

DOI: 10.20103/j.stxb.202209012492

郑燕萍, 刘琦, 黄欣, 刘奉明, 姚君润, 覃国峰, 曾浩谦, 颜云榕. 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. 生态学报, 2024, 44(1): 440-453.

Zheng Y P, Liu Q, Huang X, Liu F M, Yao J R, Qin G F, Zeng H Q, Yan Y R. Community structure of fish in mangrove forests of the Leizhou Peninsula and its relationship with human activity intensity. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 440-453.

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

郑燕萍¹, 刘琦^{2,3}, 黄欣³, 刘奉明¹, 姚君润¹, 覃国峰¹, 曾浩谦¹, 颜云榕^{1,3,4,*}

1 广东海洋大学水产学院, 湛江 524088

2 岭南师范学院地理科学学院, 湛江 524048

3 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 湛江 524013

4 广东省南海深远海渔业管理与捕捞工程技术研究中心, 湛江 524088

摘要:水产养殖、城镇建设等引起的土地利用变化使红树林生态系统遭受严重破坏,是红树林生物多样性面临的主要威胁之一。了解雷州半岛红树林鱼类群落结构,探究人类活动强度对鱼类群落结构的影响,对红树林鱼类资源保护至关重要。基于2021—2022年雷州半岛7片红树林共21条潮沟的鱼类数据,结合周边土地利用数据,研究鱼类群落结构及其与土地利用类型的关系。结果显示,共采集鉴定鱼类49种,隶属于8目25科,鲈形目鱼类最多,共33种占总种类数的75.5%,其中,虾虎鱼科种数最多,共15种占30.6%;食性上,主要为杂食性和肉食性鱼类,分别为53.06%和44.90%;各红树林 Shannon-Wiener 多样性指数在秋冬春三季的变化范围均为0—2.5, Simpson 多样性指数均为0—0.9;各红树林鱼类个体数、物种数和生物量均存在显著差异($P>0.05$);除秋季北潭与流沙湾的鱼类群落无显著差异($P>0.05$)外,其余红树林间的鱼类群落在三个季度均有显著差异($P<0.05$);人类活动强度、红树林面积和东西岸对鱼类多样性指数、个体数、物种数和生物量均有显著的主效应和交互效应($P<0.05$);青斑细棘虾虎鱼 *Acentrogobius viridipunctatus* 等杂食性鱼类丰度与城镇用地、耕地和林地的面积占比呈正相关,眶棘双边鱼 *Ambassis gymnocephalus* 等肉食性鱼类丰度呈负相关,尼罗罗非鱼 *Oreochromis niloticushh* 等鱼类丰度与养殖塘面积占比呈正相关。研究结果表明人类活动对鱼类群落结构已产生负面影响,对红树林周边土地利用的合理规划可作为鱼类保护与利用的重要手段。

关键词:鱼类群落;土地利用;红树林;雷州半岛

Community structure of fish in mangrove forests of the Leizhou Peninsula and its relationship with human activity intensity

ZHENG Yanping¹, LIU Qi^{2,3}, HUANG Xin³, LIU Fengming¹, YAO Junrun¹, QIN Guofeng¹, ZENG Haoqian¹, YAN Yunrong^{1,3,4,*}

1 Fisheries College of Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

2 Department of Geography, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China

3 Guangdong Provincial Laboratory of Southern Marine Science and Engineering (Zhanjiang), Zhanjiang 524013, China

4 Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center of Far Sea Fisheries management and Fishing of South China Sea, Zhanjiang 524088, China

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U20A2087);广东省普通高校青年创新人才类项目(2022KQNCX025);南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)资助项目(ZJW-2022-07);广东省南海深远海渔业管理与捕捞工程技术研究中心配套经费

收稿日期:2022-09-01; **网络出版日期:**2023-06-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yryan_gdou@163.com

Abstract: Changes in land use caused by aquaculture, urban construction, and other factors have led to severe damage to mangrove ecosystems, posing a major threat to mangrove biodiversity. Understanding the community structure of fish in the Leizhou Peninsula mangroves and investigating the impact of human activities on the fish community structure are crucial for the conservation of mangrove fish resources. This study is based on fish data from 21 tidal creeks in seven mangrove areas of the Leizhou Peninsula from 2021 to 2022. Land use data in the surrounding areas were combined to study the relationship between fish community structure and land use types. The results show that a total of 49 fish species were collected and identified, belonging to 8 orders and 25 families. The order Perciformes had the highest number of fish species, with 33 species accounting for 75.5% of the total species. Among them, the family Gobiidae had the highest number of species, with 15 species accounting for 30.6%. In terms of diet, the main categories were omnivorous fish and carnivorous fish, accounting for 53.06% and 44.90%, respectively. The Shannon-Wiener diversity index of fish communities in different mangroves ranged from 0 to 2.5 in autumn, winter, and spring, while the Simpson diversity index ranged from 0 to 0.9. There were significant differences ($P > 0.05$) in fish abundance, species richness, and biomass among the different mangroves. Except for the fish communities between Beitan and Liushawan mangroves in autumn, which showed no significant differences ($P > 0.05$), the fish communities in the other mangroves differed significantly in all three seasons ($P < 0.05$). Human activity intensity, mangrove area, and east-west coast had significant main effects and interaction effects on fish diversity index, abundance, species richness, and biomass ($P < 0.05$). The abundance of omnivorous fish such as *Acentrogobius viridipunctatus* showed a positive correlation with the proportion of urban land, arable land, and forest land, while the abundance of carnivorous fish such as *Ambassis gymnocephalus* showed a negative correlation with the proportion of urban land, arable land, and forest land. The abundance of fish species such as *Oreochromis niloticus* showed a positive correlation with the proportion of fishpond area. The results of the study indicate that human activity has had a negative impact on fish community structure, and the rational planning of land use in the surrounding areas of mangroves can be an important means for the conservation and utilization of mangrove fish.

Key Words: fish community; land use; mangrove; Leizhou Peninsula

红树林主要生长于热带和亚热带陆、海交汇或海湾的河口地区,是鱼类的重要栖息地,具有食物来源丰富、隐蔽性强、饵料压力低的特点^[1]。此外,红树林内具有发达的潮沟,能将海湾、河口或泻湖与红树林内陆连接起来,扩展红树林区域范围。不同生命阶段鱼类经常将潮沟作为育幼场所或临时栖息地^[2]。

近年来,受城市发展影响,红树林周边自然用地向城镇用地、农业用地和水产养殖等土地利用类型的转变,不仅使红树林的面积大幅减少,而且非渗透表面积的增加改变了水的径流和红树林原有栖息地特征^[3],导致原本脆弱的红树林生态系统逐渐被破坏^[4-5]。Bernardino 等^[6]研究发现由红树林砍伐和底层土壤清除引起的土地变化会导致甲壳类动物、环节动物等底栖动物消失;Dinesh 等^[7]研究表明清除红树林会导致土壤养分和有机基质水平显著降低;Erazo 等^[8]研究表明养殖面积和废水增加会显著改变红树林中的微生物群落;Laura 等^[9]研究发现受人类活动干扰的红树林区底栖生物多样性、生物量和丰度均出现了显著下降。人类活动对红树林底栖动物、微生物和土壤等影响已有了大量的相关研究,但对红树林鱼类群落结构的影响研究鲜有报道。

雷州半岛拥有中国大陆面积最大、物种多样性最丰富的红树林^[10]。有研究表明,雷州半岛沿岸由于砍伐造田(1977—2000年)、围海养殖(2000年后)、城镇建设等开发活动导致了红树林生境大幅退化^[11]。目前有关人类活动对雷州半岛红树林鱼类影响的相关研究未见报道。因此,本研究基于2021—2022年雷州半岛七片红树林21条潮沟的鱼类调查数据,结合土地利用数据,旨在了解雷州半岛红树林鱼类群落结构,探究人类活动强度对红树林鱼类群落的影响,揭示土地利用类型(养殖塘、城镇用地、耕地和林地)与鱼类群落结构的关系,为雷州半岛红树林鱼类资源养护与利用提供重要的科学参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

雷州半岛(20°12'—21°35'N, 109°30'—110°55'E)位于中国大陆最南端,南隔琼州海峡与海南岛相望,西临北部湾,东临南中国海。地势平缓,西北高,东南低,海拔不超过 1000m;属热带海洋季风气候,干湿季节明显^[10];雷州半岛红树林主要分布在河口、海湾和岛屿的背风面,底质以沙滩为主,仅在河口和海湾地区为沉积泥滩^[12]。

对雷州半岛七片红树林区周边一公里半径范围内的土地利用情况进行解译发现(图 1),高桥和附城红树林周边均无草地、城镇用地和耕地,周边以养殖塘为主;北潭红树林周边耕地面积占比最大(25.18%),其次为流沙湾(19.36%);东里和企水红树林周边城镇用地面积占比最大,分别为 7.52%和 7.51%。



图 1 雷州半岛各红树林周边一公里半径范围内土地利用类型占比

Fig.1 Proportion of land use types within a one-kilometer radius around mangroves in the Leizhou Peninsula

1.2 采样方法

本研究于 2021 年 9 月(秋季)、2022 年 1 月(冬季)和 2022 年 4 月(春季)在雷州半岛高桥、北潭、企水、流沙湾、和安、东里和附城七片红树林进行鱼类资源调查(图 2),依据各红树林生境特征,对于有主潮沟且潮沟内具有分支的大面积红树林,在主潮沟与小潮沟的分支处采样,没有主潮沟但有多条小潮沟的红树林,依据潮沟间的距离进行选择。每片红树林区各选取 3 条潮沟,大潮时能被潮水完全淹没(图 2)。每条潮沟内放置 5 条笼网,网长约 8m,网目大小为 5mm,于白天大潮期间在当地渔民的配合下同时进行鱼类样品的采集,每季度连续调查 3 天,每日涨潮前布置网具,退潮后收集渔获物。渔获物收集后立即冷冻保存,运回实验室后主要依据《广西北部湾红树林湿地海洋动物图谱》^[13]、《南海经济鱼类图鉴》^[14]等相关资料鉴定鱼类物种,测量并记录每种鱼类的个体数和生物量。

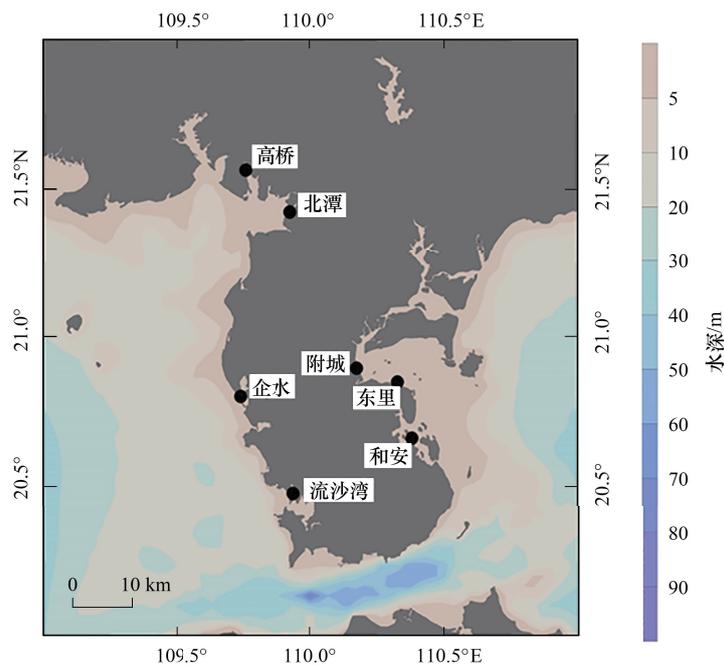


图 2 雷州半岛红树林采样站点图

Fig.2 Map of mangrove sampling sites in Leizhou Peninsula

1.3 数据分析

1.3.1 鱼类多样性指数计算方法

$$\text{Shannon-Weiner 指数}(H)^{[15]} \quad H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

$$\text{Pielou 均匀度指数}(J)^{[16]} \quad J = H/\ln S$$

$$\text{Simpson 多样性指数}(S)^{[17]} \quad S = 1 - \sum_{i=1}^s (P_i)^2$$

式中, P_i 为鱼类群落中第 i 种鱼个体数占所有鱼类总个体数的比例; S 代表所有鱼类种类数。

1.3.2 人类活动强度指数计算方法

人类活动强度是度量人类改造自然程度的有效指标^[18]。当前以建设用地当量评价人类活动强度的方法得到了广泛认可和运用^[19]。本研究采用徐勇等^[20]提出的陆地表层人类活动强度的计算方法,结合红树林周边土地利用的区域特点,选择适合各土地利用类型的建设用地当量折算系数(表 1),计算各红树林区周边一公里半径范围内的人类活动强度。采用 Google Earth 软件解译 2021 年各红树林区周边一公里半径范围内的土地利用类型,将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、城镇用地、养殖塘和红树林六大类。计算公式如下^[20]。

$$\text{HAILS} = \frac{S_{\text{CLEV}}}{S} \times 100\%$$

$$S_{\text{CLEV}} = \sum_{i=1}^n (SL_i \times CI_i)$$

式中, HAILS 为人类活动强度指数; S_{CLEV} 为建设用地当量面积; S 为计算区域总面积; SL_i 为第 i 种土地利用类型的面积; CI_i 为第 i 种土地利用的建设用地当量折算系数; n 为区域内土地利用类型数。

表 1 不同土地类型的建设用地当量折算系数

Table 1 Equivalent conversion coefficients of construction land of different land types

土地类型 Land types	特点 Trait	折算系数 (CI) Convert coefficient
耕地 Plowland	灌溉水田、菜地等	0.2
林地 Forest	表层自然覆被改变, 以人工林为主	0.133
草地 Grassland	表层自然覆被未改变但被利用	0.067
养殖塘 Breeding pond	向红树林排水半年或一年一次	0.067
	向红树林排水频率高, 1—2 月一次	1
城镇用地 Urban land	主要为农村居民点	1
红树林 Mangrove	灌木林地	0

1.3.3 统计分析

采用单因素方差分析方法分析红树林间鱼类多样性指数、个体数、物种数和生物量的差异; 采用线性回归分析方法分析多样性指数、个体数、物种数和生物量与人类活动强度的关系; 以物种丰度为指标, 基于 Bray-Curtis 相似性系数矩阵, 采用 vegan 包进行非度量多维尺度分析 (NMDS) 来表征不同季节雷州半岛红树林间鱼类群落的分布格局; 采用 pairwiseAdonis 包进行置换多元方差分析 (PERMANOVA) 来分析雷州半岛红树林间鱼类群落结构差异的显著性, 以上分析均在 R 语言软件中进行。运用 Past4.09 软件进行相似性百分比 (SIMPER) 分析来表征各红树林间相异性的主要贡献种。

运用 Canoco 5.0 软件^[21]对鱼类物种丰度进行去趋势对应分析 (DCA)。本研究三个季度 DCA 分析排序轴值均大于 3, 统一选用 CCA 分析红树林周边土地利用类型对鱼类群落的影响。为避免偶见种的影响, 分析前剔除了出现频数低于 3 的物种, 对鱼类丰度数据和土地利用数据均进行了中心化处理。

依据红树林在雷州半岛所处位置分为东岸和西岸两组; 依据 Google Earth 软件解译的各红树林区面积 (图 1), 依次划分为大面积 ($\geq 50\text{hm}^2$) 和小面积 ($< 50\text{hm}^2$) 红树林; 依据人类活动强度指数依次划分为高强度 (HAILS ≥ 20) 和低强度 (HAILS < 20) 人类活动, 各红树林具体划分情况如表 2 所示。采用多因素方差分析方法分析人类活动强度、红树林面积及东西岸对红树林鱼类群落的影响, 该分析在 SPSS 21.0 软件中实现。

表 2 雷州半岛各红树林区人类活动强度、红树林面积和东西岸的划分

Table 2 Human activity intensity, mangrove area and east and west bank division of mangrove forests in the Leizhou Peninsula

地点 Site	人类活动强度指数 Human activity intensity index	人类活动强度 Human activity intensity	红树林面积 Mangrove area/ hm^2	红树林面积 Mangrove area	东西岸 East and West bank
高桥	1.04	低	776.20	大	西岸
北潭	23.01	高	54.13	大	西岸
企水	21.72	高	39.46	小	西岸
流沙湾	16.30	低	11.18	小	西岸
和安	28.64	高	334.37	大	东岸
东里	10.56	低	26.55	小	东岸
附城	2.89	低	201.39	大	东岸

2 结果

2.1 不同季节红树林鱼类组成特征

本研究共采集鱼类 49 种,隶属于 8 目 25 科。鲈形目鱼类最多,共 33 种占总种类数的 75.5%,其中,虾虎鱼科种数最多,共 15 种占 30.6%;杂食性鱼类共 26 种占 53.06%,肉食性鱼类共 22 种占 44.90%,植食性鱼类仅 1 种;和安红树林鱼类种数最多,共 31 种,流沙湾最少,仅 16 种(附表 1)。

2.2 人类活动强度与鱼类群落指数的关系

雷州半岛七片红树林区 Shannon-Wiener 多样性指数在三季度的变化范围均为 0—2.5, Simpson 多样性指数均为 0—0.9, Pielou 均匀度指数均为 0—1(图 3)。各红树林间鱼类多样性指数在三个季度均有显著差异($P < 0.05$),多样性指数整体从高到低依次为和安>企水>北潭>东里>高桥>附城>流沙湾;东岸红树林区鱼类各多样性指数与人类活动强度均呈显著正相关($P < 0.05$),西岸呈正相关但不显著($P > 0.05$)。红树林间鱼类个体数、物种数和生物量在三个季度均有显著差异($P < 0.05$)(图 4)。人类活动强度与物种数在冬季和春季均呈显著正相关($P < 0.05$),与个体数和生物量在三个季度均无显著线性关系($P > 0.05$)(图 4)。个体数整体从高到低依次为高桥>企水>东里>和安>北潭>流沙湾;物种数依次为高桥>和安=东里=企水>北潭>附城>流沙湾;生物量依次为东里>企水>附城>和安>高桥>北潭>流沙湾。

2.3 土地利用类型与鱼类群落结构的关系

CCA 分析结果显示(图 5),秋季累积解释率为 93.04%,冬季为 88.16%,春季为 95.38%。第一轴排序轴的特征值均大于 0.24,第二排序轴均大于 0.16,三个季度的排序图均较好反映了土地利用类型、物种和样点之间的关系。红树林、耕地、林地、养殖塘、城镇用地和草地面积占比在三个季度对鱼类群落均具有极显著影响($P < 0.01$)。在秋季、冬季和春季,眶棘双边鱼(*Ambassis gymnocephalus*)和嵴塘鳢(*Butis butis*)的丰度主要与红树林面积占比呈正相关;青斑细棘虾虎鱼(*Acentrogobius viridipunctatus*)、短吻缙虾虎鱼(*Amoya brevirostris*)、雷氏蜂巢虾虎鱼(*Favonigobius reichei*)和中华乌塘鳢(*Bostrychus sinensis*)的丰度主要与城镇用地、耕地和林地的面积占比呈正相关;前鳞鲃(*Planiliza affinis*)、鲮(*Mugil cephalus*)和尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的丰度主要与养殖塘面积占比呈正相关。其中,青斑细棘虾虎鱼、眶棘双边鱼和鲮在三个季度中均是导致红树林间鱼类群落差异贡献率高于 10%的物种。

置换方差检验结果显示(表 3),除秋季北潭与流沙湾外($P > 0.05$),其余红树林间鱼类群落在三个季度均有极著差异($P < 0.05$)。

多因素方差分析结果显示(表 4),人类活动强度的主效应对鱼类的多样性指数和物种数在冬季和春季均有显著影响($P < 0.05$),与红树林面积的交互效应对鱼类个体数、物种数和生物量在三个季度均有显著影响($P < 0.05$),与东西岸的交互效应对鱼类的 Shannon-Wiener 多样性指数和物种数在冬季和春季均有显著影响($P < 0.05$);红树林面积的主效应对鱼类的 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数、个体数和生物量在秋季和春季均有显著影响($P < 0.05$),与东西岸的交互效应对鱼类个体数、物种数和生物量在三个季度均有显著影响($P < 0.05$);东西岸的主效应对鱼类的 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、个体数和生物量在多个季节均有显著影响($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 人类活动强度对鱼类群落结构的影响

本研究结果显示,人类活动强度对红树林鱼类多样性指数和物种数在多个季节均有显著影响($P < 0.05$)(表 4)。尽管红树林的面积和东西岸差异均有显著的主影响,但人类活动强度的影响依然能够清晰体现出来,可见人类活动强度的变化已成为制约红树林水生生物群落亟需关注的重要因素。

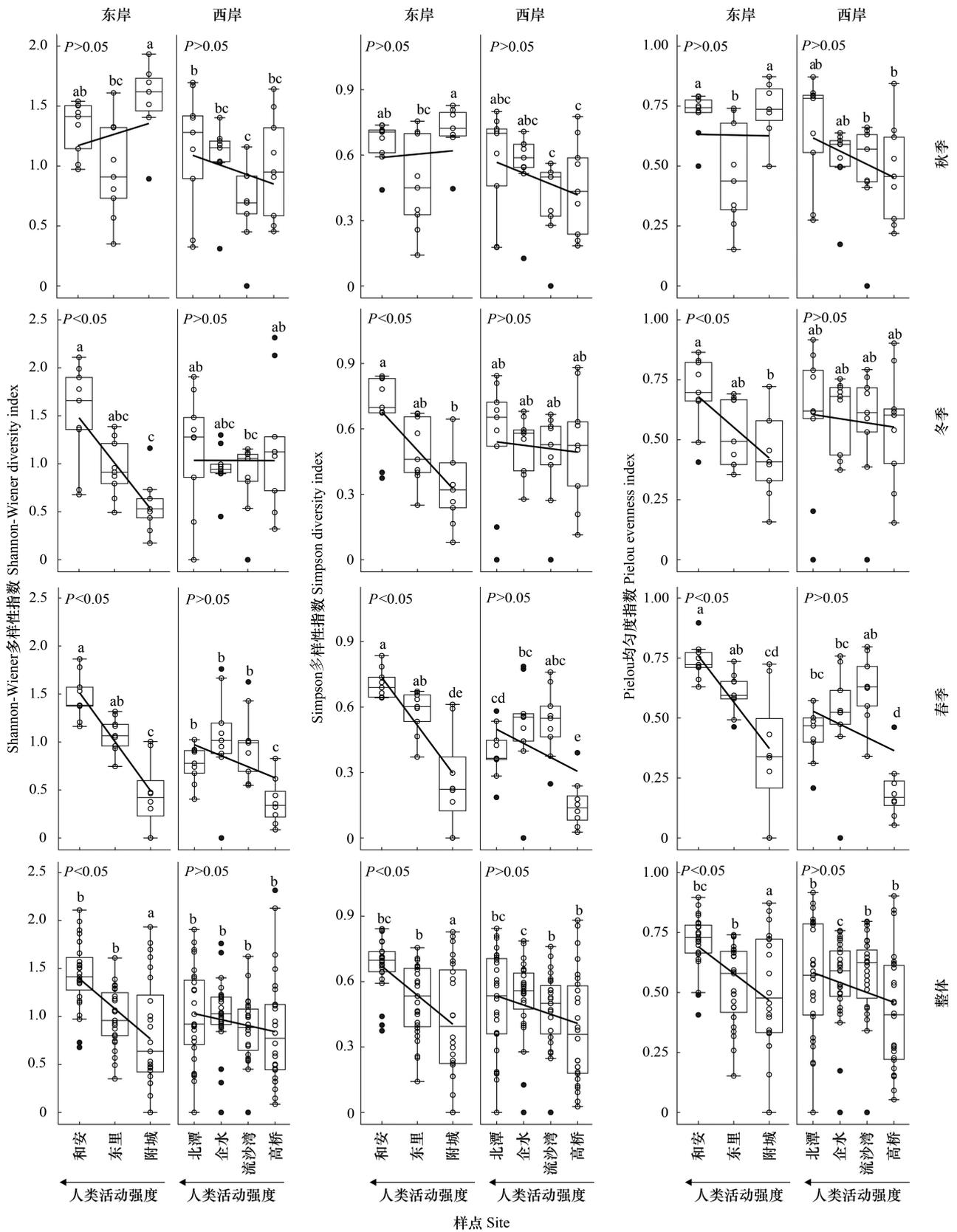


图3 不同时期各红树林区鱼类多样性指数与人类活动强度的关系

Fig.3 Relationship between fish diversity index and human activity intensity in mangrove forest at different periods

箱型图上边缘的不同字母为组间差异检验结果

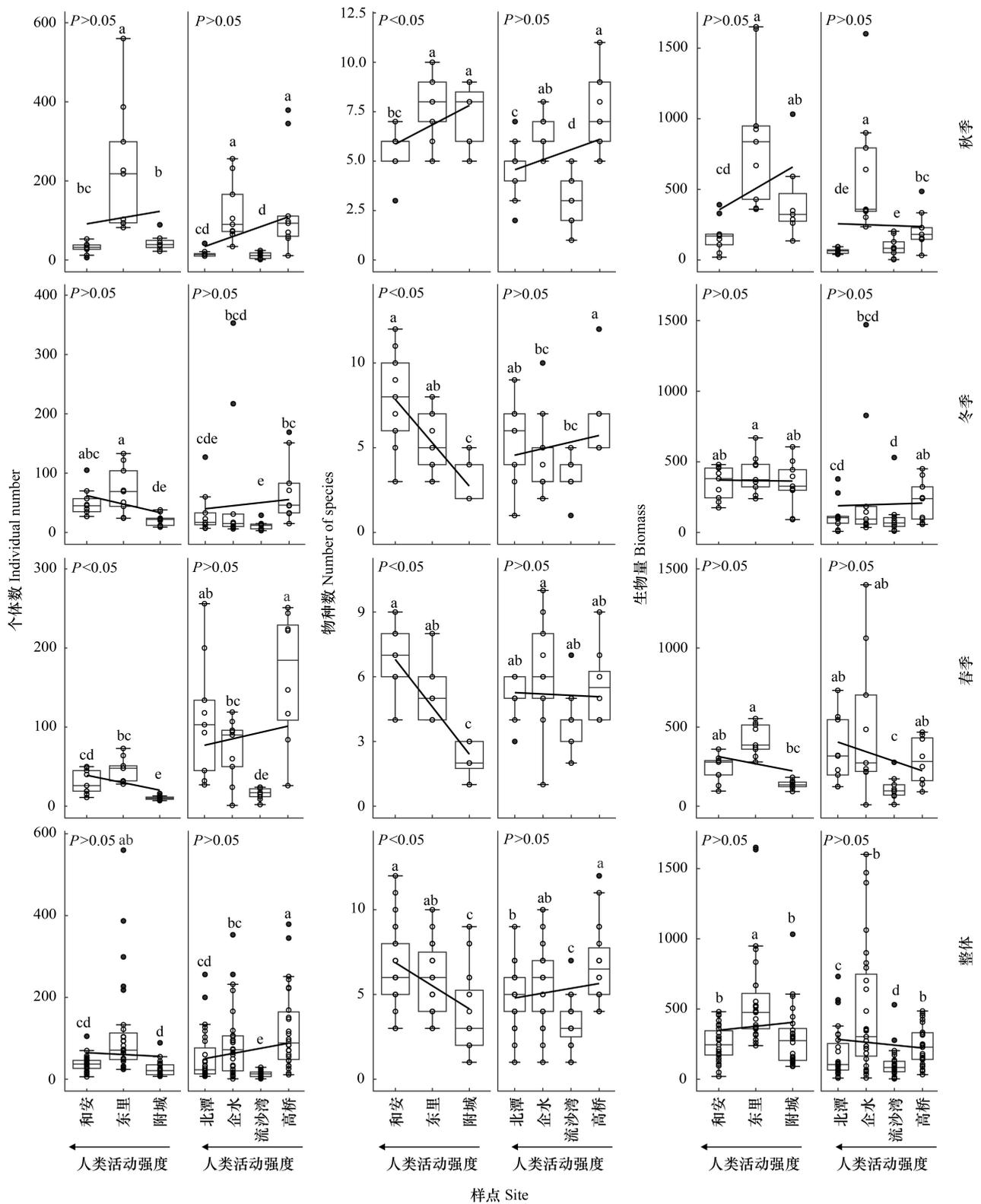


图 4 不同季度各红树林区鱼类个体数、物种数和生物量与人类活动强度的关系

Fig.4 Relationship between individual fish species number and biomass of mangrove forest and human activity intensity in different seasons
箱型图上边缘的不同字母为组间差异检验结果

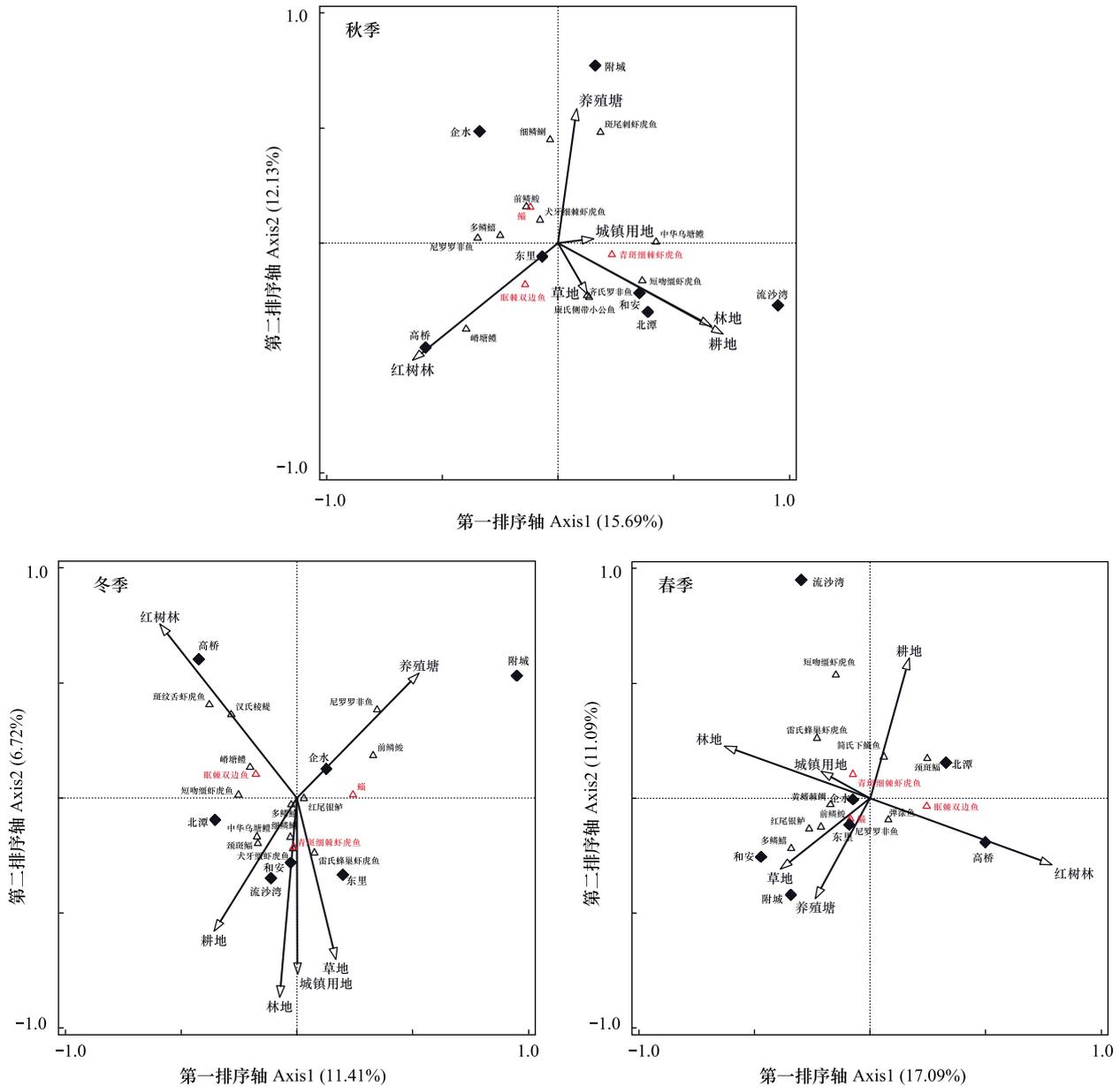


图5 土地利用类型与鱼类物种、红树林的 CCA 排序结果

Fig.5 CCA ranking of land use types and fish species and mangroves

鲮 *Mugil cephalus*; 前鳞鲃 *Planiliza affinis*; 青斑细棘虾虎鱼 *Acentrogobius viridipunctatus*; 眶棘双边鱼 *Ambassis gymnocephalus*; 尼罗罗非鱼 *Oreochromis niloticus*; 齐氏罗非鱼 *Coptodon zillii*; 犬牙细棘虾虎鱼 *Acentrogobius caninus*; 中华乌塘鳢 *Bostrychus sinensis*; 雷氏蜂巢虾虎鱼 *Favonigobius reichei*; 斑纹舌虾虎鱼 *Glossogobius olivaceus*; 颈斑鲃 *Nuchequela nuchalis*; 斑尾刺虾虎鱼 *Acanthogobius ommaturus*; 短吻缙虾虎鱼 *Amoya brevisrostris*; 多鳞鲃 *Sillago sihama*; 嗜塘鳢 *Butis butis*; 康氏侧带小公鱼 *Stolephorus commersonii*; 细鳞鲷 *Terapon jarbua*; 黄鳍棘鲷 *Acanthopagrus latus*; 红尾银鲈 *Gerres oyena*; 简氏下鱚鱼 *Hyporhamphus gernaerti*; 汉氏梭鲃 *Thryssa hamiltonii*; 弹涂鱼 *Periophthalmus modestus*; 标红物种为导致红树林间鱼类群落差异贡献率高于 10% 的物种

人类活动驱动的土地利用变化对鱼类群落结构有着重要影响^[22]。国内外相关研究发现城镇用地和耕地的面积占比是影响鱼类群落结构的主要土地类型^[23]。高欣等^[24]研究发现农业用地占比超过 25% 时,水生态系统中的鱼类群落结构会发生显著改变。美国 Ohio 环境保护署数据指出,当城镇用地面积占比超过 5% 时,鱼类种群开始受到干扰^[25]。本研究中具有高人类活动强度的红树林周边耕地面积占比超过 25% 或城镇用地面积比超过 5% (图 1),使得优势鱼类如虾虎鱼科鱼类及其它鱼类个体数和生物量均较低(图 4)。可见耕地

表 3 雷州半岛红树林间鱼类物种组成的置换方差检验

Table 3 Test of displacement variance of fish species composition among mangrove forests in the Leizhou Peninsula

红树林 Mangrove	高桥	北潭	企水	流沙湾	和安	东里
秋季 Autumn						
高桥						
北潭	0.163 **					
企水	0.225 **	0.254 ***				
流沙湾	0.250 ***	0.095	0.203 **			
和安	0.270 ***	0.168 **	0.219 ***	0.169 ***		
东里	0.412 ***	0.320 ***	0.342 ***	0.273 **	0.215 ***	
附城	0.539 ***	0.462 ***	0.336 ***	0.361 ***	0.356 ***	0.449 ***
冬季 Winter						
高桥						
北潭	0.310 ***					
企水	0.337 ***	0.350 ***				
流沙湾	0.360 **	0.217 ***	0.382 ***			
和安	0.501 ***	0.278 ***	0.387 ***	0.339 ***		
东里	0.552 ***	0.267 ***	0.469 **	0.385 ***	0.216 **	
附城	0.461 ***	0.354 ***	0.411 ***	0.427 ***	0.538 ***	0.583 **
春季 Spring						
高桥						
北潭	0.238 **					
企水	0.404 ***	0.318 ***				
流沙湾	0.585 ***	0.409 ***	0.363 ***			
和安	0.575 ***	0.388 ***	0.291 ***	0.282 ***		
东里	0.678 ***	0.469 ***	0.156 ***	0.476 ***	0.359 ***	
附城	0.676 ***	0.618 ***	0.351 ***	0.536 ***	0.401 ***	0.557 ***

表中的值为 R^2 ; ***:表示 $P < 0.01$; **:表示 $P < 0.05$

表 4 人类活动强度、红树林面积和东、西岸对鱼类群落结构的多因素方差分析

Table 4 Multivariate variance analysis of the effects of human activity intensity, mangrove area and East and West Bank on fish community structure

因素 Factor	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index			Simpson 多样性指数 Simpson diversity index			Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index		
	秋季 Autumn	冬季 Winter	春季 Spring	秋季 Autumn	冬季 Winter	春季 Spring	秋季 Autumn	冬季 Winter	春季 Spring
人类活动强度 Human activity intensity	0.682	9.84 **	30.894 **	1.354	8.330 **	22.527 **	0.607	4.626 *	11.592 **
红树林面积 Mangrove area	8.827 *	0.011	26.9 **	4.393 *	0.646	29.329 **	8.097 *	0.625	21.311 **
东西岸 East and West bank	7.791 *	0.211	13.551 **	4.575 *	0.161	13.442 **	1.705	0.001	9.875 **
I×A	0.963	0.169	2.074	0.084	0.025	5.824 **	1.230	0	10.202 **
I×EW	2.002	9.977 **	8.249 **	1.645	5.266 *	3.547	2.233	2.286	1.818
A×EW	1.089	5.199 *	0.028	2.151	2.534	0.317	5.212 *	0.343	2.320
因素 Factor	个体数 Number			物种数 Species number			生物量 Biomass		
人类活动强度 Human activity intensity	0.317	3.28	2.227	0.064	11.452 **	28.523 **	0.899	1.125	12.103 **
红树林面积 Mangrove area	12.935 *	2.303	5.680 *	0	0.147	7.646 **	20.398 **	1.709	5.560 *
东西岸 East and West bank	8.992 *	1.677	15.208 **	28.808 **	1.577	0.739	24.241 **	12.480 **	0.609
I×A	15.637 *	7.178 *	12.072 **	43.8 **	3.423	6.770 *	12.743 **	3.882 *	5.493 *
I×EW	3.077	3.166	5.271 *	1.080	20.381 **	19.190 **	0.257	0.409	0.068
A×EW	26.468 *	8.533 *	34.531 **	23.987 **	17.796 **	16.743 **	8.406 **	1.317	10.002 **

数值为方差分析的 F 值; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; I×A: 人类活动强度 Human activity intensity×红树林面积 Mangrove area; I×EW: 人类活动强度 Human activity intensity×东、西岸 East and West bank; A×EW: 红树林面积 Mangrove area×东西岸 East and West bank

和城镇用地的面积占比对红树林生境和鱼类丰度已产生了负面影响。研究还发现青斑细棘虾虎鱼和短吻缙虾虎鱼等杂食性鱼类丰度与耕地、城镇用地和林地的面积占比均呈正相关,优势肉食性鱼类如眶棘双边鱼的丰度则均呈负相关(图 5),可能是这些土地变化促进了红树林中浮游生物的生长,为杂食性鱼类提供了更多的食物来源,但破坏了底层水生生物的栖息地和食物来源,致使肉食性鱼类丰度下降。同时也说明了红树林周边种植的经济林,未能起到有效缓解水质污染的作用。

值得注意的是,研究发现养殖塘的面积占比与养殖鱼类如鳊、前鳞鲃和尼罗罗非鱼的丰度均呈正相关关系(图 5),可见红树林的鱼类群落结构可能受到了周边养殖逃逸鱼类的影响。雷州半岛各红树林周边均有一定面积的养殖塘,本研究发现除养殖鱼类外,养殖塘面积占比与大多数红树林本土鱼类如青斑细棘虾虎鱼、眶棘双边鱼等的丰度在三个季度均呈负相关(图 5)。大量研究发现水产养殖是导致红树林生态功能退化的主要原因之一,一方面是由于养殖塘排放的废水中可能含有高浓度的氮、磷等营养物质,进入红树林海域会导致水体富营养化,从而影响鱼类群落结构;另一方面是养殖塘中的鱼类可能患有疾病,这些病原体可能通过水流传播入红树林,从而影响鱼类群落的健康^[26-29]。如流沙湾周边养殖塘以红虫养殖为主,养殖饲料通常为甘蔗渣、鸽子粪、淤泥等^[30],养殖污水直接排入红树林,排水频率较高,红树林水体呈褐色并伴有恶臭味,水质污染严重,致使流沙湾鱼类多样性指数、个体数、物种数和生物量均较低。

3.2 雷州半岛红树林鱼类群落结构及资源变化

本研究在雷州半岛七片红树林共采集鉴定鱼类 49 种,和安红树林的鱼类种数最多,为 31 种,流沙湾的种数最少,仅 16 种(附表 1)。共采集鲈形目鱼类物种数占比 75.5%,其中,虾虎鱼科物种数占比 30.61%,均为红树林常见鱼类。与吴映明等^[31]在高桥使用笼网渔获的物种组成相当,说明雷州半岛红树林鱼类的主要物种组成未发生显著变化。在秋季调查中,北潭、企水、附城、和安和东里鱼类种类数(11 种、12 种、17 种、17 种和 21 种)均低于 2002 年调查种类数(58 种、22 种、33 种、39 种和 27 种)^[32]。高桥红树林鱼类共 19 种,亦低于 2002 年、2005 和 2006 年相近季节调查数量(41 种、48 种和 32 种)^[33]。2017 年多次调查结果显示高桥鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数平均值均大于 2.5^[31],而本研究鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数平均值均低于 1.5。本研究共捕获鱼类 12113 尾,渔获量 56423g,远低于叶宁等^[33]仅在高桥主要渔获的 52612 尾,165436g(表 5)。以上结果表明,尽管不同研究调查的网具和调查方法及强度存在差别和特异性,对捕获鱼类会产生一定影响,但不同红树林鱼类多样性均呈现出随时间变化而下降的趋势。研究发现雷州半岛红树林周边由于砍伐造田、围海养殖等开发活动严重破坏了红树林格局和生境,可能是引起鱼类资源下降的重要原因^[34-35]。

表 5 雷州半岛红树林渔获数据与历史渔获数据对比

Table 5 Comparison of mangrove catch data and historical catch data in the Leizhou Peninsula

变量 Variables	本次数据 This data	2002 年	2016—2017 年 (高桥)	2002、2005、2006 年 (高桥)
物种数 Species				
高桥	28	40	47	75
北潭	21	58	—	—
企水	22	22	—	—
附城	21	33	—	—
和安	31	39	—	—
东里	28	27	—	—
鲈形目比例 Proportion of Perciformes/%	75.50	51.20	62.77	56
虾虎鱼科比例 Proportion of Gobiidae/%	30.61	16.54	30.85	13.33
个体数 Number/尾	12113	—	10918	52612
渔获量 Catches/g	56423	—	138.2	165436
Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	<1.5	—	>2.5	—
网具类型 Network type	笼网	多种网具	笼网	陷阱 笼壶 地拉网 刺网、耙刺 敷网
采样总天数 Total sampling days /d	9	—	60	2—3
采样点个数 Sampling number /个	3	—	6	7
参考文献 References	—	何秀玲等 ^[32]	吴映明等 ^[31]	叶宁等 ^[33]

4 结论

本研究基于雷州半岛七片红树林 21 条潮沟的鱼类调查数据,并结合土地利用数据分析得出结论如下:

共采集鱼类 49 种,12113 尾,56423g,隶属 8 目 25 科。各红树林区鱼类 Shannon-Wiener 多样性指数为 0—2.5, Simpson 多样性指数为 0—0.9, Pielou 均匀度指数为 0—1。

人类活动强度对鱼类多样性指数和物种数均呈显著正相关($P < 0.05$)。除秋冬季北潭与流沙湾外,各红树林间鱼类群落均有显著差异($P < 0.05$)。城镇用地、耕地和林地的面积占比对青斑细棘虾虎鱼、短吻缙虾虎鱼等杂食性鱼类和眶棘双边鱼、嵴塘鳢等肉食性鱼类丰度分别呈正影响和负影响,养殖废水的排放,已影响到红树林本土物种,加之红树林周边的养殖可能增加了鲮、尼罗罗非鱼和前鳞鲷等养殖逃逸鱼类的丰度,说明人类活动已经在一定程度上影响了红树林的鱼类群落结构,加强红树林周边土地利用的合理规划,可作为红树林鱼类资源保护的重要手段。

参考文献(References):

- [1] 徐姗楠,陈作志,李适宇.红树林水生动物栖息地功能及其渔业价值.生态学报,2010,30(1):186-196.
- [2] Pantallano A D S, Bobiles R U, Nakamura Y. Dependence of fish on subtropical riverine mangroves as habitat in the Ryukyu Islands, Japan. Fisheries Science, 2018, 84(4): 613-625.
- [3] Singkran N, Sudara S. Effects of changing environments of mangrove creeks on fish communities at trat bay, Thailand. Environmental Management, 2005, 35(1): 45-55.
- [4] Lugendo B R, Nagelkerken I, Kruitwagen G, Van Der Velde G, Mgya Y D. Relative importance of mangroves as feeding habitats for fishes: a comparison between mangrove habitats with different settings. Bulletin of Marine Science -Miami-, 2007, 80(3): 497-512.
- [5] Clynick B, Chapman M G. Assemblages of small fish in patchy mangrove forests in Sydney Harbour. Marine and Freshwater Research, 2002, 53(3): 669-677.
- [6] Bernardino A F, Sanders C J, Bissoli L B, de O Gomes L E, Kauffman J B, Ferreira T O. Land use impacts on benthic bioturbation potential and carbon burial in Brazilian mangrove ecosystems. Limnology and Oceanography, 2020, 65(10): 2366-2376.
- [7] Dinesh R, Chaudhuri S G. Soil biochemical/microbial indices as ecological indicators of land use change in mangrove forests. Ecological Indicators, 2013, 32: 253-258.
- [8] Erazo N G, Bowman J S. Sensitivity of the mangrove-estuarine microbial community to aquaculture effluent. iScience, 2021, 24(3): 102204.
- [9] Carugati L, Gatto B, Rastelli E, Lo Martire M, Coral C, Greco S, Danovaro R. Impact of mangrove forests degradation on biodiversity and ecosystem functioning. Scientific Reports, 2018, 8: 13298.
- [10] 韩维栋,黄剑李,李锡冲.雷州半岛红树林湿地的生态价值评估.泉州师范学院学报,2012,30(4):62-66.
- [11] 梁姗姗,刘捷,苏尚柯,陈光程,陈顺洋,陈彬,刘文华,胡文佳.海平面上升和土地利用驱动下红树林生境脆弱性研究.中国环境科学,2023,43(1):266-275.
- [12] 唐秋霞,王友绍.雷州半岛红树林群落特征及其分布格局.生态科学,2021,40(5):23-32.
- [13] 何斌源,赖廷和.广西北部湾红树林湿地海洋动物图谱.北京:科学出版社,2013:160-219.
- [14] 颜云榕,易木荣,冯波.南海经济鱼类图鉴.北京:科学出版社,2021:24-415.
- [15] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [16] Pielou E C. Ecological Diversity. New York: Wiley, 1975:1-165.
- [17] 陈国宝,李永振,陈新军.南海主要珊瑚礁水域的鱼类物种多样性研究.生物多样性,2007,15(4):373-381.
- [18] 黄孟勤,李阳兵,李明珍,陈爽,曾晨岑,张冰,夏春华.三峡库区人类活动强度与景观格局的耦合响应.生态学报,2022,42(10):3959-3973.
- [19] Zhang X S, Xu Z C. Functional coupling degree and human activity intensity of production - living - ecological space in underdeveloped regions in China: case study of Guizhou Province. Land, 2021, 10(1): 56.
- [20] 徐勇,孙晓一,汤青.陆地表层人类活动强度:概念、方法及应用.地理学报,2015,70(7):1068-1079.
- [21] 刘燕山,谷先坤,唐晟凯,李大命,曾庆飞,陆建明,毛志刚,殷稼雯,陈辉辉,沈冬冬,何浩然,张彤晴.东太湖鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系.生态学报,2021,41(2):769-780.
- [22] 刘伟,张远,高欣,贾晓波,马淑芹,刘思思.浑河流域鱼类群落特征及其与环境因子的关系.环境工程技术学报,2016,6(3):266-274.

[23] Trautwein C, Schinegger R, Schmutz S. Cumulative effects of land use on fish metrics in different types of running waters in Austria. *Aquatic Sciences*, 2012, 74(2): 329-341.

[24] 高欣, 丁森, 张远, 马淑芹, 刘思思, 孟伟. 鱼类生物群落对太子河流域土地利用、河岸带栖息地质量的响应. *生态学报*, 2015, 35(21): 7198-7206.

[25] Matthews W J. *Patterns in freshwater fish ecology*. New York: Chapman and Hall, 1998.

[26] 宇文青. 海水养殖对海洋环境影响的探讨. *海洋开发与管理*, 2008, 25(12): 113-117.

[27] Richards D R, Friess D A. Rates and drivers of mangrove deforestation in Southeast Asia, 2000-2012. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(2): 344-349.

[28] 覃盈盈, 罗万次, 梁铭忠, 魏明月, 高长颖, 郑海雷. 虾塘养殖对红树林沉积物和间隙水理化性质的影响. *农业现代化研究*, 2021, 42(2): 357-366.

[29] 谭振. 水产养殖对红树林湿地水质影响评价. *热带林业*, 2021, 49(4): 72-76.

[30] 彭小彤, 郑伟文, 冯德庆, 宋铁英, 陈永聪. 水产上的几种“红虫”及其养殖. *中国水产*, 1994, (9): 26-27.

[31] 吴映明, 郑培珊, 刘妮, 唐以杰, 崔志民, 黄飘平, 黄芳, 王晓萍. 广东红树林区鱼类物种多样性. *中山大学学报: 自然科学版*, 2018, 57(5): 104-114.

[32] 何秀玲, 叶宁, 宣立强. 雷州半岛红树林海区的鱼类种类调查. *湛江海洋大学学报*, 2003, 23(3): 3-10.

[33] 叶宁, 吴晓东, 张苇. 湛江高桥红树林区鱼类调查. *广东海洋大学学报*, 2007, 27(6): 55-61.

[34] 杨卫华, 高会旺, 张永举. 海水养殖对近岸海域环境影响的研究进展. *海洋湖沼通报*, 2006(1): 100-107.

[35] 袁彦婷, 丁振华, 张玲, 龙江平, 卢豪良, 刘洋, 潘家永. 土地利用方式改变对红树林沉积物中营养元素含量的影响. *地球与环境*, 2012, 40(3): 385-390.

附表 1 雷州半岛各红树林区物种名录

Appendix table 1 Species list of mangrove forests in the Leizhou Peninsula

物种 Species	东岸 East Bank			西岸 West Bank				食性 Feeding habits
	东里	附城	和安	高桥	北潭	企水	流沙湾	
(一) 鲱形目 Clupeiformes								
(1) 鳀科 Engraulidae								
1. 康氏侧带小公鱼 <i>Stolephorus commersonii</i>			*	*	*		*	杂食性
2. 中华侧带小公鱼 <i>Stolephorus chinensis</i>				*		*		杂食性
(2) 鲱科 Clupeidae								
3. 日本海鲷 <i>Nematalosa japonica</i>				*	*			杂食性
4. 汉氏棱鳀 <i>Thryssa hamiltonii</i>		*	*	*	*			肉食性
(二) 颌针鱼目 Beloniformes								
(3) 颌针鱼科 Belonidae								
5. 尾斑柱颌针鱼 <i>Strongylura strongylura</i>	*	*			*			肉食性
(4) 鱺科 Hemiramphidae								
6. 异鳞鱺 <i>Zenarchopterus kampeni</i>		*		*				杂食性
7. 简氏下鱺鱼 <i>Hyporhamphus gernaerti</i>	*		*	*	*	*	*	肉食性
(三) 鲈形目 Perciformes								
(5) 鲷科 Leiognathidae								
8. 颈斑鲷 <i>Nuchequula nuchalis</i>	*		*					杂食性
9. 短吻鲷 <i>Leiognathus brevirostris</i>			*	*	*	*	*	肉食性
(6) 鲷科 Sparidae								
10. 黑棘鲷 <i>Acanthopagrus schlegelii</i>	*							杂食性
11. 黄鳍棘鲷 <i>Acanthopagrus latus</i> [△]	*		*	*		*	*	杂食性
(7) 仿石鲈科 Haemulidae								
12. 大斑石鲈 <i>Pomadourus maculatus</i>			*					肉食性
(8) 花鲈科 Lateolabracidae								
13. 日本花鲈 <i>Lateolabrax japonicus</i>				*		*	*	肉食性
(9) 尖吻鲈科 Latidae								
14. 尖吻鲈 <i>Lates calcarifer</i>	*							肉食性
(10) 金钱鱼科 Scatophagidae								
15. 金钱鱼 <i>Scatophagus argus</i>		*						杂食性
16. 多纹钱蝶鱼 <i>Selenotoca multifasciata</i>			*					杂食性

续表

物种 Species	东岸 East Bank			西岸 West Bank				食性 Feeding habits
	东里	附城	和安	高桥	北潭	企水	流沙湾	
(11) 鲷科 Theraponidae								
17. 细鳞鲷 <i>Terapon jarbua</i> [△]	*	*	*	*	*	*		杂食性
(12) 丽鱼科 Cichlidae								
18. 尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i> [△]	*	*	*	*		*		杂食性
19. 齐氏罗非鱼 <i>Coptodon zillii</i> [△]	*			*	*		*	杂食性
(13) 鲹科 Carangidae								
20. 布氏鲳鲹 <i>Trachinotus blochii</i> [△]						*		肉食性
(14) 石首鱼科 Sciaenidae								
21. 半斑黄姑鱼 <i>Nibea semifasciata</i>				*	*		*	肉食性
(15) 双边鱼科 Ambassidae								
22. 眶棘双边鱼 <i>Ambassis gymnocephalus</i>	*	*	*	*	*	*	*	肉食性
(16) 塘鳢科 Eleotridae								
23. 嵴塘鳢 <i>Butis butis</i>	*		*	*	*			肉食性
24. 锯嵴塘鳢 <i>Butis koilomatodon</i>	*		*	*	*			肉食性
25. 中华乌塘鳢 <i>Bostrychus sinensis</i>	*	*	*	*	*	*	*	肉食性
(17) 鲷科 Blenniidae								
26. 斑点肩鳃鲷 <i>Omobranchus punctatus</i>	*						*	杂食性
(18) 鱧科 Sillaginidae								
27. 多鳞鱧 <i>Sillago sihama</i>	*	*	*	*	*	*		杂食性
(19) 虾虎鱼科 Gobiidae								
28. 斑尾刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius ommaturus</i>	*	*	*		*			肉食性
29. 大弹涂鱼 <i>Boleophthalmus pectinirostris</i>	*	*	*					杂食性
30. 弹涂鱼 <i>Periophthalmus modestus</i>	*	*		*		*		杂食性
31. 雷氏蜂巢虾虎鱼 <i>Favonigobius reichei</i>	*		*			*	*	杂食性
32. 纹缟虾虎鱼 <i>Tridentiger trigonocephalus</i>			*	*		*		肉食性
33. 髯缟虾虎鱼 <i>Tridentiger barbatus</i>		*						肉食性
34. 小鳞沟虾虎鱼 <i>Oxyurichthys microlepis</i>			*					杂食性
35. 短吻缟虾虎鱼 <i>Amoya brevirostris</i>	*	*	*	*	*	*	*	杂食性
36. 青弹涂鱼 <i>Scartelaos histophorus</i>	*		*					杂食性
37. 斑纹舌虾虎鱼 <i>Glossogobius olivaceus</i>		*	*					杂食性
38. 舌虾虎鱼 <i>Glossogobius giuris</i>	*	*						肉食性
39. 横带犁突虾虎鱼 <i>Myersina fasciatus</i>	*						*	杂食性
40. 青斑细棘虾虎鱼 <i>Acentrogobius viridipunctatus</i>	*	*	*	*	*	*	*	杂食性
41. 犬牙细棘虾虎鱼 <i>Acentrogobius caninus</i>	*	*	*	*	*	*		杂食性
42. 触角鳞沟虾虎鱼 <i>Oxyurichthys tentacularis</i>			*					杂食性
(20) 银鲈科 Gerreidae								
43. 红尾银鲈 <i>Gerres oyena</i>	*		*	*	*	*		肉食性
(四) 鳗鲡目 Anguilliformes								
(21) 蛇鳗科 Ophichthyidae								
44. 杂食豆齿鳗 <i>Pisodonophis boro</i>		*	*			*		肉食性
(五) 鲀形目 Tetraodontiformes								
(22) 鲀科 Tetraodontidae								
45. 星点多纪鲀 <i>Takifugu niphobles</i>				*		*		肉食性
(六) 鲉形目 Scorpaeniformes								
(23) 毒鲉科 Synanceiidae								
46. 单指虎鲉 <i>Minous monodactylus</i>				*				肉食性
(七) 鲻形目 Mugiliformes								
(24) 鲻科 Mugilidae								
47. 前鳞鲛 <i>Planiliza affinis</i> [△]	*	*	*	*	*	*	*	植食性
48. 鲻 <i>Mugil cephalus</i> [△]	*	*	*	*	*	*	*	杂食性
(八) 鲽形目 Pleuronectiformes								
(25) 鲷科 Soleidae								
49. 东方宽箬鲷 <i>Brachirus orientalis</i>			*					肉食性
汇总 Summary	28	21	31	28	21	22	16	

△: 养殖鱼类; *: 该红树林区出现的鱼类