刘欣禹，徐子钧，张洪亮，等. 渤海西南部小型水母群落特征与环境因子相关性研究[J]. 海洋学报，2023, 45(3): 66–75, doi:10.12284/hyxb2023012

Liu Xinyu, Xu Zijun, Zhang Hongliang, et al. Characteristics of small medusae community correlated with environmental factors in the southwest of Bohai Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(3): 66–75, doi:10.12284/hyxb2023012

渤海西南部小型水母群落特征与环境因子相关性研究

刘欣禹[1, 2, 3]，徐子钧[1, 2, 3]，张洪亮[1, 2, 3]，李保磊[1, 2, 3]，温国义[1, 2, 3]，李笑语[1, 2, 3]，沙婧婧[1, 2, 3]，杜小媛[1, 2, 3]，鲍萌萌[1, 2, 3]，孙卓男[1, 2, 3]，丁凯[1, 2, 3]，齐衍萍[1, 2, 3*]，温若冰[1, 2, 3]，曹婧[1, 2, 3]

(1. 国家海洋局北海环境监测中心，山东 青岛 266033; 2. 自然资源部渤海生态预警与保护修复重点实验室，山东 青岛 266033; 3. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室，山东 青岛 266061)

摘要：根据 2020 年 8 月至 2021 年 5 月对渤海西南部浮游动物调查的 4 个航次数据，分析该海域水螅水母、栉水母群落结构和季节变化特征，讨论了环境因子对小型水母丰度的影响。研究发现，渤海西南部小型水母种类组成和丰度分布存在季节变化，全年调查共发现小型水母 13 种，11 种水螅水母、2 种栉水母；春、夏、秋、冬该海域水母种数分别为 4 种、9 种、7 种和 2 种，丰度均值分别为 30.74 ind./m^3、30.78 ind./m^3、12.08 ind./m^3、0.57 ind./m^3；优势种为嵊山秀氏水母（*Sugiura chengshanense*）、八斑芮氏水母（*Rathkea octopunctata*）、锡兰和平水母（*Eirene ceylonensis*）、半球美螅水母（*Clytia hemisphaerica*）、球型侧腕水母（*Pleurobrachia globosa*），优势种季节更替率平均为 91.67%，呈现明显季节演替。水温和盐度是影响渤海西南部小型水母丰度季节变化的主要环境因子，春季水温回升及适宜营养盐含量促进小型水母生长繁殖，夏季桡足类为小型水母提供了丰富的饵料促进其生长，秋季群落主要受盐度的影响。根据渤海西南部小型水母风险种分布情况，推测夏季和秋季风险种旺发对拟建核电存在风险。

关键词：水螅水母；栉水母；季节变化；环境因子；浮游动物桡足类；渤海

中图分类号：Q178.53　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253−4193(2023)03−0066−10

1　引言

水母是海洋生态系统中的重要组成部分，我国近海发现的水母有 420 多种。水母类生物种类繁多、数量巨大且分布范围广，是海洋生态系统物质和能量流动的重要环节[1−3]，刺胞动物门的水螅水母和管水母以及栉水母动物门的栉水母，统称为小型水母[1, 4]，是海洋浮游动物中重要的肉食性类群。部分研究发现，小型水母能摄食浮游桡足类、鱼卵及仔稚鱼，这可能对渔业资源产生一定负面影响[5−6]。自 20 世纪 90 年代，在世界部分海湾、区域[7−8]及我国近海水母暴发频繁[9]，逐渐成为全球性的生态环境问题[10]，严重影响海洋渔业生产以及海洋生态功能等[2, 11]。另外水母也是威胁核电冷源安全的风险生物之一，其大量暴发会影响到使用海水冷却的核电冷源系统运行，严重时甚至使核电海水冷源系统瘫痪[12]，国内约 59% 的取水堵塞事件由水母造成[8]。水母的暴发往往和全球变暖、海域富营养化和沿海建设等相关[10]，引发的社会与经济问题受到各界的广泛关注。一般而言，水母暴发主要指大型水母暴发，但近年研究发现，我国近海海域特别是海湾内小型水母也有暴发的趋势[4, 13−14]。小型水母—— 球型侧腕水母（*Pleurobrachia globosa*）已被列

收稿日期：2022−05−12；**修订日期：**2022−07−18。

基金项目：国家重点研发计划（2019YFC1407903）；自然资源部北海局海洋科技项目（202202）；北海分局海洋科技项目（202001）。

作者简介：刘欣禹（1988—）女，山东省青岛市人，工程师，主要研究方向为海洋生态学。E-mail: liuliu.xinyu@163.com

*** 通信作者：**齐衍萍，高级工程师，主要从事海洋生态研究。E-mail: qiyanping@ncs.mnr.gov.cn

为宁德海域核电[15]及辽宁红沿河核电[16]冷源风险致灾海洋生物。

渤海西南部海域浮游动物丰富，通过摄食浮游植物进行生长和繁殖，同时也是鱼虾蟹类的重要饵料[17]，因此是鱼类等良好的索饵场、产卵场[18]，该海域的浮游动物群落特征已有较详细研究[19]，但针对该海域小型水母群落特征的研究较少。渤海西南部海域位于天津、河北及山东半包围区域内，近年来随着环渤海地区经济的高速发展，为保障稳定的电力供应，该海域西岸拟投建核电，以海水作为冷却水[20]。

本研究选取渤海西南部海域开展调查，分析小型水母类群的分布现状，探究水母类群及优势种的动态变化趋势，分析环境因子对小型水母时空变化的影响机制，推测其对滨海拟建核电生产带来的潜在风险。历史研究主要针对海月水母(*Aurelia aurita*)、霞水母(*Cyanea* sp.)等大型水母，鲜有针对小型水母的专项调查，本研究为渤海西南部海域小型水母的生态学研究提供了基础资料，并评估了其潜在风险，以期为今后渤海生态系统的评估提供研究基础。

2　材料与方法

2.1　样品采集与处理

2020 年 8 月、2020 年 11 月、2021 年 2 月及 2021 年 5 月对渤海西南部海域进行 4 个航次浮游动物调查监测，共计 29 个站位，见图 1。

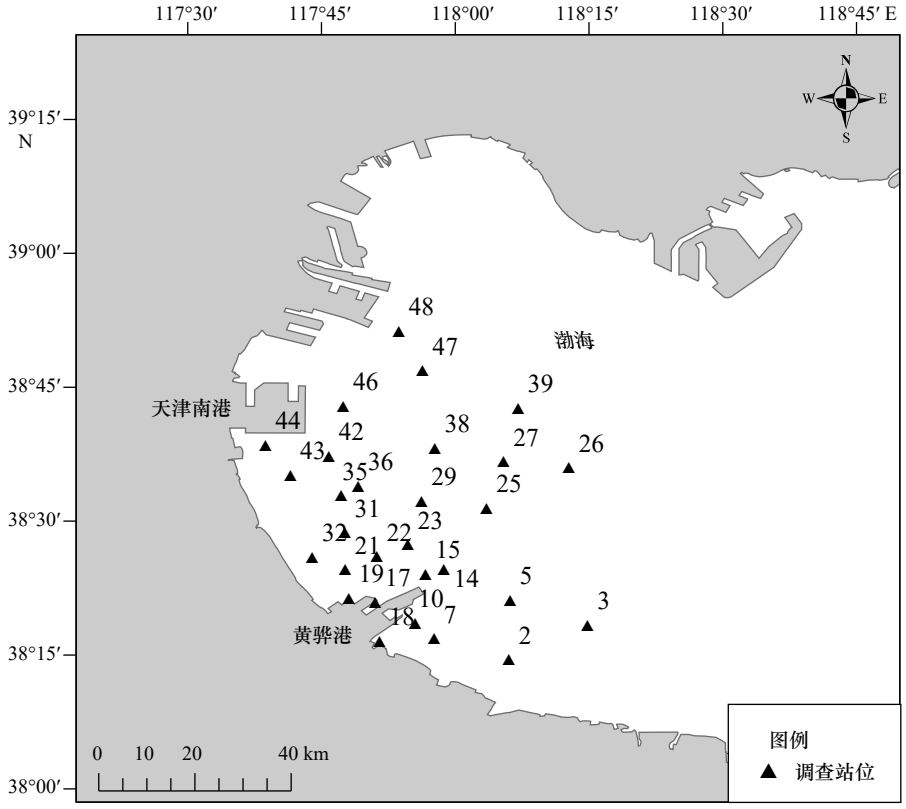

图 1　渤海西南部调查站位

Fig. 1　The sample stations in the southwest of Bohai Sea

浮游动物采样使用浮游生物网(浅水 I 型，口径为 50 cm，网目孔径为 0.505 mm)，由底至表垂直拖拽，网收上甲板后用冲水设备自上而下反复冲洗网衣外表面，最后将所有标本转入样品瓶，保存在 5% 的甲醛海水溶液中，带回实验室分析。将所得样品转移至培养皿中，在体视显微镜下，按个体计数法对小型水母、桡足类等鉴定到种，记录生物密度。站位布设、小型水母丰度分布图由 ArcGIS 10.6 软件绘制。

环境参数包括水深、海水表层温度、盐度、pH、溶解氧含量、化学需氧量、磷酸盐含量、无机氮含量，各环境要素样品均使用 CTD(型号 CTD48M)采样，其中水深、水温、盐度数据使用 CTD 测得，其他环境要素样品带回实验室，分析方法详见表 1。

2.2　数据处理

2.2.1　群落结构及优势种计算

小型水母优势种使用物种优势度指数(Y)[21]进行计算，见式(1)；相邻季节间小型水母种类更替率使用种类更替率(R)[22]进行计算，见式(2)。

$$Y = P_i \times F, \quad (1)$$

$$R = [(a+b-2c)/(a+b-c)] \times 100\%, \quad (2)$$

式中，Y 为物种优势度指数，当 Y>0.02 时，该种即为该海域优势种[4]；F 为该种的出现频率；$P_i=n_i/N$，其中，n_i 是第 i 个物种的个体数，N 是全部物种的个体数；R 为种类更替率；a、b 分别为相邻两个季节的种类数；c 为相邻两个季节共同的种类数。

表 1 环境要素分析方法

Table 1 Analysis methods of environmental factors

序号	环境要素	方法
1	pH	pH计法
2	溶解氧含量	碘量法
3	化学需氧量	碱性高锰酸钾法
4	磷酸盐含量	流动分析法
5	无机氮含量	流动分析法

2.2.2 环境因子相关分析

使用 Canoco 5.0 软件对夏季、秋季、冬季、春季 4 个航次的小型水母优势种丰度与桡足类丰度、环境变量的关系进行分析，先对数据进行去趋势对应分析（DCA），结果建议采用典范对应分析（CCA），物种矩阵经 lg(x+1) 转换，经蒙特卡罗检验，探究环境因子、桡足类对小型水母丰度变化的影响；使用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA），分析 4 个季节环境要素的差异性。

3 结果

3.1 种类组成与优势种

2020−2021 年渤海西南部海域 4 个航次共鉴定出小型水母 13 种，包括 11 种水螅水母、2 种栉水母。在小型水母的种类组成上，水螅水母占 84.62%，栉水母占 15.38%。

2020 年 8 月（夏季）共鉴定出 9 种，包括 8 种水螅水母及 1 种栉水母，高手水母（*Bougainvillia* sp.）、灯塔水母（*Turritopsis nutricula*）、锡兰和平水母（*Eirene ceylonensis*）仅于夏季出现；2020 年 11 月（秋季）共鉴定出 7 种，包括 5 种水螅水母及 2 种栉水母，其中四手触丝水母（*Lovenella assimilis*）及蝶水母（*Ocyropsis crystallina*）仅在秋季出现；2021 年 2 月（冬季）共鉴定出 2 种，均为水螅水母；2021 年 5 月（春季）共鉴定出 4 种，均为水螅水母，其中小介螅水母（*Hydractinia minima*）仅在春季出现，种类组成详见表 2。

表 2 不同季节水母种类组成名录

Table 2 Species composition of medusae in different seasons

序号	类群	学名	拉丁学名	夏季	秋季	冬季	春季
1	水螅水母	高手水母	*Bougainvillia* sp.	+	−	−	−
2	水螅水母	八斑芮氏水母	*Rathkea octopunctata*	−	−	+	+
3	水螅水母	灯塔水母	*Turritopsis nutricula*	+	−	−	−
4	水螅水母	小介螅水母	*Hydractinia minima*	−	−	−	+
5	水螅水母	薮枝螅水母属	*Obelia* spp.	+	+	−	−
6	水螅水母	嵊山秀氏水母	*Sugiura chengshanense*	+	+	−	+
7	水螅水母	四手触丝水母	*Lovenella assimilis*	−	+	−	−
8	水螅水母	锡兰和平水母	*Eirene ceylonensis*	+	−	−	−
9	水螅水母	细颈和平水母	*Eirene menoni*	+	+	−	−
10	水螅水母	半球美螅水母	*Clytia hemisphaerica*	+	+	−	+
11	水螅水母	四枝管水母	*Proboscidactyla flavicirrata*	+	−	+	−
12	栉水母	球型侧腕水母	*Pleurobrachia globosa*	+	+	−	−
13	栉水母	蝶水母	*Ocyropsis crystallina*	−	+	−	−

注：+表示检出，−表示未检出。

夏、秋、冬、春 4 个季节间的种类组成更替率分别为：夏秋 54.54%，秋冬 100%，冬春 80.00%，春夏 81.82%，平均更替率为 79.09%，季节之间存在种类更替，夏季到秋季的种类更替率最低。参照物种更替率，计算各季节

优势种季节更替率, 夏秋 66.67%, 秋冬 100%, 冬春 100%, 春夏 100%, 平均更替率为 91.67%, 优势种存在季节更替。

调查海域 4 个航次共出现 5 种优势种, 小型水母的优势种结构季节演替非常明显。球型侧腕水母是夏季、秋季第一优势种; 八斑芮氏水母在冬季为优势种; 春季第一优势种为嵊山秀氏水母。各季度优势种优势度、丰度占比及出现率详见表 3。

3.2　水母丰度季节变化与环境因子关系

本年度调查渤海西南部小型水母夏季、秋季、冬季、春季的平均丰度分别为 30.78 ind./m^3、12.08 ind./m^3、0.57 ind./m^3、30.74 ind./m^3, 春季和夏季小型水母丰度总体较高, 秋季和冬季水母丰度总体较低(图 2)。

本年度调查发现, 调查海域沿岸和中部小型水母丰度比较高。夏季水母丰度最高, 高值区位于黄骅港北至天津南港附近, 向外水母丰度先逐渐降低又逐渐升高, 至渤海湾中部, 主要优势种类为球型侧腕水母和锡兰和平水母。秋季高值区位于黄骅港东南侧海域, 主要优势种类为球型侧腕水母, 另外渤海湾中部水母种群丰度较高, 黄骅港西北侧海域水母种群丰度较低。冬季水母丰度为一年中最低, 小型水母主要分布于天津南港南侧海域, 主要种类为八斑芮氏水母。春季高值区位于黄骅港西北侧、天津南港东侧及调查海域中部, 主要优势种类为嵊山秀氏水母。

表 3　各季节水母优势种及优势度指数

Table 3　The dominant species and dominant degree of medusae in different seasons

种类	季节	优势度	丰度占比/%	出现率/%
球型侧腕水母	夏季	0.39	45.52	86.21
锡兰和平水母	夏季	0.27	35.17	75.86
半球美螅水母	夏季	0.08	11.59	65.52
球型侧腕水母	秋季	0.69	83.95	82.76
八斑芮氏水母	冬季	0.18	87.27	20.69
嵊山秀氏水母	春季	0.32	58.56	55.17
八斑芮氏水母	春季	0.05	26.15	17.24

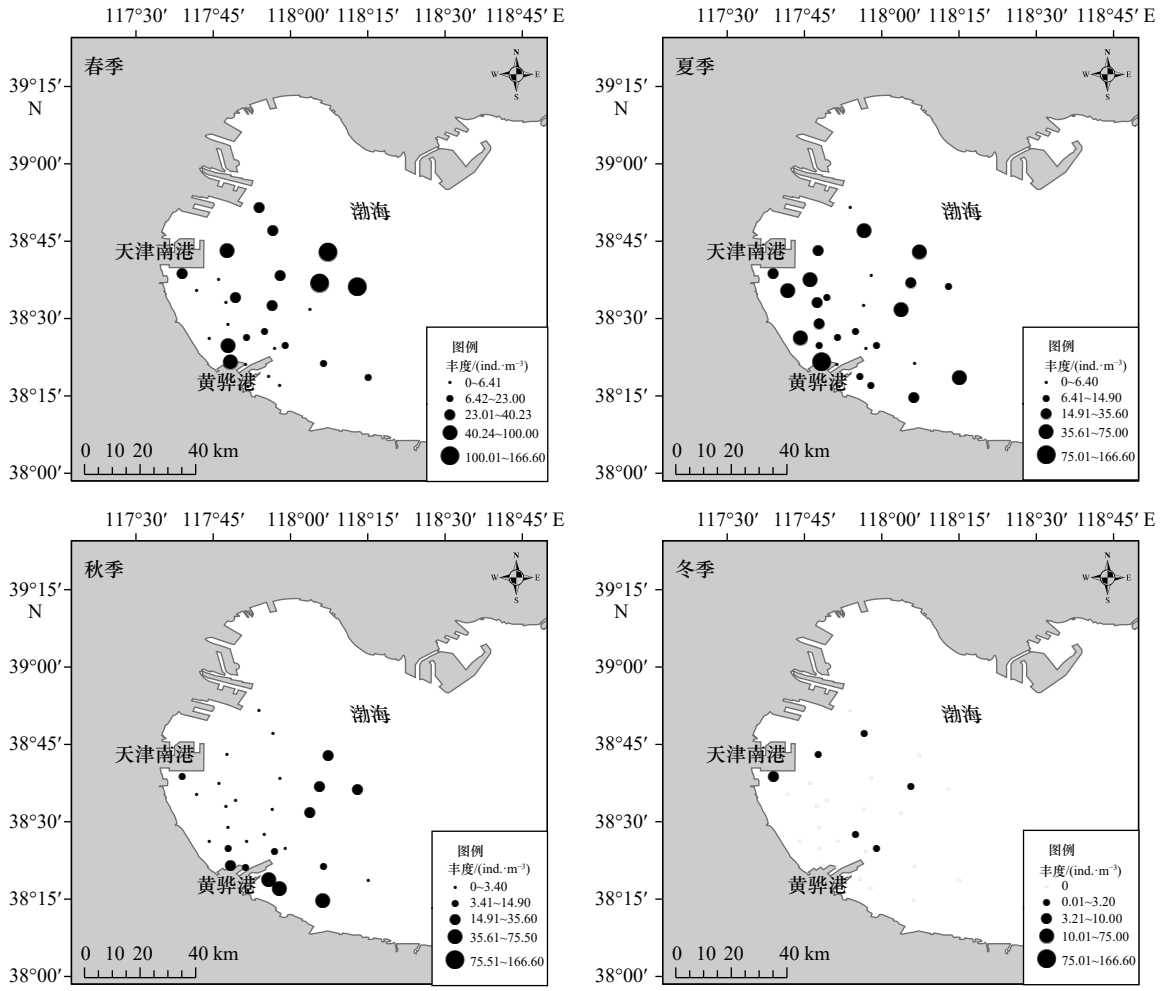

图 2　不同季节水母丰度分布

Fig. 2　Distribution of medusae abundance in different seasons

调查海域 29 个站位，水深变化范围为 2.0～16.0 m，由近岸向中部海域呈现递增趋势。水温季节间呈极显著差异（p<0.01），夏季水温最高，冬季水温最低；全年盐度平均为 31.4，冬季盐度最高，夏季最低；pH 全年平均为 8.18，秋季最高，夏季最低；溶解氧含量全年平均为 8.73 mg/L，化学需氧量全年平均为 1.20 mg/L；磷酸盐含量全年平均为 7.00 μg/L，无机氮含量全年平均为 196.17 μg/L。本年度调查的浮游动物丰度及各项海洋环境要素详细数据见表 4，各要素在季节之间均存在极显著性差异（p<0.01）。

表 4 不同季节浮游动物丰度及海水环境要素平均值

Table 4 Average values of zooplankton abundance and seawater environmental factors in different seasons

参数	夏季	秋季	冬季	春季	p
浮游动物丰度/(ind.·m^{-3})	180.20±105.56	96.85±671.91	163.92±568.7	2 078.68±171.69	**
桡足类丰度/(ind.·m^{-3})	53.80±422.22	5.05±19.61	85.64±275.83	1 678.11±162.11	**
水温/℃	27.69±5.37	12.56±2.1	2.69±4.41	17.16±7.17	**
盐度	30.95±1.24	31.24±2.02	31.96±1.54	31.46±1.83	**
pH	8.09±0.24	8.28±0.45	8.21±0.4	8.12±0.14	**
溶解氧含量/(mg·L^{-1})	7.04±1.87	8.93±3.42	11.44±2.72	7.52±2.76	**
化学需氧量/(mg·L^{-1})	1.193±1.47	1.20±1.50	1.41±1.82	1.01±0.77	**
磷酸盐含量/(μg·L^{-1})	10.94±66.02	4.185±9.04	8.99±14.34	3.89±5.14	**
无机氮含量/(μg·L^{-1})	315.43±856.2	143.921±621.5	248.09±722.6	77.25±199.5	**

注：**代表p<0.01。

由 CCA 可知，蒙特卡罗检验结果显著（p=0.004），小型水母呈现明显的季节特征，其季节变化特点与环境因子显著相关（图 3）。两个排序轴的特征值分别为 0.67 和 0.12，小型水母丰度与环境因子排序轴的相关系数为 0.899 和 0.427。水温（WT）与第一排序轴呈最大正相关（0.791 2），盐度（S）与第一排序轴呈最大负相关（−0.597 5），说明影响渤海西南部小型水母季节变化的主要影响因子是水温和盐度。

图 3 中，根据小型水母季节样本与环境因子分布特点，春季样本主要分布在第二主轴的右侧，在第一主轴上下均有分布，推断水温、无机氮含量、磷酸盐含量是春季群落主要影响因子；夏季样本主要分布在第二主轴的左侧下方，推断桡足类丰度是夏季主要影响因子；秋季调查样本与盐度、溶解氧含量、pH 分布在第二主轴左侧上方，溶解氧含量与第一主轴相关系数为−0.302 9，pH 与第一主轴的相关系数为−0.244 8，推断盐度与溶解氧含量、pH 等环境因子相比，对秋季小型水母群落结构影响更大，是其主要影响因子；冬季水母出现较少，各环境因子未形成明显的影响趋势。

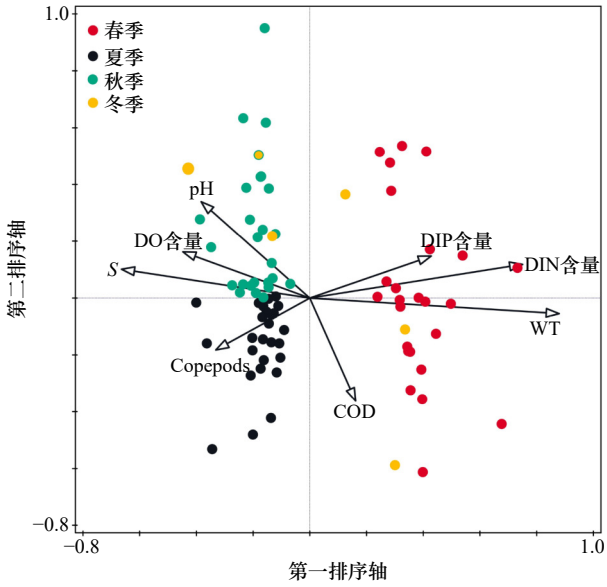

图 3 渤海西南部小型水母与环境因子的 CCA 排序

Fig. 3 CCA ordination of small medusae and environmental factors in southwest of Bohai Sea

WT：水温；DIN：无机氮；DIP：磷酸盐；DO：溶解氧；S：盐度；COD：化学需氧量；Copepods：桡足类

WT: Water temperature; DIN: dissolved inorganic nitrogen; DIP: dissolved inorganic phosphorus; DO: dissolved oxygen: S: salinity; COD: chemical oxygen demand; Copepods: Copepods

4 讨论

4.1 渤海西南部海域优势种类的季节动态变化

渤海西南部海域小型水母的群落组成为水螅水母和栉水母，生态类型为温带近岸低盐型。4 个季节间的种类组成更替率分别为：夏秋间为 54.54%、秋冬

间为 100%、冬春间为 80.00%、春夏间为 81.82%; 优势种季节更替率为夏秋 66.67%、秋冬 100%、冬春 100%、春夏 100%。不同季节的种类组成和优势种均呈现明显演替, 与季节温度、盐度的变化密切相关[11]。春季、冬季共同优势种类八斑芮氏水母是低温种, 在我国沿海主要分布于黄海以北, 渤海最多, 该种类在渤海 1−5 月份占有绝对优势[23−24], 历史调查数据显示, 1959 年及 1992−1993 年两次对渤海进行调查发现 2 月为八斑芮氏水母密度的最高峰, 密度占比达到 99.9% 以上, 在 4 月份最低, 5 月份又回升形成一个小峰, 密度占比 80.8% 以上, 6 月份后不再出现[23]。2014 年 5 月对渤海湾北部海域的调查中发现了较多八斑芮氏水母[25]。本次在 2021 年 2 月(冬季)和 2021 年 5 月(春季)的调查中发现, 八斑芮氏水母冬季密度占比为 82.27%, 出现率为 20.69%; 春季密度占比为 26.15%, 站位出现率为 17.24%, 与以往调查结果相近。

嵊山秀氏水母是春季优势种, 该种类在渤海、黄海、东海均有分布[26]。嵊山秀氏水母主要分布在温度为 17～18℃, 盐度为 30～31.5 的海域[27], 本次春季调查温度为 17.16℃, 盐度为 31.46, 本年度调查结果与历史调查相近, 春季适宜的温度、盐度促使嵊山秀氏水母成为优势种。

夏季、秋季的优势种类球型侧腕水母属于广温性浮游动物, 是适应环境能力较强的种类[28]。根据张金标[29] 的研究可知, 球型侧腕水母出现的水温(表层)范围为 10.3～30.6℃, 当水温高于 25.5℃, 球型侧腕水母的分布范围极其广泛。本年度夏季调查发现, 海水的平均水温为 27.69℃, 平均盐度为 30.95, 属于球型侧腕水母适宜的生活环境。另外张金标[29] 指出, 球型侧腕水母在温度降低时, 会受到盐度的影响, 当水温平均仅为 13.2℃ 时, 栉水母(球型侧腕水母)较集中于盐度高于 31 的水域。秋季航次环境现状与该调查环境现状相近, 秋季调查平均水温为 12.56℃, 平均盐度为 31.24, 因此本年度调查夏季及秋季水体环境适合球型侧腕水母生长。

夏季另外两种优势种分别为半球美螅水母和锡兰和平水母, 半球美螅水母夏季丰度占比 11.59%, 锡兰和平水母丰度占比 35.17%。这两种水母在我国海域均有分布[30]。以往调查也证实, 半球美螅水母在渤海为丰度较高的种类[31], 1959 年夏季调查中美螅水母属丰度达到渤海水母类丰度的 68.9%[23], 在初夏半球美螅水母成为黄海浮游动物中的优势种[32]。锡兰和平水母属于和平水母属, 是渤海夏秋季的常见种类。在 1959 年及 1992年调查中发现, 7−8 月份是该属在全年丰度最高的时期, 1992 年 8 月份在渤海湾内还出现了丰度大于25 ind./m^3 的高密集区[23], 丰度占比达到 80.9%。本年度夏季调查发现, 小型水母优势种的季节变化特征与以往调查结论基本相近[23, 27, 29]。

研究表明, 球型侧腕水母已被列为宁德海域核电冷源风险致灾海洋生物[15], 是辽宁红沿河核电冷源取水区的“高”风险生物[16]。本研究发现, 夏季与秋季调查获得球型侧腕水母, 夏季站位出现率为 86.21%, 秋季为 82.76%, 冬季和春季未见风险种类。张国辉等[33] 对北方核电厂取水口堵塞原因分析中发现, 球型侧腕水母在 6 月、9 月份对北方核电厂取水口的影响大, 与本调查的评估结果相近。

通过对国内外取水堵塞事件调查可知, 影响核电冷源系统的致灾海洋大型水母主要为海月水母(*Aurelia aurita*)[34]、沙海蜇(*Rhopilema esculentum*)、白色霞水母(*Cyanea nozakii*)[33, 35] 及狮鬃水母(*Cyanea capillata*)[8]。渤海西南部海域大型水母主要是沙海蜇、海月水母[36], 出现时间一般为 6−9 月[37]; 2013 年秦皇岛附近海月水母最大丰度为 1 500×10^4 ind./km^2, 沙海蜇密度 3×10^4 ind./km^2[37]。2018 年 6 月发现渤海湾东南部海域海月水母丰度达 221.21 ind./(net·h), 渤海湾外侧、渤海中部海域沙海蜇丰度为(3.68±3.34) ind./(net·h)[38]。

由此推测渤海西南部海域拟建核电在夏季、秋季存在一定风险, 应重点关注球型侧腕水母、沙海蜇及海月水母。

4.2　环境因子对小型水母季节变化的影响

小型水母营浮游生活, 对环境较为敏感, 其生长、繁殖以及种群结构与其所处水团的温度、盐度密切相关[4, 39]。CCA 发现水温、盐度与水母丰度变化呈最大相关, 说明本年度调查水温和盐度是影响小型水母丰度季节变化主要环境因子。

渤海西南部海域的小型水母丰度呈现明显季节性差异, 具体表现为夏高冬低, 该分布特点与其他中高纬度海区小型水母季节分布特点相吻合[40−41], 该分布特点与该水域季节性温度差异密切相关(表 4), 本年度调查夏季航次水温(27.69℃)达全年四季中最高值, 小型水母平均丰度亦达全年四季中最高 30.78 ind./m^3, 夏季为高温适应的小型水母提供了适宜的生长和繁殖条件[4, 25]。其次为春季, 春季温度(17.16℃)回升, 促进浮游动物的生长繁殖[14, 25]。秋季水温为 12.56℃, 小型水母平均丰度为 12.08 ind./m^3, 伴随着水温降低, 冬季(水温为 2.69℃)小型水母平均丰度为 0.57 ind./m^3。

其他调查区域也发现小型水母丰度主要受水温变化的影响，2003−2013 年胶州湾浮游动物调查中，胶州湾湾北与湾中调查区域小型水母类丰度与海水温度均呈正相关关系[10]；2002−2003年长江口及邻近海域全年小型水母丰度与表层温度呈显著正相关[4]。温度直接影响生物有机体的体温，体温的高低又决定了浮游动物新陈代谢、发育速度、繁殖等，从而影响浮游动物的生物量和分布[42]。

在 CCA 中发现盐度与水母丰度变化呈最大负相关。盐度与大部分物种的丰度呈负相关[43]，胶州湾浮游动物调查中[10]，也发现小型水母类丰度与盐度呈负相关关系。本年度调查发现，渤海西南部海域出现的小型水母主要是广温、低盐的近岸类群，由此推断，除了温度以外，盐度可能限制了小型水母丰度的增长。盐度变化可影响小型水母的浮力、繁殖和摄食率[44−45]，除了食物和温度，盐度也是影响调查海域小型水母丰度水平分布的主要因子[4]。

本年度研究发现，春季、夏季水母平均丰度较高，CCA 中夏季小型水母丰度与小型桡足类丰度显著正相关，说明桡足类种群在夏季的扩大为水母种群的壮大提供了丰富的饵料基础。其他调查中同样发现，小型桡足类如小拟哲水蚤等是小型水母的重要饵料[24, 46]。小型桡足类旺发，为小型水母提供了丰富的饵料[4]。

春季环境因子与水母季节动态相关性分析，发现除水温外，营养盐（无机氮、磷酸盐）含量也是影响春季小型水母丰度的环境因子。春季水温回升，适宜的温度与营养盐含量促进浮游植物及浮游动物增长[14]，在对温州近岸的调查中也发现春季浮游动物群落结构主要与营养盐含量有关[47]，因此推测，浮游动物增加，为水母提供了食物，间接影响水母丰度。

相较于其他海洋生物，水母类耐受低氧能力较强，可出现在溶氧含量低于 2.0 mg/L 的水域[48−49]，另外 pH 对水母繁育的影响不大[48]，水母在 pH 为 6～10 时均正常生长繁殖[49]。CCA 发现，秋季样本与盐度、溶解氧含量、pH 分布于同一象限，但是 pH 与第一主轴的相关系数为−0.244 8，溶解氧含量与第一主轴相关系数为−0.302 9，盐度与其呈最大负相关。因此判断盐度与溶解氧含量、pH 等环境因子相比，对秋季小型水母群落结构影响更大，是其主要影响因子。

小型水母季节群落变化主要受水温和盐度影响；夏季小型水母丰度与桡足类丰度呈正相关，桡足类为小型水母类群提供了食物，促进夏季水母的生长；春季适宜的温度与营养盐含量促进小型水母的增长，是影响春季小型水母主要环境因子；秋季群落主要受盐度的影响。

5 结论

通过分析渤海西南部海域小型水母类群落结构与环境因子的关系，得出以下结论：

（1）该调查海域小型水母种类组成数量、优势种组成和丰度分布均存在明显季节变化，全年调查共发现小型水母 13 种，春、夏、秋、冬首要优势种分别为嵊山秀氏水母、球型侧腕水母、球型侧腕水母、八斑芮氏水母，优势种季节演替明显；丰度均值分别为 30.74 ind./m^3、30.78 ind./m^3、12.08 ind./m^3、0.57 ind./m^3。

（2）小型水母季节动态变化主要受水温和盐度影响；夏季桡足类为小型水母类群提供了食物，促进夏季水母的生长；春季适宜的温度与营养盐含量促进小型水母的增长；秋季群落主要受盐度的影响。

（3）渤海西南部海域滨海核电冷源风险种球型侧腕水母（*Pleurobrachia globosa*）出现在夏季与秋季，应加强夏、秋季小型水母监测。

参考文献：

［1］ 中国科学院中国动物志编辑委员会. 中国动物志−无脊椎动物−第二十七卷−刺胞动物门, 水螅虫纲管水母亚纲 钵水母纲[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
Editorial Committee of Zoology of China, Chinese Academy of Sciences. Invertebrata, Vol.27 Phylum Cnidaria Class Hydrozoa Subclass Siphonophorae Class Scyphomedusae[M]. Beijing: Science Press, 2002.

［2］ 张芳, 孙松, 李超伦. 海洋水母类生态学研究进展[J]. 自然科学进展, 2009, 19(2): 121−130.
Zhang Fang, Sun Song, Li Chaolun. Advances in the study of marine jellyfish ecology[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(2): 121−130.

［3］ Richardson A J, Bakun A, Hays G C, et al. The jellyfish joyride: causes, consequences and management responses to a more gelatinous future[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2009, 24(6): 312−322.

［4］ 高倩, 陈佳杰, 徐兆礼, 等. 长江口及邻近海域浮游水螅水母、管水母和栉水母的丰度分布与季节变化[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7328−7337.
Gao Qian, Chen Jiajie, Xu Zhaoli, et al. Abundance distribution and seasonal variation of medusae, siphonophores, and ctenophores in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and the adjacent East China Sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7328−7337.

[5] 孙松. 水母暴发研究所面临的挑战[J]. 地球科学进展, 2012, 27(3): 257−261.
Sun Song. Challenges in the Jellyfish bloom research[J]. Advances in Earth Sciences, 2012, 27(3): 257−261.

[6] Purcell J E, Sturdevant M V. Prey selection and dietary overlap among zooplanktivorous jellyfish and juvenile fishes in Prince William Sound, Alaska[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 210: 67−83.

[7] Purcell J E, Uye S I, Lo W T. Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans: a review[J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, 350: 153−174.

[8] 韩瑞, 纪平, 赵懿珺, 等. 滨海核电厂取水堵塞事件调研及分析[J]. 给水排水, 2018, 44(S1): 75−80.
Han Rui, Ji Ping, Zhao Yijun, et al. The investigation and analysis on cooling water blockages of Costal Nuclear Power Plants[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(S1): 75−80.

[9] 李聪. 我国水母灾害研究现状与展望[J]. 渔业研究, 2018, 40(2): 156−162.
Li Cong. Review on the current situation and perspective of Chinese jellyfish disasters' research[J]. Journal of Fisheries Research, 2018, 40(2): 156−162.

[10] 王卫成. 胶州湾浮游动物功能群长期变化研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2017.
Wang Weicheng. Long-term changes of zooplankton functional groups in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2017.

[11] 张芳, 李超伦, 孙松, 等. 水母灾害的形成机理、监测预测及防控技术研究进展[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1187−1195.
Zhang Fang, Li Chaolun, Sun Song, et al. Progress on studying jellyfish bloom, and the monitoring and control[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(6): 1187−1195.

[12] 邓邦平, 刘衡, 王洪波, 等. 福建宁德晴川湾海域水母群落特征及其潜在生态风险分析[J]. 海洋学报, 2020, 42(4): 128−136.
Deng Bangping, Liu Heng, Wang Hongbo, et al. Analysis on the community characteristics and potential ecological risk of jellyfish in the Qingchuan Bay of Ningde, Fujian Province[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(4): 128−136.

[13] 李浩然, 刘光兴, 马静, 等. 夏、秋季黄河口及邻近水域浮游动物群落特征[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(5): 631−639.
Li Haoran, Liu Guangxing, Ma Jing, et al. Community characteristics of zooplankton in the Yellow River Estuary and its adjacent area in summer and autumn[J]. Marine Environmental Science, 2018, 37(5): 631−639.

[14] 黄旭光, 郭东晖, 肖武鹏, 等. 九龙江口春季微型浮游生物数量变动及其与小型水母消长的关系[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 579−583.
Huang Xuguang, Guo Donghui, Xiao Wupeng, et al. The relationship between quantitative changes of microplankton and population dynamics of small medusa in the Jiulong River Estuary in spring of 2011[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(3): 579−583.

[15] 唐娅菲. 滨海核电运行安全典型致灾生物研究——以宁德核电为例[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
Tang Yafei. Study on typical disaster-causing organisms of coastal nuclear power operation safety: taking Ningde nuclear power as an example[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018.

[16] 张朝文, 关春江, 徐鹏, 等. 辽东湾东部海域核电冷源取水区的风险生物分析[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(1): 41−45.
Zhang Chaowen, Guan Chunjiang, Xu Peng, et al. Analysis on risk organisms for the cold source water of nuclear power plantin the eastern waters of Liaodong Bay[J]. Marine Environmental Science, 2019, 38(1): 41−45.

[17] Lalli C M, Parsons T R. Biological Oceanography: An Introduction[M]. 2nd ed. Burlington, USA: Butterworth-Heinemann, 1997.

[18] 张晓举, 温若冰, 于海洋. 渤海湾南部水域春秋季强壮滨箭虫摄食压力变化的初步研究[J]. 海洋通报, 2013, 32(4): 434−439.
Zhang Xiaoju, Wen Ruobing, Yu Haiyang. Preliminary study on the variations of Aidanosagitta crassa feeding pressure in southern Bohai Bay during spring and autumn[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(4): 434−439.

[19] 高文胜, 刘宪斌, 张秋丰, 等. 渤海湾近岸海域浮游动物多样性[J]. 海洋科学, 2014, 38(4): 55−60.
Gao Wensheng, Liu Xianbin, Zhang Qiufeng, et al. Species diversity of zooplankton in the coastal area of Bohai Bay[J]. Marine Sciences, 2014, 38(4): 55−60.

[20] 吴春勇. 近海核电厂地下水放射性污染环境影响评价[D]. 衡阳: 南华大学, 2018.
Wu Chunyong. Groundwater environmental impact assessment of the radioactive contamination in offshore NPP[D]. Hengyang: University of South China, 2018.

[21] 陈亚瞿, 徐兆礼, 王云龙, 等. 长江口河口锋区浮游动物生态研究Ⅰ.生物量及优势种的平面分布[J]. 中国水产科学, 1995, 2(1): 49−58.
Chen Yaqu, Xu Zhaoli, Wang Yunlong, et al. An ecological study on zooplankton in plume front zone of Changjiang(Yangtze) River estuarine area I. biomass distribution of dominant species[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1995, 2(1): 49−58.

[22] 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): 1213−1119.
Du Feiyan, Wang Xuehui, Jia Xiaoping, 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): 1213−1119.

[23] 马喜平, 高尚武. 渤海水母类生态的初步研究——种类组成、数量分布与季节变化[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 533−540.
Ma Xiping, Gao Shangwu. The ecology of medusae in the Bohai Sea—Species composition, quantitative distribution and seasonal variation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(4): 533−540.

[24] 冯颂, 孙松, 李超伦, 等. 胶州湾半球美螅水母(*Clytia hemisphaerica*)数量周年变动及对浮游动物摄食压力估算[J]. 海洋与湖沼,

2012, 43(3): 464−470.
Feng Song, Sun Song, Li Chaolun, et al. Annual changes in *Clytia hemisphaerica* abundance and its grazing pressure on zooplankton population in the Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(3): 464−470.
[25] 刘西汉, 石雅君, 姜会超, 等. 曹妃甸邻近海域浮游动物群落时空变化及其影响因素[J]. 海洋科学, 2021, 45(4): 114−125.
Liu Xihan, Shi Yajun, Jiang Huichao, et al. Spatial and temporal variations of zooplankton community and their influential factors in Caofeidian coastal waters[J]. Marine Sciences, 2021, 45(4): 114−125.
[26] 蒋双, 陈介康. 黄渤海水螅水母、管水母和栉水母的地理分布[J]. 海洋通报, 1994, 13(3): 17−23.
Jiang Shuang, Chen Jiekang. Geographical distribution of Hydromedusae, Siphonophore and Ctenophora in Bohai Sea and Yellow Sea[J]. Marine Science Bulletin, 1994, 13(3): 17−23.
[27] 陈洪举, 刘光兴. 夏季长江口及邻近海域水母类生态特征研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(4): 17−24.
Chen Hongju, Liu Guangxing. Ecological characteristics of medusa in the Changjiang River Estuary and its adjacent waters in summer[J]. Marine Sciences, 2010, 34(4): 17−24.
[28] 徐兆礼, 张凤英, 罗民波. 东海栉水母(Ctenophora)生态特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1301−1305.
Xu Zhaoli, Zhang Fengying, Luo Minbo. Ecological characters of Ctenophora in East China Sea[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(11): 1301−1305.
[29] 张金标. 我国东南近岸海域球型侧腕水母的分布和丰度[J]. 海洋学报, 1983, 5(S1): 840−846.
Zhang Jinbiao. Distribution and abundance of Pleurobrachia globosa in the coastal waters of China[J]. Haiyang Xuebao, 1983, 5(S1): 840−846.
[30] 张金标. 中国海域水螅水母类区系的初步分析[J]. 海洋学报, 1979, 1(1): 127−137.
Zhang Jinbiao. A preliminary analysis on the Hydromedusae Fauna of the China Sea areas[J]. Haiyang Xuebao, 1979, 1(1): 127−137.
[31] 孙松, 张芳, 李超伦, 等. 黄海小型水母的分布特征[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 429−437.
Sun Song, Zhang Fang, Li Chaolun, et al. The distribution pattern of small medusae in the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(3): 429−437.
[32] 时永强. 黄海浮游动物功能群年际变化研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2015.
Shi Yongqiang. Interannual changes of zooplankton functional groups in the Yellow Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2015.
[33] 张国辉, 宋和航, 穆阳阳. 北方核电厂取水口堵塞原因分析及改进措施评价[J]. 核动力工程, 2019, 40(5): 111−117.
Zhang Guohui, Song Hehang, Mu Yangyang. Reason analysis and improvement measures evaluation for water intake blockage at Northern Nuclear Power Plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(5): 111−117.
[34] 於凡, 许波涛, 吴昕, 等. 基于核电冷源安全的海洋生物调查及筛选评价方法研究[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(1): 139−143.
Yu Fan, Xu Botao, Wu Xin, et al. Study on the method of marine organisms investigation, screening and evaluation based on nuclear power plant cold source safety[J]. Marine Environmental Science, 2021, 40(1): 139−143.
[35] Sun Song, Sun Xiaoxia, Jenkinson I R. Preface: giant jellyfish blooms in Chinese waters[J]. Hydrobiologia, 2015, 754(1): 1−11.
[36] 郑向荣, 李燕, 张海鹏, 等. 河北沿海大型水母生物量调查[J]. 河北渔业, 2014(1): 15−18, 42.
Zheng Xiangrong, Li Yan, Zhang Haipeng et al. Investigation of macro-jellyfish biomass in the Hebei coast[J]. Hebei Fisheries, 2014(1): 15−18, 42.
[37] 袁晓博, 刘志亮, 薛力园, 等. 秦皇岛海域水母灾害发生规律及研究进展[J]. 河北渔业, 2021(6): 12−17.
Yuan Xiaobo, Liu Zhiliang, Xue Liyuan, et al. Review on the occurrence regularity and current situation of jellyfish disaster in Qinhuangdao coastal area[J]. Hebei Fisheries, 2021(6): 12−17.
[38] 王朋鹏, 张芳, 孙松, 等. 2018年6月渤海大型水母分布特征[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(1): 85−94.
Wang Pengpeng, Zhang Fang, Sun Song, et al. Distribution of giant jellyfish in the Bohai Sea in June 2018[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(1): 85−94.
[39] Molinero J C, Casini M, Buecher E. The influence of the Atlantic and regional climate variability on the long-term changes in gelatinous carnivore populations in the northwestern Mediterranean[J]. Limnology and Oceanography, 2008, 53(4): 1456−1467.
[40] Gibbons M J, Richardson A J. Patterns of jellyfish abundance in the North Atlantic[M]//Pitt K A, Purcell J E. Jellyfish Blooms: Causes, Consequences, and Recent Advances. Dordrecht: Springer, 2008: 51−65.
[41] Fraser J H. The ecology of the ctenophore *Pleurobrachia pileus* in Scottish waters[J]. ICES Journal of Marine Science, 1970, 33(2): 149−168.
[42] 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.
Jiang Huichao, Chen Haigang, Song Xiukai, et al. Zooplankton community structure in Jincheng area of Laizhou Bay and its relationship with environmental factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7308−7319.
[43] 姜会超, 刘宁, 高继庆, 等. 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, 2017, 37(4): 1318−1327.
Jiang Huichao, Liu Ning, Gao Jiqing, et al. Zooplankton community structure in Sishili Bay and its relationship with environmental factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4): 1318−1327.
[44] Mills C E. Density is altered in hydromedusae and ctenophores in response to changes in salinity[J]. The Biological Bulletin, 1984,

166(1): 206−215.
[45] Ma X P, Purcell J E. Temperature, salinity, and prey effects on polyp versus medusa bud production by the invasive hydrozoan *Moerisia lyonsi*[J]. Marine Biology, 2005, 147(1): 225−234.
[46] Purcell J E. Dietary composition and diel feeding patterns of epipelagic siphonophores[J]. Marine Biology, 1981, 65(1): 83−90.
[47] 林义, 邹清, 王航俊, 等. 温州沿岸海域春、夏季浮游动物群落特征及与环境因子的关系[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(6): 51−59.
Lin Yi, Zou Qing, Wang Hangjun, et al. Characteristics of zooplankton community structure and its response to environment factors in the Wenzhou coastal waters during spring and summer[J]. Ocean Development and Management, 2021, 38(6): 51−59.
[48] 周强, 王云忠, 齐继光, 等. 环境因子对4种常见观赏性水母生长发育影响的研究进展[J]. 湖南农业科学, 2019(10): 120−124.
Zhou Qiang, Wang Yunzhong, Qi Jiguang, et al. Research progress in effect of environmental factors on growth and development of four common ornamental jellyfish[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2019(10): 120−124.
[49] 曲长凤, 宋金明, 李宁. 水母旺发的诱因及对海洋环境的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3701−3712.
Qu Changfeng, Song Jinming, Li Ning. Causes of jellyfish blooms and their influence on marine environment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(12): 3701−3712.

Characteristics of small medusae community correlated with environmental factors in the southwest of Bohai Sea

Liu Xinyu [1, 2, 3], Xu Zijun [1, 2, 3], Zhang Hongliang [1, 2, 3], Li Baolei [1, 2, 3], Wen Guoyi [1, 2, 3], Li Xiaoyu [1, 2, 3], Sha Jingjing [1, 2, 3], Du Xiaoyuan [1, 2, 3], Bao Mengmeng [1, 2, 3], Sun Zhuonan [1, 2, 3], Ding Kai [1, 2, 3], Qi Yanping [1, 2, 3], Wen Ruobing [1, 2, 3], Cao Jing [1, 2, 3]

(1. *North China Sea Environmental Monitoring Center*, *State Oceanic Administration*, *Qingdao* 266033, *China*; 2. *Key Laboratory of Ecological Prewarning and Protection of Bohai Sea*, *Ministry of Natural Resources*, *Qingdao* 266033, *China*; 3. *Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Environment and Disaster Prevention and Mitigation*, *Qingdao* 266061, *China*)

Abstract: According to the data of four voyages of zooplankton survey in the southwest of Bohai Sea from August 2020 to May 2021, the community structure and seasonal variation of small medusae were analyzed, and the effects of environmental factors on the abundance of small medusae were discussed. There were seasonal variations in species composition and abundance distribution of small medusae in the southwest of Bohai Sea, a total of 13 species of small medusae were found throughout the year, including 11 species of hydromedusae and 2 species of ctenophores. The number of medusae species in spring, summer, autumn and winter were 4, 9, 7 and 2 species respectively. The mean abundance values were 30.74 ind./m^3, 30.78 ind./m^3, 12.08 ind./m^3 and 0.57 ind./m^3 respectively. The dominant species were *Sugiura chengshanense*, *Rathkea octopunctata*, *Eirene ceylonensis*, *Clytia hemisphaerica*, *Pleurobrachia globosa*. The average seasonal replacement rate of dominant species was 91.67%, showing obvious seasonal succession. Water temperature and salinity were main environmental factor affecting the seasonal variation of total abundance of small medusae in the southwest of Bohai Sea. The increase of water temperature and nutrients in spring promote the growth and reproduction of small medusae. In summer, copepods provided rich bait for small medusae to promote its growth, the community was mainly affected by salinity in autumn. According to the risk species of small medusae in the southwest of Bohai Sea, it was speculated that the peak of risk species in summer and autumn was a risk to the planned nuclear power.

Key words: hydromedusae; ctenophores; seasonal variation; environmental factor; zooplankton copepods; Bohai Sea