

# 大亚湾海域低营养盐维持高生产力的机制探讨 I \*

郑爱榕 沈海维 刘景欣 李文权 陈清花

(厦门大学海洋系,亚热带海洋研究所 361005)

**提要** 利用 2000 年 4 月大亚湾海域的现场调查数据,分析水体中各种形态氮的含量、分布、转化及其影响因素,探讨大亚湾海域低营养盐维持高生产力的原因。调查结果表明:大亚湾海域水体仍属贫氮海区,氮、磷比约为 12:1,生产力水平依然受氮控制;大亚湾海域氮以溶解态的形式居多,占总氮的 74.8%,颗粒态占 25.2%;而溶解态中又以有机氮居多,占总氮的 62.1%。孵化实验表明:(1) 充氧条件下氨氮向硝氮转化,缺氧条件下硝氮向氨氮转化;(2) 水体中溶解有机氮在有氧条件下可以降解转化为无机氮。这意味着占绝对优势的溶解有机氮降解转化为无机氮可能是大亚湾海域低营养盐维持高生产力的主要原因之一。

**关键词** 低营养盐,高生产力,机制,大亚湾

 氮是藻类生长所必需的营养物质,它构成浮游植物细胞的蛋白质分子、参与生物的新陈代谢,是某些自然海区初级生产力的限制因子。通常,海洋生态系的生产力与

\* 中国科学院大亚湾海洋生物开放综合实验站基金资助课题 P9907。

收稿日期:2000-10-23;修回日期:2001-07-08

营养盐是正相关的即高营养盐高生产力,或低营养盐低生产力。但研究<sup>[1]</sup>表明:大亚湾海水的营养盐含量与大洋水相比是低的,而从海区的叶绿素含量和生产力来看却是高的。因此,大亚湾生态系的低营养盐与高生产力似乎是矛盾的。本文利用2000年4月大亚湾海域的现场调查数据,分析水体中各种形态氮的含量、分布、转化及其影响因素,研究大亚湾海域氮的相互转化规律,以探讨水体“低营养盐维持高生产力”的机制。

## 1 采样和实验方法

### 1.1 采样和分析方法

采样站位见图1,分别按光衰减0,1%和10%的深度采表、中和底层水样。水样氨氮用次溴酸钠氧化法,硝酸氮用锌-镉还原偶氮比色法,亚硝酸氮用重氮偶氮比色法测定。总氮(TN)的测定采用过硫酸钾氧化法。总溶解态氮(TDN)的测定与TN一样,但水样是经0.45 μm醋酸纤维膜过滤的。颗粒态氮(PN) = TN - TDN,溶解有机氮(DON) = TDN - TIN总无机氮, TIN为三态无机氮之和。沉积物总氮的测定采用浓硫酸、高氯酸氧化法。温度、盐度、pH、溶解氧、无机磷、叶绿素等的测定按海域监测规范(GB 17378-1998)进行。

### 1.2 各种形态氮的转化实验

取2号站位水样,用253 nm的滤网滤去摄食者,装入500 ml锥形瓶中,外面蒙上黑布使体系保持黑暗,将瓶子置于恒温(约25℃)的流动水中,进行孵化实验。分别在第1,3,4,7和第9天采样,照上述方法测定TN,TDN及三氮,计算PN,DON。实验设置了充氧(用充氧机24h充气)、不充氧和添加沉积物对照组。沉积物取自大亚湾大鹏澳岸边淤泥,添加量为

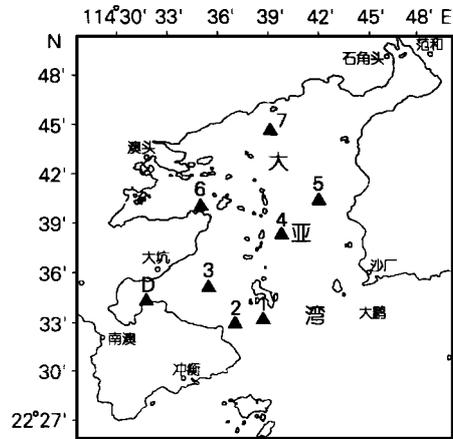


图1 采样站位示意  
Fig.1 Locations of sampling

0.49 g/L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 各种形态氮的含量和营养盐水平

调查结果(表1)表明:大亚湾水域中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>N, PN和DON含量的变化范围分别在0.00~3.62, 0.00~6.20, 0.29~14.37和0.61~30.99 μmol/L,平均分别为1.52, 0.93, 4.99和12.32 μmol/L。对照表2可知:NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>N的结果与1996年3月的几乎一致,而NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N的平均含量比1985年4月,1991年4月,1993年4月,1995年5月的测定结果高,2000年比1985年增加了5倍;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>N的平均含量比1985年4月,1991年4月增加

表1 各种形态氮的含量

Tab.1 Content of nitrogen species

水层	表层	中层	底层*	平均值			
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> N(μmol/L)	(0.00 ~ 0.11)	0.04	(0.00 ~ 0.12)	0.04	(0.00 ~ 0.49)	0.10	0.06
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> N(μmol/L)	(0.00 ~ 3.62)	1.84	(0.00 ~ 3.10)	1.11	(0.00 ~ 2.43)	1.62	1.52
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> N(μmol/L)	(0.00 ~ 1.11)	0.23	(0.00 ~ 1.62)	0.36	(0.54 ~ 6.20)	2.43	0.93
TIN(μmol/L)	(0.00 ~ 3.90)	2.10	(0.10 ~ 3.52)	1.51	(1.44 ~ 7.95)	4.14	2.51
PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> P(μmol/L)	(0.08 ~ 0.34)	0.24	(0.07 ~ 0.34)	0.20	(0.06 ~ 0.95)	0.40	0.27
TN(μmol/L)	(11.06 ~ 38.40)	21.62	(11.17 ~ 39.75)	19.75	(11.21 ~ 27.55)	17.78	19.82
TDN(μmol/L)	(5.49 ~ 27.92)	14.87	(5.61 ~ 34.51)	15.84	(3.29 ~ 26.52)	13.57	14.82
PN(μmol/L)	(1.32 ~ 14.37)	6.75	(0.29 ~ 13.50)	3.91	(0.73 ~ 7.92)	4.20	4.99
DON(μmol/L)	(3.67 ~ 24.02)	12.77	(3.57 ~ 30.99)	14.33	(0.61 ~ 21.57)	9.43	12.32
N/P**	(0.0 ~ 39.4)	13.1	(0.3 ~ 35.2)	9.5	(6.0 ~ 30.8)	13.5	11.95
Chl a (mg/m <sup>3</sup> )	(2.2 ~ 7.4)	3.6	(0.6 ~ 8.9)	3.9	(0.4 ~ 8.1)	2.3	3.34

\* 底层没有1号站; \*\* N/P = TIN/PO<sub>4</sub><sup>-</sup>P。

表 2 大亚湾海域无机氮、磷和叶绿素 a 平均含量的时间变化

Tab.2 Variation of mean content of inorganic nitrogen, phosphorus and chlorophyll a with time

作者	时间 (年.月)	NO <sub>2</sub> -N (μmol/L)	NO <sub>3</sub> -N (μmol/L)	NH <sub>4</sub> -N (μmol/L)	TIN (μmol/L)	PO <sub>4</sub> -P (μmol/L)	N/P	Chl-a(mg/m <sup>3</sup> )
徐恭昭等 <sup>[1]</sup>	1985.4 1986.5	0.14	0.25	0.59	0.98	1.09	0.90	1.08
陈金斯 <sup>[2]</sup>	1991.4							
朱卓洪 <sup>[3]</sup>	1991.4	0.06	0.44	0.58	1.08	0.32	3.38	2.66
黄西能 <sup>[4]</sup>	1992.5							
黄西能等 <sup>[5]</sup>	1993.4	0.03	0.35	1.77	2.15	/	/	/
李文权等 <sup>[6]</sup>	1995.5	0.09	0.84	1.48	2.40	0.29	8.28	/
王小平等 (1995)	1996.3	0.20	1.57	1.07	2.84	0.70	4.05	/
本文	2000.4	0.06	1.52	0.93	2.51	0.27	11.95	3.34

约 58%，比 1993 年 5 月，1995 年 5 月减少了 37%~47%。净结果 TIN 在 1985~2000 年期间逐步增加，2000 年比 1985 年增加约 1.6 倍，说明大亚湾水域无机氮水平在逐步提高，但本航次 TIN 平均浓度为 2.51 μmol/L，仍比浮游植物对无机氮最佳浓度要求的下限 5.71 μmol/L<sup>[2]</sup> 低，并且根据郭卫东等<sup>[7]</sup>对中国近岸海域潜在性富营养化程度评价的营养级划分原则：DIN < 14.28 μmol/L，PO<sub>4</sub>-P < 0.97 μmol/L，N/P = 8~30 的水体属贫营养级，这意味着大亚湾水域依然是个贫氮海区。此外，虽然十几年来 PO<sub>4</sub>-P 的含量已大幅降低(如本航次比 1985 年已减少 75%)，但水体 N/P 仍然小于浮游植物对营养盐吸收同化的最佳比例 16:1，为 11.95，因而氮还是该海区海洋生产力的限制因子。与

此同时叶绿素水平十几年来也提高了约 2 倍，说明大亚湾海域至今依然保持着“低营养盐高生产力”的特征。

### 2.2 各种形态氮在总氮中的分布

由表 3 可知：3 种形态的无机氮占 TIN 的百分比变化较大，NO<sub>3</sub>-N 最大占 60.6%，NH<sub>4</sub>-N 其次占 37.0%，NO<sub>2</sub>-N 很少占 2.4%。湾西南部的 2、3 号站、湾西北部的 6 号站和湾北部的 7 号站 NO<sub>3</sub>-N 占比例较大，在 65%~80% 之间。靠近湾口(1 号站)、湾中央(4 号站)和湾东部(5 号站) NH<sub>4</sub>-N 占比例较大，在 52%~63% 之间。这表明 1、4 和 5 号站的无机氮之间还未达到热力学平衡状态，因为海洋水体中各种形态氮的相互转化达到热力学平衡时，氮应基本上以 NO<sub>3</sub>-N

表 3 各种形态氮的平均含量及其在 TN 和 TIN 中所占百分比

Tab.3 Mean content of nitrogen species and making up percent of TN and TIN

站位	TN 平均值 (μmol/L)	PN		DON		TIN		NH <sub>4</sub> -N		NO <sub>3</sub> -N		NO <sub>2</sub> -N	
		平均值	占 TN 百分比 (%)	平均值	占 TN 百分比 (%)	平均值	占 TN 百分比 (%)	平均值	占 TIN 百分比 (%)	平均值	占 TIN 百分比 (%)	平均值	占 TIN 百分比 (%)
1*	28.14	7.41	26.3	19.58	69.6	1.15	4.1	0.61	53.0	0.55	47.8	0.00	0.00
2	33.50	3.85	11.5	25.53	76.2	4.12	12.3	1.03	25.0	3.04	73.8	0.05	1.2
3	23.62	0.78	3.3	21.19	89.7	1.65	7.1	0.32	19.4	1.32	80.0	0.01	0.6
4	12.52	5.04	40.3	5.79	46.2	1.70	13.6	1.07	62.9	0.62	36.5	0.01	0.6
5	16.31	6.45	39.5	6.24	38.3	3.62	22.2	2.07	57.2	1.48	40.9	0.07	1.9
6	12.28	4.54	37.0	6.41	52.2	1.33	10.8	0.31	23.3	0.96	72.2	0.06	4.5
7	15.10	7.68	50.9	3.90	25.8	3.52	23.3	1.02	29.0	2.32	65.9	0.18	5.1
平均值	19.82	4.99	25.2	12.32	62.1	2.52	12.7	0.93	37.0	1.52	60.6	0.06	2.4

\* 1 号站只有上和中两层。

形式存在。从表 3 还可以看出:大亚湾海域的氮以溶解态的形式居多, 占总氮的 74.8%, 颗粒态仅占 25.2%; 而溶解态中又以有机氮居多, 占总氮的 62.1%。金启增等<sup>[8]</sup> 1992~1993 年对大亚湾大鹏澳 5 个航次的调查结果表明 DON 占海水总氮的 81%, 悬浮颗粒有机氮占 11%, 无机三态氮占 8%, 这与本研究的结果很接近, 由此可见大亚湾的高生产力可能与水体中高含量的溶解有机氮有关。因为溶解有机氮包含氨基酸、脲、肌酸和甲基胺等一系列含氮化合物, 这些含氮有机物来自浮游生物代谢产物及其残骸分解产物, 有少部分被浮游植物直接吸收, 大部分被细菌分解成无机氮。徐立等 1995 年研究了丙氨酸、半胱氨酸、尿素以及生活污水中的溶解有机氮化合物对骨条藻等海洋浮游植物生长速度的影响, 结果表明这些有机氮可作为藻类生长的一种氮源, 能被藻类间接或直接地吸收利用, 对藻类的生长起到维持或促进作用。显然, 这一研究与上述观点不谋而合, 后述的 DON 与 TIN 之间的转化实验亦可支持这一观点。

### 2.3 各种形态氮与其他因子的相关性

由表 4 可知:  $\text{NO}_3^- \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  与 TIN 之间, TIN 和 TDN 与 DON 之间呈显著的正相关关系, 这与上述结果—— $\text{NO}_3^- \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  占 TIN, DON 占 TN 和 TDN 的绝对优势相符。此外,  $\text{NH}_4^+ \text{N}$  和 TIN 与 DO 之间呈显著的负相关关系, 说明氨氮随着溶解氧的增加而下降, 同时也与无机氮转化实验的结果(图 2)——氨氮在在充氧条件下减小, 不充氧条件下增加相一致。

### 2.4 各种形态氮的转化

#### 2.4.1 溶解有机氮与无机氮的转化

图 2 是各种形态氮转化的孵化实验结果。显然, 在充氧条件下(图 2a), 随着孵化时间的延长, 水体中 DON 由于氧化作用在第 1 天迅速下降(40%), 此后下降趋缓, 体现了小分子有机氮化合物在富氧环境中的

表 4 无机氮、溶解有机氮与其他因子的相关性

Tab.4 Relationship between inorganic, dissolved organic nitrogen and other factors

线性回归方程	相关系数	显著水平 (%)	n
$\text{NO}_3^- \text{N} = 0.61 + 0.23 \text{ Chl-a}$	0.494 0	95	18
$\text{NH}_4^+ \text{N} = 9.20 - 1.19 \text{ DO}$	-0.867 0	99	20
$\text{TIN} = 11.8 - 1.34 \text{ DO}$	-0.724 0	99	20
$\text{TIN} = 1.46 + 1.12 \text{ NH}_4^+ \text{N}$	0.830 5	99	20
$\text{TIN} = 0.66 + 1.22 \text{ NO}_3^- \text{N}$	0.664 7	99	20
$\text{DON} = -5.09 + 0.88 \text{ TIN}$	0.870 3	99	20
$\text{DON} = -1.76 + 0.95 \text{ TDN}$	0.975 7	99	20

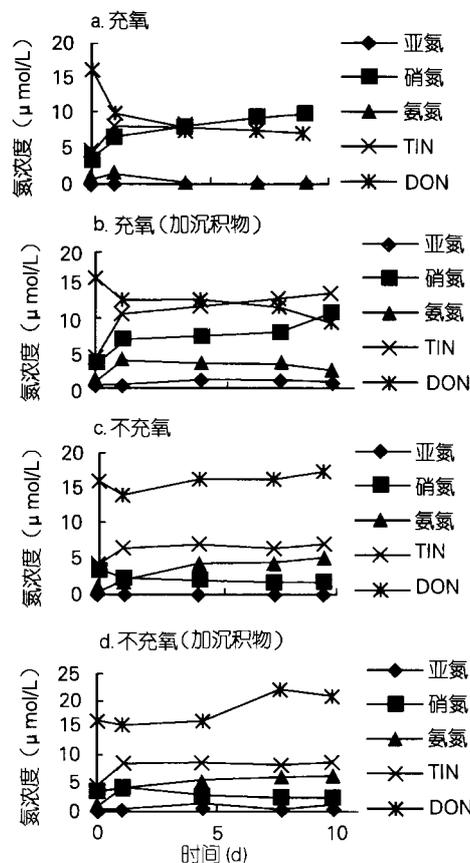


图 2 各种形态氮的相互转化

Fig. 2 Transformation of nitrogen species

可降解性; 而 TIN 由于 DON 的分解转化在第 1 天就增加 85%, 此后继续增加 21%。在不充氧的条件下(图 2c), 第 1 天由于水体尚有氧存在, 因而 DON 可被氧化故略有下降(13%), 此后随着溶解氧的耗竭, 浮游植物衰亡并分解, 因而 DON 又略有增加(20%); 由于 DON 的氧化降解转化, 第 1 天 TIN 有较大幅度增加(49%), 以后较为恒定。将图 2b 与图 2a 对照, 图 2c 与图 2d 对照发现: 在添加沉积物的体系中, 不论是充氧还是不充氧状态, DON 与 TIN 的转化趋势与未添加沉积物的极其相似, 只是在添加沉积物的体系中由于沉积物的释放, TIN 在第 1 天增加的量是未添加的 1.4 倍(充氧状态)和 1.8 倍(不充氧状态)。上述实验结果充分表明: 在有氧条件下, DON 可被氧化转变为无机氮供浮游植物吸收。

#### 2.4.2 无机氮之间的转化

由图 2a 可知: 在充氧条件下, 氨氮在孵化的第 1 天略有增加(因 DON 降解转化为氨氮的速率大于氨

氮被氧化的速率),此后就被氧化而下降,至第4天就降为零;硝氮则随着孵化时间逐步升高,亚硝氮基本不变。而在不充氧条件下(图2c),氨氮与硝氮的转变与充氧条件正好相反,即氨氮逐渐增加,硝氮逐步下降。在添加沉积物的状况下不论充氧(图2b)还是不充氧(图2d),水体无机三氮之间的转化趋势均与未添加沉积物的一致。只是添加沉积物后因沉积物中氨氮的释放和水体中DON的降解转化,水体氨氮含量均大于未添加沉积物的含量。这说明贫氧或缺氧环境中,硝氮可被还原为氨氮,水体氨氮占绝对优势;在充氧环境中,氨氮可被转化成硝氮,水体硝氮占绝对优势。

### 3 结论

本航次调查研究结果表明:大亚湾海域水体仍属贫氮海区,氮、磷比约为12:1,生产力水平依然受氮控制;大亚湾海域的氮以溶解态的形式居多,占总氮的74.8%,颗粒态占25.2%;而溶解态中无机氮占总氮的12.7%,其中三氮的含量是硝氮>氨氮>亚硝氮,有机氮占总氮的62.2%,居绝对优势。

孵化实验表明:水体中无机氮之间的转化与水体含氧程度有关。在充氧条件下氨氮向硝氮转化,硝氮占绝对优势;在缺氧条件下硝氮向氨氮转化,水体氨氮占绝对优势。实验结果还表明水体中溶解有机氮在有氧条件下可以降解转化为无机氮,这意味着占绝对

优势的溶解有机氮降解转化为无机氮可能是大亚湾水域低营养盐维持高生产力的主要机制之一。

### 参考文献

- 1 徐昭恭等.大亚湾环境与资源.安徽:安徽科学出版社,1989.76~91
- 2 陈金斯.见:中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站编.大亚湾生态系统研究(一).北京:气象出版社,1999.30~35
- 3 朱卓洪.见:中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站编.大亚湾生态系统研究(一).北京:气象出版社,1999.25~29
- 4 黄西能.见:中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站编.大亚湾生态系统研究(一).北京:气象出版社,1999.36~45
- 5 黄西能,朱卓洪,徐春梅等.见:潘金培,王肇鼎编.中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站研究年报(1994~1996).北京:科学出版社,1998.94~101
- 6 李文权,崔淑芬,蔡阿根等.见:潘金培,王肇鼎编.中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站研究年报(1994~1996).北京:科学出版社,1998.76~85
- 7 郭卫东,章小明,杨逸萍等.台湾海峡,1998,17(1):64~70
- 8 金启增,沈寿彭.见:中国科学院大亚湾海洋生物综合实验站编.大亚湾生态系统研究(一).北京:气象出版社,1999.1~8

## THE MECHANISM OF LOW NUTRIENTS- HIGH PRODUCTIVITY IN DAYA BAY

ZHENG Ai-rong SHEN Hai-wei LIU Jing-xin LI Wen-quan CHEN Qing-hua

(Department of Oceanography, Institute of Subtropical Oceanography, Xiamen University, 361005)

Received: Oct., 23, 2000

Key Words: Low nutrients, High productivity, Mechanism, Daya Bay

### Abstract

Ammonia ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), nitrous ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), nitrate ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) and dissolved organic nitrogen (DON) in Daya Bay in April, 2000 were measured. Content, contribution and transformation of nitrogen species were described and their relationship with environmental factors was discussed. The results show that N/P is about 9:1 in Daya Bay seawater, suggests that productivity is still controlled by nitrogen. The test of incubation indicate that: (1) Inorganic nitrogen and their transformation relate to oxidoreduction environment, nitrous was reduced to ammonia when oxygen-poor. Ammonia were converted to nitrous when oxygen-rich and; (2) DON makes up 62% of the total nitrogen could be degraded into inorganic nitrogen under the condition of oxygen-rich, may be a principal cause result in lower nutrients-higher productivity.

(本文编辑:刘珊珊)