

南沙群岛珊瑚礁浮游动物多样性与群落结构

尹健强^{1*} 黄良民¹ 李开枝¹ 熊兰兰^{1,2}

1 (中国科学院南海海洋研究所海洋生物资源可持续利用重点实验室, 广州 510301)

2 (中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 珊瑚礁是地球上已知的海洋生物多样性最高的生态系统, 为了深入分析珊瑚礁的浮游动物多样性和群落结构, 2004年5月5–15日在南沙群岛渚碧礁布设10个大面站(潟湖、礁坪各5个)和1个连续站(位于礁坪), 使用网目孔径分别为169 μm 和505 μm 的两种浮游生物网进行垂直拖网采样。结果表明: 共鉴定浮游动物种类96种和幼虫17个类群(或类型), 其中桡足类最多, 达65种, 其次是幼虫; 浮游动物数量丰富, 根据169 μm 网具样品的数据, 平均丰度高达 $926.0 \pm 1,155.8 \text{ inds./m}^3$, 优势类群依次是桡足类、被囊类和幼虫, 优势种为奥氏胸刺水蚤(*Centropages orsinii*)、珍妮纺锤水蚤(*Acartia shuzheni*)、长尾住囊虫(*Oikopleura longicauda*)、梭形住囊虫(*O. fusiformis*)和腹足类面盘幼虫(*Gastropoda veliger*); 渚碧礁浮游动物空间分布差异相当显著, 潟湖区形成与礁坪区不同的群落, 前者种类多、丰度高、优势种突出、均匀度低, 而后者则完全相反, 浮游动物群落的空间变化是由珊瑚礁礁盘的空间异质性所造成。浮游动物昼夜变化明显, 夜间出现的种数和平均丰度分别是日间的4.6和46.2倍。浮游动物群落以终生浮游生物的种类和数量占多数, 它们来源于礁外海水, 有的也属于礁栖类型。在珊瑚礁中, 中小型浮游动物无论在种类还是丰度方面都占有非常重要的位置。

关键词: 南海, 珊瑚礁, 浮游动物, 种类组成, 丰度分布, 昼夜变化

Species diversity and community structure of zooplankton in the Zhubi Atoll, Nansha Islands, South China Sea

Jianqiang Yin^{1*}, Liangmin Huang¹, Kaizhi Li¹, Lanlan Xiong^{1,2}

1 Key Laboratory of Marine Bio-resources Sustainable Utilization, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Coral reefs contain the highest biodiversity ecosystem on Earth. In order to improve our understanding of the biodiversity and zooplankton communities, zooplankton was sampled using vertical trawls with 169 μm and 505 μm planktonic nets at 10 stations (5 within lagoon and 5 on reef flat) and one continuous observatory station from the 5th to the 15th of May, 2004 in the Zhubi Atoll of the Nansha Islands. A total of 96 species and 17 groups of planktonic larvae were identified, among which the greatest species number was the copepods with 65 species, followed by the planktonic larvae. The average abundance of zooplankton based on the data from 169 μm planktonic net was $926.0 \pm 1,155.8 \text{ inds./m}^3$. Decreasingly dominant groups included copepods, tunicates and larvae, while dominant species included *Centropages orsinii*, *Acartia shuzheni*, *Oikopleura longicauda*, *O. fusiformis* and *Gastropoda veliger*. Zooplankton community structure differed between the lagoon area and reef flat. The lagoon was characterized by high species number and abundance, a prominence of dominant species and low in species evenness indices, while the reef flat showed a more even community, likely due to relatively high levels of spatial heterogeneity in coral reefs. Diurnal variations of zooplankton were obvious that species richness and average abundance at nighttime were 4.6 and 46.2 times that of the daytime values on the reef flat, respectively. Holoplankton dominated communities both in terms of richness and were either transported from oceanic waters outside the

收稿日期: 2011-07-29; 接受日期: 2011-12-02

基金项目: 中科院知识创新工程项目(KZCX2-YW-Q07-02)、中国近海海洋综合调查与评价专项(908-01-ST08)和广东省海洋渔业资源综合评价(GD908-02-05)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: jqyin@scsio.ac.cn

atoll or were associated with the reef-associated itself. Both meso- and micro-zooplankton played an important role in species richness and abundance in the coral reef.

Key words: South China Sea, coral reef, zooplankton, species composition, abundance distribution, diurnal variation

珊瑚礁是地球上已知的海洋生物多样性最高的生态系统,尤其在东南亚海区,即中印度—西太平洋区的珊瑚礁,其珊瑚和礁栖生物种类的多样性最为丰富(McManus, 2010)。浮游动物是珊瑚礁生物群落中,特别是珊瑚和鱼类的重要食物和营养来源(Alldredge & King, 1977, 2009; Coma *et al.*, 1999; Heidelberg, 2004)。珊瑚虫不能从共生虫黄藻的光合作用中获得氮、磷等营养,必须捕食浮游动物予以补充(Johannes *et al.*, 1970; Sebens *et al.*, 1996),因此浮游动物在珊瑚礁生态系统的物质循环和能量流动中具有十分重要的地位。

南海紧邻东南亚海区,珊瑚礁类型主要为岸礁和环礁,在岸礁(尹健强等, 2008; Nakajima *et al.*, 2008, 2009)和环礁(陈清潮和尹健强, 1982; 陈清潮等, 1989; 钱宏林等, 1990; 章淑珍和李纯厚, 1997; 尹健强等, 2003)浮游动物群落方面已开展过一些研究。此外,在浮游动物物种多样性方面,陈清潮(1983)发现了黄岩岛环礁的桡足类一新种中华歪水蚤(*Tortanus sinicus*); Chen等(2004)、陈清潮(2008)发现了南沙群岛渚碧礁的桡足类两个新种膨大歪水蚤(*T. tumidus*)和珍妮纺锤水蚤(*Acartia shuzheni*); 张谷贤和尹健强(2002)首次在国内报道了在渚碧礁出现毛颚类的锄虫属(*Spadella*)种类。但总体来说,南海特别是南海诸岛珊瑚礁的浮游动物多样性和群落结构,由于受取样困难等因素的制约,研究还很充分。本文根据2004年5月在南沙群岛渚碧礁的调查资料,进一步分析浮游动物的群落结构和多样性,为深入开展珊瑚礁生态系统研究提供科学资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及调查站位

渚碧礁位于南沙群岛海区北部,是一个典型的珊瑚礁,中心位置大约在10°55' N、114°05' E。礁体近似梨形,NE-SW向,长5.75 km,宽3.25 km,面积约16.1 km²。礁坪北、西和西南部较宽,达500–600 m,地势稍高;东部和南部较窄,仅约300 m,地势

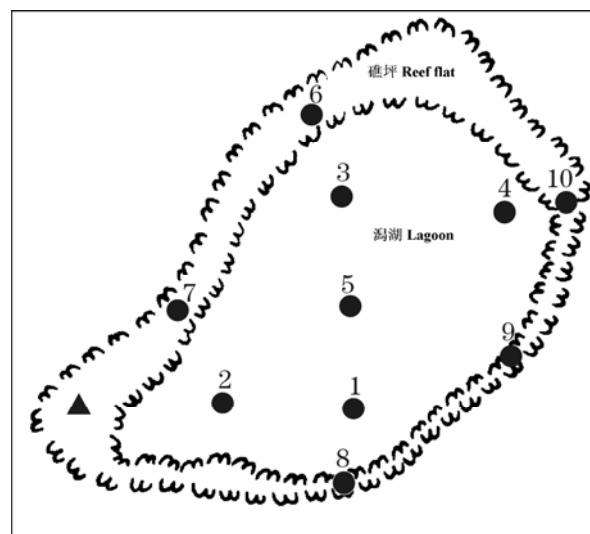


图1 渚碧礁浮游动物调查站位图(●大面站; ▲连续站)

Fig. 1 Maps with the sampling stations of zooplankton in the Zhubi Atoll of the South China Sea (●sampling stations within the lagoon and on the reef flat; ▲one continuous observatory station)

较低矮。中间潟湖面积约9.5 km²,水深大部分在20 m左右,最大深度为24 m。属热带和赤道带海洋季风气候,终年高温高湿,5月下旬至9月盛行西南季风,11月至翌年4月中旬盛行东北季风,4–5月与10月分别为东北、西南与西南、东北季风转换时期(林锡贵和张庆荣, 1990)。该礁为封闭型环礁,边缘全被礁坪围封,没有口门通往外海。大潮低潮时,礁坪基本露出,潟湖水体与外海水不能交换,高潮时外海水才能漫入潟湖;小潮时,礁盘可终日被海水淹没。

在渚碧礁共设10个大面站,其中1、2、3、4、5号站位于潟湖内,6、7、8、9、10号站位于礁坪,另在西南礁坪设1个连续站(图1)。礁坪连续站的水深在0.8–1.8 m之间(受潮汐影响),其他礁坪测站的水深在1.1–2.3 m之间,潟湖的测站水深在17.0–21.5 m之间。

1.2 样品采集与环境因子观测

调查于2004年5月5–15日进行,大面站分别使

用浅水I型浮游生物网(网口内径50 cm, 网长145 cm, 网目孔径505 μm)和修改的浅水II型浮游生物网(网口内径50 cm, 网长145 cm, 网目孔径169 μm)由底至海面垂直拖网采集。采样在上午8:00–11:30进行。连续站在小潮期间进行(2004年5月13–14日), 使用浅水II型浮游生物网由底至海面垂直拖网采集, 每隔2 h进行一次, 共取样13次, 每次采样重复3次。样品均用5%的福尔马林溶液固定保存, 运回实验室在解剖镜下鉴定计数。大多数浮游动物鉴定到种(陈清潮和章淑珍, 1974a, b; 郑重等, 1984)。放射虫、水母类、介形类等个别类群未完全鉴定到种; 幼虫按习惯鉴定到类群或类型。在进行种数统计时, 未鉴定到种的类群按1种统计。浮游动物的丰度、多样性指数、均匀度分布根据浅水II型网的分析结果, 并进行了两种网具分析结果的比较。

温度和盐度使用YSI 6600进行现场测定。在连续站进行了叶绿素a的测定, 现场采水后, 经0.45 μm 孔径醋酸纤维滤膜过滤、丙酮萃取后使用Turner-Design 10型荧光计测定。

1.3 数据分析

采用Shannon-Wiener多样性指数(H')和Pielou均匀度指数(J)计算浮游动物的群落多样性(Shannon, 1948):

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (2)$$

式中, P_i 为该站中第*i*种的个体数与该站总个体数的比值, S 为该站的种数。

优势种的确定由优势度(Y)决定, 计算公式如下:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (3)$$

式中, n_i 为第*i*种的个体数, N 为总个体数, f_i 为第*i*种在各站位出现的频率。优势度 $Y > 0.02$ 确定为优势种(徐兆礼和陈亚瞿, 1989)。

应用*t*检验法进行了两种网具采集效果的差异显著性检验。

依据大面站浅水II型网调查获得浮游动物数据, 为了减少机会种对群落结构分析的影响, 将浮游动物种类按照丰度由高到低排列, 挑选出前50种, 从而得到用于群落结构分析的物种。将这些种类的丰度以 $\log_{10}(x+1)$ 转换, 利用PRIMER6.0软件, 采用

Bray-Curtis相似性系数进行等级聚类(hierarchical cluster)分析调查海区浮游动物群落结构特征(Clarke & Gorley, 2006)。

2 结果

2.1 环境因子

2.1.1 大面站

大面站总体的表层和底层温度平均值(Mean \pm SD)分别为 $29.87 \pm 0.14^\circ\text{C}$ 和 $29.81 \pm 0.17^\circ\text{C}$; 潟湖区分别为 $29.82 \pm 0.04^\circ\text{C}$ 和 $29.70 \pm 0.06^\circ\text{C}$; 礁坪区分别为 $29.91 \pm 0.20^\circ\text{C}$ 和 $29.91 \pm 0.19^\circ\text{C}$ 。总体来说, 调查区表层和底层的温度差别非常小, 礁坪区的水温略微高于潟湖区。由于潟湖水较深, 而礁坪水浅, 潟湖区所有站位的底层水温稍低于表层, 礁坪区的表层和底层水温几乎没有差别(图2a)。礁坪区各站的温度变化相对较大, 与采样时间差异和天气变化(如降雨, 8号站)有关。

大面站总体的表层和底层盐度平均值分别为 33.73 ± 0.10 和 33.74 ± 0.10 ; 潟湖区分别为 33.78 ± 0.12 和 33.97 ± 0.11 ; 礁坪区分别为 33.69 ± 0.05 和 33.69 ± 0.05 。总体来说, 调查区盐度垂直分布均匀, 潟湖区各站的盐度变化幅度稍大于礁坪区(图2b)。

2.1.2 连续站

连续站的水深变化受潮汐影响, 采样期间的潮汐类型为全日潮, 高潮出现于白天, 16:00达最高潮; 低潮出现于夜晚, 2:00–4:00为最低潮(图3a), 涨潮历时大于落潮历时。在高潮期间水流较急, 礁外海水可明显影响调查位置; 而在低潮期间由于受礁坪的阻挡, 水流缓慢, 礁外海水对调查位置的影响较小。

温度的变化范围为 $29.43\text{--}31.68^\circ\text{C}$, 昼夜变化相当显著, 8:00开始升温, 16:00达最高温, 以后逐渐下降, 22:00下降至低位, 以后保持稳定(图3b)。盐度的变化范围为 $32.65\text{--}34.10$ 。盐度的变化主要受降雨影响, 调查期间正值西南季风兴起初期, 天气不稳定, 时有骤雨, 3:00下了大雨, 盐度显著下降, 从2:00的 33.93 急降至 $32.65(4:00)$, 停雨后盐度很快恢复正常(图3b)。叶绿素a含量的变化范围为 $0.162\text{--}0.395 \text{ mg/m}^3$, 没有明显的昼夜变化规律(图3c)。

2.2 种类组成及其种数分布

本次调查鉴定出的浮游动物超过96个种(包括17种以上的未定种)和浮游幼虫17个类群(或类型)

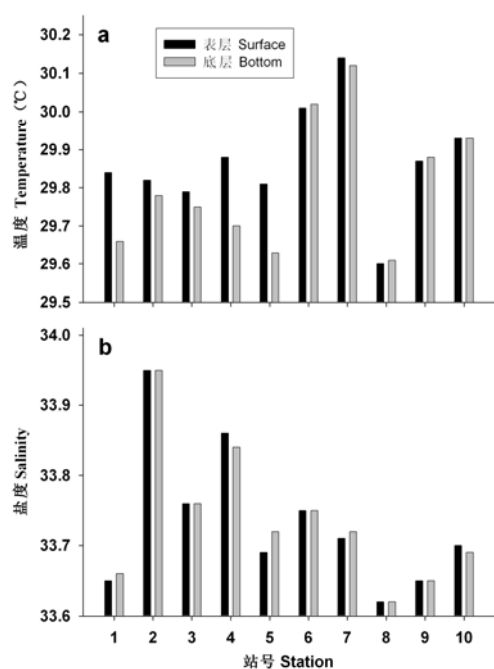


图2 渚碧礁大面站表层和底层的温度(a)与盐度(b)分布
Fig. 2 Distribution of temperature (a) and salinity (b) at the surface and bottom layers in the Zhubi Atoll

(附录I), 包括放射虫1种、水母类3种、软体动物1种、枝角类2种、介形类4种、桡足类65种、涟虫类1种、端足类1种、十足类1种、毛颚类10种、被囊类6种和头索动物1种。其中桡足类的种类最多, 其种数占浮游动物总种数(包括浮游幼虫)的57.5%, 其次为浮游幼虫, 占浮游动物总种数的15.0%。使用浅水II型网采集的浮游动物的种类数显著多于浅水I型网, 除四叶小舌水母(*Liriope tetraphylla*)1种外, 用浅水I型网能采到的种类都能用浅水II型网采到。在潟湖出现的种类显著多于礁坪, 用浅水I型网和浅水II型网采集的样品, 在潟湖出现的种类分别为礁坪的2.25倍和2.93倍。

浮游动物种数的平面分布见表1。根据浅水II型网采样的分析结果, 潟湖区和礁坪区的浮游动物种数分布差异显著, 前者的变化范围为19–32种, 平均为 27.6 ± 5.2 种/站, 后者的变化范围为2–14种, 平均为 7.8 ± 5 种/站, 前者平均数为后者的3.5倍。

2.3 丰度分布

浮游动物丰度变化范围为8.4–3,326.5 inds./m³, 平均为 $926.0 \pm 1,155.8$ inds./m³。潟湖区的平均丰度高达 $1,798.1 \pm 1,050.2$ inds./m³, 礁坪区的仅为 $53.9 \pm$

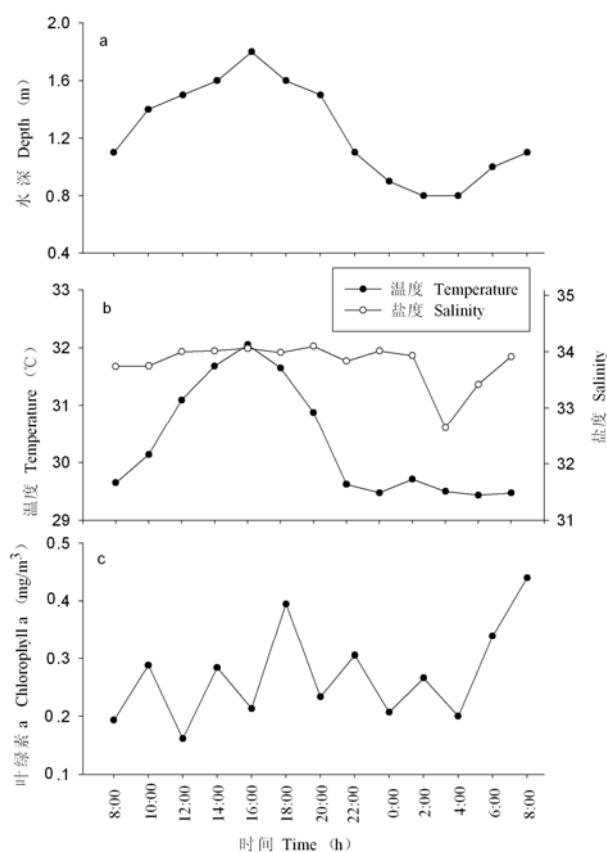


图3 渚碧礁连续站的水深(a)、温度和盐度(b)及叶绿素a含量(c)的昼夜变化
Fig. 3 Diurnal variations of depth (a), temperature (°C), salinity (b) and chlorophyll a (mg/m³) (c) at the continuous observatory station

38.2 inds./m³, 潟湖区浮游动物丰度明显高于礁坪区(图4), 为礁坪区的33.4倍。

桡足类、被囊类和浮游幼虫是渚碧礁浮游动物的三大类群, 它们的丰度分别占浮游动物总丰度的78.56%、13.51%和7.26%。从图5可以看出, 它们均密集于潟湖区, 而在礁坪区的数量非常稀少。桡足类、被囊类在潟湖区的丰度分别是礁坪区的41.54和47.48倍, 而幼虫的差别相对较小, 仅为11.78倍, 可能与底栖生物主要分布于礁坪有一定的关系。

2.4 优势种及其丰度分布特征

从表2可看出两种网具采集的浮游动物优势种既有相似, 也有不同。长尾住囊虫(*Oikopleura longicauda*)、梭形住囊虫(*O. fusiformis*)是两种网具都采集到的优势种, 但二者在浅水II型网的丰度均明显大于浅水I型网; 奥氏胸刺水蚤(*Centropages*

表1 浮游动物种数、多样性指数和均匀度的分布
Table 1 Distribution of richness, diversity and evenness indices of zooplankton at the sampling stations

| 区域 Region | 站号 Station | 浅水I型网 Planktonic net I | | | 浅水II型网 Planktonic net II | | |
|--------------|---------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | | 种数 Richness (S) | 多样性指数 Diversity index (H') | 均匀度 Evenness index (J) | 种数 Richness (S) | 多样性指数 Diversity index (H') | 均匀度 Evenness index (J) |
| 潟湖 Lagoon | 1 | 4 | 1.796 | 0.898 | 31 | 2.136 | 0.431 |
| | 2 | 8 | 2.529 | 0.843 | 19 | 1.382 | 0.325 |
| | 3 | 11 | 2.572 | 0.743 | 29 | 1.892 | 0.390 |
| | 4 | 8 | 1.619 | 0.468 | 32 | 2.160 | 0.363 |
| | 5 | 11 | 2.504 | 0.724 | 27 | 2.098 | 0.441 |
| 礁坪 Reef flat | 6 | 0 | — | — | 7 | 2.210 | 0.787 |
| | 7 | 2 | 1.000 | 1.000 | 2 | 1.000 | 1.000 |
| | 8 | 0 | — | — | 12 | 2.960 | 0.826 |
| | 9 | 6 | 1.787 | 0.691 | 14 | 3.442 | 0.904 |
| | 10 | 1 | 0.000 | 1.000 | 4 | 2.000 | 1.000 |

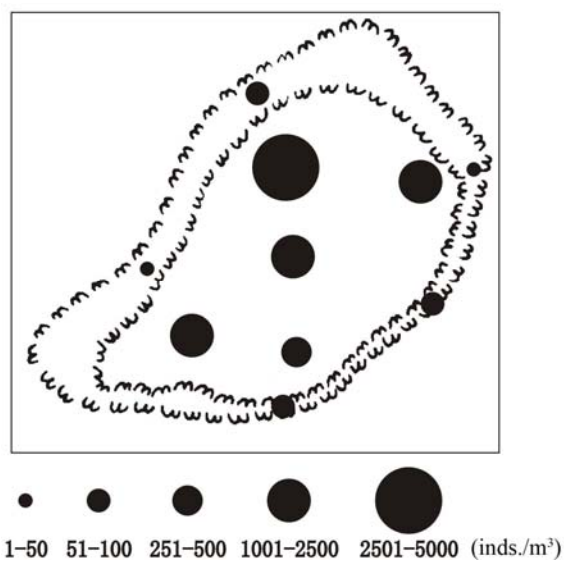


图4 渚碧礁浮游动物总丰度(inds./m³)的分布
Fig. 4 Distribution of zooplankton abundance (inds./m³) in the Zhubi Atoll

orsinii)、珍妮纺锤水蚤属于中小型桡足类, 在浅水II型网的平均丰度很高, 优势度也很明显, 但在浅水I型网样品中的数量非常稀少。优势种在渚碧礁均呈明显的区域分布特征, 在礁坪的出现频率低、数量少, 在潟湖的出现频率高、数量丰富。特别是奥氏胸刺水蚤、珍妮纺锤水蚤在潟湖的平均丰度可达 $1,082.9 \pm 697.3$ inds./m³和 275.5 ± 222.2 inds./m³, 分别占潟湖区浮游动物总丰度的60.22%和15.32%, 而在礁坪的平均丰度仅为 0.8 ± 1.9 inds./m³和 $15.3 \pm$

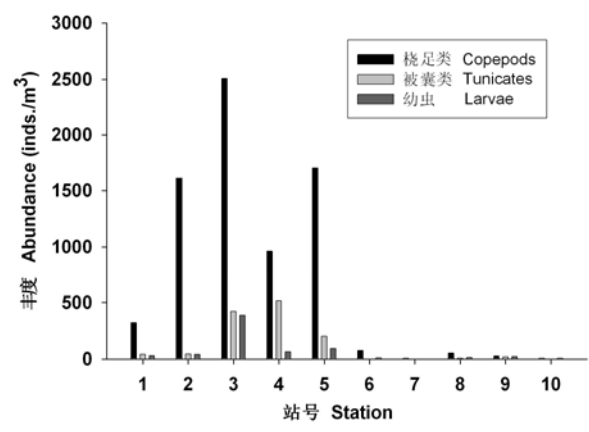


图5 浮游动物主要类群丰度(inds./m³)的分布
Fig. 5 Distribution of abundance (inds./m³) of copepods, tunicates and larvae groups

21.4 inds./m³。同时, 奥氏胸刺水蚤、珍妮纺锤水蚤在潟湖的数量分布呈群集现象, 最大丰度可分别达 2,169 inds./m³和494 inds./m³。

2.5 多样性指数、均匀度和群落结构聚类分析

大面站总体以及潟湖区、礁坪区的多样性指数平均值分别为 2.128 ± 0.694 、 1.934 ± 0.326 、 2.322 ± 0.939 ; 均匀度分别为 0.647 ± 0.280 、 0.390 ± 0.048 、 0.903 ± 0.098 , 均低于2002年5月的调查结果(尹健强等, 2003)。从表1可看出, 潟湖区的浮游动物群落由于优势种非常突出, 种间数量分布不均匀, 各站的均匀度值明显低于礁坪区。浅水II型网的均匀度也明显低于浅水I型网。

表2 浅水I型和II型网具采集的浮游动物优势种的丰度和优势度
Table 2 The dominant species with their abundance, frequency and dominance in the Zhubi Atoll sampling with planktonic nets I and II type

| 网具 Planktonic net | 种类 Species | 平均丰度 Abundance (inds./m ³) | 占总丰度的百分比 Percentage (%) | 出现频率 Frequency | 优势度 Dominance |
|----------------------|-------------------------------------|---|----------------------------|-------------------|------------------|
| 浅水II型网 Net II | 奥氏胸刺水蚤 <i>Centropages orsinii</i> | 541.86 | 58.52 | 0.6 | 0.351 |
| | 珍妮纺锤水蚤 <i>Acartia shuzheni</i> | 145.38 | 15.70 | 0.7 | 0.110 |
| | 长尾住囊虫 <i>Oikopleura longicauda</i> | 76.14 | 8.22 | 0.7 | 0.058 |
| | 梭形住囊虫 <i>O. fusiformis</i> | 45.62 | 4.93 | 0.7 | 0.034 |
| | 腹足类面盘幼虫 <i>Gastropoda veliger</i> | 36.27 | 3.92 | 0.8 | 0.031 |
| 浅水I型网 Net I | 长尾住囊虫 <i>Oikopleura longicauda</i> | 5.50 | 38.40 | 0.6 | 0.230 |
| | 短尾类溞状幼虫 <i>Brachyura zoea larva</i> | 1.28 | 8.93 | 0.6 | 0.054 |
| | 长尾类幼虫 <i>Macrura larva</i> | 1.55 | 10.80 | 0.5 | 0.054 |
| | 红住囊虫 <i>Oikopleura rufescens</i> | 1.96 | 13.70 | 0.3 | 0.041 |
| | 梭形住囊虫 <i>O. fusiformis</i> | 1.13 | 7.88 | 0.3 | 0.024 |

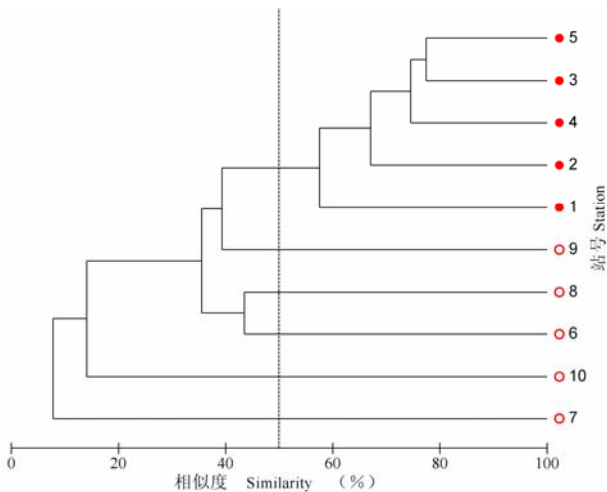


图6 渚碧礁浮游动物群落聚类树枝图(●为潟湖站号;○为礁坪站号)
Fig. 6 Cluster analysis of the zooplankton community in the Zhubi Atoll

聚类分析结果表明, 潟湖区的浮游动物明显属于一个单独的群落, 各站的相似度大约在60–80%之间。潟湖区浮游动物群落的特征是种类多、丰度大、优势种突出、均匀度低。礁坪区的浮游动物群落由于既受潟湖, 也受礁外海水的影响, 环境变化大, 各站的相似度低, 大约在10%和50%之间变化。

2.6 连续站浮游动物种类与丰度的昼夜变化

连续站的浮游动物种数和丰度的昼夜差异非常显著, 日间出现的浮游动物种数为16种, 而夜间出现的种数为73种(附录I), 是日间的4.6倍; 日间的浮游动物平均丰度仅为 $8.79 \pm 12.80 \text{ inds./m}^3$, 而夜

间则高达 $405.67 \pm 239.9 \text{ inds./m}^3$, 是日间的46.2倍。白天浮游动物种类和数量都非常贫乏, 正午至午后2:00甚至为零; 在日落后1小时, 即20:00显著上升; 在日落后3小时, 即22:00达到最高峰, 浮游动物的种数和丰度分别高达41种和 737.4 inds./m^3 ; 24:00开始逐渐下降, 至次日上午10:00种类和数量变得相当稀少(图7a)。

浮游动物各主要类群丰度均呈显著的白天下降、夜晚上升的昼夜垂直移动, 但夜晚上升的时间有差异, 底栖动物和游泳动物的幼虫最先上升, 其次是桡足类, 再次是毛颚类和介形类(图7b)。

2.7 两种网具采集样品分析结果的比较

王荣和王克(2003)、尹健强等(2008)在不同海区进行了两种网目孔径大小不同的浮游生物网的捕获性能的对比分析, 发现对于个体较大的种类, 两种网具的结果差异不很显著, 而对于个体较小的种类则差别很大。表3列出两种网具采集的大面站10个站浮游动物总种数、总丰度、多样性指数、均匀度和优势种丰度的差异显著性检验结果。从表中可看出, 浮游动物总种数、总丰度以及奥氏胸刺水蚤、珍妮纺锤水蚤的丰度差异极显著或显著, 而个体较大的种类梭形住囊虫、长尾住囊虫、短尾类溞状幼虫和长尾类幼虫的差异不显著。

3 讨论

3.1 渚碧礁的浮游动物的种类多样性及来源

渚碧礁的浮游动物种类丰富, 本次调查(附录I)共鉴定浮游动物96种, 加上前人记录过的泡蝇螺

表3 两种网具采集样品分析结果的比较(*t*检验法)
Table 3 Comparison of zooplankton community between planktonic net I and II (*t*-test)

| 类别 Variable | 浅水 II 型网 Net II (169 μm) | | | 浅水 I 型网 Net I (505 μm) | | | 差异性 Significance |
|---------------------------------------|--------------------------|-----------|---------------|------------------------|-----------|---------------|---------------------|
| | 平均数 Mean | 标准差 SD | 变异系数 CV(%) | 平均数 Mean | 标准差 SD | 变异系数 CV(%) | |
| 总种数 Richness | 17.7 | 11.5 | 65.0 | 5.1 | 4. | 84.4 | ** |
| 总丰度 Abundance (inds./m ³) | 926.0 | 1,155.8 | 124.8 | 14.3 | 15. | 105.1 | * |
| 多样性指数 Diversity index | 2.128 | 0.69 | 32.6 | 1.06 | 1. | 77.3 | ns |
| 均匀度 Evenness index | 0.647 | 0.28 | 43.3 | 0.53 | 0. | 73.3 | ns |
| 优势种丰度(inds./m ³) | | | | | | | |
| 珍妮纺锤水蚤 <i>Acartia shuzheni</i> | 145.4 | 202.4 | 139.2 | 0.2 | 0. | 163.1 | * |
| 奥氏胸刺水蚤 <i>Centropages orsinii</i> | 541.9 | 735.7 | 135.8 | 0.3 | 0. | 128.6 | * |
| 梭形住囊虫 <i>Oikopleura fusiformis</i> | 45.6 | 73.7 | 161.5 | 1.1 | 2. | 244.4 | ns |
| 长尾住囊虫 <i>O. longicauda</i> | 76.1 | 153.5 | 201.6 | 5.5 | 9. | 178.4 | ns |
| 短尾类溞状幼虫 <i>Brachyura zoea larva</i> | 1.0 | 1.6 | 166.0 | 1.3 | 1. | 113.1 | ns |
| 腹足类面盘幼虫 <i>Gastropoda veliger</i> | 36.3 | 83.3 | 229.7 | 0.2 | 0. | 316.2 | ns |
| 长尾类幼虫 <i>Macrura larva</i> | 2.6 | 3.9 | 147.9 | 1.5 | 1. | 12.9 | ns |

**P*<0.05; ** *P*<0.01; ns, 差异不显著。

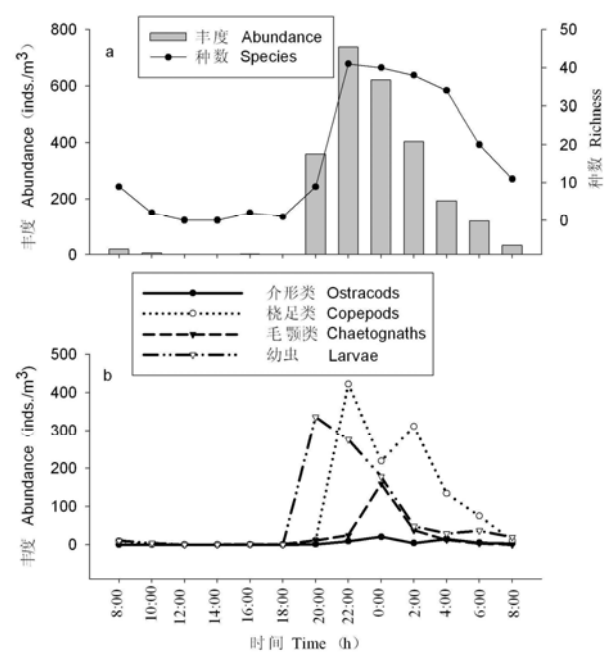


图7 浮游动物种数、总丰度(a)和主要类群丰度(b)的昼夜变化
Fig. 7 Diurnal variations of richness, abundance of zooplankton (a) and main groups (b) at continuous observatory station

(*Limacina bulimoides*)、马蹄螺(*L. trachiformis*)(章淑珍和李纯厚, 1997)、爪室水母(*Chelophyes appendiculata*)、小哲水蚤(*Nannocalanus minor*)、小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)、太平洋齿箭虫(*Serratosagitta pacifica*)(尹健强等, 2003)、膨大歪水

蚤(Chen *et al.*, 2004), 渚碧礁已经报道的浮游动物种类(除浮游幼虫)已过百种, 这些物种基本上也是南沙群岛及其邻近海区的常见种类(陈清潮, 2003)。但也许会存在一些珊瑚礁特有种类, 如中华歪水蚤、珍妮纺锤水蚤、膨大歪水蚤等目前仍只见报道出现于珊瑚礁中(陈清潮, 1983, 2008; Chen *et al.*, 2004)。

珊瑚礁的浮游动物主要有两个来源: 一是来自于礁外海水, 即外海类型; 二是来自于珊瑚礁本身, 即礁栖类型(Emery, 1968; Alldredge & King, 1977; Heidelberg *et al.*, 2004, 2010; Nakajima *et al.*, 2009), 但确定浮游动物的来源有些困难, 底栖性浮游动物基本上来自于珊瑚礁, 浮游幼虫等阶段性浮游生物既可来自于礁内, 也可以来自于礁外。终生浮游生物通常认为来自于礁外, 但一些研究(Emery, 1968; Sale *et al.*, 1978; Madhupratap *et al.*, 1991; Heidelberg *et al.*, 2004, 2010)发现纺锤水蚤(*Acartia*)、胸刺水蚤(*Centropages*)等传统上归类为外海终生浮游动物的种类也可以改变行为, 适应栖息于珊瑚礁。奥氏胸刺水蚤、珍妮纺锤水蚤和长尾住囊虫(表2)也是2002年5月渚碧礁调查时的优势种(尹健强等, 2003), 表明它们适合栖息于珊瑚礁, 特别是潟湖, 也属于礁栖类型。终生浮游生物在渚碧礁不但种类占多数, 数量上也占优势。

本次调查中, 浮游幼虫无论种类和数量都在群落中占据重要地位, 符合珊瑚礁浮游动物群落特征

(Goswami & Goswami, 1990; Carleton & Doherty, 1998)。珊瑚礁生态系统以生物多样性丰富而著称, 复杂多样的生境栖息着种类繁多的营固着、穴居、隐居、爬行、游动以及游泳等各种生活方式的礁栖无脊椎动物和脊椎动物。这些动物的幼虫成为了珊瑚礁浮游动物群落的重要组成部分。李新正等(2007)研究表明渚碧礁的底栖动物的种类和数量都很丰富。

底栖性浮游动物通常被认为是珊瑚礁浮游动物重要的来源之一。它们白天栖息于珊瑚礁基底表面或沉积物中, 而夜晚移动到水柱中, 包括糠虾类、钩虾类、涟虫类、介形类、等足类、猛水蚤类、剑水蚤类、端足类、多毛类等(Alldredge & King, 1977, 1980; Porter & Porter, 1977; Heidelberg *et al.*, 2004)。本次调查中底栖性浮游动物种类和数量都很少, 原因主要是大面站调查均在白天进行, 连续站也只进行了几次的夜晚采集。

3.2 潟湖与礁坪的差异原因分析

尹健强等(2003)对渚碧环礁潟湖与礁坪浮游动物的种类与丰度分布差异作过报道, Alldredge和King (1977)报道了大堡礁礁坪与潟湖的浮游动物数量差异不显著, 但总体来说这方面的研究报道很少。有关环礁潟湖的浮游动物群落与邻近海区的比较, 在太平洋(Gerber, 1981; Borgne *et al.*, 1989; Carleton & Doherty, 1998)和印度洋(Pratap *et al.*, 1977; Goswami, 1983; Goswami & Goswami, 1990)都有报道。在太平洋面积和水深都较大的环礁, 潟湖内浮游动物的种类组成与邻近开阔的大洋有明显的不同, 数量也较为丰富; 在印度洋面积和水深都较小的环礁, 既有学者认为潟湖与邻近海区有差异(Goswami, 1983; Goswami & Goswami, 1990), 也有学者认为潟湖内不存在特有的浮游动物区系(Pratap *et al.*, 1977), 但都发现潟湖内的浮游动物数量低于邻近海区, 认为是由于浮游动物从邻近海区越过礁坪进入潟湖时被珊瑚礁群落作为食物所消耗。渚碧礁潟湖的浮游动物群落特征与太平洋的环礁更为相似。章淑珍和李纯厚(1997)也报道了南沙群岛的三个环礁: 半月礁、仁爱礁、渚碧礁潟湖的小型浮游动物丰度相当高, 最高可达5,128 inds./m³。

渚碧礁远离大陆, 又位于海洋表层, 温度和盐度空间变化小(图2), 不是影响礁坪和潟湖浮游动物群落空间差异的主要因素。礁坪和潟湖的空间异质

性高: 礁坪水浅, 受风浪、海流、潮汐影响大, 水体交换非常快, 而且受太阳的辐射影响也大, 昼夜温差大(图3b); 潟湖水深, 由于被礁坪围封, 受风浪、海流、潮汐影响小, 水体交换相对缓慢, 浮游植物、颗粒有机碳(POC)和颗粒有机氮(PON)也较礁坪丰富(Shen *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2011)。珊瑚黏液、有机碎屑等颗粒有机物同浮游植物一样也是珊瑚礁浮游动物的重要食物来源(Johannes, 1967; Richman *et al.*, 1975; Gerber & Marshall, 1982; Gottfried & Roman, 1983)。因此, 潟湖较为独特的生境形成了与礁坪不同的浮游动物群落。一些学者认为珊瑚礁浮游动物的分布与地形结构有关(Emery, 1968; Heidelberg *et al.*, 2010)。此外, 珊瑚以及鱼类等礁栖动物主要分布于礁坪, 礁坪的浮游动物丰度较低与它们的摄食也有很大的关系。

3.3 两种网具分析结果的比较

中小型浮游动物在渚碧礁具有十分重要的地位, 不但种类多, 而且数量占绝对优势。例如, 珍妮纺锤水蚤、隆哲水蚤(*Acrocalanus*)、丽哲水蚤(*Calocalanus*)、微刺哲水蚤(*Canthocalanus pauper*)、奥氏胸刺水蚤、基齿哲水蚤(*Clausocalanus*)、大眼水蚤(*Corycaeus*)、双长腹剑水蚤(*Dioithona*)、尖额谐猛水蚤(*Euterpina acutifrons*)、羽刺大眼水蚤(*Farranula*)、瘦长毛猛水蚤(*Macrosetella gracilis*)、小毛猛水蚤(*Microsetella norvegica*)、长腹剑水蚤(*Oithona*)、隆水蚤(*Oncaea*)、拟哲水蚤(*Paracalanus*)、强额孔雀哲水蚤(*Pavocalanus crassirostris*)、锥形宽水蚤(*Temora turbinata*)、三锥水蚤(*Triconia*)等很多的桡足类的体长基本上在1.50 mm以下(张武昌等, 2010)。此外, 双壳类面盘幼虫、腹足类面盘幼虫、无节幼虫、鸟喙尖头蚤(*Penilia avirostris*)、肥胖三角蚤(*Pseudeutadna tergestina*)等种类的个体也非常细小。在浅水II型浮游生物网样品中, 奥氏胸刺水蚤和珍妮纺锤水蚤2个种的丰度即占浮游动物总丰度的74.22%(表2)。

国内早期的珊瑚礁浮游动物研究由于使用网孔较大的浅水I型浮游生物网进行调查, 结果显示珊瑚礁浮游动物种类和数量非常稀少(陈清潮和尹健强, 1982; 陈清潮等, 1989; 钱宏林等, 1990), 低估了浮游动物在珊瑚礁生态系统中的重要性; 后期改用了网孔较小的浅水II型浮游生物网进行调查, 发现珊瑚礁的浮游动物种类和数量都相当丰富(章

淑珍和李纯厚, 1997; 尹健强等, 2003, 2008)。因为中小型浮游动物的个体体宽多数小于505 μm , 在使用浅水I型浮游生物网拖网过程中基本上漏掉了。本次调查使用两种网具的采集结果也表明无论浮游动物的总种数、总丰度, 还是主要优势种(奥氏胸刺水蚤和珍妮纺锤水蚤)的丰度都差异显著(表3), 更充分证实了渚碧礁的浮游动物主要由中小型种类所组成。

世界上其他珊瑚礁也有相似的研究结果。在中太平洋的Enewetak环礁的浮游动物群落以小型桡足类以及被囊类的有尾类(Appendiculata, 又称幼虫纲(Larvacea))占优势(Gerber & Marshall, 1982), 同本次调查结果相类似。而在南太平洋的Taiaro环礁由于使用了与浅水I型浮游生物网相类似的网具(网目孔径: 500 μm)进行调查, 浮游动物的种类数和总丰度都很低(Carleton & Doherty, 1998)。在南海的一些岸礁的浮游动物群落也是以中小型的浮游动物占优势(Nakajima *et al.*, 2008, 2009)。Lewis和Boers(1991)报道了在加勒比海的岸礁浮游动物群落中以桡足幼体和小型浮游动物的丰度最大。Hamner和Carleton(1979)观察到了大堡礁潟湖的2种小型桡足类*Acartia australis*(体长<1.3 mm)和奥氏胸刺水蚤(体长<1.4 mm)的群集现象。珊瑚礁的浮游动物的种类组成和数量不但随时间和空间而改变, 而且研究结果与采样技术有关。因此, 今后在进行珊瑚礁浮游动物调查研究时, 应当选用合适的采样方法。

3.4 珊瑚礁浮游动物的昼夜垂直移动对物种多样性和群落结构的影响

珊瑚礁浮游动物具有昼夜垂直移动行为。本次调查, 渚碧礁礁坪白天的浮游动物种类和数量稀少, 而夜晚明显增加(图7), 与在南海和东南亚(Porter & Porter, 1977; 尹健强等, 2003; Nakajima *et al.*, 2008, 2009)、红海(Yahel *et al.*, 2005a, b)、印度洋(Goswami & Goswami, 1990; Madhupratap *et al.*, 1991)、太平洋(Alldredge & King, 2009)、大堡礁(Alldredge & King, 1977; Hamner & Carleton, 1979)、墨西哥湾和加勒比海(Emery, 1968; Ohlhorst, 1982; Heidelberg *et al.*, 2010)等世界上不同海区的珊瑚礁的研究结果相一致。由此表明, 光照度的昼夜变化是影响珊瑚礁浮游动物垂直移动的主要因素, 浮游动物白天下沉到较深水层, 也可能是躲避强烈的太阳辐射和高温(图3b)。

有些浮游动物的昼夜垂直移动与食物有关, 例如毛颚类是凶猛的肉食性动物, 主要捕食桡足类和其他小型甲壳动物, 毛颚类紧随幼虫和桡足类之后上升, 在毛颚类丰度显著增加的同时, 桡足类和幼虫丰度明显降低(图7b), 表明毛颚类的上升与追逐食物有关。而浮游动物的垂直移动与叶绿素a含量的昼夜变化(图3c)没有明显的关系。

2002年5月连续站调查(尹健强等, 2003)时的涨落潮时间与本次调查(图3a)相反, 即高潮出现于夜晚, 低潮出现于白天, 但两次调查的浮游动物种类和数量白天减少、夜晚增加的规律没有改变, 表明潮汐变化不会改变浮游动物的昼夜垂直移动节律。

有些研究(Yahel *et al.*, 2005a; Nakajima *et al.*, 2008, 2009)报道, 浮游动物大型种类(>200 μm 或 >350 μm)的数量昼夜变化明显, 而小型种类变化不显著。而在渚碧礁浮游动物的昼夜变化与个体大小无关, 不管小型种类如微刺哲水蚤、奥氏胸刺水蚤、弓角基齿哲水蚤(*Clausocalanus arcuicornis*)、驼背羽刺大眼水蚤(*Farranula gibbula*)、中隆水蚤(*Oncaea media*)、矮拟哲水蚤(*Paracalanus nanus*), 还是大型种类如凶形猛箭虫(*Ferosagitta ferox*)、正形滨箭虫(*Aidanosagitta regularis*)、短尾类蚤状幼虫、长尾类幼虫、多毛类幼虫等昼夜变化均非常显著。

珊瑚礁浮游动物的昼夜垂直移动对物种多样性和群落结构有相当大的影响: 一是一些终生浮游生物白天下降到较深水层, 夜晚上升到表层可以随水流进入珊瑚礁, 如幼平头水蚤(*Candacia catula*)、弓角基齿哲水蚤、印度真刺水蚤(*Euchaeta indica*)、异尾宽水蚤(*Temora discaudata*)、孟加蛮蛾(*Lestrignus bengalensis*)、粗壮猛箭虫(*Ferosagitta robusta*)、太平洋镰虫(*Krohnitta pacifica*)等多种终生浮游生物仅出现于夜晚的样品中, 二是一些底栖性浮游动物白天栖息于底部, 夜晚上升到水柱中, 如星萤、针尾涟虫、文昌鱼等(见附录I)。可见, 珊瑚礁浮游动物群落的种类组成和丰度空间分布格局是随着浮游动物的昼夜垂直移动的变化过程而改变。

致谢: 许战洲、张建林进行温度、盐度观测和叶绿素a水样分析, 谨致谢忱。

参考文献

Alldredge AL, King JM (1977) Distribution, abundance, and substrate preferences of demersal reef zooplankton at Lizard

- Island Lagoon, Great Barrier Reef. *Marine Biology*, **41**, 317–333.
- Allredge AL, King JM (1980) Effects of moonlight on the vertical migration patterns of demersal zooplankton. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **44**, 133–156.
- Allredge AL, King JM (2009) Near-surface enrichment of zooplankton over a shallow back reef: implications for coral reef food webs. *Coral Reefs*, **28**, 895–905.
- Borgne RL, Bianchot J, Charpy L (1989) Zooplankton of Tikehau atoll (Tuamotu archipelago) and its relationship to particulate matter. *Marine Biology*, **102**, 341–353.
- Carleton JH, Doherty PJ (1998) Tropical zooplankton in the highly-enclosed lagoon of Taiaro Atoll (Tuamotu Archipelago, French Polynesia). *Coral Reefs*, **17**, 29–35.
- Chen QC (陈清潮), Zhang SZ (章淑珍) (1974a) The pelagic copepods of the South China Sea. I. *Studia Marina Sinica* (海洋科学集刊), **9**, 101–124. (in Chinese with English abstract)
- Chen QC (陈清潮), Zhang SZ (章淑珍) (1974b) The pelagic copepods of the South China Sea. II. *Studia Marina Sinica* (海洋科学集刊), **9**, 125–137. (in Chinese with English abstract)
- Chen QC (陈清潮), Yin JQ (尹健强) (1982) The zooplankton of Huangyan Atoll. In: *Symposium on Research Reports on the Sea Area of South China Sea* (南海海区综合调查研究报告(一)) (ed. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南海海洋研究所)), pp. 273–277. Science Press, Beijing. (in Chinese with English abstract)
- Chen QC (陈清潮) (1983) The pelagic copepods of the South China Sea. III. In: *Contributions on Marine Biological Research of the South China Sea I* (南海海洋生物研究论文集(一)) (ed. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南海海洋研究所)), pp. 133–138. Ocean Press, Beijing. (in Chinese with English abstract)
- Chen QC (陈清潮), Zhang GX (张谷贤), Yin JQ (尹健强) (1989) Zooplankton. In: *Symposium on Research Reports on the Nansha Island and Adjacent Waters* (I), Vol. 1 (南沙群岛及其邻近海区综合调查研究报告(一)上卷) (ed. The Multidisciplinary Oceanographic Expedition Team of Academia Sinica to Nansha Islands (中国科学院南沙综合科学考察队)), pp. 99–100. Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Chen QC (陈清潮) (2003) *Biodiversity in the Nansha Islands* (南沙群岛海区生物多样性名典), pp. 1–220. Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Chen QC, Hwang JS, Yin JJ (2004) A new species *Tortanus* (Copepoda, Calanoida) from the Nansha Archipelago in the South China Sea. *Crustaceana*, **77**, 129–135.
- Chen QC (陈清潮) (2008) Subclass Copepoda. In: *Checklist of Marine Biota of China Seas* (中国海洋生物名录) (ed. Liu RY (刘瑞玉)), pp. 608–635. Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Clarke KR, Gorley RN (2006) PRIMER v6: User Manual/ Tutorial. Plymouth: PRIMER-E, Ltd.
- Coma R, Ribes M, Orejas C, Gili JM (1999) Prey capture by a benthic coral reef hydrozoan. *Coral Reefs*, **18**, 141–145.
- Emery AR (1968) Preliminary observations on coral reef plankton. *Limnology and Oceanography*, **13**, 293–303.
- Gerber RP (1981) Species composition and abundance of lagoon zooplankton at Eniwetak Atoll, Marshall Islands. *Atoll Research Bulletin*, **247**, 1–22.
- Gerber RP, Marshall N (1982) Characterization of the suspended particulate organic matter and feeding by the lagoon zooplankton at Enewetak Atoll. *Bulletin of Marine Science*, **32**, 290–300.
- Goswami SC (1983) Production & zooplankton community structure in the lagoon & surrounding sea at Kavaratti Atoll (Lakshadweep). *Indian Journal of Marine Sciences*, **12**, 31–35.
- Goswami SC, Goswami U (1990) Diel variation in zooplankton in Minicoy lagoon and Kavaratti atoll (Lakshadweep Islands). *Indian Journal of Marine Sciences*, **19**, 120–124.
- Gottfried M, Roman MR (1983) Ingestion and incorporation of coral-mucus detritus by reef zooplankton. *Marine Biology*, **72**, 211–218.
- Hammer WM, Carleton JH (1979) Copepod swarms: attributes and role in coral reef ecosystems. *Limnology and Oceanography*, **24**, 1–14.
- Heidelberg KB, Sebens KP, Purcell JE (2004) Composition and sources of reef zooplankton on a Jamaican forereef along with implications for coral feeding. *Coral Reefs*, **23**, 263–276.
- Heidelberg KB, O'neil KL, Bythell JG, Sebens K (2010) Vertical distribution and diel patterns of zooplankton abundance and biomass at Conch Reef, Florida Keys (USA). *Journal of Plankton Research*, **32**, 75–91.
- Johannes RE (1967) Ecology of organic aggregates in the vicinity of a coral reef. *Limnology and Oceanography*, **2**, 189–195.
- Johannes RE, Coles SL, Kuenzel NT (1970) The role of zooplankton in the nutrition of some scleractinian corals. *Limnology and Oceanography*, **15**, 579–586.
- Lewis JB, Boers JJ (1991) Patchiness and composition of coral reef demersal zooplankton. *Journal of Plankton Research*, **13**, 1273–1289.
- Li XZ (李新正), Li BQ (李宝泉), Wang HF (王洪法), Wang SQ (王少青), Wang JB (王金宝), Zhang BL (张宝琳) (2007) Macrobenthic community characters of Zhubi Reef, Nansha Islands, South China Sea. *Acta Zoologica Sinica* (动物学报), **53**, 83–94. (in Chinese with English abstract)
- Lin XG (林锡贵), Zhang QR (张庆荣) (1990) Weather climatic features of Nansha Islands and neighbouring sections. *Tropic Oceanology* (热带海洋), **9**(1), 9–16. (in Chinese with English abstract)
- Madhupratap M, Achuthankutty CT, Nair SRS (1991) Zooplankton of the lagoons of the Laccadives: diel patterns and emergence. *Journal of Plankton Research*, **13**, 947–958.
- McManus JW (2010) Coral reefs. In: *Marine Ecological Processes* (ed. Steele JH), 2nd edn., pp. 36–46. Academic Press, London, Burlington, San Diego.

- Nakajima R, Yoshida T, Othman BHR, Toda T (2008) Diel variation in abundance, biomass and size composition of zooplankton community over a coral-reef in Redang Island, Malaysia. *Plankton & Benthos Research*, **3**, 216–226.
- Nakajima R, Yoshida T, Othman BHR, Toda T (2009) Diel variation of zooplankton in the tropical coral-reef water of Tioman Island, Malaysia. *Aquatic Ecology*, **43**, 965–975.
- Ohlhorst SL (1982) Diel migration patterns of demersal reef zooplankton. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **60**, 1–15.
- Porter JW, Porter KG (1977) Quantitative sampling of demersal plankton migrating from different coral reef substrates. *Limnology and Oceanography*, **22**, 553–555.
- Pratap MM, Wafar MVM, Haridas P, Narayanan B, Menon PG, Sivadas P (1977) Comparative studies on the abundance of zooplankton in the surrounding sea & lagoons in the Lakshadweep. *Indian Journal of Marine Sciences*, **6**, 138–141.
- Qian HL (钱宏林), Huang YR (黄亚如), Ou Q (欧强), Huang YL (黄雅良), Liu JY (刘建益), Yu WG (余文根), Liu GC (刘高潮), Ren LP (任力平), Huang ZX (黄卓轩) (1990) Zooplankton in the Huangyan Atoll and adjacent waters. *Postgraduate Journal of Jinan University* (暨南大学研究生学报), **6**(2), 81–84. (in Chinese)
- Richman S, Loya Y, Slobodkin LB (1975) The rate of mucus production by corals and its assimilation by the coral reef copepod *Acartia negligens*. *Limnology and Oceanography*, **20**, 918–923.
- Sale PF, McWilliam PS, Anderson DT (1978) Faunal relationships among the near-reef zooplankton at three locations on Heron Reef, Great Barrier Reef, and seasonal changes in this fauna. *Marine Biology*, **49**, 133–145.
- Sebens KP, Vandersall KS, Savina LA (1996) Zooplankton capture by two scleractinian corals, *Madracis mirabilis* and *Montastrea cavernosa*, in a field enclosure. *Marine Biology*, **127**, 303–317.
- Shannon CE (1948) A mathematical theory of communication. *Bell System Technology Journal*, **27**, 379–423.
- Shen PP, Tan YH, Huang LM, Zhang JL, Yin JQ (2010) Occurrence of brackish water phytoplankton species at a closed coral reef in Nansha Islands, South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **60**, 1718–1725.
- Wang R (王荣), Wang K (王克) (2003) Field test of capture capabilities of two plankton nets. *Journal of Fisheries of China* (水产学报), **27**(Suppl.), 98–102. (in Chinese with English abstract)
- Xu ZL (徐兆礼), Chen YQ (陈亚瞿) (1989) Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea and Yellow Sea. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **8**(4), 13–15. (in Chinese with English abstract)
- Yahel R, Yahel G, Genin A (2005a) Near-bottom depletion of zooplankton over coral reefs. I. Diurnal dynamics and size distribution. *Coral Reefs*, **24**, 75–85.
- Yahel R, Yahel G, Berman T, Jaffe JS, Genin A (2005b) Diel pattern with abrupt crepuscular changes of zooplankton over a coral reef. *Limnology and Oceanography*, **50**, 930–944.
- Yang WF, Huang YP, Chen M, Qiu YS, Li HB, Zhang L (2011) Carbon and nitrogen cycling in the Zhubi coral reef lagoon of the South China Sea as revealed by ^{210}Po and ^{210}Pb . *Marine Pollution Bulletin*, **62**, 905–911.
- Yin JQ (尹健强), Chen QC (陈清潮), Tan YH (谭焯辉), Zhang JL (张健林) (2003) Zooplanktonic community characteristics in waters of Zhubi coral reef (Nansha Islands) in spring. *Journal of Tropical Oceanography* (热带海洋学报), **22**(6), 1–8. (in Chinese with English abstract)
- Yin JQ (尹健强), Huang H (黄晖), Huang LM (黄良民), Li KZ (李开枝), Lian JS (练健生) (2008) Summer zooplankton in coral reef area of Leizhou Peninsula, China. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (海洋与湖沼), **39**, 131–138. (in Chinese with English abstract)
- Zhang GX (张谷贤), Yin JQ (尹健强) (2002) Diurnal vertical migration of chaetognath around Nansha Islands waters, southern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography* (热带海洋学报), **21**(1), 48–56. (in Chinese with English abstract)
- Zhang SZ (章淑珍), Li CH (李纯厚) (1997) The nutrition role of microzooplankton in the lagoon ecosystem from coral reefs of the Nansha Islands. In: *Studies on the Chemistry and Biology in Coral Reef Lagoons of the Nansha Islands* (南沙群岛珊瑚礁潟湖化学与生物学研究) (ed. The Multidisciplinary Oceanographic Expedition Team of Academia Sinica to Nansha Islands (中国科学院南沙综合科学考察队)), pp. 64–69. Ocean Press, Beijing. (in Chinese with English abstract)
- Zhang WC (张武昌), Zhao N (赵楠), Tao ZC (陶振铨), Zhang CX (张翠霞) (2010) *An Illustrated Guide to Marine Planktonic Copepods in China Seas* (中国海浮游桡足类图谱), pp. 1–468. Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Zheng Z (郑重), Li SJ (李少菁), Xu ZZ (许振祖) (1984) *Marine Planktonology* (海洋浮游生物学), pp. 1–653. Ocean Press, Beijing. (in Chinese)

(责任编辑: 孙军 责任编辑: 闫文杰)

附录I 浮游动物种类名录及不同网具、区域以及连续站昼夜出现的种类比较

Appendix I The list of zooplankton species in the Zhubi Atoll and comparison between planktonic net I and II with regions, the appearance of day and night at continuous observatory station
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/w2011-130-1.pdf>