

# 曹妃甸海域浮游植物群落及其 在围填海前后的变化分析

刘西汉<sup>1,2,3</sup>, 王玉珏<sup>3</sup>, 石雅君<sup>3</sup>, 田海兰<sup>1,2</sup>, 程林<sup>1,2</sup>, 王艳霞<sup>1,2</sup>

(1. 河北省科学院 地理科学研究所 河北海岸带生态与环境联合实验室 河北 石家庄 050011; 2. 河北省科学院 地理科学研究所 河北省地理信息开发应用工程技术研究中心 河北 石家庄 050011; 3. 中国科学院 烟台海岸带研究所 海岸带环境过程与生态修复重点实验室 山东 烟台 264003)

**摘要:** 本文通过 2013 年 8 月和 2014 年 5 月在曹妃甸周边海域实施的两次调查, 分析了浮游植物群落特征及其与环境因子的关系, 并结合历史调查资料分析了围填海前后浮游植物群落的变化情况。结果表明: 春季和夏季分别鉴定出浮游植物 49 种和 76 种, 均以硅藻为主, 甲藻和金藻相对较少。春季浮游植物丰度范围为  $(1.93 \sim 7.89) \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup>, 优势种主要为具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)、细弱圆筛藻(*Coscinodiscus subtilis*) 等, 夏季浮游植物丰度范围为  $(5.85 \sim 5022.91) \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup>, 优势种主要为浮动弯角藻(*Eucampia zodiacus*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*) 等。春季和夏季浮游植物丰度的空间分布基本一致, 均呈现近岸高、远岸低的分布规律。温度、盐度和营养盐是影响浮游植物群落季节变化和空间分布的主要因素。曹妃甸围填海后 Shannon-Wiener 多样性指数(*H'*) 和 Pielou 均匀度指数(*J*) 的变化具有空间差异, 与水动力环境变化引起的营养盐重新分布有关; 内湾海域受围填海影响较大, 河流输入的淡水和营养盐不易被交换至外海, 从而促进了浮动弯角藻的快速增殖, 其丰度高达  $3725.58 \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup>, 表明内湾海域赤潮风险较高。

**关键词:** 曹妃甸; 浮游植物; 环境因子; 围填海

中图分类号: Q948.8; Q178.53 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2020)03-0379-08

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2020.03.009

## Phytoplankton community and changes after reclamation in Caoheidian coastal waters

LIU Xi-han<sup>1,2,3</sup>, WANG Yu-jue<sup>3</sup>, SHI Ya-jun<sup>3</sup>, TIAN Hai-lan<sup>1,2</sup>, CHENG Lin<sup>1,2</sup>, WANG Yan-xia<sup>1,2</sup>

(1. Co-Laboratory of Ecology and Environment of Hebei Coastal Zone, Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China; 2. Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China; 3. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

**Abstract:** Based on two surveys respectively in August 2013 and May 2014 in Caoheidian coastal waters, phytoplankton community, its correlations with environmental factors, and changes after land reclamation were analyzed. The results showed that totally 49 and 76 species were identified in spring and summer, respectively, in which diatoms dominated with rare dinoflagellates and chrysophytes. Phytoplankton abundance in spring ranged from  $1.93 \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup> to  $7.89 \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup>, and dominant species included *Paralia sulcata*, *Coscinodiscus subtilis*, etc.; while in summer, it ranged from  $5.85 \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup> to  $5022.91 \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup>, and dominant species were *Eucampia zodiacus*, *Skeletonema costatum*, etc. The distributions of phytoplankton abundance in spring and summer were similar with high abundances ordinarily observed in inshore waters. Temperature, salinity and nutrients were important factors controlling sea-

收稿日期: 2018-11-01, 修订日期: 2018-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(41776126, 41676117); 中国科学院院地合作项目(13001001); 河北省科学院两院合作项目(161304, 181601); 河北省科学院高层次人才资助项目(2016022577-43)

作者简介: 刘西汉(1987-), 男, 河北邢台人, 助理研究员, 主要从事海洋生态学研究, E-mail: xihan\_ouc@126.com

通讯作者: 王艳霞, 副研究员, 主要从事海洋资源开发与环境保护研究, E-mail: chelsea\_wang@126.com

sonal shifts and spatial variations of phytoplankton community. After land reclamation, the changes of Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ) and Pielou evenness index ( $J$ ) showed spatial variations, which was related to nutrients redistribution due to hydrodynamic changes. The northeastern bay was seriously affected by reclamation. Freshwater and nutrients imported by rivers were hard to exchange outside, thus promoting the proliferation of *E. zodiacus* whose abundance reached  $3725.58 \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup> in summer, which suggested that the bay tended to be threatened by red tide.

**Key words:** Caofeidian; phytoplankton; environmental factors; reclamation

浮游植物作为海洋生态系统中重要的初级生产者,贡献了全球约50%的初级生产,是海洋食物链的基础环节,对维持海洋生态系统平衡具有重要意义<sup>[1]</sup>。由于浮游植物具有较强的环境敏感性,其丰度、种类组成和时空分布在温度、盐度、营养盐、潮汐等因素发生变化时可迅速做出响应<sup>[2]</sup>,进而影响整个海洋生态系统的物质循环和能量传递,因此浮游植物通常可作为指示生物来反映人类活动和气候变化对海洋生态系统带来的影响<sup>[3]</sup>。

曹妃甸是位于渤海湾北部的一个小型离岸沙岛,面积约4 km<sup>2</sup>,距大陆岸线约18 km,南侧为最大水深可达41 m的潮汐深槽,北侧为平均水深仅1.5 m的浅滩<sup>[4]</sup>。2004年,曹妃甸开始在北侧浅滩实施围填海工程,截止到2011年已完成造陆面积274.7 km<sup>2</sup><sup>[5]</sup>,此后围填速度明显减慢甚至完全停止。大规模的围填海活动可引发水动力条件改变、水质恶化、生物多样性丧失、生态灾害风险加剧等问题,严重威胁近海生态系统结构与功能的稳定性<sup>[6]</sup>。目前,已有多项研究报道了曹妃甸围填海之后的生态环境状况,表明围填海的影响存在着空间差异:曹妃甸甸头附近海域的潮流流速增大10%~40%,而两侧前沿海域和港池区域潮流流速减少10%~60%<sup>[7]</sup>;曹妃甸东侧入海排污口附近海域的水交换能力增加了0.60%和15.49%,而西侧排污口区域的水交换能力减弱了9.59%和30.77%<sup>[8]</sup>。潮流和水交换能力等因素的改变,尤其是这些改变往往具有空间差异,极有可能导致浮游植物群落出现一定响应,然而目前尚缺乏在曹妃甸海域开展的浮游植物群落研究,也缺乏围填海前后浮游植物群落结构的对比分析。

本研究通过2013年—2014年在曹妃甸海域开展春季、夏季两个调查航次,分析了浮游植物群落的时空分布特征及其与环境因子的关系,并结合历史调查资料分析了围填海的影响。研究结果

可为围填海区域的补偿性环境整治提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与站位布设

本研究围绕曹妃甸邻近海域(118.319°E—118.936°E, 38.738°N—39.122°N),分别在2014年5月和2013年8月开展春季和夏季两个航次的调查,按4个断面共11个站位进行采样(图1),其中A、B和C断面主要参照2004年实施的河北省第二次海岸带资源调查<sup>[9]</sup>进行布设,每个断面设置3个站位;曹妃甸东北侧的内湾海域在以往历次调查中均未涉及,因此本研究在此处海域增设D断面,布设D1和D2站位。

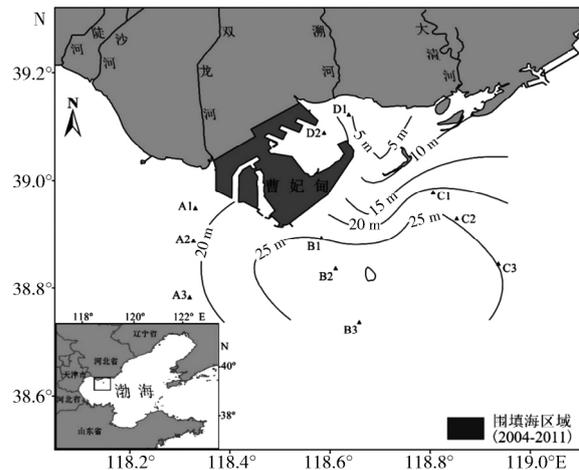


图1 研究区域水深及采样站位

Fig. 1 Sampling sites and bathymetry of study area

### 1.2 样品采集与分析

海水样品的采集及其物理化学参数的分析过程主要参照了《海洋监测规范》,其过程基本为:表层海水样品使用5 L卡盖式采水器(国家海洋技术中心)采集;温度( $T$ )和盐度( $S$ )由YSI 6920型多参数水质分析仪现场测定;悬浮颗粒物(SPM)按照称重法测定;无机氮(DIN)、磷酸盐(DIP)、硅酸盐(DSi)由SEAL AA3型连续流动分析仪测定;叶绿素 $a$ (Chl  $a$ )按照分光光度法测定。浮游植物样品的采集使用III型浮游生物网

(网目孔径 76 μm,网口内径 37 cm,网口面积 0.1 m<sup>2</sup>,网长 140 cm)从海底至海面进行垂直拖网,转移入干净聚乙烯瓶中后立即用甲醛溶液固定(终浓度为 5%)。拖网水体的体积用 HYDRO-BIOS 网口流量计读取。实验室内浮游植物样品经浓缩,取 0.25 mL 亚样品在 Olympus CX31 型显微镜下进行鉴定。鉴定过程主要参考《中国海藻志》<sup>[10]</sup>、《海藻学》<sup>[11]</sup>和《中国海域常见浮游硅藻图谱》<sup>[12]</sup>。部分浮游植物的中文名和拉丁名参照孙军和刘东艳的修订<sup>[13]</sup>。

1.3 数据分析

浮游植物优势度采用优势度指数(Y)进行计算,其计算公式为:

$$Y = n_i \cdot f_i / N \quad (1)$$

式中:  $n_i$  为第  $i$  种的丰度;  $f_i$  为该物种在站位中的出现频率;  $N$  为调查海域浮游植物的总丰度;  $Y > 0.02$  的物种为优势种。

浮游植物群落多样性采用香农-威纳指数(Shannon-Wiener index) ( $H'$ )<sup>[14]</sup>和 Pielou 均匀度指数(Pielou index) ( $J$ )<sup>[15]</sup>,其计算公式分别为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \times \log_2 p_i \quad (2)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (3)$$

式中:  $H'$  为香农-威纳指数;  $S$  为总种类数;  $p_i$  为第  $i$  种的丰度与样品中浮游植物丰度的比值;  $J$  为均匀度指数。

浮游植物与环境因子之间关系的分析选取在总丰度中占比超过 1% 的物种进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),在 Canoco 5.0 中完成。围填海前的浮游植物群落参考 2004 年实施的河北省第二次海岸带资源调查<sup>[9]</sup>。

2 结果与讨论

2.1 浮游植物种类组成

本次调查鉴定出的浮游植物包括 3 门 38 属 88 种,其中硅藻门(Bacillariophyta)物种数最多,有 30 属 76 种,占总物种数的 86.36%,其次为甲藻门(Dinophyta)鉴定出 7 属 11 种,占总物种数的 12.50%,金藻门(Chrysophyta)出现极少,鉴定出 1 属 1 种,占总物种数的 1.14%。春季和夏季的总物种数分别为 49 种和 76 种,均以硅藻为主,甲藻次之,金藻最少(表 1)。

表 1 曹妃甸海域浮游植物物种组成

Tab. 1 Phytoplankton species composition in Caofeidian coastal waters

季节	硅藻	甲藻	金藻	总物种数
春季	42	6	1	49
夏季	67	8	1	76

2.2 浮游植物丰度

春季,浮游植物丰度范围为(1.93 ~ 7.89) × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>,其中硅藻、甲藻和金藻的丰度范围分别为(1.87 ~ 7.85) × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>、0 ~ 0.27 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>和 0 ~ 0.02 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>,分别占总丰度的 98.15%、1.81%和 0.04%(表 2)。硅藻是浮游植物丰度组成的主要类群,其高值区主要出现在 A1、B1、C1 和 C3 站位,丰度通常在 5.00 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>以上,而其他站位的丰度在(1.00 ~ 5.00) × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>之间(图 2a)。甲藻在调查海域出现较少,只在 B1、B3 和 C1 站位的丰度较高,超过了 0.10 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>,其他大部分海域基本在 0.10 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>以下(图 2b)。金藻仅出现在 A3 站位,其丰度为 0.02 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>。

表 2 曹妃甸海域浮游植物群落特征

Tab. 2 The characters of phytoplankton community in Caofeidian coastal waters

参数	春季		夏季	
	范围	平均值 ± 标准偏差	范围	平均值 ± 标准偏差
总丰度 / × 10 <sup>4</sup> cells · m <sup>-3</sup>	1.93 ~ 7.89	4.80 ± 1.94	5.85 ~ 5022.91	704.30 ± 1462.81
硅藻 / × 10 <sup>4</sup> cells · m <sup>-3</sup>	1.87 ~ 7.85	4.71 ± 1.94	5.12 ~ 5021.05	697.77 ± 1463.12
甲藻 / × 10 <sup>4</sup> cells · m <sup>-3</sup>	0 ~ 0.27	0.09 ± 0.09	0 ~ 21.81	6.52 ± 7.83
金藻 / × 10 <sup>4</sup> cells · m <sup>-3</sup>	0 ~ 0.02	0.00 ± 0.01	0 ~ 0.11	0.01 ± 0.03
多样性指数( $H'$ )	1.96 ~ 3.62	2.98 ± 0.60	1.29 ~ 3.94	3.05 ± 0.81
均匀度指数( $J$ )	0.45 ~ 0.84	0.65 ± 0.12	0.27 ~ 0.75	0.57 ± 0.13

夏季,浮游植物丰度明显高于春季,其范围为(5.85 ~ 5022.91) × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>,其中硅藻、甲藻和金藻的丰度范围分别为(5.12 ~ 5021.05) × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>、0 ~ 21.81 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>和 0 ~ 0.11 × 10<sup>4</sup>

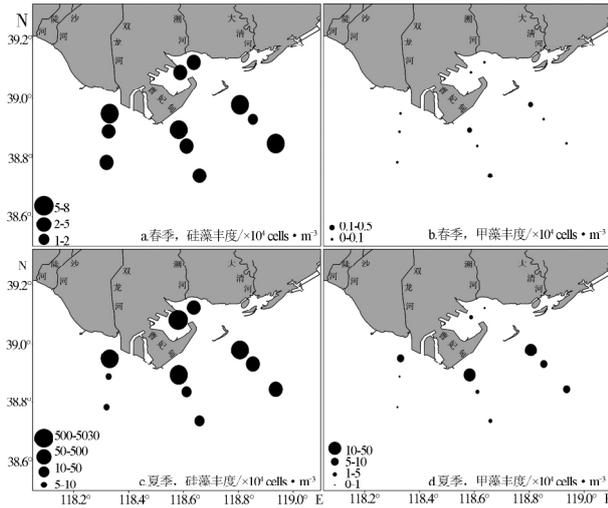


图2 曹妃甸海域浮游植物丰度的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of phytoplankton abundance in Caofeidian coastal waters

cells/m<sup>3</sup>,分别占浮游植物总丰度的98.91%、1.08%和0.01%(表2),丰度组成与春季基本一致。硅藻丰度呈现出明显的从近岸到远岸逐渐降低的分布趋势,内湾海域丰度最高,其中D2站位高达5021.05 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>,近岸的A1、B1和C1站位丰度在(500.00 ~ 1000.00) × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>之间,其他站位丰度相对较低(图2c)。甲藻的高值区分布在B1、C1等甸头附近海域,丰度在10.00 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>以上,其他海域低于10.00 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>(图2d)。金藻仅在B断面出现,B1站位金藻丰度较高,为0.11 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>。

### 2.3 浮游植物优势种

春季,浮游植物优势种均为硅藻,包括具槽帕拉藻、细弱圆筛藻、海链藻(*Thalassiosira* spp.)、圆筛藻(*Coscinodiscus* spp.)、长菱形藻(*Nitzschia longissima*)、巨圆筛藻(*Coscinodiscus gigas*)和舟形藻(*Navicula* spp.)(表3)。其中具槽帕拉藻的优势度最高,达到0.365,其高值区出现在A1、B断面和C断面,丰度高于1.00 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>(图3a)。细弱圆筛藻的优势度为0.176,主要出现在东侧的C1站位以及西侧的A2和A3站位(图3b)。海链藻、圆筛藻等优势种的分布相对较为均匀,基本为近岸高、远岸低的分布规律。

夏季,浮游植物优势种同样均为硅藻,包括浮动弯角藻、中肋骨条藻、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)和高齿状藻(*Odontella regia*)(表3)。浮动弯角藻是夏季最主要的优势种,优势度达到0.458,该物种集中出现在内湾海域,在D2站位的丰度达到3725.58 × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>,B1、C1和D1站位的丰度也较高,在(10.00 ~ 500.00) × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>,其他海域则较少出现(图3c)。中肋骨条藻的优势度为0.307,在A1、B1、C1、C2、D1和D2等近岸站位普遍丰度较高,基本在(50.00 ~ 1000.00) × 10<sup>4</sup> cells/m<sup>3</sup>之间(图3d)。旋链角毛藻、高齿状藻的空间分布也基本遵循近岸高、远岸低的分布规律。

表3 曹妃甸海域浮游植物优势种

Tab. 3 Dominant species of phytoplankton in Caofeidian coastal waters

季节	优势种	丰度比例/(%)	频率/(%)	优势度(Y)
春季	具槽帕拉藻( <i>Paralia sulcata</i> )	36.50	100.00	0.365
	细弱圆筛藻( <i>Coscinodiscus subtilis</i> )	19.39	90.91	0.176
	海链藻( <i>Thalassiosira</i> spp.)	7.25	100.00	0.073
	圆筛藻( <i>Coscinodiscus</i> spp.)	4.24	100.00	0.042
	长菱形藻( <i>Nitzschia longissima</i> )	3.03	81.82	0.025
	巨圆筛藻( <i>Coscinodiscus gigas</i> )	2.84	81.82	0.023
	舟形藻( <i>Navicula</i> spp.)	2.39	90.91	0.022
夏季	浮动弯角藻( <i>Eucampia zodiacus</i> )	50.33	90.91	0.458
	中肋骨条藻( <i>Skeletonema costatum</i> )	30.67	100.00	0.307
	旋链角毛藻( <i>Chaetoceros curvisetus</i> )	2.54	100.00	0.025
	高齿状藻( <i>Odontella regia</i> )	2.20	100.00	0.022

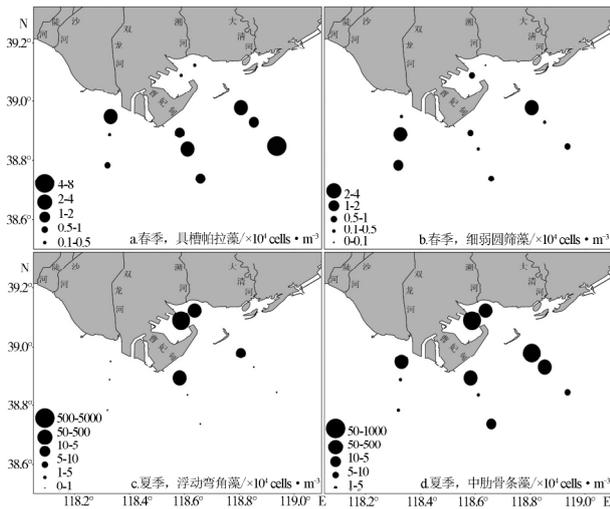


图3 曹妃甸海域浮游植物优势种的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of dominant phytoplankton species in Caofeidian coastal waters

### 2.4 浮游植物群落多样性

春季,浮游植物群落  $H'$  的范围为 1.96 ~ 3.62 (表 2),基本为西侧较高,东侧较低,近岸较高,远岸较低,分布规律(图 4a)。 $J'$  范围为 0.45 ~ 0.84(表 2),其空间分布与  $H'$  基本一致(图 4b)。

夏季,浮游植物群落  $H'$  的范围为 1.29 ~ 3.94,均值较春季略高, $J'$  的范围为 0.27 ~ 0.75,均值较春季略低(表 2),两者的空间分布与春季相反,呈现出近岸低、远岸高的分布规律(图 4a,图 4b),内湾海域  $H'$  和  $J'$  均最低,与浮动弯角藻在浮游植物群落中占据了绝对优势有关(图 3c)。

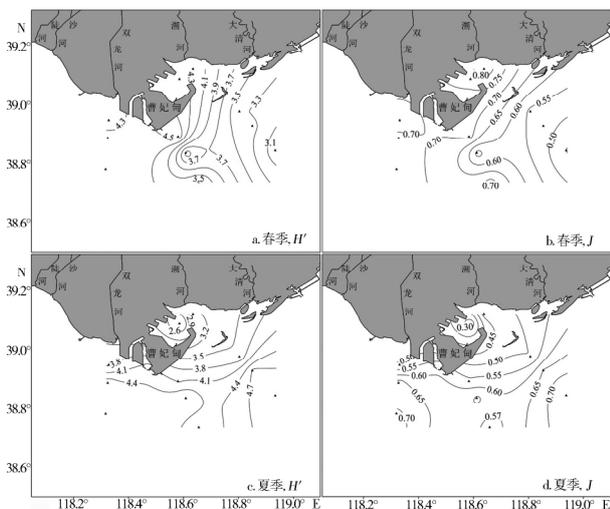


图4 曹妃甸海域浮游植物多样性指数和均匀度指数的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of Shannon-Wiener index and Pielou index of phytoplankton in Caofeidian coastal waters

### 2.5 浮游植物群落与环境因子的关系

浮游植物群落的季节差异与环境因子紧密相关。春季,具槽帕拉藻和菱形藻在研究海域大量出现(表 3),其适宜的温度范围分别为 11℃ ~ 18℃ 和 12℃ ~ 19℃<sup>[16]</sup>,适应春季较低的水温(14.32 ± 1.50)℃。圆筛藻在春季出现也较多,它和具槽帕拉藻、菱形藻均属于底栖兼性浮游种类<sup>[17-18]</sup>。春季,风浪的作用较强,对浅海沉积物可产生明显的搅拌作用,大量底栖种类因而悬浮进入水体,从而提高了这些种类在水体中的丰度。夏季出现的浮游植物种类多偏向于高温、低盐环境(表 3),如浮动弯角藻在温度为 25℃ 和盐度为 25 的水体中可以达到最大生长速率<sup>[19]</sup>,中肋骨条藻在盐度较低的河口附近海域往往成为优势种<sup>[17]</sup>,高齿状藻、角毛藻和丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)也均属于喜高温低盐水体的种类<sup>[16]</sup>。夏季调查海域较高的温度(21.60 ± 3.51)℃ 以及较低的盐度(28.53 ± 0.55)使得这些藻类取代了春季的具槽帕拉藻、圆筛藻和菱形藻等,成为夏季的优势类群。

浮游植物的空间分布与环境因子的关系也十分紧密,而且随着种类的不同而有所差异。羽纹纲硅藻通常比中心纲种类对 N 的需求较高,对 P 的需求较低<sup>[20]</sup>,这就使得羽纹纲种类在低 DIP 环境中更具有竞争优势,因而在本研究中体现为与 DIP 负相关,与 DIN 正相关,中心纲硅藻的生长需要较多 P<sup>[20]</sup>,因此普遍与 DIP 具有正相关关系。具槽帕拉藻作为春季优势度最高的物种,与盐度具有明显的正相关关系(图 5a),这与其喜好高盐环境<sup>[21]</sup>的特点是相符的,但它与 DIN 关系不明显,甚至与 DIP、DSi 出现负相关关系(图 5a),说明具槽帕拉藻的生长主要受盐度影响,其生长对营养盐的消耗作用造成了 P 和 Si 的浓度相对较低。圆筛藻、海链藻等大部分种类与 DIP 和 DSi 呈现的正相关关系(图 5a)表明其倾向于分布在 DIP 和 DSi 浓度较高的海域,与春季 DIP 和 DSi 相对不足的营养状态较为吻合,反映了营养盐对浮游植物生长的重要作用。浮动弯角藻与温度的正相关以及与盐度的负相关(图 5b)和其喜好高温、低盐环境的特点相符<sup>[19]</sup>。浮动弯角藻在夏季浮游植物群落中的丰度比例高达 50.33%,同样对

营养盐具有重要的消耗作用,因而出现了与 DIN 关系不明显,而与 DIP 和 DSi 具有负相关关系(图 5b)。其他丰度占比较低的种类,如中肋骨条藻、

角毛藻等,与 DIP 和 DSi 具有正相关关系(图 5b) 则显示出 DIP 和 DSi 对浮游植物生长的重要影响。

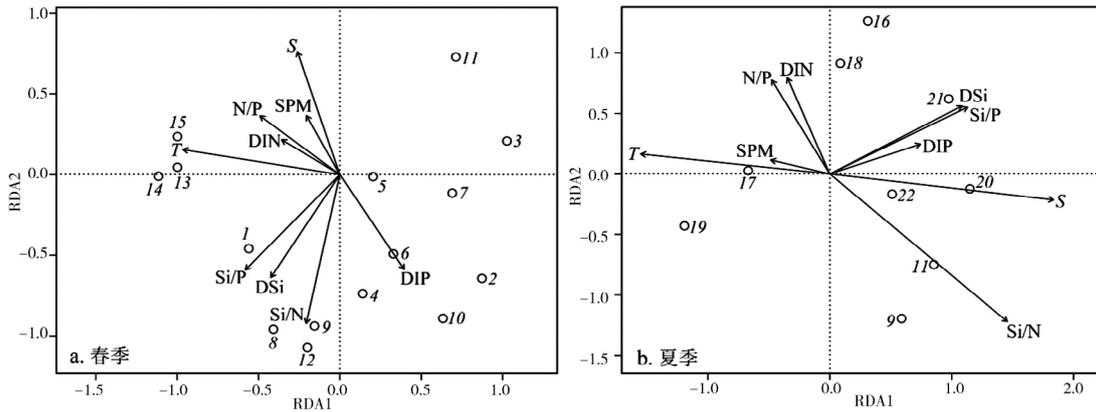


图5 曹妃甸海域浮游植物与环境因子的 RDA 排序

Fig. 5 RDA ordination of phytoplankton and environmental parameters in Caofeidian coastal waters

T: 温度; S: 盐度; SPM: 悬浮颗粒物; DIN: 无机氮; DIP: 磷酸盐; DSi: 硅酸盐; N/P: 无机氮/磷酸盐; Si/N: 硅酸盐/无机氮; Si/P: 硅酸盐/磷酸盐; 1: 圆筛藻; 2: 辐射列圆筛藻; 3: 蛇目圆筛藻; 4: 巨圆筛藻; 5: 虹彩圆筛藻; 6: 细弱圆筛藻; 7: 星脐圆筛藻; 8: 辐环藻; 9: 海链藻; 10: 离心列海链藻; 11: 具槽帕拉藻; 12: 短楔形藻; 13: 长菱形藻; 14: 新月筒柱藻; 15: 舟形藻; 16: 中肋骨条藻; 17: 丹麦细柱藻; 18: 高齿状藻; 19: 浮动弯角藻; 20: 角毛藻; 21: 旋链角毛藻; 22: 拟旋链角毛藻

T: seawater temperature; S: seawater salinity; SPM: suspended particle matter; DIN: dissolved inorganic nitrogen; DIP: dissolved inorganic phosphorus; DSi: dissolved silicate; N/P: DIP/DIP; Si/N: DSi/DIN; Si/P: DSi/DIP; 1: *Coscinodiscus* spp.; 2: *Coscinodiscus radiatus*; 3: *Coscinodiscus argus*; 4: *Coscinodiscus gigas*; 5: *Coscinodiscus oculus-iridis*; 6: *Coscinodiscus subtilis*; 7: *Coscinodiscus asteromphalus*; 8: *Actinocyclus* spp.; 9: *Thalassiosira* spp.; 10: *Thalassiosira eccentrica*; 11: *Paralia sulcata*; 12: *Licmophora abbreviate*; 13: *Nitzschia longissima*; 14: *Cylindrotheca closterium*; 15: *Navicula* spp.; 16: *Skeletonema costatum*; 17: *Leptocylindrus danicus*; 18: *Odontella regia*; 19: *Eucampia zodiacus*; 20: *Chaetoceros* spp.; 21: *Chaetoceros curvisetus*; 22: *Chaetoceros pseudocurvisetus*

## 2.6 围填海对浮游植物群落的影响

曹妃甸海域浮游植物的丰度、 $H'$ 、 $J$  和优势类群在围填海后均体现出一定变化(表 4)。春季, A、B 和 C 三个断面的浮游植物丰度均明显降低。DIN 平均浓度在围填海前后变化较小,分别为  $8.04 \mu\text{mol/L}$  和  $8.61 \mu\text{mol/L}$ , 而 DIP 浓度从  $0.21 \mu\text{mol/L}$  下降至  $0.14 \mu\text{mol/L}$ , N/P 从 38.29 上升至 61.50。DIP 的降低以及 N/P 的进一步失衡是造成浮游植物丰度下降的重要原因。 $H'$  和  $J$  在西侧海域明显升高, 东侧海域有所降低, 这可能与水动力条件变化所导致的营养盐重新分布有关。2004 年西侧海域平均 DIN 浓度为  $14.82 \mu\text{mol/L}$ , 本次调查下降至  $8.85 \mu\text{mol/L}$ , N/P 从 61.75 下降至 55.31, 这造成部分嗜氮种类的相应减少, 如具槽帕拉藻的丰度比例从 30% 降低至 27%, 这使得群落结构更为均衡,  $H'$  和  $J$  因而有所升高。东侧海域的 DIN 浓度从 2004 年的  $5.48 \mu\text{mol/L}$  上升

到本次调查的  $8.02 \mu\text{mol/L}$ , N/P 从 28.84 上升至 57.29, 这有利于具槽帕拉藻等种类优势度的进一步提高, 其丰度比例从 33% 升高至 50%,  $H'$  和  $J$  则表现为有所降低。夏季浮游植物丰度明显高于 2004 年调查丰度, 且优势物种出现了较大改变, 具槽帕拉藻、虹彩圆筛藻 (*Coscinodiscus oculus-iridis*) 等偏向于高盐环境的种类转变成中肋骨条藻、浮动弯角藻等偏向于低盐环境的种类。这种变化与围填海无关, 而是与河流的淡水输入有关。根据《河北省水资源公报》2013 年河北省入海水量为  $24.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 远超多年平均值  $9.18 \times 10^8 \text{ m}^3$  [22], 而且河流输入的淡水主要在夏季入海 [23], 这就使得调查期间的盐度 ( $28.53 \pm 0.55$ ) 明显低于 2004 年夏季盐度 ( $31.30 \pm 1.30$ ), 因而造成偏向于低盐环境的种类在研究海域大量出现。曹妃甸东北侧的内湾海域浮游植物丰度极高, 最高值达到  $5022.91 \times 10^4 \text{ cells/m}^3$ , 其中浮动弯角藻的丰

度高达  $3725.58 \times 10^4 \text{ cells/m}^3$ 。曹妃甸北侧的浅滩在围填海之后逐渐成为陆地,这在一定程度上阻碍了东北侧内湾与外海的海水交换,潮河等河流输入的淡水和营养盐更容易在内湾海域聚集,为浮动弯角藻提供了较为适宜的低盐环境,也保

证了藻类细胞的持续增殖,从而在内湾海域出现了浮动弯角藻的丰度高值,这表明内湾海域面临着较高的赤潮风险,需要在以后的近海环境监测、水环境治理和赤潮防治方面给予更多关注。

表 4 曹妃甸海域围填海后浮游植物群落的变化

Tab. 4 Changes of phytoplankton community in Caofeidian coastal waters after reclamation

季节	海域	年份	丰度 / $\times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$	<i>H'</i>	<i>J</i>	主要物种 [ 丰度百分比 / ( % ) ]
春季	西侧海域	2004	20.44	2.32	0.66	翼鼻状藻(32)、具槽帕拉藻(30)
	(A 断面)	本研究	5.67	3.35	0.70	具槽帕拉藻(27)、细弱圆筛藻(21)
	南侧海域	2004	69.57	2.97	0.74	具槽帕拉藻(28)、翼鼻状藻(19)
	(B 断面)	本研究	4.67	3.12	0.66	具槽帕拉藻(42)、细弱圆筛藻(14)
	东侧海域	2004	47.58	2.80	0.71	具槽帕拉藻(33)、翼鼻状藻(19)
	(C 断面)	本研究	5.35	2.20	0.50	具槽帕拉藻(50)、细弱圆筛藻(26)
夏季	西侧海域	2004	3.20	2.57	0.73	具槽帕拉藻(49)、小等刺硅鞭藻(9)
	(A 断面)	本研究	182.86	3.30	0.61	中肋骨条藻(57)、旋链角毛藻(7)
	南侧海域	2004	6.95	1.03	0.45	具槽帕拉藻(45)、扁平原多甲藻(30)
	(B 断面)	本研究	208.74	3.30	0.60	中肋骨条藻(46)、浮动弯角藻(10)
	东侧海域	2004	3.04	0.95	0.56	具槽帕拉藻(57)、虹彩圆筛藻(23)
	(C 断面)	本研究	385.46	3.44	0.64	中肋骨条藻(53)、旋链角毛藻(8)

注:翼鼻状藻(*Proboscia alata*);小等刺硅鞭藻(*Dietyocha fibula*);扁平原多甲藻(*Protoperidinium depressum*)

### 3 结 论

(1) 曹妃甸海域浮游植物群落主要由硅藻组成,甲藻和金藻相对较少。春季物种数和丰度较低,主要的优势种包括具槽帕拉藻、细弱圆筛藻等,夏季物种数和丰度较高,主要的优势种包括浮动弯角藻、中肋骨条藻等。春季和夏季浮游植物丰度的空间分布基本一致,均为近岸高、远岸低的分布规律,尤其是夏季内湾海域的浮游植物丰度较高。温度、盐度和营养盐是影响浮游植物群落季节变化和空间分布的主要因素。

(2) 曹妃甸大规模围填海后,浮游植物群落体现出明显变化:春季,浮游植物丰度的降低与 DIP 浓度的减少有关,西侧海域的 *H'* 和 *J* 有所升高,而东侧海域有所降低,与水动力条件变化导致的营养物质重新分布有关;夏季,浮游植物丰度显著升高,具槽帕拉藻等高盐种类转变为中肋骨条藻、浮动弯角藻等低盐种类,这与 2013 年入海水量的显著增多有关。东北侧内湾海域受围填海影响较大,海水交换能力的降低使得河流输入的淡

水和营养盐在此聚集,促进浮动弯角藻的快速增殖,因而具有较高的赤潮风险。

### 参考文献:

- [1] FIELD C B ,BEHRENFELD M J ,RANDERSON J T ,et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. *Science* ,1998 281( 5374 ): 237-240.
- [2] LALLI C M ,PARSONS T R. *Biological Oceanography: An Introduction* [M]. 2nd ed. Burlington ,USA: Elsevier Butterworth-Heinemann ,1997.
- [3] LIU D Y ,SHEN X H ,DI B P ,et al. Palaeoecological analysis of phytoplankton regime shifts in response to coastal eutrophication [J]. *Marine Ecology Progress Series* ,2013 475: 1-14.
- [4] 季荣耀,陆永军,左利钦.渤海湾曹妃甸深槽形成机制及稳定性分析[J]. *地理学报* ,2011 66( 3 ): 348-355.
- [5] 吴越,杨文波,王琳,等.曹妃甸填海造地时空分布遥感监测及其影响初步研究[J]. *海洋湖沼通报* ,2013( 1 ): 153-158.
- [6] 林磊,刘东艳,刘哲,等.围填海对海洋水动力与生态环境的影响[J]. *海洋学报* ,2016 38( 8 ): 1-11.
- [7] 戚健文,匡翠萍,蒋茗韬,等.曹妃甸港口工程进展及其三维潮流场响应特征研究[J]. *水动力学研究与进展* ,2014 29( 3 ): 346-354.
- [8] 刘亚飞,娄安刚,孟云.岸线地形变化对环渤海排污口临近海

- 域水交换能力的影响[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(5): 719-725, 753.
- [9] 河北省国土资源利用规划院. 河北省海洋资源调查与评价专题报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2007.
- [10] 郭玉洁, 钱树本. 中国海藻志[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] 钱树本, 刘东艳, 孙军. 海藻学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2014.
- [12] 杨世民, 董树刚. 中国海域常见浮游硅藻图谱[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2006.
- [13] 孙军, 刘东艳. 中国海区常见浮游植物种名更改初步意见[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(3): 271-286.
- [14] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana IL: University of Illinois Press, 1949: 1-125.
- [15] PIELOU E C. An introduction to mathematical ecology[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969: 1-286.
- [16] CLOERN J E, DUFFORD R. Phytoplankton community ecology: principles applied in San Francisco Bay[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, 285: 11-28.
- [17] 栾青杉, 孙军. 2005年夏季长江口水域浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(18): 4967-4975.
- [18] 傅明珠, 孙萍, 孙霞, 等. 锦州湾浮游植物群落结构特征及其对环境变化的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3650-3660.
- [19] NISHIKAWA T. Effects of temperature, salinity and irradiance on the growth of the diatom *Eucampia zodiacus* caused bleaching of seaweed *Porphyra* isolated from Harima-Nada, Seto Inland Sea, Japan[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 2002, 68(3): 356-361.
- [20] 孙军, 刘东艳, 陈宗涛, 等. 不同氮磷比率对青岛大扁藻、新月柱鞘藻和米氏凯伦藻生长影响及其生存策略研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2122-2126.
- [21] MCQUOID M R, NORDBERG K. The diatom *Paralia sulcata* as an environmental indicator species in coastal sediments[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 56(2): 339-354.
- [22] 河北省水利厅. 河北省水资源公报[R]. 石家庄: 河北省水利厅, 2001-2016.
- [23] 顾杰, 钱从锐, 梁慧迪, 等. 曹妃甸海域化学需氧量(COD)的季节性分布特征[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(4): 578-583.