

近 10 a 廉州湾富营养化因子变化特征 及其与赤潮演变的关系

彭小燕^{1,2}, 喻泽斌¹, 蓝文陆², 李天深²

(1. 广西大学环境学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西壮族自治区海洋环境监测中心站, 广西 北海 536000)

摘 要:利用 2005 ~ 2015 年广西廉州湾每年枯水期、丰水期和平水期共 32 个航次的监测数据, 分析了营养盐等富营养化因子的变化特征, 用富营养化指数评价该海域富营养化程度的演变, 并探讨富营养化因子变化与浮游植物响应的关系。结果表明, 近 10 a 廉州湾的营养盐及 COD 最高浓度主要出现在丰水期, DIN 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 枯水期明显高于平水期, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和 COD 在枯水期和平水期浓度相近。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 年际间变化幅度较大并呈较明显上升趋势, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 呈下降趋势, DIN 和 COD 年均变化总体不大。在枯水期 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、DIN 和 COD 均呈现出上升趋势。径流输入对海湾的 DIN 和 COD 变化起主导作用, 生活排污、水产养殖对 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的分布和变化有重要的作用。年均富营养化指数范围为 0.10 ~ 1.85, 富营养化程度主要由 DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 决定。海湾营养盐结构总体处于 P 限制状态, 近 10 a N/P 和 Si/P 比例呈显著下降趋势, P 限制在一定程度上减轻。廉州湾在高 DIN 和高 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 值的条件下, $\text{PO}_4\text{-P}$ 输入量的陡增及其导致营养盐比例的改变是诱发赤潮的最重要环境因素。近年来营养盐输入增加, 富营养化程度有所加重, P 限制得到一定的缓解, 海湾赤潮的生态风险加大。

关键词:廉州湾; 富营养化; 变化特征; 赤潮

中图分类号:P734

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2018)05-0670-08

The development of eutrophication and its impact on the evolution of red tide in the Lianzhou bay for recent ten years

PENG Xiao-yan^{1,2}, YU Ze-bin¹, LAN Wen-lu², LI Tian-shen²

(1. School of Environment, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Marine Environmental Monitoring Central Station, Beihai 536000, China)

Abstract: A total of 32 research cruises were set to monitor the water quality parameters in the Lianzhou bay in dry, wet, and normal season between 2005 and 2015. We analyzed the changes of factors related to the eutrophication, and applied an index to show the development of eutrophication in this important bay. Finally, the relationship between the eutrophication index and the response of phytoplankton was discussed. Our results indicated that the nutrients and the maximum concentration of COD generally occurred in the wet season. The DIN and $\text{PO}_4\text{-P}$ concentrations were higher in dry season than normal season, while the $\text{SiO}_3\text{-Si}$ and COD concentrations were comparable between dry and normal season. The $\text{PO}_4\text{-P}$ concentrations varied significantly in different years and exhibited an obvious increasing pattern. In contrast, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentrations decreased and there were not much changes in DIN and COD concentrations. The $\text{PO}_4\text{-P}$

收稿日期:2017-05-16, **修订日期:**2017-09-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41466001); 广西科技计划项目(桂科 A A17129001, 桂科 A D17129041); 广西自然科学基金项目(2015GXNSFBA139194, 2015GXNSFAA139244)

作者简介:彭小燕(1983-), 女, 广西玉林人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事环境综合分析与监测工作, E-mail: pengxiaoyansky@163.com

通讯作者:蓝文陆, 博士, 高级工程师, E-mail: dr. lan@139.com

P、DIN and COD concentration generally increased in dry season. It was found that the input of runoff may have a major impact on the changes of DIN and COD levels, while the sewage discharge and aquaculture industry may remarkably affect the $\text{PO}_4\text{-P}$ distribution. The annual average eutrophication index ranged between 0.10 ~ 1.85, which was mainly attributed to the changes of DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$. Our results indicated that P was limited in the Lianzhou bay. The ratio of N/P and Si/P kept decreasing in the recent 10 years, indicating the abatement of P limitation. Under the high levels of DIN and $\text{SiO}_3\text{-Si}$, the sharp input of $\text{PO}_4\text{-P}$ had changed the nutrient structure, which was the major factor triggering red tides. With increasing input of nutrients into the bay, the limitation of P keep relieving and the eutrophication is becoming serious, which will eventually lead to higher ecological risk.

Key words: Lianzhou bay; eutrophication; evolution characteristics; red tide

廉州湾是广西的重要海湾之一,其东临北海市,南邻北部湾,是亚热带典型的半封闭海湾。近10 a 来随着南流江流域以及廉州湾周边地区社会经济发展的迅猛发展及养殖业的日益兴起,海湾的生态环境受到了严重的威胁^[1-2],廉州湾已成为广西近岸海域赤潮高发区,赤潮的爆发频次也呈增加趋势^[3]。近年来对廉州湾的营养盐以及赤潮等的研究已有一些报道^[1-5],但对营养盐及富营养化程度在各水期的长期连续时空变化特征少有报道,导致无法分析该海湾赤潮频次增加的原因及机理。本文基于2005~2015年间在廉州湾海域5个站点共32个航次的调查,分析了廉州湾丰平枯三个水期营养盐和富营养化指数的11 a 时空变化以及结构变化特征,探讨引起该海域营养状况变化的主要影响因素及其与赤潮演变的关系,以期为进一步了解廉州湾赤潮演变的机理和生态环境保护等提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 采样时间与站位

在廉州湾海域共布设5个连续固定监测站位,站位分布如图1所示。分别于2005~2015年的枯水期(2~3月)、丰水期(7~8月)和平水期(10~11月)进行了32个航次的综合调查。其中枯水期除2010年和2015年监测时间为2月外,其余年份均为3月;丰水期除2007、2013和2015年监测时间为8月外,其余年份均为7月;平水期除2005、2009和2010年监测时间为11月外,其余年份均为10月。

1.2 调查项目及测定方法

采集表层海水样品(水面下0.5 m),调查项目包括海水温度、盐度、硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、活性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)、活性硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$)、化学需氧量

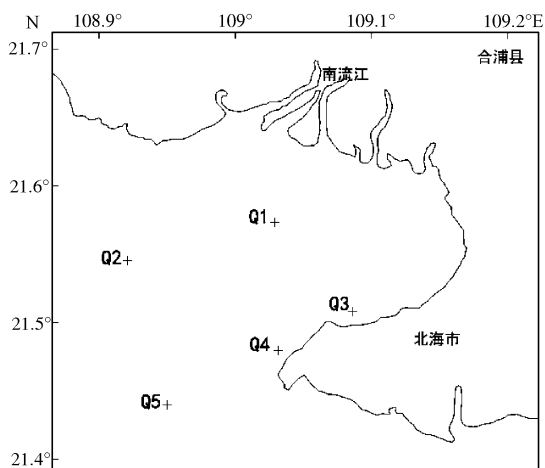


图1 站点布设

Fig. 1 Location of sampling stations

(COD)、叶绿素 a (Chl a) 等,各要素的采集、处理和分析方法按照《海洋监测规范》(GB17378) 执行。无机氮(DIN)为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 三者含量之和。

1.3 富营养化评价方法

采用《近岸海域环境监测规范》(HJ442-2008)中的富营养化指数(E)评价方法,计算公式为: $E = (\text{COD} \times \text{DIN} \times \text{PO}_4\text{-P}) \times 10^6 / 4500$,其中 COD、DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的质量浓度单位为 mg/L 。

当 $E < 1.0$ 时为贫营养; $1.0 \leq E < 2.0$ 时为轻度富营养; $2.0 \leq E < 5.0$ 时为中度富营养; $5.0 \leq E < 15.0$ 时为重富营养; $E \geq 15.0$ 时为严重富营养。

1.4 营养盐限制因素评价方法

根据浮游植物吸收的营养盐各成份比例,选用 Justic 等^[6]和 Dorch 等^[7]提出的系统评估每种营养盐化学计量限制标准,评估该海区的营养盐结构及影响浮游植物生长的限制因素^[8]。

(1)若 $\text{Si/P} > 22$ 和 $\text{N/P} > 22$,则 $\text{PO}_4\text{-P}$ 为限制因素;(2)若 $\text{N/P} < 10$ 和 $\text{Si/N} > 1$,则 DIN 为限制因素;(3)若 $\text{Si/P} < 10$ 和 $\text{Si/N} < 1$,则 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 为限制

因素。

1.5 数据统计与分析

采用 Daniel 检验, Spearman 秩相关系数判断长期变化趋势的显著性, 对趋势不显著的变化结合线性趋势法进行分析。对相关因子间的相互关系采用软件 SPSS 17.0 的 Pearson 相关性分析, $P < 0.05$ 为显著性差异。在相关性分析及平均值计算前, 均采用 Kolmogorov-Smirnov 检验对数据进行了正态分布检验, 结果 $P > 0.05$ 的数据组才用于趋势分析。各水期数据为站位平均值, 年均值为各站位各水期的平均值。

2006 年丰水期调查在暴雨过后, 5 个点的盐度平均值仅为 2, 处于明显的偏淡水性质, 与其它年份差距太大, 为较为客观地分析多年变化趋势, 本文不将该航次的结果纳入统计分析中。

2 结果与讨论

2.1 结果

2.1.1 温盐环境参数的变化

廉州湾附近海域近 10 a 的温度和盐度的变化见图 2。调查期间的温度变化范围为 14.8 ~ 33.0℃, 盐度变化范围为 15.5 ~ 31.9。各水期温盐变化均较明显, 温度表现为丰水期>平水期>枯水期, 盐度在丰水期均处于全年最低, 平水期和枯水期相差不大。从年际变动的趋势来看, 近 10 a 水温和盐度基本保持稳定, 除了 2006 年之外, 盐度较低的年份分别为 2007 年、2011 和 2013 年。

2.1.2 营养盐及 COD 含量的变化

DIN 在枯水期、丰水期和平水期的浓度范围分别为 0.06 ~ 0.55 mg/L, 0.15 ~ 0.52 mg/L, 0.02 ~ 0.43 mg/L (图 3), 平均值分别为 0.22、0.30 和 0.11 mg/L, 调查期间 DIN 最高值和最低值分别出现在 2014 年的枯水期和平水期。从各水期特征及变化趋势看, 丰水期 DIN 平均浓度最高, 其次为枯水期, 除了 2011 年之外均明显高于平水期。近 10 a 枯水期和平水期 DIN 浓度表现出上升趋势, 丰水期则略呈下降趋势, 年均值整体上没有明显的变化趋势。

PO₄-P 在枯水期、丰水期和平水期的浓度范围分别为 0.002 ~ 0.039 mg/L, 0.002 ~ 0.032 mg/L, 0.002 ~ 0.027 mg/L, 平均值分别为 0.011、0.012 和 0.010 mg/L。调查期间 PO₄-P 最高值和

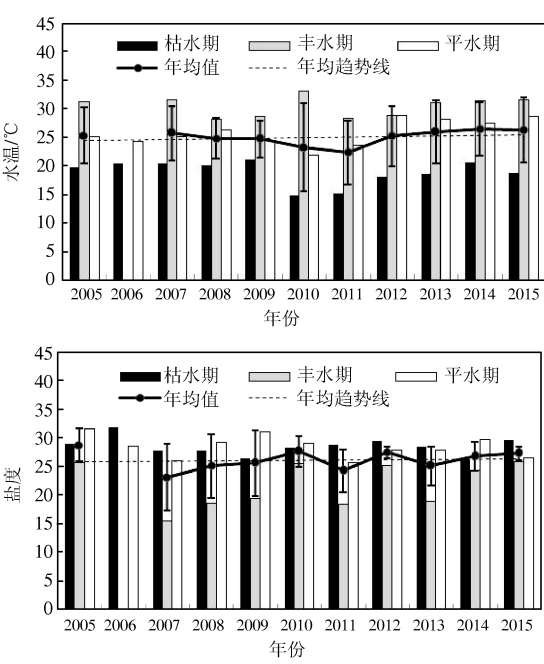


图 2 海水温度和盐度的季节和年际变化

Fig. 2 Seasonal and annual variations of seawater temperature and salinity

最低值出现时间与 DIN 一致。各水期 PO₄-P 浓度波动较大, 变化规律不明显, 以丰水期 PO₄-P 浓度在各年份最高的出现频率较大 (占 50%)。近 10 a 枯水期 PO₄-P 浓度表现出显著的上升趋势, 丰水期则略呈下降趋势, 平水期除 2006、2011 和 2015 年出现较高值外其余年份变化较为平稳, 年均浓度呈现出上升趋势 (图 3)。

SiO₃-Si 在枯水期、丰水期和平水期的浓度范围分别为 0.29 ~ 0.89 mg/L, 0.34 ~ 2.18 mg/L, 0.15 ~ 0.80 mg/L, 平均值分别为 0.57、1.03 和 0.48 mg/L。调查期间 SiO₃-Si 最高值出现在 2007 年丰水期, 最低值出现在 2005 年平水期。丰水期 SiO₃-Si 浓度相对较高, 平水期 and 枯水期相差不大。SiO₃-Si 年际间波动幅度较小, 整体变化呈下降趋势。

COD 在枯水期、丰水期和平水期的浓度范围分别为 0.53 ~ 1.29 mg/L, 0.95 ~ 2.66 mg/L, 0.60 ~ 1.35 mg/L, 平均值分别为 0.90、1.67 和 1.00 mg/L。调查期间 COD 最高值出现在 2011 年丰水期, 最低值出现在 2005 年平水期。丰水期 COD 明显高于其他水期, 平水期 and 枯水期相差不大。近 10 a 枯水期 COD 浓度表现出上升趋势, 丰水期和平水期变化趋势不明显, 年均浓度在 2005 ~ 2011 年间呈现上升而在 2011 ~ 2015 年间呈下降趋势。

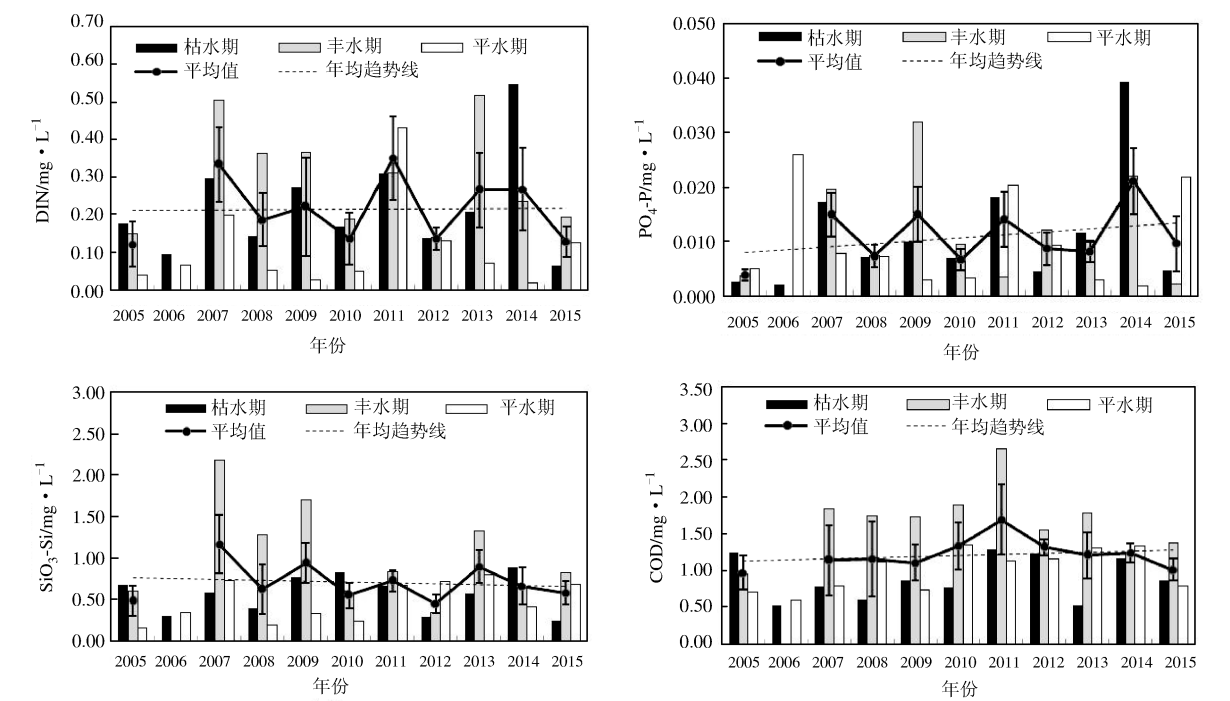


图 3 营养盐及 COD 的季节和年际变化

Fig.3 Seasonal and annual variations of nutrients and COD

2.1.3 富营养化指数及营养盐结构比例的变化

近 10 a 廉州湾海域在枯水期、丰水期和平水期的富营养化指数范围分别为 0.02 ~ 5.52, 0.13 ~ 4.46, 0.01 ~ 2.21, 平均值分别为 0.87、1.52 和 0.35。调查期间两个高峰值分别出现在 2014 年枯水期(5.52)和 2009 年丰水期(4.46)。各水期富营养化指数总体表现为丰水期>枯水期>平水期。年均富营养化指数范围为 0.10 ~ 1.85, 平均值为 0.74, 近 10 a 年均变化整体呈现波动上升趋势(图 4), 海域富营养化程度为加剧状态。采用富营养等级划分, 调查海域在枯水期有 82%、9%、9% 比例分别属于贫营养、轻度富营养和重富营养, 丰水期有 50%、20%、30% 比例分别属于贫营养、轻度富营养和中度富营养, 平水期有 91%、9% 比例分别属于贫营养和中度富营养, 海域富营养状态以贫营养为主, 较高富营养状态主要出现在丰水期和枯水期。

图 5 列出了各营养盐之间的比例结构。廉州湾 N/P 和 Si/P 比值在不同水期的变化幅度较大, N/P 比值的变化范围为 6 ~ 150, Si/P 的变化范围为 15 ~ 288。总体看, N/P 和 Si/P 在各水期变化为丰水期>枯水期>平水期。近 10 a 枯水期和年

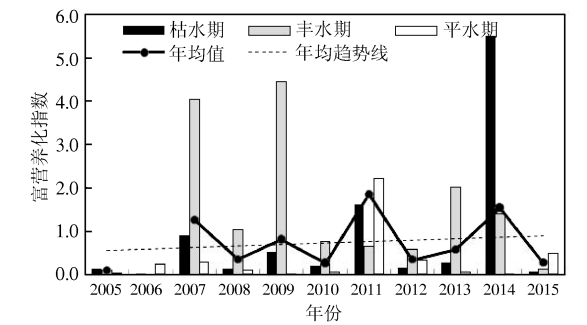


图 4 富营养化指数的季节和年际变化

Fig.4 Seasonal and annual variations of eutrophication index

际变化上, N/P 和 Si/P 均呈显著性下降趋势, 其中 Si/P 下降幅度相对较大。Si/N 比值除平水期个别年份较高值外, 其余年份各水期的变化幅度较小, 年均值保持在 2 左右。

从影响浮游植物生长的营养盐限制因素方面分析(表 1), 廉州湾海域表层水体中磷酸盐为主要限制因子, 在枯水期、丰水期和平水期出现磷限制的比例分别为 100%、100% 和 45%。氮限制仅在平水期出现, 占比仅为 9%, 硅限制几乎不存在。从各营养盐比值看, 近 10 a 枯水期和丰水期的 N/P 和 Si/P 比值均远大于 22, 表明廉州湾海域的磷限制程度较高。

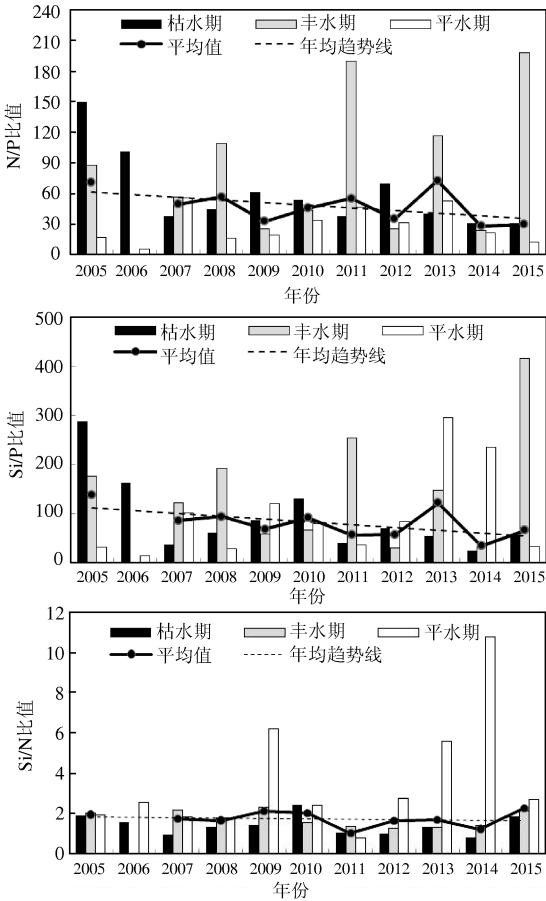


图 5 N/P、Si/P 和 Si/N 比值的季节和年际变化
Fig.5 Seasonal and annual variations of stoichiometric ratio of N/P, Si/P and Si/N

表 1 不同水期各营养盐作为单一限制因子出现的概率
Tab.1 Relative frequency of nitrogen, phosphorus and silicon as a single limitation factor in seasons

限制因子	限制条件	出现概率		
		枯水期	丰水期	平水期
P 限制	Si/P>22, N/P>22	100%	100%	45%
N 限制	N/P<10, Si/N>1	0	0	9%
Si 限制	Si/P<10, Si/N<1	0	0	0

表 2 营养盐与环境因子之间的相关系数

Tab.2 Correlation coefficient between nutrients and other environmental parameters						
营养盐及比例	pH	T/℃	S	DO/mg · L ⁻¹	Chl a/μg · L ⁻¹	COD/mg · L ⁻¹
NH ₄ -N	-0.434 **	-0.059	-0.447 **	-0.138	-0.099	0.217 **
NO ₃ -N	-0.443 **	0.100	-0.736 **	-0.084	0.150	0.513 **
NO ₂ -N	-0.396 **	0.255 **	-0.760 **	-0.166 *	0.121	0.555 **
DIN	-0.475 **	0.086	-0.741 **	-0.106	0.112	0.500 **
PO ₄ -P	-0.458 **	0.022	-0.407 **	-0.208 **	-0.119	0.215 **
SiO ₃ -Si	-0.579 **	0.247 **	-0.877 **	-0.232 **	0.168 *	0.662 **
N/P	0.078	0.015	-0.058	0.063	0.033	0.080
Si/P	0.082	0.121	0.005	0.041	0.045	0.132
Si/N	0.040	0.093	0.221 * *	-0.155	-0.038	-0.063

注: n=160; *: P<0.05; **: P<0.01

2.1.4 浮游植物叶绿素 a 的变化

Chl a 在枯水期、丰水期和平水期的浓度范围分别为 0.62 ~ 4.91 μg/L, 1.27 ~ 14.52 μg/L, 0.98 ~ 10.62 μg/L (图 6), 平均值分别为 2.29、6.06 和 3.75 μg/L。除 2005 和 2012 年外, 各年份 Chl a 浓度在枯水期最低, 而在丰水期和平水期较高, 最低值出现在 2014 年枯水期, 最高值出现在 2015 年丰水期, 次高值在 2012 年平水期, 这 2 个高值浓度均超过了 10 μg/L。Chl a 年均浓度在 2008 ~ 2012 年之间呈现出明显的逐年上升, 在 2013 ~ 2015 年期间有较大回落, 总体上近 10 a 呈上升趋势, 尤其是 2008 年到 2015 年间。

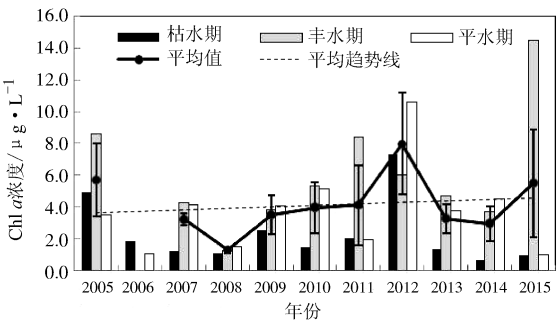


图 6 Chl a 的季节和年际变化
Fig.6 Seasonal and annual variations of chlorophyll a

2.1.5 营养盐与环境因子的相关性

从表 2 中可看出, NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N、DIN、PO₄-P 和 SiO₃-Si 均与 pH 和盐度有非常显著的负相关性, 而与 COD 有非常显著的正相关性。NO₂-N、SiO₃-Si 与水温有显著正相关性, 其他营养盐与水温没有相关性。NO₂-N、PO₄-P 和 SiO₃-Si 与 DO 有显著负相关性。Chl a 除与 SiO₃-Si 有显著正相关性外, 与其他营养盐及其比值的相关性不显著。

2.2 讨论

2.2.1 廉州湾富营养化因子季节变化特征及其年际间差异原因分析

本研究通过11 a的连续调查发现廉州湾海域营养盐及COD在各水期之间变化很大,在各年际之间也发生了一定的变化。近岸海域营养盐受河流、海洋排污、大气沉降、水体交换等多方面因素影响^[9-10]。一般来说,无机氮和磷酸盐主要来源于陆源性径流输入以及海洋微生物的氧化分解^[11]。近10 a 廉州湾营养盐及COD总体表现出丰水期浓度明显高于枯水期和平水期,这和盐度的变化特征正好相反(图2),表明了廉州湾营养盐及COD主要是受径流的影响。廉州湾周边有南流江、西门江和大风江等河流汇入,其中最大河流南流江流域污染以面源为主,污染物负荷COD、总氮、总磷的面源占比分别为92%、89%和94%^[12],这决定了廉州湾在丰水期营养盐浓度最高,其次为步入雨季初期的枯水期,平水期最低的总体季节变化特征。径流量的变化同样导致了营养盐季节变化的年际差异,从图2可以看出在2005、2010、2012、2014和2015年丰水期盐度较高,与代俊峰^[13]、黄莹^[14]等对南流江径流量长期变化历程对比,这几年的径流量也相对较弱,而营养盐表现出与一般季节变化不一样的特征,表明了廉州湾营养盐的季节变化特征及其年际间差异主要受控于径流强弱。

除了径流的强弱之外,海湾营养盐不同的来源也很可能是导致不同营养盐季节变化特征的主要因素之一。根据广西海洋环境监测中心站2012年入海污染源调查统计结果,河流输入的比例对有机物及总氮可达到90%以上,但对总磷不到75%,总磷的第二大来源海湾周边直排海市政污水接近20%(图7),这很可能是导致海湾 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的季节变化特征在各年之间差异较大的另一个主要原因。相关性分析表明 $\text{PO}_4\text{-P}$ 与盐度的相关系数低于DIN,说明 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的影响因素与DIN有所不同,海湾周边的城市生活排污、水产养殖以及海湾沉积物中磷酸盐的溶出^[1]对该海区 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的分布和变化有重要的作用。浮游植物的消耗比例不同也是另外一个主要原因,从表1可以看出廉州湾最主要是处于磷限制状态,浮游植物对 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的吸收比例会比DIN更强烈,从而导致其季节变化特征的不同。此外,磷在河口区独特的缓冲机

制也可能是 $\text{PO}_4\text{-P}$ 不同季节变化的原因之一,与DIN通常呈现保守混合行为不同, $\text{PO}_4\text{-P}$ 通常呈非保守生化行为^[15]。

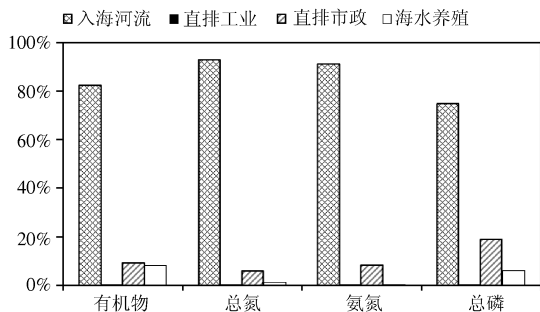


图7 2012年营养盐和有机物入海污染源比例构成
Fig.7 The structure proportion of pollution sources of nutrients and organic pollutant in 2012

数据来源:广西壮族自治区海洋环境监测中心站,《广西近岸海域水环境质量变化及保护对策研究》(2013)

2.2.2 廉州湾富营养化因子近10 a演变趋势特征

本研究发现廉州湾自2006年到2015年盐度略有升高的趋势特征(图2),很可能表明了汇入海湾的径流量略有减少。 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 主要来源于自然风化,受人为增加量较少,从图3的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 变化呈现出略微下降的趋势也同样印证了在调查期间廉州湾汇入的径流量呈现出略微减少的趋势。这也和代俊峰^[13]、黄莹^[14]等对南流江径流量长期变化趋势特征的研究结果相一致。

在输入海湾径流量减少趋势的情况下,DIN和COD枯水期呈现出上升趋势, $\text{PO}_4\text{-P}$ 更是总体上呈现出上升的趋势,表明了廉州湾在近10 a中受入海流域及海湾周边人为活动的明显影响。从近10 a 廉州湾营养盐、COD的变化历程看,2005~2007年海湾的营养盐表现为上升较快的特征,这一时期由于2006年北部湾经济区的成立,南流江流域畜禽养殖业的迅速扩增及海湾周边经济、海水养殖的发展,入海污染物量增加较大,促使海域营养盐处于较高浓度水平,而2008年随着节能减排工作的推进以及沿江沿海城市污水处理厂的建设运营,营养盐和有机物河流入海总量下降明显,但2010年后随着新一轮经济的发展又开始回升并逐渐增加。廉州湾DIN和COD年均值总体变化不大而 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和氨氮呈现总体增加的趋势,从一定程度上反映了流域及海湾周边农业施肥结构发生了变化、畜禽养殖及人口的增加导致的排

污影响,应引起重视和加强污染防治。廉州湾富营养化因子的演变导致了海湾富营养化程度发生了一定的变化。近 10 a 廉州湾富营养化总体较轻,年际指数均小于 2,但总体变化趋势呈现出由贫营养向轻度富营养加重发展的趋势(图 4)。DIN 的浓度变化和富营养化指数的年际变化特征较为接近,但富营养化指数峰值出现时间则与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 相一致。相关性分析表明富营养化指数与 DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 有极显著的正相关(相关系数分别为 0.699,0.685, $n=160,P<0.01$),与 COD 相关系数为 0.469, $n=160,P<0.05$,表明廉州湾富营养化程度主要由 DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 决定。从近 10 a DIN 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 各水期和年际浓度的变化情况看,DIN 浓度相对较高(年平均浓度大于 0.2 mg/L), $\text{PO}_4\text{-P}$ 由低浓度不断增长,富营养化指数出现峰值的时间具有高 N 和高 P 值特征,其中 N 是常态因子,而 P 则是关键因子。

2.2.3 富营养化因子变化与赤潮演变的关系

本研究显示近 10 a 廉州湾富营养化总体较轻,32 次调查中只有 4 次平均富营养指数超过 2,1 次超过 5(图 4),绝大部分处于贫营养状态。这主要是由于廉州湾较低的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 COD 浓度所致。但在北部湾近岸海域廉州湾却是一个相对的赤潮高发区。根据历史文献报道,在 1995 年~2015 年间廉州湾海域发生了 5 次赤潮^[3]。廉州湾的贫营养状态能够支撑赤潮发生的主要原因在于该海湾独特的富营养化结构特征。廉州湾的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 COD 浓度均较低,年平均浓度值分别为 0.011 mg/L 和 1.18 mg/L 均处于海水一类水质标准附近,这是决定海湾富营养化指数低的主要原因。在富营养化因子中,支撑浮游植物生长的主要因子是氮磷而非 COD,而且廉州湾受三条主要河流持续不断的营养盐输入补充以及沿岸生活

排污影响,导致了廉州湾低富营养化指数条件下仍是北部湾一个相对的赤潮高发区。

浮游植物按一定比例(Redfield 比值)从海水中吸收营养物质维持自身的物质和能量代谢^[16],某个营养元素的缺乏或营养结构比例失衡往往会限制浮游植物的生长和繁殖^[17]。本研究对廉州湾近 10 a 的营养盐结构分析结果显示,该海湾的 N/P、Si/P 比值大部分超过 Redfield 比值,为 P 限制状态,这与北部湾近岸海域存在 P 限制的研究结果相一致^[18-19]。近 10 a 由于海湾的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度的总体增加和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的总体下降,N/P 和 Si/P 呈现了明显的下降趋势,使海湾营养盐对浮游植物的 P 限制特征一定程度的缓解,浮游植物更有效地吸收营养盐,有利于浮游植物的生长繁殖^[20]。近 10 a 浮游植物 Chl *a* 呈现升高趋势(图 6),表明了廉州湾 P 限制的缓解对浮游植物已经起到了一定的影响,浮游植物对海区营养盐浓度和结构变化产生了生态响应。

$\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度的增加不仅加重了海区富营养化程度,促进了海区浮游植物的生长繁殖,更增加了海区赤潮等生态风险。本研究发现近 5 a 廉州湾 Chl *a* 浓度接近或超过 10 $\mu\text{g/L}$ 的频率明显增高,部分站点 Chl *a* 浓度最高达到 23.4 $\mu\text{g/L}$,海区赤潮风险明显增加。营养盐是影响富营养化的重要因素,富营养化程度的加重有助于浮游植物生物量的增加和赤潮的发生^[11]。廉州湾曾于 2009 年 7 月、2011 年 11 月、2014 年 2 月~3 月和 2015 年 1 月发生赤潮^[3],本研究期间 2009 年丰水期、2011 年平水期和 2014 年枯水期调查正好在赤潮发生前期,研究结果显示这 3 次赤潮前期的营养盐浓度和富营养化指数在历年中相对较高,N/P 比值与其它年份相比已下降较明显,P 限制得到较大程度的缓解(表 3)。

表 3 廉州湾及其他海湾赤潮发生前的营养盐浓度及结构情况

Tab. 3 Nutrient concentration and composition before red tide occurrence in Lianzhou bay and other bays							
海区	调查时间及参考文献	DIN/mg · L ⁻¹	PO ₄ -P/mg · L ⁻¹	SiO ₃ -Si/mg · L ⁻¹	N/P	Si/P	E
廉州湾	1995-03 ^[21]	0.22	0.027	—	18	—	1.40
	2009-07 本研究	0.37	0.032	1.70	25	59	4.46
	2011-10 本研究	0.43	0.020	0.68	47	37	2.21
	2014-03 本研究	0.55	0.039	0.89	31	25	5.52
深圳湾	2006-04 ^[8]	0.84	0.042	0.81	44	10	—
	2007-04 ^[8]	0.95	0.040	1.22	52	15	—
长江口附近海域	2002-05 ^[22]	0.48	0.017	0.55	62	16	—
	2010-04 ^[23]	0.49	0.030	0.92	36	15	—

从该表可看出,廉州湾1995年发生的赤潮前期 DIN 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 也较高, $\text{PO}_4\text{-P}$ 处于本研究3次赤潮前的浓度范围内,但其 N/P 比值已突破 P 限制。与其他赤潮高发区相比较,深圳湾和长江口附近海域赤潮前期也基本处于高 N 高 Si 的状态,其中 DIN 浓度、N/P 比值相对高于廉州湾, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 则较为接近,而 Si/P 相对低于廉州湾。赤潮发生的原因复杂多种,但通过以上的分析和类比表明,廉州湾赤潮的爆发与富营养化程度和营养盐结构比值有较大的关系,在高 N 高 Si 的条件下, $\text{PO}_4\text{-P}$ 输入量的陡增及其导致营养盐限制状态改变是诱发赤潮的最重要环境因子,在天气、水文等环境适宜的情况下,促进了某种赤潮生物的大量繁殖和生长而引发了赤潮。因此,廉州湾赤潮风险监控中应着重关注陆源的 P 输入和海区 P 浓度的变化。

3 结 论

(1) 近10 a 廉州湾富营养化因子的季节变化特征总体为:营养盐及 COD 在丰水期高于枯水期和平水期,DIN 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 枯水期明显高于平水期, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 和 COD 在枯水期和平水期的浓度较接近。年际变化上, $\text{PO}_4\text{-P}$ 年际间变化幅度较大并呈上升趋势, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 呈下降趋势,DIN 和 COD 年均变化总体不大。在各水期长期变化趋势中,枯水期 DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 COD 均呈现出上升趋势,其中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 上升趋势显著。

(2) 近10 a 廉州湾年均富营养化指数范围为 0.10 ~ 1.85,变化趋势呈现由贫营养向轻度富营养加重发展,主要由 DIN 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 决定。海湾营养盐结构总体处于 P 限制状态,近10 a 随着 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的增加,N/P 和 Si/P 比值呈显著下降趋势,海区 P 限制减弱。

(3) 径流输入对海湾的 DIN 和 COD 变化起主导作用,生活排污、水产养殖等因素也对 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的分布和变化有重要的作用。近年来营养盐输入增加,海湾赤潮的生态风险加大,在高 N 高 Si 值情况下, $\text{PO}_4\text{-P}$ 输入量的陡增及其导致营养盐比例的改变是诱发赤潮的最重要因素。

参考文献:

[1] 何本茂,韦蔓新. 北海湾赤潮形成原因及机理[J]. 海洋环境科学,2009,28(1):62-66.

- [2] 何本茂,韦蔓新. 北海湾近10年来溶解无机氮含量变化及其与环境因子的关系[J]. 海洋科学,2012,36(2):96-102.
- [3] 罗金福,李天深,蓝文陆. 北部湾海域赤潮演变趋势及防控思路[J]. 环境保护,2016,44(20):40-42.
- [4] 杨静,张仁铎,赵庄明,等. 近25年广西北部湾海域营养盐时空分布特征[J]. 生态环境学报,2015,24(9):1493-1498.
- [5] 吴敏兰. 北部湾北部海域营养盐的分布特征及其对生态系统的影响研究[D]. 厦门:厦门大学,2014.
- [6] JUSTE D, RABALAIS NN, TURNER R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication[J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 30(1):41-46.
- [7] 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.
- [8] 韦桂秋,王华,蔡伟叙,等. 近10年珠江口海域赤潮发生特征及原因初探[J]. 海洋通报,2012,31(4):466-474.
- [9] 张哲,王江涛. 胶州湾营养盐研究概述[J]. 海洋科学,2009,33(11):90-94.
- [10] ZHAI S J, YANG L Y, HU W P. Observations of atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during the period of algal bloom formation in Northern Lake Taihu, China [J]. Environmental Management, 2009, 44(3):542-551.
- [11] 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.
- [12] 蓝文陆,邓琰,黎明民,等. 北海市合浦县南流江亚桥和南域断面水体达标方案[R]. 北海:广西壮族自治区海洋环境监测中心站,2016.
- [13] 代俊峰,张学洪,王敦球,等. 北部湾经济区入海河流径流变化分析[J]. 水电能源科学,2011,29(2):4-6.
- [14] 黄莹,胡宝清. 基于小波变换的南流江年径流量变化趋势分析[J]. 广西师范学院学报:自然科学版,2015,32(3):110-114.
- [15] 郭洲华,王金坑,王翠,等. 河口与近海营养状况评价方法及其应用验证[J]. 环境科学研究,2015,28(1):23-30.
- [16] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. American Scientist, 1958, 46(3):230A, 205-221.
- [17] 宋秀贤,俞志明,殷克东,等. 香港近岸海域营养盐结构特征及其对浮游植物生长的影响[J]. 海洋与湖泊,2013,44(4):846-852.
- [18] 蓝文陆,彭小燕. 2003~2010年铁山港湾营养盐的变化特征[J]. 广西科学,2011,18(4):380-384,391.
- [19] LENTON T M, KLAUSMEIER C A. Biotic stoichiometric controls on the deep ocean N:P ratio[J]. Biogeosciences, 2007, 4(3):353-367.
- [20] WANG Y J, LIU D Y, DONG Z J, et al. Temporal and spatial distributions of nutrients under the influence of human activities in Sishili Bay, northern Yellow Sea of China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(12):2708-2719.
- [21] 韦蔓新,何本茂. 廉州湾富营养化与赤潮形成的研究[J]. 热带海洋,1998,17(4):65-72.
- [22] 张传松,王修林,石晓勇,等. 东海赤潮高发区营养盐时空分布特征及其与赤潮的关系[J]. 环境科学,2007,28(11):2416-2424.
- [23] 张璇. 长江口及邻近海域营养盐的历史演变及其在赤潮中的作用研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2012.