

2013—2022年大连湾海洋浮游动物群落结构变化及其与环境因子关系研究

李雨轩^{1,2}, 王睿睿^{2,3}, 王 薇^{2,3}, 尹延明², 刘振鹏^{1,2},
代 征^{2,3}, 李明浩^{2,3}, 闫启仑^{2,3}

(1.大连海洋大学 海洋科技与环境学院, 辽宁 大连 116023; 2.国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 3.国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘 要:本研究基于 2013—2022 年大连湾春季和秋季浮游动物的调查资料, 分析了浮游动物的群落结构变化及其与环境因子的关系。2013—2022 年春季和秋季, 大连湾海域共鉴定浮游动物 8 大类 64 种(类), 其中, 桡足类、水母类和浮游幼虫是主要类群, 分别占种类组成的 34%、25% 和 20%; 主要优势种春季为腹针胸刺水蚤 (*Centropages mcmurrichi*)、沃氏纺锤水蚤 (*Acartia Omorii*)、中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 和拟长腹剑水蚤 (*Oithona similis*), 秋季为肥胖三角溞 (*Evadne tergestina*)、异体住囊虫 (*Oikopleura dioica*)、小拟哲水蚤 (*Paracalanus parvus*) 和强壮箭虫 (*Sagitta crassa*)。基于浅水 I 型浮游生物网 (以下简称 I 型网) 的浮游动物平均密度春季和秋季分别为 652 ind/m³ 和 1040 ind/m³, 基于浅水 II 型浮游生物网 (以下简称 II 型网) 的浮游动物平均密度春季和秋季分别为 30470 ind/m³ 和 24355 ind/m³。浮游动物平均生物量春季和秋季分别为 143 mg/m³ 和 190 mg/m³。2013—2022 年, 基于 I 型网的浮游动物平均密度和生物量总体呈下降趋势。基于 I 型网的浮游动物多样性指数平均值春季和秋季分别为 2.40 和 2.80, II 型网分别为 2.38 和 2.66; 基于 I 型网的浮游动物均匀度指数平均值春季和秋季分别为 0.73 和 0.78, II 型网分别为 0.69 和 0.75; 基于 I 型网的浮游动物丰富度指数平均值春季和秋季分别为 1.14 和 1.57, II 型网分别为 0.73 和 0.86。浮游动物多样性不高, 总体略呈上升趋势。温度、盐度及氨氮是影响大连湾浮游动物结构特征的主要环境因子, 温度与桡足类优势种的密度呈负相关关系, 盐度与中华哲水蚤的密度有较强的相关性。研究结果可为大连湾的环境保护与生态评估提供科学依据。

关键词:浮游动物; 群落结构; 环境因子; 大连湾

中图分类号: Q178.53

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)02-0247-10

Study on the changes in the community structure of marine zooplankton in Dalian bay from 2013 to 2022 and its relationship with environmental factors

LI Yuxuan^{1,2}, WANG Ruirui^{2,3}, WANG Wei^{2,3}, YIN Yanming², LIU Zhenpeng^{1,2},
DAI Zheng^{2,3}, LI Minghao^{2,3}, YAN Qilun^{2,3}

(1.College of Marine Sciences and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 3.State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal

收稿日期: 2023-12-31, 修订日期: 2024-07-05

基金项目: 大连市科技创新基金项目 (2021JJ12SN36)

作者简介: 李雨轩 (1996—), 女, 辽宁沈阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生物学, E-mail: yuxuanli96@163.com

王睿睿 (1978—), 女, 副研究员, 主要研究方向为海洋生物学和生态毒理学, E-mail: rrwang@nmemc.org.cn

通信作者: 闫启仑 (1966—), 男, 研究员, 主要研究方向为海洋生物学和生态学, E-mail: qlyan@nmemc.org.cn

Ecosystem, Dalian 116023, China)

Abstract: Analyzes the changes in zooplankton community structure and its relationship with environmental factors based on survey data of zooplankton in the spring and autumn of Dalian Bay from 2013 to 2022. A total of 64 species of zooplankton were identified, with copepods, jellyfish, and planktonic larvae being the main groups, accounting for 34%, 25%, and 20% of the species composition; The main dominant species were *Centropages mcmurrichi*, *Acartia Omorii*, *Calanus sinicus* and *Oithona similis* in spring and *Evadne tergestina*, *Oikopleura dioica*, *Paracalanus parvus* and *Sagitta crassa* in autumn. The average density of zooplankton collected by the shallow water Type I plankton net (hereinafter referred to as Type I net) was 652 ind/m³ in spring and 1040 ind/m³ in autumn. The average density of zooplankton collected by the shallow water Type II plankton (hereinafter referred to as Type II net) was 30470 ind/m³ in spring and 24355 ind/m³ in autumn. The average biomass of zooplankton was 143 mg/m³ in spring and 190 mg/m³ in autumn, respectively. In the past decade, the average density and biomass of large planktonic animals have generally shown a downward trend. The average diversity index of zooplankton by Type I net was 2.40 in spring and 2.80 in autumn, meanwhile, by Type II net 2.38 in spring and 2.66 in autumn, The average evenness index of zooplankton by Type I net was 0.73 in spring and 0.78 in autumn, meanwhile, by Type II net 0.69 in spring and 0.75 in autumn. The average richness index of zooplankton by Type I net was 1.14 in spring and 1.57 in autumn, meanwhile, by Type II net 0.73 in spring and 0.86 in autumn. The diversity of zooplankton was not high and overall showed a slight upward trend. Temperature, salinity, and ammonia nitrogen were the main environmental factors affecting the structure characteristics of zooplankton in Dalian Bay in the past decade. There was a negative correlation between temperature and the density of copepods, while salinity has a strong correlation with the density of *Calanus sinicus*. The research results may provide scientific basis for environmental protection and ecological assessment in Dalian Bay.

Key words: zooplankton; community structure; environmental factors; Dalian bay

海洋浮游动物是海洋生态系统中次级生产力的重要组成部分^[1-2],也是更高营养级生物的饵料。浮游动物在水体食物链中受上行控制与下行控制的影响,起着承上启下的作用^[3],浮游动物的研究对渔业及养殖业有重要意义^[4]。浮游动物对环境因子的变化敏感,生物群落结构和多样性变化可以反映生态系统的变化情况,例如,厄尔尼诺期间,浮游动物对气候变化有明显的响应,可以作为海洋环境中有关气候变化和海洋环境监测与评价的指示生物^[5]。

大连湾(38°54'12"N—39°03'18"N, 121°34'48"E—121°49'41"E)位于辽东半岛南端,湾口朝向东南且与北黄海相连,是一个半封闭的天然海湾,是典型的基岩式海岸的海湾^[6-7];大连湾岸线曲折,长度约125 km,海湾总面积约174 km²^[8],潮汐类型为正规半日潮,海流以潮流为主体,多为往复流。大连湾周围产业以重工业为主,曾经,大连湾是全市生活污水与工业废水主要的排入海域^[9],主要污染物为无机氮、活性磷酸盐、石

油类以及重金属镉和铅^[10],赤潮发生频繁^[11]。目前,海水养殖业已全部退出大连湾。

目前,对于大连湾区域有浮游植物调查、鱼类的群落结构、环境污染等方面的研究报道^[9,12-15],对大连湾浮游动物及其与环境关系的研究报道较少,仅有对1982—1983年大连湾浮游动物周年逐月调查结果的报道^[8]和20世纪90年代初大连湾枝角类的调查报道^[16]。本研究选用2013—2022年大连湾浮游动物和相关环境因子的监测数据,分析了浮游动物的群落结构及其年际变化,并探讨了它们与环境因子之间的关系。研究所获取的大连湾浮游动物的生态调查研究基础资料,可为大连湾的环境保护与生态评估提供科学依据,并为大连湾后续浮游动物的相关研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 调查时间、站位和方法

本研究数据来自2013—2022年国家海洋环

境监测中心在大连湾开展的部分调查结果, 10 年间共在大连湾采集浮游动物 16 次, 其中春季 9 次, 秋季 7 次, 各航次布设站位数量 8~18 个不等(表 1), 站位分布如图 1 所示。

表 1 2013—2022 年大连湾浮游动物站位数量和采样时间
Tab.1 Number of zooplankton stations and sampling time in Dalian bay from 2013 to 2022

年份	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
春季	站位数量	13	—	18	8	8	14	12	12	12
	采样日期	5.30		5.24	5.20	5.12	4.19	5.1	5.26	5.27
秋季	站位数量	12	14	16	—	—	—	12	12	12
	采样日期	9.6	9.9	9.20				10.26	10.28	10.29

注: “—” 表示无数据

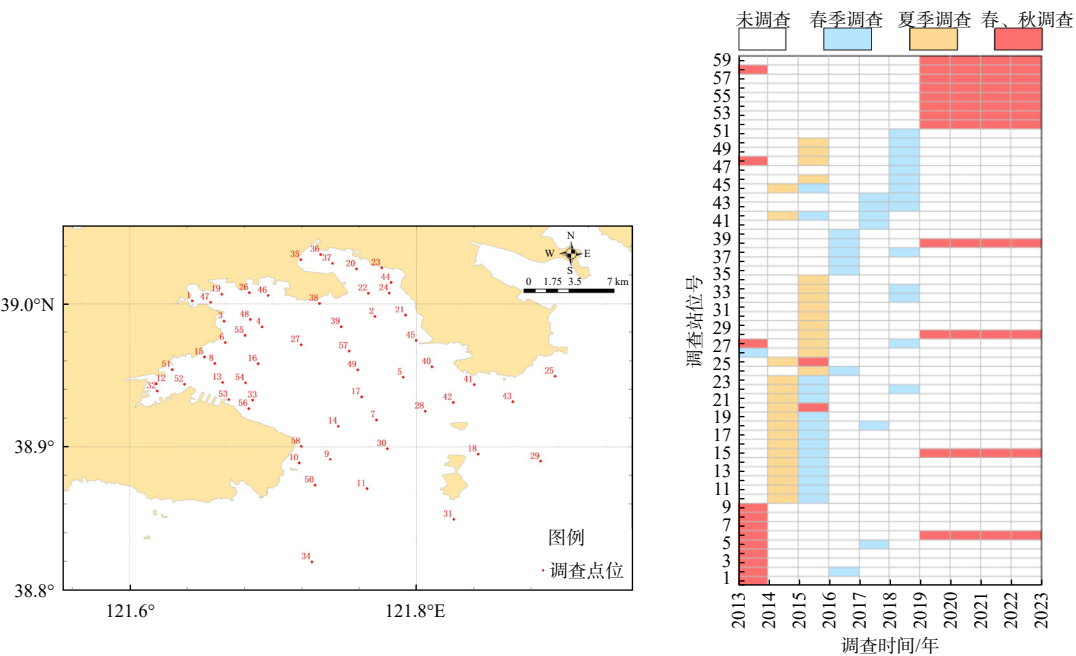


图 1 2013—2022 年大连湾浮游动物采样站位
Fig. 1 Sampling stations of zooplankton in Dalian Bay from 2013 to 2022

按照《海洋监测规范 第 7 部分: 近海污染生态调查和生物监测》(GB 17378.7—2007)^[17], 浮游动物样品使用浅水 I 型浮游生物网(以下简称 I 型网)和浅水 II 型浮游生物网(以下简称 II 型网)自底层至表层垂直拖取采集, 所获样品按样品体积 5% 加入甲醛溶液固定保存。浮游动物样品分析采用个体计数法鉴定计数, 浮游动物生物量为基于 I 型网的浮游动物湿重生物量。

环境参数选择温度、盐度、溶解氧、pH、无机氮、氨氮、活性磷酸盐和叶绿素 *a*。各参数的分析方法如下: 温度和盐度采用温盐深剖面仪

法; 溶解氧采用电化学探头法; pH 采用 pH 计法; 亚硝酸盐采用萘乙二胺分光光度法; 氨氮采用靛酚蓝分光光度法; 活性磷酸盐采用磷钼蓝分光光度法; 叶绿素 *a* 采用荧光分光光度法^[18-20]。

1.2 数据分析与处理

当浮游动物优势度 $Y \geq 0.02$ 时, 可判定为优势种^[21], 浮游动物群落多样性指数包括 Shannon-Weaver 多样性指数 (H')^[22]、Pielou 均匀度指数 (J')^[23] 和 Margalef 丰富度指数 (d')^[24], 计算公式如下:

$$Y = n_i/N \times f_i \tag{1}$$

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (3)$$

$$d = (S-1) / \log_2 N \quad (4)$$

式中: Y 为优势度; N 为研究海域浮游动物所有种类的个体总数; n_i 为第 i 种的个体数目; f_i 为第 i 种出现的频率; P_i 为第 i 种的个体数占所有种类的个体总数的比值; S 为样品中的物种总数。

选取 2015 年、2016 年和 2018 年的春季环境数据, 2013 年、2014 年和 2015 年的秋季环境数据, 浮游动物群落结构参数与环境因子相关分析使用二者同年份数据。浮游动物群落结构参数与环境因子的相关分析使用 SPSS20.0 软件, 进行 Pearson 相关性分析。使用 Canoco5.0 软件对浮游动物优势种与环境因子进行冗余分析 (RDA), 分析二者相关性, 为提高分析准确性, 降低优势种密度值与环境因子间存在的数量级差距, 将环境数据 (pH 除外) 及浮游动物密度进行 $\lg(x+1)$ 转换, 然后进行 RDA 分析。

2 结果与讨论

2.1 浮游动物种类组成

2013—2022 年, 大连湾共鉴定浮游动物 8 大类 64 种 (类), 分别为水母类 (16 种)、枝角类 (4 种)、桡足类 (22 种)、涟虫类 (1 种)、软体动

物 (2 种)、毛颚动物 (2 种)、被囊动物 (4 种) 以及浮游幼虫 (13 类), 此外, 还有猛水蚤、端足类、涟虫类、介形类、等足类、多毛类少量未定种。种类数最多的为桡足类 (占 34%), 其次为水母类 (占 25%)、浮游幼虫 (占 20%)。

春季共鉴定 7 大类 39 种 (类), 秋季共鉴定 7 大类 56 种 (类), 秋季种类数高于春季。2013—2022 年春季和秋季浮游动物种类数变化幅度均不大, 春季为 15~24 种, 最低值出现在 2017 年, 最高值在 2022 年; 秋季为 16~35 种, 最低值出现在 2020 年, 最高值在 2013 年 (图 2)。

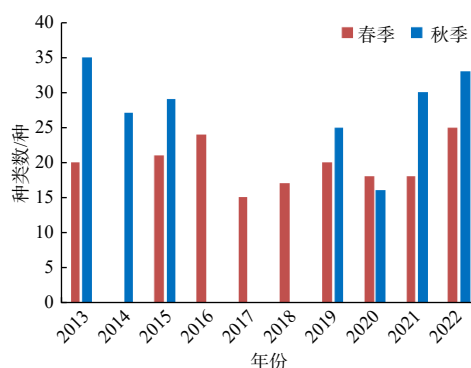


图2 浮游动物种(类)数

Fig. 2 Number of zooplankton species

物 (2 种)、水母类和浮游幼虫是大连湾浮游动物的主要类群。枝角类、毛颚动物和被囊动物出现频率较高。桡足类是大连湾最占优势的类群, 种数几乎每航次都占 30% 以上 (图 3)。

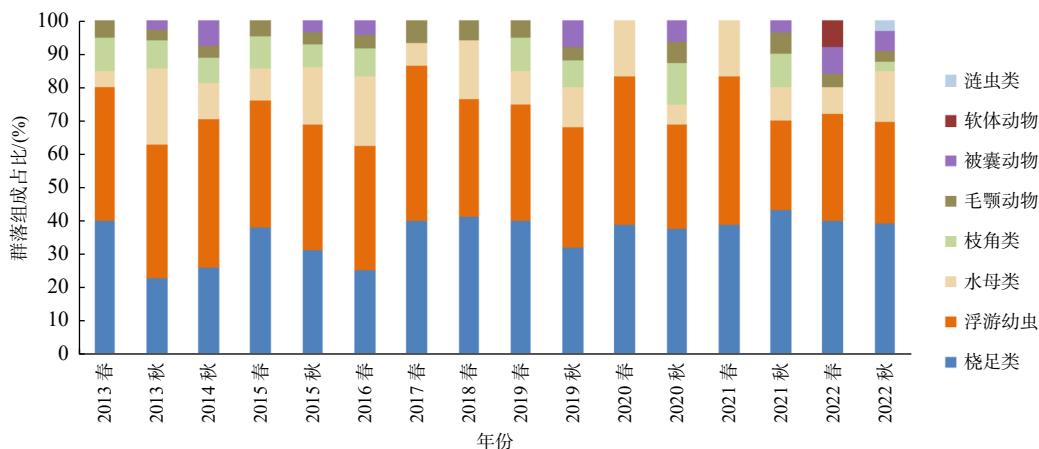


图3 浮游动物群落组成

Fig. 3 Community composition of zooplankton

2013—2022 年, 大连湾浮游动物优势种春

季有腹针胸刺水蚤 (*Centropages abdominalis*)、

沃氏纺锤水蚤(*Acartia Omorii*)、中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)、拟长腹剑水蚤(*Oithona similis*)、多型圆囊溞(*Podon polyphemoides*)、八斑唇腕水母(*Rathkea octopunctata*)、洪氏纺锤水蚤(*Acartia Hongi*)、强壮箭虫(*Sagitta crassa*)、异体住囊虫(*Oikopleura dioica*)、鳞茎高手水母(*Bougainvillia muscus*)、小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)、诺氏三角溞(*Evadne nordmanni*)、曲膝蓼枝螳水母(*Obelia geniculata*)。其中,腹针胸刺水蚤、拟长腹剑水蚤、沃氏纺锤水蚤和中华哲水蚤常年春季占优势地位,成为优势种的年数分别有9年、9年、7年和6年。

2013—2022年,大连湾浮游动物优势种秋季有肥胖三角溞(*Evadne tergestina*)、异体住囊虫、小拟哲水蚤、强壮箭虫、鸟喙尖头溞(*Penilia avirostris*)、拟长腹剑水蚤、中华哲水蚤、圆唇角水蚤(*Labidocera rotunda*)、大西洋五角水母(*Muggiaea atlantica*)、钳形歪水蚤(*Tortanus forcipatus*)、小齿海樽(*Doliolum denticulatum*)、半球美螳水母(*Clytia hemisphaerica*)、近缘大眼水蚤(*Corycaeus affinis*)、多型圆囊溞、诺氏三角溞、洪氏纺锤水蚤和沃氏纺锤水蚤。其中,异体住囊虫、小拟哲水蚤、拟长腹剑水蚤、强壮箭虫和近缘大眼水蚤常年占优势地位,成为优势种的年数分别有7年、7年、7年、6年和6年。大连湾浮游动物优势种中桡足类占比最高,季节更替明显。

《中国海湾志》第一分册(辽东半岛东部海湾)记录了1982年4月至1983年5月大连湾逐月浮游动物现场调查结果,共鉴定浮游动物61种^[8]。与该历史记录比较,2013—2022年,大连湾仅春季和秋季就鉴定到浮游动物51种,考虑到夏季和冬季存在的一些季节性特有种类,表明大连湾浮游动物种数有所增加。

大连湾浮游动物种类组成具有显著的季节变化特征,优势种春季和秋季更替明显,种类组成变化也较大。2013—2022年,浮游动物种类数变化幅度不大,春季种类数平均值小于秋季,符合浮游动物种类数夏、秋季多,春、冬季少的一般规律^[3];桡足类作为大连湾浮游动物的主要类群,秋季种数多于春季,与以往大连湾及邻近海

域调查结果一致^[8,16,25-26];鸟喙尖头溞和肥胖三角溞在春季不占优势地位,但在秋季数量大增,这与历史调查结果一致^[16]。

《中国海湾志》记录大连湾春季浮游动物优势种为洪氏纺锤水蚤,秋季优势种为拟长腹剑水蚤、短角长腹剑水蚤、近缘大眼水蚤、小拟哲水蚤^[8]。2013—2022年秋季浮游动物优势种与历史调查数据大致相似,拟长腹剑水蚤、近缘大眼水蚤和小拟哲水蚤仍为主要优势种。曲膝蓼枝螳水母成为新的常见种,甚至在春季成为优势种。

大连湾浮游动物种类组成主要是暖温带种,以广温近岸低盐种为主体,生态属性为广温近岸低盐群落。生态类型可分为:(1)沿岸低盐类型,主要分布在盐度较低的河口区和沿岸水域,数量常常较大,大连湾沿岸低盐种类有腹针胸刺水蚤、沃氏纺锤水蚤、多型圆囊溞、八斑唇腕水母、洪氏纺锤水蚤、鳞茎高手水母、小拟哲水蚤、诺氏三角溞、曲膝蓼枝螳水母、鸟喙尖头溞、近缘大眼水蚤、圆唇角水蚤、钳形歪水蚤、真刺唇角水蚤(*Labidocera euchaeta*)、瘦尾胸刺水蚤(*Centropages tenuiremis*)、针刺拟哲水蚤(*Paracalanus aculeatus*)、太平洋纺锤水蚤(*Acartia pacifica*)、太平洋真宽水蚤(*Eurytemora pacifica*)、瘦歪水蚤(*Tortanus gracilis*)、海洋伪镖水蚤(*Pseudodiaptomus marinus*)、日本棍螳水母(*Coryne nipponica*)、贝氏真囊水母(*Euphysora bigelowi*)、耳状囊水母(*Euphysa aurata*)、杜氏外肋水母(*Ectopleura dumortieri*)和卡玛拉水母(*Malagazzia carolinae*)等;(2)广温广盐类型,分布广、种类多、数量大,大连湾沿岸广温广盐种类有中华哲水蚤、强壮箭虫、异体住囊虫、肥胖三角溞、拟长腹剑水蚤、半球美螳水母和小介螳水母(*Hydractinia minima*)等;(3)高温广盐类型,多出现在温度较高的夏季和秋季,大连湾沿岸高温广盐种类有锡兰和平水母(*Eirene ceylonensis*)及细颈和平水母(*Eirene menoni*)^[27]。

大连湾浮游动物种类组成不仅有近岸低盐类型的暖温带近岸性种,也有受黑潮暖流影响进入的暖水种,如双生水母(*Diphyes chamissonis*)、大西洋五角水母、拟细浅室水母(*Lensia subtiloides*)、

小齿海樽、软拟海樽(*Dolioletta gegenbauri*)和肥胖箭虫(*Sagitta enflata*)等。

2.2 浮游动物密度和生物量年际变化

2013—2022 年,大连湾基于 I 型网的浮游动物平均密度春季和秋季分别为 652 ind/m³ 和 1040 ind/m³(表 2),年度波动范围分别为 40 ~

1560 ind/m³ 和 55 ~ 3750 ind/m³; II 型网分别为 30470 ind/m³ 和 24355 ind/m³,年度波动范围分别为 13698 ~ 56147 ind/m³ 和 1821 ~ 61838 ind/m³。基于 I 型网的浮游动物年平均密度春季小于秋季,II 型网则相反,春季大于秋季。

表 2 浮游动物密度与生物量
Tab.2 Density and biomass of zooplankton

年份	密度/ind·m ⁻³				生物量/mg·m ⁻³	
	I 型网		II 型网		I 型网	
	春季	秋季	春季	秋季	春季	秋季
2013	903	3750	56147	59375	340	545
2014	—	845	—	61838	—	251
2015	1560	2204	31436	23717	268	426
2016	360	—	27479	—	56	—
2017	571	—	15812	—	86	—
2018	422	—	13698	—	175	—
2019	1414	185	19714	5399	284	52
2020	426	62	42446	1821	31	12
2021	40	55	14572	3941	12	6
2022	168	182	52928	14395	36	35
平均值	652	1040	30470	24355	143	190

注: “—” 表示无数据

春季浮游动物生物量平均值为 143 mg/m³,年度波动范围为 12 ~ 340 mg/m³,总体呈下降趋势,由 2013 年的 340 mg/m³ 下降至 2022 年的 36 mg/m³。秋季生物量平均值为 190 mg/m³,年度波动范围为 6 ~ 545 mg/m³,总体也呈下降趋势,由 2013 年的 545 mg/m³ 下降至 2022 年的 35 mg/m³。2013—2022 年浮游动物春季生物量平均值小于秋季的数值。

春季浮游动物密度值 2015 年最高,生物量 2013 年最高,密度与生物量最低值均出现在 2021 年。秋季密度与生物量最高值均出现在 2013 年,最低值均出现在 2021 年。2013—2022 年秋季浮游动物密度与生物量的平均值均高于春季,生物量变化趋势与基于 I 型网的浮游动物密度变化趋势总体相同,呈现下降趋势(图 4)。

2013—2022 年,大连湾基于 I 型网的浮游动物密度与生物量总体均呈下降趋势。2019 年秋

季至 2022 年的 3 次春季和 4 次秋季调查中,单一或少数几个物种密度很高的状态已经消失,这 7 次调查的所有优势种、优势度最高值出现在 2019 年秋季,为小拟哲水蚤,优势度为 0.27。各季节的生物量与密度平均值都呈现出较低水

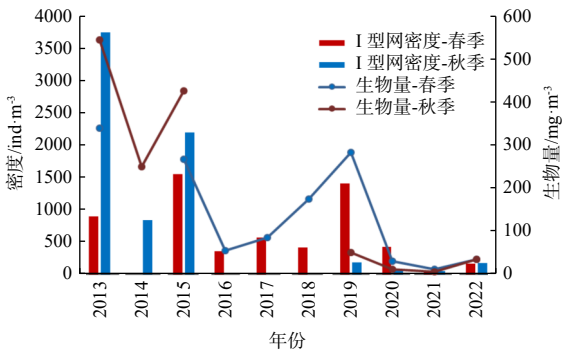


图 4 浮游动物密度与生物量年际变化

Fig. 4 Interannual changes in zooplankton density and biomass

平,优势种的种类数变多,但是优势度都不高。

《中国海湾志》记录大连湾基于Ⅱ型网的浮游动物平均密度季节变化为双峰型,高峰期在9月和2月,2月最高,平均密度为 87311 ind/m^3 ,低谷期在6月和12月,12月最低,平均密度为 8292 ind/m^3 。2013—2022年,浮游动物春季和秋季的平均密度均处于《中国海湾志》记录的高峰期和低谷期之间,2019—2021年秋季平均密度值分别为 5399 ind/m^3 、 1821 ind/m^3 和 3941 ind/m^3 ,均低于《中国海湾志》记录的低谷期的平均密度,但是,2022年秋季平均密度值为 14395 ind/m^3 ,有所回升。

《中国海湾志》记录大连湾浮游动物生物量季节变化也为双峰型,高峰期在2月和10月,2月最高,平均为 123 mg/m^3 ,低谷期在7月和11月,7月最低,平均为 10 mg/m^3 。2013—2022年,浮游动物春季和秋季的平均生物量均高于《中国海湾志》记录的高峰期的平均生物量。2013—2022年,大连湾浮游动物生物量总体呈下降趋势,2019年以来尤其明显,2019—2022年春

季生物量平均值分别为 284 mg/m^3 、 31 mg/m^3 、 12 mg/m^3 和 36 mg/m^3 ,秋季生物量平均值分别为 52 mg/m^3 、 12 mg/m^3 、 6 mg/m^3 和 35 mg/m^3 ,但是,它们仍高于《中国海湾志》记录的低谷期的平均生物量。

2013—2022年,大连湾浮游动物密度和生物量平均值总体处于《中国海湾志》记录的高峰期和低谷期平均值之间或略高,但值得注意的是,2019年以来,大连湾浮游动物密度和生物量平均值总体上呈现出较明显的下降趋势。

2.3 浮游动物群落多样性指数年际变化

2013—2022年,大连湾基于Ⅰ型网的浮游动物多样性指数 H' 、 J 和 d 的平均值春季分别为2.40、0.73和1.14,最高值分别出现在2016年、2021年和2016年;最低值均出现在2019年,分别为1.89、0.62和0.80。大连湾基于Ⅰ型网的浮游动物多样性指数 H' 、 J 和 d 的平均值秋季分别为2.80、0.78和1.57,最高值分别出现在2019年、2020年和2021年。最低值分别出现在2013年、2013年和2015年(表3,图5)。

表3 浮游动物多样性指数年际变化

Tab.3 Interannual variation of plankton diversity index

网型	H'		J		d	
	波动范围	平均值	波动范围	平均值	波动范围	平均值
Ⅰ型网春季	1.89 ~ 3.09	2.40	0.62 ~ 0.88	0.73	0.80 ~ 1.58	1.14
Ⅰ型网秋季	2.46 ~ 3.12	2.80	0.62 ~ 0.89	0.78	1.44 ~ 1.66	1.57
Ⅱ型网春季	1.89 ~ 2.73	2.38	0.55 ~ 0.80	0.69	0.52 ~ 1.05	0.73
Ⅱ型网秋季	2.36 ~ 3.01	2.66	0.65 ~ 0.89	0.75	0.54 ~ 1.07	0.86

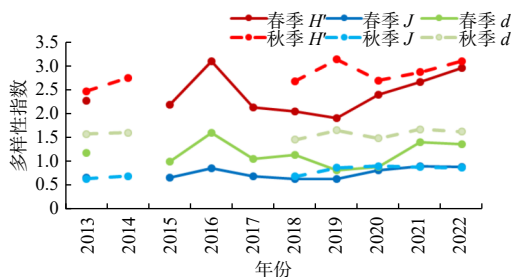


图5 基于Ⅰ型网的浮游动物多样性指数年际变化

Fig. 5 The interannual variation of the diversity index of zooplankton of Type I Net

大连湾基于Ⅱ型网的浮游动物多样性指数 H' 、 J 和 d 的平均值春季分别为2.38、0.69和

0.73,最高值分别出现在2019年、2021年和2016年;最低值分别出现在2015年、2020年和2021年。大连湾基于Ⅱ型网的浮游动物多样性指数 H' 、 J 和 d 的平均值秋季平均值分别为2.66、0.75和0.86,秋季最高值分别出现在2013年、2020年和2015年;最低值分别出现在2020年、2015年和2020年(表3,图6)。

基于Ⅰ型网和基于Ⅱ型网的浮游动物多样性指数 H' 、 J 和 d 的平均值均为春季<秋季,且同一季节基于Ⅰ型网的浮游动物多样性指数 H' 、 J 和 d 的平均值均高于基于Ⅱ型网的平均值。

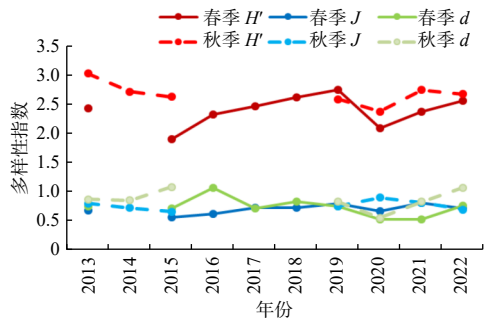


图 6 基于Ⅱ型网的浮游动物多样性指数年际变化

Fig. 6 The interannual variation of the diversity index of zooplankton of Type II Net

2013—2022 年, 大连湾浮游动物多样性不高, 呈波动变化, 变化幅度不大, 总体略呈上升趋势。大连湾基于Ⅱ型网的浮游动物多样性指数 H' 和 J 的平均值春季分别为 2.38 和 0.69, 波动范围分别为 1.89 ~ 2.73 和 0.55 ~ 0.8; 秋季分别为 2.66 和 0.75, 波动范围分别为 2.36 ~ 3.01 和 0.65 ~ 0.89。2001 年 9 月至 2002 年 9 月, 赵文等^[26]在黑石礁海区使用Ⅱ型网进行了每月一次的周年浮游动物调查, 结果表明, H' 的月均值变

化范围为 1.52 ~ 3.36, 年均值为 2.46; J 的月均值变化范围为 0.47 ~ 0.81, 年均值为 0.72。诚如该文作者所言, 该次调查海域范围较小, 采样点较少, 所获得的调查结果具有一定的局限性, 但是, 黑石礁海区与大连湾邻近, 二者具有较强的可比性, 2013—2022 年, 大连湾浮游动物 H' 和 J 的春季和秋季的平均值与其年均值基本一致, 表明 2001—2022 年, 大连湾浮游动物 H' 和 J 的变化不大, 多样性指数不高。

2.4 浮游动物群落结构特征与环境因子的关系

春季, 基于Ⅰ型网的浮游动物种类数与温度、磷酸盐呈正相关关系; 密度与盐度和氨氮呈正相关关系, 与 pH 呈负相关关系; H' 与温度呈极显著正相关关系, 与盐度呈极显著负相关关系。基于Ⅱ型网的浮游动物种类数与盐度、无机氮和氨氮呈负相关关系; 密度与温度、无机氮和氨氮呈正相关关系; H' 与温度、盐度和氨氮呈极显著负相关关系, 与溶解氧和 pH 呈极显著正相关关系(表 4)。

表 4 浮游动物群落结构特征与环境因子的相关性分析

Tab.4 Correlation analysis between zooplankton community structure and environmental factors

环境因子	春季						秋季					
	Ⅰ型网			Ⅱ型网			Ⅰ型网			Ⅱ型网		
	种类数	密度	H'	种类数	密度	H'	种类数	密度	H'	种类数	密度	H'
温度	0.394*	0.151	0.562**	-0.087	0.344*	-0.534**	0.209	0.303	-0.131	-0.109	0.464**	0.130
盐度	-0.302	0.321*	-0.438**	-0.465**	0.042	-0.443**	0.018	-0.027	0.026	0.329*	-0.437**	-0.296
溶解氧	-0.212	-0.299	-0.284	0.082	-0.299	0.734**	-0.091	-0.251	0.159	0.132	-0.166	-0.499**
pH	0.010	-0.370*	0.047	0.267	-0.166	0.731**	0.097	0.070	-0.016	0.227	-0.325*	0.112
无机氮	0.167	0.308	0.125	-0.356*	0.449**	-0.116	0.295	0.054	-0.052	-0.420**	0.111	0.069
磷酸盐	0.354*	0.053	0.305	0.051	0.263	0.230	0.014	-0.043	-0.048	-0.222	0.341*	-0.309*
叶绿素a	-0.153	0.066	0.032	-0.311	0.054	0.062	0.312	0.207	-0.242	-0.587**	0.513**	0.067
氨氮	0.185	0.487**	0.103	-0.430**	0.592**	-0.429**	0.323*	0.094	-0.129	-0.349*	0.062	0.124

注: * $p < 0.05$, 表示显著性差异; ** $p < 0.01$, 表示极显著性差异

秋季, 基于Ⅰ型网的浮游动物种类数与氨氮呈显著正相关关系。基于Ⅱ型网的浮游动物种类数与盐度呈正相关关系, 与无机氮、叶绿素 a 和氨氮呈负相关关系; 密度与温度、磷酸盐和叶绿素 a 呈正相关关系, 与盐度和 pH 呈负相关关系; H' 与溶解氧和磷酸盐呈负相关关系

(表 4)。

春季, 温度与鳞茎高手水母、曲膝数枝螅水母和多型圆囊溞等的密度呈正相关关系, 与中华哲水蚤等桡足类优势种的密度呈负相关关系, 而盐度与它们呈正相关关系, 无机氮和磷酸盐对浮游动物优势种的密度影响较小。秋季, 温度与诺

氏三角溞和肥胖三角溞等大部分种类的密度呈正相关关系,盐度与中华哲水蚤的密度呈正相关关系,与大部分种类的密度呈负相关关系,叶绿素 *a* 和 pH 与诺氏三角溞的密度呈显著正相关关系(图 7)。温度、盐度和 pH 对大连湾浮游动物优势种的密度影响较大。

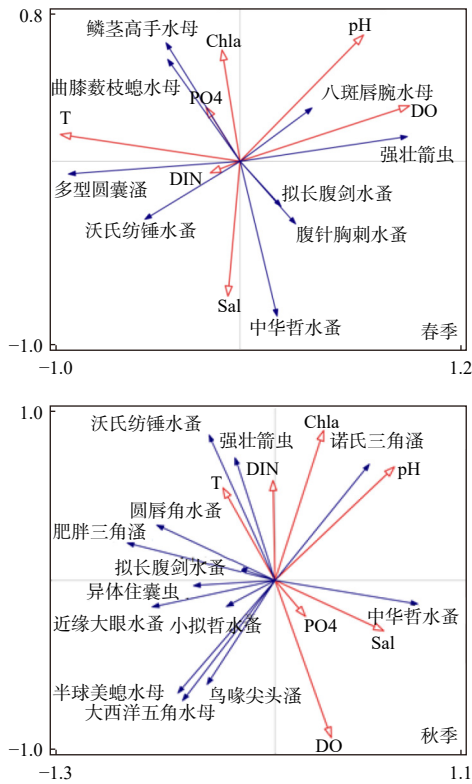


图 7 浮游动物优势种与环境因子的 RDA 排序

Fig. 7 RDA ordination graph of dominant species and environmental factors of zooplankton

温度、盐度及氨氮是影响大连湾浮游动物群落结构特征的主要环境因子。春季,温度与基于 II 型网的浮游动物的密度呈正相关关系,与 *H'* 呈负相关关系;盐度与两种网型的种类数和 *H'* 均呈负相关关系,春季大连湾盐度升高对浮游动物的多样性起到了一定的抑制作用;氨氮与基于 I 型网的浮游动物密度呈正相关关系,与 II 型网浮游动物种类数呈负相关关系,密度呈正相关关系, *H'* 呈显著负相关关系。大连湾海域水温和氨氮含量升高会引起中小型浮游动物个别种类密度升高与多样性下降,盐度升高会导致浮游动物的种类数和 *H'* 下降。秋季,只有氨氮与基于 I 型网的浮游动物种类数呈显著正相关关系,其他环境

因子与基于 I 型网的浮游动物参数均无明显相关性。盐度与基于 II 型网的浮游动物种类数呈正相关关系,密度呈负相关关系,秋季盐度升高有利于中小型浮游动物种类数增加;叶绿素 *a* 和氨氮等都与种类数呈负相关关系,磷酸盐和叶绿素 *a* 与密度呈正相关关系,营养盐和浮游植物细胞数量的增加,导致单一或少数几种浮游动物大量繁殖,种类数和多样性因此下降。

RDA 分析结果表明,温度和盐度对大连湾浮游动物优势种的密度影响较大^[28]。春季,温度与鳞茎高手水母、曲膝数枝螳水母和多型圆囊溞等的密度呈正相关关系,与中华哲水蚤、腹针胸刺水蚤、拟长腹剑水蚤和沃氏纺锤水蚤的密度呈负相关关系,盐度与中华哲水蚤等桡足类优势种的密度均呈正相关关系。温度的升高会导致中华哲水蚤等种类繁殖高峰的提前来临,所以,温度往往与这些桡足类优势种的密度呈负相关关系^[29-30]。秋季,温度与诺氏三角溞和肥胖三角溞等大部分种类的密度呈正相关关系,盐度与中华哲水蚤的密度呈正相关关系,与其他大部分优势种的密度呈负相关关系。2013—2022 年鉴定到的 4 种海洋枝角类是大连湾浮游动物重要的组成部分,经常成为优势种,近岸低盐属性,受温度影响显著,它们的数量增长与温度有较强的相关性^[16]。

3 结论

(1)2013—2022 年,大连湾共鉴定浮游动物 8 大类 64 种(类),桡足类和水母类是最占优势的类群。大连湾浮游动物种类组成具有显著的季节变化特征,优势种季节更替明显。大连湾浮游动物种类组成主要是暖温带种,以广温近岸低盐种为主体,生态属性为广温近岸低盐群落。生态类型可分为沿岸低盐类型、广温广盐类型和高温广盐类型,还有受黑潮暖流影响进入的暖水种。

(2)2013—2022 年,大连湾基于 I 型网的浮游动物平均密度春季和秋季分别为 652 ind/m³ 和 1040 ind/m³, II 型网分别为 30470 ind/m³ 和 24355 ind/m³。春季生物量平均值为 143 mg/m³, 秋季生物量平均值为 190 mg/m³。2013—2022

年, 秋季浮游动物密度与生物量的平均值均高于春季, 生物量变化趋势与基于 I 型网的浮游动物密度变化趋势总体相同, 均呈现下降趋势。

(3) 2013—2022 年, 大连湾基于 I 型网和 II 型网的浮游动物的多样性指数 H' 、 J 和 d 的平均值均为春季 < 秋季, 且同一季节基于 I 型网的浮游动物多样性指数 H' 、 J 和 d 的平均值高于基于 II 型网的平均值。2013—2022 年, 大连湾浮游动物多样性不高, 呈波动变化, 变化幅度不大, 总体略呈上升趋势。

(4) 温度、盐度及氨氮是影响大连湾浮游动物群落结构特征的主要环境因子, 温度、盐度和 pH 对大连湾浮游动物优势种的密度影响较大。

参考文献:

- [1] 谭焯辉, 黄良民, 尹健强. 南沙群岛海区浮游动物次级生产力及转换效率估算 [J]. 热带海洋学报, 2003, 22(6): 29-34.
- [2] 刘承松, 陈清潮, 吴云华. 几种海洋浮游动物生化成份的分析 [J]. 热带海洋, 1982, 1(2): 170-175.
- [3] 王 晓. 南黄海浮游动物群落及环境因子对其分布影响的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [4] 郑 重, 李少菁, 许振祖. 海洋浮游生物学 [M]. 北京: 海洋出版社, 1984.
- [5] 刘镇盛, 杜明敏, 章 菁. 国际海洋浮游动物研究进展 [J]. 海洋学报, 2013, 35(4): 1-10.
- [6] 李宸然. 用海项目对大连湾海洋生态环境的影响分析 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014: 13.
- [7] 王伟伟, 王 鹏, 吴英超, 等. 海岸带开发活动对大连湾环境影响分析 [J]. 海洋环境科学, 2011, 30(4): 512-515.
- [8] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第一分册 [M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 250-323.
- [9] 谭 馨. 基于环境容量的入海污染物总量控制研究——以大连湾为例 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [10] 李 震, 刘景泰. 大连湾海域水体富营养状况分析 [J]. 中国环境监测, 2000, 16(1): 38-41.
- [11] 王惠卿, 杜广玉. 大连市近岸海域赤潮状况、预测及防治对策 [J]. 中国环境监测, 2000, 16(6): 42-46.
- [12] 张树林, 赵 晖. 大连湾春秋季节浮游植物的调查研究 [J]. 海洋科学, 2003, 27(2): 45-48.
- [13] 秦宇博, 刘修泽, 董 婧, 等. 大连湾海域鱼类的群落结构研究 [J]. 水产科学, 2016, 35(3): 261-266.
- [14] 张艳霞. 污染物对大连湾海域的累积环境影响研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [15] 杨 丹, 张伟东, 侯昊辰, 等. 大连湾局部海域石油污染对潮间带海洋线虫生物群落的影响 [J]. 海洋湖沼通报, 2014(3): 135-141.
- [16] 王真良, 徐汉光, 刘晓丹, 等. 大连湾的枝角类 [J]. 海洋科学, 1991(5): 65-67.
- [17] GB 17378.7—2007, 海洋监测规范 第 7 部分: 近海污染生态调查和生物监测 [S].
- [18] GB 17378.3—2007, 海洋监测规范 第 3 部分: 样品采集、贮存与运输 [S].
- [19] GB 17378.4—2007, 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析 [S].
- [20] HY/T 147.6—2013, 海洋监测技术规程 第 6 部分: 海洋水文、气象与海冰 [S].
- [21] 孙儒泳. 动物生态学原理 [M]. 2 版. 北京: 北京师范大学出版社, 1992. 356-357.
- [22] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949: 1-114.
- [23] PIELOU E C. The measurement of diversity in different types of biological collections [J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 13: 131-144.
- [24] MARGALEF R. Information theory in ecology [R]. [2023 年 2 月 20 日]. <https://digital.csic.es/handle/10261/284346>.
- [25] 陈 颖, 王 璐, 尚宏鑫, 等. 大连旅顺口区典型养殖海区中浮游动物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 水产养殖, 2022, 43(1): 1-6.
- [26] 赵 文, 殷旭旺, 李柏戩, 等. 大连黑石礁海区浮游动物的群落结构及时空格局 [J]. 大连水产学院学报, 2005, 20(4): 270-277.
- [27] 王云龙, 沈新强, 李纯厚, 等. 中国大陆架及邻近海域浮游生物 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2005.
- [28] 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.
- [29] 徐兆礼, 高 倩. 长江口海域真刺唇角水蚤的分布及其对全球变暖的响应 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1196-1201.
- [30] 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.

(本文编辑: 胡莹莹)