

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2019.18378

雷州湾附近海域鱼类群落结构及其与环境因子的关系

曾嘉维¹, 林坤¹, 王学锋¹, 李纯厚²

1. 广东海洋大学水产学院, 广东 湛江 524088;

2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300

摘要: 为了解雷州湾及其附近海域渔业生物的群落结构及其物理影响因素, 于 2016—2017 年开展了 4 个季度的底拖网渔业资源与生态环境调查。运用聚类分析、相似性百分比分析以及冗余分析研究了该海域鱼类群落结构及其与环境因子之间的关系。结果表明, 雷州湾附近海域共捕获鱼类 256 种, 以底层鱼类和暖水性鱼类为主; 各季节均可划分为两个亚群落(Anosim test: $R=0.28\sim0.77$, $P<0.01$), 群落 I 的平均相似性为 38.48%~47.44%, 相似性的主要贡献种为斑头舌鳎(*Cynoglossus puncticeps*)、中华海鲇(*Tachysurus sinensis*)和线纹鳗鲡(*Plotosus lineatus*)等; 群落 II 的平均相似性为 41.38%~52.59%, 主要贡献种为多齿蛇鲻(*Saurida tumbil*)、斑头舌鳎和花斑蛇鲻(*Saurida undosquamis*)等。两个亚群落的平均相异性为 57.74%~76.25%; 水深是 4 个季度显著影响鱼类分布的重要生态因子, 溶解氧是 3 个季度显著影响鱼类分布的重要环境因子。综上所述, 雷州湾及其附近海域鱼类种类数丰富, 高于海州湾、大亚湾等海域; 本研究揭示了该海域鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系, 为该海域鱼类资源的养护及利用提供参考依据。

关键词: 鱼类; 群落结构; 雷州湾; 环境因子

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2019)01-0108-10

雷州湾位于广东省西南部雷州半岛东侧, 北有东海岛, 与湛江港相隔, 东有硇洲岛为屏障, 南至徐闻县外罗渔港, 湾口向东南敞开, 水域宽阔, 面积达 1690 km²[1]。潮汐特征较为复杂, 属于非正规半日潮, 受潮汐、沿岸流和外海水的综合影响[2]。该海域是南海多种幼鱼、幼虾的重要栖息地, 同时也是世界第二大中华白海豚种群的栖息地(仅次于珠江口)[3], 具有重要的生态价值。关于雷州湾海域海洋生态系统状况的研究较少, 据《中国海湾志》[1]记载, 20 世纪 90 年代该海域水质优良, 渔业资源丰富。然而近年来, 随着雷州湾沿岸工农业的迅速发展, 雷州湾海域生态系统正经受前所未有的压力, 海洋生态系统出现了退化趋势[2, 4]。

气候变化的加剧和人为因素的潜在影响, 可能导致海洋生态系统及其生物群落发生实质性变化[5-6]。鱼类群落结构与功能可反映海域生态系统状态, 是海洋生态系统质量评价的重要指标[7]。研究雷州湾海域鱼类群落结构与功能及其物理驱动因素, 有助于了解该海域鱼类在群落中的相对重要性及其栖息地偏好, 为渔业资源增殖养护的种类筛选、容量评估等提供基础数据。

本研究依据 2016—2017 年雷州湾及其附近海域 4 个季度的渔业资源与生态环境调查数据, 对该海域鱼类的种类组成及其生态类型、群落结构、群落相似性和相异性的主要贡献种, 以及群落结构与环境因子的关系进行了分析, 为今后深入研究该海域渔业资源对气候变化及人类活动的

收稿日期: 2018-11-9; 修订日期: 2018-12-17.

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201403008).

作者简介: 曾嘉维(1992-), 男, 硕士研究生, 从事渔业生态学研究. E-mail: zengjiw1992@163.com

通信作者: 王学锋, 副教授. E-mail: xuefeng1999@126.com

响应及其资源增殖养护规划等提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来源于 2016 年 4 月(春季)、8 月(夏季)、11 月(秋季)和 2017 年 2 月(冬季)在雷州湾附近海域进行的渔业资源底拖网调查。每个航次分别调查 20 个站位(图 2), 其中冬季 S19 号站因样品损坏, 未进行分析。调查船长 24 m, 宽 5 m, 主机功率 180 kW。底拖网网口宽度 11 m, 网口网目长度 40 mm, 网囊网目长度 25 mm。拖网时于船的左右舷各放一张网, 每个站拖网时间约为 40 min, 拖速约为 3 kn, 因海况不同, 每个站位实际拖速和拖网时间可能有所偏差, 在数据分析前统一进行标准化处理, 即换算成在航速 3 kn 的情况下每小时的渔获量(kg/h)。渔获物样品采集和分析均按照《海洋调查规范》^[8]中规定的方法进行。同时现场采用 SM-5A 型测深仪测定水深, YSI 水质检测仪测定溶解氧、pH、盐度和水温。采水样 500 mL 低温保存, 送回实验室采用分光光度法测定叶绿素浓度。

1.2 数据处理与分析

1.2.1 鱼类类群划分 根据鱼类对水温的适应能力, 划分为冷水种、温水种和暖水种 3 个类型, 划分依据如下^[9-10]:

(1)冷水种: 一般生长、生殖适温低于 4℃, 其自然分布区月平均水温不高于 10℃, 包括寒带种和亚寒带种, 前者适温为 0℃左右, 后者为 0~4℃;

(2)温水种: 生长、生殖适温范围较广, 为 4~20℃, 自然分布区月平均变化幅度很大, 为 0~25℃, 包括冷温种和暖温种, 前者适温为 4~12℃, 后者为 12~20℃;

(3)暖水种: 生长、生殖适温高于 20℃, 自然分布区月平均水温大于 15℃, 包括亚热带种和热带种, 前者适温为 20~25℃, 后者适温高于 25℃。

参考《中国海洋鱼类》^[11], 根据鱼类喜好的栖息水层将其分为中上层、中下层和底层鱼类。

仅在全年某 1 个季度出现的种类称为该季的特有种; 在某 2 季(或 2 季以上)共同出现的鱼类称为 2 季(或 2 季以上)的共有种。

1.2.2 鱼类资源密度的估算 采用扫海面积法, 其计算公式如下:

$$\rho_i = \frac{C_i}{a_i q_i}$$

式中, ρ_i 指第 i 站的鱼类资源密度(重量密度单位: kg/km²); C_i 指第 i 站每小时拖网渔获物中鱼类重量(重量单位: kg/h); a_i 指第 i 站的网具每小时扫海面积(km²/h); q 指网具捕获率, 本研究取 0.5。

1.2.3 多元统计分析 在进行多元统计分析前, 为平衡优势种和非优势种在群落中的作用, 将出现频率小于 10%的稀有种剔除, 同时对原始数据中各站位鱼类的重量资源密度进行 4 次方根转换, 环境因子除 pH 外进行 lg(x+1)转换。

采用 K-means 聚类^[12]分析各季度不同站位鱼类群落的聚集性。该聚类的基本思想是根据给定的参数 k , 先把 20 个站位粗略地分为 k 类, 然后按照 Hartigan-Wong 算法修改不合理的分类, 直到达到收敛或者停止阈值。由于该算法需要提前给定聚类数 k , 而确定最佳聚类数目是一个很重要的问题, 因此采用 Calinsky 准则^[13]确定最佳聚类数目:

$$[SS_b/(k-1)]/[SS_w/(n-k)]$$

式中, k 是聚类数, n 是样本数, SS_w 是组内平方和误差, SS_b 是组与组之间的平方和误差, SS_w 越小, SS_b 越大, 聚类效果越好, 所以一般 Calinsky criterion 值越大, 聚类效果越好。为检验聚类分析后各组之间差异是否具有显著性, 对聚类结果进行相似性分析(ANOSIM)。用相似性百分比分析(SIMPER)分析各组内相似性和组间相异性的平均贡献率及其主要贡献种, 将贡献率排名前 5 的种作为划分标准。

在分析物种分布与环境因子关系时, 对各站位的鱼类质量密度矩阵(站位×各鱼种的质量密度)进行除趋势对应分析(DCA), 根据 DCA 分析里面的“lengths of gradient”来判别选择线性模型(RDA)还是单峰模型(CCA)^[14]。如果 DCA 排序前 4 个轴中最大值超过 4, 选择单峰模型排序更合适。如果是小于 3, 则选择线性模型更好。如果介于 3~4 之间, 单峰模型和线性模型均可。用蒙特卡洛置换检验(Monte Carlo permutation test)检验环境因

子与物种分布相关的显著性, 置换循环的次数为 999 次。SIMPER 分析使用 PRIMER v7.0 软件进行, 其余数据分析及可视化采用 R 统计软件^[15] (Vegan package, VennDiagram package) 完成, 地图 Arcgis 10.2 绘制。

2 结果与分析

2.1 种类组成及其生态类型

雷州湾附近海域 4 个季度调查共采集到鱼类 52937 尾, 经鉴定隶属于 18 目 75 科 155 属 256 种(不含未定种 8 种)。各季度种类数从大到小依次为夏季(172 种)>春季(136 种)>冬季(114 种)>秋季(109 种)。用各季度鱼类种类数为子集构建不同季度鱼类种类数重叠的 Venn 图(图 1), 结果表明 4 季共有种 39 种, 分别占春季、夏季、秋季和冬季总种类数的 28.68%、22.67%、35.78%和 34.21%。特有种种类数春季为 31 种(占该季总种类数的 22.79%), 夏季 40 种(23.26%), 秋季 13 种(11.93%)和冬季 24 种(21.05%)。

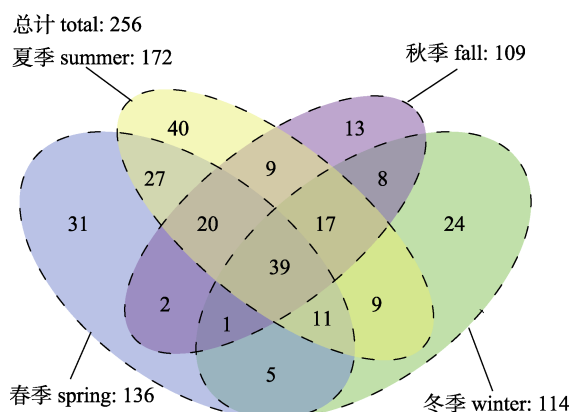


图 1 雷州湾海域各季度鱼类种类数的 Venn 图分析

Fig. 1 Species richness of Leizhou Bay waters between seasons using Venn diagrams

从适温类型看, 共有种中以暖水性鱼类为主(82.05%), 其余为暖温性鱼类(17.95%), 未出现冷水性鱼类。特有种中春季、夏季和秋季均以暖水性为主, 分别占各季度总种类数的 74.19%、90.00%和 92.31%, 冬季特有种以暖水性(58.33%)和暖温性(41.67%)鱼类为主。

从栖息水层看, 共有种以底层鱼类为主(76.92%), 其次为中下层鱼类(15.38%), 中上层鱼

类占比最少(7.69%)。特有种栖息水层占比与共有种相似, 以底层鱼类为主(61.54%~77.42%), 其次为中下层鱼类(16.13%~30.77%), 中上层鱼类最少(6.45%~12.50%)。

2.2 鱼类群落结构

各季度 Calinsky criterion 值均在 $k=2$ 时达到最大, 因此各季度雷州湾附近海域鱼类均分为 2 个亚群落, 且两个群落之间差异有高度统计意义 (Anosim test $R=0.28\sim0.77$, $P<0.01$) (图 2)。群落 I 大部分站点位于 10 m 等深线及 10 m 以浅范围内, 群落 II 大部分站点位于 10~20 m 等深线范围内。春季群落 I 包含 9 个站位, 位于湛江港口门及雷州湾湾口附近海域; 群落 II 包含 11 个站位, 位于群落 I 东侧 10~20 m 附近海域; 夏季群落 I 包含 14 个站位, 较春季多, 主要表现为湛江港口门群落向东扩展, 压缩了群落 II 的空间; 秋季群落 I 包含 11 个站位, 范围较夏季有所减小; 冬季群落 I 包含 15 个站位, 范围为四季最广, 群落 II 仅含 4 个站位, 主要位于 20 m 等深线附近。

2.3 群落相似性的主要贡献种

各季度对群落平均相似性贡献前 5 的鱼类及其贡献率见表 1。群落 I 的平均相似性为 38.48%~47.44%, 前 5 的鱼类对群落相似性的累计贡献率为 31.58%~50.05%。其中斑头舌鲷(*Cynoglossus puncticeps*)、中华海鲢(*Tachysurus sinensis*)和线纹鳗鲡(*Plotosus lineatus*)为 3 个季度中群落 I 相似性的主要贡献种, 皮氏叫姑鱼(*Johnius belangerii*)和食蟹豆齿鳗(*Pisodonophis cancrivorus*)在 2 个季度中为群落 I 相似性的主要贡献种, 其余种类如花斑蛇鲻(*Saurida undosquamis*)、二长棘鲷(*Parargyrops edita*)和竹荚鱼(*Trachurus japonicus*)等仅在某 1 个季度为群落 I 的主要贡献种。

群落 II 的平均相似性为 41.38%~52.59%, 前 5 的鱼类累计贡献率为 23.19%~59.91%。其中多齿蛇鲻(*Saurida tumbil*)为 3 个季度中群落 II 相似性的主要贡献种, 斑头舌鲷、花斑蛇鲻、中华海鲢和二长棘鲷在 2 个季度中为群落 II 相似性的主要贡献种, 其余种类如竹荚鱼、鹿斑鲷(*Secutor ruconius*)和丽叶鲷(*Alepes kleinii*)等仅在某 1 个季度为群落 II 相似性的主要贡献种。

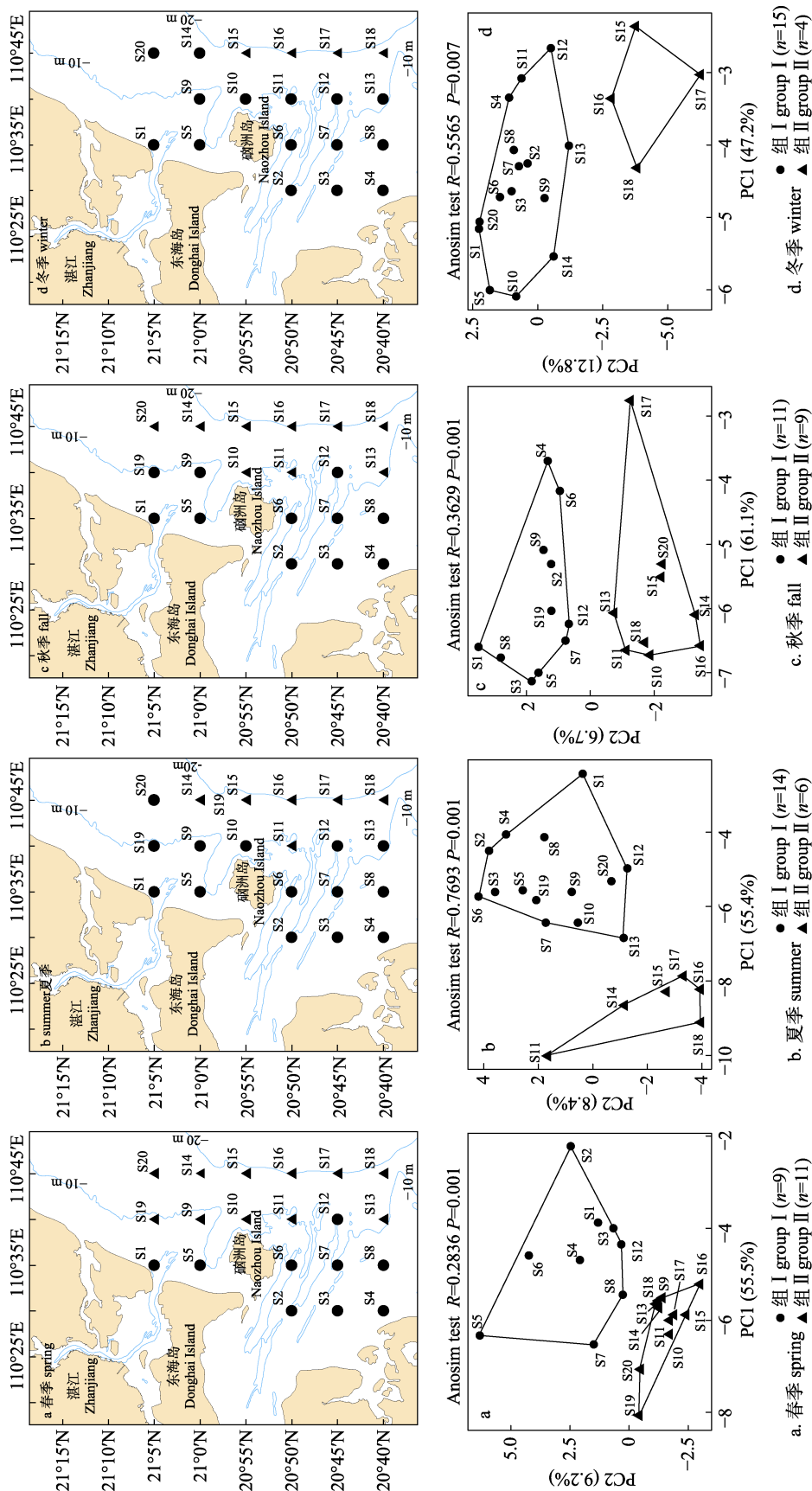


图2 雷州湾附近海域鱼类群落聚类分析
 Fig. 2 K-means clustering analysis of fishes in Leizhou Bay waters

表 1 雷州湾附近海域鱼类群落内相似性贡献前 5 的种类及其贡献率
Tab. 1 The top five typifying fish species and their percentage contributions to the average within-group similarity in Leizhou Bay waters

种名 species	群落 I group I				群落 II group II			
	春季 spring	夏季 summer	秋季 fall	冬季 winter	春季 spring	夏季 summer	秋季 fall	冬季 winter
斑头舌鲷 <i>Cynoglossus puncticeps</i>		6.33	7.47	13.86			7.66	12.87
花斑蛇鲻 <i>Saurida undosquamis</i>	11.64				13.07			15.14
中华海鲷 <i>Tachysurus sinensis</i>		6.11	7.84	10.18	4.92		6.54	
多齿蛇鲻 <i>Saurida tumbil</i>					19.68	4.50		10.95
线纹鳎 <i>Plotosus lineatus</i>		4.48	11.22	15.14				
二长棘鲷 <i>Parargyrops edita</i>	10.29				10.19	5.37		
竹荚鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	7.77							10.00
皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belangerii</i>			9.49	5.11				
食蟹豆齿鳎 <i>Pisodonophis cancrivorus</i>		7.93	6.34					
鹿斑鲷 <i>Secutor ruconius</i>								10.95
丽叶鲷 <i>Alepes kleinii</i>		6.73				3.93		
短吻鲷 <i>Leiognathus brevirostris</i>	9.58							
刺鲷 <i>Psenopsis anomala</i>	8.58							
黑斑多指马鲛 <i>Polydactylus sextarius</i>							7.24	
双线舌鲷 <i>Cynoglossus bilineatus</i>							6.81	
黄鲫 <i>Setipinna tenuifilis</i>							5.98	
多鳞鱚 <i>Sillago sihama</i>				5.75				
绿鳍鱼 <i>Chelidonichthys kumu</i>					5.27			
海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i>						5.03		
弯角鲷 <i>Callionymus curvicornis</i>						4.36		
总计 total	47.86	31.58	42.36	50.05	53.13	23.19	34.23	59.91

2.4 群落相异性的主要贡献种

表 2 列出了各季度鱼类群落相异性及对相异性贡献前 5 的物种。各季度两个群落的平均相异性为 57.74%~76.25%，相异性最高为冬季，最低为秋季。春季对两群落相异性贡献较高的物种包括多齿蛇鲻、短吻鲷(*Leiognathus revirostris*)、花斑蛇鲻、竹荚鱼和中华海鲷等；夏季为丝背美尾鲷(*Callionymus doryssus*)、二长棘鲷、弯角鲷(*Callionymus curvicornis*)、线纹鳎和多齿蛇鲻等；秋季为线纹鳎、中华海鲷、黑鳃舌鲷(*Cynoglossus roulei*)、皮氏叫姑鱼和黄鲫(*Setipinna tenuifilis*)；冬季为花斑蛇鲻、多齿蛇鲻、竹荚鱼、线纹鳎和中华海鲷等。

2.5 鱼类群落与环境因子的关系

各季度 DCA 排序前 4 个轴中最大值均小于 4，因此选择基于线性模型的冗余分析(RDA)来分析鱼类群落与环境因子的关系(图 3)，环境因子的

显著性检验见表 3。

春季溶解氧和水深对鱼类群落影响具高度统计意义($P<0.01$)，其余环境因子影响不具统计意义($P>0.05$)。水深与群落 II 呈正相关。6 个环境因子对鱼类空间格局的贡献率为 41.98%，第 1 排序轴共解释了 14.36%的物种分布变化，第 2 排序轴共解释了 10.56%的物种分布量变化。

夏季仅水深对鱼类群落影响具高度统计意义($P<0.01$)。水深与群落 I 除 S20 和 S13 号站之外的其他站位呈负相关，与群落 II 呈正相关。环境因子对鱼类空间格局的贡献率为 44.31%，第 1 排序轴共解释了 18.75%的物种分布变化，第 2 排序轴共解释了 9.49%的物种分布变化。

秋季除 pH 外，其余环境因子对鱼类群落影响具高度统计意义($P<0.01$)，其中影响较大的有溶解氧、水深和水温。群落 I 北侧与溶氧呈正相关，南侧与叶绿素 a 呈正相关。群落 II 与水深

表 2 雷州湾附近海域鱼类群落间相异性及其相异性贡献前 5 的种类
Tab. 2 The top five discriminating fish species and their contributions to the average between-group dissimilarity in Leizhou Bay waters

种类 species	平均资源密度/(kg/km ²) average catch rate		贡献率/% contribution	累计贡献率/% cumulated contribution
	群落 I group I	群落 II group II		
春季 spring				
多齿蛇鲻 <i>Saurida tumbil</i>	1.63	150.06	5.17	5.17
短吻鲷 <i>Leiognathus revirostris</i>	8.16	0.00	3.63	8.8
花斑蛇鲻 <i>Saurida undosquamis</i>	16.32	58.03	3.32	12.12
竹荚鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	14.16	1.63	2.87	14.99
中华海鲷 <i>Tachysurus sinensis</i>	0.14	3.73	2.74	17.73
平均相异性=66.53 average dissimilarity = 66.53				
夏季 summer				
丝背美尾鲷 <i>Callionymus doryssus</i>	0.00	26.09	2.82	2.82
二长棘鲷 <i>Parargyrops edita</i>	0.52	44.31	2.42	5.24
弯角鲷 <i>Callionymus curvicornis</i>	0.04	17.66	2.15	7.39
线纹鳗鲡 <i>Plotosus lineatus</i>	1.08	2.77	2.14	9.53
多齿蛇鲻 <i>Saurida tumbil</i>	0.47	24.29	2.12	11.65
平均相异性=63.23 average dissimilarity = 63.23				
秋季 fall				
线纹鳗鲡 <i>Plotosus lineatus</i>	40.33	1.69	3.25	3.25
中华海鲷 <i>Tachysurus sinensis</i>	17.32	11.46	2.78	6.03
黑鳃舌鲷 <i>Cynoglossus roulei</i>	2.77	0.00	2.71	8.74
皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belangerii</i>	15.06	4.42	2.71	11.45
黄鲫 <i>Setipinna tenuifilis</i>	0.33	7.78	2.62	14.07
平均相异性=57.74 average dissimilarity = 57.74				
冬季 winter				
花斑蛇鲻 <i>Saurida undosquamis</i>	0.00	28.97	5.41	5.41
多齿蛇鲻 <i>Saurida tumbil</i>	0.00	8.55	4	9.41
竹荚鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	0.00	4.54	3.45	12.86
线纹鳗鲡 <i>Plotosus lineatus</i>	19.08	0.24	3.28	16.14
中华海鲷 <i>Tachysurus sinensis</i>	4.80	0.01	2.99	19.13
平均相异性=76.25 average dissimilarity = 76.25				

呈正相关, 除水深外, 群落 II 北侧与盐度呈正相关, 南侧则与水温呈正相关。环境因子对鱼类空间格局的贡献率为 41.76%, 第 1 排序轴共解释了 14.32% 的物种分布变化, 第 2 排序轴共解释了 11.65% 的物种分布变化。

冬季水深、盐度、溶解氧、叶绿素 a 和水温对鱼类群落的影响具高度统计意义($P<0.01$), pH 的影响具统计意义($P<0.05$), 其中影响最大的环境因子为水深, 其次为盐度。群落 I 北侧与溶氧和水温呈较强正相关, 南侧与溶氧和叶绿素 a 呈较强正相关。群落 II 则与水深、盐度和 pH 呈正相

关。环境因子对鱼类空间格局的贡献率为 47.11%, 第 1 排序轴共解释了 21.10% 的物种分布变化, 第 2 排序轴共解释了 11.00% 的物种分布变化。

3 讨论

3.1 鱼类种类组成

与近年来其他海域的调查结果相比, 雷州湾附近海域周年调查共发现鱼类 256 种, 占整个南海北部近海调查种类数的 50% 以上(466 种)^[16], 其鱼类种类数远高于海州湾^[17]、马鞍列岛、大亚湾^[18]等海域。造成其鱼类种类丰富的可能原因如

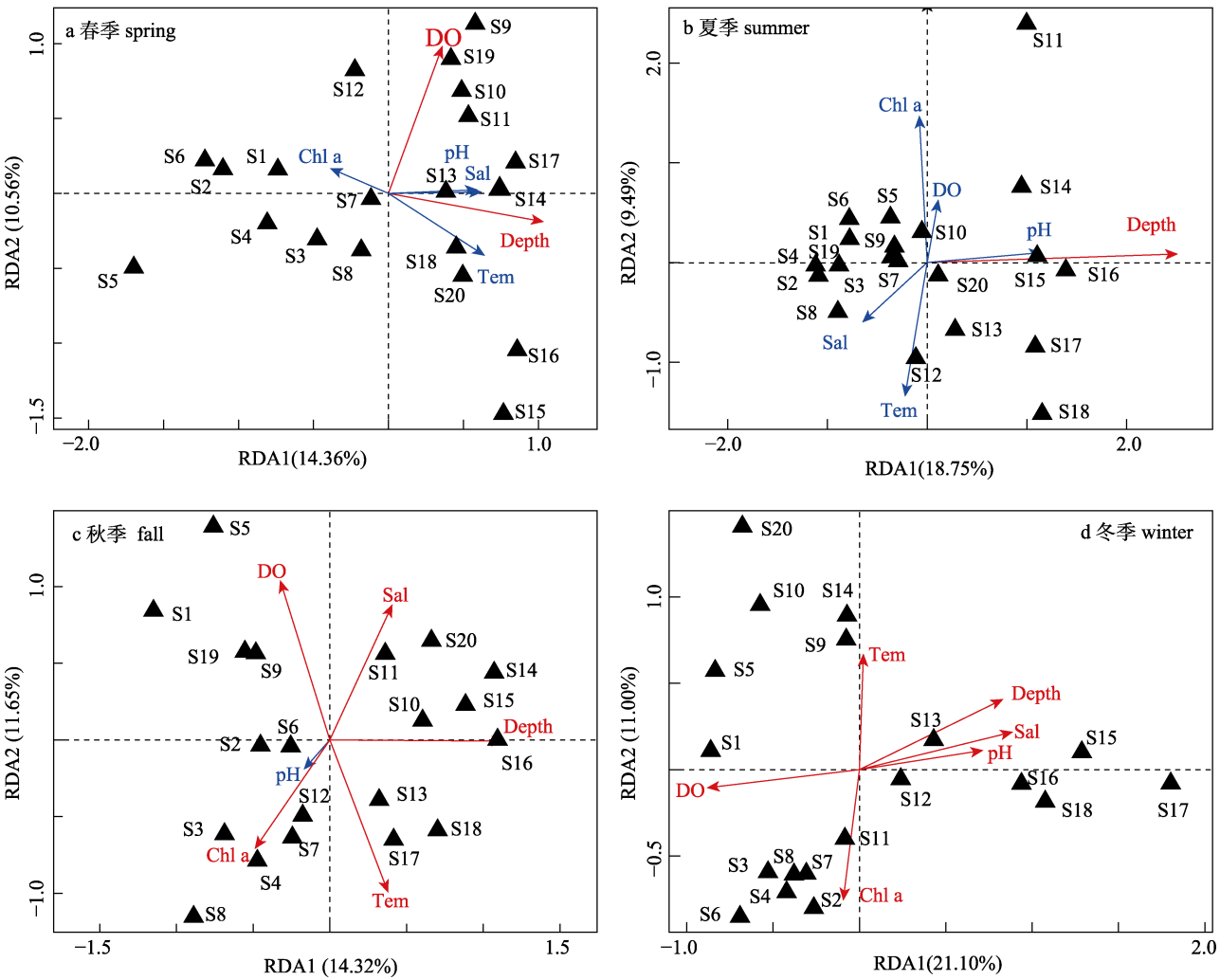


图 3 雷州湾附近海域鱼类群落与环境因子的 RDA 排序

红色轴线表示对鱼类群落的影响具统计意义的环境因子($P<0.05$), 蓝色轴线表示影响不具统计意义($P>0.05$).

Fig. 3 RDA triplots of fish community and environmental factors in the Leizhou Bay waters

The red axes represent the correlations between environmental factors and fish communities were significant ($P<0.05$), and the blue ones show the correlations were non-significant ($P>0.05$).

表 3 雷州湾附近海域环境因子相关显著性检验

Tab. 3 Significance test of environmental factors in the Leizhou Bay waters

环境因子 environmental factor	春季 spring			夏季 summer			秋季 fall			冬季 winter		
	RDA1	RDA2	r^2	RDA1	RDA2	r^2	RDA1	RDA2	r^2	RDA1	RDA2	r^2
水深 depth	0.98	-0.22	0.49**	1.00	0.02	0.77**	1.00	-0.01	0.73**	0.85	0.52	0.79**
水温 Tem	0.76	-0.65	0.27	-0.15	-0.99	0.24	0.34	-0.94	0.70**	0.09	1.00	0.48**
溶解氧 DO	0.28	0.96	0.68**	0.16	0.99	0.05	-0.29	0.96	0.74**	-0.98	-0.19	0.65**
盐度 Sal	1.00	0.07	0.14	-0.74	-0.67	0.09	0.40	0.92	0.57**	0.95	0.32	0.72**
酸碱度 pH	1.00	0.04	0.16	1.00	0.07	0.15	-0.64	-0.77	0.03	0.97	0.23	0.43*
叶绿素 a Chl a	-0.87	0.49	0.07	-0.07	1.00	0.29	-0.54	-0.84	0.44**	-0.16	-0.99	0.64**

注: **表示相关性具高度统计意义($P<0.01$); *表示相关性具统计意义($P<0.05$).

Note: ** denotes that the correlation is highly significant with an alpha level of 0.01 (2-tailed), and * denotes that the correlation is significant with an alpha level of 0.05 (2-tailed).

下: (1)雷州湾三面环陆, 加上复杂的海底地形^[19], 为鱼类提供了良好的繁育生长场所, 仅 4 个季度的共有种就达 39 种; (2)雷州湾水动力环境优越, 受潮汐、沿岸流和外海水的综合影响, 每个季度迁入该海域的特有种也有 13~40 种; (3)与全球气候变暖有关, 气候变暖会引起热带鱼类向温带迁移、温带鱼类向寒带迁移^[20], 近 30 年来该海域表层年平均水温上升了 2.4℃, 年均温度的升高相当于纬度的降低, 符合低纬度生物物种多样性高的规律, 且该海域的浮游植物群落研究也出现了种类数增多的情况^[2]。从鱼类适温类型看, 鱼类适温性占比差别不大, 以暖水性鱼类为主(80.08%), 其次为暖温性鱼类(19.92%)。水温虽然上升了 2.4℃, 然而并没有改变该海域鱼类的适温性比例。但从鱼类喜好的栖息水层看, 中上层鱼类占比从 24.1%^[1]下降至 12.11%。由于缺乏长时间连续性的监测数据, 难以对具体的鱼类种类变化进行分析, 捕获的中上层鱼类主要以鳀科、鲹科和鲱科为主, 且绝大多数为 R 选择对策者, 其寿命短且生长快, 因此高度依赖于海洋环境^[21], 气候变化容易引起其迁移, 而部分迁移能力和适应能力弱的种类则面临局部消失的风险; 此外, 过度捕捞会使这些中上层鱼类更容易受到气候变化的胁迫, 从而导致其种类数和资源密度的下降^[22-23]。

3.2 群落结构及其与环境因子的关系

鱼类群落结构总体上是鱼类的环境耐受性和栖息地偏好属性在空间上的综合表征^[24]。各季度雷州湾及其附近海域鱼类可分为两个亚群落, 6 个环境因子共解释了 41.76%~47.11% 的鱼类群落空间格局。沿 RDA 轴第一主轴, 从左往右, 采样点呈现出从群落 I 向群落 II 过渡的空间变化趋势。表明随着环境梯度的变化, 鱼类群落也会发生改变^[25]。水深是 4 个季度均显著影响鱼类群落分布的因子。随着水深的变化, 海洋的理化性质和饵料生物(如浮游生物等)亦相应改变, 鱼类会根据其自身的适应能力做出相应的响应^[26]。SIMPER 分析结果表明两个亚群落鱼类的栖息密度差异较大, 蛇鲻类、鲷等在群落 II 的栖息密度较高, 而短吻鲷等典型的近岸水域(海湾)种则更倾向于水深较浅的群落 I。溶解氧是春季、秋季

和冬季显著影响鱼类分布的环境因子, 但并没有呈现出较规律的空间特征。大部分鱼类喜居于溶解氧相对较高的区域, 但也有部分鱼类由于饵料生物的影响而聚集于低溶解氧区域^[27]。水温、盐度和叶绿素 a 浓度是秋季和冬季显著影响鱼类空间分布的环境因子。其中叶绿素 a 对雷州湾湾口海域群落有较大的影响。2008—2011 年的水质调查研究表明部分时间段雷州湾海域已经达到了高富营养化水平^[4]。雷州湾湾内的网箱养殖和近岸的虾塘养殖等会带来大量的营养盐, 而丰富的营养盐会促进浮游生物的生长繁殖, 形成叶绿素 a 高值区, 吸引鱼类索饵聚集^[28], 进而影响该海域的鱼类群落结构。

参考文献:

- [1] China Gulf Chronicles Codification Committee. The Gulf of China, Part 10: Western Bay of Guangdong Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 1999: 249-305. [中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志·第十分册: 广东省西部海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1999: 249-305.]
- [2] Chen C L, Zhang C X. Community structure of phytoplankton in the coastal waters of Leizhou Bay with its relationships to environmental factors[J]. Journal of Applied Oceanography, 2016, 35(2): 174-182. [陈春亮, 张才学. 雷州湾浮游植物群落结构特征及其环境影响分析[J]. 应用海洋学学报, 2016, 35(2): 174-182.]
- [3] Xu X R, Song J Y, Zhang Z H, et al. The world's second largest population of humpback dolphins in the waters of Zhanjiang deserves the highest conservation priority[J]. Scientific Reports, 2015, 5: Article No. 8147.
- [4] Fu D Y, Yang F, Liang X J, et al. Assessment and variation of temporal and spatial of key factors of water quality in coastal area of the Leizhou Peninsula[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2014, 34(6): 58-64. [付东洋, 杨锋, 梁晓军, 等. 雷州半岛近海水质环境关键因子时空变化与评价[J]. 广东海洋大学学报, 2014, 34(6): 58-64.]
- [5] Majewski A R, Atchison S, MacPhee S, et al. Marine fish community structure and habitat associations on the Canadian Beaufort shelf and slope[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2017, 121: 169-182.
- [6] Vergés A, Steinberg P D, Hay M E, et al. The tropicalization of temperate marine ecosystems: climate-mediated changes in herbivory and community phase shifts[J]. Proceedings: Biological Sciences, 2014, 281(1789): 20140846.
- [7] Yuan H R, Chen P M, Qin C X, et al. Seasonal variation of

- fish community structure in Zhelin Bay, the South China Sea[J]. South China Fisheries Science, 2017, 13(2): 26-35. [袁华荣, 陈丕茂, 秦传新, 等. 南海柘林湾鱼类群落结构季节变动的研究[J]. 南方水产科学, 2017, 13(2): 26-35.]
- [8] National Standardization Management Committee. GB/T 12763.6-2007 specifications for oceanographic survey-part 6: survey of marine species[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [9] Tian M C, Sun B L, Yang J M. Analysis of fish fauna in Bohai Sea[J]. Studia Marina Sinica, 1993, 34: 157-167. [田明诚, 孙宝龄, 杨纪明. 渤海鱼类区系分析[J]. 海洋科学集刊, 1993, 34: 157-167.]
- [10] Editorial Committee of the Chinese Academy of Sciences. Chinese Physical Geography: Marine Geography[M]. Beijing: Science Press, 1979: 159-160. [中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 中国自然地理-海洋地理[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 159-160.]
- [11] Chen D G, Zhang M Z. Chinese Marine Fish[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2015: 1-2152. [陈大刚, 张美昭. 中国海洋鱼类[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2015: 1-2152.]
- [12] Hartigan J A, Wong M A. Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm[J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), 1979, 28(1): 100-108.
- [13] Caliński T, Harabasz J. A dendrite method for cluster analysis[J]. Communications in Statistics, 1974, 3(1): 1-27.
- [14] Liu H, Niu J G, Liu C C, et al. Fish community structure and its relationship with environmental factors of main stream of Emin River, Xinjiang[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(12): 3558-3563. [刘鸿, 牛建功, 刘春池, 等. 新疆额敏河干流鱼类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 2017, 36(12): 3558-3563.]
- [15] The R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, [CP/OL]. <http://www.R-project.org/>.
- [16] Cai Y C, Xu S N, Chen Z Z, et al. Current status of community structure and diversity of fishery resources in offshore northern South China Sea[J]. South China Fisheries Science, 2018, 14(2): 10-18. [蔡研聪, 徐姗楠, 陈作志, 等. 南海北部近海渔业资源群落结构及其多样性现状[J]. 南方水产科学, 2018, 14(2): 10-18.]
- [17] Sui H Z, Xue Y, Ren Y P, et al. Studies on the ecological groups of fish communities in Haizhou Bay, China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(12): 59-71. [隋昊志, 薛莹, 任一平, 等. 海州湾鱼类生态类群的研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2017, 47(12): 59-71.]
- [18] Guo J Z, Chen Z Z, Xu Y W, et al. Tempo-spatial distribution characteristics of fish resources in Daya Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(12): 47-55. [郭建忠, 陈作志, 许友伟, 等. 大亚湾鱼类资源数量的时空分布特征[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2018, 48(12): 47-55.]
- [19] Zhang Y, Li G X. Analysis of port construction conditions in the Leizhou Bay[J]. Coastal Engineering, 2013, 32(2): 11-19. [张勇, 李冠星. 雷州湾建港条件分析[J]. 海岸工程, 2013, 32(2): 11-19.]
- [20] Cheung W W L, Watson R, Pauly D. Signature of ocean warming in global fisheries catch[J]. Nature, 2013, 497(7449): 365-368.
- [21] Merino G, Barange M, Mullon C. Climate variability and change scenarios for a marine commodity: Modelling small pelagic fish, fisheries and fishmeal in a globalized market[J]. Journal of Marine Systems, 2010, 81(1): 196-205.
- [22] McLean M, Mouillot D, Lindegren M, et al. A climate-driven functional inversion of connected marine ecosystems [J]. Current Biology, 2018, 28(22): 3654-3660.
- [23] Guo J Z, Chen Z Z, Xu Y W, et al. The effects of anthropogenic activities on the diversity and succession of fish community in Daya Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(3): 595-607. [郭建忠, 陈作志, 许友伟, 等. 人类活动对大亚湾海域鱼类群落多样性及其演替的影响[J]. 中国水产科学, 2018, 25(3): 595-607.]
- [24] Boada J, Sagué O, Gordo A. Spearfishing data reveals the littoral fish communities' association to coastal configuration [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 199: 152-160.
- [25] Dong J R, Hu C Y, Shui Y Y, et al. Fish community structure and its relationships with environmental factors in the southern inshore waters of Wenzhou[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(2): 209-219. [董静瑞, 胡成业, 水玉跃, 等. 温州南部沿岸海域鱼类群落特征及其与环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 2017, 24(2): 209-219.]
- [26] Pinault M, Bissery C, Gassiole G, et al. Fish community structure in relation to environmental variation in coastal volcanic habitats[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2014, 460: 62-71.
- [27] Hu C L, Zhang H L, Zhang Y Z, et al. Fish community structure and its relationship with environmental factors in the Nature Reserve of *Trichiurus japonicus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(5): 694-703. [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与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2018, 42(5): 694-703.]
- [28] Liu Z L, Yang L L, Yan L P, et al. Fish assemblages and

environmental interpretation in the northern Taiwan Strait and its adjacent waters in summer[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(6): 1399-1416. [刘尊雷, 杨林

林, 严利平, 等. 夏季台湾海峡北部及邻近海域鱼类群落结构及环境解释[J]. 中国水产科学, 2016, 23(6): 1399-1416.]

Fish community structure and its relationship with environmental factors in Leizhou Bay

ZENG Jiawei¹, LIN Kun¹, WANG Xuefeng¹, LI Chunhou²

1. Fisheries College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China

Abstract: Leizhou Bay, located on the eastern side of Leizhou Peninsula in Guangdong province, is the primary habitat of Chinese white dolphin (*Sousa chinensis*), besides being a reserve for juvenile fish and shrimp. However, the ecological state of this coastal ecosystem remains largely unknown. To understand the fish community structure and its physical drivers in Leizhou Bay, seasonal bottom trawl along with environment monitoring surveys were conducted from 2016 to 2017. The relationships of fish community structure with environmental factors were analyzed using K-means cluster analysis, similarity percentage analysis, and redundancy analysis. These analyses led to the identification of 256 fish species, comprising mainly demersal fish and warm-water fish. The study sites for each season could be divided into two groups: group I, with water depth of less than 10 m, and group II, with water depth between 10 m and 20 m. Group I showed an average similarity of 38.48%–47.44% across seasons in terms of fish community structure (which was shown as matrixes of sites by species biomass). Three species, *Cynoglossus puncticeps*, *Tachysurus sinensis*, and *Plotosus lineatus* contributed greatly to the average similarity within Group I in summer, fall and winter. Furthermore, Group II showed an average similarity of 41.38%–52.59% across seasons. The *Saurida tumbil* contributed mostly to the average similarity within Group II in spring, summer and winter. The average dissimilarity between group I and group II in seasons was 57.74%–76.25%. Six ecological factors, i.e. depth, dissolved oxygen, water temperature, salinity, pH, and chlorophyll a, explained 41.76%–47.11% of variation in fish biomass, with depth being the dominant environmental factor affecting fish community structure in each season. Moreover, the fish species richness in Leizhou Bay was obviously higher than in other bays of China. This study provides preliminary data on fish community structure and its relationship with environmental factors in Leizhou Bay, and provides clues for stocking enhancement in the waters.

Key words: fish; community structure; Leizhou Bay; environmental factors

Corresponding author: WANG Xuefeng. E-mail: xuefeng1999@126.com