

东、黄海典型海域叶绿素 a 含量的垂向变化与周日波动^{*}林学举¹ 黄邦钦^{1*} 洪华生¹ 王大志¹ 肖天²⁽¹⁾ 厦门大学海洋环境科学教育部重点实验室, 环境科学研究中心 361005)⁽²⁾ 中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

提要 2000年10月21至11月5日对东海与黄海典型海区进行了叶绿素 a 浓度的现场周日观测。地理环境和水文状况的差异使各海区的垂向变化与日波动表现出各自的特征: 东海观测站位在垂向上的分布比较单一, 多数呈上混合层均匀分布型并在跃层以下递减; 长江口受潮流影响大, 偶而在底层出现峰值; 而南黄海观测站位垂向分布出现了均匀分布型与次表层双峰型两种。受潮流等影响, 叶绿素 a 浓度的日变化在各海区间及各自的垂向上都有所差异: 出现层化的测站, 跃层以上日波动比跃层以下明显; 在 E7 测站的表层和长江口测站的底层都以半日周期为主, 而南黄海测站以全日周期为主。

关键词 叶绿素 a, 垂向变化, 周日波动, 黄海, 东海, 长江口

叶绿素 a 被海洋学家广泛用于指示水体浮游植物现存量的多少, 而且它的时空变化包含着海区基本的生态信息。我国在东海与黄海某些海区进行叶绿素 a 的研究已有一些报道^[1]。本文主要结合叶绿素 a 的实测值与荧光探头提供的数据, 分析黄海与东海典型海区 (包括南黄海水区、长江口与受黑潮影响的东海陆架) 叶绿素 a 分布的垂向精细结构及高频 (每小时 1 次或每 3 个小时 1 次) 日观测值的波动特征, 并讨论环境因子对其波动的影响, 为东、黄海生态系统动力学研究提供基础参数。

1 方法与数据处理

2000年秋季(10月21日至11月5日), “东方红 2 号”综合考察船在秋季航次所进行的研究站位布设见图 1。每个测站采样层次依水深及 CTD 探头探测的跃层深度等实际情况决定; 叶绿素 a (Chla) 的测定是参照 Parsons 等 1984 年所描述的方法略作改进进行的^[2], 并按《海洋调查规范》(GB 12763) 中的公式计算叶绿素 a 的浓度 C_{Chla} ; 同时采用 Seapoint PN24187 型荧光计 (量程为 0~15 $\mu\text{g/L}$) 测得剖面水体荧光值, 并由校正公式计算取得校正后的叶绿素 a (C_{Chla}) 浓度。取东方红 2 号采样测站的各层叶绿素实测值与荧光探头测值进行回归校正, 两者的关系式可表达成:

$$C_{\text{Chla}} (\text{mg/m}^3) = 0.7572 \times C_{\text{FChla}} + 0.0910$$

$$(r^2 = 0.6338, n = 74)$$

其中, 回归的叶绿素标准偏差值为 0.1972 mg/m^3 。

针对叶绿素浓度随时间变化呈现出的波形特征, 使用非线性三角方程进行曲线拟合 (由软件 SigmaPlot 4.0 完成)。先把叶绿素浓度描述成随时间变化的三角方程:

$$C_{\text{Chla}} (\text{mg/m}^3) = a_0 + a_1 \times \sin(2\pi \cdot t/k)$$

其中, a_0 、 a_1 为常数项, π 设为 3.14159265359, k 为波动周期。使用自动初始化参数计算方程 (SigmaSimp), 由快速傅立叶变换 (FFT) 返回参数的矢量值, 并代入方程经 100 次迭代, 通过曲线拟合优化得到最终参数与模拟曲线。各观测站的数据经傅立叶回归后的参数见表 1。

* 国家重点基础研究发展规划 (973) 资助项目 G19990437 号

第一作者: 林学举, 出生于 1977 年, 硕士, 现在美国纽约州立大学石溪分校攻读博士学位, 研究方向: 海洋微型生态。

** 通讯联系人, E-mail: bqhuang@jingxian.xmu.edu.cn

收稿日期: 2001-08-16 修回日期: 2001-10-25

2 结果与讨论

依地理环境和水文状况的差异 (如表 2), 对所观测的站点分成三个海区进行讨论。

表 1 东、黄海各观测站叶绿素 a 浓度时间序列回归参数
Tab.1 Time-series regression parameters of chlorophyll a concentration in the stations of East China Sea and Southern Yellow Sea

测站及观测水层 (m)	C _{chl a}				
	a ₁	k	a ₀	n	r
E1 0	0.091	19.9	0.560	9	0.462
E2 0	0.024	23.4	0.399	32	0.207
20	0.08	24.4	0.427	32	0.725
38	0.126	-70.7	0.553	32	0.433
50	-0.019	56.7	0.152	32	0.638
E4 0	0.231	21.7	0.846	9	0.510
E7 0	-0.238	11.9	1.083	9	0.642
50	-4.202	8.77	9.463	9	0.932

注: n 为回归样品数; r 为相关系数

表 2 东、黄海各观测站表层水特征参数

Tab.2 Characteristic parameters of surface water in the stations of East China Sea and Southern Yellow Sea

测站	南黄海			长江口	东海陆架			
	E1	E2	E3	E4	E6	P2	P3	E7
经纬度	121.00.88E 35.00.16N	123.03.74E 34.29.81N	123.59.99E 32.30.12N	122.38.04E 31.00.02N	125.28.91E 29.00.32N	126.43.25E 28.28.21N	124.37.39E 29.59.48N	125.04.87E 29.24.83N
深度(m)	40	70	40	20	100	200	50	80
温度(℃)	20.43	20.11	21.46	21.64	23.17	26.03	23.42	22.65
盐度	31.73	31.51	31.94	28.06	32.97	33.93	33.81	32.50
C _{SiO₃} (μmol/L)	21.92	19.79	24.04	35.13	0.00	46.29	20.47	22.24
C _{NO₃} (μmol/L)	0.91	0.27	9.45	17.11	0.20	0.18	1.42	1.12
C _{PO₄} (μmol/L)	0.21	0.02	0.78	0.61	0.05	0.08	0.19	0.19
N/P	4.33	13.5	12.12	28.05	4	2.25	7.47	5.89
C _{chl a} (mg/m ³)	0.58	0.62	0.347	0.88	0.96	0.163	0.35	1.06

2.1 受黑潮水影响的东海陆架

黑潮暖流对东海本调查区影响最大的是 p2 测站, 黑潮水表现出高温高盐及低营养盐的特征, 水体层化明显, 叶绿素 a 浓度在上混合层分布均匀, 平均浓度仅为 0.163 mg/ m³, 并随深度往下呈降低趋势(图 2)。到 p3 测站, 黑潮水已没有显著影响, 该测站水体混合剧烈, 荧光探头的输出信号产生很大的干扰, 但

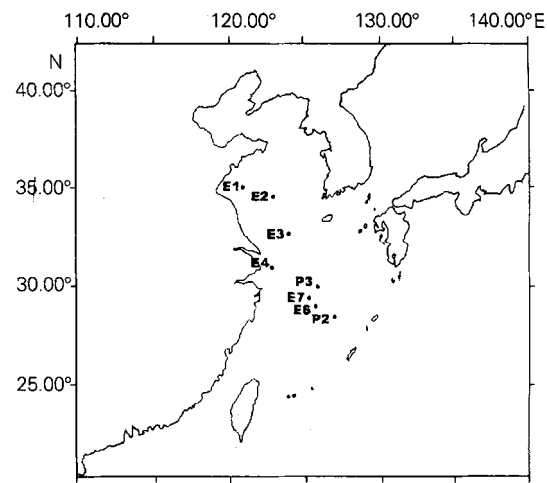


图 1 2000 年秋季东海与黄海观测站位分布图
Fig.1 Sampling stations in East China Sea and Southern Yellow Sea during the cruise in Autumn, 2000

总的呈现均匀分布的模式, 相对应的温盐在垂向上都呈直线型(图 2)。E6 与 E7 测站的垂向分布模式很一致, 水体层化现象明显, 在上混合层叶绿素 a 浓度都是均匀分布, 表层浓度分别可达 0.962 mg/ m³ 与 1.055 mg/ m³, 深层因光的限制而使叶绿素含量降低。同时, 对 E7 测站的日变化观测数据进行傅立叶回归结果可以看出(表 1), 该海区表层叶绿素 a 浓度的

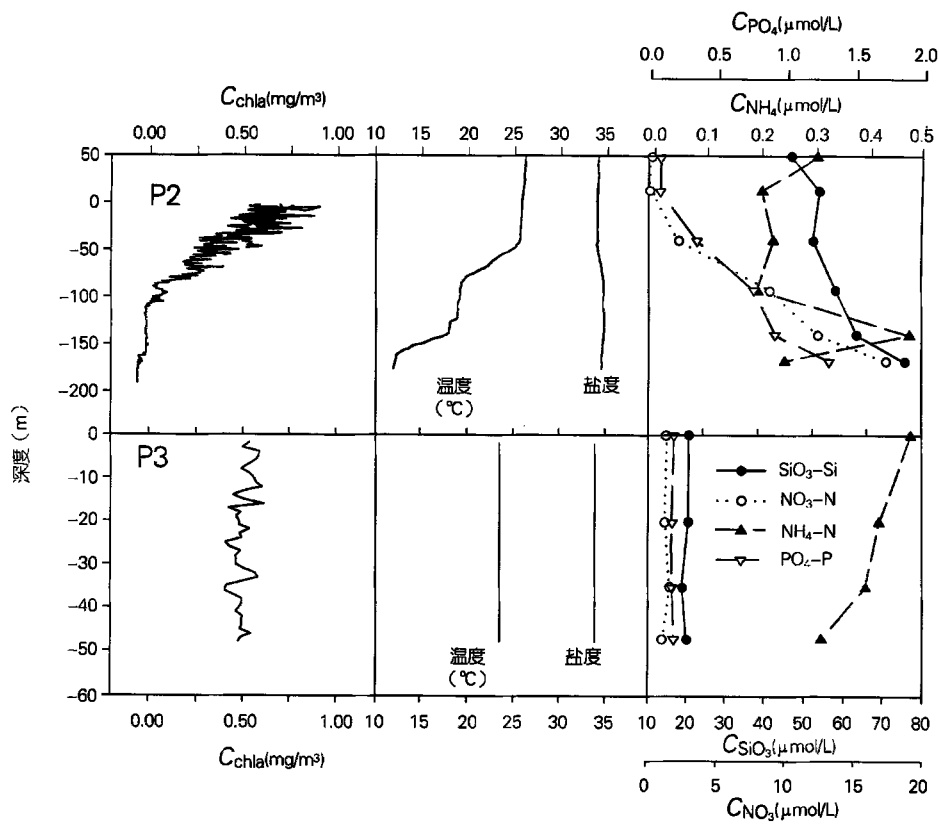


图2 受黑潮影响的东海陆架站位(P2、P3)叶绿素a、温度、盐度与营养盐垂直分布
Fig.2 Vertical profiles of Chla, temperature, salinity and nutrients in stations P2, P3

日变化呈现出半日周期,而底层没有显著的变化。

长江口同时受到淡水径流与潮汐的影响,在观测期间, E4 测站温盐没有明显的层化分布(图3),在

2.2 长江口

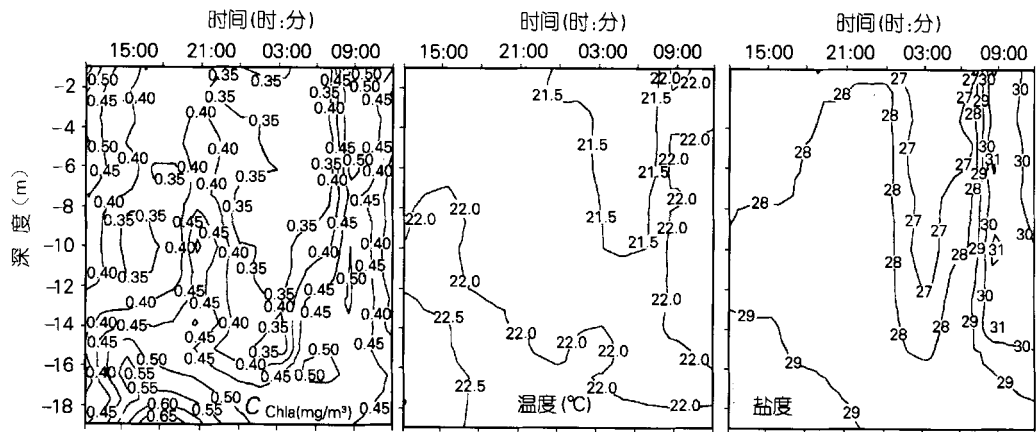


图3 E4 测站叶绿素a、温度与盐度在日观察期内的等值分布
Fig.3 Contour plot of Chla, temperature and salinity during the observed time in station E4

观测的初始时段,底层出现高温高盐水,可能由于台湾暖流前缘水切入底层水引起^[4],其中的叶绿素 a 浓度也表现出高值。在日观测的后期,外海水的输入超过了淡水的影响,表现为盐度明显增高,叶绿素含量也相对增加。垂向上,水体混合均匀,叶绿素 a 浓度在表层平均为 0.958 mg/m^3 ,底层叶绿素 a 的日波动比较明显,呈现出半日周期的变化,说明潮汐对底层有较大的影响。

2.3 南黄海陆架区

从本航次的研究结果来看,南黄海研究海区的叶绿素 a 剖面分布表现出两种模式。在水浅的 E1 与 E3 测站,水体混合均匀,温度和盐度在垂直方向上没有明显的变化,叶绿素 a 的剖面分布也相当均匀(图 4)。两个测站相比,E3 测站的叶绿素 a 浓度在日周期上更具稳定性,日变化不超过 0.1 mg/m^3 ;而通过傅立叶回归的结果可以看出,E1 测站叶绿素 a 浓度的变化表现出明显的全日周期规律,分析各环境因子的波动情况,仅发现硝酸盐的波动出现类似的规律,并且叶绿素 a 浓度达到峰值的时间滞后于硝酸盐达到峰值的时间(图 5)。此外,该测站 NP 表现出的低值(表 2)可以推测硝氮的补充对 E1 测站叶绿素含量的变化具有明显的影响。

叶绿素 a 的另一种剖面分布模式如图 6 所示,呈垂直分布的双峰型。一个峰位于温跃层以上的 20 m 深,叶绿素 a 浓度介于 $0.345 \sim 1.466 \text{ mg/m}^3$ 之间;第 2 个峰位于温跃层内约 38 m 深,该处荧光探头的叶绿

素浓度校正正值介于 $0.434 \sim 0.582 \text{ mg/m}^3$ 之间。在跃层处(38 m 左右)存在着一层厚度很薄的荧光最大值层,由于本文的叶绿素采样深度偏离这个深度,导致从叶绿素 a 的剖面分布图中不能反映出第 2 个叶绿素 a 的存在高峰。这种现象提醒我们在以后的研究与数据分析中,应结合荧光探头数据提供的精细垂向结构来探讨海区的叶绿素 a 分布特征。

荧光探头的叶绿素浓度校正正值随时间变化反映在图 7 中。从傅立叶回归的模拟曲线可以看出,E2 测站的温跃层以上波动与温跃层以下具有明显的差异。在 20 m 水深处表现出明显的全日周期波动,波动幅度为 0.08 mg/m^3 ;而表层在一日周期内虽也表现出全日变化,但波动幅度很小,仅为 0.024 mg/m^3 。在跃层以下,38 m 与 50 m 深度处的波动周期都长于全日周期,而且波动幅度明显小于 20 m 水深处的波动,反映出跃层上下不同的影响机制,并可能意味着两个峰的存在具有不同的形成与维持机制。

自从 Yentsch^[6] 1965 年第一个描述了海洋中叶绿素 a 在次表层形成最大值以来,这种现象在层化水体中被广泛认同。通常来说,叶绿素 a 在次表层形成最大值与垂向上海水密度的不连续性、营养跃层的存在密切相关,而且形成于 $0.1\% \sim 10\%$ 的表层光强处^[6]。不同的海区次表层峰值的形成没有一种统一的控制机制,但主要可归结为浮游植物的沉降速率、行为聚集、碳与叶绿素 a 比率的生理变化、营养跃层处增强的生长速率以及摄食行为等^[5]。在本文观测测

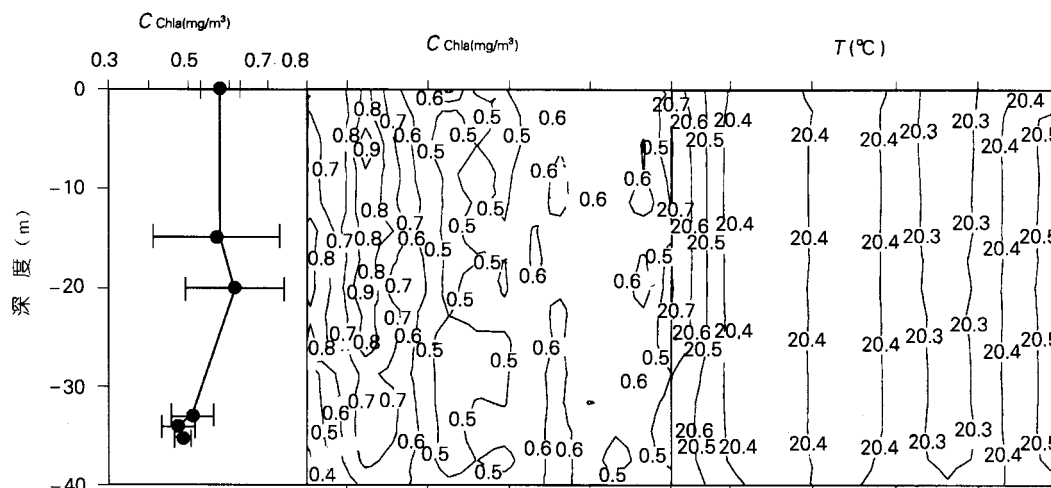


图 4 叶绿素 a 剖面平均及其温度的日变化等
Fig. 4 Profile of Chla and contour plot of temperature

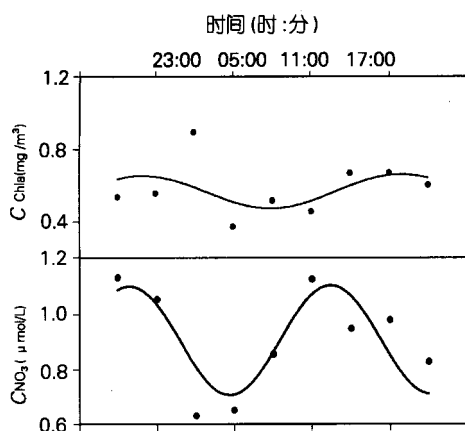


图 5 E1 测站叶绿素 a 和硝酸盐的日变化回归曲线
Fig. 5 Regression curve of Chla and nitrate in station E1

站, 跃层以上叶绿素 a 的垂直分布模式可能与摄食存在着紧密的关系。从 0 ~ 20 m 水深, 氨氮 ($\text{NH}_4\text{-N}$) 的分布规律正好与叶绿素相反, 说明表层水中浮游动物旺盛的摄食作用。第一个峰值处叶绿素 a 浓度表现出全日周期变化进一步支持着摄食对叶绿素垂直分布模式的影响。从图 6 可以看出, 在跃层处叶绿素 a 峰的存在与底层低温高盐富营养水的侵入有密切的关系, 而密度跃层的存在又为来自上层的浮游植物沉降聚集和浮游植物的生长聚集提供稳定的水动力条件。温带海区叶绿素 a 次表层峰值的这种形成机制同样被其他研究者观察到^[3]。有关南海叶绿素最大值层形成的营养机制等一系列问题还有待进一步的分析研究。

2.4 各环境因子对叶绿素 a 浓度变化的影响

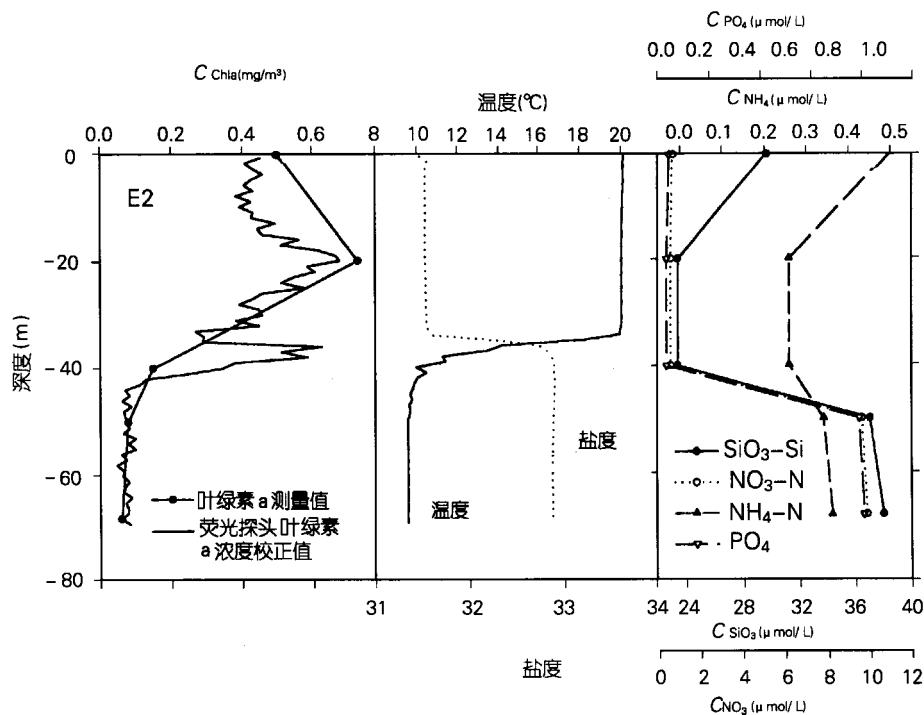


图 6 E2 测站(2000 年 10 月 23 日 16:00)叶绿素 a、温度、盐度与营养盐垂直分布
Fig. 6 Vertical profiles of Chla, temperature, salinity and nutrients in station E2

使用 SPSS8.0 统计软件对各观测站的叶绿素与可能影响其分布的环境因子(包括温度、盐度、硅盐、硝氮、亚硝氮、氨氮、磷酸盐以及代表光照变化的深度)进行回归。结果表明(如表 3), 叶绿素与各环境因

子之间的直接相关性都不是很显著。

考虑到海区复杂的环境因子之间可能存在的协同作用, 作者试图引进以下多元回归模型:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_k x_k$$

表 3 叶绿素与各环境因子之间的相关系数 ($n = 84$)

Tab.3 Parameters of regression between chlorophyll a concentration and environmental factors ($n = 84$)

相关系数	温度	盐度	SiO ₃	NO ₃	NO ₂	NH ₄	PO ₄	深度
R	0.523	-0.299	-0.234	-0.108	0.065	0.045	-0.309	-0.561

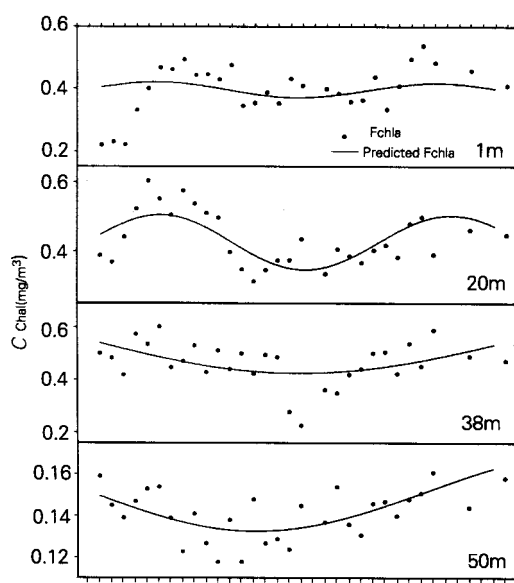


图 7 E2 测站分层叶绿素 a 的日变化回归曲线
Fig.7 Regression curve of Chla along the vertical profile in station E2

其中, y 是因变量 (预测叶绿素浓度值), x_i 是独立变量 (代表各环境因子), a_0 是常数项。对变量的回归本文采用因子的逐步加入回归法, 而最终能保留在模型中的变量将具有最显著的正协同效应。

本文的模型进行第一次尝试的变量不包括深度, 最终能进入模型的参数只有温度、盐度、硅盐和亚硝酸氮, 所得到的回归方程及其回归参数如下:

$$Tchl a = 1.532 + 0.04 \quad T - 0.048 \quad S - 0.006 \quad C_{SiO_3} - 0.09 \quad C_{NO_2}$$

T 检验: (2.235) (5.070) (-2.431) (-2.501) (-1.735)

F 检验: 11.486 R^2 : 0.368 D.W. 检验: 1.352

其中, T 为温度, S 为盐度。

模型不是很理想, 但方程各参数仍能表明叶绿素的分布一定程度上是温度、盐度、硅盐和亚硝酸氮协同

作用的结果, 但其中营养盐与叶绿素分布呈负相关性似乎与事实不相符。实际上, 自然海区中营养盐通常呈底层高于表层现象, 而底层因光限制又会导致营养盐的吸收出现叶绿素低的现象, 这就是模型的矛盾之处。由此, 作者重新引入与光照强度相关的深度进行另一次逐步回归, 最终能进入模型的因子只有温度与深度, 模型方程及相关的参数如下:

$$Tchl a = 0.279 + 0.022 \quad T - 0.006 \quad D$$

T 检验: (1.278) (2.164) (-3.138)

F 检验: 21.991 R^2 : 0.352 D.W. 检验: 1.353

其中, D 为深度, T 表示温度。

结果表明, 叶绿素分布与深度之间呈负相关性, 暗示着光照可能对海区生物量的显著影响。同时, 从两个方程的对比来看, 可以结合实际情况推论出在各因子的协同作用方面, 光照条件对我们观测海区的叶绿素分布具有比营养盐更显著的效应。

3 总结

由上可知, 3 个观测海区叶绿素 a 的垂向分布及周日波动各有特征。在垂向分布上, 东海观测站比较单一, 多数呈上混合层均匀分布型并在跃层以下递减; 长江口测站受潮流影响大, 偶而在底层出现峰值; 而南黄海观测站垂向分布出现了均匀分布型与次表层双峰型。受潮流等影响, 叶绿素 a 浓度的日变化在各海区间及各自的垂向上都有所差异: 出现层化的测站, 跃层以上日波动比跃层以下明显; 在 E7 测站的表层和长江口测站的底层都以半日周期为主, 而南黄海测站以全日周期为主。同时, 对环境因子的分析表明, 叶绿素 a 的波动主要与各海区特定的水动力条件 (如潮汐与温跃层的存在) 密切相关, 与各环境因子之间没有简单的相关关系。

参考文献

- 1 朱明远, 孙明华. 黄海水域的叶绿素 a 和初级生产力, 黄

- 渤海海洋, 1993, 11(3): 38 ~ 51.
- 2 洪华生、阮五琦、黄邦钦等. 中国海洋学文集. 北京: 海洋出版社, 1997. No. 7, 1
 - 3 Odate T., Furuya K., Well-developed subsurface chlorophyll maximum in the vicinity of Komahashi No.2 Seamount, summer, *Deep Sea Research*, 1998, 45: 1 595 ~ 1 607
 - 4 Beardsley R.C., Limeburner R., Yu H. *et al.*. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea, *Cont. Shelf. Res.*, 1985, 4: 57 ~ 76
 - 5 Cullen J.J.. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll a, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1982, 39: 791 ~ 803
 - 6 Longhurst A.R. and Harrison W.G.. The biological pump: Profiles of plankton production and consumption in the upper ocean, *Prog. Oceanogr.*, 1989, 22: 47 ~ 123

VERTICAL CHARACTERISTICS AND DIEL VARIATION OF CHLOROPHYLL A IN THE TYPICAL AREAS OF EAST CHINA SEA AND SOUTHERN YELLOW SEA

LIN Xue-ju¹ HUANG Bang-qin¹ HONG Hua-sheng¹ WANG Da-zhi¹ XIAO Tian²

(¹ Marine Environmental Lab. of SEDU, Environmental Science Research Center, Xiamen University, 361005)

(² Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

Received: Aug., 16, 2001

Key Words: Chlorophyll a, Vertical characteristics, Diel variations, East China Sea Changjiang(Yangtze) River estuary, Southern Yellow Sea

Abstract

The vertical distribution and diel variation of chlorophyll a concentration in the typical areas of East China Sea and Southern Yellow Sea were observed from October 21 to November 5, 2000. Due to the geographic environment and the hydrological conditions, there were marked characteristics of distribution and variation of chlorophyll a concentration. In the East China Sea, chlorophyll a concentration was well distributed in the mixed layer and decreased with the depth under the thermocline. Affected by the tidal currents, the maximum of chlorophyll a occasionally appeared at the bottom water in the Changjiang(Yangtze) River estuary. But in the surveyed area of Southern Yellow Sea, there existed two types of profiles of chlorophyll a distribution, namely, the well-distributed profile and the deep chlorophyll maximum profile. Accordingly, the diel variation of chlorophyll a showed more distinct in the mixed layer than under the thermocline in the stratified waters. In addition, the cycle of diel variation is half-day at the surface water of station E7 and at the bottom water of station E4 and is full-day in the stations of Southern Yellow Sea.

(本文编辑:张培新)