

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20200120

数字出版日期: 2020-12-18; 数字出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20201216.1705.001.html>

2019年夏季昌黎黄金海岸国家级自然保护区浮游植物 结构特征及其环境影响因素

郭夏青¹, 杨悦¹, 于洋¹, 赵兴贵¹, 刘宪斌^{1,2}

(1. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457; 2. 天津市海洋环境保护与修复技术工程中心, 天津 300457)

摘要: 于2019年8月对昌黎黄金海岸国家级自然保护区14个站位的浮游植物和水质理化因子进行综合调查, 探讨该海域浮游植物群落的空间分布特征及其与环境因子的关系。结果表明, 调查期间共发现浮游植物2门21属45种, 以硅藻门为主。优势种为硅藻门中的中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、劳氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)和甲藻门中的三角角藻(*Ceratium tripos*)。浮游植物细胞丰度介于2 839~633 709 m⁻³。各监测站位的多样性指数(H')的变化范围为1.02~3.46, 平均值为2.51; 丰度指数(d)的变化范围为0.83~1.89, 平均值为1.26; 均匀度指数(J')的变化范围为0.26~0.95, 平均值为0.70。冗余分析结果表明, 硝酸盐氮、pH、活性磷酸盐、盐度、活性硅酸盐、氨氮是影响该海域夏季浮游植物分布的关键环境因子。

关键词: 昌黎黄金海岸; 国家级自然保护区; 浮游植物; 群落结构; 冗余分析

中图分类号: X83

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2021)01-0048-08

Structural Characteristics of and Environmental Impact on Phytoplankton in Changli Gold Coast National Nature Reserve in Summer 2019

GUO Xiaqing¹, YANG Yue¹, YU Yang¹, ZHAO Xinggui¹, LIU Xianbin^{1,2}

(1. College of Marine and Environmental Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. Tianjin Marine Environmental Protection and Restoration Technology Engineering Center, Tianjin 300457, China)

Abstract: In August 2019, phytoplankton and physicochemical factors of water quality were comprehensively investigated at 14 stations of the Gold Coast National Nature Reserve in Changli, and the spatial distribution characteristics of the phytoplankton community in the sea area and their relationship with environmental factors were studied. The results showed that 45 species of phytoplankton were found, belonging to 21 genera and 2 phyla, mainly Bacillariophyta. The dominant species are *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros lorenzianus*, and *Ceratium tripos* of *Dinophyta*. The abundance of the phytoplankton was between 2 839-633 709 m⁻³. The diversity index (H') at each monitoring station was 1.02-3.46, and the average value was 2.51. The abundance index (d) was 0.83-1.89, and the average value was 1.26. The evenness index (J') was 0.26-0.95, and the average value was 0.70. Redundancy analysis shows that nitrate nitrogen, pH, active phosphate, salinity, silicate and ammonia nitrogen are the key environmental factors that affect the distribution of the phytoplankton in that sea area in summer.

Key words: Changli Gold Coast; national nature reserve; phytoplankton; community structure; redundancy analysis

昌黎黄金海岸国家级自然保护区位于中国河北省 东北部的秦皇岛市昌黎县, 保护面积约为 300 km²[1].

收稿日期: 2020-07-19; 修回日期: 2020-10-30

基金项目: 天津市大学生创新创业训练项目(202010057229); 天津市“131”创新型人才团队建设项目(20180314)

作者简介: 郭夏青(1995—), 女, 山东济南人, 硕士研究生; 通信作者: 刘宪斌, 教授, lx0688@tust.edu.cn

由于河流的注入,在河口浅海区构成了低盐度、营养丰富、水温适宜的沿岸水团,为众多海洋生物尤其是特有物种文昌鱼提供了适宜的产卵、孵化及育幼条件,形成了渤海重要的产卵场^[2],主要生境包括沙丘、沙堤、潟湖、林带、林间洼地、河口及海洋。昌黎海岸带景观独特,生境复杂多样,生物多样性高,海洋与海岸带资源丰富,具有重要的生态价值、科研价值和观赏价值。同时,该区域还是国务院首批批准建立的5个国家级海洋类自然保护区之一。

浮游植物是高度多样化的、微观的和丰富的生物体,构成了海洋食物链的基础,是海洋生态系统中最主要的初级生产者^[3],大约50%的初级生产力是由浮游植物完成^[4]。浮游植物是浮游动物存活的基础饵料,在能量流动和物质循环过程中起着至关重要的作用。它通过光合作用制造有机物,成为食物链的首要环节,被称为“海洋中的森林”。浮游植物种群和丰度的变化不止会影响到其他海洋生物的生存,同时会影响到整个海洋生态系统的平衡^[5-6]。浮游植物群落的动态变化是评价海域营养化水平、污染状况、资源现状、生产潜力以及海洋生态系统稳定性的重要指标^[7-9]。已有文献对该区的浮游植物、浮游动物和底栖生物进行了报道,洛昊等^[10]于1999—2013年对该保护区海域开展了连续15年的生态调查工作,对种类组成、细胞密度、多样性等进行讨论;梁晓林等^[1,11]在2005—2013年夏季运用典范对应分析方法,对昌黎生态监控区浮游植物群落结构进行分析;孙富强等^[9]于2016年对昌黎黄金海岸国家级自然保护区海域浮游植物的种类组成、细胞数量、生物多样性指数、均匀度指数等进行调查。

但是,关于近3年来对该区浮游植物群落结构的研究不多,本文增加了多项环境因子的测定,比如石油类和活性硅酸盐,且利用冗余分析对浮游植物群落结构与环境因子的关系进行讨论,研究了2019年8月昌黎黄金海岸国家级自然保护区浮游植物的群落特征变化以及其环境影响因素,旨在为保护区的环境管理策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点的布设

本文根据昌黎黄金海岸国家级自然保护区的地理和水文特征等,在昌黎黄金海岸国家级自然保护区设置14个采样站位(图1),采样时间为2019年8月(夏季)。

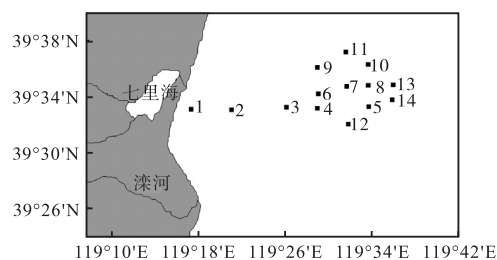


图1 河北昌黎黄金海岸国家级自然保护区采样站位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling stations in Changli Gold Coast National Nature Reserve, Hebei province

1.2 样品采集和处理

浮游植物的采集、贮存、运输、预处理和分析按照 GB 17378.7—2007《海洋监测规范·第7部分:近海污染生态调查和生物监测》^[12]规定的方法进行,样品的采集采用浅Ⅲ型浮游生物网自下而上垂直拖网进行采样,样品用5%甲醛固定和保存,经浓缩后在CKX53型倒置显微镜(OLYMPUS公司)下进行种类鉴定和细胞计数,每个浮游植物样品均计数3次取平均值,以保证数据的可靠性。

水质样品的采集、贮存、运输、预处理和分析按照 GB 17378.4—2007《海洋监测规范·第4部分:海水分析》^[13]方法进行,水样的采集采用5L的卡盖式采水器,采取表层水样,分别用于营养盐、叶绿素a的测定。将部分水样用0.45 μm醋酸纤维膜过滤后,滤液用于营养盐浓度的测定。水温采用YSI多功能水质参数仪(美国YSI公司)进行现场测定。

测定的水质因子包括水温、pH(pH计法)、浊度(浊度计法)、溶解氧(碘量法)、盐度(盐度计法)、油类(紫外分光光度法)、化学需氧量(碱性高锰酸钾法)、叶绿素a(分光光度法)、亚硝酸盐(萘乙二胺分光光度法)、硝酸盐(铈还原法)、氨氮(次溴酸盐氧化法)、活性硅酸盐(硅钼蓝法)、活性磷酸盐(磷钼蓝分光光度法)。

1.3 生物多样性指数

采用Primer 6.0软件进行生物多样性数据计算。生物多样性指数采用多样性指数(H')^[12]、丰度指数(d)^[14]和均匀度指数(J')^[15]。根据HJ 442—2008《近岸海域环境监测规范》中的生物多样性评价指标进行评价(表1^[16])。优势种选取优势度 ≥ 0.02 的物种^[17]。

多样性指数 H'

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

丰度指数 d

$$d = \frac{S-1}{\ln N} \quad (2)$$

均匀度指数 J'

$$J' = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (3)$$

优势度 Y

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (4)$$

式中: $p_i = n_i/N$; n_i 为第 i 种的个体数; N 为所有种的个体数; S 为物种总数; f_i 为第 i 种的出现频率。

表 1 生物多样性评价指标
Tab. 1 Evaluation index of biodiversity

H'	生境质量等级
$H' \geq 3.0$	优良
$2.0 \leq H' < 3.0$	一般
$1.0 \leq H' < 2.0$	差
$H' < 1.0$	极差

1.4 冗余分析

利用 Canoco 5.0 软件进行群落与环境变量的冗余分析 (redundancy analysis, RDA). 进入分析的物种需满足以下条件: (1) 出现的频度要大于 12.5%; (2) 这个物种在至少 1 个站点上的相对密度 $\geq 1\%$ [18]. 对浮游植物群落结构进行降维对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 最长 $SD = 2.19 < 3$, 所以采用冗余分析. 变量重要性的相对大小在程序结果中得到, 变量的显著性水平通过蒙特卡洛置换检验 ($P < 0.05$) [18].

2 结果与讨论

2.1 浮游植物的物种组成和丰度特征

本次调查共发现浮游植物 2 门 21 属 45 种, 其中硅藻为 39 种, 占总数的 86.7%, 甲藻 6 种, 占总数的 13.3%, 可见调查期间该海域浮游植物以硅藻为主.

调查海区浮游植物的生态类型以广温、广盐和近岸种为主, 优势种为硅藻门中的中肋骨条藻、劳氏角毛藻和甲藻门中的三角角藻 (表 2), 3 种均为常见的赤潮种.

各站点浮游植物细胞丰度的平面分布差异较大, 1—14 站点为 $2839 \sim 633709 \text{ m}^{-3}$, 平均值为 71794 m^{-3} . 细胞丰度最高值出现在近岸的 1 号站点, 最低值在远海的 14 号站点 (图 2), 其中, 硅藻占浮游植物丰度的 97.7% 以上, 浮游植物细胞丰度的分布趋势与硅藻丰度分布趋势基本一致, 这与近几年的调查

结果也相符 [1-2, 17].

表 2 调查期间浮游植物优势种及其优势度
Tab. 2 Dominant species and dominance index of the phytoplankton community during two surveys

类别	种名	占比/%	出现频率/%	优势度
硅藻门	中肋骨条藻	76.8	78.6	0.60
甲藻门	三角角藻	2.68	100	0.03
硅藻门	劳氏角毛藻	2.55	85.7	0.02

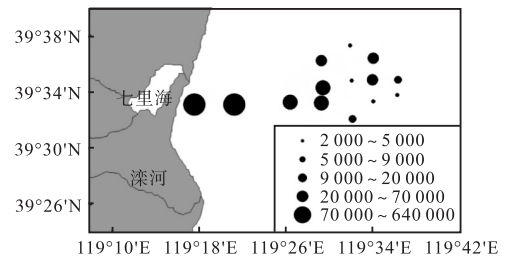


图 2 2019 夏季昌黎黄金海岸国家级自然保护区各站点浮游植物丰度变化

Fig. 2 Phytoplankton abundance changes at each station of Changli Gold Coast National Nature Reserve in summer 2019

2.2 浮游植物群落指数特征

各监测站点 H' 的变化范围为 1.02 ~ 3.46, 平均值为 2.51, 最大值出现在 5 号站点, 最小值出现在 2 号站点; d 的变化范围为 0.83 ~ 1.89, 平均值为 1.26, 最大值出现在 5 号站点, 最小值出现在 11 号站点; J' 的变化范围为 0.26 ~ 0.95, 平均值为 0.70, 最大值出现在 14 号站点, 最小值出现在 2 号站点 (图 3). 根据表 1 得出, 2019 年夏季昌黎黄金海岸国家级自然保护区生境质量表现为一般, 其中 5、7、8、10、13 号站点生境质量达到优良, 而近岸几个站点的生境质量为差.

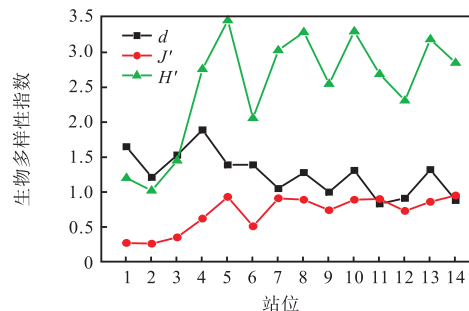


图 3 2019 年夏季昌黎黄金海岸国家级自然保护区各站点浮游植物多样性指数变化

Fig. 3 Changes in the phytoplankton diversity index at each station of Changli Gold Coast National Nature Reserve in summer 2019

2.3 环境因子的分布特征

溶解氧变化范围为 5.48 ~ 8.46 mg/L, 最大值出现在 4 号站点, 最小值出现在 11 号站点. 盐度变化

范围为 29.0~32.0,最大值出现在 10 号站位,最小值出现在 1、2 和 3 号站位. pH 变化范围为 7.14~7.75,最大值出现在 8 号和 14 号站位,最小值出现在 1 号站位. 油类含量变化范围为 9.19~155 $\mu\text{g/L}$,最大值出现在 3 号站位,最小值出现在 1 号站位. 水温变化范围为 17.0~19.0 $^{\circ}\text{C}$,最大值出现在 6 号站位,最小值出现在 1 号站位. 浊度变化范围为 0.180~1.75 NTU,最大值出现在 4 号站位,最小值出现在 1 号站位. 叶绿素 a 含量的变化范围为 0.474~2.57 $\mu\text{g/L}$,最大值出现在 2 号站位,最小值出现在 12 号站位. 化学需氧量的变化范围为 1.24~2.59 mg/L ,最大值出现在 1 号站位,最小值出现在 9 号站位. 亚硝酸盐氮含量的变化范围为 1.87~23.0 $\mu\text{g/L}$,最大值出现在 13 号站位,最小值出现在 5 号站位. 氨氮含量的变化范围为 79.1~218 $\mu\text{g/L}$,最大值出现在 4 号站位,最小值出现在 14 号站位. 硝酸盐氮含量的变化范围为 40.2~157 $\mu\text{g/L}$,最大值均出现在 1 号站位,最小值出现在 7 号站位. 活性硅酸盐含量的变化范围为 613~1 122 $\mu\text{g/L}$,最大值出现在 6 号站位,最小值出现在 11 号站位. 活性磷酸盐含量的变化范围为 18.1~82.3 $\mu\text{g/L}$,最大值均出现在 1 号站位,最小值均出现在 8 号站位(表 3). 营养盐、浊度、油类、叶绿素 a 的分布趋势呈现近海大于远海的趋势, pH、溶解氧和透明度呈现远海大于近海的趋势.

表 3 2019 年夏季昌黎黄金海岸国家级自然保护区海域环境因子变化范围

Tab. 3 Variation range of environmental factors of Changli Gold Coast National Nature Reserve in summer 2019

环境因子	最小值	最大值	平均值	标准差
溶解氧/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	5.48	8.46	7.03	0.842
盐度	29.0	32.0	30.4	0.093
pH	7.14	7.75	7.66	0.161
油类/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	9.19	155	35.4	40.0
水温/ $^{\circ}\text{C}$	17.0	19.0	17.5	1.00
浊度/NTU	0.180	1.75	0.781	0.524
叶绿素 a/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.474	2.57	1.44	0.732
化学需氧量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.24	2.59	1.87	0.419
亚硝酸盐氮/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.87	23.0	11.3	8.15
氨氮/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	79.1	218	137	36.0
硝酸盐氮/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	40.2	157	77.0	43.4
活性硅酸盐/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	613	1 122	723	213
活性磷酸盐/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	18.1	82.3	33.2	15.3
N/P	8.61	23.6	16.1	4.87
Si/N	0.894	2.85	1.68	0.536
Si/P	11.4	44.5	26.6	9.99

Justic 提出的化学计量限制的评估法则^[19]: (1)

若 $\text{Si/P} > 22$, 且 $\text{N/P} > 22$, 则判定为 P 限制; (2) 若 $\text{N/P} < 10$, 且 $\text{Si/N} > 1$, 则判定为 N 限制; (3) 若 $\text{Si/P} < 10$, 且 $\text{Si/N} < 1$, 则判定为 Si 限制. 从营养限制的角度分析, 夏季 N/P 的变化范围为 8.61~23.6, Si/N 为 0.894~2.85, Si/P 为 11.4~44.5, 调查区域的 1 号站位存在氮限制, 2、3、13 号站位存在磷限制.

2.4 浮游植物与环境因子冗余分析

通过 Monte Carlo 置换检验得出, 排序效果良好. 所有参加排序的环境因子共解释了 65.18% 的物种累积变化信息. 通过分析结果(表 4)可知, 轴 1 和轴 2 可以解释大部分的物种累积变化信息, 共解释了总体的 41.93% 的物种变化信息, 特征值分别为 0.275 6 和 0.143 7. 结果显示(表 5), 硝酸盐氮、pH、活性磷酸盐、盐度、活性硅酸盐、氨氮的 P 值均小于 0.05, 说明是影响该海域夏季浮游植物分布的关键环境因子. 其他环境因子与群落关系不显著, 说明它们依赖于主要环境变量, 不能独立解释浮游植物群落的特征变化.

表 4 2019 年夏季昌黎黄金海岸国家级自然保护区海域 RDA 分析中排序轴信息

Tab. 4 Sorting axis information in the RDA analysis of Changli Gold Coast National Nature Reserve in summer 2019

排序轴	1	2	3	4
特征值	0.275 6	0.143 7	0.124 3	0.108 2
解释变量(累积)/%	27.56	41.93	54.36	65.18
相关性	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
物种-环境相关性 累计变化率/%	27.56	41.93	54.36	65.18

表 5 环境变量的显著性检验

Tab. 5 Significance test of environmental variables

环境变量	F	P
硝酸盐氮	3.4	0.002
pH	3.4	0.002
活性磷酸盐	2.1	0.006
盐度	2.1	0.010
活性硅酸盐	2.1	0.008
氨氮	1.9	0.032

图 4 为筛选后 26 种物种(S1—S26)与 16 项环境因子(E1—E16)的排序图, 其中: S1 为中肋骨条藻, S2 为三角角藻, S3 为劳氏角毛藻, S4 为圆筛藻属, S5 为星脐圆筛藻, S6 为布氏双尾藻, S7 为旋链角毛藻, S8 为角毛藻, S9 为中华盒型藻, S10 为格氏圆筛藻, S11 为透明辐杆藻, S12 为丹麦细柱藻, S13 为虹彩圆筛藻, S14 为威氏圆筛藻, S15 为冰河拟星杆藻, S16 为巨圆筛藻, S17 为泰晤士旋鞘藻, S18 为曲舟

藻, S19 为琼氏圆筛藻, S20 为浮动弯角藻, S21 为海洋曲舟藻, S22 为叉状角藻, S23 为辐射圆筛藻, S24 为菱形藻, S25 为夜光藻, S26 为针杆藻; E1 为溶解氧, E2 为盐度, E3 为 pH, E4 为油类, E5 为水温, E6 为浊度, E7 为叶绿素 a, E8 为化学需氧量, E9 为亚硝酸盐氮, E10 为氨氮, E11 为硝酸盐氮, E12 为活性硅酸盐, E13 为活性磷酸盐, E14 为 N/P, E15 为 Si/N, E16 为 Si/P. 在轴 1、轴 2 构成的平面中, 环境因子用虚线箭头表示, 箭头连线的长度代表某个环境因子与群落分布和种类分布间相关程度的大小, 连线越长, 说明相关性越大. 箭头连线与排序轴的夹角代表此环境因子与排序轴相关性大小, 夹角越小, 相关性越高. 两箭头之间的连线为锐角, 说明两环境因子为正相关. 物种因子用实线箭头表示. 环境因子与物种因子之间夹角的余弦值代表其相关性, 即夹角越小, 说明相关性越强; 呈直角说明不相关.

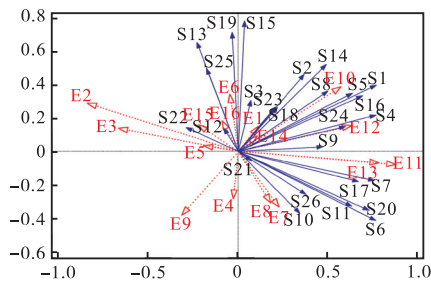


图 4 2019 年夏季昌黎黄金海岸国家级自然保护区海域冗余分析

Fig. 4 RDA analysis of Changli Gold Coast National Nature Reserve in summer 2019

由图 4 可以看出: 与硝酸盐氮、活性磷酸盐呈正相关的为中华盒形藻 (*Biddulphia sinensis*)、旋链角毛藻 (*Chaetoceros curvisetus*)、泰晤士旋鞘藻 (*Helicotheca tamesis*) 和菱形藻 (*Nitzschia* spp.) 等, 呈负相关的是叉状角藻 (*Ceratium furca*) 等; 与 pH、盐度呈正相关的是叉状角藻、丹麦细柱藻 (*Leptocylindrus danicus*), 呈负相关的是中华盒形藻、旋链角毛藻、泰晤士旋鞘藻和菱形藻; 与活性硅酸盐呈正相关的是圆筛藻 (*Coscinodiscus* sp.) 和菱形藻; 与氨氮呈正相关关系的有中肋骨条藻、三角角藻和角毛藻 (*Chaetoceros* sp.) 等. 硅藻可能与营养盐指标关系较大, 甲藻与盐度可能有关.

3 讨论

3.1 与前人历史资料对比

梁晓林等^[1]于 2013 年 8 月对昌黎海域进行调

查, 共发现浮游植物 3 门 35 种, 其中硅藻 29 种、甲藻 5 种和金藻 1 种. 孙富强等^[9]在 2016 年夏季对该海域浮游植物群落结构进行了调查, 共获得浮游植物 47 种, 其中有硅藻 42 种、甲藻 4 种、金藻 1 种; 而本次调查期间共鉴定浮游植物 2 门 45 种, 其中硅藻种数最多, 为 39 种. 与前人的调查相比, 本次调查未出现金藻门种类, 仍为硅藻占据优势, 种群结构也比较稳定. 对比其他海域, 张彭如燕等^[20]在 2014 年夏季天津近岸海域进行调查, 同样属于甲藻门和硅藻门. 于潇等^[21]在 2018 年对莱州湾的监测研究中发现, 浮游植物分属硅藻门、甲藻门、金藻门、绿藻门、隐藻门, 较本海域出现类别多.

3.2 浮游植物群落结构变化

本次调查浮游植物优势种为中肋骨条藻、劳氏角毛藻和三角角藻. 研究表明, 中肋骨条藻是一种常见赤潮种, 其最适温度范围为 20 ~ 25 °C, 这也解释了夏季中肋骨条藻成为优势种的原因^[22]. 已有实验^[23-25]表明: 环境中不同氮磷比对中肋骨条藻有不同影响, 主要是影响比生长率和细胞状态, N 浓度相比 P 浓度制约能力大, P 限制条件下的细胞数量和比生长率高于 N 限制条件下. 三角角藻也是一种常见的赤潮甲藻.

在细胞丰度上, 由近海向外海逐渐减小, 可能是由于在夏季保护区来自滦河口和大蒲河口的大量淡水入海, 受径流影响, 而优势种中肋骨条藻喜好低盐环境, 大量生长, 导致近海岸浮游植物数量明显多于远海调查区域^[1, 26-27].

物种多样性是群落组织独特的生物学特征, 其作用是表征浮游植物群落的结构类型、所处的发展阶段、生境质量差异^[28]. 一般情况下, 一个群落的生物种类越多, 多样性指数就会越大, 呈现正相关关系. 而一个群落的多样性指数越大, 群落就相对越稳定. 同时, 它还可以反映生物环境质量. 均匀度是反映群落结构均匀性的指数, 丰度指数反映群落中种类的丰富程度. 从图 3 中可以明显看出近岸的多样性指数偏低, 原因可能是中肋骨条藻细胞密度较大, 优势过于明显, 加之浮游植物群落组成的生物种类较少, 且种间密度分布不均, 导致多样性指数值随之变小.

3.3 浮游植物与环境因子的关系

本次调查硝酸盐氮、pH、活性磷酸盐、盐度、硅酸盐、氨氮是影响夏季该海域浮游植物分布的关键环境因子.

首先, 营养盐的变化是对浮游植物群落的一个重

要影响因素, N、P 和 Si 是海洋藻类生存三大元素, 对浮游植物的群落有重要作用^[29]. 卞少伟等^[30]研究渤海湾浮游植物时, 发现浮游植物群落受多个因素影响, 主要影响因素为营养盐. Dortch 等^[31]研究表明, 当海水中 Si 缺乏时, 会相应的限制硅藻的生长, 而其它非硅藻(如甲藻)类却相反. 杨东方等^[32]认为在近岸水域会经常发生因为甲藻产生的赤潮, 追根究底就是营养盐结构的不平衡. 当水体中 Si 浓度低, 而 N、P 浓度过高时, 硅藻生长受到影响, 空间被甲藻迅速占据. Si 在硅藻壳中很难再生, 并且再循环速率比 N 和 P 慢得多^[33]. N/P 的持续升高、Si/N 的持续降低, 也将导致硅藻群落的继续衰退, 这样会危害传统养殖产业, 可能还会出现其他问题, 如低氧和酸化等. 相关研究^[34-35]表明, 硅藻喜欢生活在硝酸盐含量高的水体, 而在本文中硝酸盐氮呈正相关关系的几乎都为硅藻类. 硅酸盐对该海域浮游植物群落结构也有很重要的作用. 硅酸盐含量如果降低, 将会呈现硅藻群落向非硅藻群落演替的趋势.

盐度能够影响浮游植物渗透压, 进而影响浮游植物吸收营养盐以及其悬浮性^[36]. 张芳等^[37]研究表明, 白令海陆架区的浮游植物受营养盐、盐度以及温度影响较明显. 本次调查海域浮游植物的生态类型大多数属于广盐性, 但也存在一个特点, 那就是密度沿盐度梯度变化^[38]. 同时, 有研究表明, 盐度对浮游植物有影响的原因主要是种类的不同, 对盐度适应性不同; 硅藻喜欢低盐, 甲藻则比硅藻耐高盐^[39]. 海水的盐度受降水、蒸发等众多因素的影响, 盐度的变化对不同的物种有着不同的影响. 在不同盐度条件下, 它将对对应于不同的浮游植物细胞密度, 并且浮游植物的生长状态会相应地变化. 本文中盐度就与甲藻类呈正相关关系.

海水中 pH 大小非常影响海洋生物代谢过程^[40]. pH 影响浮游植物对营养盐的利用程度, 同时影响新陈代谢过程, 进而干扰浮游植物自身生长状况^[41]. 一般状态下海水 pH 较为稳定, 如果 pH 呈现下降趋势, 则水质和溶解氧浓度也可能会下降, 同时还可能会使 H₂S 含量增加; 如果 pH 过高会改变氨氮的存在形式, 还会增加毒性^[42]. 浮游植物进行光合作用时将会产生 OH⁻, 而随着浮游植物数量的增加, 海水中的 pH 就会升高.

此外, 环境因子和浮游植物的关系是极其复杂的, 环境因子与浮游植物的某一方的变化均会给对方带来影响, 同时各个环境因子之间也会相互作用. 因此, 多因子、多季节的分析是必要的. 本文仅调查了

一个季节, 可能存在一些不足, 该海域浮游植物密度与环境因子之间的关系有待于进一步的研究.

4 结 论

(1) 调查期间共发现浮游植物 2 门 21 属 45 种, 硅藻占总数的 86.7%, 甲藻占 13.3%. 优势种是硅藻门的中肋骨条藻、劳氏角毛藻和甲藻门的三角角藻. 各站位细胞丰度变化范围为 2 839 ~ 633 709 m⁻³, 平均值为 71 794 m⁻³, 硅藻为主要的组成部分.

(2) H' 的变化范围为 1.02 ~ 3.46; d 的变化范围为 0.83 ~ 1.89; J' 的变化范围为 0.26 ~ 0.95, 2019 年夏季昌黎黄金海岸国家级自然保护区海域生境质量为一般.

(3) RDA 结果表明, 硝酸盐氮、pH、活性磷酸盐、盐度、活性硅酸盐、氨氮是影响 2019 年夏季昌黎海域浮游植物分布的关键环境因子.

致谢: 感谢昌黎黄金海岸国家级自然保护区管理处对本文野外样品采集的帮助.

参考文献:

- [1] 梁晓林, 赵志楠, 张月明, 等. 2013 年夏季昌黎生态监控区浮游植物群落结构特征分析[J]. 水产科学, 2015, 34(2): 89-94.
- [2] 高敏, 高杰, 韩晓庆, 等. 近十年来昌黎生态监控区生态环境演变分析[J]. 海洋湖沼通报, 2017(4): 91-97.
- [3] Mamun A A, Akhtar A, Hassan M, et al. An approach to analyzing environmental drivers of phytoplankton community patterns in coastal waters in the northern Bay of Bengal[J]. Bangladesh Regional Studies in Marine Science, 2019, 29: 100642.
- [4] Muniza O R, Rodrguez J G, Revilla M, et al. Seasonal variations of phytoplankton community in relation to environmental factors in an oligotrophic area of the European Atlantic coast (southeastern Bay of Biscay) [J]. Regional Studies in Marine Science, 2018, 17: 59-72.
- [5] Sun D, Huan Y, Wang S, et al. Remote sensing of spatial and temporal patterns of phytoplankton assemblages in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. Water Research, 2019, 157: 119-133.
- [6] Marañón E. Cell size as a key determinant of phytoplankton metabolism and community structure[J]. Annual Review of Marine Science, 2015, 7: 241-264.
- [7] Wang Y, Xiang P, Kang J, et al. Environmental controls on spatial variability of summer phytoplankton structure

- and biomass in the Bering Sea[J]. *Journal of Sea Research*, 2017, 131: 1–11.
- [8] 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.
- [9] 孙富强,刘宪斌,赵兴贵. 昌黎黄金海岸国家级自然保护区海域浮游植物群落结构[J]. *海洋信息*, 2017(3): 33–40.
- [10] 洛昊,冯志权,金照光,等. 昌黎保护区浮游植物的群落结构特征及变化趋势[J]. *大连海洋大学学报*, 2015, 30(2): 98–101.
- [11] 梁晓林,杨阳,王玉良,等. 昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析[J]. *环境科学*, 2015, 36(4): 179–187.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB 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.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB 17378.7—2007 海洋监测规范·第7部分:近岸污染生态调查和生物监测[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- [14] Margalef D R. *Perspectives in Ecological Theory*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- [15] Pielou E C. *An introduction to mathematical ecology*[J]. *Bioscience*, 2011, 24(2): 7–12.
- [16] 中华人民共和国生态环境部. HJ442—2008 近岸海域环境监测标准[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2008.
- [17] 尹翠玲,张秋丰,崔健,等. 2008—2012年渤海湾天津近岸海域夏季浮游植物组成[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(4): 527–537.
- [18] 武丹,韩龙,梅鹏蔚,等. 渤海湾浮游植物群落特征及其环境影响因子[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(4): 68–73.
- [19] 孙慧慧,刘西汉,孙西艳,等. 莱州湾浮游植物群落结构与环境因子的时空变化特征研究[J]. *海洋环境科学报*, 2017, 36(5): 662–669.
- [20] 张彭如雁,李德亮,戴媛媛,等. 天津近岸海域浮游植物群落结构特征[J]. *海洋湖沼通报*, 2016(6): 53–59.
- [21] 于潇,卢钰博,李希磊,等. 莱州湾浮游植物时空变化及其与环境因子的关系[J]. *烟台大学学报:自然科学与工程版*, 2020, 33(1): 63–71.
- [22] 金德祥,陈贞奋,刘师成,等. 温度和盐度对三种海洋浮游硅藻生长繁殖的影响[J]. *海洋与湖沼*, 1965, 7(4): 373–384.
- [23] 刘皓,高永利,殷克东,等. 不同氮磷比对中肋骨条藻和威氏海链藻生长特性的影响[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(6): 92–97.
- [24] 王金花,唐洪杰,杨茹君,等. 氮磷营养盐对中肋骨条藻生长及硝酸还原酶活性的影响[J]. *海洋科学*, 2008, 32(12): 64–68.
- [25] 赵艳芳,俞志明,宋秀贤,等. 不同磷源形态对中肋骨条藻和东海原甲藻生长及磷酸酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(3): 693–699.
- [26] Tang D L, Di B P, Wei G F, et al. Spatial, seasonal and species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 568(1): 245–253.
- [27] 徐玉山,刘宪斌,张秋丰. 渤海湾近岸海域浮游植物多样性研究[J]. *盐业与化工*, 2009, 38(6): 11–14.
- [28] 冷春梅,曹振杰,张金路,等. 黄河口浮游生物群落结构特征及环境质量评价[J]. *海洋环境科学*, 2014, 33(3): 360–365.
- [29] Fu Y, Xu S, Liu J. Temporal-spatial variations and developing trends of chlorophyll-a in the Bohai Sea, China[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2016, 173: 49–56.
- [30] 卞少伟,孙韧,梅鹏蔚,等. 2013年春季夏季天津近岸海域浮游植物的结构特征[J]. *水生态学杂志*, 2015, 36(1): 47–52.
- [31] Dortch Q, Whitley T E. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions?[J]. *Continental Shelf Research*, 1992, 12(11): 1293–1309.
- [32] 杨东方,高振会,陈豫,等. 硅的生物地球化学过程的研究动态[J]. *海洋科学*, 2002, 26(3): 39–42.
- [33] Sun J, Liu D Y, Qian S. Preliminary study on seasonal succession and development pathway of phytoplankton community in the Bohai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 20(2): 251–260.
- [34] 王俊. 渤海近岸浮游植物种类组成及其数量变动的研究[J]. *海洋水产研究*, 2003(4): 44–50.
- [35] Goldman J C. Potential role of large oceanic diatoms in new primary production[J]. *Deep-Sea Research*, 1993, 40(1): 159–168.
- [36] Vonshak A, Abeliovich A, Boussiba S, et al. Production of spirulina, biomass: Effects of environmental factors and population density[J]. *Biomass*, 1982, 2(3): 175–185.
- [37] 张芳,何剑锋,林凌,等. 2008年夏季白令海陆架区微小型浮游植物分布及环境相关性分析[J]. *海洋学报*, 2011, 33(2): 134–145.

- [38] Pilkaitytė R, Schoor A, Schubert H. Response of phytoplankton communities to salinity changes: A mesocosm approach[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 513(1): 27–38.
- [39] 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.
- [40] 柴然, 冯娟, 陈碧鹃, 等. 崂山近岸浮游植物群落结构季节变化及其环境影响因素[J]. *渔业科学进展*, 2020, 41(1): 21–30.
- [41] Chen C Y, Durbin E G. Effects of pH on the growth and carbon uptake of marine phytoplankton[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 109: 83–94.
- [42] Barcelose R J, Müller M N, Riebesell U. Short-term response of the coccolithophore *Emiliania huxleyi* to an abrupt change in seawater carbon dioxide concentrations[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(1): 177–186.

责任编辑: 郎婧

(上接第47页)

覆量的回归方程且经验证可靠性较高。

(2) 根据涂覆料液体积恒定回归方程预测出了颗粒完全涂覆临界状态时喷液量、涂覆量及涂覆厚度。颗粒刚涂覆完全时, 涂覆厚度约为 140 ~ 180 μm , 且大颗粒涂覆厚度大于小颗粒涂覆厚度, 中心区域颗粒涂覆厚度大于边缘区域颗粒涂覆厚度, 说明完全涂覆临界状态下, 颗粒涂覆液膜不均匀。

(3) 当颗粒完全涂覆后, 当喷液量增大, 颗粒直径越大, 颗粒表面涂覆厚度越大, 且中心区域颗粒涂覆厚度与边缘区域颗粒涂覆厚度差距增大, 说明随着涂覆进行, 不同区域颗粒之间涂覆厚度均匀度降低。以 3 mm 颗粒为例, 当喷液量为 5.95 g 时, 涂覆厚度的理论值为 173.71 μm , 而实验测得的颗粒涂覆厚度平均值为 173.04 μm , 理论值与实验值十分接近, 且误差 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。这说明理论值较为准确, 一定程度上实现了低温涂覆球形颗粒液膜厚度的检测与控制。

参考文献:

- [1] Rogers S, Wu W D, Saunders J, et al. Characteristics of milk powders produced by spray freeze drying[J]. *Drying Technology*, 2008, 26(4): 404–412.
- [2] 徐庆, 耿县如, 李占勇. 喷雾冷冻干燥对颗粒产品形态的影响[J]. *化工进展*, 2013, 32(2): 270–275.
- [3] Leuenberger H, Plitzko M, Puchkov M. Spray-freeze-drying in a fluidized bed at normal and low pressure[J]. *Drying Technology*, 2006, 24(6): 711–719.
- [4] 李占勇, 徐庆, 吴中华, 等. 一种惰性粒子喷雾冷冻干燥设备及方法: 201110103036.9[P]. 2013–03–08.
- [5] 武秀胜, 徐庆, 王瑞芳, 等. 微米级液滴撞击低温球形颗粒的涂敷冻结[J]. *天津科技大学学报*, 2019, 34(3): 43–48.
- [6] Nandiyanto A B D, Okuyama K. Progress in developing spray-drying methods for the production of controlled morphology particles: From the nanometer to submicrometer size ranges[J]. *Advanced Powder Technology*, 2011, 22(1): 1–19.
- [7] 耿县如, 徐庆, 李占勇, 等. 喷雾冷冻法单个液滴冻结过程模拟[J]. *化工进展*, 2012, 31(5): 981–986.
- [8] 徐庆, 王瑾, 李苗苗, 等. 单液滴撞击冷板面的实验和模拟[J]. *化工学报*, 2016, 67(10): 4160–4168.
- [9] 王瑾, 李占勇, 徐庆, 等. 单液滴撞击水平冷表面的模拟研究[J]. *天津科技大学学报*, 2014, 29(1): 36–41.
- [10] 徐庆, 李占勇, 王瑞芳, 等. 单液滴撞击球形表面的涂敷效果[J]. *天津科技大学学报*, 2013, 28(1): 50–54.
- [11] Xu Q, Li Z Y, Wang J, et al. Characteristics of single droplet impact on cold plate surfaces[J]. *Drying Technology*, 2012, 30: 1756–1762.

责任编辑: 郎婧