

大亚湾海域浮游动物生态特征

方良^{1,2}, 李纯厚^{1,*}, 杜飞雁¹, 贾晓平¹, 张伟^{1,2}

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部海水养殖生态与质量控制重点开放实验室, 广州 510300;

2. 广东海洋大学水产学院, 湛江 524088)

摘要: 2004年3月(春季)、5月(夏季)、9月(秋季)和12月(冬季)4个航次对大亚湾海域浮游动物进行了调查。共计鉴定浮游动物128个种类, 浮游幼体14个类群。浮游动物出现的种类数依次是: 夏季(90种), 秋季(81种), 冬季(71种), 春季(47种)。浮游动物的丰度以夏季最高, 平均 $1013.38 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$; 其次是秋季, 平均 $913.30 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$; 春季最低, 平均 $162.37 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$ 。浮游动物生物量的季节变化: 秋季($773.89 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 夏季($472.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 冬季($286.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 春季($164.11 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 生物量高低与种类组成关系密切, 秋季优势类群为水母类和毛颚类等大型浮游动物, 所以生物量较高。4个季节的Shannon-Wiener多样性指数 H' 值、物种均匀度指数 J 值和物种丰富度指数 D 值的变化趋势十分相似: 春季的3项指数值均最低, 冬季最高, 夏、秋季节相差不大。此外, 分析结果表明: 毛颚类作为优势种且4个季节均有出现, 是对大亚湾海域水体较20a前水温上升的响应; 浮游动物近岸生物量高于湾中部; 从丰度的平面分布看, 大亚湾海域浮游动物栖息环境已经不同程度受到大型建设工程和人类活动的影响。

关键词: 大亚湾; 浮游动物; 丰度; 生物量; 生物多样性

Ecological characteristics of zooplankton in Daya Bay

FANG Liang^{1,2}, LI Chunhou^{1,*}, DU Feiyan¹, JIA Xiaoping¹, ZHANG Wei^{1,2}

1 South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Mariculture & Ecology and Quality Control, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510300, China

2 Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

Abstract: Four investigations were conducted on the zooplankton in Daya Bay, in March, May, September, and December 2004. A total of 128 zooplankton species and 14 pelagic larvae were identified. Zooplankton appeared in summer (90 species), autumn (81 species), winter (71 species), and spring (47 species). The abundance of Zooplankton was $1013.38 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$ (summer), $913.30 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$ (autumn), $437.86 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$ (winter), and $162.37 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$ (spring). The seasonal variation of Zooplankton biomass was $773.89 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in autumn, $472.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in Summer, $286.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in winter, and $164.11 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in spring. The level of biomass was close to the species composition, the dominant species in the autumn were large zooplankton, such as Jellyfish and Chaetognatha. Therefore, the biomass was high. The trend of the H' , J and D variation was close for the four investigations. The three indexes were the lowest in the spring, the highest in winter, summer, autumn more or less the same. In addition, results of the analysis showed that Chaetognatha, which was a dominant species, appeared in four seasons, indicating the response to rising water temperature. Zooplankton biomass in the coast was higher than that in the central of the Bay. According to the abundance distribution, the environment of the zooplankton in the Daya Bay had been affected by large-scale construction projects and human activities.

Key Words: Daya Bay; zooplankton; abundance; biomass; biodiversity

基金项目: 科技部科研院所社会公益研究专项资金资助项目(2005 DIB3J020); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国水产科学研究院南海水产研究所)资助项目(2007ZD08)

收稿日期: 2009-03-27; **修订日期:** 2009-10-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: scslch@163.com

大亚湾为三面环山半封闭式的海湾,湾内岛屿众多岸线曲折,具有优越的自然环境和丰富的生物资源,1983 年被广东省人民政府划为省级水产资源自然保护区。近 20a 来,大亚湾沿岸社会经济飞速发展,尤其是西部大亚湾核电站和岭澳核电站相继投入运营,北部惠州石化工业区的投产,大型建设造成岸线变化,湿地减少,大量陆源物质的输入,加速了大亚湾生态环境退化^[1-2]。

大亚湾海域浮游动物研究早前有过报道^[3-6],多侧重于对浮游动物的生物量和丰度进行研究,在 1987 年和 1988 年连光山等^[7]较为系统的研究了大亚湾海域的浮游动物群落的特征。但近些年大亚湾西北部海域沿岸大型工程项目的开发,可能导致水环境发生较大的变化,而近 20a 来对大亚湾海域浮游动物群落在生态学上的系统研究较为缺乏。本文根据 2004 年 3 月(春季)、5 月(夏季)、9 月(秋季)和 12 月(冬季)4 个航次的调查资料,对大亚湾西北部海域浮游动物的种类组成,丰度的时空分布,优势种的组成,生物量的时空分布以及物种多样性等进行了研究,并比较历史资料分析该水域近些年来浮游动物的变化特征。一方面了解近些年人类活动对大亚湾近岸海域生态系统结构和功能的影响;另一方面,为重大工程建设项目对该水域环境影响评价及生态环境保护措施的制订和渔业资源可持续利用等提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 调查站位

调查范围为大亚湾西北部约 500km² 的海域,共布设站位 10 个(图 1),各站位经纬度及水深(表 1)。

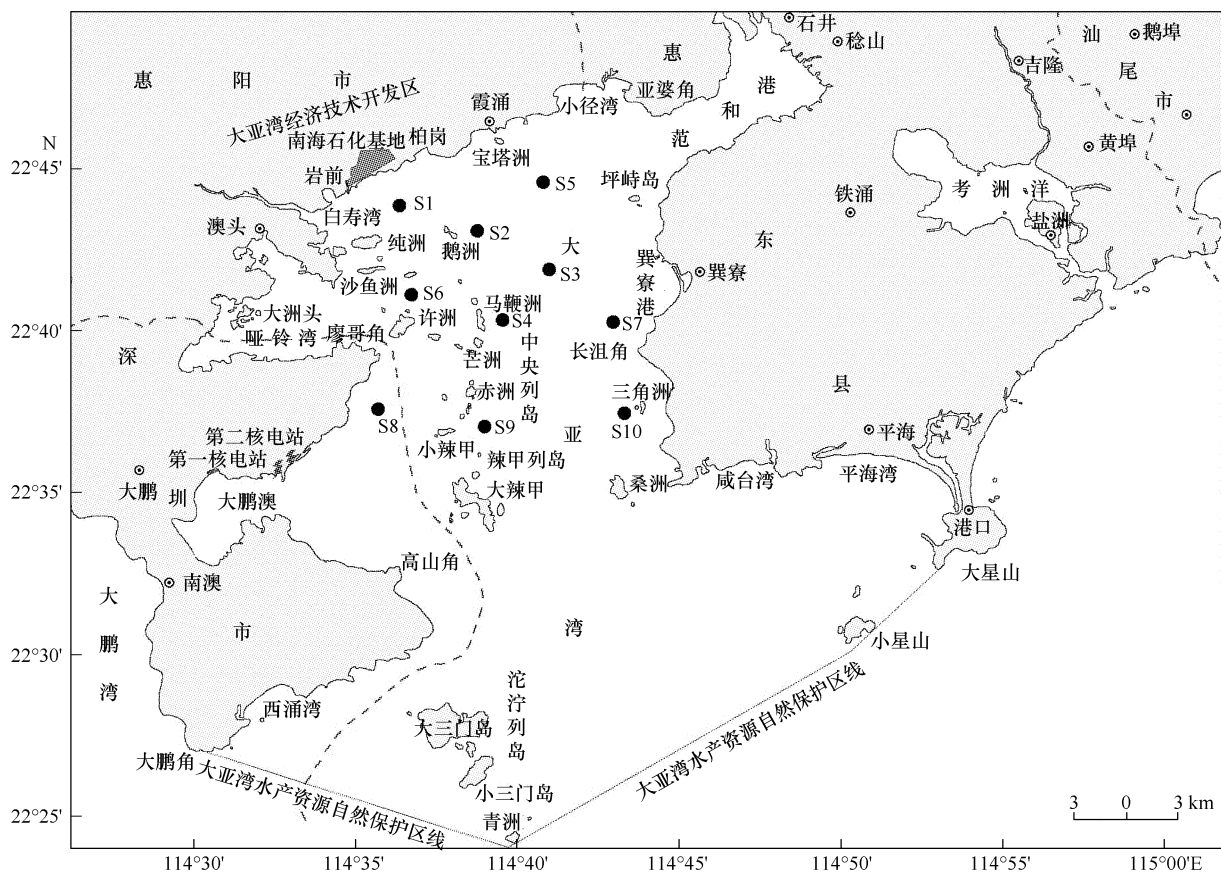


图 1 采样站位示意图

Fig. 1 Map of sampling stations

1.2 监测日期和采样方法

4 个航次分别于 2004 年 3 月 17—18 日(春季)、5 月 27—28 日(夏季)、9 月 21—22 日(秋季)和 12 月 21—22 日(冬季)租用“粤汕尾 11092”渔船进行浮游动物采集。

浮游动物采集遵照《海洋调查规范:海洋生物调查》(GB 12763.6-91)执行,用浅水 I 型浮游生物网(网长 145cm,网口内径 50cm,网口面积 0.2m^2 ,网目大小 0.505mm)采样,每个调查站自底层至表层垂直拖曳 1 网。浮游动物样品采集后用 5% 福尔马林溶液固定。

1.3 分析方法和计算公式

根据滤水量(网口面积与垂直采样水深之积)将浮游动物计数的结果换算成浮游动物的丰度($\text{ind}\cdot\text{m}^{-3}$),文中浮游动物生物量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)是指单位体积的样品湿重含量(样品湿重含量除以滤水量)。平面分布图用 surfer8.0 绘制。

浮游动物的优势种根据每个种的优势度(Y)值

来确定: $Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i$ 。 Y 大于 0.02 的种类为优势种^[8]。

Margalef 丰富度指数: $D = (S - 1) / \log N$

物种多样性的计算采用 Shannon-Wiener 多样性指数: $H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$

物种均匀度指数采用 Pielou 的计算公式: $J = H' / H_{\max}$

式中, n_i = 第 i 种的个体数量; N = 某站总浮游动物个体数; $P_i = n_i / N$; f_i = 某种生物的出现频率(%); $H_{\max} = \log_2 S$, 最大多样性指数; S = 出现生物总种数。

优势种更替率(R)^[9]指两季间不同的优势种类数与两季间出现的总优势种类数的百分比,计算公式为:

$R = (a + b - 2c) / (a + b - c) \times 100\%$, a 与 b 分别为相邻两季的优势种数; c 为相邻两季共同的优势种数。

2 结果

2.1 种类组成

2.1.1 种类组成

4 个航次共计鉴定浮游动物 128 个种类。其中腔肠动物 37 种,占种类组成的 28.90%;栉水母 2 种,占种类组成的 1.56%;毛颚类 8 种,占 6.25%;软体动物 6 种,占 4.69%;被囊类 4 种,占 3.12%;节肢动物门甲壳动物 71 种,占 55.47%。其中,桡足类 60 种,占甲壳动物组成的 84.51%、总种类组成的 46.88%;糠虾类 3 种,占甲壳动物组成的 4.23%,总种类组成的 2.34%;糠虾类 1 种,占甲壳动物组成的 1.41%,总种类组成的 0.78%;十足类 4 种,占甲壳动物组成的 5.63%,总种类组成的 3.12%;枝角类 3 种,占甲壳动物组成的 4.23%,总种类组成的 2.34%。

从 4 个航次种类组成来看,浮游动物以甲壳动物占优势,为种类总数的一半,而桡足类是其主要类群。

调查发现各站位出现的浮游动物平均种类数差异较大,各站年平均种类数最多的 3 个站是哑铃湾口的 S6 站、湾顶的 S5 站和湾顶靠岸的 S2 站,分别是 37、35 种和 35 种,平均种类数最少的 3 个站是南海石化基地附近的 S1 站、湾顶靠东岸的 S3 站和湾口的 S9 站,分别是 15、24 种和 24 种,从浮游动物在各站的种类数分布来看有两大特点:其一,冬夏季节东部高于西部;其二,呈湾中向近岸递减的趋势。

2.1.2 优势种的组成及其季节更替

大亚湾西北部海域浮游动物优势种全年共出现 19 种,各个季节间的优势种有很大差异(表 2),有明显的季节更替。常出现的优势种有弱箭虫(*Sagitta delicata*)、软拟海樽(*Dolioletta gegenbauri*)、美丽箭虫(*Sagitta pulchra*)、双生水母(*Diphyes chamissonis*)、鸟喙尖头蚤(*Penilia avirostris*)、红纺锤水蚤(*Acartia erythraea*)、小箭虫(*Sagitta neglecta*)、肥胖箭虫(*Sagitta enflata*)。各季节特有的优势种分别是:春季有长角隆哲水蚤

表 1 各站位经纬度及水深

Table 1 Latitude, longitude and water depth of the stations

站号 Station	经度 Longitude	纬度 Latitude	水深/m Water depth
S1	114°36.4'	22°43.9'	4
S2	114°38.8'	22°43.1'	8
S3	114°41.0'	22°41.9'	10
S4	114°39.5'	22°40.3'	11
S5	114°40.8'	22°44.6'	8
S6	114°36.7'	22°41.1'	5
S7	114°43.0'	22°40.3'	8
S8	114°39.0'	22°37.0'	10
S9	114°43.3'	22°37.46'	14
S10	114°43.3'	22°37.4'	8

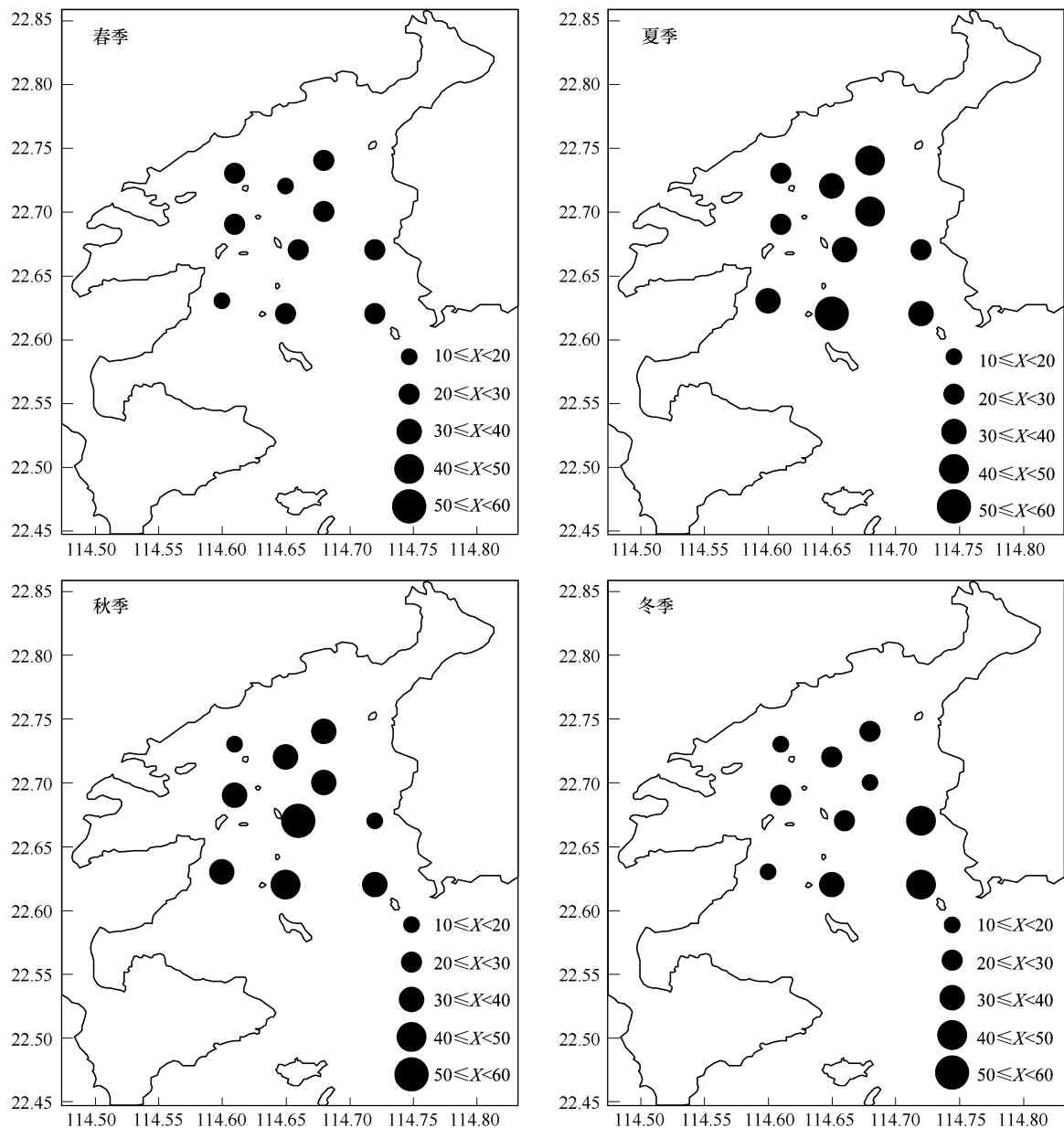


图2 大亚湾海域浮游动物种类数平面分布

Fig.2 The horizontal distribution of zooplankton species Daya Bay

(*Acrocalanus longicornis*)、丹氏纺锤水蚤(*Acartia danae*)、黑褐新糠虾(*Neomysis awatschensis*)、小长腹剑水蚤(*Oithona nana*)；夏季有汉森莹虾(*Lucifer hanseni*)；秋季有小齿海樽(*Doliolum denticulatum*)；冬季有锥形宽水蚤(*Temora turbinata*)、瘦尾胸刺水蚤(*Centropages tenuiremis*)、微刺哲水蚤(*Canthocalanus pauper*)、太平洋纺锤水蚤(*Acartia pacifica*)。

各季节优势种的组成具有以下特点：

(1) 甲壳动物的桡足类作为优势种的种类数最多，全年共出现 8 种，其中春季和冬季出现桡足类种类数较多；

(2) 毛颚类在各个季节均有优势种出现；

(3) 秋季被囊类作为优势种具有极其明显的优势，共有 2 优势种，占到秋季总优势种类的 25.00%，其中小齿海樽优势度 0.42 为全年最高；

(4)4 个季节均出现的优势种只有肥胖箭虫;3 个季节出现的优势种有小箭虫、红纺锤水蚤、软拟海樽;2 个季节出现的优势种有鸟喙尖头蚤、美丽箭虫、弱箭虫、双生水母;

(5)春、夏、秋、冬 4 季节第一优势种分别是百陶箭虫(0.05)、鸟喙尖头蚤(0.30)、小齿海樽(0.42)、红纺锤水蚤(0.12)。

优势种更替率(R)计算结果表明, R 值在春季-夏季最高,达 92.86%;冬季-春季次之,为 80.00%;秋季-冬季居第三,为 69.23%;夏季-秋季最低,仅 44.44%。这在一定程度上反应了大亚湾西北部浮游动物栖息的环境在春季转为夏季这段时期变化较大,从夏季转至秋季变化较小。

表 2 优势种的组成
Table 2 Dominant species composition

春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
种名 Specie	优势度 Dominant	种名 Specie	优势度 Dominant	种名 Specie	优势度 Dominant	种名 Specie	优势度 Dominant
百陶箭虫	0.05	鸟喙尖头蚤	0.3	小齿海樽	0.42	红纺锤水蚤	0.12
长角隆哲水蚤	0.03	肥胖箭虫	0.19	鸟喙尖头蚤	0.13	肥胖箭虫	0.08
肥胖箭虫	0.03	红纺锤水蚤	0.06	双生水母	0.08	锥形宽水蚤	0.08
软拟海樽	0.02	小箭虫	0.05	红纺锤水蚤	0.05	小箭虫	0.07
美丽箭虫	0.02	汉森莹虾	0.04	小箭虫	0.04	瘦尾胸刺水蚤	0.04
丹氏纺锤水蚤	0.02	弱箭虫	0.03	软拟海樽	0.02	微刺哲水蚤	0.03
黑褐新糠虾	0.02			弱箭虫	0.02	太平洋纺锤水蚤	0.02
双生水母	0.02			肥胖箭虫	0.02	软拟海樽	0.02
小长腹剑水蚤	0.02					美丽箭虫	0.02

2.2 丰度的季节变化与平面分布

2.2.1 季节变化

4 个季节浮游动物丰度差异很大,图 2。4 个季节的平均丰度范围为 162.37—1013.38ind·m⁻³,年总平均丰度为 518.21ind·m⁻³。其中夏季平均丰度最高,为 1013.38ind·m⁻³;秋季平均丰度次之,为 913.30ind·m⁻³;冬季平均丰度居第三,为 437.86ind·m⁻³;春季平均丰度最低为 162.37 ind·m⁻³。

2.2.2 平面分布

4 个季节浮游动物丰度的平面分布规律存在明显差异。春季湾口的 S9 站、湾东部沿岸的 S7 站和 S10 站丰度明显高于其他各站,夏季靠近石化基地附近的 S1 站、湾顶靠岸的 S2 站、湾顶靠东岸的 S3 站和湾顶的 S5 站明显高于其他各站;秋季湾顶靠岸的 S2 站、湾顶靠东岸的 S3 站、湾中中央列岛的 S4 站、湾顶的 S5 站和哑铃湾口的 S6 站明显高于沿岸的各站;冬季湾东部的湾顶靠东岸的 S3 站、湾顶的 S5 站、湾东部沿岸的 S7 站和 S10 站明显高于其他各站。

本周年 4 个航次各个站位浮游动物年平均丰度有较明显差异,各站位年平均丰度以 S2 站为最高 1265.85ind·m⁻³;S 5 站次之 949.03ind·m⁻³;S3 站、S4 站和 S10 站居中,丰度范围在 400—700ind·m⁻³之间;S1 站、S6 站、S7 站、S8 站和 S9 站较低丰度范围在 200ind·m⁻³之间,其中靠近石化基地的 S1 站和靠近核电站的 S8 站年平均丰度为所有站位中最低,分别仅为 285.89ind·m⁻³和 250.72ind·m⁻³。

2.3 生物量的季节变化及平面分布

2.3.1 季节变化

4 个季节调查表明大亚湾西北部海域浮游动物生物量差异较大,图 4。其年总平均生物量为 349.90 mg·m⁻³,其中秋季平均生物量最高为 773.89mg·m⁻³;夏季平均生物量次之 472.82mg·m⁻³;冬季平均生物量居第三 286.44mg·m⁻³;春季平均生物量最低 164.11mg·m⁻³。

2.3.2 平面分布

4 个季节浮游动物生物量的平面分布存在明显的差异。春季近岸的 S1 站、S5 站、S6 站、S7 站和 S10 站高

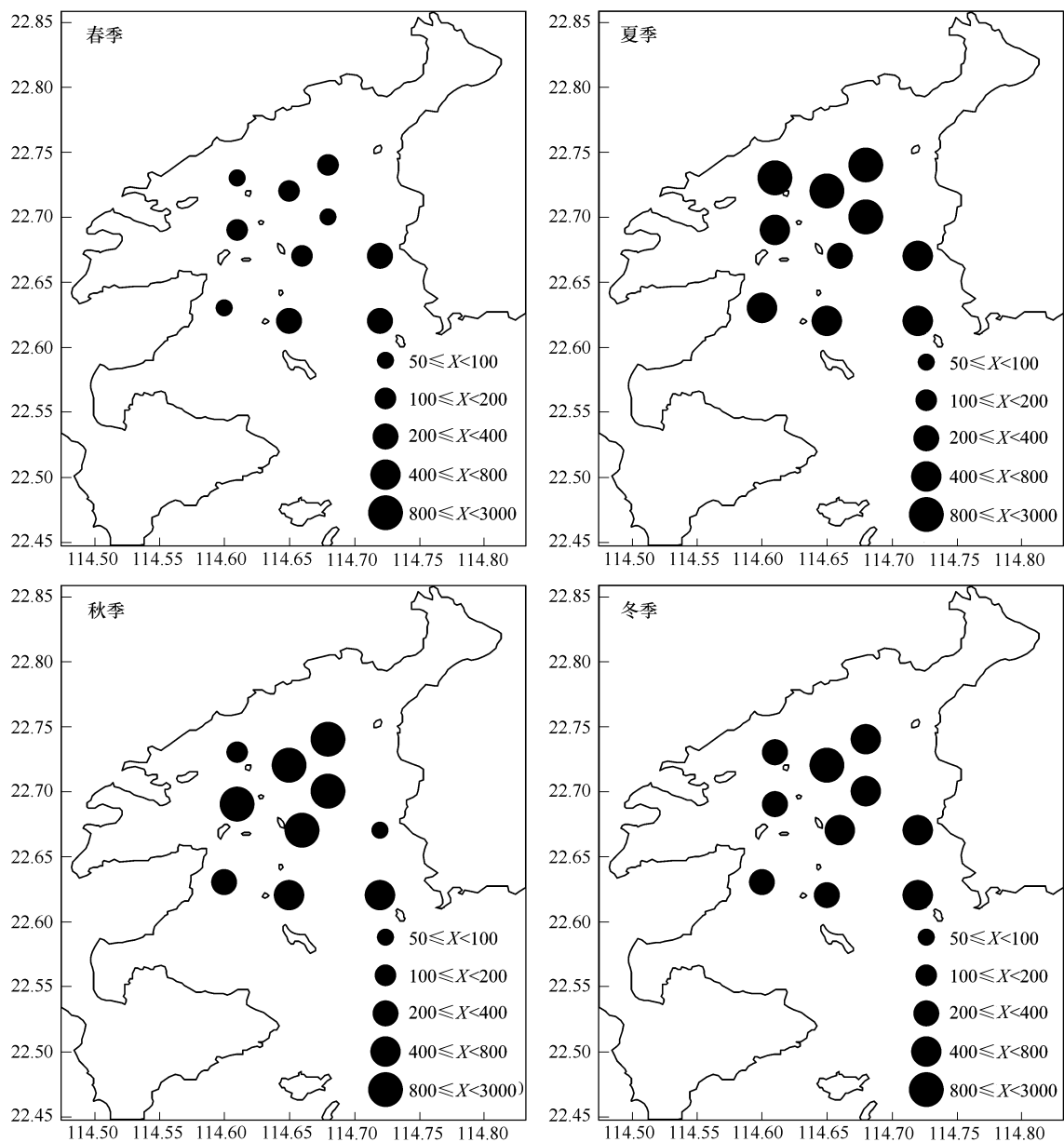


图3 大亚湾浮游动物丰度的平面分布($\text{ind} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 3 The horizontal distribution of zooplankton abundance Daya Bay

于其他各站;夏季近岸的S5站、S8站和S10站高于其他各站;秋季靠近湾顶的S1站、S2站、S6站、S5站和湾中S4站高于其他各站;冬季近岸的S6站、S7站和S10站高于其他各站。

本年度4个航次各站位年平均生物量,S5站最高 $562.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;S7站次之为 $518.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;S1站居第三为 $498.94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;S10站居第四为 $476.62 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;其后的S2站、S4站、S6站和S8站较为接近其范围在 $300\text{—}400 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,S9站和S3站最低分别为 $235.85 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $199.11 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2.4 物种多样性的时空变化

2.4.1 季节变化

从表3统计结果显示:大亚湾西北部海域浮游动物种类数季节变化为:夏季(90种) > 秋季(81种) > 冬季(71种) > 春季(47种);物种多样性指数 H' 值大小顺序为:冬季(3.539) > 夏季(3.228) > 秋季(3.074) > 春季(2.623);均匀度指数 J 值为:冬季(0.575) > 夏季(0.497) > 秋季(0.485) > 春季(0.472);丰富度指数 D

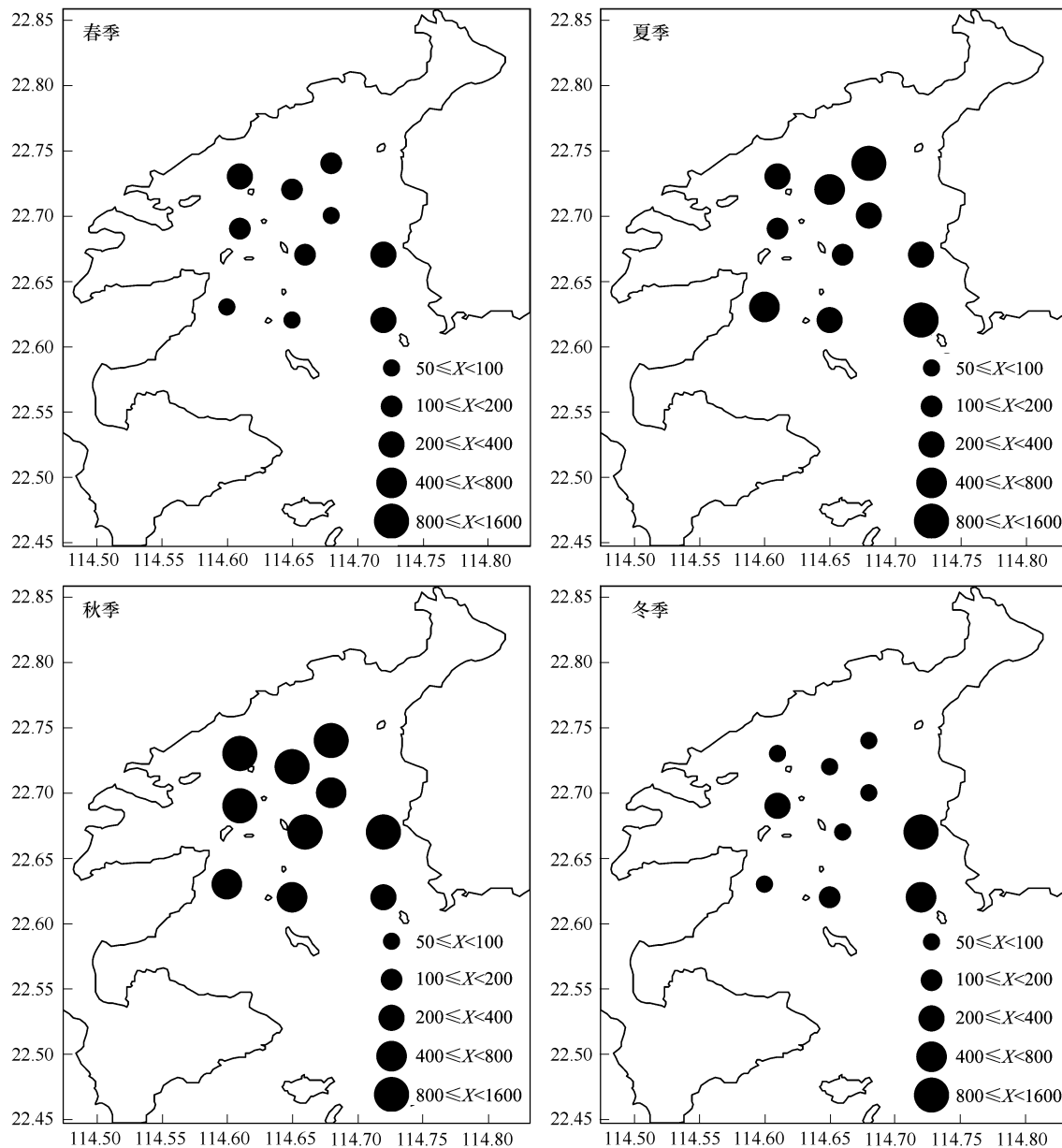


图4 大亚湾海域浮游动物生物量的平面分布

Fig. 4 The horizontal distribution of zooplankton biomass in Daya Bay ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

值为:冬季(3.868) > 夏季(3.574) > 秋季(3.555) > 春季(2.720)。4个航次的 H' 值、 J 值和 D 值的变化趋势十分相似,春季的3项指数值均最低,冬季最高,夏、秋季节相差不大。各季节种类数的多少与 H' 值、 J 值和 D 值大小没有直接关系。

2.4.2 平面分布

各站的年平均物种多样性指数范围为2.592—3.854,表3。多样性指数最高的3个站是湾顶的S5站、哑铃湾口的S6站和核电站附近的S8站,分别是3.854、3.814和3.787,多样性指数最低的3个站是石化基地的S1站、湾中部的S3站和S4站,分别是2.744、2.592和3.194,大亚湾海域的浮游动物多样性总体水平较高,近岸高于湾中部。

各站年平均均匀度指数范围为0.674—0.799。仅有S2站、S3站和S4站3个站的均匀度值在0.700左右,其他站位均在0.700以上。

各站的年平均丰富度指数范围为 2.041—4.079。丰富度指数最高的 3 个站:S6 站、S9 站和 S10 站,分别为 4.079、4.074 和 3.890,丰富度指数最低的 3 个站是 S1 站、S3 站和 S7 站,分别为 2.041、2.668 和 2.989。

表 3 大亚湾海域浮游动物多样性指数、均匀度指数和丰富度指数

Table 3 Diversity index, evenness index and richness index of zooplankton in Daya Bay

指数 Index	时间 Time	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	全海区均值 Average of the area
多样性指数	3 月 March	2.322	4.623	2.322	4.39	4.157	5.273	3.928	4.869	3.585	2.161	2.623
Diversity index	5 月 May	3.029	3.301	2.096	3.38	4.016	3.372	3.017	3.394	3.274	3.538	3.228
	9 月 September	2.454	2.814	1.889	2.697	3.375	2.513	3.417	3.081	3.494	4.091	3.074
	12 月 December	3.17	3.527	4.061	2.308	3.866	4.098	3.459	3.804	3.381	3.153	3.539
	年平均 Annual average	2.744	3.566	2.592	3.194	3.854	3.814	3.455	3.787	3.434	3.236	3.116
均匀度指数	3 月 March	1	0.962	1	0.985	0.932	0.972	0.961	0.965	1	0.931	0.472
Evenness index	5 月 May	0.652	0.649	0.416	0.627	0.789	0.607	0.621	0.722	0.638	0.627	0.497
	9 月 September	0.6	0.54	0.371	0.526	0.579	0.479	0.683	0.77	0.693	0.749	0.485
	12 月 December	0.916	0.654	0.911	0.591	0.833	0.948	0.8	0.693	0.865	0.605	0.575
	年平均 Annual average	0.792	0.701	0.674	0.682	0.783	0.751	0.766	0.788	0.799	0.728	0.445
丰富度指数	3 月 March	1.256	3.15	0.721	3.691	2.199	4.51	2.585	3.704	4.737	0.641	2.72
Richness index	5 月 May	2.441	3.512	2.875	4.05	3.905	4.042	3.137	2.825	3.695	5.257	3.574
	9 月 September	2.18	3.777	2.877	3.18	5.189	3.703	3.231	2.658	3.821	4.939	3.555
	12 月 December	2.286	4.225	4.2	2.042	3.868	4.061	3.004	3.878	3.934	4.722	3.868
	年平均 Annual average	2.041	3.666	2.668	3.241	3.79	4.079	2.989	3.266	4.047	3.89	3.429

3 讨论

3.1 种类组成的变化

本调查中各季节出现浮游动物种类数有一定差异:夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季,这与连光山^[7]等在 20a 前调查结果一致。

黄亚如^[10]等在 1991 年春季对大亚湾核电站附近的浮游动物做过调查,发现浮游动物 31 种,以桡足类居多,腔肠动物其次,各类群所占比例与本次调查相符。

优势种的组成较以往有很大变化,优势种由 20a 前^[7]的小拟哲水蚤、鸟喙尖头蚤、小长腹剑水蚤、肥胖三角蚤、小箭虫、软拟海樽、红纺锤水蚤等组成;而本次调查显示常有优势种为弱箭虫、软拟海樽、美丽箭虫、双生水母、鸟喙尖头蚤、红纺锤水蚤、小箭虫、肥胖箭虫等组成。毛颚类的百陶箭虫、弱箭虫、美丽箭虫、肥胖箭虫跃居为优势种行列。百陶箭虫、弱箭虫属近岸暖水种,美丽箭虫、肥胖箭虫属暖水广布种^[11]。于景^[12]等对大亚湾 1983—2004 年表层水温研究发现:年平均水温在这 20 多年间有上升。以核电站运行的 1994 年为分界,将 1983—1993 年与 1994—2004 年月平均水温作比较,发现核电站运行前后 11a 的月平均水温上升了 0.2—2.7℃。由此可见,这几种毛颚类作为优势种且 4 个季节均有出现,是对大亚湾海域水体较 20a 前水温上升的响应。

多个研究表明海樽类可以作海流或水团的指示种^[13-15],尤其是作为暖流的指示种,其数量随水温上升而增加。本次调查秋季优势种中小齿海樽的优势度高达 0.42,但此时大亚湾的水温并不是一年中最高,这是否与水团在大亚湾的时空分布有关,有待进一步调查分析。

3.2 浮游动物丰度和生物量的比较分析

3.2.1 丰度的季节变化特征

从浮游动物丰度的季节变化看:夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季,这与浮游动物种类数的季节变化情况一致,浮游动物丰度的季节变化规律可以从以下两个方面解释:

(1) 与浮游植物的关系

根据孙翠慈^[16]等 2002 年对大亚湾浮游植物群落特征的调查分析,发现大亚湾浮游植物的生物量春夏季节较高,秋冬季节较低。由于春季水温升高,浮游植物开始大量繁殖,这时,浮游动物有了足够丰富的食物也开始了大量繁殖,所以到了夏季浮游动物种类和丰度开始上升。但是浮游动物对浮游植物的摄食导致浮游动物数量的增加有一个时滞效应,所以浮游动物数量的增加总是比浮游植物数量的增加要滞后一段时期。如此循环下来,在冬季浮游植物的生物量最低时,浮游动物在食物上受到限制,从而表现为春季数量上有了大幅度下降。

(2) 与气候、水文条件的关系

夏季随着温度升高,大亚湾海域形成较强的温跃层和密度跃层,同时夏季南海盛行西南风,在西南季风作用外海温水团带入湾内,促进了浮游动物的快速繁殖。夏季出现了弱箭虫、肥胖箭虫、小箭虫、鸟喙尖头蚤等近岸暖水种作为优势种的出现也是这个季节的水温较高的响应。

秋、冬、春季南海盛行东北季风,在东北风作用下粤东近海形成向西南方向运动的沿岸流,大亚湾湾口外还受低温、低盐的粤东沿岸水支配。因此,粤东沿岸水将随大亚湾的环流从大辣甲以西水域进入湾内,低温等因素限制了浮游动物的生长和繁殖。

3.2.2 丰度的平面分布特征

从浮游动物丰度的平面分布来看,各站位的丰度在不同季节有很大差异,其年平均丰度范围 250.72—1265.85 ind·m⁻³。S1 站、S6 站、S7 站、S8 站、S9 站和 S10 站一共 6 个站的丰度为 250.72—468.84 ind·m⁻³,低于年平均丰度 518.21 ind·m⁻³,S4 站略高于年平均丰度为 557.83 ind·m⁻³。结合各站位地理位置不难看出,S1 站和 S8 站分别位于石化基地和核电站附近;S6 站、S7 站和 S10 站 3 个站都靠近沿岸;S9 站处于油船航道;S4 站处于马鞭洲油码头。

浮游动物丰度分布的总体特征呈现:近岸低于湾中;工程建设区低于自然海区。根据以往大亚湾研究资料^[1-3]表明沿岸社会经济活动对大亚湾生态系统(特别是沿岸水域)已经产生了一定影响,如:生活和工业废水排放(尤其是养殖和核电站温排水)。而本次调查湾中多个区域浮游动物丰度也较低,初步分析是由于航道中轮船的通行和油码头的爆破施工引起的泥沙悬浮、水体混浊、水质下降等,对生态环境都是严重的干扰。从生态学观点出发,生物与环境的统一是生物与环境相互作用的结果。水环境决定了生物种群或群落结构特征;反之,生物的个体、种群或群落的变化,可以客观反映出水体质量的变化规律。由此可见,大亚湾海域浮游动物栖息环境已经不同程度受到大型建设工程和人类活动的影响。

3.2.3 生物量的变化特征

从浮游动物生物量的季节变化看:秋季 > 夏季 > 冬季 > 春季,相比浮游动物丰度的季节变化来看,略有不同,表明生物量高低与种类组成关系密切,秋季优势种类为被囊类、水母类和毛颚类等大型浮游动物,所以生物量较高,而冬春季节优势种以桡足类等小型浮游动物为主所以生物量较低。

从浮游动物生物量的平面分布结合各站的年平均生物量来看,有两大分布特征,其一,湾东部生物量高于西部海域生物量;其二,湾内中部海域生物量相对较低,近岸水域生物量较高。这与杜飞雁^[3]的研究结果一致。但这些与本次调查丰度的平面分布恰好相反,浮游动物丰度近岸较低。解释这一分布规律的原因只有一个:大亚湾海域近岸浮游动物个体较大,湾中部海域个体较小。

浮游动物个体大小差异较大,导致丰度与生物量往往不成正比,但是将丰度与生物量对比,可以初步反应调查区域浮游动物群落结构中浮游动物个体的大小,生物量/丰度比值越大,群落中生物个体越大,反之,生物个体越小。由图 5 各站位丰度与生物量相比较,S2、S3 和 S5 站浮游动物群落个体较小;S1、S7、和 S8 站浮游动物群落个体较大。调查显示各站浮游动物群落个体特征总体上为:近岸水域个体较大,湾中部海域个体较小。王友绍等研究表明,近 20a 来人类活动的影响改变了大亚湾海域生态环境,使大亚湾海域浮游动物个体呈逐年小型化的趋势^[1]。但近岸海域受人类活动影响,环境恶化程度更为严重,单纯从这一角度似乎不能解释该海域浮游动物如此分布特征,有待结合海流、水温、盐度、生物等方面因素进一步系统研究。

3.3 浮游动物多样性评价

调查显示,大亚湾海域浮游动物种类多,多样性水平较高,年平均多样性指数 H' 值 3.116,高于 1987 年的 2.97;年平均均匀度指数 J 值 0.507,低于 1987 年的 0.57;年平均丰富度指数 D 值 3.429。春季种类数最少,其他各项指标也最低,但夏季和秋季种类数较多, H' 值、 J 值和 D 值却不高,相反,冬季的种类数不多, H' 值、 J 值和 D 值却最高。结合各季节的优势种组成,不难看出,夏季虽然浮游动物种类多,但是优势种类少,群落中优势种的相对多度 $P_i(n_i/N)$ 不高,这恰好反映在夏季物种多样性指数水平上。调查中各季节浮游动物种类数与多样性指数不相符,主要是由于个季节优势种的差异造成的。

致谢:样品鉴定由国家海洋局第三海洋研究所的张金标、连光山和戴燕玉研究员指导完成,中国水产科学研究院南海水产研究所余景博士对写作给予帮助,在此一并致谢。

References:

- [1] Wang Y S, Wang Z D, Huang L M. Environment Changes and trends in Daya Bay in recent 20years. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23 (5): 85-95.
- [2] Wang Z D, Lian J S, Hu J X, Wei G F. Characteristics of degraded ecosystem in Daya Bay. *Ecologic Science*, 2003, 22(4): 313-320.
- [3] Du F Y, Li C H, Liao X L, Jia X P, Wang X H. The variety of zooplankton biomass in Daya Bay. *Marine Environment Science*, 2006, 25(1): 37-40.
- [4] Zhao R P, Fu T B. Carbon and nitrogen content of zooplankton in Daya Bay. *Collections of papers on marine ecology in the Daya Bay*. Beijing: Ocean Press, 1990: 158-162.
- [5] Lian G S, Cai B J, Lin Y H. Distribution of biomass and density of zooplankton in Daya Bay. *Collections of papers on marine ecology in the Daya Bay*. Beijing: Ocean Press, 1990: 221-231.
- [6] Cai B J. Abundance of the planktonic larvae in Daya Bay. *Collections of papers on marine ecology in the Daya Bay*. Beijing: Ocean Press, 1990: 232-236.
- [7] Lian G S, Lin Y H, Cai B J. Characteristics of zooplankton community in Daya Bay. *Collections of papers on marine ecology in the Daya Bay*. Beijing: Ocean Press, 1990. 274-281.
- [8] Xu Z L, Chen Y Q. aggregated Intensity of Dominant Species of Zooplankton in Autumn in the East China Sea and Yellow Sea. *Journal of Ecology*, 1989, 8(4): 13-15.
- [9] Yang G M, He D H. Study on the biological oceanography characteristics of planktonic copepods in the waters north of Taiwan Island II. Community characteristics. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(6): 72-80.
- [10] Huang Y R, Ou Q. Comparison of zooplankton from Dapeng Bay and Daya Bay relationship between zooplankton and red tide. *Marine Science Bulletin*, 1993, 12(2): 46-51.
- [11] Dai Y Y. A study on the species diversity of Chaetognaths in China seas. *Chinese Biodiversity*, 1995, 3(2): 69-73.
- [12] Yu J, Tang D L, Im-Sang Oh, Li J Y. Response of Harmful Algal Blooms to environmental changes in Daya Bay, China. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2007, 18(5): 1011-1027.
- [13] Zhang J B, Huang J X, Lian G S. Species Composition and Abundance Distribution of Thaliacea in Late Autumn and Early Winter in the Nanwan Bay of Taiwan, China. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22(6): 9-16.
- [14] Zhang J B, Lian G S, Wang Y L, Xu Z L, Chen Y Q. Distribution of Thaliacea (Tunicata) in eastern Taiwan Strait. *Journal of Oceanography in Taiwan Trait*, 2003, 22(3): 279-286.
- [15] Lin M. Ecological studies of Thaliacea in Daya Bay. *Collections of papers on marine ecology in the Daya Bay*. Beijing: Ocean Press, 1990: 390-396.
- [16] Sun C C, Wang Y S, Sun S, Zhang F Q. Analysis dynamics of phytoplankton community characteristics in Daya Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 3947-3958.

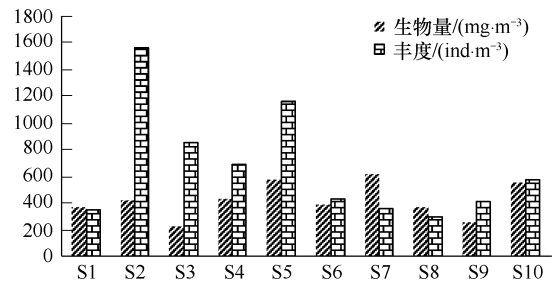


图5 各站位的浮游动物的年平均丰度和生物量

Fig. 5 The annual average of zooplankton abundance and biomass in every station

参考文献:

- [1] 王友绍,王肇鼎,黄良民. 近 20 年来大亚湾生态环境的变化及其发展趋势. 热带海洋学报,2004,23(5):85-95.
- [2] 王肇鼎,练健生,胡建兴,韦桂峰. 大亚湾生态环境退化现状与特征. 生态科学,2003,22(4):313-320.
- [3] 杜飞雁,李纯厚,廖秀丽,贾晓平,王雪辉. 大亚湾海域浮游动物生物量变化特征. 海洋环境科学,2006,25(1):37-40.
- [4] 赵榕平,傅天保. 大亚湾浮游动物的碳、氮含量. 大亚湾海洋生态文集. 北京:海洋出版社,1990:158-162.
- [5] 连光山,蔡秉及,林玉辉. 大亚湾浮游动物生物量和密度的分布. 大亚湾海洋生态文集. 北京:海洋出版社,1990:221-231.
- [6] 蔡秉及. 大亚湾浮游幼虫的丰度. 大亚湾海洋生态文集. 北京:海洋出版社,1990:232-236.
- [7] 连光山,林玉辉,蔡秉及. 大亚湾浮游动物群落的特征. 大亚湾海洋生态文集. 北京:海洋出版社,1990:274-281.
- [8] 徐兆礼,陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲶渔场的关系. 生态学杂志,1989,8(4):13-15.
- [9] 杨关铭,何德华. 台湾以北海域浮游桡足类生物海洋学特征的研究 II. 群落特征. 海洋学报,1999,21(6):72-80.
- [10] 黄亚如,欧强. 南海大鹏湾与大亚湾浮游动物的比较及其与赤潮的关系. 海洋通报,1993,12(2):46-51.
- [11] 戴燕玉. 中国海毛颚类物种多样性的研究. 生物多样性,1995,3(2):69-73.
- [13] 张金标,黄将修,连光山. 台湾南湾区秋末冬初海樽类的种类组成和数量分布. 海洋通报,2003,22(6):9-16.
- [14] 张金标,连光山,王云龙,徐兆礼,陈亚瞿. 台湾海峡东部海域海樽类被囊动物的分布. 台湾海峡,2003,22(3):279-286.
- [15] 林茂. 大亚湾海樽类生态的研究. 大亚湾海洋生态文集. 北京:海洋出版社,1990:390-396.
- [16] 孙翠慈,王友绍,孙松,张凤琴. 大亚湾浮游植物群落特征. 生态学报,2006,26(12):3947-3958.