

文章编号: 1000-0615(2019)09-1963-09

DOI: 10.11964/jfc.20190711859

人工鱼礁对中小型浮游动物昼夜变化的影响

杜飞雁*, 王亮根, 丁玲, 宁加佳, 李亚芳,
徐磊, 黄德练, 贾晓平

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东省渔业生态环境重点开放实验室,
农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站, 广东广州 510300)

摘要: 浮游动物有明显的昼夜垂直移动现象, 这种生态习性会导致摄食浮游动物的某些鱼类昼夜垂直移动。为分析人工鱼礁对中小型浮游动物昼夜变化的影响, 于2018年11月在防城港人工鱼礁区及附近海域进行了1个昼夜的中小型浮游动物采样, 获取了14份样品。结果显示: (1)礁区和非礁区浮游动物种类组成相似度高、更替率低, 且主要优势种相同, 属于同一生态类型; (2)在人工鱼礁流场效应的作用下, 礁区浮游动物的数量和多样性高于非礁区; (3)非礁区浮游动物数量的昼夜变化明显, 呈明显的正弦曲线, 以16:00数量最高, 8:00最低, 其垂直运动规律明显, 可分为4:00~20:00的运动期和20:00~次日4:00的稳定期; (4)在礁体上方流速较快的水平层的阻隔作用下, 礁区浮游动物数量始终处于波动状态, 没有明显的昼夜垂直变化规律, 在礁区上层保持较高的数量, 可提升集鱼效果、促进生产力转换; (5)聚类分析和排序表明, 礁区浮游动物为一个群落类型。而非礁区中小型浮游动物可分2个群落类型, 一个是白天随浮游植物而上浮的以植食性种类为主要特征种的群落类型, 另一个是晚上植食性种类下沉后以肉食性种类为主要特征种的群落类型。

关键词: 中小型浮游动物; 昼夜变化; 人工鱼礁效应; 防城港

中图分类号: S 931

文献标志码: A

浮游动物是海洋食物网中的关键环节, 它们下行控制初级生产力, 上行被经济鱼类等高层级消费者摄食, 在生态系统结构和生源要素循环中扮演着重要角色。中小型浮游动物具有繁殖快、生命周期短、产量高、粒径小的特点, 其对浮游植物的摄食压力会超过大型浮游动物, 对海洋初级生产力的利用大于大型浮游动物^[1]。此外, 小型桡足类是仔稚鱼最重要的开口饵料, 作为基础饵料比大型桡足类更具特殊意义, 因此, 其数量是判断经济鱼类资源量的重要依据^[2-4]。海洋牧场是在特定海域通过投放人工鱼礁、构建海藻场等方式, 统筹海域内部各功能区的功能, 充分利用海域生产力, 人为

营造出一种适于渔业资源增长的生境, 并对此进行科学管理的人工渔场^[5]。人工鱼礁是人们为了诱集鱼类, 保护、增殖鱼类等水产资源, 改善水域环境, 进行休闲渔业活动等而有意识地设置于预定水域的构造物。鱼礁投放后, 其周围形成的涡流能促使浮游生物和附着生物的生长, 具有明显的饵料效应, 也是鱼礁能诱集鱼类的原因之一^[6]。浮游动物有明显的昼夜垂直移动现象, 这种生态习性不仅改变了周围的环境, 也会导致了摄食浮游动物的某些鱼类的昼夜垂直移动^[7]。而人工鱼礁投放对浮游动物昼夜变化的影响, 目前尚未见报道。本实验通过对礁区和非礁区浮游动物昼夜变化的差异进行初

收稿日期: 2019-07-01 修回日期: 2019-08-15

资助项目: 防城港钢铁项目渔业生态保护修复工程(01-154)

通信作者: 杜飞雁, E-mail: feiyanegg@163.com

步分析, 以期为深入了解人工鱼礁对浮游动物生态习性的影响, 掌握人工鱼礁的生态效应提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 站位设置及取样方法

2018年11月10日—11日在广西防城港海域的人工鱼礁区(21°25'22"N、108°13'8"E)和非人工鱼礁区(21°22'44"N、108°13'57"E)各设置1个测站, 使用中型浮游生物网(网口面积0.2 m², 网目大小160 μm)每隔4个小时对浮游动物进行10 m至表层的垂直采样, 共采获样品14份。样品的处理、保存、计数等均按《海洋调查规范》^[8]进行。

1.2 数据分析

采用优势度计算浮游动物优势种^[9], 其计算式为: $Y=(n_i/N) \times f_i$; 式中: n_i 为第*i*种的个体数量; N 为某站总浮游动物个体数; f_i 为某种生物的出现频率。选用种类更替率(R)进行种类组成的时段或区域变化研究^[10], 其计算式为: $R(\%)=[(a+b-2c)/(a+b-c)] \times 100\%$; 式中, a 与 b 分别为相邻2个时段或区域的种数, c 为相邻2个时段或区域共同的种数。用杰卡德(Jaccard)种类相似性指数进行群落相似性的研究, 其表示式为: $J_s(\%) = \frac{c}{a+b-c} \times 100\%$; 式中: a 为样品*A*的生物种类数(或属数), b 为样品*B*的生物种类数(或属数), c 为样品*A*和*B*的共有种数(或属数)。

采用Shannon-Wiener指数 H' 、Pielou均匀度 J 研究浮游动物多样性特征^[11]。Shannon-Wiener指数的表达式为: $H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$, $P_i = N_i/N$; 均匀度指数的表达式为: $J = H'/\log_2 S$, 式中, S 为样品中的种类总数, P_i 为第*i*种的个体数(n_i)与总个体数(N)的比值(n_i/N)。

通过聚类分析和多维尺度排序, 分析人工鱼礁投放对浮游动物群落结构的影响。为减少机会种对群落结构的干扰, 首先将人工鱼礁区和非礁区浮游动物栖息密度进行4次方根转换, 然后采用Bray-Curtis相似性指数, 建立站位×种类的二维矩阵, 进而采用等级聚类(hierarchical clustering)和非度量多维标度排序MDS(non-metric multi-dimensional scaling)分析; 通过SIMPER(species contributions to similarity)了解群落种类组成的相似性和表征群落特征的物种(贡献率≥8%)。

以上分析通过PRIMER 6.0软件完成。

2 结果

2.1 种类组成和优势种

观测样品共鉴定出浮游动物114种(类), 分属水螅水母类、管水母类、枝角类、桡足类、端足类、十足类、糠虾类、等足类、介形类、翼足类、毛颚类、有尾类、海樽类和浮游幼虫(体)等14个类群。其中, 桡足类出现种类数最多, 为50种; 浮游幼虫(体)次之, 出现39类; 其他类群种类数均较少。

礁区共出现浮游动物91种, 除翼足类没有出现外, 其余类群均有出现。非礁区出现92种, 除等足类外, 其他类群均有出现。2个区域共有种为73种, 种类更替率为33.6%, 杰卡德种类相似性为63.4%。

以优势度 $Y \geq 0.02$ 为划分标准^[11], 防城港海域中小型浮游动物优势种组成较为复杂(表1)。礁区浮游动物优势种由尖额谐猛水蚤(*Euterpina acutifrons*)、桡足类幼虫(Copepoda larvae)、鸟喙尖头蚤(*Penilia avirostris*)、长尾类幼体(Macrura larvae)、红小毛猛水蚤(*Microsetella rosea*)、强额孔雀水蚤(*Pavocalanus crassirostris*)和长腹剑水蚤幼体(*Oithona larvae*)等15种组成, 桡足类和浮游幼虫(体)均有7种, 枝角类1种。其中, 第一优势种尖额谐猛水蚤的优势地位不明显, 优势度大于0.05的优势种有8种。非礁区浮游动物优势种有14种, 分别为桡足类幼虫、尖额谐猛水蚤、红小毛猛水蚤、鸟喙尖头蚤、瘦拟哲水蚤等, 其中有7种桡足类、6种浮游幼虫(体)和1种枝角类。第一优势种桡足类幼虫的优势地位非常明显, 优势度大于0.05的优势种只有5种。优势种组成中, 2个区域的共有优势种有10种, 优势种更替率为47.4%。

从种类组成和优势种组成来看, 礁区和非礁区浮游动物均以桡足类为主, 种类相似度较高, 相似性指数、种类和优势种的更替率分别为63.4%、33.6%和47.4%; 对群落起主导作用的主要优势种(前二位)组成也基本相同, 均为尖额谐猛水蚤和桡足类幼虫, 表明礁区和非礁区的中小型浮游动物属于同一生态类型。

2.2 数量变化

礁区浮游动物平均栖息密度和生物量分别

表 1 防城港浮游动物优势种组成

Tab. 1 Composition of the dominant zooplanktons in the Fangcheng Harbor

礁区优势种	dominant species in reef area	优势度 Y	非礁区优势种	dominant species in control area	优势度 Y
尖额诸猛水蚤	<i>Euterpina acutifrons</i>	0.10	桡足类幼虫	Copepoda larvae	0.19
桡足类幼虫	Copepoda larvae	0.09	尖额诸猛水蚤	<i>E. acutifrons</i>	0.09
鸟喙尖头蚤	<i>Penilia avirostris</i>	0.09	红小毛猛水蚤	<i>M. rosea</i>	0.08
长尾类幼体	Macrura larvae	0.09	鸟喙尖头蚤	<i>P. avirostris</i>	0.07
红小毛猛水蚤	<i>Microsetella rosea</i>	0.08	瘦拟哲水蚤	<i>Paracalanus gracilis</i>	0.05
强额孔雀水蚤	<i>Pavocalanus crassirostris</i>	0.07	长腹剑水蚤幼体	Oithona larvae	0.04
双壳类幼虫	Bivalve larvae	0.06	强额孔雀水蚤	<i>P. crassirostris</i>	0.04
长腹剑水蚤幼体	Oithona larvae	0.05	隆剑水蚤幼体	<i>Oncaea larvae</i>	0.04
无节幼虫(桡足类)	Nauplius larvae	0.04	双壳类幼虫	Bivalve larvae	0.03
短角长腹剑水蚤	<i>O. brevicornis</i>	0.03	无节幼虫(桡足类)	Nauplius larvae	0.02
锥形宽水蚤	<i>Temora turbinata</i>	0.03	锥形宽水蚤	<i>T. turbinata</i>	0.02
瘦拟哲水蚤	<i>P. gracilis</i>	0.02	背突隆剑水蚤	<i>O. clevei</i>	0.02
肥胖三角蚤	<i>Evadne tergestina</i>	0.02	拟哲水蚤幼体	Paracalanus larvae	0.02
腹足类幼虫	Gastropoda larvae	0.02	中隆剑水蚤	<i>Oncaea media</i>	0.02
多毛类担轮幼体	Polychaeta larvae	0.02			

为40 189 个/m³和4 219.94 mg/m³, 非礁区为22 962 个/m³和3 068.74 mg/m³, 礁区浮游动物栖息密度明显高于非礁区(配对T检验, $P < 0.05$), 表明人工鱼礁的饵料效应明显(表2)。栖息密度和生物量的比值, 可以反映出生物个体的大小。防城港观测海域人工鱼礁区浮游动物平均栖息密度和生物量的数量比为9.5个/mg, 而非礁区两者的

数量比为7.5 个/mg, 表明礁区浮游动物的个体小于非礁区。

礁区和非礁区浮游动物数量变化明显, 8:00 礁区和非礁区10 m以浅水层内浮游动物数量均最低(图1)。礁区浮游动物数量昼夜变化幅度虽相对较小($SD_{\text{栖息密度}}=11\ 852$, $SD_{\text{生物量}}=1\ 468$), 但始终处于波动中, 没有明显的稳定期。非礁区浮

表 2 防城港浮游动物数量和多样性指数

Tab. 2 Density, biomass and diversity of zooplankton in the Fangcheng Harbor

时间 time	栖息密度/(个/m ³) density		生物量/(mg/m ³) biomass		多样性指数 diversity index		均匀度 evenness index	
	礁区 reef area	非礁区 control area	礁区 reef area	非礁区 control area	礁区 reef area	非礁区 control area	礁区 reef area	非礁区 control area
12:00	59 911	31 415	3 370.83	4 009.17	4.05	4.13	0.71	0.75
16:00	31 989	48 971	3 626.00	5 586.36	4.55	4.22	0.79	0.78
20:00	48 650	19 971	5 290.00	2 823.33	4.27	4.42	0.75	0.75
0:00	35 949	17 169	4 271.00	3 624.00	4.33	4.09	0.77	0.76
4:00	43 368	19 541	6 950.91	3 203.33	4.46	4.03	0.83	0.75
8:00	23 378	837	2 593.33	295.00	4.34	3.82	0.77	0.76
12:00	38 080	22 834	3 437.50	1 940.00	4.26	3.91	0.75	0.69
平均值 average	40 189	22 962	4 219.94	3 068.74	4.32	4.09	0.77	0.75
标准差 SD	11 852	14 672	1 468	1 662	0.16	0.20	0.03	0.02

游动物数量昼夜变化幅度较大($SD_{\text{栖息密度}}=14\ 672$, $SD_{\text{生物量}}=1\ 662$)、规律明显,有明显的运动期和

稳定期。

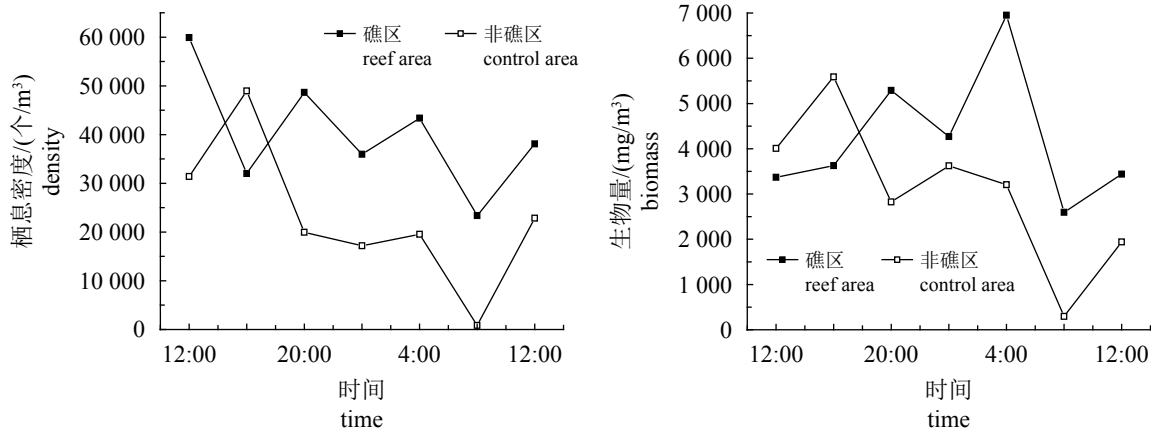


图1 防城港人工鱼礁区和非礁区浮游动物数量昼夜变化

Fig. 1 Diel changes of zooplankton density and biomass in reef area and control area in the Fangcheng Harbor

2.3 物种多样性

礁区和非礁区浮游动物多样性均处于较高的水平(图2),平均多样性指数和均匀度分别为4.32、4.09和0.77、0.75,礁区略高于非礁区。随着浮游动物的垂直变化,与数量昼夜变化一致,多样性指数的变化幅度仍是礁区略低于非礁区($SD_{\text{礁区}}=0.16$, $SD_{\text{非礁区}}=0.20$)(表2)。

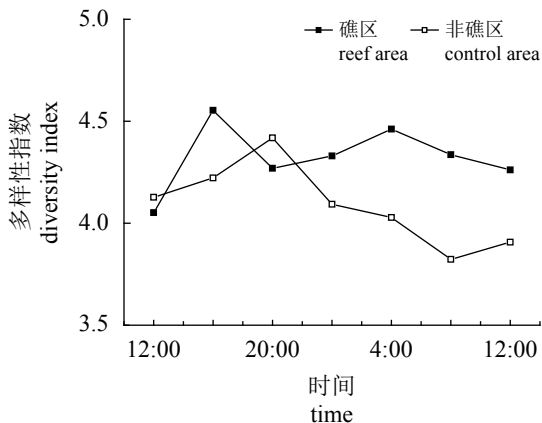


图2 浮游动物多样性指数昼夜变化

Fig. 2 Diel changes of zooplankton diversity index in the Fangcheng Harbor

礁区和非礁区浮游动物多样性指数的变化趋势与数量变化趋势相似。礁区在16:00最高,12:00最低;非礁区在20:00最高,8:00最低。

2.4 群落结构

聚类分析和多维尺度排序表明,礁区与非

礁区浮游动物分化明显(图3)。礁区浮游动物为1个群落,群落种类组成的平均相似度为70.91%,以桡足类幼虫和鸟喙尖头蚤为特征种(栖息密度贡献率>7%);非礁区浮游动物则分化为2个群落:以拟哲水蚤幼体、红小毛猛水蚤、桡足类幼体和尖额谐猛水蚤为特征种的凌晨-早晨群落(群落III)和以桡足类幼体、强额孔雀水蚤为特征种的中午-晚上群落(群落I)。

SIMPER分析表明,非礁区的群落I和群落III之间种类组成的平均不相似度为54.69。群落I种类组成的平均相似度为67.54,以桡足类幼虫、强额孔雀水蚤为特征种,其中植食性的强额孔雀水蚤仅出现在群落I中。群落III种类组成的平均相似度为42.44,以拟哲水蚤幼体、红小毛猛水蚤、桡足类幼虫和尖额谐猛水蚤为特征种,其中,拟哲水蚤幼体仅出现在群落III中,红小毛猛水蚤和尖额谐猛水蚤为肉食性的浮游动物。

3 讨论

从人工鱼礁区和非人工鱼礁区中小型浮游动物的种类组成和更替情况来看,防城港观测区的浮游动物属于同一生态类型,但在个体大小、数量及其昼夜变化、物种多样性和群落结构等方面,礁区和非礁区中小型浮游动物存在明显的差异。浮游动物的种类组成和分布特征与水温、盐度、溶解氧、叶绿素a、pH和营养盐等生态因子密切相关,其中,温度、盐度是影响浮游动物分布的最重要因子^[12]。据2017年11月

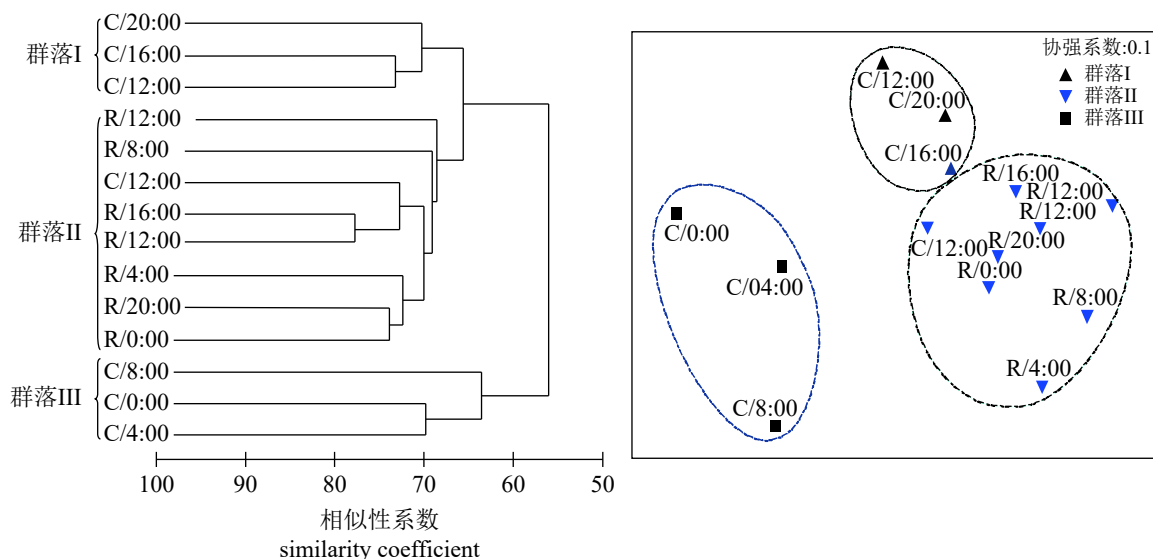


图3 浮游动物群落结构的聚类分析和排序

C-非礁区, R-礁区

Fig. 3 Cluster analysis and MDS ordination of zooplankton in the Fangcheng Harbor

C-control area, R- reef area

现场实测数据, 礁区和非礁区温度分别为 24.9°C 和 25.0°C 、盐度分别为 25.38 和 25.66 , 表明礁区和非礁区温度和盐度没有明显差异^①。因此, 人工鱼礁投放带来的物理环境变化, 是造成两个区域浮游动物差异的主要原因。

3.1 人工鱼礁流场效应对浮游动物数量和多样性水平的影响

人工鱼礁的生态效应主要通过其流场效应来实现^[13]。人工鱼礁通过其流场效应所产生的上升流和背涡流, 能促进上下层海水交换, 加快营养物质循环速度, 提高海域新生产力水平、改善海域生态环境, 从而养护渔业资源^[14]。人工鱼礁在潮流的作用下, 其迎流面会产生上升流, 在其前面和上面形成一个流速较快的上升流区; 另一方面, 礁体周围会形成一个流速缓慢的背涡流区^[15]。上升流将底层的营养盐和沉积物带到光照充足的水面附近, 促进浮游生物繁殖, 提高海洋初级生产力和基础饵料水平, 起到聚集海洋生物的作用^[16]。防城港观测区内, 人工鱼礁区浮游动物平均栖息密度和生物量分别为 $40\ 189$ 个/ m^3 和 $4\ 219.94$ mg/ m^3 , 而非礁区分别为 $22\ 962$ 个/ m^3 和 $3\ 068.74$ mg/ m^3 , 礁区浮游动物

栖息密度明显高于非礁区; 礁区浮游动物平均多样性指数和均匀度分别为 4.32 和 0.77 , 非礁区浮游动物多样性(4.09 和 0.75)也低于礁区。因此, 正是在人工鱼礁上升流的作用之下, 使防城港人工鱼礁区浮游动物数量和生物多样性水平高于非礁区。天津、象山港、寻山海域人工鱼礁区浮游植物和浮游动物数量和生物多样性, 也高于对照区^[12, 17-19]。

3.2 浮游动物个体差异与人工鱼礁的关系

栖息密度和生物量的比值, 可以反映出生物个体大小。防城港观测海域人工鱼礁区浮游动物平均栖息密度和生物量的数量比为 9.5 个/mg, 而非礁区两者的数量比为 7.5 个/mg, 表明人工鱼礁区中小型浮游动物个体小于非人工鱼礁区。Loick等^[20]通过研究发现越南上升流海区的浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随个体体型的变大而增加, 并由此推论更大的浮游生物拥有更高的营养生态位。许多研究已经指出在海洋浮游食物网中存在以个体大小为基础的消费关系, 浮游生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 随个体体型的变大而增加^[20-22]。蔡德陵等^[23]对渤海分粒级的浮游动物的碳稳定同位素(^{13}C)研究发现浮游生物的营养层次随颗粒的增大而升高。通

① 中国水产科学研究院南海水产研究所, 防城港钢铁项目渔业生态保护修复工程人工鱼礁效果跟踪监测与评估报告, 2018.9

过浮游动物个体大小与营养生态位的关系可知,防城港人工鱼礁区中小型浮游动物的营养生态位低于非礁区。

从2017年防城港人工鱼礁区游泳生物刺网调查结果来看,秋季人工鱼礁区游泳生物渔获率为531.7个/h和7.183 kg/h,对照区为10个/h和0.411 kg/h^①。礁区和非礁区游泳生物尾数和重量的比值分别为74个/kg和24个/kg,表明人工鱼礁区游泳生物个体明显小于非礁区。渔业资源声学调查结果也表明防城港人工鱼礁区游泳生物小型个体所占比重较高,春季小型个体比重达到极高的水平^①。小个体的游泳生物优先摄食体型较大、营养层级较高的浮游动物^[24],因此,礁区个体较小、营养层级较低的浮游动物数量相对较多,导致人工鱼礁区浮游动物的营养层级低于非礁区。

3.3 人工鱼礁对浮游动物昼夜数量变化的影响

浮游动物时空变化和昼夜垂直迁移是生态动力学研究的关键,浮游动物的垂直迁移对生态系统能量流动和碳循环至关重要^[25]。从防城港人工鱼礁区和非礁区浮游动物昼夜的数量变化结果来看,非礁区浮游动物栖息密度和生物量的昼夜变化趋势基本一致,8:00数量最低,之后开始上升,16:00升至最高值后数量明显降低,20:00—次日4:00数量相对稳定,4:00—8:00数量急剧降低。浮游动物垂直迁移会导致不同水层内其数量的变化。总体而言,非礁区浮游动物垂直运动规律明显,可明确分为2个时段:4:00—20:00的运动期和20:00—次日4:00的稳定期。20:00—次日4:00浮游动物在10 m以浅的水层内数量较为稳定,没有明显的垂直运动;4:00浮游动物开始迅速下沉,8:00大部

分浮游动物下沉至10 m以深水层内后快速上浮,16:00在10 m水层以浅内数量达到最高峰后又急剧下沉,半数的浮游动物沉至10 m以深水层,另有半数的浮游动物仍稳定停留在10 m以浅水层内至次日4:00后继续下沉。非礁区浮游动物的昼夜垂直迁移更为明显,其不同时段内上升-下沉-稳定-下沉的变化规律也非常明确,可分为上浮(群落I)和下沉(群落III)两个群落。植食性的强额孔雀水蚤为群落I的特征种,肉食性的红小毛猛水蚤和尖额谐猛水蚤为群落III的特征种。浮游植物为满足其光合作用的需要,随着光的变化白天上浮、夜晚下沉的垂直运动现象非常明显^[26]。非礁区中,小型植食性浮游动物为满足其摄食的需求,也表现出昼夜随着浮游植物白天上浮、夜晚下浮垂直运动规律,与大亚湾秋季浮游动物白天偏向聚集于上层相似^[27]。由于白天植食性种类的上浮,形成以植食性种类为主要特征种的群落I。晚上植食性种类下沉后,则形成以肉食性种类为主要特征种的群落III。

礁区浮游动物在10 m以浅水层中始终保持较高数量,但每个时段均处于波动状态,其群落也未发生分化,为一个稳定的群落。人工鱼礁区浮游动物栖息密度以12:00较高,4:00生物量最高,8:00栖息密度和生物量均最低。

防城港观测区的人工鱼礁于2016年开始投放、2017年投放完毕,礁区水深14~16 m,人工鱼礁的礁体为高度4 m、5.5 m和6 m的方型有孔鱼礁。图4是来流速度为0.7 m/s时,防城港人工鱼礁附近流场速度的数值模拟结果。从图中可以看出,在人工鱼礁迎流面产生上升流,礁顶区域流速明显加快,并在礁体上方向下游区延伸,在礁顶区域约1米的区域内形成一个流速较快的水平层。浮游动物主动游泳能力弱,中小

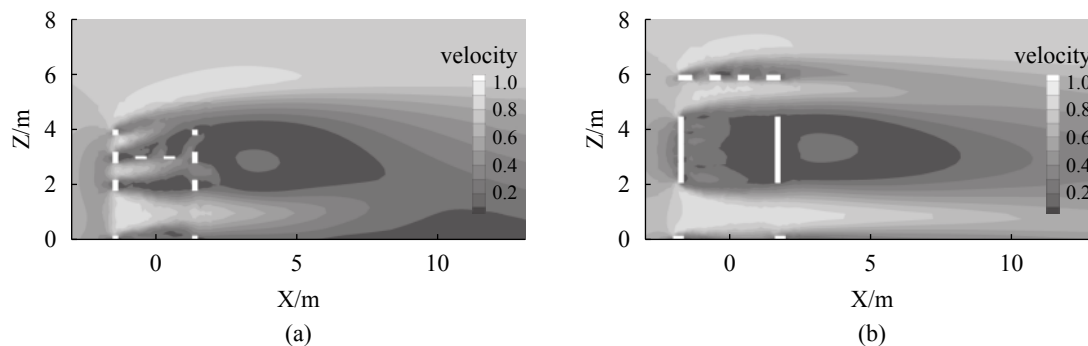


图4 防城港人工鱼礁垂直剖面流场速度云图(Y=0,纵向中心)

Fig. 4 Contour map of velocity field of vertical section of an artificial reef in the Fangcheng Harbor

型浮游动物的游泳能力则更弱,礁体上方流速较快水平层的出现,对浮游动物的垂直迁移起到明显的阻隔作用。因此,人工鱼礁区的中小型浮游动物,没有表现出像非礁区浮游动物那么明显的垂直运动,在礁体以上的10 m以浅区域虽然出现数量的波动,但始终保护较高的水平。Manriquez等^[28]评估智利中南部近岸上升流对中型浮游动物群落结构的影响,发现浮游动物进入低氧带食物丰富的上层有利于浮游食物网的碳流动,更加高效地将近岸上升流系统初级生产力转化为鱼类生产力。浮游动物在人工鱼礁礁体上方流速较快的水平层的阻断作用下,在礁区上层保持较高的数量,提升集鱼效果、促进生产力转换,也是海洋牧场人工鱼礁的重要生态效应之一。

样品鉴定得到了厦门大学黄加祺教授、许振祖教授和自然资源部第三海洋研究所林茂研究员的帮助,中国水产科学研究院南海水产研究所邱永松研究员对文章和英文摘要进行了修改和润色、唐朝博士提出建设性意见,课题组黎小国和刘玉负责外业调查和样品采集,特致谢忱。

参考文献:

- [1] Morales C E, Bedo A, Harris R P, *et al.* Grazing of copepod assemblages in the north-east Atlantic: the importance of the small size fraction[J]. *Journal of Plankton Research*, 1991, 13(2): 455-472.
- [2] 王荣,张鸿雁,王克,等.小型桡足类在海洋生态系统中的功能作用[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(5): 453-460.
Wang R, Zhang H Y, Wang K, *et al.* Function performed by small copepods in marine ecosystem[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 453-460(in Chinese).
- [3] 熊瑛,王云龙,汤建华,等.黄海南部大型水母暴发区中小型浮游动物生态特征[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 2063-2068.
Xiong Y, Wang Y L, Tang J H, *et al.* Ecological characteristics of meso- and micro-zooplankton in macro-jellyfish bloom areas of Southern Yellow Sea[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(10): 2063-2068(in Chinese).
- [4] 吴玲玲,朱艾嘉,郭娟,等.珠江口夏季中、小型浮游动物生态特征研究[J]. *海洋通报*, 2012, 31(6): 689-694.
Wu L L, Zhu A J, Guo J, *et al.* Ecological study on meso-zooplankton and micro-zooplankton in the Pearl river estuary in summer[J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(6): 689-694(in Chinese).
- [5] 杨红生.我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. *水产学报*, 2016, 40(7): 1133-1140.
Yang H S. Construction of marine ranching in China: Reviews and prospects[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(7): 1133-1140(in Chinese).
- [6] 杨吝,刘同渝,黄汝堪.中国人工鱼礁的理论与实践[M].广州:广东科技出版社,2005.
Yang L, Liu T Y, Huang R K. Theory and Practice of Artificial Reef in China[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2005 (in Chinese).
- [7] 王真良,刘晓丹.北黄海浮游动物昼夜垂直移动的初步研究[J]. *黄渤海海洋*, 1989, 7(4): 50-54.
Wang Z L, Liu X D. A preliminary research on diel vertical migration of zooplankton in north Huanghai Sea (Yellow Sea)[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1989, 7(4): 50-54(in Chinese).
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6-2007海洋调查规范第6部分:海洋生物调查[S].北京:中国标准出版社,2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 12763.6-2007 Specifications for oceanographic survey—Part 6: marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008 (in Chinese).
- [9] 陈清潮,黄良民,尹健强,等.南沙群岛海区浮游动物多样性研究[M]//中国科学院南沙综合科学考察队.南沙群岛及其邻近海区海洋生物多样性研究I.北京:海洋出版社,1994: 42-50.
Chen Q C, Huang L M, Yin J Q, *et al.* Studies on the zooplanktonic biodiversities in the waters around Nansha islands[M]//Nansha Comprehensive Scientific Investigation Team, Chinese Academy of Sciences. Studies on marine biodiversity of the Nansha Islands and neighbouring waters I. Beijing: China Ocean Press, 1994: 42-50 (in Chinese).
- [10] 连光山,林玉辉,蔡秉及,等.大亚湾浮游动物群落的特征[M]//国家海洋局第三海洋研究所.大亚湾海洋生态文集(II).北京:海洋出版社,1990: 274-281.
Lian G S, Lin Y H, Cai B J, *et al.* Characteristics of

- zooplankton community in the Daya Bay[M]//Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration. Collections of papers on marine ecology in the Daya Bay (II). Beijing: Ocean Press, 1990: 274-281 (in Chinese).
- [11] 徐兆礼, 崔雪森, 陈卫忠. 东海浮游桡足类的种类组成及优势种[J]. 水产学报, 2004, 28(1): 35-40.
Xu Z L, Cui X S, Chen W Z. Species composition and dominant species study on pelagic copepods in the East China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2004, 28(1): 35-40(in Chinese).
- [12] 戴媛媛, 侯纯强, 杨森, 等. 天津海域人工鱼礁区浮游动物群落结构及其与环境因子的相关性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2018(5): 163-170.
Dai Y Y, Hou C Q, Yang S, *et al.* Community structure of zooplankton in artificial reef area of Tianjin seashore and its relationship with environmental factors[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018(5): 163-170(in Chinese).
- [13] 王云新, 冯吉南. 鱼礁与聚鱼[J]. 水产科技, 2002(2): 30-31.
Wang Y X, Feng J N. Reefs and fish gathering effects[J]. Fisheries Science & Technology, 2002(2): 30-31(in Chinese).
- [14] 林军, 章守宇. 人工鱼礁物理稳定性及其生态效应的研究进展[J]. 海洋渔业, 2006, 28(3): 257-262.
Lin J, Zhang S Y. Research advances on physical stability and ecological effects of artificial reef[J]. Marine Fisheries, 2006, 28(3): 257-262(in Chinese).
- [15] Baine M. Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance[J]. Ocean & Coastal Management, 2001, 44(3-4): 241-259.
- [16] 陈勇, 于长清, 张国胜, 等. 人工鱼礁的环境功能与集鱼效果[J]. 大连水产学院学报, 2002, 17(1): 64-69.
Chen Y, Yu C Q, Zhang G S, *et al.* The environmental function and fish gather effect of artificial reefs[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2002, 17(1): 64-69(in Chinese).
- [17] 张雪, 徐晓甫, 戴媛媛, 等. 天津近岸人工鱼礁海域浮游植物群落及其变化特征[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(6): 1-10.
Zhang X, Xu X F, Dai Y Y, *et al.* Phytoplankton community characteristics and variation at artificial reefs of Tianjin offshore[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(6): 1-10(in Chinese).
- [18] 陈涛, 廖勇, 王云龙, 等. 象山港人工鱼礁海域浮游动物群落生态变化[J]. 海洋通报, 2013, 32(6): 710-716.
Chen T, Liao Y, Wang Y L, *et al.* Study of the ecological changes of zooplankton communities in the artificial reef waters in the Xiangshan Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(6): 710-716(in Chinese).
- [19] 赵晓娟, 邱盛尧, 焦金菊, 等. 寻山人工鱼礁区浮游动物群落变化的初步观察[J]. 齐鲁渔业, 2010, 27(5): 4-6.
Zhao X J, Qiu S Y, Jiao J J, *et al.* Preliminary observation of the changes of zooplankton communities in Xunshan artificial reef areas[J]. Shandong Fisheries, 2010, 27(5): 4-6(in Chinese).
- [20] Loick N, Dippner J, Doan H N, *et al.* Pelagic nitrogen dynamics in the vietnamese upwelling area according to stable nitrogen and carbon isotope data[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2007, 54(4): 596-607.
- [21] Rolff C. Seasonal variation in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of size-fractionated plankton at a coastal station in the northern Baltic proper[J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, 203: 47-65.
- [22] 柯志新, 黄良民, 徐军, 等. 大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7102-7108.
Ke Z X, Huang L M, Xu J, *et al.* The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7102-7108(in Chinese).
- [23] Cai D L, Wang R, Bi H S. Trophic relationships in the Bohai ecosystem: preliminary investigation from $\delta^{13}\text{C}$ analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(8): 1354-1359.
- [24] Nunn A D, Tewson L H, Cowx I G. The foraging ecology of larval and juvenile fishes[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2012, 22(2): 377-408.
- [25] 刘镇盛, 杜明敏, 章菁. 国际海洋浮游动物研究进展[J]. 海洋学报, 2013, 35(4): 1-10.
Liu Z S, Du M M, Zhang J. International research advances in marine zooplankton[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(4): 1-10(in Chinese).
- [26] Katano T, Yoshida M, Yamaguchi S, *et al.* Diel vertical migration and cell division of bloom-forming dinoflagellate *Akashiwo sanguinea* in the Ariake Sea,

- Japan[J]. *Plankton and Benthos Research*, 2011, 6(2): 92-100.
- [27] 林玉辉, 连光山. 大亚湾核电站出水口水域浮游桡足类的昼夜垂直移动[M]//国家海洋局第三海洋研究所. 大亚湾海洋生态文集(I). 北京: 海洋出版社, 1989: 123-129.
- Lin Y H, Lian G S. Diurnal vartical migration of planktonic copepods in waters around outlet of Daya Bay nuclear power station[M]//Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration. Collections of papers on marine ecology in the Daya Bay (I). Beijing: China Ocean Press, 1989: 123-129 (in Chinese).
- [28] Manríquez K, Escribano R, Hidalgo P. The influence of coastal upwelling on the mesozooplankton community structure in the coastal zone off Central/Southern Chile as assessed by automated image analysis[J]. *Journal of Plankton Research*, 2009, 31(9): 1075-1088.

Effects of an artificial reef on diel changes of micro- and meso-zooplankton

DU Feiyan*, WANG Lianggen, DING Ling, NING Jiajia, LI Yafang,
XU Lei, HUANG Delian, JIA Xiaoping

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Fisheries Ecology and Environment; Scientific Observatory and Experimental Station of South China Sea Fisheries Resources & Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: The apparent diurnal vertical migration of zooplankton leads to diurnal vertical migration of certain fishes that feed on zooplankton. In order to investigate the effects of an artificial reef on diurnal vertical migration of micro- and meso-zooplankton, we obtained 14 zooplankton samples from diurnal sampling in and outside an artificial reef area in the coastal Fangchenggang City, Guangxi Autonomous Region in November, 2018. The analysis showed that zooplankton compositions were quite similar between the artificial reef site and the control site, with the low species replacement rate and the same dominant species, indicating that the zooplanktons came from the same faunal assemblage. However, influenced by the flow-field effect of an artificial reef, zooplankton abundance and diversity were higher at the reef site than those at the control site. At the control site, zooplankton abundance showed apparent diurnal changes following a sinusoidal trend, with the highest abundance at 16:00 and the lowest at 08:00. There was apparent vertical migration between 4:00 and 20:00, while zooplankton abundance was quite stable from 20:00 to 4:00. At the reef site, due to the effect of horizontal fast flow field above the reef, zooplankton abundance fluctuated with time and no apparent diurnal vertical rhythm was observed. It is believed that higher zooplankton abundance above an artificial reef would enhance the reef's fish-aggregating effect and promote the conversion of zooplankton productivity to fish. Cluster analysis and ordination of the 14 zooplankton samples identified one sample group for the reef site, but two sample groups for the control site, one being mainly composed of phytoplankton feeders following the upward shifts of phytoplankton during the daytime, the other being mainly composed of carnivorous species during nighttime after the phytoplankton feeders migrating downward.

Key words: micro- and meso-zooplankton; diel changes; artificial reef effects; Fangcheng Harbor

Corresponding author: DU Feiyan. E-mail: feiyanegg@163.com

Funding projects: Supporting Funds for Fish Stock Damage Compensation by the Fangcheng Harbor Steel Project (01-154)