

文章编号: 1674-5566(2019)06-0902-09

DOI:10.12024/jsou.20180402303

长江口封闭养殖海域水质污染及潜在风险

林庆莹, 白凯强, 孙 彬, 何培民

(上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306)

摘 要: 针对上海奉贤碧海金沙封闭养殖海域的水质状况及浮游植物动态变化进行监测分析, 并据此分析养殖期间的水质污染状况和潜在风险。调查时间为 2016 年 4 月、7 月、10 月及 2017 年 1 月。水质调查表明: 4 月、7 月、10 月, 调查海域 DIP、DIN 和 COD 浓度保持较高水平, 其中, DIP、DIN 浓度在 4 月最高, 而 COD 浓度最高值出现在 7 月。而养殖结束后, 即 10 月到次年 1 月, 水质状况明显改善。浮游植物共发现 7 门 42 种, 其中秋季、夏季居多。浮游植物四季演替明显, 春季优势度最高为隐藻门的尖尾蓝隐藻 (*Chroomonas acuta*), 夏季则为绿藻门的小球藻 (*Chlorella*), 秋季蓝藻门的卷曲鱼腥藻 (*Anabaena circinalis*) 为主要优势种, 冬季则为蓝藻门的颤藻 (*Oscillatoria*), 其中小球藻四季均为优势种。浮游植物丰度较高集中在秋季、夏季。Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 和均匀度指数 (J) 分别在 0.709 ~ 2.088 和 0.440 4 ~ 0.870 7。分析表明: 该海域浮游植物群落结构稳定性较差且水质污染较重, 影响浮游植物丰度的环境因子为营养盐浓度和温度, 卷曲鱼腥藻和中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 分别在夏季和夏、秋季优势度较高, 具有潜在造成赤潮的风险, 需控制养殖容量, 结合生态修复, 优化养殖环境。

关键词: 浮游植物; 养殖; 水质污染; 潜在风险

中图分类号: S 917 **文献标志码:** A

浮游植物作为河口区域和近海生态系统的主要初级生产者^[1], 其生物量的多少对海域的生产能力起着决定性作用^[2]。根据食物链中营养级关系, 浮游植物的生物量主要受营养盐浓度和光照条件的上行控制和浮游植物摄食者的下行控制^[3-4]。浮游植物生长受到周围环境的影响^[5], 林军等^[6]研究表明, 影响长江口外海浮游植物分布的主要环境因子为悬浮物浓度、温盐和营养盐, 这与李云等^[7]对长江口及邻近海域的研究结果相似。刘海娇等^[8]报道了东海陆架海域浮游植物群落的季节变化, 结果表明, 不同群落间存在季节的演替现象, 但主要优势群落为硅藻和甲藻, 该现象与周茜茜等^[9]的研究结果一致。

近海养殖实际上人为改变了近海生物的种类组成和群落演替。董双林等^[10]进行海湾贝类的围隔养殖实验, 发现海湾贝类的滤食作用造成了浮游植物的粒级结构变大, 研究还表明, 海湾地区赤潮灾害的发生与高密度的水产养殖有关,

养殖水体中含氮化合物可直接被浮游植物利用, 引发赤潮灾害, 水体中富营养化程度的提高, 使得藻类大量繁殖, 为形成赤潮提供了适宜条件。海水养殖活动影响海域生态环境, 并与浮游植物和浮游动物的种群组成和数量变动密切相关。养殖动物通过摄食浮游动物可以促进浮游植物的种群增长, 浮游植物的大量繁殖会改变海水特性, 进而影响浮游动物的适应性, 使得浮游动物种类减少, 群落结构简单化, 多样性指数下降, 不利于生态环境的稳定^[11]。

作为典型的近岸封闭养殖海域, 上海奉贤碧海金沙海域位于长江口南缘, 杭州湾北部, 通过引进外海海水养殖斑节对虾、东方对虾和锯缘青蟹等经济水产动物, 养殖期为 4—10 月, 每年 3 月份进水, 次年 1 月底排水, 该过程通过潮汐作用完成, 其间(除蒸发、降水外)无水体交换, 水质状况难于控制。本研究进行浮游植物群落动态季节变化的监测, 以期掌握该养殖过程中水质状况

收稿日期: 2018-04-30 修回日期: 2019-03-01

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAC07B03); 上海市海洋局科研项目(沪海科 2015-02)

作者简介: 林庆莹(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为近海海洋生物。E-mail: 1183097084@qq.com

通信作者: 何培民, E-mail: pmhe@shou.edu.cn

对浮游植物季节变化的影响和浮游植物动态变化可能带来的潜在危害,控制养殖容量,季节防治,并结合有效的生态修复,优化养殖效果。

1 材料与方法

1.1 采样时间、地点及方法

实验中浮游植物采样时间分为 4 次,分别为 2016 年 4 月 22 日、2016 年 7 月 13 日、2016 年 10 月 16 日、2017 年 1 月 15 日,采样海域平均深度为 1.5 m,采样点共设置 4 个,站位分布如图 1。水样采集时间为 2016 年 3 月至 2017 年 1 月,每月中旬采集 1 次,使用圆柱有机玻璃采水器 (2 500 mL, Shanghai) 采集海面表层 0.5 m 处的水样约 500 mL,各站点分别采集 3 个平行样,并低温环境下运输至实验室,并且由便捷式溶氧仪 (JENCO 9010, America) 原位测量温度、溶解氧 (dissolved oxygen, DO),手持式盐度计 (HAS-10, Shanghai) 测量盐度。化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 采用碱式高锰酸钾法测定; PO_4^{3-} -P、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 由 SKALAR (Skalar San + +, Netherlands) 测定,水样经 0.22 μmol 滤膜抽滤后直接测定。样品采集和处理方法参照《海洋调查规范:海水化学要素观测》(GB/T 12763.4—1991)。在每个站点采集表层约 0.5 m 处的 500 mL 的浮游植物水样,样品的采集及处理方法均按照《海洋调查规范——海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007) 进行,采得样品由 5% 的甲醛固定。所有样品集中低温运送回实验室进行分类鉴定并计数。

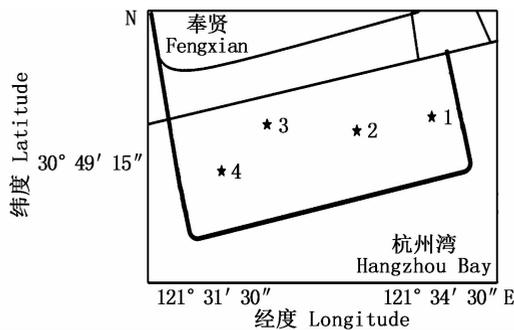


图 1 采样站点位置图

Fig. 1 The location of sampling site

1.2 数据分析

有关浮游生物的群落统计方法见如下参数 (多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用):

浮游生物的物种多样性指数的计算采用 Shannon-Wiener 指数 (H')^[12], 计算公式为

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

式中: H' 为种类多样性指数; S 为某样品中的种类总数; P_i 为第 i 种个体总数与总个体数的比值。

Pielou 均匀度指数 (J)^[13] 计算公式为

$$J = H' / \log_2 S \quad (2)$$

式中: H' 为物种多样性指数; S 为样品中的种类总数。

优势度 (Y) 的计算公式为

$$Y = f_i \times P_i \quad (3)$$

式中: Y 为优势度; f_i 为第 i 种个体在采样点中出现的频率; P_i 为第 i 种个体总数与总个体数的比值; 当 $Y \geq 0.02$ 时, 即为优势种。

物种丰富度指数 (D)^[14] 的计算公式

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

式中: D 为物种丰富度指数; S 为样品中的种类数; N 为样品中物种总丰度。

也可以根据浮游植物的多样性参数判断水质的污染情况, 在通常情况下认为物种多样性指数 (H') 与均匀度指数 (J) 相结合可以更可靠的对水质污染进行评价^[15] (评价标准如表 1)。

表 1 浮游植物多样性指数对水质污染评价标准

Tab. 1 Evaluation criteria for water pollution by phytoplankton diversity index

多样性指数 Diversity index	轻度或无污染 Mild or no pollution	中度污染 Medium pollution	重度污染 Serious pollution
H'	$H' > 3$	$1 \leq H' \leq 3$	$0 \leq H' \leq 1$
J	$0.5 < J \leq 0.8$	$0.3 < J \leq 0.5$	$0 < J \leq 0.3$

1.3 数据处理

海域环境数据和浮游植物数据运用 Excel 2007 进行处理, 其中, 以 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的浓度之和作为溶解性无机氮 (DIN) 的浓度, 以 PO_4^{3-} -P 的浓度作为溶解性无机磷 (DIP) 的浓度。相关数据比较运用 SPSS 18.0 软件进行多样性差异分析, 浮游植物与环境因子的排序图

使用 Canoco (4.50 版) 预先进行 DCA (detrended correspondence analysis) 分析得知,4 个轴的梯度最大值大于 4,因此选择典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA)。

2 结果

2.1 海域环境特征

研究区域为奉贤碧海金沙封闭养殖海域,风向四季多为东风。海域的环境特征详细描述见图 2。该海域 DIN、DIP 和 COD 浓度在 3 月出现

峰值,然后整体呈下降趋势。但养殖过程中,4—10 月, DIN、DIP 和 COD 浓度均保持较高水平,其中 6 月和 8 月 DIN、DIP 的浓度出现两次高峰,而 COD 浓度在 7 月达到最高值。另外,4—5 月和 9—10 月,海域营养盐及 COD 浓度出现两次同步下降。根据海水水质评价标准 (GB 3097—1997),养殖期间水质处于 IV、III 类水质标准。养殖结束后,11 月—次年 1 月, DIN、DIP 和 COD 浓度均不同程度的下降。

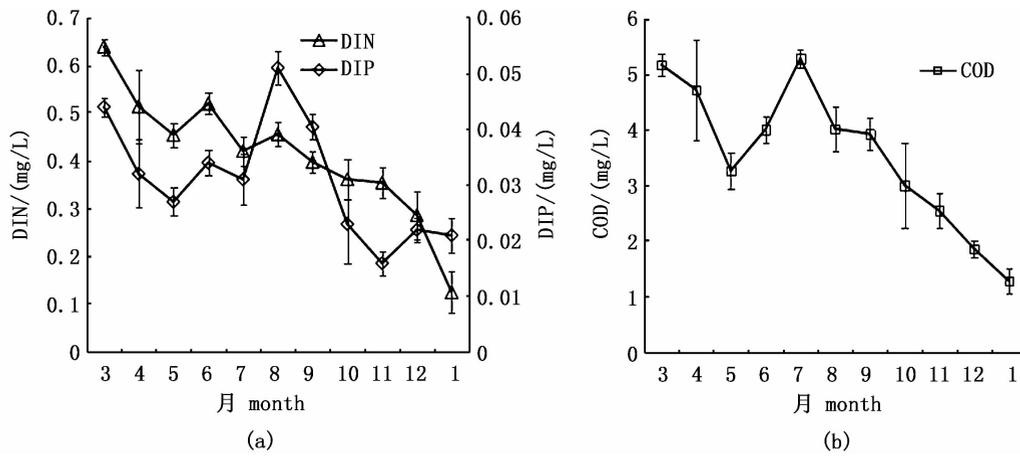


图 2 水样的环境参数

Fig.2 Environmental parameters of water samples

2.2 浮游植物的种类组成及优势种

对奉贤封闭养殖海域浮游植物 4 次调查共鉴定出浮游植物 7 门 42 种 (属)。其中,以硅藻门、绿藻门和蓝藻门种类居多,分别占总数的 35.71%、26.19% 和 21.43%,其他各门为甲藻门、隐藻门、裸藻门、黄藻门。从季节变化来看,秋季最多 (19 种),其次是春季 (16 种)、冬季 (15 种) 和夏季 (14 种),见图 3。四季优势种类数量相差不大,种类重复度不高,只有小球藻在四季均为优势种 (见表 2)。奉贤海域浮游植物优势种的季节性演替明显,其中,夏、秋高温季节以绿藻门和蓝藻门占绝对优势。春季优势度最高的为尖尾蓝隐藻 (隐藻门),而夏季为小球藻 (绿藻门),秋季为卷曲鱼腥藻 (蓝藻门),冬季为颤藻 (蓝

藻门)。另外,赤潮种中肋骨条藻在夏、秋季节优势度较高。

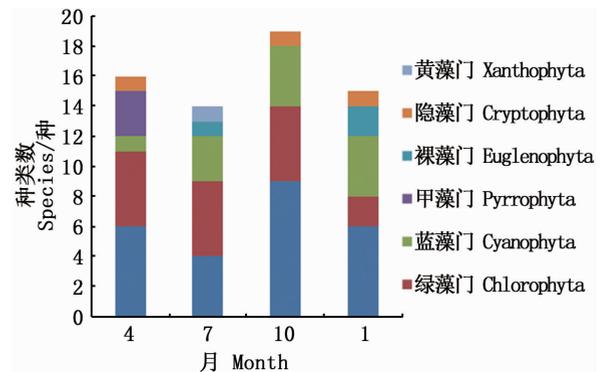


图 3 奉贤养殖海域内四季浮游植物种类数比较

Fig.3 Comparison of seasonal phytoplankton species in Fengxian Sea Area

表 2 奉贤海域四季优势种及丰富度
Tab. 2 Four seasons' dominant species and richness in Fengxian Sea Area

中文名 The Chinese name	拉丁文名 The Latin name	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
尖尾蓝隐藻	<i>Chroomonas acuta</i>	0.470 9			
裸甲藻	<i>Gymnodinium aerucinosum</i> Stein	0.114 9			
小球藻	<i>Chlorella</i>	0.145 3	0.476 9	0.039 3	0.035 7
衣藻	<i>Chlamydomonas</i>	0.029 2			
蹄形藻	<i>Kirchneriella</i> sp.		0.098 1		
月牙藻	<i>Selenastrum bibraianum</i>		0.030 7		
平裂藻	<i>Merismopedia</i>		0.020 2	0.054 4	
色球藻	<i>Chroococcus</i>			0.041 5	0.100 0
卷曲鱼腥藻	<i>A. circinalis</i>			0.253 8	
颤藻	<i>Oscillatoria</i>			0.0676	0.285 7
中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>		0.102 0	0.132 0	

2.3 浮游植物丰度的分布特征

奉贤调查范围海区浮游植物的丰度变化存在季节性差异,其中夏季、秋季各站点丰度整体偏高(见表3)。值得注意的是,秋季站点4浮游植物丰度较其他内海站点都差异很大,数据统计显示,该站点观察到高丰度蓝藻的出现。

表 3 不同季节浮游植物的丰度分布表

Tab. 3 The abundance distribution of phytoplankton in different seasons 10^4 个/L

丰度 Total abundance	站点1 Station1	站点2 Station 2	站点3 Station 3	站点4 Station 4
春季 Spring	2.64	1.88	2.72	3.67
夏季 Summer	8.20	5.58	5.90	5.80
秋季 Autumn	6.84	7.27	10.33	39.12
冬季 Winter	2.95	0.45	1.00	2.6

2.4 浮游植物的多样性的分布特征

调查奉贤养殖海域浮游植物四季的多样性指数(H')的变化范围为0.708 8~1.587 9。相同月份不同站位比较,只有站点1和站点2之间存在显著性差异($P=0.035, P<0.05$),养殖海域各站点 H' 的波动较小,其中,站点3的多样性指数均较低,各站点7月份出现最低值,然后呈上升趋势(见图4a)。均匀度(J)全年在0.440 4~0.870 7

波动,相同月份不同站位之间差异均不显著($P>0.05$,见图4b)。 J 与 H' 趋势相同均在7月份出现最低值。物种丰富度指数(D)的变化范围在0.269 5~1.288 5。其中各季节的最低值均出现在站点3,且 D 值最低值多出现在10月份(见图4c)。相同月份的不同站位之间均无显著差异($P>0.05$)。根据 H' 判断,水质污染均处于中度甚至重度污染。根据 J 判断,站点3处于中度污染。

2.5 浮游植物与环境因子之间的关系

选择各站点中丰度大于总物种丰度10%的种类,进行典范对应分析CCA(图5),其中CCA排序图的前两个轴的解釋度分别为38.4%和20.6%。影响浮游植物优势种的环境因子主要是温度、COD和亚硝酸盐,其中春季优势度最高的尖尾蓝隐藻主要受到磷酸盐、硝酸盐的影响。在夏季,对小球藻而言,磷酸盐、硝酸盐和温度与其呈正相关关系。而秋季优势度最高的卷曲鱼腥藻生物量表现出与盐度呈负相关,与亚硝酸盐和铵盐呈正相关,赤潮种中肋骨条藻与硝酸盐、磷酸盐和温度呈正相关。冬季优势种较少,尤其对于优势度最高的颤藻,与各环境因子的相关性均不大。

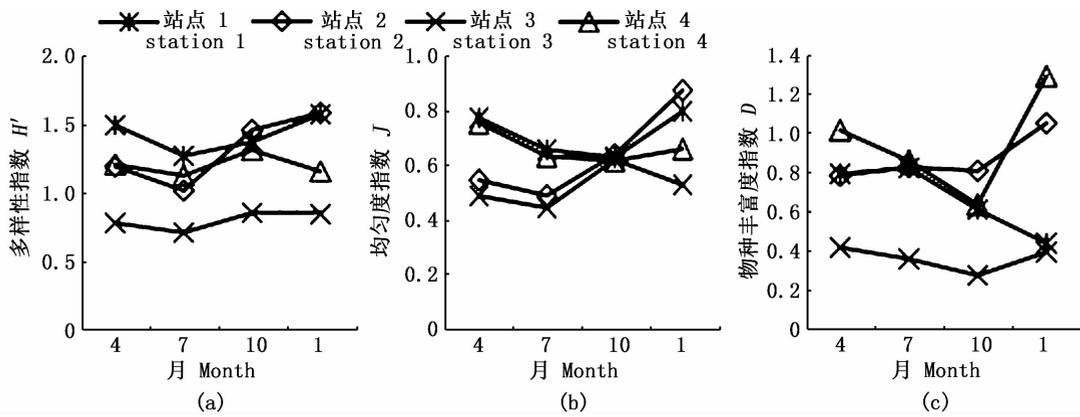
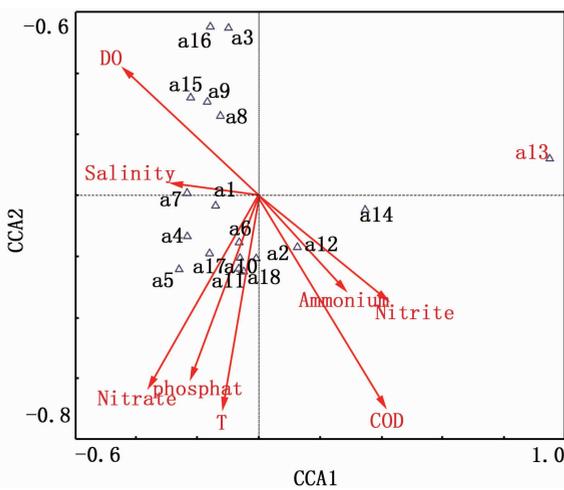


图 4 奉贤海域浮游植物四季物种多样性的变化

Fig. 4 Changes of four seasons' species diversity of phytoplankton in Fengxian



a1. 舟形藻; a2. 月牙藻; a3. 小环藻; a4. 尖尾蓝隐藻; a5. 裸甲藻; a6. 小球藻; a7. 衣藻; a8. 螺旋藻; a9. 扁裸藻; a10. 中肋骨条藻; a11. 蹄形藻; a12. 平裂藻; a13. 颤藻; a14. 卷曲鱼腥藻; a15. 膨胀色球藻; a16. 梅尼小环藻; a17. 针状菱形藻; a18. 绿海球藻

a1. *Navicula*; a2. *Selenastrum bibrainum*; a3. *Cyclotella meneghiniana*; a4. *Chroomonas acuta*; a5. *Gymnodinium aerucyinosum* Stein; a6. *Chlorella*; a7. *Chlamydomonas*; a8. *Spirulina*; a9. *Phacus*; a10. *Skeletonema costatum*; a11. *Kirehneriella*; a12. *Merismopedia*; a13. *Oscillatoria*; a14. *Anabaena circinalis*; a15. *Scytosiphon lomentaria*; a16. *Cyclotella meneghiniana*; a17. *Nitzschia acicularis*; a18. *Halosphaera viridis*

图 5 浮游植物种类与环境因子的排序图

Fig. 5 Correlation plots of the CCA on the relationship between the environmental variables and phytoplankton species

3 讨论

根据 2016 年海域环境质量公报, 评估 9 个重要海湾水质状况, 其中长江口、杭州湾为极差级

别, 碧海金沙海域通过引进临近外海海水进行养殖, 进水初期, 营养盐浓度保持最高水平, 一方面因为杭州湾及附近海域富营养化较严重^[16], 另一方面大量进水使得水体的垂直运动频繁, 上升运动造成营养盐的持续供给^[17]。3—5 月, 营养盐浓度呈下降趋势, 随着进水结束, 封闭海域无强烈的垂直交换, 水体悬浮物沉降, 研究^[18]发现, 封闭养殖池塘的 N、P 自净主要来自浮游植物的吸收和底泥的吸附作用。另外, 中国气象网提供的数据显示: 春季(4—5 月)海域降水偏多, 也是造成表层海水营养盐浓度下降的重要原因。随着养殖投放量的增加和养殖动物的生长, 养殖高峰期 6—8 月, DIN、DIP 和 COD 达到新高峰, 浓度分别为 0.520 mg/L、0.051 mg/L 和 5.28 mg/L, 此阶段封闭海域的温度较高不利于海藻和多种浮游植物的生长, 海域自净能力远小于养殖生产带来的营养盐积累, 造成营养盐浓度的升高; 8 月底开始, 随着养殖动物的大量捕捞, 海域的环境压力降低, 秋季浮游植物和海藻的繁殖使得海域自净能力增强, 成为营养盐下降的主要作用因素^[19]。

浮游植物群落不同水环境和不同季节等因素综合作用下, 其种类组成和丰度都在不断的变动^[20-21]。通过多样性指数的变化可以反映水体污染情况和水质的变化^[22]。研究^[23-24]表明, 浮游植物的多样性指数与生态系统的健康呈正比。封闭养殖海域内各站点物种多样性指数(H')、均匀度指数(J)均在养殖高峰期出现最低值, 综合说明该海域养殖高峰时浮游植物种类结构稳定性较差且水质已处于较重污染状态^[21]。在四季

调查中,浮游植物硅藻门种类最多,其次是绿藻门和蓝藻门。这与唐亚菲等^[25]对奉贤海域的研究一致,也与李娣等^[26]对太湖、黄俊^[27]对滇池湖泊的研究结果一致。唐娅菲等^[25]对三沙湾浮游植物群落研究表明低盐度和丰富的营养盐会使硅藻占优势,奉贤海域全年盐度较低,且引进海水和养殖生产保持了高浓度的营养盐,使得硅藻在全年种类丰富。研究表明夏季温度高,光线强、营养物质丰富,浮游藻类生长旺盛,绿藻和蓝藻成为主要优势种^[28],对于封闭养殖海域,夏季温度偏高,适应高温的浮游植物种类较少,出现多样性偏低的现象,根据浮游植物多样性指数对水质污染评价标准,该海域养殖期间以7月污染最为严重,这与营养盐和COD浓度变化趋势一致,说明养殖高峰期对环境的污染较严重,梅雨季节降雨对改善水质并未有明显效果,说明养殖污染已超出了生态系统的自净能力。浮游植物丰度最高出现在秋季,其次是夏季,且营养盐、COD和温度可以解释大部分的物种分布。浮游植物各季节优势种演替明显,由春季的隐藻演替为夏季的绿藻后变为秋冬季的蓝藻。夏季以小球藻占绝对优势,与硝酸盐、磷酸盐和温度呈正比,从光合作用的特性方面分析,小球藻能适应较强的光照强度和较高的温度^[29],在养殖高峰期利用营养盐大量繁殖,成为绝对的优势种。秋季的卷曲鱼腥藻优势度最高,与盐度呈负相关,研究表明卷曲鱼腥藻为秋季水库的优势种^[30],该海域的低盐环境为卷曲鱼腥藻的繁殖提供条件,鱼腥藻生长需较高温度,常在富含有机质的水域中大量繁殖,造成“赤潮”。另外,中肋骨条藻成为夏、秋季节的主要优势种,在养殖高峰期,水体营养盐丰富,容易大量繁殖造成“赤潮”。春季的尖尾蓝隐藻的优势度比同季节优势种高的多,刘霞等^[31]对太湖隐藻生物量动态研究发现,高浓度的营养盐和高有机物浓度会使得隐藻生存更有优势,且由王艳玲等^[32]的研究结论可知,尖尾蓝隐藻是中污水体的指示种,因此春季尖尾蓝隐藻的绝对优势与进水初期高浓度的营养盐和COD有关。研究发现,冬季与秋季相比较,颤藻的优势度上升而小球藻的优势度下降,通过黄亮等^[33]的研究可知,在相同条件下,小球藻的竞争能力低于颤藻,颤藻分布广泛,且具有极强的生命力,生长不受季节限制,作为冬季优势度最高的种类也

有引起“赤潮”的可能。

奉贤封闭海域养殖用水源自杭州湾,水质受工业和生活污水排放的影响,常年处于富营养化状态。章守宇等^[34]对杭州湾的研究表明,杭州湾近岸浮游植物的生长环境比外海更加恶劣。全年调查中,近岸海域的营养盐浓度高于封闭养殖海域,站点3和4的营养盐浓度高于其他站点,主要因为站点3和4处于下风区和人类活动频繁的近岸区,由风和浓度差引起的营养盐流动使其具有更高的浓度。海水中的营养盐控制着海洋初级生产力,研究^[35]表明,氮磷营养盐的浓度和比例均控制着浮游植物的种群动态和群落结构。李云等^[7]对长江口及邻近海域的研究表明,海域长期的氮磷比例失衡引起浮游植物中的甲藻类比例大增,时常有甲藻赤潮的发生。奉贤海域四季氮磷比在7.47~15.81,平均比值10.80,加剧了营养型浮游植物的生长。夏、秋季节为养殖高峰期,水体营养盐及COD浓度偏高,且温度较高,使得浮游植物丰度较高,主要优势种卷曲鱼腥藻的繁殖有引起赤潮的潜在危险,另外秋季、夏季的优势种中肋骨条藻也是长江口常见的赤潮种^[36-37],这几种优势种均与海域中氮、磷等营养盐和COD的浓度呈正比,所以在养殖高峰期应重点控制营养盐及有机物的浓度,改善水质状况,控制养殖投放量,防治海洋灾害对养殖生产造成损失。浮游植物群落多样性与海洋生态系统的稳定性有着密切的关系,优势种的种类和数量对群落结构的稳定性有重要影响,浮游植物群落结构的单一化可能使其存在着赤潮爆发的风险^[25]。通过对浮游植物种类和数量的监控可以进行水质风险评价,指导人们运用生物调控手段综合利用浮游植物,预防水质灾害,维持水体生态平衡^[38]。浮游植物群落动态和结构变化的影响因子很多,其生态作用的研究也很复杂。对于奉贤封闭养殖海域,通过监测分析预防潜在的养殖风险,结合有效的手段改善水质状况,提高环境容量是今后的研究方向。

参考文献:

- [1] 邵倩文,刘镇盛,章菁,等. 长江口及邻近海域浮游动物群落结构及季节变化[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 683-691.
SHAO Q W, LIU Z S, ZHANG J, et al. Seasonal variation in zooplankton community structure in the Changjiang Estuary

- and its adjacent waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 683-691.
- [2] 陆健健. 河口生态学[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
LU J J. *Estuarine ecology*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2003.
- [3] THOMPSON P A, BONHAM P I, SWADLING K M. Phytoplankton blooms in the Huon Estuary, Tasmania: top-down or bottom-up control? [J]. *Journal of Plankton Research*, 2008, 30(7): 735-753.
- [4] LEHMAN J T. Interacting growth and loss rates: the balance of top-down and bottom-up controls in plankton communities [J]. *Limnology and Oceanography*, 1991, 36(8): 1546-1554.
- [5] 宋洪军, 张学雷, 王保栋, 等. 长江口及邻近海域浮游植物现存量的上下行控制分析[J]. *海洋学报*, 2014, 36(8): 91-100.
SONG H J, ZHANG X L, WANG B D, et al. Bottom-up and top-down controls of the phytoplankton standing stock off the Changjiang Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(8): 91-100.
- [6] 林军, 朱建荣, 张经, 等. 长江口外海区浮游植物生物量分布及其与环境因子的关系[J]. *水产学报*, 2011, 35(1): 74-87.
LIN J, ZHU J R, ZHANG J, et al. Distribution of phytoplankton biomass and its relationships with the environmental factors off the Changjiang (Yangtze River) Estuary[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(1): 74-87.
- [7] 李云, 李道季, 唐静亮, 等. 长江口及毗邻海域浮游植物的分布与变化[J]. *环境科学*, 2007, 28(4): 719-729.
LI Y, LI D J, TANG J L, et al. Phytoplankton distribution and variation in the Yangtze river estuary and its adjacent sea [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4): 719-729.
- [8] 刘海娇, 傅文诚, 孙军. 2009—2011年东海陆架海域网采浮游植物群落的季节变化[J]. *海洋学报*, 2015, 37(10): 106-122.
LIU H J, FU W C, SUN J. Seasonal variations of netz-phytoplankton community in East China Sea continental shelf from 2009 to T2011[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(10): 106-122.
- [9] 周茜茜, 陈长平, 梁君荣, 等. 中国东部陆架边缘海网采浮游植物种类组成和季节变化[J]. *生物多样性*, 2015, 23(1): 23-32.
ZHOU Q Q, CHEN C P, LIANG J R, et al. Species composition and seasonal variation of netz-phytoplankton in the eastern marginal China seas [J]. *Biodiversity Science*, 2015, 23(1): 23-32.
- [10] 董双林, 李德尚, 潘克厚. 论海水养殖的养殖容量[J]. *青岛海洋大学学报*, 1998, 28(2): 253-258.
DONG S L, LI D S, PAN K H. On the carrying capacity of mariculture [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1998, 28(2): 253-258.
- [11] 周颖, 钟昌标. 近海养殖对海洋渔业环境的影响分析[J]. *渔业经济研究*, 2008(6): 11-17.
ZHOU Y, ZHONG C B. Analysis of the effect on inshore cultivation to ocean fishery environment [J]. *Fisheries Economy Research*, 2008(6): 11-17.
- [12] SHANNON C E, WEAVER W. *The mathematical theory of communication*[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [13] PIELOU E C. *An introduction to mathematical ecology*[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969: 7-12.
- [14] MARGALEF R. *Information theory in ecology*[J]. *International Journal of General Systems*, 1958, 3: 36-71.
- [15] 沈韞芬, 顾曼如, 龚循矩, 等. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
SHEN W F, GU M R, GONG X J, et al. *Micro biological monitoring technology*[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1990.
- [16] 尹艳娥, 沈新强, 蒋玫, 等. 长江口及邻近海域富营养化趋势分析及与环境因子关系[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 622-629.
YIN Y E, SHEN X Q, JIANG M, et al. Analysis on the trend of eutrophication in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and in the adjacent East China Sea and its relation to environmental factors [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(4): 622-629.
- [17] 韦钦胜, 臧家业, 战闰, 等. 夏季长江口东北部上升流海域的生态环境特征[J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42(6): 899-905.
WEI Q S, ZANG J Y, ZHAN R, et al. Characteristics of the ecological environment in the upwelling area northeast of the Changjiang river estuary [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(6): 899-905.
- [18] 李耀初, 周劲风, 温琰茂. 封闭式精养池塘 N、P 营养盐的自净作用研究[J]. *淡水渔业*, 2006, 36(4): 29-33.
LI Y C, ZHOU J F, WEN Y M. Research on the self-cleaning mechanisms for nitrogen and phosphorus nutrients in farming ponds [J]. *Freshwater Fisheries*, 2006, 36(4): 29-33.
- [19] 丁平真, 韦章良, 陶燕东, 等. 围隔海域水质评价及底栖曲浒苔对水质修复能力评估研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26(4): 519-527.
DING P Z, WEI Z L, TAO Y D, et al. The evaluation of water quality in enclosed mariculture bay and assessment of bioremediation abilities of *Ulva flexuosa* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, 26(4): 519-527.
- [20] 韦章良, 柴召阳, 石洪华, 等. 渤海长岛海域浮游动物的种类组成与时空分布[J]. *上海海洋大学学报*, 2015, 24(4): 550-559.
WEI Z L, CHAI Z Y, SHI H H, et al. Species Composition, Abundance and Distribution of Zooplankton along the coast of Chang Island in the Bohai Sea, China [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2015, 24(4): 550-559.

- [21] DUBE A, JAYARAMAN G. Mathematical modelling of the seasonal variability of plankton in a shallow lagoon [J]. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 2008, 69(3): 850-865.
- [22] 张爱菊, 朱俊杰, 蒋文枰, 等. 三角帆蚌养殖池塘浮游植物群落时空动态及其多样性指数[J]. *淡水渔业*, 2014, 44(5): 67-72.
- ZHANG A J, ZHU J J, JIANG W P, et al. Temporal and spatial pattern of phytoplankton community and its biodiversity indices in the pond of *Hyriopsis cumingii* [J]. *Freshwater Fisheries*, 2014, 44(5): 67-72.
- [23] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2005, 5(2): 87-91.
- KUANG Q J, MA P M, HU Z Y, et al. Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(2): 87-91.
- [24] 李仁全, 王明书, 孙敏, 等. 赤城湖指示藻类的组成及物种多样性指数分析[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(2): 773-776, 782.
- LI R Q, WANG M S, SUN M, et al. Analysis of constitution features and species diversity index of indicator algae in Chicheng lake[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(2): 773-776, 782.
- [25] 唐娅菲, 王金辉, 程宏, 等. 三沙湾春季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(4): 522-530.
- TANG Y F, WANG J H, CHENG H, et al. Community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors of Sansha Bay in spring[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(4): 522-530.
- [26] 李娣, 李旭文, 牛志春, 等. 太湖浮游植物群落结构及其与水质指标间的关系[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1814-1820.
- LI D, LI X W, NIU Z C, et al. Structure of phytoplankton community and relationship between phytoplankton community and water quality in Taihu Lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(11): 1814-1820.
- [27] 黄俊. 滇池湖泊浮游植物变化趋势分析[J]. *环境科学导刊*, 2012, 31(5): 35-37.
- HUANG J. An analysis of phytoplankton change trend in Dianchi lake[J]. *Environmental Science Survey*, 2012, 31(5): 35-37.
- [28] 武琳, 刘雪华, 成小英, 等. 景观水体浮游藻类变化及与水质因子关系分析[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(4): 120-126.
- WU L, LIU X H, CHENG X Y, et al. Spatial-temporal variation of phytoplankton in clean landscape water in Southeast China from autumn to spring and analysis of the related factors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(4): 120-126.
- [29] 朱晓艳, 张丹, 梁芳, 等. 环境因子对小球藻 (*Chlorella* sp. XQ-20044) 光合作用的影响[J]. *植物科学学报*, 2014, 32(1): 74-79.
- ZHU X Y, ZHANG D, LIANG F, et al. Effects of Environmental Factors on the Photosynthesis of *Chlorella* sp. XQ-20044 [J]. *Plant Science Journal*, 2014, 32(1): 74-79.
- [30] 刘歆璞, 张玮, 王丽卿, 等. 青草沙水库浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2015, 24(4): 532-543.
- LIU X P, ZHANG W, WANG L Q, et al. Structure of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in Qingcaosha Reservoir [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2015, 24(4): 532-543.
- [31] 刘霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖北部隐藻生物量时空动态[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(1): 142-148.
- LIU X, LU X H, CHEN Y W. Temporal and spatial dynamics of Cryptophytes biomass in the north of Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(1): 142-148.
- [32] 王艳玲, 冯静, 李建国, 等. 产芝水库的浮游植物与水体水质评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2008(4): 85-90.
- WANG Y L, FENG J, LI J G, et al. Phytoplankton and evaluation of water quality in Chanzhi reservoir [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2008(4): 85-90.
- [33] 黄亮, 邬长福, 董余, 等. 光照强度对颤藻、小球藻、铜绿微囊藻的生长影响[J]. *净水技术*, 2016(4): 69-72, 103.
- HUANG L, WU C F, DONG Y, et al. Influence of light intensity on growth of *Oscillatoria*, *Chlorella* and *Microcystis Aeruginosa* [J]. *Water Purification Technology*, 2016(4): 69-72, 103.
- [34] 章守宇, 邵君波, 戴小杰. 杭州湾富营养化及浮游植物多样性问题的探讨[J]. *水产学报*, 2001, 25(6): 512-517.
- ZHANG S Y, SHAO J B, DAI X J. Studies on eutrophication and phytoplankton diversity in Hangzhou Bay [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2001, 25(6): 512-517.
- [35] 王文涛, 曹西华, 袁涌铨, 等. 2012 年长江口及其邻近海域营养盐分布的季节变化及影响因素[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(4): 804-812.
- WANG W T, CAO X H, YUAN Y Q, et al. Variation and controlling factor of nutrient distribution in Changjiang River estuary and adjacent areas in 2012 [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(4): 804-812.
- [36] 赵其彪, 孙军, 李丹, 等. 东海低氧区及邻近水域浮游植物的季节变化[J]. *生态学报*, 2015, 35(7): 2366-2379.
- ZHAO Q B, SUN J, LI D, et al. Seasonal changes of the phytoplankton along hypoxia area and adjacent waters in the East China Sea [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2366-2379.
- [37] 汤勇, 张薇, 薛俊增, 等. 长江口大洋山近岸水域浮游植物群落及其与环境因子的关系[J]. *长江流域资源与环*

境, 2016, 25(8): 1176-1183.

TANG Y, ZHANG W, XU J Z, et al. Community structures and environmental factors of phytoplankton in the Yangtze river Estuary of Da Yangshan inshore waters[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(8): 1176-1183.

[38] 林治宝, 李琳, 姜鹏. 浮游植物鉴定对水源地水库水质监

测的重要性及技术方法[J]. 现代农业科技, 2016(15): 200-201.

LIN Z B, LI L, JIANG P. Importance and technical methods of phytoplankton identification in water quality monitoring of water source reservoir[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016(15): 200-201.

Water pollution and potential risk in closed aquaculture area of Yangtze River Estuary

LIN Qingying, BAI Kaiqiang, SUN Bin, HE Peimin

(College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This study was conducted to monitor and analyze the water quality and the dynamic changes of phytoplankton in the closed aquaculture area of Bihai Jinsha in Fengxian of Shanghai were monitored and analyzed and the pollution and potential risks during the aquaculture process was analyzed. The investigations took place in April, July, October 2016 and January 2017. Water quality surveys showed that DIP, DIN and COD concentration remained relatively high in April, July and October. Among them, DIP and DIN concentrations were highest in April, while the highest values of COD concentrations occurred in July. From October to January, the water quality improved significantly at the end of the cultivation. Phytoplankton was found to have a total of 42 species of 7 Phyla, of which most were in autumn and summer and it showed obvious four-season succession. The species with the highest dominance in the four seasons were *Chroomonas acuta*, *Chlorella*, *Anabaena circinalis* and *Oscillatoria*, and it is worth noting that *Chlorella* is a dominant species in all seasons. The high abundance of phytoplankton is focused on the summer and autumn. The Shannon-Wiener diversity index (H') and evenness index (J) were from 0.709 to 2.088 and from 0.440 4 to 0.870 7 respectively. The analysis showed that the stability of the community structure of phytoplankton was poor and the water pollution was heavy. The environmental factors affecting the abundance of phytoplankton were nutrition concentration and temperature, and the dominance of *Anabaena circinalis* and *Skeletonema costatum* were higher in autumn and both in summer and autumn, respectively, which may cause the risk of red tide. It is necessary to control the aquaculture capacity, improve water quality, and optimize breeding environment.

Key words: phytoplankton; cultivation; water pollution; potential risks