

2004—2016 年夏季长江口网采浮游植物及其影响因素^{*}

黄海燕 王秋璐 许 艳 刘 捷 曲艳敏

(国家海洋信息中心 天津 300171)

摘要 基于 2004—2016 年夏季长江口生态监控区 13 年的生态环境调查数据,开展网采浮游植物年际变化及其与环境因子关系研究。结果表明: (1)共鉴定出浮游植物 7 门 263 种,以硅藻占绝对优势,甲藻次之,物种数呈增加趋势,其中硅藻种类数占有比下降,而甲藻的种类数占有比呈上升趋势; (2)总细胞丰度、硅藻细胞丰度和甲藻细胞丰度都呈上升趋势,除 2014 年外,其余年份硅藻细胞丰度都占绝对优势并与总细胞丰度的分布曲线和变化趋势基本一致; (3)水平分布模式及其年际变化受环流变化和水团消长的影响,总体趋势是河口区细胞丰度较低,由河口到外海呈逐渐增大趋势,部分年份呈现先增大后减小的趋势; (4)生物多样性多年呈下降趋势,物种组成随空间和时间变化较大,只有较少的种类能够保持稳定,多数物种只是偶尔被检出; (5)中肋骨条藻有 10 年为区域第一优势种,41 种常见种中有 31 种细胞丰度呈增加趋势,10 种细胞丰度呈下降趋势。 (6)浮游植物细胞丰度与活性磷酸盐和无机氮具有相关性,种类数、多样性指数除了与溶解氧、氨氮、叶绿素 *a* 无相关性外与其他 10 种环境因子都相关。本研究能够较好反映研究区域浮游植物的本底情况及演变趋势。

关键词 长江口; 浮游植物; 年际变化; 影响因素

中图分类号 Q178.1 doi: 10.11693/hyhz20171100289

长江口生态监控区是全国范围内实施生态监控区制度的 18 个典型生态系统之一。监控区位于上海市近岸海域,作为河口与海洋的交汇区域,受长江冲淡水、沿岸流、台湾暖流和黑潮的影响,加上航道整治、滩涂围垦以及长江上游大型水利工程建设引起的水动力条件变化,造就了复杂多变的环境。长江流域承载流经地区的工、农业废水和城市污水,将大量生源要素(碳、氮、磷等)、有机污染物、重金属等从陆地带入长江口海域,对该区域生态环境造成了极大的影响,水体富营养化严重、赤潮频发(周名江等, 2003; 范丽等, 2008; 张璇, 2012; 尹艳娥等, 2014; 张桂成, 2015)。

浮游植物是赤潮发生的生物基础,作为初级生产者,其种群变动和群落结构直接影响海洋生态系

统的结构和功能。对长江口及其毗邻海域浮游植物研究的报导已有很多,内容涵盖种类组成、数量分布、生物多样性、浮游植物群落与环境因子关系等(Gao *et al.*, 2005; Kong *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2014; Jiang *et al.*, 2015; 李云等, 2007; 栾青杉等, 2007; 王丹等, 2008; 何青等, 2009; 章飞燕, 2009; 栾青杉等, 2010; 唐峰华等, 2010; 王江涛等, 2012; 赵冉等, 2013; 林峰竹等, 2008; 江志兵等, 2014; 刘海娇等, 2015; 林梅等, 2017),但由于受到样本和数据的限制,这些研究主要是基于一次调查或者是短时期内群落结构变化,长期趋势变化分析只能依赖历史文献材料收集,所分析的材料往往存在不同年份调查区域、调查时间不一致的情况,即使是在同一

^{*} 国家重点研发计划资助“海洋环境安全保障”重点专项—海洋大数据分析预报技术研发项目, 2016YFC1401906 号; 国家重点研发计划资助“海洋环境变化关键参数观测数据处理方法和产品研制”, 2017YFA0603200 号。黄海燕, 硕士, 助理研究员, E-mail: huanghaiyan1000@126.com

通讯作者: 王秋璐, 高级工程师, E-mail: 87603116@qq.com

收稿日期: 2017-11-14, 收修改稿日期: 2017-11-27

年份,也存在调查站位个数有限,调查资料不完整等问题,不足以反映研究区域浮游植物多年连续变化情况。本文基于研究区域连续 13 年同一时间段的大面调查数据,开展浮游植物种类组成、物种变化、数量变化、群落特征指数及其变化趋势研究,并结合水深、盐度、pH、溶解氧、无机氮、活性磷酸盐、活性硅酸盐等 13 种环境因子开展相关性分析,长期连续的年际调查资料是研究浮游植物年际变化的珍贵数据资源,可以弥补以往研究的不足。本研究有助于摸清长江口生态监控区浮游植物的本底情况及演变趋势,为赤潮发生机制及生态系统变化研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 材料

浮游植物数据来源于 2004—2016 年海洋环境监测长江口生态监控区 8 月份由底至表垂直拖网调查,网型为 型浮游生物网(网目孔径 76 μ m),鉴定分析方法按《海洋监测规范》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007)第 7 部分执行,采用浓缩计数法计数。数据空间范围为 121.32°—123°E, 30.75°—31.75°N, 除 2011 和 2012 年站位为 17 个,其余各年份站位都为 20 个,各年份站位在空间上分布上略有差异,共计 30 个不重复站位,其中有 8、3、7、1、1、1、4、4 个站位分别调查了 13 年、12 年、11 年、10 年、9 年、4 年、3 年、2 年、1 年数据。如图 1 所示。

水质数据来源于相应站位调查,水质因子分析均按《海洋监测规范》执行,包括水深、盐度、pH、溶解氧、悬浮物、化学耗氧量、活性磷酸盐、氨氮、硝酸盐、亚硝酸盐、无机氮、活性硅酸盐和叶绿素 a_0 。

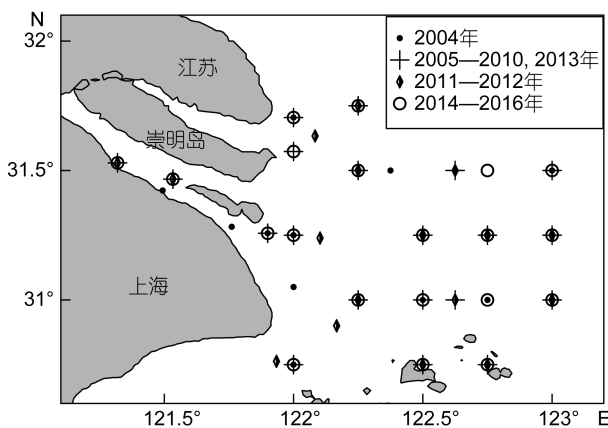


图 1 2004—2016 年夏季网采浮游植物站位分布图
Fig.1 Phytoplankton net-sampling stations in summer from 2004 to 2016

1.2 数据处理分析

本文以物种站位检出率(F)、丰度百分比(C)研究浮游植物物种变化特征。

$$F = \frac{Z_i}{Z}, \quad (1)$$

$$C = \frac{\bar{C}_i}{\sum_{i=1}^s \bar{C}_i}, \quad (2)$$

Z_i 为第 i 种出现的站位数, Z 为总站位数; $\bar{C}_i$ 为第 i 种的年平均丰度; s 为所有调查样品的种类数。

本文以区域物种优势度 Y 最大的物种为第一优势种(简称优势种),物种多样性指数 H' (Shannon-Wiener index)、物种丰富度指数 D (Margalef's index)和均匀度指数 J (Pielou index)研究浮游植物群落特征。

$$Y = \frac{M_i}{M} \times f_i, \quad (3)$$

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i, \quad (4)$$

$$D = (S-1)/\log_2 N, \quad (5)$$

$$J = H'/\log_2 S, \quad (6)$$

M_i 表示所有样品中第 i 种的总个体数, M 表示所有样品中所有物种的总个体数, f_i 为第 i 种在所有样品中出现的频率; S 表示样品中的种类数, N 表示样品中物种总个体数, P_i 表示第 i 种在该样品中占的比例。

群落与环境因子分析主要利用多元统计分析软件 SPSS12 进行 Pearson 相关性分析。

2 结果

2.1 种类组成

2004—2016 年长江口生态监控区夏季网采浮游植物(以下简称浮游植物)共鉴定出 7 门 263 种(定种 224 种),其中硅藻 171 种(定种 149 种)、甲藻 62 种(定种 59 种)、金藻 4 种(定种 3 种)、红藻 1 种、蓝藻 12 种(定种 5 种)、裸藻 1 种、绿藻 12 种(定种 8 种)。各年份种类组成上硅藻占绝对优势,占浮游植物种类数 62%—74%,呈下降趋势;甲藻占浮游植物种类数 19%—29%,呈上升趋势。2004—2016 年物种变化范围为 60—113 种,2004 和 2008 年最高,2009 年最低,各年份物种数在波动中呈增加趋势(图 2)。

2004—2016 年各站位浮游植物物种数统计如图 3 所示,各站位物种变化范围为 1—58 种,2012 年各站位间物种数差异最大,为 54 种,2007 年各站位间物种数差异最小,为 22 种,2004 年有一个离群值,为 51 种。

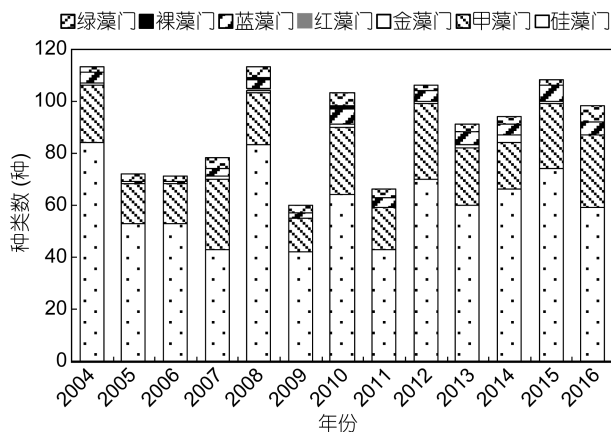


图 2 2004—2016 年夏季浮游植物种类变化

Fig.2 Variation of phytoplankton species in summer from 2004 to 2016

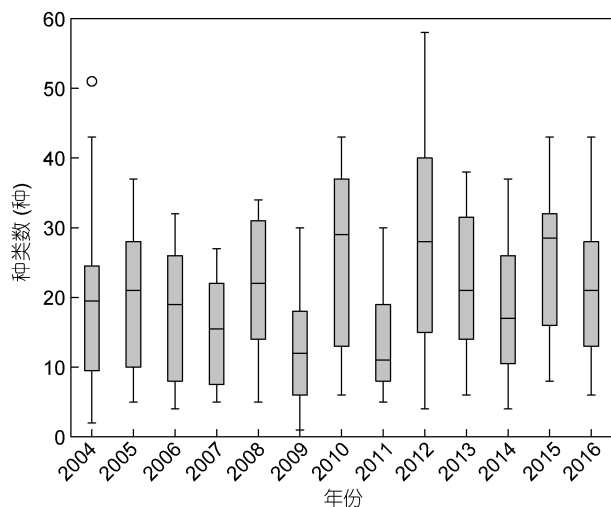


图 3 2004—2016 年夏季各站浮游植物种类数变化

Fig.3 Variation in the number of phytoplankton species in the stations in summer from 2004 to 2016

2.2 物种变化

2004—2016 年夏季长江口各浮游植物物种年检出状况如图 4 所示, 所有年份都检出的物种有 18 种, 占 6.8%, 包括硅藻 12 种, 甲藻 5 种和蓝藻 1 种; 出现 5—12 年的物种有 85 种, 占 32%; 出现 1—4 年的物种有 160 种, 占 61%, 其中仅出现 1 年的物种有 88 种。

近 13 年, 各物种站位检出率在 0.4%—85%; 站位检出率 $\geq 50\%$ 的物种有 11 种, 由硅藻和甲藻组成, 其中中肋骨条藻和琼氏圆筛藻站位检出率在 80% 以上, 洛氏角毛藻、虹彩圆筛藻和纺锤角藻站位检出率在 60% 以上; 站位检出率 $< 10\%$ 的共有 212 种, 占全部物种数的 80.6%, 站位检出率 $< 1\%$ 的有 185 种, 占 70%。各物种站位检出率如图 5 所示。

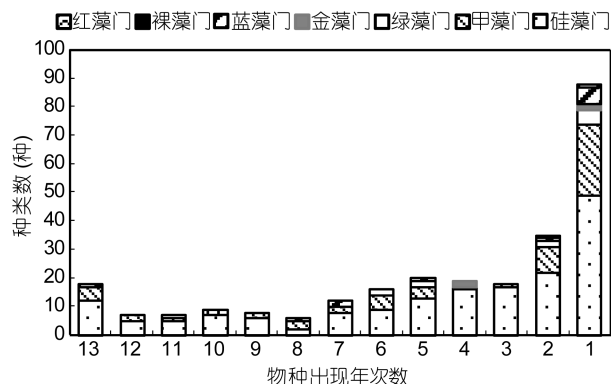


图 4 2004—2016 年夏季浮游植物各物种年检出数

Fig.4 The time of presence of phytoplankton species in summer from 2004 to 2016

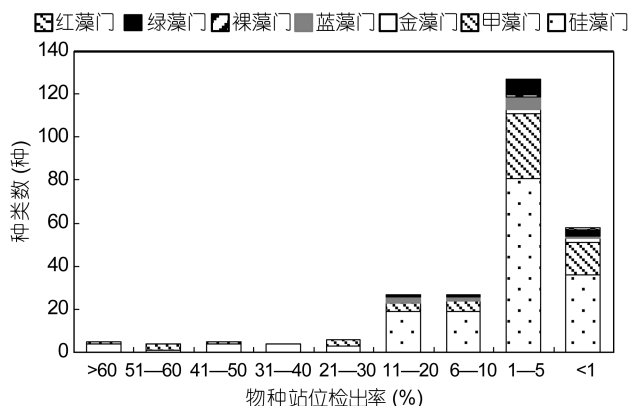


图 5 2004—2016 年夏季各浮游植物站位检出率

Fig.5 The frequency of occurrence of phytoplankton species in summer from 2004 to 2016

近 13 年中检出年份数 ≥ 10 年的物种有 41 种, 这些常见种的检出年份数、站位检出率、丰度百分比及各年份各物种细胞丰度及变化情况如表 1 所示。这些常见浮游植物种包括硅藻 29 种, 甲藻 10 种, 蓝藻和绿藻各 1 种, 站位检出率范围 7%—85%, 站位检出率 $\geq 50\%$ 的有 11 种, 丰度百分比范围从 $< 0.01\%$ 到 93.6%, 以中肋骨条藻占绝对优势, 站位检出率和丰度百分比都为最大, 丰度百分比 $\leq 0.01\%$ 的有 25 种。各常见浮游植物中细胞丰度呈增加趋势的有 31 种, 呈下降趋势的 10 种。中肋骨条藻、旋链角毛藻和尖刺拟菱形藻物种的丰度百分比之和达 96.1%, 因此, 其余 260 种浮游植物细胞丰度之和小于 4%。

2.3 数量变化

2004—2016 年夏季长江口浮游植物平均细胞丰度范围为 $(110—93030) \times 10^4 \text{ cells/m}^3$, 硅藻平均细胞丰度范围为 $(104—93021) \times 10^4 \text{ cells/m}^3$, 甲藻平均细胞丰度范围为 $(2—94) \times 10^4 \text{ cells/m}^3$ 。长江口浮游植物平均

表 1 2004—2016 年浮游植物常见物种的细胞数量年际变化(单位: cells/m³)Tab.1 Annual variation in the cell numbers of common phytoplankton species in summer from 2004 to 2016 (unit: cells/m³)

物种名称	年份数	站检 出率(%)	丰度 百分比(%)	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	趋势
硅藻门																	
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	13	85	93.6														↗
琼氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus jonesianus</i>	13	83	0.11														↗
虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	13	63	0.02														↗
洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	13	61	0.45														↗
菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	13	45	0.15														↘
旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	13	41	1.06														↗
布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i>	13	35	0.01														↘
扁面角毛藻 <i>Chaetoceros compressus</i>	13	31	0.37														↗
丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>	13	20	0.01														↘
圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i>	13	20	0.01														↗
扭鞘藻 <i>Streptothecha thamesis</i>	13	20	<0.01														↗
蜂窝三角藻 <i>Triceratium favus</i>	13	18	<0.01														↘
伏氏海毛藻 <i>Thalassiothrix frauenfeldii</i>	12	59	0.07														↘
中华盒形藻 <i>Biddulphia sinensis</i>	12	50	0.01														↗
透明辐杆藻 <i>Bacteriastrium hyalinum</i>	12	31	0.02														↗
窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	12	24	0.08														↗
颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	12	20	0.03														↘
刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i>	11	30	<0.01														↗
笔尖形根管藻 <i>Rhizosolenia styloformis</i>	11	23	0.01														↗
冕孢角毛藻 <i>Chaetoceros diadema</i>	11	13	0.05														↗
小细柱藻 <i>Leptocylindrus minimus</i>	11	11	<0.01														↗
具槽直链藻 <i>Melosira sulcata</i>	11	9	<0.01														↗
尖刺拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	10	50	1.48														↗
齿角毛藻 <i>Chaetoceros denticulatus</i>	10	18	0.01														↗
短角弯角藻 <i>Eucampia zoodiacus</i>	10	17	0.12														↗
翼根管藻纤细型 <i>Rhizosolenia alata</i> f. <i>gracillima</i>	10	17	<0.01														↗
爱氏角毛藻 <i>Chaetoceros eibonii</i>	10	12	<0.01														↗
有翼圆筛藻 <i>Coscinodiscus bipartitus</i>	10	9	<0.01														↗
密聚角毛藻 <i>Chaetoceros coarctatus</i>	10	7	<0.01														↗
甲藻门																	
纺锤角藻 <i>Ceratium fusus</i>	13	65	0.07														↗
三角角藻 <i>Ceratium tripos</i>	13	57	0.01														↗
夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>	13	52	0.02														↗
叉角藻 <i>Ceratium furca</i>	13	52	0.01														↗
具尾鳍藻 <i>Dinophysis caudata</i>	13	46	<0.01														↘
五角多甲藻 <i>Peridinium pentagonum</i>	12	28	<0.01														↘
锥形多甲藻 <i>Peridinium conicum</i>	12	27	<0.01														↗
扁平多甲藻 <i>Peridinium depressum</i>	11	25	<0.01														↘
三叉角藻 <i>Ceratium trichoceors</i>	10	13	<0.01														↗
锥状斯克里普藻 <i>Scrippsiella trochoidea</i>	10	12	<0.01														↗
蓝藻门																	
微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	13	15	<0.01														↗
绿藻门																	
单角盘星藻具孔变种 <i>Pediastrum simplex</i> var. <i>duodenarium</i>	11	14	0.01														↘

注: 通过线性回归分析物种细胞数量变化趋势, “↗”代表斜率 $k>0$; “↘”代表斜率 $k<0$; 0 0-10² 10²-10³ 10³-10⁴ 10⁴-10⁵ 10⁵-10⁶ >10⁶

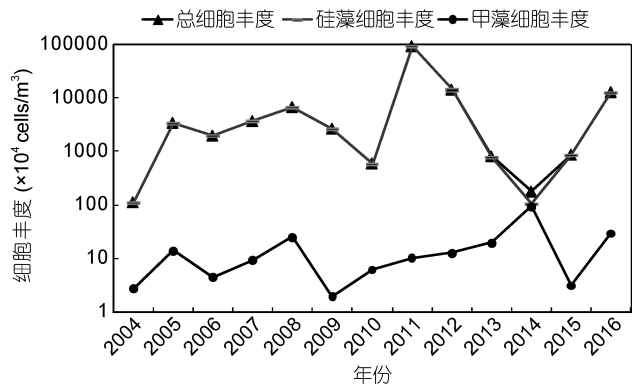


图 6 2004—2016 年夏季浮游植物细胞丰度
Fig.6 Cell abundance of phytoplankton in summer from 2004 to 2016

细胞丰度、硅藻平均细胞丰度和甲藻平均细胞丰度都呈上升趋势,总细胞丰度在 2012 年最高,2004 和 2014 年最低。除 2014 年外,其余年份硅藻细胞丰度都占绝对优势,与总细胞丰度分布曲线和变化趋势基本一致(图 6)。

2004—2016 年夏季长江口各站位浮游植物细胞

丰度分布情况见图 7, 明显可见 2016、2012、2009 和 2008 年各站位细胞丰度水平较其他年份略高, 2015、2014 和 2004 年各站位细胞丰度水平较低。2011 年各站位细胞丰度水平差异较大, 有 5 个站位细胞丰度明显高于其他站位。各站位细胞丰度分布状况由河口到外海呈羽状分布, 总体呈逐渐增大趋势, 部分年份呈现先增大后减小的趋势。

2.4 优势种

中肋骨条藻、旋链角毛藻、纺锤角藻和尖刺拟菱形藻为 2004—2016 年夏季长江口浮游植物优势种(表 2), 各年份优势种优势度范围为 0.2—0.89, 细胞丰度范围为 (49—92955)×10⁴cells/m³, 站位检出率范围 35%—100%, 丰度百分比范围为 31%—99.9%。13 年中, 中肋骨条藻有 10 年为区域第一优势种, 且在 2006、2007、2008、2011、2012 和 2016 年处于绝对优势, 旋链角毛藻、纺锤角藻和尖刺拟菱形藻分别在 2013、2014 和 2015 年成为该区域第一优势种, 且优势度都较低。

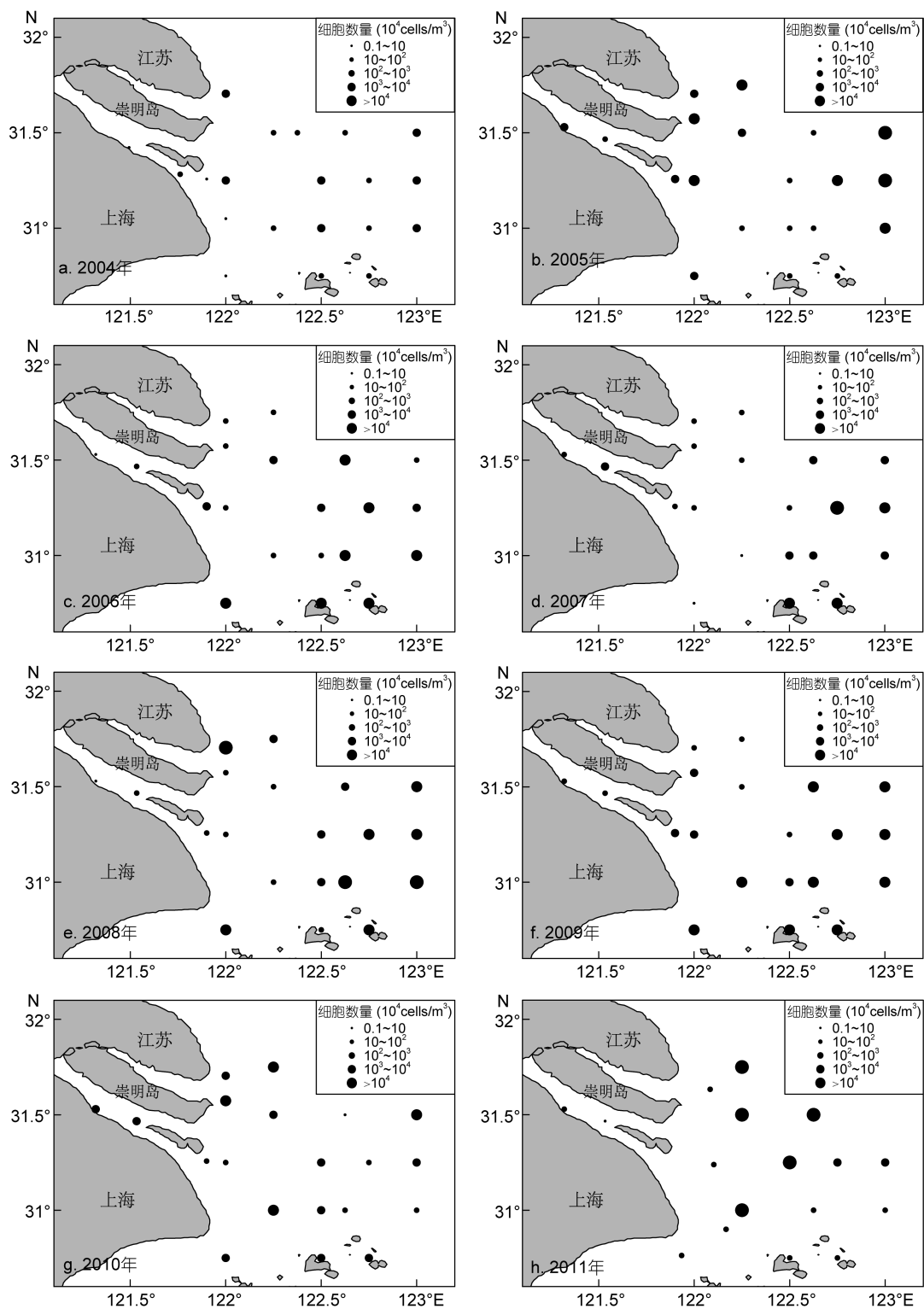
表 2 2004—2016 年夏季网采浮游植物优势种
Tab.2 Dominant species of net-phytoplankton in summer from 2004 to 2016

年份	优势种	优势度	细胞丰度(10 ⁴ cells/m ³)	站位检出率(%)	丰度百分比(%)
2004	中肋骨条藻	0.35	49	80	44
2005	中肋骨条藻	0.63	2387	90	70
2006	中肋骨条藻	0.72	1666	85	85
2007	中肋骨条藻	0.79	3414	85	93
2008	中肋骨条藻	0.84	5656	100	84
2009	中肋骨条藻	0.39	1604	85	61
2010	中肋骨条藻	0.26	182	85	31
2011	中肋骨条藻	0.88	92955	88	99.9
2012	中肋骨条藻	0.79	11973	94	84
2013	旋链角毛藻	0.2	461	35	58
2014	纺锤角藻	0.28	66	75	38
2015	尖刺拟菱形藻	0.34	387	75	45
2016	中肋骨条藻	0.89	12044	95	94

2.5 多样性指数

2004—2016 年长江口物种多样性指数范围为 0.73—2.28, 丰富度指数范围 0.51—1.28, 均匀度指数范围 0.21—0.6; 各站位物种多样性指数范围为 0—4.03, 丰富度指数范围 0—3.04, 均匀度指数范围 0—0.99(图 8)。站位多样性指数 0 值出现在 2009 年和 2011 年, 因其中某些站位只检测到一个物种或者某一物种

细胞数量太大造成多样性指数接近 0 值。2009、2010、2012 和 2016 年各站位物种多样性指数分布呈左偏, 2004 和 2010 年呈右偏, 其余年份分布较对称; 均匀度指数在 2010、2012 和 2015 年出现离群值, 丰富度指数在 2004、2009 和 2016 年出现离群值。经线性回归分析, 物种多样性指数和均匀度指数在波动中总体程下降趋势, 丰富度指数在波动中总体呈上升趋势。



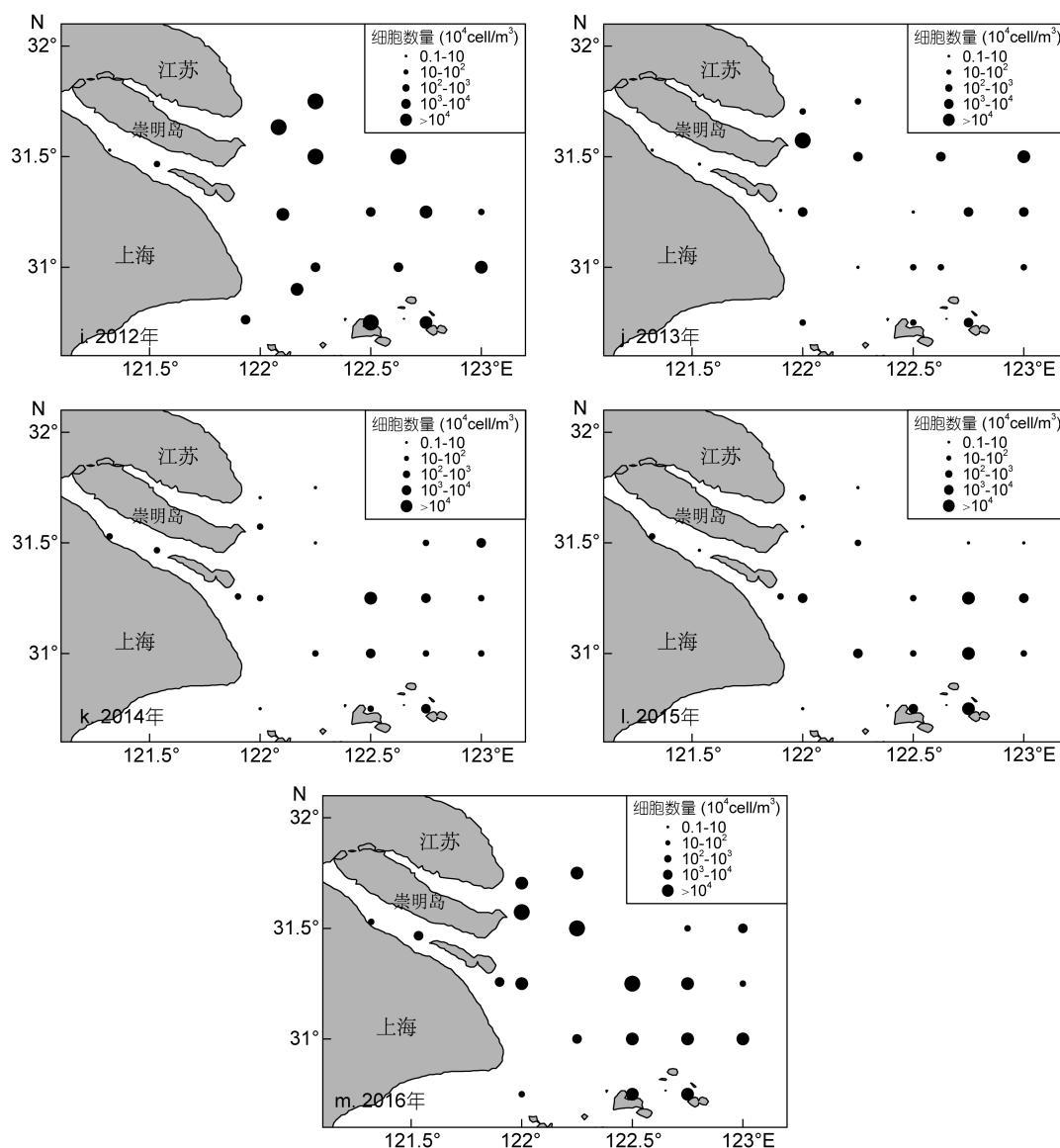


图 7 2004—2016 年夏季网采浮游植物细胞丰度分布

Fig.7 Distribution in cell abundance of net-phytoplankton in summer from 2004 to 2016

2.6 群落结构与环境相关性分析

利用 SPSS12 分析软件对各个站位的浮游植物细胞丰度、硅藻细胞丰度和甲藻细胞丰度、种类数、物种多样性指数、丰富度指数、均匀度指数与水深、盐度、pH、溶解氧、悬浮物、化学耗氧量、活性磷酸盐、氨氮、硝酸盐、亚硝酸盐、无机氮、活性硅酸盐和叶绿素 *a* 共 13 项相关环境因子开展进行相关性分析(表 3)。结果表明, 近 13 年夏季长江口网采浮游植物细胞丰度与活性磷酸盐、硝酸盐和无机氮正相关; 甲藻细胞丰度与盐度正相关, 与活性磷酸盐、氨氮、硝酸盐、无机氮呈负相关, 与活性硅酸盐呈显著负相关; 硅藻细胞丰度与活性磷酸盐、硝酸盐和无机氮正

相关; 浮游植物各站位物种数与水深、盐度、pH 显著正相关, 与悬浮物、化学耗氧量、活性磷酸盐、硝酸盐、无机氮和活性硅酸盐呈显著负相关关系, 与亚硝酸盐呈负相关关系; 物种多样性指数与水深、盐度显著正相关, 与悬浮物、化学耗氧量、活性磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐、无机氮呈显著负相关关系, 与活性硅酸盐呈负相关关系; 丰富度指数与水深、盐度、pH 显著正相关, 与悬浮物、化学耗氧量、活性磷酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐、无机氮和活性硅酸盐呈显著负相关关系; 均匀度指数与盐度呈正相关, 与化学耗氧量、亚硝酸盐呈显著负相关, 与无机氮呈负相关关系。

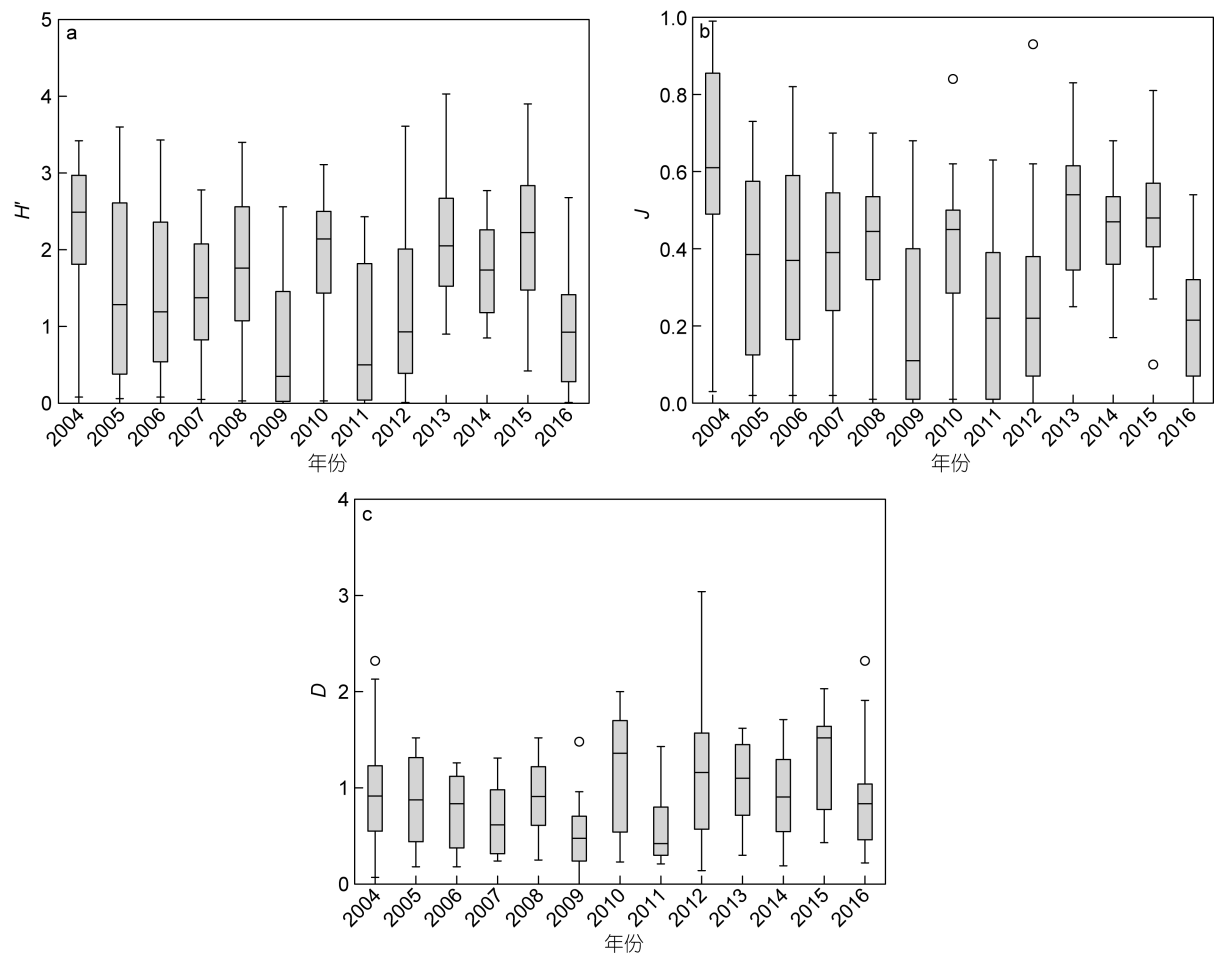


图 8 2004—2016 年夏季网采浮游植物多样性指数 H' (a), 均匀度指数 J (b), 和丰富度指数 D (c)

Fig.8 Diversity indexes of net-phytoplankton in summer from 2004 to 2016

a. H' (Shannon-Wiener index); b. J (Pielou index); c. D (Margalef's index)

表 3 浮游植物群落与环境参数 Pearson 相关系数

Tab.3 The Pearson correlation coefficient of phytoplankton abundance and environmental factors

		总细胞丰度	甲藻细胞丰度	硅藻细胞丰度	物种数	物种多样性指数	丰富度指数	均匀度指数
水深	Pearson 相关性	-0.065	0.093	-0.065	0.547**	0.303**	0.487**	0.161
	显著性(双侧)	0.464	0.292	0.464	0.000	0.000	0.000	0.068
	N	130	130	130	130	130	130	130
盐度	Pearson 相关性	-0.125	0.169*	-0.125	0.613**	0.379**	0.585**	0.199*
	显著性(双侧)	0.108	0.029	0.108	0.000	0.000	0.000	0.010
	N	166	166	166	166	166	166	166
pH	Pearson 相关性	-0.057	0.060	-0.057	0.332**	0.135	0.239**	0.045
	显著性(双侧)	0.520	0.496	0.520	0.000	0.126	0.006	0.615
	N	130	130	130	130	130	130	130
溶解氧	Pearson 相关性	0.125	-0.126	0.125	-0.004	-0.126	-0.091	-0.126
	显著性(双侧)	0.087	0.084	0.087	0.957	0.084	0.212	0.084
	N	189	189	189	189	189	189	189
悬浮物	Pearson 相关性	0.116	-0.101	0.116	-0.490**	-0.232**	-0.478**	0.019
	显著性(双侧)	0.111	0.168	0.110	0.000	0.001	0.000	0.794
	N	189	189	189	189	189	189	189

续表

		总细胞丰度	甲藻细胞丰度	硅藻细胞丰度	物种数	物种多样性指数	丰富度指数	均匀度指数
化学耗氧量	Pearson 相关性	0.055	-0.004	0.055	-0.251**	-0.348**	-0.335**	-0.301**
	显著性(双侧)	0.571	0.968	0.571	0.008	0.000	0.000	0.001
	<i>N</i>	110	110	110	110	110	110	110
活性磷酸盐	Pearson 相关性	0.175*	-0.180*	0.175*	-0.571**	-0.276**	-0.505**	-0.104
	显著性(双侧)	0.016	0.013	0.016	0.000	0.000	0.000	0.156
	<i>N</i>	189	189	189	189	189	189	189
氨氮	Pearson 相关性	0.029	0.195*	0.029	-0.113	-0.125	-0.126	-0.108
	显著性(双侧)	0.706	0.011	0.706	0.145	0.108	0.104	0.164
	<i>N</i>	168	168	168	168	168	168	168
硝酸盐	Pearson 相关性	0.177*	-0.158*	0.177*	-0.519**	-0.250**	-0.471**	-0.071
	显著性(双侧)	0.016	0.031	0.016	0.000	0.001	0.000	0.333
	<i>N</i>	186	186	186	186	186	186	186
亚硝酸盐	Pearson 相关性	-0.024	0.010	-0.024	-0.161*	-0.200**	-0.192**	-0.203**
	显著性(双侧)	0.748	0.895	0.748	0.027	0.006	0.008	0.005
	<i>N</i>	189	189	189	189	189	189	189
无机氮	Pearson 相关性	0.174*	-0.162*	0.174*	-0.621**	-0.348**	-0.583**	-0.175*
	显著性(双侧)	0.023	0.035	0.023	0.000	0.000	0.000	0.022
	<i>N</i>	170	170	170	170	170	170	170
活性硅酸盐	Pearson 相关性	0.047	-0.233**	0.047	-0.567**	-0.201*	-0.483**	-0.005
	显著性(双侧)	0.601	0.008	0.600	0.000	0.022	0.000	0.954
	<i>N</i>	129	129	129	129	129	129	129
叶绿素 <i>a</i>	Pearson 相关性	0.007	0.106	0.007	0.115	-0.050	0.027	-0.087
	显著性(双侧)	0.921	0.145	0.921	0.114	0.490	0.708	0.235
	<i>N</i>	190	190	190	190	190	190	190

注: *N*: 样本数; **: $P<0.01$ 极显著相关; *: $P<0.05$ 显著相关

3 讨论

本文对 2004—2016 年长江口夏季网采浮游植物数据开展分析, 共计 254 组浮游植物数据, 并采用与之对应站位的 190 组水质各参数数据开展相关性分析, 缺少的为 2011 年部分站位及 2012—2014 年全部站位的水质数据, 主要原因是由于方案的调整, 未对应站位开展水质调查。

种类组成上, 硅藻占绝对优势, 甲藻次之, 此外还有少量的金藻、红藻、蓝藻、裸藻和绿藻。近 13 年物种数在波动中呈增加趋势, 硅藻种类数占有比例下降, 而甲藻的种类数占有比呈上升趋势。王金辉等(2004)分析了 1990—2002 年间长江口海域浮游植物的年际变化, Jiang 等(2014)研究了过去 50 年长江口海域浮游植物的演替, 林梅等(2017)分析了 1986—2014 年春季长江口海域浮游植物年际变化, 虽然在各自研究时间段中浮游植物种类数变化趋势有所差异, 但都一致认为, 硅藻种类数占有比呈下降

趋势, 而甲藻的种类数占有比呈上升趋势。近半个世纪以来, 长江口及其邻近海域悬沙含量降低, 增加了水体的透明度, 氮、磷营养盐含量也明显增加, 而硅浓度显著降低(辛明, 2014)。透明度和氮、磷营养盐含量的增加有利于浮游植物的生长, 促进种类数的上升, 而硅浓度的降低将限制硅藻群落的发展, 使得硅藻种类占有比下降, 再加上近些年对甲藻研究鉴定技术的进步, 发现了更多种类的甲藻, 使得甲藻种类占有比上升。

各年际间物种数和年内各站位物种数差异都较大, 10 年都有出现的物种占 15.6%, 出现 1—4 年次的物种占 61%, 站位检出率 $\geq 50\%$ 的物种占 4.2%, 站位检出率 $< 1\%$ 的物种占 70%。中肋骨条藻在 2004—2012 年、2016 年皆为本研究区域的第一优势种, 旋链角毛藻和尖刺拟菱形藻分别在 2013 和 2015 年成为第一优势种, 这三种硅藻的细胞丰度百分比之和达 96.1%, 因此, 其余 260 种浮游植物细胞丰度之和小于 4%。由此可见, 长江口夏季浮游植物物种组成随

空间和时间变化较大,只有较少的种类能够保持稳定,多数物种因调查时间和区域不同而只是偶尔被检出,这与长江口复杂的生态环境有关。根据盐度、光照、流沙等水体理化性质,长江河口生态系统自西向东划分为长江口咸淡水生态系(河口区, 122°E 以西)、河口半咸水生态系(冲淡水区 $122^{\circ}\text{—}122.5^{\circ}\text{E}$)、外海高盐生态系(外海区, 122.5°E 以东),其范围随着丰水期和枯水期有所变化(王金辉, 2002),只有广适性的浮游植物才能在如此复杂的环境中占据主导地位。中肋骨条藻为广温广盐的典型代表种,旋链角毛藻尖刺拟菱形藻亦为广温性沿岸种,这三种硅藻皆为小型的链状群体种类(郭皓, 2004),它们的生理特性使其能够适应长江口复杂的环境,个体微小营群体生活,使其在竞争中更占优势。

资料显示(国家海洋局, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017),长江口海域为在赤潮高发区,2004—2016年每年都有赤潮发生,引发赤潮的生物种主要为中肋骨条藻、东海原甲藻、米氏凯伦藻、红色中益虫和海链藻。中肋骨条藻在 2005、2007、2008、2010、2011、2015、2016 年发生赤潮,东海原甲藻在 2004、2006、2010、2012、2013、2014、2016 年发生赤潮,米氏凯伦藻在 2006、2012、2013 年发生赤潮。本研究数据中显示中肋骨条藻在各年份都有检测出且细胞丰度大,说明该区域有发生中肋骨条藻赤潮的生物基础。而东海原甲藻仅出现在 2007 和 2013 年,米氏凯伦藻仅在 2007 年被检测出,一方面可能是由于赤潮发生时间主要集中在 5—6 月份,8 月份东海原甲藻和米氏凯伦藻由于密度较低所以在网采样品中未检测到;另一方面是由于对东海原甲藻和米氏凯伦藻等单细胞浮游植物,型网对其捕获效率比较差,网采数据在反应其实际数量方面存在不足。

硅藻在调查海域细胞丰度上占优势,除 2014 年外,整个调查海域浮游植物细胞丰度基本与硅藻细胞丰度呈现一致的分布趋势。在水平分布上,不同年份有所差异,总体趋势是河口区细胞丰度较低,由河口到外海呈逐渐增大趋势,部分年份呈现先增大后减小的趋势。浮游植物的细胞丰度的分布模式与长江冲淡水、台湾暖流水等水系的影响范围以及不同浮游植物物种的生理生态习性有较大的关系(栾青杉等, 2010)。研究发现(郭术津, 2012),长江口近岸海域浮游植物细胞丰度高值区多集中于海水盐度为 15—23 的海域,并且随长江冲淡水的扩展和回缩东西偏移,

再加上不同的年份东海的水团分布有所差别,如长江径流量的年度变化、台湾暖流北上的范围以及黑潮对东海大陆架入侵的年度差异等,这些差异会明显影响长江口海域理化因子如温度、盐度和营养盐等的分布趋势,从而造成长江口细胞丰度分布模式的差异。

在群落结构上,虽然近 13 年物种多样性指数和均匀度指数均在波动中总体呈下降趋势,但物种的丰富度呈增加趋势,各年份内各站位间多样性指数差异较大。一般而言,物种多样性指数越高、种类丰富度越大、个体分布越均匀,代表这个海洋生态系统越健康,而在本研究中,丰富度指数和其它多样性指数变化趋势不同,主要原因在于长江口是典型的河口区,浮游植物优势种和其它物种的丰度相差很悬殊,导致物种丰富度指数失去了对群落多样性的判别能力(孙军等, 2004)。与环境因子的相关性表明,多样性指数与悬浮物、化学耗氧量、活性磷酸盐、无机氮和硅酸盐呈显著负相关关系,浮游植物群落结构的变化也预示着近年来长江口海域富营养水平加剧。

4 结论

研究结果表明,2004—2016 年夏季共鉴定出浮游植物 7 门 263 种,以硅藻占绝对优势,甲藻次之,物种数呈增加趋势,其中硅藻种类数占有比例下降,而甲藻的种类数占有比呈上升趋势。总细胞丰度范围、硅藻平均细胞丰度和甲藻平均细胞丰度都呈上升趋势,除 2014 年外,其余年份硅藻细胞丰度都占绝对优势并与总细胞丰度的分布曲线和变化趋势基本一致。水平分布模式及其年际变化受环流变化和水团消长的影响,总体趋势是河口区细胞丰度较低,由河口到外海呈逐渐增大趋势,部分年份呈现先增大后减小的趋势。生物多样性多年呈下降趋势,物种组成随空间和时间变化较大,只有较少的种类能够保持稳定,多数物种因调查时间和站位不同而只是偶尔被检出。中肋骨条藻有 10 年为区域第一优势种,41 种常见种中有 31 种细胞丰度呈增加趋势,10 种细胞丰度呈下降趋势。浮游植物细胞丰度与活性磷酸盐 and 无机氮具有相关性,种类数、多样性指数除了与溶解氧、氨氮、叶绿素 a 无相关性外与其他 10 种环境因子都相关。本研究使用的是同一区域连续 13 年同一时间段的大面调查数据,是研究浮游植物年际变化的珍贵数据资源,能够较好反映长江口生态监控区浮游植物物种的本底情况及演变趋势。

致谢 感谢国家海洋局东海分局提供海洋环境监测数据。

参 考 文 献

- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007. GB 17378—2007 海洋监测规范. 北京: 中国标准出版社
- 尹艳娥, 沈新强, 蒋 玫等, 2014. 长江口及其邻近海域富营养化趋势分析及与环境因子关系. 生态环境学报, 23(4): 622—629
- 王 丹, 孙 军, 周 锋等, 2008. 2006 年 6 月长江口低氧区及邻近水域浮游植物. 海洋与湖沼, 39(6): 619—627
- 王江涛, 曹 婧, 2012. 长江口海域近 50a 来营养盐的变化及其对浮游植物群落演替的影响. 海洋环境科学, 31(3): 310—315
- 王金辉, 2002. 长江口 3 个不同生态系的浮游植物群落. 青岛海洋大学学报, 32(3): 422—428
- 王金辉, 黄秀清, 刘阿成等, 2004. 长江口及邻近水域的生物多样性变化趋势分析. 海洋通报, 23(1): 32—39
- 刘海娇, 傅文诚, 孙 军等, 2015. 2009—2011 年东海陆架海域网采浮游植物群落的变化. 海洋学报, 37(10): 106—122
- 孙 军, 刘东艳, 2004. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用. 海洋学报, 26(1): 62—75
- 江志兵, 曾江宁, 李宏亮等, 2014. 长江口及其邻近陆架区夏季网采浮游植物及其影响因素. 海洋学报, 36(6): 112—123
- 何 青, 孙 军, 2009. 长江口及其邻近水域网采浮游植物群落. 生态学报, 29(7): 3928—3938
- 张 璇, 2012. 长江口及邻近海域营养盐的历史演变及其在赤潮中的作用研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文
- 张桂成, 2015. 长江口及其邻近海域溶解有机氮的生物可利用性及其在赤潮爆发过程中的作用研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 2015
- 李 云, 李道季, 唐静亮等, 2007. 长江口及毗邻海域浮游植物的分布与变化. 环境科学, 28(4): 719—729
- 辛 明, 2014. 长江口海域关键环境因子的长期变化及其生态效应. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文
- 周名江, 颜 天, 邹景忠, 2003. 长江口邻近海域赤潮发生区基本特征初探. 应用生态学报, 14(7): 1031—1038
- 国家海洋局, 2005. 2004 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 国家海洋局, 2006. 2005 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 国家海洋局, 2007. 2006 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 国家海洋局, 2008. 2007 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 国家海洋局, 2009. 2008 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 国家海洋局, 2010. 2009 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 国家海洋局, 2011. 2010 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 国家海洋局, 2012. 2011 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 国家海洋局, 2013. 2012 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 国家海洋局, 2014. 2013 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 国家海洋局, 2015. 2014 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 国家海洋局, 2016. 2015 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 国家海洋局, 2017. 2016 年中国海洋环境质量公报. 北京: 国家海洋局
- 林 梅, 李 杨, 2017. 长江口海域春季浮游植物的年际变化. 海洋与湖沼, 48(2): 303—311
- 林峰竹, 吴玉霖, 于海成等, 2008. 2004 年长江口浮游植物群落结构特征分析. 海洋与湖沼, 39(4): 401—410
- 范 丽, 程金平, 郭广勇, 2008. 长江口污染物种类及其来源. 江苏环境科技, 21(S1): 10—12, 15
- 赵 冉, 孙 军, 宋书群等, 2013. 2006 年春季长江口及其邻近水域浮游植物[J]. 海洋通报, 32(4): 421—428
- 唐峰华, 伍玉梅, 樊伟等, 2010. 长江口浮游植物分布情况及与径流关系的初步探讨. 生态环境学报, 19(12): 2934—2940
- 栾青衫, 孙 军, 宋书群等, 2007. 长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析. 植物生态学报, 31(3): 445—450
- 栾青衫, 孙 军, 2010. 2005 年夏季长江口水域浮游植物群落特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 30(18): 4967—4975
- 郭 皓, 2004. 中国近海赤潮生物图谱. 北京: 海洋出版社
- 郭术津, 2012. 东海浮游植物群落研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文
- 章飞燕, 2009. 长江口及邻近海域浮游植物群落变化的历史对比及其环境因子研究. 上海: 华东师范大学硕士毕业论文
- Gao X L, Song J M, 2005. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China. Marine Pollution Bulletin, 50(3): 327—335
- Jiang Z B, Liu J J, Chen J F *et al*, 2014. Responses of summer phytoplankton community to drastic environmental changes in the Changjiang (Yangtze River) estuary during the past 50 years. Water Research, 54: 1—11
- Jiang Z B, Chen J F, Zhou F *et al*, 2015. Controlling factors of summer phytoplankton community in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent East China Sea shelf. Continental Shelf Research, 101: 71—84
- Kong F Z, Xu Z J, Yu R C *et al*, 2016. Distribution patterns of phytoplankton in the Changjiang River estuary and adjacent waters in spring 2009. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 34(5): 902—914
- Yang S, Han X R, Zhang C S *et al*, 2014. Seasonal changes in phytoplankton biomass and dominant species in the Changjiang River Estuary and adjacent seas: general trends based on field survey data 1959—2009. Journal of Ocean University of China, 13(6): 926—934
- Zhu Z Y, Ng W M, Liu S M *et al*, 2009. Estuarine phytoplankton dynamics and shift of limiting factors: A study in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent area. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 84(3): 393—401

DISTRIBUTION OF SUMMER COMMUNITY OF NET-COLLECTED PHYTOPLANKTON FROM 2004 TO 2016 AND THE FACTORS IN THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY

HUANG Hai-Yan, WANG Qiu-Lu, XU Yan, LIU Jie, QU Yan-Min
(National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China)

Abstract Based on ecological environment survey data collected in the Changjiang (Yangtze) River estuary ecological monitoring area in summer from 2004 to 2016, the interannual variation of net-collected phytoplankton and its relationship to environmental factors were studied. Seven phyla including 263 species of phytoplankton were identified and dominated by diatoms, followed by dinoflagellates. In the past 13 years, the number of species tended to increase; the contribution of diatom diversity to total phytoplankton diversity declined, and the proportion of dinoflagellates diversity increased correspondingly. The cell abundance of the total species, including diatom and dinoflagellates displayed an increasing trend. The diatom cell abundance dominated except for 2014, and the distribution and variation patterns were consistent with the total cell abundance in the rest of the year. The horizontal distribution pattern of cell abundance and its interannual variation were affected by circulation change and water consumption. The cell abundance was relatively low in the estuary and increased toward the open sea; the overall cell abundance increased gradually but fluctuated in some years. The biodiversity slightly decreased, and the community composition changed greatly in temporal and spatial scopes. Only a few species remained stable during the period, and most could be detected occasionally. *Skeletonema costatum* was dominant species in at least 10 years. Of 41 common species, 31 showed an increasing trend and 10 decreased in cell abundance. In addition, phytoplankton cell abundance was correlated with phosphate and inorganic nitrogen. The species number and diversity index were related to 10 out of 13 studied environmental factors, exclusive of dissolved oxygen, ammonia nitrogen, and chlorophyll *a*. This study would be of great significance to understand the current situation and evolution trend of phytoplankton.

Key words Changjiang River estuary; phytoplankton; interannual variation; influential factors