

雷州半岛红树林时空变化与景观格局演变特征

陈增淳, 李瑾, 吴笛

广东工贸职业技术学院测绘遥感信息学院, 广东 广州

收稿日期: 2026年4月1日; 录用日期: 2026年6月5日; 发布日期: 2026年6月17日

摘要

红树林是热带、亚热带海岸带重要的湿地生态系统, 在防风消浪、固碳储碳、维持生物多样性等方面发挥着不可替代的生态功能。雷州半岛拥有中国面积最大的红树林国家级自然保护区, 是我国红树林资源最为丰富的区域之一。本研究基于2019、2021和2023年三个时相的高精度红树林分布数据, 综合运用面积统计、空间变化检测和景观格局分析等方法, 系统分析雷州半岛红树林的时空演变特征。研究结果表明: 2019~2023年, 雷州半岛红树林总面积由4342.21公顷增至5085.08公顷, 累计净增742.87公顷, 增幅达17.11%, 呈现持续增长态势; 在空间格局上, 麻章区是增长最为突出的区域, 累计增量占全市总增量的30.30%, 新增斑块多分布于主要河流入海口两侧及潮沟沿线, 与水体边界紧密相邻, 消失斑块则相对零星, 多位于远离主要水系的边缘地带; 在景观格局上, 斑块数量由2959个减少至2836个, 平均斑块面积由1.47公顷增至1.79公顷, 景观破碎化程度有所降低, 斑块合并与整合趋势明显。本研究揭示了雷州半岛红树林“面积持续增长、空间沿水系扩展、格局趋于优化”的演变特征, 可为区域红树林资源监测、保护修复成效评估及海岸带空间规划提供科学依据。

关键词

雷州半岛, 红树林, 时空演变, 空间变化检测, 景观格局

Spatial-Temporal Changes and Landscape Pattern Evolution Characteristics of Mangroves in Leizhou Peninsula

Yuchun Chen, Jin Li, Di Wu

Information School of Surveying, Mapping and Remote Sensing, Guangdong Polytechnic of Industry and Commerce, Guangzhou Guangdong

Received: April 1, 2026; accepted: June 5, 2026; published: June 17, 2026

Abstract

Mangroves are crucial wetland ecosystems in tropical and subtropical coastal zones, playing indispensable ecological roles in windbreak, wave attenuation, carbon sequestration, and biodiversity conservation. The Leizhou Peninsula hosts China's largest national-level mangrove nature reserve, making it one of the most abundant mangrove resource areas in the country. Based on high-resolution mangrove distribution data from 2019, 2021, and 2023, this study systematically analyzes the spatiotemporal evolution characteristics of mangroves in the Leizhou Peninsula using methods such as area statistics, spatial change detection, and landscape pattern analysis. The findings reveal: From 2019 to 2023, the total mangrove area in the Leizhou Peninsula increased from 4342.21 hectares to 5085.08 hectares, with a cumulative net gain of 742.87 hectares—a 17.11% rise, indicating sustained growth. Spatially, Mazhang District exhibited the most pronounced expansion, accounting for 30.30% of the city's total increase. New patches predominantly formed along the shores of major rivers and tidal creeks, closely adjacent to water bodies, while disappearing patches were relatively scattered and located in peripheral areas far from major water systems. In terms of landscape patterns, the number of patches decreased from 2959 to 2836, while the average patch area expanded from 1.47 hectares to 1.79 hectares, indicating reduced fragmentation and a clear trend toward patch merging and integration. This study reveals the evolutionary characteristics of mangroves in the Leizhou Peninsula—"continuous area expansion, spatial extension along water systems, and optimized landscape patterns"—providing scientific insights for regional mangrove resource monitoring, conservation and restoration effectiveness evaluation, and coastal zone spatial planning.

Keywords

Leizhou Peninsula, Mangrove Forests, Spatiotemporal Evolution, Spatial Change Detection, Landscape Pattern

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带滩涂湿地上的常绿木本植物群落,具有防风消浪、促淤护岸、固碳储碳、维持生物多样性等重要生态功能[1][2]。然而,红树林生态系统十分脆弱,易受病虫害[3]、物种入侵[4]、全球气候变化[5]等自然因素以及水产养殖[6]、水体污染[7]等人为因素的干扰,导致全球范围内红树林面积减少、生态功能退化等问题[8]。我国自 2000 年以来不断加强红树林资源保护与修复工作,红树林面积呈现回升趋势[9]-[11]。

雷州半岛位于中国大陆最南端,拥有中国面积最大的红树林国家级自然保护区——广东湛江红树林国家级自然保护区,是我国红树林资源最为丰富的区域之一[12]。红树林主要分布于半岛东部的通明海湾、雷州湾,西北部的英罗湾以及东南部的外罗港湾等沿海潮间带区域,在维护海岸带生态安全中发挥着重要作用[13]。近年来,随着《红树林保护修复专项行动计划(2020-2025年)》¹的实施,雷州半岛红树林保护修复工作持续推进,亟需开展系统性的时空变化研究,为保护成效评估和后续管理提供科学依据。

红树林监测研究方法主要分为传统实地调查和遥感监测两大类。实地调查方法存在工作量大、效率

¹https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/29/content_5538354.htm

低、时空范围有限等问题[14] [15]; 而遥感监测方法以其时空范围广、时效性强、成本相对较低等优势, 逐渐成为红树林定量监测的重要数据来源[16]。已有学者开展了涉及雷州半岛的红树林时空分布及变化研究[17][18], 但现有研究在数据规格、时间跨度和空间精度上存在一定差异, 缺乏近五年系统、连续的红树林分布数据集。叶晋良等基于 Sentinel-2 影像, 采用面向对象分类方法构建了 2019~2023 年雷州半岛红树林分布数据集, 总体精度达 95.3%, 为开展红树林时空变化研究提供了高质量的数据基础[19]。

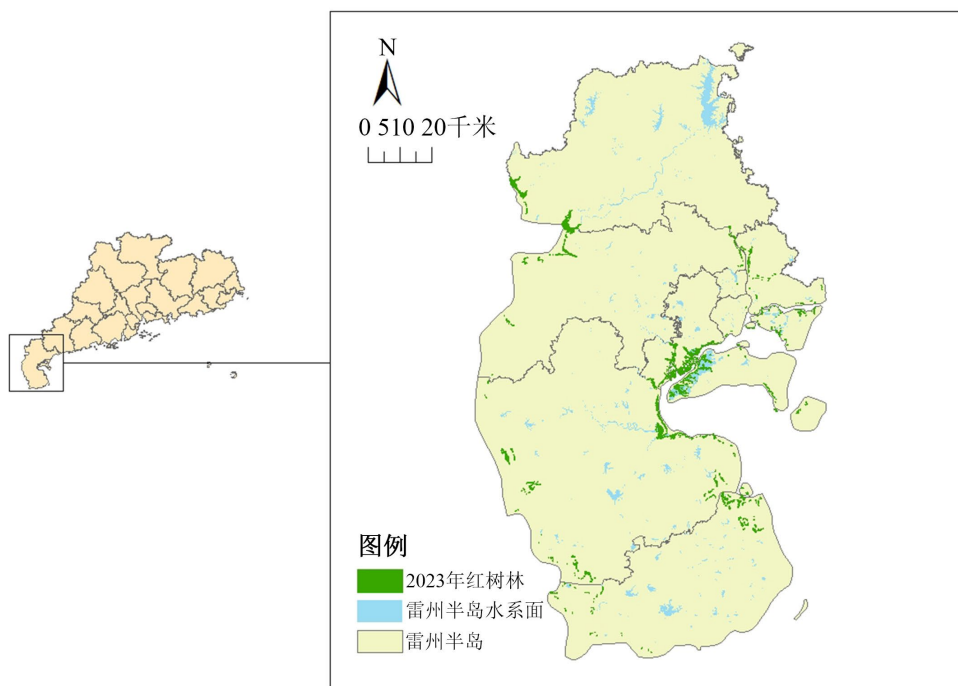
本研究基于该数据集, 利用 ArcGIS Pro 和 Fragstats 4.2 等软件平台, 综合运用面积统计、空间变化检测和景观格局指数等方法, 分析 2019~2023 年雷州半岛红树林的面积变化特征、空间分布格局及景观演变规律, 以为雷州半岛红树林资源监测、保护修复成效评估及海岸带空间规划提供科学依据。

2. 研究区概况与研究方法

2.1. 研究区概况

雷州半岛位于中国大陆最南端, 地处广东省西南部, 介于 $20^{\circ}14' \sim 21^{\circ}35'N$ 、 $109^{\circ}40' \sim 110^{\circ}38'E$ 之间, 东濒南海, 西临北部湾, 南隔琼州海峡与海南岛相望。半岛地势北高南低, 以玄武岩台地和滨海平原为主, 海岸线曲折绵长, 港湾众多, 拥有丰富的滩涂湿地资源(图 1)。该区域属热带季风气候, 年均气温 $22^{\circ}C \sim 24^{\circ}C$, 年均降水量约 1400~1800 mm, 雨热同期, 为红树林的生长提供了优越的自然条件。

雷州半岛红树林主要分布于半岛东部、西北部、东南部等沿海潮间带区域, 是典型的以红树林为主体的滨海湿地生态系统。红树林在防风消浪、促淤护岸、固碳储碳、维持生物多样性等方面发挥着重要生态功能[20]。半岛行政区划包括湛江市下辖的坡头区、赤坎区、霞山区、麻章区、经开区、廉江市、遂溪县、雷州市和徐闻县共 9 个区县, 本研究即以这 9 个区县范围内的红树林分布区为研究对象, 开展 2019~2023 年的时空变化分析。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2024) 0568 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. Study area location and mangrove distribution
图 1. 研究区位置与红树林分布示意图

2.2. 数据来源与处理

本研究所用雷州半岛红树林矢量数据来源于叶晋良等公开发布的《2019~2023 年雷州半岛红树林分布数据集》[19]。该数据集以 Sentinel-2 星座多光谱影像为数据源,通过对 2019 年、2021 年和 2023 年三个时相的无云影像进行超分辨率重建、沿海缓冲区提取,并结合随机森林算法的面向对象分类及分类结果优化处理而成。数据集的总体精度达 95.3%,空间分辨率为 10 m,采用 WGS_1984_UTM 投影坐标系。数据涵盖坡头区、赤坎区、霞山区、麻章区、经开区、廉江市、遂溪县、雷州市和徐闻县共 9 个区县,按年份分为 3 个文件夹,共计 216 个 Shapefile 矢量文件,文件命名格式为“区县名称 + 红树林_年份”,该数据可从 Science Data Bank 平台(<https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00001.01184>)获取。

水系数据来源于 OpenStreetMap (OSM) 开源地图平台,提取了雷州半岛范围内的河流、湖泊、水库等水体矢量面数据,用于分析红树林空间变化与水系分布的关联特征。

2.3. 研究方法

2.3.1. 面积统计与变化分析

基于三个年份的红树林分布图层,采用 ArcGIS Pro 的面积计算工具统计各年份红树林总面积及各县区面积。计算 2019~2021 年、2021~2023 年及 2019~2023 年三个时段的面积变化量,并计算年际变化率,公式如下:

$$\rho = \frac{A_2 - A_1}{A_1} \quad (1)$$

其中, ρ 为变化率, A_1 和 A_2 分别为研究初期和末期的红树林面积。

2.3.2. 空间变化检测

采用叠加分析方法识别红树林的空间变化类型。将相邻年份的红树林图层进行空间叠加,生成稳定、新增、消失三类变化图层。分别对 2019~2021 年和 2021~2023 年两个时段进行变化检测,并结合水系数据,分析新增与消失区域的分布特征及其与水系的空间关联。

2.3.3. 景观格局指数

Table 1. Landscape pattern index and corresponding calculation formula
表 1. 景观格局指数及相应计算公式

指数名称	计算公式	说明
斑块数量(NP)	$NP = N$	N 为斑块数量。直接反映景观的破碎化程度,值越高说明景观越零散。
最大斑块指数 (LPI)	$LPI = \frac{\max(a_j)}{A}$	a_j 为斑块面积, A 是景观总面积。衡量景观的优势度与集中化。LPI 值增大,表明景观中出现了占主导地位的核心斑块,生态系统结构与功能更稳定,抗干扰能力更强。
边界密度(ED)	$ED = \frac{E}{A} * \alpha$	E 为景观中所有斑块的边缘总长度, A 为景观总面积, α 为转换系数。ED 表明单位面积内有多少“景观边缘”,边缘越多,通常意味着斑块被切割得越碎,形状也可能越复杂。
平均斑块面积 (AREA_MN)	$AREA_MN = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a_j$	N 为斑块数量。反映景观的平均粒度或破碎化程度。AREA_MN 增大,表明斑块平均规模扩大,生境内部环境比例增加,边缘效应相对减弱,有利于物种生存;反之则表明景观趋于破碎。
聚合度指数(AI)	$AI = \left[\frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right] * 100$	AI 用来量化同类斑块的空间聚集与连接程度。AI 值越高(最大是 100),表明红树林斑块在空间上越紧凑、连通性越好,有利于物种迁移和基因流动;值降低则表明斑块趋向于离散、隔离状态。

为定量揭示广东省红树林景观在斑块层面的结构特征与时空演变规律,本研究选取景观格局指数,借助 Fragstats 4.2 软件进行计算与分析。景观格局指数是一组高度浓缩景观空间格局信息的量化指标,能够有效反映红树林斑块的面积、形状、聚集程度及破碎化状态,从而从生态学角度评估其生境质量与空间稳定性[21] [22]。本研究从破碎化程度、优势度、景观粒度与空间连接性四个维度,选取了斑块数量、最大斑块指数、平均斑块面积、聚合度指数共 4 个具有明确生态学意义的景观格局指数进行计算(表 1),这些指数从不同维度刻画红树林景观的演变。

3. 结果与分析

3.1. 雷州半岛红树林面积变化特征

自 2019 年至 2023 年,雷州半岛红树林总面积呈持续增长态势(表 2)。2019 年红树林面积为 4342.21 公顷,2021 年增至 4732.48 公顷,2023 年进一步增至 5085.08 公顷,研究期内累计净增 742.87 公顷,相对增幅达 17.11%。从分时段变化看,2019~2021 年和 2021~2023 年两个阶段分别增加 390.27 公顷和 352.60 公顷,增长率分别为 8.99%和 7.45%,前一时段增量略高于后一时段,但整体保持平稳增长态势。

在区域尺度上,红树林面积变化表现出明显的空间异质性。2019~2023 年累计增量最大的区县为麻章区,达 225.12 公顷,占全市总增量的 30.30%;其次为经开区(118.60 公顷,占 15.96%)、雷州市(114.13 公顷,占 15.36%)和廉江市(93.82 公顷,占 12.63%),上述四区县合计贡献了全市增量的 74.25%。相比之下,霞山区和赤坎区增量极小,分别仅为 4.71 公顷和 0.24 公顷,合计不足总增量的 1%。从增长率来看,麻章区以 38.61%的总增长率居首位,经开区(28.53%)、坡头区(27.78%)和霞山区(23.71%)也表现出较高的相对增幅;而徐闻县(11.93%)、廉江市(9.12%)和雷州市(9.05%)的总增长率相对较低。

进一步分析各时段区域增长特征,不同区县的增长节奏存在差异。2019~2021 年间,增量较大的区县依次为麻章区(102.04 公顷)、经开区(77.79 公顷)、廉江市(65.17 公顷);2021~2023 年间,增量较大的区县依次为麻章区(123.08 公顷)、雷州市(72.83 公顷)、经开区(40.81 公顷)和坡头区(38.85 公顷)。其中,麻章区、雷州市和坡头区在后一时段的增量超过前一时段,呈现增长加速特征;而经开区、廉江市、遂溪县和徐闻县后一时段增量较前一时段有所减少,增长放缓;霞山区和赤坎区两时段增量均较小,且后一时段进一步下降。

Table 2. Changes in mangrove area of Leizhou Peninsula (Unit: ha)

表 2. 雷州半岛红树林面积变化(单位:公顷)

范围	2019 年	2021 年	2023 年
赤坎区	2.54	2.73	2.78
经开区	415.77	493.56	534.37
雷州市	1262.37	1303.67	1376.5
廉江市	1029.39	1094.56	1123.21
麻章区	583.39	685.43	808.51
坡头区	205.99	224.31	263.16
遂溪县	307.88	348.51	375.5
霞山区	19.86	22.75	24.57
徐闻县	515.02	556.96	576.48
雷州半岛	4342.21	4732.48	5085.08

3.2. 红树林斑块动态分析

2019~2021年,雷州半岛红树林空间变化呈现“整体稳定、局部新增、零星消失”的格局(图2)。从空间分布来看,稳定区域构成了红树林分布的主体(图2(a)),集中连片分布于廉江市西南部的九洲江口沿岸、麻章区通明河入海口两侧、雷州市东部的雷州湾潮滩以及徐闻县东北部沿岸,这些区域均位于主要河流水系影响的潮间带范围内,斑块连续性好,边界清晰。新增红树林斑块的分布具有显著的沿水系集聚特征(图2(b))。新增区域主要出现在麻章区北部通明河入海口东侧、经开区东部沿海潮沟周边、雷州市南部的小河入口以及廉江市九洲江口南岸的淤积区域。其中,麻章区北部和雷州湾沿岸的新增斑块最为密集,多依附于现有稳定红树林边缘向外扩展,或沿潮沟、河汊呈指状延伸,与水体边界紧密相邻。消失红树林斑块相对零散,主要分布在遂溪县西部沿岸、徐闻县东南部局部岸段以及部分远离主要河流水系的孤立小斑块(图2(c))。在遂溪县西部,消失斑块多位于水系边缘;在徐闻县东南部,消失区域位于主要河流水系影响范围的边缘地带;此外,在廉江市和雷州市的个别远离河口的区域也有零星消失斑块。整体而言,2019~2021年红树林的新增与稳定分布高度集中于水系影响较强的潮滩环境,而消失斑块则多处于水文条件相对不稳定或远离主要水系的边缘地带。

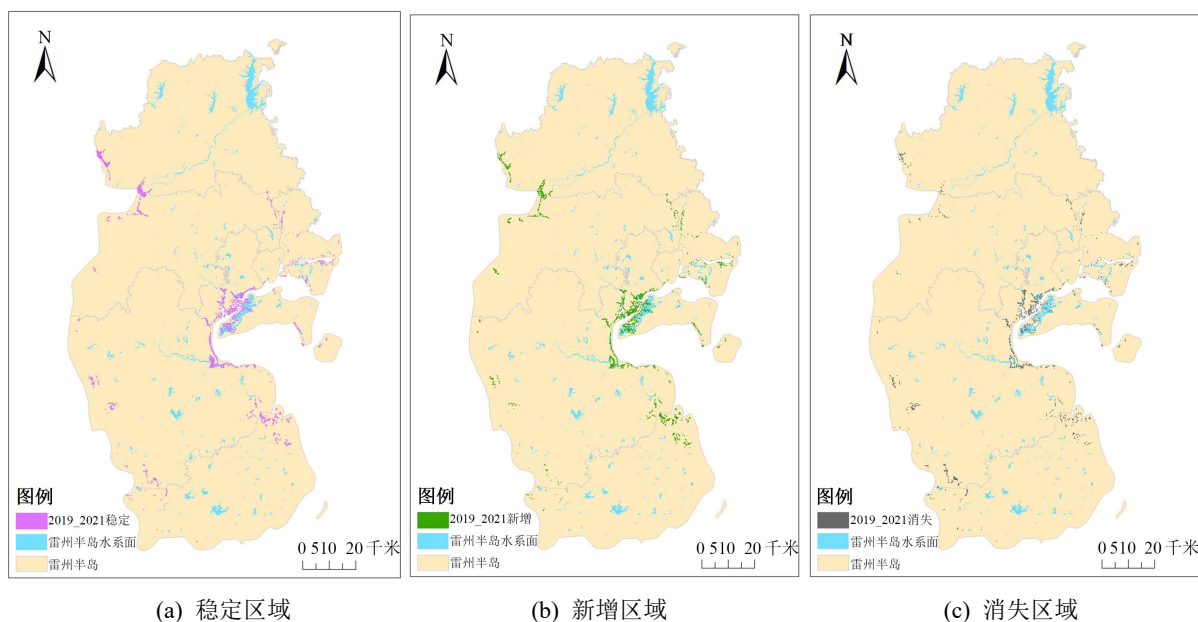


Figure 2. Dynamic changes of mangroves in Leizhou Peninsula from 2019 to 2021

图2. 2019-2021年雷州半岛红树林动态变化图

2021~2023年,雷州半岛红树林空间变化持续呈现增长态势,新增区域分布更为广泛,消失斑块较上一时期更为零星(图3)。从空间分布来看,稳定区域仍构成红树林分布的主体,集中连片分布于廉江市西南部九洲江口沿岸、麻章区通明河入海口两侧、雷州市东部雷州湾潮滩以及徐闻县东北部沿岸,这些区域均处于主要河流水系影响的潮间带范围内,斑块连续性好,与水体边界紧密相邻。新增红树林斑块的分布具有显著的沿水系扩展特征。新增区域广泛出现在麻章区北部通明河入海口东侧和西侧、经开区东部沿海潮沟周边、雷州市南部多条小河入口的淤积区域、廉江市九洲江口南岸以及徐闻县东北部局部岸段。其中,麻章区北部和雷州市东部沿海的新增斑块最为密集,多依附于现有稳定红树林边缘向外呈片状扩展,或沿潮沟、河汊呈指状延伸(图3(a))。与2019~2021年相比,本期新增斑块在麻章区和雷州市的分布范围进一步扩大,部分区域已形成新的红树林斑块群(图3(b))。消失红树林斑块较上一时期更为

零星，主要分布在遂溪县西部沿岸、徐闻县东南部局部岸段以及部分远离主要河流体系的孤立小斑块(图 3c)。在遂溪县西部，消失斑块零星分布于水系边缘；在徐闻县东南部，消失区域位于主要河流水系影响范围的边缘地带；此外，在廉江市和雷州市的个别远离河口的区域也有极少量消失斑块。整体而言，2021~2023 年红树林的新增与稳定分布仍高度集中于水系影响较强的潮滩环境，新增范围持续扩大，而消失斑块则更为零星且多处于远离主要水系的边缘地带。

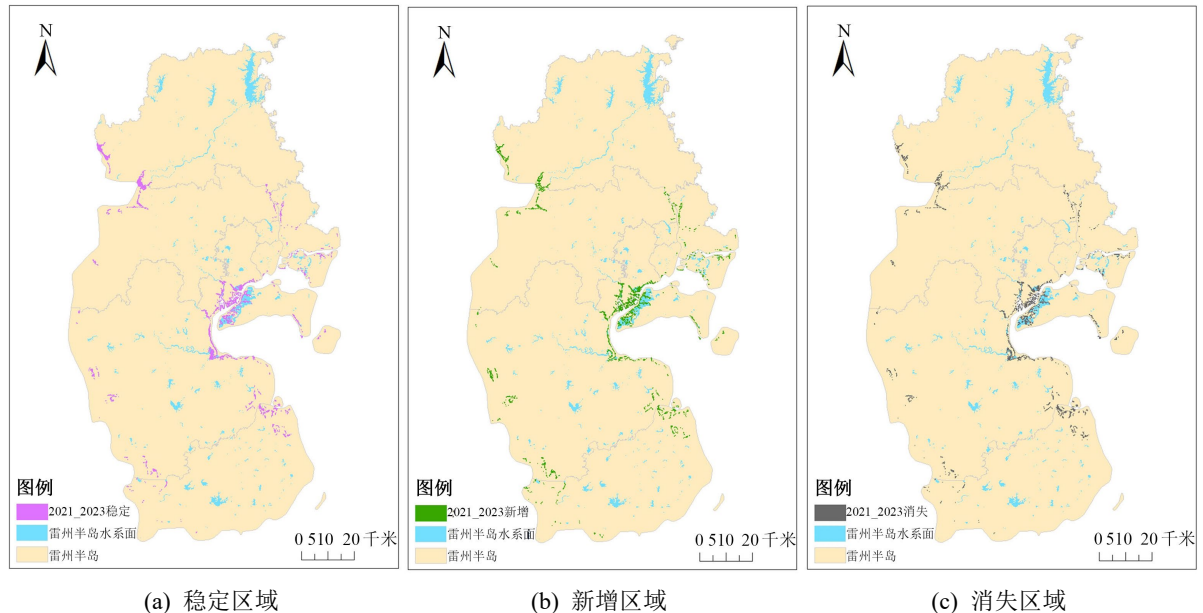


Figure 3. Dynamic changes of mangroves in Leizhou Peninsula from 2021 to 2023
图 3. 2021~2023 年雷州半岛红树林动态变化图

3.3. 红树林空间格局与转移分析

Table 3. Mangrove landscape pattern indices in Leizhou Peninsula
表 3. 雷州半岛红树林景观格局指数

年份	NP	LPI	ED	AREA_MN	AI
2019	2959	4.26	376.80	1.47	90.72
2021	2882	4.36	371.10	1.64	90.85
2023	2836	4.19	378.64	1.79	90.66

由表 3 可知，2019~2023 年，红树林斑块数量(NP)呈持续下降趋势，由 2959 个减少至 2836 个，累计减少 123 个；而平均斑块面积(AREA_MN)则由 1.47 公顷持续增加至 1.79 公顷，累计扩大 0.32 公顷。这一“数量下降、平均面积上升”的组合特征表明，红树林景观正在经历斑块合并与整合过程，原本破碎、孤立的小斑块逐渐连接或扩张形成更大的连续斑块，景观破碎化程度有所降低。最大斑块指数(LPI)呈现先升后降的波动特征，从 2019 年的 4.26 上升至 2021 年的 4.36，随后下降至 2023 年的 4.19。这表明 2021 年最大连续斑块的面积占比达到峰值，但到 2023 年其相对优势有所减弱。结合平均斑块面积的持续上升，可以推断 2021~2023 年间其他斑块的扩张速度可能超过了最大斑块，或最大斑块周边新增了较多小斑块，稀释了其面积占比。边界密度(ED)由 2019 年的 376.80 降至 2021 年的 371.10，随后回升至 2023 年的 378.64；聚集度指数(AI)则由 90.72 升至 90.85 后略降至 90.66。2019~2021 年边界密度下降、聚集度上升，

表明该时期斑块形状趋于规整、内部连接性增强；2021~2023 年边界密度回升、聚集度微降，则可能反映新增斑块多呈指状、条带状向外扩展(沿水系、潮沟分布)，增加了斑块边界长度，同时对整体聚集度产生轻微稀释作用，这与空间变化检测中“新增斑块沿水系呈指状扩展”的观察结果相吻合。

4. 讨论

本研究基于 2019、2021 和 2023 年三个时相的红树林矢量数据，对雷州半岛红树林的面积变化、空间格局及景观特征进行了系统分析。研究结果表明，2019~2023 年间雷州半岛红树林总面积持续增长，累计净增 742.87 公顷，增幅达 17.11%，呈现出良好的恢复态势。这一变化趋势与我国近年来大力推进红树林保护修复工作的宏观背景高度吻合。自《红树林保护修复专项行动计划(2020~2025 年)》实施以来，广东湛江红树林国家级自然保护区及周边区域积极开展退塘还林、人工种植等生态修复工程，有效促进了红树林资源的恢复与扩展。本研究的面积统计结果进一步证实了这些保护措施在雷州半岛的显著成效。

从空间格局来看，红树林的增长表现出明显的区域异质性，且与水系分布密切相关。麻章区是增长最为突出的区域，累计增量占全市总增量的 30.30%，增长率高达 38.59%，这一现象与该区域通明河入海口及沿岸潮沟发育良好的水文条件密切相关。此外，根据湛江市政府公开信息，麻章区自 2019 年起被列为湛江市红树林保护修复重点区域，实施了退塘还林、人工种植等系列工程，政策驱动的生态修复对面积增长起到了重要推动作用。新增红树林斑块多分布于主要河流入海口两侧及潮沟沿线，说明淡水输入带来的泥沙沉积和营养物质为红树林的自然扩散和人工种植提供了有利条件。从水文动力机制来看，雷州半岛沿海多为淤泥质潮滩，潮汐汉道和入海河流带来的细颗粒沉积物不断淤积，形成红树林生长的适宜底质；同时，河流淡水输入可降低局部盐度，减少极端高盐环境对红树林幼苗的胁迫，从而促进红树林沿水系向外扩展。相比之下，雷州市、廉江市和徐闻县虽为传统红树林分布大县，但增长率相对较低，这可能与这些区域红树林分布已达到较高密度、适宜生境趋于饱和有关，同时也提示需要关注这些区域是否存在人为干扰或自然退化等潜在风险。霞山区和赤坎区由于城市化水平高、海岸带开发强度大，红树林增长空间极为有限，反映出城市海岸带生态保护的现实约束。

在景观格局演变方面，研究期内红树林斑块数量持续减少、平均斑块面积不断增加，表明景观破碎化程度有所降低，斑块合并与整合趋势明显。这一变化特征与面积增长相呼应，说明新增红树林主要附着于现有斑块边缘向外扩展，而非形成大量孤立小斑块，这种增长模式有利于红树林生态系统的功能维持与提升。值得注意的是，边界密度和聚集度指数在 2021~2023 年间呈现波动，边界密度回升、聚集度微降，结合空间变化检测结果可以推断，这一变化主要源于新增斑块沿水系呈指状、条带状向外延伸，增加了景观边界的复杂程度，同时对整体聚集度产生轻微稀释作用。这一发现揭示了红树林自然扩散和人工引导扩张的空间模式差异：前期以内部填充和斑块整合为主，后期则更多表现为沿水系向外辐射式扩展。

将本研究结果与已有研究成果进行比较，可以发现雷州半岛红树林的变化特征与全国红树林保护修复的总体趋势相一致。Chen 等研究显示 2015 年中国红树林面积较 2000 年有所回升[9]，Zhao 等进一步证实了 2017~2019 年间中国红树林的持续增长态势[11]。本研究将时间序列延伸至 2023 年，证实了雷州半岛红树林的增长势头仍在延续。与区域尺度的研究相比，马昇鑫等基于遥感影像分析了湛江红树林保护区的生态系统变化[18]，本研究则进一步细化了各县区的空间差异，并揭示了新增与消失斑块的空间分布特征及其与水系的关联，为更精细化的保护管理提供了依据。

本研究仍存在一定局限性。首先，红树林矢量数据来源于遥感影像分类提取，尽管总体精度较高(大于 94%)，但分类误差可能对面积统计和空间分析结果产生一定影响，尤其是在红树林与滩涂、其他植被交错的边缘地带。其次，本研究主要聚焦于红树林面积和空间格局的变化，尚未深入分析变化背后的具

体驱动力,如人类活动强度、养殖塘变迁、海岸工程影响等因素。此外,水系数据仅作为空间分析的辅助图层,未进一步量化水系密度、河道变迁与红树林变化之间的相关性。

基于以上分析,未来研究可从以下方向深入:一是结合高分辨率遥感影像和实地调查数据,进一步验证和修正红树林分布数据的精度,尤其是在变化频繁的边缘地带;二是开展红树林变化驱动力的定量分析,引入养殖塘分布、城镇扩张、保护区内外部对比等多源数据,探究不同因子对红树林变化的影响机制;三是结合红树林物种组成和生态功能指标,评估面积增长和景观格局变化对红树林生态系统服务功能的影响,为红树林保护修复工程的成效评估提供更全面的科学依据。

5. 结论

本研究基于 2019、2021 和 2023 年三个时相的红树林矢量数据,对雷州半岛红树林的面积变化、空间格局及景观特征进行了系统分析,得出以下主要结论:

(1) 2019~2023 年,雷州半岛红树林总面积呈持续增长态势,由 4342.21 公顷增至 5085.08 公顷,累计净增 742.87 公顷,相对增幅达 17.11%。年均增长约 185.7 公顷,表明区域红树林保护修复工作取得显著成效。

(2) 红树林增长呈现明显的空间异质性,麻章区是增长最为突出的区域,累计增量占全市总增量的 30.3%,增长率高达 38.6%;经开区、雷州市和廉江市合计贡献了全市增量的 44.0%。新增斑块多分布于主要河流入海口两侧及潮沟沿线,与水体边界紧密相邻,而消失斑块则相对零星,多位于水文条件不稳定或人为干扰较强的边缘地带。

(3) 景观格局演变特征表现为斑块数量持续下降(由 2959 个减少至 2836 个),平均斑块面积持续增加(由 1.47 公顷增至 1.79 公顷),景观破碎化程度有所降低,斑块合并与整合趋势明显。边界密度和聚集度指数的波动反映了新增斑块沿水系呈指状、条带状向外扩展的空间模式。

基于本研究结果,提出以下针对性管理建议:

(1) 分区管理思路:根据红树林的时空变化特征,可将雷州半岛红树林分布区划分为三类功能区域。核心保护区以稳定连片分布区为主(如廉江市九洲江口、麻章区通明河口、雷州湾潮滩),应严格限制人为干扰,维持现有斑块的完整性;生态修复优先区以新增斑块集中但周边仍存在破碎化现象的区域为主(如麻章区北部、经开区东部潮沟沿线),应优先开展斑块连通和生境质量提升工程;胁迫因子排查区以消失斑块相对集中的区域为主(如遂溪县西部、徐闻县东南部局部岸段),建议重点排查水产养殖、海岸工程等潜在胁迫因素。

(2) 针对“指状”扩张斑块的管理:本研究发现新增斑块多呈指状沿水系向外扩展,这类斑块形态狭长,边界复杂,稳定性相对较低。建议加强对这类斑块的长期稳定性监测,特别是在台风风暴潮频发季节,防范潮沟冲刷导致的斑块断裂或退化;必要时可采取人工辅助加固措施,如补植、护岸等。

(3) 针对城市化压力较大区域的管理:霞山区和赤坎区红树林增长空间极为有限,且受城市开发影响较大。建议在这些区域划定海岸生态缓冲带(宽度建议 ≥ 50 米),严格控制填海造地和海岸工程建设,落实生态保护红线要求,防止城市扩张进一步挤压红树林生境。

综上所述,2019~2023 年雷州半岛红树林面积持续增长、景观格局趋于优化,保护修复成效显著。本研究结果可为雷州半岛红树林资源的精细化管理及后续保护修复工程的科学评估提供数据支持与决策依据。

基金项目

广东工贸职业技术学院第十五届“挑战杯”广东大学生创业大赛暨 2026 年广东省科技创新战略专项

资金(攀登计划)校级培育项目(项目编号: 2025SCP Y025)。

参考文献

- [1] 张颖, 陈光程, 钟才荣. 中国濒危红树植物研究与恢复现状[J]. 应用海洋学报, 2021, 40(1): 142-153.
- [2] Das, S. and Vincent, J.R. (2009) Mangroves Protected Villages and Reduced Death Toll during Indian Super Cyclone. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**, 7357-7360. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810440106>
- [3] 张翼生. 人工红树林修复工程中病虫害防治技术的优化与实践研究[J]. 种子世界, 2025(11): 171-173.
- [4] 张林, 王瑁, 王文卿. 红树林湿地主要大型底栖动物的生态功能及多样性保护需求[J]. 广西科学院学报, 2024, 40(3): 197-206.
- [5] 陈思明, 邓钟, 张红月, 等. 气候变化对中国沿海红树林潜在分布格局的影响[J]. 湿地科学与管理, 2024, 20(3): 32-37+44.
- [6] 莫锦英, 田义超, 王家乐, 等. 基于机器学习的养殖池-红树林-海洋复合生态系统氨氮遥感反演[J]. 环境科学学报, 2024, 44(11): 415-429.
- [7] 梁曾飞, 黄哲, 彭泰来, 等. 惠东县红树林资源现状及保护对策[J]. 浙江林业科技, 2021, 41(1): 108-112.
- [8] 李瑞利, 杨芳, 王辉, 等. 红树林保护与修复标准发展现状及对策[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(5): 916-928.
- [9] Chen, L., Wang, W., Zhang, Y. and Lin, G. (2009) Recent Progresses in Mangrove Conservation, Restoration and Research in China. *Journal of Plant Ecology*, **2**, 45-54. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtp009>
- [10] Wang, W., Fu, H., Lee, S.Y., Fan, H. and Wang, M. (2020) Can Strict Protection Stop the Decline of Mangrove Ecosystems in China? From Rapid Destruction to Rampant Degradation. *Forests*, **11**, Article 55. <https://doi.org/10.3390/f11010055>
- [11] Zhao, H., Yan, B., Mo, X., Li, P., Li, B., Li, Q., et al. (2019) Prevalence and Proliferation of Antibiotic Resistance Genes in the Subtropical Mangrove Wetland Ecosystem of South China Sea. *Microbiology Open*, **8**, e871. <https://doi.org/10.1002/mbo3.871>
- [12] 覃国铭, 张靖凡, 周金戈, 等. 广东省红树林土壤碳储量及固碳潜力研究[J]. 热带地理, 2023, 43(1): 23-30.
- [13] 郑燕萍, 刘琦, 黄欣, 等. 雷州半岛红树林鱼类群落结构及其与人类活动强度的关系[J]. 生态学报, 2024, 44(1): 440-453.
- [14] 吴后建, 刘世好, 贺东北, 等. 中国红树林监测研究进展与展望[J]. 湿地科学与管理, 2022, 18(1): 69-72.
- [15] 钟才荣, 程成, 陈鹭真, 等. 海南省红树林湿地监测体系构建和监测方法初探[J]. 湿地科学, 2021, 19(5): 646-650.
- [16] Heumann, B.W. (2011) An Object-Based Classification of Mangroves Using a Hybrid Decision Tree—Support Vector Machine Approach. *Remote Sensing*, **3**, 2440-2460. <https://doi.org/10.3390/rs3112440>
- [17] 王子予, 刘凯, 彭力恒, 等. 基于 Google Earth Engine 的 1986-2018 年广东红树林年际变化遥感分析[J]. 热带地理, 2020, 40(5): 881-892.
- [18] 马昇鑫, 周玲玲, 王晋, 等. 基于遥感的湛江红树林保护区生态系统时空变化特征[J]. 资源科学, 2022, 44(12): 2580-2593.
- [19] 叶晋良, 朱焱, 肖鹤, 等. 2019-2023 年雷州半岛红树林分布数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2025, 10(4): 468-481.
- [20] 骆娟, 吴兰卡, 王秋娜, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的海南岛红树林湿地碳储量时空演变与预测[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2026, 24(2): 246-257.
- [21] 李佳, 盘延明, 陈科东, 等. 基于 ArcGIS 和 Fragstats 的城市森林景观格局分析——以柳州市莲花山为例[J]. 广西林业科学, 2024, 53(3): 369-376.
- [22] 奥勇, 蒋嶺峰, 白召弟, 等. 基于格网 GIS 的黄河流域土地生态质量综合评价[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 164-175.