

# 南海北部浮游植物生长对营养盐的响应

彭 欣<sup>1</sup>, 宁修仁<sup>1,2,3,\*</sup>, 孙 军<sup>4</sup>, 乐凤凤<sup>1,3</sup>

(1. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012; 2. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012;  
3. 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 杭州 310012; 4. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

**摘要:** 2004 年夏季作者在南海北部海域研究了浮游植物生长的营养动力学, 结物理-化学过程对浮游植物生物量分布的影响与机制进行了研究, 阐明了水平对流和中尺度涡对营养盐分布的影响及浮游植物生长和现存生物量对其的响应。受西南季风和东向沿岸流作用所形成的 Ekman 输送的影响, 南海北部海岸带表层海水作离岸运动, 使深层富含营养盐的冷水爬坡涌升到表层来补充, 激发浮游植物生物量迅速增长。海区反气旋涡使海水辐聚下沉, 造成水体具高温、低盐、高溶解氧浓度、低营养盐浓度和低浮游植物生物量。同时通过现场营养盐加富试验, 发现该海域营养盐是浮游植物生长的主要限制因子, 而且是多种营养元素共同限制了浮游植物的生长, 添加单一的营养盐并不能促进浮游植物的生长。在生物量出现增长的试验组中, 营养盐添加不仅促使浮游植物生物量的增长, 而且也改变了浮游植物的粒级结构和群落结构。例如, 在站 S1008, 培养前叶绿素 a 浓度为  $0.28 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 加富培养 60 h 后浮游植物生物量在 NP 和 NPSi 的试验组中有显著的增加, 叶绿素 a 浓度分别达  $1.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $1.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 培养前粒度分级叶绿素 a 主要以 Pico 级份占优势, 而加富试验结束后, 在 NP 和 NPSi 的试验组以 Nano 级份占优势, 其它试验组仍以 Pico 级份占优势; 同时, 在培养后生物量出现增长的试验组, 浮游植物群落的优势类群从甲藻向硅藻演替。

**关键词:** 南海北部; 浮游植物生长; 营养盐加富; 叶绿素 a; 粒度分级

文章编号: 1000-0933(2006)12-3959-10 中图分类号: Q178.533 文献标识码: A

## Responses of phytoplankton growth on nutrient enrichments in the northern South China Sea

PENG Xin<sup>1</sup>, NING Xiu-Ren<sup>1,2,3,\*</sup>, SUN Jun<sup>4</sup>, LE Feng-Feng<sup>1,3</sup> (1. Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China; 2. State Key Lab of Satellite Ocean Environment Dynamics, Hangzhou 310012, China; 3. SOA Key Lab of Marine Ecosystems and Biogeochemistry, Hangzhou 310012, China; 4. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 3959 ~ 3968.

**Abstract:** The multidisciplinary oceanographic survey and in situ nutrient enrichment experiments were conducted in the northern South China Sea during summer of 2004, aimed at better understanding of the responses of phytoplankton growth on nutrient enrichments. Elucidated the effects of the coastal upwelling resulted from Ekman transportation formed by southwest monsoon and coastal current toward northeast and middle scale eddies on the distribution of nutrients, and effected ultimately on the phytoplankton growth and standing stock, and the responses of the latter to the former, the physical-chemical coupling processes. The water mass with the properties of high temperature, low salinity, high dissolved oxygen concentration, low nutrient concentration and low phytoplankton biomass was found in anticyclonic eddies, resulted from the downwelling induced by water convergence. Results of nutrient enrichment experiments showed that only multi-nutrients adding could stimulate the phytoplankton

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(90211021)

收稿日期: 2005-08-28; 修订日期: 2005-12-31

作者简介: 彭欣(1979-), 男, 江西新余人, 硕士, 主要从事海洋生态学研究。

\*通讯作者 Corresponding author. E-mail: ning-xr@126.com

致谢: 南海分局提供同步观测的水文和化学资料, 特此致谢!

Foundation item: The project was financially supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 90211021)

Received date: 2005-08-28; Accepted date: 2005-12-31

Biography: PENG Xin, Master, mainly engaged in marine ecology.

Acknowledgement: We thank the South China Sea Branch of SOA for providing hydrological and chemical data of the synchronic observation.

growth. At the station of S1008, for example, Chla obviously increased in NP and NPSi experimental groups from  $0.28 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  to  $1.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  and  $1.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  respectively after 60 hours incubation since nutrients adding. Furthermore, we also found that the nutrient enrichments resulted in the successions of not only size-structure but also species structure of phytoplankton communities, i. e. the shifts from picophytoplankton to nanophytoplankton and netphytoplankton, and from dinoflagellates to diatoms.

**Key words:** northern South China Sea; phytoplankton growth; nutrient enrichments; Chla; size-fractionation

在海洋生态系统的研究中,浮游植物生长的上行效应?营养盐补充与再生和浮游植物营养动力学研究越来越受到人们的重视。许多国际重大研究计划,诸如地圈-生物圈计划(IGBP)中的全球海洋通量联合研究(JGOFS)、海岸带陆-海相互作用研究(LOICZ)等均把浮游植物营养动力学列入重要研究内容;而且近来 IGBP 第二阶段提出和实施的关于全球变化海洋科学研究的两个姊妹项目——“GLOBEC(海洋生态系统动力学)”与“IMBER(海洋生物地球化学与生态系统整合研究)”,也把研究与地球系统和全球变化紧密联系的海洋生物地球化学循环和海洋食物网的相互作用,作为新世纪海洋生态系统深入研究的重要方向,从而使浮游植物生长的营养动力学研究进入了更深层次的阶段。

南海是我国四大海中最大的一个近似封闭的海域,也是西太平洋最大的边缘海。南海位于低纬季风区,夏季西南季风盛行。同时南海北部沿岸带既有珠江冲淡水的输入,又受夏季沿岸上升流的影响,营养盐丰富,浮游植物生物量高;陆架区由于受常年跃层的影响,真光层营养盐得不到补充,具有寡营养的特色,特别是海南岛东部和香港东南反气旋涡的存在<sup>[1,2]</sup>,致使表层硝酸盐和磷酸盐浓度经常在检测限(分别为  $0.05$  和  $0.03 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ )附近,使浮游植物的生长受到限制<sup>[3,4]</sup>,叶绿素 a 浓度非常低<sup>[5]</sup>。但是,南海北部浮游植物群落生物量的增长、类别结构和粒级结构对物理-化学海洋学耦合过程、特别是对营养盐及其补充的响应如何?目前尚了解不多。

本研究结合物理过程和化学过程对浮游植物分布的影响与机制进行分析,通过现场营养盐加富试验,即将自然生态与实验生态相结合,阐明南海北部浮游植物生长的营养动力学特征,结果不仅可为南海北部生态系统结构与功能的深入研究积累科学资料,而且也填补南海这一研究的空白。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究海区和采样观测

2004年8月26日至9月6日,在南海北部海域( $110^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$ ,  $18^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$ )使用“海监74”海洋调查船进行了观测和试验。垂直于岸线布设了两条断面(S1和S2),并在两条断面两端之间各加了两个观测站,共计18个站位。水深自近岸浅于50m至东南外海深于2500m的海盆,跨越了沿岸带、陆架区和深海区(图1)。

温度、盐度、营养盐( $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}$ )和叶绿素 a 等参数每站都观测;营养盐加富试验在S1008和S2007站采集表层水进行培养。对盐度和化学参数测定用的水样使用  $1.0 \text{ dm}^3$  的南森瓶采集;对生物样品的采集,用有机玻璃制的  $2.5 \text{ dm}^3$  采水器采集水样,采样层次为表层、10、25、50、75、100、150m层。

### 1.2 环境理化参数的测定

水温测量用颠倒温度计,盐度测量用盐度测定仪,营养盐测定用分光光度计,按《海洋调查规范》<sup>[6]</sup>进行。海面光辐射用光量子计(LF1000 Data Logger, LFCOR Inc)测定。

### 1.3 生物参数的测定

叶绿素 a 的测定采用萃取荧光法<sup>[7]</sup>。量取预先经  $200 \mu\text{m}$  孔宽的筛绢过滤(除去大多数的浮游动物)的水样  $250 \text{ cm}^3$ ,再先后经孔宽  $20 \mu\text{m}$  筛绢(截留小型浮游生物)、孔径  $2.0 \mu\text{m}$  Nuclepore 滤膜(截留微型浮游生物)和 Whatman GF/F 滤膜过滤(截留微微型浮游生物)。截留浮游生物的筛绢和滤膜用 90% 丙酮萃取 18 h,萃取液在唐纳荧光计(Turner Designs Fluorometer, Model 10)上进行测定,程序和计算公式按《海洋调查规范》<sup>[6]</sup>进行。浮游植物样品各层取  $250 \text{ cm}^3$  水样,并立即用中性福尔马林固定,带回实验室;浮游植物鉴定采用 Utermöhl 方

法<sup>[8]</sup>(通常检测大于 5  $\mu\text{m}$  的浮游植物),亚样品于 Hydro-bios 的 Utermöhl 计数框,用 AO 倒置显微镜,在  $\times 200$ 和  $\times 400$  倍下进行物种鉴定与计数。

#### 1.4 营养盐加富培养试验

用 Houskin 球盖式采水器采 1 m 层水样 30  $\text{dm}^3$ ,经 200  $\mu\text{m}$  孔宽的筛绢预过滤,分装入体积为 2.0  $\text{dm}^3$  培养瓶,共分成 6 个试验组:A. 空白(C),B. 添加氮(+N),C. 添加磷(+P),D. 同时添加氮和磷(+NP),E. 添加硅(+Si)和 F. 同时添加氮、磷和硅(+NPSi)。每组设 2 个平行样,共 12 组,然后按要求加入每种营养盐 1  $\text{cm}^3$ (其中硝酸盐浓度为 0.2  $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ,磷酸盐浓度为 0.01  $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ,硅酸盐浓度为 0.2  $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ),摇匀,置于甲板培养箱中模拟现场温度培养 3~4 d,并且在培养过程中经常振荡培养瓶。每隔一定时间取样,以测定其叶绿素 a 浓度的变化;在开始和最后采样分析中,粒度分级叶绿素 a(水样经孔宽 20  $\mu\text{m}$  筛绢、孔径 2.0  $\mu\text{m}$  Nuclepore 滤膜和 Whatman GF/F 滤膜过滤)以分析其粒度结构的变化;另外再取 50  $\text{cm}^3$  水样,加入 3~4  $\text{cm}^3$  福尔马林,用于浮游植物物种鉴定。

## 2 结果

为了便于阐明研究海区浮游植物及其相关环境参数的空间分布格局,将所获得的观测结果,按不同自然地理区划分为沿岸带、陆架区及陆坡和开阔洋。由于真光层深度大多在 50 m 左右,而且 Chl a 浓度最大值也在 50~75 m,因此又将每一自然地理区有关环境参数及粒度分级叶绿素 a 和浮游植物丰度按表层和 50 m 层及水柱积分平均(150 m 以浅)来比较其垂直分布特征(表 1)。

表 1 南海北部有关环境参数和粒度分级 Chl a 及浮游植物丰度平均值( $\bar{X} \pm \text{SD}$ )

参数 Parameter	沿岸带 Coastal zone (<50m) (n=5)			陆架区 Shelf (50~200m) (n=4)			陆坡和开阔洋 Slope + Open sea (>200m) (n=7)		
	表层 Surface	50m	水柱平均 Mean of water column	表层 Surface	50m	水柱平均 Mean of water column	表层 Surface	50m	水柱平均 Mean of water column
Temp (°C)	28.94 $\pm$ 1.12	22.14 $\pm$ 0.18	25.22 $\pm$ 0.30	29.08 $\pm$ 1.10	24.14 $\pm$ 2.41	25.40 $\pm$ 0.72	29.22 $\pm$ 0.29	25.23 $\pm$ 1.43	22.18 $\pm$ 2.62
Sal	30.57 $\pm$ 3.48	34.50 $\pm$ 0.06	33.46 $\pm$ 0.59	33.61 $\pm$ 0.38	34.40 $\pm$ 0.14	34.21 $\pm$ 0.03	33.73 $\pm$ 0.20	34.28 $\pm$ 0.10	34.31 $\pm$ 0.07
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ( $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ )	1.58 $\pm$ 1.89	0.99 $\pm$ 0.64	1.06 $\pm$ 0.53	0.94 $\pm$ 0.77	0.59 $\pm$ 0.75	0.77 $\pm$ 0.85	1.36 $\pm$ 0.40	1.25 $\pm$ 0.36	1.34 $\pm$ 0.42
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ( $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ )	0.15 $\pm$ 0.12	0.14 $\pm$ 0.10	0.29 $\pm$ 0.12	0.07 $\pm$ 0.08	0.17 $\pm$ 0.11	0.12 $\pm$ 0.06	0.05 $\pm$ 0.06	0.10 $\pm$ 0.06	0.10 $\pm$ 0.02
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ )	3.76 $\pm$ 3.01	4.64 $\pm$ 0.75	5.30 $\pm$ 1.64	3.47 $\pm$ 1.19	1.58 $\pm$ 2.39	4.63 $\pm$ 1.70	1.31 $\pm$ 0.64	0.89 $\pm$ 0.60	4.58 $\pm$ 2.89
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ( $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ )	0.12 $\pm$ 0.12	0.16 $\pm$ 0.01	0.19 $\pm$ 0.18	0.08 $\pm$ 0.11	0.26 $\pm$ 0.14	0.21 $\pm$ 0.10	0.09 $\pm$ 0.10	0.15 $\pm$ 0.12	0.47 $\pm$ 0.25
SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ( $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ )	9.98 $\pm$ 7.66	17.75 $\pm$ 4.73	12.87 $\pm$ 7.37	2.73 $\pm$ 1.60	7.10 $\pm$ 3.98	5.99 $\pm$ 3.39	6.45 $\pm$ 3.59	5.67 $\pm$ 3.37	11.46 $\pm$ 4.47
Chl a ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )									
Net-	2.30 $\pm$ 4.82	0.32 $\pm$ 0.40	0.72 $\pm$ 1.09	0.07 $\pm$ 0.08	0.09 $\pm$ 0.09	0.08 $\pm$ 0.06	0.01 $\pm$ 0.01	0.02 $\pm$ 0.01	0.03 $\pm$ 0.01
Nano-	0.73 $\pm$ 0.82	0.23 $\pm$ 0.08	0.79 $\pm$ 0.73	0.07 $\pm$ 0.05	0.14 $\pm$ 0.13	0.13 $\pm$ 0.07	0.04 $\pm$ 0.01	0.05 $\pm$ 0.02	0.05 $\pm$ 0.01
Pico-	1.31 $\pm$ 1.44	0.26 $\pm$ 0.05	0.56 $\pm$ 0.28	0.13 $\pm$ 0.06	0.91 $\pm$ 1.46	0.51 $\pm$ 0.36	0.13 $\pm$ 0.06	0.37 $\pm$ 0.25	0.24 $\pm$ 0.07
Sum	4.34 $\pm$ 5.82	0.81 $\pm$ 0.43	2.07 $\pm$ 1.42	0.27 $\pm$ 0.18	1.14 $\pm$ 1.65	0.72 $\pm$ 0.48	0.18 $\pm$ 0.07	0.44 $\pm$ 0.27	0.31 $\pm$ 0.09
Cell abundance ( $\times 10^3 \text{cell} \cdot \text{dm}^{-3}$ )	1052.78 $\pm$ 1141.17	23.15 $\pm$ 20.76	464.43 $\pm$ 429.47	161.72 $\pm$ 244.51	4.86 $\pm$ 4.67	32.37 $\pm$ 37.12	1.35 $\pm$ 1.16	1.46 $\pm$ 0.74	1.26 $\pm$ 0.48

### 2.1 环境参数

**2.1.1 水文参数** 水温分布范围在 14.56(站 S1010 的 150 m)~30.07 (站 S1004 的表层),调查海区总平均值为(25.37  $\pm$ 4.13)。除了西北近岸有个低值区外,表层水温变化不大(图 2-a),但 50 m 层水温平面分布从近岸向外海升高(表 1),另外还可以看到两个具较高水温的块状区,与柴扉等<sup>[10]</sup>所报道的海南岛东部反气旋

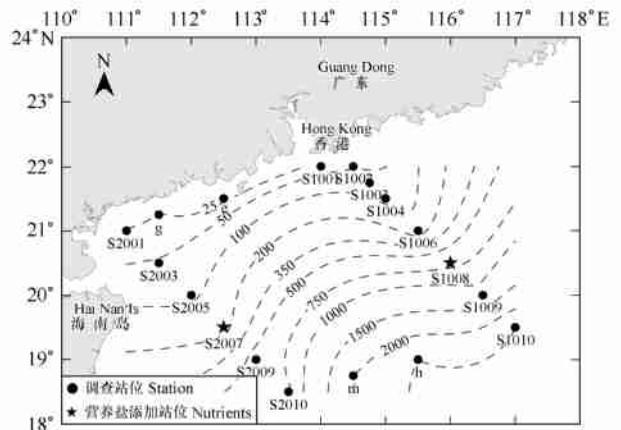


图 1 南海北部采样站位及水深(m)分布

Fig. 1 Sampling stations and depth (m) in the northern South China Sea

涡和香港东南反气旋涡的位置相一致(图 3-a)。

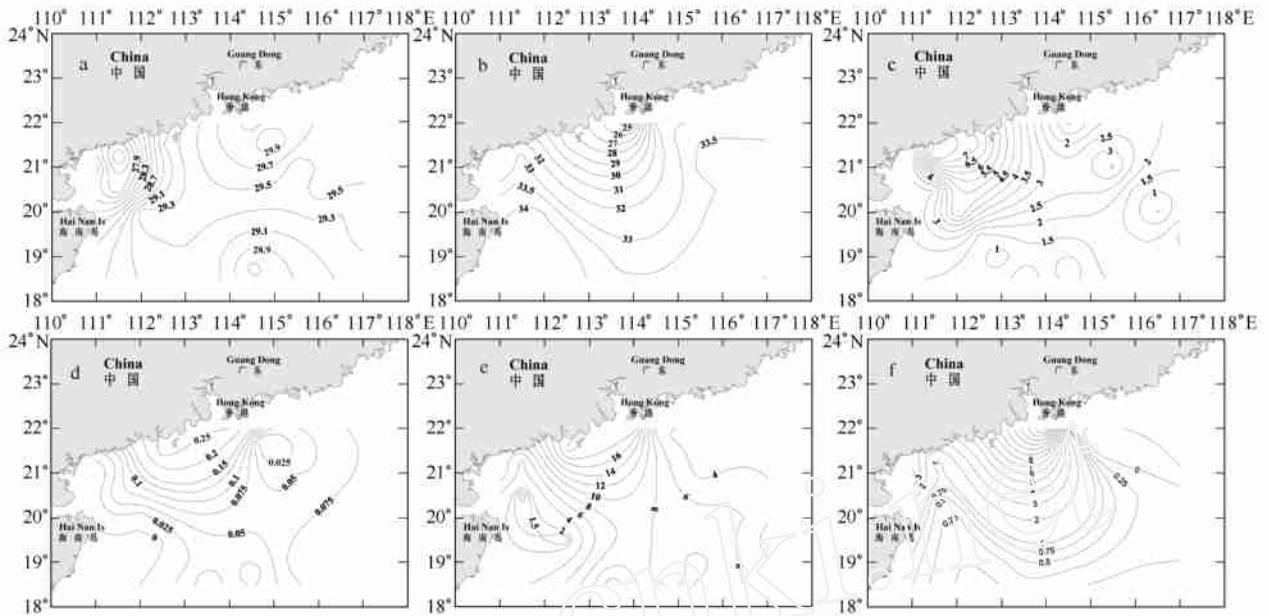


图2 南海北部夏季表层叶绿素 a 和有关环境参数的平面分布

Fig. 2 Horizontal distribution of chlorophyll a and the related environment parameters at the surface in the northern South China Sea

a. 温度 Temperature ; b. 盐度 Salinity ; c. 硝酸盐 Nitrate ; d. 磷酸盐 Phosphate ; e. 硅酸盐 Silicate ; f. 叶绿素 a Chlorophyll a

盐度分布范围在 24.19 ~ 34.59, 调查海区平均为  $32.65 \pm 2.43$ , 近岸海域表层大多受珠江冲淡水的影响, 盐度较低, 向外海逐渐增大(表 1), 但在调查海区的西北近岸, 有个高盐区(图 2-b)。从 50 m 层的平面分布图来看, 盐度的变化幅度较小, 而且从近岸向外海降低(表 1), 另外也可以看到上述两个反气旋涡(图 3-b)。

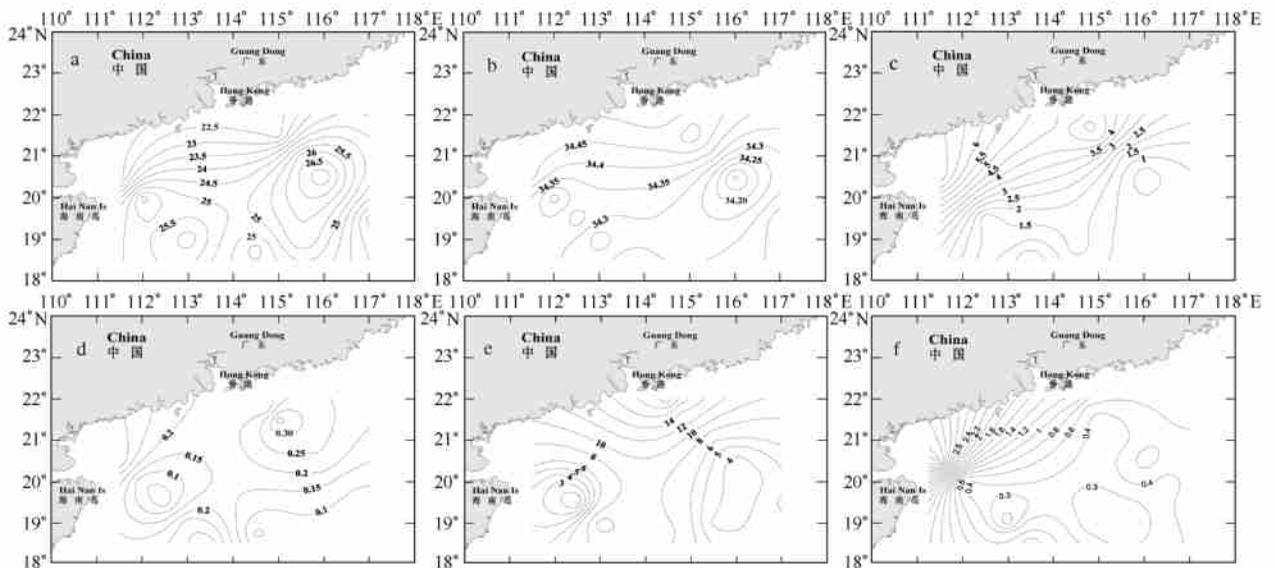


图3 南海北部夏季 50m 层叶绿素 a 和有关环境参数的平面分布

Fig. 3 Horizontal distribution of chlorophyll a and the related environment parameters 50m in the northern South China Sea

a. 温度 Temperature ; b. 盐度 Salinity ; c. 硝酸盐 Nitrate ; d. 磷酸盐 Phosphate ; e. 硅酸盐 Silicate ; f. 叶绿素 a Chlorophyll a

2.1.2 化学参数 硝酸盐浓度的分布范围在 0.01(站 S2010 的 50 m) ~ 16.13(站 S2005 的 100 m)  $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  之间, 调查海域平均为  $(3.64 \pm 3.29) \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ 。近岸表层受到珠江冲淡水以及沿岸上升流的影响, 硝酸盐的浓

度较高,从近岸向外海逐渐降低(图 2-c、3-c,表 1)。

磷酸盐浓度的变化范围较大(< 检测限 ~  $1.18 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ),平均为  $(0.25 \pm 0.28) \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ,最大值出现在 h 站的 150 m 处,在站 S1003、S1004、S2007 的表层,其值低于检测限,表层的分布趋势是在近岸高,外海低(表 1),特别在海南岛东部表层磷酸盐检测不出,呈现东面高于西面的分布趋势(图 2-d、3-d)。

硅酸盐浓度的分布范围是 < 检测限(站 S2003 的 10 m) ~  $33.00 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ (站 S1001 的 20 m),平均在  $(8.27 \pm 5.90) \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ 。从珠江口向外海逐渐降低,特别在海南岛东北部硅酸盐浓度小于  $2 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ,呈现东面高于西面(图 2-e、3-e)。

**2.1.3 叶绿素 a 浓度** 叶绿素 a 浓度的范围为 0.08(站 S1009 的表层) ~  $15.50 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (站 S1001 的表层,次高值  $4.32 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  出现在 S2001 的表层),平均为  $(0.75 \pm 1.85) \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。叶绿素 a 浓度的空间分布具有明显的区域性差异,其高值位于沿岸带,其次为陆架区,最小为陆坡和深海区(表 1)。表层叶绿素 a 分布从珠江口向外海方向降低,在香港东南海域出现一个检测不出的极低值区(图 2-f)。但从 50 m 层的平面分布来看,从调查海区的西北近岸向东南方向降低(图 3-f)。

粒度分级结果表明,在现存生物量较低的陆架区和深海区,微微型浮游植物(Pico 级份)对浮游植物群落叶绿素 a 的贡献最大(70%以上),在沿岸区以小型(Net 级份)和微型浮游植物(Nano 级份)的贡献最大(50%以上)(表 1)。

**2.1.4 浮游植物的分布特征** 南海北部夏季浮游植物丰度的分布范围在  $0.21 \times 10^3$  个  $\cdot \text{dm}^{-3}$ (站 S2009 的 100 m)到 3051.97(站 S1001 的表层)  $\times 10^3$  个  $\cdot \text{dm}^{-3}$ ,平均丰度为  $(115.05 \pm 438.89) \times 10^3$  个  $\cdot \text{dm}^{-3}$ 。水平分布从近岸向外海降低;而垂直分布近岸随着深度的增加丰度迅速降低,陆坡和深海区随着深度先增加后降低,在次表层(50 ~ 75 m)有一个最大值(表 1),与叶绿素 a 浓度的分布结果一致。

浮游植物主要优势种为柔弱伪菱形藻(*Pseudonitzschia delicatissima*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、皇冠角毛藻(*Chaetoceros diadema*)、具齿原甲藻(*Prorocentrum dentatum*)、冰河拟星杆藻(*Asterionellopsis glacialis*)、菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)、洛氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)、丛毛辐杆藻(*Bacteriastrum comosum*)、赫胥历藻(*Emiliania huxleyi*),它们大多是南海常见种。越靠近外海硅藻类所占的比例越小,而甲藻类所占的比例越高,特别在反气旋涡的附近站,甲藻类占 50%以上。

## 2.2 浮游植物对营养盐添加的响应

**2.2.1 营养盐加富培养水样的初始叶绿素 a 和营养盐浓度** 营养盐加富试验两站 S1008 和 S2007 初始叶绿素 a 浓度相当,但是两站的营养盐浓度相差很大(表 2)。在站 S2007,磷酸盐未检出,而硝酸盐和硅酸盐也都接近于浮游植物生长的阈值。站 S1008 磷酸盐与硝酸盐浓度也很低,硅酸盐浓度( $6.81 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ )相对高一些,而 N:P 的原子比为 47.3, Si:N 的原子比为 2.4, Si:P 的原子比为 113.5。

表 2 S2007 和 S1008 站初始叶绿素 a ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 和营养盐浓度 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) 及营养盐浓度间的原子比值

Station	Chl a	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$	DIN	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{SiO}_3^{2-}$	N/P	Si/N	Si/P		
S2007	0.26	0.52	低于检测限	Undetectable	1.42	1.94	低于检测限	Undetectable	1.1	—	0.77	—
S1008	0.28	0.62	0.09	2.13	2.84	0.06	6.81	47.3	2.40	113.5		

**2.2.2 叶绿素 a 浓度对营养盐加富的响应** 培养过程叶绿素 a 浓度的变化见表 3。在站 S2007,添加 NPSi 试验组培养 72 h 后叶绿素 a 浓度开始增加(平均  $0.53 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),96 h 后达到  $3.84 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,培养结束后叶绿素 a 浓度更是达到  $14.40 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,为起始浓度的 50 倍左右;而空白和其它营养盐添加组叶绿素 a 浓度没有明显的变化(图 4)。

在站 S1008,添加 NP 和 NPSi 的试验组培养在 48 h 开始增长,其后叶绿素 a 浓度开始快速增长。到 60 h 叶绿素 a 浓度有明显增加,平均分别达到  $1.07 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $1.19 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,为起始浓度的 4 倍左右,而其它试验组叶绿素 a 浓度变化不明显(图 5)。

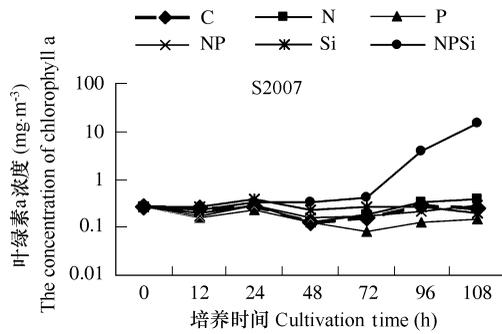


图4 S2007 站叶绿素 a 浓度对营养盐加富的响应

Fig. 4 Response of chlorophyll a to nutrient enrichment at S2007

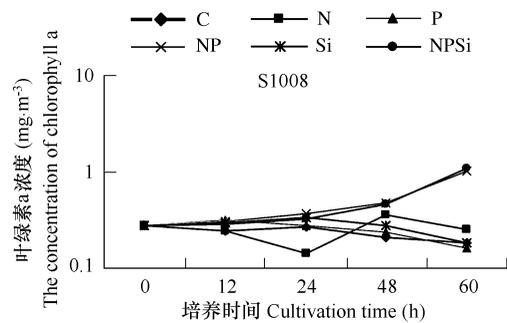


图5 S1008 站叶绿素 a 浓度对营养盐加富的响应

Fig. 5 Response of chlorophyll a to nutrient enrichment at S1008

表3 S2007 和 S1008 站叶绿素 a 浓度对营养盐加富的响应 ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )Table 3 Response of chlorophyll a to nutrient enrichments at the Stations S2007 and S1008 ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

站位 Station	培养时间 Cultivation time (h)	试验组 Experimental group											
		C1	C2	N1	N2	P1	P2	NP1	NP2	Si1	Si2	NPSi1	NPSi2
S2007 站	0	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
	12	0.24	0.23	0.19	0.21	0.18	0.15	0.13	0.22	0.26	0.28	0.22	0.25
	24	0.29	0.25	0.27	0.28	0.27	0.17	0.25	0.31	0.40	0.34	0.37	0.30
	48	0.14	0.10	0.10	0.15	0.11	0.15	0.16	0.15	0.23	0.24	0.32	0.33
	72	0.23	0.10	0.14	0.22	0.07	0.10	0.20	0.15	0.24	0.30	0.64	0.42
	96	0.26	0.31	0.31	0.34	0.14	0.11	0.30	0.11	0.30	0.22	4.26	3.62
	108	0.29	0.20	0.35	0.43	0.17	0.12	0.35	0.23	0.21	0.19	17.34	11.46
S1008 站	0	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
	12	0.22	0.27	0.24	0.25	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31	0.28	0.29	0.29
	24	0.27	0.27	0.23	0.06	0.31	0.24	0.38	0.37	0.31	0.36	0.24	0.41
	48	0.22	0.20	0.29	0.43	0.22	0.24	0.57	0.38	0.27	0.29	0.41	0.51
	60	0.20	0.17	0.32	0.18	0.17	0.15	1.03	1.11	0.22	0.15	1.16	1.21

**2.2.3 粒度分级叶绿素 a 对营养盐加富的响应** 从浮游植物的粒度分级叶绿素 a 来看(表 4),在站 S2007,培养前叶绿素 a 浓度以 Pico 占优势(84.6%),但是添加营养盐经一段时间培养后,在 NP、Si、NPSi 试验组以 Nano 级份占优势,特别在 NPSi 试验组更加显著,Nano 达到 55.3%,其次 Net 为 35.4%,Pico 所占的比重反而最小,只有 9.3%(图 6),而其它试验组 Pico 还占有很大比重。站 S1008 与站 S2007 一样,培养前叶绿素 a 浓度以 Pico 占优势(86.5%),但是添加营养盐培养一段时间后,Nano 在 NP(45.7%)和 NPSi(56.57%)试验组中所占比重有明显的增加,Net 也有增加,但增加不大,Pico 所占比重则明显降低(表 4),而其它生物量没有增加的试验组还是以 Pico 占优势(图 7)。虽然两站 Pico 在生物量增加试验组中所占比重都下降,但是其对总叶绿素 a 浓度的贡献还是都增加了。

**2.2.4 营养盐加富对浮游植物丰度及其群落结构的影响** 从上述两站营养盐加富试验的浮游植物物种(>5 $\mu\text{m}$ 的浮游植物)鉴定结果来看,在站 S2007、S1008,培养前后的主要优势种发生了明显的变化(表 5)。培养前的浮游植物,主要优势种为具齿原甲藻(*Prorocentrum dentatum*)、旋沟藻(*Gyrodinium spirale*)和菱形藻(*Nitzschia* sp.);培养后的浮游植物,主要优势种有柔弱伪菱形藻(*Pseudonitzschia delicatissima*)、新月筒柱藻(*Cylindrotheca closterium*)、小细柱藻(*Leptocylindrus minimus*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、赫胥历藻(*Emiliana huxleyi*),其中又以新月筒柱藻(S2007 站)和柔弱伪菱形藻(S1008 站)占多数。其中在站 S2007 原始水样的浮游植物丰度中以甲藻占优势(62.5%),硅藻其次(37.5%);培养后在 NPSi 试验组,浮游植物的丰度以硅藻占优势(90.3%),而甲藻变为其次(7.8%),其它种类只占 1.9%。站 S1008 与 S2007 一样,原始水样的浮游植物丰度以甲藻为主(60%),硅藻其次(40%),营养盐加富后,在生物量增加的 NP 和 NPSi 试验组,硅藻

分别增加为 73.9 %和 94.0 %;而甲藻所占的比例显著下降,分别为 20 %和 6.0 % (表 6)。

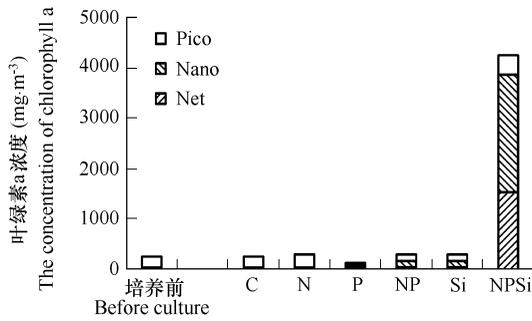


图 6 S2007 培养前后粒度分级叶绿素 a

Fig. 6 Size-fractionated chlorophyll a before and after culture at S2007

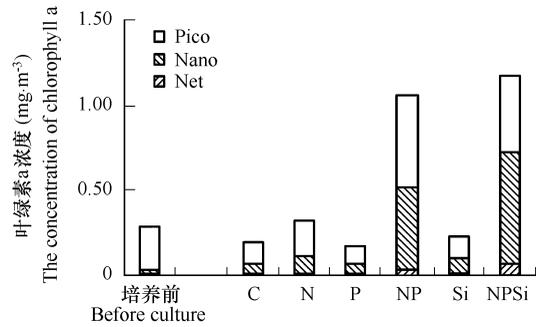


图 7 S1008 培养前后粒度分级叶绿素 a

Fig. 7 Size-fractionated chlorophyll a before and after culture at S1008

表 4 站 S1008 (60h) 和 S2007 (96h) 粒度分级叶绿素 a 对营养盐加富的响应

Table 4 Response of size-fractionated chlorophyll a to nutrient enrichment at the stations of S1008 (60h) and S2007 (96h)

Chl a	S1008 站 Station S1008						
	培养前 Before incubation		培养后 After incubation				
	原始水样 Original seawater sample	C	N	P	NP	Si	NPSi
Net	0.01 (2.52 %)	0.01 (5.26 %)	0.02 (6.24 %)	0.01 (5.88 %)	0.02 (1.94 %)	0.01 (4.55 %)	0.07 (5.72 %)
Nano	0.03 (11.03 %)	0.06 (31.58 %)	0.09 (28.13 %)	0.06 (35.29 %)	0.48 (46.60 %)	0.09 (40.91 %)	0.66 (56.57 %)
Pico	0.24 (86.45 %)	0.12 (63.16 %)	0.21 (65.63 %)	0.10 (58.83 %)	0.53 (51.45 %)	0.12 (54.54 %)	0.44 (37.71 %)
S2007 站/Station S2007							
Net	0.01 (3.50 %)	0.04 (15.38 %)	0.02 (6.26 %)	0.05 (35.71 %)	0.02 (6.90 %)	0.03 (10.00 %)	1.50 (35.35 %)
Nano	0.03 (11.89 %)	0.01 (3.85 %)	0.01 (3.13 %)	0.03 (21.43 %)	0.13 (44.83 %)	0.15 (50.00 %)	2.35 (55.33 %)
Pico	0.22 (84.61 %)	0.21 (80.77 %)	0.29 (90.63 %)	0.06 (42.86 %)	0.14 (48.27 %)	0.12 (40.00 %)	0.40 (9.32 %)

表 5 夏季营养盐加富培养前后浮游植物优势种的演替及其丰度 (个  $\cdot \text{dm}^{-3}$ )

Table 5 Dominant species succession and its abundance before and after nutrient enrichments (cell  $\cdot \text{dm}^{-3}$ )

S2007			S1008						
原始水样 Original seawater	+ NPSi		原始水样 Original seawater	+ NP		+ NPSi			
具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>	170	新月柱鞘藻 <i>Cylindrotheca closterium</i>	2043	具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>	85	柔弱伪菱形藻 <i>Pseudonitzschia delicatissima</i>	1617	新月柱鞘藻 <i>Cylindrotheca closterium</i>	1851
菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	85	细筒藻 <i>Leptocylindrus minimus</i>	1702	旋沟藻 <i>Gyrodinium spirale</i>	213	锥状斯比藻 <i>Scripsiella trochoidea</i>	212	柔弱伪菱形藻 <i>Pseudonitzschia delicatissima</i>	723
		旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	1702	菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	128	旋沟藻 <i>Gyrodinium spirale</i>	170		

表 6 加富培养前后主要门类浮游植物丰度和所占比重的变化

Table 6 Changes in the proportion of abundance of major phytoplankton phylum by nutrient enrichments

	S2007				S1008					
	原始水样 Original water sample		NPSi		原始水样 Original water sample		NP		NPSi	
	cell $\cdot \text{dm}^{-3}$	(%)	cell $\cdot \text{dm}^{-3}$	(%)	cell $\cdot \text{dm}^{-3}$	(%)	cell $\cdot \text{dm}^{-3}$	(%)	cell $\cdot \text{dm}^{-3}$	(%)
硅藻 Diatoms	128	37.5	5915	90.26	255	40	2042	73.85	2660	93.98
甲藻 Dinoflagellates	213	62.5	511	7.79	383	60	553	20	170	6.02
其它藻类 Others	—	—	128	1.95	—	—	170	6.15	—	—
总和 Sum	341		6554		638		2765		2830	

营养盐加富不仅对浮游植物群落结构演替的影响显著,而且对浮游植物的丰度也有明显的提高 (表 6)。

培养前,在站 S2007、S1008 浮游植物细胞丰度分别为 341 个  $\text{dm}^{-3}$ 、638 个  $\text{dm}^{-3}$ ;加富培养后,细胞丰度都有了显著的提高,分别达 809 ~ 6554 个  $\text{dm}^{-3}$ 和 681 ~ 2830 个  $\text{dm}^{-3}$ ,特别是在叶绿素 a 浓度增加的试验组,两站最高分别达到了 6554 个  $\text{dm}^{-3}$ 、2830 个  $\text{dm}^{-3}$ 。

### 3 讨论

南海北部海域具有及其复杂的生态特征,既有富营养盐和低盐度的河口(如珠江口)和沿岸带,也有营养盐和盐度适中的陆架以及寡营养盐和高盐度的陆坡和开阔海;既有季风和地形形成的气旋上升流,又有反气旋辐聚的下降流;既有水体层化和跃层的影响,又有光、温度、盐度、营养盐等的垂直分布的差异<sup>[9]</sup>。这些环境特征决定了南海北部浮游植物时空分布的复杂性。

陆源营养盐自珠江口和广东沿岸输入,使南海北部近岸表层水体的物理、化学和生物各参数发生了明显的变化,显示低盐( $<30$ )、高营养盐的特性,促进了浮游植物的增长,表层叶绿素 a 浓度一般较高( $>4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,图 2-f)。同时南海北部夏季受西南季风作用,近岸水体作 Ekman 离岸运动而导致底层水的向岸涌升<sup>[10]</sup>,使近岸海域具高营养盐,有利于浮游植物群落的生长。

由于季风、地形、惯性力等的综合作用,南海出现众多的中尺度涡<sup>[11]</sup>。表层水体受混合层(50 m 左右)的影响较大,反气旋涡表现不明显,但从 50 m 层温盐平面分布图可以明显看到两个反气旋涡-海南岛东部反气旋涡和香港东南反气旋涡的存在(图 3-a、b),其形成机制是相同的,即锋面和地形联合作用的结果<sup>[2]</sup>。反气旋涡使表层水辐聚下沉,从 S1 和 S2 断面各参数的垂直分布可清楚地看到等值线下沉的现象。受其影响,下降流中心的水温比周围高 1.5,盐度比周围低 0.15;另外真光层是浮游植物的主要活动区,营养盐消耗量大,其浓度显著降低,有人把反气旋涡称之为营养盐的“荒漠带”<sup>[2]</sup>。对南海北部陆架区典型反气旋涡内、外的营养盐历史资料分析,发现营养盐浓度涡内总小于涡外,且随着季节变化而有所差异,也正是营养盐的匮乏,使该区域的浮游植物生物量偏低,初级生产力也随之降低。

营养盐是浮游植物生长繁衍所必需的基本成分,是调控海域初级生产力水平的主要因子<sup>[11]</sup>。全区各营养盐的平均浓度与 1999 年夏季相比(表 7),硝酸盐升高了 1 倍多,而磷酸盐和硅酸盐却降低了不少,特别是磷酸盐几乎为 1999 年的一半。其原因是,磷排放量的减少和氮排放量的增加——人为因素造成了营养盐结构及其比例的严重失衡<sup>[12]</sup>。近岸受珠江冲淡水及沿岸上升流的影响,营养盐补充速率较快,浮游植物生物量也高( $\text{Chl a} > 1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),而且浮游植物多为个体较大(Net 或 Nano 级份)的种类(例如个体较粗壮的硅藻和甲藻),这些大细胞的浮游植物,由于其营养盐半饱和常数大,使其在营养盐丰富的海域更具有竞争优势,对浮游植物群落生物量(Chl a)的贡献达 50%以上。但在陆架和开阔海区,真光层营养盐浓度都非常低,特别在表层甚至低于检测限,且低于浮游植物的生长阈值,这样就限制了浮游植物的生长。另外,由于跃层的阻挡,真光层下方向上补充的无机营养盐很少,营养盐主要是靠系统内的循环再生,叶绿素 a 浓度低( $<1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),而且浮游植物多为个体微小的种类(例如:蓝细菌、原绿球藻),由于这些小细胞浮游植物的营养盐半饱和常数小,在寡营养的环境下具有竞争优势,因此微型浮游植物对浮游植物群落生物量(Chl a)的贡献较大(70%以上)<sup>[1,9]</sup>。

表 7 2004 与 1999 年夏季南海北部海域硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐的平均浓度( $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ )和范围\*

Table 7 Mean  $\pm$ SD and range of nitrate, phosphate and silicate concentrations ( $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ) in the summer of 2004 and 1999 in the northern South China Sea

	2004 年 8 月 August 2004			1999 年 8 月 August 1999		
	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{SiO}_3^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{SiO}_3^{2-}$
平均 Average	3.64 $\pm$ 3.29	0.25 $\pm$ 0.28	8.27 $\pm$ 5.90	1.37 $\pm$ 2.20	0.50 $\pm$ 0.42	13.99 $\pm$ 8.68
范围 Range	0.01 ~ 16.13	0 ~ 1.18	0 ~ 33.00	0 ~ 10.00	0.10 ~ 2.36	0 ~ 43.70

\* Original data are provided by the South China Sea Branch of SOA

通过在南海北部夏季的现场加富试验,发现营养盐是该海域浮游植物生长的主要限制因子,而且是多种

营养盐共同限制了浮游植物的生长;并进一步揭示了营养盐与浮游植物的生长存在很大关系,营养盐浓度的改变不仅与浮游植物的生物量有关,而且对浮游植物粒级结构和群落结构也有显著的影响。

站 S2007 添加任何单一的营养盐都没有促进浮游植物的生长,而只有同时添加 NPSi 的试验组中,生物量才有显著的增加,叶绿素 a 浓度在 108 h 达到  $14.40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,可见是 N、P、Si 共同限制了浮游植物的生长;在 S1008 却是添加 NP 和 NPSi 的试验组,生物量在 24 h 开始增长,到培养结束时(60 h),其叶绿素 a 浓度是开始时的 4 倍左右(分别为  $1.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $1.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),而其它的试验组生物量都没有明显的变化,可见是 N、P 共同限制了浮游植物的生长。对比刘媛等<sup>[13]</sup>和 Chen 等<sup>[4]</sup>的营养盐加富试验,生物量增加的试验组中都是在培养 120 h 出现了叶绿素 a 浓度的峰值,其后降低。本试验在培养期间内没有看到叶绿素 a 降低的过程,这与培养时间较短有关,而且添加营养盐之后的浓度都远大于起始浓度(如在站 S1008 硝酸盐添加后浓度达到  $101.42 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ );另外站 S1008 比 S2007 叶绿素 a 浓度的响应时间要早,可能与本底各营养盐和叶绿素 a 浓度高有一定关系。

营养盐加富试验改变了浮游植物的粒度结构,在浮游植物生物量有显著增加的试验组中,两个站各粒级的叶绿素 a 浓度都有增加,但是 Nano 和 Net 级份增加的速率更快。由于两个站都位于陆架的边缘区,而且在反气旋涡附近,其营养盐浓度非常低,粒径较小的浮游植物(Pico 级份)在浮游植物群落生物量中占绝对优势(80%以上)(表 4)。但是添加营养盐后,使较大细胞的浮游植物(Net 级份和 Nano 级份)更具有竞争优势并快速增长,在叶绿素 a 浓度中所占的比重逐渐增加,特别是 Nano 级份在培养结束后所占叶绿素 a 的比重达到 50%以上。而站 S1008 站 .721,难度浓度不断累积,所以营养盐浓度在真光层以下随着深度 on interaction in the presence of viral infection. observations and Pico 级份之所以还占有一定比重,可能是培养时间太短的缘故(培养 60 h),Nano 级份和 Net 级份的浮游植物还处于适应过程,且其丰度比较低,这个时期浮游植物生长比较缓慢,从站 S1008 培养结束时叶绿素 a 的浓度(分别为  $1.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $1.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )来看,也要比 S2007 站的叶绿素 a 浓度( $14.40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )低很多。

营养盐浓度的改变会导致浮游植物群落结构的演替<sup>[14~16]</sup>。在对营养盐的竞争过程中,营养盐的供应状况对浮游植物的群落结构产生重要的调节作用,营养盐浓度越高,其比例离 Redfield 越远,浮游植物物种就越少,Shannon 指数越低<sup>[17]</sup>。在营养盐丰富的海域,硅藻类占有绝对优势,而其它藻类占很少一部分;但在 P 或 Si 缺乏的海域,往往甲藻类占优势<sup>[18,19]</sup>。从本次试验的浮游植物物种鉴定结果来看,添加营养盐培养后,发现在生物量有明显增加的试验组当中,不仅细胞丰度得到大幅度增加(例如在站 S1008 的 NPSi 试验组中细胞丰度达到  $2830 \text{ 个} \cdot \text{dm}^{-3}$ ),而且其浮游植物的群落结构也发生了明显的变化。培养前以甲藻占优势(例如具齿原甲藻),培养后以硅藻占优势(例如柔弱伪菱形藻和新月柱鞘藻),这与 Chen 等<sup>[4]</sup>在南海东北部和 ERLA 等<sup>[16]</sup>在美国 Galveston 湾的培养结果一致。在营养盐缺乏的海区,甲藻在低营养盐浓度的环境下适应能力较硅藻强,更具有竞争优势,因此甲藻类在浮游植物中占优势(例如本次调查的反气旋涡附近站);而营养盐比例不失衡且营养盐浓度高的海区,硅酸盐充分为硅藻硅质外壳的形成提供物质基础,有利于硅藻生长,因此硅藻类在浮游植物中占优势(例如近岸海域)。

#### 4 结论

在南海北部夏季对浮游植物生长的营养动力学的研究,阐明了物理-化学过程对浮游植物分布的影响与机制。夏季受西南季风和东向沿岸流作用所形成的 Ekman 输送的影响,南海北部海岸带表层海水作离岸运动,深层富含营养盐的冷水爬坡向岸涌升补充到真光层,激发浮游植物生物量迅速增长;此外,海区反气旋涡-海南岛东部反气旋涡和香港东南反气旋涡使具高温、低盐、低浓度营养盐和低浮游植物生物量的水体辐聚下沉。通过营养盐添加试验得出营养盐是限制陆架和外海域浮游植物生长的主要因子,而且发现是多种营养盐的共同限制。营养盐加富试验不仅使浮游植物生物量增长,而且使群落粒级结构发生变化,从小细胞向大细胞演替,而且使浮游植物的群落结构也发生变化,自甲藻向硅藻演替。今后的加富试验,若能设更多的平行样进行统计分析,将会得到更好的结果。

## References :

- [ 1 ] Ning X R, Chai F, Xue H J, *et al.* Physical-biological oceanographic coupling influencing phytoplankton and primary production in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 110, C05015, doi:10.1029/2005JC002968, 2005.
- [ 2 ] Yin K D, Qian P Y, Madeline C S, *et al.* Shift from P to N limitation of phytoplankton growth across the Pearl River estuarine plume during summer. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 221: 17 ~ 28.
- [ 3 ] Chen Y L, Chen H, David M K, *et al.* Nitrogen modulates phytoplankton growth in spring in the South China Sea. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 527 ~ 541.
- [ 4 ] Cai Y M, Ning X R, Liu C G. Distribution characteristics of size-fractionated chlorophyll a and productivity of phytoplankton in the northern South China Sea and Beibu gulf during august 1999. *Studia Marina Sinica*, 2002, 44: 12 ~ 20.
- [ 5 ] China State Bureau of Technical Supervision. The specification for oceanographic survey. Beijing, China Ocean Press, 1991.
- [ 6 ] Holm Hansen O, Lorenzen C J, Holmes R W. Fluorometric determination of chlorophyll. *Cons. Int. Explor Met.*, 1965, 30: 3 ~ 15.
- [ 7 ] Sun J, Liu D Y, Qian S B. A quantitative research and analysis method for marine phytoplankton: an introduction to utermohl method and its modification. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 2002, 20(2): 105 ~ 112.
- [ 8 ] Ning X, Li W K W, Cai Y, *et al.* Standing stock and community structure of photosynthetic picoplankton in the northern South China Sea. *Acta Oceanol. Sinica*, 2005, 24(2): 57 ~ 76.
- [ 9 ] Chai F, Xue H J, Shi M C. Formation and distribution of upwelling and downwelling in the South China Sea. *Oceanography in China*, 2001, 13: 107 ~ 128.
- [ 10 ] Chai F, Xue H J, Shi M C. Hydrographic characteristics and seasonal variation of three anticyclonic eddies on the northern continental shelf of the South China Sea. *Oceanography in China*, 2001, 13: 105 ~ 116.
- [ 11 ] Wang Y, Jiao N Z. The primary research of nutrient limitation of phytoplankton in northern Yellow Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(5): 512 ~ 518.
- [ 12 ] Yang D F, Gao Z H, Chen Y, *et al.* The biogeochemical process of silicon. *Marine Science*, 2002, 26(3): 39 ~ 42.
- [ 13 ] Liu Y, Cao Z R, Huang B Q, *et al.* Phytoplankton growth response to nutrients addition in typical sea area in Yellow Sea and East China Sea. *Journal of Xiamen University*, 2004, 43(supplement): 147 ~ 152.
- [ 14 ] Boyd P, Harrison P J. Phytoplankton dynamics in the NE subarctic Pacific. *Deep-Sea Research*, 1999, 46: 2405 ~ 2432.
- [ 15 ] Balode M, Purina I, Bēhemin C H, *et al.* Effects of nutrient enrichment on the growth rates and community structure of summer phytoplankton from the Gulf of Riga, Baltic Sea. *Journal of Plankton Research*, 1998, 20: 2251 ~ 2272.
- [ 16 ] Erla B Ö, Lumsden S E, Pinckney J L. Nutrient pulsing as a regulator of phytoplankton abundance and community composition in Galveston Bay, Texas. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2004, 303: 197 ~ 220.
- [ 17 ] Qu K M, Chen B J, Yuan Y X, *et al.* A preliminary study on influence of N and P on population constituent of plankton diatoms in seawater. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 445 ~ 448.
- [ 18 ] Egge J K. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations? *Journal of Marine Systems*, 1998, 16: 191 ~ 198.
- [ 19 ] Shen Z L. Historical changes in nutrient structure and its influences on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, 52: 211 ~ 224.

## 参考文献:

- [ 4 ] 蔡昱明, 宁修仁, 刘诚刚. 1999 年夏季南海北部和北部湾海域粒度分级叶绿素 a 和初级生产力的分布特征. *海洋科学集刊*, 2002, 44: 12 ~ 20.
- [ 5 ] 国家技术监督局. 海洋调查规范. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [ 7 ] 孙军, 刘东艳, 钱树本. 一种海洋浮游植物定量研究分析方法——Utermohl 方法的介绍及其改进. *黄渤海海洋*, 2002, 20(2): 105 ~ 112.
- [ 9 ] 柴扉, 薛惠洁, 侍茂崇. 南海升降流区域分布及形成机制分析. *中国海洋学文集*, 2001, 13: 107 ~ 128.
- [ 10 ] 柴扉, 薛惠洁, 侍茂崇. 南海北陆架区 3 个典型反气旋涡水文特征及演变规律. *中国海洋学文集*, 2001, 13: 105 ~ 116.
- [ 11 ] 王勇, 焦念志. 北黄海浮游植物营养盐限制的初步研究. *海洋与湖沼*, 1999, 30(5): 512 ~ 518.
- [ 12 ] 杨东方, 高振会, 陈豫, 等. 硅的生物地球化学过程的研究动态. *海洋科学*, 2002, 26(3): 39 ~ 42.
- [ 13 ] 刘媛, 曹振锐, 黄邦钦, 等. 东黄海典型海区浮游植物对营养盐添加的响应. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2004, 43(增刊): 147 ~ 152.
- [ 17 ] 曲克明, 陈碧鹃, 袁有宪, 等. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种类组成的初步研究. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 445 ~ 448.