

DOI: 10.5846/stxb201509091866

成方妍, 刘世梁, 尹艺洁, 吕一河, 安南南, 刘昕明. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其驱动因素. 生态学报, 2017, 37(3): - .

Cheng F Y, Liu S L, Yin Y J, Lü Y H, An N N, Liu X M. The dynamics and main driving factors of coastal vegetation in Guangxi Based on MODIS NDVI. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): - .

基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其驱动因素

成方妍¹, 刘世梁^{1,*}, 尹艺洁¹, 吕一河², 安南南¹, 刘昕明³

¹ 北京师范大学环境学院, 北京 100875

² 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

³ 广西壮族自治区海洋研究院, 南宁 530022

摘要: 归一化植被指数 (NDVI) 可以表征区域植被状况, 目前利用 NDVI 表征沿海区域植被动态的研究仍相对缺乏。以 MODIS NDVI 为源数据, 分析 2000—2014 年间, 广西沿海区域的植被动态、NDVI 动态趋势和持续性, 以及 NDVI 动态的主要驱动因素。结果表明: 在海岸线 10 km 区域范围内, NDVI 均值较高 (0.71), 年际间波动较小 (SD 为 0.02)。空间上, NDVI 呈现出陆地高、滨海和河口区域低的分布特征, 不同类型植被 NDVI 差异显著, 以广泛分布于陆地的林地最高 (0.76), 以滨海湿地植被 (0.52) 和其他类型植被 (未利用地等) 最低 (0.50)。植被动态趋势 (斜率 k) 表明, 57% 的林地表现为改善趋势 ($k \geq 0.002$), 而 52% 的滨海湿地则表现为退化趋势 ($k \leq -0.002$)。利用 Hurst 指数对生态持续性进行分析, 林地、旱地表现为持续改善, 滨海湿地呈现持续退化的趋势。驱动因素分析表明, 气象因素对植被 NDVI 的影响均不显著, NDVI 的动态主要受地形特征和人为因素的影响, NDVI 及其动态趋势与复合地形指数和距河流的距离多呈负相关, 与坡度、高程、距交通线路和城镇的距离多为正相关。总体上, 区域内 NDVI 动态趋势以良性发展为主, 但滨海湿地等呈现持续退化的区域需持续关注。

关键词: 滨海区域; 时空变化; 趋势分析; Hurst 指数; 驱动因素

The dynamics and main driving factors of coastal vegetation in Guangxi Based on MODIS NDVI

CHENG Fangyan¹, LIU Shiliang^{1,*}, YIN Yijie¹, LÜ Yihe², AN Nannan¹, LIU Xinming³

¹ The School of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

² State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

³ Marine Research Academy of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, China

Abstract: The normalized difference vegetation index (NDVI) can be used to characterize a region's vegetation status, however, there have been few studies on the NDVI dynamics of coastal wetland areas. Using MODIS NDVI as the data source, we analyzed the vegetation dynamics, NDVI trend, and the main driving factors of NDVI in the coastal wetland areas of Guangxi from 2000 to 2014. The results showed that in the coastal wetland area with a 10-km buffer, the mean NDVI value was relatively high (0.71). However, annual fluctuations were more stable (SD = 0.02). Spatially, NDVI showed a higher trend in terrestrial land and a lower trend in coastal and estuarine areas. The NDVI values of various vegetation types were significantly different, and the highest value was recorded for woodland, which is widely distributed in the terrace (0.76), and the lowest value was found for coastal wetland (0.52) and other vegetation types (e.g., bare land).

基金项目: 国家自然科学基金 (41571173); 国家科技支撑计划项目 (2014BAK19B06); 广西壮族自治区海洋研究院自主课题

收稿日期: 2015-09-09; **网络出版日期:** 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shiliangliu@bnu.edu.cn

(0.50). The vegetation trend (slope k) showed that 57% of the woodland was improving ($k \geq 0.002$), and 52% of the coastal wetland was degrading ($k \leq -0.002$). The Hurst index of the sustainability of vegetation showed that forest land and dry land have been continuously improving, while the coastal wetland showed a trend of continuous degradation. The influence of meteorological factors on NDVI dynamics was not significant, and the NDVI was mainly affected by topographic characteristics and human activities. NDVI and its trend were negatively correlated with comprehensive topographic indexes and the distance from the river, and positively correlated with slope, altitude, and the distance from roads and valleys. Altogether, most regions showed positive development, but the coastal wetland exhibited degradation and needed to be improved.

Key Words: coastal wetland area; temporal and spatial dynamics; trend analysis; Hurst index; driving factor

植被动态受气候条件、地形地貌以及人类活动的影响,是反映区域生态环境状况的重要指标^[1-3]。归一化植被指数(NDVI)削弱了大气层和地形阴影的影响,对地表植被的覆盖程度非常敏感,是检测和指示植被覆盖状况和动态的常用指标之一^[4-5]。NDVI 时序数据在植被监测、物候预测和灾难预测等方面均得到了广泛的应用^[4, 6]。

NDVI 数值的大小直接反映了地表植被的覆盖程度,其年内波动可用于表征地表植被的物候期,李加林^[7]和耿利宁等^[8]研究发现,NDVI 年内波动与互花米草和水稻的主要物候期一致;将 NDVI 与其他指数结合分析,则可用于评价干旱、水土流失、雪灾等对区域的影响^[9-11]。以往研究从不同的时间和空间尺度上对 NDVI 的分布特征进行了研究^[1, 12, 13],总体上,全球植被活动呈增强的趋势^[14]。NDVI 动态受到海拔、降雨、气温、土地利用程度、人口密度、经济水平等自然因素和人为因素的共同影响^[1, 15-16],Park 等^[15]发现,高纬度寒冷区域比低纬度地区对气象因素的响应更强烈,陈云浩等^[17]则发现干旱区域的 NDVI 值受到降水量的影响更大,然而,目前对热带湿润沿海区域 NDVI 动态驱动因素的研究较少。我国海岸带资源综合调查简明规程规定海岸带的陆域部分为海岸线向陆延伸 10 km 的等距线^[18],而以往研究则多以行政界线为研究区的陆域界限^[16, 19-20]。滨海区域受海陆共同作用,是脆弱的生态敏感区,但由于物质、环境资源丰富,滨海区域得到多方面的综合开发,造成滨海生态环境发生了明显的变化。此外,滨海地带性植被多有明显的带状分布特征,如红树林、防护林带等,其宽度通常不超过几千米。MODIS NDVI 数据可以识别较窄的带状地物(李加林, 2006),且 MODIS 数据免费,易于获取,波段宽度较小、信息量大,从而适用于滨海植被的监测,且时间分辨率高,虽然 MODIS 的空间分辨率较弱,但是本研究主要是针对整体海岸线进行研究,从总体上能够广泛、及时地掌握滨海植被的变化与出现的问题^[21]。

广西沿海的湿地面积广阔,资源丰富,具有较高的生态功能和社会价值。近年来,随着广西沿海经济的快速发展,人类活动愈发密集,大量的滨海湿地区转变为咸水养殖场,过度的开发利用,导致处于海路交互核心区的滨海过渡带的生态环境敏感而脆弱,严重破坏了滨海湿地区域的生态平衡^[22]。该文选取 2000—2014 年广西沿海区域生长季盛期的 MOD13Q1 影像,沿海岸线向内陆方向设定 10 km 的缓冲区作为研究区域,利用最大值合成法分析 NDVI 时间序列的时空分布动态,采用一元线性回归方程斜率 k 和 Hurst 指数研究不同类型植被 NDVI 的动态趋势特征以及持续性,探讨 NDVI 时间序列波动的主要驱动因素,为沿海区域植被的利用和保护提供基础数据和理论依据。

1 研究地概况和研究方法

1.1 研究区概况

广西沿海区域位于广西壮族自治区最南端,从东至西分属北海市、钦州市和防城港市管辖。海岸线东起两广交界的洗米河口,西至中越边界的北仑河,长 1 629 m,有 6 条主要河流入海。属于亚热带海洋性季风气候,广西沿海区域陆域自海岸线向陆延伸 10 km 范围内地形海拔均小于 300 m。海岸各地年平均气温在

21—24 ℃ 之间,最高 38 ℃,最低 -2 ℃;年降水量在 2 141—2 771 mm 之间,平均年蒸发量在 1 428—1 831 mm 之间;年平均相对湿度为 79%—82%;年日照时数在 1 540—2 232 h 之间。广西海岸带天然植被包括针叶林、常绿季雨林、红树林、竹林等类型,针叶林主要为南亚松林和马尾松林,常绿季雨林主要有箭毒木片林、格木片林等,红树林主要树种有白骨壤、桐花树等,竹林代表种为刺竹;人工植被有经济林、防护林、农作物群落及少量的香蕉果园。沿海区域人工地貌突出,河口三角洲及海积平原已大面积开辟为海水养殖场。

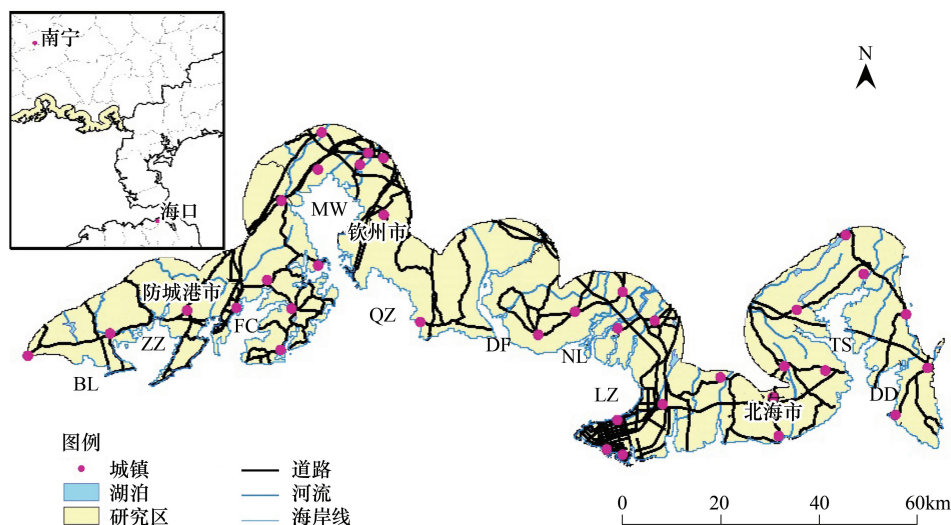


图 1 广西沿海区域位置示意图

Fig.1 Geographical location of the coastland of Guangxi

BL:北仑河口; ZZ:珍珠湾; FC:防城港市; MW:茅尾海; QZ:钦州市; DF:大风江口; NL:南流江口; LZ:廉州湾; TS:铁山港; DD:丹兜海

1.2 研究数据

该研究中 NDVI 数据来源于美国宇航局 (NASA) 的 MODIS 植被指数产品数据 MOD13Q1, 该数据基于最大合成法, 产品数据经过几何和大气校正, 每 16 d 合成, 空间分辨率 250 m。该研究选取 2000 至 2014 年 7 至 9 月的影像为研究对象, 该时期也是年内植被覆盖程度最高的月份^[19], 利用 Envi4.7 对原始影像进行预处理。

鉴于滨海湿地具有带状特征^[7], 以海岸线为基线, 1 km 为间隔, 从海岸线向内作 15 km 的环状缓冲带^[23], 土地利用变化在 7 km 处趋于平稳, 在 13 km 处又出现波动 (图 2), 故研究区域以广西海岸线为起点, 向陆延伸 10 km 的带状区域。基于对广西滨海湿地的调查发现, 滨海红树林、潮间带等分布范围在 3 km 范围内, 对于景观动态来说, 10 km 范围内的植被的变化也是最为显著区域。

土地覆被数据产品 (MCD12Q1), 是综合 MODIS TERRA 和 MODIS AQUA 土地覆被数据产品产生, 考虑研究区内主要的植被类型, 将区域内土地覆被类型简化为 6 类: 林地、旱地、水田、居住地 (包括交通用地)、湿地和其他 (荒地、未利用地等)。广西滨海区域的 DEM 高程数据通过全国 1:25 万 DEM 提取和计算, 气象数据来源于国家气象信息中心。

1.3 分析方法

探讨沿海区域植被覆盖的年际变化规律, 利用最大值合成法获取每年生长季盛期 (7 至 9 月) NDVI 影像

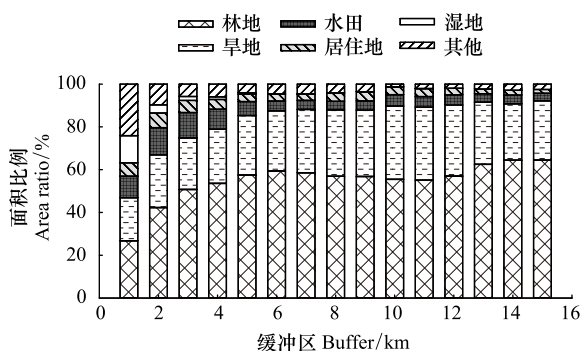


图 2 不同尺度缓冲区内土地利用结构

Fig.2 Land-use composition of different buffer zones

的最大值,代表当年的植被覆盖状况^[24]。分析研究区域 NDVI 空间分布特征时,则取 15 年 NDVI 的平均值,以此代表研究区多年的平均植被覆盖情况。采用趋势线分析法模拟植被覆盖的年际变化趋势^[25],利用 Hurst 指数指示变化趋势的生态持续性^[26],并在此基础上分析植被覆盖变化的主要驱动因素。同时,利用 ANOVA 单因素方差分析不同类型植被覆盖程度差异的显著性水平。

1.3.1 NDVI 的年际变化趋势

NDVI 的年际变化趋势,以各栅格多年数值最小次方线性回归方程的斜率表示^[27],具体公式如下:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times M_{NDVI,i}) - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n M_{NDVI,i}}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: n 为 15, i 为年序号, $M_{NDVI,i}$ 为第 i 年的 NDVI。其中,当 $k > 0$ 时,说明植被覆盖在 15 年间的变化趋势是增加的;反之,则减少。当前, k 值变化趋势的划分并没有统一标准^[25, 28-29],考虑研究区中 NDVI 的整体分布情况,通过计算 k 值的变化,研究发现 k 值基本符合正态分布,故利用等间距划分法,将植被覆盖变化划分为 5 个等级,分别为退化($k \leq -0.002$)、轻度退化($-0.002 \leq k < -0.001$)、稳定不变($-0.001 \leq k < 0.001$)、轻度改善($0.001 \leq k < 0.002$)和改善($k \geq 0.002$)。ANOVA 结果表明,不同等级间差异显著($F_{4, 68\ 021} = 222\ 400$, $P < 0.001$)。

1.3.2 植被变化趋势的持续性

Hurst 指数(H)是定量描述时间序列长程依赖性的主要方法之一,当 $0.5 < H < 1$ 时,时间序列具有长程依赖性,表现为持续性,即未来变化与过去的变化趋势一致,过去为增加趋势的区域在将来也将继续增加,反之亦然,且 H 越接近 1,持续性越强;当 $H = 0.5$ 时,则说明 NDVI 时间序列为随机序列,不存在长期相关性;当 $0 < H < 0.5$ 时,则表明时间序列具有反持续性,即未来的变化趋势与过去的变化趋势相反^[12]。其计算步骤如下,对于时间序列 $NDVI_i, i = 1, 2, \dots, n$:

$$\overline{NDVI}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} NDVI_i, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$S_\tau = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (NDVI_i - \overline{NDVI}_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$X_{(i,\tau)} = \sum_{i=1}^i (NDVI_i - \overline{NDVI}_\tau), 1 \leq i \leq \tau \quad (4)$$

$$R_\tau = \max_{1 \leq i \leq \tau} X_{(i,\tau)} - \min_{1 \leq i \leq \tau} X_{(i,\tau)}, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

对于比值 $R_\tau / S_\tau \triangleq R / S$,若 $R / S \propto \tau^H$,则说明该时间序列存在 Hurst 现象。 H 值由 $\lg(R / S)_n = a + H \times \lg(n)$ 利用最小二乘法拟合得到。由于 τ 值小时散点稀疏,而 τ 值大时散点则相对过于密集,这样在利用最小二乘法线性拟合时斜率会受到权重的影响,研究取 $\tau \geq 4$ ^[26]。

1.3.3 植被 NDVI 变化的驱动因素

考虑到光、热、水是影响植物生长的主要气象因素,选取月气温、降水和日照数据(东兴市、防城港市、钦州市和北海市 4 个气象站点平均),分析研究区内 NDVI 值与气象因素的相关性。由于气象因素之间可能存在的相关性^[3],探讨 NDVI 与不同气象因素的相关关系时采用偏相关分析。该研究的 NDVI 影像取自 7 至 9 月,考虑到气象因素对植被的影响可能具有“时滞效应”,因此从 6—9 月的气象数据中,分别提取单月、双月及 3 个月平均值进行相关性分析。

除了气候因素,地形特征和人类活动也是影响植被覆盖时空变化的重要因素^[16,30]。参考以往研究,选择复合地形指数 CTI(表征空间位置的综合水热条件^[31]),坡度(%),坡向(按顺时针方向从正北的 0° 到 360°)和高程表征地形特征^[16,31-32]。从人类活动角度出发考虑,城镇是人类活动的核心区域,而河流往往是人类居住区的重要考虑因素,不同居住区间又以道路网络相连接,考虑研究区位于滨海区域并参考以往研究^[16,31,33],该研究选取了四个因素代表人类活动对植被覆盖的干扰,分别为距河流、交通路线、城镇和海岸线

的距离。基于 DEM 数据,利用 ArcGIS10.2 的空间分析模块与 Geomorphometry 软件得到 CTI,坡度,坡向,高程,距河流距离、距交通路线距离、距城镇距离和距海岸线距离。分别分析区域内各栅格多年平均 NDVI 和 k 值与以上影响因素的相关性,探讨 NDVI 年际波动的主要驱动因素。由于坡向是一环形变量,分别对其求正弦、余弦值进行变换,生成 2 个新的亚变量,进行相关分析,正弦值表示朝东的程度,余弦值表示朝北的程度^[32]。

2 结果和分析

2.1 植被覆盖的时间变化特征

2000 至 2014 年间,沿海区域 NDVI 在 0.68 至 0.76 之间波动,NDVI 的多年平均值为 0.71,年际间差异较小,SD 为 0.02(图 3)。其中,2007 至 2011 年间,区域 NDVI 值偏高,波动在 0.71 至 0.76 之间。

2.2 植被覆盖的空间分布特征

广西沿海区域 NDVI 的空间分布呈现出陆地高,滨海和河流下游低的分布特征(图 4),陆地土地覆被类型多为林地和旱地,而滨海和河流下游区域上居住区和其他覆被类型广泛分布。NDVI 小于 0.1 的区域主要分布在防城港湾、钦州湾、大风江口、南流江口和铁山港湾沿岸,多为其他覆被类型(图 4、5)。整体上,NDVI 大于 0.7 的高植被覆盖区域占区域总面积的 70%,0.3—0.7 之间的植被覆盖区域占 26%,NDVI 小于 0.1 的区域占 1%。

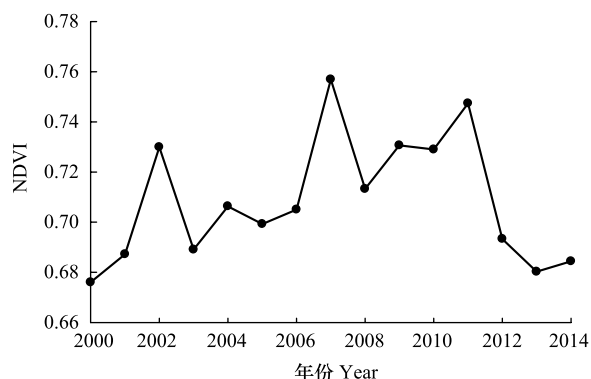


图 3 2000—2014 年广西沿海区域 NDVI 的年际变化

Fig. 3 Inter-annual variations of NDVI in the coastland of Guangxi from 2000 to 2014

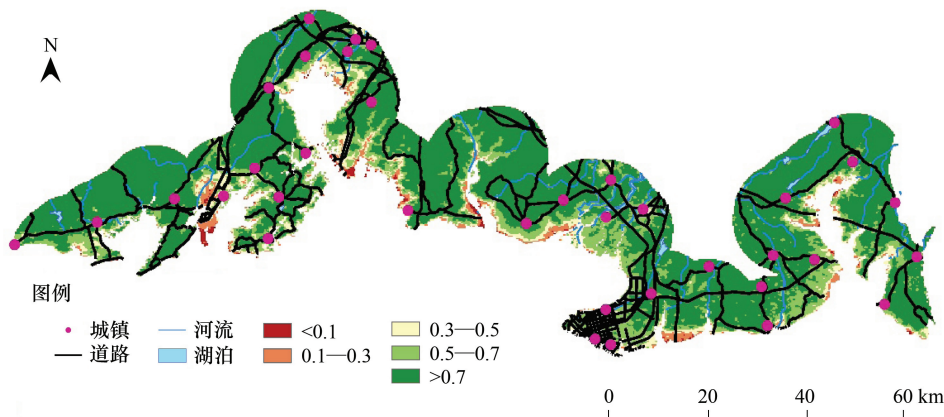


图 4 2000—2014 年广西沿海区域 NDVI 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of NDVI in coastland of Guangxi from 2000 to 2014

研究区域内,不同土地覆被类型的 NDVI 差异极显著 ($F_{5,89} = 182, P < 0.001$),但 NDVI 年际波动差异并不显著 ($P > 0.05$),因此以 15 年的平均 NDVI 代表不同土地覆被类型的植被覆盖状况。不同土地覆被类型间,以林地的平均 NDVI 值最高,旱地和水田其次,居住区居中,湿地和其他最低(表 1)。其中,林地、旱地和水田 NDVI 主要分配在 >0.7 的范围内,而居住地、湿地和其他则多分布在 0.5 附近。

2.3 植被动态趋势及其持续性分析

2000 至 2014 年间,研究区域内有 46% 的植被得到改善,多分布于河流中上游的陆地上;退化土地则集中于滨海和河流中下游地区,约占总面积的 27%;轻度退化、轻度改善以及稳定不变状态的土地斑块较为分散,分别占总面积的 8%、14% 和 6%(图 6)。不同土地覆被类型中,57% 的林地得到了改善,52% 的湿地呈现出退

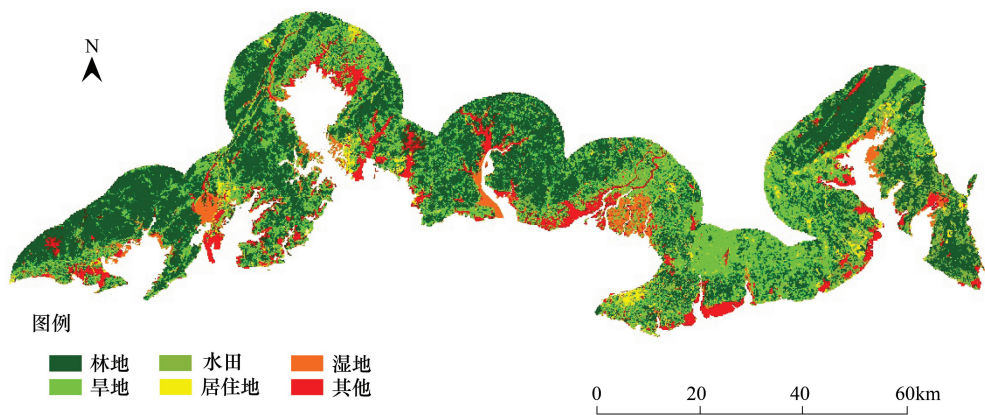


图 5 广西沿海区域土地覆被类型分布
Fig.5 Distribution of land-use types of coastland of Guangxi

化趋势,其他的覆被类型则多处于相对稳定的状态(图 7)。

表 1 不同土地覆被类型 NDVI 比较

土地覆被类型 Types		NDVI	面积比例 Area ratio	分配比例 Allocation ratio/%				
				<0.1	0.1—0.3	0.3—0.5	0.5—0.7	>0.7
林地 Forest land		0.76	47%	0%	0%	1%	9%	89%
旱地 Dry land		0.72	26%	0%	0%	3%	19%	78%
水田 Paddy fields		0.70	8%	0%	0%	3%	33%	63%
居住区 Residential quarters		0.62	5%	0%	3%	21%	37%	39%
湿地 Wetland		0.52	4%	1%	2%	43%	46%	8%
其他 Others		0.50	9%	0%	14%	34%	36%	16%

将 NDVI 动态趋势与 Hurst 指数叠加,得到 NDVI 动态趋势持续性的分布(图 8)。持续改善的植被面积占研究区总面积的 33%,多分布于林地、旱地等 NDVI 相对较高的土地覆被类型中;持续退化的植被较少,所占比例为 17%,但多分布于湿地、其他等 NDVI 偏低类型中。此外,未来变化趋势无法确定的区域占总面积的 30%,多集中于滨海区域(表 2)。

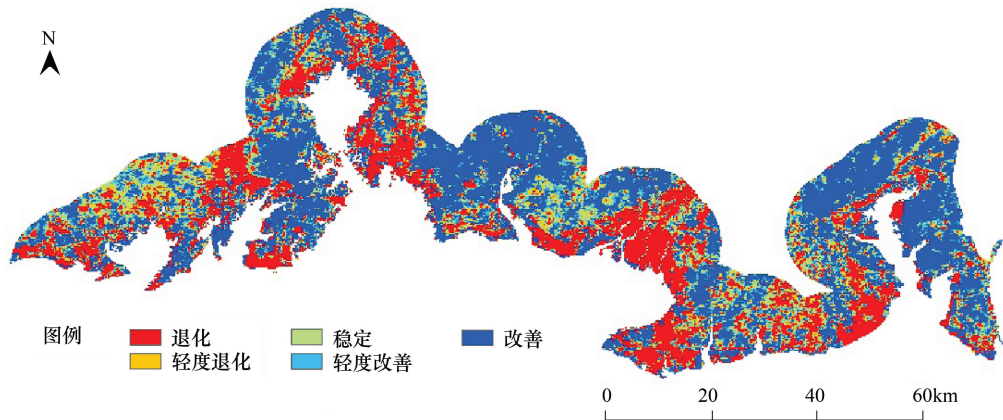


图 6 2000—2014 年广西沿海区域 NDVI 动态趋势
Fig.6 Trends of NDVI in coastland of Guangxi from 2000 to 2014

表 2 不同土地覆被类型 NDVI 变化特征统计

Table 2 Statistics of NDVI variation character by different land-use types

土地覆被类型 Types	分配比例 Allocation ratio/%					
	持续退化 Persistence Degradation	持续轻度退化 Persistence slightly degradation	持续稳定不变 Persistence Stableness	持续轻度改善 Persistence Slightly improvement	持续改善 Persistence Improvement	不确定 Uncertainty
林地 Forest land	18%	4%	10%	9%	34%	26%
旱地 Dry land	18%	5%	10%	8%	37%	23%
水田 Paddy field	23%	5%	11%	6%	31%	25%
居住区 Residential quarters	30%	5%	9	10%	17%	30%
湿地 Wetland	29%	1%	3%	4%	16%	47%
其他 Others	23%	4%	8%	4%	22%	40%

2.4 植被覆盖动态的驱动因素分析

沿海区域 6 至 8 月的气象因素(气温、降水量和日照时间),两两之间相关性多显著(图 9),故分析气象因素与 NDVI 相关性时,采用偏相关分析。然而,气象因素与区域内不同土地覆被类型 NDVI 的相关性均不显著($P>0.05$)。

坡向的正弦和余弦值、距海岸线距离与区域及其不同土地覆被类型的 NDVI 和 NDVI 动态趋势相关性多不显著,故在表 3 中不再列出以上 3 个变量。NDVI 和 NDVI 动态趋势与其他变量则呈现出较好的相关性,二者与 CTI 和距离河流的距离多为负相关,与坡度、高程、距交通线路和城镇的距离则多为正相关。

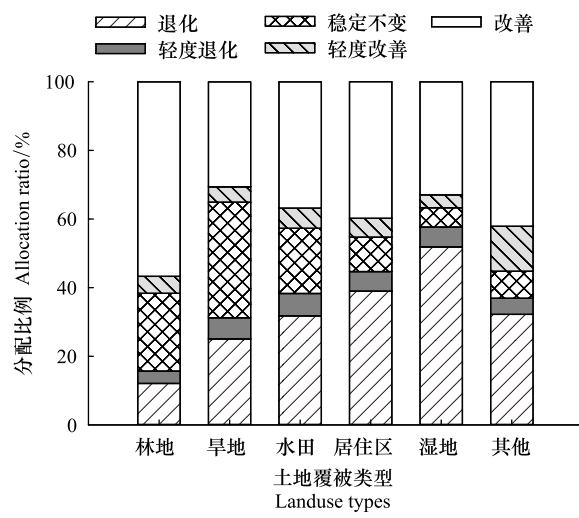


图 7 不同土地覆被类型 NDVI 动态趋势统计

Fig.7 Statistics of NDVI trend by different land-use types

3 讨论

广西沿海区域整体的 NDVI 值较高,而且年际波动较小,与以往的研究结果相似^[19,34]。研究区内 NDVI>0.7 的区域占区域总面积的 70%,NDVI 不足 0.3 的区域仅占 4%,这导致区域整体的 NDVI 值偏高。此外,研究区域为南亚热带海洋性季风气候,常年高温多雨,植被

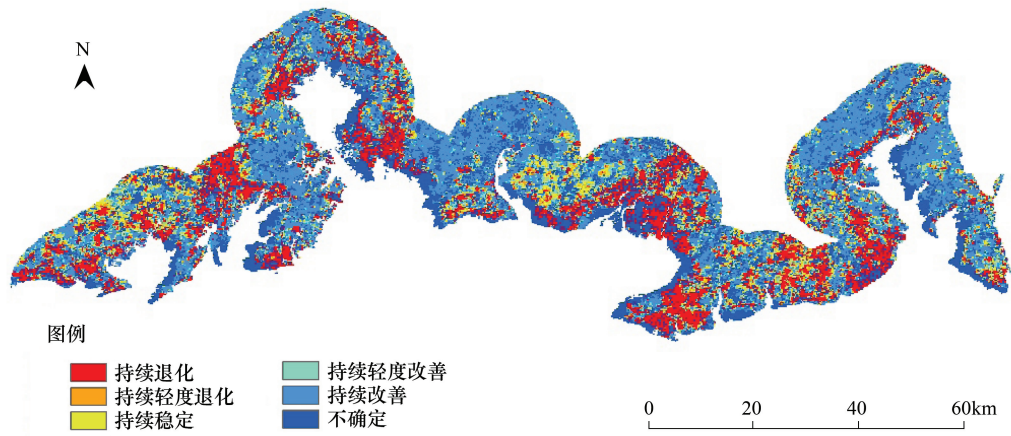


图 8 基于 Hurst 指数的 NDVI 变化特征空间分布

Fig.8 Spatial distribution of NDVI variation character based on Hurst index

覆盖率高且多为常绿植物,在非极端天气影响下,NDVI 的年际波动程度较低。空间上,区域 NDVI 分布表现为陆地高,滨海和河流下游低的趋势,这与土地覆被类型的分布有关,陆地多为林地和旱地,而滨海和河流下游区域则多分布着居住区、湿地和其他覆被类型。

2000 至 2014 年间,研究区内约一半的植被得到改善,改善植被多为林地,这与当地政府在低山丘陵区大面积植树种草有关^[19];退化区域则多集中于滨海和河流下游,这些区域内大量分布着居住区和其他类型植被,且交通网络密布。值得注意的是,林地等 NDVI 较高的区域通常表现为持续改善趋势,而湿地等 NDVI 低的区域则多表现为持续退化。林地等覆被类型由当地政府的扶持得以持续改善,而大量的湿地则开发为港口、道路、养殖场等,从而呈现为退化趋势,在未来的开发利用活动中应加强对滨海湿地等 NDVI 偏低区域的关注。

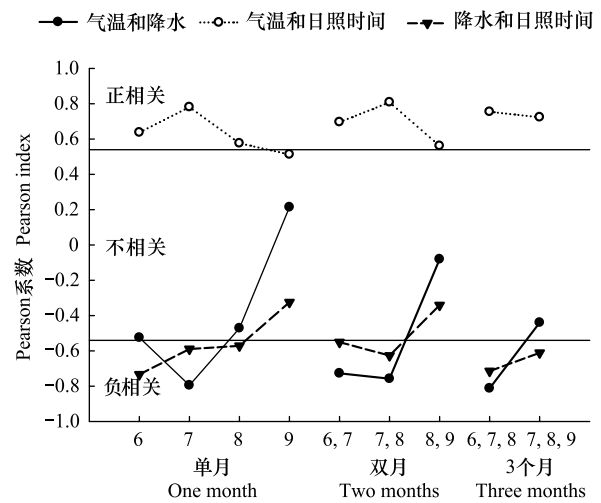


图9 气温、降水和日照时间的相关性分析

Fig.9 Correlation analysis between temperature, precipitation and sunshine duration

表 3 NDVI 及其变化趋势与影响因素的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of NDVI or NDVI trend with their impact factors

变量 Variation	土地覆被类型 Types	CTI	坡度 Slope	高程 Elevation	距河流距离 Distance from river	距交通线路距离 Distance from traffic line	距城镇距离 Distance from valley
NDVI	区域	-0.321 **	0.272 **	0.313 **	-0.166 **	-0.020 **	-0.024 **
	林地	-0.184 **	0.286 **	0.280 **	-0.149 **	0.039 *	0.045 **
	旱地	-0.212 **	0.258 **	0.283 **	-0.169 **	—	0.117 **
	水田	-0.061 *	0.193 **	0.251 **	-0.165 **	0.112 **	—
	居住区	-0.139 **	0.214 **	0.250 **	-0.276 **	—	—
	湿地	-0.124 *	—	0.215 **	-0.145 *	—	-0.181 **
	其他	-0.080 **	0.253 **	0.251 **	-0.174 **	-0.077 *	—
k	区域	-0.081 **	0.082 **	0.094 **	-0.091 **	0.036 **	0.096 **
	林地	-0.114 **	0.135 **	0.128 **	-0.055 **	0.117 **	0.110 **
	旱地	-0.116 **	0.132 **	0.167 **	-0.101 **	0.042 *	0.149 **
	水田	—	0.104 **	0.132 **	-0.069 *	0.088 **	0.056 *
	居住区	-0.071 *	0.112 *	0.097 **	-0.239 **	—	—
	湿地	-0.155 **	0.244 **	—	—	-0.137 *	0.270 **
	其他	—	0.156 **	0.116 **	-0.147 **	—	0.184 **

* $P<0.05$, ** $P<0.01$. 复合地形指数 CTI

土地覆被分类的不同、植被下垫面与 NDVI 分辨率也会影响计算的结果,在该研究中,土地覆被类型分类体系与 NDVI 来源相同,而且在 NDVI 时间选择上,选择 NDVI 数值最大的月份。另外,为了消除分辨率的问题,研究的尺度较大,能够体现变化的总体趋势。通过和实地的调研比较,研究结果与实际情况较为符合。

植被 NDVI 及其动态趋势与气象因素的相关性并不显著,而多与地形特征和人为因素呈现显著相关性,这与以往对沿海区域的研究相似^[17,35]。研究区域内,尽管 4 个气象站点的年均温 ($F_{14, 59} = 68.78$, $P<0.001$)、年降水量 ($F_{14, 59} = 7.98$, $P<0.001$) 和年日照时数 ($F_{14, 59} = 11.61$, $P<0.001$) 的年际变化差异均显著,但其与 NDVI 相关性并不显著这可能与 NDVI 动态更多的受到地形特征和人类活动的干扰有关。广西沿海区域海拔

波动范围为-6 m 至 290 m 之间,高海拔区域集中分布于西北和东北的山地;在研究区内,以 1 km×1 km 为分析窗口,逐个提取地形起伏度^[36],滨海区域平均地形起伏度为 0.02,最大起伏度为 0.55,整个区域内地形波动较小,但 NDVI 及其动态趋势与地形特征因素的相关性却多显著。NDVI 及其动态趋势与 CTI 多为负相关,由于 CTI 与坡度有关,因此这种负相关间接反映了植被动态与坡度的关系^[32];沿海区域 NDVI 及其动态趋势与坡度和高程表现为正相关,与坡向则多不相关,这与刘亚龙等^[2]和马宗文等^[16]的研究结果相似,原因可能是平坦地区更利于城市建设,以及人为在低山丘陵区的大面积植树。NDVI 及其动态趋势与距河流的距离呈现为负相关,可能与研究区多处于河流下游,而河口、三角洲等地区近年来多有开发活动有关;距交通线路、城镇的距离与 NDVI 表现为正相关,可能与居住区和交通线路绿化区有关。

4 结论

该研究基于 MODIS NDVI 数据,利用 NDVI 时间序列,采用最大值合成法、一元线性回归方程斜率和 Hurst 趋势指数,探讨了沿海区域植被的时空分布特征及其影响因素。结果表明,广西沿海区域 NDVI 值较高,但年际波动不大,空间上则表现为陆地高,滨海和河流下游低的趋势,这主要与土地覆被类型的空间分布有关,林地、旱地等高 NDVI 类型广泛分布于陆地,而湿地等低 NDVI 类型则多分布于滨海和河流河口。此外,林地在人工大量植树造林的基础上表现出持续改善趋势,而滨海、河口区域的高强度开发则造成湿地呈现持续退化趋势。广西沿海植被覆盖的变化与气象因素相关性并不显著,主要受到地形特征和人类活动的影响,因此,在未来的开发利用活动中应加强对滨海湿地和河口区域的关注。

参考文献 (References):

- [1] Lamchin M, Park T, Lee J Y, Lee W K. Monitoring of vegetation dynamics in the mongolia using MODIS NDVIs and their relationship to rainfall by natural zone. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2014, 43(2): 325-337.
- [2] 刘亚龙,王庆,毕景芝,张明明,邢前国,施平. 基于 Mann-Kendall 方法的胶东半岛海岸带归一化植被指数趋势分析. *海洋学报*, 2010, 32(3): 79-87.
- [3] 孙红雨,王长耀,牛铮,布和敖斯尔,李兵. 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. *遥感学报*, 1998, 2(3): 204-210.
- [4] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, Gaillard J M, Tucker C J, Stenseth N C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [5] Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen M S. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 490-507.
- [6] Li L L, Wang Y P. What drives the aerosol distribution in Guangdong-the most developed province in Southern China?. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5972-5972.
- [7] 李加林. 基于 MODIS 的沿海带状植被 NDVI/EVI 季节变化研究——以江苏沿海互花米草盐沼为例. *海洋通报*, 2006, 25(6): 91-96.
- [8] 耿利宁. 基于时序 MODIS 的水稻种植制度提取[D]. 南京:南京信息工程大学, 2013: 42-44.
- [9] Lu L L, Kuenzer C, Wang C Z, Guo H D, Li Q T. Evaluation of three MODIS-Derived vegetation index time series for dryland vegetation dynamics monitoring. *Remote Sensing*, 2015, 7(6): 7597-7614.
- [10] 吴健生,陈莎,彭建. 基于图像阈值法的森林雪灾损失遥感估测——以云南省为例. *地理科学进展*, 2013, 32(6): 913-923.
- [11] 白云. 基于混合像元分解的海坛岛植被覆盖度因子研究. *亚热带资源与环境学报*, 2013, 8(4): 81-86.
- [12] 袁丽华,蒋卫国,申文明,刘慧慧,王文杰,陶亮亮,郑华,刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [13] 张雪艳,胡云锋,庄大方,齐永清. 蒙古高原 NDVI 的空间格局及空间分异. *地理研究*, 2009, 28(1): 10-18, 图版 2.
- [14] Xiao J, Moody A. Geographical distribution of global greening trends and their climatic correlates: 1982-1998. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(11): 2371-2390.
- [15] Park H, Jeong S J, Ho C H, Kim J, Brown M E, Schaeppman M E. Nonlinear response of vegetation green-up to local temperature variations in temperate and boreal forests in the Northern Hemisphere. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 165: 100-108.
- [16] 马宗文,许学工,卢亚灵. 环渤海地区 NDVI 拟合方法比较及其影响因素. *生态学杂志*, 2011, 30(7): 1558-1564.

- [17] 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. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716-720.
- [18] 宗玮. 上海海岸带土地利用/覆盖格局变化及驱动机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012: 44-44.
- [19] 田义超, 陈志坤, 梁铭忠. 北部湾海岸带植被覆盖时空动态特征及未来趋势. 热带地理, 2014, 34(1): 76-86.
- [20] 徐大勇, 张涛, 孙贻超, 邓小文, 周滨, 卢学强, 邵晓龙, 张良运, 陈红, 袁雪竹, 白明英. 基于 *NDVI* 的天津市滨海新区植被覆盖度变化及预测研究. 生态经济, 2010, (12): 45-50.
- [21] 李建平, 张柏, 张玲, 王宗明, 宋开山. 湿地遥感监测研究现状与展望. 地理科学进展, 2007, 26(1): 33-43.
- [22] 曹庆先, 戴培建, 范航清, 葛文标, 何斌源, 兰国宝, 黎广钊, 梁文, 莫竹承, 邱广龙, 吴斌, 曾聪, 周浩郎. 广西北部湾典型海洋生态系统—现状与挑战. 北京: 科学出版社, 2015.
- [23] 王毅杰, 俞慎. 长江三角洲城市群区域滨海湿地利用时空变化特征. 湿地科学, 2012, 10(2): 129-135.
- [24] 韩贵锋. 中国东部地区植被覆盖的时空变化及其人为因素的影响研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007: 35-35.
- [25] 范娜, 谢高地, 张昌顺, 陈龙, 李文华, 成升魁. 2001 年至 2010 年澜沧江流域植被覆盖动态变化分析. 资源科学, 2012, 34(7): 1222-1231.
- [26] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题——以在气候变化研究中的应用为例. 地理科学, 2004, 24(2): 177-182.
- [27] 刘世梁, 赵海迪, 董世魁, 苏旭坤, 刘琦, 邓丽, 张翔. 基于 *SPOT NDVI* 的阿尔金山自然保护区植被动态变化研究. 干旱区研究, 2014, 31(5): 832-837.
- [28] 庄长伟, 欧阳志云, 徐卫华, 郑华, 王效科, 白杨. 基于 *MODIS* 的海河流域生态系统空间格局. 生态学杂志, 2009, 28(6): 1149-1154.
- [29] 张月丛, 赵志强, 李双成, 孟宪锋. 基于 *SPOT NDVI* 的华北北部地表植被覆盖变化趋势. 地理研究, 2008, 27(4): 745-754, 图版 1.
- [30] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [31] 刘琦, 刘世梁, 赵清贺, 王聪, 邓丽, 杨珏婕, 董世魁. 漫湾水电站建设的景观生态风险时空分异及影响因子研究. 安全与环境学报, 2012, 12(6): 113-118.
- [32] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征. 生态学报, 2006, 26(3): 647-654.
- [33] 包维楷, 刘照光. 岷江上游大沟流域驱动植被退化的人为干扰体研究. 应用与环境生物学报, 1999, 5(3): 233-239.
- [34] 杨绍镠, 谭裕模, 胡钧铭. 基于 *NDVI* 的广西近十年植被变化特征分析. 南方农业学报, 2012, 43(11): 1783-1788.
- [35] 何章莉, 史合印, 邢前国, 潘伟斌. 遥感技术在大亚湾区域土地利用类型监测中的应用. 生态科学, 2006, 25(4): 371-374, 384-384.
- [36] 周自翔, 李晶, 任志远. 基于 *GIS* 的关中-天水经济区地形起伏度与人口分布研究. 地理科学, 2012, 32(8): 951-957.