

河北昌黎近岸海域浮游动物群落结构及其与环境因子的关系

杨森, 刘宪斌, 邓元告, 刘占广, 赵兴贵

(天津市海洋环境保护与修复技术工程中心, 天津科技大学 天津 300457)

摘要:为更好地了解河北省昌黎地区近岸海域浮游动物的群落结构、丰度和生物量的分布特征及其与主要环境因子的关系, 2016年春季(5月)和夏季(8月)分别进行了2个航次的调查采样, 并监测了12种常规水质因子。结果表明, 春、夏季航次共鉴定出浮游动物6类群31种(属), 其中桡足类12种、浮游幼虫类10种、腔肠类6种、糠虾类1种、毛颚类1种、被囊类1种。春、夏季全区浮游动物丰度和生物量季节变化明显, 春季浮游动物平均丰度和平均生物量(4 706个/m³和138.2 mg/m³)均高于夏季(4 239个/m³和13.5 mg/m³); 春季优势种有双毛纺锤水蚤(*Acartia bifilosa*)、拟长腹剑水蚤(*Oithona similis*)、腹针胸刺水蚤(*Centropages abdominalis*)和小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)。夏季优势种有双壳类幼虫(*Lamellibranchiata larva*)、小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)、双毛纺锤水蚤(*Acartia bifilosa*)、强壮箭虫(*Sagitta crassa*)。春、夏季均出现的优势种有2种, 分别是小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)和双毛纺锤水蚤(*Acartia bifilosa*)。夏季 Shannon-Weaver 多样性指数和 Margalef 物种丰富度指数(1.94和2.18)均高于春季(1.71和1.80); 典范对应分析(CCA)表明, 盐度、水温、硝酸盐和透明度是影响昌黎近岸海域浮游动物群落结构的主要环境因子; 与历史资料相比, 昌黎近岸海域浮游动物丰度及生物量呈下降趋势, 其优势种基本保持稳定。

关键词:昌黎近岸海域; 浮游动物; 环境因子; 典范对应分析

中图分类号:S931 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)01-0037-09

昌黎黄金海岸自然保护区是国务院批准建立的我国首批五个国家级海洋类型自然保护区之一, 位于河北省东部沿海, 主要划分为核心区、缓冲区和实验区三部分。保护区海域既是文昌鱼在渤海的主要栖息地, 也是研究海洋动力过程和海陆变化的典型岸段, 具有重要的生态价值、科研价值和观赏价值。根据《昌黎黄金海岸国家级自然保护区总体规划(2003~2010)(2011~2015)》, 相关科研院所仅开展了一些保护性研究, 大部分研究集中在渤海湾不同海域的综合调查(张武昌等, 2002; 王克等, 2002; 王宇等, 2014; 高文胜等, 2014; 韦章良等, 2015; 张达娟等, 2016; 徐东会等, 2016; 武丹等, 2016)。

中小型浮游动物是仔稚鱼最重要的开口饵料, 作为基础饵料更具有特殊的意义, 其数量是判断经济鱼类资源量的重要依据。而关于该海域浮游动物

作为初级饵料生物在不同季节群落演替规律方面的研究较少, 鉴于此, 本文通过调查该海域浮游动物群落结构特征, 结合环境因子的监测结果, 分析该海域浮游动物群落结构季节演替, 初步探讨浮游动物、环境因子和鱼产力之间的关系, 以为昌黎近岸海域文昌鱼栖息地保护工作提供基础数据, 也为该海域生物资源的合理开发利用与管控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样区域、时间与方法

2016年春季(5月)和夏季(8月)对河北省昌黎近岸海域(119°10'~119°42'E, 39°26'~39°38'N)进行2个航次的综合调查, 调查区域共设置16个采样站位, 具体站位见图1。其中1~9号站位为海域缓冲区; 10~16号站位为海域核心区; 其中缓冲区和核心区是禁止开发的, 是最原始、自然的生态系统, 具有重要的科学研究价值。

浮游动物采样选取浅水Ⅱ型浮游生物网(网长140 cm, 网口内径31.60 cm, 网口面积0.08 m², 网目大小160 μm)自底层至表层作垂直拖网采集, 样品经5%中性福尔马林溶液固定保存, 带回实验室进行分类、鉴定、计数等工作。各监测站位同步调查水温(WT)、盐度(S)、透明度(T)、溶解氧(DO)、化

收稿日期: 2018-01-21

基金项目: 天津市科委科技计划项目(15ZCZDSF00620); 天津市“131”创新群体项目(20180314); 天津市教委高校创新群体项目(TD12-5003)。

作者简介: 杨森, 1992年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为环境污染过程与生态修复。E-mail: yangsen66888@163.com

通信作者: 刘宪斌, 1964年生, 男, 教授, 主要从事环境调查与评价和环境生态修复。E-mail: lxb0688@tust.edu.cn

学耗氧量(COD_{Mn})、活性磷酸盐(DIP)、硅酸盐(DI-Si)、叶绿素(Chl-a)等环境参数,所有操作步骤均严格按照《海洋监测规范》(GB17378-2007)进行(国家质检总局,国家标准化委员会,2008)。

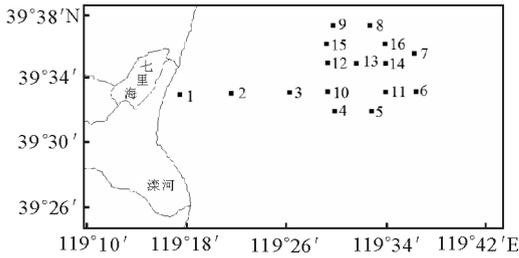


图1 调查区域及站位分布

Fig.1 Location of the study area and sampling stations

1.2 数据分析

该海域春季和夏季浮游动物丰度、优势度(Y)、Shannon-Weaver 多样性指数(H')和 Margalef 丰富度指数(D)等指标计算方法参考徐东会等人的研究(徐东会等,2016);将 $Y \geq 0.02$ 的种类作为优势种(徐兆礼等,1989)。

生物多样性指数参考《近岸海域环境监测规范》(HJ442-2008)(环境保护部科技标准司,2009)提供的指标,即 $H' \geq 3.0$ 生境质量等级为轻度污染, $2.0 \leq H' < 3.0$ 生境质量等级为中度污染, $1.0 \leq H' < 2.0$ 生境质量等级为中度重污染, $H' < 1.0$ 生境质量等级为严重污染。

采用 SPSS 17.0 软件对丰度和生物量与环境因子的相关性进行分析。浮游动物群落组成采用无趋势对应分析(DCA, Dedentred correspondence analysis),当四个轴中梯度长度(lengths of gradient)最大值小于3时,采用软件 CANOCO 4.5 中典范对应分析(CCA, Canonical correspondence analysis)分析浮游动物丰度与环境因子间的关系。

浮游动物鱼产力的估算方法参考相关文献(王宇等,2014)。

2 结果与分析

2.1 种类组成及优势种

本次调查共鉴定浮游动物6类群31种(属),其中桡足类最多,共12种,占种类数的38.7%;其次是浮游幼虫类10种,占种类数的32.3%;再次是腔肠类6种,占种类数的19.4%。另外有糠虾类1种、毛颚类1种、被囊类1种。

调查海域种类数季节变化明显,整体呈夏季多(27种,其中桡足类10种、浮游幼虫类10种、腔肠

类5种、毛颚类1种、被囊类1种),春季少(23种,其中桡足类9种、浮游幼虫类8种、腔肠类4种、毛颚类1种、糠虾类1种)的格局,具体种类数见表1。

昌黎近岸海域浮游动物优势种有明显的季节变化(表2),夏季优势种明显多于春季,春季优势种有5种,其中双毛纺锤水蚤(*Acartia bifilosa*)、拟长腹剑水蚤(*Oithona similis*)、腹针胸刺水蚤(*Centropages abdominalis*)和小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)占主要优势,其优势度分别为0.580、0.146、0.110和0.064,其余种优势度均低于0.060。夏季优势种有8种,其中双壳类幼虫(*Lamellibranchiata larva*)、小拟哲水蚤、双毛纺锤水蚤、强壮箭虫(*Sagitta crassa*)占主要优势,其优势度分别为0.389、0.302、0.059和0.038,其余种优势度均小于0.03。春季和夏季均出现的优势种为小拟哲水蚤和双毛纺锤水蚤,但优势度存在一定的差异。

2.2 浮游动物丰度及生物量时空分布特征

河北昌黎近岸海域浮游动物丰度时空分布见图2。从图2中可以看出,春季各站位浮游动物丰度略高于夏季。春季调查海域各站位浮游动物丰度在270~13277个/ m^3 ,平均值为4706.0个/ m^3 ,丰度最高值出现在2号站位(13277个/ m^3),最低值为11号站位(270个/ m^3)。其中,缓冲区浮游动物丰度(6060个/ m^3)显著高于核心区(2965个/ m^3)。

夏季浮游动物丰度范围476~16113个/ m^3 ,平均值为4239个/ m^3 ,丰度最高值出现在7号站位(16113个/ m^3),最低值为9号站位(476个/ m^3)。其中,缓冲区浮游动物丰度(5007个/ m^3)明显高于核心区(3251个/ m^3)。

浮游动物生物量的时空分布见图3。从图3中可以看出,河北昌黎近岸海域浮游动物湿重生物量春季明显高于夏季,且浮游动物湿重生物量的分布格局与丰度存在一定的差异。春季海域各站位浮游动物湿重生物量在2.9~386.3mg/ m^3 ,平均值为138.2mg/ m^3 ,最高值出现在2号站位(386.3mg/ m^3),最低值为16号站位(2.9mg/ m^3)。总体呈现出缓冲区浮游动物湿重生物量(164.2mg/ m^3)明显高于核心区(104.8mg/ m^3)。

夏季各站位浮游动物湿重生物量在1.4~41.9mg/ m^3 ,平均值为13.5mg/ m^3 ,最高值出现在3号站位(41.9mg/ m^3),最低值为14号站位(1.4mg/ m^3)。缓冲区(13.8mg/ m^3)与核心区(13.3mg/ m^3)差异不显著。

表 1 河北昌黎近岸海域浮游动物种类组成

Tab.1 Zooplankton composition in the Changli coastal region of Hebei Province

| 种 类 | 缩略词 | 站 位 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| 腔肠动物门 Coelenterata | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 带拟杯水母 <i>Phialucium taeniogonia</i> | PTAE | + | + | + | | + | + | + | | | + | | | | | + | |
| 四枝管水母 <i>Proboscidactyla</i> | PROB | | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| 球型侧腕水母 <i>Pleurobrachia globosa</i> | PGLO | | + | + | | + | | | | | + | | | | | + | |
| 贝氏真囊水母 <i>Euphysora bigelowi</i> | EBIG | + | + | + | + | | + | + | + | | + | + | | + | + | + | |
| 崂山杯水母 <i>Phialidium chengshanenses</i> | PCHE | | | + | | + | | | | | | | | + | | | |
| 锡兰和平水母 <i>Eirene ceylonensis</i> | ECEY | | + | + | + | | + | + | + | | + | + | + | + | + | + | |
| 毛颚动物 Chaetognathe | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i> | SCRA | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| 糠虾类 Mysidacea | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 长额刺糠虾 <i>Acanthomysis longirostris</i> | ALON | | | | | | | | + | | + | | + | + | + | + | |
| 桡足类 Copepoda | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i> | CSIN | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| 小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i> | PPAR | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| 双毛纺锤水蚤 <i>Acartia bifilosa</i> | ABIF | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | | + | + | + | + | |
| 太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i> | APAC | + | + | + | + | | + | + | | | | + | + | + | | + | |
| 拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i> | OSIM | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| 强额拟哲水蚤 <i>Paracalanus crassirostris</i> | PCAR | + | + | + | + | + | | | | | + | + | | + | + | + | |
| 真刺唇角水蚤 <i>Labidocera euchaeta</i> | LEUC | + | + | + | + | | + | + | | | + | + | + | | | + | |
| 腹针胸刺水蚤 <i>Centropages abdominalis</i> | CABD | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | | + | + | + | + | |
| 太平洋真宽水蚤 <i>Eurytemora pacifica</i> | EPAC | + | + | + | + | + | | + | + | + | | + | + | + | | + | |
| 瘦尾胸刺水蚤 <i>Centropages tenuiremis</i> | CTEN | + | | + | + | | + | | | | | | | | | | |
| 小毛猛水蚤 <i>Microsetella norvegica</i> | MNOR | + | | | + | | | | | | | | | | | | |
| 近缘大眼剑水蚤 <i>Corycaeus affinis</i> | CAFF | + | + | + | + | | | + | + | + | + | | + | + | + | + | |
| 被囊动物 Tunicata | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 长尾住囊虫 <i>Oikopleura longicauda</i> | OLON | + | + | + | + | | + | + | | | + | + | + | | + | + | |
| 浮游幼虫 Pelagic larvae | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 无节幼体 Nauplius larva | NAUL | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| 长尾类幼虫 Macruran larva | MACL | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| 短尾类幼虫 Brachyura larva | BRAL | + | + | + | | + | | | | | + | + | + | | + | | |
| 多毛类幼体 Polychaeta larva | POLL | + | + | + | + | + | | | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| 腹足类幼虫 Gastropoda larva | GASL | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| 双壳类幼虫 Lamellibranchiata larva | LAML | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| 蔓足类幼虫 Cirripedia larva | CIRL | | + | + | + | + | + | + | | + | + | + | + | + | + | + | |
| 羽腕幼虫 Bipinnara larva | BIPL | | | | + | + | + | + | | | + | | + | + | + | + | |
| 仔鱼 Fish larva | FISL | + | | | | | + | | | | + | | | | + | | |
| 鱼卵 Fish eggs | FISE | + | + | + | | + | + | + | | + | + | | + | + | + | + | |

注:“+”表示该种类出现在春季或夏季。

Notes:“+”denotes observed species or taxon in spring and summer.

表 2 河北昌黎近岸海域浮游动物优势种及其优势度

Tab.2 Dominant zooplankton species in the Changli coastal region of Hebei Province

| 种 类 | 缩略词 | 春季 | | | 夏季 | | |
|---------------------------------------|------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|
| | | 丰度比/% | 出现频率/% | 优势度 | 丰度比/% | 出现频率/% | 优势度 |
| 强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i> | SCRA | 0.423 | 87.50 | - | 3.782 | 100 | 0.038 |
| 中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i> | CSIN | 2.428 | 100 | 0.024 | 0.028 | 56.25 | - |
| 小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i> | PPAR | 6.399 | 100 | 0.064 | 30.171 | 100 | 0.302 |
| 双毛纺锤水蚤 <i>Acartia bifilosa</i> | ABIF | 61.845 | 93.75 | 0.580 | 6.285 | 93.75 | 0.059 |
| 太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i> | APAC | - | - | - | 4.324 | 62.50 | 0.027 |
| 拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i> | OSIM | 14.600 | 100 | 0.146 | 1.213 | 100 | - |
| 腹针胸刺水蚤 <i>Centropages abdominalis</i> | CABD | 11.728 | 93.75 | 0.110 | 0.215 | 18.75 | - |
| 近缘大眼剑水蚤 <i>Corycaeus affinis</i> | CAFF | 0.056 | 62.50 | - | 2.722 | 93.75 | 0.026 |
| 长尾住囊虫 <i>Oikopleura longicauda</i> | OLON | - | - | - | 2.330 | 93.75 | 0.022 |
| 多毛类幼体 <i>Polychaeta larva</i> | POLL | 0.034 | 62.50 | - | 2.099 | 100 | 0.021 |
| 双壳类幼虫 <i>Lamellibranchiata larva</i> | LAML | 0.173 | 87.50 | - | 41.448 | 93.75 | 0.389 |

注:“-”表示优势度 <0.02 。Notes:“-”denotes dominance <0.02 .

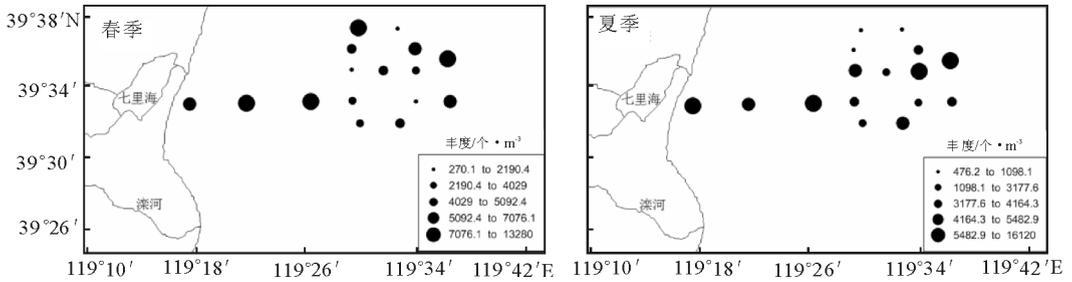


图2 浮游动物丰度分布图

Fig.2 Horizontal distribution of zooplankton abundance

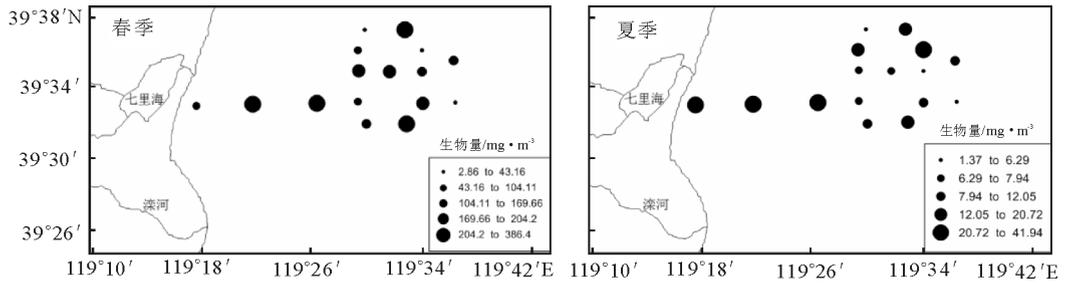


图3 浮游动物生物量平面分布

Fig.3 Horizontal distribution of zooplankton biomass

结合图2、3得到,春、夏季浮游动物的丰度和生物量最高值均出现在缓冲区,春季浮游动物丰度和湿重生物量均呈现缓冲区明显高于核心区,夏季没有明显差异。由于缓冲区距离海岸线近,人类活动、生物干扰、潮汐等因素直接影响水体运动,浮游动物亦随之流动;同时海水的温度、盐度、透明度等环境因子也会影响海洋生物的时空分布(姜会超等,2017;周建等,2018),进而出现缓冲区与核心区浮游动物的种类数、丰度和生物量存在一定的差异性。

2.3 浮游动物优势种丰度分布特征

2.3.1 小拟哲水蚤 小拟哲水蚤的平面分布见图4,从中可以看出,该种在河北昌黎近岸海域的平面分布不均匀。春季小拟哲水蚤的平均丰度为301个/ m^3 ,对浮游动物总丰度的贡献率达6.4%。丰度最高值出现在1号站位(1347个/ m^3)。夏季

的平均丰度为1279个/ m^3 ,其贡献率达30.2%。最高值出现在3号站位(3996个/ m^3)。由此可见,夏季小拟哲水蚤的平均丰度明显高于春季,且夏季贡献率较春季高24%。

2.3.2 双毛纺锤水蚤 双毛纺锤水蚤的平面分布见图5。从图5中可以看出,春季双毛纺锤水蚤的平均丰度为2911个/ m^3 ,对浮游动物总丰度的贡献率达到61.8%。最高值出现在2号站位(6908个/ m^3)。夏季平均丰度为个/ m^3 ,贡献率达到6.3%。最高值出现在1号站位(2620个/ m^3)。由此可以看出,春季双毛纺锤水蚤的丰度明显高于夏季,且春季贡献率较夏季高55%。小拟哲水蚤和双毛纺锤水蚤均为该海域春、夏季的共同优势种,但在丰度和贡献率方面存在一定的差异,可能是由于二者的饵料生物或生活习性差异导致这一现象。

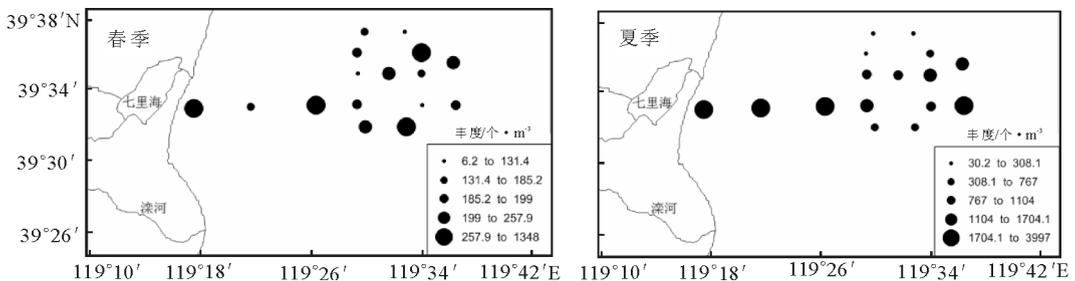


图4 小拟哲水蚤丰度平面分布

Fig.4 Horizontal distribution of *Paracalanus parvus* abundance

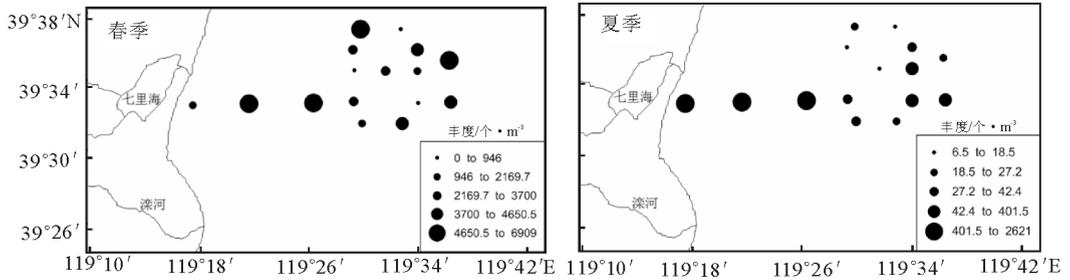


图 5 双毛纺锤水蚤丰度平面分布

Fig.5 Horizontal distribution of *Acartia bifilosa* abundance

从图 4、5 可以看出,春、夏季小拟哲水蚤和双毛纺锤水蚤的丰度均呈缓冲区高于核心区的趋势,且最高值均出现在缓冲区。其原因可能是夏季降雨导致淡水注入,从而降低海水盐度;而春季枯水期过度到丰水期,陆源径流带来丰富营养物质,浮游动物大量繁殖。同时小拟哲水蚤和双毛纺锤水蚤均属于小型浮游动物,易受到人为或生物扰动、潮汐及风浪扰动形成的水力剪切力的伤害,从而不利于其在连续波动海域中成长和生存(周建等,2018)。

2.4 浮游动物多样性的时空分布特征

根据表 3 中多样性指数的平均值绘制春季和夏季浮游动物不同站位各指数变化趋势图(见图 6)。

表 3 河北昌黎近岸海域浮游动物多样性指数

Tab.3 Diversity indices of the zooplankton community in the buffer and core areas of Hebei Province

| 名称 | 春季 | | 夏季 | |
|-----------|------|------|------|------|
| | 缓冲区 | 核心区 | 缓冲区 | 核心区 |
| 丰富度指数(D) | 1.76 | 1.85 | 2.19 | 2.15 |
| 多样性指数(H') | 1.67 | 1.72 | 1.87 | 2.05 |
| 均匀度指数(J) | 0.42 | 0.44 | 0.45 | 0.49 |

由表 3 可以看出,除夏季丰富度指数外,其余各多样性指数均呈现核心区大于缓冲区。这与夏季湿重生物量有相似的规律性。根据《近岸海域环境监测规范》(HJ442-2008)(环境保护部科技标准司,2009)提供的生物多样性指数参考指标判断,调查海域海水质量春季处于中度重污染,夏季为中度污染。

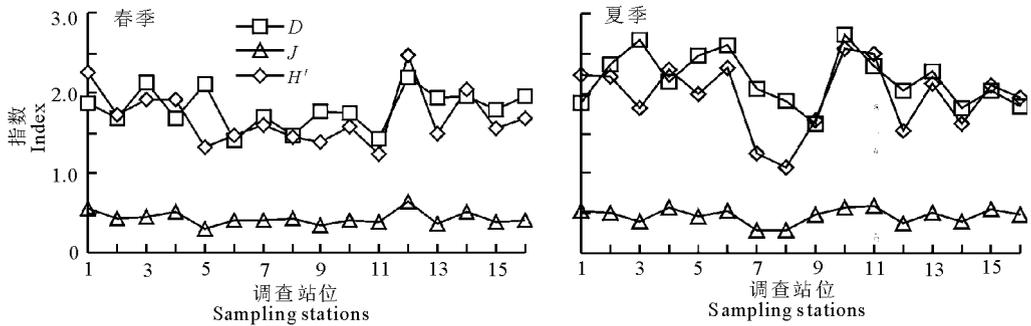


图 6 昌黎近岸海域春季和夏季不同采样点浮游动物多样性、均匀度和丰富度指数变化

Fig.6 Variations of the Shannon-Wiener diversity index, Pielou evenness index and Margalef richness index of zooplankton community at different sampling stations in spring and summer

从图 6 可以明显看出,春季浮游动物丰富度指数(D)最大值出现在 12 号站位,最小值出现在 6 号站位。Shannon-Weaver 生物多样性指数(H')最大值出现在 12 号站位,最小值出现在 11 号站位。均匀度指数(J)最大值出现在 12 号站位,最小值出现在 5 号站位。

由此可见,春季浮游动物丰富度指数和 Shannon-Weaver 生物多样性指数变化趋势相似,且最大值均出现在 12 号站位(该站位属于海域核心区)。

夏季浮游动物丰富度指数最大值出现在 10 号站位,最小值出现在 9 号站位。Shannon-Weaver 生

物多样性指数最大值出现在 10 号站位,最小值出现在 8 号站位。均匀度指数最大值出现在 11 号站位,最小值出现在 7 号站位。

同样,夏季浮游动物丰富度指数和 Shannon-Weaver 生物多样性指数变化趋势一致,且指数最大值均出现在 10 号站位(该站位属于海域核心区)。总体趋势为最高值均出现在核心区,最低值均出现在缓冲区。说明,缓冲区水体波动频繁,浮游动物种类数、丰度和生物量不断演替;而核心区水体波动较小,各指数趋于稳定。

从整体上看,夏季浮游动物丰富度指数、Shan-

non-Weaver 生物多样性指数明显高于春季 ($P < 0.05$), 而均匀度指数变化不明显 ($P > 0.05$)。

2.5 浮游动物丰度、生物量与环境因子间的相关性分析

浮游动物丰度、生物量与水温、盐度、营养盐、叶绿素 a 等 12 项理化因子相关性见表 4。

表 4 浮游动物生物量、丰度与环境因子的相关性系数

Tab.4 Regression analysis of physical-chemical parameters with density and biomass of zooplankton

| 理化因子 | 丰度 | | 生物量 | |
|-----------------------------------|--------|-------|--------|---------|
| | R | P | R | P |
| 溶解氧 DO | 0.029 | 0.875 | 0.623 | 0.000** |
| 酸碱度 pH | -0.065 | 0.722 | 0.157 | 0.391 |
| 盐度 S | 0.185 | 0.311 | 0.274 | 0.130 |
| 水温℃ WT | -0.064 | 0.729 | -0.567 | 0.001** |
| 透明度 T | -0.214 | 0.239 | 0.218 | 0.230 |
| 叶绿素 a Chl-a | -0.077 | 0.676 | -0.497 | 0.004** |
| 化学需氧量 COD _{Mn} | 0.289 | 0.108 | 0.004 | 0.984 |
| 亚硝酸盐 NO ₂ ⁻ | -0.114 | 0.533 | -0.360 | 0.043* |
| 氨氮 NH ₄ ⁺ | -0.046 | 0.801 | -0.472 | 0.006** |
| 硝酸盐 NO ₃ ⁻ | 0.072 | 0.694 | 0.335 | 0.061 |
| 硅酸盐 DISi | 0.060 | 0.745 | -0.602 | 0.000** |
| 磷酸盐 DIP | 0.112 | 0.540 | -0.516 | 0.003** |

注: * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$ 。

Note: * means a significant correlation at the level of 0.05;

** means an extremely significant correlation at the level of 0.01.

浮游动物生物量与溶解氧显著正相关 ($P < 0.01$), 与水温、叶绿素 a、氨氮、硅酸盐、活性磷

酸盐显著负相关 ($P < 0.01$), 与亚硝酸盐显著负相关 ($P < 0.05$), 与其它参数无显著相关性 ($P > 0.05$); 浮游动物丰度与各参数无显著相关性 ($P > 0.05$)。

对河北昌黎近岸海域浮游动物与环境因子进行 CCA 分析, 结果见图 7。春季盐度、溶解氧、硝酸盐、酸碱度、水温和透明度是影响浮游动物分布特征的主要环境因子, 而氨氮、叶绿素 a、亚硝酸盐、化学需氧量、硅酸盐和活性磷酸盐对浮游动物影响较小。

夏季盐度、水温、硅酸盐、硝酸盐、透明度、化学需氧量和叶绿素 a 是主要影响因子, 而氨氮、亚硝酸盐、溶解氧、酸碱度和活性磷酸盐影响较小。其中水温、叶绿素 a、硝酸盐是影响小拟哲水蚤和双毛纺锤水蚤分布的主要环境因子。

综上所述, 影响该浮游动物群落结构特征的主要环境因子呈现明显的季节差异, 其中盐度、水温、硝酸盐和透明度在春、夏季均有影响。

2.6 浮游动物鱼产力的估算

鱼产力是鱼类将水中各种生物和无机、有机营养物质转化为鱼产品的能力。评定鱼产力是科学利用水域天然饵料资源的依据。该海域浮游动物的总生物量为 $2\ 428.21\ \text{mg}/\text{m}^3$, P/B 系数取 30, 假设鱼类对浮游动物利用率为 30%, 饵料系数为 10, 平均水深 13.0 m, 则河北昌黎海域浮游动物提供的鱼产力为 $0.28\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。

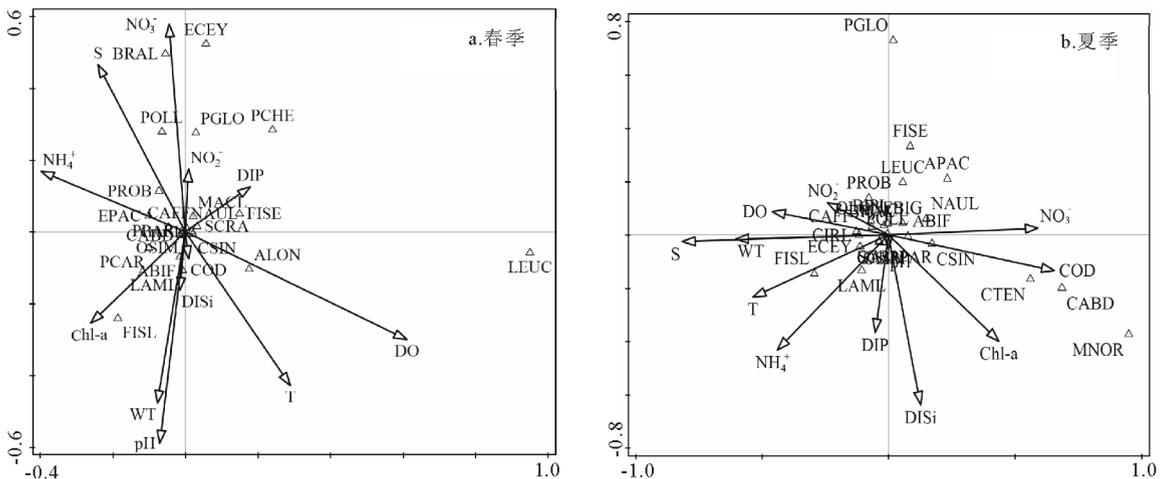


图 7 浮游动物群落结构与环境因子的 CCA 分析

Fig.7 Canonical correspondence analysis (CCA) of the zooplankton community and associated environmental factors

3 讨论

3.1 河北昌黎海域浮游动物的种类组成

本次调查共鉴定出浮游动物 31 种, 分属 6 大类, 其中桡足类种类和丰度均占有绝对的优势。王真良等人(2006)调查春、夏季河北沿岸共采集到浮

游动物 64 种, 生态属性为广温近岸低盐生态型。本研究结果浮游动物种类数明显低于上述的研究结果, 但优势种种类和生态属性与其研究结果相似。分析原因: 其一是本次调查海域面积仅为王真良调查范围 1/3, 取样不能涵盖所有种类, 结果可能偏小; 其二是缓冲区人类活动以及陆源污染的排入引

起海洋生态环境发生变化,浮游动物种类数减少。但浮游动物丰度和生物量春、夏季平均值分别高于1984年河北海岸带调查和王真良研究结果,说明昌黎黄金海岸自然保护区近年来的保护效果初见成效,但还存在一定的生态问题(王真良等,2006;河北省海岸带资源编辑委员会,1988)。

3.2 河北昌黎海域浮游动物群落结构

多样性指数(生物多样性指数、均匀度指数和丰富度指数)是反映群落结构特点和指示有机物污染的指标之一。种类越多,个体数量分布越均匀,上述各指数越大,反映生物的组成越稳定,空间异质性越高(张达娟等,2016;时玉涛等,2011)。本研究中,除夏季丰富度指数外,其余各多样性指数均呈现核心区大于缓冲区。相比缓冲区,核心区生物组成较为稳定,但夏季核心区多样性指数为2.05,其余核心区和缓冲区多样性指数均低于2,说明昌黎近岸海域生境质量等级较低。水质生物学评价指标显示,调查海域海水质量处于中度重污染水平。其主要原因可能是昌黎近岸海域高密度的筏式养殖改变了海洋水动力环境,以及昌黎黄金海岸旅游业的迅猛发展人为因素对生境的影响。加之,近年来滦河上游兴修大量蓄水工程,使河口过渡段面积缩小,水体交换不充分,进而影响浮游动物群落演替,使生物多样性逐渐下降(杜明敏等,2013)。从鱼产力角度看,调查海域是可以进行生物修复工作的区域,浮游动物可为移植、投放的高附加值经济品种提供较为丰富的饵料。

3.3 浮游动物群落结构与环境因子的相关性分析

浮游动物的种类组成、数量变化、时空分布特征以及群落结构与水温、盐度、溶解氧、叶绿素 a、pH 和营养盐含量等生态因子密切相关(Froneman, 2004; Marques et al, 2006; Elliott, 1995; Devreker et al, 2005; Lenz et al, 2005),其中,温度、盐度是影响浮游动物分布最重要的因子(骆鑫等,2016;姜会超等,2017)。本研究发现,除盐度、水温外,硝酸盐和透明度与浮游动物群落分布也存在相关性。而环境因子对浮游动物的影响机制被认为是一个复杂且相互作用的过程。

昌黎近岸海域春季(5月)到夏季(8月),温度由14℃逐渐升高到27℃,促使以浮游植物为主要食物的浮游动物快速繁殖,从而出现夏季浮游动物较为丰富的现象。浮游动物主要通过渗透压的离子调节机制来适应海水盐度的变化。该海域春、夏季盐度均在30~31.5之间,无明显梯度变化,故浮游动物

不需要频繁的调节渗透压即可正常生存。调查结果显示,近岸站位盐度偏低,有利于广温广盐和近岸低盐浮游动物生长繁殖,主要体现在优势种小拟哲水蚤和双毛纺锤水蚤的丰度变化。这与骆鑫(2016)、姜会超(2017)等人研究结果相一致。而营养盐含量和透明度主要影响浮游植物叶绿素 a 的含量,从而影响浮游动物的群落结构。营养盐是浮游植物的重要来源及生长要素,营养盐通过浮游植物间接控制浮游动物的生长和繁殖。夏季,水体透明度上升,叶绿素 a 含量升高,浮游植物密度增大,进而控制浮游动物的群落分布。此外,浮游动物群落结构还与鱼类捕食压力、水产养殖活动、旅游活动等因素有关。因此,关于浮游动物群落结构受环境等因素影响的变化机理,有待进一步对大中型浮游动物内生动力与外部环境进行全方位调查及综合分析。

志谢:感谢河北省昌黎黄金海岸国家级自然保护区管理处工作人员在样品采集过程中给予的支持与帮助。

参考文献

- 杜明敏,刘镇盛,王春生,等,2013. 中国近海浮游动物群落结构及季节变化[J]. 生态学报,33(17): 5407-5418.
- 高文胜,刘宪斌,张秋丰,等,2014. 渤海湾近岸海域浮游动物多样性[J]. 海洋科学,38(4): 55-60.
- 姜会超,刘宁,高继庆,等,2017. 烟台四十里湾浮游动物群落特征及与环境因子的关系[J]. 生态学报,37(4): 1318-1327.
- 骆鑫,曾江宁,徐晓群,等,2016. 舟山海域夏、秋季浮游动物的分布特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报,36(24): 8194-8204.
- 时玉涛,温海燕,乔光建,2011. 人类活动对滦河口湿地生态环境影响分析[J]. 南水北调与水利科技,9(3): 124-128.
- 王克,张武昌,王荣,等,2002. 渤海中南部春秋季节浮游动物群落结构[J]. 海洋科学集刊,44(00): 42-50.
- 王真良,林凤翔,冯志权,等,2006. 河北沿岸春季和夏季的浮游动物[J]. 海洋环境科学,25(3): 41-45.
- 王宇,房恩军,郭彪,等,2014. 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,36(4): 300.
- 韦章良,柴召阳,石洪华,等,2015. 渤海长岛海域浮游动物的种类组成与时空分布[J]. 上海海洋大学学报,24(4): 550-559.
- 武丹,周笑白,李炜,等,2016. 渤海湾近岸海域浮游动物群落特征[C]. 北京:中国环境科学学会.

- 徐兆礼,陈亚瞿,1989. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐鲐渔场的关系[J]. 生态学杂志, (19): 13 - 15.
- 徐东会,孙雪梅,陈碧鹃,等,2016. 渤海中部浮游动物的生态特征[J]. 渔业科学进展, 37(4): 7 - 18.
- 张武昌,王克,高尚武,等,2002. 渤海春季和秋季的浮游动物[J]. 海洋与湖沼, 33(6): 630 - 639.
- 张达娟,孙延斌,毕相东,等,2016. 天津港临港工业区附近海域中小型浮游动物群落结构[J]. 水产科学, 35(4): 431 - 435.
- 周建,秦伯强,2018. 风浪对湖泊浮游生物影响的研究进展[J]. 水科学进展, 29(2): 293 - 300.
- 郑重,李少菁,许振祖, 1984. 海洋浮游生物学[M]. 北京: 海洋出版社.
- 国家质检总局,国家标准化管理委员会,2008. 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.
- 环境保护部科技标准司, 2009. 近岸海域环境监测技术规范: HJ 442 - 2008[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 河北省海岸带资源编辑委员会, 1988. 河北省海岸带资源 (下卷)[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社.
- Devreker D, Souissi S, Seuront L, 2005. Effects of chlorophyll concentration and temperature variation on the reproduction and survival of *Temora longicornis* (Copepoda, Calanoida) in the Eastern English Channel[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 318(2): 145 - 162.
- Elliott A, 2010. A comparison of thermal polygons for British freshwater teleosts[J]. Freshwater Forum, 5 (3): 178 - 184.
- Froneman P W, 2004. Zooplankton community structure and biomass in a southern African temporarily open/closed estuary[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 60(1): 125 - 132.
- Lenz P H, Hower A E, Hartline D K, 2005. Temperature compensation in the escape response of a marine copepod, *Calanus finmarchicus* (Crustacea) [J]. Biological Bulletin, 209(1): 75 - 85.
- Marques S C, Azeiteiro U M, Marques J C, et al, 2006. Zooplankton and ichthyoplankton communities in a temperate estuary: spatial and temporal patterns[J]. Journal of Plankton Research, 28(3): 297 - 312.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in the Changli Coastal Region of Hebei Province

YANG Sen, LIU Xian-bin, DENG Yuan-gao, LIU Zhan-guang, ZHAO Xing-gui

(Tianjin Marine Environmental Protection and Rehabilitation Engineering Center,
Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, P.R.China)

Abstract: Changli Golden Coast Nature Reserve, located in eastern Hebei Province, is the primary habitat of amphioxii. It is a typical coastal region, suitable for studying coastal ocean dynamics and sea-land changes and providing important ecological, scientific and aesthetic services. In this study, we analyzed the seasonal dynamics of the zooplankton community in the Changli coastal region and explored the relationship between the zooplankton community, environmental conditions and fishery productivity. The study provides basic data for habitat conservation of amphioxii and scientific evidence for the rational development and utilization of coastal biological resources. In May (spring) and August (summer) of 2016, a zooplankton community investigation was conducted at 16 sampling sites (Sites 1–9 in the buffer area and Sites 10–16 in the core area) in the Changli coastal region, including species composition, abundance, biomass, diversity, and spatiotemporal distribution of zooplankton. Twelve conventional environmental factors were determined simultaneously. A total of 31 zooplankton species, belonging to 6 taxonomic groups, were identified, including 12 Copepoda species, 10 pelagic larvae species, 6 Coelenterata species, 1 Mysidacea species, 1 Chaetognath species and 1 Tunicata species. The abundance and biomass of zooplankton varied significantly in spring and summer. The average abundance and biomass of zooplankton were higher in spring ($4\,706\text{ ind/m}^3$ and 138.2 mg/m^3) than in summer ($4\,239\text{ ind/m}^3$ and 13.5 mg/m^3). Spatially, zooplankton abundance and biomass in spring and winter were higher in the buffer area than in the core area. The dominant species in spring were *Acartia bifilosa*, *Oithona similis*, *Centropages abdominalis*, and *Paracalanus parvus*. The dominant species in summer were *Lamellibranchiata larva*, *Paracalanus parvus*, *Acartia bifilosa*, and *Sagitta crassa*. *Paracalanus parvus* and *Acartia bifilosa* were dominant in spring and summer. The Shannon-Wiener diversity index (H') and Margalef richness index (D) were higher in summer (1.94 and 2.18, respectively) than in spring (1.71 and 1.80, respectively). Canonical correspondence analysis (CCA) showed that salinity, temperature, nitrate and transparency were the primary environmental factors affecting zooplankton community structure. Finally, a comparison of our results with historical data showed that zooplankton abundance and biomass have declined in the Changli coastal region, but the dominant species have remained relatively stable.

Key words: Changli coastal region; zooplankton; environmental factors; canonical correspondence analysis (CCA)