

# 气温、降雨与社会经济活动对湛江市特呈岛 红树林分布的影响

谭浩然<sup>1</sup>, 管东生<sup>1</sup>, 王刚<sup>2</sup>

(1.中山大学 环境科学与工程学院, 广东 广州 510006; 2.广东工业大学 管理学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**本研究首先利用 Google Earth 影像, 目视解译出湛江市特呈岛近 20 年的红树林分布面积, 再利用相关分析、回归分析及主成分分析等方法, 探讨了气温、降雨与海岸带社会经济活动对红树林分布面积的定量影响。结果表明, 1 月气温与红树林面积呈正相关, 枯水期降雨量与红树林面积呈负相关。1 月气温和枯水期降雨对红树林分布的影响存在明显的滞后效应, 滞后期分别为 3 年和 2 年, 这在一定程度上说明, 气候变化对红树林分布的影响可持续数年。极端低温天气和枯水期降雨量的增加可能不利于红树林植物的生长繁殖与迁移扩散, 甚至加剧红树林的退化。另外, 湛江市区的人口数量、国民生产总值 (GDP)、农业总产值、水产品总产量、货物吞吐量、旅游人数等均与特呈岛红树林面积呈负相关关系, 海岸带社会经济活动对红树林分布的影响不容忽视。

**关键词:**红树林; 气温; 降雨; 社会经济活动; 特呈岛; 分布面积

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2023)04-0558-08

## Effects of air temperature, rainfall and socio-economic activities on mangrove forest distribution in Techeng Island of Zhangjiang

TAN Haoran<sup>1</sup>, GUAN Dongsheng<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>

(1.School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China; 2.School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Firstly, this study used Google Earth images to visually interpret the mangrove distribution area of Techeng Island in Zhanjiang in the past 20 years. Secondly, correlation analysis, regression analysis and principal component analysis were used to quantitatively explore how mangrove distribution area in Techeng Island of Zhanjiang could be affected by air temperature, precipitation and socio-economic activities in coastal zone. The result showed that there was a positive correlation between air temperature and mangrove forest area, and a negative correlation between rainfall and mangrove forest area. There was a lag effect for the influence of air temperature in January and rainfall in dry season on mangrove forest distribution. The lag period is 3 years for the air temperature in January and 2 years for the rainfall in dry season, respectively. This results partially indicated that the effects of climate factors on mangrove distribution would continue for several years. The increase of extremely cold air temperature weather and rainfall in dry season may not be conducive to the growth, reproduction, migration and spread of mangrove plants, and even aggravate the degradation of mangroves. Moreover, total population, gross domestic product (GDP), agricultural output value, total output of aquatic products, cargo throughput, and number of tourist in the urban district of Zhanjiang were all negatively

收稿日期: 2022-06-22, 修订日期: 2022-11-07

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (2018A030313891, 2021A1515011574)

作者简介: 谭浩然 (1998-), 男, 广东广州人, 硕士研究生, 研究方向为区域环境与生态, E-mail: tanhr3@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 王刚 (1983-), 男, 四川内江人, 讲师, 研究方向为区域环境与生态, E-mail: gdut\_tony@163.com

correlated with mangrove distribution area. Thus, the influence of socio-economic activities in coastal zone on mangrove forest distribution cannot be ignored.

**Key words:** mangrove forest; air temperature; rainfall; socio-economic activity; Techeng Island; distribution area

红树林是生产力最高的自然生态系统之一,在气候调节、生物净化、防风护堤、提供生境等方面均有重要的作用<sup>[1]</sup>。同时,红树林植物根系发达,能够高效阻滞和沉降水体中的泥沙等悬浮物质,具有极高的固碳、储碳功能,远高于盐沼湿地、陆地生态系统和海洋生态系统,是重要的“蓝碳”库与汇<sup>[2]</sup>。然而,近50年来,全球红树林面积已累计减少20%~35%,且每年仍以约1%的速度持续减少<sup>[3]</sup>。王浩等<sup>[4]</sup>研究发现,我国红树林面积呈先减少后增加的趋势。20世纪90年代以前,海岸带港口建设、围塘养殖、毁林造田等社会经济活动改变了全国红树林的分布格局,红树林面积显著减少,生态服务功能显著下降<sup>[5]</sup>。但是自20世纪90年代以来,我国政府开始重视红树林的管护与恢复工作,逐渐扭转了红树林面积减少的趋势,但我国红树林仍面临着气候变化和海岸带社会经济活动的双重影响<sup>[5]</sup>。

当前,气候变化与社会经济活动对红树林生态系统结构、功能的影响,已成为国内外红树林研究的热点。在气候变化方面,研究者主要分析了寒潮和霜冻等低温事件、干旱气候可能对红树林分布造成的生态风险<sup>[6]</sup>;在社会经济活动方面,研究者重点关注了海岸带社会经济活动对红树林景观格局变化的影响及其机制<sup>[7]</sup>。尽管我国超过75%的红树林已被划入各级自然保护区,但气候变化与社会经济活动(如海岸养殖、港口运输和旅游等)对红树林生态系统的影响仍不可忽视<sup>[8]</sup>。

我国《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025年)》正式印发,标志着红树林的管护与修复工作进入了新阶段。湛江市特呈岛分布有全球罕见的白骨壤(*Avicennia marina*)古树群落,部分林龄已超过500年,具有特殊的科研与生态人文价值<sup>[9]</sup>。然而,特呈岛红树林仍面临着大面积退化的风险,部分区域已形成大量的林窗<sup>[10]</sup>。湛

江港口作业部分改变了区内的水文环境,对特呈岛红树林的生存造成一定的威胁<sup>[11]</sup>。受周期性潮水冲刷和人类扰动的双重影响,已有红树林外缘的白骨壤因侵蚀严重而死亡<sup>[12]</sup>。因此,积极研究气温、降雨与社会经济活动对特呈岛红树林分布的影响,可为红树林的管护与修复工作提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

特呈岛位于湛江市霞山区东南方的湛江港内(图1),地势平缓,潮型为不规则半日潮,平均低潮位为1.33 m,高潮位为3.20 m。特呈岛气候温和湿润,属热带海洋性季风气候,年平均气温为22.4℃~24.6℃,年均降雨量超过1000 mm。红树林土壤以沙质土壤为主,常见树种为白骨壤、红海榄(*Rhizophora stylosa*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、木榄(*Bruguiera gymnorrhiza*)等,主要由白骨壤单优群落以及白骨壤-红海榄混交群落组成<sup>[13]</sup>,部分外缘红树林的退化趋势明显。由于距离湛江市区较近,红树林生态系统结构与功能受区内工、农、渔业生产和旅游等活动的影响显著<sup>[14]</sup>。



图1 湛江市特呈岛的区位

Fig. 1 Location of Techeng Island, Zhanjiang

### 1.2 数据收集及研究方法

#### 1.2.1 数据收集

在 Google Earth Pro 7.3 软件中,根据 Google

Earth 历史高分影像, 目视解译出 2003 年至 2020 年红树林的分布范围, 再将目视解译结果从 Google Earth Pro 7.3 软件中导出(KML 文件), 最后将 KML 文件在 ArcMap 10.2 中转换为 Shape 矢量文件, 并统计红树林的分布面积。本文使用的 Google Earth 历史影像空间分辨率均小于 1 m。由于缺少 2004 年、2008 年、2009 年、2010 年和 2016 年的特呈岛 Google Earth 高分影像, 因此, 最终仅有 13 年的红树林分布数据。

气候数据来自温室数据共享中心网站 (<http://data.sheshiyuanyi.com>), 收集湛江站点的气象数据, 选取 1 月平均最低气温、1 月平均最高气温、1 月平均气温、年均气温、枯水期(4—9 月除外)降雨量、年降雨量共 6 项指标。根据 2003—2020 年的《湛江市统计年鉴》, 收集并整理湛江市城区人口、国民生产总值(GDP)、湛江港口货物吞吐量、旅游人次、水产品总产量、农业总产值 6 项指标。

### 1.2.2 研究方法

在 SPSS(Version 18.0)进行相关分析的基础上, 利用 Origin 软件(Version 2021b)进行拟合分析, 分析红树林分布面积随气温、降雨或社会经济的变化趋势。确认当年和不同滞后期(如滞后期 1 年、滞后期 2 年、滞后期 3 年……)的气温、降雨与当年红树林分布面积间的相关性, 根据相关性的大小分别确认气温和降雨对红树林分布面积影响的滞后期。利用 SPSS(Version 18.0)进行主成分分析, 进一步确定气候条件/海岸带社会经济活动与红树林面积间的动态关系。所有统计分析均采用 95% 的置信水平。

## 2 结果与讨论

### 2.1 历年红树林变化

2003—2020 年特呈岛红树林面积的变化如图 2 所示。从总体上看, 红树林的总面积呈先降后升的趋势。2006 年红树林总面积最大, 为 17.08 ha; 2017 年红树林总面积最小, 为 13.09 ha, 相比 2006 年, 下降幅度达 23.36%。2017 年以后, 全岛红树林总面积呈明显上升趋势, 2020 年红树林总面积达 15.88 ha, 与 2017 年相比, 累积增长 21.31%, 但与 2006 年相比, 仍然下降

7.03%。从图 3 可以看出, 特呈岛红树林面积分布变化比较大的区域主要是中西部地区, 而西南方向较为稳定。解译结果和现场踏勘显示, 岛上红树林呈明显的退化趋势, 中西部方向退化更为明显。退化的原因主要有: (1) 人类社会经济活动侵占红树林生境, 如虾塘养殖活动中直接铲除红树林边缘的植被; (2) 海岸带污染问题, 如红树

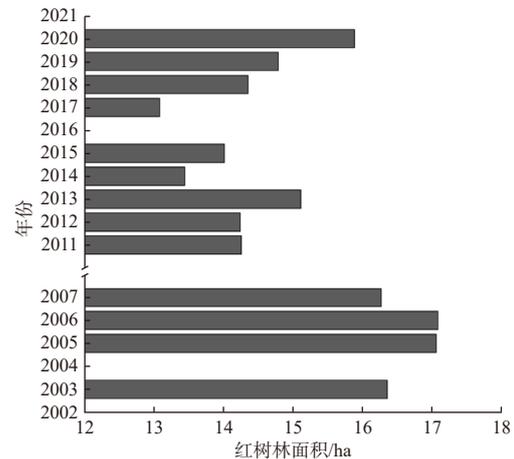


图 2 湛江市特呈岛历年红树林面积变化

Fig. 2 Changes in mangrove forest area over the years in Techeng Island, Zhanjiang

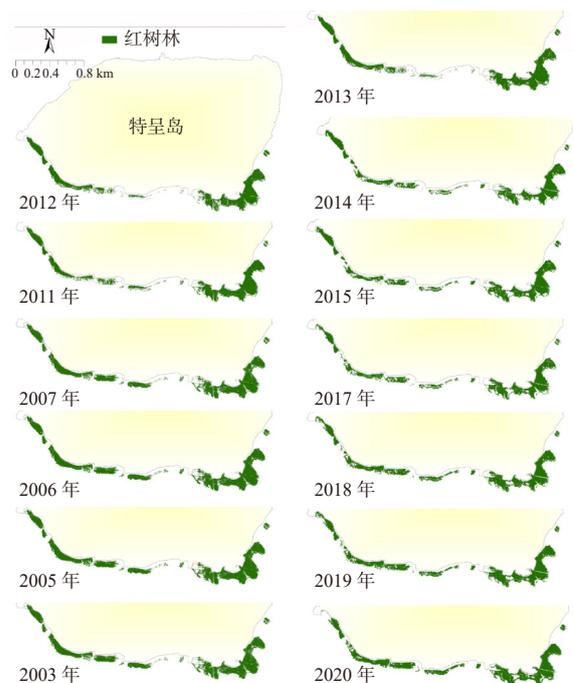


图 3 湛江市特呈岛历年红树林空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of mangrove forests over the years in Techeng Island, Zhanjiang

林群落中有大量的塑料垃圾,影响了红树林的更新与迁移;(3)海岸带土壤侵蚀严重,导致红树林的退化乃至死亡。

## 2.2 气温对红树林分布的影响

气温是影响红树林分布格局的关键非生物因素之一,适宜的气温有利于红树林植物的生长繁殖与迁移扩散,但极端低温天气不利于红树林的保育工作。相关性分析结果显示,红树林面积与当年气温的相关性不显著,但是与3年前气温的相关性显著,气温对红树林分布的影响具有明显的滞后性。由图4可知,除年度平均气温外,3年前的1月最低气温均值、1月平均气温和1月最高气温均值均与红树林面积呈显著正相关,即气温升高可促使其分布面积增加。需要注意的是,气温对红树林分布的影响是持续性的,且气温的影响在当年并不显著,它的影响可能

在3年后才有直观表现。与1月平均气温和1月最高气温均值相比,1月最低气温均值与红树林面积间线性回归模型的斜率最大,这在一定程度上说明,1月最低气温对红树林分布面积的影响较大。1月最高气温均值与红树林面积的相关性明显低于1月最低气温均值、1月平均气温与红树林面积间的相关性(图4),进一步证实了1月的最低气温对红树林分布面积有重要的影响。1月是寒潮事件发生频率较高的月份<sup>[15]</sup>,极端低温天气对红树林分布格局的持续性影响不容忽视。研究表明,极端低温天气可降低红树植物幼苗的存活率,甚至导致成年大树冻伤死亡,也可导致红树林植物大量落花、落果,影响繁殖体产量,影响未来几年内幼苗的自然扩散<sup>[16]</sup>。低温胁迫也会导致红树林的光合作用能力受损,阻碍其生长发育<sup>[17]</sup>。

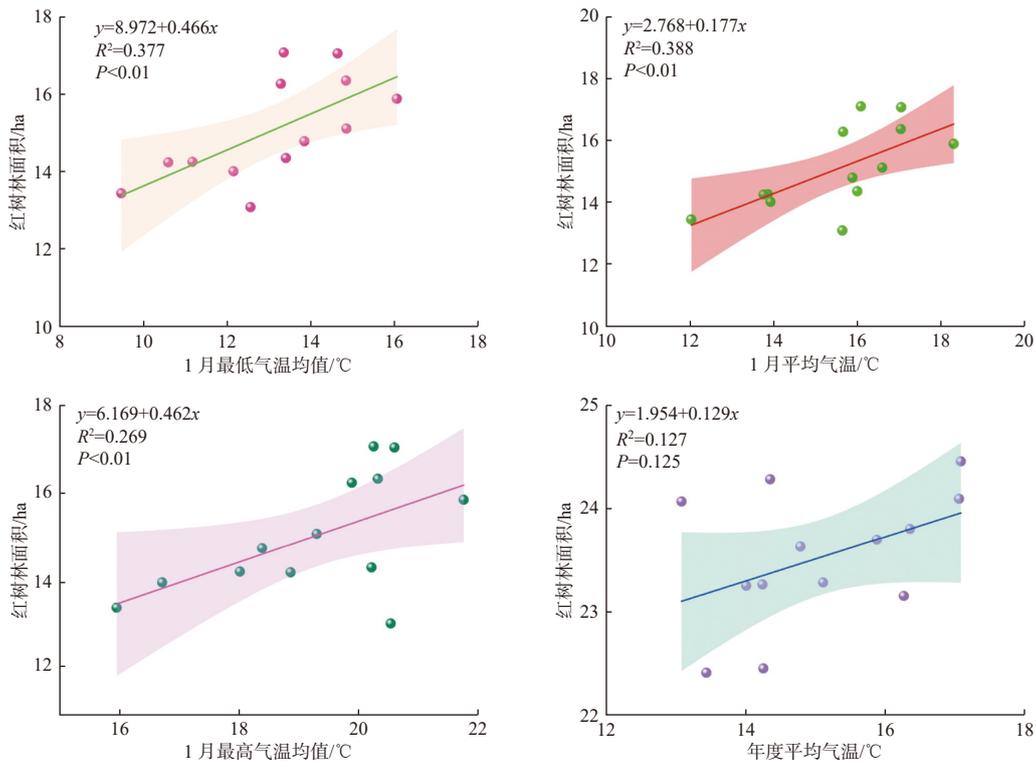


图4 气温与红树林面积间的相关性(滞后期为3年)

Fig. 4 Correlation between air temperature and mangrove area (the lag period of 3 years)

另外,树高与林分密度是调节林内温度的重要因素。一般情况下,矮小且林分密度低的红树林更易受到寒风冻害<sup>[17]</sup>。白骨壤是特呈岛红树林的主要优势种<sup>[12]</sup>。相比其他红树树种的耐寒

能力,白骨壤的抗寒能力较强<sup>[18]</sup>。但是,白骨壤群落的林分密度往往远低于秋茄(*Kandelia obovata*)群落和桐花树群落。根据研究者对特呈岛红树林的野外调查发现,向水一侧红树林的林

分密度更低,群落高度亦显著低于向陆一侧的红树林,这在一定程度上限制了红树林的抗寒能力。值得注意的是,特呈岛向水一侧的红树林退化趋势更为明显,据分析,寒潮也是红树林退化的驱动力之一。

由于缺乏 2008 年、2009 年和 2010 年 Google Earth 高分影像,导致无法分析相应年份红树林变化的基本情况。但是,2011 年与 2007 年相比,特呈岛红树林面积大幅下降,降幅达 12.35%,减少的红树林主要集中在中西部向海一侧(图 5)。红树林面积的大幅减少可能与 2008 年华南地区遭遇的 50 年一遇的大范围寒潮有关,这场寒潮无论是持续时间还是强度都极为罕见<sup>[19]</sup>。在全球尺度上,极端寒潮事件可限制红树林植物的纬向分布,促使红树林向低纬度迁移,但当前全球气候变暖、冬季低温胁迫的频率降低才是影响红树林分布的主要因素<sup>[20]</sup>。需要注意的是,寒潮事件对特呈岛红树林分布的影响需要更多的证据,如 2008 年、2009 年和 2010 年高分影像的获取,可以更加直观地分析 2008 年极端低温对红树林分布的定量影响。

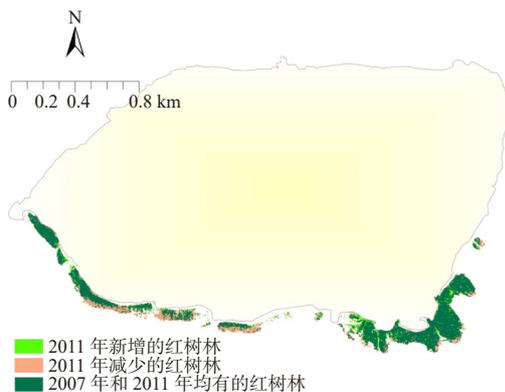


图 5 2007—2011 年特呈岛红树林的空间分布变化

Fig. 5 Variation in spatial pattern of mangrove forests in Techeng Island from 2007 to 2011

### 2.3 降雨对红树林分布的影响

通常,年降雨量的增加有利于红树林分布面积的增加,但本研究发现,特呈岛红树林分布面积与年降雨量间无显著相关性,且当年枯水期和丰水期的降雨量与红树林分布面积间亦无显著相关性。回归分析结果显示(图 6),红树林面积与 2 年前的枯水期降雨量呈显著负相关,说明枯

水期降雨量的增加可影响红树林的分布,使其面积减少,且枯水期降雨对红树林分布面积的影响亦有明显的滞后性。与气温影响的滞后期相比,降雨影响的滞后期较短,仅为 2 年。并且,降雨量对红树林分布面积的影响主要集中在枯水期,丰水期的影响较小,导致全年降雨量与红树林的分布面积无显著相关性。

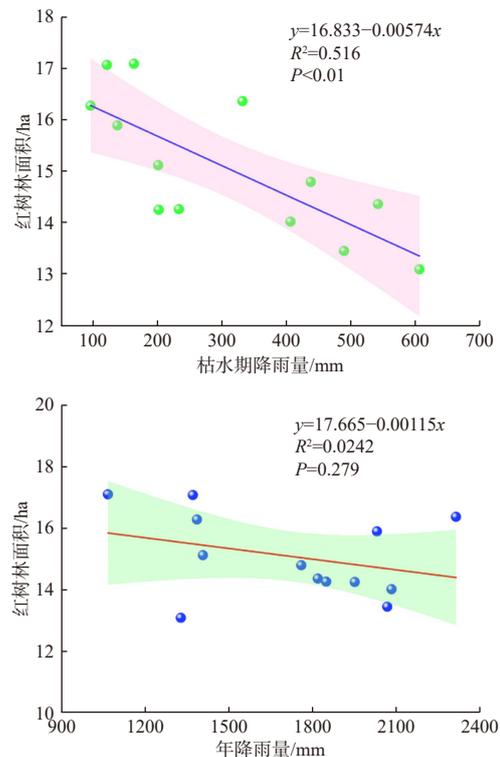


图 6 降雨与红树林面积间的相关性(滞后期为 2 年)

Fig. 6 Correlation between rainfall and mangrove area (the lag period of 2 years)

有研究表明,雨季降雨主要通过影响地表径流量、沉积物输送过程和海平面高度变化等间接影响红树林分布<sup>[21]</sup>。若雨季降雨量较大,可能导致一段时间内海平面上升,使红树林处于水淹的环境,而长期水淹会抑制植物的呼吸作用和光合作用,限制物质与能量的生产,抑制红树植物的生长、繁殖<sup>[22]</sup>。然而,本研究发现,枯水期降雨量对红树林分布的影响更加明显,且相关影响具有滞后性(图 6),但是当前关于枯水期降雨对红树林分布影响的研究较少。枯水期降雨量的增加使红树林面积减少,这可能是由于枯水期的降雨量较少,气温较低,属低温干燥环境,而降雨

量的增多意味着相对较低的气温。白文丽等<sup>[23]</sup>在研究春季降水对高寒草甸草原生态系统植物生长的影响中发现, 在低温环境中, 降雨量增加不能满足植被光、热需求, 植被的生物量积累减少, 而红树植物同样存在相应的应对低温干旱环境的响应机制。华南地区枯水期一般为冬季至次年春季, 此时降雨量增加可能使水体温度降低, 低于红树林分布的临界水温, 而较低的气温和水温的相互作用可能对红树植物产生低温胁迫, 导致红树植物的衰退, 甚至死亡<sup>[18]</sup>。这在一定程度上解释了随着低温环境的发生, 枯水期降

雨增加会导致红树林面积减少, 而这将会持续限制红树林植物的恢复发展甚至扩张, 使红树林发生退化。

#### 2.4 社会经济活动对红树林分布的影响

人口数量、GDP、农业总产值、水产品产量、港口货物吞吐量与旅游人数均与红树林面积呈显著负相关(图 7)。海岸带社会经济活动会增加对红树林生态系统的扰动, 直接或间接地导致红树林分布面积的减少。从线性回归的决定系数  $R^2$  来看, 农业总产值与红树林面积间的相关性最强, 决定系数  $R^2$  为 0.754; GDP 与红树

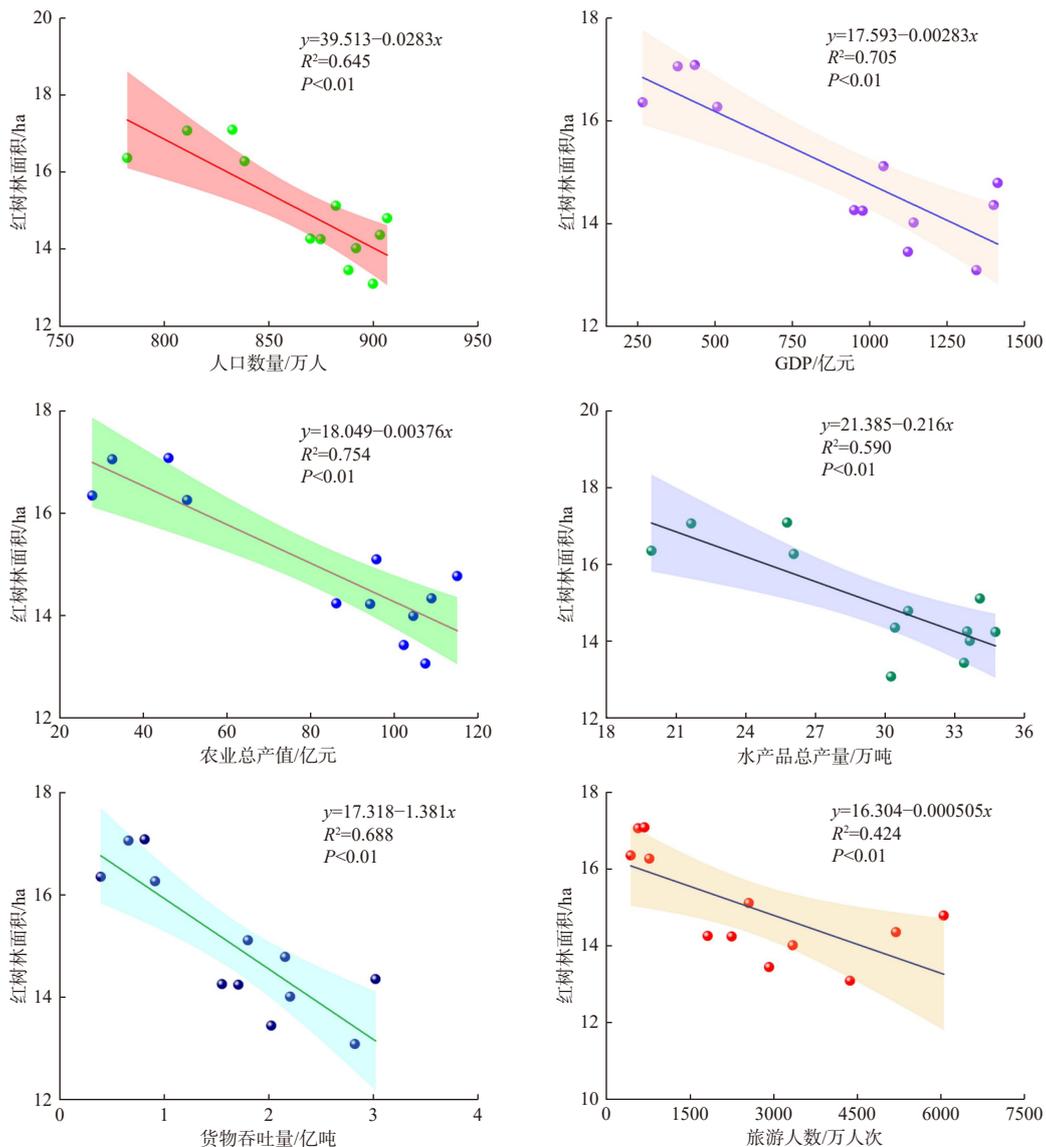


图 7 人口数量、GDP、农业总产值、水产品总产量、货物吞吐量和旅游人数与红树林面积间的相关性

Fig. 7 Correlation between population, GDP, agricultural output value, total aquatic product, cargo throughput, number of tourists and mangrove area

林面积间的相关性次之, 决定系数  $R^2$  亦超过 0.7, 说明当地产业发展特别是农业生产活动对红树林分布的扰动较大, 是红树林分布面积减少的重要人为驱动因素; 旅游人数与红树林分布面积间的相关性最小, 决定系数  $R^2$  不超过 0.45。另外, 港口货物运输对红树林分布的影响也较大, 货物吞吐量与红树林分布面积间的线性回归方程的决定系数  $R^2$  接近 0.7。

由于生态环境政策与监管措施的不完善、保护工作的不充分, 以及随着城镇化进程与社会经济的快速发展, 工、农业污水和生活污水的排放量增加, 这些都持续地改变着红树林的生境, 海岸带土地开发利用与污染排放等社会经济活动对红树林分布的影响依然不容忽视<sup>[22]</sup>。预测结果表明, 受人口增长、土地利用变化和陆源污染的影响, 未来 20 年印度尼西亚各沿海城市的红树林退化面积将达 20%~60%<sup>[24]</sup>。由于海岸带农业和水产养殖的不断发展, 增加了农田、鱼塘等的开挖活动, 农业生产导致的面源污染与虾塘养殖废水的排放将影响红树林生境条件, 导致红树林大面积退化<sup>[25]</sup>。

特呈岛红树林旅游人次逐年增加, 而缺乏严格管制的旅游活动可能对红树林造成扰动。也有研究指出, 在湛江湾港口活动中, 货轮进出港增加了海浪频率<sup>[22]</sup>, 可能扰动红树林沉积物, 导致潮滩高程下降, 加速红树林的退化进程。船舶交通及港口码头活动还可能存在石油泄漏的污染问题<sup>[26]</sup>, 石油残留物黏附在红树植被的根上, 会影响其呼吸作用<sup>[27]</sup>, 甚至导致红树植物的死亡。

### 2.5 气温、降雨与社会经济活动对红树林分布的协同影响

从主成分分析结果可以看出, 影响红树林面积的是第一主成分(表 1)。其中, 1 月平均最低气温、1 月平均最高气温、1 月平均气温、枯水期降雨量、城区人口、市区 GDP、货物吞吐量、旅游人次、市区水产品总产量、市区农业总产值在第一主成分中的相关系数较大, 相关指标与红树林面积的相关性显著。红树林面积与 1 月气温呈正相关, 与枯水期降雨量呈负相关, 与海岸带社会经济活动呈负相关, 说明红树林面积受气候

因素影响的同时, 也受社会经济活动的深刻影响。气候指标的载荷值为 0.36~0.70, 小于社会经济活动指标的载荷值(0.79~0.96), 可见社会经济活动对红树林面积的影响更加明显。因此, 在强化红树林的保育工作中, 应减少海岸带社会经济活动对红树林的扰动。

表 1 主成分分析结果

Tab.1 Principal component analysis result

因子	成份		
	主成分1	主成分2	主成分3
方差	7.87	2.90	1.08
特征值	60.50	22.33	8.31
红树林面积	-0.95	0.01	-0.09
1月平均最低气温	-0.65	0.60	0.09
1月平均最高气温	-0.67	0.61	-0.06
1月平均气温	-0.70	0.66	0.06
年均气温	-0.45	0.79	0.08
枯水期降雨量	0.69	0.41	0.50
年降雨量	0.36	-0.43	0.76
城区人口数量	0.92	0.28	-0.24
市区GDP	0.92	0.36	-0.04
货物吞吐量	0.88	0.44	-0.01
旅游人次	0.79	0.55	0.11
市区水产品总产量	0.88	-0.15	-0.36
市区农业总产值	0.96	0.22	-0.11

### 3 结论

(1) 本研究探讨了气温、降雨与社会经济活动对特呈岛红树林分布面积的影响。结果表明, 1 月气温与红树林的面积呈显著正相关, 枯水期降雨量与红树林面积呈显著负相关, 且气温与枯水期降雨量对红树林分布面积的影响具有明显的滞后性。湛江市区人口、GDP、农业总产值、水产品总产量、货物吞吐量和旅游人次等均与特呈岛红树林分布面积呈负相关关系, 海岸带社会经济活动对特呈岛红树林的保育工作尚存在威胁。

(2) 建议在特呈岛建立定位生态监测站, 跟踪监测并分析气候变化对红树林面积以及群落结构与功能的定量影响; 强化港口、渔业以及旅

游活动的监管,从而最大限度地减少人类活动对红树林生境的扰动;重视海岸带污染减排工作,处理好社会经济发展与红树林保护的关系,减少海岸带污染排放对红树林的负面影响。

#### 参考文献:

- [1] 林益明,林鹏.中国红树林生态系统的植物种类、多样性、功能及其保护[J].*海洋湖沼通报*,2001(3):8-16.
- [2] 陈鹭真,潘良浩,邱广龙.中国滨海蓝碳及其人为活动影响[J].*广西科学院学报*,2021,37(3):186-194.
- [3] POLIDORO B A, CARPENTER K E, COLLINS L, et al. The loss of species: mangrove extinction risk and geographic areas of global concern[J].*PLoS One*,2010,5(4): e10095.
- [4] 王浩,任广波,吴培强,等.1990—2019年中国红树林变迁遥感监测与景观格局变化分析[J].*海洋技术学报*,2020,39(5):1-12.
- [5] 杨盛昌,陆文勋,邹禛,等.中国红树林湿地:分布、种类组成及其保护[J].*亚热带植物科学*,2017,46(4):301-310.
- [6] XIMENES A C, PONSONI L, LIRA C F, et al. Seasonal atmospheric and oceanographic factors influencing poleward mangrove expansion in the southeastern American coast[J].*Estuarine, Coastal and Shelf Science*,2021,262:107607.
- [7] ADAME M F, REEF R, SANTINI N S, et al. Mangroves in arid regions: ecology, threats, and opportunities[J].*Estuarine, Coastal and Shelf Science*,2021,248:106796.
- [8] 叶翔,王爱军,马牧,等.高强度人类活动对泉州湾滨海湿地环境的影响及其对策[J].*海洋科学*,2016,40(1):94-100.
- [9] 晁碧霄,胡文佳,陈彬,等.基于MaxEnt模型的广东省红树林潜在适生区和保护空缺分析[J].*生态学杂志*,2020,39(11):3785-3794.
- [10] 高秀梅,韩维栋.特呈岛白骨壤古树群的调查分析[J].*防护林科技*,2008(1):6-8,42.
- [11] 曾群英,李际平,黄剑坚,等.特呈岛退化红树林林窗特征[J].*南京林业大学学报:自然科学版*,2014,38(6):170-174.
- [12] 陈碧珊,苏文华,罗松英,等.湛江特呈岛红树林湿地土壤重金属含量特征及污染评价[J].*生态环境学报*,2017,26(1):159-165.
- [13] 许会敏,叶蝉,张冰,等.湛江特呈岛红树林植物群落的结构和动态特征[J].*生态环境学报*,2010,19(4):864-869.
- [14] 马立宇,黄剑坚.特呈岛红树植物群落特征及生态位研究[J].*防护林科技*,2019(7):9-12.
- [15] 刘亚云,孙红斌,陈桂珠.特呈岛红树林自然保护区水环境质量评价[J].*海洋湖沼通报*,2012(3):115-122.
- [16] 伍红雨,杜尧东.1961—2008年华南区域寒潮变化的气候特征[J].*气候变化研究进展*,2010,6(3):192-197.
- [17] 陈鹭真,王文卿,张宜辉,等.2008年南方低温对我国红树植物的破坏作用[J].*植物生态学报*,2010,34(2):186-194.
- [18] COHEN M C L, DE SOUZA A V, LIU K B, et al. Effects of the 2017–2018 winter freeze on the northern limit of the American mangroves, Mississippi River delta plain[J].*Geomorphology*,2021,394:107968.
- [19] 陈鹭真,郑文教,杨盛昌,等.红树林耐寒性和向海性生态系列对气候变化响应的研究进展[J].*厦门大学学报:自然科学版*,2017,56(3):305-313.
- [20] 黄雪松,陈燕丽,莫伟华,等.近60年广西北部湾红树林生态区气候变化及其影响因素[J].*生态学报*,2021,41(12):5026-5033.
- [21] 韦兴平,石峰,樊景凤,等.气候变化对海洋生物及生态系统的影响[J].*海洋科学进展*,2011,29(2):241-252.
- [22] WANG Y S, GU J D. Ecological responses, adaptation and mechanisms of mangrove wetland ecosystem to global climate change and anthropogenic activities[J].*International Biodeterioration & Biodegradation*,2021,162:105248.
- [23] 白文丽,胡发成,赵雅丽.降水对高寒草甸草原植被盖度及地上生物量的影响[J].*畜牧兽医杂志*,2021,40(1):62-64.
- [24] WIBOWO A, SUPRIATNA S. Coastal environmental vulnerability on coastal cities in indonesia[J].*Journal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*,2011,3(2):1-20.
- [25] 徐慧鹏,刘涛,张建兵.红树林碳埋藏过程对海平面上升、气候变化和人类活动的响应[J].*广西科学*,2020,27(1):84-90.
- [26] OLIVEIRA T S, DE A XAVIER D, SANTOS L D, et al. Reconstructing the history of environmental impact in a tropical mangrove ecosystem: A case study from the Suape port-industrial complex, Brazil[J].*Regional Studies in Marine Science*,2021,44:101747.
- [27] ETEMADI H, SMOAK J M, ABBASI E. Spatiotemporal pattern of degradation in arid mangrove forests of the Northern Persian Gulf[J].*Oceanologia*,2021,63(1):99-114.