

初秋南沙群岛海域网采浮游植物群落特征及其与环境因子的关系*

戴明¹ 刘华雪¹ 廖秀丽¹ 李开枝² 闫家国¹ 齐占会¹ 黄洪辉^{1**}

(¹中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室/广东省渔业生态环境重点实验室, 广州 510300; ²中国科学院南海海洋研究所, 海洋生物资源可持续利用重点实验室, 广州 510301)

摘要 根据2011年8—9月南沙群岛海域的生物和环境调查资料,对网采浮游植物的群落特征及其与环境因子的关系进行分析.结果表明:在鉴定的3门34属113种网采浮游植物中,甲藻门和硅藻门种类各占57.5%和40.7%,其中硅藻门的角藻属种类最多,占30.1%.网采浮游植物平均丰度为 $2.12 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$,丰度高值区出现在北部礼乐滩多涡区域和南部万安气旋涡附近海域.蓝藻门束毛藻属是网采浮游植物的主要功能群,占海域平均丰度的77.0%.主要优势种为铁氏束毛藻、红海束毛藻和夜光梨甲藻.优势种(类)存在较明显的空间差异,蓝藻门在 S_3 、 S_5 、 S_6 和 $S_{10} \sim S_{14}$ 站占优势;甲藻门在中部 S_4 、 $S_7 \sim S_9$ 站占优势,硅藻门在南部 S_1 和 S_2 站占优势.网采浮游植物多样性和均匀度指数分别为3.10和0.62.影响浮游植物群落特征的重要环境因子有盐度、水温、铵氮、亚硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐,以及南沙中尺度气旋涡和南沙西部沿岸流.典范对应分析排序图较好地显示了浮游植物和环境因子之间的关系.

关键词 浮游植物 环境因子 典范对应分析 南沙群岛

文章编号 1001-9332(2013)12-3553-08 **中图分类号** Q948.1; X171 **文献标识码** A

Characteristics of net phytoplankton community and their relationships to environmental factors in the waters around Nansha Islands. DAI Ming¹, LIU Hua-xue¹, LIAO Xiu-li¹, LI Kai-zhi², YAN Jia-guo¹, QI Zhan-hui¹, HUANG Hong-hui¹ (¹Ministry of Agriculture Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization/Guangdong Province Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Guangzhou 510300, China; ²Key Laboratory of Marine Bio-resources Sustainable Utilization, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(12): 3553-3560.

Abstract: Based on samples collected in the waters around Nansha Islands from August 25 to September 28, 2011, the characteristics of net phytoplankton community and their relationships to environmental factors were investigated. A total of 113 species, belonging to 34 genera of 3 phyla were identified, among which 57.5% belonged to Pyrrophyta and 40.7% belonged to Bacillariophyta. *Ceratium* in Pyrrophyta had the most species accounting for 30.1% of the 113 species. The average abundance of net phytoplankton was $2.12 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$ and high abundances were encountered in the complex gyre adjacent to Reed Tablemount and in the Cyclonic Gyre adjacent to Wan'an Tan. *Trichodesmium* in Cyanophyta was the dominant functional group, taking up 77.0% of the total net phytoplankton abundance. *Trichodesmium thiebautii*, *T. erythraeum* and *Pyrocystis noctiluca* were the major dominant species. The dominant species varied with locations. Cyanophyta widely dominated at stations 3, 5, 6 and 10-14, Pyrrophyta were the dominant phytoplankton in the central locations at stations 4 and 7-9, while Bacillariophyta dominated only at the southernmost stations 1 and 2. The values of Shannon index and Pielou evenness index of net phytoplankton community were 3.10 and 0.62, respectively. The salinity, water temperature, contents of ammonium, nitrite, phosphate and silicate, as well as mesoscale gyres and the west Nansha coastal current were

* 农业部财政重大专项(NFZX2013)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2008TS03)资助.

** 通讯作者. E-mail: jxhuanghh@21cn.com

2013-02-27 收稿, 2013-09-25 接受.

the important environmental factors affecting the characteristics of net phytoplankton community. The ordination plots by canonical correspondence analysis could well display the characteristics of net phytoplankton community and their relationships to environmental factors.

Key words: phytoplankton; environmental factor; canonical correspondence analysis; Nansha Islands.

南沙群岛位于南海南部,受地形和季风驱动,中尺度涡频发,呈多涡环流结构^[1-4],生境复杂.其复杂的生态环境孕育了多样的生物组成^[5].其中浮游植物是海洋的主要初级生产者,其群落特征能反映出海洋环境的现状^[6-8].它与水温、盐度、水团、营养盐和下行摄食等因素密切相关.20世纪80年代以来在南沙海域开展了多次生态调查,结果表明,其网采浮游植物群落具有明显的季节性和区域性变化特征^[9-13].本次调查在9月季风转换期,对目前南沙海域网采浮游植物秋季资料相对缺乏的现状起到了补充和完善的作用.采用典范对应分析通过直观地给出浮游植物、站位和环境因子的排序图,量化浮游植物群落与环境因子之间的整体相关性,以期深入了解南沙海域网采浮游植物与环境之间的关系,为南沙海域海洋生态学研究提供基础资料.

1 研究区域与研究方法

1.1 调查站位和时间

2011年8月25日—9月28日“南锋号”科学考察船对南沙海域(6°—11°N, 110°—116°E)进行了生物和环境调查,共设置14个调查站位(图1).

1.2 样品采集和处理

网采浮游植物使用小型浮游生物网(网口直径37 cm,网口面积0.1 m²,网目孔径77 μm)挂上重锤由200 m至表层垂直拖网一次,获得的样品用甲醛固定保存(最终浓度2%),带回实验室静置沉淀浓

缩至40~100 mL,取0.1 mL浓缩样品在Leica DM-LB生物显微镜下进行种类鉴定和计数^[14].水温(T)和盐度(S)用CTD(Sea-Bird)测得.叶绿素a(Chl a)和营养盐(NH₄⁺、NO₃⁻、NO₂⁻、PO₄³⁻、SiO₃²⁻)水样采集按照《海洋调查规范》^[14]进行,在表层、25、50、75、100、150和200 m层分层采样,获得的水样带回实验室测定,叶绿素a采用Turner Designs 10荧光法测定,营养盐用Lachat QC 8500流动注射比色法测定.

1.3 数据分析

浮游植物群落指数采用Shannon多样性指数、Pielou均匀度指数和优势度指数^[15].采用Canoco for Windows 4.5软件进行典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA).首先筛选出现频率(≥3个站位)和丰度比例(≥1%)的网采浮游植物种类数据,以保证进入CCA排序的种类能反映出整个网采浮游植物群落的特征.其次将浮游植物种类数据与不同水层的水温、盐度、叶绿素a和营养盐等环境数据经过lg(X+1)标准化转换.然后将种类数据和环境数据经过CCA模块分析,绘制出种类、站位和环境因子的排序图^[16-18].浮游植物的种类数、丰度和环流的平面分布分析采用ArcGIS 10.0软件的地理统计模块.方差分析在SPSS 17统计软件上完成.

2 结果与分析

2.1 网采浮游植物种类组成

本次调查南沙海域共鉴定出网采浮游植物3门34属113种(包含26个变种和变型)(表1).其中,甲藻门12属65种,占总种类数的57.5%;硅藻门21属46种,占40.7%;蓝藻门1属2种,占1.8%.角藻属种类最多,出现34种(占30.1%),其次是根管藻属,出现12种(占10.6%).其他出现种类较多的属有:圆筛藻属(9种)、原多甲藻属(7种)、双管藻属(5种)和鸟尾藻属(5种).调查区域种类分布比较分散,出现频率<30%的种类数占总种类数的54.9%,出现频率≥50%的种类占23.9%.

暖水种和高盐种是南沙海域的主要生态类型,

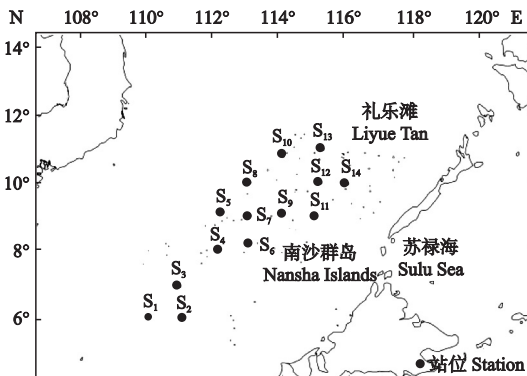


图1 南沙群岛海域调查站位分布

Fig. 1 Distribution of sampling stations in the waters around Nansha Islands.

表 1 网采浮游植物种类组成

Table 1 Species compositions of net phytoplankton

类群 Phyla	属 Genera	种 Species	主要属 Major genera	适温性 Thermophily			适盐性 Halophilism		
				暖水种 Warm water species	广温种 Eurythermic species	温带种 Temperate species	高盐种 Polystenohaline species	近岸种 Neritic species	广盐种 Euryhaline species
甲藻门 Pyrrophyta	12	65	角藻属 34 种、原多甲藻属 7 种、 双管藻属 5 种、乌尾藻属 5 种	58	2	2	42	7	9
硅藻门 Bacillariophyta	21	46	根管藻属 12 种、圆筛藻属 9 种	28	11	2	18	12	9
蓝藻门 Cyanophyta	1	2		2	0	0	2	0	0
总计 Total	34	113*		88	13	4	62	19	18

* 包括部分未鉴定到种或无法确定其生态类型的种类 Including certain species unable to be identified to species levels or their habits could not be determined.

分别占 77.9% 和 54.9% (表 1). 出现频率 $\geq 50\%$ 的种类中, 暖水种和高盐种分别占 70.4% 和 51.9%; 丰度 $\geq 10\%$ 的种类中, 暖水种和高盐种分别为 100% 和 71.4%. 种类组成体现了南沙海域典型的热带外海生物区系特征.

2.2 网采浮游植物丰度

网采浮游植物丰度变化范围在 $0.06 \times 10^4 \sim 14.50 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均为 $2.13 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$. 丰度高值区出现在北部礼乐滩附近 (S_{10} 、 $S_{12} \sim S_{14}$ 站), 其丰度均值约为海域平均丰度的 3 倍; 次高值区出现在 S_3 站, 其丰度 ($2.20 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$) 约等于海域平均值; 较低丰度出现在中部的 $S_4 \sim S_9$ 和 S_{11} 站 ($0.14 \times 10^4 \sim 0.58 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$) 和南部的 S_1 和 S_2 站 (0.11×10^4 和 $0.06 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{m}^{-3}$). 整个调查范围内蓝藻门、硅藻门和甲藻门丰度各占 77.0%、15.3% 和 7.7%. 不同站位的丰度组成变化较大, S_1 和 S_2 站硅藻门丰度占优势, 分别为 61.8% 和 62.8%; S_4 、 $S_7 \sim S_9$ 站甲藻门丰度占优势, 为 65.2% \sim 81.4%;

其他站点蓝藻门丰度占优势, 为 51.1% \sim 87.1%.

2.3 网采浮游植物多样性

各站点网采浮游植物种类数在 19 \sim 59 种, S_{13} 站种类数最多; S_3 、 S_7 和 S_{10} 站种类数在 44 \sim 46 种; S_1 、 S_2 和 S_4 站种类较少 (19 \sim 26 种), 其余调查站点种类在 30 \sim 39 种. 多样性指数范围在 1.75 \sim 4.96, 平均为 3.10. 均匀度指数范围在 0.35 \sim 0.90, 平均为 0.62. S_1 、 S_2 、 S_4 、 $S_7 \sim S_9$ 站多样性和均匀度指数均明显高于其他以蓝藻门丰度占优势的站点.

2.4 典范对应分析 (CCA) 结果

典范对应分析结果显示了在环境梯度下网采浮游植物种类的分布特征、站位的聚类特征、种类与环境及站位之间的关系 (图 2). 入选 CCA 分析的网采浮游植物种类见表 2.

2.4.1 网采浮游植物分布特征

1) 相同属的种类在 CCA 坐标中占据相似的生态位, 且相对位置较近. 例如: 蓝藻门束毛藻属 (sp01 和 sp02) 集中在坐标原点左上区域, 硅藻 (sp61、sp62、sp81、sp91、sp94 和

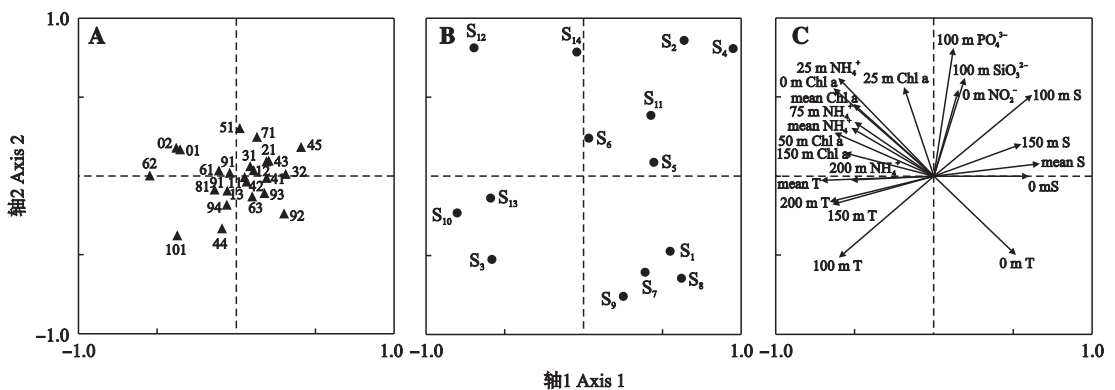


图 2 网采浮游植物种类、调查站位和环境因子的排序图

Fig. 2 CCA triplots of net phytoplankton species, sampling stations and environmental factors.

A: 种类 Species; B: 站位 Stations; C: 环境因子 Environmental factors. T: 温度 Temperature; S: 盐度 Salinity.

表 2 入选 CCA 排序的网采浮游植物种类

Table 2 Species of net phytoplankton included for CCA

类群 Phyla	代码 Code	种类 Species	平均丰度 Average abundance (cell · m ⁻³)	丰度 Abundance (%)	出现频率 Frequency of occurrence (%)
蓝藻 Cyanophyta	sp01	铁氏束毛藻 <i>T. thiebautii</i>	8275	38.9	57.1
	sp02	红海束毛藻 <i>T. erythraeum</i>	8093	38.1	50.0
甲藻 Pyrrophyta	sp11	夜光梨甲藻 <i>P. noctiluca</i>	446	2.1	100
	sp12	浅弧梨甲藻 <i>P. gerbautii</i>	30	0.1	78.6
	sp13	梭梨甲藻 <i>P. fusiformis</i>	137	0.6	85.7
	sp21	二齿双管藻 <i>A. bidentata</i>	54	0.3	85.7
	sp31	中距鸟尾藻 <i>O. thurnii</i>	64	0.3	100
	sp32	美丽鸟尾藻 <i>O. splendidus</i>	29	0.1	64.3
	sp41	锚角藻美丽变种亚美变型 <i>C. tripos</i> var. <i>pulchellum</i> f. <i>semipulchellum</i>	76	0.4	85.7
	sp42	三叉角藻 <i>C. trichoceros</i>	114	0.5	78.6
	sp43	马西里亚角藻具刺变种 <i>C. massiliense</i> var. <i>armatum</i>	26	0.1	71.4
	sp44	大角角藻原变种 <i>C. macroceros</i> var. <i>macroceros</i>	42	0.2	50.0
	sp45	歧分角藻原变种 <i>C. carriense</i> var. <i>carriense</i>	30	0.1	57.1
硅藻 Bacillariophyta	sp51	紧挤角毛藻 <i>C. coarctatus</i>	184	0.9	64.3
	sp61	笔尖形根管藻长棘变种 <i>R. styliformis</i> var. <i>longispina</i>	56	0.3	78.6
	sp62	覆瓦根管藻 <i>R. imbricata</i>	181	0.9	35.7
	sp63	距端根管藻 <i>R. calcar-avis</i>	114	0.5	92.9
	sp71	美丽漂流藻 <i>Planktoniella formosa</i>	53	0.3	71.4
	sp81	热带环刺藻 <i>Gossleriella tropica</i>	104	0.5	71.4
	sp91	圆筛藻属一种 <i>Coscinodiscus</i> sp.	74	0.3	85.7
	sp92	可疑圆筛藻 <i>C. suspectus</i>	20	0.1	50.0
	sp93	细弱圆筛藻 <i>C. subtilis</i>	58	0.3	50.0
	sp94	中心圆筛藻 <i>C. centralis</i>	64	0.3	78.6
	sp101	大角管藻 <i>C. bicornis</i>	116	0.5	42.9

sp101) 主要集中在轴 1 (axis 1) 负方向, 甲藻 (sp11、sp12、sp21、sp31、sp32、sp41 ~ sp43 和 sp45) 主要分布在轴 1 正方向. 梨甲藻属 (sp11 ~ sp13)、角藻属 (sp41 ~ sp43 和 sp45)、鸟尾藻属 (sp31 ~ 32) 和根管藻属 (sp61 和 sp62) 等相同属占据的生态位亦较接近.

2) 靠近 CCA 坐标原点的种类分布范围广, 如出现频率达 100% 的夜光梨甲藻 (*Pyrocystis noctiluca*) sp11 和中距鸟尾藻 (*Ornithocercus thurnii*) sp31 离坐标中心较近; 而分布在 CCA 坐标外围的覆瓦根管藻 (*Rhizosolenia imbricata*) sp62、可疑圆筛藻 (*Coscinodiscus suspectus*) sp92 和大角管藻 (*Cerataulina bicornis*) sp101 出现频率相对较低. 其他出现频率较高的种类还有: 梭梨甲藻 (*P. fusiformis*)、锚角藻美丽变种亚美变型 (*Ceratium tripos* var. *pulchellum* f. *semipulchellum*)、二齿双管藻 (*Amphisolenia bidentata*) 和距端根管藻 (*R. calcar-avis*) 等 (表 2).

3) 浮游植物种类与站位的连接距离大小代表着相应站位中该种类的多度, 距离越短多度最大, 反之越小. 铁氏束毛藻 (*Trichodesmium thiebautii*) sp01 和红海束毛藻 (*T. erythraeum*) sp02 是本次调查的优势种, 优势度分别为 0.195 和 0.190, 占海域网采浮

游植物总丰度的 38.9% 和 38.1%. 两者在轴 1 负方向位置的所有站位中丰度较高; 在轴 1 正方向位置的站位中除了距离原点较近的 S₅、S₆ 和 S₁₁ 站有较低丰度的铁氏束毛藻或红海束毛藻出现外, 其他站位均无束毛藻出现. 铁氏束毛藻在不同站位的丰度百分比在 20.6% ~ 71.9%. 红海束毛藻在不同站位的丰度百分比在 16.8% ~ 54.6%. 作为第三优势种的夜光梨甲藻 sp11 丰度在 S₃ 和 S₁₃ 站较高, 而丰度百分比则以 S₁、S₄、S₇ ~ S₉ 站较高 (12.7% ~ 30.8%), 这 5 个站位均未出现束毛藻. 除上述优势种外, 占站位丰度 10% 以上的种类还有: 梭梨甲藻 sp13、距端根管藻 sp63、笔尖形根管藻长棘变种 (*Rhizosolenia styliformis* var. *longispina*) sp61 和紧挤角毛藻 (*Chaetoceros coarctatus*) sp51. 梭梨甲藻在 S₉ 站丰度百分比最高达 14.5%. 距端根管藻在 S₁ 站丰度百分比最高达 25.5%. 紧挤角毛藻和笔尖形根管藻长棘变种在 S₂ 站丰度百分比最高, 分别占 30.2% 和 20.9%.

2.4.2 站位聚类分析结果 在 CCA 排序图中, 调查站位首先被轴 1 分成两组: S₃、S₁₀、S₁₂ ~ S₁₄ 为组 I, S₁、S₂、S₄ ~ S₉ 和 S₁₁ 为组 II (表 3). 方差分析显示,

表 3 调查站位分组及其网采浮游植物群落指数
Table 3 Groups of sampling stations and their indices of net phytoplankton community

分组 Group	站位 Stations	种类数 Species	平均丰度 Average abundance ($\times 10^4$ cell $\cdot m^{-3}$)	Shannon 指数 Shannon index	Pielou 均 匀度指数 Pielou evenness index
I	S ₃ , S ₁₀ , S ₁₂ ~ S ₁₄	33 ~ 59	5.46	2.18	0.40
II	S ₁ , S ₂ , S ₄ ~ S ₉ , S ₁₁	19 ~ 46	0.28	3.61	0.74

调查站位组 I 和组 II 的网采浮游植物种类数、丰度、多样性指数、均匀度指数和环境因子水温(表层和水柱平均)、盐度(表层)、叶绿素 a(0、100 m 层和 0 ~ 200 m 层水柱平均)、铵态氮(25 m 层)、硝酸盐(100 m 层)、硅酸盐(75 m 层和 0 ~ 200 m 层水柱平均)含量均有显著差异。

3 讨 论

3.1 南沙海域网采浮游植物历史资料对比

从表 4 可以看出,南沙海域网采浮游植物种类在 1987 年 5 月和 1999 年 7 月因调查范围较广,调查种类数高于其他站位,本次调查种类数与剩余的其他航次种类数较接近^[9-13]。1987 年 5 月调查的结果较特殊,以硅藻门种类为主(78.7%);其他航次

甲藻门种类数大于或约等于硅藻门,甲藻门百分比在 43.5% ~ 65.9%。尤其以 1997 年 11 月调查的甲藻门种类数百分比最大。本次调查中甲藻门种类数占 57.5%,处于中间水平,并且出现种类最多的属仍为角藻属(占 30.1%)。角藻属多年(1993 年 5 月和 12 月、1999 年 4 月、1999 年 7 月和 2011 年 8—9 月)成为南沙海域出现种类最多的属(33 ~ 56 种,占种类数的 25.0% ~ 33.0%)^[11-12]。此外,本次调查种类数第二位的根管藻属也是各次调查中出现种类较多的属^[11-12]。不同的是角毛藻属在春、夏、冬季均曾经出现过较多种类(17 ~ 40 种)^[9,11-12],但在本次秋季调查中仅出现 3 种。秋季角毛藻属种类少是否具有普遍意义需要进一步验证。

夜光梨甲藻、梭梨甲藻、三叉角藻、距端根管藻、笔尖形根管藻和紧挤角毛藻一直是南沙海域常见的优势种,也是本次调查的主要种类。同时,不同季节间优势种存在波动,角毛藻、根管藻、伪菱形藻和海绵藻在春、夏季的优势趋势较明显,甲藻门优势种在秋冬之交出现的相对较多。曾在 20 世纪 80 年代成为优势种的垂缘角毛藻、短叉角毛藻、劳氏角毛藻、双孢突角毛藻英国变种、大西洋角毛藻那不勒斯变种和中肋骨条藻在此后的调查中不再占据优势地

表 4 南沙群岛网采浮游植物历史资料对比

Table 4 A comparison of net phytoplankton in the waters around Nansha Islands with historical surveys

调查时间 Sampling date	水层 Water layer (m)	种类数 Species No.	甲藻种类数 Species No. of pyrrophyta	硅藻种类数 Species No. of bacillariophyta	优势种 Dominant species	平均丰度 Average abundance ($\times 10^4$ cell $\cdot m^{-3}$)	调查范围 Survey area	文献 Reference
2011-08—09	0 ~ 200	113	65(57.5%)	46(40.7%)	铁氏束毛藻、红海束毛藻和夜光梨甲藻	2.13	6°—11° N, 110°—116° E	本研究 This study
1999-07	0 ~ 75	172	89(51.7%)	83(48.3%)	距端根管藻、紧挤角毛藻、尖根管藻、二齿双管藻、笔尖形根管藻粗径变种、三叉角藻、笔尖形根管藻、梭梨甲藻	1.03	4.79°—10.54° N, 108.33°—115.65° E	[12]
1999-04	0 ~ 75	109	51(46.8%)	58(53.2%)	菱形海线藻、二齿双管藻、紧挤角毛藻、距端根管藻、二裂角藻、三叉角藻	0.73	5.58°—9.96° N, 108.68°—113.75° E	[12]
1997-011	0 ~ 75	121	65(64.4%)	36(35.6%)	三叉角藻、夜光梨甲藻、短角角藻、梭梨甲藻、美丽乌尾藻	0.07	5°59'—10°25' N, 110°—116°48' E	[13]
	75 ~ 150		58(65.9%)	30(34.1%)	太阳漂流藻、夜光梨甲藻、三叉角藻、具尾鳍藻	0.044		
1993-12	0 ~ 50	132	61(46.2%)	63(47.7%)	菱形海线藻、距端根管藻、夜光梨甲藻、三叉角藻	1.12	5°—12° N, 108°30'—114°15' E	[11]
1993-05	0 ~ 70	103	52(50.5%)	40(38.8%)	距端根管藻、笔尖形根管藻、翼根管藻纤细型、紧挤角毛藻、马西里角藻、钩梨甲藻	0.8	9°15'—12° N, 112°45'—115°30' E	[11]
1987-05	0 ~ 75	155	25(16.1%)	122(78.7%)	柔弱伪菱形藻、垂缘角毛藻、菱形海线藻、中肋骨条藻、短叉角毛藻、尖刺伪菱形藻、劳氏角毛藻、双孢突角毛藻英国变种	84	3°33'—8°43' N, 108°44'—116°26' E	[9]
	75 ~ 150				与 0 ~ 75 m 层大致相同	10		
	150 ~ 250				柔弱伪菱形藻、尖刺伪菱形藻、短叉角毛藻、中肋骨条藻	3		
1984—1988	0 ~ 250	391	170(43.5%)	207(52.9%)	菱形海线藻、大西洋角毛藻那不勒斯变种	5.6 ~ 8.3	4°—12° N, 108°—118° E	[10]

位.除1997年11月调查中以甲藻门优势种占主导外,其他历史调查大多以硅藻门为主^[9-12].然而在本次调查中,铁氏束毛藻和红海束毛藻成为了主导优势种,这是否与季节有关值得进一步研究.据报道,铁氏束毛藻和红海束毛藻是南沙海域的常见种^[19-20],但是否成为主导优势种尚未见报道.南沙海域所在的热带东南亚海域是全球大洋束毛藻丰度较高的区域之一^[20].研究表明,束毛藻广泛分布在热带和亚热带大洋的真光层中^[21],是热带、亚热带大洋的主要固氮生物.它能够把大气中的氮气转换为浮游植物所需要的化合态氮(NH_4^+),固氮量约为 $80 \text{ Mt} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[22],是这一类海域新氮的重要来源和新生产力的主要贡献者^[23].本次调查的束毛藻丰度与25 m层 NH_4^+ 呈显著正相关,这为束毛藻是南沙海域新氮的重要来源提供了佐证.铁是束毛藻合成固氮酶必不可少的元素,与其他浮游生物相比,固氮生物对铁的需求更高^[24],因此铁也是影响束毛藻分布的主要环境因子^[25].Duce等^[26]的研究显示,热带东南亚海域受亚洲大陆的影响,铁的沉降通量较高.并且9月在西南季风影响下,南沙西部沿岸流向东北方向输送至越南东部变成向东和向东北两个分支^[1,4],东向分支所在位置正好是本次调查中束毛藻丰度高值区,推测束毛藻优势种的形成与沿岸流带来的营养盐和微量元素有关.

网采浮游植物平均丰度以1984—1988年的调查较高,其他航次调查丰度相对接近(表4).经分析发现,1984—1988年的调查中,海线藻、角毛藻、伪菱形藻和骨条藻等硅藻为优势种,个体小,丰度较高.此后调查中大多以个体较大的硅藻(根管藻、漂流藻)或甲藻(梨甲藻、角藻、鳍藻和双管藻)为优势种,丰度较低,尤其以1997年11月的调查中,丰度最低,且以甲藻丰度最占优势(0~75 m层占77.0%、75~150 m层占66.7%)^[13],这可能与1997—1998年出现的史上最强的厄尔尼诺现象有关.Avaria等^[27]和林更铭等^[28]对北智利和台湾海峡的研究也发现,厄尔尼诺现象造成浮游植物丰度明显下降的同时,优势种组成也发生了变化.

3.2 网采浮游植物与环流的关系

从网采浮游植物种类数和丰度与环流的叠加效果图分析(图3),海洋环流交汇的区域(S_3 、 S_7 、 S_{10} 和 S_{13})浮游植物种类数多.礼乐滩附近的浮游植物丰度高值区是一个复杂的多涡区域^[4],万安气旋涡附近出现丰度次高值.Ning等^[19]在1998年夏季的调查中也发现,万安气旋涡附近是一个高营养盐和高

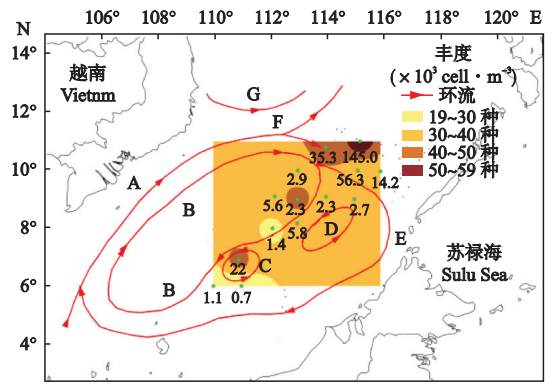


图3 南沙群岛海域网采浮游植物种类数、丰度和环流分布^[1,4]

Fig. 3 Distributions of species number and abundance of net phytoplankton superimposing ocean circulations in the waters around Nansha Islands^[1,4].

A: 南沙西部沿岸流 West Nansha coastal current; B: 南沙反气旋涡 Nansha anticyclone gyre; C: 万安气旋 Wanan cyclonic gyre; D: 南沙海槽气旋 Nansha trough cyclonic gyre; E: 南沙东部沿岸流 East Nansha coastal current; F: 北南沙海流 North Nansha current; G: 金兰湾外海气旋涡 Cam Ranh Bay offshore cyclone gyre.

叶绿素 a 含量区域.因为气旋冷涡引起的富营养盐底层水的涌升促发了浮游植物丰度增高^[29],反映出南沙海域中尺度涡与浮游植物群落的密切关系.

3.3 网采浮游植物与环境的关系

CCA 网采浮游植物第一排序轴(CCA species axis 1)与环境因子的相关系数显示,轴1与盐度(表层、100、150 m和0~200 m水柱平均)和表层水温呈正相关,与水温(100、150、200 m层和0~200 m水柱平均)、铵态氮(25、75、100 m,0~200 m水柱平均)和叶绿素 a 含量(表层、50、150 m,0~200 m水柱平均)呈负相关(表5).CCA轴1正方向是调查站位组II所在范围(图2),是较高盐度、较高表层水温、较低深层(100~200 m)水温、较低铵态氮和叶绿素 a 含量的区域.这可能与受通过苏禄海进入南沙海域的西太平洋海流的影响有关.

CCA 网采浮游植物第二排序轴(CCA species axis 2)与环境因子的相关系数(>0.5)以*和#标示区分成两类,标注*的环境因子包括负权重的表层水温和正权重的25 m层铵态氮、表层亚硝酸盐、表层叶绿素 a 和25 m层叶绿素 a.在CCA排序图中对应的 S_{10} 、 $S_{12} \sim S_{14}$ 站的表层平均水温明显低于其他站位平均值 $0.25 \text{ }^\circ\text{C}$ ($P=0.004$).这可能与南沙西部沿岸流及其沿岸流向东北输送后引起的沿岸低温底层水涌升有关.该区域浮游植物以束毛藻丰度占主导优势.据报道,铁氏束毛藻一般生活在10~20 m水层,红海束毛藻则生活在上层1~2 m处^[30].束

表 5 浮游植物第一、第二排序轴与环境因子的相关系数矩阵

Table 5 Correlation matrix of phytoplankton CCA axis 1 and axis 2 to environmental factors

环境因子 Environmental factor		第一排序轴 Axis 1	第二排序轴 Axis 2	
盐度	0 m	0.602	-0.005	
Salinity	100 m	0.622	0.513 [#]	
	150 m	0.552	0.201	
	0~200 m	0.669	0.079	
水温	0 m	0.517	-0.500 [*]	
	100 m	-0.601	-0.514 [#]	
	150 m	-0.644	-0.179	
	200 m	-0.657	-0.161	
Temperature	0~200 m	-0.750	-0.028	
	NH ₄ ⁺	25 m	-0.605	0.622 [*]
		75 m	-0.500	0.342
		200 m	-0.523	-0.025
0~200 m	25 m	-0.520	0.306	
	NO ₂ ⁻	0 m	0.127	0.509 [*]
	PO ₄ ³⁻	100 m	0.124	0.811 [#]
		SiO ₃ ²⁻	100 m	0.194
叶绿素 a	0 m	-0.634	0.555 [*]	
	Chl a	25 m	-0.188	0.561 [*]
50 m		-0.629	0.275	
150 m		-0.566	0.147	
0~200 m		-0.508	0.458	

毛藻的固氮作用促使 25 m 层铵态氮较高,产生的新氮反过来又促进浮游植物的生长,使水层叶绿素 a 含量较高. 标注#的环境因子包括正权重的 100 m 层盐度、100 m 层磷酸盐、100 m 层硅酸盐和负权重的 100 m 层水温. 这些指标可以解读为中尺寸气旋涡环流带动富营养盐深层水向上涌升至 100 m 层,使 100 m 层盐度较高,水温较低,磷酸盐和硅酸盐相对较高,理论上会提高浮游植物丰度. 但 CCA 排序图中处于上述生态位的 S₂、S₄ 和 S₁₁ 站浮游植物丰度并不高,可能与真光层深度有关,南海真光层底部在 75 m 层附近^[19],上述涌升至 100 m 层营养盐不能促进浮游植物丰度的提高是否与该处的光限制有关,需要进一步的验证.

致谢 林秋雁老师在样品鉴定中提供帮助,“南锋号”科考船工作人员在采样过程中提供了大量帮助,谨致谢忱.

参考文献

- [1] Fang W-D (方文东), Guo Z-X (郭忠信), Huang Y-T (黄羽庭). The observation and study of the circulation in the southern South China Sea. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 1997, **42**(21): 2264-2271 (in Chinese)
- [2] Chu PC, Fan CW, Lozano CJ, *et al.* An airborne ex-

pendable bathythermograph (AXBT) survey of the South China Sea, May 1995. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**: 21637-21652

- [3] Su J-L (苏纪兰), Xu J-P (许建平), Cai S-Q (蔡树群), *et al.* Gyres and eddies in the South China Sea// Ding Y-H (丁一汇), Li C-Q (李崇银), eds. Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 66-72 (in Chinese)
- [4] Huang Q-Z (黄企洲), Fang W-D (方文东), Chen R-Y (陈荣裕). A discussion on relations between southwest monsoon variation and sea surface circulation structure and evolution in Nansha Islands sea area. *Journal of Tropical Oceanography* (热带海洋学报), 2001, **20**(1): 18-26 (in Chinese)
- [5] Huang L-M (黄良民), Huang Y-T (方文东), Chen Z-R (陈荣裕). Biotic environment characteristics involved maritime boundary delimitation in Nansha Islands adjacent waters. *Research & Development of South China Sea* (南海研究与开发), 1997(1): 1-7 (in Chinese)
- [6] Paerl HW, Valdes LM, Pickney JL, *et al.* Phytoplankton photopigments as indicators of estuarine and coastal eutrophication. *BioScience*, 2003, **53**: 953-964
- [7] Blanco AC, Nadaoka K, Yamamoto T. Planktonic and benthic microalgal community composition as indicators of terrestrial influence on a fringing reef in Ishigaki Island, Southwest Japan. *Marine Environmental Research*, 2008, **66**: 520-535
- [8] Shen PP, Tan YH, Huang LM, *et al.* Occurrence of brackish water phytoplankton species at a closed coral reef in Nansha Islands, South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **60**: 1718-1725
- [9] Lin Q-Y (林秋雁), Lin Q-S (林永水), Yuan W-B (袁文彬). Phytoplankton// Nansha Islands Comprehensive Scientific Expedition, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南沙综合科学考察队), ed. Comprehensive Investigation Research Reports of Nansha Islands Adjacent Waters. I. Volume 2. Beijing: Science Press, 1989: 652-659 (in Chinese)
- [10] Lin Q-S (林永水), Lin Q-Y (林秋雁). Phytoplankton distribution characteristics in Nansha Islands adjacent waters// Nansha Islands Comprehensive Scientific Expedition, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南沙综合科学考察队), ed. Papers on the Study of Marine Biology in Nansha Islands Adjacent Waters. II. Beijing: Ocean Press, 1991: 66-88 (in Chinese)
- [11] Qian S-B (钱树本), Chen G-W (陈国蔚). Phytoplankton diversity in Nansha Islands adjacent waters// Nansha Islands Comprehensive Scientific Expedition, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南沙综合科学考察队), ed. Marine biodiversity in Nansha Islands adjacent waters. II. Beijing: Ocean Press, 1996: 11-27 (in Chinese)
- [12] Song X-Y (宋星宇), Huang L-M (黄良民), Qian S-B (钱树本), *et al.* Phytoplankton diversity in waters around Nansha Islands in spring and summer. *Biodiversity Science* (生物多样性), 2002, **10**(3): 258-268

- (in Chinese)
- [13] Li K-Z (李开枝), Guo Y-J (郭玉洁), Yin J-Q (尹健强), *et al.* Phytoplankton diversity and abundance in Nansha Islands waters in autumn of 1997. *Journal of Tropical Oceanography* (热带海洋学报), 2005, **24** (3): 25–30 (in Chinese)
- [14] State technological supervision bureau (国家技术监督局). Specifications of Oceanographic Survey (GB/T12763–2007). Beijing: China Standards Press, 2007 (in Chinese)
- [15] Ma K-P (马克平). Measurement of biotic community diversity// Qian Y-Q (钱迎倩), Ma K-P (马克平), eds. Principle and Method of Biodiversity Study. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1994: 141–165 (in Chinese)
- [16] Li D-L (李德亮), Zhang T (张婷), Xiao T-Y (肖调义), *et al.* Phytoplankton's community structure and its relationships with environmental factors in an aquaculture lake, Datong Lake of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23** (8): 2107–2113 (in Chinese)
- [17] Liu X, Lu XH, Chen YW. The effects of temperature and nutrient ratios on *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China: An 11-year investigation. *Harmful Algae*, 2011, **10**: 337–343
- [18] Tian Y-Q (田永强), Yu C-C (俞超超), Huang L (王磊), *et al.* Dynamic changes of phytoplankton's community structure in Beixi of Jiulongjiang River, Fujian Province of East China and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(9): 2559–2565 (in Chinese)
- [19] Ning X, Chai F, Xue H, *et al.* Physical-biological oceanographic coupling influencing phytoplankton and primary production in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**, doi: 10.1029/2004JC-002365
- [20] Zhang D-S (张东声), Wang C-S (王春生), Wang X-G (王小谷), *et al.* The large-scale distribution of *Trichodesmium* in the tropical and subtropical Pacific Ocean and the southern Indian Ocean. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报), 2010, **32**(4): 148–154 (in Chinese)
- [21] Jenkins WJ. Nitrate flux into the euphotic zone near Bermuda. *Nature*, 1988, **331**: 521–523
- [22] Capone DG, Zher JP, Paerl HW, *et al.* *Trichodesmium*, a globally significant marine cyanobacterium. *Science*, 1997, **276**: 1221–1229
- [23] Karl D, Letelier R, Tupas L, *et al.* The role of nitrogen fixation in biogeochemical cycling in the subtropical North Pacific Ocean. *Nature*, 1997, **388**: 533–538
- [24] Kustka A, Carpenter EJ, Sanudo-Wilhelmy SA. Iron and marine nitrogen fixation: Progress and future directions. *Research in Microbiology*, 2002, **153**: 255–262
- [25] Tyrrell T, Maranon E, Poulton AJ, *et al.* Large-scale latitudinal distribution of *Trichodesmium* spp. in the Atlantic Ocean. *Journal of Plankton Research*, 2003, **25**: 405–416
- [26] Duce RA, Tindale NW. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 1991, **36**: 1715–1726
- [27] Avaria S, Munoz P. Effects of the 1982–1983 El Niño on the marine phytoplankton off northern Chile. *Journal of Geophysical Research*, 1987, **9**: 14369–14382
- [28] Lin G-M (林更铭), Yang Q-L (杨清良). Interdecadal variation in distribution features of phytoplankton in the Taiwan Strait under global climate change. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2011, **17**(5): 615–623 (in Chinese)
- [29] Vaillancourt RD, Marra J, Scki MP, *et al.* Impact of a cyclonic eddy on phytoplankton community structure and photosynthetic competency in the subtropical North Pacific Ocean. *Deep Sea Research*, 2003, **50**: 829–847
- [30] Liang S (梁松), Qian H-L (钱宏林). Domestic and oversea general situation of study on red tide organisms. *South China Sea* (南海海洋), 1985 (suppl.): 69–73 (in Chinese)

作者简介 戴明,女,1978年生,硕士,助理研究员.主要从事浮游植物生态学研究. E-mail: daimmy@163.com

责任编辑 肖红
