

印太交汇区浮游植物和浮游动物生态学研究进展*

孙晓霞^{1, 2, 4, 5} 郭术津^{1, 2, 3, 4} 刘梦坛^{1, 2, 3, 4} 李海波^{2, 3, 4}

(1. 中国科学院海洋研究所 山东胶州湾海洋生态系统国家野外科学观测研究站 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266237; 3. 中国科学院海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071; 5. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 海洋浮游植物和浮游动物是海洋生态系统中的重要组成部分, 支撑了整个海洋生态系统的正常运转。因此, 海洋浮游植、动物的生态学研究有利于我们全面认识和了解一个海洋生态系统的状况。印太交汇区作为全球最大的海洋生物多样性中心, 是国际上生物多样性研究的热点区域, 但该区域对浮游生物生态学方面的研究较少, 不利于我们深入认识该区域生物多样性中心形成的生态机制。本文针对当前国内、外关于印太交汇区浮游植、动物生态学研究的进展进行综述, 介绍了印太交汇区的浮游植物群落结构、生物量、粒级组成和初级生产力水平, 以及浮游动物群落结构特征、生物量分布及影响因素等, 对未来印太交汇区浮游生态学研究的方向进行了展望, 希望可以为该区域相关生态学研究提供借鉴和参考。

关键词 浮游植物; 浮游动物; 印太交汇区; 群落结构; 生物量

中图分类号 Q948.8 **doi:** 10.11693/hyhz20200900243

印太交汇区泛指亚洲大陆、太平洋和印度洋的交汇地区, 主要包括东印度洋和西太平洋, 含有世界上范围最大、海表温度最高的“暖池”, 是南亚季风、东亚季风的连接区(卢峰等, 2011)。复杂的水文、气候环境, 在此孕育了全球最大的海洋生物多样性中心, 是全球重要的生物多样性热点地区(Brooks *et al.*, 2006), 比如, 仅印太交汇区的珊瑚礁大三角区域就孕育了全球 76% 的造礁珊瑚、37% 的珊瑚礁鱼类、75% 的红树林和 45% 的海草物种数(Briggs *et al.*, 2013)。目前, 关于印太交汇区高生物多样性的成因有物种形成、物种保存、物种汇聚和物种重叠等假说(Brooks *et al.*, 2006), 印太交汇区海洋生物多样性的特点、地理分布格局、驱动因素等也是当下海洋生物多样性研究的全球焦点。

海洋浮游生物, 是指悬浮在水体中随水流移动的海洋生物, 主要包括浮游植物和浮游动物, 另外也包括浮游病毒、浮游细菌和古菌等其他生物(陈纪新等, 2013)。浮游植物是海洋中的初级生产者, 通过光

合作用将太阳能转化为有机能, 启动了海洋中的物质循环和能量流动, 是海洋食物链的最基础环节(焦念志等, 1993); 浮游动物是海洋中的重要消费者, 通过次级生产过程将这部分有机能通过食物链进行利用并进一步传递到上层营养级(谭烨辉等, 2003)。因此, 浮游植、动物通过以上初级生产和次级生产过程, 为上层营养级生物提供食物和能量来源, 支撑了整个海洋生态系统的正常运转。作为海洋生态系统的重要组成部分, 浮游生物的多样性研究是海洋生物多样性研究的重要分支(Simon *et al.*, 2009; Barton *et al.*, 2010; 孙军等, 2016), 如“全球海洋生物普查计划”(Census of Marine Life, CoML)就将浮游生物多样性调查作为其重要研究内容。另外, 有研究发现, 海洋浮游生物主导的生产过程及生产力水平与海洋生态系统的生物多样性之间也存在一定的联系(Tilman *et al.*, 1997; Purvis *et al.*, 2000; Vadrucchi *et al.*, 2003)。因此, 浮游生物相关的生态学研究可以为了解一个海区生态系统的结构和功能以及该海区生物多样性的

* 中国科学院战略性先导科技专项(B 类), XDB42000000 号; 国家自然科学基金重点支持项目, 91751202 号。孙晓霞, 博士生导师, 研究员, E-mail: xsun@qdio.ac.cn

收稿日期: 2020-09-02, 收修改稿日期: 2020-11-06

形成机制提供重要参考。

国际上对于印太交汇区的研究,始于20世纪60年代国际印度洋科学考察计划(International Indian Ocean Expedition, IIOE-1)和美国联合东南亚国家开展的“Naga 调查”计划。近些年,我国发起了国际合作研究计划“太平洋-印度洋暖池”研究计划、全球变化及海气相互作用专项、大洋专项、国家自然科学基金委开放共享航次等,也对该区域进行了现场考察,积累了宝贵的资料(李艳等, 2019)。总体而言,国内关于印太交汇区的浮游生物研究多集中于热带西太平洋(陈兴群等, 2002; 代鲁平等, 2014; 代晟等, 2017; 郭术津等, 2018; Wang *et al.*, 2019)、东印度洋(薛冰等, 2016; 李艳等, 2019)以及近岸或陆架海域(刘华雪等, 2011; 柯志新等, 2012; 王磊等, 2015), 相关研究为印太交汇区海洋浮游生物的群落结构、时空分布、生物量和生产力等生态学问题的研究积累了有益资料。本文在已发表资料基础上, 拟从浮游植物和浮游动物两方面对印太交汇区海域浮游生物生态学的研究进行综述, 为深入认识印太交汇区生物多样性中心形成的生态机制提供参考。

1 印太交汇区浮游植物生态学研究

1.1 浮游植物群落结构和粒径组成

印太交汇区涵盖热带西太平洋、东印度洋以及两者之间交汇的区域, 不同区域理化背景和生物地球化学过程的差异将显著影响浮游植物群落结构。目前, 关于印太交汇区近岸海域浮游植物的调查已经积累了一些资料(Kannan *et al.*, 1992; Bajarias, 2000; Choudhury *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2018; Borja *et al.*, 2019)。研究发现, 硅藻在印太交汇区的近岸海域占据重要地位, 优势物种以链状硅藻为主: Bajarias (2000) 发现在菲律宾西部海域表层, 硅藻占浮游植物总丰度的73%, 优势物种为角毛藻(*Chaetoceros* spp.)、幅杆藻(*Bacteriastrum* spp.)、根管藻(*Rhizosolenia* spp.)、海毛藻(*Thalassiothrix* spp.) 和丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*); 在印度洋孟加拉湾(Bay of Bengal), 硅藻物种日本星杆藻(*Asterionella japonica*) 和耳型齿状藻(*Odontella rhombus*) 是主要优势种(Choudhury *et al.*, 2010); 在印度尼西亚的爪哇海(Java sea), 岩藻黄素浓度较高, 表明硅藻是该海域的优势类群(Gao *et al.*, 2018)。除硅藻外, 甲藻也是印太交汇区近海的重要类群。受陆源输入和人类活动影响, 印太交汇区的近岸区域存在富营养化加剧现象, 近

年有害赤潮频发(Yap *et al.*, 2004)。在菲律宾的马尼拉湾(Manila Bay), 近30年常见藻华物种有巴哈马麦甲藻(*Pyrodinium bahamense*)、亚历山大藻(*Alexandrium* spp.)、链状裸甲藻(*Gymnodinium catenatum*)、夜光藻(*Noctiluca scintillans*)、鳍藻(*Dinophysis* spp.)、原多甲藻(*Protoperidinium* spp.)、多环旋沟藻(*Cochlodinium polykrikoides*)等(Borja *et al.*, 2019)。Yap-Dejeto 等(2016)在菲律宾的圣佩德罗湾(San Pedro Bay)报道了共计20种有害藻华物种, 其中包括17种甲藻。

印太交汇区外海海域相关的浮游植物群落研究资料较少, 研究方法多以网采样品分析为主(陈卓等, 2018; 郭术津等, 2018; 李艳等, 2019)。在热带西太平洋海域, 硅藻和甲藻是网采浮游植物的主要功能群, 优势物种以链状硅藻如根管藻(*Rhizosolenia*)、半管藻(*Hemiaulus*)和角毛藻(*Chaetoceros*)等种类为主(郭术津等, 2018); 另外, 蓝藻中的铁氏束毛藻(*Trichodesmium thiebaultii*)优势度也比较明显(陈卓等, 2018)。在东印度洋海域, 网采浮游植物类群同样以硅藻和甲藻为主, 硅藻优势物种有美丽漂流藻(*Planktoniella formosa*)、菱形藻(*Nitzschia* spp.)、角毛藻(*Chaetoceros* spp.)、佛氏梯形藻(*Climacodium frauenfeldianum*)和距端假管藻(*Pseudosolenia calcaravis*), 甲藻有夜光梨甲藻(*Pyrocystis noctiluca*)和波状新角藻(*Neoceratium trichoceros*)等。

浮游植物粒级结构在海洋生态系统食物网结构和碳循环途径中扮演重要角色, 海洋浮游植物的很多生理过程及生态功能都是由其粒级决定的, 包括种群的生长与呼吸速率、营养物质吸收动力学、种间竞争能力、细胞的沉降速率等。因此, 浮游植物粒级组成的研究, 对于理解浮游食物网中物质和能量的传递途径具有重要意义。印太交汇区海域具有极其复杂的生态环境, 既有富营养的近岸海域, 又有中营养的陆架区及寡营养和高盐度的陆坡与开阔海域, 这使得营养盐、光照、温度等生态因子在不同海域有所区别, 造成了不同区域浮游植物粒级组成的差异。

目前, 关于印太交汇区浮游植物粒级组成的研究多集中于陆架区和外海。柯志新等(2012)研究发现, 在季风转换期间巽他海峡叶绿素 *a* 浓度较低, 印度洋、爪哇海和南海表层的叶绿素 *a* 浓度分别为0.13、0.30 和 0.10 $\mu\text{g/L}$, 微微型浮游植物的生物量比例分别为81%、59%和80%; 王磊等(2015)研究发现巽他陆架表层叶绿素 *a* 粒级组成主要以微微型浮游植物为优势; 代晟等(2017)研究了热带西太平洋马里亚纳 M2 海

山浮游植物粒级结构,发现微微型浮游植物为最优势类群,占总叶绿素 *a* 的 85%,微型浮游植物和小型浮游植物的贡献率较低。浮游植物在不同环境条件下的竞争优势主要是由其粒径决定的,在营养盐丰富的环境中,粒径较大的小型浮游植物由于具有较高的内禀增长率,在浮游植物群落中容易占据优势;在营养盐贫乏的环境中,粒径较小的微微型浮游植物由于具有较大的比表面积和较低的营养盐半饱和吸收系数,从而在寡营养海域容易占据优势。印太交汇区陆架和外海水体表层具有高温和寡营养盐特征(Messié *et al.*, 2006),温盐跃层阻碍了深层高营养盐水体向上层水体的补充,表层营养盐浓度很低,从而限制了小型和微型浮游植物的生长(张文静等, 2016)。

1.2 浮游植物初级生产力

目前,在印太交汇区近岸区域已有一些初级生产力相关研究的积累(表 1)。刘华雪等(2011)对孟加拉湾的研究发现,初级生产力变化范围介于 199—367 mg C/(m²·d),其中微微型浮游植物贡献 44.3%,其次为小型浮游植物(29.6%)和微型浮游植物(26.1%)。在外海区域,关于初级生产力的研究也有一些报道。钱宏林等(1992)估算了热带西太平洋的初级生产力水平介于 50—100 mg C/(m²·d)。陈兴群等(2002)研究发现,在热带西太平洋,赤道暖水区的初级生产力高于西部海域,分别为 228 和 171 mg C/(m²·d)。代晟等(2017)研究发现,热带西太平洋 M2 海山的初级生产力为 71.31 mg C/(m²·d),初级生产力的主要贡献者为微型和微微型浮游植物。在东印度洋,初级生产力范围则介于 83—403 mg C/(m²·d)之间(袁超, 2015)。

表 1 印太交汇区各区域初级生产力水平
Tab.1 Primary production levels in the Indo-Pacific convergence region

研究区域	研究方法	初级生产力 [mg C/(m ² ·d)]	参考文献
热带西太平洋 (122°24'—165°00'E, 10°30'—18°20'N)	C-14 标记法	43—543	钱宏林等, 1992
热带西太平洋 (120°00'—142°00'E, 2°00'S—20°00'N)	C-14 标记法	228	陈兴群等, 2002
孟加拉湾 (78°00'—90°00'E, 8°00'—24°00'N)	C-14 标记法	350±225	Madhu <i>et al.</i> , 2006
孟加拉湾 (83°00'—91°00'E, 10°00'N)	C-14 标记法	199—367	刘华雪等, 2011

印太交汇区是典型的热带海洋气候,常年高温,季风现象显著(李艳等, 2019)。印太交汇区除近岸海

域的大部分区域属于寡营养性海域,其真光层中营养盐浓度很低。突发性海洋事件如上升流、季风、台风和内波等的发生加剧了海水垂直混合,营养盐跃层变浅会提高生产力,存在明显的物理-化学-生物海洋耦合过程(Krey, 1973)。

2 印太交汇区浮游动物生态学研究

海洋浮游动物种类繁多,数量丰富,分布广泛,是重要的海洋生物类群。在海洋生态系统中,浮游动物通过摄食浮游植物控制初级生产力水平;同时,浮游动物又被更高营养阶层的动物捕食,充当了次级生产者的角色,其群落结构、种群动态和物种多样性会影响鱼类和其他的海洋动物资源量。

2.1 印太交汇区中型浮游动物研究

目前,印太交汇区中型浮游动物群落的研究多集中于菲律宾海和热带西太平洋附近海域(表 2)。在菲律宾海的表层水温常年较高,水体层化结构稳定。由于上层海水常年缺乏营养盐补充,导致这一区域初级生产力很低。受此影响,浮游动物生物量低,季节变化不显著(孙栋等, 2017)。另外,浮游动物群落受上升流及北赤道流、北赤道逆流、亚热带逆流等大尺度海流影响很大(Dai *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2017a)。Hidaka 等(2003)研究发现,该区域浮游动物生物量在北赤道逆流区(North Equatorial Counter Current, NECC)应高于北赤道流区(North Equatorial Current, NEC)。Yang 等(2017a)和 Dai 等(2016)等得到相似的结论,即浮游动物生物量高值区出现在 NECC 区。在棉兰老流区(Mindanao Current, MC),虽然也有上升流输入营养盐,但其偏离辐散中心相对较远,上升流的影响减弱,因此形成了初级生产力和浮游动物丰度的次高值区。

在垂向分布上,菲律宾海域浮游动物的丰度随水深增加急剧减小(Dai *et al.*, 2017)。其中,桡足类丰度在浮游动物群落中贡献最大,其丰度也随水深增加而逐渐降低,但其对深层浮游生物群落的贡献比例呈增加趋势(Dai *et al.*, 2017)。在海洋上层,由于有充足的光照、适宜的水温,初级生产力水平相对较高,浮游动物丰度也相对较高;在海洋中层,由于浮游植物饵料浓度降低,浮游动物丰度急剧减小,且分布和种类组成受低氧等环境因子影响也较大;在深海区,浮游动物丰度及生物量均很低。另外,昼夜垂直移动对浮游动物群落结构具有一定的影响,磷虾类、桡足类、刺胞动物及有尾类等一些浮游动物类群的昼夜垂

表 2 印太交汇区中型浮游动物物种数量、丰度和优势类群

Tab.2 Species richness, abundance and dominant groups of zooplankton in the Indo-Pacific convergence region

调查区域	调查时间	采样方法	水层	调查对象	属、种数量	丰度范围 (个/m ³)	优势物种/类群	参考文献
热带西太平洋 (120°—135°E, 2°—23°N)	2014.08—2014.10	WP2 网	0—300 m	浮游动物	73 类 259 种	86—312	长尾基齿哲水蚤 <i>Clausocalanus furcatus</i> 等刺隆水蚤 <i>Oncaea mediterranea</i> 羽长腹剑水蚤 <i>Oithona plumifera</i>	Yang <i>et al</i> , 2017a
热带西太平洋 (130°E, 2°—21°N)	2014.08—2014.10	浮游生物 连续采样网	0—3000 m	浮游动物	13 个 类群	259—1561	桡足类 Copepoda	Dai <i>et al</i> , 2017
菲律宾海(124°—130°E, 3°—17°N)	2012.11—2012.12	大型浮游 生物网	0—200 m	浮游动物	12 个 类群	11—116	桡足类 Copepoda	代鲁平等, 2014
苏禄海 (121°29.1'E, 7°33.7'N; 121° 13.2'E, 7°26.3'N)	2000.02, 2002.11	Mocness-1 浮游 生物连续采样网	0—1000 m	浮游动物	22 类	3—1000	桡足类 Copepoda	Nishikawa <i>et al</i> , 2007
西里伯斯海 (2°25.8'N, 122°28.2'E; 5°08.0'N, 124°07.9'E)	2000.02, 2002.11	Mocness-1 浮游生 物连续采样网	0—1000 m	浮游动物	22 类	2—1000	桡足类 Copepoda	Nishikawa <i>et al</i> , 2007
苏禄海(121°22'E, 7°39'N)	2000.02	Mocness-1 浮游生 物连续采样网	0—1000 m	毛颚类	4 属 22 种	4—5	肥胖箭虫 <i>Sagitta enflata</i>	Johnson <i>et al</i> , 2006
西里伯斯海 (122°24'E, 2°33'N)	2000.02	Mocness-1 浮游生 物连续采样网	0—1000 m	毛颚类	4 属 19 种	2—3	肥胖箭虫 <i>Sagitta enflata</i> 太平洋齿箭虫 <i>Serratosagitta pacifica</i> 肥胖软箭虫 <i>Flaccisagitta enflata</i>	Johnson <i>et al</i> , 2006
菲 律 宾 海 (137°E, 3°—34°N)	1967.01—1995.12	北太平洋网	0—150 m	毛颚类	26 种	1—9	龙翼箭虫 <i>Pterosagitta draco</i> 微型中箭虫 <i>Mesosagitta minima</i> 琴形伪箭虫 <i>Pseudosagitta lyra</i>	Nagai <i>et al</i> , 2015

直移动影响了浮游动物群落的垂直分布和结构(Sun *et al*, 2019)。

浮游动物群落结构还会呈现季节性的变化。不同季节季风引发的上升流强度和上层海水营养盐水平的变化会导致显著的初级生产力季节变化, 这种季节变化可以通过上行效应影响上层浮游动物群落的时空分布(Li *et al*, 2011)。在班达海海域的研究, 从夏季东南季风期到冬季西北季风期, 浮游动物的丰度和生物量均下降(Baars *et al*, 1990; Schalk *et al*, 1990); 对该海域磷虾类的研究也发现, 与冬季相比, 夏季磷虾类的丰度更高, 物种组成更复杂(van Couwelaar, 1994)。在南海西北部的研究也发现, 不同季节季风风向的转换和上升流强度的强弱会显著影响中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)和浮游介形类(*Ostracods*)的时空分布特征(尹健强等, 2013; 廖彤晨等, 2020)。另外, 夏季浮游动物空间分布差异较大, 水深较深的海盆区浮游动物丰度显著低于陆架区, 冬季浮游动物分布则相对比较均匀(Baars *et al*, 1990; Schalk *et al*,

1990)。而在海洋深层, 理化环境相对稳定, 季风对上层浮游生态系统的影响很难传递到深层, 因此其群落几乎不存在明显的季节变化。

目前关于印太交汇区浮游动物生理生态学方面的研究较少。Yang 等(2017b)以同位素标记法研究了热带西北太平洋浮游动物群落结构营养特征, 发现浮游动物群落的同位素特征受到温度、盐度、营养盐、叶绿素等环境因子的影响, 在更大的尺度上可归因于涡流、大气固氮作用以及水团生态水文特征等的影响, 说明浮游动物的摄食受环境因子的影响。热带和亚热带西太平洋不同水层的浮游动物表现出不同的摄食特征(Dai *et al*, 2017)。在真光层, 由于浮游植物生物量较高, 浮游动物种类以植食性和杂食性种类为主; 在海洋中层, 在有缺氧区存在的条件下桡足类更易被肉食性的毛颚类等捕食, 因此该水层桡足类所占比例较低, 而肉食性的毛颚类在浮游动物群落中所占比重较大; 在深海区, 浮游动物群落依赖表层向底层沉积的有机物, 其群落中碎屑食性的种类所

占比例明显增加(Dai *et al*, 2017; Yamaguchi *et al*, 2002, 2015)。谭烨辉等(2003)在南沙群岛海区进行了浮游动物次级生产力的估算,发现水体的次级生产力平均为 72.9 mg C/(m²·d),初级生产力与浮游动物次级生产力的营养传递效率为 18%。

2.2 印太交汇区微型浮游动物研究

微型浮游动物浮游纤毛虫是海洋微食物网的重要组成部分,主要摄食微微型和微型浮游生物,同时又被中型浮游动物和鱼类幼体等所摄食,是连接微食物网和经典食物链的重要中介(Azam *et al*, 1983)。由于浮游纤毛虫粒径较小,相对于中型浮游动物有

较快的生长率、摄食率及代谢率,因此对环境变化的响应更为迅速,在海洋浮游生态系统的物质循环和能量流动中发挥重要的作用。

目前,关于印太交汇区浮游纤毛虫多样性的研究多集中于砂壳纤毛虫方面(表 3)。在热带西太平洋海域, Gómez (2007)共鉴定出砂壳纤毛虫 37 属 102 种;王超锋(2016)则鉴定出砂壳纤毛虫 33 属 76 种,优势种为纤弱细瓮虫(*Steenstrupiella gracilis*)、卢氏真铃虫(*Eutintinnus lusus-undae*)、管状真铃虫(*Eutintinnus tubulosus*)、膨大波膜虫(*Undella turgid*)等; Li 等(2018)在太平洋西边界流区共鉴定出砂壳纤毛虫 39 属 124

表 3 印太交汇区不同区域砂壳纤毛虫物种数量、丰度和优势物种组成
Tab.3 Species richness, abundance and dominant species of tintinnids in the Indo-Pacific convergence region

区域	调查时间	采样方法	属、种数量	丰度	优势物种	参考文献
热带西太平洋						
22°10'—22°30'S, 166°20'—166°40'E	2002.04—2003.03	采水	27 属 76 种	~250 个/L	拟铃虫属 <i>Tintinnopsis</i> 真铃虫属 <i>Eutintinnus</i> 棘尾拟波膜虫 <i>Parundella aculeate</i>	Dolan <i>et al</i> , 2006
30°—35°N, 138°E	2002.05	采水	28 属 64 种	20—30 个/L	网状拟网膜虫 <i>Epirocylodes reticulate</i> 酒杯类管虫 <i>Dadayiella ganymedes</i> 号角虫属 <i>Salpingella</i> 简单原纹虫 <i>Protorhabdonella simplex</i>	Gómez, 2007
30°—35°N, 138°E	2002.07	采水	28 属 51 种	-	棘尾拟波膜虫 <i>Parundella aculeate</i> 真铃虫属 <i>Eutintinnus</i>	Gómez, 2007
4°—16°N, 116°—124°E	2002.11—2002.12	采水	26 属 42 种	<20 个/L	- 开孔真铃虫 <i>Eutintinnus apertus</i> 变形条纹虫 <i>Rhabdonella amor</i>	Gómez, 2007
0°N, 160°E—170°W	2003.01	采水	21 属 43 种	<20 个/L	纤弱细瓮虫 <i>Steenstrupiella gracilis</i> 四线瓮状虫 <i>Amphorides quadrilineata</i> 棘口虫属 <i>Acanthostomella</i> 鐳形囊坎虫 <i>Ascampbelliella armilla</i>	Gómez, 2007
11°—23°N, 122°—130°E	2012.11—2012.12	采水	39 属 124 种	0—90 个/L	酒杯类管虫 <i>Dadayiella ganymedes</i> 纤弱细瓮虫 <i>Steenstrupiella gracilis</i> 福雷号角虫 <i>Salpingella faurei</i> 纤弱细瓮虫 <i>Steenstrupiella gracilis</i>	Li <i>et al</i> , 2018
11°—20°N, 126°—136°E	2015.11—2015.12	采水	28 属 56 种	<15 个/L -	斯廷细瓮虫 <i>Steenstrupiella steenstrupii</i> 简单原纹虫 <i>Protorhabdonella simplex</i>	Wang <i>et al</i> , 2019
南海						

续表

区域	调查时间	采样方法	属、种数量	丰度	优势物种	参考文献
11°—16°N, 109°30'—114°30'E	2007.08—2007.09	拖网	7 属 12 种	0—11622 个/m ²	尖形钟形虫 <i>Cyrtarocyli</i> <i>acutiformis</i>	丰美萍等, 2013
					宽口钟形虫 <i>C. eucecryphalus</i> 费瓦拟平顶虫 <i>Xystonellops</i> <i>favata</i> 南方类铃虫 <i>Codonellops</i> <i>meridionalis</i> 圆锥条纹虫 <i>Rhabdonella</i> <i>conica</i> 福雷号角虫 <i>Salpingella faurei</i> 尖锐号角虫 <i>Salpingella</i> <i>acuminata</i>	
18°50'—21°00'N, 114°20'—116°40'E	2015.06—2015.07	采水	27 属 53 种	<27 个/L -	酒杯类管虫 <i>Dadayiella</i> <i>ganymedes</i> 微细原孔虫 <i>Proplectella</i> <i>parva</i>	Wang <i>et al.</i> , 2019
东印度洋						
5°N—6°S, 80°—94°E	2012.03—2012.04	拖网	32 属 126 种	200—3000 个/L -	小棘口虫 <i>Acanthostomella</i> <i>minutissima</i> 纤弱细瓮虫 <i>Steenstrupiella</i> <i>gracilis</i> 四线瓮状虫 <i>Amphorides</i> <i>quadrilineata</i>	Zhang <i>et al.</i> , 2017
					简单原纹虫 <i>Protorhabdonella</i> <i>simplex</i> 隆胀细瓮虫 <i>Steenstrupiella</i> <i>intumescens</i> 奥氏波膜虫 <i>Undella ostenfeldi</i>	
10°N, 85°—91°E	2010.04—2010.05	采水	16 属 20 种	0—200 个/L -	佛氏真铃虫 <i>Eutintinnus</i> <i>fraknoii</i> 四线瓮状虫 <i>Amphorides</i> <i>quadrilineata</i>	Liu <i>et al.</i> , 2012

注: -: 没有数据

种, 以暖水型和广布型种类为主; Dolan 等(2006)在新喀里多尼亚(New Caledonia)附近泻湖的调查中, 共鉴定出 27 属 76 种砂壳纤毛虫, 以近岸型种类为主; Wang 等(2019)在南海陆坡区共鉴定砂壳纤毛虫 27 属 53 种, 优势种为福雷号角虫(*Salpingella faurei*)、开孔真铃虫(*Eutintinnus apertus*)、梯状网梯虫(*Climacocylis scalaroides*)和酒杯类管虫(*Dadayiella ganymedes*)等。东印度洋浮游纤毛虫的研究较少, 目前仅有两例相关报道。Liu 等(2012)调查了孟加拉湾的砂壳纤毛虫群落, 共鉴定砂壳纤毛虫 16 属 20 种; Zhang 等(2017)通过垂直拖网的方式, 在东印度洋共鉴定出砂壳纤毛虫 32 属 126 种。

在印太交汇区, 无壳纤毛虫是浮游纤毛虫群落的优势类群, 砂壳纤毛虫占浮游纤毛虫总丰度的比例较低。在小笠原群岛(Bonin Islands)西部海域, 砂壳纤毛虫对浮游纤毛虫总丰度的贡献为 6.1%—30.9%, 平均为 13.4% (Endo *et al.*, 1983); Gómez(2007)对亲潮

和黑潮交汇区、菲律宾海、苏禄海(Sulu Sea)和南海进行的调查发现, 砂壳纤毛虫占浮游纤毛虫丰度的 10%—20%; Wang 等(2019, 2020)通过对南海北部陆坡区和热带西太平洋的浮游纤毛虫群落结构调查, 发现砂壳纤毛虫丰度占浮游纤毛虫总丰度比例低于 10%。关于印太交汇区无壳纤毛虫的研究, 目前多集中在粒径大小方面。根据粒径的大小, 浮游无壳纤毛虫可以分为三类: 小粒径(<20 μm)纤毛虫、中粒径(20—30 μm)纤毛虫和大粒径(>30 μm)纤毛虫。在热带西太平洋的三座海山区(雅浦海山、卡洛琳海山和马里亚纳海山), 小粒径无壳纤毛虫丰度占无壳纤毛虫总丰度的 35%以上, 中粒径和大粒径纤毛虫丰度比例均小于小粒级无壳纤毛虫(王超锋, 2019)。在热带西太平洋和南海北部, 小粒级无壳纤毛虫占无壳纤毛虫总丰度的比例多在 40%以上(Wang *et al.*, 2019, 2020)。

资料表明, 在大洋中叶绿素 *a* 浓度是影响浮游纤毛虫分布的一个重要因子。Gómez (2007)调查了苏禄

海浮游纤毛虫的分布趋势,发现砂壳纤毛虫丰度在叶绿素 *a* 最高的 50 m 层处升高;在新喀里多尼亚(New Caledonia)近岸的泻湖中,砂壳纤毛虫丰度与叶绿素 *a* 浓度呈显著正相关(Dolan *et al*, 2006)。在太平洋西边界流区,砂壳纤毛虫丰度的高值出现在次表层叶绿素最大层上层(Li *et al*, 2018)。Liu 等(2012)研究了孟加拉湾(Bay of Bengal)的砂壳纤毛虫分布,发现砂壳纤毛虫在水体中的垂直分布模式与叶绿素 *a* 浓度相似,先随水深的增加而升高,在叶绿素最大层 75 m 处达到峰值,然后再随水深增加而降低。Zhang 等(2017)等研究发现,东印度洋砂壳纤毛虫丰度与叶绿素 *a* 浓度呈显著正相关。

3 展望

国际上关于印太交汇区浮游生物的研究已经有一定的进展,不过国内该方面的研究起步较晚,且研究也很少。未来国内的相关研究可以从如下几方面展开:

(1) 在印太交汇区进行生态学本底调查,摸清浮游生物的物种组成及生物量的时空分布和变化规律;结合物理、化学等调查手段,掌握物种组成和生物量的时空变化与环境因子之间的关系,揭示浮游生物群落结构的时空演变格局、生态位特征和环境影响机制;

(2) 从生物地球化学循环的角度,针对浮游植物对碳及相关生源要素的同化、颗粒—溶解—胶体有机碳形态间的转化、浮游动物的摄食、颗粒沉降等展开研究,探索碳及氮(N)、磷(P)、硅(Si)等生源要素的循环过程及影响机制;

(3) 从生态系统功能特征的角度,在初级生产、次级生产两个层面展开研究,探索该区域初级生产和次级生产水平及关键驱动因素;开展浮游生物粒径谱相关研究,对浮游生物群落的生物量分布和摄食粒径范围进行探索,掌握印太交汇区能量流动和营养传递的特征;通过现场培养实验及模型研究,探讨印太交汇区浮游生物多样性对生产力水平的影响,理解浮游生物多样性与生态系统功能之间的关系;

(4) 通过现场的围隔实验和室内受控培养,研究海洋酸化和升温等对印太交汇区浮游植物固碳和储碳过程的影响机理,关注在全球气候变化背景下印太交汇区浮游植物碳汇的响应机制。

参 考 文 献

丰美萍, 张武昌, 于莹等, 2013. 夏季南海西部砂壳纤毛虫水平分布. 热带海洋学报, 32(3): 86—92
王磊, 冷晓云, 孙庆杨等, 2015. 春季季风间期巽他陆架和

马六甲海峡表层海水浮游植物群落结构研究. 海洋学报, 37(2): 120—129
王超锋, 2016. 热带西太平洋及南海北部陆坡海区浮游纤毛虫的垂直分布. 北京: 中国科学院大学(海洋研究所)硕士学位论文, 45—46
王超锋, 2019. 北半球不同海区浮游纤毛虫的垂直分布及群落结构变化. 北京: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所)博士学位论文, 38—42
尹健强, 黄良民, 李开枝等, 2013. 南海西北部陆架区沿岸流和上升流对中华哲水蚤分布的影响. 海洋学报, 35(2): 143—153
卢峰, 郑彬, 2011. 亚印太交汇区海表温度的分布和变化特征及其对中国降水的影响. 海洋学报, 33(5): 39—46
代晟, 孙晓霞, 梁俊华等, 2017. 2016年春季西太平洋M2海山浮游植物粒级结构与初级生产力研究. 海洋与湖沼, 48(6): 1456—1464
代鲁平, 李超伦, 孙晓霞等, 2014. 2012年冬季菲律宾海浮游动物丰度和生物量的水平分布. 海洋与湖沼, 45(6): 1225—1233
刘华雪, 柯志新, 宋星宇等, 2011. 春季季风转换期间孟加拉湾的初级生产力. 生态学报, 31(23): 7007—7012
孙军, 林茂, 陈孟仙等, 2016. 全球气候变化下的海洋生物多样性. 生物多样性, 24(7): 737—738
孙栋, 王春生, 2017. 深远海浮游动物生态学研究进展. 生态学报, 37(10): 3219—3231
李艳, 孙萍, 袁超等, 2019. 东印度洋南部春季网采浮游植物群落特征及长期变化. 海洋环境科学, 38(6): 825—832
张文静, 孙晓霞, 陈芸燕等, 2016. 2014年冬季热带西太平洋雅浦Y3海山浮游植物叶绿素 *a* 浓度及粒级结构. 海洋与湖沼, 47(4): 739—747
陈卓, 孙军, 张桂成, 2018. 2016年秋季热带西太平洋网采浮游植物群落结构. 海洋科学, 42(7): 114—130
陈兴群, 张明, 陈其焕, 2002. 热带太平洋西部及赤道暖水区的初级生产力. 海洋学报, 24(1): 86—95
陈纪新, 黄邦钦, 柳欣, 2013. 海洋浮游生物原位观测技术研究进展. 地球科学进展, 28(5): 572—576
柯志新, 黄良民, 李刚等, 2012. 春末夏初巽他陆架表层水体的叶绿素粒级结构及其和营养盐的关系. 海洋学报, 34(3): 190—196
袁超, 2015. 春季季风间期热带东印度洋叶绿素 *a*、初级生产力与光合荧光特征. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文, 23—25
钱宏林, 齐雨藻, 1992. 1986年11-12月热带西太平洋初级生产力的估算. 暨南大学学报(自然科学), 13(3): 124—129
郭术津, 孙晓霞, 郑珊等, 2018. 热带西太平洋Y3和M2海山区网采浮游植物群落结构特征. 海洋科学, 42(10): 31—40
焦念志, 王荣, 1993. 海洋初级生产力的结构. 海洋与湖沼, 24(4): 340—344
廖彤晨, 尹健强, 李开枝等, 2020. 南海西北部夏冬季浮游介形类的分布及其影响因素. 热带海洋学报, 39(2): 77—87
谭辉辉, 黄良民, 尹健强, 2003. 南沙群岛海区浮游动物次级生产力及转换效率估算. 热带海洋学报, 22(6): 29—34
薛冰, 孙军, 丁昌玲等, 2016. 2014年春季季风间期东印度洋赤道及其邻近海域硅藻群落. 海洋学报, 38(2):

- 112—120
- Azam F, Fenchel T, Field J G *et al*, 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series*, 10: 257—263
- Baars M A, Sutomo A B, Oosterhuis S S *et al*, 1990. Zooplankton abundance in the eastern Banda Sea and northern Arafura Sea during and after the upwelling season, August 1984 and February 1985. *Netherlands Journal of Sea Research*, 25(4): 527—543
- Bajarias F F A, 2000. Phytoplankton in the surface layers of the South China Sea, Area III: Western Philippines. In: *Proceedings of the 3rd Technical Seminar on Marine Fisheries Resources Survey in the South China*. Bangkok: Southeast Asian Fisheries Development Center, 220—234
- Barton A D, Dutkiewicz S, Flierl G *et al*, 2010. Patterns of diversity in marine phytoplankton. *Science*, 327(5972): 1509—1511
- Borja V M, Furio E F, Gatdula N C *et al*, 2019. Occurrence of harmful algal blooms caused by various phytoplankton species in the last three decades in Manila Bay, Philippines. *Philippines Journal of Nature and Science*, 24: 80—90
- Briggs J C, Bowen B W, 2013. Marine shelf habitat: biogeography and evolution. *Journal of Biogeography*, 40(6): 1023—1035
- Brooks T M, Mittermeier R A, da Fonseca G A B *et al*, 2006. Global biodiversity conservation priorities. *Science*, 313(5783): 58—61
- Choudhury A K, Pal R, 2010. Phytoplankton and nutrient dynamics of shallow coastal stations at Bay of Bengal, Eastern Indian coast. *Aquatic Ecology*, 44: 55—71
- Dai L P, Li C L, Tao Z C *et al*, 2017. Zooplankton abundance, biovolume and size spectra down to 3000 m depth in the western tropical North Pacific during autumn 2014. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 121: 1—13
- Dai L P, Li C L, Yang G *et al*, 2016. Zooplankton abundance, biovolume and size spectra at western boundary currents in the subtropical North Pacific during winter 2012. *Journal of Marine Systems*, 155: 73—83
- Dolan J R, Jacquet S, Torréton J P, 2006. Comparing taxonomic and morphological biodiversity of tintinnids (planktonic ciliates) of New Caledonia. *Limnology and Oceanography*, 51(2): 950—958
- Endo Y, Hasumoto H, Taniguchi A, 1983. Microzooplankton standing crop in the Western Subtropical Pacific off the Bonin Islands in winter, 1980. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 39(4): 185—191
- Gao C L, Fu M Z, Song H J *et al*, 2018. Phytoplankton pigment pattern in the subsurface chlorophyll maximum in the South Java coastal upwelling system, Indonesia. *Acta Oceanologica Sinica*, 37(12): 97—106
- Gómez F, 2007. Trends on the distribution of ciliates in the open Pacific Ocean. *Acta Oecologica*, 32(2): 188—202
- Hidaka K, Kawaguchi K, Tanabe T *et al*, 2003. Biomass and taxonomic composition of micronekton in the western tropical-subtropical Pacific. *Fisheries Oceanography*, 12(2): 112—125
- Johnson T B, Nishikawa J, Terazaki M, 2006. Community structure and vertical distribution of chaetognaths in the Celebes and Sulu Seas. *Coastal Marine Science*, 30(1): 360—372
- Kannan L, Vasantha K, 1992. Microphytoplankton of the Pitchavaram mangals, southeast coast of India: species composition and population density. *Hydrobiologia*, 247(1—3): 77—86
- Krey J, 1973. Primary production in the Indian Ocean I. In: Zeitzschel B, Gerlach S A eds. *The Biology of the Indian Ocean*. Berlin, Heidelberg: Springer, 115—126
- Li K Z, Yin J Q, Huang L M *et al*, 2011. Distribution and abundance of thaliaceans in the northwest continental shelf of South China Sea, with response to environmental factors driven by monsoon. *Continental Shelf Research*, 31(9): 979—989
- Li H B, Zhang W C, Zhao Y *et al*, 2018. Tintinnid diversity in the tropical West Pacific Ocean. *Acta Oceanologica Sinica*, 37(10): 218—228
- Liu H X, Li G, Huang L M *et al*, 2012. Community structure and abundance of tintinnids in the Bay of Bengal during the spring. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 7(4): 407—411
- Madhu N V, Jyothibabu R, Maheswaran P A *et al*, 2006. Lack of seasonality in phytoplankton standing stock (chlorophyll *a*) and production in the western Bay of Bengal. *Continental Shelf Research*, 26(16): 1868—1883
- Messié M, Radenac M H, 2006. Seasonal variability of the surface chlorophyll in the western tropical Pacific from SeaWiFS data. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53(10): 1581—1600
- Nagai N, Tadokoro K, Kuroda K *et al*, 2015. Latitudinal distribution of chaetognaths in winter along the 137°E meridian in the Philippine Sea. *Plankton and Benthos Research*, 10(3): 141—153
- Nishikawa J, Matsuura H, Castillo L V *et al*, 2007. Biomass, vertical distribution and community structure of mesozooplankton in the Sulu Sea and its adjacent waters. *Deep-Sea Research II*, 54(1—2): 114—130
- Purvis A, Hector A, 2000. Getting the measure of biodiversity. *Nature*, 405(6783): 212—219
- Schalk P H, Witte J I, Budihardjo S *et al*, 1990. Monsoon influences on micronekton of the Banda Sea (Indonesia). *Netherlands Journal of Sea Research*, 25(4): 601—610
- Simon N, Cras A L, Foulon E *et al*, 2009. Diversity and evolution of marine phytoplankton. *Comptes Rendus Biologies*, 332(2—3): 159—170
- Sun D, Zhang DS, Zhang RY *et al*, 2019. Different vertical distribution of zooplankton community between North Pacific Subtropical Gyre and Western Pacific Warm Pool: its implication to carbon flux. *Acta Oceanologica Sinica*, 38(6): 32—45
- Tilman D, Knops J, Wedin D *et al*, 1997. The influence of

- functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, 227(5330): 1300—1302
- Vadrucci M R, Vignes F, Fiocca A *et al*, 2003. Space-time patterns of co-variation of biodiversity and primary production in phytoplankton guilds of coastal marine environments. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems*, 13(6): 489—506
- van Couwelaar M, 1994. Vertical distribution and feeding pattern of Euphausiacea (Crustacea) in the eastern Banda Sea (Indonesia) during the SE and NW monsoons. *Journal of Plankton Research*, 16(12): 1717—1740
- Wang CF, Li HB, Xu ZQ *et al*, 2020. Difference of planktonic ciliate communities of the tropical West Pacific, the Bering Sea and the Arctic Ocean. *Acta Oceanologica Sinica*, 39(4): 9—17
- Wang C F, Li H B, Zhao L *et al*, 2019. Vertical distribution of planktonic ciliates in the oceanic and slope areas of the western Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 167: 70—78
- Yamaguchi A, Matsuno K, Homma T, 2015. Spatial changes in the vertical distribution of calanoid copepods down to great depths in the North Pacific. *Zoological Studies*, 54(1): 13
- Yamaguchi A, Watanabe Y, Ishida H *et al*, 2002. Structure and size distribution of plankton communities down to the greater depths in the western North Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(24—25): 5513—5529
- Yang G, Li C L, Guilini K *et al*, 2017a. Regional patterns of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ stable isotopes of size-fractionated zooplankton in the western tropical North Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 120: 39—47
- Yang G, Li C L, Wang Y Q *et al*, 2017b. Spatial variation of the zooplankton community in the western tropical Pacific Ocean during the summer of 2014. *Continental Shelf Research*, 135: 14—22
- Yap L G, Azanza R V, Talaue-McManus L, 2004. The community composition and production of phytoplankton in fish pens of Cape Bolinao, Pangasinan: a field study. *Marine Pollution Bulletin*, 49(9—10): 819—832
- Yap-Dejeto L G, Batula H S, 2016. Bloom of *Trichodesmium* (Oscillatoriales, Phormidiaceae) and seasonality of potentially harmful phytoplankton in San Pedro Bay, Leyte, Philippines. *Revista de Biología Tropical*, 64(2): 897—911
- Zhang C X, Sun J, Wang D X *et al*, 2017. Tintinnid community structure in the eastern equatorial Indian Ocean during the spring inter-monsoon period. *Aquatic Biology*, 26: 87—100

RESEARCH PROGRESS ON PHYTOPLANKTON AND ZOOPLANKTON ECOLOGY IN INDO-PACIFIC CONVERGENCE REGION

SUN Xiao-Xia^{1, 2, 4, 5}, GUO Shu-Jin^{1, 2, 3, 4}, LIU Meng-Tan^{1, 2, 3, 4}, LI Hai-Bo^{2, 3, 4}

(1. Jiaozhou Bay Marine Ecosystem Research Station, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Marine Ecology and Environmental Science Laboratory, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Marine plankton is an important part of marine ecosystem, including mainly phytoplankton and zooplankton. As primary producers in the ocean, phytoplankton converts solar energy into organic energy via photosynthesis, which initiates the circulation of material and energy flow in the ocean. Zooplankton are important consumers in the ocean, feeding on phytoplankton in secondary production process and transferring the organic energy to the upper trophic level through the food chain. The study of marine plankton ecology is important for the comprehensive understanding on the state of marine ecosystem. The Indo-Pacific convergence region is a hotspot of biodiversity research in the world, but the study of plankton ecology is still not sufficient in this area. Therefore, in this paper, the study of plankton ecology in this area, including community structure, biomass, the size fraction and the primary production of phytoplankton, the community structure of zooplankton and its influencing factors are reviewed. In addition, the future research directions of phytoplankton and zooplankton ecology in this area are prospected. This review can provide a reference for scientists in the research field.

Key words phytoplankton; zooplankton; Indo-Pacific convergence region; community structure; biomass