

河北抚宁海湾扇贝养殖区浮游植物与水质因子的相关研究

卜世勋¹, 张福崇², 方笑², 李永仁¹

(1. 天津农学院 水产学院, 天津市水产生态及养殖重点实验室, 天津 300384; 2. 河北省海洋与水产科学研究院, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 为研究抚宁海湾扇贝养殖区浮游植物变化特征, 探讨水质因子对浮游植物的影响, 2020年5月—11月, 每月测定该海域的主要水质因子, 统计浮游植物。结果表明: 共鉴定浮游植物69种, 优势种33种; 浮游植物密度 $(8.3\sim 267.9)\times 10^4$ cell/L, 5月份最高; 生物多样性指数为0.458~3.747, 均匀度指数0.099~0.796, 丰富度指数0.933~4.755。海水水温范围11.8~26.8℃, 盐度28.8~34.0, 活性硅酸盐($\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$)含量0.025~0.627 mg/L, 硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)浓度0.057~0.284 mg/L, 均呈“上升-下降”趋势; pH范围为7.867~8.190, 化学需氧量(COD)为0.260~1.415 mg/L, 活性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)0.003~0.006 mg/L, 变化趋势为“下降—上升”; 对优势种与水质因子的分析表明, 影响该海域浮游植物变化的主要环境因子为活性硅酸盐、盐度、活性磷酸盐和硝酸盐氮; 裸藻门与活性磷酸盐、盐度呈正相关, 与活性硅酸盐、硝酸盐氮呈负相关; 甲藻门与活性硅酸盐呈正相关, 与活性磷酸盐、硝酸盐氮呈负相关; 隐藻门与活性硅酸盐、盐度成正相关, 与硝酸盐氮呈负相关。

关键词: 海湾扇贝养殖区; 营养盐; 浮游植物; 冗余分析

中图分类号: S932 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)10-0150-09

DOI: 10.11759/hyxx20210926002

河北省秦皇岛海域位于渤海西部, 水质清肥, 沙砾底质, 是我国海湾扇贝 *Argopecten irradians* 的主要养殖区^[1], 主要分布于离岸1.5~4海里的浅海。

海湾扇贝属软体动物门, 瓣鳃纲, 异柱目, 扇贝科, 海湾扇贝属。中国科学院海洋研究所于1982年由北美洲引入国内养殖, 是我国的四大养殖贝类之一^[2]。海湾扇贝对养殖水体依赖性高, 其生存与生长需要海水保持一定的动态平衡, 海水中任何指标的异常都会对海湾扇贝的健康养殖造成威胁^[3]。海湾扇贝滤食海水中的单细胞藻类, 影响海水的透明度, 同时向水体中排泄营养盐, 为浮游植物的生长提供条件^[4], 导致海域的营养盐、浮游植物具有独特的分布规律。

2009—2014年期间, 秦皇岛近海连续6年发生抑食金球藻褐潮, 导致海湾扇贝滞长甚至死亡, 损失巨大^[5]。2010年, 褐潮发生规模最大面积达到了3 350 km², 致使河北全省经济直接损失2亿元^[6]。因此, 该海域浮游植物与水质因子受到广泛关注, 张建乐等^[7]调查了2004年秦皇岛海域浮游植物构成, 发现硅藻种类数占浮游植物总种数的81.8%; 慕建东等^[8]研究了2010年秦皇岛海域N/P、盐度、硝

酸盐、硅酸盐、亚硝酸盐、水温等与浮游植物群落结构特征的关系; 也有研究表明氮盐是导致水体富营养化的主要因子^[9]。本团队选取海湾扇贝养殖密集区(抚宁县离岸2.5海里浅海), 持续监测常规水质因子和浮游植物, 分析二者的相关性, 以期对海湾扇贝浅海养殖以及海域生态治理提供数据参考。

1 研究方法

1.1 试验材料

2020年5月至11月, 每月由抚宁人造河口海湾扇贝养殖区(离岸2.5海里, 如图1)采集表层海水样本。

收稿日期: 2021-09-26; 修回日期: 2022-04-07

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0901404); 天津市海水养殖产业技术体系创新团队(ITTMR2021003); 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS49); 天津市科技计划项目(21ZYCGSN00350)

[Foundation: National Key R&D Program of China, No. 2018YFD0901404; Tianjin modern Agro-industry technology research system aquaculture shellfish breeding positions, No. ITTMR2021003; Earmarked fund for modern Agro-industry technology research system, No. CARS-49; Tianjin project of science and technology, No. 21ZYCGSN00350]

作者简介: 卜世勋(1996—), 男, 天津汉沽人, 硕士研究生, 主要从事海水养殖技术研究, E-mail: 535804199@qq.com; 李永仁, 通信作者, 副教授, 研究方向: 贝类遗传育种, E-mail: lyr1018@163.com

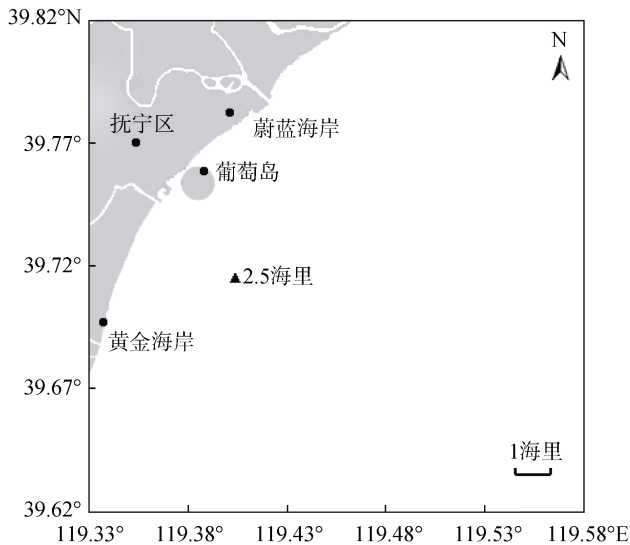


图1 秦皇岛海湾扇贝养殖区调查站位图

Fig.1 Location of survey stations in the Qinhuangdao Bay scallop breeding area

1.2 试验方法

现场测定温度、盐度，海水样本带回实验室，依照 GB 17378.4—2007^[10]、GB 17378.7—2007^[11]、GB/T 12763.4—2007^[12]测定 COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ，镜检样本的浮游植物种类、密度。

1.3 数据处理

对浮游生物种类数、主要类群、优势种、数量、生态指数进行分析。相关指标计算公式如下^[13]：

1) 物种优势度(Y)

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

2) 生物多样性指数 (H' , Shannon - Weaver index)

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

3) Pielou 物种均匀度指数(J)

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

4) Margalef 丰富度指数(D)

$$D = \frac{S-1}{\log_2 N}, \quad (4)$$

5) 浮游植物密度(N')采用浓缩计数法，计算公式为：

$$N' = \frac{nV'}{VV''}, \quad (5)$$

其中， N' 为浮游植物密度(cell/L); n 为取样计数所得的细胞数目(个); V' 为水样浓缩体积(mL); V 为水样浓缩前体积(mL); V'' 为取样体积(mL); P_i 为第 i 种的个体数量与样品总数量的比值; S 为样品的总种类数; N 为样品的总个体数; n_i 为第 i 种的个体数量; f_i 为第 i 种在各个站位分析样品中出现的频率; 优势度 $Y \geq 0.02$ 时，判定为优势种。

使用 Canoco 5.0 对浮游植物优势种与水质因子进行冗余分析及排序图绘制^[14]，分析二者的关系。

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落特征

调查海域 2020 年鉴定浮游植物 69 种(表 1)，属硅藻门、绿藻门、蓝藻门、裸藻门、甲藻门、金藻门、隐藻门等 7 门。其中硅藻 48 种，约占总浮游植物种数目的 70%，甲藻 14 种，绿藻 3 种，蓝、裸、金、隐藻各 1 种，常见种类包括中肋骨条藻、舟形藻、菱形藻等，甲藻门常见种有锥状斯克里普藻、微小原甲藻等。

浮游植物优势种共计 33 种($Y > 0.02$)，硅藻门 25 种，甲藻门 6 种，裸藻门、隐藻门各 1 种。5 月份的优势种数目最少，骨条藻的优势度最高($Y = 0.47$)；8—10 月优势种分别为 12 种、11 种、8 种，8 月份中肋骨条藻、丹麦细柱藻优势度明显，柔弱伪菱形藻、刚毛根管藻分别为 9、10 月份的主要优势藻种。

调查海域浮游植物密度(图 2)为 $(8.3 \sim 267.9) \times 10^4$ cell/L，5 月份浮游植物密度最高，6 月份浮游植物密度骤降至 47.7×10^4 cell/L，10 月浮游植物密度最低。

浮游植物 Shannon-Weaver 生物多样性指数(图 3)范围 0.458~3.747，月平均 2.694，5 月份生物多样性指数为 0.458，其他月份多样性指数均为 2~3 之间。根据 Shannon-Wiener 多样性指数评价等级^[15]，该海域大部分时间处于中污染状态。

Pielou 物种均匀度指数范围(图 3)0.099~0.796，均值为 0.615。根据 Pielou 物种均匀度指数评价等级^[16]，除 5 月份为重污染状态，6—11 月均处于清洁—寡污型状态。

Margalef 物种丰富度指数范围(图 3)0.933~4.755，均值为 2.525，9 月份物种丰富度指数为 4.755，11 月为 0.933，其余月份的物种丰富度处于 1~3 之间。按照 Margalef 物种丰富度指数评价等级^[17]，该海域基本处于轻污染—中污染状态。

表 1 浮游植物种类组成及优势度

Tab. 1 Species composition and dominance of phytoplankton

	种类	时间						
		5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月
硅藻门	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	+	+	0.28	0.14	0.19		0.25
	骨条藻 <i>Skeletonema</i> sp.	0.47	0.25	+				
	条纹小环藻 <i>Cyclotella striata</i>	+	+			+		
	大洋角管藻 <i>Cerataulina pelagica</i>				0.02		+	
	斯氏根管藻 <i>Rhizosolenia stolterfothii</i>				+	0.03		
	刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i>			0.04	+	+	0.46	0.18
	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	+	0.05	+	0.03	+	0.03	
	曲舟藻 <i>Pleurosigma</i> spp.		+		+	+	+	0.03
	长角盒型藻 <i>Biddulphia longicruris</i>				+			
	角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.		0.02					
	丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>				0.11	+	+	0.37
	地中海细柱藻 <i>Leptocylindrus mediterraneus</i>				0.03	0.03		
	长菱形藻 <i>Nitzschia longissima</i>	+	+	+	+	+	+	
	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i>				+	+		
	尖刺拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> Hasle		+	0.05	0.03	0.02	0.08	
	菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	+	0.10	+				
	柔弱伪菱形藻 <i>Pseudonitzschia delicatissima</i>					0.27	0.05	0.05
	新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i>	+				+	0.03	
	洛氏菱形藻 <i>Nitzschia lorenziana</i>	+		+		+	+	
	奇异菱形藻 <i>Nitzschia paradoxa</i> (Gmelin) Grunow	+				+		
	环纹娄氏藻 <i>Lauderia annulata</i>					0.08	+	
	海链藻 <i>Thalassiosira</i> sp.					+		
	圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i>		+			0.04		
	诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>				+	+		
	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.					+	+	
	羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.	+				+	+	
	沟链藻 <i>Aulacoseira</i> sp.	+				+		
	翼茧形藻 <i>Amphiprora alata</i>			+	+	+		
	蜂腰双壁藻 <i>Diploneis bombus</i>						+	
	并基角毛藻 <i>Chaetoceros decipiens</i>	+						
	窄细角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i> var. <i>affinis</i>	+		+	0.03			
	聚生角毛藻 <i>Chaetoceros socialis</i>				+			
	圆柱角毛藻 <i>Chaetoceros teres</i>	+						
	罗氏角毛藻 <i>Chaetoceros lauderi</i>				0.02	+		
	拟旋链角毛藻 <i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>				0.08			
	扭链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>				0.03			
	双突角毛藻 <i>Chaetoceros didymus</i> Ehrenberg				+			
	大西洋角毛藻 <i>Chaetoceros atlanticus</i>					0.04		
	扁面角毛藻 <i>Chaetoceros compressus</i>				0.03			
	丹麦角毛藻 <i>Chaetoceros debilis</i> Cleve		+			0.08		
	日本星杆藻 <i>Asterionella japonica</i>	+	+			+	+	0.03
	柔弱根管藻 <i>Rhizosolenia delicatula</i>	+						

续表

种类	时间						
	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
硅藻门	布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i>			+			
	短楔形藻 <i>Licmophora abbreviata</i>			+	+	+	
	浮动弯角藻 <i>Eucampia zodiacus</i> Ehrenberg				+		
	菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>			+			
	细弱圆筛藻 <i>Coscinodiscus subtilis</i>			0.07	+		
	辐射圆筛藻 <i>Coscinodiscus radiatus</i>				+		
绿藻门	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>				+		
	纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> sp.	+					
	小球藻 <i>Chlorella</i> sp.		+				
蓝藻门	束毛藻 <i>Trichodesmium</i> sp.				+		
裸藻门	裸藻 <i>Euglena</i> sp.				0.02	+	
甲藻门	锥状斯克里普藻 <i>Scrippsiella trochoidea</i>	+	+	+	+	0.02	0.04
	反曲原甲藻 <i>Prorocentrum sigmoides</i>			0.19	+	0.02	
	微小原甲藻 <i>Prorocentrum minimum</i>	+	0.08	+	+	0.02	
	渐尖鳍藻 <i>Dinophysis acuminata</i>					+	0.04
	塔玛亚历山大藻 <i>Alexandrium tamarense</i>	+	+				
	具刺膝沟藻 <i>Gonyaulax spinifera</i>		+		+		
	春膝沟藻 <i>Gonyaulax verior</i>	+	+	+	+		
	原多甲藻 <i>GenusProtoperidinium</i> sp.		+				
	光甲多甲藻 <i>Peridinium pellucidum</i>				+		
	点刺原多甲藻 <i>Protoperidinium punctulatum</i>	+	+		+		
	环沟藻 <i>Gyrodinium</i> sp.		+	+	+		
	多米泥环沟藻 <i>Gyrodinium dominans</i>		+		+		
	叉状角藻 <i>Ceratium furca</i>		+	0.08	+	+	
	异甲藻 <i>Heterocapsa</i> sp.	0.03	0.19	+	+	+	
金藻门	小等刺硅鞭藻 <i>Dictyocha fibula</i>	+	+				
隐藻门	隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.	+	0.15	+	+	0.03	

注：“+”代表此物种在该月出现，表中数字为该物种在该月份的优势度

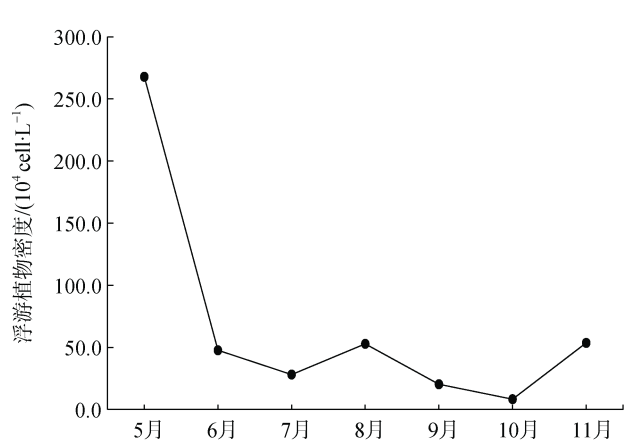


图2 海湾扇贝养殖区浮游植物密度变化情况

Fig. 2 Changes in phytoplankton density in the bay scallop culture area

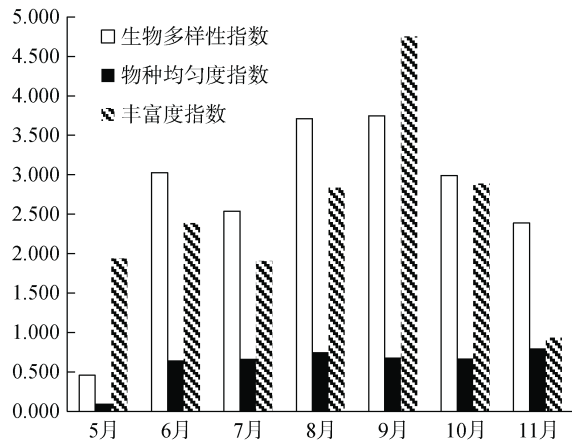


图3 海湾扇贝养殖区浮游植物群落特征指数

Fig. 3 Phytoplankton community characteristic index in the bay scallop culture area

2.2 水质因子变化特征

2020 年海湾扇贝养殖区水质因子变化情况见图 4。海水水温变化范围 11.8~26.8 ℃, 盐度变化范围为 28.8~34.0, 均呈先升后降的趋势; pH 变化范围为 7.867~8.190, 化学需氧量为 0.260~1.415 mg/L, 基本呈“下降—上升”趋势; 活性磷酸盐含量维持在 0.003~0.006 mg/L 之间, 5 月、11 月含量最高, 为 0.006 mg/L, 10 月份的活性磷酸盐含量最低, 为 0.003 mg/L; 活性硅酸盐含量为 0.025~0.627 mg/L 之间, 7 月份最高, 11 月最低, 呈“上升—下降”趋势; 氮盐以硝酸盐氮为主, 硝酸盐氮含量为 0.057~

0.284 mg/L, 8 月份含量最高, 11 月含量最低, 呈“上升—下降”趋势, 亚硝酸盐氮及氨氮含量极低。

2.3 冗余分析(RDA)分析

参加排序的水质因子共解释了 94.26% 的物种累积变化信息。分析结果(表 2)表明, 轴 1 和轴 2 解释了总体的 99.79% 的物种变化信息, 特征值分别为 0.810 5 和 0.130 0。常规水质因子检验结果显示(表 3), 活性硅酸盐、盐度、活性磷酸盐和硝酸盐氮的解釋度分别为 47.3%、20.1%、13.0%、13.8%, 说明这四种水质因子是影响该海域浮游植物优势种分布的关键环境因子, 但不能独立解释浮游植物群落的特征变化。

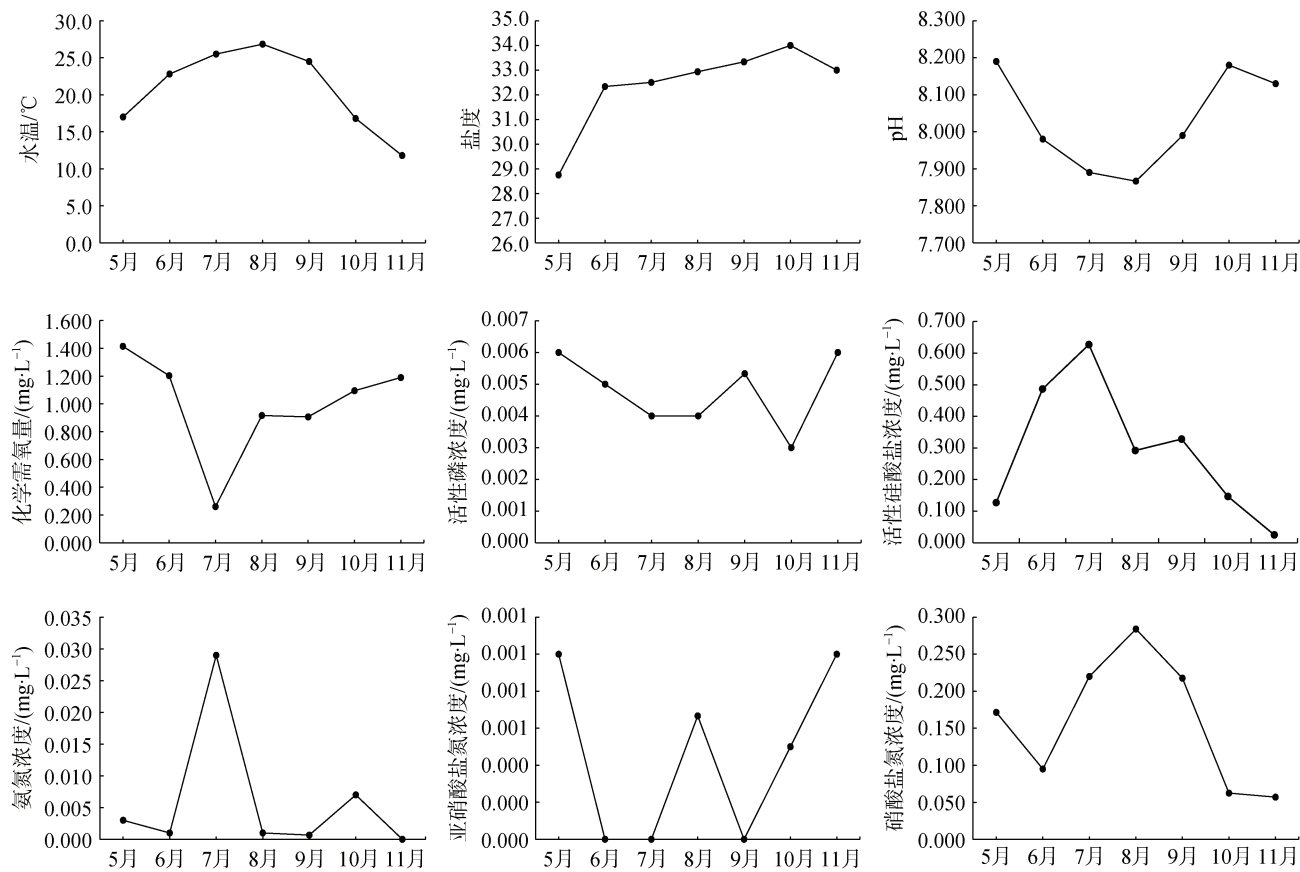


图 4 调查海域常规因子指标变化情况

Fig. 4 Changes in conventional factor indicators in the surveyed sea area

表 2 浮游植物优势种与常规水质因子的 RDA 分析中排序轴信息

Tab. 2 Ordination axis information in the redundancy analysis of dominant phytoplankton species and conventional water quality factors

排序轴	1	2	3	4
特征值	0.810 5	0.130 0	0.001 8	0.000 3
解释变量(累积)/%	81.05	94.05	94.23	94.26
相关性	0.991 0	0.968 7	0.224 4	0.462 0
物种—环境相关性累计变化率/%	81.99	99.79	99.97	100.00

表 3 常规水质因子的显著性检验

Tab. 3 Significance test of conventional water quality factors

常规水质因子	解释度/%	<i>F</i>	<i>P</i>
活性硅酸盐	47.3	4.5	0.058
盐度	20.1	2.5	0.118
活性磷酸盐	13.0	2.0	0.180
硝酸盐氮	13.8	4.8	0.088

通过 Canoco 5.0 软件对 33 种浮游植物优势种以门为单位与常规水质因子进行分析(图 5), 活性硅酸盐与活性磷酸盐呈负相关; 盐度与活性磷酸盐呈正相关, 与硝酸盐氮呈负相关; 活性磷酸盐与硝酸盐氮呈负相关。硅藻门、裸藻门与活性磷酸盐、盐度呈正相关, 与活性硅酸盐、硝酸盐氮呈负相关, 且硝酸盐氮、活性硅酸盐、盐度影响较大, 受活性磷酸盐影响较小; 甲藻门与活性硅酸盐呈正相关, 与活性磷酸盐、硝酸盐氮呈负相关, 受活性磷酸盐影响程度小; 隐藻门与活性硅酸盐、盐度成正相关, 与硝酸盐氮呈负相关。

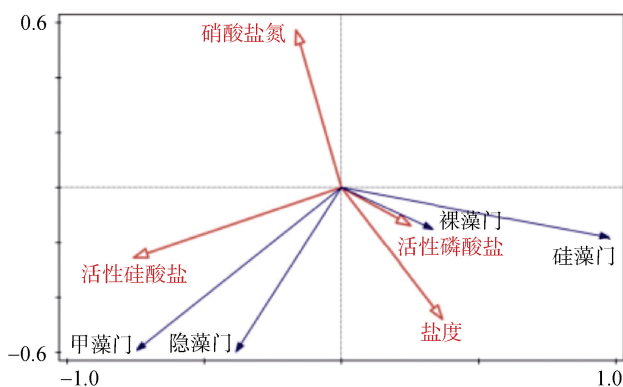


图 5 浮游植物优势种与常规水质因子的冗余分析(RDA)排序

Fig. 5 Redundancy analysis sequencing of dominant phytoplankton species and conventional water quality factors

3 讨论

3.1 海湾扇贝养殖区水质因子变化特征

海湾扇贝养殖区水温变化呈季节性变化, 海水盐度与季节关系不明显, 除 5 月份低于 30.0 外, 6—11 月盐度维持在 32.3—34.0 之间, 褐潮期间秦皇岛海域 6—7 月盐度变化为 26.0—29.0 且日间波动不定^[18], 相比较而言, 监测期间该海域海水盐度稳定

性较高。6—9 月份, 该海域 pH 值偏低, 可能与降雨及浮游植物密度降低有关, 光合作用较弱导致海水 CO₂ 浓度升高, 降低海水的 pH 值^[18]。各月份化学需氧量较低, 均符合国家一类水质标准(COD≤2 mg/L), 有利于海洋生物、浮游植物的生存。

调查海域的活性磷酸盐含量各月份基本无明显变化, 相差最大为 0.003 mg/L。三氮营养盐浓度: 硝酸盐氮>氨氮>亚硝酸盐氮, 亚硝酸盐氮含量极低, 硝酸盐氮含量在 6—8 月上升, 氨氮含量在 7 月最高, 可能与在此期间海湾扇贝苗种移入海中有关^[19]。活性硅酸盐浓度在 7 月份以后持续降低, 推断与海湾扇贝对硅藻类的滤食有关。根据 Justic 等^[20]建立的营养盐化学计量限制标准: 若 Si/P>22, N/P>22, 则受磷酸盐限制; 若 N/P<10, Si/N>1, 则受无机氮限制; 若 Si/P<10, Si/N<1, 则受硅酸盐限制。海水中营养元素低于阈值($C_{DIN}=0.028$ mg/L, $C_P=0.031$ mg/L, $C_{Si}=0.0028$ mg/L), 可判断该元素为限制因子^[21]。根据以上原则判定, 调查海域 5—11 月均表现为磷酸盐限制, 11 月也存在硅酸盐限制。

3.2 浮游植物变化规律

调查海区共鉴定 69 种浮游植物, 其中硅藻 48 种, 甲藻 14 种, 浮游植物组成在各不同月份差异明显, 浮游植物结构与福建菲律宾蛤仔育苗垦区的调查结果相似^[22], 说明该海区内浮游植物群落结构较为稳定。

常见浮游植物种群中, 硅藻门的角毛藻属、菱形藻属和甲藻门的原甲藻属、多甲藻属的种类较多。原甲藻属是扇贝、牡蛎和幼鱼等的饵料, 但其大量繁殖时会引发赤潮, 成为重要的赤潮种^[23]。

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^[24], 与生物种类呈正相关。本调查中, 5 月份浮游植物多样性指数偏低, 可能与骨条藻优势度过大有关, 另外, 优势种抢占了其他浮游植物种类生存空间, 导致均匀度降低^[13]。秦皇岛海域为开放型海域, 调查海域站位由于距岸远、海水流动性较强、受到陆源排放物影响小等因素^[25], 6—10 月调查海域浮游植物群落指标普遍较高。

3.3 水质因子与优势种的关系

调查海域的水质因子中, 活性硅酸盐、盐度、活性磷酸盐和硝酸盐氮是影响该海域浮游植物分布的

关键环境因子。N、P 和 Si 是海洋微藻类生存三大元素,对浮游植物的群落有重要作用^[26]。

硅藻门全年均为该海域浮游生物主体,骨条藻的优势度在 5 月、6 月较大,有研究表明氮限制和高盐度会促进骨条藻细胞的生长及合成营养物质^[27],该海域内 5—6 月氮营养盐浓度低,促进了骨条藻的成为主要优势种,而活性硅酸盐 6—7 月浓度较高,促使中肋骨条藻连续 3 月均成为优势种。其中,成为优势种不仅由营养盐所影响,还由于沿海风、水温等发挥重要作用^[28]。硅藻门与活性磷酸盐、盐度呈正相关,与活性硅酸盐、硝酸盐氮呈负相关。硅藻类浮游植物在种数、丰度均远高于其他藻类,由于硅藻生长的完整周期中需要摄取大量的活性硅酸盐,而调查海区内活性硅酸盐被硅藻吸收利用,导致活性硅酸盐含量减少。石峰等^[29]研究表明:氮、磷、硅营养盐的减少则随浮游植物增加而被消耗,硅酸盐被硅藻类浮游植物大量消耗,并表现出补充量不足,导致硅藻与硅酸盐呈负相关现象。硅藻在 15~35 °C 之间均可较好地生长^[30],该海域中部分月份表现氮营养盐含量不高却被硅藻积极利用,且水温达到 26.8 °C,也为硅藻提供了生长环境进行大量繁殖。

参考文献:

- [1] 方笑,张福崇,王六顺,等.海湾扇贝(*Argopecten irradians*)新品种“海益丰 12”养殖效果评价[J].河北渔业,2019,6: 1-3.
FANG Xiao, ZHANG Fuchong, WANG Liushun, et al. Evaluation of the breeding effect of a new species of bay scallop (*Argopecten irradians*) “Haiyifeng 12”[J]. Hebei Fisheries, 2019, 6: 1-3.
- [2] GUO X, LUO Y. Scallops and scallop aquaculture in China, Developments in Aquaculture and Fisheries Science[M]. Elsevier, 2016: 937-952.
- [3] 胡博,谭丽菊,王江涛.昌黎近岸海域扇贝养殖区沉积物-水界面溶解无机氮磷及尿素扩散通量研究[J].海洋环境科学,2017,36(6): 864-870.
HU Bo, TAN Liju, WANG Jiangtao. Study on the diffusion fluxes of dissolved inorganic nitrogen phosphorus and urea across sediment-water interface in scallop culture area of Changli coastal waters[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(6): 864-870.
- [4] 郑向荣,张福崇,吴新民,等.昌黎县海湾扇贝养殖区的营养盐[J].河北渔业,2011,1: 35-38.
ZHENG Xiangrong, ZHANG Fuchong, WU Xinmin, et al. Nutrients in bay scallop culture area in Changli County[J]. Hebei Fisheries, 2011, 1: 35-38.
- [5] 晋利,丁洁然.褐潮对秦皇岛近海养殖业的危害及其防治对策[J].中国环境管理干部学院学报,2016,26(1): 84-85.
JIN Li, DING Jieran. Impacts of brown tide on Qinhuangdao inshore marine aquaculture and prevention and cure countermeasures[J]. Journal of China Institute of Environmental Management, 2016, 26(1): 84-85.
- [6] 公晗.秦皇岛海域“褐潮”对几种海洋生物影响的初步研究[D].北京:中国科学院大学(海洋研究所),2014.
GONG Han. Preliminary study on the effects of “brown tide” in Qinhuangdao on marine organisms[D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2014.
- [7] 张建乐,张秋丰.秦皇岛沿岸浮游植物与赤潮生物的初步研究[J].河北渔业,2007,7: 7-12.
ZHANG Jianle, ZHANG Qiufeng. A preliminary study on phytoplankton and red tide organisms along the coast of Qinhuangdao[J]. Hebei Fisheries, 2007, 7: 7-12.
- [8] 慕建东,郑向荣,赵振良,等.秦皇岛海域赤潮期间浮游植物的生态特征[J].中国水产科学,2015,22(2): 288-301.
MU Jiandong, ZHENG Xiangrong, ZHAO Zhenliang, et al. Ecological characteristics of phytoplankton in Qinhuangdao coastal areas during the red-tide period[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(2): 288-301.
- [9] 赵广拓,刘云鹏,张秀文,等.昌黎县海湾扇贝养殖海域水质调查与评价[J].河北渔业,2019,2: 35-41.
ZHAO Guangtuo, LIU Yunpeng, ZHANG Xiuwen, et al. Investigation and evaluation of the water quality of the scallop culture area in Changli County[J]. Hebei Fisheries, 2019, 2: 35-41.
- [10] GB 17378.4—2007, 海洋监测规范 第4部分:海水分析[S].
GB 17378.4—2007, The specification for marine monitoring—Part 4: Seawater analysis[S].
- [11] 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[S].
GB 17378.7—2007, The specification for marine monitoring—Part 7: Ecological survey for offshore pollution and biological monitoring[S].
- [12] GB/T 12763.4—2007, 海洋调查规范 第4部分:海水化学要素调查[S].
GB/T 12763.4—2007, Specifications for oceanographic survey—Part 4: Survey of chemical parameters in sea water[S].
- [13] 籍辰旭,陈逍遥,陈火荣,等.三沙湾春季浮游植物群落结构特征[J].渔业研究,2021,43(1): 42-52.
JI Chenxu, CHEN Xiaoyao, CHEN Huorong, et al. Characteristic of phytoplankton community structure in Sansha Bay of Fujian Province in spring[J]. Journal of

- Fisheries Research, 2021, 43(1): 42-52.
- [14] 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 Na, DUAN Yuanliang, BAO Yanlin, 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.
- [15] 李钊, 李秋华, 陈文生, 等. 贵州三板溪水库后生浮游动物群落结构的动态变化[J]. 湖泊科学, 2016, 28(2): 340-349.
LI Yao, LI Qihua, CHEN Wensheng, et al. Dynamic changes of metazooplankton community structure in Sanbanxi Reservoir, Guizhou Province[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(2): 340-349.
- [16] 吴天浩, 刘劲松, 邓建明, 等. 大型过水性湖泊——洪泽湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 440-448.
WU Tianhao, LIU Jinsong, DENG Jianming, et al. Community structure of phytoplankton and bioassessment of water quality in a large water-carrying lake, Lake Hongze[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(2): 440-448.
- [17] 马方方, 张万磊, 张永丰, 等. 2013—2014 年秦皇岛海域褐潮期间浮标主要水质参数变化[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(4): 520-525.
MA Fangfang, ZHANG Wanlei, ZHANG Yongfeng, et al. Data changes of main water quality parameters of monitoring buoys during brown tide blooms in Qinhuangdao between 2013 and 2014[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(4): 520-525.
- [18] 张艳军, 赵润德, 胡跃诚, 等. 强降雨对胶州湾生源要素补充和分布的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 79-88.
ZHANG Yanjun, ZHAO Runde, HU Yuecheng, et al. The influence of typhoon-induced precipitation on biogenic element supplementary and distribution of Jiaozhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(4): 79-88.
- [19] 于潇, 李希磊, 杨俊丽, 等. 烟台四十里湾扇贝养殖区水质评价及对浮游植物的影响[J]. 水产学杂志, 2020, 33(5): 58-64.
YU Xiao, LI Xilei, YANG Junli, et al. Evaluation and effect of water quality on phytoplankton of scallop culture area in Sishili Bay in Yantai[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2020, 33(5): 58-64.
- [20] DUBRAVKO J, NANCY N. RABALAIS, R. Eugene Turner, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 40(3): 339-356.
- [21] 陈丹丹, 庞巧珠, 涂志刚, 等. 后水湾深水网箱养殖区浮游植物群落季节变化及其与环境因子的关系[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(1): 73-80.
CHEN Dandan, PANG Qiaozhu, TU Zhigang, et al. Seasonal variation of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in deep-water cage aquaculture area of Houshui bay[J]. Marine Environmental Science, 2021, 40(1): 73-80.
- [22] 祁剑飞, 郑雅友, 巫旗生, 等. 菲律宾蛤仔育苗垦区浮游植物群落结构及其与水质因子的关系[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(1): 55-60.
QI Jianfei, ZHENG Yayou, WU Qisheng, et al. Phytoplankton community structure and its relationship with water quality factors in the breeding pond of *Ruditapes Philippinarum*[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2020, 59(1): 55-60.
- [23] 陶邦一, 毛志华, 朱乾坤. 基于 MODIS 的东海原甲藻赤潮识别算法研究[A]. 浙江省减灾委员会办公室、浙江省科学技术协会. 第二届浙江减灾之路学术研讨会论文集[C]. 浙江省减灾委员会办公室、浙江省科学技术协会, 2016: 9.
TAO Bangyi, MAO Zhihua, ZHU Qiankun. Research on *Prorocentrum donghaiense* red tide recognition algorithm based on MODIS[A]. Office of Zhejiang Disaster Reduction Committee, Zhejiang Science and Technology Association. Proceedings of the Second Zhejiang Disaster Reduction Road Symposium[C]. Office of Zhejiang Disaster Reduction Committee, Zhejiang Science and Technology Association, 2016: 9.
- [24] 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.
LENG Chunmei, CAO Zhenjie, ZHANG Jinlu, et al. Community characteristic of plankton and water quality assessment of the Yellow River Estuary[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(3): 360-365.
- [25] 陈丽梅, 刘利华, 贾晓平, 等. 2012 年大神堂贝类养殖区浮游生物的群落结构[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(1): 28-33.
CHEN Limei, LIU Lihua, JIA Xiaoping, et al. Plankton community structure in shellfish culture area of Dashedang in 2012[J]. Journal of Hydroecology, 2014, 35(1): 28-33.
- [26] 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.
WU Dan, HAN Long, MEI Pengwei, et al. Phytoplankton community characteristics and environmental impact factors in the Bohai Bay[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(4): 68-73.
- [27] 胡婧文, 弋钰昕, 尤庆敏, 等. 骨条藻属硅藻的分

- 类、生态及生理研究进展[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2020, 49(6): 698-708.
- HU Jingwen, YI Yuxin, YOU Qingmin, et al. Taxonomic, ecological and physiological research progress in *Skeletonema* (Bacillariophyta)[J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Science), 2020, 49(6): 698-7-8.
- [28] LI Chunqiang, ZHU Baibi, CHEN Hong, et al. The relationship between the *Skeletonema costatum* red tide and environmental factors in Hongsha Bay of Sanya, South China Sea[J]. Journal of Coastal Research, 2009, 25(3): 651-658.
- [29] 石峰, 王修林, 石晓勇, 等. 东海沉积物—海水界面营养盐交换通量的初步研究[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(1): 5-8.
- SHI Feng, WANG Xiulin, SHI Xiaoyong, et al. Benthic flux of dissolved nutrients at the sediment-water interface in the East China Sea[J]. Marine Environmental Science, 2004, 23(1): 5-8.
- [30] 王利利. 水动力条件下藻类生长相关影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- WANG Lili. Research on the Relevant Factors of the Algal Growth in Hydrodynamic Condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

Relationship between phytoplankton and water quality factors in the *Argopecten irradians* culture area of Funing Bay, Hebei

BU Shi-xun¹, ZHANG Fu-chong², FANG Xiao², LI Yong-ren¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Aqua-Ecology and Aquaculture, College of Fisheries, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2. Hebei Ocean and Fisheries Science Research Institute, Qinhuangdao 066000, China)

Received: Sep. 26, 2021

Key words: *Argopecten irradians* culture area; nutrients; phytoplankton; redundancy analysis

Abstract: To study the change in the characteristics of phytoplankton in the scallop culture area of Funing Bay and to explore the influence of water quality factors on phytoplankton, the main water quality factors of the sea area were determined monthly from May to November 2020, and the phytoplankton was counted. A total of 69 species of phytoplankton were identified, of which 33 were dominant. The density of phytoplankton in the studied area is $(8.3-267.9) \times 10^4$ cell/L and is the highest in May. The biodiversity index is 0.458–3.747, the evenness index is 0.099–0.796, and the richness index is 0.933–4.755. The seawater temperature range is 11.8 °C–26.8 °C, the salinity is 28.8–34.0, the active silicate (SiO_3^{2-} -Si) content is 0.025–0.627 mg/L, and the nitrate nitrogen (NO_3^- -N) concentration is 0.057–0.284 mg/L, with an “up-down” trend. The pH range is 7.867–8.190, chemical oxygen demand (COD) is 0.260–1.415 mg/L, active phosphate (PO_4^{3-} -P) is 0.003–0.006 mg/L, and the change trend is “down-up.” An analysis of dominant species and water quality factors shows that the main environmental factors affecting the changes in phytoplankton in this sea area are active silicate, salinity, active phosphate, and nitrate nitrogen. *Bacillariophyta* and *Euglenophyta* are positively correlated with active phosphate and salinity and negatively correlated with active silicate and nitrate nitrogen. *Pyrrophyta* is positively correlated with active silicate and negatively correlated with active phosphate and nitrate nitrogen. *Cryptophyta* is positively correlated with active silicate and salinity and negatively correlated with nitrate.

(本文编辑: 康亦兼)