

王朝晖, 杨宇峰, 宋淑华, 等. 2011 大亚湾海域营养盐的季节变化及微表层对营养盐的富集作用 [J]. 环境科学学报, 31(2): 307-315
Wang ZH, Yang Y F, Song SH, *et al* 2011 Seasonal changes in nutrients and their accumulation in the surface micro layer in Daya Bay, South China Sea[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(2): 307-315

大亚湾海域营养盐的季节变化及微表层对营养盐的富集作用

王朝晖^{1,2*}, 杨宇峰^{1,2}, 宋淑华¹, 付永虎¹, 邓邦平¹, 王庆¹, 谷阳光¹

1 暨南大学水生生物研究所, 广州 510632
2 热带亚热带水生生态工程教育部工程研究中心, 广州 510632

收稿日期: 2010-05-19 修回日期: 2010-06-15 录用日期: 2010-06-18

摘要: 于 2007 年 5 月 ~ 2008 年 4 月对大亚湾海域微表层、次表层和底层氮 (N)、磷 (P)、硅 (Si) 营养盐进行了每月一次的周年调查和比较分析。结果表明, 大亚湾海域营养盐含量较前期调查略有上升, 可溶性无机氮 (DIN)、可溶性无机磷 (DIP)、可溶性硅酸盐 (DSi) 的平均值分别为 8.93、0.41 和 9.41 $\mu\text{mol L}^{-1}$, 养殖区营养盐含量明显较高。DIN 组成以 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为主, 在 3 个水层中, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在微表层中的百分比含量相对较高, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在次表层中的百分比含量较高。大亚湾海域 DIN、DSi 含量丰富, DIP 含量较低, N:P 远远高于 Redfield 比值, 浮游植物的生长明显受到 P 限制。微表层 DIP 和 DSi 含量明显较高, 且波动明显。大亚湾海域 N、P 以有机营养物质为主, 微表层中 DIN 百分比含量较低, DIP 百分比含量较高。微表层对营养盐具有显著富集作用, 平均富集系数在 1.31 ~ 4.68 之间; 对磷的富集作用较强, 对 DIP 和总磷 (TP) 的平均富集系数分别达到 4.68 和 1.95。微表层对不同营养盐的富集概率在 47.2% ~ 97.2% 之间, 其中, 对 TP 和 DSi 的富集概率最高。调查结果表明, 近年来大亚湾水质有进一步恶化的趋势, 而微表层营养盐结构的变化可能会导致该水层生物群落结构的改变。

关键词: 营养盐; 氮; 磷; 硅; 大亚湾; 微表层

文章编号: 0253-2468(2011)02-307-09 中图分类号: X145 文献标识码: A

Seasonal changes in nutrients and their accumulation in the surface micro layer in Daya Bay, South China Sea

WANG Zhaohui^{1,2*}, YANG Yufeng^{1,2}, SONG Shuhua¹, FU Yonghu¹, DENG Bangping¹, WANG Qing¹, GU Yangguang¹

1 Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632
2 Engineering Research Center of Tropical and Subtropical Aquatic Ecological Engineering Ministry of Education, Guangzhou 510632

Received 19 May 2010 received in revised form 15 June 2010 accepted 18 June 2010

Abstract A comparison study of the nutrient status in the surface micro layer, sub-surface and bottom water was carried out monthly from May 2007 to April 2008 in Daya Bay, South China Sea. Nutrients included dissolved inorganic nitrogen (DIN, the sum of ammonium, nitrites and nitrates), dissolved inorganic phosphorus (DIP, orthophosphates), and dissolved inorganic silica (DSi, silicate), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP). The nutrient levels were higher than those reported in previous studies and concentrations of DIN, DIP and DSi were 8.93, 0.41 and 9.41 $\mu\text{mol L}^{-1}$ respectively. Nutrient levels in cultural areas were obviously higher. Ammonium and nitrate were the main components of DIN. Within the three water layers, and higher proportions of nitrate and ammonium were in the surface microlayer and sub-surface layer, respectively. DIN and DSi was sufficient in Daya Bay, however DIP was generally low. The N:P ratios were far over the Redfield ratio, and the growth of phytoplankton was mostly limited by phosphorus. TN and TP were dominated by organic nitrogen and phosphorus in Daya Bay. Lower proportions of DIN and higher proportions of DIP were recorded in the surface microlayer. All nutrients were significantly accumulated in the surface microlayer, and the average enrichment factors ranged from 1.31 to 4.68. The strongest enrichment effect was recorded for phosphorus, especially for DIP, and enrichment factors were 4.68 and 1.95 for DIP and TP, respectively. The enrichment ratio ranged between 47.2% and 97.2%, and the highest ratios were recorded for TP and DSi. Results from this survey suggested that the water quality in Daya Bay tends to further deteriorate, and changes in nutrient structure in the surface microlayer might result in a shift

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40773063, 40673062)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40773063, 40673062)
作者简介: 王朝晖 (1968—), 女, 教授 (博士), E-mail: wz@jnu.edu.cn * 通讯作者 (责任作者)
Biography: WANG Zhaohui (1968—), female professor (Ph.D.), E-mail: wz@jnu.edu.cn * Corresponding author

of plankton structure

Keywords nutrient nitrogen phosphorus silica Daya Bay surfacem icrolayer

1 引言 (Introduction)

海洋微表层是海洋与大气之间相互作用的一个重要界面,具有独特的物理、化学和生物性质.越来越多的研究表明,微表层在海气交换、通量计算、气候变化、海洋生物研究等方面都具有重要意义 (Cincinelli *et al.*, 2005; Joux *et al.*, 2006; Wurl *et al.*, 2009; Garcia-Fló *et al.*, 2009). 海洋微表面对营养盐、有机化合物、重金属以及微生物、浮游生物等均具有明显富集作用,但不同研究中微表面对不同化学物质的富集系数差别较大 (Cincinelli *et al.*, 2005; Joux *et al.*, 2006; Weinbauer *et al.*, 2009; Guitart *et al.*, 2010).

国内对胶州湾、厦门港、珠江口、大亚湾等海域微表层营养盐、有机物、微量金属的分布特征及富集作用进行了一些初步研究,结果显示,海洋微表面对大部分研究对象富集作用明显,且在海洋物质地化循环过程中具有重要作用 (洪华生等, 1988; 陈金斯等, 1994; 潘明祥等, 2000; 彭云辉等, 2000; 2002; 张安慧等, 2002; Zhang *et al.*, 2003; 陈小睿等, 2006). 随着海洋污染的加剧,我国近岸海域水体营养盐状况发生了巨大变化,微表层营养盐分布特征也应有所变化,但我国有关海洋微表层的研究大部分是 20 世纪 90 年代以及 21 世纪初期的调查资料,其结果不能全面反映近年来海洋环境巨变过程中的微表层营养盐特征. 基于此,本研究于 2007 年 5 月至 2008 年 4 月在大亚湾大鹏澳海域,对微表层、次表层和底层的水环境因子、浮游植物、浮游动物进行了周年监测,在分析微表层浮游植物、浮游动物分布与群落结构的基础上 (宋淑华等, 2009; 邓邦平等, 2009), 分析各水层营养盐状况,重点对微表层营养盐特征进行分析,以揭示微表层营养盐结构特征,为海洋环境保护及微表层在海洋环境调控中的作用研究提供背景资料和参考.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 采样点的设置

于 2007 年 5 月 ~ 2008 年 4 月在大亚湾大鹏澳海域设置 3 个采样点 (图 1), 进行每月一次的周年调查. 站位 1 (St.1) 位于鱼排网箱养殖区, 站位 2 (St.2) 位于贝类养殖区, 站位 3 (St.3) 位于非养殖区.

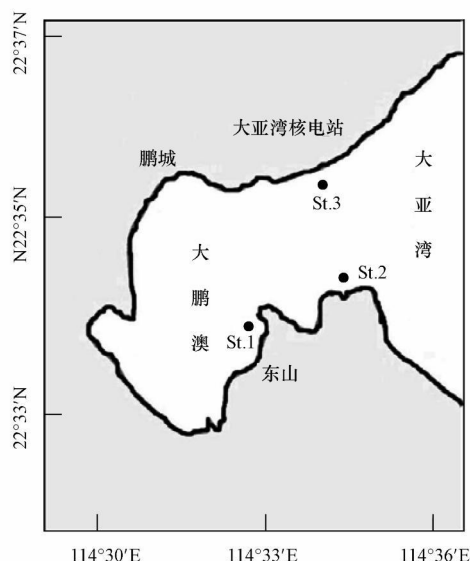


图 1 大亚湾海域采样点的设置

Fig. 1 Sampling stations in Daya Bay

2.2 样品的采集

次表层和底层样品用采水器采集, 次表层样品为离水面 0.5 m 的水层水样, 底层水样为采集自距离水底 0.5 m 的水样. 微表层样品使用平板玻璃 (长 × 宽 × 厚: 40 cm × 60 cm × 0.5 cm) 采集, 将平板玻璃垂直没入海中, 然后以 $15 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的速度提起, 用自制的硅橡胶刮片, 刮取微表层水样 (厚度约为 50 μm).

样品采集后, 测定可溶性无机盐的样品立即用 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤, 而测定总氮总磷的样品则不需要过滤. 所有水样置于冰壶中冷藏保存, 在 2~3 h 内带回实验室进行营养盐分析.

2.3 样品分析

样品分析项目包括可溶性无机氮 (DIN, 为氨态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、亚硝态氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 之和)、可溶性无机磷 (正磷酸盐, DIP)、可溶性硅酸盐 (DSi)、总氮 (TN) 和总磷 (TP). TN 和 TP 含量按照“我国近海海洋综合调查与评价专项—海洋化学调查技术规程”进行测定, 其他营养盐的分析测定均参照《海洋调查规范第 4 部分: 海水要素调查》(GB/T 12763.4-2007) 中的标准方法进行.

微表层富集系数为微表层营养盐浓度与次表层营养盐浓度的比值, 微表层富集概率为富集系数大于 1.0 的样品数占总样品的百分率.

3 结果 (Results)

3.1 DN 的周年变化

调查期间, 大鹏澳海域各调查站位 DN 含量的周年变化范围为 $1.00 \sim 22.87 \mu\text{mol L}^{-1}$, 年平均值为 $8.93 \mu\text{mol L}^{-1}$, DN 的季节分布趋势不明显 (图 2). 在浮游植物高峰期的 2007 年 7~8 月及 2008 年 2 月 (宋淑华等, 2009), 由于浮游植物对营养盐的大量吸收利用, 使 DN 含量出现一个低谷, 特别是在浮游植物数量较高的 St 2 和 St 3 位于鱼类养殖区的 St 1 的 DN 含量明显较高, 周年平均含量为 $12.02 \mu\text{mol L}^{-1}$, 而 St 2 和 St 3 的周年平均含量分别为 7.61 和 $7.15 \mu\text{mol L}^{-1}$.

调查发现, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 是 DN 的主要组

成部分, NO_2^--N 含量较低. 养殖区特别是鱼类养殖区 NH_4^+-N 相对含量较高, 3 个站位 NH_4^+-N 平均百分比含量分别为 63.9%、57.0% 和 55.8%; 本调查中 NO_3^--N 的相对含量偏低, 3 个站位平均含量分别为 32.2%、36.5% 和 38.1%; NO_2^--N 所占比例最低, 年平均值仅为 3.8%.

NH_4^+-N 含量的周年变化趋势与 DN 相近, 周年变化范围在 $0.36 \sim 14.76 \mu\text{mol L}^{-1}$ 之间, 整个海湾的周年平均值为 $5.29 \mu\text{mol L}^{-1}$, NH_4^+-N 含量的最低值也出现在 2008 年 2 月. NO_3^--N 含量变化范围为 $0.51 \sim 10.48 \mu\text{mol L}^{-1}$, 整个海湾周年平均值为 $3.43 \mu\text{mol L}^{-1}$. NO_2^--N 含量的整体水平较低, 变化范围为 $0.01 \sim 1.25 \mu\text{mol L}^{-1}$, 整个海湾的周年平均值为 $0.30 \mu\text{mol L}^{-1}$.

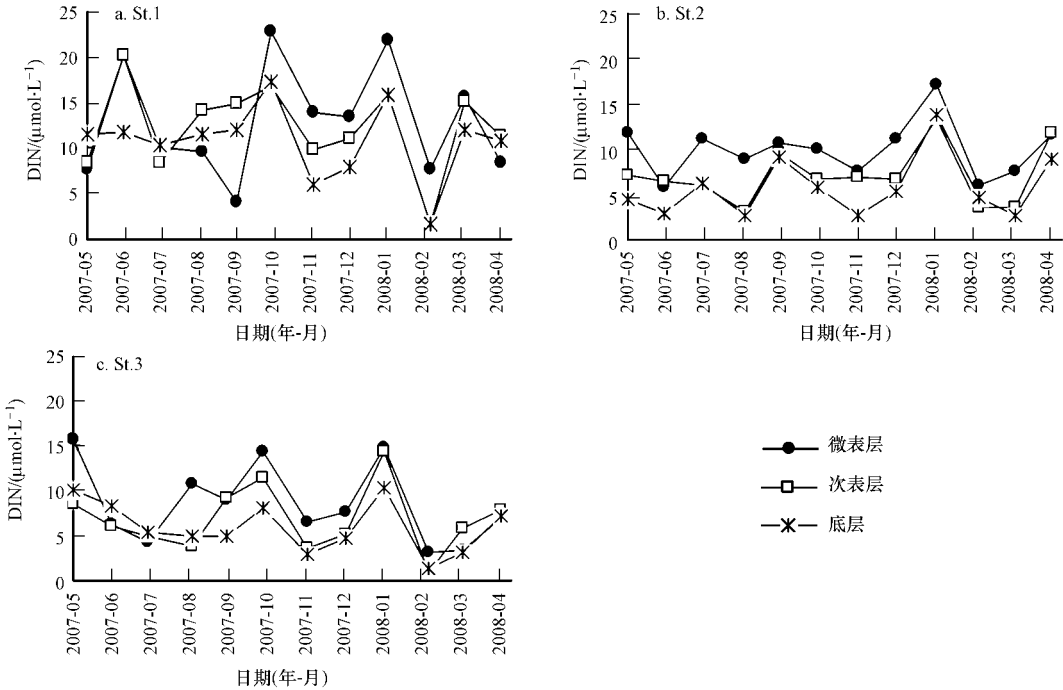


图 2 大亚湾海域不同水层和站位 DN 含量的季节变化

Fig. 2 Seasonal changes in DN content in different water layers in Daya Bay from 2007 to 2008

由图 3 可知, 三个水层中各形态 N 的百分比含量相近, 季节变化趋势一致. 整体来说, NH_4^+-N 占据明显优势, 但在冬季 NO_3^--N 百分比含量较高. 相对而言, NO_3^--N 在微表层中的百分比含量相对较高, NH_4^+-N 在次表层中百分比含量较高, NO_2^--N 在底层中百分比含量相对较高.

3.2 DIP 和 DSi 的周年变化

调查期间, DIP 含量周年变化范围为 $0.01 \sim 2.95 \mu\text{mol L}^{-1}$, 整个海湾的周年平均值为 0.41

$\mu\text{mol L}^{-1}$, 同样在 2007 年 7~8 月及 2008 年 2 月较低 (图 4a). 微表层 DIP 含量明显较高而且波动非常明显, 最高值和最低值之间相差了 86.8 倍; 次表层和底层 DIP 含量波动则相对较平缓, 且两者季节变化趋势相近. 微表层中 DIP 的周年平均含量为 $0.71 \mu\text{mol L}^{-1}$, 远远高于同期调查中的次表层 ($0.26 \mu\text{mol L}^{-1}$) 和底层 ($0.27 \mu\text{mol L}^{-1}$). 位于鱼类养殖区 St 1 的 DIP 含量较高, 三站位年平均含量分别为 0.54 0.33 $0.39 \mu\text{mol L}^{-1}$.

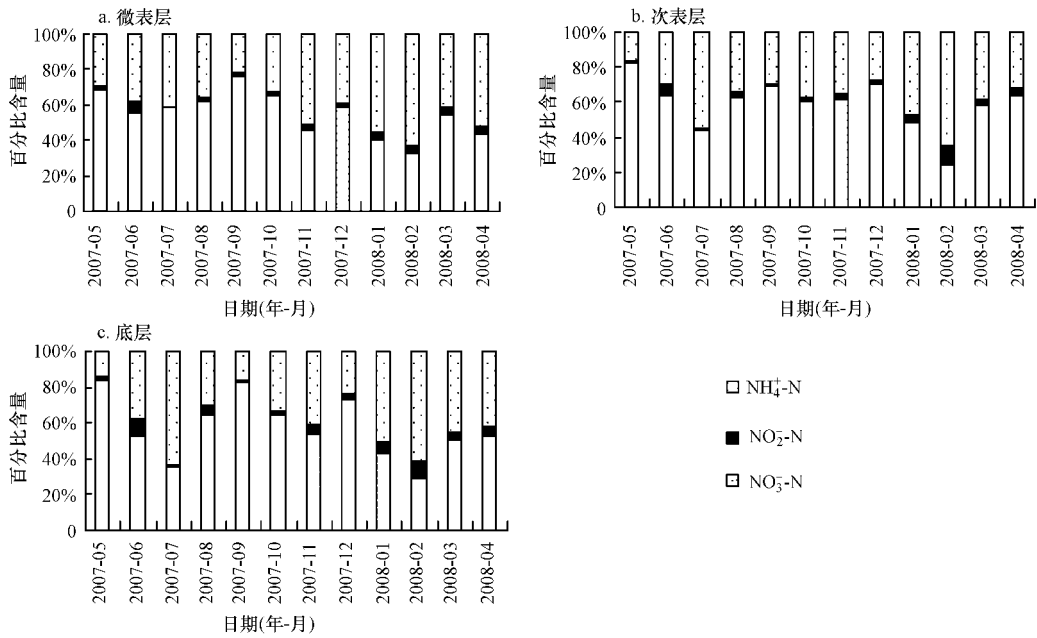


图 3 大亚湾海域不同水层三氮百分比含量的季节变化

Fig 3 Seasonal changes in percentage of three forms of nitrogen in different water layers in Daya Bay from 2007 to 2008

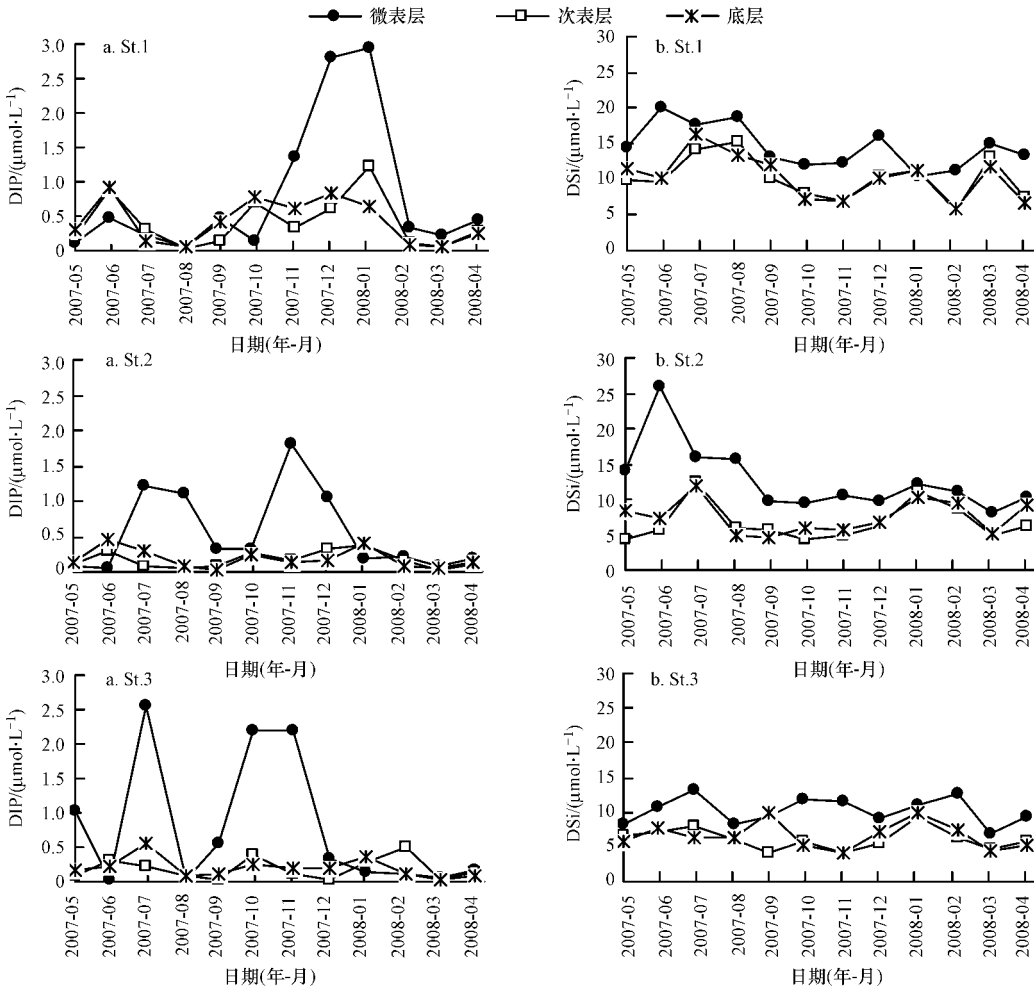


图 4 大亚湾海域不同水层和站位 DIP 和 DSi 含量的季节变化

Fig. 4 Seasonal changes in DIP content and DSi content in different water layers and stations in Daya Bay from 2007 to 2008

大亚湾海域硅含量丰富, DSi 含量在 $4.02 \sim 25.84 \mu\text{mol L}^{-1}$ 之间, 平均值为 $9.41 \mu\text{mol L}^{-1}$, 季节变动规律不明显(图 4b). St.1 的 DSi 含量较高, 3 站位年平均含量分别为 11.67 、 8.95 、 $8.11 \mu\text{mol L}^{-1}$. 微表层 DSi 含量较高, 且波动较明显.

3.3 营养盐之间比例的变化

由表 1可知, 大亚湾海域各站位 N:P 变动十分

明显, 周年变化范围为 $1.66 \sim 542.43$ 平均值为 64.03 远远高于 Redfield 比值; Si:N 的周年变化范围为 $0.42 \sim 6.30$ 平均值为 1.36 Si:P 的周年变化范围为 $5.17 \sim 590.12$ 平均值为 72.25 表层中 N:P 明显较高, 平均值为 76.91 而微表层中则是 Si:P 较高, 平均值为 80.23 微表层和底层中 Si:N 均较高, 分别为 1.48 和 1.42 .

表 1 大亚湾不同层次水样中三氮的百分比、 DN/TN 、 DIP/TP 以及营养盐之间比值
Table 1 Proportions of different forms of inorganic nitrogen, ratios of DN/TN and DIP/TP , and nutrient ratios in surface microlayer, sub-surface and bottom water in Daya Bay

水层	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{DN}$	$\text{NO}_2^--\text{N}/\text{DN}$	$\text{NO}_3^--\text{N}/\text{DN}$	DN/TN	DIP/TP	N:P	Si:N	Si:P
微表层	55.03%	3.11%	41.86%	26.66%	26.93%	60.25	1.48	80.23
次表层	59.02%	3.67%	37.31%	34.47%	24.77%	76.91	1.19	72.54
底层	57.11%	4.69%	38.20%	31.43%	22.65%	54.92	1.42	63.96
平均	57.05%	3.82%	39.13%	30.85%	24.78%	64.03	1.36	72.25
变化范围	11.62% ~ 90.40%	0.09% ~ 18.74%	8.10% ~ 80.01%	3.08% ~ 79.63%	1.12% ~ 66.74%	1.66~ 542.43	0.42~ 6.30	5.17~ 590.12

3.4 TN 、 TP 的周年变化

由图 5可知, 微表层的 TN 和 TP 明显较高, 且

波动较为明显; 而次表层和底层 TN 、 TP 含量基本平稳, 仅在个别月份出现一些峰值, 如 2008 年 3 月 TN

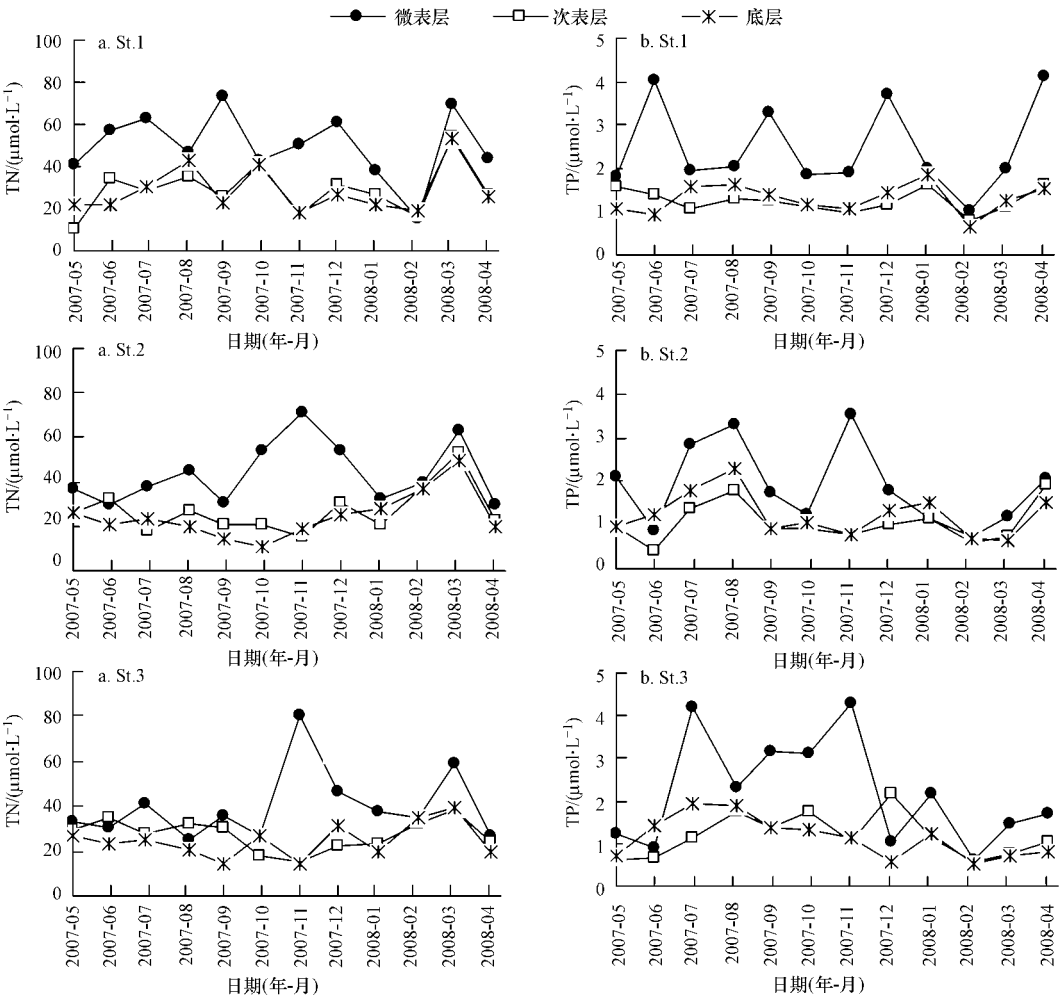


图 5 大亚湾海域不同水层和站位 TN 和 TP 含量的季节变化
Fig. 5 Seasonal changes in TN and TP contents in different water layers in Daya Bay from 2007 to 2008

的峰值及 2007 年 7~ 8 月 St 2 和 St 3 出现的 TP 峰值. TN、TP 的变化范围和平均值分别为 10.69~ 80.46 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 、0.41~ 2.95 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 和 32.78 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 、1.52 $\mu\text{mol L}^{-1}$.

从无机营养盐占总营养盐的比例来看, 大亚湾海域 N、P 以有机营养物质为主, DN 和 DIP 占 TN 和 TP 的平均百分比分别为 30.9% 和 24.78% (表 1). DN 百分比含量以次表层较高, 微表层较低; DIP 百分比含量以微表层较高, 底层较低.

3.5 微表层对营养盐的富集作用

由表 2 可知, 微表层对大部分营养盐具有显著的富集作用, 富集系数波动幅度较大, 平均富集系

数介于 1.31~ 4.68 之间. 微表层对 P 的富集作用较强, 对 DIP 和 TP 的平均富集系数分别达到 4.68 和 1.95. 而对 DIN (包括 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 DN) 的富集作用稍弱. 虽然位于鱼类养殖区的 St 1 各种营养盐含量均较高, 但该站位微表层对营养盐的富集系数较低, 明显低于 St 2 和 St 3.

微表层对不同营养盐的富集概率在 47.2% ~ 97.2% 之间, 对 DSi 和 TP 的富集概率最高, 在全年 36 个样品中仅有 1 个样品不具有明显富集作用; TN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的富集概率次之, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的富集概率和富集系数均较低.

表 2 微表层对营养盐的富集系数和富集概率
Table 2 Enrichment factor and enrichment ratio of nutrients in surface microlayer

站点	富集系数							
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	DN	DIP	DSi	TN	TP
St 1	1.35 [*]	1.19	1.80 [†]	1.31 [*]	2.21 ^{**}	1.49 ^{**}	1.93 [*]	1.98 [*]
St 2	1.87 ^{**}	1.19	1.56 [*]	1.55 ^{**}	5.31 ^{**}	2.10 ^{**}	1.80 [*]	1.89 [*]
St 3	1.44 ^{**}	1.54 ^{**}	1.85 [*]	1.48 ^{**}	6.54 ^{**}	1.73 ^{**}	1.65 [*]	1.99 [*]
平均值	1.55 ^{**}	1.31 [*]	1.74 [*]	1.45 ^{**}	4.68 ^{**}	1.78 ^{**}	1.79 [*]	1.95 [*]
变化范围	0.22~ 6.47	0.49~ 6.06	0.39~ 4.12	0.27~ 4.49	0.11~ 22.4	0.92~ 4.64	0.78~ 5.41	0.49~ 4.47
富集概率	63.9%	47.2%	80.6%	69.4%	69.4%	97.2%	89.9%	97.2%

注: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

4 讨论 (Discussion)

4.1 大亚湾营养盐结构特征与海洋生态环境的稳定

长期以来, 大亚湾海域是我国沿海内湾中水质最好的海湾之一 (王朝晖等, 2004), 且被认为是低营养盐水平、高初级生产力的海域 (郑爱榕等, 2001). 本次调查中, 大亚湾海域溶解态无机 N、P、Si 的周年平均值分别为 8.93、0.41 和 9.41 $\mu\text{mol L}^{-1}$, DN 和 DIP 均在国家一类海水标准 (GB 3097-1997) 范围内. 大亚湾海域营养盐含量全年分布均匀, 补充及时, 这也是维持该海域较高初级生产力的基础 (Wang *et al.*, 2009). 但在营养盐补充较少的冬季, 浮游植物细胞密度高峰能使营养盐特别是 DN 和 DIP 含量下降, 如 2008 年 2 月份, 以中肋骨条藻为优势种的浮游植物细胞密度达到全年次高峰, 此时 DN 和 DIP 含量均下降至较低水平.

与其他近岸海域营养盐结构相近, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是 DN 的主要组成部分, 且鱼类养殖区 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较高. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是浮游植物优先使用的 N 源, 养殖区丰富的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 能提高 N 的利用效率

(沈国英等, 2002). 同时, 本次调查结果显示, 大亚湾海域有机营养物质含量丰富, DN 和 DIP 在 TN 和 TP 中的比例仅为 25% ~ 30% 左右. 甲藻等鞭毛藻类在有机营养盐利用方面的能力远高于硅藻等非鞭毛藻类 (Yanaguchi *et al.*, 2005; Lovdalen *et al.*, 2008), 有机营养物质的增加有利于鞭毛藻类的生长, 这也是近年来大亚湾海域有毒有害鞭毛藻类赤潮发生频率不断增长的原因之一.

近 20 年来, 大亚湾海域营养盐结构发生了巨大变化, 20 世纪 90 年代中期以前, 大亚湾大鹏澳海域尚属于 N 缺乏性水体, 从 90 年代后期开始, 该海域 DN 含量逐渐增加, 而 DIP 含量则逐渐下降, DN 含量由 1985~ 1986 年度的 18 $\mu\text{g L}^{-1}$ 左右上升至 1998 年的 80 $\mu\text{g L}^{-1}$ 左右, 而 DIP 含量则由 35 $\mu\text{g L}^{-1}$ 左右下降至 4 $\mu\text{g L}^{-1}$ 左右, 并且从 N 限制型向 P 限制型转变 (彭云辉等, 2002a; Wang *et al.*, 2008). 水体中 N 含量上升使浮游植物生物量迅速增加 (Riegman, 1995), P 元素被浮游植物大量利用, 藻细胞内 P 在水华消亡后随着藻体的沉降而进入沉积物中, 由于 P 循环为沉积型循环, 再生利用速率较低, 其结果导致水体中 DIP 含量急剧下降.

本次调查中, N、P含量均比 20世纪 90年代末略有增加(王朝晖等, 2004 Wang *et al.*, 2008), 而且也高于本课题组在 2005~2006年间在同一海域的调查结果(Wang *et al.*, 2009), 说明近年来大亚湾水质有进一步恶化的趋势. 与该海域前期调查结果相近, 大亚湾海域仍然为 P限制性海域, N:P平均值达到 64.03. 浮游植物的生长受到 P的严重限制, P限制的出现概率高达为 71.3%, 而 N限制和 Si限制出现频率仅为 10%左右(宋淑华等, 2009). 一般来说, 硅藻生长对 N和 Si需求较高, 而水体中 N和 Si的耗尽也是近岸海域硅藻水华消亡的重要原因(Riegman, 1995). 大亚湾海域 N含量的上升, 促使小型硅藻的生长(Wang *et al.*, 2009); 而丰富的硅酸盐含量使硅藻生长不会受到硅限制, 这也是该海域硅藻占据优势的重要因素和基本条件. 但是, 硅藻的快速生长可导致水体中可溶性营养盐含量的急剧下降, 造成 N、Si等营养元素的暂时性缺乏, 此时甲藻等鞭毛藻类利用其对有机营养盐的利用能力以及对营养盐缺乏的耐受能力占据浮游植物群落优势, 从而引发赤潮.

4.2 微表层对营养盐的富集作用

大量研究表明, 海洋微表层对营养盐、有机物、重金属以及微生物等具有明显富集作用(洪华生等, 1988; 彭云辉等, 2002b; Cincinelli *et al.*, 2005; Joux *et al.*, 2006; Wurl *et al.*, 2009; Garcia-Flóres *et al.*, 2009; Weinbauer *et al.*, 2009; Guitart *et al.*, 2010), 但不同研究中微表层对不同化学物质的富集系数差别较大. 在厦门港、九龙江海域微表层对营养盐、有机物和微量金属的平均富集系数多在 1.0~2.0之间(洪华生等, 1988); 潘明祥等(2000)在 1998年对大亚湾微表层、次表层营养元素进行了昼夜变动研究, 发现微表层对磷酸盐没有富集作用; 彭云辉等(2002b)于 1998~1999年对大亚湾不同层次的营养盐状况进行了调查, 发现微表层对 COD、BOD 及无机氮均具有明显富集作用, 富集系数可达到 2.5~3.0以上, 但对无机磷的富集作用较低, 而且调查结果差别较大, 有的航次微表层对磷酸盐具有明显富集作用, 而有的航次则无富集作用.

本研究中微表层对各种营养盐均具有明显的富集作用, 平均富集系数介于 1.31~4.68之间, 富集概率在 47%~97%之间. 微表层对磷元素的富集作用最为明显, 对 DIP 和 TP 的平均富集系数分别为 4.68和 1.95, 远高于 1998~1999年的调查结果

(潘明祥等, 2000; 彭云辉等, 2002b). 由于微表层对磷元素的富集作用, 使微表层 N:P明显低于次表层, 而且微表层 DIP/TP值也较高, 微表层中易被浮游植物吸收利用的无机态 P含量增加. 微表层这种营养盐结构特征对该水层的生物群落结构产生一定影响, 特别是在 P限制性的大亚湾海域. 同期的浮游生物调查结果显示, 微表层浮游植物中蓝藻细胞数量和百分比含量均显著增加(宋淑华等, 2009), 而浮游动物则表现为原生动物百分比含量明显增加(邓邦平等, 2009). 微表层浮游生物群落结构的变化与微表层营养盐结构的关系尚需进一步研究.

研究结果显示, 微表层富集系数波动十分剧烈, 对同一营养因子的富集系数之间最大可相差 207倍. 微表层富集作用的差异首先与微表层的复杂性有关, 微表层作为一个活性很强的气水界面, 与大气和水体交换活跃, 物质浓度时刻处在动态变化过程中(Zhang *et al.*, 2003). 因此, 虽然整体上微表层对营养盐具有明显富集作用, 但其富集程度随着海域水文、水化及气象因子的波动而差异显著. 此外, 调查方法的差异也影响调查结果, 目前国内对微表层调查多使用平板玻璃法, 玻璃板提升的速度以及提升过程中水分的蒸发都会影响实验结果.

5 结论 (Conclusions)

1) 2007~2008年度大亚湾海域可溶性无机氮、磷、硅的平均值分别为 8.93、0.41 和 9.41 $\mu\text{mol L}^{-1}$, 营养盐水平尚在国家一类海水标准范围内, 但高于前期调查结果, 说明近年来大亚湾水质有进一步恶化的趋势, 而且养殖区营养盐含量明显较高.

2) 大亚湾海域氮、硅含量丰富, 磷含量较低, N:P远远高于 Redfield比值, 浮游植物的生长受到磷限制.

3) 可溶性无机氮组成以氨态氮和硝态氮为主, 相对来说, 硝态氮在微表层的百分比含量较高, 氨态氮在次表层的百分比含量较高; 有机氮磷相对含量较高, 微表层中无机氮百分比含量较低, 而无机磷百分比含量较高.

4) 微表层营养盐含量波动显著, 而且对各类营养盐均具有明显富集作用, 对磷元素的富集作用较强, 导致微表层 N:P的下降, 微表层营养盐结构的变化可能会导致该水层生物群落结构的改变.

责任作者简介: 王朝晖 (1968—), 女, 博士, 教授, 主要从事水域生态学、海洋环境与赤潮研究。E-mail: twzh@jnu.edu.cn

参考文献 (References):

- 陈金斯, 李永飞, 朱卓洪. 1994. 珠江口水域微表层中的衡量金属 [J]. 热带海洋, 13(3): 25-30
- Chen J S, Li Y F, Zhu Z H. 1994. Trace metals in the surface microlayer of Zhujiang River mouth [J]. Tropical Oceanology, 13(3): 25-30 (in Chinese)
- 陈小睿, 宫海东, 单宝田, 等. 2006. 胶州湾海洋微表层铜络合的容量 [J]. 环境科学, 27(5): 885-891
- Chen X R, Gong H D, Shan B T, *et al.* 2006. Copper complexing capacities of seawater in surface microlayer in Jiaozhou Bay [J]. Environmental Science, 27(5): 885-891 (in Chinese)
- Cicinelli A, Stortini A M, Checchini L, *et al.* 2005. Enrichment of organic pollutants in the sea surface microlayer (SML) at Terra Nova Bay, Antarctica: influence of SML on superficial snow composition [J]. Journal of Environmental Monitoring, 7: 1305-1312
- 邓邦平, 杨宇峰. 2009. 大鹏澳养殖海域微表层与次表层水质及浮游动物群落特征的比较 [J]. 暨南大学学报 (自然科学与医学版), 30(1): 101-105
- Deng B P, Yang Y F. 2009. Comparative studies on water quality and community structure of zooplankton between the sea surface microlayer and the subsurface microlayer in mariculture areas in Dapeng Cove [J]. Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition), 30(1): 101-105 (in Chinese)
- García-Fabrón N, Dachs J, Bayona JM, *et al.* 2009. Surface waters are a source of polychlorinated biphenyls to the coastal atmosphere of the North-Western Mediterranean Sea [J]. Chemosphere, 75: 1144-1152
- Guitart C, García-Fabrón N, Miquel J C, *et al.* 2010. Effect of the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sea surface microlayer on their coastal air-sea exchanges [J]. Journal of Marine Systems, 79: 210-217
- 洪华生, 林杰. 1988. 厦门港、九龙江口海洋微表层营养盐、有机物、微量金属分布特征初探 [J]. 海洋学报, 10(6): 695-703
- Hong H S, Lin J. 1988. Distribution of nutrients, organic matters and micro metals in surface microlayer of Xiamen Harbor and Jianglong River mouth [J]. Acta Oceanologica Sinica, 10(6): 695-703 (in Chinese)
- 沈国英, 施并章. 2002. 海洋生态学 [M]. 北京: 科学出版社. 292-294
- Shen G Y, Shi B Z. 2002. Marine Ecology [M]. Beijing: Science Press. 292-294 (in Chinese)
- Joux F, Agogue H, Obemosterer I, *et al.* 2006. Microbial community structure in the sea surface microlayer at two contrasting coastal sites in the northwestern Mediterranean Sea [J]. Aquatic Microbial Ecology, 42: 91-104
- Lovdal T, Eichner-Grossart H P, *et al.* 2008. Competition for inorganic and organic forms of nitrogen and phosphorus between phytoplankton and bacteria during an Emiliana huxleyi spring bloom [J]. Biogeochemistry, 5: 371-383
- 潘明祥, 张正斌, 王肇鼎, 等. 2000. 大亚湾海水微表层生物-化学研究 II. (二) 生物-化学特性的周日变化规律 [J]. 热带海洋, 19(2): 57-63
- Pan M X, Zhang Z B, Wang Z D, *et al.* 2000. Biological and chemical studies of sea-surface microlayer at Daya Bay II. (B) diurnal variations of biological and chemical characteristics [J]. Trophic Oceanology, 19(2): 57-63 (in Chinese)
- 彭云辉, 孙丽华, 陈浩如, 等. 2002a. 大亚湾海区营养盐的变化及富营养化研究 [J]. 海洋通报, 21(3): 44-49
- Peng Y H, Sun L H, Chen H R, *et al.* 2002a. Study on eutrophication and change of nutrients in the Daya Bay [J]. Marine Science Bulletin, 21(3): 44-49 (in Chinese)
- 彭云辉, 王肇鼎, 孙丽华, 等. 2002b. 大亚湾微表层和次表层海水营养盐的研究 [J]. 台湾海峡, 21(3): 310-316
- Peng Y H, Wang Z D, Sun L H, *et al.* 2002b. Studies on nutrients of sea surface microlayer and hypolayer at Daya Bay [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 21(3): 310-316 (in Chinese)
- 彭云辉, 王肇鼎, 潘明祥, 等. 2000. 大亚湾海区微表层、次表层 BOD 和 COD 的研究 [J]. 海洋湖沼通报, 4: 13-19
- Peng Y H, Wang Z D, Pan M X, *et al.* 2000. Studies on BOD and COD of sea surface microlayer (SML) and subsurface layer (SSL) water in Daya Bay [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 4: 13-19 (in Chinese)
- Riegman R. 1995. Nutrient related selection mechanisms in marine phytoplankton communities and the impact of eutrophication on the planktonic foodweb [J]. Water Science Technology, 32: 63-75
- 宋淑华, 王朝晖, 付永虎, 等. 2009. 大亚湾大鹏澳海域微表层浮游植物群落研究 [J]. 海洋环境科学, 28(2): 181-185
- Song S H, Wang Z H, Fu Y H, *et al.* 2009. Research on phytoplankton community at micro-layer in Dapengao Area of Daya Bay [J]. Marine Environmental Science, 28(2): 181-185 (in Chinese)
- Spatharis S, Tsirtsis G, Danielidis D R, *et al.* 2007. Effects of pulsed nutrient inputs on phytoplankton assemblage structure and blooms in an enclosed coastal area [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 73: 807-815
- Wang Y S, Lou Z P, Sun C C, *et al.* 2008. Ecological environment changes in Daya Bay, China, from 1982 to 2004 [J]. Marine Pollution Bulletin, 56(11): 1871-1879
- 王朝晖, 齐雨藻, 李锦蓉, 等. 2004. 大亚湾养殖区营养盐状况分析与评价 [J]. 海洋环境科学, 23(2): 25-28
- Wang Z H, Qi Y Z, Li J R, *et al.* 2004. Analysis and evaluation trophic status in aquaculture areas of Daya Bay [J]. Marine Environmental Science, 23(2): 25-28 (in Chinese)
- Wang Z, Zhao J, Zhang Y, *et al.* 2009. Phytoplankton community structure and environmental parameters in aquaculture areas of Daya Bay, South China Sea [J]. Journal of Environmental Science, 21: 1268-1275
- Weinbauer M G, Bettarel Y, Cattaneo R, *et al.* 2009. Viral ecology of organic and inorganic particles in aquatic systems: avenues for

further research[J]. Aquatic Microbial Ecology, 57: 321-341

Wurl O, Miller L, Ruttgers R, *et al.* 2009. The distribution and fate of surface-active substances in the sea-surface microlayer and water column[J]. Marine Chemistry, 115: 1-9

Yamaguchi H, Sakou H, Fukami K, *et al.* 2005. Utilization of organic phosphorus and production of alkaline phosphatase by the marine phytoplankton, *Heterocapsa circularisquama*, *Fibrocapsa japonica* and *Chaetoceros ceratosporum* [J]. Plankton Biology Ecology, 52: 67-75

张安慧, 张正斌, 刘莲生, 等. 2002. 胶州湾海水微表层粘度及其在海-气通量计算中的作用 [J]. 青岛海洋大学学报, 32 (3): 456-462

Zhang A H, Zhang Z B, Liu L S, *et al.* 2002. The viscosity of sea surface microlayer in the Jiaozhou Bay and the effect on the flux of chemical species between air and sea [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 32 (3): 456-462 (in Chinese)

Zhang Z, Liu L, Liu C, *et al.* 2003. Studies on the sea surface microlayer II. The layer of sudden change of physical and chemical properties[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 264: 148-159

郑爱榕, 沈海维, 刘景欣, 等. 2001. 大亚湾海域低营养盐维持高生产力的机制探讨 I [J]. 海洋科学, 25(11): 48-52

Zheng A R, Shen H W, Liu J X, *et al.* 2001. The mechanisms of low nutrients-high productivity in Daya Bay[J]. Marine Science, 25 (11): 48-52 (in Chinese)