

宋晨, 孟周, 王晓波, 等. 2019–2020 年夏季舟山海域浮游动物优势种生态位及其生态分化[J]. 海洋学报, 2022, 44(10): 127–139, doi:10.12284/hyxb2022170

Song Chen, Meng Zhou, Wang Xiaobo, et al. Ecological niches and ecological differentiation of dominant zooplankton species in the Zhoushan waters in summer 2019–2020[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(10): 127–139, doi:10.12284/hyxb2022170

# 2019–2020 年夏季舟山海域浮游动物 优势种生态位及其生态分化

宋晨<sup>1</sup>, 孟周<sup>1</sup>, 王晓波<sup>2,3</sup>, 韩庆喜<sup>1\*</sup>

(1. 宁波大学 海洋学院, 浙江 宁波 315832; 2. 国家海洋局宁波海洋环境监测中心站, 浙江 宁波 315012; 3. 禹治环境科技(浙江)有限公司, 浙江 宁波 315199)

**摘要:** 为了解舟山海域浮游动物种间关系及环境因子变化对优势种生态位分化的影响, 根据 2019 年夏季和 2020 年夏季舟山海域浮游动物调查资料, 利用优势度指数判断该海域浮游动物优势种, 运用 Shannon 公式和 Pianka 公式分析浮游动物优势种生态位宽度和生态位重叠指数, 采用冗余分析方法探究影响舟山海域浮游动物优势种生态位分化的主要环境因子。结果表明, 舟山海域 2019 年、2020 年浮游动物优势种更替率为 66.67%。根据舟山海域浮游动物优势种生态位宽度值, 可将其分为广生态位种、中生态位种、窄生态位种, 2019 年广生态位种有 4 种, 2020 年有 6 种, 分别占浮游动物优势种的 66.67% 和 60.00%, 表明广生态位种是舟山海域浮游动物优势种的主要组成成分。2019 年浮游动物优势种生态位重叠指数范围为 0.11~0.79, 2020 年生态位重叠指数范围为 0~0.98。冗余分析表明, 2019 年浮游动物优势种生态位分化主要受硅酸盐浓度、化学需氧量、温度和叶绿素 *a* 浓度的影响, 2020 年浮游动物优势种生态位分化主要受硅酸盐和溶解氧浓度的影响。该研究有望进一步了解舟山海域浮游动物群落的种间关系, 为阐述浮游动物对环境变化的适应机制等研究提供数据基础和科学依据。

**关键词:** 舟山海域; 浮游动物; 优势种; 生态位; 冗余分析

中图分类号: Q178.53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)10-0127-13

## 1 引言

浮游动物是海洋中的次级生产者, 其种类、分布和数量均可影响海域生产力, 对渔业发展意义重大<sup>[1-2]</sup>。浮游动物的群落结构、生物量和优势种分布可以反映水域环境的变化, 常作为水域环境的指示动物<sup>[3]</sup>。浮游动物因其随波逐流的特性而受到诸多因素的影响。例如, 王慧君等<sup>[4]</sup>发现, 不同水团会对浮游动物群落结构地理分布格局产生影响; 何瑞等<sup>[5]</sup>指出, 浮

游植物可通过食物网影响浮游动物种类组成和分布; 付显婷等<sup>[6]</sup>指出, 水环境变化会对浮游动物群落结构分布起主导作用。生态位是指种群在生态系统中所占据的时空位置以及它与其他种群之间的相互影响<sup>[7-8]</sup>。生态位理论常用于生物多样性、种间关系、群落的结构和演替及种群进化等方面的研究<sup>[9-10]</sup>, 亦广泛运用于海洋生态系统, 常用于研究海域内生物的种群特征、生存状况、利用各种资源的幅度及种对间的相互关系等<sup>[11]</sup>。

收稿日期: 2022-03-08; 修订日期: 2022-05-31。

基金项目: 国家自然科学基金(42076156, 41676139)。

作者简介: 宋晨(1999—), 男, 河南省商丘市人, 主要从事底栖生态学研究。E-mail: 1158145369@qq.com

\* 通信作者: 韩庆喜, 副研究员, 主要从事底栖生态学研究。E-mail: hanqingxi@nbu.edu.cn

舟山海域位于浙江省北部,受长江和钱塘江两大河口及台湾暖流和沿岸寒流交汇的影响,水域环境复杂,水团交汇带来大量饵料,是我国舟山渔场的主要海区。然而,由于20世纪70年代以来无节制的捕捞等原因,使舟山渔场渔业资源减少,此外,人类活动愈加频繁,海域环境质量下降<sup>[12]</sup>,使该海域浮游动物生物量呈下降趋势<sup>[13]</sup>。近年来,“绿水青山就是金山银山”的呼吁深入人心,合理有效地开发海洋资源及对环境的保护越来越得到重视。

目前对舟山海域浮游动物的研究主要集中在分布特征、群落结构等方面<sup>[1,4,13-14]</sup>,而该海域浮游动物优势种生态位的研究鲜有报道。此外对浮游动物的研究主要针对季节变化<sup>[3,9-10]</sup>,对年际变化鲜有报道。浮游动物生态位分布在一定程度上能反映出海洋生态环境的变化现状<sup>[9]</sup>,因此研究浮游动物的生态位和年际变化具有重要意义。有鉴于此,根据2019年夏季和2020年夏季对舟山海域浮游动物的采样调查,分析了舟山海域浮游动物优势种组成及生态位的主要特征,并采用冗余分析(RDA)探究环境因子变化对浮游动物优势种生态位分化的影响,该研究将加深对舟山海域浮游动物群落的认识程度,有望进一步了解

该海域浮游动物群落中不同种群的相互作用关系,为阐述浮游动物应对环境变化的适应机制等研究提供数据基础和科学依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与分析

根据舟山海域的海域特点和本次研究目的,共设置相同采样站位12个(图1),调查范围为舟山海域(29°~31°N, 122°00'~123°30'E), Z1、Z3、Z5、Z6、Z7、Z9、Z11 站位分布在舟山近岸, Z2、Z4、Z8、Z10、Z12 站位分布在舟山近海,租用渔船分别在2019年7月24-28日、8月14日和2020年7月26-31日及8月7日进行浮游动物和水质参数的调查采样。采用浅水Ⅱ型浮游动物网具(网口内径为31.6 cm,网长为140 cm,网口面积为0.08 m<sup>2</sup>),从底层至表层垂直拖网采集浮游动物样品。将样品用5%的福尔马林固定之后,带回实验室去除杂质,在显微镜(奥林巴斯, SZX16, 日本)和解剖镜(奥林巴斯, SZ61, 日本)下进行鉴定和统计。样品采集和分析按《海洋调查规范》(GB/T 12763.6-2007)<sup>[15]</sup>进行。

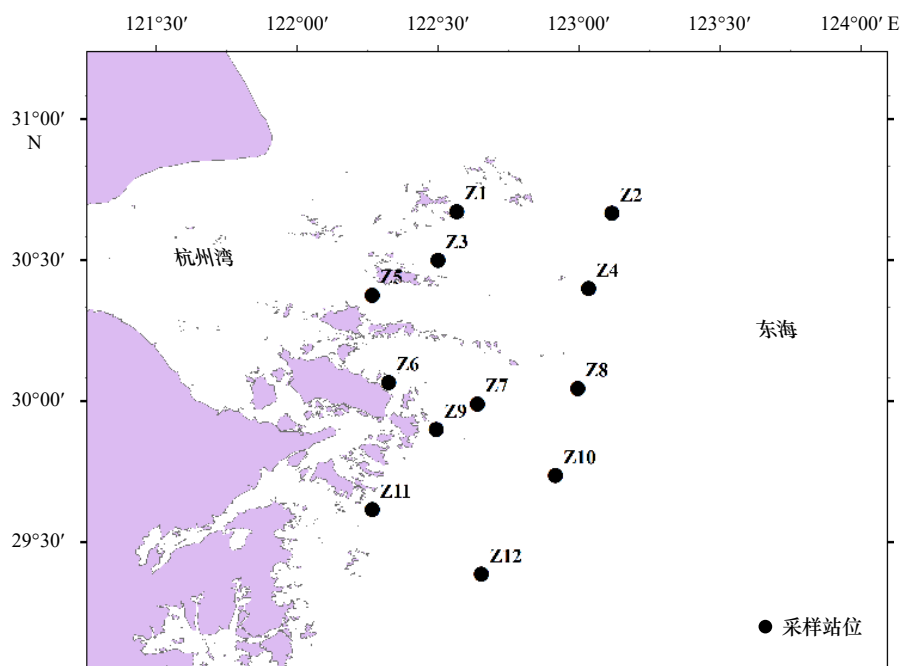


图1 2019-2020年夏季舟山海域浮游动物采样站位

Fig. 1 Zooplankton sampling stations in the Zhoushan waters during the summer of 2019-2020

使用船载测深仪测量水深;使用温盐深仪CTD测量水温和盐度;使用pH计法测量pH;采用碘量法测量溶解氧(DO)浓度;采用荧光分光光度法测量叶绿素a(Chl a)浓度;采用过滤物重量法测量悬浮物(SS)浓度;采用碱性高锰酸钾法测量化学需氧量(COD);

采用磷钼蓝分光光度法测量活性磷酸盐( $\text{PO}_4\text{-P}$ )浓度;采用奈乙二胺分光光度法测量亚硝酸盐-氮( $\text{NO}_2\text{-N}$ )浓度;采用锌-镉还原法测量硝酸盐-氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ )浓度;采用次溴酸盐氧化法测量氨-氮浓度;采用磷钼蓝法测量活性硅酸盐( $\text{SiO}_3\text{-Si}$ )浓度。此外,总无机氮

(TIN)浓度等于亚硝酸盐-氮、硝酸盐-氮与氨-氮的浓度和。水样采集与分析按《海洋监测规范》(GB 17378.4-2007)<sup>[16]</sup>进行。

## 2.2 数据分析

### 2.2.1 优势种分析

采用优势度指数( $Y$ )<sup>[17]</sup>判断浮游动物优势种:

$$Y = (n_i/N) \times f_i, \quad (1)$$

式中,  $n_i$ 为第  $i$  种浮游动物的个体数;  $N$  为所有浮游动物种类总个体数;  $f_i$  为该种出现的站位数与总站位数的比值。当  $Y > 0.02$ <sup>[10]</sup> 时, 该种为优势种。

### 2.2.2 优势种更替率

优势种更替率计算公式( $S$ )<sup>[10]</sup> 为

$$S = (a + b - 2c) / (a + b - c) \times 100\%, \quad (2)$$

式中,  $a$  为 2019 年浮游动物优势种种类数;  $b$  为 2020 年浮游动物优势种种类数;  $c$  为两年共同优势种种类数。

### 2.2.3 生态位宽度

Shannon 生态位宽度( $B_i$ )计算公式<sup>[18]</sup> 为

$$B_i = - \sum_{j=1}^R (P_{ij} \ln P_{ij}), \quad (3)$$

式中,  $B_i$  的取值范围为  $[0, R]$ ;  $P_{ij}$  为  $i$  种在  $j$  站位的个体数与该物种总个体数的比值;  $R$  为总站位数。

### 2.2.4 生态位重叠

Pianka 指数生态位重叠指数( $O_{ik}$ )计算公式<sup>[19]</sup> 为

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^R (P_{ij} P_{kj}) / \sqrt{\sum_{j=1}^R P_{ij}^2 \sum_{j=1}^R P_{kj}^2}, \quad (4)$$

式中,  $O_{ik}$  的取值范围为  $[0, 1]$ ;  $P_{ij}$  和  $P_{kj}$  分别为  $i$  种和  $k$  种在  $j$  站位的个体数占该物种总个体数的比值;  $R$  为总站位数; 当  $O_{ik} > 0.6$ , 视为显著重叠<sup>[20]</sup>, 当  $0.3 < O_{ik} < 0.6$  时, 视为重叠有意义<sup>[11]</sup>。

## 2.3 数据处理

使用 ArcGIS Desktop 10.6 制作采样站位分布图; 使用 Microsoft Excel 2019 计算优势度指数和优势种更替率; 使用 R4.2.1 软件计算生态位宽度值和生态位重叠值; 使用 SPSS 18.0 进行两独立样本  $t$  检验; 使用 Canoco 5.0 进行冗余分析(RDA)。

在统计分析之前对除 pH 外的环境因子进行对数( $\lg(x+1)$ )转换<sup>[21]</sup>, 使其符合正态分布, 然后对浮游动物优势种数据进行去趋势对应分析(DCA)。当排序轴最大梯度小于 3 时, 使用冗余分析; 排序轴最大梯度大于 4 时, 使用典范对应分析(CCA); 当排序轴最大梯度大于 3 小于 4 时, 二者均可使用。结果显示, 两年排序轴最大梯度均小于 3, 因此选择 RDA。

## 3 结果

### 3.1 浮游动物群落结构及优势种

2019–2020 年夏季在舟山海域共采集到浮游动物 8 个大类共 130 种, 2019 年采集到浮游动物 103 种, 其中桡足类 43 种(41.7%)、浮游幼虫 16 种(15.5%)、水螅水母类 11 种(10.7%)、毛颚类 3 种(2.9%)、多毛类 3 种(2.9%)、原生动物 1 种(1.0%)、背囊类 1 种(1.0%)、其他动物 25 种(24.3%); 2020 年采集到浮游动物 82 种, 其中桡足类 27 种(32.9%)、浮游幼虫 16 种(19.5%)、水螅水母类 12 种(14.6%)、毛颚类 5 种(6.1%)、多毛类 2 种(2.5%)、其他动物 20 种(24.4%)。2019 年浮游动物平均丰度为 3 866.6 ind./m<sup>3</sup>, Z5 站最高(10 205.8 ind./m<sup>3</sup>), Z11 站最低(1 164.4 ind./m<sup>3</sup>), 舟山近岸海域平均丰度为 4 521.1 ind./m<sup>3</sup>, 舟山近海平均丰度为 2 950.4 ind./m<sup>3</sup>; 2020 年浮游动物平均丰度为 2 269.2 ind./m<sup>3</sup>, 其中 Z11 站最高(8 452.2 ind./m<sup>3</sup>), Z9 站最低(573.8 ind./m<sup>3</sup>) 舟山近岸海域平均丰度为 2 397.4 ind./m<sup>3</sup>, 舟山近海平均丰度为 2 089.6 ind./m<sup>3</sup>。

根据优势度指数( $Y > 0.02$ ), 舟山海域共有浮游动物优势种 12 种, 其中 2019 年有优势种 6 种, 分别是针刺真浮萤(*Euconchoecia aculeata*)、针刺拟哲水蚤(*Paracalanus aculeatus*)、夜光虫(*Noctiluca scintillans*)、桡足类桡足幼体(copepoda copepodite)、桡足类无节幼体(copepoda nauplius)、强额孔雀水蚤(*Parvocalanus crassirostris*); 2020 年 10 种, 分别是刺尾纺锤水蚤(*Acartia spinicauda*)、肥胖箭虫(*Flaccisagitta enflata*)、拟长腹剑水蚤(*Oithona similis*)、强额孔雀水蚤、桡足类桡足幼体、桡足类无节幼体、刷状萤虾(*Lucifer penicillifer*)、微驼隆哲水蚤(*Acrocalanus gracilis*)、针刺拟哲水蚤和中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)。两年共同优势种(类)4 种, 分别为针刺拟哲水蚤、桡足类桡足幼体、桡足类无节幼体和强额孔雀水蚤(表 1)。2019 年、2020 年优势种更替率为 66.67%。

### 3.2 优势种的生态位宽度

2019–2020 年夏季舟山海域浮游动物优势种的生态位宽度范围为 0.45~2.34, 根据生态位宽度值的大小将其划分为 3 段, 第 1 段浮游动物优势种  $B_i \geq 1.60$ , 为广生态位种; 第 2 段浮游动物优势种  $0.8 \leq B_i < 1.60$ , 为中生态位种; 第 3 段浮游动物优势种  $B_i < 0.8$ , 为窄生态位种。

2019 年夏季舟山海域浮游动物优势种的生态位宽度范围为 1.47~2.27, 其中针刺真浮萤(1.60)、强额

表 1 2019 年、2020 年夏季舟山海域浮游动物优势种

Table 1 Dominant zooplankton species in the Zhoushan waters in summer 2019 and 2020

序号	物种	2019年			2020年		
		出现频率/%	优势度(Y)	平均丰度/(ind·m <sup>-3</sup> )	出现频率/%	优势度(Y)	平均丰度/(ind·m <sup>-3</sup> )
1	针刺拟哲水蚤 <i>Paracalanus aculeatus</i>	83.33	0.160	890.9	50	0.051	464.9
2	桡足类桡足幼体 copepoda copepodite	100	0.132	511.6	100	0.280	634.9
3	夜光虫 <i>Noctiluca scintillans</i>	58.33	0.107	1 214.7			
4	强额孔雀水蚤 <i>Parvocalanus crassirostris</i>	58.33	0.042	474.5	91.67	0.106	286.2
5	桡足类无节幼体 copepoda nauplius	100	0.024	91.0	91.67	0.025	67.6
6	针刺真浮萤 <i>Euconchoecia aculeata</i>	91.67	0.022	109.0			
7	刺尾纺锤水蚤 <i>Acartia spinicauda</i>				100	0.103	233.4
8	微驼隆哲水蚤 <i>Acrocalanus gracilis</i>				66.67	0.036	181.6
9	拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i>				91.67	0.034	91.6
10	肥胖箭虫 <i>Flaccisagitta enflata</i>				75	0.032	127.5
11	中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>				83.33	0.031	100.2
12	刷状萤虾 <i>Lucifer penicillifer</i>				66.67	0.025	128.3

孔雀水蚤(1.75)、桡足类无节幼体(2.23)和桡足类桡足幼体(2.27)为广生态位种,针刺拟哲水蚤(1.47)和夜光虫(1.55)为中生态位种,无窄生态位种(表2)。广生态位种和中生态位种分别占全部优势种的66.67%和33.33%。

表 2 2019 年夏季舟山海域浮游动物优势种生态位宽度值 ( $B_i$ ) 和生态位重叠指数 ( $O_{ik}$ )Table 2 Niche breadth index ( $B_i$ ) and niche overlap index ( $O_{ik}$ ) of dominant zooplankton species in the Zhoushan waters in summer 2019

序号	物种	$B_i$	$O_{ik}$						
			1	2	3	4	5	6	
1	桡足类桡足幼体	2.27	1						
2	桡足类无节幼体	2.23	0.79	1					
3	强额孔雀水蚤	1.75	0.60	0.63	1				
4	针刺真浮萤	1.60	0.58	0.52	0.29	1			
5	夜光虫	1.55	0.53	0.39	0.30	0.31	1		
6	针刺拟哲水蚤	1.47	0.59	0.68	0.72	0.17	0.11	1	

2020 年夏季舟山海域浮游动物优势种的生态位宽度范围为 0.45~2.34, 其中微驼隆哲水蚤(1.61)、强额孔雀水蚤(1.73)、肥胖箭虫(1.74)、桡足类无节幼体(1.82)、中华哲水蚤(1.92)和桡足类桡足幼体(2.34)为广生态位种,刺尾纺锤水蚤(1.25)和拟长腹

剑水蚤(1.41)为中生态位种,针刺拟哲水蚤(0.45)和刷状萤虾(0.76)为窄生态位种(表3)。广生态位种、中生态位种和窄生态位种分别占全部优势种的60.00%、20.00%和20.00%。

共同优势种中,除针刺拟哲水蚤外,其他3种优势种生态位宽度值变化不大,仍为广生态位种,仅针刺拟哲水蚤生态位宽度值大幅度下降,由2019年的中生态位种(1.47)变为2020年的窄生态位种(0.45)。

### 3.3 生态位重叠

2019-2020 年夏季舟山海域浮游动物优势种的生态位重叠指数范围为 0~0.98。2019 年浮游动物优势种生态位重叠指数范围为 0.11~0.79, 其中生态位显著重叠( $O_{ik} \geq 0.6$ )有 5 种对, 占 33.33%, 分别为桡足类桡足幼体和桡足类无节幼体(0.79)、桡足类桡足幼体和强额孔雀水蚤(0.60)、桡足类无节幼体和强额孔雀水蚤(0.63)、桡足类无节幼体和针刺拟哲水蚤(0.68)、针刺拟哲水蚤和强额孔雀水蚤(0.72)。生态位重叠有意义( $0.3 \leq O_{ik} < 0.6$ )的有 6 种对, 占 46.67%, 其中桡足类桡足幼体和针刺真浮萤(0.58)、桡足类桡足幼体和针刺拟哲水蚤(0.59)之间重叠指数均接近 0.6。其余 3 个种对的生态位重叠指数均小于 0.3, 占 20%(表2)。

2020 年浮游动物优势种生态位重叠指数范围为 0~0.98, 生态位显著重叠( $O_{ik} \geq 0.6$ )有 11 种对, 占 24.45%。其中微驼隆哲水蚤和刷状萤虾(0.87)、拟长

表3 2020年夏季舟山海域浮游动物优势种生态位宽度值( $B_i$ )和生态位重叠指数( $O_{ik}$ )Table 3 Niche breadth index ( $B_i$ ) and niche overlap index ( $O_{ik}$ ) of dominant zooplankton species in the Zhoushan waters in summer 2020

序号	物种	$B_i$	$O_{ik}$											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	桡足类桡足幼体	2.34	1											
2	中华哲水蚤	1.92	0.56	1										
3	桡足类无节幼体	1.82	0.65	0.46	1									
4	肥胖箭虫	1.74	0.55	0.77	0.73	1								
5	强额孔雀水蚤	1.73	0.58	0.18	0.38	0.22	1							
6	微驼隆哲水蚤	1.61	0.48	0.34	0.62	0.45	0.22	1						
7	拟长腹剑水蚤	1.41	0.79	0.33	0.43	0.22	0.26	0.11	1					
8	刺尾纺锤水蚤	1.25	0.76	0.23	0.31	0.10	0.27	0.11	0.96	1				
9	刷状莹虾	0.76	0.27	0.18	0.26	0.17	0.10	0.87	0.02	0.09	1			
10	针刺拟哲水蚤	0.45	0.69	0.16	0.26	0.06	0.23	0	0.97	0.98	0	1		

腹剑水蚤和刺尾纺锤水蚤(0.96)、拟长腹剑水蚤和针刺拟哲水蚤(0.97)、刺尾纺锤水蚤和针刺拟哲水蚤(0.98)之间的生态位重叠指数达到了0.85以上。生态位重叠有意义( $0.3 \leq O_{ik} < 0.6$ )的有11种对,占24.45%,其中桡足类桡足幼体和强额孔雀水蚤(0.58)之间重叠值接近0.6。其余23个种对的生态位重叠指数均小于0.3,占51.10%,其中微驼隆哲水蚤和针刺拟哲水蚤(0)、刷状莹虾和针刺拟哲水蚤(0)生态位重叠指数为0(表3)。

### 3.4 生态位分化

#### 3.4.1 舟山海域环境因子

2019–2020年夏季舟山海域主要环境因子存在显著差异(表4),其中2019年温度、pH和Chl *a*浓度显著高于2020年( $p < 0.05$ ),而2020年SS和SiO<sub>3</sub>-Si浓度则显著高于2019年( $p < 0.05$ ),其余各环境因子差异不显著( $p > 0.05$ )。

#### 3.4.2 冗余分析

利用前向选择和蒙特卡罗检验对各环境因子进行筛选( $p < 0.05$ ),根据筛选结果(表5),2019年筛选出SiO<sub>3</sub>-Si浓度、COD、温度和Chl *a*浓度进行排序分析,2020年筛选出SiO<sub>3</sub>-Si浓度和DO浓度进行排序分析(图2)。

2019年筛选出4个环境因子与6个浮游动物优势种进行RDA分析,分析结果如下:RDA1特征值为0.5875,解释物种变量为58.75%,RDA2特征值为0.2326,解释物种变量为23.26%,2个排序轴4个环

表4 2019年、2020年夏季舟山海域环境因子

Table 4 Environmental factors of Zhoushan waters in summer 2019 and 2020

环境因子	2019年	2020年	<i>p</i>
温度/°C	26.64±1.89	23.90±2.93	0.024
盐度	27.46±5.16	25.42±6.38	0.317
水深/m	32.92±16.80	33.25±16.96	0.730
pH	8.20±0.13	8.02±0.13	0.001
DO浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	7.59±1.25	7.08±1.92	0.406
Chl <i>a</i> 浓度/(μg·L <sup>-1</sup> )	10.81±10.23	2.25±3.19	0.028
SS浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	49.10±36.81	94.25±50.24	0.010
COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.26±0.61	1.08±0.55	0.474
PO <sub>4</sub> -P浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.02±0.01	0.01±0.01	0.142
TIN浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.41±0.20	0.45±0.22	0.360
SiO <sub>3</sub> -Si浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.48±0.31	1.19±0.30	0

注: DO. 溶解氧; Chl *a*. 叶绿素 *a*; SS. 悬浮物; COD. 化学需氧量; PO<sub>4</sub>-P. 活性磷酸盐; TIN. 总无机氮; SiO<sub>3</sub>-Si. 活性硅酸盐。

境因子的累积解释物种变量为82.01%。2019年浮游动物生态位分化主要受SiO<sub>3</sub>-Si浓度、COD、温度和Chl *a*浓度的影响。

2020年筛选出2个环境因子与10个浮游动物优势种进行RDA分析,分析结果如下:RDA1特征值为0.7392,解释物种变量为73.92%,RDA2特征值为0.1474,解释物种变量为14.74%,2个排序轴2个环

表 5 环境因子筛选结果

Table 5 Results of the selection on environmental factors

环境因子	2019年		2020年	
	F	p	F	p
SiO <sub>3</sub> -Si浓度	6.2	0.008	3.6	0.022
COD	3.3	0.046		
温度	4	0.018		
Chl a浓度	5.2	0.014		
DO浓度			3.4	0.044

境因子的累积解释物种变量为 88.66%。2020 年浮游动物生态位分化主要受 SiO<sub>3</sub>-Si 浓度和 DO 浓度的

影响。

### 3.4.3 RDA 排序图

由图 2 可知, 2019 年针刺真浮萤、针刺拟哲水蚤、桡足类桡足幼体、桡足类无节幼体和强额孔雀水蚤的分布主要受 COD、温度、Chl a 浓度和 SiO<sub>3</sub>-Si 浓度的影响, 其中针刺拟哲水蚤、桡足类桡足幼体、桡足类无节幼体和强额孔雀水蚤分布与 COD、温度、Chl a 浓度和 SiO<sub>3</sub>-Si 浓度呈正相关, 针刺真浮萤分布与 COD、温度、Chl a 浓度和 SiO<sub>3</sub>-Si 浓度呈负相关, 夜光虫分布与 COD 和 Chl a 浓度呈正相关, 与 SiO<sub>3</sub>-Si 浓度呈负相关, 与温度相关性较低。

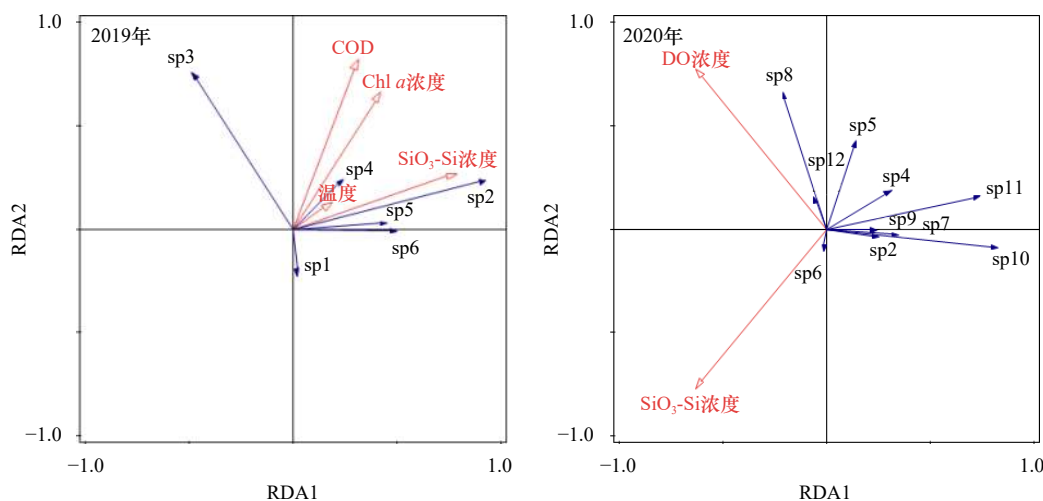


图 2 2019–2020 年夏季舟山海域浮游动物优势种冗余分析排序图

Fig. 2 RDA ordination graphs of the dominant zooplankton species in the Zhoushan waters in summer 2019–2020

sp1. 针刺真浮萤; sp2. 针刺拟哲水蚤; sp3. 夜光虫; sp4. 桡足类桡足幼体; sp5. 桡足类无节幼体; sp6. 强额孔雀水蚤; sp7. 刺尾纺锤水蚤; sp8. 肥胖箭虫; sp9. 拟长腹剑水蚤; sp10. 刷状萤虾; sp11. 微驼隆哲水蚤; sp12. 中华哲水蚤

sp1. *Euconchoecia aculeata*; sp2. *Paracalanus aculeatus*; sp3. *Noctiluca scintillans*; sp4. copepoda copepodite; sp5. copepoda nauplius; sp6. *Parvocalanus crassirostris*; sp7. *Acartia spinicauda*; sp8. *Flaccisagitta enflata*; sp9. *Oithona similis*; sp10. *Lucifer penicillifer*; sp11. *Acrocalanus gracilis*; sp12. *Calanus sinicus*

2020 年, 针刺拟哲水蚤、桡足类桡足幼体、桡足类无节幼体、强额孔雀水蚤、刺尾纺锤水蚤、肥胖箭虫、拟长腹剑水蚤、刷状萤虾、微驼隆哲水蚤和中华哲水蚤的分布主要受 SiO<sub>3</sub>-Si 浓度和 DO 浓度的影响, 其中桡足类无节幼体、肥胖箭虫、中华哲水蚤的分布与 DO 浓度呈正相关, 除强额孔雀水蚤的分布与 SiO<sub>3</sub>-Si 浓度呈正相关外, 其余优势种的分布均与 SiO<sub>3</sub>-Si 浓度呈负相关。

## 4 讨论

### 4.1 浮游动物群落结构及优势种分析

本研究中, 浮游动物群落组成均为桡足类最多, 其次依次为浮游幼虫和水螅水母类, 这种群落结构与

孟庆超和赵淑江<sup>[22]</sup>、骆鑫等<sup>[13]</sup>的研究结果相似。2020 年浮游动物物种数、平均丰度均低于 2019 年, 该结果与许卓昀等<sup>[23]</sup>发现“舟山海域浮游生物种类逐年减少、丰度逐年上升”的研究结果不完全一致, 其原因可能与 2019 年夜光虫暴发有关, 其平均丰度远高于其他优势种, 使得 2019 年浮游动物丰度高于 2020 年。两年舟山近海浮游动物平均丰度低于舟山近岸海域, 这种研究结果与陈小庆等<sup>[24]</sup>研究结果相一致。

2019 年舟山海域浮游动物优势种共 6 种, 分别是针刺真浮萤、针刺拟哲水蚤、夜光虫、桡足类桡足幼体、桡足类无节幼体、强额孔雀水蚤, 平均优势度约为 0.08。2020 年浮游动物优势种共 10 种, 分别是刺尾纺锤水蚤、肥胖箭虫、拟长腹剑水蚤、强额孔雀水

蚤、桡足类桡足幼体、桡足类无节幼体、刷状萤虾、微驼隆哲水蚤、针刺拟哲水蚤和中华哲水蚤, 平均优势度约为 0.07。已有的研究表明, 浮游动物优势种越多且优势度越小, 则群落结构越复杂、稳定<sup>[25]</sup>, 简单、脆弱的群落结构会给该海域海洋生态系统的稳定和健康带来威胁<sup>[26]</sup>。本研究与侯朝伟等<sup>[21]</sup>2018年夏季在烟台近海海域获得浮游动物优势种 11 种(平均优势度 0.07)、李浩然等<sup>[27]</sup>2009年夏季在黄河口及邻近海域获得浮游动物优势种 5 种(平均优势度 0.11)、叶文建等<sup>[2]</sup>2014年夏季在舟山岛附近海域获得浮游动物优势种 6 种(平均优势度 0.11)相比, 烟台近海海域浮游动物优势种群落结构最复杂稳定, 其次为舟山海域, 且随着年份增加, 结构的复杂性、稳定性增加, 再次为黄河口及其邻近海域, 群落结构相对简单、脆弱。2019年和 2020年共同优势种共 4 种, 分别为针刺拟哲水蚤、桡足类桡足幼体、桡足类无节幼体和强额孔雀水蚤。2019年、2020年优势种的更替率为 66.67%, 更替率处于较高水平, 说明 2019–2020年舟山海域浮游动物的优势种组成存在较为明显的年际差异<sup>[21]</sup>。

#### 4.2 生态位宽度分析

生态位宽度指物种可以利用的所有资源的总和, 反映出其对生境的适应程度和对资源的利用能力<sup>[28–29]</sup>。2019–2020年舟山海域浮游动物优势种的生态位宽度范围为 0.45~2.34, 存在较大的差异, 根据生态位宽度值的大小, 可将其划分为广生态位种( $B_i \geq 1.60$ ), 对环境有广泛适应能力; 中生态位种( $0.8 \leq B_i < 1.60$ ), 对环境的适应能力稍差; 窄生态位种( $B_i < 0.8$ ), 对环境的要求较高<sup>[21]</sup>。2019年和 2020年浮游动物优势种中, 窄生态位种的占比分别为 0% 和 20%, 中生态位种的占比分别为 33.33% 和 20%, 广生态位种的占比分别为 66.67% 和 60.00%, 表明广生态位种是舟山海域浮游动物优势种的主要组成成分, 这与侯朝伟等<sup>[21]</sup>在烟台近海海域的研究结果相似。广生态位种主要对空间因素做出响应, 窄生态位种主要对环境因素做出响应<sup>[6]</sup>, 当环境发生变化时, 物种对生境的适应程度和对资源的利用能力也会发生变化<sup>[21]</sup>。在 4 种共同优势种中, 桡足类桡足幼体、桡足类无节幼体和强额孔雀水蚤的生态位宽度值发生浮动, 这 3 个物种生态位宽度值在 2019 年均占据前列, 虽经历变化但仍属于广生态位种, 仅针刺拟哲水蚤的生态位宽度值大幅度下降, 由 2019 年的中生态位种(1.47)变为 2020 年的窄生态位种(0.45)。分析其原因, 强额孔雀水蚤为近海广布种, 其适合的温度为 5~33℃<sup>[30]</sup>, 舟山近海温度的变化仍在其适合的温度范围内, 夏季比较适宜浮游幼

虫的生存<sup>[31]</sup>; 因此, 它们生态位宽度变化不大。针刺拟哲水蚤为近岸暖水种, 2019–2020 年温度下降较为显著, 对针刺拟哲水蚤造成一定的影响, 使其对舟山近海环境的适应程度和资源的利用能力下降, 从而使其生态位宽度下降。同样的情况发生在针刺真浮萤, 其虽在 2019 年为广生态位种(1.60), 但其为暖水种, 对温度变化极为敏感<sup>[32]</sup>, 温度的显著下降使得该种大量减少。由此, 广生态位种一般更容易适应环境的改变, 使得其竞争力增强从而更容易取得优势地位, 生态位宽度值在一定程度上可以判定物种的优势度大小, 该研究结果与前人的研究结果<sup>[10, 33]</sup>相似。

#### 4.3 生态位重叠分析

生态位重叠指数可以衡量物种间对资源环境利用的相似度和竞争性<sup>[33]</sup>。本研究中, 2019 年浮游动物优势种  $O_k \geq 0.6$  的占 33.33%, 2020 年  $O_k \geq 0.6$  的占 24.44%, 种间显著重叠现象不广泛。梁森等<sup>[10]</sup>和侯朝伟等<sup>[21]</sup>研究发现, 广生态位种之间往往生态位重叠程度也较高, 但本研究结果并未发现这一现象, 如 2020 年的桡足类桡足幼体( $B_i=2.34$ )和中华哲水蚤( $B_i=1.92$ )之间的生态位重叠指数仅为 0.56, 重叠不显著。刘坤等<sup>[34]</sup>研究表明, 环境资源的高异质性、物种的斑块状分布、种群生态学特性差异等因素, 均会导致不同生态位宽度的物种间产生不同程度的生态位重叠。因此, 仅靠生态位宽度值判断物种间的竞争性可能存在一定的偏差。

2019 年生态位重叠指数最高的为桡足类无节幼体和桡足类桡足幼体(0.79), 桡足类发育分为无节幼体和桡足幼体两个阶段<sup>[35]</sup>, 二者之间关系密切, 对环境的选择重合度较高。2020 年生态位重叠指数最高的为针刺拟哲水蚤和刺尾纺锤水蚤(0.98), 从生态类群看, 二者均为暖水近岸低盐种<sup>[36–38]</sup>, 生存环境相似, 资源不足时种间易产生较激烈的竞争。2020 年微驼隆哲水蚤和刷状萤虾(0.87)等 4 组种对之间的生态位重叠指数达到了 0.85 以上, 表明这些种类在同一空间竞争共同资源的现象极其激烈。2020 年微驼隆哲水蚤和针刺拟哲水蚤(0)、刷状萤虾和针刺拟哲水蚤(0)生态位重叠指数为 0, 表明这些种类在同一生境中既相互重叠又相互独立<sup>[39]</sup>。除 2020 年肥胖箭虫和中华哲水蚤、肥胖箭虫和桡足类无节幼体以及刷状萤虾和微驼隆哲水蚤之间生态位重叠显著外, 两年中其余种间生态位重叠显著的均为桡足类生物。另外, 2019 年针刺拟哲水蚤的生态位宽度值为 1.47, 到 2020 年时已下降为 0.45, 其原因亦可能是其与刺尾纺锤水蚤(0.98)和拟长腹剑水蚤(0.97)的种间竞争有密

切的关系。从生态类群看,前两者均为暖水低盐种,拟长腹剑水蚤虽为广温广盐种<sup>[40]</sup>,但有研究证明拟长腹剑水蚤对低盐度表现出一定的偏好,且对温度和盐度都表现出较高的耐受性<sup>[41]</sup>,因此三者之间的种间竞争较为激烈,从而导致针刺拟哲水蚤的生态位宽度值下降。

#### 4.4 浮游动物优势种生态位与环境因子的关系分析

浮游动物体积较小,游泳能力微弱,其移动通常靠水的流动,浮游动物的生态位分布主要受环境因子的影响<sup>[4,6]</sup>。舟山海域位于长江及钱塘江两大河口的交汇处,大量营养物质随河水流入,同时受台湾暖流和沿岸寒流的影响,使得该海域环境因子复杂多样<sup>[42]</sup>,因此浮游动物种类及分布也呈多样化。冗余分析能很好地考虑环境因子对物种的影响,反映浮游动物对不同生境的适应性特征<sup>[34]</sup>。根据 RDA 结果分析,2019 年浮游动物优势种生态位分化主要受  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度、COD、Chl *a* 浓度和温度的影响,2020 年浮游动物优势种生态位分化主要受  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度和 DO 浓度的影响。

本研究发现,  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度是影响舟山海域 2019–2020 年浮游动物优势种变化的主要因素之一,2019 年有多种浮游动物优势种与  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度成正相关,2020 年多数与  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  浓度成负相关,存在一定的差异,姜会超等<sup>[43]</sup>和卞少伟等<sup>[44]</sup>均发现浮游动物丰度与硅酸盐浓度呈正相关,但庞碧剑等<sup>[26]</sup>发现浮游动物丰度与硅酸盐浓度呈负相关,朱旭宇等<sup>[45]</sup>发现浮游生物群落参数与硅酸盐浓度等具有较强相关性,但因物种的不同而存在差异。氮:磷:硅比值为 16:1:16 是浮游植物生长过程中吸收营养盐的最佳比值<sup>[45]</sup>,且营养盐浓度及结构不同,对浮游动物群落结构调控作用不同。本研究中,2019 年氮:磷:硅比值为 25:1:30,2020 年氮:磷:硅比值为 78:1:230,可见本海域存在严重的营养盐比例失调现象。而  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  是许多海洋浮游植物尤其是硅藻必需的营养盐之一,舟山海域浮游动物优势种多为桡足类,喜食硅藻<sup>[46]</sup>,一方面硅酸盐等营养盐通过影响硅藻等浮游植物的分布间接影响浮游动物分布<sup>[1]</sup>,与浮游动物之间并非简单的线性关系,另一方面舟山海域捕捞、开发和航行等繁密人类活动也可能对浮游动物产生影响,应在今后的研究中增加对浮游植物的测定及研究,进一步探讨浮游动物群落变化机理。

本研究发现,舟山海域 2019 年多数浮游动物优势种与 COD、Chl *a* 浓度和温度呈正相关,该结果与俞存根等<sup>[47]</sup>、骆鑫等<sup>[13]</sup>、边佳胤等<sup>[14]</sup>和叶文建等<sup>[2]</sup>在

舟山海域夏季所得结果相似。COD 可反映出水体中有机物污染的程度和水体溶解氧的交换平衡,是评测有机物相对含量的重要指标,Chl *a* 浓度可评估海域初级生产力和浮游植物生物量,与浮游植物丰度相关性高<sup>[48]</sup>,COD 和 Chl *a* 浓度均可通过影响浮游植物的分布间接影响浮游动物分布<sup>[49]</sup>;海水温度一方面可影响浮游动物的新陈代谢强度直接影响浮游动物分布<sup>[50–51]</sup>,另一方面可影响浮游植物的生长分布间接影响浮游动物分布<sup>[52]</sup>,2019 年舟山海域存在厄尔尼诺现象,使得海水温度较高,优势种多为暖水种,如针刺拟哲水蚤等;2020 年舟山海域多数浮游动物优势种与 DO 浓度成负相关,该结果与卞少伟等<sup>[44]</sup>在辽东湾夏季及叶文建等<sup>[2]</sup>在舟山海域夏季所得结果相似,但也有些浮游动物优势种与 DO 浓度成正相关,边佳胤等<sup>[14]</sup>发现舟山海域夏季浮游动物丰度与 DO 浓度成正相关。水中 DO 浓度是浮游动物生活和分布的重要因素,其浓度高低可以直观表征生物的环境状况<sup>[28]</sup>。叶文建等<sup>[2]</sup>监测时间、范围为 2014 年 7 月舟山岛附近,边佳胤等<sup>[14]</sup>监测时间、范围为 2016 年 8 月舟山及邻近海域,时空分布不同,可能会导致结果存在一定的差异,可见浮游动物与溶解氧之间的关系比较复杂,存在一定的相关性,但这种相关性可能会因时空分布及人为因素等存在差异。

#### 4.5 舟山海域浮游动物历史变化及人类活动的影响

参考近年来舟山海域夏季浮游动物研究报告(表 6),2011 年与 2014 年相比,2019 年与 2020 年相比,舟山海域浮游动物种类数和丰度均下降。2016 年的研究范围主要为舟山各岛近岸海域,分布在近海的站位相对较少,因此导致种类数、丰度及生物量均偏高。2019–2020 年的研究中,采集浮游动物使用的是浅水 II 型浮游动物网具,网口面积小,因此导致物种数、丰度偏高,但这种情况下下降趋势仍较为明显。

舟山作为重要的港口城市和中国最大的渔场,人

表 6 不同年份夏季舟山海域浮游动物统计

Table 6 Statistics of zooplankton in summer of different years in the Zhoushan waters

年份	种类数	丰度/(ind. m <sup>-3</sup> )	生物量/(mg·m <sup>-3</sup> )	参考文献
2011	70	552.0	487.7	文献[1]
2014	67	143.97	176.34	文献[13]
2016	96	577.9	1 124.7	文献[14]
2019	87	3 866.6	–	本研究
2020	66	2 269.2	–	本研究

口繁密,人为干扰会对浮游动物造成巨大的影响。浮游动物是海洋水质监测的重要指标,且可以作为渔业资源的重要饵料,对舟山渔场渔业资源的维持具有重要意义。叶文建等<sup>[2]</sup>发现人类活动对舟山西部海域的生物群落干扰显著;陆延等<sup>[53]</sup>发现舟山电厂排水口海域浮游动物种类数、密度、生物量高于对照点海域;骆鑫等<sup>[13]</sup>发现石油污染加剧会导致浮游动物丰度和生物量偏低。2020年舟山市生态环境状况公报显示:一、二、三、四类海水比例均上升,劣四类海水比例下降,保护环境政策初具成效,但是富营养化仍较为严重,下一步可针对舟山海域浮游生物和生态环境进行长期、多次检测和评估,以期为恢复舟山渔场的海洋生态提供一些参考资料。

## 5 结论

(1) 2019年和2020年夏季调查共采获浮游动物

8大类130种,桡足类是浮游动物主要类群。2019年浮游动物优势种6种,2020年浮游动物优势种10种,两年共有优势种4种,两年浮游动物优势种年际差异明显,更替率为66.67%。

(2) 2019年夏季浮游动物优势种的生态位宽度范围为1.47~2.27,生态位重叠指数范围为0.11~0.79,广生态位种占浮游动物优势种的66.67%;2020年夏季浮游动物优势种的生态位宽度范围为0.45~2.34,生态位重叠指数范围为0~0.98,广生态位种占浮游动物优势种的60.00%;两年夏季广生态位物种是舟山海域浮游动物优势种的主要组成成分,但未呈现出广生态位种之间生态位重叠程度均较高的现象。

(3) 根据RDA结果,2019年浮游动物优势种生态位分化主要受 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度、COD、温度和Chl *a*浓度的影响。2020年主要受 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度和DO浓度的影响。

## 参考文献:

- [1] 王婕妤,黄备,贾海波,等. 2011年春、秋季浙江舟山海域浮游动物群落结构和多样性现状[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2014, 33(4): 311–316.  
Wang Jieyu, Huang Bei, Jia Haibo, et al. Community structure and diversity of zooplankton in sea area of Zhoushan, Zhejiang of 2011[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2014, 33(4): 311–316.
- [2] 叶文建,杜萍,寿鹿,等. 舟山海域大中型浮游动物群落时空变化及受控要素[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 254–267.  
Ye Wenjian, Du Ping, Shou Lu, et al. Spatio-temporal variation of macro and mesozooplankton communities and the controlling factors around Zhoushan archipelago[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 254–267.
- [3] 范林洁,胡晓东,陈文猛,等. 2018年白马湖浮游动物生态位及其生态分化[J]. 水生态学杂志, 2021, doi: 10.15928/j.1674–3075.202105120140.  
Fan Linjie, Hu Xiaodong, Chen Wenmeng, et al. Zooplankton niche and ecological differentiation in Baima Lake in 2018[J]. Journal of Hydroecology, 2021, doi: 10.15928/j.1674–3075.202105120140.
- [4] 王慧君,许永久,俞存根,等. 2018–2019年舟山近海浮游动物群落结构春季年际变化及其与水团的关系[J]. 海洋学报, 2020, 42(6): 90–100.  
Wang Huijun, Xu Yongjiu, Yu Cungen, et al. Spring interannual changes of zooplankton community structure and the influencing factors of water masses in the Zhoushan nearshore waters during 2018–2019[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(6): 90–100.
- [5] 何瑞,蒋然,杨芳,等. 茂名近岸海域中、小型浮游动物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 生态环境学报, 2022, 31(1): 142–150.  
He Rui, Jiang Ran, Yang Fang, et al. Characteristics of mesozooplankton community and its relationship with environmental factors in sea water near Maoming[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(1): 142–150.
- [6] 付显婷,杨薇,赵彦伟,等. 白洋淀浮游动物群落结构与水环境因子的关系[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1271–1282.  
Fu Xianting, Yang Wei, Zhao Yanwei, et al. Community structure of zooplankton and its relationship with water environmental factors in Baiyangdian Lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(6): 1271–1282.
- [7] Helaouët P, Beaugrand G. Physiology, ecological niches and species distribution[J]. Ecosystems, 2009, 12(8): 1235–1245.
- [8] 郑挺,林元烧,曹文清,等. 北部湾北部生态系统结构与功能——浮游动物空间生态位及其分化[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3635–3649.  
Zheng Ting, Lin Yuanshao, Cao Wenqing, et al. Ecosystem structure and function in northern Beibu Gulf: zooplankton spatial niche and its differentiation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3635–3649.
- [9] 张皓,宋昌民,闫启仑,等. 辽河口春、夏季浮游动物空间生态位的比较[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(6): 920–925.  
Zhang Hao, Song Changmin, Yan Qilun, et al. Comparative studies on the spatial niche of zooplankton in the Liaohe Estuary in spring and summer[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(6): 920–925.
- [10] 梁淼,姜倩,孙丽艳,等. 曹妃甸近岸海域大、中型浮游动物优势种空间生态位研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1241–1250.  
Liang Miao, Jiang Qian, Sun Liyan, et al. Spatial niches of dominant macro-zooplankton and meso-zooplankton species in the coastal

- area of Caofeidian[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(7): 1241–1250.
- [11] 刘坤, 俞存根, 郑基, 等. 舟山群岛近岸海域春秋主要鱼类功能群特征及其生态位分析[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2021, 48(5): 592–605.  
Liu Kun, Yu Cungen, Zheng Ji, et al. Analysis of functional groups characteristics and niche of major fish species in the coastal waters of Zhoushan Islands in spring and autumn[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2021, 48(5): 592–605.
- [12] 钟志, 刘琴, 郭远明, 等. 舟山渔场海域环境质量评价[J]. *广州化工*, 2011, 39(3): 138–139.  
Zhong Zhi, Liu Qin, Guo Yuanming, et al. Assessment and analysis of environmental quality at Zhoushan fishing ground[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2011, 39(3): 138–139.
- [13] 骆鑫, 曾江宁, 徐晓群, 等. 舟山海域夏、秋季浮游动物的分布特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2016, 36(24): 8194–8204.  
Luo Xin, Zeng Jiangning, Xu Xiaoqun, et al. Distribution of zooplankton in the Zhoushan Sea and its relationship with environmental factors in summer and autumn[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24): 8194–8204.
- [14] 边佳胤, 余健涛, 谢挺, 等. 春、夏季舟山海域浮游动物分布特征、群落结构及其与环境因子的关系[J]. *海洋湖沼通报*, 2020(2): 122–130.  
Bian Jiayin, Yu Jiantao, Xie Ting, et al. Distribution characteristics and community structure of zooplankton in seawater around Zhoushan in spring and summer and their associations with environmental factors[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020(2): 122–130.
- [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. 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: 1–157.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB/T 12763.6–2007, Specifications for oceanographic survey. Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1–157.
- [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. GB 17378.4–2007, 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 88–91.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB 17378.4–2007, The specification for marine monitoring. Part 4: Seawater analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 88–91.
- [17] 孙儒泳. 动物生态学原理[M]. 2版. 北京: 北京师范大学出版社, 1992.  
Sun Ruyong. Principles of Animal Ecology[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing Normal University Publishing Group, 1992.
- [18] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1963.
- [19] Pianka E R. The structure of lizard communities[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 53–74.
- [20] Wathne J A, Haug T, Lydersen C. Prey preference and niche overlap of ringed seals *Phoca hispida* and harp seals *P. groenlandica* in the Barents Sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 194: 233–239.
- [21] 侯朝伟, 孙西艳, 刘永亮, 等. 烟台近海浮游动物优势种空间生态位研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5822–5833.  
Hou Chaowei, Sun Xiyan, Liu Yongliang, et al. Spatial niches of dominant zooplankton species in the Yantai offshore waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5822–5833.
- [22] 孟庆超, 赵淑江. 舟山东极岛海域浮游动物群落结构特征[J]. *农村经济与科技*, 2019, 30(11): 63–66.  
Meng Qingchao, Zhao Shujiang. Structural characteristics of zooplankton community in the sea area of Zhoushan East Pole Island[J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2019, 30(11): 63–66.
- [23] 许卓昀, 陈根, 张靖尧, 等. 舟山附近海域环境调查及浮游生物分析[J]. *环境生态学*, 2019, 1(5): 43–46.  
Xu Zhuoyun, Chen Gen, Zhang Jingyao, et al. Environmental investigation and analysis of plankton community in Zhoushan offshore sea area[J]. *Environmental Ecology*, 2019, 1(5): 43–46.
- [24] 陈小庆, 陈斌, 黄备, 等. 夏季舟山渔场及邻近海域浮游动物群落结构特征分析[J]. *动物学研究*, 2010, 31(1): 99–107.  
Chen Xiaoping, Chen Bin, Huang Bei, et al. Analysis on community structure of zooplankton in Zhoushan fishing ground and its adjacent area in summer[J]. *Zoological Research*, 2010, 31(1): 99–107.
- [25] 吴利, 李源玲, 陈延松. 淮河干流浮游动物群落结构特征[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 932–940.  
Wu Li, Li Yuanling, Chen Yansong. Characteristics of community structures of zooplankton in the mainstream of Huaihe River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(5): 932–940.
- [26] 庞碧剑, 李天深, 蓝文陆, 等. 钦州湾秋季和春季浮游动物分布特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2018, 38(17): 6204–6216.  
Pang Bijian, Li Tianshen, Lan Wenlu, et al. Distribution patterns and environmental factors of zooplankton in the Qinzhou Bay in spring and autumn[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 6204–6216.
- [27] 李浩然, 刘光兴, 马静, 等. 夏、秋季黄河口及邻近水域浮游动物群落特征[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(5): 631–639.  
Li Haoran, Liu Guangxing, Ma Jing, et al. Community characteristics of zooplankton in the Yellow River Estuary and its adjacent area in summer and autumn[J]. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(5): 631–639.

- [28] 刘同琳, 陈皓若, 洪陈聪, 等. 苏州城区河道后生浮游动物群落结构与环境因子的关系[J]. 动物学杂志, 2021, 56(5): 674–685.  
Liu Tonglin, Chen Haoruo, Hong Chencong, et al. Relationship between Metazooplankton community structure and environmental factors in Suzhou Urban River[J]. Chinese Journal of Zoology, 2021, 56(5): 674–685.
- [29] 彭海, 程子卿. 生态位理论的意义及应用[J]. 黑龙江科技信息, 2009(35): 133, 330.  
Peng Hai, Cheng Ziqing. The significance and application of niche theory[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2009(35): 133, 330.
- [30] 陆家昌, 李杰, 赖俊翔, 等. 广西近岸强额孔雀水蚤对球形棕囊藻的下行控制[J]. 广西科学院学报, 2020, 36(3): 323–329.  
Lu Jiachang, Li Jie, Lai Junxiang, et al. Top-down control of *Parvocalanus crassirostris* on *Phaeocystis globosa* in coastal water of Guangxi[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2020, 36(3): 323–329.
- [31] 赵祺, 刘辉, 张秀文, 等. 唐山海洋牧场浮游动物群落结构及生态位[J]. 河北渔业, 2021(10): 17–24, 30.  
Zhao Qi, Liu Hui, Zhang Xiwen, et al. Community structure and niche of zooplankton in Tangshan marine ranching[J]. Hebei Fisheries, 2021(10): 17–24, 30.
- [32] 廖彤晨, 尹健强, 李开枝, 等. 南海西北部夏冬季浮游介形类的分布及其影响因素[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(2): 77–87.  
Liao Tongchen, Yin Jianqiang, Li Kaizhi, et al. Distribution of planktonic ostracods and its influencing factors during summer and winter in the northwestern coastal waters of South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2020, 39(2): 77–87.
- [33] 张亚洲, 张琳琳, 印瑞, 等. 浙江乐清湾浮游动物空间生态位[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 342–348.  
Zhang Yazhou, Zhang Linlin, Yin Rui, et al. Spatial niches of dominant zooplankton species in Yueqing Bay, Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1): 342–348.
- [34] 刘坤, 俞存根, 许永久, 等. 舟山群岛东侧海域春秋季节主要甲壳类物种的空间生态位分析[J]. 浙江大学学报(理学版), 2021, 48(4): 450–460, 480.  
Liu Kun, Yu Cungen, Xu Yongjiu, et al. Analysis of the spatial niche of major crustacean species in the waters east of Zhoushan Islands in spring and autumn[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2021, 48(4): 450–460, 480.
- [35] 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 Rong, Zhang Hongyan, Wang Ke, et al. Function performed by small copepods in marine ecosystem[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(5): 453–460.
- [36] 方宏达, 朱艾嘉, 董燕红, 等. 2005–2006年珠江口浮游动物群落变化研究[J]. 台湾海峡, 2009, 28(1): 30–37.  
Fang Hongda, Zhu Aijia, Dong Yanhong, et al. Study on the variation of zooplankton community in the Pearl River Estuary in 2005–2006[J]. Journal of Applied Oceanography, 2009, 28(1): 30–37.
- [37] 蒋建飞, 王琼, 刘桂群, 等. 洋山港港口海域浮游动物季节变化与分布特征[J]. 生物学杂志, 2015, 32(6): 40–44.  
Jiang Jianfei, Wang Qiong, Liu Guiqun, et al. Zooplankton seasonal variation and distribution characteristics in Yangshan Port[J]. Journal of Biology, 2015, 32(6): 40–44.
- [38] 邹清, 姚炜民, 张淑敏. 乐清湾2009年夏季浮游动物种类组成和数量分布[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(2): 266–275.  
Zou Qing, Yao Weimin, Zhang Shumin. Species composition and quantitative distribution of zooplankton in Yueqing Bay during the summer of 2009[J]. Advances in Marine Science, 2012, 30(2): 266–275.
- [39] 刘惠, 俞存根, 郑基, 等. 杭州湾灰鳖洋海域秋季主要游泳动物生态位与种间联结[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3828–3836.  
Liu Hui, Yu Cungen, Zheng Ji, et al. Niche and interspecific association of major nekton in the Hui-Bie-Yang sea area of Hangzhou Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): 3828–3836.
- [40] 朱丽岩, 徐培培, 张天文, 等. 胶州湾拟长腹剑水蚤时空分布变化的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(S1): 83–88.  
Zhu Liyan, Xu Peipei, Zhang Tianwen, et al. The spatial and temporal distribution of *Oithona similis* in Jiaozhou Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(S1): 83–88.
- [41] 薛泽, 朱丽岩, 王博渊, 等. 温度和盐度对两种海洋桡足类动物摄食和代谢的影响[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(1): 95–102.  
Xue Ze, Zhu Liyan, Wang Boyuan, et al. Effects of temperature and salinity on feeding and metabolism of two marine copepods[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(1): 95–102.
- [42] 胡亚丽, 梁君, 许永久, 等. 2019年舟山近海浮游动物群落结构变化与水团的关系[J]. 水产科学, 2021, doi: 10.16378/j.cnki.1003-1111.20237.  
Hu Yali, Liang Jun, Xu Yongjiu, et al. The relationship between the change of zooplankton community structure and water masses in the coastal waters of Zhoushan in 2019[J]. Fisheries Science, 2021, doi: 10.16378/j.cnki.1003-1111.20237.
- [43] 姜会超, 刘宁, 高继庆, 等. 烟台四十里湾浮游动物群落特征及与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1318–1327.  
Jiang Huichao, Liu Ning, Gao Jiqing, et al. Zooplankton community structure in Sishili Bay and its relationship with environmental factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4): 1318–1327.
- [44] 卞少伟, 韩龙, 梅鹏蔚, 等. 辽东湾夏秋季浮游动物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2020, 40(4): 44–49.  
Bian Shaowei, Han Long, Mei Pengyu, et al. Community structure of zooplankton and its relationship with environmental factors in sum-

- mer and autumn in Liaodong Bay[J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 40(4): 44–49.
- [45] 朱旭宇, 陈中伟, 刘吉堂, 等. 春季南黄海绿潮分布区浮游生物群落现状[J]. *环境生态学*, 2020, 2(1): 43–51.  
Zhu Xuyu, Chen Zhongwei, Liu Jitang, et al. Community status of plankton in green tide area of southern Yellow Sea[J]. *Environmental Ecology*, 2020, 2(1): 43–51.
- [46] 王丽, 王保栋, 陈求稳, 等. 三峡三期蓄水后长江口海域浮游动物群落特征及影响因子[J]. *生态学报*, 2016, 36(9): 2505–2512.  
Wang Li, Wang Baodong, Chen Qiuwen, et al. Characteristics of the zooplankton community and impactfactors in the Yangtze Estuary coastal eara after third stage impoundment of the Three Gorges Dam[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(9): 2505–2512.
- [47] 俞存根, 陈小庆, 胡颖琰, 等. 舟山渔场及邻近海域浮游动物种类组成及群落结构特征[J]. *水生生物学报*, 2011, 35(1): 183–193.  
Yu Cungen, Chen Xiaoqing, Hu Haoyan, et al. Species composition and community structure characteristics of zooplankton in the Zhoushan fishing ground and its adjacent area[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(1): 183–193.
- [48] 陈光荣, 雷泽湘, 谭镇, 等. 环境因子对广东城市湖泊后生浮游动物的影响[J]. *水生态学杂志*, 2010, 3(4): 28–32.  
Chen Guangrong, Lei Zexiang, Tan Zhen, et al. Influence on metazoan zooplankton by environmental factors in urban lakes in Guangdong Province[J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 3(4): 28–32.
- [49] 程成, 申艳萍, 袁伟琳, 等. 滦河干流浮游生物群落结构特征及水质环境评价[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(2): 401–412.  
Cheng Cheng, Shen Yanping, Yuan Weilin, et al. Plankton community structure and water quality evaluation in the main stream of the Luanhe River[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(2): 401–412.
- [50] Froneman P W. Zooplankton community structure and biomass in a southern African temporarily open/closed estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60(1): 125–132.
- [51] Lenz P H, Hower A E, Hartline D K. Temperature compensation in the escape response of a marine copepod, *Calanus finmarchicus* (Crustacea)[J]. *The Biological Bulletin*, 2005, 209(1): 75–85.
- [52] 戴红, 邱茂福, 杨毕斌, 等. 闽江口以南海域夏季浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. *渔业研究*, 2016, 38(1): 56–66.  
Dai Hong, Qiu Maofu, Yang Bicheng, et al. Community characteristics of phytoplankton and relationships with environmental factors in southern part area of Minjiang Estuary in Fujian Province in summer[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2016, 38(1): 56–66.
- [53] 陆延, 程爱勇, 林波, 等. 舟山电厂附近海域夏季浮游动物群落结构及时空变化[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(4): 74–78.  
Lu Yan, Cheng Aiyong, Lin Bo, et al. Community structure and spatio-temporal variations of zooplankton in the sea near Zhoushan power plant in summer[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(4): 74–78.

## Ecological niches and ecological differentiation of dominant zooplankton species in the Zhoushan waters in summer 2019–2020

Song Chen<sup>1</sup>, Meng Zhou<sup>1</sup>, Wang Xiaobo<sup>2,3</sup>, Han Qingxi<sup>1</sup>

(1. *School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315832, China*; 2. *Marine Environmental Monitoring Centre of Ningbo, State Oceanic Administration, Ningbo 315012, China*; 3. *Yuzhi Environmental Technology (Zhejiang) Co., Ltd., Ningbo 315199, China*)

**Abstract:** In order to understand the relationship between zooplankton species in the Zhoushan waters and the impact of environmental factor changes on the niche differentiation of dominant species, according to the survey data of zooplankton in the Zhoushan waters in the summer of 2019 and 2020, the dominance index was used to judge the dominant species of zooplankton in this sea area. The Shannon formula and the Pianka formula were used to analyze the niche breadth and niche overlap index of the dominant zooplankton species, and the redundancy analysis (RDA) method was used to explore the main environmental factors affecting the niche differentiation of the dominant zooplankton species in the Zhoushan waters for two years. The results showed that the replacement rate of dominant zooplankton species in the Zhoushan waters was 66.67% in 2019 and 2020. According to the niche width value of the dominant species of zooplankton in the offshore Zhoushan waters, they could be divided into broad niche species, medium niche species, and narrow niche species. They accounted for 66.67% and 60.00% of the dominant species of zooplankton in 2019 and 2020, indicating that the broad niche species were the main components of the dominant species of zooplankton in the coastal waters of Zhoushan. The niche overlap index of the dominant zo-

oplankton species ranged from 0.11 to 0.79 in 2019, and the range of the niche overlap index in 2020 was from 0 to 0.98. RDA analysis showed that the niche differentiation of zooplankton dominant species in 2019 was mainly affected by  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  concentration, COD, temperature and Chl *a* concentration, and the niche differentiation of zooplankton dominant species in 2020 was mainly affected by  $\text{SiO}_3\text{-Si}$  concentration and DO concentration. This study is expected to further understand the interspecific relationships of zooplankton communities in the Zhoushan waters, and provide a data basis and scientific basis for studies such as elaborating the adaptation mechanism of zooplankton to environmental changes.

**Key words:** Zhoushan waters; zooplankton; dominant species; ecological niche; redundancy analysis