

日照近岸海域冬夏季网采浮游植物群落结构及其与环境因子的关系

王尽文, 黄娟, 姜万钧, 纪莹璐, 王波, 张建柏, 林森

Features of Net-phytoplankton communities and their environmental factors in the coastal waters of Rizhao in winter and summer

WANG Jinwen, HUANG Juan, JIANG Wanjun, JI Yinglu, WANG Bo, ZHANG Jianbai, LIN Sen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20201003196>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[杭州湾人工湖夏季浮游植物群落演替与环境因子的关系](#)

Relationship between summer phytoplankton community succession and environment factors in the artificial lagoon of Hangzhou bay
上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 757 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200202922>

[长江口北支贝类放流滩涂区潮下带水域浮游植物分析](#)

Analysis of phytoplankton in the subtidal waters of the north branch of the Yangtze River Estuary
上海海洋大学学报. 2019, 28(5): 699 <https://doi.org/10.12024/jsou.20181002425>

[上海市环城绿带休憩型河道浮游植物群落结构特征](#)

Structural characteristics of phytoplankton community in suburb rivers for leisure located in Green belt around City of Shanghai, China
上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 734 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200302960>

[三沙湾春季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系](#)

Community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors of Sansha Bay in spring
上海海洋大学学报. 2018, 27(4): 522 <https://doi.org/10.12024/jsou.20170802123>

[长江口浮游植物群落结构的特征](#)

Ecological features of phytoplankton community in the Yangtze River Estuary
上海海洋大学学报. 2019, 28(5): 689 <https://doi.org/10.12024/jsou.20181002414>

日照近岸海域冬夏季网采浮游植物群落结构及其与环境因子的关系

王尽文^{1,2}, 黄娟^{1,2}, 姜万钧^{1,2}, 纪莹璐^{1,2}, 王波³, 张建柏⁴, 林森^{1,2}

(1. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266061; 3. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266071; 4. 烟台市海洋经济研究院, 山东 烟台 264004)

摘要: 为了解日照近岸海域浮游植物的群落结构及其环境影响因子, 于 2016 年 2 月和 8 月对该海域 18 个站位进行了浮游植物种类和优势种组成、丰度、群落多样性及其环境因子调查分析, 利用 CLUSTER 聚类分析、MDS 排序和 Pearson 相关分析探讨该海域浮游植物群落结构和环境因子的关系。调查海域共鉴定浮游植物 3 门 41 属 92 种, 其中, 硅藻门(Bacillariophyta) 31 属 73 种, 甲藻门(Pyrophyta) 9 属 18 种, 金藻门(Chrysophyta) 1 属 1 种。冬季主要优势种为柔弱几内亚藻(*Guinardia delicatula*), 夏季主要优势种为劳氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*) 和深环沟角毛藻(*Chaetoceros constrictus*)。冬季浮游植物丰度为 $2.20 \times 10^6 \sim 6.12 \times 10^7$ cells/m³, 夏季丰度为 $3.75 \times 10^4 \sim 5.70 \times 10^6$ cells/m³。Pearson 相关分析表明影响浮游植物丰度的环境因子为盐度、水深、溶解氧(DO)、硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、总氮和重金属中的锌。在日照近岸海域, 相比 Shannon-Wiener 多样性指数(H') 分析方法, 多元统计分析能更好地反映该海域的水环境质量状况。

关键词: 浮游植物; 群落结构; 环境因子; 多变量分析; 聚类分析

中图分类号: Q 145; X 524 **文献标志码:** A

浮游植物是海洋中最重要的初级生产者, 地球上近 50% 的初级生产量由其提供^[1]。它们生长迅速, 分布范围广、对环境变化反应敏感。其丰度和种类会随着周围海域环境的变化迅速发生改变^[2], 因此浮游植物常被作为海洋生态系统的生物指示种^[3]。日照近岸海域位于黄海中部, 其近岸海域海洋生物资源十分丰富^[4]。我国对于黄海浮游植物的研究自 20 世纪 60 年代至今多有报道^[5-7]。这些研究对黄海海域浮游植物的数量、种类组成、季节变化作了详细的分析和研究, 但对浮游植物与环境因子之间的关系研究较少, 或仅限于温度、盐度和营养盐等。本文利用 2016 年冬夏两季的浮游植物和水质调查资料, 对日照近岸海域的浮游植物群落结构和 20 个环境因子进行初步分析, 以期找出影响日照近岸海域浮游植物群落的关键环境因子, 进而为研究该海域的生态系统状况和环境治理提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域设置在日照市近岸海域(119°35'E ~ 119°45'E, 35°20'N ~ 35°35'N), 该片海域于 2011 年被国家批准为第 1 批国家级海洋公园。为获取该海域全面、系统、综合的基础资料, 于 2016 年 2 月 25 日—26 日和 7 月 30 日—8 月 2 日在该海域进行了浮游植物和水质调查, 从近岸海域向远岸海域布设 A、B、C、D、E、F 等 6 个断面 18 个站位。见图 1。

1.2 样品采集和分析

浮游植物样品使用浅水 III 型浮游生物网(网长 140 cm, 网口内径 37 cm, 网口面积 0.1 m², 筛绢规格 JP80, 孔径近似值 0.077 mm) 自离底 2 m 至表层垂直拖曳。样品用缓冲甲醛溶液(40% 商用甲醛加入同体积蒸馏水, 1 dm³ 20% 的甲醛溶

收稿日期: 2020-10-15 修回日期: 2021-01-12

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1402103, 2017YFC1405306); 山东省海洋重点实验室开放基金项目(202002)

作者简介: 王尽文(1980—), 男, 高级工程师, 研究方向为海洋环境监测与评价。E-mail: 1109429515@qq.com

通信作者: 王波, E-mail: ousun@fio.org.cn

液加 100 g 六次甲基四胺)固定后带回实验室用浓缩计数法进行种类鉴定并计数。水温、水深和盐度采用 DS5X 型多参数水质仪现场测定。水环境要素中油类用 QCC-1 型采水器采集,其他水环境要素均用击开式采水器采集。当水深 ≥ 15 m 时,取表、中、底层;当水深在 5 m 和 15 m 之间时,取表、底层;当水深 ≤ 5 m 时,只取表层;油类和重金属只取表层样品。其分析方法按《海洋监测规范》(GB 17378—2007)执行。

1.3 评价方法

1.3.1 生态优势度

浮游植物群落生态优势度采用以下公式:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (1)$$

式中: Y 为优势度; N 为所有种的个体总数; n_i 为第 i 种的个体数; f_i 为第 i 种的出现频率,即该种出现的站位数与总站位数之比的百分数。将 $Y \geq 0.02$ 的物种定为优势种^[8]。

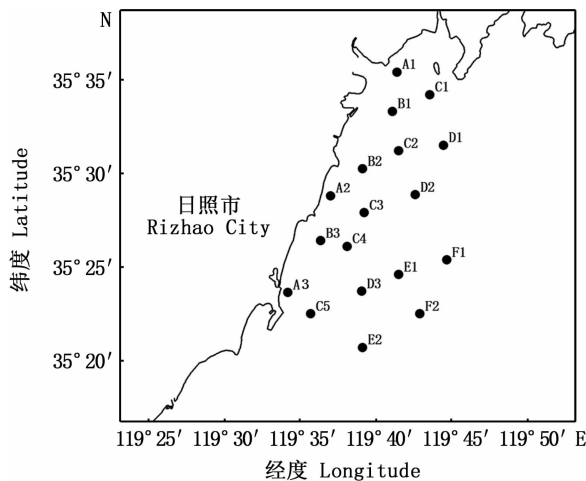


图 1 浮游植物调查站位图

Fig. 1 Sampling stations of phytoplankton

1.3.2 生物多样性

利用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')^[9]、Margalef 的种类丰富度指数 (D)^[10] 和 Pielou 均匀度指数 (J)^[11] 来分析群落生物多样性。

$$H' = \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

$$D = \frac{S-1}{\log_2 N} \quad (3)$$

$$J = \frac{H'}{H_{\max}} \quad (4)$$

式(2)~式(4)中: S 为浮游植物的种类总数; N

为浮游植物总个数; P_i 为第 i 种浮游植物占总个数的比例, H_{\max} 为 $\log_2 S$ 。

1.3.3 群落结构及环境因子分析

用 Primer 5.0 中的 CLUSTER 和 MDS 模块对浮游植物群落进行多元变量统计分析,在 CLUSTER 聚类分析时为减少机会种的影响,去除丰度过小的种类^[12]。用 SPSS 25.0 对浮游植物丰度与环境因子做 Pearson 相关分析,在此之前用 SPSS 25.0 对水质环境因子做夏皮洛-威尔克正态性检测。若数据呈正态分布,则利用单因素 ANOVA 检验(显著水平为 $P < 0.05$)分析水质环境因子季节间有无显著差异;若数据不符合正态性,则利用单样本 K-S 检验(显著水平为 $P < 0.05$)分析水质环境因子季节间有无显著差异。

2 结果

2.1 环境因子特征

本文所测水质环境因子共 20 项。其中冬季水温 3.72 ~ 4.86 °C, 盐度 30.77 ~ 31.60, pH 7.98 ~ 8.11, 溶解氧 (DO) 质量浓度为 7.67 ~ 8.00 mg/L, 水深 3.5 ~ 23.4 m, 化学需氧量 (COD) 质量浓度为 0.75 ~ 1.69 mg/L, 油类质量浓度为 0.012 ~ 0.082 mg/L。夏季水温 25.39 ~ 28.99 °C, 盐度 30.69 ~ 31.40, pH 7.84 ~ 8.10, 溶解氧质量浓度为 6.72 ~ 8.13 mg/L, 水深 5.7 ~ 23.9 m, 化学需氧量质量浓度为 0.87 ~ 8.34 mg/L, 油类质量浓度为 0.016 ~ 0.099 mg/L。冬夏两季总悬浮物和营养盐水质监测结果见表 1、表 2。从分布趋势看 COD、硝酸盐 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、总无机磷 (DIP)、和重金属中镉 (Cd)、铜 (Cu)、锌 (Zn)、汞 (Hg) 均呈由近岸向远海 (A 断面向 F 断面) 逐渐降低的趋势。盐度、DO 分布趋势与之相反。其他环境因子分布趋势不明显。夏皮洛-威尔克正态性检测显示数据呈正态分布的环境因子有水深、盐度、pH、铵盐 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、油类和重金属中的铅 (Pb)、汞 (Hg)。单因素 ANOVA 检验和单样本 K-S 检验显示所测环境因子冬夏两季有显著差异的为水温、pH、COD、DO、总无机氮 (DIN)、总铬 (Cr)、砷 (As)。

2.2 种类和优势种组成

冬夏两季调查共鉴定浮游植物 3 门 41 属 92 种: 硅藻门 (Bacillariophyta) 31 属 73 种, 甲藻门 (Pyrrophyta) 9 属 18 种, 金藻门 (Chrysophyta) 1

属 1 种,依次占总种数的 79.35%、19.57% 和 1.09%。从属级上看:角毛藻属 (*Chaetoceros*) 出现最多,为 21 种,占总种数的 22.83%;海链藻属 (*Thalassiosira*) 和角藻属 (*Ceratium*) 均出现 6 种,各占 6.52%;根管藻属 (*Rhizosolenia*) 和原多甲

藻属 (*Protoperdinium*) 均出现 5 种,各占 5.44%;其他 36 属出现种类数均小于 5 种。从季节上看,冬季出现 2 门 29 属 57 种(硅藻门 24 属 51 种,甲藻门 5 属 6 种),夏季 3 门 31 属 70 种(硅藻门 24 属 53 种,甲藻门 7 属 16 种,金藻门 1 属 1 种)。

表 1 日照近岸海域冬季总悬浮物、营养盐和重金属监测结果
Tab. 1 Monitoring results of total suspended solids, nutrients and heavy metals in the coastal waters of Rizhao in winter

站位 Stations	TSS/ (mg/L)	NO ₂ -N/ (mg/L)	NO ₃ -N/ (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg/L)	DIN/ (mg/L)	DIP/ (mg/L)	Cu/ (μg/L)	Pb/ (μg/L)	Cd/ (μg/L)	Cr/ (μg/L)	Zn/ (μg/L)	As/ (μg/L)	Hg/ (μg/L)
A1	26.4	0.001	0.078	0.019	0.098	0.002	7.943	0.002	0.78	5.571	5.45	0.87	0.027
A2	21.6	0.004	0.065	0.049	0.117	0.028	2.514	2.857	0.84	0.143	1.05	0.36	0.026
A3	28.8	0.008	0.242	0.038	0.288	0.002	2.514	0.286	0.42	3.000	1.75	0.36	0.021
平均 Mean	25.6	0.004 3	0.128 3	0.035 3	0.167 7	0.010 7	4.323 7	1.048 3	0.68	2.905	2.75	0.53	0.025
B1	22.6	0.002	0.025	0.034	0.060	0.002	8.229	1.429	0.25	4.429	6.85	0.26	0.054
B2	28.6	0.007	0.048	0.022	0.077	0.001	6.229	0.002	0.32	3.571	4.25	0.54	0.022
B3	26.4	0.007	0.087	0.011	0.105	0.001	7.086	4.571	0.41	0.143	6.32	0.25	0.025
平均 Mean	25.9	0.005	0.053	0.022	0.081	0.001	7.181	2.001	0.33	2.714	5.81	0.35	0.034
C1	23.0	0.002	0.032	0.031	0.065	0.001	3.657	-	0.21	6.143	1.05	0.38	0.010
C2	20.0	0.002	0.103	0.033	0.138	0.005	6.229	-	0.20	2.429	2.63	0.68	0.025
C3	29.6	0.002	0.102	0.023	0.127	0.006	0.686	0.002	0.21	0.010	0.85	0.10	0.035
C4	31.8	0.001	0.060	0.021	0.082	0.003	3.943	3.714	0.32	4.143	2.52	0.68	0.026
C5	24.0	0.002	0.114	0.023	0.139	0.004	9.850	-	0.21	4.429	1.52	1.68	0.027
平均 Mean	25.68	0.002	0.082	0.026	0.110	0.004	4.873	1.858	0.23	3.431	1.71	0.70	0.025
D1	19.2	0.001	0.096	0.024	0.121	0.019	7.371	4.571	0.21	7.571	5.62	0.98	0.011
D2	18.4	0.002	0.045	0.019	0.066	0.003	1.371	5.143	0.35	1.000	0.68	0.36	0.007
D3	26.2	0.005	0.014	0.024	0.043	0.008	0.514	2.000	0.35	0.429	0.25	0.36	0.003
平均 Mean	21.3	0.003	0.052	0.022	0.077	0.010	3.085	3.905	0.30	3.000	2.18	0.57	0.007
E1	54.2	0.005	0.058	0.039	0.102	0.005	0.800	2.286	0.25	0.010	0.21	0.36	0.004
E2	29.6	0.005	0.074	0.038	0.117	0.002	1.943	4.571	0.10	4.714	0.35	0.59	0.001
平均 Mean	41.9	0.005	0.066	0.039	0.110	0.004	1.372	3.429	0.18	2.360	0.28	0.48	0.003
F1	12.6	0.004	0.079	0.042	0.125	0.001	0.229	0.286	0.21	6.429	0.21	0.36	0.009
F2	24.2	0.004	0.069	0.020	0.093	0.007	0.514	0.002	0.21	0.010	0.36	0.21	0.009
平均 Mean	18.4	0.004	0.074	0.031	0.109	0.004	0.372	0.144	0.21	3.220	0.29	0.29	0.009

冬季 A 到 F 断面出现种类数 A 断面 (39 种) > C 断面 (36 种) > B 断面 (29 种) > F 断面 (25 种) > E 断面 (24 种) > D 断面 (22 种); 夏季 A 到 F 断面出现种类数 C 断面 (41 种) > A 断面 (38 种) = D 断面 (38 种) > B 断面 (34 种) > F 断面 (32 种) > E 断面 (27 种)。从平面分布来看,冬夏两季出现种类数大致呈从近岸海域向远岸海域逐渐降低的趋势。

冬夏两季调查共出现优势种 11 种(表 2),其中,冬季 2 种,夏季 9 种。两季优势种更替率为 100.00%。在冬季航次中,柔弱几内亚藻 (*Guinardia delicatula*) 出现频率为 1.00,优势度达 0.80,在冬季航次中占据绝对优势;夏季航次中,除劳氏角毛藻 (*Chaetoceros lorenzianus*) 和深环沟角毛藻 (*Chaetoceros constrictus*) 优势度相对较高外,其他 7 个优势种优势度均小于 0.1(表 3)。

表 2 日照近岸海域夏季总悬浮物、营养盐和重金属监测结果
Tab. 2 Monitoring results of total suspended solids, nutrients and heavy metals in the coastal waters of Rizhao in summer

站位 Stations	TSS/ (mg/L)	NO ₂ -N/ (mg/L)	NO ₃ -N/ (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg/L)	DIN/ (mg/L)	DIP/ (mg/L)	Cu/ (μg/L)	Pb/ (μg/L)	Cd/ (μg/L)	Cr/ (μg/L)	Zn/ (μg/L)	As/ (μg/L)	Hg/ (μg/L)
A1	11.3	0.006	0.037	0.016	0.059	0.007	5.855	3.933	0.119	1.35	6.65	5.24	0.042
A2	10.3	0.005	0.108	0.023	0.136	0.013	0.400	3.489	0.647	0.35	2.36	2.14	0.025
A3	11.8	0.001	0.029	0.015	0.046	0.009	4.036	2.378	0.504	0.73	5.32	3.24	0.042
平均 Mean	11.1	0.004	0.058	0.018	0.080	0.010	3.430	3.267	0.423	0.81	4.78	3.54	0.036
B1	8.5	0.002	0.135	0.028	0.165	0.021	5.309	1.933	0.661	1.73	0.45	2.09	0.021
B2	9.8	0.003	0.069	0.016	0.089	0.015	4.582	0.156	0.933	0.48	0.65	2.11	0.031
B3	6.3	0.004	0.085	0.020	0.108	0.012	1.127	1.933	1.661	0.60	2.65	1.68	0.021
平均 Mean	8.2	0.003	0.096	0.021	0.121	0.016	3.673	1.341	1.085	0.93	1.25	1.96	0.024
C1	15.8	0.007	0.190	0.037	0.234	0.010	0.036	0.289	0.761	0.48	4.15	3.42	0.013
C2	9.5	0.003	0.089	0.019	0.111	0.011	3.491	3.711	0.961	2.10	2.34	2.82	0.036
C3	13.3	0.003	0.106	0.022	0.132	0.013	1.491	1.267	1.161	0.23	3.62	2.14	0.005
C4	10.5	0.003	0.093	0.020	0.116	0.009	2.036	2.378	0.319	2.48	1.25	3.98	0.008
C5	16.8	0.001	0.065	0.027	0.094	0.024	16.036	1.489	0.319	12.73	0.39	3.25	0.005
平均 Mean	13.2	0.003	0.109	0.025	0.137	0.013	4.618	1.827	0.704	3.60	2.35	3.12	0.013
D1	10.8	0.002	0.129	0.030	0.161	0.003	3.127	2.156	1.047	0.42	0.25	3.16	0.037
D2	16.8	0.001	0.108	0.022	0.131	0.002	3.127	2.156	1.304	0.22	1.75	2.67	0.021
D3	16.0	0.002	0.086	0.033	0.121	0.005	0.030	1.267	0.290	0.25	1.95	3.71	0.049
平均 Mean	14.5	0.002	0.108	0.028	0.138	0.003	2.095	1.860	0.880	0.29	1.32	3.18	0.036
E1	19.5	0.001	0.074	0.016	0.091	0.003	2.400	2.156	1.690	1.65	1.03	2.28	0.025
E2	18.3	0.001	0.100	0.018	0.119	0.004	0.050	2.822	1.061	0.54	0.36	2.88	0.021
平均 Mean	18.9	0.001	0.087	0.017	0.105	0.004	1.225	2.489	1.376	1.10	0.70	2.58	0.023
F1	12.0	0.004	0.090	0.037	0.131	0.010	8.400	1.044	1.661	0.85	0.45	3.42	0.020
F2	14.8	0.002	0.080	0.037	0.118	0.003	0.030	3.489	1.390	1.62	0.65	11.00	0.042
平均 Mean	13.4	0.003	0.085	0.037	0.125	0.007	4.215	2.267	1.526	1.24	0.55	7.21	0.031

表 3 日照近岸海域浮游植物优势种类及其优势度

Tab. 3 Dominant species and its dominances of phytoplankton in the coastal waters of Rizhao

季节 Seasons	种名 Species	属 Genus	出现频率 Frequency	优势度 Dominance
冬季 Winter	柔弱几内亚藻 <i>Guinardia delicatula</i>	几内亚藻属 <i>Guinardia</i>	1.00	0.80
	鼓胀海链藻 <i>Thalassiosira gravida</i>	海链藻属 <i>Thalassiosira</i>	0.90	0.05
夏季 Summer	劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	角毛藻属 <i>Chaetoceros</i>	1.00	0.17
	深环沟角毛藻 <i>Chaetoceros constrictus</i>	角毛藻属 <i>Chaetoceros</i>	1.00	0.13
	窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	角毛藻属 <i>Chaetoceros</i>	0.90	0.08
	三角角藻 <i>Ceratium tripos</i>	角藻属 <i>Ceratium</i>	1.00	0.04
	扭链角毛藻 <i>Chaetoceros tortissimus</i>	角毛藻属 <i>Chaetoceros</i>	0.44	0.04
	尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	伪菱形藻属 <i>Pseudo-nitzschia</i>	0.44	0.03
	刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i>	根管藻属 <i>Rhizosolenia</i>	0.90	0.03
	卡氏角毛藻 <i>Chaetoceros castracanei</i>	角毛藻属 <i>Chaetoceros</i>	0.78	0.03
	冰河拟星杆藻 <i>Asterionellopsis glacialis</i>	拟星杆藻属 <i>Asterionellopsis</i>	0.33	0.02

2.3 丰度及平面分布

冬夏两季调查日照近岸海域浮游植物丰度范围为 $1.71 \times 10^5 \sim 6.12 \times 10^7$ cells/m³, 均值为 1.37×10^7 cells/m³ (图 2)。浮游植物丰度季节变化较大: 冬季丰度范围为 $2.20 \times 10^6 \sim 6.12 \times 10^7$ cells/m³, 平均值为 2.61×10^7 cells/m³, 这主要因为冬季调查出现了大量的柔弱几内亚藻, 其丰度高达 2.08×10^7 cells/m³。夏季丰度范围为 $1.71 \times 10^5 \sim 5.70 \times 10^6$ cells/m³, 平均值为 1.22×10^6 cells/m³。从平面分布趋势来看: 冬季 C 断面

> B 断面 > A 断面 > E 断面 > D 断面 > F 断面; 最高值出现在调查海域中部近岸海域的 A2 号站, 最低值出现在远岸的 D1 号站; 高值区出现在 A 断面、B 断面和 C 断面。夏季 A 断面 > C 断面 > B 断面 > D 断面 > F 断面 > E 断面; 最高值出现在调查海域北部近岸海域的 A1 号站, 最低值出现在中部近岸海域的 B2 号站; 高值区出现在调查海域北部靠近吉利河口海域。冬夏两季浮游植物丰度分布总体上呈从近岸海域向远岸海域逐渐降低的趋势。

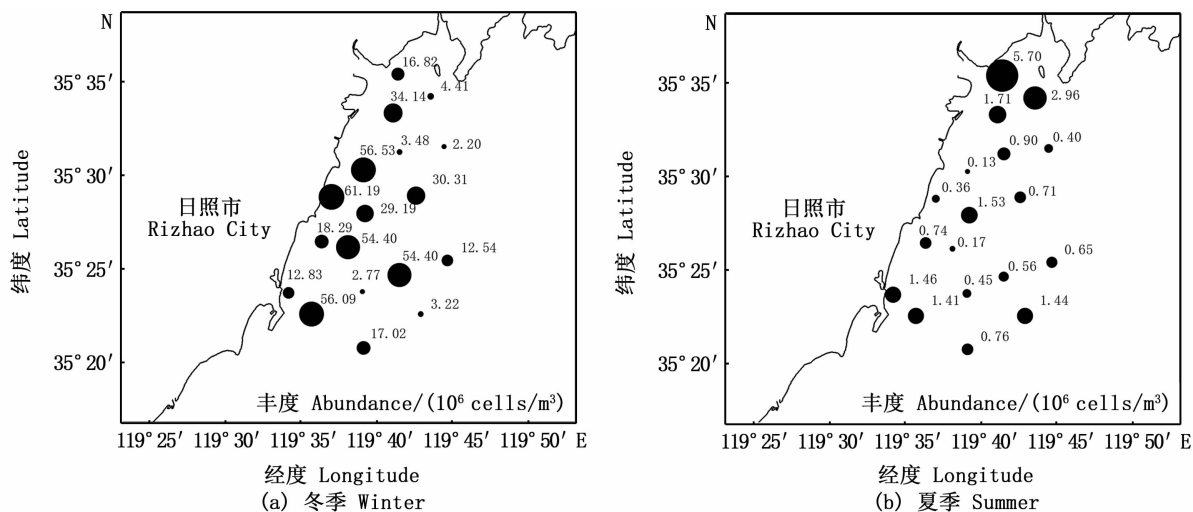


图 2 日照近岸海域浮游植物丰度平面分布

Fig. 2 Abundance distribution of phytoplankton in the coastal waters of Rizhao

2.4 群落多样性

冬夏两季调查日照近岸海域浮游植物生物多样性指数 (H') 为 0.48 ~ 4.08, 平均值为 2.20 (图 3)。日照近岸海域冬季浮游植物生物多样性指数明显低于夏季, 变化范围为 0.48 ~ 1.45, 平均值为 0.97; 高值区出现在调查海域南部, 最高值出现在南部远岸的 F1 号站, 最低值出现在北部近岸的 B1 号站, 整体呈南高北低的趋势; 夏季多样性指数 (H') 平面分布比较均匀, 远岸稍高于近岸海域。两季调查均匀度指数 (J) 为 0.11 ~

0.88, 平均值为 0.50 (图 4)。冬夏两季差别较大: 冬季均匀度指数整体处在一个较低的水平, 其中 B 断面 3 个站点均匀度指数平均值仅为 0.17, 最高的 F 断面平均值为 0.27; 夏季均匀度指数平面分布较均匀, 为 0.67 ~ 0.88, 平均值为 0.77。两季调查丰富度指数 (D) 为 1.13 ~ 4.52, 平均为 2.53 (图 5)。和多样性指数的平面分布相似, 冬季明显低于夏季, 冬季呈南北高中间低趋势分布, 平均值为 1.66; 夏季平均值为 3.40, 平面分布和冬季相反, 呈中间高南北低的趋势。

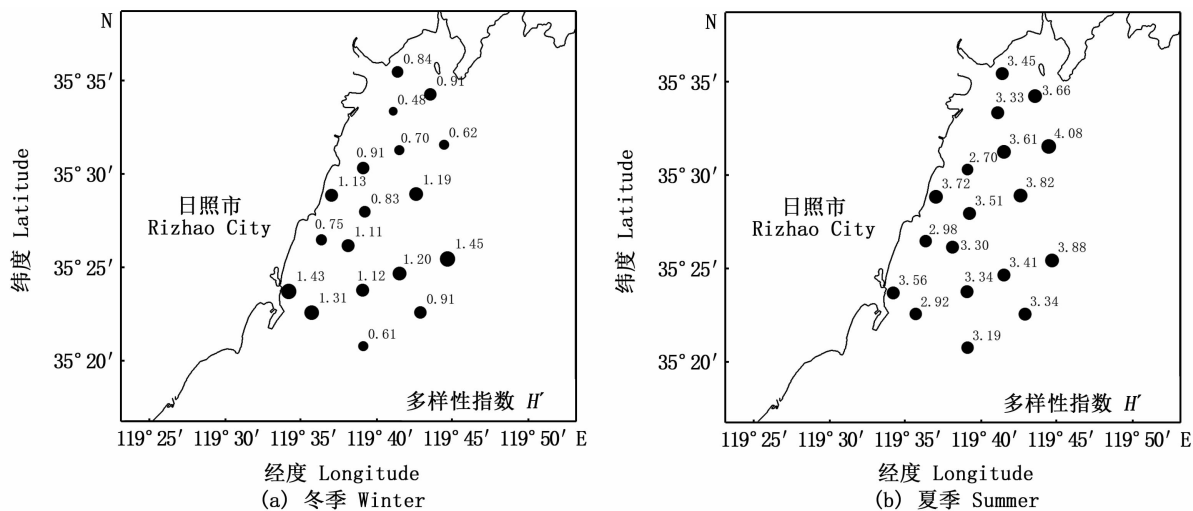


图 3 日照近岸海域浮游植物多样性指数 (H') 分布

Fig. 3 Distribution of Shannon diversity index (H') in the coastal waters of Rizhao

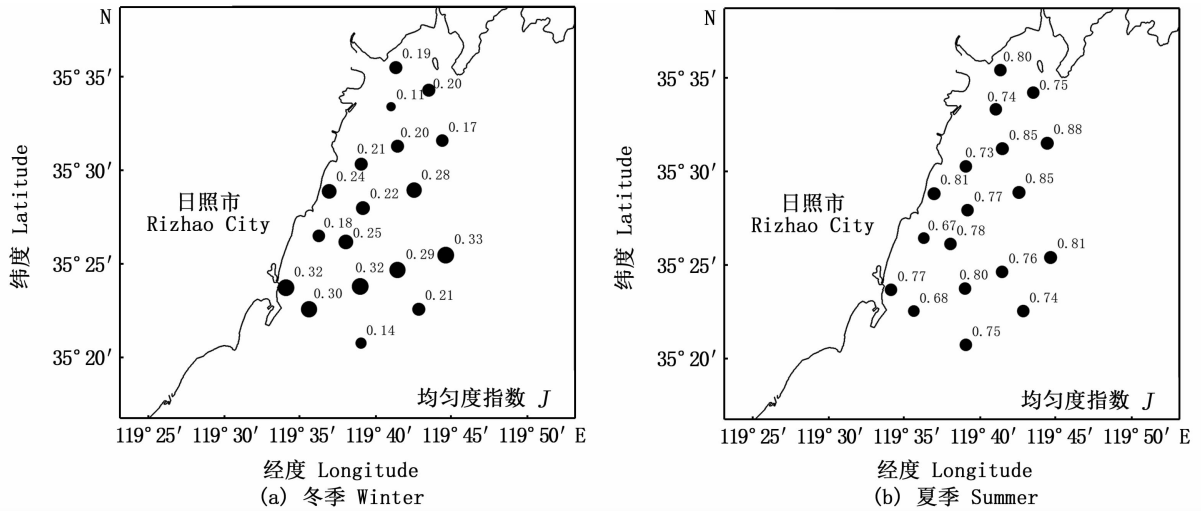


图 4 日照近岸海域浮游植物均匀度指数(J)分布

Fig. 4 The distribution of Pielou's evenness index (J) in the coastal waters of Rizhao

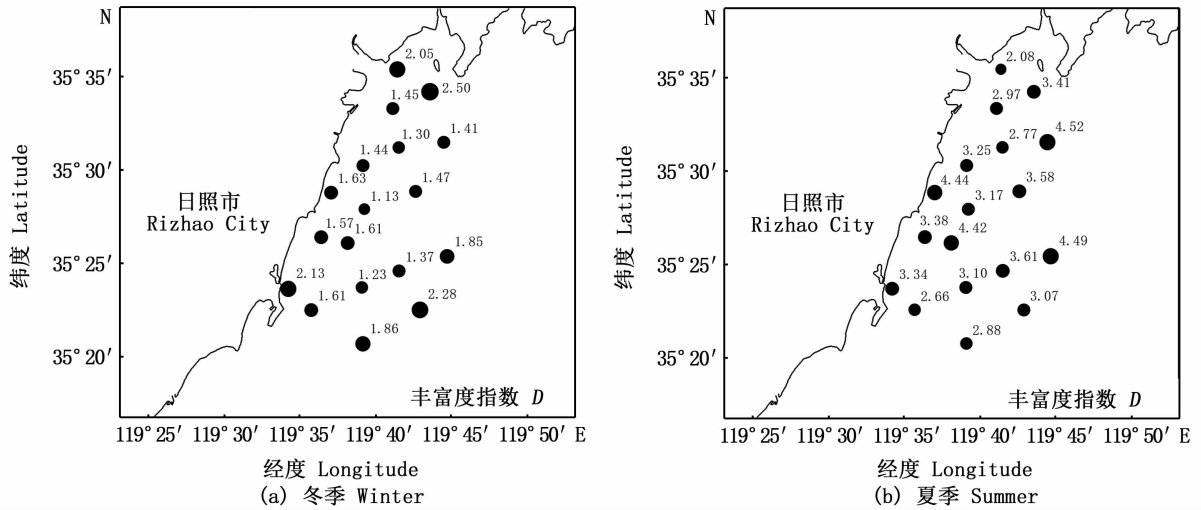


图 5 日照近岸海域浮游植物丰富度指数(D)分布

Fig. 5 The distribution of Margalef's species richness index(D) in the coastal waters of Rizhao

2.5 聚类分析

当相似性尺度为 55% (图 6) 时,冬季 18 个调查站位划分为 3 个群落,其中:群落 II 仅包含 A2 一个站位;群落 I 包含 C1、C2、D1、D3、F2 共 5 个站位;群落 III 包含 A1、A3、B1、B2、B3、C3、C4、C5、D2、E1、E2、F1 共 12 个站位。当相似性尺度为 45% (图 6) 时,夏季 18 个调查站位划分为 3 个群落,其中:群落 I 包含 B2、C4 两个站位;群落 II

包含 A3、B3、C5、D3、E1、E2、F1、F2 共 8 个站位;群落 III 包含剩余 8 个站位。图 7 是以 Bray-Curtis 相似性测量为基础的调查海域 18 个站位浮游植物组成相似 MDS 图。在压力系数为 0.08 和 0.11 时,冬夏两季 MDS 排序和群落聚类分析结果一致。在 MDS 排序图中两个生物群落结构越相似,它们之间的距离越近,因此和聚类分析相比 MDS 排序能更直观地反映不同站位之间的相似性。

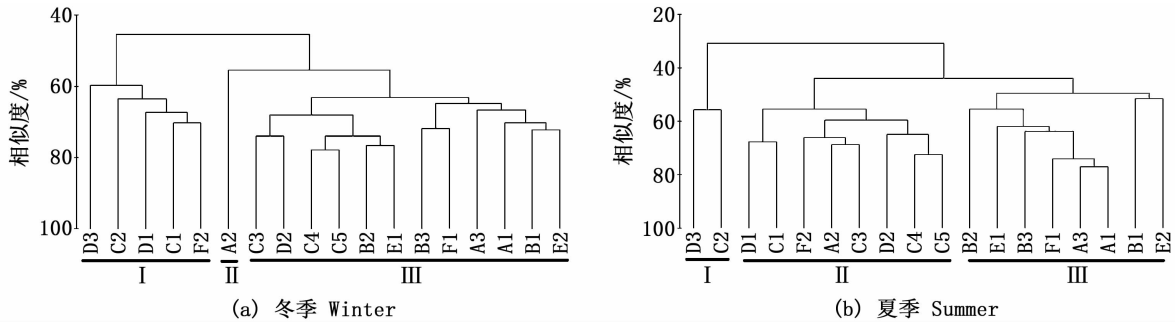


图 6 日照近岸海域浮游植物聚类分析图

Fig. 6 Dendrogram for the similarity of phytoplankton in the coastal waters of Rizhao

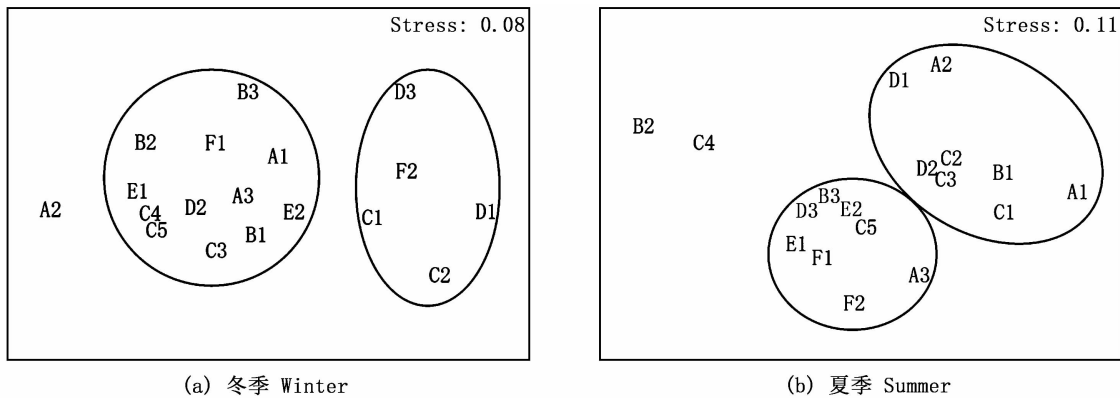


图 7 日照近岸海域浮游植物群落 MDS 分析

Fig. 7 MDS for the similarity of phytoplankton in the coastal waters of Rizhao

2.6 丰度与环境因子的 Pearson 相关分析

浮游植物丰度与环境因子的关系采用 SPSS 25.0 中的 Pearson 相关分析模块。表 4 为冬夏季浮游植物细胞丰度与环境因子 Pearson 相关性分析结果,冬季日照近岸海域浮游植物的丰度和盐度($r = -0.476, P = 0.046$)存在显著的负相关关系($P < 0.05$)。夏季日照近岸海域浮游植物的丰

度和水深($r = -0.483, P = 0.043$)、DO($r = -0.519, P = 0.027$)存在显著的负相关关系($P < 0.05$);和 $\text{NO}_3\text{-N}$ ($r = 0.734, P = 0.001$)、 $\text{NO}_2\text{-N}$ ($r = 10.699, P = 0.001$)、铵盐($\text{NH}_4^+\text{-N}$)($r = 0.591, P = 0.010$)、DIN($r = 0.755, P = 0.0003$)及重金属中的 Zn($r = 0.718, P = 0.001$)呈极显著的正相关关系($P < 0.01$)。

表 4 冬夏季浮游植物细胞丰度与环境因子 Pearson 相关性

Tab. 4 Pearson correlation between phytoplankton cell abundance and environmental factors in winter and summer

季节 Seasons	环境因子 Environmental factors	水深 Depth	水温 Temperature	pH	DO	COD	TSS	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	DIN
冬季 Winter	皮尔逊相关性 Sig. (双尾)	-0.263 0.293	-0.091 0.719	0.106 0.676	0.022 0.930	-0.359 0.144	0.388 0.111	0.018 0.945	-0.106 0.676	0.067 0.793	-0.089 0.727
夏季 Summer	皮尔逊相关性 Sig. (双尾)	-0.483* 0.043	-0.054 0.831	-0.193 0.444	-0.519* 0.027	-0.368 0.133	0.164 0.516	0.699** 0.001	0.734** 0.001	0.591** 0.010	0.755** 0.0003
季节 Seasons	环境因子 Environmental factors	油类 Oils	盐度 Salinity	DIP	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As	Hg
冬季 Winter	皮尔逊相关性 Sig. (双尾)	0.060 0.814	-0.476* 0.046	0.052 0.836	0.151 0.549	0.086 0.736	0.264 0.290	-0.210 0.403	-0.012 0.962	0.202 0.421	0.330 0.181
夏季 Summer	皮尔逊相关性 Sig. (双尾)	-0.446 0.064	-0.367 0.134	0.361 0.141	0.153 0.546	0.244 0.330	-0.389 0.111	0.059 0.815	0.718** 0.001	0.281 0.259	0.131 0.605

注: ** 在 0.01 级别相关性显著; * 在 0.05 级别相关性显著。

Notes: ** at 0.01 level; * at 0.05 level.

3 讨论

3.1 影响群落及其结构的环境因子

本研究中浮游植物种类数、丰度均呈由近岸向外海逐渐降低的趋势。这与所测环境因子 COD、NO₃-N、NO₂-N、DIP、和重金属中 Cd、Cu、Zn、Hg 分布趋势相同,与盐度、水深、溶解氧分布趋势相反。丰度与环境因子的 Pearson 相关分析表明调查海域的浮游植物丰度与盐度、水深、溶解氧呈显著的负相关关系,与 NO₃-N、NO₂-N、NH₄⁺-N、DIN 和重金属中的 Zn 呈显著的正相关关系。两者分析结果基本一致。分析表明日照近岸海域浮游植物种类数、丰度随着盐度、溶解氧浓度的增大而减小,随着 NO₃-N、NO₂-N 和重金属中的 Zn 浓度的增大而增大。日照近岸海域地处中纬度地区,为温带季风气候,冬季寒冷,夏季高温。温度对浮游植物的生长和优势种类影响较大^[13-17]。本文冬季调查占绝对优势的种类为温带近岸性种类(柔弱几内亚藻),夏季随着温度的升高,优势种类变为温带至热带近岸性种[劳氏角毛藻、三角角藻(*Ceratium tripos*)]和沿岸广温性种[深环沟角毛藻、窄隙角毛藻(*Chaetoceros affinis*)、扭链角毛藻(*Chaetoceros tortissimus*)等]。营养盐也是影响近岸浮游植物生长的关键因子^[18-21]。海洋中的浮游植物按 Redfield 系数吸收营养盐,当海水中营养盐比值偏离 Redfield 系数时,那么某一相对低的含量元素就会成为一个限制因子^[22]。冬季由于海水垂直对流强烈加上沿岸河流营养盐的汇入,营养盐一般不会成为限制因子。到了夏季,海水垂直对流变弱,表层营养盐被大量消耗,底层营养盐又不能充分利用,营养盐成为浮游植物生长的限制因子。此时营养盐和浮游植物丰度呈正相关关系,这与本研究的结果相吻合。本文夏季调查甲藻种类数(16种)远大于冬季调查甲藻种类数(6种),这一方面是因为甲藻可在低氮、低磷的环境中生长和繁殖^[23],营养盐不能成为其限制因子,另一方面是因为甲藻比硅藻对低氧环境的适应能力更强。另外盐度和水深也是影响调查海域浮游植物丰度的环境因子。曲静等^[24]在研究青岛南部近海春、秋季浮游植物群落结构时发现浮游植物丰度与水深成显著正相关;王小平等^[25]在研究春季红海湾水域盐度与浮游植物关系时发现表层和底

层浮游植物丰度与盐度分别呈正相关和负相关。本文研究结论与上述两项报道不尽相同,这种差异与调查海域范围及调查季节有关,即不同的调查海域、不同的季节对浮游植物的影响因子也不同。

3.2 群落结构对海域水环境状况的指示

一般来说当环境改变时,生物的群落结构也会发生变化。环境的好坏可以通过生物的群落结构特征来评价,但用不同的方法对处在同一环境的生物群落结构的同一监测数据进行评价时结果也不尽相同^[26]。Shannon-Wiener 多样性指数(H')常用于生物群落结构的研究来评价水体受污染的程度^[27]。一般说来: $H' \geq 3$,轻污染或无污染; $1 \leq H' < 3$,中污染; $0 \leq H' < 1$,重污染^[28]。依此判断,冬季 18 个调查站位中 11 个为重污染,8 个为中污染,分别占总站位的 61.11%、38.89%,11 个重污染站位分布在 A、B、C、D、E、F 共 6 个断面。夏季 3 个站位为中污染,15 个站位为轻污染或无污染,3 个中污染站位分布在 B、C 2 个断面。根据调查海域同步水质中 pH、DO、COD、油类、DIN、DIP 调查结果,冬季 A3 站位的 DIN,A1、A2、D1 的 DIP,A1、A2、B3、C1、C3、C4、D1 站位的油类和夏季 A1、C1 站位的 DIN,A1、B1、C4 站位的 DIP,B2、B3、C3、D3、E1、F1 站位的油类超过国家 I 类海水水质标准。冬夏两季营养盐和油类超标站位主要集中在近岸海域,进一步分析表明,两季海水质量状况并无明显差别:按照《山东省海岸带海洋资源综合调查》中综合质量指数与环境质量分级的关系两季调查海域水质均为尚清洁范围。很显然,多样性指数值的大小并不能正确反映调查海域的水环境状况。多样性指数值的大小受物种总数和均匀度的双重影响,种数越多,个体分布越均匀多样性指数越大。冬季调查由于出现了大量的柔弱几内亚藻致使个体分布极不均匀,夏季调查浮游植物种类数较多且个体分布较均匀。有报道^[29]表明生物多样性指数和均匀度的这种密切联系在诸如捕食、竞争、演替等生态过程中均会有所体现。除此以外,浮游植物的多样性指数与所处环境所受到的扰动强度紧密相关。根据“中度扰动假设”理论^[30],环境在无扰动环境和强扰动环境下,物种数量会降低,多样性指数会变小,中等强度的扰动环境有利于浮游植物群落多样性达到较

高水平。研究海域在不同站位不同季节受到的扰动强度的差异也是造成多样性指数不能很好地反映调查海域水环境状况的原因之一。

多元变量统计分析是分析群落结构变化的较灵敏的另一种方法。聚类分析结果:冬季群落Ⅱ包含的 A2 站位距岸最近且水质中 DIN、油类均超过国家Ⅰ类海水水质标准,为 18 个站位中污染最为严重中的一个站位;群落Ⅰ包含的 5 个站位中 C1 站位油类超标,D1 站位 DIP 和油类超标;群落Ⅲ包含的 12 个站位中,A1 站位 DIP 超标,A1、B3、C3 和 C4 站位油类超标。从聚类划分和水质调查结果来看,群落Ⅱ为营养盐和油类均超标海域,群落Ⅰ群落Ⅲ为营养盐和油类超标较轻或不超标海域。可见当海域的水环境污染(主要指营养盐和油类)较重时,聚类分析的这种群落划分可以很好地反映水质环境的变化,当污染较轻时,聚类分析不能通过群落划分的方式反映水质环境的变化情况。从夏季聚类划分和水质调查结果来看:2 个 DIN 超标站位属于群落Ⅲ;3 个 DIP 超标站位 2 个属于群落Ⅲ,1 个属于群落Ⅰ;6 个油类超标站位 1 个属于群落Ⅰ,4 个属于群落Ⅱ,1 个属于群落Ⅲ。相比于冬季聚类结构,夏季群落结构能更好地反映水环境污染状况:污染较严重站位属于群落Ⅰ,油类超标站位大部分集中在群落Ⅱ,营养盐超标站位大部分集中在群落Ⅲ。但是夏季调查海域浮游植物群落结构的划分也不能完全反映水环境质量状况,这主要是因为除了营养盐、油类这些污染因子外,浮游植物群落的结构还与水环境的温度、DO、盐度等因子以及海域所处地理位置有关。相对而言在日照近岸海域多元统计分析比 Shannon-Wiener 多样性指数(H')分析能更好的反应水环境质量状况。

参考文献:

- [1] 孙军. 海洋浮游植物与生物碳汇[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5372-5378.
SUN J. Marine phytoplankton and biological carbon sink [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5372-5378.
- [2] BROGUEIRA M J, OLIVEIRA M D R, CABEÇADAS G. Phytoplankton community structure defined by key environmental variables in Tagus estuary, Portugal [J]. Marine Environmental Research, 2007, 64(5): 616-628.
- [3] GHINAGLIA L T, HERRERA-SILVEIRA J A, COMÍN F A. Structural variations of phytoplankton in the coastal seas of Yucatan, Mexico [J]. Hydrobiologia, 2004, 519(1/3): 85-102.
- [4] 王尽文, 黄娟, 陶卉卉, 等. 石臼港近岸海域春季鱼卵仔稚鱼调查研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(21): 91-94.
WANG J W, HUANG J, TAO H H, et al. Investigation on ichthyoplankton in offshore area of Shijiu Port in spring [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(21): 91-94.
- [5] 朱树屏, 郭玉潔. 烟台、威海鲈鱼渔场及其附近海区角毛硅藻属的研究-I. 分类的研究[J]. 海洋与湖沼, 1957, 1(1): 27-36.
ZHU S P, GUO Y J. Studies on the genus *Chaetoceros ehrenberg* from the fishing ground of the mackerel, *Pneumatophorus japonicus* (Houttuyn), off the shantung coast from chefoo to Weihai part 1. a systematic study [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1957, 1(1): 27-36.
- [6] 王勇, 焦念志. 北黄海浮游植物营养盐限制的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(5): 512-518.
WANG Y, JIAO N Z. The primary research of nutrient limitation of phytoplankton in Northern Yellow Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1999, 30(5): 512-518.
- [7] 纪昱彤, 王宁, 陈洪举, 等. 2013 年秋季渤海浮游植物的群落特征[J]. 中国海洋大学学报, 2018, 48(s2): 31-41.
JI Y T, WANG N, CHEN H J, et al. Phytoplankton community structure in the Bohai and the Huanghai in autumn 2013 [J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(s2): 31-41.
- [8] 陈亚瞿, 徐兆礼. 南黄海、东海鲈鱼索饵场浮游动物生态特征[J]. 应用生态学报, 1990, 1(4): 327-332.
CHEN Y Q, XU Z L. Ecological characteristics of zooplankton in feeding ground of mackerel and scads form South Yellow Sea and East China Sea [J]. Journal of Applied Ecology, 1990, 1(4): 327-332.
- [9] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: The University of Illinois Press, 1949: 1-117.
- [10] MARGALEF R. Information theory in ecology [J]. General Systems, 1958, 3: 36-71.
- [11] PIELOU E C. Ecological diversity [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1975: 4-49.
- [12] FIELD J G, CLARKE K R, WARWICK R M. A practical strategy for analysing multispecies distribution patterns [J]. Marine Ecology Progress Series, 1982, 8(1): 37-52.
- [13] 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 X 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.

- [14] 王妍,张永,王玉珏,等. 胶州湾浮游植物的时空变化特征及其与环境因子的关系[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(1): 163-170.
WANG Y, ZHANG Y, WANG Y J, et al. Spatial and temporal characteristics of phytoplankton and its relation with the environmental factors in Jiaozhou Bay [J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(1): 163-170.
- [15] 杨晓改. 海州湾及其邻近海域浮游生物群落结构及其与环境因子的关系[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
YANG X G. Community structure of plankton in Haizhou Bay and adjacent waters and their relationships with environmental factors[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [16] 张家路,王银平,蔺丹清,等. 扬中夹江浮游植物种群特征及其对环境因子的响应[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(4): 607-615.
ZHANG J L, WANG Y P, LIN D Q, et al. Phytoplankton community structure in Jiajiang in Yangzhong Estuary and its relation to environmental factors [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(4): 607-615.
- [17] 上官欣欣,薛俊增,吴惠仙. 长江口浮游植物群落结构的特征[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(5): 689-698.
SHANGGUAN X X, XUE J Z, WU H X. Ecological features of phytoplankton community in the Yangtze River Estuary [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(5): 689-698.
- [18] 胡好国,万振文,袁业立. 南黄海浮游植物季节性变化的数值模拟与影响因子分析[J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 74-88.
HU H G, WAN Z W, YUAN Y L. Simulation of seasonal variation of phytoplankton in the southern Huanghai (Yellow) Sea and analysis on its influential factors [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(6): 74-88.
- [19] 杨世民,董树刚,汤志宏. 2005年夏季福建罗源湾浮游植物群落结构特征[J]. 海洋湖沼通报, 2010(2): 101-108.
YANG S M, DONG S G, TANG Z H. Phytoplankton community of the Luoyuan bay in summer 2005 [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2010(2): 101-108.
- [20] 姜庆宏,王佳宁,李卫平,等. 包头南海湖非冰封期浮游植物的时空动态特征[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(1): 30-36.
JIANG Q H, WANG J N, LI W P, et al. Temporal and spatial dynamics of phytoplankton in Nanhai lake, Baotou, during the ice-free period [J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(1): 30-36.
- [21] 杨娜,段元亮,包炎琳,等. 杭州湾人工潟湖夏季浮游植物群落演替与环境因子的关系[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(5): 757-769.
YANG N, DUAN Y L, BAO Y L, et al. Relationship between summer phytoplankton community succession and environment factors in the artificial lagoon of Hangzhou bay [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(5): 757-769.
- [22] HECKY R E, KILHAM P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment [J]. Limnology and Oceanography, 1988, 33(4): 796-822.
- [23] 张凡. 北黄海海洋牧场及周边海域浮游植物时空变动的研究[D]. 威海: 山东大学, 2019.
ZHANG F. Study on the seasonal and variation of phytoplankton around marine ranching area of the Northern Yellow Sea [D]. Weihai: Shandong University, 2019.
- [24] 曲静,宫相忠,邢永泽,等. 青岛南部近海春、秋季浮游植物群落结构的初步研究[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(s1): 99-104.
QU J, GONG X Z, XING Y Z, et al. Preliminary study on phytoplankton community structure in coastal waters south of Qingdao in spring and autumn [J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(s1): 99-104.
- [25] 王小平,贾晓平,林钦,等. 红海湾养殖水域营养盐消长与温度、盐度、浮游植物量的关系[J]. 湛江海洋大学学报, 1999, 19(2): 18-24.
WANG X P, JIA X P, LIN Q, et al. Relationship between nutrients, temperature, salinity and phytoplankton in the aquaculture waters of Honghai Bay [J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 1999, 19(2): 18-24.
- [26] 马藏允,刘海,王惠卿,等. 底栖生物群落结构变化多元变量统计分析[J]. 中国环境科学, 1997, 17(4): 297-300.
MA Z Y, LIU H, WANG H Q, et al. Multivariate analysis of community structure on macrobenthos [J]. China Environmental Science, 1997, 17(4): 297-300.
- [27] 李永祺,丁美丽. 海洋污染生物学[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
LI Y Q, DING M L. Marine pollution biology [M]. Beijing: China Ocean Press, 1991.
- [28] MAGNUSSEN S, BOYLE T J B. Estimating sample size for inference about the Shannon-Weaver and the Simpson indices of species diversity [J]. Forest Ecology and Management, 1995, 78(1/3): 71-84.
- [29] 郭劲松,陈杰,李哲,等. 156 m蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2710-2715.
GUO J S, CHEN J, LI Z, et al. Investigation of phytoplankton and assessment of algal diversity on backwater area of Xiaojiang river in Three Gorges reservoir after its initiate impounding to the water level of 156 m in spring [J]. Environmental Science, 2008, 29(10): 2710-2715.
- [30] BOITEAU R M, FITZSIMMONS J N, REPETA D J, et al. Detection of iron ligands in seawater and marine cyanobacteria cultures by high-performance liquid chromatography-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Analytical Chemistry, 2013, 85(9):

4357-4362.

Features of Net-phytoplankton communities and their environmental factors in the coastal waters of Rizhao in winter and summer

WANG Jinwen^{1,2}, HUANG Juan^{1,2}, JIANG Wanjun^{1,2}, JI Yinglu^{1,2}, WANG Bo³, ZHANG Jianbai⁴, LIN Sen^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecology and Environment & Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266061, Shandong, China; 2. North China Sea Marine Forecasting Center of SOA, Qingdao Oceanic Environmental Monitoring Central Station of SOA, Qingdao 266061, Shandong, China; 3. The First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266071, Shandong, China; 4. Yantai Marine Economic Research Institute, Yantai 264004, Shandong, China)

Abstract: To understand the features of phytoplankton communities and their main impact factors, two cruises were conducted in the coastal waters of Rizhao in February and August 2016. Phytoplankton species and dominant species composition, abundance, community diversity and environmental factors were analyzed, and the cluster analysis, multi-dimensional scaling (MDS) ordination techniques, Pearson correlative analysis were applied in this study to reveal the relationship between phytoplankton community structure and environmental factors. In total, 92 taxa were identified, which belonged to 41 genera and 3 phyla. Among them 73 were diatoms, 18 were dinoflagellates, 1 was Chrysophyta. The dominant species was *Guinardia delicatula* in winter, and *Chaetoceros lorenzianus*, *Chaetoceros constrictus* in summer. The cell abundance of phytoplankton ranged from $2.20 \times 10^6 - 6.12 \times 10^7$ cells/m³ with an average of 2.61×10^7 cells/m³ in winter and from $3.75 \times 10^4 - 5.70 \times 10^6$ cells/m³ with an average of 1.22×10^6 cells/m³ in summer. Pearson correlation analysis showed that salinity, depth of water, dissolved oxygen (DO), nitrates, nitrite, ammonium salt, total nitrogen, heavy metal (Zn) in the sea water had the great influence on abundance of phytoplankton. Compared with Shannon Wiener diversity index (H') method, multivariate statistical analysis could better reflect the water environment quality in the coastal waters of Rizhao.

Key words: phytoplankton; community structure; environmental factor; multivariate analysis; cluster analysis