

DOI: 10.5846/stxb201403260565

姜会超, 陈海刚, 宋秀凯, 刘宁, 何健龙, 程玲, 王月霞. 莱州湾金城海域浮游动物群落结构及与环境因子的关系. 生态学报, 2015, 35(22): - .
Jiang H C, Chen H G, Song X K, Liu N, He J L, Cheng L, Wang Y X. Zooplankton community structure in Jincheng area of Laizhou Bay and its relationship with environmental factors. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): - .

莱州湾金城海域浮游动物群落结构及与环境因子的关系

姜会超^{1,*}, 陈海刚², 宋秀凯¹, 刘宁³, 何健龙¹, 程玲¹, 王月霞¹

1 山东省海洋资源与环境研究院 山东省海洋生态修复重点实验室, 烟台 264006

2 广东省渔业生态环境重点实验室, 广州 510300

3 烟台市芝罘区渔业技术推广站, 烟台 264001

摘要: 于 2009 年和 2010 年 3—12 月在莱州湾金城海域对浮游动物群落结构及其环境因子进行了连续 20 个月份的综合调查, 共记录到浮游动物 75 种, 分属 14 个不同大类。浮游动物以桡足类和浮游幼虫居多, 分别鉴定出 22 种、20 类, 占种类总数的 29.3%、26.7%, 其次为水螅水母类, 鉴定出 11 种, 端足类、被囊动物、腹足类和栉水母类分别鉴定出 6 种、4 种、4 种、2 种, 其它枝角类、毛颚动物、等足类、糠虾类、磷虾类以及钵水母类各鉴定出 1 种。主要优势种为强壮箭虫 (优势度 $Y=0.24$)、中华哲水蚤 ($Y=0.13$)、墨氏胸刺水蚤 ($Y=0.07$)、以及洪氏纺锤水蚤 ($Y=0.02$)。2009 年与 2010 年浮游动物群落结构的变化趋势比较稳定, 同一季节群落结构相似度达到 40% 以上。浮游动物丰度分别在 2009 年及 2010 年的 5 月份达到最高值 951.65 ind/m^3 、 1348.14 ind/m^3 。种类数分别在 2009 年 9 月和 2010 年 6 月达到最高值 48 种、40 种。多样性指数分别在 2009 年 10 月及 2010 年 5 月达到最高值 2.6、2.7, 呈现明显的季节变化特征。典范对应分析 (Canonical correspondence analysis, CCA) 显示, 水温 and 盐度是影响浮游动物群落结构最主要的影响因子, 水温与浮游动物种类数的相关系数达到 0.87 ($P<0.01$)。盐度与浮游动物数量的相关系数为 0.484 ($P<0.05$)。透明度、化学耗氧量、pH、叶绿素及总氮总磷等环境参数对浮游动物群落结构的影响较弱。

关键词: 莱州湾; 浮游动物; 环境因子; 典范对应分析

Zooplankton community structure in Jincheng area of Laizhou Bay and its relationship with environmental factors

JIANG Huichao^{1,*}, CHEN Haigang², SONG Xiukai¹, LIU Ning³, HE Jianlong¹, CHENG Ling¹, WANG Yuexia¹

1 Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Shandong Key Laboratory of Marine Ecological Restoration Yantai 264006, China

2 Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangdong Province, Guangzhou 510300, China

3 Zhifu Fishery Technical Extension Station, Yantai 264001, China

Abstract: Coastal waters are ecosystems of great human and ecological interest where complex processes occur. The interaction of physical (e.g., coastal currents, upwelling, tides, and advection), chemical (variable chemical properties including nutrient inputs), and ecological (e.g., biological production and its dynamics, and prey/predator interactions) processes induce high spatial and temporal variability in the water. This variability determines the abundance and structure of different biological communities present in coastal waters, in particular zooplankton, which are at the lower levels of the oceanic food chain. To understand coastal zooplankton community structure and explore its relationship with various environmental factors, a zooplankton survey was carried out in Jincheng, Laizhou Bay. Fifteen sampling sites were chosen to

基金项目: 广东省渔业生态环境重点实验室开放基金 (LFE-2014-4); 国家海洋公益性行业科研专项 (200805031, 200905019); 水生动物营养与饲料“泰山学者”岗位经费资助 (2007-2012)

收稿日期: 2014-03-26; 网络出版日期: 2015-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianghuichao2008@163.com

study water temperature, salinity, transparency, COD, pH, Chl *a*, total nitrogen, and total phosphorus from March 2009 to December 2010. Sampling and testing methods followed those of the Specifications for Oceanographic Surveys and Specifications for Marine Monitoring. The relationships between zooplankton communities and various environmental factors were analyzed by canonical correspondence analysis (CCA). A total of 75 zooplankton species, belonging to 14 taxonomic groups, were recorded in Jincheng over the study period. Copepods and zooplankton larvae were the main taxonomic groups, accounting for 29.3% and 26.7% of total species, respectively, followed by Hydromedusa accounting for 14.7%. Six Amphipod, four Tunicate, four Gastropod, and two Ctenophora species were identified, accounting for 8%, 5.3%, 5.3%, and 2.7% of all species, respectively; whereas only one species each of Cladocera, Chaetognatha, Isopoda, Mysidacea, Euphausiacea, and Scyphomedusae were identified. The dominant species, which exhibited significant seasonal variability ($P < 0.05$), were *Sagitta crassa* ($Y = 0.24$), *Calanus sinicus* ($Y = 0.13$), *Centropages memmrichi* ($Y = 0.07$), and *Acartia hongi* ($Y = 0.02$). Similar seasonal variations in the zooplankton community were observed in 2009 and 2010. Four zooplankton community structure types were observed from the cluster dendrogram; the zooplankton community similarity in different months of the same season reached $>40\%$. The zooplankton community structure in this area had high stability and reproducibility. The highest zooplankton abundances were observed in October 2009 and May 2010, with 951.65 and 1348.14 ind./m³, respectively. The zooplankton species number reached its maximum in September 2009 and June 2010, with 48 and 40 species, respectively, and exhibited a significant seasonal difference ($P < 0.05$). The zooplankton biomass reached its maximum in October 2009 and December 2010, and the mean 2009 biomass (648.48 mg/m³) was higher than that in 2010 (489.32 mg/m³). Margalef indices revealed an obvious unimodal annual variation trend with higher Margalef indices in summer and lower in other seasons. Shannon-Wiener indices (H') were higher in both spring and autumn, showing an obvious bimodal annual variation trend. The highest H' values were recorded in October 2009 and May 2010 at 2.6 and 2.7, respectively. Pielou indices (E) exhibited the same bimodal annual variation trend as the Shannon-Wiener indices, and the highest E values were recorded in October 2009 and May 2010 at 0.69 and 0.72, respectively. Canonical correspondence analysis (CCA) indicated that water temperature and salinity accounted for most of the temporal variation in the zooplankton community. The zooplankton community distribution was significantly correlated with water temperature, with a Pearson correlation of 0.87 ($P < 0.01$); weaker correlations with pH, Chl *a*, COD, and transparency were recorded. Because different species require different environments, the CCA biplot revealed the ecological suitability of zooplankton in this area.

Key Words: Laizhou Bay; Zooplankton community; Environmental factors; CCA

莱州湾地处渤海南岸,内有黄河、海河、界河等多条河流注入,这些河流带来大量营养物质的同时,也对莱州湾造成了一定程度的污染,加上对海洋资源的过度捕捞,莱州湾的海洋生态环境不断恶化。近年来针对莱州湾海域的生态调查多集中在渔业资源上,对浮游动物的调查较少见有报道^[1-4]。浮游动物是具有有限的活动能力的异养生物,一方面通过捕食作用控制浮游植物数量,另一方面作为鱼类等高层营养者的饵料,其数量变化可以直接影响鱼类等的资源量,在海洋生态系统结构和功能中起重要的调控作用^[5-6]。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等方面均具有重要意义。

近岸海域中浮游动物种类繁多、环境因子复杂多变,水域中的浮游动物群落同时受周围多种环境因素(如物理、化学和生物等)的影响,其群落结构与动态是多个环境因子在时间和空间尺度上综合作用的结果^[7]。在以往的研究中人们多采用简单的线性模型来处理浮游动物与单个理化因子(物理、化学等)之间的关系。但由于近岸海域环境条件复杂多变,这种线性相关分析从单一的环境因子去讨论,难以给出全面的结果^[8]。近年来,典范对应分析(CCA)因具有能同时结合多个环境因子分析生物与环境因子间的复杂关系、信息包含量大、结果明确、且直观等优点而得到越来越多国外学者的青睐,并在生态学领域中得到广泛运用^[5,9,10]。本文选取莱州湾重点贝类养殖区—金城海域,在2009—2010年进行了长达两年共计20个航次的浮

游动物调查,并结合理化因子数据,采用典范对应分析(CCA)技术对莱州湾金城海域近岸浮游动物种类组成、群落结构、优势种更替和数量分布及其与环境理化因子的关系进行研究,旨在较全面、系统地阐明近岸浮游动物的群落结构特征,探讨浮游动物群落演替规律及其与环境理化因子的关系,并为深入研究渤海浮游动物的长期变化规律、海洋生态系统动态变化机制及生态环境保护措施的制订等提供基础资料和理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样区域、时间与方法

调查海区为莱州湾金城海域,采样站位布设如图 1,共设 15 个采样站位(J1-J15),水深范围为 3.5 m—13.0 m,由南向北逐渐加深。于 2009 年 3—12 月和 2010 年 3—12 月对 15 个采样站位进行两年共 20 个月(航次)的水质及浮游动物调查,使用船只仅为当地渔民渔船。

浮游动物采集方法及标本处理等均按《海洋调查规范》^[11]进行,用浅 I 浮游生物网自底至表层作垂直拖网采集,样品经 5% 甲醛溶液固定后实验室进行分类、鉴定、计数和统计(不包括夜光虫)。各监测站位同步调查水温(WT)、盐度(Salinity)、透明度(Transparency)、化学耗氧量(COD)、pH 值、叶绿素(Chla)及总氮(TN)总磷(TP)等环境参数,所有操作均按照《海洋监测规范》^[12]进行。

1.2 数据分析

浮游动物丰度以每立方米出现的个体数表示(ind/m³)。

优势种的优势度:

$$Y = (n_i / N') \times f_i$$

式中, n_i 为第 i 种的丰度, f_i 为该种在各站位中出现的频率, N' 为总丰度。根据种类优势度公式计算各种生物的优势度,将 $Y > 0.02$ 的生物定为优势种。

物种多样性指数的计算采用 Shannon-Winner 指数:

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

物种丰度指数采用 Margalef 指数(d_{Ma})计算公式:

$$d_{Ma} = (S-1) / \log_2 N$$

均匀度指数采用 Pielou 指数计算公式:

$$E = H' / \ln S$$

式中 N 为采集样品中所有物种的总个体数, S 为样品中的种类总数, P_i 为第 i 种的个体数与样品中的总个体数的比值。

多元统计方法包括聚类分析和典范对应分析(CCA)等,均是基于种类数据和环境数据集合的排序方法,已逐步应用于浮游生物群落结构分析中。在数值分析前,对数据进行标准化处理。选择出现频率大于 15% 的种类。环境参数数据库包括 8 个环境指标,分别为水温、盐度、pH 值、透明度、COD、TN、TP、Chla。对种类数据和环境参数采用对数 $\log(x+1)$ 转换。典范对应分析(CCA,canonical correspondence analysis)是探讨浮游动物群落与环境因子之间对应关系的一种方法,通过直接梯度分析,可将物种、样点及环境指标之间的关系反映在坐标轴上,直观地反映生物与环境之间的相关程度。

全部数据的统计分析用 SPSS 17.0 软件完成,群落结构聚类分析使用 PRIMER 6.0 软件,典范对应分析采用 CANOCO4.5 软件完成。

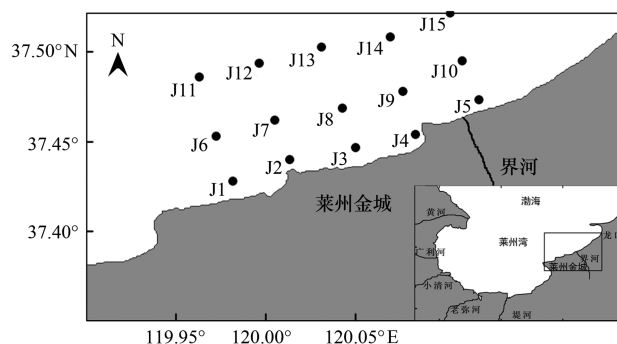


图 1 莱州湾金城海域采样站位图

Fig. 1 Sampling stations in Jinchen area of Laizhou Bay

表 1 2009—2010 年莱州湾金城水域各月份理化环境参数 (均值±标准误)
Table 1 Environmental factors of 20 samples in Jincheng area of Laizhou Bay 2009–2010 (mean±SE)

年份 Years	月份 Months	透明度 (m) Transparency	酸碱度 pH	水温 (°C) Water temperature	化学耗氧量 (mg/L) Chemical oxygen demand	盐度 Salinity	叶绿素 (ug/L) Chl <i>a</i>	总氮 (mg/L) Total nitrogen	总磷 (mg/L) Total phosphorus
2009	03	3.08±0.11	8.18±0.01	3.14 ±0.04	1.22±0.03	30.63±0.02	0.89±0.18	0.67±0.03	0.01±0.00
	04	2.84±0.10	8.16±0.01	6.55 ±0.17	1.12±0.05	30.51±0.03	0.88±0.24	1.01±0.16	0.03±0.00
	05	4.17±0.17	7.88±0.02	16.93±0.22	1.65±0.02	29.78±0.04	1.46±0.18	0.63±0.05	0.02±0.00
	06	2.83±0.22	8.17±0.01	25.25±0.19	1.45±0.04	30.98±0.01	2.77±0.36	0.51±0.05	0.01±0.00
	07	2.55±0.14	8.14±0.02	26.10±0.08	1.44±0.07	30.34±0.02	1.74±0.37	0.68±0.08	0.01±0.00
	08	2.73±0.10	8.12±0.01	27.32±0.04	1.23±0.04	30.73±0.05	2.03±0.12	0.32±0.02	0.03±0.00
	09	4.33±0.20	8.17±0.02	23.35±0.13	1.21±0.05	30.69±0.02	1.97±0.42	1.05±0.07	0.06±0.00
	10	2.07±0.06	8.24±0.04	19.33±0.10	1.67±0.07	30.34±0.19	3.14±0.38	0.75±0.06	0.06±0.00
	11	2.80±0.11	8.13±0.02	6.44 ±0.18	1.19±0.03	30.03±0.11	2.32±0.19	0.50±0.01	0.01±0.00
	12	2.10±0.11	8.02±0.00	2.24 ±0.18	1.15±0.03	29.71±0.05	4.19±1.36	0.65±0.03	0.02±0.00
2010	03	2.35±0.05	8.16±0.01	4.01 ±0.06	1.36±0.03	31.20±0.01	2.40±0.26	0.62±0.01	0.03±0.00
	04	2.13±0.40	8.33±0.00	7.71 ±0.07	1.12±0.04	31.14±0.05	2.53±0.33	0.62±0.01	0.03±0.00
	05	2.41±0.41	8.19±0.00	15.26±0.06	1.19±0.04	31.90±0.01	3.59±0.19	0.63±0.01	0.03±0.00
	06	3.23±0.10	8.11±0.02	24.55±0.23	1.38±0.04	31.19±0.01	2.17±0.26	0.66±0.01	0.03±0.00
	07	2.43±0.07	8.10±0.01	25.89±0.08	1.56±0.06	31.20±0.01	1.69±0.10	0.73±0.01	0.04±0.00
	08	2.51±0.07	8.04±0.01	26.65±0.05	1.27±0.02	31.04±0.05	2.11±0.16	0.70±0.05	0.04±0.00
	09	2.85±0.08	8.11±0.03	25.83±0.09	1.29±0.05	30.38±0.14	2.30±0.13	0.64±0.01	0.04±0.00
	10	3.05±0.17	8.07±0.03	16.79±0.12	1.25±0.02	30.51±0.09	2.03±0.18	0.65±0.01	0.04±0.00
	11	3.27±0.08	8.18±0.02	10.40±0.13	1.33±0.03	29.88±0.12	1.34±0.17	0.77±0.01	0.02±0.00
	12	1.51±0.06	7.84±0.01	3.51 ±0.09	1.17±0.02	29.72±0.06	2.49±0.10	1.38±0.02	0.02±0.00

2 结果

2.1 环境因子

2009 及 2010 年水质理化指标结果如表 1 所示,2009 年水质透明度要略高于 2010 年,年均透明度分别为 2.95 m 和 2.57 m,09 年 9 月达到最高值(4.33 ± 0.2)m,10 年 12 月达到最低值(1.51 ± 0.06)m。pH 值在 10 年 4 月达到最高值(8.33 ± 0),同年 12 月降低到最低值(7.84 ± 0.01),09 年与 10 年的年均 pH 值分别为 8.12、8.11。水温在 09 年 8 月达到最高值(27.32 ± 0.04)℃,同年 12 月降到最低值(2.24 ± 0.18)℃,09 年与 10 年的年均水温分别为 15.67℃、16.06℃。COD 在 09 年 10 月达到最高值(1.67 ± 0.07)mg/L,在 10 年 4 月降到最低值(1.12 ± 0.05)mg/L,其年均 COD 值分别为 1.33 mg/L、1.29 mg/L。盐度在 10 年 3 月达到最高值(31.9 ± 0.01),09 年 12 月降到最低值(29.71 ± 0.05),09 年与 10 年的年均盐度分别为 30.37、30.82。Chla 在 09 年 4 月达到最低值(0.88 ± 0.24)μg/L,同年 12 月达到最高值(4.19 ± 1.36)μg/L。09 年与 10 年的年均 Chla 含量分别为 2.14 μg/L、2.27 μg/L。总氮与总磷两种营养盐在 09 年的波动情况比较剧烈,而在 10 年的各月份之间则无明显波动。从两年的水质监测数据看,除总氮与总磷外,其他各项指标在两年之间并无明显差异,且各指标在年际间的变化趋势也较为相似。

2.2 浮游动物群落组成

本调查共鉴定出 75 种不同种类的浮游动物,分属 12 大类。其中以桡足类和浮游幼虫居多,分别鉴定出 22 种、20 类,占总种数 29.3%、26.7%。其次为水螅水母类,鉴定出 11 种,占总种数 14.7%。端足类、被囊动物、腹足类和栉水母类分别鉴定出 6 种、4 种、4 种、2 种,占总种数 8%、5.3%、5.3%、2.7%,其它枝角类、毛颚动物、等足类、糠虾类、磷虾类以及钵水母类各 1 种。虽然毛颚动物只鉴定到一种强壮箭虫,但其几乎在每个站位均有分布,占总数量的 24.2%,为绝对优势种(表 2)。

表 2 2009—2010 年莱州湾金城海域浮游动物种类列表

Table 2 Species list of zooplankton collected in Jinchen area of Laizhou Bay from 2009 to 2010

物种 Species	拉丁学名 Latin name	缩略词 Abbreviate	丰度 ind/m ³ Average abundance	出现频率 Occurrence frequency	优势度 Dominant
毛颚动物	Chaetognatha				
强壮箭虫	<i>Sagitta crassa</i>	SCRA	75.042	1	0.242
水螅水母类	Hydromedusa				
贝氏真囊水母	<i>Euphysora bigelowi</i>	EBIG	1.401	0.1	<0.02
八斑芮氏水母	<i>Rathkea octopunctata</i>	ROCT	9.494	0.15	<0.02
鲍氏水母	<i>Bougainvillia muscus</i>	BAUT	1.114	0.05	<0.02
带玛拉水母	<i>Malagazzia taeniogonia</i>	PTAE	0.009	0.1	<0.02
两手鲍氏水母	<i>Bougainvillia bitentaculata</i>	BBIT	0.007	0.05	<0.02
卡玛拉水母	<i>Malagazzia carolinae</i>	PVIR	0.084	0.05	<0.02
单囊美螅水母	<i>Clytia folleata</i>	PDIS	1.935	0.25	<0.02
囊状全水母	<i>Catablema vesicarium</i>	TVES	0.010	0.05	<0.02
双叉蕓枝螅水母	<i>Obelia dichotoma</i>	ODIC	0.022	0.05	<0.02
蕓枝螅水母	<i>Obelia</i> sp.	OBSP	1.341	0.55	<0.02
水螅水母类	Hydromedusae	HYSP	0.644	0.5	<0.02
钵水母类	Scyphozoa				
海月水母	<i>Aurelia aurita</i>	AAUR	0.010	0.05	<0.02
栉水母类	Ctenophora				
刺胞栉水母	<i>Euchlora rubra</i>	ERUB	0.405	0.05	<0.02
球形侧腕水母	<i>Pleurobrachia globosa</i>	PGLO	4.303	0.25	<0.02
桡足类	Copepoda				
背针胸刺水蚤	<i>Centropages dorsispinatus</i>	CDOR	1.762	0.4	<0.02
短角长腹剑水蚤	<i>Oithona brevicornis</i>	OBRE	0.776	0.55	<0.02

续表

物种 Species	拉丁学名 Latin name	缩略词 Abbreviate	丰度 ind/m ³ Average abundance	出现频率 Occurrence frequency	优势度 Dominant
海洋伪镖水蚤	<i>Pseudodiaptomus marinus</i>	PMAR	0.108	0.25	<0.02
巨大怪水蚤	<i>Monstrilla grandis</i>	MGRA	0.012	0.2	<0.02
克氏纺锤水蚤	<i>Acartia clausi</i>	AGIE	3.741	0.4	<0.02
孔雀脣角水蚤	<i>Labidocera pavo</i>	LPAV	0.050	0.1	<0.02
墨氏胸刺水蚤	<i>Centropages memurichi</i>	CMCM	46.313	0.45	0.067
拟长腹剑水蚤	<i>Oithona similis</i>	OSIM	0.881	0.55	<0.02
挪威小毛猛水蚤	<i>Microsetella norvegica</i>	MNOR	0.172	0.4	<0.02
钳状歪水蚤	<i>Tortanus forcipatus</i>	TFOR	0.028	0.1	<0.02
强额拟哲水蚤	<i>Parvocalanus crassirostris</i>	PCRA	0.453	0.3	<0.02
近缘大眼剑水蚤	<i>Corycaeus affinis</i>	CAFF	0.562	0.65	<0.02
瘦尾歪水蚤	<i>Tortanus gracilis</i>	TGRA	0.016	0.05	<0.02
洪氏脣角水蚤	<i>Labidocera rotunda</i>	LROT	0.933	0.55	<0.02
洪氏纺锤水蚤	<i>Acartia hongii</i>	ABIF	19.057	0.35	0.022
太平洋纺锤水蚤	<i>Acartia pacifica</i>	APAC	1.119	0.4	<0.02
太平洋真宽水蚤	<i>Eurytemora pacifica</i>	EPAC	21.169	0.25	<0.02
汤氏长足水蚤	<i>Calanopia thompsoni</i>	CTHO	4.392	0.6	<0.02
小拟哲水蚤	<i>Paracalanus parvus</i>	PPAR	4.298	0.9	<0.02
真刺脣角水蚤	<i>Labidocera euchaeta</i>	LEUC	0.883	0.5	<0.02
中华哲水蚤	<i>Calanus sinicus</i>	CSIN	42.477	0.95	0.130
左突脣角水蚤	<i>Labidocera sinilobata</i>	LSIN	0.018	0.05	<0.02
枝角类	Cladocera				
鸟喙尖头蚤	<i>Penilia avirostris</i>	PAVI	5.936	0.25	<0.02
浮游幼虫	Pelagic larva				
阿利玛幼体	Alima larva	ALIL	0.391	0.35	<0.02
桡足类幼体	Copepodite larva	COPL	2.086	0.7	<0.02
磁蟹蚤状幼体	Porcellana larva	PORL	0.728	0.5	<0.02
长尾类幼体	Maeruran larva	MAEL	14.027	0.75	0.034
短尾类幼体	Brachyura larva	BRAL	6.952	0.5	<0.02
多毛类幼体	Polychaete larvae	POLL	1.175	0.85	<0.02
海参耳状幼体	Holothuroidea larva	HOLL	0.168	0.05	<0.02
海胆长腕幼虫	Echinoidea larva	ECHL	10.405	0.3	<0.02
海蛇尾长腕幼虫	Ophiuroidea larva	OPHL	0.118	0.3	<0.02
海星纲羽腕幼体	Asteroidea larva	ASTL	0.283	0.05	<0.02
舌贝幼虫	Lingula larva	LINL	0.035	0.05	<0.02
双壳类壳顶幼虫	Bivalvia larva	BIVL	2.179	0.85	<0.02
藤壶六肢幼虫	Balanidae sp nauplius larva	BALL	0.542	0.5	<0.02
幼螺	Nail	NAIL	0.295	0.4	<0.02
鱼卵	Fish egg	FISE	0.445	0.55	<0.02
仔稚鱼	Fish larva	FISL	0.471	0.5	<0.02
枝角类幼体	Cladocera larva	CLAL	0.026	0.15	<0.02
帚毛虫幼体	Actinotrocha larva	ACTL	0.089	0.2	<0.02
珠形幼虫	Arachnactis larva	ARAL	0.120	0.1	<0.02
碟状体	Ephyra	EPHY	0.003	0.05	<0.02
被囊动物	Tunicate				
长尾住囊虫	<i>Oikopleura longicauda</i>	OLON	0.021	0.1	<0.02
红住囊虫	<i>Oikopleura rufescens</i>	ORUF	3.851	0.05	<0.02
异体住囊虫	<i>Oikopleura dioica</i>	ODIO	2.131	0.35	<0.02
软拟海樽	<i>Doliolletta gegenbauri</i>	DGEG	2.208	0.05	<0.02
端足类	Amphipoda				
端足类	Amphipod	AMPH	0.023	0.05	<0.02

续表

物种 Species	拉丁学名 Latin name	缩略词 Abbreviate	丰度 ind/m ³ Average abundance	出现频率 Occurrence frequency	优势度 Dominant
钩虾	Gammarid	GAMM	0.930	0.4	<0.02
螺赢蛭	<i>Corophium</i> sp.	CORO	0.058	0.15	<0.02
麦杆虫	Caprellid	SSHR	1.135	0.35	<0.02
内海拟钩虾	<i>Gammaropsis utinomii</i>	GUTI	2.945	0.2	<0.02
细足法	<i>Themisto gracilipes</i>	TGRA	0.157	0.25	<0.02
腹足类	Gastropoda				
腹足类	Gastropoda	GAST	4.126	0.3	<0.02
泥螺	<i>Bullacta exarata</i>	BEXA	0.002	0.05	<0.02
翼足螺	Pteropod	PTER	0.010	0.05	<0.02
马蹄螺	<i>Limacina trochiformis</i>	LTRO	0.026	0.1	<0.02
等足类	Isopoda				
等足类	Isopoda	ISOP	1.002	0.5	<0.02
糠虾类	Mysidacea				
糠虾	Mysidacea	MYSI	0.006	0.05	<0.02
磷虾类	Euphausiacea				
磷虾	Euphausid	EUPH	0.003	0.05	<0.02

2.3 浮游动物群落参数

如图 2 所示,生物丰度变化呈现出比较明显地季节变化规律,2009 年与 2010 年的数据显示,3—4 月份生物丰度均比较低,到 5 月份迅速升高达到一年当中的最高值(2009 年 951.65 ind/m³,2010 年 1348.14 ind/m³),从 6 月到 12 月,生物密度则基本表现出依次下降趋势,2009 年与 2010 年浮游动物生物密度的总体变化趋势较为相似,年均生物丰度分别为 310.81 ind/m³和 314.57 ind/m³。

生物量在 3—8 月份的变化趋势与生物密度较为相似,在 5 月份达到全年最高值(2009 年 1751.88 mg/m³,2010 年 854.95 mg/m³)。2009 年与 2010 年的生物量在继 8 月份下降之后又迅速上升,分别在 10 月份和 12 月份达到一年中的第二高峰。呈现出比较明显的双峰变化模型。2009 年的生物量较 2010 年略高,年均生物量分别为 648.48 mg/m³和 489.32 mg/m³。

浮游动物种类数的动态变化呈现出明显的单峰模型,在 3、4 月份种类比较少,平均每月份只监测到十几种浮游动物,5 月份开始增加,到 6—9 月份达到全年的最高值(2009 年 48 种,2010 年 40 种),从 9 月份开始浮游动物种类数开始缓慢下降,一直到 11、12 月下降到最低值。

浮游动物丰富度指数表现出与种类数相似的动态变化趋势,在 3—5 月份丰富度较低,在 6—10 月份丰富度较高,分别在 2009 年的 7 月份以及 2010 年的 6 月份达到了年度的最高值 2.31 和 1.97。11、12 月浮游动物丰富度指数则又迅速下降到与 3、4 月份持平。2009 年与 2010 年浮游动物年均丰富度指数分别为 1.31 和 1.32。

2009 年与 2010 年的浮游动物多样性变化趋势均表现出比较明显的双峰模型,即在 5、6 月份和 9、10 月份多样性指数比较高,而在其他月份多样性指数则较低。2009 年多样性指数最高值出现在 10 月份为 2.6,2010 年多样性指数最高值出现在 5 月份为 2.7,2009 年多样性指数较 2010 年略高,其年均值分别为 1.83 和 1.61。

浮游动物均匀度指数变化趋势与多样性指数较为相似,均匀度指数在 5、6 月份和 9、10 月份比较高,而在 7、8 月份比较低,表现出比较明显的双峰模型。2009 年均均匀度指数较 2010 年略高,其年均值分别为 0.57 和 0.48。

2.4 优势种动态变化

在 75 种浮游动物中共监测到 4 种优势种(表 2),分别为强壮箭虫($Y=0.24$)、中华哲水蚤($Y=0.13$)、墨氏胸刺水蚤($Y=0.07$)以及洪氏纺锤水蚤($Y=0.02$),各优势种的动态变化如图 3 所示。

强壮箭虫在 2009 年变化趋势为单峰模型,5 月份达到全年最低值 20.4 ind/m³,到 7 月份迅速上升到最高峰 155.2 ind/m³,年均值为 75.8 ind/m³。2010 年表现出双峰的变化趋势,在 5 月份达到一年中的次高峰 156.4 ind/m³,到 8 月份达到最高峰 215.4 ind/m³,年均值为 74.3 ind/m³。

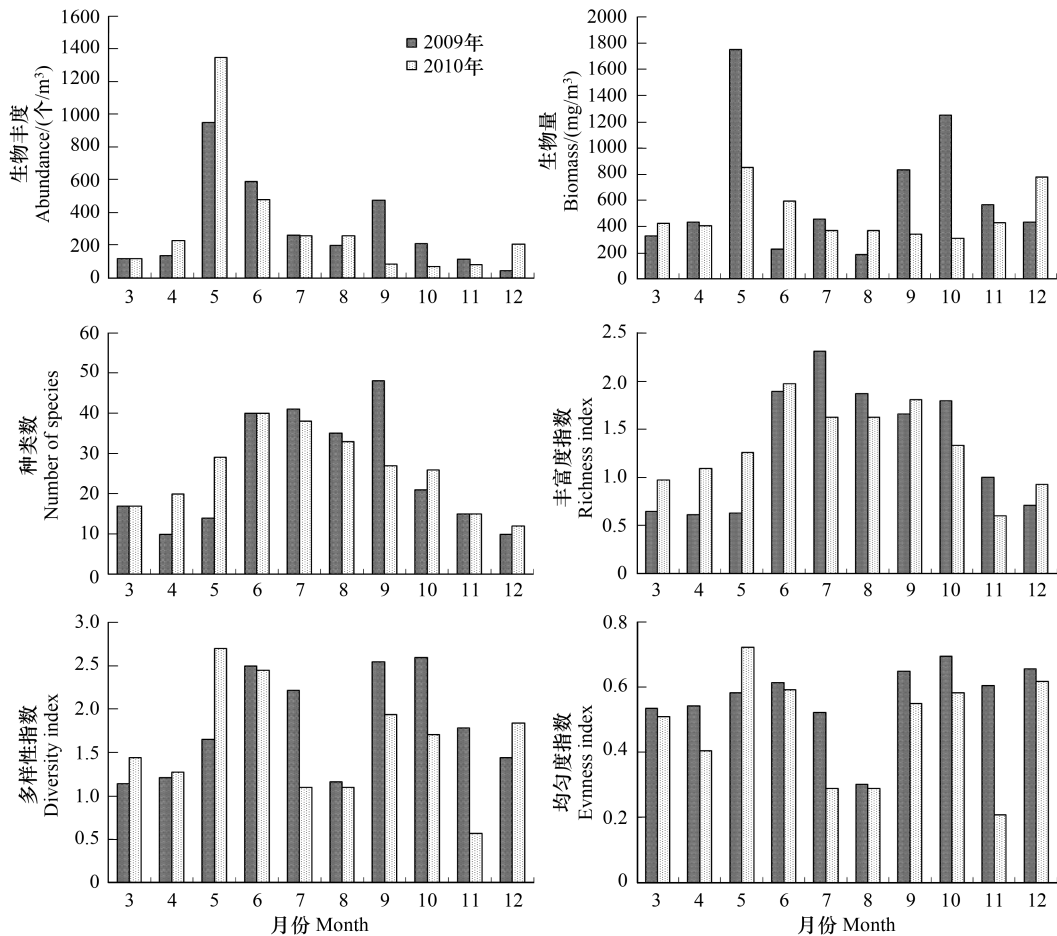


图2 2009—2010年浮游动物群落参数(生物密度、生物量、种类数、丰富度指数、多样性指数、均匀度指数)动态变化

Fig. 2 Zooplankton community variation in 2009 and 2010 including density, biomass, species, richness, diversity and evenness

中华哲水蚤在2009年与2010年表现出极其相似的变化趋势,在3、4月份丰度比较低,而后迅速增加,分别在5月、6月达到全年的最高值 250.4 ind/m^3 、 294.7 ind/m^3 。中华哲水蚤丰度在6月份之后迅速下降,在8—12月份一直保持较低的丰度分布。

墨氏胸刺水蚤变化趋势与中华哲水蚤非常相似,2009年与2010年均于5月份达到最高值 294.4 ind/m^3 、 340.5 ind/m^3 。进入6月份后迅速下降,在7—12月份几乎监测不到其存在。墨氏胸刺水蚤在2009年和2010年年均丰度分别为 62.1 ind/m^3 、 123.1 ind/m^3 。

2009年与2010年洪氏纺锤水蚤丰度均在5月份达到全年最高值,但是两年丰度相差较大,2009年洪氏纺锤水蚤的年均丰度为 37.6 ind/m^3 ,而2010年仅为 2.9 ind/m^3 。洪氏纺锤水蚤在5月份丰度最高,而在10—12月份基本监测不到其存在,表现出明显的季节变化特征。

2.5 浮游动物群落聚类分析

对不同月份采集到的浮游动物群落组成进行聚类分析,结果如图4所示,以40%相似度为界限,各月份的浮游动物群落组成可以明显的划分为四大类别,第Ⅰ类别以3、4、5月份样品为代表,为春季样品,第Ⅱ类别以6、7、8月份样品为代表,为夏季样品,第Ⅲ类别以9、10月份样品为代表,为秋季样品,第Ⅳ类别以11、12月份样品为代表,为冬季样品。四大类别内部均表现出比较高的聚类效果。从图4可以看出,浮游动物的群落组成体现出了非常明显的季节特性,且不同年份间同一季节,甚至同一月份的浮游动物群落结构具有高度的相似性。如09年8月与10年8月以及09年7月与10年7月样品,其群落结构组成相似度均在60%以上。说明浮游动物群落组成随季节变化的分布特征具有良好的稳定性与重现性。

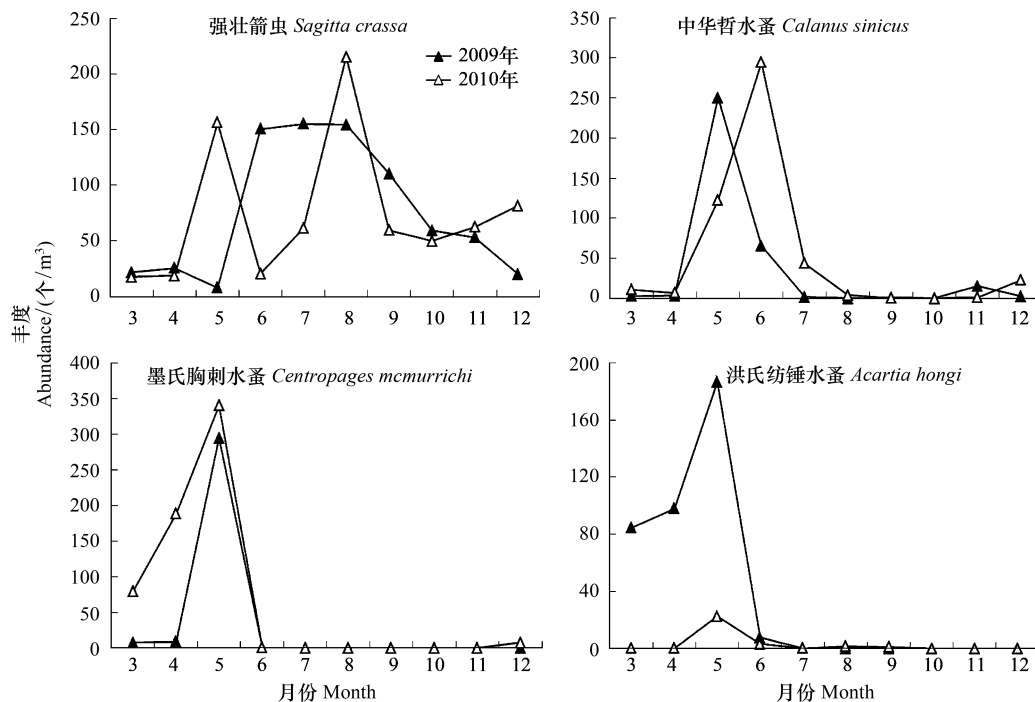


图3 2009—2010年主要优势种的数量动态变化
Fig. 3 Abundance variation of dominate species in 2009—2010

2.6 浮游动物群落结构与环境因子关系

为了探讨浮游动物与环境因子的关系,对浮游动物群落的4项指标(丰度、种类数、生物量以及多样性指数)与水温、盐度等8项环境指标做相关性分析,结果如表3所示。水温与浮游动物种类数有极强的相关性,相关系数达到0.87, ($P < 0.01$)。盐度与浮游动物的丰度有一定的正相关,相关系数为0.484。生物量与COD正相关,而与pH值负相关,其相关系数分别为0.466、-0.480。多样性指数与Chl a有较好的正相关性,而与其它各环境因子的相关性较低。从表可知,水温与浮游动物种类数相关性最强,而透明度、TN、TP与浮游动物各个指标均无明显相关性。

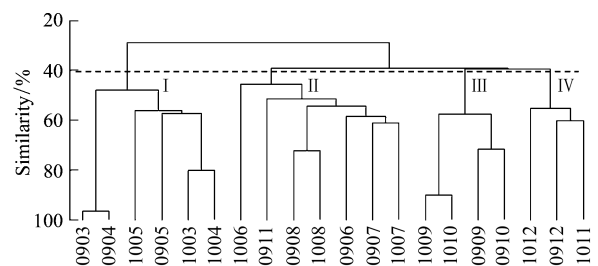


图4 2009—2010年莱州湾金城海域20个月份浮游动物聚类树状图
Fig. 4 Cluster dendrogram of zooplankton in 20 sampling months in Jincheng area of Laizhou Bay 2009—2010

表3 浮游动物各项指标与环境因子的相关性

Table 3 Pearson correlations of main environmental factors and parameters of zooplankton community

理化指标 Environment factors	丰度 Abundance		种类数 Number of species		生物量 Biomass		多样性指数 Diversity index	
	R	P	R	P	R	P	R	P
酸碱度 pH	-0.095	0.692	0.185	0.434	-0.480 *	0.032	0.070	0.771
水温 WT	0.246	0.295	0.870 **	0.000	0.008	0.975	0.336	0.147
化学需氧量 COD	0.172	0.469	0.394	0.086	0.466 *	0.038	0.229	0.332
盐度 Salinity	0.484 *	0.031	0.437	0.054	-0.226	0.338	0.223	0.344
叶绿素 a Chl a	0.221	0.349	0.182	0.444	-0.105	0.659	0.494 *	0.027
透明度 Transparency	0.249	0.289	0.062	0.795	0.374	0.104	0.063	0.791
总氮 TN	-0.129	0.588	-0.196	0.407	-0.014	0.954	0.088	0.711
总磷 TP	-0.078	0.745	0.194	0.413	-0.010	0.966	0.247	0.294

* 0.05 显著水平(双尾); ** 0.01 显著水平(双尾)

为了进一步探讨环境因子与浮游动物群落结构的关系,我们对其进行 CCA 分析。在 CCA 排序图中,箭头表示环境因子,箭头连线的长短表示物种分布与环境因子相关性的大小。蒙特卡罗检验 (Monte Carlo test) 表明,第 1 轴和全部轴均呈极显著差异 ($P < 0.01$),故 CCA 分析的排序结果是可信的。通过图 5 可以看出影响浮游动物群落结构最主要的因素是水温,其次是盐度,影响最小的是透明度和 Chla。这与表 3 所示的结果相吻合。不同浮游动物对环境的要求不一样,某一个环境条件对某些种类比较适宜,而对其它某些种类则不一定适宜。从图 5-A、B 中可知,桡足类幼体、海胆长腕幼虫、短尾类幼体、帚毛类幼体等大多数浮游幼虫都分布在水温和盐度较高的 6、7 月份,与水温、盐度呈一定的正相关性;背针胸刺水蚤、强额拟哲水蚤、太平洋纺锤水蚤、强额拟哲水蚤等大部分的桡足类以及水螅水母类都分布在水温较高且总磷含量较高的 8 月、9 月,与水温、总磷呈现较好的正相关性;而钩虾、麦秆虫等端足类则多分布在 11、12 月份,与水温、盐度呈现较强的负相关,与总氮呈现较强的正相关。

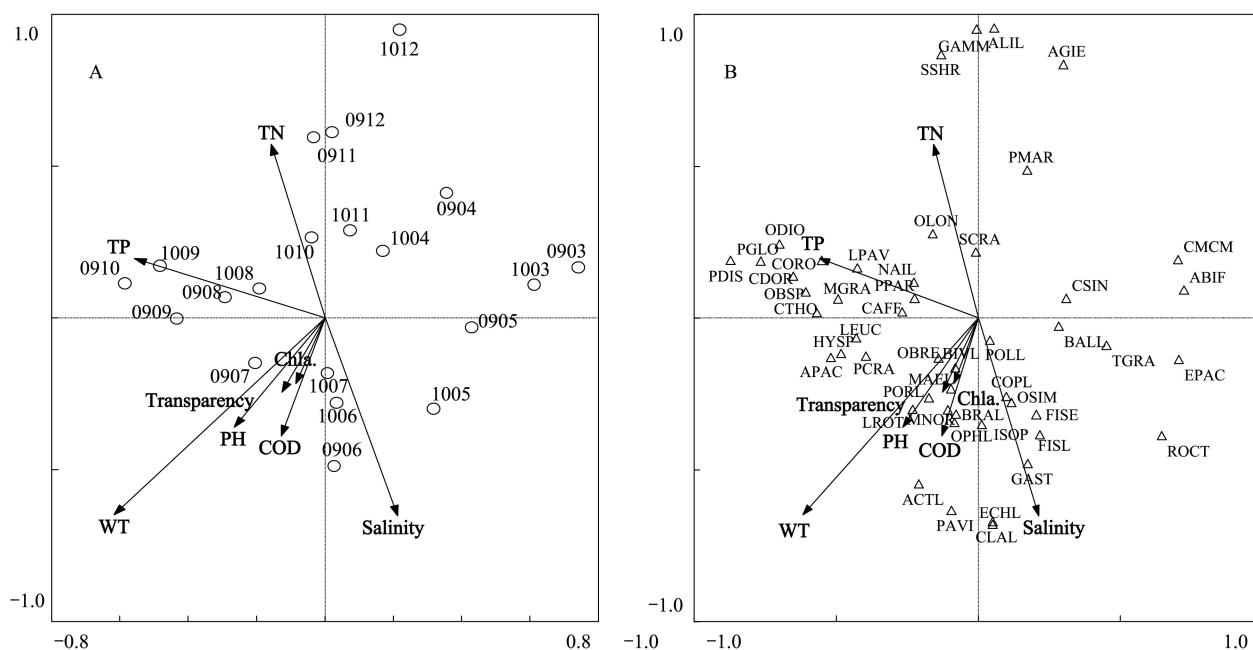


图 5 浮游动物群落分布与环境因子典范对应分析

Fig. 5 CCA of the zooplankton and associated environmental factors

A: 样本与环境因子关系; B: 物种与环境因子关系

3 讨论

3.1 浮游动物种群结构及其动态变化

本次调查共鉴定浮游动物 75 种,分属 14 大类,其中桡足类无论是丰度还是种类均占有绝对的优势。毕洪生^[13]等分析 1959 年全国海洋普查渤海浮游动物样品时发现桡足类是渤海浮游动物的主要构成者,张武昌^[14]等在调查 1998—1999 年渤海浮游动物群落构成时也报道过桡足类的优势地位,这与本次浮游动物调查结果相一致。本次调查发现浮游动物的种类与丰度分布均呈现比较明显的季节变化特征。在 3—5 月份由于表层水温升高,光度增强,营养盐类丰富,浮游植物主要是硅藻迅速繁殖,数量激增,而浮游动物由于水温适宜和食料丰富也出现大量繁殖^[15],浮游动物的丰度在 5 月份达到最高值,种类数也在 6、7 月份达到峰值。在本次调查中,浮游动物的种类变化与多样性指数变化没有很好的吻合(图 2),如 2009 年 8 月份浮游动物的种类数较高(35 种),而多样性指数反而仅为 1.16,仔细观察我们会发现 2009 年 8 月份样品中强壮箭虫的丰度比较高,而其他浮游动物的丰度较低,即 8 月份样品的物种均匀度较低(图 2),最终导致浮游动物多样性指数较

低。因此在判断浮游动物的群落组成时不能单单通过一两个指标,而要综合考虑多种因素才能更加真实地反映群落组成情况。

莱州湾金城海域浮游动物主要优势种包括强壮箭虫、中华哲水蚤、墨氏胸刺水蚤以及洪氏纺锤水蚤。4种优势种在5—6月份数量均比较多,基本达到年度最高峰,这与此时水温比较适宜,食料丰富不无关系。中华哲水蚤、墨氏胸刺水蚤和洪氏纺锤水蚤这3种优势种,在5—6月份达到高峰以后迅速下降到极低水平,在8—12月份近于绝迹,具有明显的季节分布特性。张武昌^[14]分析过1998—1999年春秋两季渤海浮游动物样品时发现,小拟哲水蚤和拟长腹剑水蚤是秋季优势种,而洪氏纺锤水蚤和墨氏胸刺水蚤是春季优势种,优势种随季节交替产生明显的变化。本研究较1998—1999年数据相比,优势种产生了较大的变化,且优势种的丰度大幅降低,产生这种差异的原因可能与整体的海洋环境变化有关,孙松报道^[16],近年来胶州湾浮游动物丰度较本世纪初有明显下降;近50年来,受暖流增强的影响,南黄海浮游动物物种数量增加,优势种组成种类多样化,主要优势种中华哲水蚤和强壮箭虫比例增加,小型桡足类和暖水性种类数量增加^[17],与本文研究相符。

由于气候的季节变化,海洋中水文条件也有季节变化的现象,因此,在季节更替中,经常有新的种类出现和旧的种类消失,浮游动物的群落结构也相应地发生变化^[15]。09年与10年浮游动物群落组成的变化趋势较为相似,从聚类分析结果看,浮游动物的群落结构分为明显地春、夏、秋、冬四大季节类型。Fabrizio^[18]等在对亚得里亚海进行长达30年的调查研究后发现,浮游动物的季节分布特性具有较好的稳定性。本次调查结果也证实了这一点。不同年份间同一季节,甚至同一月份的浮游动物群落结构具有高度的相似性。如09年7月份与10年7月份样品以及09年8月与10年8月,其群落结构组成相似度均在60%以上。

3.2 环境因子对浮游动物的影响

浮游动物的分布受着各种环境因子综合作用的影响,其中温度、盐度是影响浮游动物分布的重要因子^[19-21]。由于各种浮游动物对温度与盐度变化的忍受力不同,因此在数量和种类组成上都随着温度、盐度的变化,而在分布上表现出差异^[15]。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过程的强度和特点、有机体的生长和发育速度、繁殖、行为等,从而影响浮游动物的生物量和分布^[22-24]。金琼贝等^[25]在室内实验中探讨了20—50℃范围内浮游动物群落结构与温度的关系。实验结果表明,种类数在30℃左右最多,38℃开始明显减少;枝角类、桡足类、无节幼体数量在30℃以下随温度的升高而增多,而后逐渐下降,40℃时数量锐减。莱州湾金城海域全年水温波动范围在2.2℃—27.4℃之间,在此范围内浮游动物的种类与水温呈极显著的正相关性($P < 0.01$),较好的印证了金琼贝的理论。

典型对应分析结果显示,盐度是继水温影响海洋浮游动物群落结构的第二环境因素,浮游动物丰度随盐度升高而显著增加($P < 0.05$)。徐兆礼^[26-27]和Gao等^[28]对长江口及邻近水域浮游动物群落研究表明,盐度是影响长江口浮游动物群落特征最重要的环境因子。李开枝等^[29-30]对珠江口及邻近海域以及Mouny等^[31]对英吉利海峡塞纳河口(Seine estuary)的研究进一步表明,在河口水域盐度是影响浮游动物分布最重要的环境因子。浮游动物适应盐度的变化与渗透压和离子调节机制密切相关。在正常环境中,浮游动物体内的体液与环境保持渗透压和离子浓度的平衡;当盐度改变时,浮游动物可以通过呼吸和排泄器官的调节机制来适应变化了的渗透压和离子浓度,以维持正常的生理活动^[32]。

除温度和盐度外,总磷含量对桡足类的影响也比较大,如图5所示,大部分桡足类都分布在总磷含量较高的区域。总磷对桡足类的影响可能是通过对浮游植物数量的影响来间接实现。值得注意的是,CCA结果显示本文所选环境因子对浮游动物群落分布的累计贡献率仅为49.8%,说明,除所选环境因子外,浮游动物群落结构还受浮游植物,鱼类捕食,以及水产养殖等人类活动等其他多方面的影响,要想进一步深入研究影响浮游动物群落结构的因素,不仅要时间上与空间上进行大尺度调查,更需从影响因素上进行进一步的筛选与整合。

参考文献 (References):

- [1] 鲍献文, 万修全, 高郭平, 吴德星. 渤海、黄海、东海 AVHRR 海表温度场的季节变化特征. 海洋学报, 2002, 24(5): 125-133.
- [2] Lin C L, Su J L, Xu B R, Tang Q S. Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem.

- Progress in Oceanography, 2001, 49(1-4): 7-19.
- [3] 张莹, 刘元进, 张英, 徐炳庆, 吕振波. 莱州湾多毛类底栖动物生态特征及其对环境变化的响应. 生态学杂志, 2012, 31(4): 888-895.
- [4] 金显仕, 邓景耀. 莱州湾渔业资源群落结构和生物多样性的变化. 生物多样性, 2000, 8(1): 65-72.
- [5] Zhou S C, Jin B S, Guo L, Qin H M, Chu T J, Wu J H. Spatial distribution of zooplankton in the intertidal marsh creeks of the Yangtze River Estuary, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 85(3): 399-406.
- [6] Mazumder D, Saintilan N, Williams R J. Trophic relationships between itinerant fish and crab larvae in a temperate Australian saltmarsh. Marine and Freshwater Research, 2006, 57(2): 193-199.
- [7] David V, Sautour B, Chardy P, Leconte M. Long-term changes of the zooplankton variability in a turbid environment: the Gironde estuary (France). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 64(2-3): 171-184.
- [8] Giraudel J L, Lek S. A comparison of self-organizing map algorithm and some conventional statistical methods for ecological community ordination. Ecological Modelling, 2001, 146(1-3): 329-339.
- [9] Huang C J, Lin X P, Lin J D, Du H, Dong Q X. Population dynamics of *Pseudo-nitzschia pungens* in Zhelin Bay, China. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2009, 89(4): 663-668.
- [10] 刘亚林, 姚伟民, 张树刚, 陈雷. 2008 年夏季飞云江口浮游植物分布特征及与环境因子的相关性. 海洋环境科学, 2009, 28(S1): 31-41.
- [11] 国家质检总局, 国家标准化委员会. 海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [12] 国家质检总局, 国家标准化委员会. 海洋监测规范第 4 部分: 海水分析. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [13] 毕洪生, 孙松, 高尚武, 张光涛. 渤海浮游动物群落生态特点 II. 桡足类数量分布及变动. 生态学报, 2001, 21(2): 177-185.
- [14] 张武昌, 王克, 高尚武, 王荣. 渤海春季和秋季的浮游动物. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 630-639.
- [15] 郑重, 李少菁, 许振祖. 海洋浮游生物学. 北京: 海洋出版社, 1984: 139-491.
- [16] 孙松, 周克, 杨波, 张永山, 吉鹏. 胶州湾浮游动物生态学研究 I. 种类组成. 海洋与湖沼, 2008, 39(1): 1-7.
- [17] 左涛, 王荣, 陈亚瞿, 高尚武, 王克. 春季和秋季东、黄海陆架区大型网采浮游动物群落划分. 生态学报, 2005, 25(7): 1531-1540.
- [18] Fabrizio B A, Gianpiero C, Francesco A, Mauro B, Franco B, Elisa C, Amelia D L, Alessandra P, Cosimo S, Giorgio S. Plankton communities in the northern Adriatic Sea: Patterns and changes over the last 30 years. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 115: 125-137.
- [19] Jin B S, Fu C Z, Zhong J S, Li B, Chen J K, Wu J H. Fish utilization of a salt marsh intertidal creek in the Yangtze River estuary, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 73(3-4): 844-852.
- [20] Froneman P W. Zooplankton community structure and bio-mass in a southern African temporarily open/closed estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 60(1): 125-132.
- [21] Marques S C, Azeiteiro U M, Marques J C, Neto J M, Pardal M A. Zooplankton and ichthyoplankton communities in a temperate estuary: spatial and temporal patterns. Journal of Plankton Research, 2006, 28(3): 297-312.
- [22] Elliott J A. A comparison of thermal polygons for British freshwater teleosts. Freshwater Forum, 1995, 5(3): 178-184.
- [23] Devreker D, Souissi S, Seuront L. Effects of chlorophyll concentration and temperature variation on the reproduction and survival of *Temora longicornis* (Copepoda, Calanoida) in the Eastern English Channel. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2005, 318(2): 145-162.
- [24] Lenz P H, Hower A E, Hartline D K. Temperature compensation in the escape response of a marine copepod, *Calanus finmarchicus* (Crustacea). The Biological Bulletin, 2005, 209(1): 75-85.
- [25] 金琼贝, 盛连喜, 张然. 温度对浮游动物群落的影响. 东北师范大学学报: 自然科学版, 1991, (4): 103-111.
- [26] 徐兆礼. 长江口邻近水域浮游动物群落特征及变动趋势. 生态学杂志, 2005, 24(7): 780-784.
- [27] 徐兆礼. 中国海洋浮游动物研究的新进展. 厦门大学学报: 自然科学版, 2006, 45(Z2): 16-23.
- [28] Gao Q, Xu Z L, Zhuang P. The relation between distribution of zooplankton and salinity in the Changjiang Estuary. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2008, 26(2): 178-185.
- [29] Li K Z, Yin J Q, Huang L M, Tan Y H. Spatial and temporal variations of mesozooplankton in the Pearl River estuary, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 67(4): 543-552.
- [30] 李开枝, 尹健强, 黄良民, 谭烨辉, 许战洲. 珠江口浮游动物的群落动态及数量变化. 热带海洋学报, 2005, 24(5): 60-68.
- [31] Mouny P, Dauvin J C. Environmental control of mesozooplankton community structure in the Seine estuary (English Channel). Oceanologica Acta, 2002, 25(1): 13-22.
- [32] 黄加祺, 郑重. 九龙江口桡足类和盐度关系的初步研究. 厦门大学学报: 自然科学版, 1984, 23(4): 497-505.