

# 小黑山岛海域网采大型浮游动物群落特征季节变化及其与环境因素关系研究

张智鹏<sup>1,2</sup>, 唐学玺<sup>1</sup>, 王其翔<sup>2</sup>, 唐海田<sup>3</sup>, 刘洪军<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 海洋生命学院生态学实验室, 山东 青岛 266003; 2. 山东省海洋生物研究院, 山东 青岛 266104; 3. 国家海洋局烟台海洋环境监测中心站, 山东 烟台 264006)

**摘要:** 海岛生态系统是一类特殊的海洋生态系统, 本研究关注了小黑山岛海域网采大型浮游动物群落特征季节变化及其与环境因子之间的相互关系。小黑山岛位于山东省的庙岛群岛之中, 处于黄渤海分界线之上, 本研究基于小黑山岛海域 2013~2015 年 8 个航次的现场调查数据, 鉴定出浮游动物 36 种, 其中桡足类 13 种, 浮游动物丰度变化范围为 1.5~287.5 ind/m<sup>3</sup>, 平均 68.4 ind/m<sup>3</sup>, 生物量变化范围为 0.3~346.9 mg/m<sup>3</sup>, 平均 51.9 mg/m<sup>3</sup>, Shannon 多样性指数变化范围为 0.64~2.15, 平均 1.22, Pielou 均匀度指数变化范围为 0.41~1.00, 平均 0.76。主要优势种有中华哲水蚤、强壮滨箭虫等, 典范对应分析 (CCA) 结果显示环境因子中水温 (WT)、透明度 (Tra) 和盐度 (Sal) 等对浮游动物群落分布影响较大, 冬季强壮滨箭虫对桡足类群落特征可能有重要影响。

**关键词:** 大型浮游动物; 环境因子; 季节变化; 海岛生态系统; 小黑山岛

**中图分类号:** Q178.53      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-6336(2017)03-0385-07

## Seasonal variations of net macrozooplankton community characteristics and its relationship with environmental factors of the sea area around Xiaoheishan island in China

ZHANG Zhi-peng<sup>1,2</sup>, TANG Xue-xi<sup>1</sup>, WANG Qi-xiang<sup>2</sup>, TANG Hai-tian<sup>3</sup>, LIU Hong-jun<sup>2</sup>

(1. College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. Marine Biology Institute of Shandong Province, Qingdao 266104, China; 3. Yantai Marine Environment Monitoring Central Station of State Oceanic Administration, Yantai 264006, China)

**Abstract:** Seasonal variations of net macrozooplankton community characteristics and its relationship with environmental factors of the sea area around Xiaoheishan island were investigated in the present study. Xiaoheishan island lies in the middle of the Miaodao Archipelago. It lies on the dividing line of the Yellow Sea and the Bohai Sea in China. From 2013 to 2015, 8 periods were included in this survey. A total of 36 species of zooplankton were identified. Among these species 13 species belong to copepods. The abundance of zooplankton ranged from 1.5 to 287.5 ind/m<sup>3</sup>, with an average of 68.4 ind/m<sup>3</sup>; the biomass ranged from 0.3 to 346.9 mg/m<sup>3</sup>, with an average of 51.9 mg/m<sup>3</sup>. the Shannon diversity index ( $H'$ ) ranged from 0.64 to 2.15, with an average of 1.22; the Pielou evenness index ( $J'$ ) ranged from 0.41 to 1.00, with an average of 0.76. The main dominant species in the sea area around Xiaoheishan island were *Calanus sinicus* and *Aidanosagitta crassa* etc. The results of the canonical correspondence analysis (CCA) applied to

收稿日期: 2016-03-21, 修订日期: 2016-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41206102); 国家海洋公益专项 (201305009); 中国海洋大学基本科研业务费项目

作者简介: 张智鹏 (1989-), 男, 河北邯郸人, 博士生, 主要从事海洋生态恢复的研究, E-mail: zhipeng246@163.com

通讯作者: 刘洪军 (1964-), 男, 研究员, E-mail: hongjunl@126.com

the environmental factors indicated that water temperature (WT), transparency (Tra) and salinity (Sal) significantly influenced the zooplankton community. And we also find out that *Aidanosagitta crassa* may has an important effect on the copepod in winter.

**Key words:** macrozooplankton; environmental factor; seasonal variations; island ecosystem; Xiaoheishan island

小黑山岛位于山东省最大的岛群庙岛群岛之中,处于黄渤海分界线之上,面积 1.26 km<sup>2</sup>,海岸线 5.79 km<sup>[1]</sup>,其生态系统属于典型的海岛生态系统,虽然有一些筏式养殖和底播养殖,但由于远离陆地和人口密集的区域,相较于一般的近岸生态系统受到的污染较小<sup>[2]</sup>。海岛生态系统是一类特殊的海洋生态系统,海岛地理位置独特,组分复杂,与其它生态系统相比,海岛生态系统具有结构简单、系统完整性等特点。

浮游动物种类多,数量大,是海洋食物链中的关键一环<sup>[3-5]</sup>,在海洋生态系统物质循环和能量流动过程中起重要作用<sup>[5-6]</sup>。它主要捕食浮游植物并为鱼类等高层营养者提供食物来源,其数量变化可以直接影响渔业资源量<sup>[7]</sup>,摸清浮游动物的群落结构特征及其变化规律对渔情预报及生态学研究等方面均具有重要意义<sup>[8]</sup>。浮游动物由于活动能力有限且生命周期较短,易受到水文水质等环境因子的强烈影响<sup>[9]</sup>。但有关海岛生态系统浮游动物研究较少<sup>[10]</sup>,本文基于 2013~2015 年小黑山岛海域大型浮游动物及相关环境因子的现场调查,研究了大型浮游动物群落特征季节变化及其与环境因子之间相互关系,为海岛生态系统的研究提供重要的数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与站位设定

本调查围绕小黑山岛海域进行,在 2013~2015 年对浮游动物以及各环境因子进行了 8 个航次的调查,调查时间分别为 2013-06-04 (春)、2013-08-27 (夏)、2013-11-05 (秋)、2014-03-19 (冬)、2014-05-15 (春)、2014-08-19 (夏)、2014-11-10 (秋)、2015-03-20 (冬),站位设置见图 1,前 4 个航次调查站位为 S1~S10,后 4 个航次为 S1~S4。

### 1.2 样品采集与处理

浮游动物样品的采集根据《海洋调查规范》<sup>[11]</sup>的要求:使用浅水 I 型浮游生物网自底至表垂直拖拽采集,采集样品使用 5% 的甲醛海水

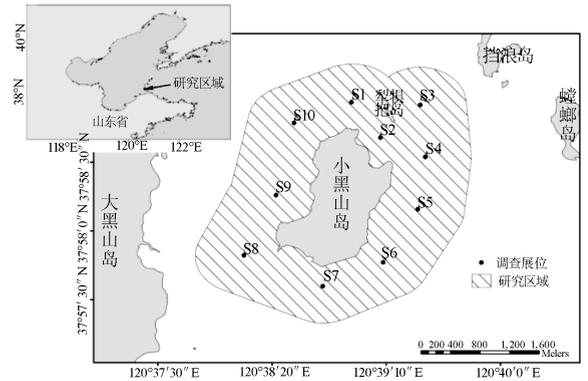


图 1 小黑山岛海域研究区域

Fig. 1 Location of survey stations in the sea area around Xiaoheishan island

溶液保存。鉴定与计数使用显微镜 Olympus CX31 进行。

Chl *a* 浓度的测定使用 Turner-Designs 700 荧光计,水温 (WT)、透明度 (Tra)、盐度 (Sal)、pH、溶解氧 (DO)、化学需氧量 (COD)、悬浮物 (SS)、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P、油类 (Oil)、Cu、Pb、Cd、As 和 Hg 共 17 项环境因子根据《海洋监测规范》<sup>[12]</sup>要求的方法进行测定。

## 1.3 数据处理与分析

### 1.3.1 优势度

$$\text{计算公式: } Y = \left( \frac{n_i}{N} \right) \times f_i$$

式中:  $n_i$  为第  $i$  种个体数;  $N$  为浮游动物总个体数;  $f_i$  为该种浮游动物在所有调查站位中的出现频率,当优势度  $Y \geq 0.02$  时,即认为该种浮游动物为调查海区浮游动物的优势种<sup>[13]</sup>。

### 1.3.2 浮游动物生物多样性指数

采用 Shannon 多样性指数 ( $H'$ )<sup>[14]</sup> 和 Pielou 均匀度指数 ( $J'$ )<sup>[15]</sup>。

Shannon 多样性指数计算公式:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  种样品个体在全个体中的比例;  $H'$  为物种多样性指数;  $S$  为物种数。

Pielou 均匀度指数计算公式:

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

式中:  $H'$  为物种多样性指数;  $S$  为物种数;  $J'$  为 Pielou 均匀度指数。

1.3.3 数据分析

使用软件 CANOCO 对小黑山岛海域各环境因子进行主成分分析 (principal component analysis, PCA); 对各航次出现频率大于 10% 的浮游动物与小黑山岛海域各环境因子和浮游植物因子进行典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA), 在分析前, 通过偏蒙特卡罗置换检验 (partial Monte Carlo permutation test) 来评估所有变量对解释浮游动物物种变量的贡献, 即实际解释能力, 比较所有变量因子的实际解释能力, 筛选出与浮游动物分布达到显著相关的变量因子<sup>[16]</sup>, 为了便于观察, 分析之前浮游动物物种数据经过  $\lg(x+1)$  转化<sup>[17]</sup>。文中柱状图、折线图使用软件

SigmaPlot 12.5 制作, 方差分析使用软件 SPSS 19。

2 结果与讨论

2.1 环境因子

本次对小黑山岛海域的调查的所有环境因子平均值如表 1 所示, 单因素方差分析表明, 各季节的 WT、Tra、Sal、pH、DO、COD、SS、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P、Oil、Cu、Pb、Cd、As 和 Hg 共 17 项环境因子均存在极显著差异 ( $p < 0.0001$ ), 根据 17 个环境因子的 PCA 分析结果 (图 2) 可以看出, 4 个季节的站位分别聚在一起: 春季和夏季透明度、NH<sub>4</sub>-N 和 NO<sub>3</sub>-N 浓度较高, 同时重金属 Hg 浓度也较高, 秋季 NO<sub>2</sub>-N 和 PO<sub>4</sub>-P 浓度较高, 冬季 DO 和悬浮物浓度较高, 同时重金属 As 和 Cd 浓度较高。

表 1 小黑山岛海域各季节环境因子参数

Tab. 1 Characterization of measured environmental factors in four seasons in the sea area around Xiaoheshan island

季节		WT/°C	Tra/m	Sal	pH	DO	COD	SS	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N
						/mg · L <sup>-1</sup>	/mg · L <sup>-1</sup>	/mg · L <sup>-1</sup>	/μg · L <sup>-1</sup>	/μg · L <sup>-1</sup>
春	Mean	13.91	2	30.16	8.18	9.22	1.56	8.46	13.27	5.19
	SD	0.49	0.2	0.54	0.04	0.79	0.11	4.22	8.82	2.24
夏	Mean	24.51	1.7	29.35	8.12	7.64	1.25	4.38	34.28	14.51
	SD	0.59	0.2	0.75	0.05	0.38	0.26	3.06	9.84	8.38
秋	Mean	15.1	1.6	30.47	8.19	8.11	1.07	10.93	16.24	35.35
	SD	0.86	0.3	0.05	0.07	0.38	0.28	3.3	8.44	2.63
冬	Mean	4.84	1.1	31.63	8.09	10.95	1.25	25.59	12.53	3.33
	SD	0.2	0.3	0.79	0.15	1.1	0.32	12.57	4.42	2.91
季节		NO <sub>3</sub> -N	PO <sub>4</sub> -P	Oil	Cu	Pb	Cd	As	Hg	
		/μg · L <sup>-1</sup>								
春	Mean	307.1	2.7	27.2	1.64	0.97	0.16	1.39	0.064	
	SD	78.5	0.8	13.6	0.561	0.22	0.04	0.27	0.01	
夏	Mean	173.7	2.8	22.5	1.461	1.17	0.16	1.3	0.057	
	SD	71.5	1.2	14.5	0.437	0.29	0.05	0.11	0.011	
秋	Mean	274	14	30.1	1.25	0.72	0.13	1.32	0.056	
	SD	119.4	2	16	0.459	0.24	0.03	0.11	0.012	
冬	Mean	136.5	2.9	12.4	1.417	1.06	0.19	1.38	0.053	
	SD	64.4	0.8	5.8	0.311	0.38	0.06	0.19	0.018	

2.2 浮游动物种类组成、丰度、生物量及多样性

本次调查, 共鉴定出浮游动物 36 种, 其中桡足类种类数最多, 有 13 种, 其丰度占浮游动物总丰度的 75.4%, 其中腹针胸刺水蚤 (*Centropages abdominalis*) 和中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 分别占浮游动物总丰度的 29.9% 和 28.9%, 毛颚动物强壮滨箭虫 (*Aidanosagitta crassa*) 占总丰度的 14.7%。中华哲水蚤各航次优势度均大于 0.02, 全

年均作为优势种出现, 春季浮游动物主要优势种有中华哲水蚤、腹针胸刺水蚤、强壮滨箭虫等, 夏季主要优势种有拟长腹剑水蚤 (*Oithona similis*)、小拟哲水蚤 (*Paracalanus parvus*) 等, 秋季主要优势种有中华哲水蚤、强壮滨箭虫等, 冬季主要优势种有强壮滨箭虫、中华哲水蚤、腹针胸刺水蚤等 (见表 2)。

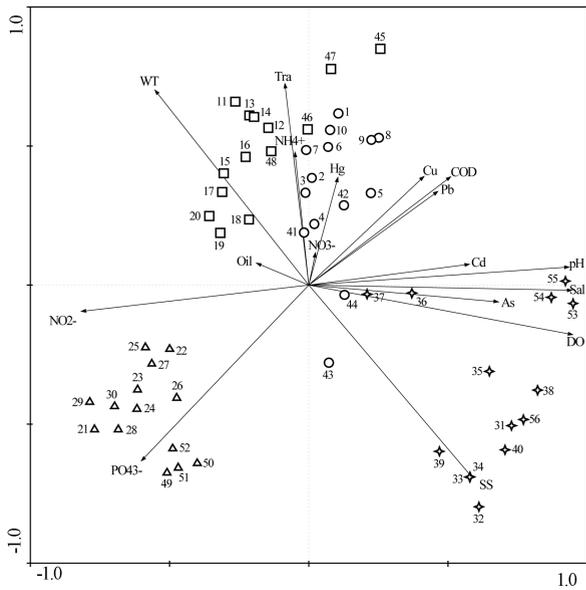


图2 小黑山岛海域各季节环境因子主成分分析

Fig.2 PCA of the environmental factors in the four seasons

○代表春季站位, □代表夏季站位, △代表秋季站位, ◇代表冬季站位

浮游动物丰度和生物量如图3所示,浮游动物丰度各站位变化范围为1.5 ~ 287.5 ind/m<sup>3</sup>,均值为68.4 ind/m<sup>3</sup>,春季丰度明显高于其他季节,平均为174.1 ind/m<sup>3</sup>,夏季为55.4 ind/m<sup>3</sup>,秋季为9.5 ind/m<sup>3</sup>,冬季为34.5 ind/m<sup>3</sup>。其中,中华哲水蚤在春季占总丰度的39.4%,夏季3.7%,秋季44.8%,冬季11.6%;强壮滨箭虫在春季占总丰度的10.2%,夏季11.9%,秋季34.3%,冬季48.5%。浮游动物生物量各站位变化范围为0.3 mg/m<sup>3</sup>到346.9 mg/m<sup>3</sup>,均值为51.9 mg/m<sup>3</sup>,春季生物量明显高于其它季节,平均为153.8 mg/m<sup>3</sup>,夏季为9.8 mg/m<sup>3</sup>,秋季为10.4 mg/m<sup>3</sup>,冬季为33.7 mg/m<sup>3</sup>。

浮游动物 Shannon 多样性指数(*H'*)变化范围为0.64 ~ 2.15,均值为1.22;Pielou 均匀度指数(*J'*)变化范围为0.41 ~ 1.00,均值为0.76。各航次 Shannon 多样性指数(*H'*)和 Pielou 均匀度指数(*J'*)变化见图4,从图中可以看出夏季浮游动物 Shannon 多样性指数(*H'*)高于其它季节;Pielou 均匀度指数(*J'*)各季节相差不大。

表2 小黑山岛海域各航次调查浮游动物优势种及其优势度

Tab.2 Dominant species of zooplankton and its dominance (*Y*) for each survey in the sea area around Xiaoheshan island

优势种		<i>Y</i>							
		2013-06-04	2013-08-27	2013-11-05	2014-03-19	2014-05-15	2014-08-19	2014-11-10	2015-03-20
中华哲水蚤	<i>Calanus sinicus</i>	0.39	0.03	0.48	0.1	0.38	0.31	0.24	0.48
真刺唇角水蚤	<i>Labidocera euchaeta</i>			0.05			0.11		
小拟哲水蚤	<i>Paracalanus parvus</i>		0.29	0.15	0.02		0.36		
洪氏纺锤水蚤	<i>Acartia hongii</i>	0.02		0.15	0.04	0.02			
圆唇角水蚤	<i>Labidocera rotunda</i>		0.03	0.06			0.11		
挪威小毛猛水蚤	<i>Microsetella norvegica</i>				0.07				
拟长腹剑水蚤	<i>Oithona similis</i>	0.03	0.37	0.11	0.02				
腹针胸刺水蚤	<i>Centropages abdominalis</i>	0.32	0.02		0.34	0.46			
孔雀唇角水蚤	<i>Labidocera pavo</i>							0.17	
近缘大眼水蚤	<i>Corycaeus affinis</i>			0.05					
强壮滨箭虫	<i>Aidanosagitta crassa</i>	0.14	0.09	0.27	0.46			0.48	0.52
长额刺糠虾	<i>Acanthomysis longirostris</i>							0.05	
细长脚973539	<i>Themistogaudichaudi</i>				0.03				
鸟喙尖头蚤	<i>Penilia avirostris</i>							0.1	
麦秆虫	<i>Caprella sp.</i>				0.02			0.08	
鱼卵	Fish egg	0.05							
水母幼体	Medusa larva							0.05	
双壳类幼体	<i>Cyphonautes larva</i>		0.02				0.07	0.05	
桡足类无节幼虫	<i>Copepoda nauplius</i>			0.07					
磷虾科幼体	<i>Euphausiidae larva</i>				0.03				
糠虾幼虫	<i>Mysidacea larva</i>		0.02	0.08					
海蛇尾长腕幼虫	<i>Ophiopluteus larva</i>		0.02						
腹足类幼体	<i>Gastropoda larva</i>	0.02	0.02				0.04	0.08	
多毛类幼体	<i>Polychaeta larva</i>		0.16				0.07		
短尾类蚤状幼虫	<i>Brachyura zoea larva</i>	0.02	0.02				0.07	0.32	
短尾类大眼幼虫	<i>Megalopa larva</i>						0.04		

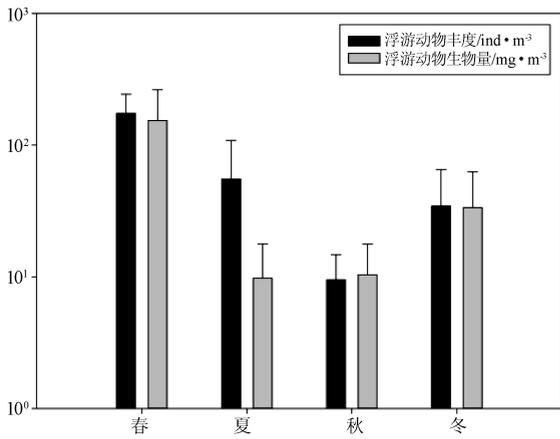


图3 小黑山岛海域浮游动物丰度与生物量的季节变化  
Fig.3 The seasonal variations of zooplankton abundance and biomass in the sea area around Xiaoheshan island

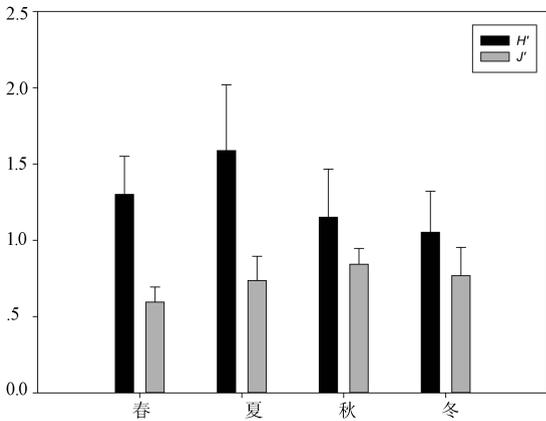


图4 小黑山岛海域浮游动物群落多样性的季节变化  
Fig.4 The seasonal variations of the Shannon diversity index ( $H'$ ) and Pielou evenness index ( $J'$ ) of zooplankton in the sea area around Xiaoheshan island

### 2.3 浮游动物生物量与 Chl a 之间的相互关系

海水中的 Chl a 浓度是浮游植物现存量的重要指标,其分布反映出了水体中浮游植物的丰度及其变化规律,而浮游植物更是浮游动物的重要食物来源,从图 5 中可以看出小黑山岛海域浮游动物生物量与 Chl a 浓度之间存在明显的相互关系,在 8 个航次的调查中,浮游动物生物量随 Chl a 变化,并且明显有一定的滞后性。2015-03-20 并未出现此规律可能是由于主要优势种强壮滨箭虫对其它桡足类摄食所导致。

### 2.4 典范对应分析(CCA)

对经过筛选的浮游动物与环境因子和浮游植物因子(Chl a、浮游植物多样性指数( $H'$ )、浮游

植物均匀度指数( $J'$ )进行典范对应分析,结果显示了环境因子和浮游植物因子影响下浮游动物种类的分布特征情况以及种类与环境因子和站位之间的相互关系(图 6)。

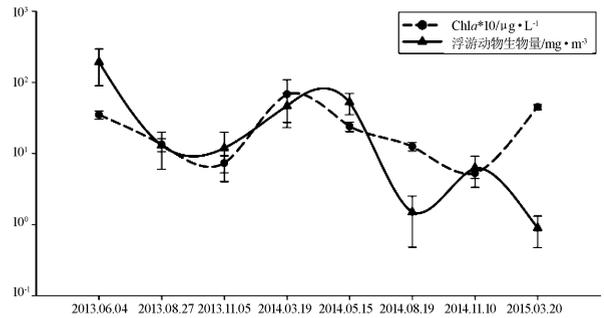


图5 浮游动物生物量与 Chl a 的相互关系

Fig.5 Relationship between the zooplankton biomass and chlorophyll a concentration

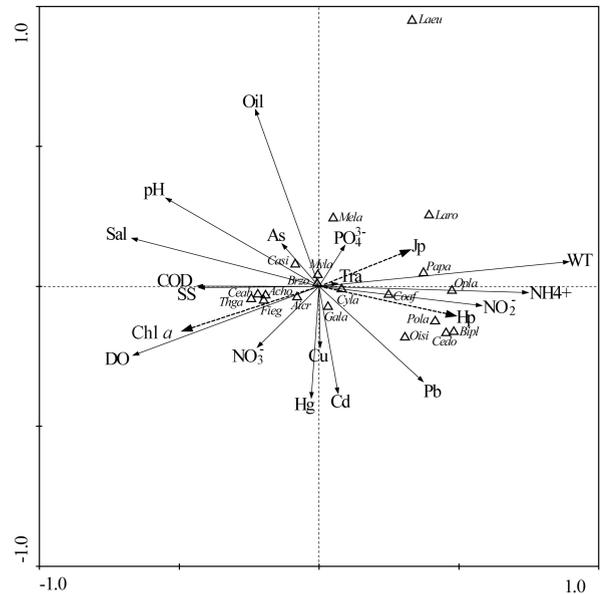


图6 小黑山岛海域浮游动物与环境因子的典范对应分析图

Fig.6 CCA of zooplankton species and the environmental factors in the four seasons

△代表浮游动物物种。Casi : 中华哲水蚤, Laeu : 真刺唇角水蚤, Papa : 小拟哲水蚤, Acho : 洪氏纺锤水蚤, Laro : 圆唇角水蚤, Oisi : 拟长腹剑水蚤, Cema : 腹针胸刺水蚤, Coaf : 近缘大眼水蚤, Cedo : 背针胸刺水蚤, Aicr : 强壮滨箭虫, Thga : 细长脚蛾, Fieg : 鱼卵, Mela : 水母幼体, Cyla : 双壳类幼体, Myla : 糠虾幼虫, Bipl : 羽腕幼虫, Opla : 长腕幼虫, Gala : 腹足类幼体, Pola : 多毛类幼体, Brzo : 短尾类溞状幼虫

前两个排序轴占物种数据总变量的 42.4%, 占物种-环境关系的解释的 61.3%, 4 个轴共占物种数据总变量的 55.5%, 占物种-环境关系的解释的 80.2%, 第一轴的浮游动物与环境因子相关性

为 98.0%,第二轴为 90.4%。根据蒙特卡罗置换检验(Monte Carlo permutation test)的结果表明:水温、透明度、油类、盐度和  $\text{NO}_2\text{-N}$  这 5 种环境因子与浮游动物群落的分布具有极显著的相关性( $p=0.002$ ), DO 和浮游植物多样性指数( $H'$ )具有

显著的相关性( $p=0.014;0.02$ )。CCA 分析的结果表明:这 7 种环境因子对排序图具有较高的解释量,解释量之和占总解释量的 80.53%,筛选出的主要的变量因子具体解释量以及与前两轴的相关性见于表 3。

表 3 小黑山岛海域典范对应分析筛选主要环境因子的解释量与相关性

Tab. 3 The importance and correlation of the main variables in CCA of the four seasons with forward selection

环境因子	单独解释量	$p$ 值	实际解释量	占总解释量/(%)	第一轴相关性	第二轴相关性
WT	0.402	0.002	0.402	39.53%	0.88	0.08
Tra	0.089	0.002	0.138	13.57%	0.07	0.01
Oil	0.105	0.002	0.091	8.95%	-0.22	0.57
Sal	0.252	0.002	0.073	7.18%	-0.66	0.16

## 2.5 浮游动物群落特征

本次调查中出现的浮游动物主要为近岸暖温种,与历史数据和邻近海域<sup>[8,10,18]</sup>调查结果一致。鉴定出的浮游动物种类较少,Shannon 多样性指数平均 1.22, Pielou 均匀度指数平均 0.76,这与韦章良等对该区域的调查结果一致<sup>[10]</sup>,但物种数量和 Shannon 多样性指数明显低于邻近渤海的莱州湾<sup>[8]</sup>和黄海的桑沟湾<sup>[18]</sup>,而 Pielou 均匀度高于这两个海域,这说明海岛生态系统的浮游动物种类组成受外海影响较小。夏秋季节浮游幼虫丰度较高,认为是该海域生物补充的关键期。小黑山岛海域浮游动物丰度和生物量明显低于外海以及临近的近岸海域<sup>[8,18-20]</sup>,这一结果与韦章良等提出的岛间海域浮游动物丰度较小的结论相一致<sup>[10]</sup>,这也是海岛生态系统明显区别于其它海洋生态系统的浮游动物群落特征。对于浮游动物与 Chl  $a$  的相互关系研究往往关注于简单的相关性分析<sup>[8,10,21]</sup>,而忽略了其季节间甚至年际间的动态变化,本次调查(图 5)发现浮游动物生物量随 Chl  $a$  变化,并且明显有一定的滞后性,这与我们之前对该海域 Chl  $a$  与营养盐之间的关系相一致<sup>[2]</sup>。

## 2.6 浮游动物与环境因子的相关性

### 2.6.1 水温与盐度

根据 CCA 分析,可以看出水温(39.53%)作为与浮游动物分布解释量和相关性最高的环境因子,与中华哲水蚤、强壮滨箭虫和腹针胸刺水蚤均呈明显的负相关性,并且与解释量和相关性也很高的盐度(7.18%)也呈明显的负相关性。对于中华哲水蚤, Wang 等<sup>[22]</sup>的研究表明其水温分布

范围为 1~27℃,而陈清潮<sup>[23]</sup>的研究进一步发现 10~18℃是其种群繁殖最适水温,且繁殖水平随水温升高而降低,徐兆礼等在长江口的研究发现在盐度低于 25 的水域中华哲水蚤被其它桡足类所替代<sup>[24]</sup>。对于强壮滨箭虫,霍元子等的调查发现其体长与海水温度呈显著负相关,并且在秋冬季节生长率最大<sup>[25]</sup>,刘青等的室内实验进一步发现了强壮滨箭虫可以耐受低温,但在高温时存活率较低(半致死水温上限为 27.5℃),且其对盐度适应范围较大(半致死盐度上限为 48.7,下限为 9.3)<sup>[26]</sup>。对于腹针胸刺水蚤,武文魁的野外调查发现其数量随水温升高有明显的降低,季节变化明显<sup>[27]</sup>,林霞的室内实验表明腹针胸刺水蚤的清滤率和摄食率在 10℃时最高,并随水温升高而降低,高于 15℃下降明显加快<sup>[28]</sup>,同时,其研究还表明腹针胸刺水蚤适应盐度范围较广<sup>[28]</sup>。综合本次调查与以上研究结果,我们进一步确认中华哲水蚤是一种喜好低温高盐的温带种,而强壮滨箭虫和腹针胸刺水蚤均为喜低温的广盐性种。与这三种浮游动物不同,拟长腹剑水蚤和小拟哲水蚤与水温呈明显的正相关,这一结果也与王真良等在黄渤海的多次调查结果一致<sup>[29]</sup>,并且在赵文等的室内实验也证实了水温达到 24℃以上时,这两种桡足类的生长和繁殖速度加快<sup>[30]</sup>,进一步说明这两种桡足类喜好高温的环境。

### 2.6.2 透明度

解释量第二的透明度(13.57%)与浮游动物的关系可以间接反映其趋光性,根据 CCA 分析的结果可以看出透明度与中华哲水蚤、强壮滨箭虫和腹针胸刺水蚤均呈明显的负相关,陶振铨的研

究表明,中华哲水蚤趋光性随光强增大迅速降低<sup>[31]</sup>。刘青等的室内实验证明了强壮滨箭虫夜间摄食率较高<sup>[32]</sup>。Tang<sup>[33]</sup>在渤海的现场测定表明腹针胸刺水蚤有明显的昼夜摄食节律。与以上三种浮游动物不同,透明度与拟长腹剑水蚤和小拟哲水蚤呈明显的正相关,赵文等对拟长腹剑水蚤的室内实验证明其在光照条件下摄食率和滤水率均大于黑暗条件<sup>[30]</sup>。

### 2.7 强壮滨箭虫对桡足类丰度的影响

强壮滨箭虫是北太平洋西部典型的暖温带适温适盐较广的肉食性浮游动物<sup>[19]</sup>,其食物来源以桡足类为主。杨纪明通过对渤海强壮滨箭虫消化道内含物的研究发现,强壮滨箭虫主要捕食真刺唇角水蚤(春季 62.7%,秋季 79.4%,冬季 93.2%)和小拟哲水蚤(夏季 41.7%),而中华哲水蚤(9.9%)等为次要捕食对象<sup>[34]</sup>,王倩等研究表明冬季毛颚类摄食可对浮游动物产生重要影响<sup>[35]</sup>,在我们的调查中冬季强壮滨箭虫丰度占总丰度的 48.5%,而中华哲水蚤仅占 11.6%,结合往年黄渤海的调查数据分析<sup>[8,10,19-20,29]</sup>,我们认为在冬季,桡足类特别是真刺唇角水蚤、中华哲水蚤等丰度的降低是受到了强壮滨箭虫摄食压力的影响。

## 3 结论

(1)2013~2015 年对小黑山岛海域浮游动物的调查中共鉴定出浮游动物 36 种,其中桡足类 13 种,群落组成的季节变化较为明显,丰度平均 68.4 ind/m<sup>3</sup>,生物量平均 51.9 mg/m<sup>3</sup>,Shannon 多样性指数平均 1.22,Pielou 均匀度指数平均 0.76。主要优势种有中华哲水蚤、强壮滨箭虫等。

(2)相较于其它海洋生态系统,海岛生态系统受外海影响较小,其浮游动物种类数量、Shannon 多样性指数、丰度和生物量较低,而 Pielou 均匀度指数较高。

(3)典范对应分析(CCA)结果显示环境因子中水温、透明度和盐度等对浮游动物群落分布影响较大。

致谢:感谢国家海洋局第一海洋研究所王晓博士在物种信息与文章写作方面提出的宝贵意见。

### 参考文献:

[1] 《中国海岛志》编纂委员会. 中国海岛志(山东卷第一册)[M]. 北京:海洋出版社,2013:183.

- [2] ZHANG Z P,TANG X X,TANG H T,et al. Seasonal variations in the phytoplankton community and the relationship between environmental factors of the sea around Xiaoheishan Island in China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,2016,doi: 10.1007/s00343-016-5241-8.
- [3] 李少菁,许振祖,黄加祺,等. 海洋浮游动物学研究[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2001,40(2):574-585.
- [4] 沈国英,施并章. 海洋生态学[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [5] 王晓,王宗灵,蒲新明,等. 夏季南海黄海浮游动物分布及其影响因素分析[J]. 海洋学报,2013,35(5):147-155.
- [6] ZHOU S C,JIN B S,GUO L,et al. Spatial distribution of zooplankton in the intertidal marsh creeks of the Yangtze River Estuary,China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2009,85(3):399-406.
- [7] LOBRY J,DAVID V,PASQUAUD S,et al. Diversity and stability of an estuarine trophic network[J]. Marine Ecology Progress Series,2008,358:13-25.
- [8] 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.
- [9] BEAUGRAND G,IBÁÑEZ F,REID P C. Spatial, seasonal and long-term fluctuations of plankton in relation to hydroclimatic features in the English Channel,Celtic Sea and Bay of Biscay[J]. Marine Ecology Progress Series,2000,200:93-102.
- [10] 韦章良,柴召阳,石洪华,等. 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,2015,24(4):550-559.
- [11] GB-T 12763-2007,海洋调查规范[S].
- [12] GB 17378-2007,海洋监测规范[S].
- [13] 孙儒泳. 动物生态学原理[M]. 3版. 北京:北京师范大学出版社,2001.
- [14] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal,1948,27(3):379-423.
- [15] PIELOU E. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. Journal of Theoretical Biology,1966,13:131-144.
- [16] LEPSĚ J,ŠMILAUER P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press,2003:149-162.
- [17] LACOUL P,FREEDMAN B. Relationships between aquatic plants and environmental factors along a steep Himalayan altitudinal gradient[J]. Aquatic Botany,2006,84(1):3-16.
- [18] 刘萍,宋洪军,张学雷,等. 桑沟湾浮游动物群落时空分布及养殖活动对其影响[J]. 海洋科学进展,2015,33(4):501-511.
- [19] 尹洁慧. 獐子岛海域浮游动物群落时空变化特征及其与环境因子之间的关系[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2013.
- [20] 刘爱英,宋秀凯,刘丽娟,等. 夏季莱州湾浮游动物群落特征[J]. 海洋科学,2012,36(10):61-67.

- 南京:江苏省海洋与渔业局,2016.
- [7] 刘运令,汪亚平,吴祥柏,等. 南黄海苏北近岸西洋水道水沙输运机制分析[J]. 海洋科学,2011,35(11):120-127.
- [8] 徐凡,陶建峰,张长宽,等. 南黄海辐射沙脊群西洋水道质点示踪数值模拟[J]. 水道港口,2013,34(2):93-98.
- [9] 倪雯斐,汪亚平,邹欣庆,等. 南黄海辐射沙脊群苦水洋海域的沉积动力特征及稳定性研究[J]. 海洋通报,2013,32(6):668-677.
- [10] 董佳,马洪亮,熊伟. 黄沙洋水道末梢浅水槽建港工程潮流数值模拟与泥沙淤积计算[J]. 水运工程,2013(8):73-79.
- [11] DHI. Mike 21 & Mike 3 flow model, hydrodynamic and transport module, scientific documentation [R]. Hørsholm: Danish Hydraulic Institute (DHI), 2007.
- [12] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment [J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3):99-164.
- [13] LUMBORG U. Modelling the deposition, erosion, and flux of cohesive sediment through Øresund [J]. Journal of Marine Systems, 2005, 56(1/2):179-193.
- [14] FOURNIOTIS N T, HORSCH G M. Three-dimensional numerical simulation of wind-induced barotropic circulation in the Gulf of Patras [J]. Ocean Engineering, 2010, 37(4):355-364.
- [15] GIANNI A, ZACHARIAS I. Modeling the hydrodynamic interactions of deep anoxic lagoons with their source basins [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 110:157-167.
- [16] TAO J F, ZHANG C K, YAO J, et al. Numerical simulation of tides and tidal currents in Jiangsu offshore areas, China [C]// Proceedings of 19th International Offshore and Polar Engineering Conference. Osaka: ISOPE, 2009:1243-1247.
- [17] 李曰嵩,潘灵芝,肖文军,等. 风对黄海绿潮藻漂移的影响 [J]. 海洋环境科学, 2014, 33(5):772-776.
- [18] 周智鹏,陶建峰,张长宽,等. 南黄海辐射沙脊群西洋水道污水输移扩散研究[J]. 海洋通报, 2015, 34(1):65-71.
- [19] XU F, TAO J F, ZHOU Z, et al. Mechanisms underlying the regional morphological differences between the northern and southern radial sand ridges along the Jiangsu Coast, China [J]. Marine Geology, 2016, 371:1-17.
- [20] XING F, WANG Y P, WANG H V. Tidal hydrodynamics and fine-grained sediment transport on the radial sand ridge system in the southern Yellow Sea [J]. Marine Geology, 2012, 291/292/293/294:192-210.
- (上接第391页)
- [21] 李芸,石彭灵,沈宏,等. 梁塘河浮游动物的空间分布及其与环境因子的关系 [J]. 环境科学研究, 2015, 28(10):1531-1537.
- [22] WANG R, ZUO T, WANG K. The yellow sea cold bottom water-an overwintering site for *Calanus sinicus* (Copepoda, Crustacea) [J]. Journal of Plankton Research, 2003, 25(2):169-183.
- [23] 陈清潮. 中华哲水蚤的繁殖、性比率和个体大小的研究 [J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(3):272-288.
- [24] 徐兆礼,李云. 长江口中华哲水蚤对不同温度和盐度的适应 [C]//2008年中国水产学会学术年会论文摘要集. 昆明:中国水产学会, 2008.
- [25] 霍元子,孙松,杨波. 南黄海强壮箭虫 (*Sagitta crassa*) 的生活史特征 [J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(2):180-185.
- [26] 刘青,曲晗,张硕. 强壮箭虫对温度、盐度的耐受性研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2007(1):111-116.
- [27] 武文魁. 墨氏胸刺水蚤在黄海的生态特点 [J]. 动物学杂志, 1991, 26(3):1-5.
- [28] 林霞,朱艺峰,赵崖. 几种环境因子对墨氏胸刺水蚤摄食的影响 [J]. 海洋湖沼通报, 2002(4):38-45.
- [29] 王真良,林凤翔,冯志权,等. 河北沿岸春季和夏季的浮游动物 [J]. 海洋环境科学, 2006, 25(3):41-45.
- [30] 赵文,宋青春,高放. 大连近海两种桡足类摄食生态的初步研究 [J]. 大连水产学院学报, 2002, 17(1):8-14.
- [31] 陶振铖. 可见光和紫外线对中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 几种行为的影响研究 [D]. 青岛:中国科学院海洋研究所, 2005.
- [32] 刘青,曲晗,张硕,等. 强壮箭虫摄食生态的实验研究 [J]. 水产学报, 2006, 30(6):767-772.
- [33] TANG Q. Ocean ecosystem dynamics [J]. Globec International Newsletter, 1999, 1(5):7-8.
- [34] 杨纪明,李军. 渤海强壮箭虫摄食的初步研究 [J]. 海洋科学, 1995(6):38-42.
- [35] 王倩,孙松,霍元子,等. 胶州湾毛颚类生态学研究 [J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(4):639-644.