

## 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

秦 雪, 徐宾铎, 杨晓改, 任一平\*

(中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003)

**摘要:** 根据2013年调水调沙前(6月)、后(8月)在黄河口及其邻近水域进行浮游植物与环境调查数据, 研究该水域夏季浮游植物种类组成、优势种、群落多样性的变化, 应用典范对应分析(CCA)研究黄河口浮游植物群落空间结构与环境因子的关系, 并探讨黄河调水调沙事件对浮游植物群落结构的影响。结果显示, 本次调查共鉴定浮游植物88种, 隶属于4门40属。其中, 硅藻门种类最多, 共30属66种, 占总种数的74.2%; 甲藻门次之, 共6属16种, 占总种数的18.2%; 绿藻门共3属5种, 占总种数的5.7%; 金藻门仅1属1种。调水调沙前浮游植物优势种为旋链角毛藻和细弱圆筛藻, 调水调沙后的优势种为梭状角藻和旋链角毛藻。浮游植物群落物种丰富度指数 $D$ 、多样性指数 $H'$ 和均匀度指数 $J'$ 均呈现调水调沙前高后低的趋势。典范对应分析表明, 调水调沙前影响浮游植物群落空间结构的主要因素为硝酸盐、亚硝酸盐、溶解氧和透明度; 调水调沙后影响浮游植物群落空间结构的主要因素为溶解氧、活性硅酸盐、铵盐和透明度。黄河调水调沙带来的营养盐变化可能是引起调水调沙前、后浮游植物种类组成和群落结构差异的主要因素。

**关键词:** 浮游植物; 群落结构; 典范对应分析; 黄河口

**中图分类号:** Q 145; S 917

**文献标志码:** A

浮游植物个体微小、种类繁多, 是海洋生产力的基础, 在生态系统的能量流动、物质循环和信息传递中起着至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。浮游植物的时空分布与海洋环境之间有着十分密切的关系, 对环境的变化具有指示作用, 同时环境变化也直接或间接地影响浮游植物的群落结构<sup>[3]</sup>。

黄河口位于渤海湾与莱州湾的交汇处, 黄河每年向河口输入大量的淡水、泥沙和营养盐, 为浮游植物的生长繁殖提供了良好的生态环境<sup>[4-7]</sup>。目前, 黄河口浮游植物生态学研究主要集中于黄河口浮游植物种类组成、丰度分布和群落结构等方面。例如, 张继民等<sup>[6]</sup>研究了黄河口附近海域丰、枯水期浮游植物种群的变化, 冷宇等<sup>[8]</sup>研究了黄河口海域夏季浮游植物的分布特征, 巩俊霞等<sup>[9]</sup>研究了黄河入海口海域丰枯水

期浮游植物丰度及其多样性。自2002年以来, 由于定期对黄河进行调水调沙, 引起黄河入海径流量的急剧变化, 影响黄河口水域生态环境, 水域环境变化进而会直接或间接地影响浮游植物的种类组成和数量分布。刘晓彤等<sup>[4]</sup>对调水调沙事件后黄河口及邻近水域的浮游植物群落结构进行分析, 苏芝娟等<sup>[10]</sup>研究了调水调沙后黄河口邻近海域浮游植物群落响应特征, 为深入分析河口环境变化对浮游植物群落的影响提供参考。若要全面了解调水调沙事件对该水域浮游植物群落的影响, 仍需进一步研究调水调沙前、后的浮游植物群落结构及影响因素。

本研究利用黄河调水调沙前、后在黄河口及其邻近水域进行的浮游植物与环境调查数据, 分析该水域调水调沙前、后浮游植物群落结构

收稿日期: 2015-05-14 修回日期: 2015-10-27

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303050)

通信作者: 任一平, E-mail: renyip@ouc.edu.cn

的变化及其与环境因子的关系，以期为深入研究黄河调水调沙对浮游植物群落的影响机制提供参考资料。

### 1 材料与方法

#### 1.1 数据来源

样品于2013年夏季黄河调水调沙前(6月)、后(8月)采自黄河口及其邻近水域，调查海域范围为37°40'~38°09'N，119°00'~119°40'E。以黄河入海口为中心，向外呈辐射状设置5条断面，18个站位，以断面-序号命名，中间3条断面各有4个站位，两侧2条断面各设置3个站位，河口附近的站位较密集(图1)。

在每个站位，使用浅水Ⅲ型浮游生物网(直径37 cm、面积0.1 m<sup>2</sup>，网目孔径77 μm)自底至表垂直拖网采集浮游植物样品，所采样品用5%福尔马林溶液固定，经浓缩后用DM 2500显微镜(Leica，德国)观察、鉴定并计数。所有操作均按《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<sup>[11]</sup>。每站起网后用CTD仪同步进行了海水表层温度(SST，°C)、海水表层盐度(SAL)和溶解氧(DO，mg/L)等环境因子的测定；同时采集水样，带回实验室进行相关营养盐参数的测定。硝酸盐(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)(mg/mL)、亚硝酸盐(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)(mg/mL)、铵盐(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)(mg/mL)、活性硅酸盐(SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si)(mg/mL)、活性磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)(mg/mL)、透明度(TRA，m)和pH样品的采集和测定按《海洋调查规范第4部分：海水化学要素调查》(GB/T 12763.4-2007)进行<sup>[12]</sup>。化学耗氧量(COD，mg/L)采用《海洋监测规范第4部

分：海水分析》(GB/T 17378.4-2007)中的碱性高锰酸钾法进行测定<sup>[13]</sup>。

#### 1.2 数据处理

优势种 优势种采用种类优势度(*Y*)来确定：

$$Y=(N_i/N) \times f_i$$

式中，*N*为同一样品中的所有种类总丰度(个/m<sup>3</sup>)；*N<sub>i</sub>*为第*i*种的丰度(个/m<sup>3</sup>)；*f<sub>i</sub>*为样品中第*i*种的出现站位频率；本研究认定*Y*>0.02为优势种<sup>[14]</sup>。

更替率 采用种类更替率来分析黄河口及其邻近水域浮游植物种类组成的变化<sup>[15]</sup>：

$$A(\%) = \frac{C}{C+S} \times 100$$

式中，*C*为2个月间物种增加及减少数；*S*为2个月间共有种数；更替率*A*是指与上个月相比较的更替情况。

多样性指数 浮游植物群落多样性分别采用Margalef物种丰富度指数*D*<sup>[16]</sup>、Shannon-Wiener多样性指数*H'*<sup>[17]</sup>和Pielou均匀度指数*J'*<sup>[18]</sup>来研究：

$$D=(S-1)/\ln N$$

$$H'=-\sum P_i \log_2 P_i (P_i=N_i/N);$$

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

式中，*S*为物种数；*N*为同一样品中的浮游植物总丰度(个/m<sup>3</sup>)；*N<sub>i</sub>*为第*i*个种的丰度(个/m<sup>3</sup>)。

#### 1.3 浮游植物群落结构及影响因子分析

为降低优势种对相似性计算的权重，对黄河口及邻近水域调水调沙前、后各站位的浮游植物种类(与CCA分析所用浮游植物种类相同)丰度进行平方根转换，根据平方根转换的丰度数据计算不同站位间的Bray-Curtis相似性系数矩阵，进而应用等级聚类分析(CLUSTER)划分不同站位组，研究黄河口及邻近水域浮游植物群落空间结构<sup>[19-20]</sup>。应用单因子相似性分析(ANOSIM)研究不同站位组间种类组成的差异显著性，*P*<0.05为显著差异，*P*<0.01为极显著差异<sup>[20]</sup>。

应用典范对应分析(CCA)研究浮游植物群落空间结构与SAL、DO、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si、COD、SST、TRA和pH等环境因子的关系。CCA要求2个数据矩阵：物种数据矩阵和环境数据矩阵。为得到更理想的排序结果，物种数据按以下2个条件进行筛选：该物种在各站位出现的频度>12.5%，且该物种在至少

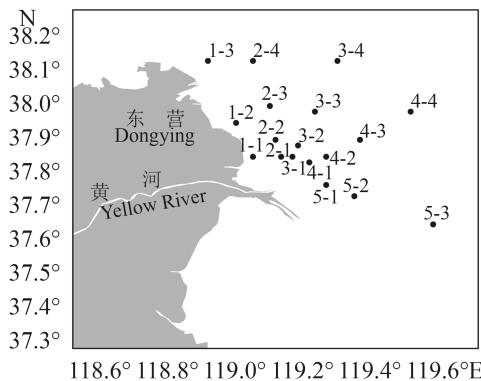


图1 黄河口及邻近水域浮游植物与环境调查站位

Fig. 1 Survey stations for phytoplankton and environment variables in the Yellow River estuary and its adjacent waters

1个站位的相对丰度>1%<sup>[21-22]</sup>, 筛选出39种符合条件的浮游植物种类用于CCA排序。为确定浮游植物丰度的数据满足正态分布, CCA分析前对物种矩阵和环境矩阵数据(除pH外)都进行lg(x+1)转换<sup>[23]</sup>。利用Canoco for Windows 4.5软件进行CCA分析。

## 2 结果

### 2.1 浮游植物种类组成

经鉴定共采集浮游植物88种, 隶属于4门, 40属。其中, 硅藻门(Bacillariophyta)最多, 共30属66种, 占总种数的74.16%; 甲藻门(Pyrrophyta)次之, 共6属16种, 占总种数的18.18%; 绿藻门(Chlorophyta)共3属5种, 占总种数的5.68%; 金藻门(Chrysophyta)仅1属1种。调水调沙前, 鉴定浮游植物共19属33种, 其中, 绿藻门仅1种四尾栅藻(*Scenedesmus quadricanda*), 其余的32种都属于硅藻门。在硅藻门中, 圆筛藻属(*Coscinodiscus*)的种数最多, 共9种; 其次为菱形藻属(*Nitzschia*)和角毛藻属(*Chaetoceros*), 均为3种。调水调沙后, 共鉴定浮游植物35属75种, 仅硅藻门就有53种, 角毛藻属和圆筛藻属的种类占绝对优势, 分别有15种和9种。调水调沙前、后共有种19种, 种类更替率为77.38%。

### 2.2 浮游植物丰度的空间变化

调水调沙前各站位浮游植物丰度变化范围为 $0.25 \times 10^4 \sim 70.56 \times 10^4$ 个/m<sup>3</sup>, 最小值在3-4站, 最大值在5-3站, 平均丰度为 $6.74 \times 10^4$ 个/m<sup>3</sup>。调水调沙

后浮游植物丰度变化范围为 $47.87 \times 10^4 \sim 7410.28 \times 10^4$ 个/m<sup>3</sup>, 最小值出现在5-1站, 最大值出现在2-2站, 平均丰度为 $971.06 \times 10^4$ 个/m<sup>3</sup>。t检验表明, 浮游植物丰度在调水调沙前、后差异显著( $P < 0.05$ )。

调水调沙前, 浮游植物丰度整体较低, 在调查水域的河口区以及东南部区域浮游植物的丰度相对较高; 而调水调沙后, 浮游植物丰度较高的区域出现在黄河口的北部近岸区域(图2)。

### 2.3 优势种的组成

调水调沙前的优势种为旋链角毛藻(*C. survisetus*)和细弱圆筛藻(*C. subtilis*)。其中, 旋链角毛藻的丰度占绝对优势, 而细弱圆筛藻的出现频率则很高(表1)。

调水调沙后浮游植物优势种为梭状角藻(*Ceratium fusus*)和旋链角毛藻。其中, 旋链角毛藻的丰度和出现频率均占绝对优势, 梭状角藻出现频率较高。在调水调沙前成为优势种且出现频率很高的细弱圆筛藻在调水调沙后并未出现(表1)。

### 2.4 浮游植物群落多样性特征

黄河口及邻近水域调水调沙前浮游植物群落D指数的变化范围为0.128~1.181, 平均值为 $0.568 \pm 0.228$ ; H'指数的变化范围为0.118~2.851, 平均值为 $2.129 \pm 0.705$ ; J'指数的变动范围为0.042~0.975, 平均值为 $0.812 \pm 0.211$ 。

黄河口及邻近水域调水调沙后浮游植物群落D指数的变化范围为0.758~1.986, 平均值为

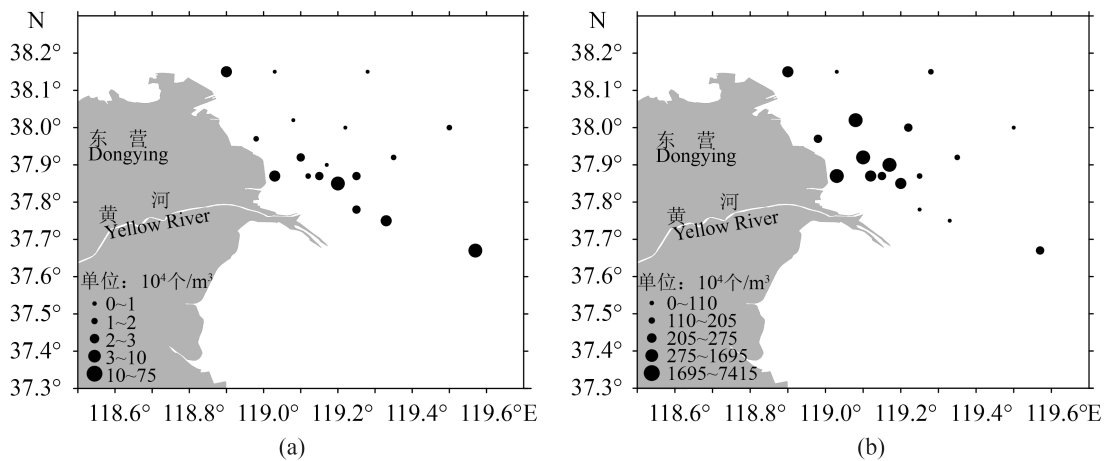


图2 黄河口及其邻近水域调水调沙前(a)、后(b)浮游植物丰度的空间变化

Fig. 2 Spatial distribution in phytoplankton abundance before (a) and after (b) the sand-washing operation in the Yellow River Estuary and its adjacent waters

表 1 黄河口及其邻近水域调水调沙前、后浮游植物优势种组成及优势度指数

**Tab. 1 Dominant species and dominance index of phytoplankton before and after the sand-washing operation in the Yellow River Estuary and its adjacent waters**

| 月份<br>month  | 物种<br>species                 | 平均丰度/( $\times 10^3$ 个/ $m^3$ )<br>mean abundance | 占总细胞丰度的比例/%<br>percentage in cell abundance | 出现频率<br>occurrence frequency | 优势度<br>dominance |
|--------------|-------------------------------|---|---|------------------------------|------------------|
| 6月<br>June   | 旋链角毛藻<br><i>C. survisetus</i> | 3.93  | 58.23                                       | 0.111                        | 0.065            |
|              | 细弱圆筛藻<br><i>C. subtilis</i>   | 0.57  | 8.49  | 0.778                        | 0.066            |
| 8月<br>August | 梭状角藻<br><i>C. fusus</i>       | 38.33   | 3.95  | 0.944                        | 0.037            |
|              | 旋链角毛藻<br><i>C. survisetus</i> | 819.27  | 84.37                                       | 1.000                        | 0.844            |

1.395 $\pm$ 0.332;  $H'$ 指数的变化范围为0.616~3.471, 其平均值为1.924 $\pm$ 0.882;  $J'$ 指数的变动范围为0.121~0.868, 平均值为0.447 $\pm$ 0.217。调水调沙后的多样性指数和均匀度指数的平均值均低于调水调沙前, 这主要是由于调水调沙后浮游植物种数增加以及旋链角毛藻的大量出现造成的。

## 2.5 浮游植物群落结构及其与环境因子关系

CLUSTER聚类分析表明, 在20.8%的相似度水平上, 黄河口及其邻近水域浮游植物群落可以分为调水调沙前和调水调沙后2个组群; 在32.5%的相似性水平上, 调水调沙前浮游植物群落可以再分为3个组群(Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ组群), 调水调沙后浮游植物群落可以另分为2个组群(Ⅰ、Ⅱ组群): Ⅰ组群(811-813、831-834、841-844、821-823、852-853, 组内相似性为41.5%); Ⅱ组群(824、851、653, 组内相似性为41.1%)、Ⅲ组群(622、631、641、651、652, 组内相似性为41.1%)、Ⅳ组群(612-613、621、623、632-633、642-644, 组内相似性为36.5%)、Ⅴ组群(624、634, 组内相似性为32.5%)(图3)。

单因子相似性分析(ANOSIM)表明不同组群间浮游植物群落组成差异极显著( $R=0.933$ ,  $P<0.01$ )。对各组群间群落组成差异性进行检验, 除Ⅱ组群与Ⅴ组群间差异不显著( $P>0.05$ )外, Ⅰ组群与Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ组群结构差异均极显著( $P<0.01$ ), 剩余组群间差异均显著( $P<0.05$ )。

CCA分析结果显示, 在调水调沙前, 轴1和轴2浮游植物种类与环境因子的相关系数分别为0.893和0.992; 调水调沙后, 轴1和轴2浮游植物种类与环境因子的相关系数分别为0.959和0.971, 其相关性都很高(表2); 调水调沙前, 2个物种排序轴间的相关系数为0.077, 2个环境排序轴间的相关系数为0; 调水调沙后, 2个物种排序

轴间的相关系数为0.022, 2个环境排序轴间的相关系数为0。说明2个排序轴的相关性很小, 排序结果可靠。

排序结果显示, 调水调沙前浮游植物群落空间结构的主要影响因素为 $NO_3^-$ -N、 $NO_2^-$ -N、DO和TRA。 $NO_3^-$ -N与CCA第一排序轴呈最大负相关( $r=-0.7005$ ),  $NO_2^-$ -N与CCA第一排序轴呈较大负相关( $r=-0.6504$ ), DO与第一排序轴呈最大的正相关( $r=0.5433$ ), TRA与第一排序轴呈较大的正相关( $r=0.4834$ )。其次, SST和SAL对浮游植物群落空间分布的影响也极显著。调水调沙前的浮游植物群落可分为3个组群, 分别为Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ组群(图3-b)。Ⅲ组群包括622、631、641、651、652共5个站, 集中分布于第二排序轴两侧, 均属于河口区低盐站位, 以细弱圆筛藻、虹彩圆筛藻(*C. oculusiridis*)、琼氏圆筛藻(*C. jonesianus*)、洛氏角毛藻(*C. lorenzianus*)为主, COD是影响其群落结构空间分布的主要环境因子; Ⅳ组群包括612、613、621、623、632、633、642、643、644共9个站位, 位于黄河口北部区域, 该组群集中分布于第三象限, 以舟形藻(*Navicula* sp.)、小环藻(*Cyclotella* sp.)、细弱圆筛藻、长菱形藻(*N. longissima*)最多, 与 $NO_3^-$ -N和 $NO_2^-$ -N呈极显著的正相关, 与DO和TRA呈极显著的负相关。

调水调沙后浮游植物群落结构空间分布的主要影响因素为DO、 $SiO_3^{2-}$ -Si、 $NH_4^+$ -N和TRA。DO的含量与CCA第一排序轴呈最大负相关( $r=-0.5857$ ),  $SiO_3^{2-}$ -Si与CCA两个排序轴相关性都较好( $r_1=-0.5404$ ,  $r_2=-0.2978$ );  $NH_4^+$ -N与CCA第二排序轴呈最大正相关( $r=0.6114$ ), TRA与CCA第一排序轴呈较大的正相关( $r=0.4178$ )。其次, pH值和SAL对浮游植物群落空间分布的影响也很

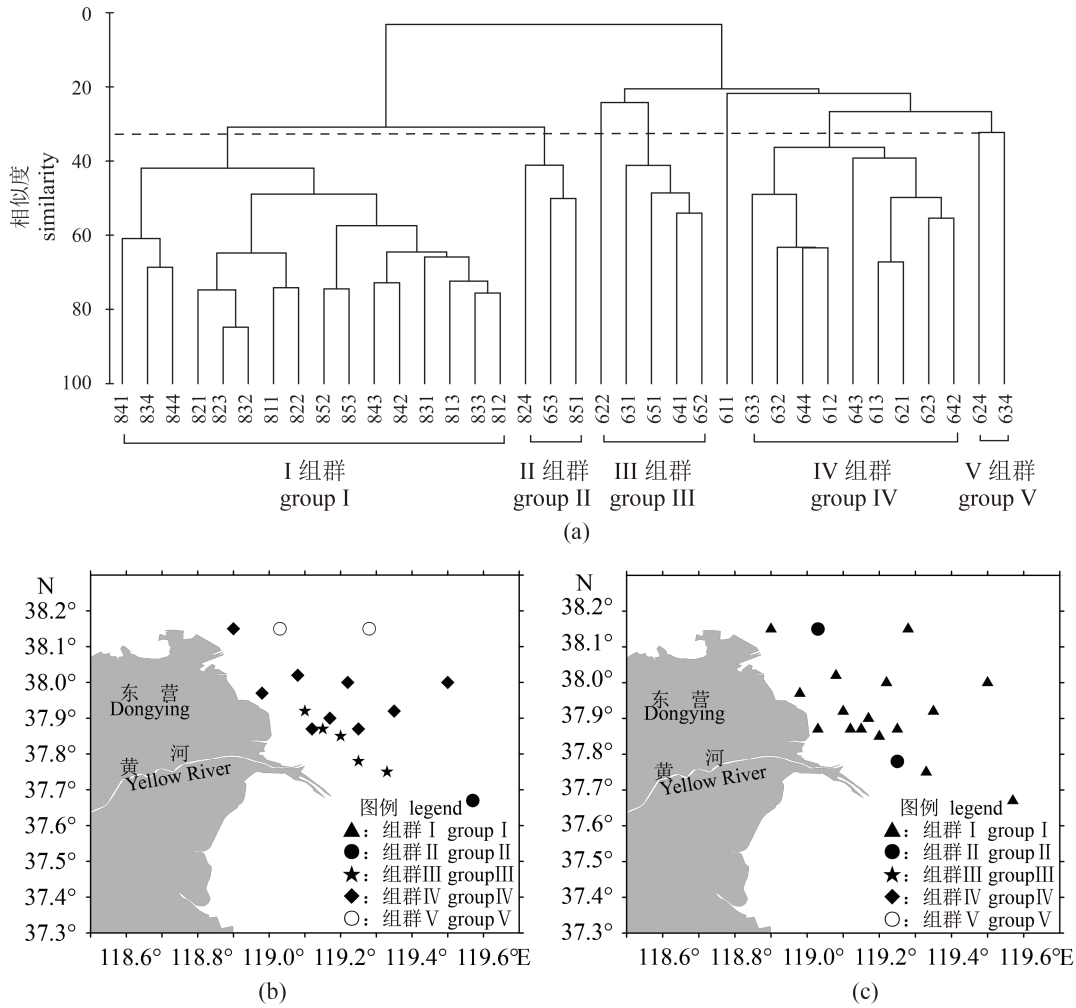


图3 黄河口及邻近水域调水调沙前、后浮游植物群落结构聚类分析

(a) 聚类分析; (b) 6月浮游植物群落组群; (c) 8月浮游植物群落组群; 图中数字编号代表站点, 例: 621代表6月第2个断面的第1个站点, 下同

Fig. 3 Cluster analysis of phytoplankton community before and after the sand-washing operation in the Yellow River estuary and its adjacent waters

(a) cluster analysis; (b) phytoplankton community groups of June; (c) phytoplankton community groups of August; numbers in the figure represent the stations, for example: 621 represents the first station of the second section in June, the same below

显著。调水调沙后的浮游植物群落可分为两个组群, 分别为 I、II 组群(图3-c)。I 组群包括除 851和824以外的所有16个站点, 这些组群浮游植物种类丰富, 其中以旋链角毛藻、梭状角藻、泰晤士扭鞘藻(*Streptotheca tamesis*)、三角角藻(*C. tripos*)、角毛藻(*C. sp.*)、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)、叉状角藻(*C. furca*)、尖刺菱形藻(*N. pungens*)、伏氏海线藻(*Thalassionema frauenfeldii*)为主。该组群站点集中于排序轴交点附近, 营养盐浓度( $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P)是影响其群落结构空间分布的主要环境因子。II 组群包括824、851、653共3个站点, 其群落组

成以旋链角毛藻和丹麦细柱藻为主, 该组群位于第二象限,  $\text{NH}_4^+$ -N、pH值是影响其空间分布的主要环境因子。

### 3 讨论

#### 3.1 种类组成及优势种的变化

调水调沙前, 鉴定浮游植物19属33种; 调水调沙后, 共鉴定浮游植物35属75种, 种类更替率高达77.38%。这可能有2个原因: ①由于黄河的调水调沙, 造成黄河入海径流短时间内剧烈变化, 在此期间的入海径流量达到了全年的20%甚至更高<sup>[24]</sup>, 同时也带来了不少淡水藻类, 如二角

表2 黄河口及其邻近水域浮游植物群落  
CCA分析的统计信息

Tab. 2 Statistics for the first two axes of CCA performed on phytoplankton community in Yellow River Estuary and its adjacent waters

| 统计信息 statistics   | 6月June    |           | 8月August  |           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
|   | 轴1 axis 1 | 轴2 axis 2 | 轴1 axis 1 | 轴2 axis 2 |
| 特征值 eigenvalues   | 0.609     | 0.568     | 0.148     | 0.083     |
| 种类-环境相关系数 species-environment correlations                                    | 0.893     | 0.992     | 0.959     | 0.971     |
| 物种变异累计百分比/% cumulative percentage variance of species data                    | 18.6      | 36.0      | 21.7      | 33.8      |
| 物种-环境变异累积百分比/% cumulative percentage variance of species-environment relation | 24.7      | 47.8      | 29.1      | 45.3      |

盘星藻(*Pediastrum duplex*)、二形栅藻(*S. dimorphus*)、栅藻(*S. sp.*)等, 这些类群主要出现在盐度较小的河口区, 可作为黄河径流的指示种群<sup>[25]</sup>; ②黄河的调水调沙带来了大量营养盐, 促进了甲藻门尤其是其中的赤潮种如叉状角藻(*C. furca*)、梭状角藻、具齿原甲藻(*Prorocentrum dentatum*)以及原多甲藻属(*Protoperidinium*)等种类的大量繁殖。

黄河口及其邻近水域浮游植物群落以硅藻为主<sup>[4, 26-27]</sup>。在本次调查中, 优势种均为硅藻门种类; 如调水调沙前的旋链角毛藻、细弱圆筛藻和调水调沙后的旋链角毛藻、梭状角藻, 其中旋链角毛藻为共同优势种, 符合河口浮游植物群落结构的一般规律<sup>[28]</sup>。旋链角毛藻为广温沿岸性种, 其丰度与水温呈极显著正相关<sup>[29]</sup>, 在水温由低于20 °C上升至25 °C左右时, 将促进藻细胞的迅速增殖<sup>[30]</sup>。黄河口调水调沙前的平均温度为18.8 °C, 调水调沙后的平均温度为26.7 °C, 正好达到了旋链角毛藻大量繁殖和生长的条件。因此, 在调水调沙后, 其数量达到最高峰, 这与康元德<sup>[27]</sup>的研究结果一致。本次调查中, 调水调沙前NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P的浓度分别为0.007、0.009和0.006 mg/mL; 调水调沙后三者的浓度分别为0.600、0.026和0.103 mg/mL。可以看出, 黄河的调水调沙带来了大量的营养盐, 为浮游植物的大量繁殖提供重要的物质基础, 亦成为旋链角毛藻和梭状角藻等赤潮种类大量暴发的主要诱因。

### 3.2 平均丰度的变化

黄河口调查海域浮游植物调水调沙后的平均

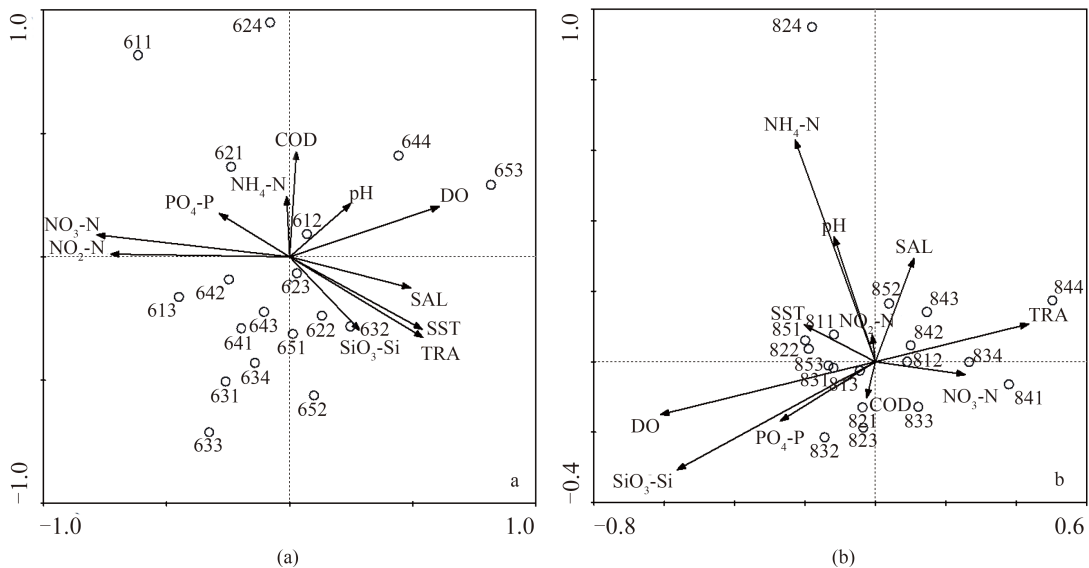


图4 黄河口及其邻近水域调水调沙前(a)、后(b)浮游植物群落种类组成与环境因子间的CCA排序图

SAL: 海水表层盐度; DO: 溶解氧; NH<sub>4</sub>-N: 铵盐; NO<sub>3</sub>-N: 硝酸盐; NO<sub>2</sub>-N: 亚硝酸盐; PO<sub>4</sub>-P: 活性磷酸盐; SiO<sub>3</sub>-Si: 活性硅酸盐; COD: 化学耗氧量; SST: 海水表层温度; TRA: 透明度

Fig. 4 CCA biplot of community composition and environmental variables before (a) and after (b) the sand-washing operation in Yellow River Estuary and its adjacent waters

SAL: sea surface salinity; DO: dissolved oxygen; NH<sub>4</sub>-N: ammonium; NO<sub>3</sub>-N: nitrate; NO<sub>2</sub>-N: nitrite nitrogen; PO<sub>4</sub>-P: phosphate; SiO<sub>3</sub>-Si: silicate; COD: chemical oxygen demand; SST: sea surface temperature; TRA: transparency

丰度显著高于调水调沙前,为调水调沙前平均丰度的144倍,其比值明显高于该海域同期水平。这可能有2个原因:①与月间变化有关;②可能与黄河的调水调沙带来的大量营养盐有关,如铵盐、硝酸盐、亚硝酸盐、活性磷酸盐等的含量显著增加,为浮游植物的大量繁殖创造条件。但是 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的浓度却有所降低,调水调沙前,表层水域 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的浓度为0.400 mg/mL;调水调沙后,表层水域 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的浓度为0.334 mg/mL。水体营养盐含量高能使浮游植物的数量快速增加<sup>[31]</sup>,而活性硅酸盐浓度与硅藻的生长、繁殖速度呈负相关性<sup>[32-33]</sup>,在本次调查中营养盐的变化规律与此完全相同,因此造成硅藻类在调水调沙后的大量爆发。此外,除营养盐外,盐度也是影响浮游植物丰度变化的重要环境因子<sup>[34]</sup>。黄河的调水调沙带来了大量淡水,该海域的盐度发生改变,其影响主要集中在河口附近的表层区域<sup>[35]</sup>,盐度在各断面从近岸向外海呈逐渐上升趋势,显示淡水输入影响逐渐减弱,适宜咸淡水生长的种类如角毛藻、旋链角毛藻等在河口附近得以大量繁殖。

此外,调水调沙前浮游植物丰度的高值区位于河口区以及东南部区域,而调水调沙后其高值区转移到北部近岸区域,这可能是由于黄河调水调沙引起入海径流的剧烈变化<sup>[23]</sup>以及黄河口北部逆时针环流所带来部分营养盐的共同作用所导致的<sup>[36]</sup>。

### 3.3 影响浮游植物群落结构的主要环境因子

一般而言,浮游植物的生长、优势种类的演替及其与各种环境因子如温度、盐度、透明度、营养盐等有密切关系,而营养盐的作用经常比其他因子更为重要<sup>[37]</sup>。张继民等<sup>[6]</sup>指出,黄河口海域营养盐浓度( $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P)的升高可能是造成浮游植物优势种类组成变化的主要因素;巩俊霞等<sup>[9]</sup>指出黄河入海口入海径流量变化引起的透明度变化是影响浮游植物群落结构变化的主要因素;刘晓彤<sup>[2]</sup>指出河口及其邻近海域浮游植物群落受到磷酸盐限制的同时,也可能受到硅酸盐限制。本研究结果表明 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 和 $\text{NH}_4^+$ -N是影响河口及其邻近水域调水调沙前、后浮游植物群落结构空间分布不同的主要环境因子。这与苏芝娟等<sup>[10]</sup>对调水调沙后影响河口邻近海域浮游植

物群落结构主要环境因子的分析有一定差异,其认为主要环境因子为盐度和营养盐( $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )。这种差异可能是由于其调查海域与本研究调查的海域有所差异,调查时间也有所不同而导致的。本次调查表明,圆筛藻属、菱形藻属、根管藻属(*Rhizosolenia*)等优势种类细胞丰度所占比例大大降低,旋链角毛藻、梭状角藻等优势种类的大量出现,可能与黄河调水调沙带来的大量营养物质有关。

### 参考文献:

- [1] 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 J, Liu D Y. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(1): 62-75.
- [2] 刘晓彤.夏、秋季黄河口及邻近海域浮游植物群落结构和粒级结构的研究[D].青岛:中国海洋大学,2011.  
Liu X T. Studies on community structure and size-fractionated structure of phytoplankton in Yellow River Estuary and its adjacent area in summer and autumn [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [3] 栾青杉,孙军,宋书群,等.长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J].植物生态学报,2007,31(3):445-450.  
Luan Q S, Sun J, Song S Q, et al. Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environment in the Yangtze River Estuary, China [J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 2007, 31(3): 445-450.
- [4] 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.  
Liu X T, Liu G X. Net-phytoplankton community structure of the Huanghe Estuary and its adjacent area in the summer of 2009 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(1): 153-162.
- [5] 马静,陈洪举,刘光兴.2007年夏季黄河口及其邻近水域浮游动物的群落特征[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2012,42(5):74-80.  
Ma J, Chen H J, Liu G X. Study on the zooplankton community structure in the Yellow River Estuary and its adjacent waters in summer, 2007 [J]. Periodical of Ocean University of China(Natural Science), 2012, 42(5): 74-

- 80.
- [6] 张继民, 刘霜, 张琦, 等. 黄河口附近海域浮游植物种群变化[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(6): 834-837.  
Zhang J M, Liu S, Zhang Q, *et al.* Population variation of phytoplankton around Yellow River Estuary [J]. Marine Environmental Science, 2010, 29(6): 834-837.
- [7] 刘元进, 吕振波, 李凡, 等. 2011年黄河调水调沙期间黄河口海域大型底栖动物群落多样性[J]. 海洋渔业, 2012, 34(3): 316-323.  
Liu Y J, Lv Z B, Li F, *et al.* Biodiversity of macrobenthic community in the Huanghe estuary during water and sediment discharge regulation in 2011 [J]. Marine Fisheries, 2012, 34(3): 316-323.
- [8] 冷宇, 赵升, 刘霜, 等. 黄河口海域夏季浮游植物的分布特征[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(6): 42-46.  
Leng Y, Zhao S, Liu S, *et al.* Distribution characteristics of phytoplankton in the estuary of Yellow River during summer [J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(6): 42-46.
- [9] 巩俊霞, 杨秀兰, 段登选, 等. 黄河入海口海域浮游植物丰度及其多样性研究[J]. 齐鲁渔业, 2009, 26(7): 10-13.  
Gong J X, Yang X L, Duan D X, *et al.* Phytoplankton abundance and diversity research in estuary of Yellow River [J]. Shangdong Fisheries, 2009, 26(7): 10-13.
- [10] 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.  
Su Z J, Wang Y Y, Dong Z J, *et al.* Response of phytoplankton assemblages to the water-sediment regulation in the adjacent sea of the Yellow River mouth [J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(4): 62-75.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12763.9-2007 海洋调查规范第9部分: 海洋生态调查指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 12763.9-2007 Specifications for oceanographic survey- Part 9: guidelines for marine ecological survey [S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12763.4-2007 海洋调查规范第4部分: 海水化学要素调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 12763.4-2007 Specifications for oceanographic survey- Part 4: survey of chemical parameters in sea water [S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 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, 2007.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 17378.4-2007 The specification for marine monitoring- Part 4: seawater analysis [S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [14] 王云龙, 袁骐, 沈新强. 长江口及邻近水域春季浮游植物的生态特征[J]. 中国水产科学, 2005, 12(3): 300-306.  
Wang Y L, Yuan Q, Shen X Q. Ecological character of phytoplankton in spring in the Yangtze River estuary and adjacent waters [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(3): 300-306.
- [15] 刘瑞玉. 胶州湾生态学和生物资源[M]. 北京: 科学出版社, 1992.  
Liu R Y. Ecology and biological resources in Jiaozhou Bay [M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [16] Ulanowicz R E. Information theory in ecology [J]. Computers Chemist, 2001, 25(4): 393-399.
- [17] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana IL: University of Illinois Press, 1949.
- [18] Pielou E C. An introduction to mathematical ecology [M]. New York: Wiley-Interscience, 1969.
- [19] Clarke K R, Ainsworth M. A method of linking multivariate community structure to environmental variables [J]. Marine Ecology Progress, 1993, 92(3): 205-219.
- [20] Clarke K R, Warwick R M. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. [M] 2nd ed. Plymouth: PRIMER-E Ltd, 2001.
- [21] Lopes M R M, Bicudo C E M, 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.
- [22] 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.
- [23] 石晓丹, 阮晓红, 邢雅囡, 等. 苏州平原河网区浅水湖泊冬夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. *环境科学*, 2008, 29(11): 2999-3008.
- Shi X D, Ruan X H, Xing Y N, *et al.* Canonical correspondence analysis between phytoplankton community and environmental factors in winter and summer in shallow lakes of Plain River Network Area, Suzhou [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(11): 2999-3008.
- [24] Wang Y, Liu Z, Gao H, *et al.* Response of salinity distribution around the Yellow River mouth to abrupt changes in river discharge [J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(6): 685-694.
- [25] 夏静. 长江口浮游植物变化及影响因子初步研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2005.
- Xia J. Study of the changes of phytoplankton and the environmental factors in the Estuary of Yangze River [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2005.
- [26] 李广楼, 陈碧鹏, 崔毅, 等. 莱州湾浮游植物的生态特征[J]. *中国水产科学*, 2006, 13(2): 292-299.
- Li G L, Chen B J, Cui Y, *et al.* Ecological characteristics of phytoplankton in the Laizhou Bay [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2006, 13(2): 292-299.
- [27] 康元德. 渤海浮游植物的数量分布和季节变化[J]. *海洋水产研究*, 1991, (12): 31-54.
- Kang Y D. Distribution and seasonal variation of phytoplankton in the Bohai Sea [J]. *Marine Fisheries Research*, 1991, (12): 31-54.
- [28] 王金辉. 长江口3个不同生态系的浮游植物群落[J]. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 2002, 32(3): 422-428.
- Wang J H. Phytoplankton community in three distinct ecotypes of the Changjiang Estuary [J]. *Periodical of Ocean University of Qingdao (Natural Science)*, 2002, 32(3): 422-428.
- [29] 龚玉艳, 张才学, 孙省利, 等. 2010年夏季雷州半岛海岸带浮游植物群落结构特征及其与主要环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(19): 5972-5985.
- Gong Y Y, Zhang C X, Sun S L, *et al.* Community characteristics of phytoplankton in the coastal area of Leizhou Peninsula and their relationships with primary environmental factors in the summer of 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(19): 5972-5985.
- [30] 茅华, 许海, 刘兆普. 温度, 光照, 盐度及pH对旋链角毛藻生长的影响[J]. *生态科学*, 2008, 26(5): 432-436.
- Mao H, Xu H, Liu Z P. Effects of water temperature, illumination, salinity and pH on the growth of *Chaetoceros curvisetus* [J]. *Ecological Science*, 2008, 26(5): 432-436.
- [31] Agawin N S R, Duarte C M, Agusti S. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(3): 591-600.
- [32] 刘晓丹. 硅在海洋浮游植物群落演替过程中的作用[J]. *海洋环境科学*, 1996, 15(2): 38-43.
- Liu X D. The role of the silicate involved in the community succession of the phytoplankton [J]. *Marine Environmental Science*, 1996, 15(2): 38-43.
- [33] Paasche E. Silicon and the ecology of marine plankton diatoms. I. *Thalassiosira pseudonana* (*Cyclotella nana*) grown in a chemostat with silicate as limiting nutrient [J]. *Marine Biology*, 1973, 19(2): 117-126.
- [34] McQuoid M R. Influence of salinity on seasonal germination of resting stages and composition of microplankton on the Swedish west coast [J]. *Marine Ecology Progress*, 2005, 289(1): 151-163.
- [35] 葛雷, 娄广艳, 张军锋, 等. 2010年黄河调水调沙对河口近海盐度影响[J]. *河南水利与南水北调*, 2013, (1): 61-62.
- Ge L, Lou G Y, Zhang J F, *et al.* The effect of sand washing operation of Yellow River on the estuary salinity in 2010 [J]. *Water Resources & South to North Water Diversion*, 2013, (1): 61-62.
- [36] 中国海湾志编纂委员. 中国海湾志, 第十四分册(重要河口)[M]. 北京: 海洋出版社, 1998, 799.
- China Gulf Editorial Board. China gulf, the 14th volumes (important estuaries) [J]. Beijing: Ocean Press, 1998, 799.
- [37] 王建林, 黄羽庭, 林永水. 雨季营养盐输入对大鹏湾赤潮发生的影响[J]. 北京: 科学出版社, 1997, 75-81.
- Wang J L, Huang Y T, Liu Y S. Effects of the nutrients input on the red tide occurrence in Dapeng Bay [J]. Beijing: Science Press, 1997, 75-81.

## Phytoplankton community structure and its relationship with environmental variables in summer in the Yellow River Estuary and its adjacent waters

QIN Xue, XU Binduo, YANG Xiaogai, REN Yiping\*

(College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Abstract:** Based on the data collected from the surveys in June and August 2013 in the Yellow River Estuary and its adjacent waters, the species composition, dominant species and species diversity of phytoplankton assemblage were studied, and the spatial structure of phytoplankton assemblage and its relationship with environmental variables were examined by canonical correlation analysis (CCA). A total of 88 phytoplankton species belonging to 4 phyla and 40 genera were collected, among which Bacillariophyta was the most abundant phylum, which included 30 genera and 66 species, accounting for 74.2% of total taxa, followed by Phaeophyta, which included 6 genera and 16 species, accounting for 18.2% of total taxa. The third phylum was Chlorophyta, which included 3 genera and 5 species, accounting for 5.7% of total taxa. And the least abundant phylum was Chrysophyta, which had only 1 species belonging to 1 genus. *Chaetoceros curvisetus* and *Coscinodiscus subtilis* were the dominant species in June, while the dominant species were *Ceratium fusus* and *C. curvisetus* in August. The Margalef species richness index ( $D$ ), Shannon diversity index ( $H'$ ) and Pielou evenness index ( $J'$ ) of the phytoplankton community were higher in June than those in August. CCA suggested that the main factors affecting the phytoplankton community structure in June were nitrate, nitrite nitrogen, dissolved oxygen and transparency; the main factors influencing the phytoplankton community structure in August were dissolved oxygen, silicate, ammonium nitrogen and transparency. The changes in diluted water and abundant nutrients resulting from the sand-washing operation of Yellow River might be the primary factors causing the difference in the spatial structure of the phytoplankton assemblage between June and August.

**Key words:** phytoplankton; community structure; canonical correspondence analysis (CCA); Yellow River Estuary

**Corresponding author:** REN Yiping. E-mail: renyip@ouc.edu.cn

**Funding projects:** National Special Research Fund for Non-Profit Sector (Agriculture)(201303050)