

doi: 10.6046/zrzyg.2022235

引用格式: 于森,贾明明,陈高,等. 基于 LandTrendr 算法海南东寨港红树林扰动研究[J]. 自然资源遥感,2023,35(2):42-49.
(Yu S, Jia M M, Chen G, et al. A study of the disturbance to mangrove forests in Dongzhaigang, Hainan based on LandTrendr[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(2): 42-49.)

基于 LandTrendr 算法海南东寨港红树林扰动研究

于森^{1,2}, 贾明明², 陈高², 鲁莹莹^{2,3}, 李毅^{1,2}, 张博淳^{1,2}, 路春燕⁴, 李慧颖⁵

(1. 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院, 长春 130118; 2. 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; 3. 长春新区北湖英才学校, 长春 130000; 4. 福建农林大学计算机与信息学院, 福州 350002; 5. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266520)

摘要: 随着我国社会经济的快速发展和对自然资源需求的日益增加, 自然保护区面临的压力越来越重。在对于红树林扰动和恢复的监测当中, 应用时间序列分析法对其进行遥感研究还处于起步阶段, 并且时间序列算法本身都十分复杂。文章基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)云平台的 LandTrendr 时间分割算法和 Landsat 影像时序数据, 研究了东寨港红树林自然保护区 1990—2020 年期间红树林的扰动情况。研究表明: 1990—2020 年间, 共有 42.39 hm² 的红树林发生了扰动, 其中 2014 年保护区内红树林扰动面积最大, 为 12.78 hm²; 1990—2020 年间, 轻微扰动和中度扰动所占比例较大, 分别为 65.39% 和 30.78%, 严重扰动所占比例最少, 只有 3.83%; 红树林变化像元的总体识别精度为 89.50%, 对扰动年份检测的总体精度为 88%, Kappa 系数为 0.79。本研究基于 LandTrendr 算法解析了 30 a 间东寨港保护区内红树林发生扰动的年份和面积, 结合实际情况分析了导致扰动的因素, 认为人类活动是红树林扰动的主要原因, 自然因素(如病虫害和极端天气等)是导致扰动的次要原因。研究结果能够为红树林保护区的管理提供科学依据和决策参考。

关键词: 东寨港; 红树林; 谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE); LandTrendr; Landsat

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)02-0042-08

0 引言

红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带或河流入海口的湿地木本植物群落, 生产力极高, 具有高光合率、高呼吸率、高归还率的特点, 是地球上生产力最高的生态系统之一^[1-2]。作为适应陆地与海洋过渡带的一种特殊森林类型, 红树林能够在沉积过程中封存埋藏大量有机碳, 对于全球环境变化和生态平衡发挥着重要的作用^[3-5]。红树林具有重要的生态和社会价值, 在防风消浪、造陆护堤、净化水质、维护物种栖息地和生物多样性上起着重要作用, 同时又为人类创造了巨大的经济效益, 例如: 药业和工业等^[1, 6]。近半个世纪以来, 红树林资源受人类活动和自然因素的干扰其面积在日益缩减, 近半数红树林消失^[7-8]。如何快速、准确地监测红

树林的扰动和恢复, 准确评估红树林生态系统, 对保护区制定合理的保护、管理政策有着重大意义。

由于红树林生长环境特殊, 传统的地面调查很难满足红树林扰动监测的需求, 遥感技术因具有尺度大、范围广等独特的优势, 成为国内外红树林监测和管理的重要技术之一^[9-10]。其中, Landsat 系列卫星以其长持续时间(1972 年发射至今)和较为适中的空间分辨率, 在植被和土地覆盖变化等遥感资源监测中有着及其重要的地位。时间序列分析方法应用于多期影像的联合分析中, 是对时间序列进行特征提取和分析, 监测生态系统长期变化的方法^[11]。目前, 已有众多学者提出了多种基于遥感时序变化检测的方法。Verbesselt 等^[12]提出将时间序列迭代分解为趋势项和季节项的变化检测算法 BFAST; Kennedy 等^[13]基于光谱曲线的时间序列分割思想提出 LandTrendr 算法; Zhu 等^[14]通过阈值判断是否

收稿日期: 2022-06-10; 修订日期: 2022-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于 Sentinel 密集时序数据和云平台的红树林扰动与恢复研究”(编号: 42171372)、“遥感大数据支持下的中国湿地逐年动态信息智能提取研究”(编号: 42171379)、“集成多时相无人机高光谱和 LiDAR 数据与面向对象一深度学习的红树林树种分类研究”(编号: 42101392)、中国科学院青年创新促进会项目“中国滨海生态系统遥感”(编号: 2021227)和吉林省科技发展计划项目(编号: 20200301014RQ)共同资助。

第一作者: 于森(2001-), 男, 本科, 研究方向为滨海湿地遥感。Email: yusen1594352@163.com。

通信作者: 贾明明(1986-), 女, 副研究员, 研究方向为滨海湿地遥感。Email: jiamingming@iga.ac.cn。

存在突变点提出连续监测方法和模型 CCDC。然而,时间序列分析方法在对于红树林的扰动监测研究上的应用并不普遍。少有案例对红树林进行检测分析。Nardin 等^[15]利用 Landsat 影像数据,对 1927—2013 年间印度尼西亚塔纳凯克岛的红树林进行分析,研究表明,受居民过度开发利用、水产养殖等人为因素的影响,红树林面积大幅减少;Wang 等^[16]利用 Landsat 遥感影像对坦桑尼亚 800 多 km 海岸红树林 10 a 间的分布变化进行了研究。

传统的时间序列遥感监测研究中数据处理和算法本身相当复杂耗时,遥感大数据云计算平台为此提供了新的解决思路。谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)是一个可以处理地理信息大数据的云计算平台。它为用户提供了大量可公开下载的地球数据的同时可以在线进行可视化计算分析处理^[17]。LandTrendr 算法在 GEE 上的实现,不仅减少了构建时序堆栈过程中对图像处理的成本,同时解决了交互式数据语言(interactive data language, IDL)本身繁重的数据处理等问题,计算更加方便快捷。利用云平台优势的 LandTrendr 算法为研究密集时间序列的红树林扰动提供了新机遇。东寨港红树林保护区内的红树林是全国成片面积最大、种类多、保护最完整的红树林^[18],对维持生态系统平衡等方面有着重要作用。因此,本文选取海南东寨港国家级自然保护区作为研究区,在 GEE 平台和 LandTrendr 算法的支持下,对其进行变化检测分析,追踪近 30 a 来保护区内的红树林扰动,探明东寨港红树林扰动发生的时间和空间,分析扰动原因,以此为红树林保护区的保护和管理提供科学依据和数据支撑。

1 研究区及其数据源

1.1 研究区概况

东寨港国家级自然保护区地处海南省东北部,地理坐标 E110°32' ~ 110°37', N19°51' ~ 20°10', 如图 1 所示。该保护区地处热带边缘,平均气温为 23.3 ~ 23.8 °C,年降水量为 1 676.44 mm,属于热带季风海洋性气候。东寨港由于地震内陷成海,整体呈漏斗状。海岸线蜿蜒曲折,海湾开阔,滩面平缓,红树林分布在整个海岸浅滩上。保护区内有大量的红树林物种,面积达 1 771 hm²,其中有红榄李、水椰、海南海桑和拟海桑等大量珍贵树种,具有极高的保护价值,有“海上森林公园”的美誉。保护区为许多水禽提供了重要迁徙停歇地。东寨港记录在内的鱼类、蟹类和虾类共 200 余种,是生物多样性的宝库。



图 1 东寨港保护区地理位置

Fig. 1 Geographical location of Dongzhaigang Reserve

1.2 数据获取与处理

利用 GEE 平台调用 1990—2020 年研究区所有的 Landsat 地表反射率数据构建时间序列影像数据集。为了尽量减少因物候变化带来的检测干扰,研究区选用的影像时间为每年的 6—8 月。由于 Landsat OLI 传感器在扫描方式、辐射分辨率、波段光谱范围等方面相较于 TM/ETM+ 传感器得到优化,为了尽可能降低传感器不同所带来的误差,通过统计协调函数优化了 OLI 和 TM/ETM+ 传感器数据之间的时间连续性^[19]。然后再用质量评估波段 QA 对图像进行掩模处理。最后利用多维中值方法,构建研究区近 30 a 的时间序列影像集。

利用的红树林生长范围数据集来自贾明明等^[20]的 CAS_Mangroves 数据集。该数据集包含了 1973—2020 年中国红树林空间分布数据。该数据集是基于面向对象的方法生成的,对于不同潮汐下红树林受到的影响运用不同的解译方法,最终精度达 92%,适合本文研究需求。本研究从 CAS_Mangrove 数据集中提取东寨港 1990—2020 年的红树林分布数据,对这些数据进行合并融合等分析,取并集作为本研究的具体研究区(图 2),最后通过 ArcGIS 10.6 软件处理 GEE 平台的结果栅格图得到保护区红树林的扰动面积和扰动事件等。

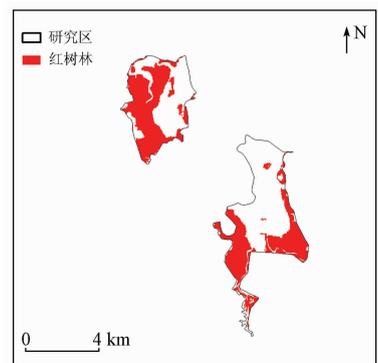


图 2 1990—2020 东寨港保护区红树林生长区域示意图

Fig. 2 Mangrove forest growth area of Dongzhaigang Reserve from 1990 to 2020

2 研究方法

2.1 LandTrendr 算法

LandTrendr 是基于轨迹的光谱 - 时间分割算法,主要用于检测 Landsat 中等空间分辨率卫星图像的时间序列中的变化,并生成基本上没有年际信号噪声的基于轨迹的光谱时间序列数据。通过对光谱时间轨迹的提取,该算法既可以识别植被等短期的突变也可以检测长期的变化,被认为是检测长时间序列动态变化的最佳算法之一^[21]。LandTrendr 算法是从影像中逐像素获取单个波段和指标的变化轨迹,并通过一个过程来识别分离光谱轨迹中持久变化或稳定性时期的断点,并记录发生变化的年份。它可以从太阳角度、物候和大气条件变化产生的短期噪声中将长时间的信号分离出来。这些断点,将像元的光谱轨迹表示为有一系列顶点分割的直线段,并且可以总结光谱在每个分段变化的属性,这些属性可以快速地查询变化特征,如何时发生变化、扰动幅度等。还可以查询到相邻阶段的信息,例如,某一像元受到扰动之前的像元时间序列轨迹。该算法能够检测指数序列突变、渐进和恢复趋势。算法包括以下几个过程:去除噪声引起的峰值、基于回归方法识别潜在顶点、采用顶点之间进行点对点相连或利用 2 个分割点之间做回归的方式进行拟合,最后通过去除最弱的断点来简化模型与挑选最佳模型^[22-23](图 3)。LandTrendr 算法中共包含 8 个参数,Kennedy 等^[21]对参数选择导致的结果变化进行了详尽的描述。具体参数变化为:Spike Threshold 参数控制噪声,Max Segments 和 Vertex Count Overshoot 参数控制分割点的识别和剔除,基于标准 F 统计的 P 值作为指标,通过该 P 值可以对比不同 Max Segments 参数下的拟合结果等。根据以往研究经

验,本文在参数选择上采用默认值进行设置(表 1)。

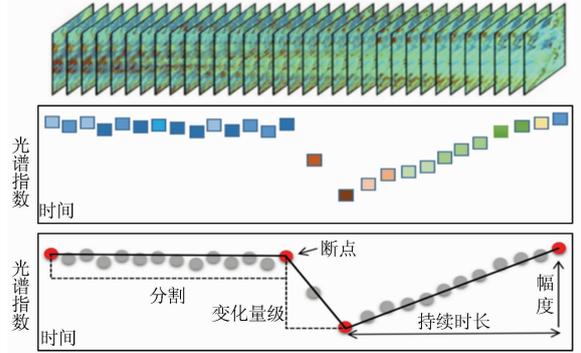


图 3 LandTrendr 变化检测算法的概念示意图

Fig. 3 Concept of LandTrendr change detection algorithm

表 1 LandTrendr 的参数设置
Tab. 1 Parameters of LandTrendr

参数	参数描述	数值
Max Segments	最大分割段数	6
Spike Threshold	去除峰值的阈值	0.9
Vertex Count Overshoot	基于初始回归函数的潜在顶点可以超过的顶点数	3
Prevent One Year Recovery	是否阻止 1 a 后恢复的情况	TRUE
Recovery Threshold	如果某个分割段的恢复率大于该值的倒数,则该舍弃分割段	0.25
Pval Threshold	回归分析中 F 检验的 P , 超过该值的话,则认为该像元没有发生变化	0.05
Best Model Proportion	最佳比例模型, 如果超过该值, 则被选中	0.75
Min Observations Needed	进行拟合中需要的最少观测个数	6

2.2 LandTrendr 算法分割指数

由于不同的监测指数对扰动类型和程度的识别能力不同,对其响应能力也有所差异。选取归一化植被指数(normalized vegetation index, NDVI)、归一化湿度指数(normalized difference moisture index, NDMI)、归一化燃烧比指数(normalized burn ratio, NBR) 3 种指数对红树林扰动的敏感性进行比较(图 4)。

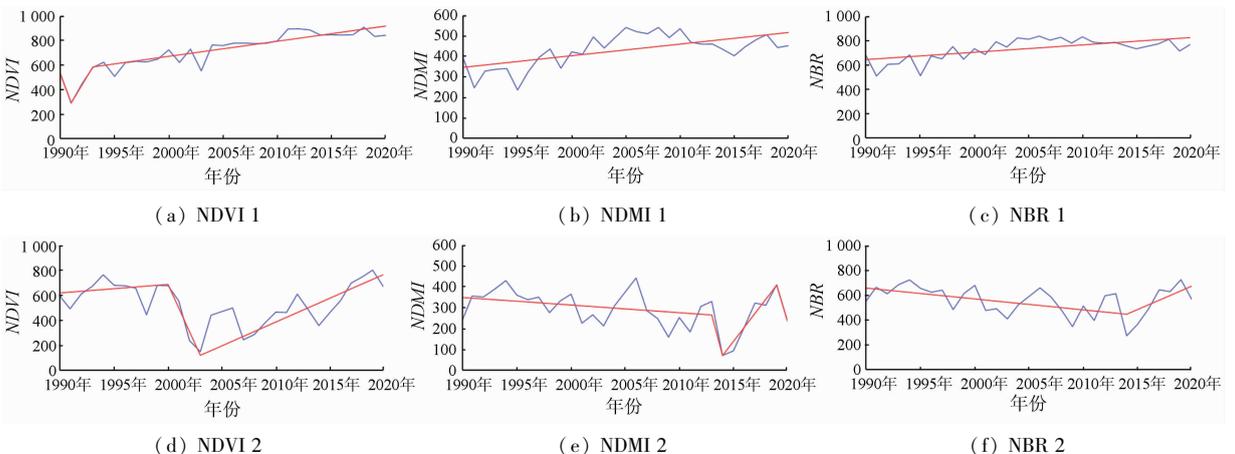


图 4 不同指数对红树林扰动监测轨迹曲线示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the monitoring trajectory curves for mangrove disturbance by different indices

NDVI 是反映植被生长状态和植被覆盖度的最佳指数之一,相较于其他指数对于红树林的扰动反映也较为敏感。它是反映生态环境的重要指标之一,也是目前使用最为广泛的指数之一^[24]。NDVI 通常被用在森林砍伐监测当中,NBR 通常被用在监测森林火灾当中^[11]。因此,选取 NDVI 作为海南东寨港保护区的红树林扰动监测指数,探测红树林扰动,其计算公式为:

$$NDVI = (R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red}), \quad (1)$$

式中 R_{nir} 和 R_{red} 分别为近红外波段和红光波段的反射率值。

2.3 红树林扰动等级划分

为进一步分析该区域内的扰动幅度,在保护区内红树林发生扰动的区域中随机选取若干样本,提取时间序列轨迹曲线。如图 5 所示,对于红树林扰动过程中,将没有明显变化且变化幅度较小的 a 曲线视为轻微扰动;曲线有适中变化且变化幅度中等的 b 曲线视为中度扰动;曲线有严重变化且变化幅度较大的 c 曲线视为严重扰动。

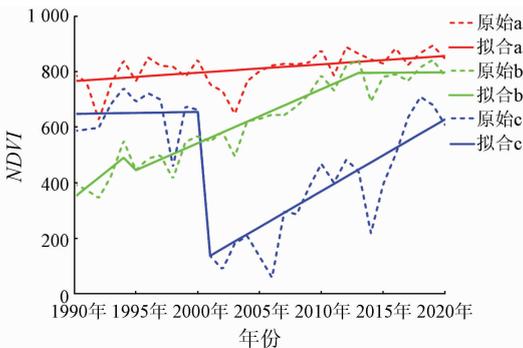


图 5 不同扰动等级示意图

Fig.5 Schematic diagram of the different interference levels

2.4 精度验证评价

本研究基于混淆矩阵来评估红树林扰动准确性。评价指标包括用户精度、生产者精度、总体分类精度和 Kappa 系数。混淆矩阵是通过将每个实测像元的位置和分类图像的位置相比较计算的。总体分类精度是被正确分类的像元数占总像元数的百分比。Kappa 系数是一种评价分类结果的指标,用于一致性检验。一般来说,Kappa 系数值介于 [0,1] 之间,值越高表示精度越高。通过参考文献等收集红树林扰动相关信息,在保护区内选择了 200 个样点,其中包括 100 个表示变化的样点和 100 个表示没有变化的样点。对于每个样点,结合高空间分辨率的谷歌地球 (Google Earth Pro) 软件进行人工目视判断,记录样本点是否发生变化,变化发生的时间。利

用 200 个验证样点生成混淆矩阵,评估研究精度。

3 结果与分析

3.1 精度评价

基于 200 个验证样本点生成的混淆矩阵如表 2 所示。扰动的总体精度为 89.50%,稳定像元和变化像元的生产者精度和用户精度均在 84% 以上,Kappa 系数为 0.79。对于变化年份的评估,表 3 给出了红树林扰动年份精度评估。从表 3 中可得,用户精度除 1991 年和 2002 年稍低外,其他年份均高于 80%。生产者精度除 1997 年为 75% 以外,其他年份均高于 80%,变化年份检测的总体精度为 88%。

表 2 红树林扰动精度评估

Tab.2 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/个	84	16	100	84.00
稳定像元/个	5	95	100	95.00
像元总数/个	89	111	200	
生产者精度/%	94.38	85.59		

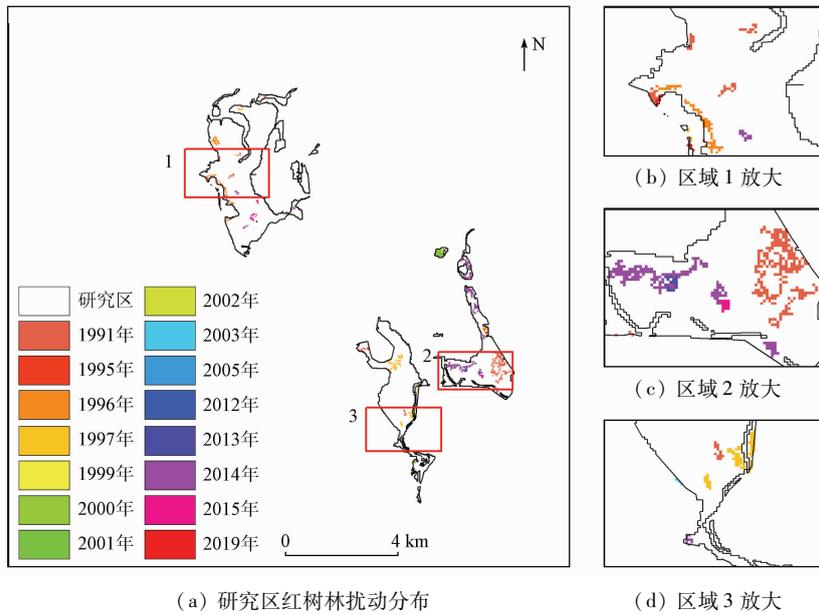
表 3 红树林扰动年份精度评估

Tab.3 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	年份	生产者精度	用户精度
1991 年	95	72	2000 年	95	100	2012 年	85	92
1995 年	100	80	2001 年	80	95	2013 年	80	95
1996 年	92	85	2002 年	100	75	2014 年	96	82
1997 年	75	95	2003 年	88	100	2015 年	95	100
1999 年	100	100	2005 年	100	95	2019 年	100	100

3.2 红树林扰动的时空分布

1990—2020 年东寨港保护区红树林扰动的时空分布如图 6 所示。分析结果表明,发生的扰动区域主要集中在罗豆区和塔市区周围,三江区也有部分扰动。1990—2020 年间,共有 42.39 hm^2 红树林发生了扰动(表 4)。其中,2014 年相较于其他年份扰动面积最大,为 12.78 hm^2 ,1991 年和 1997 年扰动面积次之,分别为 8.79 hm^2 和 7.86 hm^2 。2005 年扰动面积最小,为 0.03 hm^2 。20 世纪 90 年代,由于海南省大力发展水产养殖业经济,导致红树林生态系统受到了很大的伤害,养殖水面的面积大幅上升,红树林湿地面积大幅减少^[25]。自 2006 年发现有部分红树植物死亡,到 2012 年团水虱爆发,团水虱对红树林的危害程度逐步加深,直到 2015 年仍然没有得到好转,同时 2014 年台风“威马逊”又侵袭了东寨港红树林,导致 2014 年红树林大幅减少^[26-27]。



(a) 研究区红树林扰动分布

(d) 区域3放大

图6 东寨港保护区红树林扰动时空分布

Fig. 6 Temporal and spatial distribution of mangrove forest disturbances in Dongzhaigang Reserve

表4 1990—2020年东寨港保护区红树林扰动面积

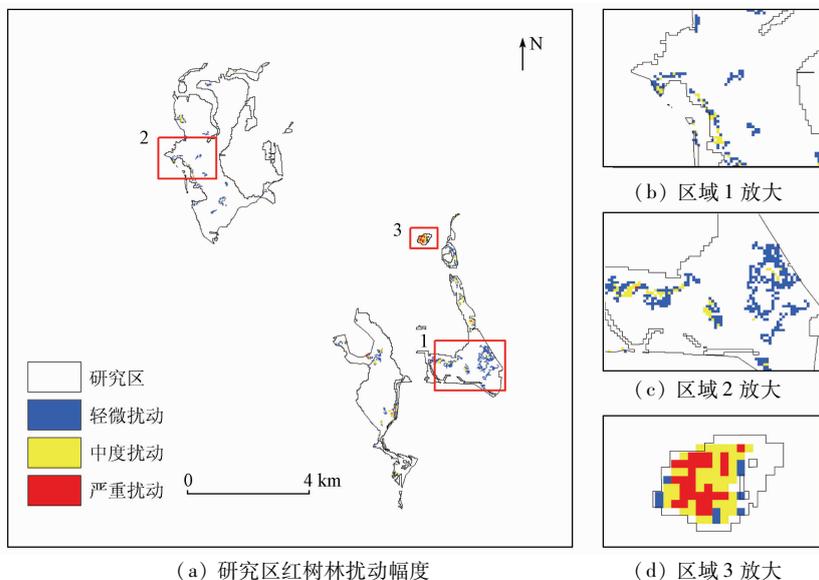
Tab. 4 Area of mangrove disturbance in Dongzhaigang Reserve during 1990—2020

(hm²)

年份	面积								
1991年	8.79	1997年	7.86	2001年	2.52	2005年	0.03	2014年	12.78
1995年	1.35	1999年	0.06	2002年	0.54	2012年	0.09	2015年	1.98
1996年	4.98	2000年	0.06	2003年	0.09	2013年	0.51	2019年	0.75

图7显示了东寨港保护区扰动幅度的时空分布。根据红树林扰动与恢复等级划分将其分为轻微扰动、中度扰动和严重扰动。轻微扰动和中度扰动分别为65.39%和30.78%，占比较大，面积为27.72 hm²和13.05 hm²，主要分布在东寨港保护区三江区附近。严重扰动主要分布在罗豆区附近，占比较少，为3.83%，面积为1.62 hm²。由于种植

业、养殖业和建筑用地等对红树林区域的占用和影响，致使东寨港红树林景观破碎化程度正在逐渐加大^[28]。随机选取不同扰动幅度上的样本点提取扰动恢复曲线，发现在发生扰动后，都呈现恢复的趋势，是因随着近年来国家对红树林越来越重视，国家和政府相继推出了多项保护政策，红树林生态系统也相继得到了恢复。



(a) 研究区红树林扰动幅度

(d) 区域3放大

图7 东寨港保护区扰动幅度时空分布

Fig. 7 Temporal and spatial distribution of mangrove disturbance intensity in Dongzhaigang Reserve

3.3 扰动因素分析

3.3.1 自然环境因素

自然环境因素是引起红树林退化的原因之一,主要包括海平面上升、极端天气、外来物种入侵和虫灾病害等。近几十年来,气候变化和温室效应等带来的相对海平面变化会使红树林向海侧边界向海推进或后退,对红树林的生存环境造成威胁。颜秀花等^[29]在气候背景下对东寨港红树林进行了评估,发现沿海海平面上升速率可达 4.6 mm/a,远高于中国和全球的沿海平均值,红树林生态受到胁迫。2014 年东寨港红树林受超级台风“威马逊”的影响,大片红树林枝干折断甚至被连根拔起,加剧了保护区内红树林的退化^[27]。2008 年受南方持续低温雨雪天气的影响,红树林产生了不同程度的损伤^[30]。2012 年东寨港地区爆发团水虱,林华文等^[31]指出团水虱的爆发与水体富养化和周边区域大量养殖海水鸭等存在必然的联系,团水虱因蛀蚀红树林的呼吸生根,对红树林直接造成伤害,导致其大面积死亡^[26]。

3.3.2 人类活动因素

除了自然因素影响,人类活动是红树林产生变化的重要影响因素。整体上来看,东寨港红树林先减少后增加,整体面积未出现较大波动,保持相对稳定。20 世纪 60—80 年代,东寨港在“围海造林”、“围海造田”的口号下,大面积的红树林被改为水稻田和养殖池等,致使红树林大面积减少。例如,海南东寨港三江农场沿岸大面积的红树林被人工利用。这些红树林先被开垦为农田,后因土壤盐渍化严重被改造为椰林,最后被进一步改造为养殖池^[32]。海南东寨港红树林自然保护区自 1980 年成立后,红树林在自然扩张和人工栽植红树林同时作用下,得到了良好的保护。但是由于缺少保护管理经验,非法砍伐红树林、在红树林中开展养殖业、捕捞林内生物等行为仍然存在。1995—1997 年间,演西村附近红树林遭到大面积砍伐和围垦等人类活动,红树林破坏严重^[33]。此外,红树林自身会输出大量的凋落物,并且林下底泥中富含着大量营养物质等特点,因此成为了水产养殖的首选地。由于红树林咸水鸭颇受大众青睐且收获利润极高,周围村民毁林养殖的行为时有发生,甚至部分村民在其周围搭建鸭舍。祝阁等^[34]调查表明在红树林内大量养殖咸水鸭,会导致红树植物幼苗和根系的更新受阻,同时底栖动物的生存环境也遭到破坏,养殖区内红树幼苗和成年红树的死亡率远远高于养殖区外,对红树林生态系统造成了极其显著的负面影响。红树林的生长环境污染也对红树林的生存带来了威胁。随着保护区周边人口和经济的增长,生产生活垃圾污水、工业废水等直接排放到海洋,造成的水质污染,对红树林的

生存存在威胁。虽有研究人员证明红树林具有净化、吸收的能力,少量污水并不会会影响红树林的生长^[35],但是随着养殖现象和排污现象时有发生,红树林的生长发育一定会受到影响。有调查表明,生活中难以降解的垃圾在达到一定的堆积率时,会阻碍红树林的发育和生长^[36]。随着国家政策的不断出台和人们对红树林生态系统重要性认识的不断提高,红树林的管理和保护受到越来越多的重视,面积也逐渐得到恢复。如《湿地保护修复制度方案》《海南省红树林保护规定》等。在保护区管理人员和周边居民的共同努力下,违法开垦、集约化养殖咸水鸭等对红树林有害的活动大幅减少。同时,政府等相关部门制定了相应的管理办法,开始在适宜种植红树林和残次林等地进行人工栽植红树林和修复,红树林面积快速增加,保护了红树林生态系统,加快了红树林的生态恢复^[20]。

4 结论

利用光谱时间分割算法 LandTrendr 算法与 GEE 平台对 1990—2020 年东寨港国家级自然保护区红树林扰动进行监测分析,主要结论如下:

1) 1990—2020 年间,共有 42.39 hm² 的红树林发生了扰动,主要集中在东寨港保护区塔市区和罗豆区附近。其中 2014 年保护区内红树林扰动面积最大,为 12.78 hm²。

2) 1990—2020 年间,轻微扰动和中度扰动所占比例较大,分别为 65.39% 和 30.78%,面积分别为 27.72 hm² 和 13.05 hm²。主要分布在东寨港保护区三江区附近。严重扰动占比较少,只有 3.83%,面积为 1.62 hm²。

3) 对红树林变化像元的总体识别精度达到 89.50%,对扰动年份检测的总体精度达到 88%,Kappa 系数为 0.79。

扰动原因既有自然因素影响也有人类活动影响。自然因素主要有海平面上升、物种入侵、极端天气、病虫害等原因导致红树林受到损害或死亡。人为因素主要有围填海工程、非法砍伐红树林、过度捕捞和养殖放牧、周边地区的污水、垃圾等的排放造成红树林生境污染等因素。本研究结果可以为当地保护区提供近 30 a 间东寨港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):

[1] 张乔民,于红兵,陈欣树,等. 红树林生长带与潮汐水位关系的

- 研究[J]. 生态学报, 1997, 17: 258 - 265.
- Zhang Q M, Yu H B, Chen X S, et al. The relationship between mangrove zone on tidal flats and tidal levels[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17: 258 - 265.
- [2] 林鹏. 中国红树林生态系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- Lin P. Study of China's mangrove ecosystem[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [3] 林鹏, 张宜辉, 杨志伟. 厦门海岸红树林的保护与生态恢复[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, 44: 1 - 6.
- Lin P, Zhang Y H, Yang Z W. Protection and restoration of mangroves along the coast of Xiamen[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science Edition)*, 2005, 44: 1 - 6.
- [4] Glaser M. Interrelations between mangrove ecosystem, local economy and social sustainability in Cacte Estuary, North Brazil[J]. *Wetlands and Management*, 2003, 11(4): 265 - 272.
- [5] 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: 84 - 90.
- Xue H P, Liu T, Zhang J B. Response of carbon sequestration in mangroves to sea level rise, climate change and human activities[J]. *Guangxi Science*, 2020, 27: 84 - 90.
- [6] 但新球, 廖宝文, 吴照柏, 等. 中国红树林湿地资源、保护现状和主要威胁[J]. 生态环境学报, 2016, 25: 1237 - 1243.
- Dan X Q, Liao B W, Wu Z B, et al. Resources, conservation status and main threats of mangrove wetlands in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25: 1237 - 1243.
- [7] 贾明明. 1973—2013年中国红树林动态变化遥感分析[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014.
- Jia M M. Remote sensing analysis of China's mangrove forests dynamics during 1973 to 2013[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Science (Northeast Institute of Geography and Agroecology), 2014.
- [8] 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.
- Lin Y M, Lin P. Plant species, diversity, functions and protection of mangrove ecosystems in China[J]. *Bulletin of Marine Limnology*, 2001(3): 8 - 16.
- [9] Son N, Chen C, Chang N, et al. Mangrove mapping and change detection in Ca Mau Peninsula, Vietnam, using Landsat data and object-based image analysis[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(2): 503 - 510.
- [10] 李伟, 崔丽娟, 张曼胤, 等. 遥感技术在红树林湿地研究中的应用述评[J]. 林业调查规划, 2008, 33(5): 1 - 7.
- Li W, Cui L J, Zhang M Y, et al. Review of the application of remote sensing technology in mangrove wetland research[J]. *Forestry Survey Planning*, 2008, 33(5): 1 - 7.
- [11] 杨辰, 沈润平. 森林扰动遥感监测进展[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 1 - 8. doi:10.6046/gtzyyg. 2015. 01. 01.
- Yang C, Shen R P. Progress in the study of forest-disturbance by remote sensing[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2015, 27(1): 1 - 8. doi:10.6046/gtzyyg. 2015. 01. 01.
- [12] Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G, et al. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 106 - 115.
- [13] Kennedy R E, Yang Z, Cohen W B, et al. Spatial and temporal patterns of forest disturbance and regrowth within the area of the Northwest Forest Plan[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122: 117 - 133.
- [14] Zhu Z, Woodcock C E. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 144: 152 - 171.
- [15] Nardin W, Woodcock C E, Fagherazzi S. Bottom sediments affect Sonneratia mangrove forests in the prograding Mekong delta Vietnam[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2016, 177: 60 - 70.
- [16] Wang Y, Bonyng G, Nugranad J, et al. Remote sensing of mangrove change along the Tanzania coast[J]. *Marine Geodesy*, 2003, 26(1-2): 35 - 48.
- [17] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18 - 27.
- [18] 王文卿, 王珺. 中国红树林[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- Wang W Q, Wang M. Chinese mangroves[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [19] Roy D P, Kovalsky V, Zhang H K, et al. Characterization of Landsat7 to Landsat8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 185: 57 - 70.
- [20] 贾明明, 王宗明, 毛德华, 等. 面向可持续发展目标的中国红树林近50年变化分析[J]. 科学通报, 2021, 66: 3886 - 3901.
- Jia M M, Wang Z M, Mao D H, et al. Spatial-temporal changes of China's mangrove forests over the past 50 years: An analysis towards the Sustainable Development Goals (SDGs)[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66: 3886 - 3901.
- [21] Kennedy R E, Yang Z, Cohen W B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr-temporal segmentation algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12): 2897 - 2910.
- [22] Kennedy R E, Yang Z Q, Gorelick N, et al. Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 691.
- [23] Kennedy R E, Yang Z, Cohen W B, et al. Spatial and temporal patterns of forest disturbance and regrowth within the area of the Northwest Forest Plan[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122: 117 - 133.
- [24] Cohen W B, Goward S N. Landsat's role in ecological applications of remote sensing[J]. *Bioscience*, 2004, 54(6): 535 - 545.
- [25] 李云哲, 蒲凌海, 孙涛. 东寨港地区红树林湿地恢复的生态补偿效应评估[J]. 农村经济与科技, 2018, 29(24): 3, 10.
- Li Y Z, Pu L H, Sun T. Assessment of the ecological compensation effect of mangrove wetland restoration in Dongzhaigang area[J]. *Rural Economy and Technology*, 2018, 29(24): 3, 10.
- [26] 高春. 团水虱灾害在海南东寨港红树林的分布规律[D]. 海口: 海南师范大学, 2016.
- Gao C. The distribution law of water lice disasters in the mangroves of Dongzhaigang, Hainan[D]. Haikou: Hainan Normal University, 2016.
- [27] 邱明红, 王荣丽, 丁冬静, 等. 台风“威马逊”对东寨港红树林灾害程度影响因子分析[J]. 生态科学, 2016, 35: 118 - 122.
- Qiu M H, Wang R L, Ding D J, et al. Impact of “Rammasun” on mangrove communities in Dongzhaigang, Hainan[J]. *Ecological Science*, 2016, 35: 118 - 122.
- [28] 无庭天, 丁山, 陈宗铸, 等. 基于LUCC和景观格局变化的海

- 海南东寨港红树林湿地动态研究[J]. 林业科学研究, 2022, 33(5): 154–162.
- Wu T T, Ding S, Chen Z Z, et al. Dynamic research on mangrove wetlands in Dongzhaigang, Hainan based on LUCC and landscape pattern changes[J]. *Forestry Research*, 2022, 33(5): 154–162.
- [29] 颜秀花, 蔡榕硕, 郭海峡, 等. 气候变化背景下海南东寨港红树林生态系统的脆弱性评估[J]. *应用海洋学报*, 2019, 38: 338–349.
- Yan X H, Cai R S, Guo H X, et al. Vulnerability of Hainan Dongzhaigang mangrove ecosystem to the climate change[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, 38: 338–349.
- [30] 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: 186–194.
- Chen L Z, Wang W Q, Zhang Y H, et al. Damage to mangroves from extreme cold in early 2008 in southern China[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2010, 34: 186–194.
- [31] 林华文, 林卫海. 团水虱对东寨港红树林的危害及防治对策[J]. *热带林业*, 2013(4): 35–36.
- Lin H W, Lin W H. The damages and controlling strategies of *Sphaeroma* in Dongzhaigang mangroves[J]. *Tropical Forestry*, 2013(4): 35–36.
- [32] 王胤, 左平, 黄仲琪, 等. 海南东寨港红树林湿地面积变化及其驱动力分析[J]. *四川环境*, 2006, 25: 44–49.
- Wang Y, Zuo P, Huang Z Q, et al. Study of the change of the mangrove wetland ecosystem and driving forces in Dongzhaigang[J]. *Sichuan Environment*, 2006, 25: 44–49.
- [33] 韩淑梅. 海南东寨港红树林景观格局动态及其驱动力研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- Han S M. Study on landscape pattern dynamics and driving forces in mangrove wetlands of Dongzhaigang Harbour, Hainan Province [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [34] 祝阁, 钟才荣, 李诗川, 等. 海南东寨港集约化海鸭养殖对红树林的影响[C]//中国生态学会红树生态学组执委会. 中国第五届红树生态学会议论文摘要集. 温州, 2011.
- Zhu G, Zhong C R, Li S C, et al. Influence of intensive sea duck farming on mangroves in Dongzhaigang Port, Hainan [C]//Executive Committee of Mangrove Science Group of Chinese Ecological Society. Summary Collection of the Fifth Chinese Mangrove Academic Conference. Wenzhou, 2011.
- [35] Feller I C, Whigham D F, McKee K L, et al. Nitrogen limitation of growth and nutrient dynamics in a disturbed mangrove forest, Indian River Lagoon, Florida[J]. *Oecologia*, 2003, 134: 405–414.
- [36] Ellison J C. Impacts of sediment burial on mangroves[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1998, 37: 420–426.

A study of the disturbance to mangrove forests in Dongzhaigang, Hainan based on LandTrendr

YU Sen^{1,2}, JIA Mingming², CHEN Gao², LU Yingying^{2,3}, LI Yi^{1,2},
ZHANG Bochun^{1,2}, LU Chunyan⁴, LI Huiying⁵

(1. School of Surveying, Mapping and Exploration Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 2. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 3. Changchun New District Beihu Yingcai School, Changchun 130000, China; 4. College of Computer and Information Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 5. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: With the rapid socio-economic development and the increasing demand for natural resources in China, the protection of natural reserves is facing increasing difficulties. The remote sensing-based research on monitoring the disturbance and the restoration of mangrove forests through time series analysis is still in its initial stage. Moreover, time series algorithms are highly complex. Based on the LandTrendr time segmentation algorithm of Google Earth Engine (GEE) and the Landsat image time-series data, this study investigated the disturbance to mangrove forests in the Dongzhaigang Mangrove Nature Reserve during 1990–2020. The results are as follows: ① A total of 42.39 hm² of mangrove forests were disturbed during 1990–2020, among which the largest disturbance area of 12.78 hm² occurred in 2014; ② During 1990–2020, minor, moderate, and severe disturbances accounted for 65.39%, 30.78%, and 3.83%, respectively; ③ The overall identification accuracy of the pixels of mangrove forests subject to changes was 89.50%, and the overall detection accuracy of years witnessing disturbance was 88%, with a Kappa coefficient of 0.79. This study analyzed the years and areas of the disturbance to mangrove forests in the Dongzhaigang Mangrove Nature Reserve over 30 years based on LandTrendr. Moreover, this study analyzed the disturbance factors according to the actual situation and concluded that human activities are the main disturbance factor, followed by natural factors, such as diseases, pests, and extreme weather events. This study will provide a scientific basis and a decision reference for the management of the mangrove forest reserve.

Keywords: Dongzhaigang; mangrove forest; Google Earth Engine (GEE); LandTrendr; Landsat

(责任编辑: 陈理)