# 山东琵琶岛海域人工鱼礁区鱼类群落物种及功能多样性

何倩1, 刘淑德2, 唐衍力1, 董秀强2, 赵伟1, 奉杰3, 于梦杰1

1. 中国海洋大学水产学院,山东 青岛 266003;

2. 山东省渔业发展和资源养护总站,山东 烟台 264003;

3. 中国科学院海洋研究所,山东 青岛 266071

**摘要:**为了解山东琵琶岛海域人工鱼礁区鱼类群落物种及功能多样性的时空变化特征,于 2020 年 7 月—2021 年 4 月在富瀚国家级海洋牧场示范区开展 4 个季度的渔业资源和环境因子调查,采用物种多样性指数和基于 12 个功能性状的功能多样性指数分析了鱼类群落多样性的时空变化及其与环境因子的关系。结果表明,鱼礁区鱼类物种和功能多样性指数均呈现显著的季节变化,而对照区仅功能多样性指数呈现显著的季节变化; Pielou 均匀度指数、Simpson 多样性指数、功能均匀度指数和功能离散度指数在空间上存在显著差异; Spearman 相关性分析结果显示,功能丰富度与物种数和 Margalef 丰富度具有显著相关关系,功能均匀度与物种数和 Pielou 均匀度具有显著相关关系;群落特征加权平均数指数(CWM)表明,鱼类群落优势性状组成呈现一定的时空变化特征;冗余分析结果显示,透明度和无机氮对物种多样性指数具有显著影响,而酸碱度、无机氮、溶解氧和透明度则对功能多样性指数影响显著。以上结果说明,鱼类群落物种和功能多样性具有明显的时空变化特征,但变化趋势不一致,表明物种和功能多样性指数在解释鱼类群落差异时存在一定的互补性。

关键词:人工鱼礁区;鱼类群落;功能性状;功能多样性;时空变化;环境因子
中图分类号: \$931
文献标志码: A
文章编号: 1005-8737-(2023)12-1479-17

人工鱼礁是人为设置在水域中的构造物,其 投放后改变了周围环境的流场分布,产生的上升 流将底层的营养盐输送至上层水体,使得浮游植 物等饵料生物大量繁殖,为其他海洋生物提供了 丰富的食物来源;礁体后方产生的背涡流区则为 许多海洋生物提供了避敌、索饵、繁殖、生长以 及发育等场所<sup>[1]</sup>。研究表明,人工鱼礁在提高海洋 初级生产力<sup>[2-4]</sup>、增殖海洋生物资源<sup>[5-8]</sup>和修复海 洋生态系统<sup>[9-10]</sup>等方面发挥了重要作用。

鱼类群落是人工鱼礁生态系统中的重要生物 类群,在营养循环、碳循环以及栖息地维护等生 态系统过程方面起着重要作用<sup>[11-12]</sup>。目前,国内 学者对人工鱼礁区鱼类群落的研究集中于群落物 种组成、群落结构的时空变化及其影响因子、群 落多样性等<sup>[13-14]</sup>,其中对群落多样性的研究大多 采用传统的丰富度指数、均匀度指数和多样性指 数等指标,这些指数通常将所有物种视为在生态 上等价<sup>[15]</sup>,忽视了物种与生物和非生物环境间相 互作用的差异<sup>[16-17]</sup>,即功能性状差异。因此,基于 功能性状的功能多样性被提出并被认为是理解和 预测生态系统功能的重要工具<sup>[18]</sup>。功能多样性是 指可以影响生态系统功能的物种性状值和范围<sup>[19]</sup>, 其所关注的物种功能性状与环境和群落功能密切 相关,不仅能够用于揭示生物群落对环境变化的 响应机制<sup>[20]</sup>,还能反映群落中物种间资源互补的 程度<sup>[21]</sup>。目前,我国对鱼类群落功能多样性的研

收稿日期: 2023-08-22; 修订日期: 2023-11-20.

基金项目:山东近海渔业资源调查与监测项目(37000023P11002710002C).

作者简介:何倩(1998-),女,硕士研究生,研究方向为渔业资源与生态学. E-mail: heqouc@163.com

通信作者: 唐衍力, 教授, 研究方向为人工鱼礁与海洋牧场. E-mail: tangyanli@ouc.edu.cn

究集中于河流<sup>[22-25]</sup>、湖泊<sup>[20,26-28]</sup>、海湾<sup>[29]</sup>等生境, 如张倩等<sup>[25]</sup>探究了嘉陵江蓬安段鱼类群落功能 多样性对水位洪、枯变化的响应及其与水环境的 关系;郑鹏等<sup>[20]</sup>探究了江湖阻隔前后鱼类功能性 状和功能多样性的变化规律;张晓妆等<sup>[29]</sup>探究了 海州湾鱼类群落功能多样性的时空变化规律。而 鱼类群落功能多样性在人工鱼礁区的研究未见报道。

本研究基于富瀚国家级海洋牧场示范区 4 个 季度的地笼和三重刺网调查数据,结合传统的物 种多样性指数和基于 12 个功能性状的功能多样 性指数分析了鱼类群落多样性的时空变化特征及 其与环境因子的关系,以期为人工鱼礁管理和鱼 类群落多样性保护提供数据支撑。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 调查海域与内容

调查海域为山东省海阳市琵琶口海域富瀚国 家级海洋牧场示范区,面积约为 848 hm<sup>2</sup>,其中, 投礁面积约为 163.39 hm<sup>2</sup>,共投放石块礁、钢筋 混凝土构件礁等约 25 万空方。调查时间为 2020 年 7 月(夏季)和 10 月(秋季)、2021 年 1 月(冬季) 和 4 月(春季),每航次在鱼礁区(AR)随机设置调 查站位 6 个、对照区(CA) 3 个。详细调查站位见 图 1。



Fig. 1 Map of survey stations

调查内容包括渔业资源调查和水环境调查。 调查渔具采用地笼和三重刺网,其中,地笼网目 尺寸为2 cm,矩形尺寸为37 cm×22 cm,每只地 笼包含25节,3只地笼串联为1组;三重刺网由4 种网目规格的网片水平连成1张,且网目规格顺 序保持一致,内网网目尺寸分别为4 cm、5 cm、6 cm 和7 cm,外网网目尺寸均为33 cm,网高1.2 m, 网长200 m。每个站点均放置1组地笼和1张三 重刺网,放置时长为48 h<sup>[30]</sup>。采集到的渔获物带 回实验室进行物种鉴定以及生物学参数(体长、体 重等)测量。现场采用多参数水质仪(YSI Proplus) 测定温度、盐度、pH 及溶解氧,采用手持式水深 仪(DMT-20)测定水深,采用塞氏盘法测定透明度; 采集到的水样带回实验室测定化学需氧量、叶绿 素 a 以及营养盐等环境参数。样品采集与分析按 照《海洋调查规范(GB/T12763-2007)》<sup>[31]</sup>和《海 洋监测规范(GB17378-2007)》<sup>[32]</sup>要求进行。

#### 1.2 数据处理与分析

**1.2.1 物种累积曲线** 物种累积曲线(species accumulation curve, SAC)是用来判断调查采样是 否充分的有效工具<sup>[33]</sup>。本研究以1个调查站位为 抽样单位对鱼礁区和对照区的鱼类群落进行物种 累积曲线分析,以此得到了物种数随抽样量增加 的变化趋势。

**1.2.2 优势种分析** 采用相对重要性指数(index of relative importance, IRI)<sup>[34]</sup>确定鱼类群落优势

种,如:

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

式中, N%为某物种尾数占总渔获物尾数的百分比; W%为该物种生物量占总生物量的百分比; F%为 该物种出现的站位数占总站位数的百分比。将 IRI≥1000 的物种定义为优势种。

**1.2.3 物种多样性**使用丰富度指数(Margalef index)、均匀度指数(Pielou index)、多样性指数 (Shannon index、Simpson index)来反映鱼类群落 在物种水平上的多样性<sup>[35]</sup>。

**1.2.4 功能多样性** 根据先前对鱼类群落功能多样性的研究<sup>[20,29]</sup>,本研究选取了与鱼类摄食、运动、生活史和种群动态有关的 12 个功能性状,包括 5 个分类性状(食性: 植食性、浮游生物食性、

浮游和底栖生物食性、底栖生物食性、底栖和游 泳动物食性、游泳动物食性;体型:鳗形、带形、 亚圆柱形、侧扁形、平扁形、不对称形、前部宽 扁,后部侧扁、前部圆柱,后部侧扁;洄游类型: 定居型、沿岸型、近海型、外海型;鱼卵类型:浮 性卵、附着性卵、黏着浮性卵、黏着沉性卵、卵 胎生;恢复力:极低、低、中等、高)和7个连续 性状(营养级、最大体长、初次性成熟体长、初次 性成熟年龄、世代时间、生长系数以及脆弱性)。 功能性状数据主要参考鱼类数据库 FishBase<sup>[36]</sup>和 已发表的文献及书籍<sup>[29,37-52]</sup>。功能性状取值优先 参考黄海及邻近海域资料,其次是中国其他海域 资料,其他数据是世界鱼类数据库 FishBase,详 细功能性状见表1。

表 1 鱼类功能性状 Tab. 1 Functional traits of fish

<i>性加</i> 禾山	食性	营养级	体型	洄游	最大体长 /cm	鱼卵	初次性成 卵 熟体长/ 型 cm	え 初次性 成熟年 龄/a	: <sup>:</sup> 世代 时间/a	生长	恢	脆弱性	采样渔具 sampling <u>fishing gear</u>	
species	feeding habit	trophic level	body shape	类型 migration type	maximum body length	类型 eggs type	body length at first sexual maturity	age at first sexual maturity	时间/a generation time	系数 growth coefficient	复刀 resilie- nce	vulnera bility	地笼 cage net	三重 刺网 trammel net
红狼牙虾虎鱼 Odontamblyopus rubicundus	В	3.9	1	ST	33.4	AE	20.3	3.7	4.2	0.19	М	31	*	*
黄鳍刺虾虎鱼 Acanthogobius flavimanus	В	3.4	6	ST	30.0	AE	27.0	2.2	2.8	0.32	М	33	*	*
六丝钝尾虾虎鱼 Amblychaeturichthys hexanema	В	3.4	6	ST	17.4	AE	11.4	1.9	2.5	0.70	М	10	*	*
矛尾虾虎鱼 Acanthogobius hasta	В	3.8	6	ST	28.2	AE	11.8	2.7	2.9	0.45	М	18	*	*
纹缟虾虎鱼 Tridentiger trigonocephalus	В	3.4	6	ST	11.0	AE	7.6	1.3	1.8	0.64	Н	10	*	
钟馗虾虎鱼 Tridentiger barbatus	В	3.5	6	ST	10.4	AE	7.3	1.5	2.0	0.56	Н	10		*
白姑鱼 Pennahia argentata	B-N	4.1	3	ОМ	40.0	PE	11.1	1.6	2.0	0.42	Н	34	*	*
黄姑鱼 Nibea albiflora	B-N	4	3	ОМ	43.5	PE	19.0	1.1	1.3	0.40	М	25	*	*
皮氏叫姑鱼 Johnius belangerii	В	3.3	3	ОМ	30.0	PE	12.5	1.3	1.5	0.53	Н	20	*	*
方氏云鳚 Pholis fangi	P-B	3.2	1	СМ	16.8	0	11.2	1.1	1.5	0.61	Н	10	*	*
吉氏绵鳚 Zoarces gillii	В	3.5	1	СМ	45.1	0	26.5	6.2	7.5	0.11	VL	35	*	

(待续 to be continued)

# (续表 1 Tab. 1 continued)

(待续 to be continued)

							初次性成	初次性		( )			采材	羊渔具
物种	食性	营养级	体型	洄游 类型	最大体长 /cm	鱼卵 类型	熟体长/ cm	成熟年 龄/a	世代 时间/a	生长 系数	恢 复力	脆弱性	saı fishi	npling ing gear
species	habit	level	shape	migration type	maximum body length	eggs type	body length at first sexual maturity	age at first sexual maturity	generation time	growth coefficient	resilie- t nce	vulnera bility	地笼 cage net	三重 刺网 trammel net
花鲈 Lateolabrax japonicus	N	3.1	3	СМ	102.0	PE	52.7	2.0	5.2	0.42	М	52		*
日本眉鳚 Chirolophis japonicus	В	3.6	3	ST	55.0	_	11.5	8.2	10.6	0.08	VL	42	*	
少鳞鱚 Sillago japonica	В	3.5	5	ОМ	30.0	PE	18.5	1.4	1.5	0.80	Н	20	*	*
细条天竺鲷 Jaydia lineata	Р	3.7	3	OM	10.2	PAE	6.8	0.8	1.0	0.50	Н	12	*	*
银鲳 Pampus argenteus	Р	3.3	3	DM	60.0	PE	25.3	1.3	1.5	0.56	М	31		*
铠平鲉 Sebastes hubbsi	В	3.5	3	ST	15.6	0	7.2	3.0	4.0	0.27	М	10		*
许氏平鲉 Sebastes schlegelii	B-N	3.8	3	ST	65.0	0	27.0	7.2	9.6	0.38	М	46	*	*
褐菖鲉 Sebastiscus marmoratus	В	3.7	3	ОМ	36.2	0	17.3	2.2	2.3	0.30	М	33	*	
绿鳍 <u>鱼</u> Chelidonichthys kumu	В	3.7	7	ОМ	60.0	PE	23.0	1.4	2.1	0.49	М	29	*	
小眼绿鳍鱼 Chelidonichthys spinosus	В	3.7	7	OM	40.0	PE	23.8	3.1	3.7	0.40	М	30		*
短鳍红娘鱼 Lepidotrigla microptera	В	3.6	5	DM	30.0	PE	18.5	2.5	2.7	0.29	М	20		*
斑头六线鱼 Hexagrammos agrammus	B-N	3.3	3	ОМ	30.0	AE	9.1	1.8	1.8	0.34	М	27	*	*
大泷六线鱼 Hexagrammos otakii	В	3.8	3	ОМ	57.0	AE	11.6	2.0	2.9	0.36	М	34	*	*
细纹狮子鱼 Liparis tanakae	B-N	4.3	7	СМ	56.3	DAE	32.2	3.3	4.3	0.31	М	43		*
鲬 Platycephalus indicus	B-N	3.6	4	ОМ	100.0	PE	45.7	1.8	2.5	0.30	М	35		*
半滑舌鳎 Cynoglossus semilaevis	В	3.7	8	СМ	61.1	PE	34.6	2.8	3.8	0.26	М	44	*	*
短吻红舌鳎 Cynoglossus joyneri	В	4.3	8	СМ	31.0	PE	17.2	3.8	4.1	0.20	М	40	*	*
石鲽 Platichthys bicoloratus	В	3.7	8	СМ	50.0	PE	31.6	3.7	4.8	0.18	М	32		*

1482

(续表1 Tab. 1 continued)

物种 species	食性	营养级	体型	洄游	最大体长/ cm maximum body length	鱼卵 类型 eggs type	初次性成 熟体长/ cm body length at first sexual maturity	初次性 成熟年 龄/a age at first sexual maturity	世代 时间/a generation time	生长 系数 growth coefficient	恢	脆弱性 vulnera bility	采样渔具 sampling fishing gear	
	feeding habit	trophic level	body shape	央型 migration type							resilie		地笼 cage net	三重 刺网 trammel net
斑鰶 Konosirus punctatus	Н	2.9	3	ОМ	32.0	PE	18.1	2.9	3.2	0.65	Н	36	*	*
赤鼻棱鳀 Thryssa kammalensis	P-B	3.4	3	ОМ	18.0	PE	8.9	2.4	3.3	0.56	М	32	*	*
黄鮟鱇 Lophius litulon	Ν	4.1	4	СМ	150.0	PAE	52.7	5.9	9.7	0.23	L	78		*
星康吉鳗 Conger myriaster	B-N	4	2	OM	100.0	PE	55.6	3.2	5.6	0.21	М	53	*	*
长蛇鲻 Saurida elongata	Ν	4.5	5	ОМ	50.0	PE	21.7	0.6	0.7	0.17	Н	23		*

注: H. 植食性; P. 浮游生物食性; P-B. 浮游和底栖生物食性; B. 底栖生物食性; B-N. 底栖和游泳动物食性; N. 游泳动物食性. 体型: 1. 带形; 2. 鳗形; 3. 侧扁形; 4. 平扁形; 5. 亚圆柱形; 6. 前部圆柱, 后部侧扁; 7. 前部宽扁, 后部侧扁; 8. 不对称形. ST. 定居型; CM. 沿岸型; OM. 近海型; DM. 远海型; PE. 浮性卵; PAE. 粘着浮性卵; AE. 附着性卵; DAE. 粘着沉性卵; O. 卵胎生; VL. 极低恢复力; L. 低恢复力; M. 中等恢复力; H. 高恢复力.

Note: H, Herbivorous; P, Planktivorous; P-B, Planktivorous and Benthivorous; B, Benthivorous; B-N, Benthivorous and Nektivorous; N, Nektivorous. Body shape: 1, Band shape; 2, Anguilliform; 3, Compressiform; 4, Depressiform; 5, Sub-cylinder; 6, Front cylindrical and rear side flat; 7, Front wide flat and rear side flat; 8, Asymmetry; ST, Settlement type; CM, Coastal migratory; OM, Offshore migratory; DM, Distantly migrating; PE, Pelagic eggs; PAE, Pelagic adhesive eggs; AE, Adhesive eggs; DAE, Demersal adhesive eggs; O, Ovoviviparous; VL, Very low resilience; L, Low resilience; M, Medium resilience; H, High resilience.

选择 Gower 距离并参考 Cornwell 等<sup>[53]</sup>和 Villeger <sup>[54]</sup> 提出的方法计算功能多样性 (functional diversity, FD)。本研究以4种功能多样 性指数来度量鱼类群落功能多样性的时空变化, 其中,功能丰富度(functional richness, FRic)量化 了物种在群落内所占生态空间的大小,反映群落 稳定性以及缓冲环境干扰和抵御生态入侵的能 力<sup>[55]</sup>; 功能均匀度(functional evenness, FEve)量 化了群落内物种功能性状丰度在功能空间中分布 的均匀程度,反映物种对整体资源的利用情况<sup>[55]</sup>; 功能离散度(functional divergence, FDiv)量化了群 落内物种功能性状丰度在功能空间中分布的离散 程度,反映群落内物种之间的生态位分化和资源 竞争程度<sup>[55]</sup>; 功能冗余度(functional redundancy, FRed)量化了群落中具有相同功能性状的物种数 高低,反映物种生态位的重叠程度<sup>[35]</sup>,通过Rao's 二次熵指数与 Simpson 多样性指数的比值计算。 最后,选取群落特征加权平均数(community

weighted mean, CWM)来反映鱼类群落优势性状 值的变化<sup>[29]</sup>。

1.2.5 群落多样性与环境因子的相关性分析 采 用方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)检 验环境变量之间的多重共线性, 剔除 VIF>10 的 环境因子。然后对物种多样性指数和功能多样性 指数进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA), 根据 DCA 分析结果中前4个排序 轴的长度(最长排序轴长度<3)选择冗余分析 (redundancy analysis, RDA), 并采用蒙特卡洛检 验探究环境因子对鱼类群落多样性影响的显著性。

#### 1.3 统计分析

采用 Excel 计算相对重要性指数;采用 PRIMER 6 计算物种多样性指数;采用 R 4.2.1 中 的"vegan"包进行物种累积曲线和 RDA 分析, "FD"包中的 dbFD 函数计算功能多样性指数, "stats"包进行 Spearman 相关性分析以探究物种多 样性与功能多样性之间的关系;采用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析和非参数检验分析,若存在 显著差异则进行多重比较(LSD)分析,以检验各 群落多样性指数在不同区域和季节之间是否存在 显著差异。

# 2 结果与分析

#### 2.1 物种累积曲线

4 个航次共有 33 个采样站位,其中,鱼礁区 22 个、对照区 11 个。基于采样次数的物种累积 曲线上升趋势平稳,且逐渐趋于平缓(图 2),表明 本研究调查采样充分。



图 2 鱼礁区(a)和对照区(b)的物种累积曲线 浅色阴影部分表示置信区间.

F1g. 2	Species accumulation curves in the reef area
	(a) and control area (b)
lightly	shaded areas indicate confidence intervals.

Tab. 2

#### 2.2 鱼类物种组成及优势种

共采集到鱼类 34 种(表 1), 隶属 7 目 21 科 30 属, 鲈形目种类最多, 其次是鲉形目、鲽形目和鲱 形目, 而鮟鱇目、鳗鲡目以及灯笼鱼目种类最少, 均为 1 种。鱼礁区和对照区分别捕获鱼类 29 种和 24 种, 种类共享率为 35.8%。

优势种分析(IRI)结果表明(表 2),优势种组成 在不同区域和季节间均存在一定变化。其中,夏 季优势种类最多,鱼礁区和对照区均为 6 种,且 第一优势种均为细条天竺鲷(*Jaydia lineate*);春 季最少,鱼礁区和对照区均为 3 种,许氏平鲉 (*Sebastes schlegelii*)为鱼礁区第一优势种,红狼牙 虾虎鱼(*Odontamblyopus rubicundus*)为对照区第 一优势种。从全年来看,鱼礁区主要优势种为许 氏平鲉、红狼牙虾虎鱼、细条天竺鲷等,对照区 主要优势种为红狼牙虾虎鱼、黄鳍刺虾虎鱼 (*Acanthogobius flavimanus*)、许氏平鲉等。其中许 氏平鲉为全年性优势种,但其优势度在不同区域 和不同季节间波动较大。

# 2.3 物种多样性与功能多样性的时空分布特征

物种多样性分析结果表明(图 3), 鱼礁区秋季 Margalef 丰富度指数显著高于夏季、冬季和春季 (P<0.05); 冬季 Shannon 多样性指数显著低于夏 季、秋季和春季(P<0.05); Simpson 多样性指数仅 在秋、冬季存在显著差异(P<0.05); 而对照区各物 种多样性指数在季节间的差异均不显著(P>0.05)。 从空间来看, 冬季鱼礁区 Pielou 均匀度指数和 Simpson 多样性指数均显著低于对照区(P<0.05); 而在夏季、秋季和春季, 各物种多样性指数在空 间上无显著差异(P>0.05)。

表 2	琵琶岛海域人工鱼礁区与对照区鱼类优势种组成变化
Changes in the compos	tion of dominant fish species in the reef area and control area of Pipa Island sea

	相对重要性指数 index of relative importance								
物种 species	夏 sur	nmer	秋 aut	umn	冬 w	inter	春 spring		
	AR	CA	AR	CA	AR	CA	AR	CA	
红狼牙虾虎鱼 Odontamblyopus rubicundus	—	—	—	_	—	—	5283.71	10302.38	
黄鳍刺虾虎鱼 Acanthogobius flavimanus	41.02	—	—	—	2247.88	7876.33	—	—	
六丝钝尾虾虎 Amblychaeturichthys hexanema	—	—	19.40	—	—	—	1404.93	231.34	

(待续 to be continued)

(续表 2 Tab. 2 continued)

			相对重要	性指数 inde	x of relative	importance			
物种 species	夏 su	immer	秋 aı	ıtumn	冬w	vinter	春 spring		
	AR	CA	AR	CA	AR	CA	AR	СА	
白姑鱼 Pennahia argentata	2976.19	2845.34	2109.85	3434.76	_	_	84.50	_	
皮氏叫姑鱼 Johnius belangerii	1875.88	1908.57	—	—	—	—	888.69	398.59	
方氏云鳚 Pholis fangi	—	—	477.70	—	2760.95	1180.87	46.14	320.96	
花鲈 Lateolabrax japonicus	—	—	—	—	—	2297.75	200.14	—	
细条天竺鲷 Jaydia lineata	3914.99	4910.70	538.34	4483.78	—	—	—	—	
许氏平鲉 Sebastes schlegelii	1311.00	1015.14	7497.55	2483.51	8976.24	3719.13	7433.59	3899.21	
鲬 Platycephalus indicus	1906.52	3241.52	—	—	—	—	—	—	
半滑舌鳎	1309.00	2612.57	2026.10	4102.75	_	282.85	384.56	2569.66	
Cynoglossus semilaevis									
短吻红舌鳎	50.77	47.25	60.62	—	2787.36	100.40	10.44	425.62	
Cynoglossus joyneri									
星康吉鳗 Conger myriaster	—	134.95	793.22	2088.07	—	—	49.21	104.74	

注:-表示未捕获; AR: 鱼礁区, CA: 对照区.

Note: - indicates no catch; AR: reef area, CA: control area.



图 3 琵琶岛海域鱼类群落物种多样性的时空变化 Fig. 3 Spatial and temporal variation in species diversity of fish communities in Pipa Island sea

功能多样性分析结果表明(图 4), 鱼礁区冬季 FRic 指数显著低于秋季和春季(P<0.05); 秋季 FEve 指数显著高于夏季、冬季和春季(P<0.05); 夏季 FDiv 指数显著高于秋季和春季(P<0.05),同时冬季显著高于春季(P<0.05);春季 FRed 指数显著高于秋季和冬季(P<0.05),同时夏季显著高于

冬季(P<0.05); 对照区冬季 FEve 指数显著高于春季(P<0.05); 夏季 FDiv 指数显著高于冬季和春季 (P<0.05), 同时秋季显著高于春季(P<0.05); 春季 FRed 指数显著高于冬季(P<0.05)。从空间来看, 秋季鱼礁区 FEve 指数显著高于对照区(P<0.05); 春季鱼礁区 FDiv 指数显著高于对照区(P<0.05); 其他功能多样性指数则在空间上无显著差异 (P>0.05)。





Spearman 相关性分析结果表明(图 5), FRic 指数与物种数和 Margalef 丰富度指数呈显著正相关关系; FEve 指数与 Pielou 均匀度指数呈显著正相关关系, 而与物种数呈显著负相关关系; FDiv 指数和 FRed 指数与物种多样性指数之间关系均不显著(P<0.05)。

#### 2.4 鱼类群落优势性状组成的时空变化特征

群落特征加权平均数(CWM)反映了鱼类群落 优势性状组成的时空变化趋势(图 6)。在食性方面, 鱼礁区夏季优势种包含 3 种食性,以浮游生物食 性为主,秋、冬、春季均包含 2 种,其中秋、冬季 以底栖和游泳动物食性为主,春季以底栖生物食 性为主;对照区夏、秋、冬季优势种食性组成较 均匀,分别包含 3 种、2 种、3 种食性,春季优势 种食性单一,以底栖生物食性为主。在营养级方 面,鱼礁区和对照区在 4 个季节中均以营养级较高的鱼类占优势。在体型方面,鱼礁区均以侧扁 形鱼类占优势,对照区在夏、秋、冬季以侧扁形 鱼类占优势,在春季以带形鱼类占优势。在洄游 类型方面,鱼礁区夏季优势种进行近海洄游,秋、 冬、春季优势种分别包含 3 种、2 种、1 种类型,且 均以定居型为主;对照区夏、秋季优势种进行近 海洄游,冬、春季均包含 2 种类型,且以定居型为 主。在最大体长方面,鱼礁区夏季优势种的最大 体长明显小于秋、冬季;对照区夏季优势种的最大 体长较小,冬季较大。在鱼卵类型方面,鱼礁区 夏季优势种以产浮性卵为主,秋、冬季以卵胎生 为主,春季以产附着性卵为主;对照区夏、冬季优 势种以产浮性卵为主,春季以产附着性卵为主。 在初次性成熟体长、初次性成熟年龄和世代时间

	S	Margalef	Pielou	Shannon	Simpson	FRic	FEve	FDiv	FRed	1.0
S	1.00	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$		$\bigcirc$	o	$\bigcirc$	- 0.8
Margalef	0.70*	1.00	$\bigcirc$		$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	o	0	- 0.6
Pielou	-0.22	0.17	1.00	$\bigcirc$		$\bigcirc$	$\bigcirc$	0	$\bigcirc$	- 0.4
Shannon	0.57	0.78**	0.54	1.00		$\bigcirc$	$\bigcirc$	ο	0	- 0.2
Simpson	0.22	0.58	0.83**	0.87**	1.00	$\bigcirc$	$\bigcirc$	0	ο	- 0
FRic	0.69**	0.57*	-0.18	0.46	0.16	1.00	$\bigcirc$	$\bigcirc$	0	0.2
FEve	-0.34*	0.19	0.65**	0.23	0.45	-0.18	1.00	$\bigcirc$	$\bigcirc$	0.4
FDiv	0.01	-0.01	-0.07	0.03	-0.10	-0.35	-0.13	1.00	$\bigcirc$	0.6
FRed	0.30	0.07	-0.15	0.08	0.02	0.11	-0.23	-0.17	1.00	0.8

图 5 物种多样性与功能多样性的 Spearman 相关性分析

\*表示显著相关(P<0.05); \*\*表示极显著相关(P<0.01); S: 物种数; Margalef: 丰富度指数; Pielou: 均匀度指数; Shannon, Simpson: 多样性指数; FRic: 功能丰富度指数; FEve: 功能均匀度指数; FDiv: 功能离散度指数; FRed: 功能冗余度指数. 圆形的大小表示相关系数的大小.

Fig. 5 Spearman's correlation analysis of species diversity and functional diversity

indicates significant correlation (P<0.05); \*\* indicates highly significant correlation (P<0.01); S: number of species;</li>
 Margalef: Margalef index; Pielou: Pielou index; Shannon: Shannon index; Simpson: Simpson index; FRic: functional richness index; FEve: functional evenness index; FDiv: functional divergence index; FRed: functional redundancy index. The size of the circle indicates the magnitude of the correlation coefficient.

方面, 鱼礁区夏季优势种表现较小, 秋、冬、春季 表现较大; 对照区夏、秋季优势种表现较小, 冬、 春季表现较大。在生长系数方面, 鱼礁区和对照 区优势种均在夏季表现较大, 在春季表现较小。在 恢复力方面, 鱼礁区优势种均以中等恢复力为主; 对照区夏、冬、春季优势种表现为高恢复力, 在秋 季表现为中等恢复力。在脆弱性方面, 鱼礁区夏 季优势种的脆弱性明显低于秋、冬季; 对照区 夏、秋季优势种的脆弱性较低, 冬、春季较高。

#### 2.5 鱼类群落多样性与环境因子的关系

通过计算方差膨胀因子共筛选出 VIF<10 的 8 个 环境因子(表 3):水深、pH、透明度、溶解氧、硅酸 盐、磷酸盐、无机氮和叶绿素 a。蒙特卡洛置换检验 和 RDA 分析结果(图 7)表明,在物种多样性方面,仅 透明度和无机氮对物种多样性影响显著。其中, Margalef 丰富度指数、Shannon 多样性指数和 Simpson多样性指数均与透明度呈正相关关系,与无 机氮呈负相关关系; Pielou 均匀度指数与透明度和无 机氮呈正相关关系。在功能多样性方面,pH、无机氮、 溶解氧和透明度对功能多样性影响显著。其中,FRic 指数与 pH 呈正相关关系,与无机氮、溶解氧以及透 明度呈负相关关系; FEve 指数与透明度、无机氮呈 正相关关系,与溶解氧、pH 呈负相关关系; FDiv 指 数与溶解氧、无机氮以及透明度呈正相关关系,与 pH 呈负相关关系; FRed 指数与 pH、溶解氧呈正相 关关系,与透明度、无机氮呈负相关关系。



图 6 琵琶岛海域鱼类群落特征加权平均数指数(CWM)的时空变化

P: 浮游生物食性; P-B: 浮游和底栖生物食性; B: 底栖生物食性; B-N: 底栖和游泳动物食性; N: 游泳动物食性; 1: 带形; 3: 侧扁形; 6: 前部圆柱,后部侧扁; 7: 前部宽扁,后部侧扁; 8: 不对称形. ST: 定居型; CM: 沿岸型; OM: 近海型; PE: 浮性卵; PAE: 黏着浮性卵; AE: 附着性卵; O: 卵胎生; M: 中等恢复力; H: 高恢复力; AR: 鱼礁区, CA: 对照区.
Fig. 6 Spatial and temporal variation of community weighted mean index (CWM) of fish community in Pipa Island sea P: planktivorous; P-B: planktivorous and benthivorous; B: benthivorous; B-N: benthivorous and nektivorous; N: nektivorous. 1: band shape; 3: compressiform; 6: front cylindrical and rear side flat; 7: front wide flat and rear side flat; 8: asymmetry. ST: settlement type; CM: coastal migratory; OM: offshore migratory; PE: pelagic eggs; PAE: pelagic adhesive eggs; AE: adhesive eggs; O: ovoviviparous; M: medium resilience; H: high resilience; AR: reef area, CA: control area.



# 表 3 各环境因子的方差膨胀因子值 Tab. 3 Variance inflation factor values for each environment factor

#### 图 7 物种多样性(a)和功能多样性(b)与环境因子的 RDA 分析

\*表示 P<0.05; \*\*表示 P<0.01; \*\*\*表示 P<0.001; Dep: 水深; Tra: 透明度; DO: 溶解氧; SiO<sub>3</sub>-Si: 硅酸盐; PO<sub>4</sub>-P: 磷酸盐;
 IN: 无机氮; chl.a: 叶绿素 a; Margalef: 丰富度指数; Pielou: 均匀度指数; Shannon, Simpson: 多样性指数; FRic:
 功能丰富度指数; FEve: 功能均匀度指数; FDiv: 功能离散度指数; FRed: 功能冗余度指数.

Fig. 7 RDA analysis of species diversity (a) and functional diversity (b) with environmental factors
\* indicates P<0.05; \*\* indicates P<0.01; \*\*\* indicates P<0.001; Dep: water depth; Tra: transparency; DO: dissolved oxygen; SiO<sub>3</sub>-Si: silicate; PO<sub>4</sub>-P: phosphate; IN: inorganic nitrogen; chl.a: chlorophyll a; Margalef: Margalef index; Pielou: Pielou index; Shannon: Shannon index; Simpson: Simpson index; FRic: functional richness index; FEve: functional evenness index; FDiv: functional divergence index; FRed: functional redundancy index.

# 3 讨论

本研究调查到的 34 种鱼类,以鲈形目和鲉形 目鱼类为主,均为山东近海常见种类<sup>[38]</sup>。许氏平 鲉为人工鱼礁区全年性优势种,其优势度在冬季 达到最高,个体尾数占比为 41.5%,生物量占比 则在春季达到最高,为 52.7%。这与吴忠鑫等<sup>[5]</sup> 和刘鸿雁等<sup>[6]</sup>的研究结果相似,表明人工鱼礁对 许氏平鲉有良好的聚集效果。此外,鱼礁区优势 种除常见的恋礁性鱼类外,还包括白姑鱼(Pennahia argentata)、细条天竺鲷、鲬(Platycephalus indicus) 以及半滑舌鳎(Cynoglossus semilaevis)等喜泥沙 底质的物种,与汪振华等<sup>[13]</sup>的研究结果一致,表 明人工鱼礁不仅对恋礁性鱼类的诱集效果显著, 其产生的饵料效应和流场效应还吸引了大量不同 生活习性的物种。

鱼类群落多样性的季节变化结果表明,鱼礁 区鱼类物种和功能多样性指数均存在显著的季节 变化,但变化趋势不一致。这是因为功能多样性

与物种多样性之间存在一定的相关关系<sup>[25,56]</sup>,如 本研究中FRic 指数与Margalef丰富度指数呈显著 正相关, FEve 指数与 Pielou 均匀度指数呈显著正 相关, 而 FDiv 指数和 FRed 指数与物种多样性指 数之间关系不显著。功能多样性由物种丰富度和 物种功能性状值共同决定[57],反映了生态系统功 能的变化机制和鱼类群落的资源分配模式。本研 究中, 鱼礁区各物种多样性指数和 FRic 指数在秋 季最高,冬季最低。一方面可能是细纹狮子鱼 (Liparis tanakae)、小眼绿鳍鱼(Chelidonichthys)、 绿 鳍 鱼 (Chelidonichthys kumu) 以 及 长 蛇 鲻 (Saurida elongata)等多种洄游性鱼类仅在秋季出 现, 增加了种类数以及洄游类型、食性、体型等 功能性状的取值和范围, 扩大了秋季鱼类群落的 生态位空间, 使得物种多样性指数和 FRic 指数升 高。而冬季海水温度降低, 部分暖温性鱼类因不 适应寒冷环境而向南部和深水海域洄游, 例如白 姑鱼、细条天竺鲷和星康吉鳗(Conger myriaster) 等, 缩小了冬季鱼类群落的生态位空间。另一方

面可能是冬季水温较低使得鱼类的运动能力降低[58], 部分鱼类躲藏在岩礁洞穴和泥沙之中<sup>[5]</sup>,由于地 笼和三重刺网均为被动性渔具,降低了对鱼类的 捕获效率, 对多样性指数存在低估; FEve 指数在 秋季最高,可能是半滑舌鳎、白姑鱼和许氏平鲉 等不同生活习性物种丰度增加,提高了对栖息空 间的利用率。同时群落优势种以洄游性鱼类为主, 其运动能力及觅食能力较强进而使得对饵料资源 的利用率提高; FDiv 指数在夏季最高, 可能是夏 季鱼类群落的优势种食性组成较复杂,包含浮游 生物食性、浮游和底栖生物食性以及底栖生物食 性 3 种类型, 且均以个体较小的鱼类占优势, 使 得鱼类对饵料资源和栖息地的竞争表现较弱; FRed 指数在夏季和春季较高,本文认为,与邻近 海域相比<sup>[29]</sup>,该人工鱼礁区鱼类群落功能丰富度 整体表现较低, 且夏季和春季的种类数和丰度均 较高,大量物种在功能性状上发生重叠<sup>[59]</sup>,导致 鱼类群落在夏季和春季具有较高的功能冗余。

鱼类群落多样性的空间变化结果表明,人工 鱼礁的投放对 Pielou 均匀度指数、Simpson 多样 性指数、FEve 指数和 FDiv 指数的影响较大。其 中, Pielou 均匀度指数和 Simpson 多样性指数在冬 季表现为鱼礁区显著低于对照区,主要原因为冬 季水温降低使得群落内物种数量在空间上分配不 均。而 FEve 指数和 FDiv 指数分别在秋季和春季 表现为鱼礁区显著高于对照区。这是因为人工鱼 礁特殊的礁体结构为海洋生物提供了多种微环境 并扩大了栖息地空间,且礁体投放后所产生的上 升流促进表底层海水交换,将底层营养盐和沉积 物带至表层, 使得浮游植物等饵料生物大量繁殖, 丰富了人工鱼礁区的饵料资源,进而直接影响鱼 类群落分布<sup>[60]</sup>,吸引了大量不同生活习性的鱼类 聚集<sup>[13]</sup>,提高了对栖息地空间和食物资源的利用 率,导致鱼礁区 FEve 指数较高,但由于不同习性 物种对资源的利用方式不同,种间竞争表现较弱, 使得 FDiv 指数升高。

RDA 分析结果表明,透明度和无机氮对物种 多样性指数具有显著影响,而 pH、无机氮、溶解 氧和透明度则对功能多样性指数影响显著,这与 张倩等<sup>[25]</sup>的研究结果类似。透明度较高意味着水

体中浮游生物、藻类以及有机碎屑等含量较少, 使得斑鰶(Konosirus punctatus)、细条天竺鲷和赤 鼻棱鳀(Thryssa kammalensis)等以植物碎屑和浮 游生物为食的鱼类在秋季减少或消失,同时以底 栖生物和游泳动物为食的大个体鱼类种类及丰度 在秋季增加,导致鱼类对其他饵料资源的利用率 提高。无机氮含量升高会刺激浮游植物及藻类等 迅速繁殖,造成水体富营养化。本研究发现无机 氮含量在冬季最高,水体富营养化水平升高通过 引起栖息生境退化、改变食物资源和营养结构<sup>[26]</sup>, 直接影响鱼类的生存和功能性状分布,导致物种 和功能多样性指数降低。溶解氧是影响鱼类分布 的重要环境因子, Maes 等<sup>[61]</sup>指出鱼类会主动逃离 低氧环境, 趋向于聚集在溶解氧含量较高的区 域。然而,在本研究中,溶解氧与 FRic 指数和 FEve 指数呈显著负相关, 与赵静等<sup>[62]</sup>的研究结 果类似。秋季运动能力较强的大个体鱼类丰度增 加导致耗氧量增加,再加上有机物分解和浮游植 物的呼吸作用共同造成了水体溶解氧含量降低, 而人工鱼礁特殊的礁体结构吸引了较多恋礁性鱼 类以及产附着性卵的鱼类聚集,进而影响了溶解 氧与鱼类群落多样性指数的关系拟合。Kuang 等<sup>[63]</sup> 发现珠江口鱼类群落 FDiv 指数与 pH 呈显著负相 关关系, 与本研究结果一致。pH 在冬季偏中性, 使得许氏平鲉、黄鳍刺虾虎鱼等适合偏中性水质 的鱼类丰度显著增加,导致鱼类群落部分功能性 状缺失, 生态位空间缩小, 物种多样性和功能丰 富度降低,此外,在此时期定居性鱼类占优势, 其活动能力较弱,进而导致觅食效率降低,种间 竞争减弱。

综上所述,基于分类学的物种多样性指数和 基于功能性状的功能多样性指数在解释鱼类群落 差异方面存在一定的互补性<sup>[64]</sup>。本研究结合两种 不同维度的多样性指数较为全面地解析了鱼类群 落多样性的时空分布格局及其驱动机制,发现其 主要受到鱼类洄游、生境复杂性和异质性以及环 境因子季节变化的综合影响。

#### 参考文献:

[1] Zhou Y B, Cai W G, Chen H G, et al. The mechanism and

research progress on fish attraction technique for artificial reefs[J]. Marine Fisheries, 2010, 32(2): 225-230. [周艳波,

蔡文贵, 陈海刚, 等. 人工鱼礁生态诱集技术的机理及研 究进展[J]. 海洋渔业, 2010, 32(2): 225-230.]

- [2] Liu C D, Guo X F, Tang Y L, et al. Phytoplankton community composition and its relationship with environmental factors in the artificial reef area around the Qiansan Islets, Haizhou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(3): 545-555. [刘长东, 郭晓峰, 唐衍力, 等. 海州湾前三岛人 工鱼礁区浮游植物群落组成及与环境因子的关系[J]. 中 国水产科学, 2015, 22(3): 545-555.]
- [3] Liu C D, Yi J, Guo X F, et al. Phytoplankton community structure in artificial reef area around Lidao, Rongcheng, and its relationship with environmental factors[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(3): 50-59. [刘长东,易 坚,郭晓峰,等. 荣成俚岛人工鱼礁区浮游植物群落结构 及其与环境因子的关系[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 46(3): 50-59.]
- [4] Xie B, Zhang S, Li L, et al. Community structure of phytoplankton in the sea farming of Haizhou Bay and its relationships with environmental factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(1): 121-129. [谢斌, 张硕, 李莉, 等. 海州湾海洋牧场浮游植物群落结构特征及其与水质 参数的关系[J]. 环境科学学报, 2017, 37(1): 121-129.]
- [5] Wu Z X, Zhang L, Zhang X M, et al. Nekton community structure and its relationship with main environmental variables in Lidao artificial reef zones of Rongcheng[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21): 6737-6746. [吴忠鑫,张磊, 张秀梅,等. 荣成俚岛人工鱼礁区游泳动物群落特征及其 与主要环境因子的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(21): 6737-6746.]
- [6] Liu H Y, Yang C J, Zhang P D, et al. Demersal nekton community structure of artificial reef zones in Laoshan Bay, Qingdao[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(8): 896-906. [刘 鸿雁,杨超杰,张沛东,等. 青岛崂山湾人工鱼礁区底层 游泳动物群落结构特征[J]. 生物多样性, 2016, 24(8): 896-906.]
- [7] Wang X M, Sheng H X, Liu S D, et al. Distribution characteristics of Liza haematocheila and its relationship with environmental factors in Furongdao artificial reef zones, Laizhou Bay, China[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 1914-1924. [王新萌, 盛化香, 刘淑德, 等. 莱州湾 芙蓉岛人工鱼礁区鳇资源分布特征及其与环境因子的相 关性分析[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1914-1924.]
- [8] Zhang M M, Liu Y, Xie T, et al. Growth, mortality and reasonable utilization of Sebastes schlegelii in the artificial reef area of Weihai, Shandong Province[J]. Journal of

Fisheries of China, 2019, 43(9): 1925-1936. [张萌萌, 刘岳, 解涛, 等. 威海西霞口海洋牧场鱼礁区中许氏平鲉的生长、死亡及合理利用[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1925-1936.]

- [9] Tang Y L, Yu Q. An integrative evaluation of ecological effect of artificial reefs with entropy-weighted fuzzy matter-element method[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(1): 18-26. [唐衍力,于晴. 基于熵权模糊 物元法的人工鱼礁生态效果综合评价[J]. 中国海洋大学 学报, 2016, 46(1): 18-26.]
- [10] Tang W Y, Tang Y L, Sheng H X, et al. Ecosystem health assessment of artificial reef area in Xigang, Weihai[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(3): 55-64.
  [唐伟尧, 唐衍力, 盛化香, 等. 威海西港人工鱼礁区生态 系统健康评价[J]. 中国海洋大学学报, 2018, 48(3): 55-64.]
- [11] Villéger S, Brosse S, Mouchet M, et al. Functional ecology of fish: Current approaches and future challenges[J]. Aquatic Sciences, 2017, 79(4): 783-801.
- [12] McLean M, Mouillot D, Lindegren M, et al. Fish communities diverge in species but converge in traits over three decades of warming[J]. Global Change Biology, 2019, 25(11): 3972-3984.
- [13] Wang Z H, Zhang S Y, Wang K. Fish and macroinvertebrates community structure in artificial habitat around Sanheng Isle, Shengsi, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(8): 2026-2035. [汪振华, 章守宇, 王凯. 三横山鱼礁生境鱼类和大型无脊椎动物群落特征[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2026-2035.]
- [14] 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.]
- [15] Mouchet M A, Villéger S, Mason N W H, et al. Functional diversity measures: An overview of their redundancy and their ability to discriminate community assembly rules[J]. Functional Ecology, 2010, 24(4): 867-876.
- [16] Petchey O L, Gaston K J. Functional diversity: Back to basics and looking forward[J]. Ecology Letters, 2006, 9(6): 741-758.
- [17] Han T T, Tang X, Ren H, et al. Community/Ecosystem functional diversity: Measurements and development[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3286-3295. [韩涛涛,唐 玄,任海,等. 群落/生态系统功能多样性研究方法及展望 [J]. 生态学报, 2021, 41(8): 3286-3295.]
- [18] Mason N W H, Mouillot D, Lee W G, et al. Functional richness, functional evenness and functional divergence: The primary components of functional diversity[J]. Oikos, 2005,

111(1): 112-118.

- [19] Tilman D, Knops J, Wedin D, et al. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes[J]. Science, 1997, 277(5330): 1300-1302.
- [20] Zheng P, Jiang X M, Cao L, et al. Long-term changes in the functional trait composition and diversity of fish assemblages in eastern plain lakes under the regime of river-lake connectivity loss[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(1): 151-161. [郑 鹏, 蒋小明, 曹亮, 等. 江湖阻隔背景下东部平原湖泊鱼 类功能特征及多样性变化[J]. 湖泊科学, 2022, 34(1): 151-161.]
- [21] Díaz S, Cabido M. Vive la différence: Plant functional diversity matters to ecosystem processes[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2001, 16(11): 646-655.
- [22] Qiao J L, Liu Y, Fu H X, et al. Urbanization affects the taxonomic and functional alpha and beta diversity of fish assemblages in streams of subtropical China[J]. Ecological Indicators, 2022, 144: 109441.
- [23] Wang J, Chen L, Tang W J, et al. Effects of dam construction and fish invasion on the species, functional and phylogenetic diversity of fish assemblages in the Yellow River Basin[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 293: 112863.
- [24] Lin L, Deng W D, Huang X X, et al. How fish traits and functional diversity respond to environmental changes and species invasion in the largest river in Southeastern China[J]. PeerJ, 2021, 9: e11824.
- [25] Zhang Q, Zeng Y, Xiao J, et al. Functional diversities of fish coummunity in Peng'an section of the middle reach of Jialing River[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2022, 46(5): 630-642.
  [张倩, 曾燏, 肖瑾, 等. 嘉陵江中游蓬安段鱼类群落功能 多样性研究[J]. 水生生物学报, 2022, 46(5): 630-642.]
- [26] Feng K, Deng W B, Zhang Y Z, et al. Eutrophication induces functional homogenization and traits filtering in Chinese lacustrine fish communities[J]. Science of the Total Environment, 2023, 857: 159651.
- [27] Jia Y T, Jiang Y H, Liu Y H, et al. Unravelling fish community assembly in shallow lakes: Insights from functional and phylogenetic diversity[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2022, 32(2): 623-644.
- [28] Jiang X M, Zheng P, Cao L, et al. Effects of long-term floodplain disconnection on multiple facets of lake fish biodiversity: Decline of alpha diversity leads to a regional differentiation through time[J]. Science of the Total Environment, 2021, 763: 144177.
- [29] Zhang X Z, Wang J, Xu B D, et al. Spatio-temporal variations of functional diversity of fish communities in

Haizhou Bay[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 3233-3244. [张晓妆, 王晶, 徐宾铎, 等. 海州湾鱼 类群落功能多样性的时空变化[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3233-3244.]

- [30] Li Z Y, Yu X T, Guan L S, et al. Effect of spring tide and gillnet investigation time on the fishery resources assessment in Qingdao Shique Beach marine ranching[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(2): 195-204. [李忠义, 于小涛, 关丽莎, 等. 潮流与布放时间对青岛石雀滩海域 海洋牧场刺网 CPUE 的影响[J]. 中国水产科学, 2021, 28(2): 195-204.]
- [31] The General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, the Standardization Administration of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey-part 6: Marine biological survey GB/T 12763.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [国家质量监督检验检疫总 局,国家标准化管理委员会.海洋调查规范第 6 部分:海 洋生物调查 GB/T 12763.6-2007[S]. 北京:中国标准出版 社, 2007.]
- [32] The General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, the Standardization Administration of the People's Republic of China. The specification for marine monitoring-part 4: Seawater analysis GB 17378.4-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [国家质量监督检验检疫总局, 国家 标准化管理委员会.海洋监测规范第 4 部分:海水分析 GB 17378.4-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [33] Ugland K I, Gray J S, Ellingsen K E. The speciesaccumulation curve and estimation of species richness[J]. Journal of Animal Ecology, 2003, 72(5): 888-897.
- [34] Pinkas L, Oliphant M S, Iverson I L K. Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters[J]. California Department of Fish and Game, Fish Bulletin, 1971, 152: 1-105.
- [35] Chen K, Meng Z H, Li X M, et al. Community structure and functional diversity of fishes in Zhelin Reservoir, Jiangxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4592-4602.
  [陈康, 孟子豪, 李学梅, 等. 江西柘林水库鱼类群落结构 及功能多样性分析[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4592-4602.]
- [36] FishBase. World Wide Web elecronic publication[EB/OL]. (2023-05)[2023-02]. https://fishbase.se/search.php.
- [37] Chen D G, Zhang M Z. Marine Fishes of China[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2015. [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.]
- [38] Cheng Q T, Zhou C W. The fishes of Shandong Province[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1997. [成庆

1493

泰,周才武.山东鱼类志[M].济南:山东科学技术出版社, 1997.]

- [39] Wei S, Jiang W M. Study on food web of fishes in the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1992, 23(2): 182-192. [韦晟, 姜卫民. 黄海鱼类食物网的研究[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(2): 182-192.]
- [40] Hu Y Z, Qian S Q. A study on the age and growth of white Chinese croaker[J]. Marine Fisheries, 1989, 11(4): 158-162.
  [胡雅竹, 钱世勤. 白姑鱼年龄和生长的研究[J]. 海洋渔 业, 1989, 11(4): 158-162.]
- [41] Chen S Y, Dong X Q, Yu M J, et al. Growth heterogeneity and resource assessment of *Sebastes schlegelii* in three artificial reef areas of coastal Shandong[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(1): 115-126. [陈淑悦, 董秀强, 于梦杰, 等. 山东近岸 3 处人工鱼礁区许氏平鲉 生长异质性及资源评价[J]. 中国水产科学, 2023, 30(1): 115-126.]
- [42] Wang K, Zhang S Y, Wang Z H, et al. A preliminary study on fishery biology of *Johnius belangerii* off Ma'an Archipelago[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(2): 228-237. [王凯, 章守宇, 汪振华, 等. 马鞍列岛海域皮氏 叫姑鱼渔业生物学初步研究[J]. 水产学报, 2012, 36(2): 228-237.]
- [43] Lin N, Jiang Y Z, Yuan X W, et al. Reproductive biology of *Nibea albiflora* in Xiangshan Bay[J]. Marine Fisheries, 2013, 35(4): 389-395. [林楠, 姜亚洲, 袁兴伟, 等. 象山港黄姑鱼的繁殖生物学[J]. 海洋渔业, 2013, 35(4): 389-395.]
- [44] Meng K K, Wang J, Zhang C L, et al. The fishery biological characteristics of *Chaeturichthys stigmatias* in the Yellow River estuary and its adjacent waters[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(5): 939-945. [孟宽宽, 王晶, 张 崇良, 等. 黄河口及其邻近水域矛尾虾虎鱼渔业生物学特 征[J]. 中国水产科学, 2017, 24(5): 939-945.]
- [45] Zhang F X, Zhang X M, Li W T, et al. Age composition, growth, and fecundity of *Sebastes hubbsi* in Jiaozhou Bay, Qingdao[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(3): 630-640. [张凤侠, 张秀梅, 李文涛, 等. 青岛胶州 湾铠平鲉年龄、生长和种群繁殖力[J]. 中国水产科学, 2016, 23(3): 630-640.]
- [46] Liu Y W, Xue Y, Wei B F, et al. An estimation of population parameters for five major fish species in the Haizhou Bay, Yellow Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(1): 125-133. [刘元文, 薛莹, 魏邦福, 等. 海州湾5种主要鱼类种群参数估算[J]. 中国水产科学, 2014, 21(1): 125-133.]
- [47] Chen Z Z, Qiu Y S, Huang Z R, et al. Estimation of growth and mortality parameters of *Argyrosomus argentatus* in

northern South China Sea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(4): 712-716. [陈作志, 邱永松, 黄梓荣, 等. 南海北部白姑鱼生长和死亡参数的估算[J]. 应用生态 学报, 2005, 16(4): 712-716.]

- [48] Wang K, Zhang C L, Chen N, et al. Evaluating the growth parameters of *Pholis fangi* based on the bootstrap-ELEFAN method[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(3): 512-521. [王琨,张崇良,陈宁,等. 基于 Bootstrap 的 ELEFAN 方法在评估方氏云鳚群体生长参数中的应用[J]. 中国水产科学, 2019, 26(3): 512-521.]
- [49] Sun Y Y, Zan X X, Xu B D, et al. Growth, mortality and optimum catchable size of *Hexagrammos otakii* in Haizhou Bay and its adjacent waters[J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44(9): 46-52. [孙远远, 昝肖肖, 徐宾铎, 等. 海州湾及邻近海域大泷六线鱼的生长、死亡和最适开捕体 长研究[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(9): 46-52.]
- [50] Ma Q Y, Mu X X, Ren Y P, et al. The growth, mortality and yield per recruitment of whitespotted conger (*Conger* myriaster) in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(6): 881-888. [麻秋云, 牟秀霞, 任一平, 等. 东、黄海星康吉鳗生长、死亡和单 位补充量渔获量[J]. 水产学报, 2018, 42(6): 881-888.]
- [51] Ji D P. Study on the fishery biology of *Hexagrammos agrammus* and *Haxagrammos otakii* in Lidao Rongcheng[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. [纪东平. 荣成 俚岛斑头鱼和大泷六线鱼的渔业资源生物学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.]
- [52] Zhang Y Q. The analysis on the current situation of the main fishery resources in the coastal waters of Shandong during 2015-2016[D]. Yantai: Yantai University, 2018. [张玉软. 2015—2016 年山东近海主要渔业资源现状分析[D]. 烟台:烟台大学, 2018.]
- [53] Cornwell W K, Schwilk D W, Ackerly D D. A trait-based test for habitat filtering: Convex hull volume[J]. Ecology, 2006, 87(6): 1465-1471.
- [54] Villéger S, Mason N W H, Mouillot D. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology[J]. Ecology, 2008, 89(8): 2290-2301.
- [55] Shuai F M, Li X H, Chen F C, et al. Functional diversity of freshwater fishes and methods of measurement[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 5228-5237. [帅方敏, 李新 辉,陈方灿,等. 淡水鱼类功能多样性及其研究方法[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 5228-5237.]
- [56] Deng W B, Feng K, Lin G, et al. Spatial-temporal patterns of fish taxonomical and functional diversity in Xiliang Lake and their relationship with water environmental factors after fishing ban[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(10):

1681-1695. [邓文博, 冯凯, 林刚, 等. 禁渔后西凉湖鱼类物种和功能多样性时空格局及其与环境因子的关系[J]. 水生生物学报, 2023, 47(10): 1681-1695.]

- [57] Zhang W, Zhai D D, Xiong F, et al. Community structure and functional diversity of fishes in the Three Gorges Reservoir[J]. Biodiversity Science, 2023, 31(2): 83-95. [张伟, 翟东东, 熊飞, 等. 三峡库区鱼类群落结构和功能多样性 [J]. 生物多样性, 2023, 31(2): 83-95.]
- [58] Pang X, Fu S J, Zhang Y G. Acclimation temperature alters the relationship between growth and swimming performance among juvenile common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2016, 199: 111-119.
- [59] Bellwood D R, Hoey A S, Choat J H. Limited functional redundancy in high diversity systems: Resilience and ecosystem function on coral reefs[J]. Ecology Letters, 2003, 6(4): 281-285.
- [60] Tang Y L, Xie T, Yu H L, et al. Effects of environment and feeding factors on the distribution of different body lengths of *Sebastes schlegelii* in the reef areas of Shandong Province [J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(6): 924-935. [唐 衍力, 解涛, 于浩林, 等. 环境与摄食对山东省近海鱼礁

区不同体长许氏平鲉分布的影响[J].水产学报,2020,44(6):924-935.]

- [61] Maes J, Stevens M, Breine J. Modelling the migration opportunities of diadromous fish species along a gradient of dissolved oxygen concentration in a European tidal watershed[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 75(1-2): 151-162.
- [62] Zhao J, Zhang S Y, Wang Z H, et al. Fish community diversity distribution and its affecting factors based on GAM model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(12): 3226-3235. [赵静, 章守宇, 汪振华, 等. 基于 GAM 模型 的鱼类群落多样性分布及影响因素[J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3226-3235.]
- [63] Kuang T X, Chen W J, Huang S H, et al. Environmental drivers of the functional structure of fish communities in the Pearl River Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2021, 263: 107625.
- [64] Xia Z J, Liu F, Yu F D, et al. Species, functional and taxonomic diversity of fish in the Chishui River Basin[J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43(5): 89-98. [夏治俊,刘飞, 余梵冬,等. 赤水河流域鱼类物种、功能和分类多样性研 究[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(5): 89-98.]

# Species and functional diversity of fish communities in an artificial reef area of the Pipa Island sea, Shandong

HE Qian<sup>1</sup>, LIU Shude<sup>2</sup>, TANG Yanli<sup>1</sup>, DONG Xiuqiang<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>, FENG Jie<sup>3</sup>, YU Mengjie<sup>1</sup>

1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Shandong Fisheries Development and Resources Conservation Center, Yantai 264003, China;

3. Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: The diversity of fish communities in artificial reefs has attracted considerable interest. Previous studies have primarily focused on species-level assessments, often overlooking variations in functional traits across species, including morphology, physiology, and reproduction. To deepen our understanding of community differences and aid in fish resource conservation, this study examined species diversity indices and functional diversity indices encompassing 12 functional traits. We analyzed data from four seasonal surveys of fishery resources and environmental variables conducted between July 2020 and April 2021 in the Fuhan National Sea Ranch Demonstration Area. Our study explored the spatial and temporal variations in fish community diversity and their correlation with environmental factors. We found significant seasonal changes in both species and functional diversity indices in the artificial reef area, whereas only functional diversity indices varied in the control area. Additionally, we observed marked spatial changes in the Pielou evenness, Simpson diversity, functional evenness, and functional dispersion indices. Spearman correlation analysis indicated that functional richness was significantly correlated with the number of species and Margalef richness index, whereas functional evenness was significantly associated with the number of species and Pielou evenness index. The community-weighted mean (CWM) index illustrates spatial and temporal shifts in the dominance of specific traits within fish communities. Redundancy analysis indicated that transparency and inorganic nitrogen were significant drivers of species diversity indices, whereas pH, inorganic nitrogen, dissolved oxygen, and transparency substantially influenced the functional diversity indices. Thus, our study highlights the complementary roles of traditional species diversity and functional diversity indices in characterizing the intricacies of fish community dynamics. Our findings suggest that the spatial and temporal patterns of fish community diversity are largely shaped by fish migration, habitat complexity, and seasonal variability in environmental factors.

Key words: artificial reef area; fish community; functional traits; functional diversity; spatial and temporal variation; environmental factors

Corresponding author: TANG Yanli. E-mail: tangyanli@ouc.edu.cn