

文章编号: 1674-5566(2024)01-0186-16

DOI: 10.12024/jsou.20230304115

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

冯雪^{1,2,3}, 戴小杰¹, 袁华荣^{2,3}, 成志健^{2,3}, 陈丕茂^{2,3}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300; 3. 农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站 农业农村部海洋牧场重点实验室, 广东 广州 510300)

摘要: 为了解外伶仃海洋牧场附近海域游泳生物群落结构特征, 于2020年春季和秋季对该海域开展了资源环境综合调查, 分析了游泳生物种类组成、优势种、渔获率和群落结构特征, 并构建游泳生物群落结构数据矩阵, 分析游泳生物群落结构与环境因子的关系。研究共采集到游泳生物73种, 隶属于12目30科49属, 其中鱼类最多, 共有47种, 虾类10种, 蟹类9种, 头足类4种, 虾蛄类3种。相对重要性指数(Index of relative importance, IRI)分析显示, 渔获物中IRI>1 000的优势种有4种, 分别为银鲳(*Pampus argenteus*)、赤鼻棱鲷(*Thrissa kammalensis*)、火枪乌贼(*Loligo beka*)和鹿斑鲷(*Leiognathus ruconius*), 其中银鲳和赤鼻棱鲷是两季调查共同优势种。游泳生物Margalef物种丰富度指数(*D*)、Shannon-Wiener多样性指数(*H'*)和Pielou均匀度指数(*J'*)均呈现春季高于秋季的结果, 单因素方差分析(ANOVA)显示多样性指数(*H'*)和均匀度指数(*J'*)在不同季节存在显著性差异, 物种丰富度指数(*D*)季节差异不显著。相似性百分比分析(SIMPER)表明春季贡献率最高的物种为赤鼻棱鲷, 秋季贡献率最高的是印度鲷, 春秋两季组间平均相异性为78.64%, 相异性累积贡献率为42.72%。冗余分析(Redundancy analysis, RDA)显示: 叶绿素a、水团和石油类是影响外伶仃海洋牧场附近海域游泳生物群落结构的主要环境因子。研究表明, 外伶仃海洋牧场附近海域游泳生物渔获量高密度区主要出现在岛礁近岸海域, 游泳生物在不同季节群落组成差异明显, 可能与生活史规律、伏季休渔政策的执行及海域重点环境因子的影响有关。研究结果可为科学合理摸清海洋牧场建设区域游泳生物群落特征和指导评估海洋牧场生态修复效果提供基础数据和理论参考。

关键词: 外伶仃岛; 种类组成; 群落结构; 环境因子; RDA分析

中图分类号: S 931.4 **文献标志码:** A

占据地球表面积71%的海洋是生命的摇篮, 是人类获取优质动物蛋白的“蓝色粮仓”, 也是缓解未来粮食危机、消除饥饿和营养不良的“解药”。珠江口外的万山群岛共有大小岛屿上百个, 是珠三角海域出入外大洋的门户和中国近海主要渔场之一, 同时也属粤港澳大湾区都市群范围。外伶仃岛位于珠江口东南海域万山群岛中北部, 距香港岛仅18.6 km, 是珠海万山群岛诸多海岛之一。2002年7月广东省人民政府办公厅《转发省海洋与渔业局关于建设人工鱼礁保护海洋资源环境议案实施办法的通知》(粤府办[2002]57号)文件确定省市财政预算8亿元资金支持广东省建设人工鱼礁50座, 珠海万山海域建

设人工鱼礁区6个, 其中包括大东湾附近海域外伶仃人工鱼礁区, 礁区海域面积1.96 km²。2018年12月, 广东省珠海市外伶仃海域国家级海洋牧场示范区入选第4批国家级海洋牧场示范区(农业农村部公告第115号), 示范区海域面积9.83 km²。外伶仃岛海岛旅游业发达, 根据发布的《珠海市海洋功能区划(2015—2020年)》显示外伶仃岛属于旅游休闲娱乐区^[1]。2023年春节假期防疫政策调整, 外伶仃岛旅游人数和综合收入创历史新高, 达12 075人次和1 026.4万元。

随着全球资源和环境的恶化, 生态系统中群落的组成和结构研究受到国内外学者的重视和关注, 在森林^[2]、动物^[3]、微生物^[4]、昆虫^[5]、湖泊海

收稿日期: 2023-03-10 修回日期: 2023-05-16

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111030002); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2023TD06)

作者简介: 冯雪(1987—), 女, 助理研究员, 博士研究生, 研究方向为海洋牧场及生态修复。E-mail: fengxue@scsfri.ac.cn

通信作者: 陈丕茂, E-mail: chenpm@scsfri.ac.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

洋^[6-7]等领域展开广泛研究。游泳生物是海洋生态类群重要组成部分和海洋生态系统的关键性对象,也是人类开发利用海洋渔业资源的目标和人类高营养食物的主要来源,在海洋生态食物链中占据重要地位^[8]。近年来持续高强度的渔业捕捞活动和人类对水产食品日益旺盛的追求进一步激发了全球生态系统失衡趋势,加剧了传统渔场的压力。FAO在2022年发布的《世界渔业和水产养殖状况:努力实现蓝色转型》报告中指出,2019年处于生物可持续水平范围内的渔业种群比例从1974年的90%下降到64.6%,其中57.3%达到可持续捕捞的上限,仅7.2%未充分捕捞^[9]。厄尔尼诺、风暴潮、沙尘暴等气候变化^[10-11],养殖污水排放、海洋航运和伏季休渔制度等^[12-13]人类活动是影响游泳生物组成特征和群落稳定的重要因素。近年来,国内外对游泳生物种类组成、群落空间格局和结构变化的研究已有不少,诸如针对阿根廷群岛^[14]、法国比斯开湾^[15]、广东考洲洋^[16]、浙江三门湾^[17]、广西三娘湾^[18]等海域游泳生物群落多样性和时空分布的研究,同时也有针对种群间优势种、关键种等方面的探讨^[19-21]。国内针对珠江口海域的调查研究成果丰富,主要是围绕整个伶仃洋来开展的,包括石油天然气工业^[22]、交通运输^[23]、安全与灾害防治^[24]、岩石地球化学^[25]、港口岸线适宜性评价^[26]、环境评价和容量^[27]等。涉渔生物学的研究则集中在珠江口渔场海域鱼卵仔稚鱼、浮游生物、游泳生物等生物学特征、群落特征、食性营养级特征等方面^[28-29]。针对外伶仃岛周围海域的研究则主要集中在海洋环境^[30-31]和海洋生态^[32]等方面,游泳生物群落结构组成及变化的研究较少。为修复岛礁生态资源和维持生态系统健康发展,推进外伶仃海洋牧场建设工作,亟须全面摸清该海域游泳生物资源状况。

为了解外伶仃岛海洋牧场附近海域游泳生物群落结构变动趋势,以2020年春季和秋季渔业资源调查数据为基础,采用相对重要性指数(Index of relative importance, IRI)、Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef物种丰富度指数(D)、Pielou均匀度指数(J')等相关参数对外伶仃海洋牧场附近海域群落结构进行研究,分析游泳生物渔获率、种类组成、生物多样性等特征。同时根据调查期内同步测定的理化数据对调查海域内游泳生物分布特征进行冗余分析(Redundancy analysis,

RDA),探讨游泳生物与环境因子的关系。这将补充和丰富外伶仃岛附近海域游泳生物研究数据,以为外伶仃海洋牧场附近海域生物资源可持续利用和海洋牧场建设提供参考和支撑。

1 材料与方法

1.1 样品和数据采集

根据农业农村部相关文件的规定,2020年南海休渔时间为5月1日至8月16日,休渔期内禁止从事捕捞作业。由于受休渔期的限制,选定2020年4月和9月对珠海外伶仃海域国家级海洋牧场示范区进行春、秋季两个航次的采样调查,内容包括环境因子和游泳生物。航次调查选取12个站位,其中3个站位在海洋牧场示范区外围海域,具体采样站位如图1所示。现场采用美国维赛公司手持式多参数水质分析仪YSI ProPlus测量水温、盐度、pH、溶解氧(Dissolved oxygen, DO)等环境因子,化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)、无机氮、活性磷酸盐、石油类、重金属铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)和叶绿素a质量浓度等的测定在实验室中进行。游泳生物采用拖网调查,底拖网网具的网上纲26 m,下纲31 m,网囊目30 mm,拖网时长15 min,平均拖速2.8 kn。

1.2 样品处理和鉴定

所有渔获物样品全部采集并于现场鉴定,各站渔获种类鉴定到种,记录体长、体质量、尾数等基础生物学数据,环境样品分装固定后转入实验室分析测定。拖网调查和环境因子处理和测定均参考《海洋调查规范》(GB/T12763—2007)和《海洋监测规范》(GB/T17378—2007)的有关方法执行。

1.3 数据分析

以现场拖网数据为基础计算游泳生物渔获率、相对重要性指数(IRI)、Shannon-Wiener多样性指数(H')、Margalef物种丰富度指数(D)、Pielou均匀度指数(J')等相关参数。

渔获率(Y)为每站拖网总渔获量标准化为单位时间渔获量。为消除两次调查及不同站位之间实际拖速差异所致生物量的误差,在程济生等^[33]提出的方法基础上加以改进,以平均拖速扫海面积为标准,对各调查数据进行标准化,标准化后渔获量 Q =实测拖网渔获量 \times (均速扫海面积/实测扫海面积)。标准化后渔获率计算公式:

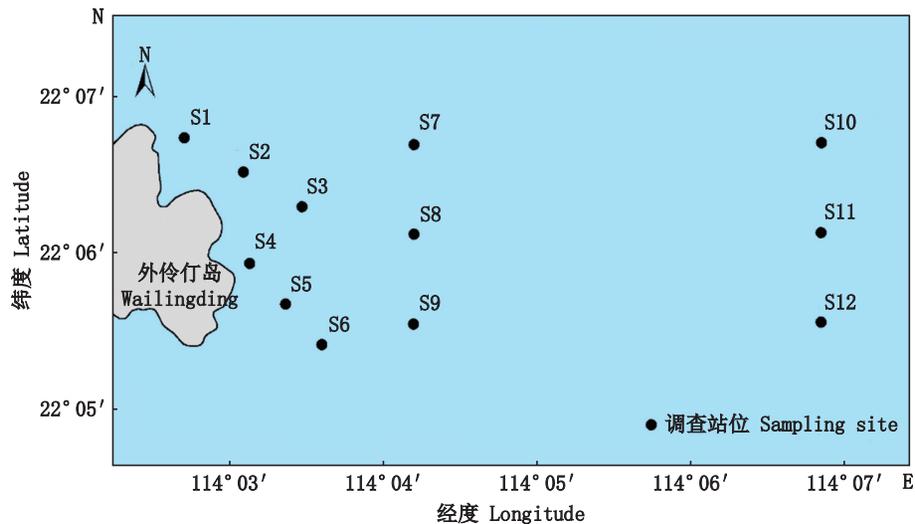


图1 外伶仃岛附近海域调查站位分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Wailingding area

$$Y = \frac{Q}{h} \quad (1)$$

式中: Y 为拖网渔获率, kg/h; Q 为标准化后每站拖网渔获量, kg; h 为拖网时长, h。

相对重要性指数 $IRI > 1\ 000$ 时为优势种^[34], 计算公式为

$$I_{IRI} = F \times (N + W) \quad (2)$$

式中: I_{IRI} 为相对重要性指数 IRI 值; F 为某物种在总站位中的出现频率; N 为某渔获尾数占总尾数的百分比; W 为某渔获质量占总质量的百分比。

Shannon-Winener 多样性指数 (H')、Margalef 种类丰富度指数 (R)、Pielou 均匀度指数 (J') 分析生物多样性, 计算公式为

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (3)$$

$$R = \frac{(S - 1)}{\ln N} \quad (4)$$

$$J' = H' / \ln S \quad (5)$$

式中: P_i 为第 i 种的个体数与总个体数的比值; S 为渔获的种类总数; N 为渔获的总尾数。

在 PRIMER 5.0 软件中使用聚类分析 (CLUSTER) 和非度量多维标度分析法 (NMDS) 构建外伶仃岛附近海域游泳生物群落结构数据矩阵, 分析前对游泳生物渔获数据进行 4 次方根标准化。用胁强系数 (Stress) 来衡量 NMDS 分析结果的优劣, 当 $Stress < 0.2$ 时可以用二维点图表示, 图形具有一定的解释意义; 当 $Stress < 0.1$ 时可以认为排序较好, 划分的科学性更高; 当 $Stress < 0.05$ 时二维点图具有很好的代表性。采用 ANOSIM 相

似性分析 (Analysis of similarities) 对不同站位、季节的游泳生物群落结构差异的显著性进行检验, 采用相似性百分比 (SIMPER) 分析各季节物种的贡献率和群落结构中的相似种及分歧种。利用去趋势对应分析 (Detrended correspondence analysis, DCA) 消除数据“弓形效应”的影响, 根据最大梯度轴长度 (Lengths of gradient, LGA) 选择合适的方法。当 $LGA < 3$ 时选择线性模型, 采用冗余分析 (RDA), 当 $LGA > 4$ 时选择单峰模型较为合适, 采用典范对应分析 (Canonical correlation analysis, CCA), 当 LGA 在 3 和 4 之间时, 两种模型均适合, 即 RDA 和 CCA 均可采用。DCA 分析结果显示, 本研究春秋两季梯度轴最大长度均小于 2.0, 因此选择冗余分析 (RDA) 探讨群落结构与环境因子的关系。经过标准化转换后, 生物和环境数据经由 RDA 模块分析, 绘制出游泳生物组成与环境因子及站位关系的三序图。

采用 PRIMER 5.0 软件对游泳生物群落相似性进行分析, 采用 CANOCO 5.0 软件对游泳生物和环境因子进行 DCA 分析并依据结果选择线性模型 RDA 分析和绘制图件。采用 ArcGIS 10.0 软件绘制调查站位示意图。

2 结果

2.1 游泳生物种类组成和渔获率时空分布

2020 年春秋两季调查共捕获鉴定游泳生物 73 种 (表 1), 隶属于 12 目 30 科 47 属, 其中鱼类种类数最多, 为 47 种, 占比 64.38%, 隶属于 25 科 33

属,另有虾类 10 种,蟹类 9 种,头足类和虾蛄类种数最少,分别为 4 种和 3 种。2020 年 4 月春季游泳生物种类共 9 目 18 科 30 属 46 种,其中对虾科最多,为 8 种,梭子蟹科 7 种,蛄科和鲱科均为 6

种。2020 年 9 月秋季游泳生物种类 11 目 27 科 37 属 48 种,对虾科的种类数最多,有 6 种,蛄科和石首鱼科鱼类均为 4 种,鲷科、鲈科、鲟科和梭子蟹科均 3 种。

表 1 外伶仃岛海域游泳生物种类组成及分析代码

Tab. 1 Composition of nekton and code in Wailingding area

种类 Species	春季 Spring	秋季 Autumn	代码 Code
枪乌贼科 Loliginidae			
枪乌贼属 <i>Loligo</i>			
杜氏枪乌贼 <i>Loligo duvaucelii</i>		+	1
火枪乌贼 <i>Loligo beka</i>	+		2
剑尖枪乌贼 <i>Loligo edulis</i>		+	3
乌贼科 Sepiidae			
无针乌贼属 <i>Sepiella</i>			
曼氏无针乌贼 <i>Sepiella maindroni</i>	+		4
对虾科 Penaeidae			
赤虾属 <i>Metapenaeopsis</i>			
宽突赤虾 <i>Metapenaeopsis palmensis</i>		+	5
新对虾属 <i>Metapenaeus</i>			
刀额新对虾 <i>Metapenaeus ensis</i>	+		6
近缘新对虾 <i>Metapenaeus affinis</i>	+	+	7
周氏新对虾 <i>Metapenaeus joyneri</i>	+	+	8
仿对虾属 <i>Parapenaeopsis</i>			
亨氏仿对虾 <i>Parapenaeopsis hungerfordi</i>	+		9
细巧仿对虾 <i>Parapenaeopsis tenella</i>	+		10
对虾属 <i>Penaeus</i>			
墨吉对虾 <i>Penaeus merguensis</i>		+	11
长毛对虾 <i>Penaeus penicillatus</i>	+	+	12
鹰爪虾属 <i>Trachypenaeus</i>			
鹰爪虾 <i>Trachypenaeus curvirostris</i>	+	+	13
管鞭虾属 <i>Solenocera</i>			
中华管鞭虾 <i>Solenocera crassicornis</i>	+		14
梭子蟹科 Portunidae			
梭子蟹属 <i>Portunus</i>			
矛形梭子蟹 <i>Portunus hastatoides</i>	+		15
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>		+	16
蛄属 <i>Charybdis</i>			
变态蛄 <i>Charybdis variegata</i>	+		17
疾进蛄 <i>Charybdis vadorum</i>	+		18
日本蛄 <i>Charybdis japonica</i>	+		19
锐齿蛄 <i>Charybdis acuta</i>	+		20
锈斑蛄 <i>Charybdis feriatius</i>	+		21
直额蛄 <i>Charybdis truncata</i>	+	+	22
长眼蟹属 <i>Podophthalmus</i>			
看守长眼蟹 <i>Podophthalmus vigil</i>		+	23
虾蛄科 Squillidae			
口虾蛄属 <i>Oratosquilla</i>			
口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	+	+	24

·续表 1·

种类 Species	春季 Spring	秋季 Autumn	代码 Code
长叉口虾蛄 <i>Oratosquilla nepa</i>	+		25
猛虾蛄属 <i>Harpisquilla</i>			
猛虾蛄 <i>Harpisquilla harpax</i>	+		26
真鲨科 Carcharhinidae			
斜齿鲨属 <i>Scoliodon</i>			
尖头斜齿鲨 <i>Scoliodon sorrakowah</i>		+	27
鲱科 Clupeidae			
小沙丁鱼属 <i>Sardinella</i>			
白腹小沙丁鱼 <i>Sardinella clupeioides</i>	+		28
印度小沙丁鱼 <i>Sardinella sindensis</i>	+		29
中华小沙丁鱼 <i>Sardinella nymphea</i>	+		30
鲹属 <i>Clupanodon</i>			
斑鲹 <i>Clupanodon punctatus</i>	+		31
鳓属 <i>Ilisha</i>			
鳓 <i>Ilisha elongata</i>	+		32
印度鳓 <i>Ilisha indica</i>	+	+	33
鳀科 Engraulidae			
小公鱼属 <i>Stolephorus</i>			
印度小公鱼 <i>Stolephorus indicus</i>	+	+	34
梭鲛属 <i>Thrissa</i>			
赤鼻梭鲛 <i>Thrissa kammalensis</i>	+	+	35
杜氏梭鲛 <i>Thrissa dussumieri</i>	+		36
黄吻梭鲛 <i>Thrissa vitirostris</i>	+	+	37
黄鲫属 <i>Setipinna</i>			
黄鲫 <i>Setipinna taty</i>	+	+	38
鲚属 <i>Coilia</i>			
七丝鲚 <i>Coilia grayi</i>	+		39
狗母鱼科 Synodidae			
蛇鲻属 <i>Saurida</i>			
长蛇鲻 <i>Saurida elongata</i>	+	+	40
犀鲑科 Bregmacerotidae			
犀鲑属 <i>Bregmaceros</i>			
太平洋犀鲑 <i>Bregmaceros atlanticus</i>	+	+	41
鲟科 Sphyracidae			
鲟属 <i>Sphyracna</i>			
斑条鲟 <i>Sphyracna jello</i>		+	42
大眼鲟 <i>Sphyracna forsteri</i>		+	43
尖鳍鲟 <i>Sphyracna acutipinnis</i>		+	44
鲷科 Mugilidae			
骨鲷属 <i>Osteomugil</i>			
前鳞骨鲷 <i>Osteomugil ophuyseni</i>	+		45
马鲛科 Polynemidae			
四指马鲛属 <i>Eleutheronema</i>			
四指马鲛 <i>Eleutheronema tetradactylum</i>	+	+	46
大眼鲷科 Priacanthidae			
大眼鲷属 <i>Priacanthus</i>			
短尾大眼鲷 <i>Priacanthus macracanthus</i>		+	47

·续表 1·

种类 Species	春季 Spring	秋季 Autumn	代码 Code
天竺鲷科 Apogonidae			
天竺鲷属 <i>Apogon</i>			
中线天竺鲷 <i>Apogon kiensis</i>		+	48
乳香鱼科 Lactariidae			
乳香鱼属 <i>Lactarius</i>			
乳香鱼 <i>Lactarius lactarius</i>		+	49
鲆科 Caranginae			
鲆属 <i>Caranx</i>			
及达叶鲆 <i>Caranx djeddaba</i>		+	50
丽叶鲆 <i>Caranx kalla</i>	+	+	51
圆鲆属 <i>Decapterus</i>			
蓝圆鲆 <i>Decapterus maruadsi</i>		+	52
石首鱼科 Sciaenidae			
白姑鱼属 <i>Argyrosomus</i>			
白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i>	+	+	53
大头白姑鱼 <i>Argyrosomus macrocephalus</i>	+	+	54
截尾白姑鱼 <i>Argyrosomus aneus</i>		+	55
黄鱼属 <i>Pseudosciaena</i>			
小黄鱼 <i>Pseudosciaena polyactis</i>	+		56
梅童鱼属 <i>Collichthys</i>			
棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>		+	57
鲷科 Leiognathidae			
鲷属 <i>Leiognathus</i>			
短吻鲷 <i>Leiognathus brevirostris</i>	+	+	58
静鲷 <i>Leiognathus insidiator</i>		+	59
鹿斑鲷 <i>Leiognathus ruconius</i>	+		60
细纹鲷 <i>Leiognathus berbis</i>		+	61
银鲈科 Gerridae			
银鲈属 <i>Gerres</i>			
短棘银鲈 <i>Gerres lucidus</i>		+	62
金线鱼科 Nemipteridae			
金线鱼属 <i>Nemipteras</i>			
日本金线鱼 <i>Nemipteras japonicus</i>	+	+	63
鲷科 Theraponidae			
鲷属 <i>Therapon</i>			
尖吻鲷 <i>Therapon oxyrhynchus</i>		+	64
羊鱼科 Mullidae			
绯鲤属 <i>Upeneus</i>			
黄带绯鲤 <i>Upeneus sulphureus</i>		+	65
鸡笼鲷科 Drepanidae			
鸡笼鲷属 <i>Drepane</i>			
斑点鸡笼鲷 <i>Drepane punctata</i>		+	66
蓝子鱼科 Siganidae			
蓝子鱼属 <i>Siganus</i>			
黄斑蓝子鱼 <i>Siganus oramin</i>		+	67
带鱼科 Trichiuridae			
带鱼属 <i>Trichiurus</i>			

·续表 1·

种类 Species	春季 Spring	秋季 Autumn	代码 Code
带鱼 <i>Trichiurus haumela</i>	+	+	68
鲷科 Stromateidae			
鲷属 <i>Pampus</i>			
银鲷 <i>Pampus argenteus</i>	+	+	69
长鲷科 Centrolophidae			
刺鲷属 <i>Psenopsis</i>			
刺鲷 <i>Psenopsis anomala</i>	+		70
舌鲷科 Cynoglossidae			
舌鲷属 <i>Cynoglossus</i>			
半滑舌鲷 <i>Cynoglossus semilaevis</i>		+	71
鲷科 Tetraodontidae			
腹刺鲷属 <i>Gastrophysus</i>			
月腹刺鲷 <i>Gastrophysus lunaris</i>		+	72
兔头鲷属 <i>Lagocephalus</i>			
月尾兔头鲷 <i>Lagocephalus lunaris</i>		+	73

各季节优势种见表 2。春季优势种有 4 种, 分别为银鲷 (*Pampus argenteus*)、赤鼻棱鲷 (*Thrissa kammalensis*)、火枪乌贼 (*Loligo beka*) 和鹿斑鲷 (*Leiognathus ruconius*), 4 种优势种渔获质量共占总质量的 69.70%, 占总尾数的 70.88%。秋季优势种有 4 种, 分别为印度鲷 (*Ilisha indica*)、细纹鲷 (*Leiognathus berbis*)、银鲷、赤鼻棱鲷, 4 种优势种渔获质量共占总质量的 71.67%, 占总尾数的 24.18%。外伶仃岛海域游泳生物春季和秋季共同优势种为银鲷和赤鼻棱鲷。银鲷各季节渔获质量占总质量分别为 39.06% 和 0.76%, 渔获尾数占总尾数分别为 10.22% 和 20.06%, 出现频率分别为 91.67% 和 83.33%, 各季节 IRI 分别为 4 518 和 1 735。赤鼻棱鲷各季节渔获质量占总质量分别为 18.81% 和 15.79%, 渔获尾数占总尾数分别为 24.29% 和 1.46%, 出现频率分别为 100.00% 和 91.67%, 各季节 IRI 分别为 4 310 和 1 581。

2.2 游泳生物多样性和时空分布

外伶仃岛海域游泳生物多样性指数变化范围为 1.785~3.497, 其中春季最高, 为 2.889; 均匀度指数变化范围为 0.437~0.839, 春季最高, 为 0.743; 物种丰富度指数变化范围为 2.144~4.733, 春季最高, 为 2.920 (图 2)。经单因素方差分析 (ANOVA) 可知, 春季和秋季多样性指数和均匀度指数存在显著性差异 ($P < 0.05$), 物种丰富度指数不存在显著性差异 ($P > 0.05$)。

从季节来看, 外伶仃岛海域春季、秋季游泳生物平均渔获率分别为 9.988 和 20.283 kg/h, 秋季游泳生物渔获率高于春季 (图 3)。春季游泳生物渔获率变化范围为 3.779~36.738 kg/h, 相对较高区域主要集中在外伶仃岛的东部近岸海域, 而远离岸边的海域整体偏低; 秋季游泳生物渔获率变化范围为 9.432~37.638 kg/h, 较之春季渔获率有所升高, 而游泳生物高密度区与春季分布趋势类似。

表 2 珠海外伶仃岛海域各季节优势游泳生物组成

Tab. 2 The dominant species in two seasons in Wailingding area

优势种 Dominate species	质量百分比 W/%		尾数百分比 N/%		出现频率 F/%		相对重要性指数 IRI	
	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn	春季 Spring	秋季 Autumn
银鲷 <i>Pampus argenteus</i>	39.06	0.76	10.22	20.06	91.67	83.33	4 518	1 735
赤鼻棱鲷 <i>Thrissa kammalensis</i>	18.81	15.79	24.29	1.46	100.00	91.67	4 310	1 581
印度鲷 <i>Ilisha indica</i>	-	31.82	-	1.94	-	100.00	-	3 376
火枪乌贼 <i>Loligo beka</i>	8.94	-	20.38	-	100.00	-	2 932	-
细纹鲷 <i>Leiognathus berbis</i>	-	23.31	-	0.72	-	100.00	-	2 403
鹿斑鲷 <i>Leiognathus ruconius</i>	2.89	-	15.99	-	100.00	-	1 887	-

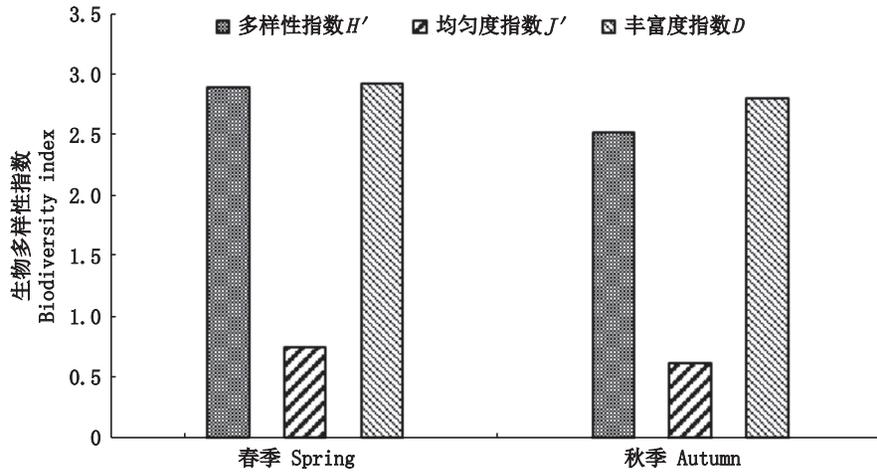


图2 外伶仃附近海域游泳生物多样性指数季节变动
Fig. 2 Diversity indices of nekton in Wailingding area

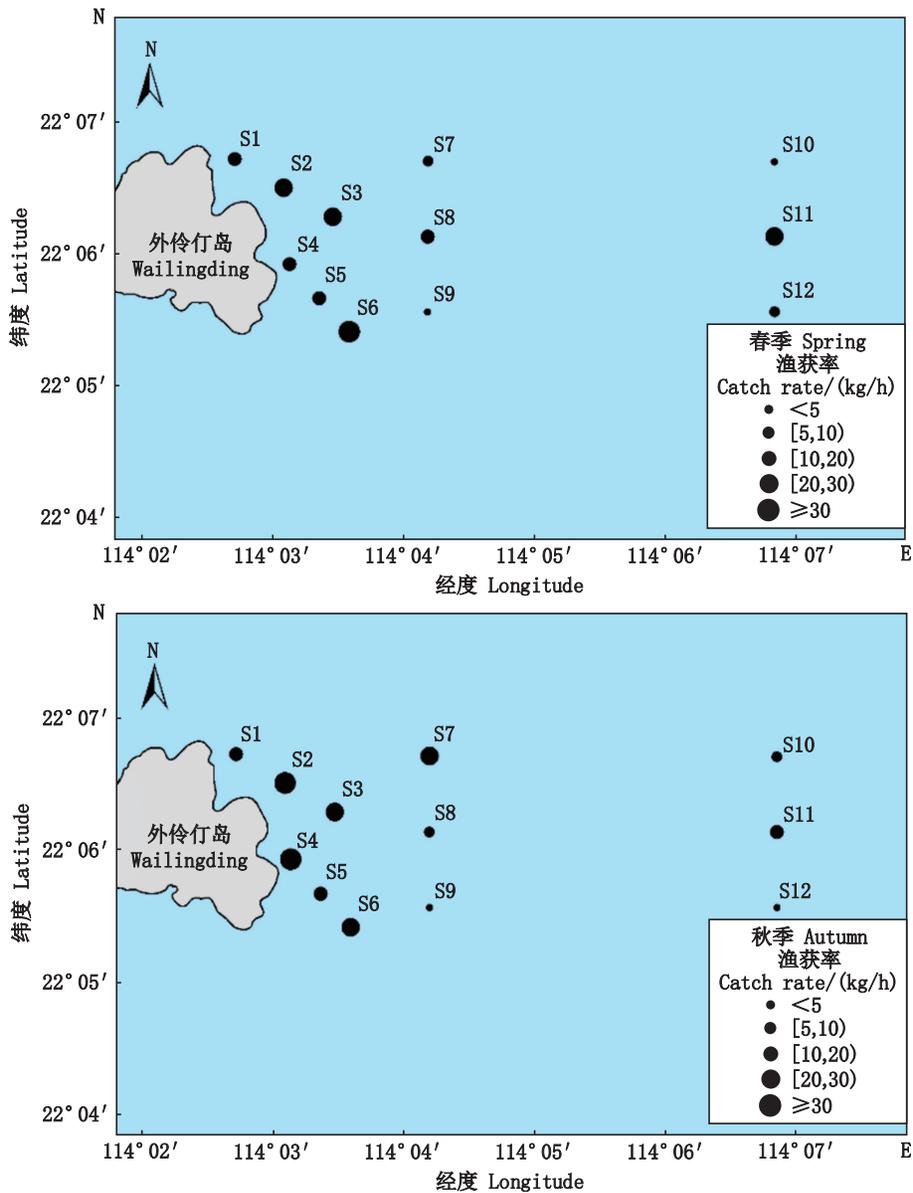


图3 外伶仃附近海域游泳生物渔获率分布
Fig. 3 Distribution of nekton catch rate in Wailingding area

2.3 游泳生物群落结构组成和差异

对春秋两季调查的聚类分析(Cluster)进行相似性程度评估来分析空间分组特征(图4)。相似性分析(ANOSIM)结果显示,外伶仃岛附近海域游泳生物群落结构组间差异大于组内差异,表明数据存在着极显著的季节差异($R=0.992, P<0.01$)。以游泳生物在12个站位分布在相似性50%水平为界,春季调查可分为4组,组1包括S1~S6、S8、S9、S11站,主要集中在岛礁近岸海域,组2至组4

分别为S10、S12和S7站。NMDS多维排序结果显示,春季胁迫系数 $Stress=0.12<0.20$,适用度为合适。秋季调查可分为2组,组1为S1、S7~S9、S10~S12站,组2为S2~S6站,为岛礁近岸及人工鱼礁投放区域。NMDS多维排序结果显示,秋季胁迫系数 $Stress=0.07<0.10$,说明分析结果可认为是一个科学性的排序。比较春秋两季调查的聚类图和NMDS图可以发现,秋季各站间最低和最高级聚类距离小于春季,站位位置分组趋于集中。

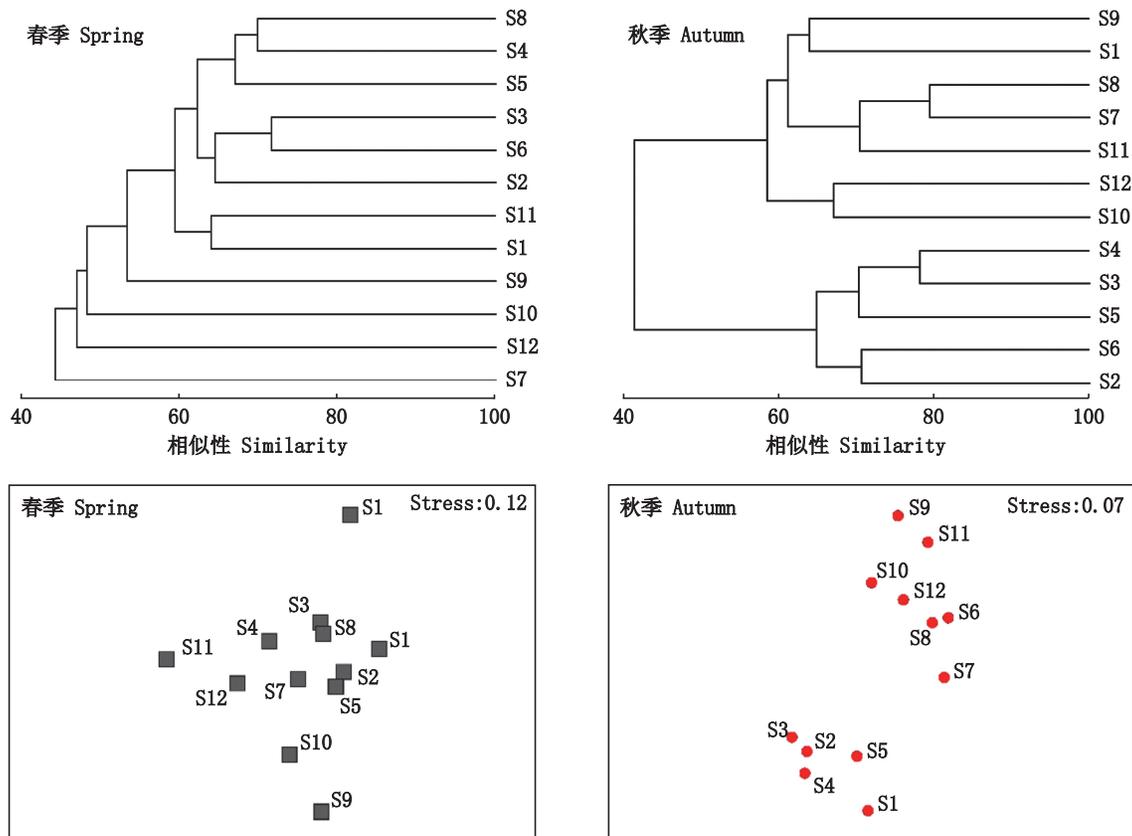


图4 外伶仃岛附近海域游泳生物聚类分析和非度量多维度排序分析
Fig. 4 Cluster analysis and NMDS of nekton community in Wailingding area

相似性百分比分析(SIMPER)结果可知,外伶仃岛海域春季游泳生物组内平均相似性为54.03%,共有10种相似性累积贡献率超过90%,主要有赤鼻棱鯧、银鲳、火枪乌贼、刺鲳(*Psenopsis anomala*)、小黄鱼(*Pseudosciaena polyactis*)、鹿斑鲷、带鱼(*Trichiurus haumela*)、短吻鲷(*Leiognathus brevirostris*)、锐齿鲷(*Charybdis acuta*)和太平洋犀鲷(*Bregmaceros atlanticus*)等,其中春季典型种赤鼻棱鯧相似性贡献率最高,为23.56%;秋季游泳生物组内平均相似性为52.02%,共有14种相似性累积贡献率超过90%,主要有印度鲷、日本金线鱼(*Nemipteras*

japonicus)、细纹鲷、银鲳、赤鼻棱鯧、带鱼等,其中秋季典型种印度鲷相似性贡献率最高,为22.85%。各季节游泳生物组间相异性结果显示,春秋两季组间平均相异性为78.64%,其中相异性贡献率>4%的分歧种有9种,分别是印度鲷、火枪乌贼、刺鲳、细纹鲷、赤鼻棱鯧、日本金线鱼、银鲳、小黄鱼和截尾白姑鱼(*Argyrosomus aeneus*),相异性累积贡献率达到42.72%,其中印度鲷是春季和秋季游泳生物群落结构差异的主要种。综上可知,春秋两季游泳生物群落结构差异较大(表3)。

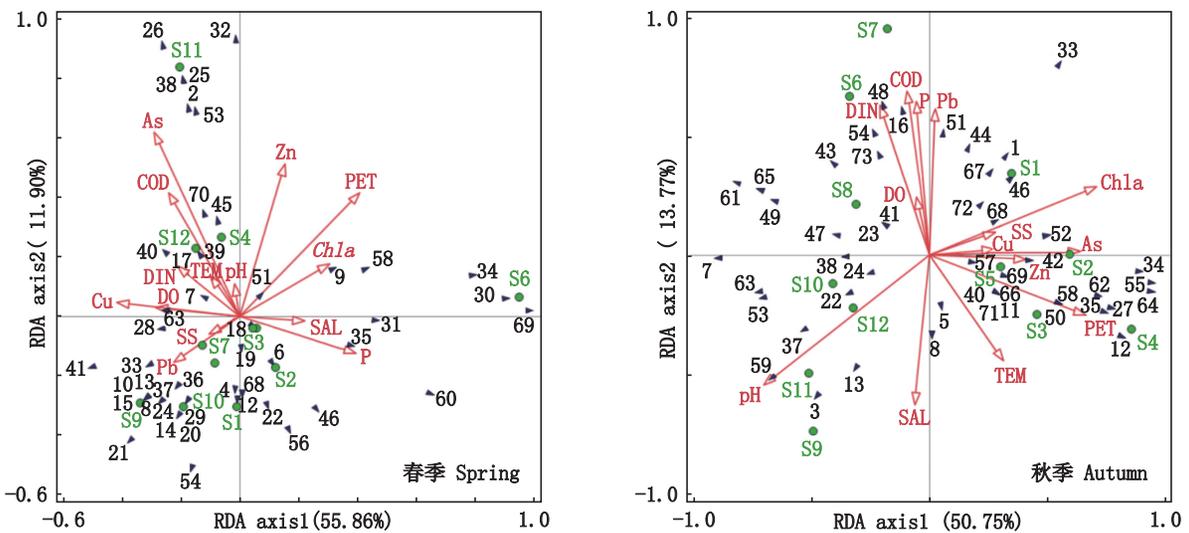
表 3 外伶仃岛海域各季节游泳生物典型种对组内相似性百分比和分歧种对组间相异性的百分比(>4%)
 Tab. 3 Main contribution species of Wailingding area in different seasons about similarity and dissimilarity percentage analysis (contribution rate greater than 4%)

种类 Species	春季 Spring	秋季 Autumn	春季&秋季 Spring&Autumn
赤鼻棱鳀 <i>Thrissa kammalensis</i>	23.56	8.29	4.85
银鲳 <i>Pampus argenteus</i>	17.29	9.66	4.74
火枪乌贼 <i>Loligo beka</i>	13.97	-	5.97
刺鲳 <i>Psenopsis anomala</i>	10.49	-	5.20
小黄鱼 <i>Pseudosciaena polyactis</i>	9.14	-	4.14
鹿斑鲷 <i>Leiognathus ruconius</i>	8.67	-	-
印度鳓 <i>Ilisha indica</i>	-	22.85	8.83
日本金线鱼 <i>Nemiptera japonicus</i>	-	10.65	4.76
细纹鲷 <i>Leiognathus berbis</i>	-	10.63	5.08
带鱼 <i>Trichiurus haumela</i>	-	6.42	-
截尾白姑鱼 <i>Argyrosomus aneus</i>	-	-	4.00

2.4 游泳生物群落结构和环境因子的关系

对外伶仃岛海域各季节游泳生物渔获率矩阵进行DCA分析,结果表明春秋季调查梯度轴长度的最大值均小于3,因此选用RDA排序方法结合蒙特卡洛检验,分析探讨游泳生物和环境因子之间的关系,筛选对群落结构影响显著的环境因子。环境因子和游泳生物的分析代码见图5注释及表1。春季和秋季RDA分析结果如图5所示,在春季,第一轴贡献了55.86%可解释的物种-环境关系,第二轴贡献11.90%;在秋季,第一轴贡献

了50.75%可解释的物种-环境关系,第二轴贡献13.77%。春秋两季石油类和叶绿素 a对游泳生物群落结构及变化影响显著。春季近岸海域S4和S6号站受石油类影响呈显著性正相关,另外春季优势种银鲳(代码69,下同)、赤鼻棱鳀(35)、鹿斑鲷(60)主要与叶绿素 a、盐度和活性磷酸盐密切相关。秋季近岸海域站位(S1~S5)受叶绿素 a和石油类影响较为明显,且秋季优势种印度鳓(33)、赤鼻棱鳀(35)和银鲳(69)也主要集中在



Tem. 水温; Sal. 盐度; pH. 酸碱度; DO. 溶解氧; COD. 化学需氧量; DIN. 无机氮; P. 活性磷酸盐; PET. 石油类; SS. 悬浮物; Cu. 铜; Pb. 铅; Zn. 锌; As. 砷; Chl. a. 叶绿素 a。
 Tem. Temperature; Sal. Salinity; pH. Potential of hydrogen; DO. Dissolved oxygen; COD. Chemical oxygen demand; DIN. Dissolved inorganic nitrogen; P. Reactive phosphate; PET. Petroleum; SS. Suspended solids; Cu. Cuprum; Pb. Plumbum; Zn. Zinc; As. Arsenic; Chl. a. Chlorophyll a.

图 5 外伶仃岛海域游泳生物群落与环境因子的 RDA 分析

Fig. 5 Redundancy analysis of nekton community and environmental factors in Wailingding area

3 讨论

3.1 伏季休渔效应和优势种生物变化特征

岛礁因自然特征而形成独特和复杂的生境类型,促进海域初级生产力提高和发挥生物资源养护作用^[35]。随着季节更迭和岛礁海域各位置特点不同,游泳生物群落结构也因此而发生变动,同时受人类行为的影响,例如伏季休渔制度的开展和人工鱼礁的投放等也对岛礁附近海域生物群落有所影响。为了海洋生物资源休养生息和恢复,坚持和贯彻“绿水青山就是金山银山”的绿色可持续发展理念,我国黄渤海、东海及南海 12°N 以北海域每年都会采取伏季休渔措施。为保护和修复资源,国外早前即开展休渔制度研究^[36],我国伏季休渔始于 1995 年,1999 年起南海海域也开始执行。本研究出海调查时间为 5 月休渔期实施前及 8 月休渔期结束后,经过上年休渔期后连续多月的高强度捕捞作业,珠江口渔场资源压力极大。外伶仃海洋牧场附近海域休渔期结束后秋季调查游泳生物平均渔获率是休渔期前春季调查的 2.03 倍,说明经过休渔期的调整外伶仃海域生物量等指标有所增加和恢复,伏季休渔效果显著,凸显了政策的正效应。苏莹佳等^[37]利用 2015—2017 年南海海域的海洋捕捞生产结构调查数据对伏季休渔制度效果进行了评价,结果表明休渔前后渔获率差异显著,渔获种间结构出现恢复迹象。王文杰等^[38]在研究粤东柘林湾甲壳类群落变动发现,在不同季节甲壳类群落结构存在明显差异,变动原因之一可能与伏季休渔制度有关。吴程宏等^[39]根据伏季休渔前后上岸渔获数据研究证明,休渔后各类型渔船及主要经济种类 CPUE 均有明显增长,捕捞生产效益增幅显著,中上层资源养护效果最佳。ARENDSE 等^[40]模拟休渔期环境研究帽贝 (*Cymbula granatina*) 的繁殖产量,发现实施禁渔针对易受干扰的物种产量效果显著。秋季具有更高渔获率和更复杂群落结构的原因还可能和游泳生物生长发育阶段有关。春季是沿岸及大陆架海域生物主要的产卵季节,经过孵化生长秋季主要为了索饵育肥进行洄游,从而使得该季节有更高的资源量^[17]。

优势种是影响生物群落种类组成、营养层级构建和循环的重要因素之一。外伶仃岛海域春

秋两季游泳生物群落结构组成差异较大,春季的优势种例如火枪乌贼和鹿斑鲷被秋季的印度鲷和细纹鲷等中上层鱼类替代。与历史资料相比,上世纪 90 年代的底层优势种例如花斑蛇鲻、六指马鲛等本次调查已非优势种,银鲳和赤鼻棱鲷为本研究春秋两季共同的优势种,是外伶仃海洋牧场附近海域重要的特征生物。赤鼻棱鲷属于近海沿岸河口类的小型鱼类,主要分布在中上层咸淡水水域,唐广隆等^[41]针对珠江口万山群岛海域的调查也发现,底拖网调查中赤鼻棱鲷相对丰度较高,为该区域的优势种。除珠江口外,赤鼻棱鲷在东海^[42]、黄海^[43]等海域也经常作为主要优势种而广泛分布。作为普通经济物种,赤鼻棱鲷体型较小,经济价值一般。秋冬季节因天气转寒冲淡水流入减少、外海咸水入侵,而作为中型优质鱼类,珠江口另一重要的优势种银鲳进入产卵季节,成为秋冬第一优势种^[44]。但文中秋季银鲳优势度低于春季调查结果,说明虽然仍为优势种类,但银鲳资源逐步被小型中上层鱼类所挤压。在高值资源被强势捕捞和整体资源持续衰退的情形下,群落环境竞争压力降低,环境中数量较多的小型种和易于繁衍生息的种类得到生长空间,从而影响了优势种的更迭品种和变化速率^[45]。郭金富等^[46]主编的《广东海岛海域海洋生物和渔业资源》一书中记录到 1990 年 9 月和 1991 年 4 月珠江口中东部岛群(包括外伶仃岛在内)底拖网游泳生物平均渔获率分别为 42.43 和 46.19 kg/h,远高于本研究所述的 10.468 和 21.269 kg/h,说明了目前珠江口渔业资源衰退明显的严峻态势。

3.2 游泳生物群落结构与环境因子关系

不同生物具有不同偏好的环境因子,环境因子的变动可影响游泳生物的分布,进而引起群落结构的改变。已有多位学者研究^[47-48]结果表明,水温、溶解氧、悬浮物、pH、叶绿素、营养盐等环境因子作为重要因素对海洋和内陆水域生物群落结构影响显著。沿岸和外海水系的相互对抗波动而具有明显的季节和区位差异,外伶仃海洋牧场游泳生物整体群落结构处于变动的不稳定状态。本研究中 RDA 结果显示,叶绿素 a、温度、石油类等因子是影响外伶仃附近海域游泳生物群落结构的主要因子。

基于食物链和营养级原理,叶绿素 a 质量浓

度与游泳生物资源量和种类息息相关。海洋中叶绿素 a 反映初级生产力的现状,同时也是表征浮游植物生物量和生物摄食饵料多寡的体现,通过层级效应传递和影响生物的分布和群落结构的变动。叶绿素 a 质量浓度高的海域浮游植物数量会相应偏高,作为初级生产者和饵料生物吸引浮游动物及其他生物摄食,从而为以浮游生物为饵料的消费者提供丰富的食物。9 月秋季调查显示叶绿素 a 质量浓度高于 4 月春季调查,渔获率也与其相似,春秋季共同优势种赤鼻棱鳀和银鲳均和叶绿素 a 呈正相关。芮银等^[49]针对大陈洋产卵场保护区鱼类调查结果与本研究相似,即在东海海域赤鼻棱鳀主要分布在叶绿素质量浓度较高的水域。唐广隆等^[41]针对外伶仃岛所处的珠江口万山群岛海域研究证明,游泳生物的分布与浮游植物群落紧密相关。USHIO 等^[50]对鱼类食物网结构研究发现随着温度的升高,初级生产力位于高位水平,群落结构趋于稳定。水文环境是仔稚鱼和游泳生物分布的关键因素^[51],浮游植物还是海流和水团的指示生物,外伶仃岛附近海域游泳生物群落结构的季节性变动也可能与水团的季节性变化有关。管伟等^[52]对南日列岛鱼类变化研究结果证明,水团通过影响饵料生物和洄游路线来控制鱼类群落结构,鱼类资源密度分布受季节性变化的水团影响明显。田丰歌等^[53]在研究珠江口康氏侧带小公鱼鱼卵分布特征时,根据站位表底层温度和盐度采用 K-means 动态聚类法将珠江口水体划分为三类(径流水、咸淡水、高盐水),结果表明鱼卵数量和分布与水团关系紧密。外伶仃岛所在珠江口海域受南海最大入海水系珠江的冲淡和中底层向岸余流作用,形成水温、盐度、浑浊度等不同特征区域。本研究推断受环境因素形成和控制的水团也是外伶仃海洋牧场附近海域游泳生物群落结构变化的重要影响因素之一。

石油类作为污染物对海洋生物的危害主要体现可急性影响直接导致海洋生物死亡。石油类对外伶仃岛近岸海域渔获量影响较为明显,这可能是因近岸岛礁海域受船舶、工业排放等问题的影响所致。石油类含有大量的烷烃和芳香烃等,不仅易在海面形成油膜隔绝气体交换,也会黏附在鱼体和鱼鳃的表面导致窒息死亡。同时石油类污染物的富集作用会缓慢地危及海洋生

物的生长,当体内累积达到一定浓度时会影响鱼体呼吸代谢,导致发育受阻、致病致畸等^[54]。本研究中石油类和长毛对虾(12)、及达叶鲐(50)、短吻蝠(58)高度接近,可能是由于这几种生物较其他生物来说抵抗力较强,对石油类污染具有一定程度的代谢能力和降解效应。贾晓平等^[55]对珠江口包括长毛对虾在内的鱼类、虾类、头足类和贝类样品脂肪烃组分特征参数分析也说明了脂肪烃主要来源于石油烃,在受石油影响的水域,部分具有较强适应能力的游泳生物降解和代谢石油烃的能力较强。

另外栖息环境的空间异质性对群落结构稳定性和生态功能也有重要影响,复杂多变的栖息环境可提供更丰富的渔获种类和数量。除岛礁独特地形地貌外,海洋牧场及其相关配套内容的建设改变了周边海域的地形地貌,增加了游泳生物栖息环境的异质性,从而影响生物群落结构^[35]。本研究中调查海域生境包含岛屿岩礁、人工鱼礁和海藻场等。一方面岩礁和人工鱼礁增加了生境的复杂性,吸引了趋礁鱼类和甲壳类等聚集,另一方面海藻场提供了优良的饵料来源和产卵环境^[56],作为许多鱼类物种繁育栖息地具有重要作用。

4 结论

珠江口外伶仃海洋牧场附近海域主要优势种有银鲳、赤鼻棱鳀、火枪乌贼、鹿斑蝠、印度鲷和细纹蝠,其中银鲳和赤鼻棱鳀为春秋两季的共有优势种。季节分布上春季和秋季游泳生物群落结构有显著性差异,受伏季休渔政策和游泳生物生活史变化规律等因素影响,秋季渔获率高于春季。影响游泳生物分布的环境因子主要包括叶绿素 a、石油类及综合作用形成的水团等。调查为推进外伶仃海洋牧场建设工作,全面摸清该海域游泳生物资源状况具有重要作用,然而短期调查结果可能存在一定偏差,调查所得数据并不能全面反映该海域生物群落结构的变动机制,定期和常态化的监测和调查尤为重要。

参考文献:

- [1] 苏芯莹,钟瑜,李尧,等. 珠江口典型海岛周边水域浮游植物分布特征及其影响因素[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(5): 30-42.
SU X Y, ZHONG Y, LI Y, et al. Distribution characteristics and influencing factors of phytoplankton in

- waters around typical islands in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2020, 39(5): 30-42.
- [2] KERNS B K, OHMANN J L. Evaluation and prediction of shrub cover in coastal Oregon forests (USA) [J]. *Ecological Indicators*, 2004, 4(2): 83-98.
- [3] 甘伟冬, 吴涌珍, 俞皓淳, 等. 东北农牧交错带啮齿动物群落结构组成及影响因素初探[J]. *野生动物学报*, 2023, 44(1): 22-30.
- GAN W D, WU Y Z, YU H C, et al. Preliminary study on rodent community structure and its influencing factors in the agro-pastoral ecotone of northeast China [J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2023, 44(1): 22-30.
- [4] 陈赛男, 钟为章, 牛建瑞, 等. 复合菌剂对土霉素菌渣好氧堆肥腐熟及微生物群落结构影响[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(8): 2672-2681.
- CHEN S N, ZHONG W Z, NIU J R, et al. Effect of compound bacterial agent on maturity and microbial community structure of oxytetracycline residue aerobic composting [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(8): 2672-2681.
- [5] 唐良德, 赵海燕, 郭灵杭. 海南北部蔬菜生境天敌瓢虫多样性研究[J]. *环境昆虫学报*, 2023: 1-13.
- TANG L D, ZHAO H Y, GUO L H. Community structure and species diversity of predatory ladybeetles in vegetable crops in north Hainan [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2023: 1-13.
- [6] 潘士远, 林坤, 吕少梁, 等. 种间互作对雷州湾海域鱼类群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(22): 9383-9393.
- PAN S Y, LIN K, LYU S L, et al. Importance of species interactions in structuring fish community of Leizhou Bay waters, northern South China Sea [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(22): 9383-9393.
- [7] PANG Z W, XU B D, ZAN X X, et al. Shrimp community structure and its relationships with environmental factors in Haizhou Bay and adjacent waters in spring [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(6): 191-195.
- [8] 刘勇, 叶孙忠, 马超, 等. 福建三沙湾游泳动物种类和数量的季节变化[J]. *海洋科学*, 2022, 46(5): 86-94.
- LIU Y, YE S Z, MA C, et al. Seasonal variations in species and the quantity of nekton in Sansha Bay, Fujian [J]. *Marine Sciences*, 2022, 46(5): 86-94.
- [9] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2022, towards blue transformation[R]. Rome: FAO, 2022.
- [10] 孙军, 林茂, 陈孟仙, 等. 全球气候变化下的海洋生物多样性[J]. *生物多样性*, 2016, 24(7): 737-738.
- SUN J, LIN M, CHEN M X, et al. Marine biodiversity under global climate change [J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(7): 737-738.
- [11] HARVELL C D, MITCHELL C E, WARD J R, et al. Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota[J]. *Science*, 2002, 296(5576): 2158-2162.
- [12] 蒋明峰, 陈新军. 中东太平洋赤道公海海域鱿钓渔业自主休渔效果初步评价[J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(3): 670-676.
- JIANG M F, CHEN X J. Preliminary evaluation of the seasonal moratorium of squid fishery on the high seas in the equatorial waters of Central Eastern Pacific [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(3): 670-676.
- [13] 刘佳. 九龙江河口生态系统健康评价研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- LIU J. Ecosystem health assessment of Jiulong river estuary [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.
- [14] TROKHYMETS V, SAVYTSKIY O, ZINKOVSKIY A, et al. Species composition, distribution and relative abundance of the inshore fish community off the Argentine Islands, Bellingshausen Sea [J]. *Polar Biology*, 2022, 45(5): 845-855.
- [15] BLANCHARD F, LELOC' H F, HILY C, et al. Fishing effects on diversity, size and community structure of the benthic invertebrate and fish megafauna on the Bay of Biscay coast of France [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, 280: 249-260.
- [16] 应锐, 蒋力, 尹芳敏, 等. 基于刺网、地笼的考洲洋游泳动物群落结构和多样性分析[J]. *南方水产科学*, 2019, 15(4): 1-10.
- YING R, JIANG L, YIN F M, et al. Analysis of community structure and diversity of nekton in Kaozhouyang Bay using gill nets and cages [J]. *South China Fisheries Science*, 2019, 15(4): 1-10.
- [17] 马路阔, 陈全震, 程方平, 等. 三门湾游泳动物群落结构与生物多样性研究[J]. *海洋与湖沼*, 2022, 53(2): 384-393.
- MA L K, CHEN Q Z, CHENG F P, et al. Analysis of community structure and biodiversity of nekton in the Sanmen Bay [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2022, 53(2): 384-393.
- [18] 妙星, 宋普庆, 刘世刚, 等. 三娘湾游泳动物种类组成及群落结构分析[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2022, 27(4): 299-306.
- MIAO X, SONG P Q, LIU S G, et al. Analysis of species composition and community structure of nekton in Sanniang Bay [J]. *Journal of Jimei University (Natural Science)*, 2022, 27(4): 299-306.
- [19] 牛翠娟, 娄安如, 孙濡泳, 等. 基础生态学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- NIU C J, LOU A R, SUN R Y, et al. Foundations in ecology [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [20] 李渊, 张静, 张然, 等. 南沙群岛西南部和北部湾口海域鱼类物种多样性[J]. *生物多样性*, 2016, 24(2): 166-174.
- LI Y, ZHANG J, ZHANG R, et al. Fish diversity in

- southwestern seas of Nansha Islands and the mouth of Beibu Bay[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(2): 166-174.
- [21] MOLINA A, DUQUE G, COGUA P. Influences of environmental conditions in the fish assemblage structure of a tropical estuary[J]. *Marine Biodiversity*, 2020, 50(1): 5.
- [22] HUANG S M, PANG H, MA K Y, et al. Evolution of the hydrocarbon migration system of the lower Enping formation in the pearl river estuary basin [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 222: 211454.
- [23] 吴旗韬, 樊杰, 张虹鸥, 等. 跨海通道空间效益模型:以珠江口跨海通道为例[J]. *地理研究*, 2015, 34(11): 2061-2072.
- WU Q T, FAN J, ZHANG H O, et al. Spatial effects of different fixed links on accessibility and regional economic linkage in Pearl River Delta [J]. *Geographical Research*, 2015, 34(11): 2061-2072.
- [24] 洪晓琪. 极端天气下珠江口水域船舶疏散与恢复调度研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- HONG X Q. Study on ship evacuation and recovery scheduling in Pearl River Estuary under extreme weather[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [25] SUN R, MA M, ZHONG K, et al. Geochemistry and zircon U-Pb ages of the Oligocene sediments in the Baiyun Sag, Zhujiang River Mouth Basin [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 40(2): 123-135.
- [26] 张晓浩, 黄华梅, 王平, 等. 1973—2015年珠江口海岸岸线和围填海变化分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2016(5): 9-15.
- ZHANG X H, HUANG H M, WANG P, et al. Change analysis of coastline and sea reclamation in Pearl River Estuary from 1973 to 2015 [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2016(5): 9-15.
- [27] 杨青云, 李敏华, 相景昌, 等. 珠江口深圳海域总氮陆源入海污染负荷与水环境容量分析[J]. *环境生态学*, 2023, 5(3): 91-98.
- YANG Q Y, LI M H, XIANG J C, et al. Analysis of land-based nitrogen into the sea and water environmental capacity in Shenzhen sea area of Pearl River estuary [J]. *Environmental Ecology*, 2023, 5(3): 91-98.
- [28] 陈静, 黄德练, 王雪辉, 等. 基于DNA条形码的江门近岸海域春季鱼卵的种类鉴定及其形态[J]. *南方水产科学*, 2022, 18(6): 10-18.
- CHEN J, HUANG D L, WANG X H, et al. Species identification and morphology of fish eggs from Jiangmen coastal waters in spring using DNA barcoding [J]. *South China Fisheries Science*, 2022, 18(6): 10-18.
- [29] 曾艳艺, 赖子尼, 杨婉玲, 等. 珠江河口渔业生物稳定同位素营养级分析[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 194-202.
- ZENG Y Y, LAI Z N, YANG W L, et al. Trophic spectrum of fishery species from the Pearl River Estuary by stable isotope analysis [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(1): 194-202.
- [30] 林洪瑛, 韩舞鹰. 珠江口伶仃洋枯水期十年前后的水质状况与评价[J]. *海洋环境科学*, 2001, 20(2): 28-31.
- LIN H Y, HAN W Y. Water quality assessment and analysis before and after the decade of the dry period in Lingdingyang estuary of the Pearl River Mouth [J]. *Marine Environmental Science*, 2001, 20(2): 28-31.
- [31] 张祖麟, 陈宗团, 徐立, 等. 珠江口外伶仃洋的现代沉积速率及重金属污染[J]. *海洋通报*, 1998, 17(3): 53-57.
- ZHANG Z L, CHEN Z T, XU L, et al. Modern sedimentary rate and heavy metal pollution in the Pearl River Estuary [J]. *Marine Science Bulletin*, 1998, 17(3): 53-57.
- [32] 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.
- FENG X, FAN J T, SUN X, et al. The stock enhancement effect evaluation of artificial reef in Wailingding, Zhuhai [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(12): 3228-3236.
- [33] 程济生, 俞连福. 黄、东海冬季底层鱼类群落结构及多样性变化[J]. *水产学报*, 2004, 28(1): 29-34.
- CHENG J S, YU L F. The change of structure and diversity of demersal fish communities in the Yellow Sea and East China Sea in winter [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2004, 28(1): 29-34.
- [34] 王雪辉, 杜飞雁, 邱永松, 等. 1980—2007年大亚湾鱼类物种多样性、区系特征和数量变化[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2403-2410.
- WANG X H, DU F Y, QIU Y S, et al. Variations of fish species diversity, faunal assemblage, and abundances in Daya Bay in 1980-2007 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2403-2410.
- [35] 韩旭东, 章守宇, 汪振华, 等. 马靴列岛及其东部海域鱼类群落格局与环境因子之间的关系[J]. *水产学报*, 2019, 43(6): 1483-1497.
- HAN X D, ZHANG S Y, WANG Z H, et al. Fish community structure and its relationship with environmental factors in the Ma'an Archipelago and its eastern waters [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(6): 1483-1497.
- [36] BAVINCK M, DE KLERK L, VAN DIJK D, et al. Time-zoning for the safe-guarding of capture fisheries: a closed season in Tamil Nadu, India [J]. *Marine Policy*, 2008, 32(3): 369-378.
- [37] 苏莹佳, 陈国宝, 周艳波, 等. 2015—2017年南海海域伏季休渔制度实施效果评价[J]. *南方水产科学*, 2019, 15(2): 20-28.
- SU Y J, CHEN G B, ZHOU Y B, et al. Assessment of impact of summer fishing moratorium in South China Sea

- during 2015–2017 [J]. *South China Fisheries Science*, 2019, 15(2): 20-28.
- [38] 王文杰, 陈丕茂, 袁华荣, 等. 粤东柘林湾甲壳类群落结构季节变化分析[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(3): 29-39.
- WANG W J, CHEN P M, YUAN H R, et al. Analysis of seasonal variation of Crustaceans community structure in Zhelin Bay of eastern Guangdong [J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(3): 29-39.
- [39] 吴程宏, 张羽翔, 刘维, 等. 基于上岸渔获调查的海南岛近海渔场伏季休渔效果评价[J]. *渔业研究*, 2021, 43(2): 200-206.
- WU C H, ZHANG Y X, LIU W, et al. Assessment of the impact of summer fishing moratorium in the offshore fishing grounds of Hainan Island based on landing survey [J]. *Journal of Fisheries Research*, 2021, 43(2): 200-206.
- [40] ARENDSE C J, GOVENDER A, BRANCH G M. Are closed fishing seasons an effective means of increasing reproductive output? A per-recruit simulation using the limpet *Cymbula granatina* as a case history [J]. *Fisheries Research*, 2007, 85(1/2): 93-100.
- [41] 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.
- TANG G L, LIU Y, WU P, et al. Community structure of fishery resources and its relationship to environmental factors in the Wanshan Islands Sea of the Pearl River Estuary in spring [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(8): 1198-1209.
- [42] 张虎, 贲成恺, 汪振华, 等. 江苏近岸海域鱼类组成和群落时空变化[J]. *水产研究*, 2018, 5(2): 76-84.
- ZHANG H, BEN C K, WANG Z H, et al. Species composition and spatial-temporal patterns of fish assemblages in Jiangsu coastal waters [J]. *Open Journal of Fisheries Research*, 2018, 5(2): 76-84.
- [43] 刘鸿, 叶振江, 李增光, 等. 黄海中部近岸春夏季鱼卵、仔稚鱼群落结构特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3775-3784.
- LIU H, YE Z J, LI Z G, et al. The community structure of ichthyoplankton in the central Yellow Sea in spring and summer [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3775-3784.
- [44] 王迪, 林昭进. 珠江口鱼类群落结构的时空变化[J]. *南方水产*, 2006, 2(4): 37-45.
- WANG D, LIN Z J. Spatial and temporal variations of fish community structure in the Pearl River Estuary waters [J]. *South China Fisheries Science*, 2006, 2(4): 37-45.
- [45] PEASE A A, TAYLOR J M, WINEMILLER K O, et al. Multiscale environmental influences on fish assemblage structure in central Texas streams [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2011, 140(5): 1409-1427.
- [46] 郭金富, 李茂照, 余勉余. 广东海岛海域海洋生物和渔业资源[M]. 广州: 广东科技出版社, 1994.
- GUO J F, LI M Z, YU M Y. Marine organisms and fishery resources in Guangdong island waters [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1994.
- [47] 袁晨, 裴瑞华, 郑梓瑶, 等. 广东东莞松木山水库鱼类群落结构及其与环境因子的关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(4): 940-949.
- YUAN C, PEI R H, ZHENG Z Y, et al. Structural characteristics of fish assemblage and its relationship with environmental factors in Songmushan Reservoir, Dongguan City of Guangdong Province [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(4): 940-949.
- [48] YE S W, LI Z J, LEK-ANG S, et al. Community structure of small fishes in a shallow macrophytic lake (Niushan Lake) along the middle reach of the Yangtze River, China [J]. *Aquatic Living Resources*, 2006, 19(4): 349-359.
- [49] 芮银, 蒋日进, 王好学, 等. 大洋产卵场保护区鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *水产学报*, 2022, 46(6): 995-1007.
- RUI Y, JIANG R J, WANG H X, et al. Characteristics of fish community structure and its relationship with environmental factors in Dachenyang spawning ground reserve [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(6): 995-1007.
- [50] USHIO M, HSIEH C H, MASUDA R, et al. Author Correction: fluctuating interaction network and time-varying stability of a natural fish community [J]. *Nature*, 2022, 605(7911): E9.
- [51] 鞠佳丽, 王小谷, 吴尘艳, 等. 南海北部海域夏季仔稚鱼种类组成和主要环境因子的关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(1): 190-202.
- JU J L, WANG X G, WU C Y, et al. The relationship between species composition of fish larvae and juveniles and main environment factors in the northern South China Sea in summer [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(1): 190-202.
- [52] 管伟, 陈佳杰, 徐兆礼. 南日列岛西南部海区鱼类数量变化及其与水团关系[J]. *热带海洋学报*, 2016, 35(3): 65-71.
- GUAN W, CHEN J J, XU Z L. The distribution and seasonal variation of fish populations in the southwest waters of the Nanri Islands and their relationships with the variation of water masses [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2016, 35(3): 65-71.
- [53] 田丰歌, 何薇, 黄彬彬, 等. 珠江口康氏侧带小公鱼鱼卵的空间分布特征[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(3): 694-701.
- TIAN F G, HE W, HUANG B B, et al. Spatial distribution of eggs of *Stolephorus commersonii* in the Pearl River Estuary [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(3): 694-701.

- [54] JIANG Z B, HUANG Y J, CHEN Q Z, et al. Acute toxicity of crude oil water accommodated fraction on marine copepods: the relative importance of acclimatization temperature and body size [J]. *Marine Environmental Research*, 2012, 81: 12-17.
- [55] 贾晓平, 林钦. 珠江口海洋生物体中脂肪烃组分的气相色谱指纹特征分析[J]. *中国环境科学*, 1997, 17(3): 256-259.
- JIA X P, LIN Q. Analysis of gas chromatography fingerprint characteristics of aliphatic hydrocarbons in marine organisms from the pearl river estuary [J]. *China Environmental Science*, 1997, 17(3): 256-259.
- [56] GUIDETTI P. Differences among fish assemblages associated with nearshore *Posidonia oceanica* seagrass beds, rocky - algal reefs and unvegetated sand habitats in the Adriatic Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 50(4): 515-529.

Relationship between community structure of nekton and environmental factors in Wailingding marine ranching area

FENG Xue^{1,2,3}, DAI Xiaojie¹, YUAN Huarong^{2,3}, CHENG Zhijian^{2,3}, CHEN Pimao^{2,3}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. South China Sea Fisheries Research Institute, CAFS, Guangzhou 510300, Guangdong, China; 3. Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environments, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China/Key Laboratory of Marine Ranching, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, Guangzhou 510300, Guangdong, China)

Abstract: In order to understand the structural characteristics of nekton community near Wailingding marine ranching area, a comprehensive survey of resources and environment was carried out in the spring and autumn of 2020, and the composition of nekton, dominant species, catch rate and community structure characteristics were analyzed, and a nekton community structure data matrix was constructed to analyze the influence relationship between nekton community structure and environmental factors. A total of 73 species of nektons were collected, belonging to 12 orders and 30 families and 49 genera, the largest number of fish with 47 species, 10 species of shrimps, 9 species of crabs, 4 species of cephalopods, and 3 species of mantis shrimps. Index of relative importance (IRI) results shows that there are four dominant species with $IRI > 1\ 000$, namely *Pampus argenteus*, *Thrissa kammalensis*, *Loligo beka* and *Leiognathus ruconius*, among which *Pampus argenteus* and *Thrissa kammalensis* were the common dominant species in both seasons. The results of Margalef index (D'), Shannon-Wiener index (H') and Pielou index (J') showed that spring was higher than autumn, one-way analysis of variance (ANOVA) showed that H' and J' were significantly different in different seasons, however D' was no significant seasonal difference. Similarity of percentage (SIMPER) revealed that the species with the highest contribution in spring was *Thrissa kammalensis*, and the highest contribution in autumn was *Ilisha indica*, the average dissimilarity was up to 78.64% and the cumulative contribution rate of anisotropy was 42.72%. Redundancy analysis (RDA) shows that chlorophyll a, water mass and petroleum are the main environmental factors that affect the community structure in Wailingding marine ranching area. The study shows that the high-density area of catch mainly appears in the coastal waters of islands and reefs, and the community composition of swimming organisms is obviously different in different seasons, which may be related to the law of life history, the fishing moratorium policy and the influence of key environmental factors in the area. The result can provide basic data and theoretical reference for scientifically and reasonably understanding the characteristics of nekton community in the construction area of marine ranching, guiding and evaluating the ecological restoration effect of marine ranching.

Key words: Wailingding; species composition; community structure; environmental factors; RDA analysis