

珠江口夏季水体中的氮和磷

林以安^{1,2,3}, 苏纪兰^{1,2,3}, 扈传昱^{1,2}, 张 美^{1,2},
李 炎^{1,2,3}, 管卫兵^{1,2,3}, 陈介中³

(1. 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 2. 国家海洋局海洋动力过程和卫星海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 3. 香港科技大学, 香港 九龙 清水湾)

摘要: 根据 1999 年 7 月 17~28 日于珠江口现场调查和实验的资料, 研究夏季水体中氮、磷的分布、形态变化和初级生产力的限制因素。结果表明该海域氨含量高, N/P 属于世界上高值区之一。从河口向外海运输过程中, 氮和磷的形态和浓度均有剧烈的变化。虽然氮在中途有新源的补充; 但由于外海水的入侵稀释、生物吸收和形态变化的迁移作用, NO_3^- 和可溶无机氮的浓度总的变化趋势仍是随盐度增大而大幅度地降低, 以至珠江口外出现 N/P 低于 16。由于夏季水体层化稳定, 在表、底层其生物地球化学变化方向相反, PO_4^{3-} 的浓度变化互成镜像关系并可按盐度分为 3 段不同特征的反应区。初级生产力的限制因素在大部分区域是磷, 但从口门至最大浑浊带和口外区则分别是浊度(或光照)及可溶无机氮。现场培养实验再现了真光层和底层氮和磷的生物地球化学过程差异并表明磷的循环和再生比氮迅速; 在可溶无机氮浓度大且高 N/P 的海域, 磷的再生可成为水华的引发因素, 而氮被耗尽却是水华消亡的原因。总体上夏季该区水体氮的迁出率比磷高。于水体层化稳定的区域, 氮和磷的生物地球化学作用在真光层以浮游生物吸收占优势, 在下层以有机物的降解和可溶无机态的再生为主, 当层化消失、上下水体充分混合则可完成循环。

关键词: 氮; 磷; 形态变化; 限制因素; 珠江口

中图分类号: P734.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2004)05-0063-11

1 引言

河口近岸区是陆海相互作用耦合带和生产力最高的区域, 生源元素来源丰富, 各种因素(包括水动力、生物地球化学过程及人类活动等)十分复杂, 其生态环境系统和生物资源的变化与人类生活和经济发展关系密切。氮和磷是生态系统的主要生源元素, 它们在海洋环境中的循

收稿日期: 2002-08-23; 修订日期: 2003-11-07.

基金项目: 香港赛马会慈善信托基金会资助项目; 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043704).

作者简介: 林以安(1943—), 男, 福建省东山县人, 研究员, 从事海洋生物地球化学研究. E-mail: linyian@sio.zj.edu.cn

环是影响全球碳循环和气候变化的重要环节,其生物地球化学行为长期以来一直为人们所重视.同时由于某些自然或人为的因素,这些区域富营养化和氮与磷比例失调屡有发生,甚至引发赤潮或出现低氧现象,直接影响生态环境系统的质量和生物资源^[1-6].这不但必须注意控制陆源的排放,而且提示我们必须加强和深入对河口、近岸区的生源元素生物地球化学行为的了解,从而使河口、近岸区的生源元素的循环和再生成为近期的研究热点^[7-12].

珠江是世界著名的河流之一,多年来平均径流量为 $3.412 \times 10^8 \text{ m}^3$,居我国第二位,携带悬浮泥沙约 $8.336 \times 10^7 \text{ t}$;进入河口区加上珠江河口区周边产生大量废弃物,其中有不少直接排入水域.这两者均含有大量的生源元素,进入河口区会直接影响生态环境.为此不少研究者已进行了大量的调查和研究并在时空分布特征、通量和环境质量影响方面取得一些有意义成果^[2,13,14],但对其生物地球化学循环和再生及机制较少涉及,况且近 20 a 来环珠江口区域经济发展迅速,人口大量增长,废弃物排放量增加,使河口区局部水域富营养化加剧,形成贫氧区,出现赤潮频发的趋势^[2,3,14],因此有必要进一步的深入研究.本文根据 1999 年 7 月 17~28 日的调查和实验资料,阐明该区氮和磷的浓度分布并试图探讨其形态变化、循环与再生机制.

2 取样、观测分析和实验

2.1 现场调查区域和站位

现场调查由“海监 74”号船执行,调查区域和站位布设如图 1 所示.设大面站位 31 个,多数站位以表、中、底 3 层观测和取样;在跃层明显的站位适当增加垂向观测和取样.连续站位 C1, C2 和 C3 均以 8 个时点系列(每隔 3 h 一次)观测和取样.

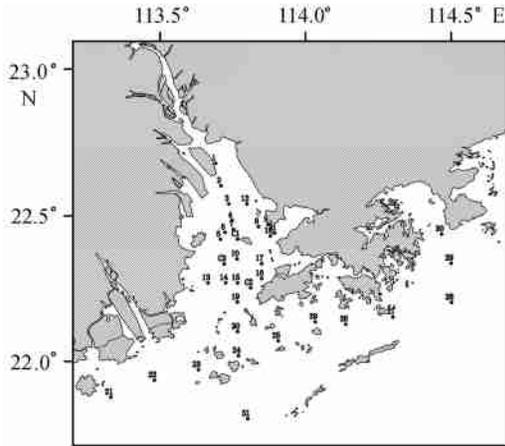


图 1 站位布设(1999-07)

2.2 取样、观测分析方法

用 Go-Flo 采水器采集水样,一部分经 $0.45 \mu\text{m}$ nucleopore 滤膜过滤分离,经过滤的水样用于测试硝酸盐($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、亚硝酸盐($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、氨盐($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、活性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$)以及溶解态总氮(DTN)和溶解态总磷(DTP);另一部分未经过滤的原海水用于测试总氮(TN)和总磷(TP).

观测分析方法如下:硝酸盐、亚硝酸盐、氨盐、活性磷酸盐分析均按照《海洋调查规范》的方法测定^[15].

溶解态总氮、溶解态总磷、总氮和总磷分析:分别将部分经过滤的水样和未过滤的原海水样

用过硫酸钾湿法氧化消化、调整 pH,然后分别按照测定硝酸盐和磷酸盐的方法进行测定.再用差减法计算悬浮颗粒氮(PN)、悬浮颗粒磷(PP)、可溶有机氮(DON)、可溶有机磷(DOP)样品的浓度.

上述各项测定均在岛津 SHIMADZU UV-1200 型紫外可见光分光光度计上进行.

叶绿素 a:在现场用进口 $1 \mu\text{m}$ GF/F 玻璃纤维膜过滤后,现场萃取,使用荧光分光光度法测定.

温度、盐度、溶解氧(DO)和浊度: 在现场采用美国金泉仪器公司的环境参数测定仪(YSI)直接测定.

2.3 培养实验

取15号站表层水, 将原海水过滤(去掉大型浮游动物)后注入20 dm³透明塑料瓶中, 置于现场海水为循环水的大水槽中, 在自然光照(露天、实验期间大部分是晴天、少部分为阴或小雨, 光能是充足的)、避光和灭菌3种不同状态条件下进行, 分别于不同的时间取样分析NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, DIN, PO₄³⁻, DIP, 叶绿素a, DO和pH等参数. 方法同2.2节, 但其中叶绿素a, DO和pH及现场温度和盐度均用YSI探头直接测试.

3 结果和讨论

3.1 可溶无机氮和无机磷的含量和分布

调查区域的水体营养盐的含量较高, 而且分布变化大, 表1列出全区氮和磷各种形态的浓度范围和平均浓度, 其中NO₃⁻-N平均值为48.91 μmol/dm³, 远比海洋水体平均丰度高. 图2, 3分别描绘NO₃⁻-N和PO₄³⁻-P的分布变化. 受高浓度营养盐径流输入和低浓度营养盐外海水入侵的影响, 总的分布变化趋势为近口门比近岸区高, 向外海方向降低, 但各种营养盐的生物地球化学行为性质不同, 形成各自的特征变化. 显然NO₃⁻-N的浓度在表层高于底层, 表层硝酸盐浓度高值区遍及整个伶仃洋, 而底层的高值区主要分布于近口门和沿岸区; 受外海水入侵的影响, 尤其明显的是中间深槽(航道)底层的浓度低于表层. NO₃⁻-N浓度从高值区向外海低值区下降的梯度较大. 可溶无机氮(DIN)的分布基本与此相似.

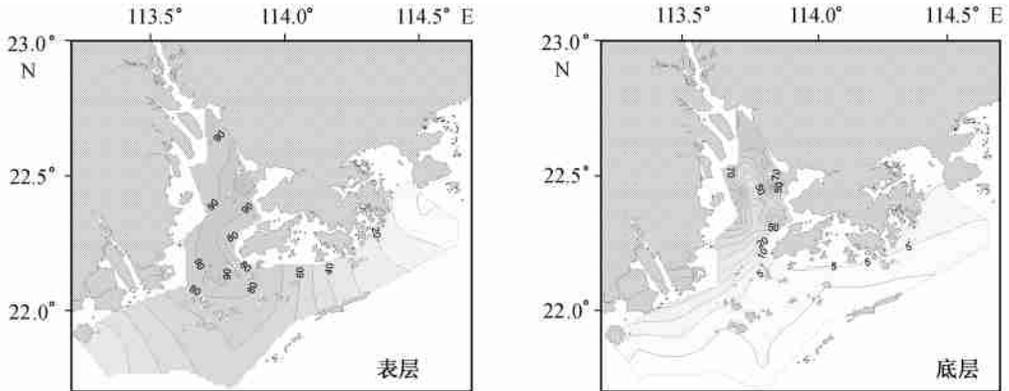


图2 珠江口NO₃⁻-N浓度(μmol/dm³)的平面分布

相对于DIN和NO₃⁻-N而言, 活性磷酸盐浓度较低, 而且底层的浓度显然大于表层, 高浓度分布于内伶仃洋大部分区域的底层, 尤其是口门和深圳湾西侧至大屿山(南涂岛)西北侧, 这说明表层的磷酸盐被生物大量吸收, 而底层由于再生而增大.

与1987~1988年调查资料^[13]比较, 珠江口伶仃洋水域溶解无机氮的浓度已增加1倍, 表明10多年来经济发展、人口增加、陆源排放加大对该河口区水质的影响.

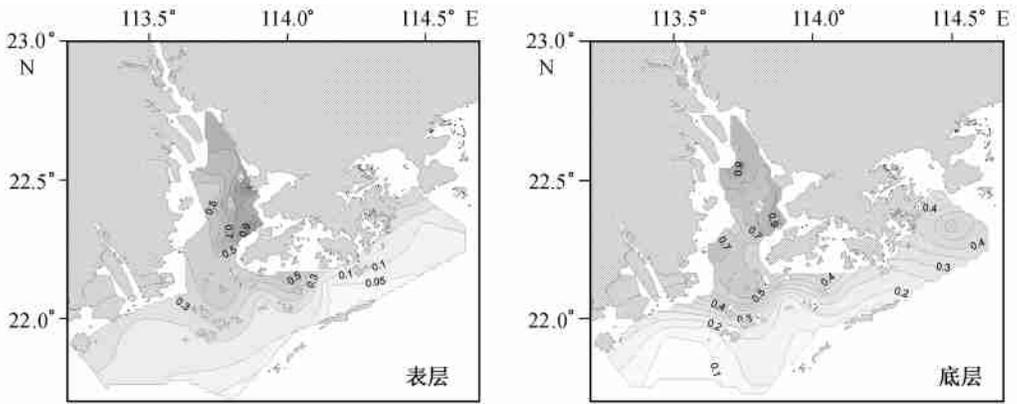


图3 珠江口 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度 ($\mu\text{mol}/\text{dm}^3$) 的平面分布

表1 珠江口水域营养盐的浓度水平

| | $\text{NO}_3^- - \text{N}/$ $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ | $\text{NO}_2^- - \text{N}/$ $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ | $\text{NH}_4^+ - \text{N}/$ $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ | $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}/$ $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ | $\text{DTN}/$ $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ | $\text{DTP}/$ $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ | $\text{SiO}_3^{2-} /$ $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ |
|-----|---|---|---|--|---|---|---|
| 最大值 | 111.23 | 5.03 | 3.91 | 1.15 | 149.80 | 2.39 | 223.3 |
| 最小值 | 0.13 | 0.02 | 0.04 | 0.05 | 11.17 | 0.14 | 9.0 |
| 平均值 | 48.91 | 1.68 | 1.27 | 0.51 | 63.50 | 0.97 | 90.7 |
| 最频值 | 89.62 | 0.73 | 0.53 | 0.73 | 92.23 | 0.87 | 81.5 |
| 计数 | 100 | 99 | 100 | 100 | 57 | 57 | 100.0 |

3.2 水域氮、磷赋存形态的变化

由于氮和磷分别以可溶无机态、可溶有机态和悬浮颗粒态赋存于水体中,其中可溶无机磷主要形态是活性磷酸盐,可溶无机氮则以硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐存在.据该航次调查资料分析统计,调查区域的氮和磷各种形态的平均浓度分别列于表2

表2 珠江口水域氮和磷各种形态的平均浓度

| 氮和磷的形态 | <i>DIN</i> | <i>DON</i> | <i>DTN</i> | <i>PN</i> | <i>TN</i> | <i>DIP</i> | <i>DOP</i> | <i>DTP</i> | <i>PP</i> | <i>TP</i> |
|--|------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| 平均浓度/ $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ | 51.84 | 11.66 | 63.50 | 6.41 | 69.08 | 0.51 | 0.46 | 0.97 | 0.82 | 1.78 |

氮和磷各种形态的比例平均分别为总氮中可溶无机氮占71%,可溶有机氮占20%,而悬浮颗粒氮仅占9%;反之,总磷中可溶无机磷仅占28.7%,可溶有机磷占25.8%,悬浮颗粒磷则占45.5%并成为主要成分.由于环境条件复杂多变,各种形态的浓度变化范围较大,其中*DIN*为1.12~115.3 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$,*DTN*为11.17~149.8 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$,*DIP*为0.05~1.15 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$,*DTP*为0.14~2.39 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$.不同区域各种形态分配比例差别明显(见表3),表明不同环境条件下形态在激烈相互转化.虎门口外(1号站)和内伶仃西滩(5号站)陆源径流占主导地位,悬浮颗粒浓度大,受光限制初级生产力低,因而显示出高*DTN*和低*PN*以及高*PP*的特点;8号站因受蛇口和香港排放的影响,不但*DIN*和*DIP*浓度高,而且出现*DOP*的最高值;24号站的初级生产力已明显提高,悬浮颗粒浓度虽然较小,但其主要成分浮游生物及其碎屑

使PN比例增加; 30号站也是高生产力区, 因远离河口DIN的供给减少, 在大量被吸收后DIN明显减少, 而DIP仍保持较高的比例, PN和PP明显增加, DON和DOP比例的增加更为突出, 表明生物的代谢非常强烈.

表3 珠江口不同区域表层水氮、磷各种形态所占比例(%)

| 站 位 | 经纬度 | DIN | DON | PN | DIP | DOP | PP |
|------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1号(虎门口外) | 22. 675°N, 113. 692°E | 66. 4 | 29. 6 | 4. 0 | 25. 9 | 5. 3 | 68. 8 |
| 5号(内伶仃西滩) | 22. 416°N, 113. 709°E | 79. 0 | 10. 9 | 10. 1 | 27. 4 | 14. 7 | 57. 9 |
| 8号(蛇口西侧) | 22. 480°N, 113. 840°E | 84. 6 | 13. 8 | 1. 6 | 34. 5 | 52. 4 | 13. 1 |
| 24号(万山群岛旁) | 22. 017°N, 113. 777°E | 81. 2 | 5. 7 | 13. 1 | 39. 6 | 46. 5 | 13. 9 |
| 30号(大鹏湾外) | 22. 434°N, 114. 467°E | 11. 1 | 69. 9 | 19. 0 | 31. 3 | 46. 4 | 22. 3 |

图4, 5分别为DIN和TN与盐度的关系, 两者的浓度变化的总趋势均随盐度的升高而下降, 显示出外海低氮水入侵稀释和浮游植物光合作用的吸收的影响, 对于DIN影响尤其明显; 影响TN的还有悬浮颗粒和有机碎屑的沉降. 浮游植物光合作用消耗营养盐理应使DIN的过程变化趋势线的值以负值偏离理论稀释线, 但实际却与之相反, 图4的表、中、底层过程变化趋势线均为向上拱的弧线, 多数的数据点落在理论稀释线上方以正值偏离, 这说明从河口向海运输过程中有新的氮源补充, 新氮源的补充量大于浮游植物光合作用的吸收量. 对于DIN而言, 新氮源补充不排除有香港、深圳排污(外源), 如8号站, 可能还包括其再生的内源, 因细菌的增多增大对DON的分解能力而使淡水环境转变为咸水环境^[16]. 图4的中、底层过程变化趋势线比表层更大的正值偏离说明, 这种再生内源补充在中、底层比表层更加显著而生物吸收却减少, 同时中、底层拟合趋势线多项式的符号恰与表层相反, 这也说明两者受不同反应所控制. 对于TN而言, 新的DON的生成也是一个重要的内源之一.

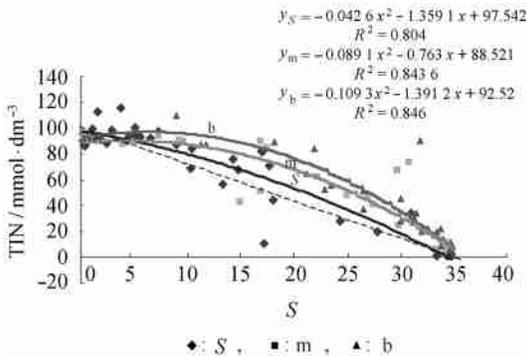


图4 珠江口水域DIN与盐度的关系

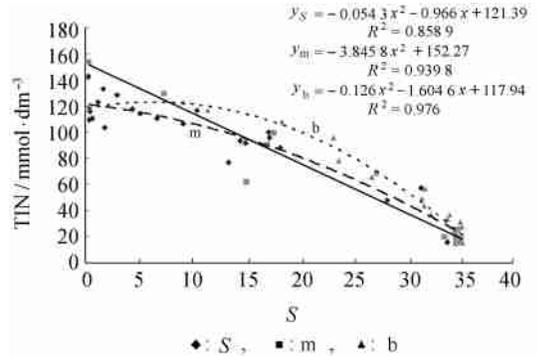


图5 珠江口水域TN与盐度的关系

另一方面, DIN和TN过程变化趋势线从盐度20至口外海区的下降梯度远大于理论稀释线, 调查结果表明使DIN和TN浓度降低的因素不仅仅是外海水的稀释和浮游生物的吸收, 还包括了有机颗粒的沉降, 而且由于大量有机物的沉降和早期降解以及夏季跃层的形成和稳定, 底层水体出现了大片低氧和高浓度 NH_4^+ 的区域^[17]. 在低(缺)氧的环境中氧化还原电位很低, NH_4^+ 的消化过程将会有 N_2 生成^[5,7](该区脱氮量尚待测定). N_2 难于被浮游生物吸

收,但易于从水中逃逸,因而脱氮可促使氮迁移率增大。

从各个站位水柱垂向平均值而言,整个调查区水体的 *DIP* 和 *TP* 变化不大,似乎有很强的“缓冲”作用,但若分层次观察,就不难发现各层之间较大的变化。图 6, 7 分别显示了表、中、底各层 *DIP* 和 *TP* 与盐度关系的趋势,各层都在 3 段盐度区间出现不同的明显变化过程:表层 *DIP* 盐度为 0~6 浓度变化很小,略有升高;盐度 6~25 出现较大幅度的下降,盐度为 25~27,是 *DIP* 浓度最低点;盐度为 27~34,则又有明显的上升。底层及中层的趋势线恰与表层成相反的映像,其拟合趋势线多项式各项的符号在底层及中层恰与表层相反。这说明上层(跃层上部或真光层)水体与中、下层水体在不同的盐度范围存在不同转化机制,发生方向相反的(反应)作用过程(包括消耗或再生补充),如表层盐度 0~6 由于浊度大、受光限制初级生产力很低, *DIP* 消耗量很少,而由于高离子强度的作用,径流输入的大量颗粒磷在河口水中发生离子交换和脱附^[18],有机磷也会在微生物作用下进行分解,从而使 *DIP* 浓度有所提高,这与密西西比河口的变化相似^[19];盐度 6~25 表层水浊度逐渐降低,光合作用加强(见图 8),发生表层 *DIP* 以消耗(或移出)为主,而底层与中层颗粒磷的离子交换作用仍然继续,尤其是在低氧区颗粒表面磷的脱附更快^[20],加上上层浮游生物颗粒和碎屑的沉降、有机磷的降解进一步加强,呈现以再生为主的过程,使 *DIP* 浓度增高(图 6, 7)。当表、底层水体能快速充分混合时,底层水高浓度的 *DIP* 迅速补充到表层,整个水体产生快速循环,即两种方向相反的生物地球化学作用(反应)的结果相互叠加,就会完成一次磷的循环及出现所谓“磷缓冲”,但由于夏季珠江口伶仃洋水体层化较为稳定,底层水所再生的高浓度 *DIP* 难以补充到表层,以致于出现表层水的磷较为严重缺乏和底层水高浓度的 *DIP* 和 *TP* 的积累。前者造成表层局部水体磷对初级生产的限制,而后者则为该水域秋季高生产力的发生形成磷储备。

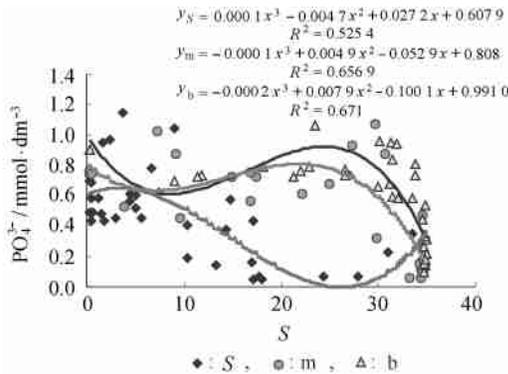


图 6 珠江口水域 *DIP* 与盐度的关系

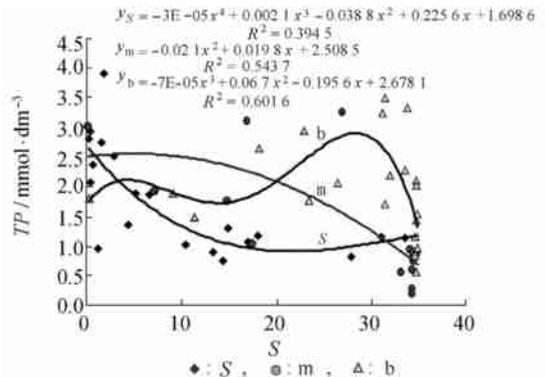


图 7 珠江口水域 *TP* 与盐度的关系

3.3 N/P 的变化和对初级生产力的限制因素

海洋浮游生物体 *N/P* 的正常值为 12~22, 平均为 16, 与大洋水体的比例相似^[10, 20, 21]。水环境可利用的氮与磷在这一比例范围被认为是最适宜浮游生物生长。但珠江口水域可溶态的 *N/P* 远远超出这个范围, 尤其是 *DIN/DIP* 平均达 122.4 (表 4), *TN/TP* 也达 38.9, 与世界各海域及河口湾比较, 属于高 *N/P* 的区域^[11, 12]。这说明该海域夏季可利用的氮非常丰富, 相对而言可利用的磷就显得十分贫乏。在大部分区域, 表层 *DIN/DIP* 大于 50, 尤其是盐度为 10~27 的 *DIN/DIP* 竟大于 200 (见图 9), 这表明磷是主要的限制因素, 但各区域也不尽相同, 在表

层盐度小于 6 的海域虽然营养盐的浓度很高(见图 4, 6), 叶绿素的浓度却不高(图 8), 从口门至最大浑浊带和低浑浊区分别以光和磷成为浮游生物生长的限制因素, 这与密西西比河口十分相似^[19]. 在盐度为 10~ 20 的 *DIN/DIP* 随浓度增大而上升, 但是当盐度大于 20 直到河口区外海, *DIN/DIP* 则呈下降趋势. 前者被解释为当浮游生物生长从含氮过量的水体按一定比例(16 左右)吸收氮与磷时, 水体中的 *DIN/DIP* 的比值将进一步升高, 而后者在盐度 20~ 32 的水体出现较高的初级生产力的同时 *DIN* 被大量吸收(或迁移)以及外海水低氮的稀释, 以致于到远离口门的 29 和 30 号站 *DIN* 已被消耗殆尽, 而 *DIP* 却由于迅速再生作用而得到补充, 终于使 *DIN/DIP* 小于 16, 氮变成为浮游生物生长的限制因素. 这显示了河口过程 *DIN* 与 *DIP* 在表层虽然同样被浮游生物吸收, 但被迁移和再生补充却有较大的差别. 由于氮与磷赋存型态的不同, *TN/TP* 的值小于 *DIN/DIP*. 两者的变化趋势在表层基本相似, 均呈中间高两端低的多项式曲线, 但两者的变化趋势在底层却基本上都是随盐度增高而下降(图 9, 10), 并与盐度成较好的负相关关系. 由此说明表层与底层的氮与磷在不同盐度范围内变化机制的差异.

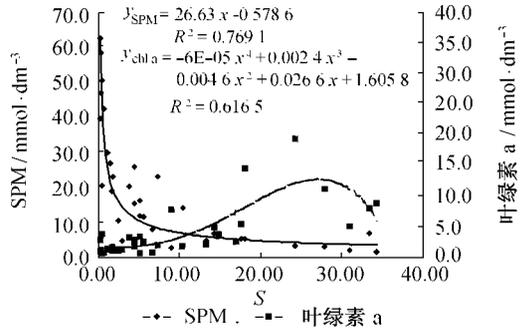


图 8 表层叶绿素浓度和浊度与盐度的关系

表 4 珠江口不同型态氮、磷的平均比值

| N/P (DI) | N/P (DO) | N/P (DT) | N/P (SPM) | N/P (总的) |
|----------|----------|----------|-----------|----------|
| 122.4 | 29.9 | 65.6 | 7.8 | 38.9 |

DI 为溶解无机态, DO 为溶解有机态, TD 为总溶解态, SP 为悬浮颗粒态.

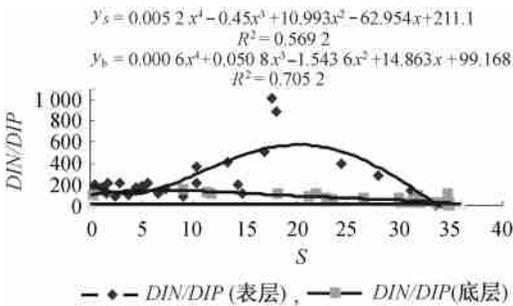


图 9 珠江口水域 *DIN/DIP* 与盐度的关系

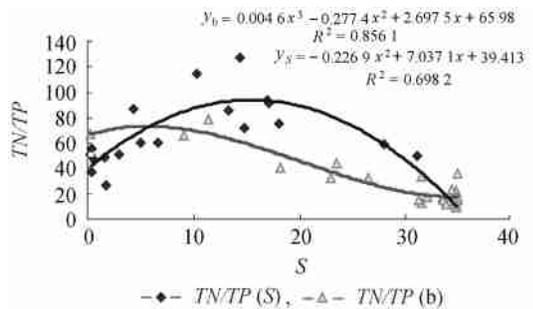


图 10 珠江口水域 *TN/TP* 与盐度的关系

3.4 现场培养实验过程氮与磷变化的差别

取 15 号站表层原海水在现场培养实验, 在自然光和避光的情况下, 经过 7 d 的培养. 实验过程中叶绿素 a, pH, DO 和营养盐均发生较大的变化(见图 11, 12). 尤其是 46 h 后(第 3 天)叶绿素 a 从 $10 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 迅速增高到 $50 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, pH 和 DO 也随之增大出现水华, 水华延续 4 d; 到第 6 天水华消亡, pH 和 DO 也随之猛烈下降. 在水华期间叶绿素 a 有一较大的波动, 即在第 4

天出现较大幅度的下降(从 $50 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 迅速下降至 $30 \mu\text{g}/\text{dm}^3$), 但随后又上升到更高的水平. 与此相应, 随着叶绿素 a 的增加 TIN , NO_3^- , PO_4^{3-} 均下降, 尤其是水华发生时 TIN , NO_3^- , PO_4^{3-} 下降最猛快, 这表明大量的营养盐被吸收. 在此过程中氮和磷分别出现一些复杂的变化——经过了 1 d 的光合作用, 原海水中赋存的 PO_4^{3-} 实际上已被消耗殆尽, 是光合作用受磷缺乏的限制, 但再经 0.5 d 后测试, PO_4^{3-} 又上升到 $0.3 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, 这说明已有 PO_4^{3-} 的再生, 这与 Watt 等^[24]的研究结果十分相似, 正是 PO_4^{3-} 的再生支持了叶绿素 a 继续增长, 尽管叶绿素 a 的迅速增长时 PO_4^{3-} 又下降; 虽然在整个水华过程期间 PO_4^{3-} 反复振荡, 但却一直支持水华的延续且保持在 $0.05 \sim 0.3 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 的浓度水平直至水华结束(图 12). TIN , NO_3^- 虽在水华过程中也出现波动性增大(在浮游生物部分死亡后和 PO_4^{3-} 迅速增长时), 但其幅度较小, 而且主要是铵, 峰值出现的时间略迟于 PO_4^{3-} , 这显然是由于浮游生物的生长-代谢和部分死亡颗粒迅速降解时 PO_4^{3-} 的再生速率比 DIN 大. 其实验结果与 Garber^[8]报道的相吻合. 原因之一是当生物代谢和有机颗粒分解时大部分并未直接生成 DIN , 而是以大量的 DON 成为过程的中间产物, 大部分以氨基酸等形态较长时间存在于水中¹⁾, 最后是以 DIN 被消耗殆尽使水华消亡的. 此实验基本上可反映水柱(尤其是真光层)中发生的消耗和再生状况.

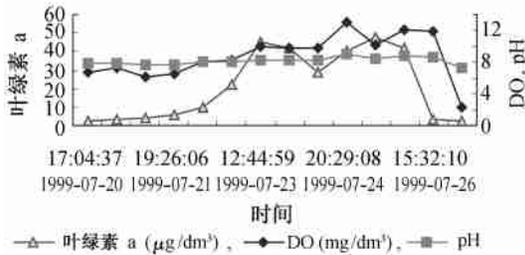


图 11 正常光照下叶绿素 a, pH 和 DO 的变化

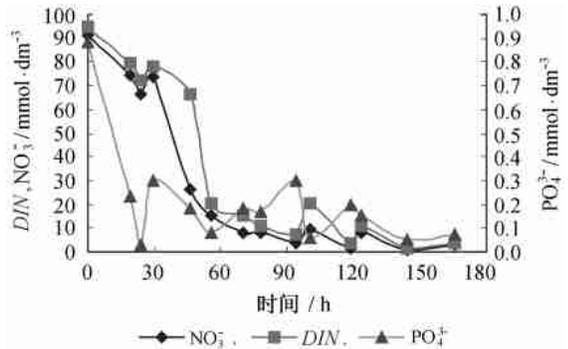


图 12 正常光照下 TIN , NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的变化

在此小生境中, 在水华消失之前, DO 一直保持较高的水平, 脱氮反应不可能发生, 如光合作用按 N/P 为 16 的比例吸收 DIN 和 DIP , 那么比较 DIN 从 $94.97 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 降到 $1.79 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, DIP 应该消耗 $5.82 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, 但实际上原海水样的 DIP 只有 $0.88 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, 这就意味着系统缺少约 $5 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 的 DIP . 然而从实验过程 DIP 变化曲线已明显地呈现, DIP 虽出现暂时的缺乏, 但很快就得到补充. 这一部分的补充可能来自水样的无机颗粒磷释放出的 DIP ; 另一部分则是由于浮游生物的代谢、死亡——有机颗粒的降解、再生和反复利用, 这一部分是主要的.

还须提及的是在避光情况下的实验, 显然水华不可能发生, 但 TIN , NO_3^- 和 PO_4^{3-} 依然呈增大趋势, 尤其是在第 4 天 PO_4^{3-} 同样出现一高值峰, 只是幅度较小(见图 13); 其后又有所下降, 可能是由于悬浮颗粒吸附-缓冲作用的结果^[20]. 这一实验基本上反映了真光层以下水体的再生状况, 而且表明其再生周期与正常光照类似并同时说明了氮和磷再生过程确有差异.

也许人们会问“为何同为珠江口的水, 在培养瓶里会发生水华, 而此时珠江口水域水华并

未发生?”产生这一差别的主要原因之一是因为培养瓶是一平静的小生境, 水体没有产生层化, 有机态降解所产出(再生)的 DIP 能及时补充, 为浮游植物再利用; 夏季珠江口水域层化稳定, 虽然有机质在珠江河口盐跃层上能滞留较长的时间, 但盐跃层附近为高叶绿素、高细菌生物量、多新鲜有机质、高溶解氧的条件, 很可能成为有机质降解和营养盐再生的重要界面, 并以此来支持上层水体的初级生产. 另一方面正如上述底层再生的大量 DIP 并不可能及时补充到上层, 磷限制没有得到较充分的缓解, 因而一般说来夏季水华未能发生(当然也不能排除其他因素的影响), 但必须提及的是, 如夏季有一些突发事件发生(如台风), 破坏跃层, 底层高浓度的营养盐迅速补充到上层水体时, 也可能出现水华和赤潮, 因此必须重视.

当秋后季风变化, 水体层化消失, 水体充分混合, 底层高浓度的营养盐补充到上层水体, 将为高生产力的形成提供支持.

4 结论

综合上述珠江口区现场调查和培养实验的结果及讨论分析得出以下几点结论:

(1) 源于径流和河口区周围环境废弃物的排放, 珠江口夏季氮存量十分丰富, 而磷相对贫乏, 大部分区域形成高 N/P 的水体, 磷成为初级生产力的限制因素, 但在最大浑浊带和口外海区其限制因素却分别是光和 DIN .

(2) 氮主要的赋存型态是可溶无机氮, 占总氮的 71%; 反之, 悬浮颗粒磷则占总磷的 45.5%, 成为主要成分. 从河向海输运过程中氮和磷的形态和浓度均发生复杂的变化: 在内伶仃洋的低盐度区, DIN 和 TN 随盐度增大浓度有所提高, 显示有新的源补充; 从盐度大于 15 至口外海区, 由于浮游植物的吸收利用和外海水的稀释, DIN 和 TN 浓度随盐度增大以较大的梯度下降. DIP 和 TP 则在 3 段盐度区间明显出现不同的变化过程, 而且表层 DIP 的变化曲线恰与中、底层成相反的镜像, 这说明两者(在不同的盐度范围和层次)存在不同的形态变化作用机制和方向相反的反应.

(3) 夏季水体层化稳定, 氮和磷的生物地球化学反应在跃层上方以浮游植物吸收和消耗(移出) DIN 和 DIP 为主, 跃层下方水体则以 DIN 和 DIP 的再生和积累为主. 当层化消失(或被破坏), 上下水体充分混合, 将完成一个长周期的循环.

(4) 水体中磷的“缓冲”, DIP 的浓度变化较小是因其再生的相对速率比 DIN 大, 尤其是跃层上方再生的 DIP 可直接为浮游植物所反复利用以及颗粒物表面磷与水体中离子交换-吸/脱附平衡的结果. DIN 浓度的下降不仅有浮游植物吸收和外海水稀释的作用, 而且形态变化过程中较大部分的氮以 DON 赋存(因低氧区的存在), 还可能有脱氮反应.

(5) 在高 N/P 的珠江口海域, PO_4^{3-} 的快速再生可成为水华的引发因素并持续供给水华藻类的生长, 水华消亡的因素之一却是发生水华的局部水体 DIN 被消耗殆尽, 使 DIN 成为终极

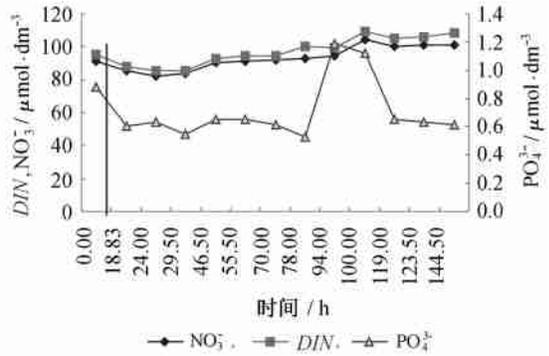


图 13 避光情况下 TIN , NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的变化

限制因素.

衷心感谢在执行此次现场调查任务中南海分局“海监 74”号的全体船员为之付出的辛勤劳动, 南海分局环境监测中心同事的密切协作和所提供叶绿素 a 的现场测试资料.

参考文献:

- [1] 胡明辉, 杨逸萍, 徐春林, 等. 长江口浮游植物生长的磷酸盐限制[J]. 海洋学报, 1989, 11(4): 439—443.
- [2] WANG Z. Evaluation of water quality in the Zhujiang Estuary, China[A]. TOMOTO OSHI O, DONALD M A, TAKAHISA Ned. Red Tides Biology, Environmental Science and Toxicology[M]. New York: Elsevier, 1989. 109—112.
- [3] YANG D B. Nutrients and chlorophyll a variation during red tides in Jinhae Bay, Korea[A]. TOMOTO OSHI Okaichi, DONALD M Anderson, TAKAHISA Nemat. Red Tides Biology, Environmental Science and Toxicology[M]. New York: Elsevier, 1989. 237—240.
- [4] MEYBECK M, CAUWET G, DESSERG S, et al. Nutrients (organic C, P, N, Si) in the eutrophic River Loire (France) and its estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1988, 27: 595—624.
- [5] POKRYFKI L, RANDALL R E. Nearshore hypoxia in the bottom water of the northwestern Gulf of Mexico from 1981 to 1984[J]. Mar Evtl Res, 1987, 22: 75—90.
- [6] TURNER R E, RABALAIS N N. Coastal eutrophication near the Mississippi River Delta[J]. Nature, 1994, 368: 619—621.
- [7] PAKULSKI J D. Microbial metabolism and nutrient cycling in the Mississippi and Atchafalaya River[J]. Plumes Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2000, 50: 173—184.
- [8] GARBER J H. Laboratory study of nitrogen and phosphorus remineralization during the decomposition of coastal plankton[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1984, 18: 685—702.
- [9] RENDEL A R, HORROBIN T M, JICKELLS T D, et al. Nutrient cycling in the Great Ouse Estuary and its impact on nutrient fluxes to the Wash, England[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1997, 45: 653—668.
- [10] HUDSON J J, TAYLOR W D. Measuring regeneration of dissolved phosphorus in planktonic communities[J]. Limnol Oceanogr, 1996, 41: 1560—1565.
- [11] DOWNING J A. Marine nitrogen: phosphorus stoichiometry and the global N:P cycle[J]. Biogeochemistry, 1997, 37: 237—252.
- [12] HUDSON J J, TAYLOR W D, SCHINDLER D W. Planktonic nutrient regeneration and cycling efficiency in temperate lakes[J]. Nature, 1999, 400(12): 659—661.
- [13] 王肇鼎, 彭云辉. 珠江口水域的营养元素[A]. 张经. 中国主要河流口的生物地球化学研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1996. 16—36.
- [14] 梁松, 钱宏林. 珠江口及其邻近海域赤潮的研究[A]. 梁松. 南海资源与环境研究文集[C]. 广州: 中山大学出版社, 1999. 189—195.
- [15] GB12764.4—91, 海洋调查规范[S].
- [16] STEPANAU SKAS R, LEONARDSON L. Bioavailability of wetland derived DON to freshwater and marine bacterioplankton[J]. Limnol Oceanogr, 1999, 44(6): 1477—1485.
- [17] 潘建明, 周怀阳, 扈传昱, 等. 夏季珠江口沉积物中营养盐剖面分布和界面交换通量[J]. 海洋学报, 2002, 24(3): 52—59.
- [18] PHILIP N F. Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: a primer on the phosphate buffer mechanism[J]. Limnol Oceanogr, 1988, 33(4, Part 2): 649—668.
- [19] LEWIS E F, SHAWN L. Factors controlling the concentration of soluble phosphorus in the Mississippi Estuary[J]. Limnol Oceanogr, 1985, 30(4): 826—832.
- [20] MICHAEL D K, ROBERT A B. Adsorption of phosphate in anoxic marine sediments[J]. Limnol Oceanogr, 1980, 25(5): 797—806.

- [21] REDFIELD A C, KETCHUP B H, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition of seawater[A]. HILL M N, GOLDBERG E D, ISELIN C O D et al. The sea: Vol. 2[M]. London: Interscience Publishers, 1963. 26—77.
- [22] TEYRRELL T. The relative influences of nitrogen and phosphorus on oceanic primary production[J]. *Nature*, 1999, 5(400): 525—531.
- [23] VALDERRAMA J C. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters[J]. *Marine Chemistry*, 1981, 10: 109—122.
- [24] WATT W D, HARYESE R. Tracer study of the phosphorus cycle in seawater[J]. *Limnol Oceanogr*, 1963, 8(2): 267—285.

N and P in waters of the Zhujiang River Estuary in summer

LIN Yi-an^{1, 2, 3}, SU Jilan^{1, 2, 3}, HU Chuan-yu^{1, 2}, ZHANG Mei^{1, 2},
LI Yi-an^{1, 2, 3}, GUAN Wei-bing^{1, 2, 3}, CHEN Jie-chong³

(1. *Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China*; 2. *Key Laboratory of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography of State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China*; 3. *Center for Coastal and Atmospheric Research, Hong Kong University of Science and Technology (HKUST), Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong, China*)

Abstract: Based on the data obtained by field survey and experiments of the Zhujiang River Estuary during July 17~28, 1999, the cycle, regeneration and restriction of N and P in water masses are studied. The results show that there is a large content of N in the Zhujiang River Estuary waters, and it belongs to a high N/P area in the world. With the water mass transported from river to sea, the speciation and concentration of N and P present a violent variation in the waters. Among others, there is new supply on the N, and the supplemental volume may be even larger than the absorbing capacity of plankton photosynthesis somewhere. Because of plankton absorbing, migration action of species variation and being intruded and being diluted by the seawater, the concentration of DIN was so constantly reduced and that the N/P was even lower than 16 off the Zhujiang River Estuary. The variation of concentration of PO_4^{3-} become mirror image each other between the surface layer and the bottom layer water, which indicates that both the directions of biogeochemical action of P are contrary. The plankton absorbing is primary process in the surface layer, but the regeneration takes precedence in the middle layer and the bottom layer. Comparatively speaking, one point is the migration ratio of DIN is greater than DIP and the other is the turbidity (or light), P and N are the limit factors of the primary productivity in three areas (from the river gate to the maximum turbidity zone, middle waters of the estuary and off the estuary) respectively. The results of incubation show that the bloom of plankton lead to the considerable decrease of concentration of DIN, but the concentration of PO_4^{3-} is in a small scope vibration and keeps a more steady concentration level. It is inferred that the cycle and regeneration of P are more rapid than N, and the regeneration of P can directly supply primary product in euphotic and become a factor bringing to the plankton bloom in the waters, but the reason of the bloom passing away is the DIN being used up in the end. Through contrast study of biogeochemical cycle of N and P, similarities and differences of the process of cycle and regeneration between N and P are explicated, and infer potentiality of the denitrification action in the hypoxia area is inferred.

Keywords: nitrogen; phosphorus; variation of speciation; restriction factor; Zhujiang River Estuary