

深圳湾浮游植物的季节变化

张才学¹, 周凯², 孙省利¹, 肖燕冰¹, 陈春亮¹, 张际标¹, 张瑜斌¹

1. 广东海洋大学海洋资源与环境监测中心, 广东 湛江 524088; 2. 深圳市海洋与渔业环境监测站, 广东 深圳 518067

摘要: 2008年2月至11月对深圳湾的浮游植物和理化环境因子进行了4个季度月的调查, 结果共检出浮游植物150种(包括变种和变型): 春季66种、夏季72种、秋季54种、冬季50种, 其中硅藻门36属108种, 甲藻门14属36种, 绿藻门3属3种, 蓝藻门2属3种。优势种共有湖沼圆筛藻*Coscinodiscus lacustris*、中肋骨条藻*Skeletonema costatum*、夜光藻*Noctiluca scientillans* 3种: 春季1种、夏季1种、秋季1种、冬季2种, 优势种群由春夏季的湖沼圆筛藻演替至秋季的中肋骨条藻、冬季的中肋骨条藻和夜光藻, 没有全年广布优势种; 4季均出现的种类共有9种, 其中硅藻8种, 甲藻1种, 各季节间共有种类数在13~31种, Jaccard种类相似性指数范围在0.12~0.35, 季节更替明显。多样性指数和均匀度的变化范围分别为0.006~1.724和0.001~0.306, 群落结构较脆弱。细胞密度在 $1.25 \times 10^7 \sim 217.90 \times 10^7$ cells·m⁻³, 夏季最高, 春季次之, 冬季最低, 属季节单峰型变化, 与一般亚热带春、秋季出现密度高峰不一致, 这与深圳湾陆源营养物质的扰动有关, 其无机氮和活性磷酸盐含量均劣于国家海水水质标准的四类水, 因此, 该海域水质营养类型属于亚热带富营养型。细胞密度与硅酸盐呈极显著的负相关, 相关系数为-0.446($p < 0.01$, $n=36$, 双尾), 与水温呈显著的正相关, 相关系数为0.371($p < 0.05$, $n=36$, 双尾), 与其他因子的相关性不明显。从优势种的种类数和多样性指数分析, 深圳湾浮游植物的群落结构已趋于单一化, 生态系统抗干扰能力极为脆弱。

关键词: 深圳湾; 浮游植物; 群落结构; 多样性; 季节变化

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906(2010)10-2445-07

深圳湾为珠江口伶仃洋东侧中部的一个内宽外窄的半封闭型浅水海湾, 海湾直线长 17.5 km, 平均宽度约 7.5 km, 水域面积约 90.8 km², 平均水深 2.9 m, 最大水深不超过 5 m。近十年来海洋经济的迅猛发展和城市现代化进程的不断加快, 深圳湾海域的生态环境正承受着愈来愈大的压力, 工农业污染和生活污水导致湾内营养盐、重金属、有毒有害有机污染物在海水和沉积物中迅速蓄积, 海湾属性弱化, 纳潮量降低, 海水交换能力变差, 海洋污损事件如赤潮等时有发生, 海湾生态系统遭受到严重破坏, 已严重影响着市民的生产和生活, 如何防治污构建环境优美人海和谐的生态港湾已成为深圳市政府面临的重大问题^[1]。有关深圳湾生态系统和环境污染已进行了不少的调查与监测, 但尚缺乏系统的资料 and 变化规律的研究^[2-4], 为了全面了解和评价深圳湾海域的环境现状、生态系统受损程度和变化规律, 对该海湾生态系统生物群落及其生态环境进行系统研究, 探讨群落结构与环境之关系, 揭示该海湾生态系统的变化规律, 为海湾环境保护和防治污, 为政府决策部门提供科学依据, 确保海湾生态系统的和谐和健康, 对深圳湾生态环境等进行了研究。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与分析

2008年2月至11月在深圳湾海域进行了4个季度的浮游植物调查, 根据深圳湾的地形特征, 共设置了9个调查站位(图1), 定性样品的采集是用浅

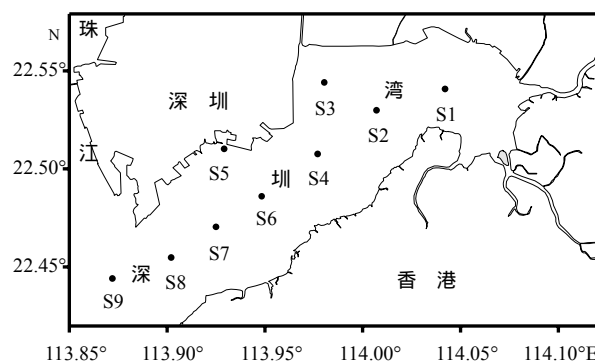


图1 深圳湾采样站

Fig.1 Sampling stations in Shenzhen Bay

水III型浮游生物网自底至表进行垂直拖网, 定量样品是用采水器采集表层水样1 dm³于塑料瓶中, 各加入体积分数为5%的福尔马林和1%的鲁哥氏液固定, 在实验室静置沉淀24 h, 浓缩至50 cm³, 于显微镜下进行分析。叶绿素a样品是用采水器采集500 cm³表层水样于塑料瓶中, 加入2.5 cm³质量浓度为10 g·dm⁻³的MgCO₃悬浮液, 用0.45 μm的醋酸微孔滤膜抽滤后, 于4 °C的冰箱内用丙酮(9+1)溶液萃取24 h, 然后在8 000 r·min⁻¹的转速下离心20 min, 取上

基金项目: 广东省科技计划资助项目(2006B36501009); 深圳海洋局资助项目(深圳湾环境容量与污染总量控制)

作者简介: 张才学(1963年生), 男, 副教授, 主要从事海洋生态及海洋环境的教学和研究工作。E-mail: zhangcx@gdou.edu.cn

收稿日期: 2010-09-05

清液于紫外-可见分光光度计分别在750、664、647、630 nm波长下测定其吸光值。无机营养盐的测定方法分别是：靛酚蓝分光光度法测氨氮、萘乙二胺分光光度法测亚硝酸盐、紫外分光光度法测硝酸盐、硅钼蓝分光光度法测活性硅酸盐、磷钼蓝分光光度法测活性磷酸盐^[5]。

1.2 统计方法

多样性指数^[5] $H' = -\sum_{i=1}^s p_i \log_2 p_i$ ，式中 s 为物种数， P_i 为第 i 种在全部采样中的比例($P_i = n_i/N$)， n_i 为第 i 种的个体数， N 为所有种的个体总数。

均匀度^[5] $J = H' / (\log_2 S)^{-1}$ ，式中 H' 为前式的多样性指数值， S 为样品中总种类数。

优势度^[6] $Y = (n_i/N) f_i$ ，式中 n_i 为第 i 种的总个体数； N 为所有物种的总个体数， f_i 为第 i 种在各站位出现的频率，以 $Y > 0.02$ 作为优势种。

Jaccard相似系数^[7] $P = c/(a+b-c)^{-1}$ ， a 、 b 为两不同季节浮游植物种类数， c 为两不同季节的共有种类数。

2 结果

2.1 浮游植物的群落结构

共鉴定出浮游植物4门55属150种^[8-11]，其中硅藻门36属108种，占浮游植物种类数的72%；甲藻门14属36种，占浮游植物种类数的24%；绿藻门3属3种，占浮游植物种类数的2%；蓝藻门2属3种，占浮游植物种类数的2%。

种类数以夏季最多，达72种，春季次之，为66种，秋季54种，冬季最少，仅有50种(表1)。在硅藻门中圆筛藻属种类最多，共有19种，其次为角毛藻属12种，菱形藻属9种，直链藻属和根管藻属各6种；在甲藻门中角藻属种类最多，有16种，其次为Protoperdinium和Prorocentrum各4种。4季均出现的种类仅有9种，它们是中华盒形藻*Biddulphia sinensis*、虹彩圆筛藻*Coscinodiscus oculusiridis*、地中海指管藻*Dactyliosolen mediterraneus*、布氏双尾藻*Ditylum brightwellii*、洛氏菱形藻*Nitzschia lorenziana*、美丽曲舟藻*Pleurosigma formosum*、相似曲舟藻*Pleurosigma affine*、中肋骨条藻*Skeletonema*

costatum、夜光藻*Noctiluca scientillans*。各季节间共有种类数在13~31种，Jaccard种类相似性指数范围在0.12~0.35。春、秋季种类相似性指数最高，春、夏季次之，夏、冬季种类差异最大，这可能与该海区季节温度变化有关，在深圳湾春、秋季的季节温度较接近，因而种类相似性较大，而夏、冬季温差较大，因而群落结构差异也大。从表2可看出，深圳湾浮游植物季节间种类相似性指数均较低，说明该海区浮游植物的季节更替明显。

表2 季节间浮游植物种类相似性指数
Table 2 The species Jaccard index of phytoplankton between every two seasons

指数	冬季/春季	冬季/夏季	冬季/秋季	春季/夏季	春季/秋季	夏季/秋季
种类数	50/66	50/72	50/54	66/72	66/54	72/54
相同种类数	19	13	16	30	31	26
Jaccard指数	0.20	0.12	0.18	0.28	0.35	0.26

2.2 浮游植物的平面分布和季节变化

深圳湾浮游植物在不同季节不同站位的分布相差较大，在季节分布上，夏季平均密度最高，为 217.9×10^7 cells·m⁻³，春季与夏季较接近，为 204.24×10^7 cells·m⁻³，秋季为 134.87×10^7 cells·m⁻³，冬季密度最小，仅为 1.25×10^7 cells·m⁻³，与夏季相差约174倍，年季节变化属单峰型，与一般亚热带春、秋季出现密度高峰不一致；在平面分布上，冬季并不是靠近河口的密度最高，而是离河口稍远的位置密度达到最大，即在S4和S2站位密度最大，之后往湾口密度逐渐减小，在湾口处由于受珠江径流的影响而略有升高；春季靠近大沙河河口密度最高，其变化趋势是从深圳河口和元朗河口往外逐渐增大，到了湾中部又趋于变小，湾口达到最小，仅为最高密度的1%；夏季整个港湾分布着2个密度高峰区：S6和S2，湾顶和湾口密度较小；秋季是湾顶密度最高，往湾口逐渐减小。全年总的分布趋势是除S6夏季密度较大外，靠近深圳河口的内湾密度较大，其他站位有越趋湾口密度越小的变化趋势(图2)。

表1 浮游植物的种类组成和数量的季节变化

Table 1 Seasonal changes of species composition and phytoplankton density

门类	冬季			春季			夏季			秋季		
	属	种	密度/ (10 ⁷ cells·m ⁻³)	属	种	密度/ (10 ⁷ cells·m ⁻³)	属	种	密度/ (10 ⁷ cells·m ⁻³)	属	种	密度/ (10 ⁷ cells·m ⁻³)
硅藻门	17	35	1.20	29	55	203.99	23	51	217.03	25	46	134.74
甲藻门	7	14	0.04	4	11	0.25	11	17	0.22	5	7	0.13
绿藻门	1	1	0.01	—	—	—	2	2	0.02	—	—	—
蓝藻门	—	—	—	—	—	—	1	2	0.63	1	1	0
合计	25	50	1.25	33	66	204.24	37	72	217.90	31	54	134.87

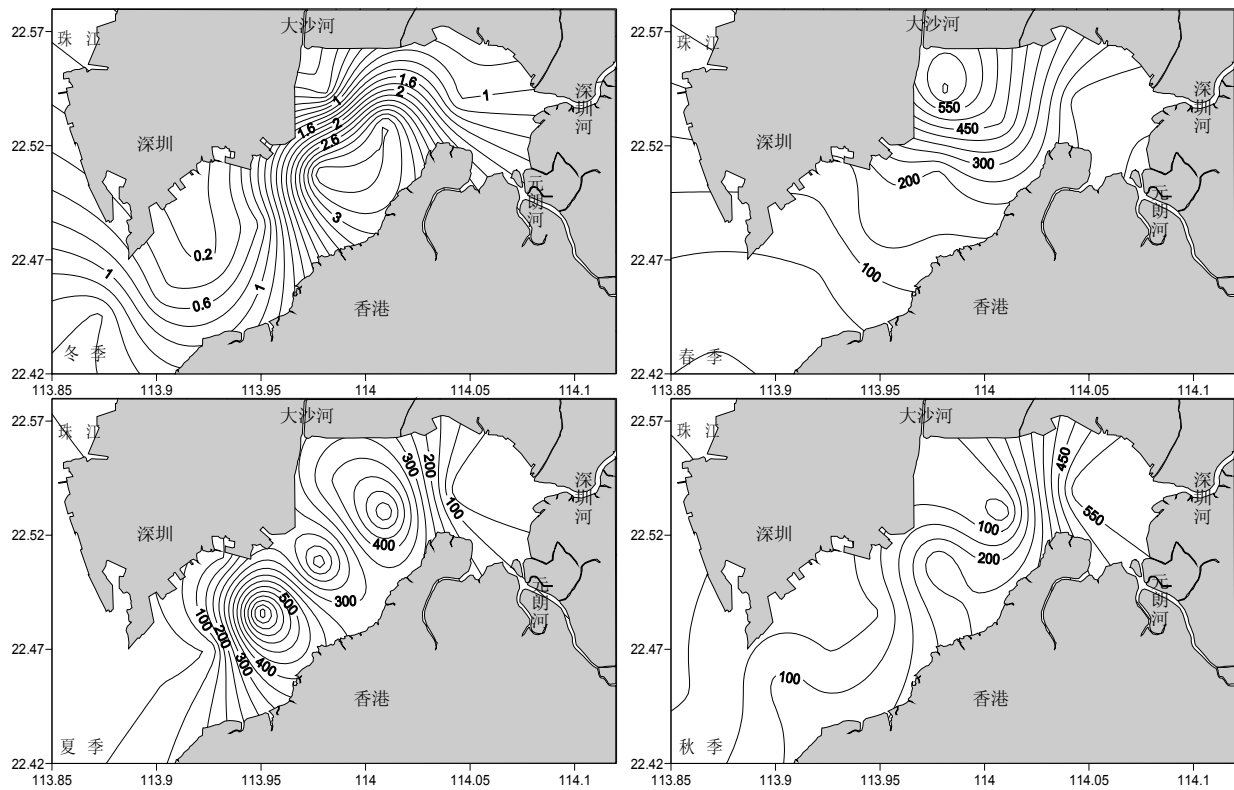


图2 深圳湾浮游植物细胞密度的平面分布和季节变化(单位: $\times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig.2 Horizontal distribution and seasonal changes of densities of phytoplankton in Shenzhen Bay

2.3 浮游植物的优势种群和季节演替

本次调查共采到3种优势种,其中春季1种;夏季1种;秋季1种;冬季2种(表3)。4个季节均为优势种的种类没有。优势度最高的是春季的湖沼圆筛藻 *Coscinodiscus lacustris*,它占了细胞总量的99.7%;其次是夏季的湖沼圆筛藻,它占了细胞总量的99.2%;秋季的优势种为中肋骨条藻,其优势度为0.957,占细胞总量的95.7%;冬季的第一优势种为中肋骨条藻,其优势度为0.605,占细胞总量的77.7%,第二优势种为夜光藻,其优势度为0.021。春、夏、秋3季优势种的优势度异常显著,浮游植物的群落结构极不稳定。

深圳湾浮游植物的季节演替较简单,优势种由春、夏季的湖沼圆筛藻演替成秋、冬季的中肋骨条藻和夜光藻。但群落结构变化较大,种类数由春季的66种增至夏季的72种,再减至秋季的54种和冬季

的50种。夏季的细胞密度最高,其次为春季,再次为秋季,冬季的密度最小,仅为 $1.25 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ (表1)。

2.4 浮游植物多样性指数、均匀度和叶绿素a的变化

深圳湾各站位浮游植物多样性指数变化范围在0.006~1.724,在平面分布上,以S4站位最低,平均为0.214,S5站位次之,平均为0.434,S9站位最高,平均为1.256。整个海湾呈现湾口和靠近河口海域浮游植物物种多样性较高,而在湾中部较低的状况。在季节变化上,冬季最高,平均为1.211,秋季次之,平均为0.823,春季最小,平均仅为0.100。在春季,多样性指数从湾内往湾口逐渐增大;在夏季,湾口和深圳河口高,而湾中部较小;在秋季,整个海湾的变化没有规律性;在冬季,也是湾口最高,往湾中部逐渐降低,到了河口附近又升高。均匀度变化范围在0.001~0.306,平均也是冬季最高,秋季次之,春季最小(表4)。

深圳湾海域叶绿素a含量的变化范围在 $2.87 \sim 309.94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,其平面分布相差明显(表4),年平均值从最高的S1($95.03 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)至最低的S9($4.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)不等,按年平均含量分析,其排序依次为 $S1 > S3 > S6 > S5 > S4 > S7 > S2 > S8 > S9$,除S2站位含量较低外,越往湾口,叶绿素a含量有逐渐减小的趋势;在季节分布上,不同站位不同季节叶绿素a含量相差悬殊,最高为春季,平均达 $101.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,其中

表3 各季节浮游植物的优势种

Table 3 Dominant species of phytoplankton every season

季节	物种	出现频度	占细胞总量/%	优势度
冬季	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	0.778	77.7	0.605
	夜光藻 <i>Noctiluca scientillans</i>	0.778	2.7	0.021
春季	湖沼圆筛藻 <i>Coscinodiscus lacustris</i>	1.000	99.7	0.997
夏季	湖沼圆筛藻 <i>Coscinodiscus lacustris</i>	0.875	99.2	0.868
秋季	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	1.000	95.7	0.957

表4 各季节浮游植物的多样性指数、均匀度和叶绿素a
Table 4 Diversity index, evenness and Chl_a of phytoplankton every season

项目	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	平均	
春季	多样性	0.017	0.026	0.006	0.027	0.075	0.018	0.087	0.166	0.477	0.100
	均匀度	0.003	0.004	0.001	0.004	0.012	0.003	0.014	0.027	0.079	0.017
	叶绿素a	309.94	74.65	240.85	59.89	45.78	54.2	76.28	43.05	5.73	101.15
夏季	多样性	1.493	0.045	0.030	0.199	0.090	0.045	1.595	1.605	0.596	0.633
	均匀度	0.242	0.007	0.005	0.032	0.015	0.007	0.259	0.260	0.911	0.102
	叶绿素a	15.76	17.26	21.93	45.77	72.48	104	12.89	4.40	3.96	33.16
秋季	多样性	0.118	1.308	1.066	0.084	0.922	1.128	0.983	0.181	1.615	0.823
	均匀度	0.021	0.227	0.185	0.015	0.160	0.196	0.171	0.031	0.281	0.143
	叶绿素a	14.19	3.89	25.75	10.64	19.17	24.1	16.23	11.73	6.26	14.66
冬季	多样性	1.230	0.789	1.581	0.547	0.650	1.030	1.674	1.724	1.676	1.211
	均匀度	0.218	0.140	0.280	0.097	0.115	0.183	0.297	0.306	0.297	0.215
	叶绿素a	40.21	6.37	23.29	11.05	4.72	3.07	3.26	2.87	3.34	10.91

在春季的S1和S3的含量竟分别高达309.94 mg·m⁻³和240.85 mg·m⁻³；最低为冬季，平均仅有10.91 mg·m⁻³，其中S8和S6分别低至2.87 mg·m⁻³和3.07 mg·m⁻³。按深圳湾季节平均含量分析，其排序依次为春季>夏季>秋季>冬季。

2.5 深圳湾各站位表层海水的营养盐

深圳湾各站位无机氮含量全年变化范围在0.455~3.782 mg·dm⁻³，平均秋季最高，达1.978 mg·dm⁻³，春季次之，为1.430 mg·dm⁻³，夏季为1.115 mg·dm⁻³，冬季最低，仅为0.784 mg·dm⁻³；活性磷酸盐含量全年变化范围在0.021~0.685 mg·dm⁻³，平均冬季最高为0.263 mg·dm⁻³，春季次之，为0.127 mg·dm⁻³，夏季为0.115 mg·dm⁻³，秋季最低，仅为0.079 mg·dm⁻³；活性硅酸盐含量全年变化范围在0.897~5.438 mg·dm⁻³，平均冬季最高，达3.338 mg·dm⁻³，夏季次之，为2.348 mg·dm⁻³，秋季为2.328 mg·dm⁻³，春季最低，仅为1.876 mg·dm⁻³。各站位N/P比值全年变化范围在1.571~134.238，平均夏季最高，达26.426，秋季次之为25.788，春季15.924，冬季最低，仅为4.000(表5)。

3 讨论

3.1 深圳湾浮游植物的时空分布及其影响因素

深圳湾浮游植物的平面分布总体上是靠近河口和排污口的密度较大，常常是在海淡水交汇处的S3、S2、S6和S1这几个站位密度较高，并有从内湾往湾口逐渐减少的变化趋势，这与陆源输入大量氮、磷、硅营养盐密切相关，在靠近河口和排污口的S1、S3、S2、S5和S6营养盐含量较高即可说明，由于S5靠近排污口且来往船只频繁，油类、悬浮物等各种污染物含量较高，故在S5站位没有出现密度高峰。河口和排污口输入的大量营养盐经扩散、稀

释，离河口和排污口越远，水体营养盐含量越低，能够被浮游植物利用的各类营养盐含量也随之下降，特别是在丰水期的夏季，大量淡水的输入（从其盐度大为下降可看出）必然给海区带来大量的营养盐，这些丰富的营养盐为夏季浮游植物的大量繁殖提供了物质基础，这是深圳湾营养盐季节变化的一个重要原因，也是导致深圳湾浮游植物季节演替与一般亚热带海域不相一致的地方，一般亚热带海域随着水温和营养盐的季节变化，浮游植物出现春秋密度高峰，而且春季高峰强于秋季高峰。然而，本调查结果显示，深圳湾浮游植物数量在春季虽然也随着水温的上升显著回升，但数量在夏季不减反增，而且在秋季仍维持在很高的水平，使得其浮游植物密度和叶绿素a含量的季节变化均为夏季>春季>秋季>冬季，并从内湾往湾口逐渐减少，这正是深圳湾外源性营养盐特别是无机氮扰动的结果（无机氮则秋季最高，春季次之，冬季最低，与一般自然海区的变化规律不符）。

在浮游植物生长过程中，N、P的作用常常是相互的，氮磷营养盐被浮游植物吸收的量符合Redfield^[12]的结论，依此结论对深圳湾的营养盐进行分析发现，春、夏季S1-S6站位N为营养限制因子，而S7-S9站位P为营养限制因子；秋季所有站位都是P为营养限制因子；冬季所有站位则都是N为营养限制因子，从平均含量分析，基本上是冬季缺N，春、夏、秋3季缺P。但此结果仅是浮游植物对营养盐的吸收比例而言，在富营养化海域，各营养盐的含量均较高，即使N、P比例与Redfield的结论不符，N或P也不会成为浮游植物生长繁殖的限制因子。胡明辉^[14]分析发现，若磷的质量浓度低于0.050 mg·dm⁻³时，就会限制浮游植物的增殖^[13]，在深圳

表5 各季节表层海水的营养盐
Table 5 The nutrient concentration of surface seawater in different seasons

项目		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	平均
春季	无机氮	3.193	0.906	2.272	1.204	1.050	1.178	0.786	0.992	1.285	1.430
	磷酸盐	0.370	0.059	0.291	0.097	0.069	0.136	0.037	0.039	0.045	0.127
	硅酸盐	2.721	1.788	2.338	1.608	1.823	1.685	1.136	1.246	2.542	1.876
	N/P	8.63	15.356	7.808	12.412	15.217	8.662	21.243	25.436	28.556	15.924
夏季	无机氮	0.948	0.469	0.455	0.600	1.334	1.146	1.381	0.882	2.819	1.115
	磷酸盐	0.298	0.150	0.171	0.130	0.084	0.095	0.030	0.055	0.021	0.115
	硅酸盐	3.971	1.896	1.896	1.418	1.258	0.897	3.152	2.676	3.971	2.348
	N/P	3.181	3.127	2.661	4.615	15.881	12.063	46.033	16.036	134.238	26.426
秋季	无机氮	1.624	2.183	3.782	1.883	2.093	2.729	0.954	1.305	1.248	1.978
	磷酸盐	0.066	0.116	0.119	0.086	0.091	0.107	0.034	0.051	0.038	0.079
	硅酸盐	2.113	2.779	2.643	1.869	2.759	2.086	3.220	1.671	1.812	2.328
	N/P	24.606	18.819	31.782	21.895	23.000	25.505	28.059	25.588	32.842	25.788
冬季	无机氮	1.076	1.109	1.094	0.591	0.878	0.597	0.605	0.557	0.550	0.784
	磷酸盐	0.685	0.320	0.515	0.125	0.246	0.137	0.137	0.123	0.076	0.263
	硅酸盐	5.438	3.714	3.886	2.644	3.624	2.945	2.799	2.222	2.766	3.338
	N/P	1.571	3.466	2.124	4.728	3.569	4.358	4.416	4.528	7.237	4.000

湾各季节的磷酸盐含量中,其平均值均高于此值,磷不会成为营养限制因子;氮的质量浓度低于 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ 时,藻类生长受到限制,而深圳湾各季节无机氮的含量均高于此值,氮也不会成为营养限制因子。而从国家海水水质标准角度分析,深圳湾各季节营养盐含量均超过了国家海水水质标准的四类水,属于富营养化海域。

对深圳湾各季节浮游植物细胞密度、叶绿素 a 与其对应的环境因子进行相关性分析发现,细胞密度与硅酸盐呈极显著的负相关,相关系数为 $-0.446(p < 0.01, n = 36, \text{双尾})$,而与水温呈显著的正相关,相关系数为 $0.371(p < 0.05, n = 36, \text{双尾})$,与其他因子的相关性不明显;叶绿素 a 与盐度和pH值均呈极显著的负相关,相关系数分别为 -0.527 和 $-0.468(p < 0.01, n = 36, \text{双尾})$,与其他因子的相关性不明显。由于深圳湾海域是敞开水体,受外界干扰较严重,营养盐的营养驱动力固然可以促使浮游植物的增殖,使浮游植物的密度与营养盐的变化趋势相协调,但3条河流淡水的冲击、污染物的伤害、摄食压力、温度、盐度、水体混浊度等环境因子的急剧变化也会对其演替产生影响,而且营养盐的测定值只能反映污染海域的瞬时值,浮游植物的生长繁殖是一定时间内的生物积累,在干扰严重的敞开水体,浮游植物的变化趋势与营养盐的变化关系不可能完全一致,只有在封闭的水体和没有摄食者的情况下才能说明二者之间的动态关系。

3.2 深圳湾浮游植物群落结构的评价

深圳湾地处亚热带,终年水温较高,湾口开阔,水体交换良好,受珠江径流、广东香港沿岸流和高温高盐南海外海水的综合影响,是咸淡水交汇的水域,盐度较低(图3),从夏季S9站的4.7至冬季S4站的28.1不等,因而生活在该区域的浮游植物多为沿岸性和咸淡水种类,主要优势种夜光藻和中肋骨条藻是典型的亚热带沿岸种,夜光藻在亚热带海区常在冬季成为优势种,中肋骨条藻是在富营养化海域常出现的优势种,而湖沼圆筛藻则属于咸淡水种类,在春夏季丰水期海水盐度较低的环境下大量繁殖成为优势种群。由于深圳湾无机氮和活性磷酸盐含量较高,均劣于国家海水水质标准的四类水,因而浮游植物大量繁殖,优势种群的优势度极高,春、夏、秋3季仅各有1种优势种,其优势种和优势度分别为湖沼圆筛藻0.997、湖沼圆筛藻0.868、中肋骨条藻0.957,冬季的优势种也仅有2种:中肋骨条藻和夜光藻,其优势度分别为0.605和0.021。深圳湾的优势种类较少,优势度极高,导致其浮游植物的物种多样性和均匀度偏低,各站位多样性指数和均匀度的变化范围分别为 $0.006 \sim 1.724$ 和 $0.001 \sim 0.306$,显示深圳湾浮游植物的群落结构已趋于单一化,生态系统抗干扰能力已极为脆弱。

以调查时间、种类数、细胞密度、多样性指数和均匀度进行综合性分析,除了大亚湾种类数较少外,各海湾浮游植物群落结构均比深圳湾的复杂,对深圳湾各调查站位叶绿素 a 的平面分布和季节变化进行综合分析,整个深圳湾叶绿素 a 的年平均值

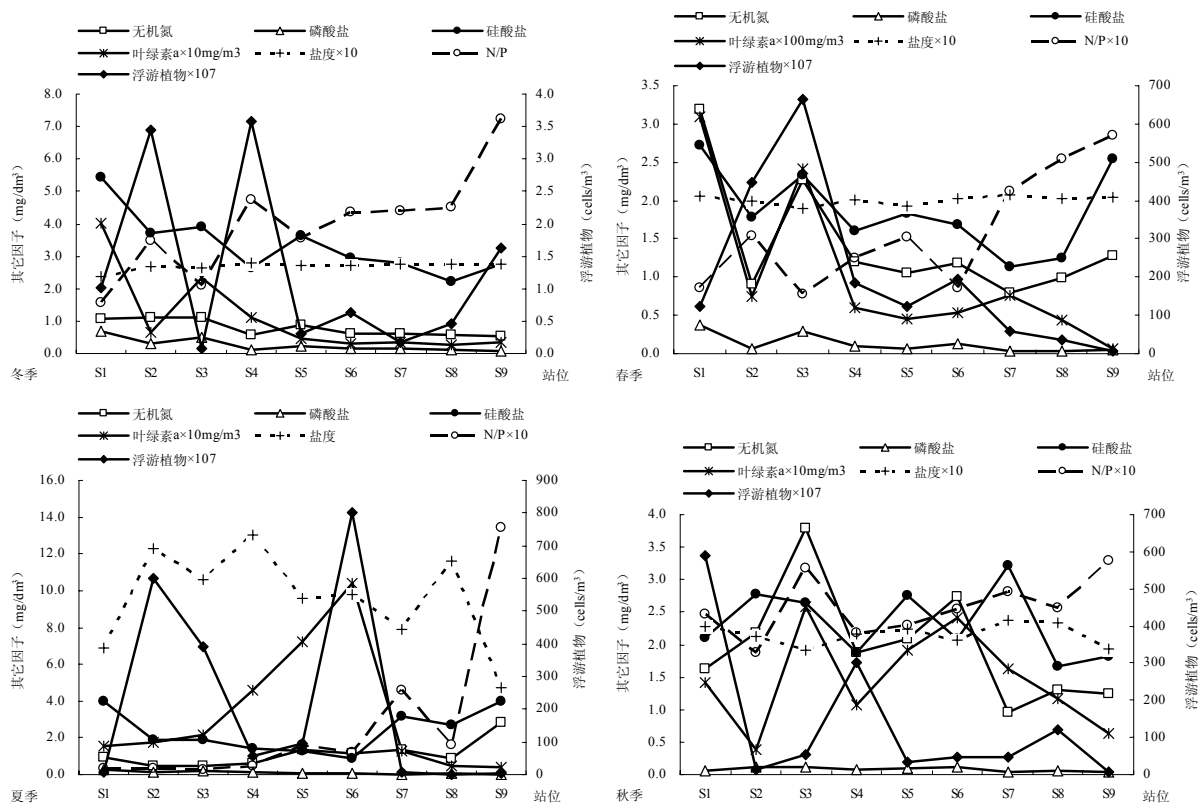


图 3 浮游植物细胞密度与环境因子的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of densities of phytoplankton and environmental factors in the investigated area

表 6 深圳湾浮游植物群落结构与其他海湾的比较

Table 6 Comparison of community structure of Phytoplankton between Shenzhen Bay and other bays

海域	调查时间	种类数	密度/($10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$)	多样性指数	均匀度	文献来源
柘林湾	2000-2001	153	35.95	1.91	0.47	周凯 ^[15] 等, 2002
珠江口	1998-1999	239	93.6	2.97	0.67	戴明 ^[16] 等, 2004
大亚湾	2002	114	0.114	2.3~4.4	0.5~0.85	孙翠慈 ^[17] 等, 2008
深圳湾红树林区	2001-2003	75	270.00	1.268	0.289	陈长平 ^[3] 等, 2005
深圳湾	2008	150	139.56	0.692	0.119	本调查

为 $39.97 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 与大亚湾^[18]2006年春季叶绿素a的平均值 $0.75 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和珠江口及毗邻海域^[19]2003年秋季叶绿素a的平均值 $2.57 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 相比明显偏高, 显示出深圳湾海域的富营养化水平, 但与历史资料^[3]相比, 其浮游植物种类数已有所增多, 细胞密度已大为下降, 其富营养化程度已有所减轻。

参考文献:

[1] 深圳市环境保护局. 深圳市海洋环境质量公报[R]. 深圳: 深圳市环境保护局, 2008.
Shenzhen environmental protection agency. Shenzhen marine environment quality bulletin [R]. Shenzhen: Shenzhen Environmental Protection Agency, 2008.

[2] 吴振斌, 贺锋, 付贵萍, 等. 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(8): 58-64.
WU Zhenbin, HE Feng, FU Guiping, et al. Investigation of plankton and benthos in Shenzhen Bay [J]. Marine Science, 2002, 26(8): 58-64.

[3] 陈长平, 高亚辉, 林鹏. 深圳福田红树林保护区浮游植物群落的季节变化及其生态学研究[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2005, 44(增刊): 11-15.

CHEN Changping, GAO Yahui, LIN Peng. Study on the seasonal changes of phytoplankton community and its ecology in Futian Mangrove Reserve of Shenzhen, China [J]. Journal of Xiamen University :Natural Science, 2005, 44(Sup): 11-15.

[4] 刘玉, 吴群河, 陈新庚. 深圳蛇口港浮游藻类氮磷因子相关性的研究[J]. 生态学杂志, 1995, 14(1): 11-14.
LIU Yu, WU Qunhe, CHEN Xingeng. Relationship between phytoplankton growth and N, P levels in Shekou Harbour of Shenzhen[J]. Chinese Journal of Ecology, 1995, 14(1): 11-14.

[5] 中华人民共和国国家标准. 海洋监测规范, 第 7 部分: 近海污染生态调查和生物监测[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 84-85.
State Standard of the People's Republic of China. The specification for marine monitoring, Part 7: Ecological survey of offshore pollution and biological monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007: 84-85.

[6] SUN J, LJU D Y, XU J, et al. The netz-phytoplankton community of the Central Bohai Sea and its adjacent waters in spring 1999[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(9): 2003-2016.

[7] JACCARD P. Nouvelles recherches surla distribution florale[J]. Bull Soc Vaud Sci Nat, 1908, 44: 223-270.

[8] 郭玉洁, 钱树本. 中国海藻志[M].北京: 科学出版社, 2003: 11-447.
GUO Yujie, QIAN Shuben. Flora Algarum Marinarum Sinicarum [M]. Beijing: Science Press, 2003: 11-447.

- [9] 金德祥, 陈金环, 黄凯歌著. 中国海洋浮游硅藻类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1965: 1-228.
JIN Dexiang, CHEN Jinhuan, HUANG Kaige. The Marine Planktonic Bacillariophyta in the China Sea [M]. Shanghai: Science Technology Press, 1965: 1-228.
- [10] 程兆第, 高亚辉, 刘师成. 福建沿岸微型硅藻[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 1-91.
CHENG Zhaodi, GAO Yahui, LIU Shicheng. The Miniature Diatom in the Fukien Coastal Area [M]. Beijing: Marine Press, 1993: 1-91.
- [11] 金德祥, 程兆第, 林均民, 等. 中国海洋底栖硅藻类(上)[M]. 北京: 海洋出版社, 1982: 1-323.
JIN Dexiang, CHENG Zhaodi, LIN Junmin, et al. The Marine Benthic Diatom in the China Sea (Vol.1) [M]. Beijing: Marine Press, 1982: 1-323.
- [12] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment [J]. Am Sci, 1958, 46: 205-222.
- [13] 胡明辉, 杨逸萍, 徐春林, 等. 长江口浮游植物生长的磷酸盐限制[J]. 海洋学报, 1989, 11(4): 439-443.
HU Minghui, YANG Yiping, XU Qunling, et al. Phosphate limitation of phytoplankton production in Changjiang river estuary [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1989, 11(4): 439-443.
- [14] WANG J. Aquatic organisms productivity in waters [C]/LIU J K, ed. Ecological Studies of Donghu Lake, Wuhan. Beijing: Science Press, 1990: 167-197.
- [15] 周凯, 黄长江, 姜胜, 等. 2000~2001年柘林湾浮游植物群落结构及数量变动的周年调查[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 688-698.
ZHOU Kai, HUANG Changjiang, JIANG Sheng, et al. Annual dynamics of phytoplankton in Zhelin Bay: 2000 ~ 2001 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(5): 688-698.
- [16] 戴明, 李纯厚, 贾晓平, 等. 珠江口近海浮游植物生态特征研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1389-1394.
DAI ming, LI Chunhou, JIA Xiaopin, et al. Ecological characteristics of phytoplankton in coastal area of Pearl River estuary [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(8): 1389-1394.
- [17] 孙翠慈, 王友绍, 孙松, 等. 大亚湾浮游植物群落特征[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 3948-3958.
SUN Cuici, WANG Youshao, SUN Song, et al. Analysis dynamics of phytoplankton community characteristics in Daya Bay [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 3948-3958.
- [18] 王晓伟, 李纯厚, 李占东, 等. 大亚湾海域春季浮游植物生长的限制性营养元素[J]. 中国水产科学, 2007, 14(5): 836-842
WANG Xiaowei, LI Chunhou, LI Zhandong, et al. Nutrient factors limiting phytoplankton production of Daya Bay in spring [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2007, 14(5): 836-842.
- [19] 李涛, 刘胜, 黄良民, 等. 广东沿岸不同海洋功能区秋季浮游植物群落结构比较研究[J]. 海洋通报, 2007, 26(2): 50-59.
LI Tao, LIU Sheng, HUANG Liangmin, et al. Degradation and adsorption of dissolved petroleum in the water body of sandy beach [J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(2): 50-59.

Seasonal changes of the phytoplankton in Shenzhen Bay

ZHANG Caixue¹, ZHOU Kai², SUN Xingli¹, XIAO Yanbing¹,
CHEN Chunliang¹, ZHANG Jibiao¹, ZHANG Yubin¹

Monitoring Center of Ocean Resource and Environment, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;
Oceanic and Fishery Environment Monitoring Station of Shenzhen, Shenzhen 518067, China

Abstract: From February to November 2008, seasonal investigation for phytoplankton community was carried out in Shenzhen Bay of Guangdong province, China. Among all 150 species founded in the bay, 66 occurred in spring, 72 in summer, 54 in autumn, and 50 in winter. Therein, 108 species in 36 genera belonged to Bacillariophyta, 36 species 14 genera Pyrrophyta, 3 species 3 genus Chlorophyta and 3 species 2 genera Cyanophyta. 3 dominant species were scrutinized, of which 1 species in spring, 1 in summer, 1 in autumn and 2 in winter. The dominant species were mainly *Coscinodiscus lacustris*, *Skeletonema costatum* and *Noctiluca scientillans*. The succession of dominant species was from *Coscinodiscus lacustris* of spring-summer to *Skeletonema costatum* of autumn, *Skeletonema costatum* and *Noctiluca scientillans* of winter finally. No dominant species was spread widely in all seasons, while 8 Bacillariophyta and 1 Pyrrophyta species occurred in all seasons, and 13~31 common species in two seasons. The obvious seasonal succession was found based on the Jaccard index with a range from 0.12 to 0.35. The diversity index changed from 0.006 to 1.724, and the evenness indices from 0.001 to 0.306, which indicating the community composition was rather brittle in this area. The density of phytoplankton ranged from 1.25×10^7 cells·m⁻³ to 217.90×10^7 cells·m⁻³ with a descending order from summer to spring, autumn, and winter. The result was particular as phytoplankton often bloomed in spring or autumn in other sub-tropic areas, and its main reason was due to the perturbation of onshore nutrient. The concentrations of the DIN and phosphate were worse than the IV limit value of the Sea Water Quality Standard of China. Therefore, the water quality was of the subtropical eutrophic type. The density of phytoplankton was significantly negative related to the silicate, and the coefficient correlation was -0.446 ($p < 0.01$, $n=36$, 2-tailed). Meanwhile, The density of phytoplankton was correlative to the water temperature with the coefficient correlation of 0.371 ($p < 0.05$, $n=36$, 2-tailed). No obvious correlation was found with other factors. In terms of the dominant species and diversity index, the community composition of the phytoplankton had tended to the simplification, and the tamper-resistant capability was rather fragile in the ecological system in Shenzhen Bay.

Key words: Shenzhen Bay; phytoplankton; community composition; Shannon-Weaver index; seasonal change