

DOI: 10.12264/JFSC2021-0338

长江口海上风电场水域鱼类群落结构特征及其与环境因子的关系

宋超^{1, 2, 4}, 胡丽娟^{1, 3}, 赵峰^{1, 2, 3, 4}, 张涛^{1, 2, 4}, 杨刚^{1, 2, 4}, 耿智^{1, 2, 4}, 庄平^{1, 2, 4}

1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部东海与长江口渔业资源环境科学观测实验站, 上海 200090;
2. 中国水产科学研究院长江口渔业生态重点实验室, 上海 200090;
3. 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海海洋大学, 上海 201306;
4. 上海长江口渔业资源增殖与生态修复工程技术研究中心, 上海 200090

摘要: 为探明长江口海上风电场水域的鱼类群落结构及其影响因素, 本研究利用多元统计和冗余分析(RDA)等方法对该水域鱼类群落组成及其与环境因子的关系进行分析。春、秋季共获得鱼类 28 种, 隶属 6 目 15 科 26 属; 鲈形目鱼类占比最高(57.14%), 其中以虾虎鱼科鱼类最多(21.43%)。鱼类组成以海洋性、暖温性、底层鱼类为主。春季优势种为棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)、刀鲚(*Coilia nasus*)、凤鲚(*Coilia mystus*)、拉氏狼牙虾虎鱼(*Odontamblyopus lacepedii*)和鳊(*Miichthys miiuy*), 秋季优势种为龙头鱼(*Harpadon nehereus*)、凤鲚、棘头梅童鱼、刀鲚和鳊。多样性分析和 ABC 曲线表明, 调查水域鱼类群落结构处于受干扰状态。*T* 检验显示, 风电场水域鱼类的丰度、生物量、丰富度指数(*D*)、均匀度指数(*J'*)和多样性指数(*H'*)均与邻近水域无显著性差异($P>0.05$)。等级聚类和非度量多维排序(NMDS)表明, 长江口海上风电场及邻近水域鱼类群落分为春季和秋季 2 个组群。相似性检验(ANOSIM)显示 2 个组群差异极显著($R=0.726, P<0.01$), 群落结构的季节更替明显。RDA 表明鱼类群落结构受溶氧、温度、深度和盐度的综合影响, 不同环境因子对不同生活史阶段优势种的影响作用不同。结果表明, 长江口海上风电场及邻近水域鱼类群落结构的干扰状态主要与季节和环境因素相关, 风电场对其影响有限。

关键词: 长江口; 海上风电场; 种类组成; 群落结构; 环境因子

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2022)03-0469-14

风力发电是目前技术最成熟的可再生能源之一, 对解决能源危机、调整能源结构、应对气候变化、实现可持续发展具有十分重要的意义。海上拥有丰富的风能资源和广阔平坦的区域, 使得海上风电成为世界可再生能源发展领域的焦点^[1]。中国风力资源储量丰富, 近海及沿海陆上风能资源总量高达 15 亿 kW, 根据风电发展综合规划^[2], 我国水深 5~50 m 海域、100 m 高度的海上风能资源开放量为 5 亿 kW, 总面积为 39.4 万 km²。继 2006 年《中华人民共和国可再生能源法》的实施, 海上风电被正式列入我国可再生能源板块, 政府

制定了系列措施鼓励支持海上风电发展, 中国风电市场持续增长, 风力发电在我国已经成为继水电之后最重要的可再生能源^[3]。

中国东部沿海地区经济发达, 能源资源紧缺, 海上风资源是当地重要的优势资源。上海市位于长江口水域, 地处北亚热带南缘的东亚季风盛行区, 近海海域开阔、障碍物少, 具有良好的风能资源开发利用价值。为充分利用上海风力资源, 扩大风力发电规模, 改善能源结构, 有效应对气候变化, 在长江口水域上海临港海上风力发电有限公司实施了上海临港海上风电项目。该项目包括

收稿日期: 2021-07-19; 修订日期: 2022-01-17.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901201); 中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2020TD13); 上海临港海上风电一期示范项目临近水域渔业资源修复专项(2019-2021).

作者简介: 宋超(1980-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事渔业资源保护和生态修复研究. E-mail: songc@ecsf.ac.cn

通信作者: 赵峰, 研究员, 主要从事河口渔业生态与保护生物学研究. E-mail: zhaof@ecsf.ac.cn

一期和二期工程,其中一期工程装机 25 台,总装机容量为 100 MW,二期工程装机 28 台,总装机容量为 100.8 MW。两期工程南北相邻,位于长江口门处南汇边滩东侧海域的避航区,西侧分别距离岸线最近约 10 km 和 12.7 km,东以长江口南港支航道以西的避航区为界,南至环球海底光缆,北至南汇大治河延长线。海上风电场及邻近水域位于长江口水域,是长江的入海水道和我国沿海南北大通道的重要组成部分,这里咸淡水交汇、沉积物多样、渔业资源丰富,是长江口渔场的重要组成部分^[4-5],有多种鱼类在此育幼、索饵和栖息^[6]。

海上工程对周边环境的影响研究包括海上核电站对海洋生态环境影响^[7],海上风电场对鸟类、海洋生物、生态系统及环境的影响等方面^[2,8-10]。海上风电场建设后,通过研究工程及邻近水域鱼类群落结构,全面了解工程建设后该水域的鱼类资源及环境状况,可为探明风电场等涉水工程建设及运行对鱼类群落结构的潜在影响提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

分别于 2019 年 4 月(春季)和 9 月(秋季)在长江口海上风电场及邻近水域设置 9 个站点进行渔业资源拖网调查(图 1)。拖网渔船为单船拖网船,功率 53 kW,网具为单船底拖网,网具总长 10 m,网口宽 6 m,网口高 2 m,网囊网目 20 mm。春季和秋季分别在每个站点拖网 30 min,拖速 3 kn。各站点均用 YSI Pro Plus 同步监测水温、盐度和水深等环境因子,样品的采集和分析均参照《海洋调查规范》(GB/T12763.6-2007)^[11],对所有鱼类进行种类鉴定^[12]和计数,并用直尺测量体长,精确到 1 mm,用电子称称量体重,精确到 0.01 g。对所获鱼类鉴定后,统计每一种类的数量和质量,然后根据拖网时间、拖速和网具规格参数,对鱼类资源数据标准化为单位面积的丰度(ind/100 m²)和生物量(g/100 m²)。

1.2 分析方法

采用 Pinkas 等^[13]的相对重要性指数(index of relative importance, IRI)来确定群落的重要种类组

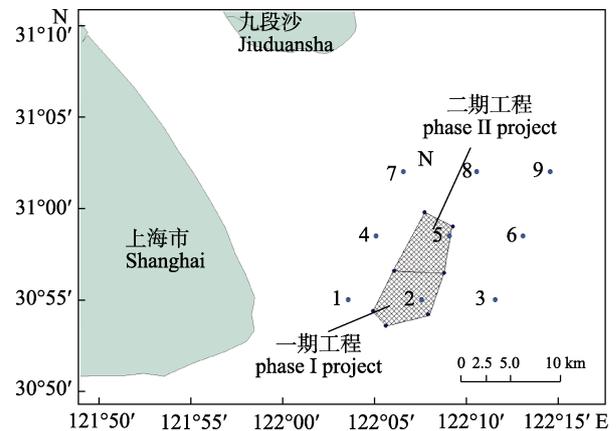


图 1 采样站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of sampling stations

成,其中将 IRI 大于 1000 确定为优势种。

$$IRI=(N+W) \times F \times 10^4$$

式中, N 、 W 、 F 分别为某一种类的数量百分比、质量百分比和相对出现频率^[13-14]。

采用 Margalef 丰富度指数(D)^[15]、Shannon 多样性指数(H')^[16]和 Pielou 均匀度指数(J')^[17]来计算各站点群落多样性。由于不同种类及同种类个体差异较大,因此本研究采用质量数据来计算多样性指数,这种结果更接近种类间能量的分布^[18-19]。

$$D = \frac{S-1}{\ln W}$$

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$J' = H' / \ln S$$

式中, S 为种类数, W 为总鱼类质量(g), P_i 为第 i 种鱼质量占总质量的比例。

应用丰度生物量比较曲线(abundance biomass comparison curve, 简称 ABC 曲线)及 W 值分析不同季节鱼类群落结构变化及受干扰程度,当生物量优势度曲线在丰度优势度曲线之上时, W 为正;反之 W 为负^[20-21]。

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

式中, B_i 和 A_i 为 ABC 曲线中第 i 种鱼类对应的生物量和丰度的累积百分比, S 为采集到的鱼类种数。

考虑到稀有种对群落结构分析的影响,对丰度数据进行 4 次方根转换,然后用 Bary-Curtis 相似性系数聚类对群落结构进行分析^[22-23];利用 CLUSTER 聚类分析和非度量多维标序(NMDS)来

研究群落结构^[20], 用胁强系数(stress)来衡量 NMDS 分析结果的优劣^[24]; 用单因子相似性分析 (ANOSIM)检验不同季节间群落结构差异的显著性, 利用相似性百分比(SIMPER)分析造成各组内群落结构相似的典型种和各组间群落结构差异的分歧种^[20,25]。

采用 *T* 检验分析不同组和不同区域资源量以及多样性指数差异的显著性。采用冗余分析(RDA)分析群落结构与环境因子之间的关系^[26-27]。多元分析和多样性分析应用 PREMIER 5.0 软件, RDA 排序应用 CANOCO 5.0 软件, 站点图和资源量的空间分布图绘制应用 ArcGIS 10.0 软件, *T*-检验应用 IBM SPSS 25 软件完成。

2 结果与分析

2.1 种类组成

春、秋季共捕获鱼类 28 种, 隶属 6 目 15 科 26 属(表 1)。鲈形目最多, 共 16 种, 占总种数的 57.14%, 其中以虾虎鱼科最多, 共 6 种, 占 21.43%; 其次为鲱形目, 共 6 种, 占 21.43%, 其

中以鳀科最多, 共 5 种, 占 17.86%。春季共捕获鱼类 16 种, 隶属 4 目 9 科 15 属, 以鲈形目为主, 共 11 种; 秋季共捕获鱼类 24 种, 隶属 6 目 13 科 22 属, 以鲈形目为主, 共 12 种。两季特有种类数分别为 4 种和 12 种。两季共同出现的种类共有 12 种, 隶属 4 目 7 科 11 属。其中鲈形目 7 种, 鲱形目 3 种, 鳎形目和鲇形目各 1 种。

从鱼类组成来看, 主要包括 3 种生态类型, 分别为河口定居性鱼类、洄游性鱼类和海洋性鱼类; 2 种适温性, 分别为暖水性和暖温性; 3 种垂直分布类型, 分别为中上层、近底层和底层^[12,28-29](表 1)。春、秋季共捕获河口定居性鱼类 10 种, 洄游性鱼类 2 种, 海洋性鱼类 16 种, 其中海洋性鱼类最多, 占 57.14%; 春季以河口定居性鱼类为主, 有 8 种, 占 50%; 秋季以海洋性鱼类为主, 有 15 种, 占 62.50%。春、秋季共捕获暖水性鱼类 10 种, 暖温性鱼类 18 种, 两季均以暖温性鱼类为主。春、秋季共捕获中上层鱼类 5 种, 近底层鱼类 8 种, 底层鱼类 15 种, 其中底层鱼类最多, 占 53.57%, 两季均以底层鱼类为主。

表 1 长江口海上风电场海域春、秋季鱼类种类组成

Tab. 1 Fish species composition in spring and autumn in offshore wind farm waters of the Yangtze River Estuary

物种 species	代码 code	春季 spring	秋季 autumn	平均体长/mm mean body length	平均体重/g mean body weight	生态类型 ecological type	适温性 thermophilic	水层分布 water distribution
鲈形目 Peciformes								
虾虎鱼科 Gobiidae								
斑尾刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius ommaturus</i>	Ao	+		218	40.39	ES	WT	D
竿虾虎鱼 <i>Luciogobius guttatus</i>	Lg	+		120	10.29	ES	WT	D
髯须虾虎鱼 <i>Tridentiger barbatus</i>	Tb	+	+	91	5.89	ES	WT	D
睛尾蝌蚪虾虎鱼 <i>Lophiogobius ocellicauda</i>	Lo	+	+	48	1.23	ES	WT	D
拉氏狼牙虾虎鱼 <i>Odontamblyopus lacepedii</i>	Ol	+	+	88	3.65	ES	WT	D
孔虾虎鱼 <i>Trypauchen vagina</i>	Tv		+	105	6.65	ES	WW	D
石首鱼科 Sciaenidae								
黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>	Na		+	42	3.98	Ma	WT	ND
棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	Cl	+	+	57	7.99	Ma	WW	D
鳊 <i>Miichthys miiuy</i>	Mm	+	+	42	1.82	Ma	WT	D
鲷科 Stromateidae								
银鲷 <i>Pampus argenteus</i>	Pa	+	+	85	28.24	Ma	WT	ND
带鱼科 Trichiuridae								
小带鱼 <i>Eupleurogrammus muticus</i>	Em		+	309	16.62	Ma	WT	ND

(待续 to be continued)

(续表 1 Tab. 1 continued)

物种 species	代码 code	春季 spring	秋季 autumn	平均体长/mm mean body length	平均体重/g mean body weight	生态类型 ecological type	适温性 thermophilic	水层分布 water distribution
马鲛科 Polynemidae								
四指马鲛 <i>Eleutheronema tetradactylum</i>	<i>Et</i>		+	96	12.33	ES	WT	D
花鲈科 Lateolabracidae								
中国花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>	<i>Lm</i>	+	+	58	66.64	ES	WW	ND
天竺鲷科 Apogonidae								
细条天竺鲷 <i>Apogon lineatus</i>	<i>Al</i>	+		24	0.35	Ma	WW	ND
鲷科 Blenniidae								
短头跳岩鲷 <i>Petroscirtes breviceps</i>	<i>Pb</i>		+	51	1.63	Ma	WT	D
鲷科 Callionymidae								
香斜棘鲷 <i>Repomucenus olidus</i>	<i>Ro</i>	+		55	1.27	ES	WT	D
鲱形目 Clupeiformes								
鳀科 Engraulidae								
刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	<i>Ce</i>	+	+	134	10.01	Mi	WT	P
凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	<i>Cm</i>	+	+	103	4.34	Mi	WT	P
康氏小公鱼 <i>Stolephorus commersonii</i>	<i>Sc</i>	+	+	56	2.37	Ma	WW	P
赤鼻棱鳀 <i>Thryssa kammalensis</i>	<i>Tk</i>		+	76	4.83	Ma	WT	P
黄鲫 <i>Setipinna taty</i>	<i>St</i>		+	74	4.26	Ma	WW	ND
锯腹鳀科 Pristigasteridae								
鳀 <i>Ilisha elongata</i>	<i>Ie</i>		+	87	7.80	Ma	WW	P
鲽形目 Pleuronectiformes								
舌鳎科 Cynoglossidae								
焦氏舌鳎 <i>Cynoglossus joyneri</i>	<i>Cj</i>	+	+	126	7.66	Ma	WT	D
日本须鳎 <i>Paraplagusia japonica</i>	<i>Pj</i>		+	110	5.67	Ma	WT	D
鲽形目 Tetraodontiformes								
鲀科 Tetraodontidae								
横纹东方鲀 <i>Takifugu oblongus</i>	<i>To</i>		+	52	5.63	Ma	WW	D
黄鳍东方鲀 <i>Takifugu xanthopterus</i>	<i>Tx</i>	+	+	79	20.36	ES	WT	D
鳗鲡目 Anguilliformes								
蛇鳗科 Ophichthyidae								
海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i>	<i>Mc</i>		+	117	98.30	Ma	WW	ND
仙女鱼目 Aulopiformes								
狗母鱼科 Synodontidae								
龙头鱼 <i>Harpadon nehereus</i>	<i>Hn</i>		+	100	7.28	Ma	WW	ND

注: ES 为河口定居性鱼类, Mi 为洄游性鱼类, Ma 为海洋性鱼类, WW 为暖水性鱼类, WT 为暖温性鱼类, P 为中上层鱼类, ND 为近底层鱼类, D 为底层鱼类。

Note: ES denotes estuarine sedentary fishes, Mi denotes migratory fishes, Ma denotes marine fishes, WW denotes warm water fishes, WT denotes warm temperature fishes, P denotes pelagic fishes, ND denotes near demersal fishes, D denotes demersal fishes.

2.2 丰度和生物量分布

从季节分布来看(图 2), 春季鱼类平均丰度为 0.99 ind/100 m², 平均生物量为 1.27 g/100 m², 主要分布在调查水域的东北部, 丰度最大值为 3.75 ind/100 m², 生物量最大值为 3.66 g/100 m²,

均位于站点 9。秋季鱼类平均丰度为 2.60 ind/100 m², 平均生物量为 13.36 g/100 m², 主要分布在调查水域的北部, 丰度最大值为 8.15 ind/100 m², 生物量最大值为 40.27 g/100 m², 均位于站点 8。两季相比, 秋季的丰度和生物量均明显高于春季, 其中

秋季丰度为春季的 2.61 倍, 生物量为春季的 10.50 倍; 春季鱼类的个体平均质量为 1.28 g, 秋季鱼类个体平均质量为 5.15 g, 秋季鱼类个体平均质量明显大于春季。

从分布区域来看(图 2), 春季风电场区(站点 2 和 5)鱼类平均丰度为 0.76 ind/100 m², 平均生物量为 1.14 g/100 m²; 邻近水域平均丰度为 1.06 ind/100 m², 平均生物量为 1.31 g/100 m², 略大于风电场区。秋季风电场区平均丰度为 2.66 ind/100 m², 平均生物量为 14.68 g/100 m²; 邻近水域平均丰度为

2.58 ind/100 m², 平均生物量为 12.98 g/100 m², 略小于风电场区。对风电场区和邻近水域的鱼类丰度和生物量数据进行独立样本 *T* 检验, 丰度和生物量在春、秋季两个水域间比较差异均不显著($P>0.05$)。

2.3 优势种

表 2 显示春、秋季共有优势种 6 种, 其中春季优势种为棘头梅童鱼(*Collichthys lucidus*)、刀鲚(*Coilia nasus*)、凤鲚(*Coilia mystus*)、拉氏狼牙虾虎鱼(*Odontamblyopus lacepedii*)和鮠(*Miichthys miiuy*), 棘头梅童鱼的优势度最大, 其平均丰度为

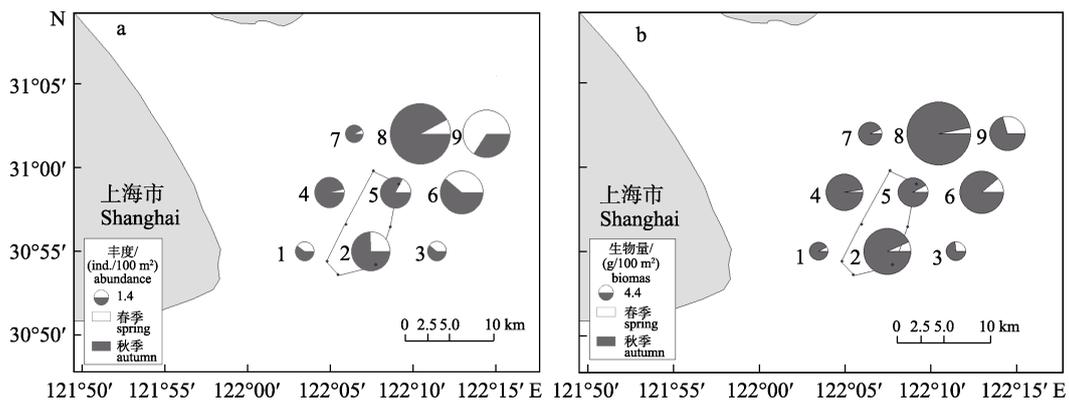


图 2 长江口海上风电场海域鱼类丰度和生物量的时空分布

Fig. 2 Temporal and spatial distribution of fish abundance and biomass in offshore wind farm waters of the Yangtze River Estuary

表 2 长江口海上风电场海域春、秋季鱼类优势种组成

Tab. 2 Dominant species composition of fishes in spring and autumn in offshore wind farm waters of the Yangtze River Estuary

优势种 dominant species	数量百分比/% percentage of number	质量百分比/% percentage of weight	出现频率 百分比/% percentage of frequency	相对重 要性指 数 IRI	平均丰度 /(ind/100 m ²) mean abundance	平均生物 量/(g/100 m ²) mean biomass	体长范围/mm range of body length	体重范围/g range of body weight
春季 spring								
棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	69.37	15.15	100.00	8451.80	0.69	0.19	2-124	0.01-34.54
刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	10.19	36.32	66.67	3100.50	0.10	0.46	11-278	0.35-88.76
凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	9.25	23.21	77.78	2524.60	0.09	0.30	55-155	0.63-11.80
拉氏狼牙虾虎鱼 <i>Odontamblyopus lacepedii</i>	2.75	12.58	100.00	1533.11	0.03	0.16	51-180	0.38-44.32
鮠 <i>Miichthys miiuy</i>	5.70	7.23	88.89	1149.00	0.06	0.09	15-81	0.02-7.54
秋季 autumn								
龙头鱼 <i>Harpadon nehereus</i>	40.72	33.88	100.00	7459.96	1.06	4.53	49-228	0.63-35.90
凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	29.22	19.49	100.00	4871.07	0.76	2.60	35-171	0.32-16.62
棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	8.60	21.11	100.00	2971.39	0.22	2.82	27-172	0.49-79.88
刀鲚 <i>Coilia nasus</i>	3.44	8.71	100.00	1214.76	0.09	1.16	77-264	1.49-60.65
鮠 <i>Miichthys miiuy</i>	9.42	2.05	88.89	1019.56	0.25	0.27	20-203	0.16-34.27

0.69 ind./100 m², 平均生物量为 0.19 g/100 m², 体长范围为 2~124 mm, 包括幼体和成体。春季优势种的尾数和质量占比之和分别为 97.25% 和 94.49%。秋季优势种为龙头鱼(*Harpadon nehereus*)、凤鲚、棘头梅童鱼、刀鲚和鲢, 其中龙头鱼的优势度最大, 其平均丰度为 1.06 ind/100 m², 平均生物量为 4.53 g/100 m², 体长范围为 49~228 mm, 包括幼体和成体。秋季优势种的尾数和质量占比之和分别为 91.40% 和 85.24%。春季特有优势种为拉氏狼牙虾虎鱼, 为河口定居性鱼类, 秋季特有优势种为龙头鱼, 为海洋性鱼类, 两季共同优势种为棘头梅童鱼、鲢、刀鲚和凤鲚, 为海洋性鱼类和洄游性鱼类。

2.4 群落物种多样性

表 3 所示为春、秋季不同站点鱼类群落多样性指数, 其中春季 D 和 H' 最大值分别为 1.36 和 1.53, 均位于站点 6, J' 最大值为 0.85, 位于站点 2;

表 3 长江口海上风电场海域春、秋季不同站点鱼类群落多样性指数

Tab. 3 Fish community-diversity indices of different stations in spring and autumn in offshore wind farm waters of the Yangtze River Estuary

站点 station	春季 spring			秋季 autumn		
	D	J'	H'	D	J'	H'
1	1.05	0.55	0.89	1.76	0.79	1.97
2	0.72	0.85	1.37	1.22	0.60	1.45
3	1.17	0.65	1.27	0.98	0.78	1.51
4	0.74	0.72	0.99	1.68	0.60	1.59
5	1.24	0.78	1.53	1.25	0.70	1.62
6	1.36	0.70	1.53	1.64	0.63	1.67
7	0.48	0.81	0.89	1.77	0.81	2.08
8	1.11	0.68	1.31	1.36	0.58	1.48
9	1.09	0.56	1.17	0.96	0.59	1.23
风电场 OWF	0.98	0.82	1.45	1.24	0.65	1.53
邻近水域 adjacent waters	1.00	0.67	1.15	1.45	0.68	1.65
平均 mean	1.00	0.70	1.22	1.40	0.68	1.62

注: D 、 J' 和 H' 分别表示 Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数和 Shannon 多样性指数。

Note: D , J' and H' denote Margalef richness index, Pielou evenness index and Shannon diversity index, respectively.

秋季 D 、 J' 和 H' 最大值分别为 1.77、0.81 和 2.08, 均位于站点 7。对春、秋季的多样性指数进行独立样本 T 检验, 秋季的 D 和 H' 平均值(1.40 和 1.62) 均显著的高于春季(1.00 和 1.22)($P < 0.05$), J' 平均值在春季(0.70)和秋季(0.68)间差异不显著($P > 0.05$), 可见, 秋季的丰富度和多样性均高于春季。对风电场区与邻近水域的多样性指数进行独立样本 T 检验, 风电场区的 D 、 J' 和 H' 与邻近水域间均无显著性差异($P > 0.05$), 可见风电场区和邻近水域的丰富度、均匀度和多样性均较一致。

2.5 丰度和生物量优势度曲线

从 ABC 曲线(图 3a, 3b)可知, 春、秋季鱼类群落的丰度与生物量优势度曲线相交, 曲线前段丰度优势度曲线高于生物量优势度曲线, 而后段两条曲线出现交叉, 春、秋季 W 值分别为 -0.105 和 -0.047, 均小于 0。春季丰度排序前 4 位的种类分别为棘头梅童鱼、刀鲚、凤鲚和鲢, 累积丰度百分比为 94.50%, 其中, 棘头梅童鱼的丰度百分比最大, 为 69.37%; 生物量排序前 4 位的种类分别为刀鲚、凤鲚、棘头梅童鱼和拉氏狼牙虾虎鱼; 累积生物量百分比为 87.26%, 其中, 刀鲚生物量百分比最大, 为 36.32%。秋季丰度排序前 4 位的种类分别为龙头鱼、凤鲚、鲢和棘头梅童鱼, 累积丰度百分比为 87.96%, 其中, 龙头鱼丰度百分比最大, 为 40.72%; 生物量排序前 4 位的种类分别为龙头鱼、棘头梅童鱼、凤鲚和刀鲚, 累积生物量百分比为 83.19%, 其中, 龙头鱼的生物量百分比最大, 为 33.88%。春、秋季丰度和生物量优势度较高的种类均为不同季节的优势种类。

对不同季节的丰度和生物量优势度曲线进行对比(图 3c, 3d), 直观呈现不同季节鱼类群落的多样性和丰富度。春季的丰度和生物量优势度曲线均较高, 且曲线上升较快, 说明春季的种类较少, 生物多样性和丰富度较低, 进一步证实了群落多样性的分析结果^[25,30]。

2.6 群落结构特征

CLUSTER 等级聚类分析表明, 风电场及邻近水域鱼类群落在 45% 相似性水平下可分为 2 个组群, I 组为春季组, II 组为秋季组。NMDS 二维分析显示, 胁强系数 stress 为 0.1 (图 4), 说明

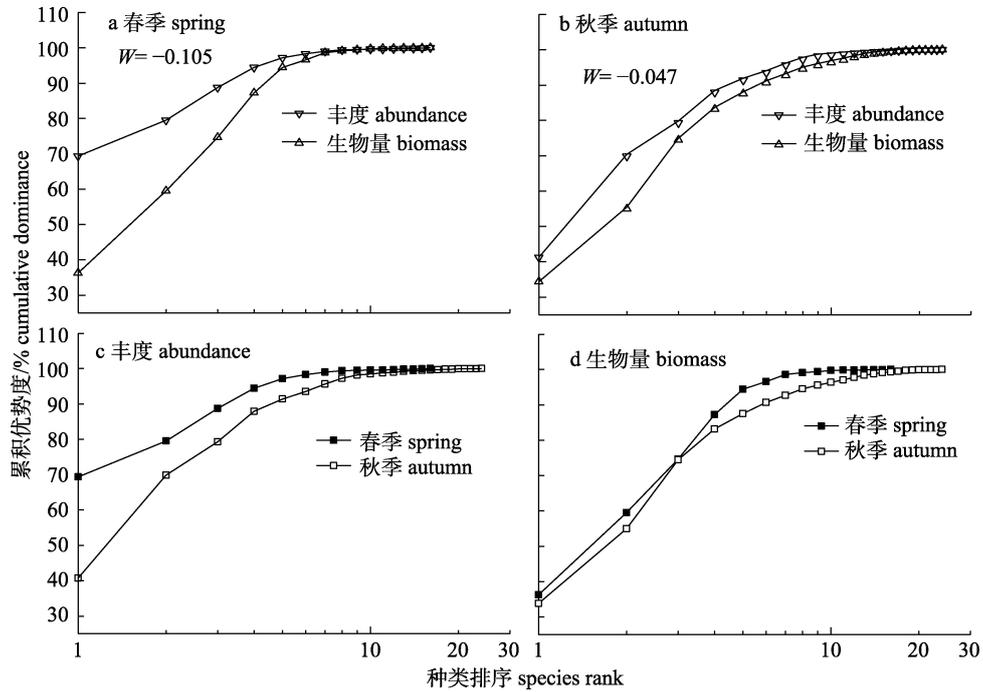


图 3 长江口海上风电场海域春、秋季鱼类丰度和生物量优势度曲线

Fig. 3 Dominance curves of fish abundance and biomass in spring and autumn in offshore wind farm waters of the Yangtze River Estuary

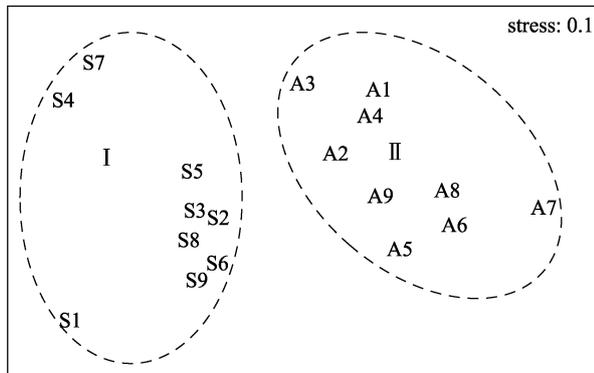
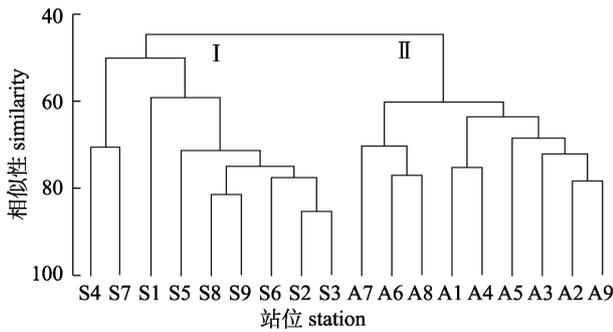


图 4 基于 Bray-Curtis 相似性系数的站点聚类分析和 NMDS 排序

S1-S9 (I)代表春季 1-9 站点, A1-A9 (II)代表秋季 1-9 站点.

Fig.4 Cluster dendrogram and NMDS ordination based on Bray-Curtis similarity of abundance

S1-S9 (I) mean 1-9 stations in spring, A1-A9 (II) mean 1-9 stations in autumn.

NMDS 图可以解释风电场及邻近水域鱼类群落结构, 进一步支持了聚类分析的结果^[20,31]。ANOSIM 分析表明, 春、秋季风电场及邻近水域鱼类群落差异极显著($R=0.726, P<0.01$)。

2.7 群落典型种与分歧种

SIMPER 分析指出(表 4), 春季(I 组)对组内相似性贡献较高的典型种有棘头梅童鱼、鲢、凤鲚和拉氏狼牙虾虎鱼, 他们对组内相似性累计贡献率达 95.11%; 秋季(II 组)对组内相似性贡献较

表 4 组内相似性和组间相异性贡献率较高的种类

Tab. 4 Species with high contributing percentage for similarity within a group and for dissimilarity between groups

种类 species	贡献率/% contribution percentage		
	春季 spring	秋季 autumn	春季与秋季 spring & autumn
棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	77.03	7.41	32.39
鲢 <i>Miichthys miiuy</i>	7.21	7.37	14.09
凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	5.57	34.91	11.44
拉氏狼牙虾虎鱼 <i>Odontamblyopus lacepedii</i>	5.30		4.98
龙头鱼 <i>Harpadon nehereuss</i>		43.38	24.10
刀鲚 <i>Coilia nasus</i>			3.69
合计 total	95.11	93.06	90.69

高的典型种有龙头鱼、凤鲚、棘头梅童鱼和鲢，他们对组内相似性累计贡献率达 93.06%。组 I 和组 II 群落组间差异性系数为 75.19%，对组间差异性贡献较高的分歧种是棘头梅童鱼、龙头鱼、鲢、凤鲚、拉氏狼牙虾虎鱼和刀鲚，他们对春、秋季相异性贡献之和为 90.69%。

2.8 群落结构与环境因子的关系

表 5 为春、秋季调查水域各环境因子的平均

值，其中秋季的表层和底层温度、盐度、pH 和深度均高于春季，而溶氧低于春季。对春、秋季环境因子进行独立样本 *T* 检验，除了表层盐度在春、秋季差异不显著外 ($P>0.05$)，其他环境因子在春、秋季间差异均显著 ($P<0.05$)。对表底层环境因子进行配对样本 *T* 检验，pH 和溶氧在表、底层间差异不显著 ($P>0.05$)，温度和盐度在表、底层间差异显著 ($P<0.05$)。

表 5 长江口海上风电场海域邻近水域春、秋季环境因子的平均值

Tab. 5 The means of environment factors in offshore wind farm waters of the Yangtze River Estuary and its adjacent waters

环境因子 environmental factor	代码 code	单位 unit	平均值±标准差 mean±SD	
			春季 spring	秋季 autumn
表层温度 surface temperature	Ts	°C	17.83±0.57	25.34±0.59
表层盐度 surface salinity	Ss		13.32±1.94 ^a	13.93±3.68 ^a
表层 pH surface pH	pHs		8.23±0.36 ^A	9.58±0.46 ^A
表层溶氧 surface dissolved oxygen	Dos	mg/L	9.15±0.47 ^A	6.97±0.76 ^A
底层温度 bottom temperature	Tb	°C	17.66±0.43	24.68±0.44
底层盐度 bottom salinity	Sb		14.09±1.21	17.43±4.13
底层 pH bottom pH	pHb		8.36±0.24 ^A	9.51±0.53 ^A
底层溶氧 bottom dissolved oxygen	Dob	mg/L	9.08±0.44 ^A	6.43±0.24 ^A
深度 depth	Depth	m	5.12±1.48	7.53±1.40

注：同行间上标相同小写字母表示差异不显著 ($P>0.05$)，无字母表示差异显著 ($P<0.05$)；同列表底层相同指标间上标相同大写字母表示差异不显著 ($P>0.05$)，无字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Superscripts with the same lowercase letters between the same row indicate that the difference is not significant ($P>0.05$), and no letters indicate that the difference is significant ($P<0.05$); superscript with the same capital letters between the surface and bottom for the same index indicate that the difference is not significant ($P>0.05$), and no letter indicates that the difference is significant ($P<0.05$).

利用 CANOCA 5.0 软件分析春、秋季鱼类群落结构与环境因子的关系，去趋势对应分析 (DCA) 显示，排序轴梯度长度的最大值为 2.7 SD，故选择 RDA 进行约束性排序^[26-27]。由图 5a 可见，春、秋季站点区分明显，春季组的站点 (S1~S9) 均分布在物种-站点 PCA 排序图的左侧，主要分布的优势种有棘头梅童鱼 (*Cl*) 和拉氏狼牙虾虎鱼 (*Ol*)；秋季组的站点 (A1~A9) 均分布在 PCA 排序图的右侧，主要分布的优势种包括龙头鱼 (*Hn*)、凤鲚 (*Cm*)、刀鲚 (*Ce*) 和鲢 (*Mm*)。如图 5a 所示，春季的主要优势种棘头梅童鱼 (*Cl*) 主要分布在 S9、S6、S2 站点，位于调查区域的东部和南部水域，3 个站点的丰度占总丰度的 57.23%；秋季的 A4、A2 和 A8 站点分布也较多，3 个站点的丰度占总丰度的 19.78%；棘头梅童鱼的分布与溶氧正相关 (图 5b)。拉氏狼牙虾虎鱼 (*Ol*) 春季主要分布在 S3

和 S6 站点，位于调查区域的东南部，2 个站点丰度占总丰度的 18.69%；秋季主要分布在 A3 和 A5 站点，2 个站点的丰度占总丰度的 41.12% (图 5a)；拉氏狼牙虾虎鱼的分布与盐度和 pH 正相关 (图 5b)。秋季的特有优势种龙头鱼 (*Hn*) 主要分布在 A8、A6 和 A9 站点，位于调查水域的东北部 (图 5a)，3 个站点丰度占总丰度的 76.04%，其分布与温度、深度、pH 和盐度正相关 (图 5b)。凤鲚 (*Cm*) 主要分布在秋季的 A8、A2 和 A5 站点，位于调查水域的中部，3 个站点丰度占总丰度的 62.46%，在春季的 S6、S9 和 S2 站点分布也较多，3 个站点丰度占总丰度的 9.01% (图 5a)。凤鲚的分布与深度、温度、pH 和底层盐度正相关 (图 5b)。刀鲚 (*Ce*) 秋季主要分布在 A8、A4 和 A2 站点，位于调查水域的中部和西部，3 个站点丰度占总丰度的 29.72%，春季主要分布在 S9、S6 和 S2 站点，3 个站点丰度

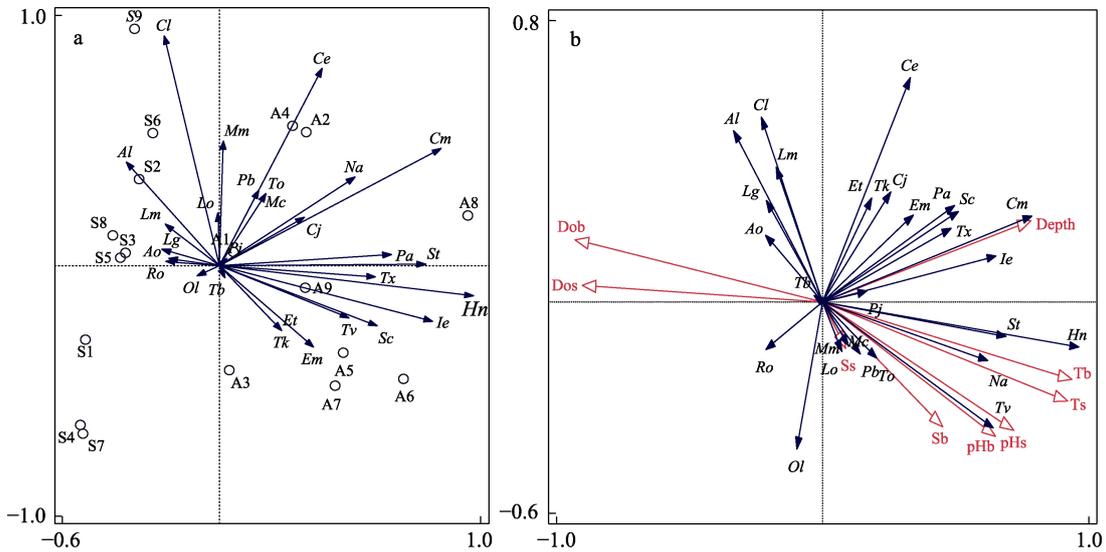


图 5 长江口海上风电场海域春、秋季鱼类丰度与站点的 PCA 排序(a)和丰度与环境因子的 RDA 排序(b)
S1-S9 代表春季 1-9 站点, A1-A9 代表秋季 1-9 站点, 代码(Cl, Ce, Cm, Mm, Ol, Hn 等)与物种之间的对应关系见表 1.

Fig. 5 PCA ordination of fish abundance and stations (a) and RDA ordination of abundance and environmental factors (b) in spring and autumn in offshore wind farm waters of the Yangtze River Estuary
S1-S9 mean 1-9 stations in spring. A1-A9 mean 1-9 stations in autumn. The species codes (Cl, Ce, Cm, Mm, Ol, Hn, etc.) are shown in table 1.

占总丰度的 48.25% (图 5a)。刀鲚的分布与深度正相关(图 5b)。鳊(Mm)秋季主要分布在的 A4、A2 和 A1 站点, 3 站点丰度占总丰度的 73.45%, 在春季的 S9 站点也有分布, 其丰度占总丰度的 5.31% (图 5a)。鳊的分布与盐度和 pH 正相关(图 5b)。

3 讨论

3.1 种类组成

调查水域位于长江口门处南汇边滩东侧水域, 以往对相邻水域的鱼类种类组成及群落结构研究表明, 该水域鱼类组成以鲈形目最多, 该结果与本研究一致^[28,32-34]。从种类组成的适温性来看, 调查水域以暖温性鱼类为主, 这与谢旭等^[28]的研究结果一致。从生态类型来看, 调查水域春季以河口定居性鱼类为主, 秋季以海洋性鱼类为主, 分别与谢旭等^[28]和王森等^[35]的研究类似, 这是由于本调查水域位于长江口南支口门外, 受长江径流和洋流共同影响, 春季处于平水期, 长江径流小, 种类组成以河口定居性鱼类为主; 秋季处于丰水期, 长江径流输送丰富营养物质至长江口门外水域, 吸引大量海洋性鱼类的幼体来此索饵, 故秋季以海洋性鱼类为主。综合来看, 该水域鱼

种类组成以鲈形目、暖温性鱼类为主, 春季主要为河口定居性鱼类, 秋季主要为海洋性鱼类。

在优势种方面, 棘头梅童鱼、刀鲚、凤鲚和鳊为春、秋季共同的优势种, 拉氏狼牙虾虎鱼和龙头鱼分别为春、秋季特有的优势种。谢旭等^[28]和宋超等^[34]对本研究区域相邻水域的调查发现, 春季的共同优势种为棘头梅童鱼, 秋季的共同优势种有龙头鱼、棘头梅童鱼和凤鲚。与本研究相比, 其春季共同优势种较少, 而秋季共同优势种较多。上述调查的季节与本研究一致, 春季的优势种组成存在较多差异的原因主要与调查区域的差异性有关。通过在不同季节对邻近水域调查发现, 棘头梅童鱼为共同优势种, 其他优势种的不同与调查水域的差异性和采样季节的不同有关^[28,33-35]。优势种的组成与调查水域和采样季节密切相关, 上述分析表明季节对优势种的种类组成影响更明显, 上述研究中不同季节出现的共同优势种均为棘头梅童鱼, 可见棘头梅童鱼为该水域最主要的鱼类组成。

3.2 群落结构

基于 Bray-Curtis 相似性系数的 ANOSIM 检验表明, 调查水域鱼类群落结构季节间存在显著性

差异。这种结构差异主要体现在两方面。一方面是优势种组成及比例不同,其中春季的特有优势种为拉氏狼牙虾虎鱼,秋季的特有优势种为龙头鱼,两季具有不同的优势种组成;虽然两季有 4 种共同优势种,但优势种在两季的组成比例明显不同,棘头梅童鱼在春季的数量比例为 69.37%,明显高于秋季(8.60%);凤鲚在秋季的数量比例为 29.22%,高于春季(9.25%)。另一方面体现在群落典型种的差异性,SIMPER 分析表明,春季典型种主要有棘头梅童鱼、鲩、凤鲚和拉氏狼牙虾虎鱼,秋季典型种主要有龙头鱼、凤鲚、棘头梅童鱼和鲩,其中组内典型种同时又是组间分歧种,均为不同季节的优势种。可见,不同季节鱼类群落结构差异主要体现在不同季节鱼类的优势种和典型种的组成差异。

不同季节间鱼类群落结构差异性较大,造成不同季节间差异的主要种类组成及数量占比不同。其中,造成春季差异的主要种类为棘头梅童鱼,数量占比 69.37%,而造成秋季差异的主要种类为龙头鱼和凤鲚,占比分别为 40.72%和 29.22%。Cabral 等^[36]研究表明优势种占比不同,群落受干扰程度也不同,从研究结果看,优势种在两季的种类组成及占比均不同,说明群落受到不同程度干扰。

对春、秋季鱼类群落结构进行对比来看,秋季的丰度和生物量明显高于春季,多样性指数 D 和 H' ,以及 W 值及丰度和生物量优势度曲线均表明,秋季的群落结构更稳定,种类数更多,丰富度和多样性更高。在鱼类群落内,物种分布季节动态多呈现为洄游性(如生殖洄游、索饵洄游)的更替节律,导致鱼类群落结构的时序相对不稳定^[12]。该水域海洋生物资源丰富,是多种鱼类的繁殖、育肥及栖息场所,不同季节有不同的鱼类在此育幼、索饵和繁殖^[37]。其中棘头梅童鱼在 4—6 月进行繁殖^[12],春季调查中捕获的 99.52%的个体为平均体长 20 mm 的当年繁殖的早期幼鱼,表明该水域是棘头梅童鱼重要的育幼场,春季棘头梅童鱼幼鱼在此大量聚集索饵从而造成春季群落结构差异。该水域也是龙头鱼的重要索饵场,龙头鱼 6—8 月进行繁殖^[12],秋季调查中捕获的 88.53%

的个体为平均体长 84 mm 的当年繁殖的幼鱼,表明该水域为龙头鱼主要的索饵场,秋季大量龙头鱼幼鱼在此聚集索饵从而造成秋季群落结构的差异。另外,凤鲚的繁殖期为 5 月中旬至 9 月初,春季捕获的 64.23%为平均体长 108 mm 的溯河洄游繁殖群体,秋季捕获的 80.14%为当年繁殖的平均体长 80 mm 幼体,可见,该水域是凤鲚幼鱼重要的索饵场和成体繁殖前后重要的索饵和栖息场所^[12]。已有研究表明,随着季节更替,优势种类交替出现,可使优势种避免剧烈竞争,充分利用饵料资源,是在时间分布上的一种适应^[38]。综合来看,鱼类群落结构在不同季节间存在显著差异,造成这种差异的原因与棘头梅童鱼、龙头鱼、凤鲚等优势种类的季节性的育幼、索饵和繁殖有关。

从 D 来看,春季平均为 1.00,秋季平均为 1.40,可见群落结构受到中度影响^[39]。从 ABC 曲线来看,春、秋季的丰度和生物量优势度曲线相交,两季的 W 值均小于 0,说明群落处于受干扰状态^[40]。本研究中,调查水域位于长江口门外南汇边滩东侧水域,主要鱼类组成为棘头梅童鱼、凤鲚、刀鲚、鲩和龙头鱼等具有季节性洄游的种类,随着季节的更替造成调查水域鱼类群落的波动。在优势种组成中,除了刀鲚外,其他种类均以个体小、数量大的幼体为主,这种以幼体为主的鱼类群落随季节更替的状态,与杭州湾北部水域的状况类似^[39]。本研究发现,鱼类的丰度、生物量、 D 、 J' 和 H' 多样性指数在风电场区和邻近水域间均无显著性差异,造成群落结构干扰的因素主要为优势种组成的季节更替,而风电场对鱼类群落结构并无显著性影响,这在其他研究中也见类似结果^[41-42]。

3.3 群落结构与环境因子的关系

本研究中,鱼类群落结构受到溶氧、温度、深度和盐度的综合影响。溶氧主要通过生理耐受限度影响鱼类活动水平,反映栖息地的适宜性^[43-44],温度影响鱼类群落结构的季节变化,深度和盐度影响鱼类群落的空间格局^[45]。不同鱼类的繁殖时间、洄游规律和垂直分布等生态习性不同,不同环境因子对不同生活史阶段鱼类的影响也不同。

从丰度来看,春季的主要种类棘头梅童鱼和

刀鲚均主要分布在站点 9、6 和 2, 其分布区域有所重叠, 但由于其生活史阶段不同对环境的需求不同。春季棘头梅童鱼以早期幼鱼为主^[12], 分布密度大, 对溶氧需求高, 主要分布在溶氧较高的水域, 其分布与溶氧正相关。春季刀鲚以上溯洄游成体为主^[12], 分布水层较深, 其分布与深度正相关。拉氏狼牙虾虎鱼为春季的优势种, 但秋季的丰度更大, 这与其繁殖时间相关。拉氏狼牙虾虎鱼分别在 2—4 月和 7 月下旬至 9 月繁殖^[12], 春季以平均体长 161 mm 的成体为主, 数量较少, 秋季以平均体长 45 mm 的当年产幼体为主, 数量较多, 成体主要分布在盐度较小的站点 6, 幼体主要分布在盐度较大的站点 5, 其分布与盐度正相关。鲢为春、秋季共同的优势种, 其春季的优势度较大, 秋季的丰度较大, 这与其繁殖时间相关。鲢在 7—8 月繁殖^[12], 春季以平均体长 46 mm 的上年产幼鱼为主, 数量较少, 秋季以平均体长 37 mm 的当年产幼鱼为主, 数量较多; 春季主要分布在站点 9, 秋季主要分布在站点 4、2 和 1, 均分布在盐度较高的水域, 其分布与盐度正相关。秋季鲢和拉氏狼牙虾虎鱼均以幼体为主, 均分布在盐度较高的水域, 但两者的栖息水层和分布水域不同, 鲢的分布水层相对较浅, 而拉氏狼牙虾虎鱼一般穴居在水底的泥层中^[12], 这种不同的水层分布和对底质的不同需求, 形成两者分布的空间差异。龙头鱼和凤鲚为秋季的优势种, 优势度和丰度均较高, 两者的繁殖期分别为 6—8 月和 5 月中旬至 9 月初^[12], 繁殖时间相互交叉, 秋季均以幼体为主, 其中龙头鱼幼鱼主要分布在站点 8、6 和 9, 凤鲚幼鱼主要分布在站点 8、2 和 5, 空间位点相互交错, 两者均分布在深度和盐度较大的水域, 两者的分布均与盐度和深度正相关。龙头鱼是一种近底层鱼类, 其分布的水层更深, 凤鲚分布水域的盐度更大, 不同的深度和盐度需求形成两者分布的空间差异。可见, 鱼类群落结构的差异主要与不同季节优势种的生态习性相关。

RDA 排序能够较好地解释物种与环境间的内在联系, 揭示鱼类对不同生态环境的适应性特征。RDA 分析表明, 不同环境因子对鱼类群落结构影响不同。溶氧是重要的栖息地指示因子, 不

仅影响鱼体生长状况, 还会影响水体的质量^[44], 温度主要在时间尺度上影响海洋生物群落结构^[23,33], 深度和盐度驱动鱼类群聚的空间变异^[45]。对于洄游性鱼类其季节性洄游是引起群落结构差异的主要因素^[46]。可见, 群落结构的差异不仅与鱼类生态习性相关, 而且受多种环境因素综合影响, 由生物因子和非生物因子共同作用。鱼类群落结构的形成与改变是鱼类在长期自然选择中表现出对环境的适应性结果, 海上风电场建设是一种人为的环境干扰。虽然造成鱼类群落结构干扰的主要为季节和环境因素, 风电场对鱼类群落的影响有限, 但风电场建成后在运行期间是否对该水域鱼类群落结构及生态环境产生影响还需进行持续监测和深入研究, 以期为该水域鱼类资源的保护和生态修复提供科学依据。

参考文献:

- [1] Xu L, Li F, Peng H B. Development of offshore wind power and its environmental problems in China[J]. China Pollution, Resources and Environment, 2015, 25(5): 135-138. [许莉, 李锋, 彭洪兵. 中国海上风电发展与环境问题研究[J]. 中国人口, 资源与环境, 2015, 25(5): 135-138.]
- [2] Wang Z Y, Shi J L, Zhao Y Q, et al. Energy technology roadmap: China's wind power development roadmap 2050[R]. National Development and Reform Commission Energy Research Institute (ERI), 2011.10. [王仲颖, 时璟丽, 赵勇强, 等. 能源技术路线图: 中国风电发展路线图 2050[R]. 国家发展和改革委员会能源研究所, 2011.10.]
- [3] Li X Y, Wang W. The status quo of China's offshore wind power generation development based on SWOT analysis method[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2018(5): 42-49. [李晓宇, 王伟. 基于 SWOT 分析我国海上风力发电的发展现状[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2018(5): 42-49.]
- [4] Fang N, Ding L, Zheng L F. Study on influence of marine oil spill accident on Jiuduansha Wetland Nature Reserve[J]. Yangtze River, 2015, 46(12): 84-86, 90. [方宁, 丁玲, 郑磊夫. 海上溢油事故对九段沙湿地保护区影响研究[J]. 人民长江, 2015, 46(12): 84-86, 90.]
- [5] Liu L Y. Engineering geological summary of offshore wind power in China[J]. Wind Power, 2017(5): 7-11. [刘莉媛. 我国海上风电工程地质概况综述[J]. 风力发电, 2017(5): 7-11.]
- [6] Zhou Y D, Jin H W, Zhang H L, et al. Distributions of ichthyoplankton of *Coilia mystus* in the coast of north Zhejiang Province in spring and summer[J]. Journal of

- Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2011, 30(4): 307-312. [周永东, 金海卫, 张洪亮, 等. 浙江北部沿岸春夏季凤鲚鱼卵及仔、稚鱼分布特征[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2011, 30(4): 307-312.]
- [7] Lan Z G, Li X Z, Xiao G, et al. Potential impacts of thermal discharge on marine environment from offshore floating nuclear power plant[J]. Marine Sciences, 2016, 40(6): 84-88. [兰志刚, 李新仲, 肖钢, 等. 海上浮式核电站温排水对海洋生态环境的影响[J]. 海洋科学, 2016, 40(6): 84-88.]
- [8] Garthe S, Markones N, Corman A M. Possible impacts of offshore wind farms on seabirds: A pilot study in Northern Gannets in the southern North Sea[J]. Journal of Ornithology, 2017, 158(1): 345-349.
- [9] Wang J J, Zou X Q, Yu W W, et al. Effects of established offshore wind farms on energy flow of coastal ecosystems: A case study of the Rudong offshore wind farms in China[J]. Ocean & Coastal Management, 2019, 171: 111-118.
- [10] Zhang J L, Yang H, Wang C F, et al. Cumulative impacts assessment of offshore wind power on the marine ecological environment in Binhai, Jiangsu[J]. Marine Environmental Science, 2019, 38(6): 884-890. [张晶磊, 杨红, 王春峰, 等. 江苏滨海海上风电场建设对近岸海洋生态环境的累积影响评价[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(6): 884-890.]
- [11] General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.6-2007 Specification for oceanographic survey Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [国家质检总局, 国家标准化委员会. 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.]
- [12] Zhuang P, Zhang T, Li S F, et al. Fishes of the Yangtze Estuary (Second Edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 1-657. [庄平, 张涛, 李圣法, 等. 长江口鱼类(第 2 版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 1-657.]
- [13] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson L K. Food habits of Albacore, Bluefin tuna, and bonito in Californian waters[J]. Fishery Bulletin, 1971, 152(1): 1-106.
- [14] Wo J, Mou X X, Xu B D, et al. Interannual changes in fish community structure in the northern part of the coastal waters of Jiangsu Province, China in spring[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 285-292. [沃佳, 牟秀霞, 徐宾铎, 等. 江苏近海北部海域春季鱼类群落结构的年间变化[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 285-292.]
- [15] Ulanowicz R E. Information theory in ecology[J]. Computers & Chemistry, 2001, 25(4): 393-399.
- [16] Shannon C E. The mathematical theory of communication. 1963[J]. M D Computing: Computers in Medical Practice, 1997, 14(4): 306-17.
- [17] Pielou E C. Ecological Diversity[M]. New York: John Wiley and Sons, 1975: 165.
- [18] Wilhm J L. Use of biomass units in shannon formula[J]. Ecology, 1968, 49(1): 153-156.
- [19] Wang X L, Xu B D, Ji Y P, et al. Fish community structure and its relationships with environmental factors in Haizhou Bay and adjacent waters of East China in winter[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1707-1714. [王小林, 徐宾铎, 纪毓鹏, 等. 海州湾及邻近海域冬季鱼类群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1707-1714.]
- [20] Clarke K R, Warwick R M. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation (2nd ed)[M]. Plymouth, UK: Primer-E, 2001.
- [21] Wang Z H, Wang K, Zhao J, et al. Fish community structure and its seasonal change in subtidal sandy beach habitat off southern Gouqi Island[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(5): 1332-1342. [汪振华, 王凯, 赵静, 等. 枸杞岛潮下带沙地生境鱼类群落结构和季节变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1332-1342.]
- [22] Bray J R, Curtis J T. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin[J]. Ecological Monographs, 1957, 27(4): 325-349.
- [23] Yang G, Hong Q Q, Zhang T, et al. Fish community structure in intertidal area of *Acipenser sinensis* natural reserve in Yangtze River Estuary[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(5): 1194-1201. [杨刚, 洪巧巧, 张涛, 等. 长江口中华鲟自然保护区潮间带鱼类群落结构[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1194-1201.]
- [24] Zhou H, Zhang Z N. Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(1): 58-64. [周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 58-64.]
- [25] Zhang W C, Ye Z J, Tian Y J, et al. Fish community structure in Yangpu waters of Beibu Gulf[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(7): 1894-1904. [张文超, 叶振江, 田永军, 等. 北部湾洋浦海域鱼类群落结构[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 1894-1904.]
- [26] ter Braak C J F. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis[J]. Ecology, 1986, 67(5): 1167-1179.
- [27] Zhou X G, Qiao Y M, Wang S, et al. Characteristics of fish assemblages associated with environmental factors in the

- Lake Erhai[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(6): 1569-1577. [周兴安, 乔永民, 王赛, 等. 洱海鱼类群落结构特征及其与环境因子关系[J]. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1569-1577.]
- [28] Xie X, Yu C G, Zhou Q S, et al. Species composition and quantitative distribution of fishes in the Hangzhou Bay during spring and autumn[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(3): 656-663. [谢旭, 俞存根, 周青松, 等. 杭州湾海域春、秋季鱼类种类组成和数量分布[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(3): 656-663.]
- [29] Chen W F, Peng X, Wang Z H, et al. Community structure characteristics of fishes in the coastal area of south Zhejiang during autumn and winter[J]. Ocean Development and Management, 2017, 34(11): 111-119. [陈伟峰, 彭欣, 汪振华, 等. 浙南近海秋冬季鱼类群落结构研究[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(11): 111-119.]
- [30] Clarke K R. Comparisons of dominance curves[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1990, 138(1-2): 143-157.
- [31] Yang Z, Tang H Y, Wan L, et al. Inter-annual dynamics of fish community structure in the Jiangjin section of the upper Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(6): 1565-1572. [杨志, 唐会元, 万力, 等. 三峡库区上游江津江段鱼类群落结构的年际变化[J]. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1565-1572.]
- [32] Hong B, Wang M, An C G, et al. Component and diversity of fishes in the offshore wind farm of the East China Sea bridge in spring and summer[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2014, 33(3): 234-239. [洪波, 王森, 安传光, 等. 春、夏季东海大桥海上风电场鱼类组成及多样性[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2014, 33(3): 234-239.]
- [33] Wang M, Hong B, Zhang Y P, et al. Community structure of nektons in northern Hangzhou Bay in summer and winter[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2015, 35(3): 56-62. [王森, 洪波, 张玉平, 等. 夏、冬季杭州湾北部游泳动物群落结构[J]. 广东海洋大学学报, 2015, 35(3): 56-62.]
- [34] Song C, Hou J L, Zhao F, et al. Fish community structure in the offshore wind farm of the East China Sea Bridge in spring and autumn[J]. Marine Sciences, 2017, 41(6): 34-40. [宋超, 侯俊利, 赵峰, 等. 春、秋季东海大桥海上风电场水域鱼类群落结构[J]. 海洋科学, 2017, 41(6): 34-40.]
- [35] Wang M, Hong B, Zhang Y P, et al. Spring and summer fish community structure in northern Hangzhou Bay[J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(5): 75-81. [王森, 洪波, 张玉平, 等. 春季和夏季杭州湾北部海域鱼类种群结构分析[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(5): 75-81.]
- [36] Cabral H N, Costa M J, Salgado J P. Does the Tagus Estuary fish community reflect environmental changes? [J]. Climate Research, 2001, 18: 119-126.
- [37] Yu C G, Chen Q Z, Chen X Q, et al. Species composition and quantitative distribution of fish in the Zhoushan fishing ground and its adjacent waters[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(3): 410-417. [俞存根, 陈全震, 陈小庆, 等. 舟山渔场及邻近海域鱼类种类组成和数量分布[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(3): 410-417.]
- [38] Shan X J, Xian W W, Wu Y F. Progress of studies on ichthyoplankton ecology of Changjiang River Estuary[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2004(4): 87-93. [单秀娟, 线薇薇, 武云飞. 长江河口生态系统鱼类浮游生物生态学进展[J]. 海洋湖沼通报, 2004(4): 87-93.]
- [39] Zhou X, Wang M, Hong B. Fishery resources community structure seasonal change in North-eastern Hangzhou Bay[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(4): 597-606. [周轩, 王森, 洪波. 杭州湾东北部渔业资源群落结构的季度变化[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(4): 597-606.]
- [40] Li Z Y, Wu Q, Shan X J, et al. Interannual variations in fish community structure in the Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(2): 403-413. [李忠义, 吴强, 单秀娟, 等. 渤海鱼类群落结构的年际变化[J]. 中国水产科学, 2017, 24(2): 403-413.]
- [41] van Hal R, Griffioen A B, van Keeken O A. Changes in fish communities on a small spatial scale, an effect of increased habitat complexity by an offshore wind farm[J]. Marine Environmental Research, 2017, 126: 26-36.
- [42] Langhamer O, Dahlgren T G, Rosenqvist G. Effect of an offshore wind farm on the viviparous eelpout: Biometrics, brood development and population studies in Lillgrund, Sweden[J]. Ecological Indicators, 2018, 84: 1-6.
- [43] Zhang Y Q, Xu Q, Xu Q Z, et al. Demersal fish community structure around the Qiansan Islets in Haizhou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(1): 156-168. [张迎秋, 许强, 徐勤增, 等. 海州湾前三岛海域底层鱼类群落结构特征[J]. 中国水产科学, 2016, 23(1): 156-168.]
- [44] Yang G, Zhang T, Zhuang P, et al. Preliminary assessment of habitat of juvenile *Collichthys lucidus* in the Yangtze Estuary[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(8): 2418-2424. [杨刚, 张涛, 庄平, 等. 长江口棘头梅童鱼幼鱼栖息地的初步评估[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2418-2424.]
- [45] Zhang Y Q, Xian W W, Li W L. Fish assemblage structure in adjacent sea of Changjiang Estuary in spring of 2004 and 2007 and its association with environmental factors[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(9): 67-74.

[张迎秋, 线薇薇, 李文龙. 2004 和 2007 年春季长江口近海鱼类群落特征及其与环境因子的关系[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(9): 67-74.]

[46] Jiang Y Z, Lin N, Yuan X W, et al. Community structure and

species diversity of nektons in Xiangshan Bay of East China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(4): 920-926.

[姜亚洲, 林楠, 袁兴伟, 等. 象山港游泳动物群落结构及多样性[J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 920-926.]

Fish community structure and its relationship with environmental factors in offshore wind farm waters of the Yangtze Estuary

SONG Chao^{1,2,4}, HU Lijuan^{1,3}, ZHAO Feng^{1,2,3,4}, ZHANG Tao^{1,2,4}, YANG Gang^{1,2,4}, GENG Zhi^{1,2,4}, ZHUANG Ping^{1,2,4}

1. Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment of the East China Sea and Yangtze Estuary, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
2. Key Laboratory of Fisheries Ecology of the Yangtze Estuary, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
3. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. Shanghai Engineering Research Center of Fisheries Resources Enhancement and Ecological Restoration of the Yangtze Estuary, Shanghai 200090, China

Abstract: In order to illustrate fish community structure and factors influencing it in offshore wind farm (OWF) waters of the Yangtze Estuary, multivariate statistics and redundancy analysis (RDA) were used to analyze the fish community structure and its relationships with environmental factors. The results showed that 28 species belonging to 6 orders, 15 families, and 26 genera were identified. Perciformes (57.14%) had the highest percentage of species, with maximum percentage of species belonging to the family Gobiidae (21.43%). Most of the species were affiliated with warm marine temperature and demersal fishes. The dominant species in spring were *Collichthys lucidus*, *Coilia nasus*, *Coilia mystus*, *Odontamblyopus lacepedii*, and *Miichthys miui*, and in autumn were *Harpadon nehereus*, *C. mystus*, *C. lucidus*, *C. nasus*, and *M. miui*. The diversity analysis and ABC curve showed that the fish community structure in these waters was disturbed. *T*-test showed that the abundance, biomass, Margalef richness index (*D*), Pielou evenness index (*J'*) and Shannon diversity index (*H'*) in the OWF were not significantly different from those of the adjacent waters ($P>0.05$). Cluster and non-metric multidimensional scaling indicated that fish community in the OWF waters could be clustered into two groups: spring and autumn assemblages. ANOSIM analysis indicated that there were significant differences in community structure between these two groups ($R=0.726$, $P<0.01$), and the seasonal alternation of fish community structure was apparent. RDA showed that the fish community structure was affected by dissolved oxygen, temperature, depth, and salinity, and different environmental factors showed different effects on dominant species during different life cycle stages. In this study, it was found that the disturbance state of fish community structure was mainly related to seasons and environmental factors, and the influence of OWF was limited.

Key words: the Yangtze Estuary; offshore wind farm (OWF); species composition; community structure; environmental factor

Corresponding author: ZHAO Feng. E-mail: zhaof@ecsf.ac.cn