

厦门海域浮游植物夏季赤潮期间分布变异的多元分析

杨清良, 林更铭

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

摘要 根据 2000 年 6 月至 7 月夏季藻华期在 11 个监测站 10 个航次获取的表层浮游植物和现场测定的理化参数数据, 采用多元分析方法揭示浮游植物聚群在污染胁迫下的动态特征。结果表明: (1) 该区调查期间浮游植物群落的物种多样性时空变异显著, 各站多样性指数值 (H') 变动在 0.45 ~ 4.23 之间; (2) 聚类分析和多维排序 (MDS) 结果显示, 浮游植物聚群可分为 3 个与浮游植物阶段性演替以及各水域间不同的理化特征相关联的群落。群落 I 系 2000 年 6 月赤潮暴发时主要出现于西海域的低盐港湾群落, 由微型 (nano-) 浮游植物组成, 包括硅藻门的角毛藻、骨条藻等属种类以及金藻门的单鞭金藻属种类等, 如中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*)、聚生角毛藻 (*Chaetoceros socialis*) 等和一种单鞭金藻 (*Chromulina* sp.) (未鉴定到种, 藻径 3 ~ 5 μm), 它们是赤潮原因种。群落 II 和群落 III 都以小型 (micro-) 浮游植物占优势。群落 II 为赤潮前后广泛出现于调查区各水域的亚热带近岸广布群落, 代表种有具槽帕拉藻 (*Paralia sulcata*)、翼鼻状藻 (*Proboscia alata*)、菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschioides*) 和冰河拟星杆藻 (*Asterionellopsis glacialis*)。群落 III 主要分布于本海区东-东北部, 由我国东南沿海常见的近海广布性种类组成, 包括旋链角毛藻 (*Chaetoceros curvisetus*)、地中海细柱藻 (*Leptocylindrus mediterraneus*)、尖刺伪菱形藻 (*Pseudonitzschia pungens*)、优美施罗藻 (*Schroederella delicatula*) 和斯氏几内亚藻 (*Guinardia striata*) 等; (3) 丰度-生物量曲线 (ABC) 分析结果显示, 当微藻赤潮出现时, 数值丰度的 K-优势曲线位于生物量 K-优势曲线上方, 而无赤潮时 2 条曲线大体上重叠。其模式可指示厦门海区西部海域污染严重以及东-东北部中度污染的状况; (4) 根据各航次全部调查数据所作的 PCA 分析得到的前 3 个最主要成分, 包括浮游植物丰度和溶解氧, 铵氮和磷酸盐, 盐度和温度等, 大约解析本调查总差异的 78.5%。

关键词 浮游植物 分布变异 赤潮 多元分析 厦门海区

文章编号 1000-0933 (2007)02-0465-12 中图分类号 Q178, X171.5, X55 文献标识码 A

A multivariate analysis of variability of phytoplankton distribution in Xiamen seas during summer bloom period

YANG Qing-Liang, LIN Geng-Ming

Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (2) 465 ~ 476.

Abstract : Algal blooms have been increasing in frequency in recent years in Xiamen seas, primarily in the western Xiamen Harbour, with occurrence in the spring and summer almost every year. There have been extensive reports on the phytoplankton in Xiamen seas, but few deals with the characterization of population dynamics of the blooms. The present study analyzes the community structure of the phytoplankton collected on 10 cruises from 11 stations during the summer red tide of 2000 (June to July) in order to understand the dynamics of phytoplankton assemblages under pollution stress

基金项目 国家专项资助项目 (908-02-01-02)

收稿日期 2006-01-05 ; **修订日期** 2006-07-12

作者简介 杨清良 (1948 ~), 男, 福建惠安人, 研究员, 主要从事海洋生态学研究. E-mail: qlyang2525 @ sina.com ; qly1888 @ 163.com

致谢 厦门市环保局环境监测中心提供同步观测的海水理化资料 美国佛罗里达理工大学海洋生物学教授 Junda Lin 博士对写作给予帮助, 在此一并致谢!

Foundation item : The project was financially supported by National Special Programme, China (No. 908-02-01-02)

Received date 2006-01-05 ; **Accepted date** 2006-07-12

Biography : Yang Qingliang, Research Professor, mainly engaged in marine ecology. E-mail: qlyang2525 @ sina.com ; qly1888 @ 163.com

conditions. The results show that : (1) the spatial and temporal variations of the phytoplankton diversity index (H') are large during the survey period, ranging from 0.45 to 4.23 ; (2) based on the results of the multivariate analysis (cluster analysis and multi-dimensional scaling), the phytoplankton assemblages can be divided into three groups associated with the specific stages of phytoplankton succession and with the different physic-chemical features associated with each sampling region. Group I was composed of the samples collected from the low salinity stations in western Xiamen Harbour in June, 2000. The community was consisted of nanophytoplankton flora including the Bacillariophyta (such as *Chaetoceros socialis*, *Skeletonema costatum*) and the Chrysophyta (such as *Chromulina* sp.). These species were responsible for the red tide. Groups II and III were both dominated by microphytoplankton assemblages. Group II was represented by the subtropical coastal eurytopic species commonly found in the studied area before and after red tide blooms, such as *Paralia sulcata*, *Proboscia alata*, *Thalassionema nitzschioides* and *Asterionellopsis glacialis*. Group III included mainly the samples collected from the stations in the eastern-northeastern Xiamen seas, represented by neretic species that are ubiquitous in the coastal areas of southeast China, including *Chaetoceros curvisetus*, *Leptocylindrus mediterraneus*, *Pseudo-nitzschia pungens*, *Schroederella delicatula* and *Guinardia striata* ; (3) in the Abundance-Biomass Comparison analysis, the K-dominant curve for numerical abundance lies below that for the biomass when the nanophytoplankton bloom occurred, while both curves largely coincided during non-bloom periods. Such a pattern may indicate the heavily polluted condition in the western waters and the moderately polluted conditions in the eastern-northeastern waters in the Xiamen seas ;4) based on the results of principal component analysis, the first three components accounted for 78.5% of the total variance and the most important factor loadings include species richness, dissolved oxygen, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, salinity, and temperature.

Key Words : phytoplankton ; distribution variation ; red tide ; multivariate analysis ; Xiamen seas

厦门海区地处亚热带区,位于台湾海峡西侧。由于近年来厦门和周边地区经济的飞速发展,给海域生态环境带来沉重压力。赤潮(藻华)次数逐年不断增加,尤其在厦门西海域,几乎每年春、夏季都有出现。

有关厦门海区赤潮生物生态学的基础研究工作已有多年的历史,也多次对一些赤潮事件进行了跟踪调查,积累了厚实的基本资料和成果^[1-7]。但由于赤潮形成机制的复杂性,加上在研究方法上更多的是仅仅采用传统的单变量技术对特定种群作静态描述,难以在群落水平上揭示植物群聚真实的变化规律。特别是有关该海区赤潮期间浮游植物的动态变化,至今少有报道。本文根据监测期内所获的数据,采用多元分析方法揭示该海区夏季赤潮过程浮游植物群落在污染胁迫下的种群动态特征,并初步探讨浮游植物分布对水质污染评估的指示意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集与数据来源

材料系厦门市环保局环境监测中心和国家海洋局第三海洋研究所 2000 年 6 月 1 日~7 月 22 日联合在厦门海域 11 个监测站(如图 1)实施赤潮监控所获的 71 份表层浮游植物的水样($0.5\text{dm}^3\cdot\text{站}^{-1}$)。同步观测的其它环境参数包括生物参数叶绿素 a,理化参数表层海水温度(t)、盐度(S)、溶解氧(DO)、化学耗氧量(COD)、酸碱度(pH)和营养盐($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、

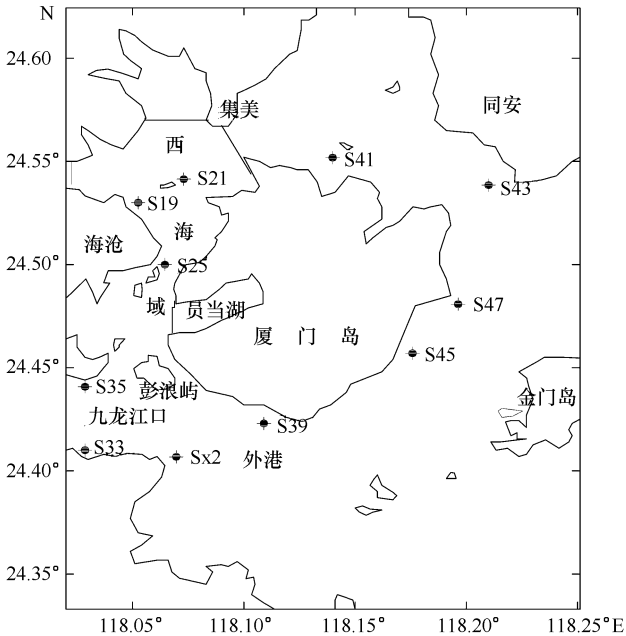


图 1 调查区浮游植物采样站(2000 年 6~7 月)

Fig. 1 Sampling stations of phytoplankton in surveyed seas during Jun. - July, 2000

PO₄⁻-P) 等。

1.2 样品的测定

理化参数和生物参数的测定程序等按《海洋调查规范》^[8] 进行。水温、盐度和营养盐的测定分别用颠倒温度计、盐度测定仪和分光光度计。叶绿素 a 的测定采用萃取荧光法^[9] 浮游植物水样经静置沉降和浓缩,随机抽取 0.1ml 浓缩的样品置于显微镜下镜检 (每次镜检标本数不少于 200 个),并按种类计算细胞密度 (换算成 cell. dm⁻³)。

1.3 群落结构分析

多样性指数,主成分分析,聚类分析和多维标序以及丰度生物量比较等分别采用 SPSS 10.0 和 PRIMER 5.0 研发者 Plymouth Marine Laboratory,UK) 软件运算。

(i) 物种均匀度 J ^[10] 和多样性指数 H' ^[11] 等分别采用以下公式:

$$J = H' / \log_2 S \tag{1}$$

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \log_2 P_i \tag{2}$$

(ii) 群落的聚类分析和多维标序 (MDS) 用 Bray-Curtis 相似性距离^[12]:

$$B(j,k) = \frac{\sum_{i=1}^s |X_{ij} - X_{ik}|}{\sum_{i=1}^s |X_{ij} + X_{ik}|} \tag{3}$$

式中, S 为样品中的种类数; P_i 为第 i 种的细胞数量与样品总细胞数量的比值; $B(j,k)$ 为第 j 个和第 k 个样品间的距离系数, X_{ij} 、 X_{ik} 分别为第 j 个和第 k 个样品的第 i 种的数据。

(iii) 物种的筛选和数据处理

为简化分析数据,避免种类检出的偶然性等,聚类分析和多维标序挑选出现率 > 10% 的种类作为物种变量。并在 PRIMER 软件上先对细胞密度作 (平方根) 转换和标准化等处理,尔后计算样品间的 Bray-Curtis 相似性距离并建立相似性矩阵。

(iv) 浮游植物群落受污染扰动的状态分析采用丰度生物量曲线 (即 K -优势度曲线) 比较法 (ABC)^[13,14]。

2 结果与分析

2.1 浮游植物的生态学特征演变

2.1.1 物种多样性的时空变异

共记录浮游植物 4 门 55 属 126 种 (含变种和变型),其中以硅藻类为主体 (44 属 105 种),其次是甲藻类 (6 属 15 种),金藻类和绿藻类较少 (都仅 3 属 3 种)。

监测期间浮游植物曾在 6 月底 (6.27 ~ 6.29) 形成面积为 45km² 的西海域局部赤潮,平均总细胞密度高达 7.839 × 10⁶ cells · dm⁻³ (藻体 < 10 μm)。赤潮前后物种多样性和均匀度出现较大时空变异 (表 1)。从不同区域来看,西海域多样性指数和均匀度均值较低,分别为 1.49 和 0.35,站均值变化范围分别为 1.42 ~ 1.61 和 0.33 ~ 0.39,赤潮时均值更低,分别仅 0.93 和 0.27。水文动力条件较好的外港区和东侧海域 (东-东北部) 多样性指数和均匀度均值都较高,尤其是东-东北部,赤潮前的均值分别为 3.40 和 0.70。当西海域出现赤潮时其平均值 (1.02 和 0.44) 也下降,但为西海域的 2 倍。其中稳定性最好的是东北部五通水道附近海域 (43 站),83% 频次的多样性指数测值高于 > 3.00,东部测站 (45 站) 高于 3.00 的多样性指数测值明显减少。九龙江口区监测资料因故不全,单从赤潮后期的数据分析,多样性指数值和均匀度约为西海域的 1.5 倍。总的看来多样性指数值和均匀度呈现自东北至东南直至西海域由外及内递减的总体趋势。这种趋势和水文动力条件^[1] 以及调查区其他理化要素的较大区域差异 (表 2) 有关;再从不同时间段看,多样性指数值和均匀度的较大变化也明显存在。根据多样性指数值始终较低的西海域有关测站 (25 站,图 2) 的变化可看到,由于夏

季华南雨季来临,6月14日后连降大雨,海区经历了温度和盐度急降而后又大幅反弹的过程,浮游植物物种多样性指数相应地由3.53跌至赤潮时的0.66,尔后缓慢回升。

但应指出,本海区这种作为对环境变化响应的浮游植物分布变异明显滞后5~7d,该现象在我国南方海湾的小时间尺度调查中常见^[15]。此外,氮、磷等营养盐含量也随之震荡,但和藻类分布的相关性较为复杂(表2,图2)。

表1 调查区2000年6~7月浮游植物多样性指数和均匀度的平面差异

Table 1 Horizontal variances of diversity index (<i>H'</i>) and evenness (<i>J'</i>) of phytoplankton in surveyed seas during Jun. – July, 2000											
日期 Date (Month-day)	西海域 Western waters (WW)			九龙江口 Jiulongjiang estuary (E)		外港区 Off harbor (H)		东侧水域 东-东北部) East-notheastern waters (ENW)			
	S21	S19	S25	S33	S35	SX2	S39	S45	S47	S43	S41
多样性指数 (<i>H'</i>)											
06-01	1.33	0.93	1.37	–	–	1.76	1.93	2.86	3.64	3.39	3.25
06-05	1.65	1.67	1.67	–	–	2.70	3.15	2.07	2.99	4.23	4.18
06-08	2.18	3.45	1.37	–	–	4.30	3.44	2.49	3.45	3.85	2.66
06-14	3.54	3.54	3.53	–	–	2.81	1.79	4.19	3.64	3.62	2.45
06-22	1.21	1.41	1.83	–	–	0.50	1.78	1.56	2.65	3.32	2.82
06-27	1.04	–	0.60	–	–	–	–	–	–	–	–
06-28	0.50	1.06	1.00	–	–	–	–	–	–	–	2.82
06-29	1.25	0.87	0.66	–	–	1.36	2.32	1.29	2.55	2.19	2.07
06-30	0.84	1.85	1.40	2.00	1.66	–	–	–	–	–	–
07-03	0.74	0.81	1.84	2.51	2.40	–	–	–	–	–	–
07-22	1.35	0.53	0.39	2.99	–	–	–	–	–	–	–
均匀度 (<i>J'</i>)											
06-01	0.36	0.22	0.26	–	–	0.37	0.41	0.56	0.72	0.75	0.75
06-05	0.32	0.34	0.34	–	–	0.49	0.58	0.38	0.61	0.86	0.84
06-08	0.51	0.73	0.40	–	–	0.83	0.72	0.47	0.69	0.88	0.89
06-14	0.77	0.81	0.75	–	–	0.64	0.56	0.82	0.87	0.89	0.74
06-22	0.31	0.35	0.46	–	–	0.16	0.51	0.33	0.65	0.71	0.85
06-27	0.29	–	0.18	–	–	–	–	–	–	–	–
06-28	0.19	0.41	0.29	–	–	–	–	–	–	–	0.85
06-29	0.39	0.27	0.16	–	–	0.32	0.46	0.28	0.52	0.56	0.41
06-30	0.18	0.46	0.31	0.38	0.33	–	–	–	–	–	–
07-03	0.16	0.17	0.36	0.46	0.46	–	–	–	–	–	–
07-22	0.37	0.11	0.08	0.72	–	–	–	–	–	–	–

2.1.2 优势种组成的阶段性演替

调查表明,除了中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 始终占有较高的密度比例 (平均细胞密度为 0.29×10^6 cells·dm⁻³, 占总量的 15.6%) 外,该区赤潮前后优势种群结构变化显著。赤潮前主要是具槽帕拉藻 (*Paralia sulcata* = *Melosira sulcata*)、翼鼻状藻 (*Proboscia alata* = *Rhizosolenia alata*) 和菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschioides*) 等常见于亚热带沿海的小型 (Micro-) 硅藻;赤潮形成期间则以聚生角毛藻 (*Chaetoceros socialis*) 约占平均总密度的 71.2%) 和单鞭金藻 (*Chromulina* sp.) 约占 19.0%) 等细胞直径小于 10μm 的微型 (Nanno-) 藻为主 (图3)。这阶段占一定比例的中肋骨条藻多为新分裂的小细胞。赤潮过后菱形海线藻等多种小型硅藻又多起来。优势种组成的阶段性演替现象在西海域尤为明显。

表 2 调查区 2000 年 6 月主要生态学参数的区域差异

Table 2 Regional variances of main ecological parameters in surveyed seas during Jun. ,2000

参数 Parameter	赤潮前 (6 月 1 ~ 22 日) Before the bloom (1-22, June)				赤潮发生时 (6 月 27 ~ 29 日) During bloom formation (27-29, June)			
	西海域 WW	外港 OH	东-东北部 ENW	平均 Mean	西海域 WW	外港 OH	东-东北部 ENW	平均 Mean
丰度 ($0^6\text{cells}\cdot\text{dm}^{-3}$)								
Abundance ($0^6\text{cells}\cdot\text{dm}^{-3}$)	0.05	0.06	0.04	0.05	9.20	1.06	1.29	5.21
叶绿素 a ($\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$)								
Chlorophylla a	3.44	3.38	4.99	4.05	34.04	15.90	13.27	24.09
T (℃)	27.26	26.96	27.42	27.28	29.37	28.00	28.55	28.87
S	23.88	21.50	26.06	24.19	22.11	22.56	22.27	22.24
DO ($\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$)	5.73	6.09	6.37	6.10	9.41	8.14	7.86	8.68
COD ($\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$)	0.96	1.17	0.81	0.93	0.99	1.10	0.69	0.91
NH ₄ ⁺ -N ($\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$)	0.21	0.13	0.06	0.12	0.08	0.01	0.01	0.05
NO ₂ ⁻ -N ($\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$)	0.03	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02
NO ₃ ⁻ -N ($\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$)	0.33	0.41	0.20	0.29	0.47	0.09	0.19	0.31
ΣN ($\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$)	0.57	0.54	0.27	0.43	0.58	0.12	0.22	0.38
PO ₄ ³⁻ -P ($\mu\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$)	0.035	0.013	0.020	0.023	0.002	0.005	0.008	0.004
pH	8.08	8.11	8.19	8.13	8.67	8.58	8.56	8.62

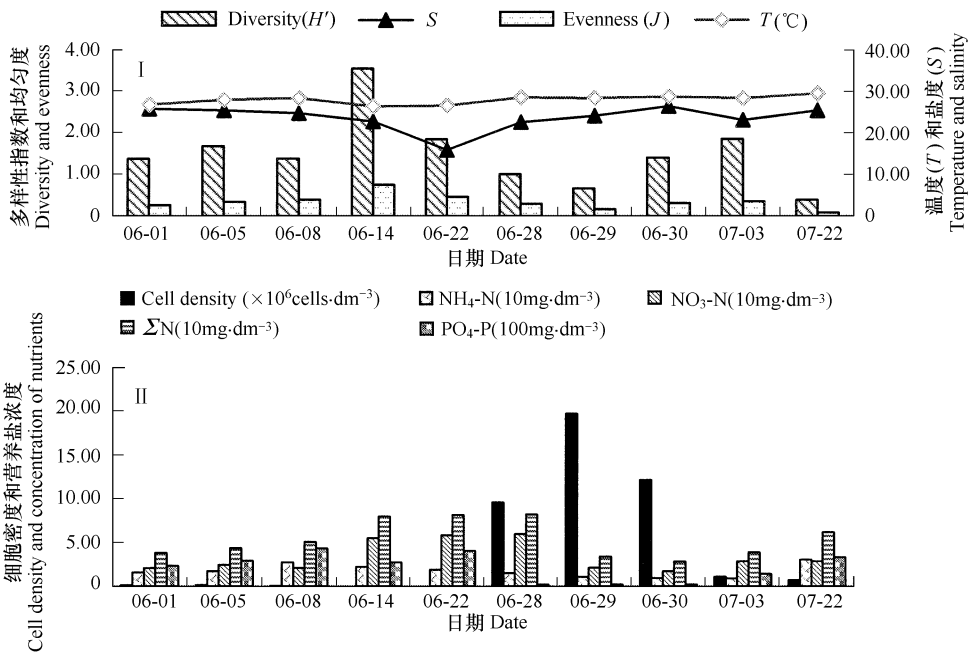


图 2 厦门西海域 S25 站 2000 年 6 ~ 7 月浮游植物和若干理化因子的时间变化

Fig. 2 Temporal variations of phytoplankton and some physico-chemical parameters at station S25 in western waters of Xiamen during Jun. - July, 2000

2.2 数据的多元分析

2.2.1 浮游植物群落的聚类分析和多维尺度标序 (MDS)

从 Bray-Curtis 相似性聚类树枝状图 (图 4) 和多维尺度标序 (图 5) 可看到调查期内调查区的浮游植物可分为 3 个群落:

群落 I 主要分布区在西海域, 由中肋骨条藻、聚生角毛藻等微形角毛藻和单鞭金藻等低盐港湾种组成, 大量出现在雨后, 并在条件适宜时形成赤潮;

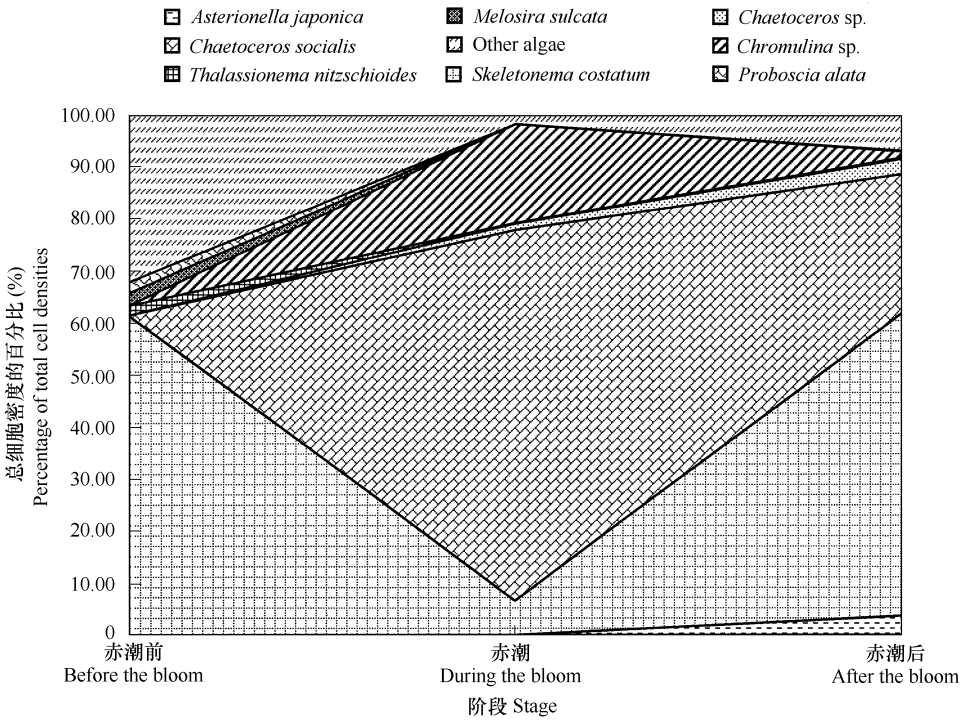


图 3 Succession of major dominant species in Xiamen seas in Jun. — July, 2000

群落 II 赤潮前后广布于西海域和外港等有关测站,优势种有中肋骨条藻、具槽帕拉藻、翼鼻状藻、菱形海线藻和冰河拟星杆藻 (*Asterionellopsis glacialis* = *Asterionella japonica*) 等近岸广布种。

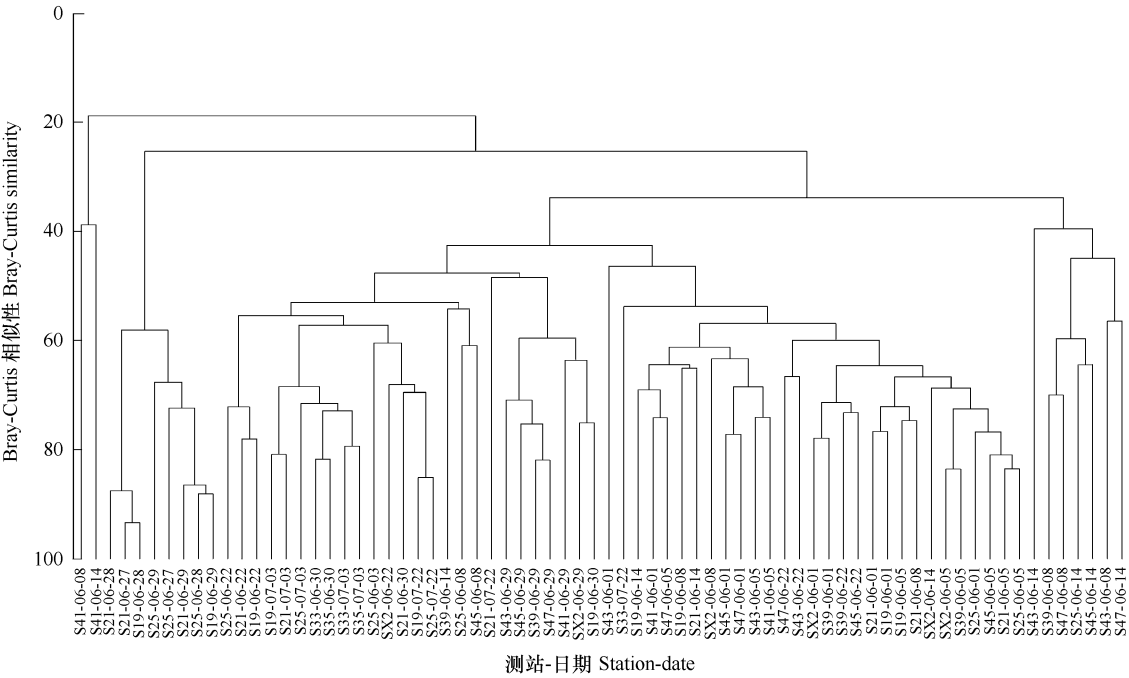


图 4 Dendrogram of cluster analysis of phytoplankton community in surveyed seas during Jun. — July, 2000

群落 III 主要分布区在东-东北部测站,主要种是旋链角毛藻 (*Chaetoceros curvisetus*)、地中海细柱藻

(*Leptocylindrus mediterraneus* = *Dactyliosolen mediterraneus*)、尖刺伪菱形藻 (*Pseudo-nitzschia pungens* = *Nitzschia pungens*)、优美施罗藻 [*Schroederella delicatula* = *Detonula pumila* (Castracane) Gran)]、斯氏几内亚藻 (*Guinardia striata* = *Rhizosolenia stolterfothii*)、具尾鳍藻 (*Dinophysis caudata*) 等亚热带近海广布种。

2.2.2 海域环境质量的生态学评估

由于赤潮前后 10 航次的调查数据时空变化大,不管用平均值或某一时段测值来进行水质评估都不客观。但动态变化和悬殊的差异恰恰才是赤潮生消过程的固有特征。本文采用丰度-生物量比较曲线 (ABC 法) 来刻画表层浮游植物群落其间受水污染干扰的过程变化及其区域差异。据研究 [3],当群落无污染干扰时,生物量曲线位于丰度曲线上方 中度污染时两条曲线大体重叠 群落被严重污染时,生物量曲线则位于丰度曲线下方,本研究 图 6) 表明调查区各水域植物群落均受污染干扰。西海域赤潮时群落生物量曲线有部分位于丰度曲线下方,未发生赤潮的东部海域虽无此现象,但两曲线始终基本重叠。从整个厦门海域来看,局部海域 (西海域) 的严重污染也得以反映,说明 *K*-优势度曲线可反映厦门海域浮游植物群落夏季赤潮期间受污染扰动的生态现状。

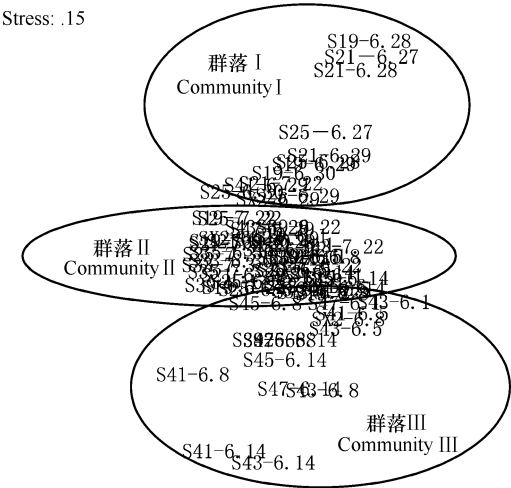


图 5 调查区 71 份样品的浮游植物群落多维尺度标序

Fig.5 Multi-Dimensional Scaling (MDS) ordination of phytoplankton community from 71 samples in surveyed seas

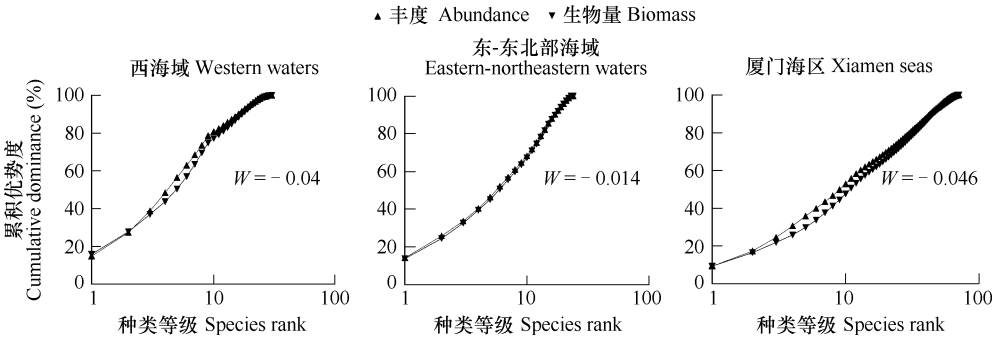


图 6 厦门海区浮游植物群落丰度生物量复合 *K*-优势度曲线 (2000 年 6 ~ 7 月)

Fig. 6 *K*-dominance curves for species biomass and abundance of phytoplankton community in Xiamen seas during Jun. - July, 2000

2.2.3 浮游植物和主要环境参数变异的主成分分析 (PCA)

根据筛选出的植物和理化参数进行主成分分析 (PCA) 获得 5 个重要因子。前 3 个最为重要,可解析监测期间诸多参数变异的总方差的 78.5% (表 3)。

根据各参数在主成分中的因子荷载大小,分别给赋予生态学意义。由表 4 可知,监测期间第 1 主成分中的权系数以叶绿素 *a*、植物细胞密度、DO 和 pH 为最大,因此第 1 主成分主要反映浮游植物在夏季的丰度变动过程,并引起 DO 和 pH 的同向变化,西海域的样品得分 (表 5) 较大且都为正值,尤其在赤潮期间 (6 月 28 ~ 30 日) 第 2 主成分各参数因子荷载的绝对值以营养盐 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 等氮盐和 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 等) 以及盐度 (δ) 为最大。其中营养要素为负值,盐度为正值,主要反映调查区水系的理化因子变化特点。由于本次九龙江口区仅在赤潮后补站点作监测 (表 1),盐度的变化主要缘于降雨,因此第二主成分主要反映随着雨季的来到海区营养盐和盐度的变化。从表 5 各测站得分情况可知 6 月 14 ~ 22 日外港和西海域所受影响最大,盐度降低而富营养化程度提高,直至赤潮形成后营养盐含量减少负绝对值得分有所下降;第 3 主成分反映伴随水温的升

表 3 主成分分析前 5 个主成分的特征值和方差贡献率

Table 3 Eigenvalues and percent of variation explained for the first 5 components of the Principal Component Analysis (PCA)			
主成分 Principal component	特征值 Eigenvalues	方差贡献率 Percent of variance (%)	累积贡献率 Cumulative variance (%)
1	4.30	35.8	35.8
2	3.96	33.0	68.8
3	1.17	9.8	78.5
4	0.66	5.5	84.0
5	0.52	4.3	88.3

降铵氮 (NH_4^+-N) 含量的同向变化状况,两者的因子荷载均为负值,可看作对各调查区域铵氮等形成富营养化的程度量度。依此从表 5 可见西海域水质明显较差,外港区域和东-东北部相对好些,与 ABC 分析结果一致。

3 结论与讨论

3.1 浮游植物夏季赤潮前后的主要生态特征

3.1.1 共记录表层浮游植物 4 门 55 属 126 种 (含变型和变种),始终以硅藻类为主体,但形成赤潮时优势种组成趋于微型化,除了历年常见的中肋骨条藻外,主要由聚生角藻等微型硅藻组成,并含一定比例的金藻类 (单鞭金藻)。聚类分析和多维尺度标序表明赤潮过程浮游植物大致可分为 3 个与其阶段性演替以及各水域间不同的理化特征相关联的群落。群落的阶段性演替特征在西海域尤为明显。

3.1.2 物种多样性和丰度的时空变异显著。多样性指数和均匀度值、细胞丰度和以叶绿素 a 为表征的生物量等的平均值及其变化范围分别为 2.21 (0.39 ~ 4.3) 和 0.50 (0.08 ~ 0.89)、 $1.60 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{dm}^{-3}$ (0.002 $\times 10^6 \sim 19.657 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{dm}^{-3}$) 和 $9.202 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ (0.210 ~ 57.440 $\mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$)。

3.2 赤潮过程的水质评估

水质评估常用的办法是根据 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、 $\sum \text{N}$ 、COD、DO 等项相关指标的静态平均值进行。但仅据水化学参数看来有一定局限性。除了 COD 的不协调外,由于生物在受环境影响的同时又反馈于环境,磷酸盐等其他要素赤潮前后过程有大幅变化。此外,在监测站点布设、数据采集和评价标准等目前都存在一系列差异,致使水质评价结果产生较大差异,甚至相反的结论。Warwick 等的生态学评估方法 [3,14] 采用的是丰度-生物量比较曲线,也即 K-优势度曲线的方法 (ABC 法)。该方法广泛用于污染对底栖生物的影响测定上,之后陆续有人用于浮游植物方面反映水域的污染现状 [6,17]。本研究将 ABC 法应用于展示赤潮生消过程浮游植物群落受扰动的动态特征,结果可用以指示厦门海域夏季赤潮发生期间有机污染的现状,即西海域属有机污染较严重的 3 类富营养区域,其他区域虽未出现赤潮,但除了东北部海面 (可作为一类区域) 外已属中度污染的二类中营养区域。

3.3 微型藻赤潮与环境的关系

根据 10 航次在 11 个测站所获的全部调查数据所作的 PCA 分析得到的前 3 个最主要成分,包括浮游植物丰度和溶解氧,铵氮和磷酸盐,盐度和温度等,大约解析本调查中总分布差异的 78.5%。

3.3.1 与 N、P

N、P 是本海区藻类生长繁殖重要的物质基础,据研究氮磷含量的不断增加已成为厦门西海域 10 余年来

表 4 浮游植物和环境参数主成分分析的因子荷载

Table 4 Factor loadings on phytoplankton and environmental parameters in PCA

因子 Factor	主成分 Principal component		
	PC1	PC2	PC3
细胞密度 Cell density	0.393	0.083	-0.287
叶绿素 a Chlorophyll a	0.421	0.123	-0.225
T (°C)	0.204	0.214	-0.518
S	-0.283	0.300	-0.337
DO	0.396	0.216	0.005
COD	0.155	-0.302	0.198
NH_4^+-N	-0.077	-0.385	-0.495
NO_2^--N	0.240	-0.306	-0.099
NO_3^--N	0.267	-0.371	0.148
$\sum \text{N}$	0.210	-0.432	-0.027
$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$	-0.223	-0.300	-0.387
pH	0.370	0.231	0.138

表 5 调查区样品的主成分得分

Table 5 Principal Component Scores maked from the samples collected in the study areas

样品 Sample	主成分得分 Principal component scores			样品 Sample	主成分得分 Principal component scores		
	1	2	3		1	2	3
S21-6.1	-1.781	-1.255	-1.305	S21-6.22	0.388	-3.672	0.151
S19-6.1	-1.448	-0.847	-0.960	S19-6.22	-0.227	-3.460	-0.114
S25-6.1	-1.405	-0.553	0.017	S25-6.22	0.653	-3.870	0.669
SX2-6.1	-0.932	0.856	0.763	SX2-6.22	1.161	-3.633	1.871
S39-6.1	-0.026	-0.619	0.007	S39-6.22	1.765	-4.111	2.023
S45-6.1	-1.073	1.520	0.877	S45-6.22	0.773	-0.260	1.269
S47-6.1	-0.749	1.966	0.108	S47-6.22	0.002	-0.006	0.847
S43-6.1	-1.228	1.110	0.464	S43-6.22	-0.077	0.149	1.340
S41-6.1	-1.982	-0.878	-1.702	SX1-6.28	6.916	-0.880	-1.361
S21-6.5	-1.804	-0.556	-1.041	S19-6.28	7.614	-0.933	-0.729
S19-6.5	-1.607	-0.603	-1.118	S21-6.28	6.519	1.856	-1.535
S25-6.5	-1.371	-0.291	-0.975	S25-6.28	5.432	-0.425	-1.621
SX2-6.5	-1.419	0.919	0.906	S19-6.29	2.397	1.929	0.318
S39-6.5	-1.419	1.202	0.970	S21-6.29	2.936	2.233	0.102
S45-6.5	-1.900	1.949	0.054	S25-6.29	3.358	1.424	-1.052
S47-6.5	-1.535	1.844	0.218	S39-6.29	0.864	2.584	1.009
S43-6.5	-1.640	1.568	0.244	S45-6.29	1.170	2.565	0.649
S41-6.5	-1.407	0.693	-0.214	S47-6.29	0.434	2.580	0.150
S21-6.8	-1.595	-1.210	-1.728	S43-6.29	0.888	1.757	0.935
S19-6.8	-1.694	-1.386	-2.068	S41-6.29	0.828	1.345	0.693
S25-6.8	-1.610	-1.693	-1.898	SX2-6.29	1.164	1.359	1.198
SX2-6.8	-0.806	0.538	0.225	S19-6.30	1.545	1.871	0.638
S39-6.8	-0.876	0.175	-0.136	S21-6.30	1.663	2.175	0.342
S45-6.8	-1.063	1.856	-0.166	S25-6.30	2.360	1.737	-0.756
S47-6.8	-1.013	1.740	0.388	S33-6.30	-0.170	2.392	0.645
S43-6.8	-1.375	1.960	0.077	S35-6.30	-0.136	2.112	0.785
S41-6.8	-1.257	1.115	-0.049	S19-7.3	-1.086	0.397	-0.483
S21-6.14	-1.223	-2.556	-0.417	S21-7.3	-0.895	0.561	-0.545
S19-6.14	-1.130	-2.521	-0.184	S25-7.3	-0.702	0.520	0.012
S25-6.14	-0.652	-2.673	0.093	S33-7.3	-0.639	1.291	0.575
SX2-6.14	1.159	-5.649	2.397	S35-7.3	-0.923	1.711	0.425
S39-6.14	1.537	-5.737	2.394	S19-7.22	-0.877	-1.607	-2.425
S45-6.14	-1.460	-0.061	1.096	S21-7.22	-0.674	-1.442	-2.130
S47-6.14	-1.523	-0.328	0.692	S25-7.22	-0.950	-1.787	-2.357
S43-6.14	-1.668	0.689	0.878	S33-7.22	-0.986	-0.267	-0.430
S41-6.14	-1.516	-0.480	-0.014				

的长期变化趋势^①,也是近年来赤潮不断的重要原因。但限制性营养盐究竟是 N 是 P 还是兼而有之至今尚无定论^[8]。监测期间西海域赤潮发生区 N、P 平均含量与 1987 年同期相比 (表 6) 提高 2 倍左右,但“富氮贫磷”^[6]的特点似乎变化不大。出现赤潮时磷酸盐大幅跌至赤潮前含量的 5%,而在各种形态的氮盐里,硝酸盐未降反而略有上升,只有铵氮下降至赤潮前 62%,这既反映了硝酸盐来源丰富也反映了水体铵氮含量的充裕,因为无论是实验室还是现场实验均发现微藻先吸收氨氮再吸收硝酸盐氮^[9,20]。此外,过剩的硝酸盐应是赤潮期间总氮始终居高不下的缘故,并与磷酸盐的锐减共同导致西海域赤潮时的 N:P (原子) 比值由赤潮前的 35:1 剧增至 647:1,增幅远大于未出现赤潮的东-东北部海域 (仅由 30:1 增至 60:1)。PCA 分析结果表明,整个变化过程氨氮与植物丰度变化关系密切。而且与往年的情况^[6]类似,华南雨季的来临造成海区大幅的降温和局部区域强烈的冲淡作用仍然是形成赤潮的触发点,包括磷酸盐在内的各种营养盐在雨后显著增加,

① 张元标等. 厦门西海域富营养化状况的长期变化趋势及其与赤潮的关系,2005

最终导致上述低盐港湾性微型藻在营养竞争中旺发。

表 6 厦门西海域若干化学因子表层平均浓度的不同年份比较

Table 6 A average surface concentration comparison of some chemical factors between several years in western waters of Xiamen (μg·dm ⁻³)						
时间 Time	PO ₄ ⁻ -P	Σ N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	COD	DO
1987	0.015	0.217 缺 1~2 月)	0.055	0.132	1.38 表 Surface, 底 Bottom)	7.510
1987 年 6 月 June, 1987	0.013	0.168	0.029	0.126	—	8.440
1987 年 7 月 July, 1987	0.004	0.128	0.027	0.090	—	6.700
2000 年 6 月 (赤潮前) Jun., 2000 (before the bloom)	0.035	0.570	0.210	0.330	0.960	5.730
2000 年 6 月 (赤潮时) Jun., 2000 (during the bloom)	0.002	0.580	0.080	0.470	0.990	9.410
2000 年 7 月 (赤潮后) July, 2000 (after the bloom)	0.024	0.480	0.180	0.280	0.850	5.710
第 1 类 (贫营养) I (oligotrophic)	≤0.010	≤0.200	—	—	≤1.000	≥6.000
第 2 类 (中营养) II (moderate trophic)	≤0.030	≤0.400	—	—	≤3.000	≥5.000
第 3 类 (富营养) III (eutrophic)	≤0.050	≤0.500	—	—	≤5.000	≥4.000

* 厦门海区水质标准^[1] Append: The sea water quality standard of Xiamen seas

3.3.2 与 COD

值得注意的是,常作为有机污染程度重要指标的 COD 含量,其变化与整个生态系统的营养变化不协调。除了承接九龙江水入海的外港区稍高 (1.1~1.2 mg·dm⁻³) 外,其他区域平均值都仅相当于一类海水的贫营养含量水平。而且赤潮前后其值变化也不大 (表 2、6)。近年来一些有关的长期变化研究发现,厦门、大亚湾等亚热带港湾都出现氮、磷含量不断增加但 COD 值却出现下降的现象^{[2]①}。对于这种不协调的一种解释是因海水中溶解有机物随着水温升高氧化还原状态发生改变引起。笔者认为还有一种可能是,与藻类群落结构受海水营养体系的长期变化影响而细胞个体趋于“微型化”有关,因为藻类从广义上讲也是有机物,COD 含量在一定程度上反映了浮游植物的现存量。据报道,厦门西海域与其他海域相似,在相继发生藻体较大 (6~60 μm) 的凯伦藻 (*Karenia* sp. = *Gymnodinium* sp.) 赤潮和浮动弯角藻 (*Eucampia zoodiacus*) 赤潮的 1986、1987 年,COD 值都出现最大值可达 3.11~9.78 mg·dm⁻³ 的异常升高。但在此后 COD 逐年下降的年份^①,赤潮原因种以微型藻为主,无一例外。

3.3.3 与营养盐结构

藻类种群个体的大小组成与水域营养结构关系密切。一方面和营养盐供给状况的优劣有关;另一方面也与氮磷比例以及不同形态氮在总氮中的含量比例等营养盐结构有关^[8,20,23~29]。关于氮磷比例,本次调查西海域的变动范围 (5~647:1) 远大于厦门海区其他水域 (0~88:1),主要反映出总氮供应富余和磷含量相对不足,因而赤潮前后变化显著。而总氮中不同形态氮的含量比例变化,即水体的氨化与硝化的阶段性变化,涉及有机物的矿化与系统的营养再生等复杂问题。在真光层中再循环的氮为再生氮,主要是 NH₄⁺-N,有机污染严重的海域 NH₄⁺-N 在总氮比例中通常较高。本次监测过程西海域铵氮含量的百分比是微型藻比例低的其他水域的 2 倍 (表 7、表 8),也是赤潮藻为小型硅藻的 1987 年度同期的 2.8~7 倍。总氮中的高铵氮比例与赤潮原因种“微型化”时空变化趋势的吻合,即与浮游植物演替的耦合关系尚有待于进一步的深入探索。有关研究表明,海区不同的营养循环特征与水域理化、水文条件,自养生物及其消费者的粒径组成等都有密切的关系^[1,30]。

① 张元标等. 厦门西海域富营养化状况的长期变化趋势及其与赤潮的关系,2005

表 7 2000 年 6 ~ 7 月铵氮比例 (NH₄⁺-N/ΣN) 的时间和区域变化

Table 7	Temporal and regional variations of the ratio of NH ₄ ⁺ -N:ΣN in Xiamen seas in Jun. — July,2000			
阶段 Stage	西海域 WW	外港 OH	东-东北部 ENW	
监测期间 £000.6.1 ~ 7.22) During survey period (£,June — 22,July,2000)	0.310	0.160	缺)	
赤潮前 £000.6.1 ~ 6.22) Before the bloom (£ — 22,June,2000)	0.370	0.170	0.200	
赤潮 £000.6.27 ~ 6.29) During the bloom £7 — 29,June,2000)	0.370	0.170	0.060	
赤潮后期 £000.6.30 ~ 7.22) After the bloom £0,June — 22,July,2000)	0.380	0.170	缺)	
1987 年 6 ~ 7 月 June ~ July,1987	0.172 ~ 0.211	—	—	

表 8 2000 年 6 ~ 7 月微型浮游植物总细胞密度百分比的时间和区域变化

Table 8	Temporal and regional variations of the percentages of the nano-phytoplankton in total cell density in Jun. — July,2000			
阶段 Stage	西海域 WW	外港 OH	东-东北部 ENW	
监测期间 £000.6.1 ~ 7.22) During survey period (£,June — 22,July,2000)	0.812	0.654	0.385	
赤潮前 £000.6.1 ~ 6.22) Before the bloom (£ — 22,June,2000)	0.657	0.606	0.299	
赤潮 £000.6.27 ~ 6.29) During the bloom £7 — 29,June,2000)	0.987	0.889	0.794	
赤潮后期 £000.6.30 ~ 7.22) After the bloom £0,June — 22,July,2000)	0.914	缺	缺	

3.3.4 与 DO 和 pH

海水中的 DO 主要源于大气中氧的溶入和浮游植物光合作用的生成. 许多监测资料显示,从赤潮开始乃至形成,DO 值总是明显上升且与浮游植物现存量呈密切正相关^[1],反映了其间氧的增加主要是由赤潮藻的光合作用贡献的. 而对于海水中的 pH 值,主要受制于二氧化碳平衡体系. 当浮游植物光合作用强度大于生物呼吸及有机质氧化分解强度时,随着 CO₂净消耗的出现 pH 势必呈现上升趋势. 因此调查区赤潮期间 DO 和 pH 值的起伏也可在很大程度上反映了浮游植物水华的生消过程.

References :

[1] Chin T G. Quantitative study on the plankton at Amoy Harbour,in 1954. Journal of Xiamen University (Natural Science),1955,5 17 — 30.

[2] Yang Q L. Comprehensive survey report on marine environment of the Xiamen Harbour (II),Chapter 4,Marinr Biology,Section 1 2Phytoplankton, Journal of Oceanography of Taiwan Strait,1988,7 (1) 1 — 10.

[3] Yang Q L, Lin G M, Lin J M. Ecological studies of phytoplankton in waters around Xiamen Amphioxus Reserve Area, Journal of Oceanography of Taiwan Strait,1993,12 (6) 205 — 217.

[4] Lin G M,Yang Q L, Lin J M. Relationship Between Phytopankton and Environment factors in waters around Xiamen Islands,Marine Science Bulletin,1993,12 (6) 40 — 45.

[5] Chen Q H, Zeng Z W, Zhang S J, Xu K C. Report on red occurred in Xiamen Harbour in 1987. In :Third Institute of Oceanography, SOA eds. Collected Papers on Red Tide Survey and Study in Xiamen Harbour. Beijing China Ocean Press,1993. 1 — 18.

[6] Zhang S J. Analysis of the development and causes of *Eucampia zoodiacus* red tide in Xiamen Harbour,In :Third Institute of Oceanography , SOA eds. Collected Papers on Red Tide Survey and Study in Xiamen Harbour. Beijing China Ocean Press,1993. 19 — 28.

[7] Zhang S J. Ecological features of phytoplankton from red tide occurring area in Xiamen Harbour,In :Third Institute of Oceanography , SOA eds. Collected Papers on Red Tide Survey and Study in Xiamen Harbour. Beijing China Ocean Press,1993. 29 — 37.

[8] China State Bureau of Techenical Supervision. The specification for oceanographic survey. Beijing :China Ocean Press,1991.

[9] Parsons T R , Yoshiaki M, Lalli C M. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford, 1984. 1 — 173.

[10] Pielous E C. An introduction to mathematical ecology. New York :Wiley-Interscience, 1969. 1 — 286.

[11] Shannon C E, Weaver W . The mathematical theory of communication. Illinios University Press, Urbana, Illinios, 1963. 1 — 125.

[12] Bray J R and Curtis J T . An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin, Ecological Monograph, 1957, 27, 325 — 349.

[13] Warwick R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities,Marine Biology, 1986,92,557 — 562.

[14] Warwick R M, Pearson T H, Ruswahyuni. Detection of pollution effects on Marine macrobenthos 2further evaluation of the species abundance / biomass method , Marine Biology, 1987,95,193 — 200.

[5] Yang Q L, Lin J M. Phytoplankton ecology in the adjacent water of the Daya Bay Nuclear Power Station in Guangdong in spring, *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 11 (4) 471—481.

[6] Ignatiadis L, Karydis M. Detection of phytoplankton seasonality trends based on k-dominance curves, *Rapp. Comm. Int. Mer Mediterranee*, CIESM, Monaco, 1990, 32 (1) 1—203.

[7] Ismael A A, Dorgham M M. Ecological indices as a tool for assessing pollution in El-Dekhaila Harbour (Alexandria, Egypt). *Oceanologia*, 2003, 45 (1) 121—131.

[8] 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.

[9] Qi Y Z, Zou J Z, Liang S, eds. Red tide on the coast of China, . Beijing : China Science Press, 2003. 1—348.

[10] Yin K, Harrison P J, Dortch Q. Lack of ammonium inhibition of nitrate uptake for a diatom grown under low light conditions. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 1998, 228 151—165.

[11] Lin H, Zhang Y B and Chen J M. Eutrophication assessment of seawater for Xiamen sea area, *Journal of Oceanography of Taiwan Strait*, 2002, 1 (4) 154—161.

[12] Wang Y S, Wang Z D, Huang L M. Environment changes and trenin in Daya Bay recent 20 yearscent . *Journal of Tropical Oceanography* , 2004, 23 (5) 86—95.

[13] Smayda. Suspension and sinking of phytoplankton in sea. *Oceanogr. Mar. Boil. Ann. Rev*, 1970, 8 353—414.

[14] Parsons T R, Takahashi M. Environmental control of phytoplankton cell size. *Limnol Oceanogr.* , 1973, 18, 511—515.

[15] Malone T C. Algal size. In : I. Morris ed. *The Physiological Ecology of Phytoplankton*, London : Blackwell Scientific Publications, 1980. 433—463.

[16] Odate T, Maita Y. Regional variation in the size composition of phytoplankton communities in the western North Pacific Ocean, spring 1985. *Biol. Oceanogr.* , 1988/1989 6 55—77.

[17] Taguchi S, Saito H, Kasai H, *et al.* Hydrography and spatial variability in the size distribution of phytoplankton along the Kurile Islands in the western subarctic Pacific Ocean. *Fish. Oceanogr.* , 1992, 1 227—237.

[18] Odate T. Abundance and size composition of the summer phytoplankton communities in the western North Pacific Ocean, the Bering Sea, and the Gulf of Alaska. *Journal Oceanography*, 1996, 52 : 335—351.

[19] Xu N, Lu S H, Duan S S, *et al.* The influence of nutrients input on the red tide occurrence. *Marine Environmental Science*, 2004, 23. (4) 20—24.

[20] Dugdale R C, Goering J J. Uptake of new and regenerated nitrogen in primary productivity. *Limnol. Oceanogr.* , 1967, 12 : 685—695.

[21] Xu K C, Ji W D, Zhou Q L, *et al.* Apparent oxygen increase (AOL) and its application in rapid assessment and prewarning of red tide in coastal waters, *Journal of Oceanography of Taiwan Strait*, 2004, 23 (4) 417—422.

参考文献：

[1] 金德祥. 厦门港 1954 年浮游生物的定量调查. *厦门大学学报*, 1955, 5 17~30.

[2] 杨清良. 厦门港湾海洋环境综合调查报告 (II), 第 4 章, 第 1 节, 浮游植物. *台湾海峡*, 1988, 7 (1) 1~10.

[3] 杨清良, 林更铭, 林金美. 厦门文昌鱼自然保护区周围海域浮游植物的生态. *台湾海峡*, 1993, 12 (5) 205~217.

[4] 林更铭, 杨清良, 林金美. 厦门岛周围海域浮游植物与环境因子的关系. *海洋通报*, 1993, 12 (6) 40~45.

[5] 陈其焕, 曾昭文, 张水浸, 等. 厦门港 1987 年赤潮调查报告. 见 *国家海洋局第三海洋研究所编, 厦门港赤潮调查研究论文集*, 北京 : 海洋出版社, 1993. 1~18.

[6] 张水浸. 厦门港 *Eucampia zoodiacus* 赤潮的形成过程及成因分析. 见 *国家海洋局第三海洋研究所编, 厦门港赤潮调查研究论文集*, 北京 : 海洋出版社, 1993. 19~28.

[7] 张水浸. 厦门港赤潮发生区浮游植物的生态特征. 见 *国家海洋局第三海洋研究所编, 厦门港赤潮调查研究论文集*, 北京 : 海洋出版社, 1993. 29~37.

[8] 国家技术监督局. *海洋调查规范*. 北京 : 海洋出版社, 1991. 1~104.

[8] 王勇, 焦念志. 北黄海浮游植物营养盐限制的初步分析. *海洋与湖沼*, 1999, 30 (5) 512~518.

[9] 林辉, 张元标, 陈金民. 厦门海域水体富营养化程度评价. *台湾海峡*, 2002, 21 (1) 154~161.

[10] 齐雨藻, 邹景忠, 梁松, 主编. *中国沿海赤潮*. 北京 : 科学出版社, 2003. 1~348.

[12] 王友绍, 王肇鼎, 黄良民. 近 20 年来大亚湾生态环境的变化及其发展趋势. *热带海洋学报*, 2004, 23 (5) 86~95.

[19] 徐宁, 吕颂辉, 段舜山, 等. 营养物质输入对赤潮发生的影响. *海洋环境科学*, 2004, 23 (1) 20~24.

[11] 许昆灿, 暨卫东, 周秋麟, 等. 表观增氧量在近岸海域赤潮快速评价与预警中的应用, *台湾海峡*, 2004, 23 (4) 417~422.