

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.17076

黄河口及其邻近水域浮游动物群落结构特征及其季节变化

刘晓慧¹, 徐宾铎¹, 张崇良¹, 薛莹¹, 任一平^{1,2}, 纪毓鹏¹

1. 中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266071

摘要: 根据 2013 年 8 月、10 月和 2014 年 2 月、5 月在黄河口及其邻近水域 4 个航次的调查数据, 分析了该海域浮游动物的种类组成、数量变动、优势种、种类多样性及其季节变化。本次黄河口及其邻近水域调查共鉴定浮游动物 43 种, 其中原生动物、毛颚动物、尾索动物和栉水母各 1 种, 刺胞动物 8 种, 浮游甲壳类 18 种, 浮游幼体及鱼卵、仔稚鱼共 13 种(类)。浮游动物的平均丰度为 2115.64 ind/m^3 , 不计夜光虫的平均丰度为 95.93 ind/m^3 , 其中浮游甲壳类占 71.43%。浮游动物丰度存在显著的季节变化, 数量高峰出现在春季(5 月), 其次为冬季(2 月)、秋季(10 月)和夏季(8 月)。毛颚动物强壮箭虫(*Sagitta crassa*)和双刺纺锤水蚤(*Acartia bipinnata*)、小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)等桡足类为夏、秋、冬三个季节的主要优势种, 夜光虫(*Noctiluca scintillans*)为春季的绝对优势种。浮游动物群落物种丰富度指数(D)、Shannon-Wiener 指数(H')和均匀度指数(J')的变化趋势一致, 表现为夏秋季高, 冬春季低。黄河口及其邻近水域浮游动物的群落结构特征具有明显的季节变化; 桡足类和浮游幼体是主要类群, 对该水域浮游动物的数量变动及种类多样性的变化具有较大影响。

关键词: 黄河口; 浮游动物; 种类组成; 优势种; 种类多样性

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)05-0922-09

黄河口位于渤海湾和莱州湾的交汇处, 黄河径流为黄河口及其邻近海域输送了大量营养盐, 使之成为渤海的高生产力水域, 是黄渤海渔业生物重要的产卵场、栖息地和育肥场^[1-2]。浮游动物作为许多经济鱼类的饵料生物, 对鱼类种群的补充和数量动态具有一定影响^[3-4], 在物质循环和能量流动中也具有十分关键的作用, 是黄河口水域生态系统的重要功能群。同时, 浮游动物对环境变化较为敏感, 常被作为反映海洋环境变化的研究对象^[5-6], 其群落结构特征及季节变化是重要的生态学特征参量^[7-8]。

长期以来, 关于黄河口及其邻近水域浮游动物种类组成、数量分布及多样性等群落结构特征的研究已有很多报道^[9-14], 但涉及黄河口水域浮游动物群落季节变化的研究较少, 且调查时间多在 20 世纪末, 如田家怡等^[15]分析了 1980—1981

年黄河口水域浮游动物种类的季节更替; 焦玉木等^[1]分析了 1996 年黄河三角洲附近海域浮游动物种类多样性的季节变化。近几十年来, 黄河改道, 调水调沙工程陆续实施, 黄河口及其邻近水域的生态环境势必会发生很大的变化^[16-18], 在现有报道中, 仅董志军等^[19]使用浅水 II 型浮游生物网对当前条件下浮游动物群落的时空变化特征进行了研究。为进一步全面了解大型浮游动物在黄河口及其邻近水域中的群落现状和季节变化规律, 本研究采用浅水 I 型浮游生物网进行了调查研究。

根据 2013 年 8 月、10 月和 2014 年 2 月、5 月在黄河口及其邻近水域 4 个航次的调查数据, 分析了目前该海域浮游动物的种类组成、数量变动、优势种、种类多样性等群落结构特征及其季节变化, 以期为深入研究黄河口及其邻近水域浮游动物生态学和河口生态系统的长期变化提供基础资料。

收稿日期: 2017-03-06; 修订日期: 2017-05-03.

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201303050).

作者简介: 刘晓慧(1992-), 硕士研究生, 主要从事渔业资源与浮游动物生态学研究. E-mail: xiaohuilala@126.com

通信作者: 纪毓鹏, 工程师, 研究方向为海域使用与规划. E-mail: cherish@ouc.edu.cn

1 材料与方法

1.1 数据来源

于2013年8月(夏季)、10月(秋季)和2014年2月(冬季)、5月(春季)在黄河口及其邻近水域进行了4个航次的浮游生物季度调查。以黄河入海口为中心,向外延伸设置5条断面,其中断面3为沿黄河口方向断面,共18个站位,分别以断面-序号命名,河口附近的站位较密集(图1)。

按照《海洋调查规范》(GB/T 12763.6—2007)的要求,使用浅水I型浮游生物网(网长145 cm,网口内径50 cm,网口面积0.2 m²,筛绢CQ14,孔径0.505 mm)自底至表垂直拖网采集浮游动物,样品用5%甲醛溶液固定,浓缩后进行镜检、鉴定和计数。根据采样滤水量将浮游动物个数换算为个体丰度(ind/m³)。

1.2 数据分析

应用优势度指数(Y)、更替率(A)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 物种丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J')和 K -优势度曲线分析黄河口及其邻近水域浮游动物群落特征。

$$\text{优势度 } Y = (N_i/N) \times f_i$$

式中, N 为样品中的所有种类总丰度; N_i 为第 i 种的丰度; f_i 为样品中第 i 种的站位出现频率; 本研究中取 $Y > 0.02$ 的种类为优势种^[20]。

$$\text{更替率}(A): A = \frac{C}{C+S} \times 100\%$$

式中, C 为两个季节间物种增加和减少的数目; S 为两个季节间共有的物种数; 更替率 A 可以反映不同季节间浮游动物种类组成的变化^[21]。

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数}(H'): H' = -\sum P_i \log_2 P_i$$

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

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

式中, S 为物种数; N 为样品中的浮游动物总丰度; P_i 为第 i 个种的丰度占总丰度的百分比^[22-24]。

将浮游动物按丰度降序排列,用丰度累计百分比与种类依丰度重要性的相对种数(对数)作图,可以得到 K -优势度曲线^[25]。上方曲线代表的群落优势度高、多样性低,下方的多样性高。

参照田家怡等^[15]、郑重等^[26]和冷宇等^[11]的相关研究划分浮游动物生态类群,分析其生态类群组成。

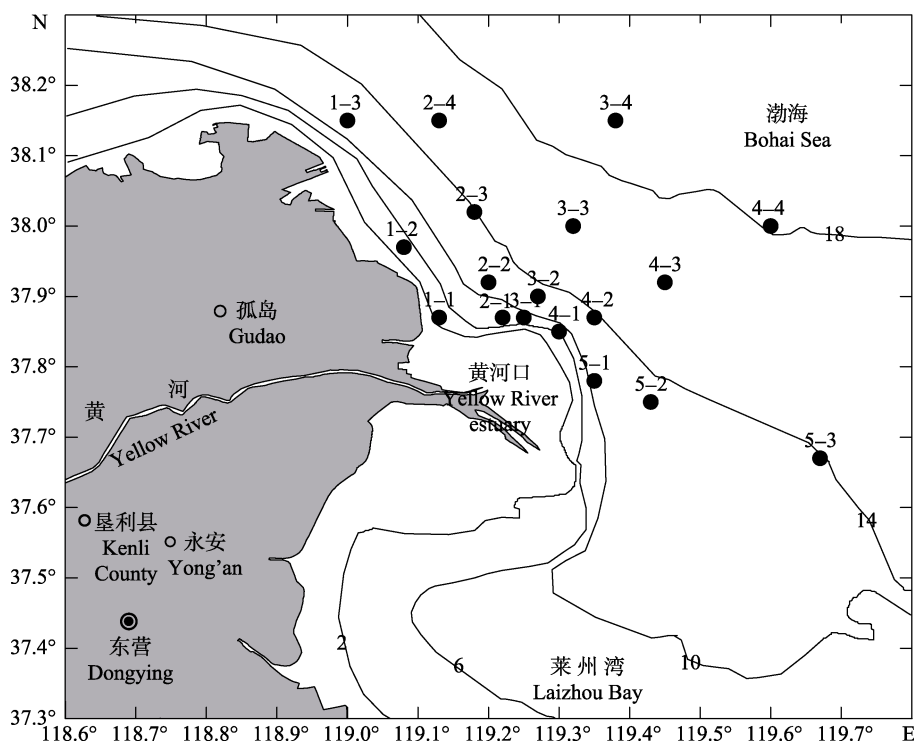


图1 黄河口及其邻近水域调查站位

Fig. 1 Sampling stations of zooplankton in the Yellow River estuary and its adjacent waters

对不同季节的浮游动物丰度进行 Aspin-Welch 差异显著性检验^[27], 分析其丰度的季节变化。为了消除夜光虫(*Noctiluca scintillans*)的影响, 同时分析了不包括夜光虫时浮游动物丰度的变化。

2 结果与分析

2.1 种类组成与季节更替

黄河口及邻近水域 4 个季节调查共记录浮游动物 43 种, 其中原生动物、毛颚动物、尾索动物和栉水母各 1 种, 合计占总种数的 9.2%; 刺胞动物 8 种, 占 18.6%; 浮游甲壳类 18 种, 占总种数的 41.9%, 其中桡足类 13 种, 十足类 2 种, 枝角类 1 种, 涟虫类 1 种, 端足类 1 种; 浮游幼体及鱼卵、仔稚鱼共 13 种(类), 占 30.2%。浮游甲壳类和浮游幼体是黄河口及其邻近水域浮游动物群落的主要类群, 占总种数的 72.1%, 其中桡足类占浮游甲壳类种数的 72.2%, 是浮游甲壳类的主要类群(图 2)。

浮游动物种类组成存在一定季节变化。夏季浮游动物种类最丰富, 为 30 种, 其次为秋季 23 种、春季 14 种和冬季 13 种; 类群组成方面, 不同季节均以浮游甲壳类、浮游幼体和刺胞动物为主; 各季节毛颚动物均为强壮箭虫(*Sagitta crassa*); 秋季出现尾索动物和栉水母各 1 种, 冬季和春季出现原生动物夜光虫(图 2)。物种组成季节间更替率较高, 夏秋季更替率为 64.1%, 秋冬季、冬春季和春夏季的更替率分别为 71.4%、41.2% 和 70.6%。

从生态特征看, 该水域浮游动物大多属于暖温带近岸类群, 其中夜光虫、八班芮氏水母(*Rathkea octopunctata*)、双刺纺锤水蚤(*Acartia bipinnata*)、拟长腹剑水蚤(*Oithona similis*)、近缘大眼剑水蚤(*Corycaeus affinis*)和强壮箭虫等为近岸低盐种; 小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)和中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)等是广温广盐种。

2.2 数量变动

黄河口及其邻近水域浮游动物的全年平均丰度为(2115.64±4143.70) ind/m³, 其中夜光虫占总丰度的 95.47%。夜光虫春季大量暴发, 导致浮游动物丰度在春季远高于其他季节(图 3)。

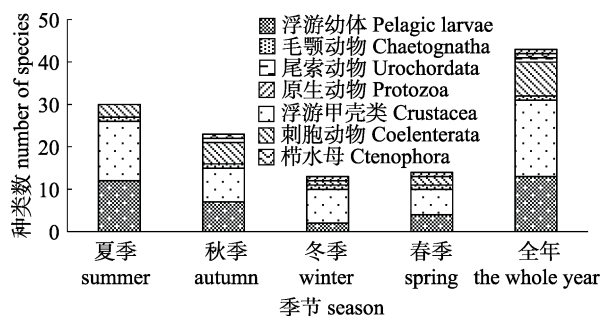


图 2 黄河口及其邻近水域浮游动物的种类组成
Fig. 2 Species composition of zooplankton in the Yellow River estuary and its adjacent waters

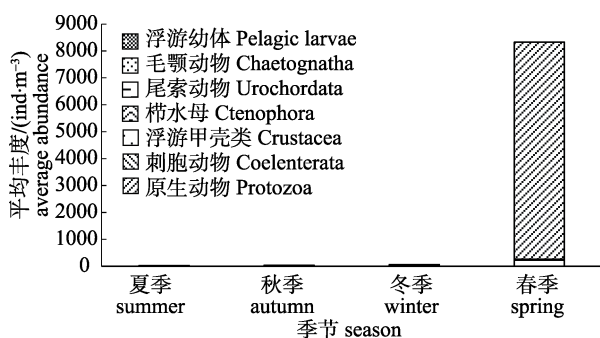


图 3 黄河口及其邻近水域浮游动物丰度的季节变化
Fig. 3 Seasonal variation of zooplankton abundance in the Yellow River estuary and its adjacent waters

除夜光虫外的浮游动物全年平均丰度为(95.93±116.27) ind/m³。就季节变化来看, 春季平均丰度最高, 为(270.06±113.83) ind/m³; 其次为冬季(45.69±17.53) ind/m³和秋季(38.17±10.20) ind/m³; 夏季最低, 为(29.79±13.33) ind/m³。除秋季和冬季外, 其他季节间浮游动物的平均丰度存在显著差异($P<0.05$) (图 4)。

不同类群丰度的季节变化规律不尽相同, 但大多在春季达到丰度高峰(图 4)。浮游甲壳类作为各季节平均丰度最主要的贡献者, 其丰度占各季节总丰度的 34.0%~80.0%, 平均丰度在春季最高, 其次为冬季、夏季和秋季; 其丰度对浮游动物总丰度的季节变化具有重要影响, 除秋季较低外, 季节变化规律与总丰度一致。毛颚动物对各季节平均丰度的贡献仅次于浮游甲壳类, 贡献率为 7.6%~40.2%, 平均丰度在春季最高, 其次为秋季、夏季和冬季, 其在秋季的平均丰度高于同期的浮游甲壳类。浮游幼体对各季节浮游动物丰度的贡献率为 3.9%~28.6%, 夏季和冬季较大, 平均

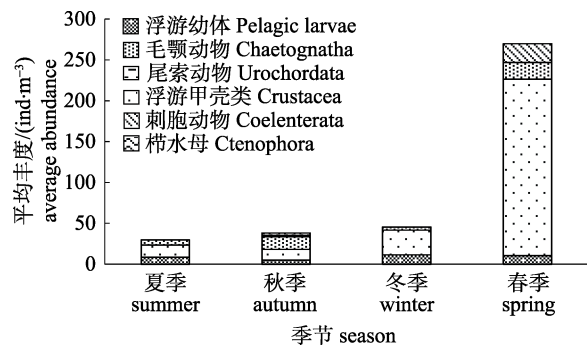


图 4 黄河口及其邻近水域浮游动物丰度的季节变化(无夜光虫)

Fig. 4 Seasonal variation of zooplankton's abundance in the Yellow River estuary and its adjacent waters (without *Noctiluca scintillans*)

丰度在冬季最高，其次为春季、夏季和秋季(图 4)。

2.3 优势种组成

黄河口及其邻近水域各季节浮游动物优势种 12 种(类)，包括桡足类 6 种，浮游幼体 3 类，原生

动物、毛颚动物、栉水母各 1 种。优势种组成具有一定的季节变化，夏、秋季以强壮箭虫和桡足类为主；秋季强壮箭虫和小拟哲水蚤的优势度相对较高，占总丰度的 60.3%；冬季以桡足类和夜光虫为主，双刺纺锤水蚤、桡足类幼体和夜光虫合计占总丰度的 84.1%；春季夜光虫大量暴发，占总丰度比例高达 96.8%，是该季节的绝对优势种，若不计夜光虫，则以双刺纺锤水蚤、瘦尾胸刺水蚤(*Centropages tenuiremis*)和中华哲水蚤等桡足类为主(表 1)。

综合来看，黄河口及其邻近水域无周年优势种，强壮箭虫和桡足类幼体是夏、秋、冬三季的优势种，其中强壮箭虫出现频率高，在总丰度中占有较大比例，是夏、秋季的第 1 优势种；双刺纺锤水蚤为冬季的第 1 优势种；中华哲水蚤和桡足类幼体为各季节常见优势种类(表 1)。

表 1 黄河口及其邻近水域浮游动物的优势种组成及优势度指数

Tab. 1 Dominant species and dominance indexes of zooplankton in the Yellow River estuary and its adjacent waters

种类 species	占总丰度的比例/% percentage in abundance	出现频率/% occurrence frequency	优势度 dominance
夏季 summer (8 月 August)			
强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i>	21.0	100.0	0.210
背针胸刺水蚤 <i>Centropages dorsispinatus</i>	24.2	77.8	0.188
长尾类幼体 <i>Macrura larva</i>	13.3	100.0	0.133
中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	13.2	88.9	0.118
桡足类幼体 <i>Copepoda larva</i>	8.2	50.0	0.041
秋季 autumn (10 月 October)			
强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i>	40.2	100.0	0.402
小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i>	20.1	100.0	0.201
瓜水母 <i>Beroe</i> sp.	7.2	83.3	0.060
瓣鳃类幼体 <i>Lamellibranchiata larva</i>	5.4	88.9	0.048
桡足类幼体 <i>Copepoda larva</i>	5.7	83.3	0.047
中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	6.2	72.2	0.045
近缘大眼剑水蚤 <i>Corycaeus affinis</i>	3.4	61.1	0.021
冬季 winter (2 月 February)			
双刺纺锤水蚤 <i>Acartia bipinnata</i>	38.7	100.0	0.387
桡足类幼体 <i>Copepoda larva</i>	17.4	100.0	0.174
夜光虫 <i>Noctiluca scintillans</i>	28.0	27.8	0.078
强壮箭虫 <i>Sagitta crassa</i>	5.9	100.0	0.059
拟长腹剑水蚤 <i>Oithona similis</i>	6.1	72.2	0.044
春季 spring (5 月 May)			
夜光虫 <i>Noctiluca scintillans</i>	96.8	94.1	0.911

2.4 群落多样性特征

黄河口及其邻近水域浮游动物群落各多样性指数的变化趋势一致,表现为夏季最高,秋季和冬季次之,春季最低(图 5)。夜光虫的大量暴发使 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J')在春季出现了大幅下降, K -优势度曲线也显示春季浮游动物群落的优势度最高,但多样性低,总丰度的 90%以上由夜光虫构成;冬季浮游动物种类间的数量差异较大,总丰度的 80%以上仅由约 3 种浮游动物构成;夏季和秋季的优势度相对较低,多样性较高,种类间的数量差异较小(图 6)。

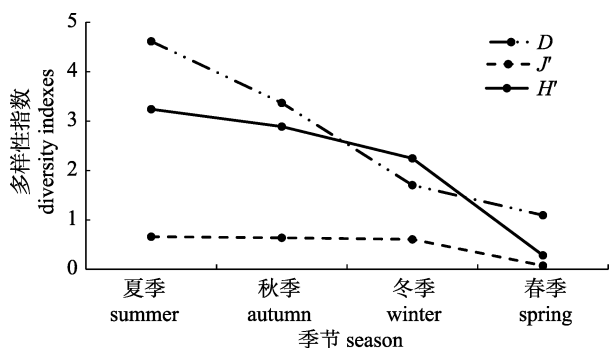


图 5 黄河口及其邻近水域浮游动物群落多样性指数的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of zooplankton community's diversity indexes in the Yellow River estuary and its adjacent waters

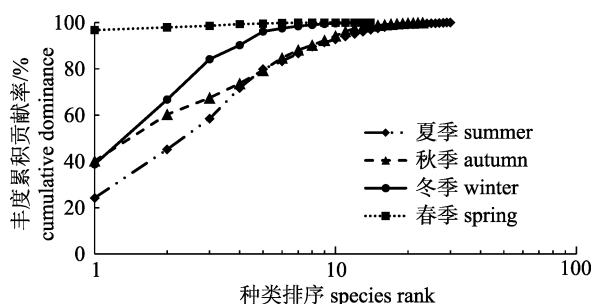


图 6 黄河口及其邻近水域浮游动物群落 K -优势度曲线

Fig. 6 K -dominance curves of zooplankton community in the Yellow River estuary and its adjacent waters

3 讨论

3.1 种类组成

黄河口及其邻近水域浮游动物以桡足类和浮游幼虫为主要类群^[11]。本研究中共鉴定浮游动物 43 种(类),其中桡足类和浮游幼体及鱼卵、仔稚

鱼各占浮游动物总种数的 30.2%,二者作为主要类群的传统优势地位未变。有研究表明,近年来全球部分海域水母类在浮游动物组成中所占比例呈上升趋势,种类数甚至超过了桡足类,海洋生态系统出现全球胶质化现象^[28-29]。本次调查中刺胞动物(水母类)8 种,占 18.6%,是仅次于桡足类和浮游幼体的重要类群,但并未出现大规模暴发的现象,与马静等^[30]和王文杰^[9]的研究结果一致,可见近年来水母类在黄河口及其邻近水域浮游动物群落中较为稳定。

受到黄河冲淡水 and 渤海高盐度海水的相互影响,黄河口及其邻近水域的盐度具有季节性和年变幅大的特点^[31],浮游动物种类多为近岸低盐种和广温广盐种^[11, 15]。黄河口及其邻近水域不同季节浮游动物种类组成较为相似,均属于上述两个类群,但存在明显的季节更替。夏季小型桡足类和浮游幼虫等大量出现,这主要是受高温低盐的影响^[15],浮游动物种类数达到一年的高峰;秋季水温下降,总种数虽有所减少,但刺胞动物种类数增加,尾索动物和栉水母也有出现。本研究中浮游动物种类组成的季节变化规律与董志军等^[19]一致,均表现为夏季种类数最多,秋季次之,然后分别为春季和冬季。1980—2014 年黄河口及其邻近水域浮游动物类群组成较为稳定,浮游甲壳类、浮游幼虫和刺胞动物是主要组成类群;毛颚动物种类少,数量大,也是重要类群之一;原生动物、被囊类、尾索动物、软体动物、栉水母、纤毛动物和环节动物则分别在黄河口邻近水域不同调查航次中出现^[1, 9-11, 13, 15, 30]。

3.2 优势种组成及变化

以往大型浮游动物调查研究表明,强壮箭虫、真刺唇角水蚤(*Labidocera euchaeta*)、中华哲水蚤、小拟哲水蚤、双刺纺锤水蚤和克氏纺锤水蚤(*Acartia clausi*)等为黄河口及其邻近水域的传统优势种^[1, 11-13],本次调查中优势种主要包括夜光虫、强壮箭虫、中华哲水蚤、双刺纺锤水蚤、小拟哲水蚤和桡足类幼体等,与历史资料相比,真刺唇角水蚤和克氏纺锤水蚤的优势地位有所下降,其他优势种变化不大。该研究结果与董志军等^[19]报道 2012—2013 年黄河口邻近海域四季浮游动物

优势种的组成和变化略有差异, 采样网具的不同应为其主要原因, 本研究采用浅水 I 型浮游生物网, 对大型浮游动物群落现状的反映更为准确。

各季节的优势种对黄河口及其邻近水域浮游动物丰度有直接影响^[13]。在不计夜光虫的情况下, 春季由于桡足类大量出现, 浮游动物丰度远高于其他三个季节, 其中双刺纺锤水蚤、瘦尾胸刺水蚤和中华哲水蚤为主要种类, 占春季总丰度的 74.6%; 强壮箭虫作为渤海大型浮游动物的主要优势种^[32], 是黄河口水域夏季和秋季的第一优势种, 其丰度分别占浮游动物总丰度的 21.0% 和 40.2%; 冬季优势种双刺纺锤水蚤、桡足类幼体和夜光虫的丰度之和占其浮游动物总丰度的 84.1%。

黄河口浮游动物优势种组成的季节变化对渔业资源种类有一定的潜在影响。研究表明, 强壮箭虫、桡足类、糠虾和毛虾(*Acetes chinensis*)等浮游动物是青鳞小沙丁鱼(*Sardinella zunasi*)、鳀(*Engraulis japonicus*)、黄鲫(*Setipinna taty*)、凤鲚(*Coilia mystus*)等小型中上层鱼类的主要饵料生物^[33]。强壮箭虫和桡足类是黄河口夏、秋季浮游动物的主要优势种, 青鳞小沙丁鱼、鳀和黄鲫等是黄河口夏、秋季节重要的渔业资源类群^[34-36], 在相应的季节, 强壮箭虫和桡足类是上述小型中上层鱼类的主要饵料。

此外, 春季夜光虫大量暴发, 是该季节的绝对优势种, 其丰度为 8061.09 ind/m³。夜光虫是黄河口及其邻近水域乃至渤海形成赤潮的主要潜在生物, 5—7 月数量最高, 其暴发对盐度有较高的要求, 与相关水域的有机污染密切相关^[37]。近年来频频有学者指出黄河口及其邻近水域的水质状况较差, 污染和富营养化严重^[38-40], 为赤潮生物的生长提供了有利条件。根据 2014 年山东省海洋环境状况公报^[41], 2014 年经黄河入海的营养盐为 32430 t, 与往年相比有所增加, 黄河口生态系统氮磷比的失衡现象及海域富营养化状况未得到明显改善, 黄河口北部富营养化和有机污染严重, 与夜光虫爆发指示的环境状况一致。1989—2006 年, 渤海共发生夜光虫赤潮 21 次^[42]; 王文杰^[9]对 2010 年秋季黄河口及其邻近海域中小型浮游动物的研究中发现, 夜光虫在秋季的优势度高达 0.608,

其丰度分布影响了整个航次浮游动物总丰度的分布。可见夜光虫一旦暴发数量庞大, 即使未达到赤潮基准丰度^[43], 也是相关水域的绝对优势种, 对浮游动物群落数量变动和丰度分布有重要影响。夜光虫优势地位突出, 也反映出水域富营养化程度的加剧^[44]。若不考虑夜光虫, 黄河口及其邻近水域浮游动物的优势种组成虽有一定的季节变化规律, 但各季节出现的交叉优势种较多, 单一优势种较少。

3.3 物种多样性

黄河口及其邻近水域浮游动物的多样性在整个中国海中并不突出, 但在渤海海域较高^[1], 受种类组成和丰度变化的影响, 存在明显的季节变化规律。就物种丰度来看, 夏季种类最多, 组成最复杂, 导致 Margalef 物种丰富度指数(D)和多样性指数(H')最高, 这一规律与焦玉木等^[1]的研究结果一致; 春季则与之相反, 种类数较少, 组成相对简单, 加上夜光虫大量暴发的影响, 使浮游动物种类间的数量差异较大, 物种多样性最低。均匀度方面, 夏季、秋季和冬季均匀度指数(J')相差不大, 均高于春季, 说明浮游动物在这 3 个季节的个体分布相对较为均匀。

黄河口及其邻近水域浮游动物的种类数组成具有明显的季节更替现象, 桡足类和浮游幼虫是其主要类群, 对该水域浮游动物的数量变动及种类多样性的变化具有较大影响。浮游动物作为黄河口及其邻近水域生态系统的重要组成部分, 其群落结构特征和季节变化不仅可以侧面反映水域生态环境的变化, 对渔业资源的补充与养护也具有十分重要的生态意义, 是提高水域生产力和进行渔业管理的重要基础。

参考文献:

- [1] Jiao Y M, Tian J Y. Zooplankton diversity around the Huanghe River Delta[J]. Marine Environmental Science, 1999, 18(4): 33-38. [焦玉木, 田家怡. 黄河三角洲附近海域浮游动物多样性研究[J]. 海洋环境科学, 1999, 18(4): 33-38.]
- [2] Deng J Y, Jin X S. Study on fishery biodiversity and its conservation in Laizhou Bay and Yellow River estuary[J]. Zoological Research, 2000, 21(1): 76-82. [邓景耀, 金显仕. 莱州湾及黄河口水域渔业生物多样性及其保护研究[J]. 动

- 物学研究, 2000, 21(1): 76–82.]
- [3] Tang Q S, Ye M Z. Exploitation and Conservation of Near-shore Fisheries Resources of Shandong[M]. Beijing: Agriculture Press, 1990. [唐启升, 叶懋中. 山东近海渔业资源开发与保护[M]. 北京: 农业出版社, 1990.]
- [4] Cushing D H. The production cycle and the numbers of marine fish[C]. Symposia of the Zoological Society of London, 1972, 29: 213–232.
- [5] Radi T, Pospelova V, de Vernal A, et al. Dinoflagellate cysts as indicators of water quality and productivity in British Columbia estuarine environments[J]. Mar Micropaleontol, 2007, 62(4): 269–297.
- [6] Xu Z L, Shen X Q. Zooplankton biomass and its variation in water near Changjiang estuary[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(3): 282–286. [徐兆礼, 沈新强. 长江口水域浮游动物生物量及其年间变化[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(3): 282–286.]
- [7] David V, Sautour B, Chardy P, et al. Long-term changes of the zooplankton variability in a turbid environment: the Gironde estuary (France)[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 2005, 64(2): 171–184.
- [8] Morgado F, Quintaneiro C, Rodrigues E, et al. Composition of the trophic structure of zooplankton in a shallow temperate estuary (Mondego Estuary, western Portugal)[J]. Zool Stud, 2007, 46(1): 57–68.
- [9] Wang W J. Studies on the mesozooplankton and microzooplankton community in the Yellow River estuary and its adjacent area in summer and autumn[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. [王文杰. 夏秋季黄河口及其邻近海域中小型浮游动物群落生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.]
- [10] Li Z S. Studies on the community characteristics and size spectra of zooplankton in the Yellow River estuary and its adjacent waters in spring[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. [李自尚. 春季黄河口及其邻近水域浮游动物群落特征与粒径谱的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
- [11] Leng Y, Zhang J M, Liu S, et al. Biodiversity in the Yellow River Estuary and Its Adjacent Waters[M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2013. [冷宇, 张继民, 刘霜, 等. 黄河口及邻近海域海洋生物物种多样性[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013.]
- [12] Gong J X, Yang X L, Duan D X, et al. A study on zooplankton community characteristics of Yellow River estuary waters in spring[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2010, 30(6): 1–6. [巩俊霞, 杨秀兰, 段登选, 等. 黄河入海口水域春季浮游动物群落特征研究[J]. 广东海洋大学学报, 2010, 30(6): 1–6.]
- [13] Ma J. Studies on the meso- and macro-zooplankton community ecology in the Yellow River estuary and its adjacent waters in summer and autumn[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. [马静. 夏、秋季黄河口及其邻近海域大中型浮游动物群落生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.]
- [14] Zhang D J, Yan Q L, Wang Z L. Variation in species number and biomass of zooplankton in typical estuaries of China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2008, 39(5): 536–540. [张达娟, 闫启伦, 王真良. 典型河口浮游动物种类数及生物量变化趋势的研究[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(5): 536–540.]
- [15] Tian J Y, Li H Y. Distribution characteristics of zooplankton and the relationship with environmental factors in Yellow River estuary[J]. Marine Environmental Science, 1985, 4(3): 32–41. [田家怡, 李洪彦. 黄河口附近海域浮游动物的分布特征及其与环境因子的关系[J]. 海洋环境科学, 1985, 4(3): 32–41.]
- [16] Li F, Li Y Z, Zhang X R. Impact of variation of water and sediment fluxes on sustainable use of marine environment and resources in the Yellow River estuary and adjacent sea III. Impact of long-term stabilization of the lower course of the Yellow River on the construction of coastal port[J]. Studia Marina Sinica, 2001, 43: 68–82. [李凡, 李永植, 张秀荣. 黄河入海水、沙通量变化对黄河口及邻近海域环境资源可持续利用的影响 III. 黄河入海口的长期稳定对港口建设的影响[J]. 海洋科学集刊, 2001, 43: 68–82.]
- [17] Chang J, Liu G H, Liu Q S. Analysis on spatio-temporal feature of coastline change in the Yellow River and its relation with runoff and sand-transportation[J]. Geographical Research, 2004, 23(5): 339–346. [常军, 刘高焕, 刘庆生. 黄河口海岸线演变时空特征及其与黄河来水来沙的关系[J]. 地理研究, 2004, 23(5): 339–346.]
- [18] Zhang X J, Xu B C, Xia D, et al. Using natural radium and radon isotopes trace the water transport process and nutrients distribution in the Yellow River Estuary under the influence of the water-sediment regulation scheme[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 38(8): 36–43. [张晓洁, 许博超, 夏冬, 等. 镭、氡同位素示踪调水调沙对黄河口水体运移及营养盐分布特征的影响[J]. 海洋学报, 2016, 38(8): 36–43.]
- [19] Dong Z J, Yang Q, Sun T T, et al. Spatial and seasonal variability of the zooplankton community in the Yellow River estuary's adjacent sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 659–667. [董志军, 杨青, 孙婷婷, 等. 黄河口邻近海域浮游动物群落时空变化特征[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 659–667.]
- [20] Xu Z L, Wang Y L, Chen Y Q, et al. An ecological study on zooplankton in maximum turbid zone of estuarine area of Changjiang (Yangtze) River[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1995, 2(1): 39–48. [徐兆礼, 王云龙, 陈亚瞿, 等.

- 长江口最大浑浊带区浮游动物的生态研究[J]. 中国水产科学, 1995, 2(1): 39–48.]
- [21] Liu R Y. Ecology and Living Resources in Jiaozhou Bay[M]. Beijing: Science Press, 1992. [刘瑞玉. 胶州湾生态学和生物资源. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [22] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana IL: University of Illinois Press, 1949: 1–125.
- [23] Margalef R. Information theory in ecology[J]. Gen Syst, 1958, 3(1): 36–71.
- [24] Pielou E C. An Introduction to Mathematical Ecology[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969: 1–286.
- [25] Lamshead P J, Platt H M, Shaw K M. The detection of differences among assemblages of marine benthic species based on an assessment of dominance and diversity[J]. J Natl Hist, 1983, 17(6): 859–874.
- [26] Zheng Z, Li S J, Xu Z Z. Marine Planktology[M]. Beijing: Ocean Press, 1984. [郑重, 李少颈, 许振祖. 海洋浮游生物学. 北京: 海洋出版社, 1984.]
- [27] Du R Q. Biostatistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. [杜荣骞. 生物统计学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.]
- [28] Liu Z S. Community structure and biodiversity of zooplankton in the Changjiang estuary and its adjacent waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. [刘镇盛. 长江口及其邻近海域浮游动物群落结构和多样性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
- [29] Du M M, Liu Z S, Wang C S, et al. The seasonal variation and community structure of zooplankton in China sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5407–5418. [杜明敏, 刘镇盛, 王春生, 等. 中国近海浮游动物群落结构及季节变化[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5407–5418.]
- [30] Ma J, Chen H J, Liu G X. Study on the zooplankton community structure in the Yellow River estuary and its adjacent waters in summer, 2007[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(5): 74–80. [马静, 陈洪举, 刘光兴. 2007年夏季黄河口及其邻近水域浮游动物的群落特征[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2012, 42(5): 74–80.]
- [31] Li Z G. Basic features of hydrologic elements in the sea area near the Yellow River estuary[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 2000, 18(3): 20–28. [李泽刚. 黄河口附近海区水文要素基本的特征[J]. 黄渤海海洋, 2000, 18(3): 20–28.]
- [32] Zheng Z, Zheng Z Z, Wang R, et al. Ecological investigations on the zooplankton of the mackerel fishing ground off Yantai-Weihai and adjacent waters[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1965, 7(24): 329–354. [郑重, 郑执中, 王蓉, 等. 烟、威海鱼渔场及邻近水域浮游动物生态的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1965, 7(24): 329–354.]
- [33] Deng J Y, Meng T X, Ren S M. Food web of fishes in the Bohai sea[J]. Marine Fisheries Research, 1988, 9: 151–171. [邓景耀, 孟田湘, 任胜民. 渤海鱼类食物关系[J]. 海洋水产研究, 1988, 9: 151–171.]
- [34] Zhai L, Xu B D, Ji Y P, et al. Spatial pattern of fish assemblage and the relationship with environmental factors in Yellow River estuary and its adjacent waters in summer[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2852–2858. [翟璐, 徐宾铎, 纪毓鹏, 等. 黄河口及其邻近水域夏季鱼类群落空间格局及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2852–2858.]
- [35] Sun P F, Shan X J, Wu Q, et al. Seasonal variations in fish community structure in the Laizhou Bay and the Yellow River estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 367–376. [孙鹏飞, 单秀娟, 吴强, 等. 莱州湾及黄河口水域鱼类群落结构的季节变化[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 367–376.]
- [36] Zhu X H, Liao F, Liu D, et al. Spatiotemporal pattern and dominant component of fish community in the Yellow River estuary and its adjacent waters[J]. Studia Marina Sinica, 2001, 43(00): 146–156. [朱鑫华, 缪锋, 刘栋, 等. 黄河口及邻近海域鱼类群落时空格局与优势种特征研究[J]. 海洋科学集刊, 2001, 43(00): 146–156.]
- [37] Tian J Y, Dong J Y. Primary research about organic pollution and red tide plankton in the Yellow River estuary[J]. Marine Environmental Science, 1983, 2(1): 46–53. [田家怡, 董景岳. 黄河口附近海域有机污染与赤潮生物的初步调查研究[J]. 海洋环境科学, 1983, 2(1): 46–53.]
- [38] Leng C M, Cao Z J, Zhang J L, et al. Community characteristic of plankton and water quality assessment of the Yellow River estuary[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(3): 360–365. [冷春梅, 曹振杰, 张金路, 等. 黄河口浮游生物群落结构特征及环境质量评价[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(3): 360–365.]
- [39] Hu Q, Qu L, Huang B G, et al. Status and evaluation on nutrients for the adjacent sea water of the Yellow River estuary in autumn of 2014[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(5): 732–738. [胡琴, 曲亮, 黄必桂, 等. 2014年秋季黄河口附近海域营养现状与评价[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(5): 732–738.]
- [40] Liu X, Xue Y, Ji Y P, et al. An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component[J]. China Environmental Science, 2015, 35(10): 3187–3192. [刘潇, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价[J]. 中国环境科学, 2015, 35(10): 3187–3192.]
- [41] Administration of Ocean and Fisheries of Shandong Province. Bulletin of marine environment of Shandong Province in 2014[R]. 2015: 3. http://govinfo.nlc.gov.cn/sdsfz/xxgk/sdsh-yyyt/201505/t20150529_7560702.html?classid=373&new=

- 1 [山东省海洋与渔业厅. 2014 年山东省海洋环境状况公报[R]. 2015: 3. http://govinfo.nlc.gov.cn/sdsfz/xxgk/sdshyy-yt/201505/t20150529_7560702.html?classid=373&new=1.]
- [42] Zhang H L, Zhang A J, Dou Y M, et al. Research of characteristics of red tide in Bohai Sea[C]//Collected Papers of Chinese Environmental Protection, 2005: 1107–1111. [张洪亮, 张爱君, 窦月明, 等. 渤海海区赤潮发生特点的研究[C]//中国环境保护优秀论文集, 2005: 1107–1111.]
- [43] Adachi R. Stipulation of red tide[C]//Collected Papers of Japan Ocean Society of Autumn's Lecture in Showa year of 48, 1973. [安达六郎. 赤潮の規定[C]//昭和 48 年度日本海洋学会秋季大会讲演要旨集, 1973.]
- [44] Du F Y, Wang X H, Jia X P, et al. Seasonal succession of zooplankton species composition and dominant species in the Daya Bay, northern South China Sea[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(8): 1213–1219. [杜飞雁, 王雪辉, 贾晓平, 等. 大亚湾海域浮游动物种类组成和优势种的季节变化[J]. 水产学报, 2013, 37(8): 1213–1219.]

Characteristics of zooplankton community structure and its seasonal variation in the Yellow River estuary and its adjacent waters

LIU Xiaohui¹, XU Binduo¹, ZHANG Chongliang¹, XUE Ying¹, REN Yiping^{1,2}, JI Yupeng¹

1. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Laboratoray for Marine Fishery Science and Food Production Processes; Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

Abstract: Zooplankton species play a crucial role in the pelagic food chain of coastal ecosystems and may reflect changes to marine environments. Therefore, community structure and seasonal variation in zooplankton assemblages are important for understanding ecosystem structure. In recent decades, anthropogenic activities have caused considerable changes to the environment of the Yellow River estuary and its adjacent waters. To ascertain how the present environment has influenced seasonal changes in zooplankton community structure, data on species composition, abundance, dominant species, and species diversity were collected during August 2013–May 2014 in the Yellow River estuary and its adjacent waters. Dominant species were selected based on a dominance(Y) greater than 0.02. Between-season species fluctuations were described using seasonal replacement rate(A). Species diversity in zooplankton communities were measured with the following indices: Margalef species richness(D), Shannon-Wiener diversity(H'), Pielou evenness (J'), and K -dominance curves. We identified 30 zooplankton species with 13 types of pelagic larvae, representing six phyla: Protozoa (one species), Chaetognatha (one species), Urochordata (one species), Ctenophora (one species), Coelenterata (eight species), and Crustacea (18 species). Seasonal replacement rates were 64.1% (summer to autumn), 71.4% (autumn to winter), 41.2% (winter to spring), and 70.6% (spring to summer), revealing obvious seasonality in species composition. Average zooplankton abundance was (2115.64 ± 4143.70) ind/ m^3 . Excluding *Noctiluca scintillans*, the average was (95.93 ± 116.27) ind/ m^3 , with Arthropoda accounting for 71.43%. Abundance was highest in spring (May), followed by winter (February), autumn (October), and finally, summer (August). *Sagitta crassa* and Copepoda such as *Acartia bipinnata* and *Paracalanus parvus* were the main dominant species, whereas *N. scintillans* was highly dominant in spring, exhibiting large blooms. All four species diversity indices were consistent in seasonal variation, being larger in summer and autumn than in winter and spring. Overall, zooplankton community structure was characterized by seasonal fluctuation. Copepoda and pelagic larvae were the dominant groups, with profound effect on variation in abundance and species diversity. Compared to previous research, zooplankton species composition and dominant species did not change significantly in the Yellow River estuary and its adjacent waters. The big blooms of *N. scintillans* were at least partially due to water organic pollution. Consequently, its increasing dominance underscores serious water eutrophication in the Yellow River estuary.

Key words: Yellow River estuary; zooplankton; species composition; dominant species; species diversity

Corresponding author: JI Yupeng. E-mail: cherish@ouc.edu.cn