

流沙湾浮游生物的群落结构与时空分布

王彦, 申玉春, 叶宁, 刘丽, 吴灶和

(广东海洋大学水产学院, 南海水产经济动物增殖广东普通高校重点实验室, 广东湛江 524025)

摘要: 于 2008 年 3 月至 2009 年 2 月对流沙湾浮游生物的群落结构及其动态变化特征进行了研究, 结果表明, 流沙湾共有浮游植物 27 属, 隶属于 5 个门, 其中硅藻门 20 属, 绿藻门 3 属, 蓝藻门 2 属, 金藻门 1 属, 甲藻门 1 属, 角毛藻 (*Chaetoceros*)、骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 和菱形藻 (*Nitzschia* sp.) 为优势种; 浮游植物生物量变化在 $0.11 \sim 23.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均为 $3.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 细胞密度平均为 $1.3247 \times 10^4 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 。流沙湾共有浮游动物 19 种, 其中原生动物 10 种, 桡足类 6 种, 枝角类、多毛类和轮虫类各 1 种, 优势种类为原生动物中的拟铃虫 (*Tintinnopsis*)、薄铃虫 (*Leprotintinnus*), 桡足类中的哲水蚤 (*Calanus*), 浮游幼体中的无节幼体 (*Nauplius*); 浮游动物生物量在 $0.08 \sim 7.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均为 $2.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 密度平均为 $8186 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水体交换能力差、大规模贝类养殖以及养殖造成的水体污染等因素, 导致流沙湾浮游生物量、物种多样性指数、均匀度指数、丰富度指数均处于较低水平, 但有明显的水平分布和月变化。

关键词: 浮游植物; 浮游动物; 群落结构; 时空分布; 流沙湾

中图分类号: Q178.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9159(2012)06-0066-08

Community Structure and Temporal and Spatial Distribution of Plankton in Liusha Bay

WANG Yan, SHEN Yu-chun, YE Ning, LIU Li, WU Zao-he

(Guangdong Ocean University, Key Laboratory of Aquaculture in South China Sea for Aquatic Economic Animal of Guangdong Higher Education Institutes, Zhanjiang 524025 China)

Abstract: Based on plankton samples collected from Mar 2008 to Feb 2009 at nine research stations in Liusha Bay, the community structure and dynamics of plankton were studied. A total of 27 genus of phytoplankton identified in Liusha Bay belong to five phyla: twenty Bacillariophyta genus, three Chlorophyta genus, two Cyanophyta genus, one Chrysophyta genera, and one Pyrrophyta genera. The dominant species were *Chaetoceros* sp., *Skeletonema costatum*, *Nitzschia* sp. Phytoplankton biomass varied from 0.11 to $23.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ with the average value $3.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; the average cell density were $1.3247 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. There were nineteen species of zooplankton identified, which included ten Protozoa species, six Copepod species, one Cladocera species, one Polychaeta species, and one Rotifera species. Many of the four dominant species belonged to the Protozoa and Copepod, including *Tintinnopsis*, *Leprotintinnus*, *Calanoida* and *Nauplius*. The zooplankton biomass varied from 0.08 to $7.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with the average 2.04 mg/L , and the average value of cell density were $8186 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$. Changed variety of the plankton biomass, species diversity index, evenness index and richness index from its original high level

收稿日期: 2012-10-25

基金项目: 广东省科技计划项目 (2011B031100012、2007A032600004); 广东省自然科学基金项目 (10152408801000005、S2011010000269)。

第一作者: 王彦 (1982—), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为水域生态与健康养殖。

通信作者: 申玉春 (1964—), 男, 博士, 教授, 从事水域生态与健康养殖研究, Tel:0759-2396011; E-mail: shenyuchun@163.com。

to the low level reflects the adverse impact of human activities including excessive cultivation, water pollution and habitat degradation. However, the community structure and dynamics of the plankton were significantly affected in different months and horizontal zones.

Key words: phytoplankton; zooplankton; community structure; spatial and temporal distribution; Liusha Bay

流沙湾位于湛江市雷州半岛西南部,处于徐闻县西部、雷州市西南部交界海域(20°22' ~ 20°31' N, 109°55' ~ 110°1' E),面积约69 km²,是一个口小腹大呈北西向葫芦形的半封闭型海湾,自然地理条件十分优越,是我国海水珍珠贝苗和海水珍珠的重要生产基地之一^[1]。近年来,随着珍珠养殖技术的逐步推广,流沙湾珍珠养殖面积急剧扩大,高密度超负荷养殖导致海区的饵料生物数量成为珍珠贝生长的限制因子。浮游生物是海洋主要的初级生产者,也是养殖贝类的重要饵料之一,因此,研究流沙湾水域浮游生物种群结构和生物量,对改善珍珠贝养殖环境,提高珍珠贝生长速度和珠母贝成活率具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 采样时间与站位

根据流沙湾水域面积和水文地理特点,设置9个采样站,用GPS定位,其站位分布如图1。于2008年3月至2009年2月,每月中旬采集浮游生物样品,进行定量定性研究。

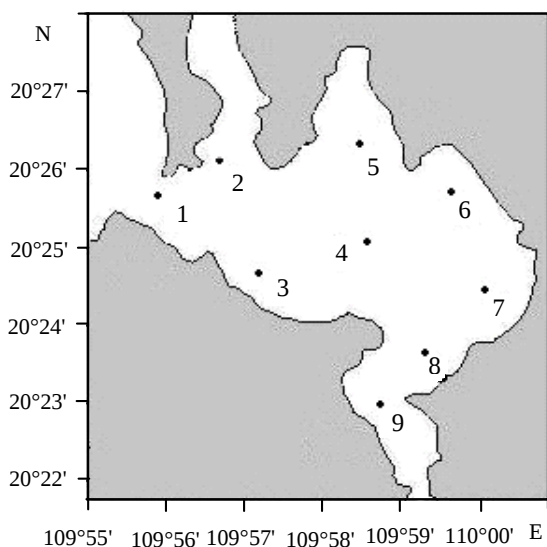


图1 流沙湾调查海域的地理位置和调查站位

Fig. 1 The distribution of sampling stations in Liusha Bay

1.2 样品采集与分析

浮游生物样品采集与定量参照《海洋调查规范 海洋生物调查》^[2]进行。定性样品用标准浮游生物采集网,自海底(离底部0.5 m)向海面垂直拖曳。定量样品用HQM-1型有机玻璃采水器取表层(离水面0.5 m)和底层(离水底0.5 m)水样各1 L混合。用浮游生物计数框在光学显微镜下计数。通过个体质量(或相似形体体积)系数换算成生物量^[3]。

1.3 生物多样性指数

物种多样性指数(H)采用Shannon-Wiener^[4]的计算公式: $H = -\sum_{i=1}^S P_i \lg P_i$; 物种均匀度指数(J)采用Pielou^[5]的计算公式: $J = H / \lg S$; 物种丰富度指数(D)采用Margalef^[6]的计算公式: $D = (S - 1) / \lg N$ 。式中, S 为浮游生物群落中物种数, N 为群落样本个体总数, P_i 为第*i*种浮游生物与总个体数的比值。

1.4 数据分析

采用SPSS 13.0 for Windows 统计软件进行单因素方差分析和Duncan多重比较,以 $\alpha = 0.05$ 作为差异显著水平,描述性统计值采用平均值 $\pm$ 标准误(Mean $\pm$ S.E.)表示。

2 结果与分析

2.1 浮游植物群落结构

2.1.1 种类组成 流沙湾9个采样站周年共检出浮游植物27属,隶属于5个门(表1),其中硅藻门20属,绿藻门3属,蓝藻门2属,金藻门1属,甲藻门1属。以硅藻门种类最多,其次是绿藻门、蓝藻门,其他门类仅有1种。角毛藻(*Chaetoceros*)、骨条藻(*Skeletonema costatum*)和菱形藻(*Nitzschia* sp.)是流沙湾水域浮游植物的优势种。

2.1.2 生物量和密度 流沙湾浮游植物生物量在0.11 ~ 23.63 mg·L⁻¹之间,平均为3.72 mg·L⁻¹(表2)。浮游植物细胞密度平均为13 247 个·L⁻¹(表3),细胞密度以硅藻门占绝对优势,密度为12 783 个·L⁻¹,占总细胞密度的96.50%,其他门类所占比例极小。

表 1 流沙湾浮游植物种类组成
Tab. 1 Constitute and distribution of phytoplankton in Liusha Bay

门类 Phylum	属 Genera	站 位 Stations								
		S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉
硅藻门 Bacillariophyta	骨条藻属 <i>Skeletonema</i>		+	+	++	++	+++	+	+++	+
	菱形藻属 <i>Nitzschia</i>						+		+	
	针杆藻属 <i>Synedra</i>	+		++	+	+	+	+	++	+
	卵形藻属 <i>Cocconeis</i>									+
	布纹藻属 <i>Gyrosigma</i>	+	+	+		++	+	+	+	+
	星杆藻属 <i>Asterionella</i>									+
	小环藻属 <i>Cylotella</i>	+		+	++	+	++	+	+	+
	盒形藻属 <i>Biddulphia</i>	+			+		+			+
	海链藻属 <i>Thalassiosira</i>	+		++	+	+++	+++	+	++	+
	角毛藻属 <i>Chaetoceros</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	海毛藻属 <i>Thalassiothrix</i>			+					+	
	根管藻属 <i>Rhizosolenia</i>		+	+	++	+	+	+	+	++
	舟形藻属 <i>Navicula</i>	+		+	+	++	+			+
	圆筛藻属 <i>Coscinodiscus</i>	+		+	+			+		+
	桥弯藻属 <i>Cymbella</i>	+			+				+	
	月形藻属 <i>Closteridium</i>						+			
	异端藻属 <i>Gomphonema</i>					+				
	直链藻属 <i>Melosira</i>	+					+			+
	平板藻属 <i>Tabellaria</i>			+						
	辐杆藻属 <i>Bacteriastrum</i>	+								
绿藻门 Chlorophyta	绿球藻属 <i>Chlorococcum</i>							+		
	扁藻属 <i>Platymonas</i>					+			+	+
	鼓藻属 <i>Cosmarium</i>	+		+	++	+		+		+
蓝藻门 Cyanophyta	色球藻属 <i>Chroococcus</i>					+				
	颤藻属 <i>Oscillatoria</i>				+					
金藻门 Chrysophyta	等鞭藻属 <i>Isochrys</i>									+
甲藻门 Pyrrophyta	裸甲藻属 <i>Gymnodinium</i>			+		+	+			

注: +表示该种数量占总数的 1%以下, 为少见种; ++表示该种数量占总数的 1%~10%, 为常见种; +++表示该种数量占总数的 10%以上, 为优势种。
Note: “+” represents rare species (below 1% of the total), “++” represents common species (1% – 10% of the total), “+++” represents dominant species (over 10% of the total).

表 2 流沙湾浮游植物生物量
Tab. 2 The biomass of phytoplankton in Liusha Bay

站 位 Stations	mg·L ⁻¹					
	3 月 Mar	4 月 Apr	5 月 May	6 月 Jun	7 月 Jul	8 月 Aug
S ₁	0.15 ± 0.05 ^{a (A)}	0.11 ± 0.02 ^{a (A)}	0.34 ± 0.04 ^{bc (A)}	0.24 ± 0.02 ^{a (A)}	1.71 ± 0.17 ^{e (D)}	3.01 ± 0.08 ^{ab (E)}
S ₂	0.21 ± 0.03 ^{a (A)}	0.31 ± 0.09 ^{bc (A)}	0.27 ± 0.03 ^{ab (A)}	0.35 ± 0.06 ^{ab (A)}	0.28 ± 0.03 ^{ab (A)}	10.02 ± 0.62 ^{d (E)}
S ₃	0.16 ± 0.02 ^{a (A)}	0.13 ± 0.04 ^{ab (A)}	0.49 ± 0.07 ^{e (A)}	0.53 ± 0.07 ^{b (A)}	1.12 ± 0.12 ^{d (A)}	1.63 ± 0.12 ^{a (A)}
S ₄	0.41 ± 0.07 ^{b (A)}	0.27 ± 0.05 ^{ab (A)}	0.11 ± 0.02 ^{a (A)}	1.22 ± 0.10 ^{d (A)}	0.24 ± 0.05 ^{ab (A)}	18.28 ± 1.49 ^{e (E)}
S ₅	0.69 ± 0.08 ^{c (A)}	1.12 ± 0.06 ^{e (AB)}	1.43 ± 0.12 ^{e (AB)}	0.78 ± 0.06 ^{c (A)}	0.58 ± 0.03 ^{c (A)}	20.09 ± 1.04 ^{e (E)}
S ₆	0.38 ± 0.05 ^{b (A)}	0.78 ± 0.06 ^{d (A)}	0.51 ± 0.02 ^{c (A)}	0.22 ± 0.03 ^{a (A)}	0.11 ± 0.02 ^{a (A)}	5.08 ± 0.90 ^{bc (C)}
S ₇	1.21 ± 0.10 ^{d (A)}	0.41 ± 0.04 ^{a (A)}	1.23 ± 0.08 ^{d (A)}	1.1 ± 0.16 ^{d (A)}	0.45 ± 0.07 ^{bc (A)}	6.81 ± 0.66 ^{c (D)}
S ₈	0.65 ± 0.04 ^{c (A)}	0.16 ± 0.04 ^{ab (A)}	0.15 ± 0.01 ^{a (A)}	0.21 ± 0.03 ^{a (A)}	0.38 ± 0.03 ^{bc (A)}	23.67 ± 1.92 ^{f (G)}
S ₉	0.15 ± 0.04 ^{a (A)}	0.24 ± 0.04 ^{abc (AB)}	0.35 ± 0.05 ^{bc (AB)}	0.56 ± 0.07 ^{bc (BC)}	1.22 ± 0.07 ^{d (DE)}	3.01 ± 0.09 ^{ab (G)}

续表 2 (Continued)

站 位 Stations	9 月 Sep	10 月 Oct	11 月 Nov	12 月 Dec	1 月 Jan	2 月 Feb
S ₁	1.54 ± 0.14 ^{a (BC)}	2.81 ± 0.16 ^{ab (E)}	3.10 ± 0.27 ^{a (E)}	2.11 ± 0.14 ^{b (D)}	1.81 ± 0.13 ^{a (CD)}	1.23 ± 0.10 ^{a (B)}
S ₂	2.09 ± 0.27 ^{ab (B)}	5.01 ± 0.23 ^{c (C)}	10.18 ± 0.57 ^{c (E)}	1.09 ± 0.12 ^{a (A)}	6.13 ± 0.46 ^{b (D)}	4.37 ± 0.38 ^{c (C)}
S ₃	3.67 ± 0.11 ^{b (B)}	10.66 ± 0.86 ^{c (D)}	15.04 ± 1.08 ^{c (E)}	4.22 ± 0.26 ^{c (B)}	8.63 ± 1.43 ^{c (C)}	4.75 ± 0.36 ^{c (B)}
S ₄	8.22 ± 1.29 ^{d (BC)}	10.17 ± 1.46 ^{c (CD)}	9.08 ± 0.33 ^{c (BC)}	7.22 ± 0.16 ^{c (B)}	11.45 ± 0.69 ^{d (D)}	8.27 ± 0.38 ^{d (BC)}
S ₅	3.56 ± 0.31 ^{b (D)}	4.18 ± 0.26 ^{bc (DE)}	10.01 ± 0.74 ^{c (F)}	2.31 ± 0.19 ^{b (C)}	3.01 ± 0.11 ^{a (CD)}	5.01 ± 0.34 ^{c (E)}
S ₆	2.31 ± 0.14 ^{ab (B)}	1.90 ± 0.11 ^{a (B)}	5.08 ± 0.23 ^{c (C)}	2.34 ± 0.06 ^{b (B)}	2.01 ± 0.13 ^{a (B)}	4.36 ± 0.27 ^{c (C)}
S ₇	6.27 ± 0.60 ^{c (CD)}	8.22 ± 0.41 ^{d (E)}	6.08 ± 0.67 ^{b (CD)}	5.25 ± 0.3 ^{d (C)}	5.25 ± 0.61 ^{b (C)}	3.33 ± 0.25 ^{b (B)}
S ₈	10.78 ± 0.38 ^{e (E)}	6.88 ± 0.27 ^{d (C)}	12.87 ± 0.64 ^{d (F)}	8.72 ± 0.85 ^{f (CD)}	9.43 ± 0.17 ^(DE)	3.24 ± 0.26 ^{b (B)}
S ₉	0.90 ± 0.13 ^{a (D)}	2.11 ± 0.29 ^(F)	1.98 ± 0.19 ^(F)	3.90 ± 0.09 ^{c (H)}	1.33 ± 0.11 ^{a (E)}	1.74 ± 0.06 ^(F)

注：上述数据为 3 个平行组的平均值 ± 标准误；同列数据右侧标有不同小写字母表示站位间差异显著 ($p < 0.05$)，同行数据括号内标有不同大写字母表示月份间差异显著 ($p < 0.05$)。

Notes: Values (expressed as mean±S.E., $n = 3$) are means of three groups; a, b, c Values (means ± S.E.) in the same column with different superscripts are significantly different at $p < 0.05$, and A, B, C Values in the same row with different superscripts are significantly at $p < 0.05$.

表 3 流沙湾浮游植物的细胞密度
Tab. 3 Cell density of phytoplankton in Liusha Bay

门类 Phylum	数量 Amount / (个·L ⁻¹)	比例 Ratio / %
硅藻门 Bacillariophyta	12 783	96.50
绿藻门 Chlorophyta	100	0.75
金藻门 Chrysophyta	20	0.15
蓝藻门 Cyanophyta	312	2.36
甲藻门 Pyrrophyta	32	0.24
总计 Total	13 247	100

浮游植物生物量有明显的月变化，在 3 月至 7 月处于较低水平，同一站位不同月份总体差异不显著；8 月到翌年 2 月处于较高水平，其中 8 月和 11 月出现两个峰值，生物量分别为 10.18 和 8.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2)，同一站位下与其他月份相比差异显著 ($p < 0.05$)。分析认为，夏季气温较高，雨量充沛，地表径流带来丰富的营养盐，导致角毛藻、骨条藻开始大量繁殖。

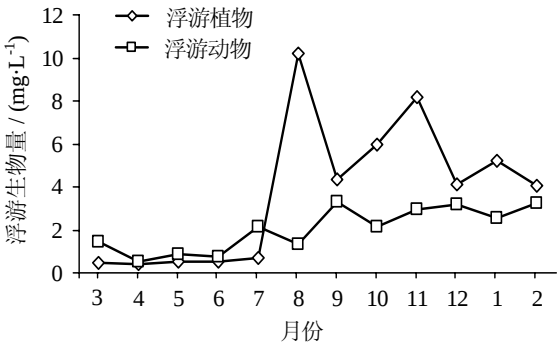


图 2 流沙湾浮游生物生物量的月变化
Fig. 2 Monthly variation of phytoplankton biomass in Liusha Bay

浮游植物生物量有明显的水平分布，表现为 4、8 号站生物量较高，平均值分别为 6.25 和 6.43 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 3)；1、6 和 9 号站生物量较低，平均值分别为 1.51、2.09 和 1.46 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，统计分析表明，部分站位在同一采样时间内生物量差异显著 ($p < 0.05$)。

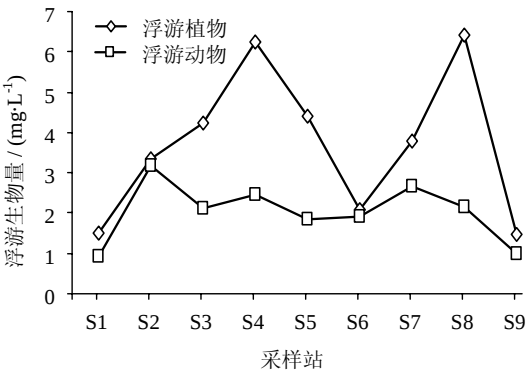


图 3 流沙湾浮游生物生物量的水平分布
Fig. 3 Horizontal distribution of plankton biomass in Liusha Bay

2.1.3 生物多样性 水平分布：浮游植物物种多样性指数变化在 0.017 ~ 0.330 之间，平均值为 0.092；均匀度指数变化在 0.005 ~ 0.079 之间，平均值为 0.022；物种多样性指数和均匀度指数具有相似的变化趋势，处于湾中的 3 号和 8 号站位较高，其他站位均处于较低水平；丰富度指数变化在 2.103 ~ 5.258 之间，平均值为 3.692 (表 4)，表现为在湾中的 5 号和 7 号站位较高，在湾口的 1 号和湾底的 9 号站位较低。3 种生物多样性指数的水平分布变化较大。

月变化：浮游植物物种多样性指数月变化范围

在 0.009 ~ 0.223 之间, 平均为 0.087; 均匀度指数月变化范围为 0.002 ~ 0.056, 平均为 0.021; 物种多样性指数和均匀度指数月变化趋势一致, 表现为 3、6、12 月较高, 其他月份均处于较低水平; 丰富度指数变化在 2.524 ~ 5.468 之间, 平均值为 4.171, 其变化趋势呈现开口向下的抛物线型, 峰值出现在 8 月和 9 月, 向两侧逐渐降低 (表 5)。浮游植物生物多样性指数有较强的季节变化。

表 4 流沙湾浮游植物生物多样性的水平分布

Tab. 4 Horizontal distribution of diversity of phytoplankton in Liusha Bay

站位 Stations	多样性 Diversity index	均匀度 Evenness index	丰富度 Richness index
S ₁	0.017	0.005	2.103
S ₂	0.023	0.006	2.944
S ₃	0.330	0.079	3.575
S ₄	0.048	0.011	4.417
S ₅	0.037	0.008	4.837
S ₆	0.026	0.006	3.996
S ₇	0.038	0.008	5.258
S ₈	0.287	0.07	3.365
S ₉	0.022	0.006	2.734
平均 Averages	0.092	0.022	3.692

表 5 流沙湾浮游植物生物多样性的月变化

Tab. 5 Monthly variation of diversity of phytoplankton in Liusha Bay

月份	多样性 Diversity index	均匀度 Evenness index	丰富度 Richness index
3 月 Mar	0.223	0.056	3.155
4 月 Apr	0.041	0.01	3.575
5 月 May	0.089	0.02	4.206
6 月 Jun	0.142	0.032	4.417
7 月 Jul	0.014	0.003	5.258
8 月 Aug	0.009	0.002	5.468
9 月 Sep	0.021	0.004	5.468
10 月 Oct	0.037	0.008	5.258
11 月 Nov	0.027	0.006	3.996
12 月 Dec	0.240	0.058	3.575
1 月 Jan	0.180	0.045	3.155
2 月 Feb	0.024	0.007	2.524
平均 Averages	0.087	0.021	4.171

2.2 浮游动物群落结构

2.2.1 种类组成 流沙湾 9 个站位共检出浮游动物 19 种 (表 6), 其中原生动物 10 种, 桡足类 6 种, 枝角类、多毛类和轮虫类各 1 种。优势种类为原生动物中的拟铃虫 (*Tintinnopsis*)、薄铃虫 (*Leprotintinnus*), 桡足类中的哲水蚤, 浮游幼体中的无节幼体等, 而轮虫和枝角类较少, 由此可以看出流沙湾的浮游动物组成特点是种群结构比较单一。

表 6 流沙湾浮游动物种类组成

Tab. 6 Constitute and distribution of zooplankton species in Liusha Bay

门类 Phylum	种类 Species	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉
原生动物 Protozoa	根状拟铃虫 <i>Tintinnopsis radix</i>								+	
	卡拉拟铃虫 <i>Tintinnopsis karajacensis</i>	+				+			+	+
	拟铃虫 <i>Tintinnopsis</i>	+	++	+	+	+	+	+	+++	+
	沙壳虫属 <i>Diffugia</i>	+								
	住囊虫 <i>Oikopleura</i>		+	+				+	+	
	类铃虫属 <i>Codonellopsis</i>	+	+	+		+				+
	网纹虫 <i>Favella campanula</i>	+	+	+		+	+	+	+	+
	薄铃虫 <i>Leprotintinnus</i>	++	+	++	+	+	+	+++	+	+
	拟铃壳虫 <i>Tintinnopsis</i>	+		++	+	++	+	++	+	+
	直颈拟铃虫 <i>Tintinnopsis drecta</i>	+		+						
轮虫类 Rotifers	壶状臂尾轮虫 <i>Brachionus urceus</i>									+
枝角类 Cladocera	蚤状蚤 <i>Daphnia pulex</i>	+	++	++	+	+	+++	+	++	+
多毛类 Polychaeta	刚毛幼虫 <i>Setae larva</i>	+			+	+				
桡足类 Copepods	剑水蚤 <i>Cyclops</i>	+		+		+		+	+	+
	哲水蚤 <i>Calanoida</i>	+	++	++	+	+	+++	+	+	+++
	猛水蚤 <i>Harpacticoida</i>	+		+	+	++		+	+	++
	浮游幼体 Pelagic larvae	+	++	+	++	+	++	+	+	+
浮游幼体 Pelagic larvae	D 形幼虫 D larvae	+	++	+	++	+	++	+	+	+
	蚤状幼体 Protozoa				+					
	无节幼体 Nauplius	++	++	+++	+	++	++	+++	+	+

注: +表示该种数量占总数的 1%以下, 为少见种; ++表示该种数量占总数的 1%~10%, 为常见种; +++表示该种数量占总数的 10%以上, 为优势种。

Note: “+” represents rare species (below 1% of the total), “++” represents common species (1%—10% of the total), “+++” represents dominant species (over 10% of the total) .

2.2.2 生物量和密度 流沙湾浮游动物生物量在 $0.08 \sim 7.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均为 $2.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 7)。浮游动物生物量有明显的月变化, 总的变化趋势是从 3 月开始逐渐升高, 其中 9、12 和 2 月较高, 生物量分别达到 3.31 、 3.18 和 $3.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2); 2、3 和 4 月较低, 生物量分别为 0.52 、 0.86 和 $0.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。浮游动物生物量有明显的水平变化, 其中 2、4 和 7 号站较高, 生物量分别为 3.19 、 2.64 和

$2.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 3), 1 和 9 号站较低, 生物量分别为 0.91 和 $0.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

浮游动物细胞密度平均为 $8186 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 8), 以原生动物和桡足类在数量上占有绝对优势, 二者分别占总量的 44.20% 、 54.42% , 轮虫类密度最少, 仅占 0.01% , 流沙湾浮游动物生物量处于较低水平, 且种群结构较为单一。

表 7 流沙湾浮游动物生物量
Tab. 7 The biomass of zooplankton in Liusha Bay

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

站位 Stations	3 月 Mar	4 月 Apr	5 月 May	6 月 Jun	7 月 Jul	8 月 Aug
S ₁	$0.45 \pm 0.05^{\text{a (B)}}$	$0.24 \pm 0.04^{\text{bc (A)}}$	$0.08 \pm 0.02^{\text{a (A)}}$	$0.06 \pm 0.02^{\text{a (A)}}$	$3.12 \pm 0.26^{\text{c (D)}}$	$0.19 \pm 0.03^{\text{a (A)}}$
S ₂	$1.41 \pm 0.10^{\text{c (B)}}$	$0.32 \pm 0.04^{\text{c (A)}}$	$0.64 \pm 0.09^{\text{b (A)}}$	$0.71 \pm 0.03^{\text{cd (A)}}$	$4.03 \pm 0.16^{\text{d (E)}}$	$3.10 \pm 0.30^{\text{d (D)}}$
S ₃	$2.40 \pm 0.13^{\text{e (C)}}$	$0.05 \pm 0.01^{\text{a (A)}}$	$0.38 \pm 0.02^{\text{b (A)}}$	$0.29 \pm 0.03^{\text{b (A)}}$	$0.05 \pm 0.02^{\text{a (A)}}$	$1.03 \pm 0.16^{\text{b (B)}}$
S ₄	$1.38 \pm 0.09^{\text{c (CD)}}$	$0.11 \pm 0.03^{\text{ab (A)}}$	$1.31 \pm 0.14^{\text{c (CD)}}$	$0.67 \pm 0.13^{\text{c (ABC)}}$	$1.60 \pm 0.07^{\text{b (D)}}$	$1.03 \pm 0.09^{\text{b (BCD)}}$
S ₅	$0.73 \pm 0.19^{\text{ab (B)}}$	$0.02 \pm 0.00^{\text{a (A)}}$	$1.34 \pm 0.11^{\text{c (CD)}}$	$1.01 \pm 0.07^{\text{c (BC)}}$	$0.19 \pm 0.02^{\text{a (A)}}$	$1.20 \pm 0.12^{\text{b (BCD)}}$
S ₆	$1.13 \pm 0.08^{\text{bc (B)}}$	$0.07 \pm 0.01^{\text{a (A)}}$	$1.57 \pm 0.07^{\text{c (C)}}$	$0.89 \pm 0.07^{\text{de (B)}}$	$4.10 \pm 0.23^{\text{d (G)}}$	$3.09 \pm 0.12^{\text{d (E)}}$
S ₇	$1.90 \pm 0.37^{\text{d (CDE)}}$	$1.16 \pm 0.08^{\text{b (B)}}$	$0.40 \pm 0.09^{\text{b (A)}}$	$1.40 \pm 0.04^{\text{f (BC)}}$	$5.55 \pm 0.42^{\text{e (H)}}$	$2.08 \pm 0.08^{\text{e (DE)}}$
S ₈	$3.33 \pm 0.08^{\text{f (E)}}$	$2.62 \pm 0.11^{\text{e (D)}}$	$1.53 \pm 0.12^{\text{c (BC)}}$	$0.44 \pm 0.06^{\text{b (A)}}$	$0.26 \pm 0.03^{\text{a (A)}}$	$0.30 \pm 0.03^{\text{a (A)}}$
S ₉	$0.73 \pm 0.10^{\text{ab (C)}}$	$0.08 \pm 0.02^{\text{a (A)}}$	$0.49 \pm 0.08^{\text{b (AB)}}$	$1.08 \pm 0.10^{\text{c (CD)}}$	$0.37 \pm 0.03^{\text{a (AB)}}$	$0.08 \pm 0.02^{\text{a (A)}}$
站位 Stations	9 月 Sep	10 月 Oct	11 月 Nov	12 月 Dec	1 月 Jan	2 月 Feb
S ₁	$1.62 \pm 0.13^{\text{b (C)}}$	$0.49 \pm 0.04^{\text{b (B)}}$	$0.38 \pm 0.03^{\text{a (A)}}$	$0.44 \pm 0.04^{\text{b (B)}}$	$3.45 \pm 0.14^{\text{d (E)}}$	$1.44 \pm 0.07^{\text{b (C)}}$
S ₂	$5.27 \pm 0.21^{\text{e (F)}}$	$3.90 \pm 0.13^{\text{f (E)}}$	$6.08 \pm 0.15^{\text{f (G)}}$	$7.24 \pm 0.17^{\text{g (H)}}$	$2.33 \pm 0.32^{\text{c (C)}}$	$3.27 \pm 0.12^{\text{c (D)}}$
S ₃	$3.01 \pm 0.07^{\text{c (D)}}$	$4.01 \pm 0.17^{\text{f (E)}}$	$4.03 \pm 0.30^{\text{e (E)}}$	$4.44 \pm 0.38^{\text{f (E)}}$	$5.46 \pm 0.27^{\text{e (F)}}$	$0.25 \pm 0.05^{\text{a (A)}}$
S ₄	$7.21 \pm 0.64^{\text{f (H)}}$	$4.08 \pm 0.15^{\text{f (F)}}$	$3.79 \pm 0.24^{\text{de (F)}}$	$2.37 \pm 0.13^{\text{cd (E)}}$	$0.32 \pm 0.05^{\text{a (A)}}$	$5.67 \pm 0.39^{\text{e (G)}}$
S ₅	$2.88 \pm 0.21^{\text{c (E)}}$	$1.03 \pm 0.09^{\text{c (BC)}}$	$4.08 \pm 0.40^{\text{e (F)}}$	$3.03 \pm 0.24^{\text{ef (E)}}$	$1.75 \pm 0.11^{\text{b (D)}}$	$4.73 \pm 0.22^{\text{d (G)}}$
S ₆	$2.91 \pm 0.06^{\text{c (E)}}$	$1.71 \pm 0.11^{\text{d (CD)}}$	$1.99 \pm 0.19^{\text{b (D)}}$	$1.90 \pm 0.22^{\text{bc (CD)}}$	$0.16 \pm 0.05^{\text{a (A)}}$	$3.55 \pm 0.13^{\text{c (F)}}$
S ₇	$4.03 \pm 0.11^{\text{d (G)}}$	$2.38 \pm 0.19^{\text{e (EF)}}$	$2.74 \pm 0.16^{\text{c (F)}}$	$3.63 \pm 0.25^{\text{e (G)}}$	$1.65 \pm 0.18^{\text{b (BCD)}}$	$5.33 \pm 0.14^{\text{e (H)}}$
S ₈	$3.01 \pm 0.14^{\text{c (E)}}$	$1.90 \pm 0.08^{\text{d (C)}}$	$3.20 \pm 0.22^{\text{cd (E)}}$	$1.44 \pm 0.19^{\text{b (B)}}$	$6.35 \pm 0.26^{\text{f (F)}}$	$1.33 \pm 0.05^{\text{b (B)}}$
S ₉	$0.11 \pm 0.03^{\text{a (A)}}$	$0.07 \pm 0.01^{\text{a (A)}}$	$0.23 \pm 0.03^{\text{a (A)}}$	$3.64 \pm 0.39^{\text{e (E)}}$	$1.35 \pm 0.13^{\text{b (D)}}$	$3.46 \pm 0.11^{\text{c (E)}}$

注: 上述数据为 3 个平行组的平均值 $\pm$ 标准误; 同列数据右侧标有不同小写字母表示站位间差异显著 ($p < 0.05$), 同行数据括号内标有不同大写字母表示月份间差异显著 ($p < 0.05$)。

Notes: Values (expressed as mean $\pm$ S.E., $n=3$) are means of three groups. a, b, c Values (means $\pm$ S.E.) in the same column with different superscripts are significantly different at $p < 0.05$. A, B, C Values in the same row with different superscripts are significantly at $p < 0.05$.

表 8 流沙湾各类浮游动物的密度
Tab. 8 Cell density of zooplankton in Liusha Bay

门类 Phylum	密度 Density / ($\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$)	比例 Ratio / %
原生动物 Protozoa	361 8	44.2
枝角类 Cladocera	66	0.81
桡足类 Copepods	445 5	54.42
多毛类 Polychaeta	46	0.56
轮虫类 Rotifers	1	0.01
总计 Total	818 6	100

2.2.3 生物多样性 水平分布: 浮游动物物种多样性指数变化在 $0.22 \sim 0.67$ 之间, 平均值为 0.41 ; 均匀度指数变化在 $0.062 \sim 0.171$ 之间, 平均值为 0.099 ; 丰富度指数变化在 $2.250 \sim 2.882$ 之间, 平均值为 2.583 。3 种多样性指数的水平分布变化差异较小, 尤其是丰富度各站位之间没有显著性差异 (表 9)。

月变化: 浮游动物物种多样性指数月变化范围在 $0.11 \sim 0.60$ 之间, 平均为 0.32 ; 均匀度指数月变化范围为 $0.033 \sim 0.144$, 平均为 0.083 ; 丰富度指数变化在 $1.524 \sim 3.239$ 之间, 平均值为 2.325 , 3 种多样性指数处于较低水平, 具有一致月变化趋势, 表

现为 8 月份最低, 3 月和 2 月较高 (表 10)。浮游动物多样性指数整体偏低, 表明海湾水环境中浮游动物生物群落构成较为简单、优势种较为单一, 且演替速度较快, 浮游动物群落稳定性较差。

表 9 流沙湾浮游动物生物多样性的水平分布

Tab.9 Horizontal distribution of diversity of zooplankton in Liusha Bay

站位 Stations	多样性 Diversity index	均匀度 Evenness index	丰富度 Richness index
S ₁	0.23	0.062	2.524
S ₂	0.67	0.171	2.800
S ₃	0.33	0.087	2.734
S ₄	0.48	0.126	2.766
S ₅	0.27	0.075	2.545
S ₆	0.23	0.066	2.277
S ₇	0.58	0.148	2.882
S ₈	0.33	0.092	2.467
S ₉	0.22	0.066	2.250
平均 Averages	0.41	0.099	2.583

表 10 流沙湾浮游动物生物多样性的月变化

Tab. 10 Monthly variation of diversity of zooplankton in Liusha Bay

月份 Month	多样性 Diversity index	均匀度 Evenness index	丰富度 Richness index
3 月 Mar	0.57	0.139	3.119
4 月 Apr	0.47	0.118	3.057
5 月 May	0.33	0.084	2.613
6 月 Jun	0.25	0.070	2.003
7 月 Jul	0.19	0.055	1.772
8 月 Aug	0.11	0.033	1.524
9 月 Sep	0.17	0.049	1.686
10 月 Oct	0.18	0.050	1.801
11 月 Nov	0.22	0.061	1.911
12 月 Dec	0.35	0.09	2.596
1 月 Jan	0.41	0.105	2.580
2 月 Feb	0.60	0.144	3.239
平均 Averages	0.32	0.083	2.325

3 讨论

3.1 流沙湾浮游植物群落结构

流沙湾浮游植物群落是一个以硅藻为主导型的浮游植物群落, 在现存的 5 门藻类中, 硅藻门的比例高达 96.50%, 优势种为角毛藻、骨条藻、菱形藻, 这与周凯等^[7]调查柘林湾全年优势种为中肋骨

条藻 (*Skeletonema costatum*) 相似, 但与其他海域比较优势种差异较大。东营近海海域枯水期浮游植物优势种以圆筛藻 (*Coscinodiscus* spp.)、刚毛根管藻 (*Rhizosolenia setigera*)、布氏双尾藻 (*Ditylum brightwellii*)、夜光藻 (*Noctiluca scintillans*) 为主^[8]; 南海北部秋季浮游植物优势种中分布较广泛的有柔弱伪菱形藻 (*Pseudo-nitzschia delicatissima*)、反曲原甲藻 (*Prorocentrum sigmoides*)、微小原甲藻 (*Prorocentrum minimum*)、锥状施克里普藻 (*Scrippsiella trochoidea*) 和红海束毛藻 (*Trichodesmium erythraeum*) 等^[9]; 三亚湾周年调查显示浮游植物优势种主要为硅藻门和蓝藻门^[10]。各海区浮游植物群落优势种差异较大, 主要与不同海区水温、光照、营养元素含量等因素有关。

流沙湾浮游植物平均总细胞数 (1.33×10^4 个 L^{-1}) 与国内其他海域研究结果比较, 柘林湾为 16.9×10^4 个 L^{-1} ^[11], 深圳湾为 2.92×10^6 个 L^{-1} ^[12], 马鞍列岛海域为 4.85×10^4 个 L^{-1} ^[13], 流沙湾浮游植物密度处于较低水平。流沙湾不同站位和季节浮游植物多样性指数和均匀度与国内其他海域研究结果比较, 柘林湾 19 个站位物种多样性指数平均值为 1.75, 均匀度指数平均值为 0.42, 季节变化多样性指数月均值为 2.69, 均匀度指数月均值为 0.64^[11]; 春季东营近海 15 个站位浮游植物多样性指数平均值 1.941, 均匀度指数平均为 0.622^[8]; 冬季湛江港外海 9 个站位浮游植物多样性指数平均为 1.87, 均匀度指数平均为 0.47^[14]; 夏季湛江湾 16 个站位浮游植物种类多样性指数平均值为 2.42, 均匀度指数平均为 0.67^[15]; 北戴河贝类养殖海域养殖期 6 个站位浮游植物多样性指数平均为 1.162, 均匀度指数平均为 0.333^[16]。综合以上研究结果发现, 流沙湾浮游植物生物量、多样性和均匀度均处于较低水平。分析认为, 流沙湾水域养殖总面积占流沙湾海域总面积的 19.7%, 其中贝类养殖面积占流沙湾水域养殖面积的 91.9%^[1], 一方面贝类的滤食作用对浮游植物构成较大的生态压力, 另一方面这种密集的养殖生产导致湾内水流不畅和光照不足。Cloern 等^[17]对旧金山北部湾研究也发现在有大量营养盐输入的浅水海湾, 浮游植物的生物量仍然较低, 高密度养殖贝类的滤食压力是导致这种情况的主要原因。

流沙湾浮游植物生物量的周年变化模式为双峰型 (图 2), 即在 2008 年夏季 (8 月) 高峰以后, 浮游植物生物量显著回落, 在 11 月份又达到了一

个新的高峰。这种双峰型的季节变化规律接近于亚热带海域浮游植物的周年变化模式^[18-19]。而将调查海域浮游植物总细胞数与水温进行回归分析表明,浮游植物数量与水温呈正相关关系,相关系数为0.584 7^[20],说明水温是影响浮游植物细胞数量的一个直接因素。这与周凯等^[7]对柘林湾水温与浮游植物总细胞数的研究结果相似。

3.2 流沙湾浮游动物群落结构

流沙湾浮游动物全年优势种为原生动物中的拟铃虫、薄铃虫,桡足类中的哲水蚤,浮游幼体中的无节幼体,这与其他海域有所不同。柘林湾全年优势种为桡足类和枝角类,其优势种类为强额拟哲水蚤(*Paracalanus crassirostris*)、短角长腹剑水蚤(*Oithona brevicornis*)和鸟喙尖头蚤(*Penilia avirostris*)^[21];黄海北部筏式贝类养殖区养殖季节浮游动物优势种为小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)、近缘大眼剑水蚤(*Corycaeus affinis*)、鸟喙尖头蚤(*Penilia avirostris*)^[22];夏季青岛近海浮游动物优势种为中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)、强壮箭虫(*Sagitta crassa*)以及浮游幼虫中的拟长脚蚺(*Parathemisto gaudichaudi*)、长尾类幼虫、短尾类幼虫等^[23]。不同海区浮游动物优势种差异的原因,可能与海区的自然地理条件、水环境因子、养殖规模和种类等不同有关。

流沙湾浮游动物的生物量均值为2.03 mg·L⁻¹,与国内其他海域的研究结果比较,柘林湾为227.8 mg·m⁻³^[24],青岛夏季近海为118.1 mg·m⁻³^[22],大亚湾海域为424.3 mg·m⁻³^[25],东海四季总生物量均值为65.32 mg·m⁻³^[26],其中,柘林湾自然气候、地理条件以及海域环境等与流沙湾较为相似,但流沙湾的浮游动物生物量远高于柘林湾,处于相对较高的水平,这可能与海湾海水养殖品种和养殖密集程度不同等因素有关。

流沙湾浮游动物生物量在2008年的9、12月和翌年2月均有较高值,而在同年6月有所回落,根据亚热带海域浮游动物生物量周年变动的一般规律,浮游动物初夏生物量较低可能是由春末夏初对饵料浮游植物的过度消耗引起饵料供应不足所致^[27]。而后,随着水温进一步上升,浮游植物开始大量繁殖,饵料供应相对充足,导致浮游植物生物量明显上升,浮游动物生物量也随之上升。

参考文献

[1] 申玉春,李再亮,黄石成,等.流沙湾海域水产养殖结构与布局调查分析[J].中国渔业经济,2009(5):45-47.

[2] 国家海洋局.海洋调查规范[S].北京:中国标准出版社,2007:1-168.

[3] 章宗涉,黄祥飞.淡水浮游生物研究方法[M].北京:科学出版社,1991:1-414.

[4] Shannon E E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. London: Univ Illinois Press, 1963: 125.

[5] Pielou E C. An introduction to mathematical ecology[M]. New York: Wiley-Interscience, 1966: 1-286.

[6] Margalef R. Perspectives in ecological theory[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968: 1-408.

[7] 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.

[8] 宋秀凯,刘爱英,马元庆,等.东营近海枯水期浮游生物群落特征研究[J].海洋湖沼通报,2010(1):95-102.

[9] 李涛,刘胜,王桂芬,等.2004年秋季南海北部浮游植物组成及其数量分布特征[J].热带海洋学报,2010,29(2):65-73.

[10] 杨志浩,董俊德,吴梅林,等.三亚湾网采浮游植物群落结构特征分析[J].热带海洋学报,2007,26(6):62-66.

[11] 杜虹,黄长江,陈善文,等.2001—2002年粤东柘林湾浮游植物的生态学研究[J].海洋与湖沼,2003,34(6):604-617.

[12] 孙金水,戴纪翠,倪晋仁.深圳湾海域浮游植物的生态特征[J].环境科学,2010,31(1):63-68.

[13] 罗文俊,章守宇.马鞭列岛海域浮游植物优势种粒径组成及影响因子分析[J].上海海洋大学学报,2009,18(5):571-578.

[14] 彭昆仑,贾后磊.湛江港外海水富营养化水平与浮游植物多样性[J].海洋通报,2007,26(2):113-116.

[15] 程海鸥,马启敏,杨锋.湛江湾海水富营养化水平和浮游植物多样性分析[J].海洋湖沼通报,2009(3):121-126.

[16] 张建乐,陈海.北戴河养殖海域浮游植物的种类组成和时空分布特征[J].海洋通报,2010,29(4):407-411.

[17] Cloern J E, Cheng R T. Simulation Model of Skeletone costatum population dynamics in Northern San Francisco Bay, California. Estuarine[J]. Coastal and Shelf Science, 1981, 12: 83-100.

[18] 杜庆红.厦门同安湾浮游植物变化的初步研究[J].海洋通报,1996,15(6):20-26.

[19] 李延凤.湄洲湾浮游植物群落结构特征与水质污染关系分析[J].农村生态环境,1999,15(4):28-31.

[20] 申玉春,齐明,朱春华,等.流沙湾悬浮物数量动态变化规律的初步研究[J].中国农学通报,2010,26(24):397-402.

[21] 姜胜,黄长江,周凯,等.2000—2001年柘林湾浮游动物的群落结构与时空分布[J].生态学报,2002,22(6):828-840.

[22] 闫启仑,郭皓,王真良,等.浮游动物在贝类筏式养殖区内、外生态特征研究[J].黄渤海海洋,1999,17(1):46-50.

[23] 王晓,王宗灵,刘萍,等.夏季青岛近海浮游动物种类组成、群落结构及多样性[J].科学海洋进展,2009,29(3):376-382.

[24] 黄长江,陈善文,何歆,等.2001—2002年粤东柘林湾浮游动物的生态学研究[J].海洋与湖沼,2003,34(2):117-130.

[25] 杜飞雁,李纯厚,廖秀丽,等.大亚湾海域浮游动物生物量变化特征[J].海洋环境科学,2006,25(Sup1):37-43.

[26] 徐兆礼,晁敏,陈亚瞿.东海浮游动物生物量分布特征[J].海洋学报,2004,26(3):93-101.

[27] 郑重,李少菁,许振祖.海洋浮游生物学[M].北京:海洋出版社,1984:139-491.