

1990年—2020年广西北仑河口红树林扰动研究

陈高^{1,3}, 钟才荣², 李明玉¹, 余洲¹, 刘心雨¹, 贾明明³

1. 延边大学 地理与海洋科学学院, 延吉 133002;

2. 海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院), 海口 571100;

3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所 湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102

摘要: 监测国家级自然保护区内红树林的扰动, 可为滨海湿地生态系统的管理和保护提供数据支撑和决策支持。本研究使用谷歌云平台GEE (Google Earth Engine) 建立Landsat长时间序列卫星数据集, 结合LandTrendr算法研究了广西北仑河口红树林自然保护区1990年—2020年红树林的扰动情况。结果表明: (1) 1990年—2020年, 共有45.94 ha的红树林发生了扰动, 其中2001年保护区内红树林扰动面积最大, 为12.91 ha; (2) 1990年—2020年, 轻微扰动和中度扰动所占比例较大, 分别为57.5%和29.17%, 严重扰动所占比例最少, 只有13.33%; (3) 红树林变化像元的总体识别精度达到88.56%, 对扰动年份检测的总体精度达到87%, Kappa系数为0.76。本研究基于LandTrendr算法解析了30年间北仑河口保护区内红树林发生扰动的年份、频率和面积, 结合实际情况分析了导致扰动的因素, 认为人类活动是北仑河口红树林扰动的次要原因, 自然因素, 如虫灾, 台风等是导致扰动的主要原因。本研究的结论和方法可为红树林保护区管理处制定科学合理的保护和恢复政策提供重要的决策支持。

关键词: 遥感, 红树林, 保护区, 谷歌地球引擎GEE (Google Earth Engine), LandTrendr算法

引用格式: 陈高, 钟才荣, 李明玉, 余洲, 刘心雨, 贾明明. 2022. 1990年—2020年广西北仑河口红树林扰动研究. 遥感学报, 26(6): 1112–1120

Chen G, Zhong C R, Li M Y, Yu Z, Liu X Y and Jia M M. 2022. Disturbance of mangrove forests in Guangxi Beilun Estuary during 1990–2020. National Remote Sensing Bulletin, 26(6): 1112–1120 [DOI: 10.11834/jrs.20221579]

1 引言

作为全球生产力最高的生态系统之一的红树林, 是生长在热带、亚热带海湾的一种特殊的木本植物群落, 它发达的根系能让它适应陆海过渡的特殊生态系统 (林鹏, 1997; 张乔民等, 1997)。由于其独特的海陆过渡特性, 红树林在维持滨海生态稳定、促进海陆能量循环中起着重要作用 (林鹏等, 2005; Spalding等, 2010)。同时, 红树林可以吸附温室气体, 能有效应对全球气候变暖带来的挑战 (Bouillon等, 2008; 徐慧鹏等, 2020)。此外, 红树林还能够固土合淤, 防风护堤, 净化水质, 为人类提供经济产品、为生物提供生长繁殖环境等方面起着重要的作用, 被国际社会列为重点保护对象 (林鹏, 1997; 毛丽君,

2011; 但新球等, 2016)。在过去的一个世纪, 全球约有67%的红树林遭到不可逆破坏, 比热带雨林和其他内陆森林受到的威胁都要更大 (Valiela等, 2001; UN-DESA, 2019)。如果任由其发展下去, 全球红树林将在未来百年内消失殆尽, 其独特的价值也将荡然无存, 沿海居民将直面海啸威胁, 渔场消失, 大量动物将面临灭绝 (Duke等, 2007; 贾明明, 2014)。因此, 有效加强中国红树林保护、管理和生态恢复工作已刻不容缓。

然而, 红树林生态系统具有敏感性和脆弱性, 自然和人为扰动都会对红树林生态系统的物质循环、能量流动和未来演替产生深远影响, 为红树林的保护和恢复工作带来难度。因此, 快速、准确地监测红树林的扰动和恢复, 对于评估红树林生态系统健康至关重要, 可为红树林管理提供必

收稿日期: 2021-09-04; 预印本: 2022-03-03

基金项目: 中国科技基础资源调查方案(编号:2019FY100607); 中国科学院青年创新促进会(编号:2021227); 国家自然科学基金青年基金项目(编号:42101392)

第一作者简介: 陈高, 研究方向为滨海湿地遥感。E-mail: cg1250498997@163.com

通信作者简介: 贾明明, 研究方向为滨海湿地遥感。E-mail: jiamingming@iga.ac.cn

要的基础信息,有助于制定科学的红树林资源可持续利用政策。

由于红树林生长于可达性极差的潮间带区域,地面调查成本高、效率低,难以满足快速、准确、全面地监测红树林扰动和恢复进程的需求(李春干和谭必增,2003;Kuenzer等,2011)。遥感技术的发展为红树林的实时监测提供了切实可行手段。其中,陆地卫星Landsat系列,具有能够免费获取,记录时间久,年数据量大,空间分辨率较高的优势,在对陆地资源长时间监测中应用广泛(Zhu等,2019;李春干,2002;王胤等,2006)。

时间序列分析方法是通过对时间序列进行特征提取和分析,有效地监测生态系统长期变化的方法(Zhu等,2019)。已有许多专家学者应用不同的时间序列分析方法对全球各地的森林生态系统进行了长时间的监测分析(Kennedy等,2018)。目前,已有多种森林系统扰动变化检测算法。例如Kennedy等(2012)提出的扰动和恢复趋势检测算法LandTrendr、Verbesselt等(2010)提出的季节和趋势中断算法BFAST(Breaks For Additive Season and Trend Monitor)以及Zhu和Woodcock(2014)提出的连续变化检测和分类算法CCDC(Continuous Change Detection and Classification)等。

然而,应用时间序列分析法对红树林扰动和恢复进行监测的遥感研究还处于起步阶段。如Zhang等(2016)利用Landsat影像对美国佛罗里达州Biscayne国家公园内红树林的季节性扰动和恢复进行25年的监测,发现归一化湿度指数(NDMI)对于红树林的变化最为敏感;Awty-Carroll等(2019)基于1988年—2018年Landsat时序影像及CCDC模型监测Sundarbans红树林在飓风Sidr过境前后的扰动与恢复情况,在飓风发生10年后,仍有一半被破坏的红树林没有恢复;De Jong等(2021)应用LandTrendr算法基于2000年—2018年Landsat时序影像确定了苏里南海岸红树林侵蚀、定居和发展模式。

由于时间序列算法的数据处理和算法本身都十分复杂,云基础空间分析平台的出现为应对上述挑战提供了新的思路和视角(楚丽霞,2019)。LandTrendr算法移植到谷歌云平台GEE(Google Earth Engine)上实施,大大提高了计算效率(Kennedy等,2018)。GEE以其高效快捷的云计算的优势可以在几十分钟完成对扰动的监测,而之

前则需要本地计算机上长时间高配置要求才能完成同样的任务。GEE平台为研究密集时间序列红树林扰动提供了新机遇。

红树林的人为和自然扰动情况,是红树林生态系统科学保育和管理的依据。广西壮族自治区大陆岸线长1490 km,单位长度海岸线上红树林分布面积为全国之最(贾明明,2014)。本文选取广西北仑河口国家级自然保护区,利用GEE云平台和LandTrendr算法进行红树林变化检测和分析,追踪近30年来广西北仑河口国家级自然保护区的红树林扰动,探明北仑河红树林扰动发生的时间和空间,分析扰动原因,以期红树林的科学保护和管理提供技术支撑和基础数据。

2 数据和研究方法

2.1 研究区概况

广西北仑河口国家级自然保护区(以下简称“北仑河口保护区”)位于广西壮族自治区防城港市防城区和东兴市境内,保护区北边是防城港市,南边是北部湾,西边与越南毗邻,从东向西依次是江平三岛、珍珠港和北仑河口,地理位置为 $21^{\circ}31'00''N$ — $21^{\circ}37'30''N$, $108^{\circ}00'30''E$ — $108^{\circ}16'30''E$,如图1所示。1985年经原防城县人民政府批准建立该保护区,随后在1990年和2000年分别晋升为自治区级保护区和国家级保护区。保护区海岸线为87 km,拥有河口海岸、开阔海岸和海域海岸等地貌类型,地处热带海洋性季风气候区。保护区珍珠湾内生长着罕见的连片木榄和老鼠簕纯林。保护区养殖业渔业发达,同时也是候鸟迁徙的重要中继站与繁殖地。

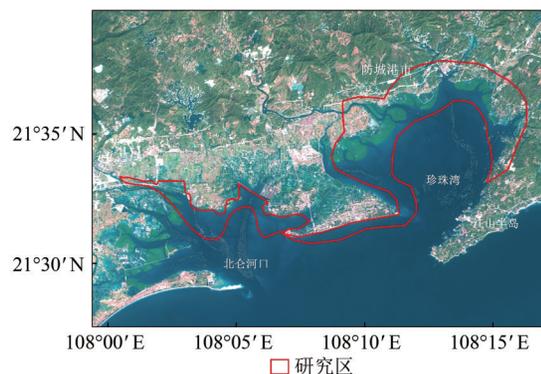


图1 北仑河口保护区地理位置

Fig. 1 Geographical location of Beilun River Estuary Reserve

2.2 数据获取与处理

首先在GEE云平台上调用1990年—2020年6月到8月的Landsat的地表反射率数据构建时间序列数据集。夏季红树林生长茂盛,选择夏季影像可以最大程度减少因物候变化而检测到伪变化。然后通过Landsat OLI影像与TM/ETM+影像传感器光谱值之间的统计协调函数优化这两个传感器数据之间的时间连续性(Roy等,2016)。之后再用质量评估波段(QA)对图像进行云、水、积雪和云阴影的掩膜处理。最后利用多维中值(medoid)方法,构建研究区30年的年度时间序列影像集。通过比较不同比值指数和波段对红树林扰动的敏感性,发现归一化植被指数(NDVI)(式(1))对红树林的扰动识别效果最好。因此,本研究计算数据集中的所有影像的NDVI。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

式中,NIR为近红外波段的反射率值,RED为红波段的反射率值。

红树林生长范围数据来自CAS_Mangroves数据集,该数据集是基于面向对象方法生成的,包含1973年—2020年中国红树林空间分布数据(贾明明等,2021)。在红树林解译过程中,研究人员充分考虑了不同潮汐状态对红树林的影响,针对高潮和低潮影像采取不同的解译方法,最终总体分类精度达到92%。

本研究从CAS_Mangrove数据集中提取北仑河口1990年—2020年的红树林分布数据,对这些数据进行叠加分析,取并集作为本研究的具体研究区如图2所示,最后通过ArcGIS 10.8软件处理GEE平台的结果栅格图可以得到保护区红树林的扰动面积。

3 研究方法

3.1 LandTrendr算法监测红树林扰动及其强度

LandTrendr算法可用于监测时间序列图像上红树林的扰动和恢复,并可以检测这些变化发生的时间和强度。LandTrendr提供了一种光谱—时间分割算法,降低背景噪声的同时可用于检测中等分辨率卫星图像中逐个像素的时间序列中的变化(Kennedy等,2018)。LandTrendr起初是为了监测陆地森林年度变化而开发的一种扰动监测算法

(Kennedy等,2012; Sengupta等,2019)后来人们将其应用在其他地物类型中进行监测年度扰动变化。LandTrendr算法生成年度最佳影像采用的是多维中值技术进行像素级影像合成。该方法选择的中值像素与观测到的波段之间的像素值的平方和最小,此举对极端像素值具有鲁棒性。而又因为所选择的像素同时是该像素的真实值之一,也保留了与各波段之间的关系(Flood,2013)。利用最佳可用像素合成,LandTrendr使用统计拟合算法来分割光谱轨迹(图3)。

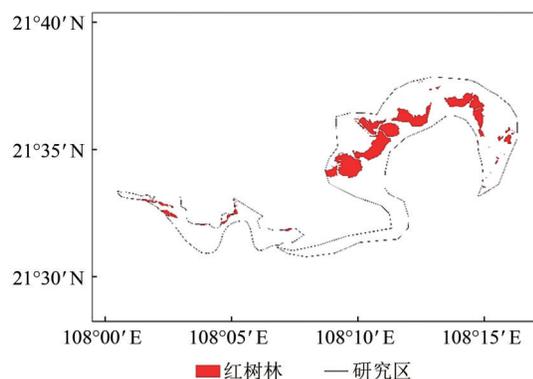


图2 1990年—2020年北仑河口保护区红树林生长区域
Fig. 2 Mangrove forest growth area of Beilun River Estuary Reserve from 1990 to 2020

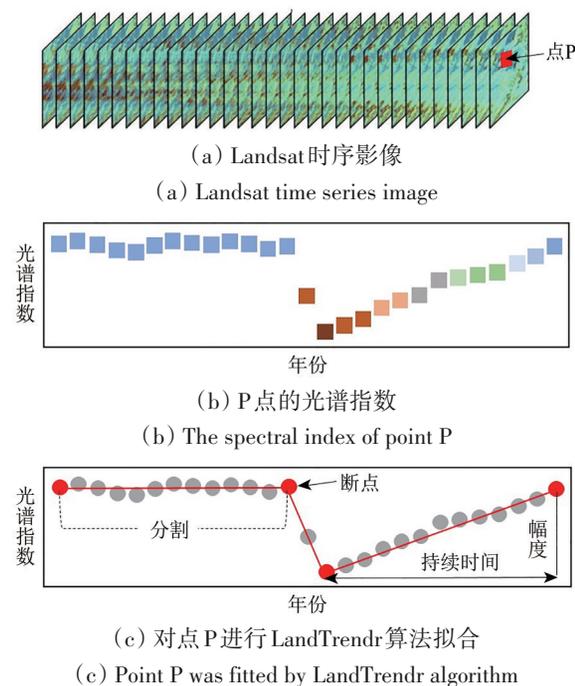


图3 LandTrendr变化检测算法的概念(Kennedy等,2018)
Fig. 3 The concept of LandTrendr change detection algorithm (Kennedy et al., 2018)

该算法对波段进行拟合时, 可以从太阳角度、物候和大气条件变化产生的短期噪声中将长期的变化信息分离出来从而检测 NDVI 序列突变、渐进和恢复趋势 (Kennedy 等, 2012, 2010)。这种短期噪声还可以通过中值合成进一步降低。该算法的运行原理如下 (Kennedy 等, 2018): 在去除短

暂的尖峰后利用简单回归识别潜在的顶点, 此时顶点比最终需要的顶点多, 这些多余的顶点通过低角度变换删除掉, 之后进行拟合, 再通过最弱的顶点来简化模型, 最后利用拟合统计量来选择最佳拟合模型。在参数选择上修改了 LandTrendr 算法默认的参数以适应本研究区 (表 1)。

表 1 LandTrendr 参数
Table 1 LandTrendr parameters

参数	描述	值
Max segments	要在时间序列上拟合的最大段数	6
Spike threshold	抑制尖峰的阈值	0.9
Vertex count overshoot	初始模型的潜在节点回归中可以超过该值	3
Prevent one year recovery	不选定一年后恢复的情况	TRUE
Recovery threshold	如果某个段的恢复率快于回复率的倒数(以年为单位), 则该段被禁止	0.25
Pval threshold	如果拟合模型的 p 值超过此阈值, 则认为该像元没有发生变化	0.05
Best model proportion	取具有大多数顶点的模型, 该模型的 p 值与具有最小 p 值的模型之间的比例不超过这个比例	0.75
Min observations needed	执行输出拟合中需要的最少观测数	6

根据对研究区资料的收集与分析, 该区域内的红树林扰动因素主要有有人为砍伐、极端低温冰冻、台风等。为进一步分析该区域内的扰动强度, 将变化分为 3 类, 分别为严重扰动、中度扰动和轻微扰动。严重扰动包括人为砍伐, 红树林变为建筑物等; 中度扰动包括红树林遭受低温、虫灾等; 轻微扰动包括红树林自身缓慢退化等。以 NDVI 指数的变化 (ΔNDVI) 作为等级划分的指标, 确定扰动等级划分的阈值区间 (刘姗姗 等, 2020)。阈值划分区间如表 2。

表 2 扰动等级阈值划分

Table 2 Interference level threshold division

扰动等级	阈值范围
严重扰动	$\Delta\text{NDVI} \in [0.35, 0.8]$
中度扰动	$\Delta\text{NDVI} \in [0.15, 0.35)$
轻微扰动	$\Delta\text{NDVI} \in [0.02, 0.15)$

3.2 精度验证评价

为了准确评估 LandTrendr 算法探测红树林扰动变化的准确性, 在北仑河口保护区内收集了 437 个验证样点, 包括为 175 个没有发生变化的样点和 262 个发生变化的样点。其中, 通过阅读文献、检索网页收集红树林扰动相关信息, 并结合高空间分辨率的 GE (Google Earth) 图像收集变化样点 175 个, 通过实地考察和咨询保护区工作人员收集

变化样点 87 个和从未发生变化的样点 175 个, 分别记录变化样点发生扰动的时间。利用这 437 个验证点生成混淆矩阵, 计算用户精度、生产者精度和总体分类精度进行精度验证, 评估研究结果的精度。

4 结果与讨论

4.1 精度评价

混淆矩阵如表 3 所示, 用户精度和生产者精度都较高, 达 84% 以上, 总体精度达到了 88.56%, Kappa 系数为 0.76, 表明检测结果与验证样点具有很好的一致性。对于检测出变化的像元, 评估了变化年份的准确性, 如表 4 所示。除了 2014 年生产者精度为 72% 外, 其他年份均超过了 80%, 用户精度除 1991 年、2001 年和 2017 年稍低以外, 其他年份都超过了 88%, 总体精度达到 87%。

表 3 红树林扰动精度评估

Table 3 Mangrove forest disturbance accuracy assessment

类别	变化像元	稳定像元	像元总数	用户精度/%
变化像元	235	27	262	89.69
稳定像元	23	152	175	86.86
像元总数	258	179	437	
生产者精度/%	91.09	84.92		
总体精度/%		88.56	Kappa 系数	0.76

表4 红树林扰动年份精度评估
Table 4 Accuracy assessment of mangrove forest disturbance years

年份	生产者精度/%	用户精度/%	年份	生产者精度/%	用户精度/%
1991	95	70	2014	72	88
1995	82	100	2015	88	95
1998	100	100	2016	92	95
1999	84	92	2017	83	75
2001	100	75	2019	95	100
2003	86	95	2020	100	100
2007	97	93	总体精度/%	87	—

4.2 红树林扰动的历史空间分布

图4为1990年—2020年北仑河口红树林发生扰动的年份和空间分布，其中区域I为北仑河口入海口处，区域II、III为珍珠湾沿岸。扰动发生的空间位置主要集中在珍珠湾沿岸如图4(b)、(c)所示，总体上，1990年—2020年共有45.94 ha的红树林发生了扰动(表5)，2001年扰动面积最大，为12.91 ha。2015年和2020年次之，扰动面积分别为10.54 ha和10.45 ha。

图5展示了1990年—2020年北仑河口自然保

护区内红树林扰动强度的时空分布图。其中轻微扰动和中度扰动所占比例较大，分别为57.5%和29.17%，严重扰动所占比例最少，为13.33%(6.13 ha)。严重扰动分布在珍珠湾西南沿岸区域如图5(b)所示。轻微扰动和中度扰动分布较广，面积分别为26.42 ha和13.40 ha。

4.3 人类活动因素

1990年之前，红树林高收益几乎零成本的经济效益使得当地居民人为毁林造池，养殖鱼虾等。珍珠湾内的陆缘红树林被大面积开垦，红树林斑块显著变小，整体性流通性变差(Jia等, 2018)。1990年—2020年，随着国家的宣传以及人们对生态保护的意识觉醒，对红树林的经济、生态价值也有了更深的了解，地方政府与当地居民自发地保护红树林，取消和禁止了许多违法破坏红树林的活动。受保护后的红树林的面积呈现出逐年增长的趋势。红树林在自然演替中斑块面积增大、整体性和连通性增强。除了人为保护红树林，国家和地方政府积极引种红树林和开展人工种植红树林的工作，加速了红树林的恢复(贾明明等, 2021)，广东电白人工种植的红树林就是十分成功的案例。

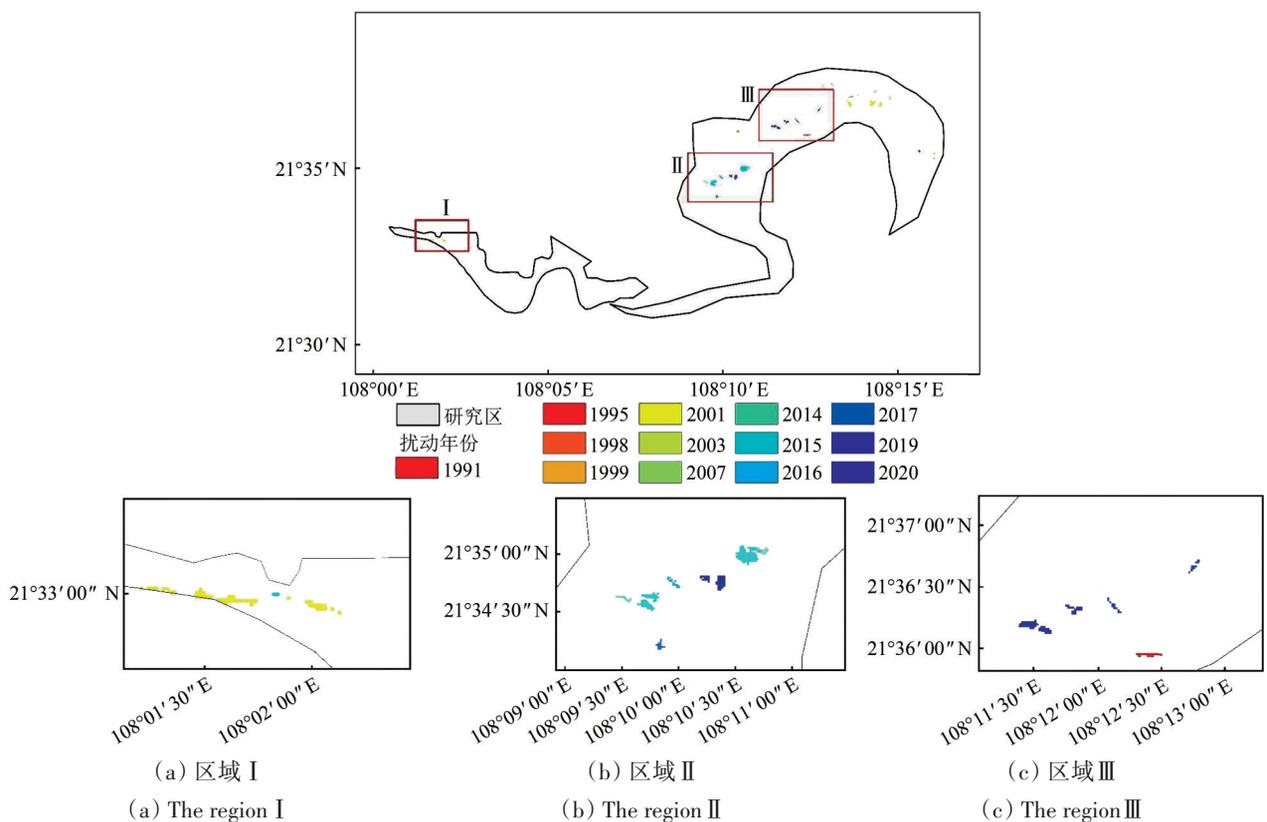


图4 1990年—2020年北仑河口保护区红树林扰动时空分布

Fig. 4 Temporal and spatial changes of mangrove forest disturbances in Beilun River Estuary Reserve during 1990—2020

表5 1990年—2020年北仑河口保护区红树林扰动面积
Table 5 Area of mangrove disturbance in Beilun River Estuary Reserve during 1990—2020

年份	面积/ha	年份	面积/ha
1991	1.49	2014	3.25
1995	0.70	2015	10.54
1998	0.97	2016	1.14
1999	0.88	2017	1.14
2001	12.91	2019	2.20
2003	0.18	2020	10.45
2007	0.09	合计	45.94

过去30年间，北仑河口的红树林被开垦为耕地、养殖池，部分改造成了人工表面。除了直接占用红树林的生存空间，人类活动也间接造成红树林的退化。未经任何处理的养殖池废水和富含磷元素的洗衣水直接排放入红树林生长区后，其中的营养物质可被红树林所吸收 (Pham 和 Yoshino, 2016)，此举导致养殖池附近的红树林生长状况更好。但是养殖池的废水达到一定浓度后

会产生抑制红树林生长的污染物，这种污染物会抑制红树林的生长 (Barg, 1992)。此外除了生活生产废水，红树林周围还有很多渔民违规打桩搭架子养殖生蚝，对红树林、海洋环境和来往的船只都造成不利因素。还有部分渔民会每天涨潮前将一大串鱼篓放入红树林生长区域内，第二天退潮后进去收获小鱼虾蟹等，此举也导致了红树林中人为的踩出了一条道路，在这些道路中，红树林生长情况远不如正常生长的红树林，不是长得矮小就是不能存活。另一方面，人工建筑也会迫使红树林向海迁移。部分沿岸的红树林被人为砍伐，生长区被建设为人工表面来吸引居住人口和旅游人口的增加，由此产生了更多的生活污水影响了陆缘红树林的生长发育；还有许多红树林被改造成人工堤坝，红树林被迫远离陆源，受到海平面上升的威胁增加，堤坝不仅阻碍了海陆生态系统的物质与能量交流，有限的淡水也加速了红树林的逐渐消亡 (Latawiec 等, 2014; Thomas 等, 2017)。

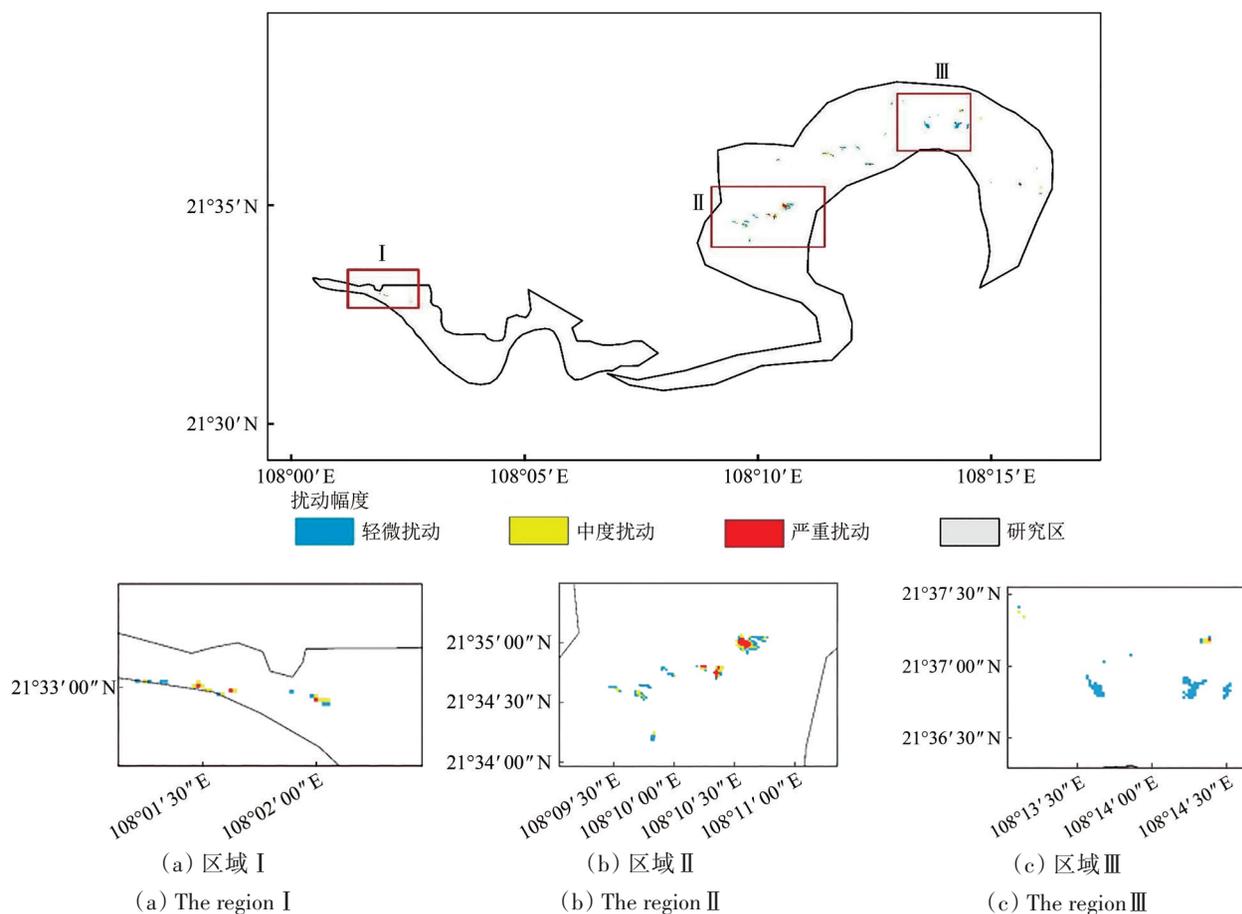


图5 北仑河口保护区扰动强度时空分布

Fig. 5 Temporal and spatial distribution of mangrove disturbance intensity in Beilun River Estuary Reserve

4.4 自然环境因素

过去的30年间除人类活动外,自然因素如海平面上升、互花米草入侵、极端气候、病虫害等也严重威胁着红树林的生长。有专家研究发现过去的几十年中,造成广西红树林面积减小的主要原因并非人类活动导致,而是极端天气,生物入侵及病虫害(王文卿和王瑁,2007;Chen等,2009,2012)。2008年1月—2月,长时间的雨雪极端天气摧毁了广西沿岸的白骨壤和红海榄幼苗(张留恩和廖宝文,2011)。2010年广西沿岸大面积的红树林被害虫毁坏。2015年9月,在防城港市爆发了虫灾,受害树种白骨壤被吃光了叶子(广西壮族自治区海洋局,2015)。2017-08-02,在东兴市竹山村发现有24 ha红树林遭受团水虱侵害,其中约有13 ha在竹山村中间沙,11 ha在竹山村五七堤区域。(防城港市海洋局,2017)。

5 结论

本文利用GEE云平台和LandTrendr算法构建了广西北仑河口国家级自然保护区1990年—2020年的Landsat影像堆栈,深入分析了该保护区内红树林的时间序列变化特征,结合归一化植被指数NDVI评估红树林扰动情况。结果发现:

(1) 1990年—2020年共有45.94 ha的红树林发生了扰动,其中2001年保护区内红树林扰动面积最大,为12.91 ha,扰动发生的地理位置主要分布在珍珠湾西北沿岸;

(2) 1990年—2020年轻微扰动和中度扰动所占比例较大,分别为57.5%和29.17%,严重扰动所占比例最少,只有13.33%;

(3) 对红树林变化像元的总体识别精度达到88.37%,对扰动年份检测的总体精度达到87%,Kappa系数为0.77。

扰动产生的原因既有人类活动因素也有自然环境因素。人为因素方面主要有保护区周边居民直接进入林区,捕获鱼、虾、蟹等,破坏红树林以及种子;违禁圈养家禽,排放污水等;为了方便停靠渔船,在红树林内修建码头等人工设施;生活废水的直接排放,对陆缘红树林的生长造成威胁。自然因素方面主要是极端天气和病虫害导致的大片红树林死亡。本研究结果可以为当地保护区提供近30年北仑河口红树林的扰动时空分布

情况,不仅可以为红树林湿地的管理、保护和科学研究提供数据基础,还能为其他滨海湿地植物群落的长时间序列动态监测提供方法借鉴。

参考文献(References)

- Awty-Carroll K, Bunting P, Hardy A and Bell G. 2019. Using continuous change detection and classification of Landsat data to investigate long-term mangrove dynamics in the Sundarbans region. *Remote Sensing*, 11(23): 2833 [DOI: 10.3390/rs11232833]
- Barg U C. 1992. Guidelines for the promotion of environmental management of coastal aquaculture development. *Food & Agriculture Org.* Vol. 328
- Bouillon S, Borges A V, Castañeda-Moya E, Diele K, Dittmar T, Duke N C, Kristensen E, Lee S Y, Marchand C, Middelburg J J, Rivera-Monroy V H, Smith T J and Twilley R R. 2008. Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2): GB2013 [DOI: 10.1029/2007GB003052]
- Chen B, Yu W W, Liu W H and Liu Z H. 2012. An assessment on restoration of typical marine ecosystems in China—achievements and lessons. *Ocean and Coastal Management*, 57: 53-61 [DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2011.11.007]
- Chen L Z, Wang W Q, Zhang Y H and Lin G H. 2009. Recent progresses in mangrove conservation, restoration and research in China. *Journal of Plant Ecology*, 2(2): 45-54 [DOI: 10.1093/jpe/rtp009]
- Chu L X. 2019. Anthropogenic Influence on Coastal Environment Using Satellite Cloud-Based Platform. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (楚丽霞. 2019. 利用遥感卫星数据云平台研究人类活动对沿海环境的影响. 北京: 中国地质大学(北京)) [DOI: 10.27493/d.cnki.gzdz.2019.001564]
- Dan X Q, Liao B W, Wu Z B, Wu H J, Bao D M, Dan W Y and Liu S H. 2016. Resources, conservation status and main threats of mangrove wetlands in China. *Ecology and Environmental Sciences*, 25(7): 1237-1243 (但新球, 廖宝文, 吴照柏, 吴后建, 鲍达明, 但维宇, 刘世好. 2016. 中国红树林湿地资源、保护现状和主要威胁. *生态环境学报*, 25(7): 1237-1243) [DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.07.021]
- De Jong S M, Shen Y C, De Vries J, Bijnaar G, Van Maanen B, Augustinus P and Verweij P. 2021. Mapping mangrove dynamics and colonization patterns at the Suriname coast using historic satellite data and the LandTrendr algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 97: 102293 [DOI: 10.1016/j.jag.2020.102293]
- Duke N C, Meynecke J O, Dittmann S, Ellison A M, Anger K, Berger U, Cannicci S, Diele K, Ewel K C, Field C D, Koedam N, Lee S Y, Marchand C, Nordhaus I and Dahdouh-Guebas F. 2007. A world without mangroves? *Science*, 317(5834): 41-42 [DOI: 10.1126/science.317.5834.41b]
- 防城港市海洋局. 2017. 北仑河口保护区红树林遭受团水虱侵害 [EB/OL]. [2017-08-02]. http://www.fegs.gov.cn/hyj/dtxx/201708/t20170802_44235.html
- Flood N. 2013. Seasonal composite Landsat TM/ETM+images using the Medoid (a multi-dimensional median). *Remote Sensing*, 5(12):

- 6481-6500 [DOI: 10.3390/rs5126481]
- 广西壮族自治区海洋局. 2015. 关于印发2015年广西沿海红树林虫害治理实施方案的通知[EB/OL]. [2015-09-28]. http://hyj.gxzf.gov.cn/zwgk_66846/fzjz_66896/t3468417.shtml
- Jia M M. 2014. Remote Sensing Analysis of China's Mangrove Forests Dynamics During 1973 to 2013. Changchun: University of Chinese Academy of Science (贾明明. 2014. 1973~2013年中国红树林动态变化遥感分析. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所))
- Jia M M, Wang Z M, Mao D H, Huang C L and Lu C Y. 2021. Spatial-temporal changes of China's mangrove forests over the past 50 years: an analysis towards the Sustainable development goals (SDGs). *Chinese Science Bulletin*, 66(30): 3886-6901 (贾明明, 王宗明, 毛德华, 黄春林, 路春燕. 2021. 面向可持续发展目标的中国红树林近50年变化分析. *科学通报*, 66(30): 3886-6901) [DOI: 10.1360/TB-2020-1412]
- Jia M M, Wang Z M, Zhang Y Z, Mao D H and Wang C. 2018. Monitoring loss and recovery of mangrove forests during 42 years: the achievements of mangrove conservation in China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73: 535-545 [DOI: 10.1016/j.jag.2018.07.025]
- Kennedy R E, Yang Z Q and Cohen W B. 2010. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr—Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 114(12): 2897-2910. [DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.008]
- Kennedy R E, Yang Z, Cohen W B, Pfaff E, Braaten J and Nelson P. 2012. Spatial and temporal patterns of forest disturbance and regrowth within the area of the Northwest Forest Plan. *Remote Sensing of Environment*, 122: 117-133 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.024]
- Kennedy R E, Yang Z Q, Gorelick N, Braaten J, Cavalcante L, Cohen W and Healey S. 2018. Implementation of the LandTrendr algorithm on google earth engine. *Remote Sensing*, 10(5): 691 [DOI: 10.3390/rs10050691]
- Kuenzer C, Bluemel A, Gebhardt S, Quoc T V and Dech S. 2011. Remote sensing of mangrove ecosystems: a review. *Remote Sensing*, 3(5): 878-928 [DOI: 10.3390/rs3050878]
- Latawiec A E, Strassburg B B.N, Rodriguez A M, Matt E, Nijbroek R and Silos M. 2014. Suriname: Reconciling agricultural development and conservation of unique natural wealth. *Land Use Policy*, 38: 627-636 [DOI: 10.1016/j.landusepol.2014.01.007]
- Li C G. 2002. Review on mangrove mapping base on remote sensing. *Central South Forest Inventory and Planning*, 21(4): 52-55, 58 (李春干. 2002. 红树林遥感成图研究综述. *中南林业调查规划*, 21(4): 52-55, 58) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-6075.2002.04.017]
- Li C G and Tan B Z. 2003. Studies on the methods of mangrove inventory based on RS, GPS and GIS. *Journal of Natural Resources*, 18(2): 215-221 (李春干, 谭必增. 2003. 基于“3S”的红树林资源调查方法研究. *自然资源学报*, 18(2): 215-221) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2003.02.014]
- Lin P. 1997. Research on Mangrove Ecosystem in China. Beijing: Science Press (林鹏. 1997. 中国红树林生态系. 北京: 科学出版社)
- Lin P, Zhang Y H and Yang Z W. 2005. Protection and restoration of mangroves along the coast of Xiamen. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 44(S1): 1-6 (林鹏, 张宜辉, 杨志伟. 2005. 厦门海岸红树林的保护与生态恢复. *厦门大学学报(自然科学版)*, 44(S1): 1-6) [DOI: 10.3321/j.issn:0438-0479.2005.z1.001]
- Liu S S, Huang X Y, Zhao S and Chen Y L. 2020. Analysis of forest disturbance and recovery dynamic characteristics based on LandTrendr time segmental algorithm. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 15(4): 15-22 (刘姗姗, 黄鑫毅, 赵帅, 陈耀亮. 2020. 基于LandTrendr模型的亚热带森林干扰与恢复动态变化分析. *亚热带资源与环境学报*, 15(4): 15-22) [DOI: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2020.04.002]
- Mao L J. 2011. Assessment of changes in mangrove forest patterns from multitemporal remotely sensed imagery over Zhanjiang city, Guangdong Province. Nanjing: Nanjing Forestry University. (毛丽君. 2011. 基于遥感的广东湛江红树林湿地动态变化研究. 南京: 南京林业大学)
- Pham T D and Yoshino K. 2016. Impacts of mangrove management systems on mangrove changes in the Northern Coast of Vietnam. *Tropics*, 24(4): 141-151 [DOI: 10.3759/tropics.24.141]
- Roy D P, Kovalskyy V, Zhang H K, Vermote E F, Yan L, Kumara S S and Egorova A. 2016. Characterization of landsat-7 to landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote Sensing of Environment*, 185: 57-70 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.024]
- Sengupta D, Chen R S, Meadows M E, Choi Y R, Banerjee A and Xia Z L. 2019. Mapping trajectories of coastal land reclamation in nine deltaic megacities using google earth engine. *Remote Sensing*, 11(22): 2621 [DOI: 10.3390/rs11222621]
- Spalding M, Kainuma M and Collins L. 2010. *World Atlas of Mangroves*. London: Earthscan [doi: 10.4324/9781849776608]
- Thomas N, Lucas R, Bunting P, Hardy A, Rosenqvist A and Simard M. 2017. Distribution and drivers of global mangrove forest change, 1996-2010. *PLoS One*, 12(6): e0179302 [DOI: 10.1371/journal.pone.0179302]
- UN-DESA. 2019. The Community of ocean action for mangroves-towards the implementation of SDG14. UN-DESA
- Valiela I, Bowen J L and York J K. 2001. Mangrove forests: one of the world's threatened major tropical environments: at least 35% of the area of mangrove forests has been lost in the past two decades, losses that exceed those for tropical rain forests and coral reefs, two other well-known threatened environments. *BioScience*, 51(10): 807-815 [DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051[0807:MFOOTW]2.0.CO;2]
- Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G and Culvenor D. 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 106-115 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.014]
- Wang W Q and Wang M. 2007. *the Mangroves of China*. Beijing: Science Press (王文卿, 王瑁. 2007. 中国红树林. 北京: 科学出版社)
- Wang Y, Zuo P, Huang Z Q and Zou X Q. 2006. Study of the change of mangrove wetland ecosystem and driving forces in Dongzhai-gang. *Sichuan Environment*, 25(3): 44-49 (王胤, 左平, 黄仲琪, 邹欣庆. 2006. 海南东寨港红树林湿地面积变化及其驱动力分析. *四川环境*, 25(3): 44-49) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-3644.2006.03.011]
- Xu H P, Liu T and Zhang J B. 2020. Response of Carbon sequestration in mangroves to sea level rise, climate change and human activities. *Guangxi Sciences*, 27(1): 84-90 (徐慧鹏, 刘涛, 张建兵.

2020. 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. 广西科学, 27(1): 84-90 [DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20200311.010]
- Zhang K Q, Thapa B, Ross M and Gann D. 2016. Remote sensing of seasonal changes and disturbances in mangrove forest: a case study from South Florida. *Ecosphere*, 7(6): e01366 [DOI: 10.1002/ecs2.1366]
- Zhang L E and Lao B W. 2011. Research progress of mangrove wetlands on Qi'ao Island, Zhuhai. *Ecological Science*, 30(1): 81-87 (张留恩, 廖宝文. 2011. 珠海市淇澳岛红树林湿地的研究进展与展望. *生态科学*, 30(1): 81-87) [DOI: 10.3969/j.issn.1008-8873.2011.01.015]
- Zhang Q M, Yu H B, Chen X S and Zheng D Z. 1997. The relationship between mangrove zone on tidal flats and tidal levels. *Acta Ecologica Sinica*, 17(3): 258-265 (张乔民, 于红兵, 陈欣树, 郑德璋. 1997. 红树林生长带与潮汐水位关系的研究. *生态学报*, 17(3): 258-265)
- Zhu Z and Woodcock C E. 2014. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144: 152-171 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.01.011]
- Zhu Z, Wulder M A, Roy D P, Woodcock C E, Hansen M C, Radeloff V C, Healey S P, Schaaf C, Hostert P, Strobl P, Pekel J F, Lymburner L, Pahlevan N and Scambos T A. 2019. Benefits of the free and open Landsat data policy. *Remote Sensing of Environment*, 224: 382-385 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.016]

Disturbance of mangrove forests in Guangxi Beilun Estuary during 1990—2020

CHEN Gao^{1,3}, ZHONG Cairong², LI Mingyu¹, YU Zhou¹, LIU Xinyu¹, JIA Mingming³

1. College of Geography and Marine Science, Yanbian University, Yanji 133002, China;

2. Hainan Forestry Science Research Institute (Mangrove Research Institute, Hainan Province), Haikou 571100, China;

3. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

Abstract: Mangrove forests are highly productive ecosystems that maintain coastal ecological balance and biodiversity by providing breeding and nursing grounds for waterfowl, marine, and pelagic species. Mangroves are highly subjected to natural and anthropogenic disturbances, owing to their intermediate position between the terrestrial and marine environments. This study used Landsat imagery to track the temporal and spatial changes of mangrove forests in Guangxi Beilun Estuary National Nature Reserve. The objectives of this study are (1) to monitor spatial distributions and intensities of mangrove forest disturbances during the past 30 years, and (2) to analyze the natural and anthropogenic factors that cause these disturbances in the reserve.

This study used the Google Earth Engine (GEE) platform to establish a time series Landsat dataset during 1990—2020. And then, GEE constructed the image dataset stack using the Medoid method for annual best pixel composition. Based on LandTrendr algorithm and the dataset, we studied disturbances of mangrove forests in Guangxi Beilun Estuary National Nature Reserve from 1990 to 2020. GEE enables quick access and processes a massive number of Landsat images in a paralleled process. Specifically, the GEE synchronizes all the Landsat data and provides different levels of processed products, including the top of atmosphere and surface reflectance data. LandTrendr algorithm can be used to detect changes in the time series of satellite images pixel by pixel and capture pixel-level subtle disturbances.

The results show that (1) during 1990—2020, the total area of mangrove forest disturbances in the Beilun Estuary Reserve in Guangxi was 45.94 ha. Most disturbances occurred near pearl Bay, and a small amount of disturbances occurred in Beilun estuary; (2) the maximum disturbed area occurred in 2001, which was 12.91 ha, and the minimum disturbed area occurred in 2007, which was 0.09 ha; (3) slight, moderate, and severe disturbances accounted for 57.5%, 29.17%, and 13.33% of the total disturbance, respectively, and the areas are 26.42, 13.40, and 6.13 ha.

According to our results and literature reviews, the following conclusions can be drawn: natural and anthropogenic factors cause the disturbance of mangrove forest in Guangxi Beilun Estuary National Nature Reserve. In terms of natural factors, sea level rise, extreme weather, pests and diseases, and invasion of spartina alterniflora have seriously threatened the growth environment of mangroves. In terms of human factors, cultivation ponds and farmland reclamation directly occupy the growth environment of mangroves. Mangroves are also threatened by wastewater from aquaculture ponds and pesticide residues in cultivated land. Parts of the terrigenous mangroves are developed as dikes or other artificial surfaces to attract residents or visitors. This condition has also led to an increase in wastewater from domestic production; not only does it hinder the growth of mangroves, but it also hinders the flow of matter and energy between land and sea. In addition, results of this study can serve as an important scientific basis and fundamental data for formulating mangrove protection and restoration strategies.

Key words: remote sensing, mangroves, protected areas, Google Earth Engine (GEE), Land Trendr algorithm

Supported by Science and Technology Basic Resources Investigation Program of China (No. 2019FY100607); Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (No. 2021227); National Natural Science Foundation of China Youth Fund Project (No. 42101392)