

2000 - 2015 年广西北部湾植被 NDVI 时空演变及因子探测^{*}

邓雁菲^{1,2}, 胡宝清^{1**}, 冯炳斌^{1,2}, 张 泽^{1,2}

(1. 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西南宁 530001; 2. 南宁师范大学地理科学与规划学院, 广西南宁 530001)

摘要:为探测广西北部湾归一化植被指数(NDVI)的时空演变格局及其影响机制, 本文运用一元线性回归法、变异系数法和地理探测器分析等方法探究 2000 - 2015 年广西北部湾植被 NDVI 变化特性及其驱动机制。结果表明: (1) 2000 - 2015 年研究区植被覆盖状况良好, 植被 NDVI 年均值为 0.753, 夏季和秋季多, 而春季和冬季少, 呈缓慢上升的趋势; 植被覆盖类型以中高级分类为主, 面积占比超过 60%, 多分布在高山地区, 中、中低级植被覆盖类型占比小, 主要分布于沿海地区; (2) 植被 NDVI 的稳定性存在明显地域差异, 变异系数均值为 3.9%, 变异稳定区面积占比为 48.55%, 不稳定区占比为 45.34%; (3) **地理探测器探测发现气温是植被 NDVI 的主要解释因子, 人为因子的解释力波动上升; 因子两两交互作用后能增强单因子解释力, 且存在线性与非线性两种协同效应; 同因子中不同的分类对植被 NDVI 的影响不同, 适度的分类等级范围能促进植被 NDVI 的增加。**

关键词:广西北部湾 因子探测 NDVI **地理探测器** 时空演变

中图分类号: K903 文献标识码: A

0 引言

植被是指地球表面某一地区所覆盖的植物群落。作为生态系统的核心组成部分, 植被是联结大气、水、生物、岩石、土壤等自然环境要素的纽带, 与物候变化、水循环、净化空气和能量流动等自然生态现象密切相关^[1-3]。因此, 掌握植被时空演变规律及驱动机制是科学认识生态系统的有效途径^[4]。

归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)是表征植被覆盖和生长状况的最佳指标, 可表征植被的种类、长势和密度等特点, 并已被广泛应用于植被变化及驱动力特性的研究^[5-7]。近年来, 为应对物候变化, 提高生态系统适应力, 许多学者对植被 NDVI 演变及其驱动力进行了研究。Benewinde 等^[8]以基纳法索、西非为研究区, 分析了植被覆盖度的影响因子, 发现可达性、气候和地形等是

^{*} 北部湾海陆交互关键带与陆海统筹发展研究广西创新研究团队项目(2016GXNSFGA380007)资助。

【作者简介】

邓雁菲(1993-), 女, 硕士, 主要从事海岸带脆弱环境演变与整治研究, E-mail: 2580528998@qq.com。

【**通信作者】

胡宝清(1966-), 男, 博士, 教授, 主要从事脆弱环境演变与整治研究, E-mail: h bq1230@gxtc.edu.cn。

植被 NDVI 的主要影响因子。Lamchin 等^[9]以亚洲为研究区,借助相关分析法探究植被覆盖度变化与气候的相关性,发现气温是影响植被绿度的重要因子。高焦波等^[10]以中国为研究对象,利用加权回归法分析植被 NDVI 与气候变化的响应规律,发现植被 NDVI 与气温呈现非平稳关系,降水影响显著区在青藏高原。李双成等^[11]以青藏高原为研究区,借助小波分析法分析植被 NDVI 与地形因子的相关性,指出人类活动是植被 NDVI 的制约因子。孔冬冬等^[12]也以青藏高原为研究区,利用回归分析探究了植被 NDVI 的物候变化,提出温度是影响植被 NDVI 变化的重要因子。彭文甫等^[13]以四川为研究区,利用地理探测器探测了影响植被覆盖度的自然因子,认为土壤、高程和温度对植被可变性有较强解释力。祝聪等^[14]以岷江上游为研究区,利用趋势分析法和地理探测器分析植被覆盖度的时空演变规律及驱动力特性,发现植被覆盖度良好、稳定,而海拔、气温、土壤类型和降水为主要解释因子。尽管已有研究对于认识植被 NDVI 演变特性及驱动力有重要意义,但仍然存在以下问题:(1)对于研究手段,此前研究多选取回归、相关分析等线性计量手段分析植被 NDVI 的驱动力,但实际中植被的响应过程十分复杂,很难存在严格的线性关系,因此线性分析难以量化自然因子对植被 NDVI 的影响;(2)对于驱动因子,此前多选取气候、人类活动和地形等单因子作为植被 NDVI 的驱动因子,但植被受复杂的自然环境影响,驱动因子

并非独立作用,因此单因子分析难以解释复杂的因子影响机制;(3)对于研究区域,此前研究区域多选大陆内部、流域、高原等,而针对海陆交互带的研究较少。

广西北部湾位于广西壮族自治区的东南部,是我国西部陆海新通道的重要关口。该地季风气候显著,地形独特,植被类型多样。近年来,西江经济带、北部湾经济区等地区经济建设加剧了植被砍伐、生态环境退化的问题。广西北部湾地处复杂的陆海交错地貌区,加上人为干扰日渐增强,植被覆盖率易受生态环境恶化的影响而下降。因此本文选取了广西北部湾作为研究区,利用一元线性回归法与变异系数法对植被 NDVI 的时空演变格局进行分析,借助地理探测器探测其多因子影响下的影响特性,以便能为该地的生态建设提供科学有效的参考依据。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

广西北部湾地处广西东南部,地理位置介于 $21^{\circ}24' - 22^{\circ}43'N$, $107^{\circ}27' - 109^{\circ}52'E$ 之间(图 1)。气候类型属亚热带季风气候,水热充足,年均温度约 $22^{\circ}C$,年均降雨量约 1 600 mm。地势北高南低,地形以平原台地为主,东北、西北方分别横贯六万大山脉及十万大山山脉,平均海拔为 800—1 000 m。在气候和地形等要素的影响下,植被类型以亚热带季风常绿阔叶林、热带雨林为主,四季常绿,无明显的换季落叶现象。

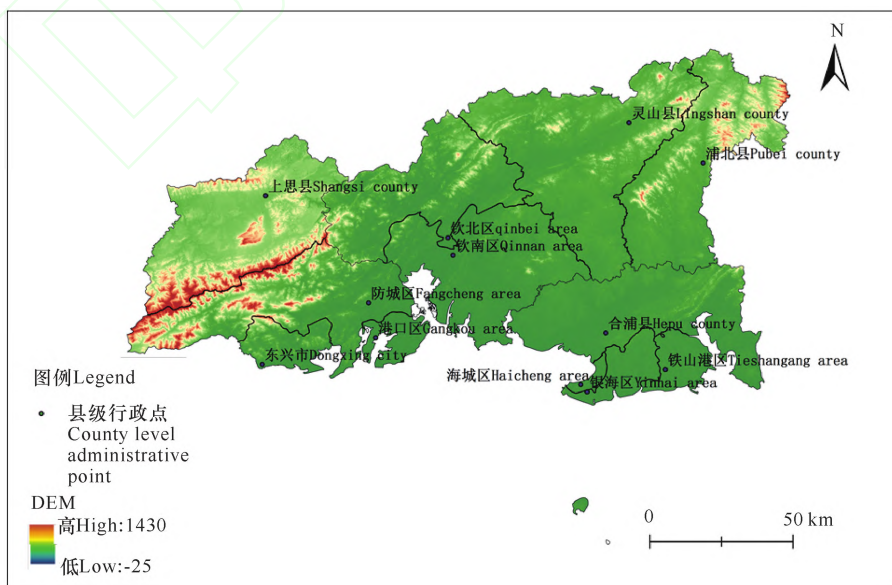


图 1 广西北部湾海岸带区域概况图(图片从国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载,审图号:GS(2016)2937)

Fig. 1 Coastal zone of Beibu Gulf of Guangxi (The picture is downloaded from website of the standard map service in National Administration of Surveying Mapping and Geoinformation, Drawing approval number:GS(2016)2937)

1.2 数据来源

植被 NDVI 的变化与高程、坡向^[15]、气候^[16]、土地利用变化、土壤类型^[17]等因素有关,而广西北部湾地处陆海交界,有独特的植被类型、地貌特征。因此,本研究依据系统性、典型性、动态性、科学性、可量化和可获取等原则,选取了高程、坡度、坡向、气温、降水、土壤类型、地貌类型、植被类型和土地利用等 9 个因子作为研究植被 NDVI 的主要驱动因子。高程、坡度、坡向数据来源于 90 米分辨率的中国海拔高度

表 1 研究数据来源

Table 1 Research data source

数据 Data	时序(年) Time (year)	分辨率 Resolution	类型 Type	来源 Source
植被 NDVI NDVI vegetation index	2000–2015	90 m	栅格 Grid	中科院资源与环境数据中心(https://www.resdc.cn/data) Resource and Environment Science and Data Center (https://www.resdc.cn/data)
海拔高度 DEM	—	90 m	栅格 Grid	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/) Geospatial data clouds (http://www.gscloud.cn/)
气候 Climate	2000, 2005, 2010, 2015	1 000 m	栅格 Grid	中科院资源与环境数据中心(https://www.resdc.cn/data) Resource and Environment Science and Data Center (https://www.resdc.cn/data)
土壤类型 Agrotype	—	1 : 1 × 10 ⁶	矢量 Vector	《1 : 100 万中华人民共和国土壤类型图》 Agrotype maps of the People's Republic of China (1 : 1 × 10 ⁶)
地貌类型 Geomorph type	—	1 : 1 × 10 ⁶	矢量 Vector	《中华人民共和国地貌图集 (1 : 100 万)》 Geomorphic type maps of the People's Republic of China (1 : 1 × 10 ⁶)
植被类型 Vegetational form	—	1 : 1 × 10 ⁶	矢量 Vector	《1 : 100 万植被图》 Vegetational form maps (1 : 1 × 10 ⁶)
土地利用 Land utilization	2000, 2005, 2010, 2015	—	矢量 Vector	中科院资源与环境数据中心(https://www.resdc.cn/data) Resource and Environment Science and Data Center (https://www.resdc.cn/data)

1.3 方法

1.3.1 变异系数法

变异系数法是衡量某对象相对变化(波动)的统计方法,通过逐像元的植被 NDVI 变异系数来探究其稳定性,其计算公式如下^[18]:

$$C_v = \frac{\sigma(\text{NDVI})}{m(\text{NDVI})}, \quad (1)$$

式中: C_v 为变异系数, $\sigma(\text{NDVI})$ 为植被 NDVI 的标准差, $m(\text{NDVI})$ 为植被 NDVI 均值。

1.3.2 趋势分析法

选用最小二乘法中的一元线性回归模型,对植被 NDVI 的年变化进行趋势分析,计算公式为^[19,20]

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n (i v_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n v_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}, \quad (2)$$

(DEM)空间分布数据。气温、降水数据是基于全国主要气象站点数据,经反距离加权平均内插和 DEM 校正获得的栅格数据;土地利用数据是基于 Landsat 8 遥感影像,通过人工目视解译生成。基于 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感数据,通过拼接镶嵌、投影变换获得每月的植被 NDVI 数据,最终采用最大值合成法将月数据进行合成得到年植被 NDVI 的数据。所有数据均依照研究区矢量边界裁剪。表 1 展示了主要研究数据的来源。

式中: S 为植被 NDVI 变化趋势斜率,当 S 为正值时,表明植被 NDVI 呈上升趋势,负值则为下降趋势; n 为研究总年数; v_i 为第 i 年的 NDVI ($i = 1, 2, \dots, 15$)。采用 F 检验对趋势结果进行显著性检验,计算公式如下^[21]:

$$F = U \frac{n-2}{Q},$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{v}_i - \bar{v}_i)^2, \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2,$$

式中: F 为检验统计量; U 为误差平方和; Q 为回归平方和; $\bar{v}_i$ 为 i 年植被 NDVI 的平均值; $\hat{v}_i$ 为 i 年植被 NDVI 回归值。根据变化趋势斜率 S 的大小将植被 NDVI 的变化趋势分为 5 种类型,如表 2 所示。

表 2 NDVI 变化趋势类型

Table 2 NDVI variation trend types

NDVI 变化趋势类型 NDVI change trend type	S	显著性 P 值 P value for significance	F
极显著增加 Extremely significant increase	$(0, +\infty)$	$(-\infty, 0.05)$	$(10.128, +\infty)$
显著增加 Significant increase	$(0, +\infty)$	$(0.05, 0.1)$	$(5.538, 10.128)$
变化不显著 Not significant change	$(-\infty, +\infty)$	$(0.1, +\infty)$	$(-\infty, 5.538)$
显著减少 Significant decrease	$(-\infty, 0)$	$(0.1, 0.05)$	$(5.538, 10.128)$
极显著减少 Extremely significant reduction	$(-\infty, 0)$	$(-\infty, 0.05)$	$(10.128, +\infty)$

1.3.3 地理探测器模型

地理探测器是基于空间分异角度统计分析驱动机制的方法,包括因子探测器、生态探测器、风险探测器、交互探测器四个探测内容^[22]。因子探测器是将因子分类区的方差和植被 NDVI 区域的总方差进行空间差异性对比分析,以探测不同因子对植被 NDVI 可变性的解释力,其计算公式如下^[23]:

$$P = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST}, \quad (4)$$

式中: P 为因子对 NDVI 的解释力,值越大表示该因子的解释力越强; $h = 1, 2, \dots, L$, 表示植被 NDVI 或因子的分类; N_h 、 N 分别为分类 h 和全区的区域单元数; σ_h^2 、 σ^2 分别是分类 h 和总区域的植被 NDVI 的方差; SSW 、 SST 分别为分类区域的方差之和与区域总方差。

生态探测器用于比较两因子间对植被 NDVI 空间分布的影响是否存在显著差异,以 F 统计量来衡量:

$$F = \frac{N_{xi} \times (N_{xj} - 1) \times \sum_{h=1}^{L_i} N_h \sigma_h^2}{N_{xj} \times (N_{xi} - 1) \times \sum_{h=1}^{L_j} N_h \sigma_h^2}, \quad (5)$$

式中: N_{xi} 、 N_{xj} 分别表示两个不同因子 (x_i 和 x_j) 的样本数量; L_i 、 L_j 分别表示变量 x_i 和 x_j 分类数。

交互探测器是用于比较因子交互前后解释 P 值的大小,用以判别因子共同作用后对植被 NDVI 的解释力是增强还是减弱,同时也用于判别因子交互的关系(线性/非线性)。

风险区探测器是判断两因子间的属性均值是否有显著的差别,用于搜索植被 NDVI 最佳区域的探

测。用 t 统计量来检验:

$$t = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(Y_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(Y_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (6)$$

式中: Y_h 为子区域 h 内植被 NDVI 值, $\bar{Y}_h$ 为子区域 h 内植被 NDVI 均值, n_h 为子区域 h 内样本数量, Var 表示方差。

基于已有的研究^[24],选用自然间断法作为因子的分类方法。将气温、降水分 10 级,高程、坡度、坡向分为 9 级。土壤类型、地貌类型、植被类型、土地利用类型,则是在原来的分类基础上,经过聚类合并将二级别分类合并成一级别分类,减少分类级数。最终将地貌类型分为 5 类,植被类型分为 9 类,土地利用分为 6 类,土壤类型分 10 类。由于地理探测器的数据容纳量最多约为 30 000,故借助 ArcGIS 软件,按照 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 的网格,在植被 NDVI 栅格数据中随机提取 2 245 个采样点。把植被 NDVI 采样点图层与因子分类图层叠加,获取采样数据与分类数据的空间关联属性表,最后将属性表导入地理探测器运行。

2 结果与分析

2.1 植被 NDVI 的时空演变

2000—2015 年广西北部湾地区植被 NDVI 年季变化统计分析表明,16 年间研究区植被生长状况整体良好(图 2)。植被 NDVI 年均值为 0.753,整体以 0.006 1 增长率缓慢上升。2000—2005 年植被 NDVI 上升较快,2005 年之后上升速度趋于平缓。从季节分配来看,研究区植被 NDVI 有明显季节差异,均值大小排序为秋季 > 夏季 > 春季 > 冬季。夏季和秋季的植被 NDVI 为 0.68—0.75,且较平稳,冬季和春

季的植被 NDVI 为 0.5–0.75, 有波动上升的趋势。以上结果表明, 研究区植被 NDVI 在 16 年间不断地增加, 且全年常绿的植被类型数量可能逐渐增多。

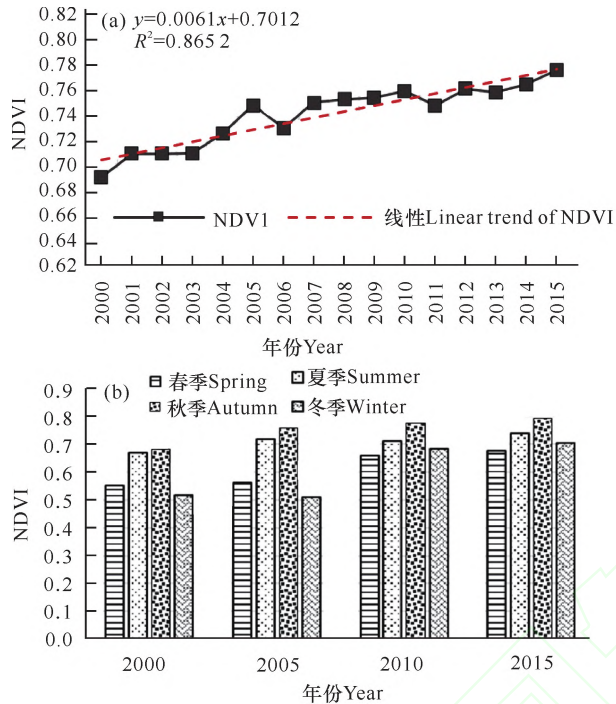


图2 广西北部湾植被 NDVI 年际变化图

Fig. 2 Interannual variation of vegetation NDVI in Beibu Gulf of Guangxi

表3 2000–2015 年广西北部湾植被 NDVI 等级变化

Table 3 Changes of vegetation NDVI grades in the Beibu Gulf of Guangxi during 2000–2015

植被 NDVI 等级 Vegetation NDVI Grade	2000		2015		2000–2015	
	面积 Area (km ²)	比例 Proportion (%)	面积 Area (km ²)	比例 Proportion (%)	面积变化 Change of area (km ²)	比例 Proportion (%)
低 (≤ 0.2) Low (≤ 0.2)	8.03	0.04	160	0.80	151.97	0.76
中低 (0.2–0.4) Low-middle (0.2–0.4)	76.30	0.39	813	4.11	736.7	3.72
中 (0.4–0.6) Middle (0.4–0.6)	1 497.97	7.55	4 128	20.81	2 630.03	13.26
中高 (0.6–0.8) Middle-high (0.6–0.8)	17 449.52	87.97	12 339	62.20	–5 110.53	–25.77
高 (≥ 0.8) High (≥ 0.8)	803.20	4.05	2 396	12.08	1 592.8	8.03

从变异角度分析(图 3b), 研究区植被 NDVI 整体较稳定, 植被 NDVI 平均变异系数为 3.91%。变异系数低于 15% 的稳定类型占比为 48.55%, 主要分布在高、中高植被覆盖地区; 变异系数为 15%–40% 的不稳定类型占比为 45.34%, 主要分布在中植被覆

将植被 NDVI 类型划分为低、中低、中、中高、高 5 个等级(表 3)。各等级的面积排序为中高>中>高>中低>低。2000 年和 2015 年研究区的植被覆盖类型分布表现出相同的趋势, 两者均以中高等级为主, 面积分别达 17 499.52 km² 和 12 339 km², 分别占总面积的 89.97% 和 62.2%; 中、高等级的面积次之; 而低、中低等级的面积占比均低于 5%。同时, 在 16 年间, 中高等级的面积显著下降, 减少面积为 5 110.53 km², 降比达 25.77%; 而中、高等级的面积显著增加, 增加面积为 1 500–2 700 km², 增幅为 8%–14%; 低、中低等级的面积仅有小幅度上升, 且比率小于 4%。

从空间演变趋势分析(图 3a), 植被 NDVI 增加 ($S>0$) 的区域占总面积的 55%, 减少 ($S<0$) 的区域占 45%, 增加的面积比减少的面积多 10%, 整体以增加为主。其中, 显著增加和极显著增加面积占 54.32%, 主要分布在中部地区以及高山地区; 显著减少和极显著减少面积占 39.34%, 主要分布在沿海地区, 最为明显的是北海的铁山港区及合浦县沿岸开发区。不显著变化面积占总面积的 6.33%, 分布在早年开发的沿海海岸区域。以上结果表明, 植被 NDVI 呈沿海较内陆地区退化更明显的状况。

盖区域; 变异系数高于 40% 的极不稳定类型占 6.11%, 主要分布在沿海海岸的低植被覆盖区。以上结果表明, 植被 NDVI 在高植被覆盖区较稳定, 在中、中低、低植被覆盖区较不稳定。

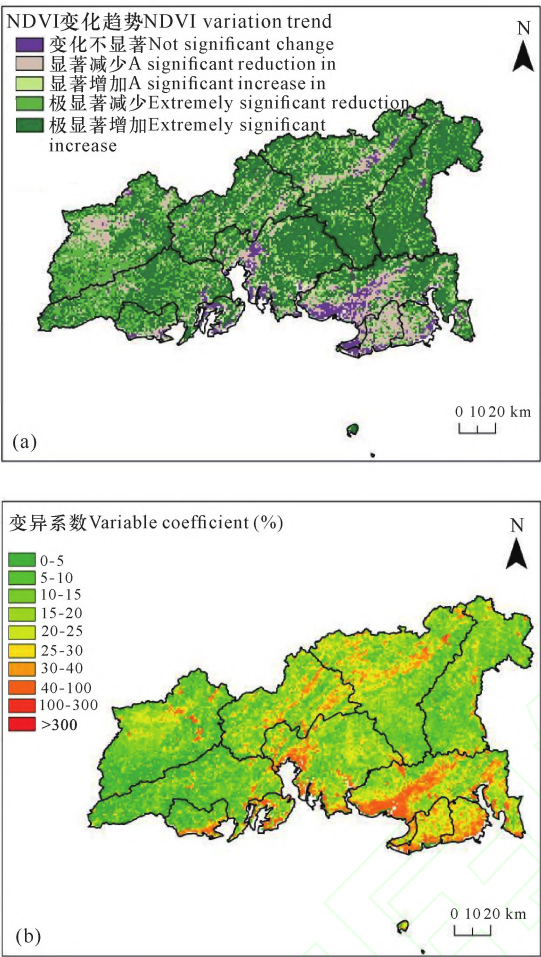


图3 2000-2015 年广西北部湾植被变化趋势与变异系数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of vegetation change trends and variation coefficients in the Beibu Gulf of Guangxi during 2000-2015

2.2 影响因子探测

2.2.1 影响因子探测

基于因子探测器的研究结果(表 4),各因子对植被 NDVI 的影响力度排序为气温>高程>土壤类型>坡度>地貌类型>土地利用>植被类型>降水>坡向。其中气温的解释力最大, P 值为 0.381,解释力超 35%。高程、土壤类型的解释力次之, P 值分别为 0.306、0.298,解释力在 29% 以上。坡向和降水的解释力最弱, P 值分别为 0.065、0.109,解释力均小于 11%。

2000-2015 年各影响因子的 P 值年际变化表明(图 4),植被类型、坡度、降水及土地利用的 P 值呈增加趋势,气温与高程的 P 值呈下降趋势,土壤类型、地貌类型、坡向的 P 值则几乎不变。2000-2005 年间土地利用和降水的 P 值呈上升趋势,其余各因子

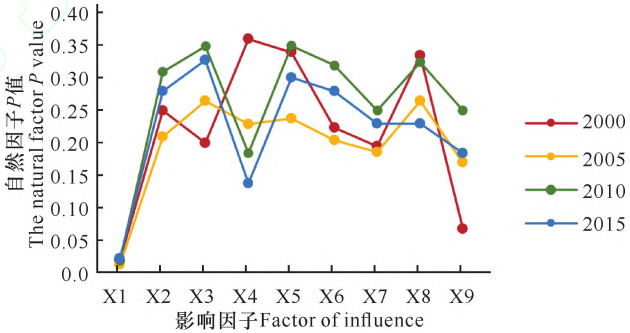
的 P 值均呈下降趋势;2005-2010 年除高程的 P 值呈下降趋势外,其余各因子的 P 值均呈上升趋势;2010-2015 年,除坡向的 P 值稍有上升趋势以外,其余各因子的 P 值均呈减少趋势。15 年间, P 值增加和下降最明显的因子分别是土地利用和高程,表明人类活动随对植被 NDVI 的影响越来越显著。

表 4 影响因子对植被 NDVI 的解释力

Table 4 The explanatory power of impact factors on vegetation NDVI

因子 Factor	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
P	0.065	0.278	0.215	0.306	0.273	0.139	0.298	0.381	0.109
q	0	0	0	0	0	0	0	0	0

注: P 代表影响因子对植被 NDVI 的解释力,值越大表示因子的解释力越强; q 代表因子的显著性; X1:坡向, X2:坡度, X3:土地利用, X4:高程, X5:地貌类型, X6:植被类型, X7:土壤类型, X8:气温, X9:降水
Note: P represents the explanatory power of impact factors to NDVI of vegetation. The greater the P value, the stronger the explanatory power of factors. q represents the significance of the factor. X1: Aspect, X2: Slope, X3: Land utilization, X4: Elevation, X5: Geomorphic type, X6: Vegetation type, X7: Soil type, X8: Air temperature, X9: Rainfall



X1:坡向, X2:坡度, X3:土地利用, X4:高程, X5:地貌类型, X6:植被类型, X7:土壤类型, X8:气温, X9:降水

X1: Aspect, X2: Slope, X3: Land utilization, X4: Elevation, X5: Geomorphic type, X6: Vegetation type, X7: Soil type, X8: Air temperature, X9: Rainfall

图 4 2000-2015 年广西北部湾植被 NDVI 影响因子变化图

Fig. 4 Changes of NDVI influence factors in Beibu Gulf of Guangxi from 2000 to 2015

2.2.2 生态探测

生态探测器分析表明,气温与其他因子对植被 NDVI 的影响存在显著差异(表 5);除坡向与降水对植被 NDVI 的影响不存在显著差异外,坡向与其他因子均对植被 NDVI 存在显著差异。坡度与高程、地貌类型、土壤类型对植被 NDVI 的影响不存在显著差异,与其余因子对植被 NDVI 的影响存在显著

差异。土地利用与所有因子对植被 NDVI 的影响均存在显著差异。高程与坡度、地貌类型及土壤类型对植被 NDVI 的影响不存在显著差异, 与其余因子对植被 NDVI 的影响存在显著差异。地貌类型与坡度、高程以及土壤类型对植被 NDVI 的影响不存在显著差异外, 与其余因子对植被 NDVI 的影响均存在显著差异。植被类型除与土壤类型对植被 NDVI 的影响不存在显著差异外, 与其它因子对植被 NDVI 的影响均存在显著差异。土壤类型与坡度、高程及地貌类型对植被 NDVI 影响无显著差异, 与其余因子对植被 NDVI 的影响均存在显著的差异。降水与坡向、植被类型对植被 NDVI 的影响无显著差异, 与其余因子对植被 NDVI 的影响均存在显著差异。结合因子探测的分析结果, 筛选得出影响植被 NDVI 变化的主要解释因子是气温。

2.2.3 因子交互探测

交互探测器分析表明(表 6), 因子之间交互协同关系存在一定的差异, 交互作用均能加强单因子对植被 NDVI 的影响。各因子之间存在线性及非线性交互关系, 无独立作用因子。其中, 以坡向为基准, 与气温产生最大影响力(0.423), 与土壤类型产生的影响力次之(0.374); 以坡度为基准, 与土壤类型产生最大影响力(0.475), 与气温产生的影响力次之(0.466);

表 6 因子交互作用解释 q 值表

Table 6 Factor interactions table based on q -value explanation

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X1	0.065●								
X2	0.290●	0.278●							
X3	0.310○	0.436●	0.215●						
X4	0.373○	0.417●	0.445●	0.306●					
X5	0.360○	0.415●	0.401●	0.403●	0.273●				
X6	0.214○	0.346●	0.326●	0.396●	0.392●	0.139●			
X7	0.374○	0.475●	0.438●	0.435●	0.444●	0.376●	0.298●		
X8	0.423●	0.466●	0.475○	0.447●	0.480●	0.447●	0.450●	0.381●	
X9	0.210○	0.382●	0.374○	0.411●	0.390○	0.263●	0.494●	0.483●	0.108●

注: 因子协同作用类型: ●代表双因子加强, ○代表因子非线性增强。X1: 坡向, X2: 坡度, X3: 土地利用, X4: 高程, X5: 地貌类型, X6: 植被类型, X7: 土壤类型, X8: 气温, X9: 降水

Note: The type of factor synergy: ● stands for double-factor enhancement, ○ stands for non-linear factor enhancement. X1: Aspect, X2: Slope, X3: Land utilization, X4: Elevation, X5: Geomorphic type, X6: Vegetation type, X7: Soil type, X8: Air temperature, X9: Rainfall

2.2.4 适宜性探测

风险探测器分析结果表明: 同因子但不同分类对植被 NDVI 影响力度不同(表 7)。将气温划分为 10 个等级, 用 A1 - A10 表示, 数字越大表明气温值越

以土地利用为基准, 与气温产生最大影响力(0.475), 与高程产生的影响力次之(0.445)。排序发现因子交互作用后的解释力均比单因子独立作用的解释力大, 气温与各因子交互作用后易产生较大的解释力。坡向与其它因子间交互协同作用多为非线性增强关系, 其余因子间交互协同的关系多为双因子增强关系。

表 5 驱动因子差异性探测表

Table 5 Differential detection table of driver factors

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X1									
X2	Y								
X3	Y	Y							
X4	Y	N	Y						
X5	Y	N	Y	N					
X6	Y	Y	Y	Y	Y				
X7	Y	N	Y	N	N	Y			
X8	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		
X9	N	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	

注: 采用显著性水平为 0.05 的 F 检验, Y 表示两种因子在对植被 NDVI 的影响存在显著性差异, N 表示无显著性差异。X1: 坡向, X2: 坡度, X3: 土地利用, X4: 高程, X5: 地貌类型, X6: 植被类型, X7: 土壤类型, X8: 气温, X9: 降水

Note: F test with a significance level of 0.05 was adopted. Y indicated that there were significant differences between the two factors on NDVI of vegetation. N means no significant difference. X1: Aspect, X2: Slope, X3: Land utilization, X4: Elevation, X5: Geomorphic type, X6: Vegetation type, X7: Soil type, X8: Air temperature, X9: Rainfall

大。随着气温的变化, 植被 NDVI 也不同。在 A2 等级产生了最大的植被 NDVI 值, 为 0.833, 但 A2 等级与 A1、A3 等级无明显差异, 表明温度在 17.6 - 21.3℃ 内植被 NDVI 值最高, 植被覆盖率较大。对

A1 - A10 分区内的植被 NDVI 大小排序, A2 (0.833) < A3 (0.832) < A1 (0.831) < A4 (0.825) < A5 (0.819) < A6 (0.798) < A7 (0.778) < A8 (0.776) < A9 (0.766) < A10 (0.707), 植被

NDVI 值在 A2 等级之后随着温度的上升而不断下降, 表明一定范围内的温度利于植被 NDVI 的增长, 超出范围则致使其下降。

表 7 气温每 2 个分区的植被 NDVI 均值及其统计显著性(置信水平 95%)

Table 7 Average NDVI and its statistical significance of vegetation in each 2 air temperature zones (confidence level 95%)

气温 Air temperature	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1										
A2	N									
A3	N	N								
A4	N	Y	Y							
A5	Y	Y	Y	Y						
A6	Y	Y	Y	Y	Y					
A7	Y	Y	Y	Y	Y	Y				
A8	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N			
A9	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		
A10	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
NDVI	0.831	0.833	0.832	0.825	0.819	0.798	0.778	0.776	0.766	0.707

注: Y 表示 2 个分区对 NDVI 的影响具有显著性差异(置信度为 95%), N 表示无显著性差异; 数字 A1 - A10 分别表示(单位: °C) 17.6 - 19.6, 19.6 - 20.6, 20.6 - 21.3, 21.3 - 21.8, 21.8 - 22.3, 22.3 - 22.7, 22.7 - 23.0, 23.0 - 23.3, 23.3 - 23.5, 23.5 - 24.1

Note: Y indicates that there is a significant difference in the influence of the two partitions on NDVI (the confidence is 95%), N indicates no significant difference; Numbers A1 to A10 represent (unit: °C) 17.6 - 19.6, 19.6 - 20.6, 20.6 - 21.3, 21.3 - 21.8, 21.8 - 22.3, 22.3 - 22.7, 22.7 - 23.0, 23.0 - 23.3, 23.3 - 23.5, 23.5 - 24.1, respectively

将高程划分为 9 个分区, 用 E1 - E9 表示(表 8)。不同的高程范围有不同的植被 NDVI, 在 E9 区内植被 NDVI 值最大, 为 0.838。E8 区与 E9 区的影响无显著差异, 与其余因子的影响均存在明显差异, 即表明海拔在 674 - 1 430 m 之间能产生较大的植被 NDVI 值。E1 - E9 区产生的植被 NDVI 大小排序为 E1 (0.719) < E2 (0.771) < E3 (0.787) < E4 (0.797) <

E5 (0.822) < E6 (0.828) < E7 (0.831) < E8 (0.833) < E9 (0.838), 表明在 0 - 1 430 m 范围内随着海拔的升高, 植被 NDVI 值也在上升。原因可能是海拔稍高的地区, 开发力度小, 生态环境保护的好, 人类活动干扰较少, 植被乱砍滥伐的现象较少, 植被覆盖度也较高。

表 8 高程每 2 个分区的植被 NDVI 均值及其统计显著性(置信水平 95%)

Table 8 Average NDVI of vegetation in each 2 elevation zones and its statistical significance (confidence level 95%)

高程 Elevation	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
E1									
E2	Y								
E3	Y	Y							
E4	Y	Y	Y						
E5	Y	Y	Y	Y					
E6	Y	Y	Y	Y	Y				
E7	Y	Y	Y	Y	Y	N			
E8	Y	Y	Y	Y	Y	N	N		
E9	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	
NDVI	0.719	0.771	0.787	0.797	0.822	0.828	0.831	0.833	0.838

注: Y 表示 2 个分区对 NDVI 的影响具有显著性差异(置信度为 95%), N 表示无显著性差异; 数字 E1 - E9 分别表示(单位: m): 0 - 47, 47 - 110, 110 - 185, 185 - 273, 273 - 382, 382 - 512, 512 - 674, 674 - 888, 888 - 1 430

Note: Y indicates that there is a significant difference in the influence of the two partitions on NDVI (the confidence is 95%), N indicates no significant difference; Numbers E1 - E9 represent (Unit: meter): 0 - 47, 47 - 110, 110 - 185, 185 - 273, 273 - 382, 382 - 512, 512 - 674, 674 - 888, 888 - 1 430

将土壤类型划分为 10 个分区, 用 S1 - S10 表示 (表 9), 不同类型的土壤存在不同的植被 NDVI 值。在 S9 区能产生最大的植被 NDVI 值, 为 0.833。S8 区与 S9 区的影响不存在明显差异, 这表明水稻土、黄色赤红壤以及黄红壤利于植被 NDVI 值的增加。原

因可能是北部湾海岸带水热充足, 水稻为主要粮食作物, 水稻土中常年种植水稻, 因而该类土壤的植被覆盖率高。黄色赤红壤、黄红壤则是研究区内分布较为广泛, 肥力也相对优质的土壤类型, 因而也利于植被 NDVI 值的生长。

表 9 土壤每 2 个分区的植被 NDVI 均值及其统计显著性 (置信水平 95%)

Table 9 Average NDVI of vegetation in each of the two soil subregions and its statistical significance (confidence level 95%)

土壤 Soil	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
S1										
S2	N									
S3	Y	N								
S4	Y	Y	Y							
S5	Y	N	Y	Y						
S6	N	N	Y	Y	Y					
S7	Y	N	Y	Y	Y	Y				
S8	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y			
S9	Y	N	Y	Y	Y	Y	Y	N		
S10	N	N	Y	Y	N	N	Y	Y	Y	
NDVI	0.650	0.760	0.633	0.571	0.740	0.707	0.788	0.830	0.833	0.721

注: Y 表示 2 个分区对 NDVI 的影响具有显著性差异 (置信度为 95%), N 表示无显著性差异; 数字 S1 - S10 分别表示: 新积土、火山灰土、紫色土、潮土、滨海盐土、酸性硫酸土、水稻土、黄色赤红壤、黄红壤、岩土

Note: Y indicates that there is a significant difference in the influence of the two partitions on NDVI (the confidence is 95%), N indicates no significant difference; Numbers S1 - S10 denote: new soil, volcanic limestone, purple soil, tidal soil, coastal saline soil, acid sulphuric soil, paddy soil, yellow lateritic soil, yellow lateritic soil, rock and soil respectively

在其余的影响因子 (植被类型、坡度、地貌类型和土地利用) 中, 植被类型分类中以亚热带季风常绿阔叶林分布区产生的植被 NDVI 最高, 为 0.832 - 0.835; 37.53 - 70.34 坡度之间产生最高的植被 NDVI, 为 0.833; 地貌类型以中/大起伏山地中产生最大植被 NDVI, 为 0.809 - 0.816; 土地利用类型则是在林地中产生最高植被 NDVI, 为 0.785。

3 讨论

本研究利用对比分析、回归分析等方法对广西北部湾的植被 NDVI 演变进行探究, 从时空尺度去挖掘其变化特点。结果发现广西北部湾地区的植被 NDVI 类型以中高覆盖度为主, 高山地区植被覆盖度高, 沿海地区植被覆盖度低。从变异视角看该区域植被覆盖度稳定性能较好, 高山地区较稳定, 内陆沿海地区稳定性较差。田义超等^[25]用标准差法探究广西北部湾植被 NDVI, 发现其呈现出“两头高、中心地带低”的分布规律, 这与本文的结论高度一致。同时, 研究结果与广西北部湾发展现状较符合, 中部高山地

带, 交通不便, 难以开发, 生态保护较好, 植被 NDVI 亦较好。沿海港口城市的开发力度大, 植被 NDVI 较低。在一带一路倡议下, 近年来广西北部湾被大力开发, 是其高植被 NDVI 增加缓慢的一个重要原因。同时, 本研究发现在一些开发建设较大的县区内出现植被 NDVI 变异较大的情况, 这也表明本研究能合理反映出研究区域的植被覆盖度的时空变化情况。

地理探测器是一个能较好的识别驱动力以及影响机制的计量方法。本文引入地理探测器, 以辨识出最具解释力的影响因子, 最终筛选出气温为主要影响因子。从年际变化看, 土地利用解释力明显上升, 表明人类因子的影响力度逐渐增加。这结论与成方妍等^[26]使用 hurst 指数对广西北部湾地带植被 NDVI 变化驱动因子分析, 提出的地形和人为因素影响是主要的影响因子结论高度契合。交互探测器探测表明, 因子之间能相互协同作用, 并加强对植被 NDVI 的解释力, 但是交互增强机制存在复杂的非线性关系, 因而单纯的线性计量手段难以解释影响因子之间的

交互关系,难以反映因子间的交互机制。另外,风险探测器已探测出各因子中较利于植被 NDVI 增加的分类。以上研究均能为广西北部湾生态保护和建设提供科学参考。

4 结论

本研究采用一元线性回归法以及变异系数法对 2000—2015 年广西北部湾植被 NDVI 时空变化及稳定性进行评价;借助因子探测器、生态探测器辨识植被 NDVI 的主要解释因子,并分析各因子解释力的时序变化特点。利用交互探测器探测因子两两交互作用的协同规律。最后,通过风险探测器筛选出植被 NDVI 最佳区域,甄别最适宜植被 NDVI 增长的因子分类。主要结论如下:

2000—2015 年研究区植被覆盖状况良好,植被 NDVI 年均值为 0.753,并呈现夏季和秋季多,冬季和春季少的现象。在 6 年间,植被 NDVI 有缓慢上升的趋势,上升的幅度较小,上升率仅为 0.0061;植被 NDVI 增加面积占比 55%,下降占比 45%,上升下降的面积占比几乎持平。从稳定性看,平均变异系数为 3.9%,变异稳定区域占总面积 48.55%,多分布在高植被覆盖区。变异不稳定区占面积比为 45.34%,多分布在沿海的低植被覆盖区,内陆的植被 NDVI 较沿海的更稳定。

2000—2015 年研究区中高类型的植被覆盖类型面积占比大,2000 年面积高达 17 499.52 km²,2015 年仍有 12 339 km²。但有往中、中低的植被类型变化的趋势,降幅较大,降比达 25.77%。高、中、中低、低这四种覆盖类型面积占比较小,但有缓慢上升的趋势。植被 NDVI 空间分布状况,呈高山地区的植被覆盖度高,沿海港口地区植被 NDVI 低,中部以中高植被覆盖类型为主的现象。

因子探测器探测发现气温是解释力最大的因子,解释力超 35%。高程、土壤类型的解释力次之,解释力分别为 30.6%、29.8%。基于 15 年间的变化趋势,气温的解释力在波动下降,而土地利用的解释力在不断上升,这表明人为因子的解释力在上升,人类活动的干扰在加剧;交互探测器探测发现因子两两交互作用后均能增强单因子解释力,无独立作用的因子,非线性协同作用强,增强机制并非单纯的叠加或线性增强。利用风险探测器探测出植被 NDVI 最佳区域,搜索出最适合植被 NDVI 增长的因子分类。此后可依据最适宜分类进行适当人为干预,以便获得

较高的植被覆盖率。

参考文献

- [1] GONG Z, ZHAO S, GU J. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in north China during 2001—2013 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(2): 143-160.
- [2] 严恩萍,林辉,党永峰,等. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征 [J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 5007-5020.
- [3] 严超,张安明,石仁蓉,等. 重庆市黔江区土地生态安全评价及时空变化分析 [J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4): 262-268.
- [4] 孙滨峰,赵红,逯非,等. 东北森林带森林生态系统固碳服务空间特征及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 4975-4983.
- [5] 刘可,杜灵通,侯静,等. 近 30 年中国陆地生态系统 NDVI 时空变化特征 [J]. *生态学报*, 2018, 38(6): 1885-1896.
- [6] 胡砚霞,黄进良,杜耘,等. 2000—2015 年丹江口库区植被覆盖时空变化趋势及其成因分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(4): 862-872.
- [7] 苗正红,刘志明,王宗明,等. 基于 MODIS NDVI 的吉林省植被覆盖度动态遥感监测 [J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(3): 387-393.
- [8] ZOUNGRANA B J B, CONRAD C, THIEL M, et al. MODIS NDVI trends and fractional land cover change for improved assessments of vegetation degradation in Burkina Faso, West Africa [J]. *Journal of Arid Environments*, 2018, 153: 66-75.
- [9] LAMCHIN M, LEE W K, JEON S W, et al. Long-term trend and correlation between vegetation greenness and climate variables in Asia based on satellite data [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 618: 1089-1095.
- [10] 高江波,焦珂伟,吴绍洪. 1982—2013 年中国植被 NDVI 空间异质性的气候影响分析 [J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 534-543.
- [11] 李双成,高伟明,周巧富,等. 基于小波变换的 NDVI 与地形因子多尺度空间相关分析 [J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 4198-4203.
- [12] 孔冬冬,张强,黄文琳,等. 1982—2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 39-52.
- [13] 彭文甫,张冬梅,罗艳玫,等. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测 [J]. *地理学报*, 2019, 74(9): 1758-1776.
- [14] 祝聪,彭文甫,张丽芳,等. 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力 [J]. *生态学报*, 2019, 39(5): 1583-1594.
- [15] 姚镇海,吴丹娃,褚荣浩,等. 安徽省植被覆盖度动态变化及其地形响应关系 [J/OL]. *水土保持通报*: 1-8 [2021-05-15].
- [16] 何国兴,韩天虎,柳小妮,等. 甘肃省草地植被 NDVI 时空变化特征及驱动因素研究 [J]. *草地学报*, 2021,

- 29(5):1004-1013.
- [17] 赵晨光,程业森,李慧瑛,等. 腾格里沙漠东北缘人工植被恢复区土地利用/覆被变化及其驱动因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(6):131-138.
- [18] 刘洋,李诚志,刘志辉,等. 1982-2013年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化[J]. 生态学报, 2016, 36(19):6198-6208.
- [19] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等. 1982-2012年中国植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(16):5331-5342.
- [20] 刘家福,马帅,李帅,等. 1982-2016年东北黑土区植被 NDVI 动态及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(21):7647-7657.
- [21] 王春敏. 基于 NDVI 的三江源植被变化及影响因素分析[D]. 北京:中国地质大学, 2018.
- [22] 穆少杰,李建龙,周伟,等. 2001-2010年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(12):3752-3764.
- [23] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1):116-134.
- [24] 曹小曙,刘丹. 大数据视角下中国城市旅游交通满意度的空间分异特征及影响因素[J]. 热带地理, 2018, 38(6):771-780.
- [25] 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[J]. 热带地理, 2014, 34(1):76-86.
- [26] 成方妍,刘世梁,尹艺洁,等. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素[J]. 生态学报, 2017, 37(3):788-797.

Spatio-temporal Evolution and Factor Detection of Vegetation NDVI in Beibu Gulf of Guangxi

DENG Yanfei^{1,2}, HU Baoqing¹, FENG Bingbin^{1,2}, ZHANG Ze^{1,2}

(1. Key Laboratory of Beibu Gulf Environmental Change and Resource Use, Ministry of Education, Nanning, Guangxi, 530001, China; 2. College of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China)

Abstract: In order to detect the pattern of space-time evolution and its influence mechanism of the Normalized differential vegetation index (NDVI) in Beibu Gulf of Guangxi, this paper uses the methods of monistic linear regression, coefficient of variation and geo-detector analysis to explore the changing characteristics and driving mechanism of vegetation NDVI in Beibu Gulf of Guangxi from 2000 to 2015. The results showed that: (1) Vegetation cover in the study area was in good condition from 2000 to 2015. The annual average vegetation NDVI was 0.753, showing a high value in Summer and Autumn, while a low value in Spring and Winter, and showing a slow upward trend; Vegetation cover type is mainly in the middle and high-level classification, the area proportion is more than 60%, and more distributed in alpine areas, medium and low-level vegetation cover type accounted for a small, mainly distributed in coastal areas. (2) There are obvious regional differences in the stability of vegetation NDVI; the coefficient of variation is 3.9% in average; the area of variation stabilization is 48.55%, and the proportion of unstable area is 45.34%. (3) Geodesy detector detection found that temperature is the main explanatory factor of vegetation NDVI, but the explanatory force fluctuation of man-made factor increases, the single-factor explanatory force can be enhanced after the interaction of the two factors, there are linear and nonlinear synergies, and the influence of different classifications on vegetation NDVI is different, the moderate classification grade range can promote the increase of vegetation NDVI.

Key words: Beibu Gulf of Guangxi, factor detection, NDVI, geographic detector, spatial-temporal evolution

责任编辑:米慧芝