

象山港海洋牧场示范区浮游植物的群落特征及其与环境因子的关系*

刘 懂¹ 陈 晨¹ 王 莉¹ 焦海峰^{1,2} 孙 元² 王一农¹ 尤仲杰^{1,2}

(1. 宁波大学海洋学院 宁波 315211; 2. 宁波市海洋与渔业研究院 宁波 315012)

摘要 根据 2014 年 4 月至 2015 年 1 月于象山港海洋牧场示范区和对照区四季的浮游植物及同步的环境调查数据,对浮游植物的群落特征进行研究,并应用冗余分析(RDA)研究了该海域环境因子对浮游植物群落结构的影响。共鉴定出浮游植物 95 种,隶属于 7 门 59 属,主要由硅藻(64 种)、绿藻(10 种)和甲藻(9 种)组成。优势种主要有琼氏圆筛藻(*Coscinodiscus jonesianus*)、太阳漂流藻(*Planktoniella sol*)和星脐圆筛藻(*C. asteromphalus*),且存在明显的季节演替现象。双因素分析结果表明:季节间,浮游植物丰度、多样性指数(Shannon-Wiener 多样性、Pielou 均匀度和 Margalef 丰富度)和环境因子(水温、盐度、pH、DO、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、PO₄-P 和 SiO₃-Si)均存在极显著差异($P < 0.01$),秋、春季全区丰度(121.59 和 79.39×10^4 个/m³)显著高于冬、夏季(13.05 和 7.05×10^4 个/m³),多样性指数均表现为冬>夏>秋>春季;区域间,丰度、多样性指数和环境因子均无显著性差异($P > 0.05$),示范区浮游植物丰度和多样性指数的四季均值都高于对照区。相似性聚类分析、多维尺度分析(nMDS)结果表明,浮游植物群落组成季节性差异显著,区域差异不显著。表明示范区的建设对浮游植物的生长有一定的积极作用,但效果不显著。RDA 分析结果表明,盐度、温度、营养盐(NO₃-N、PO₄-P 和 SiO₃-Si)和 DO 是影响浮游植物群落结构的主要因子,各种浮游植物对环境因子的响应机制有所不同。

关键词 象山港; 海洋牧场; 浮游植物; 环境因子; 冗余分析

中图分类号 Q958.1 doi: 10.11693/hyhz20160500096

象山港位于浙江省北部沿海,是一个由东北向西南深入内陆的狭长型半封闭式海湾,全港纵深 62.8km,总面积 563km²,水体交换能力较弱(中国海湾志编纂委员会,1992)。港内自然环境优良,生物资源丰富,是浙江省重要的海水养殖区和生态湿地(尤仲杰等,2011)。近年来,由于象山港沿岸基础设施建设(象山港大桥)和临港工业的迅猛发展(火电厂和造船厂),给原本较脆弱的生态环境和渔业资源造成了严重的影响(刘晶晶等,2010; 曾相明等,2011)。为改善和修复象山港的生态环境,保护和增殖海洋渔业资源,宁波市于 2008 年在白石山海域投放了 230 个水泥鱼礁体(共 0.5×10^4 m³)。并于 2012 年 4 月在象山

港海洋牧场示范区(白石山-中央山北侧)建成 1 个人工鱼礁群(共 3.6×10^4 m³),移植大型海藻 10ha,放流各类鱼苗 2.4×10^6 尾。

海洋牧场是基于人工鱼礁的一种新型渔业资源增殖模式,科学地设计和设置人工鱼礁,可以明显改善水域环境,达到诱集和增殖渔业资源的效果(Dupont, 2008)。浮游植物是海洋生态系统中最重要初级生产者,其群落结构易受到环境因子的影响,对环境的变化比较敏感(吴玉霖等,2005)。目前,国内外学者大多通过对投礁前后以及投礁区域和未投礁区域鱼类、无脊椎动物(Fabi *et al.*, 2002; 汪振华等, 2010)、底栖动物(Boaventura *et al.*, 2006; 廖一波等,

* 公益性行业(农业)科研专项,201303047 号;国家自然科学基金项目,31671097 号;国家海洋局海域使用金专项(2012)。刘懂,硕士研究生, E-mail: 18815282717@163.com

通讯作者: 王一农,副教授, E-mail: wangyinong@nbu.edu.cn

收稿日期: 2016-05-03, 收修改稿日期: 2016-06-12

2014)、附着生物(张伟等, 2009)群落结构的对比分析, 来阐明人工鱼礁生态修复和资源增殖的效果, 但对人工鱼礁区或增殖区浮游植物的研究报道较少(Chen *et al.*, 2008; 雷安平等, 2009; 江志兵等, 2012)。其中江志兵等(2012)对象山港 2008 年投礁后鱼礁区和对照区的浮游植物群落进行了研究, 本文对象山港 2012 年投礁后海洋牧场示范区和对照区浮游植物的群落特征及其与主要环境因子的关系进行了研究, 以期合理地评价示范区建设的资源和生态修复效

果提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域与站位设置

象山港海洋牧场示范区位于白石山-中央山北侧, 象山港航道以南 600m 海域, 海域面积 4.2km²。本次调查在示范区及其邻近海域共设 10 个站点。其中 1—5 号站点位于示范区, 6—10 号站点位于对照区, 具体站点设置见图 1。

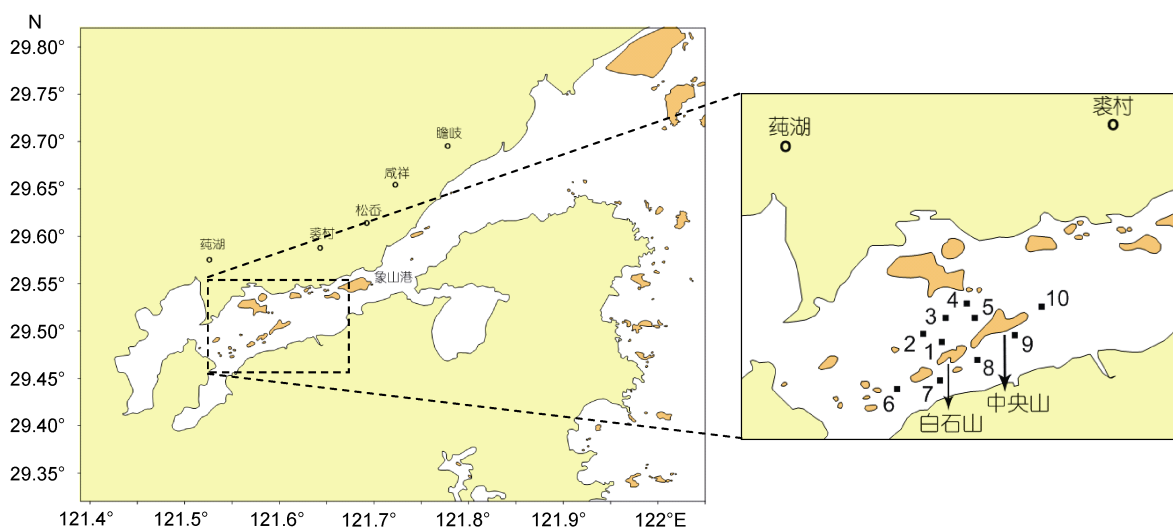


图 1 研究区域和调查站点

Fig.1 Study area and sampling stations in the Xiangshan Bay

1.2 样品采集与分析

采样时间为 2014 年 4 月(春)、7 月(夏)、10 月(秋)和 2015 年 1 月(冬)。样品的采集用浅水 III 型浮游生物网(网口内径为 37cm, 网目孔径 77 μ m)垂直拖网, 5%福尔马林溶液现场固定。各样品在实验室浓缩到 100ml, 并进行种类鉴定和个体计数。所有操作均按《海洋调查规范》(GB/T 12763.6-2007)执行(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008)。采集浮游植物的同时, 测量表层水(0.5m)的温度、盐度、pH 值、溶解氧(DO)、营养盐(NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N、PO₄-P 和 SiO₃-Si), 用 SZC15-2 型 CTD 测量仪测量水深。

1.3 数据处理与分析

用 PRIMER 5.0 版软件对浮游植物的丰度进行平方根转换, 建立 Bray-Curtis 相似性聚类分析, 并进行非度量多维尺度排序(nMDS: non-metric multidimensional scaling)。浮游植物群落的时间、区域性差异用双因素相似性(ANOSIM: analysis of similarity)分析。同时, 用 Primer 5.0 版软件计算浮游植物的 Margalef 丰富度

指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J)。用优势度指数(Y)分析浮游植物的优势种(沈国英等, 2002)。用优势种更替率(R)分析优势种的季节演替(郑白雯等, 2014)。

用 SPSS 22.0 版软件对浮游植物丰度、群落多样性指数和环境因子进行以季节和区域为因素的双因素方差分析, 各变量分析前进行正态检验($K-S$ 检验)和方差齐性检验。若不满足上述要求, 则对参数进行非参数检验($K-W$ 检验)。用 Canoco 4.5 版软件分析环境因子对浮游植物物种分布的影响, 本文将研究区域的优势种作为排序的物种, 对排序物种数据进行除趋势对应分析(DCA), 发现 4 个轴中梯度最大值 <3, 故选择 RDA 进行物种-环境相关性分析。采样站位平面图用 Surfer 11.0 软件绘制。

2 结果

2.1 种类组成

调查海域共鉴定出浮游植物 95 种(含变种、变型),

隶属于 7 门 59 属, 其中硅藻门 31 属 64 种; 绿藻门 10 属 10 种; 甲藻门 6 属 9 种; 蓝藻门 7 属 7 种; 金藻门和裸藻门均为 2 属 2 种; 黄藻门 1 属 1 种。浮游植物各门类种类数的时空分布见图 2, 种类数的季节分布表现为冬季(48 种)>秋季(44 种)>夏季=春季(39 种), 区域分布表现为示范区(76 种)>对照区(56 种)。

2.2 优势种

调查海域 4 个季节浮游植物优势种($Y \geq 0.02$)共有 13 种, 均隶属于硅藻(表 1)。其中春季优势种共 4 种, 主要优势种为琼氏圆筛藻(*Coscinodiscus jonesianus*)和太阳漂流藻(*Planktoniella sol*), 琼氏圆筛藻占据绝对优势($Y=0.651$); 夏季优势种共 8 种, 主要优势种和春季一致, 但太阳漂流藻演替为最主要优势种; 秋季优势种共 5 种, 整齐圆筛藻(*C. concinnus*)、琼氏圆筛藻和星脐圆筛藻(*C. asteromphalus*)成为主要优势种;

冬季优势种共 9 种, 太阳漂流藻、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)和辐射圆筛藻(*C. radiatus*)演替为主要优势种, 琼氏圆筛藻和星脐圆筛藻为全年优势种。秋季到冬季的更替率最高(72.7%), 其次为夏季到秋季(70%), 春季到夏季最低, 也有 50%, 表明存在明显的季节演替。示范区和对照区的优势种各 7 种, 主要优势种均为琼氏圆筛藻、太阳漂流藻和整齐圆筛藻。

2.3 丰度和生物多样性

双因素方差分析结果表明(图 3): 季节间, 浮游植物丰度、Margalef 丰富度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)均存在极显著差异($P < 0.01$)。秋、春季全区的细胞丰度(121.59 和 79.39×10^4 个/ m^3)显著高于冬、夏季(13.05 和 7.05×10^4 个/ m^3), 四季均值为 55.27×10^4 个/ m^3 ; D 、 H' 和 J 均表

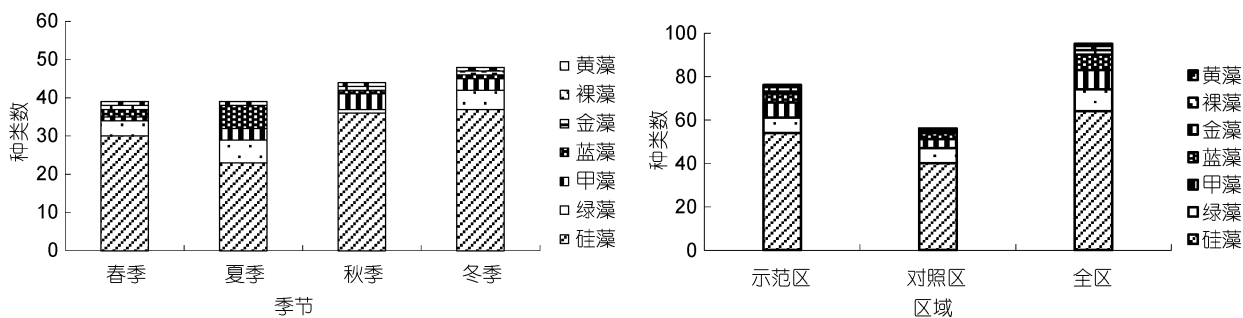


图 2 浮游植物各门类种类数的时空变化
Fig.2 Temporal and spatial variations of phytoplankton taxonomy

表 1 浮游植物优势种与优势度(Y)
Tab.1 Dominant species of phytoplankton and their dominance (Y)

优势种	季节				区域		
	春	夏	秋	冬	示范区	对照区	全区
中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	—	—	—	0.129	0.044	0.021	0.032
太阳漂流藻 <i>Planktoniella sol</i>	0.139	0.333	—	0.158	0.144	0.172	0.158
星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	0.087	0.031	0.194	0.048	0.097	0.082	0.090
整齐圆筛藻 <i>C. concinnus</i>	—	0.048	0.301	0.030	0.081	0.110	0.095
格氏圆筛藻 <i>C. granii</i>	—	—	0.167	—	0.048	0.036	0.042
琼氏圆筛藻 <i>C. jonesianus</i>	0.651	0.220	0.204	0.067	0.275	0.297	0.286
辐射圆筛藻 <i>C. radiatus</i>	0.038	0.039	—	0.115	0.039	0.057	0.048
有棘圆筛藻 <i>C. spinosus</i>	—	0.020	—	—	—	—	—
细弱圆筛藻 <i>C. subtilis</i>	—	—	0.052	—	—	—	—
中华盒形藻 <i>Biddulphia sinensis</i>	—	—	—	0.023	—	—	—
洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	—	0.045	—	0.029	—	—	—
尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	—	—	—	0.025	—	—	—
奇异菱形藻 <i>Nitzschia paradoxa</i>	—	0.030	—	—	—	—	—

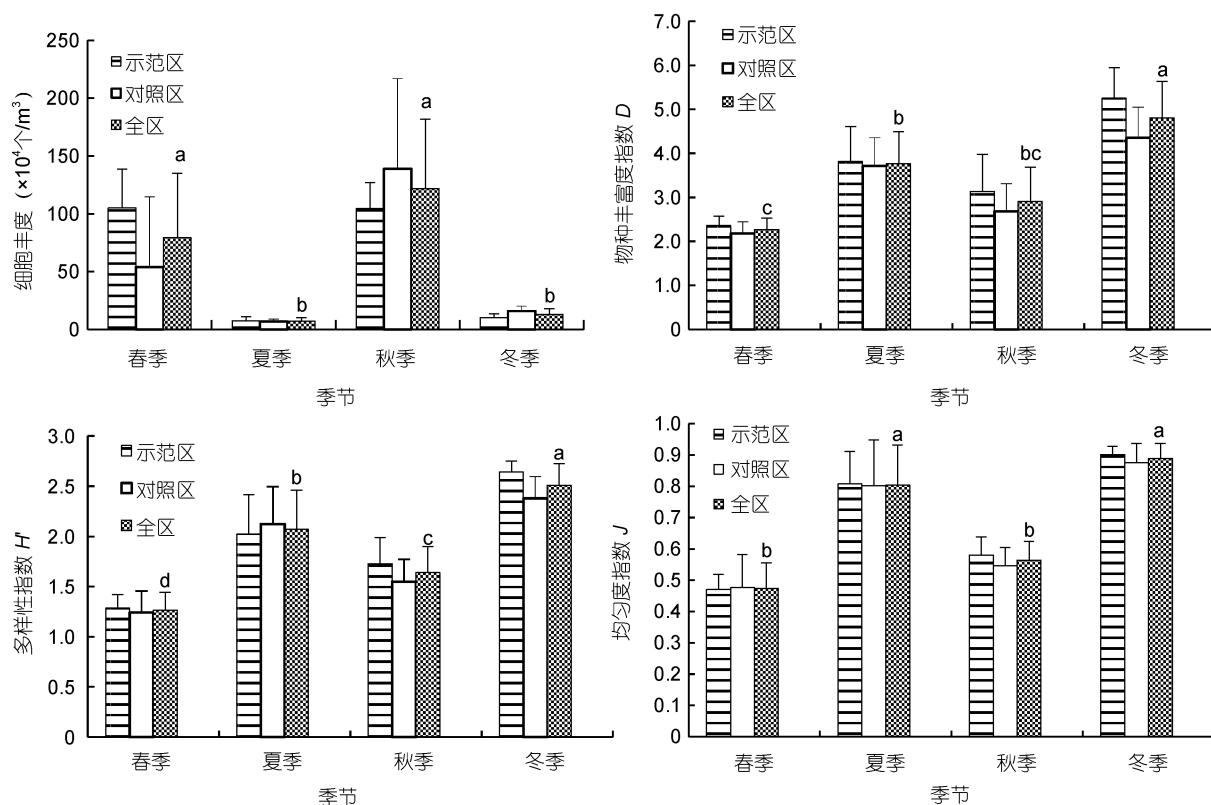


图 3 浮游植物丰度和生物多样性指数(Mean±SD)的时空变化

Fig.3 Temporal and spatial variations of density and biodiversity indices for phytoplankton

注: 丰度和生物多样性指数比较均采用双因素方差分析; 不同小写字母表示季节间存在极显著差异($P < 0.01$)

现为冬>夏>秋>春季。区域间, 各季节示范区与对照区的浮游植物丰度、 D 、 H 和 J 均无显著差异($P > 0.05$)。示范区春、夏季浮游植物细胞丰度(104.98 和 7.32×10^4 个/ m^3)高于对照区(53.76 和 6.78×10^4 个/ m^3), 秋、冬季(104.38 和 10.16×10^4 个/ m^3)低于对照区(138.8 和 15.94×10^4 个/ m^3); D 表现为示范区略高于对照区; H 表现为春、秋、冬季示范区高于对照区, 夏季反之; J 表现为夏、秋、冬季示范区高于对照区, 春季反之。示范区丰度、多样性指数(D 、 H 和 J)的四季均值均高于对照区。

2.4 群落结构

聚类分析结果表明(图 4), 除冬季 1 号站点有些偏离冬季群落外, 不同季节间浮游植物群落组成差异明显, 而各季节示范区和对照区群落组成相似度较高。nMDS 排序结果(图 5)与聚类分析结果基本一致, 因此可将浮游植物群落大致划分为春、夏、秋、冬季 4 个类群。双因素相似性分析结果(ANOSIM)也表明(表 2), 季节间浮游植物群落组成存在显著性差异($R = 0.95$, $P = 0.001$), 各季节区域间无显著性差异($R = 0.10$, $P = 0.088$)。

2.5 浮游植物与环境因子的关系

环境因子的时空特征见表 3。季节间, 除水深外, 其它环境因子(水温、盐度、pH、DO、 NO_3-N 、 NO_2-N 、 NH_4-N 、 PO_4-P 和 SiO_3-Si)均存在极显著差异($P < 0.01$)。区域间, 上述环境因子差异均不显著($P > 0.05$)。根据 4 个季节浮游植物的种类和环境数据, 选取 13 种优势种和 10 种环境因子, 用于 RDA 分析。共产生 4 个 RDA 排序轴, 第 1 轴与所有典范轴均呈极显著差异($P = 0.002$), 且前 2 个排序轴特征值占总特征值的 73.40%, 两主要排序轴(第 1 轴和第 2 轴)的特征值分别为 0.451 和 0.276, 各自的物种-环境相关系数分别为 0.909 和 0.805, 表明 RDA 排序结果良好。

优势种与环境因子间的 RDA 排序图表明(图 6A), 象山港示范区附近海域浮游植物的主要影响因素为盐度、水温、营养盐(NO_3-N 、 PO_4-P 、 SiO_3-Si)和 DO。其中与第 1 轴正相关性较强的因子为 NO_3-N 、 PO_4-P 和 SiO_3-Si , 相关系数分别为 0.809、0.771 和 0.731; 与第 1 轴负相关性较强的环境因子为盐度和水温, 相关系数分别为 -0.856、-0.794。第 2 轴与 DO 呈最大正相关, 相关系数为 0.366, 与 NO_2-N 呈最大负相关,

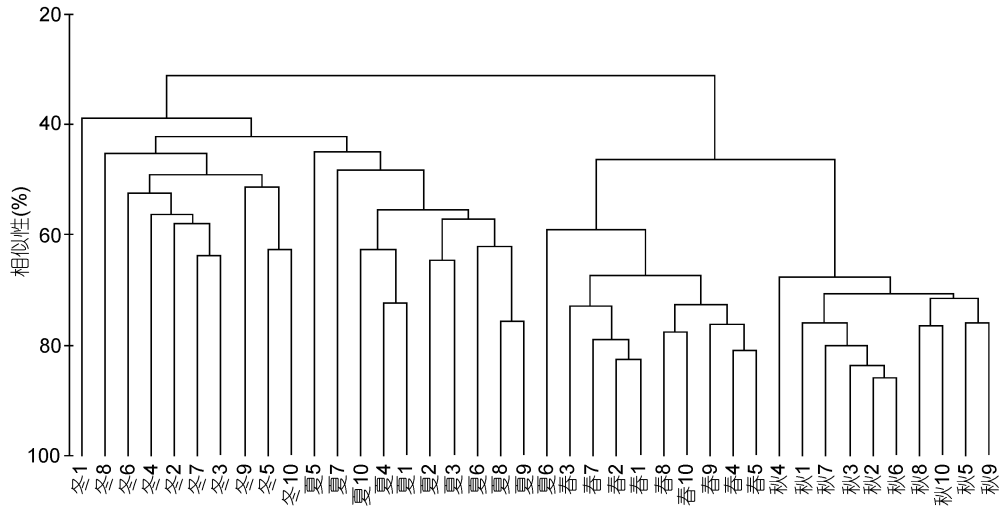


图 4 不同季节浮游植物群落聚类分析

Fig.4 Cluster analysis on phytoplankton community in different seasons

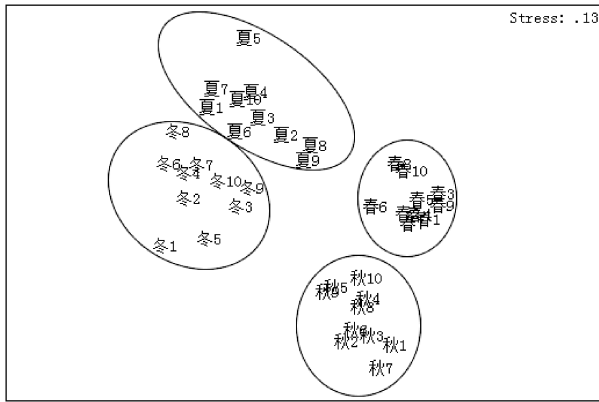


图 5 浮游植物群落的多维尺度分析

Fig.5 The nMDS of phytoplankton communities

表 2 群落结构时空差异的 ANOSIM 分析结果

Tab.2 ANOSIM results on temporal and spatial differences in community structure

组别	Two-way ANOSIM	
	R	P
季节	0.95	0.001
春 vs 夏	0.90	0.001
春 vs 秋	0.97	0.002
春 vs 冬	0.99	0.001
夏 vs 秋	0.99	0.001
夏 vs 冬	0.75	0.001
秋 vs 冬	1.00	0.001
示范区 vs 对照区	0.10	0.088

相关系数为-0.409。因此,第 1 轴基本反映了盐度、水温和营养盐($\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$)的变化,第 2

轴主要反映 DO 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的变化。琼氏圆筛藻、太阳漂流藻、辐射圆筛藻、整齐圆筛藻、星脐圆筛藻、中肋骨条藻和尖针杆藻等主要优势种与盐度、温度、营养盐($\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$)和 DO 等因子密切相关,且响应机制有所不同。

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构的季节变化

本次调查共鉴定浮游植物 95 种,其中硅藻门在种类和丰度上均占有绝对优势(分别为 67.37%、98.28%),表明示范区及其邻近海域属于硅藻型浮游植物群落,这与尤仲杰等(2011)的研究结果大体一致。此现象可能与象山港海域硅酸盐含量丰富(张丽旭等, 2008),且硅酸盐含量影响硅藻的生长繁殖(谢文玲等, 2007)有关。相较于其它季节,夏季硅藻门的种类所占比重(58.97%)明显低于秋季(81.82%)、冬季(77.08%)和春季(76.92%),而蓝、绿藻所占比重明显升高(均为 15.38%)。这可能是由于乌沙山电厂温排水对海洋牧场示范区及其邻近海域升温影响程度较大(黄秀清等, 2014),且升温过高会导致蓝、绿藻数量增多,而抑制硅藻的生长(Snoeijs *et al*, 1989; 於凡等, 2010)。

浮游植物丰度呈现周年内出现两个峰值的双周期型的季节变动特点,秋、春季明显高于冬、夏季。夏季处于丰水期,象山港湾内无机氮含量相对较低,且示范区内大面积的海藻养殖会消耗大量的营养盐,导致夏季浮游植物的丰度最低(吕华庆等, 2009)。秋季,长江冲淡水、江浙沿岸流和内陆径流汇入象山港,

表 3 环境因子(Mean±SD)的时空特征
Tab.3 Temporal and spatial characteristics of environmental variables

因子	春季			夏季		
	示范区	对照区	全区	示范区	对照区	全区
水深(m)	14.49±6.83	12.34±5.17	13.42±6.15	14.90±6.50	12.64±5.43	13.77±6.09
水温()	17.37±0.27	17.07±0.57	17.22±0.47 ^c	28.26±0.42	28.10±0.18	28.18±0.33 ^a
盐度	26.21±0.12	26.00±0.60	26.10±0.44 ^a	23.12±0.32	22.86±0.61	22.99±0.50 ^c
pH	7.66±0.01	7.69±0.07	7.68±0.05 ^{ab}	7.75±0.03	7.70±0.05	7.73±0.04 ^{ab}
DO(mg/L)	9.88±0.10	9.35±0.22	9.62±0.31 ^b	7.63±0.58	10.23±2.09	8.93±2.01 ^b
NO ₃ -N(mg/L)	0.508±0.025	0.448±0.029	0.478±0.040 ^c	0.673±0.060	0.652±0.080	0.662±0.062 ^b
NO ₂ -N(mg/L)	0.034±0.002	0.027±0.005	0.031±0.004 ^b	0.055±0.009	0.061±0.005	0.058±0.008 ^a
NH ₄ -N(mg/L)	0.074±0.012	0.077±0.004	0.075±0.010 ^a	0.085±0.031	0.076±0.014	0.079±0.019 ^a
PO ₄ -P(mg/L)	0.060±0.012	0.044±0.008	0.052±0.009 ^d	0.068±0.005	0.066±0.003	0.067±0.004 ^c
SiO ₃ -Si(mg/L)	0.806±0.029	0.749±0.045	0.778±0.036 ^b	1.032±0.099	0.945±0.008	0.989±0.083 ^c

因子	秋季			冬季		
	示范区	对照区	全区	示范区	对照区	全区
水深(m)	14.30±6.66	12.10±4.72	13.20±5.87	14.26±7.51	12.40±5.57	13.33±6.68
水温()	23.06±0.37	22.86±0.56	22.95±0.49 ^b	11.29±0.34	11.05±0.28	11.17±0.34 ^d
盐度	20.05±0.16	20.10±0.33	20.08±0.26 ^d	23.67±0.28	23.87±0.36	23.77±0.34 ^b
pH	7.25±0.75	7.49±0.31	7.37±0.258 ^b	7.95±0.03	7.98±0.02	7.96±0.02 ^a
DO(mg/L)	10.02±1.50	9.20±1.46	9.61±1.53 ^b	14.50±1.33	13.75±1.99	14.13±1.73 ^a
NO ₃ -Nmg/L)	0.812±0.086	0.833±0.006	0.822±0.062 ^a	0.728±0.040	0.788±0.025	0.758±0.029 ^a
NO ₂ -N(mg/L)	0.027±0.005	0.028±0.013	0.027±0.010 ^c	0.027±0.002	0.020±0.012	0.024±0.005 ^c
NH ₄ -N(mg/L)	0.049±0.011	0.085±0.031	0.067±0.029 ^a	0.034±0.010	0.037±0.013	0.035±0.012 ^b
PO ₄ -P(mg/L)	0.087±0.010	0.081±0.011	0.085±0.011 ^a	0.082±0.012	0.066±0.008	0.074±0.009 ^b
SiO ₃ -Si(mg/L)	1.352±0.088	1.280±0.117	1.316±0.110 ^a	1.129±0.045	1.186±0.049	1.158±0.047 ^b

注: 丰度和生物多样性指数比较均采用双因素方差分析; 不同小写字母表示季节间存在极显著差异($P<0.01$)

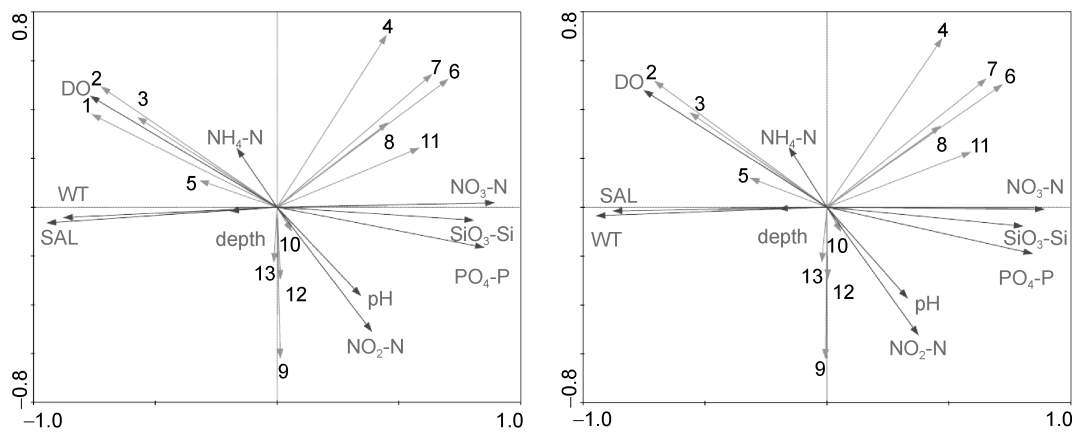


图 6 浮游植物优势种与环境因子间的 RDA 排序图

Fig.6 RDA (redundancy analysis) ordination of environmental variables with dominant species of phytoplankton
注: A: 13 种优势种与环境因子间的 RDA 排序图; B: 剔除太阳漂藻后的 RDA 排序图。Tem: 水温; Sal: 盐度; 1: 太阳漂藻 *Planktoniella sol*; 2: 琼氏圆筛藻 *C. jonesianus*; 3: 辐射圆筛藻 *C. radiatus*; 4: 星脐圆筛藻 *C. asteromphalus*; 5: 有棘圆筛藻 *C. spinosus*; 6: 格氏圆筛藻 *C. granii*; 7: 整齐圆筛藻 *C. concinnus*; 8: 细弱圆筛藻 *C. subtilis*; 9: 洛氏角毛藻 *Chaetoceros lorenzianus*; 10: 奇异菱形藻 *Nitzschia paradoxa*; 11: 中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*; 12: 尖针杆藻 *Synedra acus*; 13: 中华盒形藻 *Biddulphia sinensis*

营养盐含量最高, 导致出现秋季高峰。冬季海水混合较强, 悬浮物浓度升高, 透明度降低, 且水温较低, 不利于浮游植物光合作和生长繁殖, 导致冬季丰度较低。春季随着水温不断升高, 加上冬季低数量的浮游植物减少了对营养盐的消耗, 导致春季浮游植物丰度的突增。

浮游植物优势种以沿岸内湾性类群为主, 并伴有外海暖流性、河溪淡水性类群(刘莲等, 2013)。优势种均为硅藻, 且存在明显的季节演替现象, 这主要是因为象山港水体的混合机理存在季节差异(中国海湾志编纂委员会, 1992; 董礼先等, 2000)。春季, 随着水温的升高, 琼氏圆筛藻为示范区及邻近海域的绝对优势种($Y=0.651$), 优势种组成较单一, 使得该季生物多样性指数(D 、 H' 和 J)显著低于其它季节。夏季, 台湾暖流的影响较大, 太阳漂流藻等暖水高盐性种类流入港内, 演替为主要优势种。秋季, 主要受到长江冲淡水、浙江沿岸流的影响, 水体盐度降到最低, 太阳漂流藻的优势度明显下降, 整齐圆筛藻和琼氏圆筛藻演替为主要优势种。冬季, 随水温降低和盐度的升高, 太阳漂流藻和广温性的中肋骨条藻演替为主要优势种。

3.2 示范区建设对浮游植物群落的影响

本次研究结果表明, 各季节示范区和对照区浮游植物的丰度、生物多样性指数(D 、 H' 和 J)和群落组成均无显著性差异, 象山港 2008 年人工鱼礁投放后浮游植物和大型底栖动物也表现出类似的规律(江志兵等, 2012; 廖一波等, 2014)。但与建设前相比, 浮游

植物的丰度、多样性指数(H' 和 J)与 DO 均有所提高(表 4), 这表明示范区的建设(2012 年)对其周围海域的资源与环境有一定的修复作用, 但效果并不显著。其主要原因可能为: (1) 示范区位于白石山邻近海域, 海底平坦, 底质类型为粉砂质粘土, 水深 10—15m, 适合投放以贝、虾、藻类为主要增殖对象的人工鱼礁(虞聪达, 2004)。示范区人工鱼礁的投放会影响其周围海域原有的流场结构, 并围绕鱼礁形成新的流场效应(迎流面上升流和背流面涡流), 加速了底层沉积物中的营养盐和有机质向水体中的输送, 从而促进示范区浮游植物的生长与繁殖(Falcão *et al*, 2009; Jiang *et al*, 2010)。(2) 人工鱼礁的投放会短期破坏原有的生境, 这种负效应转化为正效应一般要历时 1—2 年(王伟定等, 2010), 本次调查距示范区的建设仅 2 年, 使得其生态效应不显著。(3) 示范区位于象山港狭湾内段, 相较于人工投礁对水体的混合作用, 投礁海域以重力环流和潮振荡为主导的纵向弥散作用更加显著(董礼先等, 1999; 王伟定等, 2010; 吴忠鑫等, 2012)。

此外, 本次投礁后示范区的丰度、 H' 和 J 的四季均值都略高于对照区, 且示范区的浮游植物种类数(76 种)也高于对照区(56 种), 这与陈海峰等(2013)的研究结果一致, 说明建设后示范区的环境较对照区更适合浮游植物的生长繁殖。而 2008 年人工鱼礁投放后结果与之相反(江志兵等, 2012), 这可能与本次人工鱼礁投放的规模($3.6 \times 10^4 \text{ m}^3$)明显高于 2008 年($0.5 \times 10^4 \text{ m}^3$), 且增殖放流力度更大有关(虞聪达, 2004)。

表 4 象山港浮游植物的时空变化
Tab.4 Temporal and spatial characteristics of phytoplankton in Xiangshan Bay

年份	季节	调查区域	丰度($\times 10^4 \text{ ind./m}^3$)	H'	J	DO	参考文献
2006—2007	四季	示范区附近	16.33	—	—	7.21	(尤仲杰等, 2011)
		示范区	44.50	1.49	0.43	8.45	
2010	四季	对照区	54.34	1.58	0.43	8.48	(江志兵等, 2012)
		全区	49.42	1.54	0.43	8.47	
		示范区	56.71	1.92	0.69	10.51	
2014—2015	四季	对照区	53.82	1.82	0.67	10.63	本文
		全区	55.27	1.87	0.68	10.57	

3.3 环境因子对浮游植物群落结构的影响

RDA 分析结果表明(图 6A), 影响象山港海洋牧场示范区及其邻近海域浮游植物群落结构的最主要环境因子为盐度, 其次为水温、营养盐($\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$

和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$)和 DO, 且各种浮游植物优势种对上述环境因子的响应机制有所不同。这与优势种的生态习性密切相关(高亚辉等, 2003; 林更铭等, 2011)。其中: 琼氏圆筛藻属于暖水种, 故其与水温呈正相关, 春、

夏、秋季(温度相对较高)优势度明显高于冬季; 太阳漂流藻属于暖水高盐种, 故其与盐度和水温呈正相关, 成为春、夏季(盐度和温度均较高)的主要优势种; 整齐圆筛藻属于低盐种, 故其与盐度呈负相关, 成为秋季(盐度最低)的主要优势种; 浮游植物的生长与营养盐的浓度密切相关, 且营养盐浓度的升高有助于提高硅藻门的丰度(Lv *et al.*, 2014; Licursi *et al.*, 2016)。本次研究优势种均为硅藻, 故绝大部分优势种与营养盐($\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$)密切正相关, 秋、冬季(营养盐浓度较高)的优势度明显高于春、夏季; 秋季较低的盐度和冬季较低的温度分别成为限制太阳漂流藻(高盐种)和琼氏圆筛藻(暖水种)生长的主要因子, 导致太阳漂流藻、琼氏圆筛藻与营养盐呈负相关。琼氏圆筛藻、太阳漂流藻和辐射圆筛藻作为全区的主要优势种, 它们光合作用产生的氧气是水体中溶解氧的重要来源(孟繁丽等, 2013), 故其与 DO 呈正相关。

本文的研究结论与 Lv 等(2014)、杨晓改等(2014)对影响浮游植物分布的主要环境因子的分析有一定差异, 其认为水温是影响亚热带海湾浮游植物群落结构最主要的因子。这主要是因为太阳漂流藻等高盐种的丰度与盐度的变化密切相关, 而温度对其影响相对较小, 当其丰度和优势度较大时, 可能会影响 RDA 排序的结果。对浮游植物原始数据分析后, 发现太阳漂流藻春、夏和冬季的优势度较大, 且是夏、冬季最主要的优势种。把太阳漂流藻剔除后, 将其余 12 种优势种与环境因子进行 RDA 排序(图 6B), 发现水温成为影响浮游植物群落结构的最主要的因子。这表明, 太阳漂流藻的大量繁殖导致盐度成为影响浮游植物群落结构最主要的环境因子。究其原因, 可能为: (1) 台湾暖流汇入象山港, 会携带一些太阳漂流藻, 导致其丰度升高。(2) 人工鱼礁的投放会改变其周围海域原有的流场结构, 使得底层高盐水与表层水充分混合(董礼先等, 2000), 导致表层水盐度升高, 有利于太阳漂流藻的生长与繁殖。

参 考 文 献

- 王伟定, 梁 君, 章守宇, 2010. 人工鱼礁建设对浙江嵊泗海域营养盐与水质的影响. 水生生物学报, 34(1): 78—87
- 尤仲杰, 焦海峰, 2011. 象山港生态环境保护与修复技术研究. 北京: 海洋出版社, 125—137
- 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, 2008. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查. 北京: 中国标准出版社, 41—44
- 中国海湾志编纂委员会, 1992. 中国海湾志: 第五分册. 北京: 海洋出版社, 166—233
- 吕华庆, 常抗美, 石钢德, 2009. 象山港氮、磷营养盐环流和分布规律的研究. 海洋与湖沼, 40(2): 138—144
- 刘 莲, 任 敏, 华敏敏等, 2013. 象山港西部海域夏季浮游植物生态学研究: I. 种类组成及年际变化. 海洋科学, 37(5): 94—99
- 刘晶晶, 曾江宁, 陈全震等, 2010. 象山港网箱养殖区水体和沉积物的细菌生态分布. 生态学报, 30(2): 377—388
- 江志兵, 陈全震, 寿 鹿等, 2012. 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, 32(18): 5813—5824
- 杨晓改, 薛 莹, 咎肖肖等, 2014. 海州湾及其邻近海域浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 25(7): 2123—2131
- 吴玉霖, 孙 松, 张永山, 2005. 环境长期变化对胶州湾浮游植物群落结构的影响. 海洋与湖沼, 36(6): 487—498
- 吴忠鑫, 张秀梅, 张 磊等, 2012. 基于 Ecopath 模型的荣成俚岛人工鱼礁区生态系统结构和功能评价. 应用生态学报, 23(10): 2878—2886
- 汪振华, 章守宇, 王 凯等, 2010. 三横山人工鱼礁区鱼类和大型无脊椎动物诱集效果初探. 水产学报, 34(5): 751—759
- 沈国英, 施并章, 2002. 海洋生态学. 2 版. 北京: 科学出版社, 158—163
- 张 伟, 李纯厚, 贾晓平等, 2009. 环境因子对大亚湾人工鱼礁上附着生物分布的影响. 生态学报, 29(8): 4053—4060
- 张丽旭, 蒋晓山, 蔡燕红, 2008. 象山港海水中营养盐分布与富营养化特征分析. 海洋环境科学, 27(5): 488—491
- 陈海峰, 王云龙, 廖 勇等, 2013. 象山港人工鱼礁区浮游植物群落特征. 海洋渔业, 35(4): 396—404
- 林更铭, 杨清良, 2011. 全球气候变化背景下台湾海峡浮游植物的长期变化. 应用与环境生物学报, 17(5): 615—623
- 於 凡, 张永兴, 曹 颖, 2010. 全球变暖背景下核电站温排水对海洋生态系统的影响. 海洋湖沼通报, (2): 155—161
- 郑白雯, 曹文清, 林元烧等, 2014. 北部湾北部生态系统结构与功能研究 II. 浮游动物数量分布及优势种. 海洋学报, 36(4): 82—90
- 孟繁丽, 何连生, 李一蕸等, 2013. 白洋淀草型与藻型水域溶解氧含量的差异性. 湿地科学, 11(2): 292—296
- 高亚辉, 虞秋波, 齐雨藻等, 2003. 长江口附近海域春季浮游硅藻的种类组成和生态分布. 应用生态学报, 14(7): 1044—1048
- 黄秀清, 叶属峰, 2014. 象山港电厂温排水温升的监测及影响评估. 北京: 海洋出版社, 127-131
- 董礼先, 苏纪兰, 1999. 象山港水交换数值研究 II. 模型应用和水交换研究. 海洋与湖沼, 30(5): 465—470
- 董礼先, 苏纪兰, 2000. 象山港盐度分布和水体混合 II. 混合分析. 海洋与湖沼, 31(3): 322—326
- 曾相明, 管卫兵, 潘 冲, 2011. 象山港多年围填海工程对水动力影响的累积效应. 海洋学研究, 29(1): 73—83
- 谢文玲, 陈长平, 高亚辉, 2007. 台湾海峡中北部至南麂列岛海域 2005 年冬季硅藻群落结构特征. 台湾海峡, 26(3): 370—379
- 雷安平, 陈 欢, 陈菊芳等, 2009. 大亚湾人工鱼礁区浮游植

- 物的种类组成和生物量研究. 海洋技术, 28(4): 83—88
- 虞聪达, 2004. 舟山渔场人工鱼礁投放海域生态环境前期评估. 水产学报, 28(3): 316—322
- 廖一波, 曾江宁, 寿 鹿等, 2014. 象山港人工鱼礁投放对大型底栖动物群落结构的影响. 海洋与湖沼, 45(3): 488—495
- Boaventura D, Moura A, Leitão F *et al*, 2006. Macrobenthic colonisation of artificial reefs on the southern coast of Portugal (Ancão, Algarve). *Hydrobiologia*, 555(1): 335—343
- Chen Y H, Wang H J, Yang Y F, 2008. Characteristics of phytoplankton community in Daya Bay artificial reef area, Guangdong China. *Ecological Science*, 27(5): 429—430
- Dupont J M, 2008. Artificial reefs as restoration tools: a case study on the West Florida Shelf. *Coastal Management*, 36(5): 495—507
- Fabi G, Sala A, 2002. An assessment of biomass and diel activity of fish at an artificial reef (Adriatic Sea) using a stationary hydroacoustic technique. *ICES Journal of Marine Science*, 59(2): 411—420
- Falcão M, Santos M N, Drago T *et al*, 2009. Effect of artificial reefs (southern Portugal) on sediment-water transport of nutrients: importance of the hydrodynamic regime. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 83(4): 451—459
- Jiang Z Y, Liang Z L, Tang Y L *et al*, 2010. Numerical simulation and experimental study of the hydrodynamics of a modeled reef located within a current. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 28(2): 267—273
- Licursi M, Gómez N, Sabater S, 2016. Effects of nutrient enrichment on epipelagic diatom assemblages in a nutrient-rich lowland stream, Pampa Region, Argentina. *Hydrobiologia*, 766: 135—150
- Lv H, Yang J, Liu L M *et al*, 2014. Temperature and nutrients are significant drivers of seasonal shift in phytoplankton community from a drinking water reservoir, subtropical China. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(9): 5917—5928
- Snøeijjs P J M, Prentice I C, 1989. Effects of cooling water discharge on the structure and dynamics of epilithic algal communities in the northern Baltic. *Hydrobiologia*, 184(1—2): 99—123

COMMUNITY STRUCTURE OF PHYTOPLANKTON AND THE RELATIONSHIP WITH ENVIRONMENTAL VARIABLES IN MARINE PASTURE DEMONSTRATION AREA IN XIANGSHAN BAY

LIU Dong¹, CHEN Chen¹, WANG Li¹, JIAO Hai-Feng^{1, 2}, SUN Yuan²,
WANG Yi-Nong¹, YOU Zhong-Jie^{1, 2}

(1. School of Marine Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Ningbo Academy of Oceanology and Fisheries, Ningbo 315211, China)

Abstract Based on the phytoplankton and environment data collected from seasonal surveys in the marine pasture demonstration area and the control area of Xiangshan Bay, East China Sea between April 2014 and January 2015, the community structure of phytoplankton was studied and the relationships with environmental variables were evaluated by redundancy analysis. A total of 95 phytoplankton species belonging to 7 phyla and 59 genera were collected, including mainly Bacillariophyta (64 species), Chlorophyta (10 species), and Dinophyta (9 species). *Coscinodiscus jonesianus*, *Planktoniella sol*, and *C. asteromphalus* were the main dominant species. There were obvious seasonal variations in species composition of dominant species. Results of two-way ANOVA show that the phytoplankton abundances, the biodiversity indices (Shannon-Wiener diversity, Pielou evenness, and Margalef richness index) and the environmental variables (temperature, salinity, pH, DO, NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, PO₄-P and SiO₃-Si) were significantly different in season ($P < 0.01$). The phytoplankton abundances in autumn and spring (121.59 and 79.39×10^4 cells/m³) were significantly higher than those in winter and summer (13.05 and 7.05×10^4 cells/m³), and all the biodiversity indices were ranked as winter > summer > autumn > spring. The phytoplankton abundances, biodiversity indices, and environmental variables showed no obvious differences between the two areas ($P < 0.05$). The average annual abundance and all the biodiversity indices were ranked as demonstration area > control area, which agreed with the temporal and spatial distributions of phytoplankton community indicated by clustering and non-metric multidimensional scaling. Therefore, the construction of the marine pasture demonstration area was conducive to the growth of phytoplankton, but the resultant effect was mild. Redundancy analysis suggested that the main variables affecting the community structure were salinity, followed by temperature, nutrition (NO₃-N, PO₄-P and SiO₃-Si), and DO. Different species of phytoplankton respond to these main variables in different ways.

Key words Xiangshan Bay; marine pasture; phytoplankton; environmental variables; redundancy analysis