

# 调水调沙对黄河口近海浮游植物群落结构时空分布影响

王 英<sup>1</sup>, 张晶晶<sup>1</sup>, 吕其明<sup>1</sup>, 吕振波<sup>1</sup>,  
王育红<sup>2</sup>, 高彦洁<sup>1</sup>, 任中华<sup>1</sup>

(1.鲁东大学 滨海生态高等研究院, 山东省高校重点实验室 滨海湿地保育与生态修复重点实验室, 山东烟台 264025; 2.山东省海洋资源与环境研究院, 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东烟台 264003)

**摘 要:** 为了研究调水调沙对黄河口近海海域浮游植物群落结构的影响, 于 2015 年 6 月 16 日、7 月 7 日、7 月 20 日及未调水调沙的 2016 年 7 月 14 日, 对黄河口近海海域叶绿素 *a* (Chl *a*) 含量、浮游植物群落结构和环境因子的空间分布特征进行了 4 次综合调查。结果显示, 2015 年随着调水调沙的进行, 调查海域 Chl *a* 浓度整体呈现先降低后升高的趋势, 在空间上由河口向离岸逐渐递减过渡到整个海域均匀分布; 2016 年 Chl *a* 浓度偏低, 高值区主要在南部近岸海域。随着调水调沙的进行, 鉴定到的浮游植物种类逐渐递增, 浮游植物群落演替明显。舟形藻 (*Navicula* spp.) 在 4 个调查航次均是优势种群, 其他优势度较高的浮游植物还有针杆藻 (*Synedra* spp.)、角毛藻 (*Chaetoceros* sp.)、细弱圆筛藻 (*Coscinodiscus subtilis*)、窄隙角毛藻 (*Chaetoceros affinis*)、日本星杆藻 (*Asterionella japonica*) 和旋链角毛藻 (*Chaetoceros curvisetus*)。调水调沙前, 温度和可溶性无机磷 (DIP) 是影响浮游植物群落结构的重要因素; 调水调沙中, 可溶性无机氮 (DIN)、DIP 和 DIN/DIP 影响逐渐增高; 调水调沙后, 可溶性无机硅 (DSi)、DSi/DIN 和温度的影响最明显。

**关键词:** 调水调沙; 黄河口; 环境因子; 浮游植物; 群落结构; 叶绿素 *a*

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2021)03-0369-10

## Effects of water and sediment regulation scheme on phytoplankton community and abundance in the Yellow River Estuary

WANG Ying<sup>1</sup>, ZHANG Jing-jing<sup>1</sup>, LV Qi-ming<sup>1</sup>, LV Zhen-bo<sup>1</sup>,  
WANG Yu-hong<sup>2</sup>, GAO Yan-jie<sup>1</sup>, REN Zhong-hua<sup>1</sup>

(1. Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Ludong University, Shandong Provincial University Key Laboratory of Coastal Wetland Conservation and Ecological Restoration, Yantai 264025, China; 2. Shandong Marine Resources and Environment Research Institute, Shandong provincial Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Yantai 264003, China)

**Abstract:** The temporal and spatial distribution of chlorophyll *a* (Chl *a*), phytoplankton community and environmental factors in the Yellow River Estuary were investigated on four ecological surveys, with the purpose of understanding the effect of Water and Sediment Regulation Scheme (WSRS) on phytoplankton community and abundance. Four surveys were conducted on the 16<sup>th</sup> of June, 7<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> of July in 2015 (WSRS year) and on the 14<sup>th</sup> of July in 2016 (normal year without WSRS). The concentration of Chl *a* showed

收稿日期: 2020-02-21, 修订日期: 2020-06-21

基金项目: 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室开放研究基金项目 (LMEB201711); 国家自然科学基金项目 (41776126); 国家自然科学基金山东联合基金重点支持项目 (U1806218); “十三五”国家重点研发计划重点专项项目 (2017YFC0505902)

作者简介: 王 英 (1997-), 女, 山东潍坊人, 硕士, 主要研究方向为滨海生态与环境, E-mail: [wy17863632302@163.com](mailto:wy17863632302@163.com)

通讯作者: 张晶晶, 讲师, E-mail: [hpj2006@163.com](mailto:hpj2006@163.com)

an increasing trend from before to during phase of WSRS, followed by a decline at the after phase. The spatial distribution of Chl *a* displayed a decreasing trend from inshore to offshore before WSRS to uniform distribution after WSRS. The concentration of Chl *a* in 2016 was much lower compared with similar period of 2015, and the high value area distributed in the southern inshore area. The identified species of phytoplankton increased along with the progress of WSRS, and an obvious succession of phytoplankton community were observed in the study area. *Navicular* spp. was the dominant species in all four survey, and other dominant species were *Synedra* spp., *Chaetoceros* sp., *Coscinodiscus subtilis*, *Chaetoceros affinis*, *Asterionella japonica* and *Chaetoceros curvisetus* respectively. Temperature and dissolved inorganic phosphorus (DIP) were the most important environmental factors affecting phytoplankton community and abundance before WSRS, while the influence of dissolved inorganic nitrogen (DIN), DIP and DIN /DIP increased during WSRS, and the dissolved inorganic silicon (DSi), DSi/DIN and temperature became the key environmental factors after WSRS.

**Key words:** water and sediment regulation scheme; Yellow River Estuary; environmental factors; phytoplankton; community; Chl *a*

黄河是我国第二大河,每年由黄河口输入的淡水占渤海淡水输入总量的75%以上<sup>[1]</sup>。近半个世纪来,由于黄河入海淡水径流持续减少,导致下游河道淤积。为了调节黄河水沙平衡,黄河水利委员会自2002年起通过水库联合调度、适时蓄存、泄放水沙的方式进行调水调沙,冲刷下游河槽淤积<sup>[2]</sup>。调水调沙期间,黄河径流量在短时间内激增,大量水沙伴随着丰富的营养物质输入黄河口,显著影响了黄河口近海海域营养盐结构<sup>[3-5]</sup>,剧烈的环境变化对河口及近海海域生态系统造成显著影响<sup>[1,6]</sup>。

浮游植物对海洋生态系统、上层食物链、气候变化,甚至整个生物地球化学循环都具有重要的影响<sup>[7-8]</sup>;同时,生态环境变化也会直接或间接地影响浮游植物的群落结构<sup>[9-10]</sup>。因此,浮游植物常常作为生态环境变化的重要指标,用于研究生态环境变化。研究表明,调水调沙后,黄河口邻近海域浮游植物生物量、生物多样性指数和物种均匀度指数均升高,硅藻、蓝藻细胞丰度升高,绿藻、甲藻细胞丰度降低<sup>[11]</sup>。然而,现有研究多针对一个时段或单个调水调沙年份进行,年际差异特别是调水调沙年份和未调水调沙年份的对比研究鲜有报道。而浮游植物群落结构受多种环境因素及采样季节、年份共同作用,进行年际间对比研究能够更好地解释调水调沙对浮游植物群落结构及丰度的影响。

鉴于此,本研究通过2015年6月16日、7月7日、7月20日及未进行调水调沙的2016年7月

14日黄河口近海环境因子、叶绿素 *a* (Chl *a*) 和浮游植物群落结构的分布特征进行系统调查,同时,结合环境因子与浮游植物群落结构的相关分析,对比研究了调水调沙不同时期和不同年份间驱动黄河口近海海域浮游植物群落结构变化的关键环境因子,旨在更清晰地揭示黄河调水调沙对黄河口近岸海域浮游植物群落结构影响,为深入分析复杂海陆交互作用地带生物地球化学循环和生态环境变迁提供重要的基础资料。

## 1 材料和方法

### 1.1 采样站位

2015年6月29日—7月15日黄河进行调水调沙,分别在2015年6月16日(调水调沙开始前)、7月7日(调水调沙期间)、7月20日(调水调沙结束后)和未进行调水调沙的2016年7月14日,针对黄河口近岸水域开展了生态环境综合调查。根据黄河冲淡水的扩散特征,以入海口为中心,从河口到离岸水域共设置了5个断面(A—E)18个站位(图1)。每个调查站位取表层水样监测温度、盐度、营养盐、Chl *a*,同时网采浮游植物进行鉴定。

### 1.2 样品采集与处理

样品采集与分析按照《海洋调查规范第9部分:海洋生态调查指南》(GB/T 12763.9-2007)进行。取1000 mL水样经47 mm GF/F滤膜过滤后(泥沙含量较多的站位用多张滤膜过滤),滤膜于-20 °C下避光冷冻保存,用于Chl *a*浓度的测

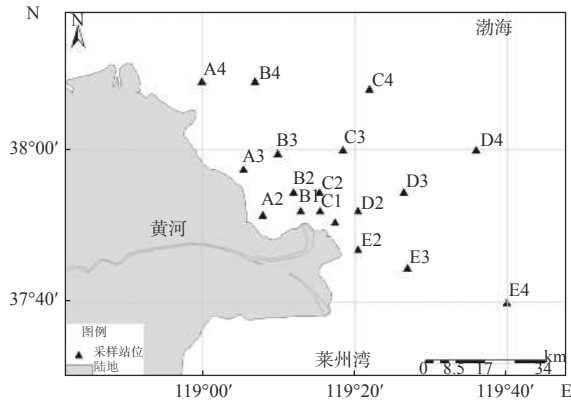


图 1 采样站位

Fig. 1 Sampling site

定。另取 250 mL 水样, 用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤, 滤液用于营养盐浓度测定。浮游植物采集使用浅水 III 型浮游植物网(直径 37 cm、网口面积 0.1 m<sup>2</sup>、网目孔径 77 μm)自底至表垂直拖网, 所采样品转移至装有 500 mL 海水的聚乙烯瓶中, 并立即用浓度为 5% 的福尔马林溶液固定。

温度和盐度用船载 CTD(Seabird911)现场测定。营养盐利用营养盐自动分析仪(QuAAtro AutoAnalyzer 39)测定, 硝酸盐(NO<sub>3</sub>-N)、亚硝酸盐(NO<sub>2</sub>-N)、氨氮(NH<sub>4</sub>-N)、磷酸盐(PO<sub>4</sub>-P)和硅酸盐(SiO<sub>3</sub>-Si)的检出限分别为 0.015 μmol/L、0.003 μmol/L、0.04 μmol/L、0.02 μmol/L 和 0.04 μmol/L。

浮游植物样品用 0.1 mL 计数框在光学显微镜(10×40 倍)中进行计数, 每个样品计数两组,

取其均值, 若计数结果差异超过 15%, 则进行第三组计数, 取计数结果相近两组的均值。

Chl *a* 浓度采用分光光度法进行测定, 具体操作参考苏芝娟等<sup>[11]</sup>的研究。

### 1.3 统计分析和图件绘制

浮游植物优势度 *Y* 指数计算公式如下<sup>[12]</sup>:

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

式中: *N* 为群落中所有种的个体数总和; *n<sub>i</sub>* 为群落中第 *i* 种在空间中的个体数量; *f<sub>i</sub>* 为第 *i* 种在各样方中出现的频率。本次调查生物优势度 *Y* ≥ 0.02 即为优势种。

浮游植物优势种群及环境因子数据经 lg(*x*+1) 转换, 转换后的数据进行 DCA(dynamic component analysis)分析, 结果显示, 4 个轴最大梯度长度小于 3, 因而选择冗余分析(redundancy analysis, RDA)研究环境因子和浮游植物群落结构的相关性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 调查海域各环境因子的时空分布特征

#### 2.1.1 温度、盐度

2015 年, 随着调水调沙进行, 调查海域水温呈逐渐升高的趋势(图 2A)。6 月 16 日, 调查海域温度变化范围为 18.5 °C ~ 24 °C, 平均值为 20.38 °C, 高值区出现在离岸海域, 低值区出现在河口; 7 月 7 日, 温度变化范围为 19.5 °C ~ 23.8 °C, 平均水温升至 21.67 °C, 最高值出现在河口处; 7 月 20 日, 调查水域水温明显升高, 表层水温平均值达 23.20 °C, 但与 2016 年同期相比略低。

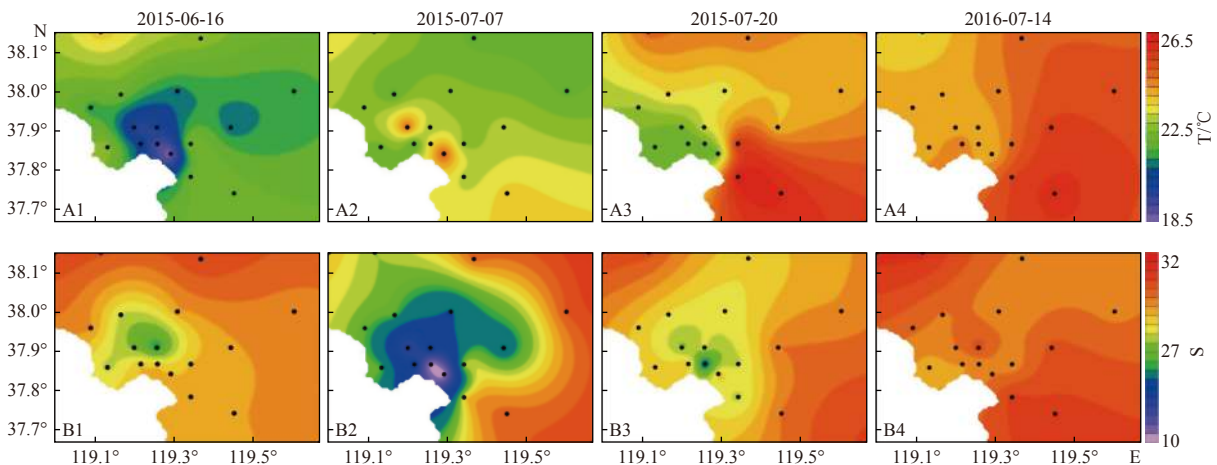


图 2 调查海域温度、盐度的时空分布特征

Fig. 2 Temporal and spatial variation of sea surface temperature and salinity in the studying area

盐度变化趋势与温度不同, 2015年3个航次, 盐度均呈现自河口向离岸逐渐升高的趋势(图2B)。调水调沙期间(7月7日), 调查海域盐度最低, 盐度变化范围为10.55~31.03, 平均值为24.8, 高值区出现在离岸, 低值区出现在河口, 盐度的变化范围和变化趋势与先前的研究结果基本一致<sup>[13]</sup>。6月16日和7月20日, 调查海域盐度变化不明显, 平均盐度分别为29.09和28.83。与2015年7月20日相比, 2016年同期调查海域盐度整体偏高, 特别是河口区域, 说明调水调沙对河口邻近海域盐度的影响往往会持续到调水调沙结束后。

### 2.1.2 营养盐

2015年6月16日, 调查海域营养盐浓度总体呈现自河口至离岸逐渐降低的趋势(图3), 可溶性无机氮(DIN, 即 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 之和)、可溶性无机磷(DIP, 即 $\text{PO}_4\text{-P}$ )和可溶性无机硅(DSi, 即 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ )的均值分别是 $28 \mu\text{mol/L}$ 、 $0.1 \mu\text{mol/L}$ 和 $18 \mu\text{mol/L}$ 。DIN高值区出现在河口区和北部近岸海域, DIP和DSi高值区均出现在河口区域。

7月7日, 调查海域DIN浓度有明显的升高, 均值为 $48 \mu\text{mol/L}$ (图3A), 说明调水调沙期间径流输入是调查海域无机氮的主要来源, 这与先前的研究结果类似<sup>[13-15]</sup>。与DIN不同, 河口附

近DSi浓度升高, 离岸区域DSi降低; DIP浓度整体呈下降趋势, 均值降至 $0.09 \mu\text{mol/L}$ , 仅河口区域略有升高, 这可能是由于调水调沙输入的黄河水具有高氮、高硅、低磷的特性<sup>[10]</sup>, 浮游植物生长消耗的DIP大于输入。这与苏之娟等<sup>[11]</sup>的研究结果基本一致, 但有的年份也存在DIP的输入大于消耗的现象<sup>[13, 15]</sup>。

7月20日, 随着营养盐输入的减少和浮游植物的生长消耗, 调查海域营养盐浓度明显下降, DIN、DIP和DSi平均浓度分别为 $29 \mu\text{mol/L}$ 、 $0.09 \mu\text{mol/L}$ 和 $13 \mu\text{mol/L}$ (图3)。2016年同期, 调查海域DIN和DSi浓度偏低, 分别是 $23 \mu\text{mol/L}$ 和 $10 \mu\text{mol/L}$ ; DIP浓度明显升高, 平均浓度为 $0.2 \mu\text{mol/L}$ 。这也说明调水调沙对调查海域DIN、DSi的输入贡献远大于DIP。

2015年, 调水调沙期间N/P(18.6~15347.6)和Si/N(1.2)明显高于其他时间; 与2015年同期相比, 2016年N/P和Si/P明显降低(表1)。这说明调水调沙可加重黄河口海域营养盐比例失衡的问题, 且在调水调沙期间, 营养盐比例失衡问题会更严重。这与孙珊等<sup>[13]</sup>的研究结果相反, 这可能是由于年际间营养盐输入差异造成。根据Dortch等<sup>[16]</sup>和Justic等<sup>[17]</sup>提出的营养盐限制的标准:  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、DIN、DIP的含量分别低于 $2 \mu\text{mol/L}$ 、 $1 \mu\text{mol/L}$ 、 $0.1 \mu\text{mol/L}$ 时, 对浮游植物的

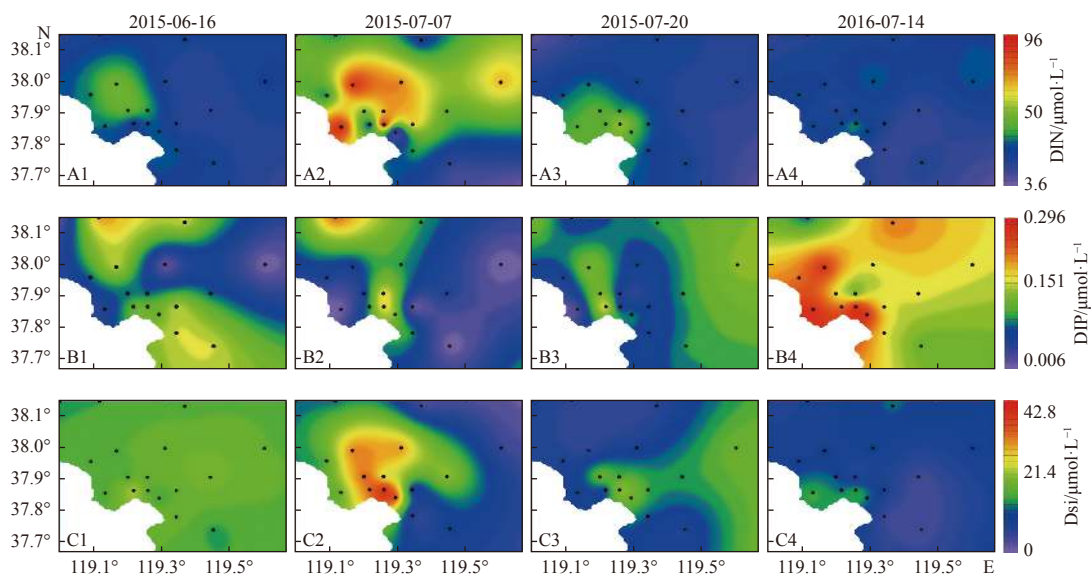


图3 调查海域营养盐时空分布特征

Fig. 3 Temporal and spatial variation of nutrients in the studying area.

生长可造成绝对限制;  $Si/P > 22$  且  $N/P > 22$  时, 存在相对磷限制;  $N/P < 10$  且  $Si/N > 1$  时, 出现相对氮限制;  $Si/P < 10$  且  $Si/N < 1$  时, 存在相对硅限制。4 个调查航次均不存在氮和硅限制, 但磷限制明显。2015 年, 几乎所有的站位均存在磷的相对

限制, 大约 40% 的站位存在绝对磷限制, 这与河口区域浮游植物可利用氮含量远大于磷的研究结果大致相同<sup>[18]</sup>。与 2015 年同期相比, 2016 年相对磷限制情况类似, 绝对磷限制明显减轻, 说明调水调沙可能加重调查海域的磷限制。

表 1 调查海域营养盐结构以及限制因子分析

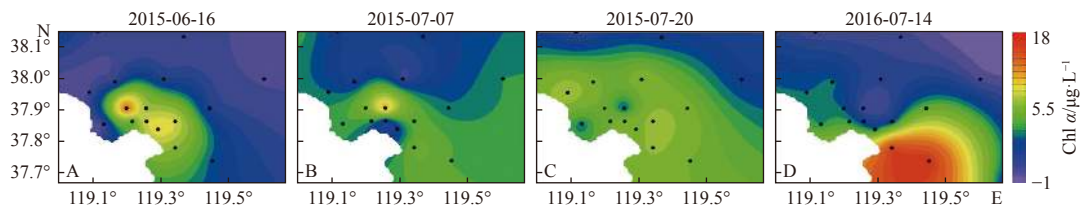
Tab.1 Analyzing nutrient ratios and the nutrient limitation in the studying area

| 营养盐比例   |     | 2015年调水调沙前      | 2015年调水调沙中     | 2015年调水调沙后    | 2016年        |
|---------|-----|-----------------|----------------|---------------|--------------|
| DIN/DIP | 范围  | 104.43 ~ 4089.9 | 18.6 ~ 15347.6 | 46.9 ~ 2201.6 | 60.1 ~ 221.3 |
|         | 平均值 | 774.6           | 2492.1         | 418.8         | 117.9        |
| DSi/DIN | 范围  | 0.4 ~ 1.2       | 0.08 ~ 12.9    | 0.2 ~ 2.2     | 0.2 ~ 1.3    |
|         | 平均值 | 0.7             | 1.2            | 0.6           | 0.5          |
| DSi/DIP | 范围  | 70.9 ~ 3014.8   | 32.2 ~ 2996.6  | 30.4 ~ 497.8  | 21.4 ~ 100.7 |
|         | 平均值 | 578.0           | 557.8          | 164.1         | 52.5         |
| DIN相对限制 | 站位数 | -               | -              | -             | -            |
| DIN绝对限制 | 站位数 | -               | -              | -             | -            |
| DIP相对限制 | 站位数 | 18              | 17             | 18            | 17           |
| DIP绝对限制 | 站位数 | 8               | 8              | 7             | 1            |
| DSi相对限制 | 站位数 | -               | -              | -             | -            |
| DSi绝对限制 | 站位数 | -               | -              | -             | -            |

## 2.2 Chl *a* 的时空分布特征

2015 年 6 月 16 日, Chl *a* 平均浓度为  $4.31 \mu\text{g/L}$ , 大致呈现自河口至离岸逐渐降低的趋势(图 4A)。7 月 7 日, Chl *a* 平均浓度为  $4.09 \mu\text{g/L}$ , 河口区域 Chl *a* 浓度降低, 离岸海域 Chl *a* 浓度升高(图 4B)。

7 月 20 日, 调查海域 Chl *a* 浓度梯度的变化进一步减小, 平均浓度升为  $4.94 \mu\text{g/L}$ (图 4C)。2016 年 7 月 14 日调查海域 Chl *a* 平均浓度为  $4.29 \mu\text{g/L}$ , 略低于 2015 年同期的 Chl *a* 浓度, 高值区出现在莱州湾海域边缘(图 4D)。

图 4 调查海域 Chl *a* 的时空分布特征Fig. 4 Temporal and spatial variation of Chl *a* in studying area

## 2.3 调查海域浮游植物丰度及优势种群时空分布特征

2015 年 6 月 16 日, 调查海域共采集到浮游植物 24 种, 全部为硅藻。优势种 ( $Y \geq 0.02$ ) 共 6 种, 分别为舟形藻 (*Navicula* spp.)、针杆藻 (*Synedra* spp.)、细弱圆筛藻 (*Coscinodiscus subtilis*)、虹彩圆筛藻 (*Coscinodiscus oculus-*

*iridis*)、格氏圆筛藻 (*Coscinodiscus granii*)、布氏双尾藻 (*Ditylum brightwellii*) (表 2)。调查海域浮游植物丰度为  $1.6 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^5 \text{ cells/m}^3$ , 平均值为  $5.2 \times 10^4 \text{ cells/m}^3$ , 高值区出现在河口, 以舟形藻、针杆藻、细弱圆筛藻为主(图 5A1、A2), 这与近年来在黄河口区域优势种的调查结果基本一致<sup>[19-21]</sup>。针杆藻 (*Synedra* spp.) 在该区域较少

表 2 调查海域浮游植物优势种变化特征

Tab.2 Variation of dominant phytoplankton species in the studying area

| 时间         | 优势种  | 优势度  | 丰度/cell·m <sup>-3</sup> | 出现频率 |
|------------|--|------|-------------------------|------|
| 2015-06-16 | 舟形藻 <i>Navicula</i> spp.                   | 0.20 | 2.1×10 <sup>5</sup>     | 0.89 |
|            | 针杆藻 <i>Synedra</i> spp.                    | 0.19 | 1.8×10 <sup>5</sup>     | 1.00 |
|            | 细弱圆筛藻 <i>Coscinodiscus subtilis</i>        | 0.09 | 1.2×10 <sup>5</sup>     | 0.67 |
|            | 虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>   | 0.05 | 7.5×10 <sup>4</sup>     | 0.67 |
|            | 格氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus granii</i>          | 0.02 | 3.6×10 <sup>4</sup>     | 0.50 |
|            | 布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i>          | 0.02 | 4.9×10 <sup>4</sup>     | 0.44 |
| 2015-07-07 | 舟形藻 <i>Navicula</i> spp.                   | 0.28 | 1.1×10 <sup>7</sup>     | 0.78 |
|            | 窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>           | 0.11 | 3.5×10 <sup>6</sup>     | 0.89 |
|            | 扁面角毛藻 <i>Chaetoceros compressus</i>        | 0.08 | 2.7×10 <sup>6</sup>     | 0.89 |
|            | 角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.                 | 0.07 | 2.6×10 <sup>6</sup>     | 0.78 |
|            | 旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>        | 0.04 | 2.1×10 <sup>6</sup>     | 0.56 |
|            | 冕孢角毛藻 <i>Chaetoceros diadema</i>           | 0.04 | 1.5×10 <sup>6</sup>     | 0.67 |
| 2015-07-20 | 角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.                 | 0.30 | 1.7×10 <sup>7</sup>     | 0.83 |
|            | 舟形藻 <i>Navicula</i> spp.                   | 0.10 | 5.3×10 <sup>6</sup>     | 0.94 |
|            | 日本星杆藻 <i>Asterionella japonica</i>         | 0.08 | 4.8×10 <sup>6</sup>     | 0.83 |
|            | 窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>           | 0.08 | 4.9×10 <sup>6</sup>     | 0.78 |
|            | 扁面角毛藻 <i>Chaetoceros compressus</i>        | 0.03 | 3.2×10 <sup>6</sup>     | 0.50 |
|            | 旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>        | 0.03 | 2.2×10 <sup>6</sup>     | 0.72 |
|            | 透明辐杆藻 <i>Bacteriastrum hyalinum</i>        | 0.03 | 1.5×10 <sup>6</sup>     | 1.00 |
|            | 尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>     | 0.03 | 1.7×10 <sup>6</sup>     | 0.72 |
| 2016-07-14 | 拟旋链角毛藻 <i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i> | 0.28 | 7.5×10 <sup>6</sup>     | 0.89 |
|            | 舟形藻 <i>Navicula</i> spp.                   | 0.18 | 4.5×10 <sup>6</sup>     | 0.94 |
|            | 角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.                 | 0.08 | 2.3×10 <sup>6</sup>     | 0.89 |
|            | 旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>        | 0.05 | 2.1×10 <sup>6</sup>     | 0.61 |
|            | 双突角毛藻 <i>Chaetoceros didymus</i>           | 0.02 | 9.4×10 <sup>5</sup>     | 0.61 |
|            | 尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>     | 0.02 | 6.4×10 <sup>5</sup>     | 0.83 |

成为优势种,仅孙慧慧<sup>[20]</sup>2013年在该海域开展的研究中报道过,针杆藻是山东境内南水北调调蓄水库中最主要的优势种群<sup>[22]</sup>,近来其生物量的升高可能与2013年以来南水北调工程开通运行,针杆藻随水库调蓄水沿淡水径流流入黄河口区域有关。

7月7日,共采集浮游植物47种,除硅藻外,还有1种绿藻,除舟形藻仍为优势种外,其他优势种更替为窄隙角毛藻(*Chaetoceros affinis*)、扁面角毛藻(*Chaetoceros compressus*)、角毛藻(*Chaetoceros* sp.)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)和冕孢角毛藻(*Chaetoceros diadema*)(表2),优

势种演替明显。这期间,浮游植物丰度明显升高(1.2×10<sup>5</sup>~1.2×10<sup>7</sup> cells/m<sup>3</sup>),高值区出现在北部近岸和河口,北部近岸以舟形藻、旋链角毛藻为主,河口区以窄隙角毛藻和扁面角毛藻为主(图5B1、图5B2)。

7月20日,共采集浮游植物54种,其中硅藻49种,甲藻、绿藻各2种,蓝藻1种。角毛藻、舟形藻、扁面角毛藻、窄隙角毛藻、旋链角毛藻仍是优势种,此外日本星杆藻(*Asterionella japonica*)、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)、透明辐杆藻(*Bacteriastrum hyalinum*)也是该航次的优势种(表2)。浮游植物丰度平

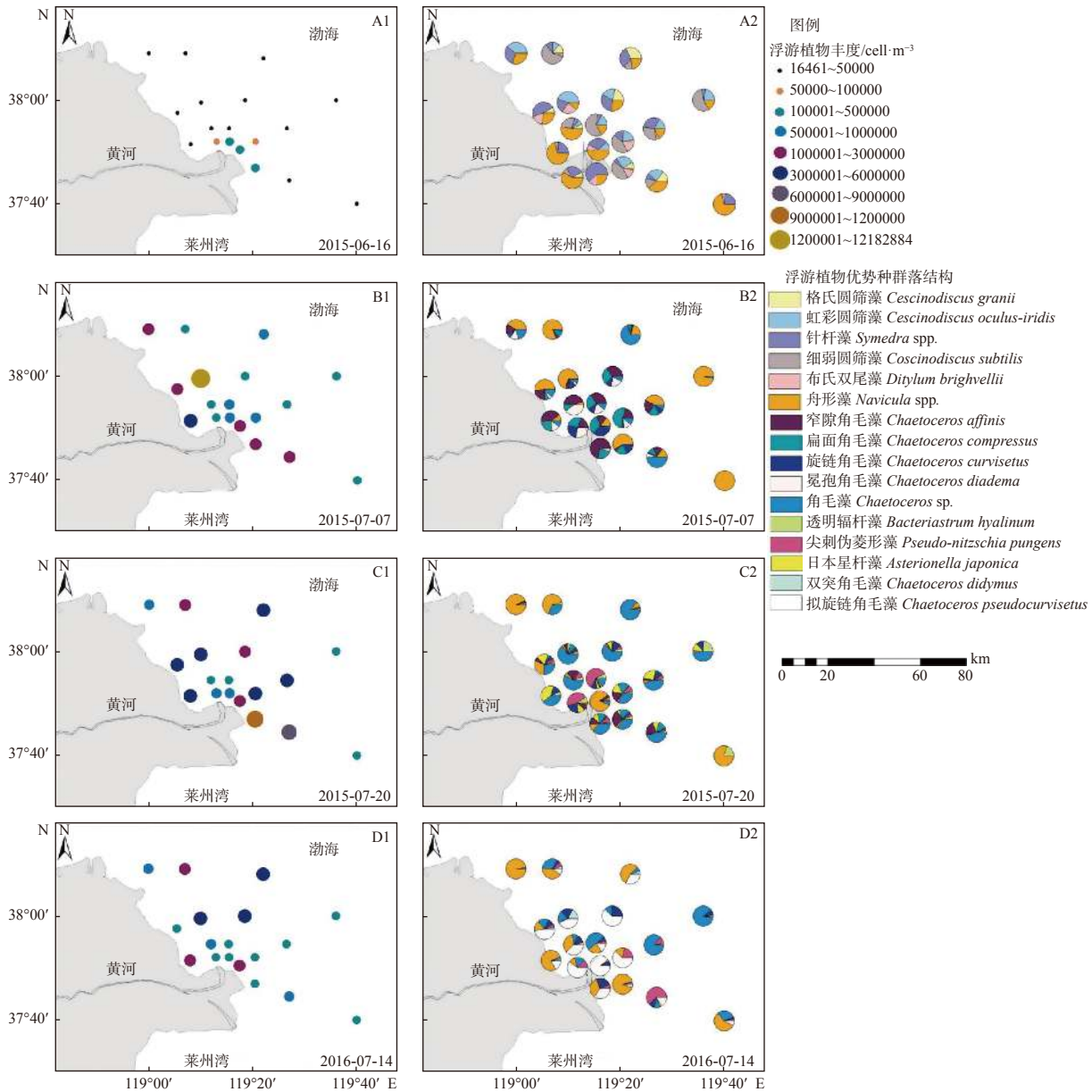


图5 调查海域浮游植物丰度和优势种的时空分布特征

Fig. 5 Temporal and spatial variation of phytoplankton community and their abundance in studying area

均值为  $2.7 \times 10^6$  cells/m<sup>3</sup>, 与调水调沙期间持平, 变化范围是  $4.2 \times 10^4 \sim 9.4 \times 10^6$  cells/m<sup>3</sup>, 空间差异性减小, 这可能是由于调水调沙期间输入的营养物质扩散到离岸海域刺激了离岸海域浮游植物的生长。高值区出现在 E2、E3 站位, 以角毛藻、窄隙角毛藻和扁面角毛藻为主(图 5C1、图 5C2), 这与近年来调水调沙后该区域的调查结果基本一致<sup>[14, 21-22]</sup>。

2016 年 7 月 14 日, 共采集到浮游植物 60 种, 硅藻 53 种, 甲藻 5 种, 绿藻、金藻各 1 种。

优势种共 7 种, 其中, 舟形藻、角毛藻、旋链角毛藻和尖刺伪菱形藻与 2015 年同期一致, 此外优势种还有拟旋链角毛藻 (*Chaetoceros pseudocurvisetus*) 和双突角毛藻 (*Chaetoceros didymus*) (表 2)。浮游植物丰度的变化范围为  $1.2 \times 10^5 \sim 5.5 \times 10^6$  cells/m<sup>3</sup>, 平均值为  $1.3 \times 10^6$  cells/m<sup>3</sup>, 与 2015 年同期相比明显降低, 高值区出现在 B3、C3 站位, 主要以拟旋链角毛藻、旋链角毛藻、角毛藻和舟形藻为主(图 5D1、图 5D2)。在 4 个调查航次中舟形藻均是优势种, 且优势度、丰度和

出现频率均较高,这与舟形藻广温的特性相符,也与栾青杉等<sup>[23]</sup>研究得到的21世纪以来舟形藻在该海域逐渐形成优势种的结果一致。此外,出现频次较高的角毛藻、旋链角毛藻也是黄河口邻近海域常见的优势藻种<sup>[14,22]</sup>。

#### 2.4 浮游植物群落结构及丰度与环境因子的相关性分析

为了进一步研究调水调沙对浮游植物群落结构的影响,本研究分别对4个航次浮游植物优势种群与环境因子进行了RDA分析。

2015年6月16日,排序图第1轴和第2轴分别解释了40.8%和7.2%的物种变化。影响排序轴1的主要环境变量是温度,说明温度是影响调水调沙前浮游植物组成的最重要的环境因子(图6A)。

相关性,说明该阶段温度的升高会抑制针杆藻和舟形藻的生长,这与针杆藻喜欢低温的生长环境吻合<sup>[24]</sup>。其他优势种则与磷酸盐呈现明显的正相关性,说明该阶段磷酸盐的升高有利于这些种群的生长。7月7日,第1轴和第2轴分别解释了62.6%和2.6%的物种变化。排序轴1主要受DIN的影响(图6B)。

舟形藻与DIN呈明显的正相关关系,这与舟形藻喜欢高氮营养环境的研究结果一致<sup>[25]</sup>。所有优势种均与DIP表现出了极强的负相关性,这可能是因为调水调沙期间,营养物质的迅速涌入河口导致浮游植物爆发性生长,消耗了大量的磷营养盐,这与调水调沙中浮游植物细胞丰度激增、DIP浓度下降的结果相符。

7月20日,第1轴和第2轴分别解释了54%和8%的物种组成变化。影响排序轴1的环境

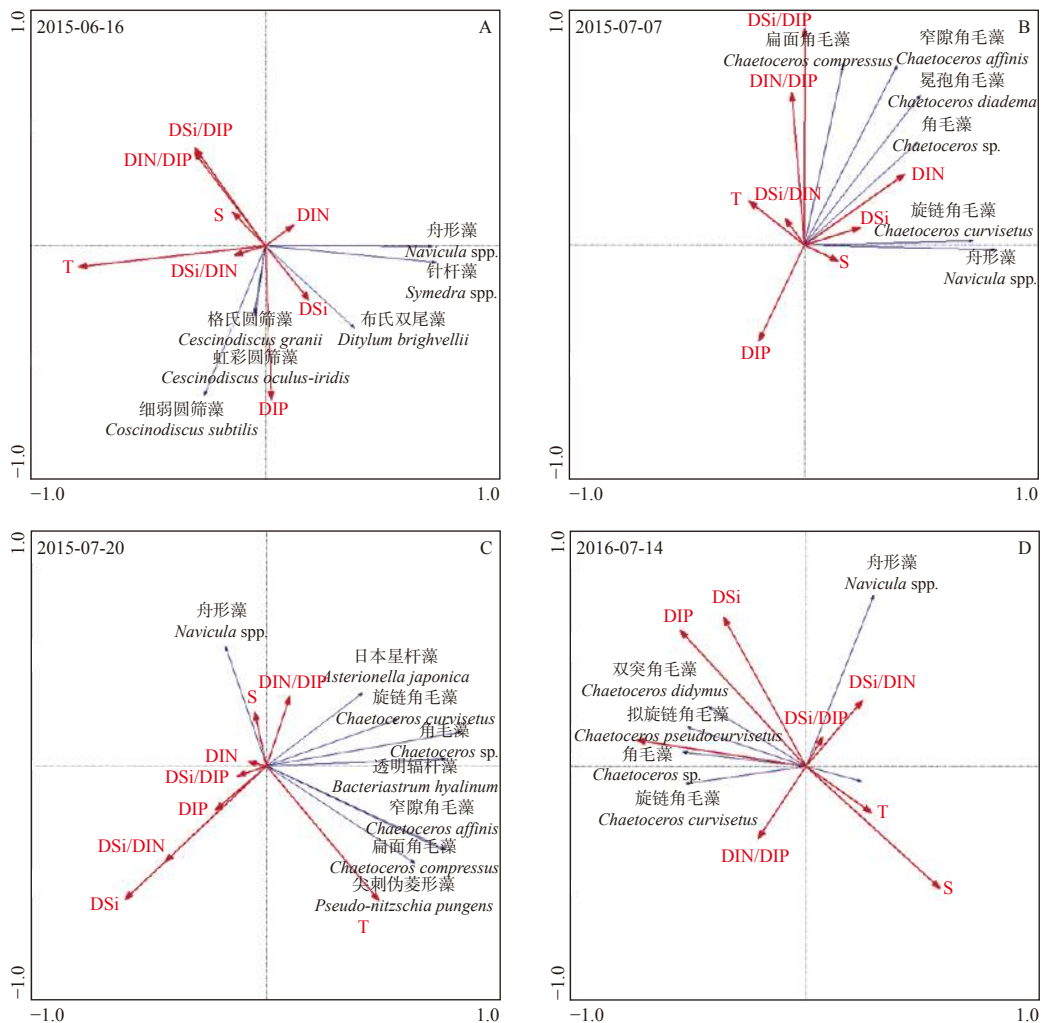


图6 调查海域浮游植物优势种与环境因子RDA排序

Fig. 6 RDA ordination plot: correlation analysis between phytoplankton dominant species and environmental factors.



变量主要是温度和 DSi(图 6C)。角毛藻与温度有极强的正相关关系,这与适宜温度范围内,温度的升高有利于角毛藻生长的研究一致<sup>[26]</sup>。几乎所有的优势种都与 DSi 呈明显负相关关系,这可能是由于硅藻爆发性增长消耗了大量硅酸盐,硅酸盐浓度的下降也证实这一推断。与 2015 年不同,2016 年同期影响优势种群的最主要因素是 DIN、DSi、DIP 和盐度。产生这种差异的原因可能有两个:(1)2016 年未进行调水调沙,调查海域盐度偏高,过高的盐度抑制了角毛藻的大量繁殖<sup>[27]</sup>,因此盐度与角毛藻呈现明显的负相关关系;(2)2016 年未经过浮游植物迅速大量增殖过程,磷酸盐相对充足(仅一个站位存在绝对磷限制),营养物质及营养盐比值适宜,因此, DIN、DSi、DIP 的增加有助于优势物种的生长,所以其与绝大多数优势种呈正相关关系。

浮游植物群落结构及其生物量的变化受多种环境因子共同影响,不同年份、不同采样时间的群落结构及其生物量存在较大差别,因此仅通过 RDA 分析难以判别调水调沙对群落结构的具体影响程度。同时,调水调沙前后也是浮游动物快速繁殖的季节,浮游动物的摄食作用可导致浮游植物生物量大量减少<sup>[28]</sup>。因此,黄河调水调沙对近海浮游植物丰度及其群落结构影响的具体机制仍有待进一步研究。

### 3 结 论

(1)调水调沙输入大量高氮、高硅、低磷的淡水,会使河口盐度明显降低;同时加重调查海域磷限制和营养盐比例失衡的现象。

(2)随着调水调沙的进行,优势种演替明显,由针杆藻、布氏双尾藻和圆筛藻逐渐演替为舟形藻和角毛藻等。

(3)环境因子与浮游植物优势种群的 RDA 分析发现,在调水调沙的不同阶段,影响浮游植物群落结构的主要因素不同。调水调沙前,温度和 DIP 的影响最显著;调水调沙期间, DIN、DIP 和 DIN/DIP 是主要的影响因子;调水调沙结束后, DSi、DSi/DIN 和温度的影响明显升高。

(4)对比 2015 年与 2016 年,发现调水调沙年份营养物质的大量输入可能会在一定程度上

提高浮游植物的生物量,特别是细胞丰度;但是对调查海域优势种的种群组成影响不大。

### 参考文献:

- [1] LIU S M. Response of nutrient transports to water-sediment regulation events in the Huanghe basin and its impact on the biogeochemistry of the Bohai[J]. *Journal of Marine Systems*, 2015, 141: 59-70.
- [2] LI G Y, SHENG L X. Model of water-sediment regulation in Yellow River and its effect[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(4): 924-930.
- [3] 杨作升, 李国刚, 王厚杰, 等. 55年来黄河下游逐日水沙过程变化及其对干流建库的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(6): 9-18.
- [4] 姚庆祯, 于志刚, 王 婷, 等. 调水调沙对黄河下游营养盐变化规律的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(12): 3534-3540.
- [5] GONG Y, YAO Q Z, YU Z G. Impact of the water-sediment regulation and a rainstorm on nutrient transport in the Huanghe River[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(1): 140-147.
- [6] LIU S M, LI L W, ZHANG G L, et al. Impacts of human activities on nutrient transports in the Huanghe (Yellow River) estuary[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 430-431: 103-110.
- [7] LENTON T M. Land and ocean carbon cycle feedback effects on global warming in a simple Earth system model[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2000, 52(5): 1159-1188.
- [8] SABINE C L, FEELY R A, GRUBER N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>[J]. *Science*, 2004, 305(5682): 367-371.
- [9] PAERL H W, ROSSIGNOL K L, HALL S N, et al. Phytoplankton community indicators of short- and long-term ecological change in the anthropogenically and climatically impacted Neuse River Estuary, North Carolina, USA[J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(2): 485-497.
- [10] WANG Y J, LIU D Y, LEE K, et al. Impact of Water-Sediment Regulation Scheme on seasonal and spatial variations of biogeochemical factors in the Yellow River estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 198: 92-105.
- [11] 苏芝娟, 王玉珏, 董志军, 等. 调水调沙后黄河口邻近海域浮游植物群落响应特征[J]. *海洋学报*, 2015, 37(4): 62-75.
- [12] 陈亚瞿, 徐兆礼, 王云龙, 等. 长江口河口锋区浮游动物生态研究 I 生物量及优势种的平面分布[J]. *中国水产科学*, 1995, 2(1): 49-58.
- [13] 孙 珊, 苏 博, 李 凡, 等. 调水调沙对黄河口及邻近海域环境状况的影响[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(3): 399-406.
- [14] 王 宁, 刘光兴, 刘晓彤, 等. 2010年夏末黄河口及其邻近水

- 域浮游植物群落结构[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 48-55.
- [15] 秦雪, 徐宾铎, 杨晓改, 等. 黄河口及其邻近水域夏季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2016, 40(5): 711-720.
- [16] DORTCH Q, PACKARD T T. Differences in biomass structure between oligotrophic and eutrophic marine ecosystems[J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1989, 36(2): 223-240.
- [17] JUSTIĆ D, RABALAIS N N, TURNER R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 30(1): 41-46.
- [18] 胡琴, 曲亮, 黄必桂, 等. 2014年秋季黄河口附近海域营养现状与评价[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(5): 732-738.
- [19] 罗先香, 单宇, 杨建强. 黄河口及邻近海域浮游植物群落分布特征及与水环境的关系[J]. 中国海洋大学学报, 2018, 48(4): 16-23.
- [20] 孙慧慧. 黄河口邻近海域浮游植物群落结构时空变化及其对调水调沙的响应[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2017.
- [21] 吕其明, 张晶晶, 高彦洁, 等. 套尔河贝类增殖区放流活动前后浮游植物群落结构变化[J]. 海洋渔业, 2020, 42(1): 20-34.
- [22] 张莎莎. 南水北调东线山东境内调蓄水库硅藻种群时空变化与环境因子[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [23] 栾青杉, 康元德, 王俊. 黄河口邻近海域浮游植物群落及其多样性的长期变化(1960-2010)[J]. 中国水产科学, 2017, 24(5): 913-921.
- [24] 闫苏苏, 雷波, 刘翔, 等. 长寿湖浮游植物功能群季节变化及影响因子[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(3): 52-60.
- [25] 马美荣, 李朋富, 陈丽, 等. 盐度和营养限制对盐田底栖硅藻披针舟形藻生长及胞外多糖产率的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2009, (1): 95-102.
- [26] 王朝晖, 齐雨藻, 陈菊芳, 等. 大亚湾角毛藻细胞数量波动及其与环境因子关系的多元分析[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1096-1102.
- [27] 费岳军, 蒋红. 舟山朱家尖海域角毛藻赤潮与环境因子关系的研究[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(S1): 38-41.
- [28] SOUCHU P, VAQUER A, COLLOS Y, et al. Influence of shellfish farming activities on the biogeochemical composition of the water column in Thau lagoon[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 218: 141-152.

(上接第 368 页)

- [8] PU X, SHI J Z, HU G D, et al. Circulation and mixing along the North Passage in the Changjiang River estuary, China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2015, 148: 213-235.
- [9] 肖莞生, 陈子燊. 珠江河口区枯季咸潮入侵与盐度运输机理分析[J]. 水文, 2010, 30(3): 10-14, 21.
- [10] 陈子燊. 珠江伶仃河口湾及邻近内陆架的纵向环流与物质运输分析[J]. 热带海洋, 1993, 12(4): 47-54.
- [11] 吕紫君, 冯佳佳, 郜新宇, 等. 磨刀门河口环流与咸淡水混合层化机制[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 908-921.
- [12] LIN Z Y, ZHANG H, LIN H Y, et al. Intraseasonal and interannual variabilities of saltwater intrusion during dry seasons and the associated driving forcings in a partially mixed estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 174: 95-107.
- [13] GONG W P, SHEN J. The response of salt intrusion to changes in river discharge and tidal mixing during the dry season in the Modaomen Estuary, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(7/8): 769-788.
- [14] GONG W P, MAA J P Y, HONG B, et al. Salt transport during a dry season in the Modaomen Estuary, Pearl River Delta, China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2014, 100: 139-150.
- [15] GONG W P, WANG Y P, JIA J J. The effect of interacting downstream branches on saltwater intrusion in the Modaomen Estuary, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 45: 223-238.
- [16] PRANDLE D. On salinity regimes and the vertical structure of residual flows in narrow tidal estuaries[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1985, 20(5): 615-635.
- [17] FISCHER H. Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 53(4): 671-687.
- [18] 袁丽蓉, 苏波, 余顺超, 等. 磨刀门河口瞬时盐度分层状态及其动力分析[J]. 人民珠江, 2012, 33(S1): 12-16.