

## ◆海洋科学◆

## 2017-2018年北部湾东北部海湾营养盐的时空分布特征\*

史华明<sup>1,2</sup>, 王翔<sup>1,2</sup>, 马玉<sup>1,2\*\*</sup>, 蔡钰灿<sup>1,2</sup>, 许欣<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋局南海调查技术中心, 广东广州 510300; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东广州 510300)

**摘要:**近海营养盐浓度显著受到人类活动和自然条件等因素影响,且会对海洋生态系统造成一定程度的干扰。本文根据2017-2018年北部湾东北部海湾秋季、冬季、春季和夏季4个季节的溶解态营养盐及其他环境参数数据,分析调查海域溶解态营养盐的时空分布、结构特征和变化趋势,并讨论该海域的营养盐限制因子。研究表明:溶解态营养盐分布表现为近岸高、远岸低的特点,高值区主要集中在铁山港、英罗港以及安铺港湾口。溶解无机氮(DIN)浓度为1.50-28.63 μmol/L,夏季浓度最高。磷酸盐(SRP)及硅酸盐(DSi)平均浓度均以秋季最高,全年SRP浓度为0.02-0.94 μmol/L,DSi浓度为1.03-18.19 μmol/L。调查海域的DIN、DSi受陆源输入的影响较大;夏季SRP的消耗速度大于输入速度,导致夏季SRP浓度较低。调查海域氮磷化(N/P)、硅磷比(Si/P)值均高于Redfield比值,其中夏季N/P平均值达175.3±94.5,SRP是该海域的主要营养盐限制因子。调查海域DIN季节平均浓度均低于钦州湾、珍珠湾和廉州湾3个海湾相应季节的DIN浓度,夏季SRP平均浓度低于廉州湾、钦州湾和珍珠湾,自20世纪80年代以来铁山港营养盐浓度呈现先升后降的趋势。

**关键词:**北部湾;营养盐;时空分布;环境因子

中图分类号:P76 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2023)04-0663-09

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20230928.005

自20世纪以来,作为主要初级生产力区域的近岸海洋生态系统逐渐受人类活动的影响<sup>[1]</sup>。大量营养盐通过地表径流、大气沉降、地下水等途径进入近海<sup>[2-4]</sup>,导致水体富营养化水平升高,营养盐结构失衡,赤潮和绿潮等生态灾害频发,对海洋生态系统造成了一定程度的影响<sup>[5]</sup>。北部湾是南海西北部的半

封闭边缘海,进入21世纪后广西北部湾经济区成为我国西部大开发和面向东盟开放合作的重点区域,经济社会发展迅速,人类活动对近海生态环境的影响也越来越显著,海洋生态文明建设亦成为社会关注的热点<sup>[6,7]</sup>。因此,分析北部湾营养盐的现状和历史演变,将有助于海洋生态系统监测和评估体系的完善,

收稿日期:2022-06-30

修回日期:2022-08-02

\* 自然资源部南海局科技发展基金项目(202205)和广东省平台基地及科技基础条件建设项目(2021B1212050025)资助。

【第一作者简介】

史华明(1983-),男,硕士,高级工程师,主要从事海洋生态环境研究,E-mail:shihuaming126@126.com。

【\*\*通信作者】

马玉(1982-),男,博士,正高级工程师,主要从事海洋生物地球化学过程研究,E-mail:362005949@qq.com。

【引用本文】

史华明,王翔,马玉,等. 2017-2018年北部湾东北部海湾营养盐的时空分布特征[J]. 广西科学,2023,30(4):663-671.

SHI H M, WANG X, MA Y, et al. Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Nutrients in the Northeastern Beibu Gulf from 2017 to 2018 [J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(4): 663-671.

促进海洋经济可持续发展。

营养盐浓度及结构变化可以反映海洋生态环境变化。近年来,有关北部湾海域营养盐变化已有不少研究成果<sup>[8-14]</sup>。蓝文陆等<sup>[9]</sup>认为铁山港附近海域营养盐浓度从枯水期到丰水期增加,从丰水期到平水期降低,其浓度主要受入海径流输入的影响,海区氮磷比(N/P)较高,浮游植物繁殖主要受磷限制。覃仙玲等<sup>[10]</sup>认为广西主要入海河流营养物质增加和不同水团输送的营养元素是沿海赤潮多发区氮磷的主要来源。黄晓煦等<sup>[12]</sup>认为涠洲岛海域营养盐整体上表现为由西南向东北递增的现象,年际海水富营养化指数均值为0.090,属贫营养海水。邢素坤等<sup>[13]</sup>指出活性磷酸盐对涠洲岛海域浮游植物的繁殖生长具有潜在的限制性作用,春夏季风生流对各形态磷含量的补充缓解了海域的磷限制,可能诱发了近年来多次赤潮的发生。本研究根据2017-2018年秋、冬、春、夏4个连续季节的调查结果,探讨北部湾东北部海湾营养盐的时空分布及其结构,旨在为保护海洋生态环境、合理开发利用该海域提供数据参考,为北部湾海洋生态文明建设服务。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查区域

调查区域位于北部湾东北部铁山港-英罗港-安铺港附近海域,共布设14个调查站位S1-S14(图1)。其中,S1位于英罗港湾口,S2和S3位于安铺港湾口,S7和S8位于铁山港湾及湾口,其他站位位于北海市与湛江市之间海域。分别于2017年11月(秋季)、2018年1月(冬季)、2018年4月(春季)和2018年8月(夏季)完成现场调查和样品采集。

### 1.2 样品采集及分析

现场使用YSI EXO2多参数水质仪测定温度、盐度和溶解氧(DO)。营养盐样品的采集和处理过程均依照《海洋调查规范 第4部分:海水化学要素调查》(GB/T 12763.4-2007)方法进行。采集各调查站位水面下0.5 m海水样品,海水样品经0.45 μm滤膜过滤后带回实验室-20℃下冷冻,测定营养盐含量,包括硝酸盐(NO<sub>3</sub>-N)、铵盐(NH<sub>4</sub>-N)、亚硝酸盐(NO<sub>2</sub>-N)、磷酸盐(SRP)和硅酸盐(DSi)等,上述物质均依据《海洋监测技术规程 第1部分:海水》(HY/T 147.1-2013)采用流动分析法进行测试,溶解无机氮(DIN)浓度为硝酸盐、铵盐和亚硝酸盐浓

度之和。海水叶绿素a样品加碳酸镁固定、现场过滤后-20℃下避光冷冻,依据《海洋监测规范 第7部分:近海污染生态调查和生物监测》(GB 17378.7-2007)采用分光光度法测试。NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、SRP、DSi和叶绿素a的检出限分别为0.04 μmol/L、0.08 μmol/L、0.02 μmol/L、0.02 μmol/L、0.03 μmol/L和0.2 μg/L。

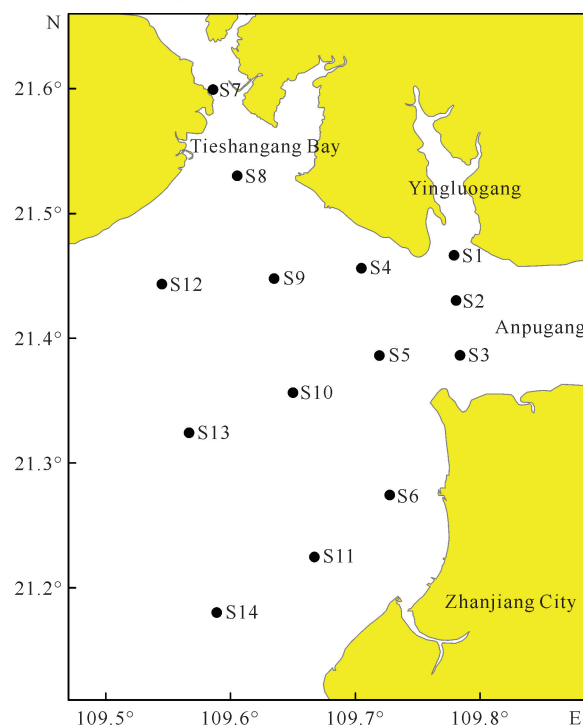


图1 北部湾东北部海域站位布设

Fig. 1 Station layout map in the northeast sea area of Beibu Gulf

### 1.3 数据处理

利用SPSS Statistics (V19)软件对4个季节的营养盐与其他环境参数做Pearson相关性分析,均值差异性分析采用配对数据t检验, $P < 0.05$ 为显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子分布特征

四季表层海水DO含量为4.68-8.69 mg/L,冬季DO的平均含量高于其他季节(表1)。四季pH值为7.71-8.19,冬季最高,夏季及秋季最低。秋季叶绿素a平均浓度最高,达到 $(4.44 \pm 1.61) \mu\text{g/L}$ ,其次是夏季和春季,冬季最低,为 $(1.72 \pm 0.68) \mu\text{g/L}$ (表1)。

表 1 北部湾东北部海域环境因子的季节变化

Table 1 Seasonal variation of environmental factors in the northeast sea area of Beibu Gulf

季节 Seasons	溶解氧/(mg/L) DO/(mg/L)		pH 值 pH value		叶绿素 a/( $\mu\text{g/L}$ ) Chlorophyll a/( $\mu\text{g/L}$ )		表层海水温度/ $^{\circ}\text{C}$ SST/ $^{\circ}\text{C}$		盐度 Salinity	
	范围 Range	平均值 Average value	范围 Range	平均值 Average value	范围 Range	平均值 Average value	范围 Range	平均值 Average value	范围 Range	平均值 Average value
Autumn	5.25-7.19	6.66 $\pm$ 0.61	7.71-8.17	8.02 $\pm$ 0.12	2.28-7.33	4.44 $\pm$ 1.61	20.3-25.8	22.4 $\pm$ 2.5	25.91-30.85	29.16 $\pm$ 1.42
Winter	7.01-7.81	7.64 $\pm$ 0.20	7.89-8.19	8.13 $\pm$ 0.07	0.95-2.94	1.72 $\pm$ 0.68	16.4-17.4	16.8 $\pm$ 0.3	28.48-31.36	29.89 $\pm$ 0.94
Spring	6.75-8.69	7.35 $\pm$ 0.44	7.89-8.16	8.05 $\pm$ 0.07	1.03-3.82	2.33 $\pm$ 0.79	23.8-26.8	24.9 $\pm$ 0.9	29.82-32.22	31.17 $\pm$ 0.85
Summer	4.68-6.98	6.35 $\pm$ 0.68	7.82-8.10	8.02 $\pm$ 0.08	1.08-7.55	4.15 $\pm$ 1.71	30.1-31.6	30.6 $\pm$ 0.5	23.07-31.08	28.12 $\pm$ 2.23

秋季表层海水温度(SST)为 20.3-25.8  $^{\circ}\text{C}$ , 空间差异较大, 平均值为 (22.4 $\pm$ 2.5)  $^{\circ}\text{C}$  (表 1), 高温区位于铁山港湾内, 低温区主要位于调查海域的东南侧, 呈铁山港向东南部海域逐渐降低的趋势[图 2(a)]。冬、春、夏季表层海水温度分别为 16.4-17.4、23.8-26.8、30.1-31.6  $^{\circ}\text{C}$ , 平均值分别为 (16.8 $\pm$ 0.3)、(24.9 $\pm$ 0.9)、(30.6 $\pm$ 0.5)  $^{\circ}\text{C}$  (表 1), 整体表现为北高南低, 且有由铁山港、安铺港向西南部海域逐渐降低的趋势[图 2:(b)、(c)、(d)]。

秋季及冬季盐度分别为 25.91-30.85 和 28.48-31.36, 平均值分别为 29.16 $\pm$ 1.42 和 29.89 $\pm$ 0.94 (表 1), 最低盐度均位于铁山港湾内, 安

铺港附近盐度亦较低, 铁山港湾附近海域北低南高, 整个调查海域南部为东低西高的分布趋势[图 2:(e)、(f)]。春、夏季的盐度分别为 29.82-32.22 和 23.07-31.08, 平均值为 31.17 $\pm$ 0.85 和 28.12 $\pm$ 2.23 (表 1), 两季表层海水盐度具有相似的分布特征, 最低值均出现在英罗港及安铺港附近海域, 盐度等值线呈西北-东南走向[图 2:(g)、(h)]。上述现象主要是由于安铺港位于九洲江入海口附近, 铁山港内也有公馆河、白沙河、营仔河和名教河等小径流河流汇入, 夏季地表径流输入导致夏季盐度平均值明显低于其他季节, 四季表层盐度均表现为湾内/口低、开阔海域高的分布趋势。

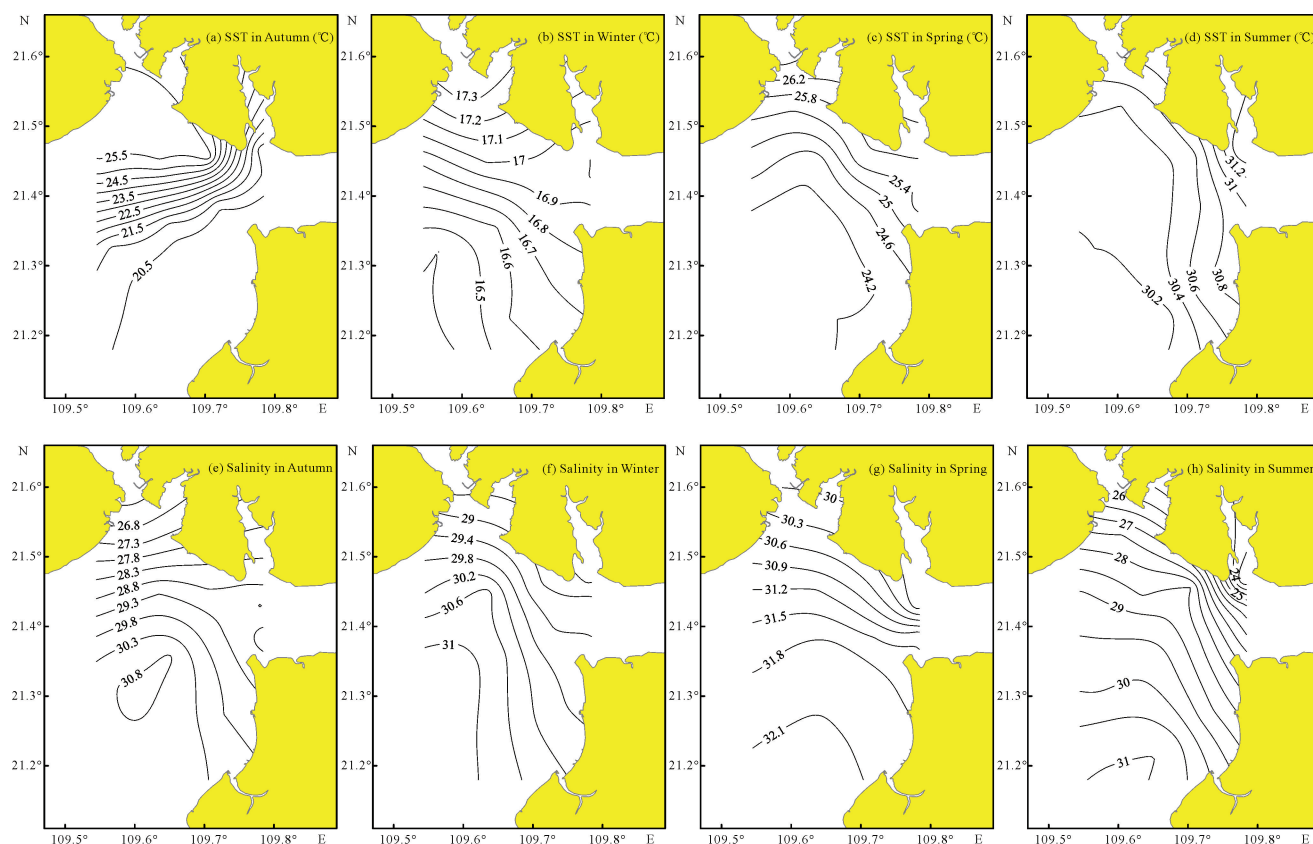


图 2 2017—2018年北部湾东北部海域环境因子变化

Fig. 2 Variation of environmental factors in northeast sea area of Beibu Gulf from 2017 to 2018

## 2.2 营养盐分布特征及季节变化情况

调查海域营养盐分布特征及季节变化情况如图3所示。秋、冬季 DIN 浓度分别为 2.50 - 16.89、1.50 - 8.35  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值分别为  $(8.32 \pm 4.30)$ 、 $(3.17 \pm 1.72)$   $\mu\text{mol/L}$ , DIN 浓度均由铁山港湾口海域向南部海域逐渐降低[图 3:(a)、(b)]。春季 DIN 浓度为 3.86 - 9.21  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为  $(7.03 \pm 1.65)$   $\mu\text{mol/L}$ , 高值区集中于铁山港湾口海域, 由北

向南部递减, 英罗港 DIN 分布与铁山港相近, 整个调查海域南半侧 DIN 等值线呈西北-东南走向, 东高西低, 最低浓度出现在调查海域西南侧海域[图 3(c)]。夏季 DIN 浓度为 2.36 - 28.63  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为  $(9.53 \pm 7.54)$   $\mu\text{mol/L}$ , 各站 DIN 含量差异较大, 空间分布与秋季、冬季相似[图 3(d)]。整体上 DIN 浓度的季节变化趋势为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季。



图3 2017-2018年北部湾东北部海域营养盐分布( $\mu\text{mol/L}$ )

Fig. 3 Distribution of nutrition concentration in the northeast sea area of Beibu Gulf from 2017 to 2018 ( $\mu\text{mol/L}$ )

秋、冬、春、夏季 SRP 浓度分别为 0.19 - 0.94、0.06 - 0.39、0.13 - 0.48 和 0.02 - 0.61  $\mu\text{mol/L}$ , 平均含量分别为  $(0.53 \pm 0.24)$ 、 $(0.18 \pm 0.10)$ 、

$(0.33 \pm 0.10)$  和  $(0.10 \pm 0.16)$   $\mu\text{mol/L}$ , 季节变化趋势为秋季 > 春季 > 冬季 > 夏季。其中, 冬季和春季的 SRP 浓度最高值均出现在英罗港及安铺湾口[图

3:(f)、(g)], 秋季和夏季最高浓度则出现在铁山港湾口[图 3:(e)、(h)]。

秋季 DSi 浓度为 8.15 - 18.19  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为  $(13.24 \pm 3.31) \mu\text{mol/L}$ 。秋季 DSi 浓度存在 2 个高值区, 最高值区位于安铺港湾口, 次高值区位于铁山港湾内, 浓度从安铺港及铁山港湾口向西南逐渐降低[图 3(i)]。冬季 DSi 浓度为 1.03 - 13.07  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为  $(3.77 \pm 2.97) \mu\text{mol/L}$ , 最高值位于铁山港湾口, 并向湾外和南部海域降低[图 3(j)]。春季 DSi 浓度为 4.02 - 13.03  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为  $(9.09 \pm 2.51) \mu\text{mol/L}$ , 最高浓度出现在调查海域北侧, 最低浓度出现在西南部海域[图 3(k)]。夏季 DSi 浓度为 2.78 - 17.09  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为  $(7.88 \pm 4.56) \mu\text{mol/L}$ , 其空间分布趋势与秋季相似, 即由安铺港及铁山港湾口向西南逐渐降低[图 3(l)]。DSi 浓度季节变化趋势为秋季 > 春季 > 夏季 > 冬季。

综合来看, 调查区域四季营养盐的整体分布趋势

均为近岸高、远岸低, 高值区主要集中于铁山港湾、英罗港及安铺港湾口, 低值区主要位于调查海域的西南侧, 不同季节略有差异。

### 2.3 营养盐结构变化

调查海域秋、冬、春季的 N/P 值分别为 16.5 - 35.0、8.7 - 38.7 和 16.8 - 30.4, 平均值分别为  $22.5 \pm 5.2$ 、 $20.3 \pm 7.9$  和  $22.4 \pm 4.1$  (表 2)。夏季 DIN 虽然与其他 3 个季节仍处于同一个数量级, 但是由于 SRP 含量较低, 部分站位 SRP 含量已接近检出限, 导致夏季的 N/P 值增大, 平均值为  $175.3 \pm 94.5$ , 远高于 Redfield 比值。因此, 调查海域四季的 N/P 平均值均高于 Redfield 比值, 其中以夏季最高; 硅磷比(Si/P)值与 N/P 值相似, 即 4 个季节的 Si/P 平均值均高于 Redfield 比值, 且夏季最高。四季硅氮比(Si/N)值未出现明显的波动, 秋季、冬季、春季、夏季平均值分别为  $2.0 \pm 0.9$ 、 $1.2 \pm 0.4$ 、 $1.3 \pm 0.2$  和  $1.0 \pm 0.3$  (表 2)。

表 2 北部湾东北部海域四季 N/P、Si/P、Si/N 值变化

季节 Seasons	N/P		Si/P		Si/N	
	范围 Range	平均值 Average value	范围 Range	平均值 Average value	范围 Range	平均值 Average value
Autumn	16.5 - 35.0	$22.5 \pm 5.2$	16.7 - 56.1	$28.8 \pm 11.4$	1.0 - 3.7	$2.0 \pm 0.9$
Winter	8.7 - 38.7	$20.3 \pm 7.9$	9.9 - 50.6	$22.5 \pm 10.2$	0.6 - 1.8	$1.2 \pm 0.4$
Spring	16.8 - 30.4	$22.4 \pm 4.1$	19.6 - 36.7	$28.8 \pm 5.6$	1.0 - 1.5	$1.3 \pm 0.2$
Summer	46.7 - 350.1	$175.3 \pm 94.5$	27.9 - 367.6	$171.9 \pm 95.0$	0.5 - 1.5	$1.0 \pm 0.3$

### 2.4 营养盐与其他环境因子的相关性

河口和近岸海域营养盐的分布受多种因素影响, 陆地径流输入是其中一个重要因素<sup>[12,15,16]</sup>。调查区域位于北部湾近岸海域, 四季 DIN、DSi 均与盐度显著负相关(表 3-6); SRP 在秋、冬、春季与盐度具有极显著的负相关关系, 而夏季不存在明显的相关性,

且夏季调查期间 SRP 平均含量为四季中的最低值, 接近检出限, 说明 SRP 的消耗速度大于补充速度。同时, 结合营养盐与盐度的空间分布结果, 营养盐的高值区主要位于盐度的低值区, 暗示陆源输入是影响调查海域营养盐分布的最主要因素, 但夏季 SRP 亦显著受生物消耗的影响。营养盐不仅受物理化学

表 3 秋季溶解态营养盐与环境因子的相关系数 ( $n = 14$ )

Table 3 Correlation coefficient between nutrition and environmental factors in autumn ( $n = 14$ )

参数 Parameters	盐度 Salinity	温度 Temperature	溶解氧 DO	pH	溶解无机氮 DIN	磷酸盐 SRP	硅酸盐 DSi	叶绿素 a Chlorophyll a
Salinity	1							
Temperature	-0.666 **	1						
DO	0.836 **	-0.890 **	1					
pH	0.882 **	-0.740 **	0.889 **	1				
DIN	-0.913 **	0.573 *	-0.728 **	-0.788 **	1			
SRP	-0.910 **	0.679 **	-0.744 **	-0.803 **	0.952 **	1		
DSi	-0.652 *	0.070	-0.320	-0.474	0.808 **	0.678 **	1	
Chl-a	0.205	-0.556 *	0.615 *	0.385	-0.167	-0.124	0.062	1

Note: \*\* indicates that the difference is extremely significant ( $P < 0.01$ ), \* indicates significant difference ( $P < 0.05$ ).

表4 冬季溶解态营养盐与环境因子的相关系数 ( $n = 14$ )Table 4 Correlation coefficient between nutrition and environmental factors in winter ( $n = 14$ )

参数 Parameters	盐度 Salinity	温度 Temperature	溶解氧 DO	pH	溶解无机氮 DIN	磷酸盐 SRP	硅酸盐 DSi	叶绿素 a Chlorophyll a
Salinity	1							
Temperature	-0.790 **	1						
DO	0.553 *	-0.636 *	1					
pH	0.624 *	-0.649 *	0.901 **	1				
DIN	-0.655 *	0.784 **	-0.815 **	-0.871 **	1			
SRP	-0.818 **	0.605 *	-0.314	-0.445	0.582 *	1		
DSi	-0.676 **	0.799 **	-0.936 **	-0.950 **	0.913 **	0.485	1	
Chl-a	-0.190	0.423	0.014	0.089	-0.040	0.214	0.087	1

Note: \*\* indicates that the difference is extremely significant ( $P < 0.01$ ), \* indicates significant difference ( $P < 0.05$ ).

表5 春季溶解态营养盐与环境因子的相关系数 ( $n = 14$ )Table 5 Correlation coefficient between nutrition and environmental factors in spring ( $n = 14$ )

参数 Parameters	盐度 Salinity	温度 Temperature	溶解氧 DO	pH	溶解无机氮 DIN	磷酸盐 SRP	硅酸盐 DSi	叶绿素 a Chlorophyll a
Salinity	1							
Temperature	-0.866 **	1						
DO	-0.509	0.560 *	1					
pH	0.661 *	-0.855 **	-0.393	1				
DIN	-0.668 **	0.711 **	0.368	-0.787 **	1			
SRP	-0.843 **	0.708 **	0.392	-0.651 *	0.820 **	1		
DSi	-0.610 *	0.705 **	0.416	-0.779 **	0.924 **	0.711 **	1	
Chl-a	-0.673 **	0.797 **	0.540 *	-0.790 **	0.829 **	0.728 **	0.815 **	1

Note: \*\* indicates that the difference is extremely significant ( $P < 0.01$ ), \* indicates significant difference ( $P < 0.05$ ).

表6 夏季溶解态营养盐与环境因子的相关系数 ( $n = 14$ )Table 6 Correlation coefficient between nutrition and environmental factors in summer ( $n = 14$ )

参数 Parameters	盐度 Salinity	温度 Temperature	溶解氧 DO	pH	溶解无机氮 DIN	磷酸盐 SRP	硅酸盐 DSi	叶绿素 a Chlorophyll a
Salinity	1							
Temperature	-0.913 **	1						
DO	0.612 *	-0.369	1					
pH	0.581 *	-0.350	0.909 **	1				
DIN	-0.753 **	0.541 *	-0.898 **	-0.910 **	1			
SRP	-0.508	0.299	-0.881 **	-0.904 **	0.909 **	1		
DSi	-0.875 **	0.757 **	-0.694 **	-0.701 **	0.904 **	0.737 **	1	
Chl-a	-0.234	0.375	-0.014	-0.202	0.118	-0.036	0.185	1

Note: \*\* indicates that the difference is extremely significant ( $P < 0.01$ ), \* indicates significant difference ( $P < 0.05$ ).

过程(如水团运输、形态转化、沉积等)的影响,而且与海洋中的各种生物过程密切相关<sup>[17,18]</sup>。春季是生物的生长期,无机态营养盐开始被吸收,此季的叶绿素 a 与温度、营养盐、DO 有明显的正相关性,说明在适

宜的温度、光照等生长条件下营养盐的存在有利于浮游植物的繁殖与生长,溶解氧随着浮游植物的快速增长而升高。

### 3 讨论

#### 3.1 营养盐限制因子

浮游植物在生长时按照一定比例吸收营养盐,因此海水中适宜的营养盐比例有利于浮游植物的吸收,反之则因某种元素的缺乏导致其生长繁殖受到限制。浮游生物体中的 C : N : P 比例接近恒定值 106 : 16 : 1<sup>[19]</sup>,而一些需要吸收 DSi 的硅藻类浮游植物生物体中的 Si : N : P = 16 : 16 : 1<sup>[20]</sup>。限制浮游植物生长的营养盐必须同时满足绝对限制和相对限制条件<sup>[21]</sup>,绝对限制法的阈值为 Si = 2  $\mu\text{mol/L}$ , DIN = 1  $\mu\text{mol/L}$ , P = 0.1  $\mu\text{mol/L}$ <sup>[22]</sup>;相对限制法判定规则如下:(1) Si/P 和 N/P 同时 > 22 时, P 为限制因子;(2) N/P < 10、Si/N > 1 时, N 为限制因子;(3) Si/P < 10 和 Si/N < 1 时, Si 为限制因子<sup>[23,24]</sup>。本研究夏季调查海域西南部区域站位 SRP 浓度低于 0.10  $\mu\text{mol/L}$ ,已经呈现 SRP 的绝对限制,而夏季 N/P 和 Si/P 均大于 22 (表 2),同时满足了绝对限制和相对限制条件,因此调查海域西南部区域在夏季主要受到 P 限制。杨静等<sup>[6]</sup>分析,1990—2014 年北部湾 N/P 统计结果长期大于 Redfield 比值,最高达 224,大部分区域处于 P 限制状态。总体而言,调查海域 N/P 和 Si/P 失衡,使得海洋生态对 SRP 变化十分敏感,一旦 SRP 含量发生剧烈变化,将导致营养盐结构产生变化,从而对调查海域的生态系统产生较大影响。

#### 3.2 影响因素分析

冬、春季调查站位所有 DIN 和 SRP 均符合第一类海水水质标准。秋、夏季调查海域各有 2 个和 4 个站位的 DIN 超出第一类海水水质标准,SRP 分别有 8 个和 1 个站位超出第一类海水水质标准,上述站位全部位于铁山港湾、安铺港和英罗港附近海域。秋季所有站位均符合第二类海水水质标准,而夏季铁山港附近 S7 号站位的 DIN 达到第三类海水水质标准,说明冬、春季调查海域的海水水质较好,随着陆地径流的输入,夏、秋季海水水质有所恶化。

本次调查海域 DIN 季节平均浓度均低于钦州湾、珍珠湾和廉州湾 3 个海湾相应季节的 DIN 浓度;夏季 SRP 平均浓度低于廉州湾、钦州湾和珍珠湾 (表 7),上述情况可能与陆地径流输入有关。钦州湾、珍珠湾、廉州湾入海河流的 DIN 浓度基本属四类或劣四类<sup>[15,29]</sup>,而铁山港附近的入海河流径流量较小,是广西六大港湾中入海径流相对较小的港湾<sup>[30]</sup>,

相对较少的径流量和营养盐输入<sup>[31]</sup>导致 DIN 营养盐水平低于其他海湾。而且,北部湾属于半封闭海湾,受陆源输入影响较大,其污染物扩散与近岸海域的水文特征密切相关:北部湾北部环流终年为气旋式<sup>[32]</sup>,由陆地径流输入的营养盐等物质在近岸海域自东向西输运,也可能是铁山港附近海域营养盐浓度较其他海湾低的原因。

表 7 北部湾近岸海域营养盐含量

Table 7 Content of nutrients in coastal areas of Beibu Gulf

Unit:  $\mu\text{mol/L}$

调查海域 Investigation sea area	调查时间 Investigation time	DIN	SRP	DSi
Lianzhou Bay	2007.08 <sup>[25]</sup>	9.85	0.30	-
	2009.08 <sup>[25]</sup>	9.77	0.29	-
Qinzhou Bay	2010.09 <sup>[26]</sup>	26.42	0.29	4.32
	2015.11 <sup>[10]</sup>	24.77	0.45	-
Zhenzhu Bay	2004 <sup>[27]</sup>	2.07	1.07	3.25
	2005 <sup>[27]</sup>	4.79	1.49	-
	2006 <sup>[27]</sup>	5.07	1.78	-
	2007 <sup>[27]</sup>	10.93	1.97	-
	2008 <sup>[27]</sup>	12.57	2.39	27.14
Tieshangang Bay	2008.08 <sup>[28]</sup>	19.28	0.32	44.87
	1983.07 <sup>[8]</sup>	1.58	0.55	45.44
	1984.01 <sup>[8]</sup>	0.27	0.32	7.37
	1996.12 <sup>[8]</sup>	1.44	0.12	9.39
	1997.07 <sup>[8]</sup>	5.37	0.40	12.31
	2008.03 <sup>[9]</sup>	10.13	0.17	13.64
	2008.07 <sup>[9]</sup>	14.04	0.75	31.32
	2008.10 <sup>[9]</sup>	7.76	0.12	18.86
	2017.11	8.32	0.53	13.24
	2018.01	3.17	0.18	3.77
	2018.04	7.03	0.33	9.09
	2018.08	9.53	0.10	7.88

2007—2009 年廉州湾海域<sup>[25]</sup>的 DIN 及 SRP 浓度变化不明显;2010—2015 年钦州湾<sup>[10,26]</sup>的 DIN 浓度变化不大,而 SRP 浓度升高;2004—2008 年珍珠湾<sup>[27,28]</sup>、1983—2008 年铁山港湾<sup>[8,9]</sup>营养盐浓度基本上呈现逐渐增大的趋势(表 7)。结合本次调查结果,铁山港湾附近海域 DIN、SRP 和 DSi 含量自 1983 年至 2018 年总体呈先升后降的趋势(表 7),可能得益于近年开展的节能减排、清洁生产活动,致使污染物排放减少,径流输入的营养盐浓度降低。

## 4 结论

(1)调查海域四季营养盐呈现近岸高、远岸低的分布趋势,高值区主要集中于铁山港、英罗港和安铺港湾口。秋、冬、春、夏季的 DIN 平均浓度分别为  $(8.32 \pm 4.30)$ 、 $(3.17 \pm 1.72)$ 、 $(7.03 \pm 1.65)$  和  $(9.53 \pm 7.54)$   $\mu\text{mol/L}$ ,夏季 DIN 含量最高;SRP 平均浓度分别为  $(0.53 \pm 0.24)$ 、 $(0.18 \pm 0.10)$ 、 $(0.33 \pm 0.10)$  和  $(0.10 \pm 0.16)$   $\mu\text{mol/L}$ ,SRP 的季节变化趋势为秋季>春季>冬季>夏季;DSi 平均浓度分别为  $(13.24 \pm 3.31)$ 、 $(3.77 \pm 2.97)$ 、 $(9.09 \pm 2.51)$  和  $(7.88 \pm 4.56)$   $\mu\text{mol/L}$ ,秋季最高,春季、夏季次之,冬季最低。

(2)调查期间 N/P 值均高于 Redfield 比值,尤其以夏季最高,平均值达到  $175.3 \pm 94.5$ 。夏季调查海域西南部区域 SRP 含量低于  $0.10 \mu\text{mol/L}$ ,且 Si/P 和 N/P 均大于 22,浮游植物生长可能受 SRP 限制。

(3)调查海域不同季节 DIN、DSi 均与盐度显著负相关,说明 DIN、DSi 主要受陆源输入影响,而夏季 SRP 与盐度无明显的相关性,且含量最低,表明其可能受陆源输入和生物活动消耗的共同影响。本次调查 DIN 季节平均浓度均低于钦州湾、珍珠湾和廉州湾 3 个海湾相应季节的 DIN 浓度,夏季 SRP 平均浓度低于上述 3 个海湾,DIN、SRP 和 DSi 浓度自 20 世纪 80 年代以来呈先升高后回落的趋势。

### 参考文献

- [1] BERNHARDT J R, LESLIE H M. Resilience to climate change in coastal marine ecosystems [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5(1): 371-392.
- [2] 刘军, 臧家业, 张丽君, 等. 黄海硅的分布与收支研究 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(1): 157-166.
- [3] TIAN R, LIN Q, LI D, et al. Atmospheric transport of nutrients during a harmful algal bloom event [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, 34: 101007.
- [4] QIU L, HUANG J, NIU W. Decoupling and driving factors of economic growth and groundwater consumption in the coastal areas of the Yellow Sea and the Bohai Sea [J]. *Sustainability*, 2018, 10(11): 4158.
- [5] 陈波, 竺利波. 广西海洋科学研究回顾与展望 [J]. *广西科学*, 2018, 25(1): 1-9, 14.
- [6] 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.
- [7] 郑华敏, 张建兵, 周游游, 等. 广西海洋环境与沿海经济发展的关系 [J]. *广西科学院学报*, 2017, 33(3): 200-208.
- [8] 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, 21(5): 69-74.
- [9] 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.
- [10] 覃仙玲, 陈波. 广西沿海赤潮多发区高浓度氮磷营养元素来源探讨 [J]. *广西科学院学报*, 2018, 34(3): 222-227.
- [11] 庞敏倩. 防城港湾连续 10 年海水水质变化及其影响因素分析 [J]. *广西科学院学报*, 2021, 37(1): 29-36.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 李斌, 谭趣孜, 李蕾鲜, 等. 2014 年北部湾主要河流污染状况及污染物入海通量 [J]. *广西科学*, 2018, 25(2): 172-180.
- [16] 侍茂崇, 陈妍宇, 陈波, 等. 2007 年夏季北部湾生态与环境要素分布规律研究 [J]. *广西科学*, 2019, 26(6): 614-625.
- [17] 阚文静, 张秋丰, 石海明, 等. 近年来渤海湾营养盐变化趋势研究 [J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(2): 238-241.
- [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] REDFIELD A C, KETCHUM B H, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition of seawater [M]// HILL M N. *The sea: ideas and observations on progress in the study of the seas*. New York: Wiley Interscience, 1963: 26-77.
- [20] 赵卫红, 焦念志, 赵增霞. 烟台四十里湾养殖水域营养盐的分布及动态变化 [J]. *海洋科学*, 2000, 24(4): 31-34.
- [21] 杨东方. 浮游植物的生态与地球生态系统的机制 [M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [22] 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: 51-63.
- [23] JUSTIC D, RABALAIS N N, TURNER R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 30(1): 41-46.
- [24] DOTCH Q, WHITLEDGE T E. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? [J]. *Continental Shelf Research*, 1993, 12(11): 1293-1309.



- [25] 李利. 廉州湾海域生态系统健康评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [26] 杨斌, 钟秋平, 鲁栋梁, 等. 钦州湾秋季营养盐分布特征及营养状态分析研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(12): 40-44.
- [27] 蒙珍金, 覃盈盈, 何祥英, 等. 珍珠湾海水增殖区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.
- [28] 蒙珍金, 覃盈盈. 珍珠湾海域水环境状况与评价[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(30): 14845-14847.
- [29] 劳齐斌, 刘国强, 申友利, 等. 北部湾入海河流营养盐的分布特征及入海通量研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(12): 93-100.
- [30] 何本茂, 韦蔓新. 铁山港湾水体自净能力及其与环境因子的关系初探[J]. 海洋湖沼通报, 2006, 3: 21-26.
- [31] 韦利珠. 九洲江广西流域水功能区水环境质量分析及保护治理探讨[C]//广西水利学会2015年学术年会暨水文水资源学术讨论会论文集. [出版地不详: 出版者不详], 2016: 166-172.
- [32] 夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风生流及密度流模拟[J]. 海洋学报, 2001, 23(6): 11-23.

## Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Nutrients in the Northeastern Beibu Gulf from 2017 to 2018

SHI Huaming<sup>1,2</sup>, WANG Xiang<sup>1,2</sup>, MA Yu<sup>1,2\*\*</sup>, CAI Yucan<sup>1,2</sup>, XU Xin<sup>1,2</sup>

(1. South China Sea Marine Survey and Technology Center, State Oceanic Administration, Guangzhou, Guangdong, 510300, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou, Guangdong, 510300, China)

**Abstract:** The concentration of nutrients in coastal waters was significantly influenced by factors such as human activities and natural conditions, and would cause a certain degree of interference to marine ecosystems. Based on the data of dissolved nutrient and other environmental parameters obtained in autumn, winter, spring and summer in the northeastern Beibu Gulf from 2017 to 2018, the spatial and temporal distribution, structural characteristics and changing trend of dissolved nutrients in the sea area were analyzed, and the limiting factors of nutrients in the sea area were discussed. The results showed that the distribution of dissolved nutrients was characterized by high in the coastal area and low in the offshore area, and the high-value areas were mainly concentrated in the Tieshangang Bay and the sea area near Yingluogang and Anpugang. The concentration of Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN) was 1.50 – 28.63  $\mu\text{mol/L}$ , with the highest content in summer. The average concentrations of Reactive Phosphate (SRP) and Dissolved Silicate (DSi) were the highest in autumn. The annual concentration of SRP was 0.02 – 0.94  $\mu\text{mol/L}$ , and the content of DSi was 1.03 – 18.19  $\mu\text{mol/L}$ . The DIN and DSi in the survey area were greatly affected by terrestrial input. The consumption rate of SRP in summer was greater than the input rate, resulting in lower SRP concentration in summer. The values of N/P and Si/P were higher than the Redfield ratio, and the average value of N/P in summer was  $175.3 \pm 94.5$ . SRP was the main nutrient limiting factor in the sea area. The seasonal average concentration of DIN in the survey area was lower than that in Qinzhou Bay, Zhenzhu Bay and Lianzhou Bay. The average concentration of SRP in summer was lower than that in Lianzhou Bay, Qinzhou Bay and Zhenzhu Bay. Since the 1980s, the nutrient concentration in Tieshangang Bay had shown a trend of increasing first and then decreasing.

**Key words:** Beibu Gulf; nutrients; spatio-temporal variation; environmental factors

责任编辑: 米慧芝