

## 海陵湾网箱养殖区浮游植物群落结构及其与环境因子的关系

苏家齐, 朱长波, 张博, 陈素文, 李婷

### Structure characteristics of phytoplankton community and the relationship with environmental factors in cage fish farming area in Hailing Bay

SU Jiaqi, ZHU Changbo, ZHANG Bo, CHEN Suwen, LI Ting

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20210103267>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

##### [日照近岸海域冬夏季网采浮游植物群落结构及其与环境因子的关系](#)

Features of Net-phytoplankton communities and their environmental factors in the coastal waters of Rizhao in winter and summer  
上海海洋大学学报. 2022, 31(1): 86 <https://doi.org/10.12024/jsou.20201003196>

##### [三沙湾春季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系](#)

Community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors of Sansha Bay in spring  
上海海洋大学学报. 2018, 27(4): 522 <https://doi.org/10.12024/jsou.20170802123>

##### [杭州湾人工湖夏季浮游植物群落演替与环境因子的关系](#)

Relationship between summer phytoplankton community succession and environment factors in the artificial lagoon of Hangzhou bay  
上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 757 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200202922>

##### [长江口封闭养殖海域水质污染及潜在风险](#)

Water pollution and potential risk in closed aquaculture area of Yangtze River Estuary  
上海海洋大学学报. 2019, 28(6): 902 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180402303>

##### [扬中夹江浮游植物种群特征及其对环境因子的响应](#)

Phytoplankton community structure in Jiajiang in Yangzhong Estuary and its relation to environmental factors  
上海海洋大学学报. 2019, 28(4): 607 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180802372>

文章编号: 1674-5566(2022)04-0929-11

DOI:10.12024/jsou.20210103267

## 海陵湾网箱养殖区浮游植物群落结构及其与环境因子的关系

苏家齐<sup>1,2</sup>, 朱长波<sup>1,2</sup>, 张博<sup>1,2</sup>, 陈素文<sup>1,2</sup>, 李婷<sup>1,2</sup>

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东 广州 510300; 2. 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, 广东 广州 510300)

**摘要:** 为研究海陵湾鱼类网箱养殖对浮游植物群落的影响, 于 2019 年 1 月、4 月和 11 月对海陵湾上、中、下游 3 个网箱养殖区进行了冬、春、秋 3 个季节的浮游植物及主要水质因子的调查, 共检出浮游植物 3 门 39 属 96 种(含变种), 其中硅藻门 29 属 76 种、甲藻门 8 属 16 种、蓝藻门 2 属 4 种。浮游植物细胞丰度为  $22 \sim 3.054 \times 10^5$  cells/L, 秋季 > 春季 > 冬季, 湾口处丰度在秋冬两季远大于湾内。冬季优势种主要为细弱海链藻 (*Thalassiosira subtilis*) 和佛氏海毛藻 (*Thalassiothrix frauenfeldii*), 春季优势种为细弱海链藻和中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*), 秋季优势种主要为中肋骨条藻和佛氏海毛藻。冬、春、秋季各采样站多样性指数分别为 1.44 ~ 4.11、0.66 ~ 2.39 和 1.62 ~ 3.10。冗余分析表明, 冬季盐度、pH, 春季氨氮、pH, 秋季硝酸盐、溶解氧对浮游植物优势种影响显著。受河流径流和养殖活动的影响, 海陵湾相邻采样站间的浮游植物群落相似性在秋季最高、冬季次之、春季最低。浮游植物群落的相似性差异与调查站位间环境的区域性差异关系密切。

**关键词:** 海陵湾; 浮游植物; 聚类分析; 鱼类网箱养殖; 环境因子

**中图分类号:** S 917.3; Q 948.1 **文献标志码:** A

海陵湾(111°41'E ~ 111°54'E, 21°34'N ~ 21°45'N), 位于广东省阳江市西南端, 海陵岛以西, 面积约 180 km<sup>2</sup>, 包括内湾和外湾 2 个部分, 外湾为开阔海域, 内湾北有丰头河、九姜河、织箕河等河流注入, 南有散头嘴和海陵岛的遮蔽, 风浪平缓, 水产养殖条件优越。海陵湾内有以闸坡旧澳湾网箱养殖基地和海陵湾浅海桩架吊养牡蛎基地等为代表的广东省著名的规模化水产养殖区, 水产养殖业已经成为当地的支柱产业之一。

浮游植物作为自然水体中的初级生产者, 是食物链的基础环节。其种群和群落的波动直接影响着水生生物的群落结构和水生生态系统的稳定性。学者们<sup>[1-3]</sup>先后在分类学、生活史、生理生态特征、群落分布与初级生产力、与其他群落的交互作用等方面对浮游植物开展研究, 并取得了丰硕的成果。由于浮游植物个体较小、生命周期短, 其群落结构对生态系统中环境因子的改变

较敏感<sup>[4]</sup>。在非生物因子和生物因子的单独或交互作用下, 浮游植物群落结构会产生明显的变化或演替现象, 从而表征水环境的状况。在浮游植物生态学上, 人们往往通过对浮游植物群落结构变化及其与环境因子的关系的研究, 探究远洋、近岸、内陆水域乃至室内养殖系统生态环境的特点并对生态环境的状态进行评价, 为生态环境的保护和有效利用提供重要参考。

近年来, 学者们<sup>[5-8]</sup>先后对海陵湾海域的浮游动物、水环境、底栖动物、水体激素含量开展了调查研究, 但关于海陵湾浮游植物的研究仅见于齐雨藻等<sup>[9]</sup>于 1987 年秋季对海区调查的报道。海水鱼类网箱养殖是一种依赖外源投饵的高度集约化养殖模式, 在水动力条件相对较弱的海湾易引起水体的富营养化<sup>[10]</sup>。作为环境依赖型产业, 鱼类养殖引起的养殖环境恶化也会对养殖鱼类产生不利影响。本研究于 2019 年冬、春、秋 3

收稿日期: 2021-01-07 修回日期: 2021-07-14

基金项目: 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2021SD16); 世界自然基金 WWF 项目(10000889-102714-1.1.01.01)

作者简介: 苏家齐(1987—), 男, 博士, 研究方向为水产养殖生态与模式。E-mail: sujiaqi2005@126.com

通信作者: 朱长波, E-mail: changbo@sosri.ac.cn

个季节对海陵湾鱼类养殖区的浮游植物及主要水质因子进行调查分析,探讨海陵湾浮游植物群落结构对环境因子和鱼类网箱养殖活动的响应,以期对海陵湾鱼类网箱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

### 1.1 采样站位点的设定

分别于2019年1月(冬季)、4月(春季)和11月(秋季)对海陵湾内湾的12个采样站进行3

个航次的采样调查。采样站位如图1所示。1~4号采样站位于海陵湾上游的溪头镇网箱养殖基地及其周边水域,5~8号位于海陵湾中游的北洋网箱养殖基地及其周边水域,9~12号位于湾口处的闸坡网箱养殖基地及其周边水域。其中2~4、5~7、9~11号采样站位于鱼排边,由于2019年阳江市对海陵湾非法渔业设施及碍航物进行清理整治,4号采样站鱼排在春季已无养殖活动并在秋季被移除。1、8、12号采样站则位于距网箱养殖区较远的周边水域。

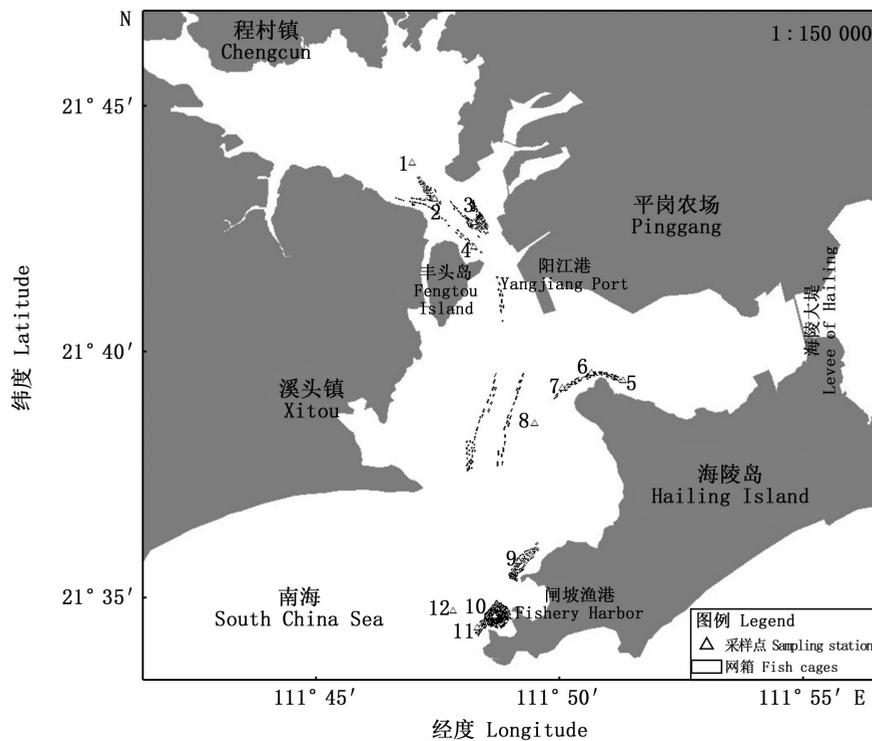


图1 海陵湾鱼类网箱养殖布局及采样站位图

Fig. 1 Fish farming structure layout and sampling stations in Hailing Bay, Guangdong Province

### 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《海洋监测规范第4部分:海水分析(GB17378.4—2007)》。定性样品采用浅水Ⅲ型浮游生物网,自底至表向水面垂直拖曳,定量样品则用有机玻璃采水器收集表底层各1 L水样,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及计数。浮游植物种类鉴定参考《中国海洋生物图集》、《中国海洋浮游生物图谱》和《中国近海赤潮生物图谱》等。

### 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 ProPlus型)现场测定,透明度(SD)采用萨式盘法测定。水样中化学需氧量(COD)采用碱性高锰酸钾法测定,活性磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )采用磷钼蓝分光光度法测定,氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )采用靛酚蓝法,亚硝酸盐( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ )采用萘乙二胺分光光度法,硝酸盐( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )采用锌镉还原法,颗粒有机物(POM)和悬浮颗粒物(TPM)的采用称重法测定。均按照《海洋监测规范第4部分:海水分析(GB17378.4—2007)》指定方法进行。

### 1.4 多样性分析方法

多样性指数(Shannon and Wiener)  $H'$ 、均匀

度(Pielou)  $J$  和优势度  $Y$  计算公式:

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

$$J = H' / \log_2 S \quad (2)$$

$$Y = (n_i / N) \times f_i \quad (3)$$

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。 $Y \geq 0.02$  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  $\lg(x+1)$  转换,建立 Bray-Curtis 相似性聚类分析,并进行非度量多维尺度(nMDS)排序。用 Canoco 4.5 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。筛选出现频率大于 12.5%,且在任意一个采样站的相对密度大于等于 1% 的浮游植物作为排序物种<sup>[11]</sup>。对排序物种数据进行趋势对应分析(DCA),发现 4 个轴中梯度最大值小于 3,故选择 RDA 进行物种-环境相关性分析。不同采样区域

的水质因子的比较采用单因素方差分析法。为实现方差齐性,对除 pH 外的水质因子数据进行  $\ln$  转换并采用 Turkey HSD 进行多重比较,差异显著性设置为  $P < 0.05$ 。数据的分析处理采用 SPSS 19.0 统计软件。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

海陵湾 2019 年冬、春、秋季 3 个航次共鉴定出浮游植物 3 门 39 属 96 种(含变种)。其中:硅藻门 29 属 76 种,占总种数的 79.17%;甲藻门 8 属 16 种,占总种数的 16.67%;蓝藻门 2 属 4 种,占总种数的 4.16%。冬季种类最多,春季最少(表 2)。海陵湾鱼类养殖区浮游植物优势种见表 3。调查期间检出浮游植物优势种共 8 种,其中,中肋骨条藻在 3 个季节都为优势种,细弱海链藻是冬季和春季的优势种,佛氏海毛藻和柔弱伪菱形藻为冬季和秋季的优势种。

表 2 2019 年 3 个季节海陵湾浮游植物的种类组成  
Tab.2 Seasonal phytoplankton composition in Hailing Bay in 2019

种类 Species	冬季 Winter		春季 Spring		秋季 Autumn	
	属 Genera	种 Species	属 Genera	种 Species	属 Genera	种 Species
硅藻 Bacillariophyta	26	58	11	16	20	48
甲藻 Pyrrophyta	3	8	2	4	6	12
蓝藻 Cyanophyta	2	2	-	-	1	3
总计 Total	31	68	13	20	27	63

表 3 海陵湾浮游植物优势种

Tab.3 Dominant species of phytoplankton in Hailing Bay, Guangdong Province

季节 Seasons	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 Dominant (Y)
冬季 Winter	细弱海链藻 <i>Thalassiosira subtilis</i>	$0.170 \times 10^3$	24.93	0.15
	佛氏海毛藻 <i>Thalassiothrix frauenfeldii</i>	$0.061 \times 10^3$	9.03	0.06
	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	$0.069 \times 10^3$	10.16	0.03
	柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	$0.025 \times 10^3$	3.68	0.03
	琼氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus jonesianus</i>	$0.025 \times 10^3$	3.68	0.02
春季 Spring	细弱海链藻 <i>Thalassiosira subtilis</i>	$3.72 \times 10^3$	46.64	0.47
	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	$3.13 \times 10^3$	39.21	0.18
秋季 Autumn	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	$3.63 \times 10^4$	63.70	0.53
	佛氏海毛藻 <i>Thalassiothrix frauenfeldii</i>	$4.41 \times 10^3$	7.74	0.08
	窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	$3.71 \times 10^3$	6.51	0.06
	热带骨条藻 <i>Skeletonema tropicum</i>	$5.09 \times 10^3$	8.92	0.05
	柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	$2.19 \times 10^3$	3.84	0.04
	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	$1.90 \times 10^3$	3.33	0.03

## 2.2 浮游植物丰度及群落结构分析

海陵湾冬、春、秋季平均丰度分别为  $0.67 \times 10^3$ 、 $7.98 \times 10^3$ 、 $57.01 \times 10^3$  cells/L, 季节变化趋势为秋 > 春 > 冬。各采样站浮游植物丰度的范围: 冬季  $0.022 \times 10^3 \sim 2.83 \times 10^3$  cells/L、春季  $1.00 \times 10^3 \sim 27.46 \times 10^3$  cells/L、秋季  $0.02 \times 10^4 \sim 30.54 \times 10^4$  cells/L。在冬、秋两季, 海陵湾内湾湾口 9~12 号采样站处浮游植物丰度远高于内湾上游、中游的 1~8 号站(图 2)。甲藻丰度在冬、春、秋季各占总丰度的 1.16%、1.66%、0.06%, 硅藻丰度在冬、春、秋季各占总丰度的 97.73%、98.34%、99.86%。冬季蓝藻丰度占总丰度的 1.10%, 主要为出现在上游的淡水种大颤藻(*Oscillatoria maxima*), 在秋季蓝藻丰度仅占总丰度的 0.08%。

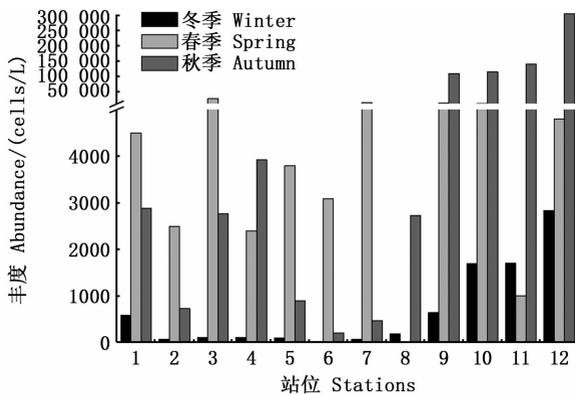


图 2 海陵湾各采样站位浮游植物丰度

Fig. 2 Abundance of phytoplankton at different sampling stations in the Hailing Bay, Guangdong Province

海陵湾浮游植物群落季节性差异显著 (Global  $R = 0.539$ ,  $P = 0.001$ )。在 52% 的相似度水平上, 从上游到下游冬季被分为 9 个类群。上游 1、2、3 号采样站各独立为 1 个类群, 上游 4 号与中游 5 号站为 1 个类群。中游 6 号独立为 1 个类群, 7、8 号站为 1 个类群。下游 9、10 号站为 1 个类群, 11、12 号各自单独为 1 个类群。在 40% 的相似度水平上, 冬季上、中、下游各相邻站位的浮游植物聚类效果较好, 被分为上游 1 号采样站、2 号采样站、上中游 3~8 号采样站以及下游 9~12 号采样站 4 个类群。春季各站位于 52% 的相似度水平上被分为 6 个类群: 1、4、12 号采样站各独立为 1 个类群, 中游的 5、6 号采样站

聚为一类, 湾口的 9、10、11 号与上游 2 号采样站聚为一类, 上游 3 号和中游 7 号采样站聚为一类。秋季上、中、下游各相邻采样站相似度较高, 共被分为 3 个类群: 位于上中游的 1~6、8 号采样站, 位于内湾湾口处的 9~12 号采样站, 以及 7 号采样站(图 3)。

## 2.3 多样性指数与均匀度的时空分布

海陵湾冬季多样性指数  $H'$  和均匀度指数  $J$  最高、春季最低(图 4)。冬季各站多样性指数为 1.44~4.11, 其中, 10 号站最高、4 号站最低。春季各站的浮游植物多样性指数为 0.66~2.39, 其中, 4 号站最高, 3、10 号站  $H'$  分别为 0.91 和 0.67。秋季, 各站的浮游植物多样性指数为 1.62~3.10, 其中, 4、2、3 号站较高, 分别为 3.10、2.88 和 2.80, 11、12 号站较低, 分别为 1.62 和 1.71。 $J$  分别为冬季 0.540~0.960, 春季 0.328~0.946, 秋季 0.334~0.736。

## 2.4 不同季节水质因子以及浮游植物群落结构的影响因素

调查期间, 海陵湾上游、中游、下游网箱养殖区环境因子的平均值见表 4。在冬季, 下游养殖区的盐度和 pH 高于上游及中游且差异显著 ( $P < 0.05$ ), 中游养殖区的水温和溶解氧最高且与上游差异显著 ( $P < 0.05$ ), 亚硝酸盐、硝酸盐与氨氮含量在中游最低, 其中与亚硝酸盐、硝酸盐与上游、下游差异显著 ( $P < 0.05$ ), 氨氮含量与上游差异显著 ( $P < 0.05$ )。春季海陵湾网箱养殖区的透明度、盐度、溶解氧、pH 在下游最高, 亚硝酸盐、硝酸盐和氨氮则在下游最低, 与上游及中游差异显著 ( $P < 0.05$ )。在秋季, 下游养殖区的水温、盐度、pH、悬浮颗粒物以及悬浮颗粒有机物高于上游及中游且差异显著, 硝酸盐含量则低于上游及中游且差异显著 ( $P < 0.05$ ), 氨氮则为下游高于中游且差异显著 ( $P < 0.05$ )。

对海陵湾浮游植物与环境因子进行冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 及 Monte Carlo 置换检验。如图 5 所示, 冬季盐度 ( $F = 3.78$ ,  $P = 0.002$ )、pH ( $F = 2.10$ ,  $P = 0.05$ ), 春季氨氮 ( $F = 2.65$ ,  $P = 0.008$ )、pH ( $F = 2.01$ ,  $P = 0.044$ ), 秋季硝酸盐 ( $F = 3.78$ ,  $P = 0.002$ )、溶解氧 ( $F = 2.21$ ,  $P = 0.01$ ) 与海陵湾鱼类养殖区浮游植物优势种密切相关并影响显著。冬季盐度和 pH 对浮游植物物种变化的解释度分别为 24% 和 14%; 氨氮和

pH 对春季浮游植物物种变化的解释度分别为 23% 和 15% ;秋季硝酸盐、溶解氧对浮游植物

种变化的解释度分别为 27% 和 13% 。

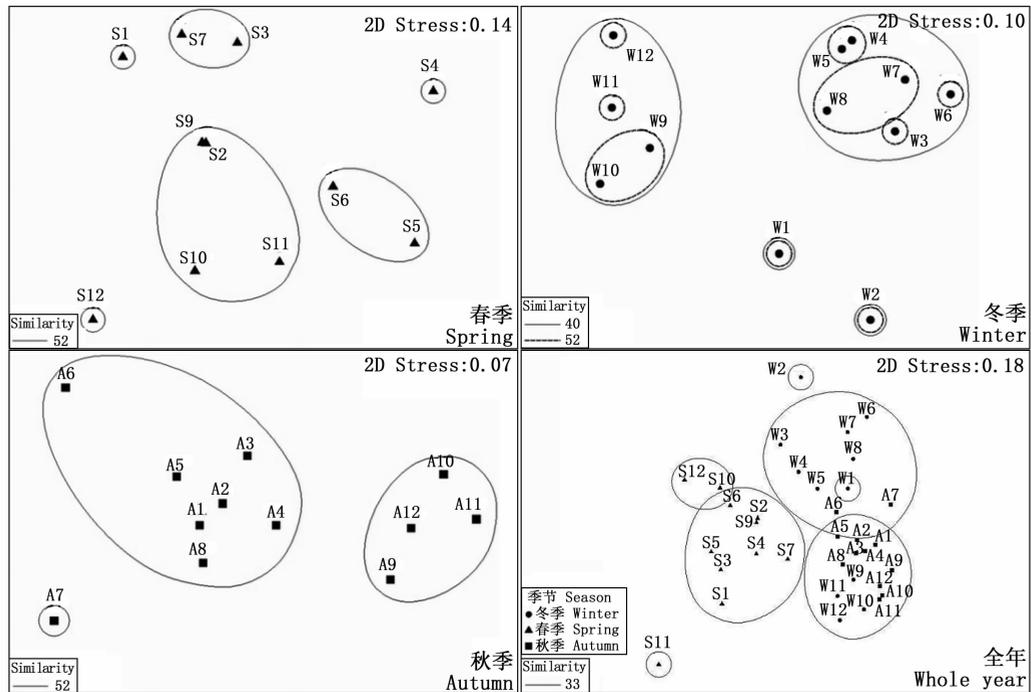


图3 海陵湾浮游植物群落的多维尺度分析  
Fig.3 The nMDS of phytoplankton communities in Hailing Bay, Guangdong Province

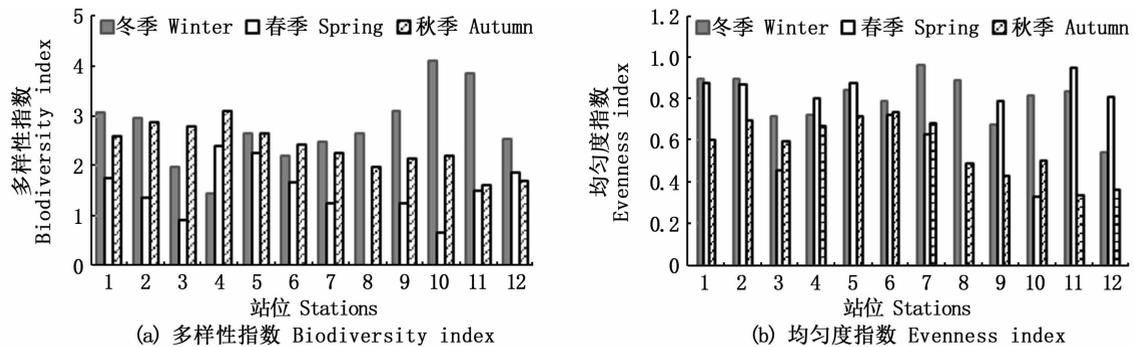


图4 海陵浮游植物多样性指数和均匀度指数  
Fig.4 Biodiversity index and evenness index of phytoplankton in Hailing Bay, Guangdong Province

### 3 讨论

#### 3.1 浮游植物与环境因子的关系

海陵湾上、中、下游各鱼类养殖片区距离较远,上游养殖区的盐度、硝酸盐质量浓度和 pH 普遍高于下游养殖区,下游的水温和悬浮颗粒物在秋冬季则普遍高于上游,这与钦州湾、三沙湾、三门湾、湛江湾等大多数河口和海湾的研究结果相似<sup>[12-15]</sup>。作为影响浮游植物生长的重要环境因子之一,盐度在河口生态系统中往往能够控制浮游植物的活动和多样性<sup>[16-17]</sup>。JIANG 等<sup>[18]</sup>在对

珠江口至南海北部浮游植物生物量与理化因子的调查中发现,水体中营养物浓度可以改变珠江口的浮游植物群落结构,而盐度对南海沿岸至北部开阔水域的所有地点的浮游植物群落结构都有显著的影响。在营养丰富的淡水和河口区海水中,较高的 pH 环境更利于藻类利用水中的可溶性无机碳进行光合作用<sup>[19-20]</sup>。MAJEWSKA 等<sup>[21]</sup>在婆罗洲河口区的调查中发现,随着 pH 的降低,浮游植物的种数和多样性随之降低,此外,相比于甲藻,硅藻对 pH 的降低更加不耐。任辉等<sup>[22]</sup>在珠江口南沙河涌的浮游植物调查中发现

硅藻门浮游植物受 pH 影响较大,其中,直链藻适  
合碱性环境生长。本次调查中盐度和 pH 对海陵

湾浮游植物影响显著这一结果符合河口区浮游  
植物对环境因子的响应规律。

表 4 海陵湾主要水质参数  
Tab. 4 Main parameters for water quality in HailingBay, Guangdong Province

参数因子 Parameters								
季节 Seasons	位置 Stations	透明度 SD/m	水温 T/°C	盐度 S	溶解氧 DO/(mg/L)	酸碱度 pH		
冬季 Winter	上游 1~4	1.69 ± 0.89	18.39 ± 0.02 <sup>b</sup>	31.25 ± 1.08 <sup>b</sup>	8.30 ± 0.23 <sup>b</sup>	7.83 ± 0.27 <sup>b</sup>		
	中游 5~8	1.40 ± 0.29	18.64 ± 0.24 <sup>a</sup>	32.09 ± 0.13 <sup>b</sup>	8.83 ± 0.44 <sup>a</sup>	8.11 ± 0.03 <sup>b</sup>		
	下游 9~12	1.55 ± 0.39	18.53 ± 0.13 <sup>ab</sup>	33.71 ± 0.14 <sup>a</sup>	8.67 ± 0.16 <sup>ab</sup>	8.15 ± 0.09 <sup>a</sup>		
春季 Spring	上游 1~4	1.45 ± 0.26 <sup>b</sup>	27.70 ± 0.22	22.53 ± 0.55 <sup>c</sup>	4.10 ± 0.28 <sup>b</sup>	7.87 ± 0.02 <sup>b</sup>		
	中游 5~8	1.30 ± 0.08 <sup>b</sup>	27.60 ± 0.29	24.93 ± 0.05 <sup>b</sup>	3.88 ± 0.26 <sup>b</sup>	7.86 ± 0.04 <sup>b</sup>		
	下游 9~12	2.18 ± 0.5 <sup>a</sup>	27.38 ± 0.25	26.83 ± 0.99 <sup>a</sup>	5.00 ± 0.64 <sup>a</sup>	8.12 ± 0.11 <sup>a</sup>		
秋季 Autumn	上游 1~4	1.19 ± 0.06	23.83 ± 0.10 <sup>c</sup>	25.43 ± 1.78 <sup>b</sup>	5.65 ± 0.11	8.04 ± 0.07 <sup>c</sup>		
	中游 5~8	1.26 ± 0.13	24.10 ± 0.23 <sup>b</sup>	29.31 ± 0.70 <sup>b</sup>	5.85 ± 0.25	8.17 ± 0.02 <sup>b</sup>		
	下游 9~12	1.24 ± 0.11	24.53 ± 0.05 <sup>a</sup>	30.72 ± 0.38 <sup>a</sup>	6.11 ± 0.60	8.29 ± 0.06 <sup>a</sup>		
参数因子 Parameters								
季节 Seasons	位置 Stations	亚硝酸盐 NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> / (mg/L)	硝酸盐 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / (mg/L)	氨氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> / (mg/L)	磷酸盐 PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> / (mg/L)	化学 需氧量 COD/ (mg/L)	悬浮 颗粒物 TPM/ (mg/L)	悬浮颗粒 有机物 POM/ (mg/L)
冬季 Winter	上游 1~4	0.08 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.41 ± 0.26 <sup>a</sup>	0.004 3 ± 0.000 7 <sup>a</sup>	0.06 ± 0.01	0.67 ± 0.09	49.66 ± 3.47 <sup>b</sup>	9.08 ± 0.50
	中游 5~8	0.04 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.58 ± 0.18 <sup>c</sup>	0.002 5 ± 0.000 7 <sup>b</sup>	0.06 ± 0.02	0.67 ± 0.40	51.71 ± 2.45 <sup>ab</sup>	9.18 ± 0.61
	下游 9~12	0.08 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.92 ± 0.17 <sup>b</sup>	0.003 4 ± 0.001 7 <sup>ab</sup>	0.07 ± 0.01	0.60 ± 0.12	55.48 ± 2.99 <sup>a</sup>	9.75 ± 0.45
春季 Spring	上游 1~4	0.12 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.06 ± 0.17 <sup>ab</sup>	0.200 8 ± 0.018 <sup>a</sup>	0.07 ± 0.03	0.15 ± 0.02	50.15 ± 7.48	12.90 ± 3.49
	中游 5~8	0.11 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.17 ± 0.15 <sup>a</sup>	0.19 ± 0.026 <sup>a</sup>	0.08 ± 0.02	0.13 ± 0.01	48.95 ± 2.10	13.40 ± 0.91
	下游 9~12	0.06 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.87 ± 0.10 <sup>b</sup>	0.11 ± 0.075 <sup>b</sup>	0.06 ± 0.01	0.12 ± 0.04	50.95 ± 2.44	13.95 ± 1.81
秋季 Autumn	上游 1~4	0.05 ± 0.01	0.29 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.035 ± 0.015 <sup>ab</sup>	0.04 ± 0.01	2.15 ± 0.42	50.70 ± 4.44 <sup>b</sup>	15.80 ± 0.85 <sup>b</sup>
	中游 5~8	0.04 ± 0.002	0.29 ± 0.07 <sup>a</sup>	0.019 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.03 ± 0.01	1.63 ± 0.54	61.25 ± 11.73 <sup>b</sup>	19.10 ± 4.08 <sup>b</sup>
	下游 9~12	0.04 ± 0.02	0.11 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.05 ± 0.026 <sup>a</sup>	0.02 ± 0.01	2.19 ± 0.28	81.85 ± 3.39 <sup>a</sup>	26.40 ± 0.85 <sup>a</sup>

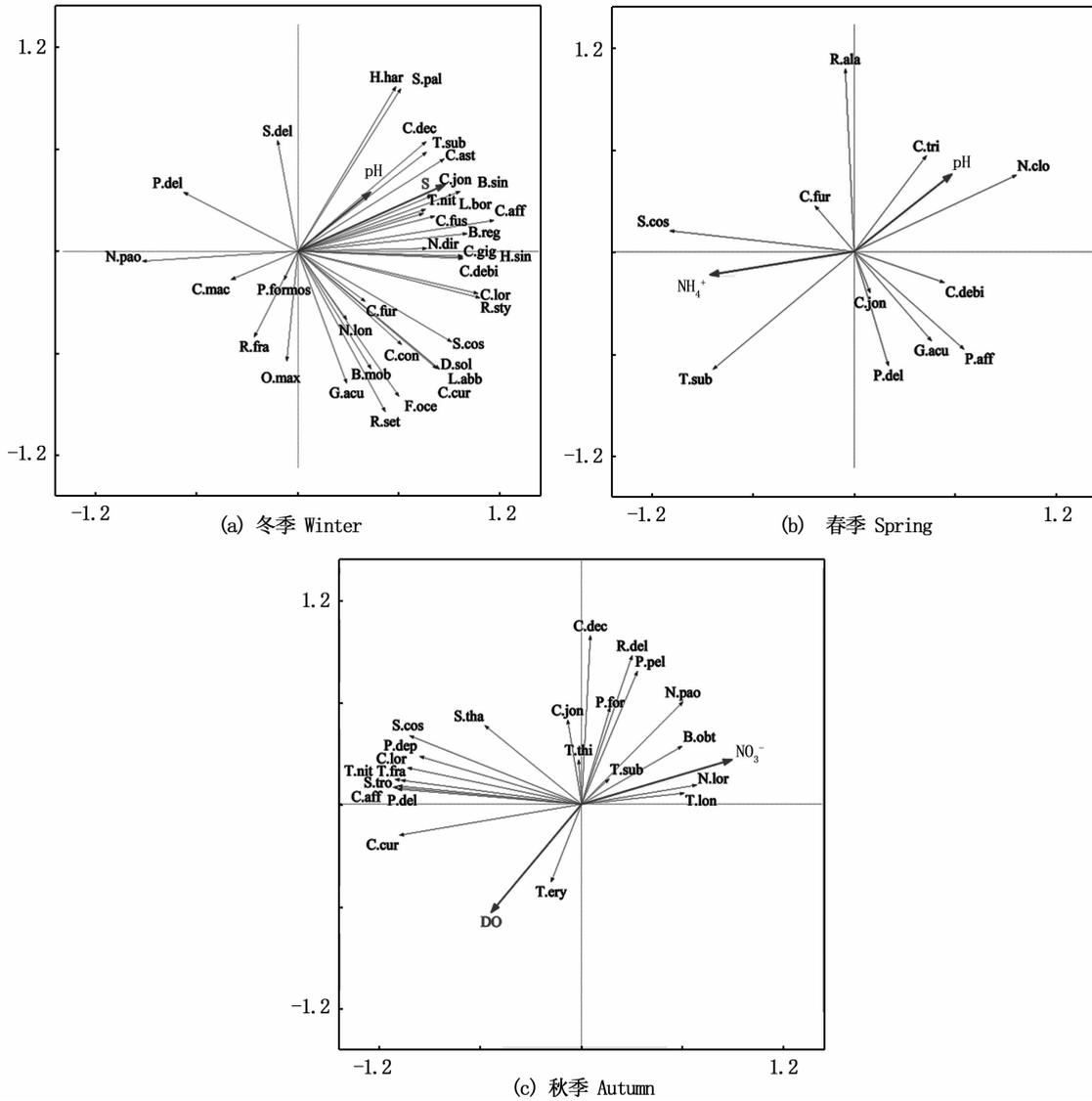
注:上标无相同字母表示两两比较差异显著( $P < 0.05$ )。

Notes: Means with different letters denote significant differences at  $P < 0.05$ .

春季,海陵湾各采样站的氨氮含量为 0.04 ~ 0.18 mg/L,平均为(0.14 ± 0.05) mg/L,远高于秋、冬两季。RDA 结果显示氨氮在春季对海陵湾浮游植物影响显著。氨氮长期以来被认为是浮游植物吸收氮的首选形式<sup>[23]</sup>。丁光茂等<sup>[24]</sup>研究发现中肋骨条藻在氨氮培养条件下生长速率高于在硝酸盐氮培养条件下;徐宁等<sup>[25]</sup>对大亚湾藻类水华开展动力学分析,发现细弱海链藻选择吸收氨氮而对硝酸盐氮吸收不明显。细弱海链藻和中肋骨条藻作为春季优势种,二者的丰度之和占调查区域总丰度的 85.25%,远远高于其他种。同时与冬季和秋季相比,春季海陵湾上、中游浮游植物丰度与下游相差不大,可能是由于海陵湾较高的氨氮水平对细弱海链藻和中肋骨条藻生长的促进作用。

齐雨藻等<sup>[9]</sup>在 1987 年秋季对海陵湾海区的调查结果显示洛氏角毛藻、假弯角毛藻等角毛藻

是该海域浮游植物的优势种。本次调查结果则显示除了窄隙角毛藻外,中肋骨条藻、柔弱伪菱形藻、菱形海线藻等成为 30 年后海陵湾内湾秋季浮游植物的优势种。学者们在藻华与环境因子关系的研究中发现,角毛藻的代谢以硝酸盐氮为主<sup>[25-26]</sup>。王艳等<sup>[27]</sup>在对广东湛江、大亚湾和汕头海域角毛藻进行调查分析后认为,中肋骨条藻和菱形海线藻、拟菱形藻等常常成为养殖水域的优势种,这些藻类的大量繁殖加强了种间竞争,从而影响角毛藻的生长。在 1987 年秋季的调查中,各调查采样站硝酸盐浓度均值为 0.10 ~ 0.12 mg/L,亚硝酸盐为 0.009 5 ~ 0.011 0 mg/L,本次秋季的调查中,各采样站硝酸盐浓度范围为 0.08 ~ 0.38 mg/L,亚硝酸盐为 0.025 ~ 0.066 mg/L,氨氮为 0.004 7 ~ 0.081 0 mg/L,较 30 年前的水平有了明显的上升。内湾浮游植物优势种的变化体现了浮游植物对当前环境下营养条件变



B. mob 为活动盒形藻; B. obt 为钝头盒形藻; B. reg 为高盒形藻; B. sin 为中华盒形藻; C. aff 为窄隙角毛藻; C. ast 为星脐圆筛藻; C. con 为整齐圆筛藻; C. cur 为旋链角毛藻; C. deb 为柔弱角毛藻; C. dec 为并基角毛藻; C. fur 为叉角藻; C. fus 为纺锤角藻; C. gig 为巨圆筛藻; C. jon 为琼氏圆筛藻; C. lor 为洛氏角毛藻; C. mac 为大角藻; C. tri 为三角藻; D. sol 为太阳双尾藻; F. oce 为大洋脆杆藻; G. acu 为尖布纹藻; H. har 为哈德半盘藻; H. sin 为中华半管藻; L. abb 为短纹楔形藻; L. bor 为北方劳德藻; N. clo 为新月菱形藻; N. dir 为直舟形藻; N. lon 为长菱形藻; N. lor 为洛伦菱形藻; N. pao 为奇异菱形藻; O. max 为大颤藻; P. aff 为近缘斜纹藻; P. del 为柔弱伪菱形藻; P. dep 为扁平多甲藻; P. for 为美丽斜纹藻; P. pel 为海洋斜纹藻; R. ala 为翼根管藻; R. del 为柔弱根管藻; R. fra 为脆根管藻; R. set 为刚毛根管藻; R. sty 为笔尖形根管藻; S. cos 为中肋骨条藻; S. del 为优美施罗藻; S. pal 为掌状冠盖藻; S. tha 为扭鞘藻; S. tro 为热带骨条藻; T. ery 为红海束毛藻; T. fra 为佛氏海毛藻; T. lon 为长海毛藻; T. nit 为菱形海线藻; T. sub 为细弱海链藻; T. thi 为铁氏束毛藻。

B. mob indicated *Biddulphia mobiliensis*; B. obt indicated *Biddulphia obtusa*; B. reg indicated *Biddulphia regia*; B. sin indicated *Biddulphia sinensis*; C. aff indicated *Chaetoceros affinis*; C. ast indicated *Coscinodiscus asteromphalus*; C. con indicated *Coscinodiscus concinnus*; C. cur indicated *Chaetoceros curvisetus*; C. deb indicated *Chaetoceros debilis*; C. dec indicated *Chaetoceros decipiens*; C. fur indicated *Ceratium furca*; C. fus indicated *Ceratium fusus*; C. gig indicated *Coscinodiscus gigas*; C. jon indicated *Coscinodiscus jonesianus*; C. lor indicated *Chaetoceros lorenzianus*; C. mac indicated *Ceratium macroceros*; C. tri indicated *Ceratium tripos*; D. sol indicated *Ditylum sol*; F. oce indicated *Fragilaria oceanica*; G. acu indicated *Gyrosigma acuminatum*; H. har indicated *Hemidiscus hardmannianus*; H. sin indicated *Hemiaulus sinensis*; L. abb indicated *Licmophora abbreviata*; L. bor indicated *Lauderia borealis*; N. clo indicated *Nitzschia closterium*; N. dir indicated *Navicula directa*; N. lon indicated *Nitzschia longissima*; N. lor indicated *Nitzschia lorenziana*; N. pao indicated *Nitzschia paradoxa*; O. max indicated *Oscillatoria maxima*; P. aff indicated *Pleurosigma affine*; P. del indicated *Nitzschia delicatissima*; P. dep indicated *Peridinium depressum*; P. for indicated *Pleurosigma formosum*; P. pel indicated *Pleurosigma pelagicum*; R. ala indicated *Rhizosolenia alata*; R. del indicated *Rhizosolenia delicatula*; R. fra indicated *Rhizosolenia fragilissima*; R. set indicated *Rhizosolenia setigera*; R. sty indicated *Rhizosolenia styliformis*; S. cos indicated *Skeletonema costatum*; S. del indicated *Schroederella delicatula*; S. pal indicated *Stephanopyxis palmeriana*; S. tha indicated *Streptothece thamesis*; S. tro indicated *Skeletonema tropicum*; T. ery indicated *Trichodesmium erythraeum*; T. fra indicated *Thalassiothrix frauenfeldii*; T. lon indicated *Thalassiothrix longissima*; T. nit indicated *Thalassionema nitzschioides*; T. sub indicated *Thalassiosira subtilis*; T. thi indicated *Trichodesmium thiebautii*.

图 5 海陵湾浮游植物与环境因子冗余分析排序图

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

化的一种响应。秋季,硝酸盐与溶解氧对海陵湾鱼类养殖区的浮游植物影响显著。本研究中,秋季海陵湾鱼类养殖区浮游植物优势种与硝酸盐含量呈负相关,这与刘璐等<sup>[28]</sup>于2013年秋季(11月)在钦州湾的调查结果相似。王小平等<sup>[29]</sup>对红海湾养殖水域中营养盐消长与温度、盐度、浮游植物量的关系的研究中发现,在春季营养盐含量随着浮游植物的生长而减少。RDA 结果显示,秋季海陵湾鱼类养殖区溶解氧与硝酸盐含量呈负相关。秋季海陵湾浮游植物丰度最高,硝酸盐含量最低,下游鱼类养殖区溶解氧含量高于上中游,浮游植物丰度远高于上中游,硝酸盐、亚硝酸盐和磷酸盐含量低于上游和下游。溶解氧与硝酸盐的负相关关系可能与秋季浮游植物大量增殖对营养盐的快速消耗,同时光合作用增加水中的溶解氧有关。

### 3.2 鱼类网箱养殖对浮游植物的影响

传统的鱼类网箱主要分布在水动力条件相对较弱的近岸浅水海域,养殖产生的残饵、粪便以及鱼类排泄物等向环境输入大量有机物和氮磷等营养物质,容易诱发富营养化等问题<sup>[10]</sup>。浮游植物多样性指数和均匀度指数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<sup>[30]</sup>。罗艳等<sup>[31]</sup>在珠海横琴岛海域浮游植物调查中,将浮游植物  $H' < 1$  时表示为水体污染;吴雪等<sup>[32]</sup>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。在本次调查中,春季3号站和10号站的  $H'$  为0.905和0.655,表明鱼类养殖在春季引起了局部的水体污染。4—8月为海陵湾鱼类网箱养殖的旺季,以海陵湾主要养殖鱼类卵形鲳鲹 (*Trachinotus ovatus*) 为例,其网箱养殖主要在每年4月放苗,8月生长至0.5 kg左右开始大批上市,并在第2年春节之前基本完成收获,其余少量鱼越冬后在第2年3月底前全部收获。海陵湾鱼类养殖区冬季多样性指数  $H'$  的均值为2.76,高于秋季(2.36)和春季(1.53),即在鱼类养殖旺季最低,淡季最高。周龙龙等<sup>[33]</sup>调查发现各项浮游植物群落结构指数显示大陈岛铜围网养殖附近海域秋季和冬季最高,春季次之,夏季最差,与本研究结果相似。此外,海陵湾4号站在冬、春、秋季的多样性指数分别为1.44、2.39、3.10,并在春季和秋季

中高于上游的1~3站位。该点在鱼类养殖设施移除前后多样性指数的变化也证明了鱼类网箱养殖对水域环境和浮游植物群落的扰动作用。

### 3.3 海陵湾网箱养殖区浮游植物群落结构特征及空间异质性

在本次调查中,共检出8个浮游植物优势种,其中,除了热带骨条藻为高温高盐种外,其余都为广温广盐类群或广温近岸种,nMDS 排序结果显示海陵湾浮游植物群落季节差异显著。海陵湾内湾南北长25 km左右,外有散头嘴和海陵岛的遮蔽,盐度及营养盐等环境因子受北部的多个河流以及南部外湾海水的交互影响,具有明显的区域性和季节性变化,其环境状况适宜广温近岸种以及广温广盐种为主体的浮游植物的生长和演替。

由水体理化特性和生态学过程造成的浮游植物空间异质性被认为是水生生态系统中的一个普遍特征<sup>[34]</sup>。骆鑫等<sup>[13]</sup>在钦州湾春、夏季浮游植物群落特征的研究中认为,夏季钦州湾受较强入海径流和外海水团作用,导致内、外湾水文环境更为单一,更易聚为相似性浮游植物类群,而在春季二者影响都十分有限,从而为浮游植物提供了不同的生境,使浮游植物群落呈离散型分布。孙雪梅等<sup>[35]</sup>在青岛崂山近海海域浮游植物调查过程中发现,8月流清河湾各站之间的群落结构相似性不高,并认为这种现象是潮水扰动的结果。海陵湾鱼类养殖区浮游植物在秋季和冬季主要分为上中游和下游区的两大类群,其中秋季聚类效果好于冬季,而春季上游和下游各相邻站位间多呈离散型分布。在秋季,影响浮游植物优势种的主要环境因子硝酸盐和溶解氧表现为下游大于上中游,冬季的主要环境因子盐度、pH在下游显著大于上中游( $P < 0.05$ )。调查站位环境的区域性差异与浮游植物区域性聚类相符。在冬季,海陵湾受河流径流的影响较小,同时上中游牡蛎养殖筏架密布、水动力条件较差,水文环境的区域差异较秋季大,因而与秋季相比,冬季相邻站位的浮游植物类群的相似性较差。在春季,海陵湾上、中游氨氮及pH差异不显著,相邻采样站的浮游植物群落也较难聚为相似性类群,其中无养殖活动的1、4、12则单独聚类,在一定程度上表明了养殖活动对环境的扰动。

## 参考文献:

- [1] RYNEARSON T A, PALENIK B. Learning to read the oceans genomics of marine phytoplankton [J]. *Advances in Marine Biology*, 2011, 60:1-39.
- [2] JI R, EDWARDS M, RUNGE J A. Marine plankton phenology and life history in a changing climate: current research and future directions [J]. *Journal of Plankton Research*, 2010, 32:1355-1368.
- [3] ABONYIA, DESCY J P, BORIC S G, et al. From historical backgrounds towards the functional classification of river phytoplankton sensu Colin S. Reynolds: what future merits the approach may hold? [J]. *Hydrobiologia*, 2021, 848:131-142.
- [4] 宫相忠,马威,田伟,等. 2009 年夏季南海北部的网采浮游植物群落[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(4):48-54.  
GONG X Z, MA W, TIAN W, et al. Netz-phytoplankton community in the northern South China Sea in summer 2009 [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(4):48-54.
- [5] 龚玉艳,肖雅元,徐姗楠,等. 海陵湾浮游动物群落结构及其与主要环境因子的关系[J]. *南方水产科学*, 2019, 15(6):49-55.  
GONG Y Y, XIAO Y Y, XU S N, et al. Zooplankton community structure in Hailing Bay and its relationship with primary environmental factors [J]. *South China Fisheries Science*, 2019, 15(6):49-55
- [6] 李婷,朱长波,李俊伟,等. 海陵湾口海水水质的综合分析与评价[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(3):49-57.  
LI T, ZHU C B, LI J W, et al. Water quality assessment for Hailing Bay estuary, China [J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(3):49-57.
- [7] 李亚芳,杜飞雁,王亮根,等. 粤西海陵湾养殖区邻近海域大型底栖动物生态学特征[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(6):1294-1307.  
LI Y F, DU F Y, WANG L G, et al. Ecology of macrobenthic fauna community in aquaculture zones of Hailing Bay and adjacent waters along the western Guangdong coast, China [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(6):1294-1307.
- [8] LIU S, CHEN H, ZHOU, G J, et al. Occurrence, source analysis and risk assessment of androgens, glucocorticoids and progestagens in the Hailing Bay region, South China Sea [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536:99-107.
- [9] 齐雨藻,吕颂辉,钱宏林,等. 南海港湾(海陵湾)浮游植物与赤潮生物研究[J]. *暨南大学学报(自然科学与医学版)*, 1994, 15(1):150-155.  
QI Y Z, LYU S H, QIAN H L, et al. Studies on phytoplankton and red tide organisms in embayments on west Guangdong coast V. Hailing Bay [J]. *Journal of Jinan University(Natural Science & Medicine Edition)*, 1994, 15(1):150-155.
- [10] 梁庆洋,齐占会,巩秀玉,等. 大亚湾鱼类深水网箱养殖对环境的影响[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(5):25-32.  
LIANG Q Y, QI Z H, GONG X Y, et al. Impact of deep-water net cage fish farming in Daya Bay, southern China on environment [J]. *South China Fisheries Science*, 2017, 13(5):25-32.
- [11] 叶海新,上官欣欣,毕子昊,等. 长江口北支贝类放流滩涂区潮下带水域浮游植物分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(5):699-707.  
YE H X, SHANGGUAN X X, BI Z H, et al. Analysis of phytoplankton in the subtidal waters of the north branch of the Yangtze River estuary [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(5):699-707.
- [12] 郑钦华. 三沙湾重点水产养殖水域理化变化特征及富营养化状况[J]. *应用海洋学学报*, 2017, 36(1):24-30.  
ZHENG Q H. Physical and chemical variations and eutrophication status in important aquaculture waters of Sansha Bay [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2017, 36(1):24-30.
- [13] 骆鑫,蓝文陆,李天深,等. 钦州湾春、夏季浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2019, 39(7):2603-2613.  
LUO X, LAN W L, LI T S, et al. Distribution of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Qinzhou Bay in spring and summer [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7):2603-2613.
- [14] 刘晶晶,江志兵,陈悦,等. 三门湾春季网采浮游植物群落特征[J]. *海洋学研究*, 2015, 33(1):74-80.  
LIU J J, JIANG Z B, CHEN Y, et al. Community characteristics of net-phytoplankton in spring in Sanmen Bay, China [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2015, 33(1):74-80.
- [15] 施玉珍,张瑜斌,孙省利. 湛江湾富营养化分布特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(12):90-96, 122.  
SHI Y Z, ZHANG Y B, SUN S L. Spatiotemporal distribution of eutrophication and its relationship with environmental factors in Zhanjiang Sea Bay area [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 38(12):90-96, 122.
- [16] WANG R, LIU X, WU J, et al. Long-term variations of phytoplankton community in relations to environmental factors in Deep Bay, China, from 1994 to 2016 [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 153:111010.
- [17] 杨旖祎,李轶,叶属峰. 乐清湾盐度环境梯度下浮游植物生态阈值研究[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(4):499-504.  
YANG Y Y, LI Y, YE S F. Studies on the ecological threshold of phytoplankton to the environmental gradient of salinity in the Yueqing Bay, Zhejiang Province, China [J]. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(4):499-504.
- [18] JIANG Z Y, WANG Y S, CHENG H, et al. Variation of phytoplankton community structure from the Pearl River estuary to South China Sea [J]. *Ecotoxicology*, 2015, 24(7/

- 8):1442-1449.
- [19] HAMMER K J, KRAGH T, SAND-JENSEN K. Inorganic carbon promotes photosynthesis, growth, and maximum biomass of phytoplankton in eutrophic water bodies [J]. *Freshwater Biology*, 2019, 64(11):1956-1970.
- [20] ZHANG Y, GAO Y, KIRCHMAN D L, et al. Biological regulation of pH during intensive growth of phytoplankton in two eutrophic estuarine waters [J]. *Marine ecology progress series*, 2019, 609:87-99.
- [21] MAJEWSKA R, ADAM A, MOHAMMAD-NOOR N, et al. Spatio-temporal variation in phytoplankton communities along a salinity and pH gradient in a tropical estuary (Brunei, Borneo, South East Asia) [J]. *Tropical Ecology*, 2017, 58(2):251-269.
- [22] 任辉,田恬,杨宇峰,等.珠江口南沙河涌浮游植物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2017, 37(22):7729-7740.
- REN H, TIAN T, YANG Y F, et al. Spatial and temporal distribution of phytoplankton community and its relationship with environment factors in Nansha's Rivers, Pearl River estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22):7729-7740.
- [23] GLIBERT P M, WILKERSON F P, DUGDALE R C, et al. Pluses and minuses of ammonium and nitrate uptake and assimilation by phytoplankton and implications for productivity and community composition, with emphasis on nitrogen-enriched conditions [J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61(1):165-197.
- [24] 丁光茂. 中国近海三种典型赤潮生物氮营养生理研究 [D]. 福建:厦门大学, 2009.
- DING G M. Nitrogen nutrient physiology of three harmful algal bloom species in the coastal waters of China [D]. Fujian: Xiamen University, 2009.
- [25] 徐宁,陈菊芳,王朝晖,等. 广东大亚湾藻类水华的动力学分析 II. 藻类水华与营养元素的关系研究 [J]. *环境科学学报*, 2001, 21(4):400-404.
- XU N, CHEN J F, WANG C H, et al. Dynamic analyses on algal bloom events in Daya Bay of Guangdong Province II. A study of relationship between algal bloom and nutrients [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(4):400-404.
- [26] 费岳军,蒋红. 舟山朱家尖海域角毛藻赤潮与环境因子关系的研究 [J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(s1):40-43.
- FEI Y J, JIANG H. Study on correlation of *Chaetoceros* red tide and environmental factors in Zhujiajian area [J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(s1):40-43.
- [27] 王艳,裴瑞,李扬,等. 广东沿海角毛藻 (*Chaetoceros*) 的种类多样性及其地理分布 [J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(3):342-352.
- WANG Y, NIE R, LI Y, et al. Species diversity and geographical distribution of *Chaetoceros* in Guangdong coastal waters [J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(3):342-352.
- [28] 刘璐,姜美洁,李艳,等. 钦州湾海域网采浮游植物群落结构季节变化 [J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(1):83-95.
- LIU L, JIANG M J, LI Y, et al. Seasonal changes of net-phytoplankton community structure in Qinzhou Bay [J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(1):83-95.
- [29] 王小平,贾晓平,林钦,等. 红海湾养殖水域营养盐消长与温度、盐度、浮游植物量的关系 [J]. *湛江海洋大学学报*, 1999, 19(2):18-24.
- WANG X P, JIA X P, LIN Q, et al. Relationship between nutrients, temperature, salinity and phytoplankton in the aquaculture waters of Honghai Bay [J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 1999, 19(2):18-24.
- [30] 陈露,李纯厚,魏小岚,等. 南沙群岛海域夏季氮磷添加模拟实验中浮游植物群落的变化 [J]. *南方水产科学*, 2015, 11(5):56-66.
- CHEN L, LI C H, WEI X L, et al. Influence of nitrogen and phosphorus enrichment on phytoplankton community structure in Nansha area in summer [J]. *South China Fisheries Science*, 2015, 11(5):56-66.
- [31] 罗艳,粟丽,林丽华,等. 珠海横琴岛海域浮游植物的生态特征 [J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(2):192-201.
- LUO Y, SU L, LIN L H, et al. Ecological characteristics of phytoplankton in Hengqin island sea area of Zhuhai City [J]. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(2):192-201.
- [32] 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 [J]. *水产科学*, 2017, 36(3):347-352.
- WU X, LI X L, YANG J L, et al. Ecological characteristics of phytoplankton in scallop culture area in Laizhou Bay [J]. *Fisheries Science*, 2017, 36(3):347-352.
- [33] 周龙龙,平仙隐,李磊,等. 铜围网大黄鱼养殖海域浮游植物群落结构特征及其环境效应研究 [J]. *海洋渔业*, 2018, 40(4):413-423.
- ZHOU L L, PING X Y, LI L, et al. On characteristics and environmental effects of phytoplankton community structure in the coast of *Pseudosciaena crocea* copper seine net cage culture [J]. *Marine Fisheries*, 2018, 40(4):413-423.
- [34] 江志兵,朱旭宇,高瑜,等. 象山港春季网采浮游植物的分布特征及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2013, 33(11):3340-3350.
- JIANG Z B, ZHU X Y, GAO Y, et al. Distribution of net-phytoplankton and its influence factors in spring in Xiangshan Bay [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(11):3340-3350.
- [35] 孙雪梅,夏斌,过锋,等. 青岛崂山近岸海域浮游植物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *渔业科学进展*, 2013, 34(3):46-53.
- SUN X M, XIA B, GUO F, et al. Structure characteristics of phytoplankton community and the relationship with environmental factors in offshore area of Laoshan, Qingdao [J]. *Progress In Fishery Sciences*, 2013, 34(3):46-53.

## Structure characteristics of phytoplankton community and the relationship with environmental factors in cage fish farming area in Hailing Bay

SU Jiaqi<sup>1,2</sup>, ZHU Changbo<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>1,2</sup>, CHEN Suwen<sup>1,2</sup>, LI Ting<sup>1,2</sup>

(1. 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, Guangzhou 510300, Guangdong, China;  
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to study the impacts to phytoplankton caused by fish cage farming activities, three seasonal investigations (winter, spring and autumn) on phytoplankton community and environmental factors in the Hailing Bay were carried out. In total, 171 phytoplankton species were detected, with 76 species of diatom belonging to 29 genera, followed by dinoflagellates represented by 16 taxa (8 genera), blue-green algae by 4 taxa (2 genera). The range of phytoplankton density was  $22 - 3.054 \times 10^5$  cells/L, which ranked as: autumn > spring > winter. In general, the phytoplankton density in the outer bay was higher than that in the inner bay except in spring. The main dominant species were *Thalassiosira subtilis* and *Thalassiothrix frauenfeldii* in winter, *T. subtilis* and *Skeletonema costatum* in spring, *S. costatum*, and *T. frauenfeldii* in autumn. The range of Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ) were 1.44 - 4.11, 0.66 - 2.39 and 1.62 - 3.10 in winter, spring and autumn. Redundancy analysis suggested that the main variables affecting the dominant species were water salinity and pH in winter, ammonia ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) and pH in spring, dissolved oxygen and nitrate ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) in autumn. Under the influence of different runoff and aquaculture activity, most of the phytoplankton communities in autumn were easily clustered into similar communities; however, those in spring tended to be more varied. Close relationship was found among the results of cluster analysis of stations on phytoplankton community structures and environmental factors.

**Key words:** Hailing Bay; phytoplankton; cluster analysis; fish cage farm activity; environmental factor