

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20240702003

http://www.yykxjz.cn/

翁辰施, 李志祥, 王英哲, 丁东生, 崔正国, 曲克明, 胡海燕, 魏玉秋. 流清河湾浮游生物群落对近海河口环境变化的不同响应及其关键驱动因素. 渔业科学进展, 2025, 46(2): 76-92

WENG C S, LI Z X, WANG Y Z, DING D S, CUI Z G, QU K M, HU H Y, WEI Y Q. Differential responses of plankton communities to environmental changes in the Liuqinghe Bay estuary. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(2): 76-92

# 流清河湾浮游生物群落对近海河口环境变化的不同响应及其关键驱动因素\*

翁辰施<sup>1,2,3</sup> 李志祥<sup>1,3</sup> 王英哲<sup>1,2,3</sup> 丁东生<sup>1,3</sup> 崔正国<sup>1,3</sup>  
曲克明<sup>1,3</sup> 胡海燕<sup>2</sup> 魏玉秋<sup>1,3①</sup>

- (1. 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室(中国水产科学研究院黄海水产研究所) 山东 青岛 266071;  
2. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院 浙江 舟山 316022;  
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)

**摘要** 近海河流和海洋环境之间存在着紧密的交互关系,因此,近海河口生态系统在生物多样性进化过程中扮演着重要角色。浮游植物和浮游动物已经被证实是近海河口生态系统中水质状况的重要生物指标。因此,综合评价多重环境因素对近海河口生态系统中浮游植物和浮游动物群落的影响至关重要。目前,关于流清河湾浮游生物群落及环境因子影响的研究相对空白,本研究于2021年3月(春季)、8月(夏季)和10月(秋季)采集了流清河湾海域7个站位的水样,获得了生物(即浮游植物和浮游动物)数据及相关环境因子数据。研究结果显示,3个航次共鉴定出浮游植物3门94种,以硅藻(Bacillariophyta)为主,其丰度及碳生物量在夏季达到最大值 $[(242.50 \pm 136.40) \times 10^3 \text{ cells/m}^3; (946.89 \pm 810.66) \mu\text{g C/m}^3]$ ;浮游动物共10类48种,桡足类(Copepods)出现次数最多,但春季最优势浮游动物为夜光虫(*Noctiluca miliaris*)浮游幼虫,且其丰度及生物量在春季最大 $[(5\ 665.71 \pm 4\ 576.32) \text{ ind./m}^3; (431.55 \pm 298.80) \text{ mg/m}^3]$ 。通过冗余分析(RDA)和Pearson相关性分析探究了环境因子对浮游生物优势种和组成的影响。结果表明,流清河湾浮游生物存在显著的时空变化,其中,春、夏季浮游生物优势种的主要影响因素是温度和营养盐浓度;影响秋季浮游生物优势种的主要驱动力是温度、盐度及营养盐,并且春、秋季存在发生赤潮的风险。此外,洋流、陆地径流及气象灾害等也是影响浮游生物优势种群落组成的重要因素。本研究的结果有助于提高对近海河口生态系统浮游生物群落的了解,为更深入了解近海浮游生物群落变化的环境影响机制提供理论基础,也为科学管理流清河湾生态环境提供数据参考。

**关键词** 流清河湾;浮游植物;浮游动物;环境变化;驱动因素;响应机制

**中图分类号** P735 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2025)02-0076-17

浮游生物是海洋生态系统的重要组成部分,虽然在系统发育、生物化学、新陈代谢和生态变异方面千

\* 国家自然科学基金(42206103)和山东省自然科学基金(ZR2022QD133)共同资助。翁辰施, Email: wcs18957239795@163.com

① 通信作者: 魏玉秋, 副研究员, Email: weiyuqiu@163.com

收稿日期: 2024-07-02, 收修改稿日期: 2024-08-02

差万别(Irigoien *et al.*, 2004; DeLong *et al.*, 2005), 但广泛分布于上层海洋, 是海洋生物泵的主要基石, 在对碳的垂直运输和调节全球生地化循环中发挥着重要作用, 有时甚至是主导作用(Stemmann *et al.*, 2012; Steinberg *et al.*, 2017)。因此, 浮游生物群落结构和分布的变化会影响水生生态系统的生地化循环以及物质和能量流动(Beaugrand *et al.*, 2003; Mitra *et al.*, 2014; Brun *et al.*, 2019)。先前的现场研究表明, 浮游生物群落的变化通常是由水体物理、化学和捕食环境驱动的(Barton *et al.*, 2013; Cloern *et al.*, 2014; Li C L *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2024)。同时, 大量的室内培养和模型研究表明, 包括温度、盐度、地理位置等在内的自然变量也是影响浮游生物物种多样性和丰度的关键因素(Elliott *et al.*, 2007; Telesh *et al.*, 2010; Kodama *et al.*, 2018)。此外, 浮游生物还能够对不同的营养物质浓度和污染物水平做出快速反应(Barton *et al.*, 2010; Hinder *et al.*, 2012)。总的来说, 浮游生物对不同水文环境变化的可塑性, 使得这类微小浮游生物可以作为水生生态系统一般功能条件的重要指标(Hounshell *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2019)。因此, 了解浮游生物群落组成、结构、时空变化及其关键驱动因素, 对深入研究生态系统动态和气候变化的潜在影响具有重要价值。

在不同的海洋生态系统中, 近海河口生态系统与人类社会关系最为密切, 因为这些区域拥有丰富的生物碳汇储量和水产资源, 这在很大程度上与浮游生物群落有关(Ma *et al.*, 2014)。流清河湾是典型的近海河口区域, 位于山东省青岛市崂山区境内, 外接黄海, 水质状况良好, 饵料生物丰富, 既是多种海珍品的栖息地, 又是青岛市重要的水产养殖区(孙雪梅等, 2013)。此外, 流清河湾生态系统是大陆河流与黄海海域之间的生态交汇点, 受到强烈的大陆-海洋生态系统的影响, 从而形成其独特的物理和化学特性, 这些特性赋予了它复杂多变的环境特征, 干扰并导致浮游生物群落结构发生时空分布上的变化(Elliott *et al.*, 2002; McLusky *et al.*, 2004; 程济生等, 2004)。总之, 流清河湾生态系统受人类活动的影响显著, 了解环境因子对近海河口地区的作用机理至关重要, 同时对河口生物资源的合理利用、管理和保护具有重要意义(Wei *et al.*, 2022)。

以往大多数的研究仅局限于近海河口单一的浮游植物或浮游动物群落(赖廷和等, 2005; Vieira *et al.*, 2015; Gong *et al.*, 2018; 陈学杨等, 2024), 并未将浮游生物统一进行系统性的描述; 其次位于山东半岛地区的调查主要集中在莱州湾近岸(宁璇璇等, 2011)和靖海湾沿岸(王英哲等, 2024)等区域, 而关于流清河湾

近岸浮游植物与浮游动物的群落特征、相互作用及其关键环境影响因素的研究鲜有报道。因此, 本研究基于 2021 年春季(3 月)、夏季(8 月)和秋季(10 月)分别对流清河湾近岸表层海水中的部分环境因子及浮游生物数据的调查, 采用物种多样性指数、群落均匀度、丰富度以及生物量等浮游生物群落结构指标, 以探究环境因素变化对浮游生物群落组成、结构和功能的影响。这一研究旨在为进一步了解流清河湾生态系统和浮游生物群落的长期变化提供数据基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

本研究分别于 2021 年 3 月、8 月和 10 月(分别代表春、夏和秋季)对崂山区流清河湾近海河口区域(36°06'~36°08'N, 126°36'~126°38'E)进行了调查, 涵盖 7 个站点, 因调查区域平均水深小于 10 m, 故只取表层水样, 并采用相同的采样策略和分析方法(图 1)。

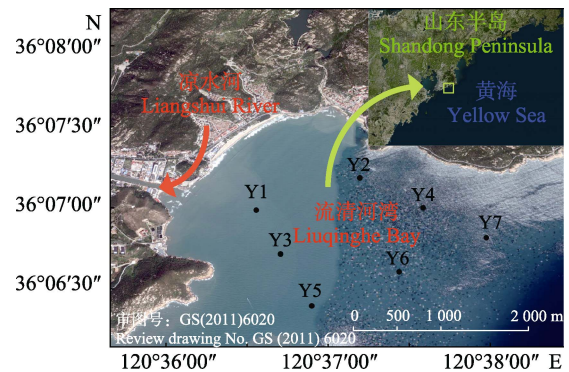


图 1 流清河湾站位坐标图(Y1~Y7)

Fig.1 The location of sampling stations(Y1~Y7) in the Liuqinghe Bay

### 1.2 样品采集与处理

**1.2.1 环境参数** 温度、盐度和 pH 等参数通过使用 YSI 便携式多参数水质测量仪(ProDSS, 美国)进行现场测定。取 500 mL 海水样品负压(<0.04 MPa)过滤到 Whatman GF/F 滤膜上用于测量叶绿素 *a* 浓度(Chl *a*), 样品-20 °C 冷冻保存, 实验室内经 90%丙酮溶液避光萃取 24 h (4 °C)后, 使用荧光计(Turner Design, 美国)进行定量测定, 根据 Welschmeyer (1994)的方法计算 Chl *a* 浓度。取 250 mL 海水样品, -20 °C 条件下迅速冷冻, 在实验室中使用  $K_2Cr_2O_7$  方法测定化学需氧量(COD)。过滤采集营养盐水样, -20 °C 冷冻保存, 使用 Technicon AA3 自动分析仪(Bran + Luebbe, 德国)根据经典比色法测定营养盐浓度, 包括铵盐( $NH_4^+$ -N)、

硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ -N)、亚硝酸盐( $\text{NO}_2^-$ -N)和磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ -P) (Crouch *et al.*, 1967; Verdouw *et al.*, 1978); 溶解无机氮(DIN)的浓度为  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 的浓度之和, 溶解无机磷(DIP)的浓度即为  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 的浓度值。

**1.2.2 生物参数** 本研究采用 20  $\mu\text{m}$  的浮游植物网采集浮游植物样品, 再用 200 mL 的无颗粒海水将网样中的浮游植物洗脱下来, 并用甲醛溶液固定, 样品甲醛终浓度为 2%。样品转移至实验室内采用 Utermöhl 法进行分析。取 25 mL 样品于 Hydro-bios 的 Utermöhl 计数框中, 沉降 24 h, 再使用倒置显微镜(Motic AE2000)在 400 倍或 200 倍的放大倍率下进行浮游植物种类鉴定和计数( $> 5 \mu\text{m}$ )(薛冰等, 2016)。

浮游动物样品按照《海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查》(GB/T 12763. 6-2007)采用浅水 I 型浮游生物网进行垂直采样, 同时为了测量过滤海水的体积, I 型网配备了一个校准的流量计(Hydrobios)。将采集的浮游动物网样用 5% 的甲醛溶液固定于 500 mL PE 瓶中, 在对浮游动物样本进行显微镜分析之前, 首先对大型浮游动物[例如水母(Scyphozoa)]进行种类鉴定和计数, 然后选择至少占总体积 1% 的剩余浮游动物样本放置在浮游生物计数架中, 使用放大倍率为 40~100 倍的倒置显微镜(Motic AE2000)进行浮游动物种类鉴定和定量(Li D Y *et al.*, 2022)。此外, 浮游动物生物量的称重使用基于湿重法的 0.01 g 的精密天平(Alcaraz *et al.*, 2003)。

### 1.3 数据分析

使用香农-威纳(Shannon-Wiener)多样性指数( $H'$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )和优势度指数( $Y$ )用于描述流清河湾浮游生物群落的组成和结构(Wei *et al.*, 2023)。在本研究中, 将优势度  $Y \geq 0.02$  的物种作为优势种(徐东会等, 2016)。

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

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (2)$$

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

式中,  $S$  代表采集样品中浮游生物物种总数,  $n_i$  为  $i$  种物种的个体数量(细胞数),  $P_i$  代表  $i$  种物种的细胞丰度,  $N$  为样品中所有物种的总丰度,  $f_i$  表示  $i$  种物种在每个样品中出现的频率。

使用富营养化指数( $E_i$ )来评价流清河湾富营养化状况, 按公式(4)计算  $E_i$  指数, 其中将  $1 \leq E_i \leq 3$  定义为轻度富营养化,  $3 < E_i \leq 9$  定义为中度富营养化,  $E_i > 9$  为重度富营养化(Zhu *et al.*, 2020)。

$$E_i = \frac{C_{\text{COD}} \times C_{\text{DIN}} \times C_{\text{DIP}}}{4500} \times 10^6 \quad (4)$$

式中,  $E_i$  为富营养化指数,  $C_{\text{COD}}$  为化学需氧量的实测浓度(mg/L),  $C_{\text{DIN}}$  为无机氮的实测浓度(mg/L),  $C_{\text{DIP}}$  为磷酸盐的实测浓度(mg/L)。

所有数据均以平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)表示, 采样站位图由 ArcMap 10.8 绘制, 柱状图、点线图和线性回归模型均利用 Origin (v 2021)软件绘制。浮游生物优势种与环境因子及营养盐之间的关系使用冗余分析(redundancy analysis, RDA)通过 Canoco 5.1 按照国际通用标准完成。使用 SPSS 26 进行 Pearson 相关性分析, 并利用 R 统计软件的“pheatmap”(v 4.0.3)绘制 Pearson 相关性热图。

## 2 结果

### 2.1 调查区域水文条件

2021 年调查区域 3 个季节表层海水水文条件的变化情况如表 1 所示, 水文参数大多具有显著的季节性差异(图 2)。研究区域平均水温为 5.90~27.00  $^{\circ}\text{C}$ , 存在较大的季节性变化, 夏季水温[(23.70 $\pm$ 0.17)  $^{\circ}\text{C}$ ]最高, 春季水温[(5.91 $\pm$ 0.03)  $^{\circ}\text{C}$ ]最低, 并且各站位间区域性变化很小(图 2a)。流清河湾平均盐度的变化(变化范围为 30.29~31.70)通常由河口径流输入所导致, 呈现明显的季节变化特征, 不同站位之间的盐度无显著差异(图 2b)。研究区域表层海水普遍呈弱碱性(变化范围为 7.80~8.37), 变化趋势随着水温的升高而降低, 当调查区域处于秋季时, 各站位的 pH 在数值上表现出显著的波动(图 2c)。与前 3 种水文参数相比, COD(变化范围为 0.57~1.17 mg/L)在 2021 年内未表现出显著的季节模式, 其最高值出现在秋季(1.17 mg/L), 最低值出现在春季(0.57 mg/L)(图 2d)。Chl  $a$  的含量变化范围为 0.56~2.29  $\text{mg}/\text{m}^3$ , 同样随时间变化具有较强的季节性差异(图 2e)。但值得注意的是, 相比于夏秋季节, 流清河湾春季的 Chl  $a$  含量在不同站位之间存在较强烈的波动, 可能的原因为春季流清河湾存在发生赤潮的风险。研究区域的营养物质(DIN 和 DIP)浓度的变化未表现出显著的相关性, 因此, 也未表现出相同的季节变化特征(图 2f, g)。其中, DIP 的最高值(24.38  $\mu\text{g}/\text{L}$ )出现在秋季, 最低值(1.90  $\mu\text{g}/\text{L}$ )出现在春季。DIN 含量最高值(126.72  $\mu\text{g}/\text{L}$ )出现在秋季, 但其平均值含量却低于春季, 最低值(42.96  $\mu\text{g}/\text{L}$ )出现在夏季。平均 N/P 比在春季最大(44.19 $\pm$ 14.40), 在秋季最小(7.34 $\pm$ 1.42)。在 2021 年中夏、秋季绝大部分情况下的 N/P 比值(图 2h)都低于正常的 Redfield N/P 比值(16 : 1),

而在春季全部站位均高于 16 : 1。这说明在春季限制浮游生物增长的营养元素为 DIP, 而夏秋季的限制元素则为 DIN。调查区域 3 个季节中  $E_i$  均低于 0.5 (表 1), 不存在富营养化情况, 故本研究中不做详细讨论。

### 2.2 浮游生物丰度及生物量

**2.2.1 浮游植物** 2021 年流清河湾浮游植物的平均丰度于夏季达到最高值 $[(242.50 \pm 136.40)^3 \times$

$10^3 \text{ cells/m}^3]$ , 春季平均丰度水平最低 $[(19.38 \pm 12.23) \times 10^3 \text{ cells/m}^3]$  (图 3a)。2021 年流清河湾浮游植物平均生物量与丰度的季节变化表现出相同的变化趋势 (图 3b), 夏季碳生物量 $[(946.89 \pm 810.66) \mu\text{g C/m}^3]$ 显著高于春季碳生物量 $[(31.15 \pm 20.96) \mu\text{g C/m}^3]$ 。综合来看, 在 2021 年间流清河湾的浮游植物丰度与碳生物量具有较强的相关性( $R^2=0.15, P<0.05$ ; 图 3c), 这也说明处于优势地位的浮游植物群落与个体碳生物量

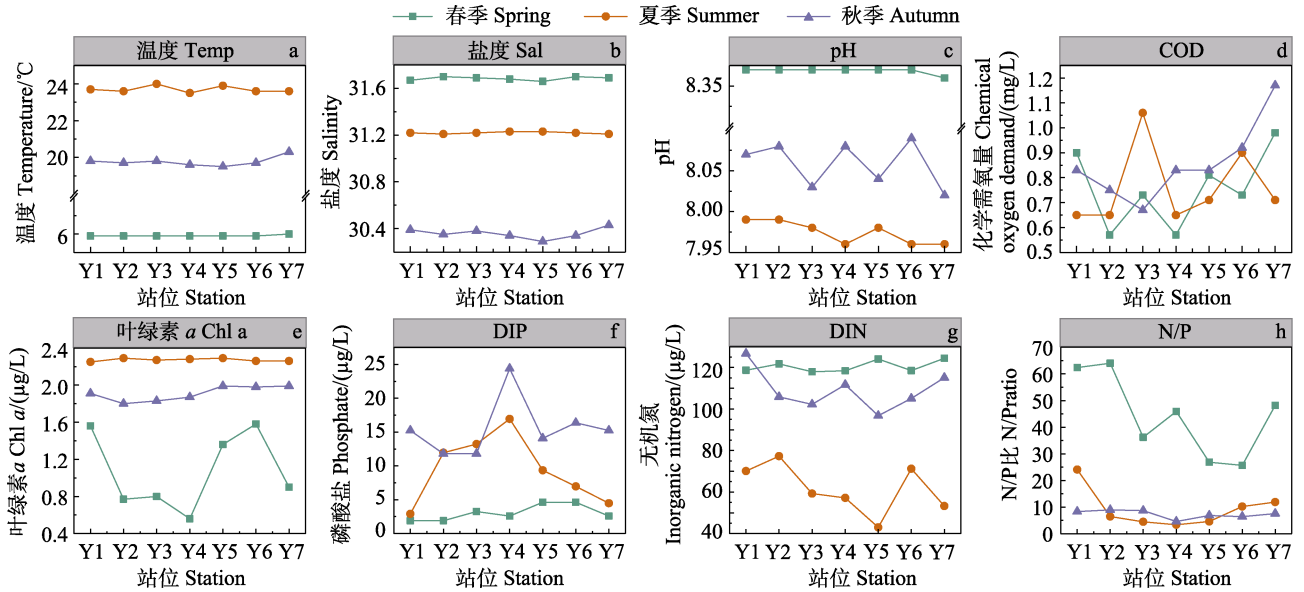


图 2 流清河湾 2021 年春、夏和秋季各项水文参数的变化

Fig.2 Changes in various hydrological parameters in spring, summer, and autumn of 2021 in Liuqinghe Bay

表 1 2021 年流清河湾的季节水文特征

Tab.1 Seasonal hydrological characteristics of the sea water in Liuqinghe Bay in 2021

环境因子 Environmental parameters		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn
温度 Temperature/°C	范围 Range	5.90~6.00	23.50~24.00	19.50~20.30
	平均值 Mean	5.91±0.03	23.70±0.17	19.77±0.24
盐度 Salinity	范围 Range	31.66~31.70	31.21~31.23	30.29~30.43
	平均值 Mean	31.68±0.01	31.22±0.01	30.36±0.04
pH	范围 Range	8.36~8.37	7.80~7.90	8.02~8.09
	平均值 Mean	8.37±0.01	7.82±0.03	8.06±0.03
化学需氧量 Chemical oxygen demand/(mg/L)	范围 Range	0.57~0.98	0.65~1.06	0.67~1.17
	平均值 Mean	0.76±0.14	0.76±0.14	0.86±0.15
叶绿素 a Chlorophyll a/(μg/L)	范围 Range	0.56~1.58	2.24~2.29	1.80~1.99
	平均值 Mean	1.07±0.39	2.27±0.02	1.91±0.07
无机氮 Inorganic nitrogen/(μg/L)	范围 Range	118.00~124.46	42.96~77.26	96.80~126.72
	平均值 Mean	120.56±2.61	61.59±11.03	109.08±9.09
磷酸盐 Phosphate/(μg/L)	范围 Range	1.90~4.62	2.91~16.95	11.80~24.38
	平均值 Mean	3.07±1.07	9.41±4.63	15.56±3.95
N/P	范围 Range	25.67~64.03	3.37~24.08	4.58~8.97
	平均值 Mean	44.19±14.40	9.30±6.70	7.34±1.42
富营养化指数 $E_i$	范围 Range	0.03~0.10	0.03~0.18	0.18~0.50
	平均值 Mean	0.06±0.03	0.10±0.05	0.33±0.11

含量存在一定程度上的联系。

**2.2.2 浮游动物** 研究区浮游动物平均丰度呈显著下降趋势,范围为(55.00±12.52)~(5 665.71±4 576.32) ind./m<sup>3</sup> (图 4a),在春季平均丰度最高,秋季平均丰度最低。生物量表现出与丰度相似的变化趋势,春季和夏季的平均生物量 [(431.55±298.80) mg/m<sup>3</sup> 和 [(378.33±116.78) mg/m<sup>3</sup>] 相对较高(图 4b)。值得注意的是,浮游动物丰度与生物量之间具有显著的相关性( $R^2=0.58$ ,  $P<0.01$ ; 图 4c),说明该区域浮游动物的生物量可以作为丰度的间接指标。

### 2.3 浮游生物群落组成及优势种

**2.3.1 浮游植物** 流清河湾 2021 年度 3 个航次共鉴定出浮游植物 3 门 94 种,硅藻门(Bacillariophyta)

群落结构最为多样,共鉴定出 80 种,其次是甲藻门(Dinoflagellata, 13 种)和金藻门(Chrysophyta, 1 种)。3 个航次中鉴定的金藻门浮游植物为同一种。2021 年春季航次共鉴定出浮游植物 3 门 44 种;夏季航次浮游植物群落组成最为丰富,共鉴定出 3 门 58 种;而秋季航次鉴定出浮游植物 3 门 55 种(表 2)。此外,3 个航次采样结果显示虽硅藻门均占比最高(> 80%),但处于显著优势地位的浮游植物物种各不相同(图 5)。

本研究中浮游植物选取优势度( $Y \geq 0.02$ )的物种作为优势种(表 3)。2021 年春季航次优势种共 8 个,分别是角毛藻(*Chaetoceros* sp.)、奇异棍形藻(*Bacillaria paradoxa*)、薄壁几内亚藻(*Guinardia flaccida*)、新月菱形藻(*Nitzschia closterium*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、舟形藻(*Navicula* sp.)、

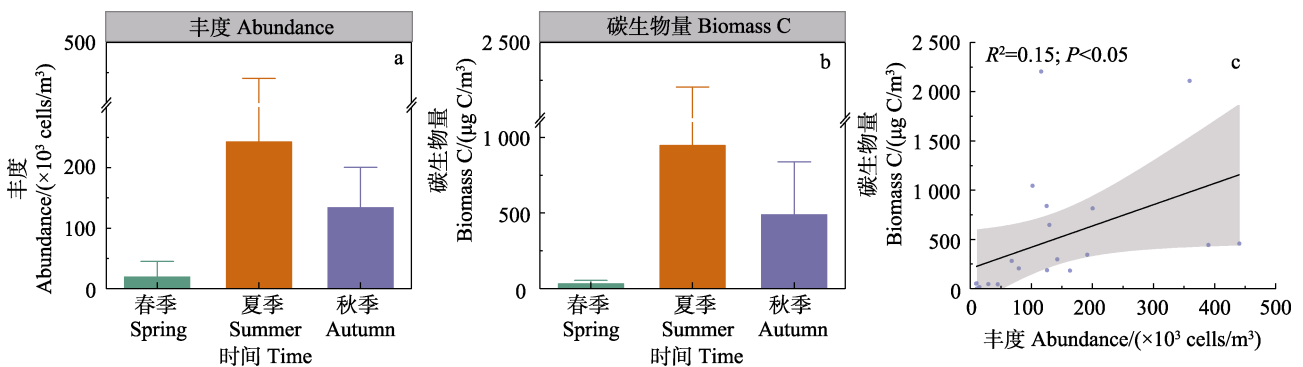


图 3 2021 年流清河湾浮游植物生物参数

Fig.3 Phytoplankton biological parameters in Liuqinghe Bay in 2021

- (a) 浮游植物平均丰度的季节变化; (b) 浮游植物平均碳生物量的季节变化; (c) 浮游植物丰度与碳生物量的线性关系。  
(a) Seasonal changes in mean phytoplankton abundance; (b) Seasonal changes in mean carbon biomass of phytoplankton;  
(c) Linear relationship between phytoplankton abundance and carbon biomass.

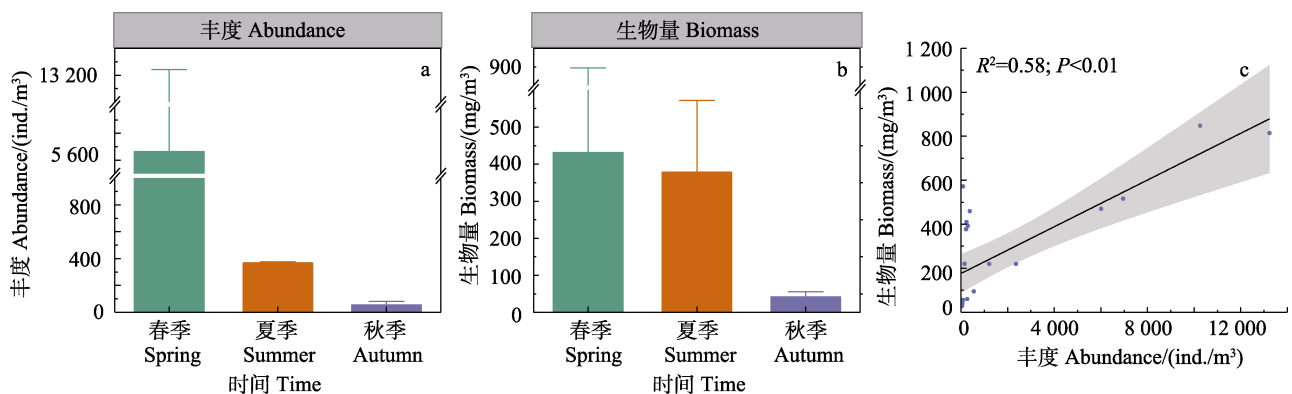


图 4 2021 年流清河湾浮游动物生物参数

Fig.4 Zooplankton biological parameters in Liuqinghe Bay in 2021

- (a) 浮游动物平均丰度的季节变化; (b) 浮游动物平均生物量的季节变化; (c) 浮游动物丰度与生物量的线性关系。  
(a) Seasonal changes in mean zooplankton abundance; (b) Seasonal changes in mean zooplankton biomass;  
(c) Linear relationship between zooplankton abundance and biomass.

表 2 2021 年流清河湾浮游植物群落组成  
Tab.2 Phytoplankton community composition in Liuqinghe Bay in 2021

物种 Species	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn	
	物种数目 Species number	占比/% Proportion	物种数目 Species number	占比/% Proportion	物种数目 Species number	占比/% Proportion
硅藻门 Bacillariophyta	38	86.4	51	87.9	48	87.3
甲藻门 Pyrrophyta	5	11.3	6	10.4	6	10.9
金藻门 Chrysophyta	1	2.3	1	1.7	1	1.8
物种总数 Total species	44		58		55	

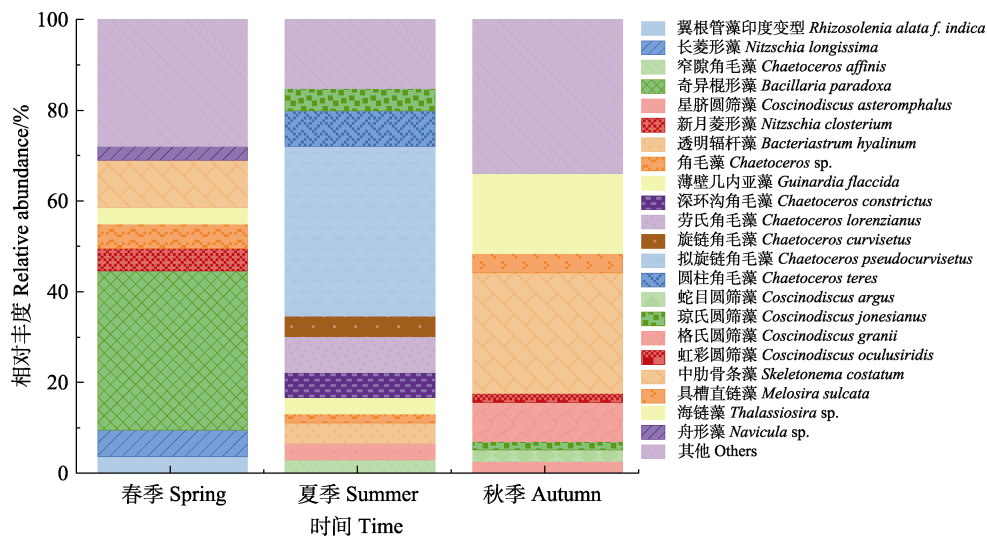


图 5 2021 年流清河湾各季节浮游植物优势物种的相对丰度

Fig.5 Relative abundance of dominant phytoplankton species by season in Liuqinghe Bay in 2021

长菱形藻(*Nitzschia longissima*)、翼根管藻印度变型(*Rhizosolenia alata f. indica*); 2021 年夏季航次优势种共计 11 种, 分别是角毛藻、星脐圆筛藻(*Coscinodiscus asteromphalus*)、薄壁几内亚藻、透明辐杆藻(*Bacteriastrium hyalinum*)、窄隙角毛藻(*Chaetoceros affinis*)、深环沟角毛藻(*Chaetoceros constrictus*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、劳氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)、拟旋链角毛藻(*Chaetoceros pseudocurvisetus*)、圆柱角毛藻(*Chaetoceros teres*)、琼氏圆筛藻(*Coscinodiscus jonesianus*); 2021 年秋季航次优势种共 8 种, 其分别为星脐圆筛藻、中肋骨条藻、蛇目圆筛藻(*Coscinodiscus argus*)、格氏圆筛藻(*Coscinodiscus granii*)、具槽直链藻(*Melosira sulcata*)、琼氏圆筛藻、虹彩圆筛藻(*Coscinodiscus oculusiridis*)、海链藻(*Thalassiosira sp.*)。其中, 春季航次奇异棍形藻为第一优势种( $Y > 0.20$ ; 总丰度为  $47.6 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$ ); 而

夏季时角毛藻属开始占据优势地位( $Y > 0.50$ ), 第一优势种是拟旋链角毛藻( $Y > 0.30$ ; 总丰度为  $635 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$ ); 秋季航次中第一优势种则变为中肋骨条藻( $Y > 0.30$ ; 总丰度为  $249.5 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$ )。在本研究中, 2021 年度各季节第一优势种各不相同, 但优势种存在部分重合(图 5), 说明流清河湾海域种间竞争明显, 且容易受到外在与内部因素的影响。

**2.3.2 浮游动物** 2021 年流清河湾在春、夏、秋三季中共鉴定出浮游动物 10 类 48 种, 桡足类(Copepods)最多(15 种), 其次是浮游幼虫和水螅水母类(Planktonic larvae、Hydrozoa, 各 11 种), 被囊类(Tunicata, 3 种), 毛颚类和枝角类(Chaetognatha、Cladocera, 各 2 种), 水母类(Scyphozoa)、端足类(Amphipoda)、糠虾类(Mysida)和磷虾类(Euphausiacea)均为 1 种。其中春季航次共鉴定出浮游动物 5 个类群 14 种; 夏季航次共鉴定出 7 个类群 28 种; 秋季航次共鉴定出 8 个类群 25 种(表 4)。

表3 2021年流清河湾优势浮游植物  
Tab.3 Phytoplankton dominant species in Liuqinghe Bay in 2021

优势物种 Dominant species	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn	
	x	Y	x	Y	x	Y
角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.	7.3	0.02	32.9	0.02	—	—
奇异棍形藻 <i>Bacillaria paradoxa</i>	47.6	0.23	—	—	—	—
星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	—	—	60	0.04	23.7	0.03
薄壁几内亚藻 <i>Guinardia flaccida</i>	4.75	0.03	62.1	0.03	—	—
新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i>	6.8	0.04	6.3	<0.02	—	—
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	14.3	0.09	—	—	249.5	0.32
透明辐杆藻 <i>Bacteriastrium hyalinum</i>	—	—	77.9	0.05	—	—
窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	—	—	50	0.03	5.4	<0.02
深环沟角毛藻 <i>Chaetoceros constrictus</i>	—	—	93.3	0.04	—	—
旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	—	—	76.7	0.05	8.3	<0.02
劳氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	—	—	135	0.07	11.7	<0.02
拟旋链角毛藻 <i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>	—	—	635	0.35	8.3	<0.02
圆柱角毛藻 <i>Chaetoceros teres</i>	—	—	132.5	0.07	—	—
蛇目圆筛藻 <i>Coscinodiscus argus</i>	—	—	—	—	24.1	0.03
舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	4.1	0.03	—	—	—	—
长菱形藻 <i>Nitzschia longissima</i>	8	0.03	—	—	—	—
格氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus granii</i>	—	—	—	—	81.3	0.11
翼根管藻印度变型 <i>Rhizosolenia alata f. indica</i>	4.9	0.03	—	—	—	—
具槽直链藻 <i>Melosira sulcata</i>	—	—	—	—	40	0.03
琼氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus jonesianus</i>	—	—	83.3	0.06	17.1	0.02
虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculusiridis</i>	—	—	20	<0.02	17.9	0.02
海链藻 <i>Thalassiosira</i> sp.	—	—	3.3	<0.02	164.6	0.21

注: x: 总丰度,  $10^3$  cells/m<sup>3</sup>; Y: 优势指数; “—”表示该物种未发现。下同。

Note: x: Total abundance,  $10^3$  cells/m<sup>3</sup>; Y: Dominant index; —: Species not found. The same below.

表4 2021年流清河湾浮游动物群落组成  
Tab.4 Zooplankton community composition in Liuqinghe Bay in 2021

物种 Species	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn	
	物种数目 Species number	占比/% Proportion	物种数目 Species number	占比/% Proportion	物种数目 Species number	占比/% Proportion
水母类 Jellyfish	1	7.1	—	—	—	—
被囊类 Tunicates	1	7.1	2	7.1	1	4.0
端足类 Amphipoda	—	—	1	3.6	1	4.0
浮游幼体 Pelagic larvae	4	28.7	8	28.7	3	12.0
糠虾类 Mysidacea	—	—	—	—	1	4.0
磷虾类 Euphausia	—	—	—	—	1	4.0
毛颚类 Chaetognaths	1	7.1	2	7.1	2	8.0
桡足类 Copepods	7	50	10	35.7	8	32.0
水螅水母类 Hydroidomedusa	—	—	3	10.7	8	32.0
枝角类 Cladocerans	—	—	2	7.1	—	—
物种总数 Total species	14		28		25	

总体来看, 各季节航次采集样品中桡足类和浮游幼虫出现频率最高, 但随着时间推移, 水螅水母类出现频率逐渐增高。

本研究中选取了优势度指数( $Y$ ) $\geq 0.02$  的浮游动物物种作为优势种(表 5)。2021 年春季航次优势种只有 2 种, 分别是腹针胸刺水蚤(*Centropages abdominalis*)和夜光虫(*Noctiluca miliaris*)[也称为夜光藻(*Noctiluca scintillans*)]; 2021 年夏季航次优势种共 5 种, 分别为强壮箭虫(*Sagitta crassa*)、背针胸刺水蚤(*Centropages dorsispinatus*)、圆唇角水蚤(*Labidocera rotunda*)、强额孔雀水蚤(*Parvocalanus crassirostris*)、鸟喙尖头蚤(*Penilia avirostris*); 2021 年秋季航次优势种共 5 种, 分别为强壮箭虫、肥胖箭虫(*Sagitta enflata*)、长尾类幼体 (*Macrura larvae*)、太平洋纺锤水蚤(*Acartia pacifica*)、微刺哲水蚤(*Canthocalanus pauper*)。2021 年流清河湾 3 个航次的数据结果显示, 浮游动物优势种差异较大(图 6), 夜光虫虽只出现在春季, 但处在绝对优势地位( $Y > 0.98$ ; 总丰度为 38 812.5 个/ $m^3$ ), 夏、

秋季航次浮游动物的第一优势种在其他季节中同样罕见, 可能的原因是流清河湾水文参数季节性差异较大及优势浮游动物对环境改变具有较弱的耐受性。

### 2.4 浮游生物群落多样性特征

2021 年流清河湾浮游生物的多样性指数在 3 个不同季节和不同站位间的变化见图 7。其中浮游植物多样性指数在 3 个季节间差异较大, 并且不同站位之间存在显著差异。浮游植物平均均匀度指数在各季节中尤其春、夏季差异并不显著, 但不同站位之间的均匀度指数波动幅度较大。总的来看, 浮游植物生物多样性在夏季最为丰富, 春季比较单一; 而均匀度指数在春、夏季分布相对均匀, 秋季较为分散。

浮游动物在多样性指数与均匀度指数分布上表现出极为相似的趋势, 夏、秋季浮游动物多样性及均匀度指数普遍高于春季(图 7c、d), 并且夏、秋季的多样性指数波动相较于春季同样强烈。总体趋势上由高到低依次为夏季、秋季、春季。

表 5 2021 年流清河湾优势浮游动物种群的组成

Tab.5 Composition of dominant zooplankton populations in Liuqinghe Bay in 2021

优势物种 Dominant species	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn	
	$x$	$Y$	$x$	$Y$	$x$	$Y$
强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i>	10.83	<0.02	245.83	0.10	105.00	0.27
肥胖箭虫 <i>Sagitta enflata</i>	-	-	10.00	<0.02	16.67	0.02
长尾类幼体 <i>Macrura larvae</i>	-	-	51.67	<0.02	28.33	0.07
太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	-	-	10.83	<0.02	150.00	0.39
腹针胸刺水蚤 <i>Centropages abdominalis</i>	751.67	0.02	-	-	-	-
背针胸刺水蚤 <i>Centropages dorsispinatus</i>	-	-	610.83	0.24	4.17	<0.02
圆唇角水蚤 <i>Labidocera rotunda</i>	-	-	1093.3	0.42	-	-
强额孔雀水蚤 <i>Parvocalanus crassirostris</i>	-	-	163.33	0.05	-	-
微刺哲水蚤 <i>Canthocalanus pauper</i>	-	-	-	-	18.33	0.03
鸟喙尖头蚤 <i>Penilia avirostris</i>	-	-	85.83	0.02	-	-
夜光虫 <i>Noctiluca miliaris</i>	38812.5	0.98	-	-	-	-

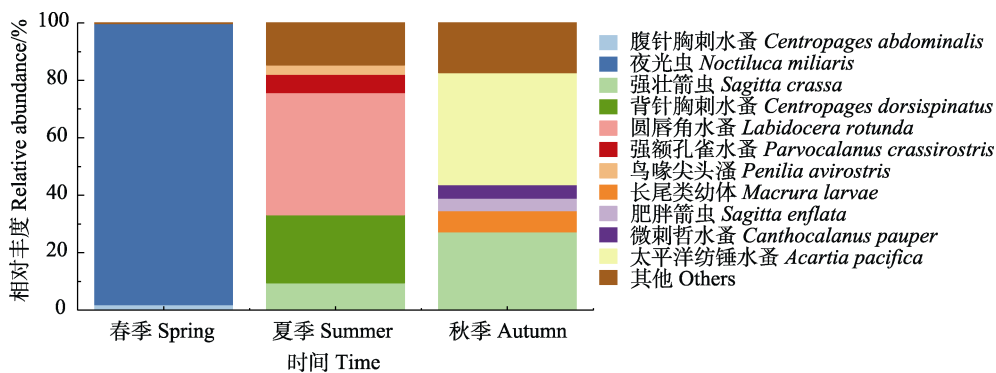


图 6 2021 年流清河湾各季节浮游动物优势物种的相对丰度

Fig.6 Relative abundance of dominant zooplankton species by season in Liuqinghe Bay in 2021



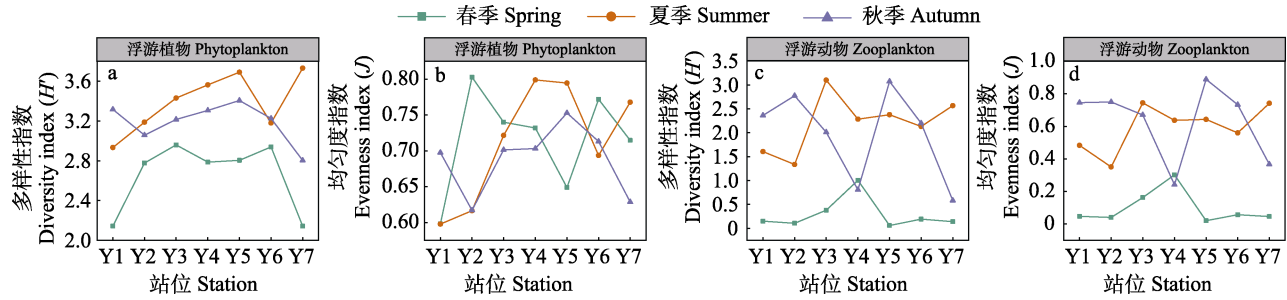


图 7 2021 年流清河湾各季节浮游生物多样性指数( $H'$ )和均匀度指数( $J$ )的变化

Fig.7 Changes in zooplankton diversity index ( $H'$ ) and evenness index ( $J$ ) by season in Liuqinghe Bay, 2021

## 2.5 浮游生物与环境因子相关性分析

**2.5.1 浮游植物** 冗余分析(RDA)解析了流清河湾浮游生物群落结构与环境变量的关联性,证实营养盐与温度等共同主导了优势种的演替格局(图 8)。RDA 分析结果显示,2021 年春季盐度对浮游植物优势物种奇异棍形藻起主要抑制作用(图 8a);而夏季,主要优势物种则与温度和 pH 呈正相关(图 8b),说明拟旋链角毛藻相较于其他浮游植物可能更耐受高温;在秋季,Chl  $a$  含量与主要优势物种中肋骨条藻呈显著负相关(图 8c),这与春季 RDA 分析结果相同。温度在 2021 年度调查中对浮游植物并未表现出一致的影响规律,主要原因是不同季节间温度差异较大,并且各季节主要优势物种不同。此外,RDA 营养盐浓度分析结果显示,在春季调查中 DIP 对优势浮游植物起主要限制作用,呈较显著的负相关关系(图 8a);夏秋季调查期间,DIN 则成为主要限制因素(图 8b、c)。

通过 Pearson 相关性分析,揭示了环境变量与浮游生物丰度、生物量及多样性之间的潜在联系(图 9)。在整个年度航次数据结果分析中,pH 与浮游植物丰度均呈正相关,尤其是在夏季呈极显著正相关( $P<0.01$ )(图 9b)。夏季期间,温度与浮游植物群落各指标均呈正相关。但在春秋季节则普遍呈负相关,特别是与秋季浮游植物群落多样性指数呈显著负相关( $P<0.05$ )(图 9c),这说明流清河湾主要浮游植物的最适生存温度在 24 °C 左右。此外,根据 2021 年夏季航次所得数据可知,浮游植物碳生物量与 COD 表现出显著正相关( $P<0.05$ ),多样性指数和均匀度指数与 DIN 呈显著负相关( $P<0.05$ )(图 9b)。除此之外,2021 年夏季 DIN 与优势浮游植物丰度呈正相关,但却与多样性指数和均匀度指数表现出显著负相关( $P<0.05$ )(图 9b)。

**2.5.2 浮游动物** RDA 分析结果显示,在流清河湾 3 次调查中主要优势浮游动物均与温度呈正相关(图 8d、e、f),但各季节之间温度相差较大,说明各优势物种的适宜生长温度不同。夜光虫作为春季浮游

动物的主要优势种,与 Chl  $a$  含量呈显著正相关(图 8d),但在夏、秋季节,Chl  $a$  与优势浮游动物呈负相关(图 8e、f)。pH 与春、夏季优势浮游动物一般无显著相关关系或呈一定程度的负相关关系(图 8d、e),而秋季航次调查结果显示,pH 与主要优势浮游动物太平洋纺锤水蚤呈显著负相关关系,却与第二优势种强壮箭虫呈显著正相关关系(图 8f)。同时,与浮游植物的 RDA 分析结果相似,浮游动物丰度与营养盐浓度相关关系显著,但各季节不同(图 8e、f),这意味着浮游动物丰度动态变化取决于限制营养元素的绝对浓度,而哪种营养元素是限制性的,则取决于环境中的 N/P 比。

Pearson 相关性分析结果显示,流清河湾春季优势浮游动物丰度和生物量与 Chl  $a$  呈极显著正相关( $P<0.01$ )(图 9d),但夏、秋季优势浮游动物丰度和生物量却普遍与 Chl  $a$  呈负相关关系,尤其是秋季(图 9f)( $P<0.05$ )。值得注意的一点是,与浮游植物 Pearson 分析结果相同,优势浮游动物均匀度指数在夏季时都与 DIN 呈显著负相关(图 9e)( $P<0.05$ ),表明 DIN 是某些优势种的限制因素,DIN 含量增加会导致某优势种数量显著增加。

## 3 讨论

浮游生物群落结构的变化受温度、盐度、营养物质、陆地径流、水团、洋流及气象等多种因素的影响,是多环境因子共同作用的结果。在传统认知上,温度、盐度及水文效应等自然变量被认为是浮游生物群落结构变化的主要决定因素(Hays *et al*, 2005; Riandey *et al*, 2005; Drira *et al*, 2014)。然而,在类似流清河湾这样的河口生态系统中,复杂多变的环境特征可能会导致营养物质浓度成为更加关键的影响因素。在全球气候变化的背景下,受人类活动的影响所导致的海洋变暖和富营养化是全球大多数沿海河口生态系统的主要变化压力源(Levitus *et al*, 2000; Smith *et al*, 2009;

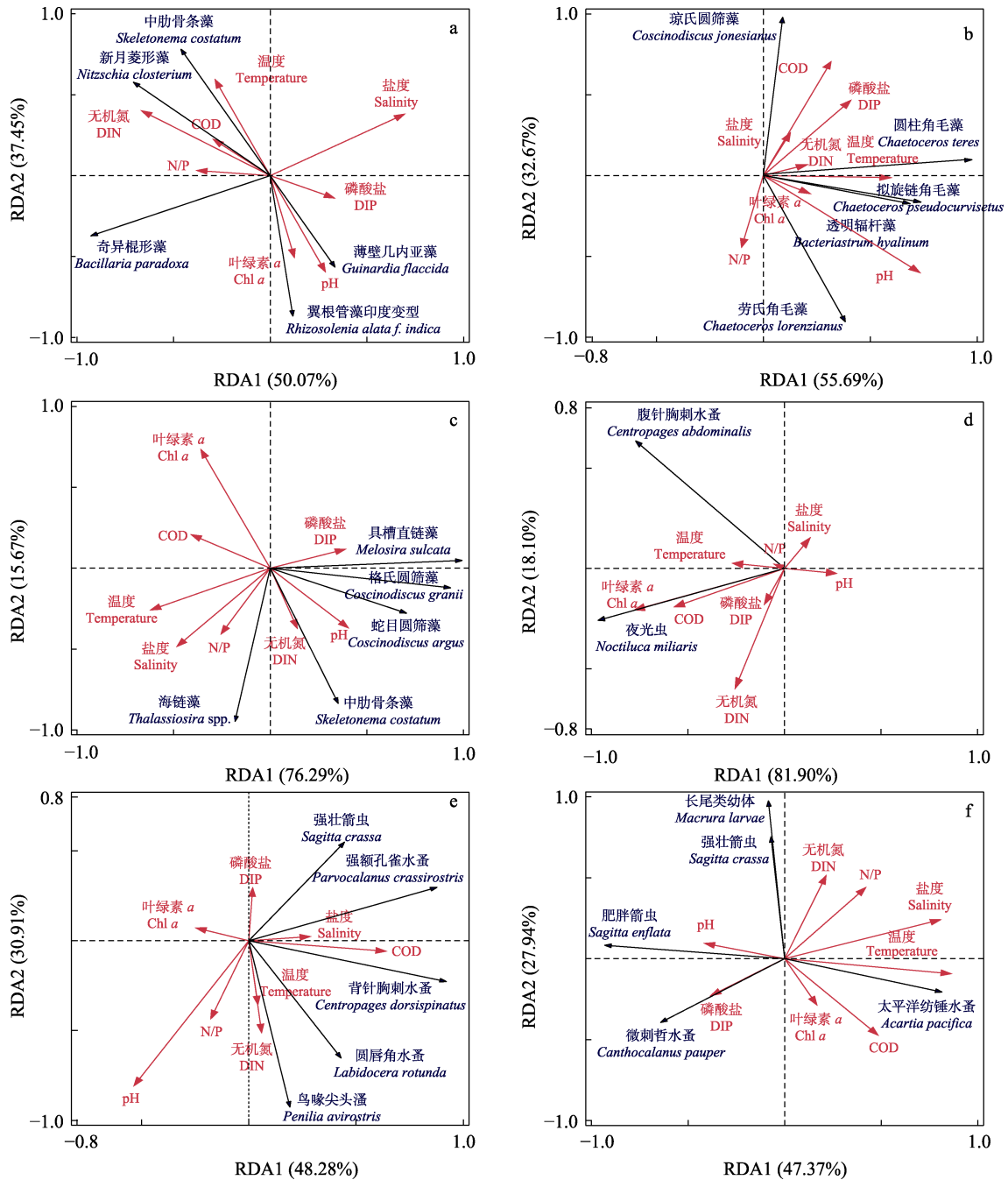


图 8 2021 年各季节流清河湾浮游生物优势种(只取前五优势种)与环境变量的冗余度分析(RDA)

Fig.8 Redundancy analysis (RDA) of zooplankton dominant species (only the top five dominant species) with environmental variables by season in the Liuqinghe Bay in 2021

- a: 浮游植物春季; b: 浮游植物夏季; c: 浮游植物秋季; d: 浮游动物春季; e: 浮游动物夏季; f: 浮游动物秋季。
- a: Phytoplankton in spring; b: Phytoplankton in summer; c: Phytoplankton in autumn;
- d: Zooplankton in spring; e: Zooplankton in summer; f: Zooplankton in autumn.

Freeman *et al.*, 2019)。但相较于其他河口海湾如靖海湾(陈学杨等, 2024), 在 2021 年度调查航次中发现流清河湾海域水质状况良好, 陆地径流主要来自凉水河与大河交汇输入流清河湾, 人类活动产生的污染物排放较低, 人为干扰因素较少。因此, 分析流清河湾中

水文环境参数与浮游生物群落之间的交互作用的结果更加清晰和具有说服力。

本研究显示, 调查期间流清河湾  $E_i$  均低于 0.5 (表 1), 河口生态系统水质相对良好。春季航次采样结果显示, 浮游植物群落多样性指数较低, 共鉴定出

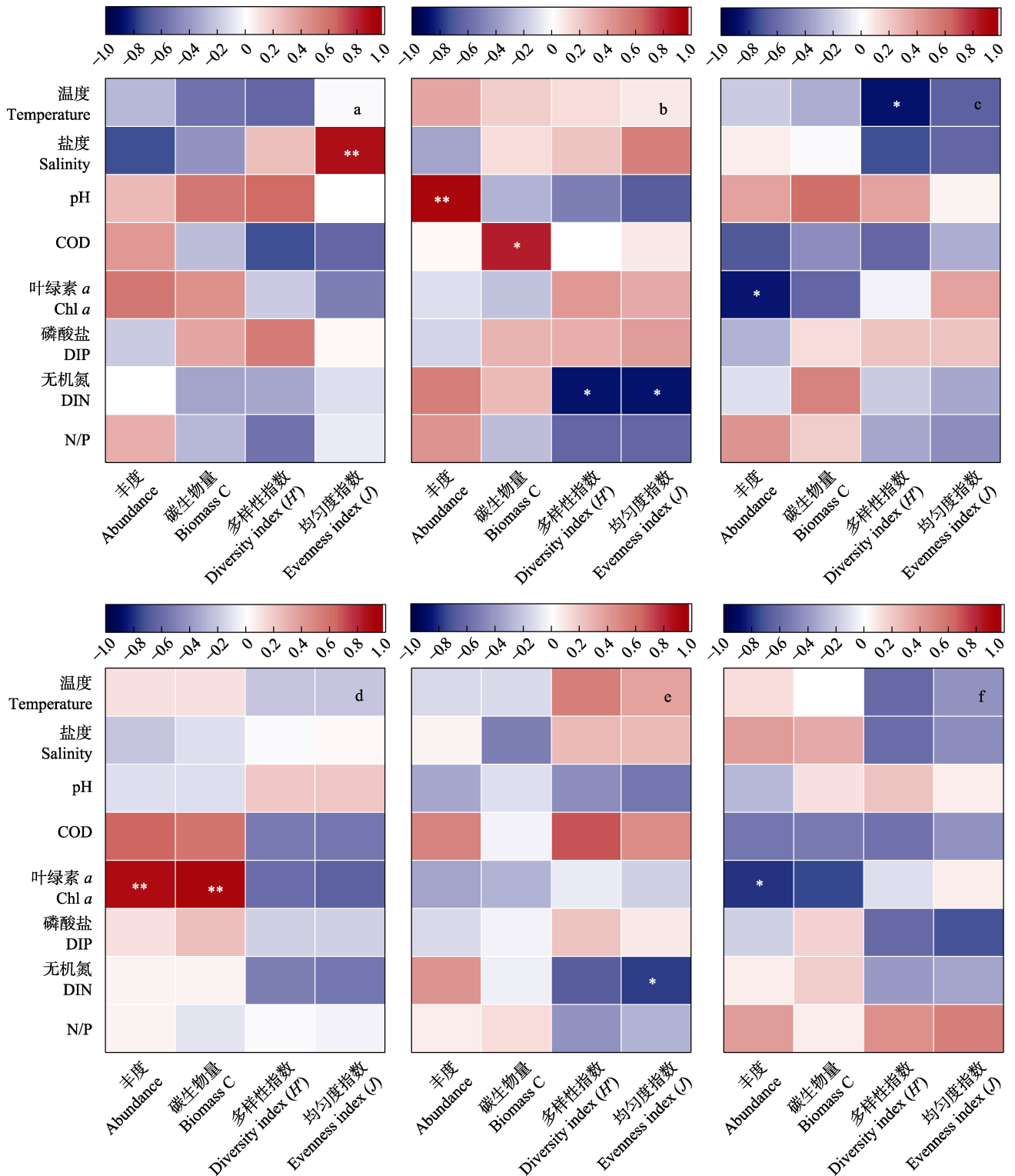


图 9 流清河湾浮游生物丰度、生物量、多样性指数和均匀度指数与环境变量之间的 Pearson 相关性分析

Fig. 9 Pearson correlation analysis between zooplankton abundance, biomass, Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ) and Pielou's evenness index ( $J$ ) and environmental variables in Liuinghe Bay

a: 浮游植物春季; b: 浮游植物夏季; c: 浮游植物秋季; d: 浮游动物春季;  
e: 浮游动物夏季; f: 浮游动物秋季。

a: Phytoplankton in spring; b: Phytoplankton in summer; c: Phytoplankton in autumn;  
d: Zooplankton in spring; e: Zooplankton in summer; f: Zooplankton in autumn.

44 种浮游植物(表 2), 且春季浮游植物的丰度及碳生物量远远低于夏秋季(图 3a、b); 浮游动物的群落组成在春季相对单一, 共采集到 14 种(表 4), 但浮游动物丰度和生物量在 3 个季节中达到最高水平(图 4a、b)。春季流清河湾的营养限制因子主要是 DIP, 同时伴随着较低的温度和较高的盐度与 pH。本研究中, 夜光虫作为春季浮游动物的绝对优势种( $Y>0.95$ ), 是青岛赤潮的主要组成物种之一, 且多为异养型生物, 主要以浮游植物和细菌等为食(Zhang *et al*, 2020)。从营养及环境因素方向考虑, DIN、DIP 等营养盐浓度不会直接影响夜光虫的生长繁殖(付仲等, 2015), 但可以通过提高浮游植物的丰度, 以提供丰富饵料藻的方式对夜光虫产生滞后、间接的影响, 这也与 RDA 和 Pearson 相关分析的结果相一致(图 8d、图 9d)。此外, 值得注意的是, 夜光虫赤潮多出现在海水温度较低的季节, 并且伴随较高浓度的 DIN 和 DIP, 并且赤潮海域 COD 浓度显著高于非赤潮海域。然而, 根据 2021 年春季航次所采集的数据来看, 流清河湾海域 DIP 及 COD 浓度较低(图 2d、f), 并未表现出异常值。并且, 夜光虫丰度( $38\ 812.5$  个/ $m^3$ )尚未达到赤潮基准浓度(徐金涛等, 2024)。与孙雪梅等(2013)对流清河湾的采集数据进行比较发现, 2012 年 5 月流清河湾 DIP 含量显著高于 2021 年春季(3 月), 同时发生了夜光虫赤潮。因此, 认为夜光虫是受到沿岸流及潮汐作用而漂移到流清河湾并生长繁殖, 快速消耗水体中营养物质并捕食浮游植物, 这是本研究中流清河湾春季浮游生物物种多样性较低及 Chl *a* 含量剧烈波动的原因(图 2e、图 7)。综上所述, 流清河湾春季存在发生夜光虫赤潮的风险, 关键取决于 DIP 能否得到快速的补充。

随着温度的升高, 流清河湾夏季浮游生物的多样性指数普遍高于春秋两季(图 7a、c), 且丰度及生物量处于较高水平(图 3a、b, 图 4a、b)。相对应地, 流清河湾水体中具有较高含量的 Chl *a*, 但营养盐浓度偏低(图 2e、f、g)。此前的研究表明, 夜光虫难以在高温条件下生存(曹新宇等, 2021), 这与在夏秋季航次中并未观察到夜光虫的情况相吻合。相较于正常浮游生物 DIN 和 DIP 吸收比例 16 : 1, 表现为 DIN 限制(Redfield, 1958), 这与 Pearson 相关分析结果一致(图 9b、e)。与往年相同季节流清河湾数据相比, 2021 年夏季流清河湾浮游植物多样性[3.38 (2021 年 8 月) $>$ 2.87 (2012 年 8 月)]及丰度[( $242.50\pm 136.40$ ) $\times 10^3$  cells/ $m^3$  (2021 年 8 月) $>$ 194.27 $\times 10^3$  cells/ $m^3$  (2012 年 8 月)]较高, 但 DIN 和 DIP 等营养元素水平较低(孙雪梅等, 2013),

可能的原因是浮游生物快速增长大量消耗了营养物质, 这与 Pearson 相关分析结果一致(图 9b)。根据表 2、表 4 和图 7 可知, 夏季浮游生物多样性及物种检测数量均居高不下, 浮游植物以硅藻为主, 浮游动物以桡足类为主, 与先前研究结果相吻合(Bopp *et al*, 2005; Chang *et al*, 2010; Liu *et al*, 2012)。当 DIN 含量过低时, 又会反过来对拟旋角毛藻等硅藻的生长繁殖起抑制作用(Flanjak *et al*, 2022), 进而间接影响浮游动物群落多样性, 导致浮游生物群落多样性的下降(图 9b、e)。因此, 认为影响流清河湾夏季浮游生物群落结构和丰度变化的主要环境因素是温度和 DIN。

流清河湾秋季航次采样数据显示, 流清河湾水域营养物质主要表现为 DIN 限制(图 2h), 温盐相对较低(图 2a、b)。中肋骨条藻和海链藻是浮游植物的主要优势种(图 5), 而太平洋纺锤水蚤和强壮箭虫在浮游动物优势种丰度中占据了很大比例(60%, 图 6)。中肋骨条藻广泛分布于我国黄渤海海域, 也是我国常见的赤潮藻种之一(霍文毅等, 2001)。太平洋纺锤水蚤是一种较为常见的海洋桡足类生物, 强壮箭虫则是一种温暖带近岸低盐表层种(杜飞雁等, 2003)。根据《中国海洋灾害公报》2021 年的数据显示, 在 9 月下旬, 山东半岛沿海曾经历过一次较强的温带风暴潮, 最大风暴增水超过 100 cm。因此, 认为在流清河湾秋季中出现的优势海洋种可能是由气象灾害引起的海水入侵和倒灌带来的海洋入侵种。此外, 已有研究表明, 中肋骨条藻对氮吸收能力较强, 所受 DIN 限制(图 2h)影响较小(李铁等, 2000a、b), 这与 RDA 结果一致(图 8c), 但氮元素的相对缺乏会抑制藻类 Chl *a* 合成(黄晓航等, 1997), 这是本研究中 Chl *a* 与浮游植物丰度及生物量呈负相关的原因(图 9c)。此外, 中肋骨条藻最适增殖盐度范围为 20~30 (霍文毅等, 2001), 相较于其他季节, 较低的盐度(图 2b)使中肋骨条藻可以快速适应流清河湾环境。然而, 高亚辉等(1999)研究发现, 太平洋纺锤水蚤的摄食率随温度(10~25 °C)升高而增加(图 8f), 并且相对偏好摄食骨条藻, 这为太平洋纺锤水蚤占据优势地位提供了物质及环境基础。强壮箭虫在盐度大于 32 的外海数量相对较低, 并且在山东半岛黄海沿岸一般在秋季丰度达到最高(李云等, 2009), 属于流清河湾本土优势物种。因此, 在海水入侵物种中的中肋骨条藻和太平洋纺锤水蚤更适应流清河湾环境, 并且太平洋纺锤水蚤对中肋骨条藻起到一定程度的抑制作用, 而本土优势种强壮箭虫又与太平洋纺锤水蚤相互竞争, 保证了流清河湾河口生态系统的相对稳定。

## 4 结论

本研究中流清河湾春秋季节优势浮游生物大多为赤潮藻种,但并未形成赤潮。推测原因可能是赤潮藻种因洋流及气象因素的影响而漂流进入研究区域,逐渐适应流清河湾环境并生长繁殖成为优势种,但并未达到形成赤潮的标准。随着营养物质浓度及 N/P 比的变化,各季节优势生物也发生改变。综合数据表明,春夏季优势种的限制因素主要是温度和营养物质浓度,秋季优势种主要限制因素是温度、盐度及营养盐。通过以上研究发现,在水质条件良好的情况下,洋流、气象灾害、温度及自身海域营养物质浓度变化等对流清河这一典型半封闭海湾及河口海域的浮游生态系统具有较大影响。

## 参 考 文 献

- ALCARAZ M, SAIZ E, CALBET A, *et al.* Estimating zooplankton biomass through image analysis. *Marine Biology*, 2003, 143: 307–315
- BARTON A D, DUTKIEWICZ S, FLIERL G, *et al.* Patterns of diversity in marine phytoplankton. *Science*, 2010, 327(5972): 1509–1511
- BARTON A D, PERSHING A J, LITCHMAN E, *et al.* The biogeography of marine plankton traits. *Ecology Letters*, 2013, 16(4): 522–534
- BEAUGRAND G, BRANDER K M, ALISTAIR LINDLEY J, *et al.* Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature*, 2003, 426(6967): 661–664
- BOPP L, AUMONT O, CADULE P, *et al.* Response of diatoms distribution to global warming and potential implications: A global model study. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(19): L19606
- BRUN P, STAMIESZKIN K, VISSER A W, *et al.* Climate change has altered zooplankton-fuelled carbon export in the North Atlantic. *Nature Ecology and Evolution*, 2019, 3(3): 416–423
- CAO X Y, LI Y M, WANG W, *et al.* Effects of temperature and salinity on increase in population density of alga *Noctiluca scintillans*. *Journal of Dalian Ocean University*, 2021, 36(1): 95–102 [曹新宇, 李远眉, 王伟, 等. 温度和盐度对夜光藻种群密度增长的影响. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(1): 95–102]
- CHANG W B, DAHMS H U, TSENG L C. Copepods assemblages in an embayment of Taiwan during monsoonal transitions. *Zoological Studies*, 2010, 49(6): 735–748
- CHEN X Y, DING D S, CUI Z G, *et al.* Changes and influencing factors of the zooplankton community in the eutrophic waters of Jinghai Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, 45(2): 14–27 [陈学杨, 丁东生, 崔正国, 等. 靖海湾富营
- 养化海域浮游动物群落变化及其影响因素. *渔业科学进展*, 2024, 45(2): 14–27]
- CHENG J S, QIU S Y, LI P J. Ecological environment and biological communities in the nearshore waters of the Yellow Bohai Sea. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 2004, 209–244 [程济生, 邱盛尧, 李培军. 黄渤海近岸水域生态环境与生物群落. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2004, 209–244]
- CLOERN J E, FOSTER S Q, KLECKNER A E. Phytoplankton primary production in the world's estuarine-coastal ecosystems. *Biogeosciences*, 2014, 11(9): 2477–2501
- CROUCH S R, MALMSTADT H V. Mechanistic investigation of molybdenum blue method for determination of phosphate. *Analytical Chemistry*, 1967, 39(10): 1084–1089
- DELONG E F, KARL D M. Genomic perspectives in microbial oceanography. *Nature*, 2005, 437(7057): 336–342
- DRIRA Z, BEL HASSEN M, AYADI H, *et al.* What factors drive copepod community distribution in the Gulf of Gabes, Eastern Mediterranean Sea? *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21: 2918–2934
- DU F Y, LI C H, JIA X P, *et al.* The situation and development trend of the study on Chaetognatha in China. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2003, 12(1): 65–71 [杜飞雁, 李纯厚, 贾晓平. 我国毛颚类的研究状况与展望. *上海水产大学学报*, 2003, 12(1): 65–71]
- ELLIOTT M, MCLUSKY D S. The need for definitions in understanding estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 55(6): 815–827
- ELLIOTT M, QUINTINO V. The estuarine quality paradox, environmental homeostasis and the difficulty of detecting anthropogenic stress in naturally stressed areas. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54(6): 640–645
- FLANJAK L, VRANA I, CVITEŠIĆ KUŠAN A, *et al.* Effects of high temperature and nitrogen availability on the growth and composition of the marine diatom *Chaetoceros pseudocurvisetus*. *Journal of Experimental Botany*, 2022, 73(12): 4250–4265
- FREEMAN L A, CORBETT D R, FITZGERALD A M, *et al.* Impacts of urbanization and development on estuarine ecosystems and water quality. *Estuaries and Coasts*, 2019, 42: 1821–1838
- FU Z, HOU Y B, XI Y J, *et al.* Study on the relationship between population density of *Noctiluca scintillans* and environmental factors in the coastal waters of Qinhuangdao. *Hebei Fisheries*, 2015(10): 31–35 [付仲, 侯雁彬, 郝艳娟, 等. 秦皇岛海域夜光藻种群密度与环境因子的关系. *河北渔业*, 2015(10): 31–35]
- GAO Y H, LIN B. Effects of some factors on feeding rates of *Acartia pacifica*. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1999, 38(5): 751–757 [高亚辉, 林波. 几种因素对太平洋纺锤水蚤摄食率的影响. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1999, 38(5): 751–757]
- GONG W, PAERL H, MARCHETTI A. Eukaryotic phytoplankton community spatiotemporal dynamics as identified through

- gene expression within a eutrophic estuary. *Environmental Microbiology*, 2018, 20(3): 1095–1111
- HAYS G C, RICHARDSON A J, ROBINSON C. Climate change and marine plankton. *Trends in ecology and evolution*, 2005, 20(6): 337–344
- HINDER S L, HAYS G C, EDWARDS M, *et al.* Changes in marine dinoflagellate and diatom abundance under climate change. *Nature Climate Change*, 2012, 2(4): 271–275
- HOUNSHELL A G, PEIERLS B L, OSBURN C L, *et al.* Stimulation of phytoplankton production by anthropogenic dissolved organic nitrogen in a coastal plain estuary. *Environmental Science and Technology*, 2017, 51(22): 13104–13112
- HUANG X H, SHI D M, ZHANG J P, *et al.* Study on nitrogen metabolism of *Prorocentrum micans* with special reference to the occurrence of red tide. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1997, 28(1): 33–38 [黄晓航, 史冬梅, 张京浦, 等. 赤潮发生机理研究——海洋原甲藻的氮营养生理特征. *海洋与湖沼*, 1997, 28(1): 33–38]
- HUO W Y, YU Z M, ZOU J Z, *et al.* Outbreak of *Skeletonema costatum* red tide and its relations to environmental factors in Jiaozhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(3): 311–318 [霍文毅, 俞志明, 邹景忠, 等. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系. *海洋与湖沼*, 2001, 32(3): 311–318]
- IRIGOIEN X, HUISMAN J, HARRIS R P. Global biodiversity patterns of marine phytoplankton and zooplankton. *Nature*, 2004, 429(6994): 863–867
- KODAMA T, WAGAWA T, IGUCHI N, *et al.* Spatial variations in zooplankton community structure along the Japanese coastline in the Japan Sea: Influence of the coastal current. *Ocean Science*, 2018, 14(3): 355–369
- LAI T H, QIU S F. Annual dynamic of the phytoplankton in the alongshore seawaters of Beihai. *Marine Science Bulletin*, 2005, 24(5): 27–32 [赖廷和, 邱绍芳. 北海近岸水域浮游植物群落结构及数量周年变化特征. *海洋通报*, 2005, 24(5): 27–32]
- LEVITUS S, ANTONOV J I, BOYER T P, *et al.* Warming of the world ocean. *Science*, 2000, 287(5461): 2225–2229
- LI C C, FENG W Y, CHEN H Y, *et al.* Temporal variation in zooplankton and phytoplankton community species composition and the affecting factors in Lake Taihu—A large freshwater lake in China. *Environmental Pollution*, 2019, 245: 1050–1057
- LI C L, YANG D Z, ZHAI W D. Effects of warming, eutrophication and climate variability on acidification of the seasonally stratified North Yellow Sea over the past 40 years. *Science of the Total Environment*, 2022, 815: 152935
- LI D Y, WEN Y J, ZHANG G D, *et al.* Effects of terrestrial inputs on mesozooplankton community structure in Bohai Bay, China. *Diversity*, 2022, 14(5): 410
- LI T, HU L G, SHI Z L. Effects of nutrients on the growth and the composition of nitrogen and phosphorus of *Skeletonema costatum* and *Nitzschia closterium*. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000a, 31(1): 46–52 [李铁, 胡立阁, 史致丽. 营养盐对中肋骨条藻和新月菱形藻生长及氮磷组成的影响. *海洋与湖沼*, 2000a, 31(1): 46–52]
- LI T, SHI Z L, LI J, *et al.* Effects of nutrients on some biochemical constituents and properties of *Skeletonema costatum* and *Nitzschia closterium*. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000b, 31(3): 239–245 [李铁, 史致丽, 李俊, 等. 营养盐对中肋骨条藻和新月菱形藻部分生化组成和性质的影响. *海洋与湖沼*, 2000b, 31(3): 239–245]
- LI Y, XU Z L, GAO Q. Effects of global warming on *Sagitta crassa* and *Sagitta enflata* (Chaetognatha) in the Changjiang Estuary during different years. *Acta Ecologica Sinica*, 29(9): 4773–4780 [李云, 徐兆礼, 高倩. 长江口强壮箭虫和肥胖箭虫的丰度变化对环境变暖的响应. *生态学报*, 2009, 29(9): 4773–4780]
- LIU N, YU Y X, WANG Y G, *et al.* Correlation analysis of bacterial community structure and eco-environmental factors in water and algae along Qingdao Coast before and after the outbreak of *Ulvaprolifera*. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, 45(6): 24–37 [刘妮, 于永翔, 王印庚, 等. 浒苔暴发前后青岛沿岸水体和藻体的细菌群落结构与生态环境因子相关性分析. *渔业科学进展*, 2024, 45(6): 24–37]
- LIU Z S, ZHANG Z N, WANG C S, *et al.* Changes in zooplankton community structure in Sanmen Bay, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 31: 104–116
- MA Y E, KE Z, HUANG L, *et al.* Identification of human-induced perturbations in Daya Bay, China: Evidence from plankton size structure. *Continental Shelf Research*, 2014, 72: 10–20
- MCLUSKY D S, ELLIOTT M. *The estuarine ecosystem: Ecology, threats and management*. Oxford: Oxford University Press, 2004
- MITRA A, CASTELLANI C, GENTLEMAN W C, *et al.* Bridging the gap between marine biogeochemical and fisheries sciences; configuring the zooplankton link. *Progress in Oceanography*, 2014, 129: 176–199
- NING X X, JI L, WANG G, *et al.* Phytoplankton community in the nearshore waters of Laizhou Bay in 2009. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011(3): 97–104 [宁璇璇, 纪灵, 王刚, 等. 2009年莱州湾近岸海域浮游植物群落的结构特征. *海洋湖沼通报*, 2011(3): 97–104]
- REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 1958, 46(3): 205–221
- RIANDEY V, CHAMPALBERT G, CARLOTTI F, *et al.* Zooplankton distribution related to the hydrodynamic features in the Algerian Basin (western Mediterranean Sea) in summer 1997. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2005, 52(11): 2029–2048
- SMITH V H, SCHINDLER D W. Eutrophication science: Where

- do we go from here? Trends in ecology and evolution, 2009, 24(4): 201–207
- STEINBERG D K, LANDRY M R. Zooplankton and the ocean carbon cycle. Annual Review of Marine Science, 2017, 9: 413–444
- STEMMANN L, BOSS E. Plankton and particle size and packaging: From determining optical properties to driving the biological pump. Annual Review of Marine Science, 2012, 4: 263–290
- SUN X M, XIA B, GUO F, *et al.* Structure characteristics of phytoplankton community and the relationship with environmental factors in offshore area of Laoshan, Qingdao. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(3): 46–53 [孙雪梅, 夏斌, 过锋, 等. 青岛崂山近岸海域浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 渔业科学进展, 2013, 34(3): 46–53]
- TELESH I V, KHLEBOVICH V V. Principal processes within the estuarine salinity gradient: A review. Marine Pollution Bulletin, 2010, 61(4/5/6): 149–155
- VERDOUW H, VAN ECHELD C J A, DEKKERS E M J. Ammonia determination based on indophenol formation with sodium salicylate. Water Research, 1978, 12(6): 399–402
- VIEIRA L R, GUILHERMINO L, MORGADO F. Zooplankton structure and dynamics in two estuaries from the Atlantic coast in relation to multi-stressors exposure. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 167: 347–367
- WANG Y Z, HU H Y, ZHU L, *et al.* Effects of eutrophication on phytoplankton community in Jinghai Bay. Environmental Chemistry, 2024, 43(3): 1010–1024 [王英哲, 胡海燕, 朱琳, 等. 富营养化对靖海湾浮游植物群落的影响. 环境化学, 2024, 43(3): 1010–1024]
- 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
- WELSCHMEYER N A. Fluorometric analysis of chlorophyll *a* in the presence of chlorophyll *b* and pheopigments. Limnology and Oceanography, 1994, 39(8): 1985–1992
- 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 J T, YAO Y, YANG W, *et al.* Preliminary investigation on the causes of red tides in Qinhuangdao coastal areas in 2022. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3): 817–826 [徐金涛, 姚远, 杨雯, 等. 2022年秦皇岛近岸海域赤潮成因初探. 应用生态学报, 2024, 35(3): 817–826]
- XUE B, SUN J, LI T T. Phytoplankton community structure of northern South China Sea in summer of 2014. Haiyang Xuebao, 2016, 38(4): 54–65 [薛冰, 孙军, 李婷婷. 2014年夏季南海北部浮游植物群落结构. 海洋学报, 2016, 38(4): 54–65]
- ZHANG W J, DONG Z J, ZHANG C, *et al.* Effects of physical-biochemical coupling processes on the *Noctiluca scintillans* and Mesodinium red tides in October 2019 in the Yantai nearshore, China. Marine Pollution Bulletin, 2020, 160: 111609
- ZHU G H, NOMAN M A, NARALE D D, *et al.* Evaluation of ecosystem health and potential human health hazards in the Hangzhou Bay and Qiantang Estuary region through multiple assessment approaches. Environmental Pollution, 2020, 264: 114791

(编辑 马璀璨)

## Differential Responses of Plankton Communities to Environmental Changes in the Liuqinghe Bay Estuary

WENG Chenshi<sup>1,2,3</sup>, LI Zhixiang<sup>1,3</sup>, WANG Yingzhe<sup>1,2,3</sup>, DING Dongsheng<sup>1,3</sup>,  
CUI Zhengguo<sup>1,3</sup>, QU Keming<sup>1,3</sup>, HU Haiyan<sup>2</sup>, WEI Yuqiu<sup>1,3</sup><sup>①</sup>

(1. State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 2. College of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China)

**Abstract** Estuarine ecosystems play an important role in biodiversity due to the close interrelationship between riverine and marine environments. Phytoplankton and zooplankton serve as ecological indicators of water quality in estuarine ecosystems. Therefore, an integrated evaluation of the effects of multiple environmental factors on the phytoplankton and zooplankton communities in estuarine ecosystems is essential. Previous studies have often been limited to the interaction between a single phytoplankton or zooplankton species and environmental factors, whereas studies on the mechanism of the overall planktonic response to environmental factors are lacking. Therefore, we collected water samples from seven stations in the waters of the Liuqinghe Bay in March (spring), August (summer), and October (autumn) 2021. Redundancy analysis and Pearson's correlation analysis were used to explore the effects of environmental factors on dominant phytoplankton and zooplankton species and communities. The results showed that there were large seasonal differences in water temperature in the study area, with the highest ( $23.70 \pm 0.17$  °C) in summer and the lowest ( $5.91 \pm 0.03$  °C) in spring. Changes in the mean salinity of offshore estuarine waters—with variations ranging from 30.29 to 31.70—were usually caused by inputs from estuarine runoff, showing obvious seasonal characteristics, and salinity among different stations did not show significant differences. The pH decreased with increasing water temperature. Compared with the first three hydrological parameters, chemical oxygen demand, Chl *a*, and nutrient salts did not show obvious seasonal patterns. In 2021, 94 phytoplankton species from three phyla were identified during the three cruises, with 80 Bacillariophyta spp. being the most abundant, followed by 13 Pyrrophyta spp. and 1 Chrysophyta sp.—it is worth mentioning that the same Chrysophyta sp. was identified in all the 3 cruises. The spring cruise in 2021 identified 44 species from three phyla, the summer cruise had the richest community composition, with 58 species from three phyla, and the autumn cruise identified 55 species from three phyla. In addition, the mean abundance of phytoplankton in Liuqinghe Bay in 2021 reached its maximum in summer ( $242.50 \times 10^3 \pm 136.40 \times 10^3$  cells/m<sup>3</sup>), with the mean abundance in spring ( $19.38 \pm 12.23$  cells/m<sup>3</sup>) at the lowest level. However, the seasonal variation of mean phytoplankton biomass in 2021 in Liuqinghe Bay showed the same abundance trend, with a maximum carbon biomass ( $946.89 \pm 810.66$  μg C/m<sup>3</sup>) in summer and the lowest carbon biomass ( $31.15 \pm 20.96$  μg C/m<sup>3</sup>) in spring. A total of 48 zooplankton species were identified in 10 groups, with copepods being the most numerous (15 species), followed by pelagic larvae and hydroidomedusa (11 species each), tunicates (3 species), chaetognaths and cladocera (2 species each), and one species each of jellyfish, amphipoda, mysidacea, and euphausia. A total of 14 zooplankton species from five taxa were identified during the spring cruise, 28 species from seven taxa during the summer cruise, and 25 species from eight taxa during

① Corresponding author: WEI Yuqiu, Email: weiyuqiu@163.com



the autumn cruise. Copepods and pelagic larvae had the highest occurrence frequency in the samples from each seasonal cruise; however, the frequency of Hydroidomedusae gradually increased over time. Moreover, the mean zooplankton abundance in the study area showed a clear seasonal pattern ranging from  $(55.00 \pm 12.52) - (5\ 665.71 \pm 4\ 576.32)$  ind./m<sup>3</sup>, with the maximum and minimum mean abundances in spring and autumn, respectively. Biomass exhibited a seasonal pattern like that of abundance, showing an overall decreasing trend. In 2021, the phytoplankton Shannon–Wiener diversity index ( $H'$ ) and Pielou's evenness index ( $J$ ) in Liuqinghe Bay varied greatly among the three seasons, and there were significant differences among different stations. The average  $J$  of phytoplankton did not differ significantly among seasons, especially in spring and summer, but it fluctuated greatly among different stations. In general, phytoplankton biodiversity was the highest in summer and lowest in spring, whereas the evenness index was relatively evenly distributed in spring and summer and more scattered in autumn. The zooplankton  $H'$  and  $J$  showed very similar trends, being generally higher in summer and autumn than in spring, and the  $H'$  fluctuation in summer and autumn was also stronger than that in spring. The overall trend was higher in the summer than in the autumn. Overall, there were significant spatial and temporal variations in plankton in Liuqinghe Bay, in which the main influences on plankton-dominant species in spring and summer were temperature and nutrient salt concentration, while the main drivers affecting plankton-dominant species in autumn were temperature, salinity, and nutrient salts, and there was a potential for red tides to occur in spring and autumn. In addition, ocean currents, land runoff, and meteorological hazards are important factors that influence the community composition of dominant zooplankton species. The results of this study will help improve the understanding of plankton communities in estuarine ecosystems. It will also provide a theoretical basis for the scientific management of the ecological environment of Liuqinghe Bay and an in-depth understanding of the mechanisms of plankton community changes in the Bay.

**Key words** Liuqinghe Bay; Phytoplankton; Zooplankton; Environmental change; Driving factors; Response mechanisms