

DOI: 10.12264/JFSC2020-0193

渤海莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系

陈传曦¹, 张建柏², 王新萌³, 方光杰¹, 魏双武¹, 于梦杰¹, 唐衍力¹

1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 烟台市海洋经济研究院, 山东 烟台 264004;

3. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071

摘要: 浮游动物作为鱼类等游泳动物重要的饵料来源, 在海洋生态系统的食物网中占据重要地位。为探究渤海莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区浮游动物群落结构特征, 于 2018 年 3 月(春季)、7 月(夏季)、10 月(秋季)和 12 月(冬季)在芙蓉岛人工鱼礁区进行了 4 个航次的调查。对该海域浮游动物的种类、生物量、多样性指数及与环境因子的关系等方面进行了分析。结果表明, 4 个航次鱼礁区共鉴定出浮游动物 6 大类 34 种, 其中, 节肢动物 18 种、腔肠动物 3 种、脊索动物 1 种、浮游幼虫 8 种、毛颚动物和其他海洋昆虫各 2 种, 主要优势种有 17 种, 存在一定的季节变化。对照区共鉴定出浮游动物 4 大类 28 种, 其中节肢动物 17 种、腔肠动物 1 种、浮游幼虫 8 种、毛颚动物 2 种, 主要优势种有 17 种, 存在一定的季节变化。鱼礁区和对照区浮游动物种类组成和优势种组成均高度相似, 群落结构无显著性差异。非参数多维尺度分析和聚类分析表明, 浮游动物群落组成存在明显的季节差异, 但区域间无显著差异。环境因子在不同季节间存在显著差异($P < 0.01$), 但在鱼礁区和对照区间无显著差异。典范对应分析(CCA)结果表明, 芙蓉岛人工鱼礁区浮游动物群落结构受环境因子的影响, 影响浮游动物群落结构的主要环境因子依次为: $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、溶解氧(DO)、透明度、温度、可溶无机氮(DIN)、叶绿素、盐度和 pH。本研究可为人工鱼礁建设、管理和渔业资源养护等提供参考依据。

关键词: 浮游动物; 人工鱼礁; 环境因子; 典范对应分析; 莱州湾

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2021)03-0299-15

人工鱼礁是在水生生境中投放的用以改善水域生态环境人工构筑物, 可以为动、植物提供良好的繁殖、生长环境, 达到保护、增殖渔业资源, 修复水域生态系统等目的^[1-3]。人工鱼礁投放后, 礁体周围流场发生复杂变化, 促成表层与底层的水体交换^[4-5], 使海域中的营养盐不断地交替补充, 有利于浮游动物群落的生长, 从而提高礁区的初级生产力水平, 能够为鱼类和大型无脊椎动物等水生生物提供避敌、索饵、生长、繁殖的栖息环境^[2,6]。浮游动物作为次级生产者, 在物质循

环和能量流动中起着承上启下的作用^[7-10]。浮游动物作为鱼类等游泳动物重要的饵料来源, 在海洋生态系统的食物网中占据重要地位^[11-13]。浮游动物的种类极多, 由于其群落结构会随着周围水域环境的变化而发生变化, 能够及时对水质的优劣状态做出反应, 因此浮游动物的多样性是水域生态系统服务功能的重要指标之一^[14]。

莱州湾位于渤海黄河口至龙口一线以南海域, 是渤海重要渔业资源的产卵场、育幼场和索饵场^[15-16]。近几十年来, 由于莱州湾渔业资源不断

收稿日期: 2020-07-20; 修订日期: 2020-09-19.

基金项目: 山东省海洋与渔业科技创新项目(2017HYCX007).

作者简介: 陈传曦(1997-), 硕士研究生, 主要从事人工鱼礁与海洋牧场研究. E-mail: chuanxichen@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 唐衍力, 教授, 主要从事选择性渔具渔法、人工鱼礁与海洋牧场方面研究. E-mail: tangyanli@ouc.edu.cn

衰退,修复海洋生态环境、增殖渔业资源成为莱州湾海洋渔业可持续发展的首要问题。莱州明波水产有限公司于 2013—2014 年在莱州湾芙蓉岛海域进行人工鱼礁建设,共投放石块礁和混凝土构件礁 13.875 万空方,建成人工鱼礁区 66.8610 hm²。国内对于莱州湾的生态环境、渔业资源、大型底栖生物及浮游生物等方面进行过研究^[17-19],人工鱼礁区的调查也有相关报道^[15-16,20],但未见关于莱州湾海域人工鱼礁区浮游动物群落结构特征及其与环境因子关系方面的相关研究。本文通过对莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区浮游动物的调查,分析浮游动物的群落结构特征及其与环境因子的关系,

以期今后人工鱼礁的建设、管理和渔业资源的可持续发展提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究于 2018 年 3 月(春季)、7 月(夏季)、10 月(秋季)和 12 月(冬季)在莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区进行了 4 个航次的调查。站位 1、2、3、4、5 位于鱼礁区,根据人工鱼礁对鱼礁区生物影响范围的研究结果,确定站位 6、7 在鱼礁区外 200 m 处作为对照区^[21-22](图 1)。

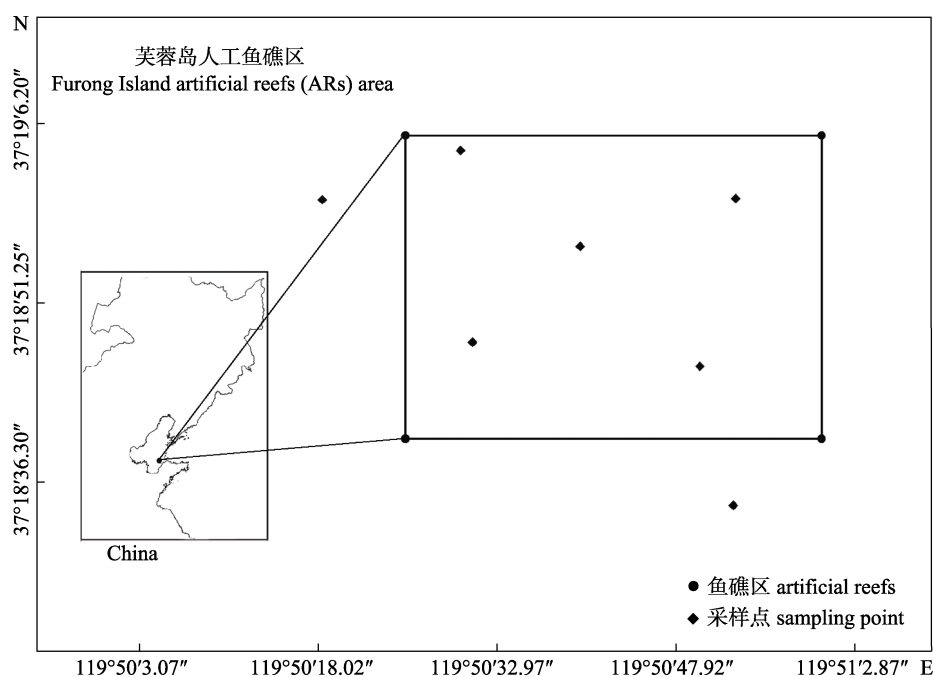


图 1 莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区调查站位

Fig. 1 Location of Furong Island artificial reefs and investigation sites

根据《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)^[23],使用浅水 I 型浮游生物网自底至表垂直拖网采集浮游动物,样品用 5%甲醛溶液固定保存,带回实验室鉴定种类与计数,并根据采样滤水量将浮游动物个数换算为个体丰度(ind/m³)。各调查站位的温度(Tem)、盐度(Sal)、pH、溶解氧(DO)用 YSI 多参数水质仪(Proplus)测得;透明度(Tra)在现场用透明度盘测得;化学需氧量(COD)、SiO₃-Si、PO₄-P、可溶无机氮(DIN)和叶绿素 a (Chl a)等参

数于现场采样后在实验室进行检测。

1.2 数据分析

计算浮游动物群落种类数(S)、Margalef 物种丰富度指数^[24](D)、Shannon-Wiener 多样性指数^[25](H')、Pielou 均匀度指数^[26](J')、优势度指数(Y),分析鱼礁区浮游动物群落特征。

$$D = (S - 1) / \ln N$$

$$H' = -\sum P_i \log_2 P_i$$

$$J' = H' / \log_2 S$$

式中, S 为物种数; N 为样品中的浮游动物总丰度; P_i 为第 i 个种的丰度占总丰度的百分比。

$$Y=(N_i/N) \times f_i$$

式中, N 为样品中的所有种类总丰度; N_i 是第 i 种的丰度; f_i 为样品中第 i 种的站位出现频率; 若 $Y \geq 0.02$, 则认定为优势种。

采用索伦森指数^[27] C_s 分析鱼礁区 and 对照区浮游动物种类组成的相似性。

$$C_s=2a/(2a+b+c)$$

式中, a 为鱼礁区和对照区共有的浮游动物种类数; b 为只在鱼礁区调查到的浮游动物种类数; c 为只在对照区调查到的浮游动物种类数。

对不同区域和不同季节浮游动物群落参数 (S 、 D 、 H' 、 J') 和环境参数 (温度、盐度、pH、透明度、COD、DO、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、DIN、chl a) 差异的显著性分析使用 $K\text{-W}$ 秩和检验完成。

应用 Primer Premier 6.0 软件对浮游动物群落的丰度进行 $\log(X+1)$ 转换, 建立 Bray-Curtis 相似矩阵进行聚类分析以及非度量多维尺度排序 (nMDS: non-metric multidimensional scaling) 分析^[28]。

应用 R 语言 Vegan 包分析浮游动物群落和环境因子之间的关系, 先将处理后的数据进行除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 并根据 DCA 分析结果中前 4 个轴长度选择模型, 如果最长排序轴长度 >4 , 选择基于单峰模型的典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA), <3 线性模型比较合适, 介于 3~4 之间 2 种模型均合适^[29]。并用蒙特卡洛方法, 检验各环境因子对浮游动物群落影响的显著性。

2 结果与分析

2.1 浮游动物种类组成

4 个季节在鱼礁区共调查到浮游动物 6 大类 34 种, 其中, 节肢动物 18 种, 占总种数的 52.94%; 腔肠动物 3 种, 占 8.82%; 脊索动物 1 种, 占 2.94%; 浮游幼虫 8 种, 占 23.53%; 毛颚动物和其他海洋昆虫各 2 种, 分别占 5.88%。浮游动物种类组成存在一定的季节变化, 夏、秋季浮游动物种类最丰富, 各为 16 种, 其次为冬季 15 种和春季 12 种 (表 1)。4 个季节在对照区共调查到浮游动物

4 大类 28 种, 其中, 节肢动物 17 种, 占总种数的 60.71%, 腔肠动物 1 种, 占 3.57%, 浮游幼虫 8 种, 占 28.57%, 毛颚动物 2 种, 占 7.14%。浮游动物种类组成在夏、冬季最多, 各为 16 种, 其次为秋季 10 种和春季 9 种 (表 2)。鱼礁区和对照区共同生物种有 26 种, 只在鱼礁区调查到的生物种为 8 种, 只在对照区调查到的生物种为 2 种, 鱼礁区和对照区浮游动物种类组成的索伦森指数 C_s 为 0.83 (>0.5), 表明鱼礁区和对照区的浮游动物种类组成高度相似。

人工鱼礁区各季节浮游动物优势种共 17 种 (类), 包括腔肠动物门 1 种、浮游幼虫 5 类、节肢动物门 10 种、毛颚动物门 1 种。优势种组成具有一定的季节变化, 春季优势种以双刺纺锤水蚤 (*Acartia bipinnata*) ($Y=0.46$)、八斑芮氏水母 (*Rathkea octopunctata*) ($Y=0.16$) 为主, 夏季优势种以小拟哲水蚤 (*Paracalanus parvus*) ($Y=0.46$)、桡足类幼体 (*Copepoda larva*) ($Y=0.22$) 为主, 秋季优势种以瓣鳃类幼体 (*Lamellibranchiata larva*) ($Y=0.29$)、小毛猛水蚤 (*Microsetella norvegica*) ($Y=0.18$) 为主, 冬季优势种以双刺纺锤水蚤 ($Y=0.41$)、太平洋真宽水蚤 (*Eurytemora pacifica*) ($Y=0.13$) 为主。综合来看, 人工鱼礁区无周年优势种。双刺纺锤水蚤是春季、夏季和冬季共同优势种; 钩虾是春季、秋季和冬季共同优势种; 太平洋真宽水蚤是春季和冬季共同优势种; 小拟哲水蚤是夏季和冬季共同优势种, 且为夏季第一优势种; 瓣鳃类幼体是夏季、秋季共同优势种 (表 3)。对照区各季节浮游动物优势种共 20 种 (类), 包括腔肠动物门 1 种、浮游幼虫 5 类、节肢动物门 13 种、毛颚动物门 1 种。优势种组成具有一定的季节变化, 春季优势种以双刺纺锤水蚤 ($Y=0.59$)、八斑芮氏水母 (*Rathkea octopunctata*) ($Y=0.13$) 为主, 夏季优势种以小拟哲水蚤 ($Y=0.53$)、桡足类幼体 ($Y=0.20$) 为主, 秋季优势种以太平洋纺锤水蚤 (*Acartia pacifica*) ($Y=0.54$)、麦秆虫 (*Caprellidea*) ($Y=0.08$) 为主, 冬季优势种以双刺纺锤水蚤 ($Y=0.20$)、小拟哲水蚤 ($Y=0.12$) 为主。综合来看对照区无周年优势种, 双刺纺锤水蚤是春季、秋季和冬季共同优势种; 麦

表 1 莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区浮游动物种类组成
Tab. 1 Species composition of zooplankton in artificial reefs

类别 sort	物种 species	季节 season			
		春 spring	夏 summer	秋 autumn	春 spring
节肢动物门 Arthropoda	中华哲水蚤	Calanus sinicus	+		+
	小拟哲水蚤	Paracalanus parvus		+	+
	瘦尾胸刺水蚤	Centropages tenuiremis	+		+
	太平洋真宽水蚤	Eurytemora pacifica	+		+
	双刺纺锤水蚤	Acartia bipinnata	+	+	+
	近缘大眼剑水蚤	Corycaeus affinis		+	+
	小毛猛水蚤	Microsetella norvegica	+		+
	其他猛水蚤	other Harpacticoida			+
	太平洋纺锤水蚤	Acartia pacifica		+	
	克氏纺锤水蚤	Acartia clausee			+
	强额拟哲水蚤	Paracalanus crassirostris		+	
	刺尾歪水蚤	Tortanus spanicaudatus			+
	短角长腹剑水蚤	Oithona brevicornis			+
	拟长腹剑水蚤	Oithona similis		+	
	钩虾	Gammaridea	+	+	+
	细足法(虫戎)	Parathemisto gracilipes	+		
	麦秆虫	Caprellidea			+
	鸟喙尖头蚤	Penilia avirostris			+
腔肠动物门 Coelenterata	米勒氏水母	Moerisia lyonsi	+		
	锡兰和平水母	Eirene ceylonensis	+		
	八斑芮氏水母	Rathkea octopunctata	+		+
浮游幼虫 Planktonic larva	多毛类幼体	Polychaeta larva		+	
	瓣鳃类幼体	Lamellibranchiata larva		+	
	腹足类幼体	Gastropoda larva		+	
	桡足类幼体	Copepoda larva	+	+	+
	桡足类无节幼虫	Nauplius larva (Copepoda)		+	
	长尾类幼体	Macrura larva		+	
	短尾类蚤状幼虫	Zoea larva (Brachyura)		+	
	长腕幼虫	Pluteus			+
毛颚动物门 Chaetognatha	强壮箭虫	Sagitta crassa	+	+	+
	肥胖箭虫	Sagitta enflata			+
脊索动物门 Chordata	异体住囊虫	Oikopleura dioica		+	
其他 other	鱼卵	fish egg			+
	仔稚鱼	fish larva		+	

秆虫是秋季和冬季共同优势种；小拟哲水蚤是夏季和冬季共同优势种(表 4)。鱼礁区和对照区优势种类相同的有 16 种，鱼礁区独有优势种为 1 种，对照区独有优势种为 4 种；鱼礁区和对照区的优势种组成索伦森指数 C_s 为 0.86 (>0.5)，表明鱼礁区和对照区的浮游动物优势种类组成高度相似。

2.2 群落多样性指数

鱼礁区浮游动物种类数、均匀度指数、丰富度指数在不同季节存在差异($P<0.05$)，丰度在不同季节有显著差异($P<0.01$)，而多样性指数在不同季节差异不显著($P>0.05$)。鱼礁区全年丰度变化范围为 63.90~6623.81 ind/m³，丰度在夏季达到

表 2 对照区浮游动物种类组成
Tab. 2 Species composition of zooplankton in the control area

类别 sort	物种 species	季节 season			
		春 spring	夏 summer	秋 autumn	冬 winter
节肢动物门 Arthropoda	中华哲水蚤	Calanus sinicus	+		+
	小拟哲水蚤	Paracalanus parvus		+	+
	瘦尾胸刺水蚤	Centropages tenuiremis	+		+
	太平洋真宽水蚤	Eurytemora pacifica	+		+
	双刺纺锤水蚤	Acartia bipinnata	+	+	+
	近缘大眼剑水蚤	Corycaeus affinis		+	+
	小毛猛水蚤	Microsetella norvegica		+	
	其他猛水蚤	other Harpacticoida	+		
	太平洋纺锤水蚤	Acartia pacifica		+	
	真刺唇角水蚤	Labibocera euchaeta			+
	克氏纺锤水蚤	Acartia clausee			+
	强额拟哲水蚤	Paracalanus crassirostris	+		
	刺尾歪水蚤	Tortanus spanicaudatus		+	
	拟长腹剑水蚤	Oithona similis	+	+	
	汤氏长足水蚤	Calanopia thompsoni		+	
	钩虾	Gammaridea	+	+	+
	麦秆虫	Caprellidea		+	+
腔肠动物门 Coelenterata	八斑芮氏水母	Rathkea octopunctata	+		
浮游幼虫 Planktonic larva	多毛类幼体	Polychaeta larva		+	+
	瓣鳃类幼体	Lamellibranchiata larva		+	
	腹足类幼体	Gastropoda larva	+	+	+
	桡足类幼体	Copepoda larva		+	+
	桡足类无节幼虫	Nauplius larva (Copepoda)	+		
	长尾类幼体	Macrura larva	+		
	短尾类蚤状幼虫	Zoea larva (Brachyura)	+	+	
	长腕幼虫	Pluteus			+
毛颚动物门 Chaetognatha	强壮箭虫	Sagitta crassa	+	+	+
	肥胖箭虫	Sagitta enflata			+

最高值, 显著高于其他季节; 冬季丰度最低。丰富度指数在夏季达到最高为 2.47, 春季最低为 1.43, 种类数也呈现夏季最高, 春季最低的规律。而多样性指数和均匀度指数均为冬季最高、夏季最低。

鱼礁区和对照区的浮游动物群落参数在冬季有差异($P<0.05$), 其他季节不存在显著性差异。除夏季外, 鱼礁区丰度均高于对照区, 但都未达到显著水平。鱼礁区的丰富度指数仅在秋季高于对照区, 其余 3 个季节鱼礁区均低于对照区, 但两者间无显著性差异。除冬季对照区的均匀度指数

高于鱼礁区外, 其余 3 个季节鱼礁区均高于对照区, 但两者间无显著性差异。冬季对照区的多样性指数高于鱼礁区, 其余 3 个季节鱼礁区均高于对照区, 但两者间无显著性差异(图 2)。

2.3 海域环境因子分布

调查海域环境因子存在显著的季节性变化($P<0.01$), 鱼礁区与对照区的环境参数无显著差异(表 5)。全区的溶解氧浓度由高到低依次为: 春、冬、秋、夏; 全区的硅酸盐浓度表现为夏、秋季高于冬、春季; 磷酸盐浓度从高到低依次为冬、秋、夏、春; 全区的无机氮含量由高到低依

表 3 不同季节人工鱼礁区浮游动物优势种的丰度和优势度

Tab. 3 Abundance and dominance of zooplankton dominant species in different seasons in artificial reefs

ind/m³, n=28, $\bar{x} \pm SD$

优势种 dominant species	春季 spring		夏季 summer		秋季 autumn		冬季 winter	
	丰度 abundance	优势度 dominance	丰度 abundance	优势度 dominance	丰度 abundance	优势度 dominance	丰度 abundance	优势度 dominance
八斑芮氏水母 <i>Rathkea octopunctata</i>	45.83±27.48	0.16	—	—	—	—	—	—
太平洋真宽水蚤 <i>Eurytemora pacifica</i>	40.23±20.08	0.14	—	—	—	—	11.78±9.20	0.13
双刺纺锤水蚤 <i>Acartia bipinnata</i>	130.88±74.16	0.46	265.70±263.83	0.03	—	—	46.56±3.39	0.41
钩虾 Gammaridea	10.18±12.85	0.03	—	—	7.06±7.20	0.07	2.91±2.67	0.02
强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i>	37.68±13.03	0.13	—	—	—	—	—	—
小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i>	—	—	3047.52±1117.73	0.46	—	—	5.84±3.05	0.09
强额拟哲水蚤 <i>Paracalanus crassirostris</i>	—	—	702.73±475.79	0.10	—	—	—	—
拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i>	—	—	556.73±339.53	0.08	—	—	—	—
瓣鳃类幼体 Lamellibranchiata larva	—	—	296.21±273.02	0.04	22.08±39.01	0.29	—	—
多毛类幼体 Polychaeta larva	—	—	—	—	2.51±2.91	0.02	—	—
桡足类幼体 Copepoda larva	—	—	1507.71±553.87	0.22	—	—	—	—
桡足类无节幼虫 Nauplius larva (Copepoda)	—	—	186.45±308.16	0.02	—	—	—	—
太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	—	—	—	—	10.23±2.90	0.13	—	—
小毛猛水蚤 <i>Microsetella norvegica</i>	—	—	—	—	13.32±12.89	0.18	—	—
麦秆虫 Caprellidea	—	—	—	—	5.06±4.51	0.06	—	—
腹足类幼体 Gastropoda larva	—	—	—	—	6.40±11.62	0.06	—	—
克氏纺锤水蚤 <i>Acartia clausee</i>	—	—	—	—	—	—	4.51±4.16	0.05

次为秋、春、冬、夏；全区的透明度由高到低依次为：春、冬、夏、秋；全区的盐度变化从高到低依次为：夏、春、冬、秋；全区的温度和叶绿素变化为夏秋季高于冬春季；全区的 COD 由高到低依次为：冬、夏、秋、春。

2.4 浮游动物群落的变化

鱼礁区和对照区的浮游动物种类及优势种组成高度相似且群落参数无显著性差异，因此将鱼礁区和对照区的浮游动物群落的变化进行整体分析。非参数多维尺度分析(nMDS)和聚类分析

结果表明，浮游动物群落组成存在显著的季节差异。nMDS 结果显示，各调查站位存在明显的季节聚集，stress 值为 0.12，表明分组适合度良好(图 3)；聚类分析结果表明，调查站位在同一季节浮游动物组成的相似度较高，不同季节间相似度较低(图 4)。

2.5 浮游动物群落与环境因子的关系

调查结果分析表明，海域环境因子存在显著的季节性变化($P<0.01$)，鱼礁区与对照区的环境参数无显著差异，且鱼礁区和对照区的浮游动物

表 4 不同季节对照区浮游动物优势种的丰度和优势度

Tab. 4 Abundance and dominance of zooplankton dominant species in different seasons in the control area
ind/m³, n=28, $\bar{x} \pm SD$

优势种 dominant species	春季 spring		夏季 summer		秋季 autumn		冬季 winter	
	丰度 abundance	优势度 dominance	丰度 abundance	优势度 dominance	丰度 abundance	优势度 dominance	丰度 abundance	优势度 dominance
八斑芮氏水母 <i>Rathkea octopunctata</i>	31.83±5.40	0.13	—	—	—	—	—	—
中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	5.09±0.00	0.02	—	—	—	—	2.12±0.60	0.03
瘦尾胸刺水蚤 <i>Centropages tenuiremis</i>	6.36±5.40	0.02	—	—	—	—	—	—
太平洋真宽水蚤 <i>Eurytemora pacifica</i>	26.73±5.40	0.11	—	—	—	—	5.09±7.20	0.04
双刺纺锤水蚤 <i>Acartia bipinnata</i>	137.50±14.40	0.59	—	—	1.69±2.40	0.03	11.45±1.80	0.20
钩虾 Gammaridea	8.91±1.80	0.03	—	—	—	—	—	—
强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i>	—	—	—	—	—	—	4.24±1.20	0.07
小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i>	—	—	5820.52±3868.78	0.53	—	—	6.79±4.80	0.12
强额拟哲水蚤 <i>Paracalanus crassirostris</i>	—	—	400.16±154.33	0.08	—	—	—	—
拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i>	—	—	447.45±272.66	0.07	—	—	—	—
瓣鳃类幼体 Lamellibranchiata larva	—	—	—	—	—	—	—	—
桡足类幼体 Copepoda larva	—	—	1353.27±473.30	0.20	—	—	—	—
桡足类无节幼虫 Nauplius larva (Copepoda)	—	—	—	—	—	—	—	—
太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	—	—	—	—	14.67±10.46	0.54	—	—
小毛猛水蚤 <i>Microsetella norvegica</i>	—	—	—	—	3.63±5.14	0.06	—	—
麦秆虫 Caprellidea	—	—	—	—	2.30±0.85	0.08	2.12±0.60	0.03
腹足类幼体 Gastropoda larva	1.27±1.80	0.05	—	—	—	—	—	—
克氏纺锤水蚤 <i>Acartia clausee</i>	—	—	—	—	—	—	3.81±5.40	0.03
近缘大眼剑水蚤 <i>Corycaeus affinis</i>	—	—	—	—	—	—	5.94±1.20	0.10
长腕幼虫 Pluteus	—	—	—	—	—	—	4.66±4.20	0.08

种类及优势种组成高度相似且群落参数无显著性差异,可分析全区浮游动物群落与全区环境因子间的关系。根据出现频率以及相对丰度,选择出现频率大于 0.2 且相对丰度大于 5%的浮游动物物种进行排序(表 6)。浮游动物种群矩阵的 DCA 分析结果表明,最长轴的长度为 3.58,介于 3 与 4 之间,因此本研究选择 CCA 进行浮游动物种群与环境因子关系研究。8 个环境因子对浮游动物群落的解释显著($P<0.01$),总解释量为 73.8%,说明选取环境因子合理。环境因子前两个轴对环境数据的解释量分别为 29.3%和 26.7%,累积解释量为 56%,说明前 2 个轴可以反映环境数据的变化。

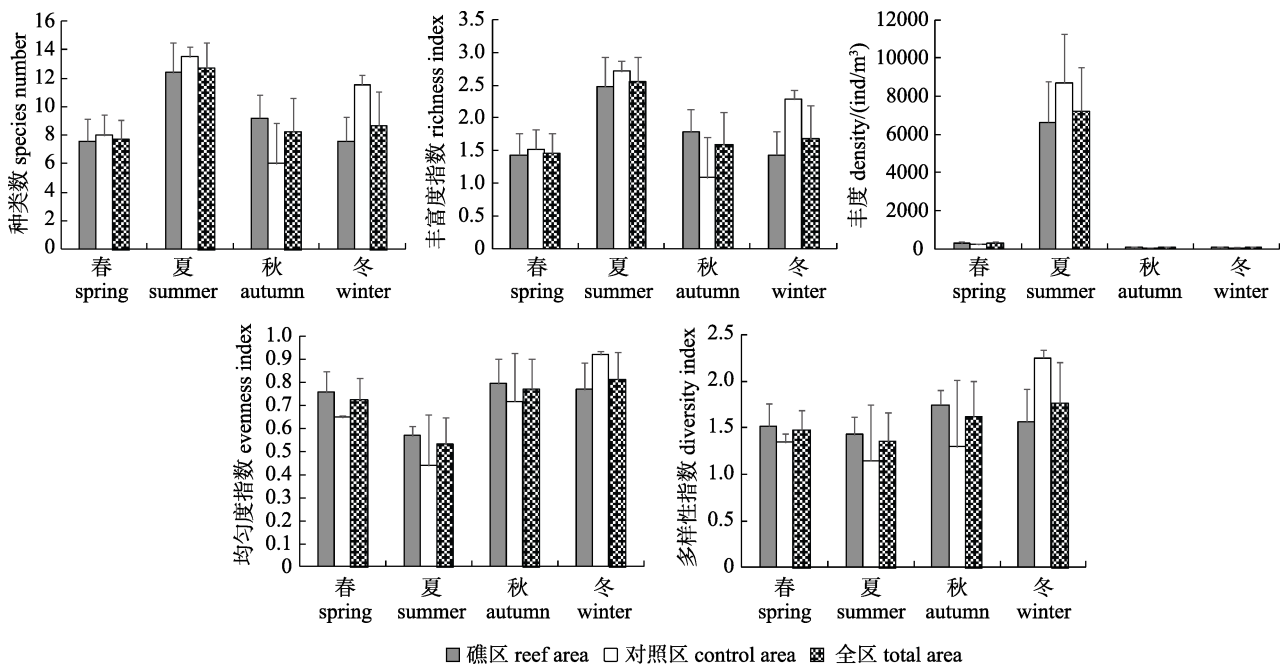


图 2 鱼礁区、对照区和全区浮游动物群落参数($n=28$; $\bar{x} \pm SD$)

Fig. 2 Community parameters of zooplankton in the artificial reef, control and total area ($n=28$; $\bar{x} \pm SD$)

表 5 调查海域环境因子时空分布

Tab. 5 Temporal and spatial characteristics of environmental variables

参数 parameter	春季 spring			夏季 summer		
	对照区 control	鱼礁区 reef	全区 total	对照区 control	鱼礁区 reef	全区 total
Tem/℃	4.65±0.07	4.70±0.12	4.68±0.10	27.50±0.00	27.76±0.13	27.68±0.16
DO/(mg/L)	11.51±0.02	11.63±0.29	11.60±0.24	6.31±0.08	6.08±0.21	6.15±0.21
Sal	29.72±0.05	29.65±0.18	29.67±0.15	30.04±0.10	30.06±0.04	30.06±0.05
pH	7.48±0.00	7.47±0.02	7.47±0.01	7.62±0.01	7.64±0.01	7.63±0.01
Tra(m)	1.45±0.21	1.46±0.11	1.45±0.12	0.90±0.00	0.80±0.00	0.82±0.04
DIN/(μg/L)	136.9±14.4	107.74±22.05	116.08±23.69	70.53±4.24	70.43±44.14	70.46±36.08
Pho/(μg/L)	3.76±0.00	4.76±4.64	4.47±3.82	10.17±3.13	11.40±1.87	11.05±2.08
Sil/(μg/L)	65.64±13.82	51.39±6.72	55.46±10.50	415.27±13.74	439.44±48.64	432.53±41.81
COD/(mg/L)	0.56±0.15	0.36±0.09	0.41±0.14	1.98±0.05	2.20±0.12	2.14±0.15
Chl a/(mg/L)	1.93±0.55	1.84±0.59	1.87±0.54	6.07±0.11	7.20±2.56	6.88±2.16

参数 parameter	秋季 autumn			冬季 winter		
	对照区 control	鱼礁区 reef	全区 total	对照区 control	鱼礁区 reef	全区 total
Tem/℃	15.70±0.00	15.62±0.08	15.64±0.07	2.20±0.00	2.16±0.05	2.17±0.04
DO/(mg/L)	7.37±0.02	7.24±0.25	7.27±0.21	10.94±0.39	11.61±0.46	11.41±0.52
Sal	24.72±0.07	24.75±0.05	24.74±0.05	24.98±0.04	25.05±0.06	25.03±0.06
pH	8.24±0.01	8.20±0.05	8.21±0.04	8.24±0.01	8.21±0.04	8.22±0.03
Tra/m	0.60±0.00	0.62±0.04	0.61±0.03	1.10±0.14	1.20±0.27	1.17±0.23
DIN/(μg/L)	1080.94±37.98	974.75±305.08	1005.09±254.90	90.57±28.54	85.57±80.15	87.00±66.51
Pho/(μg/L)	11.09±6.08	19.90±6.34	17.38±7.17	27.62±7.11	27.28±9.06	27.38±7.94
Sil/(μg/L)	351.10±29.54	356.67±42.19	355.08±36.60	174.33±4.30	120.68±92.03	136.01±79.59
COD/(mg/L)	1.75±0.40	2.20±0.11	2.07±0.28	2.77±0.13	3.52±0.77	3.31±0.72
Chl a/(mg/L)	2.94±0.55	2.19±0.79	2.40±0.77	1.22±0.26	1.76±0.63	1.61±0.59

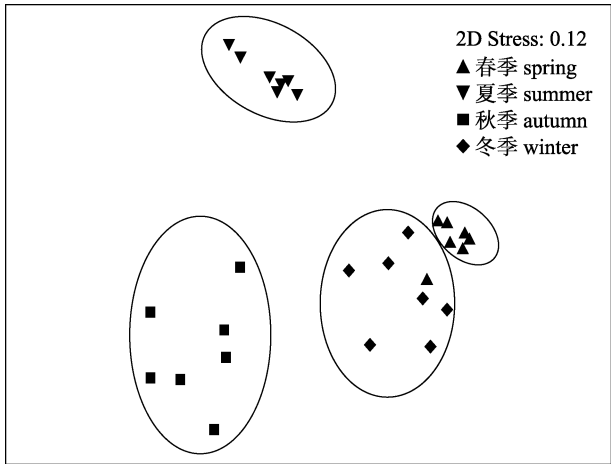


图 3 不同站位浮游动物的多维标度分析
1, 2, 3, 4 分别为春季、夏季、秋季、冬季采样记录。
Fig. 3 Multidimensional scaling of zooplankton of different sites
1, 2, 3, 4 represent sampling records of spring, summer, autumn, winter, respectively.

环境因子与浮游动物群落的二维排序图(图 5)与基于蒙特-卡洛置换检验的各环境因子的显著性分析(表 7)表明,除磷酸盐和 COD 以外,其他 8 个环境因子对浮游动物群落结构都有显著影响,各因子的重要性由高到低依次为: SiO₃-Si、DO、透明度、温度、DIN、叶绿素、盐度和 pH。春季和冬季第一优势种双刺纺锤水蚤(s5)与透明度和 DO 呈正相关,而与无机氮和 pH 呈负相关。夏季第一优势种小拟哲水蚤(s12)与叶绿素、SiO₃-Si 和温度呈正相关,而与 DO 呈负相关。秋季第一优势种瓣鳃类幼体(s17)与无机氮和温度呈正相关,

表 6 CCA 排序中浮游动物种类代码
Tab. 6 Codes of zooplankton species for CCA ordination

编号 code	种类 species	编号 code	种类 species
s1	八斑芮氏水母 <i>Rathkea octopunctata</i>	s12	小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i>
s2	中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	s13	强额拟哲水蚤 <i>Paracalanus crassirostris</i>
s3	瘦尾胸刺水蚤 <i>Centropages tenuiremis</i>	s14	太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>
s4	太平洋真宽水蚤 <i>Eurytemora pacifica</i>	s15	近缘大眼剑水蚤 <i>Corycaeus affinis</i>
s5	双刺纺锤水蚤 <i>Acartia bipinnata</i>	s16	多毛类幼体 <i>Polychaeta larva</i>
s6	拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i>	s17	瓣鳃类幼体 <i>Lamellibranchiata larva</i>
s7	小毛猛水蚤 <i>Microsetella norvegica</i>	s18	桡足类无节幼虫 <i>Nauplius larva (Copepoda)</i>
s8	钩虾 Gammaridea	s19	长尾类幼体 Macrura larva
s9	强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i>	s20	短尾类蚤状幼虫 <i>Zoea larva (Brachyura)</i>
s10	腹足类幼体 <i>Gastropoda larva</i>	s22	麦秆虫 <i>Caprellidea</i>
s11	桡足类幼体 <i>Copepoda larva</i>	s23	克氏纺锤水蚤 <i>Acartia clausae</i>

与透明度和盐度呈负相关关系。

3 讨论

3.1 浮游动物群落结构特征

本研究 4 个航次调查,在莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区及对照区共发现浮游动物 36 种,包括节肢动物、腔肠动物、脊索动物、浮游幼虫、毛颚动

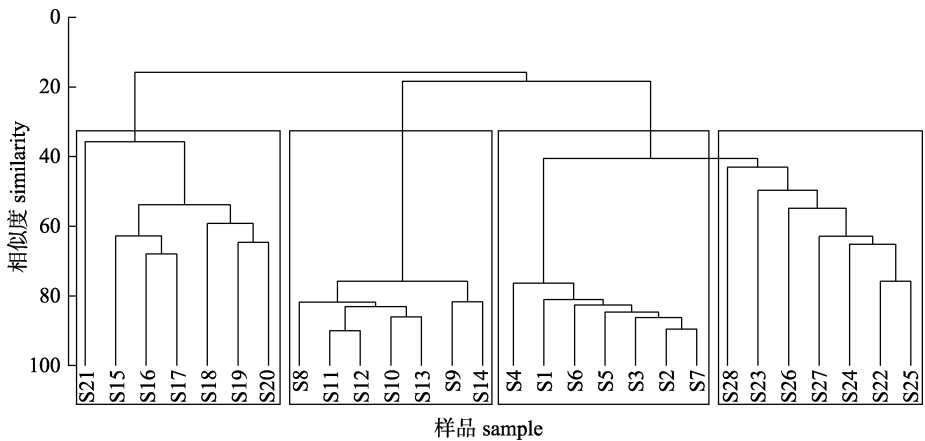


图 4 不同站位浮游动物的聚类分析
s1-s7: 春季样品; s8-s14: 夏季样品; s15-s21: 秋季样品; s22-s28: 冬季样品。
Fig. 4 Cluster analysis of zooplankton of different sites
s1-s7: spring samples; s8-s14: summer samples; s15-s21: autumn samples; s22-s28: winter samples.

表 7 各环境因子对浮游动物丰度影响显著性
Tab. 7 Significance of effects of each environment factor on zooplankton abundance

环境因子 environment factor	CCA1	CCA2	r^2	P	显著性 significance
溶解氧 dissolved oxygen (DO)	-0.67	0.73	0.90	0.001	***
盐度 salinity	0.70	0.71	0.48	0.001	***
pH	-0.46	-0.88	0.35	0.004	**
透明度 transparency	-0.34	0.93	0.85	0.001	***
温度 temperature	0.85	-0.51	0.84	0.001	***
无机氮 dissolved inorganic nitrogen	-0.41	-0.90	0.84	0.001	***
PO ₄ -P phosphate	-0.38	-0.92	0.02	0.756	
SiO ₃ -Si silicate	0.69	-0.72	0.91	0.001	***
化学需氧量 chemical oxygen demand (COD)	0.82	-0.56	0.11	0.259	
叶素绿 chlorophyll	0.99	-0.13	0.70	0.001	***

注: CCA1、CCA2: 环境因子与排序轴的相关性; r^2 : 环境因子与物种分布的系数; P: 相关的显著性; ***: $P<0.001$, **: $P<0.01$.
Note: CCA1, CCA2: correlation between environment factors and the ordination axes; r^2 : coefficient of environment factors and species distribution; P: significance of correlation; ***: $P<0.001$, **: $P<0.01$.

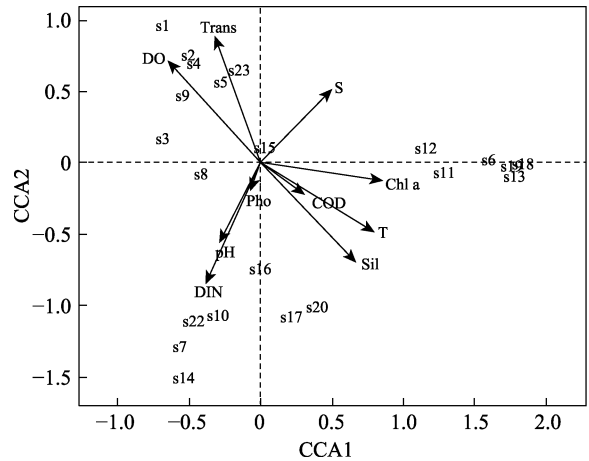


图 5 主要浮游动物种类与环境因子间的 CCA 排序图
Chl a: 叶绿素 a; COD: 化学需氧量; DIN: 可溶无机氮;
DO: 溶解氧; Pho: PO₄-P; S: 盐度; Sil: SiO₃-Si;
T: 温度; Trans: 透明度.

Fig. 5 CCA ordination of main zooplankton species with environmental factors
Chl a: chlorophyll-a; COD: chemical oxygen demand;
DIN: dissolved inorganic nitrogen; DO: dissolved oxygen;
Pho: PO₄-P; S: salinity; Sil: SiO₃-Si; T: temperature;
Trans: transparency.

物以及其他海洋昆虫等 6 大类, 其中节肢动物桡足类及浮游幼虫为主要类群; 宋洪军等^[30]研究发现莱州湾浮游动物种类以桡足类为最多, 各类群的浮游幼体也在浮游动物样品种类鉴定中频繁出现; 姜会超等^[31]调查莱州湾金城海域也发现浮游动物以桡足类和各类浮游幼虫居多。本研究中区浮游动物丰度在 60.38~7211.7 ind/m³ 之间, 其中鱼礁区浮游动物丰度在 63.9~6623.81 ind/m³ 之间,

对照区浮游动物丰度在 26.79~8681.58 ind/m³ 之间, 鱼礁区和对照区的浮游动物丰度无显著性差异, 可能是由于鱼礁区和对照区距离较近, 而宋洪军等^[30]调查发现在 1982 年至 2014 年间, 莱州湾历年浮游动物丰度在 45.8~3581.1 ind/m³ 之间。通过与宋洪军等^[30]的研究结果对比分析, 本研究调查的莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区及邻近海域浮游动物丰度较往年对莱州湾海域调查结果相比有显著的提升, 且芙蓉岛人工鱼礁区于 2014 年建设完成, 本调查研究于 2018 年完成, 表明人工鱼礁的投放可有效提升海区生产力水平。研究发现鱼礁区浮游动物的多样性指数和均匀度指数均高于对照区, 除夏季外, 鱼礁区浮游动物丰度均高于对照区, 表明人工鱼礁区的浮游动物群落结构稳定性优于对照区。鱼礁区浮游动物种类表现出明显的季节变化, 在不同季节和不同环境因子的综合作用下, 其种类数和丰度都在不断地变动。春季双刺纺锤水蚤为主要优势种; 夏季小拟哲水蚤为主要优势种; 秋季瓣鳃类幼体和太平洋纺锤水蚤为主要优势种; 冬季的主要优势种为双刺纺锤水蚤。王新萌等^[20]调查发现鮟是芙蓉岛人工鱼礁区渔业资源的主要优势种, 袁小楠^[32]调查发现渤海湾和莱州湾鮟仔稚鱼以小拟哲水蚤、拟长腹剑水蚤 (*Oithona similis*)、双刺纺锤水蚤 3 种小型桡足类及大型桡足类中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 的无节幼体为主要饵料, 结果分析表明, 莱州湾芙蓉岛

人工鱼礁的投放可以聚集大量浮游动物,为鲛等滤食性动物提供饵料。

nMDS 及聚类分析显示,鱼礁区和对照区浮游动物群落没有显著差异。张硕等^[33]对海州湾海洋牧场调查发现人工鱼礁区和对照区的浮游动物群落结构的差异性不大,与本研究结果一致;而陈涛等^[34]对象山港鱼礁区及周围水域的浮游动物进行聚类分析,结果显示鱼礁区的浮游动物类群与对照区存在明显差异,与本研究存在差异,原因是多方面的。相关研究表明^[11,35-36],浮游动物作为海洋生态系统的重要组成部分,其群落结构、种类组成和数量分布等均与水温、盐度、营养盐等密切相关。象山港是一个半封闭的深水港湾,受外界海流影响较小,易形成相对独立的生境结构。海州湾是开敞海湾,受外界洋流影响较大,因此,鱼礁区及对照区生境差异较小;莱州湾是位于黄渤海交汇处的浅水海湾,与外界海流交流充分,同时芙蓉岛人工鱼礁区面积较小,海区水位较浅,导致鱼礁区与对照区的生境差异较小,本研究调查结果也表明鱼礁区与对照区间环境参数无显著差异。

3.2 环境因子对浮游动物群落的影响

芙蓉岛人工鱼礁区环境因子对浮游动物群落存在影响,CCA 分析结果表明,本研究中鱼礁区浮游动物的种类组成主要受 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、DO、透明度、温度、DIN、叶绿素、盐度和 pH 的影响。戴媛媛等在对天津海域人工鱼礁区浮游动物群落结构研究时发现温度和盐度是影响浮游动物分布的主要环境因子^[37];张皓宇等^[38]在对獐子岛近岸人工鱼礁区浮游动物群落调查时发现水温、盐度和营养盐是影响浮游动物群落十分重要的环境因子;与本研究调查结论一致。

浮游动物群落在夏季达到 7211.74 ind/m^3 ,显著高于春季的 267.38 ind/m^3 、秋季的 60.38 ind/m^3 以及冬季的 61.40 ind/m^3 ,在不同季节间有显著差异,说明温度对浮游动物群落结构有显著的影响。刘潇等^[39]在调查荣成近岸海域浮游动物群落结构及其与环境因子的关系时发现,在温度较高的夏季,浮游动物能够大量繁殖;相关调查表明温度直接影响生物有机体的体温,体温的高低决

定了浮游动物代谢过程的强度,影响浮游动物的生长、发育、繁殖^[40-41],与本研究调查结果一致。本研究发现叶绿素和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 对浮游动物群落结构影响显著,CCA 排序结构表明,夏季第一优势种与叶绿素和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 呈正相关,夏季时,水体透明度上升,叶绿素 a 含量升高,浮游植物密度增大,叶绿素和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 含量上升;浮游动物通过摄食浮游植物进而会大量繁殖,进而控制浮游动物的群落分布^[42]。此外,DO 浓度也是影响鱼礁区浮游动物群落结构的主要环境因子之一,本研究发现 DO 浓度与大部分物种呈负相关关系,在浮游动物丰度最高的夏季,DO 浓度最低。DO 浓度的变化会引起各种浮游动物的生理、行为和繁殖方面的变化,从而影响其群落特征^[43]。一些研究还表明,DO 浓度可能在 P 的释放中起关键作用,并且在有氧条件下释放速率会下降^[44-45],因此,DO 浓度升高可能会对浮游动物群落产生负面影响,这与本研究中的 CCA 分析一致。而盐度是影响鱼礁区浮游动物群落的另一重要因素,盐度与大部分物种的分布呈负相关;戴媛媛等^[37]在调查天津海域人工鱼礁区浮游动物群落研究表明,盐度是影响浮游动物分布的主要环境因子之一,这与本次调查结果相类似。pH 是另一个影响浮游动物群落结构的环境因子,程宏等^[46]在调查宁德市东部海域调查时发现,浮游动物种类与 pH 呈较强的正相关关系,该调查海域有较好的弱碱性,适宜浮游动物的生长发育,与本研究分析结果一致。本研究发现营养盐对浮游动物也有显著影响,张武昌等^[47]研究发现一方面营养盐为浮游动物提供养分,对浮游动物起积极作用,另一方面过高的营养盐含量也会破坏群落结构。

4 结论

本研究结果表明,莱州湾芙蓉岛人工鱼礁区浮游动物群落结构有明显的季节更替现象,同时受环境因子的影响。节肢动物和浮游幼虫是浮游动物的主要类群,对该水域浮游动物的数量变动及种类多样性的变化具有较大影响。作为芙蓉岛人工鱼礁区及其邻近海域生态系统的重要组成部分,随着人工鱼礁的投放,浮游动物群落丰度及

稳定性有了显著的提升,表明人工鱼礁的投放具有一定的生态效益,能够有效地提升该海域的生产力,对渔业资源的补充与养护具有十分重要的生态意义。研究发现鱼礁区和对照区的浮游动物群落结构和环境因子均无显著性差异,这可能是由于鱼礁区和对照区距离较近,且莱州湾是位于黄渤海交汇处的浅水海湾,与外界海流交流充分,同时芙蓉岛人工鱼礁区面积较小,海区水位较浅;故导致鱼礁区与对照区的生境差异较小,后期可针对此问题进一步探讨。

参考文献:

- [1] Thierry J M. Artificial reefs in Japan-A general outline[J]. *Aquacultural Engineering*, 1988, 7(5): 321-348.
- [2] 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.]
- [3] Chen X, Feng Q Y, Deng R R. A studying on present situation of man-made reef constructions and its development countermeasures[J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2006, 24(1): 83-89. [陈心, 冯全英, 邓中日. 人工鱼礁建设现状及发展对策研究[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2006, 24(1): 83-89.]
- [4] Wolanski E, Hamner W M. Topographically controlled fronts in the ocean and their biological influence[J]. *Science*, 1988, 241(4862): 177-181.
- [5] Lin J, Zhang S Y. Research advances on physical stability and ecological effects of artificial reef[J]. *Marine Fisheries*, 2006, 28(3): 257-262. [林军, 章守宇. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展[J]. *海洋渔业*, 2006, 28(3): 257-262.]
- [6] Yang L, Zhang S, Sun M C, et al. The research of relationships between phytoplankton and environmental factors in artificial reef area of Haizhou Bay[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2011, 20(3): 445-450. [杨柳, 张硕, 孙满昌, 等. 海州湾人工鱼礁区浮游植物与环境因子关系的研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(3): 445-450.]
- [7] Sun S, Li C L, Zhang G T, et al. Long-term changes in the zooplankton community in the Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(5): 625-631. [孙松, 李超伦, 张光涛, 等. 胶州湾浮游动物群落长期变化[J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42(5): 625-631.]
- [8] Pang B J, Lan W L, Li M M, et al. Community structure and seasonal variation of zooplankton in coastal Beibu Gulf[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(19): 7014-7024. [庞碧剑, 蓝文陆, 黎明民, 等. 北部湾近岸海域浮游动物群落结构特征及季节变化[J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7014-7024.]
- [9] Zhang C X, Zhou K, Sun X L, et al. Community structure and seasonal variation of the zooplankton in Shenzhen Bay[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(11): 2686-2692. [张才学, 周凯, 孙省利, 等. 深圳湾浮游动物的群落结构及季节变化[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2686-2692.]
- [10] Shao Q W, Liu Z S, Zhang J, et al. Seasonal variation in zooplankton community structure in the Changjiang Estuary and its adjacent waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 683-691. [邵倩文, 刘镇盛, 章菁, 等. 长江口及邻近海域浮游动物群落结构及季节变化[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 683-691.]
- [11] Ji H H, Ye S F. Ecological distribution characteristics of zooplankton and its relationship with environmental factors in the Changjiang River estuary[J]. *Marine Sciences*, 2006, 30(6): 23-30. [纪焕红, 叶属峰. 长江口浮游动物生态分布特征及其与环境的关系[J]. *海洋科学*, 2006, 30(6): 23-30.]
- [12] Newton G M. Estuarine ichthyoplankton ecology in relation to hydrology and zooplankton dynamics in a salt-wedge estuary[J]. *Marine and Freshwater Research*, 1996, 47(2): 99-111.
- [13] Strom S L, Brainard M A, Holmes J L, et al. Phytoplankton blooms are strongly impacted by microzooplankton grazing in coastal North Pacific waters[J]. *Marine Biology*, 2001, 138(2): 355-368.
- [14] Yang Q, Wang Z L, Fan J F, et al. Zooplankton diversity and its variation in the Northern Yellow Sea in the autumn and winter of 1959, 1982 and 2009[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21): 6747-6754. [杨青, 王真良, 樊景凤, 等. 北黄海秋、冬季浮游动物多样性及年间变化[J]. *生态学报*, 2012, 32(21): 6747-6754.]
- [15] Gao D K, Zhao J, Zhang X M, et al. Species composition and distribution patterns of ichthyoplankton within and outside artificial reefs in Laizhou Bay[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(2): 369-381. [高东奎, 赵静, 张秀梅, 等. 莱州湾人工鱼礁区及附近海域鱼卵和仔稚鱼的种类组成与数量分布[J]. *中国水产科学*, 2014, 21(2): 369-381.]
- [16] Yang C J, Wu Z X, Liu H Y, et al. The fishing strategy of *Charybdis japonica* and *Rapana venosa* and the carrying capacity of *Apostichopus japonicus* in Zhuwang, Laizhou Artificial Reef Ecosystem based on Ecopath model[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(11): 168-177. [杨超杰, 吴忠鑫, 刘鸿雁, 等. 基于Ecopath模型估算莱州湾

- 朱旺人工鱼礁区日本鳀、脉红螺捕捞策略和刺参增殖生态容量[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(11): 168-177.]
- [17] Sun P X, Wang B, Zhang Z H, et al. Relationship between nutrient distributions and eutrophication in seawater of the Laizhou Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(3): 329-335. [孙丕喜, 王波, 张朝晖, 等. 莱州湾海水中营养盐分布与富营养化的关系[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(3): 329-335.]
- [18] Zhang J F, Gao X L, Zhuang W, et al. Analysis of long-term changes in fishery resources and environment in the Laizhou Bay[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2014(3): 82-90. [张锦峰, 高学鲁, 庄文, 等. 莱州湾渔业资源与环境变化趋势分析[J]. 海洋湖沼通报, 2014(3): 82-90.]
- [19] Yang J Q, Zhu Y G, Song W P, et al. The eco-environmental evaluation based on habitat quality and ecological response of Laizhou Bay[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 105-114. [杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 等. 基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 105-114.]
- [20] 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鳎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.]
- [21] D'Anna G, Giacalone V M, Pipitone C, et al. Movement pattern of white seabream, *Diplodus sargus* (L., 1758) (Osteichthyes, Sparidae) acoustically tracked in an artificial reef area[J]. *Italian Journal of Zoology*, 2011, 78(2): 255-263.
- [22] Topping D T, Szedlmayer S T. Home range and movement patterns of red snapper (*Lutjanus campechanus*) on artificial reefs[J]. *Fisheries Research*, 2011, 112(1-2): 77-84.
- [23] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB/T 12763.9-2007 Marine Investigation Criterion[S]. Beijing: Standard Press of China, 2007. [国家质量监督检验检疫局. GB/T 12763-2007 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [24] Margalef R. Information theory in ecology[J]. *General Systems*, 1958, 3(1): 36-71.
- [25] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana IL: University of Illinois Press, 1949: 1-125.
- [26] Pielou E C. An Introduction to Mathematical Ecology[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969: 1-286.
- [27] Fang G J, Sun L Y, Tang Y L, et al. A comparative study on fishery resource of artificial reefs based on gillnet and cage catches[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(S1): 23-33. [方光杰, 孙利元, 唐衍力, 等. 基于刺网和地笼渔获物的人工鱼礁区资源丰度比较研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(S1): 23-33.]
- [28] Rakesh M, Raman A V, Kalavati C, et al. Zooplankton community structure across an eddy-generated upwelling band close to a tropical bay-mangrove ecosystem[J]. *Marine Biology*, 2008, 154(6): 953-972.
- [29] Lpx J, Smilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 43-60.
- [30] Song H J, Zhang Z H, Liu P, et al. Analysis of marine plankton and benthos diversity in the Laizhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(6): 844-851. [宋洪军, 张朝晖, 刘萍, 等. 莱州湾海洋浮游和底栖生物多样性分析[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(6): 844-851.]
- [31] Jiang H C, Chen H G, Song X K, et al. Zooplankton community structure in Jincheng area of Laizhou Bay and its relationship with environmental factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(22): 7308-7319. [姜会超, 陈海刚, 宋秀凯, 等. 莱州湾金城海域浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7308-7319.]
- [32] Yuan X N. Studies on the relationship between the gape size of *Liza haematocheilus* larvae and the planktonic copepods[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. [袁小楠. 渤海湾和莱州湾鲆鱼仔稚鱼口裂与浮游桡足类的关系研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.]
- [33] Zhang S, Shi B J, Xie B, et al. Zooplankton community structure of the sea farming in Haizhou Bay and its relationships with environment factors[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(8): 1410-1418. [张硕, 施斌杰, 谢斌, 等. 连云港海州湾海洋牧场浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1410-1418.]
- [34] Chen T, Wang Y L, Liao Y. The species composition and community structure of zooplankton in Xiangshan Bay[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(7): 41-46. [陈涛, 王云龙, 廖勇. 象山港人工鱼礁区浮游动物种类组成及群落结构特征[J]. 海洋科学, 2014, 38(7): 41-46.]
- [35] Abdul W O, Adekoya E O, Ademolu K O, et al. The effects of environmental parameters on zooplankton assemblages in tropical coastal estuary, south-west, Nigeria[J]. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 2016, 42(3): 281-287.
- [36] Lucena-Moya P, Duggan I C. Correspondence between zooplankton assemblages and the Estuary Environment Classi-

- fication system[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 184: 1-9.
- [37] Dai Y Y, Hou C Q, Yang S, et al. Community structure of zooplankton in artificial reef area of Tianjin seashore and its relationship with environmental factors[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018(5): 163-170. [戴媛媛, 侯纯强, 杨森, 等. 天津海域人工鱼礁区浮游动物群落结构及其与环境因子的相关性研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2018(5): 163-170.]
- [38] Zhang H Y, Liu H C, Liu Y H, et al. Distribution characteristics of zooplankton community in artificial reef area in Zhangzi island[J]. *Fisheries Science*, 2016, 35(5): 473-479. [张皓宇, 刘汉超, 刘永虎, 等. 獐子岛近岸人工鱼礁区浮游动物群落结构特征[J]. *水产科学*, 2016, 35(5): 473-479.]
- [39] Liu X, Pan Y L, Sun B B, et al. Structure of zooplankton community and its relation with environmental factors in Rongcheng adjacent waters[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(10): 177-179, 182. [刘潇, 潘玉龙, 孙蓓蓓, 等. 荣成近岸海域浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *现代农业科技*, 2019(10): 177-179, 182.]
- [40] Froneman P W. Zooplankton community structure and biomass in a southern African temporarily open/closed estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60(1): 125-132.
- [41] Marques S C, Azeiteiro U M, Marques J C, et al. Zooplankton and ichthyoplankton communities in a temperate estuary: Spatial and temporal patterns[J]. *Journal of Plankton Research*, 2006, 28(3): 297-312.
- [42] Froneman P W. Zooplankton community structure and biomass in a southern African temporarily open/closed estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60(1): 125-132.
- [43] Stalder L C, Marcus N H. Zooplankton responses to hypoxia: Behavioral patterns and survival of three species of calanoid copepods[J]. *Marine Biology*, 1997, 127(4): 599-607.
- [44] Wu Y H, Wen Y J, Zhou J X, et al. Phosphorus release from lake sediments: Effects of pH, temperature and dissolved oxygen[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, 18(1): 323-329.
- [45] Wang T, Yu W, Zou X, et al. Zooplankton community responses and the relation to environmental factors from established offshore wind farms within the Rudong coastal area of China[J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 34(4): 843-855.
- [46] Cheng H, Xu B X, Liu Y X, et al. Zooplankton community and its relation to environmental factors in the eastern sea area of Ningde[J]. *Ocean Development and Management*, 2019, 36(8): 18-23. [程宏, 徐炳旭, 刘溢馨, 等. 宁德市东部海域浮游动物群落及其与水环境因子的关系[J]. *海洋开发与管理*, 2019, 36(8): 18-23.]
- [47] Zhang W C, Zhang C X, Xiao T. Role of microzooplankton in marine planktonic ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(11): 1195-1201. [张武昌, 张翠霞, 肖天. 海洋浮游生态系统中小型浮游动物的生态功能[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(11): 1195-1201.]

Zooplankton community structure and its relationship with environmental factors in an artificial reef near Furong Island, Laizhou Bay, Bohai Sea

CHEN Chuanxi¹, ZHANG Jianbo², WANG Xinmeng³, FANG Guangjie¹, WEI Shuangwu¹, YU Mengjie¹, TANG Yanli¹

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

2. Yantai Marine Economic Research Institute, Yantai 264004, China;

3. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: As secondary producers, zooplankton play a key role in cycles of both biological material and energy in the marine ecosystem. Therefore, evaluating community structures and seasonal variations in zooplankton assemblages is important for understanding the ecosystem structure of marine environments. Furong Island is located in Laizhou Bay, China. In 2013, artificial reefs were constructed around Furong Island to improve the marine environment and enhance fisheries resources. To better describe the community structure of zooplankton in this artificial reef area and its relationship with major environmental factors, four cruise surveys were conducted in 2018, including in the spring (March), summer (July), autumn (October), and winter (December). During each survey, conventional environmental factors were monitored and recorded. In the samples collected from the artificial reef area, we identified 34 zooplankton species, including 18 species of Arthropoda, three species of Coelenterata, one species of Chordata, eight species of phytoplankton larvae, two species of Chaetognatha, and two other species of marine insects. We identified 17 main dominant species in the four seasons, with a certain seasonal variation. In the control area, we identified 28 zooplankton species, including 17 species of Arthropoda, one species of Coelenterata, eight species of phytoplankton larvae, and two species of Chaetognatha, and there were 17 main dominant species in the four seasons, with a certain seasonal variation. The Sorensen index showed that the zooplankton species composition and dominant species composition were highly similar between the artificial reef area and the control area, and there were no significant differences in community structures. Zooplankton community parameters (species number, abundance, chlorophyll a concentration, Margalef's richness index, Shannon-Wiener diversity index, and the Pielou evenness index) were not significantly different ($P>0.05$) between the reef and control areas, with the exception of the species number in winter, and significant differences were found among the seasons ($P<0.01$). Environmental factors were also significantly different between seasons, but no differences were found between the reef and control areas. Multidimensional scaling and cluster analyses indicate that zooplankton community composition was very similar between the two areas but significantly different among seasons. Canonical correspondence analysis indicates that environmental factors affect the zooplankton community structure and that silicate, dissolved oxygen, transparency, temperature, dissolved inorganic nitrogen, chlorophyll, salinity, and pH were the main factors affecting the zooplankton community. We believe the results of this study can be used to inform artificial reef construction, management, and fishery resource conservation.

Key words: zooplankton; artificial reef; environmental factor; canonical correspondence analysis; Laizhou Bay

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