

DOI: 10.5846/stxb201305151068

傅明珠, 孙萍, 孙霞, 韦钦胜, 张学雷, 王宗灵. 锦州湾浮游植物群落结构特征及其对环境变化的响应. 生态学报, 2014, 34(13): 3650-3660.

Fu M Z, Sun P, Sun X, Wei Q S, Zhang X L, Wang Z L. Phytoplankton community structure and its ecological responses to environmental changes in Jinzhou Bay, China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3650-3660.

锦州湾浮游植物群落结构特征及其对环境变化的响应

傅明珠^{1,2}, 孙萍^{1,2,*}, 孙霞^{1,2}, 韦钦胜^{1,2}, 张学雷^{1,2}, 王宗灵¹

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 2. 海洋生态环境科学与工程国家海洋局重点实验室, 青岛 266061)

摘要: 锦州湾是我国北方污染严重的海湾, 以水体的富营养化和重金属污染为特征。基于 2011 年 8 月 (夏季) 和 2012 年 5 月 (春季) 在锦州湾进行的航次调查, 研究了该湾水采浮游植物的群落结构、时空分布及其对生态环境变化的响应。研究结果表明: 锦州湾海域浮游植物群落主要由硅藻、甲藻组成, 其生态类型主要为温带近岸型。春季和夏季共鉴定出浮游植物 4 门 41 属 62 种, 硅藻在两个季节的物种数和细胞丰度上均占绝对优势, 且底栖硅藻比例较高。夏季浮游植物细胞丰度平均值为 41.44×10^3 个/L, 主要优势种为海链藻 *Thalassiosira* spp. 和叉角藻 *Cerarium furca*; 春季浮游植物细胞丰度平均值为 13.80×10^3 个/L, 主要优势种为新月柱鞘藻 *Cylindrotheca closterium* 和中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*。锦州湾春季和夏季浮游植物群落组成差异明显, 冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 表明硝酸盐浓度和水温分别是夏季和春季影响浮游植物群落结构的最重要环境因子。与历史资料相比, 锦州湾优势种发生了显著变化, 适于富营养化环境的微型浮游植物和部分耐污种在群落中占优势, 表明人类活动引起的水体富营养化以及其它污染物, 可能对浮游植物种类组成及分布产生了一定影响。

关键词: 浮游植物群落结构; 锦州湾; 冗余分析; 生态响应

Phytoplankton community structure and its ecological responses to environmental changes in Jinzhou Bay, China

FU Mingzhu^{1,2}, SUN Ping^{1,2,*}, SUN Xia^{1,2}, WEI Qinsheng^{1,2}, ZHANG Xuelei^{1,2}, WANG Zongling¹

1 First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China

2 Key Laboratory of Science and Engineering for Marine Ecological Environment, SOA, Qingdao 266061, China

Abstract: Phytoplankton plays a vital role in marine ecosystem functioning. It generates roughly 50% of the global primary production, affects the climate process and biogeochemical cycles and sets the upper limits to fishery yield. In addition, due to its fast population responses to water quality and environment stressors, phytoplankton is usually employed as an indicator for assessing eutrophication caused by excess nutrient input and ecosystem health. Jinzhou Bay ($120^{\circ}55' - 121^{\circ}14'E, 40^{\circ}42' - 40^{\circ}52'N$) is a small and shallow semi-enclosed bay in north China with a area of 151.5 km^2 and an averaged depth of 3.5 m. It has a long history of heavy pollution featured by water column eutrophication and heavy metals contamination. Two cruises were carried out during August 2011 and May 2012 respectively to study the spatial distribution and assemblage structure of phytoplankton as well as their ecological responses to the environment changes. Surface water phytoplankton samples were collected at 26 stations and the relevant environmental parameters, i.e. water temperature, salinity, pH, DO, SPM, and nutrient (nitrate, phosphate, silicate) concentrations were measured or sampled simultaneously. The phytoplankton assemblages in Jinzhou Bay were mainly composed by diatom and dinoflagellates groups, and most of them were temperate coastal types. A total of 62 species belong to 4 phylum and 41 genera were identified in the summer and

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2010BAC69B00); 海洋公益性行业科研专项经费项目 (201205001); 国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项基金 (GY02-2008T07, 2013G10, 2013T05)

收稿日期: 2013-05-15; 修订日期: 2014-04-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunping@fio.org.cn

spring cruises. Diatoms were dominant both in species number and cell abundance, with a relatively higher proportion of benthic species. The phytoplankton community structures were significantly different between the two sampling periods. In August 2011, the average cell abundance was 41.44×10^3 cell/L and the first two dominant species were *Thalassiosira* spp. and *Cerarium furca*. In May 2012, the average cell abundance was 13.80×10^3 cell/L and the first two dominant species were *Cylindrotheca closterium* and *Skeletonema costatum*. The species diversity was relatively higher in spring (mean 2.46) than in summer (mean 1.98). Multivariate ordination techniques were employed to explore the relationships between phytoplankton species and environmental parameters by CANOCO 4.5. Detrended correspondence analysis (DCA) for the species data showed the maximum gradient length was lower than 3, therefore linear model was applied. Furthermore, the results of redundancy analysis (RDA) indicated that nitrate concentrations and water temperature was the most important influencing factor in summer and spring respectively. Compared with the historic data, the dominant phytoplankton species significantly changed during the last 30 years. Smaller-sized phytoplankton and the species typically found in the eutrophicated environment tended to dominant in Jinzhou Bay. In contrast, the *Chaetoceros* sp. and *Coscinodiscus* sp. which were common and important in coastal areas, were both low in species number and cell abundance. This variation trend suggested that the culture eutrophication together with other contaminants might produce certain impacts to the species composition of phytoplankton community in Jinzhou Bay. Systematic and long-term monitoring and study is needed to reveal the ecological responses of phytoplankton assemblage to environment changes and to identify the species capable of indicating the water column eutrophication and heavy metal pollution status of Jinzhou Bay.

Key Words: phytoplankton assemblage structure; jinzhou bay; redundancy analysis; ecological responses

浮游植物在海洋生态系统中具有重要生态功能,贡献了全球约 50% 的初级生产^[1],决定了最大渔业资源量^[2],影响气候变化以及生源要素的生物地球化学循环过程^[3]。此外,由于浮游植物种群对水质、水动力条件以及气候变化等具有快速的响应能力,浮游植物经常被用作环境条件变化的指示因子,评估营养盐输入负荷的变化造成的海洋富营养化以及生态系统健康^[4-6]。

锦州湾(120°55'—121°14'E, 40°42'—40°52'N)位于渤海辽东湾的西北部,湾口朝向东南,海湾面积约为 151.5 km²,平均水深只有 3.5 m,湾周围有多条河流输入,存在较大面积的漫滩,为半封闭型浅水海湾^[7]。锦州湾是我国污染严重的海域之一,以水体的富营养化和重金属污染为主要特征,严重影响了海湾生态系统健康^[8]。自 80 年代中期开始,不断加重的富营养化趋势^[9-10],为藻类大量繁殖提供了物质基础,1998 年锦州湾及其邻近海域曾爆发面积达 3000 km²的叉角藻赤潮^[11]。重金属污染严重是锦州湾突出的生态问题^[12-14],湾西南端的五里河口附近由于河流输入以及葫芦岛锌厂的直接排海成为锦州湾最大的点源污染。

尽管锦州湾具有独特的生态环境和污染特征,

对其浮游植物群落及其与环境因子相关性的研究报道却非常有限^[7, 15-17]。本文根据 2011 年夏季以及 2012 年 5 月的两个航次调查,研究了锦州湾浮游植物的种类组成、数量丰度以及优势种的时空分布,分析了不同季节影响浮游植物群落结构的主要环境因子,并结合历史资料探讨了优势种的变化以及浮游植物对生态环境变化的响应,为锦州湾浮游生态学提供基础资料和科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析方法

2011 年 8 月 4 日和 2012 年 5 月 27 日在锦州湾及其邻近海域设置 26 个站位(图 1),对表层水体的浮游植物及相关的水文化学参数进行了样品采集与测定。其中水温、盐度、pH 采用多参数水质仪(RBR-XR-620)现场测定,营养盐样品(NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , SiO_3^{2-})经 0.45 μm 滤膜过滤, -20℃ 冷冻保存,带回实验室用营养盐自动分析仪测定(SKALAR)。其它参数按照《海洋调查规范》(GB12763.4—2007)^[18]所规定的方法进行采样分析。

叶绿素 a 浓度采用萃取荧光法测定。叶绿素 a

样品用 GF/F 膜过滤 100—500 mL 水样获得。滤膜 -20℃ 冷冻保存,经体积比例 = 9:1 的丙酮萃取 14—24 h 后,用 Turner-Designs 700 荧光计进行测定。

浮游植物水样采集:每站位取 500mL 表层水样于聚丙烯瓶中,立即用 1% 碘液固定。带回实验室后,样品分析按沉降浓缩方法进行:样品静置 48h 以上后,虹吸上清液,约浓缩至样品原来体积的 1/20。之后取亚样品 1 mL 在 Nikon 倒置显微镜下 (TE-2000U) 进行浮游植物种类鉴定^[19-23]并计数。

浮游植物优势度依据公式计算:

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

式中, n_i 为第 i 种的总个体数, f_i 为该种在各样品中出现的频率, N 为全部样品中的总个体数;当 $Y \geq 0.02$ 时,该种即为优势种。浮游植物多样性采用 Shannon-Wiener 指数 (H') 计算,方法为:

$$H' = - \sum_i \frac{n_i}{N} \times \log_2(n_i/N)$$

式中, n_i 、 N 为第 i 种类的个体数和样品中所有种类的总个数。

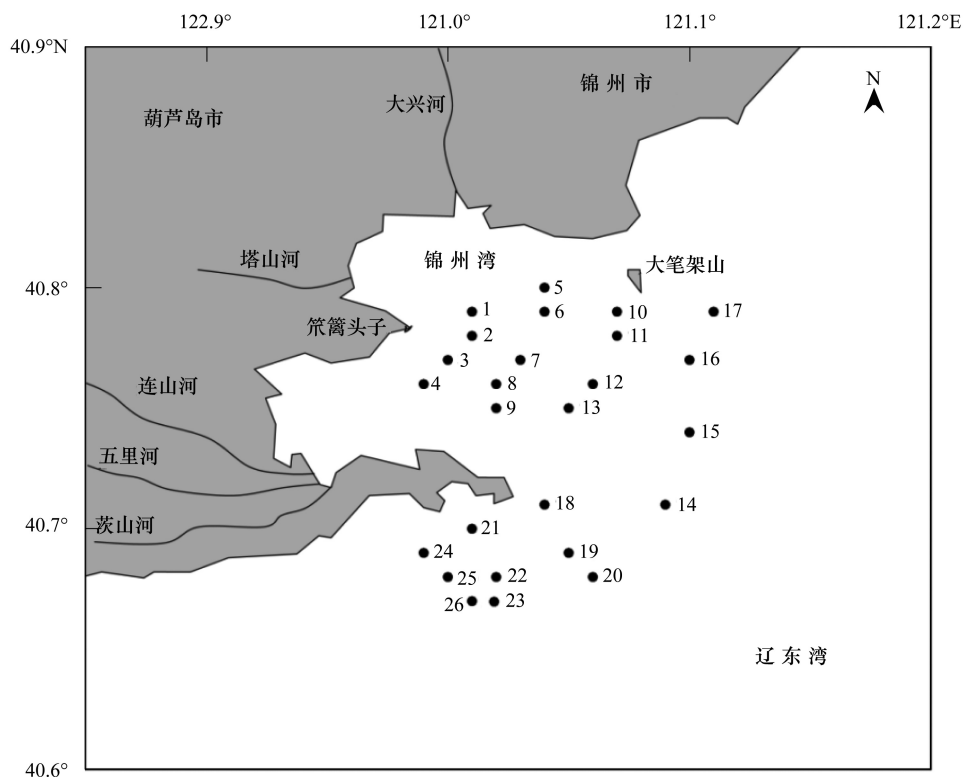


图 1 2011—2012 年锦州湾浮游植物调查站位图

Fig.1 Sampling stations in Jinzhou Bay during 2011—2012

1.2 数据处理与分析

生物群落的分类和排序分析为客观、准确地揭示群落、物种及其与环境之间的关系提供了有效的方法。本文采用 CANOCO 4.5 软件对锦州湾浮游植物物种数据和环境因子进行了多元统计分析,从而更好的反映浮游植物群落与环境的关系^[24]。

在对浮游植物群落结构分析前,需要对数据进行筛选和转换。参与排序的浮游植物物种需要满足以下两个条件:该物种在各站位的出现频率 $\geq 5\%$ (即出现站位 ≥ 2);该物种在至少一个站位的相对丰度 $\geq 1\%$ 。本文实际参与分析的浮游植物物种夏季

和春季分别包括 29 种和 30 种,环境参数 7 项。

为了降低少数优势种权重及稀有种对物种数据的影响对物种数据矩阵进行 $\log(x+1)$ 转换,以使它们的分布更接近正态分布;本研究区域环境参数数量级差异不大,故未对环境因子进行对数转换。在对数据进行空间排序之前,首先对锦州湾调查海域春夏季的浮游植物物种数据进行去趋势对应分析 (DCA),结果显示,夏季排序轴最大梯度长度为 2.063,春季为 2.481,均 < 3 ,表明浮游植物群落对生态梯度的响应是线性的,因此选用 RDA 线性模型进行排序分析。

2 结果

2.1 浮游植物物种组成

锦州湾 2011 年夏季和 2012 年春季共鉴定出浮游植物 4 门 41 属 62 种,其中硅藻 27 属 44 种(占物种数量的 71.0%),甲藻 12 属 16 种(占物种数量的 36.4%),金藻 1 属 1 种,隐藻 1 属 1 种(物种名录见附表 1)。夏季和春季浮游植物种类数差别不大(分别为 40 种和 36 种),但物种组成差异显著,相同种类只有 13 种。浮游植物生态类型多为温带近岸性种,底栖性物种占有相当的比例。

2011 年 8 月,锦州湾浮游植物优势种有 5 种(表 1),包括 4 种硅藻和 1 种甲藻。主要优势种为硅藻门的海链藻(*Thalassiosira* spp.)和甲藻门的叉角藻(*Ceratium furca*),二者的细胞丰度对总丰度的贡献高达 66.7%。但二者的空间分布具有明显差异,海链藻的高值区主要分布于湾内,而叉角藻的高值区主要分布于锦州湾西南部外海(图 2)。其它 3 种优势种中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、菱形藻(*Nitzschia* sp.)和斜纹藻(*Pleurosigma* sp.)空间分布

较均匀,斜纹藻在湾外细胞丰度略高于湾内。值得注意的是,鳍藻(*Dinophysis* sp.)在湾内具有很高的出现频率(84.6%),虽然细胞丰度并不高(平均 1.93×10^3 个/L),已能够成为湾内的优势种,而在湾外只在 1 个站位检测到。该季节锦州湾浮游植物多样性指数(H')平均值为 1.98,波动范围为 0.59—3.60。

2012 年 5 月,锦州湾浮游植物优势种有 5 种(表 1),全部为硅藻。主要优势种为粒径较小的微型浮游植物中肋骨条藻和新月柱鞘藻(*Cylindrotheca closterium*),二者的细胞丰度占总丰度的 44.4%。中肋骨条藻出现频率相对较低(53.8%),高值区主要分布于湾口区域和湾外西南部(图 2),新月柱鞘藻出现频率较高(96.2%),细胞丰度空间分布较均匀,在湾内和西南部外海丰度相对较高(图 2)。其它 3 种优势种菱形藻、脆杆藻(*Fragilaria* spp.)和海链藻空间分布较均匀,湾外的平均细胞丰度均高于湾内。另外,布氏双尾藻在湾外分布较广泛(出现率 53.8%),而在湾内出现站位很少。锦州湾 2012 年 5 月浮游植物多样性指数(H')平均值为 2.46,波动范围为 1.54—3.56,多样性程度高于 2011 年 8 月。

表 1 锦州湾浮游植物优势种

Table 1 Dominant phytoplankton species in Jinzhou Bay

	物种 Taxa	细胞丰度比例/% Percentage in cell abundance	出现频率/% Occurrence	优势度 Dominance
夏季 Summer	海链藻 <i>Thalassiosira</i> spp.	39.5	84.6	0.3187
	叉角藻 * <i>Ceratium furca</i>	27.2	100.0	0.2716
	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	5.1	65.4	0.0311
	菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	3.0	92.3	0.0273
	斜纹藻 <i>Pleurosigma</i> sp.	2.7	92.3	0.0246
春季 Spring	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	29.6	53.8	0.1595
	新月柱鞘藻 <i>Cylindrotheca closterium</i>	14.8	96.2	0.1427
	菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	8.7	73.1	0.0639
	脆杆藻 <i>Fragilaria</i> spp.	7.5	65.4	0.0489
	海链藻 <i>Thalassiosira</i> spp.	5.5	65.4	0.0358

* 甲藻 dinoflagellate

2.2 浮游植物生物量与细胞丰度

2011 年 8 月锦州湾调查海域叶绿素 a 变化范围为 3.27—14.55 mg/m³,平均值为 7.85 mg/m³,整体处于较高水平。从平面分布看,锦州湾北部区域叶绿素 a 浓度相对较低(<5 mg/m³),锦州湾西南部以及东南部外海区域叶绿素 a 浓度为本次调查高值区,浓度高于 10 mg/m³(图 3)。2012 年 5 月锦州湾

调查海域叶绿素 a 变化范围为 0.90—6.65 mg/m³,平均值为 3.91 mg/m³,明显低于夏季水平,该季节叶绿素 a 高值区位于锦州湾西南部外海(图 3)。

2011 年 8 月锦州湾海域表层水体浮游植物细胞丰度变化范围为 4.98—83.5 × 10³ 个/L,平均值为 41.44 × 10³ 个/L,丰度高值区分别位于锦州湾北部、西南部河口区以及锦州湾西南部外海(图 3);

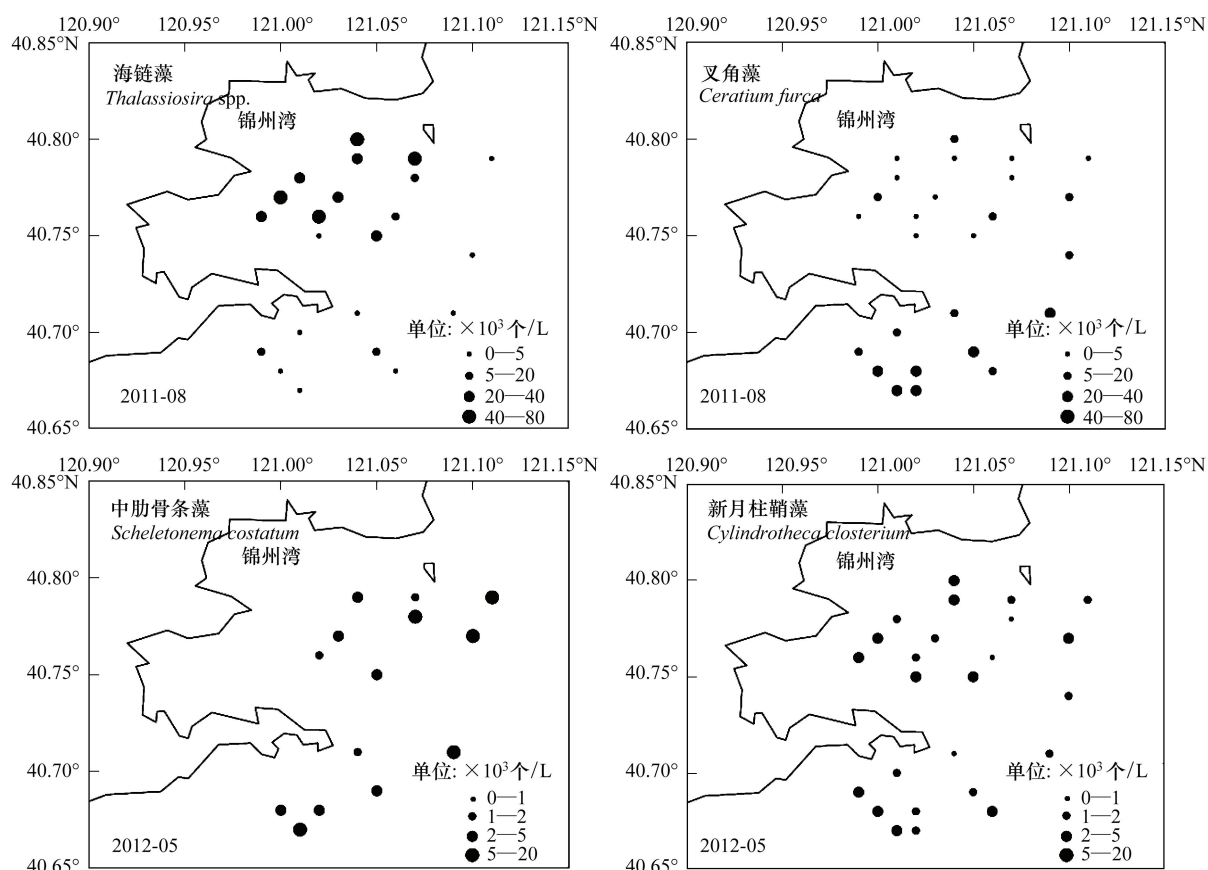


图2 锦州湾浮游植物主要优势种分布

Fig.2 Distribution of major dominant phytoplankton species in Jinzhou Bay

a.海链藻 *Thalassiosira* spp.; b.叉角藻 *Ceratium furca*; c.中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*; d.新月柱鞘藻 *Cylindrotheca closterium*

2012年5月锦州湾海域表层水体浮游植物细胞丰度变化范围为 $(3.58-36.48) \times 10^3$ 个/L, 平均值为 13.80×10^3 个/L, 高值区位于研究区西南部以及湾外东北部和西南部小范围区域(图3d)。锦州湾浮游植物生物量和细胞丰度均表现出夏季明显高于春季的趋势, 但二者空间分布存在一定差异。

锦州湾调查海域硅藻在物种数和细胞丰度上均占有优势, 尤其是春季, 细胞丰度几乎全部由硅藻所贡献。夏季, 硅藻和甲藻占浮游植物总丰度的比例分别为 58% 和 42%, 硅藻略高于甲藻, 但二者的平面分布具有明显差异, 硅藻丰度高值区位于锦州湾内, 而甲藻高值区主要位于锦州湾外西南部海域。

2.3 锦州湾浮游植物群落的冗余分析(RDA 排序)

锦州湾春、夏季主要环境因子的变化范围及其与浮游植物物种的排序图分别见表2和图4。环境因子在湾内和湾外具有明显差异, 湾内的生态环境特征为: 水深较浅, pH 较低, 营养盐浓度较高, 悬浮物含量较高, 受河流淡水及物质输入影响显著, 而湾

外水深较深, 营养盐含量和悬浮物浓度相对较低。因此水深与 pH 具有明显的正相关性, 悬浮物与营养盐浓度呈正相关性, 前者和后者在排序轴上表现出相反的变化趋势(图4), 体现了湾内外的生态环境差异。浮游植物群落受到多种环境因子的共同影响, 表现出复杂的分布趋势和相关性。

在 RDA 排序图中, 环境因子箭头的长度反映了其与浮游植物物种的相关性强弱。2011 年夏季锦州湾浮游植物对营养盐浓度以及水深和 pH 具有较强的响应关系(图4), 其中优势种叉角藻丰度高值区位于水深较深的外海区域(图2), 与营养盐表现出强烈的负相关, 海链藻与营养盐呈正相关(夹角 $< 90^\circ$), 在湾内丰度远高于湾外(图2), 中肋骨条藻和斜纹藻在湾外出现频率较高, 与水深相关性较好, 菱形藻平面分布较均匀, 与环境因子相关性较低。另外, 湾内的优势种鳍藻也与营养盐表现出较强的相关性。大部分物种与水深表现出正相关性, 说明湾外的物种丰富度较高。2012 年春季锦州湾内外生态

环境梯度差异较小,物种分布相对均匀,优势种的分布与环境因子的相关性不明显。

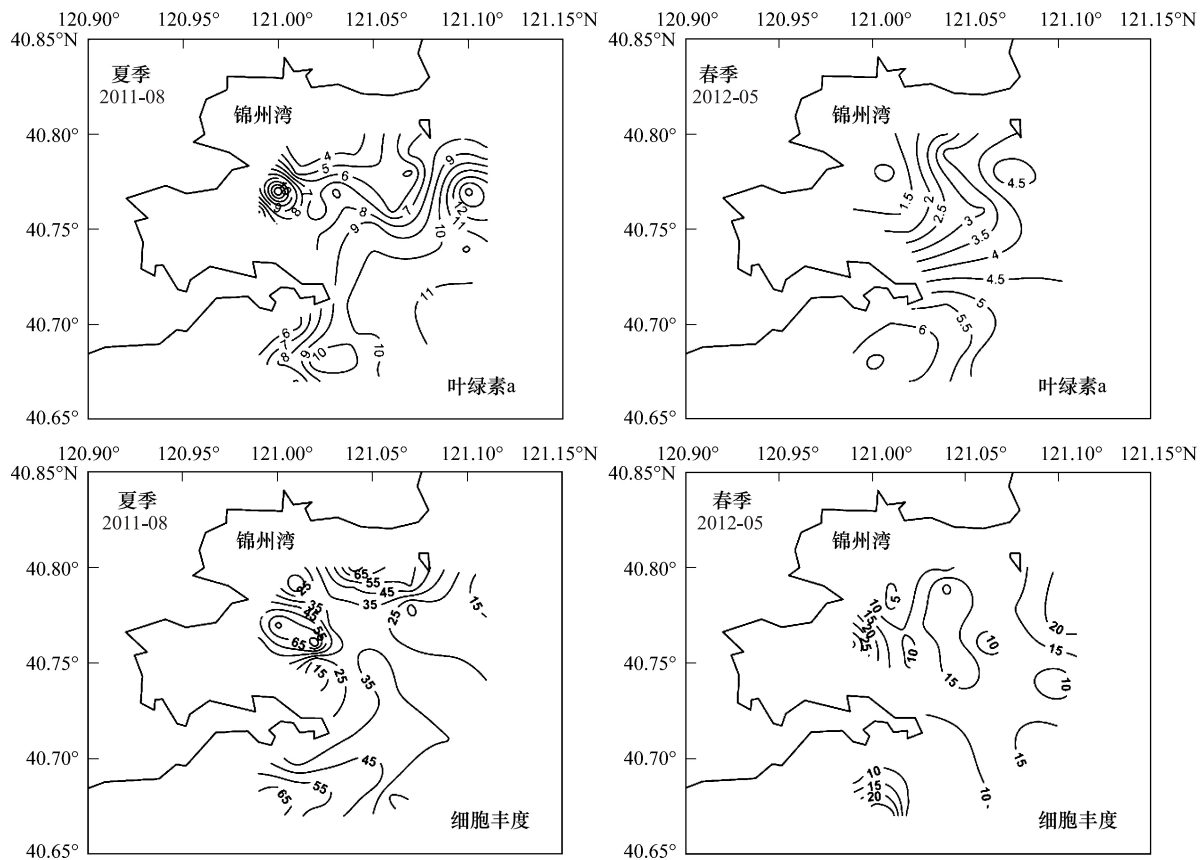


图 3 锦州湾表层水体叶绿素 a(mg/m³)与细胞丰度(×10³个/L)平面分布
Fig.3 Distribution of Chl a and phytoplankton cell abundance in Jinzhou Bay

表 2 锦州湾内、外水体主要环境因子比较

Table 2 Comparison of environmental parameters inside and outside of Jinzhou Bay									
		水深/m	T/℃	pH	COD/ (mg/L)	NO ₃ ⁻ / (μmol/L)	PO ₄ ³⁻ / (μmol/L)	SiO ₃ ²⁻ / (μmol/L)	TSS/ (mg/L)
2011 年 8 月	湾内	2.50—9.00 (4.46)	—	7.77—7.98 (7.88)	1.53—2.05 (1.75)	42.28—82.86 (56.34)	1.30—2.75 (1.93)	19.07—37.49 (23.69)	5.67—22.19 (13.45)
	湾外	6.50—21.00 (11.11)	—	7.94—8.28 (8.07)	1.57—1.89 (1.74)	22.50—36.06 (28.86)	0.44—1.27 (0.88)	8.23—17.19 (14.09)	4.29—19.37 (8.75)
2012 年 5 月	湾内	2.50—9.00 (4.46)	16.48—18.47 (17.44)	7.90—8.05 (7.97)	1.17—1.37 (1.28)	5.55—16.96 (8.54)	—	1.25—9.12 (3.22)	10.50—50.00 (27.53)
	湾外	6.50—21.00 (11.11)	15.72—16.35 (15.97)	8.00—8.11 (8.04)	1.14—1.58 (1.36)	3.58—12.24 (6.30)	—	0.66—1.64 (0.98)	6.00—22.75 (15.08)

—: 数据未采用;括号内数据为平均值

采用 Monte-Carlo 置换对浮游植物物种与环境因子相关性进行显著性检验 ($P<0.05$), 结果显示硝酸盐是影响锦州湾夏季浮游植物群落的最主要环境因子, 与物种的相关系数为 0.876, 对物种变量的解释比例为 35.9%; 温度是影响锦州湾春季浮游植物群落的最主要环境因子, 与物种的相关系数为

0.738, 对物种变量的解释比例分别为 20.8%。

3 讨论

3.1 锦州湾浮游植物优势种的历史变化与季节差异
历史上对锦州湾浮游植物群落的研究多采用网采方式(浅水 III 型浮游生物网)进行样品采集, 细胞

造成大面积的水体和沉积物污染,使生态环境遭到严重破坏。自 2005 年设立锦州湾生态监控区以来,监测结果显示锦州湾水体处于严重富营养化状态,生态系统处于不健康或亚健康状态^[8]。重金属污染严重一直是锦州湾突出的生态问题^[8,12-14],水体和沉积物中 Zn、Pb、Cu 等具有较高的生态风险^[13-14]。

浮游植物群落世代更新时间较短,对环境变化响应迅速,经常被当作敏感指标来指示水体的富营养化状态、酸度变化以及重金属等污染物的污染状况以及生态系统的健康评价^[4-6, 30-31]。水体的富营养化除了引发赤潮和底层水体低氧等生态灾害,也会对自然浮游植物群落产生重要影响,例如浮游植物生物量增加、优势种变化以及群落结构由大粒径浮游植物向小粒径浮游植物占主导的趋势转变^[32]。

锦州湾 2011—2012 年的浮游植物优势种中,多为粒径<20 μm 的微型浮游植物,如中肋骨条藻、海链藻、新月柱鞘藻、菱形藻,而且属于富营养化海域的常见种。这是由于小细胞的浮游植物具有更高的比生长速率,更倾向于速生种(r 选择物种),细胞生物的能量主要用于分裂生长,多出现于富营养型水域,而大细胞藻类则更倾向于 K 选择物种,通过保持低密度种群来适应和平衡环境的承载力^[29]。Jannus 等^[33]对富营养化严重的波罗的海浮游植物群落的优势种变化与海区营养盐浓度增加关系的长期研究表明,新月柱鞘藻和中肋骨条藻可以作为该海区比较可靠的富营养化指示物种。这种大型硅藻小型化的趋势也在营养盐浓度和比例变化显著的胶州湾海域中体现^[34]。1983 年 6—7 月锦州湾湾口附近叶绿素浓度为 1.0—2.0 mg/m^3 ,1991 年 6 月—7 月锦州湾近岸水域叶绿素平均浓度为 4.70 mg/m^3 ^[7],本文的

调查结果要明显高于上世纪 90 年代以前的水平,也可能反映了浮游植物生物量对水体富营养化状况的响应。

在 20 世纪 80 年代,沈亮夫^[16]和黄文祥等^[15]分别通过现场调查与培养实验的手段,对锦州湾的浮游植物群落结构与水体污染的相互关系进行了初步探讨。黄文祥等^[15]培养实验结果表明,不同污水浓度(来自葫芦岛锌厂排放口)会减少浮游植物生物量和物种数量,长菱形藻 *Nitzschia longissima* 是较高污水浓度培养组的优势种,可以看作锦州湾的耐污种。沈亮夫^[16]对 1980 年 4、6、8 月的锦州湾浮游植物种类组成与污染关系的研究表明,物种时空格局在很大程度上受污染物分布的控制,浮游植物高密度区分布于锦州湾南滩附近海域,中肋骨条藻、角毛藻、长菱形藻、柔弱根管藻为耐污种。在本文的研究中,中肋骨条藻在春季和夏季均为优势种,该种在有机质丰富及受污染近海海域常占有较大比例。长菱形藻在本次调查研究中的出现频率和细胞丰度均较低,没有表现出对污染程度的指示作用。另外,还有一些学者研究了硅藻对重金属污染的指示作用^[4,31],但这些研究多集中于河流中的淡水底栖物种,因此目前还无法判断锦州湾浮游植物是否对局部水体的重金属污染具有指示作用。

综上所述,锦州湾浮游植物群落对生态环境的长期变化已经显示出了一定的响应,具体表现为生物量的增加,优势种变化为由适应于富营养化环境的微型浮游植物和部分耐物种等。限于目前调查资料在时间上的不连续性,锦州湾浮游植物群落的演变趋势还需要长期可靠的监测资料来证实。

表 3 锦州湾不同季节浮游植物主要优势种历史变化

Table 3 Historical changes of major dominant phytoplankton species in Jinzhou Bay

年份 Year	月份 Month					文献出处 References
	4	5	6	7	8	
1980	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>		具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i> 、念珠直连藻 <i>Melosira moniliformis</i>		角毛藻 <i>Chaetoceros</i> spp.	[7]
1987			斯氏几内亚藻 <i>Guinardia striata</i> (83%)、圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp. (15%)			[7]

续表

年份 Year	月份 Month					文献出处 References
	4	5	6	7	8	
1991				斯氏几内亚藻 <i>Guinardia striata</i> (47%)、圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> spp. (13%)		[7]
2007			中肋骨条藻 <i>Skeletonema</i> <i>costatum</i> 、 具槽帕拉藻 <i>Paralia</i> <i>sulcata</i> (二者之和 64.5%)		扭链角毛藻 <i>C. tortissimus</i> 、 劳氏角毛藻 <i>C. lorenzianus</i> (二者之和 59.6%)	[17]
2011					海链藻 <i>Thalassiosira</i> spp. (39.5%), 叉角 藻 <i>Ceratium furca</i> (27.2%)	本研究
2012		中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i> (29.6%)、新月柱鞘 藻 <i>Cylindrotheca</i> <i>closterium</i> (14.8%)				本研究

表中列出的是优势度为前两位的优势种;括号内数值为主要优势种占总细胞丰度的比例

致谢: 国家海洋局第一海洋研究所王保栋研究员提供海水化学参数,范士亮、王洪平、徐宗军、王晓娜以及研究生刘云龙、马新、辛明、何秀萍等在现场调查以及室内样品分析工作中提供大量协助,特此致谢。

References:

- [1] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281: 237-240.
- [2] Chassot E, Bonhommeau S, Dulvy N K, Melin F, Watson R, Gascuel D, Le Pape O. Global marine primary production constrains fisheries catches. *Ecology Letters*, 2010, 13: 495-505.
- [3] Boyce D G, Lewis M R, Worm B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, 2010, 466: 591-596.
- [4] Li G C, Liu L S, Wang X, Li L. Application of diatom in river health assessment: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(9): 2617-2624.
- [5] Yin X W, Qu X D, Li Q N, Liu Y, Zhang Y, Meng W. Using periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(6): 1677-1691.
- [6] Garmendia M, Borja Á, Franco J, Revilla M. Phytoplankton composition indicators for the assessment of eutrophication in marine waters: Present state and challenges within the European directives. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 66: 7-16.
- [7] Compiling Committee of Records of China Bays. Records of China Bays 2nd Fascicule (The Bays in western part of Liaoning Province). Beijing: Ocean Press, 1997.
- [8] State Oceanic Administration. Bulletin of China's Marine Environmental Status for the years 2011—2012. Beijing, 2012-2013.
- [9] Zhao J, Mu Y X. Study on the eutrophication trend in the coastal area of Jinzhou Bay. *Environmental Science and Technology on Rural and Urban area of Liaoning Province*. 2000, 20(3): 3-5.
- [10] Wu C J, Li N, Wang Y T, Ma Q M. Application of spatial interpolation method to seawater eutrophication evaluation in Jinzhou Bay. *Journal of Water Resource and Water Engineering*. 2012, 23(6): 116-119.
- [11] State Oceanic Administration. Bulletin of China's Marine Disaster for the year 1998. Beijing, 1999.
- [12] Yan Q L, Ma D Y, Guo H, Hansen D J, Berry W J. Testing acute toxicity of contaminated sediment in Jinzhou Bay with marine amphipods. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(6): 629-634.
- [13] Wan L, Wang N B, Ding Q, Zhang Q Y, Yu B C. The distribution of heavy metal pollution in Jinzhou Bay, Bohai Sea. *Fisheries Science*, 2009, 28(12): 801-804.
- [14] Zhang Y F, Song Y G, Wang L J, Wang N B, Tian J, Ma Z Q, Song L, Wu J H. The ecological risk assessment of heavy metals in sediments in Jinzhou Bay, Liaoning Province. *Fisheries Science*, 2011, 30(3): 156-159.
- [15] Huang W X, Mu X L, Wang L M, Wang H Y. Effects of sewages on biomass and community composition of phytoplankton in Jinzhou Bay. *Marine Environmental Science*, 1982, 1(2): 67-78.
- [16] Shen L F. Primary study on the relationship between phytoplankton community structure and the water pollution in

- Jinzhou Bay. Marine Environmental Science, 1984, 3(1): 14-23.
- [17] Yang S M, Li K R, Bai J. Community structure of phytoplankton in Jinzhou Bay in spring and summer 2007. Marine Environmental Science, 2010, 29(2): 196-200.
- [18] The state administration of quality supervision, inspection and quarantine of the People's Republic of China. Specifications for oceanographic survey Part 4: Survey of chemical parameters in sea water (GB/T 12763.4—2007). Beijing: China Standards Press, 2007.
- [19] Jin D X, Chen J H, Huang K G. Marine planktonic diatoms in China. Shanghai: Shanghai Science Press, 1965.
- [20] Guo Y J, Qian S B. Flora algarum marinarum sinicarum (tomus V): Bacillariophyta No. 1 Centricae. Beijing: Science Press, 2003.
- [21] Guo H Eds. Harmful algae species atlas in China coastal waters. Beijing: Ocean Press, 2004.
- [22] Yang S M, Dong S G. Common pelagic diatom atlas in China coastal waters. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 2006.
- [23] Sun J, Liu D Y. The preliminary notion on nomenclature of common phytoplankton in China Seas waters. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(3): 271-286.
- [24] ter Braak C J F, Šmilauer P. Canoco Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows-Software for Canonical Community Ordination (ver. 4.5). Ithaca, New York: Microcomputer Power; 2002.
- [25] Sun J, Liu D Y, Wang W, Chen K B, Qin Y T. The netz-phytoplankton community of the central Bohai Sea and its adjacent waters in autumn, 1998. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8): 1644-1656.
- [26] Lin F A, Lu X W, Luo H, Ma M H. History, status and characteristics of red tide in Bohai Sea. Marine Environmental Science, 2008, 27(S2): 1-5.
- [27] Sun X X, Sun S, Wu Y L, Zhang Y S, Zheng S. Long-term changes of phytoplankton community structure in the Jiaozhou Bay. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(5): 639-646.
- [28] Baek S H, Shimode S, Han M S, Kikuchi T. Growth of dinoflagellate, *Ceratium furca* and *Ceratium fusus* in Sagami Bay, Japan: The role of nutrients. Harmful Algae, 2008, 7: 729-739.
- [29] Sun J, Liu D Y, Chen Z T, Wei T D. Growth of *Platymonas helgolandica* var. *tsingtaoensis*, *Cyclindrotheca closterium* and *Karenia mikimotoi* and their survival strategies under different N/P ratios. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2122-2126.
- [30] Li Q X, Tao J H. Application of phytoplankton community indexes in coastal eutrophication assessment. China Environmental Science, 1999, 19(6): 548-551.
- [31] Ferreira da Silva E, Almeida S F P, Nunes M L, Luís A T, Borg F, Hedlund M, Marques de Sá, Patinha C, Teixeira P, 2009. Heavy metal pollution downstream the abandoned Coval da Mó mine (Portugal) and associated effects on epilithic diatom communities. Science of the Total Environment, 2009, 407: 5620-5636.
- [32] Cederwall H, Elmgren R. Biological effects of eutrophication in the Baltic Sea, particularly in the coastal zone. Ambio, 1990, 19: 109-112.
- [33] Jaanus A, Toming K, Hällfors S, Kaljurand K, Lips I. Potential phytoplankton indicator species for monitoring Baltic coastal waters in the summer period. Hydrobiologia, 2009, 629: 157-168.
- [34] Shen Z L. Long-term changes in nutrient structure and its influences on ecology and environment in Jiaozhou Bay. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(3): 322-331.
- 参考文献:**
- [4] 李国忱, 刘录三, 汪星, 李黎. 硅藻在河流健康评价中的应用研究进展. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2617-2624.
- [5] 殷旭旺, 渠晓东, 李庆南, 刘颖, 张远, 孟伟. 基于着生藻类的太子河流域生态系统健康评价. 生态学报, 2012, 32(6): 1677-1691.
- [7] 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). 北京: 海洋出版社, 1997. 343-425.
- [8] 国家海洋局. 2011年—2012年中国海洋环境状况公报. 北京, 2012-2013.
- [9] 赵军, 穆云侠. 锦州湾近岸海域富营养化趋势的探讨. 辽宁城乡环境科技, 2000, 20(3): 3-5.
- [10] 吴翠晴, 李楠, 王亚涛, 马启敏. 空间插值方法在锦州湾海水富营养化评价中的应用. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 116-119.
- [11] 国家海洋局. 1998年中国海洋灾害公报. 北京, 1999.
- [12] 闫启仑, 马德毅, 郭皓, Hansen D J, Berry W J. 锦州湾沉积物急性毒性的海洋端足类检验. 海洋与湖沼, 1999, 30(6): 629-634.
- [13] 宛立, 王年斌, 丁倩, 张启岳, 余报楚. 锦州湾海域重金属的污染分布. 水产科学, 2009, 28(12): 801-804.
- [14] 张玉凤, 宋永刚, 王立军, 王年斌, 田金, 马志强, 宋伦, 吴金浩. 锦州湾沉积物重金属生态风险评价. 水产科学, 2011, 30(3): 156-159.
- [15] 黄文祥, 牟秀林, 王黎明, 王洪源. 污水对锦州湾浮游植物影响的初步研究. 海洋环境科学, 1982, 1(2): 67-78.
- [16] 沈亮夫. 锦州湾浮游植物群落结构与污染关系的初探. 海洋环境科学, 1984, 3(1): 14-23.
- [17] 杨世民, 李岩然, 白洁. 2007年春季夏季锦州湾浮游植物群落结构特征. 海洋环境科学, 2010, 29(2): 196-200.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 《海洋调查规范第4部分: 海水化学要素调查》(GB/T 12763.4—2007). 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [19] 金德祥, 陈金环, 黄凯歌. 中国海洋浮游硅藻类. 上海: 上海科学技术出版社, 1965.
- [20] 郭玉洁, 钱树本. 中国海藻志(第五卷): 硅藻门中心纲. 北京: 科学出版社, 2003.
- [21] 郭皓主编. 中国近海赤潮生物图谱. 北京: 海洋出版社, 2004.
- [22] 杨世民, 董树刚. 中国海域常见浮游硅藻图谱. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2006.
- [23] 孙军, 刘东艳. 中国海区常见浮游植物种名更改初步意见. 海洋与湖沼, 2002, 33(3): 271-286.
- [24] 孙军, 刘东艳, 王威, 陈凯彪, 秦玉涛. 1998年秋季渤海中部及其邻近海域的网采浮游植物群落. 生态学报, 2004, 24(8): 1644-1656.
- [25] 林凤翱, 卢兴旺, 洛昊, 马明辉. 渤海赤潮的历史、现状及其特

点. 海洋环境科学, 2008, 27(增2): 1-5.

- [26] 孙晓霞, 孙松, 吴玉霖, 张永山, 郑珊. 胶州湾网采浮游植物群落结构的长期变化. 海洋与湖沼, 2011, 42(5): 639-646.

- [28] 孙军, 刘东艳, 陈宗涛, 魏天迪. 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. 应用

生态学报, 2004, 15(11): 2122-2126.

- [29] 李清雪, 陶建华. 应用浮游植物群落结构指数评价海域富营养化. 中国环境科学, 1999, 19(6): 548-551.

- [33] 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. 海洋与湖沼, 2002, 33(3): 322-331.

附表 1 锦州湾夏季和春季浮游植物物种组成

Appendix 1 Phytoplankton species composition during summer and spring in Jinzhou Bay

物种 Taxa	夏季 Summer	春季 Spring	排序代码 Code for RDA	物种 Taxa	夏季 Summer	春季 Spring	排序代码 Code for RDA
硅藻 Bacillariophyta				近缘斜纹藻 <i>Pleurosigma affine</i>	+	+	<i>Paff</i>
长柄曲壳藻 <i>Achnanthes longipes</i>		+	<i>Alon</i>	美丽斜纹藻 <i>Pleurosigma formosum</i>	+		<i>Pfor</i>
翼茧形藻 <i>Amphiprora alata</i>		+	<i>Aala</i>	斜纹藻 <i>Pleurosigma</i> sp.	+	+	<i>Pleu</i>
双眉藻 <i>Amphora</i> sp.		+		尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	+	+	<i>Ppun</i>
派格棍形藻 <i>Bacillaria paxillifera</i>		+	<i>Bpax</i>	刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i>		+	<i>Rset</i>
辐杆藻 <i>Bacteriastrium</i> sp.	+		<i>Bact</i>	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	+	+	<i>Scos</i>
窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	+		<i>Caff</i>	双菱藻 <i>Surirella</i> sp.		+	<i>Suri</i>
卡氏角毛藻 <i>Chaetoceros castracanei</i>	+		<i>Ccas</i>	针杆藻 <i>Synedra</i> spp.		+	<i>Syne</i>
洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	+		<i>Clor</i>	伏氏海线藻 <i>Thalassionema frauenfeldii</i>	+		<i>Tfra</i>
角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.	+			菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	+		
盾卵形藻 <i>Cocconeis scutellum</i>		+	<i>Cscu</i>	海链藻 <i>Thalassiosira</i> spp.	+	+	<i>Thal</i>
盾卵形藻小形变种 <i>Cocconeis scutellum</i> var. <i>parva</i>		+	<i>Cscuw</i>	甲藻 Pyrrophyta			
辐射列圆筛藻 <i>Coscinodiscus radiatus</i>		+	<i>Crad</i>	叉角藻 <i>Ceratium furca</i>	+		<i>Cfur</i>
圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	+	+	<i>Cosc</i>	双鞭毛藻 Dinoflagellate	+		<i>Dino</i>
柔弱几内亚藻 <i>Cuinardia delicatula</i>	+		<i>Cdel</i>	渐尖鳍藻 <i>Dinophysis acuminata</i>	+		
小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	+		<i>Cycl</i>	鳍藻 <i>Dinophysis</i> sp.	+		
条纹小环藻 <i>Cyclotella striata</i>		+		膝沟藻 <i>Gonyaulax</i> sp.	+		
新月柱鞘藻 <i>Cylindrotheca closterium</i>	+	+	<i>Cclo</i>	底刺膝沟藻 <i>Gonyaulax spinifera</i>	+		
布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i>	+	+	<i>Dbri</i>	春膝沟藻 <i>Gonyodolax verior</i>	+		<i>Gver</i>
脆杆藻 <i>Fragilaria</i> spp.		+	<i>Frag</i>	链状裸甲藻 <i>Gymnodinium catenatum</i>	+		<i>Gcat</i>
柔弱几内亚藻 <i>Guinardia delicatula</i>		+		米氏凯伦藻 <i>Karenia mikimotoi</i>	+		<i>Kmik</i>
簇生布纹藻弧形变种 <i>Gyrosigma fasciola</i> var. <i>arcuata</i>		+	<i>Gfasv</i>	红色赤潮藻 <i>Akashiwo sanguinea</i>	+		
舟形藻 <i>Navicula</i> spp.		+	<i>Navi</i>	裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp.	+		<i>Gymn</i>
似船舟形藻 <i>Navicula subcarinata</i>		+		螺旋环沟藻 <i>Gyrodinium spirale</i>	+		<i>Gspi</i>
尖锥菱形藻 <i>Nitzschia acuminata</i>		+	<i>Nacu</i>	环沟藻 <i>Gyrodinium</i> spp.	+		
杂菱形藻 <i>Nitzschia hybrida</i>		+	<i>Nhyb</i>	微小原甲藻 <i>Prorocentrum minimum</i>	+		
长菱形藻 <i>Nitzschia longissima</i>	+	+	<i>Nlon</i>	扁平原多甲藻 <i>Protoperidinium depressum</i>	+		
弯端长菱形藻 <i>Nitzschia longissima</i> var. <i>reversa</i>		+		原多甲藻 <i>Protoperidinium</i> sp.	+		<i>Prot</i>
洛氏菱形藻 <i>Nitzschia lorenziana</i>		+	<i>Nlor</i>	金藻 Chrysophyta			
钝头菱形藻刀形变种 <i>Nitzschia obtusa</i> var. <i>scalpelliformis</i>		+		小等刺硅鞭藻 <i>Dictyocha fibula</i>	+	+	<i>Dfib</i>
菱形藻 <i>Nitzschia</i> spp.	+	+	<i>Nitz</i>	隐藻 Cryptophyta			
具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	+	+	<i>Psul</i>	隐藻 Cryptomonads	+	+	<i>Cryp</i>
羽纹藻 <i>Pinnularia</i> spp.	+	+	<i>Pinn</i>	总种数 Total species number	62		
端尖曲舟藻 <i>Pleurosigma acutum</i>		+					

+代表物种出现, 空格代表未出现