

文章编号: 1674-5566(2019)05-0689-10

DOI:10.12024/jsou.20181002414

## 长江口浮游植物群落结构的特征

上官欣欣<sup>1,2</sup>, 薛俊增<sup>1,2</sup>, 吴惠仙<sup>1,2</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 港航生态安全研究中心, 上海 201306)

**摘要:** 研究了长江口南、北支浮游植物的空间分布特征。共采集到浮游植物 157 种, 隶属 8 门 71 属, 平均细胞密度  $3.31 \times 10^5$  个/L。其中硅藻门为主要优势类群, 共 25 属 61 种, 占浮游植物总种类数的 39%。主要优势种为蓝藻门的湖泊鞘丝藻, 常见种为蓝藻门的阿氏颤藻、两栖颤藻、小颤藻、绿藻门的小球藻, 以及硅藻门的中肋骨条藻。浮游植物细胞密度在  $3.27 \times 10^4 \sim 1.50 \times 10^6$  个/L, 南北支水域以及主河道水域没有差别。各样点的均匀度指数变化比较平稳; 多样性指数变化和丰富度指数变化一致, 南支水域显著高于北支和主河道水域。统计分析浮游植物与环境因子相关性显示: 物种数和总细胞丰富度分别与温度、叶绿素 a 显著正相关, 与盐度显著负相关; 多样性指数和均匀度指数分别与温度、叶绿素 a 显著正相关, 与电导率显著负相关; 蓝藻细胞密度与温度显著正相关, 与溶氧量、盐度显著负相关; 硅藻细胞密度与电导率显著正相关, 与温度显著负相关。对调查水域浮游植物种类和密度的分布影响较为显著的环境因子为盐度、电导率、溶氧量、温度和叶绿素 a。因此, 长江口环境因子的不同影响浮游植物群落结构的时空变化。

**关键词:** 长江口; 浮游植物; 群落结构; 环境因子

**中图分类号:** Q 948.8; S 917 **文献标志码:** A

浮游植物是指生活史的一部分或全部在海洋、湖泊、池塘或河流中漂浮生活的光合自养生物<sup>[1]</sup>, 是河口生态系统的初级生产者, 处于食物链营养级的基础, 直接或间接地为河口水域和沉积物中的浮游动物、鱼虾类及其幼体提供主要的食物来源。浮游植物的物种组成、群落结构特征及分布不仅可以直接影响水域生态系统, 而且可以改善水体的物质循环、能量流动和自我净化效率, 以及能够调节水域生态系统的平衡<sup>[2-5]</sup>。另外, 水体环境条件的变化也会引起浮游植物群落特征的变化, 例如水温、溶氧量和 pH 等非生物因素变化会使浮游植物的种类和数量升高或降低, 一些生物因素如鱼的捕食等也会引起浮游植物的改变<sup>[6-7]</sup>。

长江口地处中国东部沿海地区, 是我国最大的入海河口。长江口周边的发展以及受径流、潮汐、沿岸流和降水等多方面环境因子的影响, 给该

区域环境造成巨大的压力, 富营养化和赤潮问题严重<sup>[8-10]</sup>。长江口南支水域流量大, 受长江径流影响较为明显, 一般显示出明显的淡水特性, 北支水域受长江径流影响较小, 主要受潮流的影响, 含盐度显著高于南支, 显示出一定的海水特征, 这就形成了南北支水域中浮游植物结构组成的差异<sup>[9-12]</sup>。关于长江口及其附近海域的浮游植物群落结构与时空分布等有较多的研究<sup>[13-18]</sup>, 但目前的研究一般集中于长江口的南支水域<sup>[2, 16]</sup>、北支水域<sup>[19-20]</sup>以及邻近海域<sup>[2, 21]</sup>, 没有对南、北分支及分支前主河道的浮游植物进行较为全面的比较。笔者通过对长江口南、北分支和分支前主河道的浮游植物进行调查, 分析在长江口复杂水文条件下不同水域浮游植物群落结构特征, 探讨影响浮游植物分布的影响因子, 以期丰富对河口浮游植物与环境关系的认识。

收稿日期: 2018-10-18 修回日期: 2019-02-14

基金项目: 上海市海洋局项目(沪海科 2017-06); 海洋公益性行业科研专项(2010418013); 上海市科委科研计划项目(17DZ1202905)

作者简介: 上官欣欣(1989—), 女, 博士, 研究方向为海洋生态学、海洋生物学。E-mail: shangguanxin0409@163.com

通信作者: 吴惠仙, E-mail: hxwu@shou.edu.cn

## 1 材料与方 法

### 1.1 样 本 的 采 集 和 处 理

依据《海洋监测规范》<sup>[22]</sup> 相关内容,于 2010 年 8 月至 2010 年 9 月在长江河口口门内水域潮下带开展水环境因子的监测和浮游植物的采样。根据当地的水动力学和泥沙沉积情况等环境特征,共设置 7 个采样断面 18 个采样点,主要集中在长江口口门段内的潮下带水域,包括 9 个南支采样点、6 个北支采样点以及 3 个主河道采样点,采样点具体分布如图 1 所示。

水温、盐度、电导率、pH、溶解氧等指标使用 YSI(85-25) 手持式野外水质检测仪进行现场测定。取水样装入 1 L 聚乙烯瓶中常温保存,用于叶绿素 a 和悬浮物测定。叶绿素 a 按《海湾生态系统观测方法》测定。悬浮物采用重量法测定。浮游植物定量样品采用浮游植物采水器采集表层水 1 L,采集后立即滴加 15 mL Lugol's 碘液进行固定,并带回实验室,静置沉淀 48 h 弃上清,浓缩至 50 mL 后滴加福尔马林保存,显微镜镜检,进行浮游植物的物种鉴定和计数<sup>[23-25]</sup>。

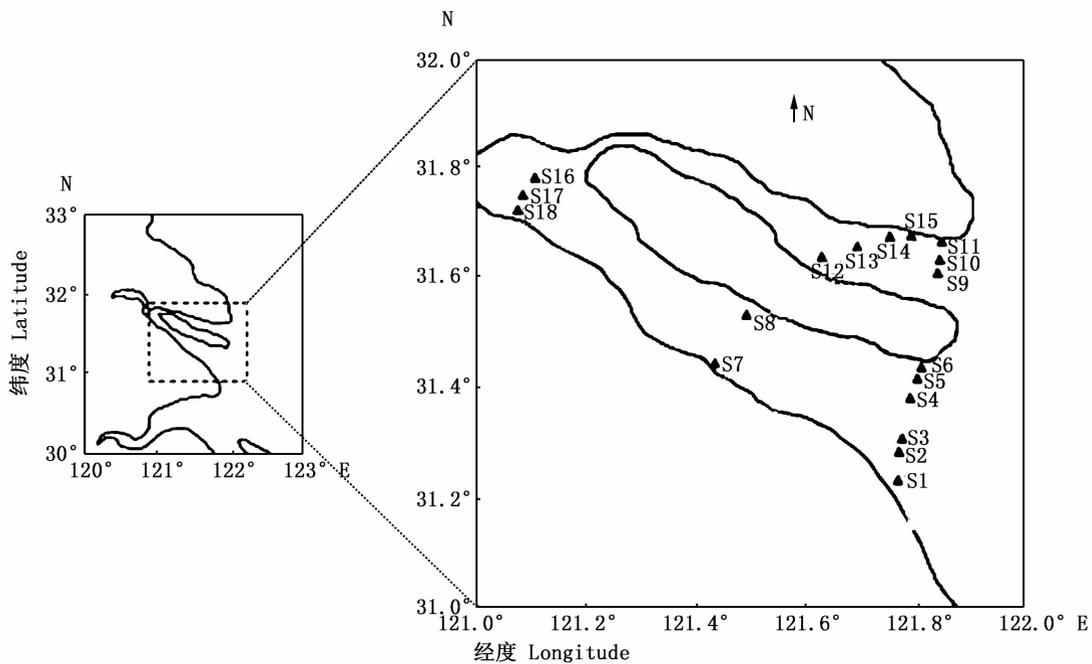


图 1 长江口浮游植物采样断面分布示意图

Fig. 1 The sampling stations in the Yangtze River Estuary

### 1.2 数 据 分 析

物种优势种用优势度指数表示,公式为

$$Y = n_i / N \times f_i \quad (1)$$

式中: $n_i$  为第  $i$  种物种个体数, $N$  为总个体数, $f_i$  为第  $i$  种物种在总站点中出现频率。当  $Y > 0.02$  时,表示该物种为优势种。

物种多样性指数 ( $H'$ ) 的计算采用香农-威纳指数 (Shannon-Wiener index),公式为

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \lg P_i \quad (2)$$

物种丰富度指数 ( $D$ ) 采用 Margalef 的计算公式:

$$D = \frac{S-1}{\ln N} \quad (3)$$

物种均匀度指数 ( $J$ ) 采用 Pielou 的计算公式:

$$J = H' / \log_2 S \quad (4)$$

式中: $S$  为样品中的种类总数, $N$  为样品中所有种类的总个体数, $P_i$  为第  $i$  个物种的个体数与样品中的总个体数的比值。

通过数据分析软件 PASW Statistics 18.0 对长江口南支、北支以及主河道浮游植物细胞密度进行 One-way ANOVA 分析和浮游植物细胞密度与环境因子 Pearson 相关性分析。

采用国际标准通用软件 Canoco for Windows 4.5 软件,对长江口浮游植物数据和环境因子进行典范应对分析 (canonical correspondence analysis, CCA)。排序之前,对物种数据进行筛选,用于排序的物种,其密度占总密度比例  $\geq$

5%,筛选过后用于 CCA 分析的浮游植物物种编号见表 1。用于分析的环境因子有溶氧(DO)、温度(Tm)、电导率(Conductivity)、盐度(salinity)、pH、叶绿素 a(Chl. a)和悬浮物(TSS)。

表 1 长江口 CCA 分析中的浮游植物编号  
Tab.1 Codes of phytoplankton species for CCA

编号 No.	中文名 Name	拉丁名 Latin name	编号 No.	中文名 Name	拉丁名 Latin name
P1	湖泊鞘丝藻	<i>Lyngbya limnetica</i>	P8	小环藻	<i>Cyclotella</i> sp.
P2	小颤藻	<i>Oseillatoria tenuis</i>	P9	小型黄丝藻	<i>Tribonema minus</i>
P3	极大螺旋藻	<i>Spirulina maxima</i>	P10	意大利直链藻	<i>Melosira italica</i>
P4	两栖颤藻	<i>Oseillatoria amphibia</i>	P11	阿氏颤藻	<i>Oseillatoria agardhii</i>
P5	小席藻	<i>Phormidium tenu</i>	P12	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>
P6	具缘微囊藻	<i>Microcystis marginata</i>	P13	鼓球藻	<i>Desmocapsa</i> sp
P7	小球藻	<i>Chlorella vulgaris</i>			

## 2 结果与分析

### 2.1 浮游植物种类组成

18 个采样点采集的浮游植物样品,共鉴定到浮游植物 8 门,71 属,157 种。其中:硅藻门种类最多达 61 种,占总种类数的 39%;其次为绿藻门 41 种,占 26%;蓝藻门 35 种,占 22%;裸藻门 7 种,占 4%;甲藻门 6 种,占 4%;黄藻门 4 种,占

3%;金藻门 2 种,占 1%;隐藻门 1 种,占 1%。对各样点的种类数进行统计(图 2),平均物种数为 32 种,其中:南支水域的 S1 样点的物种数最多,为 57 种;北支水域的 S13 样点的物种数最少,仅有 19 种。结果显示南支水域的浮游植物种类数较多,北支水域和主河道水域的种类数相对较少,可达极显著差异( $P < 0.01$ )。

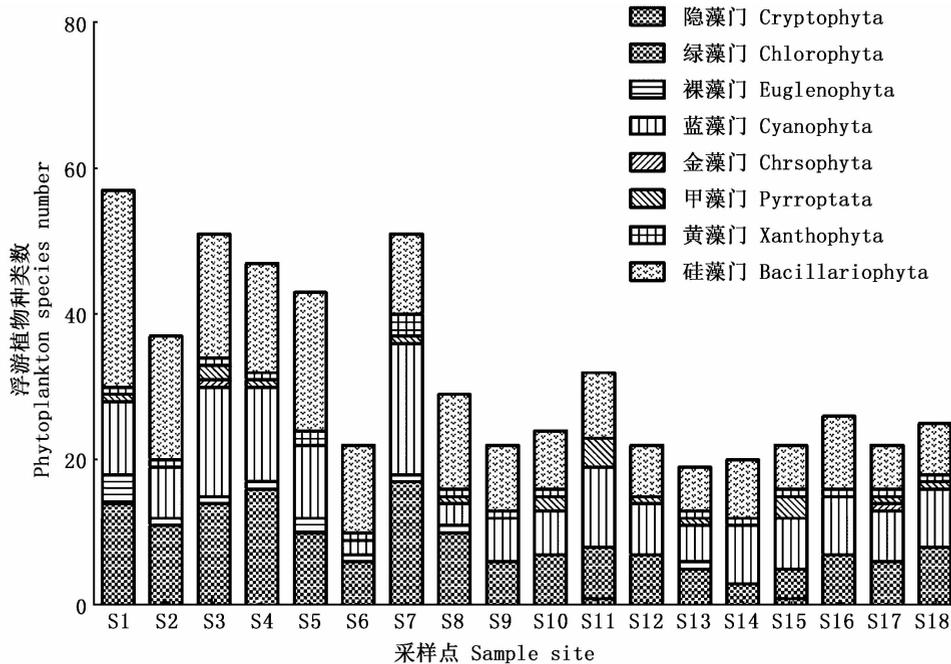


图 2 长江口各样点浮游植物种类数变化

Fig.2 Variation in the number of phytoplankton species at the stations in the Yangtze River estuary

## 2.2 各水域的浮游植物优势藻类

对长江口各取样点的优势种进行分析(表2),发现南支和主河道水域的优势种都来自蓝藻门,而北支的优势种来自硅藻门。蓝藻门的湖泊鞘丝藻(*Lyngbya limnetica*)是全年优势种中优势

度最高的,常见种为蓝藻门的阿氏颤藻(*Oseillatoria agardhii*),两栖颤藻(*amphibia*),小颤藻(*Oseillatoria tenuis*),绿藻门的小球藻(*Chlorella vulgaris*),以及硅藻门 *Oseillatoria* 的中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)。

表2 长江口浮游植物各样点优势种、平均细胞密度及优势度

Tab.2 The dominant species, average abundance and dominance of phytoplankton in the Yangtze River Estuary

采样点 Sample site	优势种 Dominant species	拉丁名 Latin name	细胞密度 Abundance/(个/L)	占细胞密度百分比 Percent in cell abundance	优势度 Dominance
南支 South branch S1-S8	湖泊鞘丝藻	<i>Lyngbya limnetica</i>	$5.42 \times 10^5$	13.53%	0.13
	小颤藻	<i>Oseillatoria tenuis</i>	$3.49 \times 10^5$	8.70%	0.06
	两栖颤藻	<i>Oseillatoria amphibia</i>	$3.64 \times 10^5$	9.08%	0.04
	具缘微囊藻	<i>Microcystis marginata</i>	$1.46 \times 10^6$	36.37%	0.04
	极大螺旋藻	<i>Spirulina maxima</i>	$2.70 \times 10^5$	6.73%	0.03
北支 North branch S9-S15	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>	$1.02 \times 10^6$	56.57%	0.27
	小环藻	<i>Cyclotella</i> sp.	$2.31 \times 10^5$	12.79%	0.13
	阿氏颤藻	<i>Oseillatoria agardhii</i>	$2.35 \times 10^5$	12.98%	0.07
	湖泊鞘丝藻	<i>Lyngbya limnetica</i>	$8.90 \times 10^4$	4.92%	0.05
主河道 The main river S16-S18	湖泊鞘丝藻	<i>Lyngbya limnetica</i>	$2.36 \times 10^5$	42.81%	0.41
	极大螺旋藻	<i>Spirulina maxima</i>	$6.82 \times 10^4$	12.38%	0.06
	阿氏颤藻	<i>Oseillatoria agardhii</i>	$5.87 \times 10^4$	10.66%	0.06
	小颤藻	<i>Oseillatoria tenuis</i>	$1.70 \times 10^4$	3.09%	0.02

## 2.3 浮游植物的多样性

2010年长江口环岛采样个体数最多的样点为S6(图3),其个体数量达到 $1.50 \times 10^6$ 个/L,个体数最少的样点为S8,其个体数量为 $3.27 \times 10^4$

个/L,18个样点的平均个体数为 $3.31 \times 10^5$ 个/L。在植物细胞密度方面,南北支水域以及主河道水域没有差别。

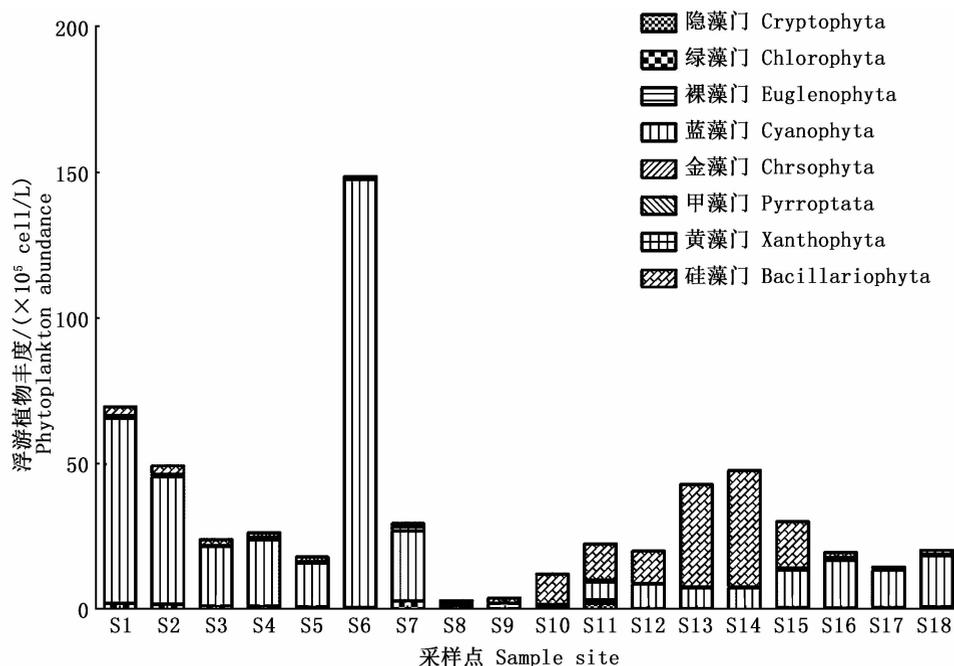


图3 长江口各样点浮游植物细胞密度变化

Fig.3 The variations of cells density of phytoplankton species at the stations in the Yangtze River Estuary

分析 Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数结果见图 4。各样点的均匀度指数变化比较平稳,仅在 S6 样点偏低,达 0.06,其余各样点均在 0.30~0.79 之间波动,S8 样点的均匀度最高,达到了 0.79;丰富度指数变化较大,在 1.45~4.16 之间:南支的丰富度指数偏高,平均为 3.38,最高点出现在 S1 样

点,为 4.16;北支和主河道的丰富度指数较低,分别为 1.82 和 1.93,最低点为 S14 样点的 1.453。Shannon-Wiener 多样性指数变化和丰富度指数变化比较一致:南支的多样性指数除 S6 样点外,整体较高( $H' > 2$ ),平均为 2.15;北支和主河道的多样性指数偏低,平均为 1.57 和 1.84。

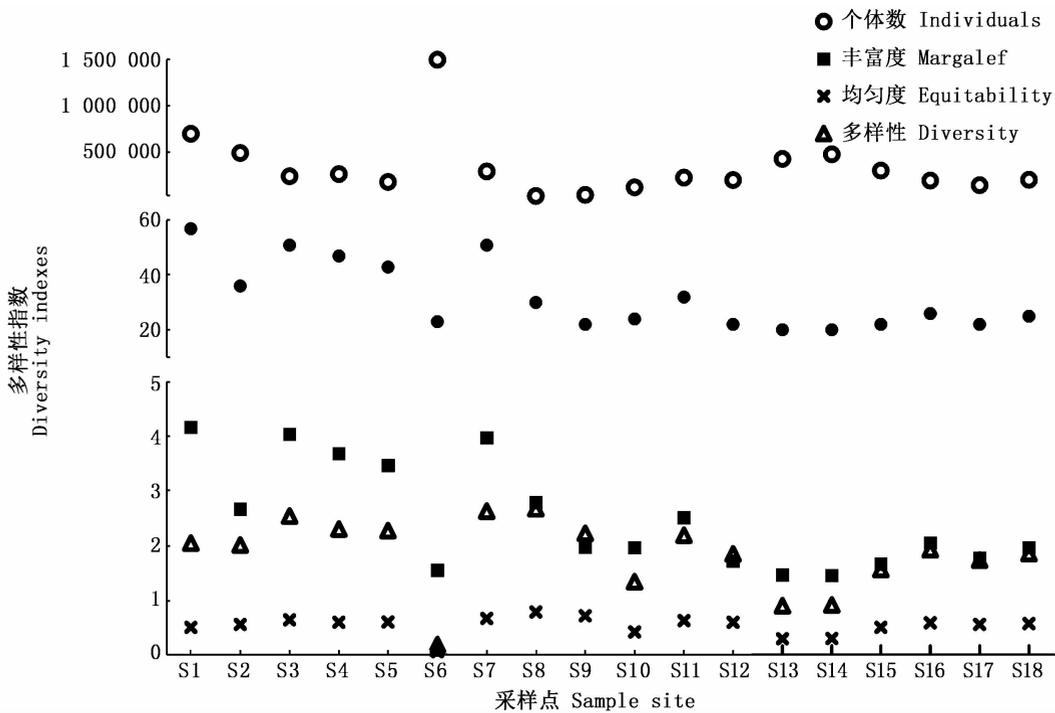


图 4 长江口浮游植物多样性指数变化

Fig. 4 The diversity index variation of phytoplankton species at the stations in the Yangtze River Estuary

#### 2.4 群落结构与环境相关性分析

在长江口河口口门内水域潮下带 18 个采样点所检测到的环境因子中,各样点溶氧量浓度的变化范围为 3.60~6.62 mg/L,平均值为 5.06 mg/L;各样点电导率的变化范围为 8.31~3 042.33 ms,平均值为 566.48 ms;各样点水温的变化范围为 25.50~32.37 °C,平均值为 29.39 °C,各样点之间水温的差异较小;各样点盐度的变化范围为 0.20~8.31,南北支盐度差异较大,南支和主河道的盐度均为 0.20,北支的盐度平均为 5.76;pH 的变化范围为 8.17~8.78,平均值为 8.50,变幅较小;各样点叶绿素 a 浓度的变化范围为 0.56~2.67 μg/L,平均值为 1.59 μg/L。

利用 PASW Statistics 18.0 分析软件对各个样点的溶氧量、温度、电导率、盐度、pH、叶绿素 a 的六项相关环境因子与物种数、Margalef 丰富度指数、多样性指数、均匀度指数、蓝藻细胞密度、硅藻细胞密度共 13 项进行 Pearson 相关性分析(表 3),结果如下:物种数和丰富度指数分别与温度、叶绿素 a 显著正相关,与盐度显著负相关;多样性指数和均匀度指数分别与温度、叶绿素 a 显著正相关,与电导率显著负相关;蓝藻细胞密度与温度显著正相关,与溶氧量、盐度显著负相关;硅藻细胞密度与电导率显著正相关,与温度显著负相关。

表 3 长江口浮游植物群落与环境因子 Pearson 相关性分析

Tab. 3 The Pearson correlation analysis between phytoplankton abundance and environmental factors

	溶氧量 Do	温度 Tm	电导率 conductivity	盐度 salinity	pH pH	叶绿素 a Chl. a	物种数 Species	丰富度指数 Total cell abundance	多样性指数 diversity index	均匀度指数 Homogeneity index	蓝藻细胞密度 cell abundance of Cyanophyta	硅藻细胞密度 cell abundance of Bacillariophyta
溶氧量 DO	1											
温度 Tm	-0.558 *	1										
电导率 Conductivity	-0.121	-0.235	1									
盐度 Salinity	0.604 **	-0.793 **	-0.357	1								
pH pH	0.613 **	-0.550 *	0.06	0.435	1							
叶绿素 a Chl. a	-0.126	0.313	-0.255	-0.116	0.097	1						
物种数 Species	-0.405	0.556 *	-0.223	-0.496 *	-0.062	0.525 *	1					
丰富度指数 Total cell abundance	-0.391	0.588 *	-0.276	-0.485 *	-0.043	0.577 *	0.988 **	1				
多样性指数 Diversity index	-0.19	0.608 **	-0.609 **	-0.243	0.001	0.650 **	0.686 **	0.767 **	1			
均匀度指数 Homogeneity index	-0.049	0.490 *	-0.689 **	-0.042	-0.015	0.570 *	0.385	0.490 *	0.932 **	1		
蓝藻细胞密度 Cell abundance of Cyanophyta	-0.475 *	0.474 *	-0.072	-0.477 *	-0.448	0.249	0.684 **	0.593 **	0.23	-0.012	1	
硅藻细胞密度 Cell abundance of Bacillariophyta	0.244	-0.700 **	0.795 **	0.221	0.387	-0.422	-0.497 *	-0.560 *	-0.817 **	-0.812 **	-0.309	1

注: \* 指相关性显著 ( $P < 0.05$ ); \*\* 指相关性极显著 ( $P < 0.01$ )

Notes: \* means that the correlation is significant ( $P < 0.05$ ); \*\* means that the correlation is extremely significant ( $P < 0.01$ )

## 2.5 浮游植物种类与环境因子关系

用 CCA 对 13 种浮游植物(表 1)和 7 种环境因子的关系进行分析,前两个排序轴的特征值为 0.768 和 0.481,浮游植物和环境因子相关系数分别为 0.970 和 0.758,说明排序图能够很好地反映物种与环境的关系。前两个排序轴所能解释的浮游植物种类与环境之间关系的解释量为 76.4%。对物种与环境因子排序,盐度( $r = 0.6137$ )、电导率( $r = 0.5831$ )、溶氧量( $r = 0.6248$ )与轴 1 表现出较高的正相关性,温度( $r = -0.8973$ )、叶绿素 a( $r = -0.6692$ )与轴一表现出较高的负相关性。因此对调查水域浮游植物种类和密度的分布影响较为显著的环境因子为:盐度、电导率、溶氧量、温度和叶绿素 a。

浮游植物物种分布与环境因子综合作用下呈分化现象,位置相近物种对环境条件的适应性比较一致。如图 5 所示,南支水域的主要优势种湖泊鞘丝藻(*Lyngbya limnetica*)、小颤藻(*Oseillatoria tenuis*)、极大螺旋藻(*Spirulina*

*maxima*)、两栖颤藻(*Oseillatoria amphibia*)、小席藻(*Phormidium tenu*)集中分布,都受到温度的正相关影响,与盐度、电导率呈负相关;北支水域的主要优势种小环藻(*Cyclotella* sp.)、阿氏颤藻(*Oseillatoria agardhii*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)受电导率、盐度的正相关影响。具缘微囊藻(*Microcystis marginata*)受悬浮物的正相关影响。

## 3 讨论

### 3.1 长江口不同水域浮游植物群落特征

由于环境特征的不同,长江口的不同水域的浮游植物组成差异较为明显:长江口南支水域,夏季降水丰富,入海径流多,河流淡水稀释作用强,使盐度降低,该区域的优势种主要为淡水藻,如蓝藻门的湖泊鞘丝藻,由于夏季水温也较高,也适合蓝藻的生长<sup>[26]</sup>;长江口北支水域的径流量明显少于南支,受潮汐的影响大,形成了独特的高盐水域环境,在这种河口淡水与海水交界区域,

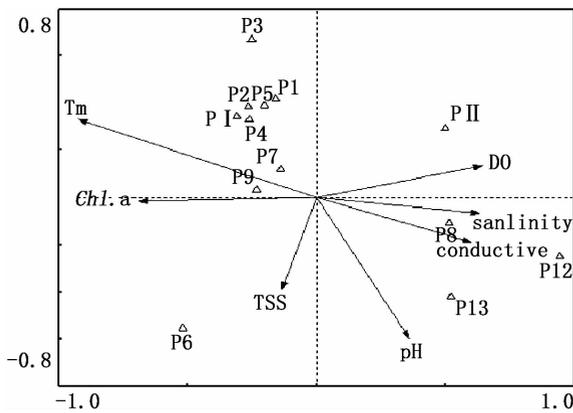


图5 浮游植物物种和环境因子的 CCA 排序图

Fig. 5 CCA biplot of phytoplankton species and environmental variables in the Yangtze River Estuary

出现了与长江口邻近海域相同的优势种中肋骨条藻<sup>[27-28]</sup>,中肋骨条藻是广温广盐的典型代表种,适宜在该盐度多变的环境中生存;在南北支分支前的主河道水域,由于盐度与南支水域相似,其优势种也是蓝藻门的湖泊鞘丝藻。

长江口在长江径流和倒灌海水等水流的共同作用下,水环境极其复杂。南北支的径流量和盐度等差异造成浮游植物群落空间分布的差异。对夏季长江口浮游植物的 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数分析,各样点物种多样性和丰富度变化趋势基本相同,南支水域的物种数和丰富度显著高于北支水域和主河道水域。

### 3.2 浮游植物群落特征和环境因子的关系

另外,浮游植物的群落特征及变化也受温度、叶绿素 a 等多个环境因子综合作用的影响<sup>[29-30]</sup>。以细胞密度为物种变量,研究了浮游植物与环境因子之间的相关性,结果显示细胞密度分别与温度和叶绿素 a 显著正相关。在 CCA 分析中,温度也是影响浮游植物的显著性环境因子,主要是因为温度变化会影响浮游植物细胞新陈代谢的速率,也会对生物体内酶的活性和细胞分裂周期等造成不同程度的影响,特别是在水体环境中,温度变化幅度比陆地温度变化相对较小,导致水生生物缺乏相应的温度补偿机制,因此浮游植物的细胞密度与温度有一定的相关性<sup>[31-32]</sup>。蓝藻细胞密度与温度呈正相关,而硅藻细胞密度与温度呈负相关,这与之前的对长江口破碎带硅藻细胞与温度呈负相关的研究结果一

致<sup>[33]</sup>。水域的环境因子可以影响水体叶绿素 a 的分布,同时叶绿素 a 也是反映该水域生态系统现状的重要指标。有研究表明在长江口丰水期,最高叶绿素 a 含量与浮游植物最大数量同时出现于长江口冲淡水区<sup>[32]</sup>。物种数、总细胞丰富度、多样性指数和均匀度指数均与叶绿素 a 显著正相关。盐度效应主要是由于长江口受陆地径流和外海高盐水共同影响,造成南北盐度差异较大,从而对浮游植物分布和种类组成产生重要影响。在调查水域,盐度较低的南支和主河道水域的优势种都来自蓝藻门的淡水藻,而盐度较高的北支的优势种则来自硅藻门的广温广盐藻。CCA 分析结果表明盐度对不同的藻类的生长影响不同,因此,浮游植物群落与它们生长的水体环境息息相关,不同的浮游植物对于同一环境反应不同,不同环境因子的排列组合也会影响浮游植物的生长。

### 参考文献:

- [1] 钱树本,陈国蔚. 浮游植物生态[J]. 山东海洋学院学报, 1986(2): 26-55, 85-86.  
QIAN S B, CHEN G W. Phytoplankton ecology[J]. Journal of Ocean University of Shandong, 1986(2): 26-55, 85-86.
- [2] 林峰竹,吴玉霖,于海成,等. 2004 年长江口浮游植物群落结构特征分析[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(4): 401-410.  
LIN F Z, WU Y L, YU H C, et al. Phytoplankton community structure in the Changjiang estuary and its adjacent waters in 2004 [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2008, 39(4): 401-410.
- [3] MALLIN M A, CAHOON L B, MCIVER M R, et al. Alternation of factors limiting phytoplankton production in the Cape Fear River Estuary[J]. Estuaries, 1999, 22(4): 825-836.
- [4] FLEMING-LEHTINEN V, LAAMANEN M, KUOSA H, et al. Long-term development of inorganic nutrients and chlorophyll  $\alpha$  in the open northern Baltic Sea[J]. Ambio: A Journal of the Human Environment, 2008, 37(2): 86-92.
- [5] FRONEMAN P W. Feeding studies on selected zooplankton in a temperate estuary, South Africa[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, 51(5): 543-552.
- [6] 周绪申,李慧峰,潘曼曼,等. 海河蓝藻暴发期间浮游植物群落结构分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(1): 63-65.  
ZHOU X S, LI H F, PAN M M, et al. Study on phytoplankton community during the cyanobacteria bloom in Haihe river[J]. Yellow River, 2013, 35(1): 63-65.
- [7] 孙晓庆,董树刚,汤志宏. 营养盐和光照对浮游植物群落结构的影响[J]. 南方水产, 2008, 4(1): 1-9.

- SUN X Q, DONG S G, TANG Z H. Influences of nutrients and illuminance on phytoplankton community structure[J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(1): 1-9.
- [8] 刘录三, 李子成, 周娟, 等. 长江口及其邻近海域赤潮时空分布研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(9): 2497-2504.
- LIU L S, LI Z C, ZHOU J, et al. Temporal and spatial distribution of red tide in Yangtze River estuary and adjacent waters[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(9): 2497-2504.
- [9] 张桂成. 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[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- ZHANG G C. Bioavailability of dissolved organic nitrogen and its role during the outbreak of harmful algal blooms in Changjiang River Estuary and its adjacent sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [10] 亢振军, 于仁成, 孔凡洲, 等. 长江口南部赤潮区春季表层沉积物中色素组成、含量与分布状况[J]. *海洋科学*, 2014, 38(10): 30-39.
- KANG Z J, YU R C, KONG F Z, et al. Pigment composition, content and distribution in surface sediment of the red-tide zone south to the Changjiang River estuary in spring[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(10): 30-39.
- [11] 曹民雄, 高正荣, 胡金义. 长江口北支水道水沙特性分析[J]. *人民长江*, 2003, 34(12): 34-36.
- CAO M X, GAO Z R, HU J Y. Analysis on flow and sediment characteristics of north branch of the Yangtze estuary[J]. *Yangtze River*, 2003, 34(12): 34-36.
- [12] 殷晓龙, 徐兆礼. 长江口南支、北支、北港及口外水域浮游动物群聚相似性[J]. *生态学报*, 2016, 36(18): 5621-5631.
- YIN X L, XU Z L. Similarity analysis of zooplankton assemblages among different zones in the Yangtze River estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18): 5621-5631.
- [13] GAO X L, SONG J M. Phytoplankton distributions and their relationship with the environment in the Changjiang Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(3): 327-335.
- [14] JIANG Z B, LIU J J, CHEN J F, et al. Responses of summer phytoplankton community to drastic environmental changes in the Changjiang (Yangtze River) estuary during the past 50 years[J]. *Water Research*, 2014, 54: 1-11.
- [15] 江志兵, 曾江宁, 李宏亮, 等. 长江口及其邻近陆架区夏季网采浮游植物及其影响因素[J]. *海洋学报*, 2014, 36(6): 112-123.
- JIANG Z B, ZENG J N, LI H L, et al. Distribution of net-phytoplankton community in summer and its influence factors in the Changjiang Estuary and adjacent continental shelf[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(6): 112-123.
- [16] 赵冉, 孙军, 宋书群. 2006年春季长江口及其邻近水域浮游植物[J]. *海洋通报*, 2013, 32(4): 421-428.
- ZHAO R, SUN J, SONG S Q. Phytoplankton in the Yangtze River estuary and its adjacent waters in spring 2006[J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(4): 421-428.
- [17] 何青, 孙军, 栾青杉, 等. 冬季长江口及其邻近水域的浮游植物[J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(4): 360-365.
- HE Q, SUN J, LUAN Q S, et al. Phytoplankton in Changjiang estuary and adjacent waters in winter[J]. *Marine Environmental Science*, 2009, 28(4): 360-365.
- [18] 王云龙, 袁骥, 沈新强. 长江口及邻近水域春季浮游植物的生态特征[J]. *中国水产科学*, 2005, 12(3): 300-306.
- WANG Y L, YUAN Q, SHEN X Q. Ecological character of phytoplankton in spring in the Yangtze River estuary and adjacent waters[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(3): 300-306.
- [19] 刘笑, 薛俊增, 吴惠仙. 长江口北支浮游植物群落结构周年变化特征[J]. *生物学杂志*, 2014, 31(3): 20-24, 28.
- LIU X, XUE J Z, WU H X. Annual variation of phytoplankton community in the north branch of the Yangtze River estuary[J]. *Journal of Biology*, 2014, 31(3): 20-24, 28.
- [20] 高月鑫, 江志兵, 曾江宁, 等. 春季长江口北支邻近海域浮游植物群落及其影响因素[J]. *海洋通报*, 2018, 37(4): 430-439.
- GAO Y X, JIANG Z B, ZENG J N, et al. Phytoplankton community in relation to environment factors off the north branch of the Yangtze River Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37(4): 430-439.
- [21] 李俊龙, 郑丙辉, 刘录三, 等. 长江口浮游植物群落特征及其与环境的响应关系[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(4): 403-409.
- LI J L, ZHENG B H, LIU L S, et al. Phytoplankton community structure in the Yangtze River estuary and its relation to environmental factors[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(4): 403-409.
- [22] 国家质量技术监督局. GB 17378—1998 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- The Quality and Technology Supervision Bureau. GB 17378—1998 The specification for marine monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [23] 程兆第, 高亚辉. 中国海藻志第五卷, 第二册, I-硅藻门, 羽纹纲, 等片藻目 曲壳藻目 褐指藻目 短缝藻目[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- CHENG Z D, GAO Y H. Chinese seaweed[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [24] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [25] 曾呈奎. 中国经济海藻志[M]. 北京: 科学出版社, 1962.
- ZENG C K. Chinese economic seaweed[M]. Beijing:

- Science Press, 1962.
- [26] 谭啸,孔繁翔,于洋,等. 升温过程对藻类复苏和群落演替的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(6): 578-582.  
TAN X, KONG F X, YU Y, et al. Effects of enhanced temperature on algae recruitment and phytoplankton community succession [J]. China Environmental Science, 2009, 29(6): 578-582.
- [27] 李俊龙,郑丙辉,刘录三,等. 长江口浮游植物群落特征及其与环境的响应关系[J]. 环境科学研究, 2013, 26(4): 403-409.  
LI J L, ZHENG B H, LIU L S, et al. Phytoplankton community structure in the Yangtze River estuary and its relation to environmental factors [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(4): 403-409.
- [28] 陈立婧,蒋琰,龚小玲. 长江口九段沙湿地近岸水域浮游植物群落结构的特征[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(1): 74-80.  
CHEN L J, JIANG Y, GONG X L. Characteristics of community structures of phytoplankton in the Jiuduansha inshore waters of the Yangtze River estuary [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(1): 74-80.
- [29] 辛明. 长江口海域关键环境因子的长期变化及其生态效应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.  
XIN M. Long-term variations of the key environmental factors and their ecological effects in the Changjiang Estuary [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [30] 韩秀荣. 长江口及邻近海域浮游植物生长的多环境效应因子影响解析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.  
HAN X R. Analytical study on multi-environment factors that influence the phytoplankton growth in the Changjiang Estuary and its adjacent area [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [31] 刘东艳. 胶州湾浮游植物与沉积物中硅藻群落结构演替的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.  
LIU D Y. Community structure succession study of phytoplankton and sediment diatom in Jiaozhou Bay [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [32] 李照. 长江口邻近海域浮游植物群落特征及其碳沉降研究[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2018.  
LI Z. Phytoplankton community and its related carbon sinking in the Changjiang ( Yangtze River ) estuary and adjacent waters [D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [33] 张松艳,王琼,薛俊增,等. 长江口碎波带浮游植物群落结构特征[J]. 生物学杂志, 2014, 31(3): 15-19.  
ZHANG S Y, WANG Q, XUE J Z, et al. Ecological features of phytoplankton community in the surf zones of the Yangtze River estuary [J]. Journal of Biology, 2014, 31(3): 15-19.

## Ecological features of phytoplankton community in the Yangtze River Estuary

SHANGGUAN Xinxin<sup>1,2</sup>, XUE Junzeng<sup>1,2</sup>, WU Huixian<sup>1,2</sup>

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Centre for Research on the Ecological Security of Ports and Shipping, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** We surveyed the spatial distribution characteristics of the phytoplankton community in the Yangtze River Estuary. A total of 157 species from 71 genera were identified and the average density were  $3.31 \times 10^5$  cells/L. Bacillariophyta was the dominant group, which was 61 species of 25 genera and its species number accounted for 39% of all species. *Lyngbya limnetica*, *Oseillatoria agardhii*, *Oseillatoria amphibia*, *Oseillatoria tenuis*, *Chlorella vulgaris* and *Skeletonema costatum* were the dominant species. Phytoplankton density ranged from  $3.27 \times 10^4$  to  $1.50 \times 10^6$  cells/L and there is no difference between the north branch, south branch and the main river. The homogeneity index between the north branch and the south branch varies little. The cell abundance and diversity index of the south branch are significantly higher than those of the north branch. The correlation analysis between phytoplankton and environmental factors showed that the species of phytoplankton and cell abundance were significantly positively correlated to temperature and chlorophyll a and were significantly negatively correlated to salinity. The diversity index and homogeneity index were significantly positively correlated to temperature and chlorophyll a and were significantly negatively correlated to conductivity. The cell abundance of Cyanophyta was significantly positively correlated to temperature and was significantly negatively correlated to dissolved oxygen and salinity. The cell abundance of bacillariophyta was significantly positively correlated to conductivity and was significantly negatively correlated to temperature. The environmental factors that have a significant impact on the distribution of phytoplankton species and density in the surveyed waters are salinity, conductivity, dissolved oxygen, temperature and chlorophyll a. Therefore, the environmental factors of the Yangtze River Estuary affect the spatial and temporal changes of phytoplankton community structure.

**Key words:** the Yangtze River Estuary; phytoplankton; ecological feature; environmental factor