

邱文致, 秦松, 唐未, 等. 南麂列岛海域浮游动物群落时空变化特征及其关键驱动因子研究[J]. 海洋学报, 2025, 47(3): 85–97, doi:10.12284/hyxb2025040

Qiu Wenzhi, Qin Song, Tang Wei, et al. Study on the spatiotemporal variation characteristics of zooplankton community and its key driving factors in Nanji Islands sea area[J]. Haiyang Xuebao, 2025, 47(3): 85–97, doi:10.12284/hyxb2025040

南麂列岛海域浮游动物群落时空变化特征 及其关键驱动因子研究

邱文致^{1,2,3}, 秦松^{2,3}, 唐未^{2,3}, 叶深^{2,3}, 范青松^{2,3}, 唐久^{2,3}, 艾龙威^{1,2,3},
吴强^{1,2,3}, 林克泽^{1,2,3}, 郑春芳^{1*}, 刘伟成^{2,3*}

(1. 温州大学生命与环境科学学院, 浙江温州 325035; 2. 浙江省海洋水产养殖研究所 全省近岸生物种质资源保护与利用重点实验室, 浙江温州 325000; 3. 浙江省海洋水产养殖研究所 温州市海洋生物遗传育种重点实验室, 浙江温州 325000)

摘要: 为掌握南麂列岛海域浮游动物群落的时空变化特征, 分别于 2022 年 11 月、2023 年 5 月、2023 年 9 月对南麂列岛海域的水生生物及环境要素进行了 3 个航次的调查。室内实验结果显示共鉴定出浮游动物 93 种, 其中包括 20 种浮游幼体, 2023.09 航次物种数最丰富 (63 种), 2022.11 航次物种数最低 (45 种); 其中优势种 ($Y \geq 0.02$) 包括百陶箭虫 (*Sagitta bedoti*)、肥胖软箭虫 (*Flaccisagitta enflata*)、中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 和太平洋纺锤水蚤 (*Acarta pacifica*) 等 19 种。浮游动物的平均丰度为 512.84 ind./m³, 平均生物量为 614.82 mg/m³, 存在明显的航次差异, 2023.09 航次丰度和生物量最高, 2022.11 航次丰度和生物量最低。浮游动物香农-威尔 (Shannon-Wiener) 多样性指数 (H')、物种均匀度指数 (J') 和丰富度指数 (D) 平均值分别为 1.64、0.55 和 2.57。Spearman 相关性分析、非度量多维度排序分析和典范对应分析结果表明, 盐度、温度、总氮质量浓度、硝酸盐质量浓度和浮游植物丰度是影响南麂列岛海域浮游动物优势种生物量的重要环境因子。

关键词: 南麂列岛; 浮游动物; 群落结构; 环境因子; 相关性分析

中图分类号: Q179.1; P714^{+.5}

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2025)03-0085-13

1 引言

当今全球海洋生态系统面临前所未有的挑战^[1], 浮游动物作为海洋生态基础, 位于食物链中的关键环节^[2], 其群落结构动态对海洋生态平衡及环境监测具有重要作用^[3-4]。当前, 浮游动物群落面临着多重威胁, 包括气候变化导致的海水温度异常、酸化加剧以及污染扩散对食物链基础的破坏^[5], 这些问题不仅影响浮游动物的生存与繁衍, 还直接关联到海洋生物多

样性的维持及渔业资源的可持续利用^[6]。

南麂列岛海域被称为“贝藻王国”和海洋生物多样性宝库。南麂列岛海域所建设的海洋牧场人工鱼礁生态效应显著^[7], 为海洋生物提供生长、繁殖和栖息场所, 促进生物多样性恢复^[8], 以及对周边的环境保护发挥了重要作用^[9-10]。已有学者对南麂列岛海域的浮游动物进行研究, 揭示了该海域浮游动物的种类组成、数量分布、多样性^[11]以及与浮游植物、营养盐等环境因子的关系^[12], 并表明南麂列岛浮游动物种类丰

收稿日期: 2024-07-11; 修订日期: 2025-01-14。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD0900805); 温州河口渔业资源养护试点专项调查研究项目(05202251)。

作者简介: 邱文致(1998—), 男, 江西省南昌市人, 主要从事渔业资源研究。E-mail: 2300598497@qq.com

* 通信作者: 郑春芳, 研究员, 主要海洋生物资源保护与岸线生态修复理论与应用研究。E-mail: 20195101@wzu.edu.cn; 刘伟成, 正高级工程师, 主要从事海洋渔业资源和生态保护研究。E-mail: lwch80@126.com

富,存在显著的时间变化^[13]。

前期研究更多关注单一航次或者特定环境下的浮游动物群落^[10-12],缺少系统性研究与分析。本研究通过 3 个航次全面分析了不同时期的浮游动物分布情况以及环境因子变化,以期能够阐明南麂列岛海域浮游动物群落结构的动态变化与环境因子之间的相关性,为深入掌握该海域海洋生态系统特征和海洋管理提供基础资料。

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究于 2022 年 11 月、2023 年 5 月、2023 年 9 月对南麂列岛海域的浮游动物和环境要素等进行了 3 个航次的综合调查。调查范围为(27°24'30"~27°31'00"N, 120°56'30"~121°09'30"E),按照南麂列岛海域等深线情况共设置 16 个调查站位点(图 1)。

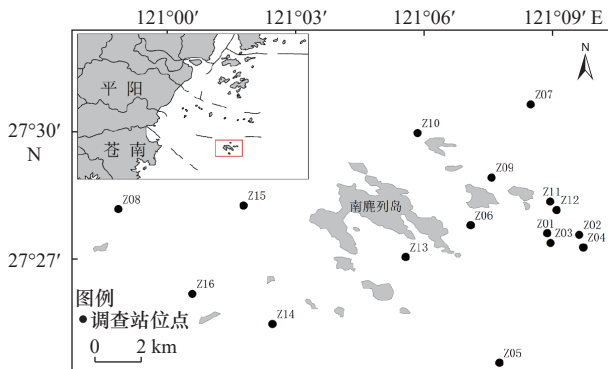


图 1 南麂列岛海域站位点布设
Fig. 1 Layout of stations in the sea area
of the Nanji Islands sea area

海水样品采集按照《海洋监测规范第 3 部分:样品采集、贮存与运输》(GB/T 17378.3—2007)^[14]开展。检测方法参考《海洋调查规范第 4 部分:海水化学要素调查》(GB/T 12763.4—2007)^[15]等,其中叶绿素 *a* 使用卡盖式采水器和水质调查一并分层采集,温度、盐度、水深、溶解氧等现场使用多功能探测仪(CSTAWAY-CTD)和便携式水质分析仪 WTW(Multi 3630 IDS, 德国)测量,叶绿素 *a* 采用采集器进行分层采集,装入 500 mL 不透光白色小口聚乙烯瓶保存,加注 1 mL 的碱式碳酸镁悬浮液(10 g/L)带回实验室分析。

浮游动物采样与分析方法按照《海洋调查规范第 6 部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007)^[16]。浮游植物使用浅水 III 型浮游生物网(网长 1.4 m,网口内径 37 cm,网孔大小 0.077 mm,网口面积为 0.1 m²)垂直拖网采集;浮游动物采用浅水 I 型浮游生物网(网长 1.45 m,网口内径 50 cm,网孔大小 0.505 mm,网口面

积为 0.5 m²)由底至表垂直拖网采集。浮游生物在采集时网口安装生物网口流量计(HYDRO-BIOS, 德国)以确定网口的滤水量,样品现场用 5% 甲醛溶液固定保存。浮游动物样品通过保存、样本制作、显微镜(型号 Nikon 80i)观察、形态鉴定与记录验证等流程来确定浮游动物的种类和丰度。将采集到的浮游动物样本置于筛绢上,使用真空泵抽滤以去除多余的水分,处理后的浮游动物样称出其湿重,根据采样时的滤水体积,将浮游动物的湿重换算成湿重生物量(mg/m³)。

2.2 数据分析

2.2.1 个体密度和湿重

各站位点的个体密度 C_B 和湿重 P_B 直接反映其浮游动物资源量情况,调查站点浮游动物的个体密度、湿重的计算公式^[16]如下:

$$C_B = N_B/V, \quad (1)$$

$$P_B = m_B/V, \quad (2)$$

式中: C_B 是单位体积的海水中浮游动物的个体数量(单位: ind./m³), N_B 是总个体数(单位: ind.), V 是滤水量(单位: m³), P_B 是单位体积海水中浮游动物的湿重(单位: mg/m³), m_B 是样品湿重(单位: mg)。

2.2.2 优势度

在优势种的判定上,采用 Pinkas^[17] 相对重要性指数 Y 作为考量指标,优势度计算公式如下:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i, \quad (3)$$

式中: Y 是该种浮游动物的优势度指数; n_i 是指第 i 种浮游动物个体数量; N 是指所有浮游动物的总数量; f_i 是指第 i 种浮游动物在各站位点样品中出现的频率,当 $Y \geq 0.02$ 时为优势种^[18]。

2.2.3 生物多样性

采用生物种类数(S)、群落 Margalef 丰富度指数(D)^[19]、Shannon-Weaver 多样性指数(H')^[20] 和 Pielou 均匀度指数(J')^[21] 4 个指标,计算公式如下:

Margalef 丰富度指数(D):

$$D = (S - 1)/\log_2 N, \quad (4)$$

式中: S 为样品种类数, N 为浮游动物总个体数。

Shannon-Weaver 多样性指数(H'):

$$H' = -\sum P_i \log_2 P_i, \quad (5)$$

式中: S 为样品种类数, P_i 为第 i 种浮游动物个体数(或生物量)占总体的百分比。

Pielou 均匀度指数(J'):

$$J' = H' / (\log_2 N) \quad (6)$$

式中: H' 为生物多样性指数, N 为样品总个体数。

2.2.4 数理统计

通过 Microsoft Excel 2019 软件对调查数据归纳整理和计算处理;应用 RStudio 软件中 vegan 程序包计算分析浮游动物的生物多样性指数;利用 ArcGIS 10.8 软件绘制南麂列岛海域调查站点图、浮游动物种类数分布图、生物量分布图和丰度分布图。

运用 SPSS 软件计算环境因子与浮游动物丰度的相关系数,通过对环境因子数据进行正态性检验,其中对于符合正态分布的环境因子数据进行 Pearson 相关性分析,对于不符合正态分布的环境因子数据进行 Spearman 相关性分析;通过非度量多维排列 (Non-metric Multidimensional Scaling, NMDS) 分析南麂列岛海域各航次和各区域之间环境因子的差异性情况;通过共线性筛选出用于与优势种相关性分析的环境因子,进行趋势对应分析 (Detrended Correspondence Analysis, DCA), 对于排序轴大于 3.0 进行典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA), 反之进行冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA), 得出环境因子对浮游动物群落的影响效应。

通过计算得出的优势度、生物多样性指数、环境因子与浮游动物丰度相关系数等,分析探讨南麂列岛海域浮游动物群落结构与环境因子的相关性。

3 结果

3.1 环境因子

南麂列岛海域 3 个航次各站点间水体 pH 变化范围为 8.12~8.51, 平均值为 8.33, 水体呈弱碱性;盐度变化范围为 28.95~32.10, 平均值 30.33;温度变化范围为 16.3~29.0℃, 平均值为 21.90℃;溶解氧质量浓度的变化范围为 7.27~10.39 mg/L, 平均值为 8.44 mg/L;化学需氧量变化范围为 0.44~0.95 mg/L, 平均值为 0.69 mg/L;氨氮质量浓度变化幅度为 0.005~0.083 mg/L, 平均值为 0.026 mg/L;硝酸盐质量浓度变化范围为 0.078~0.851 mg/L, 平均值为 0.157 mg/L;总氮质量浓度变化范围为 0.124~0.278 mg/L, 平均值为 0.174 mg/L;海水中浮游植物丰度变化范围为 $2.1 \times 10^4 \sim 4.9 \times 10^7$ ind./m³, 平均值为 1.7×10^6 ind./m³;其余各航次水体理化指标见表 1。

3.2 浮游动物种类组成及其季节变化

3 个航次共鉴定到浮游动物 93 种, 隶属于 18 个类群, 其中以桡足类和浮游幼体为主, 分别为 30 种和 20 种, 占总种类数 32.26% 和 21.51%;其次为水螅水母 8 种和端足类 7 种, 分别占总种类数 8.60% 和 7.53%;糠虾类、磷虾类和枝角类均为 4 种, 占总种类

表 1 南麂列岛海域环境因子

Table 1 Environmental factors in the Nanji Islands sea area

环境因子	2022.11航次	2023.05航次	2023.09航次
水温/(℃)	19.85~20.53	16.3~16.65	28.75~29
盐度	31.15~32.1	30.05~30.3	28.95~29.75
酸碱度(pH)	8.12~8.21	8.37~8.51	8.38~8.4
溶解氧质量浓度/(mg·L ⁻¹)	7.27~7.59	9.96~10.39	7.39~7.67
叶绿素a质量浓度/(μg·L ⁻¹)	0.33~0.9	1.39~5.26	0.63~2.6
浮游植物丰度/(10 ³ ind·m ⁻³)	27~245	21~260	103~49 357
化学需氧量/(mg·L ⁻¹)	0.44~0.89	0.47~0.71	0.76~0.95
氨氮质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.011~0.034	0.011~0.047	0.005~0.083
铜质量浓度/(μg·L ⁻¹)	1.11~2.65	0.32~2.22	0.15~1.09
硝酸盐质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.083~0.223	0.078~0.17	0.082~0.851
亚硝酸盐质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.002~0.008	0.01~0.018	0.007~0.037
无机氮质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.1~0.25	0.1~0.17	0.09~0.86
活性磷酸盐质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.02~0.03	0.006~0.012	0.003~0.007
石油烃质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.007~0.027	0.013~0.07	0.005~0.031
总氮质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.12~0.28	0.16~0.19	0.12~0.19
总磷质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.06~0.11	0.03~0.06	0.02~0.04
颗粒有机物质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.05~0.13	0.06~0.39	0.05~0.1

数 4.30%; 介形类 3 种, 占总种类数 3.23%; 十足类、毛颚类、尾索动物门、管水母和腹足类均为 2 种, 占总种类数 2.15%; 栉水母类、涟虫类、多毛类、介形类、钵水母和被囊类均为 1 种, 占总种类数 1.08%(图 2)。

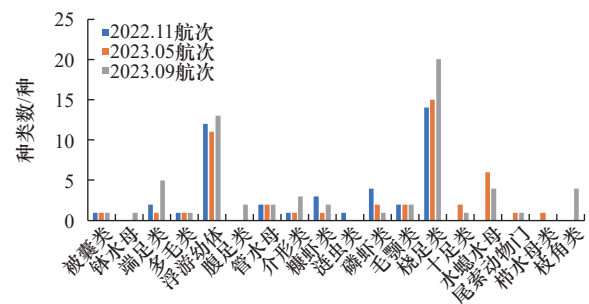


图 2 南麂列岛海域浮游动物种类

Fig. 2 Zooplankton species in the Nanji Islands sea area

南麂列岛海域浮游动物的物种组成具有明显时间变化, 在 2022.11 航次调查中, 共鉴定出浮游动物 46 种。其中桡足类 14 种(占 30.4%); 糠虾类 3 种(占 6.5%); 十足类 2 种(占 4.3%) 以及其他共 12 大类。在 2023.05 航次调查中, 共鉴定出浮游动物 47 种, 其中桡足类 15 种(占 31.9%); 水螅水母 7 种(占 14.9%); 十足类 2 种(占 4.3%) 以及浮游幼体 14 大类。在

2023.09 航次调查中,共鉴定出浮游动物 63 种,其中桡足类 20 种(占 31.7%);端足类 5 种(占 7.9%);水螅水母 5 种(占 7.9%)以及其他浮游动物 15 大类(图 3)。

3.3 生物量与丰度分布情况

南麂列岛海域浮游动物生物和丰度整体情况见图 4。南麂列岛海域 2022.11 航次浮游动物生物量范围在 35.01~141.41 mg/m³,平均生物量为 60.82 mg/m³。2023.05 航次浮游动物生物量变化范围在 107.34~1 597.83 mg/m³之间,平均生物量为 867.67 mg/m³。最高值出现在 Z08 号站位,最低值出现在 Z06 号站位。2023.09 航次浮游动物生物量变化范围在 29.82~2 877.08 mg/m³之间,平均生物量为 833.69 mg/m³。最高值出现在 Z09 号站位,最低值出现在 Z07 号站位。

南麂列岛海域 2022.11 航次浮游动物丰度范围在 8.92~107.58 ind./m³,平均丰度为 56.53 ind./m³。其中上马鞍鱼礁区的 Z16 号站位最高,下马鞍、破屿鱼礁区的 Z14 号点最低,总体呈由西北向东南逐渐递减趋势。2023.05 航次浮游动物丰度范围在 142.94~1 191.29 ind./m³,平均丰度为 7 678.77 ind./m³。最高值出现在 Z15 号站位,最低值出现在 Z06 号点位,总体分布较为均匀。2023.09 航次浮游动物丰度范围在 9.12~1 621.33 ind./m³,平均丰度为 772.01 ind./m³。最高值出现在 Z05 号站位,最低值出现在 Z07 号点位,总体呈现由南至北依次降低趋势。

3.4 优势种及优势度

3 个航次共计 19 种优势种,隶属于 7 大类群,其

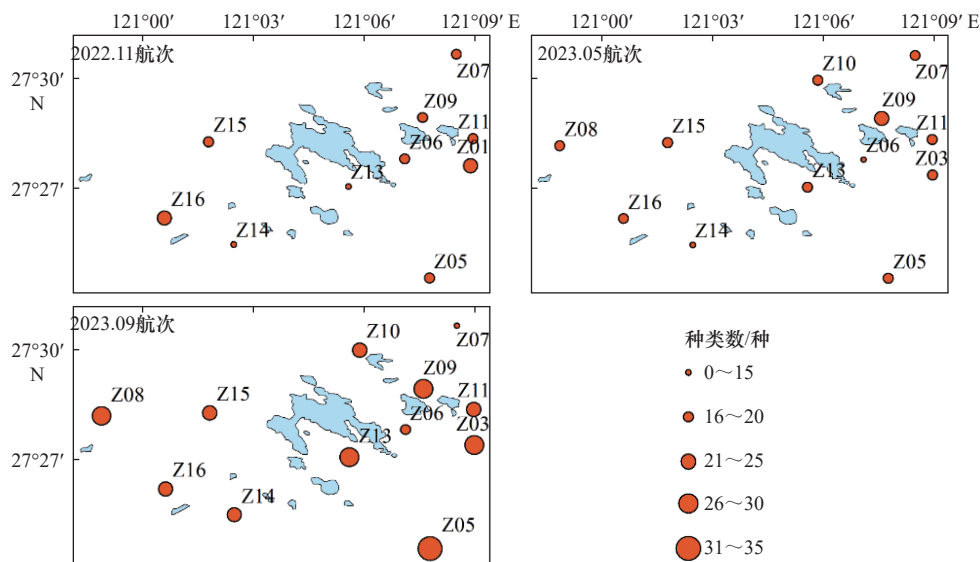


图 3 南麂列岛海域浮游动物种类数分布

Fig. 3 Distribution of zooplankton species in the Nanji Islands sea area

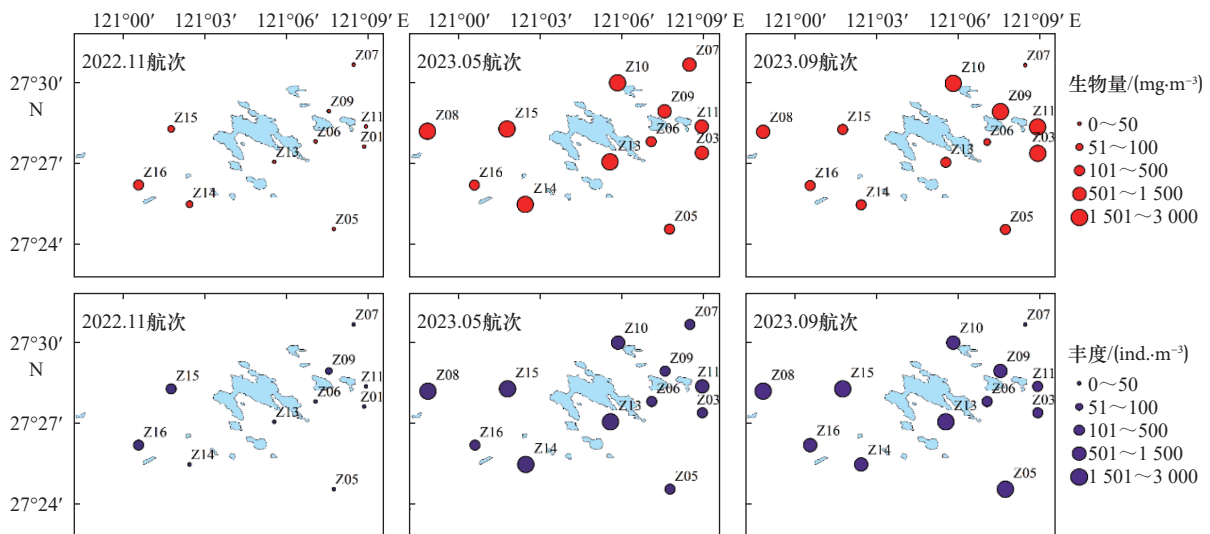


图 4 南麂列岛海域浮游动物生物量与丰度分布

Fig. 4 Distribution of biomass and abundance of zooplankton in the Nanji Islands sea area

中桡足类 9 种、浮游幼体 3 种、枝角类 2 种、毛颚类 2 种、水螅水母 1 种、管水母 1 种和磷虾类 1 种。3 个航次优势种与优势度具体情况见表 2。

表 2 南麂列岛海域浮游动物主要优势种及优势度
Table 2 The main dominant species and dominance of zooplankton in the Nanji Islands sea area

航次	类别	种名	拉丁学名	优势度
2022.11	毛颚类	百陶箭虫	<i>Sagitta bedoti</i>	0.041
		肥胖软箭虫	<i>Flaccisagitta enflata</i>	0.087 9
	桡足类	精致真刺水蚤	<i>Euchaeta concinna</i>	0.418 8
		太平洋纺锤水蚤	<i>Acartia pacifica</i>	0.032 6
		微刺哲水蚤	<i>Canthocalanus pauper</i>	0.027 1
	磷虾类	中华哲水蚤	<i>Calanus sinicus</i>	0.031
		小型磷虾	<i>Euphausia nana</i>	0.072 6
	浮游幼体	桡足类无节幼体	<i>Nauplius larva</i>	0.021 8
		长尾类幼体	<i>Macrura larvae</i>	0.027 7
	2023.05	桡足类	中华哲水蚤	<i>Calanus sinicus</i>
近缘大眼水蚤			<i>Corycaeus affinis</i>	0.045 1
小拟哲水蚤			<i>Pavacalanus parvus</i>	0.026 3
水螅水母		嵎山秀氏水母	<i>Sugiura chengshanense</i>	0.091
毛颚类		百陶箭虫	<i>Sagitta bedoti</i>	0.029 2
2023.09	管水母	五角水母	<i>Muggiaea atlantica</i>	0.256 2
	枝角类	肥胖三角溞	<i>Evadne tergestina</i>	0.138 2
		诺氏三角溞	<i>Evadne nordmanni</i>	0.032 2
	毛颚类	肥胖软箭虫	<i>Flaccisagitta enflata</i>	0.111 7
	桡足类	亚强真哲水蚤	<i>Eucalanus subcrassus</i>	0.080 9
		锥形宽水蚤	<i>Temora turbinata</i>	0.035 0
		瘦长毛猛水蚤	<i>Macrosetella gracilis</i>	0.021 9
	浮游幼体	微刺哲水蚤	<i>Canthocalanus pauper</i>	0.020 6
		长尾类溞状水蚤	<i>Macrura zoea larva</i>	0.059 4

优势种有百陶箭虫、肥胖软箭虫、精致真刺水蚤、桡足类无节幼体、太平洋纺锤水蚤、微刺哲水蚤、小型磷虾、中华哲水蚤和长尾类幼体。其中精致真刺水蚤是第一优势种,占浮游动物个体总数的 41.88%。2023.05 航次调查的浮游动物主要优势种有中华哲水蚤、近缘大眼水蚤、小拟哲水蚤、嵎山秀氏水母和百陶箭虫。其中中华哲水蚤是该航次第一优势种,占浮游动物个体总数的 72.67%。2023.09 航次调查的浮游动物主要优势种有五角水母、肥胖三角溞、诺氏三角溞、肥胖软箭虫、亚强真哲水蚤、锥形宽水蚤、瘦长毛猛水蚤、微刺哲水蚤和长尾类溞状幼体。五角水母是第一优势种,占浮游动物个体总数的 27.95%,肥胖三角溞次之占比达 16.59%。

3.5 生物多样性

通过调查结果显示,南麂列岛海域浮游动物多样性指数(H')2022.11 航次最高,2023.05 航次最低;浮游动物均匀度指数(J')2022.11 航次最高,2023.05 航次最低;浮游动物丰富度(D)2022.11 航次最高,2023.05 航次最低。南麂列岛海域浮游动物多样性指数 3 个航次变化范围为 0.52~2.32,平均值为 1.64 ± 0.25 。2022.11 航次浮游动物多样性指数平均值为 1.95 ± 0.09 ,处于最高水平;2023.05 航次浮游动物多样性指数平均值为 1.18 ± 0.21 ,处于最低水平;2023.09 航次浮游动物多样性指数平均值为 1.85 ± 0.11 。浮游动物均匀度指数变化范围为 0.21~0.83,平均值为 0.55 ± 0.03 。2022.11 航次浮游动物均匀度指数平均值为 0.67 ± 0.01 ,为 3 个航次间最高;2023.05 航次浮游动物均匀度指数平均值为 0.41 ± 0.02 ,为 3 个航次间最低;2023.09 航次浮游动物均匀度指数平均值为 0.59 ± 0.01 。浮游动物丰富度变化范围为 1.10~4.56,平均值为 2.57 ± 0.71 。2022.11 航次浮游动物丰富度平均值为 2.45 ± 0.56 ,为 3 个航次间最高;2023.05 航次浮游动物丰富度平均值为 1.50 ± 0.16 ,为 3 个航次间最低;2023.09 航次浮游动物丰富度平均值为 2.06 ± 0.12 ,处于中间水平。具体情况如图 5。

南麂列岛海域 2022.11 航次调查的浮游动物主要

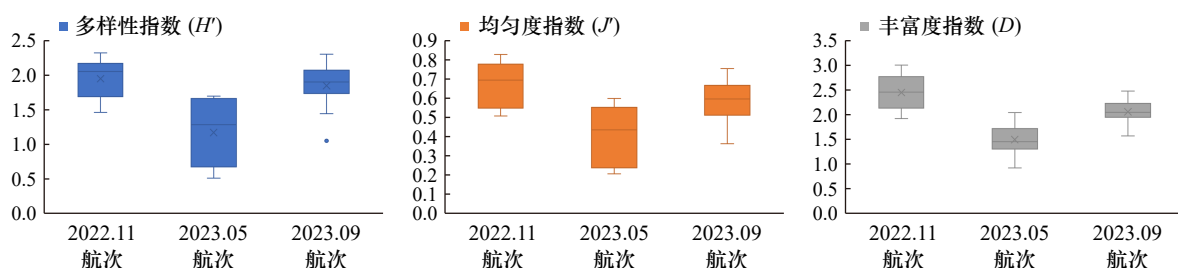


图 5 南麂列岛海域浮游动物生物多样性参数分布

Fig. 5 Distribution of biodiversity parameters of zooplankton in the Nanji Islands sea area

3.6 浮游动物与环境因子的相关性分析

通过对南麂列岛海域的 3 个航次调查得到表层、中层和底层环境因子数据取平均值,将浮游动物生物量、浮游动物丰度与环境因子(水温、盐度、pH、溶解氧质量浓度、叶绿素 *a* 质量浓度、无机氮质量浓度等)进行 Spearman 相关性分析。结果显示,与浮游动物生物量呈极显著相关($p < 0.01$)的包括盐度、酸碱度、叶绿素 *a*、无机氮质量浓度、总磷质量浓度、亚硝酸盐质量浓度、活性磷酸盐质量浓度和铜离子质量浓度;与浮游动物丰度呈极显著相关($p < 0.01$)的包括盐度、酸碱度、叶绿素 *a* 质量浓度、总磷质量浓度、活性磷酸盐质量浓度和铜离子质量浓度(表 3)。

表 3 南麂列岛海域浮游动物与环境因子的 Spearman 相关性分析

Table 3 Spearman correlation analysis of zooplankton and environmental factors in the Nanji Islands sea area

环境因子	浮游动物生物量	浮游动物丰度
水温	-0.114 (0.523)	0.126 (0.479)
盐度	-0.588 (0.000**)	-0.553 (0.001**)
酸碱度(pH)	0.625 (0.000**)	0.515 (0.002**)
溶解氧质量浓度	0.306 (0.078)	0.358 (0.038*)
叶绿素 <i>a</i>	0.533 (0.001**)	0.713 (0.000**)
无机氮质量浓度	-0.469 (0.005**)	-0.387 (0.024*)
浮游植物丰度	0.113 (0.526)	0.21 (0.233)
总磷质量浓度	-0.493 (0.003**)	-0.5 (0.003**)
亚硝酸盐(NO ₂ ⁻)质量浓度	0.622 (0.000**)	0.322 (0.063)
石油烃质量浓度	0.255 (0.146)	0.027 (0.878)
活性磷酸盐质量浓度	-0.549 (0.001**)	-0.638 (0.000**)
总氮质量浓度	-0.414 (0.015*)	-0.339 (0.050*)
颗粒有机物质量浓度	0.032 (0.856)	-0.076 (0.671)
化学需氧量	0.242 (0.168)	0.414 (0.015*)
铜(Cu ²⁺)质量浓度	-0.455 (0.007**)	-0.47 (0.005**)
氨氮质量浓度	-0.075 (0.672)	0.083 (0.640)
硝酸盐(NO ₃ ⁻)质量浓度	-0.444 (0.009**)	-0.309 (0.076)

注: **、*分别代表小于0.01和小于0.05的显著性水平。

将南麂列岛海域环境因子数据划分为不同方位和不同航次进行 NMDS 的分析如图 6 和图 7 所示,其结果呈现了不同的时空变化。分析结果显示南麂列岛海域东部、中部和西部排列结果大部分重叠,各方位于第一轴与第二轴的正负半轴均有分布,说明各方

位分布距离较近;3 次航次的环境因子排序未有重叠面积,2022.11 航次主要分布于第一、二轴负半轴,2023.05 航次主要分布于第一轴的正半轴和第二轴的正负半轴,2023.09 航次主要分布在第一、二轴的负半轴,说明 3 个航次的分布距离较远。在 NMDS 分析结果的基础上进行置换多元方差分析(PERMANOVA),通过置换检验进行显著性统计得出各航次之间的 R^2 为 0.57, F 统计量为 20.96, p 值为 0.000 1,表示航次对差异的解释度为 57%,差异性极显著;各方位之间的 R^2 为 0.04, F 统计量为 1.34, p 值为 0.20,表示区域对差异的解释度为 4%,差异性不显著。

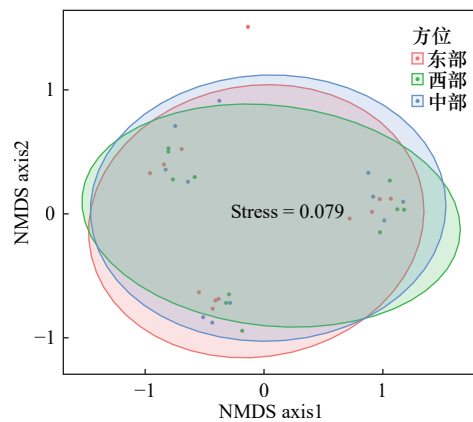


图 6 南麂列岛海域不同方位 NMDS 排序结果
Fig. 6 NMDS ordination results for different azimuth in the Nanji Islands sea area

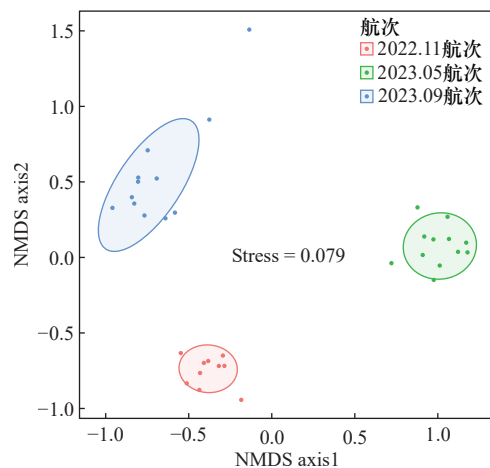


图 7 南麂列岛海域不同航次 NMDS 排序结果
Fig. 7 NMDS ordination results for different cruises in the Nanji Islands sea area

由于 NMDS 分析结果显示南麂列岛海域环境因子航次存在显著性差异但是区域间的差异的解释度仅为 4%且差异性不显著,使得在后续的分析过程中不考虑方位因素的差异进行相关性分析。为了进一步探究南麂列岛海域的环境因子对浮游动物群落结

构的影响,将其7大类群19个优势种进行DCA趋势对应分析,在DCA趋势对应分析前对环境变量进行共线性分析选择,筛选出水温、盐度、浮游植物丰度、硝酸盐质量浓度和总氮质量浓度作为浮游动物群落的环境变量。DCA趋势对应分析结果,排序轴长度为4.022(大于4.0),因此选择CCA进行浮游动物群落与环境因子的相关性分析。环境因子第一排序轴的特征值为0.9342,解释比例为40.33%;第二排序轴的特征值为0.5072,解释比例为21.89%,第一排序轴与第二排序轴累计比例为62.22%,表明前两排序轴中环境因子对南麂列岛海域的浮游动物群落分布的整体解释量为62.22%。在排序图中(图8),盐度、海水温度、总氮质量浓度和硝酸盐质量浓度均对浮游动物的分布有较大影响。与CCA1相关性较高的为海水温度(0.9977)、盐度(-0.7408)、总氮质量浓度(-0.4942)和硝酸盐质量浓度(0.3719);与CCA2相关性较高的为硝酸盐质量浓度(0.8412)和总氮质量浓度(0.61224)。

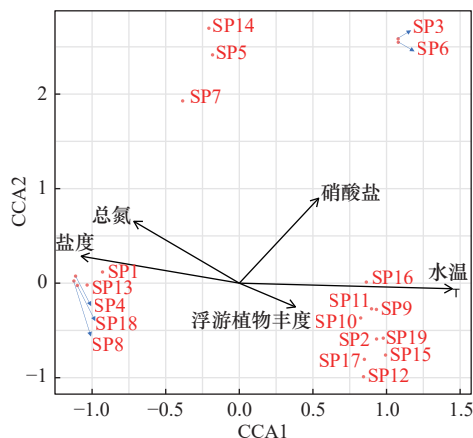


图8 南麂列岛海域浮游动物优势种与环境因子的典范对应分析

Fig. 8 CCA of dominant zooplankton species and environmental factors in the Nanji Islands sea area

SP1:百陶箭虫;SP2:肥胖软箭虫;SP3:肥胖三角溇;SP4:近缘大眼水蚤;SP5:精致真刺水蚤;SP6:诺氏三角溇;SP7:桡足类无节幼体;SP8:嵯山秀氏水母;SP9:瘦长毛猛水蚤;SP10:太平洋纺锤水蚤;SP11:微刺哲水蚤;SP12:五角水母;SP13:小拟哲水蚤;SP14:小型磷虾;SP15:亚真真哲水蚤;SP16:长尾类溇状幼体;SP17:长尾类幼体;SP18:中华哲水蚤;SP19:锥形宽水蚤
SP1: *Sagitta bedoti*; SP2: *Flaccisagitta enflata*; SP3: *Evadne tergestina*; SP4: *Corycaeus affinis*; SP5: *Euchaeta concinna*; SP6: *Evadne nordmanni*; SP7: *Nauplius larva*; SP8: *Sugiura chengshanense*; SP9: *Macrosetella gracilis*; SP10: *Acartia pacifica*; SP11: *Canthocalanus pauper*; SP12: *Muggiaea atlantica*; SP13: *Paracalanus parvus*; SP14: *Euphausia nana*; SP15: *Eucalanus subcrassus*; SP16: *Macrura zoea larva*; SP17: *Macrura larvae*; SP18: *Calanus sinicus*; SP19: *Temora turbinata*

4 讨论

4.1 浮游动物种类组成及航次变化

南麂列岛海域调查共记录到浮游动物93种,隶属于18个类群,种类数量较多的有桡足类30种和浮游幼体20种。2022.11航次各站点点浮游动物种类数较为平均,Z16上马鞍鱼礁区海域种类数最多;2023.05航次的差异幅度较大,Z14下马鞍破屿鱼礁区海域种类数最少,Z09大桶山鹿山鱼礁区海域种类数最多;2023.09航次组内差异较大,Z07对照区海域种类数最少,Z05对照区海域种类数最多,南麂列岛西侧存在明显的江浙沿岸流,因此浮游动物分布特征可能和调查作业时浮游动物受江浙沿岸流影响较大,靠近海岸线的Z07受其裹挟作用分布的浮游动物种类数最少。调查海域的浮游动物种类数分布情况整体上符合由北往南递增的趋势,通过对南麂列岛不同航次环境因子的NMDS得出各航次组间差异性极显著结论以及南麂列岛海域位于江浙沿岸流、台湾暖流以及外海深层上升流交汇的海域^[11],几种不同性质的海流在此交替混合,物质交换充分,营养物质丰富,共同影响着该海域浮游动物分布情况^[22],这几种海流本身随着时间推移具有明显的季节性^[23],各航次环境因子的差异性以及海流水团的季节性共同作用导致3个航次之间浮游动物的种类数和类群组成存在显著差异。其中由于2022.11航次水温较低,暖水性的浮游动物种类数量较少,调查期间江浙沿岸流相对较强,携带了大量的陆源营养物质^[24],使得浮游动物种类数较为平均。2023.05航次海流的变化较为复杂,不同站位之间的差异幅度较大^[25]。2023.05航次相较于2022.11航次随着水温的升高和光照的增强,浮游植物大量繁殖,为浮游动物提供丰富的食物来源并且受到台湾暖流的影响逐渐增强,使得一些暖水性的浮游动物种类数量增加。2023.09航次水温适中、光照充足,浮游动物的种类数和数量也相对较高,期间海洋环境相对稳定,但海流的变化仍会对游泳能力较弱的浮游动物的分布产生较大影响。此时,台湾暖流的影响可能达到高峰,使得一些暖水性的浮游动物种类数量达到最大值^[26]。分析浮游动物整体情况也可侧面反映出海流和水团对调查海域的影响程度^[27],例如以中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)作为暖温带近海类群指示种,其丰度反映江浙沿岸流对于南麂列岛海域的影响程度,当江浙沿岸流较强时,中华哲水蚤的数量会增加;反之则会减少^[28]。以肥胖软箭虫(*Flaccisa-*

gitta enflata) 作为暖水性广布类群指示种, 其丰度反映台湾暖流对南麂列岛海域的影响程度, 当台湾暖流较强时, 肥胖软箭虫的数量会增加, 反之则会减少^[29]。表明浮游动物物种分布与其生态特征、生活习性密切相关^[30]。

4.2 优势种航次变化

调查结果显示 3 个航次共 19 种优势种 7 个类群, 桡足类浮游动物占比 47.37%, 在 7 个类群中最高, 这与张泽凌等^[31]的研究结果相符。从各航次的情况来看, 由于调查时间的差异, 环境因子存在较大变化, 这使得各航次所涉及的优势种在种类和数量方面呈现不同特征^[32]。其中 2022.11 航次与 2023.09 航次优势种种类数最高(9 种), 2023.05 航次优势种种类数最少(5 种), 最大差异因素是海水温度, 其种类数变化和水温变化一致, 说明浮游动物的新陈代谢在一定范围内与海水温度呈正相关^[33], 即温度越高, 新陈代谢能力越快^[34], 繁殖能力越强^[35]。在南麂列岛海域研究中, 肥胖软箭虫和微刺哲水蚤(*Canthocalanus pauper*) 在 2022.11 航次和 2023.09 航次都作为优势种出现, 肥胖软箭虫优势度均大于 0.08, 作为暖水指示种可表明在两航次调查时间段外海的深层上升流和台湾暖流携带高盐水在涨潮时可能侵入南麂列岛海域; 微刺哲水蚤优势度均大于 0.02, 作为高温高盐种类, 温度高于 20℃ 且盐度处于 31~33 最适宜, 其分布状况对温度和盐度有重要的指示作用^[36]。百陶箭虫(*Sagitta bedoti*) 和中华哲水蚤在 2022.11 航次和 2023.05 航次均作为优势种出现, 百陶箭虫优势度均大于 0.02, 源自于暖水性外海种, 主要分布在盐度跨度较大, 沿岸流与外海高盐度海水的汇集区, 与盐度相关性较强^[37-38]; 中华哲水蚤优势度均大于 0.03, 对环境适应能力较强, 为暖水种, 在不同区域有着不同的适温特征^[39], 在本研究结果表明, 其分布特征与海水温度呈显著正相关。在其他研究中, 例如舟山群岛近岸海域, 其优势种的种类和占比与南麂列岛海域存在明显差异^[40-41]。舟山群岛近岸海域的桡足类浮游动物占比约为 35%, 低于南麂列岛海域的 47.37%, 且优势种中的暖水指示种和高温高盐种类的分布特征与南麂列岛海域不尽相同, 也验证了浮游动物分布与温度、盐度的相关性, 当然也可能是由于受到不同的地理条件、海洋环境(如海水温度、盐度等)以及周边人类活动等的影响^[42], 这也进一步表明南麂列岛海域独特的海洋生境对浮游动物群落结构有着特殊的塑造作用。

4.3 浮游动物生物量和丰度的分布和航次变化

南麂列岛海域浮游动物的生物量在不同航次呈

现出特定的分布规律, 其中 2023.05 航次的平均生物量最高, 2023.09 航次次之, 2022.11 航次最低。而各航次浮游动物的丰度分布状况与生物量分布状况存在一定差异, 2023.09 航次的丰度平均值达到最高, 2023.05 航次次之, 2022.11 航次最低。这种分布模式可能揭示了浮游动物在时空上的动态变化过程。2023.05 航次虽然生物量达到顶峰, 但其丰度却不及 2023.09 航次, 这一现象可能是因为该航次中水母类浮游动物的高比例贡献。水母类以其高含水量和湿重较大的特征^[43], 在生物量计算中占据了主导地位, 远超桡足类和毛颚类等其他类群。2022.11 航次在浮游动物生物量和丰度主要集中在下马鞍、马祖岙口和上马鞍人工鱼礁区, 可直观反映海洋牧场中人工鱼礁区的资源养护效果^[44], 也与尹增强和章守宇^[45]在东海区域的研究一致, 强调了人工干预在维持海洋浮游动物生物量和丰度的作用。2023.05 航次浮游动物生物量分布符合由南向北逐步减少, 这主要是由于该航次台湾暖流强度强于江浙沿岸流和外海上升流等海流作用, 此趋势与台湾暖流北上路径相契合^[46]。2023.09 航次浮游动物生物量分布集中在大礁山和竹屿附近海域, 其中生物量较高的站点点分别是 Z03、Z09、Z10、Z11, 可能是因为五角水母(*Muggiaea atlantica*) 占比较高, 五角水母作为管水母类群的代表, 通常被视为水团运动的指示物种, 其分布紧密关联于海流和水团的动态^[47], 说明该区域受海流影响较大, 也与福建沿海区域研究中的五角水母生物量受台湾暖流影响分布西低东高的研究结果一致^[48], 表现出区域间生态连接的复杂性。南麂列岛海域浮游动物生物量集中区域与在三门湾海域^[49]的研究中类似, 浮游动物生物量的集中区域更多受当地独特的地貌以及特殊的海洋环流系统共同作用, 时空分布变化较快。2023.05 航次浮游丰度的均匀分布与 2023.09 航次中由南至北逐步递减的差异, 表明环境因子对浮游动物分布格局的深刻影响。

4.4 影响优势种分布的环境因子

优势种指在浮游动物中占优势的种类, 优势种的种群结构和分布情况可以在很大程度上反映该海域浮游动物群落结构特征^[50]。本研究中, 利用 Spearman 相关性分析、非度量多维排序分析和典范对应分析, 计算出环境因子对浮游动物生物量和丰度相关系数、环境因子各分组的差异性 p 值以及优势种生物量与环境因子的相关系数。通过全模型置换检验和每轴置换检验, 全模型置换检验的卡方值为 2.32, F 统计量为 7.61, p 值小于 0.001(标记为***), 每轴置换检

验结果显示 CCA1 轴的解释是最显著的,卡方值为 0.93, F 统计量为 15.34, p 值小于 0.001(标记为***)。综上两种置换检验的结果表明本研究建立的 CCA 模型是有意义的,并且所选的环境变量与物种组成之间有极显著的关系。

结果表明,盐度与温度是浮游动物群落结构两大主要影响因素。盐度作为海水的重要的理化指标,对浮游动物的丰度起到明显影响作用,适宜的盐度能满足河口类群、广布类群以及海洋类群等浮游动物的繁殖^[51]。南麂列岛海域除了暖水近岸类群和广布类群还调查到太平洋纺锤水蚤(*Acartia pacifica*)等低盐种和中华哲水蚤等河口半咸种作为优势种出现,说明调查海域受鳌江低盐水团迁移影响^[52]。温度也作为海洋浮游动物群落结构影响的重要因素^[53],水温差异对浮游动物生理适应性、食物资源关联和环境适应性均有影响,从而影响其生存和分布。除此之外,总氮质量浓度、硝酸盐质量浓度和浮游植物丰度也共同影响着浮游动物的群落结构。氮是浮游植物生长所需的营养物质,可影响浮游植物丰度,从而影响浮游动物食物结构^[54-55]。硝酸盐作为 6 类营养盐之一^[56],高质量浓度的硝酸盐质量浓度利于杆状藻类生长^[57],也就解释了以杆状藻类为食的桡足类优势种生物量以其成正比。

综上,通过 Spearman 相关性分析、NMDS 分析和 CCA 分析显示,盐度、温度、总氮质量浓度、浮游植物丰度和硝酸盐质量浓度是优势种生物量分布情况的主要环境因子,其中 CCA 分析结果显示这 5 个环境因子可以解释南麂列岛海域 62.22% 优势种分布原

因,剩余 37.78% 变异量未能解释。这部分未解释的变异量可能来源于其他环境因子,如溶解氧质量浓度和 pH 等。其他环境因子的影响可能通过复杂的生态过程间接作用于浮游动物,或者与其他环境因子相互作用,共同塑造浮游动物的群落结构^[58]。因此,未来的研究需要更深入地探索这些未解释变异量的来源,收集更多关于其他潜在环境因子的数据,并进行更深入的分析,更准确地揭示影响浮游动物群落结构的关键因素。

5 总结与展望

南麂列岛海域浮游动物群落结构受多种环境因子的共同影响,表现出显著的时空异质性。通过对 3 个航次的调查数据分析,发现浮游动物种类组成、优势种分布、生物量和丰度均随调查时间变化而波动,这种波动与水温、盐度、营养盐质量浓度等环境因子密切相关。Spearman 相关性分析、非度量多维排序分析和典范对应分析显示出盐度、温度、总氮质量浓度、浮游植物丰度和硝酸盐质量浓度是影响浮游动物群落结构的主要因素。这些环境因子不仅直接作用于浮游动物的生长和繁殖,还通过影响浮游植物的食物链关系间接调控浮游动物的分布。

本研究已经识别出了一些关键的环境因子,但仍有一部分浮游动物群落结构的变异量未能得到阐明。海洋生态系统的复杂性远超过笔者目前的认知,未来研究需要更全面地考虑各种环境因子的相互作用,以及它们对浮游动物群落结构的综合影响。

参考文献:

- [1] 韩增林, 胡伟, 钟敬秋, 等. 基于能值分析的中国海洋生态经济可持续发展评价[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2563-2574.
Han Zenglin, Hu Wei, Zhong Jingqiu, et al. Sustainable development of marine eco-economics based on an emergy analysis in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2563-2574.
- [2] Thorpe R B. We need to talk about the role of zooplankton in marine food webs[J]. *Journal of Fish Biology*, 2024, 105(2): 444-458.
- [3] Uttieri M, Carotenuto Y, Di Capua I, et al. Ecology of marine zooplankton[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(10): 1875.
- [4] 杨丹, 付全有, 韩正兵, 等. 南极典型海域浮游生物生产力/群落结构对 BP/MCP 储碳影响及其年代际变率[J]. 海洋学报, 2024, 46(5): 37-56.
Yang Dan, Fu Quanyou, Han Zhengbing, et al. Effects of plankton productivity/community structure on BP/MCP carbon storage and their interdecadal variations in a typical Antarctic waters[J]. *Haiyang Xuebao*, 2024, 46(5): 37-56.
- [5] 姚莹. “海洋命运共同体”的国际法意涵: 理念创新与制度构建[J]. *当代法学*, 2019, 33(5): 138-147.
Yao Ying. The international law meaning of “marine community of shared future”: concept innovation and system construction[J]. *Contemporary Law Review*, 2019, 33(5): 138-147.
- [6] 孙海博, 王小豪, 何苗, 等. 长江如皋段的浮游动物群落结构及其与水环境因素的关系[J]. *湿地科学*, 2023, 21(4): 555-563.
Sun Haibo, Wang Xiaohao, He Miao, et al. Structure of zooplankton community in Rugao section of Yangtze River and its relationship with water environmental factors[J]. *Wetland Science*, 2023, 21(4): 555-563.
- [7] 阚华勇, 陈勇, 张秀梅, 等. 现代海洋牧场建设的现状与发展对策[J]. *中国工程科学*, 2016, 18(3): 79-84.

- Que Huayong, Chen Yong, Zhang Xiumei, et al. Modern marine ranching: status and development strategy[J]. *Strategic Study of CAE*, 2016, 18(3): 79–84.
- [8] 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 Hongsheng. Construction of marine ranching in China: reviews and prospects[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(7): 1133–1140.
- [9] 伍家祺, 王利伟, 陈柳云. 海洋牧场建设类型比较及发展对策研究——以广东、辽宁、山东为例[J]. *河北渔业*, 2024(2): 42–46.
Wu Jiaqi, Wang Liwei, Chen Liyun. Comparison of construction types and development countermeasures of marine pasture—Take Guangdong, Liaoning and Shandong as examples[J]. *Hebei Fisheries*, 2024(2): 42–46.
- [10] 李梦迪, 李娇, 薛月光, 等. 基于灰色-马尔科夫模型评估石雀滩海洋牧场岩礁鱼类碳储量[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(1): 14–22.
Li Mengdi, Li Jiao, Xue Yueguang, et al. Assessment of carbon storage of reef fish in Shique beach marine ranching based on Grey-Markov model[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, 45(1): 14–22.
- [11] 纪焕红, 叶属峰, 刘星, 等. 南麂列岛海洋自然保护区浮游动物的物种组成及其多样性[J]. *生物多样性*, 2006, 14(3): 206–215.
Ji Huanhong, Ye Shufeng, Liu Xing, et al. The species composition and diversity of zooplankton in Nanji Islands national nature reserve[J]. *Biodiversity Science*, 2006, 14(3): 206–215.
- [12] 王春生, 杨关铭, 朱根海, 等. 南麂列岛附近海域浮游动物的分布及其与浮游藻类和营养盐的关系[J]. *东海海洋*, 1998, 16(2): 41–48.
Wang Chunsheng, Yang Guanming, Zhu Genhai, et al. Distribution of zooplankton and its relation to planktonic algae and nutrients in the waters near Nanji Islands[J]. *Donghai Marine Science*, 1998, 16(2): 41–48.
- [13] 张晓辉, 周燕, 龙华, 等. 南麂列岛海洋保护区浮游动物调查[J]. *水利渔业*, 2007, 27(1): 59–61.
Zhang Xiaohui, Zhou Yan, Long Hua, et al. Zooplankton in the reserve of Nanlu Islands[J]. *Reservoir Fisheries*, 2007, 27(1): 59–61.
- [14] 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 17378.3—2007, 海洋监测规范 第 3 部分: 样品采集、贮存与运输[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 the People's Republic of China. GB 17378.3—2007, The specification for marine monitoring-part 3: sample collection, storage and transportation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [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 12763.4—2007, 海洋调查规范 第 4 部分: 海水化学要素调查[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 the People's Republic of China. GB/T 12763.4—2007, Specifications for oceanographic survey-part 4: survey of chemical parameters in sea water[S]. Beijing: Standards Press of China, 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. 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 the People's Republic of China. GB/T 12763.6—2007, Specifications for oceanographic survey-part 6: marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [17] Pianka E R. Ecology of the agamid lizard *Amphibolurus isolepis* in Western Australia[J]. *Copeia*, 1971, 1971(3): 527–536.
- [18] Zhang Yanrong, Yin Zengqiang, Wang Yan, et al. Zooplankton structure and ecological niche differentiation of dominant species in Tahe Bay, Lushun, China[J]. *Sustainability*, 2024, 16(19): 8590.
- [19] Burks A W. The mathematical theory of communication[J]. *The Philosophical Review*, 1951, 60(3): 398–400.
- [20] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379–423.
- [21] 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 17378.7—2007, 海洋监测规范 第 7 部分: 近海污染生态调查和生物监测[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 the People's Republic of China. GB 17378.7—2007, The specification for marine monitoring-part 7: ecological survey for off-shore pollution and biological monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [22] 姚瑞. 基于高通量 DNA 测序的南麂列岛海洋底栖环节动物多样性分析[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2018.
Yao Rui. Analysis of marine benthic annelid diversity in Nanji Islands based on high-throughput DNA sequencing[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2018.
- [23] 李扬, 李欢, 吕颂辉, 等. 南麂列岛海洋自然保护区浮游植物的种类多样性及其生态分布[J]. *水生生物学报*, 2010, 34(3): 618–628.
Li Yang, Li Huan, Lü Songhui, et al. Species diversity and distribution of phytoplankton in Nanji Islands national nature reserve[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(3): 618–628.
- [24] 战庆, 王张华, 赵宝成, 等. 末次冰消期以来长江口沉积环境演化及沿岸流变化[J]. *地球科学*, 2020, 45(7): 2697–2708.
Zhan Qing, Wang Zhanghua, Zhao Baocheng, et al. Sedimentary evolution and coastal currents variations of the Yangtze River Mouth (East China Sea) since Last Deglaciation[J]. *Earth Science*, 2020, 45(7): 2697–2708.
- [25] 李汝伟. 浙江近海海域超微型浮游生物类群的生态研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017.
Li Ruwei. Ecological studies on picoplankton in coastal waters of Zhejiang[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2017.

- [26] 孙鲁峰, 柯昶, 徐兆礼, 等. 上升流和水团对浙江中部近海浮游动物生态类群分布的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(6): 1811–1821.
Sun Lufeng, Ke Chang, Xu Zhaoli, et al. The influence of upwelling and water mass on the ecological group distribution of zooplankton in Zhejiang coastal waters[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 1811–1821.
- [27] Aggio C E G, Oliveira F R, Progenio M, et al. The zooplankton of tropical streams: is it determinism or stochasticity that drives the spatial and temporal patterns in community structure?[J]. *Community Ecology*, 2022, 23(2): 219–229.
- [28] 吴丽航, 王健鑫, 许永久, 等. 长江口及邻近海域冬、夏季浮游动物群落结构的季节差异分析[J]. *浙江海洋大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(3): 183–191.
Wu Lihang, Wang Jianxin, Xu Yongjiu, et al. Seasonal difference analysis of zooplankton community structure in winter and summer in the Yangtze Estuary and adjacent waters[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2022, 41(3): 183–191.
- [29] 王亮根, 李亚芳, 杜飞雁, 等. 大亚湾人工鱼礁区和岛礁区浮游动物群落特征及对仔稚鱼的影响[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(2): 41–50.
Wang Lianggen, Li Yafang, Du Feiyan, et al. Zooplankton community characteristics and impact on ichthyoplankton in artificial reefs and island reefs of Daya Bay[J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(2): 41–50.
- [30] 沈小飞, 王咏雪, 陈利, 等. 乐清湾海域浮游动物群落结构时空变化研究[J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(10): 109–112, 119.
Shen Xiaofei, Wang Yongxue, Chen Li, et al. Spatial and temporal variations of the zooplankton community structure in the Yueqing Bay waters[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(10): 109–112, 119.
- [31] 张泽凌, 蒋霞敏, 夏明月, 等. 渔山列岛浮游动物的群落结构特征分析[J]. *生物学杂志*, 2014, 31(1): 51–55.
Zhang Zeling, Jiang Xiamin, Xia Mingyue, et al. Analysis of community structure of zooplankton in Yushan Islands[J]. *Journal of Biology*, 2014, 31(1): 51–55.
- [32] 边佳胤, 王平波, 沈丹迪, 等. 2018年春、夏季浙北海域大中型浮游动物生态特征及其与环境因子的关系[J]. *海洋湖沼通报*, 2023, 45(5): 152–162.
Bian Jiayin, Wang Pingbo, Shen Dandi, et al. Ecological characteristics of macro- and meso-zooplankton in north coastal areas of Zhejiang Province in spring and summer, 2018, and their relationship with environmental factors[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2023, 45(5): 152–162.
- [33] Devreker D, Souissi S, Seuront L. Effects of chlorophyll concentration and temperature variation on the reproduction and survival of *Temora longicornis* (Copepoda, Calanoida) in the Eastern English Channel[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, 318(2): 145–162.
- [34] Işkın U, Filiz N, Cao Yu, et al. Impact of nutrients, temperatures, and a heat wave on zooplankton community structure: an experimental approach[J]. *Water*, 2020, 12(12): 3416.
- [35] 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.
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.
- [36] 胡亚丽, 王健鑫, 许永久, 等. 2016和2020年长江口及邻近海域浮游动物群落结构夏季年际变化及与环境因子的关系[J]. *浙江海洋大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(3): 192–201.
Hu Yali, Wang Jianxin, Xu Yongjiu, et al. Summer interannual changes of zooplankton community structure in the Yangtze River estuary and adjacent waters in 2016 and 2020 and its relationship with environmental factors[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2022, 41(3): 192–201.
- [37] 戴美霞, 朱艺峰, 林霞, 等. 象山港浮游动物 β 多样性及其成分变化的环境因子解释[J]. *生态学报*, 2017, 37(17): 5780–5789.
Dai Meixia, Zhu Yifeng, Lin Xia, et al. Interpretation of environmental factors affecting zooplanktonic beta diversity and its components in Xiangshan Bay[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(17): 5780–5789.
- [38] Zadereev E, Drobotov A, Anishchenko O, et al. The structuring effects of salinity and nutrient status on zooplankton communities and trophic structure in Siberian lakes[J]. *Water*, 2022, 14(9): 1468.
- [39] 杨杰青, 陈渊戈, 张冬融, 等. 春季中华哲水蚤在不同海湾或河口对环境的适应性[J]. *应用海洋学学报*, 2023, 42(3): 460–468.
Yang Jieqing, Chen Yuange, Zhang Dongrong, et al. Adaption of *Calanus sinicus* to the environment factors in bays and estuaries in spring season[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2023, 42(3): 460–468.
- [40] 刘镇盛. 长江口及其邻近海域浮游动物群落结构和多样性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Liu Zhensheng. Community structure and biodiversity of zooplankton in the Changjiang estuary and its adjacent waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [41] 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.
- [42] Choo S, Kwak M T, Cho Y K, et al. Effects of water masses on the zooplankton community structure in the northern East China Sea during the East Asian Summer Monsoon in 2020[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110847.
- [43] 张亮, 张绍萍, 陶卉卉, 等. 胶州湾大沽河口邻近海域夏、秋季大型浮游动物群落结构特征[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2024, 44(3): 312–321.

- Zhang Liang, Zhang Shaoping, Tao Huihui, et al. Community structure characteristics of macrozooplankton in the sea area near Dagu River Estuary of Jiaozhou Bay in summer and autumn[J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2024, 44(3): 312–321.
- [44] 冯雪, 范江涛, 孙晓, 等. 珠海外伶仃人工鱼礁对鱼类资源养护效果初步评估[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(12): 3228–3236
- Feng Xue, Fan Jiangtao, Sun Xiao, et al. The stock enhancement effect evaluation of artificial reef in Wailingding, Zhuhai[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(12): 3228–3236
- [45] 尹增强, 章守宇. 东海区资源保护型人工鱼礁生态效果评价体系的初步研究[J]. *海洋渔业*, 2012, 34(1): 23–31.
- Yin Zengqiang, Zhang Shouyu. The ecological effect evaluation system of protective artificial reef in East China Sea[J]. *Marine Fisheries*, 2012, 34(1): 23–31.
- [46] 杨阳阳. 长江河口典型浮游动物群落时空变动及其主要驱动因素研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- Yang Yangyang. Temporal and Spatial Variation and the main driving forces of Zooplankton Community in the Yangtze River Estuary[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [47] 李开枝, 柯志新, 李刚, 等. 热带东北印度洋海域管水母类的群落结构特征[J]. *海洋学报*, 2014, 36(8): 72–81.
- Li Kaizhi, Ke Zhixin, Li Gang, et al. Community structure of siphonophores in the tropical northeast Indian Ocean[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(8): 72–81.
- [48] 张芳, 杨波, 张光涛. 胶州湾水母类生态研究 II. 优势种丰度的时空分布[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(6): 518–526.
- Zhang Fang, Yang Bo, Zhang Guangtao. Ecology of medusae in Jiaozhou Bay II. Spatial and temporal distribution of dominant species[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(6): 518–526.
- [49] 徐晓群, 曾江宁, 陈全震, 等. 浙江三门湾浮游动物优势种空间生态位[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 818–824.
- Xu Xiaohun, Zeng Jiangning, Chen Quanzhen, et al. Spatial niches of dominant zooplankton species in Sanmen Bay, Zhejiang Province of East China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3): 818–824.
- [50] 徐佳奕, 徐兆礼. 三沙湾浮游动物生态类群演替特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1413–1424.
- Xu Jiayi, Xu Zhaoli. Seasonal succession of zooplankton in Sansha Bay, Fujian[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1413–1424.
- [51] 谢福武, 谢海群, 王少露, 等. 海南新村潟湖海草床区浮游动物粒径结构特征与环境因子相关性[J]. *广东海洋大学学报*, 2024, 44(3): 64–73.
- Xie Fuwu, Xie Haiqun, Wang Shaolu, et al. Characteristics of Zooplankton size structure and its relationship with environmental factors on seagrass beds of Xincun Lagoon, Hainan[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2024, 44(3): 64–73.
- [52] 王雨航, 李尚清, 叶深, 等. 瓯江口海域浮游动物群落结构与环境因子的相关性分析[J]. *海洋学报*, 2024, 46(3): 98–110.
- Wang Yuhang, Li Shangqing, Ye Shen, et al. Correlation analysis of zooplankton community structure and environmental factors in the Oujiang River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2024, 46(3): 98–110.
- [53] 戴希贤, 马旭洲, 张文博, 等. 盆地环境条件下幼蟹养殖池塘浮游动物群落结构及水质评价[J]. *安徽农业大学学报*, 2023, 50(6): 991–999.
- Dai Xixian, Ma Xuzhou, Zhang Wenbo, et al. Evaluation of zooplankton community structure and water quality in juvenile crab culture ponds under basin environmental conditions[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2023, 50(6): 991–999.
- [54] 魏朝军, 邱鹏飞, 王府臣, 等. 天津于桥水库浮游动物群落变化及其与束丝藻消长的关系[J]. *水生态学杂志*, 2024, 45(6): 134–144.
- Wei Chaojun, Qiu Pengfei, Wang Fuchen, et al. Zooplankton community dynamics and its relationship with the growth of *Aphanizomenon* sp. in Yuqiao Reservoir, Tianjin[J]. *Journal of Hydroecology*, 2024, 45(6): 134–144.
- [55] Dagg M J. Ingestion of phytoplankton by the micro- and mesozooplankton communities in a productive subtropical estuary[J]. *Journal of Plankton Research*, 1995, 17(4): 845–857.
- [56] 张荣华. 用于厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 研究的海气耦合模式综述: 中间型和混合型模式[J]. *海洋与湖沼*, 2024, 55(1): 1–23.
- Zhang Ronghua. A review of progress in coupled ocean-atmosphere model developments for ENSO studies: intermediate coupled models and hybrid coupled models[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2024, 55(1): 1–23.
- [57] 任爽宁, 张硕, 高世科, 等. 海州湾浮游桡足类丰度的季节变化及其与环境因子的相关性[J]. *海洋学报*, 2024, 46(3): 89–97.
- Ren Shuangning, Zhang Shuo, Gao Shike, et al. Seasonal variations of planktonic copepods abundance and their relationship with environmental factors in the Haizhou Bay[J]. *Haiyang Xuebao*, 2024, 46(3): 89–97.
- [58] Hossain M S, Ullah M A, Sultana S, et al. Exploring phyto- and zooplankton community structure, spatial variation, and driving forces shaping the community from a large-scale freshwater dominated estuary[J]. *Environmental Research Communications*, 2024, 6(11): 115012.

Study on the spatiotemporal variation characteristics of zooplankton community and its key driving factors in Nanji Islands sea area

Qiu Wenzhi^{1,2,3}, Qin Song^{2,3}, Tang Wei^{2,3}, Ye Shen^{2,3}, Fan Qingsong^{2,3}, Tang Jiu^{2,3}, Ai Longwei^{1,2,3},
Wu Qiang^{1,2,3}, Lin Keze^{1,2,3}, Zheng Chunfang¹, Liu Weicheng^{2,3}

(1. College of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Coastal Biological Germplasm Resources Conservation and Utilization, Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325000, China; 3. Wenzhou Key Laboratory of Marine Biological Genetics and Breeding, Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325000, China)

Abstract: To understand the spatio-temporal variation characteristics of zooplankton communities in the Nanji Islands sea area, three voyage surveys of aquatic organisms and hydrological factors were conducted in November 2022, May 2023, and September 2023, respectively. Laboratory experimental results showed that a total of 93 species of zooplankton were identified, including 20 species of plankton larvae. The 2023.09 voyage recorded the highest species richness (63 species), while the 2022.11 voyage had the lowest (45 species). Among these, 19 dominant species ($Y \geq 0.02$) included *Sagitta bedoti*, *Flaccisagitta enflata*, *Calanus sinicus*, *Acartia pacifica*, and others. The average abundance of zooplankton was 512.84 ind./m³, and the average biomass was 614.82 mg/m³, with significant differences among the voyages. The 2023.09 voyage had the highest abundance and biomass, while the 2022.11 voyage had the lowest. The average values of the Shannon-Wiener diversity index (H'), species evenness index (J'), and richness index (D) for zooplankton were 1.64, 0.55, and 2.57, respectively. Results from Spearman correlation analysis, non-metric Multidimensional Scaling Analysis and Canonical Correspondence Analysis indicated that salinity, temperature, total nitrogen content, nitrate concentration, and phytoplankton abundance were important environmental factors influencing the biomass of dominant zooplankton species in the Nanji Islands sea area.

Key words: Nanji Islands; zooplankton; community structure; environmental factors; correlation analysis