

广西北海半岛夏季营养盐及水质状况分析

徐轶肖^{1,2}, 陶晓娉¹, 刘成辉³, 韦光领¹, 何喜林¹, 姚秋翠¹, 陈武荣¹, 李 斌³

(1. 南宁师范大学 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西 南宁 530001; 2. 广西大学 广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 广西科学院 广西红树林研究中心, 广西 北海 536000)

摘要: 近年北部湾藻华灾害频发, 为了解与藻华暴发密切相关的营养盐及水质状况, 2020年8月作者对北部湾北海半岛铁山港、营盘、涠洲岛、斜阳岛及涠洲岛西部远岸海域共21个站位采集表层海水, 分析营养盐含量和结构特征, 并利用富营养化指数和有机污染指数对该海域水质进行等级划分与评价。结果表明: 北海半岛海域 DIN、PO₄-P 和 SiO₃-Si 均值分别为 0.210、0.021 和 0.270 mg/L。其中, 铁山港营养盐由港内至港外呈递减趋势, 营盘海域由近岸至远岸, DIN 和 SiO₃-Si 含量先递减再增加, PO₄-P 则表现为递增, 涠洲岛海域及远岸各站位营养盐分布无明显特征。北海半岛海域 N/P、Si/N 和 Si/P 均值分别为 11.8、1.7 和 14.6, 显示 47.6% 海域为潜在 N 限制, 而潜在 P 限制和 Si 限制海域均为 9.5%; 叶绿素 *a* 仅与 COD 显著相关, 相关系数为 0.475。调查海域富营养化指数均值 1.82, 以铁山港港内富营养化程度最高, 由港内严重富营养至港外贫营养递减, 营盘近岸 7 号站位中度富营养, 其余 76.2% 调查站位仍处于贫营养水平; 有机污染指数均值 1.85, 良好和较好水质共占 38.1%, 其余 61.9% 水质受到不同程度有机污染, 亦以铁山港水质污染最为严重, 重度污染仅在该海域发现。可见, 北海半岛夏季表层海水以潜在 N 限制为主, 铁山港和营盘近岸富营养化和有机污染较严重, 其余站位基本良好, 影响表层水体叶绿素 *a* 含量的主要因素是有机质, 可能与海域微生物强烈降解作用相关。本研究可为北部湾海洋环境保护和赤潮研究提供基础环境数据。

关键词: 营养盐; 水质; 评价; 北海; 北部湾

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)06-0107-11

DOI: 10.11759/hyxx20210112001

北部湾是一个天然的半封闭浅海湾, 地处南海大陆架西北部, 夏季高温, 降水丰沛, 有多条河流汇入, 是典型的海陆交界区。北海半岛是北部湾近岸海域的重要组成部分, 铁山港位于北海半岛东侧, 拥有北部湾典型红树林和海草床生态系统, 以虾增养殖、珍珠贝为主的水产养殖业发达^[1]。涠洲岛位于北海半岛南边海域, 是北部湾最大的岛屿, 由火山喷发堆积而成, 拥有热带北缘典型珊瑚礁生境, 水产资源丰富。自 2008 年《广西北部湾经济区发展规划》获批以来, 北部湾发展迅速, 工农业与生活排污导致海域营养盐、重金属及其他污染物明显增加, 生态失衡与环境污染日趋严重^[2-4]。

营养盐是海洋生态系统物质循环与能量流动的物质基础。诸多研究表明, 水体营养盐过量(富营养化)是藻华暴发的一个重要诱因^[5-6], 富营养化过程不仅影响藻华规模, 也会造成藻华原因种和优势类群的变化^[7]。北部湾近年球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)与夜光藻(*Noctiluca scintillans*)藻华频发, 与过去 30 年营养盐含量增加和水质变化存在密切

相关^[8-9]。1980—2010 年, 北部湾无机氮、硝酸盐、亚硝酸盐和氨盐均值分别增长了 17.9、12.7、33.5 和 1.5 倍, 而 1990—2010 年, 活性磷酸盐均值增加了近 2 倍, 化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)最大值则由 20 世纪 80 年代的 2.7 mg/L 升至 2010 年的 7.5 mg/L, 夏季北部湾劣质水面积亦呈明显上升趋势^[8]。因此全面认识北部湾水体污染及富营养化状况, 是该海域海洋环境保护和海岸带综合管理的基础。目前学者们对该海域海水和沉积物已开展了一些营养盐和水质研究^[2, 10-12], 但针对北海半岛的相关研

收稿日期: 2021-01-12; 修回日期: 2021-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41976155); 广西自然科学基金项目(2020GXNSFDA297001); 广西南海珊瑚礁研究重点实验室开放基金项目(GXLSRSCS2019002)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41976155; Natural Science Foundation of Guangxi, No. 2020GXNSFDA297001; the Opening Project of Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, No. GXLSRSCS2019002]

作者简介: 徐轶肖(1977—), 女, 浙江兰溪人, 副研究员, 博士, 主要从事海洋有毒有害藻类与海产品安全研究, E-mail: xuyixiao_77@163.com; 李斌, 通信作者, E-mail: lihshang1@163.com

究仍较少。因此,本文于2020年8月对铁山港、涠洲岛、营盘海域等共21个站位的广西北海半岛表层海水进行营养盐与水质调查,评价水体富营养化和水质状况,旨在明确该海域夏季表层营养盐浓度与结构特征,探讨浮游植物生物量的影响因素,为北部湾海洋生态保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

2020年8月23~28日在北海半岛周围海域设站

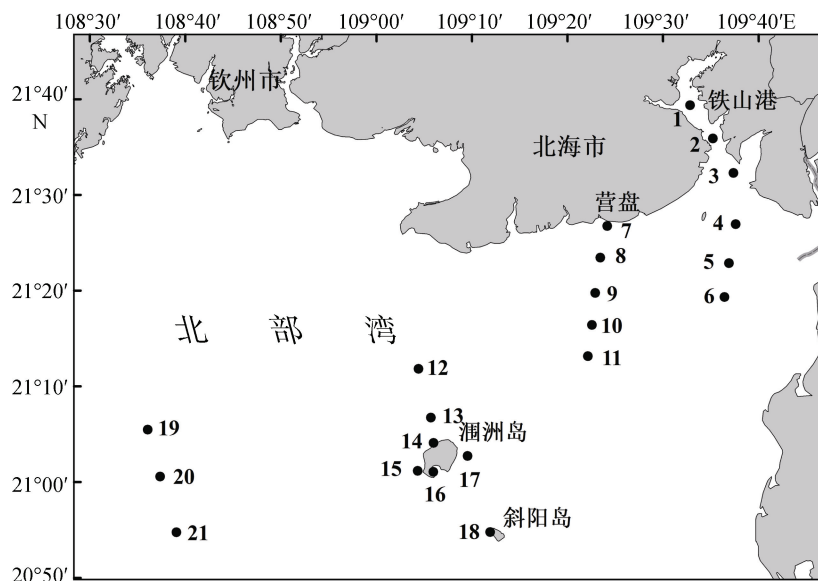


图1 调查站位
Fig 1 Survey station

位21个(图1),采集表层水样,调查水温、盐度、pH、硝酸盐(NO₃-N)、亚硝酸盐(NO₂-N)、氨盐(NH₄-N)、活性磷酸盐(PO₄-P)、硅酸盐(SiO₃-Si)、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)和叶绿素 *a*(Chl-*a*)。具体样品采集、保存、分析参照《海洋调查规范》^[13]与《海洋监测规范》^[14],分析方法分别为:水温计法、盐度计法、pH计法、镉柱还原法、萘乙二胺分光光度法、次溴酸盐氧化法、磷钼蓝分光光度法、硅钼蓝比色法、碘量法、碱性高锰酸钾法和分光光度法。

1.2 数据处理与分析

1.2.1 数据处理

结果用Excel进行初步整理分析;以《海水水质标准》^[15]判定海水类别;应用软件Arcmap10.2符号系统中的自然间断点分级法对营养盐数据分级成图,以明确各营养盐的空间分布特征;使用SPSS20软件对数据进行描述统计,检验其是否符合正态分布,并对叶绿素 *a* 和环境因子进行Spearman相关性分析。

1.2.2 富营养化指数法

运用《近岸海域环境监测规范》^[16]中富营养化指数法对海水富营养化程度进行评价,公式为:

$$E = \frac{\text{化学需氧量} \times \text{无机氮} \times \text{活性磷酸盐}}{4500} \times 10^6, \quad (1)$$

式中, *E* 为富营养化指数;无机氮(DIN) = NO₃-N + NO₂-N + NH₄-N; 单位均为 mg/L。当 *E* ≥ 1 时为富营

养化,富营养化程度随 *E* 的增大而增大,具体见表1。

表1 水质富营养等级划分标准

Tab. 1 Classification standard of water eutrophication

水质等级	贫营养	轻度富营养	中度富营养	重富营养	严重富营养
富营养化指数	$E < 1$	$1 \leq E < 2$	$2 \leq E < 5$	$5 \leq E < 15$	$E \geq 15$

1.2.3 有机污染指数法

使用有机污染指数法进行水质评价^[17-18],公式为:

$$A = \frac{\text{COD}_i}{\text{COD}_0} + \frac{\text{DIN}_i}{\text{DIN}_0} + \frac{\text{DIP}_i}{\text{DIP}_0} - \frac{\text{DO}_i}{\text{DO}_0}, \quad (2)$$

式中, *A* 为有机污染指数; COD_{*i*}、DIN_{*i*}、DIP_{*i*} 和 DO_{*i*} 分别为 COD、DIN、DIP 和 DO 的实测值; COD₀、DIN₀、DIP₀ 和 DO₀ 分别为 COD、DIN、DIP 和 DO

的海水水质标准值, 即一类海水水质标准值 2、0.2、0.015 和 6 mg/L, 具体分级见表 2。

表 2 水质有机物污染等级划分标准
Tab. 2 Classification standard of organic matter pollution in seawater

<i>A</i>	污染等级	水质评价
$A < 0$	0	良好
$0 < A < 1$	1	较好
$1 < A < 2$	2	开始受到污染
$2 < A < 3$	3	轻度污染
$3 < A < 4$	4	中度污染
$A > 4$	5	重度污染

2 结果

2.1 营养盐含量

2.1.1 无机氮

北海半岛夏季表层水体 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 DIN 变化范围分别为: 0.005~0.289、0.002~0.047、0.002~0.222 和 0.049 mg/L ~0.485 mg/L, 对应均值为 0.121±0.089、0.011±0.012、0.078±0.073 和 0.210 mg/L±0.151 mg/L($n=21$)。33.3% 站点 DIN 含量值超过二类海水标准(0.30 mg/L), 其中 1~2、7 和 20 号站点超过 3 类海水标准(0.40 mg/L)。位于涠洲岛正西方的 20 号站点 DIN 最高(0.485 mg/L)(图 2)。铁山港 DIN 由港内向港外明显递减, 营盘海域随离岸距离增加先递减再递增, 涠洲岛西侧 15 号站点含量为该岛最高(0.336 mg/L)(图 2)。

2.1.2 活性磷酸盐

北海半岛夏季表层水体 $\text{PO}_4\text{-P}$ 变化范围(0.006~0.060)mg/L, 平均(0.021±0.013)mg/L($n=21$)。66.7% 站点 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量超过一类海水标准(0.015 mg/L), 其中 1~2、5、13 和 17 号站点含量达到二、三类海水标准(0.030 mg/L)。铁山港 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量最高值位于港内站点 1(0.060 mg/L), 5 号站点亦较高(0.043 mg/L)(图 2), 总体趋势表现为由港内向港外递减。营盘海域 $\text{PO}_4\text{-P}$ 高值位于 10 号站点, 呈由营盘向远岸递增趋势。涠洲岛附近海域 $\text{PO}_4\text{-P}$ 高值位于涠洲岛北部 13 号站点(0.036 mg/L)和东部 17 号站点(0.030 mg/L)(图 2)。

2.1.3 硅酸盐

北海半岛夏季表层水体 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 变化范围(0.114~1.054)mg/L, 平均(0.270±0.206)mg/L($n=21$)。铁山港

$\text{SiO}_3\text{-Si}$ 含量从港内向港外递减, 站点 1~3 较本调查其他海域明显高(图 2)。营盘海域由近岸向远岸先递减再递增, 浓度高值位于站点 7(0.308 mg/L)和站点 11(0.300 mg/L)(图 2)。涠洲岛 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 高值位于涠洲岛东部 17 号站点(0.328 mg/L)和斜阳岛 18 号站点(0.341 mg/L), 离岸较远的 19~21 号站点 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 随离岸距离增加而增加(图 2)。

2.1.4 叶绿素 *a* 与环境因子相关性分析

北海半岛夏季表层水体 Chl *a* 变化范围(2.00~6.51)μg/L, 平均(3.07±1.040)μg/L($n=21$)。本调查环境因子中除 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 COD 符合正态分布, 其余数据均为非正态分布, 因此采用 Spearman 相关系数表征表层海水中叶绿素 *a* 与环境因子之间的相关性。结果发现 Chl *a* 仅与 COD 显著相关, 相关系数为 0.475(表 3)。

2.2 营养盐结构

北海半岛夏季表层水体各无机氮成分占 DIN 百分比为 $\text{NO}_3\text{-N}$ (57.56%)> $\text{NH}_4\text{-N}$ (37.15%)> $\text{NO}_2\text{-N}$ (5.29%)。N/P、Si/N 和 Si/P 变化范围分别为 1.8~32.9、0.3~4.7 和 3.0~34.3, 对应均值分别为 11.8±8.6、1.7±1.2 和 14.6±7.2($n=21$)。N/P 最高值位于营盘站点 7、最低值位于铁山港站点 5; Si/N 最高值位于斜阳岛站点 18, 最低值位于远岸站点 20; Si/P 最高值在站点 18, Si/P 最低值在站点 5。根据 Justić 等^[19]提出的计量限制性营养盐标准: N/P<10, Si/N>1 受 N 限制; N/P>22, Si/P>22 受 P 限制; Si/P<10, Si/N<1 受 Si 限制, 得出北海半岛海域浮游植物生长营养盐受限结果: 铁山港 1、4~6 号站点, 营盘海域 8~10 号站点、涠洲岛 16~17 号和斜阳岛 18 号站点均受潜在 N 限制, 占有所有站点的 47.6%; 7 号站点和远岸 21 号站点受到潜在 P 限制, 占 9.5%; 13 和 20 号站点受到潜在 Si 限制, 占 9.5%。

2.3 富营养化状况

北海半岛夏季表层水体富营养化指数 *E* 值变化范围(0.01~18.11), 平均 1.82±4.10($n=21$), 最高值 18.11 在铁山港 1 号站点, 达到严重富营养水平, 次高值 6.17 和 5.56 分别在铁山港 2、3 号站点(图 2), 为重富营养, 营盘 7 号站点达到中度富营养, 铁山港外 5 号站点达到轻度富营养。其余 76.2% 站点未达到富营养化标准, 处于贫营养。富营养化水平在铁山港由港内向港外(站点 1~6)呈递减趋势(图 2), 营盘海域近岸富营养化水平最高(站点 7>8~11)。

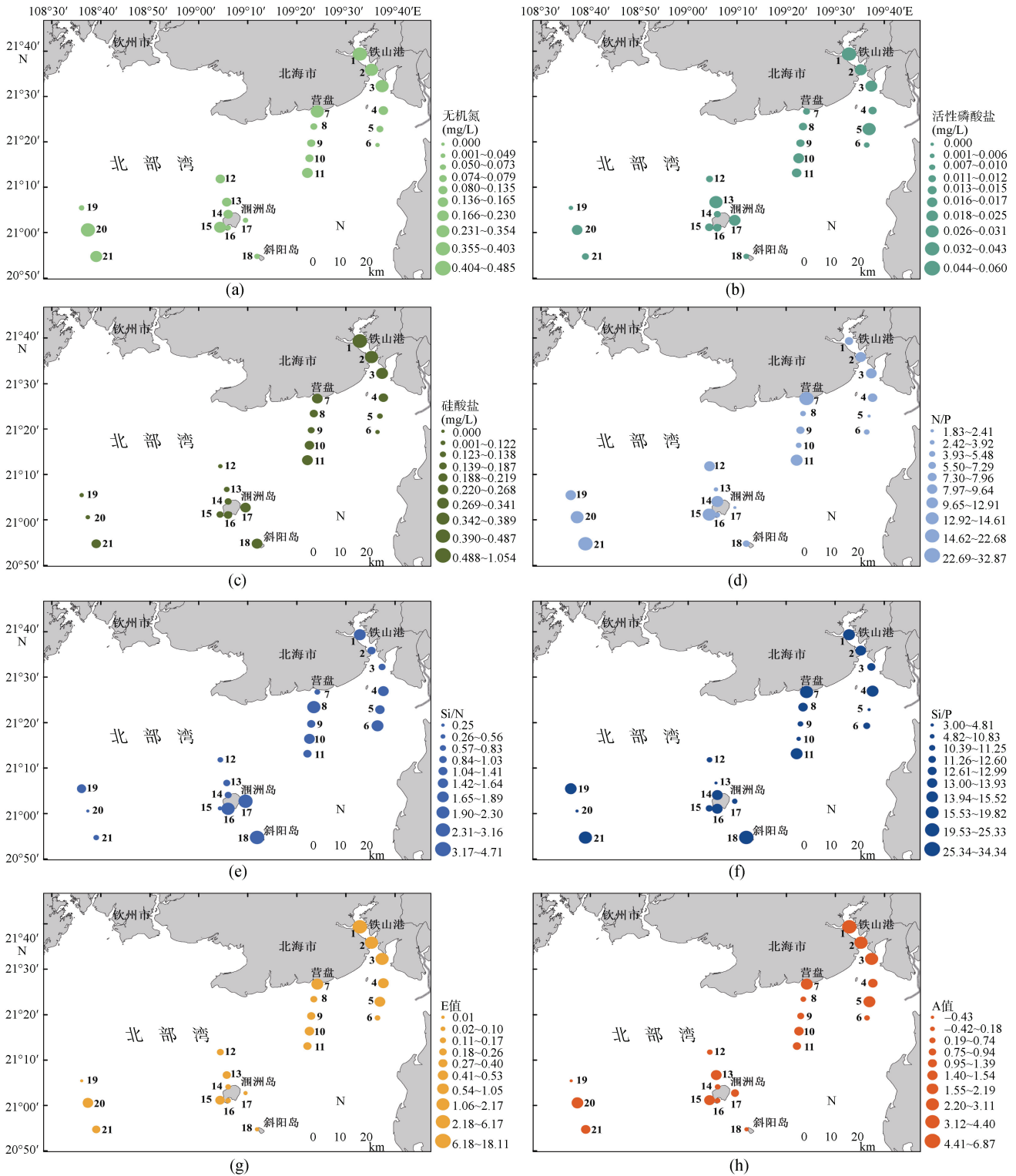


图2 北海半岛夏季表层水体无机氮浓度(a)、活性磷酸盐浓度(b)、硅酸盐浓度(c)、氮磷比值(d)、硅氮比值(e)、硅磷比值(f)、富营养化指数(g)及有机污染指数(h)分布

Fig. 2 Distribution of inorganic nitrogen concentration (a), reactive phosphate concentration(b), silicate concentration (c), N/P(d), Si/N(e), Si/P(f), eutrophication index(g), and organic pollution index(h) in the surface water of the Beihai Peninsula during summers

表 3 叶绿素 *a* 与环境因子相关性分析

Tab. 3 Correlation between nutrients and chlorophyll-*a* in the surface water of the Beihai Peninsula during summers

项目	水温	盐度	pH	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₄ -N	DIN	PO ₄ -P	SiO ₃ -Si	DO	COD
Chl <i>a</i>	-0.046	-0.082	-0.030	-0.292	0.266	0.014	-0.265	-0.138	-0.141	-0.149	0.475*

注: *n*=21; *指置信度(双侧)为 0.05 时, 相关性显著

2.4 有机污染状况

北海半岛夏季表层水体有机污染指数 *A* 变化范围(-0.43~6.87), 平均 1.85±1.68(*n*=21)。仅离岸较远的 19 号站位水质良好, 另站位 6、8~9、12、14、16 和 18 水质较好外, 其余 61.9% 站位受到不同程度有机污染。铁山港水质有机污染严重, 由港内至港外污染水平逐级降低(图 2), 港内站位 1 和 2 属于重度污染, 为本调查唯一的重度污染水域。中度污染发生则只在铁山港站位 3 和远岸站位 20 发现。

3 讨论

3.1 营养盐含量比较

本文铁山港表层水体各营养盐浓度由湾内向湾外递减, 营盘海域 DIN 和 SiO₃-Si 先递减再递增, PO₄-P 表现为递增; 涠洲岛海域、斜阳岛海域与远岸 19~21 号站位各项营养盐分布无明显变化趋势。本文铁山港 DIN、PO₄-P 和 SiO₃-Si 均值 0.352、0.034 和 0.549 mg/L(站位 1~4), 相对铁山港 2003 年~2010 年均值 0.102、0.005 和 0.823 mg/L^[1], DIN 与 PO₄-P 分别增加了 2.5 和 5.8 倍, SiO₃-Si 则减小至 66.7%。氮、磷营养盐递增与铁山港工业区及港湾建设污水输入、水产养殖排污及有机降解补充相关, 而河流输入是近海溶解硅的重要来源, 硅入海量不变或减少, 浮游植物生长繁殖仍大量消耗 SiO₃-Si, 导致铁山港海域 SiO₃-Si 的递减^[1, 20]。本文涠洲岛表层海水 DIN 和 PO₄-P 均值分别为 0.161 和 0.018 mg/L(站位 14~17), 相对 2011—2016 年珊瑚礁海域均值(0.111 和 0.004 mg/L)^[21-22]和 2010—2013 年藻华控制区均值(0.048 和 0.004 mg/L)^[23]分别递增近 1.5 和 4.5 倍, 及 3.4 和 4.5 倍, 分析受陆源输入、海水交换作用及生物氧化分解等因素综合影响^[22]。

北部湾夏季 DIN 浓度均值在钦州湾和廉州湾相对较高, 而 DIN、PO₄-P 在涠洲岛明显较低, 北海半岛海域夏季 DIN 和 SiO₃-Si 均值低于钦州湾、廉州湾和防城港^[23-28], 河流作为营养盐重要来源, 研究区入海径流流量小是造成营养盐浓度差异的重要因素之一, 处于丰水期的夏季差异愈加突出^[29-30], Masotti

等^[31]对智利中部近岸海域河流流量控制营养盐浓度及其季节变化研究发现类似结论。另外, 本次调查海域营养盐浓度均值明显低于中国其他典型入海口, 其中珠江口 DIN、PO₄-P 和 SiO₃-Si 浓度均值分别是本文的 9.6、1.4 和 23.7 倍, 长江口 DIN 是本文 6.9 倍, 黄河口莱州湾 DIN 和 SiO₃-Si 则是本文的 1.6 和 2 倍^[32-34]。河流输入、沿岸建设与人类活动造就了这些典型入海口营养盐的高负荷状态, 经济建设处于上升期的北部湾, 尽管水体营养盐含量总体不高, 但处于明显上升趋势^[8], 为防止出现东部沿海高负荷营养盐局面, 海水保质与海洋生态防护尤为重要。

3.2 营养盐结构变化

营养盐结构是影响海域浮游植物生长繁殖与群落组成的重要因素, 严重时影响海洋藻华的发生。2017 年北部湾近岸大部分海域受潜在 P 限制, 仅铁山港、钦州湾和珍珠湾部分海域受潜在 N 限制^[35], 与本文铁山港 4~6 号站位潜在 N 限制特征相符, 但与本调查 47.6% 站位潜在 N 限制、仅 9.5% 站位潜在 P 限制不符, 分析与采样季节和采样地点差异相关。而在韦蔓新等^[36]研究中, 铁山港整体处于 N 缺乏状态, 说明随着时间推移铁山港海域 N 输入增加, 浮游植物生长受潜在 N 限制可能性减小。本调查发现营盘临近陆地的 7 号站位受潜在 P 限制, 其他离岸站位受潜在 N 限制或不受限, 分析与该海域工业生产输入大量 DIN^[3], 浮游植物生长利用 P 并导致 P 的相对不足相关。前人研究中涠洲岛绝大部分海域受潜在 P 限制^[22, 37], 与本研究 16、17 号站位受潜在 N 限制、其余站位不受营养盐限制不同。结合近年涠洲岛海域 DIN 浓度整体呈年际下降, PO₄-P 浓度基本保持不变^[22], SiO₃-Si 浓度明显下降的结论^[37], 认为 N、Si 的消耗与 P 的相对稳定造成了涠洲岛海域限制性因素由 P 向 N 的转化。2011 年以前, 涠洲岛是北部湾藻华的“热点”海域。2001—2010 年, 北部湾 70% 藻华发生在涠洲岛海域, 2011 年之后藻华在北部湾更多海域出现^[8]。该海域营养盐浓度下降, 营养盐结构发生显著变化, 可能是涠洲岛海域藻华发生率在 2010 年后显著降低的原因之一。

2014 年以来,球形棕囊藻赤潮在北部湾经常暴发,每年春节左右至清明前后,广西近岸海水中的球形棕囊藻都会阶段性暴发增殖^[38],严重时堵塞防城港核电站冷却水系统,造成机组跳机、跳堆,严重威胁核电冷源安全^[39]。而 2021 年 2 月,一场 6 400 km² 特大规模的夜光藻赤潮席卷北部湾海域^[40],北部湾正经历藻华种群演变,未来充满不确定性。据研究,球形棕囊藻生长和藻华维持需要大量的 N 营养盐支持^[41-42],而夜光藻大量繁殖并不依赖高营养盐环境^[43],在胶州湾甚至发现夜光藻丰度与硝氮、亚硝氮之间呈显著负相关^[44]。本调查发生在 2020 年夏季,结果显示多数海域为潜在 N 限制,与他人之前研究结论北部湾多数海域为潜在 P 限制不一致^[35, 45],某种程度上解释了由球形棕囊藻向夜光藻藻华的演变。

3.3 富营养化与叶绿素 *a* 含量

水体富营养化是引发藻华的物质基础,《2015 中国近岸海域环境质量公报》显示 2015 年北部湾水体整体处于贫营养水平,2016 年后包括铁山港在内的各海湾内湾及入海口富营养化明显^[3]。本调查发现铁山港表层水体富营养化严重,营盘临近陆地的 7 号站位亦达到中度富营养,北海半岛其余海域均处于贫营养状态。铁山港和北海近岸是北部湾水产养殖重要海域,养殖区排污对营养盐的补充作用不可小觑^[1]。此外,北部湾北部海水夏季呈气旋式环流,受入海径流、琼州海峡水体输送和西南季风共同作用,营养盐含量与分布随海流而变化^[30, 46]。涠洲岛海域、斜阳岛和远岸 19~21 号站点离岸较远,受海流作用更为强烈,可能是造成它们表层海水营养盐分布无明显特征与富营养化水平低的原因。

叶绿素 *a* 是浮游植物光合作用的主要色素,其质量浓度是衡量海域浮游植物生物量和反映海水富营养化程度的重要指标。与北部湾富营养进程一致,北部湾叶绿素平均质量浓度由 1994 年的 0.94 $\mu\text{g/L}$ ^[47] 升至 2006 年的 1.13 $\mu\text{g/L}$ ^[48],陆源营养盐输入和养殖活动明显的钦州湾 2009 年表层水体叶绿素 *a* 已达 5.39 $\mu\text{g/L}$ ^[49]。叶绿素 *a* 与环境因子的相关性随海区和季节而异,渤海海域夏季盐度、磷酸盐与硅酸盐的浓度、氮磷比和氮硅比是影响 Chl-*a* 浓度空间分布的重要因素^[50];钦州湾 4 个季节航次调查发现 Chl-*a* 与水温、盐度和氨氮之间存在密切的相关关系^[49];夏季海南黎安港叶绿素 *a* 与无机氮和活性磷酸盐呈显

著正相关,与水温和透明度相关性不显著;秋季与无机氮呈显著负相关,与其他因子相关性不显著^[51]。本调查发现叶绿素 *a* 仅与 COD 显著相关,与无机营养盐等环境因子相关性不显著。COD 常表征海水中有机物质含量,说明影响夏季北海半岛表层水体叶绿素 *a* 含量的主要因素是有机质,分析可能与海域微生物强烈降解作用相关。据研究,铁山港和涠洲岛分别发育有典型的红树林、海草床生态系统和珊瑚礁生态系统,植物凋落物、珊瑚虫代谢物降解、生物尸骸腐解等生态区内部有机分解为浮游植物提供了充足营养盐^[22, 52-54]。

3.4 有机污染

氮磷及耗氧有机物在近岸海域的大量输入直接影响水质与浮游植物的生长。北部湾近岸海域 2006 年和 2011 年夏有机污染指数(*A*) 变化范围分别为 -0.7~4.49 和 -1.23~4.49,水质良好海域分别占 93.4% 和 96.4%^[55],2015 和 2016 年 8 月 *A* 值均值分别为 -0.30、0.83,其中 2016 年夏铁山港出现中度污染,营盘海域出现轻度污染^[3, 56]。具体到北海半岛海域,1996 年铁山港未受到有机污染^[36];涠洲岛珊瑚礁海域 2013—2016 年 *A* 均值为 -0.24,其中 2013 年出现轻度污染,其余年份水质状况未达到污染水平^[57]。本文北海半岛海域表层水体 *A* 值均值为 1.85,开始受到污染至重度污染站位(*A*>1)占全部站位的 61.9%,铁山港、营盘和涠洲岛近岸海域 *A* 值均值分别为 4.18(站位 1~4)、1.44(站位 7~9)和 1.11(站位 14~17),说明北海半岛海域有机污染呈加重趋势,铁山港尤为严重。

4 结论

(1) 北海半岛海域夏季表层 DIN、PO₄-P 和 SiO₃-Si 含量均值分别为 0.210、0.021 和 0.270 mg/L。铁山港营养盐由港内至港外递减,营盘海域由近岸至远岸, DIN、SiO₃-Si 浓度先递减再增, PO₄-P 浓度表现递增,涠洲岛海域及远岸各站点营养盐分布无明显特征。

(2) 北海半岛海域 N/P、Si/N 和 Si/P 含量均值分别为 11.8、1.7 和 14.6,47.6% 海域受潜在 N 限制;叶绿素 *a* 仅与 COD 显著相关,与无机营养盐等环境因子相关性不显著,说明影响夏季北海半岛表层水体叶绿素 *a* 含量的主要因素是有机质,分析可能与海域微生物强烈降解作用相关。

(3) 北海半岛海域富营养化指数均值 1.82, 铁山港富营养化程度最高, 由港内严重富营养至港外贫营养呈递减趋势; 营盘近岸 7 号站位中度富营养, 其余 76.2% 站位处于贫营养水平。北海半岛海域有机污染指数均值 1.85, 良好和较好水质共占 38.1%, 其余 61.9% 水质受到不同程度有机污染, 以铁山港水质污染最为严重。

参考文献:

- [1] 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.
LAN Wenlu, PENG Xiaoyan. Variation characteristics of nutrient concentrations in the Tieshangang Bay[J]. Guangxi Sciences, 2011, 18(4): 380-384, 391.
- [2] LAI J, JIANG F, KE K, et al. Nutrients distribution and trophic status assessment in the northern Beibu Gulf, China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 32(5): 1128-1144.
- [3] 李萍, 莫海连, 郭钊. 2016 年北部湾近岸海域海水环境质量评价[J]. 海洋湖沼通报, 2019, 1: 54-64.
LI Ping, MO Hailian, GUO Zhao. Annual assessment of seawater quality of Beibu Gulf in 2016[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019, 1: 54-64.
- [4] 王毅, 李师. 广西北部湾海洋环境与生物体内重金属研究进展[J]. 人民珠江, 2020, 41(7): 25-32, 69.
WANG Yi, LI Shi. Research progress of heavy metals in marine environment and organisms of Beibu Gulf in Guangxi[J]. Pearl River, 2020, 41(7): 25-32, 69.
- [5] HEISLER J, GLIBERT P M, Burkholder J A M, et al. Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus[J]. Harmful Algae, 2008, 8(1): 3-13.
- [6] GLIBERT P M. Eutrophication, harmful algae and biodiversity—challenging paradigms in a world of complex nutrient changes[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 124(2): 591-606.
- [7] 于仁成, 吕颂辉, 齐雨藻, 等. 中国近海有害藻华研究现状与展望[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(4): 768-788.
YU Rencheng, LV Songhui, QI Yuzao, et al. Progress and perspectives of harmful algal bloom studies in China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(4): 768-788.
- [8] XU Y, ZHANG T, ZHOU J. Historical occurrence of algal blooms in the northern Beibu Gulf of China and implications for future trends[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 451.
- [9] 马继先, 于学颖, 李丽芳, 等. 钦州湾海域夜光藻赤潮发生区水文气象因子变化研究[J]. 广东化工, 2017, 44(7): 90-92.
MA Jixian, YU Xueying, LI Lifang, et al. Study on the change of environmental factors during *Noctiluca scintillans* red tide in Qinzhou Bay[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(7): 90-92.
- [10] KAISER D, UNGER D, QIU G. Particulate organic matter dynamics in coastal systems of the northern Beibu Gulf[J]. Continental Shelf Research, 2014, 82: 99-118.
- [11] YANG B, ZHOU J B, LU D L, et al. Phosphorus chemical speciation and seasonal variations in surface sediments of the Maowei Sea, northern Beibu Gulf[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 141: 61-69.
- [12] DAN S F, LAN W, YANG B, et al. Bulk sedimentary phosphorus in relation to organic carbon, sediment textural properties and hydrodynamics in the northern Beibu Gulf, South China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 155: 111176.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12763-2007 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 12763-2007 Specifications for Oceanographic Survey[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. GB 17378-2007 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 17378-2007 The specification for marine monitoring[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [15] 国家环境保护局. GB 3097-1997 海水水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
National Environmental Protection Agency. GB 3097-1997 Sea water quality standard[S]. Beijing: China Standards Press, 1998.
- [16] 国家环境保护部. HJ 442-2008 近岸海域环境监测规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ 442-2008 Specification for off-shore environmental monitoring[S]. Beijing: China Environmental Press, 2009.
- [17] 刘彬昌. 黄骅近海及滩涂水域环境与赤潮形成初探[J]. 海洋环境科学, 1993, 12(3-4): 69-75.
LIU Binchang. Preliminary study on the environment for the coastal and tidal flat area and formation of harmful algal blooms in Huanghua[J]. Marine Environment Science, 1993, 12(3-4): 69-75.
- [18] 国家海洋局. HY/T 084-2005 海湾生态监测技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
State Oceanic Administration. HY/T 084-2005 Technical Specification for Eco-monitoring of Bay[S]. Beijing: China Standards Press, 2005.
- [19] JUSTIĆ D, RABALAIS N N, TURNER R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its conse-

- quences[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, 40(3): 339-356.
- [20] 冉祥滨, 于志刚, 臧家业, 等. 地表过程与人类活动对硅产出影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(5): 577-587.
RAN Xiangbin, YU Zhigang, ZANG Jiaye, et al. Advances in the influence of earth surface process and human activity on silicon output[J]. *Progress in Earth Sciences*, 2013, 28(5): 577-587.
- [21] 史海燕. 广西北海涠洲岛珊瑚礁海域生态环境监测与评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 20-25.
SHI Haiyan. Monitoring and evaluation of ecological environment of coral reef areas in Weizhou Island, Beihai, Guangxi[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012: 20-25.
- [22] 陈继艺, 陈旭阳, 张春华, 等. 涠洲岛珊瑚礁海洋公园海域营养盐含量变化及富营养化研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2018, 6: 166-174.
CHEN Jiyi, CHEN Xuyang, ZHANG Chunhua, et al. A study on changes of nutrient content and eutrophication around the coral reef ocean park of Weizhou Island[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018, 6: 166-174.
- [23] 邢素坤, 李萍, 何志江, 等. 涠洲岛赤潮监控区营养盐变化及其结构特征[J]. *广西科学*, 2019, 26(3): 308-314.
XING Sukun, LI Ping, HE Zhijiang, et al. Variations and structure characteristic of nutrients in red-tide monitoring area of Weizhou Island[J]. *Guangxi Science*, 2019, 26(3): 308-314.
- [24] 杨斌, 方怀义, 钟秋平, 等. 钦州湾夏季营养盐的分布特征及富营养化评价[J]. *海洋通报*, 2012, 31(6): 640-645.
YANG Bin, FANG Huaiyi, ZHONG Qiuping, et al. Distribution characteristics of nutrients and eutrophication assessment in summer in Qinzhou Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(6): 640-645.
- [25] XU C, DAN S F, YANG B, et al. Biogeochemistry of dissolved and particulate phosphorus speciation in the Maowei Sea, northern Beibu Gulf[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 593: 125822.
- [26] 李萍, 刘保良, 陈旭阳. 广西北海市廉州湾养殖区营养盐分布与富营养化的研究[J]. *科技传播*, 2011, 17: 75-76.
LI Ping, LIU Baoliang, CHEN Xuyang. Nutrients distribution and eutrophication in aquaculture of Lianzhou Bay, Guangxi[J]. *Science and Technology Communication*, 2011, 17: 75-76.
- [27] KAISER D, UNGER D, QIU G, et al. Natural and human influences on nutrient transport through a small subtropical Chinese estuary[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 450: 92-107.
- [28] 赖俊翔, 陈宪云, 柯珂, 等. 广西防城港市近岸海域营养盐分布及富营养化研究[J]. *海洋技术*, 2013, 32(3): 63-69, 91.
LAI Junxiang, CHEN Xianyun, KE Ke, et al. Study on nutrients distribution and eutrophication in the coastal waters of Fangchenggang, Guangxi[J]. *Ocean Technology*, 2013, 32(3): 63-69, 91.
- [29] BAUER A. Hydrographical and biogeochemical characterization of the Beibu Gulf, South China Sea[D]. Rostock: University Rostock, 2012: 44-51.
- [30] 陈波, 许铭本, 牙韩争, 等. 入海径流扩散对北部湾北部环流的影响[J]. *海洋湖沼通报*, 2020, 2: 43-54.
CHEN Bo, XU Geben, YA Hanzheng, et al. Effect of runoff diffusion on the circulation in the northern Beibu Gulf[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020, 2: 43-54.
- [31] MASOTTI I, APARICIO-RIZZO P, YEVENES M A, et al. The influence of river discharge on nutrient export and phytoplankton biomass off the central Chile coast (33°—37°S): seasonal cycle and interannual variability[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2018, 5: 423.
- [32] 王松鸽. 珠江河口浮游细菌群落结构及影响因素[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019: 10-12.
WANG Songge. Bacterioplanktonic community's structure and their influencing factors in the Pearl River Estuary[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019: 10-12.
- [33] 武亚男, 张昊飞, 王璐, 等. 长江口无机氮和活性磷酸盐水质基准研究[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(5): 1066-1079.
WU Yanan, ZHANG Haofei, WANG Lu, et al. Water quality criteria dissolved inorganic nitrogen and soluble reactive phosphorus in Changjiang River Estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(5): 1066-1079.
- [34] 张欣泉, 姜会超, 马元庆, 等. 2017年丰水期莱州湾环境因子分布特征及网采浮游植物的响应[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(4): 614-621, 629.
ZHANG Xinquan, JIANG Huichao, MA Yuanqing, et al. The spatial distribution of environmental factors and the response of net-phytoplankton in the Laizhou bay during wet-season in 2017[J]. *Marine Environmental Science*, 2020, 39(4): 614-621, 629.
- [35] GUO J, WANG Y, LAI J, et al. Spatiotemporal distribution of nitrogen biogeochemical processes in the coastal regions of northern Beibu Gulf, south China sea[J]. *Chemosphere*, 2020, 239: 124803.
- [36] 韦蔓新, 赖廷和, 何本茂. 铁山港湾水质状况发展趋势[J]. *海洋通报*, 2002, 5: 69-74.
WEI Manxin, LAI Tinghe, HE Benmao. Development

- trend of the water quality conditions in the Tieshangang Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2002, 5: 69-74.
- [37] 韩丽君, 郑新庆, 蓝文陆, 等. 近 10 年涠洲岛周边海域表层海水营养盐含量变化特征[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(1): 65-72.
HAN Lijun, ZHENG Xinqing, LAN Wenlu, et al. Variations of nutrients concentration in surface seawater in adjacent area of Weizhou Island in recent 10 years[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2015, 34(1): 65-72.
- [38] 广西壮族自治区海洋局. 广西壮族自治区 2019 年海洋灾害公报[EB/OL]. [2021-04-15]. http://hyj.gxzf.gov.cn/zwgk_66846/hygb_66897/hyzhgb/t7203608.shtml.
Ocean Bureau of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Guangxi Zhuang Autonomous Region Marine Hazards Bulletin in 2019[EB/OL]. [2021-04-15]. http://hyj.gxzf.gov.cn/zwgk_66846/hygb_66897/hyzhgb/t7203608.shtml.
- [39] 贺立燕, 宋秀贤, 於凡, 等. 潜在影响防城港核电冷源系统的藻类暴发特点及其监测防控技术[J]. *海洋与湖沼*, 2019, 50(3): 700-706.
HE Liyan, SONG Xiuxian, YU Fan, et al. Potential risk and prevention of phytoplankton outbreak to water-cooling system in nuclear power plant in Fanchenggang, Guangxi[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50(3): 700-706.
- [40] 科学网. 海洋一号 C/D 卫星发现北部湾夜光藻赤潮[EB/OL]. [2021-04-15]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2021/2/453258.shtml>.
ScienceNet.cn. *Noctiluca scintillans* bloom was detected in Beibu Gulf by Haiyang 1# C/D satellite[EB/OL]. [2021-04-15]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2021/2/453258.shtml>.
- [41] 徐宁, 齐雨藻, 陈菊芳, 等. 球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa* Scherffel)赤潮成因分析[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(1): 113-118.
XU Ning, QI Yuzao, CHEN Jufang, et al. Analysis on the cause of *Phaeocystis globosa* Scherffel red tide[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(1): 113-118.
- [42] GONG B, WU H, MA J, et al. The algae community in taxon Haptophyceae at the early bloom stage of *Phaeocystis globosa* in Northern Beibu Gulf in winter[J]. *BioRxiv*, 2018: 492454.
- [43] 王雨, 叶又茵, 林茂, 等. 南海北部夜光藻种群的时空分布及其环境适应性[J]. *生物多样性*, 2012, 20(6): 685-692.
WANG Yu, YE Youyin, LIN Mao, et al. Spatial-temporal distribution of a *Noctiluca scintillans* population and its adaption to environmental conditions in northern South China Sea[J]. *Biodiversity Science*, 2012, 20(6): 685-692.
- [44] 田达玮, 宋书群, 陈田田, 等. 胶州湾夜光藻种群动态及其大量繁殖的生态机制[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(2): 276-284.
TIAN Dawei, SONG Shuqun, CHEN Tiantian, et al. *Noctiluca scintillans* blooming in the Jiaozhou Bay: population dynamics and ecological mechanism[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(2): 276-284.
- [45] 黄大力. 广西北部湾近岸海域浮游植物粒径级结构分布及影响因素[D]. 南宁: 广西大学, 2018: 28-30.
HUANG Dali. Distribution of size-fractionated phytoplankton and its controlling factors in the coastal seawaters of Beibu Gulf, Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2018: 28-30.
- [46] CHEN B, DONG D, QIN X, et al. Relationship between the occurrence of red tides and the dynamic response mechanisms in the northern Beibu Gulf[J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 93(SI): 185-193.
- [47] 刘子琳, 宁修仁, 蔡昱明. 北部湾浮游植物粒径分级叶绿素 *a* 和初级生产力的分布特征[J]. *海洋学报(中文版)*, 1998, 20(1): 50-57.
LIU Zilin, NING Xiuren, CAI Yuming. Distribution characteristics of size-fractionated chlorophyll *a* and productivity of phytoplankton in the Beibu Gulf[J]. *Haiyang Xuebao*, 1998, 20(1): 50-57.
- [48] 吴易超, 郭丰, 黄凌风, 等. 北部湾夏季浮游植物叶绿素 *a* 含量的分布特征[J]. *广州化工*, 2014, 42(8): 144-146.
WU Yichao, GUO Feng, HUANG Lingfeng, et al. Distribution characteristics of chlorophyll *a* content in the Beibu Gulf[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2014, 42(8): 144-146.
- [49] 杨斌, 钟秋平, 张晨晓, 等. 钦州湾叶绿素 *a* 和初级生产力时空变化及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(5): 1333-1340.
YANG Bin, ZHONG Qiuping, ZHANG Chenxiao, et al. Spatio-temporal variations of chlorophyll *a* and primary productivity and its influence factors in Qinzhou Bay[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5): 1333-1340.
- [50] 张莹, 王玉珏, 王跃启, 等. 2013 年夏季渤海环境因子与叶绿素 *a* 的空间分布特征及相关性分析[J]. *海洋通报*, 2016, 35(5): 571-578.
ZHANG Ying, WANG Yujue, WANG Yueqi, et al. Spatial distribution and correlation of environmental factors and chlorophyll *a* concentrations in the Bohai Sea during the summer of 2013[J]. *Marine Science Bulletin*, 2016, 35(5): 571-578.
- [51] 庞巧珠, 骆丽珍, 曾广锐, 等. 黎安港海水和沉积物中叶绿素 *a* 含量及与环境因子的关系分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2021(1): 133-141.

- PANG Qiaozhu, LUO Lizhen, ZENG Guangrui, et al. Analyses of chlorophyll *a* content in seawaters and sediments and its relationship with environmental factors in Li'an Lagoon[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2021(1): 133-141.
- [52] 韦蔓新, 何本茂, 李智, 等. 广西铁山港海草生态区无机 N 的季节变化规律及其相关性分析[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(3): 400-404.
WEI Manxin, HE Benmao, LI Zhi, et al. Seasonal variation and analysis of inorganic nitrogen in sea-grass ecosystem of Tieshan Bay in Guangxi[J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(3): 400-404.
- [53] 韦蔓新, 范航清, 何本茂, 等. 广西铁山港红树林区水体的营养水平与结构特征[J]. *热带海洋学报*, 2013, 32(4): 84-91.
WEI Manxin, FAN Hangqing, HE Benmao, et al. Nutritional level and component characteristic of water in mangrove area of Tieshan Bay[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32(4): 84-91.
- [54] BECKER C C, WEBER L, SUCA J J, et al. Microbial and nutrient dynamics in mangrove, reef, and seagrass waters over tidal and diurnal time scales[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2020, 85: 101-119.
- [55] 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: 63-64.
WU Minlan. The distribution feature of nutrients and the study of their influence on ecosystem in the northern Beibu Gulf[D]. Xiamen: Xiamen University, 2014: 63-64.
- [56] 李萍, 莫海连, 郭钊. 广西近岸海域水质状况调查与评价[J]. *科技通报*, 2018, 34(7): 274-279.
LI Ping, MO Hailian, GUO Zhao. Current condition and assessment of inshore water quality in Guangxi[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2018, 34(7): 274-279.
- [57] 梁鑫, 彭在清. 广西涠洲岛珊瑚礁海域水质环境变化研究与评价[J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(1): 114-119.
LIANG Xin, PENG Zaiqing. Analysis and appraisal of seawater quality in coral reef water, Weizhou Island, Guangxi[J]. *Ocean Development and Management*, 2018, 35(1): 114-119.

Nutrients and water quality in the Beihai Peninsula of Guangxi during summers

XU Yi-xiao^{1, 2}, TAO Xiao-ping¹, LIU Cheng-hui³, WEI Guang-ling¹, HE Xi-lin¹, YAO Qiu-cui¹, CHEN Wu-rong¹, LI Bin³

(1. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 2. Guangxi Laboratory on the Study of Coral Reefs in the South China Sea, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai 536000, China)

Received: Jan. 12, 2021

Key words: nutrients; water quality; assessment; Beihai; Beibu Gulf

Abstract: In this study, nutrients and water quality conditions closely related to algal blooms, a recent frequent occurrence in the Beibu Gulf, are investigated. Nutrients and water quality from surface seawater collected in August 2020 from 21 stations across Tieshan Bay, Yingpan, Weizhou Island, Xieyang Island, and the far west coast of Weizhou Island in the Beihai Peninsula of Beibu Gulf were analyzed. The eutrophication and organic pollution indexes were used for evaluating the nutrients and water quality. An average dissolved inorganic nitrogen (DIN) content of 0.210 mg/L, an average PO₄-P content of 0.021 mg/L, and an average SiO₃-Si content of 0.270 mg/L in the Beihai Peninsula were calculated. Results showed that the nutrients were decreasing in the Tieshan Bay from inside to outside, nutrients of DIN and SiO₃-Si in Yingpan first decreased and then increased, and there was an increasing trend in PO₄-P from inshore to offshore. However, no nutrient distribution pattern was observed near the Weizhou Island and at other offshore stations. Average values of 11.8 for N/P, 1.7 for Si/N, and 14.6 for Si/P in the Beihai Peninsula were calculated, exhibiting 47.6% of the sea areas with potential N limitation, and potential P and Si limitations of 9.5%, each. Chlorophyll-*a* was only significantly correlated with chemical oxygen demand, with a correlation coefficient of 0.475. The average eutrophication index was found to be 1.82 in the Beihai Peninsula, with Tieshan Bay having the most serious eutrophication, from severe eutrophication inside the port to oligotrophic status outside the port of Tieshan Bay. There was moderate eutrophication in Station 7 located at Yingpan inshore; in contrast, oligotrophic status was shown by 76.2% of the Beihai Peninsula. The average organic pollution index was calculated to be 1.85 for the Beihai Peninsula, with good water quality (38.1%) and organic pollution (61.9%) to some extent. Heavy water pollution, the most serious one, was found only in Tieshan Bay. Generally, there is potential N limitation in the main surface water of the Beihai Peninsula during summers, and eutrophication and organic pollution in Tieshan Bay and Yingpan are much worse than those in the other stations. Chlorophyll-*a* content is affected majorly by organic matter in surface water, which may be related to the strong degradation of marine microorganisms. This study will provide basic data for marine environmental protection and harmful algal blooms management in the Beibu Gulf region.

(本文编辑: 谭雪静)