

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20171024002

http://www.yykxjz.cn/

苏家齐, 朱长波, 李俊伟, 李婷, 陈素文, 颀晓勇, 张博. 流沙湾浮游植物群落特征季节变化及其与养殖活动的关系. 渔业科学进展, 2018, 39(6): 11–23

Su JQ, Zhu CG, Li JW, Li T, Chen SW, Xie XY, Zhang B. Phytoplankton community characteristics in different seasons and their relationship with aquaculture in Liusha Bay. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(6): 11–23

流沙湾浮游植物群落特征季节变化及其与养殖活动的关系*

苏家齐 朱长波^① 李俊伟 李婷 陈素文 颀晓勇 张博

(农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室 中国水产科学研究院南海水产研究所

广东省渔业生态环境重点实验室 广州 510300)

摘要 流沙湾是中国海水珍珠“南珠”的主产区和广东省重要的贝类养殖区。为评估湾内养殖活动的环境效应,于 2015~2016 年对流沙湾海区进行了夏(8月)、秋(11月)、冬(2月)、春(5月)4个季节的浮游植物和海水理化因子调查。共检出浮游植物 171 种,包括硅藻门 43 属 122 种、甲藻门 10 属 44 种、蓝藻门 2 属 2 种、金藻门 2 属 2 种和裸藻门 1 属 1 种。流沙湾内湾浮游植物细胞丰度为 $(0.05\sim 79.04)\times 10^4$ 个/L,夏季>春季>秋季>冬季,且夏季丰度远大于其他三季,内湾和外湾差异不显著。春季须状角毛藻(*Chaetoceros crinitus*)、红海束毛藻(*Trichodesmium erythraeum*)和明壁圆筛藻(*Coscinodiscus debilis*)为主要优势种,夏季优势种主要为中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*),秋季优势种主要为拟弯角毛藻(*Chaetoceros pseudocurvisetus*)、奇异棍形藻(*Bacillaria paradoxa*)、洛氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*),冬季主要优势种为威氏圆筛藻(*Coscinodiscus wailesii*)、柔弱根管藻(*Rhizosolenia delicatula*)、岛脆杆藻(*Fragilaria islandica*)。其中,奇异棍形藻为春、秋、冬季的优势种,红海束毛藻为春、夏、秋季的优势种。冗余分析表明,流沙湾浮游植物优势种在春季与水温 and 氨氮密切相关,夏季受透明度显著影响,而在秋、冬季受亚硝酸氮含量影响显著。流沙湾不同养殖区的浮游植物多态性和丰度有明显季节差异。与 2012 年相比,流沙湾外湾的养殖覆盖率提高了近 50%,内湾的珍珠贝养殖减少了近 90%,养殖品种、规模和分布格局都发生了明显变化,目前流沙湾的浮游植物群落特征正是对其变化的一种响应。夏季鱼类网箱养殖提高了水域营养盐水平并降低了浮游植物多样性。大规模的扇贝养殖则导致了扇贝养殖区浮游植物丰度的降低。

关键词 流沙湾;浮游植物;聚类分析;养殖活动

中图分类号 S932.7 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2018)06-0011-13

水产养殖业属环境依赖型产业,水环境状况与周边水域环境和生态系统,从而引发新的生态效应。养殖品种的生长繁育息息相关。养殖活动也会影响养殖活动与环境之间的相互作用具有多样性和复杂

* 广东省海洋渔业科技与产业发展专项项目(Z2015013)和中央级公益性科研院所基本科研业务费南海水产研究所专项资金项目(2013ZD01)共同资助[This work was supported by Special Fund for Marine Fisheries Research and Extension of Guangdong Province (Z2015013), and Scientific Research Funds for Central Non-Profit Institutes, South China Sea Fisheries Research Institute (2013ZD01)]. 苏家齐, E-mail: sujiaqi2005@126.com

① 通讯作者:朱长波,副研究员, E-mail: changbo@scsfri.ac.cn

收稿日期:2017-10-24, 收修改稿日期:2017-12-26

性,不同的养殖模式和养殖种类的环境效应也存在较大差异。高密度养殖设施会影响海水流动,造成水文情况的改变。同时,养殖过程中,投药、施肥等养殖管理活动也会造成一定的环境压力。在鱼类网箱养殖投饲过程中产生的大量残饵和粪便会给环境带来大量的营养物质,过高的养殖密度易造成水体的富营养化和污染,进而改变周围环境的生物多样性,甚至造成养殖鱼类的死亡(Grigorakis *et al.*, 2011; Edwards, 2015)。滤食性贝类以有机碎屑和浮游生物为食,规模化养殖可引起养殖区悬浮颗粒物的衰减,影响浮游生物动力学,并加速颗粒有机物的沉积(张继红等, 2009)。相对于鱼类网箱养殖,贝类养殖对浮游生物具有调控作用,一定程度上可以修复或延缓水体的富营养化(张继红等, 2013; 唐启升等, 2016; 蒋增杰等, 2012)。

流沙湾(22.36°~20.50°N, 109.80°~110.02°E)位于广东省湛江市雷州半岛西南部,为西北向呈葫芦形的半封闭海湾,面积约为 69 km²,是中国最大的海水珍珠育苗与养殖基地,海水珍珠产量占全国的 60%以上。自 2005 年以来,流沙湾周边养殖户们先后引入了墨西哥湾扇贝(*Argopecten irradians concentricus*)、卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)、华贵栉孔扇贝(*Chlamys nobilis*)等养殖品种,至此,流沙湾形成了多品种与模式

共存的养殖格局。随着扇贝等新兴品种养殖生产的扩大,流沙湾的养殖区域和养殖布局也随之发生改变。2015 年流沙湾的养殖面积已达到 16 km²,占其总面积的近 1/4。与 2012 年相比,扇贝养殖面积由 1132 hm² 增加到 1400 hm²,珍珠贝养殖面积由 272 hm² 下降至约 100 hm²,网箱养殖面积约为 95 hm²,其中,新增深水网箱约 27 hm²。

流沙湾是粤西典型的养殖海湾,自 2010 年,湾内养殖品种和布局一直在不断调整中,养殖格局的变化必然引起水域环境的响应。多元的养殖品种和养殖方式共同作用,及其与环境因素相互作用,可能对流沙湾的浮游植物的群落结构特征产生潜在影响。本研究针对流沙湾水域开展浮游植物的调查,并对珍珠贝、扇贝和鱼类网箱等不同养殖类型海域的浮游植物群落结构和环境因子进行对比分析,探讨养殖活动对流沙湾浮游植物群落的影响,进而为流沙湾养殖结构优化和生态环境评价提供一定的参考。

1 材料与方法

流沙湾海域养殖品种呈多元化,不同品种的养殖方式与养殖周期差异较大,主要养殖品种及养殖周期见表 1。

表 1 流沙湾水域养殖情况
Tab.1 The information of aquaculture in Liusha Bay

养殖方式 Breeding pattern	主要养殖品种 Main breeding species	放苗时间 Starting time	收获时间 Harvest time	养殖周期 Breeding cycle
鱼类小网箱养殖 Traditional fish cage	卵形鲳鲹 <i>T. ovatus</i>	当年 4 月 April	当年 11 月之前 Before November in the current year	7~8 个月 7~8 months
贝类筏式养殖 Raft breeding	墨西哥湾扇贝 <i>A. irradians concentricus</i>	当年 7~10 月 July to October	当年 5 月之前 Before May in the current year	6~8 个月 6~8 months
	华贵栉孔扇贝 <i>C. nobilis</i>	当年 8 月~次年 1 月 August to January in the next year	全年 Whole year	约 1 年 Nearly 1 year
贝类筏式、桩式养殖 Raft or pile type breeding	合浦珠母贝 <i>Pinetada fucata</i>	3~4 月、8~12 月 March to April, August to December	—	1~2 年 1~2 years

1.1 采样站位点的设定

分别于 2015 年 8 月(夏季)、11 月(秋季)和 2016 年 2 月(冬季)、5 月(春季)在流沙湾内港、外港布设 12 个站位,进行 4 个航次的采样调查。采样站位如图 1 所示。其中,扇贝养殖区有 1、2、3 和 6 号站位,珠母贝养殖区有 7 号站。8 号站位位于湾口鱼类网箱

养殖区,4 和 9 号站位分别位于内、外港主航道,5 号站位为外海边界,10 和 11 号站位为内湾采样点,12 号站位为外湾近岸采样点。

1.2 浮游植物的采集与分析

浮游植物样品的采集与定量参照《海洋调查规范》(GB17378.7-2007)。定性样品采用浅水Ⅲ型浮游

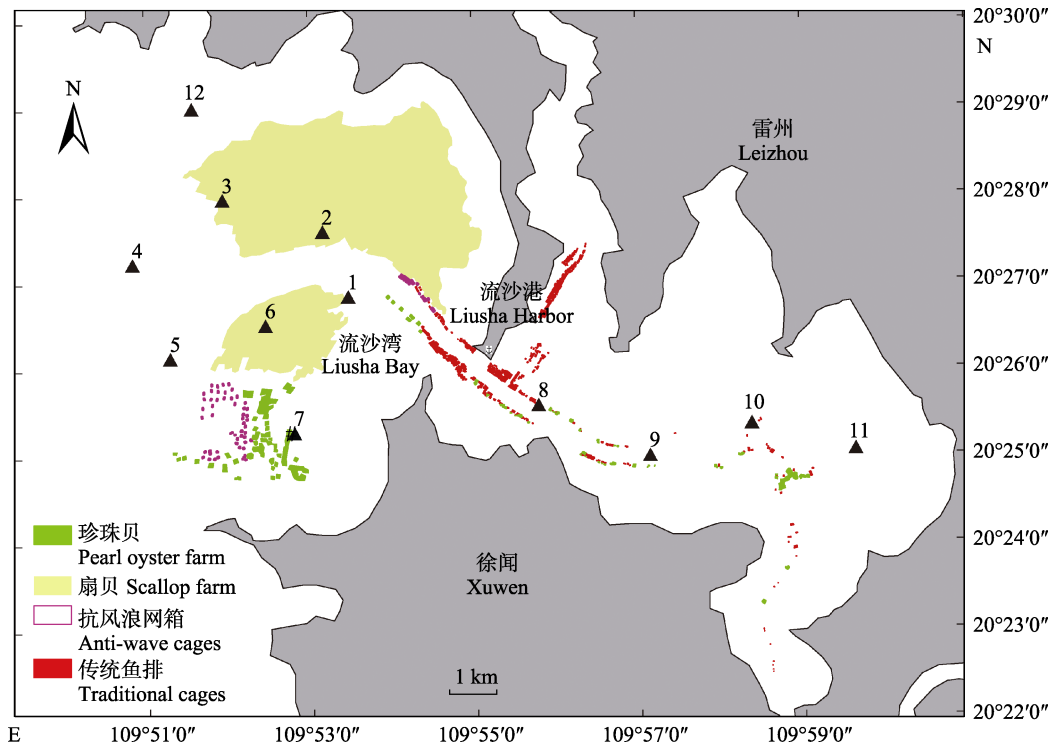


图 1 流沙湾养殖布局及采样站位图

Fig.1 Farming structure layout and sampling stations in Liusha Bay

生物网,自距底 2 m 深度向海面垂直拖曳,定量样品采用有机玻璃采水器收集表层及底层的水样(各 1 L)进行混合,现场用鲁戈氏液固定后带回实验室,用浮游生物计数框镜检、计数。

1.3 环境因子的测定

海水溶解氧(DO)、水温(T)、盐度(S)和 pH 采用便携式水质分析仪(YSI-556 型)现场测定,透明度(SD)采用萨式盘法测定。水样中,亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)采用萘乙二胺分光光度法,氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)采用靛酚蓝法,硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)采用锌(Zn)-镉(Cd)还原法,活性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)采用磷钼蓝分光光度法测定,总氮(TN)和总磷(TP)采用过硫酸钾氧化法测定。叶绿素 a(Chl-a)颗粒有机物(POM)的测定方法分别为丙酮萃取法和灼烧称重法。以上方法均按照《海洋监测规范》(GB17378.4-2007)指定方法进行。

1.4 多样性分析方法

浮游植物的多样性、均匀度分别采用 Shannon-Weaver 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J),计算公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (2)$$

$$\text{优势度} \quad Y = \left(\frac{n_i}{N}\right) * f_i \quad (3)$$

式中, s 为物种数, P_i 为第 i 物种在全部采样中的比例, n_i 为第 i 种的个体数, N 为所有种的个体总数, S 为样品种类总数, f_i 为第 i 种在各站点的监测频率。 $Y \geq 0.02$ 视为优势种。

1.5 数据处理和分析

采用 PRIMER 6.0 软件对浮游植物丰度进行 4 次方根转换,建立 Bray-Curtis 相似性聚类分析,并进行非度量多维尺度排序(nMDS)。用 Canoco4.5 软件分析环境因子对浮游植物物种分布的影响,相关数据除 pH 外,经过 $\lg(x+1)$ 转换。本研究将各季出现的优势种作为排序物种,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 ArcMap 10.2 软件绘制。

2 结果

2.1 浮游植物种类组成及优势种的时空变化特征

2015~2016 年四季流沙湾浮游植物的种类组成见表 2。从表 2 可以看出,夏、秋、冬、春 4 个航次共鉴定出浮游植物 5 门 58 属,共 171 种(含变种)。其中,硅藻 42 属 122 种,占总种数的 71.35%;甲藻 10 属

44种, 占总种数的25.73%; 金藻2属2种; 蓝藻2属2种; 裸藻1属1种。在冬季, 硅藻种数最少, 而甲藻种数最多。流沙湾浮游植物优势种见表3。如表3所示, 调查期间发现浮游植物优势种共16种, 秋季最多, 夏季最少。其中, 奇异棍形藻为春、秋、冬季优势种, 红海束毛藻为春、夏、秋季优势种。在夏季, 中肋骨条藻在各采样站位占据绝对优势, 其丰度占夏季浮游植物总丰度的69%。

2.2 浮游植物丰度及群落结构分析

在调查期间, 流沙湾海域各采样点的浮游植物丰度相差较大。春季, 浮游植物丰度的变化范围为 $0.05 \times 10^4 \sim 13.15 \times 10^4$ 个/L。夏季各采样点浮游植物丰度较高, 其变化范围为 $2.02 \times 10^4 \sim 79.04 \times 10^4$ 个/L。秋季浮游植物丰度变化范围为 $0.11 \times 10^4 \sim 7.45 \times 10^4$ 个/L, 冬季浮游植物丰度较低, 范围为 $0.15 \times 10^4 \sim 4.53 \times 10^4$ 个/L。流沙湾四季平均丰度分别为 0.10×10^4 、 0.12×10^4 、

表2 2015~2016年四季流沙湾浮游植物的种类组成
Tab.2 Seasonal phytoplankton composition in Liusha Bay during 2015~2016

种类 Species	属/种 Genera/specie			
	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring
硅藻 Bacillariophyta	34/66	26/67	29/56	26/64
甲藻 Pyrrophyta	7/20	4/8	5/30	8/15
蓝藻 Cyanophyta	1/1	2/2	1/1	1/1
其他 Others	1/1	1/1	-	1/1
总计 Total	43/88	33/78	35/87	39/81

表3 流沙湾浮游植物优势种
Tab.3 Dominant species of phytoplankton in Liusha Bay

季节 Season	优势种 Dominant species	平均丰度 Average abundance (cells/L)	占总细胞丰度百分比 Percent in total abundance(%)	优势度 Y Dominance	编码 Code
夏 Summer	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	2.10×10^5	0.69	0.695	1
	红海束毛藻 <i>Trichodesmium erythraeum</i>	5.64×10^4	0.19	0.124	2
	刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i>	8.02×10^3	0.03	0.026	3
秋 Autumn	拟弯角毛藻 <i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>	3.54×10^3	0.24	0.158	4
	奇异棍形藻 <i>Bacillaria paradoxa</i>	1.60×10^3	0.11	0.107	5
	洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	1.26×10^3	0.08	0.084	6
	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	1.11×10^3	0.07	0.075	7
	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	1.12×10^3	0.08	0.063	
	尖刺拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	1.22×10^3	0.08	0.054	8
	红海束毛藻 <i>Trichodesmium erythraeum</i>	9.42×10^2	0.06	0.042	
	佛氏海毛藻 <i>Thalassiothrix frauenfeldii</i>	5.12×10^2	0.03	0.034	9
冬 Winter	威氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus wailesii</i>	3.51×10^3	0.29	0.288	10
	柔弱根管藻 <i>Rhizosolenia delicatula</i>	1.92×10^3	0.16	0.158	11
	岛脆杆藻 <i>Fragilaria islandica</i>	2.17×10^3	0.15	0.179	12
	明壁圆筛藻 <i>Coscinodiscus debilis</i>	1.53×10^3	0.13	0.126	13
	奇异棍形藻 <i>Bacillaria paradoxa</i>	7.38×10^2	0.05	0.061	
春 Spring	须状角毛藻 <i>Chaetoceros crinitus</i>	3.74×10^3	0.20	0.196	15
	红海束毛藻 <i>Trichodesmium erythraeum</i>	6.84×10^3	0.36	0.119	
	明壁圆筛藻 <i>Coscinodiscus debilis</i>	2.01×10^3	0.11	0.105	
	圆柱角毛藻 <i>Chaetoceros teres</i>	8.75×10^2	0.05	0.034	16
	奇异棍形藻 <i>Bacillaria paradoxa</i>	5.27×10^2	0.03	0.028	
	洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	5.49×10^2	0.03	0.026	

0.16×10^4 、 2.52×10^4 个/L, 季节变化趋势为夏>春>秋>冬, 且夏季内、外湾丰度相差不大。甲藻的丰度在冬季最高, 占冬季总丰度的 6.3%, 在其余季节不超过 1%。蓝藻主要为红海束毛藻, 其丰度在春季最高, 占总丰度的 35.8%。硅藻丰度在春、冬、秋和夏各占总丰度的 63.6%、81.2%、82.3%和 92.7%。

流沙湾全年浮游植物 nMDS 排序结果如图 2 所示, 不同季节间浮游植物群落组成差异显著。因此, 可将浮游植物群落大致按照季节划分为 4 个大类群, 而各季节不同站位的群落组成相似度有一定差异。分别对春、夏、秋和冬 4 个航次的浮游群落进行 Bray-Curtis 聚类分析, 结果如图 3 所示, 在 50% 的相似度水平上, 春季各站位被分为 5 个类群, 分别为处于航道及附近的 1、2、8 和 9 号站位, 位于内湾的 10 和 11 号站位, 位于扇贝养殖区的 3 号站位, 位于珠母贝养殖区的 7 号站位和位于外湾的其他站位。夏季各站位可以分为 4 个类群: 位于鱼类网箱养殖区及其附近的 8 和 9 号站位、位于内湾的 10 号站位、位于内湾近岸的 11 号站位和位于外湾的其他站位。在秋季, 各站位也被分为 4 个类群: 位于鱼类网箱养殖区及其附近的 8 号站位、位于流沙湾分界点的 5 号站位、位于内湾的 11 和 10 号站位和位于外湾的其他站位。冬季各站位可以分为 3 个类群: 位于内湾的 10 和 11 号站位和位于航道以北的 2、3 和 12 号站位及其他站位。

2.3 多样性指数与均匀度的时空分布

流沙湾四季多样性指数(H')和均匀度指数(J)冬季最高、夏季最低(图 4)。春季, 各站位的浮游植物多样性指数范围为 4.21~2.22, 其中, 2 号站位最高, 为 4.21, 3、9、1 和 7 号站位较低, 分别为 3.10、3.09、2.73 和 2.22。夏季, 各站位的浮游植物多样性指数范围为 2.66~0.23, 其中, 2 号站位最高, 为 2.66, 3、6、9、11、8 和 10 号站位 H' 均不超过 1。秋季, 各站位的浮游植物多样性指数范围为 3.60~2.02, 其中, 8 和 9 号站位最高, 为 3.60 和 3.59, 5 和 3 号站位较低, 分别为 2.12 和 2.02。冬季各站位 H' 相差不大, 范围为 3.15~2.50, 其中, 9 号站位最高、4 号站位最低。而 J 分别为春季 0.469~0.879、夏季 0.522~0.048、秋季 0.440~0.749、冬季 0.520~0.706。

2.4 不同季节浮游植物群落结构的影响因素分析

调查期间, 流沙湾 4 个季节环境因子的平均值见表 4。对优势种与环境因子间进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA)及 Monte Carlo 置换检验。如图 5 所示, 检验结果显示, 春季温度($F=4.05, P=0.022$)和氨氮($F=3.03, P=0.05$)、夏季透明度($F=58.34, P=0.002$)、秋季亚硝酸氮($F=4.55, P=0.006$)、冬季亚硝酸氮($F=3.91, P=0.022$)与流沙湾浮游植物优势种密切相关并影响显著。透明度是影响夏季流沙湾浮游植物优势种的关

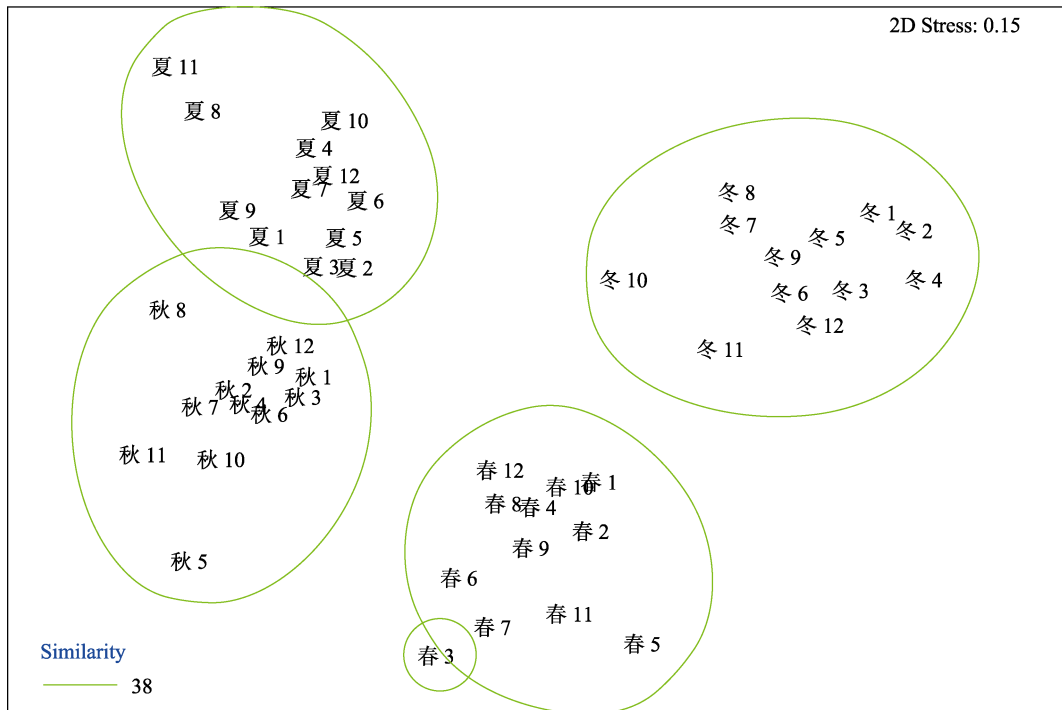


图 2 浮游植物群落的多维尺度分析
Fig.2 The nMDS of phytoplankton communities

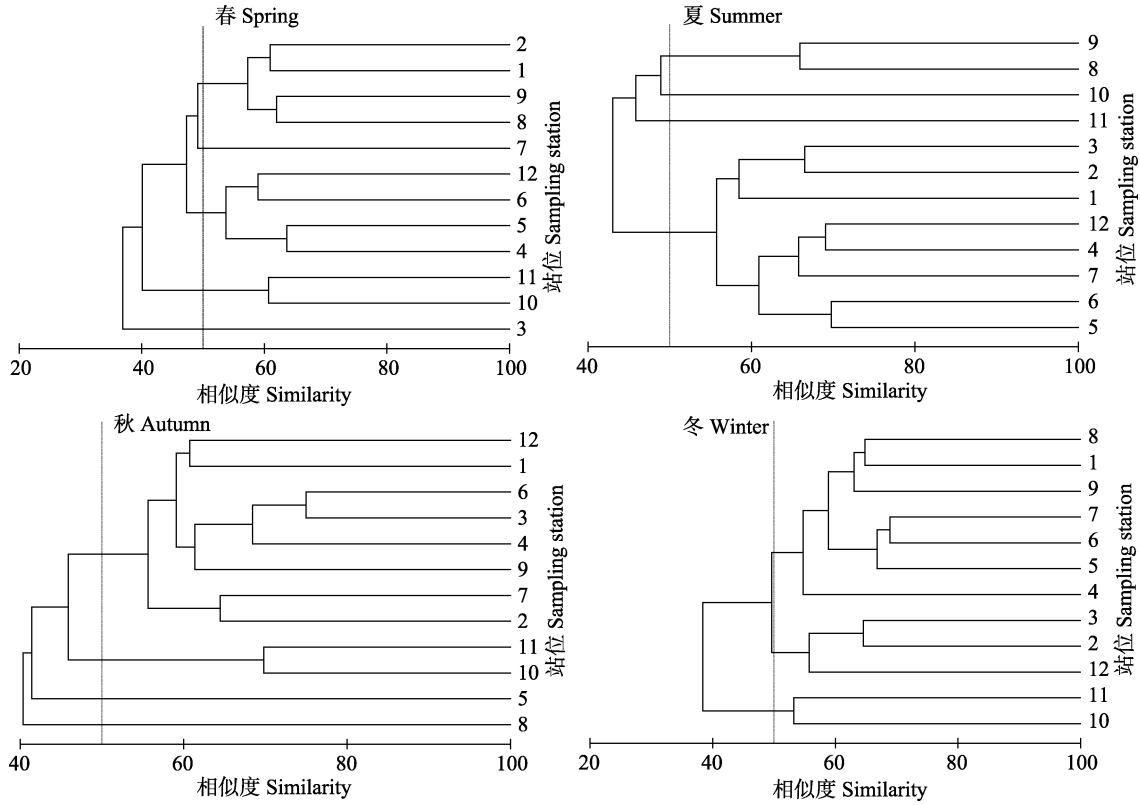


图 3 流沙湾 12 个采样点 4 个季节的聚类

Fig.3 Cluster of twelve sampling stations of four seasons in Liusha Bay

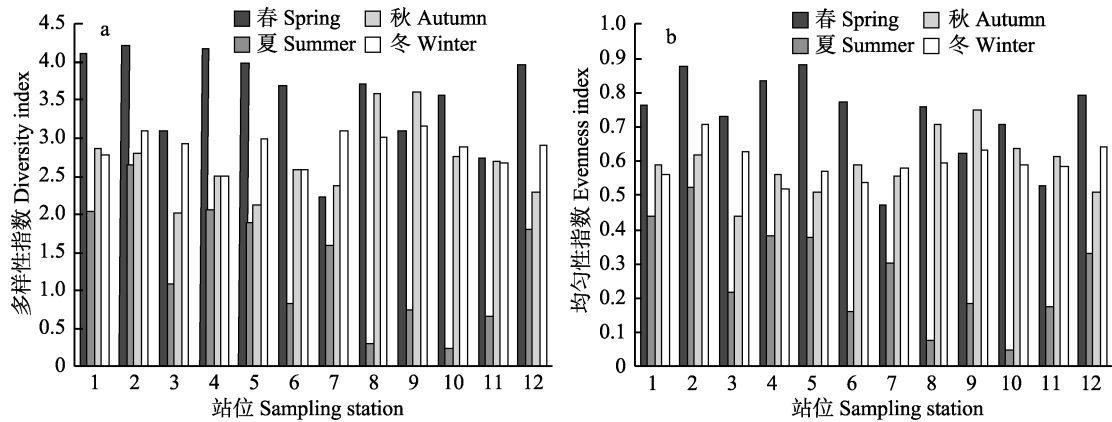


图 4 流沙湾浮游植物多样性指数(a)和均匀度指数(b)

Fig.4 Diversity index (a) and evenness index (b) of phytoplankton in Liusha Bay

键因子,对浮游植物物种变化的解释度高达 85%;亚硝酸氮对秋、冬季浮游植物物种变化的解释程度分别为 34%和 28%。春季温度和氨氮对浮游植物物种变化的解释度分别为 25%和 15%。

2.5 流沙湾不同养殖区浮游植物丰度、多样性指数及可溶性营养盐含量

比较了外湾对照区(4 和 5 号站位)、扇贝主养区(1、3 和 6 号站位)、珍珠贝养殖区(7 号站位)、网箱鱼类养殖区(8 号站位)和内湾区(9 和 10 号站位)的浮

游植物丰度和多样性指数(图 6)。结果显示,在浮游植物丰度方面,鱼类小网箱养殖区浮游植物丰度在秋季和冬季高于其他区域。扇贝养殖区的浮游植物丰度较低,在夏、秋、冬三季低于外湾对照区,除秋季外,低于珍珠贝养殖区。除夏季外,内湾区的浮游植物丰度高于外湾对照区。在多样性方面,春、夏两季贝类养殖区浮游植物多样性小于外海对照区。在夏季,鱼类小网箱养殖区多样性最低。秋季鱼类养殖区与内湾区多样性高于外湾。冬季各区多样性指数均接近。

外湾对照区、扇贝主养区、珍珠贝养殖区、网箱

表 4 流沙湾主要水质参数
Tab.4 Main parameters of water quality in Liusha Bay

参数因子 Parameters	季节 Season			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
氨氮 NH ₄ ⁺ (mg/L)	0.058±0.034	0.023±0.026	0.021±0.017	0.617±0.316
亚硝酸盐 NO ₂ (mg/L)	0.042±0.052	0.002±0.002	0.007±0.006	0.016±0.008
硝酸盐 NO ₃ (mg/L)	0.106±0.034	0.018±0.018	0.126±0.017	0.981±0.315
磷酸盐 PO ₄ (mg/L)	0.012±0.003	0.022±0.006	0.007±0.003	0.014±0.003
总磷 TP (mg/L)	0.019±0.012	0.109±0.031	0.016±0.008	0.039±0.013
总氮 TN (mg/L)	0.910±0.249	—	2.211±0.631	1.682±0.263
透明度 SD (m)	2.13±0.47	1.57±0.49	1.04±0.22	2.24±0.66
温度 T (°C)	30.19±0.97	32.36±1.44	27.69±0.70	18.20±0.65
溶氧 DO (mg/L)	5.60±0.72	5.97±0.27	6.12±0.21	8.73±0.54
酸碱度 pH	8.33±0.20	8.48±0.04	8.43±0.09	8.56±0.07
盐度 S	29.68±0.09	33.43±0.11	30.37±0.16	30.63±0.09
颗粒有机物 POM (mg/L)	7.49±1.87	10.22±7.54	5.01±0.58	5.87±1.96
叶绿素 a Chl-a (µg/L)	6.65±2.08	1.56±1.83	1.09±0.93	3.24±1.10
总颗粒物 TPM (mg/L)	18.74±3.98	50.62±13.41	29.88±3.13	26.82±5.28

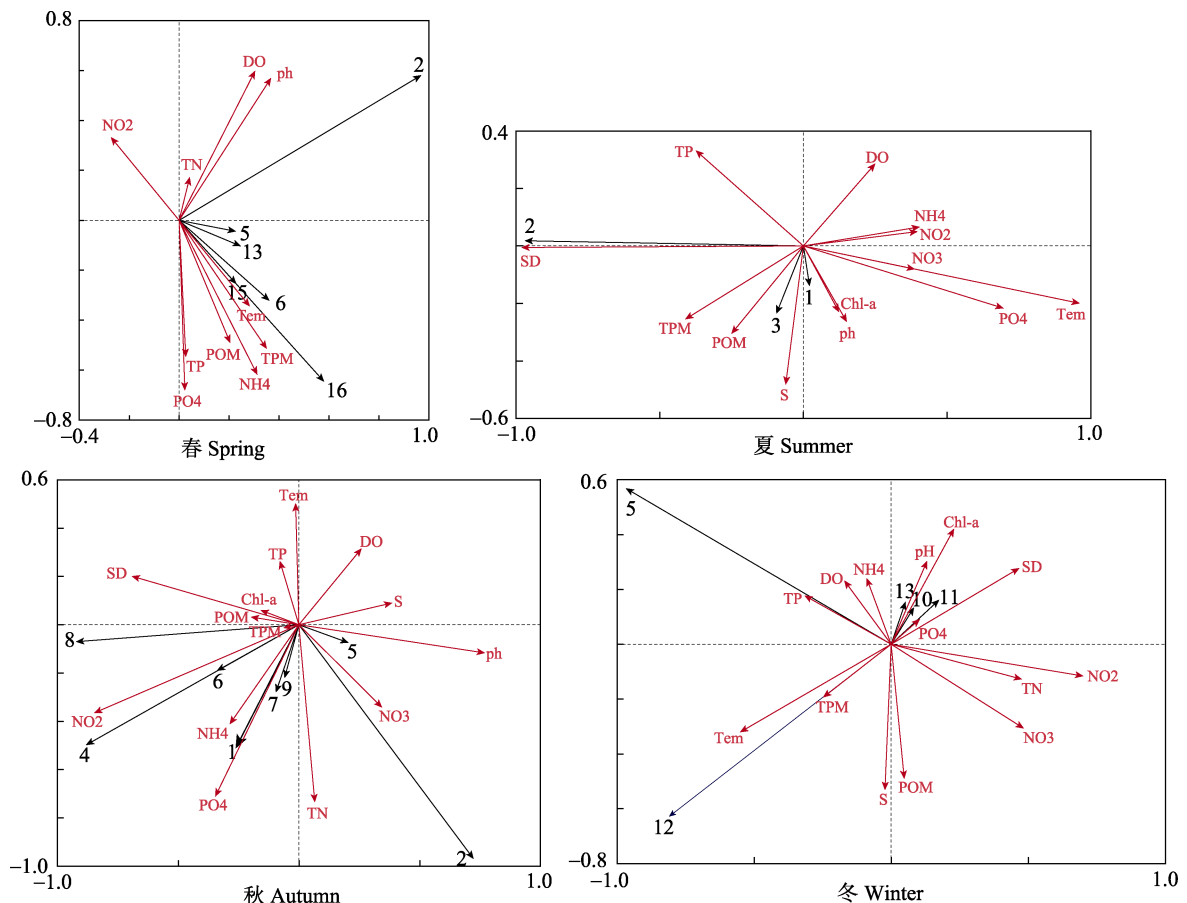


图 5 流沙湾浮游植物与环境因子冗余分析排序

Fig.5 RDA ordination of phytoplankton community composition and environmental factors in Liusha Bay

鱼类养殖区和内湾区的可溶性无机氮(DIN)和磷酸盐 (PO₄-P)含量见图 7。从图 7 可以看出,流沙湾内湾区

和鱼类网箱养殖区的 DIN 含量在春季低于其他区域,而在夏、秋季则高于其他区域。秋季各区的 DIN

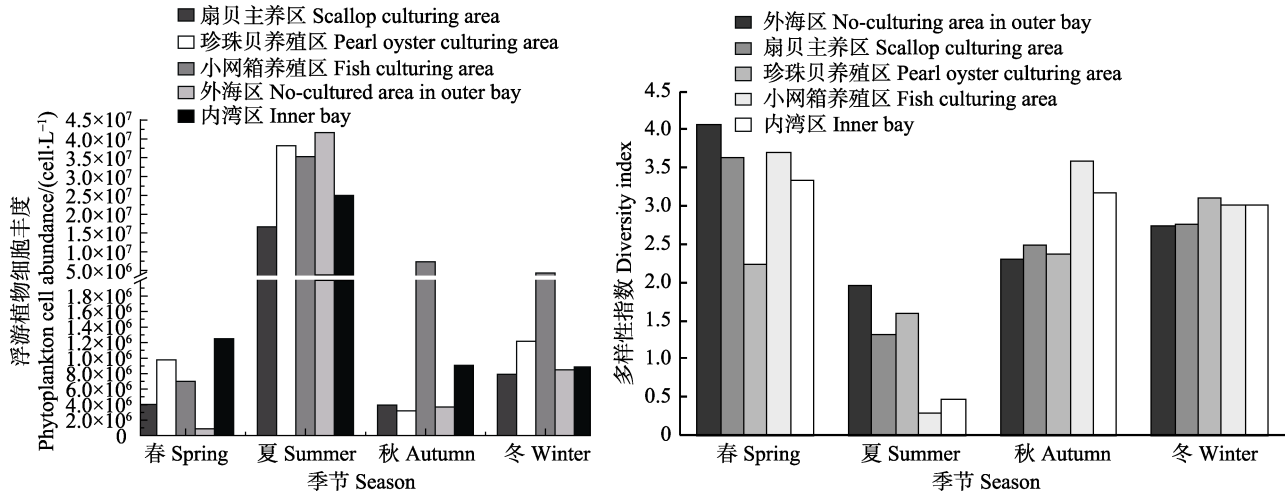


图6 流沙湾不同区域浮游植物浮游植物丰度及多样性指数
Fig.6 Phytoplankton density and diversity index in different areas in Liusha Bay

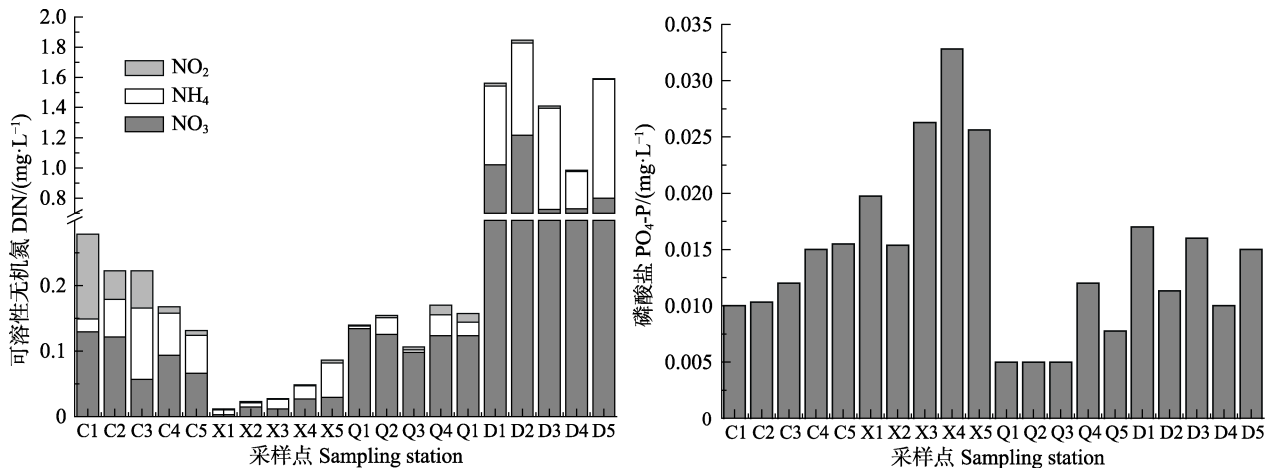


图7 流沙湾不同养殖区可溶性无机氮和磷酸盐含量
Fig.7 DIN and PO₄-P of different area in Liusha Bay

1: 外海对照区; 2: 扇贝养殖区; 3: 珍珠贝养殖区; 4: 鱼类小网箱养殖区; 5: 内湾区;

C: 春季; X: 夏季; Q: 秋季; D: 冬季

1: No-culturing area in outer bay; 2: Scallop culturing area; 3: Pearl oyster culturing area; 4: Fish culturing area; 5: Inner bay; C: Spring; X: Summer; Q: Autumn; D: Winter

含量相差不大。冬季鱼类网箱区的 DIN 为各区域之间最低。同时,流沙湾外海对照区全年的氨氮浓度普遍低于其他海区。在 PO₄-P 方面,除冬季外,鱼类网箱养殖区和内湾区的磷含量高于其他三区。与此同时,外海对照区的 PO₄-P 浓度则普遍低于其他海区。

3 讨论

3.1 流沙湾浮游植物群落结构的季节变化特征及其影响因素分析

浮游植物在地球生态系统中起着重要的功能和

作用。浮游植物作为海洋食物网的基础,提供约占全球总产出一半的初级生产量,在 O₂ 的制造、CO₂ 的固定和储存、海洋营养物质循环等生态过程中有着不可或缺贡献(Not *et al*, 2012)。浮游植物群落结构对生态系统中环境因子的改变有直接的响应,其时空变化特征与水文、温度、营养元素等环境因子关系密切(王符菁等, 2015)。Bode 等(2017)对拉科努尼亚沿海地区的浮游植物多样性进行调查,发现河水径流和海湾上升流共同影响浮游植物的群落结构组成,同时,浮游植物的群落结构也受到季节的影响。Wu 等(2014)对大亚湾海区浮游植物群落与环境因子的关系进行了分析,结果显示,环境温度和营养等因素对浮游植

物的季节演替率有很大的影响。

在本次调查中,流沙湾海域浮游植物群落的细胞丰度夏季最高,平均丰度为 2.52×10^4 个/L,远高于其他 3 个季节。春季、秋季和冬季从高到低依次为 0.16×10^4 、 0.12×10^4 、 0.1×10^4 个/L。各季节浮游植物群落的主要优势种出现了明显的更替,夏季主要优势种为中肋骨条藻,占总丰度的 69.5%,秋季优势种较多,但占总丰度的比例不高,其中,主要优势种拟弯角毛藻、奇异棍形藻、洛氏角毛藻的丰度之和仅占总丰度的 43%。冬季主要优势种为威氏圆筛藻、柔弱根管藻、岛脆杆藻,三者占总丰度的 60%。春季以须状角毛藻、红海束毛藻和明壁圆筛藻为主要优势种,3 种微藻的丰度之和共占流沙湾浮游植物总丰度的 67%。多维尺度排序的胁强值为 0.15,表明本次排序结果可以较好地解释物种的群落结构分组情况(Manly, 2005)。结果显示,调查站位在相同季节浮游植物群落组成的相似度较高,即浮游植物群落结构存在明显的季节差异。

在流沙湾海域,奇异棍形藻为秋、冬、春季优势种,红海束毛藻为夏、秋、春季优势种。其中,奇异棍形藻为广温沿岸种(王符菁等, 2015),其在夏季之后在流沙湾海域广泛存在。而红海束毛藻对温度的要求较高(丁昌玲等, 2016),在水温较低的冬季只存在于内湾近岸的 11 号站位,未成为冬季优势种。流沙湾冬季平均水温为 18.2°C ,期间出现的主要优势种如威氏圆筛藻、柔弱根管藻等也属于不耐高温的温带近岸或广布种。在春、秋两季,出现较多的主要优势种如须状角毛藻、拟弯角毛藻等则属于偏暖性近岸种。在水温最高的夏季,耐高温的中肋骨条藻和喜高温的红海束毛藻成为流沙湾海区的主要优势种。表明环境温度对流沙湾浮游植物的季节演替率有很大的影响。乔倩等(2016)发现,中肋骨条藻可以有效利用多种有机氮源,对无机氮具有较低的亲和能力。夏季流沙湾养殖活动频繁,为海区带来较多的有机氮源,同时, DIN 含量在 4 个季节中最低,也为中肋骨条藻的大量繁殖提供了有利条件。

3.2 规模化海水养殖对浮游植物的影响

多样性指数和均匀度是反映水生态稳定性的重要指标,也是评价群落是否成熟和稳定的特征之一(陈露等, 2015)。在夏季各采样点中,8 号站的多样性指数为 0.29,在春、秋、冬季均大于 3,分别为 3.71、3.59、3.01,显示出良好的多态性,表明鱼类网箱养殖在夏季对浮游植物多态性影响显著。夏季,养殖鱼

类生长迅速,因而也是网箱养殖活动的高峰期,传统养殖网箱密集分布通常会造水体富营养化。周志诚等(2014)发现,流沙湾网箱养殖区水体中氮、磷浓度自 5~9 月逐渐增加,10 月开始下降。认为这是网箱养鱼投饵、养殖生物体集中排泄以及浮游生物活动共同作用的结果。

高密度的滤食性贝类养殖会降低浮游植物的多样性。张玲等(2015)对大鹏澳牡蛎养殖区及其邻近海域进行了采样调查,研究表明,牡蛎养殖对浮游植物群落结构造成了一定影响,能够显著降低浮游植物丰度、种类多样性和均匀度。董婧等(2003)在对小窑湾的牡蛎、扇贝养殖区调查中发现,在高密度贝类筏式养殖区,随着贝类摄食强度的增强,浮游植物数量、种类都大量减少,浮游植物群落多样性指数偏低,丰度指数偏低,均匀度指数因季节不同而有较大差异。本次调查中,贝类养殖区平均多样性指数在春、夏两季低于外湾对照区,在秋季则低于内湾区。表明,流沙湾贝类养殖对浮游植物多态性产生了一定的影响。本次调查还发现,位于扇贝养殖区的 3 和 6 号站位在夏、秋季,多样性指数均明显低于其他站位。同时,1 和 2 号站位则表现出很高的多态性,表明在水流通畅的湾口,扇贝养殖活动对浮游植物多样性影响不大。

浮游植物的生长同时受到海水营养盐的上行效应以及浮游动物滤食性双壳类及鱼类下行效应的影响。鱼类网箱养殖产生的残饵和粪便会给海水环境带来大量的有机营养物,而贝类主要以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和无机磷酸盐的方式向水中排泄 N 或 P。鱼、贝养殖可以增加海水中营养盐的含量,促进藻类的生长。研究表明,海湾扇贝(*Argopecten irradians*)和合浦珠母贝的养殖活动会影响海区 DO、COD 和 P、TN 的变化(徐东会等, 2017; 王增焕等, 2011)。流沙湾外海对照区无养殖活动,全年的氨氮浓度普遍低于养殖区,同时,磷酸盐含量往往也低于养殖区。仅在贝类代谢水平降低且无鱼类小网箱养殖活动的冬季,外海对照区磷酸盐含量高于其他区域。同时,在鱼类养殖活动旺盛的夏季,小网箱区的 DIN 和磷酸盐含量明显高于其他海区,而在无养殖活动的冬季则低于其他海区。表明流沙湾海区的多种养殖活动在养殖季节对水质影响较大。

滤食性的扇贝和珍珠贝等贝类能够给浮游植物带来摄食压力。流沙湾扇贝养殖区浮游植物丰度,除春季高于外海对照区外,全年都低于其他海区。而在无贝类摄食压力的鱼类网箱养殖区和内湾区,浮游植物丰度则高于外海对照区。而在珍珠贝区,浮游植物丰度高于扇贝区,可能是因为珍珠贝区养殖规模小,

对浮游植物带来的摄食压力较低的缘故。此外,不同贝类对浮游植物的选择性摄食也可能引起浮游植物群落结构的改变。栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)主动选择摄食甲藻和定鞭金藻(*Pavlova gyrans*),对骨条藻的选择性不高。在中肋骨条藻为优势种的夏季,栉孔扇贝胃含物最高的品种为海链藻(*Thalassiosira*)(乔芮, 2015)。而中肋骨条藻可以很好的作为合浦珠母贝幼贝和珠母贝(*Pinctada margaritifera*)的饵料(Kuwatani, 1964; Martínez-Fernández *et al*, 2007)。夏季,流沙湾合浦珠母贝对中肋骨条藻的摄食作用可以在一定程度上抑制中肋骨条藻的优势,导致夏季合浦珠母贝养殖区多样性指数高于扇贝养殖区。

3.3 养殖布局对浮游植物的影响

随着水产养殖活动规模的扩大,其对近岸环境的影响和污染问题也越来越突出(鲍旭腾等, 2012)。传统网箱养殖广泛投喂人工饲料和天然杂鱼等饵料,大量的残饵是海域的污染物质来源之一,易造成水体营养指数偏高、底部沉积物堆积、养殖水体底层贫氧现象严重等老化特征。而贝类筏式养殖可以阻挡海水流动,降低养殖海区水体的流速、改变水流方向,使得有机物质和营养盐被截留(苗卫卫等, 2007)。同时,即使在营养盐、水温等富营养化条件满足的情况下,流量、流速和水位等水动力条件也可能成为水体富营养化的制约因子(刘洪波等, 2013)。许栋等(2017)对南渡江下游进行二维水动力及水生态数值模拟,结果显示,枯水期水质富营养化风险远高于丰水期。

与往年调查相比,流沙湾的浮游植物种数和硅藻种数有所恢复,与 2008 年持平(表 5)。然而,丰度和多样性指数(H')在夏季却出现了较大的波动。吴雪等(2017)认为,一般 $H' < 1$ 时,表明浮游植物群落可能受到其他环境因素的干扰;均匀度 $J > 0.3$, 则表明海区内浮游植物多样性较好。即以 $H' > 1$ 且 $J > 0.3$ 作为浮游植物多样性较好的评价标准。在本次调查中,夏季内湾 8~11 号站位、外湾扇贝养殖区 3、6 号站位的生物多样性指数和丰富度均低于标准,表明该位点浮游植物多样性差、结构不稳定。郭永坚等(2015)在

2012 年对流沙湾的调查中发现,鱼贝养殖区的多样性指数、均匀度指数较高,且网箱鱼类养殖区的多样性指数一直为各区最高,与本次调查得出的结论完全相反。上述现象可能是因为流沙湾养殖设施增多,对海水流动性的阻碍增大,引起局部水体污染造成的。

张静等(2013)研究表明,流沙湾潮流运动为带有旋转流的往复流运动,落潮流速大于涨潮流速,且余速较强,海水自净能力很强。罗昭林等(2014)的水动力建模表明,流沙湾内、外湾口水体流速差异显著,退潮时,内湾口水流速度趋于静止状态(图 8)。2015 年,外湾扇贝筏式养殖面积进一步扩大,势必对流沙湾的水交换产生更大的影响。朱宜平等(2010)通过围隔装置研究 3 种流速对浮游动植物生长的影响,发现浮游植物生物量随着流速增长出现先升高后降低的趋势,并在总量上小于静水环境。鱼类网箱养殖活动易造成水体的富营养化,水动力不足易造成内湾透明度降低,营养盐水平升高,其与夏季高温的共同作用导致耐高温和盐度适应能力较强的中肋骨条藻在内湾大面积增殖。此外,本次调查发现,红海束毛藻首次在流沙湾海区发现,并在夏季普遍出现于湾外各采样点,秋季则遍布于内外湾,冬季仅存在于水温最高的 11 号站位,春季则出现在内湾的 10、11 号站位和外湾的 3、4 号站位。红海束毛藻体积小,生存温度在 $18^{\circ}\text{C} \sim 32^{\circ}\text{C}$ 之间,在北部湾海域大量分布(Boatman *et al*, 2017; 丁昌玲等, 2016),几乎不受贝类摄食压力的影响,其在流沙湾全年的时空分布出现了明显的温度相关,也间接地表明,流沙湾水动力受到养殖设施较大的干扰。

与 2012 年相比,流沙湾无机磷和总颗粒有机物的含量有所上升,其中,颗粒有机物范围由原先的 2.64~6.18(郭永坚等, 2015)上升到本次的 5.01~10.22,表明随着水动力不足,部分海域可能出现了富营养化趋势。此外,本次调查中,溶解氧水平低于 2012 年的调查结果,表明流沙湾可能已出现养殖负荷超过系统承载力的状况。水动力不足的情况下,在养殖活动强度大的 5~11 月,应注意赤潮和水中氧含量过低情况的发生。

表 5 近年来流沙湾浮游植物群落特征比较

Tab.5 Comparison of characteristics of phytoplankton community in Liusha Bay in recent years

采样时间 Sampling date	硅藻种数/总种数 Diatom species/total species	丰度 Abundance (10^4 个/L)	多样性指数 H' Diversity index	参考文献 Reference
2008	123/151	0.24~5.72	1.07~3.35	张才学等(2012)
2012-08~2013-01	69/80	0.00~1.50	1.62~3.74	郭永坚等(2015)
2015-08~2016-05	122/172	0.05~79.04	0.23~4.21	本调查 This study

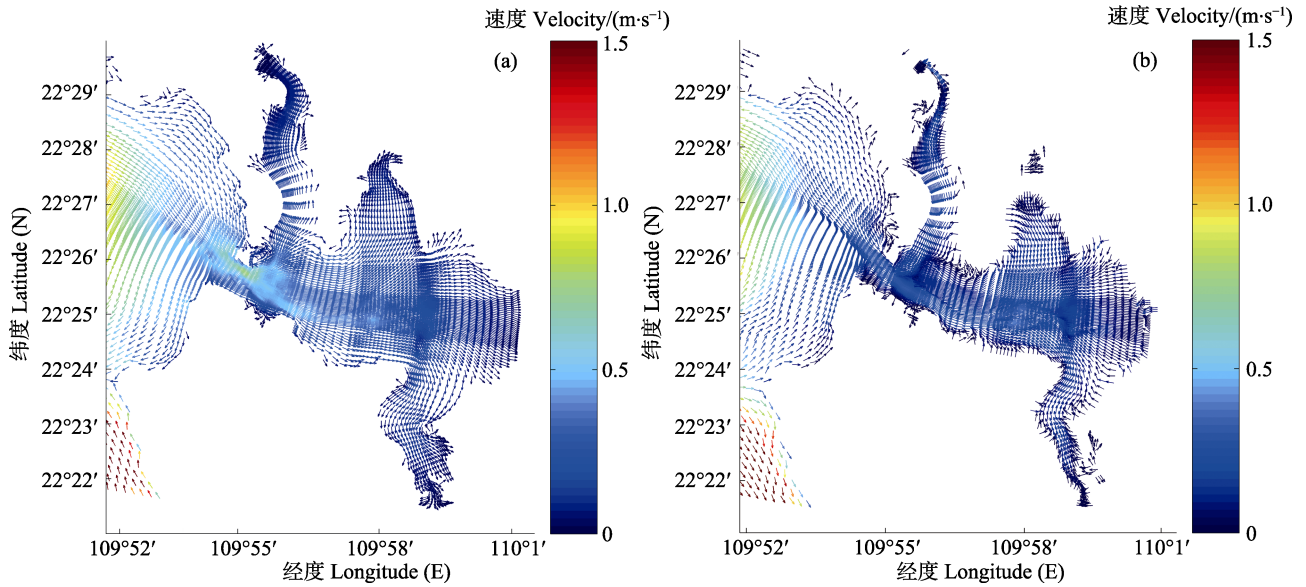


图 8 流沙湾涨/落潮流场(罗昭林等, 2014)

Fig.8 Tidal current at the time of flood and eddy of Liusha Bay (Luo *et al.*, 2014)

参 考 文 献

- Bao XT, Xu H, Zhang JH, *et al.* Best management practices for controlling aquaculture non-point pollution. *South China Fisheries Science*, 2012, 8(3): 79–86 [鲍旭腾, 徐皓, 张建华, 等. 水产养殖面源污染控制的 最佳管理实践. *南方水产科学*, 2012, 8(3): 79–86]
- Boatman TG, Lawson T, Geider RJ. A key marine diazotroph in a changing Ocean: The interacting effects of temperature, CO₂ and light on the growth of *Trichodesmium erythraeum* IMS101. *PLoS One*, 2017, 12(1): e0168796
- Bode A, Varela M, Prego R, *et al.* The relative effects of upwelling and river flow on the phytoplankton diversity patterns in the ria of A Coruña (NW Spain). *Marine Biology*, 2017, 164(4): 93
- Chen L, Li CH, Wei XL, *et al.* Influence of nitrogen and phosphorus enrichment on phytoplankton community structure in Nansha area in summer. *South China Fisheries Science*, 2015, 11(5): 56–66 [陈露, 李纯厚, 魏小岚, 等. 南沙海域夏季氮磷添加模拟实验中浮游植物群落的变化. *南方水产科学*, 2015, 11(5): 56–66]
- Ding CL, Sun J, Xue B. Winter and summer diazotrophic cyanobacteria in the western South China Sea. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(4): 84–94 [丁昌玲, 孙军, 薛冰. 冬夏季南海西部固氮蓝藻. *海洋学报*, 2016, 38(4): 84–94]
- Dong J, Bi YP, Wang WB, *et al.* Effect of high density bivalve rafts cultivation on phytoplankton community. *Marine Fisheries Research*, 2003, 24(3): 50–54 [董婧, 毕远溥, 王文波, 等. 小窑湾高密度贝类筏式养殖对浮游植物群落的影响. *海洋水产研究*, 2003, 24(3): 50–54]
- Edwards P. Aquaculture environment interactions: Past, present and likely future trends. *Aquaculture*, 2015, 447: 2–14
- Grigorakis K, Rigos G. Aquaculture effects on environmental and public welfare-The case of Mediterranean mariculture. *Chemosphere*, 2011, 85(6): 899–919
- Guo YJ, Luo ZL, Zhu CB, *et al.* Influence of aquaculture on characteristics of phytoplankton community in Liusha Bay. *South China Fisheries Science*, 2015, 11(2): 57–65 [郭永坚, 罗昭林, 朱长波, 等. 水产养殖对流沙湾浮游植物群落特征的影响. *南方水产科学*, 2015, 11(2): 57–65]
- Jiang ZJ, Fang JG, Mao YZ, *et al.* Environmental effect of marine fish cage aquaculture and integrated multi-trophic aquaculture. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(1): 120–124 [蒋增杰, 方建光, 毛玉泽, 等. 海水鱼类网箱养殖的环境效应及多营养层次的综合养殖. *环境科学与管理*, 2012, 37(1): 120–124]
- Kuwatani Y. Rearing of the pearl oyster, *Pinctada martensii* (Dunker), on the diet of *Skeletonema costatum*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1964, 30(2): 104–113
- Liu HB, Zhu ML, Wang JZ, *et al.* Influence of reservoir hydrodynamic on eutrophication of water body. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(2): 19–21 [刘洪波, 朱梦玲, 王精志, 等. 水库水动力对水体富营养化影响. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(2): 19–21]
- Luo ZL, Zhu CB, Guo YJ, *et al.* Distribution characteristics of C, N and P in Liusha Bay surface sediment and their pollution assessment. *South China Fisheries Science*, 2014, 10(3): 1–8 [罗昭林, 朱长波, 郭永坚, 等. 流沙湾表层沉积物中碳、氮、磷的分布特征和污染评价. *南方水产科学*, 2014, 10(3): 1–8]
- Manly BF. *Multivariate statistical methods: A primer*. Chapman and Hall, 2005: 1–224

- Martínez-Fernández E, Southgate PC. Use of tropical microalgae as food for larvae of the black-lip pearl oyster *Pinctada margaritifera*. *Aquaculture*, 2007, 263(1-4): 220-226
- Miao WW, Jiang M. Environmental impacts and sustainable development of aquaculture in China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(s1): 319-323 [苗卫卫, 江敏. 我国水产养殖对环境的影响及其可持续发展. *农业环境科学学报*, 2007, 26(s1): 319-323]
- Not F, Siano R, Kooistra WHCF, *et al.* Chapter one-diversity and ecology of eukaryotic marine phytoplankton. *Advances in Botanical Research*, 2012, 64: 1-53
- Qiao Q, Wang CH, Guo X. Effects of nitrogen sources on the growth of *Skeletonema costatum*. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(8): 2110-2116 [乔倩, 王朝晖, 郭鑫. 不同氮源对中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)生长的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(8): 2110-2116]
- Qiao R. Microscope and phytoplankton pigments analysis of the shellfish feeding habits. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2015 [乔芮. 基于镜检和浮游植物色素分析的贝类食性研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2015]
- Tang QS, Han D, Mao YZ, *et al.* Species composition, non-fed rate and trophic level of Chinese aquaculture. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(4): 729-758 [唐启升, 韩冬, 毛玉泽, 等. 中国水产养殖种类组成、不投饵率和营养级. *中国水产科学*, 2016, 23(4): 729-758]
- Wang FJ, Lin YS, Cao WQ, *et al.* The relationship between nutrients and phytoplankton community structure in northern Beibu Gulf. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(6): 73-85 [王符菁, 林元烧, 曹文清, 等. 北部湾北部浮游植物群落结构及其与营养盐的关系. *热带海洋学报*, 2015, 34(6): 73-85]
- Wang ZH, Ke CL, Wang XN, *et al.* Marine environmental quality assessment of shellfish culture in Liusha Bay. *South China Fisheries Science*, 2011, 7(3): 24-30 [王增焕, 柯常亮, 王许诺, 等. 流沙湾贝类养殖海域环境质量评价. *南方水产科学*, 2011, 7(3): 24-30]
- Wu ML, Wang YS, Wang YT, *et al.* Influence of environmental changes on phytoplankton pattern in Daya Bay, South China Sea. *Revista De Biologia Marina Y Oceanografia*, 2014, 49(2): 323-337
- Wu X, Li XL, Yang JL, *et al.* Ecological characteristics of phytoplankton in scallop culture area in Laizhou Bay. *Fisheries Science*, 2017, 36(3): 347-352 [吴雪, 李希磊, 杨俊丽, 等. 莱州湾扇贝养殖区浮游藻类的生态特征. *水产科学*, 2017, 36(3): 347-352]
- Xu D, Wang D, Ji CN, *et al.* Numerical simulation of two-dimensional hydrodynamics and aquatic ecology of the lower reach of Nanduijiang River in Hainan Island, China. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(2): 214-223 [许栋, 王迪, 及春宁, 等. 海南南渡江下游二维水动力及水生态数值模拟. *环境科学研究*, 2017, 30(2): 214-223]
- Xu DH, Chen BJ, Jiang T, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of water nutrients and eutrophication evaluation in aquaculture water areas of Sanggou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(3): 1-11 [徐东会, 陈碧鹏, 江涛, 等. 桑沟湾养殖海域营养盐时空分布特征及富营养化评价. *渔业科学进展*, 2017, 38(3): 1-11]
- Zhang CX, Chen HY, Sun SL, *et al.* Temporal and spatial distribution of phytoplankton in Liusha Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(5): 1527-1537 [张才学, 陈慧妍, 孙省利, 等. 流沙湾海草床海域浮游植物的时空分布及其影响因素. *生态学报*, 2012, 32(5): 1527-1537]
- Zhang J, Liu Y, Ma ZH, *et al.* Three-dimensional numerical simulation of tide and tidal currents in Liusha Bay and the study on its sea environmental capacity. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(1): 34-44 [张静, 刘玉, 马志华, 等. 流沙湾海域潮汐潮流的三维数值模拟和海域环境容量研究. *海洋通报*, 2013, 32(1): 34-44]
- Zhang JH, Fang JG, Wang W. Progress in studies on ecological carrying capacity of mariculture for filter-feeding shellfish. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, 16(4): 626-632 [张继红, 方建光, 王巍. 浅海养殖滤食性贝类生态容量的研究进展. *中国水产科学*, 2009, 16(4): 626-632]
- Zhang L, Li ZJ, Chen YF, *et al.* Impact of oyster aquaculture on phytoplankton population structure in Dapeng Cove. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, 46(3): 549-555 [张玲, 李政菊, 陈飞羽, 等. 大鹏澳牡蛎养殖对浮游植物种群结构的影响研究. *海洋与湖沼*, 2015, 46(3): 549-555]
- Zhang L, Wu T, Xu D, *et al.* Feeding on feces, diets and cage farming sediments of *Paralichthy solivaceus* by Japanese scallop *Patinopecten yessoensis*. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(2): 96-102 [张继红, 吴桃, 徐东, 等. 虾夷扇贝对牙鲆的粪便、残饵及网箱养殖区沉积物的摄食. *渔业科学进展*, 2013, 34(2): 96-102]
- Zhou ZC, Shen YC, Xue HB. Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and their load estimation in cage-culture waters in Liusha Bay, Guangdong. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2014, 34(3): 65-69 [周志诚, 申玉春, 薛海波. 广东流沙湾网箱养鱼区水体氮磷的时空变化及负荷估算. *广东海洋大学学报*, 2014, 34(3): 65-69]
- Zhu YP, Zhang HP, Li FP, *et al.* Enclosure experiments about the hydrodynamics effects on the plankton. *Environmental Science*, 2010, 31(1): 69-75 [朱宜平, 张海平, 李飞鹏, 等. 水动力对浮游生物影响的围隔研究. *环境科学*, 2010, 31(1): 69-75]

(编辑 马瑾艳)

Phytoplankton Community Characteristics in Different Seasons and Their Relationship with Aquaculture in Liusha Bay

SU Jiaqi, ZHU Changbo^①, LI Junwei, LI Ting, CHEN Suwen, XIE Xiaoyong, ZHANG Bo

(Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs;
South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangdong Provincial
Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangzhou 510300)

Abstract Liusha Bay is one of the main aquaculture areas of marine mollusks in Guangdong Province, characterized by the main producing areas of South Pearl. To assess the environmental effects of aquaculture activities, the phytoplankton composition, abundance, community structure, diversity, and water physicochemical factors were investigated in each season from August 2015 to May 2016. In total, 171 phytoplankton species were detected, with 122 species of diatom belonging to 43 genera, followed by dinoflagellates represented by 44 taxa (10 genera), blue-green algae by two taxa (two genera), chrysophyceae by two taxa (two genera), and euglena by one taxa (one genus). The range of phytoplankton density was $0.05 \times 10^4 \sim 79.04 \times 10^4$ cells/L, which ranked as: summer > spring > autumn > winter. In general, the phytoplankton density in the outer bay was similar to that in the inner bay. The abundance of phytoplankton in summer was distinctly higher than that in the other three seasons. The most common dominant species were *Chaetoceros crinitus*, *Trichodesmium erythraeum*, and *Coscinodiscus debilis* in spring, *Skeletonema costatum* in summer, *Chaetoceros pseudocurvisetus*, *Bacillaria paradoxa*, and *Chaetoceros lorenzianus* in autumn, and *Coscinodiscus wailesii*, *Rhizosolenia delicatula*, and *Fragilaria islandica* in winter. *B. paradoxa* was the dominant species in spring, autumn, and winter. *T. erythraeum* was the dominant species in all seasons except for autumn. Redundancy analysis suggested that the main variables affecting the dominant species were water temperature and nitrate (NO₃-N) in spring, transparency in summer, and nitrite (NO₂-N) in autumn and winter. The phytoplankton diversity and abundance of different cultured zones presented seasonal differences. Compared to 2012, the total coverage of the aquaculture zone in 2015 increased by approximately 50% in the outer bay. Furthermore, coverage of the pearl oyster farming zone decreased by about 90% in the inner bay. Both the distribution of the aquaculture zone and the scale of the mariculture species were significantly changed, and the characteristics of the phytoplankton community responded to these changes. In summer, cage fish farming could efficiently increase nutrient content in seawater and decrease phytoplankton diversity. Furthermore, phytoplankton abundance was decreased by large-scale scallop culture.

Key words Liusha Bay; Phytoplankton; Cluster analysis; Aquaculture activity

^① Corresponding author: ZHU Changbo, E-mail: changbo@scsfri.ac.cn