

# 基于DNA宏条形码的长江口邻近海域夏、冬季浮游动物群落结构特征研究

徐艳格<sup>1,2</sup>, 周超<sup>1,2</sup>, 李博<sup>1</sup>, 颜金培<sup>3</sup>,  
刘星辰<sup>1</sup>, 张鸿博<sup>1,2</sup>

(1.浙江海洋大学 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022; 2.浙江海洋大学 比萨海洋研究生学院, 浙江 舟山 316022; 3.自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 为了解长江口邻近海域浮游动物群落组成与变化, 本研究根据 2020 年夏、冬两季长江口邻近海域浮游动物调查数据, 利用 DNA 宏条形码 (DNA metabarcoding) 技术及形态学鉴定方法分析了该海域浮游动物的种类组成、优势种及群落结构特征。结果表明: 调查海域夏、冬两季通过人工形态学方法鉴定浮游动物 101 种, DNA 宏条形码技术注释浮游动物 275 种; 夏、冬两季浮游动物平均生物量 (湿重) 分别为 1357.5 mg/m<sup>3</sup> 和 88.1 mg/m<sup>3</sup>, 总体呈近岸高于外海, 由近岸向外海逐渐递减的趋势; 平均多样性指数 ( $H'$ ) 分别为 1.96 和 1.85, 平均丰富度指数 ( $D$ ) 分别为 0.39 和 0.40, 平均均匀度指数 ( $J$ ) 分别为 0.59 和 0.61, 上述 3 种生物多样性指数均略低, 浮游动物生物多样性处于一般水平。与以往的研究相比, 该海域浮游动物生物量呈上升趋势, 但其优势种组成较稳定。

**关键词:** DNA 宏条形码; 长江口邻近海域; 浮游动物; 群落结构; 多样性

中图分类号: Q178.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)02-0236-11

## Characterization of zooplankton community structure in summer and winter on the Yangtze River Estuary and adjacent waters based on DNA metabarcoding

XU Yange<sup>1,2</sup>, ZHOU Chao<sup>1,2</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, YAN Jinpei<sup>3</sup>,  
LIU Xingchen<sup>1</sup>, ZHANG Hongbo<sup>1,2</sup>

(1.College of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2.Pisa Marine Graduate School, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 3.Third Institute Of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Based on the zooplankton survey data in the waters adjacent to the Yangtze River Estuary in the summer and winter seasons of 2020, this study analyzed the species composition, dominant species and community structure of zooplankton in the waters adjacent to the Yangtze River Estuary using DNA metabarcoding and morphological methods to understand the composition of the zooplankton community in this area and its changes. The results showed that 101 species of zooplankton were found in the summer and winter by artificial morphology, and 275 species of zooplankton were found by DNA metabarcoding; the average biomass of zooplankton in the summer and winter was 1 357.5 mg/m<sup>3</sup> and 88.1 mg/m<sup>3</sup>, respectively. The

收稿日期: 2024-01-16, 修订日期: 2024-06-18

**基金项目:** 自然资源部海洋大气化学与全球变化重点实验室开放基金资助项目 (GCMAC2308); 舟山市科技局“浙江海洋大学科技专项”资助项目 (2019C21095); 浙江省自然科学基金青年科学基金资助项目 (LQ18D060006)

**作者简介:** 徐艳格 (1999—), 女, 江西上饶人, 硕士研究生, 主要研究方向为生态毒理学, E-mail: oxygen1026@163.com

**通信作者:** 周超, 男, 山东滨州人, 博士, 主要研究方向为生态毒理学, E-mail: zc43115@163.com

biomass is generally higher inshore than offshore, with a decreasing trend from inshore to offshore. In the summer and winter, the average Shannon diversity index ( $H'$ ) were 1.96 and 1.85, the Margalef's species richness diversity ( $D$ ) were 0.39 and 0.40, and Pielou's evenness index ( $J$ ) were 0.59 and 0.61, respectively. Community diversity indices were all slightly lower, and zooplankton community diversity was at an average level. The zooplankton biomass in this area showed an increasing trend compared to previous studies, but the composition of dominant species was more stable.

**Key words:** DNA metabarcoding; Yangtze River Estuary and adjacent waters; zooplankton; community structure; diversity

海洋浮游动物是海洋食物网的关键组分,在海洋生态系统的能量传递、物质交换及循环中发挥着重要作用,并通过捕食和代谢改变其所处生态系统的营养结构<sup>[1]</sup>。且浮游动物类群对水温、盐度和洋流的变化高度敏感,可以作为气候变化的指示生物<sup>[2]</sup>。因此,分析浮游动物的类群组成、群落结构及种群动态变化,有助于了解其所处海域的生态系统功能及环境质量。

长江口邻近海域囊括长江口与杭州湾交汇处、宁波舟山港、东极岛及东海外海等重要海区,也是舟山渔场的所在地。其海域辽阔且海洋环境复杂,尤其是近岸海域水体富营养化严重,导致生态破坏、渔业资源衰退,已威胁海洋生态安全。根据《2020年中国海洋生态环境状况公报》<sup>[3]</sup>,2020年我国海域中东海劣四类海水海域面积最大(71.43%),严重富营养化海域面积亦最大(12310 km<sup>2</sup>),比前一年增加了1860 km<sup>2</sup>,且主要分布在长江口、杭州湾及浙江沿岸。此外,以往的研究<sup>[4]</sup>证实长江口邻近海域存在年平均气温上升、海洋酸化及微塑料废弃物日益增多等问题。这些环境污染问题会造成浮游动物群体发生改变,甚至导致生物量的下降。因此,研究历年长江口邻近海域浮游动物的群落组成和季节变化,有助于增强对该海域环境的全面监测。

浮游生物多样性监测在评估人类活动及气候变化对近海水域状况的影响与海洋生态环境的保护都具有至关重要的意义<sup>[5]</sup>。DNA宏条形码作为一项海洋生物监测领域发展迅速的技术,其突破传统方法的局限性,能够快速准确地鉴别环境中的浮游生物类群。目前,针对长江口邻近海域浮游动物的研究多集中在传统形态学方法<sup>[6]</sup>,而DNA宏条形码技术可以降低近缘物种和小基数物种的漏检率<sup>[7]</sup>,有助于及时发现非本

土物种,提高入侵物种的监测效率。但DNA宏条形码技术在浮游动物生物量和丰度的准确量化问题上存在缺陷<sup>[8]</sup>。本文以DNA宏条形码技术为主,选用可变区和保守区且序列进化速率慢,通用引物覆盖广物种的18SrDNA基因中最适用于浮游动物多样性研究的V4区进行扩增<sup>[9]</sup>。在浮游动物个体数量评估方面,以形态学鉴定数为补充,评估该海域的浮游动物多样性。且长江口邻近海域浮游动物的研究区域大多在124°E以内,极少涉及东海陆架边缘。为准确了解长江口邻近海域的浮游动物群落结构特征,本研究以自长江口附近舟山海域至东海陆架边缘处为研究区域,基于DNA宏条形码技术与人工形态学鉴定,利用2020年8月(夏季)、12月(冬季)的调查数据,分析该海域浮游动物的种类组成、优势种、多样性指数与群落结构的变化,以期为长江口邻近海域的近岸海洋生物资源开发利用、海域生态影响评价和海洋管理决策提供基础资料 and 科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与分析

#### 1.1.1 浮游动物样品采集

本研究依托“浙江海洋大学自主航次-海洋锋面及渔业资源长期调查计划”,分别在2020年夏季(8月10日至17日)、冬季(11月29日至12月10日),于30.0°N—31.0°N,122.2°E—126.0°E区域开展浮游动物调查。参照《海洋监测规范》<sup>[10]</sup>(GB 17378.3—2007)采集样品。每个站位均垂直拖网两次,获得两份浮游动物样品。一份加入5%福尔马林溶液固定用于形态学鉴定,另一份滤水后置于-20℃冷冻,待回实验室称量湿重,再加入无水乙醇固定,用于基于18S

$V_4$  宏条形码的分子鉴定。两次均利用浅水 I 型浮游生物拖网在调查区域采集浮游动物, 夏季调

查站位为 21 个, 冬季调查站位为 16 个(图 1), 冬季受突发极端天气影响调查站位有所减少。

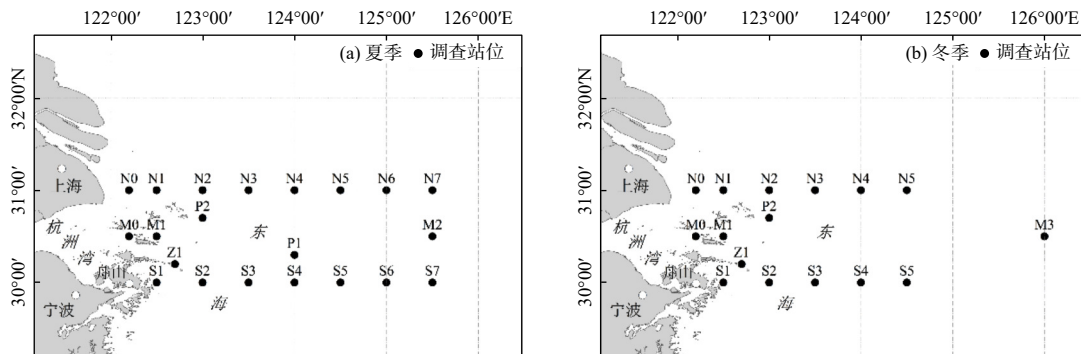


图 1 航次调查站位

Fig. 1 Zooplankton sampling station

### 1.1.2 DNA 宏条形码技术分子鉴定

酒精样送往上海美吉生物医药科技有限公司进行 DNA 提取、PCR 扩增及高通量测序, 选用浮游动物通用引物 Uni18SF(5' AGGGCAAK YCTGGTGCCAGC 3') 和 Uni18SR(5' GRCGGTA TCTRATCGYCTT 3') 对 18S rDNA 基因的  $V_4$  区进行扩增。测序得到的原始数据使用 Flash 1.2.1 进行数据拼接, 参照 Qiime 1.9.1 完成质量控制, 并将拼接后的序列去重过滤、序列分类注释、beta 多样性距离计算。采用 Uparse11 按照 97% 相似性对非重复序列(不含单序列)进行可操作分类单元(Operational Taxonomic Units, OTUs)聚类, 利用 Usearch11 进行 OTUs 统计处理, 将期望误差阈值(EER)设为 1.0。使用 RDP Classifier 2.13 方法与 NCBI(National Center for Biotechnology Information)对 OTUs 代表序列进行序列分类注释<sup>[9]</sup>。

### 1.1.3 形态学鉴定

甲醛保存的浮游动物样品用奥特体视显微镜(SZ650)进行形态学分类、鉴定和统计, 浮游幼体鉴定到类水平, 其他类别鉴定至种水平。在进行物种统计分析时, 少部分无法鉴定到种的样本, 逐一鉴定至更高的分类水平并按另一物种统计<sup>[11]</sup>。

## 1.2 数据分析

### 1.2.1 生物量

浮游动物生物量的计算公式<sup>[12]</sup>为:

$$M = \frac{m}{V} \quad (1)$$

式中:  $M$  为单位体积浮游动物的生物量(单位:  $\text{mg}/\text{m}^3$ );  $m$  为浮游动物样品湿重(单位:  $\text{mg}$ );  $V$  为总取样体积(单位:  $\text{m}^3$ )。

### 1.2.2 优势种分析

浮游动物优势种以优势度为标准进行判断, 其计算公式<sup>[12]</sup>为:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (2)$$

式中:  $Y$  为某单一物种浮游动物的优势度;  $n_i$  为第  $i$  种浮游动物的个体数;  $N$  为浮游动物的总个体数;  $f_i$  为第  $i$  种浮游动物在调查站位中的出现频率。

当优势度  $Y \geq 0.02$  时<sup>[12]</sup>, 则判断该物种为优势种。

浮游动物的优势种更替率公式<sup>[13]</sup>为:

$$R = \frac{(a+b-2c)}{(a+b-c)} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $a$  为夏季浮游动物优势种种类数;  $b$  为冬季浮游动物优势种种类数;  $c$  为两季共同优势种种类数。

### 1.2.3 生物多样性指数特征

Shannon 多样性指数( $H'$ )<sup>[12]</sup>的计算公式为:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i \quad (4)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  种浮游动物的个体数( $n_i$ )与总个体数( $N$ )的比值( $n_i/N$ ); 每个 OTUs 序列作为一个个体数目计算<sup>[9]</sup>。

Margalef's 物种丰富度指数( $D$ )<sup>[12]</sup>的计算

公式为:

$$D = \frac{S-1}{\log_2 N} \quad (5)$$

式中:  $S$  为样品中的种类总数。

Pielou's 均匀度指数( $J$ )<sup>[12]</sup>的计算公式为:

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (6)$$

式中:  $H'$  为样品的种类多样性指数。

### 1.3 数据处理

基于形态学鉴定数据,对浮游动物的生物量和优势种进行计算。在宏条形码数据基础上对 OTUs 进行多样性计算,同时在各分类水平上对物种注释进行群落结构的组成分析。采用 R 语言 3.5.1 软件中的 Vegan 包对多样性指数进行计算,并使用 ArcGIS 10.2 软件绘制相应图件。最后将 OTUs 数据进行标准化处理,利用 PRIMER 5.0 软件 Cluster 分析模块,基于 Bray—Curtis 距离矩阵,进行浮游动物群落的聚类情况分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 浮游动物种类及组成

基于形态学鉴定,夏季共检出浮游动物 7 门、17 类、84 种;冬季共检出浮游动物 7 门、14 类、56 种。两季检出物种中均为桡足类占比最大,其中夏季检出 26 种、冬季检出 23 种。检出的桡足类物种数占夏季总物种数目的 30.95%、占冬季总物种数目的 41.07%,糠虾类、管水母类、十足类、端足类等种类也有分布。

DNA 宏条形码技术鉴定结果显示,夏、冬两季共检出浮游动物 275 种,其中夏季检出浮游动物物种 192 种 158 属(包括 23 门、53 纲、97 目、141 科),冬季检出浮游动物物种 137 种(包括 24 门、45 纲、72 目、106 科)。其中桡足类在检出物种中占比最大:夏季检出 84 种,占总物种数目的 43.75%;冬季检出 53 种,占冬季总物种数目的 38.69%。根据 DNA 宏条形码数据,本研究选取每个站位鉴定至纲、目、科,三个分类水平上相对丰度前 10 的物种,绘制成相应的物种相对丰度柱状图(图 2)。

研究表明,在纲分类水平上,两季相对丰度最高的均为桡足纲,在夏季中占比 44.02%、

冬季占比 38.88%。而软甲纲和水螅虫纲相对丰度也较高,占比为 16.37%~30.67%,其他纲水平浮游动物还包括箭虫纲、海樽纲、无触手纲等;在目分类水平上,哲水蚤目、管水母目都占据较大优势,其中哲水蚤目的相对丰度最高,在夏、冬两季分别为 43.99% 和 38.88%,其次为管水母目,在夏季丰度占比为 27.67%、冬季丰度占比为 22.75%,此外本研究还鉴别出了端足目、糠虾目、花水母目等其他目水平的浮游动物;在科分类水平上,夏季双生水母科、哲水蚤科和剑水蚤科占优势,相对丰度分别为 27.44%、22.88% 和 16.10%;冬季磷虾科、双生水母科和哲水蚤科占优势,相对丰度分别为 22.28%、23.70% 和 14.58%,其他科水平的浮游动物还包括真刺水蚤科、糠虾科、箭虫科等。

本研究基于形态学方法,夏、冬两季检出物种中桡足类占 30.95% 和 41.07%;基于 DNA 宏条形码技术,两季检出物种中桡足类占 43.75% 和 38.69%。骆鑫等<sup>[14]</sup>2014 年对该海域浮游动物调查发现,夏季出现浮游动物共 13 类群,67 种,其中桡足类有 22 种,占总数的 32.8%。边佳胤等<sup>[15]</sup>2016 年在东海海域夏季共鉴定浮游动物 7 门,16 类,96 种,其中桡足类浮游动物检出占比最高。孟庆超等<sup>[16]</sup>2018 年在东海海域对浮游动物群落调查结果显示,四季共鉴定出浮游动物 15 个类群,78 种和 23 类浮游幼体,其中桡足类最多(36 种),占种类组的 35.6%。研究结果显示,无论使用人工形态学方法还是 DNA 宏条形码技术,所得浮游动物群落结构均为桡足类在该海域浮游动物中占最大优势,这与往年调查所得的结果相符<sup>[15-17]</sup>,说明长江口邻近海域浮游动物的种类结构呈稳定状态。本次调查浮游动物种类组成有着较明显的季节变化,而夏季长江冲淡水及钱塘江径流给长江口海域提供充足的营养盐,促进了浮游植物的生长,丰富了浮游动物的食物多样性,所以夏季浮游动物种类数较冬季更多。

### 2.2 优势种

本研究在夏、冬两季调查,通过人工形态学鉴定共发现优势种 9 种(表 1),其中节肢动物 7 种,刺胞动物、毛颚动物各 1 种。夏、冬季调查

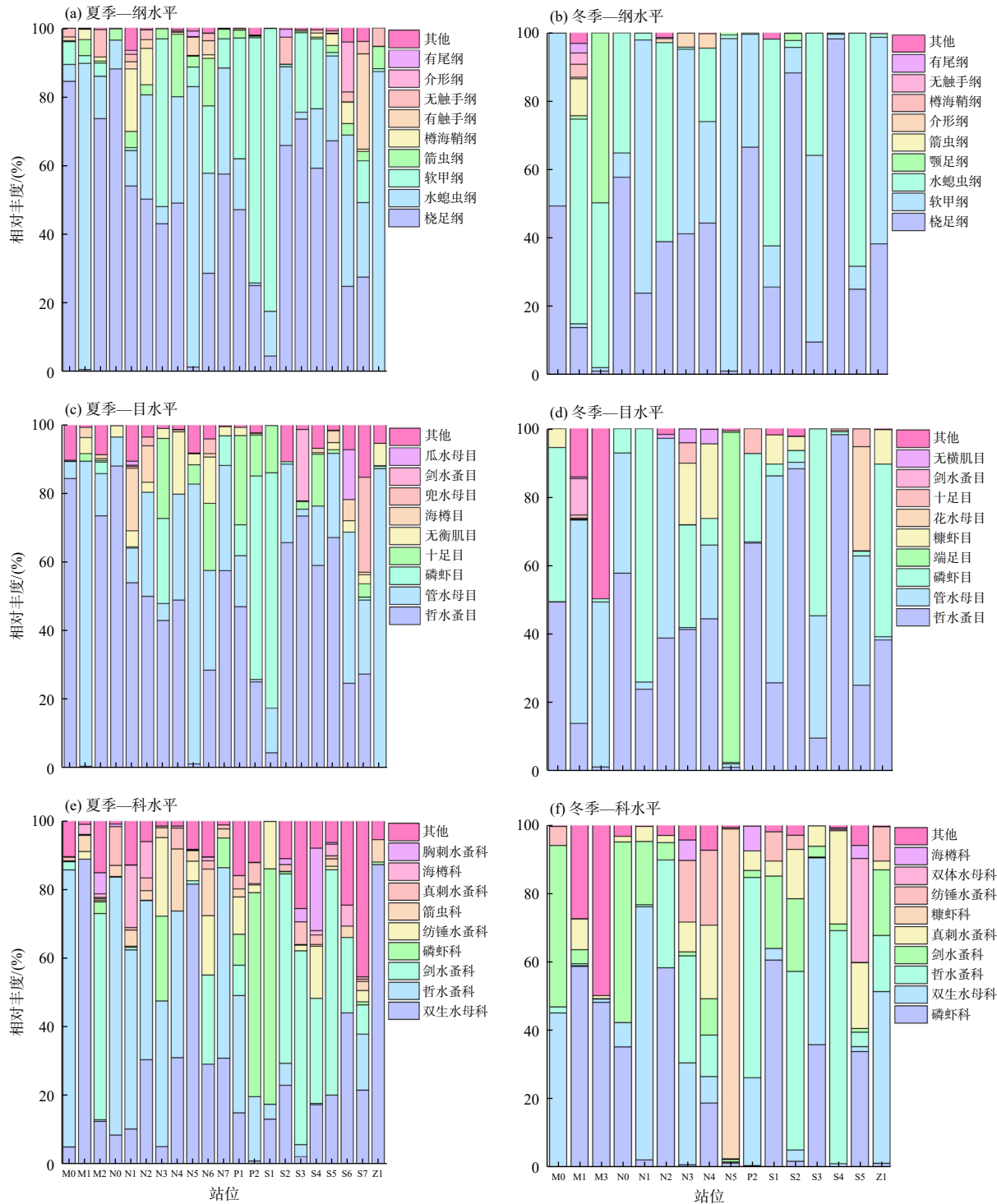


图2 基于DNA宏条形码技术的长江口邻近海域浮游动物相对丰度占比柱状图

Fig. 2 Column Graph of relative abundance proportion of zooplankton samples in the Yangtze River Estuary and adjacent waters based on DNA metabarcoding

发现的优势种大致相同,共同优势种有双生水母、中华哲水蚤、针刺拟哲水蚤、长额刺糠虾和精致真刺水蚤。除此之外,夏季优势种还包括中型莹虾和肥胖箭虫,冬季优势种还包括刷状莹虾

和太平洋纺锤水蚤。其中,中华哲水蚤、针刺拟哲水蚤、长额刺糠虾都是长江口邻近海域历年优势种<sup>[17-19]</sup>,精致真刺水蚤是舟山近海海域的历年优势种<sup>[15-18]</sup>。而夏季和冬季的第一优势种均

为双生水母(夏季为 0.27, 冬季为 0.22), 出现频率均为 100%。优势种季度差异不明显, 更替率为 44.4%, 杜明敏等<sup>[20]</sup>研究发现, 在全球范围内, 水母类在浮游动物类群中占比呈逐年上升趋势, 在部分海域的占比甚至超过桡足类。全球变暖、海洋酸化、赤潮等均可能为水母种群数量扩大的原因<sup>[21]</sup>, 这需要引起重视并长期持续监测。

表 1 长江口邻近海域浮游生物夏/冬季各站位优势物种比例  
Tab.1 The ratio of dominant species of plankton at each station in summer/winter in the eastern the Yangtze River Estuary and adjacent waters

| 序号 | 物种名/拉丁文名                                | 夏季       |        |                           | 冬季       |        |                           |
|----|-----------------------------------------|----------|--------|---------------------------|----------|--------|---------------------------|
|    |                                         | 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  | 双生水母/ <i>Diphyopsis chamonis</i>        | 100.00   | 0.274  | 1 216.7                   | 100.00   | 0.222  | 1027.4                    |
| 2  | 中华哲水蚤/ <i>Calanus sinicus</i>           | 100.00   | 0.229  | 1 014.5                   | 100.00   | 0.131  | 607.0                     |
| 3  | 针刺拟哲水蚤/ <i>Paracalanus aculeatus</i>    | 95.24    | 0.140  | 669.5                     | 87.50    | 0.069  | 402.1                     |
| 4  | 长额刺糠虾/ <i>Acanthomysis longirostris</i> | 66.67    | 0.039  | 376.9                     | 93.75    | 0.081  | 435.7                     |
| 5  | 精致真刺水蚤/ <i>Euchaeta concinna</i>        | 95.24    | 0.023  | 226.3                     | 100.00   | 0.080  | 370.8                     |
| 6  | 中型莹虾/ <i>Lucifer intermedius</i>        | 66.67    | 0.024  | 144.3                     | —        | —      | —                         |
| 7  | 肥胖箭虫/ <i>Sagitta enflata</i>            | 100.00   | 0.033  | 110.1                     | —        | —      | —                         |
| 8  | 刷状莹虾/ <i>Lucifer penicillifer</i>       | —        | —      | —                         | 93.75    | 0.097  | 517.0                     |
| 9  | 太平洋纺锤水蚤/ <i>Acartia pacifica</i>        | —        | —      | —                         | 87.50    | 0.083  | 537.5                     |

注: —代表未检出

2.3 生物量及分布

夏季调查浮游动物生物量平均值为 1357.5 mg/m<sup>3</sup>, 范围为 43.0 ~ 3108.7 mg/m<sup>3</sup>, 其中 M1 站位的生物量最低, Z1 站位的生物量最高(图 3)。冬季调查浮游动物的生物量范围为 38.9 ~ 253.6 mg/m<sup>3</sup>, 平均值为 88.1 mg/m<sup>3</sup>, 其中,

S1 站位的生物量最低, M3 站位的生物量最高。从季节分布看, 夏季的生物量明显高于冬季。从图 3 中可以看出, 浮游动物生物量大体为近海生物量高于远海, 且呈现从近海向远海递减的趋势, 但附近有岛屿的站位如 M1、Z1、S1 容易出现生物量极值。

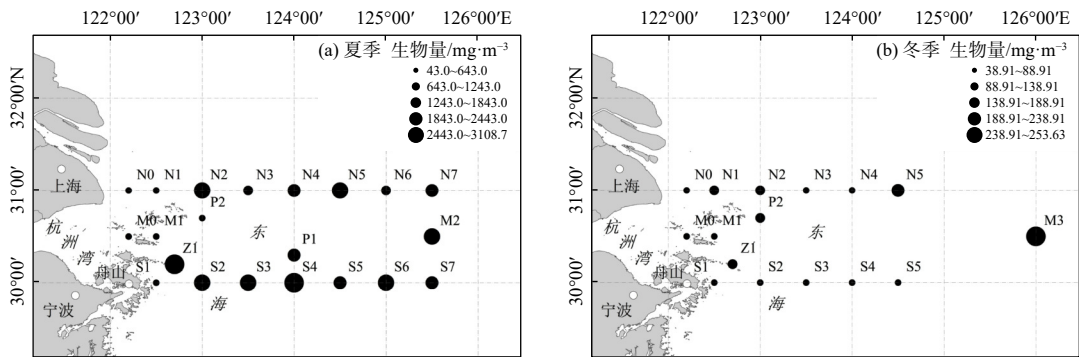


图 3 长江口邻近海域浮游动物生物量平面分布  
Fig. 3 Horizontal distribution of zooplankton biomass in the Yangtze River Estuary and adjacent waters

本研究通过夏、冬两季调查发现, 夏季调查浮游动物生物量均值为 1 357.5 mg/m<sup>3</sup>, 高于冬季的平均值 88.1 mg/m<sup>3</sup>。夏季生物量高于冬季, 推测是由于夏季温度升高、光照强度增大、浮游植

物生长速率增快, 浮游动物因适宜的生长发育条件而大量繁殖。而冬季相对生长环境逐渐恶劣, 浮游动物生物量也随之减少。本研究结果和以往长江口邻近海域调查结果<sup>[19]</sup>相似, 该海域浮

游动物的季节变化情况未发生改变。但部分与人类活动相关的站位出现了生物量极值,如M1站位出现夏季浮游动物最低生物量,该站位于小衢山与双子山之间,与之相近的M0站位生物量水平也较低,推测为矿山开采项目<sup>[22]</sup>等工业污染排放对当地生态环境造成影响。而夏季浮游动物最高生物量出现在Z1站位,该站位于东极岛,其深耕“生态贻贝养殖”,养殖废水<sup>[23]</sup>为浮游生物提供能量与物质,有助于浮游动物的生长繁殖。冬季浮游动物最低生物量出现在S1站位,该站位于普陀山、珞珈山和白沙岛的右侧,而这三个岛屿均靠近舟山本岛,亦因旅游业的发达而往来频繁,而船舶航行过程中所排放的油污水、生活污水均会对周围的环境产生污染<sup>[24]</sup>,从而导致浮游生物量下降。

## 2.4 生物多样性

生物多样性指数是海洋生态环境质量变化

的指示因子,也是生态功能评价的工具<sup>[25]</sup>。本研究利用测序数据计算夏、冬两季浮游动物的Shannon多样性指数( $H'$ )、丰富度指数( $D$ )以及均匀度指数( $J$ ),其中多样性指数( $H'$ )在夏季为0.69~2.99,平均为1.96;冬季为0.29~3.03,平均为1.85,各站位分布情况如图4所示。均匀度指数( $J$ )在夏季为0.15~0.57,平均为0.39;冬季为0.10~0.64,平均为0.40,各站位分布情况如图5所示。丰富度指数( $D$ )在夏季为0.20~0.82,平均为0.59;冬季为0.07~0.86,平均为0.61,各站位分布情况如图6所示。夏季调查平均多样性指数高于冬季,平均丰富度指数和均匀度指数低于冬季。在水平分布上夏季调查多样性指数、均匀度指数和丰富度指数均表现为南部海域高于北部,冬季调查多样性指数、均匀度指数和丰富度指数均呈现近岸高于远海。

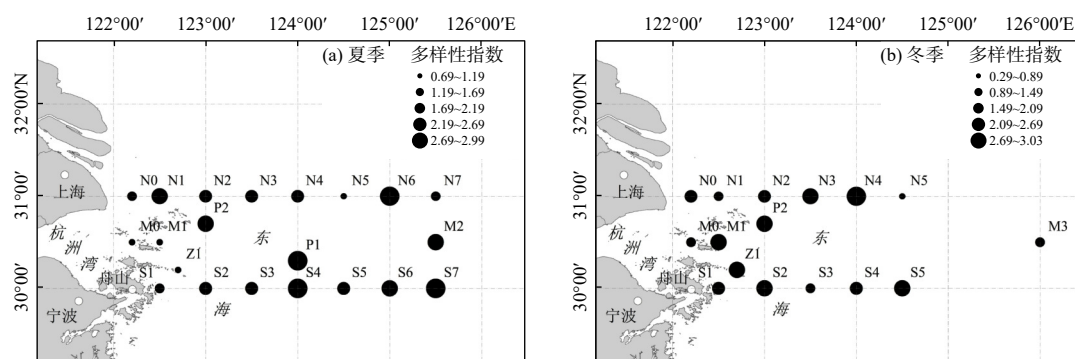


图4 长江口邻近海域浮游动物多样性指数( $H'$ )平面分布

Fig. 4 Horizontal distribution of Shannon diversity index ( $H'$ ) in the Yangtze River Estuary and adjacent waters

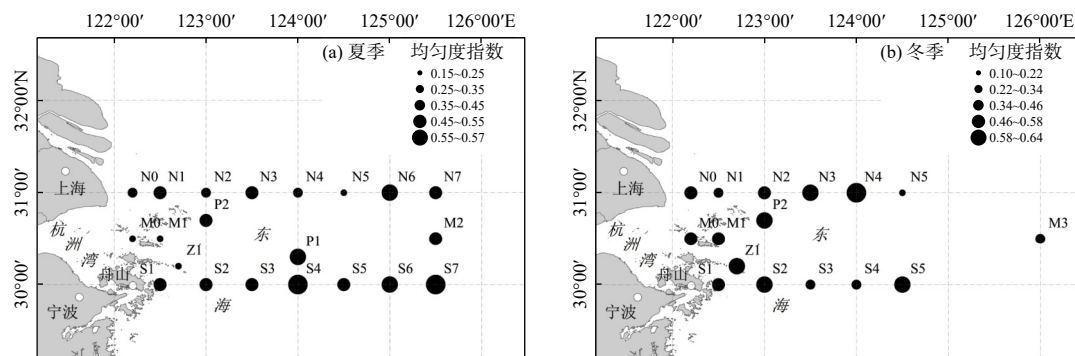


图5 长江口邻近海域浮游动物均匀度指数( $J$ )平面分布

Fig. 5 Horizontal distribution of Palou's evenness index ( $J$ ) in the Yangtze River Estuary and adjacent waters

本研究以夏、冬两季调查结果为基础,依据

陈清潮等<sup>[25]</sup>对生物多样性阈值的分级( $Dv=$

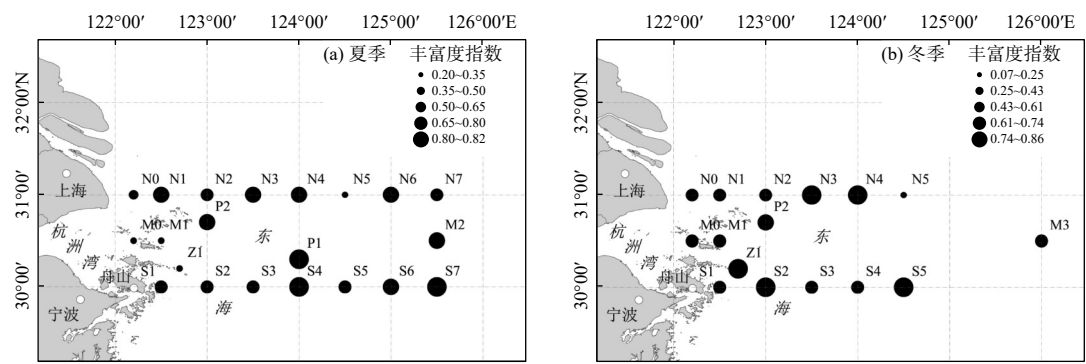


图 6 长江口邻近海域浮游动物丰富度指数( $D$ )平面分布

Fig. 6 Horizontal distribution of *Margalit's* species richness diversity ( $D$ ) in the Yangtze River Estuary and adjacent waters

$H'$ × $J$ ), 对长江口邻近海域浮游动物的多样性指数进行等级评价。长江口邻近海域夏季浮游动物平均多样性阈值为 0.83、冬季多样性阈值为 0.81, 两季多样性评价等级均为 II 级, 等级描述为多样性一般。研究表明, 夏季 21 个站

中, 多样性低的站位占 23.81%、多样性一般的站

位占 61.90%、多样性较高的站位占 14.29%; 冬季 16 个站位中, 多样性低的站位占 37.50%、多样性一般的站位占 56.25%、多样性较高的站位占 6.25%。各站位详细评价结果见表 2。

表 2 长江口邻近海域浮游动物多样性指数

Tab.2 The diversity index of zooplankton in the eastern the Yangtze River Estuary and adjacent waters

| 站位 | 夏季            |              |             |       | 冬季            |              |             |       |
|----|---------------|--------------|-------------|-------|---------------|--------------|-------------|-------|
|    | 多样性指数( $H'$ ) | 均匀度指数( $J$ ) | 阈值( $D_v$ ) | 等级描述  | 多样性指数( $H'$ ) | 均匀度指数( $J$ ) | 阈值( $D_v$ ) | 等级描述  |
| M0 | 1.10          | 0.25         | 0.3         | 多样性低  | 1.46          | 0.35         | 0.5         | 多样性低  |
| M1 | 0.73          | 0.15         | 0.1         | 多样性低  | 2.35          | 0.38         | 0.9         | 多样性一般 |
| M2 | 2.52          | 0.45         | 1.1         | 多样性一般 | —             | —            | —           | —     |
| M3 | —             | —            | —           | —     | 1.13          | 0.29         | 0.3         | 多样性低  |
| N0 | 1.23          | 0.29         | 0.4         | 多样性低  | 1.55          | 0.37         | 0.6         | 多样性一般 |
| N1 | 2.49          | 0.39         | 1.0         | 多样性一般 | 1.36          | 0.30         | 0.4         | 多样性低  |
| N2 | 1.95          | 0.35         | 0.7         | 多样性一般 | 1.73          | 0.39         | 0.7         | 多样性一般 |
| N3 | 2.10          | 0.43         | 0.9         | 多样性一般 | 2.48          | 0.53         | 1.3         | 多样性一般 |
| N4 | 1.89          | 0.33         | 0.6         | 多样性一般 | 3.03          | 0.64         | 1.9         | 多样性较高 |
| N5 | 1.19          | 0.24         | 0.3         | 多样性低  | 0.29          | 0.10         | 0           | 多样性低  |
| N6 | 2.79          | 0.46         | 1.3         | 多样性一般 | —             | —            | —           | —     |
| N7 | 1.58          | 0.38         | 0.6         | 多样性一般 | —             | —            | —           | —     |
| P1 | 2.84          | 0.55         | 1.6         | 多样性较高 | —             | —            | —           | —     |
| P2 | 2.27          | 0.42         | 1.0         | 多样性一般 | 2.20          | 0.48         | 1.1         | 多样性一般 |
| S1 | 1.53          | 0.40         | 0.6         | 多样性一般 | 1.60          | 0.38         | 0.6         | 多样性一般 |
| S2 | 1.93          | 0.38         | 0.7         | 多样性一般 | 2.47          | 0.52         | 1.3         | 多样性一般 |
| S3 | 2.02          | 0.41         | 0.8         | 多样性一般 | 1.47          | 0.33         | 0.5         | 多样性低  |
| S4 | 2.95          | 0.57         | 1.7         | 多样性较高 | 1.60          | 0.31         | 0.5         | 多样性低  |
| S5 | 2.04          | 0.42         | 0.9         | 多样性一般 | 2.37          | 0.47         | 1.1         | 多样性一般 |
| S6 | 2.32          | 0.46         | 1.1         | 多样性一般 | —             | —            | —           | —     |
| S7 | 2.99          | 0.56         | 1.7         | 多样性较高 | —             | —            | —           | —     |
| Z1 | 0.69          | 0.19         | 0.1         | 多样性低  | 2.47          | 0.51         | 1.3         | 多样性一般 |
| 平均 | 1.96          | 0.39         | 0.76        | 多样性一般 | 1.85          | 0.40         | 0.73        | 多样性一般 |

注: —代表无数据

夏季和冬季的多样性评价均为多样性一般,两个季节无显著性差异( $p>0.05$ ),这可能归因于网型的选择。夏季为浮游动物的产卵季节,而本研究使用的 I 型网无法像 II 型网那样采集到中小型的浮游动物(包括浮游动物的幼体),会低估中小型浮游动物的丰度和多样性<sup>[26]</sup>,使得其多样性水平与冬季相当。两季的均匀度指数与丰富度指数都基本接近,冬季略高于夏季。而在空间上,浮游动物均匀度分布由近海到远海逐渐升高,推测因为远海海域受人类活动影响小,群落结构更加稳定。

夏季 Z1 站位和冬季 N5 站位的多样性指数低,多样性差,但这两个站位的生物量却相对较高。经过进一步研究,我们发现 Z1 站位出现了大量的双生水母,而 N5 站位出现了大量的漂浮小井伊糠虾并且其优势度非常高。柳丽华等<sup>[27]</sup>研究发现,当优势度非常突出的物种出现时,生物群落多样性将随之下降,即某些站位多样性指数低的直接原因是出现优势度过高的物种。夏

季 M1 站位均匀度指数较低,考虑该站位毗邻宁波舟山港海轮航道,可能受船舶扰动,导致其均匀度偏低。另外,船舶排放的含油污水也会导致附近海域海水中石油类物质的增加,进而对附近的浮游动物产生影响。根据徐汉光等<sup>[28]</sup>的研究结果,石油类物质会对中华哲水蚤的趋光性产生干扰,甚至导致其生长周期缩短,因此, M1 站位均匀度指数较低可能与航道通航的船舶数量较多有关。

## 2.5 群落划分

本研究聚类分析结果(图 7)显示,夏季调查的 21 个站位,在 38% 的相似度上被划分为 2 个群落,其中群落 I 包含站位 M1、N5、Z1、N6、S6、S4、S3、M2、S2、S5,群落 II 包含站位 S1、P2、S7、P1、N3、M0、N0、N1、N4、N2、N7。冬季调查的 16 个站位,在 40% 的相似度上被划分为 3 个群落,其中群落 I 包含站位 N5,群落 II 包含站位 N3、P2、S2、S4,群落 III 包含站位 S3、N1、Z1、M0、N0、M3、N2、M1、S1、N4、S5。

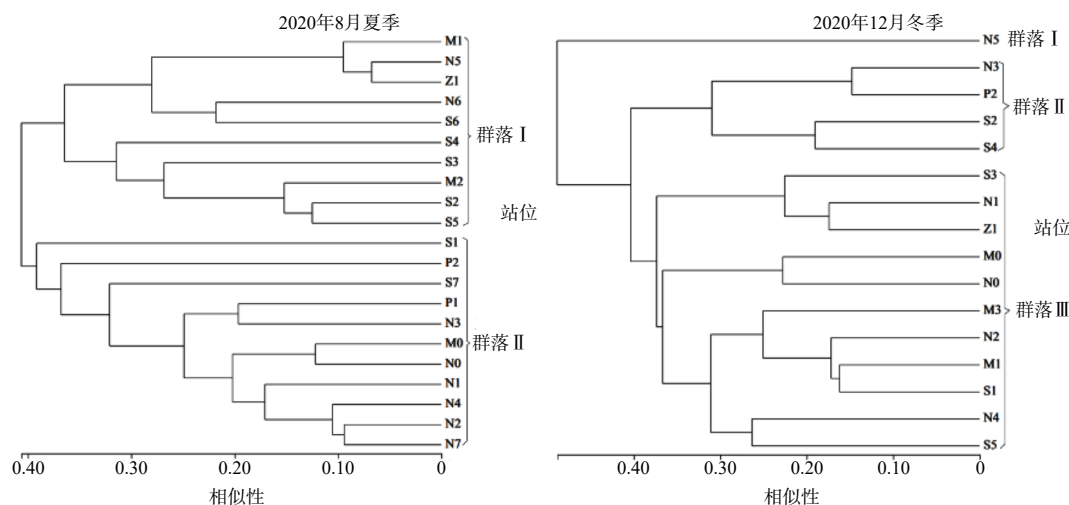


图 7 长江口邻近海域浮游动物群落相似性聚类分析

Fig. 7 Similarity cluster analysis of zooplankton community in the eastern the Yangtze River Estuary and adjacent waters

由聚类分析结果(图 7),可将长江口邻近海域的调查站位在夏季划分为 2 个聚类群落,冬季划分为 3 个聚类群落(图 8)。夏、冬两季调查所划分的群落组成站位不同,可能源于季节交替与生境变化导致的浮游动物各群落间相互交换与竞争<sup>[20]</sup>,且根据以往的研究结果<sup>[15-18]</sup>,浮游动物群落结构有较大的季节性差异,此外,优势种的

不同分布也会影响群落的结构<sup>[21]</sup>。在两季调查中位于 30.0°N 的 S2 站位、S4 站位和位于 122.2°E 的 N0 站位、M0 站位均被划为一个群落,推测为站位所处海域位置相当,即经纬度位置对浮游动物群落聚类的影响。而站位所处的海域位置不同,其环境影响因子如海水温度、盐度、叶绿素浓度亦有所不同,各影响因子综合作用导致浮游

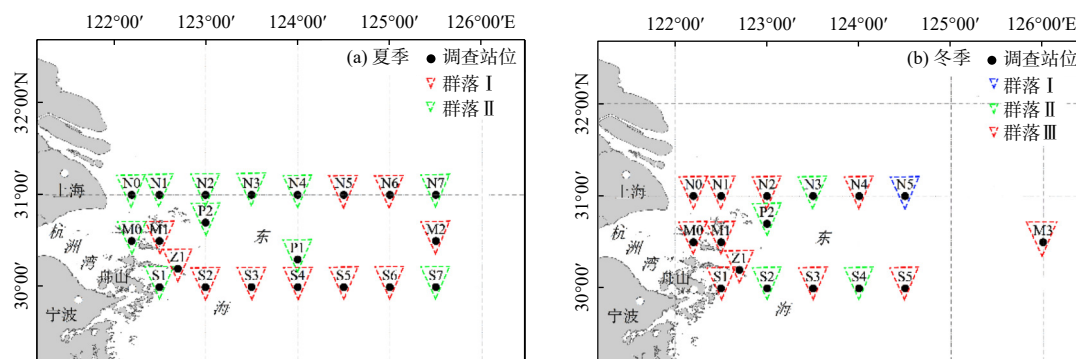


图 8 长江口邻近海域浮游动物群落相似性聚类分析平面分布

Fig. 8 Horizontal distribution of zooplankton community similarity cluster analysis in the eastern the Yangtze River Estuary and adjacent waters

动物的聚类群落结构产生差异。

## 2.6 宏条形码技术在浮游动物多样性鉴定中的优势

本研究通过形态学方法鉴定所得浮游动物的种类数与邻近海域历史数据<sup>[14-19]</sup>相近,但 DNA 宏条形码技术检出的种类数远高于历史数据。相较于传统形态学方法,本研究的 DNA 宏条形码结果能更全面地反映长江口邻近海域的浮游动物物种情况。本研究中基于 DNA 宏条形码技术鉴定出的各水平类群显著高于形态学鉴定,例如,基于本研究最大优势类群桡足类的鉴定结果发现, DNA 宏条形码技术检出的腹足目及部分浮游幼虫在形态学鉴定结果中未体现。这与 DNA 宏条形码技术在浮游动物鉴定领域的研究结果一致<sup>[29]</sup>,表明宏条形码技术方法可以更全面地展示调查海域浮游动物多样性。目前, DNA 宏条形码技术已广泛应用于国际海洋生物多样性研究<sup>[30]</sup>, 在我国海洋浮游动物多样性研究中也具有很大的应用潜力。

## 3 结论

(1)2020 年夏季和冬季通过 DNA 宏条形码技术和人工形态学方法分别检测出浮游动物物种 192 种、137 种和 84 种、56 种,在类群组成上均为桡足类检出最多。而由于 DNA 宏条形码技术的全面性和准确性,该方法所得的浮游动物物种数远高于人工形态学方法且高于该海域历史平均水平。而浮游动物的种类组成为节肢动物、刺胞动物占优势,这与以往调查结果相似。

(2)2020 年夏季和冬季优势种各 7 种,共同优势种 5 种。优势种季度差异不明显,更替率为 44.4%,而双生水母成为第一优势种的现象,与近年其他海域环境水母类在物种组成中占优势相符。

(3)2020 年浮游动物夏季调查平均多样性指数与冬季相当,平均丰富度指数和均匀度指数也基本接近。其中,夏季调查物种数高于冬季。浮游动物种类组成存在差异,且在各调查站位间的分布不均匀。

(4)2020 年调查结果显示,长江口邻近海域浮游动物生物量在夏季为 43.0 ~ 3108.7 mg/m<sup>3</sup>,平均为 1357.5 mg/m<sup>3</sup>;冬季为 38.9 ~ 253.6 mg/m<sup>3</sup>,平均为 88.1 mg/m<sup>3</sup>,夏季调查浮游动物生物量显著高于冬季,舟山海域浮游动物的季节变化情况未发生改变。

**致谢:** 感谢浙江海洋大学自主航次——海洋锋面及渔业资源长期调查计划在样品的采集、分析等方面对本研究的资助。

## 参考文献:

- [1] JAKUBAS D, WOJCZULANIS-JAKUBAS K, ILISZKO L M, et al. Habitat foraging niche of a High Arctic zooplanktivorous seabird in a changing environment[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 16203.
- [2] LI Y, WANG R, SU H J, et al. Eutrophication and predation mediate zooplankton diversity and network structure[J]. *Limnology and Oceanography*, 2022, 67(Suppl 1): S133-S145.
- [3] 生态环境部. 2020 年中国海洋生态环境状况公报(摘录)[J]. *环境保护*, 2021, 49(12): 59-75.
- [4] 曹宗元, 王坚侃, 何 晴, 等. 浙江沿海大气候特征及影响

- 系统分析[J]. *海洋预报*, 2023, 40(2): 89-97.
- [5] FIŠER C, ROBINSON C T, MALARD F. Cryptic species as a window into the paradigm shift of the species concept[J]. *Molecular Ecology*, 2018, 27(3): 613-635.
- [6] 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.
- [7] 王方晗, 王 雷, 孙婷婷, 等. 基于形态学和宏条形码技术的南海西沙群岛浮游动物多样性的比较分析[J]. *应用海洋学报*, 2022, 41(2): 317-327.
- [8] 冯芸芝, 孙 栋, 邵倩文, 等. DNA 宏条形码技术在海洋浮游动物多样性和生态学中的应用[J]. *生态学报*, 2022, 42(21): 8544-8554.
- [9] 张金勇, 高养春, SAH A S R M, 等. 基于高通量测序和形态学鉴定的马来西亚马塘红树林区浮游动物多样性分析[J]. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(6): 910-919.
- [10] 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. 海洋监测规范 第3部分: 样品采集、贮存与运输: GB 17378.3—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [11] 尹健强, 黄良民, 李开枝, 等. 南沙群岛珊瑚礁浮游动物多样性与群落结构[J]. *生物多样性*, 2011, 19(6): 685-695.
- [12] 张 亮, 宿 凯, 张绍萍, 等. 日照岚山港北作业区邻近海域春、秋季浮游动物群落结构研究[J]. *海洋学报*, 2022, 44(1): 79-88.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 孟庆超, 赵淑江. 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.
- [17] 陈小庆, 俞存根, 胡颖琰, 等. 舟山渔场及邻近海域浮游动物数量分布特征[J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1834-1844.
- [18] 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.
- [19] 刘承莹, 王 锐, 高 航, 等. 夏季长江口——东海陆架大中型浮游生物分布特征及影响因素[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(10): 1363-1373.
- [20] 杜明敏, 刘镇盛, 王春生, 等. 中国近海浮游动物群落结构及季节变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(17): 5407-5418.
- [21] 孙 松. 对黄、东海水母暴发机理的新认知[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(3): 406-410.
- [22] 刘 瑶, 李欣泽, 杨 彤, 等. 海洋石油勘探开发溢油环境污染损害风险可保性研究[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(1): 64-71.
- [23] 赵泓睿, 赵 晟. 东极岛养殖区内分泌干扰物污染状况调查[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(17): 74-77.
- [24] 吴国凡. 我国船舶污染的现状及对策[J]. *船海工程*, 2016, 45(2): 51-54, 57.
- [25] 陈清潮, 黄良民, 尹健强, 等. 南沙群岛海区浮游动物多样性研究[M]//中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛及其邻近海区海洋生物多样性研究 I. 北京: 海洋出版社, 1994: 42-50.
- [26] 田丰歌, 何 静, 王符菁, 等. 夏季珠江口两种网型网采浮游动物的群落特征比较[J]. *广东海洋大学学报*, 2023, 43(2): 51-59.
- [27] 柳丽华, 左 涛, 陈瑞盛, 等. 2004年秋季长江口海域浮游植物的群落结构和多样性[J]. *海洋水产研究*, 2007(3): 112-119.
- [28] 徐汉光, 杨 波, 王真良, 等. 原油和成品油对浮游桡足类中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)存活的影响[J]. *海洋环境科学*, 1983, 2(2): 55-59.
- [29] 高养春, 李海涛, 王孝程, 等. 利用宏 DNA 条形码研究浮游动物多样性——以鸭绿江口为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(11): 3822-3832.
- [30] COWART D A, PINHEIRO M, MOUCHEL O, et al. Metabarcoding is powerful yet still blind: a comparative analysis of morphological and molecular surveys of seagrass communities[J]. *PLoS One*, 2015, 10(2): e0117562.

(本文编辑: 曲丽梅)