

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.14309

海州湾前三岛人工鱼礁区浮游植物群落组成及与环境因子的关系

刘长东, 郭晓峰, 唐衍力, 盛化香, 黄六一

中国海洋大学 水产学院 海洋渔业系, 山东 青岛 266003

摘要: 通过 2012 年 9 月至 2013 年 8 月对海州湾前三岛人工鱼礁及邻近海域浮游植物 4 个航次的调查, 共鉴定出浮游植物 3 门 35 属 85 种, 其中硅藻门 67 种, 甲藻门 17 种, 金藻门 1 种。春、秋季全区浮游植物丰度(分别为 16.5×10^5 、 13.31×10^5 cell/m³)明显高于夏、冬季(分别为 6×10^5 、 3.8×10^5 cell/m³)。主要优势种有密联角毛藻(*Chaetoceros densus*)、深环沟角毛藻(*Chaetoceros constrictus*)、拟旋链角毛藻(*Chaetoceros pseudocurvisetus*)、细弱圆筛藻(*Coscinodiscus subtilis*)、明壁圆筛藻(*Coscinodiscus debilis*)、卡氏角毛藻(*Chaetoceros castracanei*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、柔弱角毛藻(*Chaetoceros debilis*)等, 其中密联角毛藻为春季的绝对优势种。除春季鱼礁区与对照区浮游植物多样性指数和均匀度指数存在显著性差异外, 其他季节的鱼礁区与对照区浮游植物群落参数(浮游植物种类数、细胞丰度、叶绿素 a 浓度、丰富度指数、多样性指数和均匀度指数)均无显著性差异($P > 0.05$), 但不同季节间浮游植物群落参数存在显著差异($P < 0.01$)。环境因子在鱼礁区与对照区不存在显著差异($P > 0.05$), 但不同季节间存在显著差异($P < 0.05$)。多维尺度和聚类分析表明, 浮游植物的群落组成存在明显的季节差异, 但区域间无显著差异($P > 0.05$)。人工鱼礁区与对照区相似的浮游植物群落结构可能是由于对照区与鱼礁区相距较近、调查范围小、水较深、采样站位靠近岛屿及人工鱼礁投放时间较短等因素引起的。冗余分析(redundancy analysis, RDA)结果表明, 影响浮游植物群落的主要环境因子依次为: 温度、SiO₃-Si、溶解氧(DO)、PO₄-P、生化需氧量(BOD₅)、可溶无机氮(DIN)、化学需氧量(COD)和透明度。

关键词: 浮游植物; 人工鱼礁; 环境因子; 冗余分析; 海州湾

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2015)03-0545-11

浮游植物作为海洋生态的初级生产者, 在地球生态圈中扮演着重要的角色, 保证了生态系统的物质循环和能量流动。浮游植物与生态环境间存在着密切的联系, 内在的或人为的海洋环境变化都会对浮游植物群落结构产生重要影响, 同时浮游植物群落结构变化对海洋环境变化具有指示作用^[1]。例如, 程军利等^[2]在分析海州湾链状裸甲藻(*Gymnodinium catenatum*)赤潮发生前后海水营养盐的变化时发现, 赤潮发生前海州湾近岸严重富营养化; 赤潮发生中, 营养盐中磷的降幅最大; 赤潮发生后, 营养盐浓度逐渐恢复正常水平。

前三岛由位于海州湾的达山岛、平山岛、车牛山岛组成, 渔业资源丰富, 是重要的渔业作业海域。近年来由于密集的捕捞和过度开发, 给海洋生态环境带来巨大的压力, 渔业资源严重衰退^[3]。为了改善该海域的自然生态环境, 修复渔业资源, 山东省政府在日照前三岛附近海域投放人工鱼礁, 礁体构建主要是石块、混凝土构建和报废船只。人工鱼礁主要是为鱼类提供栖息、庇护和产卵场所, 同时人工鱼礁还可以改善水域环境^[4]。人工鱼礁所引起的流态效应可能会通过上升流把海底营养物质带到海面而促进浮游植物的生长, 但这种

收稿日期: 2014-07-17; 修订日期: 2014-09-10.

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203018).

作者简介: 刘长东(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事渔业信息系统研究. E-mail: changdong@ouc.edu.cn

通信作者: 唐衍力, 教授. E-mail: tangyanli@ouc.edu.cn

机制可能会受潮流和水深的影响。目前关于人工鱼礁对鱼类种群的诱集效果^[5-8]和人工鱼礁的流场效应研究^[9-13]较多,但关于人工鱼礁对海洋主要初级生产力的浮游植物群落结构的影响研究相对较少^[14-17]。

本研究根据 2012 年 9 月至 2013 年 8 月对前三岛人工鱼礁区及邻近水域 4 个航次浮游植物调查数据及同步理化数据,比较不同季节(春、夏、秋、冬季)和不同区域(鱼礁区、对照区)浮游植物群落与环境因子的变化,同时利用 R 语言 Vegan 包提供的冗余分析(redundancy analysis, RDA),确定对浮游植物群落具有显著影响的环境因子,探讨该海区人工鱼礁投放对初级生产力的影响,为前三岛海域人工鱼礁修复效果评价提供基础资料。

1 研究区域和方法

1.1 研究区域及数据收集

本研究调查位于海州湾平山岛周边海域(东经 119°52'~119°56', 北纬 35°07'~35°10'), 该海域

潮流具有东北-西南向。人工鱼礁区(图中矩形区域)设置 8 个站位, 分别位于平山岛的南北两侧; 章守宇等^[3]认为鱼礁设置所产生的流场影响范围在水平尺度上一般不超过鱼礁单体大小的 50 倍, 将对照区设置在距鱼礁区最小距离为 850 m 的平山岛西侧, 共 6 个站位(图 1)。每次调查在鱼礁区随机选取 4~7 个站位, 对照区随机选取 3 个站位, 进行浮游植物及同步理化数据的测定。调查时间为 2012 年 9 月、2013 年 1 月、2013 年 5 月和 2013 年 8 月, 对应秋、冬、春、夏 4 个不同季节。浮游植物使用浅水 III 型浮游生物网自底至表作垂直拖网采集, 并使用 Hydro-bios 流量计记录滤水量, 对采集到的浮游植物样品用 5% 甲醛固定保存, 固定好的样品带回实验室鉴定种类、统计数量。同步测量的理化数据包括: 温度(Tem)、盐度(Sal)、透明度(Tra)、生化需氧量(BOD₅)、化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)、SiO₃-Si、PO₄-P、可溶无机氮(DIN)和叶绿素 a(chl-a)。样品采集和分析均按《海洋调查规范》(GB/T12763—2007)^[18]进行。

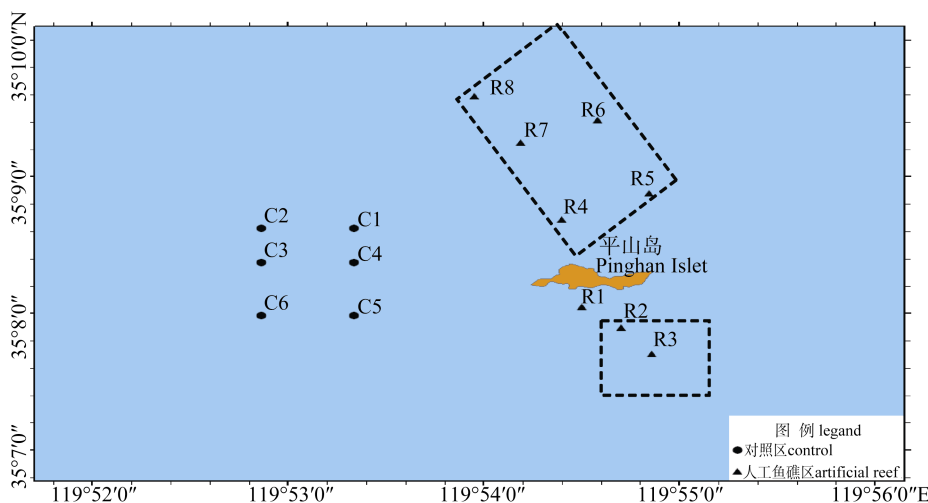


图 1 采样站点

Fig.1 Sampling sites

1.2 数据处理

计算浮游植物群落种类数(S)、Margalef 物种丰富度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Pielou 均匀度指数(J)以及优势度(Y)。优势度 Y

计算公式为: $Y = n_i / N \times f_i$, 其中, n_i 为样品中第 i 种浮游植物的个数, N 为样品中浮游植物的总个体数, f_i 为第 i 种浮游植物出现的概率, 若 $Y \geq 0.02$, 则认定为优势种。对不同区域(鱼礁区、对照区)

和不同季节(春、夏、秋、冬季)浮游植物群落参数(S 、 D 、 H 、 J 、 chl-a 浓度)和环境参数(温度、盐度、透明度、 BOD_5 、 COD 、 DO 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 DIN 、 chl-a)差异的显著性使用 K-W 秩和检验。

应用 R 语言的 *vegan* 包研究浮游植物群落与环境因子的关系时, 需要一个物种数据矩阵和一个环境数据矩阵, 物种数据矩阵和环境数据矩阵都经 $\log(x+1)$ 转换^[19-20]。为简化数据处理, 避免结果的偶然性, 物种数据需经过筛选。本研究用于排序的物种在各站位的出现频率大于 20%, 在至少一个站位的相对丰度大于 1%。通过除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)判断是选择基于单峰模型的典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)还是选择基于线性模型的 RDA 分析, 来探究浮游植物群落结构与环境因子的关系。如 DCA 分析最长轴的长度小于 3, 选择 RDA 模型; 介于 3 到 4 之间, 选择 CCA 和 RDA 模型均可; 大于 4, 选择 CCA 模型^[21]。

2 结果与分析

2.1 浮游植物种类组成

前三岛人工鱼礁区及邻近海域网采的浮游植物共鉴定出 3 门 35 属 85 种, 其中硅藻门最多, 有 28 属 67 种占 79.5%; 甲藻门次之, 有 6 属 17 种占 19.3%; 金藻门最少, 仅有 1 属 1 种占 1.2%, 不同季节的浮游植物种类数见图 2。浮游植物种类

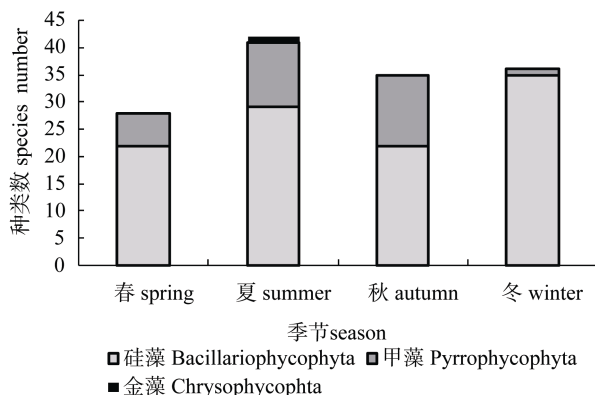


图 2 不同季节浮游植物种类数

Fig.2 Species number of phytoplankton in different seasons

数由多到少依次为: 夏季(42 种)、冬季(36 种)、秋季(35 种)、春季(28 种)。

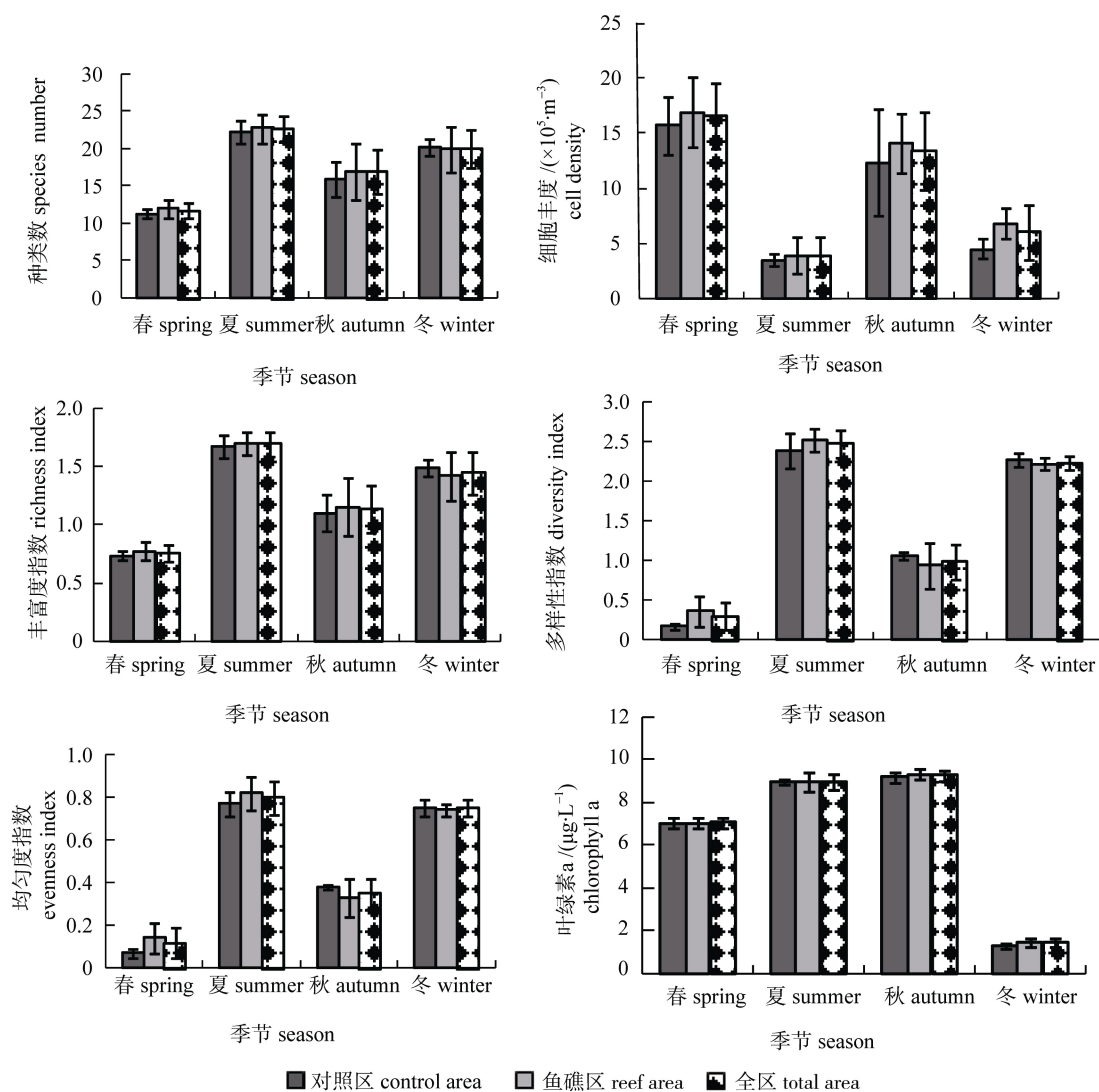
2.2 群落参数

全区浮游植物种类数、细胞丰度、丰富度指数、多样性指数、均匀度指数和叶绿素 a 浓度在不同季节间存在显著差异($P < 0.01$)。其中全区的细胞丰度(细胞密度)在春季和秋季分别达到 $16.5 \times 10^5 \text{ cell/m}^3$ 和 $13.31 \times 10^5 \text{ cell/m}^3$, 明显高于冬季的 $6 \times 10^5 \text{ cell/m}^3$ 和夏季的 $3.8 \times 10^5 \text{ cell/m}^3$ 。丰富度指数夏季达到最高的 1.69, 春季最低为 0.75, 多样性指数和均匀度指数也呈现出夏季最高春季最低的规律。叶绿素 a 浓度春季、夏季、秋季分别为 7.05、8.95、9.27 $\mu\text{g/L}$ 显著高于冬季(1.42 $\mu\text{g/L}$)。

鱼礁区与对照区除春季多样性指数和均匀度指数存在显著性差异, 其余季节鱼礁区与对照区的群落参数不存在显著性差异。鱼礁区春、夏、秋、冬季的细胞丰度分别为 $16.9 \times 10^5 \text{ cell/m}^3$ 、 $3.9 \times 10^5 \text{ cell/m}^3$ 、 $14.05 \times 10^5 \text{ cell/m}^3$ 、 $6.77 \times 10^5 \text{ cell/m}^3$ 略高于对照区 $15.7 \times 10^5 \text{ cell/m}^3$ 、 $3.5 \times 10^5 \text{ cell/m}^3$ 、 $12.33 \times 10^5 \text{ cell/m}^3$ 、 $4.46 \times 10^5 \text{ cell/m}^3$, 但未达到显著水平($P > 0.05$)。鱼礁区春、夏、秋、冬季的叶绿素 a 浓度分别为: 7.06、8.96、9.3、1.47 $\mu\text{g/L}$, 略高于对照区的 7.01、8.94、9.2、1.3 $\mu\text{g/L}$, 但仍未达到显著水平($P > 0.05$)。鱼礁区丰富度指数春、夏、秋、冬季依次为: 0.77, 1.7, 1.15, 1.42; 对照区为: 0.73, 1.67, 1.1, 1.49, 对照区的丰富度指数仅冬季略高于鱼礁区, 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($P > 0.05$)。春季鱼礁区与对照区的多样性指数和均匀度指数存在显著差异($P < 0.05$), 鱼礁区高于对照区(图 3)。

2.3 浮游植物群落优势种

在本研究的调查站位中, 密联角毛藻(*Chaetoceros densus*)、窄隙角毛藻(*Chaetoceros affinis*)、劳氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)、深环沟角毛藻(*Chaetoceros constrictus*)、拟旋链角毛藻(*Chaetoceros pseudocurvisetus*)、叉状角藻(*Ceratium furca*)、粗刺角藻(*Ceratium horridum*)、梭角藻(*Ceratium fusus*)、三角角藻(*Ceratium tripos*)、大角角藻(*Ceratium macroceros*)、细弱圆筛藻(*Coscinodiscus*)

图 3 人工鱼礁区、对照区和全区浮游植物群落参数($\bar{x} \pm SD$)Fig.3 Community parameters of phytoplankton in artificial reef, control and total area($\bar{x} \pm SD$)

subtilis)、明壁圆筛藻(*Coscinodiscus debilis*)、派格棍形藻(*Bacillaria paxillifera*)、卡氏角毛藻(*Chaetoceros castracanei*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、柔弱角毛藻(*Chaetoceros debilis*)、膜状缪氏藻(*Meuniera membranacea*)、棘冠藻(*Corethron criophilum*)共 18 种浮游植物为优势种, 其中甲藻有 5 种, 硅藻 13 种(表 1), 不同季节优势种组成存在明显差异。密联角毛藻在春季和冬季均为优势种, 并且在春季是绝对的优势种, 优势度达到 0.94。

2.4 环境因子

环境因子存在显著的季节变化($P < 0.01$), 如

表 2 所示。全区的溶解氧浓度由高到低依次为: 冬(9.3 mg/L)、春(8.57 mg/L)、秋(8.3 mg/L)、夏(7.6 mg/L); 无机氮与溶解氧浓度季节变化趋势一致; 全区的营养盐(SiO_3-Si 和 PO_4-P)含量表现为冬、春季高于夏、秋季; 全区的透明度由高到低依次为: 夏(4.11 m)、秋(3.52 m)、春(3.44 m)、冬(3.1 m); 全区的盐度变化依次为: 秋(33.4)、夏(32.4)、冬(32.3)、春(31.9); 全区的 BOD_5 、COD 和温度变化表现为夏季和秋季高于春季和冬季。鱼礁区与对照区间环境参数无显著差异($P > 0.05$)。

2.5 浮游植物群落的季节变化

多维尺度和聚类分析表明浮游植物群落组成

表 1 不同季节浮游植物优势种的丰度($\times 10^5$ cell/ m^3)和优势度
 Tab.1 Abundance($\times 10^5$ cell/ m^3) and dominance of phytoplankton dominant species in different seasons

$n=35; \bar{x} \pm SD$

优势种 dominant species	春季 spring		夏季 summer		秋季 autumn		冬季 winter	
	丰度	优势度	丰度	优势度	丰度	优势度	丰度	优势度
	abundance	dominance	abundance	dominance	abundance	dominance	abundance	dominance
密联角毛藻 <i>Chaetoceros densus</i>	15.60 $\pm$ 2.60	0.94	—	—	—	—	0.80 $\pm$ 0.52	0.13
窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	—	—	0.37 $\pm$ 0.28	0.10	—	—	—	—
劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	—	—	0.30 $\pm$ 0.15	0.08	—	—	—	—
深环沟角毛藻 <i>Chaetoceros constrictus</i>	—	—	0.77 $\pm$ 0.37	0.20	—	—	—	—
拟旋链角毛藻 <i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>	—	—	0.46 $\pm$ 0.36	0.12	—	—	—	—
叉状角藻 <i>Ceratium furca</i>	—	—	0.12 $\pm$ 0.10	0.03	—	—	—	—
粗刺角藻 <i>Ceratium horridum</i>	—	—	0.11 $\pm$ 0.07	0.03	—	—	—	—
梭角藻 <i>Ceratium fusus</i>	—	—	0.28 $\pm$ 0.10	0.08	—	—	—	—
三角角藻 <i>Ceratium tripos</i>	—	—	0.20 $\pm$ 0.10	0.05	1.00 $\pm$ 0.26	0.07	—	—
大角角藻 <i>Ceratium macroceros</i>	—	—	0.38 $\pm$ 0.24	0.10	—	—	—	—
细弱圆筛藻 <i>Coscinodiscus subtilis</i>	—	—	—	—	8.40 $\pm$ 3.32	0.63	0.50 $\pm$ 0.16	0.08
明壁圆筛藻 <i>Coscinodiscus debilis</i>	—	—	—	—	3.30 $\pm$ 2.54	0.25	—	—
派格棍形藻 <i>Bacillaria paxillifera</i>	—	—	—	—	—	—	0.10 $\pm$ 0.03	0.05
卡氏角毛藻 <i>Chaetoceros castracanei</i>	—	—	—	—	—	—	0.90 $\pm$ 0.30	0.15
旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	—	—	—	—	—	—	0.60 $\pm$ 0.42	0.09
柔弱角毛藻 <i>Chaetoceros debilis</i>	—	—	—	—	—	—	1.50 $\pm$ 0.66	0.25
膜状缪氏藻 <i>Meuniera membranacea</i>	—	—	—	—	—	—	0.60 $\pm$ 0.31	0.10
棘冠藻 <i>Corethron criophilum</i>	—	—	—	—	—	—	0.14 $\pm$ 0.07	0.02

表 2 人工鱼礁区、对照区和全区的环境因子

Tab.2 Environmental parameters of artificial reef, control and total area

$n=35; \bar{x} \pm SD$

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
BOD/(mg·L ⁻¹)	1.92 $\pm$ 0.10	1.89 $\pm$ 0.08	1.90 $\pm$ 0.08	2.26 $\pm$ 0.26	2.03 $\pm$ 0.18	2.09 $\pm$ 0.22
Tem/°C	14.00 $\pm$ 0.06	14.00 $\pm$ 0.14	14.00 $\pm$ 0.12	24.50 $\pm$ 0.50	25.10 $\pm$ 0.22	24.90 $\pm$ 0.39
COD/(mg·L ⁻¹)	1.83 $\pm$ 0.16	1.44 $\pm$ 0.48	1.55 $\pm$ 0.45	1.93 $\pm$ 0.18	1.82 $\pm$ 0.21	1.85 $\pm$ 0.21
Sal	32.00 $\pm$ 0.00	31.90 $\pm$ 0.35	31.90 $\pm$ 0.30	32.80 $\pm$ 0.58	32.30 $\pm$ 0.46	32.40 $\pm$ 0.54
Tra/m	3.43 $\pm$ 0.06	3.45 $\pm$ 0.22	3.44 $\pm$ 0.19	4.30 $\pm$ 0.61	4.04 $\pm$ 0.97	4.11 $\pm$ 0.87
Sil/(μg·L ⁻¹)	22.94 $\pm$ 0.56	27.13 $\pm$ 2.46	25.99 $\pm$ 2.85	19.44 $\pm$ 0.93	15.38 $\pm$ 4.25	16.49 $\pm$ 4.05
Pho/(μg·L ⁻¹)	4.43 $\pm$ 0.06	4.60 $\pm$ 1.01	4.55 $\pm$ 0.85	4.76 $\pm$ 0.52	4.45 $\pm$ 0.67	4.54 $\pm$ 0.62
DIN/(μg·L ⁻¹)	106.47 $\pm$ 15.65	111.11 $\pm$ 17.94	109.85 $\pm$ 16.71	90.71 $\pm$ 5.04	90.73 $\pm$ 5.18	90.72 $\pm$ 4.89
DO/(mg·L ⁻¹)	8.63 $\pm$ 0.26	8.55 $\pm$ 0.30	8.57 $\pm$ 0.28	7.53 $\pm$ 0.33	7.62 $\pm$ 0.28	7.60 $\pm$ 0.28
参数	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
BOD (mg·L ⁻¹)	1.97 $\pm$ 0.05	2.14 $\pm$ 0.29	2.09 $\pm$ 0.26	1.46 $\pm$ 0.22	1.33 $\pm$ 0.30	1.36 $\pm$ 0.28
Tem/°C	25.00 $\pm$ 0.00	25.00 $\pm$ 0.05	25.00 $\pm$ 0.05	4.50 $\pm$ 0.06	4.40 $\pm$ 0.09	4.40 $\pm$ 0.08
COD/(mg·L ⁻¹)	2.06 $\pm$ 0.28	1.93 $\pm$ 0.29	1.97 $\pm$ 0.28	1.35 $\pm$ 0.26	1.31 $\pm$ 0.20	1.32 $\pm$ 0.20
Sal	33.30 $\pm$ 0.58	33.40 $\pm$ 0.68	33.40 $\pm$ 0.63	31.80 $\pm$ 0.29	32.50 $\pm$ 1.10	32.30 $\pm$ 0.98
Tra/m	3.20 $\pm$ 0.10	3.64 $\pm$ 0.30	3.52 $\pm$ 0.33	3.50 $\pm$ 0.00	2.95 $\pm$ 0.46	3.10 $\pm$ 0.46
Sil/(μg·L ⁻¹)	22.21 $\pm$ 3.54	19.45 $\pm$ 5.69	20.20 $\pm$ 5.18	78.11 $\pm$ 4.15	67.35 $\pm$ 6.15	70.82 $\pm$ 7.43
Pho/(μg·L ⁻¹)	1.58 $\pm$ 0.42	2.68 $\pm$ 1.46	2.38 $\pm$ 1.34	10.06 $\pm$ 2.53	13.51 $\pm$ 4.83	12.57 $\pm$ 4.50
DIN/(μg·L ⁻¹)	111.64 $\pm$ 32.40	106.86 $\pm$ 16.35	108.16 $\pm$ 20.05	143.43 $\pm$ 13.51	143.37 $\pm$ 19.64	143.39 $\pm$ 17.51
DO/(mg·L ⁻¹)	8.30 $\pm$ 0.13	8.31 $\pm$ 0.26	8.30 $\pm$ 0.22	9.43 $\pm$ 0.14	9.25 $\pm$ 0.09	9.30 $\pm$ 0.13

注: BOD: 生化需氧量; Tem: 温度; COD: 化学需氧量; Sal: 盐度; Tra: 透明度; Sil: SiO₃-Si; Pho: PO₄-P; DIN: 可溶无机氮; DO: 溶解氧。

Note: BOD: biochemical oxygen demand; Tem: temperature; COD: chemical oxygen demand; Sal: salinity; Tra: transparency; Sil: SiO₃-Si; Pho: PO₄-P; DIN: dissolved inorganic nitrogen; DO: dissolved oxygen.

存在明显的季节差异(图 4-5)。多维尺度分析结果表现为各调查站位按季节聚集的特征, Stress 值为 0.08, 表明分组适合度良好^[22](图 4); 聚类分析可得出与多维尺度分析相似的结果, 调查站位在同一季节浮游植物组成的相似度较高, 但不同季节间, 相似度较低(图 5)。

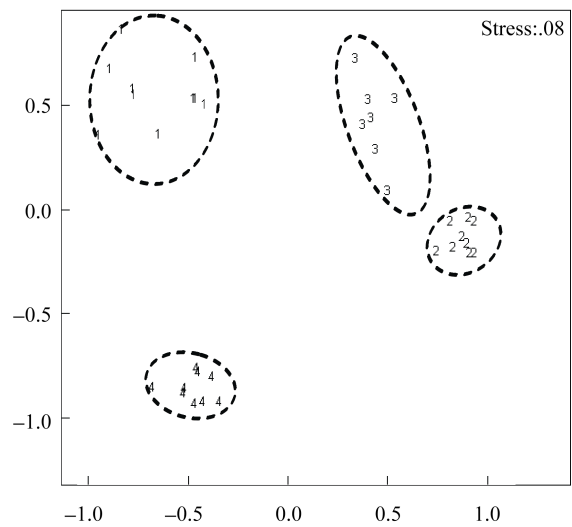


图 4 不同站位浮游植物的多维标度分析
1, 2, 3, 4 分别为春季, 夏季, 秋季, 冬季采样记录。
Fig.4 Multidimensional scaling of phytoplankton of different sites
1, 2, 3, 4: sampling records of spring, summer, autumn, winter.

2.6 浮游植物群落与环境因子的关系

根据出现频率及相对丰度, 用于排序的浮游植物种群见表 3。浮游植物种群矩阵的 DCA 分析结果表明, 最长轴的长度(2.99)小于 3, 故选择 RDA 进行浮游植物种群与环境因子关系研究。9 个环境因子对浮游植物群落的解释显著($P<0.01$), 总解释量为 68.8%, 说明选取的环境因子合理。环境因子前两个轴的特征值分别为 270.85 和 72.24, 对环境数据的解释量分别为 67.3%和 18%, 累积解释量为 85.3%, 说明前两个轴在很大程度上可以反映环境数据的变化。环境因子与浮游植物种群的二维排序图如图 6, 箭头表示各个环境因子, 箭头与原点连线的长短表示浮游植物种群与环境因子相关性的大小。基于蒙特卡罗检验, 各环境因子的显著性如表 4 所示。

除盐度外其他 8 个环境因子对浮游植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: 温度、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、 DO 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 BOD_5 、 DIN 、 COD 和透明度。春季第一优势种密联角毛藻(s5)丰度与 DIN 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和 DO 成正相关, 而与透明度和 COD 成负相关。夏季第一优势种深环沟角毛藻(s25)与透明度和 COD 成正相关关系, 与可溶无

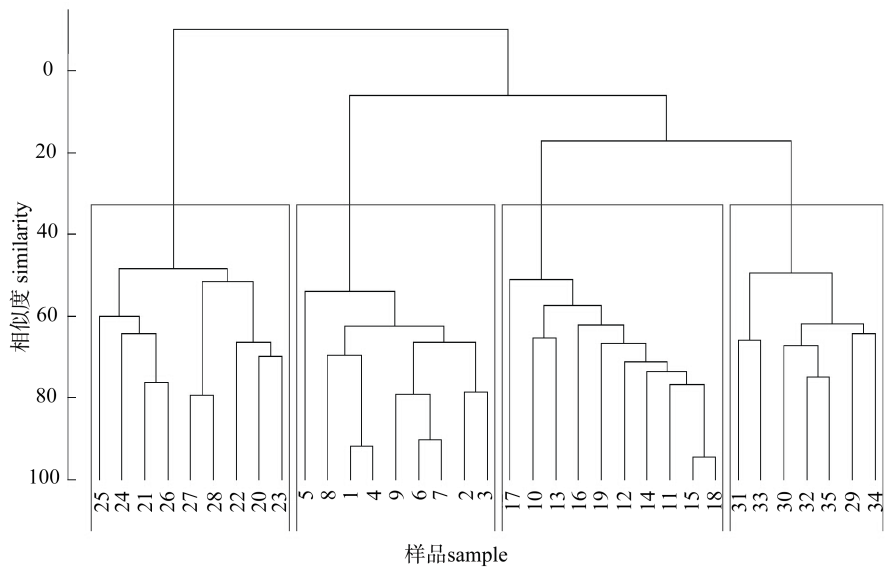


图 5 不同站位浮游植物的聚类分析
1-9: 冬季样品; 10-19: 春季样品; 20-28: 夏季样品; 29-35: 秋季样品。
Fig.5 Cluster analysis of phytoplankton of different sites
1-9: winter samples; 10-19: spring samples; 20-28: summer samples; 29-35: autumn samples.

表 3 RDA 排序中浮游植物种类代码
Tab.3 Codes of phytoplankton species for RDA ordination

编号 code	种类 species	编号 code	种类 species
s1	派格棍形藻 <i>Bacillaria paxillifera</i>	s16	梭角藻 <i>Ceratium fusus</i>
s2	卡氏角毛藻 <i>Chaetoceros castracanei</i>	s17	叉状角藻 <i>Ceratium furca</i>
s3	旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	s18	粗刺角藻 <i>Ceratium horridum</i>
s4	柔弱角毛藻 <i>Chaetoceros debilis</i>	s19	三角角藻 <i>Ceratium tripos</i>
s5	密联角毛藻 <i>Chaetoceros densus</i>	s20	大角角藻 <i>Ceratium macroceros</i>
s6	棘冠藻 <i>Corethron criophilum</i>	s21	斯氏扁甲藻 <i>Pyrophacus steinii</i>
s7	明壁圆筛藻 <i>Coscinodiscus debilis</i>	s22	星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i>
s8	细弱圆筛藻 <i>Coscinodiscus subtilis</i>	s23	窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>
s9	太阳双尾藻 <i>Ditylum sol</i>	s24	劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>
s10	膜状缪氏藻 <i>Meuniera membranacea</i>	s25	深环沟角毛藻 <i>Chaetoceros constrictus</i>
s11	菱形藻属 <i>Nitzschia hassal</i> sp.	s26	拟旋链角毛藻 <i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>
s12	翼根管藻 <i>Rhizosolenia alata</i>	s27	优美辐杆藻 <i>Bacteriastum delicatulum</i>
s13	佛氏海线藻 <i>Thalassionema frauenfeldii</i>	s28	薄壁几内亚藻 <i>Guinardia flaccida</i>
s14	膜质舟形藻 <i>Navicula membranacea</i>	s29	格氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus granii</i>
s15	夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>		

表 4 各环境因子对浮游植物丰度影响的显著性
Tab.4 Significance of effects of each environmental factor on phytoplankton abundance

环境因子 environmental factor	RDA1	RDA2	r^2	P	显著性 significance
温度 temperature	0.97	-0.23	0.98	0.001	**
盐度 salinity	0.97	0.25	0.01	0.860	
透明度 transparency	0.99	0.10	0.19	0.040	*
COD chemical oxygen demand	1.00	-0.06	0.32	0.001	**
BOD ₅ biochemical oxygen demand	0.97	-0.25	0.67	0.001	**
SiO ₃ -Si silicate	-0.98	0.21	0.89	0.001	**
PO ₄ -P phosphate	-0.87	0.49	0.76	0.001	**
无机氮 dissolved inorganic nitrogen	-1.00	0.05	0.55	0.001	**
DO dissolved oxygen	-1.00	-0.10	0.85	0.001	**

注: RDA1, RDA2: 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 : 相关性的显著性; **: $P<0.01$, *: $P<0.05$.
Note: RDA1, RDA2: correlation between environmental factors and the ordination axes; r^2 : coefficient of environmental factors and species distribution; P : significance of correlation; **: $P<0.01$, *: $P<0.05$.

机氮和 DO 成负相关关系。秋季第一优势种细弱圆筛藻(s8)位于排序图的原点附近, 与各环境因子没有明显的相关性。冬季第一优势种柔弱角毛藻(s4)与 PO₄-P 和 SiO₃-Si 成正相关, 与 BOD 和温度成明显的负相关。

3 讨论

3.1 浮游植物群落的变化

前三岛人工鱼礁及邻近海域浮游植物优势种在春、秋和冬季主要为硅藻, 在夏季优势种为硅

藻和甲藻。调查时间内, 浮游植物群落优势种存在明显的季节更替。密联角毛藻是春季唯一的优势种, 且为绝对优势种, 在各站位的细胞丰度占总丰度的 90%以上; 夏季的优势种较平均, 多种优势种共同占据优势; 秋季的优势种有细弱圆筛藻、明壁圆筛藻和三角角藻, 其中细弱圆筛藻占绝对优势; 冬季的优势种又比较平均。由于春季密联角毛藻的爆发性繁殖, 导致春季的浮游植物丰富度指数、多样性指数及均匀度指数显著低于夏、秋、冬季; 秋季的细弱圆筛藻占绝对优势, 同

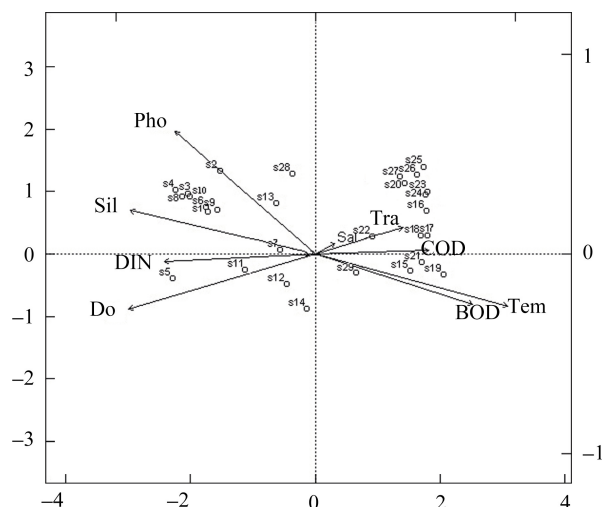


图 6 主要浮游植物种类与环境因子间的 RDA 排序图
BOD: 生化需氧量; Tem: 温度; COD: 化学需氧量; Sal: 盐度;
Tra: 透明度; Sil: $\text{SiO}_3\text{-Si}$; Pho: $\text{PO}_4\text{-P}$; DIN: 可溶无机氮;
DO: 溶解氧。

Fig.6 RDA ordination of main phytoplankton species with environmental factors

Note: BOD: biochemical oxygen demand; Tem: temperature; COD: chemical oxygen demand; Sal: salinity; Tra: transparency; Sil: $\text{SiO}_3\text{-Si}$; Pho: $\text{PO}_4\text{-P}$; DIN: dissolved inorganic nitrogen; DO: dissolved oxygen.

时明壁圆筛藻也有较高优势, 导致秋季的浮游植物丰富度指数、多样性指数及均匀度指数低于优势种较均匀的夏、冬季。浮游植物细胞丰度春、秋季明显高于夏、冬季, 但叶绿素 a 浓度夏、秋季最高, 春季次之, 冬季最低, 说明浮游植物细胞数量与叶绿素 a 浓度并不一致, 这可能是由于尽管夏季浮游植物的细胞丰度较低, 但优势种的细胞体积较大(chl-a 含量高); 春季浮游植物的细胞丰度较高, 但优势种细胞体积较小(chl-a 含量低)。

3.2 鱼礁区与对照区浮游植物群落结构的比较

多尺度及聚类分析显示浮游植物群落结构存在明显的季节差异, 但鱼礁区与对照区在各季节聚集在一起, 说明鱼礁区和对照区浮游植物群落没有明显的差异。人工鱼礁投放可能产生的上升流把海底的营养盐带到阳光充足的海面, 而有利于浮游植物的生长和繁殖, 但这种机制可能受潮流及水深的影响。江志兵等^[16]在比较象山港人工鱼礁和对照区四个季节浮游植物群落参数时, 发现区域间没有显著差异。本研究区域与象山港有一些相似的地理特性: 调查区域较小并靠近岛屿,

岛屿及潮流对浮游植物空间分布可能影响较大; 人工鱼礁投放时间较短, 人工鱼礁区与对照区空间距离较近, 其辐射范围可能通过潮流影响对照区。同时, 本研究区域水较深(>20 m), 较深的水深及潮流, 可能会使人工鱼礁对表层浮游植物的影响范围扩大。廖秀丽等^[17]通过 2007—2009 年 3 个航次春季大亚湾的调查数据, 也发现人工鱼礁区和对照区具有相似的浮游植物群落结构。本研究中, 虽然鱼礁区和对照区的浮游植物群落参数没有显著差异, 但鱼礁区的叶绿素浓度、浮游植物细胞丰度和多样性指数都高于对照区, 这说明人工鱼礁投放在一定程度上还是提高了该海区的初级生产力水平。孙习武等^[23]对于海州湾人工鱼礁海域鱼类和大型无脊椎动物的研究表明, 鱼礁投放后其增殖的效果是明显的, 对生态和渔业资源修复有积极影响。人工鱼礁投放而产生的生态效应, 可能需要长时间的积累才能体现。

3.3 环境因子对浮游植物群落的影响

环境因子对浮游植物变动的总解释量为 68.8%, 前两个轴占总解释量的 85.2%(第一轴占 67.3%, 第二轴占 17.9%), 故前两个轴对浮游植物变动的总解释量为 58.6%。RDA 分析是主成分分析(principal component analysis, PCA)的限制形式, 故比较 PCA 与 RDA 分析前两个轴解释量的差异, 可以判断 RDA 分析选择的解释变量是否合理。种群数据经 PCA 分析, 结果显示前两个轴的累积解释量为 72.5%, 这说明只有 14% 的变动, 在 RDA 分析中没有被前两个轴解释, 前两个轴的解释量较高。选取的环境因子中, 只有盐度不显著, 这是由于调查区域受地表径流影响小, 盐度的季节变化相对较小, 没有限制浮游植物的分布。环境因子的交互作用、浮游动物的下行效应都会影响浮游植物的分布, 这些都有待以后进一步研究。作为海州湾赤潮生物种之一的密联角毛藻^[24], 与 DIN、DO 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 成正相关, 而与透明度和 COD 成负相关。春、冬季的 DIN、DO 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度都高于夏、秋季; 同时, 透明度和 COD 低于夏、秋季, 故密联角毛藻是春、冬季的优势种。同样是海州湾赤潮生物种之一的细弱圆

筛藻, 在秋、冬季为优势种, 并在秋季为绝对优势种, 但本研究没有找出显著影响细弱圆筛藻分布的环境因子, 这需在以后测量更多的环境因子及考虑生物的下行效应, 再做进一步分析。

参考文献:

- [1] Round F E. The Ecology of Algae[M]. London: Cambridge University Press, 1981: 1–653.
- [2] Cheng J L, Zhang Y, Zhang D, et al. Analysis of ecological environment elements during the red tide occurring in Haizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(2): 217–223.[程军利, 张鹰, 张东, 等. 海州湾赤潮发生期生态环境要素分析[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(2): 217–223.]
- [3] Zhang S Y, Zhang H J, Jiao J P, et al. Change of ecological environment of artificial reef waters in Haizhou Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(4): 475–480.[章守宇, 张焕君, 焦俊鹏, 等. 海州湾人工鱼礁海域生态环境的变化[J]. 水产学报, 2006, 30(4): 475–480.]
- [4] Zhou Y B, Cai W G, Chen H G, et al. The mechanism and research progress of 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.]
- [5] Zhang S, Sun M C, Chen Y. The attractive effects of different structural artificial reef models on juvenile Schlegels rockfish *Sebastes schlegeli* and fat greenling *Hexagrammos otakii*[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2008, 23(1): 13–19.[张硕, 孙满昌, 陈勇. 人工鱼礁模型对大泷六线鱼和许氏平鲈幼鱼个体的诱集效果[J]. 大连水产学院学报, 2008, 23(1): 13–19.]
- [6] Wang Z H, Zhang S Y, Wang K, et al. A preliminary study on fish and macroinvertebrate enhancement in artificial reef area around Sanheng Isle, Shengsi, China[J]. Journal of fisheries of China, 2010, 34(5): 751–759.[汪振华, 章守宇, 王凯, 等. 三横山人工鱼礁区鱼类和大型无脊椎动物诱集效果初探[J]. 水产学报, 2010, 34(5): 751–759.]
- [7] Zhou Y B, Cai W G, Chen H G, et al. Attraction effect of various artificial reef models on *Sparus macrocephalus*[J]. Journal of fisheries of China, 2011, 35(5): 711–718.[周艳波, 蔡文贵, 陈海刚, 等. 10 种人工鱼礁模型对黑鲷幼鱼的诱集效果[J]. 水产学报, 2011, 35(5): 711–718.]
- [8] Zhou Y B, Cai W G, Chen H G, et al. Attractive effect of combination of artificial reef models on young *Lutjanus argentimaculatus* in experimental tank[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2012, 31(2): 231–237.[周艳波, 蔡文贵, 陈海刚, 等. 试验水槽中多种人工鱼礁模型组合对紫红笛鲷幼鱼的诱集效果[J]. 台湾海峡, 2012, 31(2): 231–237.]
- [9] Liu H S, Ma X, Zhang S Y, 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.[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.]
- [10] Li J, Zhang S Y. The comparison between numerical simulation and water channel experiment on an Mi-Zi artificial reef[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(10): 1587–1593.[李珺, 章守宇. 米字型人工鱼礁流场数值模拟与水槽实验的比较[J]. 水产学报, 2010, 34(10): 1587–1593.]
- [11] Zheng Y X, Guan C T, Song X F, et al. Numerical simulation on flow field around star artificial reefs[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(19): 185–193.[郑延璇, 关长涛, 宋协法, 等. 星体型人工鱼礁流场效应的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 185–193.]
- [12] Zheng Y X, Liang Z L, Guan C T, et al. Numerical simulation and experimental study on flow field of artificial reefs in three tube-stacking layouts[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(1): 11–19.[郑延璇, 梁振林, 关长涛, 等. 三种叠放形式的圆管型人工鱼礁流场效应数值模拟与 PIV 试验研究[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(1): 11–19.]
- [13] Fu D W, Chen Y, Chen Y S, et al. PIV experiment of artificial monomer reefs on the flowing field[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2014, 29(1): 82–85.[付东伟, 陈勇, 陈衍顺, 等. 方形人工鱼礁单体流场效应的 PIV 试验研究[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(1): 82–85.]
- [14] 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.]
- [15] Yang L, Zhang S, Sun M C, 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.[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.]
- [16] Jiang Z B, Chen Q Z, Shou L, et al. Community composition of net-phytoplankton and its relationship with the environmental factors at artificial reef area in Xiangshan Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5813–5824.[江志兵, 陈全震, 寿鹿, 等. 象山港人工鱼礁区的网采浮游植物群

- 落组成及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5813–5824.]
- [17] Liao X L, Chen P M, Ma S W, et al. Community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors before and after construction of artificial reefs in Yangmeikeng, Daya Bay[J]. South China Fisheries Science, 2013, 9(5): 109–119.[廖秀丽, 陈丕茂, 马胜伟, 等. 大亚湾杨梅坑海域投礁前后浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 南方水产科学, 2013, 9(5): 109–119.]
- [18] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. GB/T12763.9-2007 Marine Investigation Criterion[S]. Beijing: China standard press, 2007.[国家质量监督检验检疫局. GB/T12763-2007 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [19] Muylaert K, Sabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium)[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 2000, 50: 673–687.
- [20] Flores L N, Barone R. Phytoplankton dynamics in two reservoirs with different trophic state (Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy)[J]. Hydrobiologia, 1998, 369/370: 163–178.
- [21] Lpx J, Smilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 43–60.
- [22] Manly B F J. Multivariate statistical methods: A primer[M]. 3rd ed. Boca Raton: F L Chapman & Hall/CRC Press, 2004: 1–224.
- [23] Sun X W, Zhang S, Zhao Y Q, et al. Community structure of fish and macro invertebrates in the artificial reef sea area of Haizhou Bay[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(4): 505–513.[孙习武, 张硕, 赵裕青, 等. 海州湾人工鱼礁海域鱼类和大型无脊椎动物群落组成和结构特征[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(4): 505–513.]
- [24] Jiao X M, Xu H, Hua W H, et al. The red tide organisms in Haizhou Bay[J]. Journal of Aquaculture, 2010, 31(5): 25–29.[矫新明, 徐虹, 花卫华, 等. 海州湾海域的赤潮生物[J]. 水产养殖, 2010, 31(5): 25–29.]

Phytoplankton community composition and its relationship with environmental factors in the artificial reef area around the Qiansan Islets, Haizhou Bay

LIU Changdong, GUO Xiaofeng, TANG Yanli, SHENG Huaxiang, HUANG Liuyi

Ocean Fisheries Department, Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

Abstract: As primary producers, phytoplankton play an important role in ensuring the laws of material recycling and energy flow in aquatic ecosystems. Phytoplankton abundance and community structure are indicators of the marine environment. Thus, they influence fisheries resources through a bottom-up effect. The Qiansan Islets have been rich in fisheries resources for a long time, but over-fishing and environmental degradation have put tremendous pressure on this marine ecosystem in recent years. Thus, the local government conducted an artificial reef construction project beginning in 2005 to improve the marine environment and enhance fisheries resources. In this study, we used multivariate statistical analysis to compare phytoplankton community structure at different times (four seasons) and locations (artificial reef and control areas) to assess primary production in this region after constructing an artificial reef. Four cruise survey samplings were carried out at the artificial reef island and the adjacent waters around the Qiansan Islets in Haizhou Bay from September 2012 to August 2013. Eighty-five species in 35 genera and three phyla were identified, including 67 species of Bacillariophycophyta, 17 species of Pyrrophytocyta, and one species of Chrysophycophyta. Phytoplankton abundance values in spring and autumn (16.5×10^5 and 13.31×10^5 cells/m³, respectively) were significantly higher than those in summer and winter (6×10^5 and 3.8×10^5 cells/m³, respectively). The dominant species included *Chaetoceros densus*, *Chaetoceros constrictus*, *Chaetoceros pseudocurvisetus*, *Coscinodiscus subtilis* var. *subtilis*, *Coscinodiscus debilis*, *Chaetoceros castracanei*, *Chaetoceros curvisetus*, and *Chaetoceros debilis*. *C. densus* was the most dominant species in the spring. Phytoplankton community parameters (species number, abundance, chlorophyll a concentration, Margalef's richness, Shannon-Wiener diversity, and the Pielou evenness index) were not significantly different ($P>0.05$) between the reef and control areas, except the Shannon-Wiener diversity and the Pielou evenness indices in spring, but significant differences were found among seasons ($P<0.01$). Environmental factors were also significantly different seasonally, but no differences were found between the reef and control areas. Multidimensional scaling and cluster analyses showed that phytoplankton community composition was very similar between areas but significantly different among seasons. The similar phytoplankton community structure was probably due to the close proximity of the reef to the control area, the small scale and deep water in the sampling area, the sampling sites' close proximity to the island, and the short settling time of the artificial reef. A redundancy analysis showed that temperature, SiO₃-Si, dissolved oxygen, PO₄-P, BOD₅, dissolved inorganic nitrogen, chemical oxygen demand, and transparency were the main factors influencing the phytoplankton community.

Key words: phytoplankton; artificial reef; environmental variable; redundancy analysis; Haizhou Bay

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