

海南岛以南海域浮游植物群落特征研究

戴明 李纯厚 张汉华 贾晓平*

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部渔业生态环境重点开放实验室, 广州 510300)

摘要: 为掌握海南岛以南海域浮游植物群落特征, 1998-1999年对其进行了4个航次的现场调查。经显微镜检, 共鉴定出浮游植物290种(包括23个变种和5个变型)。在此基础上, 作者通过统计和聚类分析方法, 研究了这一区域浮游植物的物种组成、丰度变动和群落结构等特征。结果显示, 海南岛以南海域浮游植物物种丰富, 以硅藻门和甲藻门为主; 物种组成的时空差异显著。其优势种的暖水性、高盐性或广盐性特征明显。冷季以广温种小舟形藻(*Navicula subminuscula*)占优势, 随气温回升, 暖水性种类优势地位突出。不同季节浮游植物丰度差异小, 以硅藻门丰度占优势, 但与冷季相比, 暖季中甲藻门和蓝藻门丰度明显上升。4月和9月的高丰度中心位于西部海域北部湾湾口附近, 1月和12月则出现在中东部水域。聚类结果显示各浮游植物群落组分无明显的斑块分布特征。群落物种多样性表现为4月和9月高于1月和12月; 群落稳定性以12月份为最差; 中南部水域群落稳定性较差。总之, 海南岛以南海域浮游植物群落具独特的热带开阔海域生物区系特征。冷暖季群落特征有明显差异。海域水文条件对群落特征的影响复杂。

关键词: 浮游植物, 物种组成, 丰度, 群落结构, 海南岛以南海域

Characteristics of the phytoplankton community in the southern waters of Hainan Island

Ming Dai, Chunhou Li, Hanhua Zhang, Xiaoping Jia*

Key and Open Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Ministry of Agriculture, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300

Abstract: The phytoplankton community in the southern waters of Hainan Island was characterized based on four cruise surveys carried out in 1998 and 1999. A total of 290 species (including 23 varieties and 5 forms) were identified by microscope, and species composition, richness and community structure were analyzed using statistical and clustering methods. The results showed that phytoplankton species were abundant in the study area, and were mainly composed of diatoms and dinoflagellates. The species composition showed a significant spatio-temporal variation. In general, the dominant species were characterized by warm water and halophilous or euryhalinous affinities. In the cool seasons, *Navicula subminuscula*, a eurythermal species, was the major dominant species, while warm water species increased rapidly with increasing air temperature. Phytoplankton richness showed no remarkable seasonal variations, and diatoms were the most abundant group throughout the year. However, the richness of dinoflagellate and blue-green algae increased significantly in warm seasons. The center of phytoplankton richness occurred in the western waters around the mouth of the Beibu Bay in April and September, and then shifted to the middle-eastern waters in December and January. A clustering diagram indicated that the phytoplankton community had no obvious block distribution. The diversity index of the phytoplankton community was relatively low in December, at which time the community was unstable in middle-southern waters. In conclusion, this phytoplankton community comprised a unique tropical open sea biota, showing significant seasonal variation, and influenced by hydrologic features.

收稿日期: 2006-06-06; 接受日期: 2006-11-16

基金项目: 国家海洋勘测专项(HY126-02-03)和广东省重大科技兴海项目(A200099E01)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jiaxiaoping53@163.com

Key words: phytoplankton, species composition, richness, community structure, southern waters of Hainan Island

海南岛是我国第二大岛和典型的热带海岛,可分为琼北、琼东、琼南、琼西四个岸段和南海诸岛。琼南海域属中热带海洋季风气候区,海岸较陡,陆架坡度大,地处南海外海流、海南岛沿岸流和越南沿岸流交汇区域,江河径流量小,人类活动相对较少,污染较轻,属寡营养水域,形成了较为独特的海洋生物区系,分布着重要的三亚渔场。琼南海域气候条件优越,水温比琼北海域高,比琼东海域少受台风侵袭,适宜养殖的港湾多,尤其适于养殖珠母贝、鲍鱼、海参、江瑶、龙虾、对虾、石斑鱼等名贵海产。近年随着网箱养殖业的兴起,琼南海域已经成为南海网箱养殖业的重要基地之一。

然而,长期以来对这一重要渔业水域的生态环境缺乏全面、系统的调查研究。仅1959年的全国海洋综合调查和1980–1986年的广东省海岸带和海涂资源综合调查对琼南17°N以北海域的资源环境作过较详细的报道(中华人民共和国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室, 1964; 广东省海岸带和海涂资源综合调查大队和广东省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室, 1987)。1998–1999年国家海洋勘测专项对离岸30 km外、水深1,500 m以浅的整个海南岛以南海域进行了4个航次调查,但该区域的浮游植物资料至今几无报道。本文根据上述4个航次资料分析了海南岛以南海域浮游植物的生态特征,旨在为全面评价该海域的生态环境状况提供依据,并为周边海域的浮游植物生态研究积累基础数据。

1 材料与方法

样品采于1998年9月、12月、1999年1月和4月,调查范围: 109°00′–110°30′ E, 16°00′–18°30′ N, 站位布设见图1, 其中1999年1月的调查范围仅限于17°00′N以北海域(站位S1–S9)。浮游植物样品处理按《海洋调查规范》执行(国家技术监督局, 1992)。采用浅水III型浮游生物网(网目直径76 μm) 自离海底2 m向海面垂直拖网。样品用甲醛溶液固定, 最终浓度为5%。样品静置、浓缩后, 取0.1 mL均匀样品置于计数框中, 在光学显微镜下全片观察, 一般计

数两片取其平均值。

统计量采用Jaccard相似性指数(Jaccard, 1908)分析季节间浮游植物物种的相似程度, 以优势度指数(Y) (陈清潮等, 1994)判断群落的优势种, 用Margalef指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数分析群落的多样性(马克平, 1994; 马克平和刘玉明, 1994)。通过系统聚类法分析浮游植物群落结构。聚类分析以站位间浮游植物的Bray-Curtis相异性测度系数(Bray & Curtis, 1957)为距离指标, 用非加权平均配对法(UPGA)在Statistics统计软件上完成 (Rohlf, 2000; 洪楠, 2002)。

2 结果

2.1 物种组成

海南岛以南海域浮游植物物种丰富, 共鉴定出290种(包括23个变种和5个变型)(附录I, 见网上),

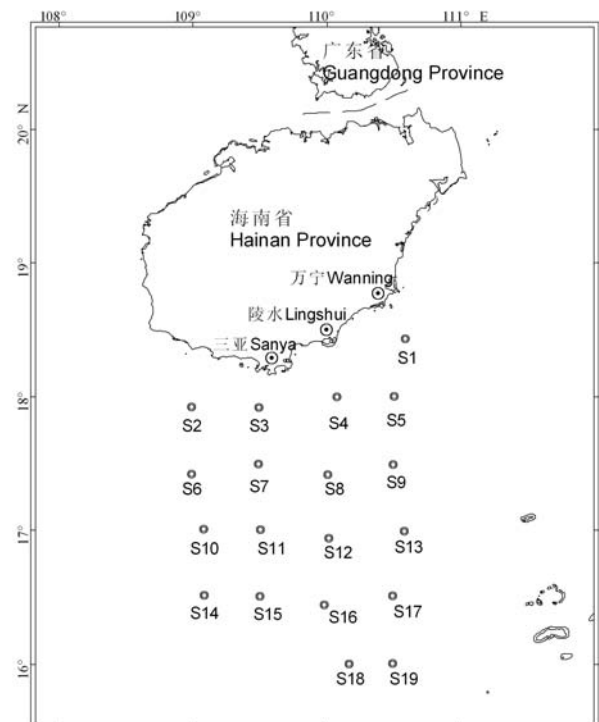


图1 海南岛以南海域调查站位分布图

Fig. 1 Location of the sampling stations in the southern waters of Hainan Island in 1998 and 1999

分属硅藻门、甲藻门、蓝藻门、金藻门和黄藻门5个门类。硅藻门(187种)和甲藻门(91种)物种最多, 分别占64.5%和31.4%, 蓝藻门、金藻门和黄藻门各出现6种、5种和1种, 合占4.1%。

浮游植物物种丰富度季节变化大。4月浮游植物物种丰富度最高, 达196种, 9月为165种, 12月为131种, 1月为109种。暖季4月和9月浮游植物物种明显多于冷季的1月和12月。不同季节间Jaccard物种相似性指数均低于46.4%。说明浮游植物物种组成季节更替明显。

不同出现频率的浮游植物物种数直方图显示(图2), 4个航次里仅在个别站位(1-2个站)出现的物种数均占总物种数的50%以上, 而在半数以上站位均出现的物种数累计不到10%(2.76-8.67%)。说明浮游植物物种组成在空间分布上亦存在显著差异。

2.2 优势种及季节变化

浮游植物优势种(优势度指数 $Y > 0.015$)随季节

变化不断更替(表1), 除翼根管藻(*Rhizosolenia alata*)和小舟形藻(*Navicula subminuscula*)在2个以上季节占据优势外, 其他优势种仅在单个季节占据优势。12月和1月以广温种小舟形藻占主要优势, 气温回升后的4月和9月暖水种劳氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)、伯氏根管藻(*R. bergonii*)和距端根管藻(*R. calcar-avis*)等丰度上升, 占据优势地位。从生态类型看优势种的暖水性特征明显, 适盐性偏向于高盐或广盐性。9月的优势种为翼根管藻、变异辐杆藻(*Bacteriastrum varians*)、伯氏根管藻和距端根管藻, 丰度占16.1%。12月的优势种为小舟形藻、伏氏海毛藻(*Thalassiothrix frauenfeldii*)和柔弱海毛藻(*T. delicatula*), 丰度占70.2%。1月的优势种为小舟形藻、细微舟形藻(*N. parva*)、翼根管藻和细弱海链藻(*Thalassiosira subtilis*), 丰度占56.0%。4月的优势种为笔尖形根管藻长棘变种(*R. styliformis* var. *longispina*)、翼根管藻纤细变型(*R. alata* f. *gracillima*)、

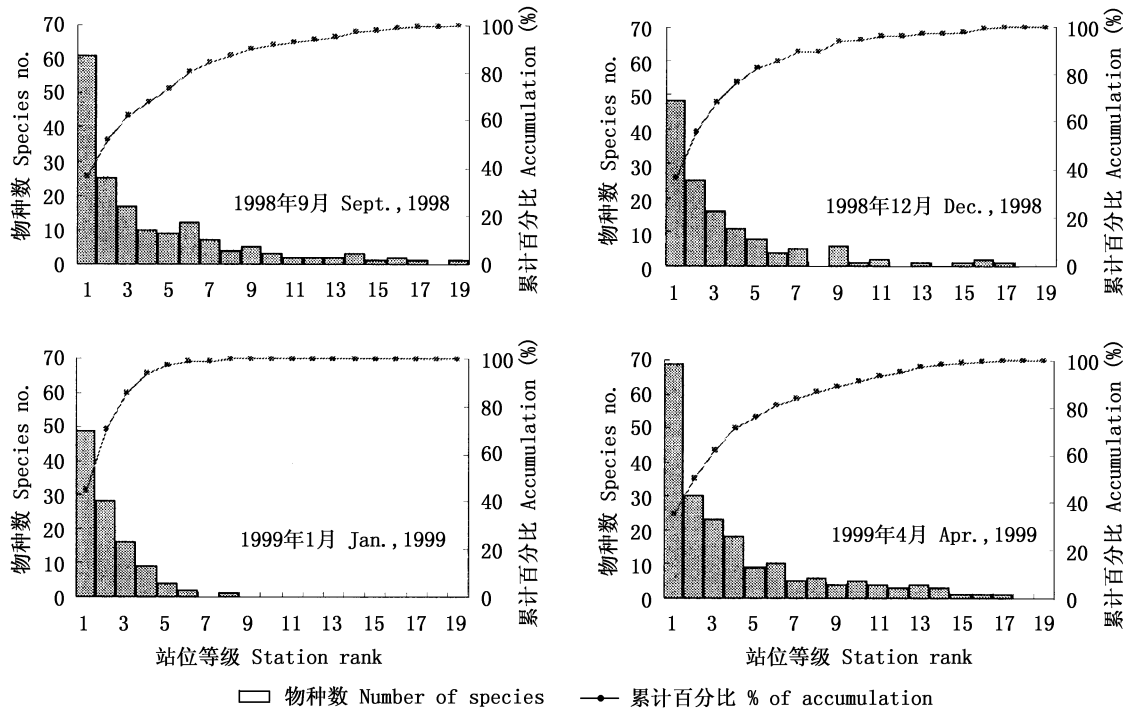


图2 不同出现频率的浮游植物物种数直方图

站位等级1表示某个种类在调查范围内仅在一个站位有出现; 以此类推。累计百分比表示在不同站位等级出现的物种数占总物种数的累计百分比。

Fig. 2 The horizontal histograms showing the number of phytoplankton species with different occurrence frequencies. Station rank 1 means species occurred at only one station in the survey areas, by analogy. % of accumulation means the accumulation percentage of species occurred in different station ranks to all species.

表1 海南岛以南海域浮游植物优势种及优势度

Table 1 The dominant phytoplankton species and their dominance in the southern waters of Hainan Island based on data surveyed in 1998 and 1999

优势种 Dominant species	1998年9月 Sept., 1998	1998年12月 Dec., 1998	1999年1月 Jan., 1999	1999年4月 Apr., 1999
小舟形藻 <i>Navicula subminuscula</i>	-	0.496	0.167	-
细微舟形藻 <i>N. parva</i>	-	-	0.051	-
翼根管藻 <i>Rhizosolenia alata</i>	0.030	-	0.039	0.031
细弱海链藻 <i>Thalassiosira subtilis</i>	-	-	0.035	-
笔尖形根管藻长棘变种 <i>R. styliformis</i> var. <i>longispina</i>	-	-	-	0.109
翼根管藻纤细变型 <i>R. alata</i> f. <i>gracillima</i>	-	-	-	0.046
窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	-	-	-	0.039
劳氏角毛藻 <i>C. lorenzianus</i>	-	-	-	0.025
变异辐杆藻 <i>Bacteriastrium varians</i>	0.028	-	-	-
伯氏根管藻 <i>R. bergonii</i>	0.026	-	-	-
距端根管藻 <i>R. calcar-avis</i>	0.026	-	-	-
伏氏海毛藻 <i>Thalassiothrix frauenfeldii</i>	-	0.081	-	-
柔弱海毛藻 <i>T. delicatula</i>	-	0.020	-	-

-表示优势度<0.015, - means dominance < 0.015.

表2 海南岛以南海域浮游植物丰度季节变化($\times 10^4$ cell/m³)Table 2 The seasonal variation of phytoplankton richness in the southern waters of Hainan Island based on data surveyed in 1998 and 1999($\times 10^4$ cell/m³)

季节 Season	均值 Mean	变幅 Range	硅藻门 Diatom		甲藻门 Dinoflagellate		其他藻类 Others		
			丰度 Richness	%	丰度 Richness	%	丰度 Richness	Richness	%
1998年9月 Sept., 1998	4.46	0.12-31.74	2.93	63.5	0.46	10.3	1.17		26.2
1998年12月 Dec., 1998	1.54	0.12-9.74	1.46	94.4	0.05	3.5	0.03		2.1
1999年1月 Jan., 1999	2.31	0.17-10.00	2.13	92.3	0.08	3.4	0.10		4.3
1999年4月 Apr., 1999	4.04	0.29-11.33	3.24	80.2	0.36	8.9	0.44		11.0
平均 Mean	3.19	-	2.44	82.6	0.24	6.5	0.44		10.9

窄细角毛藻(*C. affinis*)、翼根管藻和劳氏角毛藻, 丰度占36.9%。

9月、12月、1月和4月最主要优势种的优势度分别为0.030、0.496、0.167和0.109。冷季优势度高于暖季, 12月和1月个别优势种占据主导地位, 4月和9月浮游植物群落的丰度分布较均匀。

2.3 丰度时空变化

浮游植物丰度范围在 0.12×10^4 – 31.74×10^4 cell/m³之间, 年平均为 3.19×10^4 cell/m³(表2)。季节变化小, 月平均最高丰度(9月)与最低丰度(12月)相差不足2倍。

丰度组成始终以硅藻门占优势, 12月和1月硅藻门丰度占绝对优势, 分别占94.44%和92.29%; 4月和9月硅藻门丰度比例相对较小, 分别占80.2%和63.5%; 而适温较高的甲藻门和蓝藻门丰度则大幅上升。4月甲藻门和蓝藻门丰度分别占8.85%和10.87%, 9月分别上升到10.34%和25.81%, 蓝藻门

丰度上升尤为明显, 其丰度比例较12月上升了12倍, 主要归因于束毛藻属丰度(*Trichodesmium*)在高温季节的迅速增殖。

图3为浮游植物丰度分布图, 从中可以看出: 9月的丰度密集区在西部海域北部湾湾口附近, 丰度在 14×10^4 – 32×10^4 cell/m³范围内; 另外陵水以南海域也出现小范围密集中心, 丰度在 10×10^4 cell/m³以上; 三亚以南海域存在一个低丰度区, 其值低于 5×10^4 cell/m³; 东南部外海海域丰度较低, 在 1×10^4 cell/m³以下。12月的丰度密集区出现在中东部偏南海域, 范围为 5×10^4 – 10×10^4 cell/m³, 其他多数站位丰度低于 1×10^4 cell/m³。1月高丰度中心与12月相似, 在东部离岸水域, 丰度为 10×10^4 cell/m³, 其他海域丰度较低, 大都在 1×10^4 cell/m³以下。4月丰度密集区与9月相似, 在北部湾湾口附近, 但位置相对南移, 西南部越南沿岸丰度最高, 其值为 11.3×10^4 cell/m³; 南部海域自西向东丰度由 11×10^4

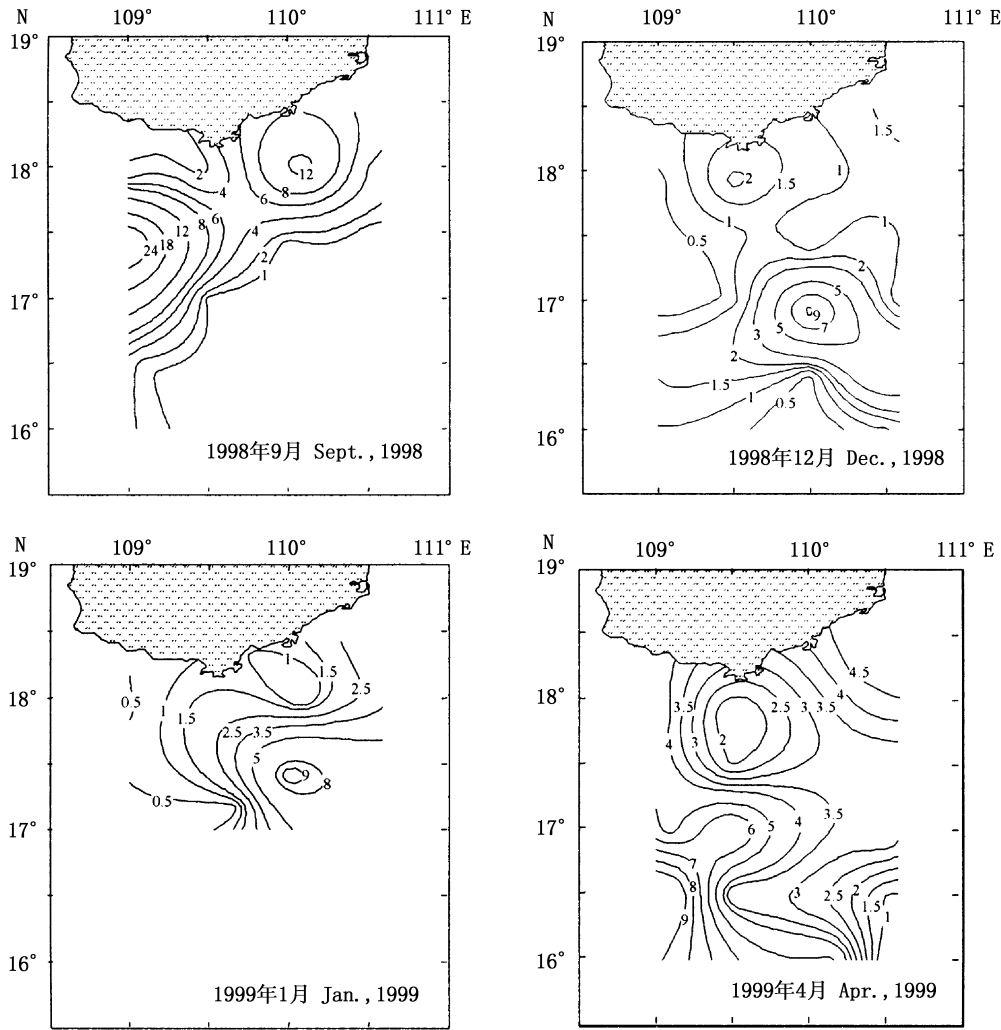


图3 海南岛以南海域不同季节浮游植物丰度分布图

Fig. 3 Spatial distribution of phytoplankton richness in different seasons in the southern waters of Hainan Island

cell/m³骤降至1×10⁴ cell/m³以下; 北部海域丰度较均匀, 在2×10⁴–5×10⁴ cell/m³范围内, 三亚以南海域亦存在一个丰度低值区。

2.4 群落结构

图4的聚类分析结果表明, 海南岛以南海域浮游植物群落组分差异不显著。9月各站位间的相异性距离范围为0.33–0.75, 12月为0.43–0.80, 1月为0.49–0.91, 4月为0.40–0.85。在不同季节几乎所有站位的相异性距离均大于0.4, 说明海南岛以南海域浮游植物群落的空间差异大, 斑块分布特征不明显。

聚类结果与浮游植物丰度空间分布(图3)呈较

好的对应关系: 丰度密集中心各站位间的相异性距离相对较小, 一般聚在一起; 丰度稀疏区的站位一般也聚在一起; 而密集区和稀疏区之间的过渡区域与前两者的相异性距离均相对较远, 形成一个过渡区组分。

2.5 群落物种多样性

群落物种多样性是群落组织独特的生物学特征, 它反映了群落特有的物种组成和个体丰度特征。Margalef指数对物种数的依赖程度较强, 能充分反映物种的分布情况。海南岛以南海域Margalef指数变幅为0.56–5.42, 季节平均在1.74–2.74范围内。9

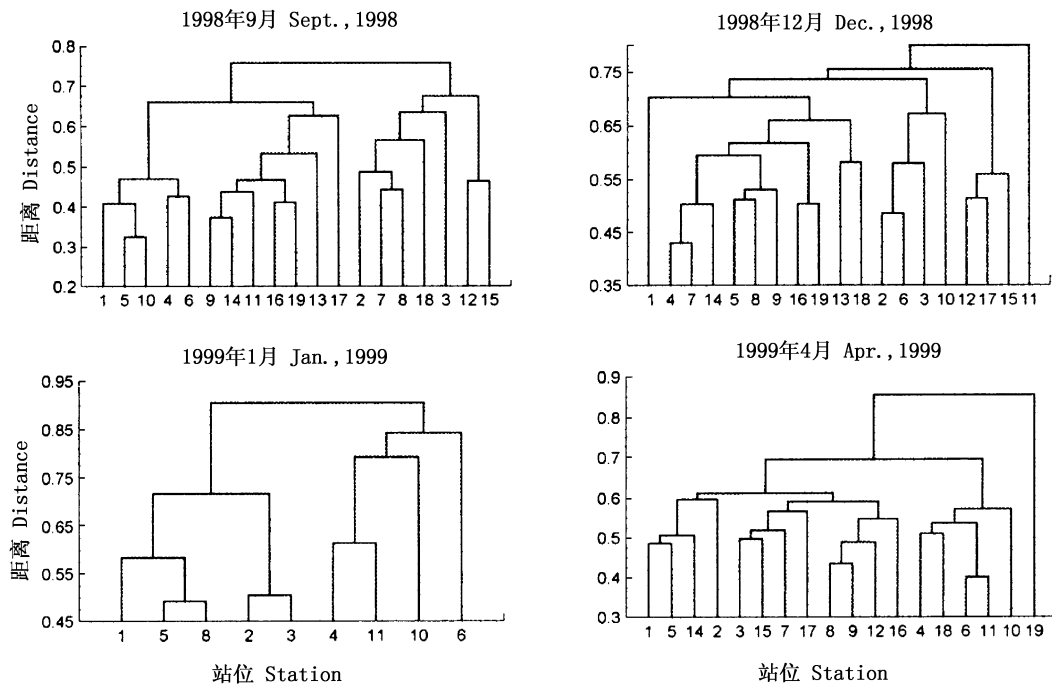


图4 不同调查站位浮游植物聚类图

Fig. 4 A dendrogram of phytoplankton of 19 sampling stations in the southern waters of Hainan Island based on Bray-Curtis community coefficient

月, 西部海域的站位S6和S10与东北部的S1、S4和S5 Margalef指数较高; 12月, 东北部的站位S4、S5、S9和东南部的S19 Margalef指数较高; 1月, 高Margalef指数值出现在中北部的站位S5、S6和S8; 4月, 其高值区在西部海域的站位S10、S14和S18(图5a)。暖季高Margalef指数值主要出现在西部海域, 冷季则主要集中在东部和北部海域。

从图5b可以看出, Shannon-Wiener指数范围为0.31–4.97, 季节平均为3.06–3.76。其中中部海域Shannon-Wiener指数值偏低, 9月的站位S12、S15, 12月的S12、S15、S17, 1月的S1, 4月的S8、S9、S12、S15多样性指数较低。Pielou指数变幅0.07–0.93, 季节平均为0.69–0.78, 其变化规律与Shannon-Wiener指数相同(图5c), 中部海域均匀度较低。

三个多样性指数的季节变化不完全相同。Margalef指数4月>9月>1月>12月, Shannon-Wiener指数9月≈4月>1月>12月, 均匀度指数9月≈1月>4月≈12月。总体上来看, 4月和9月浮游植物群落多样性高于1月和12月。

用多样性变异系数(H'_s / H'_m)来描述群落稳定性, 其中 H'_s 为标准差, H'_m 为平均值(丛建国, 1997)。如果变异系数小, 则在相同外界干扰下群落抗外界干扰能力强, 群落相对稳定。计算Shannon-Wiener指数的变异系数结果表明, 不同季节海南岛以南海域浮游植物群落的稳定性表现为9月>1月>4月>12月, 变异系数依次为0.16、0.19、0.23、0.39。其中9月、1月和4月的稳定性较接近, 12月的稳定性明显较差。就海域而言, 北部海域的站位S3、S4、S5、S6、S7、S11和外海的S16、S18、S19的稳定性较好, 变异系数在0.2以下; 近岸海域的站位S1、S2、S14和中部海域的S8、S9、S10、S13的稳定性次之, 变异系数在0.2–0.4之间; 而中部偏南海域的站位S12、S15、S17号站的稳定性最差, 变异系数在0.5以上。

3 讨论

海南岛以南海域浮游植物群落具有鲜明的热带开阔海域独特的群落组成特征, 即物种丰富度高, 暖水高盐性或广盐性种类占优势。其丰度季节

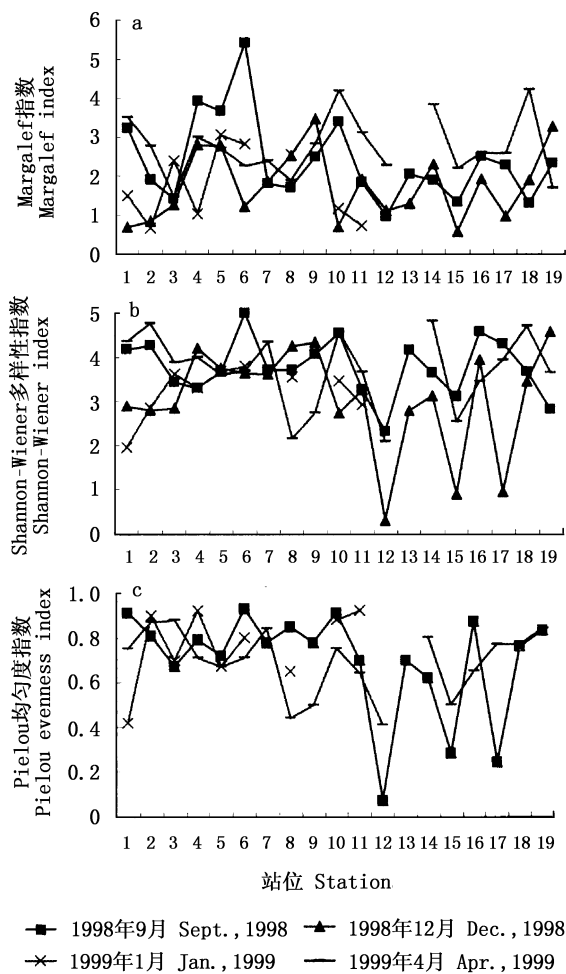


图5 海南岛以南海域不同站位浮游植物群落多样性指数
 Fig. 5 Diversity indices of phytoplankton community of 19 sampling stations in the southern waters of Hainan Island

变化小, 年平均为 $3.19 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$, 远低于相邻的北部湾海域的同期调查结果, 两者丰度相差31倍(高东阳等, 2001)。这可能是由于海南岛沿岸海水的磷酸盐和硅酸盐含量在广东沿岸海岸带均属最低(广东省海岸带和海涂资源综合调查大队和广东省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室, 1987); 海南岛以南海域地处中热带海域, 9月、12月、1月和4月表层平均水温分别为 30.78°C 、 25.78°C 、 23.69°C 和 28.53°C , 全年均适宜浮游植物生长, 营养盐消耗大, 而且河流补给营养物质少, 故营养盐极可能成为浮游植物增殖的限制因子。虽然水温不太会限制浮游植物生长, 但对群落特征有

较大影响。暖季(4、9月份)浮游植物的物种数和丰度均高于冷季(12、1月份), 这与20世纪80年代海南岛15 m以浅海岸带调查的结果相似(广东省海岸带和海涂资源综合调查大队和广东省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室, 1987)。随气温回升暖水性种类劳氏角毛藻、伯氏根管藻和距端根管藻丰度上升, 取代了冷季广温种小舟形藻的优势地位。另外适温较高的甲藻门和蓝藻门丰度在暖季大幅上升。9月蓝藻门的束毛藻丰度增加最为明显, 这与1959–1960年的调查结果即6–9月束毛藻数量最高相似(中华人民共和国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室, 1964)。

海南岛以南海域面临南海开阔外海, 常年受南海海外海流、海南岛沿岸流和越南沿岸流交互作用, 水文动力条件复杂。上述三大水系在明显的海洋季风气候中随夏半年的西南季风或冬半年东北季风此消彼长, 导致浮游植物群落组成也随之有明显的冷暖季节差异。

海南岛以南海域降雨的季节性分布不均匀, 雨季与台风季节沿岸流洪峰流量可达年平均流量的25–45倍。因此4月和9月份越南沿岸径流和陵水河径流对浮游植物丰度影响较大, 使得越南近岸和陵水以南区域成为浮游植物丰度密集中心。越南沿岸流一分支至北部湾湾南后因受南海南部外海水北进势力的推动又转向北流, 形成逆时针环流(曾嘉, 2002), 致使越南近岸的浮游植物密集中心有向北扩展至北部湾湾口的现象。夏半年南海南部外海流势力在西南季风作用下向岸推进, 且以夏季最为强盛(农牧渔业部水产局和农牧渔业部南海区渔业指挥部, 1989), 所以9月北部湾湾口附近的密集中心相对4月更向北扩展, 并且此时由外海水控制的浮游植物低密度区也较4月向北推进。12月随着东北季风的盛行和外海水势力的消退, 浮游植物高密度区开始往东中部海域迁移。因此从4月至9月再至12月(1月), 浮游植物物种数和丰度的高值区由西南–西北–东中部海域呈顺时针方向转移。

海南岛以南海域浮游植物群落多样性差异大, 很低、低、一般、高、很高各个水平都有出现, 基本上属于一般或高水平(孙军等, 2001; 乐凤凤等, 2006)。12月浮游植物群落多样性低, 稳定性较差, 这可能与冬季受冷空气影响, 大风频率较高有关(农牧渔业部水产局和农牧渔业部南海区渔业指挥

部, 1989)。风生流引起的上升流可能促使底栖种小舟形藻的悬浮堆积, 并成为优势种类, 尤其是中南部的站位S12、S15、S17小舟形藻丰度占80%以上, 群落结构单一, 均匀度低, 多样性和稳定性都较差, 但其稳定性差的原因有待开展进一步的研究。

致谢: 向参加海上采样和样品分析的全体课题组成员致以衷心的感谢。

参考文献

- Bray JR, Curtis JT (1957) An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, **27**, 325–349.
- Chen QC (陈清潮), Huang LM (黄良民), Yin JQ (尹健强) (1994) Biodiversity of the zooplankton in the waters around Nansha Islands. In: *Marines Biodiversity of the Nansha Islands and Its Neighboring Waters* (南沙群岛及其邻近海域海洋生物多样性研究), 42–50. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese)
- Comprehensive Oceanographic Survey Office of Ocean Group, Science and Technology Commission, P.R.C. (中华人民共和国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室) (1964) *Comprehensive Oceanographic Survey Report of Oceans of Bohai, Huanghai, Donghai and Nanhai (Eighth Part), on Plankton of China Inshore Zone* (全国海洋综合调查报告(第八册)——中国近海浮游生物的研究). Comprehensive Oceanographic Survey Office of Ocean Group, Science and Technology Commission, P.R.C., Beijing. (in Chinese)
- Cong JG (丛建国) (1997) Study on the community of spider in Chinese arborvitae forest of Shandong central mountains, China. *Acta Arachnologica Sinica* (蛛形学报), **6**, 26–30. (in Chinese with English abstract)
- Fishery Bureau, Ministry of Agriculture, Farming and Fishery(农牧渔业部水产局), Fishery Administration Office of South China Sea, Ministry of Agriculture, Farming and Fishery (农牧渔业部南海区渔业指挥部) (1989) *Investigation and Regionalization on Fishery Resource of South China Sea* (南海区渔业资源调查和区划). Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou. (in Chinese)
- Gao DY (高东阳), Li CH (李纯厚), Liu GF (刘广锋), Zhang HH (张汉华) (2001) The species composition and distribution of phytoplankton in the Beibu Bay. *Journal of Zhanjiang Ocean University* (湛江海洋大学学报), **21**(3), 13–18. (in Chinese with English abstract)
- Group and Leading Team Office of Comprehensive Resource Investigation on the Littoral Zone and Tidal Flat of Guangdong Province(广东省海岸带和海涂资源综合调查大队, 广东省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室) (1987) *The Report of Comprehensive Resource Investigation on the Littoral Zone and Tidal Flat* (广东省海岸带和海涂资源综合调查报告). China Ocean Press, Beijing. (in Chinese)
- Hong N (洪楠) (2002) *STATISTICA for Windows Statistic and Chart Analysis Tutorial* (统计与图表分析教程). Tsinghua University Press & Northern Jiaotong University Press, Beijing. (in Chinese)
- Jaccard P (1908) Nouvelles recherches sur la distribution florale. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, **44**, 223–270.
- Le FF (乐凤凤), Sun J (孙军), Ning XR (宁修仁), Song SQ (宋书群), Cai YM (蔡昱明), Liu CG (刘诚刚) (2006) Phytoplankton in the northern South China Sea in summer 2004. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), **37**, 238–248. (in Chinese with English abstract)
- Ma KP (马克平) (1994) Measurement of biotic community diversity. I. α diversity (1). *Chinese Biodiversity* (生物多样性), **2**, 162–168. (in Chinese)
- Ma KP (马克平), Liu YM (刘玉明) (1994) Measurement of biotic community diversity. I. α diversity (2). *Chinese Biodiversity* (生物多样性), **2**, 231–239. (in Chinese)
- Rohlf FJ (2000) *NTSYSpc: Numerical Taxonomy and Multivariate Analysis System, Version 2.1, Users Guide*. Exeter Software, Setauket, New York.
- Sun J (孙军), Liu DY (刘东艳), Wei H (魏皓), Qian SB (钱树本) (2001) Fuzzy evaluation on the marine phytoplankton diversity of Ryukyu-Gunto and its adjacent waters. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), **32**, 445–453. (in Chinese with English abstract)
- Technical Supervision Bureau of China (国家技术监督局) (1992) *Specification of Marine Investigation* (海洋调查规范). China Standard Press, Beijing. (in Chinese)
- Zeng J (曾嘉) (2002) The oceanic hydrological conditions of fishing ground in Beibu Bay. *South China Sea Fisheries Research* (南海水产研究), **25**, 67–71. (in Chinese)

(责任编辑: 于丹 责任编辑: 周玉荣)

附录I 海南岛以南海域浮游植物调查物种名录(<http://www.biodiversity-science.net/PCN/qikan/manage/wenzhang/060114.pdf>)
Appendix I Species list of phytoplankton surveyed in the southern waters of Hainan Island in this study
(<http://www.biodiversity-science.net/PCN/qikan/manage/wenzhang/060114.pdf>)

附录I 海南岛以南海域浮游植物调查物种名录(<http://www.biodiversity-science.net/PCN/qikan/manage/wenzhang/060114.pdf>)
Appendix I Species list of phytoplankton surveyed in the southern waters of Hainan Island in this study
(<http://www.biodiversity-science.net/PCN/qikan/manage/wenzhang/060114.pdf>)

物种 Species	1998年9月 Sept., 1998	1998年12月 Dec., 1998	1999年1月 Jan., 1999	1999年4月 Apr., 1999
东方曲壳藻				+
爱氏辐环藻				+
辐衲藻属	+	+		
波状辐衲藻	+			
双眉藻属	+		+	
蛛网藻	+			
日本星杆藻				+
标志星杆藻	+			+
星杆藻属	+		+	
南方星纹藻	+		+	+
长卵面星脐藻	+			
扇形星脐藻				+
椭圆星脐藻				+
星脐藻属一种				+
近似沟盘藻	+			
沟盘藻属一种	+			
丛毛辐杆藻				+
优美辐杆藻	+	+	+	+
长辐杆藻	+	+	+	+
透明辐杆藻	+	+	+	+
辐杆藻属一种		+		
变异辐杆藻	+	+	+	+
活动盒形藻	+	+	+	+
中华盒形藻	+	+	+	+
柏氏角管藻				+
紧密角管藻	+			
窄隙角毛藻等角变种				+
窄隙角毛藻	+	+	+	+
大西洋角毛藻	+	+	+	+
大西洋角毛藻那不勒斯变种		+		
大西洋角毛藻骨条变种		+		+
奥氏角毛藻				+
卡氏角毛藻				+
密聚角毛藻	+	+	+	+
扁面角毛藻	+		+	+
扭角毛藻		+		
中肋角毛藻		+	+	
须状角毛藻		+		
旋链角毛藻	+		+	+
达氏角毛藻	+			+
丹麦角毛藻		+		
柔弱角毛藻				+
并基角毛藻	+	+	+	+
密连角毛藻				+
齿角毛藻		+	+	+
双叉角毛藻		+	+	
双突角毛藻				+
双突角毛藻英国变种				+
远距角毛藻	+	+	+	+
异角角毛藻	+	+	+	+
爱氏角毛藻	+			
印度角毛藻				+
垂缘角毛藻	+	+		+
平滑角毛藻	+			
罗氏角毛藻				+
劳氏角毛藻	+	+	+	+
短刺角毛藻	+	+	+	+
日本角毛藻			+	
奇异角毛藻	+			+

	物种 Species	1998年9月 Sept., 1998	1998年12月 Dec., 1998	1999年1月 Jan., 1999	1999年4月 Apr., 1999
海洋角毛藻	<i>C. pelagicus</i>	+	+	+	+
悬垂角毛藻	<i>C. pendulum</i>		+	+	+
秘鲁角毛藻	<i>C. peruvianus</i>	+	+	+	+
拟弯角毛藻	<i>C. pseudocurvisetus</i>	+			+
角毛藻属	<i>Chaetoceros</i> spp.	+	+	+	+
圆柱角毛藻	<i>C. teres</i>	+			
长刺角毛藻	<i>C. tetrastichon</i>				+
范氏角毛藻	<i>C. vanheurcki</i>		+		
双凹梯形藻	<i>Climacodium biconcavum</i>				+
佛朗梯形藻	<i>C. frauenfeldianum</i>	+			+
串珠梯楔藻	<i>Climacosphenia moniligera</i>		+		+
卵形藻属一种	<i>Cocconeis</i> sp.			+	
小环毛藻	<i>Corethron hystrix</i>		+		+
海洋环毛藻	<i>C. pelagicum</i>				+
安氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus angstii</i>	+			+
狭线形圆筛藻	<i>C. anguste-lineatus</i>		+		
星脐圆筛藻	<i>C. asteromphalus</i>	+	+	+	+
中心圆筛藻	<i>C. centralis</i>		+		
整齐圆筛藻	<i>C. concinnus</i>	+			
明壁圆筛藻	<i>C. debilis</i>		+		
巨圆筛藻	<i>C. gigas</i>		+	+	
离心列圆筛藻	<i>C. excentricus</i>		+		
强氏圆筛藻	<i>C. janischii</i>				+
线形圆筛藻	<i>C. lineatus</i>	+	+	+	+
宽边圆筛藻	<i>C. marginatus</i>	+			
光亮圆筛藻	<i>C. nitidus</i>	+			
壮丽圆筛藻	<i>C. nobilis</i>			+	
结节圆筛藻	<i>C. nodulifer</i>			+	
虹彩圆筛藻	<i>C. oculus-iridis</i>		+		
辐射圆筛藻	<i>C. radiatus</i>	+	+		+
洛氏圆筛藻	<i>C. rothii</i>		+		
圆筛藻属	<i>Coscinodiscus</i> spp.	+	+	+	+
地中海指管藻	<i>Dactyliosolen mediterraneus</i>	+	+		+
短棘藻	<i>Detonula pumida</i>				+
双壁藻属一种	<i>Diploneis</i> sp.				+
布氏双尾藻	<i>Ditylum brightwelli</i>		+		+
太阳双尾藻	<i>D. sol</i>	+			+
伽氏筛盘藻	<i>Ethmodiscus gazellae</i>	+			
长角弯角藻	<i>Eucampia cornuta</i>				+
短角弯角藻	<i>E. zodiacus</i>	+			+
脆杆藻属一种	<i>Fragilaria</i> sp.				+
热带戈斯藻	<i>Gossleriella tropica</i>				+
海生斑条藻	<i>Grammatophora marina</i>	+			
菱软几内亚藻	<i>Guinardia flaccida</i>	+	+	+	+
中国半管藻	<i>Hemiaulus chinensis</i>	+		+	
霍氏半管藻	<i>H. hauckii</i>	+	+		+
印度半管藻	<i>H. indicus</i>	+			+
薄壁半管藻	<i>H. membranaceus</i>	+	+		+
中华半管藻	<i>H. sinensis</i>		+		+
楔形半盘藻	<i>Hemidiscus cuneiformis</i>	+			+
北方劳德藻	<i>Lauderia borealis</i>		+		
丹麦细柱藻	<i>Leptocylindrus danicus</i>	+			+
短纹楔形藻	<i>Licmophora abbreviata</i>		+	+	
扇形楔形藻	<i>L. flabellata</i>	+		+	
楔形藻属	<i>Licmophora</i> spp.	+		+	
短喙胸隔藻	<i>Mastogloia rostellata</i>				+
长喙胸隔藻	<i>M. rostrate</i>				+
念珠直链藻	<i>Melosira moniliformis</i>			+	
拟银币直链藻	<i>M. nummuloides</i>		+		
直链藻属	<i>Melosira</i> spp.	+		+	
具槽直链藻	<i>M. sulcata</i>				+
舟形藻属	<i>Navicula</i> spp.	+	+	+	+

	物种 Species	1998年9月 Sept., 1998	1998年12月 Dec., 1998	1999年1月 Jan., 1999	1999年4月 Apr., 1999
直舟形藻	<i>N. directa</i>	+		+	+
远距舟形藻	<i>N. distans</i>				+
宽阔舟形藻	<i>N. latissima</i>	+			
细微舟形藻	<i>N. parva</i>		+	+	
帕维舟形藻	<i>N. pavillardi</i>			+	
小舟形藻	<i>N. subminuscula</i>	+	+	+	+
新月菱形藻	<i>Nitzschia closterium</i>		+	+	
簇生菱形藻	<i>N. fasciculata</i>				+
碎片菱形藻	<i>N. frustulum</i>	+			
杂菱形藻	<i>N. hybrida</i>				+
长菱形藻	<i>N. lanceola</i>	+			
披针菱形藻	<i>N. lanceolata</i>		+		
长菱形藻	<i>N. longissima</i>	+	+	+	+
长菱形藻弯端变种	<i>N. longissima</i> var. <i>reversa</i>		+		
洛伦菱形藻密条变种	<i>N. lorenziana</i> var. <i>densestriata</i>				+
奇异菱形藻	<i>N. paradoxa</i>		+	+	
弯菱形藻	<i>N. sigma</i>		+	+	+
弯菱形藻弯变种	<i>N. sigma</i> var. <i>sigmatella</i>			+	
菱形藻属	<i>Nitzschia</i> spp.	+	+		+
三角褐指藻	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	+	+	+	+
羽纹藻属一种	<i>Pinnularia</i> sp.			+	
太阳漂流藻	<i>Planktoniella sol</i>	+	+	+	+
艾希斜纹藻	<i>Pleurosigma aestuarii</i>	+		+	+
近缘斜纹藻	<i>P. affine</i>			+	
宽角斜纹藻	<i>P. angulatum</i>				+
舟形斜纹藻	<i>P. naviculaceum</i>			+	
诺马斜纹藻	<i>P. normanii</i>		+	+	+
斜纹藻属一种	<i>Pleurosigma</i> sp.	+			
柔弱伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	+	+	+	+
尖刺伪菱形藻	<i>P. pungens</i>	+	+	+	+
成列伪菱形藻	<i>P. seriata</i>	+	+		
尖根管藻	<i>Rhizosolenia acuminata</i>				+
翼根管藻	<i>R. alata</i>	+	+	+	+
翼根管藻弯喙变型	<i>R. alata</i> f. <i>curvirostris</i>		+		
翼根管藻纤细变型	<i>R. alata</i> f. <i>gracillima</i>	+	+	+	+
翼根管藻印度变型	<i>R. alata</i> f. <i>indica</i>	+			+
伯氏根管藻	<i>R. bergonii</i>	+	+	+	+
距端根管藻	<i>R. calcar-avis</i>	+	+	+	+
卡氏根管藻	<i>R. castracanei</i>	+		+	+
克氏根管藻	<i>R. clevei</i>	+			
圆柱根管藻	<i>R. cylindrus</i>	+	+		+
钝棘根管藻半刺变型	<i>R. hebetata</i> f. <i>semispina</i>		+	+	+
脆根管藻	<i>R. fragilissima</i>	+			+
粗根管藻	<i>R. robusta</i>	+	+	+	+
刚毛根管藻	<i>R. setigera</i>		+		
根管藻属	<i>Rhizosolenia</i> spp.		+	+	+
斯托根管藻	<i>R. stolterforthii</i>	+	+		+
笔尖形根管藻	<i>R. styliformis</i>	+	+		+
笔尖形根管藻粗径变种	<i>R. styliformis</i> var. <i>latissima</i>	+			+
笔尖形根管藻长棘变种	<i>R. styliformis</i> var. <i>longispina</i>				+
优美施罗藻	<i>Schroederella delicatula</i>			+	
中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>	+	+		
掌状冠盖藻	<i>Stephanopyxis palmeriana</i>		+		
扭鞘藻	<i>Streptothece thamesis</i>	+	+	+	+
南海条纹藻	<i>Striatella nanhainica</i>				+
华丽针杆藻	<i>Synedra formosa</i>				+
针杆藻属	<i>Synedra</i> spp.		+	+	+
菱形海线藻	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	+	+	+	+
密联海链藻	<i>Thalassiosira condensata</i>	+	+		+
细弱海链藻	<i>T. subtilis</i>	+	+	+	+
柔弱海毛藻	<i>Thalassiothrix delicatula</i>	+	+	+	
伏氏海毛藻	<i>T. frauenfeldii</i>	+	+	+	+

	物种 Species	1998年9月 Sept., 1998	1998年12月 Dec., 1998	1999年1月 Jan., 1999	1999年4月 Apr., 1999
长海毛藻	<i>T. longissima</i>	+	+	+	+
地中海海毛藻	<i>T. mediterranea</i>		+	+	
海毛藻属	<i>Thalassiothrix</i> spp.		+		
三角藻属	<i>Triceratium</i> spp.	+			+
绿海球藻	<i>Halosphaera viridis</i>	+			
二齿双管藻	<i>Amphisolenia bidentata</i>	+	+		+
细长双管藻	<i>A. extensa</i>	+			
四齿双管藻	<i>A. schauinslandi</i>		+		+
三叉双管藻	<i>A. thrinax</i>				+
羊头角藻	<i>Ceratium arietinum</i>	+			
针角藻	<i>C. belone</i>			+	
短角角藻	<i>C. breve</i>	+	+	+	+
短角角藻平行变种	<i>C. breve</i> var. <i>parallelum</i>	+	+		+
腊台角藻	<i>C. candelabrum</i>	+	+	+	+
歧分角藻	<i>C. carriense</i>	+	+		+
歧分角藻舞姿变型	<i>C. carriense</i> f. <i>volans</i>	+			+
扭角藻	<i>C. contortum</i>				+
扭角藻舞姿变种	<i>C. contortum</i> var. <i>saltans</i>		+		+
相反角藻	<i>C. contrarium</i>	+	+		+
偏转角藻	<i>C. deflexum</i>		+		+
长梭角藻	<i>C. extensum</i>	+	+	+	+
拟镰角藻	<i>C. falcatifforme</i>			+	+
镰角藻	<i>C. falcatum</i>	+		+	
叉角藻	<i>C. furca</i>	+	+		+
梭角藻	<i>C. fusus</i>	+	+	+	+
针状梭角藻	<i>C. fusus</i> var. <i>seta</i>	+			
瘤壁角藻	<i>C. gibberum</i>	+	+	+	+
瘤壁角藻异角变种	<i>C. gibberum</i> var. <i>dispar</i>	+			+
圆头角藻	<i>C. gravidum</i>	+			+
网纹角藻	<i>C. hexacanthum</i>	+			
粗刺角藻	<i>C. horridum</i>				+
矮胖角藻	<i>C. humile</i>		+	+	+
膨角藻	<i>C. inflatum</i>		+		
卡氏角藻	<i>C. karstenii</i>	+	+	+	
科氏角藻	<i>C. kofoidii</i>	+			+
细长角藻	<i>C. longissimum</i>	+			+
新月角藻	<i>C. lunula</i>	+			
大角角藻	<i>C. macroceros</i>	+	+	+	+
大角角藻橡实变种	<i>C. macroceros</i> var. <i>gallicum</i>	+	+	+	+
马西里亚角藻	<i>C. massiliense</i>	+			+
圆胖角藻	<i>C. paradoxides</i>	+			
五角角藻	<i>C. pentagonum</i>	+		+	+
五角角藻长角变种	<i>C. pentagonum</i> var. <i>longisetem</i>				+
美丽角藻	<i>C. pulchellum</i>	+	+		+
反折角藻	<i>C. reflexum</i>				+
角藻属一种	<i>Ceratium</i> sp.	+	+		+
对称角藻	<i>C. symmetricum</i>				+
纤细角藻	<i>C. tenue</i>		+		+
圆柱角藻	<i>C. teres</i>				+
波状角藻	<i>C. trichoceros</i>	+	+	+	+
锚角藻	<i>C. tripos</i>	+	+	+	+
锚角藻广盐变种	<i>C. tripos</i> var. <i>subsalsum</i>		+		
兀鹰角藻	<i>C. vultur</i>	+		+	+
兀鹰角藻苏门答腊变种	<i>C. vultur</i> var. <i>sumatranum</i>	+	+		+
双刺角甲藻	<i>Ceratocorys bipes</i>	+			
多刺角甲藻	<i>C. horrida</i>	+			+
甲藻纲	DINOPHYCEAE				+
具尾鳍藻	<i>Dinophysis caudata</i>	+			+
勇士鳍藻	<i>D. miles</i>	+			+
斯氏鳍藻	<i>D. schuttii</i>	+			
鳍藻属一种	<i>Dinophysis</i> sp.	+			
新月球甲藻	<i>Dissodinium lunula</i>	+	+		+

	物种 Species	1998年9月 Sept., 1998	1998年12月 Dec., 1998	1999年1月 Jan., 1999	1999年4月 Apr., 1999
膝沟藻属	<i>Gonyaulax</i> spp.	+			
裸甲藻属	<i>Gymnodinium</i> spp.	+		+	
夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i>			+	+
大鸟尾藻	<i>Ornithocercus magnificus</i>	+			+
方鸟尾藻	<i>O. quadratus</i>	+	+		
鸟尾藻属	<i>Ornithocercus</i> spp.		+		+
美丽鸟尾藻	<i>Ornithocercus splendidus</i>	+	+	+	+
四叶鸟尾藻	<i>Ornithocercus steinii</i>	+	+		+
中距鸟尾藻	<i>Ornithocercus thurnii</i>				+
刺尖甲藻	<i>Oxytoxum scolopax</i>	+			
尖甲藻属	<i>Oxytoxum</i> spp.			+	+
多甲藻科	PERIDINIACEAE	+		+	+
脚膜多甲藻	<i>Perdinium fatulipes</i>		+		+
锥形多甲藻	<i>P. conicum</i>				+
扇形多甲藻	<i>P. depressum</i>	+		+	+
分叉多甲藻	<i>P. divergens</i>	+		+	+
优美多甲藻	<i>P. elegans</i>				+
大多甲藻	<i>P. grande</i>	+	+	+	+
海洋多甲藻	<i>P. oceanicum</i>	+	+	+	+
五角多甲藻	<i>P. pentagonum</i>				+
卵多甲藻	<i>P. ovum</i>	+			
多甲藻属	<i>Perdinium</i> spp.	+			
斯氏多甲藻	<i>P. steinii</i>			+	+
楔形秃甲藻	<i>Phalacroma cuneus</i>	+			+
大平秃甲藻	<i>P. vastiforme</i>	+			
单刺足甲藻	<i>Podolampas spinifera</i>				+
梭梨甲藻	<i>Pyrocystis fusiformis</i>	+	+	+	+
浅弧梨甲藻	<i>P. gerbautii</i>			+	+
钩梨甲藻	<i>P. hamulus</i>			+	+
钩梨甲藻异肢变种	<i>P. hamulus</i> var. <i>inaequalis</i>		+		
钩梨甲藻半圆变种	<i>P. hamulus</i> var. <i>semicircularis</i>				+
拟夜光梨甲藻	<i>P. pseudonociluca</i>	+	+	+	+
扁甲藻	<i>Pyrophacus horologicum</i>	+			+
扁甲藻多甲变种	<i>P. horologicum</i> var. <i>steinii</i>	+			
小等刺硅鞭藻短刺变种	<i>Dictyocha fibula</i> var. <i>messanensis</i>			+	
小等刺硅鞭藻	<i>D. fibula</i>	+	+		+
八异刺硅鞭藻八刺变种	<i>Distephanus octonarius</i> var. <i>octonarius</i>	+			
六异刺硅鞭藻	<i>D. speculum</i>	+			+
六异刺硅鞭藻八角变种	<i>D. speculum</i> var. <i>octonarium</i>				+
颤藻属	<i>Oscillatoria</i> spp.	+	+	+	+
胞内植生藻	<i>Richelia intracellularis</i>		+		+
红海束毛藻	<i>Trichodesmium erythraeum</i>	+			+
汉氏束毛藻	<i>T. hildebrandtii</i>				+
束毛藻属	<i>Trichodesmium</i> spp.				+
铁氏束毛藻	<i>T. thiebautii</i>	+			+