

余思滢, 赵祺, 李建都, 等. 河北省祥云湾人工鱼礁区网采浮游植物群落结构的时空变化特征及其与关键环境因子的关系[J]. 海洋学报, 2024, 46(9): 52–63, doi:10.12284/hyxb2024110

Yu Sitian, Zhao Qi, Li Jiandu, et al. Temporal and spatial variation characteristics of net-collected phytoplankton community structure and its relationship with key environmental factors in the artificial reef area of Xiangyun Bay, Hebei Province[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(9): 52–63, doi:10.12284/hyxb2024110

河北省祥云湾人工鱼礁区网采浮游植物群落结构的时空变化特征及其与关键环境因子的关系

余思滢¹, 赵祺¹, 李建都^{2,3}, 招家宝¹, 尤凯¹, 张沛东^{1*}

(1. 中国海洋大学, 海水养殖教育部重点实验室, 青岛 266003; 2. 辽宁省海洋水产科学研究院, 大连 116023; 3. 农业农村部水产种质资源保护与发掘利用重点实验室, 大连 116023)

摘要: 为探究河北省祥云湾人工鱼礁区浮游植物群落结构特征的时空变化规律, 明确人工鱼礁区建设对浮游植物的养护效果及其与环境因子的关系, 于 2021 年 5 月、8 月、11 月和 2022 年 1 月对祥云湾人工鱼礁区及对照区海域开展了网采浮游植物和关键环境因子季度调查。结果表明, 4 个季度共发现浮游植物 3 门 39 属 70 种, 其中硅藻种类数最多 (78.6%); 浮游植物丰度呈现显著季节变化, 夏、秋季丰度最高, 2 处人工鱼礁区浮游植物的年平均丰度为 313.5×10^4 cells/m³, 是对照区浮游植物丰度的 1.4 倍; 除春季外, 人工鱼礁区浮游植物的丰富度指数、多样性指数和均匀度指数均高于对照区, 且礁区春-夏和夏-秋季节礁区优势种更替率低于对照区, 表明人工鱼礁区群落结构相比对照区更稳定; 人工鱼礁区浮游植物主要类群的生物增量指数为 0.9~3.6, 特别是硅藻类群的生物增量指数平均达到 1.8; Pearson 相关性分析显示, 浮游植物丰度主要受 TP、TN、NH₄-N、NO₃-N 和 DIP 的影响, 且各季节之间存在显著差异。研究表明, 人工鱼礁建设对浮游植物具有良好的养护效果, 且养护效果主要与营养盐的时空变化密切相关。

关键词: 浮游植物; 生物增量效果; 时空异质性; 环境驱动; 人工鱼礁

中图分类号: S931.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)09-0052-12

1 引言

浮游植物是海洋初级生产力的重要组成部分, 具有繁殖速度快、生态转换效率高^[1]、对环境变化敏感^[2]的特性, 能够快速响应海域环境的变化, 并通过食物网上行效应调控浮游动物和高营养级渔业生物的群落结构, 因此浮游植物群落结构常被用作监测海域生态环境变化的重要指标^[3-5]。人工鱼礁的投放主要通过改善流场特性^[6]、优化营养盐结构^[7]等方式对浮游

植物产生增益效果。Baine^[8]发现, 人工鱼礁通过营造周边流和上升流, 扰动水体底部营养盐和有机物向上层输送, 给真光层的浮游植物提供丰富的光合作用原料。研究表明, 人工鱼礁建设显著影响浮游植物的群落结构。如李海州^[9]研究发现, 海阳富瀚海洋牧场人工鱼礁区的浮游植物年平均丰度是对照区的 7.1 倍; 杨柳等^[10]调查发现, 海州湾人工鱼礁区的浮游植物多样性指数是对照区的 1.5 倍。

人工鱼礁投放有效地促进了水域环境的改善, 从

收稿日期: 2024-04-22; 修订日期: 2024-05-30。

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2401102)。

作者简介: 余思滢 (1999—), 女, 浙江省金华市人, 主要从事浮游生物学研究。E-mail: 401934384@qq.com

* 通信作者: 张沛东 (1975—), 男, 河北省张家口市人, 教授, 主要从事海洋牧场生境构建和资源养护研究。E-mail: zhangpdsg@ouc.edu.cn

而对浮游植物群落产生显著影响^[11-13]。目前针对祥云湾海洋牧场浮游植物的研究仅涉及单一礁区的调查, 尚未见2处礁区与对照区的对比分析, 也未探究浮游植物群落结构与环境因子的关系。为此, 本研究选取祥云湾海洋牧场2处人工鱼礁区和对照区, 通过4个季度的网采浮游植物和环境因子调查监测, 明确了祥云湾海洋牧场浮游植物群落结构的时空变化特征, 解析了其与环境因子的关系, 以期为海洋牧场人工鱼礁区建设效果评价和基础生物效应研究提供资料。

2 材料与方法

2.1 调查区域

祥云湾海域位于河北省唐山市乐亭县南部, 渤海北部, 地处渤海垂直暖流带与滦河交汇处, 水深6~13 m, 是渤海湾重要的渔业资源产地, 但由于富营养化、生境破坏和过度捕捞的影响, 渔业资源面临平均营养级下降、群体结构小型化、低龄化等突出问题^[14-17]。

为了恢复渔业资源, 唐山海洋牧场实业有限公司于2013年开始在祥云湾开展人工鱼礁投放工作, 并于2015年入选为第一批国家级海洋牧场示范区(河北省祥云湾海域国家级海洋牧场示范区, 以下简称“祥云湾海洋牧场”), 共计建成石块礁区和钢筋混凝土礁区2处, 礁区总面积1.90 km²。其中A礁区于2018年完成投礁, 投礁量为 7.71×10^4 m³, 礁体类型为钢筋混凝土礁, 礁区面积0.57 km²; B礁区于2013-2017年完成投礁, 投礁量为 12.33×10^4 m³, 礁体类型为石块礁, 礁区面积1.33 km²。

2.2 调查时间和站位

调查时间为2021年5月、8月、11月和2022年1月。按照《人工鱼礁资源养护效果评价技术规范》(SC/T 9417-2015)^[18]的要求, 在A礁区、B礁区和对照区分别设置3个调查站位, 其中, A1、A2和A3位于A礁区, B1、B2和B3位于B礁区, C1、C2和C3位于对照区(图1)。

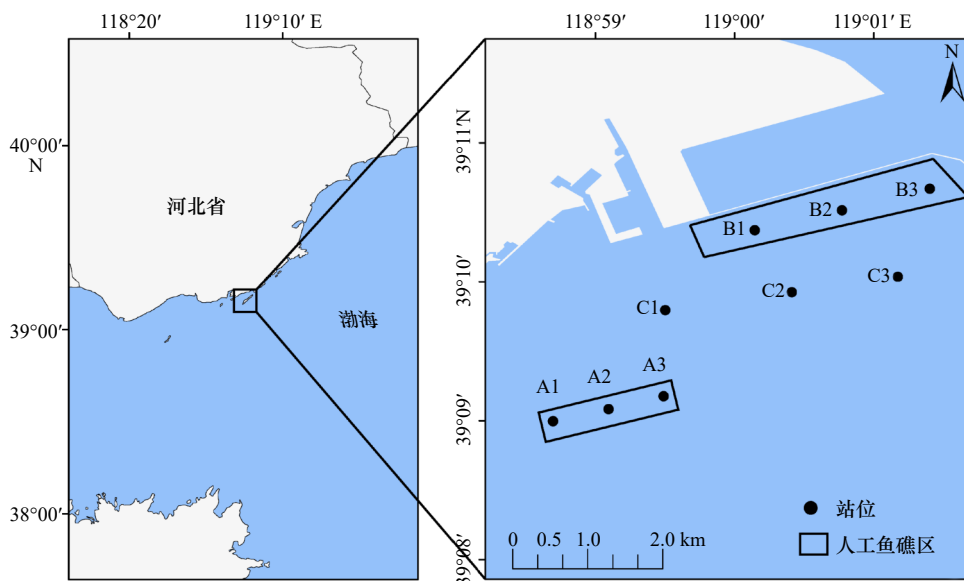


图1 调查站位设置

Fig. 1 Setting of survey stations

2.3 调查内容和测定方法

浮游植物采集使用浅水Ⅲ型浮游生物网(网口直内径37 cm, 网目大小0.077 mm), 每个站位从底层至表层垂直拖网3次, 记录流量计开始和结束读数。浮游植物样品使用Lugol's试剂固定后避光保存, 采集样品均带回实验室并在光学显微镜下进行种类鉴定和计数。

在每个站位点使用YSI6000多参数水质仪同步测量水温(T)、盐度(S)、溶解氧(DO)和酸碱度(pH)

等指标。使用2.5 L采水器在表层下0.5 m处和距离海底2 m处分别采集表层和底层水样, 均匀混合后装入500 mL聚乙烯瓶中, 放在冰桶内4℃保存并在24 h内带回实验室。使用GF/F 47 mm玻璃微纤维滤膜过滤水样, 过滤后的水样用于亚硝态氮(NO_2-N)、氨氮(NH_4-N)、硝态氮(NO_3-N)、磷酸盐(DIP)、总氮(TN)和总磷(TP)质量浓度测定。所有样品的采集、保存及分析均按照中华人民共和国国家标准《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)和《海洋监测规范第3部分:

样品采集贮存和运输》(GB 17378.3-2007)进行^[19-20]。

2.4 数据处理和分析

浮游植物丰度根据采样时的滤水体积,以每立方米海水中细胞数表示(cells/m³)。优势种用浮游植物优势度指数(Y)和优势种更替率(R)^[21]进行分析,本研究中将 $Y \geq 0.02$ 的浮游植物种类定为优势种^[22]。群落结构多样性用丰富度指数(D)、多样性指数(H')和均匀度指数(J)进行分析^[23]。

$$R = \frac{a+b-2c}{a+b-c} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: R 为优势种的季节更替率; a 和 b 分别为相邻两个季节优势种的数量; c 为相邻两个季节共有优势种的个数。

为探究人工鱼礁区建设的资源养护效果,对礁区和对照区的浮游植物丰度进行独立样本 T 检验,筛选出具有显著差异($P < 0.05$)的生物类群,并对这些类群进行生物增量指数(Biological increment index, BII)^[24]的计算,公式如下:

$$\sigma_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 + \frac{CJ_{ji} - \overline{CD}_i}{\overline{CD}_i} \right), \quad (2)$$

$$BII = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sigma_j, \quad (3)$$

式中: σ_j 为礁区第 j 站位的生物增量指数; n 为某生物类群的物种数; m 为礁区总站位数; CJ_{ji} 为礁区第 j 站位的某生物类群第 i 种生物的丰度,单位:cells/m³; \overline{CD}_i 为对照区所有调查站位某生物类群第 i 种生物的平均丰度,单位:cells/m³。当BII值大于1时,表征人工鱼礁建设对浮游植物产生养护效果。

实验数据以平均数 \pm 标准差(Mean \pm SD)表示,使用Excel 2020、IBM SPSS 25软件处理实验数据,不同调查区域和不同季节浮游植物群落参数和环境参数的差异显著性使用单因素方差分析(Oneway-AN-OVA)进行统计学分析,运用独立样本 T 检验对礁区间生物增量指数差异进行分析,显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。使用PRIMER 5计算浮游植物群落参数,使用Pearson相关性分析探究各季节浮游植物丰度与调查海域环境因子之间的相关关系,使用Arcgis 10.8、Origin 2023软件进行调查站位和分析结果的绘图。

3 结果

3.1 环境因子

环境因子呈现显著的季节变化特征,多数环境因子在夏季或秋季达到最大值,而DIP和NH₄-N在春季质量浓度最高,如表1所示。除 T 、 S 和pH外,其余

表1 人工鱼礁区和对照区环境因子的时空变化

Table 1 Spatio-temporal variations of environmental factors in artificial reef areas and control area

环境指标	区域	春季	夏季	秋季	冬季
水温 $T/^\circ\text{C}$	A	16.13 \pm 0.25 ^a	26.83 \pm 0.13 ^a	13.80 \pm 0.20 ^a	1.99 \pm 0.01 ^a
	B	16.05 \pm 0.11 ^a	26.80 \pm 0.13 ^a	13.60 \pm 0.03 ^a	2.00 \pm 0.02 ^a
	C	16.07 \pm 0.12 ^a	26.89 \pm 0.12 ^a	13.65 \pm 0.15 ^a	2.00 \pm 0.03 ^a
盐度 S	A	31.85 \pm 0.78 ^a	29.23 \pm 0.13 ^a	33.75 \pm 0.25 ^a	32.84 \pm 0.29 ^a
	B	32.05 \pm 0.13 ^a	29.40 \pm 0.10 ^a	33.50 \pm 0.02 ^a	32.77 \pm 0.05 ^a
	C	31.95 \pm 0.15 ^a	29.47 \pm 0.16 ^a	33.00 \pm 0.00 ^a	32.77 \pm 0.08 ^a
溶解氧DO 质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	A	8.96 \pm 0.02 ^a	8.74 \pm 0.04 ^b	9.64 \pm 0.07 ^a	7.70 \pm 0.24 ^b
	B	8.75 \pm 0.03 ^a	9.14 \pm 0.04 ^a	9.64 \pm 0.07 ^a	8.09 \pm 0.03 ^a
	C	8.97 \pm 0.21 ^a	8.61 \pm 0.08 ^c	9.62 \pm 0.30 ^a	7.56 \pm 0.30 ^b
酸碱度pH	A	8.12 \pm 0.02 ^a	8.10 \pm 0.02 ^a	7.40 \pm 0.20 ^a	8.04 \pm 0.02 ^a
	B	8.07 \pm 0.07 ^a	8.10 \pm 0.02 ^a	7.20 \pm 0.00 ^a	8.04 \pm 0.02 ^a
	C	8.12 \pm 0.02 ^a	8.14 \pm 0.02 ^a	8.14 \pm 0.03 ^a	8.06 \pm 0.01 ^a
总氮TN 质量浓度/ (10 ⁻¹ mg·L ⁻¹)	A	0.66 \pm 0.04 ^b	2.24 \pm 0.06 ^a	0.90 \pm 0.06 ^b	1.19 \pm 0.30 ^b
	B	0.76 \pm 0.06 ^b	2.31 \pm 0.11 ^a	1.00 \pm 0.09 ^a	1.29 \pm 0.17 ^a
	C	1.13 \pm 0.18 ^a	2.11 \pm 0.04 ^b	1.09 \pm 0.10 ^a	1.18 \pm 0.10 ^b
总磷TP 质量浓度/ (10 ⁻¹ mg·L ⁻¹)	A	0.17 \pm 0.03 ^b	0.29 \pm 0.06 ^a	0.08 \pm 0.01 ^b	0.16 \pm 0.01 ^a
	B	0.17 \pm 0.04 ^b	0.22 \pm 0.05 ^a	0.09 \pm 0.03 ^b	0.14 \pm 0.02 ^b
	C	0.20 \pm 0.02 ^a	0.16 \pm 0.04 ^b	0.12 \pm 0.01 ^a	0.13 \pm 0.01 ^b
无机磷DIP 质量浓度/ (10 ⁻¹ mg·L ⁻¹)	A	0.11 \pm 0.02 ^a	0.06 \pm 0.01 ^b	0.06 \pm 0.01 ^a	0.12 \pm 0.01 ^a
	B	0.09 \pm 0.02 ^b	0.08 \pm 0.01 ^a	0.08 \pm 0.01 ^a	0.10 \pm 0.01 ^a
	C	0.06 \pm 0.04 ^c	0.09 \pm 0.01 ^a	0.09 \pm 0.01 ^a	0.08 \pm 0.01 ^b
氨氮NH ₄ -N 质量浓度/ (10 ⁻¹ mg·L ⁻¹)	A	0.15 \pm 0.01 ^a	0.09 \pm 0.01 ^c	0.04 \pm 0.01 ^b	0.13 \pm 0.03 ^a
	B	0.13 \pm 0.02 ^a	0.16 \pm 0.06 ^a	0.05 \pm 0.01 ^b	0.14 \pm 0.03 ^a
	C	0.17 \pm 0.04 ^a	0.12 \pm 0.04 ^b	0.06 \pm 0.03 ^a	0.11 \pm 0.03 ^a
硝态氮 NO ₃ -N 质量浓度/ (10 ⁻¹ mg·L ⁻¹)	A	0.21 \pm 0.20 ^a	0.02 \pm 0.02 ^c	0.31 \pm 0.01 ^a	0.30 \pm 0.01 ^a
	B	0.06 \pm 0.04 ^a	0.10 \pm 0.01 ^a	0.32 \pm 0.02 ^a	0.33 \pm 0.03 ^a
	C	0.09 \pm 0.03 ^b	0.09 \pm 0.05 ^a	0.26 \pm 0.05 ^b	0.37 \pm 0.05 ^a
亚硝态氮 NO ₂ -N 质量浓度/ (10 ⁻¹ mg·L ⁻¹)	A	0.21 \pm 0.01 ^a	0.28 \pm 0.01 ^a	0.21 \pm 0.01 ^a	0.20 \pm 0.05 ^a
	B	0.18 \pm 0.04 ^a	0.32 \pm 0.06 ^a	0.20 \pm 0.01 ^a	0.21 \pm 0.04 ^a
	C	0.10 \pm 0.03 ^b	0.27 \pm 0.03 ^a	0.27 \pm 0.05 ^a	0.10 \pm 0.05 ^b

A、B和C分别代表A礁区、B礁区和对照区;数字上角a、b、c表示环境因子在相同季节不同调查区域之间存在显著差异($P < 0.05$)。

环境因子在3处调查区之间存在一定的空间差异。其中,人工鱼礁区TN和TP质量浓度在夏季显著高于对照区($P < 0.05$);DIP质量浓度在春季显著高于对照区,平均是其1.7倍,在夏季则低于对照区,平均仅

为对照区的 77.8%。

3.2 浮游植物群落结构

3.2.1 种类组成

四个航次各调查区域共鉴定浮游植物 70 种, 隶属于 3 门 39 属, 其中硅藻门 32 属 55 种, 甲藻门 6 属 14 种, 金藻门 1 属 1 种(图 2)。3 处调查区域浮游植物的物种数均在夏季达到最大值; 相同季节人工鱼礁区和对照区的物种数和种类组成均无显著差异($P > 0.05$)。

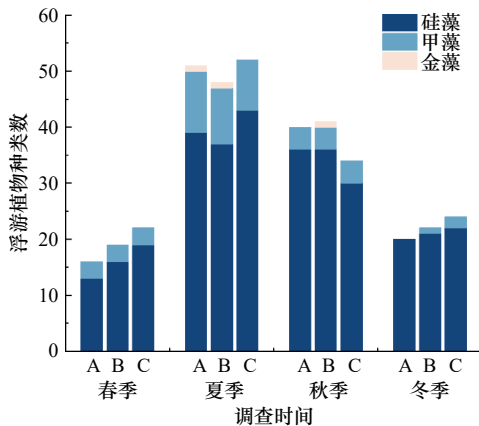


图 2 人工鱼礁区和对照区浮游植物物种数的比较
Fig. 2 Comparison of phytoplankton species numbers in artificial reef areas and control area

A、B 和 C 分别代表 A 礁区、B 礁区和对照区
A, B and C represent reef area A, reef area B and control area, respectively

3.2.2 细胞丰度

浮游植物丰度平均为 $18.3 \times 10^4 \sim 1428.1 \times 10^4$ cells/m³ (图 3)。夏、秋季浮游植物的平均丰度呈现 B 礁区 >

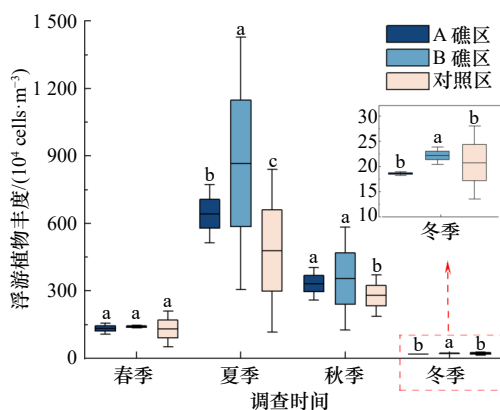


图 3 人工鱼礁区和对照区浮游植物细胞丰度的比较
Fig. 3 Comparison of phytoplankton cell abundance in artificial reef areas and control area

误差线上的不同小写字母表示浮游植物丰度在相同季节不同调查区域之间存在显著差异($P < 0.05$)

Different lowercase letters on the error bars indicate significant differences in phytoplankton abundance between different survey areas in the same season ($P < 0.05$)

A 礁区 > 对照区的趋势, A 礁区和 B 礁区的年平均丰度分别为对照区的 1.3 倍和 1.7 倍, 其中夏季差异最明显。

3.2.3 第 1 优势种

浮游植物第 1 优势种呈现明显的季节变化, 但同一季节各调查区域优势种组成类似, 未见全年优势种(表 2)。优势种更替率为 0.75~1.00(表 3), 各季节 A 礁区浮游植物更替率均低于对照区, 而 B 礁区在高温季节(春-夏, 夏-秋)呈现该特点。表明人工鱼礁区浮游植物群落结构更趋于稳定。

表 2 人工鱼礁区和对照区浮游植物第 1 优势种及优势度指数的时空变化

Table 2 Spatial-temporal variations of the first dominant species and dominance index of phytoplankton in artificial reef areas and control area

时间	区域	第 1 优势种	优势度
春季	A	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	0.48
	B	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	0.38
	C	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	0.45
夏季	A	劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	0.38
	B	劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	0.35
	C	劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	0.33
秋季	A	窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	0.28
	B	旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	0.28
	C	窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	0.21
冬季	A	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	0.34
	B	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	0.39
	C	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	0.53

A、B 和 C 分别代表 A 礁区、B 礁区和对照区。

表 3 人工鱼礁区和对照区浮游植物优势种的季节更替率
Table 3 The seasonal succession rate of the phytoplankton dominant species in artificial reef areas and control area

区域	春-夏	夏-秋	秋-冬	冬-春
A	0.92	0.75	0.88	0.78
B	0.93	0.80	1.00	0.92
C	1.00	0.88	0.91	0.89

A、B 和 C 分别代表 A 礁区、B 礁区和对照区。

3.2.4 群落特征指数

浮游植物群落的多样性指数和丰富度指数呈现夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季的趋势, 而均匀度指数在秋季较高, 春季和夏季较低(图 4)。除春季外, 人工鱼

礁区多样性指数和均匀度指数均高于对照区,且在夏季达到显著水平($P < 0.05$)。人工鱼礁区丰富度指数在秋季显著高于对照区,平均是其1.4倍($P < 0.05$)。

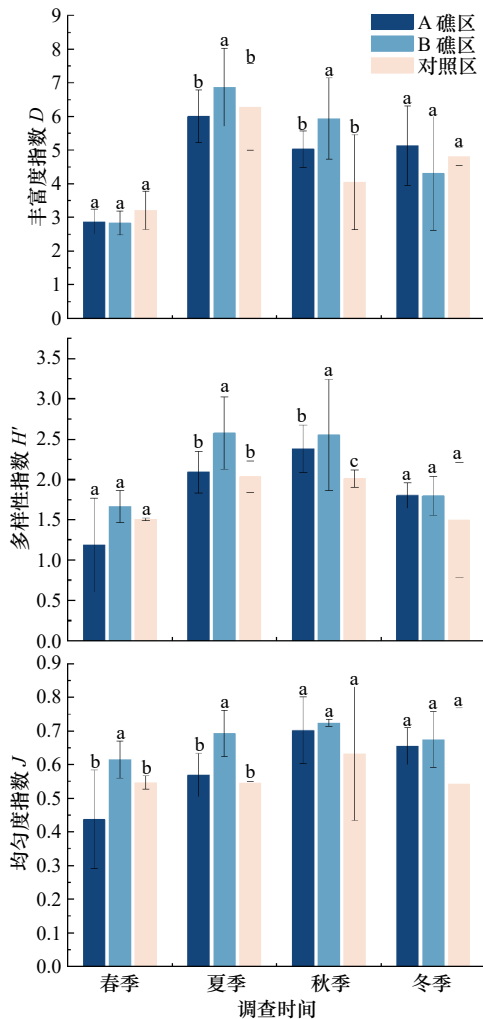


图4 人工鱼礁区和对照区浮游植物群落特征指数的比较

Fig. 4 Comparison of phytoplankton community parameters in artificial reef areas and control area

误差线上的不同小写字母表示浮游植物群落特征指数在相同季节不同调查区域之间存在显著差异($P < 0.05$)

Different lowercase letters on the error bars indicate significant differences in phytoplankton community parameters between different survey areas in the same season ($P < 0.05$)

3.3 浮游生物资源养护效果

3.3.1 礁区和对照区差异类群筛选

为探究人工鱼礁建设对浮游生物的资源养护效果,对A礁区、B礁区和对照区不同浮游植物类群丰度进行独立样本 T 检验(表4)。结果显示,夏、秋季硅藻类群的平均丰度在2处礁区高于对照区,且在夏季差异显著($P < 0.05$)。其中,B礁区对硅藻的资源养护效果最好,年平均丰度为对照区1.6倍。春、

秋季2处礁区对甲藻的资源养护效果均显著优于对照区($P < 0.05$)。

表4 人工鱼礁区和对照区各浮游植物类群丰度的对比

Table 4 Comparison of phytoplankton taxa abundance in artificial reef areas and control area

时间	区域	平均丰度/(10^4 cells· m^{-3})		
		硅藻	甲藻	金藻
春季	A	126.95 ± 27.12^b	4.95 ± 2.85^a	0^a
	B	135.74 ± 8.78^a	4.49 ± 2.82^a	0^a
	C	127.76 ± 80.63^b	2.53 ± 1.17^b	0^a
夏季	A	623.70 ± 121.05^b	19.86 ± 6.64^b	0.002 ± 0.00^a
	B	868.52 ± 168.49^a	15.16 ± 5.91^c	0.003 ± 0.00^a
	C	452.56 ± 158.27^c	26.53 ± 3.21^a	0^a
秋季	A	322.31 ± 73.07^a	8.91 ± 2.18^a	0^b
	B	343.58 ± 223.42^b	10.17 ± 6.33^a	0.08 ± 0.08^a
	C	275.26 ± 91.23^b	3.02 ± 1.15^b	0^b
冬季	A	18.53 ± 0.40^a	0.07 ± 0.07^a	0^a
	B	22.04 ± 1.64^a	0.12 ± 0.10^a	0^a
	C	20.49 ± 7.15^a	0.29 ± 0.21^a	0^a

A、B和C分别代表A礁区、B礁区和对照区;误差线上的不同小写字母表示浮游植物类群丰度在相同季节不同调查区域之间存在显著差异($P < 0.05$)。

在硅藻和甲藻类群中采集到的种类多为赤潮种,为防止人工鱼礁区及周围海域出现赤潮等危害,本文根据陈楠生等^[25]的研究,筛选出两大类群中最常见、且为本研究采集到的赤潮种类,探究人工鱼礁建设对有害藻类资源量的影响,人工鱼礁区和对照区中浮游植物常见赤潮种如表5所示。

3.3.2 生物增量指数

选取具有统计学差异且在各季节出现频率超过75%的类群(硅藻和甲藻)以及3.3.1节中的常见赤潮种进行生物增量指数计算(图5)。结果显示,A礁区和B礁区硅藻和甲藻的生物增量指数为0.9~3.6,总体大于1,说明人工鱼礁建设对浮游植物资源发挥了良好的养护效果。对比可知,2处礁区硅藻生物增量指数范围在1.1~3.6,平均值达1.8,是甲藻该值的1.3倍,表明人工鱼礁对硅藻的资源养护效果优于甲藻。除春季外,B礁区对硅藻类群的增益效果优于A礁区,且在夏、秋季差异显著($P < 0.05$),其生物增量指数分别是A礁区的2.0倍和1.2倍。除夏季外,2处礁区对甲藻类群的增益效果无明显差异($P > 0.05$)。从常见赤潮种看,不同季节不同海域间硅藻

表5 人工鱼礁区和对照区常见赤潮种
Table 5 Common red tide species in artificial reef areas and control area

序号	学名	拉丁文
1	窄隙角毛藻	<i>Chaetoceros affinis</i>
2	旋链角毛藻	<i>Chaetoceros curvisetus</i>
3	柔弱角毛藻	<i>Chaetoceros debilis</i>
4	劳氏角毛藻	<i>Chaetoceros lorenzianus</i>
5	星脐圆筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i>
6	格氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus granii</i>
7	辐射列圆筛藻	<i>Coscinodiscus radiatus</i>
8	威利圆筛藻	<i>Coscinodiscus wailesii</i>
9	布氏双尾藻	<i>Ditylum brightwellii</i>
10	短角弯角藻	<i>Eucampia zodiacus</i>
11	薄壁几内亚藻	<i>Guinardia flaccida</i>
12	具槽帕拉藻	<i>Melosira sulcata/Paralia sulcata</i>
13	中华齿状藻	<i>Odonella sinensis</i>
14	尖刺拟菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>
15	刚毛根管藻	<i>Phizosolenia setigera</i>
16	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>
17	佛氏海线藻	<i>Thalassionema frauenfeldii</i>
18	菱形海线藻	<i>Thalassionema nitzschioides</i>
19	圆海链藻	<i>Thalassiosira rotula</i>
20	叉状角藻	<i>Ceratium furac</i>
21	梭角藻	<i>Ceratium fusus</i>
22	三角角藻	<i>Ceratium tripos</i>

和甲藻赤潮种增量均有不同幅度的增长,特别是秋季硅藻常见赤潮种和甲藻常见赤潮种的生物增量指数达到全年最高值,且高于硅藻类群和甲藻类群的生物增量指数。

3.4 浮游植物群落结构特征与关键环境因子的关系

选取人工鱼礁区和对照区具有统计学差异的环境因子(DO和营养盐)与各调查区域浮游植物丰度进行 Pearson 相关性分析(图6)。结果显示,春季浮游植物丰度在2处礁区与TP呈显著负相关($P < 0.05$),而在对照区与TP呈正相关;夏季各海域浮游植物丰度均与TN呈极显著正相关($P < 0.01$); $\text{NH}_4\text{-N}$ 在2处礁区与浮游植物丰度呈显著负相关($P < 0.05$),而在礁区未达到显著相关水平; $\text{NO}_3\text{-N}$ 在A礁区与浮游植物丰度呈极显著正相关($P < 0.01$),在B礁区和对

照区呈显著正相关($P < 0.05$);秋季各海域浮游植物丰度均与DIP呈显著负相关($P < 0.05$);冬季浮游植物丰度在对照区与DIP呈显著负相关($P < 0.05$),而在2处礁区与DIP呈正相关。

4 讨论

4.1 人工鱼礁建设对浮游植物的养护效果分析

祥云湾海洋牧场人工鱼礁区及其对照区浮游植物种类组成与唐山附近海域浮游植物种类基本相同,硅藻门的种类和丰度占绝对优势^[26]。人工礁区浮游植物年平均丰度为对照区的1.4倍,与张雪等^[27]在天津近岸人工鱼礁区的研究结果一致。各季节2处礁区对硅藻和甲藻类群的生物增量指数总体大于1,表明人工鱼礁建设能够促进浮游植物主要类群的生长繁殖。人工鱼礁的投放会产生上升流、背涡流等复杂流态,促进沉积物的营养盐向水体扩散,并加速底层水和表层水的交换^[28],增加人工鱼礁区海水的营养盐质量浓度,从而促进浮游植物丰度和生物多样性的提高。如杨柳^[29]指出,海州湾人工鱼礁区浮游植物丰度与海水磷酸盐质量浓度呈现正相关,礁区海水磷酸盐平均质量浓度相比对照区提高了1.3倍,浮游植物丰度则为对照区的2.7倍。研究表明,人工鱼礁建设能够提升海水营养盐水平,从而促进浮游植物主要类群的生长繁殖。

本研究发现,人工礁区建设对硅藻类群的增益效果优于甲藻类群,这可能是因为硅藻和甲藻对营养盐(氮、磷)变化的响应模式不同。Xiao等^[30]对东海23个航次2816个浮游植物样品分析发现,硅藻偏好高营养盐,而甲藻对营养盐变化相对不敏感。本研究中礁区TN和TP质量浓度在夏季显著高于对照区,DIP质量浓度在春季显著高于对照区,平均是其1.7倍。营养盐水平差异改变了硅藻-甲藻结构指数,进而影响了礁区对不同浮游植物类群的养护效果。

本研究发现,秋季硅藻常见赤潮种和甲藻常见赤潮种的生物增量指数达到全年最高值,且高于硅藻类群和甲藻类群。这可能是因为秋季更适合赤潮种的生长。调查发现,硅藻和甲藻赤潮种主要出现有角毛藻属(*Chaetoceros*)、圆筛藻属(*Coscinodiscus*)、海链藻属(*Thalassiosira*)。角毛藻属种类能在低温的贫营养状态下通过消耗氮元素实现生长,具有很强的生长能力^[31]。由于2处礁区及对照区离岸较近,且周边有水产养殖、港口等人为因素影响,陆源污染影响较大,氮元素的流入为其提供生长发育充足的营养物质。圆筛藻属属于广温种^[32],在本研究4个季度各海

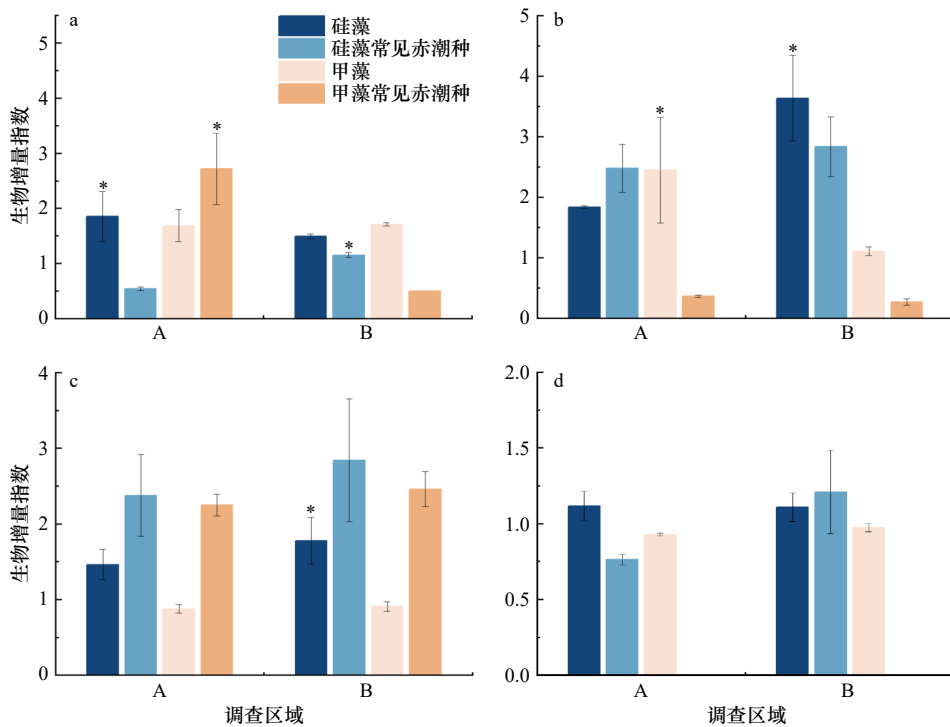


图5 人工鱼礁区春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)生物增量指数

Fig. 5 Biological increment index of artificial reef areas in spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d)

A 和 B 分别代表 A 礁区和 B 礁区; *代表生物增量指数在相同季节不同礁区之间存在显著差异 ($P < 0.05$)

A and B represent reef area A and reef area B, respectively; * represents significant difference in biological increment index between reef area A and reef area B in the same season ($P < 0.05$)

域均有出现。虽然近年来该种类频繁出现,但未见因其暴发赤潮的危害^[25]。海链藻属部分种类也是赤潮的重要组成部分,在渤海曾多次出现^[33]。与圆筛藻属相似的角藻属,特别是三角角藻,其繁殖盛期一般出现在夏季和秋季,在营养条件丰富的状态下可大量生长,但其近期也未发生三角角藻赤潮现象。根据文献显示,营养盐、水温、风素和风向以及流场对赤潮发生有重要影响^[34],但是受2处礁区类型(A礁区:牡蛎礁;B礁区:藻礁)的共同作用,现阶段未发现祥云湾海洋牧场海域有赤潮风险,后续应加强监测预警。

本研究中石块礁区(B礁区)对硅藻的资源养护效果优于钢筋混凝土礁区(A礁区),这可能与礁龄和礁体附着生物等因素有关^[24, 35]。一方面,人工鱼礁的生态效应具有时间积累性。赵荣荣^[36]对长岛挡浪岛人工鱼礁区的调查发现,浮游植物丰度在投礁后呈逐年递增趋势,2015年礁区浮游植物丰度较2013年提高1.4倍。本研究中,石块礁区的平均礁龄达到8.5 a,是钢筋混凝土礁区建礁时间的1.4倍,从而对浮游植物,特别是硅藻发挥了更强的养护作用。另一方面,人工鱼礁对浮游植物的增益效果也受到礁区离岸距离影响。石块礁区(B礁区)更靠近陆地,且礁区附近

有港口存在,导致氮磷的持续输送,由此致使营养盐在礁区间产生差异^[37],进而影响浮游植物的生长发育和礁区间增益效果的不同。

4.2 人工鱼礁建设对浮游植物群落结构特征的影响

各调查海域浮游植物丰富度指数、多样性指数和均匀度指数在夏、秋季达到高峰或次高峰,最低值出现在春季,这与乳山湾海域^[38]、海州湾海洋牧场^[39]的报道相一致。夏、秋季优势种优势度较为平均,多种优势种共同占据优势,而春季圆筛藻和冬季具槽帕拉藻优势度高,在各站位丰度占总丰度的50%以上,导致春、冬季浮游植物丰富度指数和多样性指数低于夏、秋季。

各海域间浮游植物群落参数无明显差异。同样,刘长东等^[40]在海州湾前三岛人工鱼礁区调查也发现,鱼礁区和对照区具有相似的浮游植物群落参数。这可能是由于礁区优势种丰度的快速增加抑制了总物种丰度增长带来的变化,从而掩盖了人工鱼礁对群落结构的增益效果。但多样性指数、丰富度指数和均匀度指数在大多数季节呈现出2处礁区高于对照区的趋势,优势种演替率在对照区高于礁区。李欣宇等^[41]运用 Ecopath 模型对该海域生态系统总体特征进行分

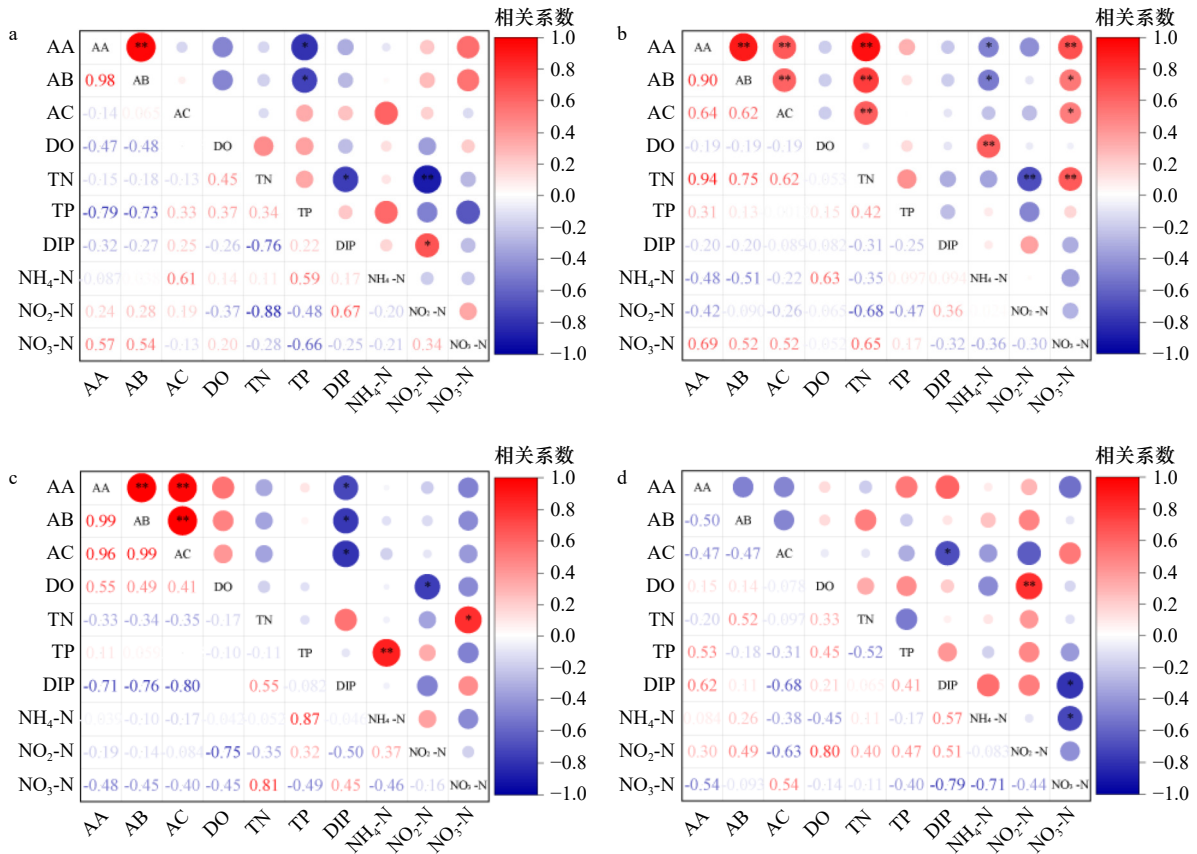


图6 人工鱼礁区和对照区春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)浮游植物丰度与环境因子的相关性分析

Fig. 6 Pearson's correlation analysis between phytoplankton abundance and environmental factors of artificial reef areas and control area in spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d)

AA 代表 A 礁区浮游植物丰度, AB 代表 B 礁区植物丰度, AC 代表对照区浮游植物丰度, DO 代表溶解氧, TN 代表总氮, TP 代表总磷, DIP 代表溶解无机磷, NH₄-N 代表氨氮, NO₂-N 代表亚硝态氮, NO₃-N 代表硝态氮; *代表在 0.05 级别(双尾)相关性显著; **代表在 0.01 级别(双尾)相关性极显著

AA represent phytoplankton abundance in reef area A; AB represent phytoplankton abundance in reef area B; AC represent phytoplankton abundance in control area; DO represent dissolved oxygen; TN represent total nitrogen; TP represent total phosphorus; DIP represent dissolved inorganic phosphorus; NH₄-N represent ammonia nitrogen; NO₂-N represent nitrous nitrogen; NO₃-N represent nitrate nitrogen; * represent significant correlation at 0.05 (two-tailed); ** represent very significant correlation at 0.01 (two-tailed)

析,发现人工鱼礁区生物群落结构的总初级生产量/总呼吸量(TPP/TR)值相较于对照区更加接近 1,礁区生态系统群落结构比对照区更加成熟稳定,也说明人工鱼礁区对群落结构存在一定的正向影响。

4.3 人工鱼礁区浮游植物群落结构特征与关键环境因子关系的解析

本研究发现,TP、DIP 和 TN 等营养盐是调控浮游植物丰度的主要驱动要素。鱼礁投放后,产生的上升流可将底层海水中大量的氮、磷营养盐带至真光层,从而有效促进浮游植物的生长和繁殖^[8]。

磷是浮游植物光合作用和能量转化的必需元素,其质量浓度变化能够影响浮游植物对磷的积累和磷的再生^[42]。浮游植物丰度在 2 处礁区与对照区对 TP、

DIP 的响应存在差异,其中 2 处礁区浮游植物丰度在春、秋季节分别与 TP 和 DIP 的质量浓度呈显著负相关。一方面,鱼礁投放后,产生的上升流可将底层海水的大量磷营养盐带至真光层。如肖荣等^[43]对霞浦方型人工鱼礁区进行数值模拟试验,发现 PO₄-P 的平均垂直通量达到 438.3 mg/(m²·d)。另一方面,A 礁区和 B 礁区礁体的附着牡蛎密度分别达到 1 206.52 ind./m³和 356.67~888.5 ind./m³^[37,44],对浮游植物具有下行调控作用^[45]。诸多研究表明,双壳贝类的排泄作用能加速溶解态的无机磷向水体释放^[46-48],礁区内以牡蛎为主的附着生物通过滤食浮游植物促进自身发育代谢,其代谢物经过微生物的矿化、分解,使得礁区磷质量浓度得到补充^[49]。相对于对照区,礁区浮游植物吸收

更多的磷,这可能是秋季2处礁区浮游植物丰度显著高于对照区的原因。与礁区不同,春季对照区浮游植物丰度均与DIP呈显著正相关。由于海流和热力学平衡的影响^[41],礁区释放的磷元素可向周边区域溢出,增加了周边区域的总磷质量浓度,从而利于浮游植物生长。其他季节浮游植物对DIP的响应略有不同,这可能是由于水温影响了浮游植物对DIP的吸收能力。

浮游植物群落结构及其演替规律还与氮营养盐质量浓度以及营养结构密切相关。本研究发现,夏季TN质量浓度与浮游植物丰度存在显著正相关关系。这是由于礁区离岸较近,在夏季汛期2处礁区和对照区受地表径流和降雨的影响,TN质量浓度在夏季出现全年最高水平,海区氮元素得到大量补充^[50];此外,2处礁区附着牡蛎的代谢活动可产生大量氮^[42],而氮是浮游植物物质合成的必需元素^[51],礁区大量的氮补充促进浮游植物生长繁殖,也保证了氮的可持续利用,进而促进2处礁区浮游植物丰度显著高于对照区。诸多研究表明,浮游植物对氮源的利用具有选择性,角毛藻等硅藻优先吸收 $\text{NH}_4\text{-N}$ ^[52], $\text{NH}_4\text{-N}$ 同化生产

力占氮生产力的50%~80%,而 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 对浮游植物生产的贡献仅为10%~20%或更小^[53],钢筋混凝土礁区DIN中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 占比(72%)高于石块礁区(55%),而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 占比(23%)低于石块礁区(28%),氮营养盐结构的变化可能是石块礁区对浮游植物丰度增益效果优于钢筋混凝土礁区的重要原因。

5 结语

综上所述,人工鱼礁建设能够对浮游植物资源量和群落结构发挥积极的养护效果,其中礁区对硅藻类群的生物增量指数平均值达1.8,礁区优势种更替率小于对照区,养护效果显著;不同礁区网采浮游植物的群落结构特征和养护效果存在差异,海水营养盐的时空异质性是关键影响要素,研究结果可为人工鱼礁投放的生态效应评价提供数据支撑和思路参考。未来可采用网采和水采相结合的方式长期监测浮游植物生物群落变化特征以及人工鱼礁区牡蛎等附着生物对浮游植物的摄食效应,明确环境因子和生物因子对牡蛎礁的响应机制。

参考文献:

- [1] Bathmann U V. Mass occurrence of *Salpa fusiformis* in the spring of 1984 off Ireland: implications for sedimentation processes[J]. *Marine Biology*, 1988, 97(1): 127-135.
- [2] 李清雪,陶建华.应用浮游植物群落结构指数评价海域富营养化[J].*中国环境科学*,1999,19(6):548-551.
Li Qingxue, Tao Jianhua. Application of phytoplankton community indexes in coastal eutrophication assessment[J]. *China Environmental Science*, 1999, 19(6): 548-551.
- [3] Wijeyaratne W M D N, Nanayakkara D B M. Monitoring of water quality variation trends in a tropical urban wetland system located within a Ramsar wetland city: a GIS and phytoplankton based assessment[J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2020, 14: 100323.
- [4] Andrew S M, Strzepek R F, Whitney S M, et al. Divergent physiological and molecular responses of light- and iron-limited Southern Ocean phytoplankton[J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2022, 7(2): 150-158.
- [5] Rodríguez P, Pizarro H. Phytoplankton and periphyton production and its relation to temperature in a humic lagoon[J]. *Limnologica*, 2015, 55: 9-12.
- [6] Seaman W. Artificial Reef Evaluation: with Application to Natural Marine Habitats[M]. Boca Raton: CRC Press, 2000: 1-264.
- [7] Neori A, Ragg N L C, Shpigel M. The integrated culture of seaweed, abalone, fish and clams in modular intensive land-based systems: II. Performance and nitrogen partitioning within an abalone (*Haliotis tuberculata*) and macroalgae culture system[J]. *Aquacultural Engineering*, 1998, 17(4): 215-239.
- [8] Baine M. Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2001, 44(3/4): 241-259.
- [9] 李海州.海阳富瀚海洋牧场生态环境效应评价[D].烟台:烟台大学,2019.
Li Haizhou. Evaluation of the ecological and environmental effects of Haiyang Fuhuan Marine Ranching[D]. Yantai: Yantai University, 2019.
- [10] 杨柳,张硕,孙满昌,等.海州湾人工鱼礁海域春、夏季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J].*生物学杂志*,2011,28(6):14-18.
Yang Liu, Zhang Shuo, Sun Manchang, et al. Community structure of phytoplankton and its relationships with environmental factors in artificial reef area of Haizhou Bay in spring and summer[J]. *Journal of Biology*, 2011, 28(6): 14-18.
- [11] 李志伟,崔力拓.人类活动影响下唐山湾近岸海域营养盐及其结构变化[J].*应用生态学报*,2016,27(1):307-314.
Li Zhiwei, Cui Lituo. Nutrient composition changes in coastal waters of Tangshan Bay, Hebei, China under anthropogenic influence[J].

- Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 307–314.
- [12] 梁森, 姜倩, 孙丽艳, 等. 曹妃甸近岸海域大、中型浮游动物优势种空间生态位研究 [J]. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1241–1250.
Liang Miao, Jiang Qian, Sun Liyan, et al. Spatial niches of dominant macro-zooplankton and meso-zooplankton species in the coastal area of Caofeidian[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(7): 1241–1250.
- [13] 刘西汉, 石雅君, 姜会超, 等. 曹妃甸邻近海域浮游动物群落时空变化及其影响因素 [J]. 海洋科学, 2021, 45(4): 114–125.
Liu Xihan, Shi Yajun, Jiang Huichao, et al. Spatial and temporal variations of zooplankton community and their influential factors in Caofeidian coastal waters[J]. Marine Sciences, 2021, 45(4): 114–125.
- [14] Jakobsen H H, Hansen P J. Prey size selection, grazing and growth response of the small heterotrophic dinoflagellate *Gymnodinium* sp. and the ciliate *Balanion comatum*—a comparative study[J]. Marine Ecology Progress Series, 1997, 158: 75–86.
- [15] Pauly D, Christensen V, Dalsgaard J, et al. Fishing down marine food webs[J]. Science, 1998, 279(5352): 860–863.
- [16] 胥延钊. 渤海渔业生物群落结构特征研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
Xu Yanzhao. Study on the characteristics of structure of community of fishery species in the Bohai Sea[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [17] 杨昊陈. 基于 Ecopath 模型的唐山海洋牧场人工鱼礁区生态效果评估 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2019.
Yang Haochen. Ecological effect evaluation of artificial reef area in Tangshan ocean pasture based on Ecopath model[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2019.
- [18] 中华人民共和国农业部. SC/T 9417–2015, 人工鱼礁资源养护效果评价技术规范 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. SC/T 9417–2015, Technical specification for evaluation of the effects of artificial fish reef[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.
- [19] 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. GB/T 12763–2007, 海洋调查规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB/T 12763–2007, Specifications for oceanographic survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [20] 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. GB 17378.3–2007, 海洋监测规范第 3 部分: 样品采集、贮存和运输 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB 17378.3–2007, The specification for marine monitoring-Part 3: sample collection, storage and transportation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [21] 杨关铭, 何德华, 王春生, 等. 台湾以北海域浮游桡足类生物海洋学特征的研究 II. 群落特征 [J]. 海洋学报, 1999, 21(6): 72–80.
Yang Guanming, He Dehua, Wang Chunsheng, et al. Study on the biological oceanography characteristics of planktonic copepods in the waters north of Taiwan Island II. Community characteristics[J]. Haiyang Xuebao, 1999, 21(6): 72–80.
- [22] 孙军, 刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用 [J]. 海洋学报, 2004, 26(1): 62–75.
Sun Jun, Liu Dongyan. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies[J]. Haiyang Xuebao, 2004, 26(1): 62–75.
- [23] 刘玉明, 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法 (下)[J]. 生物多样性, 1994, 2(4): 231–239.
Liu Yuming, Ma Kepin. Measurement method for biodiversity of biological communities I α methods for measuring diversity (Part 2)[J]. Biodiversity Science, 1994, 2(4): 231–239.
- [24] 李建都, 赵祺, 刘晋冀, 等. 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 [J]. 中国水产科学, 2023, 30(3): 371–383.
Li Jiandu, Zhao Qi, Liu Jinji, et al. 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[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(3): 371–383.
- [25] 陈楠生, 黄海龙. 中国海洋浮游植物和赤潮物种的生物多样性研究进展 (一): 渤海 [J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(2): 346–362.
Chen Nansheng, Huang Hailong. Advances in the study of biodiversity of phytoplankton and red tide species in China (I): the Bohai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2021, 52(2): 346–362.
- [26] 李志伟, 崔力拓. 环境因子对唐山湾海域浮游动物群落结构的驱动作用 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3797–3804.
Li Zhiwei, Cui Lituo. Environmental control of zooplankton community structure in Tangshan Bay, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11): 3797–3804.
- [27] 张雪, 徐晓甫, 戴媛媛, 等. 天津近岸人工鱼礁海域浮游植物群落及其变化特征 [J]. 渔业科学进展, 2018, 39(6): 1–10.
Zhang Xue, Xu Xiaofu, Dai Yuanyuan, et al. Phytoplankton community characteristics and variation at artificial reefs of Tianjin offshore[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(6): 1–10.
- [28] 刘洪生, 马翔, 章守宇, 等. 人工鱼礁流场效应的模型实验 [J]. 水产学报, 2009, 33(2): 229–236.
Liu Hongsheng, Ma Xiang, Zhang Shouyu, et al. Research on model experiments of effects of artificial reefs on flow field[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(2): 229–236.
- [29] 杨柳. 海州湾人工鱼礁区浮游生物变动分析 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
Yang Liu. Variations of plankton in artificial reef area of Haizhou Bay[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011.
- [30] Xiao Wupeng, Liu Xin, Irwin A J, et al. Warming and eutrophication combine to restructure diatoms and dinoflagellates[J]. Water Re-

- search, 2018, 128: 206–216.
- [31] Nishikawa T, Tarutani K, Yamamoto T. Nitrate and phosphate uptake kinetics of the harmful diatom *Eucampia zodiacus* Ehrenberg, a causative organism in the bleaching of aquacultured *Porphyra thalli*[J]. *Harmful Algae*, 2009, 8(3): 513–517.
- [32] 栾青杉, 康元德, 王俊. 渤海浮游植物群落的长期变化 (1959~2015)[J]. *渔业科学进展*, 2018, 39(4): 9–18.
Luan Qingshan, Kang Yuande, Wang Jun. Long-term changes in the phytoplankton community in the Bohai Sea (1959~2015)[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(4): 9–18.
- [33] 陈善文, 高亚辉, 杜虹, 等. 双环海链藻 (*Thalassiosira diporocyclus* Hasle) 赤潮 [J]. *海洋与湖沼*, 2004, 35(2): 130–137.
Chen Shanwen, Gao Yahui, Du Hong, et al. First recording of *Thalassiosira diporocyclus* bloom in the Southeast China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(2): 130–137.
- [34] 张琪, 孙家伟, 冯延竹, 等. 天津沿海赤潮发生的基本特征研究 [J]. *海洋预报*, 2020, 37(1): 62–66.
Zhang Qi, Sun Jiawei, Feng Yanzhu, et al. Research on the basic characteristics of red tide in Tianjin coastal area[J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(1): 62–66.
- [35] 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.
- [36] 赵荣荣. 长岛挡浪岛人工鱼礁生态修复效果初步评价 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.
Zhao Rongrong. Preliminary evaluation on ecological restoration effect of artificial reefs in Danglang Island, Changdao Island[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019.
- [37] 侯润. 祥云湾海洋牧场牡蛎礁构建效果评估 [D]. 秦皇岛: 河北农业大学, 2022.
Hou Run. Effect evaluation of oyster reef construction in Xiangyun Bay marine ranching[D]. Qinhuangdao: Hebei Agricultural University, 2022.
- [38] 崔毅, 陈碧鹃, 马绍赛. 乳山湾浮游植物与环境因子的相关关系研究 [J]. *应用生态学报*, 2000, 11(6): 935–938.
Cui Yi, Chen Bijuan, Ma Shaosai. Correlation of photoplankton and its environmental factors in Rushan Bay[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(6): 935–938.
- [39] 李大鹏, 张硕, 石一茜, 等. 海州湾海洋牧场浮游植物群落年际变化特征分析 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(2): 285–295.
Li Dapeng, Zhang Shuo, Shi Yiqian, et al. Different seasonal changes of phytoplankton community in the marine farming of Haizhou Bay[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(2): 285–295.
- [40] 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 (自然科学版)*, 2016, 46(3): 50–59.
Liu Changdong, Yi Jian, Guo Xiaofeng, 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.
- [41] 李欣宇, 张云岭, 齐遵利, 等. 基于 Ecopath 模型的祥云湾海洋牧场生态系统结构和能量流动分析 [J]. *大连海洋大学学报*, 2023, 38(2): 311–322.
Li Xinyu, Zhang Yunling, Qi Zunli, et al. Analysis of ecosystem structure and energy flow in Xiangyun Bay marine ranching based on Ecopath model[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2023, 38(2): 311–322.
- [42] 周毅, 杨红生, 张福绥. 海水双壳贝类的 N、P 排泄及其生态效应 [J]. *中国水产科学*, 2003, 10(2): 165–168.
Zhou Yi, Yang Hongsheng, Zhang Fusui. Nitrogen and phosphorus excretions by marine bivalves and the ecological effects[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2003, 10(2): 165–168.
- [43] 肖荣, 杨红. 人工鱼礁建设对福建霞浦海域营养盐运输的影响 [J]. *海洋科学*, 2016, 40(2): 94–101.
Xiao Rong, Yang Hong. Influence of artificial reef construction on the transportation of nutrients in the off-shore area of Xiapu, Fujian[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(2): 94–101.
- [44] 王旭. 祥云湾海洋牧场贝藻礁生态系统结构功能研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2022.
Wang Xu. The study of the structure and function of artificial algae-shellfish reef ecosystem at Xiangyun Bay marine ranching[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2022.
- [45] Cloern J E. Does the benthos control phytoplankton biomass in South San Francisco Bay?[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1982, 9: 191–202.
- [46] Prins T C, Smaal A C. The role of the blue mussel *Mytilus edulis* in the cycling of nutrients in the Oosterschelde estuary (The Netherlands)[J]. *Hydrobiologia*, 1994, 282-283: 413–429.
- [47] 张升利, 张安国, 袁秀堂, 等. 底播增殖菲律宾蛤仔碳、氮、磷收支 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1244–1252.
Zhang Shengli, Zhang Anguo, Yuan Xiutang, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus budgets of bottom-cultured clam *Ruditapes philippinarum*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1244–1252.
- [48] 李希磊, 杨俊丽, 于潇, 等. 烟台四十里湾扇贝养殖区浮游植物群落调查 [J]. *海洋科学*, 2018, 42(8): 30–37.
Li Xilei, Yang Junli, Yu Xiao, et al. Investigation of phytoplankton community in the scallop culture area of Sishili Bay in Yantai[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(8): 30–37.
- [49] 周毅, 杨红生, 何义朝, 等. 四十里湾几种双壳贝类及污损动物的氮、磷排泄及其生态效应 [J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(4): 424–431.
Zhou Yi, Yang Hongsheng, He Yichao, et al. Nitrogen and phosphorus excretion and its ecological effect by several bivalves and fouling

- animals[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(4): 424–431.
- [50] 高凤祥. 乳山湾浮游植物群落结构与太平洋牡蛎性成熟的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
Gao Fengxiang. Studies on phytoplankton community structure and sexual maturation of the Pacific Oyster[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.
- [51] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(32): 11254–11258.
- [52] 胡章喜, 徐宁, 段舜山. 不同氮源对 4 种海洋微藻生长的影响 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(10): 2452–2457.
Hu Zhangxi, Xu Ning, Duan Shunshan. Effects of nitrogen sources on the growth of *Heterosigma akashiw*, *Karenia* sp. , *Phaeocystis globosa* and *Chaetoceros* sp. [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10): 2452–2457.
- [53] Harrison W G, Douglas D, Falkowski P, et al. Summer nutrient dynamics of the Middle Atlantic Bight: nitrogen uptake and regeneration[J]. *Journal of Plankton Research*, 1983, 5(4): 539–556.

Temporal and spatial variation characteristics of net-collected phytoplankton community structure and its relationship with key environmental factors in the artificial reef area of Xiangyun Bay, Hebei Province

Yu Sitian¹, Zhao Qi¹, Li Jiandu^{2,3}, Zhao Jiabao¹, You Kai¹, Zhang Peidong¹

(1. Key Laboratory of Mariculture (Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao 266003, China; 2. Liaoning Ocean and Fisheries Science Research Institute, Dalian 116023, China; 3. Key Laboratory of Protection and Utilization of Aquatic Germplasm Resource, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics and spatial-temporal variations of the phytoplankton community in artificial reef areas, as well as to elucidate the relationship between phytoplankton abundance and environmental factors associated with artificial reef construction, four surveys were conducted in 2021 (May, August, November) and 2022 (January) at two artificial reef areas and a control area in Xiangyun Bay. A total of 70 phytoplankton taxa belonging to 39 genera and 3 classes were identified in this study. The annual average abundance of phytoplankton in the artificial reef areas was recorded as 313.5×10^4 cells/m³, which were 1.4 times higher than that observed in the control area. Except in spring, the richness index, diversity index and evenness index of phytoplankton in the artificial reef areas were higher than those in the control area. The succession rate of dominant species from spring to summer and from summer to autumn in the reef areas were lower than that in the control area, suggesting greater stability of community structure within artificial reef areas compared to the control area. The biological increment index for each phytoplankton taxon ranged from 0.9 to 3.6; notably, Bacillariophyta displayed an average biological increment index value of 1.8. Pearson correlation analysis revealed that phytoplankton abundance was primarily influenced by TP, TN, NH₄-N, NO₃-N and DIP; significant seasonal differences were observed among these variables. These findings demonstrate that artificial reef construction has a positive conservation effect on phytoplankton communities closely related to temporal and spatial changes in nutrient availability.

Key words: phytoplankton; biotic augmentation effects; spatiotemporal heterogeneity; environmental driving; artificial reefs