

乐清湾海水养殖环境水质质量时空变化及富营养化状况评价

李妙聪¹, 刘文胜², 江锦花³

(1.台州市生态环境局温岭分局, 浙江 温岭 317500; 2.温州海洋环境监测中心站, 浙江 温州 325000; 3.台州学院 环境工程系, 浙江 椒江 318000)

摘 要: 本文分析了 2016—2018 年乐清湾养殖区水体中 pH、温度、盐度、溶解氧 (dissolved oxygen, DO)、叶绿素 (chlorophyll A, Chl *a*)、氨氮 (ammonia nitrogen, NH₄-N)、亚硝酸盐氮 (nitrite nitrogen, NO₂-N)、硝酸盐氮 (nitrate nitrogen, NO₃-N)、可溶性磷酸盐 (soluble active phosphors, DIP) 等海水水质质量指标, 并研究了其水质质量状况。通过单因子污染指数法的评价结果表明, 乐清湾养殖区的 pH、温度、盐度、DO 等指标均符合国家二类水质标准。与其他海域养殖区比较, DO 浓度处于偏低状态; 而 DIN 和 DIP 的浓度较高。利用水质质量富营养化指标分析法 (the analysis of water quality eutrophication index, *TRIX*), 本研究发现乐清湾养殖区的水质富营养指标值较大, 处于较高的富营养化状态。通过主成分分析 (principal component analysis, PCA) 可知, 第一主成分相关指标主要是 NO₂-N、NH₄-N、DIP、温度以及 NO₃-N, 且 NH₄-N、NO₃-N、DIN 与 *TRIX* 之间存在一定的正相关关系。

关键词: 海水养殖; 乐清湾; 水环境; 营养状态; 营养盐

中图分类号: X82

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2021)05-0724-08

Analysis of spatial-temporal variation and nutritional status of environmental quality in the mariculture zone at the Yueqing bay

LI Miao-cong¹, LIU Wen-sheng², JIANG Jin-hua³

(1. Wenling Branch of Taizhou Ecological Environment Bureau, Wenling 317500, China; 2. Wenzhou Marine Environment Monitoring Center, State Oceanic Administration, Wenzhou 325000, China; 3. Department of Environmental Engineering, Taizhou University, Jiaojiang 318000, China)

Abstract: Based on the monitoring data of the mariculture zone at the Yueqing bay from 2016 to 2018, the assessment and analysis on the marine environmental quality is conducted. The spatial-temporal variation and the relevance of pH, temperature, salinity, DO, Chl *a*, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N and DIP of seawater in these areas were analyzed and their nutritional status were also evaluated. Assessment by single factor pollution index method revealed that the levels of pH, temperature, salinity and DO in these areas were in accordance with the national second-class water quality standard. Compared with those in other marine aquaculture zones, the DO concentration levels were in the low, and the DIN and DIP levels were in the high. According to *TRIX*, the eutrophication index of water quality in these areas were relatively high and may be in a state of high eutrophication. The related indexes of the first principal component were NO₂-N, NH₄-N, DIP, temperature and

收稿日期: 2020-04-30, 修订日期: 2020-07-01

基金项目: 温岭市科技局项目 (2017C212004)

作者简介: 李妙聪 (1981—), 男, 浙江温岭人, 工程师, 主要从事海洋环境监测工作, E-mail: summers98@163.com

通讯作者: 江锦花 (1965—), 教授, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: jjh4421@163.com

$\text{NO}_3\text{-N}$ by PCA, and there were positive correlation among $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, DIN and TRIX .

Key words: mariculture; Yueqing bay; water environment; nutritional status; nutrient

乐清湾位于浙江南部沿海,是一个深入内地的半封闭海湾,三面环陆,南面与东海相连。由于其良好的避风条件和优越的气候条件,乐清湾海水养殖业从20世纪80年代起得到了迅猛的发展,随着养殖规模的不断扩大,这里已经成为浙江省的重点海水养殖基地之一^[1]。在海水养殖的过程中,往往需要人工投喂大量的配合饲料和鲜活饵料,这些饵料仅有一部分被有效利用,其他饵料以残饵、排泄物和粪便等形式排入周边的海洋环境中,由此形成了养殖的内源污染物。值得注意的是,高密度的投饵养殖鱼、虾类等养殖方式,往往造成养殖海域氮、磷化合物浓度的增加。海水养殖鱼、虾类等排出的氮、磷废弃物占投喂饲料总量的70%以上^[2-3],由此可引发水体富营养化。海水富营养化可促使浮游生物迅速生长,造成海水中溶解氧浓度降低,阻碍水生经济动物的生长,成为海水养殖可持续发展的瓶颈^[4]。同时,海水养殖的经济生物也可能引起海水中营养盐浓度、结构和浮游植物群落结构的改变^[5]。此外,海水营养盐输入、输出的平衡性,也会引起水生生态系统物种、物质与能量流动等的不平衡,最终导致水生生态环境状况恶化^[6-7]。因此,海水质量不仅对海水养殖有重要影响,而且也是海洋生态环境系统良性循环的有力保障。目前,近海富营养化状态的评价方法有:以化学需氧量(COD)、营养盐等为参数的单指数法^[8],以总氮、总磷、COD和Chl *a*为参数的营养状态质量指数法^[9],潜在性富营养化(N/P)法^[10]以及富营养化状态指数法(TRIX 法)等综合指数法^[11],其中, TRIX 法是我国海洋环境评价的重要方法。

本文通过对乐清湾养殖区主要海水水质指标的连续性跟踪调查,评价了养殖环境的海水质量等级,分析了其主要污染因子及来源。通过 TRIX 方法,分析乐清湾养殖区的海水质量状况,评价其海洋生态系统的结构与功能,这对于合理开发和利用乐清湾的海洋资源具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 采样点确定

选取浙江省乐清湾海水养殖区的7个站位作为采样点(图1),主要以养殖缢蛏、泥蚶、蛤蜊等滤食性双壳贝类为主;采样时间为每年的5月、8月、9月、10月,连续3年(2016—2018年)的海水水质监测数据;采样点位于水面下0.5 m处。

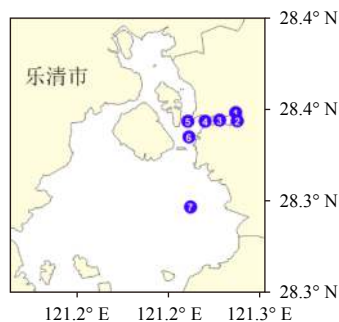


图1 乐清湾采样图

Fig. 1 Sampling stations of the Yuqing bay

1.2 测定方法

监测指标为pH、温度、盐度、DO、Chl *a*、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和DIP。全部样品的采集、预处理和保存参照《海洋监测规范》(GB/T 12763-2007)和《海洋监测标准》(GB17378-2007)执行。分析项目及方法如下:pH用pH计测定;温度用表层水温表法;盐度采用盐度计法;DO用碘量法;Chl *a*的测定方法为分光光度法(SL 88-2012); $\text{NH}_4\text{-N}$ 测定用纳氏试剂分光光度法(HJ 536-2009); $\text{NO}_2\text{-N}$ 用酚二磺酸分光光度法(GB/T 7480-1987); $\text{NO}_3\text{-N}$ 分析用锌镉还原法(HJ 346-2007);DIP分析用抗坏血酸还原磷钼蓝法(HJ 671-2013);DIN为 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 之和。

1.3 富营养化状态指数 TRIX 指数法

1998年,Vollenweider等^[11]提出近海富营养化评价方法的 TRIX 指数法,计算公式如下:
$$\text{TRIX} = [\lg(\text{Chl } a \times aD\%O_2 \times \text{DIN} \times \text{DIP}) - (-1.5)] / 1.2 \quad (1)$$

式中: $Chl\ a$ 为水体中 $Chl\ a$ 的浓度; DIN、DIP 分别代表水体中总氮和总磷的浓度; $aD\%O_2$ 为水体中溶解氧的绝对标准偏差。 $TRIX$ 指数法对富营养化状态的分类标准为: $2 < TRIX < 4$ 为极低富营养化; $4 \leq TRIX < 5$ 为低富营养化; $5 \leq TRIX < 6$ 为中等富营养化; $6 \leq TRIX < 8$ 为高富营养化。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2010 软件, 对原始数据进行处理; 采用 SPSS 19.0 软件, 分析海水中各水质指标的相关性; 采用 OriginPro 8.0 软件进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 乐清湾养殖海域水质指标分析

从 2016 年到 2018 年, 每年分别采集 5 月、8 月、9 月、10 月乐清湾海水养殖区 7 个有代表性的海水水样, 按照国家《海水水质标准》(GB 3097-1997), 分别对水质指标中的 pH、温度、盐度、DO、 $Chl\ a$ 、 $NH_4\text{-}N$ 、 $NO_2\text{-}N$ 、 $NO_3\text{-}N$ 、DIP 等指标进行测定分析, 并对 7 个采样点各指标的 3 年平均值、最大值、最小值进行统计, 并与国家标准进行比较, 结果见表 1。

由表 1 可知, 乐清湾养殖区域中海水 pH 的

变化范围(平均值)为 7.73 ~ 8.16 (7.89); 水温变化范围(平均值)为 21.03 $^{\circ}C$ ~ 32.80 $^{\circ}C$ (26.41 $^{\circ}C$), 由于采样时间设为每年的 5 月到 10 月, 所以水温的变化幅度相对较小; 盐度的变化范围(平均值)为 17.13 ~ 31.06 (23.66); 海水中 DO 浓度变化范围(平均值)为 5.01 ~ 7.88 mg/L (6.51 mg/L); 海水中 $NH_4\text{-}N$ 的浓度范围(平均值)为 1.10 ~ 370.60 $\mu g/L$ (81.69 $\mu g/L$); 海水中 $NO_2\text{-}N$ 浓度范围(平均值)为 0.60 ~ 157.00 $\mu g/L$ (55.95 $\mu g/L$); $NO_3\text{-}N$ 浓度范围(平均值)为 230.00 ~ 3845.00 $\mu g/L$ (692.21 $\mu g/L$); DIN 的浓度范围(平均值)为 273.10 ~ 3942.50 $\mu g/L$ (829.85 $\mu g/L$); 海水中 DIP 的浓度范围(平均值)为 5.2 ~ 152.70 $\mu g/L$ (52.36 $\mu g/L$); $Chl\ a$ 的浓度变化范围(平均值)为 0.20 ~ 12.20 $\mu g/L$ (2.09 $\mu g/L$)。其中, 水温、盐度、DO 各采样点的 3 年平均值变化不大, 各采样点海水中 DO 的平均浓度均大于 5 mg/L, 符合第二类海水水质标准; 而 DIN 和 DIP 的浓度超标较为严重, 劣于第四类海水水质标准范围要求。与其他海域养殖区相比, 乐清湾海域水体中 DO 处于低浓度水平。

表 1 乐清湾海水养殖区 2016—2018 年间各水质参数

Tab.1 Seawater quality characteristics (mean $\pm$ SD) from mariculture areas in Yueqing bay between 2016 and 2018

采样点	pH	$T/^{\circ}C$	S	$DO/mg\cdot L^{-1}$	$Chl\ a/\mu g\cdot L^{-1}$	$NH_4\text{-}N/\mu g\cdot L^{-1}$	$NO_2\text{-}N/\mu g\cdot L^{-1}$	$NO_3\text{-}N/\mu g\cdot L^{-1}$	$DIN/\mu g\cdot L^{-1}$	$DIP/\mu g\cdot L^{-1}$
S1	7.89 $\pm$ 0.14	26.43 $\pm$ 3.57	23.14 $\pm$ 4.62	6.41 $\pm$ 0.69	1.64 $\pm$ 1.21	111.76 $\pm$ 98.15	69.56 $\pm$ 45.06	699.93 $\pm$ 253.21	881.25 $\pm$ 217.45	67.83 $\pm$ 33.44
S2	7.88 $\pm$ 0.14	26.36 $\pm$ 3.59	23.44 $\pm$ 4.32	6.37 $\pm$ 0.73	2.54 $\pm$ 3.37	94.55 $\pm$ 75.81	59.23 $\pm$ 41.67	654.45 $\pm$ 290.33	808.23 $\pm$ 273.25	52.67 $\pm$ 19.03
S3	7.89 $\pm$ 0.13	26.46 $\pm$ 3.62	23.22 $\pm$ 4.43	6.49 $\pm$ 0.69	2.18 $\pm$ 2.75	89.93 $\pm$ 61.82	61.66 $\pm$ 42.24	928.11 $\pm$ 1000.18	1079.70 $\pm$ 977.93	54.05 $\pm$ 21.88
S4	7.89 $\pm$ 0.12	26.56 $\pm$ 3.72	23.37 $\pm$ 4.41	6.37 $\pm$ 0.66	1.92 $\pm$ 1.96	86.48 $\pm$ 60.23	59.00 $\pm$ 39.81	681.57 $\pm$ 284.87	827.05 $\pm$ 262.00	51.52 $\pm$ 17.05
S5	7.89 $\pm$ 0.12	26.44 $\pm$ 3.87	23.61 $\pm$ 4.06	6.56 $\pm$ 0.69	2.09 $\pm$ 2.43	68.36 $\pm$ 61.16	51.03 $\pm$ 38.99	627.74 $\pm$ 291.77	747.13 $\pm$ 271.38	49.34 $\pm$ 24.82
S6	7.88 $\pm$ 0.11	26.38 $\pm$ 3.64	24.16 $\pm$ 3.94	6.59 $\pm$ 0.63	2.18 $\pm$ 3.12	69.15 $\pm$ 66.79	51.66 $\pm$ 41.19	664.51 $\pm$ 291.78	785.32 $\pm$ 251.65	48.68 $\pm$ 20.21
S7	7.92 $\pm$ 0.10	26.26 $\pm$ 3.81	24.68 $\pm$ 4.00	6.80 $\pm$ 0.70	2.09 $\pm$ 2.00	51.58 $\pm$ 47.22	39.50 $\pm$ 35.21	589.18 $\pm$ 263.34	680.26 $\pm$ 254.90	42.40 $\pm$ 19.61
最小值	7.73	21.03	17.13	5.01	0.20	1.10	0.60	230.00	273.10	5.20
最大值	8.16	32.80	31.06	7.88	12.20	370.60	157.00	3845.00	3942.50	152.70
平均值	7.89	26.41	23.66	6.51	2.09	81.69	55.95	692.21	829.85	52.36

2.2 乐清湾养殖海域水质指标动态变化分析

2016 年 5 月到 2018 年 10 月连续 3 年养殖环境水质指标的动态分布见图 2。3 年间变化幅度较小的指标有 pH、水温、盐度、DO 和 $NO_3\text{-}$

N , 变化幅度较大的指标有 $Chl\ a$ 、 $NH_4\text{-}N$ 和 $NO_2\text{-}N$ 等。其中, pH 的变化幅度最小, 范围为 7.74 ~ 8.12, 且均符合第一类海水水质标准要求; 其次, 水温的变化范围为 21.50 $^{\circ}C$ ~ 32.09 $^{\circ}C$, 最高海水

温度出现在8月,5月和10月温度差别较小,盐度的变化幅度也较小,为18.09~30.41。DO的最高浓度出现在2018年5月,为7.50 mg/L,而最低值出现在2016年8月,仅为5.31 mg/L,当海水中DO浓度低于3 mg/L时称为低氧环境,不利于海水中好氧微生物的生长。DIP的浓度较高,最高值出现在2017年10月,结果为89.59 mg/L,最低值出现在2018年9月,为21.53 mg/L,每年10月,海水中DIP的浓度均明显高于其他月的平均值。DIN浓度范围为421.80~1357.99 mg/L,最高值和最低值分别出现在2016年5月和2018年8月,部分海域劣于第四类海水水质标准,其中,2016年5月监测结果平均值超出标准近3倍。在DIN的3种形态中, $\text{NO}_3\text{-N}$ 所占的比例最高,为 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的

5~10倍,是DIN的主要存在形态,这说明该海水水域环境氧化能力较强,水体具有较好的自净能力,这与Cutrim等^[7]的研究结果一致。不同时期, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的变化幅度较大,范围为8.55~204.86 $\mu\text{g/L}$,其中,最高浓度出现在2017年8月,为最低浓度2018年9月的3倍以上,海水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的浓度高低没有明显的季节特性。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的变化幅度较大,范围为12.53~143.00 mg/L,最大值和最小值分别出现在2016年8月和2017年9月。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的总体水平较高,其变化幅度范围为321.29~1288.14 mg/L,最大值和最小值分别出现在2016年5月和2018年8月,高浓度的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 是海水中DIN的主要贡献指标,这与养殖环境大量的饵料投入有关。

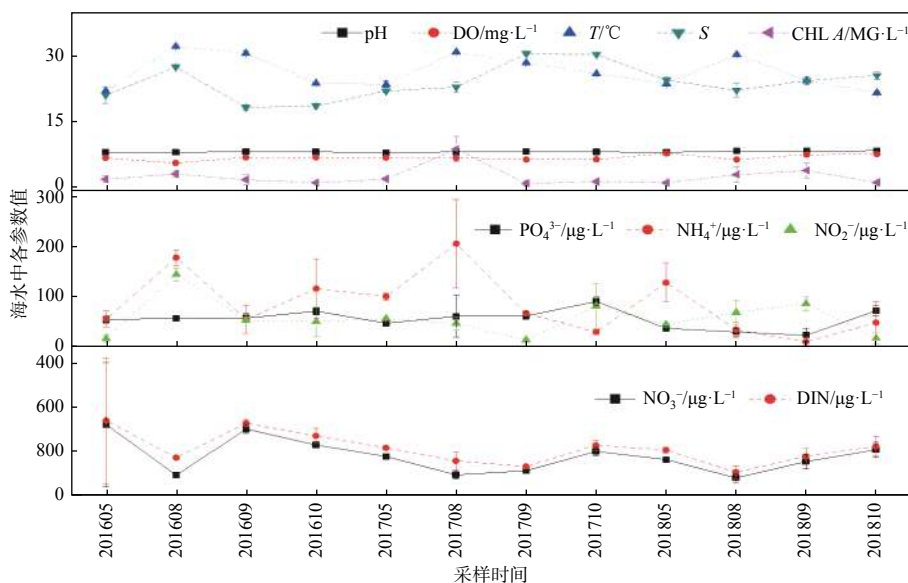


图2 2016—2018年水质指标时空变化

Fig. 2 Spatiotemporal variation of water quality from 2016—2018

2.3 与其他海域水质质量状况比较

为进一步了解乐清湾海域养殖区水质指标及营养盐水平,将该海域水体中各指标从2016—2018年3年的浓度变化范围和平均值,与国内外其他海水养殖区中的指标进行分析比较,结果见表2。从表2可知,pH的平均值略低于其他地区,且各海水养殖区的变化幅度较小;水温平均值明显高于其他养殖区,这与该研究的采样

时间为每年的5—10月有关。与其他海域水质指标的对比分析发现,各水质指标存在明显的地域差异,乐清湾海水养殖区的盐度、Chl *a* 的浓度平均值处于中等偏下的水平,如盐度和Chl *a* 浓度较高的海水养殖区有Izmir Bay^[12]、黄海^[13]、Bizerte Lagoon, Mediterranean^[14]、大连^[15]等;而盐度和Chl *a* 浓度较低的海水养殖区域如lagoons of Western Greece^[16]等,其浓度分别是

高值海域的 1/3 和 1/7。而乐清湾增养殖区海水中 DO 的平均值为 6.5 mg/L, 远低于其他养殖区, 如大连海域^[16] 海水养殖区 DO 的平均浓度高达 9.5 mg/L, the Marano 海湾^[7] 养殖区海水中的 DO 为 8.8 mg/L。与此结果类似, 杨平等^[17] 研究发现, 养殖塘水体较高的 DO 浓度有利于水生生物的生长, 因此, 在海水养殖初期, 水中 DO 浓度较低, 但在养殖中、后期, 海水中 DO 浓度会不断增加; 王颢等^[18] 也发现低氧区的出现可能与网箱养殖活动有关。有研究表明, 低氧环境不利于水生动物的生长, 如孙元敏等^[19] 发现, 经历低氧变动模式的鲢鱼代谢速率下降, 同时需要消耗较多的物质和能量参与氧化应激, 用于生长的物质和能量需求减少, 从而导致其生长速度下降。因此, 需要对该区域的低氧原因作深入分析, 并采取适当措施。NH₄-N 的浓度处于中等水平, 但与其他海水养殖区相比, NO₂-N、NO₃-N、DIN、DIP 的浓度均处于浓度偏高水平。

2.4 水质质量富营养化指标分析

为了进一步了解乐清湾养殖区的水质富营养化状况, 对 2016—2018 年 7 个不同采样点的 *TRIX* 进行统计分析, 结果见表 3。由表 3 可知, 该区域水体富营养化现象比较严重, 各点 3 年平均值均为 6.06~6.41, 每个采样点的水质均处于高富营养化 ($6 \leq \text{TRIX} < 8$) 状态。2016 年 5 月、6 月, 2017 年 5 月、8 月、10 月, 2018 年 10 月, 该区域水质均处于高富营养化状态; 2017 年 9 月、2018 年 5 月、2018 年 8 月、2018 年 9 月, 分别有 71.42%、85.71%、57.14%、42.86% 的采样点水质为低富营养化状态 ($4 \leq \text{TRIX} < 5$), 其他采样点均为高富营养化状态。对照其他海水养殖水质的富营养化指标 *TRIX*, 该区域的富营养化属中等偏上的水平, *TRIX* 值较高的海域如 Jansen Lagoon^[7] 和 Izmir Bay^[12], 其平均值分别为 8.04 和 6.70; *TRIX* 值较低的海域如中国的黄东海海区^[13]、渤海^[3], 其平均值分别为 5.65、5.79。*TRIX* 值超过 6 时, 海水处于典型的高生产力状态, 易产生水体富营养化现象, 富营养化频发可以导致海域底层缺氧, 但 *TRIX* 值低于 4 时, 不利于海水养殖生产力提高^[15]。因此, 海水养殖区域往往具有较高的 *TRIX* 值, 也有暴发水体富营养化灾害的危险。

2.5 乐清湾水质指标相关性及其来源分析

为进一步研究水质指标对海水养殖产量及水体富营养化的影响, 对乐清湾养殖区域中的水质指标进行相关性和来源分析。利用主成分分析法分别对 pH、温度、盐度、DO、Chl *a*、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、DIN、DIP 和 *TRIX* 等指标进行相关性的来源分析, 分别提取第 1、2、3 主成分, 其方差贡献率分别为 64.07%、13.05% 和 11.27%, 累计贡献率为 88.38%; 再对 3 个主成分的变量载荷 PC1 作为 *x* 轴, PC2 和 PC3 作为 *y* 轴, 分别作图 PC1—PC2、PC1—PC3 (如图 3 所示), 研究各相关因子对水体富营养化的贡献率, 分析该区域水体富营养化的可能原因。由图 3 可知, 第一主成分的方差贡献率最大, 达 64.07%, 与第一主成分相关的指标是 NO₂-N、NH₄-N、DIP、温度以及 NO₃-N 的载荷较大, 其中与 NO₂-N 的相关系数最大, 为 0.99, 其次为 NH₄-N, 其相关系数为 0.95, 与 DO、盐度和 pH 存在明显的负相关关系, 这说明氮、磷浓度的升高, 以及盐度和 pH 的降低是导致该区域水体富营养化的主要原因。盐度与第一主成分存在明显的负相关性, 其相关系数为 -0.96, 说明盐度越低, 其水体中富营养化程度越高。褚帆等^[20] 也发现盐度低的入海口海水富营养化程度相对较高, 说明盐度对海域富营养化状况有重要的影响。首先, 盐度对富营养化状况的影响体现在氮磷等营养盐来源为陆源, 随着向近海的排放, 必然存在浓度梯度。随着稀释作用的加强, 高盐度海水的污染物浓度会降低, 呈显著负相关性。其次, 第一主成分与 DO 之间也存在明显的负相关性, 其相关系数为 -0.89, DO 的高低直接影响水中生物生长情况, 水生动物过度繁殖、有机物含量过高的区域消耗大量的氧, DO 会随生物量的增加迅速下降^[21], 较低浓度的 DO 是水体富营养化结果的重要表现, 由此推断该海域易发生水体富营养化现象。第二主成分与 Chl *a* 之间存在明显的相关关系, 其相关系数为 0.83, 为影响该海域水体富营养化的次要驱动因子, Chl *a* 是反映水体藻类生长的主要生物量之一, 处于富营养化状态中的水体, Chl *a* 的浓度一般处于较高的水平^[22]。第三主成分与 NO₃-N 之间存在最大的相关关系, 其相关系数

表 2 其他海域海水的质量参数
Tab.2 Quality parameters of seawater in other areas

采样点	采样时间	pH	T/°C	S	Chl $a/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4\text{-N}/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2\text{-N}/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3\text{-N}/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	DIN/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	DIP/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	参考文献
乐清湾	2016—2018	7.9 (7.7~8.2)	26.4 (21.0~32.8)	23.7 (17.3~31.1)	2.1 (0.2~12.2)	6.5 (5.1~7.9)	81.7 (1.1~370.6)	56.0 (0.6~157.0)	692.2 (230.0~3845.0)	829.9 (273.1~3942.5)	52.4 (5.2~152.7)	本研究
Kalpakkam	2012—2014	8.1 (7.9~8.4)	—	—	3.3 (27.2~32.1)	5.6 (4.4~6.8)	153.3 (53.3~220.2)	10.1 (nd~28.7)	10.8 (nd~30.4)	—	22.9 (5.6~66.0)	[6]
The Marano and Grado Lagoon	2012—2014	—	16.3 (3.21~30.1)	23.5 (0.21~37.9)	1.26 (0.06~111)	8.8 (3.19~14.9)	55.9 (0.56~369.6)	14.0 (0.42~170.8)	826.0 (1.68~5152)	895.9 (2.66~5692.4)	14.26 (0.31~316.2)	[7]
Izmir	2015—2017	8.1 (7.9~38.4)	19.4 (11.0~28.7)	38.3 (36.9~41.2)	8.6 (1.09~32.8)	7.1 (5.51~10.1)	115.4 (1.4~334.6)	—	—	—	66.3 (11.5~135.5)	[12]
Bay, Eastern Aegean	—	—	19.3	32.2	2.9	—	—	—	—	352.3	21.0	[13]
Yellow Sea, China	2013—2015	—	(3.9~29.0)	(16.5~34.8)	(0.1~32.6)	7.1	18.2	0.98	75.3	(75.5~1691.2)	(3.5~196.9)	[14]
Bizerte Lagoon, Mediterranean	2012	—	19.7 (9.9~28.0)	36.6 (34.2~38.4)	3.8 (1.2~7.2)	7.1 (5.4~8.9)	—	—	—	94.5 (17.8~49.0)	—	[15]
大连	2014—2015	8.1 (7.9~8.2)	6.4 (1.9~15.7)	31.8	—	9.5 (5.6~12.3)	—	—	—	202.0 (13.0~335.0)	24.0	[16]
lagoons of Western Greece	2005—2007	8.2 (7.3~9.0)	24.2 (15.3~32.5)	14.1 (4.1~56.1)	1.2 (0.0~16.5)	185.7 (0.8~2097.6)	21.3 (0.0~198.3)	396.0 (5.6~1742.0)	603.0 (8.0~2276.5)	7.3 (0.8~274.5)	—	[16]

注: “—”表示未检测

表 3 TRIX 的时空变化
Tab.3 The temporal and spatial variation of TRIX

时间	采样点							平均值
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	
2016-05	6.57	6.55	7.28	6.68	6.36	6.33	6.06	6.55
2016-08	6.56	6.75	6.61	6.58	6.74	6.54	6.67	6.63
2017-05	6.54	6.36	6.23	6.36	6.45	6.4	6.39	6.39
2017-08	7.05	7.09	6.69	6.55	6.43	6.7	6.19	6.67
2017-09	5.77	6.00	5.92	5.77	6.33	5.65	5.58	5.86
2017-10	6.70	6.5	6.61	6.55	6.51	6.47	6.23	6.51
2018-05	5.77	5.57	6.04	5.76	5.74	5.76	5.62	5.75
2018-08	6.28	5.73	5.82	6.39	5.52	6.1	5.91	5.97
2018-09	6.40	6.37	5.47	6.36	5.44	6.04	5.84	5.99

为 0.63, 是影响该海域水体富营养化的重要因子。同时, 从图 3 可以发现, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、

DIN 与 $TRIX$ 之间存在良好的正相关性, 说明该区域水体中的氮和磷可能具有相同的来源。

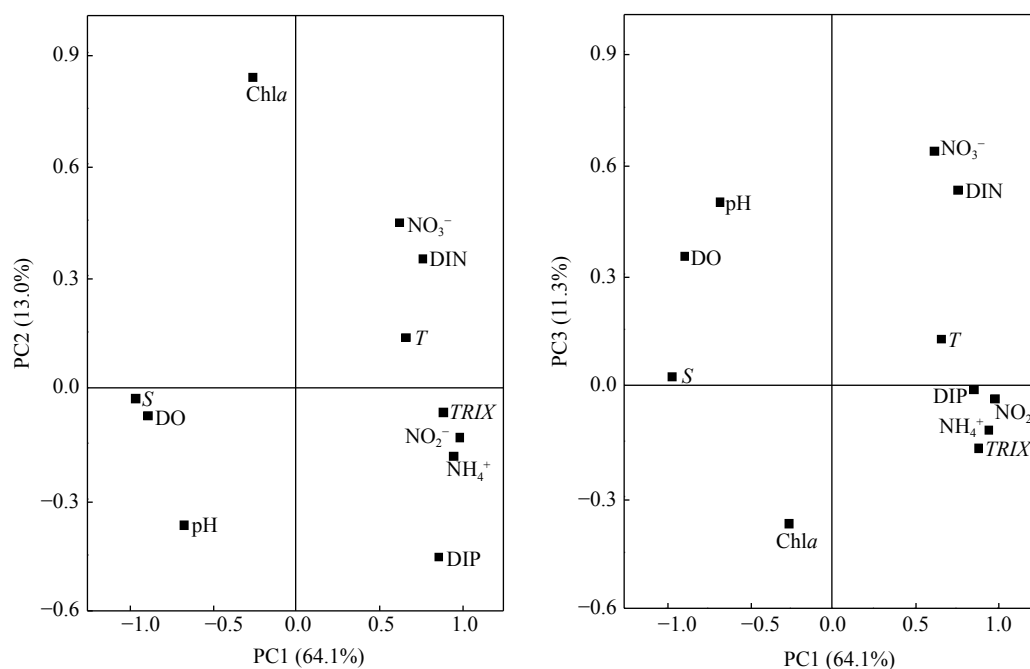


图 3 海水中各水质指标的主成分分析图

Fig. 3 Principal component analysis diagram of each water quality index in seawater

3 结 论

(1) 2016—2018 年, 乐清湾养殖区水体中 pH、温度、盐度、DO 等指标质量状况良好, 达到海水养殖水体的一、二级水质质量的要求, 但与其他海域养殖区比较, DO 浓度偏低, 而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DIP 较高, 特别是 DIN 和 DIP 较高, 均超过海水水质四类标准要求, 需要重视并分析原因, 探究合理的控制措施。根据 3 年的连续测定发现, 各水质指标季节分布规律性不强, 可能与外源性污染物的输入有关。

(2) 利用 $TRIX$ 水质质量富营养化指标分析法发现, 乐清湾养殖区的水质富营养指标超标比较严重, 大部分时间及采样点处于高富营养化状态, 需引起重视。

(3) 通过主成分分析, 第一主成分相关指标主要是亚硝酸盐、氨氮、DIP、温度以及硝酸盐, 且氨氮、硝酸盐、DIN 与 $TRIX$ 之间存在良好的正相关性, 说明该区域水体中的氮和磷可能具有相同的来源。

参考文献:

- [1] 姚炜民, 陈 雷. 乐清湾海水增养殖区环境质量状况及分析[J]. 海洋通报, 2017, 26(4): 116-120.
- [2] DU J, ZHAO H X, WANG Y, et al. Presence and environmental risk assessment of selected antibiotics in coastal water adjacent to mariculture areas in the Bohai Sea[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 177: 117-123.
- [3] 车潇伟, 孔宪喻, 刘艳芳, 等. 基于支持向量机的渤海富营养化快速测评技术研究[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(7): 72-78, 95.
- [4] LI H M, LI X M, LI Q, et al. Environmental response to long-term mariculture activities in the Weihai coastal area, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601/602: 22-31.
- [5] LU X X, WANG Z H, FENG J. Sedimentary records of recent anthropogenic eutrophication and metal contamination in Zhelin Bay, an important mariculture area in Southern China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(2): 1118-1124.
- [6] SMITA ACHARY M, PANIGRAHI S, SATPATHY K K, et al. Health risk assessment and seasonal distribution of dissolved trace metals in surface waters of Kalpakkam, southwest coast of Bay of Bengal[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, 6: 96-108.
- [7] CUTRIM M V J, FERREIRA F S, DOS SANTOS A K D, et

- al. Trophic state of an urban coastal lagoon (northern Brazil), seasonal variation of the phytoplankton community and environmental variables[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 216: 98-109.
- [8] CARLSON R E. A trophic state index for lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(2): 361-369.
- [9] WU H L, HUO Y Z, HU M, et al. Eutrophication assessment and bioremediation strategy using seaweeds co-cultured with aquatic animals in an enclosed bay in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 95(1): 342-349.
- [10] 郭卫东, 章小明, 杨逸萍, 等. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价[J]. 台湾海峡, 1998, 17(1): 64-70.
- [11] VOLLENWEIDER R A, GIOVANARDI F, MONTANARI G, et al. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index[J]. *Environmetrics*, 1998, 9(3): 329-357.
- [12] KUCUKSEZGIN F, GONUL L T, PAZI I, et al. Assessment of seasonal and spatial variation of surface water quality: Recognition of environmental variables and fecal indicator bacteria of the coastal zones of Izmir Bay, Eastern Aegean[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2019, 28: 100554.
- [13] KONG X Y, SUN Y Y, SU R G, et al. Real-time eutrophication status evaluation of coastal waters using support vector machine with grid search algorithm[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 119(1): 307-319.
- [14] BÉJAOUÏ B, ARMI Z, OTTAVIANI E, et al. Random Forest model and TRIAX used in combination to assess and diagnose the trophic status of Bizerte Lagoon, southern Mediterranean[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 71: 293-301.
- [15] 柴成林, 袁洪梅, 张 瑜, 等. 大连市金州海带养殖区理化因子动态及营养状况评价[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(3): 342-348.
- [16] CHRISTIA C, GIORDANI G, PAPASTERGIADOU E. Assessment of ecological quality of coastal lagoons with a combination of phytobenthic and water quality indices[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 86: 411-423.
- [17] 杨 平, 谭立山, 金宝石, 等. 九龙江河口区养虾塘水体营养盐与叶绿素 a 含量的变化特征及影响因素[J]. 湿地科学, 2017, 15(6): 794-800.
- [18] 王 颢, 魏姗姗, 阳 藻, 等. 福建三沙湾夏季海水溶解氧分布及低氧现象初探[J]. 海洋湖沼通报, 2014 (3): 167-174.
- [19] 孙元敏, 陈 彬, 黄海萍, 等. 南海北部海岛周边海域生态环境质量综合评价[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(9): 2874-2880.
- [20] 褚 帆, 刘宪斌, 刘占广, 等. 天津近岸海域海水富营养化评价及其主成分分析[J]. *海洋通报*, 2015, 34(1): 107-112.
- [21] 杨丽娜, 李正炎, 张学庆. 大辽河近入海河段水体溶解氧分布特征及低氧成因的初步分析[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 51-57.
- [22] 刘 潇, 薛 莹, 纪毓鹏, 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(10): 3187-3192.

(上接第 723 页)

- [25] 乔 倩. 不同氮源对典型赤潮藻类生长的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2016.
- [26] DUGDALE R C, GOERING J J. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnol Oceanogr* 12: 196-206[J]. *Limnology and Oceanography*, 1967, 12(2): 196-206.
- [27] COLLOS Y, HARRISON P J. Acclimation and toxicity of high ammonium concentrations to unicellular algae[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 80(1/2): 8-23.
- [28] 蒋汉明, 高坤山. 氮源及其浓度对三角褐指藻生长和脂肪酸组成的影响[J]. *水生生物学报*, 2004, 28(5): 545-551.
- [29] 王培磊, 刘明河, 张学成, 等. 盐生杜氏藻对不同氮源吸收规律的比较研究[J]. 海洋水产研究, 2007, 28(6): 56-60.
- [30] BERGE S J A, CHARLEBOIS D O, MAUZERALL D C, et al. Differential effects of nitrogen limitation on photosynthetic efficiency of photosystems I and II in microalgae[J]. *Plant Physiology*, 1996, 110(2): 689-696.
- [31] LATASA M, BERDALET E. Effect of nitrogen or phosphorus starvation on pigment composition of cultured *Heterocapsa* sp[J]. *Journal of Plankton Research*, 1994, 16(1): 83-94.