

## 廉州湾五项营养盐变化与环境因子的关系 The Relation of Change of Five Nutrients and Environmental Factors in Lianzhou Bay

赖廷和 韦蔓新  
Lai Tinghe Wei Manxin

(广西海洋研究所 北海 536000)  
(Guangxi Institute of Oceanography, Beihai, 536000)

**摘要** 根据1996年12月及1997年7月调查廉州湾的资料,分析廉州湾水域五项营养盐: $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的含量分布特征,并对五项营养盐与其它环境因子之间进行相关分析。结果表明:廉州湾水域 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 均具有丰水期明显高于枯水期的分布特征, $\text{NH}_4\text{-N}$ 则与此相反。影响枯水期营养盐含量的主要因素是以江河径流影响为主,沿岸排污和水体自身再生补充影响为辅;但在丰水期,只有 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 与盐度之间呈良好负相关关系(相关系数分别为 $r = -0.805$ 和 $r = -0.766$ ,  $n = 7$ ),其它三项营养盐与盐度及其它环境因子均呈不相关关系,体现出暴雨后径流与沿岸排污综合影响的结果。

**关键词** 营养盐 分布特征 环境因子

中图分类号 P734.44; X131.2

A

**Abstract** The distribution of contents of five nutrients is analyzed based on the investigation of December 1996 and July 1997 in Lianzhou Bay of Guangxi. The correlation analysis of the five nutrients (including  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ ) and environmental factors is conducted. The contents of  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$  and  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  in high water discharge period are higher than that in low water discharge period, and reverses for  $\text{NH}_4\text{-N}$ . The river runoff is the key factor affecting the contents of nutrients in low water discharge period. The sewage from shore and water self-recycle also have some influence. In high water discharge period, there is good negative correlativity of  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  to salinity ( $r = -0.805$ ,  $r = -0.766$ , respectively,  $n = 7$ ), and no correlativity of  $\text{PO}_4^-$  and  $\text{SiO}_3^-$  to salinity. The results reveal the joint influence of runoff after heavy raining and swcage drainage from shore land.

**Key words** nutrients, distribution, environmental factors

N、P、Si 等是海洋生物所必需的营养成份,是浮游植物生长的主要生源要素,其生物地球化学循环对生态系统具有至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。由于廉州湾周边属人口密度较大、工农业比较发达的地区。随着合浦、北海经济的迅速发展,城乡生活污水和工业废水的排放量增加,大量陆源污染物随南流江径流携带入海,加上海湾近岸大面积的养殖业所产生的养殖污染物,使该湾水质污染日趋严重。为了更好地了解和保护廉州湾的水域生态环境,本文根据1996年12月和1997年7月对该海区的调查资料,研究廉州湾五项营养盐含量的分布特征,并着重探讨其与其它环境因子的关系。

## 1 廉州湾环境特征

廉州湾(108°58'00"至109°02'35"E, 21°26'20"至21°37'00"N)地处北部湾顶,为断陷河口湾。该湾大部分区域水深较浅,滩涂面积约100 km<sup>2</sup>。廉州湾地区为典型的南亚热带海洋性季风气候,年平均气温22.5℃,历年平均降雨量1682.7 mm,蒸发量1780.7 mm。平均相对湿度81.5%。廉州湾潮汐为正规全日潮,平均潮差2.46 m,最大潮差5.36 m。本次采样前2周,适逢广西南部遭到30年一遇的大范围暴雨,正是江河行洪期,湾内水体比较混浊。

## 2 调查资料

在廉州湾进行2个航次的调查时间为1996年12月和1997年7月,分别代表枯水期和丰水期,枯水期布设6个测站(比丰水期少02号站),丰水期布设7个站(见图1)。所采集水样均为表层水。测定的指标包括五项营养盐及环境因子(水温、盐度、pH值、DO、COD、Chl-a)。水样的采集和分析方法均按《海洋监测规范》<sup>[4]</sup>进行。

## 3 结果分析

### 3.1 营养盐的分布特征

#### 3.1.1 无机氮

该水域溶解无机氮(DIN)的分布具有明显的河口区域特征,随地表水的增减呈显著的季节变化。调查结果(表1)显示,在枯水期,DIN含量较低,变化为54.79~170.44 μg/L,平均97.56 μg/L,变化幅度为115.65 μg/L,最高值出现在该湾中部04号站,03号站次高,05、07号站最低。丰水期由于雨量比较充沛,大量农业用肥料在雨水冲刷下流失并经南流江径流携带入海,加上北海市近期普降暴雨,使N的人海量显著增加,DIN明显高于枯水期,平均值高达424.05 μg/L,变化幅度为789.85 μg/L。其中03号站含量最高,01、02、04、06号站次之,07、05号站最低。

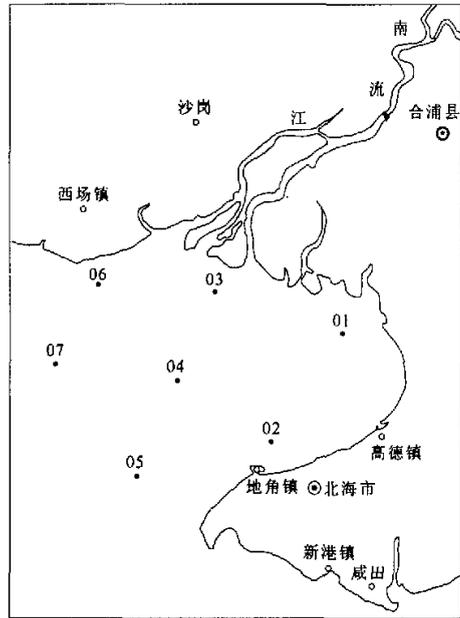


图1 调查站位

表 1 廉州湾营养盐含量分布

| 站位   | NO <sub>3</sub> -N/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ |        | NO <sub>2</sub> -N/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ |       | NH <sub>4</sub> -N/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ |       | DIN/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ |        | PO <sub>4</sub> -P/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ |       | SiO <sub>3</sub> -Si/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ |         |
|------|---|--------|---|-------|---|-------|--|--------|---|-------|---|---------|
|      | 枯水期   | 丰水期    | 枯水期   | 丰水期   | 枯水期   | 丰水期   | 枯水期                                    | 丰水期    | 枯水期   | 丰水期   | 枯水期   | 丰水期     |
| 01   | 50.08   | 522.26 | 2.21  | 8.89  | 35.68   | 12.33 | 87.97                                  | 543.48 | 7.0   | 18.49 | 421.6   | 2 969.5 |
| 02   | \   | 308.51 | \   | 11.13 | \   | 15.69 | \                                      | 335.33 | \   | 10.35 | \   | 1 747.7 |
| 03   | 92.89   | 858.33 | 2.66  | 12.82 | 22.66   | 14.00 | 118.21                                 | 885.15 | 3.50  | 20.81 | 673.4   | 3164.9  |
| 04   | 70.46   | 406.84 | 2.15  | 7.34  | 87.83   | 18.81 | 170.44                                 | 432.99 | 5.50  | 15.00 | 570.6   | 1 747.7 |
| 05   | 33.27   | 68.81  | 1.31  | 3.55  | 20.21   | 29.22 | 54.79                                  | 101.58 | 6.50  | 8.02  | 265.6   | 809.2   |
| 06   | 74.12   | 533.07 | 1.76  | 11.41 | 23.18   | 30.02 | 99.06                                  | 574.50 | 2.50  | 20.81 | 595.4   | 2 460.4 |
| 07   | 37.20   | 66.78  | 1.31  | 0.74  | 16.40   | 27.78 | 54.91                                  | 95.30  | 3.50  | 10.35 | 393.3   | 736.2   |
| 平均值  | 59.67   | 394.94 | 1.90  | 7.98  | 35.99   | 21.12 | 97.56                                  | 424.05 | 4.75  | 14.83 | 486.6   | 1 947.9 |
| 变化幅度 | 59.62   | 790.55 | 1.35  | 12.08 | 81.43   | 17.69 | 115.65                                 | 789.85 | 4.50  | 11.79 | 407.8   | 2 428.7 |

在无机氮中,以 NO<sub>3</sub>-N 含量较高, NH<sub>4</sub>-N 次之, NO<sub>2</sub>-N 含量较低,但随着季节的变化,各态氮具有明显不同的分布特征。在枯水期 NO<sub>3</sub>-N 变化范围 33.27~92.89  $\mu\text{g/L}$ , 平均 59.67  $\mu\text{g/L}$ , 变化幅度 59.62  $\mu\text{g/L}$ , 位于南流江口的 03 号站含量最高, 平面分布以南流江口海域较高, 往西南呈明显的递减趋势; 丰水期随着陆源水剧增, NO<sub>3</sub>-N 含量上升至 66.78~858.33  $\mu\text{g/L}$ , 平均值 394.44  $\mu\text{g/L}$ , 比枯水期高 5 倍多; 最高值仍出现在 03 号站, 最低值出现在 07 号站, 呈南流江口明显高于西南部海域的分布特征。NO<sub>2</sub>-N 的含量分布与 NO<sub>3</sub>-N 相似, 枯水期含量明显低于丰水期; 前者呈北高南低, 后者呈内高外低的分布特征, 一方面说明 NO<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>2</sub>-N 有较好的同源性, 另一方面则说明 NO<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>2</sub>-N 的供应源, 枯水期突出体现南流江水的主导控制作用, 丰水期由于调查期间正值行洪期, 来源于雨水中的 N 和陆源排污的 N 显著增加, 在异常充沛的地表水和潮流的直接影响下, 廉州湾近岸海域的盐度值明显偏低, 从而使整个内湾出现低盐高 N, 外湾西南部海域出现明显的高盐低 N 特征分布。显然, 本季度月 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 的含量分布是江河径流、暴雨后的陆源输送及潮汐作用综合影响的结果。而作为海水中有有机氮分解第一个产物的 NH<sub>4</sub>-N, 无论是在量值上还是在分布趋势上均与 NO<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>2</sub>-N 明显不同。其特点主要表现在, 枯水期 NH<sub>4</sub>-N 的含量明显高于丰水期, 与 NO<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>2</sub>-N 恰好相反; 在平面分布上, 枯水期在湾中部 04 号站含量最高, 内湾 01、02 号站次之, 外湾 07 号站最低分布趋势。说明潮流作用下水体中有机物的氧化分解对 NH<sub>4</sub>-N 的含量具有重大影响, 而合浦、北海沿岸的排污、排废影响则占次要地位。丰水期 NH<sub>4</sub>-N 的含量呈现出外湾明显高于内湾的分布趋势, 突出体现水体自身 NH<sub>4</sub>-N 的再生影响作用, 而南流江水的输送和普降暴雨后的陆源补充对 NH<sub>4</sub>-N 的含量影响不大。

以上结果表明, 三态无机氮的分布和变化既有相似性, 也有差异性, 主要表现在氮源的供应和补充途径上, 它们在比例组成上的变化同样也体现了如此特征。从三态氮的含量变化中我们可以看出, NO<sub>3</sub>-N 含量最高, 是本水域无机氮的主要形式, NH<sub>4</sub>-N 次之, NO<sub>2</sub>-N 最低, 但随着季节的变化, 它们占无机氮的比例差值较大, 枯水期分别为 61%、37% 和 2%; 丰水期则分别为 93%、5% 和 2%。前者 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> % 的明显下降和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> % 的明显上升, 与该季度月雨水较少, N 的供应源无论是水体自身补充还是陆源输入均突出表现有机态氮氧化分解作用的影响; 后者 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> % 的显著上升和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> % 的显著下降, 一方面与该季度月暴雨携带大量的无机态 N<sup>[1]</sup> 随南流江径流输入海有关, 另一方面则与该季度月温度较高, 由陆源排入的有机

物在高温下迅速氧化分解,使三态氮的转化率显著上升有关。

### 3.1.2 无机磷和活性硅

从表 1 可以看出,枯水期  $PO_4-P$  含量较低,变化为  $2.5\sim 7.0\ \mu\text{g/L}$ ,平均  $4.75\ \mu\text{g/L}$ ,变化幅度  $4.50\ \mu\text{g/L}$ ,以合浦至北海近岸海域  $PO_4-P$  含量较高,由此向西北呈明显的梯度递减趋势,南流江口以西海域  $PO_4-P$  含量最低,说明本季度月无机磷的供应源主要受合浦、北海的沿岸排污影响为主,南流江径流在 P 的供应方面显得比较缺乏。丰水期  $PO_4-P$  含量显著上升,其变化为  $8.02\sim 20.81\ \mu\text{g/L}$ ,平均  $14.83\ \mu\text{g/L}$ ,变化幅度  $11.79\ \mu\text{g/L}$ ,最高值出现于南流江口 03、06 号站,最低值出现在 05 号站,呈南流江口向西南梯度明显递减趋势,主要体现了陆源径流的影响。

表 1 中枯水期  $SiO_3-Si$  含量变化为  $265.6\sim 673.4\ \mu\text{g/L}$ ,平均  $486.6\ \mu\text{g/L}$ ,变化幅度  $407.8\ \mu\text{g/L}$ ,最高值出现在南流江口的 03 号站,由此向南呈递减趋势,等值线呈弓形由西北向东南延伸,体现了南流江水的主导控制作用。丰水期  $SiO_3-Si$  变化为  $736.2\sim 3164.9\ \mu\text{g/L}$ ,平均  $1947.9\ \mu\text{g/L}$ ,变化幅度  $2428.7\ \mu\text{g/L}$ ;最高值也出现在江口的 03 号站,次高值则出现在 01、06 号测站,其余测站 Si 含量明显偏低,尤以 05、07 号站最为明显。说明本季度月 Si 的含量分布是受南流江径流影响为主,合浦、北海陆源输送影响为辅。

综上所述,廉州湾无机 P 和活性 Si 的分布特性,既体现南流江径流的重大贡献作用,也体现沿岸排污的重要影响作用。

### 3.2 营养盐与环境因子的关系

相关分析结果表明,廉州湾水域五项营养盐与环境因子之间的关系以枯水期表现得比较密切,在五项营养盐中,  $NO_3^-$ 、 $NO_2^-$  和  $SiO_3^{2-}$  与盐度和 COD 之间均具有明显的负相关趋势,尤以  $SiO_3^{2-}$  的相关性最好(相关系数分别为  $r = -0.884$  和  $r = -0.852, n = 6$ ),置信水平均在 95% 以上;  $NO_3^-$  和  $NO_2^-$  与盐度之间的相关系数略差( $r = -0.765$  和  $r = -0.615, n = 6$ ),但已接近 95% 的置信水平,而与 COD 的负相关性则较好,尤以  $NO_2^-$  较为显著(相关系数分别为  $r = -0.884$  和  $r = -0.959, n = 6$ );

$NH_4^+$  与各因子之间均没有相关性。说明本季度月陆源径流对营养盐含量的影响以  $SiO_3^{2-}$  最大,其次为  $NO_3^-$  和  $NO_2^-$ ,对  $NH_4^+$  的影响最小;而

营养盐与 COD 的负相关影响作用则以  $NO_2^-$  为大,  $NO_3^-$  和  $SiO_3^{2-}$  次之,  $NH_4^+$  最小。  $PO_4^{3-}$  含量与各因子之间的关系以与 pH 值的正相关关系最好( $r = 0.852, n = 6$ ),而与盐度之间则表现出明显的正相关趋势( $r = 0.570, n = 6$ ),说明本季度月南流江的径流输入对磷含量的影响不大,而合浦、北海沿岸生活污水的排入使沿岸海域磷含量升高的同时,也促进浮游植物的繁殖和生长,这从该海域叶绿素 a 含量高达  $1.39\sim 1.44\ \text{mg/m}^3$  的结果中得以证明。浮游植物繁盛,使光合作用加强、 $CO_2$  下降的同时, pH 值明显上升,从而使该海域出现  $PO_4^{3-}$  与 pH 值之间良好正相关关系。在丰水期,调查期间正值行洪期,陆源径流补充量大,但五项营养盐

表 2 营养要素间的相关系数

| 相关因子                  | 冬季     | 夏季     | 相关因子                     | 冬季     | 夏季     |
|-----------------------|--------|--------|--------------------------|--------|--------|
| $NO_3^- - NO_2^-$     | 0.824  | 0.853  | $NO_2^- - PO_4^{3-}$     | -0.009 | 0.710  |
| $NO_3^- - NH_4^+$     | 0.249  | -0.588 | $NO_2^- - SiO_3^{2-}$    | 0.764  | 0.848  |
| $NO_3^- - PO_4^{3-}$  | -0.493 | 0.906  | $NH_4^+ - PO_4^{3-}$     | 0.309  | -0.336 |
| $NO_3^- - SiO_3^{2-}$ | 0.972  | 0.950  | $NH_4^+ - SiO_3^{2-}$    | 0.282  | -0.647 |
| $NO_2^- - NH_4^+$     | 0.334  | -0.547 | $PO_4^{3-} - SiO_3^{2-}$ | -0.595 | 0.905  |

注: 枯水期  $r_{0.05} = 0.811, r_{0.01} = 0.917, n = 6$ ; 丰水期  $r_{0.05} = 0.754, r_{0.01} = 0.874, n = 7$ 。

与盐度间的相关关系均达不到显著 ( $\alpha = 0.01$ ) 水平。唯有  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  与盐度呈良好负相关关系 (相关系数分别为  $r = -0.805$  和  $r = -0.766, n = 7$ ), 其它三项与环境因子均不相关。显然, 丰水期营养盐的含量受陆源排污的影响也较大。

### 3.3 营养要素间的相互关系

从表2可看出, 五项营养盐之间具有密切的关系, 其密切程度随季节而改变。在枯水期, 以  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{SiO}_3^{2-}$  之间的正相关关系最为显著, 其次是  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  与  $\text{SiO}_3^{2-}$  的相关性略差,  $\text{NH}_4^+$  与四项营养盐之间仅显示出正相关趋势; 而  $\text{PO}_4^{3-}$  与  $\text{SiO}_3^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  之间则表现出明显的负相关趋势。这说明  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{SiO}_3^{2-}$  和  $\text{NO}_2^-$  之间以及  $\text{NO}_2^-$  与  $\text{SiO}_3^{2-}$  之间具有较好的同源性;  $\text{NH}_4^+$  与四项营养盐的同源性较差; 而  $\text{PO}_4^{3-}$  与  $\text{SiO}_3^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  之间则没有同源性。在丰水期, 五项营养盐之间的关系较枯水期密切, 其中  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}$  之间以及  $\text{PO}_4^{3-}$  与  $\text{SiO}_3^{2-}$  之间的正相关关系最为显著, 置信水平均在99%以上;  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NO}_2^-$  之间以及  $\text{NO}_2^-$  与  $\text{SiO}_3^{2-}$  之间也呈良好的正相关关系, 置信水平均在95%以上; 只有  $\text{NH}_4^+$  与四项营养盐均呈明显负相关关系, 说明本季度月五项营养盐中有四项具有很好的同源性, 间接说明陆源输入对四项营养盐的重大贡献, 而  $\text{NH}_4^+$  则以水体自身的再生补充为主。

## 4 结束语

(1) 廉州湾水域五项营养盐的含量分布具有明显的河口区域特征, 其中  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 和  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 含量均表现为丰水期明显高于枯水期, 变化幅度也是丰水期远大于枯水期;  $\text{NH}_4^+$ -N 则与此相反。说明前者以陆源输入为主, 后者则以水体自身的再生补充为主。

(2) 相关分析结果表明, 本水域五项营养盐与环境因子之间的关系以枯水期表现得较为密切, 其中  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}$  与 COD 之间、 $\text{SiO}_3^{2-}$  与盐度之间均具有良好的负相关关系, 而  $\text{PO}_4^{3-}$  与环境因子的良好相关性只表现在与 pH 的正相关关系上, 体现了江河径流、沿岸排污和生物作用的综合影响; 丰水期除  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  与盐度呈良好正相关关系外, 其余三项营养盐与环境因子之间均呈不相关关系, 突出了暴雨后沿岸排污及径流的综合影响作用。

(3) 五项营养盐之间具有密切的关系, 枯水期以  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{SiO}_3^{2-}$  的正相关关系最为显著, 与  $\text{NO}_2^-$  的关系次之; 丰水期则以  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}$  的正相关关系最为显著,  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NO}_2^-$  之间以及  $\text{NO}_2^-$  和  $\text{SiO}_3^{2-}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  与  $\text{SiO}_3^{2-}$  之间的正相关关系次之, 说明它们之间具有很好的同源性。

## 参考文献

- 1 张正斌, 顾宏堪, 刘莲生等. 海洋化学. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 220~323.
- 2 宋金明, 罗延馨, 李鹏程. 渤海沉积物—海水界面附近磷和硅的生物地球化学循环模式. 海洋科学, 2000, 24(12): 30~32.
- 3 韦蔓新, 董万平, 赖廷和等. 铁山港湾生原要素的变化特征及其影响因素. 海洋湖沼通报, 2001, (4): 23~27.
- 4 国家海洋局. 海洋监测规范. 北京: 海洋出版社, 1991.
- 5 陈水土. 台湾海峡上升流区氮、磷、硅的化学特性及输送通量估算. 海洋学报, 1996, 18(3): 36~44.

(责任编辑: 邓大玉)