

文章编号: 1674-5566(2019)05-0699-09

DOI:10.12024/jsou.20181002425

## 长江口北支贝类放流滩涂区潮下带水域浮游植物分析

叶海新<sup>1,2</sup>, 上官欣欣<sup>1,2</sup>, 毕子昊<sup>1</sup>, 潘为箴<sup>1</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:** 2012 年 9 月至 2013 年 6 月按季度对长江口北支贝类放流区外潮下带海域进行了浮游植物调查, 共鉴定出浮游植物 8 门 75 属 228 种, 其中硅藻门 153 种、绿藻门 25 种、蓝藻门 21 种、甲藻门 14 种、金藻门 2 种、黄藻门 2 种、隐藻门 2 种和裸藻门 9 种。不同季节浮游植物种类组成不同, 春季 6 门 31 属 73 种, 夏季 5 门 34 属 106 种, 秋季 7 门 61 属 111 种, 冬季 5 门 27 属 63 种。各季节丰度分别为春季  $3.78 \times 10^5$  个/L, 夏季  $7.93 \times 10^5$  个/L, 秋季  $3.72 \times 10^5$  个/L, 冬季  $1.14 \times 10^5$  个/L。对浮游植物与水化因子进行 CCA 典范应对分析, 结果显示悬浮物、浊度、营养盐对浮游植物丰度影响较大。由于贝类投放和环境因子的变化, 生态修复前后浮游植物种类组成变化显著, 各季节浮游植物种类数及丰度都有明显增加。

**关键词:** 长江口; 北支; 贝类; 生态放流; 浮游植物; 环境因子

**中图分类号:** Q 89; S 917 **文献标志码:** A

长江口是中国最大的河口<sup>[1]</sup>, 泥沙含量高, 透明度低<sup>[2]</sup>, 生物多样性丰富。长江口被崇明岛分为南北两支, 其中北支径流极小, 仅不超过上游来水量的 5%<sup>[3]</sup>, 水体盐度高于南支<sup>[4]</sup>, 水流缓慢, 沉积作用导致泥沙淤积并形成了大片的滩涂湿地。近年来在北支堤岸外约 70 km<sup>2</sup> 的潮间带滩涂开展贝类放流, 每 3 年放流 1 次大型底栖贝类, 进行生态和渔业资源修复。放流贝类均为土著栖息种类<sup>[5]</sup>, 每次投放泥螺 (*Bullacta exarata*) 1 000 t、彩虹明樱蛤 (*Moerella iridescens*) 2 000 t 以及缢蛏 (*Sinonovacula constricta*) 5 000 t。浮游植物是海洋生态系统中重要的初级生产者<sup>[6]</sup>, 在海洋生态系统的物质循环和能量流动中占据重要的地位<sup>[7]</sup>。河口位于河流和海洋的过渡地带, 受潮汐和河流径流的影响, 生态环境特殊<sup>[8-9]</sup>, 河口水域浮游植物有其特有的生态特点<sup>[10]</sup>, 因此国内外学者<sup>[11-15]</sup>对河口浮游植物种群时空分布状况以及主要环境因子对浮游植物多样性的影响有深入研究, 然而有关长江口的相关研究<sup>[15-26]</sup>主要

集中在长江口南支以及口外部分。在贝类放流前曾对长江口北支贝类放流区潮下带水域浮游植物进行过调查<sup>[18]</sup>, 是在放流 1 年后进行的, 通过对浮游植物组成及其与环境因子关系的分析, 为进一步研究贝类放流对周边水域的作用以及对长江口生态环境和生物多样性的保护提供基础依据。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 采样点设置

在长江口北支沿生态修复区设置 5 个采样点: S1 (31° 37. 769' N, 121° 46. 633' E)、S2 (31° 37. 670' N, 121° 47. 573' E)、S3 (31° 37. 008' N, 121° 48. 667' E)、S4 (31° 37. 550' N, 121° 49. 697' E)、S5 (31° 37. 371' N, 121° 50. 733' E) (图 1), 分别于 2012 年 9 月、2012 年 12 月、2013 年 3 月、2013 年 6 月进行浮游植物样本采集。样本采集时均在涨潮的时间段内。

收稿日期: 2018-10-30 修回日期: 2019-05-15

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); 上海市科委科研项目 (17DZ1202905)

作者简介: 叶海新 (1993—), 女, 硕士生, 研究方向为生态学。E-mail: 2373784314@qq.com

通信作者: 吴惠仙, E-mail: hxwu@shou.edu.cn

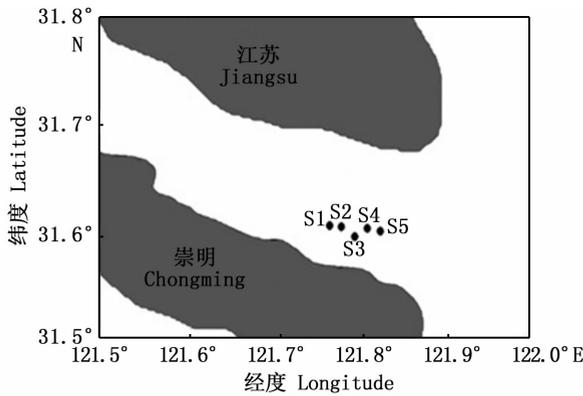


图1 采样点示意图

Fig. 1 The sampling sites in the north branch of the Yangtze River Estuary

## 1.2 浮游植物采集及理化指标测定

根据《海洋生态环境监测技术规程》<sup>[26]</sup>中浮游植物采样要求进行采样。采集表层水 1 L, 采集后立即滴加 15 mL 鲁哥氏液固定, 带回实验室静置沉淀 48 h 后弃去上清液浓缩并定容至 50 mL 后滴加福尔马林保存, 显微镜下进行浮游植物的分类和计数。种类鉴定参考《中国海藻志》《中国海洋浮游生物图谱》《海洋浮游藻类图谱》等。

同步分析亚硝氮 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、氨氮 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ )、硝氮 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、溶解氧 (DO)、总磷 (TP)、总氮 (TN)、水温 (T)、盐度 (Salinity)、浊度 (Turbidity) 和悬浮物 (TSS) 等环境因子。水温、盐度、溶解氧等水环境指标使用 YSI 85-25 现场检测。采集 1 L 水样带回实验室, 参考《海湾生态系统观测方法》<sup>[27]</sup>测定叶绿素 a, 根据《海洋监测规范: 海水分析》(GB/T 17378.4—2007)<sup>[28]</sup>进行现场处理以及其他水质指标检测。

## 1.3 数据分析

对样点浮游植物丰度和主要水体理化因子关系进行典范应对分析 (canonical correlation analysis, CCA)。其中, 用于排序的物种要满足该物种在各样点出现的频率大于 12.5%, 且在 1 个样点的相对密度大于等于 1%<sup>[29-31]</sup>。对物种丰度取对数 ( $\log_{10}$ ) 处理。对筛选出的浮游植物环境数据选取了亚硝氮 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、氨氮 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ )、硝氮 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、总磷 (TP)、浊度 (Turbidity)、悬浮物 (TSS)、叶绿素 a (*Chl. a*) 和温度这 8 个参数。环境数据使用原始数据, CCA 分析通过 R 语言完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子

水体温度季节变化显著, 与气温的季节变化相一致; 同一季节, 各样点间的温度差异不显著 (图 2a)。盐度季节变化明显, 表现为春季高, 夏秋冬季低的趋势; 冬季从 S1 ~ S5, 盐度逐渐降低, 可能与本次调查期间靠近 S5 的北八淞河开闸放水影响有关 (图 2b)。pH 季节变化明显, 表现为夏季低, 秋冬春季高的趋势; 除冬季外其他样点间 pH 差异较小, 冬季从 S1 ~ S5, pH 逐渐降低 (图 2c)。溶解氧季节变化明显, 表现为夏季高, 冬季较高, 春秋季节低的趋势; 同一季节各样点间无显著差异 (图 2d)。悬浮物季节变化明显, 表现为秋季低春夏冬季高的趋势; 同一季节各样点之间秋季悬浮物差异不明显, 春季与夏季各样点之间变化趋势一致 (图 2f)。叶绿素 a 季节变化明显, 表现为秋季高春夏冬低的趋势; 同一季节各样点之间除秋季外差异不明显, 秋季 S1 样点明显低于 S2 ~ S5 (图 2g)。硝氮季节变化显著, 表现为夏、冬、秋、春依次降低的趋势; 除秋季外, 同一季节各样点之间差异较小, 秋季 S3 硝氮含量明显低于其他样点 (图 2h)。亚硝氮有明显的季节变化, 表现为秋、夏、冬、春依次降低的趋势 (图 2i)。氨氮季节变化明显, 表现为秋冬季较高夏秋季较低的趋势 (图 2j)。总磷季节差异显著, 表现为秋季高冬春季较低的变化趋势; 夏季 S1 ~ S5 含量逐渐升高, 冬季 S1、S2 含量较低, S3 ~ S5 差异较小, 春季 S3 样点明显高于其他样点 (图 2k)。从整体上看各水体理化因子季节变化显著, 同一季节各样点之间温度、溶解氧差异不明显, 其他因子各样点间均存在差异。

### 2.2 浮游植物种类组成

调查期间共鉴定出浮游植物 228 种, 隶属于 8 门 75 属。其中硅藻门 (Bacillariophyta) 35 属 153 种, 绿藻门 (Chlorophyta) 14 属 25 种、蓝藻门 (Cynophyta) 11 属 21 种、甲藻门 (Pyrrophyta) 8 属 14 种、金藻门 (Chrysophyta) 1 属 2 种、黄藻门 (Xanthophyta) 1 属 2 种、隐藻门 (Cryptophyta) 1 属 2 种和裸藻门 (Euglenophyta) 4 属 9 种。周年季度调查结果显示, 阶段性优势种 6 种, 其中硅藻门 4 种、蓝藻门 1 种、裸藻门 1 种。硅藻门浮游植物优势种多样性、平均丰度以及优势度明显高于其他

藻种,中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 四季均 为优势种且优势度最高(表 1)。

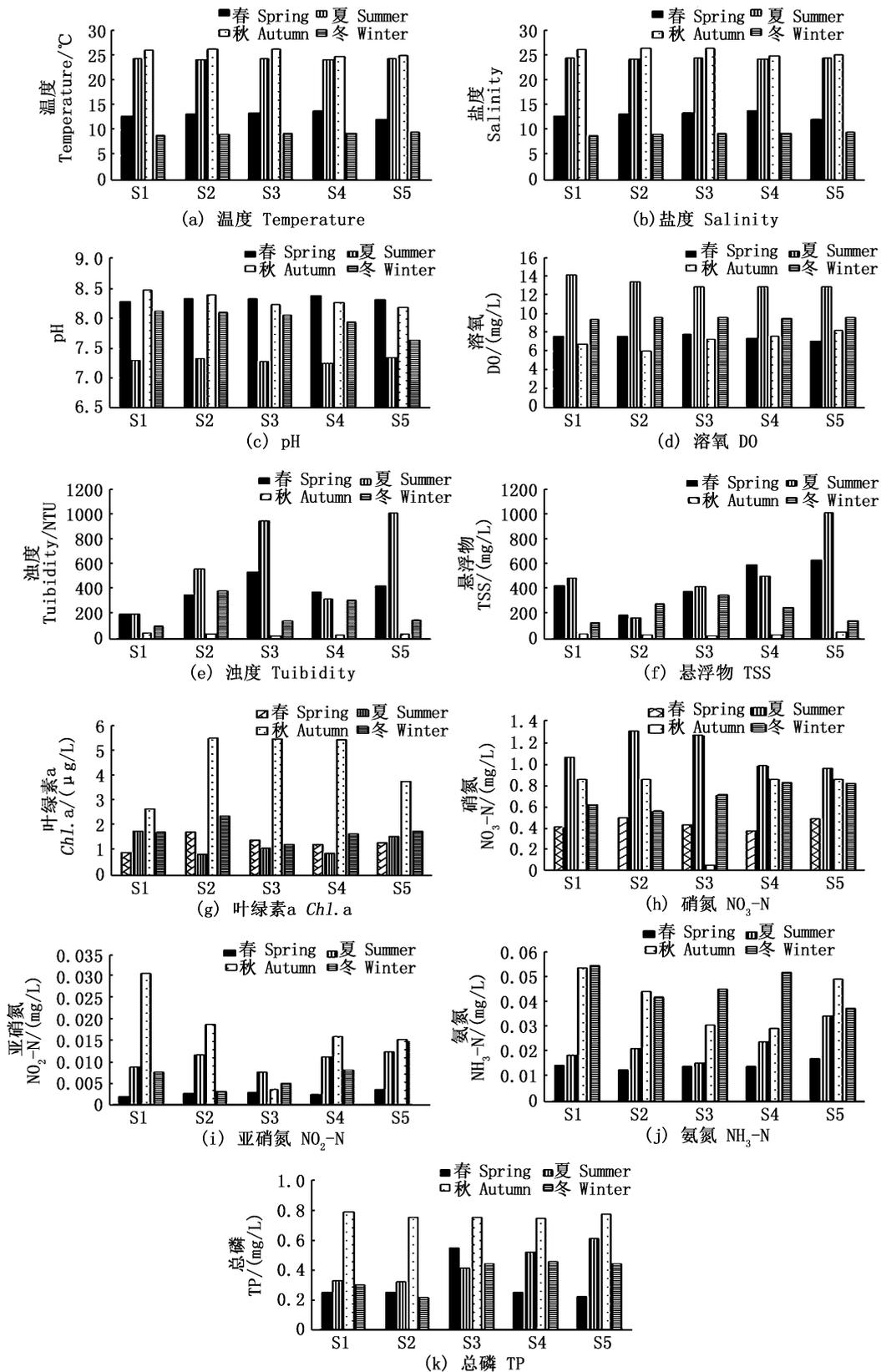


图 2 各水化因子季节变化

Fig. 2 Seasonal changes in each hydration factor

表 1 长江口浮游植物优势种平均丰度及优势度 (Y) 的季节变化  
 Tab.1 Seasonal variation in average abundance and dominance (Y) of dominant species of phytoplankton, in the Yangtze River Estuary

季节 Season	优势种 Dominant species	丰度 Abundance/(个/L)	优势度 Dominance
冬季 Winter	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	$4.95 \times 10^5$	0.87
	海洋菱形藻 <i>Nitzschia marina</i>	$1.60 \times 10^4$	0.03
春季 Spring	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	$3.49 \times 10^5$	0.92
夏季 Summer	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	$7.54 \times 10^5$	0.95
秋季 Autumn	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	$2.14 \times 10^5$	0.54
	鳞孔藻属一种 <i>Lepocinclis</i> sp.	$6.85 \times 10^4$	0.17
	羽纹藻属一种 <i>Pinnularia</i> sp.	$3.35 \times 10^4$	0.09
	颤藻属一种 <i>Oscillatoria</i> sp.	$1.64 \times 10^4$	0.04
	柔软舟形藻 <i>Navicula mollis</i>	$1.45 \times 10^4$	0.04

### 2.3 修复后浮游植物季节变化

春季共鉴定出浮游植物 6 门 31 属 73 种,夏季有浮游植物 5 门 34 属 106 种,秋季有浮游植物 7 门 61 属 111 种,冬季共调查浮游植物 5 门 27 属 63 种,见图 3。夏秋季节浮游植物种类较多,冬春季节浮游植物种类较少。春季浮游植物丰度为  $3.78 \times 10^5$  个/L,夏季为  $7.93 \times 10^5$  个/L,秋季为  $3.72 \times 10^5$  个/L,冬季为  $1.14 \times 10^5$  个/L,浮游植物丰度较高且存在明显的季节差异,夏季浮游植物丰度明显高于其他季节,见图 4。

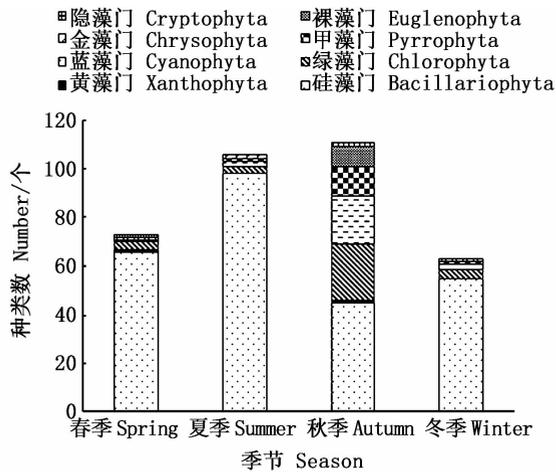


图 3 各季节浮游植物种类数  
 Fig.3 Number of phytoplankton species in each season

由于不同种类的浮游植物对环境的适应性以及对不同环境因子的依赖性有差异,不同浮游植物在 CCA 分析图中的位置存在明显差异。CCA 分析发现,中肋骨条藻、鳞孔藻未定种 (*Lepocinclis* sp.)、羽纹藻未定种 (*Pinnularia* sp.)、柔软舟形藻 (*Navicula mollis*)、海洋菱形藻 (*Nitzschia marina*)、

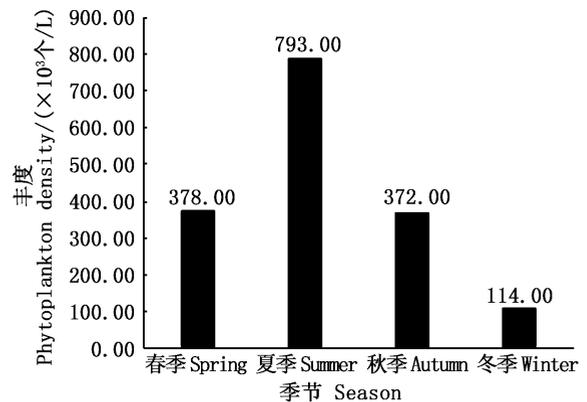


图 4 各季节浮游植物丰度  
 Fig.4 Phytoplankton density in each season

具槽直链藻 (*Melosira sulcata*)、比利时缝舟藻 (*Rhaphoneis belgica*)、冰岛直链藻 (*Melosira islandica*) 多分布于悬浮物、浊度较低的位置。水华微囊藻 (*Microcystis flosaquae*)、卵形褶盘藻 (*Tryblionopsis cocconeiformis*)、小伪菱形藻双楔 (*Pseudo-Nitzschiasicula* var. *Bicuneata*) 与温度、叶绿素 a 呈明显正相关。条纹小环藻 (*Cyclotella striata*) 与氨氮相关性明显。近缘黄丝藻 (*Tribonema affine*)、明壁圆筛藻 (*Coscinodiscus debilis*)、细弱圆筛藻 (*Coscinodiscus subtilis*) 与总磷显著相关。颤藻未定种 (*Oscillatoria* sp.)、小黄丝藻 (*Tribonema minus*) 和有翼圆筛藻 (*Coscinodiscus blandus*) 受以上环境因子影响较弱。硅藻门中的大部分种类,对环境的适应性具有一定的相似性,悬浮物、浊度对浮游植物影响较大。中肋骨条藻、条纹小环藻等丰度较高的浮游植物主要分布于悬浮物、浊度低的水域或营养盐较高的水域。浮游植物丰度整体上与悬浮物、浊度呈负相

关,与营养盐呈正相关。悬浮物、浊度的变化是 而溶解态 N、P 营养盐对细胞丰度有明显的影响。调查区浮游植物群落及丰度变化关键驱动因素,

表 2 CCA 排序图中浮游植物编号  
Tab.2 Phytoplankton numbers in CCA analysis

编号 Number	中文名 Chinese name	拉丁名 Latin name	编号 Number	中文名 Chinese name	拉丁名 Latin name
1	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>	10	小伪菱形藻双楔变种	<i>Pseudo-Nitzschiasicula var. Bicuneata</i>
2	鳞孔藻未定种.	<i>Lepocinclis sp.</i>	11	条纹小环藻	<i>Cyclotella striata</i>
3	羽纹藻未定种.	<i>Pinnularia sp.</i>	12	小黄丝藻	<i>Tribonema minus</i>
4	颤藻未定种.	<i>Oscillatoria sp.</i>	13	近缘黄丝藻	<i>Tribonema affine</i>
5	柔软舟形藻	<i>Navicula mollis</i>	14	明壁圆筛藻	<i>Coscinodiscus debilis</i>
6	海洋菱形藻	<i>Nitzschia marina</i>	15	卵形褶盘藻	<i>Tryblioptychus cocconeiformis</i>
7	具槽直链藻	<i>Melosira sulcata</i>	16	细弱圆筛藻	<i>Coscinodiscus subtilis</i>
8	比利时缝舟藻	<i>Rhaphoneis belgica</i>	17	有翼圆筛藻	<i>Coscinodiscus blandus</i>
9	水华微囊藻	<i>Microcystis flosaquae</i>	18	冰岛直链藻	<i>Melosira islandica</i>

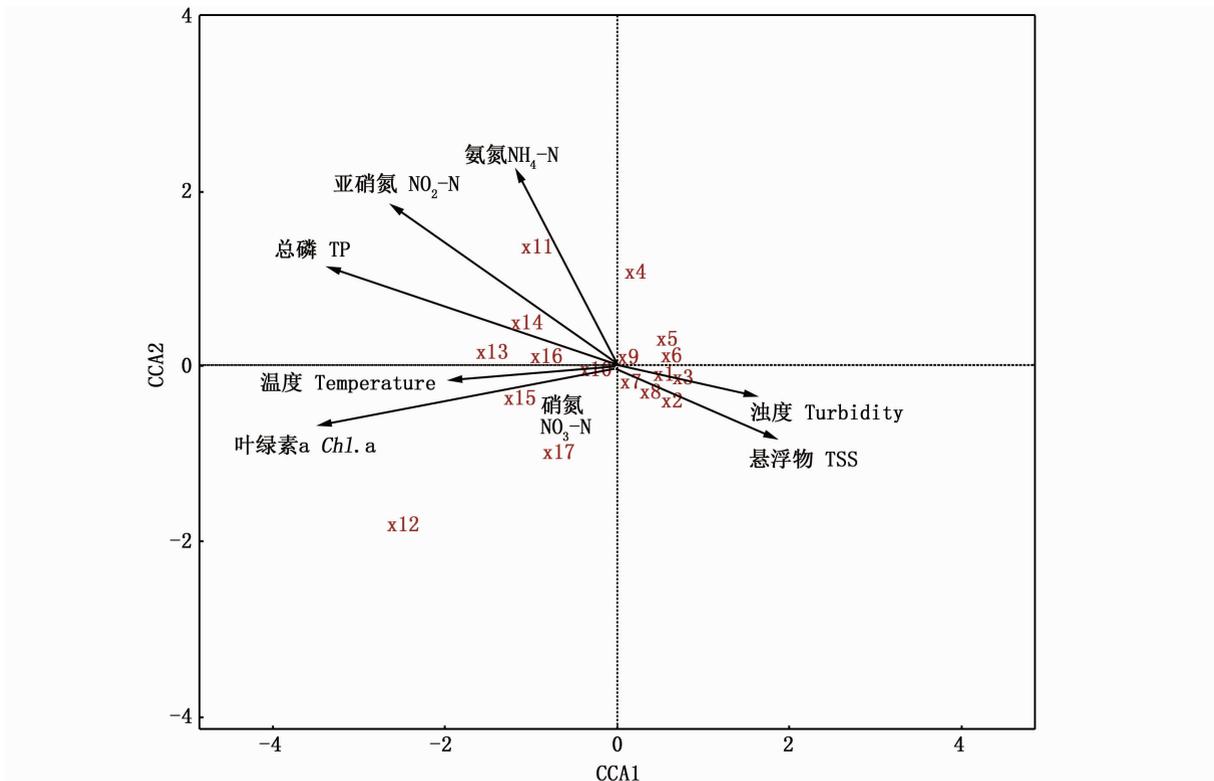


图 5 浮游植物和环境因子的 CCA 排序图

Fig.5 CCA ranking map of phytoplankton and environmental factors

### 3 讨论

#### 3.1 优势种组成特点

河口是江河与海洋联系的过度地带,该区域的环境因子变化与河流和海洋均有差异,具有其自身特殊性。此次调查长江口北支贝类放流滩

涂区潮下带水域,该水域浮游植物的丰度和多样性具有明显的季节差异,但在四季的优势种上,硅藻门的中肋骨条藻占据着绝对优势且优势度最高。在之前的研究中,黄河三角洲河口浮游植物虽然硅藻所占比例较大,但绿藻、裸藻等仍有一定比例,优势种主要包括小球藻、谷生棕鞭藻、

色球藻、尖尾蓝隐藻,种类组成多为淡水种<sup>[32]</sup>;长江口南支碎波带浮游植物优势种中硅藻门占44%,其次是蓝藻和甲藻,淡水种和半咸水种类数和丰度较高<sup>[25]</sup>;从2004—2016年,对长江口邻近海域中浮游植物的研究发现,中肋骨条藻有10年为该区域第一优势种<sup>[33]</sup>;相对于长江口南支及近海水域,长江口北支径流量偏小,受潮汐影响较大,形成了独特的高盐水域环境,因此该区域出现了与长江口近海区域相同的优势种群<sup>[10,33]</sup>。中肋骨条藻对盐度变化敏感,其细胞具有较强的渗透调节能力,能对外界环境做出迅速反应<sup>[34]</sup>,因此较适宜在复杂多变的环境中生存,由此导致修复前后中肋骨条藻均为优势物种,而中肋骨条藻又是调查海域硅藻的主要组成部分,

由此直接导致修复前后硅藻丰度均在浮游植物总密度中占比最大。

### 3.2 生态修复前后植物群落特征变化

2010年10月—2011年9月对长江口北支浮游植物群落进行调查,共采集浮游植物6门49属183种,各季节丰度分别为春季 $1.85 \times 10^4$ 个/L,夏季 $6.17 \times 10^4$ 个/L,秋季 $6.47 \times 10^3$ 个/L,冬季 $4.67 \times 10^3$ 个/L<sup>[18]</sup>。本次调查针对修复后的浮游植物,发现浮游植物种类数增长至228种,全年丰度升高到 $1.14 \times 10^5 \sim 7.93 \times 10^5$ 个/L。2012年9月—2013年6月调查期间,各季浮游植物种类明显增多,且增加了裸藻门、隐藻门。硅藻门浮游植物丰度在修复前后均为最大(表3)。

表3 2010—2013年长江口修复前后浮游植物重要指标对比  
Tab.3 Comparison of important indicators of phytoplankton before and after the restoration of the Yangtze River Estuary from 2010 to 2013

不同藻种占总密度百分比 Percentage of different algae species to total density	硅藻 Bacilla riophyta/%	绿藻 Chlorophyta/%	蓝藻 Cyanobacteria/%	物种数 Species number/种	平均丰度 Average abundance/(个/L)
2010—2011年度 <sup>[18]</sup>	72.60	4.37	20.46	183	$1.73 \times 10^4$
2012—2013年度	92.76	0.26	2.26	228	$3.98 \times 10^5$

2010年10月—2011年9月,共采集到183种浮游植物,全年丰度为 $2.83 \times 10^3 \sim 6.18 \times 10^4$ 个/L。方磊等<sup>[35]</sup>调查贝类在生态修复中的作用时发现,贝类可通过降低水体中颗粒有机物(例如藻类和有机碎屑)的浓度间接控制氮磷营养盐浓度,耦合水层-底栖环境,保护生物多样性和营造生物生境。本调查中作为饵料的硅藻,密度百分比增长了20.16%,而经常作为水华种出现的蓝藻的密度百分比下降明显,下降了18.20%,绿藻的密度百分比下降了4.11%,贝类放流后营养盐与放流前相比总体上呈上升趋势<sup>[2]</sup>,因此认为浮游植物种类丰度及种类组成的变化可能与贝类放流有关。

浮游植物多样性和丰度的提升,可能不仅仅与投放贝类的生态修复工作有关,与长江口整个生态环境的改变也有密切联系。辛明等<sup>[36]</sup>研究了长江口及邻近海域的生物群落对生态环境变化的响应,结果表明入海泥沙通量能够影响海水浊度、悬浮物从而影响浮游植物的光合作用,进而影响浮游植物生长。通过CCA分析发现,大部分优势种与悬浮物和浊度呈显著性相关。经调

查生态修复后悬浮物和浊度明显降低,海水透明度提高,促进了光合作用,有利于中肋骨条藻等浮游植物生长。

### 参考文献:

- [1] 李路,朱建荣. 长江口枯季北港淡水向北支扩展的动力机制[J]. 水科学进展, 2016, 27(1): 57-69.  
LI L, ZHU J R. Dynamic mechanism of freshwater extension from the north channel to the north branch in the Changjiang Estuary in dry seasons [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(1): 57-69.
- [2] 肖南燕,边佳胤,吴惠仙,等. 长江口北支水域生态环境因子的周年变化[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(s1): 153-159.  
XIAO N Y, BIAN J Y, WU H X, et al. Annual changes of environmental factors in north branch waters of Yangtze estuary [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(s1): 153-159.
- [3] 张凤英,庄平,徐兆礼,等. 长江口中华鲟自然保护区底栖动物[J]. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1244-1249.  
ZHANG F Y, ZHUANG P, XU Z L, et al. Benthos in the nature reserve of *Acipenserscensensis* in Changjiang River estuary [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(8): 1244-1249.

- [4] 李伯昌,施慧燕. 长江口河段水环境现状分析[J]. 水资源保护, 2005, 21(1): 39-44.  
LI B C, SHI H Y. Analysis on the present situation of water environment in the Changjiang estuary[J]. Water Resources Protection, 2005, 21(1): 39-44.
- [5] 庄平,罗刚,张涛,等. 长江口水域中华鲟幼鱼与6种主要经济鱼类的食性及食物竞争[J]. 生态学报, 2010, 30(20): 5544-5554.  
ZHUANG P, LUO G, ZHANG T, et al. Food comparison among juvenile *Acipensersinensis* and other six economic fishes in the Yangtze estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(20): 5544-5554.
- [6] 周茜茜,陈长平,梁君荣,等. 中国东部陆架边缘海网采浮游植物种类组成和季节变化[J]. 生物多样性, 2015, 23(1): 23-32.  
ZHOU Q Q, CHEN C P, LIANG J R, et al. Species composition and seasonal variation of net-phytoplankton in the eastern marginal China seas[J]. Biodiversity Science, 2015, 23(1): 23-32.
- [7] AZAM F, MALFATTI F. Microbial structuring of marine ecosystems[J]. Nature Reviews Microbiology, 2007, 5: 782-791.
- [8] 郭冲涌,沈焕庭. 河口浮游植物生态学研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 139-142.  
GUO P Y, SHEN H T. Research advance in estuarine phytoplankton ecology [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 139-142.
- [9] 孙涛,杨志峰,刘静玲. 海河流域典型河口生态环境需水量[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2707-2715.  
SUN T, YANG Z F, LIU J L. Study on the ecological water demands for typical estuaries in Haihe River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2707-2715.
- [10] 黄海燕,王秋璐,许艳,等. 2004—2016年夏季长江口网采浮游植物及其影响因素[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(2): 319-330.  
HUANG H Y, WANG Q L, XU Y, et al. Distribution of summer community of net-collected phytoplankton from 2004 to 2016 and the factors in the Changjiang River estuary[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(2): 319-330.
- [11] 栾青杉,孙军. 2005年秋季长江口及其邻近水域浮游植物群落[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(2): 202-208.  
LUAN Q S, SUN J. Phytoplankton assemblage of the Yangtze River estuary and its adjacent waters in autumn 2005 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(2): 202-208.
- [12] 栾青杉,孙军. 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[J]. 生态学报, 2010, 30(18): 4967-4975.  
LUAN Q S, SUN J. Feature of phytoplankton assemblages in Yangtze River estuary and its relationship with environmental factors in summer 2005[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(18): 4967-4975.
- [13] MUYLEAERTK, SABBEK. Spring phytoplankton assemblages in and around the maximum turbidity zone of the estuaries of the Elbe ( Germany ), the Schelde ( Belgium/The Netherlands ) and the Gironde ( France ) [J]. Journal of Marine Systems, 1999, 22(2/3): 133-149.
- [14] 孙军,赵冉,张利永. 春末三峡大坝首次蓄水期长江口浮游植物群落[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4): 1045-1052.  
SUN J, ZHAO R, ZHANG L Y. Phytoplankton assemblages in Yangtze River Estuary in the first sluice discharge duration of Three Gorges dam in late spring [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4): 1045-1052.
- [15] 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.
- [16] 林梅,李扬. 长江口海域春季浮游植物的年际变化[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(2): 303-311.  
LIN M, LI Y. Interdecadal variation of phytoplankton assemblage in Changjiang River estuary in spring [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(2): 303-311.
- [17] 贾海波,邵君波,胡颖琰,等. 三峡水库蓄水前后长江口及其邻近海域浮游植物群落结构的变化及原因分析[J]. 海洋通报, 2014, 33(3): 305-314.  
JIA H B, SHAO J B, HU H Y, et al. Changes and reason analysis of phytoplankton community structure in the Yangtze estuary and adjacent sea before and after the impoundment of the Three Gorges dam [J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(3): 305-314.
- [18] 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.
- [19] 章飞燕. 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[D]. 上海:华东师范大学, 2009.  
ZHANG F Y. Historical comparison on evolution of phytoplankton community and its relations with environmental factors in Yangtze Estuary and adjacent sea [D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [20] 何青,孙军. 长江口及其邻近水域网采浮游植物群落[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3928-3938.  
HE Q, SUN J. The Netz-phytoplankton community in Changjiang ( Yangtze ) River Estuary and adjacent waters [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3928-3938.
- [21] 任晶,孙瑛,崔百惠,等. 长江口九段沙湿地及其附近水域浮游植物群落结构特征[J]. 复旦学报(自然科学版),

- 2014, 53(2): 271-276.
- REN J, SUN Y, CUI B H, et al. Characteristics of community structures of phytoplankton in the Jiuduansha wetland and its adjacent waters of the Yangtze River Estuary [J]. Journal of Fudan University(Natural Science), 2014, 53(2): 271-276.
- [22] 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.
- [23] 张晋芳. 长江口南部邻近海域浮游植物的吸收特性及其参数化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- ZHANG J F. Parameterization and variability of phytoplankton absorption properties in South adjacent coastal ocean of the Yangtze Estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
- [24] 吴波. 长江口区藻类分布格局及其与环境因子相关性的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- WU B. Study of algal distribution pattern and its correlation with environmental factors in Yangtze River Estuary Area [D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [25] 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.
- [26] 国家质量技术监督局. GB 17378—2007 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- National Bureau of Quality and Technical Supervision. GB 17378 - 2007 Marine monitoring regulations [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [27] 宁修仁, 孙松. 海湾生态系统观测方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- NING X R, SUN S. Bay ecosystem observation method [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.4—2007 海洋监测规范第4部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.4 - 2007 The specification for marine monitoring - Part 4: seawater analysis [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [29] MUYLAERT K, SABBE K, VYVERMAN W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, 50(5): 673-687.
- [30] LOPES M R M, DE M. BICUDO C E, FERRAGUT M C. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil [J]. Hydrobiologia, 2005, 542(1): 235-247.
- [31] 宫梓琳. 松花江流域(哈尔滨江段)近岸微型生物群落时空分布特征及其与环境因子关系的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2015.
- GONG Z L. Research on temporal and spatial distribution characteristics of shoreside micro biological community and environmental factors correlation in Songhua River (Harbin section) [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2015.
- [32] 冷春梅, 王亚楠, 董贯仓, 等. 黄河三角洲河口区浮游植物组成及多样性分析[J]. 环境保护科学, 2012, 38(1): 37-40.
- LENG C M, WANG Y N, DONG G C, et al. Analysis on species composition and diversity of phytoplankton in the estuary of Yellow River delta [J]. Environmental Protection Science, 2012, 38(1): 37-40.
- [33] 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.
- [34] RIJSTENBIL J W, MUR L R, WIJNHOLDS J J, et al. Impact of a temporal salinity decrease on growth and nitrogen metabolism of the marine diatom *Skeletonema costatum* in continuous cultures [J]. Marine Biology, 1989, 101(1): 121-129.
- [35] 方磊, 刘健, 陈锦辉, 等. 贝类生态修复作用及固碳效果研究进展[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(3): 7-11.
- FANG L, LIU J, CHEN J H, et al. Research progress on ecological restoration and carbon sequestration of shellfish [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2011, 39(3): 7-11.
- [36] 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.

## Analysis of phytoplankton in the subtidal waters of the north branch of the Yangtze River Estuary

YE Haixin<sup>1,2</sup>, SHANGGUAN Xinxin<sup>1,2</sup>, BI Zihao<sup>1</sup>, PAN Weizhen<sup>1</sup>, WU Huixian<sup>1,2</sup>

(1. School of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Port and Shipping Ecological Security Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** From September 2012 to June 2013, phytoplankton surveys were conducted in the outer and outer tidal zones of the north branch of the Yangtze River estuary. A total of 228 species of 75 genera of phytoplankton were identified, including 153 species of *Bacillariophyta*, 25 species of *Chlorophyta*, 21 species of *Cyanobacteria*, 14 species of *Dinoflagellates*, 2 species of *Chrysophyta*, 2 species of *Xanthophyta*, 2 species of *Cryptophyta* and 9 species of *Euglena*. There was obvious seasonal variation in the species composition of phytoplankton. There are 73 species of 31 genera and 6 phyla in spring, 106 species of 34 genera and 5 phyla in summer, 111 species of 61 genera and 7 phyla in autumn, and 63 species of 27 genera and 5 phyla in winter. The abundance of each season was  $3.78 \times 10^5$  cells/L in spring,  $7.93 \times 10^5$  cells/L in summer,  $3.72 \times 10^5$  cells/L in autumn, and  $1.14 \times 10^5$  cells/L in winter. The CCA model response analysis of phytoplankton and hydration factors was carried out. The results showed that suspended solids, turbidity and nutrient salt had great influence on the abundance of phytoplankton. Due to the change of shellfish and environmental factors, the composition of phytoplankton changed significantly before and after ecological restoration. The number and abundance of phytoplankton increased obviously in all seasons.

**Key words:** Yangtze River Estuary; north branch; shellfish; ecological release; phytoplankton; environmental factor