

李照, 宋书群, 李才文, 等. 丰、枯水期长江口邻近海域浮游植物群落结构特征及其环境影响初探[J]. 海洋学报, 2017, 39(10): 124—144, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2017.10.011

Li Zhao, Song Shuqun, Li Caiwen, et al. Preliminary discussion on the phytoplankton assemblages and its response to the environmental changes in the Changjiang (Yangtze) River Estuary and its adjacent waters during the dry season and the wet season[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(10): 124—144, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2017.10.011

# 丰、枯水期长江口邻近海域浮游植物群落结构特征及其环境影响初探

李照<sup>1,2,3</sup>, 宋书群<sup>1,2</sup>, 李才文<sup>1,2\*</sup>, 俞志明<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266200; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 通过 2013 年 3 月和 8 月在长江口及其邻近海域进行的多学科综合调查, 研究了枯水期和丰水期浮游植物的群落结构和空间分布特征, 并探讨了影响其分布的环境因子效应。枯水期共发现浮游植物 3 门 41 属 80 种(不包括变种和变型), 以硅藻为主, 主要优势种为具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*); 浮游植物细胞丰度介于  $0.15 \times 10^3 \sim 16.35 \times 10^3$  cells/L, 平均值为  $(3.24 \pm 3.14) \times 10^3$  cells/L; 浮游植物细胞丰度在长江口外东北部海域形成高值, 垂直变化较小, 硅藻刻画了浮游植物的空间分布。丰水期共发现浮游植物 4 门 67 属 135 种(不包括变种和变型), 甲藻物种数量和细胞丰度均升高, 主要优势种为东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)和骨条藻(*Skeletonema* sp.); 浮游植物细胞丰度介于  $0.2 \times 10^3 \sim 1925.45 \times 10^3$  cells/L, 平均值为  $(41.67 \pm 186.00) \times 10^3$  cells/L; 浮游植物细胞丰度在长江口外形成南北两个高值区, 随水深增加, 细胞丰度逐渐降低。浮游植物的空间分布受长江口冲淡水影响, 与盐度和浊度有显著的相关性; N/P 比影响浮游植物群落结构, 随着 N/P 比升高, 甲藻的相对丰度升高, 硅藻的相对丰度逐渐降低。浮游植物在层化水体的上层大量繁殖是底层低氧形成的必要条件, 硅藻具有较高的沉降速率, 因而以硅藻为主的群落更利于低氧的形成。

**关键词:** 浮游植物; 群落结构; 长江口; 冲淡水; 低氧

**中图分类号:** Q948.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4193(2017)10-0124-21

## 1 引言

近年来, 随着流域人口增加和经济、社会发展, 向河流中排放的工农业废水和生活污水不断增加, 陆源营养盐的大量输入使河口及其邻近海域水体富营养化加剧。富营养化引发有害藻华频发等一系列环境问

题, 导致生态系统的稳定性明显下降<sup>[1-4]</sup>。浮游植物作为海洋中最重要的初级生产者, 在海洋生态系统的物质循环和能量流动中起着关键作用, 其物种组成和生物量的变动受环境变化的影响, 对富营养化、低氧区形成等环境问题具有一定指示作用<sup>[5]</sup>。研究浮游植物群落结构是了解该海区生态系统结构的基础<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2016-12-23; 修订日期: 2017-03-13。

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2014DQ029); 国家基金委—山东省联合基金项目(U1606404); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助项目(XDA11020302)。

作者简介: 李照(1990—), 女, 山东省济南市人, 博士研究生, 主要从事浮游植物生态学研究。E-mail: lizhao0708@126.com

\* 通信作者: 李才文, 研究员, 博士生导师。E-mail: cwli@qdio.ac.cn

长江口及其邻近海域处于长江冲淡水、台湾暖流和黄海冷水团交汇区域,理化条件复杂<sup>[7]</sup>。从 1980 年代开始,长江口及其邻近海域有害藻华发生的频率、范围、持续时间及危害增加<sup>[4, 8]</sup>,低氧现象频繁出现<sup>[9]</sup>。1999 年夏季观测到的低氧区面积达 13 700 km<sup>2</sup>,溶解氧最低值达到 1 mg/L,近年来低氧区呈现位置北移、溶解氧最低值波动下降和面积扩大的变化趋势<sup>[10-11]</sup>。浮游植物在低氧区形成中发挥一定作用,李道季等<sup>[10]</sup>认为表层浮游植物产生的大量颗粒有机碳向底层输送,并在底层进行化学和生物氧化是该海域低氧区形成的主要原因。

长江口及其邻近海域一直是我国海洋浮游植物研究的重点区域,浮游植物的丰度变化与群落结构具有明显的季节特征。20 世纪 80 年代就有关于该海域的浮游植物群落组成和生物量的时空分布的调查研究<sup>[12-13]</sup>,栾青杉等<sup>[14-15]</sup>与何青和孙军<sup>[16]</sup>报道了不同季节浮游植物的群落结构及其与环境因子的关系,江志兵等<sup>[17]</sup>发现该海域浮游植物群落组成与分布主要受长江冲淡水和台湾暖流消长变化的影响。全球变化和

人类活动正影响长江径流量的季节分配,为深入了解径流量的动态对长江河口生态系统的影响,需要更多的工作来研究浮游植物群落结构对长江冲淡水的响应以及浮游植物在低氧区形成中的作用。本研究基于 2013 年枯水期(3 月份)与丰水期(8 月份)的两次多学科综合调查,采用 Utermöhl 方法定量研究了浮游植物群落的物种组成和细胞丰度特征,分析了长江冲淡水对浮游植物群落结构的影响,并初步探讨了浮游植物在该海域低氧区形成中的作用。相关结果为深入研究长江口及其邻近海域的生态系统结构提供基础资料,并为应对该海域多种环境问题提供参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究站位

分别于 2013 年 3 月 4 日至 20 日(枯水期)和 2013 年 8 月 17 日至 28 日(丰水期)在长江口及其邻近海域进行水文、化学和生物的多学科综合调查,研究区域位于 28.5°~32.5°N 和 125°E 以西水域,枯水期和丰水期分别布设 64 个、36 个站位(图 1)。

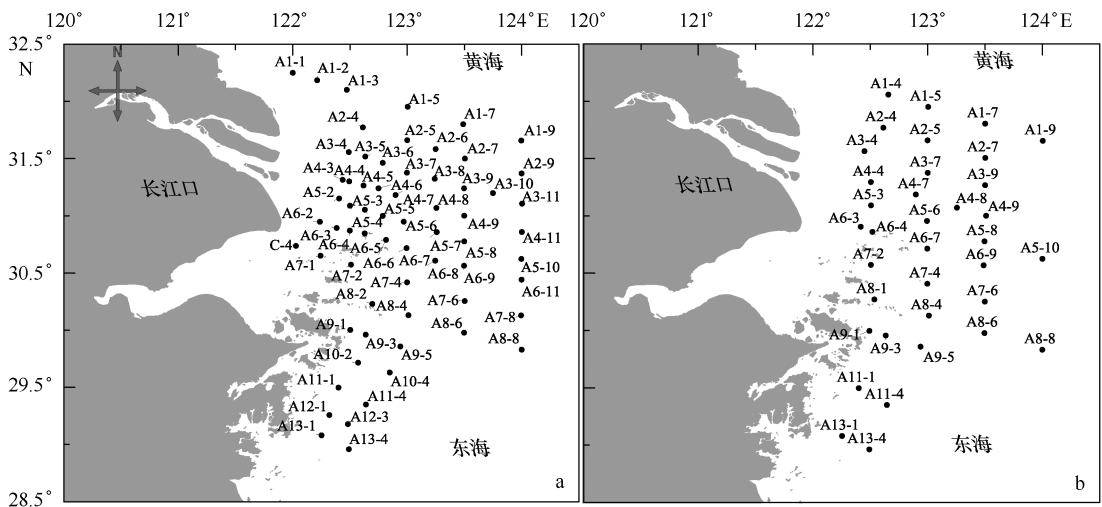


图 1 调查区与调查站位(a,枯水期;b,丰水期)

Fig.1 Survey area and sampling stations(a, dry season; b, wet season)

### 2.2 样品采集与分析

各站位根据水深采集标准层水样,包括表层、5 m、10 m、20 m、30 m、50 m 和底层(底下 2 m,底层与标准层间隔小于 3 m 时只采集底层水样)。取 250~500 mL 水样置于大口 PE 样品瓶中,加中性甲醛溶液固定(终浓度 2%)用于镜检浮游植物物种组成和细胞丰度;浮游植物样品根据 Utermöhl 方法进行分析,取 20 mL 亚样品于 Hydro-bios 计数框内静置沉降 24

h 后,使用 IX71 倒置显微镜(Olympus)在 ×200 和 ×400 倍下进行物种鉴定与细胞计数,浮游植物物种鉴定参考金德祥等<sup>[18]</sup>,细胞丰度的统计和误差处理参考孙军等<sup>[19]</sup>。营养盐(硝酸盐、亚硝酸盐、硅酸盐、磷酸盐)和溶解氧的取样和分析参考《海洋调查规范》(GB 17378.3-2007)。

各站位的温度、盐度、pH 和浊度剖面由 CTD 仪(SBE917)获得。长江大通水文站的径流量数据来源

于长江水位管理系统 <http://yu-zhu.vicp.net/>。

### 2.3 数据处理

浮游植物群落结构的分析采用如下参数<sup>[20]</sup>：

优势度  $Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i$  ,

Shannon-Wiener 指数  $H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$  ,  $P_i = \frac{n_i}{N}$  ,

Pielou 均匀度指数  $J = \frac{H'}{\log_2 S}$  ,

Margalef 丰富度指数  $d = (S - 1) / \ln N$  ,

式中,  $n_i$  为第  $i$  种的个体数,  $N$  为样品中的总个体数,  $f_i$  为第  $i$  种在样品中出现的频率,  $P_i$  为第  $i$  种在样品中的细胞丰度概率,  $S$  为样品中的物种总数。

环境因子和浮游植物细胞丰度的平面、断面等值线分布图采用 Golden Software Surfer 12.0 软件绘制, Box-whisker 图采用 Golden Software Grapher 8.0 绘制; 浮游植物不同类群和优势种细胞丰度与环境因子之间的 Pearson 相关性分析使用 SPSS 20.0 进行。

## 3 结果

### 3.1 环境特征

枯水期表层水温介于 6.23~14.06℃, 平均值为 (11.27±1.62)℃; 水温由北至南、从近岸到外海逐渐升高(图 2a)。丰水期表层水温介于 23.89~29.30℃, 平均值为 (26.90±1.39)℃, 较枯水期显著升高; 长江口门及杭州湾附近水域水温较低, 外海区域水温较高(图 2c)。枯水期表层盐度介于 19.12~34.17, 平均值为 (30.79±3.45); 丰水期表层盐度介于 14.75~33.64, 平均值为 (29.99±4.47), 较枯水期略低。长江冲淡水的扩展与长江径流量有关, 大通站 2013 年 3 月的平均径流量为 18 116 m<sup>3</sup>/s, 8 月的平均径流量为 33 467 m<sup>3</sup>/s, 造成两次调查表层盐度的分布存在明显差异。在枯水期, 低盐水舌出口门后向东北偏北方向扩展, 30 等盐线位于 123°E 附近(图 2b); 在丰水期, 低盐水舌出口门后向东北偏北和东南方向偏转, 30 等盐线较枯水期向东扩展, 延伸至 124°E(图 2d); 低盐水舌的分布指示了长江冲淡水的扩展。

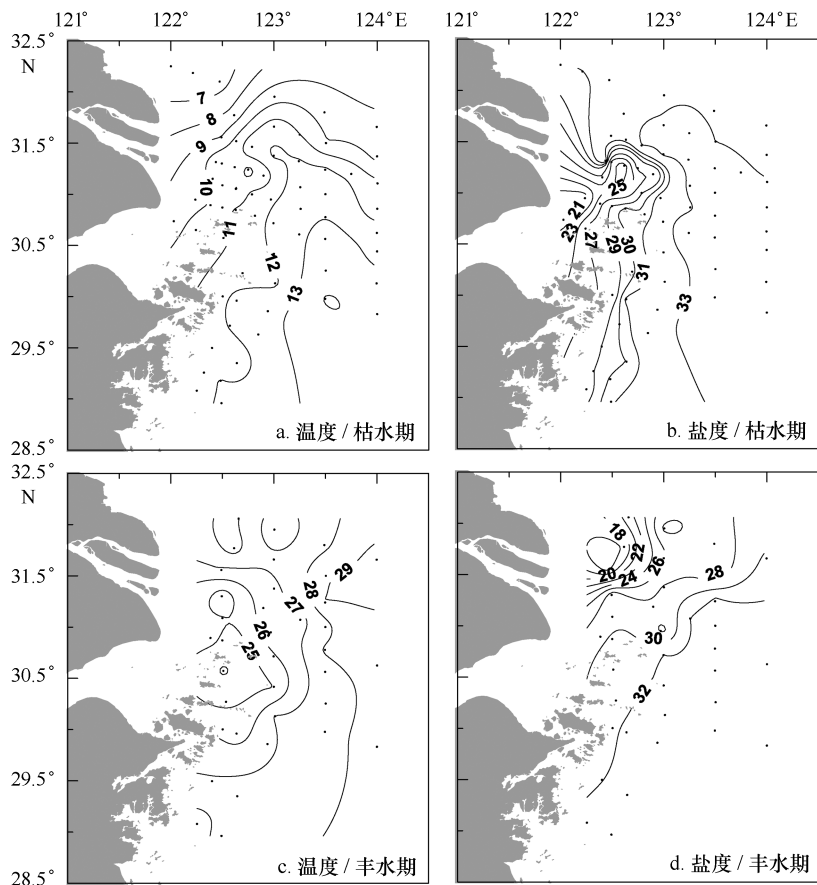


图 2 调查区表层温度(℃)和盐度的平面分布

Fig.2 Horizontal distribution of temperature (℃) and salinity at the surface water in the survey area

在枯水期表层水体中,硝酸盐浓度介于  $2.97 \sim 67.13 \mu\text{mol/L}$ ,平均值为  $(16.03 \pm 12.04) \mu\text{mol/L}$ ;磷酸盐浓度介于  $0.30 \sim 1.40 \mu\text{mol/L}$ ,平均值为  $(0.64 \pm 0.23) \mu\text{mol/L}$ ;硅酸盐浓度介于  $3.99 \sim 59.12 \mu\text{mol/L}$ ,平均值为  $(19.61 \pm 10.27) \mu\text{mol/L}$ 。营养盐在近口门水域形成高值区,在高盐水域浓度较低,等值线的形态与表层盐度类似(图 3a、b 和 c)。在丰水期表层水体中,硝酸盐浓度介于  $0.02 \sim 51.63 \mu\text{mol/L}$ ,

平均值为  $(14.62 \pm 13.66) \mu\text{mol/L}$ ;磷酸盐浓度介于  $0.07 \sim 1.22 \mu\text{mol/L}$ ,平均值为  $(0.47 \pm 0.35) \mu\text{mol/L}$ ;硅酸盐浓度介于  $1.81 \sim 101.04 \mu\text{mol/L}$ ,平均值为  $(17.41 \pm 21.85) \mu\text{mol/L}$ 。与枯水期相比,丰水期的营养盐水平有所降低,但硅酸盐最大值显著升高,平面分布上,高值区仍分布在近岸水域,外海区域呈现低值(图 3c、d 和 e)。

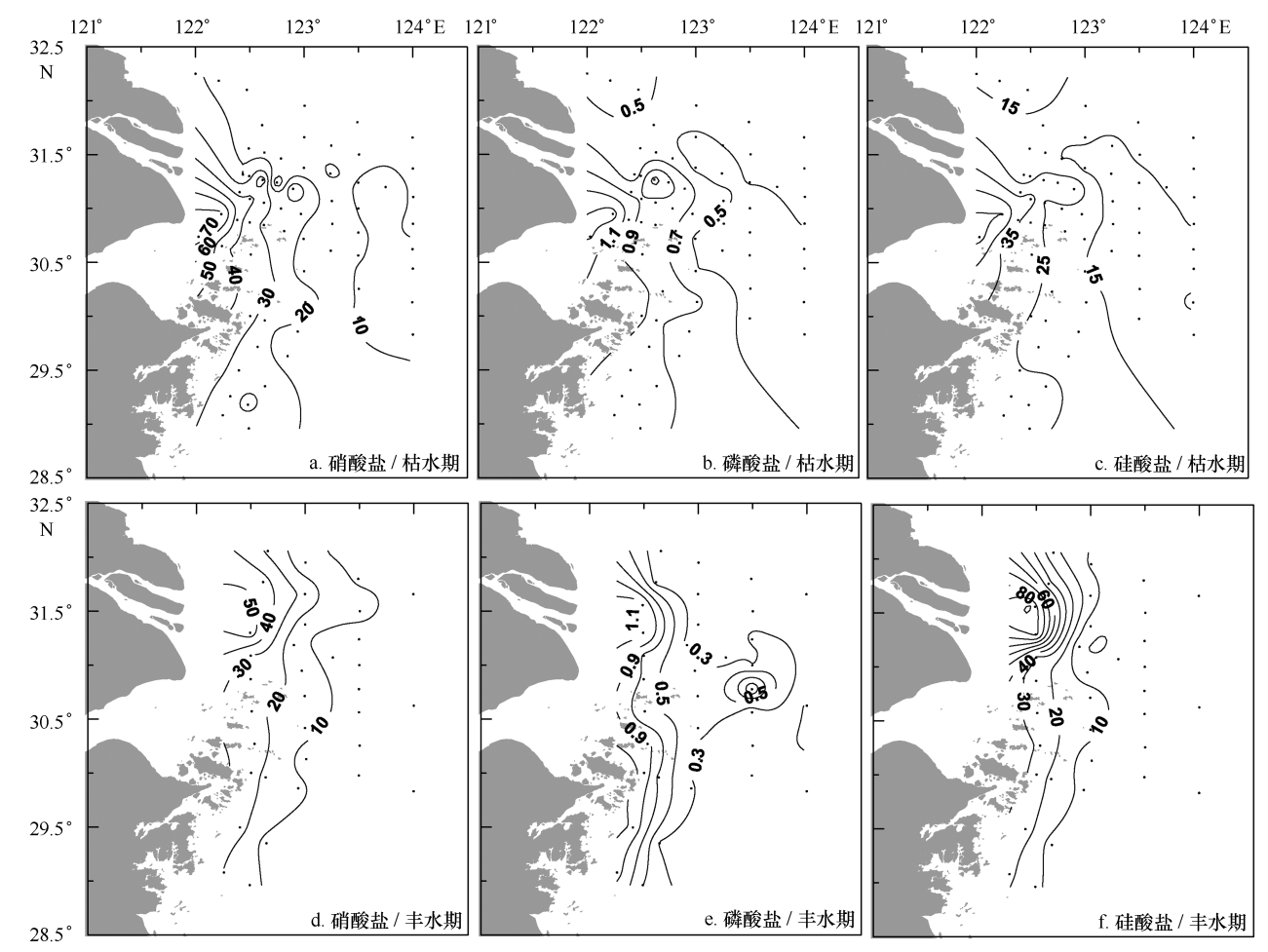


图 3 调查区表层营养盐( $\mu\text{mol/L}$ )的平面分布

Fig.3 Horizontal distribution of inorganic nutrients ( $\mu\text{mol/L}$ ) at the surface water in the survey area

### 3.2 浮游植物物种组成

枯水期共发现浮游植物 3 门 41 属 80 种(不包括变种和变型),其中硅藻门 30 属 63 种,占浮游植物物种数的 78.75%,以中心纲硅藻为主,甲藻门 10 属 16 种,占浮游植物物种数的 20.00%,金藻门 1 属 1 种(附表)。丰水期共发现浮游植物 4 门 67 属 135 种(不包括变种和变型),其中硅藻门 46 属 87 种,占浮

游植物物种数的 64.44%,甲藻门 19 属 45 种,占浮游植物物种数的 33.33%,金藻门 1 属 2 种,蓝藻门 1 属 1 种(附表)。硅藻和甲藻是调查海域的主要浮游植物类群,丰、枯水期浮游植物均以沿岸广温型为主,其中 66 种在两次调查中均有检出;丰水期的物种数量远高于枯水期,且甲藻物种数量显著升高。具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)和东海原甲藻(*Prorocentrum*



*donghaiense*) 分别成为枯水期和丰水期最优势的浮游植物物种,二者占浮游植物总细胞丰度的比例均超过 70%,其中具槽帕拉藻在枯水期的出现频率高达 0.88 (表 1)。

表 1 调查区的浮游植物优势物种  
Tab.1 Phytoplankton dominant species in survey area

| 时期  | 物种                                         | 丰度比例/% | 频度 <i>f<sub>i</sub></i> | 优势度 <i>Y</i> |
|-----|--------------------------------------------|--------|-------------------------|--------------|
| 枯水期 | 具槽帕拉藻 ( <i>Paralia sulcata</i> )           | 73.46  | 0.88                    | 0.6434       |
|     | 圆筛藻 ( <i>Coscinodiscus</i> sp.)            | 7.44   | 0.85                    | 0.0632       |
|     | 离心列海链藻 ( <i>Thalassiosira eccentrica</i> ) | 5.58   | 0.84                    | 0.0468       |
|     | 辐辏藻 ( <i>Actinoptychus</i> sp.)            | 1.79   | 0.45                    | 0.0080       |
|     | 具翼漂流藻 ( <i>Planktoniella blanda</i> )      | 1.12   | 0.37                    | 0.0042       |
| 丰水期 | 东海原甲藻 ( <i>Prorocentrum donghaiense</i> )  | 73.39  | 0.47                    | 0.3481       |
|     | 窄隙角毛藻 ( <i>Chaetoceros affinis</i> )       | 3.27   | 0.62                    | 0.0204       |
|     | 骨条藻 ( <i>Skeletonema</i> sp.)              | 7.43   | 0.21                    | 0.0153       |
|     | 洛氏角毛藻 ( <i>Chaetoceros lorenzianus</i> )   | 1.60   | 0.66                    | 0.0106       |
|     | 米氏凯伦藻 ( <i>Karenia mikimotoi</i> )         | 2.06   | 0.42                    | 0.0086       |

3.3 浮游植物细胞丰度及分布

调查海域枯水期浮游植物的细胞丰度介于  $0.15 \times 10^3 \sim 16.35 \times 10^3$  cells/L,平均值为  $(3.24 \pm 3.14) \times 10^3$  cells/L;硅藻和甲藻细胞丰度平均值分别为  $(3.22 \pm 3.14) \times 10^3$  cells/L 和  $(0.02 \pm 0.04) \times 10^3$  cells/L;其中,硅藻占浮游植物细胞丰度的比例介于 64.29%~100.00%,平均值为 98.34%,具槽帕拉藻的平均丰度高达  $(2.37 \pm 2.70) \times 10^3$  cells/L。丰水期浮游植物的细胞丰度介于  $0.2 \times 10^3 \sim 1\,925.45 \times 10^3$  cells/L,平均值为  $(41.67 \pm 186.00) \times 10^3$  cells/L;甲藻和硅藻的细胞丰度平均值分别为  $(33.53 \pm 176.06) \times 10^3$  cells/L 和  $(8.13 \pm 26.45) \times 10^3$  cells/L,甲藻对浮游植物细胞丰度的贡献较大;但就每个样品的情况来看,甲藻和硅藻占浮游植物细胞丰度的比例分别介于 0.00%~98.68%和 0.01%~100.00%,硅藻的平均比例(55.17%)高于甲藻(44.72%),表明硅藻在大部分站位占据优势。

3.3.1 平面分布

枯水期表层浮游植物细胞丰度介于  $0.20 \times 10^3 \sim 10.35 \times 10^3$  cells/L,平均值为  $(2.43 \pm 2.50) \times 10^3$  cells/L;高值区分布在长江口外东北部海域,近岸水域细胞丰度处于较低水平(图 4a)。表层硅藻细胞丰度介于  $0.20 \times 10^3 \sim 10.35 \times 10^3$  cells/L,平均值为  $(2.40 \pm 2.51) \times 10^3$  cells/L;其平面分布与浮游植物

细胞的基本一致(图 4b)。表层甲藻的细胞丰度介于  $0 \sim 0.15 \times 10^3$  cells/L,平均值为  $(0.02 \pm 0.04) \times 10^3$  cells/L;甲藻与硅藻呈镶嵌分布模式,在近口门和调查区东南部水域丰度略高(图 4c)。丰水期表层浮游植物细胞丰度介于  $0.45 \times 10^3 \sim 912.00 \times 10^3$  cells/L,平均值为  $(104.18 \pm 239.83) \times 10^3$  cells/L;在长江口外形成南北两个高值区,调查区的东南部丰度较低(图 4d)。表层硅藻和甲藻的细胞丰度分别介于  $0.05 \times 10^3 \sim 178.75 \times 10^3$  cells/L 和  $0.10 \times 10^3 \sim 854.55 \times 10^3$  cells/L,平均值分别为  $(20.24 \pm 38.63) \times 10^3$  cells/L 和  $(83.94 \pm 220.72) \times 10^3$  cells/L;二者共同刻画了表层浮游植物的平面分布(图 4e,f)。

枯水期和丰水期主要优势种表层细胞丰度的平面分布示于图 5。具槽帕拉藻在枯水期占据绝对优势,表层细胞丰度介于  $0.00 \times 10^3 \sim 9.05 \times 10^3$  cells/L,平均值为  $(1.75 \pm 2.18) \times 10^3$  cells/L;高值分布在调查区东北部,它基本刻画了枯水期硅藻和浮游植物的分布(图 5a)。圆筛藻(*Coscinodiscus* sp.)和离心列海链藻(*Thalassiosira eccentrica*) 在表层的细胞丰度分别介于  $0.00 \times 10^3 \sim 1.20 \times 10^3$  cells/L 和  $0.00 \times 10^3 \sim 0.70 \times 10^3$  cells/L,平均值分别为  $(0.19 \pm 0.26) \times 10^3$  cells/L 和  $(0.13 \pm 0.16) \times 10^3$  cells/L;其高值区也出现在调查区东北部(图 5b,c)。东海原甲藻是丰水期的最优势物种,表层细

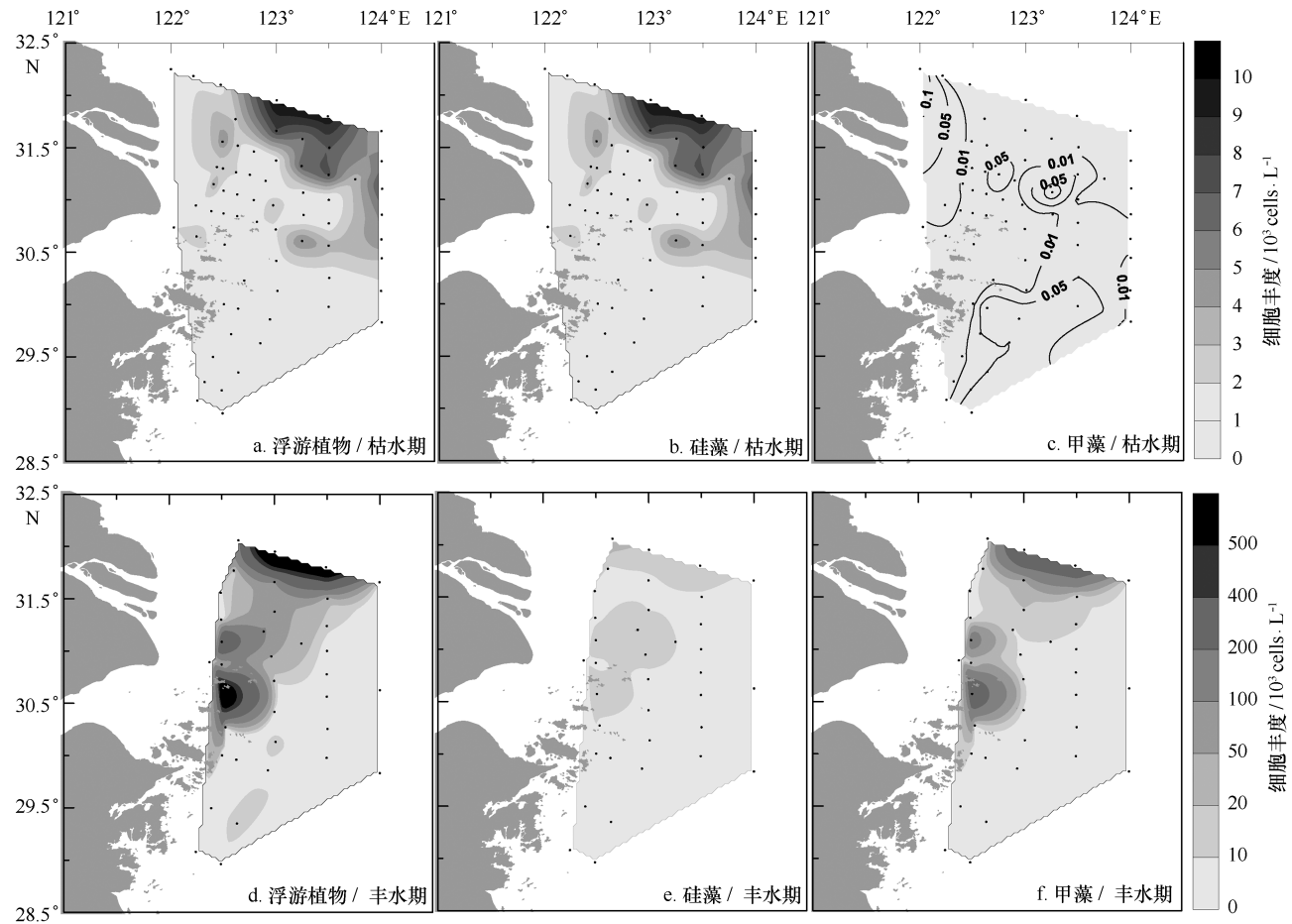


图4 调查区浮游植物表层细胞丰度( $10^3$  cells/L)的平面分布

Fig.4 Horizontal distribution of phytoplankton abundance ( $10^3$  cells/L) at the surface water in the survey area

胞丰度介于  $0 \sim 795.50 \times 10^3$  cells/L, 平均值为  $(77.03 \pm 210.97) \times 10^3$  cells/L; 其在口门外南北两侧形成两个高值区(图 5d)。骨条藻在表层的细胞丰度介于  $0 \sim 170.25 \times 10^3$  cells/L, 平均值为  $(9.58 \pm 30.73) \times 10^3$  cells/L; 其高值分布与东海原甲藻类似, 二者共同决定了丰水期浮游植物的分布(图 5e)。洛氏菱形藻(*Chaetoceros lorenzianus*)细胞丰度介于  $0 \sim 12.80 \times 10^3$  cells/L, 平均值为  $(1.59 \pm 2.88) \times 10^3$  cells/L; 高值区集中在口门外东南部水域(图 5f)。

### 3.3.2 垂直分布

枯水期浮游植物在垂直方向上变化较小, 基本上由硅藻的垂直分布决定(图 6a 和 b), 与表层分布一致; 甲藻丰度远低于硅藻, 在 10 m 以浅水层中略高(图 6c)。丰水期硅藻和甲藻均在表层和 5 m 层出现高值, 二者决定了浮游植物细胞丰度的垂直分布; 硅藻丰度由 5 m 层至 20 m 层明显降低, 20 m 以深随水

深变化较小; 甲藻丰度由 5 m 层至 30 m 层明显降低, 底层与 30 m 层差别较小(图 6d、e 和 f)。

选取 A5 断面研究了冲淡水断面浮游植物的垂直分布。枯水期浮游植物细胞丰度在近口门水域垂直变化较小, A5-6 以东水域在 20~30 m 层出现高值(图 7a); 硅藻细胞丰度的剖面与浮游植物的基本一致(图 7b); 甲藻细胞丰度远低于硅藻, 仅分布在 A5-7 以东水域, 细胞丰度在表层和次表层略高(图 7c)。丰水期浮游植物细胞丰度在口门附近的表层水体形成高值, 随水深增加迅速降低, 在外海区域呈现低值, 垂直变化较小(图 7d); 硅藻细胞丰度高值区的范围与浮游植物的一致, 但丰度较低(图 7e); 甲藻细胞丰度高值区较硅藻更为集中, 垂直变化更为显著(图 7f)。整体而言, 浮游植物及主要类群在丰水期的水体上层形成高值, 而在枯水期的垂直变化较小。

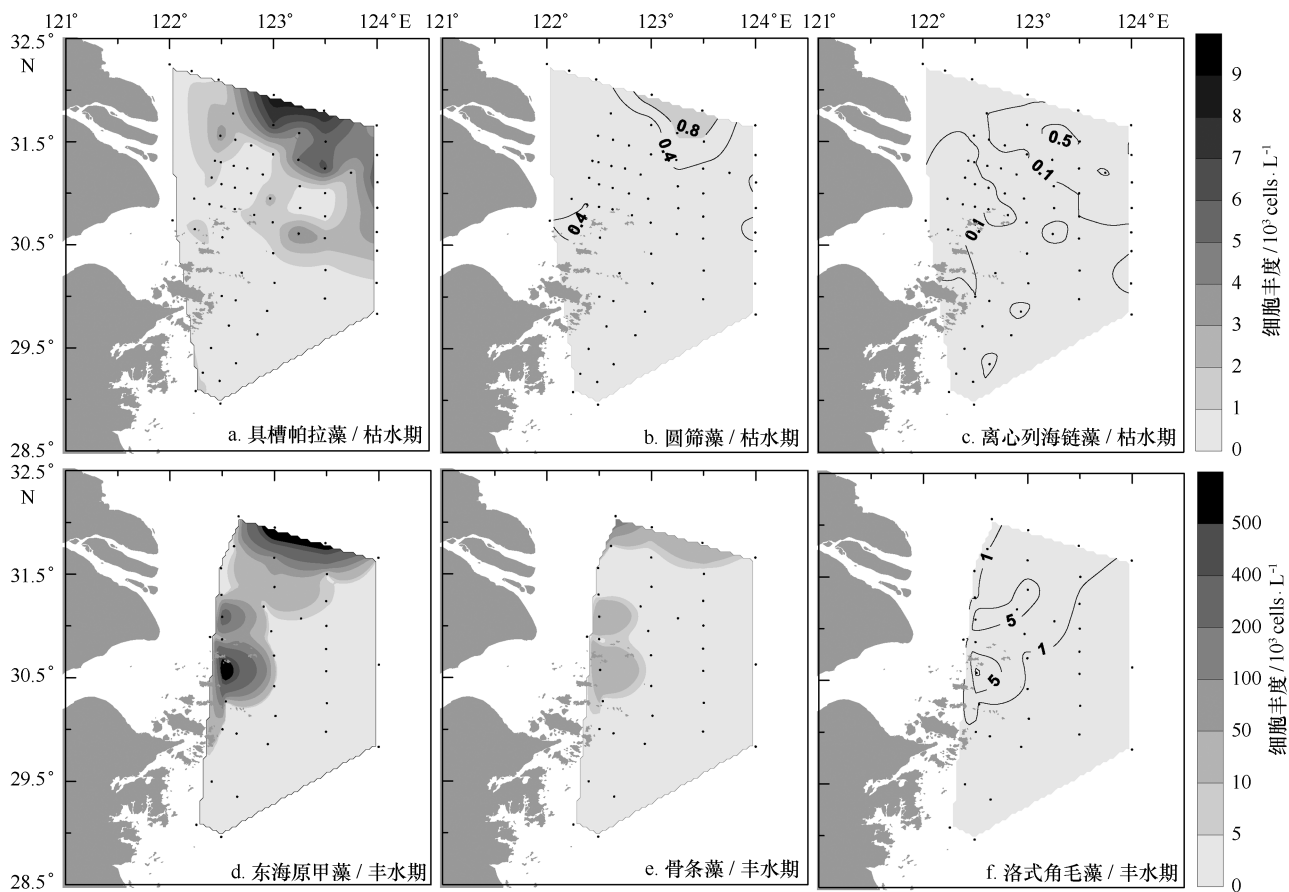


图5 调查区浮游植物优势物种表层细胞丰度( $10^3$  cells/L)的平面分布

Fig.5 Horizontal distribution of phytoplankton dominant species abundance ( $10^3$  cells/L) at the surface water in the survey area

### 3.4 浮游植物群落多样性

综合 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数评估了调查海域表层水体中浮游植物群落的多样性。枯水期, Shannon-Wiener 指数介于 0.45~2.95, 平均值为  $(1.58 \pm 0.61)$ ; 在近口门和调查区东南部水域形成高值, 在细胞丰度高值区呈现低值(图 8a)。Pielou 均匀度指数介于 0.19~1.00, 平均值为  $(0.64 \pm 0.22)$ ; Margalef 丰富度指数介于 0.38~3.19, 平均值为  $(1.56 \pm 0.61)$ ; 二者的平面分布基本与 Shannon-Wiener 指数一致(图 8b 和 c), 显示细胞丰度高值区物种丰富度较低且优势种单一导致群落多样性较低。丰水期, Shannon-Wiener 指数介于 0.51~4.48, 平均值为  $(2.66 \pm 1.06)$ ; 高值区出现在细胞丰度较低的调查区中部(图 8d)。Pielou 均匀度指数介于 0.11~0.98, 平均值为  $(0.65 \pm 0.26)$ ; Margalef 丰富度指数介于 1.76~6.75, 平均值为  $(3.57 \pm 1.28)$ ; 前者高值出现在调查区东南部水域(图 8e), 后者高值区出现在调查区中部(图 8f), 物种

丰富度决定了群落多样性的分布。与枯水期相比, 丰水期表层水体中浮游植物群落多样性较高, 主要取决于较为丰富的物种组成。

### 3.5 低氧与浮游植物的分布

枯水期底层溶解氧介于 4.04~10.64 mg/L, 平均值为  $(8.70 \pm 0.82)$  mg/L; 丰水期底层溶解氧介于 0.64~5.32 mg/L, 平均值为  $(3.49 \pm 1.24)$  mg/L。丰水期底层溶解氧明显低于枯水期, 其分布示于图 9, 调查区西北部的近口门水域底层溶解氧低于 3 mg/L, A1-4 和 A1-5 站位的底层溶解氧均低于 1 mg/L, 出现低氧现象。

选取丰水期的 A2 断面研究溶解氧和温度、盐度以及浮游植物细胞丰度的垂直剖面。溶解氧随水深增加迅速降低, 10 m 以深降至 3 mg/L 以下, 在 A2-4 站点 10 m 层出现 1.24 mg/L 的低值(图 10a)。等盐线在 A2 断面近似水平排列(图 10b), 呈现显著的垂直梯度, 低盐的冲淡水漂浮在高盐水之上; 等温线的排列方式与盐度的类似, 但水温随水深增加降低(图

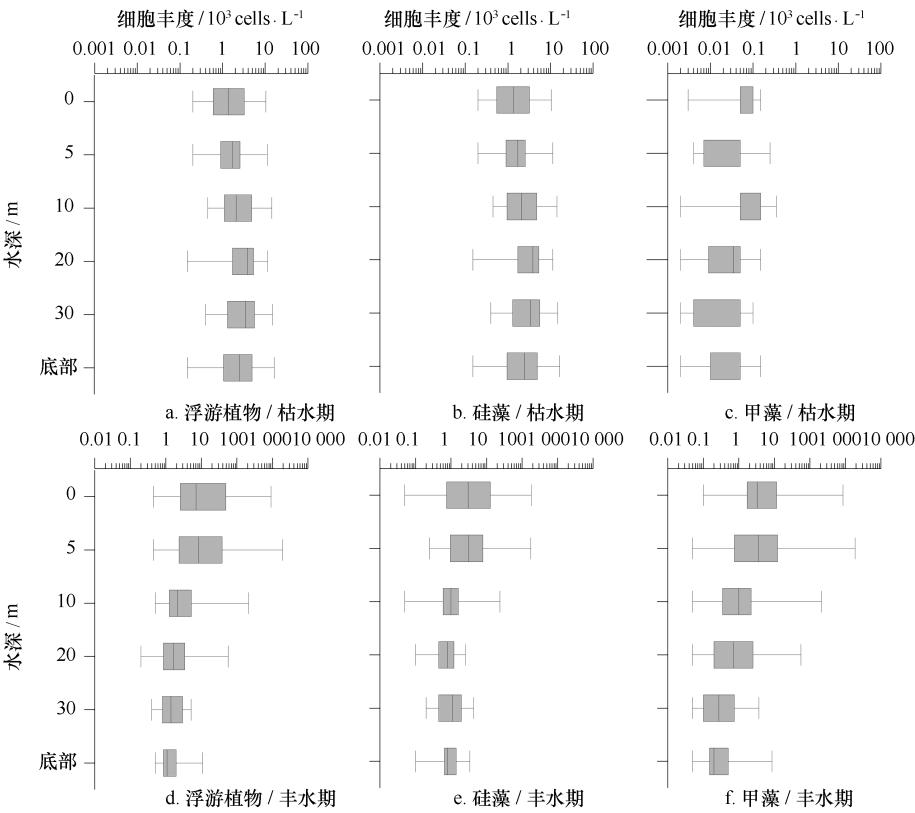


图 6 调查区浮游植物细胞丰度( $10^3$  cells/L)的垂直分布

Fig.6 Vertical distributions of phytoplankton abundance ( $10^3$  cells/L) in the survey area

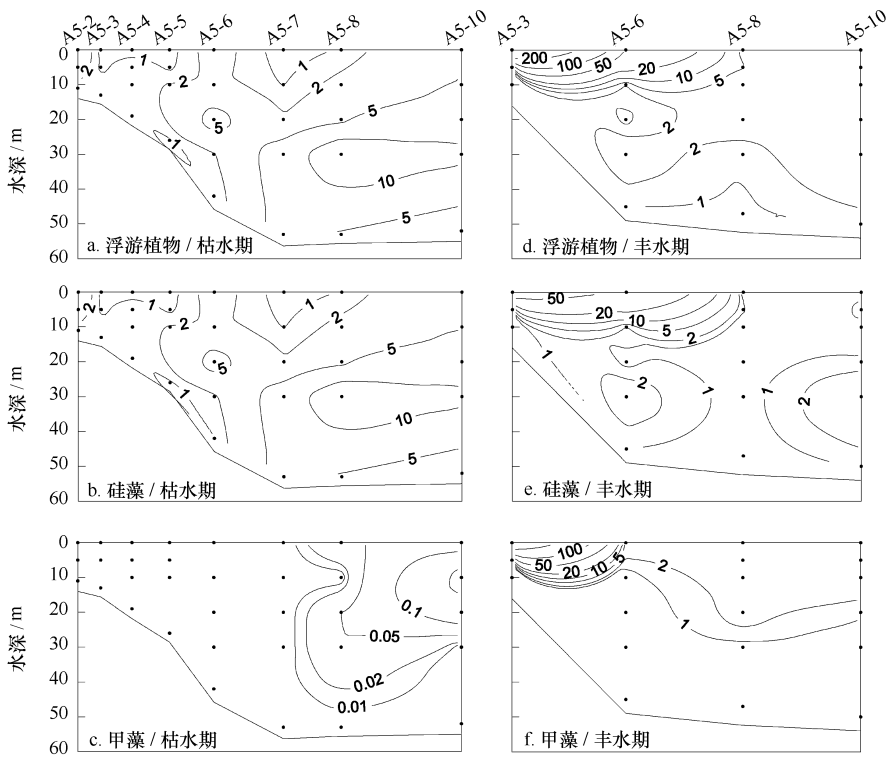


图 7 A5 断面的浮游植物细胞丰度( $10^3$  cells/L)剖面

Fig.7 Vertical profiles of phytoplankton abundance ( $10^3$  cells/L) in the Section A5



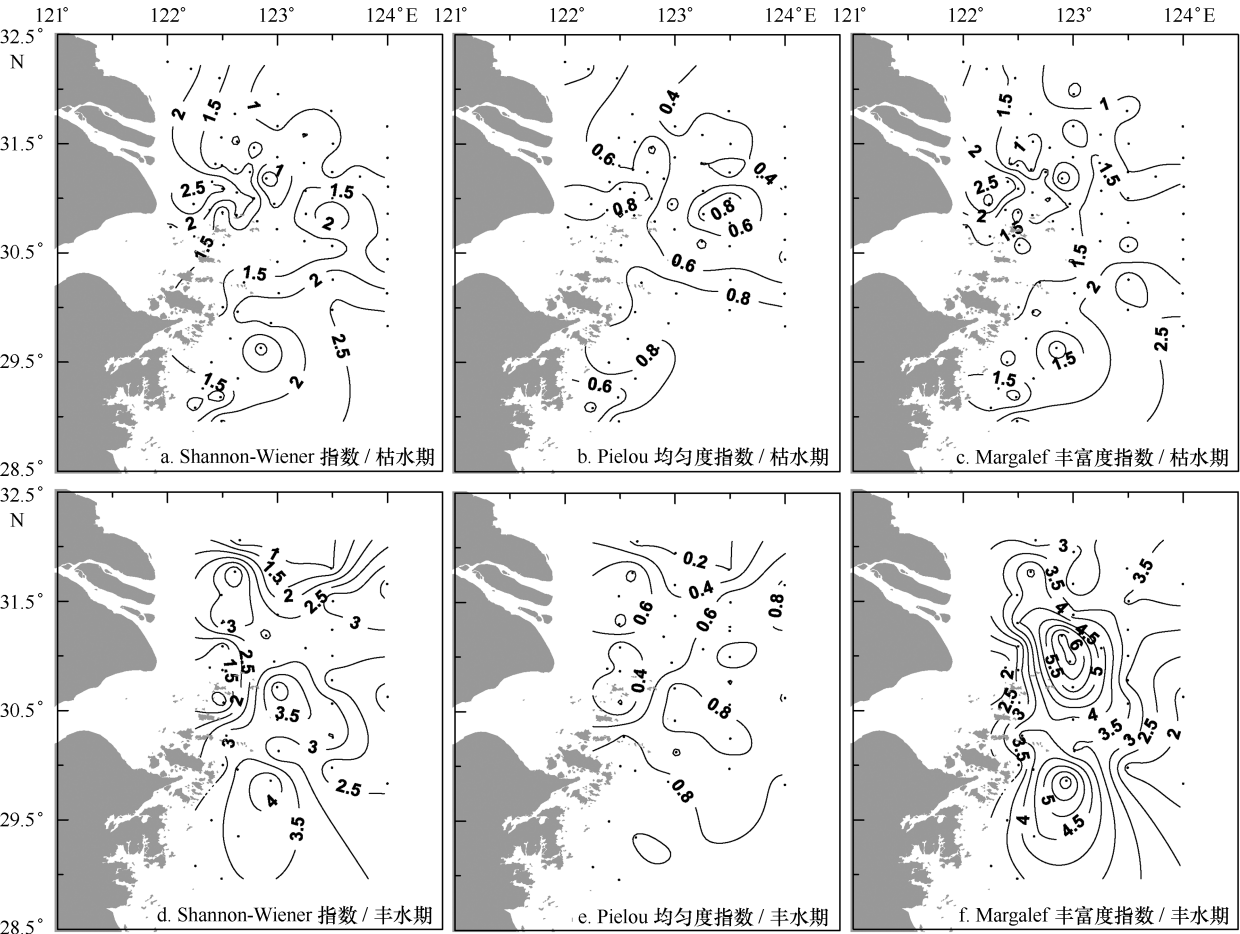


图 8 调查区群落多样性指数的平面分布

Fig.8 Horizontal distribution of community biodiversity indice in the survey area

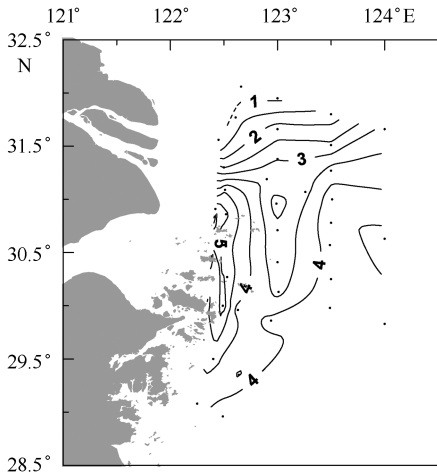


图 9 丰水期底层溶解氧(mg/L)的平面分布

Fig.9 The distribution of DO (mg/L) at the bottom in the wet season

10c)。温、盐的垂直分布显示丰水期 A2 断面的水体层化,阻碍了水体的垂直交换。浮游植物及硅藻和甲藻的细胞丰度均在浅层水体形成高值(图 10d、e 和 f)。其中,浮游植物细胞丰度介于  $0.60 \times 10^3 \sim$

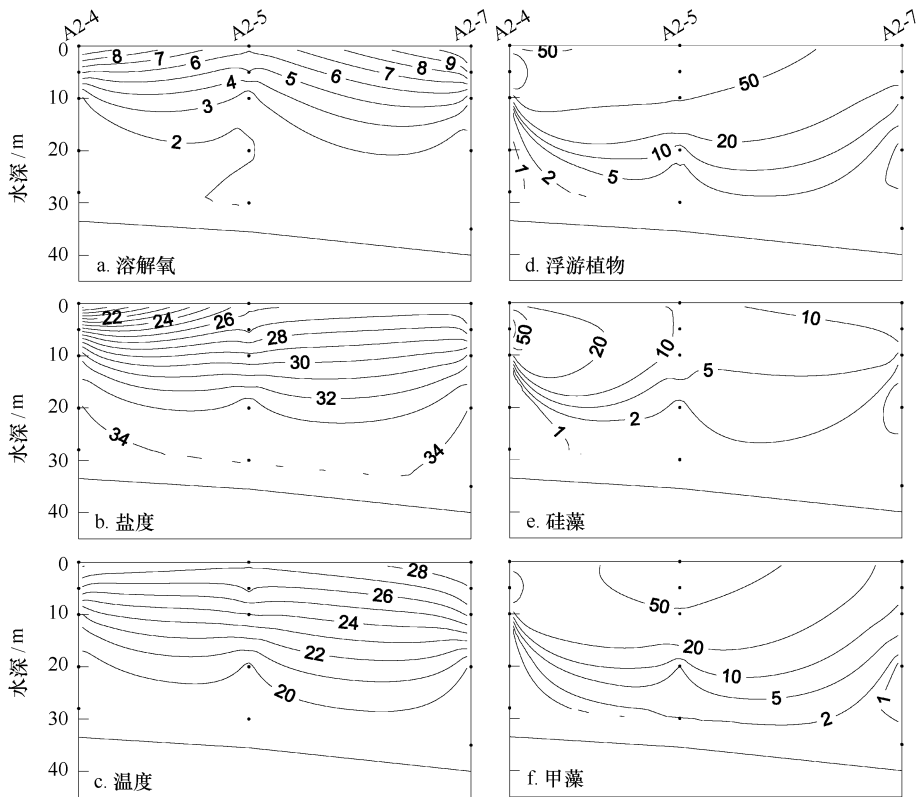


图 10 丰水期 A2 断面的溶解氧(mg/L)、盐度、温度(°C)和浮游植物丰度( $10^3$  cells/L)剖面

Fig.10 Vertical profiles of DO (mg/L) salinity, temperature (°C) and phytoplankton abundance ( $10^3$  cells/L) in the Section A2 in the wet season

$287.45 \times 10^3$  cells/L,平均值为  $(40.45 \pm 72.01) \times 10^3$  cells/L;硅藻细胞丰度介于  $0.50 \times 10^3 \sim 170.85 \times 10^3$  cells/L,平均值为  $(15.92 \pm 41.74) \times 10^3$  cells/L;甲藻细胞丰度介于  $0 \sim 116.60 \times 10^3$  cells/L,平均值为  $(24.47 \pm 36.11) \times 10^3$  cells/L。

## 4 讨论

### 4.1 环境因子对浮游植物分布的影响

长江口及其邻近海域浮游植物群落的特征及动态变化受温度、盐度、浊度、营养盐等多个环境因子的综合作用,以细胞丰度为主要的物种变量,研究了浮游植物与环境因子之间的相关性(表 2)。枯水期,表层浮游植物和硅藻均与盐度呈正相关,与硝酸盐呈负相关;甲藻与各环境因子没有明显的相关性;优势种具槽帕拉藻与盐度呈显著的正相关,与硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐呈负相关。全水层浮游植物、硅藻、甲藻和具槽帕拉藻均与浊度呈负相关,除甲藻外与盐度呈正相关,而与 3 项营养盐均呈负相关。相关性分析表明枯水期浮游植物的分布与盐度、浊度和营养盐关系

密切,显示长江冲淡水过程主导了浮游植物的分布,其中浊度指示的水体透光度可能对其影响最大<sup>[3,16]</sup>。丰水期,表层浮游植物和硅藻与盐度和浊度呈负相关,与温度和营养盐没有明显的相关性;甲藻仅与浊度呈负相关,与温度、盐度和营养盐没有明显的相关性;优势物种窄隙角毛藻与浊度呈负相关,骨条藻与盐度呈负相关。全水层浮游植物与温度呈正相关,与盐度和浊度以及磷酸盐呈负相关;硅藻与温度和硝酸盐呈正相关,与盐度和磷酸盐呈负相关;甲藻和东海原甲藻仅与盐度呈负相关,与其他环境因子无显著相关性;优势硅藻窄隙角毛藻和骨条藻均与温度呈正相关、与盐度呈显著负相关,前者与磷酸盐呈负相关,后者与硝酸盐呈正相关;米氏凯伦藻与温度呈正相关,与盐度和磷酸盐呈负相关。丰水期浮游植物与各环境因子的关系不同于枯水期,体现了不同浮游植物类群对环境因子响应的差异,细胞丰度高值区的位置更靠近口门;浊度仍是制约浮游植物生长的主要环境因子。

表 2 浮游植物与环境因子的相关性分析

Tab.2 Correlation analysis between the phytoplankton and environmental factors

| 时间  |       |    | 温度       | 盐度        | 浊度        | 硝酸盐       | 磷酸盐       | 硅酸盐       |
|-----|-------|----|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 枯水期 | 浮游植物  | 表层 | −0.150   | 0.317 *   | −0.172    | −0.304 *  | −0.237    | −0.236    |
|     |       | 全部 | −0.004   | 0.319 **  | −0.205 *  | −0.363 ** | −0.292 ** | −0.333 ** |
|     | 硅藻    | 表层 | −0.148   | 0.315 *   | −0.171    | −0.303 *  | −0.236    | −0.235    |
|     |       | 全部 | −0.004   | 0.319 **  | −0.204 *  | −0.363 ** | −0.291 ** | −0.333 ** |
|     | 甲藻    | 表层 | 0.160    | 0.138     | −0.169    | −0.102    | −0.103    | −0.122    |
|     |       | 全部 | 0.108    | 0.060     | −0.149 *  | −0.065    | −0.092    | −0.096    |
|     | 具槽帕拉藻 | 表层 | −0.116   | 0.385 **  | −0.240    | −0.362 ** | −0.279 *  | −0.282 *  |
|     |       | 全部 | 0.027    | 0.349 **  | −0.265 ** | −0.384 ** | −0.306 ** | −0.344 ** |
|     | 浮游植物  | 表层 | −0.263   | −0.129 *  | −0.009 *  | −0.009    | −0.173    | −0.062    |
|     |       | 全部 | 0.158 *  | −0.248 ** | −0.072 *  | −0.009    | −0.157 *  | −0.063    |
| 丰水期 | 硅藻    | 表层 | −0.111   | −0.364 *  | −0.027 *  | 0.116     | −0.215    | −0.046    |
|     |       | 全部 | 0.214 ** | −0.509 ** | −0.076    | 0.185 *   | −0.192 *  | 0.006     |
|     | 甲藻    | 表层 | −0.266   | −0.077    | −0.005 *  | −0.030    | −0.150    | −0.059    |
|     |       | 全部 | 0.135    | −0.185 *  | −0.064    | −0.037    | −0.137    | −0.068    |
|     | 东海原甲藻 | 表层 | −0.275   | −0.073    | 0.003     | −0.025    | −0.141    | −0.052    |
|     |       | 全部 | 0.127    | −0.176 *  | −0.059    | −0.038    | −0.127    | −0.063    |
|     | 窄隙角毛藻 | 表层 | −0.191   | −0.193    | −0.067 *  | −0.019    | −0.227    | −0.187    |
|     |       | 全部 | 0.206 ** | −0.378 ** | −0.107    | 0.060     | −0.220 ** | −0.134    |
|     | 骨条藻   | 表层 | −0.039   | −0.326 *  | 0.012     | 0.165     | −0.128    | 0.051     |
|     |       | 全部 | 0.154 *  | −0.427 ** | −0.039    | 0.184 *   | −0.130    | 0.062     |
|     | 米氏凯伦藻 | 表层 | −0.162   | −0.144    | −0.047    | −0.015    | −0.196    | −0.098    |
|     |       | 全部 | 0.167 *  | −0.360 ** | −0.094    | 0.101     | −0.219 ** | −0.051    |

注：\* \* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,\* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

近年来,长江口及其邻近海域硅藻丰度占浮游植物总丰度的比重呈下降趋势,甲藻丰度比重上升,甲藻藻华频繁暴发,威胁生态环境的安全<sup>[21-22]</sup>。Zhou 等<sup>[4]</sup>认为浮游植物群落的这一改变与长江口及其邻近海域 N/P 比增加、Si/N 比减小有关。受长江冲淡水、沿岸流、黑潮及黄海冷水团的影响,1960 年到 1990 年长江口及其邻近海域的 DIN 增加了 2 倍、硅酸盐减少了 2 倍,导致 N/P 增加、Si/N 降低<sup>[23]</sup>。对调查区内表层浮游植物硅藻、甲藻的相对丰度与 N/P、Si/N 比值的拟合分析发现,随着 N/P 比值的升高,硅藻的相对丰度逐渐降低、甲藻逐渐升高。与 Si/N 比值并没有明显的相关性(图 11)。Huang 等<sup>[24]</sup>

在对东头岛附近海域进行的研究结果显示不同的 N/P 比对浮游植物群落生长及演替具有一定的影响,不断提高 N/P 比会促进硅藻到甲藻的群落演替。甲藻对于磷具有一定的储存能力而硅藻易于受到磷限制,硅藻在细胞氮磷比值较低的情况下更易生长;甲藻对于磷的适应范围较宽,在细胞氮磷比值较高时,仍能达到健康状态,具有较强的生长潜力。Anderson 等<sup>[25]</sup>认为不同种类浮游植物的生长和营养盐利用方式的差异是影响其生态策略并决定群落竞争格局的关键因素之一。与其他藻类相比,多数硅藻(如中肋骨条藻)对营养盐吸收的半饱和浓度( $K_s$ )较低而且又具有更高的生长速率,它们被称为  $r$ -对策者。这

些类群在演替前期营养盐充足条件下凭借其生长特性迅速占据竞争优势。与此相反,多数甲藻(如东海原甲藻和尖叶原甲藻)细胞储备营养盐的能力远高于硅藻但生长速率较低,属于典型的  $k$ -对策者。这些类群在演替前期营养盐充足时通过“奢侈消费”在细胞内储备更多营养盐(并非用于生长),并在演替后期

营养盐缺乏时保持良好生长状态和繁殖速率从而使其取得竞争优势<sup>[26-28]</sup>。长江口营养盐含量的时空变化以及浮游植物生长繁殖时内在需求的差异,影响了该水域浮游植物群落特有的时空分布格局,从而导致了浮游植物不同区域分布和季节变化的现象。

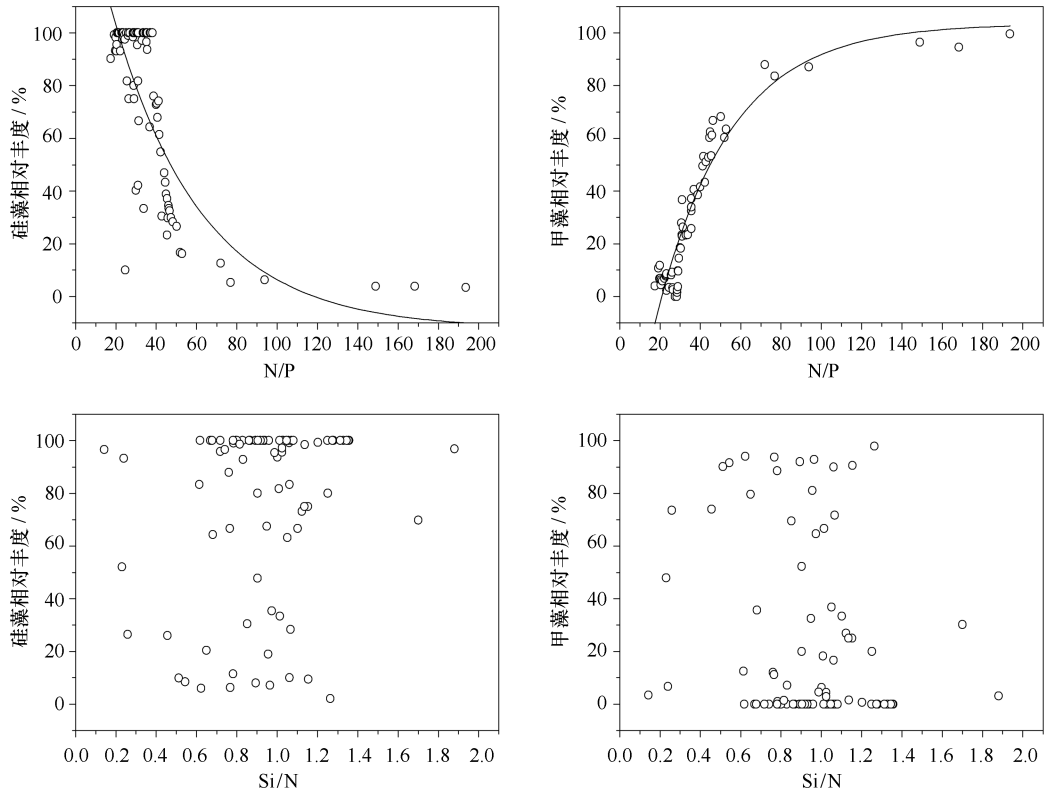


图 11 调查区表层水体 N/P 比、Si/N 比与硅藻、甲藻细胞相对丰度的关系

Fig.11 Relative abundance of diatom and dinoflagellate versus N/P and Si/N ratios at the surface in the survey area

#### 4.2 浮游植物在低氧区形成中的作用

长江口外的低氧现象日益严重,夏季低氧区呈现位置北移、溶解氧最低值波动下降和面积扩大的趋势<sup>[10-11,29]</sup>。低氧区的形成受浮游植物丰度及群落结构组成、有机物沉降速率及底层的停留时间、温度、水体层化、海底地形等多种因素的共同影响<sup>[30]</sup>。在 2013 年同期的现场调查中,丰水期有 5 个站位底层溶解氧浓度低于 2 mg/L,最低值仅为 0.64 mg/L,溶解氧饱和度最低值仅为 9.17 %;结果显示底层溶解氧低值区分布与表层叶绿素高值区大致吻合,均位于调查海域的北部;低氧现象与表层浮游植物的生长和现存量密切相关<sup>[31]</sup>,同时,在本研究中温度、盐度和浮游植物细胞丰度的垂直剖面显示,低氧区水体层化,

浮游植物在上层呈现高值。浮游植物沉降到底层分解大量消耗溶解氧,温、盐跃层阻碍了溶解氧的补充(图 10)。

为进一步分析表层浮游植物与底层低氧的关系,研究了丰水期 A2-4 和 A4-7 站位浮游植物分布与溶解氧的关系。A2-4 站位水体在 5 m 层附近存在温、盐跃层,浮游植物细胞丰度在 5 m 层最高,随深度增加迅速降低,底层仅为 5 m 层的 1/400(图 12);溶解氧分布与细胞丰度分布趋势一致,10 m 以深水层溶解氧浓度较低,在底层达到低氧范围。A4-7 站位水体在 10 m 层附近存在温、盐跃层,细胞丰度在表层最高,随深度增加而降低(图 12);溶解氧最大值出现在表层,随深度增加而降低,底层未出现低氧现象。两

站水体均呈现层化,且浮游植物在上层水体形成高值,但 A4-7 站位未形成底层低氧。这一方面与 A4-7 跃层较弱有关,A2-4 站位水体层化程度高于 A4-7 站位,阻碍了溶解氧的补充。另一方面可能与浮游植物群落结构有关,A2-4 站位主要优势类群为骨条藻与

海链藻,A4-7 站位主要优势类群为角毛藻与裸甲藻。Guo 等<sup>[32]</sup>发现浮游植物沉降速率与浮游植物群落的结构具有较大相关性,硅藻占优势的群落沉降速率高于甲藻占优势的群落,因此,A2-4 站位的浮游植物比 A4-7 站位的更容易沉降到水体底层。

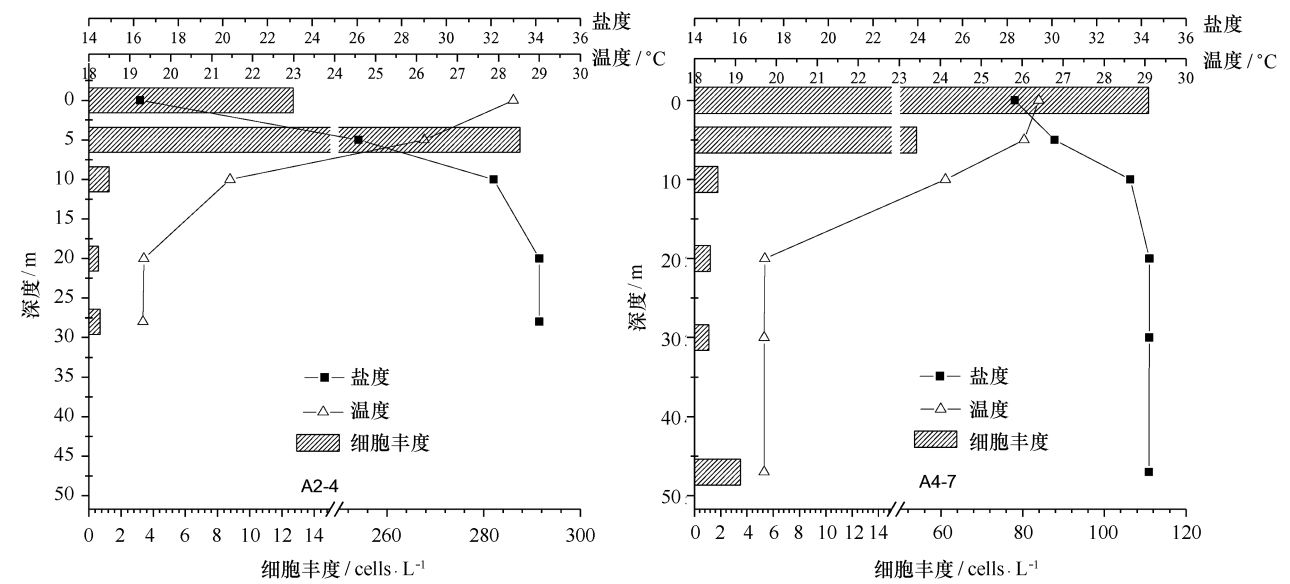


图 12 典型站位温度(°C)、盐度、细胞丰度(10<sup>3</sup> cells/L)的垂直分布

Fig.12 Vertical profiles of temperature (°C), salinity and phytoplankton abundance (10<sup>3</sup> cells/L) at the typical stations

5 结论

长江口及其邻近海域丰、枯水期浮游植物群落主要由硅藻和甲藻组成,以沿岸广温型为主;丰水期物种丰富,细胞丰度高,在近岸水域形成高值区,随深度增加而降低,主要优势种为东海原甲藻和骨条藻;枯水期物种数量较少,细胞丰度低,在离岸水域形成高值区,垂直变化较小,主要优势种为具槽帕拉藻。

浮游植物的空间分布受长江口冲淡水影响,与盐度和浊度有显著的相关性;N/P 比影响浮游植物群落

结构,随着 N/P 比升高,甲藻的相对丰度升高,硅藻的相对丰度逐渐降低。

丰水期口门外底层水体出现低氧现象,水体层化和跃层上方浮游植物细胞的大量繁殖是低氧形成的必要条件;不同浮游植物类群具有不同的沉降速率,因而浮游植物群落结构与底层低氧的形成有一定关系。

致谢:本研究搭载的“2013 年长江口海洋科学考察共享航次”由国家自然科学基金委资助,谨致谢忱!

参考文献:

[1] Beman J M, Arrigo K R, Matson P A. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean[J]. Nature, 2005, 434 (7030): 211—214.

[2] Burkholder J M, Dickey D A, Kinder C A, et al. Comprehensive trend analysis of nutrients and related variables in a large eutrophic estuary: a decadal study of anthropogenic and climatic influences[J]. Limnology and Oceanography, 2006, 51(1): 463—487.

[3] Chai Chao, Yu Zhiming, Song Xiuxian, et al. The status and characteristics of eutrophication in the Yangtze River (Changjiang) Estuary and the adjacent East China Sea, China[J]. Hydrobiologia, 2006, 563(1): 313—328.

[4] Zhou Mingjiang, Shen Zhiliang, Yu Rencheng. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(12): 1483—1489.

[5] Paerl H W, Valdes L M, Pinckney J L, et al. Phytoplankton photopigments as indicators of estuarine and coastal eutrophication[J]. BioScience,



- 2003, 53(10): 953—964.
- [6] 黄邦钦, 胡俊, 柳欣, 等. 全球气候变化背景下浮游植物群落结构的变动及其对生物泵效率的影响[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2011, 50(2): 402—410.
- Huang Bangqin, Hu Jun, Liu Xin, et al. Review on phytoplankton community structure and its coupling with biological carbon pump under global climate changes[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2011, 50(2): 402—410.
- [7] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 1—16.
- Su Jilan. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China[J]. Haiyang Xuebao, 2001, 23(4): 1—16.
- [8] He X, Bai Y, Pan D, et al. Satellite views of the seasonal and interannual variability of phytoplankton blooms in the eastern China seas over the past 14 yr (1998—2011)[J]. Biogeosciences, 2013, 10(7): 4721—4739.
- [9] Zhu Zhuoyi, Zhang Jing, Wu Ying, et al. Hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary: oxygen depletion and organic matter decomposition [J]. Marine Chemistry, 2011, 125(1/4): 108—116.
- [10] 李道季, 张经, 黄大吉, 等. 长江口外氧的亏损[J]. 中国科学:D 辑, 2002, 32(8): 686—694.
- Li Daoji, Zhang Jing, Huang Daji, et al. Oxygen depletion off the Changjiang (Yangtze River) Estuary[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2002, 32(8): 686—694.
- [11] 韦钦胜, 臧家业, 战闰, 等. 夏季长江口东北部上升流海域的生态环境特征[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(6): 899—905.
- Wei Qinsheng, Zang Jiaye, Zhan Run, et al. Characteristics of the ecological environment in the upwelling area northeast of the Changjiang River Estuary[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(6): 899—905.
- [12] 郭玉洁, 杨则禹. 长江口浮游植物的数量变动及生态分析[J]. 海洋科学集刊, 1992, 33: 167—189.
- Guo Yujie, Yang Zeyu. Quantity variation and ecological analysis of phytoplankton in Yangtze River[J]. Studia Marina Sinica, 1992, 33: 167—189.
- [13] 李瑞香, 毛兴华. 东海陆架区的甲藻[J]. 东海海洋, 1985, 3(1): 41—55.
- Li Ruixiang, Mao Xinghua. Dinoflagellates in the continental shelf of the East China Sea[J]. Donghai Marine Science, 1985, 3(1): 41—55.
- [14] 栾青杉, 孙军, 宋书群, 等. 2004 年秋季长江口及其邻近水域浮游植物群集[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(3): 364—371.
- Luan Qingshan, Sun Jun, Song Shuqun, et al. Phytoplankton assemblage in Changjiang Estuary and its adjacent waters in Autumn, 2004[J]. Advances in Marine Science, 2008, 26(3): 364—371.
- [15] 栾青杉, 孙军. 2005 年夏季长江口水域浮游植物群集特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(18): 4967—4975.
- Luan Qingshan, Sun Jun. 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.
- [16] 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 Qing, Sun Jun. The netz-phytoplankton community in Changjiang (Yangtze) River Estuary and adjacent waters[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3928—3938.
- [17] 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 Zhibing, Zeng Jiangning, Li Hongliang, et al. Distribution of net-phytoplankton community in summer and its influence factors in the Changjiang Estuary and adjacent continental shelf[J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(6): 112—123.
- [18] 金德祥, 陈金环, 黄凯歌. 中国海洋浮游硅藻类[M]. 上海: 科学技术出版社, 1965: 1—230.
- Jin Dexiang, Chen Jinhuan, Huang Kaige. Marine Planktonic Diatoms of China[M]. Shanghai: Shanghai Science Press, 1965: 1—230.
- [19] 孙军, 刘东艳, 钱树本. 一种海洋浮游植物定量研究分析方法—Utermöhl 方法的介绍及其改进[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(2): 105—112.
- Sun Jun, Liu Dongyan, Qian Shuben. A quantative research and analysis method for marine phytoplankton: an introduction to Utermöhl method and its modification[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2002, 20(2): 105—112.
- [20] 孙军, 刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用[J]. 海洋学报, 2004, 26(1): 62—75.
- Sun Jun, Liu Dongyan. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies[J]. Haiyang Xuebao, 2004, 26(1): 62—75.
- [21] 王金辉. 长江口邻近水域的赤潮生物[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(2): 37—41.
- Wang Jinhui. HAB alga nearby Changjiang Estuary[J]. Marine Environmental Science, 2002, 21(2): 37—41.
- [22] Zhu Zhuoyi, Ng Waiman, Liu Sumei, et al. Estuarine phytoplankton dynamics and shift of limiting factors: a study in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent area[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 84(3): 393—401.
- [23] Wang Baodong. Cultural eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) plume: history and perspective[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 69(3/4): 471—477.
- [24] Huang Wei, Zhu Xuyu, Zeng Jiangning, et al. Responses in growth and succession of the phytoplankton community to different N/P ratios near Dongtou Island in the East China Sea[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2012, 434—435: 102—109.
- [25] Andersen T, Schartau A K L, Paasche E. Quantifying external and internal nitrogen and phosphorus pools, as well as nitrogen and phosphorus supplied through remineralization, in coastal marine plankton by means of a dilution technique[J]. Marine Ecology Progress Series, 1991, 69: 67—80.
- [26] Baek S H, Shimode S, Han M S, et al. Growth of dinoflagellates, *Ceratium furca* and *Ceratium fusus* in Sagami Bay, Japan: the role of nutrients [J]. Harmful Algae, 2008, 7(6): 729—739.

- [27] Li Yang, Lü Songhui, Jiang Tianjiu, et al. Environmental factors and seasonal dynamics of *Prorocentrum* populations in Nanji Islands National Nature Reserve, East China Sea[J]. Harmful Algae, 2011, 10(5): 426—432.
- [28] Cuvín-Aralar M L, Focken U, Becker K, et al. Effects of low nitrogen-phosphorus ratios in the phytoplankton community in Laguna de Bay, a shallow eutrophic lake in the Philippines[J]. Aquatic Ecology, 2004, 38(3): 387—401.
- [29] 石晓勇, 王修林, 陆茸, 等. 东海赤潮高发区春季溶解氧和 pH 分布特征及影响因素探讨[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(5): 404—412.  
Shi Xiaoyong, Wang Xiulin, Lu Rong, et al. Distribution of dissolved oxygen and pH in frequent HAB area of the East China Sea in Spring 2002 [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(5): 404—412.
- [30] 朱卓毅. 长江口及邻近海域低氧现象的探讨——以光合色素为出发点[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.  
Zhu Zhuoyi. Hypoxia in the Changjiang estuary and its adjacent area—started with phytoplankton pigments[D] Shanghai: East China Normal University, 2007.
- [31] 李照, 宋书群, 李才文. 长江口及其邻近海域叶绿素 *a* 分布特征及其与低氧区形成的关系[J]. 海洋科学, 2016, 40(2): 1—10.  
Li Zhao, Song Shuqun, Li Caiwen. Distribution of chlorophyll *a* and its correlation with the formation of hypoxia in the Changjiang River Estuary and its adjacent waters[J]. Marine Sciences, 2016, 40(2): 1—10.
- [32] Guo Shujin, Sun Jun, Zhao Qibiao, et al. Sinking rates of phytoplankton in the Changjiang (Yangtze River) estuary: a comparative study between *Prorocentrum dentatum* and *Skeletonema dornanii* bloom[J]. Journal of Marine Systems, 2016, 154: 5—14.

附表 丰、枯水期浮游植物的物种组成  
Appendix Phytoplankton species composition during the wet season and dry season

|         | 物种                                       | 枯水期 | 丰水期 |
|---------|------------------------------------------|-----|-----|
| 硅藻门     | Bacillariophyta                          |     |     |
| 六辐辐润藻   | <i>Actinoptychus senarius</i>            | +   | +   |
| 辐衲藻     | <i>Actinoptychus</i> sp.                 | +   | +   |
| 华美辐衲藻   | <i>Actinoptychus splendens</i>           |     | +   |
| 三舌辐润藻   | <i>Actinoptychus trilingulatus</i>       | +   | +   |
| 细线条月形藻  | <i>Amphora lineolata</i>                 | +   | +   |
| 花舟藻     | <i>Anomoeoneis</i> sp.                   | +   |     |
| 冰河拟星杆藻  | <i>Asterionellopsis glacialis</i>        |     | +   |
| 加拉星平藻   | <i>Asteroplanus karianus</i>             |     | +   |
| 叉状辐杆藻   | <i>Bacteriastrium furcatum</i>           |     | +   |
| 辐杆藻     | <i>Bacteriastrium</i> sp.                | +   | +   |
| 平滑盒形藻   | <i>Biddulphia laevis</i>                 | +   |     |
| 网状盒形藻   | <i>Biddulphia reticulata</i>             | +   |     |
| 盒形藻     | <i>Biddulphia</i> sp.                    | +   | +   |
| 窄隙角毛藻   | <i>Chaetoceros affinis</i>               | +   | +   |
| 旋链角毛藻   | <i>Chaetoceros curvisetus</i>            | +   | +   |
| 皇冠角毛藻   | <i>Chaetoceros diadema</i>               |     | +   |
| 洛氏角毛藻   | <i>Chaetoceros lorenzianus</i>           |     | +   |
| 秘鲁角毛藻   | <i>Chaetoceros peruvianus</i>            | +   | +   |
| 角毛藻     | <i>Chaetoceros</i> sp.                   | +   | +   |
| 威氏角毛藻   | <i>Chaetoceros weissflogii</i>           |     | +   |
| 梯形藻     | <i>Climacodium</i> sp.                   |     | +   |
| 豪猪棘冠藻   | <i>Corethron hystrix</i>                 | +   | +   |
| 蛇目圆筛藻   | <i>Coscinodiscus argus</i>               |     | +   |
| 星脐圆筛藻   | <i>Coscinodiscus asteromphalus</i>       | +   | +   |
| 中心圆筛藻   | <i>Coscinodiscus centralis</i>           | +   | +   |
| 整齐圆筛藻   | <i>Coscinodiscus concinnus</i>           | +   | +   |
| 弓束圆筛藻   | <i>Coscinodiscus curvatus</i>            | +   | +   |
| 格氏圆筛藻   | <i>Coscinodiscus granii</i>              | +   | +   |
| 琼氏圆筛藻   | <i>Coscinodiscus jonesianus</i>          | +   |     |
| 具边圆筛藻   | <i>Coscinodiscus marginatus</i>          | +   |     |
| 具边线型圆筛藻 | <i>Coscinodiscus marginatus-lineatus</i> | +   | +   |
| 小眼圆筛藻   | <i>Coscinodiscus oculatus</i>            | +   |     |

续附表

|        | 物种                                            | 枯水期 | 丰水期 |
|--------|-----------------------------------------------|-----|-----|
| 虹彩圆筛藻  | <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>            | +   | +   |
| 辐射圆筛藻  | <i>Coscinodiscus radiatus</i>                 | +   |     |
| 圆筛藻    | <i>Coscinodiscus</i> spp.                     | +   | +   |
| 细弱圆筛藻  | <i>Coscinodiscus subtilis</i>                 | +   | +   |
| 苏氏圆筛藻  | <i>Coscinodiscus thorii</i>                   | +   | +   |
| 筛链藻    | <i>Coscosira</i> sp.                          |     | +   |
| 小环藻    | <i>Cyclotella</i> sp.                         | +   | +   |
| 条纹小环藻  | <i>Cyclotella striata</i>                     | +   | +   |
| 新月柱鞘藻  | <i>Cylindrotheca closterium</i>               |     | +   |
| 脆指管藻   | <i>Dactyliosolen fragilissimus</i>            |     | +   |
| 矮小短棘藻  | <i>Detonula pumila</i>                        |     | +   |
| 蜂腰双壁藻  | <i>Diploneis bombus</i>                       | +   | +   |
| 双壁藻    | <i>Diploneis</i> sp.                          | +   | +   |
| 布氏双尾藻  | <i>Ditylum brightwelli</i>                    | +   |     |
| 太阳双尾藻  | <i>Ditylum sol</i>                            | +   |     |
| 翼内茧藻   | <i>Entomoneis alata</i>                       | +   | +   |
| 浮动弯角藻  | <i>Eucampia zodiacus</i>                      |     | +   |
| 柔弱井字藻  | <i>Eunotogramma frauenfeldii</i>              | +   | +   |
| 环刺藻    | <i>Gossleriella</i> sp.                       |     | +   |
| 菱软几内亚藻 | <i>Guinardia flaccida</i>                     |     | +   |
| 斯氏几内亚藻 | <i>Guinardia striata</i>                      |     | +   |
| 半管藻    | <i>Hemiaulus</i> sp.                          |     | +   |
| 丹麦细柱藻  | <i>Leptocylindrus danicus</i>                 |     | +   |
| 短纹楔形藻  | <i>Licmophora abbreviata</i>                  | +   | +   |
| 颗粒直链藻  | <i>Melosira granulata</i>                     | +   | +   |
| 念珠直链藻  | <i>Melosira moniliformis</i>                  | +   |     |
| 直链藻    | <i>Melosira</i> sp.                           | +   | +   |
| 舟形藻    | <i>Navicula</i> sp.                           | +   | +   |
| 长菱形藻   | <i>Nitzschia longissima</i>                   | +   | +   |
| 弯端长菱形藻 | <i>Nitzschia longissima</i> f. <i>reversa</i> |     | +   |
| 洛氏菱形藻  | <i>Nitzschia lorenziana</i>                   |     | +   |
| 菱形藻    | <i>Nitzschia</i> sp.                          | +   | +   |
| 中华齿状藻  | <i>Odontella sinensis</i>                     | +   | +   |
| 哈德掌状藻  | <i>Palmeria hardmaniana</i>                   |     | +   |

续附表

|        | 物种                                    | 枯水期 | 丰水期 |
|--------|---------------------------------------|-----|-----|
| 具槽帕拉藻  | <i>Paralia sulcata</i>                | +   | +   |
| 褐指藻    | <i>Phaeodactylum</i> sp.              |     | +   |
| 羽纹藻    | <i>Pinnularia</i> sp.                 | +   | +   |
| 具翼漂流藻  | <i>Planktoniella blanda</i>           | +   | +   |
| 近缘斜纹藻  | <i>Pleurosigma affine</i>             | +   | +   |
| 宽角斜纹藻  | <i>Pleurosigma angulatum</i>          |     | +   |
| 美丽斜纹藻  | <i>Pleurosigma formosum</i>           |     | +   |
| 海洋斜纹藻  | <i>Pleurosigma pelagicum</i>          | +   | +   |
| 菱形斜纹藻  | <i>Pleurosigma rhombeum</i>           |     | +   |
| 斜纹藻    | <i>Pleurosigma</i> sp.                | +   | +   |
| 翼鼻状藻   | <i>Proboscia alata</i>                |     | +   |
| 琴式沙网藻  | <i>Psammodictyon panduriformis</i>    |     | +   |
| 柔弱伪菱形藻 | <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> | +   | +   |
| 尖刺伪菱形藻 | <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>       | +   | +   |
| 伪菱形藻   | <i>Pseudo-nitzschia</i> sp.           |     | +   |
| 粗根管藻   | <i>Rhizosolenia robusta</i>           |     | +   |
| 刚毛根管藻  | <i>Rhizosolenia setigera</i>          |     | +   |
| 根管藻    | <i>Rhizosolenia</i> sp.               | +   | +   |
| 骨条藻    | <i>Skeletonema</i> sp.                | +   | +   |
| 掌状冠盖藻  | <i>Stephanopyxis palmeriana</i>       | +   |     |
| 双菱藻    | <i>Surirella</i> sp.                  | +   | +   |
| 针杆藻    | <i>Synedra</i> sp.                    |     | +   |
| 伏氏海线藻  | <i>Thalassionema frauenfeldii</i>     |     | +   |
| 菱形海线藻  | <i>Thalassionema nitzschioides</i>    | +   | +   |
| 角海链藻   | <i>Thalassiosira angulata</i>         |     | +   |
| 离心列海链藻 | <i>Thalassiosira eccentrica</i>       | +   | +   |
| 细海链藻   | <i>Thalassiosira leptopus</i>         |     | +   |
| 诺氏海链藻  | <i>Thalassiosira nordenskioldi</i>    | +   |     |
| 太平洋海链藻 | <i>Thalassiosira pacifica</i>         | +   | +   |
| 圆海链藻   | <i>Thalassiosira rotula</i>           | +   | +   |
| 海链藻    | <i>Thalassiosira</i> spp.             |     | +   |
| 长海毛藻   | <i>Thalassiothrix longissima</i>      |     | +   |
| 膨杆藻    | <i>Toxarium</i> sp.                   |     | +   |
| 粗纹藻    | <i>Trachyneis</i> sp.                 | +   | +   |



续附表

|          | 物种                                     | 枯水期 | 丰水期 |
|----------|----------------------------------------|-----|-----|
| 蜂窝三角藻    | <i>Triceratium favus</i>               | +   |     |
| 甲藻门      | Dinophyta                              |     |     |
| 红色赤潮藻    | <i>Akashiwo sanguinea</i>              |     | +   |
| 链状亚历山大藻  | <i>Alexandrium catenella</i>           |     | +   |
| 微小亚历山大藻  | <i>Alexandrium minutum</i>             |     | +   |
| 亚历山大藻    | <i>Alexandrium</i> sp.                 | +   | +   |
| 塔玛亚历山大藻  | <i>Alexandrium tarmarense</i>          | +   | +   |
| 蓝色贝其那藻   | <i>Balechina coerulea</i>              |     | +   |
| 二裂角藻     | <i>Ceratium biceps</i>                 |     | +   |
| 叉状角藻     | <i>Ceratium furca</i>                  | +   | +   |
| 梭状角藻     | <i>Ceratium fusus</i>                  | +   | +   |
| 梭状角藻刚毛变种 | <i>Ceratium fusus</i> var. <i>seta</i> |     | +   |
| 线形角藻     | <i>Ceratium lineatum</i>               |     | +   |
| 波状角藻     | <i>Ceratium trichoceros</i>            |     | +   |
| 三角角藻     | <i>Ceratium tripos</i>                 | +   | +   |
| 多环旋沟藻    | <i>Cochlodinium polykrikoides</i>      |     | +   |
| 旋沟藻      | <i>Cochlodinium</i> sp.                |     | +   |
| 渐尖鳍藻     | <i>Dinophysis acuminata</i>            | +   |     |
| 具尾鳍藻     | <i>Dinophysis caudata</i>              |     | +   |
| 倒卵形鳍藻    | <i>Dinophysis fortii</i>               | +   | +   |
| 鳍藻       | <i>Dinophysis</i> sp.                  |     | +   |
| 新月梨甲藻    | <i>Dissodinium pseudolunula</i>        |     | +   |
| 多纹膝沟藻    | <i>Gonyaulax polyramma</i>             |     | +   |
| 膝沟藻      | <i>Gonyaulax</i> sp.                   | +   | +   |
| 简单裸甲藻    | <i>Gymnodinium simplex</i>             |     | +   |
| 裸甲藻      | <i>Gymnodinium</i> sp.                 | +   | +   |
| 环沟藻      | <i>Gyrodinium</i> sp.                  | +   | +   |
| 螺旋环沟藻    | <i>Gyrodinium spirale</i>              |     | +   |
| 异帽藻      | <i>Heterocapsa</i> sp.                 |     | +   |
| 米氏凯伦藻    | <i>Karenia mikimotoi</i>               | +   | +   |
| 凯伦藻      | <i>Karenia</i> sp.                     |     | +   |
| 灰白下沟藻    | <i>Katodinium glaucum</i>              |     | +   |
| 下沟藻      | <i>Katodinium</i> sp.                  |     | +   |
| 夜光藻      | <i>Noctiluca scintillans</i>           | +   | +   |

续附表

|  | 物种      | 枯水期                               | 丰水期 |
|--|---------|-----------------------------------|-----|
|  | 具喙原夜光藻  | <i>Pronoctiluca rostrata</i>      | +   |
|  | 具齿原甲藻   | <i>Prorocentrum dentatum</i>      | +   |
|  | 微小原甲藻   | <i>Prorocentrum minimum</i>       | +   |
|  | 尖叶原甲藻   | <i>Prorocentrum triestinum</i>    | +   |
|  | 锥形原多甲藻  | <i>Protoperidinium conicum</i>    | +   |
|  | 扁平原多甲藻  | <i>Protoperidinium depressum</i>  | +   |
|  | 椭圆原多甲藻  | <i>Protoperidinium oblongum</i>   | +   |
|  | 海洋原多甲藻  | <i>Protoperidinium oceanicum</i>  | +   |
|  | 卵形原多甲藻  | <i>Protoperidinium ovum</i>       | +   |
|  | 光甲原多甲藻  | <i>Protoperidinium pallidum</i>   | +   |
|  | 灰甲原多甲藻  | <i>Protoperidinium pellucidum</i> | +   |
|  | 梨状原多甲藻  | <i>Protoperidinium pyriforme</i>  | +   |
|  | 原多甲藻    | <i>Protoperidinium</i> sp.        | +   |
|  | 梭梨甲藻    | <i>Pyrocystis fusiformis</i>      | +   |
|  | 锥状斯克里普藻 | <i>Scrippsiella trochoidea</i>    | +   |
|  | 金藻门     | Chrysophyta                       |     |
|  | 小等刺硅鞭藻  | <i>Dictyocha fibula</i>           | +   |
|  | 六等刺硅鞭藻  | <i>Dictyocha speculum</i>         | +   |
|  | 蓝藻门     | Cyanophyta                        |     |
|  | 铁氏束毛藻   | <i>Trichodesmium thiebautii</i>   | +   |

Preliminary discussion on the phytoplankton assemblages and its response to the environmental changes in the Changjiang (Yangtze) River Estuary and its adjacent waters during the dry season and the wet season

Li Zhao<sup>1,2,3</sup>, Song Shuqun<sup>1,2</sup>, Li Caiwen<sup>1,2</sup>, Yu Zhiming<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266200, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:**Based on the multi-discipline surveys in the Changjiang (Yangtze) River Estuary and its adjacent waters in March and August 2013, the phytoplankton species composition and community structure was studied, and its correlations with major environment factors were analyzed as well. During the dry season, 80 taxa belonging to 41 genera and 3 phyla were identified. *Paralia sulcate* was the most dominant specie. The cell abundance ranged from  $0.15 \times 10^3$  cells/L to  $16.35 \times 10^3$  cells/L, with an average of  $(3.24 \pm 3.14) \times 10^3$  cells/L. The horizontal distribution of cell abundance was mainly dominated by diatom, with high values appeared in the north of the survey area

and lower in the coastal waters. During the wet season, 135 taxa belonging to 67 genera and 4 phyla were identified, the main dominant species were *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema* sp.. The cell abundance ranging from  $0.2 \times 10^3$  cells/L to  $1\,925.45 \times 10^3$  cells/L, with an average of  $(41.67 \pm 186.00) \times 10^3$  cells/L, was higher in the north of the survey area as well as in the southeast area close to the coast, dominated by dinoflagellate. The salinity and turbidity influenced the phytoplankton assemblage during the survey. The N/P ratio, instead of Si/N ratio, played a significant role in regulating the phytoplankton community structure. With the increase of N/P ratio, the diatom became dominant in the phytoplankton assemblage. Proliferation of phytoplankton in the upper layer and stratification of water column were necessary for the formation of hypoxia. Diatom-dominant community had higher sinking rate than dinoflagellate-dominant community, thus in favor of the consuming of dissolved oxygen in the bottom waters.

**Key words:** phytoplankton; assemblage structure; Changjiang (Yangtze) River Estuary; diluted water; hypoxia