

深圳湾海域浮游植物的生态特征

孙金水^{1,2}, WAI Onyx Wing-Hong³, 戴纪翠^{1,2}, 倪晋仁^{1,2*}

(1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055; 2. 北京大学环境工程系, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; 3. 香港理工大学土木工程系, 香港)

摘要 根据香港环境保护署 2006 年 1~12 月份深圳湾浮游植物的监测数据, 分析了深圳湾海域浮游植物的植物群落结构的时空变化特征及浮游植物多样性指数与环境因子的关系. 结果表明, 2006 年在深圳湾海域共鉴定出浮游植物 27 属 34 种, 主要类群是硅藻, 占总种数的 52.94%, 其次是甲藻, 占总种数的 29.41%, 其他藻类占总种数的 17.65%. 浮游植物细胞丰度的年波动范围在 $2.13 \times 10^6 \sim 4.15 \times 10^6$ cells/L 之间, 平均值为 2.92×10^6 cells/L, 并且在秋季 (10 月) 最高, 春季 (5 月) 次之, 呈明显的双周期变化特征, 平面分布表现为由海湾中部向湾口处递减的格局. 浮游植物多样性指数和均匀度偏低, 其中多样性指数变化范围在 0.76~2.52 之间, 均匀度范围在 0.29~0.74 之间, 反映出种类间个体数分布欠均匀, 群落结构稳定性差, 优势种优势度明显. 研究海区物种丰度整体水平较低, 浮游植物物种丰度指数变化范围在 0.57~2.17 之间, 这与深圳湾海域水质污染严重而导致该海域生态环境恶化有一定关系. 研究还表明, 营养盐、盐度和溶解氧与浮游植物多样性指数之间呈现显著相关关系.

关键词 深圳湾; 细胞丰度; 物种丰度; 多样性指数; 均匀度; 环境因子

中图分类号: X145 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)01-0063-06

Ecological Characteristics of Phytoplankton in Shenzhen Bay

SUN Jin-shui^{1,2}, WAI Onyx Wing-Hong³, DAI Ji-cui^{1,2}, NI Jin-ren^{1,2}

(1. Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Department of Environmental Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Department of Civil & Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract Based on the data of surface phytoplankton investigated by Hong Kong Environmental Protection Department in Shenzhen Bay in 2006, variation characteristics of phytoplankton communities and the relationship between the phytoplankton diversity indices and environmental factors were analyzed in the present paper. Results showed that a total of 27 genera and 34 species of phytoplankton were identified. Of these, 18 were diatoms (52.94%), 10 were dinoflagellates (29.41%), 6 were from other minor groups (17.65%). The cell abundance was estimated to be from 2.13×10^6 to 4.15×10^6 cells/L, with an average of 2.92×10^6 cells/L. The maximum cell abundance appeared in the autumn (October), followed in spring (May). The cell abundance showed double abundance peaks annually. The cell abundance of phytoplankton decreased from the middle bay to the bay mouth. In the marine area, the diversity index of the phytoplankton ranged from 0.76 to 2.52; the evenness of phytoplankton ranged from 0.29 to 0.74; the diversity and evenness of phytoplankton community were rather low, which indicated that the relative abundances of the species diverged from evenness, phytoplankton community were not steady, and only few dominant species increased rapidly. The species richness index ranged from 0.57 to 2.17, the high eutrophic water body caused the species richness index declined. Better relationship was found between phytoplankton diversity indices and nutrient, salinity, dissolved oxygen.

Key words Shenzhen Bay; cell abundance; species richness; diversity index; evenness; environmental factors

深圳湾位于珠江口内伶仃水道的东侧(图 1), 介于深圳和香港之间, 是一个半封闭型海湾, 水深较浅, 平均深度仅为 2.9 m. 湾内主要有深圳一侧的深圳河、大沙河、新洲河以及香港一侧的元朗河、天水围等河流汇入. 深圳湾半封闭型的结构使得潮流运动受到阻碍, 进而影响到水体中污染物的迁移、扩散. 过去 20 a 来, 随着深圳湾两岸现代化工、农业生产的迅猛发展和人口的增多, 大量工农业废水和生活污水排入海湾, 导致海湾富营养化程度日趋严重^[1,2]. 水体富营养化会影响海湾水体中的浮游植物组成与多样性的变化, 浮游植物是海湾生态系统中

重要的初级生产者, 其组成与多样性的变化将直接影响海洋生态系统的结构与功能^[3~6]. 浮游植物多样性与海洋环境之间有着十分密切的关系, 浮游植物物种变化对环境的变化具有指示作用, 同时环境条件的改变也直接或间接地影响到浮游植物的群落结构. Qi 等^[7]根据 1986~1989 年深圳湾监测资料论述了深圳湾浮游植物于海湾环境的关系; 吴振斌

收稿日期: 2009-02-19; 修订日期: 2009-05-27

基金项目: 深圳市环境保护局专项课题项目

作者简介: 孙金水(1980~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水资源与水沙环境. E-mail: sunjinshui@iee.pku.edu.cn

* 通讯联系人. E-mail: njinren@iee.pku.edu.cn

等^[8]根据 1998 年 7 月深圳湾监测资料对深圳湾浮游植物、浮游动物和底栖动物的种类、数量及分布现状进行了研究;冷科明等^[9]利用 2000~2002 年的监测资料对深圳湾该时期浮游植物种类、数量分布等进行了研究.本研究根据香港环保署于 2006 年在深圳湾海域的海水水质监测资料,对深圳湾海域浮游植物群落的种类组成和数量分布进行了分析,并进一步探讨了环境因子对浮游植物多样性的影响,从而有助于

了解深圳湾生态系统特征变化情况,从而为评估水体质量、改善海湾生态环境等提供理论依据.

1 调查与方法

香港环境署在深圳湾设立 5 个监测站位,站位分布如图 1 所示,其中 DM3 和 DM5 除了常规海水水质监测外还进行浮游植物监测.本研究调查时间为 2006 年 1~12 月,每 1 个月取样 1 次.

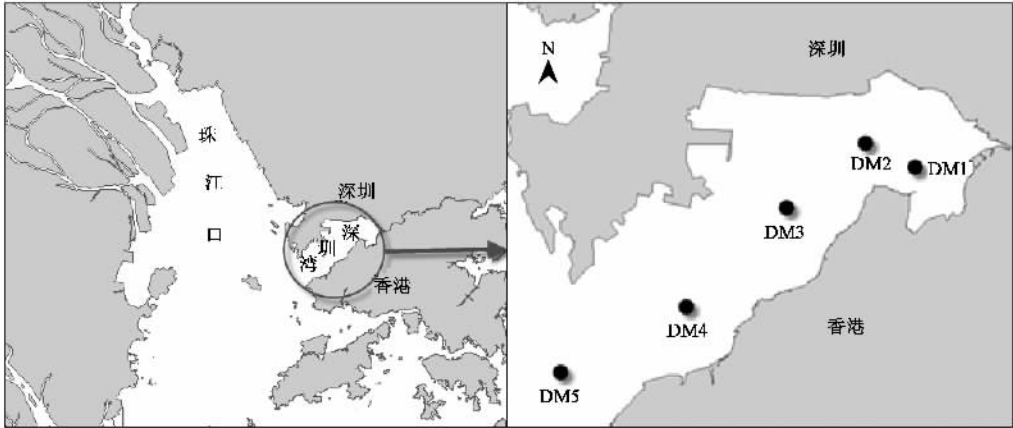


图 1 深圳湾监测站位位置

Fig. 1 Location of the sampling sites in Shenzhen Bay

浮游植物采样和鉴定:采用计算机控制的多瓶式采样器在各站位于水面以下 1 m 水深位置收集大约 1 L 样本,在现场加鲁格氏固定液约 10 mL,带回实验室作进一步处理.在实验室,样品静置沉淀 48 h 后,将 10 mL 沉淀过的样品放入浮游生物皿中,用倒置显微镜鉴定种类、计数细胞数量^[10,11].

本研究主要选择以下环境因子进行分析:水温

(*t*)、盐度(*S*)、透明度(*SD*)、溶解氧(*DO*)、氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、亚硝酸盐($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、硝酸盐($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、活性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$)、二氧化硅(SiO_2).其中水温、盐度、透明度在采集海水样本的同进行现场测定,采集的海水样本带回实验室进一步处理,实验室分析均按照标准方法进行^[12,13],各项指标采用的具体分析

方法如表 1 所示.

表 1 深圳湾海水水质参数分析方法^[14]

Table 1 Analytical method for the variables of marine water quality in Shenzhen Bay

参数	采样深度	分析方法/技术
<i>t</i> /℃	剖面	现场量度/Seacat19 + CTD 温盐深剖面仪(热敏电阻)
EC/mS·m ⁻¹	剖面	现场量度/Seacat19 + CTD 温盐深剖面仪(导电率)
DO/mg·L ⁻¹	剖面	现场量度/SBE23Y 溶解氧探测器(膜电极)连接 Seacat19 + CTD 温盐深剖面仪
SD/m	—	Seacat19 + CTD 温盐深剖面仪
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ /mg·L ⁻¹	表层、中层、底层	实验室分析/内部分析法 GL-IN-15,按照 ASTM D3590-89H 流动注射分析法)
$\text{NO}_2^- - \text{N}$ /mg·L ⁻¹	表层、中层、底层	实验室分析/内部分析法 GL-IN-18,按照 APHA 20ed. 4500- NO_2^- -H 流动注射分析法)
$\text{NO}_3^- - \text{N}$ /mg·L ⁻¹	表层、中层、底层	实验室分析/内部分析法 GL-IN-18,按照 APHA 20ed. 4500- NO_3^- -F&H 流动注射分析法)
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ /mg·L ⁻¹	表层、中层、底层	实验室分析/内部分析法 GL-IN-16,按照 ASTM D515-88H 流动注射分析法)
SiO_2 /mg·L ⁻¹	表层、中层、底层	实验室分析/内部分析法 GL-IN-17,按照 APHA 20ed. 4500- SiO_2 C&H 流动注射分析法)

物种多样性指数的计算采用 Shannon-Wiener 指数(*H'*),计算公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$$

(1)

物种均匀度采用 Pielou 均匀度指数(*J*),计算公式为:

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

(2)

物种丰度的计算采用 Margalef 指数 (d), 计算公式为:

$$d = \frac{S - 1}{\log_2 N} \quad (3)$$

式中, S 为样品中物种数, N 为样品中的生物总个体数, $p_i = \frac{n_i}{N}$, n_i 为第 i 种的个体数.

2 结果与讨论

2.1 深圳湾海域浮游植物种类组成

调查期间在深圳湾海域共鉴定出浮游植物 27 属 34 种, 其中硅藻 14 属 18 种, 甲藻 8 属 10 种, 隐藻 2 属 2 种, 裸藻 1 属 1 种, 绿藻 1 属 1 种, 金藻 1 属 1 种, 其他的还有红色中蛭虫 1 种. 深圳湾海域浮游植物的主要类群是硅藻, 占总种数的 52.94%, 这与冷科明等^[9] 在 2000~2002 年的研究结果一致, 显示在该海域仍是以硅藻种类为主; 其次是甲藻, 占总种数的 29.41%, 其他藻类占总种数的 17.65%. 研究区域主要硅藻种类为中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 和海链藻 (*Thalassiosira* spp.), 分别占该区硅藻种群数量的 38.52% 和 34.40%; 斯氏藻 (*Scrippsiella* spp.) 是该海域最常见的甲藻种类, 占该区甲藻种群数量的 70.66%, 其他藻类以小型鞭毛藻 (*Small flagellates*) 为主要种类, 占其他藻类的 69.85%.

图 2 给出的是调查期间深圳湾海域浮游植物的种类周年变化情况, 可以看出, 浮游植物种类季节变化明显, 秋季 (10 月) 出现种类最多 (22 种), 夏季 (6 月) 出现种类最少 (7 种). 其中硅藻和甲藻均为秋季 (9 月、10 月和 11 月) 种类最多, 其他藻类则是夏季

(6 月、7 月和 8 月) 最多.

2.2 浮游植物细胞丰度分布特征

调查期间深圳湾海域浮游植物细胞丰度的范围在 $2.13 \times 10^6 \sim 4.15 \times 10^6$ cells/L 之间, 平均值为 2.92×10^6 cells/L; 浮游植物细胞丰度分别在春 (5 月) 和秋季 (10 月) 出现明显的峰值. 深圳湾浮游植物细胞丰度的季节变动规律虽属双周期型的变动型式, 但与一般亚热带海域春季为最高峰, 秋季为次高峰的典型季节变动特性不同, 而形成秋季为最高峰, 春季为次高峰季节变动特点, 尤其是在春季的 4 月份呈现数量达到最低值, 导致这种现象的原因可能是汛期雨水带入湾内水体中悬浮的有机或无机微物质较多, 高浑浊度降低了水体的透明度, 从而影响了浮游植物进行光合作用的能力, 致使浮游植物的生长繁殖受到限制^[15]. 将本次调查结果与历史数据进行对比, 1998 年 7 月的调查资料显示, 深圳湾湾口段浮游植物藻类平均密度为 4.28×10^6 cells/L^[8]; 2000~2002 年的连续监测显示, 深圳湾浮游植物细胞数量的消长类型基本上呈双周期性变化, 高峰期 2 月和 6 月分别为 5.17×10^8 cells/L 和 3.46×10^8 cells/L^[9]. 本次监测明显低于历史上其它时期的结果, 这可能与近期深圳湾海域受到的人为干扰与环境变化有一定关系.

表 2 是深圳湾海域细胞丰度的周年变化情况, 可以看出, 硅藻细胞丰度的范围是 $0.08 \times 10^6 \sim 2.41 \times 10^6$ cells/L, 全年平均细胞丰度为 0.56×10^6 cells/L. 甲藻细胞丰度的年波动范围是 $0.01 \times 10^6 \sim 0.62 \times 10^6$ cells/L, 全年平均细胞丰度为 0.12×10^6 cells/L. 其他藻类细胞丰度的年波动范围是 $1.64 \times 10^6 \sim 2.89 \times 10^6$ cells/L, 全年平均细胞丰度为 2.24×10^6 cells/L. 硅藻在春 (5 月)、夏 (8 月) 和秋季 (10 月) 分别出现一个明显的峰值, 春季的优势种类是海链藻 (*Thalassiosira* spp.), 夏季的优势种类是海链藻 (*Thalassiosira* spp.) 和中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*), 秋季的优势种类是中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*). 甲藻只存在一个夏季 (8 月) 高峰, 与硅藻夏季高峰出现时间一致, 并且在数量上相差不大, 其优势种类是斯氏藻 (*Scrippsiella* spp.). 其他藻类分别在 3 月、6 月和 8 月出现 3 个峰值, 主要是以小型鞭毛藻 (*Small flagellates*) 为主. 调查期内除在 10 月间其他藻类细胞丰度占全部细胞丰度的百分比为 39.54% 外, 其它月份其他藻类所占百分比均超过 55%, 因此其他藻类细胞丰度在浮游植物细胞丰度上占据优势地位.

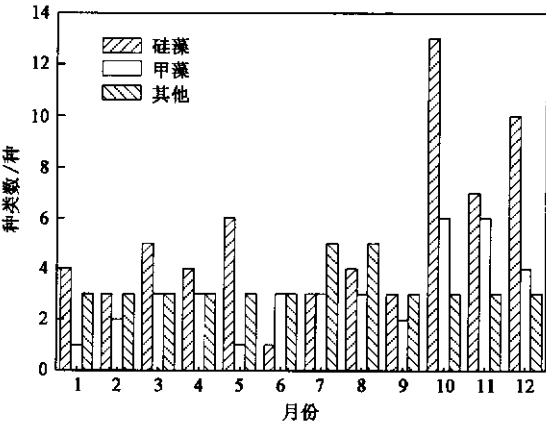


图 2 深圳湾海域浮游植物种类数目周年变化

Fig. 2 Annual variation of species number of phytoplankton in Shenzhen Bay

表 2 深圳湾海域细胞丰度的周年变化 $\times 10^6/\text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$
Table 2 Cell abundance of phytoplankton in Shenzhen Bay $\times 10^6/\text{cells}\cdot\text{L}^{-1}$

种类	月份												年平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
硅藻	0.28	0.20	0.13	0.15	0.86	0.08	0.74	0.41	0.13	2.41	0.59	0.79	0.56
甲藻	0.20	0.01	0.06	0.06	0.02	0.09	0.62	0.06	0.04	0.11	0.17	0.05	0.12
其他	1.82	2.49	2.61	1.92	2.54	2.78	1.82	2.89	2.20	1.64	1.87	2.27	2.24
全部	2.29	2.70	2.80	2.13	3.42	2.95	3.18	3.36	2.36	4.15	2.63	3.11	2.92

图 3 是深圳湾海域 DM3 和 DM5 站位浮游植物细胞丰度的周年变化情况,可以看出,除 3 月、4 月和 6 月期间海湾中部(DM3)浮游植物细胞丰度低于湾口(DM5)外,其余月份海湾中部浮游植物细胞丰度均高于湾口处(图 3),原因在于海湾中部是河水、海水的交汇地带,受到淡水径流的影响较大,盐度变化强烈,并且营养盐含量较高,为浮游植物生长繁殖提供了充足条件;另外在雨季期间,充足的雨水造成

珠江向伶仃洋海区排洪,导致整个珠江口海域盐度大幅下降^[9],为低盐种类的藻类生长提供了便利条件,此外该期间深圳湾上游河流带入大量的悬浮固体进入湾内,高浑浊度降低了光照强度,也使得浮游植物的生长繁殖受到一定限制,因此在个别时期湾口附近浮游植物细胞丰度高于海湾中部。

2.3 浮游植物群落多样性指数、均匀度和物种丰度

调查期间深圳湾海域浮游植物多样性指数在 0.76~2.52 之间,均匀度在 0.29~0.74 之间。每个站位的群落多样性指数和均匀度的月均值的周年变化趋势基本一致(图 4),但是 2 个站位的生物多样性指数和均匀度的月均值最高值和最低值的出现时期不同,其中 DM3 站群落多样性指数月均值的最高值和最低值分别出现在 12 月和 6 月,其月均值分别为 2.45 和 0.85,均匀度月均值的最高值和最低值分别出现在 12 月和 4 月,其月均值分别为 0.74 和 0.30,而 DM5 站群落多样性指数月均值的最高值和最低值分别出现在 11 月和 5 月,其月均值分别为 2.52 和 0.76,均匀度月均值的最高值和最低值分别出现在 1 月和 5 月,其月均值分别为 0.72 和 0.29。该调查海域群落多样性指数和均匀度偏低,反映出种类间个体数分布欠均匀,稳定性差,优势种优势度明显。

图 3 深圳湾海域 DM3 和 DM5 站位浮游植物细胞丰度的周年变化

Fig.3 Annual variation of total cell number of phytoplankton at DM3 and DM5 in Shenzhen Bay

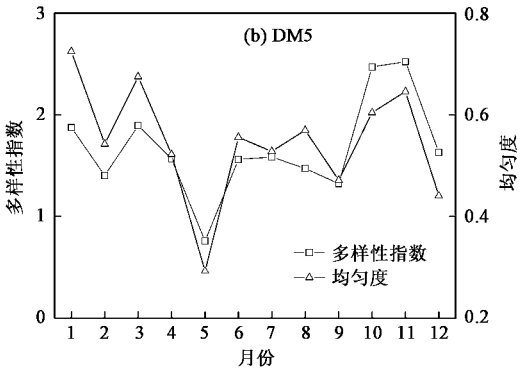
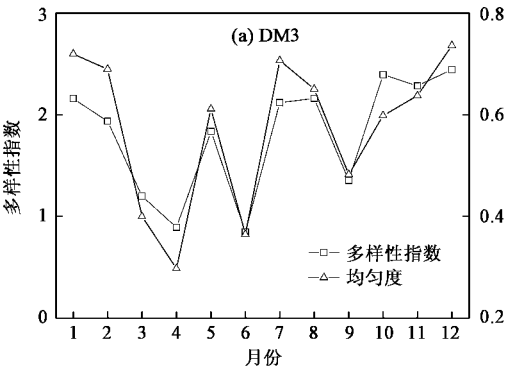


图 4 深圳湾海域 DM3 和 DM5 站位浮游植物多样性指数与均匀度的周年变化

Fig.4 Annual variation of diversity and evenness of phytoplankton at DM3 and DM5 in Shenzhen Bay

物种丰度对物种数的依赖程度较强,是表示群落中种类丰富程度的指数,一般情况下,健康的环境,物种丰度高;受到污染的环境,物种丰度低.在调查期间,DM3 站位物种丰度指数为 0.57~1.91,平均为 1.07;DM5 站位物种丰度为 0.69~2.17,平均为 1.08.该海区物种丰度最高值出现在 DM5 站位,最低值出现在 DM3 站位(图 5).2 个站位物种丰度的峰值均出现在秋季(10 月),这与该海区 10 月份主要污染物的含量较低有关^[14],反映了物种丰度与所在海域的水质状况有一定关系^[16].

2.4 浮游植物多样性与环境因子关系

浮游植物生长繁殖与栖息环境的变化紧密相关,直接受到海洋水文、海水透明程度以及海水营养物质等因素影响^[17~19].为探讨深圳湾海域浮游植物多样性与环境因子的关系,利用 SPSS13.0 统计软件对深圳湾浮游植物多样性指数与水温、盐度、透明度、溶解氧、营养盐等环境因子进行了相关分析研究

(表 3).从表 3 可以看出,浮游植物多样性指数与环境因子的相关关系在不同季节有显著的差别.

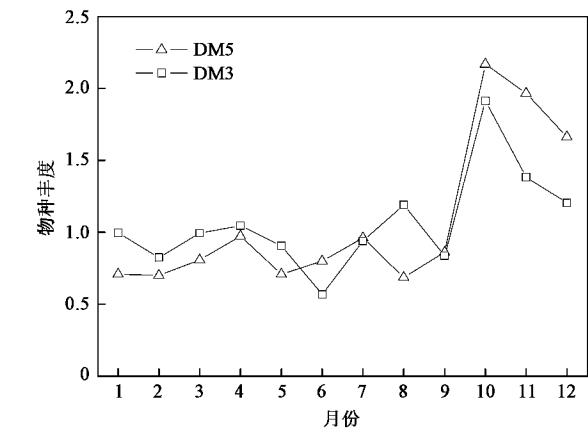


图 5 深圳湾海域 DM3 和 DM5 站位物种丰度的周年变化
Fig.5 Annual variation of species abundance of phytoplankton at DM3 and DM5 in Shenzhen Bay

表 3 浮游植物多样性指数与环境因子的相关性¹⁾

季度	环境因子							
	<i>t</i>	<i>S</i>	DO	SiO ₂	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P
春	-0.186	-0.288	0.822*	0.198	0.292	-0.028	0.239	-0.030
夏	0.088	-0.418	-0.674	0.696	0.219	0.646	0.260	0.902*
秋	-0.730	0.927**	0.865*	-0.947**	-0.967**	-0.429	-0.134	-0.291
冬	0.175	-0.534	-0.554	0.858*	0.370	0.917*	0.857*	0.909*

1) *表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$

海水中无机氮、磷酸盐和硅酸盐等营养盐是海洋浮游植物生长繁殖不可缺少的化学成分.浮游植物多样性指数与营养物质的相关关系除在春季相关性不显著外,在其他 3 个季节的相关性显著($p < 0.05$),需要指出的是在不同季节与浮游植物多样性指数呈现显著相关关系的营养物质并非同一种成分,这也说明各种营养物质在不同时期对不同浮游植物生长繁殖的影响不尽相同.

海水中的溶解氧主要来源于大气中氧气的溶解和海洋植物光合作用所产生的氧.海水中溶解氧是海洋生命活动不可缺少的物质,不同生物对其有不同量的需求^[20].相关分析结果表明:深圳湾海域的溶解氧与浮游植物多样性指数相关关系在春、秋季呈现显著正相关关系($p < 0.05$),而在夏、冬呈现负相关关系.这是产氧与耗氧作用的必然结果,当水体中浮游植物数量较多时,强烈的光合作用使水体氧含量升高,但当浮游植物大量死亡,其氧化耗氧作用大大超过光合作用时,水体中溶解氧含量将急剧下降^[21].

海水盐度是维持生物原生质与海水间渗透关系的一项重要因素,各种浮游植物对盐度有一定的适应范围和耐受极限^[22].夏季,充沛的雨水形成的地面径流汇入深圳湾,导致海域盐度下降.从秋季至春初,随着地面径流的减少以及南海海水的侵入,深圳湾海水的盐度增加.由于潮流作用使得深圳湾内咸淡水交汇,盐度在时间和空间上都存在差异,导致浮游植物种类组成也明显不同.盐度与浮游植物多样性指数的相关分析表明,其与浮游植物多样性指数在秋季呈现非常显著正相关($R = 0.927$, $p < 0.01$),在其他季节相关程度一般.

温度是影响浮游植物生长繁殖的重要因素^[23~24],各种浮游植物有其生长繁殖的最适温度.秋季浮游植物高峰与水温的升高和入湾河流携带来的营养盐有关,从而促进广温性和暖温性浮游植物大量繁殖.但水温偏高或者偏低时,浮游植物生长受到抑制,主要适合一些偏高温种类、偏低温种类以及少数广温性种类生长.温度与浮游植物多样性指数相关分析表明,在调查期间二者相关程度一般,原因在

于浮游植物的生长繁殖是在多种影响因子协同作用下的结果,单一影响因子的作用受到其他环境因子的制约.

3 结论

(1)调查期间在深圳湾海域共鉴定出浮游植物 27 属 34 种,浮游植物的主要类群是硅藻,占总种数的 52.94%,其次是甲藻,占总种数的 29.41%,其他藻类占总种数的 17.65%.从种类组成的季节变化来讲,秋季(10 月)出现种类最多(22 种),夏季(6 月)出现种类最少(7 种).

(2)深圳湾海域浮游植物细胞丰度的年波动范围在 $2.13 \times 10^6 \sim 4.15 \times 10^6$ cells/L 之间,平均值为 2.92×10^6 cells/L.浮游植物细胞丰度分别在春(5 月)和秋季(10 月)出现明显的峰值.浮游植物细胞丰度的平面分布表现为由海湾中部向湾口处递减的格局.

(3)浮游植物多样性指数和均匀度偏低,其中多样性指数变化范围在 0.76~2.52 之间,均匀度范围在 0.29~0.74 之间,反映出种类间个体数分布欠均匀,群落结构稳定性差,优势种优势度明显.

(4)研究海区物种丰度整体水平较低,浮游植物物种丰度指数变化范围在 0.57~2.17 之间,这与深圳湾海域水质状况污染严重而导致该海域生态环境恶化有一定关系.

(5)浮游植物多样性指数与环境因子的相关关系在不同季节有显著的差别,其中营养盐、盐度和溶解氧与浮游植物多样性指数之间呈现显著相关关系.

参考文献:

[1] Lau S S S , Chu L M . Water quality degradation at the Mai Po Marshes Nature Reserve(Hong Kong) with reference to nutrient enrichment[J]. *Hydrobiologia* , 1999 , **403**(1) :195-203 .

[2] EPD . 20 Years of Marine Water Quality Monitoring in Hong Kong [R]. Hong Kong : the Environmental Protection Department of the Hong Kong , 2006 . 140 .

[3] Polishchuk L V . Contribution analysis of disturbance-caused changes in phytoplankton diversity[J]. *Ecology* , 1999 , **80**(2) :721-725 .

[4] Tse P , Hui S Y , Wong C K . Species composition and seasonal abundance of Chaetognatha in the subtropical coastal waters of Hong Kong[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science* , 2007 , **73**(1-2) :290-298 .

[5] Huang L M , Jian W J , Song X Y , *et al.* . Species diversity and distribution for phytoplankton of the Pearl River estuary during rainy and dry seasons[J]. *Marine Pollution Bulletin* , 2004 , **49**(7-8) :588-

596 .

[6] Cardinale B J , Palmer M A , Collins S L . Species diversity enhances ecosystem functioning through interspecific facilitation[J]. *Nature* , 2002 , **415**(6870) :426-429 .

[7] Qi Y Z , Zhang J P . Shenzhen Bay , South China Sea[A]. In : McComb A J (ed). *Eutrophic Shallow Estuaries and Lagoons* [C]. USA : CRC Press , 1995 . 31-37

[8] 吴振斌,雷志洪.深圳湾浮游生物和底栖动物现状调查研究[J]. *海洋科学* , 2002 , **26**(008) :58-64 .

[9] 冷科明,廖敏,陈波,等.深圳海域赤潮研究[M]. 北京:海洋出版社,2004.35-37 .

[10] Lund J W G , Kipling C , Cren E D . The inverted microscope method of estimating algal numbers and the statistical basis of estimations by counting[J]. *Hydrobiologia* , 1958 , **11**(2) :143-170 .

[11] Utermöhl H . Zur Vervollkommung der quantitativen Phytoplankton-Methodik[A]. In : Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie[C]. *Mitteilungen* , 1958 . 1-39 .

[12] APHA . Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. Washington , DC : APHA , 1995 . 1268 .

[13] ASTM . American society for testing and materials standards[S]. New York : ASTM , 2001 . 212 .

[14] EPD . Marine Water quality monitoring in Hong Kong in 2006[R]. Hong Kong : the Environmental Protection Department of the Hong Kong , 2006 . 140 .

[15] 赖廷和,邱绍芳.北海近岸水域浮游植物群落结构及数量周年变化特征[J]. *海洋通报* , 2005 , **24**(5) :27-32 .

[16] 李正华.2004 年春至秋季福建东海湾浮游植物生态特征及探讨[J]. *水产科学* , 2007 , **26**(6) :343-348 .

[17] 杨东方,陈生涛,胡均,等.光照、水温 and 营养盐对浮游植物生长重要影响大小的顺序[J]. *海洋环境科学* , 2007 , **26**(3) :201-207 .

[18] Agawin N S R , Duarte C M , Agustí S . Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production[J]. *Limnology and Oceanography* , 2000 , **45**(3) :591-600 .

[19] Juhl A R , Murrell M C . Nutrient limitation of phytoplankton growth and physiology in a subtropical estuary(Pensacola Bay , Florida) [J]. *Bulletin of Marine Science* , 2008 , **82**(1) :59-82 .

[20] 李广玉,鲁静,何拥军.胶州湾浮游植物多样性及其与环境因子的关系[J]. *海洋地质动态* , 2005 , **21**(4) :10-13 .

[21] 覃雪波,黄璞祎,刘曼红,等.安邦河湿地浮游植物数量与环境因子相关性研究[J]. *海洋湖泊通报* , 2008 (3) :43-52 .

[22] Oren A . Salts and brines[A]. In : Whitton B A , Potts M (eds). *The ecology of cyanobacteria : their diversity in time and space* [M]. The Netherlands : Kluwer Academic , 2000 . 281-306 .

[23] 陈菊芳,齐雨藻,徐宁,等.大亚湾澳头水域浮游植物群落结构及周年数量动态[J]. *水生生物学报* , 2006 , **30**(3) :311-317 .

[24] Lehman P W . The influence of climate on phytoplankton community biomass in San Francisco Bay Estuary [J]. *Limnology and Oceanography* , 2000 , **45**(3) :580-590 .