

近 12 年广西植被覆盖与降水和气温的时空响应特征

韦振锋^{1,2}, 任志远¹, 张 翀¹

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 西安 710062; 2. 广西财经学院, 南宁 530003)

摘 要: 植被是生态系统中比较活跃的成员, 分析其与降水和气温之间年际动态变化特征, 已经成为当前国内外研究生态环境的发展趋势。基于植被归一化(NDVI)数据和气象数据, 以一元线性回归方法分析 1999—2010 年间植被变化趋势, 同时通过相关分析和偏相关分析方法初步探讨 12 年 NDVI 与降水和气温之间的相关程度。结果表明: (1) 广西植被覆盖变化趋势总体是良好的, 桂南和桂西北植被覆盖变化趋势表现较显著, 其他地区相对变化不显著。(2) 广西主要植被类型中, 显著增加的植被主要有稀疏灌丛、密集灌丛、常绿阔叶林和常绿针叶林, 其他植被类型变化不显著。(3) 研究区域内, 降水对植被的响应相对气温对植被的响应较弱, 相关强度呈由桂西南向桂东北递减的规律。(4) 气温对整个研究区域的植被覆盖响应呈正相关, 中部相关较强, 而四周相对较弱。综上, 植被覆盖与降水和气温的时空响应特征, 与研究区域的气候变化和地形概况相一致。

关键词: 广西地区; 相关和偏相关; NDVI; 气温; 降水

中图分类号: P461.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)05-0033-06

Research on Vegetation Response to Temperature and Precipitation in Guangxi in Recent 12 Years

WEI Zhen-feng^{1,2}, REN Zhi-yuan¹, ZHANG Chong¹

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2. Guangxi University of Finance and Economics, Nanning 530003, China)

Abstract: Vegetation is more active factor in ecological system, analyzing dynamic change characteristics between it and precipitation and temperature has become research trend in the domestic and foreign research of the ecological environment development. Based on the vegetation normalized index data and meteorological data, the vegetation change trend from 1999 to 2010 was analyzed by using a linear regression method, and at the same time, we analyzed the related degree between NDVI and precipitation, temperature in recent 12 years through the correlation analysis and partial correlation analysis method. The results show that: (1) the vegetation change trend in general is good, vegetation cover change trend is remarkable in south Guangxi and northwest Guangxi, it is not significant in other areas; (2) sparse scrub, dense thickets, evergreen broad-leaved forest and evergreen coniferous forest increased quickly, others was not significant; (3) vegetation response to precipitation is less than temperature, the relevant strength decrease from southwest Guangxi to northeast Guangxi. In conclusion, the response between vegetation cover and precipitation, temperature is related to climate change and terrain profile consistent.

Key words: Guangxi area; correlation and partial correlation; NDVI; temperature; precipitation

随着全球气候变化, 陆地生态系统失衡越来越明显, 全球各个地区都发生不同程度的自然灾害, 如近年来发生的大海啸和地震, 严重危害人类的生存和发展。因而国际地圈生物圈计划(IGBP)研究^[1], 成为国内外学者的重点研究领域。植被是地球生态系统

比较活跃的成员, 全球气候的任何变化必然会引起植被类型、数量或质量方面的变化^[2]。而地表植被能通过改变地表反照率、发射率、粗糙度等物理性质和碳、氮储量等生物化学属性对气候变化产生反馈效应^[3-5]。植被的茂密程度及植物进行光合作用面积的

大小,是反映地表植被群落生长态势的重要指标和描述生态系统的重要基础数据,因此,植被覆盖度成为区域生态系统研究的重要指标^[6]。植被覆盖度是指单位面积内植被地上部分(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比^[7]。同时气候因子(如气温和降水)通过有效积温和可利用水分来调控植物光合作用、呼吸作用及土壤有机碳分解等,进而影响植被的生长和分布^[8],成为影响植被覆盖度的重要因素^[9]。研究表明,NDVI与一些代表植被活动状况的地表变量存在密切相关。NDVI与叶面积指数(LAI)^[10]、植被覆盖度^[11]以及吸收光合有效辐射(APAR)^[12-13]均存在一定的函数关系。研究气候变化对植被的响应已成为当前研究的重要内容之一^[14-15]。已有诸多学者从同一空间尺度(某一区域)或时间尺度(年际水平)来探讨植被生长和气候要素的关系,却忽略了植被生长和降雨、气温在空间分布和时间分配上均有较大差异的特点^[16-18]。而本文在全球气候变化的背景下,研究广西气温、降水气候变化,对政府指导工农业生产、发展经济、保护生态平衡等具有重要意义。

基于1999—2010年的MODIS-NDVI遥感数据获取广西地区地表植被覆盖度的时空变化信息,结合研究区24个站点同期降雨量和气温数据,在不同空间和时间尺度上分析植被覆盖度的年际变化和旬变化对气候变化的响应,旨在揭示不同时空格局下气候要素变化对植被生长的影响机制,以及探讨其变化规律。

1 研究区概况

广西位于全国地势第二台阶中的云贵高原东南边缘,地处两广丘陵西部,南临北部湾海面。整个地势自西北向东南倾斜,山岭连绵、山体庞大、岭谷相间,四周多被山地、高原环绕,呈盆地状,有“广西盆地”之称(附图6)。境内河流纵横,地理环境比较复杂。在太阳辐射、大气环流和下垫面综合作用下气候有以下特点:北半部属中亚热带气候,南半部属南亚热带气候;从地形状况来看,桂北、桂西具有山地气候一般特征,“立体气候”较为明显,小气候生态环境多样化;而桂南又具有温暖湿润的海洋气候特色。雨、热资源丰富,且两热同季。年降雨量1 000~2 800 mm,防港市东兴区最多,达2 822.7 mm,降雨量最少的是田阳县,在1 100 mm左右。太阳年总辐射量达90~100 J/(cm²·a),≥10℃积温5 000~8 300℃,持续日数为240~358 d,降雨量和热量资源分布大体上是由北向南增多。在4—9月间降雨量占年降雨量的75%,雨季恰好与热季重叠。

2 数据来源与预处理

本文所用到的数据包括1999—2010年每年旬最大化合成GIMMS-NDVI数据、1999—2010年广西地区24个气象站点的日均温与降水数据、广西地区行政区划图和地貌区划图等数据。其中,降水和气温数据均来自于中国气象科学数据共享服务网,将1999—2010年各气象站点的日均温与降水数据转化为旬降水和旬均温。GIMMS(global inventory modelling and mapping studies)NDVI数据是美国国家航天航空局(NASA)C-J-Tucker等人于2003年11月推出的最新全球植被指数变化数据。该数据集格式为ENVI标准格式,投影为ALBERS,其时间分辨率是15 d,空间分辨率为8 km。本文基于GIMMS-NDVI数据,计算广西地区12 a的旬均NDVI值。

3 研究方法

3.1 植被覆盖年际变化趋势计算

通过一元线性回归分析1999—2010年间每个像元的年际变化趋势,用 x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量, t_i 表示 x_i 所对应的时间,建立 x_i 与 t_i 的一元线性回归方程^[19],计算公式如下:

$$\hat{x}_i = a + bt_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

对序列 x_i 以及相应的 t_i ,回归系数 b 值大小反映了上升或下降的速率, $b>0$ 时, x 随时间 t 的增加呈上升趋势; $b<0$ 时,则反之。本文采用 F 检验可置信程度的高低。计算公式为:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (2)$$

式中, $U = \sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 称为误差平方和, $Q = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2$ 称为回归平方和, y_i 为第 i 年的NDVI实际观测值, \hat{y}_i 为12 NDVI平均值, $n=12$ 为年数。根据 F 检验值将变化趋势划分为5个等级:极显著减少($b<0$, $P<0.01$);显著减少($b<0$, $0.01<P<0.05$);变化不显著($P>0.05$);显著增加($b>0$, $0.01<P<0.05$);极显著增加($b>0$, $P<0.01$)。

3.2 植被覆盖与气候因子相关计算

地理研究系统是由多个要素构成的复杂系统,当某一要素发生变化必然会引起其他要素的变化,因此本文采用相关分析和偏相关分析植被覆盖和气候因子的相关。其中偏相关分析是指当两个变量同时与第三个变量相关时,将第三个变量的影响剔除,只分析另外两个变量之间相关程度的过程^[20]。

植被覆盖与气候因子的相关系数计算公式如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: R_{xy} —— x, y 两变量的相关系数; x_i ——第 i 个时间序列的变量值; y_i ——第 i 个时间序列的变量值, \bar{x} —— x_i 的平均值; \bar{y} —— y_i 的平均值; i ——样本数。

偏相关系数计算公式如下:

$$r_{xyz} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (4)$$

式中: r_{xyz} ——将变量 z 固定后变量 x 与变量 y 之间的偏相关系数; r_{xy}, r_{xz}, r_{yz} ——变量 x 与变量 y 、变量 x 与变量 z 、变量 y 与变量 z 的相关系数。

由相关分析和偏相关分析公式分别计算年和月尺度上像元的植被覆盖与降水、气温之间的相关系数和偏相关系数。其中以 1999—2010 年来计算年际之间 NDVI 与降水、气温之间的相关系数和偏相关系数;以 12 a 的年均旬 36 旬来计算旬之间 NDVI 与降水、气温之间的相关系数和偏相关系数;此外,还以 1~33 旬的气候因子对 NDVI 的 3~36 旬的滞后三旬的相关系数和偏相关分析。

4 结果与分析

4.1 植被覆盖年际变化趋势分析

1999—2010 年植被覆盖趋势显著分布(附图 7a),大部分地区的植被趋势变化不显著,占整个区的 56.76%,其中主要分布在桂北地区的桂林和柳州地区,还有桂东的贺州和梧州部分地区,其次是中部的来宾、南宁等地部分地区;极显著增加地区(显著值<0.01,变化趋势系数>0)占整个区的 17.48%,主要分布在桂西北的百色和河池地区,桂南地区也是极显著增加,其中北海表现尤为明显;而显著增加分布和极显著增加分布相似,主要分布在极显著增加和变化不显著之间的一个过渡地区,占整个面积的 25.58%;显著减少和极显著减少几乎没有。根据显著趋势图得出,1999—2010 年广西植被覆盖总体趋势是增加,大部分地区是变化不显著,其次是显著和极显著增加,整个区植被覆盖趋势无减少趋势。植被覆盖显著趋势空间分布和广西近几年发展相一致,桂西北地区属于山区,城镇发展相对较慢,植被受破坏面积较小,因而该地区植被覆盖变化趋势呈显著增加;桂南属于近几年广西重点发展区域——北部湾,政府注重该地区的城镇建设和生态环境建设协调发展,因此桂南的植被覆盖也呈显著增加;其他地区如桂林、柳州和贺州地区相对桂西北和桂南地区而言植被覆盖变化趋势变化不显著。

不同植被类型显著情况(附图 7b):根据植被类型图和显著图叠加得出,显著增加的地区主要是桂西北和桂南地区,其中桂西北主要的植被类型有常绿阔叶林、常绿针叶林和密集灌丛;桂南地区的稀疏灌丛较显著增加。显著减少的植被主要有高山亚高山牧场草地和稀疏灌丛;显著增加的植被主要有稀疏灌丛、密集灌丛、常绿阔叶林和常绿针叶林。

4.2 植被覆盖与降水和气温年际相关及偏相关分析

NDVI 与降水和气温年际相关和偏相关空间分布(图 1),其中图 1a 为 NDVI 与降水年际相关空间分布图,图中 R_{np} 为 NDVI 与降水的相关系数;图 1b 为排除气温对 NDVI 和降水的影响得出 NDVI 与降水年际偏相关空间分布图,图中 $R_{np/t}$ 为 NDVI 和降水的偏相关系数。图 1c 为 NDVI 与气温年际相关空间分布图,图中 $R_{nt/p}$ 为 NDVI 与气温的相关系数;图 1d 为排除降水对 NDVI 和气温的影响得出 NDVI 与气温年际偏相关空间分布图,图中 $R_{nt/p}$ 为 NDVI 和气温的偏相关系数。

NDVI 与降水相关空间分布(图 1a),NDVI 与降水大部分地区呈负相关,负相关系数在 -0.89~0.00 之间,占 93.7%;极少数地区呈正相关,正相关系数在 0~0.7 之间,占 6.3%。总体 NDVI 与降水呈负相关。NDVI 与降水偏相关空间分布(图 1b),排除气温对 NDVI 和降水的干扰,计算 NDVI 和降水的偏相关系数,NDVI 与降水正偏相关主要分布在桂西南,正偏相关系数值在 0~0.75 之间,占 29.6%;负偏相关主要分布在桂东北地区,值在 -0.90~0 之间,占 70.4%,说明降水与 NDVI 存在正相关。由相关系数和偏相关系数结合分析,得出 NDVI 和降水呈负相关大于正相关,负相关主要分布在桂东北地区,而正相关主要分布在桂西南地区,相关空间分布和偏相关空间分布相差较大,排除气温因子的影响较强。

NDVI 与气温相关空间分布(图 1c),主要表现为正相关,相关系数值在 0~0.93 之间,占 99.75%,其中最大相关系数在 0.6~0.93 之间,占 20.28%,主要分布在桂西南的崇左、防城港和百色部分地区,以及中部地区的来宾和贵港部分地区。NDVI 与气温呈负相关,面积很小,主要分布在河池地区。NDVI 与气温偏相关空间分布图 1d 为排除降水的干扰得出 NDVI 与气温之间相关空间分布图,与图 1d 图的正负相关分布很相似,正负相关分布更明显,大部分地区呈正相关,正相关系数在 0~0.89 之间,占 94.6%,其中最大相关系数在 0.54~0.69 之间,占 21.55%,主要分布在桂西南的崇左、防城港和百色部分地区,以及中部地区的来宾和贵港部分地区。负相关系数在一

0.62~0 之间,占 5.4%,主要分布在河池地区。由 NDVI 与气温相关和偏相关空间分布图结合得出,NDVI 与气温大部分地区呈正相关,其中最大正相关分布在桂西南的崇左、防城港和百色部分地区,以及中部地区的来宾和贵港部分地区,呈负相关存在极少地区,其中主要为河池地区。图 1a 到图 1b 空间变化差异较小,

都呈正相关,说明排除降水因子的影响较弱。根据 NDVI 与降水和气温的年际变化分析得出,NDVI 与降水存在负相关,主要分布在桂西北地区;而 NDVI 与气温表现出比较明显的正相关,只有极少数地区呈负相关。其中气温对 NDVI 的影响相对降水的影响较强。

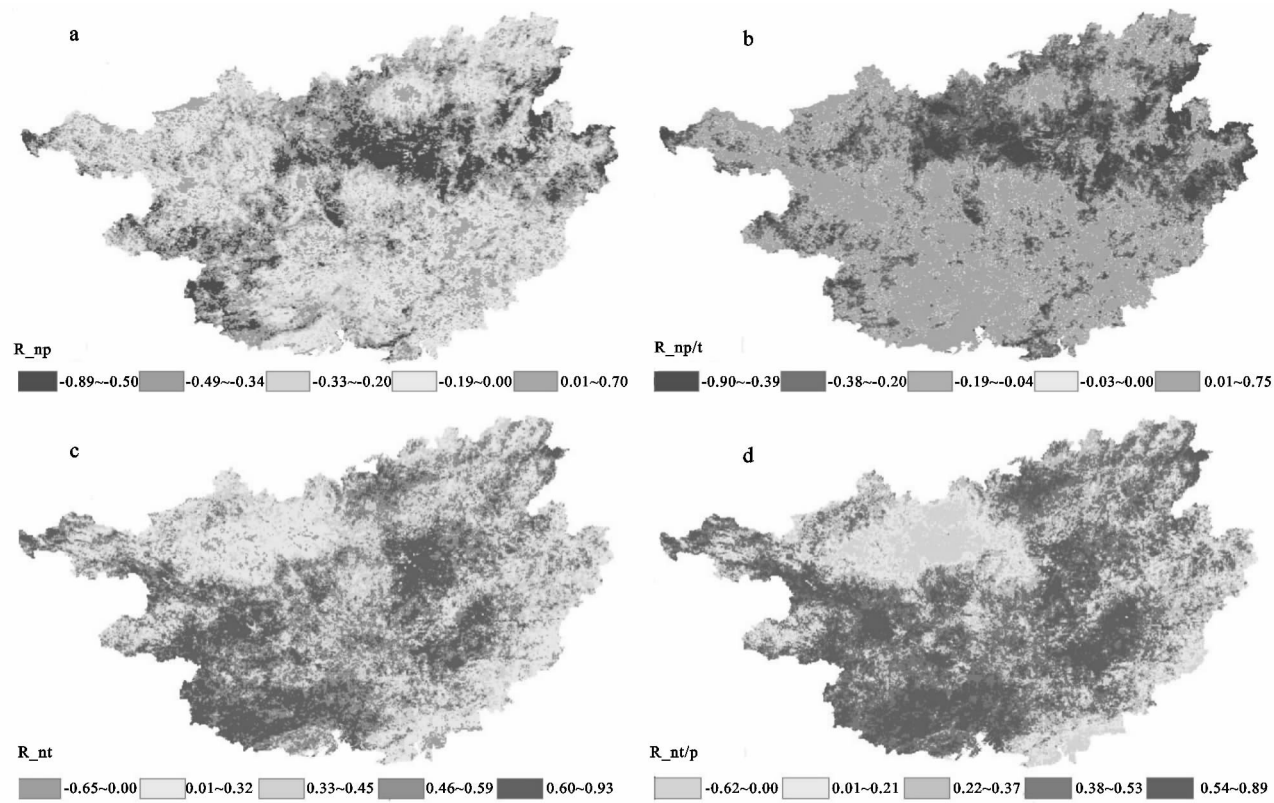


图 1 NDVI 与降水和气温年际相关、偏相关空间分布

4.3 植被覆盖与降水和气温的年均旬相关和偏相关分析

NDVI 与降水年均旬相关空间分布(图 2a),正相关系数为 0~0.82,主要分布在桂西南和桂西北地区,占整个区域的 82.72%;负相关系数为-0.65~0,分布在桂东北地区,占 27.28%。得出 NDVI 与降水年均旬相关大部分为正相关,且呈由桂西南向桂东北递减规律。图 2a 为 NDVI 与降水年均旬偏相关空间分布图,排除气温对 NDVI 和降水的干扰计算偏相关系数。空间分布也呈由桂西南向桂东北递减规律,只是大部分都呈负相关,几乎没有正相关。由图 2a 和图 2b 得出降水对 NDVI 的影响有一定的规律性,呈由桂西南向桂东北递减的规律。从相关系数和偏相关系数的数值变化来看,图 2a 有正相关,到图 2b 全部是负相关,说明剔除气温因素的影响较大。而降水对 NDVI 的影响规律呈由桂西南向桂东北递减的变化规律。

从图 2c 中可以看出,整个研究区域的 NDVI 与气温都呈正相关,其中最大正相关系数值为 0.71~0.94,占 28.55%,主要分布在广西中部地区的南宁、

来宾和柳州部分地区,而四周相关程度相对较弱。剔除降水因子的影响,NDVI 与气温年均旬偏相关空间分布(图 2d),整个区域都呈正偏相关,只是桂西北和桂西南地区的偏相关程度较弱更明显。其中最大正偏相关为 0.75~0.94,占 25.26%,主要分布在中部地区的南宁、来宾和柳州部分地区,与图 2c 的空间分布最大相关分布相似,都在中部地区,这主要和广西地形呈盆地有关。根据 NDVI 与气温年均旬相关和偏相关空间分布图,可以看出整个研究区域 NDVI 与气温都呈正相关,其中呈正相关较强的主要分布在广西中部地区。图 2c—d 的相关系数数值变化不大,说明排除降水的干扰,NDVI 与气温依然呈正相关,证明降水干扰较弱。

综合 NDVI 与降水和气温的年均旬相关和偏相关分析,得出降水对 NDVI 的影响呈由桂西南向桂东北递减的规律,这主要和广西降水分布由南向北递减相一致。而气温和 NDVI 呈正相关,降水干扰较弱,正相关变化趋势由四周向中部变化明显,这主要受广西中部地区是盆地的影响。

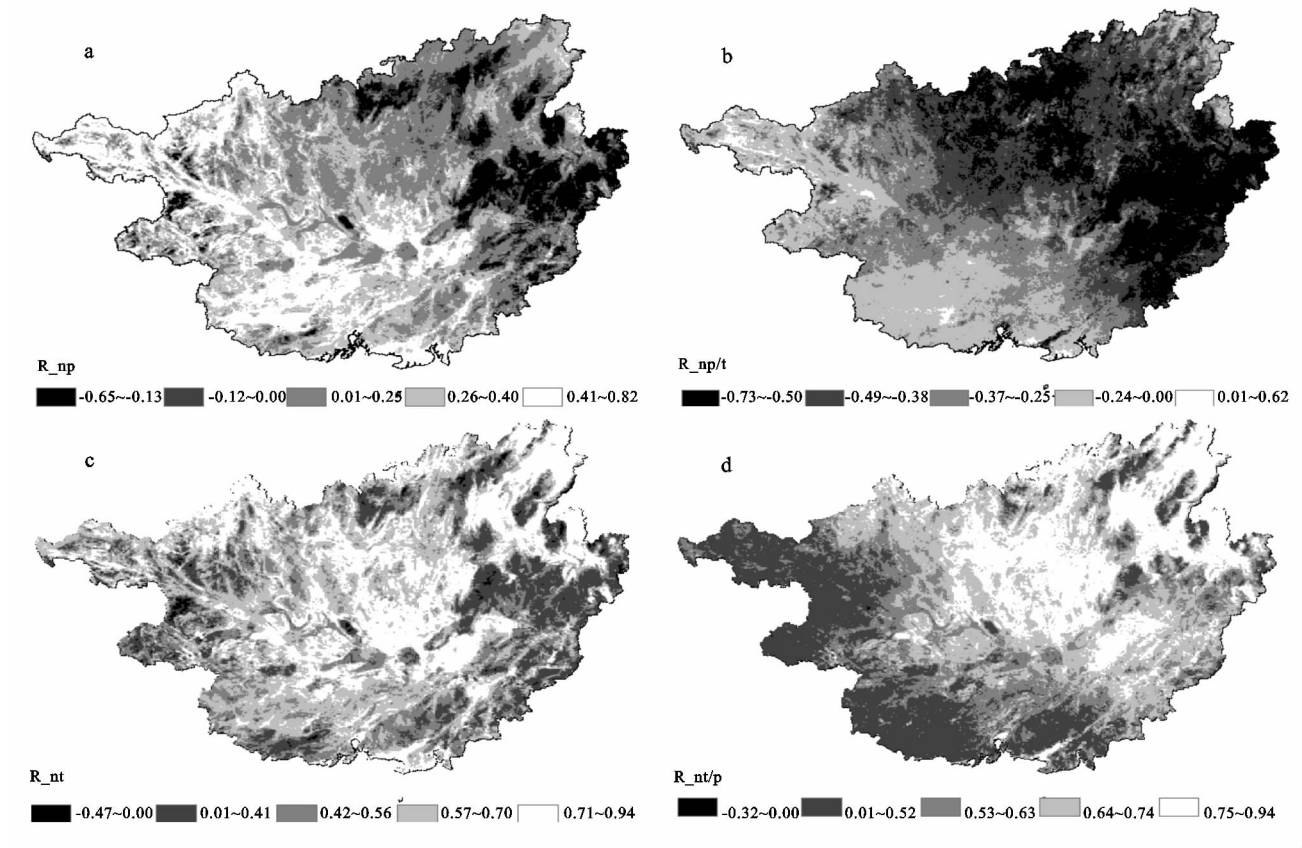


图 2 NDVI 与降水和气温旬相关、偏相关空间分布

4.4 植被覆盖与降水和气温滞后一个月相关和偏相关分析

根据一年 36 旬,滞后一个月就相当滞后 3 旬,用

降水和气温的 1~33 旬数据和 NDVI 的 3~36 旬数据计算相关和偏相关系数。NDVI 与降水和气温滞后一个月的相关和偏相关空间分布(图 3)与图 2 相似。

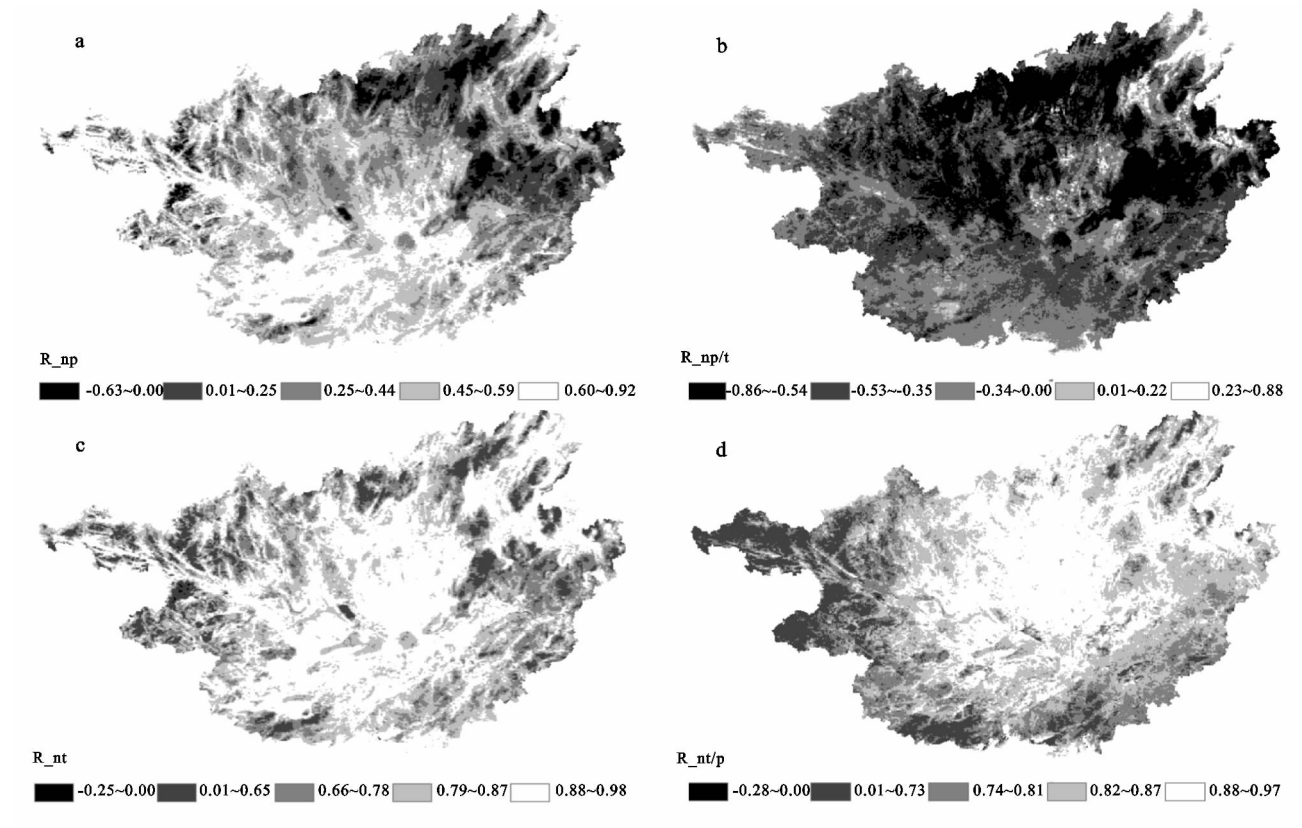


图 3 NDVI 与降水和气温滞后一个月相关、偏相关空间分布

NDVI与降水滞后一个月(图3a)的大部分呈正相关,呈桂西南向桂东北递减的规律。排除气温对NDVI和降水的干扰,NDVI与降水滞后一个月的偏相关(图3b)大部分呈负相关,空间变化规律和图3a相似,都呈桂西南向桂东北递减的规律,只是相关系数由正相关变负相关,说明气温对NDVI和降水的干扰较强。NDVI与气温滞后一个月相关空间分布(图3c)呈正相关,最大相关系数为0.88~0.98,主要分布在广西中部的南宁、崇左和来宾等地区,而周边相关相对较弱,整个区域相关变化规律呈由中部向四周递减的规律,这主要和广西中部呈盆地相对应。排除降水对NDVI和气温的影响,NDVI与气温滞后一个月偏相关空间分布(图3d)还是呈正相关,说明降水的干扰相对较弱。分布空间规律也是呈由广西中部向周边递减的规律,和图3c分布规律相似,偏相关比相关分布相对明显,说明气温对NDVI的影响呈正相关,相关强度呈由中部向四周递减的规律。

综上,降水对NDVI和气温的影响相对较弱,影响规律呈由桂西南向桂东北的递减变化,这主要是由于广西的降雨量和热量资源分布大体上是由北向南增多的影响。气温对NDVI的影响呈正相关,影响规律呈由中部向四周递减的规律,主要受广西地形四周为山地,中间呈盆地状的影响,境内河流纵横,地理环境比较复杂,桂北、桂西具有山地气候,“立体气候”较为明显,小气候生态环境多样化;而桂南又具有温暖湿润的海洋气候特色。

5 结论

本文在综合国内外相关研究的基础上,选取1999—2010年植被覆盖归一化指数和气象数据,通过一元线性回归分析植被覆盖变化趋势,同时以相关和偏相关方法分析植被覆盖与降水和气温动态的相关程度,以期揭示区域生态变化的时空动态变化特征。

1999—2010年间广西植被覆盖变化总体趋势是增加,无明显减少地区。其中桂南和桂西北植被覆盖变化趋势较显著,其他地区变化不显著。这应与桂西北属于山区,人们开发力度较小,植被受破坏程度相对较弱有关。而桂南地区属于广西重点发展地区,政府注重城镇和生态协调发展,因此该地区的植被受到一定的保护。广西主要植被类型中,显著增加的植被主要有稀疏灌丛、密集灌丛、常绿阔叶林和常绿针叶林,其他植被类型变化不显著。研究区域内,降水对植被的响应呈由桂西南向桂东北递减的规律,这主要受广西降雨呈由北向南增多的影响。降水对植被的

相关程度相对气温的影响较弱,气温对植被的响应呈正相关,中部相关较强,四周相对较弱,主要受广西地形四周山地,中间呈盆地状的影响。

综上,广西植被覆盖与降水和气温的时空响应特征,主要受广西的降雨量和热量资源分布由北向南增多的影响,广西地形四周山地,中间呈盆地状,境内河流纵横,地理环境比较复杂,桂北、桂西具有山地气候,“立体气候”较为明显,小气候生态环境多样化,桂南具有温暖湿润的海洋气候等多个因素的影响。

参考文献:

- [1] Walker B, Steffen W. IGBP Science No. 1: A Synthesis of GCTE and Related Research[M]. Stockholm: GBP, 1997.
- [2] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. Nature, 2003,421(6918):37-42.
- [3] Foley J A, Levis S, Costa M H, et al. Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models[J]. Ecological Applications, 2000,10(6):1620-1632.
- [4] Denman K L, Brasseur G, Chidthaisong A, et al. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry[M]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [5] Mahmood R, Pielke R A, Hubbard K G, et al. Impacts of land use/land cover change on climate and future research priorities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010,91(1):37-46.
- [6] 甘春英,王兮之,李保生,等. 连江流域近18年来植被覆盖度变化分析[J]. 地理科学, 2011,31(8):1019-1024.
- [7] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. Remote Sensing of Environment, 2002,80(1):76-87.
- [8] 刘军会,高吉喜. 气候和土地利用变化对中国北方农牧交错带植被覆盖变化的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9):2016-2022.
- [9] Dai S P, Zhang B, Wang H J, et al. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981—2006): Impacts of climate changes and human activities[J]. Science in Chinese: Series D, 2008,51(1):67-78.
- [10] Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 1991,35(2/3):161-173.

- [2] Eulogio Chacon-Moreno, Smith J K, Skidmore A K. Modeling spatial patterns of plant distribution as a consequence of hydrological dynamic processes in a Venezuelan Flooding Savanna[J]. *Ecotropicos*, 2007, 20(2): 55-73.
- [3] 许海丽, 潘云, 宫辉力, 等. 1959—2000 年奶水河流域气候变化与水文响应分析[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(2): 43-47.
- [4] 白桦, 穆兴民, 高鹏, 等. 嘉陵江流域降水及径流演变规律分析[J]. *土保持研究*, 2012, 19(1): 102-106.
- [5] 傅伯杰, 陈利顶, 邱扬, 等. 黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程[M]. 北京: 商务印书馆, 2002.
- [6] 索安宁, 于波, 王天明, 等. 泾河流域植被景观格局对流域径流的调节作用[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 40-43.
- [7] 杨国靖, 肖笃宁, 周立华. 祁连山区森林景观格局对水文生态效应的影响[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4): 489-494.
- [8] 朱丽, 秦富仓, 姚云峰, 等. SWAT 模型灵敏性分析模块在中尺度流域的应用: 以密云县红门川流域为例[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1): 161-165.
- [9] 高桥浩一郎. 从月平均气温、月降水量来推算蒸散发量的公式[J]. *天气*, 1979, 26(12): 29-32.
- [10] Srinivas A, Rao B V, Rao V V S G. Recharge process and aquifer models of a small watershed[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1999, 44(5): 681-692.
- [11] 肖笃宁, 胡远满, 李秀珍. 环渤海三角洲湿地的景观生态学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [12] 李谢辉, 王磊. 河南省土地利用/覆盖景观格局变化分析[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 83-89.
- [13] 董李勤, 章光新. 嫩江流域沼泽湿地景观变化及其水文驱动因素分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(2): 25-31.
- [14] 徐摇丽. 空间粒度变化对合肥市景观格局指数的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1167-1173.
- [15] 白林波, 白明生, 贾科利. 银川市景观格局动态变化研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(2): 265-267.
- [16] 杨国靖, 肖笃宁, 周立华. 祁连山区森林景观格局对水文生态效应的影响[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4): 489-494.
- [17] 张庆云. 1880 年以来华北降水及水资源的变化[J]. *高原气象*, 1999, 18(4): 486-495.
- [18] 余新晓, 牛健植, 关文彬. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(上接第 38 页)

- [11] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 533-1543.
- [12] Sellers P J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, 6(8): 1335-1372.
- [13] Myneni R B, Hall F B, Sellers P J, et al. The interpretation of spectral vegetation indices [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 481-486.
- [14] 陈效逯, 王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. *地理学报*, 2009, 64(1): 84-94.
- [15] 牛建明. 内蒙古主要植被类型与气候因子关系的研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 47-52.
- [16] 渠翠平, 关德新, 王安志, 等. 科尔沁草甸草地归一化植被指数与气象因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 58-64.
- [17] 马玉玲, 余卫红. 呼伦贝尔草原对全球变暖的响应[J]. *干旱区地理*, 2004, 27(1): 29-34.
- [18] 李云鹏, 娜日苏, 刘朋涛, 等. 呼伦贝尔草原退化遥感监测与气候成因[J]. *华北农学报*, 2006, 21(增刊 1): 56-61.
- [19] 施能, 马丽, 袁晓玉, 等. 近 50 a 浙江省气候变化特征分析[J]. *南京气象学院学报*, 2001, 24(2): 207-2131.
- [20] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2011, 66(1): 47-58.