

◆海洋科学◆

海南新村港海草床区春、秋季浮游动物粒径结构特征*

谢福武¹, 王少露^{1**}, 谢海群^{2**}, 庞巧珠², 符俊优²

(1. 海南省生态环境监测中心, 海南海口 571126; 2. 海南省海洋与渔业科学院, 海南海口 571126)

摘要:为探究海草床区不同粒径浮游动物的群落结构特征及其对环境因子的响应机制, 本研究分别于2022年4月和11月对海南省陵水县新村港海草床区不同性质水域的浮游动物粒径结构和重要功能类群展开调查研究, 并探讨其季节性差异的影响因素。结果表明: 春季共鉴定出浮游动物37科40属65种, 浮游幼体20类, 以小粒径的桡足类幼体/无节幼体占优势; 秋季共鉴定出浮游动物23科25属37种, 浮游幼体19类, 以夜光虫(*Noctiluca scientillans*)占绝对优势。浮游动物物种数、丰度存在季节性差异, 春季物种数高于秋季, 湾口外海区和海草生长区最突出, 以600–1250、355–600 μm 的种类居多。浮游动物丰度则反之, 鱼排养殖区丰度最高, 以160–355、355–600 μm 的丰度居多。此外, 春季的主要限制因子为磷酸盐、硅酸盐及悬浮物, 与2000–4000、1250–2000 μm 的浮游动物丰度呈显著正相关性($P < 0.05$); 盐度与2000–4000 μm 的浮游动物丰度呈极显著负相关性($P < 0.01$); 水深则为秋季主要影响因子, 与600–1250、355–600、160–355 μm 偏小粒径浮游动物丰度存在显著正相关性($P < 0.05$)。新村港海草床区各粒径浮游动物丰度呈季节性变化, 与环境因子间也存在不同程度相关性, 亟需对该区域的浮游动物粒径结构进行长期监测研究。

关键词:浮游动物; 粒径结构; 环境因子; 海草床; 海南新村港

中图分类号: P735 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2024)01-0040-12

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20240417.005

浮游动物作为海洋生态系统中次级生产力的重要组成部分, 在海草床生态系统中承担着举足轻重的作用^[1,2]。浮游动物也是海草床生态系统中重要的次级消费者, 在海洋食物网、生物地化循环和渔业资源补充等方面均起着重要的作用^[1-4]。浮游动物种类

多、分布广、运动能力弱, 常随水流被动漂流, 不同类群的浮游动物对海洋生态环境的适应能力存在明显差异^[5,6]。浮游动物群落结构及优势种更替对海草床的生态环境变化存在着较为敏感的反应机制。另外, 海草床区水温、盐度、溶解氧等环境因子的变化也

收稿日期: 2023-11-29

修回日期: 2023-12-14

* 海南省自然科学基金青年基金项目(321QN0960)资助。

【第一作者简介】

谢福武(1992—), 男, 工程师, 主要从事海洋环境与浮游生态学研究, E-mail: xfw1021900977@163.com。

【**通信作者简介】

王少露(1989—), 女, 工程师, 主要从事海洋环境与浮游生态学研究, E-mail: 15248951720@163.com。

谢海群(1989—), 女, 工程师, 主要从事海洋生态环境调查与研究, E-mail: 1216146315@qq.com。

【引用本文】

谢福武, 王少露, 谢海群, 等. 海南新村港海草床区春、秋季浮游动物粒径结构特征[J]. 广西科学, 2024, 31(1): 40-51.

XIE F W, WANG S L, XIE H Q, et al. Particle Size Structure Characteristics of Zooplankton during Spring and Autumn in the Seagrass Areas of Xincun Port, Hainan Island [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(1): 40-51.

会影响浮游动物群落结构。因此,评估海草床生态系统中浮游动物粒径结构的响应状况,对海草床生态环境质量评价具有重要意义^[7,8]。

新村港位于海南省陵水县东南部,是一个完全为潮汐控制的近封闭天然湖湾,内为平坦的浅海潟湖盆地。整个新村港被海积阶地、残丘和沙堤所环绕,仅在西部区域有一狭窄口与外海相连。新村港海域可大致划分为海草生长区、海水养殖区及渔港码头区^[8]。受海水养殖、生活垃圾和污水排放等人类活动的影响,新村港内对流不畅,富营养化程度加剧,水质下降,加上港内回填淤积严重,导致水体面积逐渐缩小。整个生态区内海草床退化较为严重,面积锐减,且生态系统健康状况下降^[9-11]。

近年来,关于海草床区的浮游动物群落特征研究已有报道,研究海域主要涉及广东流沙湾^[2]、辽东湾觉华岛^[12]和山东荣成天鹅湖^[13]等。但关于海南近岸海草床区的浮游动物群落结构和分布特征研究却鲜有报道,尤其是关于海草生长区、海水养殖区及渔港码头区等不同性质水域的浮游动物群落结构差异性研究比较匮乏。由于海草生长区及湾口外海区的浮游动物粒径结构和种类组成更加多样化,研究海草床区不同性质水域浮游动物粒径结构特征具有重要意义。截至目前,仅有龚玉艳等^[14]于2014—2016年在陵水湾对浮游动物群落结构特征及其季节变化进行研究,但有关该海域不同粒径范围的浮游动物种类、丰度的季节性变化情况目前尚不得而知。基于此,本研究选取海南省陵水县新村港作为典型的研究区域,对整个海草床区内不同性质水域且不同粒径范围的浮游动物群落结构展开调查,以为海南近岸海草床区生态系统的健康状况评估、生物资源开发利用和生态影响评价提供数据资料。

1 材料与方法

1.1 调查区域

浮游动物样品采集于海南省陵水县新村港海草床区(109°57'30"—110°01'30"E, 18°23'00"—18°27'00"N),采样站位分为海草生长区(S1—S5)、鱼排养殖区(S6—S7)、虾塘养殖区(S8—S9)、渔港码头区(S10—S11)以及湾口外海区(S12),具体见图1。

1.2 样品采集

本研究分别于2022年4月(春季)和11月(秋季)对新村港海域不同性质水域的浮游动物进行样品采集,获取12个站位的样品数据。其中,水质理化样

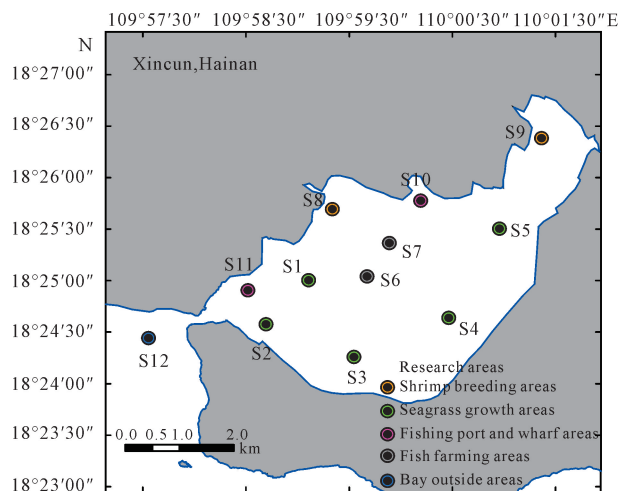


图1 采样站位

Fig. 1 Sampling sites

品采集与分析参照《海洋调查规范 第4部分:海水化学要素调查》(GB/T 12763.4—2007)^[15]中规定的方法进行;浮游动物样品采集与分析按照《海洋调查规范 第6部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007)^[16]中规定的方法进行,采用网口带有流量计的浅水Ⅱ型浮游生物网(网口直径31.6 cm,网长140 cm,筛绢孔径0.160 mm)从距底1 m至表层垂直拖曳获取样品,水深较浅的站位则采用水平拖网的方式采集样品,分装于1 L聚乙烯瓶,于现场加入体积分数为5%的甲醛溶液固定保存,并记录采样前后的流量值,待实验室处理与分析。

1.3 样品处理与分析

不同粒径范围的浮游动物种群及优势种对海草床生态退化过程响应机制有所区别。根据粒径大小将海洋浮游动物分为大型浮游动物、中型浮游动物和小型浮游动物3类。参考Zhou等^[17]在浮游动物研究中粒径范围的设定,根据筛绢孔径大小制作分级过滤装置,筛网孔径由大到小分别为4 000、2 000、1 250、600、355、160 μm ,分别将采集并固定保存的样品按照装置的筛网孔径由大到小依次进行分级过滤(移除分离过程中粒径 $>4 000 \mu\text{m}$ 的浮游动物)。

拆分分级过滤装置,用体积分数为5%的甲醛溶液将不同孔径筛网所截留的浮游动物完全清洗至100 mL聚乙烯瓶,从而分别获取2 000—4 000、1 250—2 000、600—1 250、355—600、160—355 μm 的样品,并对每个站位不同粒径范围的样品做好标记,等待镜检分类。

采用体视解剖镜(Discovery V8型,德国ZEISS公司)和正置显微镜(Axioscope 5,德国ZEISS公司)

对分级过滤好的所有浮游动物样品进行分类、鉴定和计数,分析方法参照《海洋调查规范 第6部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007)^[16]。

1.4 数据分析

(1)根据网口流量计的读数,直接测量采集的滤水量,按以下公式计算浮游动物丰度。

$$A = \frac{n}{(r_i - r_0) \times k \times S}$$

式中, A 表示浮游动物丰度,单位为个/立方米(ind./m³); n 表示浮游动物个体数或总数量,单位为个(ind.); r_i 表示流量计的结束值,单位为转(r); r_0 表示流量计的初始值,单位为转(r); k 表示流量计的标定值,单位为米/转(m/r); S 表示网口面积,单位为平方米(m²)。

(2)采用优势度(Y)对浮游动物群落结构进行统计分析,计算公式如下。

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i$$

式中, n_i 表示第 i 种浮游动物的个体数; N 表示所有种类的总个体数; f_i 表示第 i 种浮游动物在各站位的出现频率。

本研究采样站位图等均采用 Arcgis 10.3 软件

表 1 海水理化环境参数

Table 1 Physicochemical and environmental parameters of seawater

季节 Season	温度/℃ Temperature/℃	水深/m Water depths/m	pH 值 pH value	盐度 Salinity	浊度/NTU Turbidity/NTU	DO/ (mg/L)	叶绿素 a /(μ g/L) Chlorophyll a / (μ g/L)	NO ₃ -N/ (mg/L)	
Spring	Range	28.0—28.5	1.1—9.7	8.11—8.28	30.0—32.0	1.98—4.40	5.44—9.62	3.66—18.93	0.004—0.017
	Mean	28.3	5.7	8.20	31.0	2.60	7.45	12.47	0.010
Autumn	Range	27.9—29.2	0.7—8.2	8.07—8.39	31.8—34.1	2.01—11.20	4.41—8.62	8.45—35.20	0.005—0.029
	Mean	28.6	3.6	8.20	32.9	4.11	6.33	15.15	0.017
季节 Season	NO ₂ -N/ (mg/L)	NH ₃ -N/ (mg/L)	DIN/ (mg/L)	DIP/ (mg/L)	DIN/DIP	DSi/ (mg/L)	悬浮物/(mg/L) Suspended solids/ (mg/L)		
Spring	Range	0.000 4—0.006 0	0.013—0.093	0.022—0.104	0.008—0.024	1.73—9.24	0.072—0.365	12.4—30.2	
	Mean	0.0040	0.045	0.058	0.014	4.61	0.149	18.6	
Autumn	Range	0.001 0—0.009 0	0.002—0.040	0.014—0.060	0.001—0.005	3.40—30.00	0.044—0.608	13.8—70.9	
	Mean	0.004 0	0.009	0.029	0.003	12.54	0.309	28.2	

2.2 浮游动物种类组成及优势种

2.2.1 种类组成

春、秋季新村港海草床区共鉴定出浮游动物 37 科 40 属 66 种,分属于 11 个类群,阶段性浮游幼体 20 类。优势类群以桡足类和刺胞动物为主,其余类

群比重均较低。两个季节各站位除优势类群外,浮游幼体占比较大。根据浮游动物对水温和盐度的适应性,分为河口类群、暖水沿岸类群和暖水广布类群 3 个生态类群,河口类群由安氏伪镖水蚤(*Pseudodiaptomus annandalei*)和双刺伪镖水蚤(*P. bispinosa*)组成;浮游动物种类占比和丰度占比等参数分布图均采用 SigmaPlot 10.0 软件绘制;Pearson 相关性分析采用 SPSS 19.0 软件,分别选取不同性质水域不同粒径范围的浮游动物丰度与春、秋季理化环境因子进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 环境理化特征

春、秋季新村港海草床区水体均呈现高温、高营养的特征,整个区域的初级生产力水平均偏高,叶绿素 a 含量分别为 3.66—18.93 和 8.45—35.20 μ g/L,平均值分别为 12.47 和 15.15 μ g/L,秋季高于春季。溶解氧含量则相反,春季各站位整体高于秋季。而悬浮物含量则以秋季居高,含量为 13.8—70.9 mg/L,明显高于春季。春季溶解态无机氮(DIN)和磷酸盐(DIP)含量整体高于秋季,尤其是磷酸盐含量差距明显。硅酸盐(DSi)则相反,秋季高于春季(表 1)。综合两个季节 DIN/DIP 值可知,春季各站位 DIN/DIP 值均小于 16;秋季仅有 S5 站位 DIN/DIP 值大于 16,水体营养盐含量呈潜在磷限制状态;其他各站位的 DIN/DIP 值均小于 16。

su)组成,暖水沿岸类群包括异体住囊虫(*Oikopleura dioica*)、锥形宽水蚤(*Temora turbinata*)、亚强次真哲水蚤(*Subeucalanus subcrassus*)与鸟喙尖头蚤(*Penilia avirostris*)等,暖水广布类群则以筒长腹剑水蚤(*Oithona simplex*)、肥胖箭虫(*Sagitta enflata*)、微刺哲水蚤(*Canthocalanus pauper*)为主。

春季浮游动物 37 科 40 属 65 种,浮游幼体 20 类。以桡足类为绝对优势类群,共 18 属 39 种,占春季浮游动物总种数的 60.0%。刺胞动物类、被囊类、毛颚类分别为 9 属 10 种、2 属 3 种和 1 属 3 种,分别

占总种数的 15.4%、4.6% 和 4.6%。其余类群如枝角类、端足类、等足类、栉水母类、十足类、多毛类、原生动物的种类数均较少,仅为 1—2 种(表 2)。

秋季浮游动物 23 科 25 属 37 种,浮游幼体 19 类。类群同样以桡足类占主导优势,共 14 属 22 种,占秋季浮游动物总种数的 59.5%。毛颚类、被囊类、刺胞动物类、端足类分别为 1 属 4 种、2 属 3 种、3 属 3 种和 1 属 1 种,分别占总种数的 10.8%、8.1%、8.1% 和 5.4%。其余类群栉水母类、十足类、多毛类和原生动物的种类均较少(表 2)。

Table 2 Composition of zooplankton species

季节 Season	被囊类 Tunicata		桡足类 Copepoda		刺胞动物类 Cnidaria		栉水母类 Ctenophora		毛颚类 Chaetognatha		枝角类 Cladocera	
	属 Genera	种 Species	属 Genera	种 Species	属 Genera	种 Species	属 Genera	种 Species	属 Genera	种 Species	属 Genera	种 Species
Spring	2	3	18	39	9	10	1	1	1	3	2	2
Autumn	2	3	14	22	3	3	0	0	1	4	1	1
Total	2	3	18	39	9	10	1	1	1	4	2	2

季节 Season	十足类 Sergestinae		端足类 Amphipoda		等足类 Isopoda		多毛类 Polychaeta		原生动物 Protozoan		合计 Total	
	属 Genera	种 Species	属 Genera	种 Species	属 Genera	种 Species	属 Genera	种 Species	属 Genera	种 Species	属 Genera	种 Species
Spring	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	40	65
Autumn	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	25	37
Total	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	40	66

2.2.2 优势种

取优势度 $Y \geq 0.02$ 的物种为优势种,两个季节的优势种共包含桡足类 3 种,被囊类 2 种,原生动物 1 种,浮游幼体 4 类(表 3)。

春季浮游动物以小粒径的浮游幼体占主导优势,桡足类幼体(Copepodite)/无节幼体(Nauplius)的优势度最高,分别为 0.20 和 0.18,平均丰度分别为 1.24×10^3 和 1.11×10^3 ind./m³。筒长腹剑水蚤和单胃住筒虫(*Fritillaria haplostoma*)的优势度也较高,分别为 0.10 和 0.09,平均丰度分别为 656.33 和

719.09 ind./m³;秋季则以原生动物类的夜光虫(*Noctiluca scientillans*)占绝对优势,优势度为 0.65,平均丰度为 7.06×10^4 ind./m³。桡足类幼体的优势度也较高,平均丰度为 1.72×10^4 ind./m³(表 3)。

总体上,春季浮游动物优势种以桡足类幼体/无节幼体的平均丰度和优势度居高,优势种粒径结构偏小型化,反观秋季则以夜光虫的数量居多,优势种的物种多样性、平均丰度均要低于春季(表 3)。

表3 浮游动物优势种组成

Table 3 Composition of zooplankton dominant species

优势种 Dominant species	春季 Spring		秋季 Autumn		
	平均丰度/(ind./m ³) Average abundance/(ind./m ³)	优势度 Dominance	平均丰度/(ind./m ³) Average abundance/(ind./m ³)	优势度 Dominance	
Tunicata	<i>Oikopleura dioica</i>	561.04	0.10	1.77×10^3	0.02
	<i>Fritillaria haplostoma</i>	719.09	0.09	—	—
Copepoda	<i>Euterpina acutifrons</i>	—	—	4.54×10^3	0.04
	<i>Oithona simplex</i>	656.33	0.10	—	—
	<i>O. plumifera</i>	320.00	0.04	—	—
Protozoan	<i>Noctiluca scientillans</i>	—	—	7.06×10^4	0.65
Pelagic larvae	Copepoda copepodite	1.24×10^3	0.20	1.72×10^4	0.16
	Copepoda nauplius	1.11×10^3	0.18	3.24×10^3	0.02
	Cirripedia nauplius	111.75	0.02	—	—
	Polychaeta larvae	129.50	0.02	—	—

2.3 浮游动物种类分布

春季浮游动物均以桡足类的物种居多,各区域均具有较高占比。湾口外海区的种类数最多,共26种,包括了桡足类(占该区春季浮游动物总种数的61.5%)、刺胞动物类(占7.7%)、被囊类(占7.7%)、毛颚类(占7.7%)、枝角类(占3.9%)、端足类(占3.9%)、多毛类(占3.9%)和原生动物(占3.9%);以粒径600—1250和1250—2000 μm 的浮游动物为主,占比分别为27.7%和23.1%,粒径结构整体偏大些。海草生长区的物种数次之,为22种,以桡足类、刺胞动物类和被囊类占比较高,分别为63.0%、11.1%和9.3%;浮游动物粒径以355—600、600—1250和160—355 μm 居多,占比分别为26.4%、24.8%和21.4%。鱼排养殖区、虾塘养殖区和渔港码头区的浮游动物种类均较少,均为15—17种,粒径以355—600和600—1250 μm 为主[图2(a)、2(c)、3(a)]。

秋季浮游动物同样以桡足类为主。其中,海草生长区的物种数最高,平均为18种,以桡足类(占该区秋季浮游动物总种数的54.4%)、毛颚类(占17.4%)和被囊类(占10.9%)为主;浮游动物粒径以2000—4000 μm (占25.1%)、600—1250 μm (占22.4%)和1250—2000 μm (占19.9%)为主。湾口外海区和虾塘养殖区的物种数也较多,均为17种,以桡足

类、毛颚类和被囊类占比较高;湾口外海区浮游动物粒径以2000—4000(占26.5%)和1250—2000 μm (占26.5%)为主,虾塘养殖区则以1250—2000 μm (占24.9%)和600—1250 μm (占23.7%)为主。渔港码头区的种类数最少,仅为12种,以桡足类占绝对优势,浮游动物粒径以1250—2000 μm (占26.2%)居多[图2(b)、2(d)、3(b)]。

2.4 浮游动物丰度分布

春季各区域浮游动物均以桡足类的物种居多。虾塘养殖区的浮游动物丰度最高,为 4.57×10^5 ind./m³,浮游幼体、桡足类和被囊类的丰度占比较高,分别为62.0%、21.1%和14.7%;浮游动物粒径丰度组成方面,以粒径160—355和355—600 μm 的丰度占比居高,分别为45.7%和44.6%。海草生长区的浮游动物丰度也较高,为 2.65×10^5 ind./m³,同样以浮游幼体、桡足类和被囊类的丰度占比居高,分别为48.6%、27.6%和21.3%;粒径160—355和355—600 μm 的丰度占比较高,分别为46.6%和42.7%。鱼排养殖区的浮游动物丰度相对较低,为 2.27×10^5 ind./m³,浮游动物主要类群及其丰度与虾塘养殖区、海草生长区相似;而浮游动物粒径丰度占比则以160—355 μm 最高,为71.2%[图4(a)、5(a)]。

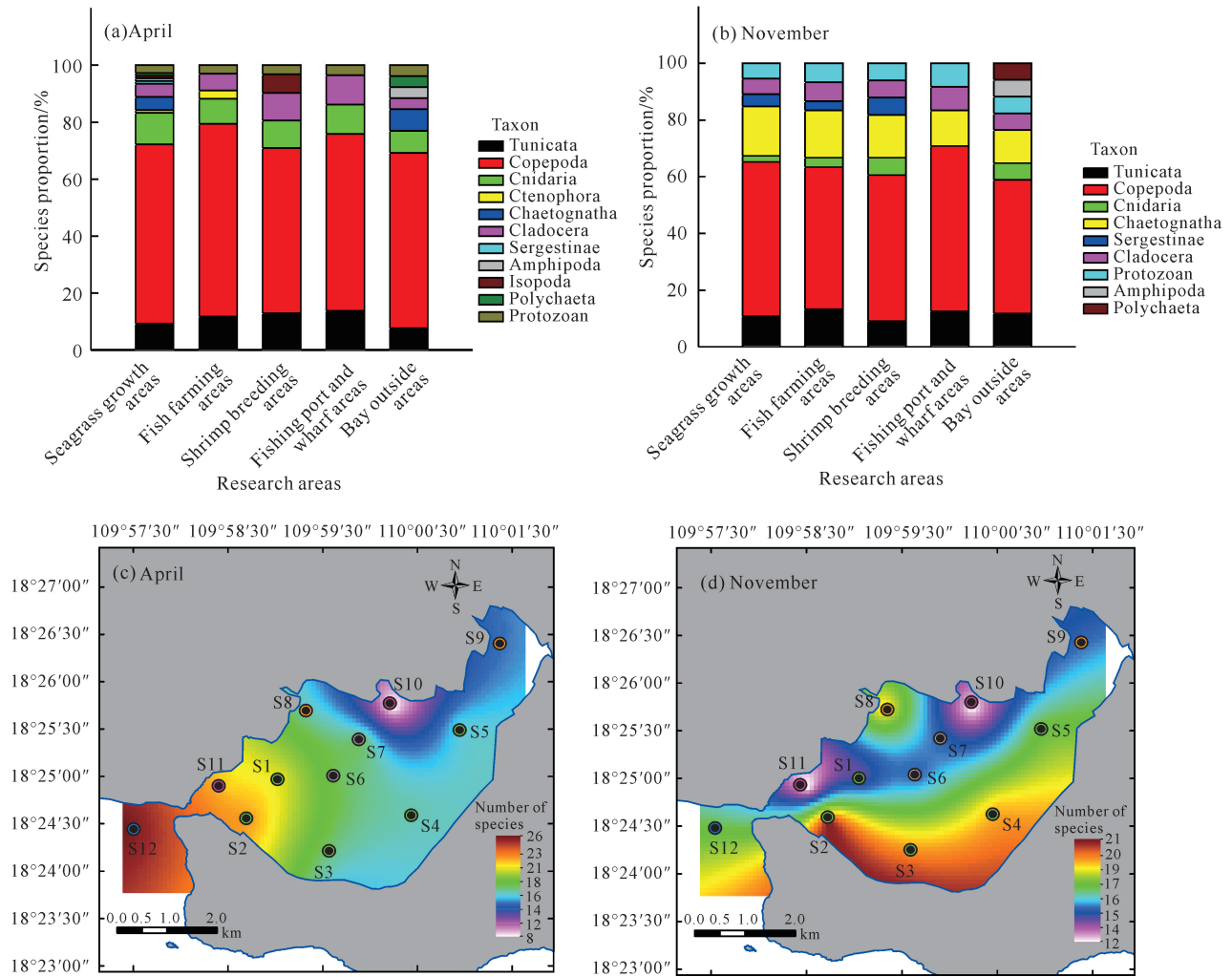


图 2 浮游动物种类组成[(a)、(c)]及分布[(b)、(d)]

Fig. 2 Composition [(a)、(c)] and distribution [(b)、(d)] of zooplankton species

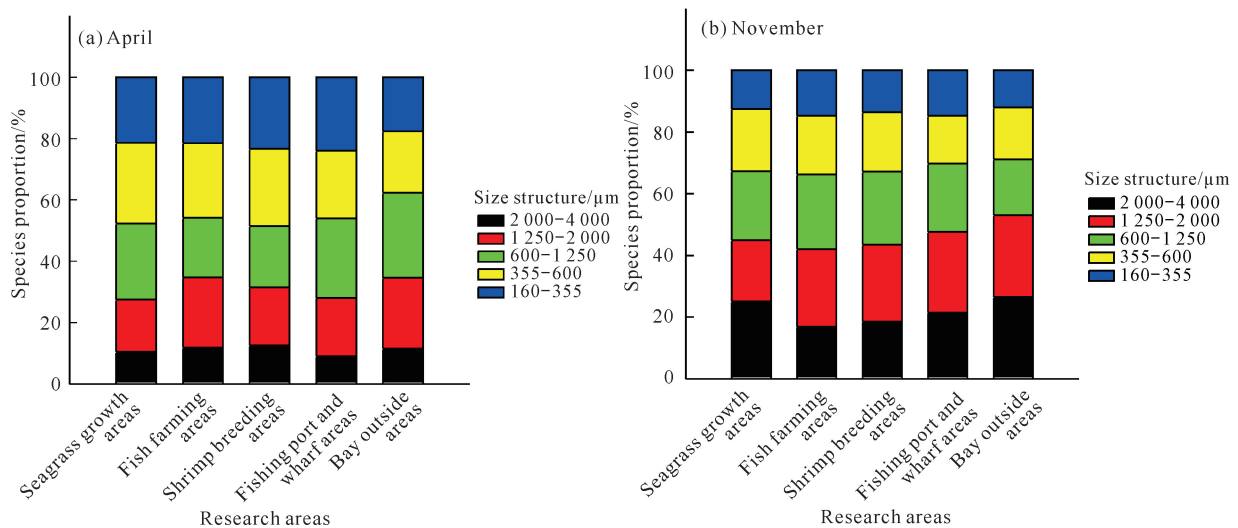


图 3 浮游动物各粒径范围的种类组成及其占比

Fig. 3 Composition and proportion of zooplankton species in each particle size range

秋季各区域浮游动物以原生动物的丰度占比最高。鱼排养殖区的浮游动物丰度最高, 为 1.54×10^6 ind./ m^3 , 原生动物丰度占比为 75.4%; 浮游动物粒径丰度占比以 160–355 和 355–600 μm 居, 分别为 52.3% 和 37.0%。湾口外海区和海草生长区的丰度均较高, 分别为 6.23×10^5 和 3.81×10^5 ind./ m^3 , 均以原生动物和浮游幼体的丰度占比居; 浮游动物

粒径丰度组成方面, 湾口外海区以粒径 355–600 和 160–355 μm 的丰度占比较高, 分别为 45.2% 和 41.7%; 海草生长区粒径 160–355 μm 丰度占比最高, 占 68.6%。渔港码头区的丰度较其他区域稍低, 为 1.57×10^5 ind./ m^3 , 浮游动物主要类群及其丰度也与其他区域较为相似, 且也以粒径 355–600 和 160–355 μm 的丰度占比最高[图 4(b)、图 5(b)]。

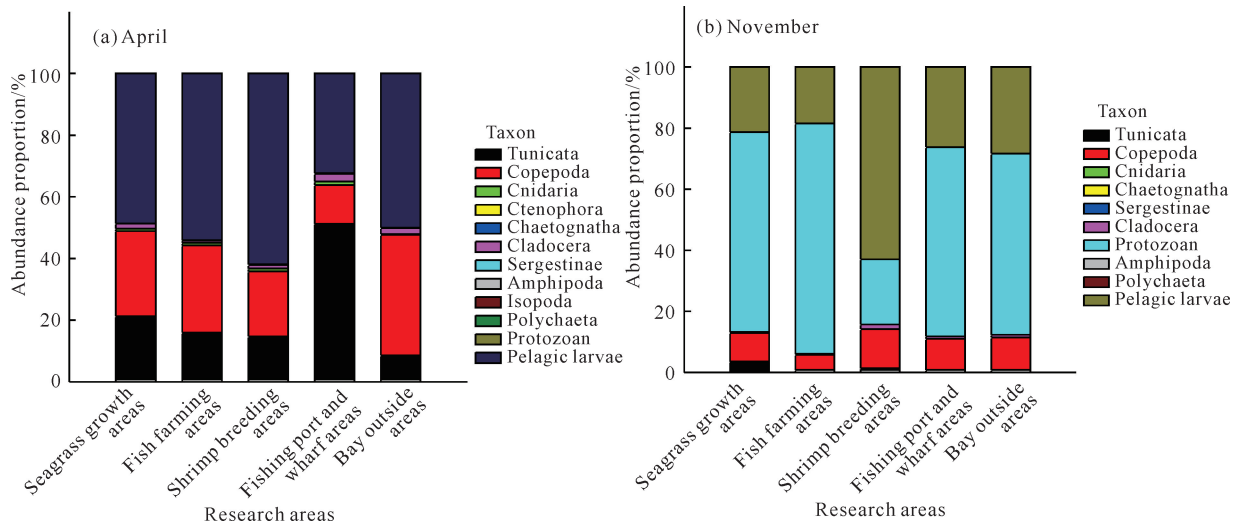


图 4 浮游动物丰度组成及其占比

Fig. 4 Composition and proportion of zooplankton abundance

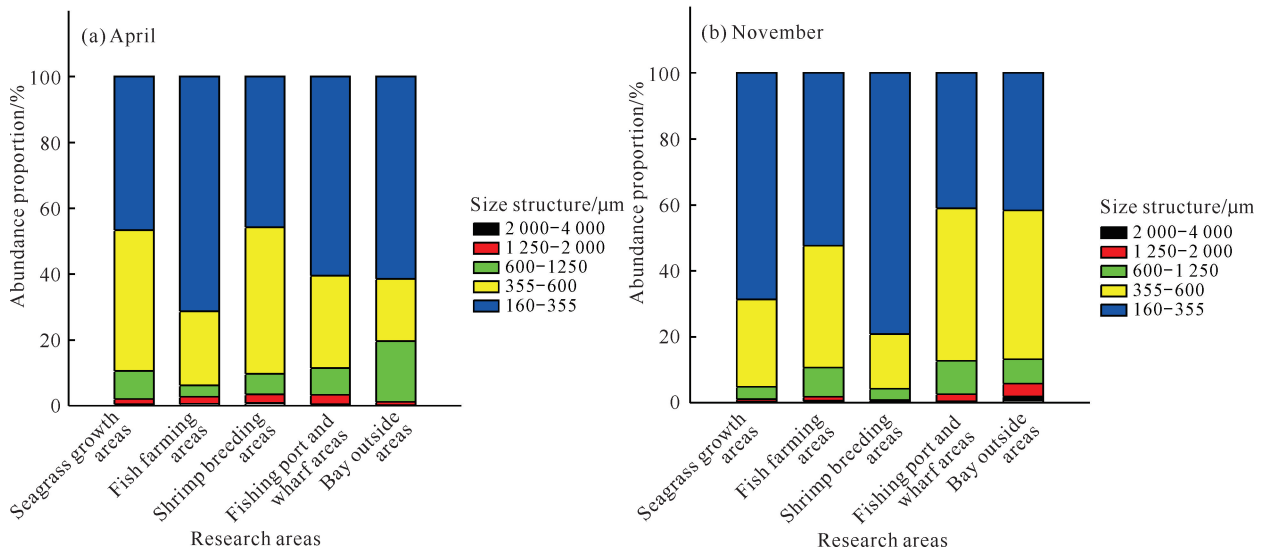


图 5 浮游动物各粒径丰度组成及其占比

Fig. 5 Composition and proportion of zooplankton abundance in each particle size

2.5 相关性分析

浮游动物各粒径丰度与环境因子的相关性分析结果见表 4。春季浮游动物粒径丰度与环境因子间呈不同程度的显著相关性。粒径为 2 000–4 000 μm 的丰度与海水盐度间呈极显著负相关性 ($P < 0.01$), 说明随着湾内-湾口外水体盐度的增加, 海草生长区、

鱼排养殖区、虾塘养殖区、渔港码头区及湾口外海区等区域的浮游动物生长、繁殖过程均受到影响, 尤其是湾口区浮游动物丰度最低, 受到严重抑制。粒径为 2 000–4 000 μm 的丰度与磷酸盐、悬浮物含量则呈显著正相关性 ($P < 0.05$)。粒径为 1 250–2 000 μm 的丰度与 DIP、DSi、悬浮物含量均呈显著或极显著正

相关关系 ($P < 0.05$), 尤其是与硅酸盐相关性最明显。另外, 粒径为 $355-600 \mu\text{m}$ 的丰度与悬浮物含量也具有显著正相关性 ($P < 0.05$)。这些现象均说明了春季高含量的磷酸盐和硅酸盐可通过促进浮游植物的生长, 间接增加以浮游藻类为食的浮游动物丰度, 加上一定含量的悬浮物在某种程度上可避免浮游动物遭仔稚鱼类和其他无脊椎动物的捕食, 进而直接或间接影响着整个海草床区内 $2\ 000-4\ 000$ 和

表 4 浮游动物各粒径丰度与环境因子的 Pearson 相关性

Table 4 Pearson correlation between zooplankton particle size abundance and environmental factors

季节 Season	粒径丰度 Abundance of particle size	温度 Temperature	水深 Water depths	pH 值 pH value	盐度 Salinity	浊度 Turbidity	DO	叶绿素 <i>a</i> Chlorophyll <i>a</i>
Spring	2 000—4 000	-0.344	-0.244	0.812	-0.993 * *	-0.141	0.271	0.896 *
	1 250—2 000	-0.103	-0.509	0.587	-0.847	-0.036	0.077	0.605
	600—1 250	-0.159	-0.487	-0.633	0.684	0.770	-0.072	-0.781
	355—600	-0.537	-0.706	0.639	-0.827	0.398	0.343	0.611
	160—355	0.139	-0.248	0.671	-0.709	-0.088	0.345	0.540
Autumn	2 000—4 000	0.362	0.774	-0.267	0.210	-0.447	0.161	-0.433
	1 250—2 000	0.278	0.704	-0.324	0.280	-0.541	0.085	-0.459
	600—1 250	0.452	0.930 *	-0.064	0.035	-0.165	0.313	-0.412
	355—600	0.466	0.896 *	-0.134	0.058	-0.230	0.280	-0.407
	160—355	0.376	0.917 *	0.316	0.330	-0.227	0.629	-0.230
季节 Season	粒径丰度 Abundance of particle size	NO ₃ -N	NO ₂ -N	NH ₃ -N	DIP	DSi	悬浮物 Suspended solids	
Spring	2 000—4 000	-0.695	-0.447	-0.448	0.895 *	0.722	0.880 *	
	1 250—2 000	-0.430	-0.158	-0.061	0.880 *	0.960 * *	0.955 *	
	600—1 250	0.609	0.421	0.548	-0.529	-0.229	-0.319	
	355—600	-0.499	-0.198	-0.107	0.792	0.846	0.959 * *	
	160—355	-0.581	0.296	0.290	0.530	0.845	0.708	
Autumn	2 000—4 000	0.454	-0.012	-0.368	-0.240	-0.053	-0.674	
	1 250—2 000	0.513	-0.081	-0.367	-0.100	-0.126	-0.691	
	600—1 250	0.086	0.264	-0.264	-0.685	0.063	-0.619	
	355—600	0.210	0.196	-0.326	-0.570	0.063	-0.629	
	160—355	0.347	-0.198	0.122	-0.530	-0.070	-0.590	

Note: * represents a significant correlation ($P < 0.05$), * * represents an extremely significant correlation ($P < 0.01$).

3 讨论

3.1 海草床区浮游动物群落结构变化特征

作为三大典型海洋生态系统之一, 海草床有着特别高的生产力和生物量^[18]。海草叶片可为各类附生生物提供良好的附着基, 而叶片上生活着许多细菌、藻类和原生动物附着生物, 可作为桡足类、端足类和腹足类等浮游动物的食物来源。本研究结果表明,

1 250—2 000 μm 的大粒径浮游动物的丰度。

秋季的分析结果则表明, 600—1 250、355—600、160—355 μm 范围偏小粒径的浮游动物丰度水平与水深呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 这说明不同性质区域的水深对浮游动物生长、繁殖影响较大, 深水体可为这些偏小粒径的浮游动物提供庇护场所和生存空间, 较浅的水体中浮游动物易遭其他高营养级的生物捕食, 不利于其生长繁殖。

春、秋季新村港海草床区浮游动物以河口类群、暖水沿岸类群和暖水广布类群为主, 优势种以暖水性的种类及浮游幼体居多, 春季以桡足类幼体/无节幼体、秋季以原生动物类的夜光虫占绝对优势, 均具有较高丰度(表 3)。龚玉艳等^[14]的研究结果显示, 2014—2016 年陵水湾的浮游动物主要由广温广盐类群、暖水沿岸类群和暖水外海类群组成, 共鉴定出浮游动物 94 种,

明显高于本研究(66种), 种类数的差异可能与新村港内近年来的海水养殖、生活垃圾和污水排放等人类活动所导致的海草床退化有关。而优势种组成方面, 本研究与龚玉艳等^[14]的研究结果较为相似, 均以暖水沿岸类群为主, 且浮游幼体的数量与丰度均较高。截至目前, 关于海南海草床区的浮游动物研究资料整体较少, 尤其是不同性质水域不同粒径范围的浮游动物群落结构研究鲜有报道, 尚不足以反映整个生态区内浮游动物群落的结构特征。鉴于此, 笔者还通过与国内不同纬度的海草生长区域浮游动物群落结构进行比较, 分析不同海草生长区浮游动物种类及优势种的区域差异性。例如, 张才学等^[2]关于广东雷州流沙湾海草床区浮游动物季节性研究的结果表明, 4个季度共鉴定浮游动物49种和浮游幼体13类, 浮游动物以桡足类和浮游幼体为主, 优势种均以暖水沿岸类群的针刺拟哲水蚤(*Paracalanus aculeatus*)、小拟哲水蚤(*P. parvus*)等桡足类为主, 丰度与生物量呈明显的季节性变化; 张兆衡等^[12]关于渤海兴城-觉华岛海草床区的研究结果表明, 共鉴定出浮游动物23种, 夏季最多为14种, 秋季为12种, 优势种组成具有季节

表5 浮游动物优势种组成与历史资料比较

Table 5 Comparison of dominant species composition of zooplankton with historical data

时间 Time	海域 Sea area	种类数 Species	优势种 Dominant species	网具 Fishing net	资料来源 Sources
Summer, Autumn, 2020	Xingcheng-Juehua Island Seagrass beds area	23	Brachyura zoea larvae, <i>Noctiluca scientillans</i> , etc	II	Zhang et al ^[12] , 2022
The four seasons, 2019	Rongcheng Swan Lake seagrass beds area	18	<i>Paracalanus parvus</i> , etc	I	Lu et al ^[13] , 2023
The four seasons, 2008	Leizhou Quicksand Bay seagrass beds area	49	<i>P. aculeatus</i> , <i>P. parvus</i> , etc	I	Zhang et al ^[2] , 2013
The four seasons, 2014–2016	Lingshui Bay, Hainan	94	<i>Acartia erythraea</i> , <i>Penilia avirostris</i> , etc	I	Gong et al ^[14] , 2019
Summer, Autumn, 2008–2009	Northwest area, Hainan	44	<i>Subeucalanus subcrassus</i> , <i>Canthocalanus pauper</i> , etc	I	Sun et al ^[21] , 2014
Summer, 2011	Coast area, Hainan	164	<i>Penilia avirostris</i> , <i>Sagitta enflata</i> , <i>Doliolum denticulatum</i> , etc	I	Zhang et al ^[19] , 2014
Summer, Autumn, 2018	Coast area, Hainan	69	<i>Oithona simplex</i> , <i>Subeucalanus subcrassus</i> , <i>Acartia erythraea</i> , etc	I	Xie et al ^[20] , 2019b
Summer, 2018	Southeast coral reef area, Hainan	62	<i>Subeucalanus subcrassus</i> , <i>Sagitta enflata</i> , <i>Diphyes chamissonis</i> , etc	I	Xie et al ^[22] , 2019a
Spring, Autumn, 2019	Artificial reef area of Wenchang, Hainan	79	<i>Penilia avirostris</i> , <i>Sagitta enflata</i> , <i>Temora turbinata</i> , <i>Subeucalanus subcrassus</i> , etc	I	Xie et al ^[24] , 2023
Spring, Autumn, 2022	Seagrass beds area of Lingshui Xincun, Hainan	66	Copepoda copepodite/nauplius, <i>Oithona simplex</i> , <i>Noctiluca scientillans</i> , etc	II	This study

性差异, 夏季以短尾类溞状幼体占优势, 秋季则以原生动物类的夜光虫居多; 路加等^[13]在山东荣成天鹅湖海草床区的研究结果也显示, 该生态区4个季度共发现浮游动物18种、浮游幼体3类, 优势种均以小拟哲水蚤为主, 浮游动物种类数呈显著的季节性变化。综上所述, 不同纬度的海草床区所鉴定的浮游动物种类数均有明显差异, 物种数从高纬度到低纬度区域呈逐渐上升趋势, 这也说明不同纬度的气候条件、地形等因素对其种类的影响。而优势种组成方面, 国内的海草床区的浮游动物优势种整体均以暖水沿岸类群及浮游幼体占主导, 整个海草床区优势种组成较为一致。

通过与海南岛近岸海域^[19,20]、西北部沿岸^[21]、东南沿岸珊瑚礁区^[22,23]、东部人工鱼礁区^[24]等海南岛海域的浮游动物群落特征研究资料相比, 新村港海草床区的浮游动物组成类群及优势种整体上与这些近岸海域较为接近, 优势种多以暖水沿岸类群为主(表5)。这表明海南岛周边海域水温常年较高且较稳定, 使得研究海域的暖水沿岸类群稳定生长并成为近岸海域的优势种类, 因此, 整个海南岛近岸海域的浮游

动物群落结构均呈现出明显的热带和亚热带区系特征^[21]。此外,本研究秋季优势种中检出了高丰度的夜光虫,而夜光虫与营养盐浓度之间存在较强的相关性,由于浮游植物生长过程中会消耗大量的营养盐(DIN、磷酸盐),丰富的浮游植物为夜光虫提供了充足的食物^[25,26],且本研究秋季DIN、磷酸盐含量低于春季(表1),表明新村港海草床区夜光虫通过摄食浮游植物进行生长繁殖的同时也间接消耗水体中较多的营养物质。这一现象需要引起足够重视,水体中夜光虫的大量增殖及死亡分解过程会消耗大量的氧气,对当地海洋生物产生负面影响,严重时会导致海域生态系统失衡。因此,后期还需对新村港海草床区的浮游动物进行长期监测研究,从而促进该生态区海草床生态系统的健康和可持续发展。

3.2 浮游动物粒径结构的影响因素

浮游动物对环境变化较为敏感,海水中浮游动物丰度除了与浮游藻类密度相关外,还与水温、盐度、营养盐、溶解氧等因子存在直接或间接关系^[27,28]。龚玉艳等^[14]的研究结果表明,盐度是陵水湾浮游动物季节变化的主要影响因子,与浮游动物丰度呈显著负相关性。张才学等^[2]的研究也表明,浮游动物丰度与pH值呈正相关性,而与盐度、磷酸盐呈负相关性。另外,在高纬度的海草生长区,水温、DO和DIN也是影响浮游动物丰度的关键限制性因子^[12,13]。本研究的春、秋季新村港海草床区不同粒径范围浮游动物丰度与环境因子间的相关性结果(表4)呈明显的季节性差异,春季磷酸盐、硅酸盐和悬浮物为影响因子,对2 000—4 000和1 250—2 000 μm 的浮游动物丰度起促进作用。盐度反之,与2 000—4 000 μm 的丰度呈极显著负相关性。秋季水深对600—1 250、355—600、160—355 μm 偏小粒径浮游动物的丰度影响较大,呈显著正相关性。新村港海草床区生境多样性、浮游动物各粒径丰度受多种因素综合调控^[28]。春季高浓度的磷酸盐和硅酸盐是浮游植物生长、繁殖的重要营养物质,尤其是海草生长区,大量繁殖的浮游藻类是海草床区不同粒径浮游动物的关键饵料来源,直接影响着大粒径浮游动物的丰度和数量。此外,较高含量悬浮物在一定程度上也可避免浮游动物遭仔稚鱼类和其他无脊椎动物的捕食^[29,30],加上海水养殖区、渔港码头区水体质量较其他区域较差,不利于大粒径浮游动物的生存与繁殖,进而直接或间接影响着海草床区2 000—4 000和1 250—2 000 μm 的大粒径浮游动物。盐度也是影响河口区域浮游动物种类

组成的重要环境因子^[27],新村港海域作为一个浅海潟湖,受陆源淡水输入的影响,整个区域为咸淡水交汇区,适宜的水体盐度能满足河口类群、暖水沿岸类群和暖水广布类群等浮游动物的生长,而高盐度水体则会直接抑制河口类群、暖水沿岸类群的生长。因此,盐度较高的湾口外海区丰度明显低于湾内潟湖区。这也解释了从湾内到湾外盐度的增加,各区域内2 000—4 000 μm 的浮游动物丰度值均受到明显抑制的重要原因。宋星宇等^[28]的研究也表明,浮游动物丰度高值区均出现于珠江河口的咸淡水交汇区,丰度与盐度间存在明显相关性,与本研究结果相似。秋季整个海草床区的水深较春季均有所下降,水体越深,浮游动物丰度越高,尤其是偏小粒径的浮游动物变化最明显。这表明新村港不同性质区域的水深对浮游动物生长、繁殖有明显促进作用,深水体可为偏小粒径的浮游动物提供庇护场所和生存空间,较浅的水体中浮游动物易遭其他高营养级生物的捕食,不利于其生长繁殖。

4 结论

本研究通过研究春、秋季海南省陵水县新村港海草床区各粒径浮游动物的群落结构特征及其对环境因子的响应机制,结果表明:春季鉴定出浮游动物37科40属65种,浮游幼体20类,优势种以桡足类幼体/无节幼体为主。秋季共鉴定出浮游动物23科25属37种,浮游幼体19类,以夜光虫占主导优势。春季浮游动物种类丰富性和多样性要高于秋季,但优势种粒径大小则相反;浮游动物物种数、丰度存在季节性差异。种类数:春季>秋季,湾口外海区和海草生长区的种类数最高,以600—1 250、355—600 μm 种类数居多。丰度则相反,秋季>春季,鱼排养殖区丰度最高,以160—355、355—600 μm 的丰度居多;春季磷酸盐、硅酸盐及悬浮物为影响因子,与2 000—4 000、1 250—2 000 μm 的浮游动物丰度呈显著正相关性。盐度则反之,呈极显著负相关性。水深是影响秋季浮游动物丰度的主要因素,与600—1 250、355—600、160—355 μm 偏小粒径浮游动物的丰度呈显著正相关性。海草床区各粒径浮游动物丰度呈现季节性变化,与环境因子间也存在不同程度相关性,亟需对该区域的浮游动物粒径结构进行长期监测研究。因此,笔者团队后期将聚焦于不同季度南海草床区的浮游动物粒径结构变化特征,研究分析不同季度不同粒径浮游动物种群、丰度及优势种的更替规律与机

制,为海南近岸海草床区的生态系统的健康状况评估提供数据支撑。

参考文献

- [1] ALCARAZ M, ALMEDA R, CALBET A, et al. The role of Arctic zooplankton in biogeochemical cycles: respiration and excretion of ammonia and phosphate during summer [J]. *Polar Biology*, 2010, 33(12): 1719-1731.
- [2] 张才学, 孙省利, 陈春亮, 等. 流沙湾海草床海域浮游动物的群落结构和季节变化 [J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(5): 1386-1394.
- [3] FERRIER-PAGÈS C, HOOGENBOOM M, HOULBRÈQUE F. The role of plankton in coral trophodynamics [M]//DUBINSKY Z, STAMBLER N. *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*. Dordrecht: Springer, 2011: 215-229.
- [4] WANG Y G, CHEN X Y, XING B P, et al. Zooplankton composition and distribution in the Lembah Strait of North Sulawesi, Indonesia [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(12): 35-44.
- [5] BIANCHI F, ACRI F, AUBRY F B, et al. Can plankton communities be considered as bio-indicators of water quality in the Lagoon of Venice? [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46(8): 964-971.
- [6] CHOU C, TSENG L, OU C, et al. Seasonal succession of planktonic copepods in bight environments of northeastern Taiwan [J]. *Zoological Studies*, 2012, 51: 1380-1396.
- [7] 杨宗岱, 吴宝铃. 青岛近海的海草场及其附生物 [J]. *黄渤海海洋*, 1984, 2(2): 56-67.
- [8] 李洋. 海南岛东海岸海草场大型底栖生物研究 [D]. 海口: 海南大学, 2015: 1-64.
- [9] 陈娟, 黄文国. 陵水新村港海水环境质量状况分析与评价 [J]. *广东化工*, 2016, 43(14): 38-39, 17.
- [10] ZHANG J P, HUANG X P, JIANG Z J. Physiological responses of the seagrass *Thalassia hemprichii* (Ehrenb.) Aschers as indicators of nutrient loading [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 83(2): 508-515.
- [11] 黄道建, 黄小平, 黄正光. 海南新村湾海菖蒲 TN 和 TP 含量时空变化及其对营养负荷的响应 [J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(1): 40-43.
- [12] 张兆衡, 杨薇, 张子玥, 等. 渤海兴城-觉华岛海域海草床典型生物群落特征及其关键环境因子识别 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(1): 90-98.
- [13] 路加, 郭栋, 余思涵, 等. 荣成天鹅湖海草床及其邻近裸沙区浮游生物的时空变化特征 [J]. *渔业科学进展*, 2023, 44(4): 12-25.
- [14] 龚玉艳, 肖雅元, 徐姗楠, 等. 陵水湾浮游动物群落结构特征及其季节变化 [J]. *中国水产科学*, 2019, 26(1): 71-81.
- [15] 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. 海洋调查规范: 第 4 部分 海水化学要素调查: GB/T 12763. 4—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 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. 海洋调查规范: 第 6 部分 海洋生物调查: GB/T 12763. 6—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [17] ZHOU L B, HUANG L M, TAN Y H, et al. Size-based analysis of a zooplankton community under the influence of the Pearl River plume and coastal upwelling in the northeastern South China Sea [J]. *Marine Biology Research*, 2015, 11(2): 168-179.
- [18] LAMB J B, VAN DE WATER J A J M, BOURNE D G, et al. Seagrass ecosystems reduce exposure to bacterial pathogens of humans, fishes, and invertebrates [J]. *Science*, 2017, 355(6326): 731-733.
- [19] 张光星, 陈石泉, 陈丹丹, 等. 海南岛近岸海域夏初浮游动物与环境因子的关系 [J]. *海洋学报*, 2014, 36(12): 125-132.
- [20] 谢福武, 梁计林, 邢孔敏. 海南岛近岸海域夏、秋季浮游动物分布特征研究 [J]. *海岸工程*, 2019, 38(4): 280-293.
- [21] 孙柔鑫, 王彦国, 连光山, 等. 海南岛西北沿岸海域浮游桡足类的分布及群落特征 [J]. *生物多样性*, 2014, 22(3): 320-328.
- [22] 谢福武, 梁计林, 邢孔敏, 等. 夏季海南东、南沿岸珊瑚礁区浮游动物群落结构特征研究 [J]. *海洋科学*, 2019, 43(7): 87-95.
- [23] LI K Z, WU X J, TAN Y H, et al. Spatial and temporal variability of copepod assemblages in Sanya Bay, northern South China Sea [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, 7: 168-176.
- [24] 谢福武, 谢海群, 吴程宏, 等. 海南文昌人工鱼礁区浮游动物群落特征与环境因子相关性 [J]. *广东海洋大学学报*, 2023, 43(1): 41-50.
- [25] 蔡世斌, 覃超梅, 黄少建, 等. 夜光藻斑块分布与水环境因子的相关关系 [J]. *热带生物学报*, 2018, 9(1): 1-11.
- [26] 田达玮, 宋书群, 陈田田, 等. 胶州湾夜光藻种群动态及其大量繁殖的生态机制 [J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(2): 276-284.
- [27] YUAN D N, CHEN L D, LUAN L L, et al. Effect of salinity on the zooplankton community in the Pearl River Estuary [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2020, 19(6): 1389-1398.

- [28] 宋星宇,林雅君,张良奎,等. 粤港澳大湾区近海中小型浮游动物分布特征及影响因素[J]. 热带海洋学报, 2023, 42(3): 136-148.
- [29] JOSUÉ I I P, CARDOSO S J, MIRANDA M, et al. Cyanobacteria dominance drives zooplankton functional dispersion [J]. *Hydrobiologia*, 2019, 831(1): 149-161.
- [30] ZHOU J, QIN B Q, ZHU G W, et al. Long-term variation of zooplankton communities in a large, heterogeneous lake: implications for future environmental change scenarios [J]. *Environmental Research*, 2020, 187(12): 109704.

Particle Size Structure Characteristics of Zooplankton during Spring and Autumn in the Seagrass Areas of Xincun Port, Hainan Island

XIE Fuwu¹, WANG Shaolu^{1**}, XIE Haiqun^{2**}, PANG Qiaozhu², FU Junyou²

(1. Hainan Ecological Environmental Monitoring Center, Haikou, Hainan, 571126, China; 2. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou, Hainan, 571126, China)

Abstract: In order to explore the community structure characteristics of zooplankton with different particle sizes in the seagrass bed area and its response mechanism to environmental factors, the particle size structure and important functional groups of zooplankton in different water areas of Xincun Port seagrass bed area in Lingshui County, Hainan Province were investigated and studied in April and November 2022, and the influencing factors of seasonal differences were also discussed. The results showed that a total of 65 species of zooplankton belonging to 40 genera and 37 families were identified in spring, and 20 types of planktonic larvae were identified. Small-sized copepod larvae/nauplii were dominant. In autumn, a total of 37 species of zooplankton, belonging to 25 genera and 23 families, and 19 species of planktonic larvae were identified. *Noctiluca scientillans* was the dominant species. There were seasonal differences in the number and abundance of zooplankton species. The number of species in spring was higher than that in autumn. The most prominent areas were the sea area outside the bay and the seagrass growth area, with the majority of 600–1 250 and 355–600 μm species. The abundance of zooplankton was vice versa, the highest abundance was observed in the fish farming areas, with the abundance of 160–355 and 355–600 μm . In addition, the main limiting factors in spring were phosphate, silicate and suspended solids, which were significantly positively correlated with the abundance of zooplankton at 2 000–4 000 and 1 250–2 000 μm ($P < 0.05$). Salinity was significantly negatively correlated with zooplankton abundance at 2 000–4 000 μm ($P < 0.01$). The water depth was the main influencing factor in autumn, and there was a significant positive correlation with the abundance of small-sized zooplankton in 600–1 250, 355–600, 160–355 μm ($P < 0.05$). The abundance of zooplankton with different particle sizes in the seagrass bed area of Xincun Port showed seasonal changes, and there were different degrees of correlation with environmental factors. Therefore, it is urgent to carry out long-term monitoring and research on the particle size structure of zooplankton in this area.

Key words: zooplankton; particle size structure; environmental factors; seagrass beds; Hainan Xincun Port

责任编辑: 陆媛峰