

# 2017年丰水期莱州湾环境因子分布特征及 网采浮游植物的响应

张欣泉<sup>1</sup>, 姜会超<sup>2</sup>, 马元庆<sup>2</sup>, 程玲<sup>2</sup>, 李佳蕙<sup>2</sup>

(1.中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2.山东省海洋资源与环境研究院, 山东 烟台 264006)

**摘要:**2017年丰水期(8月份),在莱州湾开展了31个站位的综合调查,研究了莱州湾丰水期环境因子空间分布以及网采浮游植物的响应特征。结果发现:2017年丰水期莱州湾水环境呈现出明显的空间分布差异,西南近岸区域总体呈现出高表层水温(SST)、低表层盐度(SSS)、高营养盐的分布特征,小清河及邻近区域陆源输入是影响莱州湾SSS和营养盐空间分布的主要因素,小清河氨氮(NH<sub>4</sub>-N)的减排对河口区NH<sub>4</sub>-N浓度下降有重要影响;莱州湾浮游植物呈现出明显的空间分布差异,小清河口区呈现出高浮游植物丰度、低多样性指数 $H'$ 的空间分布特征, $H'$ 高值区主要位于东部湾口区,浮游植物群落划分为4大不同类群,各类群之间群落结构差异明显;浮游植物丰度与SSS和Si/N呈显著负相关( $p<0.05$ ),与硝酸盐(NO<sub>3</sub>-N)、NH<sub>4</sub>-N、无机氮(DIN)呈显著正相关( $p<0.05$ ),浮游植物多样性指数 $H'$ 与SST和DIN呈显著负相关( $p<0.05$ )。活性硅酸盐(DiSi)是影响浮游植物群落结构最主要的因素,而NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、DiSi、Si/N是影响浮游植物群落结构最主要的环境组合。浮游植物群落对环境变化有明显的响应。

**关键词:**莱州湾; 营养盐; 浮游植物

中图分类号:Q178.53

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2020)04-0614-08

## The spatial distribution of environmental factors and the response of net-phytoplankton in the Laizhou bay during wet-season in 2017

ZHANG Xin-quan<sup>1</sup>, JIANG Hui-chao<sup>2</sup>, MA Yuan-qing<sup>2</sup>, CHENG Ling<sup>2</sup>, LI Jia-hui<sup>2</sup>

(1.College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2.Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006, China)

**Abstract:** To better understand the distribution of environmental factors and the response of phytoplankton in the Laizhou bay, a comprehensive survey contained 31 stations about surfer sea temperature (SSS), surfer sea salinity (SST), nitrite (NO<sub>2</sub>-N), nitrate (NO<sub>3</sub>-N), ammonium (NH<sub>4</sub>-N), dissolved inorganic nitrogen (DIN), phosphate (PO<sub>4</sub>-P), silicate (SiO<sub>3</sub>-Si) and net-phytoplankton abundance and species diversity ( $H'$ ) was conducted in August 2017. In the present study, obvious spatial distribution differences of environmental factors were observed with high SST, nutrients while low SSS located in southwest coast of the Laizhou Bay, especially at Xiaoqing River estuary. The terrestrial inputs such as the Xiaoqing River and its vicinity were the main factors influencing the distributions of SSS and nutrients. The low NH<sub>4</sub>-N value at the Xiaoqing River estuary was mainly attributed to the NH<sub>4</sub>-N reduction in the Xiaoqing River. High

收稿日期:2019-01-22, 修订日期:2019-03-07

作者简介:张欣泉(1980-),男,山东青岛人,硕士,讲师,研究方向为环境规划与管理, E-mail: xqzhang@ouc.edu.cn

通讯作者:姜会超, 硕士, 助理研究员, E-mail: jianghuichao2008@163.com

phytoplankton abundance and low  $H'$ , showing obvious spatial distribution differences, were mainly observed at the Xiaoqing River estuary. Four different phytoplankton groups were observed according to the community structures difference indicating an obvious response of phytoplankton to environmental factor variations. Phytoplankton abundance showed significant negative correlation with  $SSS$  and  $Si/N$  ( $p < 0.05$ ) while positive with  $NO_3-N$ ,  $NH_4-N$  and  $DIN$ . Significant negative correlations were observed between  $H'$  and  $SST$ ,  $DIN$  ( $p < 0.05$ ). The phytoplankton community structure were mostly influenced by the environmental combination of  $NO_3-N$ ,  $NH_4-N$ ,  $DISi$ ,  $Si/N$  and single factor of  $DISi$ .

**Key words:** Laizhou bay; nutrients; phytoplankton

浮游植物可以调节海洋生态系统的物质循环和能量流动,是海洋生态系统重要的组成部分<sup>[1]</sup>。在过去的数十年中,随着全球环境的变化,许多重要河口海湾等近岸区域浮游植物群落结构发生了明显的变化,从硅藻占优势逐渐演变为甲藻和蓝藻占优势,有毒有害藻类(HAB)比例不断上升<sup>[2-3]</sup>。近岸海洋生态系统是地球上最具生产力和资源量最丰富的区域之一<sup>[4]</sup>,其浮游植物丰度的大量爆发会扩大近岸低氧区的范围,严重威胁着河口和近岸海洋生态系统的可持续发展<sup>[5]</sup>,此外,浮游植物群落结构的变化也会显著影响海洋初级生产力,进而对整个海洋生态系统产生深远影响<sup>[1]</sup>。因此,摸清浮游植物对环境变化的响应机制,确定驱动浮游植物变化的关键环境因子,对于环境政策的制定实施显得尤为重要。

莱州湾作为中国九大海湾之一,在维护区域生态系统稳定、服务经济社会发展的同时也遭受着其他近岸海域普遍面临的环境压力问题。相关学者已对莱州湾的环境及浮游植物开展了较为系统的研究,发现无机氮由1982年的 $2.9 \mu\text{mol/L}$ 上升到2014年的 $34.7 \mu\text{mol/L}$ , $N/P$ 由4.1升高到385,硅氮比( $Si/N$ )由6.1下降到2.2<sup>[6]</sup>。受小清河等陆源输入影响,莱州湾西南部近岸区域为营养盐高值区<sup>[6-7]</sup>。大量研究表明,无机氮的富集以及由此引发的营养盐结构比例的严重失衡会对浮游植物群落结构产生重要的影响<sup>[2-3]</sup>,Jiang等<sup>[8]</sup>研究发现,受营养盐影响,莱州湾西南部浮游植物总体呈现出高丰度、低多样性指数的分布特征。2017年丰水期(8月份),课题组在莱州湾开展了31个站位的综合调查,旨在进一步完善浮游植物对环境变化响应的研究,为科学制定环境保护措施,维护海湾生态环境可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查站位及样品采集

2017年丰水期(8月份)在莱州湾开展了31个站位的调查研究,站位布设如图1所示。调查项目包含水质及浮游植物。样品采集严格按照《海洋调查规范》(GB 17378-2007)要求进行。采样层次为表层水样,样品经 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜减压过滤后,分装于500 mL高密度聚乙烯瓶(美国,Nalgene)中,加入0.5 mL氯仿保存并运至实验室。浮游植物的采集采用浅水III型网,网口直径为0.37 m,筛绢孔径为 $76 \mu\text{m}$ 。从底到表垂直拖网,网口系数流量计以计算滤水量。样品采集后保存至终浓度为1%的卢戈氏碘液中,运至实验室待进一步分析。

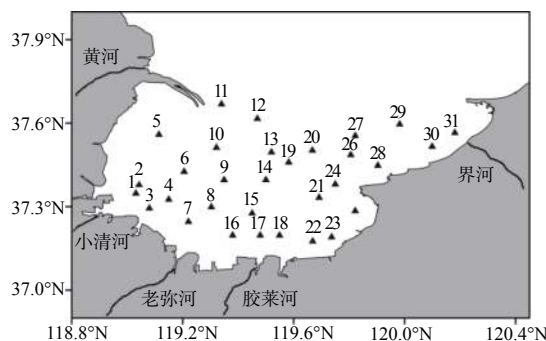


图1 莱州湾站位调查图

Fig. 1 Sampling stations in the Laizhou bay

### 1.2 样品分析

水质分析项目主要包含表层水温( $SST$ )、表层盐度( $SSS$ )、亚硝酸盐( $NO_2-N$ )、硝酸盐( $NO_3-N$ )、氨盐( $NH_4-N$ )、无机氮( $DIN=NO_2-N+NO_3-N+NH_4-N$ )、活性磷酸磷( $DIP$ )、活性硅酸盐( $DISi$ )。 $SST$ 和 $SSS$ 采用YSI Professional Plus多参数水质测量仪进行现场测定。 $NO_2-N$ 采用

重氮-偶氮法进行测定; NO<sub>3</sub>-N 先采用锌-镉还原法将其还原为 NO<sub>2</sub>-N 后,再用重氮-偶氮法测定; NH<sub>4</sub>-N 经次溴酸钠氧化为 NO<sub>2</sub>-N 后,采用重氮-偶氮法测定; PO<sub>4</sub>-P 采用抗坏血酸还原磷钼蓝法测定; SiO<sub>3</sub>-Si 采用硅钼黄法测定。NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P、SiO<sub>3</sub>-Si 五种营养盐分析检出限分别为 0.02 μmol/L、0.05 μmol/L、0.03 μmol/L、0.02 μmol/L、0.10 μmol/L。

浮游植物样品先静止 48 h, 然后根据实际情况浓缩至适当体积, 样品混匀后取适量样品 (0.1 mL) 置于倒置光学显微镜下 (Leica DM 2500), 放大倍数一般为 200 倍或 400 倍。每个样品中实际计数的浮游植物个体数要保持在 500 个以上。浮游植物的鉴定参考书为《中国海藻志》<sup>[9]</sup>、《海藻学概论》<sup>[10]</sup>、《海藻学》<sup>[11]</sup>、《中国近海赤潮生物图谱》<sup>[12]</sup>、《中国海域常见浮游硅藻图谱》<sup>[13]</sup> 等, 浮游植物力求鉴定到种, 并统计每个物种的丰度。

### 1.3 统计分析

浮游植物群落多样性指数采用 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ), 其计算公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

式中:  $P_i$  表示第  $i$  种的个体数与样品中的总个数的比值;  $S$  表示样品中浮游植物总种类数。

浮游植物优势种以优势度指数 ( $Y > 0.02$ ) 来判断, 其计算公式为:

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

式中:  $n_i$  表示样本中第  $i$  物种的总个体数;  $N$  表示样本中所有物种的总个体数;  $f_i$  表示第  $i$  物种在各站位出现的频率。

采用 Surfer 11.0 对莱州湾环境因子以及浮游植物丰度、多样性指数 ( $H'$ ) 作等值线分析。采用 primer 6.0 进行浮游植物群落结构 MDS 分析, 并用 ANOSIM 进行群落结构差异的统计检验, 对不同浮游植物类群进行 SIMPER 分析, 以便鉴定对样品分组起主要作用的种, 采用 BIOENV 分析影响浮游植物群落结构的最优环境组合。环境与浮游植物丰度、多样性指数 ( $H'$ ) 的线性相关性分析采用 STATISTICA 6.0 进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 环境空间分布

莱州湾 SST 范围在 27.8 °C ~ 30.8 °C 之间, 平均值为 29.3 °C, 总体呈现出由西南近岸向东北部湾口递减的趋势, 最高值出现在小清河口及邻近区域 (图 2a); SSS 空间分布梯度明显, 范围在 23.288 ~ 31.287 之间, 平均值为 29.768, 小清河口为低值区 (图 2b); 莱州湾 DIN 以 NO<sub>3</sub>-N 为主, 占 75%, 其次 NH<sub>4</sub>-N 和 NO<sub>2</sub>-N 分别占 18% 和 7%。NO<sub>2</sub>-N 范围为 0.03 μmol/L ~ 11.43 μmol/L, 平均值 1.70 μmol/L; NO<sub>3</sub>-N 范围为 3.96 μmol/L ~ 85.71 μmol/L, 平均值 18.35 μmol/L; NH<sub>4</sub>-N 范围 0.14 μmol/L ~ 16.50 μmol/L, 平均值 4.27 μmol/L, DIN 范围为 5.86 μmol/L ~ 94.29 μmol/L, 平均值为 24.32 μmol/L。总体上 NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N 以及 DIN 呈现出西南近岸高, 东北部湾口低的空间分布特征, NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N 以及 DIN 高值区主要位于小清河口及其邻近区域, NH<sub>4</sub>-N 高值区介于黄河和小清河口之间 (图 2c-f)。莱州湾 DIP 含量较低, 范围为 0.03 μmol/L ~ 0.44 μmol/L, 平均值为 0.17 μmol/L, 空间分布呈现出一定的斑块化, 近岸区域相对略高, 高值区主要位于东南部近岸区域 (图 2g)。DISi 范围为 5.89 μmol/L ~ 60.36 μmol/L, 平均值为 19.39 μmol/L, 高值区主要位于西南部近岸区域, 尤其是老弥河河口区域 (图 2h)。

### 2.2 浮游植物群落空间差异

2018 年夏季共调查发现浮游植物 49 种, 其中硅藻 45 种, 甲藻 4 种。尖刺拟菱形藻和大洋角管藻为主要优势种, 优势度分别为 0.49 和 0.08。浮游植物丰度空间差异显著, 范围在  $7.9 \times 10^3$  ~  $3.1 \times 10^8$  cells/m<sup>3</sup> 之间, 平均值为  $2.8 \times 10^7$  cells/m<sup>3</sup>, 丰度高值区主要位于小清河口区域, 其它区域丰度相对较低 (图 3a)。  $H'$  范围在 0.05 ~ 3.47 之间, 平均值为 1.68,  $H'$  高值区主要位于莱州湾东北部湾口区域 (图 3b)。

不同站位浮游植物群落 MDS 分析结果如图 4 所示。本次统计中, 浮游植物群落结构 MDS 压力系数在 0.13 之间, 排序结果可信度较高。

结果发现, 不同站位浮游植物群落结构存在

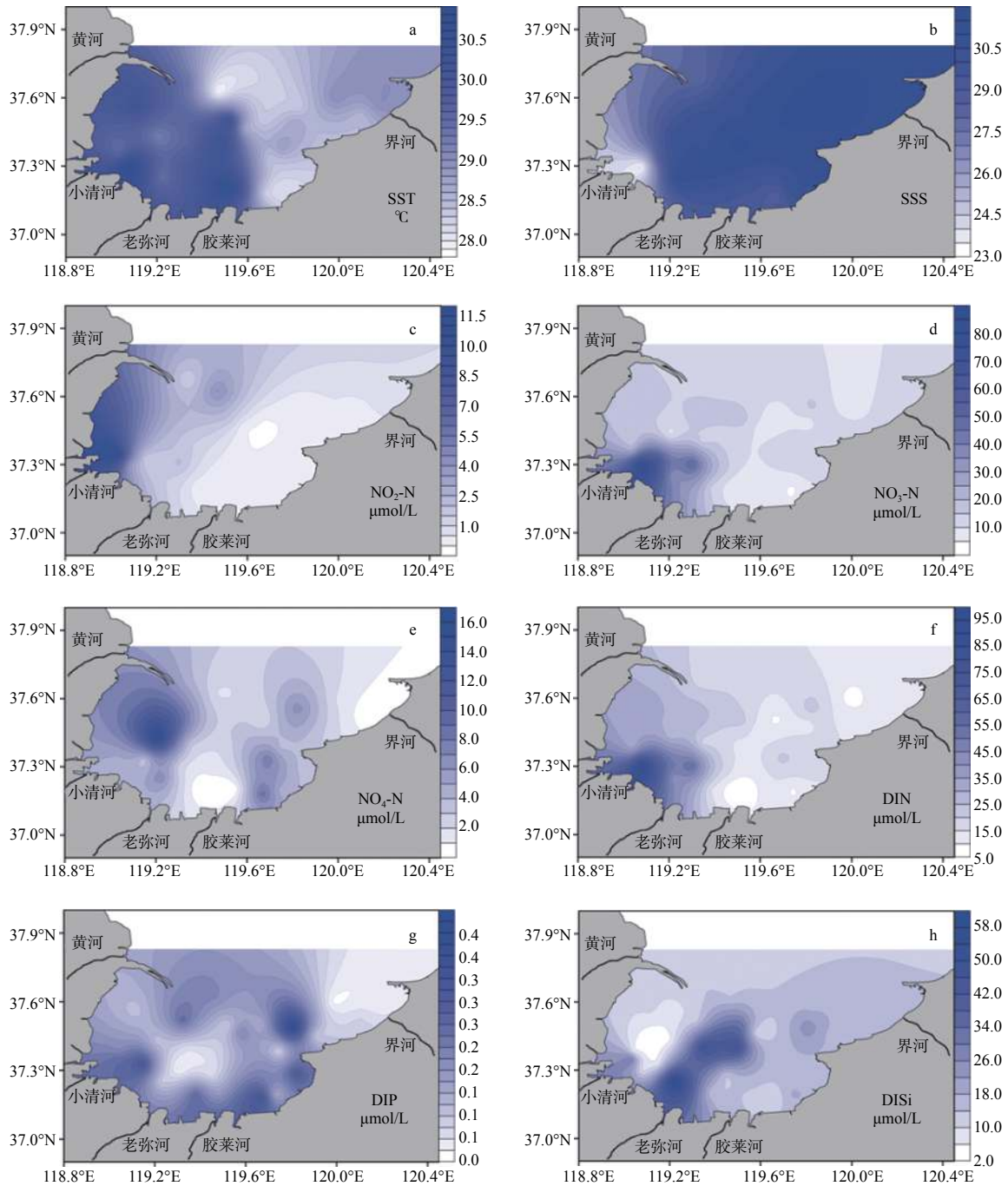


图 2 莱州湾环境因子空间分布(a:SST; b:SSS; c:NO<sub>2</sub>-N; d:NO<sub>3</sub>-N; e:NH<sub>4</sub>-N; f:DIN; g:DIP; h:DISi)

Fig. 2 Horizontal distribution of environmental factors in the Laizhou bay (a: SST; b: SSS; c: NO<sub>2</sub>-N; d: NO<sub>3</sub>-N; e: NH<sub>4</sub>-N; f: DIN; g: DIP; h: DISi)

明显差异, 在 20% 相似度水平上, 浮游植物群落大体可以划分为 4 个类群: 类群 I, 以小清河口及其邻近区域样本为主, 特征物种为尖刺拟菱形藻 (*Pseudo-nitzschia pungens*)、大洋角管藻 (*Cerataulina pelagica*)、高齿状藻 (*Odontella regia*) (表 1); 类群 II, 主要以莱州湾中北部样本

为主; 特征物种为伏氏海线藻 (*Thalassionema frauenfeldii*)、尖刺拟菱形藻 (*P. pungens*)、窄面角毛藻 (*Chaetoceros paradoxus*)、透明辐杆藻 (*Bacteriastrium hyalinum*)、高齿状藻 (*O. regia*) 和蛇目圆筛藻 (*Coscinodiscus argus*) (表 1); 类群 III 则以南部近岸 23 和 24 号站位为主, 特征物种



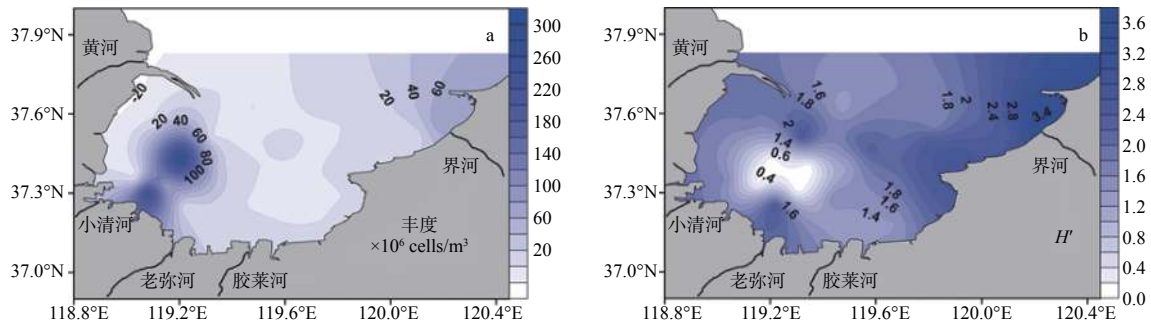
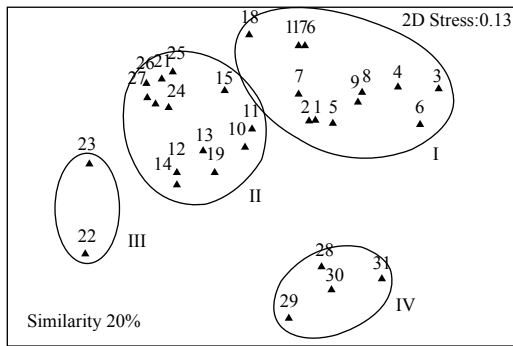
图 3 浮游植物丰度及  $H'$  空间分布Fig. 3 Horizontal distribution of phytoplankton abundance and  $H'$  in the Laizhou bay

图 4 浮游植物群落结构 MDS 分析

Fig. 4 Results of the MDS analyses of the phytoplankton community structures

为伏氏海线藻 (*T. frauenfeldii*) 和虹彩圆筛藻 (*Coscinodiscus oculus-iridis*) (表 1); 类群 IV 则以莱州湾东部样本为主, 特征物种为扭链角毛藻 (*Chaetoceros tortissimus*)、劳氏角毛藻 (*Chaetoceros lorenzianus*)、圆柱角毛藻 (*Chaetoceros teres*)、冰河拟星杆藻 (*Asterionellopsis glacialis*)、短孢角毛藻 (*Chaetoceros brevis*)、旋链角毛藻 (*Chaetoceros pseudocurvisetus*)、冕孢角毛藻 (*Chaetoceros diadema*)、远距角毛藻 (*Chaetoceros dichaeus*) (表 1)。

### 2.3 浮游植物与环境因子相关性

表 2 所示, 莱州湾  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DIN 与 SSS 呈现出显著负相关 ( $p < 0.05$ ),  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、DIP、DISi 与 SSS 无显著相关性 ( $p > 0.05$ )。浮游植物丰度与 SSS 和 Si/N 呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ), 与  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、DIN 呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 浮游植物多样性指数  $H'$  与 SST 和 DIN 呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ), 与其他环境因子无显著相关性 ( $p > 0.05$ )。

通过 BIOENV 分析发现 (表 3), DISi 是影响浮游植物群落结构最主要的因素, 而  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、DISi、Si/N 是影响浮游植物群落结构最主要的环境组合, 相关性为 0.316。

### 2.4 环境因子空间分布影响因素

莱州湾 SST 总体呈现出西南近岸高, 东北部湾口低的空间分布特点, 一方面与该区域水深较浅, 水温回温较快有关, 另一方面与该区域河流众多有关, 如小清河、弥河、胶莱河等, 大量陆源高温径流的注入提升了该区域的表层水温。同时, 大量径流的输入也明显降低了该区域的盐度水平, 本研究发现小清河口区域为莱州湾盐度低值区, 这与其他学者研究相吻合<sup>[7, 14]</sup>。截至目前, 相关学者对莱州湾营养盐空间分布已开展了大量的研究, 发现莱州湾营养盐总体上呈现出西南近岸高, 东北部湾口低的空间分布特征<sup>[6-7]</sup>。本研究发现, 莱州湾  $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DIN 空间分布与前人研究结果较为一致, 高值区主要分布在小清河口区域。黄河 DIN 年入海通量是小清河的 4 倍, 达到 13384 t/a<sup>[15]</sup>, 但从空间分布上看, DIN 高值区主要位于小清河口区域。一方面, 这与小清河径流 DIN 浓度较高有关, 研究表明, 小清河 DIN 浓度是黄河的 5 倍<sup>[15]</sup>; 另一方面与莱州湾的地形结构有关, 莱州湾水动力整体较弱, 湾底区域受围填海及筏式养殖规模扩大的影响, 流速及水交换率减弱<sup>[16]</sup>, 而黄河口区域相对开阔, 水动力条件较好, 黄河输入的大量 DIN 能够得到及时有效的稀释扩散, 这是导致小清河口区域 DIN 明显高于黄河口的重要因素。本研究发现,  $\text{NH}_4\text{-N}$  的空间分布与 DIN 呈现一定的差异, 高值区出现在黄河口以南区域, 小清河口区域

表1 不同浮游植物类群特征物种的平均丰度及贡献度

Tab.1 The average abundance and contributions of species representing different phytoplankton community groups

类群	特征物种	拉丁名	平均丰度/cells·m <sup>-3</sup>	贡献率/(%)
I	尖刺拟菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	46822845	60.2
I	大洋角管藻	<i>Cerataulina pelagica</i>	14544113	20.62
I	高齿状藻	<i>Odontella regia</i>	359157	6.71
II	伏氏海线藻	<i>Thalassionema frauenfeldii</i>	22501	6.77
II	尖刺拟菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	74720	6.48
II	窄面角毛藻	<i>Chaetoceros paradoxus</i>	8002	6.04
II	透明辐杆藻	<i>Bacteriastrium hyalinum</i>	9163	5.56
II	高齿状藻	<i>Odontella regia</i>	3540	5.04
II	蛇目圆筛藻	<i>Coscinodiscus argus</i>	7489	4.92
III	伏氏海线藻	<i>Thalassionema frauenfeldii</i>	3222	52.97
III	虹彩圆筛藻	<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	2236	47.03
IV	扭链角毛藻	<i>Chaetoceros tortissimus</i>	6557521	33.75
IV	劳氏角毛藻	<i>Chaetoceros lorenzianus</i>	884593	14.81
IV	圆柱角毛藻	<i>Chaetoceros teres</i>	1411731	13.28
IV	冰河拟星杆藻	<i>Asterionellopsis glacialis</i>	1956875	10.09
IV	短孢角毛藻	<i>Chaetoceros brevis</i>	1880004	7.48
IV	旋链角毛藻	<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>	2345414	5.97
IV	冕孢角毛藻	<i>Chaetoceros diadema</i>	1941058	3.21
IV	远距角毛藻	<i>Chaetoceros dictyosphaerium</i>	993188	3.19

表2 浮游植物丰度及H'与环境因子相关性分析

Tab.2 Correlation between phytoplankton abundance, H' and environmental factors

环境因子Factors	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N	DIN	DIP	DISi	H'
SST	0.25	<b>0.46*</b>	-0.16	<b>0.43*</b>	-0.12	0.14	<b>-0.38*</b>
SSS	<b>-0.73*</b>	<b>-0.62*</b>	-0.17	<b>-0.70*</b>	-0.31	0.24	0.29
NO <sub>2</sub> -N		0.35	0.27	<b>0.50*</b>	0.07	0.00	-0.22
NO <sub>3</sub> -N			0.02	<b>0.97*</b>	0.14	0.06	-0.35
NH <sub>4</sub> -N				0.24	0.18	-0.14	-0.17
DIN					0.17	0.03	<b>-0.38*</b>
DIP						-0.31	-0.03
DISi							-0.04
N/P							-0.34
Si/N							0.05
Si/P							-0.22

注: \*代表p&lt;0.05

NH<sub>4</sub>-N 相对较低, 这可能与近年来在小清河持续开展的环境治理有关, 2011年山东开始实施陆源NH<sub>4</sub>-N总量控制措施, 小清河NH<sub>4</sub>-N入海通量由2003年的2977 t/a<sup>[15]</sup>下降到2014年的406 t/a<sup>[17]</sup>,

小清河NH<sub>4</sub>-N减排可能是导致河口区NH<sub>4</sub>-N浓度下降的主要因素。

## 2.5 浮游植物丰度及H'对环境的响应

浮游植物与环境因子的关系是复杂多变的,

表 3 影响浮游植物群落结构的最有环境因子组合

Tab.3 The best environmental factor assembly influencing phytoplankton communities.

环境因子数	相关性	环境因子组合
4	0.316	NO <sub>3</sub> -N、NH <sub>4</sub> -N、DISi、Si/N
3	0.312	NO <sub>3</sub> -N、NH <sub>4</sub> -N、DISi
2	0.264	DISi、NH <sub>4</sub> -N
1	0.254	DISi

在河口海湾等近岸区域尤其明显。SSS、SST 以及营养盐浓度通常被认为是影响浮游植物最重要的环境因素<sup>[18-19]</sup>。本研究发现浮游植物丰度与 SST 无明显相关性( $p>0.05$ ), 8 月份莱州湾水温范围在 27.8 °C ~ 30.8 °C 之间, 较小的空间差异可能是导致其相关性弱的主要因素。相比之下, 莱州湾较高的 SSS 空间差异以及由此引起的 DIN 显著的空间分布, 使其对浮游植物丰度的影响明显大于 SST。莱州湾西南部尤其是小清河口区域大量的径流输入降低了河口区的盐度, 同时也带来了大量的营养盐, 为浮游植物的生长繁殖提供了充足的营养物质。DIP 和 DISi 与浮游植物丰度无显著相关性( $p>0.05$ ), 这可能与丰水季降雨对浮游植物影响有关, Jiang 等<sup>[8]</sup>发现, 降雨量与莱州湾浮游植物总丰度呈现出明显的正相关, 降雨量可能是干扰 DIP、DISi 与浮游植物丰度相关性的重要因素。

虽然小清河口丰富的营养盐促进了浮游植物的生长繁殖, 但是该区域浮游植物多样性指数  $H'$  却明显偏低(图 3b)。小清河在带来大量营养物质的同时, 也带来了剧烈的扰动, 增加河口区生态环境压力。在这些压力作用下, 浮游植物的类群往往会出现单一物种大量增殖而使群落结构简单化<sup>[8, 20]</sup>, 例如在营养盐波动剧烈的西南近岸区域, 尖刺拟菱形藻(*P. pungens*)大量爆发, 丰度占比达到 98%。莱州湾东部  $H'$  较高, 一方面与该区域水环境较好有关, 另一方面, 该区域为扇贝养殖区, 扇贝对浮游植物的滤食没有选择性, 这在一定程度上也促进了浮游植物的多样性水平。近年来, 有学者提出了一种中度扰动假说, 即在中度环境扰动下生物多样性指数往往最高<sup>[21]</sup>。在较低程度的环境扰动下, 物种间的竞争非常剧烈, 导致多样性水平较低, 而随着环境扰

动的增加, 物种间的竞争减弱, 多样性水平上升, 但随着外部环境扰动的进一步加剧, 物种的生存压力变大, 不适应的物种消失, 适应的则开始大量繁殖。该理论在爱琴海<sup>[20]</sup>、亚得里亚海东部<sup>[22]</sup>、葡萄牙南部近岸泻湖<sup>[23]</sup> 以及意大利奥尔贝泰洛泻湖<sup>[24]</sup> 等河口近岸区域已得到广泛证实, 本研究发现莱州湾浮游植物多样性指数  $H'$  的空间分布与该理论较为吻合。

## 2.6 浮游植物群落结构对环境的响应

从生态学上看, 生物与环境是有机统一的整体。水环境决定了生物群落结构变化的方向; 反之, 生物的个体、种群或群落的变化也是对环境变化的响应, 一定程度上反映出水体质量的变化<sup>[2, 18]</sup>。表 3 所示, NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、DISi、Si/N 是影响莱州湾浮游植物群落结构最重要的组合, DISi 为最重要的影响因素, 莱州湾浮游植物主要类群为硅藻, DISi 为影响浮游植物群落结构的最重要因素, 这与以往研究相吻合<sup>[25]</sup>。

本研究发现, 莱州湾的浮游植物群落明显分为 4 大类群, 不同类群之间差异明显(图 4, 表 1)。类群 I, 主要以小清河口及其邻近区域样本为主, 该区域尖刺拟菱形藻(*P. pungens*)大量爆发, 丰度均值达到  $4.7 \times 10^7$  cells/m<sup>3</sup>(表 1)。尖刺拟菱形藻(*P. pungens*)是在全球近岸海域普遍存在的广温广盐性赤潮生物种, 在我国的大连、胶州湾、长江口、厦门港等近岸区域都引发过赤潮<sup>[26]</sup>。该藻对氮磷依赖性强, 属于营养型藻类<sup>[27]</sup>, 张诚和邹景忠<sup>[28]</sup>研究尖刺拟菱形藻对氮磷吸收动力学特性, 发现该藻具有较强的氮吸收能力。吕颂辉<sup>[27]</sup>研究发现, 尖刺拟菱形藻在 N/P 范围 10~32 之间会有较大增长, 但在本研究中并未发现此规律, 尖刺拟菱形藻丰度与 N/P、Si/N、Si/P 无显著相关性(表 2), 但与 NH<sub>4</sub>-N 呈显著正相关( $p<0.05$ , 数据未给出), 莱州湾西部 6 号站 NH<sub>4</sub>-N (16.5 μmol/L)明显高于其他区域, 相应的其尖刺拟菱形藻(*P. pungens*)的丰度达到了峰值  $3.1 \times 10^8$  cells/m<sup>3</sup>。相比之下, 类群 II 主要位于莱州湾中北部, 水质状况较好, 营养盐含量明显低于小清河口区(表 4), 营养盐浓度的下降也在一定程度上降低了浮游植物生物量, 尖刺拟菱形藻(*P. pungens*)虽然在该区域也占有一定优势, 但是其

表4 不同浮游植物类群环境特征

Tab.4 Environmental factors feature of different phytoplankton groups

类群	SST	SSS	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N	DIN	DIP	DISi
I	29.9	28.537	3.28	28.77	4.80	36.85	0.18	21.46
II	29.0	30.576	0.89	13.16	4.17	18.23	0.20	19.17
III	28.2	29.564	0.06	5.33	6.80	12.19	0.24	14.86
IV	28.8	30.938	0.43	10.50	1.69	12.62	0.07	16.16

丰度明显下降, 丰度均值为  $7.5 \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup> (表1)。类群IV主要位于莱州湾东部扇贝养殖区, 该区域水交换好, 水质呈现出高盐度、低营养盐的特点, 其相应的浮游植物群落也明显不同于其他区域, 角毛藻等优良饵料生物成为该区域的主要优势种, 丰富的饵料生物为该区域扇贝的大规模增养殖提供了充足的食物供给。

### 3 结论

(1) 2017年夏季莱州湾水环境呈现出明显的空间分布差异, 西南近岸区域总体呈现出高SST、低SSS、高营养盐的分布特征, 小清河及邻近区域陆源输入是影响莱州湾SSS和营养盐空间分布的主要因素, 小清河NH<sub>4</sub>-N的减排对河口区NH<sub>4</sub>-N浓度下降有重要影响。

(2) 莱州湾浮游植物呈现出明显的空间分布差异, 小清河河口区呈现出高丰度、低H'的空间分布特点, H'高值区主要位于东部湾口区。浮游植物群落划分为4大不同类群, 各类群之间群落结构差异明显。

(3) 浮游植物丰度与SSS和Si/N呈显著负相关( $p < 0.05$ ), 与NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、DIN呈显著正相关( $p < 0.05$ ), 浮游植物多样性指数H'与SST和DIN呈显著负相关( $p < 0.05$ ), DISi是影响浮游植物群落结构最主要的因素, 而NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、DISi、Si/N是影响浮游植物群落结构最主要的环境组合。浮游植物群落对环境变化有明显的响应。

### 参考文献:

- [1] FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [2] AUBRY F B, COSSARINI G, ACRI F, et al. Plankton communities in the northern Adriatic Sea: patterns and

changes over the last 30 years[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 115: 125-137.

- [3] ANDERSON D M, GLIBER P M, BURKHOLDER J M. Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences[J]. *Estuaries*, 2002, 25(4): 704-726.
- [4] DAY J W JR, KEMP W M. Human impact and management of coastal and estuarine ecosystems[M]//*Estuarine Ecology*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2012: 483-495.
- [5] PAERL H W, HALL N S, PEIERLS B L, et al. Evolving paradigms and challenges in estuarine and coastal eutrophication dynamics in a culturally and climatically stressed world[J]. *Estuaries and Coasts*, 2014, 37(2): 243-258.
- [6] 姜会超, 王玉珏, 李佳蕙, 等. 莱州湾营养盐空间分布特征及年际变化趋势[J]. *海洋通报*, 2018, 37(4): 411-423.
- [7] 赵玉庭, 刘霞, 李佳蕙, 等. 2013年莱州湾海域营养盐的平面分布及季节变化规律[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(1): 95-99.
- [8] JIANG H C, LIU D Y, SONG X K, et al. Response of phytoplankton assemblages to nitrogen reduction in the Laizhou Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 136: 524-532.
- [9] 郭玉洁, 钱树本. 中国海藻志[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [10] 李伟新, 朱仲嘉, 刘凤贤. 海藻学概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.
- [11] 钱树本, 刘东艳, 孙军. 海藻学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.
- [12] 郭皓. 中国近海赤潮生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.
- [13] 杨世民, 董树刚. 中国海域常见浮游硅藻图谱[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2006.
- [14] 夏斌, 张晓理, 崔毅, 等. 夏季莱州湾及附近水域理化环境及营养现状评价[J]. *渔业科学进展*, 2009, 30(3): 103-111.
- [15] 马绍赛, 辛福言, 崔毅, 等. 黄河和小清河主要污染物入海量的估算[J]. *渔业科学进展*, 2004, 25(5): 47-51.
- [16] PELLING H E, UEHARA K, GREEN J A M. The impact of rapid coastline changes and sea level rise on the tides in the Bohai Sea, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(7): 3462-3472.
- [17] 国家海洋局. 2014年中国海洋环境状况公报[EB/OL]. (2015-03-11). [http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619\\_1797643.html](http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1797643.html).