

◆全流域生态环境治理◆

广西北部湾近岸海域营养盐与富营养化状态研究^{*}温玉娟^{1,2},徐轶肖^{1,2},黎慧玲^{1,2},雷富³,谢欢达^{1,2},吴森^{1,2**}

(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. 南宁师范大学,广西地表过程与智能模拟重点实验室,广西南宁 530001;3. 广西科学院广西北部湾海洋研究中心,广西近海海洋环境科学重点实验室,广西南宁 530007)

摘要:为全面了解广西北部湾近岸海域营养盐与富营养化程度,于2021年8月和2022年1月在珍珠湾、钦州湾、廉州湾、铁山港和涠洲岛海域共27个站位采集表层水,分析营养盐浓度,并运用营养盐限制因素评价方法和富营养化指数法分析营养盐结构特征和富营养化状况。结果表明:广西北部湾近岸海域夏季表层水体溶解态无机氮(DIN)、磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)和硅酸盐($\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$)均值分别为0.177 mg/L、0.019 mg/L和0.578 mg/L,冬季三者分别为0.162 mg/L、0.021 mg/L和0.324 mg/L,营养盐浓度均为 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si} > \text{DIN} > \text{PO}_4^{3-}\text{-P}$;其中DIN和 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 平均值在夏季高于冬季,而 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为夏季略低于冬季。各海湾营养盐浓度大小依次为铁山港和钦州湾>廉州湾>珍珠湾>涠洲岛,且在4个海湾均呈湾内向湾外递减的空间变化趋势。夏季氮磷摩尔比(N/P)、硅氮摩尔比(Si/N)和硅磷摩尔比(Si/P)分别为4.3–35.2、0.5–6.5和12.0–139.9,对应均值分别为19.6、2.0和35.5,以潜在磷(P)限制为主,占有站位的29.6%;氮(N)限制占14.8%,其余站位无营养盐限制的情况。冬季N/P、Si/N和Si/P分别为4.3–36.2、0.8–2.0和8.4–37.1,对应均值分别为20.4、1.1和21.5,以潜在P限制为主,占有站位的36.4%;N限制占9.1%。夏季富营养化指数E为0.04–3.92,平均值为1.13;冬季富营养化指数E为0.03–3.68,平均值为1.08,夏季富营养化程度略高于冬季。总的来说,北部湾近岸铁山港富营养化程度最高,其次为钦州湾,两者绝大部分海域均已达到中度富营养,廉州湾30.0%海域达到轻度富营养,而珍珠湾和涠洲岛均属于贫营养。本研究结果可为北部湾海洋环境保护和海水养殖提供基础数据。

关键词:营养盐 富营养化 营养盐浓度 营养盐结构 近岸海域

中图分类号:P76 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2022)03-0541-11

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20220601.001

收稿日期:2022-03-09

^{*} 国家自然科学基金项目(41976155),广西自然科学基金项目(2020GXNSFDA297001)和广西科技重大专项(桂科AA17202020)资助。

【作者简介】

温玉娟(1998–),女,在读硕士研究生,主要从事海洋与海岸带环境演变研究。

【**通信作者】

吴森(1977–),男,实验员,主要从事海洋环境监测与控制技术研究,E-mail:wumiao_2020@163.com。

【引用本文】

温玉娟,徐轶肖,黎慧玲,等.广西北部湾近岸海域营养盐与富营养化状态研究[J].广西科学,2022,29(3):541-551.

WEN Y J, XU Y X, LI H L, et al. Nutrient and Eutrophication in Coastal Waters of Beibu Gulf in Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(3): 541-551.

氮和磷等营养盐是海洋环境中维持海洋生物体生命活动的必需元素,也是水体富营养化、赤潮暴发等环境问题的物质基础^[1]。广西北部湾海域是我国南海大陆架西北部的一个天然半封闭浅海湾,随着该区社会与经济的迅速发展,工农业生产和生活污水携带大量营养物质流入海洋,主要营养盐浓度整体上呈明显的年际上升趋势。经统计,1980–2010 年,广西北部湾溶解态无机氮(DIN)均值增长了 17.9 倍^[2]。以《海水水质标准》(GB 3097–1997)^[3]为评价依据,1990–2000 年北部湾近岸海域溶解态磷酸盐(DIP)优于一类海水水质标准;2000–2007 年有所上升,但总体变化不大;而 2008 年后,大部分湾内湾口的 DIP 最高值已处于二、三类海水水质标准,甚至劣于四类海水水质标准^[4]。近年北部湾赤潮灾害明显加重,2021 年暴发了高达 6 400 km² 的超大规模夜光藻(*Noctiluca scintillans*)赤潮^[5,6],赤潮生物由最近十年的球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)演变为夜光藻,有害赤潮种类增加^[7],严重威胁北部湾海洋生态环境和经济可持续发展,急需就该地区主要海域的营养盐状况进行研究。

北部湾有多条河流汇入,水产资源丰富。珍珠湾、钦州湾、廉州湾和铁山港是北部湾沿岸分布的 4 个主要海水养殖区,以生蚝、虾、金鲳鱼养殖为主^[8,9]。钦州湾号称“大蚝之乡”,是我国重要的蚝苗繁育基地,提供了全国 70% 的蚝苗^[10];铁山港则是重要的金鲳鱼养殖基地,金鲳鱼产品连续 3 年出口到欧

洲,连续 17 年出口到美国^[11]。涠洲岛位于北部湾中部,是北部湾最大的岛屿,拥有典型的珊瑚礁生态系统,是北部湾最重要的生态景观和资源之一,具有较高的初级生产力、重要的环境功能与社会效益^[12]。营养盐状况对上述海域的海洋环境质量、海洋生态环境保护 and 海洋产业可持续发展研究具有重要意义。目前对北部湾营养盐研究报道较多,但多只关注某一具体海域^[13–15],同时针对北部湾多个海域多个季节的营养盐研究工作仍不多。因此,本研究于 2021 年 8 月(夏季)和 2022 年 1 月(冬季)在北部湾主要养殖水域和涠洲岛周围布设站位,分析表层海水营养盐浓度、结构和限制情况,评价水体富营养化状况,拟为北部湾海水养殖、赤潮灾害管理和海洋生态保护提供基础环境数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与测定

2021 年 8 月和 2022 年 1 月在广西北部湾近岸海域进行 2 个航次调查(图 1),分别对珍珠湾、钦州湾、廉州湾、铁山港和涠洲岛海域共 27 个站位采集表层水样(珍珠湾因疫情影响无冬季数据,廉州湾冬季采样时因潮位较低,采样站位较夏季外移至 28–32)。调查站位主要选取代表性近岸海域,包括生蚝和蚝苗养殖区钦州湾、金鲳鱼养殖区铁山港、珊瑚生长海域涠洲岛等。样品采集、保存和分析按《海洋监测规范》执行^[16],测定的海水温度、盐度、pH 值、溶解

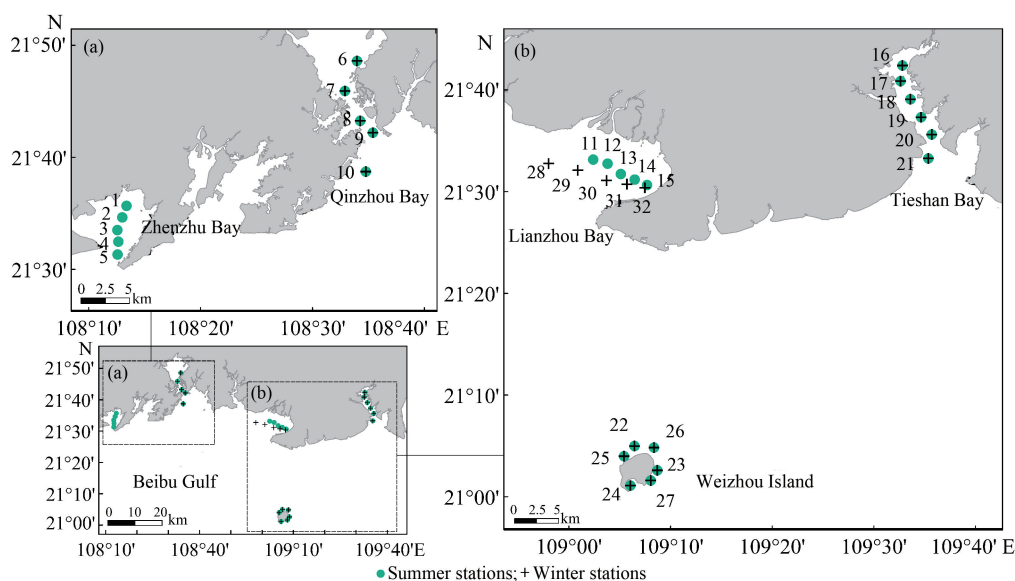


图 1 北部湾近岸海域调查站位

Fig. 1 Sampling stations in nearshore seawaters of Beibu Gulf

氧(DO)、化学需氧量(COD)分析精度分别为 0.2℃、2,0.01,0.085 mg/L、0.15 mg/L,测定的 5 项营养盐硝酸盐(NO_3^- -N)、亚硝酸盐(NO_2^- -N)、氨盐(NH_4^+ -N)、活性磷酸盐(PO_4^{3-} -P)和硅酸盐(SiO_3^{2-} -Si)检出限分别为 0.04 $\mu\text{mol/L}$ 、0.02 $\mu\text{mol/L}$ 、0.03 $\mu\text{mol/L}$ 、0.02 $\mu\text{mol/L}$ 、0.10 $\mu\text{mol/L}$ 。

1.2 评价方法

1.2.1 营养盐限制因素评价

浮游植物生长过程中需按照一定比例吸收生源要素,以浮游植物对营养盐 SiO_3^{2-} -Si、 PO_4^{3-} -P 和 DIN 的需求阈值 2 $\mu\text{mol/L}$ 、0.1 $\mu\text{mol/L}$ 和 1 $\mu\text{mol/L}$ 作为相应组分的绝对限制标准^[17,18],当某种营养盐含量低于对应阈值则表示该项营养盐为绝对限制因子;当含量高于阈值,则根据浮游植物对不同营养盐吸收的化学计量关系(摩尔比)评价其潜在限制情况:若 $\text{N/P} < 10$ 、 $\text{Si/N} > 1$,则为潜在 N 限制;若 $\text{Si/P} > 22$ 、 $\text{N/P} > 22$,则为潜在 P 限制;若 $\text{Si/P} < 10$ 、 $\text{Si/N} < 1$,则为潜在 Si 限制^[19]。

1.2.2 富营养化指数法

20 世纪 80 年代邹景忠等^[20]将富营养化指数法用于渤海湾富营养化研究,后来被学者广泛用于水体富营养化评价,计算公式如下:

$$E = \frac{\text{COD} \times \text{DIN} \times \text{DIP}}{4500} \times 10^6,$$

式中, E 为富营养化指数;COD、DIN、DIP 分别为化学需氧量、溶解态无机氮、溶解态无机磷含量,其中 $\text{DIN} = \text{NO}_3^-$ -N + NO_2^- -N + NH_4^+ -N;单位均为 mg/L。 $E < 1$ 为贫营养, $1 \leq E < 2$ 为轻度富营养, $2 \leq E < 5$ 为中度富营养, $5 \leq E < 15$ 为重度富营养, $E \geq 15$ 为严重富营养。

1.3 数据处理

实验数据由 Excel 2010 进行初步整理。使用

表 1 北部湾近岸表层水体营养盐浓度(mg/L)

Table 1 Nutrient concentrations in nearshore surface waters in Beibu Gulf (mg/L)

项目 Item	夏季 Summer		冬季 Winter	
	浓度范围 Concentration range	平均值 Average	浓度范围 Concentration range	平均值 Average
NO_3^- -N	0.008 - 0.298(10.1% - 96.0%)	0.103 ± 0.077(58.0%)	0.008 - 0.291(22.9% - 83.3%)	0.101 ± 0.074(62.4%)
NO_2^- -N	0.001 - 0.028(0.7% - 11.0%)	0.010 ± 0.008(5.9%)	0.001 - 0.013(1.0% - 39.6%)	0.006 ± 0.003(3.6%)
NH_4^+ -N	0.003 - 0.187(3.6% - 83.2%)	0.064 ± 0.057(36.1%)	0.013 - 0.117(14.8% - 53.4%)	0.055 ± 0.030(34.0%)
DIN	0.028 - 0.427	0.177 ± 0.121	0.034 - 0.349	0.162 ± 0.087
PO_4^{3-} -P	0.007 - 0.037	0.019 ± 0.008	0.004 - 0.037	0.021 ± 0.012
SiO_3^{2-} -Si	0.097 - 1.187	0.578 ± 0.336	0.120 - 0.706	0.324 ± 0.151

Note: Percentages in parentheses as a range or ratio of their share of DIN

Arcmap 10.2 绘制研究区域采样图;运用 Origin 2019b 软件绘制营养盐浓度和分布图,同时绘制营养盐历史趋势图并进行线性拟合分析。

2 结果与分析

2.1 海域温盐状况

夏季表层海水温度为 30.0 - 33.1℃,平均值为 (31.3 ± 0.8)℃ ($n = 27$),最高值出现在廉州湾 11 号站位,最低值出现在涠洲岛 22 - 25,27 号站位。冬季表层海水温度为 13.5 - 19.6℃,平均值为 (16.7 ± 1.8)℃ ($n = 22$),最高值出现在钦州湾 6 号站位,最低值出现在涠洲岛 26 号站位。夏季盐度为 21.2 - 34.0,平均值为 28.0 ± 3.3 ($n = 27$),最高值出现在涠洲岛 23,26 号站位,最低值出现在钦州湾 6 号站位;冬季盐度为 22.4 - 32.8,平均值为 30.2 ± 2.5 ($n = 22$),最高值出现在涠洲岛 24 号站位,最低值出现在钦州湾 6 号站位。

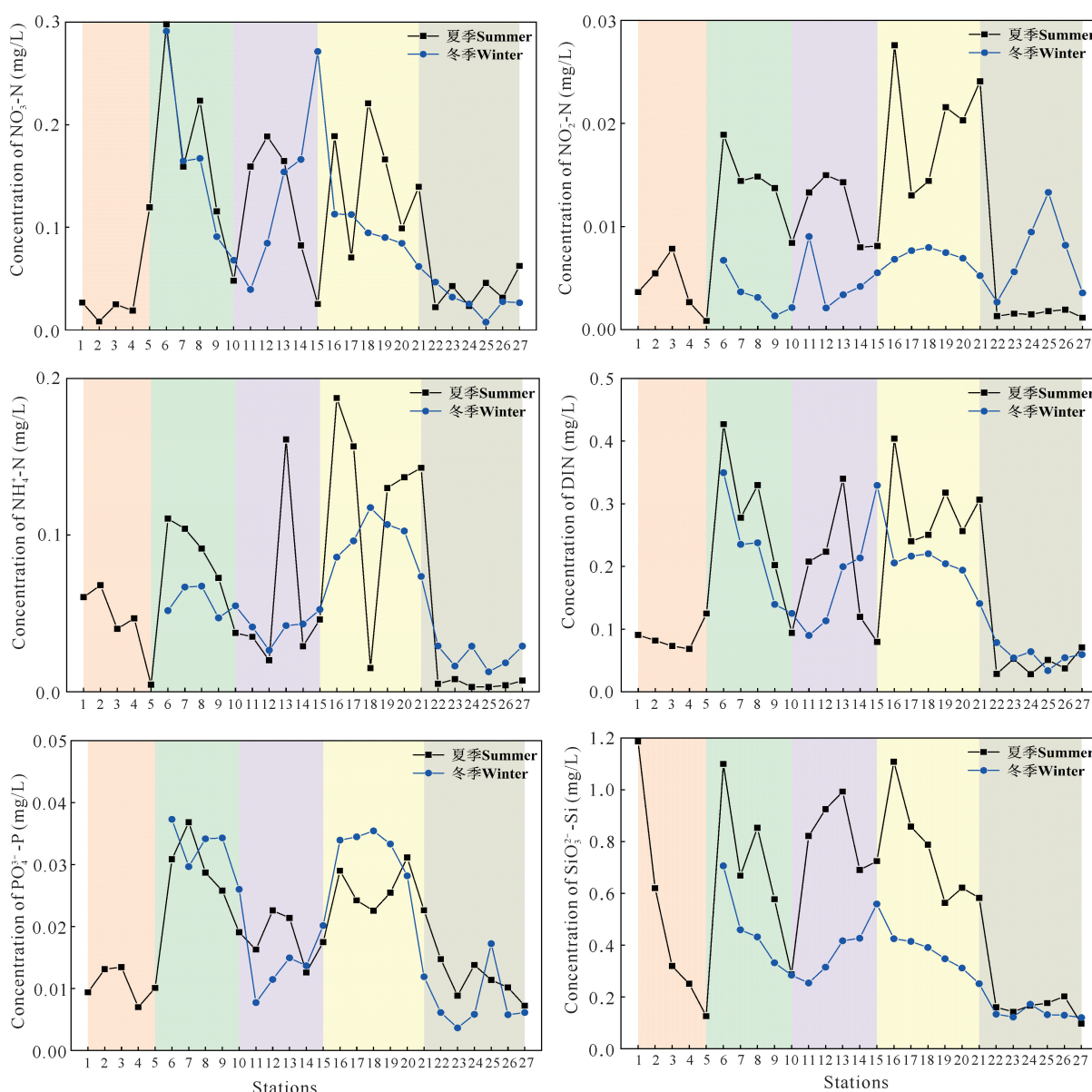
2.2 营养盐浓度

夏季营养盐浓度较高,浓度变化范围也较冬季大。夏、冬季营养盐浓度从大到小均为 SiO_3^{2-} -Si > DIN > PO_4^{3-} -P。 DIN 和 SiO_3^{2-} -Si 平均值夏季高于冬季,而 PO_4^{3-} -P 平均值夏季略低于冬季。 NO_3^- -N 是 DIN 的主要组成部分,夏、冬季 NO_3^- -N 平均值均占 DIN 的 55% 以上;其次为 NH_4^+ -N,占比 34.0% - 36.1%; NO_2^- -N 占比最低(表 1)。

营养盐浓度及分布见图 2。夏季 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 和 DIN 最高浓度分别出现在钦州湾 6 号站位(0.298 mg/L)、铁山港 16 号站位(0.028 mg/L)、铁山港 16 号站位(0.187 mg/L)和钦州湾 6 号站位(0.427 mg/L),最低浓度分别出现在珍珠湾 2 号站位(0.008 mg/L)、珍珠湾 5 号站位(0.001 mg/L)、

涠洲岛 24、25 号站位 (0.003 mg/L) 和涠洲岛 24 号站位 (0.028 mg/L)。上述营养盐冬季最高浓度分别出现在钦州湾 6 号站位 (0.291 mg/L)、涠洲岛 25 号站位 (0.013 mg/L)、铁山港 18 号站位 (0.117 mg/L) 和钦州湾 6 号站位 (0.349 mg/L), 最低浓度分别出现在涠洲岛 25 号站位 (0.008 mg/L)、钦州湾 9 号站位 (0.001 mg/L)、涠洲岛 25 号站位 (0.013 mg/L) 和涠洲岛 25 号站位 (0.034 mg/L)。夏季 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 最高浓度分别出现在钦州湾 7 号站位

(0.037 mg/L)、珍珠湾 1 号站位 (1.187 mg/L), 最低浓度分别为珍珠湾 4 号站位 (0.007 mg/L)、涠洲岛 27 号站位 (0.097 mg/L)。冬季 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 最高浓度均出现在钦州湾 6 号站位 (分别为 0.037 mg/L、0.706 mg/L), 最低浓度分别出现在涠洲岛 23 号站位 (0.004 mg/L)、涠洲岛 27 号站位 (0.120 mg/L)。空间分布上, 营养盐浓度总体上涠洲岛最低, 各个海湾间呈铁山港和钦州湾 > 廉州湾 > 珍珠湾 > 涠洲岛 (表 2), 且呈湾内向湾外递减趋势。



Stations 11 – 15 on the x-axis correspond to stations 11 – 15 in summer or 28 – 32 in winter, respectively

图 2 北部湾近岸夏季和冬季表层海水营养盐浓度及分布

Fig. 2 Nutrient concentration and distribution in nearshore surface seawater of Beibu Gulf in summer and winter

表 2 北部湾近岸海域营养盐浓度均值(mg/L)

Table 2 Average value of nutrient concentrations in nearshore seawaters of Beibu Gulf (mg/L)

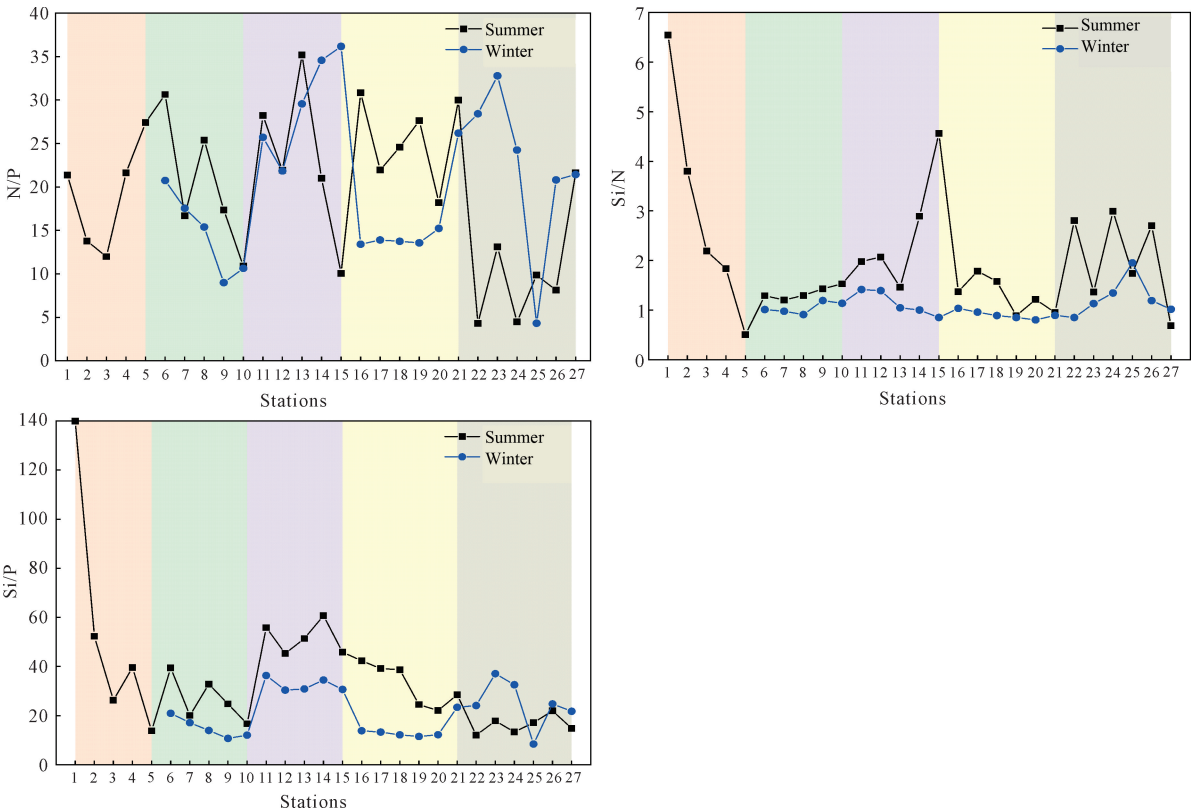
海湾 Bay	DIN		DIP		SiO ₃ ²⁻ -Si	
	夏季 Summer	冬季 Winter	夏季 Summer	冬季 Winter	夏季 Summer	冬季 Winter
Zhenzhu Bay	0.088±0.022 (0.068-0.125)	—	0.011±0.003 (0.007-0.013)	—	0.500±0.425 (0.126-1.187)	—
Qinzhou Bay	0.266±0.126 (0.094-0.427)	0.217±0.091 (0.125-0.349)	0.028±0.007 (0.019-0.037)	0.032±0.004 (0.026-0.037)	0.697±0.304 (0.287-1.100)	0.442±0.164 (0.284-0.706)
Lianzhou Bay	0.194±0.101 (0.079-0.340)	0.189±0.095 (0.090-0.329)	0.018±0.004 (0.013-0.023)	0.014±0.005 (0.008-0.020)	0.831±0.129 (0.690-0.993)	0.394±0.117 (0.254-0.559)
Tieshan Bay	0.296±0.062 (0.240-0.404)	0.197±0.029 (0.141-0.220)	0.026±0.004 (0.023-0.031)	0.030±0.009 (0.012-0.035)	0.753±0.210 (0.563-1.108)	0.357±0.067 (0.251-0.425)
Weizhou Island	0.045±0.016 (0.028-0.071)	0.057±0.015 (0.034-0.078)	0.011±0.003 (0.007-0.015)	0.007±0.005 (0.004-0.017)	0.157±0.036 (0.097-0.202)	0.135±0.019 (0.120-0.172)

Note: The values in parentheses are the nutrient concentration range; "—" indicates no record

2.3 营养盐限制情况

本研究营养盐含量均高于绝对限制阈值,故不存在营养盐绝对限制情况。由图 3 可知,营养盐结构显示夏季 N/P、Si/N 和 Si/P 分别为 4.3-35.2、0.5-6.5 和 12.0-139.9,对应均值为 19.6±8.4、2.0±1.3 和 35.5±24.9 (n=27); 冬季 N/P、Si/N 和 Si/P 分别为 4.3-36.2、0.8-2.0 和 8.4-37.1,对应均值为 20.4±8.6、1.1±0.3 和 21.5±9.5 (n=22)。

夏季,涠洲岛 22、24-26 号站位为潜在 N 限制,占所有站位的 14.8%;钦州湾 6、8 号站位,廉州湾 11、13 号站位和铁山港 16、18、19、21 号站位均为潜在 P 限制,占所有站位的 29.6%,其余站位不具有营养盐限制的情况。冬季,钦州湾 9 号、涠洲岛 25 号站位为潜在 N 限制,占所有站位的 9.1%;廉州湾 11、13-15 号,铁山港 21 号和涠洲岛 22-24 号站位均为潜在 P 限制,占所有站位的 36.4%。可见,夏、冬季潜在 P



Stations 11-15 on the x-axis correspond to stations 11-15 in summer or 28-32 in winter, respectively

图 3 北部湾近岸夏季和冬季表层海水 N/P、Si/N、Si/P 分布

Fig. 3 Distribution of N/P, Si/N, Si/P in nearshore surface seawater of Beibu Gulf in summer and winter

限制比例均高于潜在 N 限制。空间分布上, 夏季潜在 N 限制发生在涠洲岛海域, 潜在 P 限制发生在钦州湾、廉州湾和铁山港, 珍珠湾无营养盐限制情况; 冬季潜在 N 限制发生在钦州湾和涠洲岛, 潜在 P 限制发生在廉州湾、铁山港和涠洲岛。

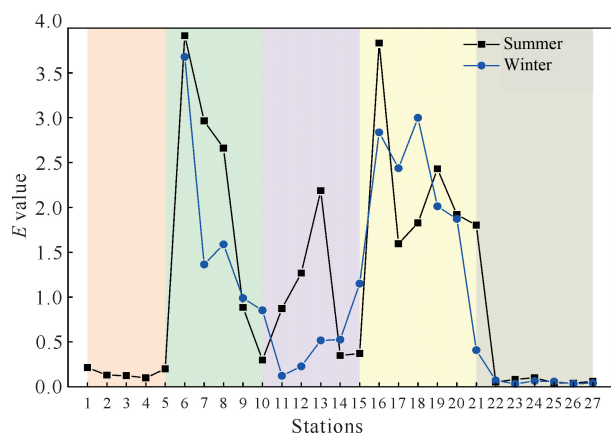
表 4 营养盐限制情况

Table 4 Nutrient limitation situation

限制等级 Limitation level	评价标准 Evaluation standard	出现比率(%) Occurrence rate (%)	
		夏季 Summer	冬季 Winter
Potential N limitation	$N/P < 10, Si/N > 1$	14.8	9.1
Potential P limitation	$Si/P > 22, N/P > 22$	29.6	36.4
Potential Si limitation	$Si/P < 10, Si/N < 1$	0	0

2.4 富营养化状况

由图 4 可知, 夏季富营养化指数 E 为 0.04 – 3.92, 平均值为 1.13 ± 1.20 ($n = 27$), 最高值位于钦州湾 6 号站位 (3.92), 达到中度富营养; 最低值位于涠洲岛 26 号站位 (0.04), 属于贫营养。其中, 钦州湾 6 – 8 号、廉州湾 13 号、铁山港 16, 19 号站位均达到中度富营养; 廉州湾 12 号、铁山港 17, 18, 20, 21 号站位均达到轻度富营养, 其余 59.3% 站位未达到富营养化标准, 属于贫营养。冬季 E 为 0.03 – 3.68, 平均值为 1.08 ± 1.09 ($n = 22$) (图 4), 最高值位于钦州湾 6 号站位 (3.68), 达到中度富营养; 最低值位于涠洲岛 23, 26 号站位 (0.03), 属于贫营养。其中, 钦州湾 6 号、铁山港 16 – 19 号站位均达到中度富营养; 钦州



Stations 11 – 15 on the x -axis correspond to stations 11 – 15 in summer or 28 – 32 in winter, respectively

图 4 北部湾近岸夏季和冬季表层海水 E 值

Fig. 4 E -values of nearshore surface seawater of Beibu Gulf in summer and winter

湾 7, 8 号、廉州湾 15 号、铁山港 20 号站位均达到轻度富营养, 其余 59.1% 站位未达到富营养化标准。可见, E 值均值夏季较冬季略高。空间分布上, 铁山港富营养化程度最高, 其次为钦州湾, 两者绝大部分海域均已达到中度富营养, 廉州湾 30.0% 海域达到轻度富营养, 珍珠湾、涠洲岛海域均属于贫营养。

3 讨论

3.1 营养盐浓度比较

本研究与先前多个研究均发现北部湾营养盐季节变化呈夏季高、冬季低的特征^[21, 22]。营养盐季节变化与气候条件、微生物活动等有关, 河流输入被认为是近岸海域最大的营养源, 因此, 河流流量的季节性差异是造成营养盐浓度夏季高于冬季的重要原因之一^[22, 23]。本研究夏、冬季营养盐浓度均为 $SiO_3^{2-}-Si > DIN > PO_4^{3-}-P$, 与李萍等^[21]、王松鸽等^[24]的研究结果一致。硅是浮游硅藻的必需元素之一, 在海洋中的浓度普遍较高, 远大于无机氮和活性磷酸盐浓度^[25]。另外, 本研究 DIN 和 $SiO_3^{2-}-Si$ 平均值均为夏季高于冬季, $PO_4^{3-}-P$ 为夏季略低于冬季, 与 Guo 等^[22]、韦蔓新等^[26]的研究结果一致。夏季虽为陆源影响最大的季节, 但磷酸盐含量却较低, 体现了以生物消耗作用影响为主、陆源补充影响为辅的特征, 这可能是活性磷酸盐浓度夏季略低的原因^[26, 27]。

本研究中珍珠湾 DIN 夏季均值 (0.088 mg/L) 约为 2004 年夏季均值 (0.029 mg/L) 的 3.0 倍, 2010 年 9 月均值 (0.035 mg/L) 的 2.5 倍, 与 2017 年均值 (0.077 mg/L) 相近^[28-30]; $PO_4^{3-}-P$ 夏季均值 (0.011 mg/L) 为 2004 – 2008 年夏季均值 (0.005 mg/L) 的 2.2 倍, 分析与近年来珍珠湾养殖业的发展和白龙码头建设污水输入有关^[28, 30]。前人研究发现珍珠湾夏季和冬季营养盐含量均低于钦州湾、铁山港和廉州湾, 珍珠湾夏季 DIN 和 $SiO_3^{2-}-Si$ 含量常高于冬季^[9, 29, 30]。因此, 尽管珍珠湾仅有夏季营养盐数据, 但是依据前人研究成果可以推测本研究结论应是一致的。本研究中钦州湾 DIN 、 $PO_4^{3-}-P$ 夏季均值分别为 0.266 mg/L、0.028 mg/L, 铁山港 DIN 、 $PO_4^{3-}-P$ 夏季均值分别为 0.296 mg/L、0.026 mg/L, 两海域营养盐浓度较 2005 年均明显增加, 这可能是北部湾经济开发区成立 (2006 年) 后, 港湾周围地区污染源种类和污水量的增加, 对营养盐的输入量产生影响^[14]。铁山港 $SiO_3^{2-}-Si$ 夏季均值 (0.753 mg/L) 较 2003 – 2010 年夏季均值 (1.07 mg/L)^[14] 有所下降。

河流输入是近岸硅酸盐的重要来源^[31], 而铁山港硅酸盐含量减少, 可能与陆源补充减少有关。廉州湾 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总体呈年际增长趋势^[32], 本研究廉州湾 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 夏季均值(0.018 mg/L)为 2000 年夏季均值(0.005 mg/L)^[33] 的 3.6 倍, 但与 2013–2016 年夏季均值(0.022 mg/L)^[9] 接近。研究表明, 廉州湾养殖区无机磷污染较严重与其靠近生活和工业排污口有关^[34]。前人研究发现涠洲岛 DIN 整体呈现上升趋势^[1,35], 而本文涠洲岛 DIN 夏季均值(0.045 mg/L)与 2010–2013 年涠洲岛赤潮监控区夏季均值(0.048 mg/L)^[36] 相近, 但比 2013–2016 年涠洲岛珊瑚礁海域夏季均值(0.110 mg/L)^[37] 要低, 比 2020 年涠洲岛夏季均值(0.161 mg/L)^[38] 也明显要小, 分析可能与本次采样时间和采样地点差异有关。

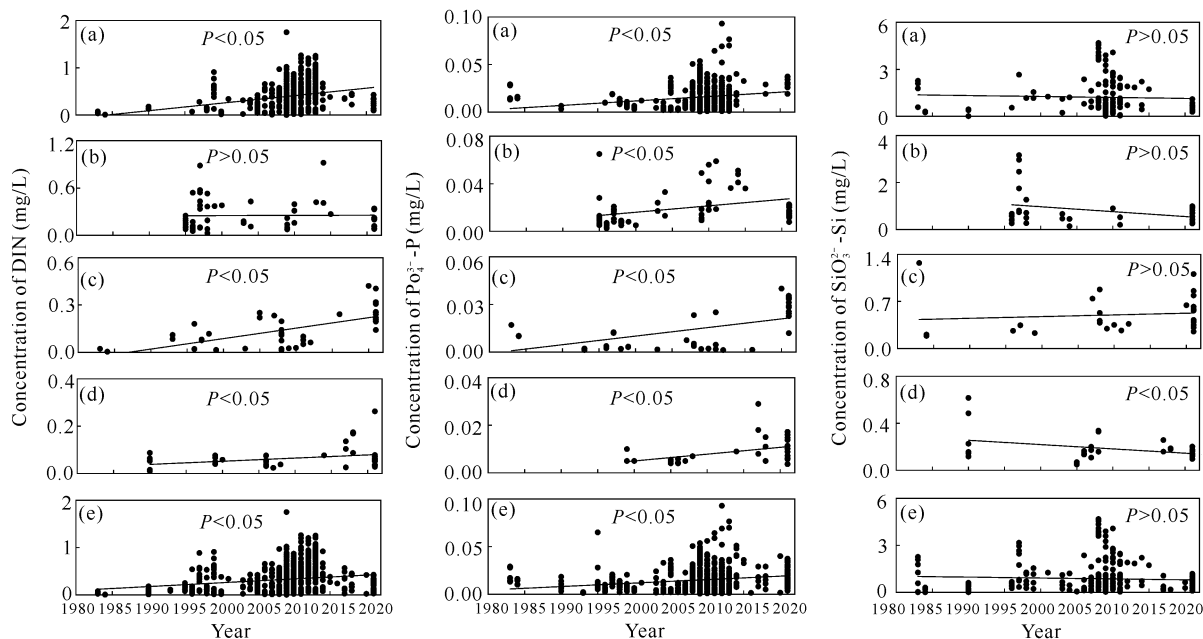
3.2 营养盐浓度变化趋势

本研究各海域的营养盐浓度符合其长期变化趋势。以中国知网有关北部湾研究的营养盐数据作图, 发现 1980 年至今, 北部湾海域 DIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量明显增加(图 5)。除廉州湾($P>0.05$)外, 钦州湾、铁山港、涠洲岛和整个北部湾海域 DIN 均经历了显著增加, 呈明显年际上升趋势($P<0.05$); 钦州湾、廉州湾、铁山港、涠洲岛和整个北部湾海域的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 亦

呈明显年际上升趋势($P<0.05$); 与 DIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 不同的是, 在过去几十年除涠洲岛 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 含量呈明显下降趋势($P<0.05$)外, 钦州湾、廉州湾、铁山港和整个北部湾海域的 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 含量均比较稳定, 未发现明显的变化趋势($P>0.05$)(图 5)。区域经济发展、土地利用开发和海水养殖是北部湾营养盐浓度升高的重要因素^[9,39]。据统计, 20 世纪 80 年代至 2015 年, 北部湾各经济区工业总产值增加了 98.1–22 703.3 倍^[2], 2015 年北部湾海岸带土地建设用占地面积占比(13.42%)为 2000 年的 2.9 倍, 且同年北部湾近岸未达到一类海水水质标准的海域面积达 4 397 km^2 , 为 2012 年的 1.7 倍^[39]。而 1978–2015 年, 北部湾海水养殖面积增加了 291 倍, 海水人工养殖产量增加了 2 606 倍^[2]。上述活动为北部湾海域特别是近岸海湾生态系统输入了大量的氮、磷营养盐^[30,40]。

3.3 营养盐结构特征

海水中 DIN 包括 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 3 种形态, 它们在海洋生物循环中起着重要的作用^[41]。本研究夏、冬季 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 平均值均占 DIN 的 55% 以上; 其次为 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 占比 34.0%–36.1%; $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 占比最低。可见 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 是研究海域 DIN 的主要存在形式, 与张际标等^[25]、蓝文陆等^[14] 研究结果相似,



The straight line indicates the long term trend. For $P<0.05$, at the 0.05 level, the slope is significantly different from zero, and there is an obvious long-term trend in nutrient concentrations; for $P>0.05$, at the 0.05 level, the slope is not significantly different from zero, and the long-term change trend of nutrient concentration is not obvious

图 5 1980–2021 年钦州湾(a)、廉州湾(b)、铁山港(c)、涠洲岛(d)、北部湾(e)海水营养盐浓度的时间变化

Fig. 5 Temporal changes in seawater nutrient concentration between 1980 and 2021 in Qinzhou Bay (a), Lianzhou Bay (b), Tieshan Bay (c), Weizhou Island (d) and Beibu Gulf (e)

与以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为主要存在形式的一些近海区域(如胶州湾^[42]、深圳湾^[43])的研究结果不同。分析可能因为北部湾的氮源主要以长距离的河流输送为主,从河流到北部湾的长距离输送过程中,生活污水和农业化肥的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 部分已被氧化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, DIN 已达到热动力平衡状态。

海水中适宜的 Si、N、P 含量和比值(摩尔比)有利于浮游植物的生长和繁殖^[44]。本研究发现北部湾近岸海域夏季和冬季营养盐含量均大于浮游植物对营养盐 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 DIN 的需求阈值,因此需考虑潜在营养盐限制情况。本研究海域夏季主要为潜在 P 限制,钦州湾、廉州湾和铁山港均为潜在 P 限制。1990–2014 年钦州湾、廉州湾水体 N/P 长期大于 Redfield 比值^[4], 2013 年铁山港夏季表现为潜在 P 限制^[26], 2015 年北部湾绝大部分海域表现为潜在 P 限制^[45], 与本研究夏季主要为潜在 P 限制一致。冬季亦主要为潜在 P 限制,主要发生在廉州湾和涠洲岛,与 2005–2015 年廉州湾和 2010–2013 年涠洲岛赤潮监控区主要为潜在 P 限制一致^[32,36]; 而钦州湾除 9 号站位为 N 限制外,该海域其余站位不存在营养盐限制,与 2003–2010 年钦州湾主要为潜在 P 限制不同^[46]。分析可能与冬季无机氮补充源输入减少、浮游植物消耗较多无机氮有关^[46,47]。本研究 5 个近岸海域均未发现潜在 Si 限制,而北部湾远岸海域有潜在 Si 限制情况,与远岸海域陆源 Si 补充欠缺以及夏季硅藻繁盛消耗大量 Si 密切相关^[26,38]。基于近年来涠洲岛海域 DIN 浓度整体呈现年际下降、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度较稳定^[37], $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 浓度呈明显下降趋势的结论^[1], 认为浮游植物对 N、Si 的消耗增加与 P 的相对稳定使得涠洲岛海域限制因素由 P 向 N 限制转化^[38], 与本研究涠洲岛夏季主要为潜在 N 限制相似。2001–2010 年,北部湾 70% 赤潮发生在涠洲岛海域, 2011 年之后赤潮在北部湾更多海域出现^[48]。涠洲岛海域营养盐浓度下降,营养盐结构发生显著变化,可能是该海域赤潮发生率在 2010 年之后显著降低的原因之一^[38]。

3.4 富营养化状况分析

北部湾近岸海域富营养化指数 E 为 0.03–3.92,总体上已达到轻度富营养化,富营养化程度为铁山港>钦州湾>廉州湾>珍珠湾>涠洲岛。北部湾为半封闭海湾,富营养化指数从湾内向湾外降低的趋势与沿岸水团、混合水团等的形成有关。沿岸水团由内陆径流与海水混合形成,而混合水团由粤西沿岸

经琼州海峡进入北部湾形成,在一定程度上阻挡了沿岸水团富营养化污染物向外输送^[4]。研究表明,2015 年北部湾海域整体处于贫营养化,2016 年后各海湾内湾及入海口富营养化明显^[40]。铁山港是北部湾水产养殖的重要海域,养殖区污水排入对营养盐的补充作用影响明显^[14]。近年来,铁山港大力发展深水抗风浪养殖产业,截至 2019 年,建成核心示范区面积 280 万 m^3 ,养殖面积超过 35 万 m^3 ,已发展成为广西最大的网箱养殖基地,为广西较大的海水养殖基地之一^[11]。2006 年之前,钦州湾富营养化指数 $E < 1.00$,但 2006–2010 年, E 值呈逐渐增高的趋势^[46]。杨静等^[4]指出,自 2000 年后廉州湾和钦州湾是主要的氮污染区,与本研究钦州湾氮污染较严重的结果相似。李萍等^[9]认为,2013–2016 年钦州湾富营养化程度已较严重,其次是廉州湾,而珍珠湾水质状况较好,属于贫营养。钦州湾海域污染的最主要来源是河流输入,入海污染物以有机物和营养盐为主^[40]。钦州湾茅尾海受到钦江和茅岭江大量营养盐和泥沙的输入、粗放的围海养殖的影响,富营养化程度较高^[9,49]。本研究涠洲岛整体处于贫营养状态,与韩丽君等^[1]、陈继艺等^[37]的研究结果一致。北部湾北部海水受入海径流、季风驱动和琼州海峡水体输送共同作用,夏季海水呈反气旋涡,冬季呈气旋式环流,营养盐浓度与分布随海流变化而变化,因此,涠洲岛海域受海流作用影响明显^[50-53],这可能是造成其夏、冬季营养盐分布无明显特征与富营养程度较低的原因。

4 结论

(1)北部湾近岸海域夏季 DIN、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 均值分别为 0.177 mg/L、0.019 mg/L 和 0.578 mg/L,冬季分别为 0.162 mg/L、0.021 mg/L 和 0.324 mg/L,营养盐浓度均为 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si} > \text{DIN} > \text{PO}_4^{3-} - \text{P}$,其中 DIN 和 $\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$ 平均值夏季高于冬季,而 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 夏季略低于冬季。

(2)夏季 N/P、Si/N 和 Si/P 均值分别为 19.6, 2.0 和 35.5,冬季三者均值分别为 20.4, 1.1 和 21.5,夏季和冬季均以潜在 P 限制为主,未发现潜在 Si 限制。

(3)富营养化指数 E 为 0.03–3.92,北部湾近岸铁山港富营养化程度最高,其次为钦州湾,两者绝大部分海域均已达到中度富营养化,廉州湾 30.0% 海域达到轻度富营养化,而珍珠湾和涠洲岛均属于贫营养。

参考文献

- [1] 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.
- [2] XU Y X,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. DOI:10.3389/fmicb.2019.00451.
- [3] 国家环境保护局.海水水质标准:GB 3097-1997 [S].北京:环境科学出版社,2004.
- [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] FU S Q,LOU X L,YANG J S,et al. Multi-satellite observation of a harmful algal bloom in the Beibu Gulf, South China Sea [C]//IEEE. 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). Hangzhou, China;IEEE,2021:2329-2335.
- [6] 刘建强,蒋兴伟,王丽丽,等.海洋一号C、D卫星组网观测与应用[J].卫星应用,2021(9):19-26.
- [7] 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.
- [8] 蓝文陆,李天深,韩丽君.广西铁山港附近海域营养盐分布及其季节变化[J].海洋科学,2014,38(7):63-69.
- [9] 李萍,劳齐斌,莫海连,等.2013-2016年广西主要海水养殖区营养盐年际变化及富营养化评价[J].海洋湖沼通报,2020(5):74-81.
- [10] 潘英,李坚明,黄伟德,等.广西牡蛎产业现状分析及发展策略[J].南方农业学报,2021,52(9):2608-2618.
- [11] 铁山港成广西最大的网箱养殖基地[J].农家之友,2020(1):14.
- [12] 王丽荣,赵焕庭.珊瑚礁生态系统服务及其价值评估[J].生态学杂志,2006,25(11):1384-1389.
- [13] 劳齐斌,刘国强,高劲松,等.钦州湾养殖区营养盐分布特征及富营养化状况研究[J].海洋环境科学,2021,40(3):407-416.
- [14] 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.
- [15] 黄晓煦,徐轶肖,张腾,等.涠洲岛海域营养盐变化特征与评价[J].广西科学,2021,28(2):130-135.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.海洋监测规范:第4部分 海水分析:GB 17378.4-2007 [S].北京:中国标准出版社,2008.
- [17] NELSON D M,BRZEZINSKI M A. Kinetics of silicic acid uptake by natural diatom assemblages in two gulf stream warm-core rings [J]. *Marine Ecology Progress Series*,1990,62(3):283-292.
- [18] 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.
- [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 consequences [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*,1995,40(3):339-356.
- [20] 邹景忠,董丽萍,秦保平.渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨[J].海洋环境科学,1983,2(2):41-54.
- [21] 李萍,郭钊,莫海连,等.广西近岸海域营养盐时空分布及潜在性富营养化程度评价[J].海洋湖沼通报,2018(3):148-156.
- [22] GUO J,WANG Y H,LAI J X,et al. Spatiotemporal distribution of nitrogen biogeochemical processes in the coastal regions of northern Beibu Gulf,south China sea [J]. *Chemosphere*,2020,239:124803. DOI:10.1016/j.chemosphere.2019.124803.
- [23] LAI J X,JIANG F J,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.
- [24] 王松鸽,赖子尼,麦永湛,等.珠江河口冬季浮游细菌群落结构及其影响因素[J].中国水产科学,2019,26(3):522-533.
- [25] 张际标,陈春亮,曲念东,等.徐闻珊瑚礁保护区营养盐时空分布特征[J].广东海洋大学学报,2008,28(1):44-48.
- [26] 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.
- [27] DIZON R M,YAP H T. Short-term responses of coral reef microphytobenthic communities to inorganic nutrient loading [J]. *Limnology and Oceanography*,1999,44(5):1159-1167.
- [28] 蒙珍金,覃盈盈,何祥英,等.珍珠湾海水增养殖区2004-2008年丰水季节的水环境变化趋势分析[J].广西科学院学报,2011,27(1):25-28.
- [29] 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.
- [30] 郭靖.广西北部湾近岸海域氮生物地球化学过程及营养盐沉积记录[D].南宁:广西大学,2020.
- [31] 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.
- [32] 彭小燕, 喻泽斌, 蓝文陆, 等. 近 10a 廉州湾富营养化因子变化特征及其与赤潮演变的关系[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(5): 670-677.
- [33] 陈群英. 广西廉州湾水质状况评价[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(2): 56-58.
- [34] 黎小正, 吴祥庆, 庞燕飞, 等. 广西主要海水贝类养殖区环境质量状况评价[J]. 广西科学院学报, 2009, 25(2): 111-115.
- [35] 何本茂, 黎广钊, 韦蔓新, 等. 涠洲岛珊瑚礁海域氮磷比值季节变化与浮游生物结构的关系[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(4): 64-72.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 徐轶肖, 陶晓娉, 刘成辉, 等. 广西北海半岛夏季营养盐及水质状况分析[J]. 海洋科学, 2021, 45(6): 107-117.
- [39] 毛蒋兴, 覃晶, 陈春炳, 等. 广西北部湾海岸带开发利用与生态格局构建[J]. 规划师, 2019, 35(7): 33-40.
- [40] 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.
- [41] 张正斌, 顾宏堪, 刘莲生, 等. 海洋化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 276-281.
- [42] 沈志良. 胶州湾营养盐结构的长期变化及其对生态环境的影响[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(3): 322-331.
- [43] 孙金水, WING-HONG W O, 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.
- [44] REDFIELD A C, KETCHUM B H, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition of seawater [M]//HILL M N (ed.). The composition of seawater: Comparative and descriptive oceanography. The sea: Ideas and observations on progress in the study of the seas. New York: Interscience Publishers, 1963(2): 26-77.
- [45] 王符菁, 林元烧, 曹文清, 等. 北部湾北部浮游植物群落结构及其与营养盐的关系[J]. 热带海洋学报, 2015, 34(6): 73-85.
- [46] 蓝文陆, 彭小燕. 茅尾海富营养化程度及其对浮游植物生物量的影响[J]. 广西科学院学报, 2011, 27(2): 109-112, 116.
- [47] 赖俊翔, 柯珂, 姜发军, 等. 广西钦州湾及邻近海域营养盐特征与富营养化评价[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(6): 860-866.
- [48] 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.
- [49] 蓝文陆, 杨绍美, 苏伟. 环钦州湾河流入海污染物通量及其对海水生态环境的影响[J]. 广西科学, 2012, 19(3): 257-262.
- [50] 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.
- [51] CHEN B, DONG D X, QIN X L, 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(S1): 185-193.
- [52] 高劲松, 陈波, 侍茂崇. 北部湾夏季环流结构及生成机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(1): 99-112.
- [53] 侍茂崇, 陈波. 涠洲岛东南部海域高浓度氮和磷的来源分析[J]. 广西科学, 2015, 22(3): 237-244.

Nutrient and Eutrophication in Coastal Waters of Beibu Gulf in Guangxi

WEN Yujuan^{1,2}, XU Yixiao^{1,2}, LI Huiling^{1,2}, LEI Fu³, XIE Huanda^{1,2}, WU Miao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Surface Process and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Beibu Gulf Marine Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

Abstract: In order to comprehensively understand the nutrient and eutrophication in coastal waters of Beibu Gulf in Guangxi, surface waters were collected from 27 stations in Zhenzhu Bay, Qinzhou Bay, Lianzhou Bay, Tieshan Bay and Weizhou Island in August 2021 and January 2022. The nutrient concentrations were analyzed, and the structure characteristics and eutrophication status of nutrients were analyzed by nutrient limiting factor evaluation method and eutrophication index method. The result showed that the average values of inorganic nitrogen (DIN), phosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), and silicate ($\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$) in surface waters of the coastal waters of Beibu Gulf in summer was 0.177 mg/L, 0.019 mg/L and 0.578 mg/L, respectively, and in winter which was 0.162 mg/L, 0.021 mg/L and 0.324 mg/L, respectively. Nutrient concentrations were ($\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$) > DIN > $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$. The average values of DIN and $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ were higher in summer than that in winter, while $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ was slightly lower in summer than that in winter. The nutrient salt concentrations were in the order of Tieshan Bay and Qinzhou Bay > Lianzhou Bay > Zhenzhu Bay > Weizhou Island, and showed a spatial variation trend of decreasing from inside to outside in all four bays. In summer, the ratio of N/P, Si/N, and Si/P was 4.3–35.2, 0.5–6.5 and 12.0–139.9, and the corresponding mean values was 19.6, 2.0 and 35.5, respectively. Phosphate was the main potential limitation, accounting for 29.6% of all stations, while nitrogen limitation accounted for 14.8%, and there was no nutrient limitation at other stations. In winter, the ratio of N/P, Si/N and Si/P was 4.3–36.2, 0.8–2.0 and 8.4–37.1, and the corresponding mean values was 20.4, 1.1 and 21.5, respectively. Phosphate was the main potential limitation, accounting for 36.4% of all stations. N limitation accounted for 9.1%. The eutrophication index E in summer was 0.04–3.92, and the average value was 1.13. The eutrophication index E in winter was 0.03–3.68, and the average value was 1.08. The degree of eutrophication in summer was slightly higher than that in winter. In general, the eutrophication degree in coastal waters of Beibu Gulf Tieshan Bay is the highest, followed by Qinzhou Bay, both of which have reached moderate eutrophication, and 30.0% of the waters of Lianzhou Bay have reached mild eutrophication, while Zhenzhu Bay and Weizhou Island are both at a poor eutrophication. The results of this study can provide basic data for marine environmental protection and mariculture in Beibu Gulf.

Key words: nutrients; eutrophication; nutrient concentration; nutrient structure; nearshore waters

责任编辑:米慧芝



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>