

2006 年冬季南海北部浮游植物生物量和 初级生产力及其环境调控

乐凤凤^{1,3}, 宁修仁^{1,2,3,*}, 刘诚刚^{1,2,3}, 郝 锵^{1,3}, 蔡昱明^{1,3}

(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)

摘要:通过 2006 年 2 月在南海北部现场调查所获得的数据分析研究了海域的浮游植物现存量 and 生产力, 结果表明冬季浮游植物的分布特征与东北季风引起的环流场的变化关系密切。调查海域水柱平均 Chl a 浓度的变化范围为 $0.03 \sim 1.21 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (平均 $(0.33 \pm 0.33) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 高值区出现在广东沿岸及海南岛东部附近海域; 初级生产力的分布范围为 $41.3 \sim 1040.0 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。由于东北季风引起近岸水体混合剧烈, 不利于浮游植物生长, 因此虽然沿岸带 Chl a 浓度 $((0.53 \pm 0.50) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3})$ 较高, 但初级生产力却是最低的, 只有 $41.3 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 同时冬季反气旋强度下降和底层富营养水的涌升, 营养盐充足, 因此开阔海的 Chl a 浓度 $((0.31 \pm 0.30) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3})$ 和初级生产力 $((631.3 \pm 578.0) \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$ 均高。浮游植物粒度级份测定表明, Pico 级份对冬季南海北部浮游植物现存量和生产力的贡献很大, 特别是在开阔海区, 分别占 47% 和 66%。

关键词:冬季; 南海北部; 浮游植物; 现存量 and 初级生产力

文章编号: 1000-0933(2008)11-5775-10 中图分类号: Q145, Q178 文献标识码: A

Standing stock and production of phytoplankton in the northern South China Sea during winter of 2006

LE Feng-Feng^{1,3}, NING Xiu-Ren^{1,2,3,*}, LIU Cheng-Gang^{1,2,3}, HAO Qiang^{1,3}, CAI Yu-Ming^{1,3}

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

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5775 ~ 5784.

Abstract: Standing stock and production of phytoplankton in the northern South China Sea (nSCS) were studied during February 2006 when northeast monsoon strongly prevailed. The results clearly showed that the distributions of phytoplankton were closely related to the physical-chemical-biological coupled processes driven by the northeast monsoon. The chlorophyll-a (Chl a) concentration varied from $0.03 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ to $1.21 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (the average value was $(0.33 \pm 0.33) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$). The most of high values appeared in the coast areas near Guangdong Province and in the sea area to the east of Hainan Island. The lowest and highest value of primary production (PP) were $41.3 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ and $1040.0 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. The distribution patterns of Chl a differed from PP in three different regions. As for Chl a, coastal region $((0.53 \pm 0.50) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3})$ had much higher value than open sea $((0.31 \pm 0.30) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3})$ and shelf region $((0.20 \pm 0.11) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3})$; as

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (90211021, 90711006)

收稿日期: 2007-09-05; 修订日期: 2008-09-24

作者简介: 乐凤凤 (1981 ~), 女, 浙江舟山人, 硕士, 主要从事海洋生态学研究. E-mail: le_ff@126.com

* 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营养盐数据, 特此致谢!

Foundation item: The project was financially supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 90211021, 90711006)

Received date: 2007-09-05; **Accepted date:** 2008-09-24

Biography: LE Feng-Feng, Master, mainly engaged in marine ecology. E-mail: le_ff@126.com

for PP, the variation showed opposite: open sea had the highest value ($(631.3 \pm 578.0) \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), followed by shelf ($162.2 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) and coastal region ($41.3 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) in turn. Photosynthetic picoplankton was found to be the greatest contributor to phytoplankton stocks and production in all study area, especially in open sea, 47% and 66% respectively.

Key Words: winter; northern South China Sea; phytoplankton; standing stock and primary production

海洋浮游植物是海洋生态系中主要的初级生产者,其生产力的高低决定着海洋中的物质循环和能量流动状况。随着世界性的资源与环境问题日益突出,全球碳循环和气候变化、生物资源潜在生产力的评估和可持续发展已成为人们关注的研究课题^[1]。近来的研究表明浮游植物生物量和初级生产力的物理-生物海洋学耦合作用过程研究对于揭示浮游植物生态动力学过程与机制具有关键性的作用^[2~4]。

南海作为我国最大的边缘海,也是西太平洋最大的半封闭边缘海,受特殊的地理环境、东亚季风等影响,在大尺度环流的前提下,上层环流具有复杂的结构,呈现多涡的特点^[5~7],这进一步影响着营养盐以及浮游植物的分布^[8]。南海是一个寡营养性海域,其真光层中硝酸盐和磷酸盐浓度常低于检测限^[9],相对硝酸盐而言磷酸盐含量较丰富因而不构成浮游植物生长的限制因子^[10],而突发性海洋事件如上升流,季风,台风和内波等的发生加剧海水垂直混合,营养盐跃层变浅从而提高生产力^[11,12]。Ning 等^[4]调查结果显示,南海海域浮游植物生物量的时空变化受到“季风-环流-营养盐”变化的驱动,存在明显的物理-化学-生物海洋耦合过程。现阶段应用遥感技术对南海北部陆架海域浮游植物生物量和初级生产力开展的研究较多^[13~15],但通过现场调查获取的初级生产力资料较分散^[16,17]。本文对 2006 年冬季南海北部浮游植物生物量和生产力的实测数据进行分析,描述其分布特征并对其调控因子进行阐释,另外将调查结果与 1998 年-强厄尔尼诺年^[18]进行比较,进一步阐明海域物理-化学-生物海洋的耦合关系。

本研究在南海北部海域,综合物理、化学资料以及实测获得的叶绿素、初级生产力数据,对东北季风驱动下的南海北部海域浮游植物现存量 and 初级生产力的分布特征进行研究,分析讨论其环境调控因素,即物理-生物海洋耦合过程对初级生产力变化所带来的影响。

1 材料与方法

1.1 调查海区 and 采样站位

2006 年 2 月进行现场调查,站位布设范围在 $110^{\circ} \sim 117^{\circ}\text{E}$, $18^{\circ} \sim 23^{\circ}\text{N}$ 海域内,设 4 条断面共 19 个站位,每个站位进行水文参数和叶绿素 a 粒度分级测定,初级生产力由于受培养时间的限制每天观测一个站位(图中▲位置)。S1、S2 观测断面垂直于岸线横跨沿岸带(水深小于 50 m)、陆架区(水深在 50 m 和 200 m 之间)和陆坡与开阔海区(水深大于 200 m),其中 S1 断面为自珠江口垂直于岸线向东南外海延伸的主断面,另外平行于岸线有近岸和外海两条断面(图 1)。在观测站位中, S1-1、S1-2、S2-1、g 和 e 站位于沿岸带, S1-3、S1-5、S1-6、S2-3、S2-5 和 S2-7 位于陆架区, S1-8、S1-9、S1-10、S2-8、S2-9、S2-10、h 和 m 则位于陆坡和开阔海区。

1.2 样品的采集和观测方法

水样的采集使用 ROSETTE 采水器或 Houskin 球盖式采水器,按表层,10,25,50,75,100,150m 等 7 个层次采集,用以水温、盐度、营养盐(NO_3^- 、 PO_4^{3-} 和 SiO_3^{2-})、溶解氧、叶绿素 a 的测定。初级生产力测定用水样,按海面入射光衰减至 100%,50%,32.5%,10%,3% 和

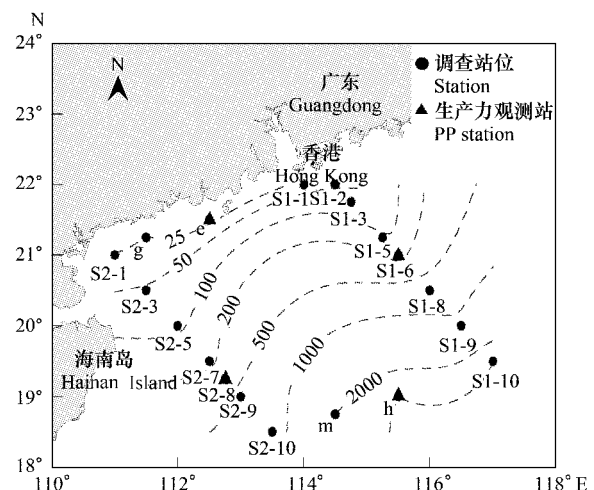


图 1 南海北部采样站位及水深(图中虚线, m)分布

Fig. 1 Sampling stations and depth (dashed line, m) in nSCS

1% 深度层次采集,并同时采集各光衰减层次的叶绿素 a 水样。水温测量用颠倒温度计,盐度测定用耦合式感应盐度计,营养盐测定用分光光度法,溶解氧测定用碘量法,程序均按《海洋调查规范》进行(数据由国家海洋局南海分局提供)。叶绿素 a 浓度按萃取荧光法^[19]进行测定。初级生产力的测定按 Steemann^[20]建立的,经 Evans 和 Ning 等改进的同位素(¹⁴C)示踪法^[21,22]进行。

所有水样收集前,经 200 μm 孔宽的筛绢预过滤,以除去大多数的浮游动物。叶绿素 a 和初级生产力粒度分级测定用水样经孔宽 20 μm 的筛绢、孔径 2.0 μm 的核孔滤膜(Nuclepore)和 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤,以分别获取小型(Net 级份, >20 μm),微型(Nano 级份, >2 μm , <20 μm)和微微型(Pico 级份, <2 μm)的光合浮游生物。

2 结果

2.1 理化环境和生物参数的分布特征

2.1.1 平面分布特征

(1) 水文参数

表层水温的变化范围为 18.06 ~ 24.70 $^{\circ}\text{C}$,平均(22.36 $\pm$ 2.00) $^{\circ}\text{C}$,从图 2a 可看到等温线大致平行于岸线向外海逐渐增高,在香港东南和海南岛东部可看到小范围的高温区。50m 层水温的变化范围为 20.94 ~ 23.66 $^{\circ}\text{C}$,平均(22.62 $\pm$ 0.75) $^{\circ}\text{C}$,也是由近岸向外海升高。从图 3a 可看到香港东南面和海南岛东部的高温中心,另外在调查区南部有一个低温区。

表层盐度的变化范围为 32.25 ~ 34.55,平均 33.92 $\pm$ 0.50,分布趋势与表层温度相似,从近岸向外海升高,在香港东南面和海南岛东部海域盐度稍低于周围水体(图 2b)。50m 层盐度的变化范围为 33.96 ~ 34.39,平均 34.12 $\pm$ 0.11,呈斑块状分布,高值出现在调查海域东部和南部;上述提及的调查区南部的低温区则表现出高盐的特点(图 3b)。

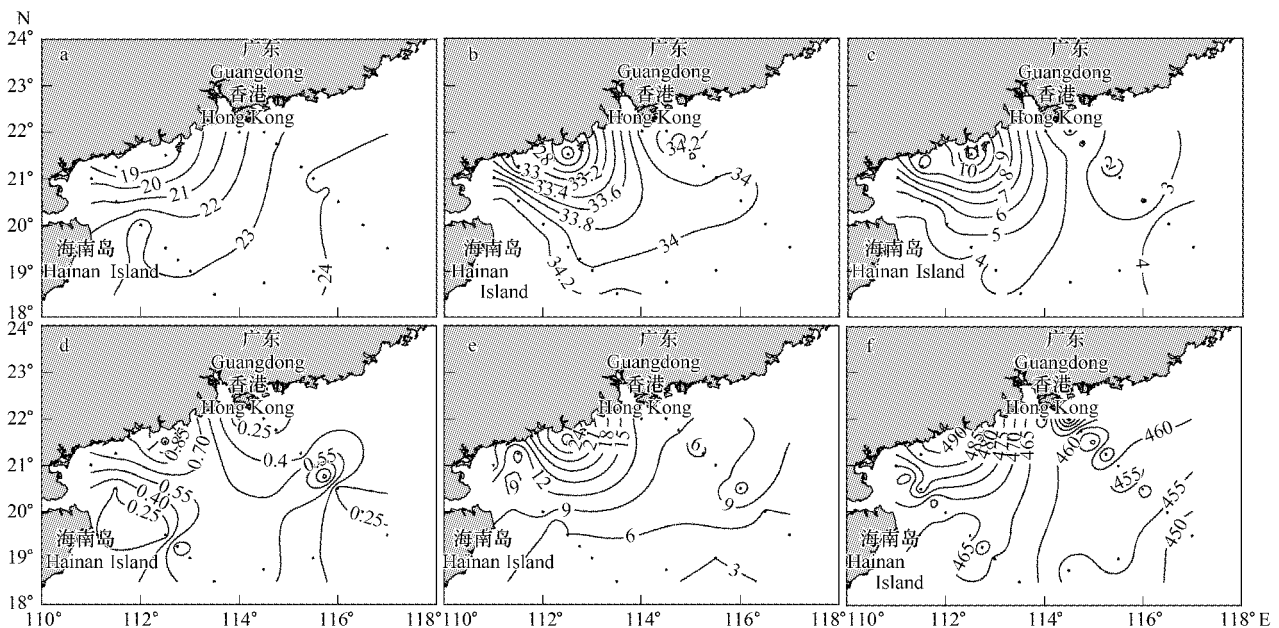


图 2 2006 年 2 月南海北部表层环境参数分布

Fig. 2 Horizontal distribution of environment parameters at the surface in nSCS in Feb. 2006

a. 温度 Temperature, $^{\circ}\text{C}$; b. 盐度 Salinity; c. NO_3^- , $\mu\text{mol dm}^{-3}$; d. PO_4^{3-} , $\mu\text{mol dm}^{-3}$; e. SiO_3^{2-} , $\mu\text{mol dm}^{-3}$; f. DO, $\mu\text{mol dm}^{-3}$

(2) 化学营养盐参数

表层硝酸盐(NO_3^-)浓度在 1.53 ~ 12.75 $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ 之间,平均(4.74 $\pm$ 2.59) $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$,近岸高于外海,最高值出现在沿岸带,在香港东南面有一低值区(图 2c)。50m 层硝酸盐(NO_3^-)浓度在 2.18 ~ 7.81

$\mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ 之间,平均 $(4.85 \pm 1.66) \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,分布上调查区西部高于东部,斑块状特征明显,调查区南部同时出现高值(图 3c)。

表层磷酸盐(PO_4^{3-})浓度近岸高于外海,变化范围为 $0.14 \sim 1.20 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,平均为 $(0.46 \pm 0.30) \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,香港近岸和海南岛东部海域均出现低值($<0.2 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$)(图 2d)。50m 层磷酸盐(PO_4^{3-})浓度变化范围为 $0.16 \sim 1.78 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,平均为 $(0.50 \pm 0.39) \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,低值出现在海南岛东部,调查区南部和香港东南面出现高值(图 3d)。

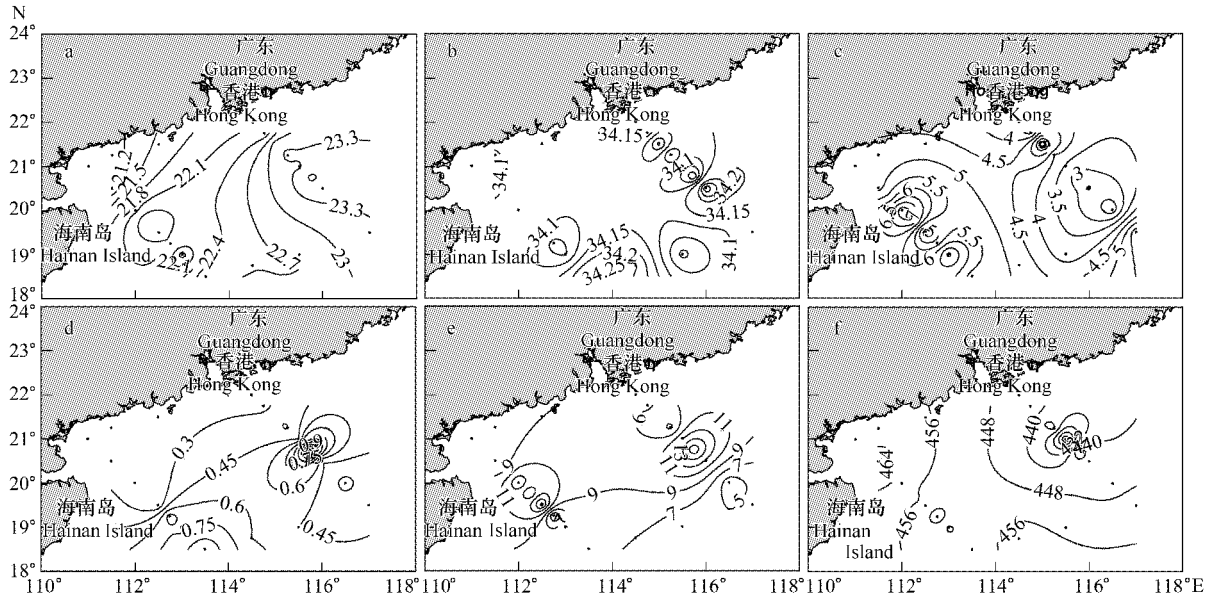


图 3 2006 年 2 月南海北部 50m 层环境参数分布

Fig. 3 Horizontal distribution of environment parameters at the 50m layer in nSCS in Feb. 2006

a. 温度 Temperature, $^{\circ}\text{C}$; b. 盐度 Salinity; c. NO_3^- , $\mu\text{mol dm}^{-3}$; d. PO_4^{3-} , $\mu\text{mol dm}^{-3}$; e. SiO_3^{2-} , $\mu\text{mol dm}^{-3}$; f. DO, $\mu\text{mol dm}^{-3}$

表层硅酸盐(SiO_3^{2-})浓度变化范围为 $3.00 \sim 28.30 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,平均 $(9.10 \pm 5.95) \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,呈现近岸向外海降低的分布特征(图 2e)。50m 层硅酸盐(SiO_3^{2-})浓度变化范围为 $2.7 \sim 18.5 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,平均 $(9.34 \pm 4.48) \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,大致呈从近岸向外海降低的分布特征,高值区出现在海南岛东部和香港东南面(图 3e)。

表层溶解氧(DO)浓度变化范围为 $445.2 \sim 492.6 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,平均 $(466.1 \pm 14.0) \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,从近岸向外海降低,S1 断面分布情况则相对复杂,高溶氧区和低溶氧区相互穿插(图 2f)。50m 层 DO 浓度变化范围为 $398.81 \sim 471.74 \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,平均 $(449.29 \pm 15.40) \mu\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$,其低值区出现在海南岛东部及香港东南面海域,在调查区南部表现出高 DO 的特征(图 3f)。

(3) Chl a 和粒度分级 Chl a 浓度

表层 Chl a 浓度分布范围为 $0.03 \sim 1.24 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,最高值出现在近岸 e 站,S1 - 10 站则出现最低值,平均浓度为 $(0.38 \pm 0.39) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,沿岸高于外海(图 4a);50m 层 Chl a 浓度分布范围为 $0.02 \sim 0.65 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,最高值和最低值分别在 S1 - 8 和 S1 - 10 站,平均浓度为 $(0.29 \pm 0.22) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,高值区位于海南岛东部和调查海域东部(图 4b)。水柱平均 Chl a 浓度的变化范围为 $0.03 \sim 1.21 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (平均 $(0.33 \pm 0.33) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$),最高值在 e 站,最低值则出现在 S1-2 站。分布趋势与表层分布特征一致,高值区出现在广东沿岸及海南岛东部附近海域(图 4c)。

从沿岸带到陆坡开阔海,Pico 级份对水柱平均总 Chl a 浓度的贡献呈逐渐增大的趋势(由 23% 增加到 47%),而 Net 和 Nano 级份则相反(表 1),它们与 Chl a 分布趋势一致。

(4) 粒度分级初级生产力

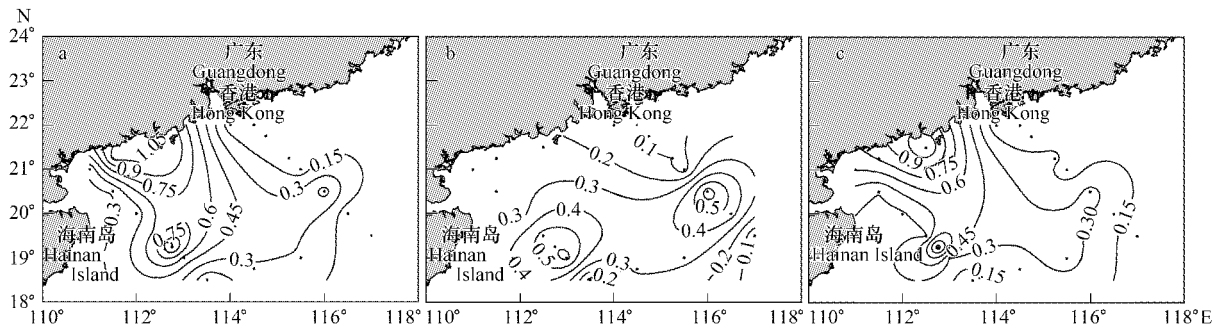


图4 2006 年2月南海北部海域 Chl a(mg·m⁻³) 分布图

Fig. 4 Horizontal distribution of Chl a concentration(mg·m⁻³) in nSCS in Feb. 2006

a. 表层; b. 50m; c. 水柱平均 a. surface; b. 50m; c. water column integrated Chl a

从初级生产力测定结果(图5)来看,最小值41.3 mgC·m⁻²·d⁻¹出现在沿岸带 e 站,最大值出现于调查海域南部 S2-8 站(1040.0 mgC·m⁻²·d⁻¹),其余二站 S1-6、h 站分别为 162.2 mgC·m⁻²·d⁻¹和 222.6 mgC·m⁻²·d⁻¹。各级份对初级生产力的贡献除了 h 站是 Nano 级份稍显优势外,其余测站均是 Pico > Nano > Net 级份,且所占比例从沿岸带向外海升高(44% ~ 66%)(表1)。Net 和 Nano 级份占生物量的比重较大,但对生产力的贡献却不如 Pico 级份大,这种情况在沿岸带尤其明显(表1)。

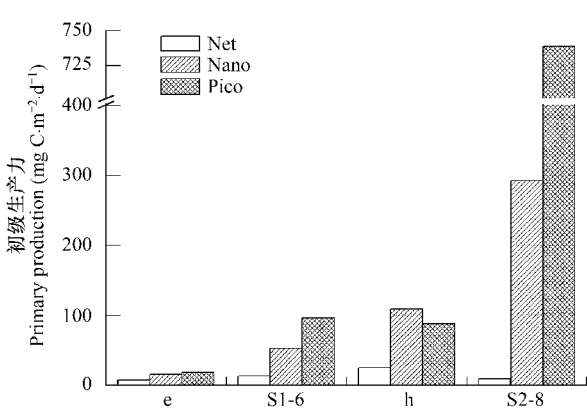


图5 2006 年2月南海北部初级生产力的粒级结构

Fig. 5 Size-fractionated primary production in nSCS in Feb. 2006

表1 2006 年2月南海北部不同海域物理、化学、生物参数比较($\bar{X} \pm SD$)

Table 1 Mean $\pm$ SD of physical, chemical, and biological parameters in the different regions of nSCS			
参数 Parameters	沿岸带 Coastal Region	陆架区 Shelf Region	陆坡及开阔海 Slope & Open sea
温度 Temperature(℃)	19.54 $\pm$ 1.44	22.06 $\pm$ 0.63	19.96 $\pm$ 0.74
盐度 Salinity(S)	33.46 $\pm$ 0.66	34.15 $\pm$ 0.10	34.30 $\pm$ 0.08
NO ₃ ⁻ (μmol·dm ⁻³)	7.06 $\pm$ 3.07	5.23 $\pm$ 1.23	7.56 $\pm$ 2.64
PO ₄ ³⁻ (μmol·dm ⁻³)	0.71 $\pm$ 0.36	0.30 $\pm$ 0.11	0.74 $\pm$ 0.30
SiO ₃ ²⁻ (μmol·dm ⁻³)	18.47 $\pm$ 7.63	10.27 $\pm$ 2.26	14.21 $\pm$ 4.11
溶解氧 Dissolved oxygen(μmol·dm ⁻³)	475.4 $\pm$ 11.1	442.5 $\pm$ 24.9	395.8 $\pm$ 25.0
表层 Chl a Surface Chl a (mg·m ⁻³)	0.55 $\pm$ 0.57	0.26 $\pm$ 0.25	0.35 $\pm$ 0.36
Chl a(mg·m ⁻³)	0.53 $\pm$ 0.50	0.20 $\pm$ 0.11	0.31 $\pm$ 0.30
Net	0.06 $\pm$ 0.06(11%)	0.04 $\pm$ 0.03(18%)	0.08 $\pm$ 0.14(24%)
Nano	0.35 $\pm$ 0.34(66%)	0.07 $\pm$ 0.05(36%)	0.09 $\pm$ 0.09(29%)
Pico	0.12 $\pm$ 0.11(23%)	0.09 $\pm$ 0.05(46%)	0.15 $\pm$ 0.10(47%)
PP(mgC·m ⁻² ·d ⁻¹)	41.3(n=1)	162.2(n=1)	631.3 $\pm$ 578.0(n=2)
Net	7.7(19%)	13.1(8%)	16.9 $\pm$ 11.3(3%)
Nano	15.5(37%)	53.1(33%)	200.9 $\pm$ 129.2(32%)
Pico	18.0(44%)	96.0(59%)	413.4 $\pm$ 460.1(66%)
真光层深度 Euphotic Depth (m)	2.6 $\pm$ 0.1(n=2)	36.4 $\pm$ 9.3(n=2)	38.3 $\pm$ 14.8(n=4)

2.1.2 垂直分布特征

从温盐断面分布图可看出近岸水体混合比较均匀,表、底层水质均一(图6),垂直方向上 Chl a 浓度差别

不大(图6);而在陆架和开阔海域海水层化比较明显,出现 Chl a 次表层最大值现象,特别是 S1-8 站。另外在 S2-9 站可看到温、盐、 NO_3^- 等值线在该处抬升(图6);其附近 S2-8 站的初级生产力高达 $1040.0 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 真光层平均 Chl a 浓度 $1.39 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 是整个调查海域出现的最大值。

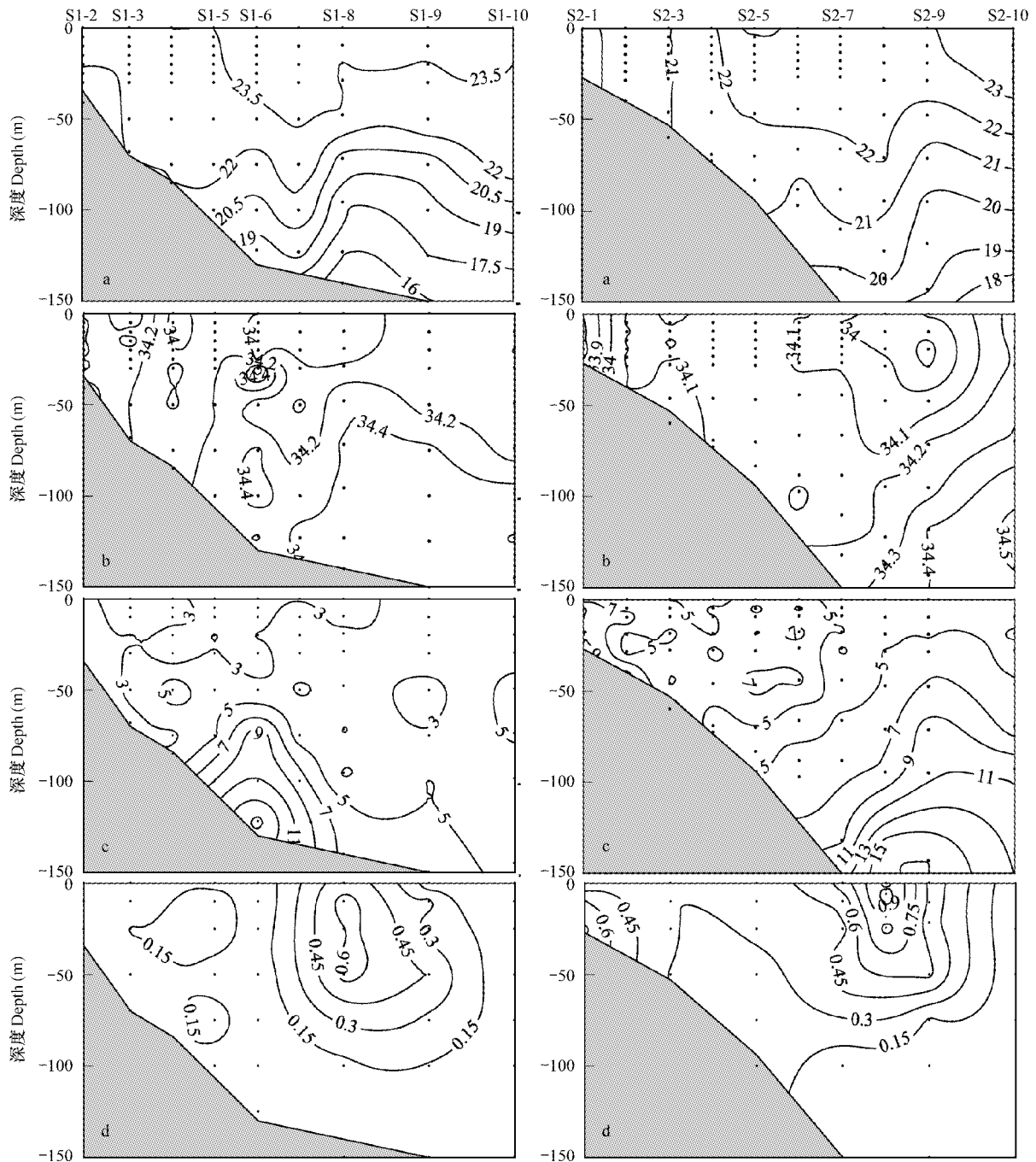


图6 2006年2月S1、S2断面各参数分布图

Fig. 6 Vertical distribution of parameters on transect S1 & S2 during winter 2006 in nSCS

a. 温度 Temperature($^{\circ}\text{C}$); b. 盐度 Salinity; c. NO_3^- ($\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$); d. Chl a ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

3 讨论

3.1 调查海域 Pico 级浮游植物的重要性

粒度分级 Chl a 和初级生产力结果显示,粒径小于 $2 \mu\text{m}$ 的 Pico 级浮游植物对总生物量的贡献较大

(23%~47%),特别是在开阔海区(表1)。而在高 Chl a 浓度($>1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)的区域如沿岸带,则是微、小型浮游植物占优势。这与不同级份浮游植物所采取的营养策略有关^[23],由于 Net、Nano 级份细胞个体较大,营养盐吸收半饱和常数大,在营养盐充足的环境中生长迅速,而 Pico 级份个体微小,比表面积大,具有较低的营养盐吸收半饱和常数,因此在低营养盐浓度的开阔海域也能迅速的生长繁殖,所占比重较大。这与 1998 年在南海大范围海域所得到的结果^[4]一致。从图 7 可看出,S2-8 站初级生产力随水深先增加后减少,在光衰减到 32.5% 层次时达到最大值,分析认为可能是多个因素综合作用的结果:(1) 富营养的低温高盐水支持了 S2-8 站的高生产力,从图 7 可以看到 S2-8 站温度随深度增加而降低,盐度则随之升高,硝酸盐和磷酸盐在 10m 水层附近出现高值,Chl a 浓度和初级生产力值相应较高;(2) 32.5% 光衰减层次出现的初级生产力高值主要由 Pico 级份贡献,该级份浮游生物适应在弱光条件下生长繁殖,它们个体微小,能量转化效率高,代谢活性强,生物量循环快,使得其初级生产力也高^[4,24]。由此可知,微微型浮游植物在营养盐贫乏的南海北部海域扮演了非常重要的角色,在今后的调查中应加大这方面的研究力度。

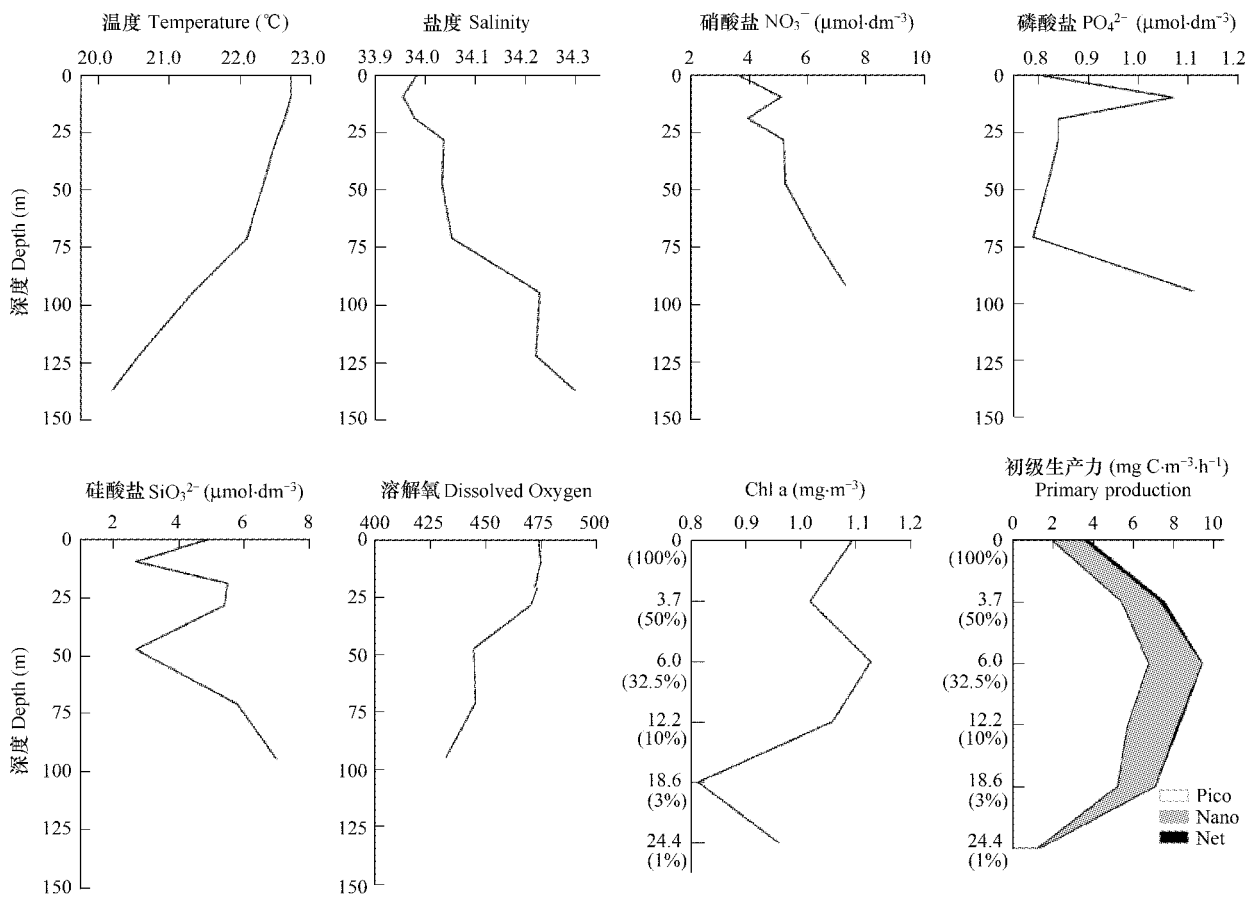


图 7 2006 年 2 月 S2-8 站各参数垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of different parameters at station S2-8 in Feb. 2006

3.2 不同海域浮游植物的现存量和生产力及其环境调控

南海北部海域具有极其复杂的生态环境^[5],既有富营养和低盐度的河口(如珠江口)、沿岸带与海湾,又有中营养和中盐度的陆架区及寡营养和高盐度的陆坡与开阔海,这使得营养盐、光照、温度等的生态因子在不同海域的重要性也有区别^[4,16,24],进一步造成了浮游植物现存量和生产力的极大差异。

在本研究中,沿岸带受东北季风的影响,一方面沿岸水向西南运动,将丰富的营养盐通过台湾海峡带入南海北部^[8];另一方面整个南海西部构成一个大尺度、强盛的气旋式西边界流^[25],引起近岸底层海水向上涌升,强大的温跃层被打破^[26]。表层营养盐得到补充(图 6),因此在沿岸带浮游植物现存量较高(表 1)。但沿岸

带浮游植物受光合作用可利用光和水体稳定度的影响^[16],其生产力较低($41.3 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),这主要是因为冬季近岸水体上下混合剧烈,混合层深度大于真光层,使得浮游植物被频繁卷入或卷出真光层,不利于进行光合作用。

在陆架和陆坡及开阔海区,由于强盛的气旋式西边界流的侧向牵引,形成一系列中、小尺度的涡旋,海水在垂直方向上的运动比较显著,或辐散涌升或辐聚下沉^[27]。柴扉等^[28]报道在南海北陆架区有 2 个常年存在的反气旋涡—香港东南面反气旋涡和海南岛东部反气旋涡,二者的中心位置分别处于 21°N , 116°E 和 19°N , 112°E 附近。从本研究所得环境参数的分布特征也可以看到它们的存在,特别是 50m 层的参数分布图(图 3),温盐呈斑块状分布,而表层由于受季风、径流、降雨等众多因素干扰,在反气旋涡位置没有表现出相应的高温、低盐特征,除了溶解氧和 Chl a 浓度,表层的各项参数值均低于 50m 层。南海北部这种多涡的环流结构^[29]影响了营养盐的分布,并进一步决定了浮游植物的生物量和生产力。在开阔海域,营养盐是影响浮游植物多寡和生产力高低的主要因子^[30,31]。陆架区离陆地较远,陆源输入对其直接影响减弱,只有通过沿岸水团的移动和底层富营养水的涌升为上层水体带来营养盐。S1、S2 断面图(图 6)上可以看到温盐等值线有不同程度的抬升或下降,说明海水存在涌升或下沉的现象。海南岛东部反气旋涡 S2-7 站附近海水下沉, PO_4^{3-} 浓度只有 $0.17 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$,从表 1 可看到 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 浓度均低于沿岸带, Chl a 浓度只有 $(0.27 \pm 0.15) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。而在 S2-8 站浮游植物生物量和生产力迅速升高, Chl a 浓度和初级生产力分别高达 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1040.0 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,分析认为与此处低温($< 22^{\circ}\text{C}$)、高盐(> 34.0)、高营养盐($\text{NO}_3^- > 6 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} > 0.7 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-} > 5.5 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)、低溶解氧($< 450.0 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)的特征有关。认为该处可能存在上升流,其形成机制还有待于进一步研究。从图 6 同样可以看到香港东南面反气旋涡被局限在较小范围,强度较弱,在其靠外海一侧也有上升流的迹象,温、盐等值线斜向上拱起,海水涌升使表层营养盐得到补充,导致 h 站的现场初级生产力 $> 200 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

3.3 厄尔尼诺年与非厄尔尼诺年的比较

海南岛东部和香港东南面的两个反气旋涡具有明显的年际变化,不同年份,其位置和影响范围,以及暖涡中心的温、盐度都有很大不同,其中最为明显的是与厄尔尼诺的关系^[28]。1997 ~ 1998 年发生了大的厄尔尼诺事件,使反气旋涡影响范围和强度比正常年份增强^[18,24]。在此选取 1998 和 2006 年分别代表强厄尔尼诺年和非厄尔尼诺年,集中截取南海北部 $18^{\circ} \sim 23^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ} \sim 117^{\circ}\text{E}$ 的海域,对其冬季的理化和生物学参数进行比较(表 2),分析海域的物理-化学-生物海洋耦合关系(1998 年数据来源于本课题组历史调查资料)。从表 2 可以看到:2006 年冬季南海北部温度较低,盐度较高, NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 浓度、DO 和初级生产力均高于 1998 年冬季。通过这个比较,证明南海海域确实存在明显的物理-化学-生物海洋耦合关系^[4]。在强厄尔尼诺事件发生时海南岛东部和香港东南面反气旋涡得到强化,即使在冬季其所在海域营养盐浓度仍不高,进而影响浮游植物生产力。

表 2 冬季南海北部强厄尔尼诺年与非厄尔尼诺年理化、生物参数的比较($\bar{X} \pm \text{SD}$)

Table 2 Comparison of physical, chemical, and biological parameters between the strong- and non-El Niño years

年份 Year	水温 Temperature($^{\circ}\text{C}$)	盐度 Salinity(S)	硝酸盐 NO_3^- ($\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)	磷酸盐 PO_4^{3-} ($\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)
1998-12(强厄尔尼诺年)	22.84 ± 2.40	33.55 ± 1.25	2.85 ± 2.65	0.27 ± 0.25
2006-02(非厄尔尼诺年)	20.60 ± 1.46	34.01 ± 0.49	6.58 ± 2.51	0.58 ± 0.33
年份	硅酸盐 SiO_3^{2-} ($\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)	溶解氧 Dissolved oxygen ($\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)	叶绿素 a Chl a ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	PP ($\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
1998-12(强厄尔尼诺年 Strong-El Niño year)	8.63 ± 8.89	422.51 ± 47.17	0.47 ± 0.42	145.8
2006-02(非厄尔尼诺年 non-El Niño year)	13.98 ± 5.74	434.91 ± 38.98	0.33 ± 0.33	366.5 ± 455.3

浮游植物和浮游动物是稚鱼的主要食物,在 Santa Barbara Channel 发现由于冷涡区食物充足使该海域拥

有丰富的鱼类资源^[32]。而在南海北部,冷涡的生消是与季风变化密不可分的,因此阐明其物理-化学-生物耦合特征不仅对于了解海洋学现象意义重大,而且对发掘海区潜在的生物资源以及如何管理现有资源实现可持续发展具有重要作用。

4 结论

在 2006 年 2 月对南海北部海域的 Chl a 浓度、初级生产力及其环境参数进行了深入调查,分析后得到如下结果:

(1) 冬季海南岛东部反气旋涡和香港东南面反气旋涡强度下降,但其中心跟周围水体相比仍具有相对高温、低盐的特征。同时发现在海南岛东部反气旋涡东南面紧邻有一个上升流,具有低温、高盐、高营养盐浓度、高 Chl a 和高初级生产力的特征。

(2) 不同海域由于环境的差别导致浮游植物生物量和生产力有较大差别:Chl a 浓度是沿岸带 > 陆坡及开阔海区 > 陆架区;而现场初级生产力则是陆坡及开阔海区最高,沿岸带受光合作用可利用光和水体稳定度的影响,生产力最低。

(3) 粒度分级 Chl a 和初级生产力结果显示,粒径小于 2 μm 的 Pico 级浮游植物对浮游植物现存量和生产力的贡献很大,特别是在开阔海区。

(4) 通过本研究数据(非厄尔尼诺年)与 1998 年 12 月(强厄尔尼诺年)历史数据的比较,佐证了南海北部存在明显的物理-化学-生物海洋耦合关系。

References:

- [1] Ning X R, Liu Z L, Cai Y M. A review on primary production studies for China seas in the past 20 years. *Donghai Marine Science*, 2000, 18(3): 13–20.
- [2] Doney S C, Glover D M, Najjar R R. A new coupled, one-dimensional biological-physical model for the upper ocean: Applications to the JGOFS Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS) site. *Deep-Sea Research II*, 1996, 43: 591–624.
- [3] McGillicuddy D J, McCarthy J J, Robinson A R. Coupled physical and biological modeling of the spring bloom in the North Atlantic (I): model formulation and one dimensional bloom processes. *Deep-Sea Research I*, 1995, 42: 1313–1357.
- [4] Ning X R, Chai F, Xue H J, *et al.* Physical-biological oceanographic coupling influence phytoplankton and primary production in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109.
- [5] Su J L, Xu J P, Cai S Q, *et al.* Gyres and eddies in the South China Sea. In: *Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean*. Beijing: Meteorological Press, 1999. 272–279.
- [6] Cai S Q, Su J L, Gan Z J, *et al.* The numerical study on the dynamic mechanism of the South China Sea upper circulation in winter. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(5): 14–23.
- [7] Wang G H, Su J L, Qi Y Q. Advances in studying Mesoscale Eddies in South China Sea. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(8): 882–886.
- [8] Lee Chen Y L. Spatial and seasonal variations of nitrate-based new production and primary production in the South China Sea. *Deep-Sea Research I*, 2005, 52: 319–340.
- [9] Gong G, Liu K K, Liu C, *et al.* The chemical hydrography of the South China Sea west of Luzon and a comparison with the west Philippine Sea. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1992, 3: 587–602.
- [10] Wu J, Chung S W, Wen L S, *et al.* Dissolved inorganic phosphorus, dissolved iron, and Trichodesmium in the oligotrophic South China Sea. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(1): 1008.
- [11] Liu K K, Chao S Y, Shaw P T, *et al.* Monsoon-forced chlorophyll distribution and primary production in the South China Sea: observations and a numerical study. *Deep-Sea Research I*, 2002, 49: 1387–1412.
- [12] Hsu M K, Liu A K. Nonlinear internal waves in the South China Sea. *Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Brest, France, 1999, 175–180.
- [13] Hao Q, Ning X R, Liu C G, *et al.* Satellite and in situ observations of primary production in the northern South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(3): 58–68.
- [14] Li X B, Chen C Q, Shi P, *et al.* Estimation of primary production of South China Sea from 1998 to 2002 by remote sensing and its spatio-temporal variation mechanism. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 25(3): 57–62.
- [15] Chen C Q, Shi P, Mao Q W. Satellite remotely-sensed analysis of distribution characters of chlorophyll concentration in South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 2001, 20(2): 66–70.
- [16] Cai Y M, Ning X R, Liu Z L. Studies on primary production and new production of the Zhujiang Estuary, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(3): 101–111.

- [17] Huang B Q, Hong H S, Ke L, *et al.* Size fractionated phytoplankton biomass and productivity in the Zhujiang River Estuary in China. *Acta Oceanologica Science*, 2005, 27(6): 180–186.
- [18] Wang S W, Gong D Y. ENSO Events and Their Intensity during the Past Century. *Meteorological Monthly*, 1999, 25(1): 9–14.
- [19] Holm-Hansen O, Lorenzen C J, Holmes R W, *et al.* Fluorometric determination of chlorophyll. *J. Cons. perm. int. Explor. Mer.*, 1965, 30: 3–15.
- [20] Steemann Nielson. The use of radioactive carbon (^{14}C) for measuring organic production in the sea, *J. Cons. Int. Explor. Mer.*, 1952, 18: 117–140.
- [21] Evans C A, O'Reilly J E, Thomas J P. A Handbook for the Measurements of Chlorophyll a and Primary Production. *Biomass Scientific Series*, 1987, 8: 1–114.
- [22] Ning, X R, Vulot D, Liu Zh, Liu Z. Standing stock and production of phytoplankton in the estuary of the Changjiang (Yangtze River) and the adjacent East China Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 1988, 49(10): 141–150.
- [23] Ning X R, Cai Y M, Li G W, *et al.* Photosynthetic picoplankton in the northern South China Sea. *Acta Oceanologica Science*, 2003, 25(3): 83–97.
- [24] Liu H B, Chang J, Tseng C M, *et al.* Seasonal variability of picoplankton in the Northern South China Sea at the SEATS station. *Deep-Sea Research II*, 2007, 54: 1602–1616.
- [25] Xue H J, Chai F, Xu D Y, *et al.* Characteristics and seasonal variation of the coastal currents in the South China Sea. *Oceanography in China*, 13, Beijing: Ocean Press, 2001. 64–74.
- [26] Xue H J, Chai F, Wang L Y, *et al.* Zhujiang River Estuarine circulation model. *Oceanography in China*, 13, Beijing, Ocean Press, 2001. 138–151.
- [27] Chai F, Xue H J, Shi M C. Formation and distribution of upwelling and downwelling in the South China Sea. *Oceanography in China*, 13, Beijing: Ocean Press, 2001. 117–128.
- [28] Chai F, Xue H J, Shi M C. Hydrographic characteristics and seasonal variation of three anticyclonic eddies in the northern South China Sea. *Oceanography in China*, 13, Beijing: Ocean Press, 2001. 105–116.
- [29] Xu J P, Xue H J, Shi M C, *et al.* Observation and study of the circulation and meso-scale eddies in the upper layer of the South China Sea. *Oceanography in China*, 13, Beijing: Ocean Press, 2001, 178–187.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Nishimoto M M, Washburn L. Patterns of coastal eddy circulation and abundance of pelagic juvenile fish in the Santa Barbara Channel, California, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 2002, 241: 183–199.

参考文献:

- [1] 宁修仁, 刘子琳, 蔡昱明. 我国海洋初级生产力研究二十年. *东海海洋*, 2000, 18(3): 13–20.
- [6] 蔡树群, 苏纪兰, 甘子钧, 等. 冬季南海上层环流动力机制的数值研究. *海洋学报*, 2001, 23(5): 14–23.
- [7] 王桂华, 苏纪兰, 齐义泉. 南海中尺度涡研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(8): 882–886.
- [13] 郝锴, 宁修仁, 刘诚刚, 等. 南海北部初级生产力遥感反演及其环境调控机制. *海洋学报*, 2007, 29(3): 58–68.
- [14] 李小斌, 陈楚群, 施平, 等. 南海 1998–2002 年初级生产力的遥感估算及其时空演化机制. *热带海洋学报*, 2006, 25(3): 57–62.
- [15] 陈楚群, 施平, 毛庆文. 南海海域叶绿素浓度分布特征的卫星遥感分析. *热带海洋学报*, 2001, 20(2): 66–70.
- [16] 蔡昱明, 宁修仁, 刘子琳. 珠江口初级生产力和新生产力研究. *海洋学报*, 2002, 24(3): 101–111.
- [17] 黄邦钦, 洪华生, 柯林, 等. 珠江口分粒级叶绿素 a 和初级生产力研究. *海洋学报*, 2005, 27(6): 180–186.
- [18] 王绍武, 龚道溢. 近百年来的 ENSO 事件及其强度. *气象*, 1999, 25(1): 9–14.
- [23] 宁修仁, 蔡昱明, 李国为, 等. 南海北部微微型光合浮游生物的丰度及环境调控. *海洋学报*, 2003, 25(3): 83–97.
- [25] 薛惠洁, 柴扉, 徐丹亚, 等. 南海沿岸流特征及其季节变化. *中国海洋学文集*, 第 13 集. 北京: 海洋出版社, 2001. 64–74.
- [26] 薛惠洁, 柴扉, 王丽娅, 等. 珠江口及其邻近海域环流模式结构. *中国海洋学文集*, 第 13 集. 北京: 海洋出版社, 2001. 138–151.
- [27] 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*, 第 13 集. 北京: 海洋出版社, 2001. 117–128.
- [28] 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*, 第 13 集. 北京: 海洋出版社, 2001. 105–116.
- [29] 许建平, 薛惠洁, 侍茂崇, 等. 1998 年夏季南海上层环流与中尺度涡旋观测研究. *中国海洋学文集*, 第 13 集. 北京: 海洋出版社, 2001. 178–187.