

# 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

何本茂, 韦蔓新

(广西红树林研究中心, 广西红树林保护重点实验室, 广西北海 536000)

**摘要:** 根据北海湾 1995~2004 年 10a 间 8 个航次的调查资料, 分析研究了该湾溶解无机氮的含量变化及其与环境因子的关系。结果表明: 该湾溶解无机氮(DIN)含量具有春夏季较高、秋冬季较低的变化特点, 突出了南流江径流的重贡献作用; 在 DIN 中, 所有航次均具有  $\text{NO}_3^-$  含量较高、 $\text{NH}_4^+$  含量次之、 $\text{NO}_2^-$  含量最低的分布特征, 而且除 2004 年秋季外,  $\text{NO}_3^-$  所占 DIN 的比值均在 63.38% 以上, 已成为该湾 DIN 的主要存在形式; 通过不同时期的对比分析, 得出该湾 DIN 具有春秋季节显著上升、冬夏季显著下降的变化规律, 增养殖排废起主导影响作用; 相关分析显示, DIN 与环境因子之间的相关性, 以与盐度出现的机率最多、显著性也最高, 与 COD 的相关性次之, 与其余环境因子的相关性依次排列为  $\text{pH} > \text{DO} > \text{Chl.a}$ , 与 3 种形态氮之间则以  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  最为密切, 7 个航次达到了显著正相关水平, 而与  $\text{NH}_4^+$  的显著正相关只出现在径流影响较小的秋冬季节。

**关键词:** 溶解无机氮; 含量变化; 环境因子; 组成比例

中图分类号: TS205.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2012)02-0096-07

北海湾(亦称廉州湾)是广西沿海六大海湾中受江河径流、沿岸排污和增养殖等人类活动影响最大的半封闭型海湾, 生态体系较为复杂, 尤其近 10a 来, 随着北海经济大开发热潮的兴起, 来源于城乡生活排污及工业、增养殖业排废的数量明显增多, 海湾生态环境的负荷日趋严重, 赤潮发生呈加重趋势。溶解无机氮作为海洋浮游植物繁殖生长所必需的重要营养盐、海湾富营养化及诱发赤潮的重要环境因子、反映海湾水体自净效果的重要指标, 其量值的变化与分布在海湾生态环境的演化过程中扮演了重要的角色<sup>[1-8]</sup>, 基于北海湾在广西沿海经济开发中的重要作用, 本文主要根据溶解无机氮的含量变化及其与环境因子的关系, 探讨该湾近 10a 来溶解无机氮的演化规律及其影响因素, 旨在了解该湾溶解无机氮的演化对海湾生态环境的影响, 希望能对评估该湾的生态环境演变、制订切实可行的环境保护措施提供理论参考。

## 1 材料来源与分析

本文所用资料分别选自 1995 年 3 月; 1996 年 12 月、1997 年 7 月; 1998 年 10 月、1999 年 1 月、4 月、8 月和 2004 年 11 月 8 个航次的调查分析结果, 分别代表北海湾开发盛期 4 个不同阶段的水环境特征。文中所涉及的分析项目(S、pH、DO、COD、Chl.a、

$\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ )均按《海洋调查规范》、《海洋监测规范》中的分析方法进行。调查站位见图 1。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同阶段溶解无机氮(DIN)的特征分布及其变化趋势

由于溶解无机氮包含了  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  三种不同的形态氮, 其含量的变化除取决于环境条件及季节变化的影响外, 还受制于水体中各种物理、化学和生物等环境因子的变化及其相互转化的速率。由表 1 结果可知, 北海湾近 10a 来 DIN 的含量变化较大, 其平均变化范围为 1.27~30.29  $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 南流江径流影响较大的春夏季节 DIN 的含量较高, 影响较小的秋冬季节 DIN 含量较低, 从直观上突出体现了陆源输入的影响作用。但在不同阶段的不同季节, DIN 的含量变化差异较大, 春秋季节 DIN 含量均呈上升趋势, 但以春季为甚, 而在冬夏季节, 则均呈下降趋势, 尤以冬季最为显著。其特征分布随着时间和环境条件的不同亦显示出明显差异。

收稿日期: 2010-11-12; 修回日期: 2011-02-20

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201005012)

作者简介: 何本茂(1953-), 男, 广西合浦人, 副研究员, 主要从事海洋化学研究, 电话: 0779-2052174, E-mail: hbmwx@163.com

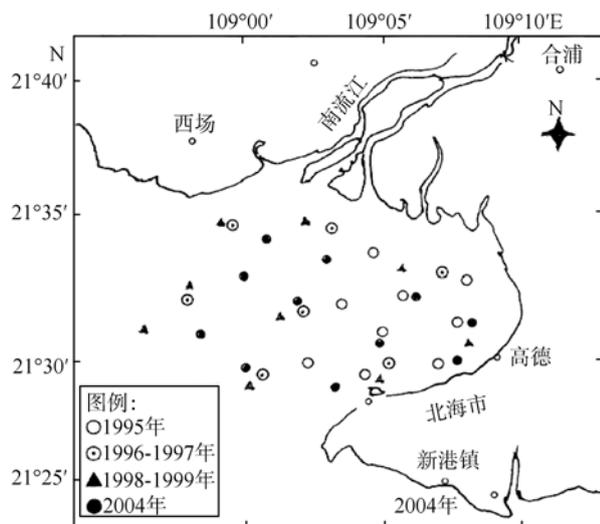


图 1 调查站位

Fig. 1 Sampling stations

1995 年是北海市进入经济大开发最有代表性的年份, 从春季的调查结果可知, 该季度月的 DIN 含量居中, 平均值为  $15.54 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 变化范围在  $7.14\sim 29.43 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  之间, 高值区均出现于径流影响最大的南流江口海域, 并具有随盐度升高而下降的梯度变化趋势, 显示了南流江径流的重大影响作用。但此时作为营养盐消费者——表征浮游植物生物量的 Chl.a 含量却除个别测站外均在  $1.24\sim 1.73 \text{mg}/\text{m}^3$  之间, 平均值已位于 10a 间的次高值。说明该季度月 DIN 的含量分布, 除受南流江径流的输入影响外, 尚与浮游植物大量吸收消耗有关。在 DIN 中, 以  $\text{NO}_3^-$  含量较高、 $\text{NH}_4^+$  含量次之、 $\text{NO}_2^-$  含量最低, 分别占 DIN 的 64.03%、32.05% 和 3.47%, 其中  $\text{NO}_3^-$  占 DIN 比值 ( $R(\text{NO}_3^-)$ , 下同) 以 10a 间的较低值出现, 而  $R(\text{NH}_4^+)$  则以较高值出现, 真实地反映了北海湾首次发生微囊藻 (Microcystis) 赤潮前夕的水环境状况<sup>[4]</sup>。1999 年春季, 虽然水体的盐度值以略低于 1995 年春季的状况出现, 但水体中 DIN 的平均含量却高达  $26.23 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 比 1995 年春季升高了 0.7 倍, 变化范围高达  $5.53\sim 69.54 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 高值区仍然出现于南流江口海域, 具有随盐度升高而下降的梯度变化趋势, 与 1995 年春季的分布较为一致, 但该季度月 Chl.a 的平均含量却明显低于 1995 年, 与 DIN 的含量变化相呼应。如此看来, 该季度月 DIN 含量的明显上升, 除沿岸增养殖排废的补充影响外, 尚与

浮游植物生物量明显下降, 对 DIN 的吸收消耗明显减少有关。该季度月的 DIN, 虽然仍以  $\text{NO}_3^-$  含量较高、 $\text{NH}_4^+$  含量次之、 $\text{NO}_2^-$  含量较低的特征出现, 但  $\text{NO}_3^-$  含量却比 1995 年春季升高 1.32 倍,  $\text{NO}_2^-$  含量则位居 10a 之首, 只有  $\text{NH}_4^+$  含量居中, 分别占 DIN 的 84.95%、4.25% 和 11.03%, 其中  $R(\text{NO}_3^-)$  以 10a 间的次高值出现,  $R(\text{NO}_2^-)$  则位居 10a 间的最高值,  $R(\text{NH}_4^+)$  则与 10a 间的最低值等同, 从 DIN 的组成比例上突出体现了该季度月具有较强的化学自净能力<sup>[7]</sup>。

1997 年 7 月为丰水期的夏季, DIN 的平均值高达  $30.29 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 达到了 10a 间的最高值, 其变化范围在  $6.80\sim 63.23 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  之间。虽然最高值出现在南流江径流影响最大的江口海域, 但出现测站的盐度值却高达 25.45, 位居该季度月的次高值; 而盐度值最低的北海近岸海域 DIN 含量只有  $23.96 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 处于该季度月较低的量值状况。这种分布特征的形成, 与调查期间北海和合浦近岸普降暴雨, 加上强大的北上海流顶托作用影响有关。正因为暴雨加巨大的北上海流顶托作用的影响, 使该季度月的盐度分布出现了根本性的逆转, 整个海域盐度值均在  $16.72\sim 29.14$  之间, 而且最低值不是出现在南流江径流影响最大的江口海域, 而是出现在暴雨影响最大的北海近岸海域, 从而出现南部海域盐度最低, 向南流江口海域递增的梯度变化趋势; 而 DIN 却因来源途径不同而出现明显不同的分布特征, 陆源补充影响最大的南流江口中部海域仍以最高值出现, 但次高值却出现于北上海流影响最大的南部测站, 盐度值最高的南流江口以西海域 DIN 含量最低。显然, 该季度月的 DIN 既突出了南流江径流的输入影响, 也突出了北上海流水动力作用的补充影响, 同时还充分体现了由暴雨补充的降水氮对该湾水环境中 DIN 的影响程度。在 DIN 中, 仍以  $\text{NO}_3^-$  含量最高, 已位居 10a 之首,  $\text{NH}_4^+$  含量次之、 $\text{NO}_2^-$  含量较低; 其占 DIN 的比例,  $R(\text{NO}_3^-)$  高达 87.10%, 位居 10a 间的最高值, 而  $R(\text{NO}_2^-)$  和  $R(\text{NH}_4^+)$  则分别占 2.05% 和 10.08%, 两者均以 10a 间的最低值出现。化学自净能力表现出最强的态势, 与该季度月巨大的南流江径流、强大的北上海流和暴雨造成的较强地表径流等水动力作用综合影响有关。1999 年夏季, 虽然平均

盐度值与 1997 年夏季极为一致, 但 DIN 含量却出现了比春季还低的量值( $13.29 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ ), 变化范围只有  $1.76\sim 41.69 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 最高值虽然出现在南流江迳流影响最大、盐度值为 3.70 的测站, 而且 Chl.a 的平均含量也位居全海域最高( $1.13 \text{mg}/\text{m}^3$ ), 但与 1997 年夏季也同时具有最高 Chl.a 含量( $1.29 \text{mg}/\text{m}^3$ )的特征相比却以显著下降的状况出现, 而且最低值出现的测站却是与最高值出现的测站相连的同一断面的中部海域, 显然与浮游植物的吸收消耗有关; 虽然该季度月表征浮游植物生物量的 Chl.a 含量并不高, 平均值只有  $0.53 \text{mg}/\text{m}^3$ , 但近年来北海湾以滤食浮

游植物的贝类养殖呈迅猛发展趋势的现实却间接地说明了浮游植物的繁殖生长及其对营养盐的吸收消耗在海湾的生态环境变化中具有重大的影响作用。该季度虽然仍然具有  $\text{NO}_3^-$  含量远高于  $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  的特征, 分别占 DIN 的 79.70%、3.73% 和 17.74%, 但与 1997 年相比  $R(\text{NO}_3^-)$  呈下降趋势, 而  $R(\text{NO}_2^-)$  和  $R(\text{NH}_4^+)$  则呈上升趋势; 体现水体氧化能力的 DO 含量和体现水体有机污染程度的 COD 含量分别以 10a 间的最低值和最高值出现却以事实说明该季度月的化学自净能力已呈明显减弱状态, 但却代表了正常气候条件下的水环境特征。

表 1 北海湾近 10a 来 DIN 及其相关环境因子的平均值

Tab. 1 Average contents of DIN and correlating environs in Beihai Bay for the recent 10 year

环境因子	1995-03 春季	1999-04 春季	1997-07 夏季	1999-08 夏季	1998-10 秋季	2004-11 秋季	1996-12 冬季	1999-01 冬季
盐度	23.61	25.61	21.48	21.18	26.25	30.11	28.88	30.27
pH	7.91	8.03	8.24	8.10	8.18	8.09	8.06	8.18
DO( $\text{mg}/\text{dm}^3$ )	7.89	7.04	6.66	6.64	6.79	7.41	8.37	7.90
COD( $\text{mg}/\text{dm}^3$ )	1.06	2.14	2.38	3.02	2.02	1.46	2.02	1.31
Chl.a( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	1.35	0.64	0.70	0.53	0.43	2.88	0.27	0.55
$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ )	9.95	23.04	28.21	11.90	4.27	6.44	4.26	0.79
$\text{NO}_2^-$ ( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ )	0.54	1.06	0.57	0.27	0.27	0.37	0.14	0.046
$\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ )	5.05	2.17	1.51	1.15	1.22	5.97	2.57	0.43
DIN( $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ )	15.54	26.23	30.29	13.29	5.76	12.79	6.97	1.27
$R(\text{NO}_3^-)$	64.03	84.95	87.1	79.70	65.03	50.35	63.38	64.08
$R(\text{NO}_2^-)$	3.47	4.25	2.05	3.73	7.24	2.89	2.11	3.88
$R(\text{NH}_4^+)$	32.50	11.03	10.85	17.74	27.96	46.68	34.55	31.99

注:  $R(\text{NO}_3^-)$ 、 $R(\text{NO}_2^-)$  和  $R(\text{NH}_4^+)$  分别为  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  所占 DIN 的百分比值

1998 年秋季, 随着径流量的明显减弱, 盐度值与春季极为接近, 但 DIN 含量却比同时期的 1999 年春季下降了 3.55 倍, 平均值只有  $5.76 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 变化范围在  $0.98\sim 14.61 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  之间, 高值区和次高值区分别出现于合浦、北海近岸海域和南流江口近岸海域, 迳流输入、增养殖排废及沿岸排污在该季度月均得到了良好体现。在 DIN 中, 三种形态氮的含量虽然仍以  $\text{NO}_3^-$  含量较高,  $\text{NH}_4^+$  次之,  $\text{NO}_2^-$  含量较低, 分别占 DIN 的 65.03%、27.96% 和 7.24%, 但与同时期的春夏季相比  $R(\text{NO}_3^-)$  明显偏低, 而  $R(\text{NO}_2^-)$  和  $R(\text{NH}_4^+)$  则明显偏高, 体现了该湾进入增养殖盛期秋季的水环境特征。2004 年, 该湾沿岸的增养殖进

入了鼎盛时期, 虽然滤食浮游植物的贝类养殖仍呈上升趋势, 贝类对浮游植物的摄食压力以及浮游植物对营养盐的摄取不断加强, 但秋季时节的北海湾在陆源径流影响最小、盐度值高达 30.11、表征浮游植物生物量的 Chl.a 含量高达  $2.88 \text{mg}/\text{m}^3$  的情况下, DIN 含量仍以高于 1998 年秋季 1.22 倍的量值出现, 平均值高达  $12.79 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ , 变化范围在  $2.52\sim 31.93 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$  之间, 高值区从内湾沿海岸域向湾中部延伸, 南流江口至远岸海域 DIN 含量却最低, 突出体现了增养殖排废的重大影响作用。正因为源源不断的增养殖排废的补充影响, 来不及氧化分解的 N 使该季度月出现了  $\text{NO}_3^-$  含量和  $\text{NH}_4^+$  含量极为相近的状

况,分别占 DIN 的 50.35%和 46.68%,并同时位居 10a 间的最低值和最高值,不仅从 DIN 转化的角度体现了该湾水体化学自净能力已出现显著下降趋势,同时还表明了该湾的生态环境正不断经受着新污染源的冲击。

1996 年冬季虽为枯水季节,但该季度月的盐度值却以低于 2004 年秋季的量值出现,平均值只有 28.88,在 Chl.a 含量只有  $0.27 \text{ mg/m}^3$ 、位居 10a 间最低值的情况下, DIN 的平均含量仅以  $6.97 \text{ } \mu\text{mol/dm}^3$  出现,变化范围在  $3.91\sim 12.17 \text{ } \mu\text{mol/dm}^3$  之间,高值区出现在湾中部海域,沿岸海域次之,东南部远岸海域含量最低,与西向沿岸流的水动力作用将沉积于湾中部海底的有机物上翻补充影响有关。该季度月 3 种形态氮的特征分布虽与其余季度月相似,但  $R(\text{NO}_3^-)$  只有 63.38%,而  $R(\text{NH}_4^+)$  却高达 34.55%,仅次于增养殖排废影响最大的 2004 年秋季,不仅从 DIN 的形态转化上体现了该湾的化学自净能力较差,而且有机污染程度也高于 2004 年秋季,但该季度月的 DO 含量却位居 10a 之首,平均值高达  $8.37 \text{ mg/dm}^3$ ;在如此的水环境条件下,  $\text{NH}_4^+$  仍然以如此比值出现,恰好说明西向沿岸流的水动力作用对该湾生态环境的影响是显而易见的。1999 年 1 月是 10a 间陆源影响最小,盐度值最高的季度月, DIN 含量亦出现了最低值,平均值仅为  $1.27 \text{ } \mu\text{mol/dm}^3$ ,比 1996 年冬季低得多,变化范围也只有  $0.34\sim 3.54 \text{ } \mu\text{mol/dm}^3$ ,高值区出现在北海近岸海域,南流江口海域及远岸海域含量最低,突出了沿岸排污的主导影响作用,但从该季度月 Chl.a 含量比 1996 年升高一倍的情况看来, DIN 含量的显著下降,除径流补充较少外,尚与浮游植物的大量摄取有关。该季度月的  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_2^-$  分别占 DIN 的 64.08%、31.99%和 3.88%,仅次于 1996 年冬季而位居第三,化学自净能力呈中下水平。

综上所述,北海湾 10a 间的溶解无机氮随着时间、季节和补充源不同而发生了明显的变化,但其最高值多出现于南流江口海域,并且以春夏季最为显著,与 TN、DTN 的分布相一致<sup>[5]</sup>,径流的补充影响起了主导控制作用,但浮游植物的兴衰对 DIN 的含量变化也具有重大的影响作用;秋季则以合浦、北海近岸海域含量最高,南流江口海域次之,远岸海域较低,突出了以增养殖排废、沿岸排污为主,径流为

辅的综合影响作用;而在径流影响最小的冬季,西向沿岸流水动力作用及北海沿岸排污起到了重要的贡献作用,浮游植物的吸收消耗也占有一定的地位。但 DIN 所包含的  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  三种不同形态氮,却始终以  $\text{NO}_3^-$  含量较高、 $\text{NH}_4^+$  次之、 $\text{NO}_2^-$  含量较低的特征出现,而且除 2004 年秋季外,所有季度月  $\text{NO}_3^-$  所占 DIN 的比值均在 63.38%以上,作为最终氧化产物的  $\text{NO}_3^-$  已成为北海湾 DIN 的主要存在形式。但从不同阶段、不同季度月 DIN 的组成比例看来,春季  $R(\text{NO}_3^-)$  上升明显,而  $R(\text{NH}_4^+)$  下降显著,从 DIN 的转化程度上体现了该湾化学自净能力呈明显增强趋势;夏季则以  $R(\text{NO}_3^-)$  略为下降,而  $R(\text{NH}_4^+)$  和  $R(\text{NO}_2^-)$  略为上升的趋势出现,化学自净能力出现减弱趋势;秋季  $R(\text{NO}_3^-)$  和  $R(\text{NO}_2^-)$  则出现了显著下降趋势,而  $R(\text{NH}_4^+)$  则出现了显著上升趋势,化学自净能力显著下降;只有冬季保持了相对均衡状态。

## 2.2 DIN 与环境因子的关系

由表 2 的相关分析结果可知,北海湾近 10a 来 DIN 与环境因子之间具有密切的关系,但在不同阶段的不同季度月,其相关因子明显不同。1995 年春季,随着沿岸流域春耕春种的开始及雨量的增加,来源于农业化肥、土壤流失及降水氮明显增加, DIN 与盐度之间达到了高度显著的负相关水平,与 pH 的负相关性也达到了显著状态,突出体现了陆源补充的主导控制作用;与  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  之间均以正相关出现,但显著性以  $\text{NO}_3^-$  最高、 $\text{NO}_2^-$  次之,均达到了高度显著水平,  $\text{NH}_4^+$  则以良好正相关出现,可能与该季度月浮游植物剧增、浮游植物优先吸收  $\text{NH}_4^+$  有关;与 COD 之间仅以明显正相关趋势出现,说明该季度月来源于有机物分解的 N 所占比例不高。1999 年春季, DIN 与盐度的显著负相关性与 1995 年相比呈上升趋势,但与 pH 的相关性却从显著负相关下降至只出现负相关趋势,生物活动的影响呈现出上升势头;与  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  之间的正相关性亦呈加强趋势,只有与  $\text{NH}_4^+$  之间的正相关性以下降趋势出现,但与 COD 之间却达到了显著正相关水平。表明该季度月的 DIN,南流江径流的输入影响最大,但由此携带入海的有机物对 DIN 亦具有重大的贡献作用;而与 Chl.a 之间正相关性的明显上升,则说明该

季度月 DIN 的大量输入, 对浮游植物的繁殖生长具有明显的促进作用。

表 2 DIN 与环境因子的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients of DIN and environs

相关因子	1995-03 (n=9)	1999-04 (n=9)	1997-07 (n=7)	1999-08 (n=9)	1998-10 (n=9)	2004-11 (n=9)	1996-12 (n=7)	1999-01 (n=11)
DIN-S	-0.97	-0.99	-0.13	-0.97	-0.92	-0.92	-0.65	0.14
DIN-pH	-0.83	-0.45	-0.13	-0.23	-0.72	-0.59	-0.32	0.64
DIN-DO	0.29	0.13	-0.048	0.24	0.53	-0.69	0.23	-0.05
DIN-COD	0.54	0.94	0.69	0.95	0.32	0.69	-0.75	-0.019
DIN-Chl.a	0.22	0.49	-0.012	0.79	-0.48	-0.28	-0.53	-0.48
DIN- NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.97	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.72	0.99
DIN- NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.94	0.99	0.86	0.76	0.93	0.98	0.66	0.82
DIN- NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.76	0.49	-0.57	-0.16	0.83	0.97	0.85	0.97

注:  $n=7$ ,  $r_{0.01}=0.874$ ,  $r_{0.05}=0.754$ ;  $n=9$ ,  $r_{0.01}=0.798$ ,  $r_{0.05}=0.666$ ;  $n=11$ ,  $r_{0.01}=0.735$ ,  $r_{0.05}=0.602$

1997 年夏季虽为丰水季节, 但该季度月的 DIN 除与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 呈高度显著正相关、与 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 呈显著正相关、与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 以明显负相关趋势出现外, 与其余环境因子却均无相关性出现, 只有与 COD 之间出现明显正相关趋势, 体现不出南流江迳流的影响作用, 与调查期间北海至合浦近岸普降暴雨、降水氮及来自沿岸面源的氮较多、加上强大的北上海流补充影响、对海湾的生态环境冲击较大有关。而同是夏季的 1999 年, DIN 与环境因子之间, 不仅与盐度达到了高度显著的负相关水平, 与 COD 亦以高度显著的正相关出现、还与 Chl.a 具有密切的关系, 正相关性达到了良好状态; 但与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 之间却分别以高度显著的正相关、良好正相关和无相关性的不同状况出现; 与 pH 的相关性在春季大幅度下降的基础上仍以明显下降的趋势出现, 由陆源径流造成的影响正在逐渐减少, 而由生物活动造成的影响正在逐渐加强。虽然该季度月的 DIN 陆源输入影响与 1999 年春季相当, 但由有机物转化的氮占比例最高, 在 Chl.a 亦以良好正相关出现的情况下, 补充远大于消耗在该季度月得到了良好体现; 与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 之间无相关性的出现, 恰好间接说明该湾的水体自净能力已呈现出较强状态,  $R(\text{NH}_4^+)$  位居 10a 间最低值充分说明了这一点。

1998 年秋季, DIN 与盐度的显著负相关性有所减弱, 但与 pH 的负相关性有所加强, 已达到良好负相关水平, 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 之间亦均以显著正

相关出现, 但与 Chl.a 和 DO 之间却分别以明显负相关和明显正相关趋势出现。说明该季度月的 DIN 与三种不同形态氮均有着很好的同源性, 陆源输入影响占主导地位, 其含量对浮游植物而言, 已出现消耗大于补充状况, 但水体中的 O<sub>2</sub> 又从中获得补充, 对加速有机物的氧化分解极为有利。2004 年 11 月虽为 10a 间南流江迳流影响最小的季度月, 但 DIN 与环境因子之间出现相关性的机率却最多, 其中与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 之间均以高度显著正相关出现, 与盐度的负相关达到了显著水平, 与 COD、DO 的正、负相关性均达到了良好状态, 与 pH 的负相关性也接近 95% 的置信水平, 只有与 Chl.a 之间没有相关性, 显然与近几年海湾沿岸养殖较多以滤食浮游植物的牡蛎等贝类有关。虽然该季度月处于北海湾 10a 间沿岸排污和养殖排废影响最大的季度月, 水体处于新污染源不断补充、有机物分解的耗氧状态, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 含量达到了最高值, 已占 DIN 的 46.68%, 从 DIN 的形态转化中体现不出较强的水体自净能力, 但表征水体氧化能力的 DO 却处于富氧状态, 高达 7.04~7.57 mg/dm<sup>3</sup>, 而表征有机污染程度的 COD 值却处于低值状态, 所有测站均在 1.72 mg · dm<sup>-3</sup> 以下的现实却从另一个角度体现了该湾仍然具有较强的水体自净能力; 而 DIN 与众多环境因子之间具有如此密切的关系, 则说明该湾在较强的水体自净作用下, 生态环境具有良好的调节作用, 但由此而引起海湾富营养化和产生的赤潮隐患<sup>[8]</sup>, 则应引起有关部门的高度重视。

1996年冬季, 枯水季节的 DIN 与环境因子之间均无显著相关性出现, 但与盐度和 COD 的负相关已接近 95% 的置信水平, 与 Chl.a 之间也以明显负相关趋势出现; 与  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  之间, 只有与  $\text{NH}_4^+$  具有显著正相关关系, 与  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  之间仅接近 95% 置信水平。显然, 该季度月的 DIN 与  $\text{NH}_4^+$  具有很好的同源性, 这是西向沿岸流水动力作用影响的结果。1999年1月为 10a 间盐度值最高, DIN 含量最低的季度月, 陆源输入对海湾的生态环境影响较小, DIN 与环境因子之间均无显著相关性出现, 但与  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  之间的正相关性均达到了显著水平, 尤以  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  最为显著。说明该季度月的三种形态氮具有相似的迁移规律。

### 3 结语

(1) 本研究结果表明, 北海湾近 10a 来的 DIN 具有春夏季较高, 秋冬季较低的变化特点, 其中春夏秋季均突出了南流江径流的重大贡献作用, 只有径流影响较小的冬季突出了西向沿岸流的补充影响和沿岸排污及增养殖排废的影响; 在 DIN 中, 8 个航次均具有  $\text{NO}_3^-$  含量较高、 $\text{NH}_4^+$  含量次之、 $\text{NO}_2^-$  含量最低的分布特征, 而且除 2004 年秋季外, 所有季度月三种不同形态氮所占 DIN 的比值均在 63.38% 以上, 作为最终氧化产物的  $\text{NO}_3^-$  已成为北海湾 10a 间 DIN 的主要存在形式; 通过不同时期的对比分析, 得出该湾的 DIN 具有春秋季节显著上升、冬、夏季显著下降的变化规律。与近几年沿岸增养殖业不断扩大、而春秋季节又为最适宜的养殖季节, 来源于养殖排废的补充影响明显增加有关。

(2) 相关分析结果显示, DIN 与环境因子之间的相关性, 以与盐度出现的机率最多、显著性也最高, 与 COD 的相关性次之, 与其余环境因子的关系依次排列为  $\text{pH} > \text{DO} > \text{Chl.a}$ 。与三种形态氮之间的关系, 则以  $\text{NO}_3^-$  与  $\text{NO}_2^-$  最为密切, 除个别季度月接近 95% 置信水平、个别季度月为良好正相关外, 其余季度月均达到了显著正相关水平, 说明 DIN 与  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  具

有相似的迁移规律; 而与  $\text{NH}_4^+$  的显著正相关均出现在径流影响较小的秋冬季节, 径流影响较大的春夏季节只有 Chl.a 含量较高、赤潮发生前夕的 1995 年春季才出现良好正相关。从 2004 年秋季 DIN 与  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  均以高度显著正相关出现的情况看来, DIN 与  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  的来源已出现高度一致的状况, 由沿岸排污及增养殖排废补充的 N 已呈现出显著增长趋势, 海湾的生态环境已不断受到沿岸排污及增养殖排废新污染源的冲击, 水体自净能力已出现明显下降势头, 海湾生态环境的负荷日益加重, 富营养化程度日趋增强, 2004 年 2 月再次发生赤潮已向人们提出警示, 应引起有关部门的高度关注。

参考文献:

- [1] 庄万金, 曾昭文. 厦门西海域营养盐的地球化学 I 无机氮[J]. 海洋学报, 1991, 10(5): 14-19.
- [2] 石强, 陈江麟, 李崇德. 渤海硝酸盐氮和亚硝酸盐氮季节循环分析[J]. 海洋通报, 2001, 20(6): 32-39.
- [3] 雷坤, 郑丙辉, 孟伟, 等. 大辽河口 N、P 营养盐的分布特征及其影响因素[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(1): 19-22.
- [4] 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.
- [5] 韦蔓新, 童万平, 何本茂, 等. 北海湾各种形态氮分布及其影响因素[J]. 热带海洋, 2000, 19(3): 59-66.
- [6] 韦蔓新, 何本茂. 北海湾生态环境特征及其营养状况分析[J]. 海洋湖沼通报, 2003, (4): 95-100.
- [7] 何本茂, 韦蔓新. 北海湾水体自净能力的探讨[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(1): 16-18.
- [8] 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.
- [9] 张正斌, 顾宏堪, 刘莲生, 等. 海洋化学[M]. 上海: 上海科技出版社, 1982: 220-342.

# Variation of dissolve inorganic nitrogen and its relationship with environmental factors in Beihai bay in a 10 year period

HE Ben-mao, WEI Man-xin

(Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi key lab for Mangrove Conservation, Beihai 536000, China)

**Received:** Nov., 12, 2010

**Key words:** dissolve inorganic nitrogen; content variation; environmental factor; composition proportion

**Abstract:** Based on the surveying data in eight cruises in Beihai bay from 1995 to 2004, variation of dissolve inorganic nitrogen and its relationship with environmental factors were analysed. It was found that the DIN content was high in springs and summers, but low in falls and winters, revealing the important contribution of the runoff of Nanliu river. In all cruises, the content of  $\text{NO}_3$  was the highest, the content of  $\text{NH}_4^+$  the second, and  $\text{NO}_2^-$  the lowest. The percentage of  $\text{NO}_3$  in DIN was more than 63.38% except for the Fall of 2004, which was the main existing form of DIN in the bay. By analyzing the data of different terms, we found that the content of DIN significantly ascended in springs and falls but descended in Winter and Summer. More and more culture discharge effluents was the main effect reaction. The correlation analysis indicated that, regarding the dependence between DIN and the environmental factors, salinity was the predominant factor. The dependence between DIN and COD was at the second place. The dependence between DIN and other environment factors were in the order of  $\text{pH} > \text{DO} > \text{Chl.a}$ , being most closely related to  $\text{NO}_3$  and  $\text{NO}_2$ , as indicated by the strong positive correlations in seven cruises. Strong positive correlation with  $\text{NH}_4^+$  was only present in the fall and winter when runoff had less effects.

(本文编辑: 张培新)