

西沙群岛珊瑚礁海域浮游动物群落结构初步分析*

李开枝^{1,2}, 柯志新^{1,2}, 王军星^{1,3}, 谭烨辉^{1,2,4}

1. 中国科学院热带海洋生物资源与生态重点实验室, 南海海洋研究所, 广东 广州 510301;

2. 广东省应用海洋生物学重点实验室, 南海海洋研究所, 广东 广州 510301;

3. 惠州市海洋技术中心, 广东 惠州 516000;

4. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 为了解西沙群岛珊瑚礁海域浮游动物的群落特征, 于 2015 年 5 月末至 7 月初在西沙群岛 8 个岛礁(七连屿、永兴岛和东岛 3 个岛屿以及浪花礁、盘石屿、玉琢礁、华光礁和北礁 5 个环礁)进行了浮游动物采样, 分析了浮游动物的多样性、丰度和群落结构特征, 并比较了 5 个环礁潟湖内和向海礁坡区浮游动物群落组成的差异。调查海域共鉴定浮游动物 180 种(包括浮游幼虫 13 个类群), 其中桡足类最多, 达 83 种, 其次是水母类(38 种)、浮游软体类(14 种)、毛颚类(11 种)和浮游被囊类(7 种); 浮游动物平均丰度为 256.4 ± 117.8 个·m⁻³, 桡足类占总丰度的 51.08%, 其次是浮游幼虫(16.30%)、浮游被囊类(13.22%)和毛颚类(7.70%)。浮游动物种数、多样性和均匀度指数、丰度在岛屿和环礁之间以及环礁的潟湖区和向海礁坡区均存在差异; 浮游动物多样性和丰度在东岛、玉琢礁和华光礁较高, 而在七连屿和北礁较低, 5 个环礁向海礁坡区的浮游动物多样性和丰度皆高于潟湖区的。多元统计分析结果表明调查岛礁的浮游动物可划分两个聚群(相似水平 85%); 岛屿近岸及环礁的潟湖群落(I)和岛屿远岸及环礁的向海礁坡群落(II); 两个聚群浮游动物组成差异较显著($r=0.832$, $p<0.001$); 前者的种数、多样性指数、总丰度和主要浮游动物类群如桡足类、毛颚类和浮游幼虫的丰度显著低于后者。环礁潟湖区和向海礁坡区的空间异质性和生态环境差异可能是导致浮游动物群落结构呈现不同特征的主要因素。

关键词: 浮游动物; 物种多样性; 空间分布格局; 珊瑚礁; 南海

中图分类号: P735.124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2022)02-0121-11

Preliminary study on the community structure of zooplankton in coral reef waters of Xisha Islands*

LI Kaizhi^{1,2}, KE Zhixin^{1,2}, WANG Junxing^{1,3}, TAN Yehui^{1,2,4}

1. Key Laboratory of Tropical Marine Bio-resources and Ecology (LMB), South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Marine Biology (LAMB), South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 510301, China;

3. Marine Technology Center of Huizhou, Huizhou 516000, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Zooplankton were sampled in coral reef waters from three islands (Qilianyu, Yongxing and Dong islands) and five atolls (Langhua, Panshi, Yuzhuo, Huaguang, and North atolls) around the Xisha Islands from May to July, 2015 in

收稿日期: 2021-03-25; 修订日期: 2021-05-17。殷波编辑

基金项目: 国家自然科学基金(41976112、31971432)

作者简介: 李开枝(1977—), 女, 河南省商城县人, 研究员, 从事浮游动物多样性和生态学研究。email: likaizhi@scsio.ac.cn

通信作者: 谭烨辉, 研究员。email: tanyh@scsio.ac.cn

*感谢刘华健协助浮游动物拖网。

Received date: 2021-03-25; Revised date: 2021-05-17. Editor: YIN Bo

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (41976112, 31971432)

Corresponding author: TAN Yehui. email: tanyh@scsio.ac.cn

order to understand the community structure of zooplankton in the region. The aims of this study are to analyze the species diversity, abundance distribution and community structure of zooplankton, and to compare the differences in zooplankton community between the lagoon and seaward reef-slope waters among the five atolls. A total of 180 species of zooplankton including 13 groups of planktonic larvae were identified, among which the greatest species number was the copepods with 80 species, followed by the hydromedusae, pelagic mollusca, chaetognaths and pelagic tunicates. The average abundance of zooplankton was $256.4 \pm 117.8 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$, among which copepods accounted for 51.08% of the total abundance, followed by planktonic larvae (16.30%), pelagic tunicates (13.22%) and chaetognaths (7.70%). Differences in zooplankton species, diversity, evenness index, and abundance between islands and atolls, as well as in the lagoon and seaward reef-slope of five atolls, were observed. The diversity and abundance of zooplankton were relatively high in Dong Island, Yuzhuo Atoll and Huaguang Atoll, but low in Qilianyu and North atolls. They were higher in the seaward reef-slope regions than in the lagoons of the five atolls. Two major assembled groups were distinguished into the atoll lagoon-island and nearshore group, and the seaward reef slope-island and offshore group at the similarity of 85%. A significant difference in the two zooplankton assemblages was observed ($r=0.832$, $p<0.001$). The former group was characterized by low values of species richness, diversity index, total abundance, and abundances of main groups such as copepods, chaetognaths and planktonic larvae compared with the latter group. The heterogeneity and ecological environment differences between the atoll lagoon and seaward reef-slope waters may be the main factors determining the zooplankton community structure around the Xisha Islands.

Key words: zooplankton; diversity; spatial pattern; coral reefs; South China Sea

珊瑚礁是一个具有高生物量、生产力和物种多样性水平的生态系统,同时也是受全球气候变化和人类活动等影响最为明显的生态系统之一,其生物多样性下降和生态系统功能退化现象已引起广泛关注(Hatcher, 1997; 沈国英等, 2010)。浮游动物在珊瑚礁生态系统的物质循环和能量流动过程中起重要作用,是珊瑚礁吸收外来营养源的中间环节,摄食浮游动物和大的颗粒有机物是许多礁栖动物,包括鱼类、海葵、海百合、腹足类以及珊瑚虫的主要异养性营养路径(Heidelberg et al, 2004; Alldredge et al, 2009)。浮游动物群落组成的定量研究对于理解珊瑚礁生态系统的营养结构和健康管理至关重要。然而,很少有研究侧重于珊瑚岛附近或者环礁的浮游动物,目前只有少数在东太平洋(Gerber, 1981; Le Borgne et al, 1989; Carleton et al, 1998; Pagano et al, 2012)和印度洋(Madhu Pratap et al, 1977; Goswami, 1983; Goswami et al, 1990)的部分环礁开展了研究。

南海是西太平洋最大的边缘海,由西沙、中沙、东沙和南沙群岛构成,拥有数百座环礁、少数台礁构成的岛屿,生境多样,生物多样性高(陈清潮, 2011)。南沙群岛珊瑚礁浮游动物的研究相对较丰富,章淑珍等(1997)报道了南沙群岛多个环礁潟湖的浮游动物,发现潟湖浮游动物具有种类少而优势种突出的特征;尹健强等(2003, 2011)深入分析了渚碧礁的浮游动物多样性和昼夜变化等,发现潟湖区和礁

坪区具有不同的群落特征,并比较得出珊瑚礁浮游动物主要由中小型种类组成,适合采用网目孔径较小的浮游生物网取样以便充分理解珊瑚礁海域浮游动物的多样性。美济礁因不同生物地貌带的空间异质性和水动力条件的影响,浮游动物群落区域差异明显,向海坡区浮游动物物种多样性比潟湖区和礁坪区高(杜飞雁等, 2015)。西沙群岛位于南海中北部,主体部分处于 $15^{\circ}40'—17^{\circ}10'N$ 和 $111^{\circ}—113^{\circ}E$ 之间,由宣德群岛、永乐群岛和其他岛礁共计 30 多个岛礁组成,年平均气温为 $26.4^{\circ}C$,是热带海区典型的珊瑚礁岛群之一(赵焕庭, 1996)。自 20 世纪 70 年代开始我国学者相继开展了西沙和中沙群岛周围海域的浮游动物调查研究,分析了其平面和垂直分布以及昼夜垂直移动(陈清潮等, 1978a, b, c; 李亚芳等, 2016; 陈畅等, 2018),报道了西、中沙群岛海域以及西沙永乐龙洞的浮游动物群落特征。相对南沙群岛珊瑚礁浮游动物的研究,西沙群岛珊瑚岛或环礁浮游动物的研究需要进一步加强。

本文根据 2015 年 5 月末至 7 月初在西沙群岛 8 个岛礁(七连屿、永兴岛和东岛 3 个岛屿以及浪花礁、盘石屿、玉琢礁、华光礁和北礁 5 个环礁)的调查数据,分析各岛屿和环礁浮游动物的多样性、丰度和群落结构特征,并比较 5 个环礁潟湖区和向海礁坡区浮游动物群落组成的差异,为深入开展西沙群岛珊瑚礁生态系统研究提供科学资料,并有助于全面认识热带珊瑚礁生态系统的结构与功能。

1 材料与方法

1.1 调查站位

2015 年 5 月 31 日—7 月 2 日在西沙群岛珊瑚礁海域的 3 个岛屿和 5 个环礁设置 48 个测站对浮游动物进行了采样, 岛屿附近设置 13 个站, 环礁 35 个站, 调查站具体位置信息如表 1。

1.2 样品采集

针对岛礁海域中小型浮游动物种类较多的特点, 使用浅水 II 型浮游生物网(网口内径 31.6cm, 网长 140cm, 网目孔径 0.160mm)采样, 每站根据调查站

深度不一决定拖网深度, 岛屿近岸和环礁潟湖内拖网深度范围为 1.5~8m, 岛屿远岸和环礁离岸区的拖网深度为 15m, 至表层垂直拖曳一网。网口中央系有流量计(Hydro-Bios 438115, 德国) 以计算拖网滤水量(单位: m^3)。样品的处理、保存、计数等均按《海洋调查规范》(国家技术监督局, 1991)进行。温度和盐度使用多参数水质监测仪(YSI 6600, 美国)进行现场测定。叶绿素 *a* 采样和测定方法是现场采水后, 经 0.7 μm 孔径 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤、90%丙酮萃取后使用 Turner-Design10 型荧光计测定叶绿素 *a* 含量(Parsons et al, 1984)。

表 1 西沙群岛珊瑚礁海域浮游动物调查岛屿和环礁的站数及其站位信息

Tab.1 Information of investigated stations of zooplankton in coral reef waters of Xisha Islands

类型	岛礁	站数	站位位置	站号	调查时间(日/月)
岛屿	七连屿	4	远岸 4 个	11~14(*)	29/06—30/06
	永兴岛	5	远岸 3 个, 近岸 2 个	15~17(*), 18~19(×)	01/07—02/07
	东岛	4	远岸 4 个	110~113(*)	16/06
环礁	浪花礁	7	潟湖 4 个, 礁坡 3 个	A1(●), A2~A4(●), A5~A7(○)	31/05—01/06
	盘石屿	8	潟湖 5 个, 礁坡 3 个	A8~A12(▲), A13~A15(Δ)	03/06—04/06
	玉琢礁	6	潟湖 2 个, 礁坡 4 个	A16~A17(■), A18~A21(□)	10/06—12/06
	华光礁	8	潟湖 4 个, 礁坡 4 个	A22~A25(▼), A26~A29(▽)	06/06—08/06
	北礁	6	潟湖 2 个, 礁坡 4 个	A30~A31(◆), A32~A35(◇)	26/06—28/06

注: “×”代表岛屿近岸调查站, “*”代表岛屿远岸调查站, “●、▲、■、▼和◆”代表环礁潟湖内调查站, “○、Δ、□、▽和◇”代表环礁向海礁坡调查站

1.3 种类鉴定

较大型浮游动物个体如水螅水母、海樽、磷虾等类群进行全样计数, 其他个体根据样品量使用 Folsom 分样器进行, 一般以 1/16 或 1/32 分样后在体视显微镜下(Leica M165C)鉴定计数。桡足类、毛颚类和管水母均鉴定到种(陈清潮 等, 1965, 1974; 张谷贤 等, 1983; 张金标, 2005; 张武昌 等, 2010), 其他类群如端足类、磷虾类和介形类等对个体较成熟的种类鉴定到种。

1.4 数据分析

浮游动物群落的多样性指数(H')和均匀度(J)分别采用 Shannon-Weaver 和 Pielou 公式计算(Shannon et al, 1963):

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

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

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。

应用 t 检验法进行了环礁潟湖区和向海礁坡区

环境因子、浮游动物多样性和丰度等生物因子的差异显著性检验, 采用 Pearson 相关系数分析浮游动物多样性和丰度与环境因子的相关性。

依据分析获得的浮游动物数据, 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, 挑选出的种类丰度共占总丰度 50%以上的种类, 从而得到用于群落结构分析的物种。将这些种类丰度以 $\lg(x+1)$ 转换, 利用 PRIMER6.0 软件, 采用 Bray-Curtis 相似性系数进行等级聚类(CLUSTER)和非参数多维标度(NMDS)分析调查岛礁浮游动物群落结构特征, 应用相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM)检验不同聚群的差异性(Clarke et al, 2006)。

2 结果

2.1 环境因子

调查期间不同岛礁之间环境因子有所差别。表层温度变化范围为 28.47~30.56℃, 浪花礁和盘石屿的温度较低(图 1a); 盐度在 32.95‰~33.80‰之间,

浪花礁和盘石屿的盐度较高, 七连屿和北礁的盐度较低(图 1b); 表层叶绿素 *a* 质量浓度波动大, 变化范围为 $0.07\sim 0.57\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中玉琢礁叶绿素 *a* 质量浓

度较低(图 1c)。环礁的潟湖区和向海礁坡区的温度和盐度差异不大(图 1d、1e), 而潟湖区的叶绿素 *a* 质量浓度明显高于向海礁坡区的(图 1f)。

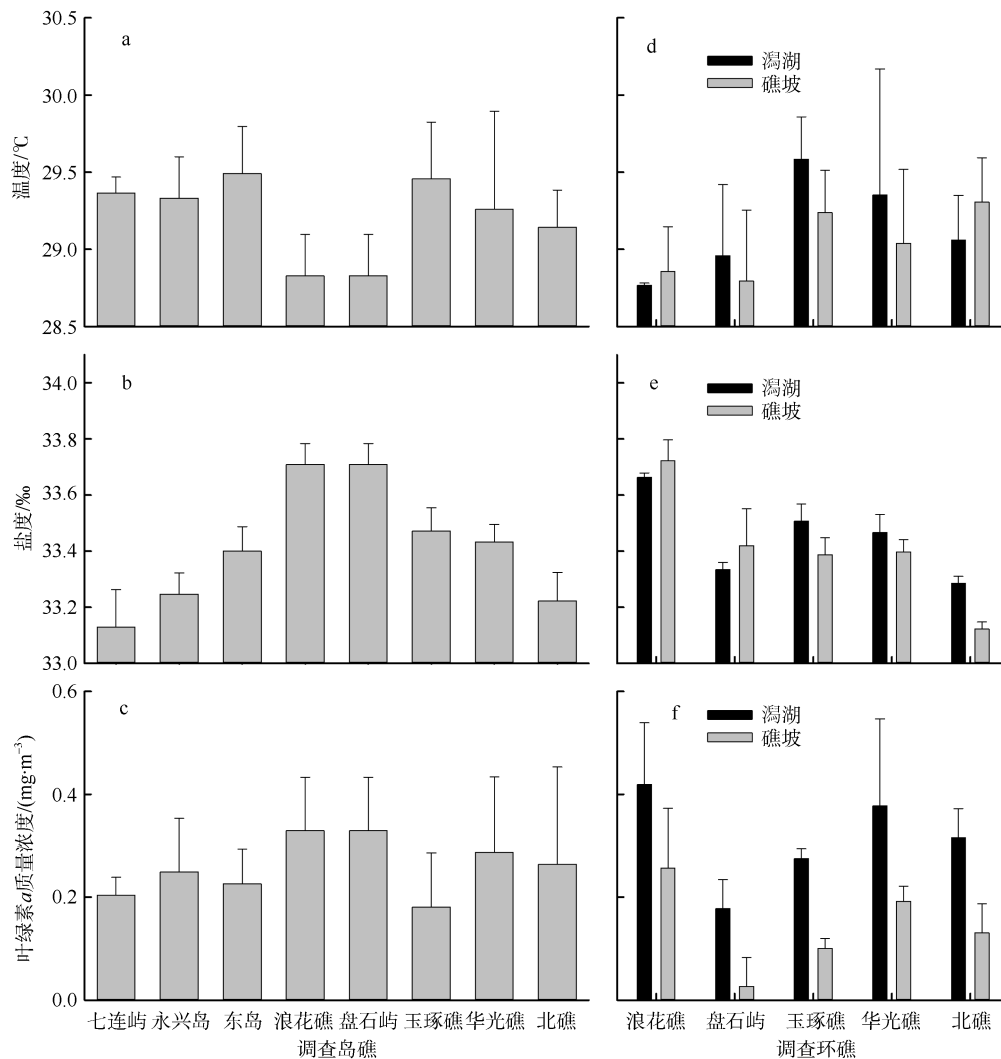


图 1 西沙群岛珊瑚礁海域岛礁的表层温度(a、d)、盐度(b、e)和叶绿素 *a* 质量浓度(c、f)分布

Fig. 1 Distributions of temperature (a, d), salinity (b, e) and chlorophyll *a* concentration (c, f) in coral reef waters of Xisha Islands

2.2 种类组成和分布

调查岛礁海域共鉴定浮游动物 180 种(包括浮游幼虫 13 类, 见表 2), 其中桡足类种数最多, 占浮游动物总种数的 46.11%, 其次是水螅水母类、管水母类、毛颚类和浮游软体类, 每类种数达 10 种以上。除七连屿出现的浮游动物种数较低外, 其他岛礁出现的浮游动物种数高于 100 种。比较 5 个环礁潟湖与向海礁坡区的浮游动物种数发现, 向海礁坡区的浮游动物种数、多样性指数和均匀度指数均高于潟湖区的, 除北礁潟湖区的均匀度指数较高外(图 2a~2c)。

2.3 丰度分布

调查海域浮游动物平均丰度 256.4 ± 117.8 个 $\cdot\text{m}^{-3}$,

变化范围为 $17.6\sim 1075.5$ 个 $\cdot\text{m}^{-3}$ 。桡足类、浮游被囊类和浮游幼虫是浮游动物的 3 大类群, 分别占总丰度的 51.08%、13.22%和 16.30%, 毛颚类和管水母类的丰度也相对较高(表 3)。各岛礁浮游动物丰度分布不均匀, 东岛、玉琢礁和华光礁的浮游动物丰度较高, 盘石屿和北礁的较低(图 3a)。5 个环礁向海礁坡区的浮游动物丰度远高于潟湖区的(图 3b)。

2.4 群落的空间分布格局

西沙群岛海域岛屿和环礁调查站的等级聚类分析结果表明, 浮游动物可划分为两个聚群(相似度水平 85%); 环礁潟湖及岛屿近岸群落(I)和环礁向海

表 2 西沙群岛珊瑚礁海域调查岛礁浮游动物各类群组成的种数
Tab. 2 Species richness and the percentage of zooplankton groups in coral reef waters of Xisha Islands

类群	七连屿	永兴岛	东岛	浪花礁	盘石屿	玉琢礁	华光礁	北礁	合计	占百分比/%
水螅水母类 Hydromedusae	3	6	8	5	10	9	9	5	20	11.11
管水母类 Siphonophores	5	6	7	9	11	8	12	8	16	8.89
栉水母类 Ctenophores	1	0	1	0	0	1	2	1	2	1.11
浮游软体类 Pelagic mollusca	2	2	6	4	5	5	9	2	10	5.56
浮游多毛类 Pelagic Polychaeta	0	0	0	4	0	0	0	0	4	2.22
枝角类 Cladocerans	2	0	1	1	2	1	1	0	2	1.11
介形类 Ostracods	0	0	1	0	1	0	1	0	3	1.67
端足类 Amphipods	0	4	0	3	0	1	1	4	6	3.33
桡足类 Copepods	56	73	60	65	69	72	75	61	83	46.11
磷虾类 Euphausiacea	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.56
十足类 Decapods	0	1	2	2	0	1	0	1	2	1.11
毛颚类 Chaetognaths	5	7	10	10	8	9	10	8	11	6.11
浮游被囊类 Pelagic tunicates	7	4	5	7	7	6	7	4	7	3.89
浮游幼虫 Planktonic larvae	6	7	10	10	9	10	12	9	13	7.22
合计	88	111	112	121	123	124	142	104	180	100.00

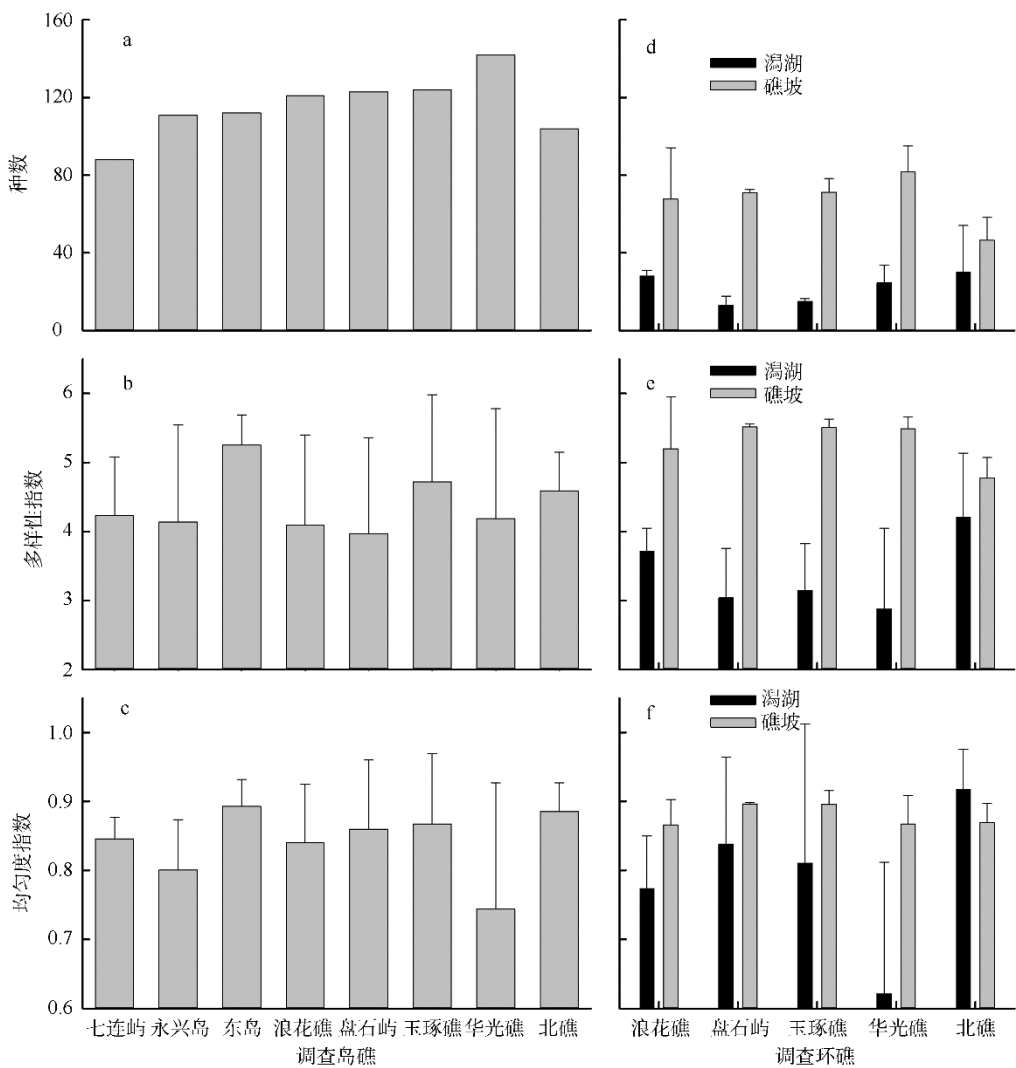


图 2 西沙群岛珊瑚环礁潟湖和向海礁坡区浮游动物种数(a、d)、多样性指数(b、e)和均匀度指数(c、f)的比较
Fig. 2 Comparison of species number (a, d), diversity index (b, e) and evenness index (c, f) of zooplankton between the lagoon and seaward reef-slope of five atolls in Xisha Islands

表 3 西沙群岛珊瑚礁海域岛礁浮游动物各类群的丰度及所占总丰度的百分比

Tab. 3 Species richness and the percentage of zooplankton groups in coral reef waters of Xisha Islands

类群	平均丰度/(个·m ⁻³)	百分比/%
水螅水母类 Hydromedusae	5.2±8.6	2.09
管水母类 Siphonophores	14.1±23.4	5.67
栉水母类 Ctenophores	0.1±0.2	0.02
浮游软体类 Pelagic mollusca	1.9±2.2	0.77
浮游多毛类 Pelagic Polychaeta	0.5±1.0	0.20
枝角类 Cladocerans	2.1±6.1	0.85
端足类 Amphipods	0.4±1.1	0.17
介形类 Ostracods	0.1±0.2	0.02
桡足类 Copepods	127.3±137.6	51.08
十足类 Decapods	0.5±1.4	0.18
磷虾类 Euphausiacea	4.3±7.6	1.72
毛颚类 Chaetognaths	19.2±27.5	7.70
浮游被囊类 Pelagic tunicates	33.0±58.6	13.22
浮游幼虫 Planktonic larvae	40.6±31.9	16.30

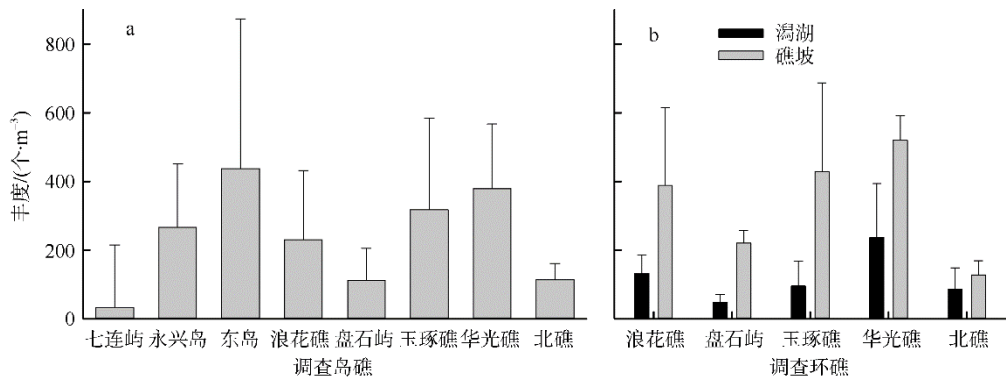


图 3 调查岛礁浮游动物丰度(a)以及环礁潟湖和向海礁坡区的浮游动物丰度(b)比较

Fig. 3 Comparison of zooplankton abundance between islands and atolls (a), as well as between the lagoon and seaward reef-slope of five atolls (b) in Xisha Islands

礁坡及远岸群落(Ⅱ)。群落Ⅰ主要包括环礁潟湖的调查站位和岛屿近岸的采样站, 群落Ⅱ主要包括环礁向海礁坡的调查站和岛屿离岸的采样站(图 4a、表 1)。NMDS 分析的 2D 压力系数 stress=0.03, 表明该结果较好地反映了不同群落样本间的相似关系(图 4b)。One-way ANOSIM 检验表明, 两个群落间的差异较为显著($r=0.832$, $p=0.001$)。两个群落之间浮游动物种数、多样性指数、丰度和主要类群(如水螅水母类、管水母类、桡足类和毛颚类)丰度差异显著(表 4)。

2.5 浮游动物与环境因子的关系

相关分析结果表明, 浮游动物种数($r=-0.309$, $p<0.05$)、多样性指数($r=-0.428$, $p<0.01$)和均匀度指数($r=-0.586$, $p<0.001$)与叶绿素 *a* 呈显著的负相关外

(表 5), 其他各因子与浮游动物的相关性不显著, 说明调查岛礁叶绿素 *a* 质量浓度较高的区域, 浮游动物的物种多样性较低。

3 讨论

3.1 西沙群岛岛礁浮游动物群落特征

西沙群岛海域调查岛礁浮游动物的种类组成丰富, 物种多样性高, 具有热带大洋生物群落特征。调查 8 个岛礁浮游动物的种数低于西沙群岛和南沙群岛开放海域的结果(陈清潮 等, 1978a; 尹健强 等, 2006), 高于南沙群岛渚碧礁和美济礁浮游动物种数(尹健强 等, 2011; 杜飞雁 等, 2015), 这说明珊瑚岛或环礁浮游动物的多样性低于周围开放性海域。浮游动物种类组成符合珊瑚礁海域浮游动物群落特

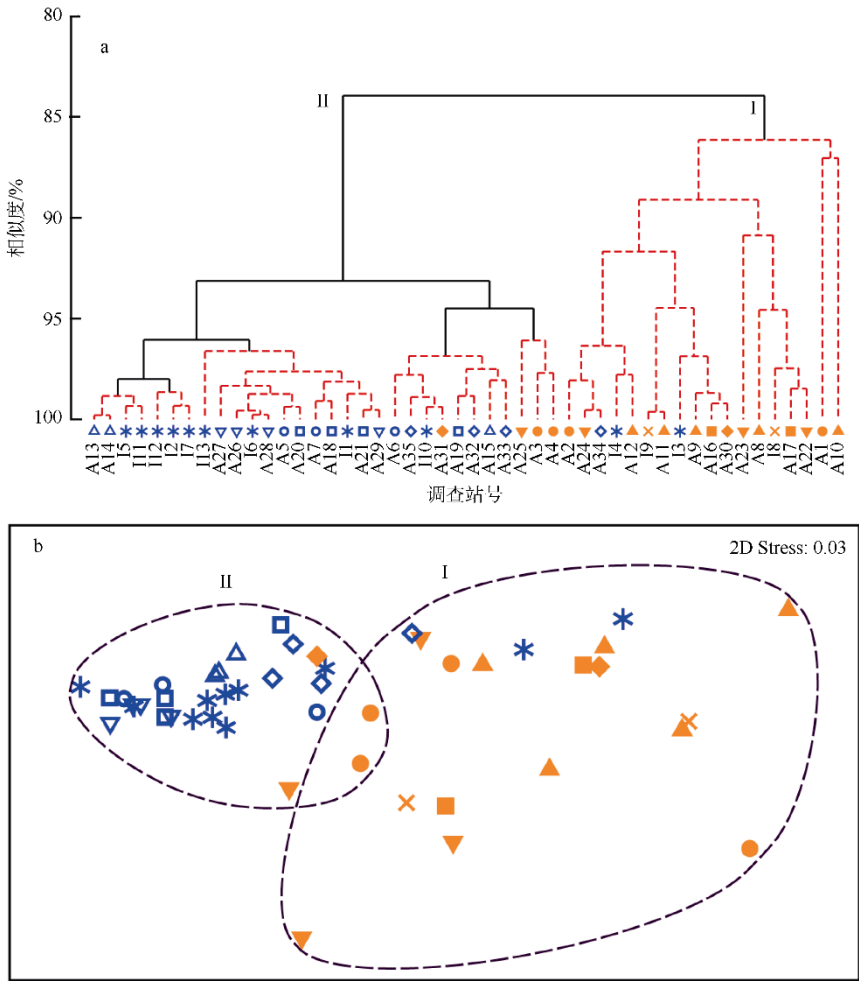


图 4 西沙群岛海域调查岛礁浮游动物聚群的等级聚类分析图(a)和非参数多维标度排序图(b)
图 a 中连接调查站的黑色实线表示调查站之间统计上差异显著($p<0.05$), 红色虚线表示调查站之间差异不显著($p>0.05$)。“×”代表岛屿近岸调查站, “*”代表岛屿远岸调查站, “●、▲、■、▼、◆”代表环礁潟湖内调查站, “○、△、□、▽、◇”代表环礁向海礁坡调查站

Fig. 4 Cluster analysis using the hierarchical agglomerative method employing group average linking of Bray-Curtis similarities (a), and non-multidimensional scaling ordination (nMDS), showing the relative position of stations based on the Bray-Curtis similarity index using $\lg(x+1)$ transformed species abundance data (b). Contours represent the 85% similarity level among stations. Black lines in (a) connect stations that are statistically distinct groups ($p<0.05$); red lines connect samples that are not statistically unique ($p>0.05$)

表 4 西沙群岛珊瑚礁海域岛礁两个聚群组成的比较(t 检验法)

Tab. 4 Comparison of the composition of two clustered groups of coral reefs in Xisha Islands (t -test)

	近岸及潟湖群落 (I)	远岸及向海礁坡群落 (II)	T 值	显著性(p)	自由度(F)
种数	17.00±8.00	63.00±18.00	-10.225	***	46
多样性指数	3.10±0.83	5.08±0.65	-9.254	***	46
均匀度	0.80±0.16	0.86±0.06	-1.771	n.s.	46
丰度/(个·m ⁻³)	89.23±94.72	345.32±220.31	-4.664	***	46
水螅水母类 Hydromedusae	0.46±1.10	8.07±9.88	-3.242	**	46
管水母类 Siphonophores	2.28±4.26	21.25±27.32	-2.911	**	46
桡足类 Copepods	21.92±14.61	190.60±140.12	-5.069	***	46
磷虾类 Euphausiacea	3.59±9.41	4.70±6.43	-0.486	n.s.	46
毛颚类 Chaetognaths	1.56±2.94	29.78±30.47	-3.901	***	46
浮游被囊类 Pelagic tunicates	31.38±89.91	33.90±30.18	-1.141	n.s.	46
浮游幼虫 Planktonic larvae	27.26±23.72	48.68±33.44	-2.337	*	46

注: *表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$; ***表示 $p<0.001$; n.s.表示差异不显著

表 5 浮游动物与环境因子的相关性系数

Tab. 5 Correlation coefficients between zooplankton abundance/biomass and environmental factors

因子	种数	丰度	多样性指数	均匀度指数
温度	-0.151 ^{n.s.}	0.024 ^{n.s.}	-0.165 ^{n.s.}	-0.224 ^{n.s.}
盐度	-0.070 ^{n.s.}	0.075 ^{n.s.}	-0.148 ^{n.s.}	-0.082 ^{n.s.}
叶绿素 <i>a</i> 质量浓度	-0.309 [*]	-0.043 ^{n.s.}	-0.428 ^{**}	-0.586 ^{***}

注: *表示 $p < 0.05$, 相关性显著; ***表示 $p < 0.001$, 相关性极显著; n.s. 表示相关性不显著

征, 即浮游幼虫在种类和数量上都占有重要位置 (Goswami et al, 1990; Carleton et al, 1998; 尹健强等, 2011; 杜飞雁等, 2015)。本次调查中浮游幼虫的丰度仅次于桡足类, 主要是长尾类幼虫 (Macruran larva)、鱼卵 (Fish egg)、短尾类幼虫 (Brachyuran larva) 和蛇尾类长腕幼虫 (Ophiopluteus larva)。浮游被囊类、毛颚类和管水母类的种类和丰度也较高, 与采样站位和调查时间有关。环礁向海礁坡区基本是大洋性水团, 调查期间处于西南季风期, 主要是一些大洋性种类主导着浮游动物的群落组成。珊瑚礁浮游动物主要由中小型种类组成, 研究结果与采样时浮游生物网目孔径有关。国内早期的珊瑚礁浮游动物采样多使用网目孔径较大的浅水 I 型浮游生物网 (网目孔径 0.505mm) 进行, 导致浮游动物种类和数量较少 (陈清潮等, 1978c), 低估了浮游动物在珊瑚礁生态系统中的重要性。本文采用浅水 II 型网 (网目孔径 0.160mm) 进行采样, 结果表明浮游动物丰度比西沙群岛海域和南沙群岛美济礁使用浅水 I 型 ((网目孔径 0.505mm) 网采集的丰度高 (陈清潮等, 1978a; 杜飞雁等, 2015), 但其丰度明显低于在雷州半岛灯楼角珊瑚礁和南沙群岛渚碧礁使用同一网目孔径采集的浮游动物丰度 (尹健强等, 2008, 2011)。珊瑚礁海域浮游动物丰度的高低一方面与采样使用网目孔径的大小有关, 另一方面也受采样时间的昼夜变化及其调查站的位置、多少等因素的影响。

3.2 西沙群岛环礁潟湖与向海礁坡区浮游动物差异

与周围海域相比, 珊瑚岛或环礁是一个高生产力的生态系统 (Hatcher, 1997)。一些环礁潟湖高度封闭, 与周围海域完全隔离, 除了在极端波浪作用 (Goswami et al, 1990; Carleton et al, 1998; 尹健强等, 2011), 还有一些环礁通过或深或浅的通道与礁滩连接到邻近的海域 (Gerber, 1981; Le Borgne et al, 1989; Pagano et al, 2012; 杜飞雁等, 2015)。环礁浮游动物群落在空间和时间上变化较大, 由于封闭环礁和开放环礁之间水文、化学和生物参数的差异, 浮游动物物种组成和丰度各不相同 (Carleton et al,

1998; 尹健强等, 2011; Pagano et al, 2012; 杜飞雁等, 2015)。与太平洋较大和较深环礁的邻近海水相比, 潟湖水域拥有独特的生物群落, 并且浮游动物丰度丰富 (Gerber, 1981; Le Borgne et al, 1989; Carleton et al, 1998)。在印度洋相对较小和较浅的环礁上, 潟湖和周围水域之间浮游动物群落的丰度和物种组成差异也较大 (Goswami, 1983; Goswami et al, 1990)。不同环礁的地形特征导致潟湖与外界水体的交换程度出现不同空间变化, 从而影响浮游动物的种类组成。西沙群岛珊瑚岛礁浮游动物群落结构具有明显的空间异质性, 一是岛屿近岸和离岸调查站分别与环礁潟湖区和向海礁坡区的群落组成相似, 二是环礁潟湖区和向海礁坡区的浮游动物群落结构差异显著。西沙群岛岛礁浮游动物空间分布的差异受岛礁的地形结构、水动力条件和生态环境等因素的影响。西沙海域有些珊瑚环礁是高度封闭、独立于周围水体, 如玉琢礁和盘石屿, 有些环礁有出入水道与外界海洋水相通, 能较好地水体交换, 如北礁、华光礁和浪花礁 (业治铮等, 1985)。本文调查 5 个环礁向海礁坡区的浮游动物种数、多样性指数、均匀度和丰度分布均值皆高于潟湖区的, 这与南沙群岛渚碧礁潟湖区浮游动物种数和丰度远高于礁坪区的结果不同 (尹健强等, 2011), 但与美济礁向海礁坡区浮游动物高物种多样性类似 (杜飞雁等, 2015)。环礁潟湖区由于较封闭, 水体营养物质丰富, 叶绿素 *a* 浓度较高 (Ke et al, 2018), 而相关分析结果表明浮游动物丰度与叶绿素 *a* 质量浓度相关性不显著, 浮游动物的多样性却在叶绿素 *a* 浓度较高的潟湖区较低, 说明向海礁坡区的高物种多样性和丰度可能与水动力因素有关。向海坡紧接外海, 坡度陡峭、生境复杂, 水深的梯度变化非常显著, 并易形成上升流区, 有利于多种类型的浮游生物生长和繁殖 (杜飞雁等, 2015)。中沙群岛海域黄岩岛具有一条潟湖和外海的通道, 潟湖内受渔船停靠影响呈现高营养盐和叶绿素 *a* 浓度特征 (Ke et al, 2018), 但向海礁坡区的浮游动物多样性和丰度高于潟湖区的 (Li et al, 2018)。同样, 西沙永乐龙洞外礁坡物种多

样性比龙洞内高(陈畅 等, 2018)。西沙群岛环礁浮游动物群落特征与黄岩岛和永乐龙洞类似; 向海礁坡区浮游动物具有较高的多样性和丰度, 可能与向海礁坡的水动力条件有关。另外, 西沙群岛有些珊瑚岛礁已经受到人为活动的影响, 如受人为活动影响的岛礁比未受人为活动影响的岛礁其造礁石珊瑚物种丰富度和多样性都低(黄晖 等, 2011)。同样, 珊瑚礁岛屿附近海域由于受人类活动影响程度不同导致生态环境的变化也会影响浮游动物的群落结构。

西沙群岛珊瑚海域岛礁因自身地形特征和水文动力条件等影响, 浮游动物群聚为两个不同的空间分布格局; 岛屿近岸及环礁潟群落和向岛屿远岸及环礁向海礁坡群落, 二者的浮游动物群落组成差异显著。本文的结果可以进一步证实环礁的潟湖区和向海礁坡区浮游动物群落结构的差异, 但是仍然有一定的局限性: 1) 调查站位的设置问题。本文针对环礁仅是在潟湖内和向海礁坡设置站位, 并且数量有限, 未在礁坪区布设调查站; 2) 调查频次问题。针对环礁浮游动物研究的资料多数是基于一次性调查数据, 需要多次调查进行验证; 3) 调查时间问题。由于本文所有调查站采样均在当地时间上午

进行, 潟湖区水较浅, 光照较强, 浮游动物可能多栖息于较底层; 4) 环礁浮游动物群落空间分布格局的机制仍不清楚。虽然环礁的空间异质性对其群落结构有一定的影响, 但从浮游动物种类自身的生态习性和营养关系方面的关注较少。西沙群岛海域岛礁众多, 自然条件和受人为活动影响程度不同, 各个岛屿和环礁动力条件和生态环境不尽相同, 因此针对西沙群岛海域岛礁的浮游动物空间分布格局需要深入研究。

4 结论

本文主要从浮游动物类群的角度分析了西沙群岛珊瑚海域浮游动物的特征, 发现西沙群岛珊瑚岛礁的浮游动物物种多样性高, 桡足类在种类和丰度上都占绝对优势, 其次是浮游幼虫的丰度较高。调查岛礁的浮游动物可划分岛屿近岸及环礁的潟湖群落和岛屿远岸及环礁的向海礁坡群落两个聚群, 前者的种数、多样性指数、总丰度和主要浮游动物类群如桡足类、毛颚类和浮游幼虫的丰度显著低于后者。环礁潟湖区和向海礁坡区的空间异质性等因素决定浮游动物群落结构呈现不同空间分布格局。

参考文献 References

- 陈畅, 傅亮, 毕乃双, 等, 2018. 南海西沙永乐龙洞浮游动物的群落组成及昼夜垂直分布特征[J]. 海洋与湖沼, 49(3): 594–603. CHEN CHANG, FU LIANG, BI NAISHUANG, et al, 2018. Zooplankton community composition and diel vertical distribution in the Yongle Blue Hole, Xisha Islands, South China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 49(3): 594–603 (in Chinese with English abstract).
- 陈清潮, 章淑珍, 1965. 黄海和东海浮游桡足类: I. 哲水蚤目[J]. 海洋科学集刊, (7): 20–131. CHEN QINGCHAO, ZHANG SHUZHEN, 1965. The planktonic copepods of the Yellow Sea and the East China Sea. I. Calanoida[J]. Studia Marina Sinica, (7): 20–131 (in Chinese).
- 陈清潮, 章淑珍, 朱长寿, 1974. 黄海和东海的浮游桡足类 II: 剑水蚤目和猛水蚤目[J]. 海洋科学集刊, (9): 27–100. CHEN QINGCHAO, ZHANG SHUZHEN, ZHU CHANGSHOU, 1974. On planktonic copepods of the Yellow Sea and the East China Sea II. Cyclopoida and Harpacticoida[J]. Studia Marina Sinica, (9): 27–100 (in Chinese).
- 陈清潮, 张谷贤, 陈柏云, 1978a. 西沙、中沙群岛周围海域浮游动物的平面分布和垂直分布[M]//中国科学院南海海洋研究所. 我国西沙、中沙群岛海域海洋生物调查研究报告集. 北京: 科学出版社: 63–74. CHEN QINGCHAO, ZHANG GUXIAN, CHEN BOYUN, 1978a. The horizontal and vertical distribution of the zooplankton in the waters around the Xisha Island and Zhongsha reefs[M]//SOUTH CHINA SEA INSTITUTE OF OCEANOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES. Proceedings of collections of marine biology investigation reports in the waters around the Xisha Island and Zhongsha reefs. Beijing: Ocean Press: 63–74 (in Chinese).
- 陈清潮, 陈柏云, 张谷贤, 1978b. 西沙、中沙群岛浅滩浮游动物的昼夜垂直移动[M]//中国科学院南海海洋研究所. 我国西沙、中沙群岛海域海洋生物调查研究报告集. 北京: 科学出版社: 75–80. CHEN QINGCHAO, CHEN BOYUN, ZHANG GUXIAN, 1978b. The diurnal vertical migration of the zooplankton from the shoals of the Xisha Islands and Zhongsha reefs[M]//SOUTH CHINA SEA INSTITUTE OF OCEANOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES. Proceedings of collections of marine biology investigation reports in the waters around the Xisha Island and Zhongsha reefs. Beijing: Ocean Press: 75–80 (in Chinese).
- 陈清潮, 张谷贤, 陈柏云, 1978c. 西沙、中沙群岛周围海域主要浮游动物的群落特征[M]//中国科学院南海海洋研究所. 我国西沙、中沙群岛海域海洋生物调查研究报告集. 北京: 科学出版社: 81–84. CHEN QINGCHAO, ZHANG GUXIAN, CHEN BOYUN, 1978c. Characteristics of the

- main zooplankton community in the waters around the Xisha Islands and Zhongsha reefs[M]//SOUTH CHINA SEA INSTITUTE OF OCEANOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES. Proceedings of collections of marine biology investigation reports in the waters around the Xisha Island and Zhongsha reefs. Beijing: Ocean Press: 81–84 (in Chinese).
- 陈清潮, 2011. 南海生物多样性的保护[J]. 生物多样性, 19(6): 834–836. CHEN QINGCHAO, 2011. The protection of biodiversity in the South China Sea[J]. Biodiversity Science, 19(6): 834–836 (in Chinese with English abstract).
- 杜飞雁, 王雪辉, 林昭进, 2015. 南沙群岛美济礁海域夏季浮游动物群落特征[J]. 生态学报, 35(4): 1014–1021. DU FEIYAN, WANG XUEHUI, LIN ZHAOJIN, 2015. The characteristics of summer zooplankton community in the Meiji coral reef, Nansha Islands, South China Sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 35(4): 1014–1021 (in Chinese with English abstract).
- 国家技术监督局, 1991. GB/T 12763.6–1991 海洋调查规范 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社: 6–91. STATE BUREAU OF TECHNICAL SUPERVISION, 1991. GB/T 12763.6–1991 The specification for oceanographic survey – Marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China: 6–91(in Chinese).
- 黄晖, 尤丰, 练健生, 等, 2011. 西沙群岛海域造礁石珊瑚物种多样性与分布特点[J]. 生物多样性, 19(6): 710–715. HUANG HUI, YOU FENG, LIAN JIANSHENG, et al, 2011. Species diversity and distribution of scleractinian coral at Xisha Islands, China[J]. Biodiversity Science, 19(6): 710–715 (in Chinese with English abstract).
- 李亚芳, 杜飞雁, 王亮根, 等, 2016. 南海中沙西沙海域海樽类群落结构特征研究[J]. 南方水产科学, 12(4): 64–70. LI YAFANG, DU FEIYAN, WANG LIANGGEN, et al, 2016. Community structure of Thaliacea in the Zhongsha and Xisha Islands, South China Sea[J]. South China Fisheries Science, 12(4): 64–70 (in Chinese with English abstract).
- 沈国英, 黄凌风, 郭丰, 等, 2010. 海洋生态学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社: 233–238. SHEN GUOYING, HUANG LINGFENG, GUO FENG, et al, 2010. Marine ecology[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press: 233–238 (in Chinese).
- 业治铮, 何起祥, 张明书, 等, 1985. 西沙群岛岛屿类型划分及其特征的研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 5(1): 1–13. YE ZHIZHENG, HE QIXIANG, ZHANG MINGSHU, et al, 1985. Classification and characteristics of Islands in the Xisha Archipelago[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 5(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- 尹健强, 陈清潮, 谭烨辉, 等, 2003. 南沙群岛渚碧礁春季浮游动物群落特征[J]. 热带海洋学报, 22(6): 1–8. YIN JIANQIANG, CHEN QINGCHAO, TAN YEHUI, et al, 2003. Zooplanktonic community characteristics in waters of Zhubi coral reef (Nansha Islands) in spring[J]. Journal of Tropical Oceanography, 22(6): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- 尹健强, 陈清潮, 张谷贤, 等, 2006. 南沙群岛海区上层浮游动物种类组成与数量的时空变化[J]. 科学通报, 51(S3): 129–138. YIN JIANQIANG, CHEN QINGCHAO, ZHANG GUXIAN, et al, 2006. Spatial and temporal variability of zooplankton community in the waters (–100m) around Nansha Islands[J]. Chinese Science Bulletin, 51(S3): 129–138 (in Chinese with English abstract).
- 尹健强, 黄晖, 黄良民, 等, 2008. 雷州半岛灯楼角珊瑚礁海区夏季的浮游动物[J]. 海洋与湖沼, 39(2): 131–138. YIN JIANQIANG, HUANG HUI, HUANG LIANGMIN, et al, 2008. Summer zooplankton in coral reef area of Leizhou Peninsula, China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 39(2): 131–138 (in Chinese with English abstract).
- 尹健强, 黄良民, 李开枝, 等, 2011. 南沙群岛珊瑚礁浮游动物多样性与群落结构[J]. 生物多样性, 19(6): 685–695. YIN JIANQIANG, HUANG LIANGMIN, LI KAIZHI, et al, 2011. Species diversity and community structure of zooplankton in the Zhubi Atoll, Nansha Islands, South China Sea[J]. Biodiversity Science, 19(6): 685–695 (in Chinese with English abstract).
- 张谷贤, 陈清潮, 1983. 南海北部和中部的毛颚类[C]//中国科学院南海海洋研究所. 南海海洋生物研究论文集(一). 北京: 海洋出版社: 17–63. ZHANG GUXIAN, CHEN QINGCHAO, 1983. Studies on chaetognaths in the central and northern parts of the South China Sea[C]//SOUTH CHINA SEA INSTITUTE OF OCEANOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES. Proceedings of contributions on marine biological research of the South China Sea. Beijing: Ocean Press: 17–63 (in Chinese).
- 张金标, 2005. 中国海洋浮游管水母类[M]. 北京: 海洋出版社: 1–151. ZHANG JINBIAO, 2005. Pelagic siphonophora in China Seas[M]. Beijing: China Ocean Press: 1–151 (in Chinese).
- 章淑珍, 李纯厚, 1997. 南沙群岛珊瑚礁潟湖生态系小型浮游动物的营养作用[M]//中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛珊瑚礁潟湖化学与生物学研究. 北京: 海洋出版社: 64–69. ZHANG SHUZHEN, LI CHUNHOU, 1997. Nutritional role of small zooplankton in coral reef lagoon ecosystem of Nansha Islands[M]//NANSHA COMPREHENSIVE SCIENTIFIC EXPEDITION TEAM OF CHINESE ACADEMY OF SCIENCES. Chemical and biological study on coral reef lagoons in Nansha Islands. Beijing: Ocean Press: 64–69 (in Chinese).
- 张武昌, 赵楠, 陶振铨, 等, 2010. 中国海洋浮游桡足类图谱[M]. 北京: 科学出版社: 1–468. ZHANG WUCHANG, ZHAO NAN, TAO ZHENCHENG, et al, 2010. An illustrated guide to marine planktonic copepods in China Seas[M]. Beijing: Science Press: 1–468 (in Chinese).
- 赵焕庭, 1996. 西沙群岛考察史[J]. 地理研究, 15(4): 55–65. ZHAO HUANTING, 1996. History of expeditions to Xisha Islands[J]. Geographical Research, 15(4): 55–65 (in Chinese with English abstract).

- ALLDREDGE A L, KING J M, 2009. Near-surface enrichment of zooplankton over a shallow back reef: implications for coral reef food webs[J]. *Coral Reefs*, 28(4): 895–908.
- CARLETON J H, DOHERTY P J, 1998. Tropical zooplankton in the highly-enclosed lagoon of Taiaro Atoll (Tuamotu Archipelago, French Polynesia)[J]. *Coral Reefs*, 17(1): 29–35.
- CLARKE K R, GORLEY R N, 2006. PRIMER v6: user manual/tutorial[M]. Plymouth: PRIMER-E.
- GERBER R P, 1981. Species composition and abundance of lagoon zooplankton at Eniwetak Atoll, Marshall Islands[J]. *Atoll Research Bulletin*, 247: 1–22.
- GOSWAMI S C, 1983. Production and zooplankton community structure in the lagoon and surrounding sea at Kavaratti Atoll (Lakshadweep)[J]. *Indian Journal of Marine Sciences*, 12: 31–35.
- GOSWAMI S C, GOSWAMI U, 1990. Diel variation in zooplankton in Minicoy lagoon and Kavaratti atoll (Lakshadweep islands)[J]. *Indian Journal of Marine Sciences*, 19: 120–124.
- HATCHER B G, 1997. Coral reef ecosystems: how much greater is the whole than the sum of the parts?[J]. *Coral Reefs*, 16(S1): S77–S91.
- HEIDELBERG K B, SEBENS K P, PURCELL J E, 2004. Composition and sources of near reef zooplankton on a Jamaican for reef along with implications for coral feeding[J]. *Coral Reefs*, 23(2): 263–276.
- KE ZHIXIN, TAN YEHUI, HUANG LIANGMIN, et al, 2018. Spatial distribution patterns of phytoplankton biomass and primary productivity in six coral atolls in the central South China Sea[J]. *Coral Reefs*, 37(3): 919–927.
- LE BORGNE R, BLANCHOT J, CHARPY L, 1989. Zooplankton of Tikehau atoll (Tuamotu archipelago) and its relationship to particulate matter[J]. *Marine Biology*, 102(3): 341–353.
- LI KAIZHI, KE ZHIXIN, TAN YEHUI, 2018. Zooplankton in the Huangyan Atoll, South China Sea: a comparison of community structure between the lagoon and seaward reef slope[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 36(5): 1671–1680.
- MADHU PRATAP M, WAFAR M V M, HARIDAS P, et al, 1977. Comparative studies on the abundance of zooplankton in the surrounding sea & lagoons in the Lakshadweep[J]. *Indian Journal of Marine Sciences*, 6: 138–141.
- PAGANO M, SAGARRA P B, CHAMPALBERT G, et al, 2012. Metazooplankton communities in the Ahe atoll lagoon (Tuamotu Archipelago, French Polynesia): spatiotemporal variations and trophic relationships[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 65(10–12): 538–548.
- PARSONS T R, MAITA Y, LALLI C M, 1984. A manual of chemical & biological methods for Seawater Analysis[M]. Oxford: Pergamon Press.
- SHANNON C E, WEAVER W, 1963. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University of Illinois Press: 1–144.