

DOI: 10.5846/stxb202003250677

张广帅, 吴婷婷, 闫吉顺, 孙家文, 蔡悦荫, 赵全民, 于永海, 宫玮. 鸭绿江口近岸海域水质环境对冬季浮游动物群落结构的影响. 生态学报, 2022, 42(1): 390-399.

Zhang G S, Wu T T, Yan J S, Sun J W, Cai Y Y, Zhao Q M, Yu Y H, Gong W. Effects of the sea water environmental factors on zooplankton community nearshore of the Yalu River estuary in winter. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 390-399.

# 鸭绿江口近岸海域水质环境对冬季浮游动物群落结构的影响

张广帅<sup>1,2</sup>, 吴婷婷<sup>3</sup>, 闫吉顺<sup>1,2,\*</sup>, 孙家文<sup>1,2</sup>, 蔡悦荫<sup>1,2</sup>, 赵全民<sup>1,2</sup>, 于永海<sup>1,2</sup>, 宫 玮<sup>1,2</sup>

1 国家海洋环境监测中心, 大连 116023

2 国家环境保护海洋生态环境整治修复重点实验室, 大连 116023

3 大连指南针海洋工程咨询有限公司, 大连 116023

**摘要:**定量分析滨海湿地近岸海域水质环境与浮游动物群落结构之间的关系对揭示海水水质环境健康状态具有重要意义。2019 年 12 月在鸭绿江口湿地国家级自然保护区近岸海域开展了浮游动物和水环境因子调查,运用冗余分析和结构方程模型等方法探讨了水质环境对冬季浮游动物群落结构的影响。研究区共鉴定出浮游动物 14 种以及浮游幼虫 5 大类,桡足类最多占比 52.63%;保护区不同功能分区间浮游动物群落结构总体差异不大,多样性指数、均匀度指数和丰富度指数平均值分别为 1.34、0.51 和 0.59;浮游动物的种群分布与海水化学需氧量、溶解性无机氮、浮游植物群落多样性指数和铜元素含量关系显著;结构方程模型模拟结果表明,海水富营养化水平对浮游动物丰富度的效应系数为-0.26,具有显著的直接影响( $P=0.01$ ),重金属污染水平通过影响浮游植物丰富度(效应系数为-0.41, $P<0.001$ )间接对浮游动物丰富度产生作用(间接效应系数为-0.2)。研究结果将有助于深化对海水环境和浮游动物群落结构协同演变过程的认识,为滨海湿地近岸海洋生态系统科学管理提供理论支撑。

**关键词:**浮游动物;富营养化;重金属污染;结构方程模型;鸭绿江口湿地

## Effects of the sea water environmental factors on zooplankton community nearshore of the Yalu River estuary in winter

ZHANG Guangshuai<sup>1,2</sup>, WU Tingting<sup>3</sup>, YAN Jishun<sup>1,2,\*</sup>, SUN Jiawen<sup>1,2</sup>, CAI Yueyin<sup>1</sup>, ZHAO Quanmin<sup>1,2</sup>, YU Yonghai<sup>1,2</sup>, GONG Wei<sup>1,2</sup>

1 National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

2 State Environmental Protection Key Laboratory of Marine Ecosystem Restoration, Dalian 116023, China

3 Dalian Compass Ocean Engineering Management Consulting Corporation Ltd., Dalian 116023, China

**Abstract:** Quantitative analysis of the relationship between the water environmental factors and zooplankton community nearshore of the coastal wetland is of great significance for assessing the sea water quality. Based on the investigation and sampling of the seawater and zooplankton nearshore of Yalu River Wetland National Nature Reserve in December 2019, the influence of environmental factors on zooplankton community structure was analyzed using Redundancy Analysis (RDA) and the Structural Equation Modeling (SEM). A total of 14 species of zooplankton and 5 groups of planktonic larvae were

**基金项目:**国家海洋环境监测中心博士启动基金(2019-A-03);北京市企业家环保基金会青年学者资助项目;国家自然科学基金重大项目(42030409);辽宁省博士科研启动基金(2019-BS-091)

收稿日期:2020-03-25; 采用日期:2021-06-02

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jsyan@nmemc.org.cn

identified, of which the number of copepods was the highest with proportion of 52.63%. None significant difference of zooplankton community was detected among different subareas of the nature reserve. The diversity index, evenness index and richness index of zooplankton community in the study area were 1.34, 0.51, 0.59, respectively. Simulation result of the SEM showed that richness index of the zooplankton community was directly affected by the eutrophication status of the sea water with a coefficient of  $-0.26$  ( $P = 0.01$ ), and was indirectly affected by the heavy metal pollution status with a coefficient of  $-0.2$ . This study provides useful insight for the relationship between sea water environmental factors and the zooplankton community, and provides basis for the scientific management of the offshore marine ecosystem of coastal wetland.

**Key Words:** zooplankton; eutrophication; heavy metal pollution; the Structural Equation Modeling; Yalu River coastal wetlands

浮游动物作为最主要的海洋次级生产力,具有数量多、个体小、代谢强等特点,是海洋物质循环与能量流动的关键类群<sup>[1]</sup>,能够通过摄食和种群动态变化来控制海洋生态系统的初级生产力以及鱼类等海洋动物资源的生物量及种类组成。浮游动物群落结构和时空分布与海洋环境的变化密切相关<sup>[2-3]</sup>。在河口与近岸海域,由于浮游动物物种多样性和优势种演替受陆源输入的营养盐浓度影响显著<sup>[4]</sup>,因此人类活动和陆源环境变化会直接和间接影响浮游动物群落结构<sup>[5-7]</sup>。不同类群浮游动物对生态环境的适应能力存在明显差异,其种群数量变化和群落结构是指示水质环境健康状态的敏感指标<sup>[8]</sup>。近年来国内外大量学者对浮游动物的群落结构、种群扩散、优势种演替及其与环境梯度格局展开了研究<sup>[9-12]</sup>,但是通过统计模型定量分析河口近岸海域水质环境对浮游动物群落结构的直接和间接影响的研究鲜有报道。

鸭绿江口湿地位于具有全球重要价值的黄海生态区北缘,具有重要的生态系统服务价值,是天然的基因库和生物资源库<sup>[13-14]</sup>。本区域由大洋河口、鸭绿江口两大河口湿地以及沿海滩涂和浅海海域等多种生态系统组成,具有典型的河口-滨海湿地特征,海陆交互作用明显。据 2017 年丹东市海洋环境质量公报<sup>[15]</sup>,鸭绿江及大洋河两条主要河流入海污染物总量为 105.64 万 t,其中化学需氧量占污染物总量的 89.89%,氨氮占 3.04%;硝酸盐氮占 6.10%,陆源污染物排放和陆域人类活动是影响鸭绿江口湿地海洋环境的主要因素。本文以 2019 年鸭绿江口湿地近岸海域冬季浮游动物及生态环境调查为基础,采用冗余分析(RDA)和结构方程模型(SEM)等统计方法,分析了冬季鸭绿江口近岸海域浮游动物群落和水环境特征,并定量揭示了水质环境对浮游动物群落的直接和间接影响。本研究将为揭示海陆相互作用下浮游动物的长期演变以及河口与近岸海域生态环境质量评估提供理论认识和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查区域概况

研究区位于鸭绿江口湿地国家级自然保护区。鸭绿江口湿地位于中国海岸线最北端,辽宁省东北部的丹东市境内,沿东港境内海岸线呈带状分布,自然保护区位于东经  $123^{\circ}21'$ — $124^{\circ}09'$ ,北纬  $39^{\circ}40'$ — $40^{\circ}40'$ 。东部的鸭绿江为湿地中最大的河流,流域面积为  $61889 \text{ km}^2$ ,年径流量多年平均值为  $243.96 \text{ 亿 m}^3$ 。西部有大洋河和小洋河,其中大洋河是湿地中第二大河流,河长  $202 \text{ km}$ ,流域面积  $6202 \text{ km}^2$ ,年径流量多年平均值为  $21.7 \text{ 亿 m}^3$ 。本区域属北温带湿润地区大陆性季风气候,年平均气温为  $6.8$ — $8.7^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量为  $881.3$ — $1087.5 \text{ mm}$ ,日照时数  $2484.3 \text{ h}$ 。保护区内生态系统类型主要包括芦苇沼泽、潮滩盐沼、碱蓬盐沼、河口湾、浅海海域五种,其中浅海海域和滩涂面积总计  $563.90 \text{ km}^2$ ,芦苇湿地  $32.22 \text{ km}^2$ 。

### 1.2 样品采集与调查分析

本研究水质环境样品和浮游动物样品于 2019 年 12 月在鸭绿江口湿地近岸海域采集得到,设置调查站位 23 个,分布于保护区的大洋河口核心区(DCA)、二道沟核心区(ECA)、缓冲区(BA)和实验区及外围海域(EA)(图 1)。

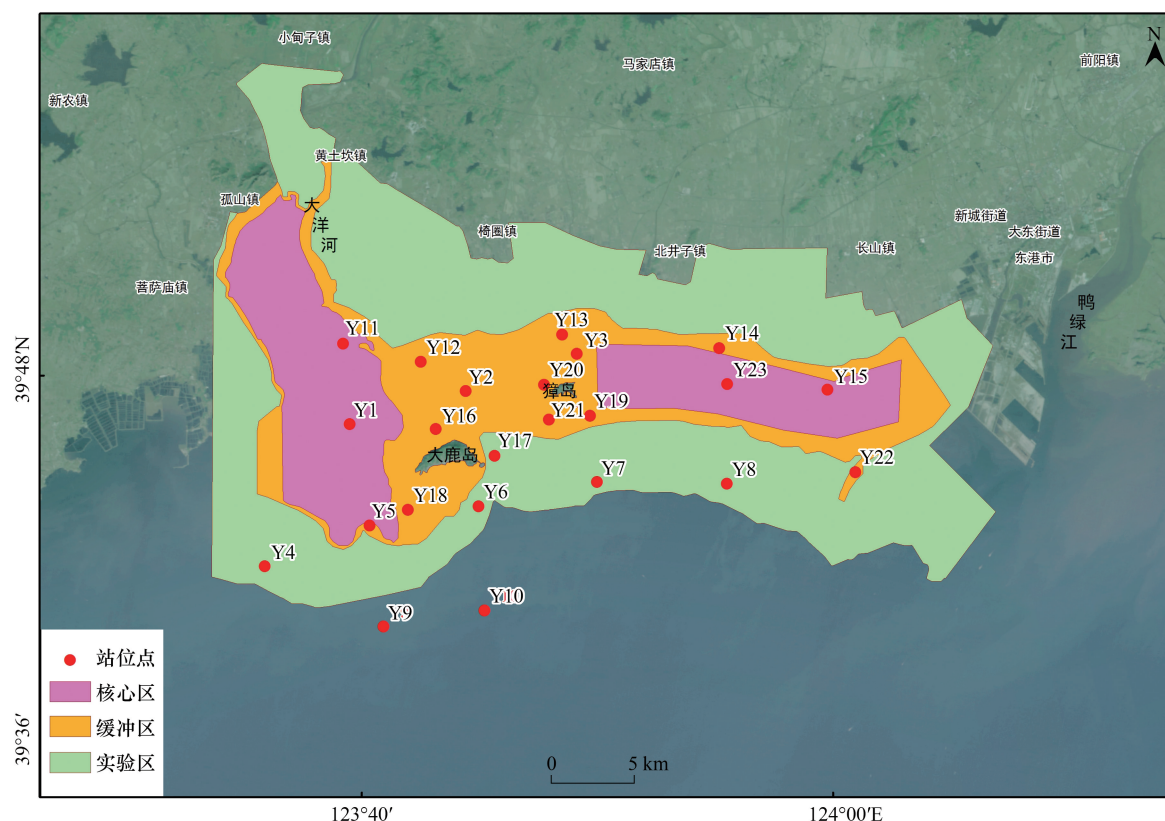


图1 研究区域与监测站位布局

Fig.1 Location of the study area and sampling plots

图内数字为监测站点编号; Y: 样点

环境因子监测项目主要有叶绿素 *a* (Chl-*a*), 悬浮物 (WTSS)、溶解氧 (*DO*)、化学需氧量 (COD)、无机氮 (DIN)、溶解性无机磷 (DIP)、铜 (Cu)、铅 (Pb)、锌 (Zn)、铬 (Cr)、汞 (Hg)、镉 (Cd) 和砷 (As), 样品的采集、预处理和分析均严格按照《海洋调查规范》<sup>[16]</sup> 进行, 采用浅水Ⅲ型浮游植物网自水底至水面拖网采集浮游植物, 采集到的浮游植物样品用浓度为 5% 甲醛固定保存。浮游植物样品经过静置、沉淀、浓缩后换入贮存瓶, 并编号, 处理后的样品使用光学显微镜采用个体计数法进行物种鉴定和数量统计, 浮游植物丰富度以个/ $\text{m}^3$  表示。浮游动物样品采集和分析方法按照《海洋监测规范》<sup>[17]</sup> 和《海洋调查规范》<sup>[16]</sup> 执行。调查采样使用浅水Ⅱ型浮游生物网, 自底至表垂直拖取, 所获样品用 5% 的甲醛溶液固定, 并于体视显微镜下分析鉴定 (包括种类、个数等), 用电子天平称量总湿重 (精确到 0.01 g), 浮游动物丰富度以个/ $\text{m}^3$  为计算单位, 浮游动物湿重生物量以  $\text{mg}/\text{m}^3$  为计算单位。

### 1.3 数据分析

采用富营养化指数和有机污染指数法<sup>[18]</sup> 分别对海水富营养化水平和有机污染水平进行量化, 公式如下:

$$Ei = \frac{\text{COD} \times \text{DIN} \times \text{DIP}}{a} \times 10^8$$

$$\text{OPI} = \frac{\text{COD}}{\text{COD}_0} + \frac{\text{DIN}}{\text{DIN}_0} + \frac{\text{DIP}}{\text{DIP}_0} - \frac{\text{DO}}{\text{DO}_0}$$

式中, COD、DIN、DIP、*DO* 分别为化学需氧量、无机氮、溶解性无机磷及溶解氧的实测值; COD<sub>0</sub>、DIN<sub>0</sub>、DIP<sub>0</sub>、*DO*<sub>0</sub> 分别为 COD、无机氮、活性磷酸盐及溶解氧的一类海水水质标准值。Ei 是由化学需氧量 (COD)、溶解无机氮 (DIN)、溶解无机磷 (DIP) 以及根据不同海域环境给定的常数 *a* 计算得出。当  $Ei \geq 1$  时, 表明海水为富营

养化状态,其中常数  $a$  取值为 4500<sup>[19]</sup>;OPI 为有机污染指数。

采用综合指数法对水质重金属污染生态风险量化<sup>[18]</sup>。公式如下:

$$WQI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_s^i}{C_n^i}$$

式中,WQI 为海水重金属综合污染指数,  $C_s^i$  为重金属含量的实测值,  $C_n^i$  为重金属含量的一类标准值。

浮游植物和浮游动物的群落结构用优势度 ( $Y$ )、Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )、均匀度指数 ( $J$ ) 和丰富度指数 ( $D$ ) 表示<sup>[20]</sup>,公式如下:

$$Y = N_i / N \times f_i$$
$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$
$$J = \frac{H'}{H_{\max}}$$
$$D = (S-1) / \log_2 N$$

式中, $Y$  为优势度, $Y \geq 0.05$  时,即认定该物种为优势种;  $N_i$  为样品中第  $i$  种的个体数;  $N$  为样品中所有种的总个体数;  $f_i$  为第  $i$  种在所有样品中的出现频率;  $H'$  为物种多样性指数;  $S$  为样品中的物种总数;  $P_i$  为第  $i$  种的个体数 ( $n_i$ ) 与总个体数 ( $N$ ) 的比值;  $J$  表示均匀度;  $H_{\max}$  为  $\log_2 S$ ,表示多样性指数的最大值;  $D$  表示丰富度指数。

数据的统计分析在 SPSS 20.0 中进行,作图在 Origin 8.0 中进行。保护区不同分区水质因子、浮游植物群落结构和浮游动物群落结构差异采用单因素方差分析,选用 Dunnett's T3 比较检验进行多重比较;浮游动物群落结构和环境因子的关系分析在 CANOCO (Canoco for Windows 5.0) 中采用冗余分析 (RDA, Redundancy analysis) 法;水质环境因子对浮游动物群落结构的直接和间接影响定量分析采用 Pearson 相关分析和结构方程模型 (SEM, Structural Equation Modeling)。

## 2 结果与分析

### 2.1 水质环境与浮游植物群落特征

鸭绿江口湿地自然保护区近岸海域不同分区水质环境因子如表 1 和表 2 所示。不同分区之间,大洋河口核心区 Chl-a 含量、DIN 含量和 Cu 含量与保护区二道沟核心区、缓冲区和实验区及外围相比显著较高 ( $P < 0.05$ ),而 As 含量显著最低 ( $P < 0.05$ ),实验区及外围海域具有显著最低的 Pb 含量 ( $P < 0.05$ ),其他水质环境因子在不同分区之间差异性不显著 ( $P > 0.05$ )。总体上研究区水质富营养化指数介于 0.37—2.13,平均值为

表 1 保护区不同分区海水水质因子

Table 1 Characterization of measured environmental factors of the sea water under different partition

分区 Partition	Chl-a/ ( $\mu\text{g/L}$ )	SA	WTSS/ ( $\text{mg/L}$ )	DO/ ( $\text{mg/L}$ )	COD/ ( $\text{mg/L}$ )	DIN/ ( $\text{mg/L}$ )	DIP/ ( $\text{mg/L}$ )
DCA	1.52±0.38a	32.23±0.06a	15.90±4.15a	6.48±0.20a	0.92±0.05a	0.24±0.03a	0.03±0.01a
ECA	0.88±0.08b	31.23±0.06a	20.80±4.96a	6.23±0.07a	0.95±0.05a	0.16±0.00b	0.02±0.00a
BA	1.02±0.30b	31.19±0.46a	15.52±6.04a	6.43±0.23a	0.89±0.10a	0.18±0.03b	0.02±0.01a
EA	0.74±0.20b	31.28±0.30a	12.57±4.57a	6.54±0.27a	0.92±0.16a	0.18±0.03b	0.02±0.00a
F	6.80 **	0.09	1.84	1.25	0.26	4.58 **	2.28

不同小写字母表示不同分区具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ); DCA 大洋河口核心区 Core area of Dayang river delta; ECA 二道沟核心区 Core area of Erdaogou; BA: 缓冲区 Buffer area; EA 试验区 Experimental area; Chl-a 叶绿素 a chlorophyll a; SA 盐度 Salinity; WTSS 水中总悬浮物 Total suspended solid in the water; DO 溶解氧 Dissolved oxygen; COD 化学需氧量 Chemical oxygen demand; DIN 溶解无机氮 Dissolved Inorganic Nitrogen; DIP 活性磷酸盐即溶解无机磷 Dissolved inorganic phosphate



表 2 保护区不同分区海水重金属含量

Table 2 Characterization of heavy metal content in the sea water under different partition

分区 Partition	Cu/ ( $\mu\text{g/L}$ )	Pb/ ( $\mu\text{g/L}$ )	Zn/ ( $\mu\text{g/L}$ )	Cr/ ( $\mu\text{g/L}$ )	Hg/ ( $\mu\text{g/L}$ )	Cd/ ( $\mu\text{g/L}$ )	As/ ( $\mu\text{g/L}$ )
DCA	3.43 $\pm$ 1.16a	2.94 $\pm$ 1.89a	18.00 $\pm$ 10.75a	23.63 $\pm$ 2.67a	0.03 $\pm$ 0.01a	0.07 $\pm$ 0.04a	0.00 $\pm$ 0.00b
ECA	3.03 $\pm$ 1.75b	2.60 $\pm$ 1.77a	10.30 $\pm$ 5.39a	25.77 $\pm$ 2.24a	0.05 $\pm$ 0.01a	0.06 $\pm$ 0.01a	0.50 $\pm$ 0.40a
BA	2.69 $\pm$ 1.28b	2.47 $\pm$ 1.19a	15.34 $\pm$ 5.83a	26.74 $\pm$ 8.11a	0.06 $\pm$ 0.05a	0.09 $\pm$ 0.09a	0.52 $\pm$ 0.21a
EA	1.40 $\pm$ 0.20b	0.88 $\pm$ 0.24b	10.45 $\pm$ 2.74a	26.40 $\pm$ 3.92a	0.06 $\pm$ 0.05a	0.05 $\pm$ 0.04a	0.39 $\pm$ 0.33a
F	3.76 **	3.93 **	2.02	0.22	0.34	0.5	2.78 **

不同小写字母表示不同分区具有显著性差异 ( $P<0.05$ ); \* \* 为 0.01 水平下具有极显著差异

0.89 $\pm$ 0.40,水质有机污染指数介于 1.03—3.26,平均值为 1.84 $\pm$ 0.55,水质重金属污染指数介于 0.32—1.42,平均值为 0.67 $\pm$ 0.29(图 2)。保护区不同分区之间浮游植物丰富值和均匀度指数差异性不大(表 3,  $P>0.05$ ),而实验区及外围海域具有显著最高的物种数、多样性指数和丰富度指数 ( $P<0.05$ ),核心区(包括大洋河口核心区和二道沟核心区)海域具有显著最低的多样性指数和丰富度指数 ( $P<0.05$ )。

表 3 保护区不同分区浮游植物群落结构特征

Table 3 Variation in the phytoplankton community abundances, species', diversity index, evenness index and richness index in the sea water under different partition

分区 Partition	总丰度 Abundance	物种数 Species	多样性指数 $H'$	均匀度指数 $J$	丰富度指数 $D$
DCA	11357 $\pm$ 2628a	7 $\pm$ 4b	2.17 $\pm$ 0.75b	0.78 $\pm$ 0.11a	0.49 $\pm$ 0.34b
ECA	9895 $\pm$ 1711a	6 $\pm$ 1b	2.22 $\pm$ 0.22b	0.87 $\pm$ 0.06a	0.38 $\pm$ 0.07b
BA	10247 $\pm$ 1933a	7 $\pm$ 1b	2.44 $\pm$ 0.24ab	0.84 $\pm$ 0.06a	0.51 $\pm$ 0.14b
EA	14341 $\pm$ 4760a	11 $\pm$ 1a	2.82 $\pm$ 0.23a	0.80 $\pm$ 0.07a	0.77 $\pm$ 0.08a
F	0.28	0.002	0.04	0.51	0.003

不同小写字母表示不同分区具有显著性差异 ( $P<0.05$ )

## 2.2 浮游动物种类组成与群落结构

保护区近岸海域共调查鉴定出浮游动物 6 大类 14 种以及浮游幼虫 5 类,其中桡足类 10 种,占物种组成的 52.63%;十足类、毛颚类、被囊类和水母类各 1 种,分别占物种组成的 4.55%;浮游幼体 5 种,占物种组成的 26.32%。鸭绿江口湿地保护区近岸海域浮游动物优势种为洪氏纺锤水蚤 (*Acartia hongii*)、双毛纺锤水蚤 (*Acartia bifilosa*)、小拟哲水蚤 (*Paracalanus parvus*) 和拟长腹剑水蚤 (*Oithona similis*) (图 3),出现频率最高的物种为小拟哲水蚤,其次为拟长腹剑水蚤。浮游动物平均丰度值为 1200 个/ $\text{m}^3$ ,平均物种数为 7(表 4)。浮游动物群落多样性指数介于 0.74—1.79,平均值为 1.34 $\pm$ 0.32,均匀度指数介于 0.27 $\pm$ 0.86,平均值为 0.51 $\pm$ 0.15,丰富度指数介于 0.29—1.05,平均值为 0.59 $\pm$ 0.19。不同分区多样性指数和均匀度指数无显著性差异(表 4,  $P>0.05$ ),而丰富度指数则表现为实验区及外围海域显著最高,核心区(包括大洋河口核心区和二道沟核心区)海域最低(表 4,  $P<0.05$ )。

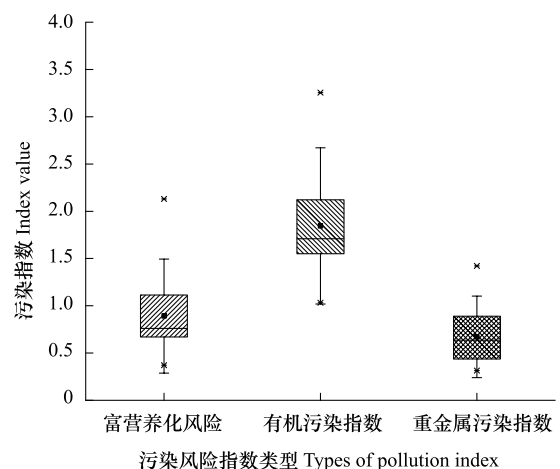


图 2 海水污染风险指数

Fig.2 Pollution index of the seawater

2.3 底栖动物群落结构与环境因子关联性分析

对研究区海域内所有调查站位的浮游动物群落进行冗余分析发现,前 2 个排序轴累积解释了浮游动物群落空间分异的 98.96%,其中第 1 排序轴的解释贡献率为 89.60%,第 2 排序轴的解释贡献率为 9.36%(图 4)。Monte Carlo 检验表明,COD ( $F=17.4$ ,  $P=0.002$ )、DIN ( $F=5$ ,  $P=0.028$ ) 和浮游植物群落多样性 ( $F=3.5$ ,  $P=0.046$ ) 对浮游动物物种空间分布具有显著性影响,解释贡献率分别为 38.4%、21.9%和 18.4%;重金属中 Cu 对浮游动物物种空间分布的影响最大 ( $F=3.1$ ,  $P=0.068$ ),解释贡献率为 6.2%。冗余分析说明,鸭绿江口湿地近岸海域冬季水质环境中 COD、DIN、浮游植物群落结构和 Cu 是驱动浮游动物物种空间分布异质性的主要因子。

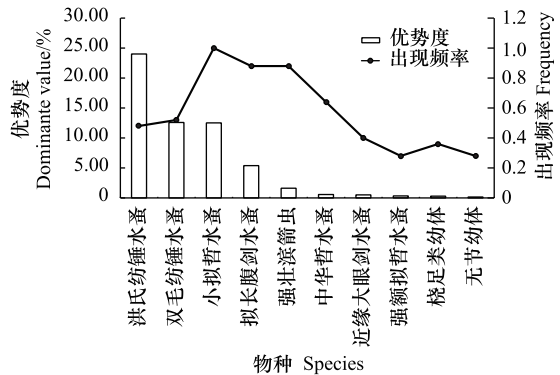


图 3 浮游动物优势种优势度和出现频率  
Fig.3 Dominance and frequency of the dominant species

表 4 不同分区浮游动物群落结构  
Table 4 Variation in the zooplankton community abundances, species', diversity index, evenness index and richness index in the sea water under different partition

分区 Partition	丰度值 Abundance/(个/m <sup>3</sup> )	物种数(种) Species	多样性指数 <i>H'</i>	均匀度指数 <i>J</i>	丰富度指数 <i>D</i>
DCA	1220.63±987.02a	5±1b	1.23±0.45a	0.50±0.20a	0.48±0.07b
ECA	661.80±343.96a	5±1b	1.51±0.26a	0.60±0.04a	0.50±0.08b
BA	1065.30±643.67a	6±1b	1.36±0.34a	0.56±0.17a	0.52±0.17b
EA	1545.56±653.88a	8±1a	1.30±0.32a	0.41±0.08a	0.75±0.17a
<i>F</i>	1.48	5.63**	0.4	2.07	4.59**

不同小写字母表示不同分区具有显著性差异 ( $P<0.05$ ); \* \* 为 0.01 水平下具有极显著差异

海水水质污染指数、浮游植物群落特征和浮游动物群落特征的相关分析(表 5)表明,水体的重金属污染指数与浮游动物物种数和丰富度指数具有极显著负相关性,与浮游动物密度具有显著负相关性;海水中浮游植物的物种数、多样性指数和丰富度指数与浮游动物种群密度、物种数和丰富度指数呈极显著正向关系,与均匀度指数呈极显著负相关性;浮游植物群落均匀度指数与浮游动物物种数和丰富度指数呈显著负相关关系。浮游动物群落多样性指数虽然与水质富营养化指数和有机污染指数没有表现出显著的相关性,但是从浮游动物多样性指数和水质有机污染指数的空间分布格局(图 5)来看,两者在空间上表现出相近的变化规律。

表 5 鸭绿江口湿地浮游动物群落结构与水质环境和浮游植物群落结构的关系  
Table 5 Correlation between the zooplankton community structure and environmental factors including the phytoplankton community of the sea water

	<i>ZD</i>	<i>ZN</i>	<i>ZSHI</i>	<i>ZEI</i>	<i>ZRI</i>
<i>Ei</i>	0.15	-0.27	-0.21	-0.06	-0.33
<i>OPI</i>	0.17	-0.30	-0.23	-0.06	-0.34
<i>WHI</i>	-0.50 *	-0.65 **	0.07	0.40	-0.63 **
<i>PN</i>	0.64 **	0.77 **	-0.20	-0.61 **	0.71 **
<i>PSHI</i>	0.61 **	0.70 **	-0.17	-0.56 **	0.66 **
<i>PEI</i>	-0.16	-0.42 *	-0.20	0.05	-0.42 *
<i>PRI</i>	0.64 **	0.76 **	-0.22	-0.63 **	0.70 **

\* \*: 在 0.01 水平上呈极显著相关; \* 在 0.05 水平上呈显著相关;*ZD*: 浮游动物密度 Zooplankton density; *ZN*:浮游动物物种数 Zooplankton species;*ZSHI*:浮游动物多样性指数 Zooplankton diversity index;*ZEI*:浮游动物均匀度指数 Zooplankton evenness index;*ZRI*:浮游动物丰富度指数 Zooplankton richness index;*Ei*:富营养化指数 Eutrophication index; *OPI*:有机污染指数 Index of water organic pollution;*WHI*:重金属污染指数;*PN*:浮游植物物种数 Phytoplankton species;*PSHI*:浮游植物多样性指数 Phytoplankton diversity index;*PEI* 浮游植物均匀度指数 Phytoplankton evenness index;*PRI*:浮游植物丰富度指数 Phytoplankton richness index

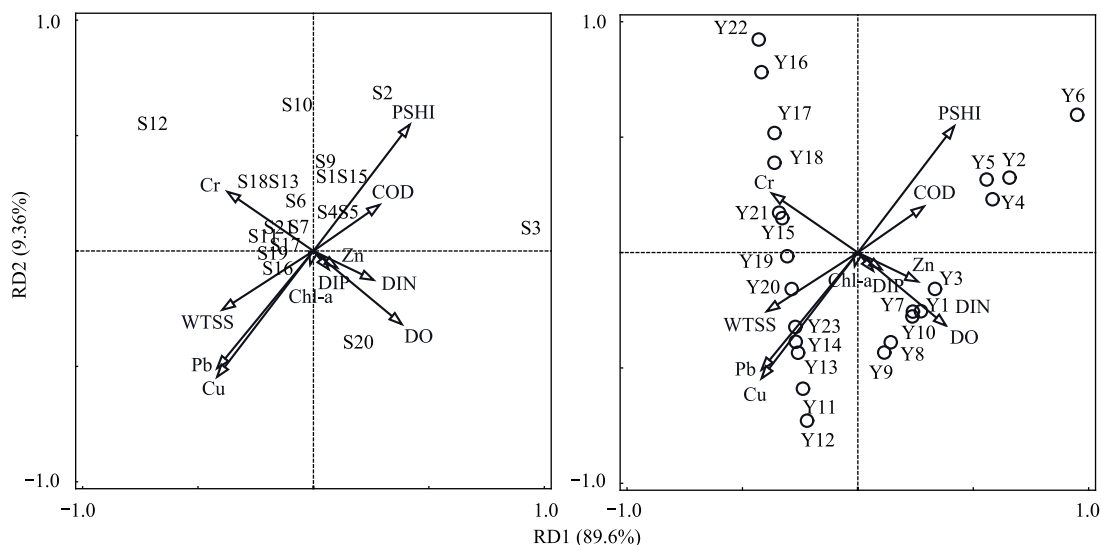


图4 浮游动物群落与环境因子的冗余分析

Fig.4 Redundancy analysis(RDA) of zooplankton communities constrained by environmental factors of the sea water

RD:冗余分析排序轴 Axis of redundancy analysis; RDA: 冗余分析 Redundancy analysis; WTSS: 水中总悬浮物 Total suspended solid in the water; COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; DIN: 溶解无机氮 Dissolved Inorganic Nitrogen; DIP: 活性磷酸盐即溶解无机磷 Dissolved inorganic phosphate; PSHI: 浮游植物群落多样性指数 Diversity index of phytoplankton community; S1: 中国毛虾 *Acetes chinensis*; S2: 小拟哲水蚤 *Paracalanus parvus*; S3: 洪氏纺锤水蚤 *Acartia hongii*; S4: 拟长腹剑水蚤 *Oithona similis*; S5: 近缘大眼剑水蚤 *Corycaeus affinis*; S6: 中华哲水蚤 *Calanus sinicus*; S7: 真刺唇角水蚤 *Labidocera euchaeta*; S9: 强额拟哲水蚤 *Paracalanus crassirostris*; S10: 猛水蚤 *Harpacticoida* sp.; S11: 太平洋纺锤水蚤 *Acartia pacifica*; S12: 双毛纺锤水蚤 *Acartia bifilosa*; S13: 强壮滨箭虫 *Aidanosagitta crassa*; S15: 桡足类幼体 *Copepoda larvae*; S16: 无节幼体 *Nauplius larvae*; S17: 双壳类幼虫 *Bivalve larvae*; S18: 钩虾亚目 *Gammaridean spp.*; S19: 麦杆虫属 *Caprella* sp.; S20: 异体住囊虫 *Oikopleura dioica*; S21: 蕨枝螅水母属 *Obelia* sp.; Y1—Y23: 监测站位编号

如图6所示,本研究所选择结构方程模型可以解释浮游动物丰富度变化的55.4%,可以解释浮游动物均匀度变化的28.3%,主要解释因子包含了海水富营养化指数、海水重金属污染指数以及浮游植物的丰富度( $\chi^2 = 0.23, df = 1, p = 0.63, GFI = 0.99, RMSE < 0.01, CFI = 1, AIC = 28.2$ ),该模型整体拟合效果可接受。模型结果表明,海水富营养化水平对浮游动物丰富度具有显著的直接影响(效应系数为-0.26,  $P = 0.01$ ),随着富营养化水平升高,浮游动物的丰富度显著降低;海水重金属污染水平对浮游动物的丰富度则表现为显著的间接影响,即通过影响浮游植物的丰富度(效应系数为-0.41,  $P < 0.001$ )来间接影响浮游动物的丰富度(间接效应系数为-0.2),而海水重金属污染水平对浮游动物丰富度的直接效应系数为-0.17 ( $P = 0.16$ )。海水富营养化水平和重金属污染水平对浮游动物的均匀度均无显著影响( $P > 0.05$ )。浮游植物群落丰富度与浮游动物丰富度也具有显著的正向关系(效应系数为0.49,  $P = 0.01$ )。

### 3 讨论

本次冬季调查在鸭绿江口湿地国家级自然保护区共鉴定出浮游动物6大类14种以及浮游幼虫5类,其中桡足类最多,占比52.63%,为主要优势类群。1958—1959年全国海洋综合普查、2009年北黄海獐子岛海域调查结果<sup>[21]</sup>以及2015—2016年北黄海调查结果<sup>[22]</sup>都表明桡足类在北黄海海域占绝对优势,与本文结果一致。本次调查浮游动物平均丰度为1200个/ $m^3$ ,而姜强于2007年在北黄海调查得到的浮游动物平均丰度值为355个/ $m^3$ <sup>[23]</sup>,段妍等2015年调查到的浮游动物丰度值范围是1799—4168个/ $m^3$ <sup>[24]</sup>,说明受到营养盐浓度、渔业捕捞以及气候变化等影响,海洋浮游动物丰度年际变化较大。优势种方面,鸭绿江口湿地保护区冬季近岸海域浮游动物优势种为洪氏纺锤水蚤、双毛纺锤水蚤、小拟哲水蚤和拟长腹剑水蚤,这与近年来国内学者

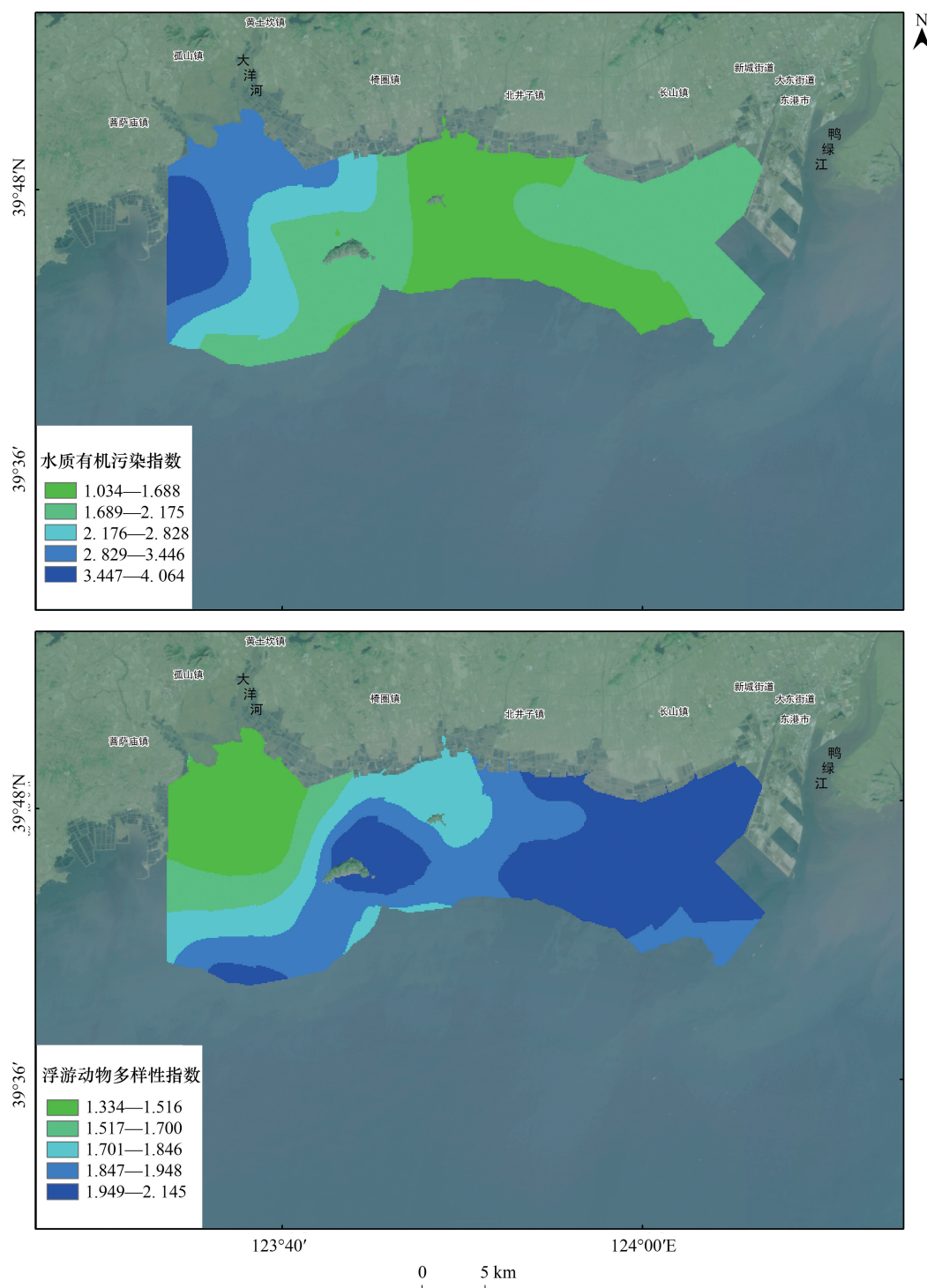


图5 鸭绿江口湿地近岸海域浮游动物群落多样性与水质污染指数空间分布格局

Fig.5 Spatial distribution of the Zooplankton diversity index and water organic pollution index

对北黄海浮游动物优势种调查结果相似<sup>[22,25]</sup>。冬季鸭绿江口湿地近岸海域浮游动物多样性指数、均匀度指数和丰富度指数平均值分别为 1.34、0.51 和 0.59,显著低于北黄海海域在其他季节的调查结果<sup>[26]</sup>,但与北黄海獐子岛附近海域冬季调查结果相似<sup>[21]</sup>。冬季浮游动物种类少、丰度和多样性水平偏低的原因主要是一方面沿岸入海河流进入枯水期,近海盐度升高,低盐种类分布减少,另一方面,受冷空气和寒潮的影响,冷水团增



强,近海水温下降,部分暖水性种类消失,高盐低温的综合作用使浮游动物的生长繁殖受到抑制<sup>[25]</sup>。

在空间分布方面,由于水体具有流动性,保护区不同功能分区之间总体上浮游动物群落结构差异性不大。研究区域浮游动物群落结构的差异主要受到水质环境的影响,浮游动物群落多样性指数低值区域出现在大洋河口附近,而保护区实验区及外围海域由于距离河口海岸最远,受陆源物质影响最弱,因此具有最高的丰富度指数。研究表明,近海浮游动物群落的区域变化不仅受到温度、盐度等环境因子的驱动,还受到人类活动所引起的富营养化及其空间变化的影响<sup>[27]</sup>。由于鸭绿江口湿地近岸海域开发利用方式主要以贝类底播养殖为主,研究表明贝类对微型浮游动物的选择性摄食将对浮游动物群落结构产生影响,此外滤食性贝类还能同桡足类等浮游动物产生食物竞争关系进而影响浮游动物种群的生长<sup>[28]</sup>。因此海水养殖区贝类养殖的密度和种类分布也会影响浮游动物群落结构的分布。

鸭绿江口湿地近岸海域水质环境对浮游动物的物种分布和群落结构存在显著影响。冗余分析结果表明,COD、DIN、浮游植物群落多样性和 Cu 是影响浮游动物种群分布的主要环境因子。近年来由于沿岸工农业污水和养殖尾水的排放以及入海河流陆源物质的输入,大洋河口和鸭绿江口氮、磷含量升高,富营养化、有机污染和重金属污染风险加剧。实验研究表明,在总氮和总磷浓度最高时,浮游植物和浮游动物的种类丰富度下降<sup>[29]</sup>。本研究发现富营养化指数对浮游动物丰富度具有显著的直接负向效应,说明进一步的富营养化可能会导致本海域浮游动物多样性水平和丰度的降低,这与辽河口的研究结果基本一致<sup>[30]</sup>。另一方面,富营养化水平也会通过影响浮游植物群落来间接影响浮游动物群落。浮游植物会通过食物网关系对浮游动物的生长和群落结构产生影响<sup>[31-32]</sup>,相关分析结果显示浮游植物的物种数、多样性指数和丰富度指数与浮游动物的丰度值、物种数和丰富度指数呈显著正相关性而与均匀度指数呈显著负相关性。海水中高水平含量的重金属混合污染物会抑制浮游植物的生长繁殖,而低水平的重金属混合污染物则会引起浮游植物种群的演替,抑制硅藻的生长<sup>[33]</sup>。黄渤海海域浮游植物群落中硅藻占显著优势<sup>[34]</sup>,因此海水环境中重金属污染水平的升高会通过抑制浮游植物群落的生长来降低浮游动物的丰富度。结构方程模型结果表明,浮游动物的丰富度对周围海域海水富营养化和重金属污染水平具有较好的指示作用,能够反映区域海水水质情况。

#### 4 结论

鸭绿江口湿地国家级自然保护区近岸海域冬季共鉴定出浮游动物 6 大类 14 种以及浮游幼虫(体)5 大类,平均丰度为 1200 个/m<sup>3</sup>,其中优势类群为桡足类,占比 52.63%,优势种为洪氏纺锤水蚤、双毛纺锤水蚤、小拟哲水蚤和拟长腹剑水蚤,多样性指数、均匀度指数和丰富度指数平均值分别为 1.34、0.51 和 0.59;保护区不同功能分区之间浮游动物群落结构总体差异不大,实验区及外围海域具有最高的丰富度指数;COD、DIN、浮游植物群落多样性和 Cu 是影响浮游动物种群分布的主要环境因子;海水富营养化水平对浮游动物丰富度具有显著的直接效应(效应系数为-0.26,  $P=0.01$ ),重金属污染水平对浮游动物的丰富度则通过影响浮游植物的丰富度(效应系数为-0.41,  $P<0.001$ )来间接影响浮游动物的丰富度(间接效应系数为-0.2)。

#### 参考文献 (References):

- [1] Zhou S C, Jin B S, Guo L, Qin H M, Chu T J, Wu J H. Spatial distribution of zooplankton in the intertidal marsh creeks of the Yangtze River Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 85(3): 399-406.

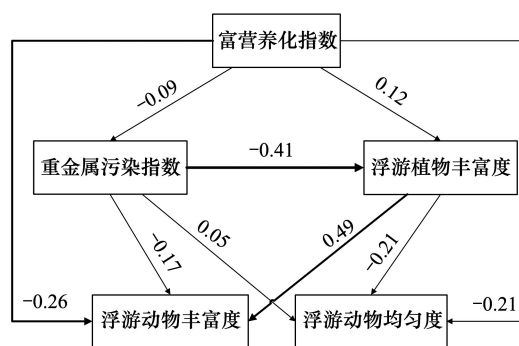


图 6 鸭绿江口湿地海洋环境对浮游动物群落影响的结构方程模型模拟

Fig.6 Simulation result of the effect of environmental factors on zooplankton community structure

- [ 2 ] Colloquium M Z. Future marine zooplankton research-a perspective. Marine Ecology Progress Series, 2001, 222: 297-308.
- [ 3 ] Lowe M R, Lawson G L, Fogarty M J. Drivers of euphausiid distribution and abundance in the Northeast U.S. Shelf Large Marine Ecosystem. ICES Journal of Marine Science, 2018, 75(4): 1280-1295.
- [ 4 ] Park G S, Marshall H G. Estuarine relationships between zooplankton community structure and trophic gradients. Journal of Plankton Research, 2000, 22(1): 121-136.
- [ 5 ] Falandysz J, Strandberg B, Strandberg L, Bergqvist P A, Rappe C. Concentrations and spatial distribution of chlordanes and some other cyclodiene pesticides in Baltic plankton. Science of the Total Environment, 1998, 215(3): 253-258.
- [ 6 ] 晏维金. 人类活动影响下营养盐向河口/近海的输出和模型研究. 地理研究, 2006, 25(5): 825-835.
- [ 7 ] 霍达, 刘萍, 李一鸣, 刘利华, 陆恒, 郭丛笑, 李连星, 乔之怡. 独流减河口浮游生物群落结构与环境因子的相关性研究. 海洋环境科学, 2018, 37(3): 396-402.
- [ 8 ] 邓邦平, 徐韧, 刘材材, 蔡芑, 叶属峰. 夏季黄海南部和东海近海浮游动物群落分布特征. 南方水产科学, 2015, 11(4): 11-19.
- [ 9 ] Gorokhova E, Lehtiniemi M, Postel L, Rubene G, Amid C, Lesutene J, Uusitalo L, Strake S, Demereckiene N. Indicator properties of Baltic zooplankton for classification of environmental status within marine strategy framework directive. PLoS One, 2016, 11(7): e0158326.
- [ 10 ] 王晓, 姜美洁, 刘萍, 张学雷, 王燕, 王宗灵. 秋季南黄海浮游动物分布及其影响因素. 海洋学报, 2016, 38(10): 125-134.
- [ 11 ] 张硕, 施斌杰, 谢斌, 张虎, 李大鹏. 连云港海州湾海洋牧场浮游动物群落结构及其与环境因子的关系. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1410-1418.
- [ 12 ] 贺雨涛, 刘光兴, 房静, 陈洪举. 2008 年夏季南黄海浮游动物群落特征. 海洋环境科学, 2019, 38(4): 494-502.
- [ 13 ] Choi C Y, Battley P F, Potter M A, Rogers K G, Ma Z J. The importance of Yalu Jiang coastal wetland in the North Yellow Sea to bar-tailed Godwits *Limosa lapponica* and Great Knots *Calidris tenuirostris* during northward migration. Bird Conservation International, 2015, 25(1): 53-70.
- [ 14 ] 孙宝娣, 崔丽娟, 李伟, 康晓明, 于菁菁, 梁钊瑞. 鸭绿江口湿地生物多样性维持价值评价. 湿地科学, 2017, 15(3): 404-410.
- [ 15 ] 丹东市海洋与渔业局. 丹东市年海洋环境质量公报. 2018.
- [ 16 ] 国家海洋局. 海洋调查规范. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [ 17 ] 国家海洋局. 海洋监测规范. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [ 18 ] 李萍, 莫海连, 郭钊. 2016 年北部湾近岸海域海水环境质量评价. 海洋湖沼通报, 2019, (1): 54-64.
- [ 19 ] 邹景忠, 董丽萍, 秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨. 海洋环境科学, 1983, 2(2): 41-54.
- [ 20 ] 周细平, 李贞, 吴培芳, 吴茜, 陈逸欣, 刘康格, 刘东艳, 王玉珏, 王跃启. 珠江河口区大型底栖动物群落结构. 生物多样性, 2019, 27(10): 1112-1121.
- [ 21 ] 尹洁慧, 张光涛, 李超伦, 王世伟, 万艾勇. 北黄海獐子岛海域浮游动物群落年际变化. 海洋学报, 2017, 39(8): 78-88.
- [ 22 ] 卜亚谦, 朱丽岩, 陈香, 董辉辉, 孙跃, 王超. 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, 2019, 49(2): 59-66.
- [ 23 ] 姜强. 春、秋季北黄海大中型浮游动物群落生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [ 24 ] 段妍, 王爱勇, 王小林, 刘修泽, 柴雨, 陆阳, 王彬, 董婧. 黄海北部春季和夏季浮游动物生态特性与时空分布. 水产科学, 2017, 36(4): 456-461.
- [ 25 ] 杜明敏, 刘镇盛, 王春生, 张东声, 章菁. 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.
- [ 26 ] 朱延忠. 夏、冬季北黄海大中型浮游动物群落生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 35-36.
- [ 27 ] Li K Z, Yin J Q, Tan Y H, Huang L M, Song X Y. Short-term variation in zooplankton community from Daya Bay with outbreaks of *Penilia avirostris*. Oceanologia, 2014, 56(3): 583-602.
- [ 28 ] Newell R I E. Ecosystem influences of natural and cultivated populations of suspension-feeding bivalve molluscs: a review. Journal of Shellfish Research, 2004, 23(1): 51-61.
- [ 29 ] Laprise R, Dodson J J. Environmental variability as a factor controlling spatial patterns in distribution and species diversity of zooplankton in the St. Lawrence Estuary. Marine Ecology Progress Series, 1994, 107(1/2): 67-81.
- [ 30 ] 杨志, 叶金清, 杨青, 郭皓. 辽河口海域浮游动物多样性及对河口环境的指示. 海洋环境科学, 2020, 39(1): 25-30.
- [ 31 ] 柯志新, 陈丹婷, 谭烨辉, 刘华健, 刘甲星. 汕头南澳-东山海域初级生产力的时空特征. 中国水产科学, 2019, 26(1): 44-52.
- [ 32 ] 任玉正, 柯志新, 谭烨辉, 李开枝. 广东省南澳岛东部海域浮游动物群落结构及其影响因素. 热带海洋学报, 2020, 39(2): 65-76.
- [ 33 ] 庄栋法, 林昱. 海洋围隔生态系中营养盐和重金属对浮游生物的影响. 海洋学报, 1990, 12(5): 661-665.
- [ 34 ] 纪昱彤, 王宁, 陈洪举, 刘光兴. 2013 年秋季渤海浮游植物的群落特征. 中国海洋大学学报, 2018, 48(S2): 31-41.