

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20171012002

http://www.yykxjz.cn/

张雪, 徐晓甫, 戴媛媛, 王宏, 房恩军, 侯纯强, 高燕, 郭彪, 陈卫. 天津近岸人工鱼礁海域浮游植物群落及其变化特征. 渔业科学进展, 2018, 39(6): 01–10

Zhang X, Xu XF, Dai YY, Wang H, Fang EJ, Hou CQ, Gao Y, Guo B, Chen W. Phytoplankton community characteristics and variation in artificial reefs of Tianjin offshore. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(6): 01–10

天津近岸人工鱼礁海域浮游植物群落 及其变化特征*

张 雪^{1,2} 徐晓甫^{1,2} 戴媛媛¹ 王 宏^{1,2}^① 房恩军^{1,2}
侯纯强^{1,2} 高 燕^{1,2} 郭 彪^{1,2} 陈 卫^{1,2}

(1. 天津渤海水产研究所 天津 300457; 2. 天津市海洋牧场技术工程中心 天津 300457)

摘要 2016年5月、7月和11月分别对天津近岸海域2010年、2012年和2014年投放的人工鱼礁区及非人工鱼礁区(对照区)进行3个航次的调查,每个区域设置3个站位,共计12个站位。结果显示,共鉴定浮游植物2门28属58种,其中,硅藻门19属44种,甲藻门9属14种。物种以硅藻为主,占总物种的75.9%,其次为甲藻,占总物种的24.1%。浮游植物优势种以硅藻门的圆筛藻属和角毛藻属为主,主要有威氏圆筛藻(*Coscinodiscus wailesii*)、星脐圆筛藻(*C. asteromphalus*)、格氏圆筛藻(*C. granii*)、虹彩圆筛藻(*C. oculusiridis*)、圆筛藻(*Coscinodiscus spp.*)、卡氏角毛藻(*Chaetoceros castracanei*)、劳氏角毛藻(*Ch. lorenzianus*)、旋链角毛藻(*Ch. curvisetus*)、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)、柔弱几内亚藻(*Guianardia delicatula*)、刚毛根管藻(*Rhizosolenia setigera*)、翼鼻状藻印度变型(*Proboscia alata f. indica*)和夜光藻(*Noctiluca scintillans*)。浮游植物细胞丰度存在明显的季节差异,11月、7月和5月浮游植物细胞丰度分别为 94.79×10^4 、 39.53×10^4 和 21.5×10^4 cell/m³,浮游植物多样性指数也有明显的季节差异,11月香农-威纳多样性指数、丰富度指数和均匀度指数均比5月和7月高。从人工鱼礁区与对照区对比来看,5月浮游植物细胞丰度礁区外显著高于鱼礁区,7月和11月2014年鱼礁区浮游植物细胞丰度显著高于其他鱼礁区和礁区外。浮游植物多样性指数,礁区外和2012年鱼礁区低于2010年和2014年鱼礁区,礁区外最低。研究表明,人工鱼礁的构建对于提高浮游植物群落多样性具有显著效果,但随着时间的延长,浮游植物群落多样性不是一直增高,有一定程度的波动。

关键词 浮游植物; 人工鱼礁; 群落结构

中图分类号 Q178 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2018)06-0001-10

天津海域位于渤海三大渔场之一的渤海湾渔场的中心部位,是渤海湾产卵场主体水域。近年来,开发活动不断增强,环境污染日益加剧,破坏了渤海生态系统的结构,使生物群落生产力下降,生态系统的

* 天津市农业科技成果转化与推广项目(201304150)和天津市渔业发展服务中心青年科技创新项目(J2018-08青; J2018-14青)共同资助 [This work was supported by Project of Tianjin Transformation and Promotion of Agricultural Science and Technology Achievements (201304150), and Projects of Youth Science and Technology Innovation of Tianjin Fishery Development Service Center (J2018-08青; J2018-14青)]. 张 雪, E-mail: zhangxue430@126.com

① 通讯作者: 王 宏, 工程师, E-mail: redhong-1984@163.com

收稿日期: 2017-10-12, 收修改稿日期: 2018-01-11

稳定性转差,海洋生物逐渐朝着低龄化、小型化、低质化方向演变,渔业资源日益衰退(李文抗等, 2003)。建设人工鱼礁被证明是恢复渔业资源和改善海洋生态环境的一种重要途径(陈勇等, 2014; Powers *et al.*, 2003; 李娇等, 2013)。人工鱼礁通过改变所在海域的环境因子来影响海洋生物环境,达到渔业资源恢复和海洋生态修复的目的。

2009年,天津市第1次在大神堂外海建设海洋牧场示范区,进行人工鱼礁投放。截止到2016年,大神堂附近海域共计投放人工鱼礁礁体19825个,建礁规模7.04万空方,礁区面积10.989 km²。2016年,该海域被列为天津市大神堂国家级海洋牧场示范区,目前,该海域人工鱼礁投放已有8年时间,该鱼礁区浮游植物群落结构如何尚未见报道。浮游植物作为海洋生态系统的初级生产者,是多种海洋生物的摄食饵料(王俊等, 1998; 张雪等, 2016),由于浮游植物对海洋生态环境的变化较为敏感,已作为一种生物监测手段,广泛应用于海洋环境富营养化的评价中(邹景忠等, 1983),因此,研究该海域的浮游植物多样性变动及其与环境变化(尤其是人为干扰后的环境)的关系,

具有重要的理论和实际应用价值。

我国海域关于人工鱼礁区浮游植物群落变化有少量报道(张硕等, 2006; 杨柳等, 2011; 江志兵等, 2012; 廖秀丽等, 2013; 王欣等, 2014),浮游植物群落变化已成为一种评价人工鱼礁建设效果的有效方法。本研究依据2016年对不同年份投放的鱼礁区及邻近礁区外进行的生物及环境理化调查数据,对浮游植物群落结构进行了系统分析,以期为人工鱼礁建设效果评价、渔业资源恢复和海洋生态环境的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 调查海区

2016年5月(春季)、7月(夏季)和11月(秋季)分别对天津近岸海域(117°54.583'E~117°59.627'E, 39°3.15'N~39°7.938'N)2010年、2012年和2014年投放的人工鱼礁区及礁区外(对照区)进行3个航次的调查,每个区域设置3个站位,共计12个站位,站位分布见图1。

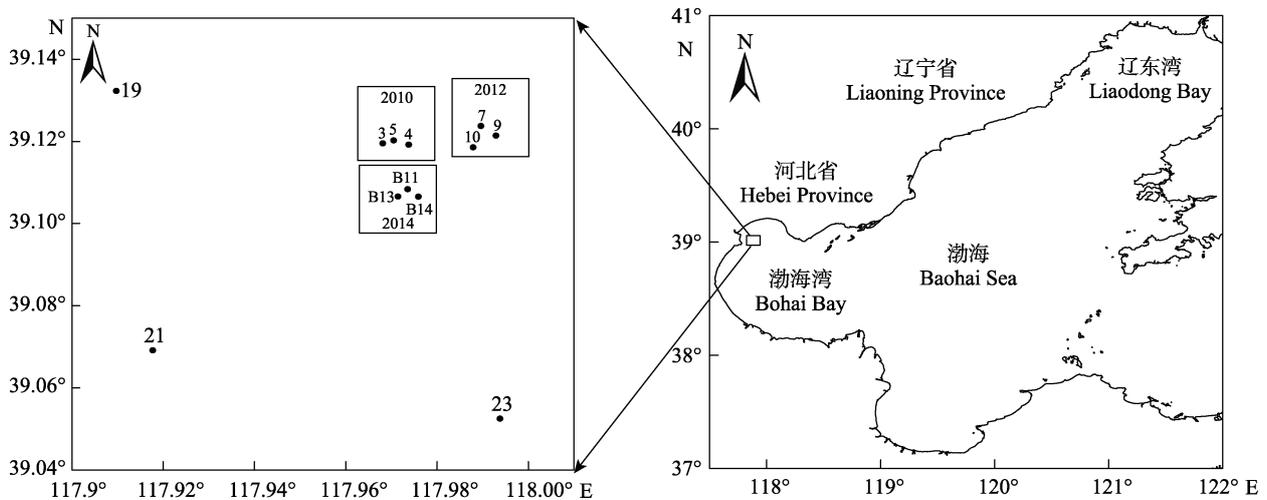


图1 调查海域及站位分布
Fig.1 Survey area and sampling stations

1.2 采集方法

样品的采集采用浅水Ⅲ型浮游生物网(网口直径37 cm,网口面积0.1 m²,网身长270 cm,网目76 μm),在每个站位自底至表垂直拖网取样,将样品使用5%的甲醛水溶液固定保存,按国家《海洋调查规范-海洋生物调查》(GB/T12763.6-2007)中的方法在实验室内对浮游植物样品进行处理,然后于实验室倒置显微镜(OLYMPUS IX71)下进行物种鉴定及数量统计。水温、盐度、溶解氧(DO)、pH、化学需氧量(COD)等指

标参数用多参数水质监测仪(YSI556)进行现场测定,各水文参数及营养盐(氨氮、硝态氮、亚硝态氮及磷酸盐)的测定均参照《海洋监测规范》(GB17378.4-2007)中规定的方法进行。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 物种多样性与优势度 物种多样性采用香农-威纳指数(H')(Shannon *et al.*, 1949)表示,物种丰富度和物种均匀度分别用 Margalef 指数(D)(Margalef, 1958)和 Pielou 指数(J)(Pielou, 1969)表示;浮游植物

物种优势度指数(Y)参考 Dufrene 等(1997)的方法。其计算公式分别为:

$$H' = -\sum_{i=1}^s p_i \times \log_2 p_i \quad p_i = n_i / N$$

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

$$D = (S - 1) / \log_2 N$$

$$Y = f_i \times p_i$$

式中, N 为总丰度(cell/m^3), S 为样品中的物种总数; p_i 为第 i 种的个体数与样品中总个体数的比值, f_i 为第 i 物种数量占总个体数量的比例; n_i 为第 i 物种的丰度(cell/m^3)。

1.3.2 浮游植物优势种与环境因子的关系 浮游植物与环境因子之间的关系采用基于 CANOCO 的生态学数据多元统计方法。将浮游植物优势种数据及环境因子数据进行 $\lg(x+1)$ 转换。先用物种数据及环境因子数据进行 DCA 分析(除趋势对应分析), 根据分析结果中梯度长度(Lengths of gradient)的大小判断下一步的分析方法。大于 4.0, 选 CCA(典范对应分析); 3.0~4.0 之间, 选 RDA(冗余分析)和 CCA 均可; 小于 3.0, RDA 的结果要好于 CCA (Lepš *et al.*, 2010)。另外, 运用 IBM SPSS Statistics 20 软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 以 $P < 0.05$ 作为差异显著性判断标准。

2 结果与分析

2.1 调查海区环境特征

调查海域环境因子存在显著的季节差异($P < 0.05$), 呈现典型温带海域的季候变化特征。温度变化呈现为 7月(27°C) $>$ 5月(14°C) $>$ 11月(12°C); 溶解氧(DO)与之相反; 盐度变化为 11月(31.5) $>$ 5月(30.6) $>$ 7月(28.5); pH 值的季节变化与之一致; 透明度的季节变化为 11月(0.92 m) $>$ 5月(0.83 m) $>$ 7月(0.66 m); 调查海区全年呈现富营养化的状态, 总氮含量为 5月(0.68 mg/L) $>$ 11月(0.48 mg/L) $>$ 7月(0.46 mg/L), 总磷含量为 7月(0.06 mg/L) $>$ 11月(0.024 mg/L) $>$ 5月(0.017 mg/L)。2010年、2012年和2014年的人工鱼礁区及礁区外的温度、溶解氧、盐度、pH值之间无显著性差异, 透明度及营养盐在鱼礁区与礁区外呈现显著性差异, 鱼礁区内的透明度明显低于礁区外, 营养盐则正好相反, 说明礁体改变水流的方向, 促进底层沉积物上移, 引起鱼礁区出现透明度降低、营养盐垂直分布相对均匀的特征。

2.2 浮游植物的种类及组成

3 个航次共鉴定浮游植物 2 门 28 属 58 种, 其中,

硅藻门 19 属 44 种, 甲藻门 9 属 14 种。物种以硅藻为主, 占总物种的 75.9%, 其次为甲藻, 占总物种的 24.1%。5 月共鉴定浮游植物 2 门 18 属 27 种, 其中, 硅藻门 15 属 23 种, 占总物种的 85.2%, 甲藻门 3 属 4 种, 占总物种的 14.8%。礁区外、2010 年鱼礁区、2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区浮游植物物种数分别为 8 种、9 种、6 种和 6 种, 没有显著性差异($P > 0.05$)。7 月共鉴定浮游植物 2 门 24 属 39 种, 其中, 硅藻门 15 属 30 种, 占总物种的 76.9%, 甲藻门 9 属 9 种, 占总物种的 23.1%。2010 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区浮游植物物种数显著高于礁区外和 2012 年鱼礁区浮游植物物种数, 依次为 15 种、16 种、8 种和 7 种($P < 0.05$)。11 月浮游植物物种数显著高于其他 2 个季节, 共鉴定浮游植物 2 门 21 属 49 种, 其中, 硅藻门 14 属 38 种, 占总物种的 77.6%, 甲藻门 7 属 11 种, 占总物种的 22.4%。礁区外、2010 年鱼礁区、2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区浮游植物物种数分别为 19 种、20 种、21 种和 20 种, 没有显著性差异($P > 0.05$)。

2.3 浮游植物优势种组成

以优势度 $Y > 0.02$ 确定为优势种, 调查区各月浮游植物优势种以硅藻门的圆筛藻属(*Coscinodiscus*)和角毛藻属(*Chaetoceros*)为主, 主要有威氏圆筛藻(*Coscinodiscus wailesii*)、星脐圆筛藻(*C. asteromphalus*)、格氏圆筛藻(*C. granii*)、虹彩圆筛藻(*C. oculus-iridis*)、圆筛藻(*Coscinodiscus* spp.)、卡氏角毛藻(*Chaetoceros castracanei*)、劳氏角毛藻(*Ch. lorenzianus*)、旋链角毛藻(*Ch. curvisetus*)、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)、柔弱几内亚藻(*Guianardia delicatula*)、刚毛根管藻(*Rhizosolenia setigera*)、翼鼻状藻印度变型(*Proboscia alata* f. *indica*)和夜光藻(*Noctiluca scintillans*)。

浮游植物优势种存在季节演替(表 2), 皆为硅藻物种。其中, 圆筛藻属各个季节都有出现, 是本地常见种。5 月浮游植物优势种为圆筛藻、星脐圆筛藻和柔弱几内亚藻, 优势度介于 0.02~0.2。其中, 柔弱几内亚藻的优势度最大为 0.2, 出现频率较低为 25%, 所占总细胞丰度比例较大为 81.4%。星脐圆筛藻的出现频率最高为 100%。7 月和 11 月优势种类组成较为相似, 共有的优势种分别为威氏圆筛藻、星脐圆筛藻、格氏圆筛藻、劳氏角毛藻、卡氏角毛藻和尖刺伪菱形藻。7 月特有的浮游植物优势种是刚毛根管藻, 浮游植物优势度介于 0.02~0.12, 优势种出现频率介于 41.7%~100%, 其中, 星脐圆筛藻和尖刺伪菱形藻出现频率达 100%, 尖刺伪菱形藻优势度最高为 0.12,

表 1 调查海域浮游植物种类名录
Tab.1 List of phytoplankton in the surveyed area

| 种类 Taxa | 5月 May | 7月 July | 11月 November | 种类 Taxa | 5月 May | 7月 July | 11月 November |
|---|-----------|------------|-----------------|---|-----------|------------|-----------------|
| 硅藻门 Bacillariophyta | | | | 具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i> | √ | | |
| 透明辐杆藻 <i>Bacteriastrum hyalinum</i> | | √ | √ | 近缘斜纹藻 <i>Pleurosigma affine</i> | | √ | |
| 北方角毛藻 <i>Chaetoceros borealis</i> | | | √ | 尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> | √ | √ | √ |
| 卡氏角毛藻 <i>Chaetoceros castracanei</i> | | √ | √ | 翼鼻状藻印度变型 <i>Proboscia alata f. indica</i> | √ | √ | √ |
| 扁面角毛藻 <i>Chaetoceros compressus</i> | | | √ | 粗根管藻 <i>Rhizosolenia robusta</i> | | | √ |
| 旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i> | | √ | √ | 刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i> | √ | √ | √ |
| 柔弱角毛藻 <i>Chaetoceros debilis</i> | | √ | √ | 根管藻 <i>Rhizosolenia</i> spp. | | | √ |
| 双突角毛藻 <i>Chaetoceros didymus</i> | | | √ | 斯托根管藻 <i>Rhizosolenia stolterfothii</i> | | √ | √ |
| 克尼角毛藻 <i>Chaetoceros knipowitschii</i> | | | √ | 笔尖根管藻 <i>Rhizosolenia styliformis</i> | | √ | √ |
| 劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i> | √ | √ | √ | 优美旭氏藻 <i>Schroderella delicatula</i> | | | √ |
| 暹罗角毛藻 <i>Chaetoceros siamense</i> | | | √ | 中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i> | √ | √ | √ |
| 角毛藻 <i>Chaetoceros</i> spp. | √ | √ | √ | 掌状冠盖藻 <i>Stephanopyxis palmeriana</i> | | √ | √ |
| 圆柱角毛藻 <i>Chaetoceros teres</i> | | | √ | 诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskioldi</i> | √ | √ | |
| 扭链角毛藻 <i>Chaetoceros tortissimus</i> | | | √ | 圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i> | | √ | √ |
| 窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i> | | √ | √ | 佛氏海线藻 <i>Thalassionema frauenfeldii</i> | √ | √ | √ |
| 蛇目圆筛藻 <i>Coscinodiscus argus</i> | √ | √ | √ | 甲藻门 Pyrrophyta | | | |
| 星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i> | √ | √ | √ | 血红哈卡藻 <i>Akashiwo sanguinea</i> | | √ | √ |
| 格氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus granii</i> | √ | √ | √ | 链状亚历山大藻 <i>Alexandrium catenella</i> | | √ | |
| 虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i> | √ | √ | √ | 叉状角藻 <i>Ceratium furca</i> | | | √ |
| 圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp. | √ | √ | √ | 梭角藻 <i>Ceratium fusus</i> | √ | | √ |
| 细弱圆筛藻 <i>Coscinodiscus subtilis</i> | √ | | | 三角角藻 <i>Ceratium tripos</i> | | √ | √ |
| 威氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus wailesii</i> | √ | √ | √ | 多环旋沟藻 <i>Cochlodinium polykrikoides</i> | | √ | √ |
| 小环藻 <i>Cyclotella</i> spp. | √ | | √ | 膝沟藻 <i>Gonyaulax</i> spp. | | √ | √ |
| 布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i> | √ | √ | | 夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i> | √ | √ | √ |
| 短角弯角藻 <i>Eucampia zodiacus</i> | | √ | √ | 叉状原多甲藻 <i>Protoperidinium divergens</i> | | | √ |
| 柔弱几内亚藻 <i>Guianardia delicatula</i> | √ | √ | √ | 里昂原多甲藻 <i>Protoperidinium leonis</i> | √ | | √ |
| 薄壁几内亚藻 <i>Guianardia flaccida</i> | | √ | √ | 海洋原多甲藻 <i>Protoperidinium marinum</i> | | √ | |
| 舟形藻 <i>Navicula</i> spp. | √ | | | 五角原多甲藻 <i>Protoperidinium pentagonum</i> | √ | | √ |
| 长菱形藻 <i>Nitzschia longissima</i> | √ | √ | √ | 原多甲藻 <i>Protoperidinium</i> spp. | | √ | |
| 中华齿状藻 <i>Odontella sinensis</i> | √ | √ | √ | 锥状斯克里普藻 <i>Scrippsiella trochoidea</i> | | √ | √ |

优势种占总细胞丰度不高, 介于 2.8%~16.4%。11 月特有的浮游植物优势种是旋链角毛藻、柔弱几内亚藻和翼鼻状藻印度变型, 浮游植物优势种优势度介于 0.02~0.19, 优势种出现频率较高介于 75%~91.7%, 劳氏角毛藻优势度最高为 0.19。

2.4 浮游植物细胞总丰度的变化特征

浮游植物细胞丰度存在明显季节差异, 如图 2 所示, 11 月浮游植物细胞丰度显著高于 5 月和 7 月。同一月浮游植物细胞丰度在礁区内与鱼礁外也不相

同, 5 月浮游植物细胞丰度礁区外显著高于礁区内, 7 月和 11 月浮游植物细胞丰度 2014 年鱼礁区显著高于其他鱼礁区和礁区外。

11 月浮游植物细胞丰度最高, 介于 $1.95 \times 10^4 \sim 185.83 \times 10^4$ cell/m³, 平均为 94.79×10^4 cell/m³。2014 年鱼礁区丰度最高为 154.4×10^4 cell/m³, 礁区外、2010 年鱼礁区和 2012 年鱼礁区分别为 66.0×10^4 、 62.8×10^4 和 96.0×10^4 cell/m³。5 月浮游植物细胞丰度平均为 21.5×10^4 cell/m³, 介于 $0.66 \times 10^4 \sim 106.6 \times 10^4$ cell/m³, $0.66 \times 10^4 \sim 106.6 \times 10^4$ cell/m³, 礁区外浮游植物细胞丰度

表 2 2016 年鱼礁区浮游植物优势种组成
Tab.2 Composition of phytoplankton dominant species at artificial reef area in 2016

| 月 Month | 编号 No. | 物种 Taxa | 出现频率 Frequency in samples(%) | 占总细胞丰度的比例 Percentage in cell abundance(%) | 优势度 Dominance (Y) |
|------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|---|-------------------------|
| 5 月 May | A | 圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp. | 50.0 | 4.2 | 0.02 |
| | B | 星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i> | 100.0 | 5.7 | 0.06 |
| | C | 柔弱几内亚藻 <i>Guianardia delicatula</i> | 25.0 | 81.4 | 0.20 |
| 7 月 July | D | 威氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus wailesii</i> | 41.7 | 5.0 | 0.02 |
| | E | 刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i> | 75.0 | 2.8 | 0.02 |
| | B | 星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i> | 100.0 | 3.6 | 0.04 |
| | F | 卡氏角毛藻 <i>Chaetoceros castracanei</i> | 41.7 | 12.9 | 0.05 |
| | G | 劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i> | 41.7 | 16.4 | 0.07 |
| | H | 格氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus granii</i> | 83.3 | 13.0 | 0.11 |
| | I | 尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> | 100.0 | 11.8 | 0.12 |
| 11 月 November | J | 夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i> | 100.0 | 21.6 | 0.22 |
| | K | 旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i> | 83.3 | 1.9 | 0.02 |
| | C | 柔弱几内亚藻 <i>Guianardia delicatula</i> | 75.0 | 2.1 | 0.02 |
| | L | 翼鼻状藻印度变型 <i>Proboscia alata</i> f. <i>indica</i> | 75.0 | 2.6 | 0.02 |
| | B | 星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i> | 83.3 | 3.0 | 0.02 |
| | D | 威氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus wailesii</i> | 83.3 | 4.5 | 0.04 |
| | I | 尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> | 75.0 | 7.5 | 0.06 |
| | M | 虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i> | 91.7 | 8.6 | 0.08 |
| | H | 格氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus granii</i> | 91.7 | 14.7 | 0.13 |
| | F | 卡氏角毛藻 <i>Chaetoceros castracanei</i> | 83.3 | 20.6 | 0.17 |
| G | 劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i> | 91.7 | 21.1 | 0.19 | |

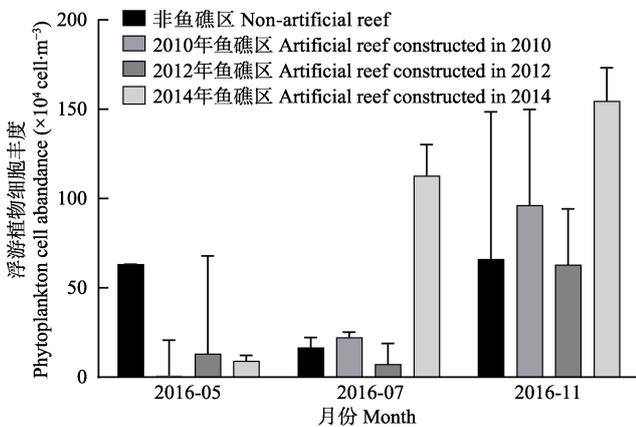


图 2 调查站位浮游植物细胞丰度在不同月的变化
Fig.2 Variations of phytoplankton cell abundance in different months

显著高于鱼礁区,为 $63.11 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$, 2010 年鱼礁区、2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区分别为 12.96×10^4 、 1.09×10^4 和 $8.86 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$ 。7 月浮游植物细胞丰度介于 $3.43 \times 10^4 \sim 317.78 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$, 平均为 $39.53 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$, 2014 年鱼礁区浮游植物细胞丰度为 $112.58 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$, 显著高于其他 3 个区域, 礁区外、

2010 年鱼礁区、2012 年放鱼礁区分别为 16.48×10^4 、 7.04×10^4 和 $22.02 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$ 。

2.5 礁区内与礁区外浮游植物细胞丰度的平面分布

浮游植物群落空间分布存在明显区域差异和季节差异。在相同月、不同年份的鱼礁区与礁区外之间浮游植物群落空间分布有较大差异, 且不均匀; 同一区域在不同月浮游植物群落空间分布也不相同, 存在季节差异(图 3)。5 月浮游植物空间分布见图 3a, 密集区出现在礁区外的 21 号站位, 细胞丰度为 $106.61 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$, 丰度最低值出现在 2012 年鱼礁区的 9 号站位, 为 $0.66 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$, 礁区外浮游植物细胞丰度显著高于鱼礁区浮游植物细胞丰度。

7 月浮游植物空间分布见图 3b, 密集区出现在 2014 年鱼礁区的 B14 号站位, 细胞丰度为 $317.78 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$, 丰度最低值出现在非鱼礁区的 19 号站位, 为 $3.43 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$, 2014 年鱼礁区浮游植物细胞丰度平均值最高, 但该鱼礁区 3 个站位点间的细胞丰度差异性较大, 2012 年鱼礁区浮游植物细胞丰度最低。11 月浮游植物空间分布见图 3c, 2014 年鱼礁区浮游植物细

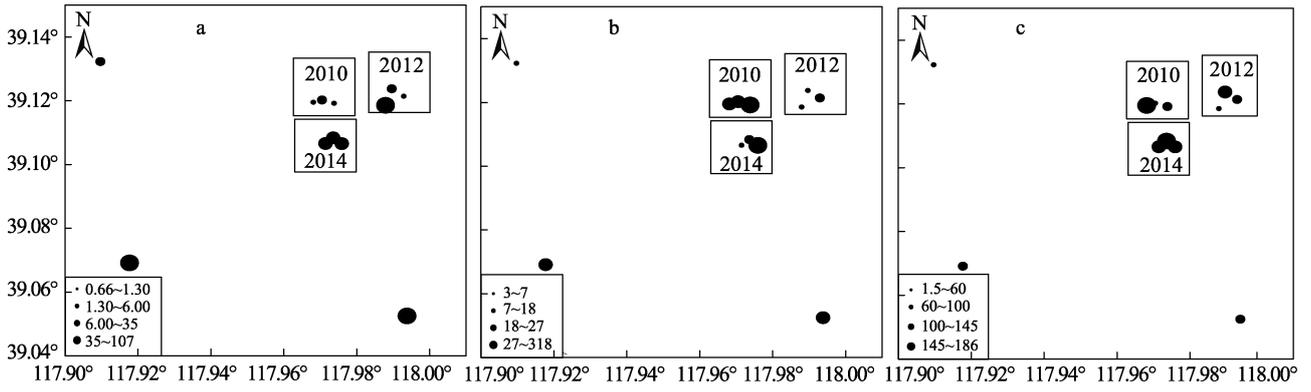


图 3 2016 年浮游植物细胞丰度($\times 10^4 \text{ cell/m}^3$)不同月平面分布
 Fig.3 Horizontal distribution of phytoplankton cell abundance ($\times 10^4 \text{ cell/m}^3$) in 2016

a: 5 月; b: 7 月; c: 11 月 a: May; b: July; c: November

胞分布较为密集,且比较均匀,细胞丰度介于 $142.31 \times 10^4 \sim 176.14 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$,丰度最低值出现在 2012 年鱼礁区的 10 号站位,为 $1.95 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$,礁区外浮游植物细胞丰度也较低,介于 $37.42 \times 10^4 \sim 99.75 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$ 。

2.6 礁区内与礁区外浮游植物群落多样性特征

浮游植物多样性指数香农-威纳指数(H'),均匀度指数(J)是表征群落稳定性的指标。一般来说,一个群落的 H' 和 J 越高,则预示着该群落所属的生态系统越稳定和成熟(孙军等, 2004)。调查海域浮游植物多样性指数变化存在季节性差异(图 4 和表 3),秋季 11 月 H' 、 D 和 J 都比 5 月和 7 月高。从鱼礁区与礁区外对比来看,2010 年和 2014 年鱼礁区浮游植物多样性指数高于礁区外和 2012 年鱼礁区,说明鱼礁区在形成 2~6 年内,礁区内的浮游植物群落稳定性较高,但这种稳定性也不是一直增高的,随着礁区投放时间的延长,浮游植物群落稳定性会发生一定的波动。

香农-威纳多样性指数(H')11 月最高,其次是 7 月,5 月为最低。11 月礁区外、2010 年鱼礁区、2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区 H' 无显著性差异 ($P>0.05$); 7 月 2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区 H' 显著高于礁区外和 2010 年鱼礁区 ($P<0.05$); 5 月礁区外 H' 最低,2010 年鱼礁区、2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区 H' 分别为 1.88、1.66 和 1.7。

丰富度指数(D)11 月显著高于 5 月和 7 月,5 月最低。11 月礁区外、2010 年鱼礁区、2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区 D 无显著性差异 ($P>0.05$); 7 月 2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区 D 显著高于礁区外和 2010 年鱼礁区 ($P<0.05$); 5 月礁区外、2010 年鱼礁区、2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区 D 无显著性差异 ($P>0.05$)。

浮游植物均匀度指数(J)无显著季节性差异 ($P>0.05$),11 月 J 稍高于其他月,5 月最低。11 月礁区外、2010 年鱼礁区、2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区

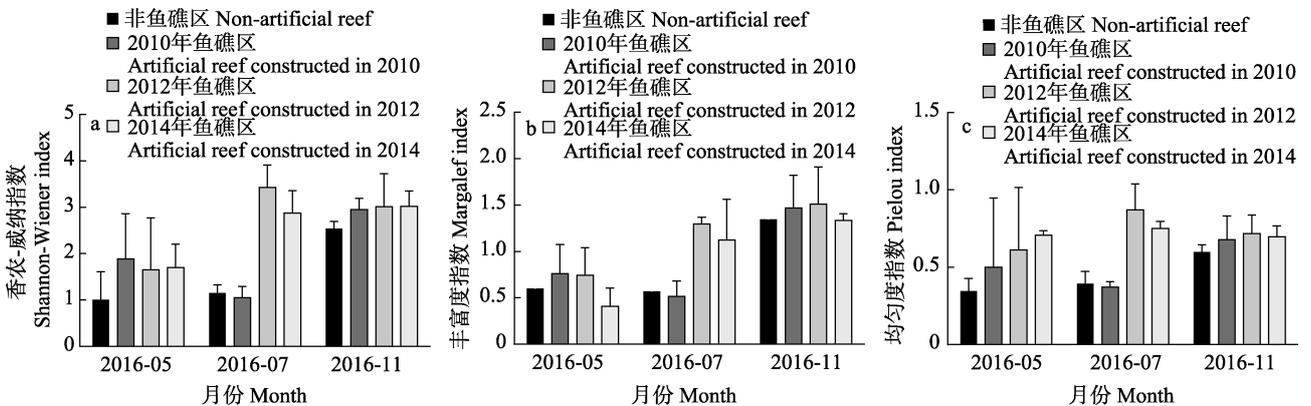


图 4 浮游植物多样性指数各月变化
 Fig.4 Phytoplankton diversity index changes in different month

a: 香农-威纳指数; b: 丰富度指数; c: 均匀度指数 a: H' ; b: D ; c: J

表 3 浮游植物多样性指数各月的变化
Tab.3 Phytoplankton diversity index changes in different month

| 项目 Items | 月 Month | 礁区外 Non-artificial reef area | 2010 年鱼礁区 2010 artificial reef area | 2012 年鱼礁区 2012 artificial reef area | 2014 年鱼礁区 2014 artificial reef area |
|------------------------------------|---------------|------------------------------------|---|---|---|
| 香农-威纳多样性指数 Shannon-Wiener index | 5 月 May | 1.01 | 1.66 | 1.88 | 1.70 |
| | 7 月 July | 1.15 | 3.43 | 1.05 | 2.87 |
| | 11 月 November | 2.54 | 3.01 | 2.95 | 3.02 |
| 丰富度指数 Margalef index | 5 月 May | 0.60 | 0.74 | 0.50 | 0.41 |
| | 7 月 July | 0.57 | 1.29 | 0.52 | 1.12 |
| | 11 月 November | 1.35 | 1.51 | 1.47 | 1.33 |
| 均匀度指数 Pielou index | 5 月 May | 0.35 | 0.61 | 0.76 | 0.71 |
| | 7 月 July | 0.39 | 0.87 | 0.37 | 0.75 |
| | 11 月 November | 0.60 | 0.72 | 0.68 | 0.70 |

J 无显著性差异($P>0.05$); 7 月 2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区 *J* 显著高于礁区外和 2010 年鱼礁区; 5 月礁区外、2010 年鱼礁区、2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区 *J* 逐渐增高。

2.7 浮游植物细胞丰度与环境因子的关系

海域环境是浮游植物赖以生存的条件, 本研究通过对调查海域浮游植物优势种丰度与海区相关环境因子(硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、磷酸盐、溶解氧、化学耗氧量、pH、透明度和温度)等进行相关性分析, 探究影响浮游植物优势种丰度的环境因子。首先对优势种数据及环境因子数据进行 DCA 分析, 梯度长度小于 3.0, 选 RDA(冗余分析)进行分析, 结果见图 5。不同浮游植物物种对环境因子的生态适应性可以通过 RDA 双序轴清楚地显现出来。从图 5 可以看出, 优势种柔弱几内亚藻、威氏圆筛藻、虹彩圆筛藻和翼鼻状藻印度变型主要与透明度呈现出明显的正相关性, 透明度较高的环境条件, 更有利于它们的生长, 圆筛藻和星脐圆筛藻与盐度和亚硝态氮表现良好的正相关性, 刚毛根管藻和水深有较好的正相关性, 卡氏角毛藻、劳氏角毛藻、旋链角毛藻和格氏圆筛藻在排序轴上的位置较集中, 有较近的相似性。

3 讨论

3.1 天津近岸人工鱼礁区浮游植物群落季节变化

浮游植物以硅藻为主, 浮游植物物种数存在季节差异, 11 月浮游植物物种数显著高于其他 2 个季节。浮游植物优势种除夜光藻外, 都属于硅藻, 以圆筛藻属为主, 存在季节演替, 但种类变化不明显。尤其是 7 月和 11 月, 优势种类组成较为相似, 共同存在的优势种有 6 种, 而 5 月的浮游植物优势种在 11 月的

优势种中也都存在。浮游植物细胞丰度存在明显季节差异, 11 月浮游植物细胞丰度最高, 其次是 7 月, 5 月浮游植物细胞丰度最低。这种现象与温带海域浮游植物出现两周年的年际变化不一致(康元德, 1991)。原因可能是 7 月夜光藻大量暴发, 其个体较大, 在强大的摄食压力下, 导致总细胞丰度减少。5 月细胞丰度最少, 这与该月对虾幼体及其他生物幼体处于摄食高峰期, 下行控制降低了浮游植物的细胞丰度; 而且该月河流径流量少, 导致海区的营养盐得不到及时的补充, 上行控制抑制了浮游植物的生长繁殖。

3.2 不同礁区内及礁区外浮游植物群落的比较

除 7 月 2012 年鱼礁区和 2014 年鱼礁区浮游植物物种数显著高于礁区外和 2010 年鱼礁区浮游植物物种数, 5 月和 11 月浮游植物物种数在各个礁区和对照区之间没有显著性差异($P>0.05$)。这与杨柳等(2011)对海州湾的研究结果基本一致, 鱼礁区和对照区的浮游植物种类及优势种类差异甚微。

5 月的浮游植物细胞丰度礁区外显著高于鱼礁区, 7 月和 11 月的浮游植物细胞丰度 2014 年鱼礁区显著高于其他鱼礁区和礁区外。浮游植物多样性指数在 5 月、7 月和 11 月都表现为 2012 年和 2014 年鱼礁区高于礁区外和 2010 年鱼礁区, 这也说明投放人工鱼礁有助于改善海域生态环境和提高水域的初级生产力水平。研究表明, 人工鱼礁能够为海洋生物提供摄食、产卵繁殖、生长、避难、休养生息的场所, 同时, 礁体会在很大程度上改变海流的方向, 进而改变海水的营养盐结构, 使底层丰富的营养盐源源不断地输送到上面, 满足不同水层浮游生物的营养需求(章守宇等, 2006), 再通过食物链关系诱集更多的海洋生物, 使人工鱼礁区生物资源量不断扩大(陈丕茂, 2005; 张虎等, 2008)。鱼礁区在刚形成的几年(2~4 年)

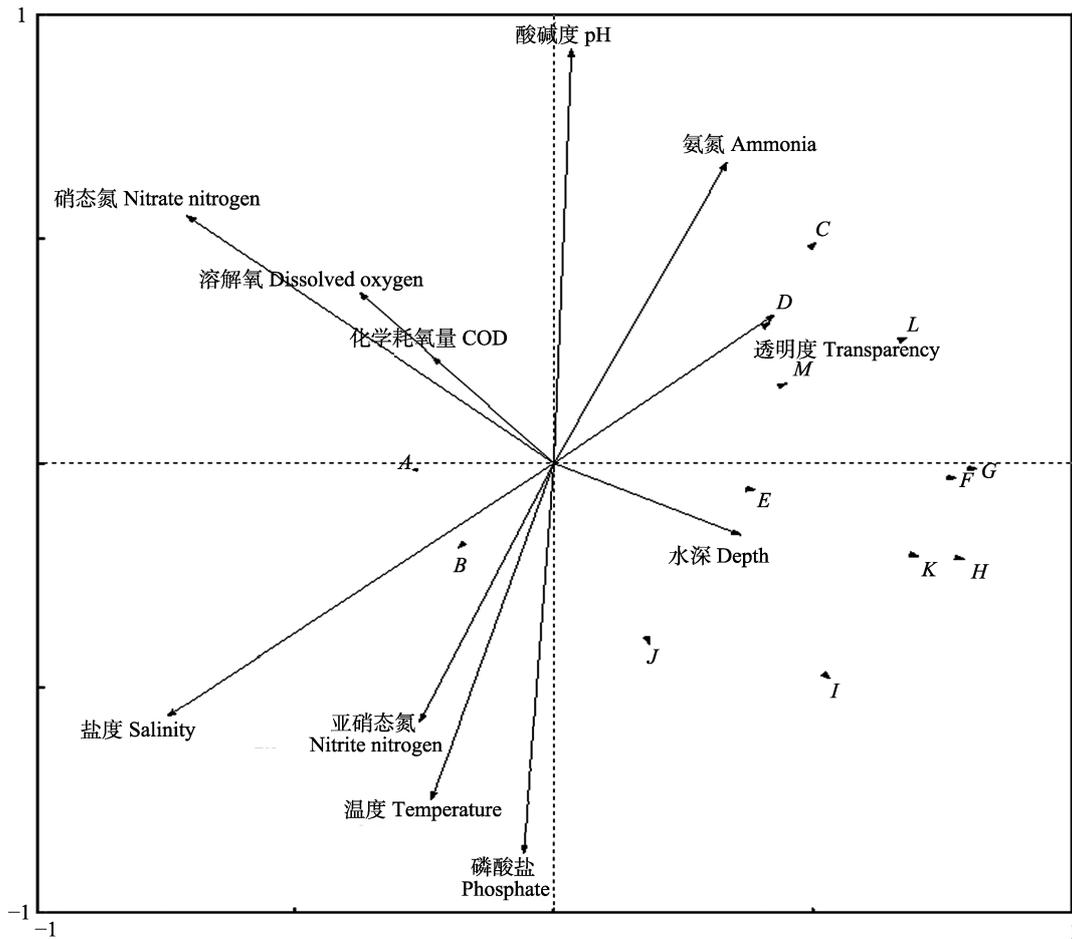


图 5 调查海域浮游植物优势种与环境因子的 RDA 双序图

Fig.5 RDA biplot of phytoplankton dominant species and environmental factors in the surveyed area

优势种代码(A~M)见表 2 The dominant species codes (A~M) refer to Tab.2

内,对礁区的浮游植物群落稳定性的贡献效果较好,随着礁区时间的延长,推测鱼礁受所在海域底质的影响会存在淤积现象,其产生的流场效应减弱,营养盐交互混合不充分,浮游植物生长受影响,浮游植物群落稳定性逐渐趋于礁区外的水平。本研究结果与多数学者的研究结果一致(张硕等, 2006; 廖秀丽等, 2013),浮游植物丰度在投礁后明显升高,表明人工鱼礁的投放对海域初级生产者的生长繁殖产生了一定的正面效应。

3.3 建礁前、后浮游植物群落的比较

建礁前,该海域浮游植物群落的研究较少,李清雪等(2000)对该人工鱼礁区的邻近海域进行调查发现,该海域浮游植物细胞丰度介于 $420 \times 10^4 \sim 7100 \times 10^4$ cell/m³, 5月、8月和10月浮游植物细胞物种数分别为8种、16种和13种。人工鱼礁邻近海域的香农-威纳多样性指数(H')介于0.27~3.01,丰富度指数(D)介于0.11~0.75,均匀度指数(J)介于0.12~1.00,通过浮游

植物的变化发现,该海域浮游植物群落细胞丰度显著减少,但浮游植物群落多样性指数明显升高,群落结构稳定性增强。由于调查年代相距较远,影响浮游植物群落结构变化的因素较多,而人工鱼礁建设对其变化的影响程度究竟有多大还需进一步调查研究。

参 考 文 献

- Chen PM. A survey on catch in artificial reef area of Zhongshan City. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(3): 73-80 [陈丕茂. 中山人工鱼礁区渔获物调查. *热带海洋学报*, 2005, 24(3): 73-80]
- Chen Y, Yang J, Tian T, *et al.* The enhancement effect of fishery resources on artificial reefs in marine ranching area in Zhangzi Island. *Journal of Dalian Ocean University*, 2014, 29(2): 183-187 [陈勇, 杨军, 田涛, 等. 獐子岛海洋牧场人工鱼礁区鱼类资源养护效果的初步研究. *大连海洋大学学报*, 2014, 29(2): 183-187]
- Dufrene M, Legendre P. Species assemblages and indicator

- species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 1997, 67(3): 345–366
- GB 17378.4-2007 Specifications for marine monitoring. 2007 [GB 17378. 4-2007 海洋监测规范. 2007]
- GB/T 12763.6-2007 Specifications for oceanographic survey: Specifications for marine biological survey. 2007 [GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范: 海洋生物调查. 2007]
- Jiang ZB, Chen QZ, Shou L, *et al.* Community composition of net-phytoplankton and its relationship with the environmental factors at artificial reef area in Xiangshan Bay. *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. *生态学报*, 2012, 32(18): 5813–5824]
- Kang YD. Phytoplankton quantitative distribution and seasonal variation in Bohai Sea. *Marine Fisheries Research*, 1991, 12: 31–44 [康元德. 渤海浮游植物的数量分布和季节变化. *海洋水产研究*, 1991, 12: 31–44]
- Li J, Guan CT, Gong PH, *et al.* Preliminary analysis of carbon sink mechanism and potential of artificial reef ecosystem. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 65–69 [李娇, 关长涛, 公丕海, 等. 人工鱼礁生态系统碳汇机理及潜能分析. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 65–69]
- Li QX, Tao JH. Studies on ecological characteristics of phytoplankton in the waters near Tianjin. *Journal of Tianjin University*, 2000, 33(4): 464–469 [李清雪, 陶建华. 天津近岸海域浮游植物生态特征的研究. *天津大学学报*, 2000, 33(4): 464–469]
- Li WK, Fang EJ. Construction of artificial reefs to repair marine fishery resources and ecological environment. *Tianjin Fisheries*, 2003(4): 5–8 [李文抗, 房恩军. 建设人工鱼礁修复海洋渔业资源生态环境. *天津水产*, 2003(4): 5–8]
- Liao XL, Chen PM, Ma SW, *et al.* Community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors before and after construction of artificial reefs in Yangmeikeng, Daya Bay. *South China Fisheries research*, 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. *南方水产科学*, 2013, 9(5): 109–119]
- Marfalef R. Information theory in ecology. *General Systems*, 1958, 3: 36–71
- Pielou EC. *An introduction to mathematical ecology*. New York: Wiley-Interscience, 1969, 286
- Powers SP, Grabowski JH, Peterson CH, *et al.* Estimation enhancement of fish production by offshore artificial reefs: Uncertainty exhibited by divergent scenarios. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 264: 265–277
- Shannon CE, Weaver W. *The mathematical theory of communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1949, 117
- Lepš J, Šmilauer P. *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO*. London: Cambridge University Press, 2010
- Sun J, Liu DY. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(1): 62–75 [孙军, 刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用. *海洋学报*, 2004, 26(1): 62–75]
- Wang J, Kang YD. Study on population dynamics of phytoplankton in the Bohai Sea. *Marine Fisheries Research*, 1998, 19(1): 43–52 [王俊, 康元德. 渤海浮游植物种群动态的研究. *海洋水产研究*, 1998, 19(1): 43–52]
- Wang X, Sheng HX, Tang YL, *et al.* Relationships between the structure of phytoplankton community and environmental factors in three artificial reef areas of Laoshan Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(4): 7–12 [王欣, 盛化香, 唐衍力, 等. 崂山湾人工鱼礁区浮游植物群落结构与环境因子的关系. *渔业科学进展*, 2014, 35(4): 7–12]
- Yang L, Zhang S, Sun MC, *et al.* The research of relationships between phytoplankton and environmental factors in artificial reef area of Haizhou Bay. *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. *上海海洋大学学报*, 2011, 20(3): 445–450]
- Zhang H, Liu PY, Tang JH, *et al.* Investigation on the macrobenthos of artificial reefs area in the Haizhou Gulf. *Marine Fisheries*, 2008, 30(2): 97–104 [张虎, 刘培廷, 汤建华, 等. 海州湾人工鱼礁大型底栖生物调查. *海洋渔业*, 2008, 30(2): 97–104]
- Zhang S, Zhu KW, Sun MC. Species composition and biomass variation in phytoplankton in artificial reef area in Haizhou Bay. *Journal of Dalian Ocean University*, 2006, 21(2): 134–140 [张硕, 朱孔文, 孙满昌. 海州湾人工鱼礁区浮游植物的种类组成和生物量. *大连水产学院学报*, 2006, 21(2): 134–140]
- Zhang SY, Zhang HJ, Jiao JP, *et al.* Change of ecological environment of artificial reef waters in Haizhou Bay. *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. *水产学报*, 2006, 30(4): 475–480]
- Zhang X, Luan QS, Sun JQ, *et al.* Annual variation in phytoplankton community and its relationship with ambient environmental factors in adjacent waters of Zhangzi Island. *Journal of Dalian Ocean University*, 2016, 31(3): 315–323 [张雪, 栾青杉, 孙坚强, 等. 獐子岛海域浮游植物群落周年变化及其与环境因子的关系. *大连海洋大学学报*, 2016, 31(3): 315–323]
- Zou JZ, Dong LP, Qin BP. Preliminary study on eutrophication and red tide in Bohai Bay. *Marine Environmental Science*, 1983, 2(2): 41–54 [邹景忠, 董丽萍, 秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨. *海洋环境科学*, 1983, 2(2): 41–54]

Phytoplankton Community Characteristics and Variation at Artificial Reefs of Tianjin Offshore

ZHANG Xue^{1,2}, XU Xiaofu^{1,2}, DAI Yuanyuan¹, WANG Hong^{1,2①}, FANG Enjun^{1,2},
HOU Chunqiang^{1,2}, GAO Yan^{1,2}, GUO Biao^{1,2}, CHEN Wei^{1,2}
(1. Tianjin Bohai Sea Fisheries Research Institute, Tianjin 300457;
2. Tianjin Marine Ranching Technical Engineering Center, Tianjin 300457)

Abstract Three cruises were conducted in May, July, and November 2016 in artificial reef areas constructed in 2010, 2012, and 2014, respectively, and the non-artificial reef area (control area) offshore of Tianjin with three sampling stations for each, totaling 12 sites. The results identified 58 taxa of phytoplankton belonging to 2 phyla and 28 genera. Among these species, Bacillariophyta includes 19 genera and 44 species, and Pyrrophyta includes 9 genera and 14 species. Diatom species are dominant, accounting for 75.9% of all species, followed by dinoflagellates, accounting for 24.1%. Dominant phytoplankton species are *Coscinodiscus* and *Chaetoceros* of Bacillariophyta, mainly *Coscinodiscus wailiesii*, *C. asteromphalus*, *C. granii*, *C. oculus-iridis*, *C. spp.*, *Chaetoceros castracanei*, *Ch. lorenzianus*, *Ch. curvisetus*, *Pseudo-nitzschiapungens*, *Guianardia delicatula*, *Rhizosolenia setigera*, *Proboscia alata f. indica*, and *Noctiluca scintillans*. Phytoplankton cell abundance showed obvious seasonal changes, with the average cell abundance in November, July, and May at 94.79×10^4 cell/m³, 39.53×10^4 cell/m³, and 21.5×10^4 cell/m³, respectively. Phytoplankton diversity index also had obvious seasonal variation. In November, the Shannon-Wiener diversity index, Margalef index, and Pielou index were higher than in May and July. Comparing the artificial reef areas with the control area, the phytoplankton cell abundance of the control in May was significantly higher than the artificial reef areas. In July and November, phytoplankton cell abundance at the artificial reef constructed in 2014 was significantly higher than other artificial reef areas and the control area. The diversity index in both the control and the artificial reef area constructed in 2012 was lower than the 2010 and 2014 reefs, and lowest in the non-artificial reef area. Clearly, the construction of an artificial reef had a significant effect in improving phytoplankton community diversity, but this diversity is not always increasing consistently but fluctuating.

Key words Phytoplankton; Artificial reef; Community structure

① Corresponding author: WANG Hong, E-mail: redhong-1984@163.com