

DOI: 10.12264/JFSC2022-0406

黄渤海不同人工鱼礁区渔业生物群落结构特征及生物增量影响要素

李建都, 赵祺, 刘晋冀, 张彦浩, 张沛东

中国海洋大学, 海水养殖教育部重点实验室, 山东 青岛 266003

摘要: 为探究黄渤海人工鱼礁区渔业生物群落结构特征及量化礁区特征要素与资源养护作用关系, 于 2021 年 10—11 月对黄渤海沿岸 5 处人工鱼礁区开展了渔业生物调查。采用生物多样性指数、聚类分析(CLUSTER)、非度量多维尺度排序(NMDS)、相似性百分比分析(SIMPER)等方法分析了不同礁区渔业生物的群落结构特征, 并通过生物增量指数、生物多样性指数差值等比较了各礁区对渔业生物的影响, 最后通过相关性分析及曲线拟合分析了生物增量指数与礁区特征要素间的关系。调查共采集渔业生物 33 科 47 种, 各礁区的优势种存在不同, 但日本鳎(*Charybdis japonica*)为多数礁区的共有优势种; 各礁区生物群落组内平均相似性范围为 38.85%~69.14%, 不同礁区生物群落间的平均相异性达到 70%以上; 长礁龄区生物群落结构优于短礁龄区, 其 Shannon 多样性指数均值和 Margalef 丰富度指数均值分别为短礁龄区的 1.3 倍和 1.2 倍, 且长礁龄区多样性指数差值高于短礁龄区; 长礁龄礁区对渔业生物的资源养护效果亦优于短礁龄礁区, 其生物增量指数最大值为 13.3, 是短礁龄礁区最大值的 8.3 倍; 生物增量指数和丰富度指数差值与礁体规模和礁龄均呈极显著正相关($P<0.01$), 其中生物增量指数与礁体规模和礁龄均呈显著的线性函数关系, 拟合优度分别为 0.95 和 0.87。研究结果进一步证实, 人工鱼礁建设对渔业资源具有显著的资源养护作用, 礁龄和礁体规模是影响礁区渔业生物资源养护效果的关键特征要素, 这为人工鱼礁建设及其效果评价提供了新的参考依据。

关键词: 人工鱼礁; 渔业生物; 群落结构; 资源养护; 黄渤海

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)03-0371-13

黄渤海海域是我国近海渔业生物重要的产卵场、索饵场和越冬场, 但随着人类活动加剧和全球气候变化, 黄渤海海域的生态环境和渔业生物均呈现衰退趋势。研究表明, 自 20 世纪 40 年代至 2014 年, 黄渤海海域的海湾面积缩减率平均达到 19%^[1]; 渔获物营养级不断下降并呈现小型化、低值化、群落结构不稳定等问题^[2]。近年来, 海洋牧场已成为集海洋环境修复、生物资源养护和渔业资源可持续产出为一体的复合生态渔业发展模式, 其中人工鱼礁是海洋牧场生境的重要组成部分^[3-4]。

人工鱼礁是为渔业生物提供索饵、庇护等场所, 改善海域水体环境, 实现渔业生物增殖的人造水下构造物^[5-6]。目前, 对人工鱼礁建设效果的

评价主要集中于水域生态系统变化^[7]和生物群落结构特征变化^[8-9]等方面。其中, 群落结构特征包括种类组成、物种多样性等内容, 是生物种群在干扰情况下对环境适应能力的重要表征^[10]。以鱼类、头足类为主的游泳生物是渔业资源养护效果的主要生物指标, 开展以游泳生物为主的渔业生物类群的群落动态变化监测是人工鱼礁建设效果评价的重要内容之一^[11]。

目前, 已有一些研究从渔业生物群落结构特征的角度分析了人工鱼礁的建设效果及群落特征与环境要素的相关性, 普遍发现礁区对渔业资源具有资源养护效果, 且温度和溶氧等是影响渔业生物群落结构的重要环境因子^[12-14]。也有研究表明,

收稿日期: 2022-11-22; **修订日期:** 2023-01-08.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0902101).

作者简介: 李建都(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为海洋牧场生境效应评价. E-mail: li.jd@foxmail.com

通信作者: 张沛东, 教授, 研究方向为海洋牧场生境构建和资源养护. E-mail: zhangpdsg@ouc.edu.cn

礁体结构类型^[8,15-16]、礁体尺寸^[17]、礁龄^[18]、礁区底质^[19]等礁区特征要素均可影响礁区生物群落结构特征,如 Hylkema 等^[16]研究发现,礁体类型对礁区的鱼类群落结构具有显著影响,分层式礁体的鱼类丰度和生物量分别为球形礁体的 3.8 倍和 4.6 倍。然而,这些研究仅局限于单一海洋牧场内人工鱼礁区与对照区生物群落结构特征的对比分析,亦缺乏对礁区生物养护效果的归一化分析及其与礁区特征要素的关系拟合。

本研究选择黄渤海海域 5 处人工鱼礁区,通过对各礁区渔业资源的秋季调查,分析了渔业生物的群落结构特征,应用生物增量指数及生物多样性指数差值比较了不同礁区的渔业资源养护效果,并通过相关性分析和曲线拟合分析了礁区渔业生物养护效果与礁区特征要素的关系,旨在科学评价人工鱼礁设的资源养护功能,明确影响礁区渔业生物养护效果的特征要素,为人工鱼礁建设及其效果评价提供新的参考依据。

1 材料与方法

1.1 调查地点

调查区域为青岛老尹家国家级海洋牧场示范

区二期确权海域礁区(LY)、青岛市崂山湾海域华润博达国家级海洋牧场示范区礁区(HR)、山东省海州湾海域顺风国家级海洋牧场示范区(RZ)、河北省祥云湾海域国家级海洋牧场示范区 A 礁区(TSA)和 B 礁区(TSB)(图 1)。5 处人工鱼礁区的礁体类型均以混凝土构件礁、石块礁为主,但在礁体规模和礁龄等方面存在差异。为便于对各礁区进行分类描述分析,参考詹启鹏等^[20]的研究结果,将 TSA、TSB 归为长礁龄区,将 LY、HR、RZ 归为短礁龄区,各礁区基本概况如表 1 所示。

1.2 调查时间与站位布设

研究表明,经过伏季休渔的资源养护,黄渤海海域秋季渔业资源量相对指数高于其他季节^[21-22],因此本研究的调查时间选定为秋季(2021 年 10 月底至 11 月底)。依据《人工鱼礁资源养护效果评价技术规范》(SC/T 9417-2015)要求及各礁区环境条件,于每个人工鱼礁区及其周边对照海域分别设置等量站位,如图 2 所示。

1.3 样品采集与测定

为克服单一网具易带来的渔获物种局限性,在本研究中采用地笼网与底刺网组合的形式进行渔业生物的采集。单条地笼网网目规格为 1.8~

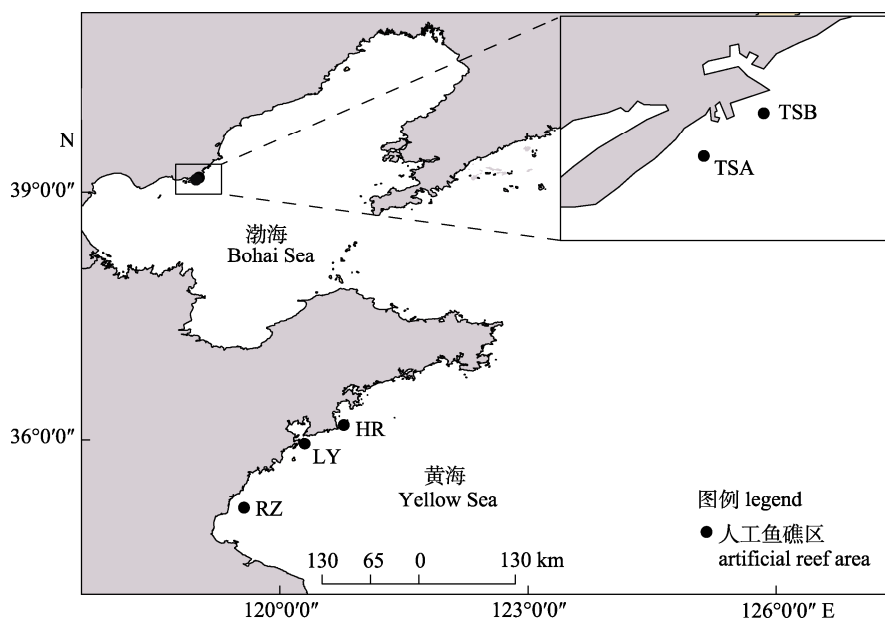


图 1 5 处人工鱼礁区的位置分布

LY: 老尹家礁区; HR: 华润博达礁区; RZ: 日照顺风礁区; TSA: 祥云湾 A 礁区; TSB: 祥云湾 B 礁区。

Fig. 1 Location of five artificial reef areas

LY: Laoyinjia artificial reef area; HR: Huarun Boda artificial reef area; RZ: Rizhao Shunfeng artificial reef area; TSA: Xiangyun Bay A reef area; TSB: Xiangyun Bay B reef area.

表 1 5 处人工鱼礁区的基本概况
Tab. 1 Overview of the five artificial reef areas

地点 site	地理位置 location	礁体类型 reef type	礁体规模/m ³ reef volume	礁龄/months reef age
RZ	海州湾 Haizhou Bay	混凝土礁 concrete reef (3 m×3 m×3 m)	1.53×10 ⁴	27
		石材礁 stone reef	1.30×10 ⁴	
HR	崂山湾 Laoshan Bay	混凝土礁 concrete reef (3 m×3 m×4 m)	3.97×10 ⁴	14.5
		石材礁 stone reef	1.93×10 ⁴	
LY	竹岔岛 Zhucha Island	混凝土礁 concrete reef (2 m×2 m×2 m)	3.68×10 ⁴	17
		石材礁 stone reef	2.11×10 ⁴	
TSA	祥云湾 Xiangyun Bay	混凝土礁 concrete reef (1.8 m×1.8 m×1.7 m)	3.63×10 ⁴	49
		石材礁 stone reef	4.08×10 ⁴	
TSB	祥云湾 Xiangyun Bay	混凝土礁 concrete reef (1.8 m×1.8 m×1.7 m)	4.52×10 ⁴	137
		石材礁 stone reef	7.81×10 ⁴	

注: LY 为老尹家礁区; HR 为华润博达礁区; RZ 为日照顺风礁区; TSA 为祥云湾 A 礁区; TSB 为祥云湾 B 礁区。
Note: LY is Laoyinjia artificial reef area; HR is Huarun Boda artificial reef area; RZ is Rizhao Shunfeng artificial reef area; TSA is Xiangyun Bay A reef area; TSB is Xiangyun Bay B reef area.

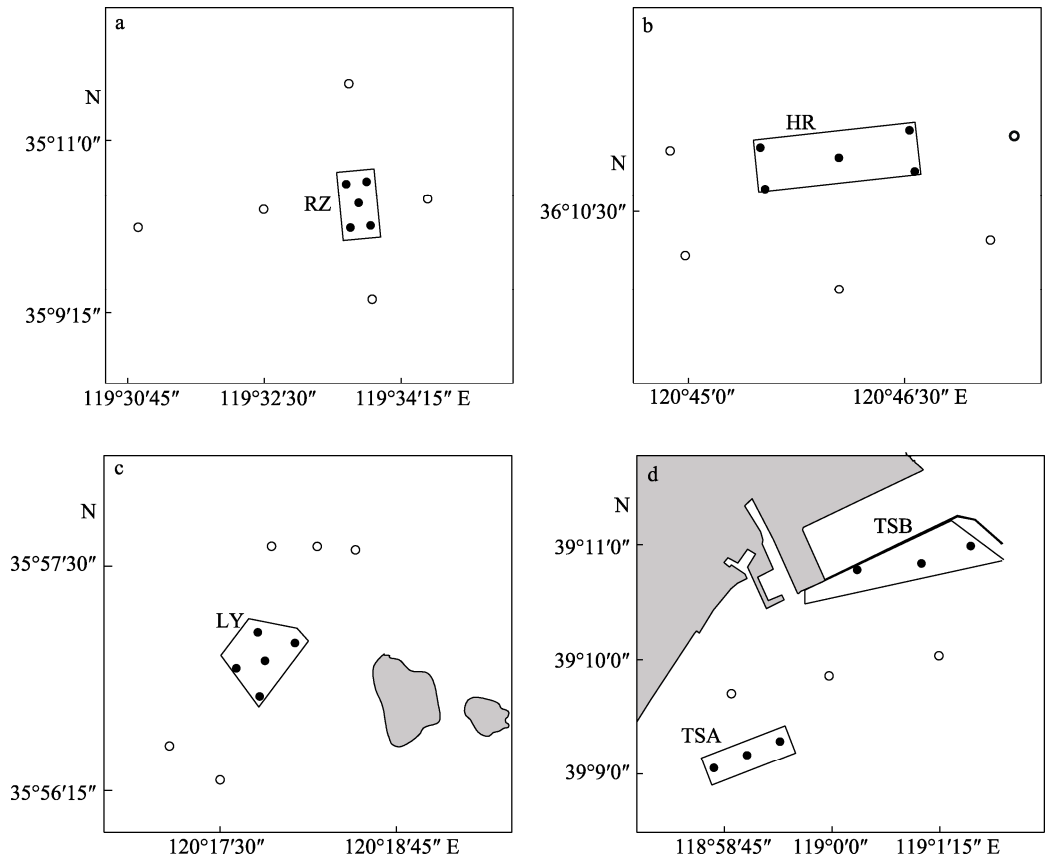


图 2 本研究调查站位布设
a. 日照顺风礁区(RZ); b. 华润博达礁区(HR); c. 老尹家礁区(LY); d. 祥云湾 A 礁区(TSA)及祥云湾 B 礁区(TSB).
实心圆点为礁区调查站位, 空心圆点为对照区调查站位。
Fig. 2 Layout of survey stations in the study
a. Rizhao Shunfeng artificial reef area (RZ); b. Huarun Boda artificial reef area (HR); c. Laoyinjia artificial reef area (LY).
d. Xiangyun Bay A reef area (TSA) and Xiangyun Bay B reef area (TSB). Solid and hollow dots represent
survey stations in reef and control areas, respectively.

3 cm, 中段每节长宽高分别为 35 cm×25 cm×22 cm, 每两条地笼网编为一组; 底刺网为三重刺网, 每单片刺网网长为 30 m, 高 1.8 m, 其外网目约为 10 cm, 内网目约为 4.5 cm, 每两片刺网编为一组。将一组地笼网和一组底刺网定为一个捕捞单元, 每个调查站位放置一个捕捞单元, 每个捕捞单元放置 36 h 后收回。对捕捞的渔业生物进行种类、生物量、个体数的鉴定与测量。

1.4 标准化处理

在实际捕捞作业中, 易出现网具丢失、破损等不可控变量, 本研究中以编组中各型网具无丢失或编组中网具破损长度不超过总网长 1/5 的站位定义为有效站位。将每个有效站位所捕获的渔获生物作为 1 个处理样本, 为减少各区域调查时网具布设时间等因素所带来的差异, 对各站位渔获生物的生物量进行标准化处理, 即分别计算各站位单位捕捞努力渔获量(catch per unit effort, CPUE), 本研究中生物量用每个捕捞单元每小时的渔获生物量来表示, 单位: g/h。

1.5 生物多样性及优势种计算

选择每站位渔业生物的数量丰度值分别进行 Shannon 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)的计算, 优势种采用 Pinkas 相对重要性指数(index of relative importance, IRI)的计算获得, 本研究中将 IRI 值大于 1000 的渔获种类定为优势种。各生物多样性指数及优势种判定的计算公式参见已有研究^[23]及海洋监测规范^[24]。

1.6 数据分析方法

渔业生物的生物量是目前评价渔业资源养护效果普遍使用的评价指标^[12-14], 特别是适合于个体间差异较大的生物养护效果评价^[10]。首先对各海域人工鱼礁区和对照区的渔业生物生物量统一进行标准化处理, 然后对两个区域进行独立样本 t 检验, 筛选出具有显著差异($P<0.05$)的生物类群, 最后再对具有差异的生物类群进行礁区与对照区生物量增量倍数的计算。将礁区不同生物类群的平均生物量增量倍数定义为礁区生物增量指数(biological increment index, BII), 计算公式如下:

$$\sigma_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 + \frac{CJ_{ji} - \overline{CD_i}}{\overline{CD_i}} \right) \quad (1)$$

$$BII = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sigma_j \quad (2)$$

式中, σ_j 为礁区第 j 站位的生物增量指数; n 为生物类群总数; BII 为礁区生物增量指数; m 为礁区总站位数; CJ_{ji} 为礁区第 j 站位的第 i 种生物类群生物量, 单位: g/h; $\overline{CD_i}$ 为对照区所有调查站位第 i 种生物类群的平均生物量, 单位: g/h。当 BII 值大于 1 时, 表征鱼礁建设对渔业生物产生养护效果。

为明确人工鱼礁建设对群落结构的改善作用, 本研究通过计算礁区与对照区生物多样性指数(D 、 H')的差值来表征渔业生物群落的变化特征, 计算公式如下:

$$DIV = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[JP_j - \frac{1}{z} \left(\sum_{x=1}^z DP_x \right) \right] \quad (3)$$

式中, DIV 为礁区生物多样性指数差值; m 为礁区总站位数; z 为对照区总站位数; JP_j 为礁区第 j 站位生物多样性指数值; DP_x 为对照区第 x 站位生物多样性指数值。

采用渔业生物丰度数据作为初始数据矩阵, 对初始数据矩阵进行平方根转换后进行 Bray-Curtis 相似性计算, 再进行聚类分析(CLUSTER)和非度量多维标度排序(nonmetric multidimensional scaling, NMDS)从而探究各研究区域生物群落组成特征, 并进一步通过单因子相似性分析(ANOSIM)检验群落组成差异的显著性, 通过 SIMPER 相似性百分比分析不同礁区渔业生物群落组内相似性和组间差异性。两组数据之间的差异分析采用独立样本 t 检验来实现, 两组以上的数据通过单因素方差分析(one-way ANOVA)后再做 Duncan's 多重比较以检验组间差异, 差异显著性水平设置为 0.05, 数据以平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)表示。使用 Excel 2016、SPSS.26 进行数据统计及显著性检验, 数据绘图及 Pearson 相关性分析、线性拟合通过 Origin 2021 实现, 聚类分析及 NMDS 通过 PRIMER 5.0 软件完成, 调查站位布设图通过 Arcgis 10.8 软件实现。

2 结果与分析

2.1 各礁区渔业生物种类组成及生物量分布

调查共发现渔业生物 33 科 47 种, 所有渔业生物可分为鱼类(16 科 25 种)、棘皮类(6 科 8 种)、甲壳类(7 科 9 种)、头足类(2 科 3 种)、腹足类(2 科 2 种) 5 大类群, 各礁区采集的渔业生物种类数目依次为 LY 区 15 种、HR 区 17 种、RZ 区 16 种、TSA 及 TSB 区均为 20 种, 各礁区渔业生物不同种类占比分布见图 3a。

在本次调查中, 甲壳类生物类群生物量占比最高, 为 36.55%; 其次为鱼类(31.55%); 棘皮类生物量占比最少, 为 5.50%。对各礁区不同类群生物量统计(图 3b), 发现 TSA 礁区和 TSB 礁区两区域渔业生物生物量占有所有调查区域总生物量值的 75.00%, 其中 TSB 礁区各生物类群总生物量分别为 TSA 礁区、RZ 礁区、HR 礁区、LY 礁区总生物量的 1.6 倍、3.1 倍、18.4 倍、6.1 倍。

2.2 优势种

各礁区渔业生物优势种不同且同一物种在各礁区的 IRI 值也不同(表 2)。其中, 马氏刺蛇尾(*Ophiothrix marenzelleri*)(IRI=4130)、尖棘瓮鳐

(*Okamejei acutispina*)(IRI=1241)仅在 LY 区出现, 其他区内未捕获; 日本蟳和口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)在 5 处鱼礁区均有发现, 日本蟳在除 LY 区外的其他 4 处礁区中均为优势种。

2.3 生物多样性分析

各调查站的种类丰富度指数、多样性指数和均匀度指数分布范围分别为 1.35~3.42、1.06~2.48、0.48~0.96(表 3)。对比分析可知, LY、HR、RZ 所对应对照区的丰富度指数、多样性指数、均匀度指数普遍高于礁区, 但差异不显著($P>0.05$); 而 TSA 和 TSB 礁区渔业生物群落的丰富度指数和多样性指数则高于对照区, 亦无显著差异($P>0.05$)。

2.4 群落结构特征分析

对各区域有效调查站位的渔业生物进行聚类分析(图 4), 此次调查的所有有效站位可分为 4 个相似群组, 各礁区大致按照各自海域分布范围进行编组。单因子相似性分析(ANOSIM)表明, 各礁区渔业生物群落结构组间差异极显著($R=0.789$, $P<0.01$)。同样对上述所有站位的渔业生物进行 NMDS 排序(图 5), 其对各站位排序结果与聚类结果类似, 且 Stress 系数为 0.11, 表明排序结果具有一定程度的解释意义。

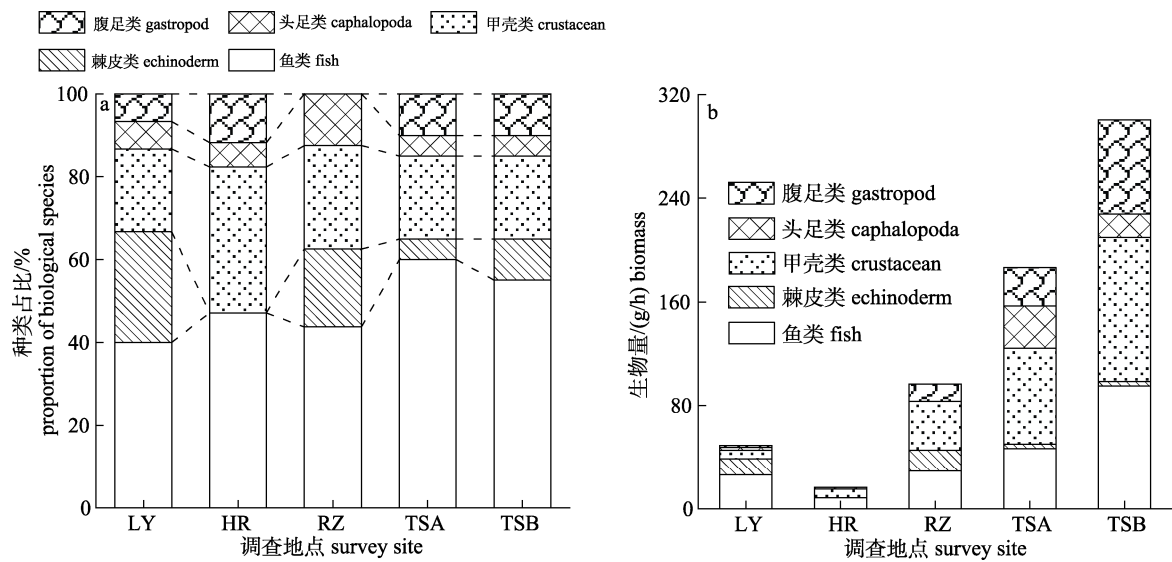


图 3 各礁区渔业生物种类数目占比(a)及生物量(b)
LY: 老尹家礁区; HR: 华润博达礁区; RZ: 日照顺风礁区; TSA: 祥云湾 A 礁区; TSB: 祥云湾 B 礁区。
Fig. 3 Proportion of fishery species numbers (a) and biomass (b) in each reef area
LY: Laoyinjia artificial reef area; HR: Huarun Boda artificial reef area; RZ: Rizhao Shunfeng artificial reef area;
TSA: Xiangyun Bay A reef area; TSB: Xiangyun Bay B reef area.

表 2 各区域优势种相对重要性指数分布
Tab. 2 Distribution of relative importance index of dominant species in each survey area

种类 species	相对重要性指数 index of relative importance, IRI				
	LY	HR	RZ	TSA	TSB
褐菖鲉 <i>Sebastes marmoratus</i>	1914	—	1822	—	—
星康吉鳗 <i>Conger myriaster</i>	—	1441	—	—	—
许氏平鲉 <i>Sebastes schlegelii</i>	—	—	160	2328	3109
尖棘瓮鲂 <i>Okamejei acutispina</i>	1241	—	—	—	—
矛尾虾虎鱼 <i>Chaemrichthys stigmatias</i>	—	915	269	227	1448
马氏刺蛇尾 <i>Ophiothrix marenzelleri</i>	4130	—	—	—	—
细雕刻肋海胆 <i>Temnopleurus toreumaticus</i>	2435	—	75	—	—
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	—	1401	450	—	46
口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	267	1072	1830	857	173
日本蟳 <i>Charybdis japonica</i>	583	1573	2457	6329	6207
砂海星 <i>Luidia quinaria</i>	—	—	2251	—	—
脉红螺 <i>Rapana venosa</i>	42	—	563	1142	2369

注: LY 为老尹家礁区; HR 为华润博达礁区; RZ 为日照顺风礁区; TSA 为祥云湾 A 礁区; TSB 为祥云湾 B 礁区; —表示未捕获。
Note: LY is Laoyinjia artificial reef area; HR is Huarun Boda artificial reef area; RZ is Rizhao Shunfeng artificial reef area; TSA is Xiangyun Bay A reef area; TSB is Xiangyun Bay B reef area; — means this species was not caught.

表 3 各区域渔业生物多样性指数
Tab. 3 Characteristic parameters of fishery community structure in each survey area
 $n=3; \bar{x} \pm SD$

区域 area	多样性指数 diversity index		
	Margalef 丰富度指数 D	Shannon 多样性指数 H'	Pielou 均匀度指数 J
LY	2.06±0.20	1.43±0.34	0.65±0.17
LY CA	2.30±0.46	1.83±0.20	0.85±0.05
HR	2.42±0.85	1.82±0.45	0.88±0.04
HR CA	2.53±0.78	1.74±0.56	0.91±0.07
RZ	2.46±0.26	1.86±0.15	0.87±0.03
RZ CA	2.74±0.69	2.07±0.32	0.89±0.00
TSA	3.02±0.35	2.23±0.24	0.83±0.06
TSA CA	1.95±0.60	1.81±0.47	0.83±0.08
TSB	2.66±0.53	2.11±0.12	0.81±0.08
TSB CA	1.95±0.60	1.81±0.47	0.83±0.08

注: LY 为老尹家礁区; HR 为华润博达礁区; RZ 为日照顺风礁区; TSA 为祥云湾 A 礁区; TSB 为祥云湾 B 礁区。
Note: LY is Laoyinjia artificial reef area; HR is Huarun Boda artificial reef area; RZ is Rizhao Shunfeng artificial reef area; TSA is Xiangyun Bay A reef area; TSB is Xiangyun Bay B reef area.

对各区域渔业生物群落进行 SIMPER 相似性百分比分析, 结果显示 LY、HR、RZ、TSA、TSB 各区域平均相似性百分比分别为 50.88%、43.06%、38.85%、69.14%、66.58%。其中, LY 礁

区相似性贡献率前 3 位的典型种为细雕刻肋海胆、马氏刺蛇尾、褐菖鲉, 该 3 种渔获对组内平均相似性的累计贡献率为 69.18%; HR 礁区相似性贡献率前 3 位的典型种为日本蟳、口虾蛄、三疣梭子蟹, 该 3 种渔获对组内平均相似性的累计贡献率为 46.48%; RZ 礁区相似性贡献率前 3 位的典型种为口虾蛄、脉红螺、日本蟳, 该 3 种渔获

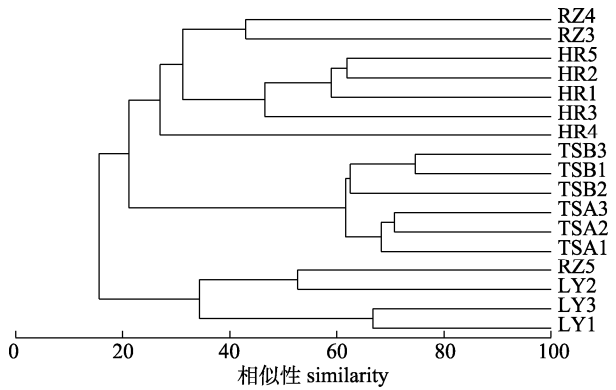


图 4 各礁区渔业生物群落聚类分析

字母表示区域, 数字表示站位编号; LY: 老尹家礁区; HR: 华润博达礁区; RZ: 日照顺风礁区; TSA: 祥云湾 A 礁区; TSB: 祥云湾 B 礁区。

Fig. 4 Cluster analysis of the fishery community in each reef area

Letters represent areas, and figures represent station numbers; LY: Laoyinjia artificial reef area; HR: Huarun Boda artificial reef area; RZ: Rizhao Shunfeng artificial reef area; TSA: Xiangyun Bay A reef area; TSB: Xiangyun Bay B reef area.

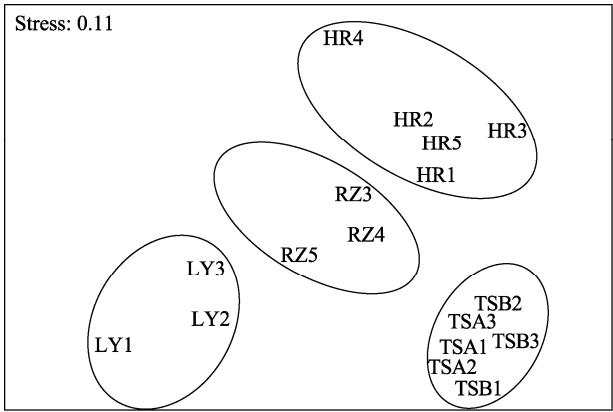


图 5 各礁区渔业群落 NMDS 排序分析
字母表示区域, 数字表示站位编号; LY: 老尹家礁区; HR: 华润博达礁区; RZ: 日照顺风礁区; TSA: 祥云湾 A 礁区; TSB: 祥云湾 B 礁区。

Fig. 5 Nonmetric multidimensional scaling analysis of the fishery community in each reef area
Letters represent areas, and figures represent station numbers; LY: Laoyinjia artificial reef area; HR: Huarun Boda artificial reef area; RZ: Rizhao Shunfeng artificial reef area; TSA: Xiangyun Bay A reef area; TSB: Xiangyun Bay B reef area.

对组内平均相似性的累计贡献率为 58.68%; TSA 礁区相似性贡献率前 3 位的典型种为日本鳎、许氏平鲷、脉红螺, 该 3 种渔获对组内平均相似性的累计贡献率为 42.00%; TSB 礁区相似性贡献率前

3 位的典型种为日本鳎、脉红螺、矛尾虾虎鱼, 该 3 种渔获对组内平均相似性的累计贡献率为 51.68%。各礁区渔业生物群落组间平均相异性及各区域组间相异性贡献率前 3 位的物种分布见表 4。

2.5 渔业生物资源养护效果

2.5.1 差异生物类群筛选 对各海洋牧场礁区及对照区不同渔业生物类群生物量进行差异性比较, 如表 5 所示。各海域生物资源量总体呈现礁区高于对照区的趋势, 尤其是鱼类、甲壳类、腹足类 3 大生物类群在群落较为稳定的长礁龄区域的生物量均显著高于对照区生物量($P<0.05$), 其中 TSB 礁区上述 3 种生物类群的资源养护效果最好, TSB 礁区鱼类、甲壳类、腹足类 3 大生物类群的平均生物量分别为对照区的 3.6 倍、5.0 倍、31.3 倍。

2.5.2 生物增量指数 选取礁区与对照区差异生物类群筛选结果中具有统计学差异, 且在各礁区中存在普适性的生物类群进行礁区生物增量指数的计算, 即选取渔业生物中鱼类、腹足类、甲壳类 3 种生物类群的生物量进行公式(1)的计算, 来确定各礁区调查站位生物增量指数, 进而取各调查站位生物增量指数的平均值来确定各礁区生物

表 4 不同礁区间主要分歧种及其相异性贡献率
Tab. 4 Main disproportionate species and their dissimilarity contribution rates among different reef area

物种 species	组间相异性贡献率 dissimilarity contribution rate									
	LY&HR (88.28)	LY&RZ (76.41)	HR&RZ (71.40)	LY&TSA (87.48)	HR&TSA (80.58)	RZ&TSA (74.8)	LY&TSB (90.80)	HR&TSB (80.70)	RZ&TSB (76.49)	TSA&TSB (38.37)
马氏刺蛇尾 <i>Ophiothrix marenzelleri</i>	16.15	18.13	0	9.94	0	0	9.23	0	0	0
细雕刻肋海胆 <i>Temnopleurus toreumaticus</i>	12.22	12.03	2.2	0	0	0	6.66	0	0	0
褐菖鲉 <i>Sebastiscus marmoratus</i>	5.87	4.07	8.02	3.48	0	4.12	3.2	0	0	0
砂海星 <i>Luidia quinariavon</i>	0	6.68	8.69	0	0	4.66	0	0	4.38	0
脉红螺 <i>Rapana venosa</i>	0	3.12	6.42	6.23	8.65	5.82	9.83	13.38	10.74	8.35
日本鳎 <i>Charybdis japonica</i>	2.92	4.22	5.27	8.52	9.84	9.99	9.21	11.04	11.06	5.07
许氏平鲷 <i>Sebastes schlegelii</i>	0	0	0	8.03	9.81	9.48	7.01	8.84	8.33	2.3
长蛸 <i>Octopus variabilis</i>	0	0	0	6.15	7	7.95	3.11	3.76	4.04	6.15
矛尾虾虎鱼 <i>Chaemrichthys stigmatias</i>	4.27	2.84	4.48	2.5	2.52	2.7	6.91	5.74	7.22	8.37
罗氏海盘车 <i>Asterias rollestoni</i>	0	0	0	4.18	5.12	5.4	0	0	0	7.11

注: 括号内为不同礁区的组间平均相异性; LY: 老尹家礁区; HR: 华润博达礁区; RZ: 日照顺风礁区; TSA: 祥云湾 A 礁区; TSB: 祥云湾 B 礁区。

Note: Average dissimilarity between groups in different reef area is in parentese; LY: Laoyinjia artificial reef area; HR: Huarun Boda artificial reef area; RZ: Rizhao Shunfeng artificial reef area; TSA: Xiangyun Bay A reef area; TSB: Xiangyun Bay B reef area.

表 5 各礁区与对照区渔业生物资源量对比
Tab. 5 Comparison of fishery biological resources between reef area and control area

区域 area	生物量 biomass				
	鱼类 fish	棘皮类 echinoderm	甲壳类 crustacean	腹足类 gastropod	头足类 cephalopod
LY	25.65±5.70*	12.53±1.55	6.35±1.74	1.77±0.38*	2.23±0.75*
LY CA	64.07±13.8	14.23±3.93	9.13±0.75	14.84±4.98	0.40±0.38
HR	8.37±2.02	0.00±0.00*	6.70±1.20*	0.17±0.10	1.07±0.75
HR CA	6.15±1.42	0.344±0.24	4.95±1.00	0.08±0.03	0.94±0.55
RZ	28.98±2.23	16.33±3.32*	37.80±3.63*	13.35±1.64*	0.00±0.00*
RZ CA	39.35±6.16	7.75±2.08	54.25±9.16	19.99±2.21	8.61±3.63
TSA	46.42±4.27*	3.49±0.96	74.32±18.00*	29.52±3.49*	32.78±4.97*
TSA CA	26.55±6.66	1.94±0.94	22.36±2.34	2.32±0.94	3.61±0.82
TSB	94.98±9.68*	3.31±0.75	111.68±15.1*	72.64±5.28*	17.86±6.90*
TSB CA	26.55±6.66	1.94±0.94	22.36±2.34	2.32±0.94	3.61±0.82

注: LY 为老尹家礁区; HR 为华润博达礁区; RZ 为日照顺风礁区; TSA 为祥云湾 A 礁区; TSB 为祥云湾 B 礁区; CA 为对照区; *表示同一海域与对照区域间差异显著($P<0.05$).
Note: LY is Laoyinjia artificial reef area; HR is Huarun Boda artificial reef area; RZ is Rizhao Shunfeng artificial reef area; TSA is Xiangyun Bay A reef area; TSB is Xiangyun Bay B reef area; CA is control area; * represents significant differences between reef area and control area in the same sea area ($P<0.05$).

增量指数。结果如图 6 所示, 建礁时间较短的 3 处礁区(LY、HR、RZ)对渔业生物所带来的增量效果劣于建礁时间较长的 TSA 和 TSB 区, 其中 TSB 礁区的生物增量指数值最高为 13.30, 约为最低值区 LY 礁区生物增量指数值的 23.75 倍。

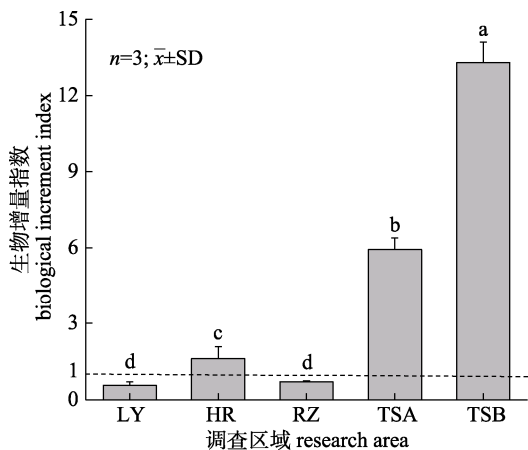


图 6 各礁区生物增量指数
LY: 老尹家礁区; HR: 华润博达礁区; RZ: 日照顺风礁区; TSA: 祥云湾 A 礁区; TSB: 祥云湾 B 礁区; 柱状图上不同字母表示差异显著($P<0.05$).
Fig. 6 Biological increment index of each reef area
LY: Laoyinjia artificial reef area; HR: Huarun Boda artificial reef area; RZ: Rizhao Shunfeng artificial reef area; TSA: Xiangyun Bay A reef area; TSB: Xiangyun Bay B reef area; different letters on the column indicate significant difference ($P<0.05$).

2.5.3 生物群落结构变化 长礁龄区(TSA 和 TSB)的丰富度指数差值和多样性指数差值均为正值, 而短礁龄区(LY、HR、RZ)丰富度指数差值均为负值(图 7), 区域间差值差异显著($P<0.05$).

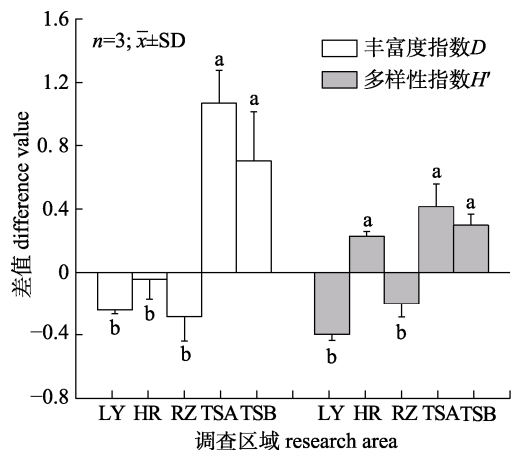


图 7 各礁区渔业生物群落多样性指数差值
LY: 老尹家礁区; HR: 华润博达礁区; RZ: 日照顺风礁区; TSA: 祥云湾 A 礁区; TSB: 祥云湾 B 礁区; 柱状图上不同字母表示差异显著($P<0.05$).
Fig. 7 Difference of diversity index of fishery biocommunity in each reef area
LY: Laoyinjia artificial reef area; HR: Huarun Boda artificial reef area; RZ: Rizhao Shunfeng artificial reef area; TSA: Xiangyun Bay A reef area; TSB: Xiangyun Bay B reef area. Different letters on the column indicate significant difference ($P<0.05$).

初步表明 TSA 和 TSB 长礁龄礁区对渔业生物多样性具有明显提升作用, 而短礁龄礁区(LY、HR、RZ)对渔业生物多样性提升作用尚不明显。

2.6 生物增量指数与礁区特征要素的相关性

Pearson 相关性分析显示, 生物增量指数(BII)与礁体规模(RV)及礁龄(RA)均呈现极显著正相关($P<0.01$)(图 8)。进一步进行线性拟合表明, 生物增量指数与礁龄、礁体规模呈现极显著的线性函数关系($P<0.001$), 拟合优度分别为 0.95 和 0.87 (图 9)。

3 讨论

3.1 人工鱼礁对渔业生物群落结构的影响

本研究调查的黄渤海 5 处礁区渔业生物的生物多样性指数与各自对照区均无显著差异, 可能是因为 LY、HR、RZ 3 处礁区的礁龄均较短, 短礁龄的人工鱼礁区尽管对渔业生物量具有较好的提升作用, 但生物群落特征的改善需要长时间尺度才更加明显^[9,25]; TSA、TSB 礁区的建礁时间较长, 但这两处礁区均离岸较近, 饵料生物较为丰富, 从而导致其与对照区的生物多样性亦无显著差异。同时, 本研究发现, 各礁区内渔业生物中游

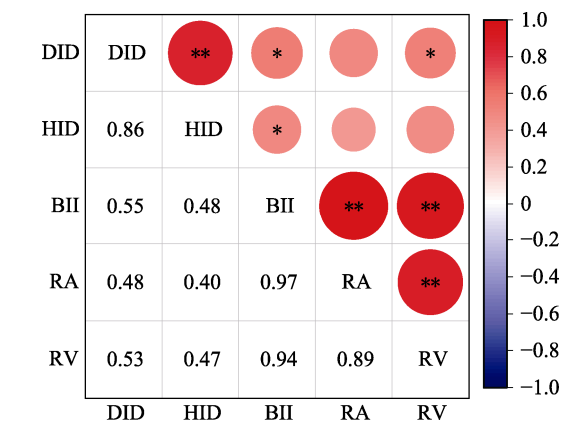


图 8 评价指标与礁区特征要素相关性分析
DID: 丰富度指数(D)差值; HID: 多样性指数(H')差值;
BII: 生物增量指数; RA: 礁龄; RV: 礁体规模. *代表差异显著($P<0.05$); **代表差异极显著($P<0.01$).

Fig. 8 Correlation analysis between evaluation index and characteristic elements of reef area
DID: species richness index difference; HID: diversified index difference; BII: biological increment index; RA: reef age; RV: reef volume. * indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

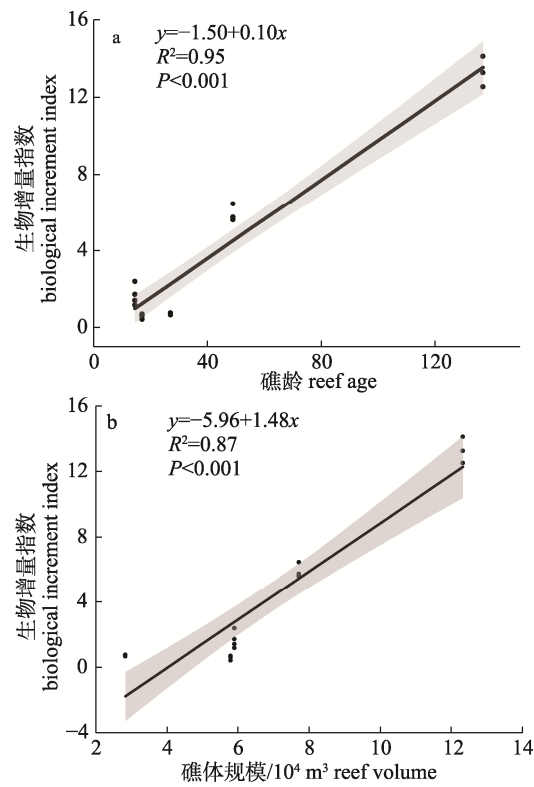


图 9 生物增量指数与礁龄(a)、礁体规模(b)线性拟合
Fig. 9 Linear fitting of biological increment index with reef age (a) and reef volume (b)

泳动物占比较高, 如 TSA 和 TSB 礁区游泳动物的生物量占比分别为 82.30%和 74.71%, 游泳动物活动范围相对较大, 这也使得礁区和对照区之间渔业生物种类相似, 造成礁区和对照区渔业生物的生物多样性指数无显著差异。

聚类分析及 NMDS 按照各礁区所处位置将各礁区调查站位进行编组, 对不同礁区渔业生物群落进行 SIMPER 相似性百分比分析, 发现除 TSA 和 TSB 外的其他区域间的相异性均在 70%以上, 表明各礁区渔业生物群落间普遍存在较大差异。另外, 研究还发现不同区域的典型种也存在不同, 但在各区域普遍存在的典型种为岩礁定居性的物种如日本蝠、褐菖鲈等, 人工鱼礁多重生态效应及鱼类趋性共同作用使得礁区典型种为平鲈属、六线鱼属等岩礁性鱼类及蝠属等甲壳类生物^[26-27]。群落的典型种和引起群落间差异性的分歧种通常与群落的优势种存在对应关系^[28], 如细雕刻肋海胆、马氏刺蛇尾、褐菖鲈为 LY 区主要优势种, 同时也是 LY 区相似性贡献率前 3 位的典型种, 而该

3 种物种也为 LY 区与 HR 区间的主要分歧种,三者对两区域组间相异性贡献率之和达到 34.24%。与以往研究类似,本研究 5 处礁区各自的渔业生物优势种多为虾虎鱼科、平鲉属、鲷属生物,其中日本鲷在 HR、RZ、TSA、TSB 4 处礁区均为优势物种,其在 TSA 和 TSB 区渔获生物量占比分别达到 37.22%和 35.77%。优势种在生物群落中的关键作用和其生活习性对群落结构的塑造性可能是造成区域生物群落差异的影响要素之一^[14]。同时,本研究 5 处礁区所处的地理位置跨越黄渤海海域,水体氮磷含量等环境要素存在较大差异^[29],各区域环境和生物之间往往存在双向选择,故不同区域的环境属性也可能是生物群落存在差异的影响要素之一^[30]。

3.2 人工鱼礁对渔业生物的养护效果及其影响因素分析

人工鱼礁的建设对海域渔业资源的分布有着显著影响,诸多研究均表明鱼礁区渔业资源密度大于对照区^[7,13,31]。在本研究中,TSA 礁区的平均渔业生物生物量约为对照区的 5.18 倍,而与 TSA 礁区位于同一海域的 TSB 礁区的平均渔业生物生物量为对照区的 3.22 倍,可见不同礁区的渔业生物养护效果不同,而带来差异的影响因素可能与诸如礁体类型等礁区特征要素有关。目前已有较多研究分析了礁体类型、礁龄和礁体规模等礁区特征要素对渔业生物群落的影响^[15-18],如 Song 等^[15]对北黄海小石岛周围 3 种不同类型人工鱼礁生境(水泥框架礁、石块礁、沉船礁)的研究发现,水泥框架礁生境底栖鱼类的生物量约为石块礁生境的 1.5 倍,且水泥框架礁的生物多样性水平也优于其他两种礁体。本研究运用生物增量指数,进一步综合量化了黄渤海人工鱼礁区特征要素与礁区渔业生物养护效果的关系,发现礁龄与礁区的生物增量指数呈现显著的正相关线性函数关系,其中礁龄最长的 TSA 礁区的生物增量指数分别约为短礁龄区 LY、HR、RZ 的 23.5 倍、8.2 倍和 19.0 倍。另外,本研究还发现长礁龄的 TSA 和 TSB 礁区的多样性指数差值和丰富度指数差值均高于短礁龄礁区。礁龄是人工鱼礁资源养护作用的关键影响因素之一,随着礁体浸水时间加长,礁体亲

和性愈佳,其带来最直接的效果是礁体附着生物不断增加,进而显著影响各营养层级生物,使得长礁龄区域的渔业生物养护效果更好^[32-34]。随着礁龄的变化,礁体表面的空间异质性和附着生物种类会产生变化^[20],但附着生物种类的数量不会随着礁龄增加而持续增加,附着生物在达到相对稳定的状态后受时间影响便会减少,但仍发挥着饵料供给等生态作用^[33]。

礁体规模也是影响礁区渔业资源养护效果的重要因素之一,礁体规模增加更易增加礁区的空间复杂程度^[35]。有学者通过改变礁体规模及形状的海区实践也表明,礁体表面积的增大可为一些重要的海洋初级生产者提供更多的生存空间,从而对植食性动物(包括鱼类)及其潜在捕食者发挥间接的养护作用^[36]。本研究也发现不同礁区的礁体规模与生物增量指数呈现显著正相关关系,初步分析认为,较大的礁体规模可能会提高礁区流场效应、饵料效应和庇护效应的覆盖面和影响尺度,从而提升礁区对渔业生物的养护作用。另一方面,礁体规模增加还可能形成更加充足的庇护空间从而增加鱼类等渔业生物的存活率^[37],而且礁体规模增加所带来的丰富饵料也会减少鱼类摄食的运动消耗并提高自身的摄食效率从而促进生物量的增加^[35,38]。

综上所述,人工鱼礁建设能够对渔业资源发挥积极的养护效果,但不同礁区的群落结构特征和渔业资源养护效果存在不同,其中礁龄和礁体规模是礁区发挥渔业资源养护效果的重要特征要素,研究结果可为海洋牧场生境效应评价提供案例支撑和新的思路。建议后续进一步开展礁体结构、礁体布局等其他特征要素对礁区渔业生物资源养护效果影响的研究,对礁区开展长时间序列的监测调查并在礁区渔业生物调查过程中改进调查方式,如引入水下摄像来与传统网具调查进行优势互补,提高调查采样的全面性及科学性。

参考文献:

- [1] Hou X Y, Hou W, Wu T. Shape changes of major gulfs along the mainland of China since the early 1940s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 118-129. [侯西勇, 侯婉, 毋亭. 20 世纪 40 年代初以来中国大陆沿海主要海湾形态

- 变化[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 118-129.]
- [2] 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.]
- [3] Yang H S, Zhang S Y, Zhang X M, et al. Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(4): 1255-1262. [杨红生, 章守宇, 张秀梅, 等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. 水产学报, 2019, 43(4): 1255-1262.]
- [4] Lin C G, Yang H S, Chen Y, et al. Construction and development of modern marine ranching—Academic review of the 230th Shuangqing forum[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(1): 143-152. [林承刚, 杨红生, 陈鹰, 等. 现代化海洋牧场建设与发展——第230期双清论坛学术综述[J]. 中国科学基金, 2021, 35(1): 143-152.]
- [5] Chen Y, Yu C Q, Zhang G S, et al. The environmental function and fish gather effect of artificial reefs[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2002, 17(1): 64-69. [陈勇, 于长清, 张国胜, 等. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果[J]. 大连水产学院学报, 2002, 17(1): 64-69.]
- [6] Li D, Hou X Y, Tang C, et al. A review on the progress of artificial reef research[J]. Marine Sciences, 2019, 43(4): 81-87. [李东, 侯西勇, 唐诚, 等. 人工鱼礁研究现状及未来展望[J]. 海洋科学, 2019, 43(4): 81-87.]
- [7] Li J, Zhang Y, Yuan W, et al. Research on artificial reef ecosystem health assessment based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(5): 10-19. [李娇, 张艳, 袁伟, 等. 基于模糊综合评价法的人工鱼礁生态系统健康研究[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(5): 10-19.]
- [8] Ajemian M J, Wetz J J, Shipley-Lozano B, et al. An analysis of artificial reef fish community structure along the north-western gulf of Mexico shelf: Potential impacts of “rigs-to-reefs” programs[J]. PLoS One, 2015, 10(5): e0126354.
- [9] 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.]
- [10] Shen G Y, Shi B Z. Marine Ecology[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002. [沈国英, 施并章. 海洋生态学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2002.]
- [11] Zhang R L. Comparative study on the structure and function of food web between artificial reef and natural reef in Yantai coastal area[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021: 6-29. [张荣良. 烟台近岸人工鱼礁与自然岩礁食物网结构与功能对比研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021: 6-29.]
- [12] Wang X M, Tang Y L, Sun X M, et al. Catch community structure characteristics and their relationships with environmental factors in the Xiao Shidao artificial reef sea area of Weihai[J]. Marine Sciences, 2016, 40(11): 34-43. [王新萌, 唐衍力, 孙晓梅, 等. 威海小石岛人工鱼礁海域渔获物群落结构特征及其与环境因子相关性[J]. 海洋科学, 2016, 40(11): 34-43.]
- [13] Yuan X N, Liang Z L, Lv Z B, et al. The effects of ecological restoration of the artificial reef in Weihai offshore[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(10): 54-64. [袁小楠, 梁振林, 吕振波, 等. 威海近岸人工鱼礁布设对生物资源恢复效果[J]. 海洋学报, 2017, 39(10): 54-64.]
- [14] Zhang R L, Liu H, Sun D Y, et al. Characteristics of benthic fishery community at natural reefs and artificial reefs located in Yantai offshore area[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2021, 52(3): 697-707. [张荣良, 刘辉, 孙东洋, 等. 烟台近岸人工鱼礁与自然岩礁底层渔业生物群落特征对比分析[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(3): 697-707.]
- [15] Song M P, Wang J H, Nie Z Y, et al. Evaluation of artificial reef habitats as reconstruction or enhancement tools of benthic fish communities in northern Yellow Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 182: 113968.
- [16] Hylkema A, Debrot A O, Osinga R, et al. Fish assemblages of three common artificial reef designs during early colonization[J]. Ecological Engineering, 2020, 157: 105994.
- [17] Marsden J E, Binder T R, Johnson J, et al. Five-year evaluation of habitat remediation in Thunder Bay, Lake Huron: Comparison of constructed reef characteristics that attract spawning lake trout[J]. Fisheries Research, 2016, 183: 275-286.
- [18] Paxton A B, Revels L W, Rosemond R C, et al. Convergence of fish community structure between a newly deployed and an established artificial reef along a five-month trajectory[J]. Ecological Engineering, 2018, 123: 185-192.
- [19] Yu H L, Fang G J, Zhou G J, et al. The effects of different substrate types on community characteristics of benthic swimming organisms in the artificial reef area[J/OL]. Shanghai: Journal of Fisheries of China, 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20211012.2107.024.html>. [于浩林, 方光杰, 周广军, 等. 人工鱼礁区不同底质对底栖游泳生物群落特征的影响[J/OL]. 上海: 水产学报, 2021. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20211012.2107.024.html>.]
- [20] Zhan Q P, Sun X, Dong J Y, et al. Community structure and functional traits of attached organisms on an artificial reef near Furong Island, Laizhou Bay[J]. Journal of Fishery Sciences, 2021: 6-29. [张荣良. 烟台近岸人工鱼礁与自然岩礁食物网结构与功能对比研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021: 6-29.]

- nces of China, 2022, 29(5): 704-719. [詹启鹏, 孙昕, 董建宇, 等. 莱州芙蓉岛海域人工鱼礁附着生物的群落结构和功能性状[J]. 中国水产科学, 2022, 29(5): 704-719.]
- [21] Wu Z, Zhang C L, Xue Y, et al. Spatial heterogeneity of demersal fish in the offshore waters of Shandong[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(2): 21-28. [吴桢, 张崇良, 薛莹, 等. 山东近海底层鱼类资源空间异质性[J]. 海洋学报, 2022, 44(2): 21-28.]
- [22] Ma Y C, Xu B D, Zhang C L, et al. Spatio-temporal distribution and standardization of CPUE for *Scomberomorus niphonius* pair trawler fishery in the Yellow and Bohai Seas[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(4): 493-502. [马亚宸, 徐宾铎, 张崇良, 等. 黄渤海蓝点马鲛双船拖网渔业 CPUE 时空变化及其标准化[J]. 中国水产科学, 2021, 28(4): 493-502.]
- [23] Zhang H S, Song P Q, Li Y, et al. Diversity and community structure of nekton in the central and southern East China Sea in autumn[J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(4): 575-586. [张琬顺, 宋普庆, 李渊, 等. 东海中南部秋季游泳动物多样性及群落结构[J]. 应用海洋学报, 2021, 40(4): 575-586.]
- [24] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB17378.7-2007 The specification for marine monitoring-Part 7: Ecological survey for offshore pollution and biological monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB17378.7-2007 海洋监测规范第 7 部分: 近海污染生态调查和生物监测[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [25] Perkol-Finkel S, Shashar N, Benayahu Y. Can artificial reefs mimic natural reef communities? The roles of structural features and age[J]. Marine Environmental Research, 2006, 61(2): 121-135.
- [26] Li J J, Li J, Gong P H, et al. Effects of the artificial reef and flow field environment on the habitat selection behavior of *Sebastes schlegelii* juveniles[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2021, 245: 105492.
- [27] 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.]
- [28] Han X D, Zhang S Y, Wang Z H, et al. Fish community structure and its relationship with environmental factors in the Ma'an Archipelago and its eastern waters[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(6): 1483-1497. [韩旭东, 章守宇, 汪振华, 等. 马鞍列岛及其东部海域鱼类群落格局与环境因子之间的关系[J]. 水产学报, 2019, 43(6): 1483-1497.]
- [29] Zhao C Y, Zang J Y, Liu J, et al. Distribution and budget of nitrogen and phosphorus and their influence on the ecosystem in the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. China Environmental Science, 2016, 36(7): 2115-2127. [赵晨英, 臧家业, 刘军, 等. 黄渤海氮磷营养盐的分布、收支与生态环境效应[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 2115-2127.]
- [30] Hwang S, Choi K H. Comparative fish community structure among different types of enclosures of estuarine environments[J]. Aquaculture and Fisheries, 2022, 7(3): 336-344.
- [31] Dong T W, Huang L Y, Tang Y L, et al. Preliminary evaluation of artificial reef around Rizhao Qiansan Island on the enhancement of fishery resources[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(8): 38-45. [董天威, 黄六一, 唐衍力, 等. 日照前三岛人工鱼礁对渔业资源影响的初步评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(8): 38-45.]
- [32] Liu G S, Li W T, Zhang X M. Assessment of the benthic macrofauna in an artificial shell reef zone in Shuangdao Bay, Yellow Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 114(2): 778-785.
- [33] Guo B, Chen W, Gao Y, et al. Community characteristics of attaching organisms on the artificial reefs built in different years in Dashentang, Tianjin[J]. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(6): 12-18. [郭彪, 陈卫, 高燕, 等. 天津大神堂海域不同时间序列礁体附着生物群落特征变化[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(6): 12-18.]
- [34] Brown L A, Furlong J N, Brown K M, et al. Oyster reef restoration in the northern gulf of Mexico: Effect of artificial substrate and age on nekton and benthic macroinvertebrate assemblage use[J]. Restoration Ecology, 2014, 22(2): 214-222.
- [35] Gatts P V, Franco M A L, Santos L N, et al. Influence of the artificial reef size configuration on transient ichthyofauna-Southeastern Brazil[J]. Ocean & Coastal Management, 2014, 98: 111-119.
- [36] Gratwicke B, Speight M R. Effects of habitat complexity on Caribbean marine fish assemblages[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 292: 301-310.
- [37] Campbell M D, Rose K, Boswell K, et al. Individual-based modeling of an artificial reef fish community: Effects of habitat quantity and degree of refuge[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(23-24): 3895-3909.
- [38] Krivan V. Behavioral refuges and predator-prey coexistence[J]. Journal of Theoretical Biology, 2013, 339: 112-121.

Study on the characteristics of fishery biological community structure and factors influencing biomass increments in different artificial reefs in the Yellow Sea and Bohai Sea

LI Jiandu, ZHAO Qi, LIU Jinji, ZHANG Yanhao, ZHANG Peidong

The Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education; Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract: In order to explore the structural characteristics of biological communities in fisheries in the Yellow Sea and Bohai Sea reef regions and quantify the relationship between the characteristic elements of reefs and conservation of fishery resources, a biological survey of five artificial reef areas along the Yellow Sea and Bohai Sea was conducted from October, 2021 to November, 2021. Biodiversity index, cluster analysis (CLUSTER), non-metric multidimensional scaling (NMDS), and similarity percentage analysis (SIMPER) were used to analyze the biological community structure of fisheries in different reef areas. The effects of different reef areas on fish were compared based on differences in the biomass increment and biodiversity indexes. Finally, correlation analysis and curve fitting were used to analyze the relationship between the gain effect of artificial reef and characteristics of the reef area. A total of 47 species belonging to 33 families of fishery organisms were obtained in the survey. The dominant species in each reef area were different, but *Charybdis japonica* was the common dominant species in most reef areas. The average similarity within each reef community group ranged from 38.85% to 69.14%, and the average dissimilarity between different reef communities was more than 70%. The biological community structure in the older reef area was better than that in the younger reef area. The average values of the Shannon diversity index and Margalef species richness index in the older reef area were approximately 1.3 times and 1.2 times those in the younger reef area, respectively, and the difference in the diversity index in the older reef area was higher than that in the younger reef area. The biomass gain effect of the older reef area was also better than that of the younger reef area. The maximum biomass increment index was 13.3 in the older reef area, which was 8.3 times that of the younger reef area. The difference in the biomass increment index and Margalef species richness index was significantly positively correlated with the size of the reef area and reef age ($P < 0.01$). The biomass increment index showed a significant linear function relationship with the size of the reef area and reef age, and the goodness-of-fit was 0.95 and 0.87, respectively. These results confirm that the construction of artificial reefs has a significant conservation effect on fishery resources. Reef age and reef volume are the key characteristic factors affecting the conservation of biological resources in fisheries. The findings of this study provide a new reference for the construction of artificial reefs and evaluation of their effects.

Key words: artificial reef; fishery species; community structure; resource conservation; the Yellow Sea and Bohai Seas

Corresponding author: ZHANG Peidong. E-mail: zhangpdsg@ouc.edu.cn