

海口湿地生态系统服务价值时空演变及其对景观格局变化的响应

陈圣天,付 晖*,付 广,陈 杰

(海南大学 林学院,海南 海口 570228)

摘 要:根据 2010、2015 年和 2020 年遥感影像获取海口市湿地数据,运用景观格局指数、当量因子法、相关性分析方法,分析海口市湿地景观格局和生态系统服务价值(ESV)演变规律,探究两者之间的响应关系,为海口湿地保护和修复工作提供参考。结果表明,1)10 a 间,以人工湿地为主的海口湿地面积逐年减少,总面积损失量高达 21.01 km²,自然湿地面积稍有增长,增长量为 4.57 km²;整体景观趋于破碎化与非均质分布,多样性减弱。2)湿地 ESV 呈下降趋势,损失率为 4.43%;西部地区湿地 ESV 衰退,重心向东南方偏移;河流、坑塘及养殖湿地在水文调节生态服务方面成效显著。3)整体而言,海口湿地 ESV 与景观形状、香农多样性呈显著正相关,与蔓延度指数为负相关;平均斑块面积、聚合度指数与人工湿地 ESV 呈正相关;增加边缘密度有助提高坑塘及养殖湿地 ESV($r=0.997, P<0.05$)。研究认为应根据湿地类型及其分布情况,因地制宜优化海口湿地景观格局,促进生态系统服务增值。

关键词:湿地;生态系统服务;景观格局;海口市

中图分类号:S731.2

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)06-0236-07

Spatial and Temporal Evolution of Wetland Ecosystem Service Value and Its Response to Landscape Pattern Changes in Haikou

CHEN Sheng-tian, FU Hui*, FU Guang, CHEN Jie

(Forestry College, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China)

Abstract: Based on the wetland data extracted from the remote sensing images of Haikou in 2010, 2015 and 2020, the landscape pattern index, equivalent factor method and correlation analysis methods were used to analyze the evolution characteristics of Haikou wetland landscape pattern and wetland ecosystem service value (ESV,) and explore the response relationship between the two, so as to provide reference for the protection and restoration of wetland in Haikou. The results showed that 1) the area of wetland in Haikou decreased year by year, the total area loss was up to 21.01 km². The natural wetland area increased slightly, with an increase of 4.57 km². The overall landscape tended to be fragmented and inhomogeneous, with diminished diversity. 2) The overall wetland ESV in Haikou decreased continuously, with a loss rate of 4.43%. The wetland ESV in the western region decreased, shifting the centrality to the southeast. Rivers, ponds, and cultivated wetland functioned effectively in hydrological management of ecological services. 3) Overall, landscape shape and Shannon diversity were significantly and positively correlated to wetland ESV in Haikou, however the Spreading index was negatively correlated. The average patch area and aggregation index were positively correlated to constructed wetland ESV; increasing edge density was beneficial to enhancing ESV of pot pond and breeding wetland ($r=0.997, P<0.05$). In order to promote the increase of

收稿日期:2022-10-11 修回日期:2023-01-30

基金项目:海南省自然科学基金(421MS015, 421QN200);海南省哲学社会科学规划课题(HNSK(ZC)21-126)。

第一作者:陈圣天。研究方向:景观生态规划。E-mail:omoyatt@163.com

* 通信作者:付 晖,博士,副教授。研究方向:景观生态规划。E-mail:iflying@126.com

wetland ESV, the landscape pattern should be optimized according to the type and distribution of wetland in Haikou.

Key words: wetland; ecosystem service; landscape pattern; Haikou City

生态系统服务是生态系统为维持地球生命系统所提供创造的一切物质原料与环境条件,生态系统服务价值(ecosystem services value, ESV)是判定生态系统安全、实现可持续发展的核心指标^[1]。1997年, Costanza 等^[2]首次提出生态系统服务经济价值参数评价模型,国内学者谢高地等^[3]在 Costanza 模型的基础上,建立了中国不同陆地生态系统服务价值评估体系,得到广泛运用^[4]。近年来,生态系统服务价值评估模型趋于多元化,不少学者致力于探究生态系统服务价值时空分布特征^[5-6]及驱动机制^[7-8];或与生态风险^[9]、生态系统健康^[10-11]等评估方法相结合,研究划分区域生态风险级别。尺度上,省市、城市群等大尺度的 ESV 研究较为常见^[12-13],较少考虑单一生态系统服务价值。

湿地生态系统是介于陆地与水生生态系统之间,在蓄洪防旱、维护区域生态安全等方面发挥重要生态价值与功能的独特生态系统^[14],定量评估湿地 ESV,对湿地环境资源可持续发展具有重要意义。景观格局能够定量描述景观空间结构特质,其演变对物质能量流动、生物多样性等方面都将造成影响,ESV 亦随之变化^[15]。故此,为探究景观格局与 ESV 之间的关系,有学者通过空间回归模型^[7]、地理加权回归模型^[16]等空间方法以及冗余分析^[17]、回归分析^[18]等数理方法论证了 ESV 与景观格局演变紧密相关。本研究基于 3 期海口湿地数据,以谢高地等^[3]提出的 ESV 评估体系为基础,探究 2010—2020 年海口湿地景观格局与生态系统服务价值时空演变规律,运用 Pearson 相关性分析定量揭示二者关联度,为优化海口湿地景观格局,促进湿地 ESV 有效增长提供借鉴与指导。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

海口市(19°31′32″—20°5′28″N, 110°7′59″—110°42′16″E)地处海南岛北部,东邻文昌市,西接澄迈县,南毗定安县,北濒琼州海峡(图 1)。全市地势平缓,市域制高点为石山镇马鞍岭,地貌以滨海平原为主,西侧羊山地区为火山熔岩地貌。属热带海洋性季风气候,全年雨量充沛,年均降水量为 1 696.6 mm,年均气温 24.4℃。截至 2020 年,海口市常住人口为 287.34 万人,全市地区生产总值 1 791.58 亿元,产业结构比为 4.5 : 15.0 : 80.5^[19]。

1.2 数据来源及预处理

本研究选用中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)2010、2015 年和 2020 年 30 m 空间分辨率的全国土地利用类型遥感监测空间分布数据,结合湿地分类标准(GB/T 24708—2009)及海口自然环境,将海口湿地划分为水田、湖泊、河流、水库、坑塘及养殖、红树林以及潮下水生层 7 大类。DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m。其他基础数据来自于海南省、海口市统计年鉴及全国农产品成本收益资料汇编。

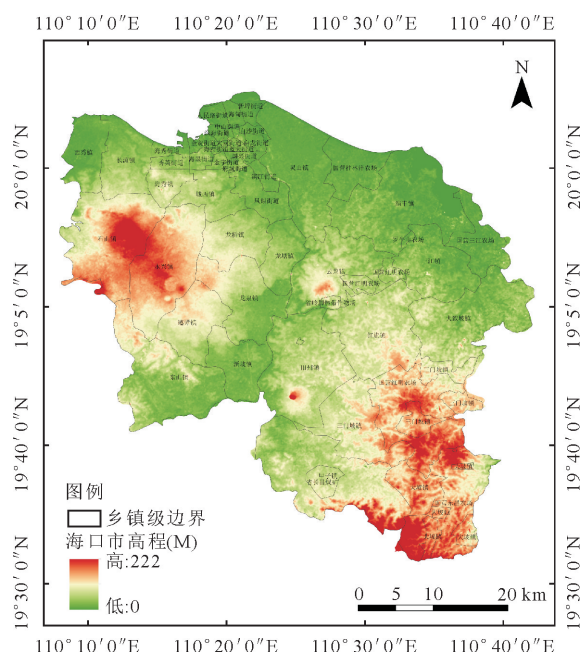


图 1 研究区位置与范围

Fig. 1 Location and scope of the study area

2 研究方法

2.1 景观格局指数

景观格局指数通过定量分析景观组成结构、空间分布情况,探究海口湿地景观特征^[20-21]。本研究从类型和景观水平分别选取 4 个特征指数,运用 Fragstats4.2 计算。类型水平选取斑块密度(PD)、边缘密度(ED)、平均斑块面积(AREA_MN)、聚合度指数(AI);景观水平为景观形状指数(LSI)、蔓延度指数(CONTAG)、连通性指数(CONNECT)、香农多样性指数(SHDI)。

2.2 湿地生态系统服务价值估算

参考谢高地等^[22]制定改进后的中国陆地生态系统单位面积服务价值当量表,视农田当量价值为1,以海口农田生态系统单位经济价值为区域单位当量服务价值的7倍来修订海口湿地生态系统价值当量。据统计分析得知,海口市粮食作物主要为早籼稻与晚籼稻,两者的播种面积与总产量占比超80%,运用式(1)计算10 a间海口市农田自然粮食产量的平均经济价值1 512.16元/hm²。水田湿地参照水田生态系统当量因子,湖泊、河流、水库、坑塘及养殖、潮下水生层参照水域生态系统,红树林参照湿地生态系统,得到湿地单位面积生态系统服务价值,根据式(2)综合计算海口湿地生态系统服务价值(表2)^[23-24]。

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (1)$$

式中: E_a 为单位生态系统服务的经济价值(元/hm²·a); i 为粮食作物种类; m_i 为第 i 种粮食作物在研究区内的平均价格(元/kg); p_i 为第 i 中粮食作物单位面积产量(kg/hm); q_i 为第 i 种粮食作物的种植面积(hm²); M 为粮食作物的总种植面积(hm²)。

$$E_{sv} = \sum A_j \times V_{Cj} \quad (2)$$

式中: E_{sv} 为生态系统服务价值; A_j 为第 j 类湿地类型面积; V_{Cj} 为第 j 类湿地生态系统服务价值系数。

2.3 相关性分析

相关性分析通过定量指标描述不同变量以评估各指标的相关程度及方向。本研究以湿地类型水平景观格局指数及不同类型湿地ESV为数据源,运用SPSS25.0进行Pearson相关性检验^[25-26]。宏观上采用偏相关分析,以湿地景观水平指数及4类生态系统服务价值量为数据源,探究二者的响应机制^[24],并利用origin2021软件进行可视化处理。Pearson相关系数表达式如下

$$r_{xy} = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{[n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2] [n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2]}} \quad (3)$$

式中: r_{xy} 为Pearson相关系数; n 为样本量; X_i 、 Y_i 分别为变量观测值。

3 结果与分析

3.1 湿地景观格局变化特征

3.1.1 湿地景观结构变化 海口市湿地总量约430 km²,以水田湿地为主,占比超60%,其次为坑塘及养殖湿地占比约10%。10 a间海口湿地面积整体呈下降趋势,其中坑塘及养殖湿地降幅明显,具体表现为新海港养殖湿地及周边零星坑塘湿地的消失;水田向其他景观共转化25.15 km²,主要发生在主城区西南侧城乡交界地带,如灵山镇建设用地增长导致水田湿地锐减;河流湿地动态度持续正向发展;潮下水生层与红树林湿地因其相互转化关系,面积此消彼长。

3.1.2 湿地景观格局指数变化 类型尺度上,湿地斑块密度与边缘密度总体偏低,平均斑块面积逐年下降,表明海口湿地整体呈破碎化发展。河流湿地呈带状分布,聚集度与连通性良好,平均斑块面积最大。红树林湿地的保护力度不断加强,景观趋于集中连片分布,平均斑块面积与聚集度较高,景观异质性较小。潮下水生层由其海域特性,分布较集中,景观聚集度最高。坑塘及养殖湿地平均斑块面积较小且逐年降低,景观破碎化发展。

景观尺度上,海口湿地总体趋于非均质分布。湿地景观形状指数变化幅度较小,10 a间先减小后增大,斑块形状复杂变化;蔓延度指数逐年增长,表明湿地景观延展程度增强;连通性指数与香农多样性持续减小,表明湿地间连通性减弱,湿地多样性降低,空间分布趋于分散(图2)。

表1 海口湿地景观面积占比及动态度

Table 1 Percentage of wetland landscape area and dynamics in Haikou

景观类型	2010年面积/ km ²	2010年面积 占比(%)	2015年面积/ km ²	2015年面积 占比(%)	2020年面积/ km ²	2020年面积 占比(%)	2010—2015年 动态度(%)	2015—2020年 动态度(%)
水田	287.33	63.08	279.43	63.25	272.90	62.81	-0.55	-0.47
湖泊	0.97	0.21	0.97	0.22	0.98	0.23	-0.04	0.26
河流	38.49	8.45	38.59	8.73	41.19	9.48	0.05	1.35
水库	31.38	6.89	32.16	7.28	29.22	6.72	0.50	-1.83
坑塘及养殖	46.86	10.29	40.71	9.21	37.87	8.72	-2.62	-1.39
红树林	15.55	3.41	13.56	3.07	16.80	3.87	-2.56	4.78
潮下水生层	34.92	7.67	36.38	8.23	35.54	8.18	0.84	-0.46
总计	455.51	100.00	441.80	100.00	434.50	100.00	-0.60	-0.33

3.2 生态系统服务价值时空变化分析

3.2.1 ESV时序变化分析 由表2可知,10 a间

海口湿地ESV呈逐年下降趋势,价值总量由31.84亿持续降至30.43亿,损失率为4.43%。其中,水

文调节 ESV 最高,占比约为 80%,最高为 25.31 亿元,从价值方面定量论证了湿地生态系统在水环境调节供给平衡方面发挥巨大作用。其次为净化环境 ESV;生物多样性 ESV 先降低后增长;原料生产及维持养分循环 ESV 最低,需着重加强生态系统供给和支持服务功能。受面积变化影响,2010—2015 年海口湿地 ESV 变化幅度较后 5 a 更剧烈;因 2015—2020 年红树林湿地面积增幅明显,湿地生态系统原料生产、土壤保持、生物多样性及美学景观服务价值由负转正。

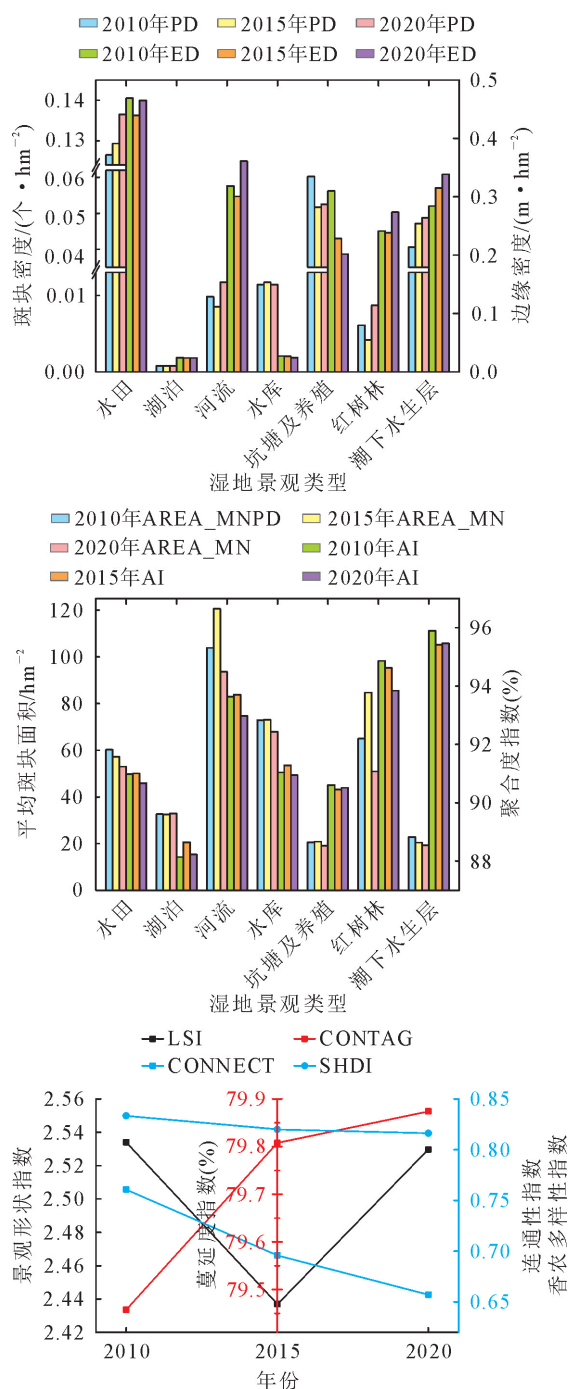


图2 2010、2015、2020年海口市湿地景观格局指数变化

Fig. 2 Changes of wetland landscape pattern index in Haikou City in 2010, 2015 and 2020

从湿地类型上看,河流、水库、坑塘与养殖、潮下水生层等以水系为主的湿地供给与调节服务当量因子较高,且面积占总量的 1/3,此类湿地 ESV 贡献度位居前列。因面积锐减造成坑塘及养殖湿地 ESV 逐年减少;河流湿地 ESV 稳步增长;水库及潮下水生层 ESV 表现为先增长后降低。水田湿地分布广泛,面积占比超 60%,但因种植灌溉需要,其水资源供给价值为负值,在土壤保持等支持服务方面价值量较低,ESV 占比仅为 5%。红树林湿地为海生动物及众多红树植物提供高质量栖息地,在生物多样性等支持服务中具有较高贡献度,ESV 先降低后增长。

3.2.2 ESV 空间格局演变分析 为进一步探究 ESV 空间格局演变情况,经反复试验后采用 ArcGIS 渔网工具创建 500 m×500 m 方格网,逐一计算海口市共计 9 455 个网格的湿地 ESV,并采用几何间隔法划分为 5 个等级(图 3)。

整体而言,海口湿地 ESV 较高区域主要为南渡江以东、三门坡镇以北的地区,与海口地势空间分布特征相吻合。西侧石山镇、永兴镇及南侧大坡镇、三门坡镇等地区海拔较高,地类主要为林地、灌木林,湿地分布较少;北侧沿海岸带、南渡江流域以及东侧东寨港地区地势较低,有利于水系汇集,湿地集中分布,ESV 较高。

2010—2015 年湿地 ESV 变化幅度较小,低值区稍有扩张。城市扩张建设不断侵占城郊坑塘及养殖湿地,导致主城区南侧及新海港周边湿地面积持续减少,ESV 等级由 V 级、IV 级向 I 级、II 级转变;在南部东山镇,因乡镇建设用地发展,导致周边水田湿地面积减少,ESV 下降,IV 级区域缩减。与前 5 a 相较,2015—2020 年湿地空间连通性进一步降低,III 级区域面积由增长转为减少, I、II 级持续增长;主城区及美兰机场周边湿地持续减少, V 级逐步消退。从全局角度分析,海口湿地 ESV 整体呈西北部衰退,东部增长,重心持续向东南方向偏移。

3.3 生态系统服务价值对景观格局演变的响应

由表 3 可知,10 a 间湿地斑块密度变化较小,仅与水田湿地 ESV 呈负相关($r = -0.955$)。边缘密度与水田及湖泊湿地 ESV 相关性较低,与坑塘及养殖湿地响应最强烈($r = 0.997, P < 0.05$),故此调整斑块边缘密度以提升湿地 ESV 的策略对坑塘及养殖湿地最为适用。南渡江等带状河流湿地具有较高的延展性,ESV 与平均斑块面积、聚合度指数的相关性系数均为负数,表明形状复杂的河流湿地斑块面积愈大,分布愈分散,ESV 愈低。水田、水库等人工湿地 ESV 与平均斑块面积、聚合度指数呈正相

关,说明平均斑块面积愈大,景观聚集发展,湿地ESV 愈高。因红树林及潮下水生层的生存环境特性,景观大多呈块状聚集分布,平均斑块面积、聚合度指数与 ESV 呈负相关。湖泊湿地 ESV 对平均斑块密度的正响应最强烈,与聚合度指数呈负相关性。

由图 4 可知,供给与调节服务对景观格局变化响应显著。蔓延度、形状指数、多样性对湿地 ESV

均有显著影响,其中景观形状、多样性指数与湿地服务价值呈正相关,蔓延度指数为负相关,说明湿地形状团聚分布,高程度多样性与聚集度,有利于提高湿地生态系统服务价值。连通性与湿地服务价值均呈负相关性,可从改变湿地景观边界形状,调整景观连通性等小幅度优化方面,提高生态系统服务价值,以避免过度调整对湿地景观造成不可覆灭的损伤。

表 2 2010—2020 年海口湿地生态系统服务类型价值变化

Table 2 Changes in the value of each ecosystem service types in Haikou wetlands,2010—2020

生态系统服务		生态系统服务价值 ESV/亿元			生态系统价值变化率(%)	
		2010 年	2015 年	2020 年	2010—2015 年	2015—2020 年
供给服务	食物生产	0.79	0.77	0.75	−2.78	−2.07
	原料生产	0.10	0.10	0.10	−3.32	0.17
	水资源供给	0.83	0.81	0.80	−2.53	−1.40
调节服务	气体调节	0.70	0.68	0.67	−3.08	−0.93
	气候调节	0.86	0.83	0.83	−3.19	−0.22
	净化环境	1.44	1.39	1.38	−2.86	−1.26
支持服务	水文调节	25.31	24.65	24.12	−2.61	−2.14
	土壤保持	0.27	0.26	0.27	−3.79	2.16
	维持养分循环	0.10	0.10	0.10	−2.96	−1.43
文化服务	生物多样性	0.86	0.82	0.84	−3.92	2.57
	美学景观	0.58	0.56	0.57	−3.74	1.95
总计		31.84	30.97	30.43	−2.72	−1.75

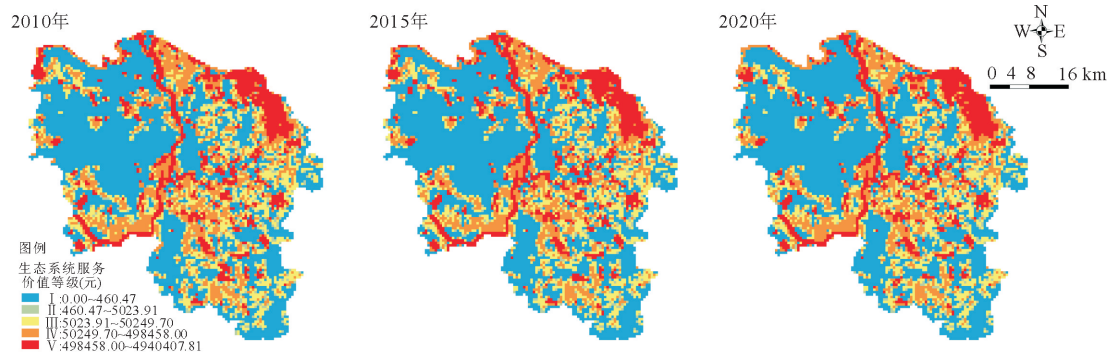


图 3 2010—2020 年海口湿地 ESV 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of wetland ESV in Haikou from 2010 to 2020

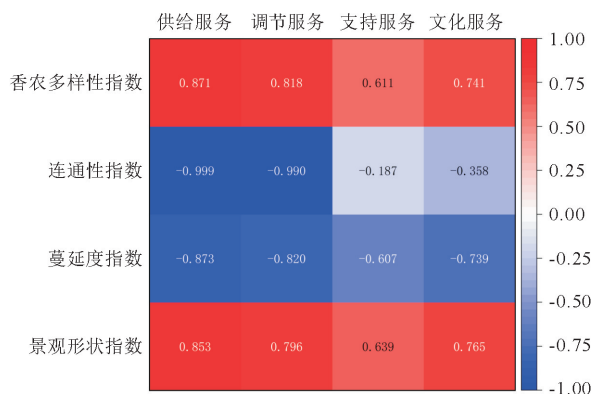


图 4 生态系统服务与景观水平景观格局指数的偏相关分析

Fig. 4 Skewed correlation analysis of ecosystem services and landscape level landscape pattern indices

4 结论与讨论

4.1 结论

海口湿地以水田、水库、坑塘及养殖等人工湿地为主,面积占比约为 80%,自然湿地为湖泊、河流、红树林、潮下水生层湿地。10 a 间湿地总面积逐年缩减,由 455.51 km² 持续减少至 434.50 km²,人工湿地呈破碎化发展,损失量为 25.58 km²;自然湿地面积先缓慢减少后增长,增长量为 4.57 km²。“十三五”期间海口湿地保护政策加强,湿地损失率有所减缓,其中红树林湿地面积见长,增长量为 3.24 km²。海口湿地景观格局整体呈现破碎化,多样性减弱,非均质分布。

表 3 湿地 ESV 与类型水平景观格局指数的相关性分析

Table 3 The correlation between wetland ecosystem service values and the type-level landscape pattern indices

湿地景观 ESV 总量	水田	湖泊	河流	水库	坑塘及养殖	红树林	潮下水生层
斑块密度	-0.955	/	0.896	0.706	0.921	1.000**	0.697
边缘密度	0.178	-0.082	0.946	0.843	0.997*	0.932	0.486
平均斑块面积	0.988	1.000**	-0.761	0.972	0.651	-0.985	-0.594
聚合度指数	0.803	-0.724	-0.992	0.867	0.779	-0.785	-0.866

注: *、** 分别表示相关系数在 0.05、0.01 水平上显著(两侧检验); / 表示不能计算, 因为至少有一个变量保持不变。

湿地 ESV 与面积变化趋势一致,呈逐年下降趋势,10 a 间损失率为 4.43%。空间上,东部地区 ESV 高于西部,呈西北部衰退,东部增长态势,ESV 重心持续向东南方向偏移。湿地生态系统在水文调节、净化环境等调节服务方面功效显著,二者 ESV 之和约为 26 亿元;在土壤保持、维持养分循环等支持方面价值较低。河流、水库等以水系为主的湿地类型 ESV 贡献度较高,占比约为 90%;其次为水田、红树林;湖泊湿地面积最小,ESV 最低。

湿地 ESV 对景观格局变化响应剧烈,类型水平上,降低斑块密度有助于提高水田湿地 ESV;增加边缘密度以提高 ESV 的方法对坑塘及养殖湿地最为适用($r=0.997, P<0.05$);人工湿地平均斑块面积愈大,破碎度愈低,ESV 愈高。景观水平上,湿地 ESV 对景观形状、多样性及蔓延度等指数的变化具有一定的敏感性,与形状指数、香农多样性呈显著正相关,与蔓延度、连通性指数为负相关,改善湿地景观形状、促使团聚分布,有利于提高湿地生态系统服务价值。

4.2 讨论

众多学者围绕海口市湿地做了大量研究:湿地面积逐年减少,主要分布于南渡江以东的地区;社会经济因素是造成湿地变化的主要原因;湿地景观破碎度持续增大;水文调节和水资源供给等服务为海口湿地核心功能等特征均已得到论证^[27]。在景观格局与 ESV 相关性方面,朱颖等^[21]、顾泽贤等^[28]学者皆已论证 ESV 与景观格局演变紧密相关;与文疆回等^[16]研究结果“高价值景观类型,多样性的提升和破碎化指数的降低有利于 ESV 增长”相似,本研究与前人研究结论基本一致。

在海南自贸港建设进程中,海口市不可避免地面临湿地面积衰退、生境破碎等困境,探究湿地生态系统对景观格局的响应机制,保障湿地生态安全迫在眉睫,需因地制宜制定可持续发展策略,优化湿地景观格局,实现提质增效。

在生态保护红线政策引导下,大型库塘和河流得到有效保护,因此,未来海口湿地生态安全防护应重点关注小微湿地,加强对主城区人工型小微湿地的管理调控,提高文化休闲服务价值。为避免小微湿地无序丧失,应持续对红旗镇等东部乡村地区的

众多池塘、坑地等自然型小微湿地开展生态修复工作,以科普宣教等形式,提升村民对小微湿地的认识。在国土空间规划背景下,保护乡村水田湿地不仅促进农业生产可持续发展,在有效提升区域湿地 ESV 方面亦有重大贡献,尤其在新坡镇、东山镇等南部平原地区,通过增加湿地平均斑块面积与聚集度,促使斑块集中分布,可重点提升湿地支持与供给服务价值。湿地为植物、鸟类等大量生物提供了充足的食物来源,承担了生物庇护所功能,在西部羊山地区应注重提高湿地景观多样性,避免单一优势景观,提升湿地生物多样性服务价值。

参考文献:

[1] 欧阳志云,王如松,赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报,1999,10(5):635-640.
OUYANG Z Y, WANG R S, ZHAO J Z. Ecosystem services and their economic valuation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(5): 635-640. (in Chinese)

[2] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.

[3] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报,2003,18(2):189-196.
XIE G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189-196. (in Chinese)

[4] 刘宇,陈学华,罗勇. 土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以贵州省为例[J]. 西北林学院学报,2008,23(1):219-223.
LIU Y, CHEN X H, LUO Y. Effects of land use variations on ecosystem services value——a case study in Guizhou Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(1): 219-223. (in Chinese)

[5] 钱江波,王恩,章银柯. 杭州西湖湖西景区土地利用/覆被变化与生态服务价值评估[J]. 西北林学院学报,2011,26(6):208-212.
QIAN J B, WANG E, ZHANG Y K. Land use/cover changes and ecological assets evaluation in the west part of the West Lake in Hangzhou[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(6): 208-212. (in Chinese)

[6] 马建明,常晓晴,邢艳秋,等. 基于 Landsat TM/OLI 影像的哈尔滨市植被覆盖度与景观格局动态变化分析[J]. 森林工程,2023,39(5):65-73.

[7] 赵育恒,曾晨. 武汉城市圈生态服务价值时空演变分析及影响

- 因素[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1426-1440.
- ZHAO Y H, ZENG C. Analysis of spatial-temporal evolution and factors that influences ecological service values in Wuhan urban agglomeration, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4): 1426-1440. (in Chinese)
- [8] HE Y, WANG W H, CHEN Y D, *et al.* Assessing spatio-temporal patterns and driving force of ecosystem service value in the main urban area of Guangzhou[J]. *Sci. Rep.*, 2021, Feb 4; 11(1): 3027.
- [9] 谢丽霞, 白永平, 车磊, 等. 基于价值—风险的黄河上游生态功能区生态分区建设[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 196-207.
- XIE L X, BAI Y P, CHE L, *et al.* Construction of ecological zone based on value-risk ecological function area in the upper Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 196-207. (in Chinese)
- [10] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 基于生态系统服务和生态系统健康的生态风险评价——以长株潭城市群为例[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5478-5489.
- OUYANG X, ZHU X, HE Q Y. Incorporating ecosystem services with ecosystem health for ecological risk assessment: case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5478-5489. (in Chinese)
- [11] 毛靓, 贾京默. 黑龙江县域农林用地景观格局变化特征[J]. 森林工程, 2022, 38(2): 44-53.
- [12] 吴隽宇, 江伟康, 黄钰婷. 粤港澳大湾区生态系统服务价值时空演变研究[J]. 南方建筑, 2022(6): 52-61.
- [13] CAO L D, LI J L, YE M Y, *et al.* Changes of ecosystem service value in a coastal zone of Zhejiang Province, China, during rapid urbanization[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(7): 1301.
- [14] 殷康前, 倪晋仁. 湿地研究综述[J]. 生态学报, 1998(5): 93-100.
- YIN K Q, NI J R. Review of wetland studies[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998(5): 93-100. (in Chinese)
- [15] 贾艳艳, 唐晓岚, 杨阳, 等. 长江沿岸芜湖区段景观格局演变及生态系统服务价值分析[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 249-258.
- JIA Y Y, TANG X L, YANG Y, *et al.* Landscape pattern changes and ecological service values in Wuhu section along the Yangtze River[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(6): 249-258. (in Chinese)
- [16] 文疆回, 李瑞. 贵州省生态系统服务价值时空演变及其对景观格局变化的响应[J/OL]. 应用生态学报: 1-12[2022-08-21].
- WEN J H, LI R. Temporal and spatial evolution of ecosystem service value and its response to landscape pattern change in Guizhou Province, China[J/OL]. *Chinese Journal of Applied Ecology*: 1-12[2022-08-21]. (in Chinese)
- [17] 黄琼瑶. 赣南地区景观格局变化对生态系统服务价值的影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [18] 柳迪子, 杜守帅, 王晨旭. 旅游型乡村景观格局变化及生态系统服务价值响应——以江苏省无锡市太湖国家旅游度假区为例[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 264-275, 286.
- LIU D Z, DU S S, WANG C X. Landscape pattern change and its response to ecosystem services value in a rural tourism area——a case study at Taihu National Tourism Resort in Wuxi city of Jiangsu Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(5): 264-275, 286. (in Chinese)
- [19] 海口市统计局, 国家统计局海口调查队. 海口统计年鉴·2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [20] 李玉杰, 马昊, 邓涛, 等. 基于“源-汇”理论的海口城市景观格局与热岛效应响应机制[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 223-232.
- LI Y J, MA H, DENG T, *et al.* Urban landscape pattern and response mechanism of heat island effect based on “Source-Sink” Theory of Haikou city[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(5): 223-232. (in Chinese)
- [21] 李颖, 王怡, 贺凤春, 等. 景观格局对阳澄湖小流域水质变化影响的空间尺度效应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 105-113, 353.
- ZHU Y, WANG Y, HE F C, *et al.* Spatial scale effect of landscape pattern on water quality change in Yangcheng lake watershed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2): 105-113, 353. (in Chinese)
- [22] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, *et al.* Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254. (in Chinese)
- [23] 高星, 杨刘婉青, 李晨曦, 等. 模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 7974-7988.
- GAO X, YANG LIU W Q, LI C X, *et al.* Land use change and ecosystem service value measurement in Baiyangdian basin under the simulated multiple scenarios[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 7974-7988. (in Chinese)
- [24] 杨婉清, 杨鹏, 孙晓, 等. 北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响分析[J/OL]. 生态学报, 2022(16): 1-13[2022-08-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20220419.1335.036.html>.
- [25] GUO S, WU C, WANG Y, *et al.* Threshold effect of ecosystem services in response to climate change, human activity and landscape pattern in the upper and middle Yellow River of China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108603.
- [26] LUO C, FU X, ZENG X, *et al.* Responses of remnant wetlands in the Sanjiang Plain to farming-landscape patterns[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108542.
- [27] 钟尊倩, 邱彭华, 杨星. 海口市近 30 年来湿地变化及其驱动力分析[J]. 海南师范大学学报: 自然科学版, 2021, 34(2): 215-226.
- ZHONG Z Q, QIU P H, YANG X. Analysis of wetland changes and driving forces in Haikou in the last 30 years[J]. *Journal of Hainan Normal University: Natural Science*, 2021, 34(2): 215-226. (in Chinese)
- [28] 顾泽贤, 赵筱青, 高翔宇, 等. 澜沧县景观格局变化及其生态系统服务价值评价[J]. 生态科学, 2016, 35(5): 143-153.