

北部湾沿海地区植被覆盖对气温和降水的旬响应特征

田义超^{1a,1c,2}, 梁铭忠^{1b,1c}

(1. 钦州学院 a.资源与环境学院, b. 建筑工程学院, c. 广西北部湾海洋生物多样性养护重点实验室与广西北部湾海岸科学与工程实验室, 广西 钦州 535000; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘要: 论文分析北部湾沿海地区植被覆盖对气候变化的响应,为该区域植被恢复和植被生产力研究提供依据。基于研究区2000—2011年423景SPOT-VEGETATION逐旬NDVI数据及逐日气温和降水数据,利用像元二分模型、相关分析、偏相关分析和时滞偏相关分析等数理统计方法,对研究区植被覆盖时空变化特征及与旬降水和旬均温的相关性及滞后性进行分析。结果表明:1)近12 a来,北部湾沿海地区植被覆盖度平均值呈增长趋势,由2000年的65.23%增加到2011年的72.02%,增加了6.79%;2)研究区植被生长季旬NDVI均值介于0.21~0.67之间,在不同时期变化是不同的,其值呈现出“降低—增长—降低”3种变化过程;3)各种植被类型与温度具有显著的相关关系,全部通过了0.01的显著性水平,且NDVI与温度的显著性水平高于NDVI与降水的显著性水平,说明北部湾沿海地区植被覆盖NDVI对气象因子中的温度更为敏感;4)NDVI与气温的时滞偏相关系数显著高于NDVI与降水的时滞偏相关系数,旬NDVI与旬降水的滞后时间多集中于6~9旬之间,而旬NDVI与旬气温的滞后时间多以0~5旬为主;5)不同类型植被的生长对气温和降水的响应时间不一致,但与水热条件时滞偏相关系数越高的植被类型响应时间越短。上述研究结果表明,近12 a来北部湾沿海地区植被处于恢复状态,且植被对降水和气温具有明显的阈值和滞后性。

关键词: 植被; SPOT-VEGETATION; 时滞偏相关; NDVI; 气候因子; 北部湾沿海地区

中图分类号: Q948.112; P461.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2016)03-0488-15

DOI: 10.11849/zrzyxb.20150188

全球变化与陆地生态系统响应(GCTE)是当前全球变化研究中的主要内容,有关地表植被覆盖与环境演变的关系是全球变化中最复杂、最具活力的研究内容^[1]。在全球生态系统中,植被是该系统的重要组成部分,植被在保持水土流失、调节大气、维持气候及整个生态系统稳定等方面具有重要的作用^[2]。植被作为陆地生态系统的主体,既是气候变化的承受者,同时又对气候变化产生反馈作用,在全球变化研究中起着“指示器”的作用^[3]。陆地地表植被覆盖的变化将直接或间接地影响局地气候平衡以及区域生态平衡,对气候变化和地理生态环境的塑造起着至关重要的作用^[4]。陆地地表植被在生长过程中受

收稿日期: 2015-02-27; 修订日期: 2015-09-23。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41376097); 广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFBA118221); 广西教育厅基金资助项目(LX2014452); 广西北部湾海洋生物多样性养护重点实验室(2015ZB07, 2015ZB04)。
[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No. 41376097; Guangxi Natural Science Foundation, No. 2014GXNSFBA118221; The Scientific Research Fundation of the Education Department of Guangxi Province, China, No. LX2014452; Guangxi Key Laboratory of Beibu Gulf Marine Biodiversity Conservation, Qinzhou University, No. 2015ZB07 and 2015ZB04.]

第一作者简介: 田义超(1986-),男,陕西西安人,工程师,博士研究生,主要从事资源环境遥感与GIS及海岸带生态环境监测的相关研究。E-mail: tianyichao1314@yeah.net

到各种气象因子的影响,其中气温和降水因子对地表植被的影响最为重要。而植被覆盖对气温和降水的响应特性则存在着一定的滞后性和累积性,从而使得气温和降水对陆地地表植被的有效时间尺度分布不均匀。因此,在全球变化背景下研究陆地地表植被覆盖对温度和降水的相互关系及时滞响应就显得格外重要,已逐渐成为地球科学领域研究的热点和重点内容。

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)与植被覆盖度(Vegetation Fractional Cover, *FC*)、叶面积指数(Leaf Area Index, *LAI*)、植物生产力和植被生物量等具有很好的关系,是监测区域或全球植被生态环境变化的有效指标^[5]。目前国内外学者已经对时序*NDVI*遥感数据与气象因子之间的关系做了大量的研究工作,其研究表明*NDVI*对气象因子变化响应敏感,降水和气温是影响地表植被覆盖变化的两个最为主要的因子^[6-8]。然而,植被对气候变化的响应特性,尤其是植被与气候因子之间的空间时滞效应方面的研究目前尚不明朗。如Mao等^[9]对中国东北地区夏季植被的*NDVI*分析发现,1995年后*NDVI*有明显的下降趋势,且温度与植被的相关性显著高于降水。戴声佩等^[4]利用SPOT VGT *NDVI*植被数据与旬降水和旬气温数据,分析了祁连山植被覆盖对气温和降水的响应特性,其研究结果认为,祁连山地区气温变化对*NDVI*的影响强于降水,气温、降水与*NDVI*的最大滞后期为2旬左右,且春夏季植被对降水的响应特性不一致。孙艳玲等^[10]对内蒙古植被与气候因子的研究结果表明,内蒙古植被1982—2000年呈增加趋势,且降水量是植被变化的制约因子。张戈丽等^[11]分析了内蒙古呼伦贝尔地区植被变化与气候因子之间的关系,认为温度与降水对生长季各月份植被的变化情况影响不同,存在一定的滞后效应。李运刚和何大明^[12]基于SPOT VEGETATION遥感数据和气象数据对红河流域*NDVI*与气候因子之间的时滞效应进行了分析,其研究结果表明,红河流域*NDVI*对降水变化的响应在时间上先于对温度变化的响应。

综上,以往大部分研究成果集中在*NDVI*的时空变化格局及*NDVI*与气候因子之间的关系上,但是对植被覆盖与气象因子之间的空间时滞效应方面的研究涉及较少,对于植被覆盖*NDVI*与气象因子之间的时滞关系研究只局限于站点尺度上,而对于植被覆盖与气象因子在不同空间尺度上的时滞特性方面的研究尚不明确。2008年1月16日,国家批准实施《广西北部湾经济区发展规划》之后,中马产业园区,大型工业、码头和制糖厂等工厂进驻北部湾地区,北部湾沿海地区作为我国西南地区重要的生态屏障区,地表植被覆盖和生态环境正面临着一系列前所未有的问题。且北部湾沿海地区位于亚热带季风地区,气候类型多样,植被类型丰富,不同地区植被覆盖与水热因子之间的相关性也存在着显著的地域性差异,因此,植被对气候因子之间的响应时间以及响应特性也不相同。鉴于此,该研究以北部湾沿海地区2000—2011年423景SPOT-VEGETATION逐旬*NDVI*数据及逐日气温和降水数据为基础,利用像元二分模型、相关分析、偏相关分析和时滞偏相关分析等数理统计方法,对研究区植被覆盖时空变化特征及与旬降水和旬均温的相关性及滞后性进行分析。在全球气候变化背景下研究北部湾沿海地区植被覆盖变化与气候因子之间的响应关系,对于评价海陆生态系统的生态环境具有重要的指导意义,同时也可可为地方政府在进行生态环境保护和生态规划方面提供一些理论上的支持与指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择北部湾沿海地区为研究区, 该区域地处 $21^{\circ}24' \sim 22^{\circ}43'N$, $107^{\circ}27' \sim 109^{\circ}52'E$ 之间, 东西长约226.77 km, 南北长约143.28 km, 总面积32 491.61 km², 下辖4市4县, 分别为北海、钦州、防城港、东兴4市, 浦北、上思、灵山、合浦4县。该地区气候属南亚热带季风气候区, 具有亚热带向热带过渡性质的海洋季风气候特点。年平均气温22℃左右, 绝对最高温度37.5℃, 绝对最低温度-1.8℃。年平均降雨量在1 800 mm左右, 平均日照时数1 800 h左右, 历年平均无霜期329~354 d。

北部湾沿海地区有自西向东的6条较大的河流, 依次为北仑河、防城河、茅岭江、钦江、大风江和南流江。海岸带的地势北高南低, 山脉多呈东北—西南走向, 地形特征依次为山脉—丘陵—滩涂—浅海, 东北方横贯着约60 km长的六万山山脉, 西北方横贯着约100 km长的十万大山山脉。北部湾是我国大西南地区出海口最近的通路。同时该地区海岸线、土地、淡水、海洋、农林和旅游等资源丰富, 发展潜力较大, 是我国沿海地区规划布局新的现代化港口群、产业群和建设高质量宜居城市的重要区域。

1.2 数据来源

该研究所选用的数据包括日值气象数据、NDVI植被数据以及北部湾沿海地区植被覆盖类型数据。气象数据为2000—2011年研究区各个气象站点的逐日气温和逐日降水量数据, 来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>)。首先将其日降水和日均温粗粒化为旬降水(Ten-day Precipitation, *TP*)和旬均温(Ten-day Mean Temperature, *TT*), 然后运用Kriging法将旬降水和旬均温插值成1 km的空间栅格数据单元。NDVI数据为2000年1月至2011年12月SPOT-VEGETATION的逐旬NDVI产品, 共432期影像, 数据来源于比利时所发布的全球NDVI植被数据 (<http://www.vgt.vito.be/>)网站。该数据由瑞典的Kiruna地面站负责接收, 由位于法国Toulouse的图像质量监控中心负责图像质量并提供相关参数(如定标系数), 最终由比利时佛莱芒技术研究所(Flemish Institute for Technological Research, Vito) VEGETATION影像处理中心(VEGETATION processing center, CTIV)负责预处理成逐旬1 km的全球NDVI数据^[13]。北部湾沿海地区植被覆盖类型数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心的全球1 km×1 km土地利用覆盖数据, 得到此数据后, 将其分类并合并为八大类(图1), 依次

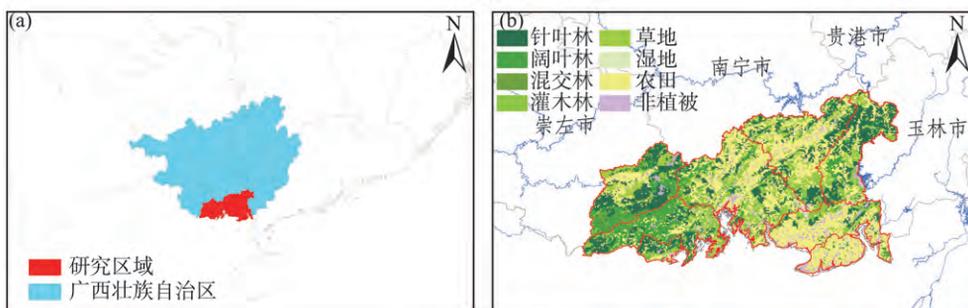


图1 北部湾沿海地区在广西区地理位置

Fig. 1 Location of Beibu Gulf coastal region in Guangxi Autonomous Region

为: 针叶林、阔叶林、混交林、灌木林、草地、湿地、农田和非植被。

1.3 分析方法

1.3.1 差值法

$NDVI$ 是植被生长状态的最佳指示因子, 并与植被覆盖度具有很好的相关性。根据像元二分模型原理^[4], 即一个像元 $NDVI$ 值可以表示为有植被覆盖和无植被覆盖两种情况, 因此, 植被覆盖度的计算公式可表示为:

$$f_c = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (1)$$

式中: $NDVI_{veg}$ 为植被全覆盖时的 $NDVI$ 值; $NDVI_{soil}$ 为无植被覆盖时的 $NDVI$ 值。本文根据 $NDVI$ 累计频率表, 根据累计频率为0.5%的 $NDVI$ 值作为 $NDVI_{soil}$, 累计频率为99.5%的 $NDVI$ 值作为 $NDVI_{veg}$ 。

1.3.2 时滞偏相关分析

偏相关系数和时滞相关法经常用来分析年内植被变化对气候因子之间的响应^[15-16]。张清雨等^[17]利用相关系数分析了内蒙古不同生长季 $NDVI$ 对温度和降水之间的时滞效应来反映植被覆盖对气候要素的响应, 然而并没有在空间上得出具体的响应时间。许多学者^[15,18]在应用时滞互相关法对植被覆盖与气候要素的关系进行分析时, 并没有考虑到植被覆盖与第一个气候因素的相关程度受到第二个气候要素的影响, 因此, 大部分学者在进行计算的过程中并没有剔除第二个气候因素对植被覆盖的影响。基于以上两点, 该研究应用时滞偏相关系数来计算研究区旬 $NDVI$ 与旬降水和旬气温之间的关系。计算过程如下:

1) 计算不同时滞下植被覆盖与气温和降水之间的相关系数:

$$R_{N_T} = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (T_i - \bar{T}_i)(N_{i+k} - \bar{N}_{i+k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (T_i - \bar{T}_i)^2 \sum_{i=1}^{n-k} (N_{i+k} - \bar{N}_{i+k})^2}} \quad (2)$$

$$R_{N_P} = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (P_i - \bar{P}_i)(N_{i+k} - \bar{N}_{i+k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (P_i - \bar{P}_i)^2 \sum_{i=1}^{n-k} (N_{i+k} - \bar{N}_{i+k})^2}} \quad (3)$$

$$R_{T_P} = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (T_i - \bar{T}_i)(P_{i+k} - \bar{P}_{i+k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (T_i - \bar{T}_i)^2 \sum_{i=1}^{n-k} (P_{i+k} - \bar{P}_{i+k})^2}} \quad (4)$$

式中: R_{N_T} 、 R_{N_P} 为不同时滞下植被覆盖与气温和降水量的相关系数; R_{T_P} 为不同时滞下气温和降水的相关系数; N_i 为植被 $NDVI$ 序列; T_i 和 P_i 分别为气温序列和降水量序列; i 为序列长度; k 为滞后时间, 根据经验其值应小于等于 $i/4$, 由于该研究是对旬数据的相关分析, 因此, $i=36$, k 的最大值取9; \bar{T}_i 、 \bar{P}_i 分别为气温和降水的时间序列均值; \bar{N}_{i+k} 、 \bar{P}_{i+k} 分别为第 $i+k$ 个时滞的 $NDVI$ 均值和降水均值。

2) 根据偏相关系数计算公式, 结合不同时滞下的相关系数, 得到不同时滞下的偏相关序列。计算公式如下:

$$R_{N_{T_P}} = \frac{R_{N_T} - R_{N_P}R_{T_P}}{\sqrt{(1 - R_{N_P}^2)(1 - R_{T_P}^2)}} \quad (5)$$

$$R_{N_{P-T}} = \frac{R_{N_{P-T}} - R_{N_{T-P}} R_{T-P}}{\sqrt{(1 - R_{N_{T-P}}^2)(1 - R_{T-P}^2)}} \quad (6)$$

式中： $R_{N_{T-P}}$ 为不同时滞下剔除降水影响下的植被覆盖与气温的偏相关系数；同理， $R_{N_{P-T}}$ 为不同时滞下剔除气温影响下植被覆盖与降水的偏相关系数。之后计算得到各个时滞下的最大偏相关系数及对应的时滞日期，以上时滞偏相关的全部计算过程是通过Matlab 2013a软件编程实现句NDVI与气象因子之间逐象元计算。

2 结果

2.1 植被覆盖变化特征

2.1.1 植被覆盖空间变化特征

由图2(a)和图2(b)可以看出：2000—2011年，北部湾沿海地区植被覆盖度平均值整体上呈增长趋势，植被覆盖度由2000年的65.23%增加到2011年的72.02%，增加了6.79%。从空间上来看，2000—2011年植被覆盖呈现出西部地区高、中东部地区低的分布格局。由图2(c)可知，植被覆盖度显著增加的区域（深绿色）主要集中在钦州市的中部及东南部，呈集中连片分布，其次灵山县、钦州市和合浦县的交界地带植被显著增加也比较明显；植被覆盖显著减少的区域（黄色、棕色）主要集中于合浦县的西南部河口

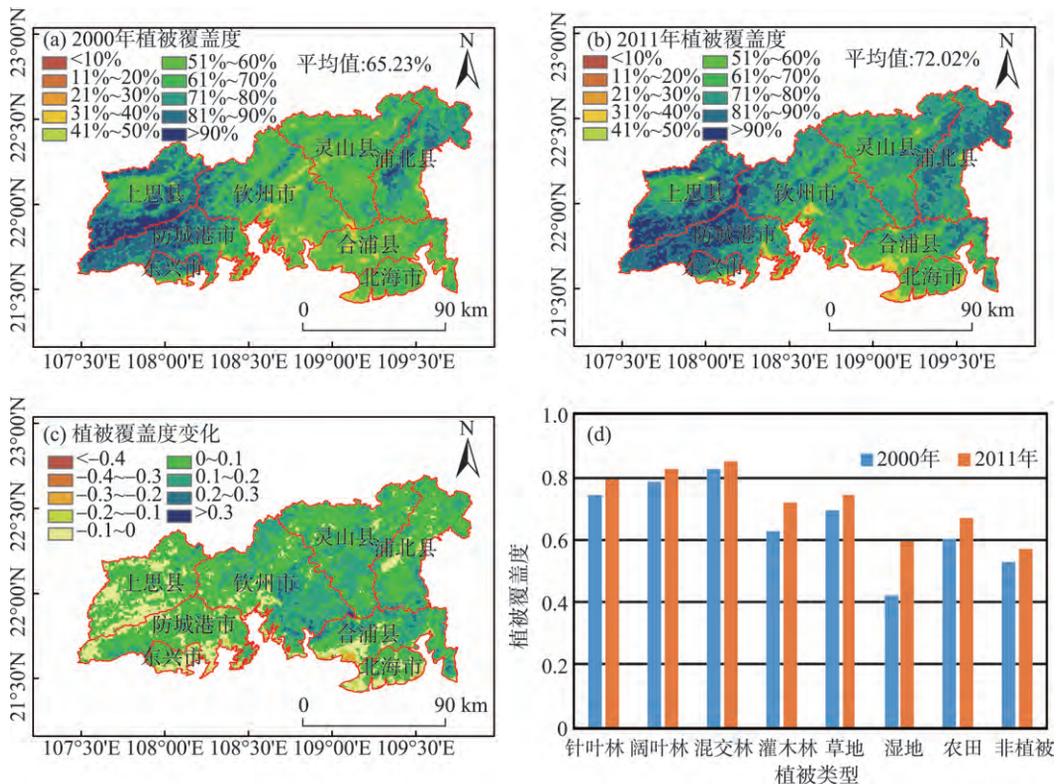


图2 研究区植被覆盖度变异以及不同植被类型植被覆盖度变化

Fig. 2 Spatial distribution variation of vegetation coverage and the vegetation coverage of different vegetation types in the study area

三角洲地带、上思县、防城港市以及北海市海岸带的边缘地带。由不同植被类型植被覆盖度的统计分析结果可知 [图 2(d)], 2000—2011 年研究区各种植被类型植被覆盖度均呈现出增加趋势, 其中湿地的植被覆盖度增加最大 (增加了 17.11%), 混交林增加最小 (增加了 2.33%)。湿地的植被覆盖度之所以增加最多, 与近年来海岸带进行大范围的红树林种植有直接的关系, 而混交林植被类型大部分分布在十万大山地区, 该地区的植被基质大部分为原始森林, 植被覆盖度增幅不明显。

为了更进一步揭示北部湾沿海地区植被覆盖空间变化特征, 通过 ArcGIS 10.2 的区域统计功能分别统计研究区不同地貌单元以及不同海拔高程植被覆盖的空间变化情况 (图 3)。由图 3(a)可知, 研究区植被 *NDVI* 的平均值为 0.55, 其中: 山地的 *NDVI* 值最高, 为 0.63; 丘陵次之, 为 0.58; 冲积台地, 为 0.53; 冲积平原最低, 为 0.50, 这与北部湾沿海地区地表下垫面性质有着直接的关系。由不同海拔高程 *NDVI* 的变化 [图 3(b)] 可知, 北部湾沿海地区 *NDVI* 在 0~200 m 以及 250~400 m 之间时, 随着海拔的升高, 植被覆盖逐渐升高, 其中 200~250 m 植被 *NDVI* 变化比较平缓, 400 m 以上 *NDVI* 几乎趋于稳定值, 这可能与 400 m 以上植被覆盖浓密且大部分为森林植被等植被类型有关。

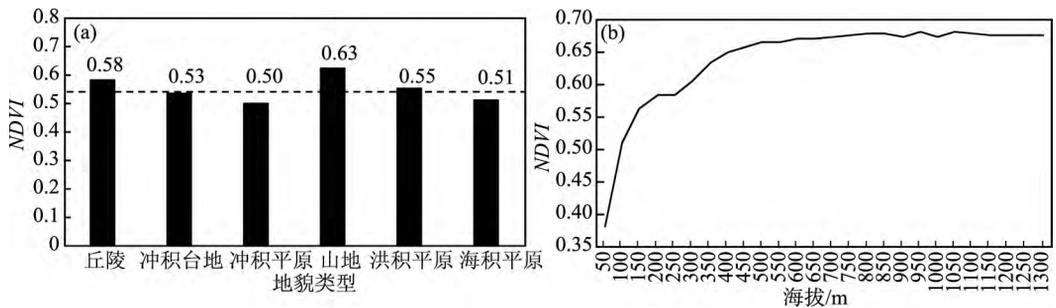


图3 研究区不同地貌类型与不同海拔 *NDVI* 分布

Fig. 3 *NDVI* in different landforms and at different altitudes in the study area

2.1.2 不同植被类型的年际变化特征

北部湾沿海地区过去 12 a 期间各种植被类型 *NDVI* 均值介于 0.522 6~0.653 0 之间, 7 种植物类型平均 *NDVI* 值的大小 (图 4) 排序依次为混交林>阔叶林>针叶林>草地>灌木林 >农田>湿地, 各种 *NDVI* 的平均值 (表 1) 分别为 0.653 0、0.629 6、0.609 1、0.575 7、0.553 2、0.522 6 和 0.444 3。在年际变化尺度上, 不同植被类型 *NDVI* 均呈现出稳步增加趋势, 灌木林和草地的 *NDVI* 平均值均达到了 0.05 的显著性水平, 其中灌木林的 *NDVI* 上升趋势最为明显。各种植被类型 *NDVI* 均值在 2005 年均出现最低值, 究其原因主要是由于 2005—2006 年期间西南地区大旱导致区域性植被覆盖降低。

在不同植被类型中, 针叶林和灌木林的标准差较低, 分别为

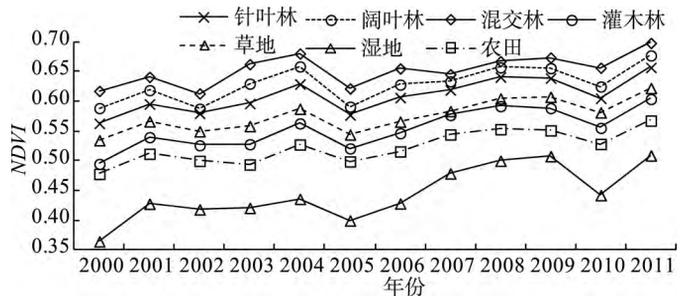


图4 2000—2011 年研究区不同植被 *NDVI* 变化情况

Fig. 4 Changes of *NDVI* for different vegetation types in study area

表1 研究区不同植被类型NDVI最大值、最小值、平均值、标准差和相关关系

Table 1 Maximum values, minimum values, mean values, standard deviations and relationship of NDVI for different vegetation types in the study area

植被类型	最小值	最大值	平均值	标准差	R^2
针叶林	0.089 7	0.787 3	0.609 1	0.058 4	0.594 7
阔叶林	0.132 3	0.808 3	0.629 6	0.065 9	0.466 5
混交林	0.262 7	0.805 0	0.653 0	0.066 2	0.455 3
灌木林	0.155 3	0.762 0	0.553 2	0.053 7	0.680 9*
草地	0.092 7	0.805 7	0.575 7	0.065 2	0.658 2*
湿地	0.267 3	0.667 3	0.444 3	0.066 3	0.646 8
农田植被	0.134 3	0.770 67	0.522 6	0.061 8	0.721 4

注：*表示通过0.05显著性水平检验。

0.058 4和0.053 7，表明在近12 a间这两种植被类型NDVI变化比较均衡和平稳，植被覆盖在2000—2011年没有明显的减少或增加的趋势，主要原因是由于北部湾沿海地区十万大山地区森林比较茂盛，植被年际波动小；而湿地的标准差较高（0.066 3），究其原因主要是由于北部湾沿海地区中的湿地类型主要是红树林湿地，该地类受到人类活动的影响比较剧烈，导致此类植被类型年际波动比较大。2002、2005以及2010年研究区各种植被类型的NDVI整体上出现较小值，与该地区该时期的降水量有着直接的关系，由降水与气温的年际变化曲线[图6(b)]可知，研究区2002、2005以及2010年的降水相对于其他年份较小，因此导致NDVI出现较小值。

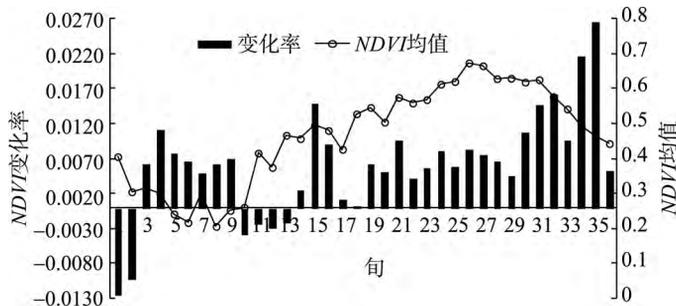


图5 研究区NDVI均值及变化率

Fig. 5 The average NDVI and its variation rate in the study area

2.1.3 研究区逐旬值NDVI变化特征

为了揭示北部湾沿海地区植被NDVI年内变化特征，利用12 a旬值SPOT VEGETATION时间序列数据，采用线性回归方程对研究区每旬NDVI进行趋势分析并求出变化率(图5)。由图5折线可知从植被生长季开始，旬NDVI均值在

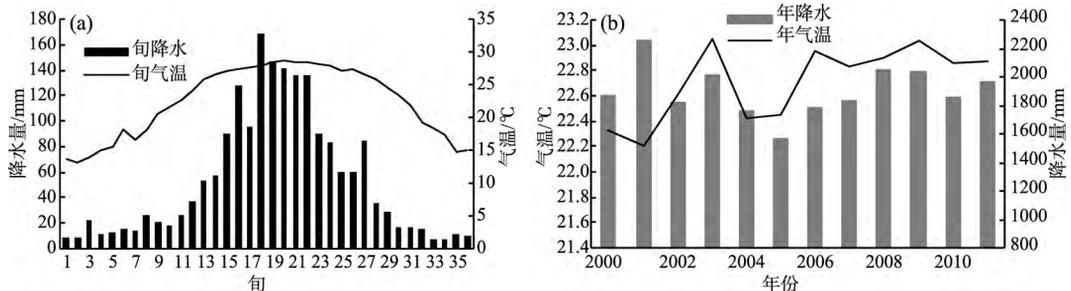


图6 2000—2011年研究区旬降水和旬均温变化以及降水和气温年际变化

Fig. 6 The variation of TP and TT and variation of annual precipitation and temperature in the study area from 2000 to 2011

不同时期变化是不同的, 其值介于0.21~0.67之间, 呈现出“降低—增长—降低”3种趋势。具体来讲植被NDVI均值在第1~6旬呈现下降趋势, 第7旬出现轻微的波动, 至第8旬后NDVI均值呈现稳步上升趋势, 到第26旬达到最大值, 之后处于降低态势; 而从NDVI旬变化率可知, 全年年内NDVI均值在下半年(18旬之后)增加的速率显著高于上半年(18旬之前), 旬NDVI除1和4月呈下降趋势外, 其余月份NDVI均值均处于增加趋势, 其中以5和12月的植被NDVI增加速率最大, 分别为 0.58 a^{-1} 和 0.79 a^{-1} 。

2.2 植被覆盖对旬降水和旬气温的时滞偏相关分析

2.2.1 北部湾沿海地区气候因子特征分析

图6(a)为北部湾沿海地区2000—2011年旬气温和旬降水的均值变化。由图6(a)可以看出, 研究区内气温变化比较平缓, 而降水的波动性比较强。具体来说, 气温呈现出两头低、中间高的正态分布曲线, 气温的最小值出现在1月的第2旬, 平均旬温度为 $14.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 最大值则出现在7月的20旬, 最高旬平均温度为 $28.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。降水量整体上也呈现出正态分布情况, 但是局部地区降水量变化则出现微小的波动, 具体来说, 降水量最小值出现在12月上旬至1月中旬, 而6月下旬至7月上旬降水量达到年内最大值, 除9月下旬的降水量出现小的上升趋势外, 之后降水量处于波动下降趋势。

图6(b)为北部湾沿海地区2000—2011年降水和气温的年际变化曲线图。2000—2011年北部湾沿海地区多年降水量均值为 $1\ 899.95 \text{ mm}$, 降水量最大的年份出现在2001年, 最小的年份则出现在2005年。年平均气温为 $22.43 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 多年平均气温呈现出增加的趋势, 增速为 $0.04 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 。由于北部湾沿海地区处于南亚热带季风气候区, 具有亚热带向热带过渡性质的海洋季风气候特点导致全年降水量高达 $1\ 800 \text{ mm}$ 以上, 年平均气温保持 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。

2.2.2 北部湾沿海地区不同植被类型NDVI与气象因子之间线性关系

为了揭示北部湾沿海地区植被NDVI与气温和降水之间的关系, 该研究分别将北部湾沿海地区36旬NDVI均值与同期降水和气温数据进行相关分析和偏相关分析, 在进行分析之前, 分别对旬NDVI和气象因子数据进行距平处理, 目的是为了消除植被生长季中NDVI和气象因子所具有的增长趋势对相关分析产生影响。由表2不同植被类型NDVI与同期温度和降水的相关分析结果可知, 北部湾沿海地区各种植被类型与温度具有显著的

表2 研究区不同植被类型NDVI与同期的温度、降水之间的线性关系

Table 2 Correlation between climatic variables and NDVI for different vegetation types in the study area

植被类型	相关分析		偏相关分析		
	降水	温度	温度/降水	降水/温度	P
针叶林	0.346 [*]	0.553 ^{**}	0.495 ^{**}	0.208	0.230
阔叶林	0.329	0.530 ^{**}	0.475 ^{**}	0.198	0.254
混交林	0.329 [*]	0.505 ^{**}	0.435 ^{**}	0.171	0.326
灌木林	0.344 [*]	0.574 ^{**}	0.525 ^{**}	0.219	0.206
草地	0.410 [*]	0.617 ^{**}	0.531 ^{**}	0.192	0.269
湿地	0.271	0.483 ^{**}	0.454 [*]	0.199	0.252
农田	0.451 ^{**}	0.675 ^{**}	0.587 ^{**}	0.203	0.241
全区	0.402 [*]	0.617 ^{**}	0.540 ^{**}	0.203	0.243

注: *、**分别表示在0.05、0.01水平(双侧)上显著相关; 偏相关分析中“温度/降水”表示在降水固定条件下, NDVI与温度的相关分析; 同理, “降水/温度”表示在温度固定条件下, NDVI与降水的相关分析。

相关关系，全部通过了0.01的显著性水平，该地区植被NDVI与温度的显著性水平高于NDVI与降水的显著性水平，说明北部湾沿海地区植被覆盖NDVI对气象因子中的温度更为敏感。从偏相关的分析结果可知，在固定气象因子降水量的前提下，各种植被类型除湿地外，其他植被类型NDVI均值与气温的偏相关系数均通过了显著性水平为0.01的检验；而在固定气象因子温度的前提下，各种植被类型NDVI与降水量的偏相关系数普遍比较低，且没用通过显著性水平为0.05的检验。由以上分析可知，在排除气象因子中降水量和气温因子两者之间的影响下，北部湾沿海地区植被覆盖NDVI对气象因子中的温度响应更为敏感，这与崔林丽等关于中国东部植被NDVI对气温和降水的旬响应特征分析结果一致，崔林丽等^[9]认为中国东部植被总体上对气温因子变化的响应大于降水。

2.3 植被覆盖对气候因子的时滞分析

2.3.1 植被覆盖对降水的时滞偏相关分析

图7(a)为北部湾沿海地区旬NDVI与旬降水的时滞偏相关系数，由图7(a)可知，植被覆盖NDVI与降水的时滞偏相关系数整体上呈现出研究区中心地带相关系数高、西北和东南地区相关系数低的空间格局，其值介于-0.05~0.90之间。具体来说，相关系数大于0.75的区域所占的面积比重不足0.01%，分布于钦州市的犀牛角镇与三娘湾一带；相关系数在0.60~0.75的区域占1.95%，主要呈集中连片状分布于钦州市的东部、钦州市东南部的钦州港地区以及北海市的南部地区；相关系数在0.45~0.60的区域所占的比重较大，为25.85%，主要分布在钦州市的大部分地区、防城港市的中东部以及东兴市；相关系数在0.30~0.45的区域所占的面积比重最大，主要分布于灵山县、浦北县与钦州市的西北部、防城港市与上思县的交界十万大山地带；相关系数在0.15~0.30的区域占18.62%，主要分布于上思县、北海市与合浦县的东北部地区；相关系数在0~0.15的区域所占的比重较小，为6.40%，主要分布于上思县的县城所在地、北海市的市区以及合浦县的东南部地区，这部分地区的相关系数之所以比较小，主要原因是由于在城市化的进程中，人类活动如建设用地占用农业地或林地导致城市下垫面性质发生改变，城市及其周边植被NDVI出现大量的零值区，甚至出现NDVI与降水的相关系数小于零的区域。

从北部湾植被覆盖NDVI对降水的滞后时间 [图7(b)] 可以看出，旬NDVI与旬降水的滞后时间多集中于6~9旬之间。其中，滞后9旬的区域所占的比重为17.25%，主要分布于研究区灵山县东北部、浦北县的中部、合浦县和灵山的交界地带，其次，防城港市和

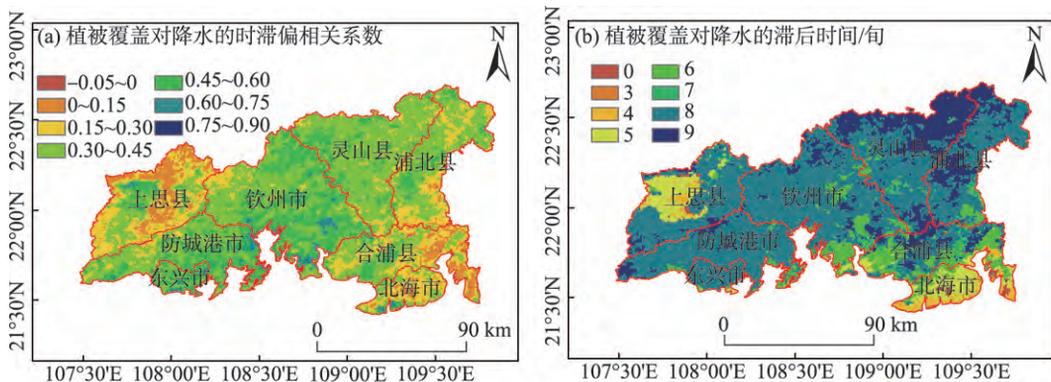


图7 2000—2011年研究区NDVI与旬降水的最大时滞偏相关系数及滞后时间

Fig. 7 Maximum time-lag partial correlation and lag time between NDVI and TP in the study area from 2000 to 2011

上思县的交界十万大山一带也有少许分布；滞后8旬的区域所占的比重最大，为60.96%，主要分布在钦州市的西部地区；滞后6~7旬的区域占12.15%，主要分布于钦州市东南部与合浦县西北交界地带、合浦县与北海市交界地带，其次，钦州至灵山县钦江流域的狭长地带也有部分分布；滞后5旬以下的区域主要集中在十万大山北麓的上思县以及北海市，所占的比重为9.64%，该类地区主要受到地表下垫面性质的影响，缺水地区植被相对于丰水地区植被对降水的响应速度更快，因此滞后时间较小。

2.3.2 植被覆盖对气温的时滞偏相关分析

图8(a)为北部湾沿海地区旬NDVI与旬气温的时滞偏相关系数，由图8(a)可知，植被覆盖NDVI与气温的时滞偏相关系数介于0.51~0.97之间，显著高于NDVI与降水的时滞偏相关系数，空间上呈现出研究区东部相关系数高、西部相关系数低的分布格局。具体来说，相关系数大于0.90的区域所占面积比重较大，为22.84%，主要分布在灵山县、钦江流域中游、北海市、合浦县的西北部以及上思县，该类地区大部分处于农耕地区，地势比较平坦，是北部湾沿海地区的主要粮食产区，农作物一年两熟到三熟，春季随着气温的上升，地温也随着上升，作物开始生长，植被覆盖程度显著增高，因此导致农作物植被对气温的响应比较迅速；相关系数在0.80~0.90的区域所占面积比重最大，为55.20%，主要分布于合浦县的东部及南部地区、钦州市的西部以及东南部地区；相关系数在0.70~0.80的区域面积占16.94%，主要分布于防城港市的中东部地区、东兴市以及上思县的东部地区；相关系数小于0.7的区域所占的比重较小，仅为5.02%，主要分布于防城港市与上思县的交界十万大山地带，由于十万大山地带海拔较高，植被类型以针叶林和常绿阔叶林为主，全年之中植被覆盖变化不大，导致植被NDVI随着气温的变化不太明显，因此导致该类地区旬NDVI与气温的相关程度比较弱。

从北部湾植被覆盖NDVI对气温的滞后时间 [图8(b)] 可以看出，植被对气温的时滞存在着明显的空间差异，滞后时间多以0~5旬为主，6~8旬所占的比重较小。滞后6~8旬的区域主要集中在浦北县的东部以及防城港市的东部地区，所占的比重仅为2.73%；滞后5旬的区域所占比重最大，为47.52%，主要分布于钦州市东南部至浦北县一带；滞后3旬的区域则主要集中在钦州市至灵山县的北部地区，占20%左右；滞后0~1旬的区域主要集中于合浦县的南流江三角洲地带以及钦州市钦江流域下游地区，该类地区水土光热条件较好，大部分处于农耕地区，农作物植被对气温的响应迅速，人类所从事的农耕活

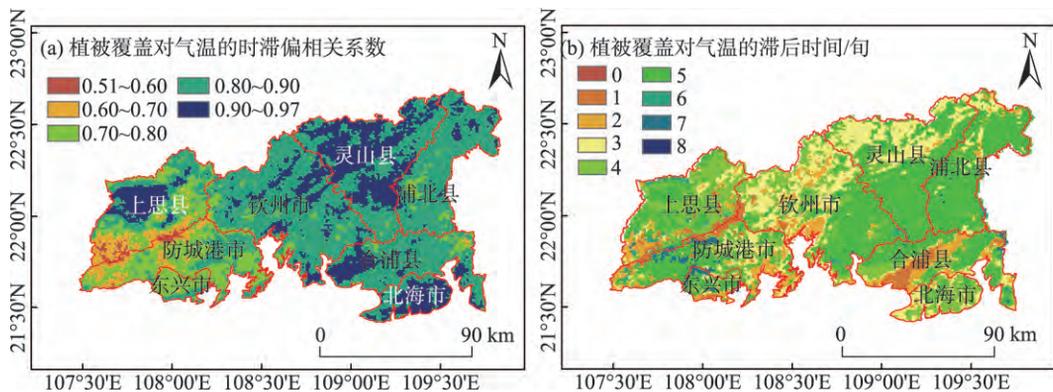


图8 2000—2011年研究区NDVI与旬均温的最大时滞偏相关系数及滞后时间

Fig. 8 Maximum time-lag partial correlation and lag time between NDVI and *TT* in the study area from 2000 to 2011

动改变自然地表植被覆盖类型,使得NDVI与气温的相关程度增强,从而提高热量的利用效率。

2.3.3 不同植被类型NDVI与气象因子的时滞分析

植被类型不仅影响植被NDVI与气象因子中的水热因子的相关程度,而且直接影响植被NDVI对水热因子的响应时间,北部湾沿海地区的植被类型主要有针叶林、阔叶林、混交林、灌木林、草地、湿地和农田等主要植被类型,不同植被类型与降水和气温的时滞偏相关系数与滞后时间如图9。

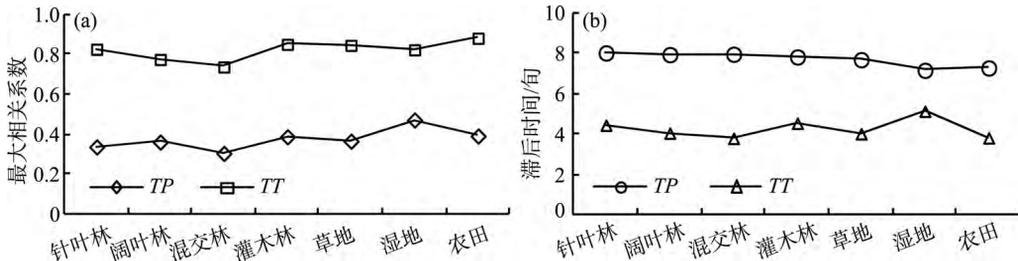


图9 不同植被类型旬NDVI与旬均温、旬降雨最大互相关系数及滞后时间

Fig. 9 Biggest correlation coefficient and lag time between ten-day NDVI and ten-day mean temperature, ten-day precipitation among different vegetations in the study area

1) 从图9(a)中时滞偏相关可以看出,对于不同的植被类型而言,旬均温TT与植被TN(指旬NDVI)的相关程度均高于旬降水TP与植被TN,旬均温TT与TN的相关系数介于0.74~0.88之间,而旬降水TP与TN的相关系数介于0.30~0.47之间。旬均温与不同植被类型的相关系数大小排序为:农业植被(农田)>灌木林>草地>针叶林>湿地>阔叶林>混交林,表明北部湾沿海地区旬均温对农业植被(农田)的影响最大,其次是灌木林、草地、针叶林、湿地、阔叶林,而旬均温对混交林的影响最弱;从旬降水TP对旬TN的时滞偏相关系数可知,二者之间的相关系数在不同植被类型之间的波动性较大,旬降水与不同植被类型的相关系数大小排序为:湿地>农业植被(农田)>灌木林>草地>阔叶林>针叶林>混交林,说明北部湾沿海地区旬降水对湿地的影响最大,其次为农业植被(农田)、灌木林、草地、阔叶林、针叶林,而降水对混交林的影响同样最弱。

2) 由图9(b)中的滞后时间可以看出,对于不同的植被类型而言,旬降水TP与植被TN的滞后时间均大于旬气温TT与植被TN,旬降水TP与TN的滞后时间介于7.15~8.01旬之间,而旬均温TT与TN的滞后时间介于3.15~5.13旬之间,由此说明旬气温与植被NDVI的响应比较快,即北部湾沿海地区气温对植被覆盖的敏感性比较强。从旬降水TP对旬TN的滞后时间可知,不同植被类型二者之间的滞后时间差异较大,旬降水与不同植被类型的滞后时间大小排序为:针叶林>混交林>阔叶林>灌木林>草地>农业植被(农田)>湿地,说明北部湾沿海地区旬降水对湿地的响应最快,其次为农业植被(农田)、草地、灌木林、阔叶林、混交林,而降水对针叶林的响应最慢;旬均温与不同植被类型的滞后时间大小排序为:湿地>灌木林>针叶林>阔叶林>草地>农业植被(农田)>混交林,表明北部湾沿海地区旬均温对混交林的响应最快,其次为农业植被(农田)、草地、阔叶林、针叶林、灌木林,而旬均温对湿地的响应最慢。

综上可知,不同类型植被的生长对气温和降水的响应时间不一致,但与水热条件时

滞偏相关系数越高的植被类型则响应的时间越短。

3 结论

本文以北部湾沿海地区 2000—2011 年 423 景 SPOT-VEGETATION 逐旬 *NDVI* 数据和逐日气温和降水数据为基础, 利用像元二分模型、相关分析、偏相关分析和时滞偏相关分析等数理统计方法, 对研究区植被覆盖时空变化特征及与旬降水和旬均温的相关性及滞后性进行了分析。其主要结论如下:

1) 近 12 a 来, 北部湾沿海地区在 2000—2011 年植被覆盖度平均值整体上呈增长趋势, 植被覆盖度由 2000 年的 65.23% 增加到 2011 年的 72.02%, 增加了 6.79%。

2) 研究区植被生长季旬 *NDVI* 均值介于 0.21~0.67 之间, 在不同时期变化是不同的, 其值呈现出“降低—增长—降低”3 种变化过程。旬 *NDVI* 在第 1~6 旬呈现下降趋势, 第 7 旬出现轻微的波动, 第 8 旬稳步上升, 至第 26 旬达到最大值, 之后处于降低趋势。

3) 研究区多年降水量的均值为 1 899.95 mm, 年平均气温为 22.43 ℃。研究区年内气温变化比较平缓, 而降水的波动性比较强。气温呈现出两头低、中间高的正态曲线分布特征, 气温的最小值出现在 1 月的第 2 旬, 最大值则出现在 7 月的 20 旬。降水量整体上也呈现出正态曲线分布特征, 但是局部地区降水量变化则出现微小的波动。

4) 研究区各种植被类型与温度具有显著的相关关系, 全部通过了 0.01 的显著性水平, 该地区植被 *NDVI* 与温度的显著性水平高于 *NDVI* 与降水的显著性水平, 说明北部湾沿海地区植被覆盖 *NDVI* 对气象因子中的温度更为敏感。

5) 研究区 *NDVI* 与降水的时滞偏相关系数介于 -0.05~0.90 之间, 整体上呈现出研究区中心地带相关系数高、西北和东南相关系数低的空间格局。*NDVI* 与气温的时滞偏相关系数介于 0.51~0.97 之间, 显著高于 *NDVI* 与降水的时滞偏相关系数, 空间上呈现出研究区东部相关系数高、西部相关系数低的分布格局。旬 *NDVI* 与旬降水的滞后时间多集中于 6~9 旬之间, 而旬 *NDVI* 与气温的滞后时间多以 0~5 旬为主。

6) 不同类型植被的生长对气温和降水的响应时间不一致, 但与水热条件时滞相关系数越高的植被类型则响应的时间越短。

4 讨论

该研究采用改进的时滞偏相关分析方法, 借助于 Matlab 2013a 软件进行编程对北部湾沿海地区旬 *NDVI* 与旬气温和降水进行了时滞分析, 该研究较之传统相关分析和偏相关分析方法不仅可以在站点尺度上解决植被覆盖 *NDVI* 与气象因子之间的时滞关系, 而且可以解决植被覆盖与气象因子在不同空间尺度上的时滞特性以及得出植被覆盖在空间上具体的响应时间。因此, 在以后进行植被覆盖与气候因子之间的相互关系研究时, 除了采用常用的相关分析和偏相关分析外, 还可以在研究中引进改进的时滞偏相关分析方法以揭示植被覆盖与气象因子之间的复杂规律。

此外, 本文在利用时滞偏相关分析方法对北部湾沿海地区植被覆盖和气候因子之间的关系分析时得出了一些结论, 但是应该注意到北部湾沿海地区地貌类型多样, 从北到南依次为山地、丘陵、山前平原和滨海湿地, 这种特殊的地貌单元, 使得研究区植被覆盖空间分布规律可能是纬度地带性、经度地带性和垂直地带性地貌的共同作用结果。海

拔、坡度以及坡向主要通过水热以及光照条件对植被 *NDVI* 之间产生影响, 北部湾沿海地区海拔梯度分异明显, 因此, 未来进行北部湾沿海地区植被覆盖与气候因子之间的相关分析时, 应该从不同海拔高程、坡度以及坡向对水热条件和光照条件的敏感性分析方面入手, 找出水热组合变化对植被覆盖本身变化的临界点以及阈值, 这还有待于今后开展进一步的深入研究。

另外, 本研究在进行不同植被类型对水热条件的时滞分析时, 并未将农田植被与不同的植被类型分开进行时滞分析, 农田植被由于受到灌溉等因素的影响可能使得农田植被对气候的响应产生影响, 但是应当注意到, 北部湾地区属于南亚热带季风气候区, 不像北方地区农田需要进行大量的浇灌, 该地区降水量大, 地表地下蓄水能力强, 水分相对于农田植被与其他植被类型都较为充足, 这有助于减少植被对降水的依赖性, 也从另外一个侧面说明北部湾地区植被对降水的响应相对于植被对气温的响应存在着一定的滞后后期。

参考文献(References):

- [1] 潘耀忠, 李晓兵, 何春阳. 中国土地覆盖综合分类研究——基于 NOAA/AVHRR 和 Holdridge PE [J]. 第四纪研究, 2000, 20(3): 270-281. [PAN Y Z, LI X B, HE C Y. Research on comprehensive land cover classification in China: Based on NOAA/AVHRR and Holdridge PE index. Quaternary Sciences, 2000, 20(3): 270-281.]
- [2] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析 [J]. 遥感学报, 1998, 2(3): 204-210. [SUN H Y, WANG C Y, NIU Z, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between *NDVI* and environmental factors by using NOAA time series data. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(3): 204-210.]
- [3] 崔林丽, 史军, 杨引明, 等. 中国东部植被 *NDVI* 对气温和降水的旬响应特征 [J]. 地理学报, 2009, 64(7): 850-860. [CUI L L, SHI J, YANG Y M, et al. Ten-day response of vegetation *NDVI* to the variations of temperature and precipitation in eastern China. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(7): 850-860.]
- [4] 戴声佩, 张勃, 王强, 等. 祁连山草地植被 *NDVI* 变化及其对气候降水的旬响应特征 [J]. 资源科学, 2010, 32(9): 1769-1776. [DAI S P, ZHANG B, WANG Q, et al. Variation in grassland vegetation *NDVI* and its ten-day response to temperature and precipitation in the Qilian Mountains. Resources Science, 2010, 32(9): 1769-1776.]
- [5] 张学霞, 葛全胜, 郑景云. 近 50 年北京植被对全球变暖的响应及其时效——基于遥感数据和物候资料的分析 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(2): 123-130. [ZHANG X X, GE Q S, ZHENG J Y. Impacts and lags of global warming on vegetation in Beijing for the last 50 years based on remotely sensed data and phenological information. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(2): 123-130.]
- [6] POTTER C S, BROOKS V. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of *NDVI*. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(15): 2921-2948.
- [7] 齐述华, 王长耀, 牛铮, 等. 利用 *NDVI* 时间序列数据分析植被长势对气候因子的响应 [J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 91-100. [QI S H, WANG C Y, NIU Z, et al. SVI and VCI based on *NDVI* time-series dataset used to monitor vegetation growth status and its response to climate variables. Progress in Geography, 2004, 23(3): 91-100.]
- [8] 汪业勛, 赵士洞. 陆地碳循环研究中的模型方法 [J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 658-664. [WANG Y X, ZHAO S D. Modelings of terrestrial carbon cycling. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 658-664.]
- [9] MAO D H, WANG Z M, LUO L, et al. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor *NDVI* changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18: 528-536.
- [10] 孙艳玲, 郭鹏, 延晓冬, 等. 内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(3): 407-414. [SUN Y L, GUO P, YAN X D, et al. Dynamics of vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Inner Mongolia. Journal of Natural Resources, 2010, 25(3): 407-414.]
- [11] 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. [ZHANG G L, XU X L, ZHOU C P, et al. Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir Grassland in past 30 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 47-58.]
- [12] 李运刚, 何大明. 红河流域 NDVI 时空变化及其与气候因子的关系 [J]. 山地学报, 2009, 27(3): 333-340. [LI Y G, HE D M. The spatial and temporal variation of NDVI and its relationships to the climatic factors in Red River Basin. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(3): 333-340.]
- [13] ALCARAZ-SEGURA D, CHUVIECO E, EPSTEIN H E, et al. Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: Differences between satellite datasets [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 760-770.
- [14] 张清春, 刘宝元, 翟刚. 植被与水土流失研究综述 [J]. 水土保持研究, 2002, 9(4): 96-101. [ZHANG Q C, LIU B Y, ZHAI G. Review on relationship between vegetation and soil and water loss. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(4): 96-101.]
- [15] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征 [J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268. [MU S J, LI J L, CHEN Y Z, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1255-1268.]
- [16] 龙慧灵, 李晓兵, 黄玲梅. 内蒙古草原生态系统净初级生产力及其与气候的关系 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(7): 781-791. [LONG H L, LI X B, HUANG L M. Net primary productivity in grassland ecosystem in Inner Mongolia and its relationship with climate. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(7): 781-791.]
- [17] 张清雨, 吴绍洪, 赵东升, 等. 内蒙古草地生长季植被变化对气候因子的响应 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(5): 754-764. [ZHANG Q Y, WU S H, ZHAO D S, et al. Responses of growing season vegetation changes to climatic factors in Inner Mongolia Grassland. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5): 754-764.]
- [18] 丁明军, 张懿铨, 刘林山, 等. 青藏高原植被覆盖对水热条件年内变化的响应及其空间特征 [J]. 地理科学进展, 2010, 29(4): 507-512. [DING M J, ZHANG Y L, LIU L S, et al. Seasonal time lag response of NDVI to temperature and precipitation change and its spatial characteristics in Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 2010, 29(4): 507-512.]

The NDVI Characteristics of Vegetation and Its Ten-day Response to Temperature and Precipitation in Beibu Gulf Coastal Region

TIAN Yi-chao^{1a,1c,2}, LIANG Ming-zhong^{1b,1c}

(1. a. College of Resources and Environment, b. College of Architecture Engineering, c. Guangxi Key Laboratory of Beibu Gulf Marine Biodiversity Conservation, Coastal Science and Engineering Laboratory of Guangxi Beibu Gulf, Qinzhou University, Qinzhou 535000, China; 2. National Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Geochemistry Institute of CAS, Guiyang 550002, China)

Abstract: By analyzing the response of vegetation coverage climate change in Beibu Gulf coastal region, this paper aims to provide references for studies on regional vegetation restoration and vegetation productivity. Based on 10-day SPOT-VEGETATION NDVI data and 10-day temperature and precipitation datasets during the period of 2000-2011, this study uses the mathematical-statistic methods, such as dimidiate pixel model, correlation analysis, partial correlation analysis and time-lag partial correlation analysis to explore the quantitative characteristics of temporal-spatial change of vegetation coverage and their correlation with the climatic factors in Beibu Gulf coastal region. The results indicate: 1) In recent 12 years, the vegetation coverage in the Beibu Gulf coastal region increased by 6.79%, from 65.23% in 2000 to 72.02% in 2011. 2) The ten-day average NDVI in growing season ranged from 0.21 to 0.67, showing

the tendency of a little reduce at the beginning, then going up steadily and finally going down again. 3) The *NDVI* of all kinds of vegetations had significant relationship with temperature, all passing the test at significant level of 0.01, and the significance level of correlation between *NDVI* and temperature is higher than correlation between *NDVI* and precipitation, which showed that the vegetation coverage of *NDVI* is more sensitive to temperature. 4) The time-lag partial correlation coefficient of *NDVI* and temperature was significantly higher than that of *NDVI* and precipitation, the lag time of *NDVI* and precipitation being 6–9 ten-day periods, that of *NDVI* and temperature being 0–5 ten-day periods. 5) The growth of different types of vegetations responded to temperature and precipitation differently, and the vegetations whose *NDVI* have higher time-lag partial correlation coefficient with water and heat conditions have short response time. In conclusion, the vegetation in Beibu Gulf coastal region is in recovery in past 12 years, and its response to precipitation and temperature has obvious threshold and is lag in time.

Key words: vegetation; SPOT-VEGETATION; time-lag partial correlation; normalized difference vegetation index; climatic factors; Beibu Gulf coastal region