

# 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\*

杨晓改 薛莹 答肖肖 任一平<sup>\*\*</sup>

(中国海洋大学水产学院, 山东青岛 266003)

**摘要** 根据2011年春季(5月)、夏季(7月)、秋季(9月)和冬季(12月)在海州湾及其邻近海域开展的大面积综合调查数据, 对海州湾浮游植物群落的种类组成、优势种、丰度以及多样性的时空变化特征进行研究, 并应用典范对应分析(CCA)研究了环境因子对海州湾浮游植物群落结构的影响。本次调查共鉴定出浮游植物113种, 隶属于3门44属。其中, 硅藻门种类最多, 共39属99种, 占总种数的87.6%; 甲藻门次之, 共4属13种, 占总种数的11.5%; 金藻门仅1属1种。优势种中硅藻门主要以圆筛藻属和角毛藻属为主, 甲藻门以角藻属为主, 主要优势种为膜状缪氏藻、细弱圆筛藻、浮动弯角藻和派格棍形藻等, 优势种组成具有明显的季节演替现象。海州湾各站位浮游植物的丰度为 $0.08 \times 10^5 \sim 108.48 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ , 年平均丰度为 $10.71 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其中, 秋季最高( $29.08 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 夏季最低( $1.69 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ )。Shannon多样性指数( $H$ )、均匀度指数( $J$ )和丰富度指数( $D$ )均为夏、秋季高, 冬、春季低。典范对应分析(CCA)表明, 影响海州湾及其邻近海域浮游植物丰度和分布的主要环境因子依次为海水表面温度(SST)、营养盐( $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P,  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si)和溶解氧(DO), 尤其是一些浮游植物优势种的丰度和分布与上述环境因子密切相关。

**关键词** 海州湾 浮游植物 群落结构 物种多样性 典范对应分析

**文章编号** 1001-9332(2014)07-2123-09 **中图分类号** Q949.2 **文献标识码** A

**Community structure of phytoplankton in Haizhou Bay and adjacent waters and its relationships with environmental factors.** YANG Xiao-gai, XUE Ying, ZAN Xiao-xiao, REN Yi-ping (College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2014, 25(7): 2123–2131.

**Abstract:** Based on the data collected from four seasonal surveys in 2011 in Haizhou Bay and adjacent waters, community structure of phytoplankton was studied and their relationships with environmental factors were evaluated by canonical correlation analysis (CCA). A total of 113 phytoplankton species belonging to 3 phyla and 44 genera were collected, among which Bacillariophyta species were the most abundant species, which included 39 genera and 99 species, accounting for 87.6% of total taxa, followed by Pyrrophyta, which included 4 genera and 13 species, accounting for 11.5 percent of total taxa. And the least abundant species were Chrysophyta species, which had only 1 species belonging to 1 genus. Among these dominant species, *Coscinodiscus* and *Chaetoceros* were the dominant groups in Bacillariophyta, while *Ceratium* was the dominant group in Dinophyta, and the dominant species were *Meuniera membranacea*, *Coscinodiscus subtilis* var. *subtilis*, *Eucampia zodiacus* and *Bacillaria paxillifera*. There were obvious seasonal variations in the species composition and predominant species. The abundances of phytoplankton in all the stations ranged from  $0.08 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$  to  $108.48 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$  in Haizhou Bay. The average annual density of phytoplankton was  $10.71 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ , being the highest in autumn ( $29.08 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ) and the lowest in summer ( $1.69 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ). The Shannon index, Pielou index and Margalef index of the phytoplankton community were higher in summer and autumn than in winter and

\* 海洋公益性行业科研专项经费项目(201305030)、高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120132130001)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(201022001, 201262004)资助。

\*\* 通讯作者. E-mail: renyp@ouc.edu.cn

2013-11-11 收稿, 2014-04-18 接受.

spring. CCA suggested that the main factors affecting the phytoplankton community were sea surface temperature (SST), followed by nutrients ( $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P,  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si) and dissolved oxygen (DO). The abundances and distribution of some dominant species were closely related with these main factors.

**Key words:** Haizhou Bay; phytoplankton; community structure; species diversity; canonical correlation analysis (CCA).

海州湾是位于我国黄海中部的一个典型的开放式海湾,岸线全长近170 km,北起绣针河入海口,南至灌河入海口<sup>[1]</sup>。海州湾属暖温带向北亚热带过度的海域,湾内水质肥沃,并且拥有沙质、基岩质和淤泥质等多种底质类型,成为各种渔业生物理想的栖息场所<sup>[2]</sup>。

浮游植物是海洋中最主要的初级生产者,具有生命力强、繁殖快、对环境条件变化反应敏感等特点,其数量的丰欠直接影响着海洋初级生产力的大小,并通过食物链最终影响渔业产量和生态系统的稳定性,在海洋生态系统的物质循环和能量转化过程中起着重要作用,因此,研究一个海区的浮游植物群落结构是了解该海区生态系统结构的基础<sup>[3-4]</sup>。

近年来,我国学者在近海海域浮游植物的群落结构和多样性方面开展过许多研究,调查范围涉及北仑港、上海崇明岛、柘林湾、莱州湾等诸多海域<sup>[5-8]</sup>,为我国近海浮游植物的研究积累了宝贵的资料。然而,对海州湾海域浮游植物的调查和研究较少,而且仅涉及海州湾投放人工鱼礁的局部海域<sup>[1,9]</sup>,不能反映海州湾浮游植物群落组成的全貌。为此,本研究根据2011年春季(5月)、夏季(7月)、秋季(9月)和冬季(12月)在海州湾及其邻近海域进行的大面积调查资料,对海州湾浮游植物的种类组成、群落结构和季节变化进行了研究,并应用典范对应分析(CCA)研究了环境因子对海州湾浮游植物群落的影响,旨在为正确评价海州湾海域的生态环境,并为合理保护和利用海州湾的渔业资源提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

样品于2011年春季(5月)、夏季(7月)、秋季(9月)和冬季(12月)采自海州湾及其邻近海域,调查海域范围为 $34^{\circ}20'—35^{\circ}40'$ N, $119^{\circ}20'—121^{\circ}10'$ E。采用分层随机取样的方法设计调查站位,根据海州湾不同海域水深、纬度等因素的差异,将调查海域分为A、B、C、D、E 5个区域,每个航次在各个区域内

均随机选取一定数量的站位进行调查(每 $10' \times 10'$ 的方格内设置一个站位),其中,A区3个,B区5个,C区3个,D区9个,E区4个,共24个调查站位。受天气等因素的影响,9月只采集了14个站位,12月采集了22个站位。

在每个站位,使用浅水Ⅲ型浮游生物网(网口直径37 cm、面积 $0.1 \text{ m}^2$ ,网目孔径77  $\mu\text{m}$ )由底至表进行垂直拖网采集浮游植物样品,并用 Hydro-bios流量计记录滤水量。样品用中性甲醛固定,经浓缩后用 Leica DM 2500 显微镜观察、鉴定并计数。所有操作均按《海洋调查规范》(GB/T 12763. 9—2007)进行<sup>[10]</sup>。

在每个调查站位,同步进行表层水温、盐度和水深的测定;同时进行水样的采集,并带回实验室进行相关环境参数的测定,包括:硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、硅酸盐( $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si)、磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ -P)、化学需氧量(COD)、透明度(TRA)、pH 和溶解氧(DO)。

### 1.2 数据分析

**1.2.1 优势种的确定** 采用种类优势度( $Y$ )<sup>[11]</sup>来确定:

$$Y = (N_i/N)f_i$$

式中: $N_i$ 为第*i*种的个体数; $N$ 为每个种的总个体数; $f_i$ 为第*i*种在各站位中出现的频率。 $Y > 0.02$ 为优势种<sup>[11]</sup>。

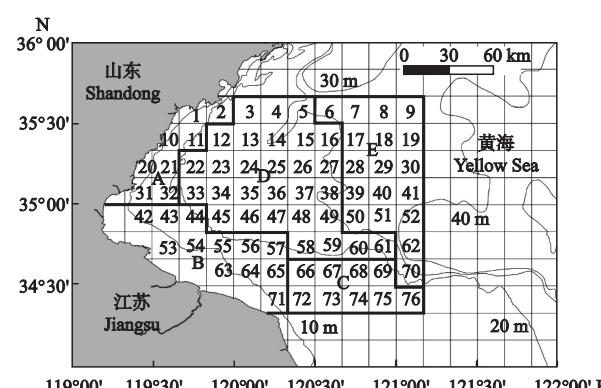


图1 海州湾及其邻近海域调查区域

Fig. 1 Sampling areas in Haizhou Bay and adjacent waters.

**1.2.2 多样性指数的计算** 浮游植物群落的各项多样性指数分别采用以下公式计算:

1) Margalef 丰富度指数( $D$ )<sup>[12]</sup>:

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

式中: $S$  为物种数; $N$  为同一样品中的个体总数.

2) Shannon 多样性指数( $H$ )<sup>[12]</sup>:

$$H = - \sum P_i \log_2 P_i \quad (P_i = n_i/N)$$

式中: $S$  为物种数; $N$  为同一样品中的个体总数; $n_i$  为第  $i$  种的个体数.

3) Pielou 均匀度指数( $J$ )<sup>[12]</sup>:

$$J = H/\log_2 S$$

### 1.3 典范对应分析

典范对应分析(CCA)要求两个数据矩阵:一个是物种数据矩阵,一个是环境数据矩阵.为了得到更理想的排序结果,物种数据按下面两个条件进行筛选:该物种在各站位出现的频度>12.5%,且该物种在至少一个站位的相对丰度>1%<sup>[13-14]</sup>.分析前,物种矩阵和环境数据矩阵(除 pH 外)都进行  $\lg(x+1)$  转换<sup>[15]</sup>,利用软件包中的 Wcanalimp 将其分别生成名为 spe.dta 和 env.dta 的文件,应用 Canoco for windows 4.5 软件进行运算,将生成的后缀名为 edw 的数据文件在 Canodraw for Windows 中作图,排序结果用物种-环境因子关系的双序图表示<sup>[16]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物的种类组成

本调查共鉴定出浮游植物 113 种,隶属于 3 门,44 属.其中,硅藻门最多,共 39 属 99 种,占总种数的 87.6%;甲藻门次之,共 4 属 13 种,占总种数的 11.5%;金藻门共 1 属 1 种.

海州湾浮游植物在温度较高的夏、秋季节种类最丰富(图 2):夏季共 3 门 36 属 87 种,占总种数的 77%,其中,硅藻门种类最多,达 75 种,占本航次种类的 86%;秋季次之,共 3 门 34 属 80 种,占总种数的 71%,其中,硅藻门的种类最多,共 69 种,占本航次总种数的 86%.在温度较低的春、冬季节种类数较少,但仍然是硅藻门种类占主导,分别为春季 3 门 23 属 45 种,冬季 3 门 27 属 63 种.

### 2.2 优势种组成

由表 1 可以看出,海州湾及其邻近海域春季的优势种主要是膜状缪氏藻(*Meuniera membranacea*)和斯氏根管藻(*Rhizosolenia stoltefothii*),二者的细胞丰度相差不大,但是前者的优势度指数远高于后者.

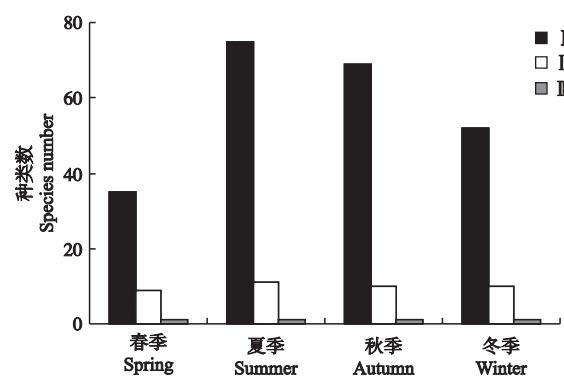


图 2 海州湾及其邻近海域浮游植物种类数组成的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations in species composition of phytoplankton in Haizhou Bay and adjacent waters.

I : 硅藻门 Bacillariophyta; II : 甲藻门 Pyrrhophyta; III : 金藻门 Chrysophyta.

在夏季,细弱圆筛藻(*Coscinodiscus subtilis* var. *subtilis*)的优势度最高,并且在本航次所调查的各站均有分布;其次为甲藻门的三角角藻(*Ceratium tripos*).

秋季以浮动弯角藻(*Eucampia zodiacus*)在细胞丰度上占绝对优势,而在优势度指数上与角毛藻属(*Chaetoceros*)和海线藻属(*Thalassionema*)种类相差不大.另外,佛氏海线藻(*T. frauenfeldii*)在本航次所调查的各站中均有分布.

冬季派格棍形藻(*Bacillaria paxillifera*)无论从细胞丰度上还是优势度指数上都占有绝对优势.另外,从种类上圆筛藻属(*Coscinodiscus*)占优势,共两种圆筛藻成为优势种,分别是细弱圆筛藻和星脐圆筛藻(*Coscinodiscus asteromphalus* var. *asteromphalus*),并且这两种圆筛藻的出现频率均为 100%.

### 2.3 浮游植物丰度的时空变化

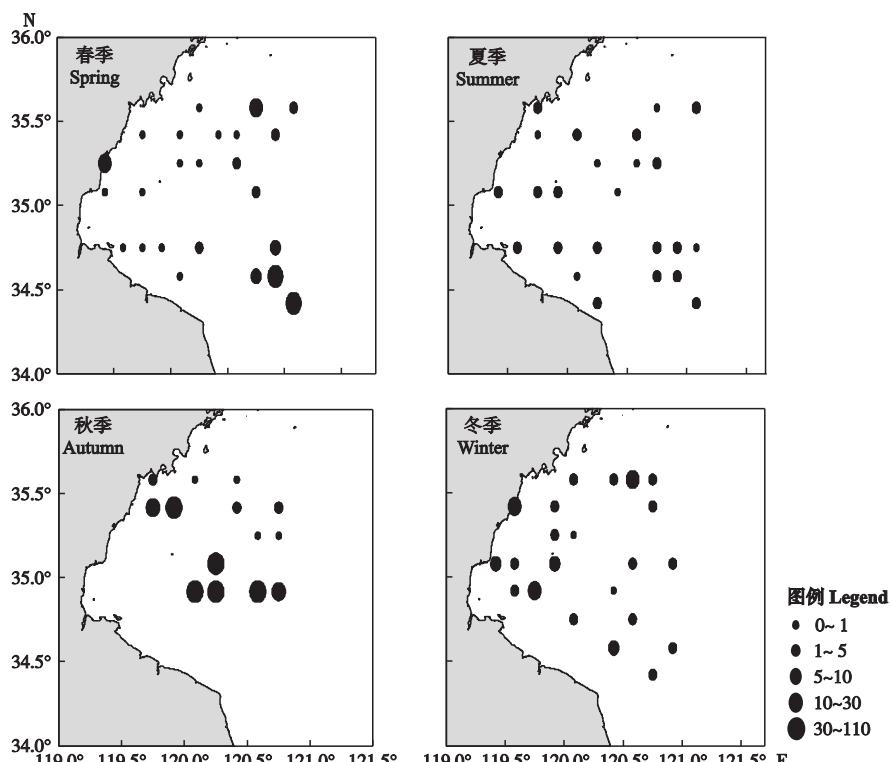
海州湾调查海域浮游植物的年平均丰度为  $10.71 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ .其中,各站平均丰度在秋季最高,达到  $(29.08 \pm 34.57) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ;春季和冬季次之,分别为  $(7.33 \pm 15.20) \times 10^5$  和  $(4.74 \pm 4.00) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ;夏季最低,为  $(1.69 \pm 1.01) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ .

由图 3 可以看出,春季在调查海区的西北部沿岸以及东北部、东南部海域浮游植物的丰度较高;而夏季,浮游植物丰度整体较低,在调查海域纬度较低的南部区域浮游植物的丰度相对较高;秋季,调查海区的西北部以及南部海域浮游植物的丰度很高,最高达到  $108.48 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ;而冬季,随着气温的降低,浮游植物丰度较高的区域出现在海州湾的近

表 1 海州湾及其邻近海域各个季节浮游植物优势种组成及优势度指数

Table 1 Dominant species and dominance index of phytoplankton in Haizhou Bay and adjacent waters

季节 Season	物种 Species	占总细胞丰度的比例 Percentage in cell abundance (%)	出现频率 Occurrence frequency (%)	优势度 Dominance
春季 Spring (5月 May)	膜状缪氏藻 <i>Meuniera membranacea</i>	45.3	79.2	0.359
	斯氏根管藻 <i>Rhizosolenia stoltefothii</i>	40.6	45.8	0.186
	梭角藻 <i>Ceratium fusus</i>	3.7	95.8	0.036
夏季 Summer (7月 July)	细弱圆筛藻 <i>Coscinodiscus subtilis</i> var. <i>subtilis</i>	13.3	100	0.133
	三角角藻 <i>Ceratium tripos</i>	12.0	91.7	0.110
	窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i> var. <i>affinis</i>	10.2	54.2	0.055
	大角角藻 <i>Ceratium macroceros</i>	5.6	91.7	0.051
	星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i> var. <i>asteromphalus</i>	6.9	62.5	0.043
	弓束圆筛藻 <i>Coscinodiscus curvatulus</i> var. <i>curvatulus</i>	3.3	75.0	0.024
秋季 Autumn (9月 September)	浮动弯角藻 <i>Eucampia zodiacus</i>	33.9	42.9	0.145
	窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i> var. <i>affinis</i>	14.2	100	0.142
	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschiooides</i>	11.4	92.9	0.106
	旋链角毛藻 <i>Chaetoceros survisetus</i>	14.7	64.3	0.095
	布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i>	3.7	92.9	0.034
	佛氏海线藻 <i>Thalassionema frauenfeldii</i>	2.0	100	0.020
冬季 Winter (12月 December)	派格棍形藻 <i>Bacillaria paxillifera</i>	52.2	95.5	0.499
	细弱圆筛藻 <i>Coscinodiscus subtilis</i> var. <i>subtilis</i>	10.9	100	0.109
	星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i> var. <i>asteromphalus</i>	5.0	100	0.050
	圆筛藻属未定种 <i>Coscinodiscus</i> sp.	4.2	100	0.042
	旋链角毛藻 <i>Chaetoceros survisetus</i>	6.0	50.0	0.030

图 3 各个季节海州湾及其邻近海域浮游植物平均丰度( $\times 10^5$  cells  $\cdot$   $m^{-3}$ )的空间变化Fig. 3 Spatial dynamics in average abundance ( $\times 10^5$  cells  $\cdot$   $m^{-3}$ ) of phytoplankton in four seasons in Haizhou Bay and adjacent waters.

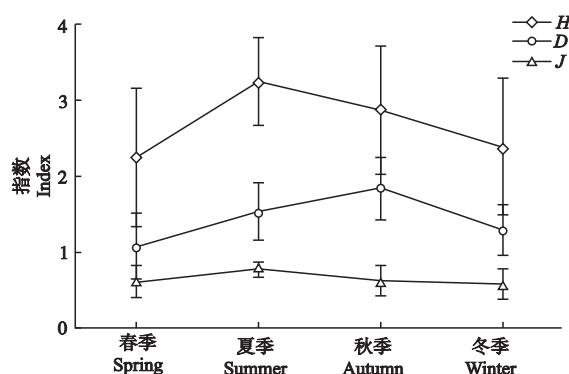


图 4 海州湾及其邻近海域浮游植物多样性指数的季节变化

**Fig. 4** Seasonal variations of phytoplankton diversity index in Haizhou Bay and adjacent waters.

岸海域,以及调查海域的东北部。

#### 2.4 浮游植物的多样性特征

Shannon 多样性指数( $H$ )和均匀度指数( $J$ )的各季节平均值为  $2.244 \sim 3.242$  和  $0.580 \sim 0.768$ , 年平均值分别为 2.670 和 0.649。从全年来看, Shannon 多样性指数和丰富度指数均表现出较为明显的季节变化,  $H$  各季节平均值在春季达到最低值 ( $2.244 \pm 0.910$ ), 随着气温的上升, 开始逐渐升高, 在夏季达到最高值 ( $3.242 \pm 0.583$ ), 随后开始降低, 在冬季降低至 ( $2.386 \pm 0.908$ )。均匀度指数( $J$ )的季节变化趋势与  $H$  相似, 均为夏季达到最高值, 但季节间的差

异不明显(图 4)。丰富度指数( $D$ )的周年变化为  $0.510 \sim 2.840$ , 年平均值是 1.386, 与  $H$  和  $J$  不同,  $D$  在秋季达到最高值, 随后开始降低, 直到翌年春季达到最低值。

#### 2.5 浮游植物的典范对应分析(CCA)

经条件筛选, 用于 CCA 排序的浮游植物见表 2。用于排序的环境因子有海水表面温度(SST)、硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、硅酸盐( $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si)、化学需氧量(COD)、水深(DEP)、磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ -P)、表层盐度(SSS)、透明度(TRA)、酸度(pH)和溶解氧(DO)。

CCA 二维排序图中, 前 2 个排序轴的特征值为 0.770 和 0.600, 物种排序轴和环境因子轴之间的相关系数分别为 0.919 和 0.921, 物种变异累积百分数分别为 16.3% 和 29.0%, 物种环境变异累计百分数分别为 34.0% 和 60.5%。两物种排序轴近似垂直, 相关系数为 0.046, 两环境排序轴相关系数为 0。经蒙特卡洛检验  $P=0.002 < 0.05$ , 说明前 2 个排序轴能在很大程度上反映浮游植物种类与环境间的关系, 排序结果可靠<sup>[17]</sup>。

在 CCA 排序图中(图 5), 与第 1 排序轴呈最大正相关的环境因子为硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N), 相关系数为 0.719; 其次为硅酸盐( $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si), 相关系数为 0.663; 第三为海水表面温度(SST), 相关系数为 0.391。磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ -P)与第 1 排序轴呈最大负相

表 2 海州湾及其邻近海域主要浮游植物名录

**Table 2** List of main phytoplankton species in Haizhou Bay and adjacent waters

编号 Code	物种 Species	编号 Code	物种 Species
1	羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.	21	佛氏海线藻 <i>Thalassionema frauenfeldii</i>
2	明壁圆筛藻 <i>Coscinodiscus debilis</i>	22	叉状角藻 <i>Ceratium furca</i>
3	新月柱鞘藻 <i>Cylindrotheca closterium</i>	23	翼根管藻 <i>Rhizosolenia alata</i> f. <i>genuine</i>
4	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschiooides</i>	24	夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>
5	锥形原多甲藻 <i>Protoperidinium conicum</i>	25	虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>
6	劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	26	粗刺角藻 <i>Ceratium horridum</i>
7	强氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus janischii</i>	27	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.
8	琼氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus jonesianus</i>	28	窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i> var. <i>affinis</i>
9	卡氏角毛藻 <i>Chaetoceros castracanei</i>	29	中华齿状藻 <i>Odontella sinensis</i>
10	柔弱角毛藻 <i>Chaetoceros debilis</i>	30	派格棍形藻 <i>Bacillaria paxillifera</i>
11	斯氏根管藻 <i>Rhizosolenia stoltzfusii</i>	31	弓束圆筛藻 <i>Coscinodiscus curvatulus</i> var. <i>curvatulus</i>
12	岐散原多甲藻 <i>Protoperidinium divergens</i>	32	布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i>
13	条纹小环藻 <i>Cyclotella striata</i> var. <i>striata</i>	33	大角角藻 <i>Ceratium macroceros</i>
14	蜂窝三角藻 <i>Triceratium favus</i>	34	蛇目圆筛藻 <i>Coscinodiscus argus</i>
15	斯氏扁甲藻 <i>Pyrophacus steinii</i>	35	星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i> var. <i>asteromphalus</i>
16	旋链角毛藻 <i>Chaetoceros survisetus</i>	36	辐射列圆筛藻 <i>Coscinodiscus radiatus</i>
17	膜状缪氏藻 <i>Meuniera membranacea</i>	37	梭角藻 <i>Ceratium fusus</i>
18	薄壁几内亚藻 <i>Guinardia flaccida</i>	38	三角角藻 <i>Ceratium tripos</i>
19	离心列海链藻 <i>Thalassiosira excentrica</i>	39	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.
20	斜纹藻 <i>Pleurosigma</i> sp.	40	细弱圆筛藻 <i>Coscinodiscus subtilis</i> var. <i>subtilis</i>

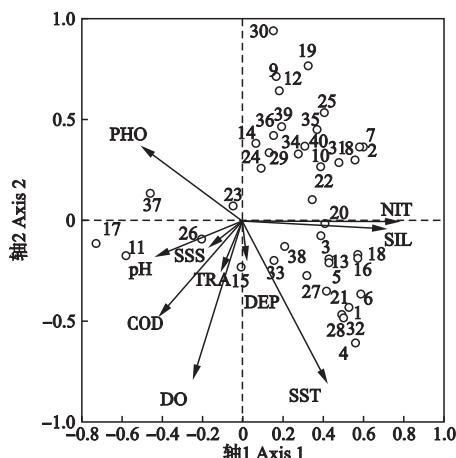


图 5 海州湾及其邻近海域主要浮游植物种类与环境因子间的 CCA 排序图

**Fig. 5** CCA biplot of main phytoplankton species and environmental variables in Haizhou Bay and adjacent waters.

SST: 表温 Sea surface temperature; NIT: 硝态氮 Nitrate; SIL: 硅酸盐 Silicate; COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand; DEP: 水深 Water depth; PHO: 磷酸盐 Phosphate; SSS: 表盐 Sea surface salinity; TRA: 透明度 Transparency; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; 1~40: 见表 2 See Table 2.

关, 相关系数为 -0.476; pH 值次之, 相关系数为 -0.419; 其次为化学需氧量 (COD), 相关系数为 -0.385.  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 与第 2 排序轴呈最大正相关, 相关系数为 0.348, 且  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 是唯一与第 2 排序轴呈正相关的环境因子; 与第 2 排序轴呈最大负相关的环境因子为 SST, 相关系数为 -0.747; 其次为溶解氧 (DO), 相关系数为 -0.740; 再次为 COD, 相关系数为 -0.441.

由图 5 可以看出, 包括明壁圆筛藻 (*Coscinodiscus debilis*)、强氏圆筛藻 (*Coscinodiscus janischii*) 和琼氏圆筛藻 (*Coscinodiscus jonesianus*) 等所有 10 种圆筛藻均分布在图的右上方。从第 1 排序轴来看, 这些圆筛藻种类与硝酸盐氮和硅酸盐呈较大的正相关性; 从第 2 排序轴来看, 其与磷酸盐呈正相关, 而与其他环境因子均呈负相关; 在前 2 个轴中圆筛藻种类与 DO、COD、pH、SSS 和 TRA 均呈负相关。除圆筛藻外, 派格棍形藻、离心列海链藻 (*Thalassiosira eccentrica*)、岐散原多甲藻 (*Protoperidinium divergens*)、卡氏角毛藻 (*Chaetoceros castracanei*) 也与 DO 和 COD 呈显著负相关, 趋向于分布在这些环境因子浓度较低的海域。

位于图 5 右下方的浮游植物中, 斜纹藻 (*Pleurosigma* sp.)、新月柱鞘藻 (*Cylindrotheca closterium*)、薄壁几内亚藻 (*Guinardia flaccida*) 和旋链角毛藻 (*Chaetoceros survisetus*) 受  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的影

响很大, 趋向于分布在此两种营养盐浓度较高的海域; 大角角藻 (*Ceratium macroceros*)、舟形藻 (*Navicula* sp.)、佛氏海线藻、羽纹藻 (*Pinnularia* sp.)、布氏双尾藻 (*Ditylum brightwellii*)、窄隙角毛藻 (*Chaetoceros affinis* var. *affinis*) 和菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschiooides*) 与 SST 有很大正相关性, 喜欢温度较高的水域; 而其他几种浮游植物同时受到这 3 种环境因子的影响, 均呈正相关, 但与  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 呈显著负相关, 趋向于分布在  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度较低的海域。

位于图 5 左上方的梭角藻 (*Ceratium fusus*) 和翼根管藻 (*Rhizosolenia alata* f. *genuina*) 与  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 呈正相关。位于图左下方的膜状缪氏藻、斯氏根管藻和粗刺角藻 (*Ceratium horridum*) 与 pH、COD、DO 和 SSS 呈正相关, 倾向于生长在这些环境因子数值更高的区域; 但与硅酸盐和硝态氮呈显著负相关, 表明在海州湾及其邻近海域, 硅酸盐和硝态氮并不是限制其生长的环境因子, 或此 3 种藻类喜欢生长在这 2 种环境因子浓度较低的海区。

### 3 讨 论

#### 3.1 优势种的季节演替

研究发现, 海州湾及其邻近海域浮游植物群落是一个以硅藻为主的浮游植物群落, 在该海域各季节的优势种中, 硅藻门种类占绝大部分, 且各季节的第一优势种均为硅藻门的种类。其中, 春季优势种以硅藻门种类为主, 但同时具有一种甲藻门优势种; 夏季硅藻门种类仍占优势但优势度与甲藻门相差不大; 秋季和冬季优势种全部为硅藻门种类。

海州湾浮游植物的种类组成和数量都具有明显的季节演替现象。这种现象的产生与环境因子的季节变化有一定的关系, 其中水温是影响浮游植物季节变化的最重要环境因子<sup>[18]</sup>。研究发现, 随着温度的升高, 海州湾浮游植物优势种呈现出由硅藻门向甲藻门演替的规律, 而且硅藻门主要以圆筛藻属和角毛藻属为主, 甲藻门以角藻属为主。硅藻是海州湾浮游植物中最重要的浮游植物, 其喜低温, 最适温度通常 <18 °C<sup>[19-20]</sup>。本次调查中, 海州湾春季的平均表层水温为 15 °C, 是硅藻生长的理想温度, 能促进其大量繁殖, 成为明显的优势种。因此, 春季浮游植物的数量高于夏季, 且优势种中硅藻门种类占总细胞丰度的比例达到 86%, 而甲藻门优势种仅占 3.7%。夏季海州湾平均表层水温达到 23 °C, 甲藻门的种类开始大量繁殖和生长, 优势种中甲藻门种类占总细胞丰度的比例达到 16% 左右, 削弱了硅藻门

种类的优势地位,这与 Sun 等<sup>[21]</sup>和周然等<sup>[22]</sup>报道的渤海浮游植物季节变化受水温控制的结论相一致。秋、冬季海州湾硅酸盐含量明显高于春、夏季,硅酸盐含量的升高使得秋、冬季节的优势种均为硅藻门种类。

### 3.2 浮游植物平均丰度的季节变化

海州湾调查海域浮游植物各站位的平均丰度在秋季最高,春季次之,夏季最低。其原因可能是海州湾的硅酸盐含量在秋季达到一年中最高值,且总氮、硝酸盐等营养盐含量也远高于夏季,有益于浮游植物的大量繁殖,因此其丰度远高于夏季;虽然冬季营养盐也较高,但其水温较低,因此浮游植物细胞丰度较低;此外,秋季赤潮生物种——浮动弯角藻的大量爆发,也可能是导致秋季海州湾浮游植物丰度最高的原因之一。除营养盐外,盐度也是影响浮游植物季节变化的重要环境因子<sup>[23]</sup>。由于夏季是丰水期,大量河水入海稀释了海水的盐度,从而造成海州湾夏季盐度相对较低。尽管近海的浮游植物多为广盐种类,能适应的盐度范围较广<sup>[24]</sup>,但它们也存在沿盐度梯度变化的特征<sup>[25]</sup>,导致夏季浮游植物数量相对较低。与张硕等<sup>[9]</sup>在夏季对海州湾人工鱼礁区进行的浮游植物调查数据相比,本次调查夏季海州湾及其邻近海域浮游植物的平均丰度偏低,可能是因为在人工鱼礁区投放鱼礁后水质和环境发生较大改善,有利于浮游植物的生长,因此鱼礁区浮游植物丰度较高。

### 3.3 浮游植物多样性特征

一般而言,群落物种的 Shannon 多样性指数 ( $H$ ) 受种类数和个体数量分布均匀程度的影响,种类数越高或分布越均匀,  $H$  值越大<sup>[26]</sup>。由于夏季海州湾及其邻近海域浮游植物的种类数最多,而且均匀度也最高,且均匀度反映的是群落内各物种的均匀程度<sup>[27]</sup>,可能是导致夏季海州湾浮游植物多样性指数最高的主要原因。

多样性指数是反映均匀度指数( $J$ )和丰富度指数( $D$ )的综合指标<sup>[10]</sup>。秋季(9月)营养盐较丰富,适宜浮游植物生长,这可能是浮游植物丰富度在秋季达到最高值的主要诱因。由图4可知,随着均匀度的增加,多样性指数也增加,而随着丰富度指数的增加,多样性指数却没有明显增加。可见,海州湾浮游植物群落多样性增高(如夏季)主要是由均匀度增大引起的。而多样性与均匀度之间的这种密切联系在诸如捕食、竞争、演替等生态过程中均有所体现,即通过改变  $J$  值来改变  $H$ ,而不会改变物种的丰富

度<sup>[28]</sup>。

### 3.4 影响浮游植物群落的主要环境因子

典范对应分析表明,影响海州湾及其邻近海域浮游植物丰度和分布的主要环境因子依次为海水表面温度(SST)、营养盐( $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P、 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si)和溶解氧(DO),尤其是一些浮游植物优势种与上述环境因子密切相关。

海州湾及其邻近海域地处中纬度地区,季节分明,因此温度对生物的影响较大,而且由于浮游植物大部分生活于海水上层,因此海水表面温度(SST)是其最重要的影响因子,这与以往的研究结果一致<sup>[29-31]</sup>。此外,与温度呈正相关分布的优势种有大角角藻、三角角藻、佛氏海线藻、布氏双尾藻和菱形海线藻,前两种藻均为甲藻门种类,喜欢分布在温度较高的水域,这与随着温度的升高,海州湾藻类优势种由硅藻门向甲藻门演替的结论一致;且这5种藻类均为温度较高的夏、秋季节的优势种。

其次,对浮游植物优势种生长和分布影响较大的因子为营养盐,包括  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 和  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si。优势种梭角藻、膜状缪氏藻和斯氏根管藻在  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 较高,而  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 和温度较低的春季有较高的丰度,表明这3种优势种的生长和繁殖在调查海区明显受到磷酸盐的限制;而旋链角毛藻在  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 较高的秋季有较高的丰度;另外,所有的圆筛藻属优势种以及派格棍形藻均与  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 呈显著正相关,而与 DO、COD 和 pH 呈显著负相关。

本文的研究结论与杨柳<sup>[15]</sup>对海州湾人工鱼礁区影响浮游植物分布的主要环境因子的分析有一定差异,其认为主要环境因子依次为总无机氮、水温和透明度,且对海州湾人工鱼礁区浮游植物主要优势种影响较大的环境因子有总无机氮、透明度以及磷酸盐,其中磷酸盐是最重要的影响因子。这种差异可能是由于海州湾人工鱼礁区较本文所调查的海州湾及其邻近海域范围小,且放置人工鱼礁会人为改变其局部生境,导致环境变化。另外,不同水域具有不同的主要影响因子:如栾青杉等<sup>[16]</sup>研究表明,影响长江口水域浮游植物分布的主要环境因子依次为透明度、硝酸盐和硅酸盐;江志兵等<sup>[29]</sup>研究表明,影响象山港人工鱼礁区浮游植物群落的主要因子依次为温度、营养盐、盐度和悬浮物。此外,季节不同,对浮游植物生长和繁殖的影响因子也有差异,如周然等<sup>[22]</sup>认为,影响渤海湾浮游植物分布的关键环境因子,春季是硝酸盐、亚硝酸盐和溶解性活性磷酸盐,

夏季是铵氮和水温。因此,研究海域和调查季节的不同也是导致浮游植物主要影响因子存在差异的原因。

## 参考文献

- [1] Cheng J-L (程军利), Zhang Y (张 鹰), Zhang D (张 东), et al. Analysis of ecological environment elements during the red tide occurring in Haizhou Bay. *Advances in Marine Science* (海洋科学进展), 2009, **27**(2): 217–223 (in Chinese)
- [2] Zhang Y (张 鹰), Ding X-R (丁贤荣). *Marine Pollution Baseline Survey Report of Jiangsu Province*. Nanjing: Hehai University Press, 2001 (in Chinese)
- [3] Liu D-Y (刘东艳), Sun J (孙 军), Zhang L-Y (张利永). Structural characteristics of phytoplankton community during harmful algae bloom in Jiaozhou Bay. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(11): 1963–1966 (in Chinese)
- [4] He Q (何 青), Sun J (孙 军), Luan Q-S (栾青山), et al. Phytoplankton assemblage in Yangtze River estuary and its adjacent waters in winter time. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(11): 2559–2566 (in Chinese)
- [5] Wang T (王 瑶), Jiang X-M (蒋霞敏), Sun Y (孙 元), et al. Seasonal dynamics of phytoplankton community and abundance, Beilun Water: 2009–2010. *Marine Environmental Science* (海洋环境科学), 2012, **31**(4): 538–541 (in Chinese)
- [6] Chen L-J (陈立婧), Wu Z-C (吴竹臣), Hu Z-J (胡忠军), et al. Phytoplankton community structure in Mingzhu Lake of Chongming Island, Shanghai. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(6): 1599–1605 (in Chinese)
- [7] Zhou K (周 凯), Huang C-J (黄长江), Jiang S (姜胜), et al. Annual dynamics of phytoplankton in Zhelin Bay: 2000–2001. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(5): 688–698 (in Chinese)
- [8] Ning X-X (宁璇璇), Ji L (纪 灵), Wang G (王 刚), et al. Phytoplankton community in the nearshore waters of Laizhou Bay in 2009. *Transactions of Oceanology and Limnology* (海洋湖沼通报), 2009(3): 97–104 (in Chinese)
- [9] Zhang S (张 硕), Zhu K-W (朱孔文), Sun M-C (孙满昌). Species composition and biomass variation in phytoplankton in artificial reef area in Haizhou Bay. *Journal of Dalian Fisheries University* (大连水产学院学报), 2006, **21**(2): 134–140 (in Chinese)
- [10] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine (国家质量监督检验检疫总局). *Marine Investigation Criterion (GB/T 12763.9–2007)*. Beijing: China Standards Press, 2008 (in Chinese)
- [11] Zhang T (张 婷), Li L (李 林), Song L-R (宋立荣). Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure in the Xionghe Reservoir. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(6): 2971–2979 (in Chinese)
- [12] Shen G-Y (沈国英), Shi B-Z (施并章). *Marine Ecology*. 2nd Ed. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese)
- [13] Lopes MRM, Bicudo CEM, Ferragut MC. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil. *Hydrobiologia*, 2005, **542**: 235–247
- [14] Muylaert K, Sabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, **50**: 673–687
- [15] Yang L (杨 柳). *Variations of Plankton in Artificial Reef Area of Haizhou Bay*. Master Thesis. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011 (in Chinese)
- [16] Luan Q-S (栾青杉), Sun J (孙 军), Song S-Q (宋书群), et al. Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environment in the Yangtze River estuary, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, **31**(3): 445–450 (in Chinese)
- [17] Tong Y (童 琰). *Study on the Phytoplankton Community Structure Dynamic and Their Relationship with Environmental Factors in Lake Dishui*. Master Thesis. Shanghai: East China Normal University, 2012 (in Chinese)
- [18] Dupuis AP, Hann BJ. Warm spring and summer water temperatures in small eutrophic lakes of the Canadian prairies: Potential implications for phytoplankton and zooplankton. *Journal of Plankton Research*, 2009, **31**: 489–502
- [19] Da Silva CA, Train S, Rodrigues LC. Phytoplankton assemblages in a Brazilian subtropical cascading reservoir system. *Hydrobiologia*, 2005, **537**: 99–109
- [20] Wasmund N, Tuimala J, Suikkanen S, et al. Long-term trends in phytoplankton composition in the western and central Baltic Sea. *Journal of Marine Systems*, 2011, **87**: 145–159
- [21] Sun J, Liu DY, Qian SB. Preliminary study on seasonal succession and development pathway of phytoplankton community in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, **20**: 251–260
- [22] Zhou R (周 然), Peng S-T (彭士涛), Qin X-B (覃雪波), et al. Phytoplankton assemblages and their relation to environmental factors by multivariate statistic analysis in Bohai Bay. *Environmental Science* (环境科学), 2013, **34**(3): 864–873 (in Chinese)
- [23] McQuoid MR. Influence of salinity on seasonal germination of resting stages and composition of microplankton on the Swedish west coast. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, **289**: 151–163
- [24] Balzano S, Sarno D, Kooistra WHCF. Effects of salinity on the growth rate and morphology of ten *Skeletonema* strains. *Journal of Plankton Research*, 2011, **33**: 937–945
- [25] Bergesch M, Garcia M, Odebrecht C. Diversity and morphology of *Skeletonema* species in southern Brazil, southwestern Atlantic Ocean. *Journal of Phycology*,

- 2009, **45**: 1348–1352
- [26] Guo P-Y (郭沛涌), Shen H-T (沈焕庭), Liu A-C (刘阿成), et al. The species composition, community structure and diversity of zooplankton in Changjiang Estuary. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(5): 892–900 (in Chinese)
- [27] Li K-Z (李开枝), Yin J-Q (尹健强), Huang L-M (黄良民), et al. Dynamic variations of community structure and quantity of zooplankton in Zhujiang River estuary. *Journal of Tropical Oceanography* (热带海洋学报), 2005, **24**(5): 60–68 (in Chinese)
- [28] Guo J-S (郭劲松), Chen J (陈杰), Li Z (李哲), et al. Investigation of phytoplankton and assessment of algal diversity on backwater area of Xiaojiang River in Three Gorges Reservoir after its initiate impounding to the water level of 156 m in spring. *Environmental Science* (环境科学), 2008, **29**(5): 2710–2715 (in Chinese)
- [29] Jiang Z-B (江志兵), Chen Q-Z (陈全震), Shou L (寿鹿), et al. Community composition of net-phytoplankton and its relationship with the environmental factors at artificial reef area in Xiangshan Bay. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(18): 5813–5824 (in Chinese)
- [30] Gong Y-Y (龚玉艳), Zhang C-X (张才学), Sun S-L (孙省利), et al. Community characteristics of phytoplankton in the coastal area of Leizhou Peninsula and their relationships with primary environmental factors in the summer of 2010. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(19): 5972–5985 (in Chinese)
- [31] Wang Y (王妍), Zhang Y (张永), Wang Y-Y (王玉珏), et al. Spatial and temporal characteristics of phytoplankton and its relation with the environmental factors in Jiaozhou Bay. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2013, **13**(1): 163–170 (in Chinese)

---

作者简介 杨晓改,女,1988年生,硕士研究生。主要从事渔业资源生态学研究。E-mail: bossmomo@126.com

责任编辑 肖红

---