

DOI: 10.3724/SP.J.1035.2010.00618

南麂列岛海洋自然保护区浮游植物的种类多样性及其生态分布

李 扬¹ 李 欢¹ 吕颂辉^{1,2} 江天久^{1,2} 萧云朴³ 陈 舜³

(1. 华南师范大学生命科学学院, 广东省水产健康安全养殖重点实验室, 广东省高等学校生态与环境科学重点实验室, 广州 510631; 2. 暨南大学赤潮与水环境研究中心, 广州 510632; 3. 浙江省平阳县海洋与渔业局, 平阳 325400)

摘要: 于2006年5月至2007年2月之间, 对南麂列岛海域的浮游植物类群进行了4个季节的调查, 分析了该海域浮游植物的种类组成、优势种类、群落结构以及水平分布等特征参数的季节变化。共鉴定浮游植物80种, 隶属于4个门, 硅藻种类最多, 甲藻其次。浮游植物可划分为3个生态类群, 以广温类群为主。春季和夏季分别以三角棘原甲藻和中肋骨条藻为绝对优势种, 秋冬季的优势种类组成多样化。共鉴定57种赤潮生物, 占浮游植物种类数的71.25%。调查期间, 三角棘原甲藻和中肋骨条藻分别于春季和夏季形成赤潮。浮游植物的物种丰富度呈现春、夏、秋、冬递减的趋势。浮游植物细胞丰度的年平均值为 1.03×10^6 cells/L, 春夏季显著高于秋冬季。春季和夏季时, 浮游植物高值区集中在南麂岛西北近岸海域; 秋季和冬季时, 浮游植物高值区相对集中在南麂岛东南近岸海域。浮游植物群落的多样性指数(H')以秋季最高, 冬季最低。春季的三角棘原甲藻赤潮期间, 水体中N/P值显著升高; 夏季的中肋骨条藻赤潮期间, 水体中N/P值显著降低。

关键词: 南麂列岛; 浮游植物; 种类多样性; 生态分布

中图分类号: Q178.53 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2010)02-0618-11

南麂列岛位于浙江省东南部海面, 西距浙江大陆最近处仅有55 km, 地处亚热带, 海洋自然环境条件优越。整个列岛由大小52个(面积大于500 m²)岛屿组成, 海岸线总长75 km, 陆域面积11.13 km²。南麂列岛是国务院批准建立的我国首批5个海洋类型的自然保护区之一, 是中国最早加入联合国教科文组织世界生物圈保护网络的海岛, 是联合国环境开发署生物多样性示范保护区^[1-3]。它是一个以保护海洋生物多样性为目标, 主要以海洋贝类、藻类及其生态环境为对象的特定海洋生态系统保护区。南麂列岛海域水深一般在15—25 m之间, 南麂岛东北和西南两侧为深水通道, 其水深在30 m以上, 最深处达45 m。

海洋浮游植物是海洋食物链的初级生产者, 其数量的丰欠决定着海洋初级生产力的大小, 并通过

食物链最终影响着渔业产量和生态系统的稳定。作为海洋生态系统动力学的主要研究内容, 研究浮游植物群落结构及其动态变化, 对于了解海洋生态系统的动力学机制和渔业资源动态有着重要的意义^[1]。21世纪以来, 有学者对南麂海域的浮游动物和贝类资源进行了调查^[2-4], 但关于该海域浮游植物的研究报道则相对较少^[5]。本文根据2006年5月至2007年2月进行的4个季节的生态调查数据, 分析了南麂列岛海域浮游植物的种类组成、优势种类、赤潮生物、群落结构等特征参数, 还分析了浮游植物及其季节优势种类的分布特征和季节动态, 为该海域海洋生物多样性的调查和保护提供基础参数和科学依据; 并为南麂列岛国家级海洋自然保护区海洋生态学的研究以及典型海洋保护区生态系统服务功能的价值评价提供基础资料和参考依据。

收稿日期: 2008-10-23; 修订日期: 2009-06-17

基金项目: 国家自然科学基金 30700046; 国家重点基础研究发展计划(973)项目资助(2010CB428702); 温州市科技计划项目 S2006A007 资助

作者简介: 李扬(1978—), 男, 河南信阳人; 副研究员, 博士; 主要从事藻类分类学和生态学研究。E-mail: liyang@scnu.edu.cn

通讯作者: 吕颂辉, E-mail: lusonghui1963@163.com

1 材料与方法

在南麂列岛海域设置了 9 个采样点, 站位具体位置(图 1)。分别于 2006 年 5 月(春季)、8 月(夏季)、11 月(秋季)和 2007 年 2 月(冬季)在以上 9 个站位进行表层浮游植物样品的采集。利用小体积采水器分别采集表层海水, 取出其中 2 L, 加入 4% 中性福尔马林固定, 用于浮游植物的分析。带回实验室后, 逐步沉淀浓缩至 10 mL 左右, 具体可视浮游植物细胞丰度而定。然后摇匀水样, 取出 0.1 mL 样品, 利用浮游植物分析框在 Olympus BH-2 显微镜下观察、计数和种类鉴定。

同时, 利用小体积采水器分别采集表层水样, 经 GF/F (Whatman) 滤膜过滤后, 现场用 VAR D 袖珍型 pH/Cond 测定仪测定 pH、盐度、温度, 然后加入 H₂SO₄ 酸化保存, 用于实验室营养盐的分析测定; 溶解氧 DO 通过现场固定样品后带回实验室测定。各项营养盐的测定均采用分光光度法^[6,7], 其中铵盐(NH₄-N)用次溴酸钠氧化法, 硝酸盐(NO₃-N)用镉铜还原-偶氮比色法, 亚硝酸盐(NO₂-N)用重氮偶氮比色法, 磷酸盐(PO₄-P)用磷钼蓝法。溶解无机氮(DIN)浓度为氨盐、硝酸盐和亚硝酸盐浓度之和。

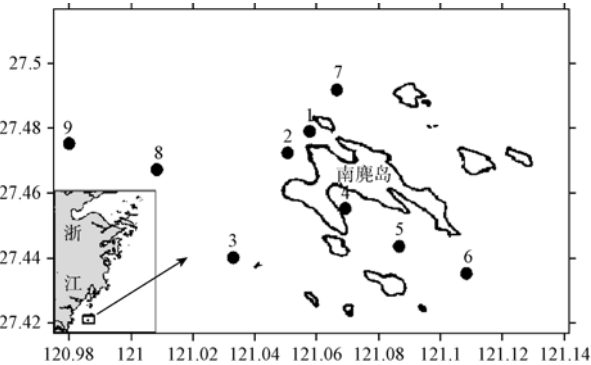


图 1 南麂列岛海域调查站位图
Fig. 1 Sampling stations in Nanji Islands Sea Area

浮游植物群落的各项生态指数, 如丰富度(*D*)、优势度(*C*)、多样性(*H'*)和均匀度(*J'*)分别采用以下公

式计算:

丰富度 $D=(S-1)/\log_2(N)$, 式中 *S* 为浮游植物的物种数, *N* 为所有物种的个体总数。

优势度 $C=\text{SUM}(n_i/N)^2$, 式中 *n_i* 为第 *i* 种的个体总数, *N* 为所有物种的个体总数。

多样性 $H'=\text{SUM}(n_i/N)\log_2(n_i/N)$, 式中 *n_i* 为第 *i* 种的个体总数, *N* 为所有物种个体总数。

均匀度 $J'=H'/\log_2 S$, 式中 *H'* 为多样性指数, *S* 为浮游植物的物种数。

用同步观测到的水温、盐度, 以及后期在实验室内检测获得营养盐浓度等数据, 分析浮游植物细胞丰度与环境因子的相关性。取水温(*T*)、盐度(*S*)、溶解氧(DO)、磷营养盐浓度(PO₄-P)、氨氮浓度(NH₄-N)、亚硝酸盐浓度(NO₂-N)、硝酸盐浓度(NO₃-N)等为自变量, 分别以浮游植物细胞丰度(*A*)和种类数(*S*)为因变量, 应用 SPSS13.0 统计软件进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 浮游植物的种类组成和生态类型以及赤潮生物的组成

浮游植物的种类组成 在南麂列岛海域 4 个季节的样品中, 共鉴定浮游植物 80 种, 分别隶属于硅藻门、甲藻门、蓝藻门和着色鞭毛藻门四个门类。硅藻门种类最多, 观察到 59 种; 甲藻门种类次之, 有 17 种; 着色鞭毛藻门种类有 3 种; 蓝藻门种类最少, 只有 1 种。4 个调查季节中, 浮游植物物种丰富度的季节变化明显(表 1)。硅藻和甲藻种类在 4 个季节均是南麂列岛海域浮游植物的主要组成类群。硅藻和甲藻物种丰富度的季节动态呈现从春、夏、秋到冬季逐渐减少的趋势。

南麂列岛海域浮游植物种类名录(表 2)。硅藻中以角毛藻属(*Chaetoceros*)的种类多样性最高, 观察到 11 种; 圆筛藻属(*Coscinodiscus*)次之, 有 7 种。甲藻中以原甲藻属(*Prorocentrum*)和角藻属(*Ceratium*)的种类多样性最高, 均有 4 种。

表 1 浮游植物的种类组成
Tab. 1 Composition of phytoplankton in different investigation seasons

季节 Season	硅藻 Bacillariophyta	甲藻 Pyrrophyta	蓝藻 Cyanophyta	着色鞭毛藻门 Chromophyta	合计 Total
春季 Spring	38	15	1	3	57
夏季 Summer	28	12	1	0	41
秋季 Autumn	25	9	1	1	36
冬季 Winter	14	5	1	0	20

表 2 浮游植物种类名录、赤潮种类及其生态类型
Tab. 2 List of phytoplankton species, ecotypes and red tide causative species

中文名 Chinese	拉丁名 Latin	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	生态类型 Ecotype	毒性 Toxin
硅藻门	Bacillariophyta						
优美旭氏藻	<i>Schroederella delicatula</i> *		+			B	
北方娄氏藻	<i>Lauderia annulata</i> *			+		A	
中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i> *	+	+	+	+	A	
诺氏海链藻	<i>Thalassiosira nordenskioldii</i> *	+				C	
太平洋海链藻	<i>Thalassiosira pacifica</i> *	+				A	
圆海链藻	<i>Thalassiosira rotula</i> *	+	+	+		C	
细弱海链藻	<i>Thalassiosira subtilis</i> *		+			A	
念珠直链藻	<i>Melosira moniliformis</i> *				+	A	
拟币氏直链藻	<i>Melosira nummuloides</i> *	+				C	
具槽直链藻	<i>Melosira sulcata</i> *		+		+	A	
细弱明盘藻	<i>Hyalodiscus subtilis</i>	+				A	
掌状冠盖藻	<i>Stephanopyxis palneriana</i> *		+			B	
丹麦细柱藻	<i>Leptocylindrus danicus</i> *	+		+		A	
豪猪棘冠藻	<i>Corethron hystrix</i>	+				A	
蛇目圆筛藻	<i>Coscinodiscus argus</i>	+	+	+	+	A	
星脐圆筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i> *	+				A	
有翼圆筛藻	<i>Coscinodiscus bipartitus</i>	+	+	+	+	B	
琼氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus jonesianus</i> *	+	+	+		B	
虹彩圆筛藻	<i>Coscinodiscus oculus</i>		+		+	A	
辐射圆筛藻	<i>Coscinodiscus radiatus</i> *	+				A	
威氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus wailes</i> *	+				A	
克氏星脐藻	<i>Asteronphalus cleveanus</i>			+		A	
环状辐辏藻	<i>Actinopteryx annulatus</i>	+				B	
波状辐辏藻	<i>Actinopteryx undulatus</i>	+		+	+	A	
柔弱根管藻	<i>Rhizosoleni delicatula</i> *		+			C	
笔尖根管藻	<i>Rhizosoleni styloformi</i> *	+	+	+		A	
中华根管藻	<i>Rhizosolenia sinensis</i>		+	+		A	
浮动弯角藻	<i>Eucampia zoodiacus</i> *	+				A	
透明辐杆藻	<i>Bacteriastrum hyalinum</i> *	+	+	+		A	
窄隙角毛藻	<i>Chaetoceros affinis</i> *	+				A	
旋链角毛藻	<i>Chaetoceros curvisetus</i> *	+	+			A	
丹麦角毛藻	<i>Chaetoceros danicus</i> *	+				C	
柔弱角毛藻	<i>Chaetoceros debilis</i> *		+			C	
密连角毛藻	<i>Chaetoceros densus</i>	+				A	
冕袍角毛藻	<i>Chaetoceros diadema</i>	+	+			C	
双突角毛藻	<i>Chaetoceros didymus</i> *	+				A	
印度角毛藻	<i>Chaetoceros indicus</i>	+				B	
洛氏角毛藻	<i>Chaetoceros lorenzianus</i> *	+	+	+		B	
秘鲁角毛藻	<i>Chaetoceros peruvianus</i> *	+				B	
聚生角毛藻	<i>Chaetoceros socialis</i> *	+				C	
锤状中鼓藻	<i>Bellerochea malleus</i> *			+		B	
布氏双尾藻	<i>Dityhum brighwellii</i> *	+	+	+	+	A	
泰晤士扭鞘藻	<i>Streptotheca thamesis</i>		+	+		C	
活动盒形藻	<i>Biddulphia mobiliensis</i>		+	+		A	
中华盒形藻	<i>Biddulphia sinensis</i>	+		+	+	B	
冰河拟星杆藻	<i>Asterionellopsis glacialis</i> *		+			A	
波状斑条藻	<i>Grammatophora undulata</i>				+	A	
细弱楔形藻	<i>Licmophora tenuis</i>			+	+	A	
菱形海线藻	<i>Thalassionema nitzschiodes</i> *	+	+			A	
伏氏海毛藻	<i>Thalassiothrix frauenfeldii</i> *		+	+	+	A	
长海毛藻	<i>Thalassiothrix longissima</i>			+		A	
多枝舟形藻	<i>Navicula ramosissima</i>					C	

续表

中文名 Chinese	拉丁名 Latin	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	生态类型 Ecotype	毒性 Toxin
镰刀斜纹藻	<i>Pleurosigma falx</i>	+	+	+	+	B	
蜂腰双壁藻	<i>Diploneis bombus</i>	+	+			A	
奇异棍形藻	<i>Bacillaria paradoxa</i> *	+			+	A	
柔弱拟菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> *	+	+	+		A	ASP
尖刺拟菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i> *	+	+	+		A	ASP
有棱菱形藻	<i>Nitzschia angularis</i>			+		C	
长菱形藻	<i>Nitzschia longissima</i> *	+				A	
甲藻门	Pyrrophyta						
东海原甲藻	<i>Prorocentrum donghaiense</i> *	+				A	
海洋原甲藻	<i>Prorocentrum micans</i> *	+	+	+		A	
反曲原甲藻	<i>Prorocentrum sigmoides</i> *		+			B	
三角棘原甲藻	<i>Prorocentrum triestinum</i> *	+	+			A	
米氏凯伦藻	<i>Karenia mikimotoi</i> *	+				A	#
夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i> *	+	+	+		A	
渐尖鳍藻	<i>Dinophysis acuminata</i> *	+				C	DSP
具尾鳍藻	<i>Dinophysis caudata</i> *	+	+	+	+	A	DSP
堂皇鸟尾藻	<i>Ornithocercus magnificus</i>			+		B	
塔玛亚历山大藻	<i>Alexandrium tamarense</i> *	+	+		+	A	PSP
多纹漆沟藻	<i>Gonyaulax polygramma</i> *	+				A	
锥状斯氏藻	<i>Scrippsiella trochoidea</i> *	+	+	+		A	
叉状角藻	<i>Ceratium furca</i> *	+	+	+	+	A	
梭角藻	<i>Ceratium fusus</i> *	+	+	+	+	A	
大角角藻	<i>Ceratium macroceros</i> *	+	+	+		A	
三角角藻	<i>Ceratium tripos</i> *	+	+	+	+	A	
锥形原多甲藻	<i>Protoperdinium conicum</i> *	+				A	
蓝藻门	Cyanophyta						
红海束毛藻	<i>Trichodesmium erythraeum</i> *	+	+	+	+	B	
着色鞭毛藻门	Chromophyta						
海洋卡盾藻	<i>Chattonella marina</i> *	+				A	#
小等刺硅鞭藻	<i>Dictyocha fibula</i> *	+		+		A	
六异刺硅鞭藻	<i>Dictyocha speculum</i> *	+				A	

注: +表示存在; *表示为赤潮生物; A 表示广温种; B 表示暖水种; C 表示温带种; #表示含有某种毒素的赤潮生物; ASP 表示含有失忆性贝毒的赤潮生物种; DSP 表示含有腹泻性贝毒的赤潮生物种; PSP 表示含有麻痹性贝毒的赤潮生物种;

Note: + shows appearance; * indicates red tide causative species; A, B, C stand for eurythermal species, warm-water species and temperate species, respectively; # shows red tide species with the ability to produce one kind of toxin; ASP shows red tide species with Amnesic Shellfish Poisoning; DSP shows red tide species with Diarrhetic Shellfish Poisoning; PSP shows red tide species with Paralytic Shellfish Poisoning

浮游植物的生态类型 可根据分布特征和生态性质, 将南麂列岛海域 80 种浮游植物分为三个类群:

(1) 广温类群(表 2 中标 A 者): 该类群对温度的适应范围较广。根据其对应盐度的不同要求可以细分为 3 个类群: 广温广盐类群。南麂海域浮游植物的广温广盐种类主要有菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)、尖刺拟菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)等。其中, 中肋骨条藻最为常见, 尤其是在夏季, 全部 9 个调查站位的细胞丰度均较高, 达到 10^6 cells/L 水平, 形成中肋骨条藻赤潮。菱形海线藻的主要分布季节

在夏季; 尖刺拟菱形藻的主要分布季节为春季和夏季, 在春季的细胞丰度高于夏季。 广温高盐类群。调查期间, 此类群的种类较少, 且出现季节有限, 如细弱海链藻(*Thalassiosira subtilis*)只出现在夏季样品中, 在各个站位的细胞丰度均处于 10^4 — 10^5 cells/L 水平之间。 广温低盐类群。南麂海域该类群的种类较少, 最具代表性的是三角棘原甲藻(*P. triestinum*), 该种在秋冬季样品中基本检测不到, 夏季的含量极低, 但是在春季的细胞丰度最高, 在 9 个调查站位的细胞含量均在 10^5 cells/L 水平以上, 其中 6 个站位的细胞含量在 10^6 cells/L 水平以上, 形成三角棘原甲藻赤潮。

(2) 暖水类群(表 2 中标 B 者): 这是一类适宜于在水温较高的季节和水域分布的种类, 根据它们对盐度的不同要求可以细分为 3 个类群: 暖水广盐类群: 如洛氏角毛藻(*C. lorenzianus*)和印度角毛藻(*C. indicum*)。洛氏角毛藻的分布广泛, 在春、夏和秋季都有出现, 春季细胞丰度最高, 在 10^3 — 10^4 cells/L 水平之间。暖水高盐类群。这一类群属于高温、高盐的热带大洋性种类, 代表种有透明辐杆藻(*Bacteriastrum hyalinum*)、秘鲁角毛藻(*C. peruvianus*)、大角角藻(*C. macroceros*)。该类群种类主要出现在春、夏和秋季, 细胞丰度均较低。该生态类型中的某些甲藻种类, 如鸟尾藻属(*Ornithocercus* spp.)的种类, 可以作为黑潮的指示种。在调查的秋季, 发现到堂皇鸟尾藻(*O. magnificus*), 出现在 6 号和 9 号站位。暖水沿岸类群。这是一类适宜于高温低盐的种类, 如旋链角毛藻(*C. curvisetus*)和琼氏圆筛藻(*C. jonesianus*), 主要出现在春夏季。

(3) 暖温类群(表 2 中标 C 者)。根据其对盐度的不同要求可以细分为 2 个类群: 暖温近岸类群。如柔弱根管藻(*Rhizosolenia delicatula*)、冕孢角毛藻(*C. diadema*)等种类, 主要出现在夏季, 细胞丰度低。暖温高盐类群。如笔尖根管藻(*R. styliiformis*)等种类, 春、夏、秋季都有出现, 细胞丰度低。

总的来说, 南麂海域浮游植物以广温种类为主, 有 54 种, 其中硅藻 37 种, 甲藻 14 种, 着色鞭毛藻 3 种。暖水种类其次, 有 14 种, 其中硅藻有 11 种, 甲藻有 2 种, 蓝藻有 1 种。温带种类最少, 有 11 种, 其中硅藻有 10 种, 甲藻有 1 种。南麂列岛海域受到多种水系活动的影响, 是浙江沿岸流、台湾暖流和外海深层上升流等多种流系汇集的海域, 水体交换充分, 营养物质丰富, 海洋生物资源丰富, 区系复杂^[2,5]。这些海流在南麂海域的交汇, 使得浮游植物不同生态类群的出现具有一定的季节性。

赤潮生物的种类组成 调查期间, 发现了 57 种赤潮原因种(表 2 中标*者), 占浮游植物种类数的 71.25%, 硅藻种类有 37 种, 甲藻种类有 16 种, 蓝藻种类有 1 种, 着色鞭毛藻有 3 种。其中有相当一部分是有毒、有害的种类, 有毒、有害种类以甲藻种类为主, 例如东海原甲藻和米氏凯伦藻是我国沿海海域常见而重要的有毒有害赤潮藻, 它们在南麂海域的细胞丰度在春季可达到很高的水平, 关于它们近年来在该海域形成赤潮的报道较多^[7,8]; 塔玛亚历

山大藻 *Alexandrium tamarense* 曾于 2006 年春季在部分站位表层水体中达到较高的细胞丰度, 接近该藻的赤潮水平, 该藻能够产生 PSP。还记录了其他一些有毒有害赤潮藻, 如能够产生 DSP 的渐尖鳍藻 *Dinophysis acuminata* 和具尾鳍藻 *D. caudata*。硅藻优势种类中的尖刺拟菱形藻和柔弱拟菱形藻也是常见的有毒赤潮藻, 具有产生 ASP 的潜在威胁。此外, 赤潮生物还包括三角棘原甲藻和锥状斯氏藻 *Scrippsiella trochoidea* 等甲藻种类; 红海束毛藻 *Trichodesmium erythraeum* 等蓝藻种类; 小等刺硅鞭藻 *Dictyocha fibula*、六异刺硅鞭藻 *D. speculum* 以及海洋卡盾藻 *Chattonella marina* 等着色鞭毛藻种类。

调查期间, 监测到两起赤潮事件, 三角棘原甲藻和中肋骨条藻的细胞丰度相继在春季和夏季达到较高的水平, 在部分站位的细胞含量达到 10^6 cells/L 水平以上, 先后形成甲藻赤潮和硅藻赤潮。

2.2 浮游植物的优势种类

各调查站位浮游植物优势种类的季节变化明显(表 3)。春季时, 除了 7 号站位的优势种类是柔弱菱形藻, 其余 8 个站位的优势种类都是三角棘原甲藻。三角棘原甲藻的优势程度显著, 6 个站位(1、2、4、5、8、9)细胞含量在 10^6 cells/L 水平以上, 形成三角棘原甲藻赤潮。三角棘原甲藻细胞数在浮游植物总细胞数的占有比例一般都在 50% 以上, 最高达到 87.68%。夏季时, 各站位优势种类都是中肋骨条藻, 在 6 个站位(1、2、5、6、8、9)的细胞含量在 10^6 cells/L 水平以上, 形成中肋骨条藻赤潮, 优势程度明显, 中肋骨条藻细胞数在浮游植物总细胞数中的占有比例都在 50% 以上, 最高可达 95.85%。秋季和冬季时, 各站位的优势种类多变化, 主要以佛氏海毛藻(*Thalassiothrix frauenfeldii*)、中肋骨条藻、镰刀斜纹藻(*Pleurosigma flax*)、奇异棍形藻(*Bacillaria paradoxa*)和蛇目圆筛藻(*C. argus*)等种类为主, 但细胞数量都不高, 在 10^2 — 10^3 cells/L 水平之间。

2.3 浮游植物的季节动态

浮游植物的物种丰富度呈现春、夏、秋、冬逐渐减少的趋势(图 2), 春季观察到的种类数最多, 有 57 种, 冬季最少, 有 20 种, 夏季和秋季居中, 分别有 41 种和 36 种。硅藻和甲藻的种类数也呈现同样的变化趋势, 春季最多, 冬季最少。纪焕红等曾于 2004—2005 年间对南麂列岛海域浮游植物进行了 4 个季节的调查^[5], 认为浮游植物物种丰富度在夏季

表 3 调查站位优势种类的细胞丰度及其占有比例
Tab. 3 List of dominant species and their cell densities, percentage in total phytoplankton

站位 Spot	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
	细胞密度 Cell abundance (cells/L)	比例 Percentage (%)	细胞密度 Cell abundance (cells/L)	比例 Percentage (%)	细胞密度 Cell abundance (cells/L)	比例 Percentage (%)	细胞密度 Cell abundance (cells/L)	比例 Percentage (%)
1	三角棘原甲藻		中肋骨条藻		佛氏海毛藻		蛇目圆筛藻	
	2435000	85.27	3310000	94.11	4000	42.11	500	76.65
2	三角棘原甲藻		中肋骨条藻		蛇目圆筛藻		奇异棍形藻	
	2697500	87.68	1998750	92.63	4000	44.44	2000	86.27
3	三角棘原甲藻		中肋骨条藻		佛氏海毛藻		奇异棍形藻	
	862000	76.59	893750	86.37	4000	61.54	1000	67.78
4	三角棘原甲藻		中肋骨条藻		中肋骨条藻		中肋骨条藻	
	1030000	52.41	308750	85.35	4500	81.82	2500	78.84
5	三角棘原甲藻		中肋骨条藻		中肋骨条藻		中肋骨条藻	
	1491000	73.73	1198750	79.23	8000	53.33	4000	50.00
6	三角棘原甲藻		中肋骨条藻		镰刀斜纹藻		中肋骨条藻	
	802500	51.79	3185000	95.21	1500	33.33	3000	72.14
7	柔弱菱形藻		中肋骨条藻		镰刀斜纹藻		具槽直链藻	
	1657500	67.61	390750	76.62	1000	66.67	5000	77.56
8	三角棘原甲藻		中肋骨条藻		佛氏海毛藻		镰刀斜纹藻	
	2048000	78.51	2908750	95.85	3000	35.29	500	66.57
9	三角棘原甲藻		中肋骨条藻		中肋骨条藻		镰刀斜纹藻	
	1020500	85.45	2280250	87.77	10000	74.07	500	73.34

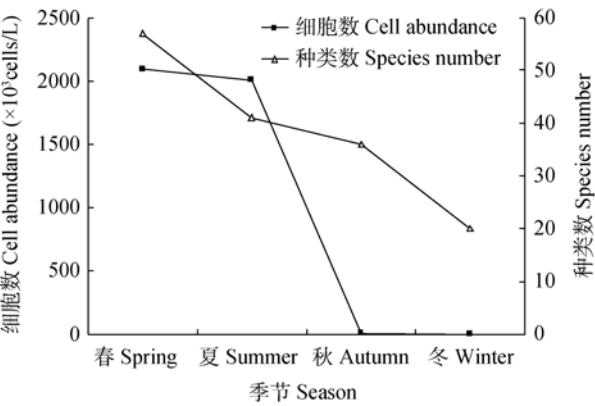


图 2 浮游植物细胞数和种类数的季节曲线
Fig. 2 Seasonal curves of cell abundances and species numbers of phytoplankton

最高，秋季其次，冬季第三，春季最少。与之相比，本文的调查结果略有不同，这与调查季节的水温有密切的关系，本文调查的春季水温在 18.9—20℃，接近三角棘原甲藻等甲藻种类的最适生长水温，因此，有较多的甲藻种类出现在春季。水温在冬季时降至最低，各站位变化范围是 11.7—12.3℃，大部分硅藻和甲藻种类在此水温条件下的细胞丰度很低，导致能够观察的种类数也随之减少，因此，浮游植

物的物种丰富度在冬季时最低。

浮游植物细胞丰度范围在 0.5—3517×10³ cells/L，年平均值 1.03×10⁶ cells/L。浮游植物细胞数量的季节变化显著，集中体现在夏季和秋季之间(图 2)。浮游植物在春季和夏季时的细胞丰度高，基本处于同一水平上，各站位的平均值达到 2×10⁶ cells/L，先后形成甲藻赤潮和硅藻赤潮，引发种类分别是三角棘原甲藻和中肋骨条藻。浮游植物在秋季和冬季时的细胞含量不高，都处于 10³ cells/L 水平。纪焕红等的调查结果认为浮游植物细胞丰度在秋季最高^[5]，为 2.81×10⁵ cells/L，夏季其次，为 3.01×10³ cells/L，春季第三，为 2.71×10² cells/L，冬季最低，为 1.95×10² cells/L。本文关于浮游植物细胞丰度的结果在各个季节都高于纪焕红等结果，尤其是春季和夏季，由于调查期间正值三角棘原甲藻和中肋骨条藻赤潮，因此，浮游植物细胞丰度远远高于以往调查结论。而秋季和冬季的结果也比以往结果高一个数量级，这是因为纪焕红等的采样方法是利用浅Ⅲ型浮游生物网由水底至表层进行垂直拖网采集，网的孔径为 65 μm，本文的采样方法利用采水器直接采集水样。与拖网采集方法相比，直接采水的方法能够更加全面的采集水

体中的浮游植物,不存在因网孔大于藻细胞直径而导致其流失的情况,尤其是针对微型浮游植物类群(细胞直径小于 20 μm)。因此,从水样中获得的浮游植物细胞丰度一般都高于由网采样品获得的细胞丰度。

2.4 浮游植物细胞数量的水平分布

浮游植物的水平分布 浮游植物细胞丰度在南麂海域的分布具有明显的季节特征(图 3)。春季时,浮游植物的细胞丰度高,各站位丰度在 $1.13\text{—}3.08\times 10^6\text{ cells/L}$ 之间,平均值是 $2.09\times 10^6\text{ cells/L}$ 。高值区集中在 2 号站位,该站位靠近南麂岛的西北沿岸,细胞丰度达到 $3.08\times 10^6\text{ cells/L}$,与 2 号站位相邻的 1 号站位,其细胞丰度也较高,达到 $2.86\times 10^6\text{ cells/L}$ 。浮游植物细胞丰度以这两个站位附近海域为中心,向四周扩展而有所降低,但是,整个调查海域浮游植物的细胞丰度都保持在 10^6 cells/L 水平以上。浮游植物在夏季的细胞丰度高,与春季接近,各站位丰度在 $3.62\text{—}35.2\times 10^5\text{ cells/L}$,平均值是 $2.01\times 10^6\text{ cells/L}$ 。高值区有两个,分别以 1 号和 6 号站位为中心,细胞丰度分别为 $3.52\times 10^6\text{ cells/L}$ 和 $3.35\times 10^6\text{ cells/L}$ 。此外,还有一个略低的次高值区,在 8 号站位,细胞丰度为 $3.03\times 10^6\text{ cells/L}$ 。低值区在 4 号站位附近,细胞丰度为 $3.62\times 10^5\text{ cells/L}$ 。秋季时,浮游植物细胞丰度的平均值下降为 $8.17\times 10^3\text{ cells/L}$,各站位丰度的变化范围是 $1.5\text{—}15\times 10^3\text{ cells/L}$ 。有两

个接近的高值区,一个在 5 号站位,另一个在 9 号站位,这两个站位的细胞丰度分别为 $1.5\times 10^4\text{ cells/L}$ 和 $1.35\times 10^4\text{ cells/L}$ 。冬季时,浮游植物细胞丰度最低,平均值为 $2.56\times 10^3\text{ cells/L}$,各站位变化范围是 $5\text{—}80\times 10^2\text{ cells/L}$ 。有一个高值区,位于 5 号站位,细胞丰度为 $8.0\times 10^3\text{ cells/L}$ 。

在春季和夏季,浮游植物细胞丰度高,高值区都集中在南麂岛西北近岸海域(1 号和 2 号站位);而在秋季和冬季,浮游植物细胞丰度较低,高值区都相对集中在南麂岛东南近岸海域(5 号和 6 号站位)。

重要赤潮生物的水平分布 三角棘原甲藻和中肋骨条藻是南麂海域浮游植物的重要优势种类,也是该海域重要的赤潮原因种。它们分别是春季和夏季浮游植物的绝对优势种类,细胞丰度达到最高值,并先后形成赤潮。其在南麂海域的水平分布特征与浮游植物分布特征有很大的相似之处,高值区有明显的重叠海域(图 4)。春季时,三角棘原甲藻在各站位表层水体中的细胞含量平均值为 $1.44\times 10^6\text{ cells/L}$,最高值达到 $2.69\times 10^6\text{ cells/L}$ (2 号站位),最低值为 $5.59\times 10^5\text{ cells/L}$ (7 号站位),高值区集中在南麂岛西北近岸的两个站位(1 号和 2 号站位),细胞丰度均在 $2.0\times 10^6\text{ cells/L}$ 以上。其次,还有一个次高值区,出现在南麂岛东南海域的 4 号和 5 号站位,细胞丰度维持在 $1.0\times 10^6\text{ cells/L}$ 左右的水平。与春季浮游

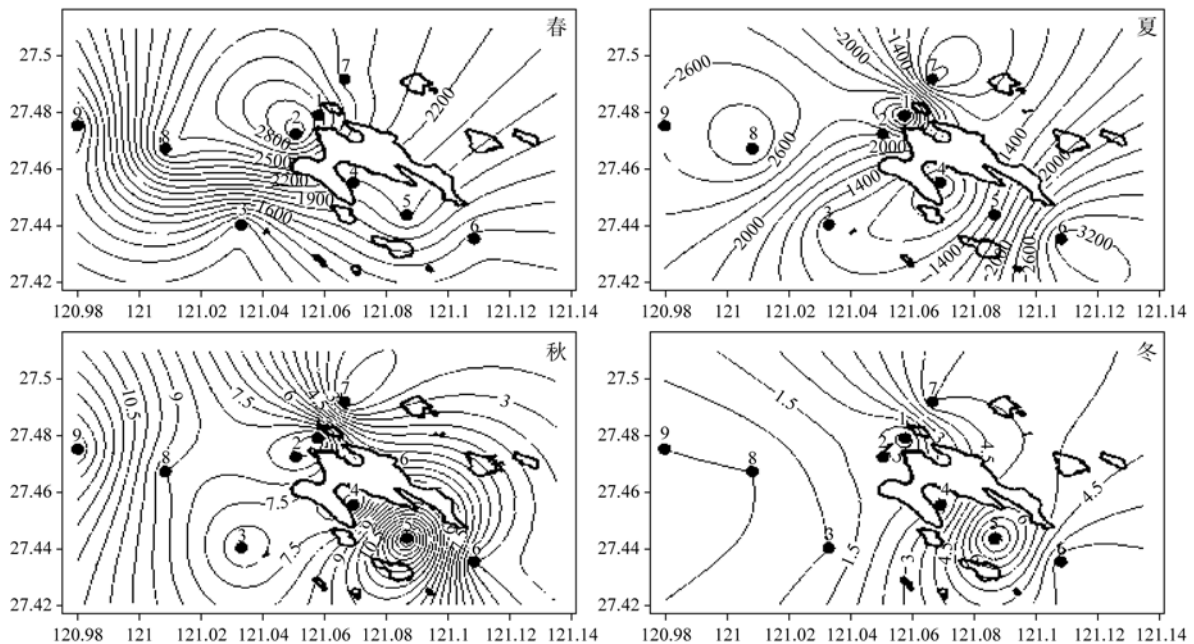


图 3 不同季节浮游植物水平分布图

Fig. 3 Horizontal distribution of phytoplankton richness in different seasons ($\times 10^3\text{ cells/L}$)

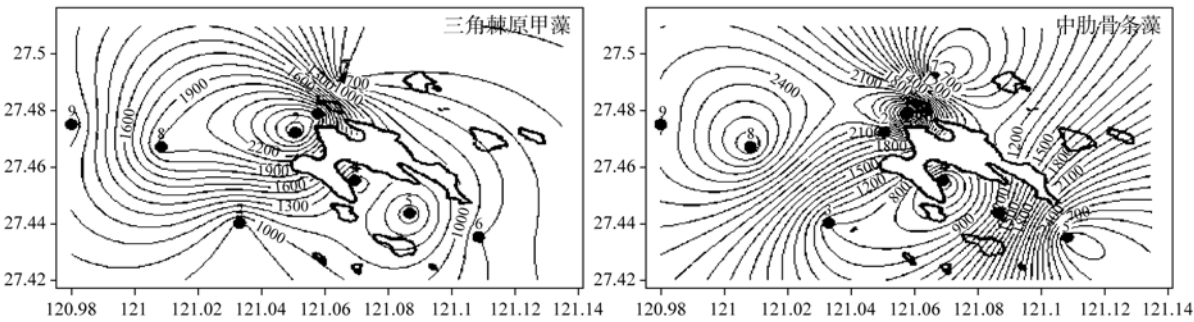


图 4 三角棘原甲藻和中肋骨条藻在其赤潮期间的水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of *P. triestinum* and *S. costatum* during their blooms respectively($\times 10^3$ cells/L)

植物分布特征相比，最高值区均出现在南麂岛西北近岸海域，即 1 号和 2 号站位附近海域。

夏季时，中肋骨条藻在部分站位形成赤潮。9 个站位水体中，细胞丰度平均值为 1.83×10^6 cells/L，最高值达到 3.31×10^6 cells/L (1 号站位)，最低值为 3.09×10^5 cells/L (4 号站位)，最高值区同样出现在南麂岛西北近岸海域的 1 号和 2 号站位，细胞丰度分别达到 3.31×10^6 cells/L 和 2.01×10^6 cells/L。此外，还有两个与之很接近的高值区，分别位于南麂岛东南近岸海域，即 5 号和 6 号站位，另一个高值区位于距离南麂岛最远的 8 号和 9 号站位，中肋骨条藻在这两个次峰值区的细胞丰度也都保持在 $1\text{—}3 \times 10^6$ cells/L 之间，都达到赤潮水平。中肋骨条藻和浮游植物总量的共同高值区完全一致，最高值区都分布在南麂岛西北近岸海域，即 1 号和 2 号站位附近海域；次高值区位于南麂岛东南沿岸海域，即 5 号和 6 号站位附近海域，此外，都还有一个第三位的高值区，位于远岸的 8 号站位附近海域。

2.5 浮游植物群落的生态指数

南麂列岛海域浮游植物群落生态指数的季节变化明显(表 4)。多样性指数(H')均值以秋季最高，为 1.75，春季其次，为 1.14，夏季较低，为 0.7，冬季最低，只有 0.32。丰富度(D)在春季和夏季接近，分别为 1.16 和 1.18，秋季较低，冬季最低，只有 0.19。均

匀度(J')以秋季最高，为 0.78，春季其次，冬季较低，夏季最低，仅为 0.2。浮游植物在冬季的种类数最少，其种类多样性指数也最低。浮游植物种类数在春季和夏季较多，但它们的多样性指数也不高，与这两个季节分别暴发三角棘原甲藻赤潮和中肋骨条藻赤潮有关，这两种赤潮原因种在春季和夏季的平均优势度(C)分别高达 0.61 和 0.79。

2.6 浮游植物与环境因子的关系

同一季节内，各项水质参数在不同站位之间的波动范围较小，而在不同季节的变化范围则很明显。各季节水质环境参数的测定结果(表 5)。

利用 SPSS13.0 进行 Pearson 相关性分析，发现浮游植物种类数和细胞丰度与各项环境因子之间均不存在显著的相关性。浮游植物在各个季节的优势种类不同，这些优势种类对环境因子的需求条件各不相同，例如三角棘原甲藻和中肋骨条藻分别在春季和夏季成为绝对优势种类，但这两种藻类分别属于甲藻和硅藻种类，它们对水温、磷酸盐浓度等环境因子的适宜水平完全不同，本次调查的结论也反应出这一特征。三角棘原甲藻的适宜水温是 $18.5\text{—}19.5^\circ\text{C}$ ，适宜盐度为 $29.58\text{‰}\text{—}30.95\text{‰}$ ；而中肋骨条藻的适宜水温是 $28.2\text{—}28.7^\circ\text{C}$ ，适宜盐度是 $31.66\text{‰}\text{—}32.95\text{‰}$ 。三角棘原甲藻和中肋骨条藻对氮磷营养盐的需求也不一致。三角棘原甲藻赤潮期间，

表 4 不同季节浮游植物群落的生态指数
Tab. 4 Community indexes of phytoplankton in different seasons

	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
丰富度 D	1.16	1.18	0.58	0.19
Gini index				
多样性 H'	1.14	0.70	1.75	0.32
Shannon-Wiener index				
均匀度 J'	0.32	0.20	0.78	0.22
Pielou index				

表 5 各项常规水质参数的季节变化及平均值
Tab. 5 Seasonal variations and average values of chemical parameters

站 位	水 温	pH	盐 度	溶 解 氧	磷 酸 盐	DIN (μg/L)	N/P	
Spot	Water temperature (°C)		Salinity (‰)	DO (mg/L)	Phosphate (μg/L)			
春 Spring	1	19.1	8.47	30.215	9.79	4	158	39.50
	2	19.1	8.5	30.275	9.8	3	115	38.33
	3	18.9	8.37	30.953	8.62	3	165	55.00
	4	19.5	8.46	30.921	9.86	3	61	20.33
	5	19.5	8.42	30.894	9.29	3	96	32.00
	6	19.5	8.4	30.836	8.94	3	126	42.00
	7	20	8.43	30.406	9.91	3	118	39.33
	8	19.2	8.47	30.344	9.62	5	72	14.40
	9	19.2	8.42	30.432	9.14	5	126	25.20
	平均值 Average	19.33	8.44	30.59	9.44	3.56	115.22	34.01
夏 Summer	1	28.3	8.31	31.659	8.66	6	74	12.33
	2	28.2	8.27	32.255	7.7	4	42	10.50
	3	28.3	8.27	32.647	6.74	6	38	6.33
	4	28	8.25	33.228	7.24	6	55	9.17
	5	28.6	8.28	32.456	8.14	3	46	15.33
	6	28.5	8.26	32.947	7.82	2	10	5.00
	7	28	8.22	33.399	6.6	5	28	5.60
	8	28.5	8.31	31.953	8.1	3	9	3.00
	9	28.7	8.51	31.688	9.12	2	6	3.00
	平均值 Average	28.34	8.29	32.47	7.79	4.11	34.22	7.81
秋 Autumn	1	22.2	8.14	30.441	7.16	5	205	41.00
	2	22.2	8.14	30.613	7.29	3	151	50.33
	3	22.3	8.15	30.764	7.06	9	172	19.11
	4	22.5	8.15	30.771	7.16	4	158	39.50
	5	22.6	8.17	30.813	7.13	6	159	26.50
	6	22.6	8.17	30.82	7	7	160	22.86
	7	22.5	8.16	30.749	7.02	3	137	45.67
	8	22.3	8.18	30.627	6.99	5	136	27.20
	9	22.2	8.18	30.646	7.18	9	174	19.33
	平均值 Average	22.38	8.16	30.69	7.11	5.67	161.33	32.39
冬 Winter	1	12.3	8.08	29.948	9.78	11	446	40.55
	2	11.7	8.1	29.997	8.97	12	397	33.08
	3	11.8	8.1	30.03	9.05	16	458	28.63
	4	11.9	8.09	30.192	9.06	13	377	29.00
	5	11.9	8.09	30.194	8.95	15	397	26.47
	6	11.8	8.1	30.191	8.92	16	361	22.56
	7	11.9	8.11	29.672	9.23	3	439	146.33
	8	11.8	8.1	29.937	8.94	15	437	29.13
	9	11.8	8.1	30.043	8.92	14	389	27.79
	平均值 Average	11.88	8.09	30.02	9.09	12.78	411.22	42.62
年平均 Annual average	20.48	8.25	30.94	8.36	6.53	180.49	29.21	

藻细胞对磷酸盐的需求高于氮盐, 因此, 导致水体中 N/P 值显著升高, 各站位 N/P 值的平均值是 34.01, 明显高于 16 的 Redfield 值。中肋骨条藻赤潮期间, 藻细胞对氮盐的需求则高于磷酸盐, 并导致水体中 N/P 值降低, 平均值为 7.81, 显著低于 Redfield 值。

在甲藻和硅藻赤潮期间, 水体中营养盐水平的高低从另一个方面也反应出甲藻和硅藻种类之间不同的磷营养生理特征。南麂海域的氮盐水平较高, 不存在氮盐缺乏的情况, 因此, 磷酸盐水平的高低对浮游植物群落变化的影响极为显著。在位于三角棘原甲藻赤潮内的春季调查期, 各站位水体中磷酸盐含量 3—5 $\mu\text{g/L}$ 之间, 平均值仅为 3.56 $\mu\text{g/L}$ 。然而, 在如此低的磷营养水平条件下, 原甲藻赤潮依然能够持续。这是因为, 原甲藻细胞储备氮、磷营养物质的能力远高于硅藻种类^[9], 因此, 它们可以在低营养条件下仍保持较好的生长状态、较快繁殖速度, 并在一段时期内维持这种状态, 不同种类的藻细胞营养储存能力的差异对决定藻类种群的生态对策及其种群在群落中的竞争结局都有重要的影响^[9—13]。原甲藻在生态策略上的这一特点使得它们可以在低磷营养的环境中下成为优势种。

参考文献:

- [1] Cai W G, Li C H, Jia X P, *et al.* Multivariate analysis and evaluation on the community structure of phytoplankton in west Guangdong waters [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, **31**(2): 155—161 [蔡文贵, 李纯厚, 贾晓平, 等. 粤西海域浮游植物群落结构特征的多元分析与评价. 水生生物学报, 2007, **31**(2): 155—161]
- [2] Ji H H, Ye S F, Liu X, *et al.* The species composition and diversity of zooplankton in Nanji Islands National Nature Reserve [J]. *Biodiversity Science*, 2006, **14**(3): 206—215 [纪焕红, 叶属峰, 刘星, 等. 南麂列岛海洋自然保护区浮游动物的物种组成及其多样性. 生物多样性, 2006, **14**(3): 206—215]
- [3] Zhang X H, Zhou Y, Long H, *et al.* Investigation on zooplankton in Nanji Marine Protected Area [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2006, **41**(4): 83—86 [张晓辉, 周燕, 龙华, 等. 南麂列岛海洋保护区浮游动物调查. 动物学杂志, 2006, **41**(4): 83—86]
- [4] Gao A G, Zeng J N, Chen Q Z, *et al.* Time and space distribution of Molluscs of intertidal zone in Nanji Archipelago Marine Nature Reserve [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, **29**(2): 105—111 [高爱根, 曾江宁, 陈全震, 等. 南麂列岛海洋自然保护区潮间带贝类资源时空分布. 海洋学报, 2007, **29**(2): 105—111]
- [5] Ji H H, Ye S F, Liu X, *et al.* Ecological characteristics of phytoplankton and cause for frequent occurrence of dinoflagellate red tide in the Nanji Islands Sea Area [J]. *Advances in Marine Science*, 2008, **26**(2): 234—242 [纪焕红, 叶属峰, 刘星, 等. 南麂列岛海域浮游植物生态特征及甲藻赤潮频发原因. 海洋科学进展, 2008, **26**(2): 234—242]
- [6] Grasshoff K, Kremling K, Ehrhardt M. Methods of Seawater Analysis (Third Edition) [M]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH. 1999. 203—223
- [7] Zhang C S, Wang J T, Zhu D D, *et al.* The preliminary analysis of nutrients in harmful algal blooms in the East China Sea in the spring and summer of 2005 [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, **30**(2): 153—159 [张传松, 王江涛, 朱德弟, 等. 2005 年春季东海赤潮过程中营养盐作用初探. 海洋学报, 2008, **30**(2): 153—159]
- [8] Zhang X F, Liu Y J. Advances in the biological study of Dinoflagellate *Prorocentrum donghaiense* Lu [J]. *Ecology and Environment*, 2007, **16**(3): 1053—1057 [张秀芳, 刘永健. 东海原甲藻生物学研究进展. 生态环境, 2007, **16**(3): 1053—1057]
- [9] Lü S H, Li Y. Nutritional storage ability of four harmful algae from the East China Sea [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2006, **6**(3): 439—444 [吕颂辉, 李英. 我国东海 4 种赤潮藻的细胞氮磷营养储存能力对比. 过程工程学报, 2006, **6**(3): 439—444]
- [10] Anderson T, Schartau A K L, Paasche E. Quantifying external and internal nitrogen and phosphorus pools as well as nitrogen and phosphorus supplied through remineralization, in coastal marine plankton by means of a dilution technique [J]. *Marine Ecological Progress Series*, 1991, **69**: 67—80
- [11] Kilham P, Hecky R E. Comparative ecology of marine and freshwater phytoplankton [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**: 776—795
- [12] Dortsch Q, Clayton J J R, Thoresen S S. Species differences in accumulation of nitrogen pools in phytoplankton [J]. *Marine Biology*, 1984, **81**: 237—250
- [13] Thompson P A, Oh H M, Rhee G Y. Storage of phosphorus in nitrogen-fixing *Anabaena flos-aquae* (Cyanophyceae) [J]. *Journal of Phycology*, 1994, **30**: 267—273

SPECIES DIVERSITY AND DISTRIBUTION OF PHYTOPLANKTON IN NANJI ISLANDS NATIONAL NATURE RESERVE

LI Yang¹, LI Huan¹, LÜ Song-Hui^{1,2}, JIANG Tian-Jiu^{1,2}, XIAO Yun-Pu³ and CHEN Shun³

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Healthy and Safe Aquaculture, Key Laboratory of Ecology and Environmental Science in Guangdong Higher Education, College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2. Research Center for Harmful Algae and Aquatic Environment, College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3. Pingyang Oceanic and Fishery Bureau, Pingyang 325400, China)

Abstract: The microscopic planktonic algae are the main primary producers in the marine ecosystem and play a very important role in marine food webs. They are critical food for filter feeding bivalve shellfish, such as oysters, mussels, scallops, clams, as well as the larvae of commercially important crustaceans and finfish. In normal cases, the proliferation of planktonic algae is beneficial for aquaculture and wild fisheries operations. However, in some cases, algal blooms caused by toxic or harmful algal species can have a negative effect, causing heavy losses to aquaculture, the fisheries industry and tourism operations, and having major environmental and human health impacts. For better understanding and assessment about the marine ecosystem in Nanji Islands National Nature Reserve, its phytoplankton community was characterized based on four cruise surveys carried out from May 2006 to February 2007, which may support many useful data and provide helpful guides for the ecological studies and protection of Nanji Islands National Nature Reserve. Species composition, seasonal variations and vertical distribution of microalgae as well as several chemical parameters were investigated. And the connections between microalgae dynamics and several environmental factors, such as water temperature, salinity, nitrogen and phosphorus nutrition concentration, were analyzed. A total of 80 species were identified, belonging to four phyla. These taxa could be classified into three ecotypes, in which the eurythermal species were dominant. *Prorocentrum triestinum* and *Skeletonema costatum* were the absolutely dominant species in spring and summer respectively and the dominant species in autumn and winter were various and polytype. Up to 71.25 percent of total taxa, 57 red tide causative species were observed, in which, diatom species were dominant and more harmful/toxic taxa were dinoflagellate. The blooms caused by *P. triestinum* and *S. costatum* occurred in spring and summer respectively. Decline trend of species number indicated from spring, summer, autumn to winter. Annual average cell abundance was 1.03×10^6 cells/L. The cell abundance reached the peaks in spring and summer, both nearly up to 2×10^6 cells/L, and their highest richness occurred in the near-shore waters where located at the north-west to Nanji Island. With low cell abundances about 10^3 cells/L in autumn and winter, their richness centers shifted to the near-shore waters where situated at the south-east to Nanji Island. Shannon-Wiener index (H') peaked in autumn (1.75) and minimized in winter (0.32). Using correlate analysis by SPSS, it is revealed that there is no obvious correlation between microalgae dynamics and any environmental factors. During the bloom of *P. triestinum* in spring, the ratio of nitrogen to phosphate nutrition maximized (34.01) because more phosphate nutrition has been absorbed by dinoflagellate cells than nitrogen nutrition. And the reverse situation occurred during the bloom of *S. costatum* in summer, the ratio minimized (7.81) because more nitrogen nutrition has been consumed by diatom cells. It was caused by the distinct nutrient habits of different bloom causative taxa in different seasons.

Key words: Nanji Islands; Phytoplankton; Species diversity; Ecological distribution