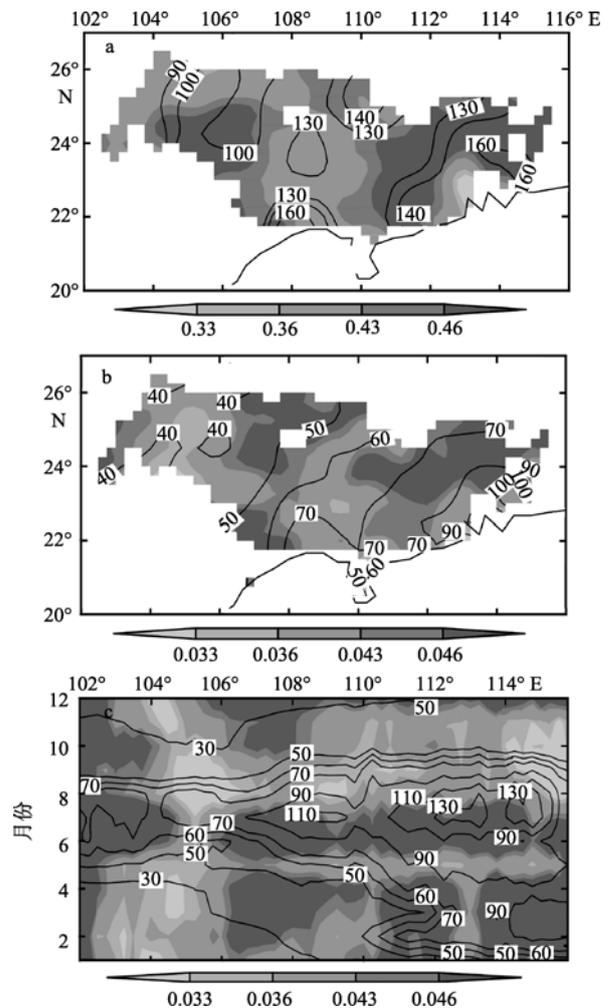


图 2 流域 NDVI(阴影)和降水(等值线,单位: mm)的多年平均值及年际方差

a. 多年平均值; b. 年际方差; c. 纬向平均的时间-经度分布

Fig. 2 Means and RMSs of NDVI and precipitation in the Pearl River Basin, with (a) for long-term mean, (b) for inter-annual standard deviation, (c) for time-longitude distribution of latitudinally-averaged value. Shading areas denote NDVI, and contours denote precipitation

表 1 NDVI 和降水年内 EOF 分析的前 2 个模态的累计方差贡献(%)

Tab. 1 Percentage of variance explained by the first two eigenvectors using EOF expansion of annually-averaged NDVI and precipitation

特征向量	降水	NDVI
第 1 模态	87.2	91.7
前 2 模态	97.2	96.7

夏季的降水量分布基本上也是以广东省为大值中心向四周递减。由图 3a 可知,NDVI 异常分布在西北地区偏低,与降水异常分布相似,而珠江口城市发达地区由于植被覆盖率较小而呈现为低值区,与植被分布情况基本一致。这说明此模态是具有实际物理意义的。

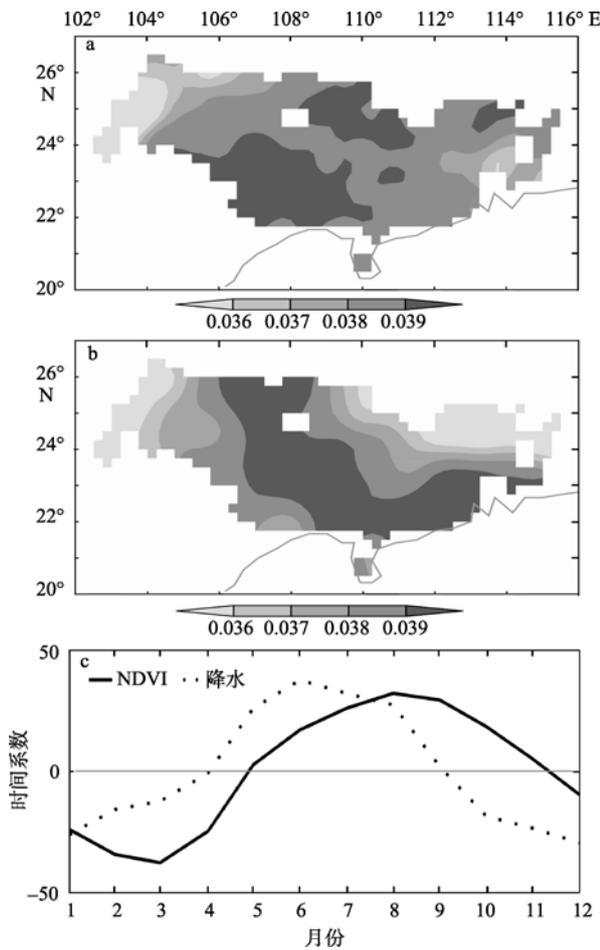


图3 NDVI和降水年内 EOF 第1 模态空间型和时间系数序列

a. NDVI 空间模态分布; b. 降水空间模态分布; c. 时间系数
 Fig. 3 The first EOF eigenvector pattern of NDVI and precipitation, and the time coefficient series in annual scale, with (a) for the first EOF eigenvector pattern of NDVI, (b) for the first EOF eigenvector pattern of precipitation, and (c) for time coefficient series in annual scale

从相应的时间系数(图 3c)可以看到, 流域降水和 NDVI 年内演变均接近正弦分布, 但相位分布不同。降水在 4 月由负异常变为正异常并逐渐增大, 华南地区进入前汛期, 降水开始增多, 此时水分条件满足, 植被开始生长。5 月植被由负异常变为正异常, 此时正是华南地区前汛期降水结束进入夏季降水阶段, 降水仍保持在正异常。到 8 月降水开始迅速减少, 9 月由正异常变为负异常, 相应的植被覆盖在 8、9 月达到最大, 即植被在夏季达到繁盛期。随后进入秋季, 由于水分的逐渐减少植被开始进入减少阶段, 11 月以后降水由正异常转入负异常。可以看出, 珠江流域的植被对降水具有很好的滞后响应, 且在不同季节和植被的不同生长阶段, 滞后的时间略有区别, 具体的滞后响应将在后面做详细分析。

2.3 NDVI 和降水年际异常的联合 EOF 分析

对 1982—1999 年 NDVI 和降水年平均资料采取标注化处理, 进行联合 EOF 分析, 将标准化的 NDVI 场 $X(m,t)$ 与降水场 $Z(m,t)$ 合并为一个矩阵, 记为 $W(n,t)$ 。其中 m 为研究区的象元数, t 为时间。即:

$$W(n,t)=X(n,t), \text{ 当 } n=1,2,\dots,m$$

$$W(n,t)=Z(n-m,t), \text{ 当 } n=m+1, m+2, \dots, 2m$$

对 $W(n,t)$ 做 EOF 分析, 并按特征值大小排序, 最后得到空间场 $E(n,t)$ 和时间场 $P(n,t)$, 将 $E(n,t)$ 分为以下两部分:

$$E_n(n,t)=E(n,t), n=1,2, \dots, m$$

$$E_p(n,t)=E(n,t), n=m+1, m+2, \dots, 2m$$

$E_n(n,t)$ 和 $E_p(n,t)$ 分别代表 NDVI 和降水的空间分布场, P 代表两者的时间系数。

表 2 为各模态方差贡献及累计方差贡献, 第 1 模态的解释方差高达 59.4%, 因此能够表达珠江流域 NDVI 异常与降水异常的主要信息。

表 2 NDVI 和降水年际联合 EOF 分析前 4 个模态的方差贡献及累积方差贡献(%)

Tab. 2 Percentage of variance explained by the first four eigenvectors using EEOF expansion of inter-annual NDVI and precipitation

特征向量	第 1 模态	第 2 模态	第 3 模态	第 4 模态
方差贡献	59.4	19.3	9.8	4.6
累积方差贡献	59.4	78.7	89.1	93.7

特征向量为 2 个要素场在同一个时间坐标系下的投影, 而时间坐标系的选取则要最大限度地同时表达 2 个要素场的时间变化规律, 因此 2 个要素场的特征向量的分布差异很大程度上能够表达两者变化趋势的异同。

从图 4a 可知, 降水场均为正值, 表明流域的降水年际异常具有空间一致性。但是东西差异较大, 东部为明显的大值区, 随着向西北内陆延伸值越来越小, 说明降水的年际异常在东部更为明显, 向西北内陆递减, 与前面降水的年际方差分布相符。在时间系数(图 4b)上反映得也比较好: 年际降水场在 1986、1989、1991、1995 年为负异常, 1983、1994、1997 年为正异常, 这与珠江流域 1986、1989、1991、1995 年降水偏少, 1983、1994、1997 年降水偏多十分吻合。NDVI 场呈明显的东西反位相分布, 大致以 108°E 为界, 108°E 以西为正, 108°E 以东为负。

这种配置反映了珠江流域年际 NDVI 场和降水场之间的一种耦合关系: 108°E 以东地区年际 NDVI 异常和降水异常反向相关, 108°E 以西地区年际 NDVI 异常与降水异常呈正相关。正负相关分界线

分布与年降水总量多年平均值分布图的 1500mm 等值线分布(图 4c)相似, 108°E 大致也是年降水总量 1500mm 的分界线, 108°E 以东年降水总量大都在 1500mm 以上, 108°E 以西则大都在 1500mm 以下。这也说明流域 NDVI 和降水的年际异常相关与年降水总量有关。年降水量大于 1500mm 的地区, NDVI 和降水的年际异常呈负相关, 反之则相反。

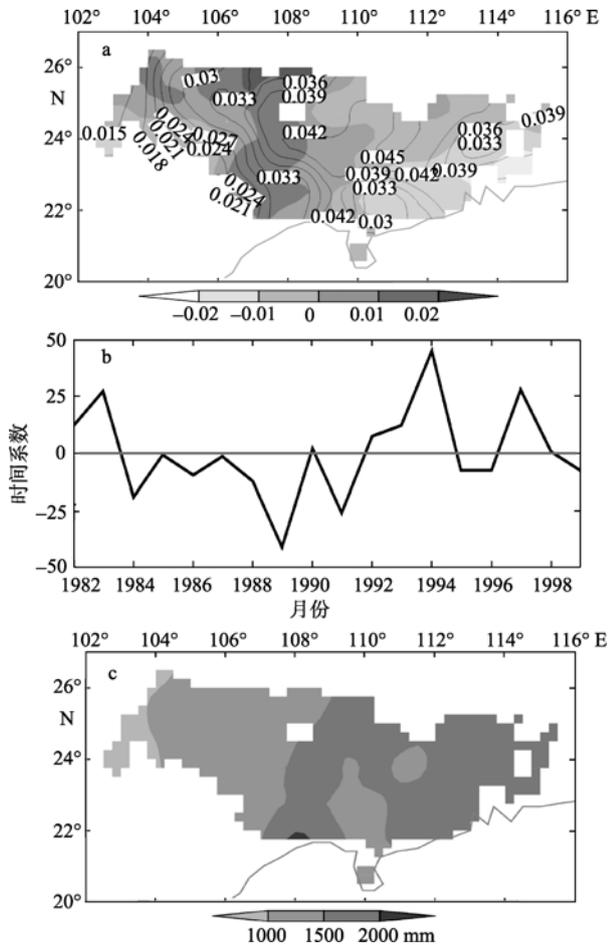


图 4 NDVI 和降水年际联合 EOF 第一模态的空间型(a; 阴影表示 NDVI, 等值线表示降水)和时间系数(b)及年降水量(c; 单位: mm)

Fig. 4 The first inter-annual EOF eigenvector pattern of NDVI and precipitation (a), the time coefficient series (b), and annual precipitation (units: mm)(c)

3 相关性分析

3.1 珠江流域 NDVI 和降水的长序列分析

对 1982—1999 年 NDVI 和降水月平均数据做标准化处理, 空间平均并滤掉季节信号, 得到 NDVI 和降水的时间序列曲线图(图 5), 且相关系数为 -0.2017 。分时段计算其相关系数: 1982—1990 和 1997—1999 年两者负相关较显著, 相关系数达 -0.35 ; 1992—1994 年正相关比较明显, 相关系数达

0.45。两者整体相关性不好的原因主要是 NDVI 和降水在不同季节以及不同地区的相关性差异所导致的, 这也正说明分区域以及分季节讨论两者相关性的必要性。

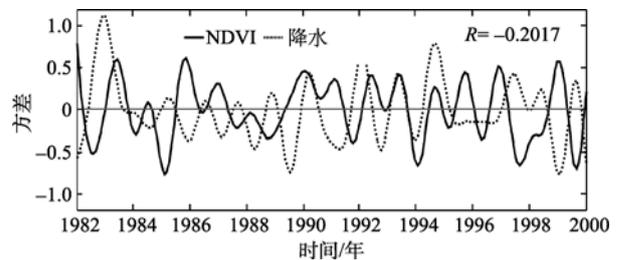


图 5 珠江流域 NDVI 和降水的长时间序列相关示意图(已去掉季节信号)

Fig. 5 Time series for correlation coefficient between NDVI and precipitation in the Pearl River Basin (seasonal signals have been removed)

3.2 分区域分季节的年际相关

由于 NDVI 和降水分布及变化的空间差异和季节差异, 且考虑到流域东西长而南北短, 以及由上面分析可知 NDVI 和降水的平均值及方差分布在径向上具有很好的一致性而在纬向上存在很大的差异性, 因此通过对经向平均的 NDVI 和降水作不同月份的年际相关和滞后相关来更好地分析两者的关系。

从图 6 可以看到, NDVI 和降水的年际相关在不同季节、不同经度存在着很大的差别, 且 NDVI 和降水的滞后相关大于同期相关, 具体分析如下。

从图 6a 可以看出, NDVI 和降水具有很强的同期负相关, 主要集中在夏季和秋季, 且东部地区更为明显, 尤其是 110°E 以东地区。

从图 6b—f 可以看出, NDVI 和降水具有很好的滞后相关, 滞后 3 个月(即 1 个季度)相关最好。

NDVI 和降水的滞后相关在时空上也有很大差别。时间上, 滞后正相关较好的时间段主要集中在春季和秋季, 负相关较好的时间段主要集中在夏季和冬季。3、7 月份的 NDVI 在滞后于降水 2 个月时相关达到最大, 4、5、8、9、10 月份的 NDVI 和降水在滞后 3 个月时相关达到最大。空间上, 大致以 110°E 为界, 110°E 西部的 NDVI 和降水的滞后正相关显著性较好, 且有规律地集中在春、秋季节, 110°E 以东地区的 NDVI 和降水滞后相关不如西部显著, 且与西部相比没有明显的季节规律, 跳跃性较大。

在 2.3 节中已经指出, 东西部年平均降水量的巨大差别是造成 NDVI 和降水相关性东西差异的一个原因。东部年降水在 1500mm 以上, 充足的降水使降水不再成为植物生长的限制因素, 过多的降水

甚至会成为抑制植物生长的因素; 相反, 西部降水在 1500mm 以下, 较少的降水使植被对降水的响应

较为明显。另外可能还会有其他一些因素, 我们将在下面作出简要分析。

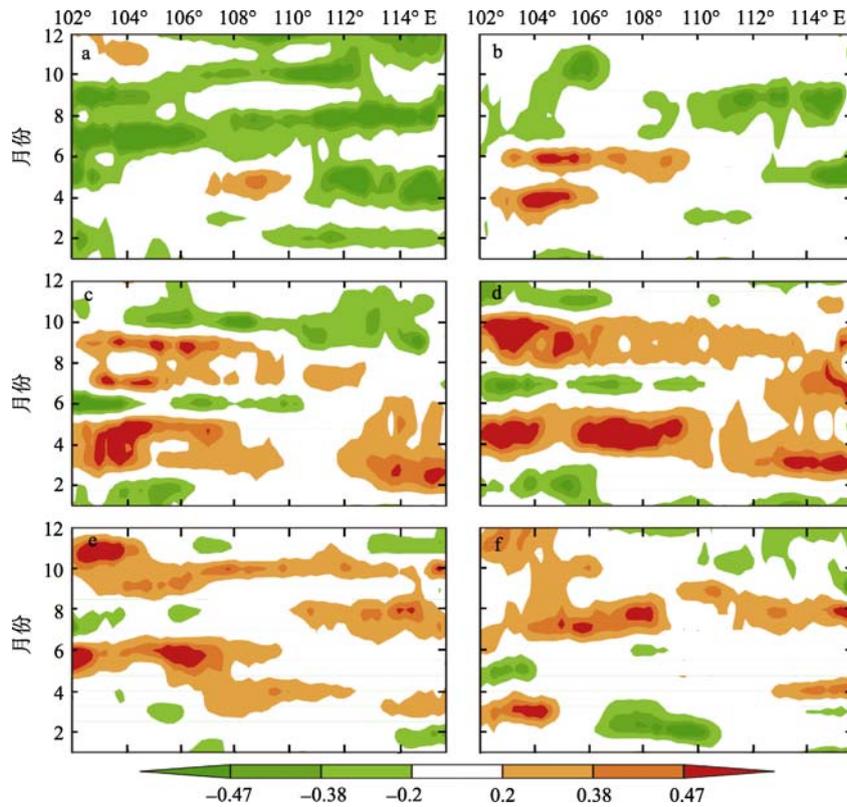


图 6 各月 NDVI 与降水的同期及滞后相关系数的年际纬向平均分布图

a. 年际相关; b. 滞后 1 个月; c. 滞后 2 个月; d. 滞后 3 个月; e. 滞后 4 个月; f. 滞后 5 个月。|R|≥0.38 时, P≤0.1; |R|≥0.47 时, P≤0.05

Fig. 6 Zonal mean of each month's inter-annual correlation and lagged correlation between NDVI and precipitation, with (a) for inter-annual correlation, (b) for one month lag, (c) for two month lag, (d) for three month lag, (e) for four month lag, and (f) for five month lag

3.3 NDVI 和其他一些气象因素的关系

前面我们已经提到, 影响植被的气候因子主要有 3 个: 降水、温度和太阳辐射, 所以造成流域植被对降水响应东西差异的原因还可能与东西部温度和太阳辐射不同有关。通过分析发现, 该区地表的温度和短波辐射(图略)多年平均值存在明显的东高西低和西高东低。

对流域 NDVI 和温度及短波辐射的相关及滞后相关均进行了分析, 发现 NDVI 和温度及短波辐射滞后相关(图略)并不明显, 但同期相关很显著。

从图 7a 可以看到, 西部 NDVI 和温度除在春季呈正相关外, 其他季节相关不明显, 甚至呈负相关; 而东部 NDVI 和温度正相关极其显著。图 7b 显示出 NDVI 和短波辐射在全区域基本均呈显著正相关,

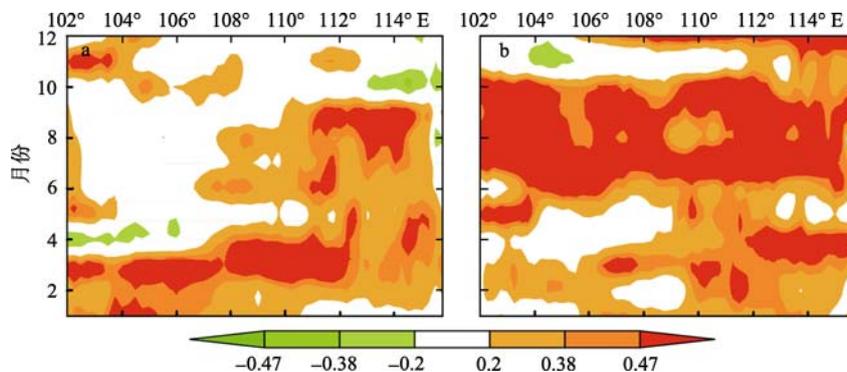


图 7 各月 NDVI 与温度(a)和短波辐射(b)相关系数的纬向平均分布图

Fig. 7 Zonal mean of each month's inter-annual correlation of NDVI with temperature (a) and short-wave radiation (b)

但依然可以明显看出东部 NDVI 与短波辐射的正相关比西部显著。

这些也同时验证了珠江流域东部地区由于降水充足, 降水不再是植被的限制因素, 而过多的降水在一定程度上会使温度和短波辐射相对减小, 使之成为影响植被生长的关键因素; 而西部地区由于地势较高, 季风降水难以到达, 降水较少, 因而降水在该区成为影响植被生长的关键因素, 表现为植被和降水正相关显著, 而温度的升高会增大蒸发, 从而加剧干旱, 所以与温度相关不显著, 甚至在某些季节呈负相关。

4 结论

1) 流域 NDVI 和降水各月的年际方差均呈明显的东西差异性, 东部呈多峰变化, 西部为单峰变化; 两者的方差均在 5 月和 9 月最小, 3 月和 7 月最大。

2) 流域 NDVI 和降水的年内异常在空间上均具有很好的一致性, 在时间上植被滞后于降水的变化, 且植被不同生长阶段滞后降水的时间也不相同; 年

际异常在东、西地区相关性相反, 降水在空间上具有明显的一致性, NDVI 在空间分布上以 108°E 为界呈现东西反向性, 东部为负, 西部为正, 即 108°E 以东地区的年际 NDVI 异常和降水异常反向相关, 108°E 以西地区的年际 NDVI 异常与降水异常呈正相关。108°E 也大致是年降水总量 1500mm 的分界线, 所以 NDVI 和降水的年际相关与年降水总量有一定关系。

3) 流域 NDVI 和降水时间序列的同期整体相关系数为-0.2017, 分区域分季节滞后相关显著, 且东西差异大、季节差异大, 具体表现为: 同期相关以负相关为主, 且东部显著; 滞后相关以正相关为主, 滞后 3 个月(即 1 个季节)时正相关最为显著; 西部滞后正相关强于东部, 春季和秋季的 NDVI 与降水的滞后相关最为显著, 夏、冬季 NDVI 和降水主要表现为负相关。

4) NDVI 和温度在流域东部呈显著正相关, 西部只有在春季正相关显著, 其他季节相关不明显, 甚至呈负相关; NDVI 和太阳短波辐射的相关也是东部比西部正相关明显。

参考文献

- [1] LAMBIN E F, STRAHLER A H. Indicators of land-cover change for change-vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15: 2099-2119.
- [2] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 374-394.
- [3] SCHULTZ P A, HALPERT M S. Global analysis of the relationships among a vegetation index, precipitation and land surface temperature[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16: 2755-2777.
- [4] WANG J, RICH P M, PRICE K P. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(11): 2345-2364.
- [5] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983—1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 716-720.
- [6] LI B, TAO S, DAWSON R W. Relations between AVHRR NDVI and ecoclimatic parameters in China[J]. *Remote Sensing*, 2002, 23(5): 989-999.
- [7] 王兆礼, 陈晓宏. 珠江流域植被净初级生产力及其时空格局[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2006, 45(6): 106-110.
- [8] BELLONE T, BOCCARDO P, PEREZ F. Investigation of vegetation dynamics using long-term normalized difference vegetation index time-Series[J]. *American Journal of Environmental Science*, 2009, 5(4): 460-466.
- [9] TAMAVSKY E, GARRIGUES S, BROWN M E. Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT and MODIS global NDVI products[J]. *Remote Sensing Environment*, 2008, 112: 535-549.
- [10] DAVENPORT M L, NICHOLSON S E. On the relation between rainfall and the normalized difference vegetation index for diverse vegetation types in east Africa[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(12): 2369-2389.
- [11] ZHOU L, TUCKER C J, KAUFMANN R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106 (D17): 20069-20083.
- [12] WILLMOTT C J, ROBESON S M. Climatologically aided interpolation (CAI) of terrestrial air temperature[J]. *International Journal of Climatology*, 1995, 15(2): 221-229.
- [13] SOON-LL AN. Conditional maximum covariance analysis and its application to the tropical Indian Ocean SST and surface wind stress anomalies[J]. *Journal of Climate*, 2003, 27(16): 2932-2938.