

# 2010 年夏末黄河口及其邻近水域浮游植物群落结构

王 宁<sup>1</sup>, 刘光兴<sup>1,2</sup>, 刘晓彤<sup>1,3</sup>, 王为民<sup>1</sup>, 陈洪举<sup>1,2</sup>

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 阳谷县环境保护局, 山东 阳谷 262300)

**摘要:**为研究黄河调水调沙对黄河口水域浮游植物群落结构的影响,于 2010 年 9 月在黄河口及其邻近水域(119°03'~119°36'E, 37°28'~38°09'N)开展了调查,研究了该水域浮游植物的种类组成、丰度分布、优势种以及群落多样性。结果显示,研究水域共记录浮游植物 44 属 80 种(包括 14 个未定种),其中硅藻门共 39 属 68 种(包括 11 个未定种),在种类数和丰度值上均占据绝对优势;甲藻门 3 属 9 种(包括 1 个未定种),蓝藻门 1 种(未定种),金藻门 1 属 1 种,绿藻门 1 属 1 种。本航次调查中浮游植物优势种有柔弱角毛藻(*Chaetoceros debilis*)、浮动弯角藻(*Eucampia zodiacus*)和叉状角藻(*Ceratium furca*)。调水调沙导致的调查水域营养盐变化对浮游植物群落结构有重要影响。该研究揭示了 2010 年黄河调水调沙后黄河口及其邻近水域浮游植物群落结构特征,丰富了该水域浮游植物群落的基础资料,为深入探讨河口环境变化对浮游植物群落乃至生态系统的影响提供了重要依据。

**关键词:**黄河口;浮游植物;群落结构;调水调沙

中图分类号:Q178.53 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2017)01-0048-08

## Phytoplankton community structure in the Yellow River estuary and its adjacent waters in late summer, 2010

WANG Ning<sup>1</sup>, LIU Guang-xing<sup>1,2</sup>, LIU Xiao-tong<sup>1,3</sup>, WANG Wei-min<sup>1</sup>, CHEN Hong-ju<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology (Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 3. Yanggu Environmental Protection Agency, Yanggu 262300, China)

**Abstract:** To study the response of phytoplankton community to the water-sediment regulation in Yellow River in summer 2010, water samples were collected in the Yellow River estuary and its adjacent waters after the event. A total of 80 species (including 14 undetermined species) representing diatom, dinoflagellate, cyanobacteria, chrysophyte and chlorophytes were identified by microscopic analysis. Diatoms were dominant in all stations surveyed with 68 species identified and taking up 85% of the total phytoplankton. The main dominant species were *Chaetoceros debili*, *Eucampia zodiacus* and *Ceratium furca* in this survey. The changes of nutrients condition in the survey area affected the phytoplankton community structure significantly. This study provides fundamental information for further research about the influences of environmental changes on phytoplankton community in the Yellow River estuary and its adjacent area.

**Key words:** Yellow River estuary; phytoplankton; community structure; water regulation

浮游植物是重要的初级生产者,在海洋生态系统的物质循环和能量传递过程中起着重要的作

收稿日期:2016-02-26, 修订日期:2016-05-30

基金项目:国家自然科学基金项目(41210008, 31101875)

作者简介:王宁(1992-),女,山东海阳人,硕士研究生,主要研究方向为海洋浮游生物生态学, E-mail:770375216@qq.com

通讯作者:陈洪举(1982-),男,讲师, E-mail:hongjuc@ouc.edu.cn

用。浮游植物为浮游动物提供直接或间接饵料,其细胞丰度和种类组成是海洋渔业资源评估的重要依据<sup>[1]</sup>,黄河口及其邻近海区是多种鱼类的产卵场、索饵场和育肥场<sup>[2]</sup>,因此对该海域浮游植物群落结构的调查是了解其生态健康状况的重要手段。

黄河是世界上输沙量最多的河流,每年向河口及附近海域注入丰富的氮、磷、硅等无机营养盐。从上世纪 70 年代以来,黄河经常断流,且断流趋势日趋严重<sup>[3]</sup>。2002 年以来,黄河水利委员会定期对黄河实施调水调沙。调水调沙使大量淡水携带泥沙流入黄河口海域,使得黄河口及其周边海域海水盐度、透明度以及营养盐状况受到显著影响。以往对黄河入海口调水调沙前后营养盐含量变化研究结果显示,硝酸盐浓度变化不大(均值为 220  $\mu\text{mol/L}$  左右),磷酸盐浓度明显降低,硅酸盐浓度迅速增加<sup>[4]</sup>。调水调沙使黄河口水域水体水文条件和营养盐状况发生改变<sup>[5]</sup>,浮

游植物群落结构也发生显著变化<sup>[6]</sup>。

2010 年分别于 6 月 19 日~7 月 7 日、7 月 24 日~8 月 3 日和 8 月 11 日~21 日对黄河实施了 3 次调水调沙,创下一年内实施调水调沙次数的新纪录。本文利用 2010 年黄河 3 次调水调沙后在黄河口采集的浮游植物水样品,针对黄河口及其邻近水域浮游植物群落结构展开研究,旨在探讨调水调沙对该水域浮游植物群落结构的影响,探讨浮游植物群落结构与营养盐等环境因素之间的关系。本研究可为黄河调水调沙的生态影响评价提供依据,为了解该海域浮游植物群落结构演替积累基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查站位

本调查于 2010 年 9 月 12 日~19 日进行,调查区域范围 119°03'~119°36'E,37°28'~38°09'N,共设置 7 个断面 30 个站位,调查区域和站位分布详见图 1。

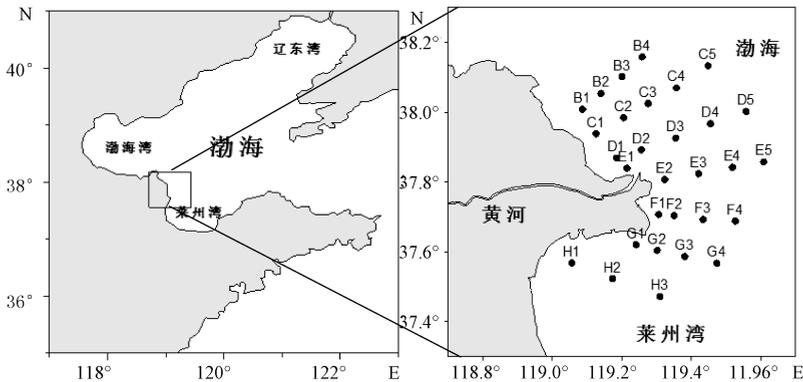


图 1 2010 年 9 月黄河口及邻近水域调查区域和站位

Fig. 1 Investigation area and sampling stations in Yellow River estuary in Sep. 2010

### 1.2 调查取样与样品分析

根据调查站位水深,用有机玻璃采水器在 30 个调查站位采集表层、5 m、10 m、15 m 和底层水样各 500 mL,立即用鲁哥氏液固定保存(终浓度为 2%)。在实验室内对样品进行静置和浓缩处理后于 Lecia DM 2500 显微镜下进行种类鉴定和计数。样品的采集、保存以及分析均按照《海洋调查规范—海洋生物调查》(GB 12763. 6-2007)进行。

温度和盐度使用 CTD(RBR 620 CTD)现场测定。透明度采用透明度盘测定。营养盐采用营养盐自动分析仪(SEAL Analytica, Auto Analyzer 3)测定, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$  检出限分别为 0.04  $\mu\text{mol/L}$ 、0.003  $\mu\text{mol/L}$ 、0.02

$\mu\text{mol/L}$ 、0.005  $\mu\text{mol/L}$  和 0.01  $\mu\text{mol/L}$ ,测定精密程度小于 3%。

### 1.3 数据处理

丰度(abundance)以单位水体细胞数(/L)表示,并根据各水层浮游植物的丰度,计算各站位浮游植物丰度水柱积分  $C_i$ :

$$C_i = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(C_i + C_{i+1})}{2} \times (D_{i+1} - D_i) \quad (1 \leq i \leq n-1)$$

式中: $C_i$ 为第  $i$  层浮游植物丰度(/L); $C_{i+1}$ 为第  $i+1$  层浮游植物丰度(/L); $D_i$ 为第  $i$  层采样水深(m); $D_{i+1}$ 为第  $i+1$  层采样水深(m); $n$  为采样层数。

根据各站位浮游植物丰度水柱积分,采用水柱平均浮游植物丰度  $C_d$ (/L)表示各站位浮游植

物的丰度。

$$C_d = \frac{C_i}{Z_{\max}}$$

式中:  $C_i$  为水柱浮游植物丰度;  $Z_{\max}$  为最大采样深度(m)。

浮游植物的优势种根据每个种的优势度值( $Y$ )来确定:

$$Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i$$

式中:  $n_i$  为第  $i$  种的丰度;  $N$  为所有种类总丰度;  $f_i$  为第  $i$  种出现频率。

取  $Y > 0.02$  的种类为优势种。

采用香农-威纳指数(Shannon-Weaner index)( $H'$ )和均匀度(Pielou index)( $J$ )对调查站位水柱平均浮游植物群落多样性进行分析。

香农-威纳指数的计算公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

均匀度的计算公式为:

$$J = H' / \log_2 S$$

式中:  $P_i$  为样品中第  $i$  种个体的比例,如样品总个体为  $N$ ,第  $i$  种个体数为  $n_i$ ,则  $P_i = n_i / N$ ;  $S$  为各站水柱平均种类数。

浮游植物细胞丰度及各生物多样性指数的平面分布采用 Surfer 8.0 软件绘制,采用 SPSS 11.5 中的 Correlate 程序进行浮游植物的丰度和生物多样性等与环境参数的相关性分析(Pearson Correlation Coefficients)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 调查水域环境特征

调查区域水温介于 19.8 ~ 26.6℃,平均值为

23.2℃,最高值出现在 G1 站,最低值出现在 F1 站,水温由河口区域向南、北方向均逐渐升高(图 2a)。盐度介于 12.3 ~ 30.7,平均值为 27.8,最大值和最小值分别位于 B4 站和 E1 站(图 2b)。本次调查盐度平均值与 2009 年调查水域盐度值相似<sup>[6]</sup>,由于调水调沙期间淡水的输入,河口区域盐度都显示由河口向外逐渐增大的趋势。透明度介于 0.15 ~ 2.5,平均值为 0.9,最高值和最低值分别位于 B4 站和 G2 站,分布趋势为由河口区域向外海区域逐渐升高(图 2c)。调查区域 DIN 含量区间为 1.75 ~ 15.56 μmol/L,均值为 4.42 μmol/L,最高值出现在 G3 站,最低值于 D3 站。PO<sub>4</sub>-P 含量平均值为 0.08 μmol/L,最高值位于 D3 站(0.39 μmol/L),H 断面 PO<sub>4</sub>-P 含量均低于检出限。SiO<sub>3</sub>-Si 含量介于 1.39 ~ 25.36 μmol/L,平均值为 9.50 μmol/L,最高值在 G2 站,最低值在 H1 站。SiO<sub>3</sub>-Si 分布从河口向远离河口区域逐渐减少(图 3c)。该区域 N:P:Si 比例明显与 Redfield 比例(N:P:Si = 16:1:16)不同,调查区域中 N/Si 的比值(4.9)远远小于 Redfield 值。

调水调沙使得大量泥沙随黄河水流入黄河口及周边水域, SiO<sub>3</sub>-Si 浓度在调水调沙后短时间内大量增加。DIN 的人海通量随着调水调沙时径流量增大而增大。相比调水调沙前, PO<sub>4</sub>-P 浓度在调水调沙后一段时间内降低,水体中悬浮物和沉积物对 P 的吸附作用已被大量模拟实验证实<sup>[7-8]</sup>,调查水域中 PO<sub>4</sub>-P 受大流量淡水稀释,同时调水调沙过程携带来的颗粒物对 PO<sub>4</sub>-P 有一定吸附解吸作用导致研究水域中 PO<sub>4</sub>-P 浓度下降。调水调沙导致近河口区域营养盐发生显著变化, N、P 和 Si 在调查水域分布规律的差异。

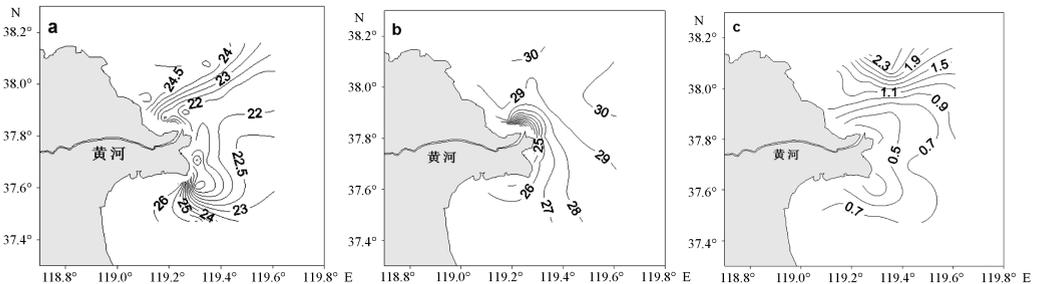


图 2 2010 年 9 月调查区域温度与盐度分布(a:温度;b:盐度;c:透明度)

Fig. 2 Temperature, salinity and transparency in survey area in Sep. 2010 (a: temperature; b: salinity; c: transparency)

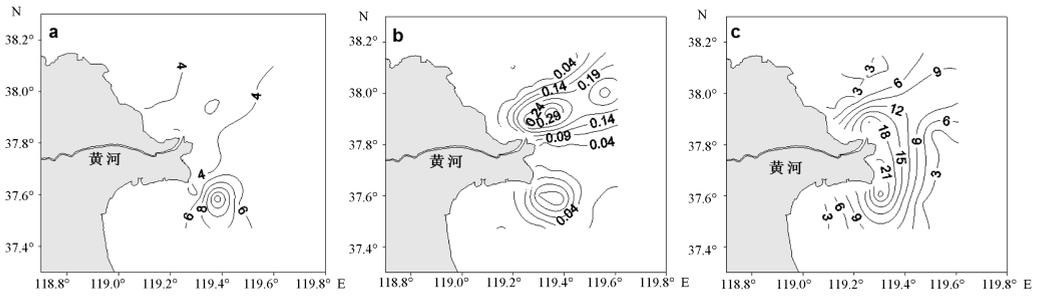


图 3 2010 年 9 月调查区域营养盐分布 (a:总无机氮;b:磷酸盐;c:硅酸盐)

Fig. 3 Nutrient distribution in survey area in Sep. 2010 ( $\mu\text{mol/L}$ ) (a: DIN; b:  $\text{PO}_4\text{-P}$ ; c:  $\text{SiO}_3\text{-Si}$ )

2.2 浮游植物种类组成

调查水域共鉴定出浮游植物 44 属 80 种 (包括 14 个未定种) (表 1)。其中,硅藻门共 39 属 68 种 (包括 11 个未定种),占总种数的 85.0%;甲藻门 3 属 9 种 (包括 1 个未定种),占总种数的 11.3%;蓝藻门 1 种 (未定种),金藻门 1 属 1 种,

绿藻门 1 属 1 种。由于黄河淡水的输入,黄河口以及邻近海域常有淡水藻的存在。本次调查在河口区域站位也有淡水藻类检出 (如念珠藻 *Nostocaceae*),此外还有适应低盐环境的克尼角毛藻 (*Chaetoceros knipowitschii*) 和中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 等。

表 1 调查区域浮游植物物种组成

Tab. 1 Species composition of phytoplankton in investigation area

中文名	拉丁文名	中文名	拉丁文名
<b>硅藻</b>	<b>Bacillariophyta</b>	中华半管藻	<i>Hemiaulus sinensis</i> Greville
短柄曲壳藻	<i>Achnanthes brevipes</i> Agardh	环纹劳德藻	<i>Lauderia annulata</i> Cleve
六辐辐裯藻	<i>Actinoptychus senarius</i> (Ehr.) Ehrenberg	丹麦细柱藻	<i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve
翼内茸藻	<i>Amphiprora alata</i> Kutzing	膜状缪氏藻	<i>Meuniera membranacea</i> (Cleve) Silva
透明辐杆藻	<i>Bacteriastrum hyalinum</i> Lauder	舟形藻	<i>Navicula</i> spp.
大洋角管藻	<i>Cerataulina pelagica</i> (Cleve) Hendeby	新月柱鞘藻	<i>Nitzschia closterium</i> (Ehrenberg) W. Smith
窄隙角毛藻	<i>Chaetoceros affinis</i> Lauder	菱形藻	<i>Nitzschia</i> spp.
桥联角毛藻	<i>Chaetoceros anastomosans</i> Grunow	中华齿状藻	<i>Odontella sinensis</i> (Greville) Grunow
卡氏角毛藻	<i>Chaetoceros castracanei</i> Karsten	具槽帕拉藻	<i>Paralia sulcata</i> (Ehr.) Cleve
扁面角毛藻	<i>Chaetoceros compressus</i> Lauder	羽纹藻	<i>Pinnularia</i> spp.
深环沟角毛藻	<i>Chaetoceros constrictus</i> Gran	具翼漂流藻	<i>Planktoniella blanda</i> Syvertsen & Hasle
旋链角毛藻	<i>Chaetoceros curvisetus</i> Cleve	斜纹藻	<i>Pleurosigma</i> spp.
柔弱角毛藻	<i>Chaetoceros debilis</i> Cleve	柔弱伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> (Cleve) Heiden et al.
并基角毛藻	<i>Chaetoceros decipiens</i> Cleve	尖刺伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (Grunow ex Cleve) Hasle
冕袍角毛藻	<i>Chaetoceros diadema</i> (Ehrenberg 1854) Gran	刚毛根管藻	<i>Rhizosolenia setigera</i> Brightwell
双袍角毛藻	<i>Chaetoceros didymus</i> var. <i>didymus</i> Ehrenberg	优美旭氏藻矮小变型	<i>Schröderella delicatula</i> f. <i>schroderi</i> (Bergon) Sournia
远距角毛藻	<i>Chaetoceros distans</i> Cleve	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i> (Greville) Cleve
克尼角毛藻	<i>Chaetoceros knipowitschii</i> Henckel	塔形冠盖藻	<i>Stephanopyxis turris</i> (Grev. et Arnott) Ralfs
洛氏角毛藻	<i>Chaetoceros lorenzianus</i> Grunow	双菱藻	<i>Surirella</i> sp.
日本角毛藻	<i>Chaetoceros nipponica</i> Ikari	针杆藻	<i>Synedra</i> spp.
窄面角毛藻	<i>Chaetoceros paradoxus</i> Cleve	佛氏海线藻	<i>Thalassionema frauenfeldii</i> (Grunow) Hallegraeff
拟旋链角毛藻	<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i> Mangin	菱形海线藻	<i>Thalassionema nitzschioides</i> Grunow
聚生角毛藻	<i>Chaetoceros socialis</i> Lauder	太平洋海链藻	<i>Thalassiosira pacifica</i> Gran et Angst
角毛藻	<i>Chaetoceros</i> spp.	圆海链藻	<i>Thalassiosira rotula</i> Meunier
棘冠藻	<i>Corethron criophilum</i> Castracane	海链藻 1	<i>Thalassiosira</i> sp.1.
蛇目圆筛藻	<i>Coscinodiscus argus</i> Ehrenberg	海链藻	<i>Thalassiosira</i> spp.
星脐圆筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i> Ehrenberg	<b>甲藻</b>	<b>Pyrrophyta</b>
具边线形圆筛藻	<i>Coscinodiscus marginato-lineatus</i> A. Schmidt	叉角藻	<i>Ceratium furca</i> (Ehrenberg) Dujardin
虹彩圆筛藻	<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i> Ehrenberg	梭角藻	<i>Ceratium fusus</i> (Ehrenberg) Dujardin

(续表1)

中文名	拉丁文名	中文名	拉丁文名
细弱圆筛藻	<i>Coscinodiscus subtilis</i> Ehrenberg	大角角藻	<i>Ceratium macroceros</i> (Ehrb.) Cleve
圆筛藻	<i>Coscinodiscus</i> spp.	三角角藻	<i>Ceratium tripos</i> (Müller) Nitzsch
条纹小环藻	<i>Cyclotella striata</i> (Kuetz.) Grunow	夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i> (Macart.) Kof. et Swezey
矮小短棘藻	<i>Detonula pumila</i> (Castracane) Gran	扁平原多甲藻	<i>Protoperidinium depressum</i> (Bailey) Balech
蜂腰双壁藻	<i>Diploneis bombus</i> Ehrenberg	灰甲原多甲藻	<i>Protoperidinium pellucidum</i> (Bergh) Schutt
布氏双尾藻	<i>Ditylum brightwellii</i> (West) Grunow	五角原多甲藻	<i>Protoperidinium pentagonum</i> (Gran) Balech
浮动弯角藻	<i>Eucampia zodiacus</i> Ehrenberg	原多甲藻	<i>Protoperidinium</i> sp.
柔弱井字藻	<i>Eunotogramma debile</i> Grunow	蓝藻	<b>Cyanophyta</b>
脆杆藻	<i>Fragilaria</i> spp.	念珠藻科	Nostocaceae
柔弱几内亚藻	<i>Guinardia delicatula</i> (Cleve) Hasle et al.	金藻	<b>Chrysophyta</b>
薄壁几内亚藻	<i>Guinardia flaccida</i> (Castracane) Peragallo	小等刺硅鞭藻	<i>Dictyocha fibula</i> Ehrenberg
斯氏几内亚藻	<i>Guinardia striata</i> (Stolterfoth) Hasle	绿藻	<b>Chlorophyta</b>
泰晤士旋鞘藻	<i>Helicotheca tamesis</i> (Shrubsole) Ricard	集星藻	<i>Actinastrum hantzschii</i> Lag
膜质半管藻	<i>Hemiaulus membranacus</i> Cleve		

### 2.3 浮游植物丰度分布

调查水域各站位浮游植物丰度平均值为  $17.03 \times 10^4/L$ , 最高值位于 G1 站 ( $50.81 \times 10^4/L$ ), 最低值位于 G2 站 ( $2.75 \times 10^4/L$ )。在调查水域存在 3 个浮游植物丰度高值区 (图 4 a): 由河口向西北方向, 浮游植物丰度逐渐升高; 由河口向东, 浮游植物丰度逐渐升高形成了东部水域高值区; 以 G1 站为中心形成西南部近岸水域浮游植物丰度高值区。硅藻平均丰度为  $14.06 \times 10^4/L$ , 最高值位于 G1 站 ( $50.34 \times 10^4/L$ ), 最低值位于 D4 站 ( $0.87 \times 10^4/L$ ), 硅藻丰度的分布趋势与总丰度分布相似; 甲藻平均丰度为  $2.59 \times 10^4/L$ , 最大值在 E4 站 ( $25.46 \times 10^4/L$ ), 最小值在 E2 站 ( $0.04 \times 10^4/L$ ), 细胞丰度由近河口水域向东逐渐增大。

硅藻在调查区域浮游植物群落中处于主导地位, 其丰度分布在很大程度上影响着浮游植物总丰度的分布趋势。甲藻在调查水域东部的集中分布形成了丰度的东部水域高值区, 对总丰度在东部水域形成高值区有重要贡献, 说明甲藻对调查水域浮游植物群落结构的作用也不容忽视。由图

4 可以看出, 硅藻和甲藻的空间分布存在较大差异, 两者在研究海区分布趋势基本相反。同步调查该水域透明度和营养盐含量, 结果显示近河口水域营养盐含量较高但透明度较差, 远离河口的水域则相反, 硅藻和甲藻的空间分布差异正是对水域环境条件差异的响应。这主要因为硅藻能适应弱光高营养盐的环境, 而甲藻则能耐强光低营养盐的环境<sup>[9]</sup>。

本次调查中浮游植物淡水种类总丰度为  $8.0 \times 10^4/L$ , 与历史资料相比<sup>[6]</sup>有所下降。淡水种类丰度下降可能与浮游植物采样时间有关, 2009 年黄河调水调沙项目于 7 月实施, 浮游植物采样调查于 7 月 18 日至 19 日完成, 调水调沙导致大量淡水输入海洋, 黄河口在短时间内形成一定范围的半咸水区域, 大量淡水藻也随之流入黄河口及其周边水域。而 2010 年黄河调水调沙项目于 8 月 21 日结束, 浮游植物采样调查于 9 月 12 日至 19 日完成, 两者相隔时间较长, 因此海水中的淡水藻数量减少。

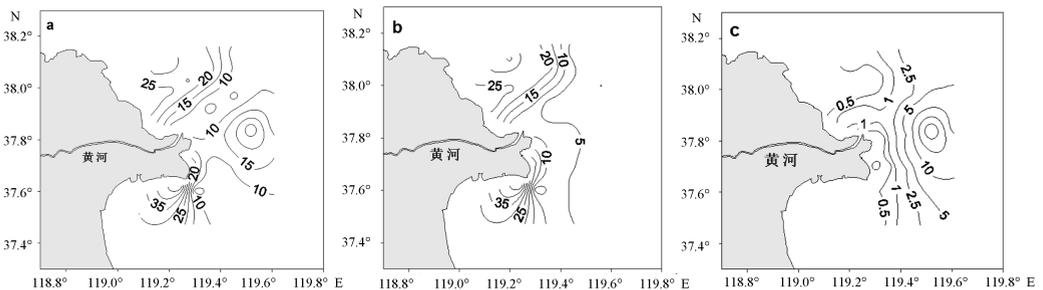


图 4 2010 年 9 月浮游植物丰度值平面分布 ( $\times 10^4/L$ ) (a: 总丰度; b: 硅藻; c: 甲藻)

Fig. 4 Depth-weighted abundance distribution of phytoplankton in Sep. 2010 ( $\times 10^4$  cells/L)

(a: Total; b: Diatom; c: Dinoflagellate)

### 2.4 浮游植物优势种

调查水域浮游植物优势种及优势度见表 2, 共 3 个优势种, 柔弱角毛藻和叉状角藻在本次调查中出现频率较高 (>90%), 同时柔弱角毛藻占总丰度的比例最高 (44.7%)。角毛藻属一直是渤海 (特别是莱州湾-黄河口一带) 的优势类群, 其物种丰富度和细胞丰度值都处于绝对优势地位<sup>[10]</sup>; 浮动弯角藻常成为渤海海域的优势种<sup>[11]</sup>。淡水种类常成为该海域浮游植物优势种类的现象<sup>[9]</sup> 在本航次中未出现。

调查区域柔弱角毛藻平均丰度为  $7.61 \times 10^4/L$ , 最高值位于 H2 站 ( $24.95 \times 10^4/L$ ), 并以其为中心形成高值区, 在调查区域西北部的 B、C 断面处

丰度也较高, 除了这两个高值区外, 该种在其他区域的丰度较低, 在靠近河口的 D、E 和 F 断面较靠外的站位柔弱角毛藻数量较少 (图 5a)。叉状角藻平均丰度为  $2.52 \times 10^4/L$ , 集中在以低营养盐浓度的 E<sub>4</sub> 站 ( $25.37 \times 10^4/L$ ) 为中心的高值区, 其他站位尤其是在靠近河口的水域该种丰度值很低 (图 5b)。叉状角藻可能更能适应环境的变化, 在营养盐浓度下降的条件下能更有效地利用环境中的营养物质。浮动弯角藻平均丰度为  $0.67 \times 10^4/L$ , 最高值位于调查区域北部的 B<sub>4</sub> 站 ( $3.31 \times 10^4/L$ ), 并在该区域形成了北部高值区, 另一高值区位于近河口水域, 在远离岸边的水域丰度较低 (图 5c)。

表 2 2010 年 9 月浮游植物优势种及优势度

Tab. 2 Dominant species and their dominance in Sep. 2010

优势种	丰度比例/(%)	出现频率/(%)	优势度	平均丰度/ $\times 10^4 \cdot L^{-1}$
柔弱角毛藻 <i>Chaetoceros debilis</i>	44.7	96.7	0.431	7.61
叉状角藻 <i>Ceratium furca</i>	14.8	93.3	0.138	2.52
浮动弯角藻 <i>Eucampia zodiacus</i>	4.0	73.3	0.029	0.67

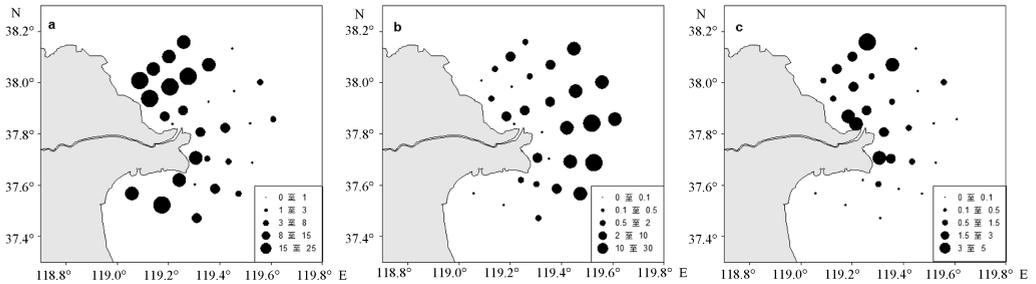


图 5 2010 年 9 月浮游植物优势种丰度值平面分布 ( $\times 10^4/L$ ) (a: 柔弱角毛藻; b: 叉状角藻; c: 浮动弯角藻)

Fig. 5 Depth-weighted abundance distributions of dominant species in Sep. 2010 ( $\times 10^2$  cells/L)

(a: *Chaetoceros debilis*; b: *Ceratium furca*; c: *Eucampia zodiacus*)

### 2.5 浮游植物群落多样性

图 6 显示, 调查水域浮游植物群落  $H'$  和  $J$  的分布趋势基本一致, 即由近河口水域向外逐渐减

小。  $H'$  平均值为 2.50,  $J$  的平均值为 0.57; 两种生物多样性指数 ( $H'$  和  $J$ ) 最低值均在 E4 站 (1.02、0.23), 最高值均在 E1 站 (3.28、0.89)。

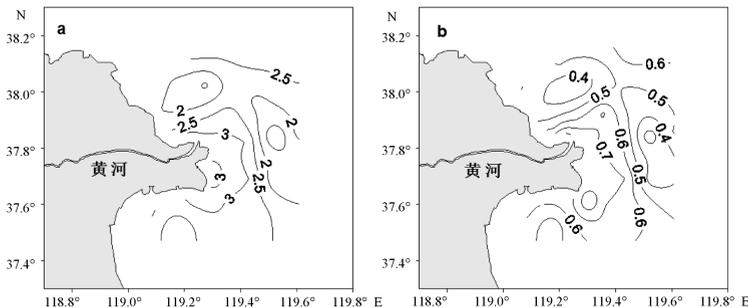


图 6 2010 年 9 月浮游植物生物多样性指数平面分布 (a: 香农-威纳指数; b: 均匀度)

Fig. 6 Spatial distributions of phytoplankton biodiversity indices in Sep. 2010 (a:  $H'$ ; b:  $J$ )

从浮游植物生物多样性来判断,本航次的个别站位出现多样性较低的情况,如 E4 站、C3 站和 C2 站。这些站位较低的多样性均是由某种浮游植物占绝对优势造成的,例如在 E4 站叉状角藻占绝对优势。Telesh<sup>[12]</sup>指出物种多样性与水域的营养水平存在密切的关系,因此浮游生物群落的结构和功能指数(如  $H'$ )的变化能够作为生态系统在环境压力下发生改变的指示,这说明了保持海洋浮游生物调查研究连续性的重要意义。

## 2.6 浮游植物与环境因子相关性分析

浮游植物总丰度与温度呈极显著的正相关,与盐度相关性不显著,与  $PO_4\text{-P}$  呈极显著的负相关,与  $SiO_3\text{-Si}$  呈显著的负相关;硅藻丰度与温度呈显著的正相关关系,与  $PO_4\text{-P}$  呈极显著负相关关系,硅藻与环境因子的相关性总丰度的一致;甲藻丰度与环境因子相关性不显著;香农-威纳指数和均匀度与温度相关性不显著,前者与盐度呈显著的负相关,后者与盐度呈极显著的负相关且与透明度呈显著的负相关,两者均与  $SiO_3\text{-Si}$  呈极显著的相关关系(表 2)。

浮游植物在水体中大致按 Redfield 比例 ( $N:P:Si=16:1:16$ ) 吸收营养盐,因此这一恒定比例可作为判定环境中某种营养盐缺乏的依据<sup>[13]</sup>。

表 3 2010 年 9 月浮游植物丰度和多样性指数与环境因子间相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis between abundance, diversity and environmental variables in Sep. 2010

	$T$	$S$	Tr	DIN	$PO_4\text{-P}$	$SiO_3\text{-Si}$
Abundance	0.653 **	0.080	0.172	0.001	-0.490 **	-0.405 *
Diatom Abundance	0.687 **	-0.025	0.166	-0.071	-0.405 *	-0.213
Dinoflagellate Abundance	-0.217	0.217	-0.059	0.160	0.047	-0.216
$H'$	-0.079	-0.430 *	-0.258	0.052	0.030	0.547 **
$J$	-0.298	-0.547 **	-0.426 *	0.010	0.180	0.726 **

注: \*\* 为  $p<0.01$ , \* 为  $p<0.05$

## 3 结论

(1) 研究水域共鉴定出浮游植物 44 属 80 种,分别属于硅藻门、甲藻门、蓝藻门、金藻门和绿藻门,优势种为柔弱角毛藻、浮动弯角藻和叉状角藻。

(2) 硅藻丰度占总丰度 82.6%,在调查区域浮游植物群落中处于主导地位,其分布趋势与总丰度相似;甲藻的空间分布与硅藻趋势基本相反,由于硅藻和甲藻对水域环境变化的响应差异导致。

P 常成为长江口和黄河口等河口及邻近海域的浮游植物生长的限制因子<sup>[14]</sup>,本次调查区域 N/P 平均值为 56.4,最大值高达 2855,远高于 Redfield 比例,但相关性分析显示该海域  $PO_4\text{-P}$  与浮游植物总丰度及硅藻丰度均呈现显著负相关关系,说明该水域浮游植物未受到磷胁迫,较大的 N/P 值可能由于调水调沙径流量增大所导致的 DIN 入海通量增大引起的。另外  $SiO_3\text{-Si}$  在硅藻生长繁殖的过程必不可少,水体中 Si/N 小于 1 时硅藻生长受抑制而甲藻生长受促进<sup>[15]</sup>,在 E4 站,最低的 Si/N 值(0.28)造成了该站位甲藻丰度的最高值( $25.46\times 10^4/L$ )。胶州湾<sup>[16]</sup>和密西西比河口<sup>[17]</sup>等海域已经出现了硅限制的现象;Wei 等<sup>[18]</sup>研究表明由于 N/P 的上升及 Si/N 的下降,甲藻在渤海浮游植物群落中的地位越来越重要。硅限制将降低硅藻优势,甚至引起非硅藻浮游植物占优势地位的状况<sup>[19]</sup>。本研究中,浮游植物丰度与  $SiO_3\text{-Si}$  浓度呈显著的负相关关系 ( $P<0.05$ ),与  $PO_4\text{-P}$  浓度呈极显著负相关,说明浮游植物的生长不仅与营养盐和光照等条件密切相关,而且还受到环境因素的影响,同时调水调沙事件造成的水体透明度降低和受到的较大物理扰动可能是浮游植物丰度比历史数据偏低的重要原因。

致谢:感谢徐东会、黄有松和王文杰等同学协助采集样品,感谢中国海洋大学环境科学与工程学院米铁柱老师提供同步营养盐数据。

## 参考文献:

- [1] 蔡德陵,李红燕,唐启升,等. 黄东海生态系统食物网连续营养谱的建立:来自碳氮稳定同位素方法的结果[J]. 中国科学 C 辑:生命科学,2005,35(2):123-130.
- [2] 朱鑫华,缪锋,刘栋,等. 黄河口及邻近海域鱼类群落时空格局与优势种特征研究[J]. 海洋科学集刊,2001(43):141-151.
- [3] 陈霁巍,穆兴民. 黄河断流的态势、成因与科学对策[J]. 自然

- 资源学报,2000,15(1):31-35.
- [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] 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.
- [6] 刘晓彤,刘光兴. 2009 年夏季黄河口及其邻近水域网采浮游植物的群落结构[J]. 海洋学报,2012,34(1):153-162.
- [7] FROELICH P N. Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: a primer on the phosphate buffer mechanism [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, 33(4part2):649-668.
- [8] 石晓勇,史致丽. 黄河口磷酸盐缓冲机制的探讨[J]. 海洋与湖沼,1999,30(2):192-198.
- [9] 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.
- [10] 孙 萍,李瑞香,李 艳,等. 2005 年夏末渤海网采浮游植物群落结构[J]. 海洋科学进展,2008,26(3):354-363.
- [11] 孙 军,刘东艳. 2000 年秋季渤海的网采浮游植物群落[J]. 海洋学报,2005,27(3):124-132.
- [12] TELES H I V. Plankton of the Baltic estuarine ecosystems with emphasis on Neva Estuary: a review of present knowledge and research perspectives [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 49(3):206-219.
- [13] SMITH S V. Phosphorus versus nitrogen limitation in the marine environment [J]. *Limnology and Oceanography*, 1984, 29(6):1149-1160.
- [14] 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.
- [15] HO K C, IRONSDIE H, LAM Y, et al. Significance of Si:N ratio to harmful algal bloom [C]//HO K C, LU S H, YU T S, et al. Recent Advances in the Prevention and Management of Harmful Algal Blooms in the South China Sea. Hong Kong: The Association on Harmful Algal Blooms in the South China Sea, 2003: 113-118.
- [16] 沈志良. 胶州湾营养盐结构的长期变化及其对生态环境的影响[J]. 海洋与湖沼,2002,33(3):322-331.
- [17] LOHRENZ S E, FAHNENSTIEL G L, REDALJE D G, et al. Nutrients, irradiance, and mixing as factors regulating primary production in coastal waters impacted by the Mississippi River plume [J]. *Continental Shelf Research*, 1999, 19(9):1113-1141.
- [18] WEI H, SUN J, MOLL A, et al. Phytoplankton dynamics in the Bohai Sea-observations and modelling [J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 44(3/4):233-251.
- [19] OFFICER C B, RYTHER J H. The possible importance of silicon in marine eutrophication [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1980, 3:83-91.

(上接第 47 页)

## 参考文献:

- [1] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第二分册)辽东半岛西部和辽宁省西部海湾[M]. 北京:海洋出版社,1997.
- [2] 韩 康,吴 冠,张存智. 普兰店湾潮流场数值模拟[J]. 海洋环境科学,2001,20(1):42-46.
- [3] 王 昆,郭 楠,王年斌,等. 辽东湾水体交换能力模拟及保守水质模型应用[J]. 水产科学,2013,32(8):475-481.
- [4] 胡建宇. 罗源湾海水与外海水的交换研究[J]. 海洋环境科学,1998,17(3):51-54.
- [5] 魏 皓,田 恬,周 锋,等. 渤海水交换的数值研究-水质模型对半交换时间的模拟[J]. 青岛海洋大学学报,2002,32(4):519-525.
- [6] DIMOU K N, ADAMS E E. A random-walk, particle tracking model for well-mixed estuaries and coastal waters [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1993, 37(1):99-110.
- [7] BILGILI A, PROEHL J A, LYNCH D R, et al. Estuary/ocean exchange and tidal mixing in a Gulf of Maine Estuary: a Lagrangian modeling study [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 65(4):607-624.
- [8] 董礼先,苏纪兰. 象山港水交换数值研究 I. 对流-扩散型的水交换模式[J]. 海洋与湖沼,1999,30(4):410-415.
- [9] 董礼先,苏纪兰. 象山港水交换数值研究 II. 模型应用和水交换研究[J]. 海洋与湖沼,1999,30(5):465-470.
- [10] LIU Z, WEI H, LIU G S, et al. Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61(1):25-35.
- [11] 姚炎明,彭 辉,杜雅杰,等. 象山港分区水交换数值研究 [J]. 海洋学报,2014,36(1):126-130.
- [12] LI Y P, ACHARYA K, YU Z B, et al. Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(2):325-334.
- [13] SHEN Y M, WANG J H, ZHENG B H, et al. Modeling study of residence time and water age in Dahuofang Reservoir in China [J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, 54(1):127-142.
- [14] BRUFAU P, GARCÍA-NAVARRO P, VÁZQUEZ-CENDÓN M E. Zero mass error using unsteady wetting-drying conditions in shallow flows over dry irregular topography [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2004, 45(10):1047-1082.
- [15] 许 婷,韩志远,温春鹏. 秦皇岛西港水体交换数值模拟研究 [J]. 中国港湾建设,2016,36(1):10-14.
- [16] ALLEN J I, SOMERFIELD P J, GILBERT F J. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models [J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 64(1/2/3/4):3-14.