

汕尾近岸海域营养盐的时空分布及潜在富营养化评价

李发明, 蔡一枝, 赵晨辉, 曹保玉, 陆文平, 刘凌峰

(国家海洋局汕尾海洋环境监测中心站, 广东 汕尾 516600)

摘要: 本文根据 2016—2018 年红海湾汕尾近岸海域 3 个站位 32 个航次的高频监测数据, 对该区域营养盐的时空分布特征、影响因素及营养盐限制状况进行分析讨论, 并结合潜在富营养化评价模式对该区域的富营养化风险进行评估。结果表明, 红海湾汕尾近岸海域 DIN 符合第二类、第三类海水水质标准, PO₄-P 符合第一类海水水质标准, 基本满足海洋功能区划要求。营养盐的空间分布特征表现为距离汕尾市区越近营养盐浓度越高; 年际变化表现为 2016 年各营养盐平均浓度高于 2017 年和 2018 年; 季节变化规律复杂, 不同年份不同营养盐均存在一定差异。相关性分析表明, 营养盐的时空分布特征主要受降雨量、盐度、pH、叶绿素 *a*、悬浮物等多种环境因子的影响。营养盐结构分析表明, 红海湾汕尾近岸海域存在磷限制, 尽管目前水体富营养化比例不高, 但潜在富营养化风险较高, 其中品清湖是高风险区, 冬、春季是高发期。

关键词: 汕尾近岸海域; 营养盐; 时空分布; 磷限制; 潜在富营养化评价

中图分类号: P734; X132

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2021)04-0497-10

Temporal-spatial distribution of nutrients and potential eutrophication assessment in Shanwei coastal area

LI Fa-ming, CAI Yi-zhi, ZHAO Chen-hui, CAO Bao-yu,

LU Wen-ping, LIU Ling-feng

(Shanwei Marine Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Shanwei 516600, China)

Abstract: The spatial-temporal distribution characteristics of nutrients, influencing factors and nutrient limitation in Shanwei coastal area of Honghai bay were analyzed, and the eutrophication risk was evaluated combined with the potential eutrophication assessment model, based on thirty-two cruises at three stations carried out during 2016—2018. The results showed that DIN in Shanwei coastal area met the second and third class seawater quality standard, and PO₄-P met the first class of seawater quality standard, which satisfied the requirements of marine functional zoning. The spatial distribution characteristics of nutrients showed that the closer it was to Shanwei city, the higher the nutrient concentration was; the interannual variation was that the average concentration of nutrients in 2016 is higher than that in 2017 and 2018; the seasonal variation was complex, there were certain differences in different years for different nutrients. Correlation analysis showed that the temporal-spatial distribution characteristics of nutrients were mainly affected by precipitation, salinity, pH, chlorophyll *a*, suspended particulate matter and other environmental factors. The nutrient structure analysis showed that there was phosphorus limitation in Shanwei coastal area of Honghai bay. Although the eutrophication ratio was relatively low, it suffered a high potential risk of eutrophication. Pinqing lake was the high risk area, and the high occurrence period was winter and spring.

Key words: Shanwei coastal area; nutrient; temporal-spatial distribution; phosphorus limitation; potential eutrophication assessment

收稿日期: 2020-06-05, 修订日期: 2020-08-21

基金项目: 国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金项目(1725)

作者简介: 李发明(1986—), 男, 湖北枣阳人, 博士, 主要研究方向为海洋环境监测, E-mail: 811515382@qq.com

《2018年中国海洋生态环境状况公报》显示,2018年我国海洋生态环境状况整体稳中向好,海水环境质量总体有所改善,但是入海河流水质状况仍不容乐观,近岸局部海域污染情况依然严重,海洋环境风险依然突出。近岸海域由于接纳了陆源输入的大量污染物,是各种海洋环境问题的高发区域,其中,以氮、磷为代表的营养盐污染和水体富营养化已然成为全球性的海洋生态环境问题。

红海湾是位于我国南海北部的一个半封闭海湾,是广东省重要的海湾规模化养殖示范区,同时也面临一定的海洋环境污染风险。目前对红海湾的研究主要集中在水体和沉积物重金属方面^[1-3],对营养盐的研究相对较少^[4]。近年来,随着生活污水排放量和化肥施用量的激增,大量营养盐输入导致红海湾生态环境受到破坏,直接影响其生态系统结构和功能。为了解红海湾汕尾近岸海域环境质量现状,国家海洋局汕尾海洋环境监测中心站在红海湾开展了长期的高频监测。本文根据2016—2018年32个航次的监测结果,对红海湾汕尾近岸海域营养盐的时空分布特征、影响因素和营养盐结构开展了初步分析,并采用潜在富营养化评价模式对调查海域的营养盐状况进行评价,旨在了解该海域营养盐的时空分布规律及富营养化风险,为该海域的海洋资源开发利用和海洋生态环境保护提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

自2016年1月至2018年12月,在红海湾汕尾近岸海域开展了32个航次的海洋环境监测,调查站位如图1所示,其中LY5站位位于汕尾品清湖内,水深2~3 m,LY4站位位于汕尾金町湾旅游区以南,LY6站位位于汕尾马宫镇牛尾山东南侧,水深均为5 m左右。

海水样品的采集严格按照《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)和《海洋监测规范》(GB/T 12378-2007)要求执行,每月采集一次。采样时,使用5 L有机玻璃采水器分别采集表、底层海水样品,其中LY4站采集平行双样。营养盐样品经0.45 μm微孔滤膜过滤(滤膜需用pH=2的盐

酸浸泡24 h,再用超纯水洗至中性),滤液装入250 mL聚乙烯瓶中,-20℃冷冻保存。其他样品现场固定带回实验室分析。

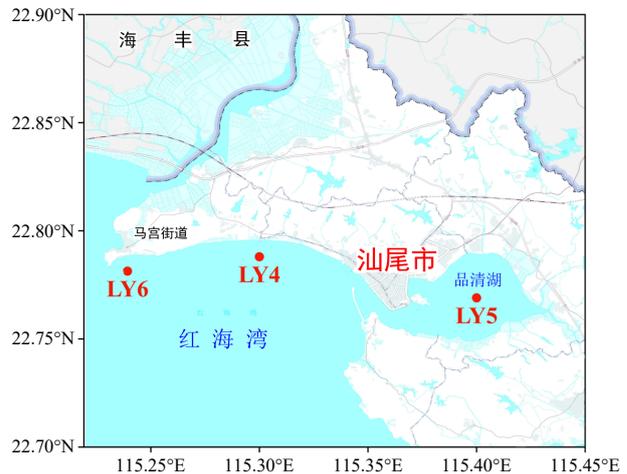


图1 调查站位(LY5:品清湖; LY4:金町湾; LY6:马宫)
Fig. 1 Sampling station (LY5: Pinqing lake, LY4: Jinting Bay, LY6: Magong town)

1.2 样品分析

亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)用重氮-偶氮法测定,检出限为0.5 μg/L,平行样相对偏差为0~5.9%;硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)用镉柱还原法测定,检出限为5.0 μg/L,平行样相对偏差为0~5.0%,加标回收率为94.5%~101.0%;铵盐($\text{NH}_4\text{-N}$)用次溴酸钠氧化法测定,检出限为5.0 μg/L,平行样相对偏差为0~4.8%;磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)用磷钼蓝法测定,检出限为1.0 μg/L,平行样相对偏差为0~6.0%;硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$)用硅钼蓝法测定,检出限为5.0 μg/L,平行样相对偏差为0.3%~4.1%。无机氮(DIN)浓度为 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的总和。分析项目还包括海水温度、盐度、pH、叶绿素a、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)和油类等,所有项目均通过国家计量认证。

2 结果与讨论

2.1 营养盐的空间分布特征

根据2016—2018年3个监测站位营养盐浓度统计结果(表1)可知,营养盐浓度从高到低依次为LY5站位、LY4站位和LY6站位。从空间分布来看,距离汕尾市区越近,营养盐浓度越高。2017年汕尾市排污口调查结果表明,品清

湖周边存在 20 多个排污口和排污河流, 大量的生活污水和渔业养殖废水直接排入品清湖。另外, 品清湖为天然潟湖, 其潮汐通道咽喉断面宽度仅 800 m, 与外海的水交换通量较小^[5]。污水排放和水交换通量不足, 是导致品清湖内 LY5

站营养盐浓度远高于其他两个站点的主要原因。LY4 站位高于 LY6 站位, 可能是因为 LY4 站位位于汕尾金町湾旅游中心区, 该区域人类活动强度较大, 受到房地产开发和海水养殖的双重影响。

表 1 红海湾汕尾近岸海域的营养盐浓度

Tab.1 Concentrations of nutrients in Shanwei coastal area of Honghai bay

营养盐	LY6		LY4		LY5	
	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
NO ₃ -N	118±62	40.6 ~ 285	116±72	46.8 ~ 331	151±91	67.1 ~ 351
NH ₄ -N	119±29	64.3 ~ 195	131±35	70.7 ~ 196	142±59	55.6 ~ 302
NO ₂ -N	10.4±9.6	0.5 ~ 40.2	12.8±9.3	0.8 ~ 46.0	19.0±16.1	0.7 ~ 69.9
DIN	248±81	116 ~ 462	260±102	123 ~ 511	312±125	142 ~ 578
PO ₄ -P	11.8±11.6	1.4 ~ 49.8	14.1±12.6	1.4 ~ 47.6	20.5±15.7	1.8 ~ 56.6
SiO ₃ -Si	366±136	134 ~ 690	376±152	119 ~ 751	498±251	112 ~ 1190

从 DIN 和 PO₄-P 的平均值来看, LY6 站位和 LY4 站位的 DIN 符合第二类海水水质标准, LY5 站位的 DIN 符合第三类海水水质标准, 3 个站位的 PO₄-P 均符合第一类海水水质标准。根据《广东省近岸海域环境功能区划》, LY6 和 LY4 站位位于金町湾旅游休闲娱乐区, LY5 站位位于品清湖港口航运区, 分别执行第二类和第三类海水水质标准, 整体来说, 红海湾汕尾近岸海域海水质量基本符合海洋功能区划要求。但是监测区域的个别月份(如 2018 年 1 月等)存在超过第三类、第四类海水水质标准的情况, 其中, 8.8% 的 DIN 和 15.6% 的 PO₄-P 浓度超过第三类海水水质标准, 1.8% 的 DIN 和 3.1% 的 PO₄-P 浓度超过第四类海水水质标准, 这表明红海湾汕尾近岸海域 DIN 和 PO₄-P 均存在一定的超标现象。

从 DIN 的组成来看, LY6 站位、LY4 站位和 LY5 站位的 NO₃-N 占 DIN 比例的平均值分别为 45.7%、42.4% 和 46.9%, NH₄-N 占 DIN 比例的平均值分别为 50.5%、52.9% 和 47.2%(表 2), 由此可见, NO₃-N 和 NH₄-N 是红海湾汕尾近岸海域 DIN 的主要组成部分。一般来说, NO₃-N 是 DIN 的主要存在形式, NO₂-N 是 NH₄-N 氧化或 NO₃-N 还原过程的中间产物, 浓度较低。NH₄-N 是污水中 DIN 的主要存在形式, 主要来源于含氮有机物的分解、动物排泄和农业施肥流失等^[6]。红海湾汕尾近岸海域海水养殖业发达, 城镇排污口较多, 因此, 渔业养殖或生活污水的直接排放可能是该区域 NH₄-N 浓度较高的主要原因, 同样的情况也出现在深圳湾和大亚湾等受工业和生活污水排放影响显著的区域^[7-8]。

表 2 红海湾汕尾近岸海域 DIN 各组分占比

Tab.2 Proportion of DIN components in Shanwei coastal area of Honghai bay

季节	LY6			LY4			LY5		
	NO ₃ -N/(%)	NH ₄ -N/(%)	NO ₂ -N/(%)	NO ₃ -N/(%)	NH ₄ -N/(%)	NO ₂ -N/(%)	NO ₃ -N/(%)	NH ₄ -N/(%)	NO ₂ -N/(%)
春季	48.0±10.5	50.6±11.0	1.4±1.0	42.3±10.2	53.9±10.1	3.7±1.4	46.7±13.2	48.9±13.4	4.4±3.1
夏季	44.5±7.4	52.0±7.5	3.5±3.1	45.8±8.3	51.0±9.4	3.2±2.0	47.4±8.6	48.7±7.7	3.9±3.0
秋季	40.5±10.5	54.8±11.3	4.8±4.1	37.8±7.8	55.5±7.2	6.7±4.7	45.0±17.4	45.6±15.4	9.4±7.7
冬季	49.9±11.6	44.5±11.0	5.6±1.7	43.5±10.8	51.1±9.4	5.4±1.9	48.4±14.6	45.5±12.2	6.1±3.1
平均值	45.7±10.5	50.5±10.8	3.8±3.1	42.4±9.6	52.9±9.1	4.7±3.1	46.9±13.2	47.2±12.0	6.0±4.9

2.2 营养盐的时间分布特征

2016年、2017年和2018年DIN的年平均浓度分别为 $(283\pm 114)\mu\text{g/L}$ 、 $(255\pm 88)\mu\text{g/L}$ 和 $(256\pm 99)\mu\text{g/L}$, 2016年最高, 2017年和2018年相近(t -test, $p=0.95$)。2016年、2017年和2018年 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的年平均浓度分别为 $(16.1\pm 13.4)\mu\text{g/L}$ 、 $(11.2\pm 10.5)\mu\text{g/L}$ 和 $(16.8\pm 15.8)\mu\text{g/L}$, 2016年和2018年相近, 均高于2017年。2016年、2017年和2018年 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的年平均浓度分别为 $(442\pm 174)\mu\text{g/L}$ 、 $(366\pm 162)\mu\text{g/L}$ 、 $(373\pm 193)\mu\text{g/L}$, 2016年最高, 2018年次之, 2017年最低。整体来看, 2016年各营养盐平均浓度高于2017年和2018年, 这可能与2016年汕尾市开始实施的“蓝色海湾”整治行动有关, 该项目旨在对汕尾近岸海域的海洋生态环境进行整治修复, 有效提升汕尾近岸海域的海水质量。

图2给出了2016—2018年各营养盐春(3月—5月)、夏(6月—8月)、秋(9月—11月)、冬(12月—次年2月)的季节变化, 由图可知, 不同年份不同营养盐浓度的季节变化特征均存在一定差异。对于DIN来说, 2016年季节变化特征表现为春、冬季高和夏、秋季低的特点; 2017年和2018年季节变化特征相似, 夏季最高, 秋、冬季次之, 春季最低。对于 $\text{PO}_4\text{-P}$ 来说, 2016年季节变化特征为春、冬季高, 秋季次之, 夏季最低; 2017年和2018年均为冬季最高, 其他3个季节相近。对于 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 来说, 2016年季节变化特征为冬季最高, 秋、春季次之, 夏季最低; 2017年和2018年相似, 均为夏季最高, 秋、冬季次之, 春季最低。整体来看, 2017年和2018年营养盐季节变化特征较一致, 2016年春季和冬季营养盐浓度一般高于2017年和2018年, 夏季和秋季稍低。

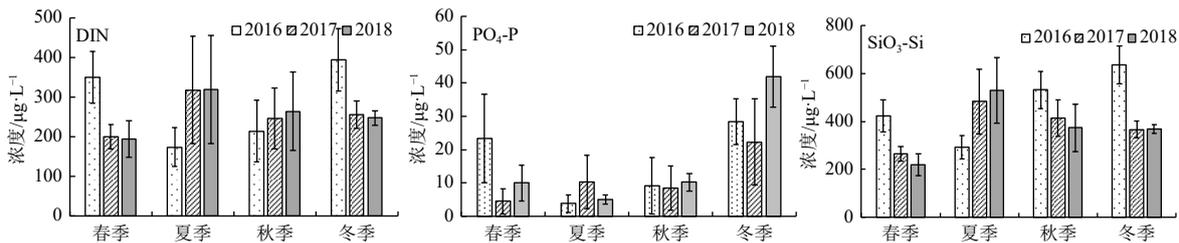


图2 2016—2018年各营养盐浓度的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of nutrients during 2016–2018

表2给出了LY6站位、LY4站位和LY5站位不同季节DIN各组分($\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$)占比, 由表可知, LY6站位和LY4站位的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在DIN中所占比例高于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。随着季节变化, 各组分占比均存在一定的差异, 其中, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的占比呈现出秋季>夏季~春季>冬季的变化趋势, $\text{NO}_2\text{-N}$ 占比表现为秋、冬季高于春、夏季。LY5站位 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的占比基本一致, 并未表现出明显的季节变化。LY4站位和LY6站位 $\text{NH}_4\text{-N}$ 占比高于LY5站位, 这可能与硝酸盐异化还原成铵(DNRA)有关。有研究表明^[9], 在珠江口等浅水河口或海湾存在明显的DNRA过程, 并且在潮汐周期内水交换显著的河口湾口, 盐度越高, DNRA的反应速率越高, 越有利于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的累积。LY5站位位于品清湖内, 水交换不畅, 这可能会对DNRA过程有一定限制。与其

他季节相比, 秋季的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 占比更高, 这与大亚湾8月—10月 $\text{NH}_4\text{-N}$ 占比达到80%以上的趋势相似^[10], 主要来自浮游生物等有机物质的降解。

图3给出了2016—2018年红海湾汕尾近岸海域营养盐的月际变化, 由图3可知, DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的月际变化趋势存在一致性, 均表现为1月浓度较高, 随月份增加逐渐降低, 6月和7月达到最低, 然后又随月份增加逐渐升高, 12月达到较高浓度, 这与浮游植物生长周期变化规律基本吻合。其中, 2017年6月和7月营养盐浓度出现高值, DIN和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度出现最大值, 这可能与这两个月降雨量增大有关。与DIN和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 相比, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的变化趋势与降雨量的月际变化趋势吻合较好, 这可能是由于 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 主要受河流和降雨等地面径流输入的影响。

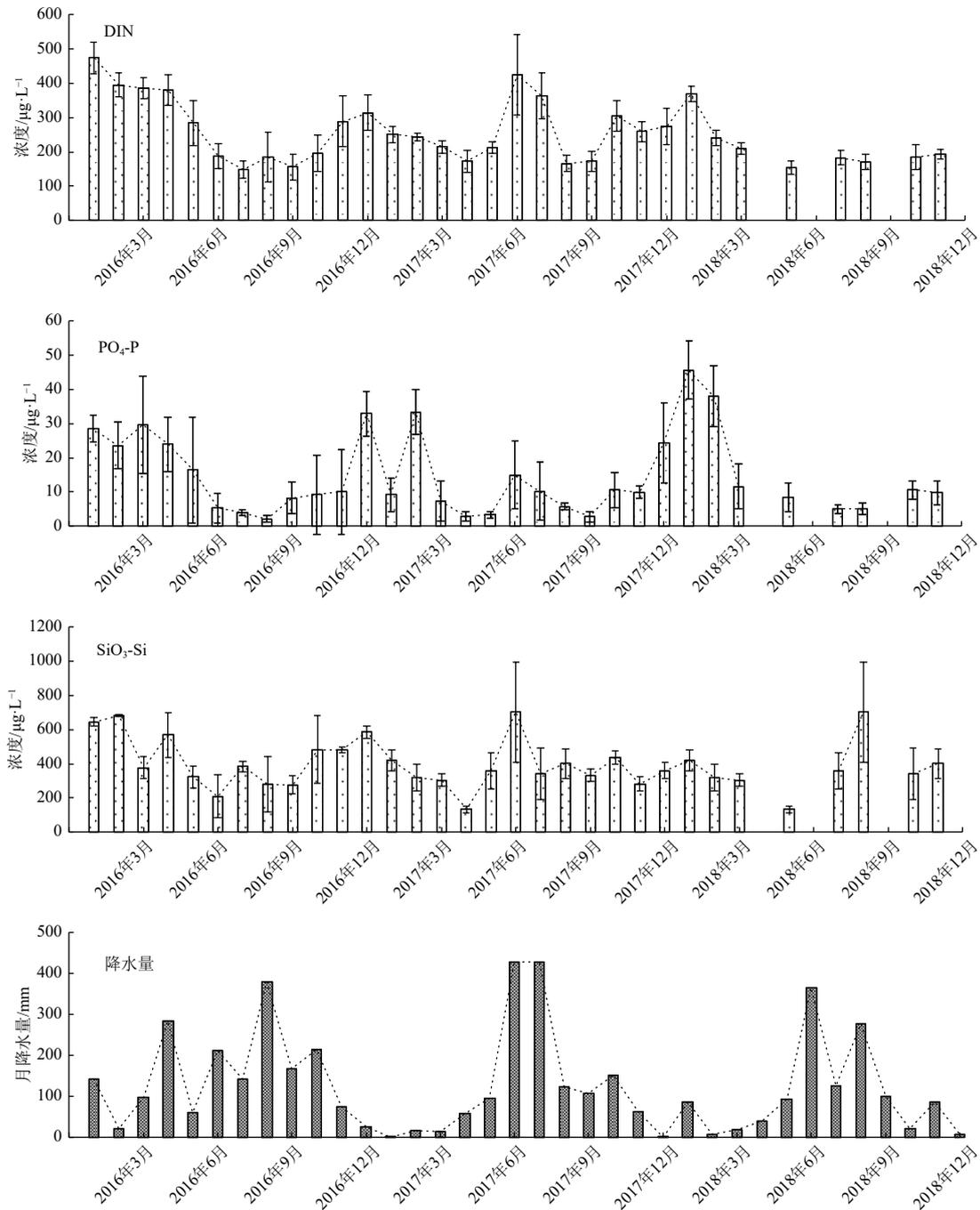


图3 红海湾汕尾近岸海域2016—2018年营养盐的月际变化

Fig. 3 Monthly variations of nutrients in Shanwei coastal area of Honghai bay during 2016—2018

2.3 营养盐与环境因子的关系

为探究红海湾汕尾近岸海域营养盐与其他环境因子的关系,本研究将营养盐与降雨量、温度、盐度、pH、DO、COD、油类、叶绿素 a 、悬浮物等环境因子进行相关性分析,结果列于表3,由表3可知, $PO_4\text{-P}$ 与降雨量呈显著负相关关系($p<0.01$),与盐度无显著相关关系,而DIN($p<0.05$)

和 $SiO_3\text{-Si}$ ($p<0.01$)均与降雨量呈显著正相关关系,与盐度呈显著负相关关系($p<0.01$),这表明降雨是影响红海湾汕尾近岸海域DIN和 $SiO_3\text{-Si}$ 分布的重要因素,而雨水的稀释可能是 $PO_4\text{-P}$ 浓度随降雨量增加而降低的原因之一。2018年汕尾遮浪海洋站大气湿沉降的监测结果显示,DIN浓度为 (0.58 ± 0.55) mg/L, $PO_4\text{-P}$ 的浓度为 $(0.013\pm$

0.022) mg/L, 年降雨量为 1231 mm(本实验室未发表结果), 经估算, 2018 年汕尾近岸海域 DIN

的大气湿沉降输入通量约为 $(0.71 \pm 0.67) \text{ g/m}^2$, 远高于 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的输入通量 $(0.016 \pm 0.027) \text{ g/m}^2$ 。

表 3 红海湾汕尾近岸海域营养盐与环境因子的相关性分析

Tab.3 Correlation analysis between nutrient and environmental factors in Shanwei coastal area of Honghai bay

营养盐	降雨量	温度	盐度	pH	DO	COD	油类	叶绿素 a	悬浮物
$\text{PO}_4\text{-P}$	-0.241**	-0.580**	-0.106	-0.165*	0.199*	-0.106	-0.054	0.095	0.185*
$\text{NO}_2\text{-N}$	0.054	-0.124	-0.154	-0.450**	-0.172*	-0.040	0.009	0.077	0.097
$\text{NO}_3\text{-N}$	0.255**	-0.288**	-0.204**	-0.193*	-0.102	-0.093	0.040	0.086	0.092
$\text{NH}_4\text{-N}$	0.080	-0.162*	-0.253**	-0.280**	-0.155	-0.071	-0.099	0.031	0.020
DIN	0.165*	-0.425**	-0.340**	-0.225**	-0.035	-0.115	-0.025	0.068	0.176*
$\text{SiO}_3\text{-Si}$	0.217**	-0.125	-0.414**	-0.179*	-0.131	0.179*	0.054	0.322**	0.151

注: **在0.01水平(双侧)上显著相关, *在0.05水平(双侧)上显著相关

各营养盐与 pH 均呈现显著负相关关系, 这可能与浮游植物的光合作用有关。一方面, 浮游植物在生长过程中会吸收营养盐, 造成营养盐浓度下降; 另一方面, 浮游植物在进行光合作用时吸收 CO_2 , 海水中 CO_2 的减少导致 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的比例相对增加, 造成 pH 升高, 因此, 营养盐均与 pH 呈现出显著负相关关系^[4]。

$\text{SiO}_3\text{-Si}$ 与叶绿素 a 呈现出显著正相关关系 ($p < 0.01$), 这可能与该区域浮游植物的种类有关。营养盐对浮游植物生长的影响极其灵敏, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度越高, 越利于硅藻的生长。2016 年 11 月和 2017 年 4 月, 红海湾汕尾近岸海域的两次生物生态调查结果显示, 该区域浮游植物优势种均为硅藻, 以中肋骨条藻 (*Pseudo-nitzschia pungens*) 和洛氏角毛藻 (*Chaetoceros lorenzianus*) 为主要优势种。 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 是硅藻的必需营养元素, 作为细胞壁结构成分, 同时参与光合色素合成、蛋白质合成、DNA 合成和细胞分裂等多种代谢和生长过程^[11]。

$\text{PO}_4\text{-P}$ 、DIN 与悬浮物呈显著正相关关系 ($p < 0.05$), $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 与悬浮物无显著相关关系, 悬浮颗粒物的吸附、解吸过程也可能会对营养盐浓度产生一定的影响。

整体来说, 红海湾汕尾近岸海域营养盐与众多环境因子呈现出显著相关关系, 其时空分布受多种因素的影响, 其中, DIN 主要受降雨、pH 和悬浮物的影响, $\text{PO}_4\text{-P}$ 主要受 pH 和悬浮物的影响, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 主要受降雨、pH 和硅藻类浮游植物

生长的影响。

2.4 营养盐结构分析

海水中适宜的营养盐比值有利于浮游植物的生长和繁殖, 某种生源要素缺乏会限制生物的生长, 过高则会影响浮游植物的种群结构, 甚至引发赤潮灾害。Redfield 比值(摩尔比)可简单判断某一海域浮游植物的生长是否受到营养盐限制, 但 Redfield 比值是不同物种间营养盐比值的平均值^[12], 不同海域浮游植物的群落结构和组成不尽相同, 将大尺度的平均值用于小尺度水体营养盐限制的判断显然是不准确的。我国近岸海域 N/P 几乎都偏离了 Redfield 比值, 并且这种偏离程度随区域和季节发生改变。后来更多的研究提倡营养盐限制的判别应该是一个阈值范围: 若 Si/P 和 N/P 大于 22, 则 P 为限制因子; 若 N/P 小于 10 和 Si/N 大于 1, 则 N 为限制因子; 若 Si/P 小于 10 和 Si/N 小于 1, 则 Si 为限制因子^[13-14]。同时, 营养盐限制还应考虑浮游植物生长的最低阈值, 通过营养盐动力学研究可得到浮游植物所能利用的营养盐最低浓度分别为: Si=54 $\mu\text{g/L}$, DIN=14 $\mu\text{g/L}$, P=3.1 $\mu\text{g/L}$ ^[15]。

图 4 给出了 2016—2018 年红海湾汕尾近岸海域的营养盐比值, 由图 4 可知, N/P、N/Si、Si/P 均呈现出一定的季节变化, 其中 N/P 和 Si/P 变化趋势比较一致 ($r^2=0.6144$), 均表现为春、夏季高于秋、冬季, 而 N/Si 相对比较稳定, 变化范围较小。从平均值来看, N/P 为 72, Si/P 为 57, N/Si 为 1.4, 参照营养盐限制的判别方法, N/P 和

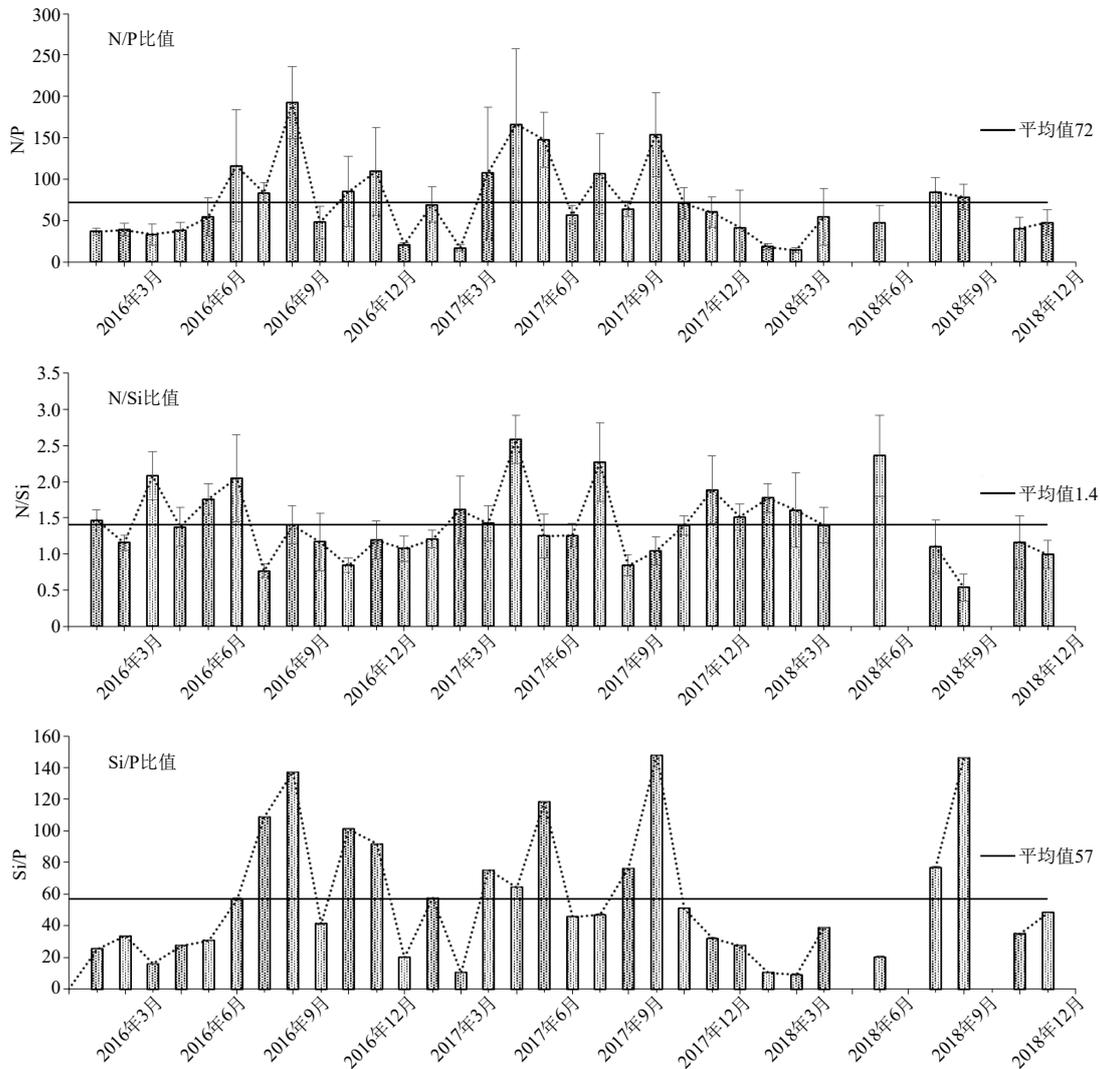


图4 2016—2018年红海湾汕尾近岸海域的营养盐比值

Fig. 4 Nutrients ratio in Shanwei coastal area of Honghai bay during 2016—2018

Si/P 均远远大于 22, 并且 LY4 站位和 LY6 站位的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 最低浓度为 $1.4 \mu\text{g/L}$, LY5 站位为 $1.8 \mu\text{g/L}$, 均低于 P 限制的最低阈值 ($3.1 \mu\text{g/L}$), 因此, 红海湾汕尾近岸海域表现出一定的磷限制, 这与中国近海普遍受到磷限制的情况一致^[16]。尽管 DIN 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度较高, 但由于受到磷限制的影响, 红海湾汕尾近岸海域并未发生赤潮或明显的水体富营养化。由于海水富营养化是一个非线性多影响因素的复杂现象, 当存在营养盐限制时, 只有 N/P 接近 Redfield 比值的情况下, 才能使潜在部分的营养盐释放出对富营养化的贡献, 因此仅仅根据营养盐浓度的高低进行线性的富营养化响应评价模式 (如单因子法和富营养化指数法) 缺乏一定的现实意义。

另外, 不同调查站位的 N/P 变化范围较大, 其中, LY6 站位平均值为 81, LY4 站位平均值为 61, LY5 站位平均值为 35, 距离汕尾城区越近, N/P 越低。从前文可知, 营养盐浓度 LY5 站位最高, LY4 站位次之, LY6 站位最低, 距离汕尾市区越近, 营养盐浓度越高, 与 N/P 的趋势相反。造成 N/P 不断升高的原因, 一是氮肥在农业中大量使用, 导致陆源氮输入量的增加; 二是国家逐渐限制生产和销售使用含磷用品, 陆源排磷量大幅降低。LY5 站位 N/P 最低, 表明清湖生活污水输入量较多, 磷高于 LY6 站位和 LY4 站位。不同调查站位的 N/Si 变化范围较小, 各站位平均值均为 1.4, 表明氮和硅存在较一致的源和汇。

从年际变化来看,调查区域 N/P 有降低的趋势(图 4), 2016 年为 71, 2017 年为 89, 2018 年为 48。有研究表明^[17], 营养盐结构的变化会导致浮游植物群落结构的改变, 对浮游植物优势种的演替至关重要, 较高的 N/P 以及高浓度的 SiO₃-Si 有助于硅藻的生长, 这可能是 2016—2018 年调查区域浮游植物硅藻类占优势的主要原因, 但随着营养盐结构的变化, 红海湾汕尾近岸海域浮游植物群落结构可能会发生一定的变化。

2.5 潜在富营养化评价

由于海水受到营养盐的限制, 相对过剩营养盐虽然会提高海区营养化水平, 但实质上不能被浮游植物利用, 这部分过剩的营养盐不应被看作对实质上的富营养化做出贡献, 而应看作只具有潜在性。从上文的营养盐结构分析可以看出, 红海湾汕尾近岸海域受到一定的磷限制, 因此, 本

文采用郭卫东提出的潜在性富营养化评价模式^[18]进行评价, 具体划分原则见表 4。根据潜在性富营养化评价模式对 2016—2018 年红海湾汕尾近岸海域进行富营养化评价, 结果列于表 5。评价结果中出现贫营养的比例占 35.6%, 中度营养占 12.5%, 富营养占 8.1%, 磷限制中度营养(IV_P)占 28.8%, 磷中等限制潜在性富营养(V_P)占 4.4%, 磷限制潜在性富营养(VI_P)占 10.6%。与深圳湾、杭州湾等海湾相比^[19-20], 红海湾汕尾近岸海域水体富营养化比例较低, 可能与磷限制有一定关系。但是, 高比例的磷限制中度营养和潜在性富营养表明红海湾汕尾近岸海域存在较高的水体富营养化风险, 一旦出现突发磷污染, 极有可能造成更高比例的水体富营养化, 甚至产生赤潮灾害。

表 4 潜在性富营养化评价模式及营养级的划分原则

Tab.4 Classification of nutrient levels of potential eutrophication assessment

级别	营养级	DIN/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	PO ₄ -P/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	N/P(摩尔比)
I	贫营养	<200	<30	8 ~ 30
II	中度营养	200 ~ 300	30 ~ 45	8 ~ 30
III	富营养	>300	>45	8 ~ 30
IV _P	磷限制中度营养	200 ~ 300	—	>30
V _P	磷中等限制潜在性富营养	>300	—	30 ~ 60
VI _P	磷限制潜在性富营养	>300	—	>60
IV _N	氮限制中度营养	—	30 ~ 45	<8
V _N	氮中等限制潜在性富营养	—	>45	4 ~ 8
VI _N	氮限制潜在性富营养	—	>45	<4

从季节变化来看, 贫营养一般出现在 6 月—10 月, 中度营养和富营养一般出现在 12 月—次年 3 月, 因此, 冬、春季是汕尾近岸海域水体富营养化的高发期。另外, 位于品清湖的 LY5 站位出现富营养的比例高于 LY4 站位和 LY6 站位, 这主要是因为品清湖周边的污水排放和水体交换不畅造成该区域营养盐浓度较高。因此, 品清湖是汕尾近岸海域水体富营养化的高风险区。

3 结论

(1) 2016—2018 年红海湾汕尾近岸海域 DIN 符合第二类、第三类海水水质标准, PO₄-P 符合

第一类海水水质标准, 基本满足海洋功能区划的要求。个别月份存在超标的现象, DIN 和 PO₄-P 的超标率分别为 8.8% 和 15.6%。

(2) 年际变化特征表现为 2016 年各营养盐平均浓度高于 2017 年和 2018 年。季节变化特征复杂, 不同年份不同营养盐的季节变化特征均存在一定的差异。

(3) 营养盐与众多环境因子呈现出显著相关关系, 其时空分布受多种因素的影响, 其中, DIN 主要受降雨、pH 和悬浮物的影响, PO₄-P 主要受 pH 和悬浮物的影响, SiO₃-Si 主要受降雨、pH 和硅藻类浮游植物生长的影响。

表5 2016—2018年红海湾汕尾近岸海域调查站位潜在富营养化评价结果

Tab.5 Potential eutrophication assessment results in Shanwei coastal area of Honghai bay during 2016—2018

时间	LY6表层	LY6底层	LY4表层	LY4底层	LY5表层
2016—01	V _P	V _P	IV _P	V _P	V _P
2016—02	V _P	V _P	V _P	V _P	III
2016—03	V _P	V _P	III	III	III
2016—04	V _P	IV _P	V _P	V _P	II
2016—05	IV _P	IV _P	IV _P	IV _P	III
2016—06	I	I	I	I	IV _P
2016—07	I	I	I	I	I
2016—08	I	I	IV _P	I	IV _P
2016—09	I	I	I	I	I
2016—10	I	I	I	I	II
2016—11	IV _P	IV _P	VI _P	IV _P	III
2016—12	II	II	III	III	II
2017—01	IV _P				
2017—02	II	II	II	II	II
2017—03	IV _P	IV _P	I	I	IV _P
2017—04	IV _P	IV _P	I	I	I
2017—05	IV _P	I	IV _P	IV _P	IV _P
2017—06	VI _P	VI _P	VI _P	V _P	V _P
2017—07	VI _P	IV _P	VI _P	VI _P	V _P
2017—08	I	I	I	I	I
2017—09	I	I	I	I	IV _P
2017—10	IV _P	IV _P	IV _P	IV _P	V _P
2017—11	IV _P				
2017—12	II	II	III	II	IV _P
2018—01	III	III	III	II	III
2018—02	II	II	II	II	II
2018—03	I	IV _P	II	IV _P	IV _P
2018—05	I	I	I	I	I
2018—07	I	I	IV _P	I	I
2018—08	I	I	I	I	I
2018—10	I	I	I	IV _P	IV _P
2018—11	I	I	I	IV _P	IV _P

(4)红海湾汕尾近岸海域存在一定的磷限制,尽管目前水体富营养化比例不高,但潜在富营养化风险较高。冬、春季是汕尾近岸海域水体富营养化的高发期,品清湖是汕尾近岸海域水

体富营养化的高风险区。

参考文献:

- [1] 李壮伟,罗荣真,陈鸿生,等.广东红海湾表层海水重金属含

- 量的时空变化特征与污染水平评价[J]. 台湾海峡, 2012, 31(1): 20-26.
- [2] 孙钦帮, 张冲, 乌立国, 等. 广东红海湾表层沉积物重金属含量的空间分布特征与污染状况评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(5): 843-849.
- [3] 孙钦帮, 高范, 王阳, 等. 广东红海湾海域表层水环境中重金属含量特征及污染评价[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(5): 685-690, 698.
- [4] 王小平, 贾晓平, 林钦, 等. 红海湾水域溶解氧、pH值、盐度和营养盐分布特征及相互关系研究[J]. 海洋通报, 1999, 18(5): 35-40.
- [5] 应秩甫, 王鸿寿, 陈志永. 粤东汕尾港潟湖-潮汐通道体系的演变及泥沙运动[J]. 海洋学报, 1990, 12(1): 54-63.
- [6] 米铁柱, 于志刚, 姚庆祯, 等. 春季莱州湾南部溶解态营养盐研究[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(3): 14-18.
- [7] 孙金水, WAI O W H, 王伟, 等. 深圳湾海域氮磷营养盐变化及富营养化特征[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2010, 46(6): 960-964.
- [8] 吴静, 唐俊逸, 李迎龙, 等. 深圳大亚湾海域无机氮的组成、分布特征及其富营养化状况再探[J]. 环境科学导刊, 2019, 38(3): 79-83.
- [9] 蒋然, 李召旭. 典型河口区硝态氮短程还原成铵的活性氮累积途径研究进展[J]. 水资源保护, 2014, 30(4): 10-13.
- [10] 彭云辉, 王肇鼎, 高红莲, 等. 大亚湾大鹏澳养殖网箱水体无机氮的生物地球化学[J]. 海洋通报, 2001, 20(2): 16-24.
- [11] 梁君荣, 陈丹丹, 高亚辉, 等. 海洋硅藻硅质细胞壁结构的形成机理研究概述[J]. 海洋学报, 2010, 32(5): 1-8.
- [12] KLAUSMEIER C A, LITCHMAN E, DAUFRESNE T, et al. Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton[J]. Nature, 2004, 429(6988): 171-174.
- [13] JUSTIĆ D, RABALAIS N N, TURNER R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication[J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 30(1): 41-46.
- [14] DORTCH Q, WHITLEDGE 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.
- [15] FISHER T R, PEELE E R, AMMERMAN J W, et al. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay[J]. Marine Ecology Progress Series, 1992, 82(1): 51-63.
- [16] 刘慧, 董双林, 方建光. 全球海域营养盐限制研究进展[J]. 海洋科学, 2002, 26(8): 47-53.
- [17] 董燕红, 蔡建东, 钱宏林. 珠江口海域营养盐比及与浮游植物的关系[J]. 海洋通报, 2009, 28(1): 3-10.
- [18] 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.
- [19] 张静, 张瑜斌, 周凯, 等. 深圳湾海域营养盐的时空分布及潜在性富营养化程度评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 253-261.
- [20] 秦铭俐, 蔡燕红, 王晓波, 等. 杭州湾水体富营养化评价及分析[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(S1): 53-56.