

深圳红树林区浮游植物时空变化与水质要素的关系

王 雨^{1,2}, 卢昌义², 谭凤仪³, 徐华林⁴, 唐森铭^{1*}

1. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门, 361005
2. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门, 361005
3. 香港城市大学生物及化学系, 香港
4. 深圳福田红树林国家级自然保护区管理局, 深圳, 518040

【摘要】 在探讨深圳福田红树林区浮游植物群落结构及种群数量变化规律的基础上, 对红树林区不同水质环境中浮游植物时空变化进行了研究, 初步分析主要水质因子与浮游植物密度时空变化的相关关系。分析表明, 福田红树林区浮游植物有 5 门 28 属 51 种 (含未知 9 种), 以硅藻门种类为主, 优势种为微小环藻 (*Cyclotella caspia*) 和诺氏海链藻 (*Thalassiosira nordenskiöldi*) 等, 蓝藻、绿藻能发展成为优势类群, 优势种为小颤藻 (*Oscillatoria minima*) 和小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 等。浮游植物种类组成季节变化明显, 空间变化显著。浮游植物密度空间变化明显, 季节差异不大。各季度的浮游植物密度较高, 达到 10^6 cells·L⁻¹ 的级别。由于接纳生活污水、工业废水、养殖废水等陆源污水, 5 个站位的主要水质因子受污水排放影响明显, 站位受陆源污水影响的顺序依次为: > > > >, 污水排放进入红树林区的水域水质显著区别于完全海水水域。陆源污水输入对浮游植物密度时空变化造成显著影响, 浮游植物密度与总氮浓度、盐度相关性较好, 与总氮成显著负相关, 与盐度成显著正相关。

关键词: 红树林; 浮游植物; 时空变化; 水质要素; 深圳福田

中图分类号: Q948.8

文献标识码: A

文章编号: 1008-8873(2007)06-505-08

Seasonal and spatial variation of phytoplankton and relationship with water-quality factors in Futian Mangroves of Shenzhen

WANG Yu^{1,2}, LU Changyi², TAM Nora Fung-Yee³, XU Hulin⁴, TANG Senming

1. The Third Institution of Oceanography, SOA, Xiamen 361005, China
2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China
3. Department of Biology and Chemistry, City University of Hong Kong, Hong Kong, China
4. The State Mangrove Reserve Administration in Shenzhen, Shenzhen, 518040, China

Abstract Phytoplankton community were studied at 5 sites in Futian Mangrove Reserves of Shenzhen from Oct. 2005 to Sep. 2006. The species composition, densities and distribution of phytoplankton, in seasonal and spatial scale, were studied. Main water-quality factors were preliminary examined for their relations to phytoplankton densities. As result a total of 51 taxa (including 1 variety and 9 unidentified taxa) belonging to 28 genera in 5 phyta were identified. It showed that diatoms, such as *Cyclotella caspia* and *Thalassiosira nordenskiöldi* dominated in 4 seasons in most sites. Among the others, species of Cyanobacteria and Chlorophyta, such as *Oscillatoria minima* and *Chlorella vulgaris*, only dominated at a few sites. In contrast to a remarkable seasonal and spatial variation of species compositions, the phytoplankton densities changes little in season though they alternated with sites in spatial. Phytoplankton density was high reaching 10^6 cells·L⁻¹ in 4 seasons. Water qualities changed with seasons in 5 sites due to the influence of domestic and industrial wastewater. The sites contaminated by the sewage are in sequence of > > > >, the pollution made water quality quite different with that of seawater in the open sea. Correlations of phytoplankton density with total nitrogen and salinity were found. It showed that the phytoplankton density changed positively with salinity but negatively with the total nitrogen.

Keywords: mangrove; phytoplankton; seasonal and spatial variation; water-quality factors; Futian in Shenzhen

收稿日期: 2007-11-02 收稿, 2007-12-20 接受

基金项目: 中国近海海洋综合调查与评价项目 908-01-ST06 和 908-02-03-09

作者简介: 王 雨 (1981 -), 男, 贵州长顺人, 硕士, 国家海洋局第三海洋研究所研究员, 从事海洋生物生态的研究。

*通讯作者, 唐森铭, 博士, 国家海洋局第三海洋研究所研究员, 邮箱: tsm@21cn.com

1 引言 (Introduction)

红树林是沿海防护林中特有的森林群落类型,在保护滨海湿地生态系统、生物多样性及维护海湾、河口地区生态平衡等方面起着不可替代的重要作用。我国早在 20 世纪 50 年代初,就开始对红树林区进行研究,到目前为止,对红树植物资源、群落生态以及依赖红树林生境的动物、土壤微生物等都进行了较为详尽深入的研究^[1]。在红树林生态系统中,浮游植物是其重要的组成成分,在食物链中占有重要地位,其群落结构的稳定对水域生态环境具有重要意义^[2]。浮游植物能对水环境的变化有敏感的反应,可作为红树林区水体水质状况的指示生物,是水污染调查的重要研究对象之一,可说明环境状况的改善与变迁^[3, 4]。对红树林生态系统中浮游植物研究,不仅对于探索红树林生长区域的生态环境及其特征意义重大,还可为红树林区资源保护及其开发利用提供重要的参考资料。本文通过对深圳福田红树林区浮游植物群落结构分析,结合相关水体理化指标,探讨主要水质因子对浮游植物时空变化的影响,旨在了解浮游植物在红树林生态系统中的作用,客观地反映红树林区水环境状况,增进对红树林生态系统的了解。

2 材料和方法(Material and Methods)

2.1 站位概况

深圳福田红树林是中国国家级的自然保护区,

位于深圳湾的东北部,东起深圳河口皇岗,西至车公庙,北到广深高速路,南达深圳湾顶,河海相互作用,咸淡水混合,并具有潮汐作用^[5]。保护区总保护面积 304 hm²,保护红树林面积 66.7 hm²,生长在高潮带,主要红树植物有秋茄 (*Kandelia candel*)、白骨壤 (*Avicennia marina*)、老鼠簕 (*Acanthus ilicifolius*)、木榄 (*Bruguiera gymnorrhiza*)、桐花树 (*Aegiceras corniculatum*)、海桑 (*Sonneratia caseolaris*) 等。红树林区林相郁闭度高,外貌整齐,高度 3~7 m。林外临近深圳湾处,多是泥质滩涂,少有其他植物分布;林外临近海岸带处,多是基围、鱼塘的养殖场所^[6]。

2.2 采样站位

深圳福田红树林保护区设置有 5 个监测站位,对红树林区进行水质常规监测工作(图 1)。5 个站从东至西依次为 站沙嘴码头,是一废弃码头,周围人烟稀疏,深圳河的淡水输入该处,两岸滩涂生长着茂密红树;

站风塘河口,是大流量的市政废水排海,在丰水期有少量海水倒灌,河口少有红树生长; 站观鸟屋,完全海水,在林区内的观光浮桥上; 站生活污水入林口,是一污水排入红树林的狭窄水道端口,周围红树稠密; 站海滨生态公园,面临深圳湾,在人工再植的红树林滩涂间隙中,在丰水期有少量生活污水流入。

2.3 研究方法

于 2005 年 10 月~2006 年 9 月对 5 个监测站的水体采样,分别于 11 月(秋)、1 月(冬)、4 月(春)、7 月(夏)进行。高潮时采集表层水样,用 Lugol's 溶液

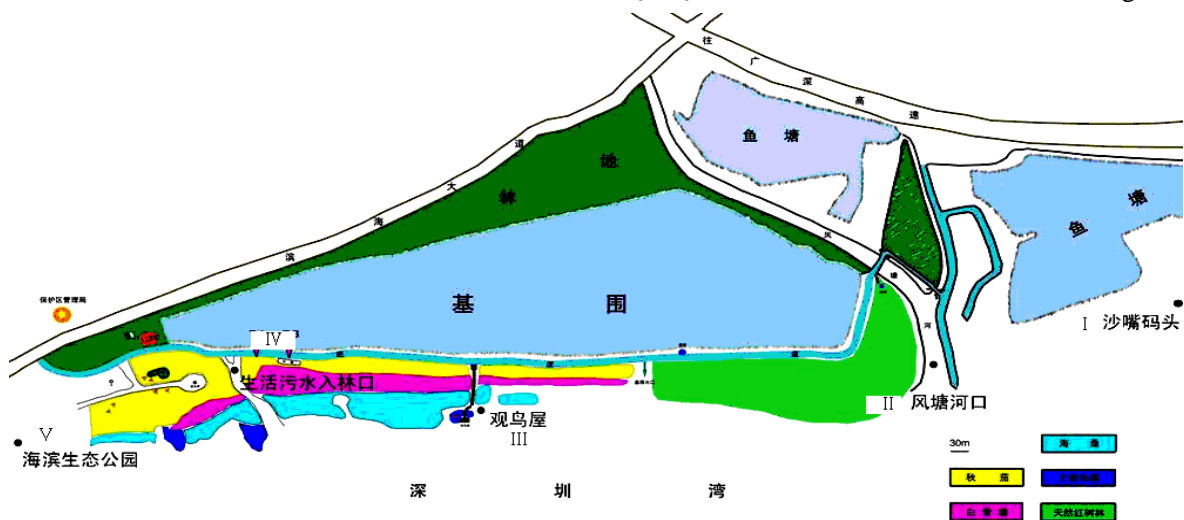


图 1 保护区采样站位分布图

Fig.1 Map of sampling sites in Futian Mangroves

固定,固定水样2000 mL,静置,沉淀,逐步浓缩至30 mL,取0.1 mL于显微镜下用血球计数板进行种类鉴定和计数,硅藻样品通过消化处理后进行研究^[7, 8, 9]。现场测定水温与盐度。主要水质因子按《水和废水监测分析方法》^[10]进行总氮(TN)、氨氮(NH₄-N)、总磷(TP)、可溶性磷酸盐(PO₄-P)、硅酸盐(SiO₃-Si)以及pH值测定。

3 结果和分析(Results)

3.1 浮游植物的种类组成

以往对福田红树林区浮游植物的研究表明,该区浮游植物的主要优势类群是硅藻,硅藻种类多,密度大,因污水的排入,存在大量能耐受污染的种类,水体营养化水平较高^[2,11,20,21]。本研究选定多个站位,对红树林区不同水质环境中浮游植物时空变化进行研究。调查结果表明,因接纳生活污水、工业废水、养殖废水,导致浮游植物群落时空变化明显。共鉴定到浮游植物5门28属51种(含未知9种)(表1)。硅藻门17属34种(包括未知7种),占总种类数的68.6%,中心纲硅藻(Centricae)9属13种,羽纹纲硅藻(Pennatae)8属18种;蓝藻门4属7种,占总种类数的13.7%;绿藻门4属5种(1未知种),占总种类数的9.8%;裸藻门1属3种,占总种类数的5.9%;隐藻门2属2种(1未知种)。

本研究发现,福田红树林区浮游植物以硅藻门种类为主,蓝藻有较多种类,绿藻、裸藻和隐藻种类较少。硅藻门羽纹纲(Pennatae)的种类稍多,占硅藻种类数的52.9%,以舟形藻属(*Navicula* spp.)及菱形藻属(*Nitzschia* spp.)种类最多,不能成为优势种;中心纲(Centricae)的种类数较少,以微型硅藻类为主,多为圆筛藻属(*Coscinodiscus* spp.)、小环藻属(*Cyclotella* spp.)、海链藻属(*Thalassiosira* spp.)的种类。中心纲的微小环藻(*Cyclotella caspia*)和诺氏海链藻(*Thalassiosira nordenskiöldi*)在以海水为主的、和站成为优势种。

蓝藻门种类不多,在站和站,常成为优势类群,如点形平裂藻(*Merismopedia punctata*)、湖生颤藻(*Oscillatoria lacustris*),以淡水常见种为主。绿藻门种类只在秋、春季鉴定到,在、站成为优势种,裸藻门种类在大多数站位都能鉴定到,个体大,没有成为优势种。

表1 深圳福田红树林区浮游植物种类组成

Tab.1 Species composition of phytoplankton in Futian Mangroves

硅藻门 Bacillariophyta	
圆筛藻属 <i>Coscinodiscus</i>	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>
虹彩圆筛藻 <i>C. oculus-iridis</i>	碎片菱形藻 <i>N. frustulum</i>
小眼圆筛藻 <i>C. oculatus</i>	颗粒菱形藻 <i>N. gramulata</i>
小环藻属 <i>Cyclotella</i>	长菱形藻 <i>N. longissima</i>
微小环藻 <i>C. caspia</i>	披针菱形藻 <i>N. lanceolata</i>
条纹小环藻 <i>C. striata</i>	新月菱形藻 <i>N. closterium</i>
条纹小环藻扭曲变种 <i>C. striata</i> var. <i>contort</i>	未知种 1
海链藻属 <i>Thalassiosira</i>	舟形藻属 <i>Navicula</i>
诺氏海链藻 <i>T. nordenskiöldi</i>	小头舟形藻 <i>N. cuspidate</i>
威氏海链藻 <i>T. weissflogii</i>	喙头舟形藻 <i>N. rhynchocephala</i>
骨条藻属 <i>Skeletonema</i>	未知种 1
中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	未知种 2
冠盘藻属 <i>Stephanodiscus</i>	布纹藻属 <i>Gyrosigma</i>
汉氏冠盘藻 <i>S. hantzschii</i>	刀形布纹藻 <i>G. scalproides</i>
三角藻属 <i>Triceratium</i>	斜布纹藻 <i>G. obliquum</i>
网纹三角藻 <i>T. reticulum</i>	斜纹藻属 <i>Pleurosigma</i>
角毛藻属 <i>Chaetoceras</i>	微小斜纹藻 <i>P. minutum</i>
牟勒角毛藻 <i>C. muelleri</i>	未知种 1
盒形藻属 <i>Biddulphia</i>	针杆藻属 <i>Synedra</i>
长角盒形藻 <i>Bidd. longicuris</i>	平片针杆藻 <i>S. tabulate</i>
直链藻属 <i>Melosira</i>	辐节藻属 <i>Stauroneis</i>
尤氏直链藻 <i>M. juergensi</i>	缢缩辐节藻 <i>S. constricta</i>
硅藻门未知种 1	双眉藻属 <i>Amphora</i>
硅藻门未知种 2	卵形双眉藻 <i>A. ovalis</i>
硅藻门未知种 3	胸隔藻属 <i>Mastogloia</i>
	矮小胸隔藻 <i>M. pumila</i>
	蓝藻门 Cyanophyta
颤藻属 <i>Oscillatoria</i>	席藻属 <i>Phormidium</i>
小颤藻 <i>O. minima</i>	小席藻 <i>P. tenue</i>
湖生颤藻 <i>O. lacustris</i>	棒条藻属 <i>Rhabdoderma</i>
灿烂颤藻 <i>O. splendida</i>	线形棒条藻 <i>R. lineara</i>
平裂藻属 <i>Merismopedia</i>	
银灰平裂藻 <i>M. glance</i>	
点形平裂藻 <i>M. punctata</i>	
	绿藻门 Chlorophyta
小球藻属 <i>Chlorella</i>	鼓藻属 <i>Cosmarium</i>
小球藻 <i>C. vulgaris</i>	未知种 1
栅藻属 <i>Scenedesmus</i>	月牙藻属 <i>Selenastrum</i>
四尾栅藻 <i>S. quadricauda</i>	小形月牙藻 <i>S. minutum</i>
二对栅藻 <i>S. bijuga</i>	
	隐藻门 Cryptophyta
隐藻属 <i>Cryptomonas</i>	蓝隐藻属 <i>Chroomouas</i>
未知种 1	尖尾蓝隐藻 <i>C. acuta</i>
	裸藻门 Euglenophyta
裸藻属 <i>Euglena</i>	
尖尾裸藻 <i>E. oxyuris</i>	
鱼形裸藻 <i>E. pisciformis</i>	
静裸藻 <i>E. deses</i>	

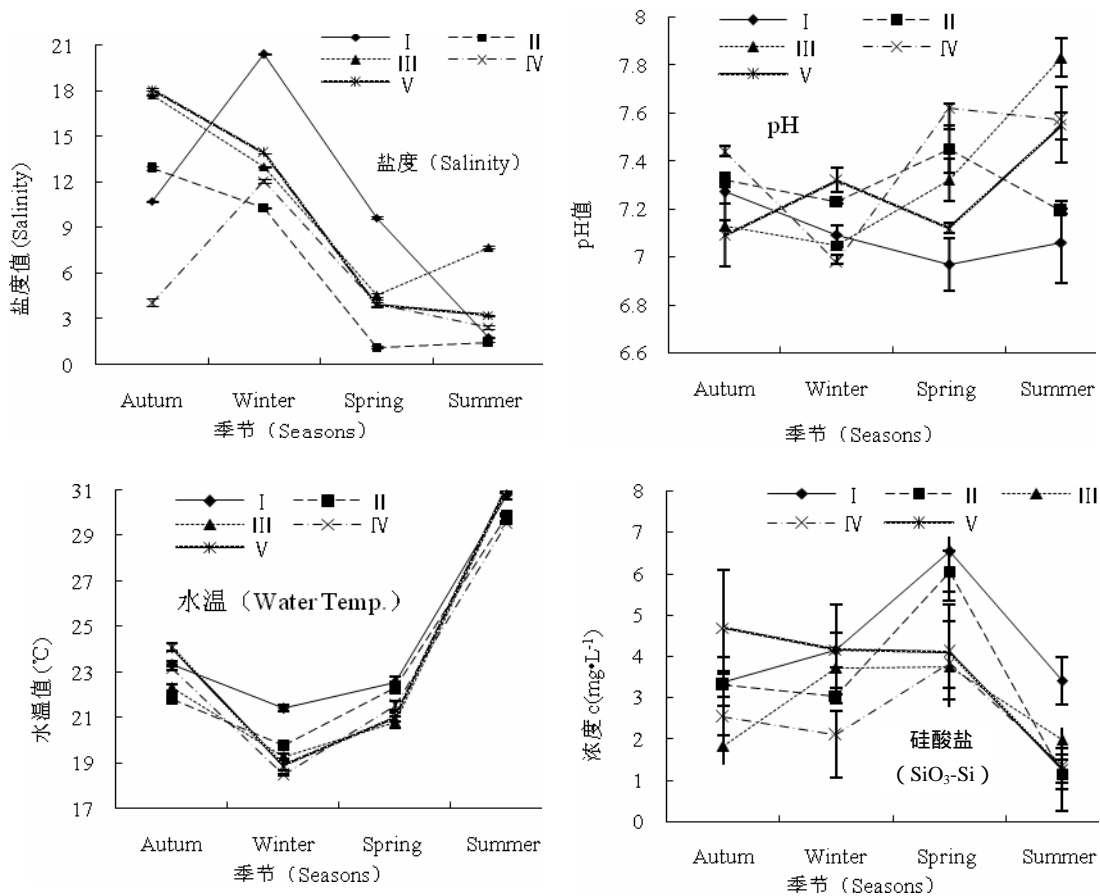


图2 福田红树林各监测站盐度、水温、pH、硅酸盐的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of salinity, water temperature, pH, SiO₃ – Si in Futian Mangroves at 5 sites

3.2 浮游植物种类组成的时空变化

浮游植物种类组成季节变化明显 种类组成在冬季最少,在春季最多,夏季与秋季差别不大,硅藻与裸藻、隐藻的季节变化明显,蓝藻与绿藻无季节变化(表2)。浮游植物种类组成空间变化明显, 站鉴定到最多的

种类, 站鉴定到最少的种类, 站与 站种类数相当, 站与 站种类数差别不大(表3)。在全年鉴定到种类共有52种,5个站位都能鉴定到种类有16种,占全部种类数的30.8%,其中仅硅藻门种类就有13,硅藻广范分布。5个站位鉴定到的种类分别为36种、26种、40种、32种和43种, 、 和 站鉴定到的种类数明显高于 、 站。仅在一个站位鉴定到的种类少。

表2 福田红树林浮游植物种类组成的季节变化

Tab.2 Seasonal variation of taxa numbers of phytoplankton in Futian Mangroves

种类 (Taxa)	季节(Season)			
	秋(Autum)	冬(Winter)	春(Spring)	夏(Summer)
硅藻	18/54.5*	20/70.0	26/63.4	16/53.3
蓝藻	7/21.2	5/17.2	7/17.1	7/23.3
绿藻	4/12.1	4/13.8	4/9.8	1/3.3
裸藻	3/9.1	0/0	3/7.3	4/13.3
隐藻	1/3.0	0/0	1/2.4	2/6.7
总种类数	33	29	41	30

*表中数据表示种数/百分比

3.3 浮游植物密度的时空变化

浮游植物密度空间变化明显,季节差异不大(表4)。 、 站浮游植物密度均以秋季明显高于冬、春、夏季。 站夏季浮游植物密度最高,冬季最少。

站浮游植物密度在冬季达最高,在夏季降为最低。浮游植物密度季节变化在 $3.33 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1} \sim 5.54 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均密度为 $4.26 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。全年最低密度值($1.21 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)与最高密度值($8.75 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)均发生在秋季。春季也有较低密度发生($1.43 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)。各季度浮游植物密度相当高,

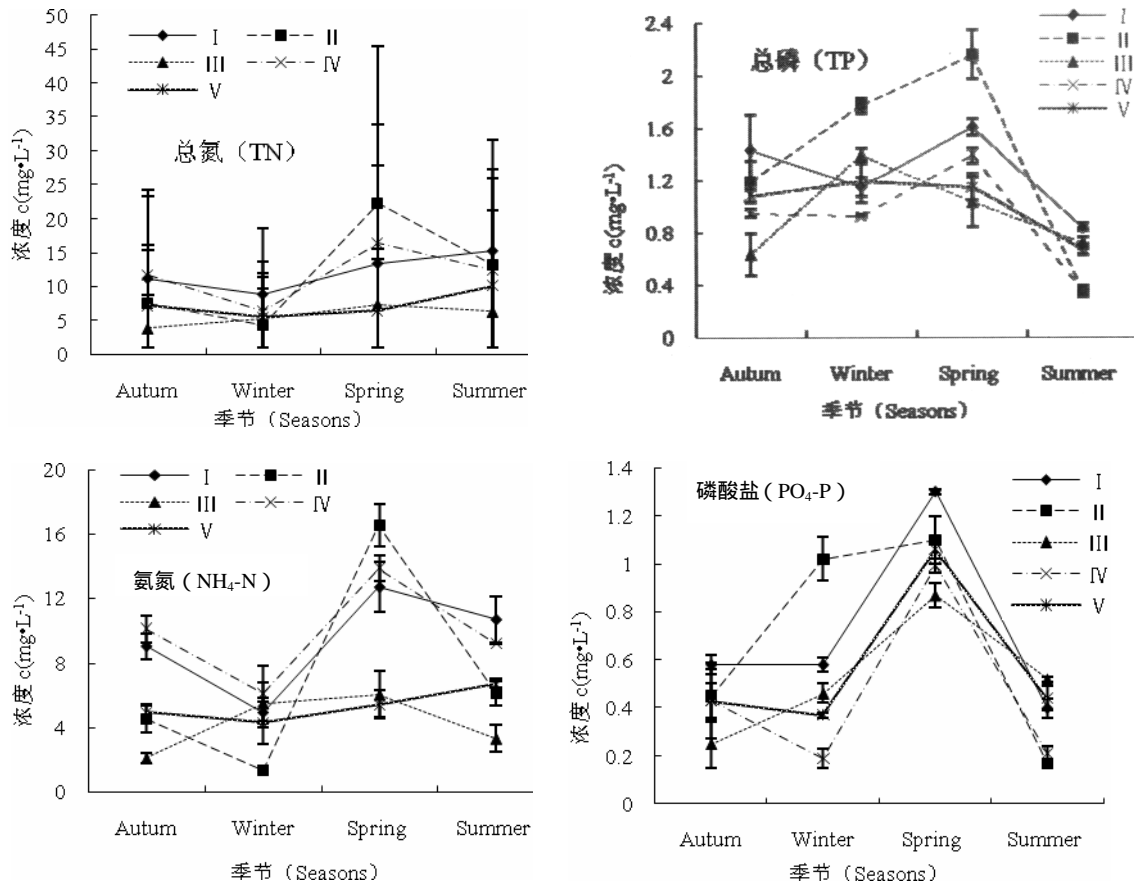


图3 福田红树林各监测站总氮、氨氮、总磷、可溶磷酸盐的季节变化

Fig.3 Seasonal variations of TN, NH₄-N, TP, PO₄-P concentrations in Futian Mangroves at 5 sites

表3 福田红树林浮游植物种类组成的空间变化

Tab.3 Spatial variation of of taxa numbers of phytoplankton in Futian Mangroves

种类 (Taxa)	站点(Site)				
硅藻	27/75.0*	15/57.7	32/81.4	17/53.1	27/61.4
蓝藻	6/16.7	7/26.9	3/6.9	7/21.9	7/15.9
绿藻	2/5.6	2/7.7	2/4.7	5/15.6	4/9.1
裸藻	0/0	1/3.8	3/6.9	3/9.4	3/6.8
隐藻	1/2.8	1/3.8	0/0	0/0	2/4.5
总种类数	36	26	41	32	44

*表中数据表示种数/百分比

达到 10^6 cells·L⁻¹的级别,按照水体富营养化的浮游植物密度评分标准^[12],达到了水体富营养化的水平。5个站点中,浮游植物密度空间变化范围是 2.30×10^6 cells·L⁻¹ ~ 6.18×10^6 cells·L⁻¹,平均密度为 4.59×10^6 cells·L⁻¹。最高密度发生在 站(8.75×10^6 cells·L⁻¹),最低密度发生在 站(1.21×10^6 cells·L⁻¹)。 站也有

较高密度(8.65×10^6 cells·L⁻¹)。各站位的浮游植物密度很高,达到水体富营养化的水平。

表4 福田红树林浮游植物密度的时空变化 ($\times 10^6$ cells·L⁻¹)

Tab.4 Seasonal and spatial variation of phytoplankton density in Futian mangroves ($\times 10^6$ cells·L⁻¹)

站点(Site)	季节 (Season)				年内 平均值 (Annual meanvalue)
	秋 (Autum)	冬 (Winter)	春 (Spring)	夏 (Summer)	
	3.77	3.09	3.55	4.20	3.65±0.46
	1.21	3.46	1.43	3.11	2.30±1.15
	8.65	6.02	3.67	5.11	5.86±2.09
	5.33	7.61	4.70	2.15	4.95±2.24
	8.75	8.26	3.31	4.41	6.18±2.73
空间变化 平均值 (Spatial meanvalue)	5.54±3.2*	4.38±2.3	3.33±1.1	3.80±1.1	4.26±0.9

*表内数据表示平均值±标准差

表5 福田浮游植物优势类群的时空变化

Tab.5 Seasonal and Spatial variation of dominant taxa in Futian Mangroves

站位 Station	秋 (Autum) (2005年11月)	冬 (Winter) (2006年1月)	春 (Spring) (2006年4月)	夏 (Summer) (2006年7月)
	诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskiöldi</i>	威氏海链藻 <i>T. weissflogii</i> 条纹小环藻 <i>C. striata</i>	微小环藻 <i>Cyclotella caspia</i>	鱼形裸藻 <i>Euglena pisciformis</i> 微小环藻 <i>Cyclotella caspia</i>
	小颤藻 <i>Oscillatoria minima</i>	微小环藻 <i>Cyclotella caspia</i>	小颤藻 <i>Oscillatoria minima</i>	小颤藻 <i>Oscillatoria minima</i>
	诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskiöldi</i>	诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskiöldi</i>	微小环藻 <i>Cyclotella caspia</i>	微小环藻 <i>Cyclotella caspia</i>
	小颤藻 <i>Oscillatoria minima</i>	小颤藻 <i>Oscillatoria minima</i>	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	小颤藻 <i>Oscillatoria minima</i>
	诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskiöldi</i>	诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskiöldi</i>	小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>	微小环藻 <i>Cyclotella caspia</i>

3.4 深圳福田红树林区浮游植物优势类群的时空变化

浮游植物优势种或优势类群时空变化明显(表5)。和 站的优势种或优势类群基本一致,和 站的优势种或优势类群差异较大。福田红树林区浮游植物优势种或优势类群主要是:硅藻门微小环藻、条纹小环藻、威氏海链藻、诺氏海链藻;蓝藻门小颤藻;绿藻门小球藻;裸藻门裸藻。这些能耐受污染的种类成为优势种或优势类群,预示着海水养殖的兴起、工农业废水和生活污水的排放,多数海域富营养化程度越来越严重,红树林区也不可幸免^[11,13],能耐受污染的种类大量生长,如小环藻、海链藻、骨条藻、颤藻、裸藻等,成为水体微型藻类优势种,常常在近海海域引发赤潮,破坏海域稳定的生物群落结构^[6,13]。至今为止,尚无红树林区水体中发生赤潮或是水华的报道。随市政和生活污水排放进入红树林的藻类,因不适应红树林区的环境而死亡,只有个别适应性比较强的种类得以生存^[2,20,21],这些留存的藻类对红树林区浮游植物群落造成一定影响,能发展成为优势种或优势类群。

3.5 深圳福田红树林区主要水质因子的时空变化

图2表明,福田红树林水域高潮时水深较浅,水温介于30~18之间,季节温差明显,站位差别不大。盐度介于1.4~20.7之间,季节变化明显,秋、冬季明显高于春、夏季,空间变化表现为、站不同于、和站的变动态势。pH值变化剧烈,属弱碱性水质,季节差异和空间变化明显,可能是市政废水、生活污水、养殖水排入红树林区,极大的扰动了

林区水体的性质^[6,13]。

总氮和总磷呈现出季节变化(图3),营养水平越高,变化幅度越大,以站最为典型,该站是生活污水排入红树林区的水道。氨氮变动趋势与总氮一致(图3),是该水域氮源的主要组成成分,所占的比例最大,是生活污水排放入林区所致^[13]。可溶性磷在站的变动不同于其他各站,其他站位的可溶性磷均与总磷以相同趋势变动(图3)。硅酸盐的变化趋势较为复杂,各站位均在春季达到极高值,又急剧地在夏季降到了最低谷,秋、冬季基本持平,站间差别极大(图2),这可能是由于内陆径流中硅酸盐输入的原因所致^[6,13]。

以上水质因子监测结果反应出站位受陆源污水影响的顺序依次为: > > > >。综合保护区水质常规监测结果^[13],表明该红树林区主要接纳的污染物是总磷和氨氮,污染程度有加重的趋势,尤其、站的水域接纳污水程度严重,是受污染的主要水域。

3.6 福田红树林区浮游植物密度与主要水质因子的关系

将全年的浮游植物密度与TN、NH₄-N、TP、PO₄-P、SiO₃-Si、pH值、盐度、水温进行相关分析(表6),发现浮游植物密度与总氮浓度、盐度相关性较好,与总氮成显著负相关(R=-0.511<R_{0.05}, n=20),与盐度成显著正相关(R=0.516<R_{0.05}, n=20)。说明浮游植物密度的时空变化受总氮浓度和盐度的影响比受水温、pH、硅酸盐浓度等的影响大。由于

接纳陆源的生活污水、工业废水、养殖废水,总氮浓度和盐度时空变化明显^[13],对浮游植物密度时空变化造成显著影响。红树林区浮游植物群落结构与海水盐度、温度^[25]和营养盐^[25,26]等环境因子的相关性、变化规律和影响程度等,有待研究和探讨。

表6 浮游植物与主要水质因子的相关关系

Tab.5 Correlations of phytoplankton density with factors of water quality

主要水质因子 (main water-quality factors)	与浮游植物密度的相关 关系 (correlation coefficient, R)
总氮 (TN)	- 0.511*
氨氮 (NH ₄ -N)	- 0.380
总磷 (TP)	- 0.216
可溶磷 (PO ₄ -P)	- 0.404
硅酸盐 (SiO ₃ -Si)	- 0.121
pH	- 0.239
盐度 (Salinity)	0.516*
水温 (Temperature)	0.227

* 表示差异显著, $p < 0.05$, $n = 20$

4 讨论(Discussion)

4.1 深圳福田红树林区浮游植物群落时空变化

深圳福田红树林区浮游植物以硅藻门种类为主,在种类和数量上均占绝对优势地位。国内外对红树林区水体浮游植物的研究结果也表明浮游植物以硅藻门种类为主^[2,11,14~21]。底栖性的硅藻,多是羽纹纲硅藻,在浮游植物中大量存在,起到丰富浮游植物种群的作用。这是由于在红树林阻挡下,林前冲刷的潮汐和风浪极易使得底栖硅藻悬浮于水体中。能耐受污染的微小环藻、条纹小环藻、威氏海链藻和诺氏海链藻成为硅藻门的优势种或优势类群^[11,21],蓝藻、绿藻能发展为优势类群^[20,21]。这是由于福田红树林区进行海水养殖的同时,接纳了深圳河淡水、深圳市的工业废水和生活市政污水,随之带来了大量的污水指示生物,如颤藻、平裂藻、小球藻等种类^[11,21]。这些典型污水指示藻类进入红树林区并形成优势类群,显示水域已经被污染物严重污染,生态系统脆弱^[6,11,21]。与保护区水质监测结果比较,水体污染有加重的趋势。

浮游植物种类组成季节变化明显。冬季鉴定到最少种类,春季种类最多,夏季与秋季种类相当,硅藻与裸藻、隐藻的季节变化明显,蓝藻与绿藻无季节变

化。接纳生活污水、工业废水、养殖废水,5个站位水质差异明显,造成浮游植物种类组成产生空间站位变化。站鉴定到最多种类,站鉴定到最少的种类,站与站种类数相当,站与站种类数差别不大,、和站鉴定到的种类数明显高于、站。

深圳福田红树林区浮游植物密度无季节变化,空间变化明显。各季度的浮游植物密度很高,达到 10^6 cells·L⁻¹的级别。有研究认为,随市政和生活污水排放进入红树林的藻类,因不适应红树林区的环境而死亡。只有少数适应红树林区生境的种类得以生存,成为红树林区浮游植物群落的一部分,并能发展成为优势种或优势类群^[20,21],这些留存的藻类生长,在一定程度上维持了红树林区较高密度的浮游植物。

4.2 深圳福田红树林区浮游植物与环境因子的关系

浮游植物群落结构与环境因子是密切相关的,季节的变化,沿岸径流的大小,水动力条件、水温、盐度、营养盐等均能引起浮游植物群落结构的变化^[5,21~24]。通过将浮游植物密度与主要水质因子的相关分析,认为红树林区水体中浮游植物密度与总氮浓度、盐度相关性较好,与总氮成显著负相关,与盐度成显著正相关。这可能是红树植物群落通过其凋落物的腐败向水体提供大量的N(氮)营养盐,N与红树林水体初级生产力密切相关,N元素及其循环在红树林区域整个生态系统中可能起着重要作用^[26,27]。由于接纳陆源的生活污水、工业废水、养殖废水,总氮浓度和盐度时空变化明显^[13],对浮游植物密度时空变化造成显著影响。应结合浮游植物群落结构指数,如多样性指数^[22,23]、均匀度指数^[22]等与相关环境因子的相关分析,才能全面地反映浮游植物时空变化与环境因子之间的关系,进而找出制约红树林区浮游植物时空变化的因素。

5 小结(Conclusion)

深圳福田红树林区水体浮游植物以硅藻门种类为主,种类数少,最高不过51种,数量较大,密度较高,各季度均达到 10^6 cells·L⁻¹的级别。能耐受污染的种类多,优势种单一化,赤潮藻如中肋骨条藻,以及能耐受污染的种类,如颤藻、裸藻、小环藻等在浮游植物群落中大量存在,没有鉴定出甲藻门的种类。浮游植物种类组成时空变化明显,浮游植物密度季节差异不大,空间变化明显。综合常规水质监测结果与浮游植物群落组成特征,站位受陆源污水影响的

顺序依次为：> > > >，污水排放进入红树林区的水域水质显著区别于完全海水水域，主要受纳的污染物是磷和氨氮，较之以往水质常规监测结果，污染程度有加重的趋势。陆源污水输入显著影响浮游植物密度的时空变化，浮游植物密度与总氮浓度、盐度相关性较好，与总氮成显著负相关，与盐度成显著正相关。

致谢 (Acknowledgement)

衷心感谢深圳福田 - 香港城大红树林研究发展中心对本研究工作的大力支持和协助！本项工作由中国近海海洋综合调查与评价项目 908-01-ST06 和 908-02-03-09 资助。

参考文献 (Reference)

- [1] 林 鹏. 1997. 中国红树林生态系[M]. 北京:科学出版社. 1-293.
- [2] 刘 玉,陈桂珠. 1997. 深圳福田红树林区藻类群落结构和生态学研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 36(1): 101-106.
- [3] Wong Y S, Tam N F Y. 1999. Asia-Pacific Symposium on Mangrove Ecosystems[M]. Kluwer Academic Publishers. 16-31.
- [4] 日本生态学会环境问题专门委员会. 1987. 环境和指示生物(水域分册)[M]. 北京:中国环境科学出版社. 1-42.
- [5] 王伯荪,廖宝文,王勇军,等. 2002. 深圳湾红树林生态系统及其持续发展[M]. 北京:科学出版社. 1-334.
- [6] 张宏达,陈桂珠,刘治平,等. 1998. 深圳福田红树林湿地生态系统研究[M]. 广州:广东科技出版社. 1-204.
- [7] 金德祥,陈金环,黄凯歌. 1965. 中国海洋浮游硅藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社. 1-230.
- [8] 胡鸿钧,李尧英,魏印心,等. 1980. 中国淡水藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社. 1-551.
- [9] 金德祥,陈兆弟. 1960. 中国海洋底栖硅藻类(上、下)[M]. 北京:海洋出版社. 1-321, 1-437.
- [10] 国家环保局. 1990. 水和废水监测分析方法[M]. 第2版. 北京:中国环境科学出版社. 1-493.
- [11] 陈长平,高亚辉,林 鹏. 2005. 深圳福田红树林保护区浮游植物群落季节变化及其生态学研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版). 44(S1):11-15.
- [12] 沈韞芬,章宗涉,龚循矩. 1990. 微型生物监测新技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社. 119-151.
- [13] 杨 琼,谭凤仪. 2006. 深圳福田红树林湿地水质监测分析报告[R]. 2005,2006. 深圳福田 - 香港城大红树林研发中心. 1-37.
- [14] 陈 坚,范航清,陈成英. 1993. 广西英罗湾红树林区水体浮游植物种类组成和数量分布的初步研究[J]. 广西科学院学报. 9(2):31-33.
- [15] 陈长平,高亚辉,林 鹏. 2002. 红树林区硅藻研究进展[J]. 海洋科学. 26(3):17-19.
- [16] 陈长平,高亚辉,林 鹏. 2007. 福建漳江口红树林保护区浮游植物群落季节变化研究[J]. 海洋科学. 31(7):25-31.
- [17] 陈长平,高亚辉,林 鹏. 2005. 福建省福鼎市后屿湾红树林区水体浮游植物群落动态研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版). 44(1), 118-122.
- [18] Damroy S. 1995. Studies on mangrove ecology of Chouldari area, South Andaman[J]. J Andaman Sci Assoc. 11(1-2):29-33.
- [19] Roy S D. 1995. Mangrove ecology of Alexandra Island and Manjera area of South Andaman[J]. J Andaman Sci Assoc. 11(1-2):58-61.
- [20] 刘 玉,陈桂珠,缪绅裕. 1994. 深圳福田红树林系统藻类生态及系统净化功能研究[J]. 环境科学研究. 11(6):29-34.
- [21] 刘 玉,陈桂珠,黄玉山,等. 1995. 红树林区污水对藻类群落结构的影响[J]. 中国环境科学. 3(15):171-176.
- [22] 宋 伦,周遵春,王年斌,等. 2007. 辽东湾浮游植物多样性及与海洋环境因子的关系[J]. 海洋环境科学. 26(4):365-368.
- [23] 林更铭,杨清良,林金美. 1993. 厦门岛周围海域浮游植物与环境因子的关系. 海洋通报. 2(6): 40-45.
- [24] 汤 琳,张锦平,许兆礼,等. 2007. 长江口临近水域浮游植物群落动态变化及其环境因子的研究[J]. 中国环境监测. 2(23):97-101.
- [25] 刘 玉,李适宇,董燕红,等. 2002. 珠江口浮游藻类生态及与关键水质因子分析[J]. 海洋环境科学. 3(21):61-66.
- [26] 王 虎,高 航,周怀阳,等. 2005. 珠江口淇澳岛红树林区海水中营养盐和叶绿素 a 研究初探[J]. 台湾海峡. 4(24):502-507.
- [27] 张汝国,宋建阳. 1996. 珠江口红树林氮磷的累积和循环研究[J]. 广州师范学院学报(自然科学版). 4(1):60-67.