

退塘还湿背景下花场湾红树林湿地景观演变与影响因素分析

Analysis of the Evolution and Influencing Factors of the Huachang Bay Mangrove Wetland under Pond-to-Wetland Restoration

韦晓春 (巴基斯坦) 卡西夫·阿里·索朗基 宋希强 杨泽秀*

WEI Xiaochun, (PK) Kashif Ali Solangi, SONG Xiqiang, YANG Zexiu*

基金项目: 澄迈县花场湾红树林湿地监测项目 (编号: HD-KYH-20241854)

摘要

为揭示海南花场湾红树林湿地景观格局的时空演变特征及其影响因素, 基于 2015、2020 和 2025 年 3 期 Sentinel-2 卫星影像, 采用土地利用动态分析、景观格局指数和皮尔逊相关分析等方法, 从斑块类型和景观尺度进行定量分析。结果表明: 研究区土地利用呈“水退林进、塘转田扩”趋势, 红树林面积增速呈前缓后快的特征, 水体面积持续缩减, 耕地和建筑用地面积扩张; 修复区斑块呈现内部整合与边缘暴露的双向演化特征, 景观整体呈破碎化加剧与多样性同步提升趋势; GDP、城镇人口分别与红树林和建筑用地扩张呈较强的趋势一致性, 气候因子对林地、沼泽植被起协同调节作用, 整体呈现经济、政策、城镇化和气候多因素协同变化的趋势特征。据此提出集中连片修复、林缘生态缓冲带构建与水文连通性恢复等建议。

Abstract

To reveal the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of the landscape pattern in the Huachang Bay mangrove wetland of Hainan, this study conducted quantitative analyses at both patch-type and landscape scales based on three periods of Sentinel-2 satellite imagery from 2015, 2020, and 2025, employing methods including land use dynamic analysis, landscape pattern indices, and Pearson correlation analysis. The results indicate that: Land use in the study area exhibits a trend of a decrease in water area, an increase in mangrove cover, and conversion of some ponds to cropland; the mangrove area shows an accelerating growth rate over time, with continuous reduction in water bodies, and expansion of cultivated land and built-up areas. The restoration area exhibits a dual evolutionary pattern of internal integration and edge exposure, with the overall landscape showing concurrent intensification of fragmentation and increase in diversity. GDP and urban population show strong trend consistency with mangrove expansion and built-up land growth, respectively, while climate variables were also associated with changes in woodland and marsh vegetation, suggesting that multiple factors may be associated with the observed changes. Accordingly, recommendations for contiguous restoration, construction of forest-edge ecological buffer zones, and restoration of hydrological connectivity are proposed.

文章亮点

1) 揭示了花场湾红树林面积增长呈前缓后快的特征, 斑块由破碎化走向融合连片。2) 红树林修复初期的离散斑块在后期趋于融合, 空间连通性提升, 林缘与耕地、建筑用地等人为景观邻接界面系统性扩大, 揭示修复成效与边缘干扰风险并存的生态特征。3) 明确花场湾景观格局演变是政策主导、经济支撑、城镇化挤压、气候调节的多因素协同驱动的结果, 提出“近林优先、集中连片”修复策略及林缘缓冲带建设等建议。

关键词

红树林; 湿地; 景观格局; 退塘还湿; 生物多样性; 生态修复; 花场湾

Keywords

Mangrove; Wetland; Landscape pattern; Returning pond to wetlands; Biological diversity; Ecological remediation; Huachang Bay

收稿日期: 2026-03-08

修回日期: 2026-05-14

红树林是热带和亚热带海岸潮间带特有的木本植物群落, 在消浪护岸、固碳储碳、净化水质和维持近海生物多样性等方面发挥着不可替代的生态服务功能, 被誉为“海岸卫士”, 是蓝碳生态系统的重要组成部分^[1-2]。然而, 受围塘养殖、城镇扩张和海岸工程等人类活动的持续影响, 全球红树林面积在过去半个世纪中大幅减少, 我国南方沿海红树林同样面临面积萎缩与栖息地破碎化的双重威胁^[3-4]。近年来, 随着“退塘还湿”“蓝色海湾”等生态修复工程的推进, 部分区域红树林面积有所恢复, 但修复区与自然残存区的景观格局差异显著, 亟须从景观生态学角度加以系统评估^[5-7]。景观格局分析法通过定量描述景观要素的空间配置与组成特征, 能够有效揭示自然演替与人为干扰的综合累积效应^[8]。遥感与GIS技术的发展则为其长时序动态监测提供了有力支撑^[9]。目前, 基于多时相遥感影像的景观格局指数分析和土地利用转移矩阵方法已在珠江口、北部湾和福建沿海等地的红树林研究中得到广泛应用^[10-11]。但已有研究多侧重于面积变化的宏观描述, 对修复过程中斑块空间动态及林缘形态变化等方面的探讨相对较少。

海南省澄迈县花场湾是海南岛北部典型的河口型红树林湿地, 现存真红树植物 12 种, 占海南省真红树总数的 46.2%, 具有重要的生态区位价值^[12]。近年来该区域城镇扩张、水产养殖、农业开发与退塘还湿生态修复工程同步推进, 各种影响因素交互作用, 对景观格局产生了不同程度的影响^[13]。目前针对该区域的研究多集中于物种组成调查与保护现状评估^[14], 基于长时序遥感数据的景观格局定量分析仍有待深入。鉴于此, 本研究以花场湾红树林湿地为对象, 基于 2015 年、2020 年和 2025 年 3 期 Sentinel-2 卫星影像, 综合运用土地利用动态分析、景观格局指数分析和影响因素相关性分析等方法, 从斑块类型水平和景观水平 2 个尺度, 系统揭示退塘还湿政策背景下花场湾近 10 年景观格局的时空演变特征, 并探讨各类人为与气候因子对上述变化的协同驱动机制, 以期在花场湾及华南沿海类似河口型红树林湿地的景观规划与生态修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

花场湾位于海南岛北部澄迈县沿海 (19° 53' 30" ~ 19° 56' 33" N, 109° 57' 17" ~ 110° 01' 29" E), 总面积约 2 378 hm², 为大丰、福山、桥头、老城四镇围合而成的滨海内湾湿地 (图 1)。研究区属典型热带季风气候, 年均气温 23.8℃, 年均降水量 1 750 mm。该区域为半封闭式沿海内湾, 潮汐类型属不规则半日混合潮, 平均潮差约 1.89 m。研究区内有真红树植物 12 种, 半红树植物 5 种, 主要包括榄李 *Lumnitzera racemosa* 群落、蜡烛果 *Aegiceras corniculatum* 群落、海榄雌 *Avicennia*

marina 群落^①。1995 年成立的花场湾红树林县级自然保护区, 近年来正实施退塘还湿生态修复工程^[15]。

1.2 数据来源与处理

本研究数据包括遥感、气候和社会经济 3 类。遥感数据为 ESA (European Space Agency, 欧洲航天局) 发布的 Sentinel-2 卫星影像 (空间分辨率为 10 m)。研究基于 Google Earth Engine 平台筛选 2014—2015 年、2019—2020 年、2024—2025 年共 3 个干季 (每年 11 月至翌年 3 月) 云量低于 5% 的 L2A 级影像, 分别以 2015 年 1—3 月、2020 年 1—3 月、2025 年 1—3 月为主要成像窗口, 辅以 Google Earth 亚米级历史影像进行目视修正, 并于 2024 年 8 月至 2025 年 8 月利用手持 GPS 与 DJI Mavic 3 多光谱无人机开展实地验证。气候数据来源于中国气象数据网澄迈县气象站逐月观测资料^②, 选取年降水量、年均气温和年均相对湿度 3 个因子。社会经济数据来源于《澄迈县统计年鉴》^③, 选取总人口、城镇人口、农村人口、GDP 和第三产业增加值 5 个指标。

研究基于 ENVI 5.3 与 ArcGIS 10.8 平台, 对影像依次进行辐射定标、大气校正及几何精校正。参照《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017), 结合研究区景观特征与影像可分辨性, 将景观划分为红树林、沼泽植被、林地、水体、耕地、草地、建筑用地及裸地 8 类, 其中红树林作为核心研究对象从林地中单独提取。研究采用最大似然法进行监



图 1 研究区位

Fig.1 Location map of the study area

① 数据来自澄迈县人民政府办公室《澄迈县花场湾红树林保护利用规划 (2019—2035 年)》(澄府办〔2019〕60 号)。

② 气候数据来自 <https://data.cma.cn>。

③ 数据来自 <https://chengmai.hainan.gov.cn/chengmai/tjnj/list2.shtml>。

督分类, 训练样本基于 Google Earth 高分辨率影像与实地调查数据联合判定, 每类景观选取不少于 30 个训练样本, 分类后依次进行以下处理: 1) 3×3 众数滤波去噪; 2) 对 3 期栅格进行空间配准与像元对齐; 3) 结合 Google Earth 高分辨率历史影像 (2015 年参考影像获取自 2015 年 2 月, 2020 年参考影像获取自 2020 年 1 月, 2025 年参考影像获取自 2025 年 1 月) 及实地 GPS 记录, 依据归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*) 阈值 (红树林不小于 0.40、沼泽植被为 0.10~0.40)、潮间带位置与气生根纹理特征, 由 2 名熟悉本区植被类型的研究人员对光谱混淆区域进行独立判读, 取一致结果作为修正依据。3 期人工修正面积分别为 8.1 hm^2 、 6.7 hm^2 和 6.5 hm^2 , 合计约 21.3 hm^2 (占研究区总面积的 0.90%), 各类型面积偏差率均低于 0.5%, 不影响景观转移规律的定性判断。接着, 研究基于分层随机抽样验证样本 (3 期分别为 316、318、328 个) 构建混淆矩阵, 3 期总体精度 (Overall Accuracy, *OA*) 分别为 84.2%、85.5% 和 85.7%, *Kappa* 系数分别为 0.81、0.82 和 0.83。其中, 水体精度最高, 用户精度 (User's Accuracy, *UA*) 不小于 92.0%, 制作者精度 (Producer's Accuracy, *PA*) 不小于 91.5%; 林地与沼泽植被为主要低精度类型, *UA* 最低值分别为 78.1% 和 76.5%, *PA* 最低值分别为 78.4% 和 79.2%。针对上述混淆类型, 研究已通过人工修正与阈值约束加以控制, 边缘密度、散布与并列指数等边缘敏感指标的误差传递风险已降低, 不影响景观格局变化趋势的定性判断。红树林与沼泽植被的光谱混淆主要源于潮间带的过渡带冠层郁闭度相近及季节性水淹导致的 *NDVI* 重叠, 已通过气生根纹理特征辅助判读与 *NDVI* 双阈值约束加以区分, 2 类误差相互对称, 不会系统性高估或低估红树林面积变化趋势 (图 2)。

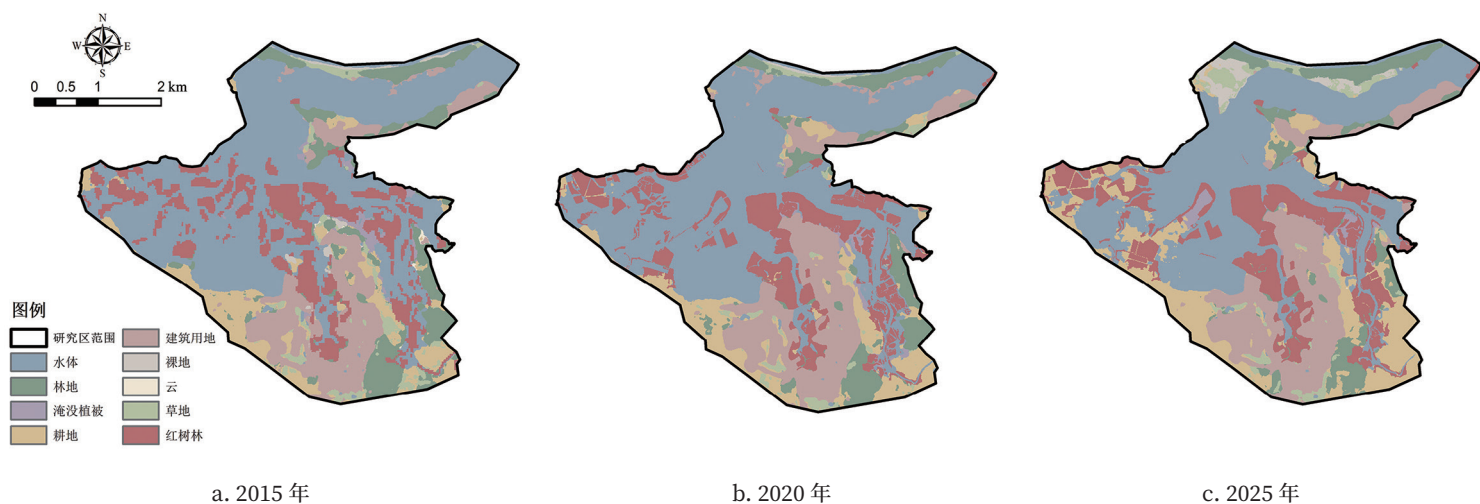


图 2 花场湾 2015—2025 年景观类型分布

Fig.2 Distribution of landscape types in Huachangwan, 2015—2025

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用动态度分析

土地利用动态度用于定量描述研究区内特定土地利用类型在一定时间范围内的变化速率, 其计算公式如下:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中 U_a 为研究初期某类土地利用类型的面积, U_b 为研究末期该类土地利用类型的面积; T 为研究时长, 当 T 的单位为年时, K 值即表示该地类在该时段的年均变化速率。

1.3.2 景观格局指数分析

研究运用 FRAGSTATS 4.2 软件, 从斑块类型水平和景观水平计算景观格局指数。栅格数据以 GeoTIFF 格式导入, 背景值设为 0, 邻域规则采用 8 邻域连通准则以识别对角相邻像元, 边缘处理采用边界补丁方式, 分析粒度与输入栅格一致 ($10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$)。Sentinel-2 卫星影像的原始分辨率为 10 m , 进一步聚合将损失潮间带窄带植被边界信息, 但数据分类后已经进行 3×3 众数滤波预处理, 有效抑制了单像元噪声对密度类指数的干扰, 与同类红树林景观研究的通行做法一致。此外, 移动窗口尺寸设定为 $800 \text{ m} \times 800 \text{ m}$ (窗口面积约占研究区总面积的 2.7%)。为验证该尺寸的合理性, 研究对 600 m 、 800 m 、 1000 m 三种窗口尺寸进行了敏感性测试, 3 种尺寸下各指数的空间分布格局与变化趋势基本一致, 表明 800 m 窗口在本研究尺度下具有稳健性, 不影响统计结论的方向性判断。最后, 研究选取斑块密度 *PD*、最大斑块指数 *LPI*、边缘密度 *ED*、景观形状指数 *LSI*、散布与并列指数 *IJI*、斑块结合度 *COHESION* 和聚集度 *AI* 七个指标评估斑块类型水平^[16]; 选取斑块密度、蔓延度 *CONTAG*、聚集度 *AI*、散布与并列指数、香农多样性指数 *SHDI* 和香农均匀度指数 *SHEI* 六个指标评估景观水平^[17] (表 1)。

1.3.3 景观水平指数变化的显著性检验

为检验景观水平指数在不同时期的变化是否具有统计意义，本研究采用移动窗口法生成空间重复样本，以80×80像元（800 m×800 m）为窗口、20像元（200 m，窗口边长的25%）为步长对研究区进行系统采样。窗口尺寸的选取综合考虑3方面：1）景观代表性上，研究区红树林主体斑块长轴约300 m~600 m，800 m窗口可完整覆盖典型斑块单元；2）样本数量上，该设置可获取满足方差分析要求的有效样本；3）尺度合理性上，窗口面积占研究区总面积的2.7%，既保证了空间重复样本能够全面反映研究区的景观异质性，又避免了窗口过大造成高重叠度与数据冗余。本文以研究区外接矩形为采样框，共生成918个候选窗口；剔除有效像元占比低于50%的452个窗口，最终每期获取466个有效样本，3期均采用相同空间位置以确保样本配对。在每个窗口内分别计算PD、CONTAG、AI、IJI、SHDI和SHEI共6项景观水平指数，采用单因素方差分析（ANOVA）检验3个时期期间的差异显著性，并以Kruskal-Wallis非参数检验进行稳健性验证；对达到显著水平的指标开展进一步事后多重比较，以明确差异主要发生的时段。此外，研究以600 m×600 m窗口对CONTAG和SHEI进行验证性计算，显著性结论与800 m窗口保持一致（ $P<0.001$ ），表明主要结论对窗口尺寸具有一定稳健性。

表1 景观格局指数及其生态学含义
Tab.1 Landscape pattern indices and their ecological meanings

分析尺度	景观指数	生态学含义
斑块类型水平	斑块密度 PD	单位面积斑块数量，反映破碎化程度
	最大斑块指数 LPI	最大斑块面积占比，指示优势景观类型
	边缘密度 ED	单位面积边界长度，反映边缘效应强度
	景观形状指数 LSI	斑块形状复杂程度，值越大形状越不规则
	散布与并列指数 IJI	斑块类型间邻接关系的复杂程度
	斑块结合度 COHESION	同类斑块的物理连通性
	聚集度 AI	同类斑块的空间团聚程度
景观水平	斑块密度 PD	景观整体破碎化程度
	蔓延度 CONTAG	优势斑块的延展与连通程度
	聚集度 AI	景观整体的团聚程度
	散布与并列指数 IJI	景观要素间邻接关系的均匀程度
	香农多样性指数 SHDI	景观类型丰富度与均衡度
	香农均匀度指数 SHEI	各景观类型面积分配的均匀程度

注：PD在2个分析尺度中计算方法相同（单位面积内斑块总数），但统计对象不同：斑块类型水平PD仅统计某一特定景观类型的斑块数量，反映该类型内部的破碎化程度；景观水平PD统计研究区所有类型的斑块总数，反映整体景观的综合破碎化程度。

1.3.4 现场调查

本研究于2024年8月至2025年8月进行野外实地调查，利用Sentinel-2卫星影像的光谱与纹理特征，建立各景观类型的遥感解译标志，开展研究区遥感判读区划，对判读结果进行现场校正。调查过程中使用手持GPS（定位精度±1 m）和DJI Mavic 3多光谱无人机进行地理定位与数据采集，对遥感预分类确定的各土地利用类型范围进行实地勘测，明确斑块边界和实际用地类型，重点校正红树林与林地、沼泽植被与水体等光谱混淆区域的分类结果，辅助完善土地利用类型分布图的编制。同时，对研究区红树林湿地的生物多样性进行观察与记录，包括红树林群落优势树种组成、生长状况及伴生动植物种类，重点关注研究区周边特别是湿地水域范围的环境现状，记录养殖退塘、农业开垦、建设用地扩张等人为干扰活动及潮沟水文连通状况，为后续景观格局变化的影响因素分析提供实地验证依据。

1.3.5 景观变化关联因素的趋势性分析

研究采用描述性趋势分析方法，以皮尔逊相关系数和单因素线性 R^2 作为趋势方向的辅助量化指标，描述各因子与土地利用类型面积及景观水平指数的协同变化方向。受限于样本量，上述数值不具备统计显著性，仅反映3个时间节点间的趋势一致程度。

2 结果与分析

2.1 土地利用动态变化

2015—2025年花场湾的水体、林地和沼泽植被的总面积呈减少趋势，其中水体减少面积最大，达222.62 hm²；红树林、耕地、建筑用地、草地及裸地面积呈增加趋势，耕地面积增量最为显著，为156.60 hm²（图3）。

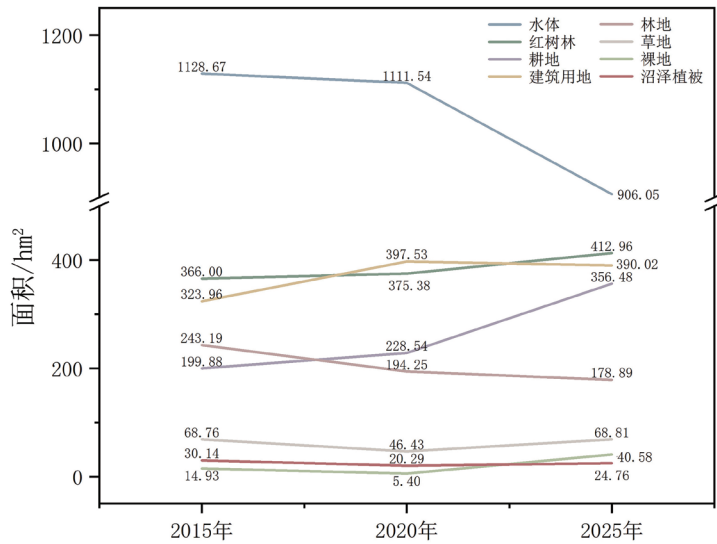


图3 2015—2025年花场湾各土地利用类型面积时序变化
Fig.3 Temporal changes of land use type area from 2015 to 2025 in Huachang Bay

十年间, 水体面积呈持续下降趋势, 至 2025 年降至 906.05 hm²; 红树林面积呈先缓增后加速增长的特征, 2015—2020 年增加 9.38 hm², 2020—2025 年增加 37.58 hm², 至 2025 年达 412.96 hm²; 耕地面积呈持续增长态势, 年均变化量为 15.66 hm²; 建筑用地面积前 5 年快速扩张 (增加 73.57 hm²), 后 5 年趋于稳定并略有回落。

2.2 景观类型转移特征

2015—2020 年景观类型转移桑基图 (图 4) 显示, 该阶段景观演变以红树林高强度空间重组与生态基质流失为主要特征。红树林呈大进大出的动态平衡格局, 97.98 hm² 的水体转化为红树林, 反映了潮间带自然演替与退塘还湿工程的综合效应; 但同期 105.19 hm² 的红树林逆向退化为水体, 保留率 (初期面积中未发生转移部分的占比) 仅 65.40%, 该退化与台风扰动、局部复垦及影像中稀疏幼苗斑块的分类误差叠加有关^[18]。建设用地保留率高达 93.80%, 新增用地侵占水体 (23.90 hm²) 和林地 (23.19 hm²), 表现出典型的不可逆扩张特征。耕地吸纳 27.95 hm² 的草地和 23.09 hm² 的林地, 向半自然生境渗透。水体、林地与草地合计净输出约 88 hm², 是该阶段主要的生态空间流失源。

2020—2025 年景观类型转移桑基图 (图 4) 显示, 景观演变的主导矛盾由城镇化侵占转为农业开发干扰。红树林保留率升至 95.40% (356.48 hm² 未发生转移), 新增转入的 55.51 hm² 中, 有 45.57 hm² 来源于水体的正向演替; 除去同期转出面积后, 红树林面积净增加 37.58 hm²。耕地成为扩张最活跃的类型, 98.14 hm² 的水体和 46.66 hm² 的林地转为耕地, 分别构成该阶段规模最大和次大的单一景观流向, 说明农业开垦已向内陆林地边缘渗透。建设用地扩张趋于饱和, 面积净减少 7.51 hm²。此外, 31.88 hm² 水体转化为裸地, 存在进一步硬质化的潜在风险。

2.3 景观格局指数变化分析

2.3.1 斑块类型水平指数

基于 2015—2025 年 3 期遥感数据, 各景观类型斑块水平指数呈明显时序分

异 (图 5)。破碎化方面, 红树林 PD 呈先升后降趋势, 表明前期破碎化加剧, 后期斑块趋于融合; 耕地 PD 持续攀升至 9.30 个/100 hm², 为破碎化程度最高的类型。边缘效应方面, 红树林 ED 呈倒 V 型变化, 与同期大量新增斑块导致的边界长度增加直接相关, 耕地 ED 则持续升高至 49.19 m/hm²。形状复杂性方面, 景观形状指数 LSI 呈现差异化演变。红树林 LSI 呈先升后降的倒 V 型趋势, 表明其斑块形状在前期趋于复杂, 后期随着斑块融合趋向规则化; 而耕地的 LSI 则持续升高, 说明受人类活动影响, 其空间形态愈发不规则。聚集特征方面, 红树林 AI 维持在 96.99%~97.55%, 表明主体景观的空间连通性未发生根本性退化; 红树林和沼泽植被的 AI 值波动最为明显。综合各项指标来看, 修复后期红树林离散斑块逐步融合连片, 连通性提升, 展现出较显著的内部整合特征; 但因林缘形态趋于复杂以及与周边耕地、建设用地的邻接界面扩张, 亦伴随着系统性的边缘暴露风险, 即修复区斑块在空间演化上呈现出内部整合与边缘暴露交织的双向特征。

2.3.2 景观水平指数

景观水平指数的变化反映了研究区整体景观结构的演变趋势 (图 6)。2015—2025 年, 景观水平 PD 从 14.87 个/100 hm² 升至 19.23 个/100 hm², 表明研究区整体破碎化程度持续增加。CONTAG 从 56.32% 降至 51.78%, 说明优势景观类型的连片程度减弱, 景观异质性提高。AI 值从 94.56% 小幅降至 93.12%, 整体聚集度有所下降但幅度有限, 景观基本格局未发生根本性改变。SHDI 从 1.32 升至 1.51, SHEI 从 0.63 升至 0.73, 两者均呈现持续上升趋势, 说明景观多样性提升。IJI 从 52.36% 升至 59.84%, 反映出不同景观类型之间的交错分布程度增加, 斑块间邻接关系趋于复杂。

综合来看, CONTAG 显著下降、SHDI 和 SHEI 上升, 表明研究区景观多样性持续提升、优势景观连片度下降; PD、AI 和 IJI 数值的变化未达显著水平, 相关结论仅代表数值变化方向, 不作确定性表述。上述格局反映了退塘还湿政策与城镇化、农业开发等多种影响因素叠加下景观结构的复杂化重塑过程。

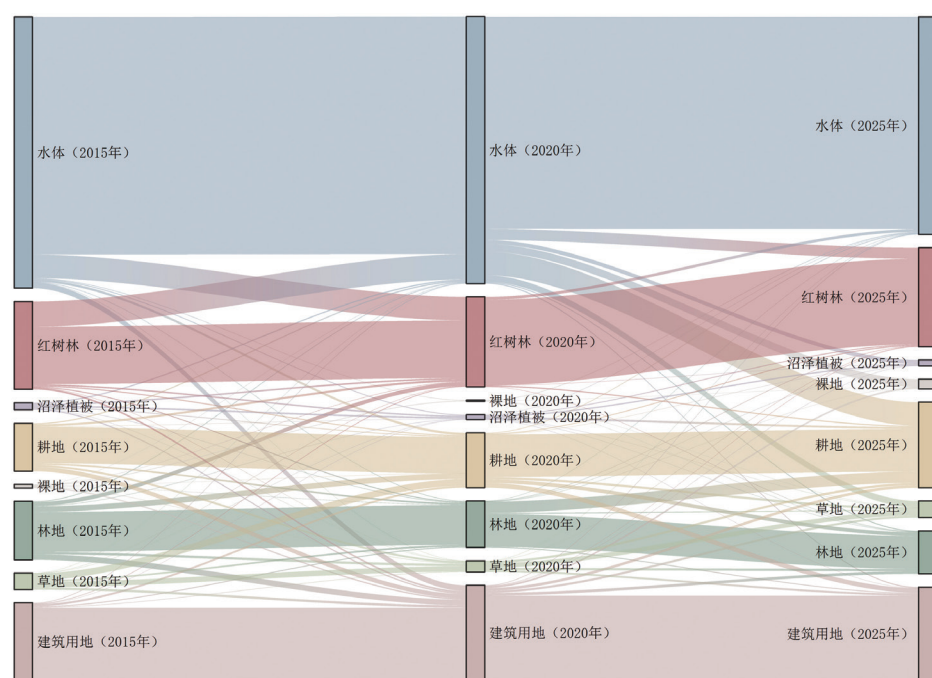


图 4 2015—2025 年景观类型转移桑基图

Fig.4 Sankey diagram of landscape type transitions (2015—2025)

移动窗口空间采样的 ANOVA 检验结果 (表 2) 显示, *CONTAG* 和 *SHEI* 在 3 个时期间的差异达到极显著水平 ($P<0.001$), *SHDI* 达到显著水平 ($P<0.05$), *AI* 接近显著性阈值 ($P=0.051$)。Kruskal-Wallis 非参数检验对 *CONTAG* 和 *SHEI* 的结果与 ANOVA 一致 ($P<0.001$), 验证了结论的稳健性。其中 *CONTAG* 的显著下降和 *SHEI* 的显著上升主要发生在 2020—2025 年 (事后检验 $P<0.001$), 与该时段退塘还湿工程集中实施、景观加速重组的时间节点吻合。*PD* 和 *IJI* 在 3 个时期间的差异未达显著水平, 可能与窗口尺度效应下局部异质性较高有关。

2.4 景观变化关联因素分析

为初步探索花场湾景观格局演变的潜在关联因素, 本研

究选取气候因素 (年降水量、年均气温、年均相对湿度) 和社会经济因素 (总人口、城镇人口、农村人口、GDP、第三产业增加值) 共 8 个指标, 采用皮尔逊相关系数与单因素线性回归方法, 分析各指标与土地利用类型面积及景观水平指数的变化趋势关联性。受限于样本量, 以下结果仅反映变量间的趋势一致性。

2.4.1 社会经济因素分析

研究发现, 社会经济因素与土地利用类型变化均表现出一定的关联性 (表 3)。其中, GDP 与红树林、耕地面积变化呈正向趋势一致性, 与水体呈负向趋势一致性; 城镇人口与建筑用地表现出较强的正相关趋势, 与林地分布呈负相关趋势; 农村人口与红树林、耕地的相关度均超 0.6, 呈一定

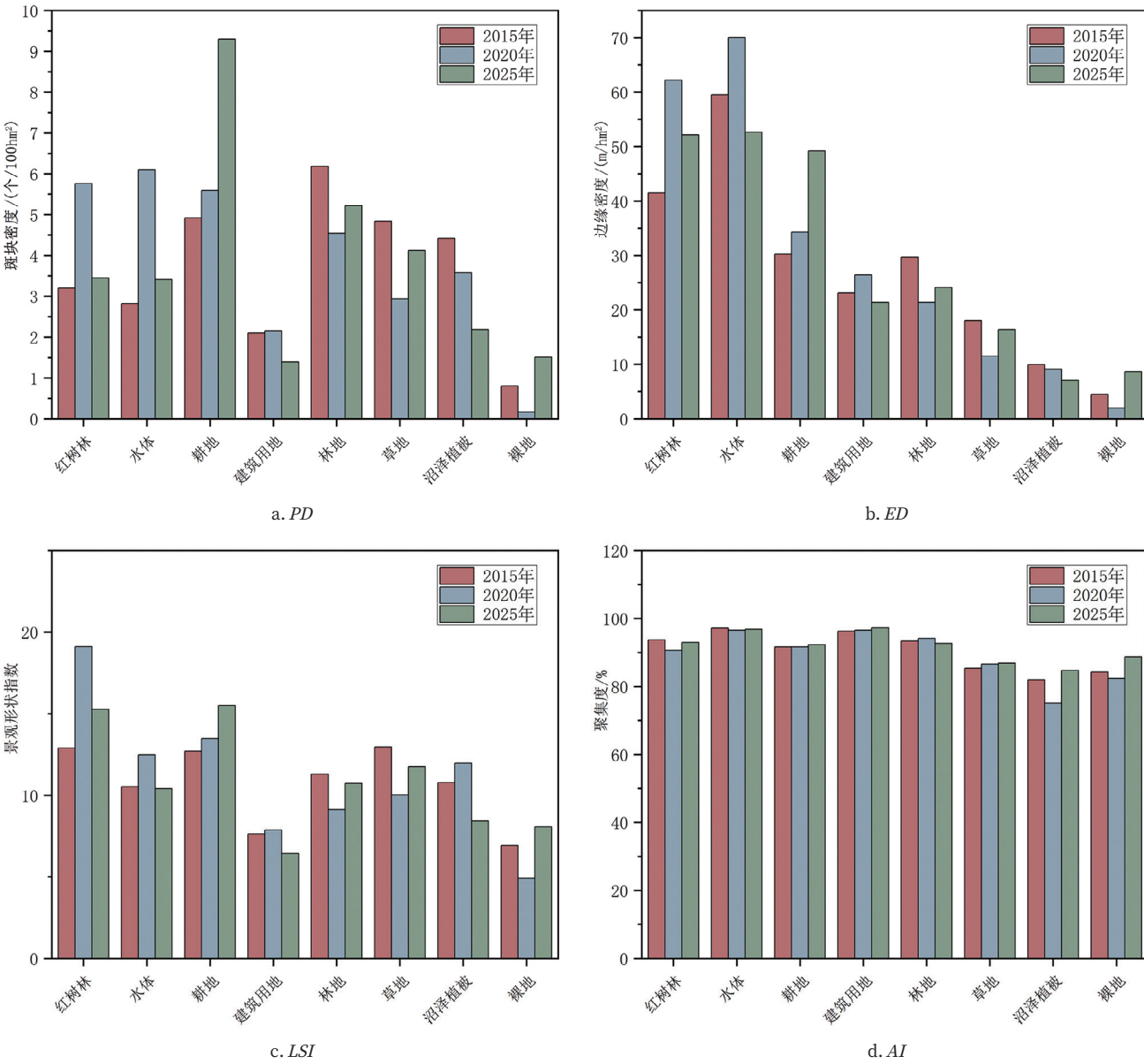


图 5 2015—2025 年研究区斑块类型水平指数变化对比

Fig.5 Comparison of changes in the patch-type-level indices in the study area (2015–2025)

正向关联，而与林地呈负向关联。

总人口与 *CONTAG* 呈正向关联，与 *PD* 指数呈负向关联；农村人口与 *PD* 呈正向关联，与 *CONTAG* 呈负向关联。GDP 和第三产业增加值与 *IJI*、*SHDI* 呈正向关联，相关度均超 0.9。综上，社会经济因素对景观格局的演变表现出较明显的关联性，人口与经济类指标分别与景观的破碎化、多样性及斑块交错分布等指数具有较强的变化趋势一致性。上述关联仅基于 3 个时间节点的趋势观察，不构成因果推断。

2.4.2 气候环境因素分析

研究发现，2015—2025 年研究区的气候环境因素与花场湾的土地利用类型及景观整体格局演变表现出明显的分异性关联（表 3）。

从土地利用类型来看，水热条件对自然植被与人为景观具有不同的影响趋势。年降水量与沼泽植被、草地和林地面积变化表现出较强的正向趋势一致性，而与建筑用地的扩张呈强负向趋势关联。年均气温与林地面积呈现极强的正向关

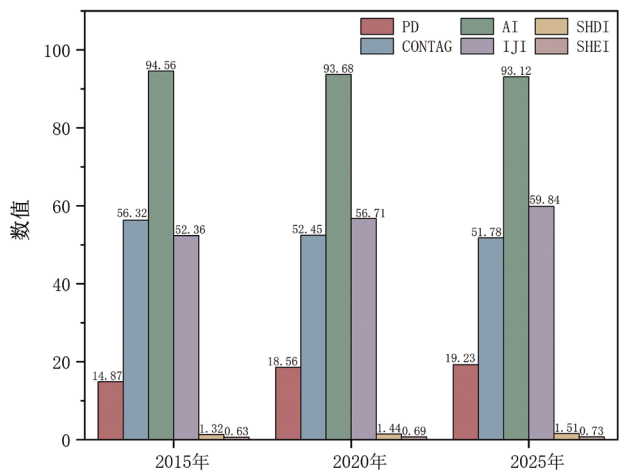


图 6 2015—2025 年景观水平指数变化趋势
Fig.6 Trends in landscape-level index changes (2015—2025)

联，与建筑用地、红树林及耕地则呈负向关联。年均相对湿度与人为景观扩张的演变同向性最强，其与建筑用地呈现极强的正相关趋势，并与红树林和耕地的增加呈一定的正向关联，而与林地、沼泽植被呈较强的负向关联。

从景观格局指数与气候因子的关联来看，降水、气温与湿度对景观指数展现出截然不同的趋势特征。年降水量和年均气温与 *CONTAG* 和 *AI* 均呈正向关联，而与 *PD* 及各类多样性指数（*SHDI*、*SHEI*）呈负向关联。与此相反，年均相对湿度的上升则伴随着 *PD*、*SHDI* 和 *SHEI* 的同步增加，以及 *CONTAG* 和 *AI* 的下降。此外，相对湿度与 *IJI* 亦表现出极强的正向趋势一致性，这反映出在相对湿度偏高的时段，研究区受退塘还湿工程与城镇开发双重叠加影响，景观异质性提升、斑块交错分布程度提高以及整体景观趋于破碎化。

综上所述，气候环境因素的变化与花场湾土地利用类型的演替表现出明显的协同关联，各类气候因子通过水热条件的波动，在宏观上间接调控了湿地景观破碎化加剧与连通性重塑的复合演变过程。受限于时间序列样本规模，上述分析仅用于表征气候因子与景观特征演变趋势的时序一致性，不作绝对因果推断。

2.4.3 景观格局动态变化影响因素

通过单因素回归分析与 R^2 验证（表 4），可以进一步揭示各影响因素对花场湾红树林湿地景观格局变化的影响程度。在社会经济因子中，GDP 与第三产业增加值对红树林、耕地及水体面积的影响最为显著；人口因子对建筑用地的解释力最强，城镇人口回归方程的 R^2 值达到 1.000，表明城镇化人口增长与建筑用地扩张具有较高的趋势一致性。此外，总人口与农村人口对林地面积变化的影响亦较为显著， R^2 值分别为 0.990 和 0.976。在气候因子中，年均气温对林地的 R^2 值达到 1.000，年降水量对沼泽植被的 R^2 值高达 0.998，年均相对湿度对建筑用地和林地的 R^2 值分别为 0.994 和 0.942，说明气候因子对林地、沼泽植被等局部自然景观的演替具有重要的直接驱动作用。综合来看，在退塘还湿背景下，GDP、第三产业增加值及人口等社会经济因素是导致

表 2 景观水平指数移动窗口 ANOVA 及 Kruskal-Wallis 检验结果
Tab.2 Results of moving-window ANOVA and Kruskal-Wallis tests for landscape-level indices

指标	2015 年均值	2020 年均值	2025 年均值	F 值	ANOVA P 值	H 值	K-W P 值	显著性
PD/ (个/100 hm ²)	57.160	55.520	59.930	1.266	0.282	3.576	0.167	ns
CONTAG/%	72.040	72.240	67.310	18.292	<0.001	29.822	<0.001	***
AI/%	93.800	94.150	93.750	2.975	0.051	5.510	0.064	ns
IJI/%	62.110	59.740	58.580	2.279	0.103	2.250	0.325	ns
SHDI	0.804	0.744	0.801	3.114	0.045	5.074	0.079	*
SHEI	0.461	0.467	0.548	20.126	<0.001	33.068	<0.001	***

注：*** $P<0.001$ ，表示差异极显著；* $P<0.05$ ，表示差异显著；ns表示差异不显著。

花场湾整体景观格局剧烈变化的主导力量，气候因子则作为重要的自然本底条件，对整体景观演变起到长期的协同调控作用。

3 讨论

3.1 土地利用变化特征及其生态效应

2015—2025 年花场湾土地利用格局最突出的特征表现为“水退林进、塘转田扩”，这一变化趋势与近年来华南沿海红树林湿地的总体演变格局基本一致，廉州湾、钦州湾等北部湾区域的研究均表明，在退塘还湿政策推动下，养殖塘向红树林和滩涂的转化已成为沿海湿地景观变化的共性特征^[19~20]。花场湾红树林面积净增 46.96 hm²，增速呈前缓后快特征，2020—2025 年增速约为前 5 年的 4 倍，说明修复工程从启动到显效存在约 5 年时滞，这与人工种植幼苗需经历定植适应、冠层郁闭等生长阶段的生态规律相吻合。

从斑块动态来看，红树林 PD 与 ED 在 2020 年达到峰值后回落，说明修复初期分散种植形成的离散斑块在后期逐步与原有群落融合，空间连通性得到改善。这一“先碎后合”的演变轨迹与珠江口、漳江口等地人工修复红树林的融合规律基本一致^[21~22]，但花场湾融合进程相对缓慢，这与该区域台风扰动频繁、退塘斑块空间较为分散密切相关。上述规律为修复工程的空间布局提供了参考：应优先在现有斑块邻近区域开展种植，可有效缩短斑块融合周期、提升修复效率。

水体面积的持续缩减同样需要重视。转移矩阵显示，2020—2025 年共有 98.14 hm² 水体转化为耕地、31.88 hm² 水体转化为裸地，表明农业开垦与硬质化占用是水体减少的主要影响路径。野外调查也记录到花场湾内部分潮沟存在人为封堵现象，潮汐水道的过度填塞会削弱湿地水文连通性，进而影响潮间带沉积物输运与底栖生物栖息环境^[23]。更深层的生态代价在于，潮沟退化将限制红树胚轴的潮汐扩散与林下盐度的周期性调节，

削弱新生斑块的自我更新能力，这与本研究红树林扩展仍以人工种植为主、自然补给贡献有限的观测现象相互印证。在推进“退塘还湿”的同时，应遵循“退塘不堵水”的原则，保留必要的潮沟网络。

3.2 景观破碎化演变趋势

景观水平指数的变化揭示了研究区景观破碎化加剧与多样性提升并行的结构转型趋势。SHDI 与 SHEI 的持续上升反映了退塘还湿工程打破了原有以水体和养殖塘为主的单一景观

表 3 影响因素与土地利用类型及景观水平指数的相关性分析

Tab.3 Correlation analysis among influencing factors, land use types and landscape-level indices

变量		气候因素		社会经济因素					
		年降水量	年均气温	年均相对湿度	总人口	城镇人口	农村人口	GDP	第三产业增加值
土地利用类型	水体	0.168	0.742	-0.548	0.663	-0.473	-0.619	-0.980	-0.969
	红树林	-0.286	-0.817	0.644	-0.749	0.576	0.709	0.997	0.992
	耕地	-0.269	-0.807	0.631	-0.737	0.562	0.697	0.995	0.989
	建筑用地	-0.946	-0.944	0.997	-0.975	1.000	0.986	0.643	0.682
	林地	0.793	1.000	-0.970	0.995	-0.946	-0.988	-0.853	-0.879
	草地	0.811	0.275	-0.510	0.379	-0.582	-0.432	0.255	0.204
	裸地	0.164	-0.480	0.243	-0.381	0.158	0.328	0.861	0.834
	沼泽植被	0.999	0.756	-0.897	0.824	-0.932	-0.855	-0.316	-0.365
景观水平指数	PD	-0.844	-0.995	0.988	-1.000	0.971	0.998	0.804	0.834
	CONTAG	0.847	0.994	-0.989	1.000	-0.972	-0.998	-0.801	-0.831
	AI	0.682	0.988	-0.917	0.965	-0.880	-0.949	-0.927	-0.946
	IJI	-0.657	-0.983	0.904	-0.956	0.863	0.938	0.94	0.956
	SHDI	-0.699	-0.992	0.926	-0.971	0.890	0.956	0.919	0.938
	SHEI	-0.673	-0.986	0.912	-0.962	0.874	0.945	0.932	0.950

注：受样本量限制（n=3），皮尔逊相关系数仅用于反映变量间的趋势方向，不具备统计显著性检验意义，不作显著性标注。

表 4 土地利用类型与影响因素的单因素回归 R²

Tab.4 Summary of R² values from single-factor regression of land use types and driving factors

土地利用类型	社会经济因子					气候因子		
	总人口	城镇人口	农村人口	GDP	第三产业增加值	年降水量	年均气温	年均相对湿度
水体	0.44	-	-	0.961	0.939	-	0.550	-
红树林	0.56	-	0.503	0.994	0.983	-	0.667	0.415
耕地	0.543	-	0.486	0.991	0.979	-	0.651	-
建筑用地	0.950	1.000	0.972	0.414	0.465	0.894	0.892	0.994
林地	0.990	0.895	0.976	0.728	0.773	0.629	1.000	0.942
沼泽植被	0.679	0.869	0.731	-	-	0.998	0.572	0.805

注：-表示R²<0.4，该因子对该土地利用类型的解释力不足；R²=1.000为数据点不足引起的过拟合现象，不代表真实拟合优度，仅供趋势参考。

基质,使景观组成趋于多元化;CON-TAG的同步下降提示这种多元化并非源于各类型的均衡扩展,而是随着优势景观连片度的削弱,景观整体的异质性与破碎化同步增加。这一分布特征,本质上对应城镇化扩张、农业开垦与生态修复3种影响因素在空间上相互叠加、相互制约的复合作用过程。

在斑块类型水平上,红树林的ED与LSI呈现出先升后降的动态,同时与周边人为景观的接触面发生较显著重构。修复期内红树林斑块向潮滩水体及沼泽植被边缘扩展,形成自然镶嵌格局,有益邻接界面占比加大,这是修复成效的空间体现;转移矩阵与斑块形态变化共同表明红树林与耕地、建筑用地等人为景观的邻接界面持续扩大,有害邻接占比加大,林缘干扰风险系统性上升。结合花场湾地理条件,该风险主要通过以下3类机制叠加作用:1)入侵物种定植风险。花场湾属半封闭式内湾,具备将入侵植物繁殖体经潮汐输运带入湾内的水动力条件,2020—2025年水体转化后,林前留存的大面积光滩过渡带为入侵植物提供了优先定植生境,一旦定植将封堵潮沟并威胁蜡虫果、海榄雌等低位先锋种的更新^[24]。2)农业面源污染累积风险。花场湾由大丰、福山、桥头、老城四镇围合,属半封闭湾体,水体交换能力有限。2020—2025年共有98.14 hm²水体及46.66 hm²林地转化为耕地,耕地PD升至9.30个/100 hm²,反映出花场湾周边以分散型小规模农业斑块为主的经营格局^[25]。农业径流中氮磷等营养盐在半封闭湾体内难以快速稀释,存在局部富营养化风险,将干扰秋茄树 *Kandelia obovata*、榄李等建群种幼苗根系的氧化还原过程,林缘界面的持续扩大意味着更多物种将长期暴露于污染梯度之中。3)养殖尾水与建设用地机械干扰。2015—2020年105.19 hm²红树林退化为水体,其中局部复垦养殖排放的高浓度有机废水水会增强林缘沉积物还原性,影响红树林根系气体交换;同期建筑用地增加,施工扬尘与夜间灯光对林缘鸟类栖息

及幼苗光合作用造成持续干扰。上述3类风险机制均基于景观格局演变推断,农业面源污染风险分析亦缺乏水体氮磷浓度实测及湾体水交换周期的量化数据支撑,养殖尾水干扰距离与沉积物氧化还原电位亦未实测,后续研究应通过针对性野外监测加以验证。基于推断,建议在红树林与人为景观之间规划生态缓冲带,种植半红树植物或乡土灌木作为过渡植被,以缓解边缘干扰^[26]。

3.3 影响机制解析

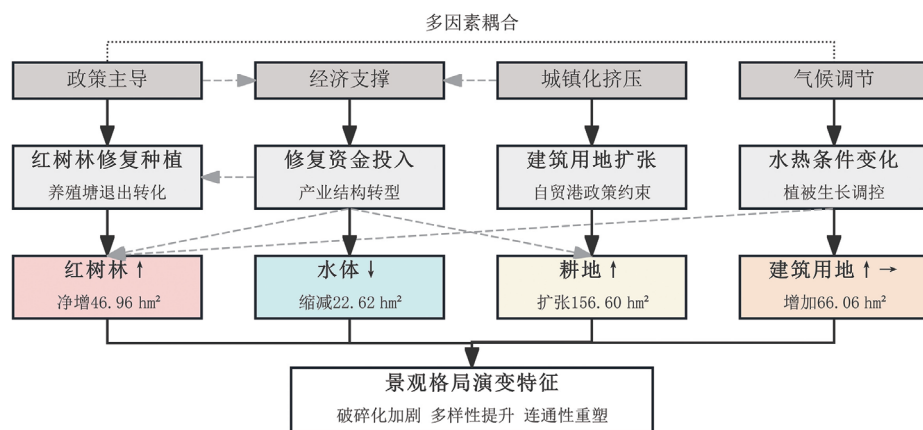
花场湾景观格局演变是自然因素与人为因素协同驱动的结果,呈现政策主导、经济支撑、城镇化挤压、气候调节的多因素耦合特征(图7)。

在政策与经济层面,退塘还湿生态修复政策是红树林面积增长的最直接因素。在2015、2020和2025年3个时间点,GDP的增长与红树林面积的增加在时间上大致同步,这是因为经济增长通过扩大地方财政收入、增强中央专项转移支付配套能力间接影响了修复投入。例如海南省依据《国土空间生态修复资金管理办法》(琼财资环规〔2022〕23号)建立了省级修复专项资金制度,仅2019—2020年中央向海南下达海洋生态修复转移支付资金约5.57亿元,为退塘还湿工程

提供了稳定的资金来源^[27]。与此同时,区域经济结构从水产养殖向旅游服务业的转型减轻了养殖业对湿地的开发压力^[28]。

在城镇化层面,城镇人口增长与建筑用地扩张高度关联。2015—2020年建筑用地面积快速增加73.57 hm²,与同期澄迈县老城经济开发区建设密切相关;2020年以后建筑用地面积趋于稳定,与《海南自由贸易港建设总体方案》及《中华人民共和国海南自由贸易港法》相继确立生态保护红线硬约束和建设用地总规模管控密切相关^[29~30];《海南自由贸易港国土空间规划条例》^[31]进一步将上述指标纳入地方政府年度考核,从制度层面将城镇化扩张空间限定于城镇开发边界之内,形成审批政策对城镇扩张的刚性制约。

在气候层面,花场湾地处热带季风气候区,气候因子对景观格局的影响具有双向调节特征。回归分析显示,年降水量对沼泽植被的 R^2 高达0.998,而与红树林面积呈弱负相关,表明降水对不同植被类型具有差异化调节效应:充沛降水有利于沼泽植被斑块扩展,而红树林面积变化与降水量关联较弱,其年际负相关可能与台风带来强降雨的同期破坏效应有关。年均气



注: ↑代表前期扩张增加, →代表后期趋于稳定。

图7 花场湾红树林湿地景观格局演变关联因素框架

Fig.7 Framework of associated factors related to landscape pattern evolution in the Huachang Bay mangrove wetland

温对林地的 R^2 较高,说明气温偏高年份可能因蒸散发加剧,削弱陆生林地的水分供应。研究区位于西北太平洋台风高发区,台风事件是红树林景观演变的关键瞬时扰动源,2015—2020 年研究区 105.19 hm^2 的红树林逆向退化便与多次强台风正面过境密切相关。这种年际尺度的瞬时冲击与经济、政策驱动的长期恢复过程相互叠加,共同构成了花场湾景观演变的复合时间尺度特征。

综合而言,上述 4 类影响因子并非独立作用,而是在时空尺度上形成动态耦合。政策通过划定生态保护红线与引导修复资金流向,界定了景观演变的空间边界与方向;经济发展通过由财政渠道为政策实施提供支撑,又通过产业结构由水产养殖向旅游服务业的转型,减轻了养殖业对湿地的直接开发压力;城镇化在审批制度约束下由空间扩张型转为总量管控型,使建筑用地扩张呈现前快后稳的阶段性特征;气候因子则叠加于上述人为过程之上,以台风、降水波动等形式形成年际尺度的瞬时扰动。四者协同作用,最终塑造了花场湾景观前期破碎重组、后期融合恢复的演变轨迹。

3.4 管理建议

基于上述分析,提出以下建议:1) 采取近林优先、集中连片的修复策略,以海榄雌、蜡烛果等耐盐先锋种作为基础,逐步引入秋茄树、榄李等建群种。2) 依据《海岸带生态减灾修复技术导则 第 2 部分:红树林》(T/CAOE 21.2—2020)中关于红树林外缘缓冲带的有关规定,在红树林与耕地、建筑用地之间规划宽度不低于 50 m 的林缘生态缓冲带,种植半红树植物或乡土灌木作为过渡植被。3) 遵循“退塘不堵水、还湿先通道”原则,保留不低于退塘面积 15% 的潮沟网络^[32]。4) 以 LPI 所示连片主体林斑为核心保护区、以 IJI 演变揭示的林缘高干扰界面为缓冲区、以水体转化的耕地、裸地集中区为合理利用区,构建 3 级差异化空间管控格局。5) 依托 Sentinel-2 卫星短重访周期,建立年度景观格局监测数据库,结合无人机和地面样方调查,实现长时序动态追踪。

4 结论

本研究基于多期 Sentinel-2 遥感影像,从斑块类型与景观 2 个尺度,系统剖析了花场湾红树林湿地近 10 年的景观演变特征与影响机制。研究区景观整体呈现由水域向陆地、由养殖塘向林田并进的结构性转型,红树林面积增速前缓后快,生态修复成效与外围开发压力长期并存,共同塑造了修复与开发交织的景观基底。斑块类型尺度上,红树林经历了从分散向集中连片的空间整合过程,连通性明显提升;但林缘形态趋于复杂、有害邻接界面持续扩大,修复区呈现内部整合与边缘暴露的双向演化特征,耕地则成为破碎化最突出的景观类型。景观尺度上, $CONTAG$ 显著下降、多样性指数显著提升,景观异质性增强与连通性数值波动并行,反映了人为扰动与生态修复共同驱动下的复合演变模式。景观格局演变是政策、经济、城镇化和气候多重影响因素耦合作用的综合结果,各影响因素在时序与空间上相互嵌套,构成自

然与人文要素交织的多尺度协同变化格局。为此,建议统筹推进集中连片修复、林缘生态缓冲带构建与潮沟水文网络恢复,推动红树林湿地管理向综合稳定转型。

研究对兼具退塘还湿政策干预与多重人为干扰的花场湾河口型红树林湿地开展近 10 年长时序景观格局定量分析,识别并揭示了修复区内部整合与边缘暴露双向演化的特征性生态格局,从政策、经济、城镇化和气候多维视角构建了协同影响机制框架,为华南沿海同类湿地的景观规划提供了可借鉴的分析范式。

但研究仍存在以下局限:1) 仅基于 3 个时间节点进行分析,难以捕捉年际尺度的动态波动;2) 最大似然分类法在红树林与林地、沼泽植被与水体等光谱混淆区域的精度有限,经本研究抽样验证的总体分类精度约 85%,对边缘密度、散布与并列指数等绝对数值存在一定影响;3) 影响因素分析受数据点限制,相关系数仅反映趋势方向,不具备统计显著性,不构成因果推断。

未来研究可增加时间节点以捕捉年际动态,引入随机森林或深度学习方法提升分类精度,借助地理探测器(Geodetector)开展定量归因分析,并纳入地形、潮汐水动力等自然因子,构建更为系统精细的影响机制研究框架,为红树林湿地的长期监测与适应性管理提供更坚实的科学依据。

注:图 1 底图的审图号为 GS (2024) 0650 号,其余均由作者自绘。

参考文献:

- [1] 潘德炉,张偲,秦大河,等.我国海岸带蓝碳生态系统结构现状与保护优化策略研究[J].中国工程科学,2024,26(6):233-245.
- [2] 林正静,胡晓珍.以红树林培育牵引蓝碳经济发展的驱动机制及优化路径研究——基于广东的案例研究[J].新经济,2025(3):5-17.
- [3] 自然资源部,国家林业和草原局.自然资源部 国家林业和草原局关于印发《红树林保护修复专项行动计划(2020-2025 年)》的通知[EB/OL].(2020-08-14)[2026-03-08].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/29/content_5538354.htm.
- [4] 王豪,杨小波,吕晓波,等.海南岛东北和西北部自然红树林群落特征比较[J].海南大学学报(自然科学版),2024,42(2):146-154.
- [5] 黄波.海岸带生态修复策略研究——以泉州市蓝色海湾综合整治行动项目为例[J].城市建筑空间,2025,32(10):57-61.
- [6] 方堃苏,张伟锋,王旭阳,等.滨海湿地生态修复治理及红树林种植——以福建东山湾八尺门海域为例[J].林业科技通讯,2025(12):68-72.
- [7] 李少坤,王少军,张志,等.三维生态足迹视角下江西省自然资本可持续利用演化及其驱动因素[J].中国农业资源与区划,2022,43(1):110-123.
- [8] 郭建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级(2版)[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [9] 郑法,黄福林,陈泽恒,等.基于 LUCC 和景观格局变化的广西山口红树林湿地动态研究[J].热带海洋学报,2024,43(4):165-173.
- [10] 林伟,李诗华,韦旭,等.基于景观格局的洛阳江河口人工红树林湿地生态风险评价[J].水生态学杂志,2025,46(5):50-62.

- [11] 李丹丹, 毕攀, 张媛静, 等. 基于 GIS 空间分析方法的九龙江河口土地利用研究 [J]. 福建师范大学学报 (自然科学版), 2026, 42 (1): 100-108, 137.
- [12] 曹虹, 刘世好, 刘斯垚. 海南花场湾红树林生态修复路径与技术要点 [J]. 福建林业科技, 2021, 48 (4): 107-111.
- [13] 林于蓝, 陈钰, 尹晓雷, 等. 围垦养殖与退塘还湿对闽江河口湿地土壤铁碳结合特征的影响 [J]. 环境科学学报, 2022, 42 (7): 466-477.
- [14] 王媛, 杜彦君, 钟云芳, 等. 半自然退塘还林模式下红树林生态环境特征及其物种多样性动态变化分析 [J]. 广东园林, 2024, 46 (3): 120-125.
- [15] 海南省人民政府办公厅. 海南省人民政府办公厅关于印发海南省 2018-2019 年度退塘还林 (湿) 工作实施方案的通知 [EB/OL]. (2018-02-22) [2026-04-08]. <https://www.hainan.gov.cn/hainan/ztwkgggw/201802/3765f75a275545c284fc99bb4f04b614.shtml>.
- [16] 孙静馨, 宋希强, 申益春, 等. 昌江海尾湿地景观格局动态变化及其影响因子 [J]. 广东园林, 2024, 46 (6): 96-103.
- [17] 陈森强. 基于时序视角与多源遥感数据融合的城市湿地景观格局分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2025, 48 (8): 145-148.
- [18] 吕诗昆, 陈惠玲, 裴雪辰, 等. 超强台风“摩羯”灾后红树林恢复能力研究——以海南清澜红树林省级自然保护区为例 [J]. 热带林业, 2025, 53 (4): 104-108.
- [19] 廖雨霞, 潘良浩, 阎冰, 等. 广西廉州湾红树林群落分布特征及物种多样性分析 [J]. 广西科学院学报, 2020, 36 (4): 361-370.
- [20] 李阳, 王洪达, 李冰心, 等. 中国东南沿海红树林湿地的生态评估与智慧监测体系 [J]. 海南热带海洋学院学报, 2023, 30 (2): 32-40.
- [21] 史可, 李夏, 张成, 等. 淇澳岛红树林分布格局变化及对地上碳储量和碳排放量的影响 (2003—2023 年) [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2025, 61 (6): 913-923.
- [22] 柯舒婷, 李广春, 郑澜, 等. 基于 GEE 的漳州市红树林长时序变化遥感监测分析 [J]. 湿地科学与管理, 2025, 21 (1): 32-38.
- [23] 邢庆会, 程浩, 李凡, 等. 围塘养殖与“退塘还湿”对滨海蓝色碳汇的影响 [J]. 海洋环境科学, 2023, 42 (3): 432-439.
- [24] 陈静云, 黄昊, 张宜辉. 中国红树林区互花米草入侵生态效应及防治策略 [J]. 广西科学院学报, 2024, 40 (3): 207-213, 222.
- [25] 张洪珊, 李书, 王彦丹, 等. 人类活动加剧三峡库区湿地景观破碎化 [J]. 水土保持学报, 2025, 39 (6): 139-151.
- [26] 陈新平, 王斌, 尹子祺, 等. 红树林防灾减灾功能研究进展及保护修复建议 [J]. 海洋通报, 2023, 42 (4): 469-480.
- [27] 海南省财政厅, 海南省自然资源和规划厅. 海南省国土空间生态修复资金管理办法 [EB/OL]. (2022-11-21) [2026-04-08]. <https://mof.hainan.gov.cn/sczt/xzgfxwj/202211/a52a6392b27a466baa959f12d02badec.shtml>.
- [28] FABINYI M, BELTON B, DRESSLER W H, et al. Coastal transitions: Small-scale fisheries, livelihoods, and maritime zone developments in Southeast Asia[J]. Journal of Rural Studies, 2022, 91: 184-194.
- [29] 中共中央 国务院. 海南自由贸易港建设总体方案 [EB/OL]. (2020-06-01) [2026-04-09]. https://www.gov.cn/zhengce/2020-06/01/content_5516608.htm.
- [30] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国海南自由贸易港法 [EB/OL]. (2021-06-11) [2026-04-09]. <https://www.hainan.gov.cn/hainan/c100507/202106/15ed6f5709354ea4beef517799fa6255.shtml?ddtab=true>.
- [31] 海南省人民代表大会常务委员会. 海南自由贸易港国土空间规划条例 [EB/OL]. (2024-12-10) [2026-04-08]. <https://www.hainan.gov.cn/hainan/dfxfg/202412/53a661b4e300425b96118cc35e7b7c7f.shtml>.
- [32] 王文卿, 张林, 张雅棉, 等. 红树林退塘还林研究进展 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2021, 60 (2): 348-354.

作者简介:

韦晓春 / 2001 年生 / 女 / 广西南宁人 / 海南大学热带农林学院 (海口 570228) / 在读硕士研究生 / 专业方向为热带园林生态与景观规划

卡西夫·阿里·索朗基 / 1992 年生 / 男 / 巴基斯坦人 / 博士 / 海南大学热带农林学院 (海口 570228) / 博士后 / 研究方向为红树林耐盐机制、红树林生理生态

宋希强 / 1972 年生 / 男 / 江西峡江人 / 博士 / 海南大学热带农林学院 (海口 570228) / 教授 / 研究方向为植物资源与利用、保护生态学

杨泽秀 (* 通信作者) / 1970 年生 / 男 / 海南东方人 / 本科 / 海南省珠峰林业生态研究所 (海口 570100) / 高级项目经理师、林业助理工程师 / 专业方向为林业 / E-mail: yzx.david@163.com