

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20241113001

http://www.yykxjz.cn/

赵杰, 时永强, 单秀娟, 韩青鹏, 邹建宇, 赵永松, 李文雄. 2021 年夏秋季渤海浮游动物群落变化特征. 渔业科学进展, 2025, 46(6): 72–87
ZHAO J, SHI Y Q, SHAN X J, HAN Q P, ZOU J Y, ZHAO Y S, LI W X. Characteristics of changes in zooplankton communities in the Bohai Sea during summer and autumn, 2021. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(6): 72–87

2021 年夏秋季渤海浮游动物群落变化特征*

赵 杰^{1,2} 时永强^{1,3,4①} 单秀娟^{1,3,4} 韩青鹏¹
邹建宇^{1,5} 赵永松¹ 李文雄^{1,2}

(1. 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室 农业农村部海洋渔业与可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 山东 青岛 266071; 2. 上海海洋大学海洋生物资源与管理学院 上海 201306; 3. 青岛海洋科技中心海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 山东 青岛 266237; 4. 山东长岛近海渔业资源国家野外科学观测研究站 山东 烟台 265800; 5. 中国海洋大学水产学院 山东 青岛 266003)

摘要 浮游动物是海洋生态系统中至关重要的次级生产者。为了解渤海浮游动物群落季节变化特征,本研究根据 2021 年 6 月和 10 月在渤海 2 个航次的调查数据,分析了夏秋季渤海浮游动物群落种类组成、丰度和优势种的季节变化情况,探究了环境因子对浮游动物群落组成和分布的影响。本研究共鉴定出浮游动物 41 种(类),其中桡足类 14 种,浮游幼虫 13 类,水螅水母类 8 种,端足类 2 种,栉板动物、枝角类、毛颚动物、尾索动物各 1 种。渤海浮游动物群落种类组成和分布呈现明显的季节差异,夏季浮游动物的平均丰度明显高于秋季,Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(d)和 Pielou 均匀度指数(J')均呈现秋季高、夏季低的趋势。小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)、洪氏纺锤水蚤(*Acartia hongii*)、拟长腹剑水蚤(*Oithona similis*)、强额拟哲水蚤(*Paracalanus crassirostris*)为夏秋季共有的优势种。冗余分析显示,夏季小拟哲水蚤等丰度与浮游植物丰度呈显著正相关($P<0.05$),强额拟哲水蚤等丰度与温度呈极显著正相关($P<0.01$),秋季近缘大眼剑水蚤(*Ditrichocorycaeus affinis*)丰度与温度呈显著正相关关系($P<0.05$)。通过聚类分析将夏秋季浮游动物群落各划分为 3 个组群。BIO-ENV 分析显示,夏季影响渤海浮游动物群落结构的最佳解释变量组合为表层温度、表层盐度、底层盐度和浮游植物丰度;秋季影响渤海浮游动物群落结构的最佳解释变量组合为表层盐度和表层溶解氧。

关键词 渤海; 浮游动物; 群落结构; 优势种; 环境因子

中图分类号 S931 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2025)06-0072-16

浮游动物作为浮游植物和高营养级生物之间的枢纽,在维持海洋生态系统的稳定中发挥着关键作用。研究表明,季节变化和其他环境因素(如温度、盐度等)

可以显著影响浮游动物的群落结构(徐东会等, 2016; Wei *et al.*, 2022、2023)。因此,研究浮游动物群落的种类组成和多样性等季节变化情况,对于掌握其季节变化

* 国家自然科学基金(42106116; 42349901)、崂山实验室科技创新项目(LSKJ202203803)、山东博士后科学基金(SDCX-ZG-202303049)、山东省泰山学者专项基金(tsqn202103135)和中国水产科学研究院基本科研业务费(2025JC01; 2023TD01)共同资助。赵 杰, Email: 2993928787@qq.com

① 通信作者: 时永强, 副研究员, Email: shiyq@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2024-11-13, 收修改稿日期: 2025-01-06

特征以及了解海洋生态环境的动态变化具有重要意义。

渤海作为中国唯一的内海,是西北太平洋典型的半封闭浅海,海岸线长约 3 780 km,平均水深约为 18.0 m,水交换能力较弱,沿岸有黄河、辽河、滦河和海河等多条河流入海,促使渤海水质肥沃、饵料生物丰富,成为我国北方经济渔业生物的主要产卵场和索饵场(徐东会等, 2016; Chen Y S *et al.*, 2023)。近年来,气候变化和人类活动对渤海的海洋生态环境造成巨大影响,尤其是内陆污染物,如重金属、石油烃等,严重威胁渤海生态环境的健康发展(Zhou *et al.*, 2021)。因此,研究渤海浮游动物群落的特征及与环境因子之间的关系,对于评估渤海生态系统现状和推动海洋生态系统可持续发展至关重要(Chen X Y *et al.*, 2023)。

目前,已有众多针对渤海浮游动物群落的调查研究,分析报道了浮游动物群落的种类组成、分布特征及其与环境因子之间的关系(马静等, 2012; 王文杰等, 2013; 王秀霞等, 2022)。前期研究主要关注渤海的局部海域,如黄河口、莱州湾、渤海中部等(徐东会等, 2016; 董志军等, 2017; 李浩然等, 2017; 刘晓慧等, 2017),对渤海整体的浮游动物群落季节变化特征研究相对较少(王静等, 2022; Wei *et al.*, 2022)。本文通过

对整个渤海海域夏秋两个季节浮游动物群落种类组成、分布和优势种的季节变化情况进行较为详尽的大面调查和分析,研究其与环境因子之间的关系,以期渤海浮游动物群落长期变化的研究及近海生态系统适应性管理提供基础资料和科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查海域及采样方法

在渤海海域 34 个调查站位(118.2°~121.5°E, 37.5°~40.5°N),搭乘“中渔科 102”号调查船,于 2021 年 6 月 1—13 日(夏季)和 10 月 23—30 日(秋季)开展 2 个航次的大面综合调查(图 1)。依照《海洋调查规范》(GB/T 12763.6-2007),使用浅水Ⅱ型浮游生物网(网口面积 0.08 m²,筛绢孔径 160 μm)和浅水Ⅲ型浮游生物网(网口面积 0.1 m²,筛绢孔径 77 μm)自近底层至表层垂直拖网分别采集浮游动物和浮游植物,样品采集后用 5%福尔马林海水溶液固定保存,在实验室进行镜检、鉴定和计数。使用 Sea-Bird CTD 装置(SBE-25plus)对各站位的温度、盐度和溶解氧等环境参数进行现场测定。

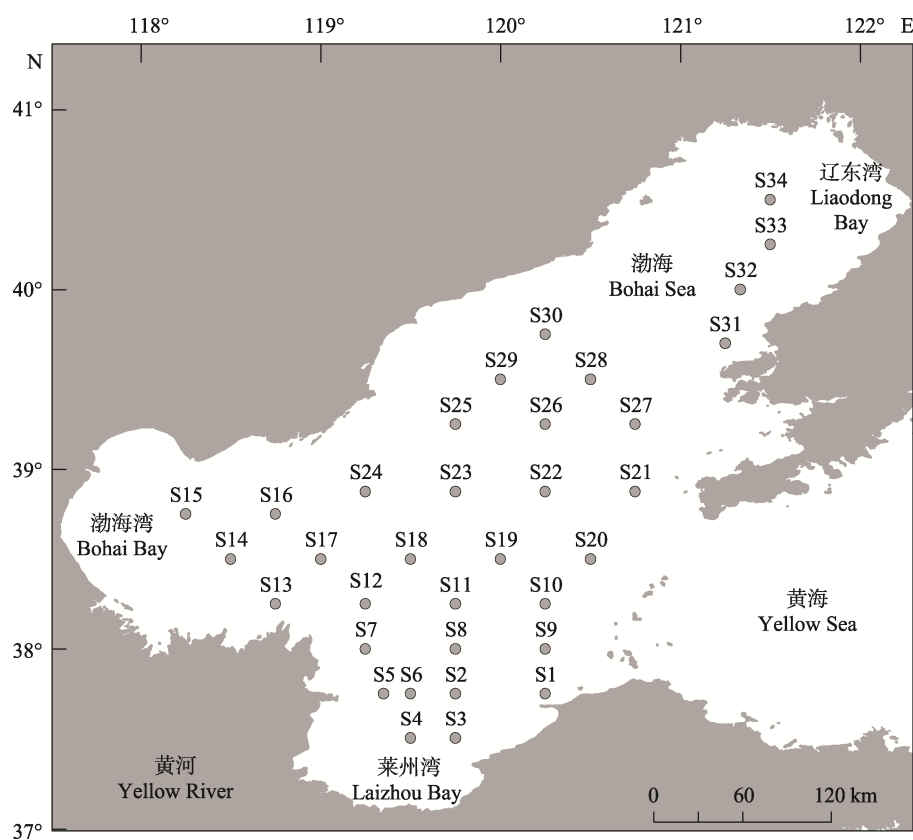


图 1 2021 年夏季和秋季渤海海域的调查站位

Fig.1 Survey stations in the Bohai Sea during summer and autumn, 2021

1.2 数据分析

采用种类更替率(A)、优势度(Y)、优势种的更替率(R)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(d)和 Pielou 均匀度指数(J')分析渤海海域浮游动物群落季节变化特征(Shannon *et al.*, 1949; Pielou, 1969; 马静等, 2012; 董志军等, 2017; 刘晓慧等, 2017; Wang *et al.*, 2023; Wei *et al.*, 2023)。计算公式如下:

$$A = \frac{C}{C+S_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$Y = \left(\frac{N_i}{N} \right) \times f_i \quad (2)$$

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

$$H' = -\sum_{i=1}^{S_2} P_i \log_2 P_i \quad (4)$$

$$d = \frac{(S_2-1)}{\ln N} \quad (5)$$

$$J' = \frac{H'}{\log_2 S_2} \quad (6)$$

式中, C 为两个季节间种类增加或减少的数目, S_1 为两季节共有的种类数目, N 为各站位样品中所有种类的总丰度, N_i 为第 i 种的总丰度, f_i 为第 i 种在各站位中的出现频率, 当 $Y \geq 0.02$ 时, 将该物种作为优势种(徐兆礼等, 1989), a 和 b 分别为两个季节的优势种数, c 为两个季节共同的优势种数, P_i 为第 i 种丰度占总丰度的百分比, S_2 为各站位样品中的物种数。

使用 CANOCO 5 对浮游动物优势种与浮游植物丰度和环境因子进行冗余分析(redundancy analysis, RDA)。将各种浮游动物丰度按照由大到小的顺序排列, 选取累计占总丰度 95% 的浮游动物作为多元统计分析对象。借助 PRIMER 软件计算站位间浮游动物群落结构的 Bray-Curtis 相似性系数, 进行聚类(cluster)和多维定标(multi-dimensional scaling, MDS)分析, 当 MDS 分析压力系数 $\text{Stress} < 0.2$ 时, 则认为所得到的 MDS 图形具有一定可信度(Clarke *et al.*, 2001); 通过 SIMPER 程序分析每个组群各种类的贡献率。采用 BIO-ENV 程序分析浮游动物丰度与环境因子和浮游植物丰度之间的关系, 找出可解释群落结构的最佳组合。使用 SPSS 22.0 软件对环境参数进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 确定其是否存在显著差异; 对优势种和环境因子进行 Pearson 相关性分析, 分析优势种与环境因子之间的相关性是否显著。各类空间分布图通过 ArcGIS 10.8.1 绘制。

2 结果

2.1 调查海域水文情况

渤海夏季平均表层海水温度(surface seawater temperature, SST)和底层海水温度(bottom seawater temperature, BST)分别为 $(16.6 \pm 1.6)^\circ\text{C}$ 和 $(15.2 \pm 1.9)^\circ\text{C}$, 均显著低于秋季 $[(17.1 \pm 0.7)^\circ\text{C}$ 和 $(16.7 \pm 1.0)^\circ\text{C}]$ ($P < 0.05$)。夏季 SST 和 BST 的高值区主要分布在莱州湾和渤海湾的湾口区域, 而秋季 SST 和 BST 的高值区主要位于渤海中部(图 2)。夏季平均表层海水盐度(surface seawater salinity, SSS)和底层海水盐度(bottom seawater salinity, BSS)分别为 30.7 ± 1.5 和 31.0 ± 1.2 , 均显著高于秋季 $(29.7 \pm 1.7$ 和 $30.2 \pm 1.0)$ ($P < 0.05$), 夏秋两季盐度的空间分布情况相似, 低盐区主要分布在辽东湾及黄河口的邻近海域(图 3)。夏季表层海水溶解氧(surface seawater dissolved oxygen, SDO)和底层海水溶解氧(bottom seawater dissolved oxygen, BDO)低值区主要集中在莱州湾湾口, 秋季 SDO 和 BDO 的分布较为均匀(图 4)。

2.2 浮游植物种类组成和丰度

研究海域夏季共采集浮游植物 43 种, 平均丰度为 $(34\ 722.6 \pm 31\ 775.1)$ ind./m³。秋季共采集 67 种, 平均丰度为 $(464\ 376.6 \pm 422\ 191.0)$ ind./m³。夏季浮游植物丰度的高值区主要分布在莱州湾、辽东湾及邻近海域, 而渤海中部的丰度较低。秋季浮游植物的高值区主要分布在渤海中南部及渤海湾湾口(图 5)。

2.3 浮游动物种类组成和丰度

本研究共采集到浮游动物 41 种(类), 其中, 桡足类 14 种, 浮游幼虫 13 类, 水螅水母类 8 种, 端足类 2 种, 栉板动物、枝角类、毛颚动物、尾索动物各 1 种(图 6)。夏秋两季浮游动物群落的种类更替率为 39.0%。夏季共采集浮游动物 30 种(类), 其中, 桡足类 12 种, 占夏季浮游动物种类总数的 40.0%; 浮游幼虫 11 类, 水螅水母类 3 种, 端足类 2 种, 毛颚动物、尾索动物各 1 种(图 6)。秋季共采集浮游动物 36 种(类), 其中, 桡足类 14 种, 占秋季浮游动物种类总数的 38.9%; 浮游幼虫 12 类, 水螅水母类 6 种, 栉板动物、枝角类、毛颚动物、尾索动物各 1 种(图 6)。夏秋季浮游动物群落的共有种(类)为 25 种(类), 包括桡足类 12 种, 浮游幼虫 10 类, 水螅水母类、毛颚动物、尾索动物各 1 种。

夏季渤海浮游动物平均丰度为 5 460.0 ind./m³, 最高值出现在 S5 站, 为 17 593.8 ind./m³, 最低值出现在

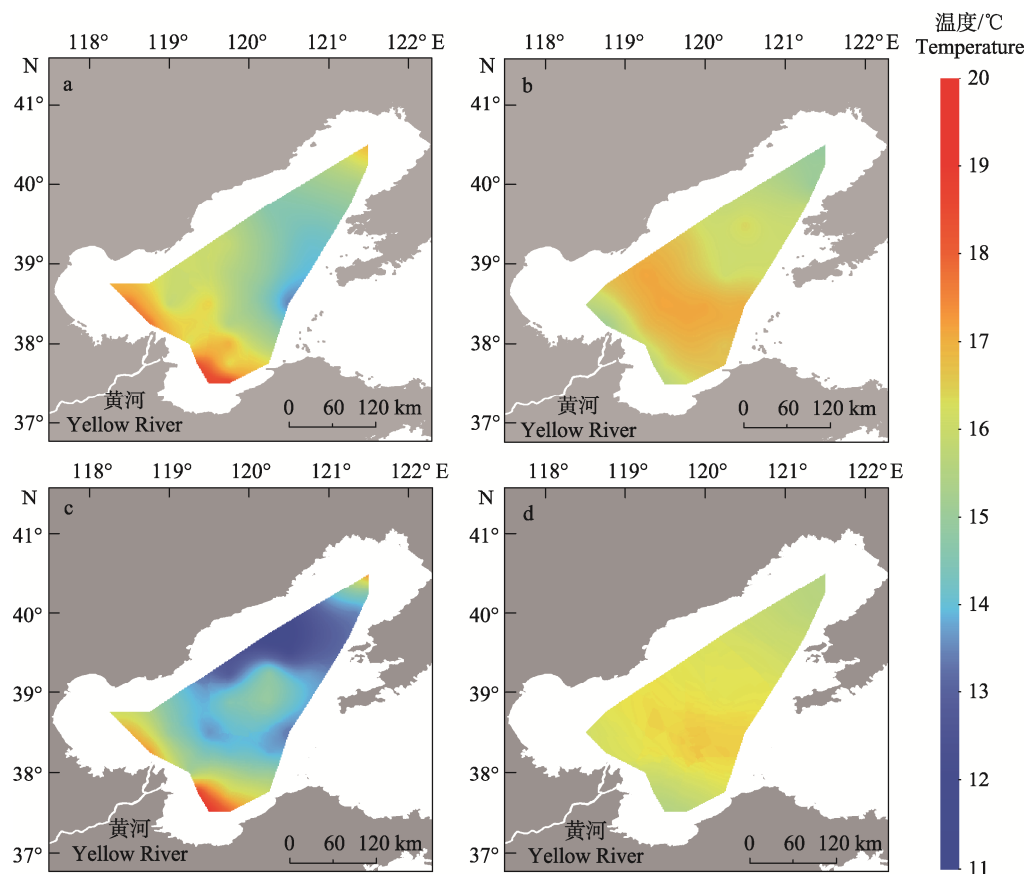


图 2 2021 年夏秋季渤海海水温度的水平分布

Fig.2 Horizontal distributions of seawater temperature in the Bohai Sea during summer and autumn, 2021

a: 夏季表层海水温度; b: 秋季表层海水温度; c: 夏季底层海水温度; d: 秋季底层海水温度。
a: Surface seawater temperature in summer; b: Surface seawater temperature in autumn;
c: Bottom seawater temperature in summer; d: Bottom seawater temperature in autumn.

S1 站, 为 196.1 ind./m^3 ; 秋季浮游动物平均丰度为 $4\,116.9 \text{ ind./m}^3$, 最高值出现在 S8 站, 为 $12\,122.3 \text{ ind./m}^3$, 最低值出现在 S20 站, 为 $1\,040.0 \text{ ind./m}^3$ 。夏季浮游动物丰度的高值区主要分布在莱州湾和渤海湾, 低值区则主要分布在渤海中部海域, 秋季浮游动物丰度的高值区主要集中在渤海中南部海域(图 7)。

2.4 浮游动物多样性特征

夏季渤海浮游动物群落的多样性指数平均值为 2.74, 最大值 3.29 位于 S7 站, 最小值 2.07 位于 S9 站; 秋季, 多样性指数升高, 平均值为 2.94, 变化范围是 2.49~3.47 (图 8)。夏秋两季浮游动物丰富度指数差异很小, 夏季平均值为 1.40, 变化范围是 0.92~2.16, 秋季平均值为 1.41, 变化范围是 1.05~1.75 (图 8)。夏季, 渤海浮游动物均匀度指数平均值为 0.74, 最大值为 0.87, 位于渤海湾外的 S24 站, 最小值(0.61)则位于渤海中南部 S10 站; 秋季, 均匀度指数平均值为 0.80, 最大值 0.89 位于 S16 站, 最小值 0.68 位于 S28

站(图 8)。

2.5 优势种组成和季节变化情况

夏季渤海浮游动物优势种包括洪氏纺锤水蚤(*Acartia hongii*)、拟长腹剑水蚤(*Oithona similis*)、小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)、腹针胸刺水蚤(*Centropages abdominalis*)、中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)、沃氏纺锤水蚤(*Acartia omorii*)、强额拟哲水蚤(*Paracalanus crassirostris*); 秋季优势种包括洪氏纺锤水蚤、小拟哲水蚤、强额拟哲水蚤、拟长腹剑水蚤、双壳类幼虫、近缘大眼剑水蚤(*Ditrichocorycaeus affinis*)、异体住囊虫(*Oikopleura dioica*) (表 1)。本次调查发现, 渤海夏秋季的优势种主要为暖水种和暖温带种, 如强额拟哲水蚤和沃氏纺锤水蚤等为暖水种, 洪氏纺锤水蚤和中华哲水蚤等为暖温带种。夏秋两季优势种更替率为 33.3%, 其中, 洪氏纺锤水蚤、小拟哲水蚤、拟长腹剑水蚤、强额拟哲水蚤为夏秋季共有优势种。夏季优势种中华哲水蚤、腹针胸刺水蚤、沃

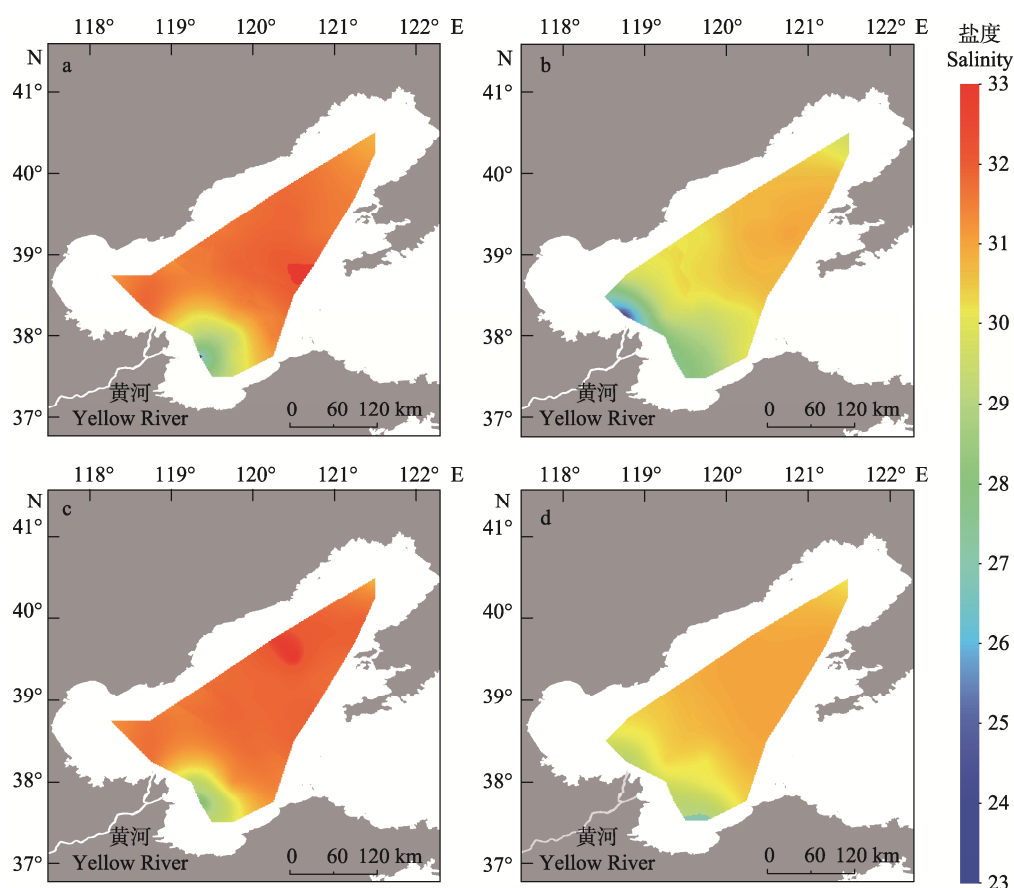


图 3 2021 年夏秋季渤海海水盐度的水平分布

Fig.3 Horizontal distributions of seawater salinity in the Bohai Sea during summer and autumn, 2021

- a: 夏季表层海水盐度; b: 秋季表层海水盐度; c: 夏季底层海水盐度; d: 秋季底层海水盐度。
a: Surface seawater salinity in summer; b: Surface seawater salinity in autumn;
c: Bottom seawater salinity in summer; d: Bottom seawater salinity in autumn.

氏纺锤水蚤在秋季优势地位丧失, 秋季出现异体住囊虫、近缘大眼剑水蚤、双壳类幼虫等新优势种(表 1)。两季节共同优势种洪氏纺锤水蚤和小拟哲水蚤分布情况相似, 夏季主要分布在莱州湾和渤海湾, 秋季集中分布在渤海中南部海域, 拟长腹剑水蚤夏季分布较均匀, 秋季主要分布在渤海中南部海域(图 9)。由于强额拟哲水蚤的优势度相对较低, 故不对其分布进行分析(表 1)。

冗余分析结果显示, 夏季第一主轴的解释比例为 60.79%, 第二主轴的解释比例为 23.42%, 前两个主轴的解释拟合率累计达 84.21%, 秋季前两个主轴的解释拟合率累计达 89.27%。结合 Pearson 相关性分析结果, 夏季小拟哲水蚤和沃氏纺锤水蚤等丰度与浮游植物丰度呈显著正相关($P < 0.05$)。小拟哲水蚤和强额拟哲水蚤的丰度与温度呈极显著正相关($P < 0.01$), 与盐度和溶解氧呈显著负相关($P < 0.05$)。沃氏纺锤水蚤和洪氏纺锤水蚤的丰度与温度呈显著正相关($P < 0.05$)。

秋季, 近缘大眼剑水蚤的丰度与温度呈显著正相关($P < 0.05$), 异体住囊虫的丰度与盐度呈极显著负相关($P < 0.01$) (图 10)。

2.6 浮游动物群落聚类分析

依据聚类分析的结果, 将渤海夏秋季浮游动物群落各划分为 3 个组群, 二维 MDS 分析压力系数 Stress 分别为 0.11 和 0.14 (图 11), 具有一定的可信度, 其中, 组群 B 和组群 F 分布情况相似, 主要分布在莱州湾和渤海湾。SIMPER 分析表明, 4 种贡献率大于 5% 的浮游动物种类对组群 A 和组群 C 的相似性累计贡献率分别达 87.7% 和 82.9%, 包括洪氏纺锤水蚤、拟长腹剑水蚤、小拟哲水蚤和腹针胸刺水蚤。对组群 B 累计贡献率达 85.3% 的物种共 4 种, 包括洪氏纺锤水蚤、小拟哲水蚤、强额拟哲水蚤和拟长腹剑水蚤。对组群 D 累计贡献率达 87.6% 的物种共 5 种, 包括洪氏纺锤水蚤、小拟哲水蚤、拟长腹剑水蚤、双壳类幼

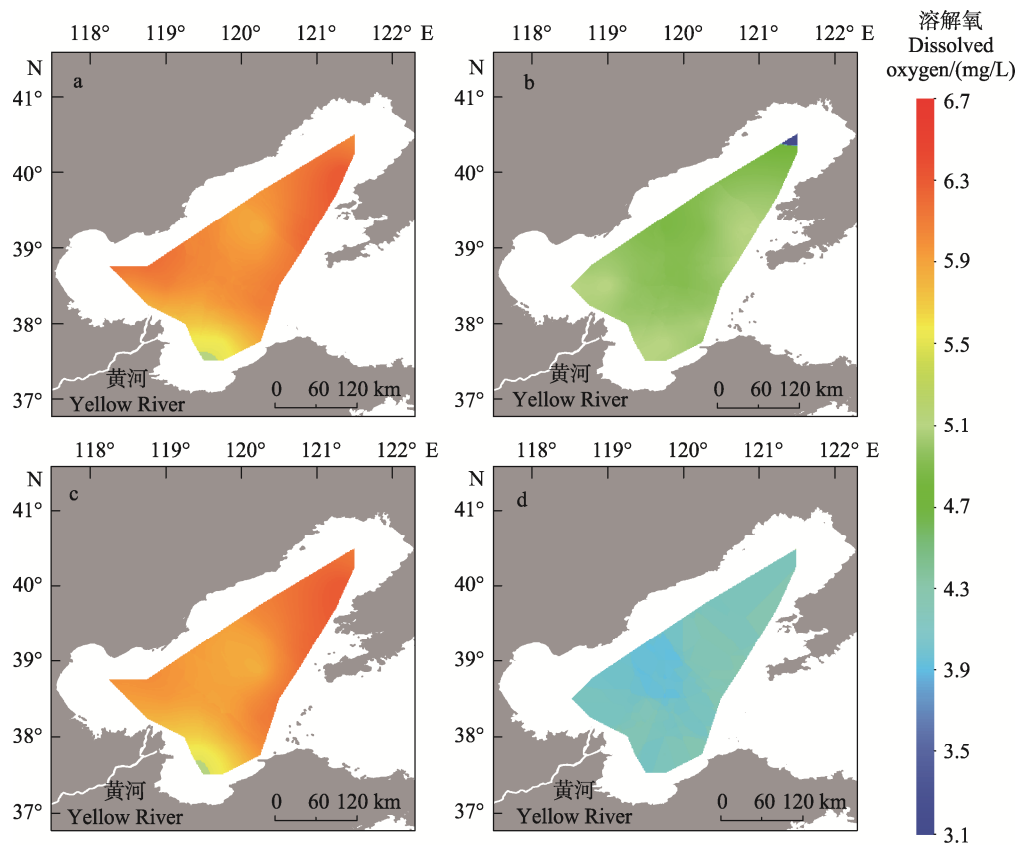


图 4 2021 年夏秋季渤海海水溶解氧浓度的水平分布

Fig.4 Horizontal distributions of dissolved oxygen concentration in the Bohai Sea during summer and autumn, 2021

a: 夏季表层海水溶解氧; b: 秋季表层海水溶解氧; c: 夏季底层海水溶解氧; d: 秋季底层海水溶解氧。
a: Surface seawater dissolved oxygen in summer; b: Surface seawater dissolved oxygen in autumn;
c: Bottom seawater dissolved oxygen in summer; d: Bottom seawater dissolved oxygen in autumn.

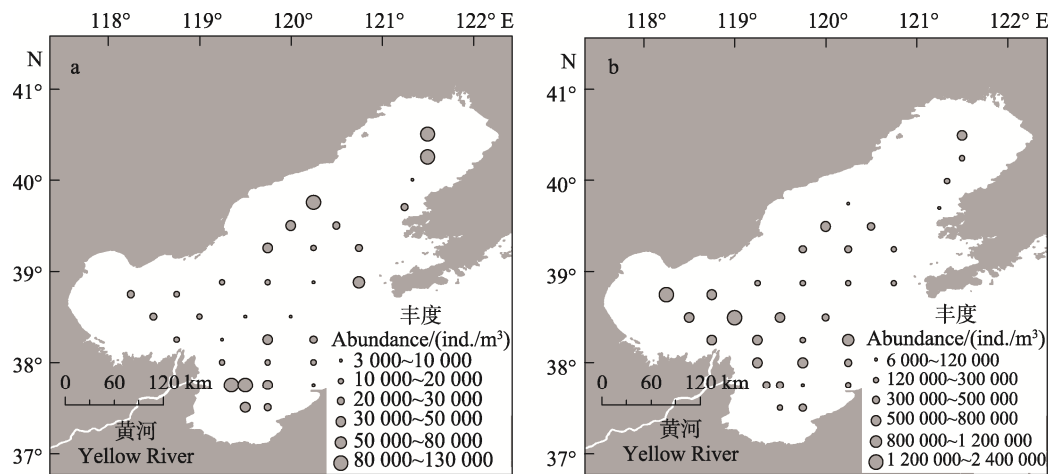


图 5 2021 年夏季(a)和秋季(b)渤海海域浮游植物丰度的水平分布

Fig.5 Horizontal distributions of phytoplankton abundance in the Bohai Sea during summer(a) and autumn(b), 2021

虫和强额拟哲水蚤。对组群 E 累计贡献率达 83.2% 的物种共 5 种, 分别为洪氏纺锤水蚤、小拟哲水蚤、双壳类幼虫、强额拟哲水蚤和近缘大眼剑水蚤。对组群 F 累计贡献率达 81.4% 的物种共 4 种, 包括小拟哲水蚤、洪氏纺锤水蚤、强额拟哲水蚤和拟长腹剑水蚤。各组群环境参数见表 2。

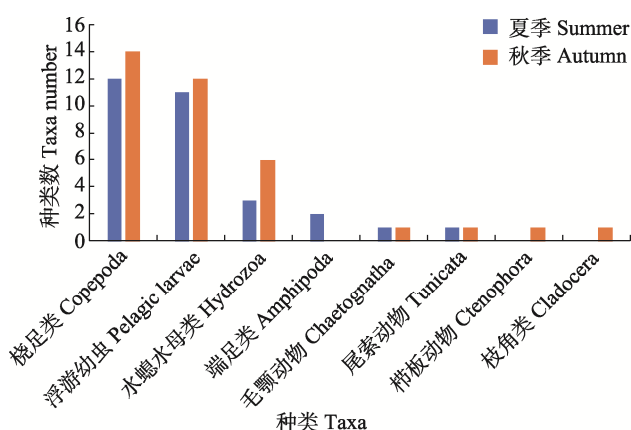


图 6 2021 年夏秋季渤海海域浮游动物的种类组成

Fig.6 Taxa number in the Bohai Sea during summer and autumn, 2021

2.7 浮游动物群落结构分布与环境因子的关系

BIO-ENV 分析结果显示, 表层温度、表层盐度、底层盐度和浮游植物丰度是影响夏季浮游动物群落结构的最佳解释变量组合($\rho=0.303$), 其次是表层温度、底层盐度和浮游植物丰度($\rho=0.298$)。对秋季浮游动物群落结构的最佳解释变量组合是表层盐度和表层溶解氧($\rho=0.190$), 其次是表层盐度、底层盐度和表层溶解氧组合($\rho=0.187$) (表 3)。

3 讨论

3.1 浮游动物种类组成、分布季节变化

本次调查共采集浮游动物 41 种(类), 其中桡足类和浮游幼虫的种类数占比最高。与历史资料相比,

本次调查采集的浮游动物种类数较少(表 4), 主要有两方面原因, 一是本研究中夏季取样时间为 6 月初, 与盛夏时期相比, 初夏海水温度较低、盐度较高, 以高温低盐为主要特征的近岸暖水种尚未出现, 如锡兰和平水母(*Eirene ceylonensis*)和卡玛拉水母(*Malagazzia carolinae*)等, 使得浮游动物种类数仍处于较低水平。其次是调查网具不同, 前期研究大多使用大型浮游生物网(网口面积 0.5 m^2) (王珊珊等, 2021; 王静等, 2022; 刘颖超等, 2023)、浅水 I 型浮游生物网(网口面积 0.2 m^2) (杜明敏等, 2013)或中型浮游生物网(网口面积 0.2 m^2) (卜亚谦等, 2019), 相比于浅水 II 型浮游生物网(网口面积 0.08 m^2), 其网口面积更大, 相同条件下捕获到的浮游动物种类可能会更多。此外, 近年来人类活动所导致的海水富营养化, 可能会影响浮游动物的生长、繁殖, 进而改变其种类组成情况(Rose *et al*, 2019; Wei *et al*, 2023)。

本次调查发现, 桡足类仍为渤海主要的优势类群。作为海洋鱼类产卵场中仔鱼的重要开口饵料, 桡足类种类组成和数量变化可以直接影响仔鱼存活率及其生长和发育状况, 从而影响渔业资源量(Lomartire *et al*, 2021)。使用浅水 I 型浮游生物网和大型浮游生物网(筛绢孔径 0.505 mm)采样, 往往会低估小型桡足类丰度。如徐东会等(2016)研究发现, 2013 年夏季渤海桡足类丰度为 78.92 ind./m^3 , 占比 39.54% , 秋季丰度为 19.56 ind./m^3 , 占比 46.46% ; 王珊珊等(2021)研究发现, 2014 年秋季渤海桡足类丰度为 21.2 ind./m^3 , 占比 2.97% 。相比于前者的研究, 本研究使用的浅水 II 型浮游生物网(筛绢孔径 0.160 mm), 对小型桡足类

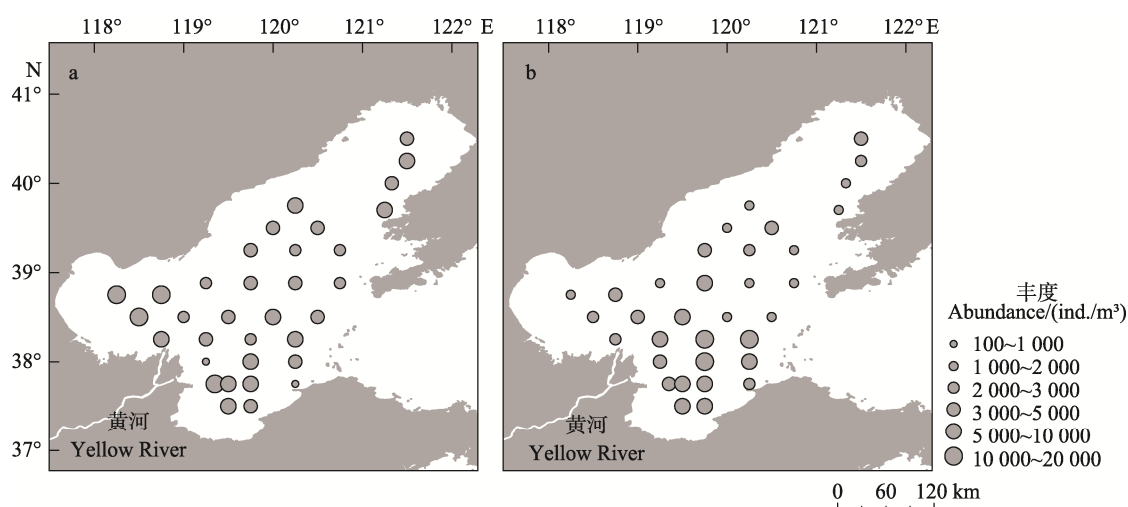


图 7 2021 年夏季(a)和秋季(b)渤海海域浮游动物丰度的水平分布

Fig.7 Horizontal distributions of zooplankton abundance in the Bohai Sea during summer (a) and autumn (b), 2021

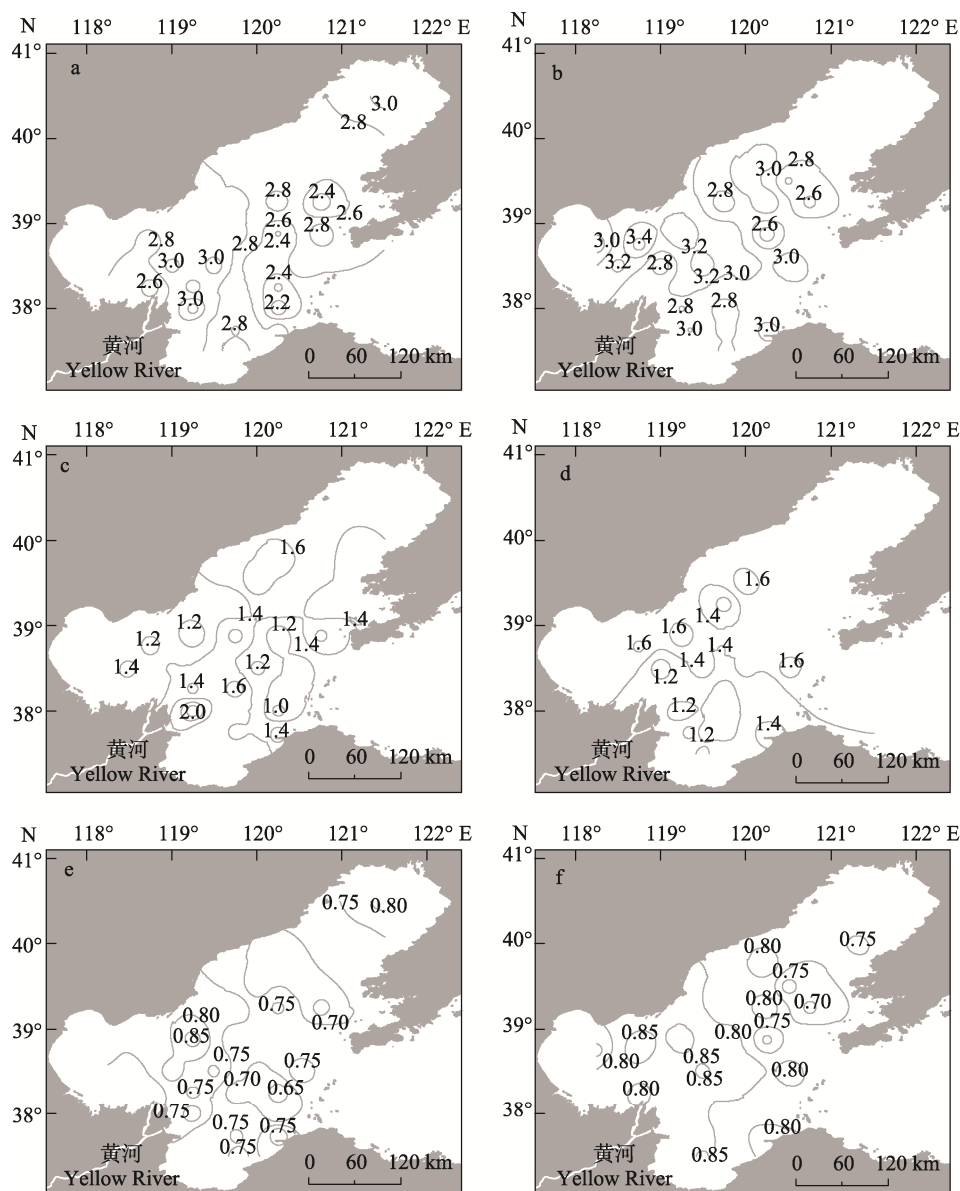


图 8 2021 年夏秋两季渤海海域浮游动物多样性指数、丰富度指数和均匀度指数的水平分布
Fig.8 Horizontal distributions of zooplankton Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index, and Pielou evenness index in the Bohai Sea during summer and autumn, 2021

a: 夏季多样性指数; b: 秋季多样性指数; c: 夏季丰富度指数; d: 秋季丰富度指数;
e: 夏季均匀度指数; f: 秋季均匀度指数。

a: Shannon-Wiener diversity index in summer; b: Shannon-Wiener diversity index in autumn; c: Margalef richness index in summer; d: Margalef richness index in autumn; e: Pielou evenness index in summer; f: Pielou evenness index in autumn.

采集效率更高,使得夏秋季桡足类平均丰度明显升高(分别为 $5\,088.2\text{ ind./m}^3$ 和 $3\,166.7\text{ ind./m}^3$),更能反映桡足类丰度的真实情况。

高温低盐环境适宜大多数浮游动物的生存和繁殖(Tackx *et al*, 2004; Villate *et al*, 2017)。夏季渤海高温低盐海域及浮游植物高丰度区域主要集中在黄河口邻近海域(图 2、3、5),促使该海域形成浮游动物高丰度区(图 7)。黄河口作为重要的鱼类产卵场,丰富

的浮游动物可为鱼类提供重要的饵料支撑。经历夏季高温后,暖水种的种类和丰度显著增加,如肥胖三角溞(*Pseudeutana tergestina*)和锡兰和水平水母等,这些暖水种的出现使秋季浮游动物的种类数(36 种)大于夏季(30 种)(图 6),直接导致秋季多样性指数迅速升高;强额拟哲水蚤等秋季平均丰度(518.6 ind./m^3)显著高于夏季(307.6 ind./m^3),并主要分布在温度较高的莱州湾及渤海中南部,影响秋季浮游动物总丰度分布趋势(图 7)。

表 1 2021 年夏秋季渤海海域浮游动物优势种的优势度(Y)和平均丰度

Tab.1 Dominance index (Y) and average abundance of zooplankton dominant species in the Bohai Sea during summer and autumn, 2021

优势种类 Dominant species	优势度 Dominance index		平均丰度 Average abundance/(ind./m ³)	
	夏季 Summer	秋季 Autumn	夏季 Summer	秋季 Autumn
洪氏纺锤水蚤 <i>Acartia hongi</i>	0.271	0.221	1 481.4±1 093.2	907.9±705.1
拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i>	0.198	0.084	1 116.2±733.2	421.1±360.7
小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i>	0.151	0.209	851.6±860.7	887.4±769.4
腹针胸刺水蚤 <i>Centropages abdominalis</i>	0.078	<0.02	468.1±453.5	39.0±83.8
中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	0.059	<0.02	331.5±375.6	33.9±32.7
沃氏纺锤水蚤 <i>Acartia omorii</i>	0.051	<0.02	349.6±325.7	11.1±56.6
强额拟哲水蚤 <i>Paracalanus crassirostris</i>	0.028	0.111	307.6±572.5	518.6±456.3
双壳类幼虫 <i>Bivalvia larvae</i>	<0.02	0.046	148.6±207.1	481.1±607.6
近缘大眼剑水蚤 <i>Diutrichocorycaeus affinis</i>	<0.02	0.045	122.0±123.3	215.5±190.6
异体住囊虫 <i>Oikopleura dioica</i>	<0.02	0.024	4.8±25.0	124.4±145.9

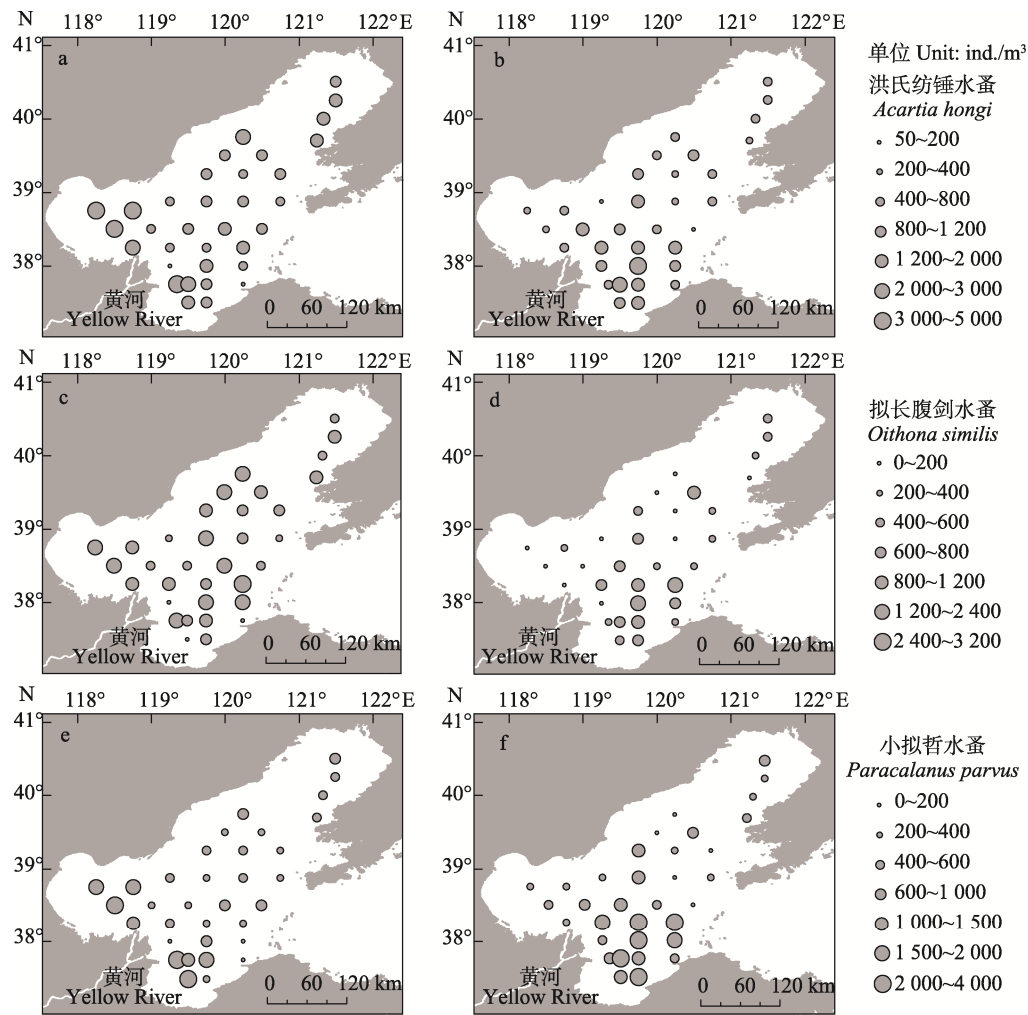


图 9 2021 年夏季(a、c 和 e)和秋季(b、d 和 f)渤海海域浮游动物主要优势种的水平分布

Fig.9 Horizontal distributions of the main zooplankton dominant species in the Bohai Sea during summer (a, c, and e) and autumn (b, d, and f), 2021

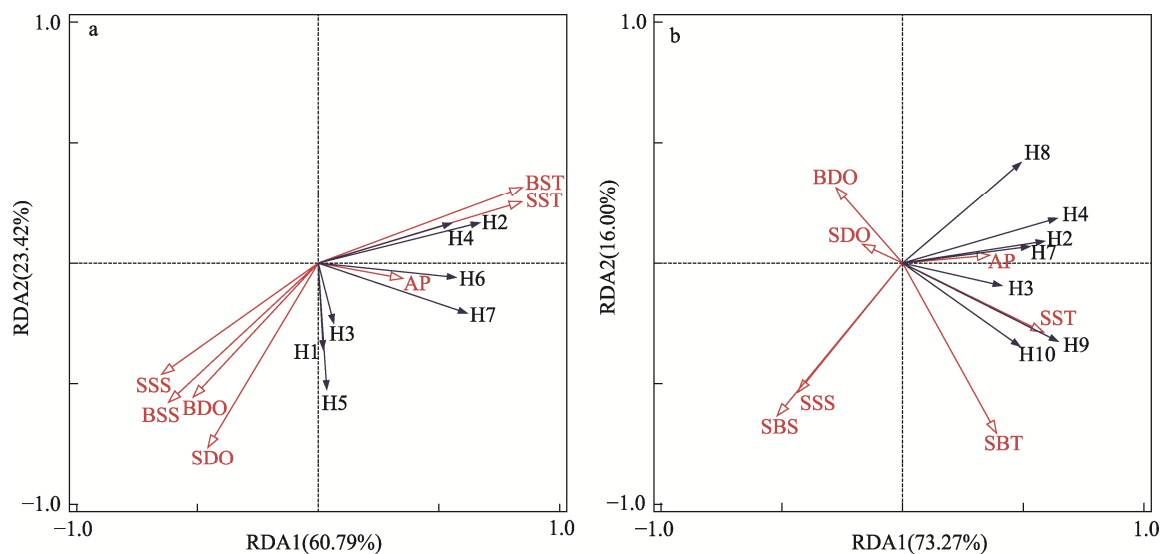


图 10 2021 年夏季(a)和秋季(b)浮游动物优势种丰度与环境因子和浮游植物丰度之间的冗余分析(RDA)

Fig.10 Redundancy analysis (RDA) plots among dominant zooplankton species abundance and environmental factors and abundance of phytoplankton during summer (a) and autumn (b), 2021

H1: 中华哲水蚤; H2: 小拟哲水蚤; H3: 拟长腹剑水蚤; H4: 强额拟哲水蚤; H5: 腹针胸刺水蚤; H6: 沃氏纺锤水蚤; H7: 洪氏纺锤水蚤; H8: 异体住囊虫; H9: 近缘大眼剑水蚤; H10: 双壳类幼虫; SST: 表层海水温度; BST: 底层海水温度; SSS: 表层海水盐度; BSS: 底层海水盐度; SDO: 表层海水溶解氧; BDO: 表层海水溶解氧; AP: 浮游植物的丰度。H1: *Calanus sinicus*; H2: *Paracalanus parvus*; H3: *Oithona similis*; H4: *Paracalanus crassirostris*; H5: *Centropages abdominalis*; H6: *Acartia omorii*; H7: *Acartia hongii*; H8: *Oikopleura dioica*; H9: *Ditrichocorycaeus affinis*; H10: *Bivalvia larvae*; SST: Surface seawater temperature; BST: Bottom seawater temperature; SSS: Surface seawater salinity; BSS: Bottom seawater salinity; SDO: Surface seawater dissolved oxygen; BDO: Bottom seawater dissolved oxygen; AP: Abundance of phytoplankton.

3.2 浮游动物优势种组成、分布季节变化

中华哲水蚤作为渤海夏秋季常见优势种(王珊珊等, 2021; 刘颖超等, 2023), 本研究仅在夏季成为优势种($Y=0.059$) (表 1), 冗余分析发现, 中华哲水蚤的丰度与温度呈负相关(图 10), 作为典型的暖温带种, 较高的温度不利于其生存和繁殖(曹文清等, 2006; 段妍等, 2016), 渤海夏季温度不断升高, 导致丰度迅速下降, 使其秋季优势地位丧失。本研究中, 腹针胸刺水蚤在夏季为优势种($Y=0.078$), 在秋季其优势地位消失(表 1)。宋昌民等(2016)研究发现, 腹针胸刺水蚤的丰度与盐度呈正相关, 但未指出温度的影响情况。本研究通过冗余分析发现, 夏季腹针胸刺水蚤的丰度与温度呈负相关, 与盐度呈正相关(图 10)。因此, 其可能更适宜在低温高盐的条件下生存, 所以腹针胸刺水蚤的丰度在夏季迅速升高成为优势种。左涛等(2016)指出, 腹针胸刺水蚤是偏冷水性的近岸种, 较高的温度不适宜其生存和繁殖, 与本研究的結果一致。

空间上, 小拟哲水蚤和洪氏纺锤水蚤的分布明显趋向高温及高浮游植物丰度的海域, 夏季主要分布在渤海湾和莱州湾, 秋季主要分布在渤海中南部(图 9)。冗余分析结果显示, 小拟哲水蚤和洪氏纺锤水蚤的丰

度与温度和浮游植物的丰度呈显著正相关($P<0.05$) (图 10), 较高的温度更加适宜其生存, 且大量的浮游植物能够为其提供充足的食物(图 5)。秋季拟长腹剑水蚤仅在渤海中南部海域有较高的丰度(图 9), 冗余分析结果显示, 拟长腹剑水蚤的丰度与温度呈正相关(图 10), 秋季渤海中部海域温度较高为其提供了良好的生存条件(图 2)。

3.3 浮游动物群落组群划分

根据聚类分析结果, 将夏秋季浮游动物各分为 3 个组群(图 11)。夏季, 组群 A 仅包含渤海南部个别站位, 浮游动物平均丰度最低(371.0 ind./m^3) (图 12); 组群 B 位于渤海湾和莱州湾海域(图 12), 温度最高, 盐度最低(表 2), 浮游动物丰度($12\,937.5 \text{ ind./m}^3$)最高; 组群 C 包括渤海中部和北部海域站位(图 12), 温度最低, 盐度和溶解氧最高(表 2), 浮游动物丰度较低($4\,755.3 \text{ ind./m}^3$)。秋季, 组群 D 主要分布在辽东湾及渤海中北部(图 12), 温度和浮游动物丰度($1\,373.5 \text{ ind./m}^3$)最低(表 2); 组群 E 位于渤海中部(图 12), 溶解氧最低(表 2), 温度和浮游动物丰度($3\,818.4 \text{ ind./m}^3$)较高(表 2); 组群 F 主要包括渤海湾和莱州湾站位(图 12), 盐度最低(表 2), 温度和浮游动物的丰度($6\,074.7 \text{ ind./m}^3$)最高;

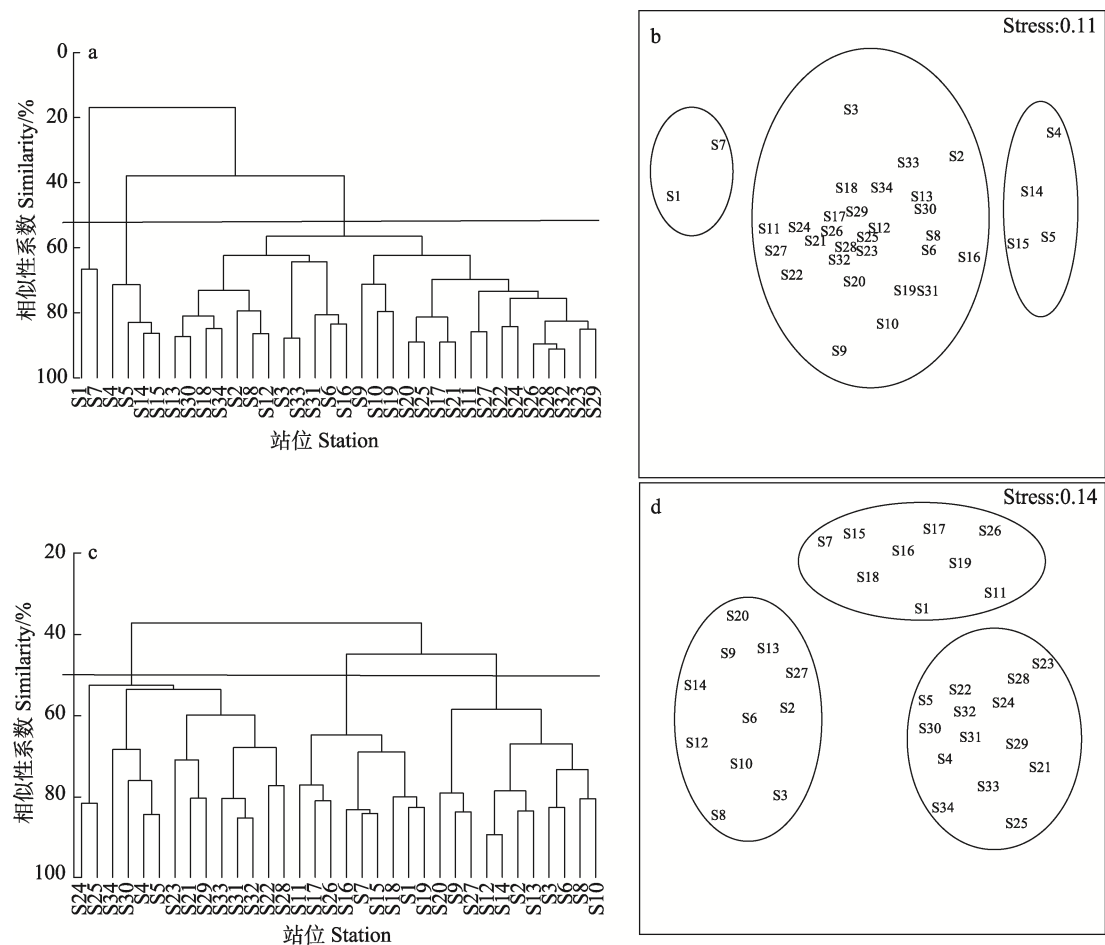


图 11 2021 年夏秋季浮游动物群落聚类分析和 MDS 分析结果

Fig.11 Cluster and MDS results of zooplankton communities during summer and autumn, 2021

a: 夏季聚类分析; b: 夏季 MDS 分析; c: 秋季聚类分析; d: 秋季 MDS 分析。

a: Cluster in summer; b: MDS in summer; c: Cluster in autumn; d: MDS in autumn.

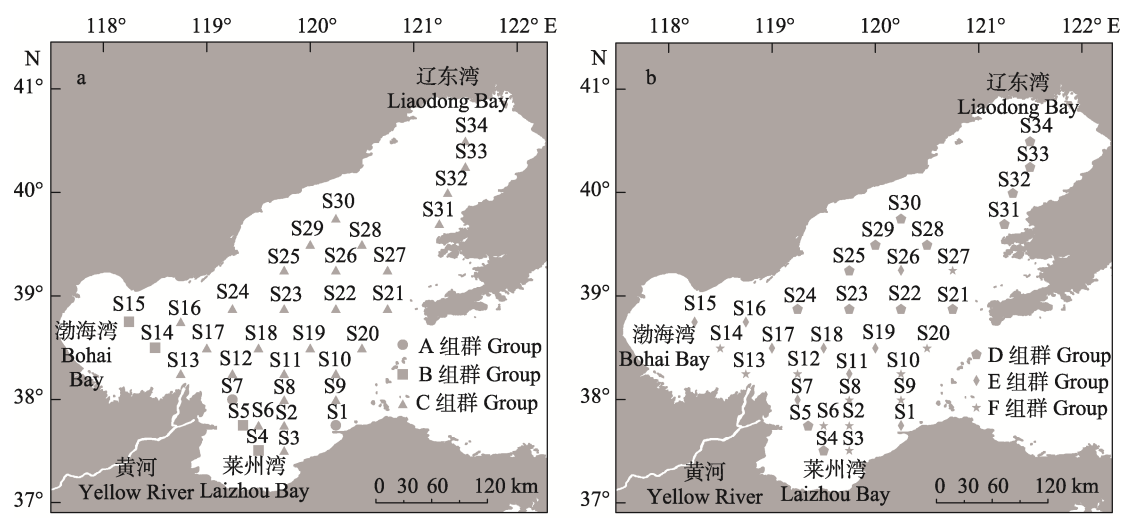


图 12 2021 年夏季(a)和秋季(b)渤海浮游动物群落的组群分布

Fig.12 Group distribution of zooplankton during summer (a) and autumn (b), 2021

表 2 2021 年渤海海域浮游动物各组群环境因子的均值和标准差

Tab.2 Mean and standard deviation of environmental factors among zooplankton community groups in the Bohai Sea in 2021						
环境因子 Environmental factors	夏季 Summer			秋季 Autumn		
	A 组群 Group	B 组群 Group	C 组群 Group	D 组群 Group	E 组群 Group	F 组群 Group
SST/℃	16.83±0.08	18.63±0.62	16.21±1.50	16.76±0.74	17.22±0.41	17.59±0.70
BST/℃	15.50±0.43	17.73±1.24	14.72±1.70	16.36±0.81	16.91±0.52	17.28±1.13
SSS	30.08±0.92	29.38±2.22	30.91±1.20	30.41±0.44	30.04±0.63	28.44±2.29
BSS	30.11±1.00	29.82±1.74	31.27±0.90	30.64±0.47	30.16±0.56	29.53±1.35
SDO/(mg/L)	5.86±0.05	5.68±0.35	5.91±0.29	4.81±0.52	4.52±0.42	4.80±0.35
BDO/(mg/L)	5.60±0.18	5.35±0.35	5.68±0.33	4.03±0.51	3.97±0.65	4.45±0.37

表 3 2021 年渤海海域浮游动物群落与环境因子相关性分析

Tab.3 Analysis of relationship between zooplankton community structure and environment factors in the Bohai Sea in 2021		
季节 Season	环境因子组合 Environmental factor combination	相关性 Correlation (ρ)
夏季 Summer	SST, SSS, BSS, AP	0.303
	SST, BSS, AP	0.298
	SST, SSS, AP	0.295
	SST, BSS	0.291
	SST, SSS, BSS, SDO, AP	0.289
秋季 Autumn	SSS, SDO	0.190
	SSS, BSS, SDO	0.187
	BST, SSS, BSS, SDO	0.186
	BST, SSS, SDO	0.185
	SSS, BSS	0.179

注：SST：表层海水温度；BST：底层海水温度；SSS：表层海水盐度；BSS：底层海水盐度；SDO：表层海水溶解氧；AP：浮游植物的丰度。

Note: SST: Surface seawater temperature; BST: Bottom seawater temperature; SSS: Surface seawater salinity; BSS: Bottom seawater salinity; SDO: Surface seawater dissolved oxygen; AP: Abundance of phytoplankton.

表 4 渤海海域浮游动物历史观测数据的比较

Tab.4 Comparison of historical observation data of zooplankton in the Bohai Sea				
年份和季节 Year and season	网型 Net type	种类数 Taxa number	平均丰度 Average abundance (ind./m ³)	参考文献 Reference
2013 夏季 Summer	浅水 I 型网 Type I plankton net	45	199.6	徐东会等, 2016
2013 秋季 Autumn	浅水 I 型网 Type I plankton net	42	42.1	徐东会等, 2016
2013 夏季 Summer	大型网 Large plankton net	49	1 737.8	刘颖超等, 2023
2014 秋季 Autumn	大型网 Large plankton net	37	715.0	王珊珊等, 2021
2014 春季 Spring	大型网 Large plankton net	47	1 108.2	王静等, 2022
2015 夏季 Summer	中型网 Medium plankton net	57	5 280.3	卜亚谦等, 2019
2016 冬季 Winter	中型网 Medium plankton net	39	264.4	卜亚谦等, 2019
2021 夏季 Summer	浅水 II 型网 Type II plankton net	30	5 456.0	本研究 This study
2021 秋季 Autumn	浅水 II 型网 Type II plankton net	36	4 116.9	本研究 This study

组群 F 与组群 B 相比，浮游动物的丰度显著下降 ($P<0.05$)，可能由于秋季莱州湾和渤海湾海域水温下降(图 2 和表 2)，沿岸陆源径流逐渐减少，水体营养盐浓度下降，影响浮游动物的生存繁殖(杜明敏等，

2013)。组群 F 与组群 D 相比，秋季莱州湾和渤海湾浮游动物丰度 ($6\,074.7\text{ ind./m}^3$) 显著高于辽东湾 ($1\,373.5\text{ ind./m}^3$) ($P<0.01$)，主要原因是渤海存在一定的南北跨度，温度由南至北逐渐降低(图 2)，较高的

温度适宜大多数浮游动物的生存和繁殖,同时,莱州湾和渤海湾邻近海域的盐度较低(表 2),有利于近岸暖温带种的生存,使其丰度升高。

3.4 浮游动物群落结构与环境因子关系

浮游动物群落结构特征与水温、盐度等环境因子息息相关。BIO-ENV 结果显示,解释夏季浮游动物群落结构最佳的环境因子组合是 SST、SSS、BSS 和浮游植物丰度(表 3)。这与以往的研究结果相似,如杜明敏等(2013)指出,水温、盐度和水深是解释夏季浮游动物群落结构变化的最佳组合。夏季,随着水温升高和陆源径流的增加,温度和盐度分布的空间差异较为明显,且各种浮游动物对温度和盐度的耐受性不同,这将直接影响浮游动物在渤海的分布。同时,本研究中浮游植物和浮游动物的空间分布较为相似(图 5 和图 7),浮游植物作为浮游动物至关重要的饵料,直接影响浮游动物的数量和分布(王静等, 2022)。在秋季, SST 和 SDO 是解释浮游动物群落结构的最佳环境因子组合,体现了影响渤海浮游动物群落分布特征的环境参数存在季节性差异。从 BIO-ENV 分析结果来看,单因素对于浮游动物群落结构变化的解释率相对较低,而多种环境因子在时空尺度上相互耦合,共同塑造了浮游动物群落分布特征与动态变化。因此,在探讨浮游动物群落生态学特征时,需全面考虑多种环境因子及它们之间的相互作用。

致谢: 感谢“中渔科 102”号调查船全体船员及出海调查人员在采样过程中给予的大力支持。

参 考 文 献

- BU Y Q, ZHU L Y, CHEN X, *et al.* Community structure of zooplankton and its relationship with environmental factors in the Bohai and the north Huanghai Sea in summer and winter. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(2): 59–66 [卜亚谦, 朱丽岩, 陈香, 等. 夏冬季渤海、北黄海浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(2): 59–66]
- CAO W Q, LIN Y S, YANG Q, *et al.* Advanced in biology of *Calanus sinicus* in China. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2006, 45(S2): 54–61 [曹文清, 林元烧, 杨青, 等. 我国中华哲水蚤生物学研究进展. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2006, 45(增刊 2): 54–61]
- CHEN X Y, CUI Z G, ZHANG Y, *et al.* Contrasting effects of river inflow and seawater intrusion on zooplankton community structure in Jiaozhou Bay, the Yellow Sea. *Marine Environmental Research*, 2023, 192: 106194
- CHEN Y S, MA Y, WANG Y M, *et al.* Impact of China's marine governance policies on the marine ecological environment—A case study of the Bohai rim. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 246: 106913
- CLARKE K R, WARWICK R M. Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation. 2nd edn. PRIMER-E, Plymouth, 2001
- DONG Z J, YANG Q, SUN T T, *et al.* Spatial and seasonal variability of the zooplankton community in the Yellow River estuary's adjacent sea. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 659–667 [董志军, 杨青, 孙婷婷, 等. 黄河口邻近海域浮游动物群落时空变化特征. *生态学报*, 2017, 37(2): 659–667]
- DU M M, LIU Z S, WANG C S, *et al.* The seasonal variation and community structure of zooplankton in China Sea. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(17): 5407–5418 [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. *生态学报*, 2013, 33(17): 5407–5418]
- DUAN Y, WANG A Y, LI M Y, *et al.* Community structure of zooplankton in coastal Liaoning of northern Yellow Sea in summer and autumn. *Fisheries Science*, 2016, 35(3): 215–220 [段妍, 王爱勇, 李梦遥, 等. 辽宁省黄海北部沿岸夏季和秋季浮游动物群落结构. *水产科学*, 2016, 35(3): 215–220]
- LI H R, LIU G X, MA J, *et al.* Ecological characteristics of zooplankton in eastern nearshore water of Laizhou Bay in summer. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(4): 37–45 [李浩然, 刘光兴, 马静, 等. 夏季莱州湾东部近岸水域浮游动物的生态特征. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(4): 37–45]
- LIU X H, XU B D, ZHANG C L, *et al.* Characteristics of zooplankton community structure and its seasonal variation in the Yellow River estuary and its adjacent waters. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(5): 922–930 [刘晓慧, 徐宾铎, 张崇良, 等. 黄河口及其邻近水域浮游动物群落结构特征及其季节变化. *中国水产科学*, 2017, 24(5): 922–930]
- LIU Y C, LI H R, CHEN H J, *et al.* Distribution and influencing factors of zooplankton in Yellow Sea and Bohai Sea in summer, 2013. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2023, 45(3): 138–146 [刘颖超, 李浩然, 陈洪举, 等. 2013 年夏季黄、渤海浮游动物分布及其影响因素. *海洋湖沼通报*, 2023, 45(3): 138–146]
- LOMARTIRE S, MARQUES J C, GONÇALVES A M M. The key role of zooplankton in ecosystem services: A perspective of interaction between zooplankton and fish recruitment. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107867
- MA J, CHEN H J, LIU G X. Study on the zooplankton community structure in the Yellow River Estuary and its adjacent waters in summer, 2007. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(5): 74–80 [马静, 陈洪举,

- 刘光兴. 2007 年夏季黄河口及其邻近水域浮游动物的群落特征. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 74–80]
- PIELOU E C. An introduction to mathematical ecology. New York: Wiley-Interscience, 1969, 1–286
- ROSE T H, TWEEDLEY J R, WARWICK R M, *et al.* Zooplankton dynamics in a highly eutrophic microtidal estuary. Marine Pollution Bulletin, 2019, 142: 433–451
- SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication. Urbana IL: University of Illinois Press, 1949, 1–125
- SONG C M. Study on the feeding rates of planktonic copepods between the Bohai Sea and the northern Yellow Sea. Master's Thesis of Dalian Ocean University, 2016 [宋昌民. 渤海和北黄海浮游桡足类摄食率的研究. 大连海洋大学硕士研究生学位论文, 2016]
- TACKX M L M, PAUW N D, MIEGHEM R V, *et al.* Zooplankton in the Schelde estuary, Belgium and The Netherlands. Spatial and temporal patterns. Journal of Plankton Research, 2004, 26(2): 133–141
- VILLATE F, IRIARTE A, URIARTE I, *et al.* Seasonal and interannual variability of mesozooplankton in two contrasting estuaries of the Bay of Biscay: Relationship to environmental factors. Journal of Sea Research, 2017, 130: 189–203
- WANG J, LI H R, CHEN H J, *et al.* Community characteristics of zooplankton in the Yellow Sea and Bohai Sea in spring 2014. Marine Sciences, 2022, 46(5): 17–29 [王静, 李浩然, 陈洪举, 等. 2014 年春季黄、渤海浮游动物群落特征. 海洋科学, 2022, 46(5): 17–29]
- WANG S S, LI H R, CHEN H J, *et al.* Characterization of zooplankton community structure and distribution in the Bohai Sea and the Yellow Sea in autumn 2014. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021, 60(5): 917–926 [王珊珊, 李浩然, 陈洪举, 等. 2014 年秋季渤、黄海浮游动物的群落结构与分布特征. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(5): 917–926]
- WANG W J, LIU G X. The characteristics of meso- and micro-zooplankton community in the Yellow River estuary and its adjacent area in autumn, 2010. Marine Sciences, 2013, 37(11): 9–15 [王文杰, 刘光兴. 2010 年秋季黄河口及其邻近海域中小型浮游动物的群落特征. 海洋科学, 2013, 37(11): 9–15]
- WANG X X, GAO Y J, ZUO M, *et al.* Interannual variation and influencing factors of zooplankton in the Yellow River estuary before and after water and sediment discharge regulation from 2011 to 2020. Marine Sciences, 2022, 46(12): 115–127 [王秀霞, 高彦洁, 左明, 等. 2011—2020 年调水调沙前后黄河口海域浮游动物年间变化及影响因子. 海洋科学, 2022, 46(12): 115–127]
- WANG X X, ZHUANG Y Y, ZHENG Z Q, *et al.* Zooplankton assemblages and indicator species in the Changjiang River estuary and its adjacent waters. Continental Shelf Research, 2023, 260: 105000
- WEI Y Q, CHEN X Y, LIU Y, *et al.* Key determinants controlling the seasonal variation of coastal zooplankton communities: A case study along the Yellow Sea. Marine Pollution Bulletin, 2023, 193: 115175
- WEI Y Q, DING D S, GU T, *et al.* Different responses of phytoplankton and zooplankton communities to current changing coastal environments. Environmental Research, 2022, 215: 114426
- XU D H, SUN X M, CHEN B J, *et al.* The ecological characteristics of zooplankton in the central Bohai Sea. Progress in Fishery Sciences, 2016, 37(4): 7–18 [徐东会, 孙雪梅, 陈碧鹃, 等. 渤海中部浮游动物的生态特征. 渔业科学进展, 2016, 37(4): 7–18]
- XU Z L, CHEN Y Q. Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea and Yellow Sea. Chinese Journal of Ecology, 1989, 8(4): 13–15, 19 [徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海水域浮游动物优势种聚集强度与鲈鲶渔场的关系. 生态学杂志, 1989, 8(4): 13–15, 19]
- ZHOU D, YU M, YU J B, *et al.* Impacts of inland pollution input on coastal water quality of the Bohai Sea. Science of the Total Environment, 2021, 765: 142691
- ZUO T, WU Q, WANG J, *et al.* Annual survey of the species diversity and assemblage dynamics of medusae in Laizhou Bay, Bohai Sea. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5646–5656 [左涛, 吴强, 王俊, 等. 莱州湾水母种类多样性及群集结构的季节变化. 生态学报, 2016, 36(18): 5646–5656]

(编辑 冯小花)

Characteristics of Changes in Zooplankton Communities in the Bohai Sea During Summer and Autumn, 2021

ZHAO Jie^{1,2}, SHI Yongqiang^{1,3,4①}, SHAN Xiujuan^{1,3,4}, HAN Qingpeng¹,
ZOU Jianyu^{1,5}, ZHAO Yongsong¹, LI Wenxiong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 2. College of Marine Living Resources Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China; 4. Shandong Changdao National Observation and Research Station for Fisheries Resources, Yantai 265800, China; 5. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract Zooplankton are essential secondary producers that are pivotal in maintaining the stability of marine ecosystems. The Bohai Sea, which is known for its rich biological resources, serves as an important spawning and feeding ground for numerous economically important fish and shrimp species in northern China Sea. Studying seasonal variations in zooplankton communities and their relationships with environmental factors is vital for assessing the current status of the Bohai Sea ecosystem and promoting the sustainable development of marine ecosystems. In this study, we analyzed the community structure of zooplankton in the Bohai Sea using various indices, such as species turnover rate (A), dominance (Y), turnover rate of dominant species (R), Shannon-Wiener diversity index (H'), Margalef richness index (d), and Pielou evenness index (J'), based on survey data collected during two cruises in June (summer) and October (autumn) 2021. The results showed that 43 phytoplankton species were collected during summer, with an average abundance of $(34,722.6 \pm 31,775.1)$ ind./m³. A total of 67 phytoplankton species were identified in autumn, with an average abundance of $(464,376.6 \pm 422,191.0)$ ind./m³. The high-value zones for phytoplankton abundance in summer were mainly located in Laizhou Bay and adjacent waters, whereas the high-value zones shifted to the Bohai Bay entrance, and central and southern Bohai Sea in autumn. A total of 41 zooplankton species (taxa) were identified, including 14 copepod species, 13 pelagic larval taxa, 8 Hydrozoa species, 2 Amphipoda species, and one species each of Ctenophora, Cladocera, Chaetognatha, and Tunicata. Owing to the influence of high summer temperatures, the number of warm-water species significantly increased in autumn, yielding higher species richness during autumn (36 taxa) than during summer (30 taxa). Zooplankton abundance averaged higher in summer ($5,460.0$ ind./m³) than in autumn ($4,116.9$ ind./m³), with high-abundance zones occurring in warmer, lower-salinity marine areas. The spatial distribution of zooplankton abundance in summer was similar to that of phytoplankton, with primary concentrations in Laizhou Bay and Bohai Bay, whereas the distribution shifted to the central and southern Bohai Sea in autumn. The H' , d , and J' all exhibited higher values in autumn than in summer. The dominant zooplankton species in summer included the following: *Acartia hongii*, *Oithona similis*, *Paracalanus parvus*, *Centropages abdominalis*, *Calanus sinicus*, *Acartia omorii*, and *Paracalanus crassirostris*. Conversely, the dominant species in autumn comprised the following: *A. hongii*, *P. parvus*, *P. crassirostris*, *O. similis*, bivalvia larvae, *Ditrichocorycaeus affinis*, and *Oikopleura dioica*. Both *P. parvus* and *A. hongii* exhibited significant correlations with elevated temperatures and increased phytoplankton abundance. Redundancy analysis revealed that *P. parvus* and *A. omorii* were significantly positively correlated with phytoplankton abundance in summer ($P < 0.05$). Moreover, *P. parvus* and *P. crassirostris*

① Corresponding author: SHI Yongqiang, Email: shiyq@ysfri.ac.cn

were significantly positively correlated with temperature ($P<0.01$) and negatively correlated with salinity and dissolved oxygen ($P<0.05$). In autumn, *D. affinis* was positively correlated with temperature ($P<0.05$), and *O. dioica* exhibited a highly significant negative correlation with salinity ($P<0.01$). Cluster analysis classified zooplankton into three groups in both summer and autumn. During summer, Group A, located at select stations in the southern Bohai Sea, exhibited the lowest zooplankton abundance (371.0 ind./m³). Group B, located in the Bohai Bay and Laizhou Bay regions, had the highest zooplankton abundance (12,937.5 ind./m³). Group C encompassed the central and northern Bohai Sea regions. In autumn, Group D, primarily located in Liaodong Bay and the central–northern Bohai Sea, had the lowest zooplankton abundance (1,373.5 ind./m³). Group E, situated in the central Bohai Sea, had a relatively high zooplankton abundance (3,818.4 ind./m). Group F, mainly located in Bohai Bay and Laizhou Bay, had the highest zooplankton abundance (6,074.7 ind./m³). SIMPER analysis revealed that four zooplankton species, each contributing over 5%, accounted for cumulative contribution rates of 87.7% and 82.9% in Groups A and C, respectively. These species included *A. hongii*, *O. similis*, *P. parvus*, and *C. abdominalis*. In Group B, four species contributed 85.3% to the similarity: *A. hongii*, *P. parvus*, *P. crassirostris*, and *O. similis*. In Group D, five species accounted for 87.6% of the similarity: *A. hongii*, *P. parvus*, *O. similis*, bivalvia larvae, and *P. crassirostris*. In Group E, five species accounted for 83.2% of the similarity: *A. hongii*, *P. parvus*, bivalvia larvae, *P. crassirostris*, and *D. affinis*. In Group F, four species contributed 81.4% to the similarity: *P. parvus*, *A. hongii*, *P. crassirostris*, and *O. similis*. BIO-ENV analysis demonstrated that the best explanatory combination of factors for summer zooplankton community structure was surface temperature, surface salinity, bottom salinity, and phytoplankton abundance ($\rho=0.303$). Conversely, the best explanatory combination for autumn was surface salinity and surface dissolved oxygen ($\rho=0.190$). These findings are important for understanding the seasonal variation characteristics and dynamic changes in the marine ecological environment. They are crucial for assessing the current status of the Bohai Sea ecosystem and promoting the sustainable development of marine ecosystems. The findings also provide foundational data and a scientific basis for the seasonal variations in zooplankton in the Bohai Sea and the adaptive management of coastal ecosystems.

Key words Bohai Sea; Zooplankton; Community structure; Dominant species; Environmental factors