

# 渤海中南部海域浮游动物群落结构及其与环境因子的关系

刘潇<sup>1,2</sup> 王鹏<sup>3</sup> 温国义<sup>1,2</sup> 张琦<sup>1,2</sup> 徐东会<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> 国家海洋局北海环境监测中心, 山东青岛 266033;

<sup>2</sup> 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 山东青岛 266061;

<sup>3</sup> 青岛市海洋发展局, 山东青岛 266000)

**摘要** 为探究渤海中南部海域浮游动物群落结构及其与环境因子的关系, 于2018年5月和9月对渤海中南部海域进行了2个航次的浮游动物调查, 并采用冗余分析(RDA)研究环境因子对浮游动物群落结构的影响。结果表明, 共鉴定浮游动物39种, 隶属8类。5月鉴定浮游动物22种, 第一优势种为中华哲水蚤(*Cladnus sinicus*); 9月鉴定29种, 第一优势种为强壮箭虫(*Sagitta crassa*)。调查海域 Shannon-Wiener 多样性指数均值为2.01, 均匀度指数均值为0.61, 物种丰富度指数均值为1.05。5月调查海域浮游动物丰度均值(2371.8 ind/m<sup>3</sup>)高于9月(231.2 ind/m<sup>3</sup>)。空间分布上, 5—9月浮游动物丰度高值呈现从中部向南部移动的特点。冗余分析结果表明, 表层水温、溶解氧、叶绿素a、盐度和化学需氧量是影响该海域浮游动物群落结构的最主要因子。

**关键词** 浮游动物; 群落结构; 冗余分析; 环境因子; 渤海中南部

中图分类号 Q958.1 文献标识码 A

文章编号 1007-5739(2022)10-0136-06

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2022.10.038

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Community Structures of Zooplankton and Its Relationship with Environmental Factors in Central and Southern Bohai Sea

LIU Xiao<sup>1,2</sup> WANG Peng<sup>3</sup> WEN Guoyi<sup>1,2</sup> ZHANG Qi<sup>1,2</sup> XU Donghui<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> North China Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Qingdao Shandong 266033;

<sup>2</sup> Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Environment and Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao Shandong 266061;

<sup>3</sup> Qingdao Municipal Marine Development Bureau, Shandong Qingdao 266000)

**Abstract** In order to explore the community structures of zooplankton and the relationship between zooplankton community and environmental factors in the central and southern Bohai Sea, zooplankton and environmental factors survey data on two voyages in May and September of 2018 were analyzed. The influence of environmental factors on the zooplankton community was discussed using redundancy analysis (RDA). The results showed that a total of 39 zooplankton species, belonging to 8 taxonomic groups, were recorded. 22 species of zooplankton were identified in May, the first dominant species was *Cladnus sinicus*; 29 species were identified in September, and the first dominant species was *Sagitta crassa*. In the surveyed sea, the average Shannon-Wiener diversity index was 2.01, the average Pielou evenness index was 0.61, and the average Margalef species richness index was 1.05. The average abundance of zooplankton in May (2371.8 ind/m<sup>3</sup>) was higher than that in September (231.2 ind/m<sup>3</sup>). In terms of spatial distribution, from May to September, the high abundance of zooplankton showed the characteristics of moving from the central Bohai Sea to the south. The redundancy analysis showed that the main factors affecting the zooplankton community of the sea were surface temperature, dissolved oxygen, chlorophyll-a (chl-a), salinity and COD.

**Keywords** zooplankton; community structure; redundancy analysis; environmental factor; central and southern Bohai Sea

**作者简介** 刘潇(1991—),女,河北石家庄人,工程师。研究方向:海洋生态和渔业资源。

\* 通信作者

**收稿日期** 2021-09-02

渤海是我国唯一的半封闭内海,其生态格局中上承黄河、辽河、海河三大流域,下接黄海,是连接三大流域和外海的枢纽,其生态系统类型复杂、生物物种丰富、地质地貌类型多样。浮游动物是海洋生物的重要类群,不仅影响浮游植物群落结构的变化,也是经济鱼类饵料的重要组成部分,其群落结构组成和空间分布与水环境状况密切相关<sup>[1]</sup>。

冗余分析(redundancy analysis, RDA)通过二维排序图上样点的位置、集散形态反映解释变量和响应变量的特点,可较清晰地解释生态类群与环境因子之间的关系,结果直观且信息量大,因而在生态学领域应用广泛<sup>[2-4]</sup>。

关于渤海浮游动物的种类组成和时空分布特征的研究多针对整体大尺度海域或局限部分区域(渤海湾、莱州湾和辽东湾),一般运用相关分析的方法研究海域浮游动物与环境因子的关系<sup>[5-9]</sup>。目前,针对渤海中南部海域浮游动物的研究较少。本研究利用2018年5月和9月在渤海中南部海域开展的浮游动物和水环境调查,对海域浮游动物的种类组成和时空分布特征进行了研究,并采用冗余分析(RDA)研究了浮游动物与环境因子的关系,以期为海域的生态研究和资源的合理利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 站位布设

于2018年5月和9月对渤海中南部海域(东经118°40'~119°50'、北纬37°50'~38°50')进行了2个航次的调查。以垂直于东营近岸所在海域主流向(NW-SE)设4个纵断面,断面间距为15 km。其中,中间两个断面各布设5个站位,其余两个断面各布设3个站位,共计16个调查站位。各站位布设如图1所示。

### 1.2 浮游动物的采集与分析

按照《海洋调查规范 第6部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007)<sup>[10]</sup>,使用浅水I型浮游生物网由底至表垂直拖网采集浮游动物,保存在5%甲醛海水中带回实验室分析。样品在体视显微镜下采用直接计数法进行种类鉴定与计数,并根据滤水量将浮游动物个数换算为个体丰度(ind/m<sup>3</sup>)。

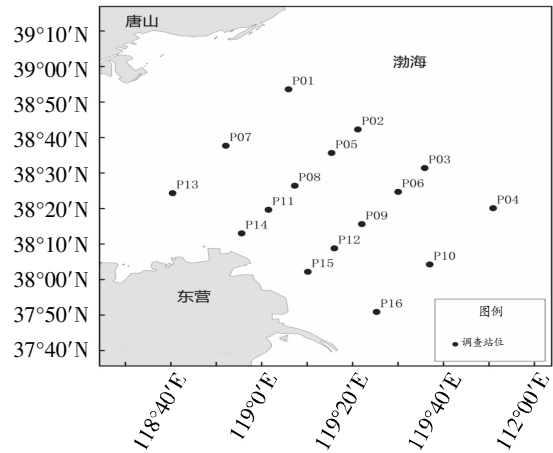


图1 渤海中南部海域调查站位分布

### 1.3 环境因子的测定

水质样品的采集和参数测定方法参照《海洋监测规范 第4部分:海水分析》(GB 17378.4—2007)<sup>[11]</sup>和《海洋调查规范 第6部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007)<sup>[10]</sup>中的规定进行。

表层水温采用高精度数字式水温仪法测定,透明度采用透明度盘法测定,盐度采用盐度计法测定。酸度采用pH计法测定,溶解氧采用碘量法测定,化学需氧量采用碱性高锰酸钾法测定,溶解磷酸盐、溶解无机氮(铵盐、亚硝酸盐和硝酸盐)均采用流动分析法测定,石油烃采用紫外分光光度法测定。叶绿素a样品按水质样品层次采集水样250 mL,经孔径为0.8 μm的滤膜过滤后干燥冷藏保存,采用萃取荧光法进行分析。

### 1.4 优势种

根据物种的出现频率及个体数量来确定优势种,用优势度表示,计算公式<sup>[12]</sup>:

$$Y = (S_i/S) \times f_i$$

式中, $S_i$ 为第*i*个物种的个体数量, $S$ 为所有物种的总个体数, $f_i$ 为第*i*个物种在各站位出现的频率。 $Y > 0.02$ 的物种为主要优势种。

### 1.5 物种多样性

浮游动物种类多样性( $H'$ )<sup>[13]</sup>、均匀度( $J$ )<sup>[14]</sup>和物种丰富度指数( $D$ )<sup>[15]</sup>的计算公式如下。

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数: } H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } J = H' / \log_2 S$$

$$\text{Margalef 物种丰富度指数: } D = (S-1) / \log_2 N$$

式中： $P_i = n_i / N$ ,  $n_i$  是第  $i$  个物种的个体数,  $N$  是全部物种的个体数,  $S$  为种数。

### 1.6 数据分析

本研究采用 Canoco 4.5 软件对浮游动物丰度和环境因子进行数据分析。先对浮游动物丰度数据进行去趋势对应分析(DCA);当排序轴最大梯度长度大于3时选择典范对应分析(CCA),当排序轴最大梯度长度小于3时选择冗余分析(RDA)。最终用物种与环境因子的双序图表示渤海中南部海域浮游动物与环境因子的关系。利用 ArcGIS 10.5 进行站位和空间分布图绘制,利用 R 语言绘制箱线图。

## 2 结果与分析

### 2.1 种类组成与优势种

2018年5月和9月,共鉴定浮游动物39种,隶属8类;5月共鉴定浮游动物22种,9月共鉴定浮游动物29种。其中:浮游幼虫最多,有14种,占总种数的35.90%;其次为桡足类,有12种,占总种数的30.77%;水母类7种,占总种数的17.95%;枝角类2种,被囊类、端足类、涟虫类和毛颚类各1种(表1)。

由表2可知,中华哲水蚤(*Cladnus sinicus*)是调查海域2个季节的优势种,且优势度较高。5月调查海域各站位均获得大量中华哲水蚤,为明显优势种;同时腹针胸刺水蚤(*Centropages abdominalis*)也具有明显优势。9月强壮箭虫(*Sagitta crassa*)为第一优势种,桡足类、水母类和浮游幼虫也具有一定优势。

### 2.2 物种多样性

调查海域9月 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、均匀度指数( $J$ )和物种丰富度指数( $D$ )均大于5月调查结果。2018年调查海域 Shannon-Wiener 多样性指数均值为2.01,其中:5月多样性水平较低,为1.09;9月较高,为2.93。均匀度指数均值为0.61,其中:5月均匀度指数水平较低,为0.37;9月较高,为0.86。物种丰富度指数均值为1.05,其中:5月物种丰富度水平较低,为0.69;9月较高,为1.41。

### 2.3 时空分布特征

5月调查海域浮游动物丰度较高,平均值为2371.8 ind/m<sup>3</sup>,浮游动物丰度(自然对数)箱线图分析表明:5月出现较小异常值点,中位数处于中间偏

表1 渤海中南部海域浮游动物种名录

种类	拉丁名/英文名	5月	9月
异体住囊虫	<i>Oikopleura dioica</i>		+
细足法虫戎	<i>Themisto gracilipes</i>	+	
针尾涟虫属	<i>Diastylis</i> sp.	+	
强壮箭虫	<i>Sagitta crassa</i>	+	+
背针胸刺水蚤	<i>Centropages dorsispinatus</i>		+
刺尾歪水蚤	<i>Tortanus spinicaudatus</i>	+	
短角长腹剑水蚤	<i>Oithona brevicornis</i>		+
腹针胸刺水蚤	<i>Centropages abdominalis</i>	+	
洪氏纺锤水蚤	<i>Acartia hongii</i>	+	
近缘大眼剑水蚤	<i>Corycaeus affinis</i>	+	+
拟长腹剑水蚤	<i>Oithona similis</i>	+	+
瘦尾胸刺水蚤	<i>Centropages tenuiremis</i>		+
双毛纺锤水蚤	<i>Acartia bifilosa</i>		+
小拟哲水蚤	<i>Paracalanus parvus</i>	+	+
真刺唇角水蚤	<i>Labidocera euchaeta</i>	+	+
中华哲水蚤	<i>Cladnus sinicus</i>	+	+
八斑唇腕水母	<i>Rathkea octopunctata</i>	+	
半球美螅水母	<i>Clytia hemisphaerica</i>	+	
卡马拉水母	<i>Malagazzia caroliniae</i>		+
球型侧腕水母	<i>Pleurobrachia globosa</i>		+
嵯山秀氏水母	<i>Sugiura chengshanense</i>	+	
蕨枝螅水母属	<i>Obelia</i> sp.	+	+
细颈和平水母	<i>Eirene hexanemalis</i>		+
半索类柱头幼虫	tornaria larva		+
短尾类幼体	brachyura zoea	+	+
多毛类幼体	polychaeta larva		+
腹足类幼体	gastropoda post larva	+	+
海蛇尾类长腕幼虫	ophiopluteus larva		+
糠虾幼体	mysidacea larva		+
口足类阿利玛幼体	alima larva		+
磷虾节胸幼体	calyptopis larva	+	
双壳类幼体	bivalvia larva	+	+
歪尾类幼体	anomura larva		+
无节幼体	nauplius larva		+
鱼卵	fish eggs	+	
仔鱼	fish larva	+	+
长尾类幼体	macrura larva	+	+
肥胖三角溞	<i>Penilia airostris</i>		+
鸟喙尖头溞	<i>Evadne tergestina</i>		+

注:“+”表示鉴定到此种类。

表2 渤海中南部海域浮游动物优势种

种类	优势度	
	5月	9月
中华哲水蚤	0.72	0.12
腹针胸刺水蚤	0.23	
强壮箭虫		0.21
背针胸刺水蚤		0.07
球型侧腕水母		0.05
小拟哲水蚤		0.05
双毛纺锤水蚤		0.04
双壳类幼体		0.04
真刺唇角水蚤		0.02

上水平,说明多个站位浮游动物丰度值较高;9月调查海域浮游动物丰度均值为231.2 ind/m<sup>3</sup>,未出现异

常值点,箱线图整体分布水平较对称,中位数处于中间水平,说明各站位丰度梯度分布较均匀(图 2)。

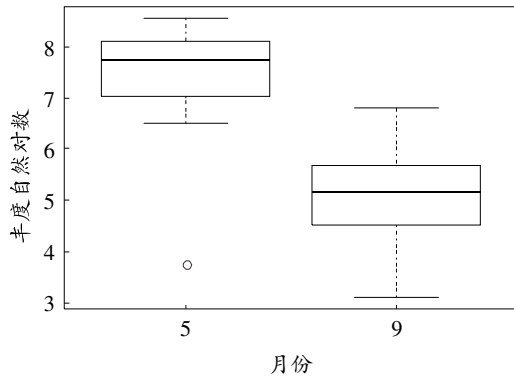
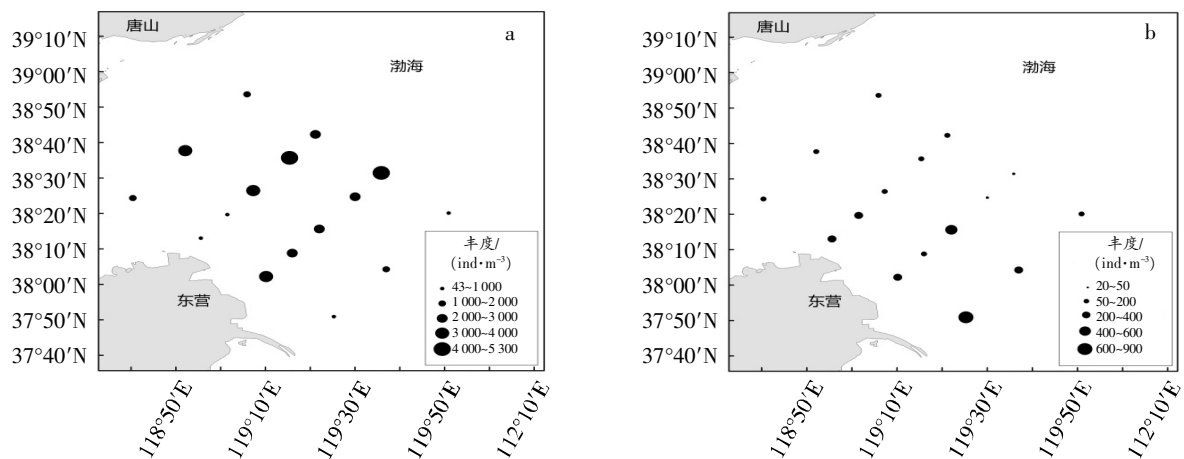


图 2 渤海中南部海域浮游动物丰度(自然对数)箱线图

调查海域浮游动物平面分布见图 3。由图 3 可知,渤海中南部海域浮游动物空间分布呈现一定的



注:a为5月;b为9月。

图 3 渤海中南部海域浮游动物平面分布

19 种浮游动物进行去趋势对应分析(DCA),排序轴最长梯度为 2.527,说明浮游动物群落结构接近线性模型,故本研究采用冗余分析(RDA)探究浮游动物与环境因子的关系。对 10 项环境因子进行Monte-Carlo 检验,检验结果表明:表层水温、溶解氧、叶绿素 a、盐度对浮游动物丰度具有显著性影响( $P < 0.01$ ),化学需氧量具有一定影响( $P=0.05$ ),故选取这 5 种环境因子进行数据分析。

上述研究筛选出 19 种浮游动物和 5 种环境因子,物种和环境(除 pH 值外)矩阵经  $\log(x+1)$  转换<sup>[16]</sup>后进行 RDA 分析,研究渤海中南部海域浮游动物与环境因子的关系。

季节特征,5—9 月调查海域浮游动物丰度高值呈现从中部向南部移动的特点。5 月浮游动物丰度高值出现在调查海域中部和北部:东北部 P03 站丰度最高,为 5 324 ind/m<sup>3</sup>;其次是中北部的 P05 站,丰度为 5 002 ind/m<sup>3</sup>;西南部东营近岸海域 P14 站出现最低值,为 43 ind/m<sup>3</sup>。9 月浮游植物丰度高值出现在调查海域的南部,东部和北部丰度值均较低;调查海域最南部 P16 站浮游动物丰度最高,为 889 ind/m<sup>3</sup>;调查海域东北部,位于第三条断面北部的 P03 和 P06 站浮游动物丰度最低,分别为 27、22 ind/m<sup>3</sup>。

## 2.4 数据分析

根据以下两个原则筛选物种:一是物种的站位出现率大于 12.5%;二是该物种至少在 1 个站位相对丰度大于 5%。调查中共筛选出 19 种浮游动物。对

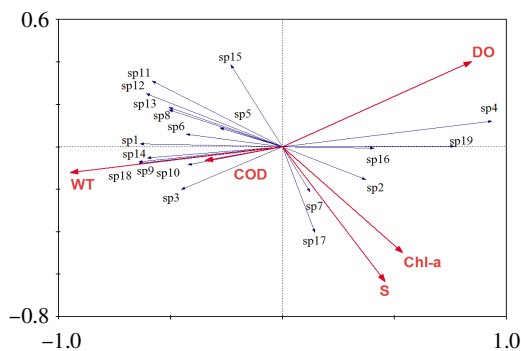
结果表明,前两个轴的特征值分别为 0.450 和 0.032,物种与环境的相关性分别为 0.960 和 0.692(表 3),表明排序能够很好地反映浮游动物与水质因子间的关系。物种的前两个排序轴相关系数为 -0.052 4,表示两个排序轴几乎垂直;环境因子前两个排序轴的相关系数为 0,表明排序结构有效<sup>[17-19]</sup>。

表 3 浮游动物种类和环境因子 RDA 分析统计信息

排序轴	特征值	物种与环境因子间相关性	物种累积百分数/%	物种与环境间关系累积百分数/%
1	0.450	0.960	45.0	86.5
2	0.032	0.692	48.2	91.5
3	0.026	0.536	50.8	96.4
4	0.015	0.686	52.3	99.3

排序图箭头长短代表其在主轴中的作用大小,物种与各环境因子指标之间夹角的余弦值表示对应的相关性,夹角越小表示相关性越高;箭头同向表示正相关,反向表示负相关,夹角接近直角表示相关性很小<sup>[20]</sup>。由于环境因子在进行分析之前都已经进行标准化处理,所以 RDA 排序图中,环境因子箭头的长短可以代表环境因子对物种数据影响程度(解释量)的大小<sup>[21]</sup>。

由图 4 可知,与第一排序轴相关性较高的环境因子为表层水温、溶解氧和化学需氧量,与第二排序轴相关性较高的环境因子为盐度和叶绿素 a,19 种浮游动物主要分布在排序图的左上方和右下方。背针胸刺水蚤、多毛类幼体、近缘大眼剑水蚤等位于排序图的左侧,与表层水温和化学需氧量成正相关,与溶解氧、盐度和叶绿素 a 成负相关;短尾类幼体、腹针胸刺水蚤、拟长腹剑水蚤等位于排序图的右侧,与溶解氧、盐度和叶绿素 a 成正相关。总体上,表层水温、溶解氧、盐度和叶绿素 a 对浮游动物的影响较大,化学需氧量的影响较小。



注:WT 为表层水温;DO 为溶解氧;Chl-a 为叶绿素 a;S 为盐度;COD 为化学需氧量;sp1 为背针胸刺水蚤;sp2 为短尾类幼体;sp3 为多毛类幼体;sp4 为腹针胸刺水蚤;sp5 为近缘大眼剑水蚤;sp6 为糠虾幼体;sp7 为拟长腹剑水蚤;sp8 为强壮箭虫;sp9 为球型侧腕水母;sp10 为瘦尾胸刺水蚤;sp11 为双壳类幼体;sp12 为双毛纺锤水蚤;sp13 为无节幼体;sp14 为细颈和平水母;sp15 为小拟哲水蚤;sp16 为鱼卵;sp17 为长尾类幼体;sp18 为真刺唇角水蚤;sp19 为中华哲水蚤。

图 4 主要浮游动物与环境因子的 RDA 分析排序情况

### 3 结论与讨论

#### 3.1 浮游动物群落结构与时空分布

2018 年共鉴定浮游动物 39 种,隶属 8 类,其中浮游幼虫 14 种;5 月共鉴定浮游动物 22 种,9 月共鉴定浮游动物 29 种。5 月中华哲水蚤为明显优势种,同时腹针胸刺水蚤也具有明显优势,9 月强壮箭

虫为第一优势种。徐东会等<sup>[8]</sup>调查了 2013 年渤海中部海域 4 个月份的浮游动物,结果显示,5 月和 8 月分别鉴定浮游动物 29 种和 45 种,中华哲水蚤和强壮箭虫是全年优势种。王克等<sup>[22]</sup>于 1998—1999 年对渤海中南部海域的大网浮游动物进行了 2 次调查,分别获得浮游动物 46 种和 23 种。本研究与附近海域历史数据相比,浮游动物种类数稍有下降,但种类组成仍是以桡足类为主,中华哲水蚤和强壮箭虫为主要优势种。

Shannon-Wiener 多样性指数的水平可以体现种类数目与个体分配均匀性 2 个因素,种类数目较多表示丰富度增大,种类间个体分配的均匀性增强也会提高多样性指数<sup>[23]</sup>。2018 年调查海域 Shannon-Wiener 多样性指数均值为 2.01,9 月水平明显高于 5 月。9 月调查海域获得浮游动物种类数为 29 种,大于 5 月的 22 种。5 月调查海域浮游动物优势种为 2 种,中华哲水蚤优势度为 0.72;9 月优势种为 8 种,无异常大的优势度值(0.02~0.21);说明 9 月物种间个体分配的均匀性优于 5 月,因而其 Shannon-Wiener 多样性指数较高。

5 月调查海域浮游动物丰度较高,平均值为 2 371.8 ind/m<sup>3</sup>,9 月均值为 231.2 ind/m<sup>3</sup>。徐东会等<sup>[8]</sup>探究了渤海中部海域浮游动物时空分布,也得出了相同结论,即春季浮游动物丰度明显高于秋季。空间分布上,5—9 月调查海域浮游动物丰度高值呈现从中部向南部移动的特点,这可能与区域水温变化有关。

#### 3.2 浮游动物与环境因子的关系

相关研究表明,温度、盐度、溶解氧、叶绿素和水团等是影响浮游动物丰度和分布主要环境因子<sup>[24-28]</sup>。不同浮游动物对环境的需求各具差异,某一环境因子只对某些种类的浮游动物有明显影响<sup>[29]</sup>。徐东会等<sup>[8]</sup>运用相关分析探究了影响渤海中部海域浮游动物分布的主要环境因子,包括盐度、温度、叶绿素、水深和溶解氧等。

本研究结果显示,表层水温、溶解氧、叶绿素 a、盐度和化学需氧量是影响渤海中南部海域浮游动物群落结构的主要因子。表层水温是影响渤海中南部海域浮游动物分布的首要因子,可能是由于温度直



接决定生物体的体温,进而影响其新陈代谢过程和生长繁殖的速度,从而对其丰度和分布产生关键影响<sup>[30]</sup>。背针胸刺水蚤等位于排序图左侧的浮游动物与 COD 成正相关,说明海域大部分浮游动物对有机污染有较强的耐受力。相关研究表明,盐度是影响浮游动物群落结构的重要环境因子<sup>[31-34]</sup>,这可能是由于盐度能够影响浮游动物的体液调节和渗透压平衡<sup>[35]</sup>。本文 RDA 分析也表明,盐度是影响渤海中南部海域浮游动物群落结构的关键环境因子。叶绿素 a 浓度可能通过初级生产力和浮游植物丰度间接对浮游动物的群落结构产生影响。

本研究中,无机氮和磷酸盐未成为决定该海域浮游动物丰度分布的环境因子。但是,有研究表明,水体中营养盐在一定浓度范围能够促进浮游植物的生长,从而间接影响浮游动物的数量与分布,硅酸盐、磷酸盐、总磷和总氮等营养盐水平是影响部分海域浮游动物群落结构的主要环境因子<sup>[32,36]</sup>。

#### 4 参考文献

- [1] DAVID V, SAUTOUR B, CHARDY P, et al. Long-term changes of the zooplankton variability in a turbid environment: the Gironde Estuary (France) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 64(2/3): 171-184.
- [2] 朱冲冲, 李秋华, 陈文生, 等. 贵州草海后生浮游动物群落季节动态特征及与环境因子的关系 [J]. *生态科学*, 2018, 37(6): 131-138.
- [3] 黄小平, 张景平, 江志坚. 人类活动引起的营养物质输入对海湾生态环境的影响机理与调控原理 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30(9): 961-969.
- [4] 林青, 由文辉, 徐凤洁, 等. 滴水湖浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2014, 34(23): 6918-6929.
- [5] 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 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2019, 49(2): 59-66.
- [6] 杨璐, 刘捷, 张健, 等. 渤海湾浮游动物群落变化及其与环境因子的关系 [J]. *海洋学研究*, 2018, 36(1): 93-101.
- [7] 王宇, 房恩军, 郭彪, 等. 渤海湾天津海域春季浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *海洋渔业*, 2014, 36(4): 300-305.
- [8] 徐东会, 孙雪梅, 陈碧鹃, 等. 渤海中部浮游动物的生态特征 [J]. *渔业科学进展*, 2016, 37(4): 7-18.
- [9] 王彬, 董婧, 刘春洋, 等. 夏初辽东湾海蜃放流区大型水母和主要浮游动物 [J]. *渔业科学进展*, 2010, 31(5): 83-90.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查: GB/T 12763.6—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析: GB 17378.4—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] MCHAUGHTON S J. Relationships among functional properties of Californian grassland [J]. *Nature*, 1967, 216(5111): 168-169.
- [13] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [14] PIELOU E C. *An Introduction to Mathematical Ecology* [M]. New York: Wiley-Interscience, 1969.
- [15] MARGALEF R. Information theory in ecology [J]. *General Systems*, 1958, 31: 36-71.
- [16] FLORES L N, BARONE R. Phytoplankton dynamics in two reservoirs with different trophic state (Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy) [M]// *Phytoplankton and Trophic Gradients*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998: 163-178.
- [17] TER BRAAK C J F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis [J]. *Ecology*, 1986, 67(5): 1167-1179.
- [18] 郝占庆, 郭水良, 叶吉. 长白山北坡木本植物分布与环境关系的典范对应分析 [J]. *植物生态学报*, 2003, 27(6): 733-741.
- [19] 杨丽丽, 何光喜, 胡忠军, 等. 鲢鳙占优势的千岛湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的相关性 [J]. *水产学报*, 2013, 37(6): 894-903.
- [20] 杨杰青, 史赞荣, 全为民, 等. 基于 RDA 与 GAMs 模型的东海近岸海域浮游动物与温盐关系 [J]. *海洋学报*, 2019, 41(8): 72-84.
- [21] LEPSŠ J, ŠMILAUER P. *Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [22] 王克, 张武昌, 王荣, 等. 渤海中南部春秋浮游动物群落结构 [J]. *海洋科学集刊*, 2002(44): 34-42.
- [23] 吴强, 李忠义, 王俊, 等. 渤海夏季甲壳类群落结构的年际变化 [J]. *渔业科学进展*, 2018, 39(2): 16-23.

(下转第 145 页)

的意义。

## 5 参考文献

- [1] 苑帆帆,卢秀茹,贾肖月,等.河北省奶牛养殖环境风险分析及对策研究[J].黑龙江畜牧兽医,2017(1):29-31
- [2] 冯静静,杨静.从北京市资源环境限制因素看奶牛养殖业的发展前景[J].农业展望,2011(2):28-32.
- [3] 张娜.规模化奶牛养殖场对环境污染的影响与防治措施[J].农业技术与装备,2015(10):77-78.
- [4] 武海玉.奶牛场环境污染与生态循环养殖模式[J].中国畜禽种业,2014,10(7):33-35.
- [5] 王广.养殖环境对奶牛生产性能的影响[J].兽医导刊,2021(1):97.
- [6] 郝金伟.奶牛乳脂率的影响因素及提高方法[J].现代畜牧科技,2019(6):35-36.
- [7] 何颖辉.环境因素对奶牛养殖的影响[J].现代畜牧科技,2019(8):32-33.
- [8] 朱洪琳.奶牛泌乳量的影响因素和提高措施[J].现代畜牧科技,2016(7):28.
- [9] 陈杰,刘宇国.影响奶牛繁殖率的因素与对策[J].中国畜禽种业,2008,4(7):28-29.
- [10] 苑秀娟.影响奶牛生产性能的因素[J].现代畜牧科技,2020(12):36-37.
- [11] 康永刚,吕颜枝,廖云琼.采用营养调控技术保护奶牛养殖环境的主要措施[J].浙江畜牧兽医,2015,40(3):26-27.
- [12] 赵登峰.规模奶牛场生态环境建设探析[J].畜牧兽医科技信息,2011(9):41-42.
- [13] 陈晓明.规模奶牛场粪污处理与环境保护状况调查报告[J].中国乳业,2013(8):19-20.
- [14] 徐武文,刘金亮,徐亚娣,等.奶牛养殖对生态环境的污染现状及其防治[J].畜牧与饲料科学,2012,33(增刊1):88-89.
- [15] 王杏龙,杨建生,王梁燕.牛粪的用途[J].上海畜牧兽医通讯,2014(1):52-53.
- [16] 吴雪利,王桂玲.我国奶牛养殖发展中存在的环境污染问题及控制措施[J].养殖与饲料,2018(2):87-88.
- (上接第 141 页)
- [24] 朱延忠,陈洪举,刘光兴.福建沙埕港浮游动物群落特征及影响因子[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2008,38(6):943-950.
- [25] 杜明敏,刘镇盛,王春生,等.中国近海浮游动物群落结构及季节变化[J].生态学报,2013,33(17):5407-5418.
- [26] GLUCHOWSKA M, TRUDNOWSKA E, GOSZCZKO I, et al. Variations in the structural and functional diversity of zooplankton over vertical and horizontal environmental gradients en route to the Arctic Ocean through the Fram Strait[J]. PLoS One, 2017, 12(2): e0171715.
- [27] 孙鲁峰,柯昶,徐兆礼,等.上升流和水团对浙江中部近海浮游动物生态类群分布的影响[J].生态学报,2013,33(6):1811-1821.
- [28] 徐兆礼.长江口邻近水域浮游动物群落特征及变动趋势[J].生态学杂志,2005,24(7):780-784.
- [29] 杨杰青,欧阳珑玲,唐峰华,等.海南西北部近岸海域浮游动物群落结构与环境因子的关系[J].中国水产科学,2020,27(2):236-249.
- [30] DEVREKER D, SOUISSI S, SEURONT L. Effects of chlorophyll concentration and temperature variation on the reproduction and survival of *Temoralongicornis* (Copepoda, Calanoida) in the Eastern English Channel[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2005, 318(2): 145-162.
- [31] LENZ P H, HOWER A E, HARTLINE D K. Temperature compensation in the escape response of a marine copepod, *Calanus finmarchicus* (Crustacea)[J]. The Biological Bulletin, 2005, 209(1): 75-85.
- [32] 姜会超,陈海刚,宋秀凯,等.莱州湾金城海域浮游动物群落结构及与环境因子的关系[J].生态学报,2015,35(22):7308-7319.
- [33] 徐兆礼.中国海洋浮游动物研究的新进展[J].厦门大学学报(自然科学版),2006,45(增刊2):16-23.
- [34] GAO Q, XU Z L, ZHUANG P. The relation between distribution of zooplankton and salinity in the Changjiang Estuary[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2008, 26(2): 178-185.
- [35] 黄加祺,郑重.九龙江口桡足类和盐度关系的初步研究[J].厦门大学学报(自然科学版),1984,23(4):497-505.
- [36] 刘潇,潘玉龙,孙蓓蓓,等.荣成近岸海域浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J].现代农业科技,2019(10):177-179.