

广西银滩南部海域海洋牧场鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系

于 杰^{1,2}, 邹建伟³, 陈国宝^{1,2}

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300

2. 农业农村部海洋牧场重点实验室/国家数字渔业(海洋牧场)创新分中心/农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站/广东省渔业生态环境重点实验室/广东省海洋休闲渔业工程技术研究中心, 广东 广州 510300

3. 北海市水产技术推广站, 广西 北海 536000

摘要: 适时评价国家级海洋牧场示范区的鱼类资源状况, 对推进海洋牧场建设具有重要意义。基于 2022 年 4 月广西银滩南部海域海洋牧场渔业资源调查数据, 分析了鱼类资源特征、群落结构及其与环境因子的相关性, 以为北部湾海洋牧场生态效应研究提供参考。结果显示, 示范区鱼类数量密度、生物量密度和种类数均高于对照区。示范区和对照区鱼类物种组成在种级水平上为中等不相似, 且 2 个区域鱼类群落均受到一定程度的干扰。研究区鱼类群落可划分为 4 个具有显著性差异的类群 ($p < 0.05$), 分别位于示范区 B 区和对照区南部站位 (类群 I)、对照区北部站位 (类群 II)、示范区 A 区和 B 区交界处 (类群 III) 和示范区 A 区 (类群 IV)。类群 I 和 III 的平均相异性指数为 53.88%, 贡献率排名前 3 位的分歧种为吉打副叶鲔 (*Alepes djedaba*)、蓝圆鲹 (*Decapterus maruadsi*) 和竹荚鱼 (*Trachurus japonicus*); 类群 III 和 IV 的平均相异性指数为 48.85%, 贡献率排名前 3 位的分歧种为竹荚鱼、短吻鲷 (*Leiognathus brevirostris*) 和花斑蛇鲻 (*Saurida undosquamis*)。水温和化学需氧量是显著影响研究区鱼类群落结构的主要环境因子, 溶解氧和浮游植物密度的影响稍弱。

关键词: 海洋牧场; 鱼类群落结构; 环境因子; 广西银滩

中图分类号: S 931.9

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Characteristics of fish community structure and its relationship with environmental factors in marine ranching zone in southern area of Yintan in Guangxi

YU Jie^{1,2}, ZOU Jianwei³, CHEN Guobao^{1,2}

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China

2. Key Laboratory of Marine Ranching, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/National Digital Fisheries (Marine Ranching) Innovation Sub-Center/Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environments, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment/Guangdong Engineering Technology Research Center of Marine Recreational Fishery, Guangzhou 510300, China

3. Beihai Fishery Technology Extension Station, Beihai 536000, China

收稿日期: 2024-05-10; 修回日期: 2024-05-30

基金项目: 北海市政府采购项目 (BHJC2022-C3-00009-XYZJ); 广东省重点领域研发计划项目 (2020B1111030002); 农业农村部渔业发展补助资金项目 (SCSFRI2024A012)

作者简介: 于 杰 (1980—), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为海洋渔业资源和海洋遥感。E-mail: yujiescs@aliyun.com

通信作者: 陈国宝 (1975—), 男, 研究员, 硕士, 研究方向为渔业资源及渔业声学。E-mail: chengb98@163.com

Abstract: Timely assessment of fish resources in state-level marine ranching demonstration zone is important in promoting the construction of marine ranching. Based on the fishery resources survey data in the southern area of Guangxi Yintan in April 2022, we analyzed the characteristics of fish resources, community stability, fish community structure and their correlation with environmental factors to provide references for research on the ecological effects of marine ranching in Beibu Gulf. The results show that the fish individual density, biomass density and number of species in the demonstration zone were higher than those in the control zone. The fish species composition in the demonstration and control zones was moderately dissimilar at species level. In addition, fish communities in both zones were somewhat disturbed. The fish community in the survey area was divided into four significantly different clusters ($p < 0.05$), which were located in the southern station of the demonstration zone B and the control zone (Cluster I), the northern station of the control zone (Cluster II), the junction of the demonstration zone A and B (Cluster III), and the demonstration zone A (Cluster IV). The average dissimilarity index of Cluster I and III was 53.88%, and the divergent species that ranked in the top three in terms of their contribution were *Alepes djedaba*, *Decapterus marauds* and *Trachurus japonicus*, while the average dissimilarity index of Cluster III and IV was 48.85%, with the top three divergent species (*T. japonicus*, *Leiognathus brevirostri* and *Saurida undosquamis*) contributing to the dissimilarity index. Water temperature and chemical oxygen demand were the main environmental factors significantly influencing the structure of the fish community in the survey area, while dissolved oxygen and phytoplankton density had a slightly weaker effect.

Keywords: Marine ranching; Fish community structure; Environmental factor; Yintan in Guangxi

海洋牧场是一种促进海洋生产力开发和海洋生物资源生产的渔业模式,是增加人类优质蛋白供给的重要途径^[1-2]。海洋牧场建设主要包括环境营造和生物增殖2个部分,而人工鱼礁是环境营造的主要方式之一,通过投放人工鱼礁为海洋生物创造具有索饵和庇护功能的栖息地。海洋牧场环境营造改变了周边海域的生态环境,进而对海洋生物的分布造成影响^[3-4]。鱼类在海洋生物群落中占据较高营养级,是渔业资源的重要组成部分,研究海洋牧场对鱼类资源的影响,是了解海洋牧场这一生态系统的主要途径之一^[5]。海洋牧场既可以通过诱集鱼类直接影响鱼类群落组成,又可以通过改变环境促使鱼类空间迁移,间接对鱼类群落结构产生影响^[6]。海洋牧场对鱼类资源的影响研究主要集中在揭示物种更迭、生物量、数量密度和多样性等指标的变化等方面^[4,7-8],在群落尺度上的相似性、稳定性和分类群方面的研究较为缺乏,对海洋牧场鱼类群落变动环境驱动机制的研究还不够深入。

北部湾位于南海西北部,雷州半岛和海南岛以西,北依中国大陆,西临越南,通过琼州海峡和南部湾口与南海相通^[9-10]。北部湾是我国南海重要的鱼类产卵场、育幼场和索饵场^[11],湾内渔业资源丰富,历史上盛产带鱼(*Trichiurus lepturus*)、二长棘鲷(*Paerargyrops edita*)、竹荚鱼(*Trachurus japonicus*)、大头白姑鱼(*Pennahia macrocephalus*)、短尾大眼鲷(*Priacanthus macracanthus*)等经济鱼类。20世纪60年代开始北部湾渔业资源开发强度

大幅增加,沿岸工业和海上运输业发展迅速,对鱼类资源及其栖息地环境造成巨大压力。根据相关资料,北部湾鱼类资源在20世纪80—90年代已出现衰退趋势,呈现鱼种小型化、低值化现象^[11-14]。近年来,海洋牧场已成为世界各国渔业资源养护的重要手段,从2016年至今,北部湾已成立的国家级海洋牧场示范区有4个,但这些海洋牧场区的鱼类资源状况仍鲜有报道,适时对国家级海洋牧场示范区的鱼类资源状况进行科学评价,对推进北部湾海洋牧场建设具有重要意义。

本研究以广西壮族自治区北海市银滩南部海域国家级海洋牧场示范区(下文简称“银滩南示范区”)为研究对象,于2022年4月开展其渔业资源和生态环境现场调查,研究鱼类资源的空间分布和群落特征,并分析环境因子对群落物种组成的影响,为北部湾海洋牧场生态效应研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 调查方法

银滩南示范区海域面积为315.3 hm²,以列入国家级海洋牧场示范区的时间为界,将列入前的建设区域称A区,列入后的建设区域则为B区(图1)。其中,A区投礁时间为2010年8月—2016年1月,B区投礁时间为2021年10月—2022年4月。银滩南示范区投礁类型为钢筋混凝土箱形结构礁,投礁区底质以砂质为主。2022年4月,采用底拖网对银滩南示范区进行渔业资源与

环境调查,在银滩南示范区设置 11 个站位 (S1—S11),在距离银滩南示范区东边界以东约 3.7 km

海域的对照区设置 3 个站位 (S12—S14),调查站位分布见图 1。

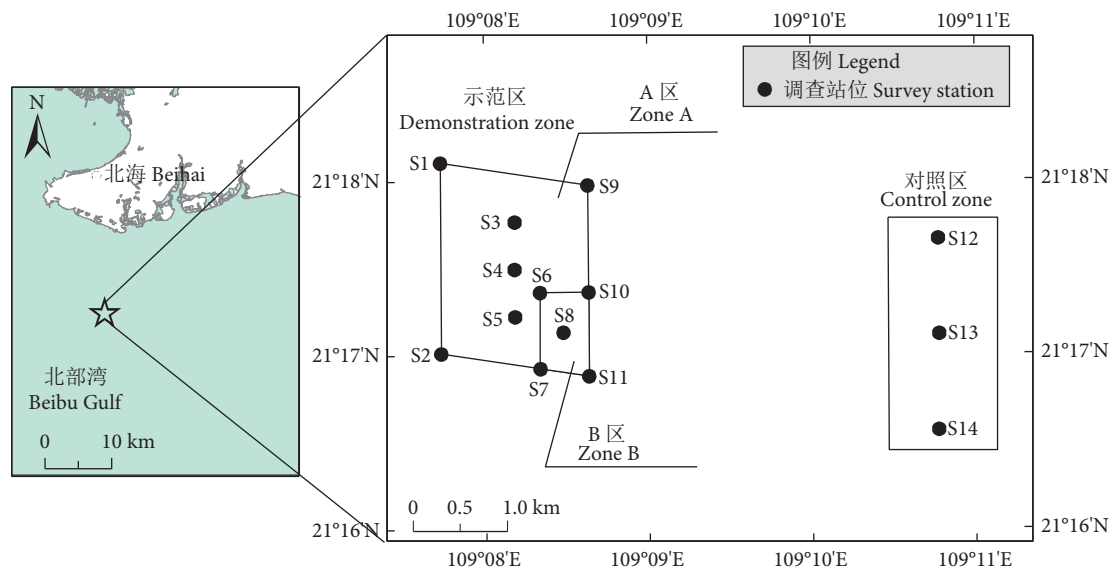


图1 调查站位示意图

Fig. 1 Location of survey stations

底拖网调查船主机功率 135 kW, 船长 21 m, 船宽 5.3 m, 型深 2.78 m。网具上纲长 9 m, 网衣长 30 m, 网囊长 2 m, 网衣网目 40 mm, 网囊网目 25 mm。调查船平均拖速控制在 3 kn 左右, 每网拖曳时长约 0.5 h。鱼类样品现场进行分类学鉴定和计数, 同时进行生物学测量, 记录体长和体质量等生物学参数。

本研究采用的环境数据为海水表层数据。现场利用手持式 YSI 多参数水质分析仪 (美国维赛公司) 测定水温、盐度和溶解氧 (Dissolved oxygen, DO) 等环境因子, 利用回声测深仪和萨氏盘分别测量水深和透明度。实验室采用紫外可见分光光度计 (UV-1800) 测定氮、磷营养盐, 采用碱性高锰酸钾法测定化学需氧量 (Chemical oxygen demand, COD)。

1.2 研究方法

1.2.1 渔业资源密度

渔业资源密度采用扫海面积法估算。由于调查船在各调查站位进行拖网作业时的拖曳时长有差异, 在对比不同站位的渔获情况时, 需要将渔获数据进行标准化处理, 以获得单位时间的渔获质量或尾数。渔业资源密度的计算公式为:

$$\rho = C / [a \times (1 - E)] \quad (1)$$

式中: ρ 为生物量密度 ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$) 或数量密度 ($\text{尾} \cdot \text{km}^{-2}$); C 为拖网渔获率 ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $\text{尾} \cdot \text{h}^{-1}$); a 为每小时扫海面积 ($\text{km}^2 \cdot \text{h}^{-1}$); E 为逃逸率 (取 0.5)。

1.2.2 差异显著性检验

通过计算得出示范区和对照区环境因子、资源密度和种类数的平均值、最小值和最大值, 对比分析这些要素的平均值在两个区域的差异情况, 并应用曼惠特尼 U 检验 (Mann-Whitney U test, MW U test) 方法检验差异的显著性。

1.2.3 物种组成相似性

采用 Jaccard 相似性系数分析示范区和对照区鱼类物种组成的相似性^[15], 计算公式为:

$$J = c / (a + b - c) \quad (2)$$

式中: a 为示范区鱼种数量; b 为对照区鱼种数量; c 为 2 个区域共有鱼种数量。

Jaccard 相似性系数越大表示两个海域之间鱼类物种组成的相似性程度越高, 相似性级别分为: $0 < J < 0.25$ 为极不相似, $0.25 \leq J < 0.50$ 为中等不相似, $0.50 \leq J < 0.75$ 为中等相似, $0.75 \leq J < 1.00$ 为极相似。

1.2.4 群落稳定性

采用丰度-生物量比较曲线 (Abundance biomass comparison curve, ABC 曲线) 和 W 统计量分析示范区和对照区鱼类群落的稳定性^[16-17]。 W 计算公式为:

$$W = \sum_{i=1}^S \frac{(B_i - A_i)}{50 \times (S - 1)} \quad (3)$$

式中: A_i 和 B_i 分别为第 i 种鱼的数量和生物量累

积百分比; S 为种类数。

当生物量曲线在丰度曲线上方时 ($W>0$), 群落结构稳定, 未受到明显干扰; 当生物量曲线位于丰度曲线下方时 ($W<0$), 群落受干扰程度较高; 当生物量曲线和丰度曲线相交时 (W 趋近于 0), 处于相对不稳定状态, 群落受到一定程度扰动。

1.2.5 群落结构

运用层次聚类分析 (Hierarchical clustering analysis, HCA) 和非度量多维标度排序 (Non-metric multidimensional scaling, NMDS) 方法分析调查海域鱼类群落的分类特征。用胁强系数 (Stress) 来衡量 NMDS 分析结果的优劣, 一般认为: $\text{Stress}<0.05$, 具有很好的代表性; $\text{Stress}<0.1$, 是一个好的排序; $\text{Stress}<0.2$, 图形具有一定的解释意义。采用相似性分析 (Analysis of similarities, ANOSIM) 方法检验不同群落类群间的差异显著性。应用相似性百分比 (Similarity percentage analysis, SIMPER) 分析各鱼种对不同类群组内相似性和组间相异性的贡献率, 获得引起类群间物种组成差异的主要鱼种。在 HCA 和 NMDS 分析前去除质量占总质量比例 $<0.1\%$ 的种类, 并对剩余的 35 个鱼种的数量密度进行 4 次方根转换^[18]。HCA、NMDS 和 SIMPER 均在 R 语言中进行。

1.2.6 群落结构与环境因子的关系

筛选出 14 种平均数量密度大于 $100 \text{ 尾}\cdot\text{km}^{-2}$ 或出现率大于 20% 的鱼种进行除趋势对应分析 (Detrended correspondence analysis, DCA), DCA 结果显示最大排序轴梯度长度小于 3, 因而选择冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 对鱼种和环境因子进行排序分析, 以探究环境因子对鱼类群落物种组成的影响。参与 RDA 分析的环境因子有水深、透明度、温度、盐度、DO、COD、总氮、总磷和浮游植物密度, 利用方差膨胀系数 (VIF) 进行多重共线性检测, 经多重共线性检测和前向选择, 最终保留了温度、盐度、DO、COD、总氮、总磷、透明度和浮游植物密度共 8 个环境因子。用蒙特卡洛检验获得全局模型、排序轴和每个环境因子的显著性。RDA 分析在 R 语言中进行, 在 RDA 分析前对数量密度进行 4 次方根转换, 对环境因子进行 $\log(x+1)$ 转换。

2 结果

2.1 示范区和对照区环境及鱼类资源特征差异分析

示范区和对照区之间的环境因子在水温、DO 和 COD 上存在显著性差异 (表 1)。示范区的

表1 示范区和对照区环境因子和渔获参数的均值、最小值和最大值
Table 1 Mean, minimum and maximum values of environmental factor and catch parameters in demonstration area and control area

环境因子 Environment factor	示范区 Demonstration zone	对照区 Control zone	显著性 Significance
	均值 (最小值~最大值) Mean (Minimum~Maximum)	均值 (最小值~最大值) Mean (Minimum~Maximum)	
水深 Water depth/m	11.69 (10.70~13.00)	11.87 (11.20~12.70)	n.s.
透明度 Transparency/m	3.76 (3.50~4.20)	3.83 (3.80~3.90)	n.s.
水温 Water temperature/℃	21.33 (20.90~21.80)	20.47 (20.40~20.60)	**
盐度 Salinity/‰	32.34 (32.09~32.56)	32.35 (32.30~32.41)	n.s.
溶解氧 Dissolved oxygen/(mg·L ⁻¹)	8.52 (8.45~8.62)	8.29 (8.10~8.50)	*
化学需氧量 Chemical oxygen demand/(mg·L ⁻¹)	1.69 (0.60~3.00)	2.85 (2.68~2.96)	*
总磷 Total phosphate/(mmol·L ⁻¹)	0.67 (0.27~3.31)	0.42 (0.35~0.49)	n.s.
总氮 Total nitrogen/(mmol·L ⁻¹)	38.64 (32.00~40.40)	41.40 (39.00~43.60)	n.s.
浮游植物密度 Phytoplankton density/(10 ³ 个·m ⁻³)	595 (250~977)	241 (215~266)	*
数量密度 Individual density/(尾·km ⁻²)	19 137 (14 839~32 997)	16 852 (14 439~20 038)	n.s.
生物量密度 Biomass density/(kg·km ⁻²)	1 897 (1 504~2 630)	1 244 (1 006~1 493)	*
种类数 Number of species	16 (11~21)	12 (11~13)	*

注: 根据 Mann-Whitney U 检验, n.s.. 无显著性差异; *. $p<0.05$; **. $p<0.01$ 。

Note: According to Mann-Whitney U test: n.s.. Insignificant difference; *. $p<0.05$; **. $p<0.01$.

水温和 DO 显著高于对照区, 而 COD 显著低于对照区, 表明示范区水体含氧量更加充足, 水温较温暖, 水质优于对照区。水深、透明度、盐度、总磷和总氮在示范区和对照区之间无显著性差异, 示范区水深、透明度、盐度和总氮均低于对照区, 而总磷略高于对照区。

示范区浮游植物密度显著高于对照区, 另外, 鱼类数量密度、生物量密度和种类数平均值均高于对照区, 分别为对照区的 1.14、1.53 和 1.33 倍。显著性水平检验结果显示示范区和对照区的鱼类生物量密度和种类数存在显著性差异, 而数量密度差异不显著(表 1)。

2.2 物种组成相似性和群落稳定性

示范区鱼类种类数为 56 种, 远高于对照区(23 种)。示范区与对照区共同种 19 种, 2 个区域在种水平上的相似性系数为 0.33, 表明在种水平上, 2 个生境间的相似性水平为中等不相似。

ABC 曲线分析结果表明(图 2), 示范区和对照区鱼类丰度曲线一直在生物量曲线上方, 最终交叉。示范区和对照区的 W 统计值均为负值, 介于 $-0.098 \sim -0.064$, 表明 2 个生境鱼类群落均受到一定的干扰。示范区丰度曲线和生物量曲线的间距较对照区更大, 说明示范区鱼类群落的受干扰程度大于对照区。

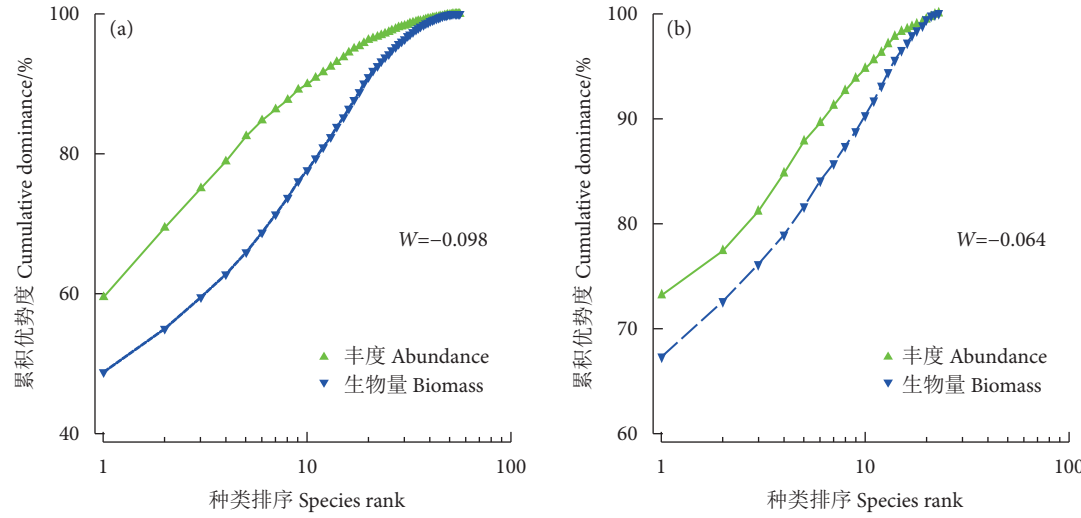


图2 示范区 (a) 和对照区 (b) 鱼类群落丰度-生物量比较曲线

Fig. 2 Abundance biomass comparison curve of fish community in demonstration zone (a) and control zone (b)

2.3 鱼类群落聚类及 NMDS 分析

图 3 为 HCA 和 NMDS 排序结果。NMDS 分析结果的 Stress 为 0.19, 表明该排序结果有一定的解

释意义。聚类分析与 NMDS 结果一致, 研究区鱼类群落分为 4 个类群, 分别为类群 I、II、III、IV (图 3), 类群间的 ANOSIM 检验结果表明 4 个类群

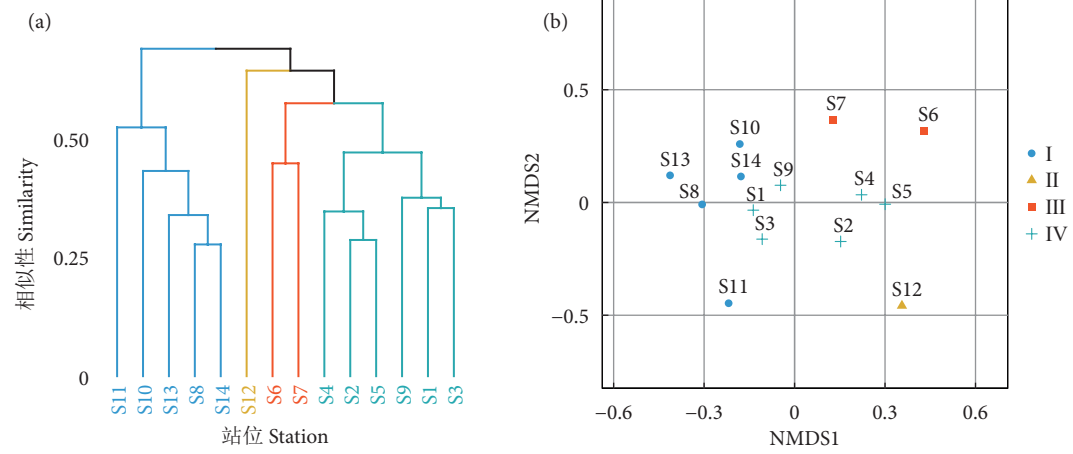


图3 银滩南示范区鱼类聚类分析 (a) 和非度量多维标度分析 (b)

Fig. 3 Cluster analysis (a) and NMDS (b) of fish community in southern station of demonstration zone in Yintan

间的差异显著 ($r=0.25, p<0.05$)。

类群 I 包括 S8、S10、S11、S13 和 S14 站位, 分布在调查海域的东南部, 其中 S8、S10 和 S11 在 B 区, S13 和 S14 在对照区南部, 组内平均相似性为 60.03%, 主要特征种 (贡献率大于 10% 的种类) 有二长棘鲷、蓝圆鲹 (*Decapterus maruadsi*)、黄斑篮子鱼 (*Siganus canaliculatus*) 和竹荚鱼。类群 II 只有 S12 1 个站位, 位于对照区北部。类群 III 包括 S6 和 S7, 位于示范区中部, 介于 A 区和 B 区的交界处, 组内平均相似性为 55.39%, 贡献率大于 10% 的种类有二长棘鲷、鹿斑仰口鲷 (*Secutor ruconius*)、侧带天竺鲷 (*Apogon lateralis*)、吉打副叶鲷 (*Alepes djedaba*) 和月尾兔头鲀 (*Lagocephalus lunaris*)。类群 IV (S1、S2、S3、S4、S5 和 S9 站位) 分布在示范区的西北部, 属于 A 区, 组内

平均相似性为 61.12%, 贡献率大于 10% 的种类有二长棘鲷、短吻鲷 (*Leiognathus brevirostris*) 和侧带天竺鲷。

类群 I 和 III 在地理位置上相邻, 2 个类群的平均相异性指数为 53.88%, 主要分歧种有 12 种 (贡献率 >4%), 其中, 吉打副叶鲷、魔拟鲉 (*Scorpaenopsis neglecta*)、鹿斑仰口鲷、纤羊舌鲷 (*Arnoglossus tenuis*)、细纹鲷 (*L. berbis*) 和侧带天竺鲷在类群 III 的平均数量密度高于类群 I, 而蓝圆鲹、竹荚鱼、黄斑篮子鱼、短吻鲷、毒拟鲉 (*S. diabolus*) 和斑鲹 (*Konosirus punctatus*) 在类群 I 的数量密度高于类群 III (表 2)。吉打副叶鲷、蓝圆鲹、竹荚鱼和斑鲹 4 种中上层鱼类的总贡献率为 22.5%; 魔拟鲉、黄斑篮子鱼、毒拟鲉和侧带天竺鲷 4 种恋礁性鱼类的总贡献率为 19.1%; 短吻鲷、鹿斑仰口

表2 鱼类不同类群组间差异和主要分歧种及其贡献率 (>4%)
Table 2 Differences in community structure and contribution rates of different species (>4%)

类群 Cluster	平均相异性 Average dissimilarity/%	种类 Species	数量密度变化 Change in individual density	贡献率 Contribution rate/%
类群 I & III Cluster I & III	53.88	吉打副叶鲷 <i>Alepes djedaba</i>	增加	6.8
		蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i>	减少	6.1
		竹荚鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	减少	5.6
		魔拟鲉 <i>Scorpaenopsis neglecta</i>	增加	5.5
		黄斑篮子鱼 <i>Siganus canaliculatus</i>	减少	5.2
		短吻鲷 <i>Leiognathus brevirostris</i>	减少	4.9
		鹿斑仰口鲷 <i>Secutor ruconius</i>	增加	4.4
		纤羊舌鲷 <i>Arnoglossus tenuis</i>	增加	4.4
		细纹鲷 <i>Leiognathus berbis</i>	增加	4.3
		毒拟鲉 <i>Scorpaenopsis diabolus</i>	减少	4.3
		侧带天竺鲷 <i>Apogon lateralis</i>	增加	4.1
		斑鲹 <i>Konosirus punctatus</i>	减少	4.0
类群 III & IV Cluster III & IV	48.85	竹荚鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	增加	8.7
		短吻鲷 <i>Leiognathus brevirostris</i>	增加	6.6
		花斑蛇鲷 <i>Saurida undosquamis</i>	增加	5.8
		蓝圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i>	增加	5.4
		魔拟鲉 <i>Scorpaenopsis neglecta</i>	减少	5.2
		吉打副叶鲷 <i>Alepes djedaba</i>	减少	5.1
		鲷 <i>Platycephalus indicus</i>	增加	4.9
		细纹鲷 <i>Leiognathus berbis</i>	减少	4.7
		少鳞鳢 <i>Sillago japonica</i>	增加	4.4
		纤羊舌鲷 <i>Arnoglossus tenuis</i>	减少	4.4
		鹿斑仰口鲷 <i>Secutor ruconius</i>	增加	4.1
		赤鼻棱鲷 <i>Thryssa kammalensis</i>	增加	4.0

蝠、纤羊舌鲆和细纹鲷 4 种近底层和底层鱼类的贡献率为 18%。

类群 III 和 IV 均位于示范区内,且在地理位置上相邻,2 个类群的平均相异性指数为 48.85%,主要分歧种有 12 种(贡献率>4%),其中,竹荚鱼、短吻鲷、花斑蛇鲷(*Saurida undosquamis*)、蓝圆鲷、鲷(*Platycephalus indicus*)、少鳞鲷(*Sillago japonica*)、鹿斑仰口鲷和赤鼻棱鲷(*Thryssa kammalensis*)在类群 III 的平均数量密度高于类群 IV,而魔拟鲷、吉打副叶鲷、细纹鲷和纤羊舌鲆在类群 IV 有更高的数量密度(表 2)。中上层鱼类(竹荚鱼、蓝圆鲷、吉打副叶鲷、赤鼻棱鲷)的总贡献率为 23.2%;恋礁性鱼类(魔拟鲷)的总贡献率为 5.2%;近底层和底层鱼类(短吻鲷、花斑蛇鲷、鲷、细纹鲷、少鳞鲷、纤羊舌鲆、鹿斑仰口鲷)的总贡献率为 34.9%。

2.4 鱼类群落结构与环境因子的关系

RDA 分析结果揭示了环境因子对鱼类群落的影响(图 4)。排序轴 1 和 2 的特征值分别为 3.521 3 和 2.781 5,两轴分别解释了 25.15% 和 19.87% 的鱼类群落变化。蒙特卡洛置换检验表明环境因子显著影响到物种分布($p=0.002$),排序轴 1 ($p=0.004$)和 2 ($p=0.025$)也均显著影响物种分布,水温和 COD 是对鱼类群落主要物种组成影响最显著的环境因子($p<0.01$),DO 和浮游植物密度与鱼类群落结构显著相关($p<0.05$),而其他环境因子与鱼类群落结构变化无显著相关性(表 3)。8 个环境因子共解释了 76.40% 的鱼类群落变异程度。

主要环境因子中,COD 与排序轴 1 呈正相关,蓝圆鲷、黄斑篮子鱼、魔拟鲷、鹿斑仰口鲷和少鳞鲷为杂食性和肉食性种类,与 COD 密切相关;DO 与排序轴 1 呈负相关,随着 DO 的增加,赤鼻棱鲷、细纹鲷、月尾兔头鲷、侧带天竺鲷和二长棘鲷的数量密度增加;水温和浮游植物密度与排序轴 2 呈正相关,鲷、花斑蛇鲷、竹荚鱼和短吻鲷的分布受水温影响较大,花斑蛇鲷和赤鼻棱鲷与浮游植物密度密切相关。

3 讨论

3.1 海洋牧场对鱼类群落物种组成相似性和群落稳定性的影响

银滩南示范区和对照区物种组成的相似性水平为中等不相似,表明 2 个区域在物种组成上存在一

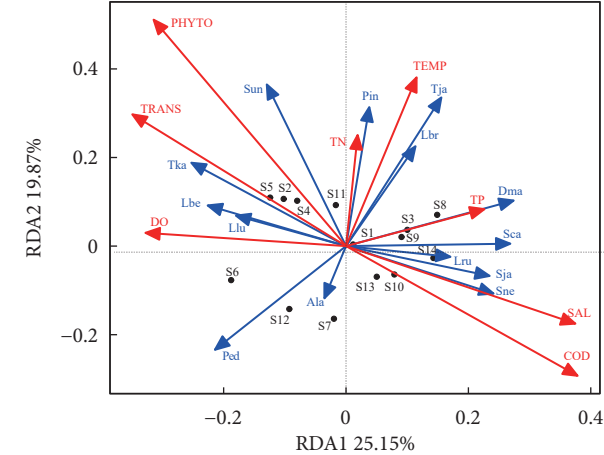


图4 银滩南示范区主要鱼种与环境因子的 RDA 分析
注: TEMP. 水温; SAL. 盐度; TRANS. 透明度; DO. 溶解氧; COD. 化学需氧量; TN. 总氮; TP. 总磷; PHYTO. 浮游植物密度; Ala. 侧带天竺鲷; Dma. 蓝圆鲷; Lbe. 细纹鲷; Lbr. 短吻鲷; Llu. 月尾兔头鲷; Lru. 鹿斑仰口鲷; Ped. 二长棘鲷; Pin. 鲷; Sca. 黄斑篮子鱼; Sja. 少鳞鲷; Sne. 魔拟鲷; Sun. 花斑蛇鲷; Tja. 竹荚鱼; Tka. 赤鼻棱鲷。

Fig. 4 Redundancy analysis between fish species and environmental factors in southern station of demonstration zone in Yintan

Note: TEMP. Temperature; SAL. Salinity; TRANS. Transparency; DO. Dissolved oxygen; COD. Chemical oxygen demand; TN. Total nitrogen; TP. Total phosphate; PHYTO. Phytoplankton density; Al. *A. lateralis*; Dma. *D. maruads*; Lbe. *L. berbis*; Lbr. *L. brevirostris*; Llu. *L. lunaris*; Lru. *L. ruconius*; Ped. *P. edita*; Pin. *P. indicus*; Sca. *S. canaliculatus*; Sja. *S. japonica*; Sne. *S. neglecta*; Sun. *S. undosquamis*; Tja. *T. japonicas*; Tka. *T. kammalensis*.

表3 RDA 分析结果显著性检验
Table 3 Significance test of redundancy analysis results

环境因子 Environment factor	F	p
水温 Water temperature	3.336 3	0.002**
化学需氧量 Chemical oxygen demand	2.806 3	0.005**
溶解氧 Dissolved oxygen	2.173 1	0.032*
浮游植物密度 Phytoplankton density	2.149 1	0.041*
总磷 Total phosphate	1.925 8	0.060
盐度 Salinity	1.325 2	0.225
透明度 Transparency	1.282 9	0.252
总氮 Total nitrogen	1.186 3	0.307

注: **. 在 0.01 水平上显著相关; *. 在 0.05 水平上显著相关。
Note: **. Significant correlation at 0.01 level; *. Significant correlation at 0.05 level.

定差异。这是由于示范区和对照区海洋环境存在差异,特别是在水温、DO、COD 和浮游植物密度上的差异非常显著,而不同鱼类对环境因子的适宜性要求迥异,鱼类具有向更有利于生存的环境迁移的趋向性。由于鱼类具备相对较强的游泳能力,在生

境选择上具有较高的自主性,因此,不同鱼类在环境差异明显的示范区和对照区间呈现出不同的选择性。从天津神堂^[19]和山东莱州湾海域^[20]的相似性结果来看,示范区与对照区的游泳动物组成一般处于中等不相似水平,不同季节的相似性指数也有差异,但基本介于0.25~0.50范围内。

从群落的稳定性来看,示范区和对照区均受到一定程度的干扰,大部分鱼类的丰度百分比高于生物量百分比,说明两个区域均以个体较小、生长快速、性成熟较早的 r 选择物种为主,这与前人对北部湾北部沿岸鱼类群落稳定性研究的结论一致^[21]。但从丰度曲线和生物量曲线间距对比来看,银滩南示范区的群落稳定性更高。示范区和对照区鱼类群落均以个体较小的种类占据优势数量,其中示范区小个体数量更占优势,说明示范区受扰动程度大于对照区,这可能与投礁时间较短、鱼礁生境尚未稳定、鱼类群落的稳定性较差有关。研究区的 W 值高于整个北部湾北部^[21],说明海洋牧场区受干扰程度降低,鱼类群落稳定性有所提升,牧场生境中较大个体的鱼类增多。

3.2 海洋牧场区鱼类聚集和群落结构特征

多项研究表明,海洋牧场示范区的数量密度和生物量密度均高于对照区^[19-20],本研究也得到相同结论,示范区的数量密度和生物量密度分别是对照区的1.14和1.53倍,其中生物量密度的差异非常显著,另外示范区在种类数上也占优势,说明银滩南示范区鱼类聚集效果明显。与海洋牧场相关的诸多研究均证实了海洋牧场鱼礁建设对鱼类的聚集效果^[22-23],比如在北戴河和獐子岛海洋牧场区,礁区生物量密度可达对照区的1.39~7.85倍,种类数增加10%以上^[24-25]。随着礁体建设时间的增加,海洋牧场区鱼类生物量密度和种类数也逐渐增加,如在杨梅坑海洋牧场,礁体建设第2和第3年生物量密度从建礁前的2.46倍增加至3.72倍,种类数从1.16倍增加至1.56倍^[4]。不同地区海洋牧场建设造成的渔业资源变化也存在差异,以鱼类种类数为例,唐山祥云湾海洋牧场投礁1年主要经济渔获物的生物总量是投礁前的2.5倍,种类数增加66.67%^[26];而在嵊泗马鞍列岛海域国家级海洋牧场区,投礁后3年礁区鱼类种类数增加45.8%^[8]。可见,海洋牧场建设后,礁区鱼类资源的生物量密度、数量密度和种类数均高于对照区,且随着建礁

时间的延长而增加,但增加幅度在不同海域海洋牧场间存在差异。

海洋牧场区鱼类群落结构存在地域差异,一方面与选址海域的本底鱼类群落种类组成有关,另一方面也受到鱼礁类型、规模和礁龄等因素的影响^[27-28]。本研究中4个鱼类类群在地理上形成了依次接壤的空间梯度格局。A区鱼礁礁龄已达7~12年,生境已相对稳定,因而形成了独立的鱼类群落。B区礁龄仅半年,生境处于不稳定变动中,与相邻的对照区南部站位地理位置接近,环境差异较小,2个区域形成了一个类群。此外,在A区和B区的交界水域形成了独立的类群。李建都等^[27]研究发现海州湾、崂山湾、竹岔湾和祥云湾示范区各自形成了独立的鱼类类群,可能与它们地理位置上相距较远有关。也有研究指出同一示范区在不同季节各自形成一个鱼类类群^[3],体现了示范区鱼类群落的季节性差异。其他研究中同样未获得与鱼礁边界对应的鱼类群落分类^[7,29],这可能与示范区与周边海域间不存在明显的引起鱼类群落地理隔离的屏障有关,短期内示范区与周边海域的环境差异不大,鱼类交流活动频繁,难以形成集中于鱼礁投放区的独立鱼类类群。从不同类群分歧种的组成来看,类群III与IV的分歧种以近底层和底层鱼类为主,其次是中上层鱼类,恋礁性鱼类的贡献率最低。而类群I和III的主要分歧种以中上层鱼类为主,其次是恋礁性鱼类,近底层和底层鱼类的贡献率最低。表明中上层鱼类和恋礁性鱼类对鱼礁礁龄较短的海洋牧场鱼类群落有较大贡献,而随着建礁时间变长,近底层和底层鱼类的贡献率升高。

3.3 影响海洋牧场及附近海域鱼类群落结构的环境因子

海洋牧场鱼类群落结构变化与环境因子密切相关,不同海洋牧场中,影响鱼类群落结构的环境因子不尽相同。在外伶仃海洋牧场中对鱼类群落影响较大的环境因子是石油类、水温和叶绿素 a ^[7];在山东烟台近岸人工鱼礁区是水温、DO和水深^[30];在山东威海小石岛人工鱼礁海域是水温、叶绿素 a 和DO^[31]。本研究中对银滩南示范区鱼类群落影响最大的是水温和COD,DO和浮游植物密度的影响稍弱。

银滩南示范区鱼类群落结构受水温的影响最大。由于鱼礁引起的流场变化会导致水温变化,而

较暖的水温有利于鱼类的运动能力、消化效率和摄食量代谢活力^[32-33],这也是本研究中大部分鱼类分布与水温呈正相关的原因。Sanders等^[34]发现鱼礁区水温较高的海域具有更丰富的鱼类。本研究中示范区的水温显著高于对照区,位于示范区的类群III与IV的主要分歧种竹荚鱼、鲷、短吻鲷和花斑蛇鲷的数量密度随着温度的升高而增加。研究发现与花斑蛇鲷同属的长蛇鲷的分布与水温显著相关^[7];在加利福尼亚湾人工鱼礁区^[35]、佛罗里达州巴拿马沿岸人工鱼礁区^[34]的研究也证实了水温对鱼类群落结构存在显著影响。

COD是衡量水质有机污染状况的重要指标^[36],主要受陆地径流、陆源输入和水动力过程的影响^[37]。COD还会影响浮游植物密度,刘子萌等^[38]研究发现COD与浮游植物密度呈正相关。而王奕杨等^[39]的研究发现COD与鱼类生物量呈负相关,认为COD的增加导致水质恶化,限制了鱼类的生存。本研究同样发现COD与浮游植物密度呈负相关。在冯雪等^[7]的研究中COD不是影响鱼类群落结构的显著因子,与之相反,本研究中示范区和对照区的COD差异显著,类群I、II和III的大部分站位均处于COD高值区,特别是魔拟鲷和少鳞鲳与COD的相关性最强。

DO是鱼类分布的重要影响因子^[6]。浮游植物光合作用释放氧气,进而增加水体DO含量,而较高的DO有利于鱼类呼吸代谢和摄食,促进鱼类生长,鱼类趋向于逃离低氧环境,而向高DO区域聚集^[40-41]。DO对鱼类群落结构的显著影响在南海的湛江雷州湾^[42]和广东大亚湾^[43]也有发现。本研究中DO相对高的示范区为鱼类提供了更好的生存环境,因此,聚集了赤鼻棱鲷、细纹鲷和月尾鬼头鲷等鱼类;但蓝圆鲈、黄斑篮子鱼、魔拟鲷、鹿斑仰口鲷和少鳞鲳等鱼类聚集在DO相对低的海域,可能是由于受到了饵料生物的影响^[44]。

浮游植物既是生态系统中的生产者,又是浮游动物的饵料,可以直接或间接影响鱼类的分布^[31,45]。王新萌等^[31]在山东威海小石岛人工鱼礁区的研究发现,浮游植物对鱼类群落结构的影响不显著。而本研究中浮游植物是显著影响鱼类群落结构的因子,这与示范区和对照区浮游植物密度的显著性差异有关。本研究示范区浮游植物密度高于对照区,在天津大神堂人工鱼礁海域^[46]、海州湾海

洋牧场^[47]、唐山祥云湾海洋牧场和象山港海洋牧场示范区^[48]的研究中也得到了类似结论,一般认为示范区鱼礁周边形成的上升流可促进底层营养盐向上输送,对浮游植物的生长具有重要作用。

本研究揭示了银滩南示范区的鱼类群落特征,分析了海洋环境因子与鱼类群落结构的关系,研究结果可为海洋牧场生态系统鱼类群落的变动研究提供参考,为海洋牧场的可持续发展提供理论支持。

参考文献:

- [1] 陈丕茂,舒黎明,袁华荣,等.国内外海洋牧场发展历程与定义分类概述[J].水产学报,2019,43(9):1981-1869.
- [2] 杨红生,章守宇,张秀梅,等.中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J].水产学报,2019,43(4):1255-1262.
- [3] 罗惠桂,汪佳仪,谢珍玉,等.三亚蜈支洲岛毗邻海域鱼类物种多样性及群落结构特征[J].海洋科学,2023,47(7):74-86.
- [4] 陈丕茂,袁华荣,贾晓平,等.大亚湾杨梅坑人工鱼礁区渔业资源变动初步研究[J].南方水产科学,2013,9(5):100-108.
- [5] HU C, SHUI Y, TIAN K, et al. Functional group classification and niche identification of major fish species in the Qixing Islands Marine Reserve, Zhejiang Province[J]. Biodiv Sci, 2016, 24(2): 175-184.
- [6] 何倩,刘淑德,唐衍力,等.山东琵琶岛海域人工鱼礁区鱼类群落物种及功能多样性[J].中国水产科学,2023,30(12):1479-1495.
- [7] 冯雪,戴小杰,袁华荣,等.外伶仃海洋牧场附近海域游泳生物群落结构及其与环境因子的关系[J].上海海洋大学学报,2024,33(1):186-201.
- [8] 张亚洲,蒋日进,梁君.嵊泗马鞍列岛海域国家级海洋牧场渔业资源增殖养护效果评析[J].浙江海洋大学学报(自然科学版),2022,41(5):466-472.
- [9] 李冠军,邱永松,王跃中,等.自然环境变动对北部湾渔业资源的影响[J].南方水产,2007,3(1):7-13.
- [10] 陈国宝,李永振,陈丕茂,等.南海北部陆架区海域蓝圆产卵场的研究[J].热带海洋学报,2003,22(6):22-28.
- [11] 张公俊,杨长平,孙典荣,等.北部湾中北部海域鱼类群落的季节变化特征[J].南方农业学报,2021,52(10):2861-2871.
- [12] 张曼,王雪辉,蔡研聪,等.北部湾带鱼空间聚散变化特征[J].中国水产科学,2022,29(11):1647-1658.
- [13] 侯刚,冯钰婷,陈妍颖,等.北部湾二长棘犁齿鲷时空分布及其与环境因子的关系[J].广东海洋大学学报,2021,41(4):8-16.
- [14] 黎树武,戴志军,葛振鹏,等.北部湾北部生态环境灾害变化研究[J].灾害学,2014,29(4):43-47.
- [15] JACCARD P. The distribution of flora in the alpine zone[J]. New Phytol, 1912, 11: 37-50.
- [16] WARWICK R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities[J]. Mar Biol, 1986, 92: 557-562.

- [17] 裴精花, 陈清华, 范金金, 等. 珠江口海域游泳动物群落结构及多样性特征[J]. 南方农业学报, 2023, 54(12): 3727-3738.
- [18] 王雪辉, 林昭进, 王跃中, 等. 南海西北部陆架区鱼类的种类组成与群落格局[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2225-2235.
- [19] 郭彪, 于莹, 张博伦, 等. 天津大神堂海域人工鱼礁区游泳动物群落特征变化[J]. 海洋渔业, 2015, 37(5): 409-418.
- [20] 徐浩, 曾晓起, 顾炎斌, 等. 人工鱼礁对山东莱州朱旺港海区游泳动物的群落结构及季节变化的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(5): 47-54.
- [21] 罗峥力, 杨长平, 王良明, 等. 北部湾北部沿岸海域鱼类资源时空分布特征及多样性变化[J]. 南方农业学报, 2023, 54(6): 1847-1857.
- [22] 冯雪, 范江涛, 孙晓, 等. 珠海外伶仃人工鱼礁对鱼类资源养护效果初步评估[J]. 南方农业学报, 2021, 52(12): 3228-3236.
- [23] 印瑞, 周永东, 梁君, 等. 中街山列岛海洋牧场大黄鱼时空分布与环境因子的关系[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 483-489.
- [24] 韩业越, 殷蕊, 孙桂清, 等. 北戴河国家级海洋牧场示范区人工鱼礁建设效果评价[J]. 河北农业, 2020, 316(4): 24-28.
- [25] 王欢欢, 毕福洋, 曹敏, 等. 獐子岛海洋牧场秋季渔业资源声学调查与评估[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(6): 802-807.
- [26] 崔晨, 张云岭, 张秀文, 等. 唐山祥云湾海洋牧场渔业资源增殖效果评估[J]. 河北农业, 2021(1): 25-31.
- [27] 李建都, 赵祺, 刘晋冀, 等. 黄渤海不同人工鱼礁区渔业生物群落结构特征及生物增量影响要素[J]. 中国水产科学, 2023, 30(3): 371-383.
- [28] HYKEMA A, DEBROT A O, OSINGA R, et al. Fish assemblages of three common artificial reef designs during early colonization[J]. Ecol Eng, 2020, 157: 105994.
- [29] 王宇, 侯纯强, 汪笑宇, 等. 天津近岸海域人工鱼礁区渔业资源增殖效果初步评估[J]. 海洋湖沼通报, 2018(2): 137-145.
- [30] 张荣良, 刘辉, 孙东洋, 等. 烟台近岸人工鱼礁与自然岩礁底层渔业生物群落特征对比分析[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(3): 697-707.
- [31] 王新萌, 唐衍力, 孙晓梅, 等. 威海小石岛人工鱼礁海域渔获物群落结构特征及其与环境因子相关性[J]. 海洋科学, 2016, 40(11): 34-39.
- [32] ROSAS-ALAYOLA J, HEMANDES-HERRERA A, GALVAN-MAGANA F, et al. Diet composition of sailfish (*Istiophorus platypterus*) from the southern Gulf of California, Mexico[J]. Fish Res, 2002, 57: 185-195.
- [33] KADYE W T, MAGADZA C H D, MOYO N A G, et al. Stream fish assemblages in relation to environmental factors on a montane plateau (Nyika, Malawi)[J]. Environ Biol Fish, 2008, 83(4): 417-428.
- [34] SANDER R M J, CHANDLER C R, LANDRY A M J. Hydrological, diel and lunar factors affecting fishes on artificial reefs off Panama City, Florida[J]. Bull Mar Sci, 1985, 37(1): 318-328.
- [35] OROPEZE O A, BALART E F. Community structure of reef fish in several habitats of a rocky reef in the Gulf of California[J]. Mar Ecol, 2001, 22(4): 283-305.
- [36] 薛燕妮, 王洁英, 别又才, 等. 清远市南部淡水养殖鱼塘水质抽样调查与污染评价[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(4): 40-42.
- [37] 杨斌, 钟秋平, 鲁栋梁, 等. 钦州湾海域 COD 时空分布及对富营养化贡献分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(3): 20-25.
- [38] 刘子萌, 冯民权, 杨锐婧, 等. 漳泽水库浮游植物群落结构特征及其影响因子[J]. 黑龙江大学工程学报, 2024, 15(1): 76-84.
- [39] 王奕杨, 毛志刚, 谷孝鸿, 等. 高宝邵伯湖鱼类群落结构及其多样性特征[J/OL]. 生态学杂志. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20240205.1147.002>
- [40] MAES J, STEVENS M, BREINE J. Modelling the migration opportunities of diadromous fish species along a gradient of dissolved oxygen concentration in a European tidal watershed[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 2007, 75(1/2): 151-162.
- [41] 张雷敏, 梁化亮, 米海峰, 等. 低氧胁迫对鱼类的影响以及营养调控策略的研究进展[J]. 动物营养学报, 2023, 35(10): 6207-6219.
- [42] 曾嘉维, 林坤, 王学锋, 等. 雷州湾附近海域鱼类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2019, 26(1): 108-117.
- [43] 曾雷, 陈国宝, 李纯厚, 等. 大亚湾湾口游泳生物群落季节异质特征与生态效应分析[J]. 南方水产科学, 2019, 15(3): 22-32.
- [44] 胡翠林, 张洪亮, 张亚洲, 等. 带鱼保护区春秋季节鱼类群落特征及其与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2018, 42(5): 694-703.
- [45] 唐广隆, 刘永, 吴鹏, 等. 珠江口万山群岛海域春季渔业资源群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2022, 29(8): 1198-1209.
- [46] 张雪, 徐晓甫, 戴媛媛, 等. 天津近岸人工鱼礁海域浮游植物群落及其变化特征[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(6): 1-10.
- [47] 谢斌, 张硕, 李莉, 等. 海州湾海洋牧场浮游植物群落结构特征及其与水质参数的关系[J]. 环境科学学报, 2017, 37(1): 121-129.
- [48] 刘懂, 陈晨, 王莉, 等. 象山港海洋牧场示范区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(5): 1024-1032.