

DOI: 10.5846/stxb201708121451

庞碧剑, 李天深, 蓝文陆, 黎明民, 骆鑫, 陈莹. 钦州湾秋季和春季浮游动物分布特征及影响因素. 生态学报, 2018, 38(17): - .

Pang B J, Li T S, Lan W L, Li M M, Luo X, Chen Y. Distribution patterns and environmental factors of zooplankton in the Qinzhou Bay in spring and autumn. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): - .

钦州湾秋季和春季浮游动物分布特征及影响因素

庞碧剑, 李天深, 蓝文陆*, 黎明民, 骆鑫, 陈莹

广西壮族自治区海洋环境监测中心站, 北海 536000

摘要: 为了解钦州湾浮游动物群落的时空分布特征及与主要环境因子的关系, 于 2014 年 10 月和 2015 年 3 月进行了秋季和春季两航次的调查。结果表明, 该海湾的浮游动物群落有明显的季节变化。秋季共鉴定出 12 类 87 种, 其中优势种有太平洋纺锤水蚤 (*Acartia pacifica*)、肥胖三角溞 (*Evadne tergestina*)、亨生莹虾 (*Lucifer hanseni*)、百陶箭虫 (*Sagitta bedoti*) 和长尾类幼虫 (*Macrura larvae*); 春季共鉴定出 11 类 48 种, 优势种为中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*) 和太平洋纺锤水蚤; 秋季浮游动物的平均丰度、生物量和多样性指数 (528.92 个/m³、110.60 mg/m³ 和 2.22) 均高于春季 (48.30 个/m³、61.10 mg/m³ 和 1.70)。空间分布上, 钦州湾外湾浮游动物丰度、生物量和多样性指数的平均值皆高于内湾。多维尺度分析表明, 秋季内湾群落相似性较高, 春季外湾浮游动物群落相似性较高。相关性分析表明盐度与营养盐是影响钦州湾浮游动物分布的主要环境因子。与 2011—2012 年数据相比, 钦州湾浮游动物群落结构已趋于单一化和小型化, 以致生物量明显下降。这一现象主要与钦州湾海水富营养化以及大面积高密度牡蛎养殖有密切的关系。

关键词: 钦州湾; 浮游动物; 季节变化; 时空分布; 多维尺度分析

Distribution patterns and environmental factors of zooplankton in the Qinzhou Bay in spring and autumn

PANG Bijian, LI Tianshen, LAN Wenlu*, LI Mingmin, LUO Xin, CHEN Ying

Marine Environmental of Monitoring Center of Guangxi, BeiHai 536000, China

Abstract: An investigation was conducted in autumn 2014 and spring 2015 in order to learn the temporal and spatial distributions of the zooplankton community, as well as its correlation with environmental factors in Qinzhou Bay. Results show distinct seasonal differences in the community. In autumn, 87 species of zooplankton were detected with 5 dominant species, *Acartia pacifica*, *Evadne tergestina*, *Lucifer hanseni*, *Sagitta bedoti*, and *Macrura larvae*; whereas in spring, 48 species were found with 2 species dominant, *Calanus sinicus* and *Acartia pacifica*. The average abundance and biomass of zooplankton was greater in autumn (528.92 ind/m³ and 110.60 mg/m³, respectively) than in spring (48.30 ind/m³ and 61.10 mg/m³, respectively). The Shannon-Wiener diversity index was higher in autumn (2.22) than in spring (1.70). Spatial distribution wise, the abundance, biomass, and diversity of the zooplankton species were higher in the outer bay than that in the inner bay. Furthermore, according to our MDS analysis, composition of the zooplankton community had high similarity in the inner bay in autumn, while the same was observed in the outer bay in spring. The results of the correlation analysis showed that salinity and nutrients were the main environmental factors that affected the zooplankton community. Comparing our results with historical data from 2011 to 2012, we found that the composition of the zooplankton community in Qinzhou Bay showed trends of simplification and had decreased in abundance, which could indicate that high density shellfish culture and eutrophication affected the zooplankton community in Qinzhou Bay.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41466001); 广西科技计划项目 ((桂科 AA17129001, 桂科 AD17129041)); 广西自然科学基金项目 (2015GXNSFBA139194; 2015GXNSFAA139244)

收稿日期: 2017-08-12; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dr.lan@139.com

Key Words: Qinzhou Bay; zooplankton; seasonal variations; temporal and spatial distribution; multidimensional scaling analysis

钦州湾位于广西北部湾的中部,由内湾(茅尾海)和外湾(钦州港)组成,是一个口小腹大呈葫芦形的半封闭海湾。近年来钦州湾沿岸的工农业、养殖业、港口、城市等迅速扩展,该海域的生态环境承受着越来越大的压力^[1]。浮游动物是食物链(网)中的关键环节,部分种类同时也是生态环境变化的指示物种,因此探究其变化规律及与环境因子的相互关系,对保护海洋生态环境具有重要意义。但目前钦州湾这方面的研究很少,仅见蓝文陆等^[2]报道了丰水期(夏季)和枯水期(春季)的浮游动物群落特征,不足以全面掌握钦州湾浮游动物的时空变化特征及其影响因素。此外 2010—2015 年是钦州湾快速发展的时段,日益频繁的开发活动是否导致了浮游动物群落结构发生较大变化尚不明确。为此,本文拟通过研究 2014 年秋季和 2015 年春季钦州湾浮游动物的群落结构、分布及其与主要环境因子的相关关系,以期掌握该海湾浮游动物的时空变化规律和关键环境影响因子,同时与 2011—2012 年的监测结果进行比较,阐明钦州湾浮游动物年际变化以及现有的开发利用活动对浮游动物群落的影响,为推动钦州湾生态环境保护和资源的可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

本研究在钦州湾内共布设了 13 个站位,其中内湾 5 个,外湾 8 个(图 1),于 2014 年 10 月和 2015 年 3 月进行了 2 个航次的调查。其中浮游动物样品使用浅水 I 型浮游生物网垂直拖网采集,用终浓度 5% (v/v) 甲醛保存,在显微镜和体视镜下对样品进行剔除杂质、分类和计数,并称量浮游动物的生物量(湿重)。浮游动物样品的采集、保存、分析等均按《海洋监测规范》(GB17378.7—2007)^[3]的要求进行。水温、盐度采用多参数水质仪(Multi 350)现场测定,其他水质监测项目样品用 8L 采水器采集后带回实验室分析。其中叶绿素 a 采用分光光度法测定,硝酸盐采用镉柱还原法测定、亚硝酸盐采用萘乙二胺分光光度法测定、铵盐采用次溴酸盐氧化分光光度法测定、无机磷采用磷钼蓝分光光度法测定、硅酸盐采用硅钼黄法测定。样品的采集、保存、分析等按《海洋监测规范》(GB17378.7—2007)的要求进行。

1.2 数据处理与分析

浮游动物群落的 Shannon-Wiener 多样性指数(H')^[3]和各站位物种多维尺度分析(MDS)使用 Primer 6.0 进行计算分析。环境因子的主成分分析(principal component analysis, PCA)以及浮游动物丰度与主要环境因子的相关性分析由 SPSS16.0 完成。站位图、主要环境因子分布图以及浮游动物群落参数分布图采用 Surfer11.0 克里金(Kriging)插值法绘制。

浮游动物优势度(Y)^[4]的计算公式为:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i$$

式中, N 为样品的总丰度; n_i 为样品中第 i 种的丰度; f_i 为该种在各样品中的出现频率。若 $Y \geq 0.02$,则认定该物种为优势种^[5]。

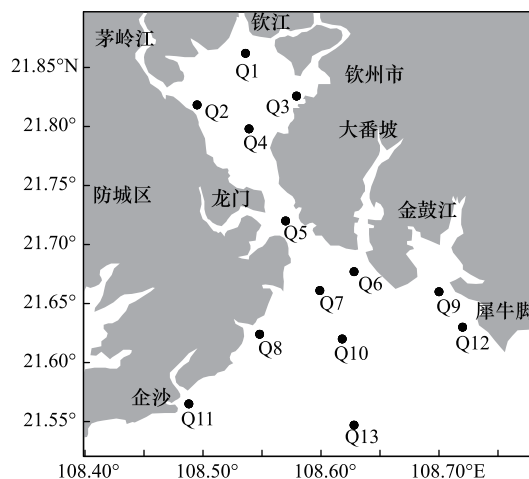


图 1 钦州湾采样站位

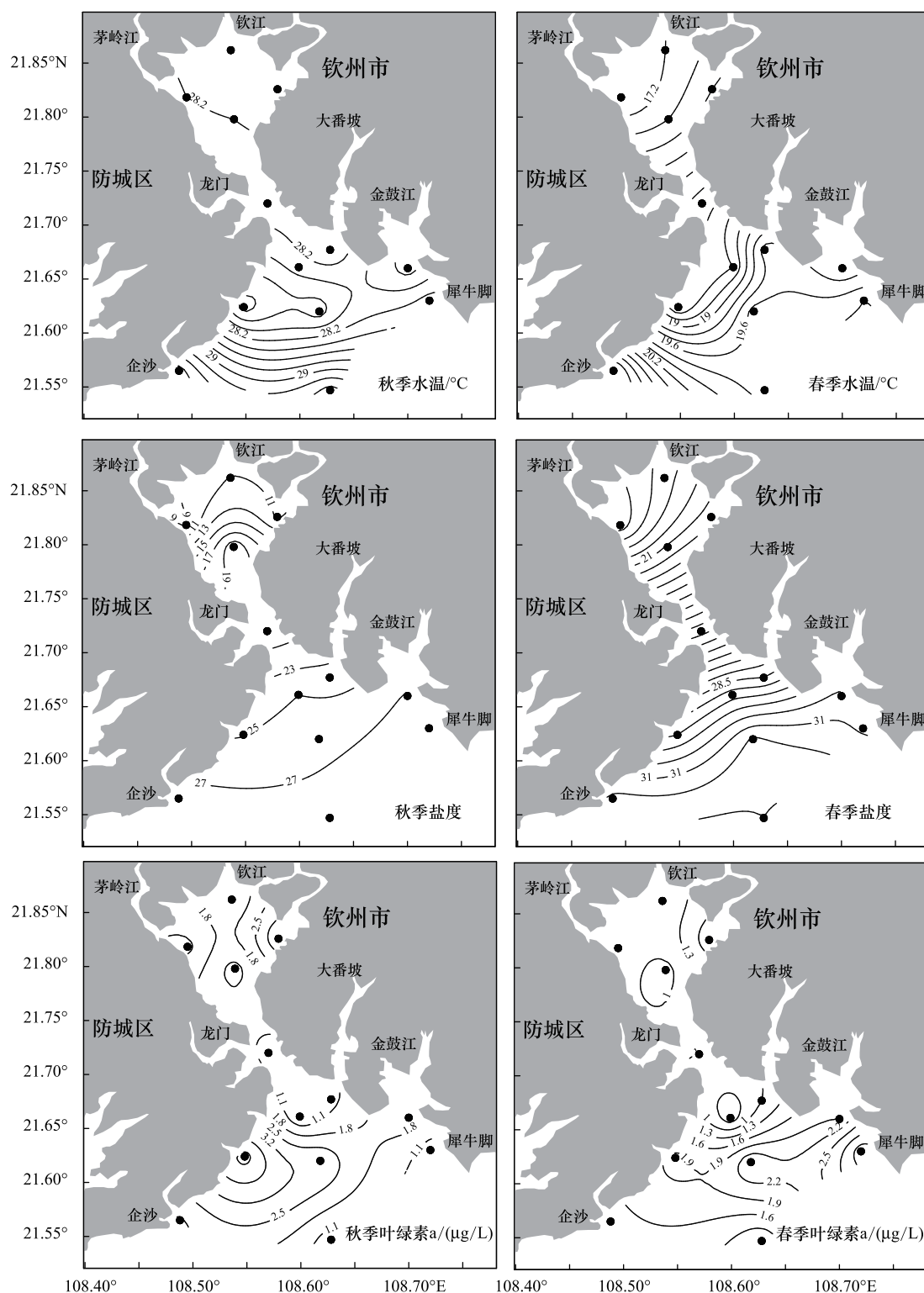
Fig.1 Sampling stations in Qinzhou Bay

“Q”表示钦州湾

2 结果

2.1 钦州湾秋季和春季主要环境因子的变化特征

钦州湾秋季和春季表层水温变化范围分别为 27.5—29.7℃、17.0—21.3℃(图 2);盐度变化范围分别为 8.8—27.7 和 18.7—32.0,均从内湾向外湾递增。秋季和春季叶绿素 a 浓度范围分别为 0.7—4.9 $\mu\text{g/L}$ 、0.5—3.3 $\mu\text{g/L}$,秋季内湾的叶绿素 a 浓度与外湾相近,春季则外湾明显高于内湾(图 2)。秋季和春季的无机氮、硅



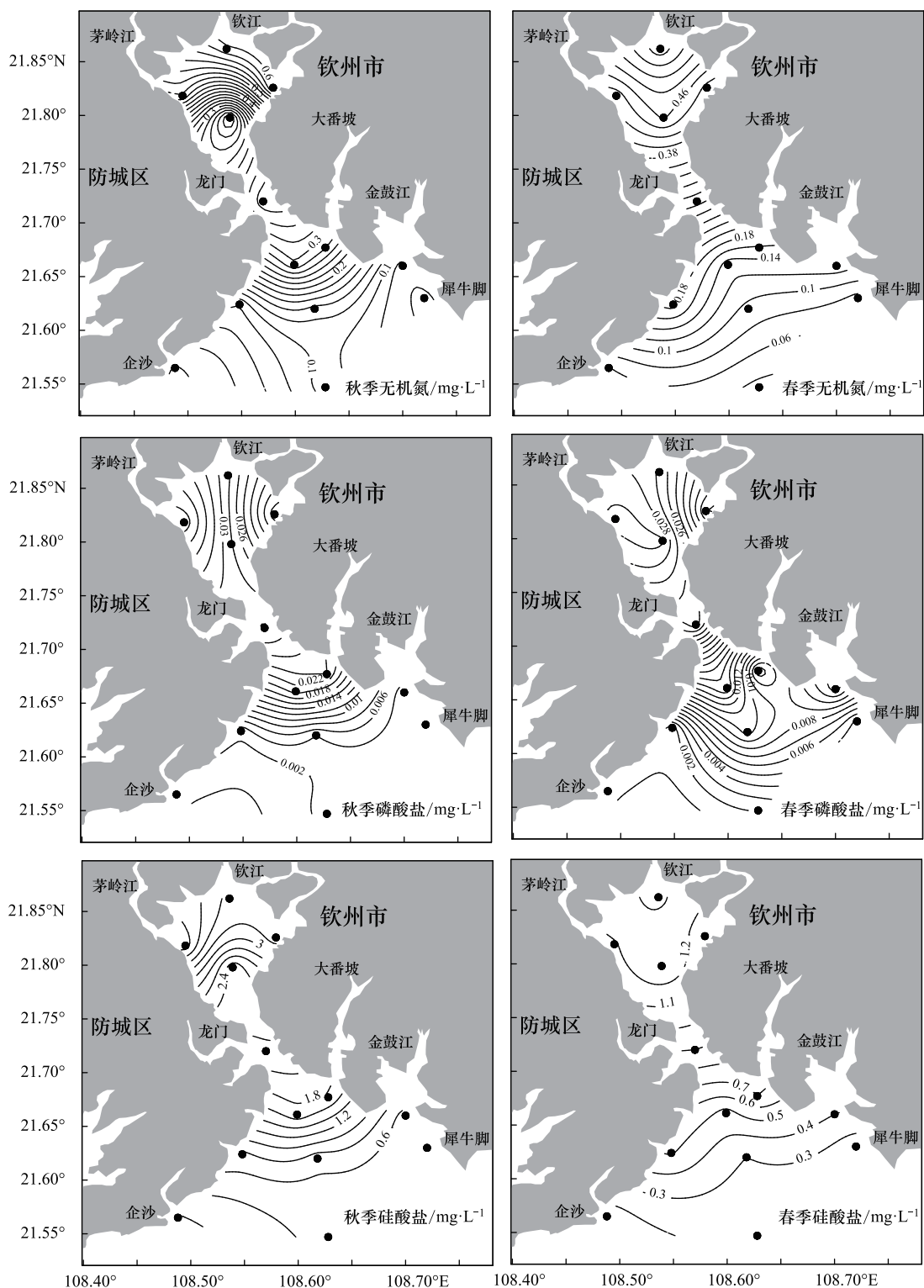


图 2 钦州湾秋季和春季主要环境因子的分布

Fig.2 Distribution of environmental parameters in autumn and spring in the Qinzhou Bay

酸盐和磷酸盐分布均是由内湾向外湾递减,秋季钦州湾海域营养盐浓度均值略高于春季。

2.2 钦州湾浮游动物的群落组成特征

钦州湾 2 次调查共检出浮游动物 111 种(类),包括 14 类浮游幼虫,浮游动物种类名录见表 1。钦州湾浮游动物以桡足类种类数最多,其次为毛颚类,浮游幼虫居第三。其中秋季出现 13 大类 87 种,春季则出现 11 大

类 48 种(表 2),秋季种类多样性明显高于春季,优势类群呈现出由秋季的暖水性种类向春季的暖温性种类更替的特征。钦州湾内湾和外湾的种类数量差异较大。秋季内湾和外湾种类数分别为 12 种和 84 种,春季内湾和外湾种类数分别为 10 种和 41 种。内湾浮游动物种类数较少,秋季内湾各站位平均种类数为 4 种,春季内湾各站位平均出现种类数为 3 种。内湾以中小型桡足类以及浮游幼虫为主要类群,代表种类有太平洋纺锤水蚤、中华异水蚤、长尾类幼虫以及短尾类幼虫。外湾浮游动物种类较丰富,秋季和春季各站位平均出现的种类分别为 10 种(类)和 20 种(类),此外外湾浮游动物类群中个体较大的种类所占比例远高于内湾。

表 1 钦州湾浮游动物种类名录(2014-10—2015-3)

Table 1 Species name of zooplankton in QinzhouBay (October, 2014 to March, 2015)

种名 Species	秋季 Autumn	春季 Spring	种名 Species	秋季 Autumn	春季 Spring
夜光虫 <i>Noctiluca scientillans</i>		+	水螅水母类 <i>Hydropolypse</i> sp.		+
拟帽水母 <i>Paratiara digitalis</i> Kramp et Damas	+		肉质介螵水母 <i>Hydractinia carnea</i>	+	
蟹形和平水母 <i>Eirene kambara</i>	+		短腺和平水母 <i>Eirene brevigona</i>		+
细颈和平水母 <i>Eirene menoni</i>	+		指突水母属 <i>Virginic</i> sp.		+
刺胞水母 <i>Cytaeis tetrastyla</i>		+	日本真瘤水母 <i>Eutima japonica</i>	+	+
杯水母属 <i>Phialidium</i> sp.	+		卵形侧丝水母 <i>Helgicirra ovalis</i>		+
拟细浅室水母 <i>Lensia subtiloides</i>	+	+	双生水母 <i>Diphyes chamissonis</i>		+
钟浅室水母 <i>Lensia campanella</i>		+	球形侧腕水母 <i>Pleurobrachia globosa</i>	+	+
鸟喙尖头蚤 <i>Penilia avirostris</i>	+		诺氏三角蚤 <i>Evadne nordmanni</i>	+	
肥胖三角蚤 <i>Evadne tergestina</i>	+		针刺真浮萤 <i>Euconchoecia aculeata</i>		+
尖尾海萤 <i>Cypridina acuminata</i>	+	+	异肢水蚤属 <i>Copepoda</i> sp.		+
中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>		+	微刺哲水蚤 <i>Canthocalanus pauper</i>		+
强额孔雀水蚤 <i>Pavocalanus crassirostris</i>	+		亚强真哲水蚤 <i>Eucalanus subcrassus</i>	+	+
精致真刺水蚤 <i>Euchaeta concinna</i>		+	狭额真哲水蚤 <i>Eucalanus subtenuis</i>	+	
矮拟哲水蚤 <i>Paracalanus nanus</i>	+		裸拟哲水蚤 <i>Delius nudus</i>	+	
小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i>	+		驼背隆哲水蚤 <i>Acrocalanus gibber</i>	+	
微驼隆哲水蚤 <i>Acrocalanus gracilis</i>	+		中华矮隆哲水蚤 <i>Bestiolina sinica</i>	+	
弓角基齿哲水蚤 <i>Clausocalanus arcuicornis</i>	+		缘齿厚壳水蚤 <i>Scolecithrix nicobarica</i>	+	
锥形宽水蚤 <i>Temora turbinata</i>	+	+	瘦尾胸刺水蚤 <i>Centropages tenuiremis</i>	+	+
伯氏平头水蚤 <i>Candacia bradyi</i>		+	小长足水蚤 <i>Calanopia minor</i>	+	
汤氏长足水蚤 <i>Calanopia thompsoni</i>	+		真刺唇角水蚤 <i>Labidocera euchaeta</i>	+	
孔雀唇角水蚤 <i>Labidocera pavo</i>	+		圆唇角水蚤 <i>Labidocera rotunda</i>	+	+
三指角水蚤 <i>Pontella tridactyla</i>	+		克氏纺锤水蚤 <i>Acartia clausi</i>	+	
红纺锤水蚤 <i>Acartia erythraeus</i>	+		太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	+	+
刺尾纺锤水蚤 <i>Acartia spinicauda</i>	+		中华异水蚤 <i>Acartiella sinensis</i>		+
钳形歪水蚤 <i>Tortanus forcipatus</i>	+		瘦形歪水蚤 <i>Tortanus gracilis</i>	+	
右突歪水蚤 <i>Tortanus dextrilobatus</i>		+	捷氏歪水蚤 <i>Tortanus derjugini</i>		+
细长腹剑水蚤 <i>Oithona affenuatus</i>	+		小长腹剑水蚤 <i>Oithona nana</i>	+	
近缘大眼剑水蚤 <i>Corycaeus affinis</i>	+		平大眼剑水蚤 <i>Corycaeus dahli</i>	+	
尖额真猛水蚤 <i>Euterpina acutifrons</i>	+	+	分叉小猛水蚤 <i>Tisbe furcata</i>	+	
中华节糠虾 <i>Siriella sinensis</i>	+		小拟节糠虾 <i>Hemisiriella parva</i>	+	
圆柱水虱属 <i>Cirolana</i> sp.	+		南沙沙钩虾 <i>Byblis nanshaensis</i>	+	
敏捷螺赢蜚 <i>Corophium kitamorii</i>	+		上野螺赢蜚 <i>Corophium uenoi</i>	+	
玻璃钩虾属 <i>Hyale</i> sp.	+		沙钩虾属 <i>Byblis</i> sp.		+
角钩虾属 <i>Ceradocus</i> sp.		+	裂颏蛮绒 <i>Lestrigonus schizogeneios</i>		+
日本毛虾 <i>Acetes japonicus</i>	+		费氏莹虾 <i>Lucifer faxonii</i>	+	
亨生莹虾 <i>Lucifer hanseni</i>	+		中型莹虾 <i>Lucifer intermedius</i>	+	+

续表					
种名 Species	秋季 Autumn	春季 Spring	种名 Species	秋季 Autumn	春季 Spring
箭虫属 <i>Sagitta</i> sp.	+		百陶箭虫 <i>Sagitta bedoti</i>	+	+
强壮箭虫内海型 <i>Sagitta crass f. naikaiensis</i>	+		多变箭虫 <i>Sagitta decipiens</i>	+	+
肥胖箭虫 <i>Sagitta enflata</i>	+	+	凶形箭虫 <i>Sagitta ferox</i>	+	+
圆囊箭虫 <i>Sagitta johorensis</i>	+		琴形箭虫 <i>Sagitta lyra</i>	+	+
小箭虫 <i>Sagitta neglecta</i>		+	美丽箭虫 <i>Sagitta pulchra</i>	+	
微型箭虫 <i>Sagitta minima</i>	+		拿卡箭虫 <i>Sagitta nagae</i>	+	
太平洋箭虫 <i>Sagitta pacifica</i>	+	+	漂浮箭虫 <i>Sagitta planctonis</i>	+	
假锯齿箭虫 <i>Sagitta pseudoserratodentata</i>	+		瘦型箭虫 <i>Sagitta tenuis</i>	+	
寻觅箭虫 <i>Sagitta zetesios</i>	+	+	粗壮箭虫 <i>Sagitta robusta</i>		+
弱箭虫 <i>Sagitta delicata</i>	+	+	贝勒福箭虫 <i>Sagitta bedfordii</i>	+	
大头箭虫 <i>Sagitta macrocephala</i>		+	异体住囊虫 <i>Oikopleura dioica</i>	+	
软拟海樽 <i>Doliioletta gegenbauri</i>		+	多毛类疣足幼虫 Nectochaeta larvae (Polychaeta)	+	
腕足类舌贝幼虫 <i>Lingula</i> larvae	+		桡足类无节幼虫 Nauplius larvae (Copepoda)	+	
蔓足类无节幼虫 <i>Nauplius</i> larvae (Cirripdia)	+	+	长尾类幼虫 <i>Macrura</i> larvae	+	+
短尾类溞状幼虫 <i>Zoea</i> larvae (Brachyura)	+	+	磁蟹溞状幼虫 <i>Zoea</i> larvae (Porcellana)	+	
鱼卵 <i>Fish</i> eggs	+	+	仔鱼 <i>Fish</i> larvae	+	
才女虫幼虫 <i>Polydora</i> larvae	+	+	蛇尾长腕幼虫 <i>Ophiopluteus</i> larvae	+	
阿利玛幼虫 <i>Alima</i> larvae	+		真寄居虾后期幼虫 <i>Eupagurus</i> post larvae	+	
肠腮类柱头幼虫 <i>Enteropneustatomaria</i>	+				
“+”表示该季节有出现					

表 2 钦州湾秋季和春季游动物的种类组成

Table 2 Species composition of zooplankton in the Qinzhou Bay in autumn and spring

浮游动物类群 Zooplankton group	种类数 Species amount			
	秋季 Autumn	春季 Spring	总计 Total	占比 Percentage/%
桡足类 Copepoda	31	14	39	35.14
毛颚类 Chaetognatha	18	11	21	18.92
浮游幼虫 Pelagic larvae	14	5	14	12.61
水螅水母类 Hydromedusae	6	6	11	9.91
端足类 Amphipoda	4	3	7	6.31
樱虾类 Sergestes	4	1	4	3.60
枝角类 Cladocera	3	0	3	2.70
糠虾类 Mysidacea	2	0	2	1.80
管水母类 Siphonophora	1	3	3	2.70
栉水母类 Ctenophora	1	1	1	0.90
介形类 Ostracocda	1	2	2	1.80
被囊类 Tunicata	1	1	2	1.80
原生动物 Protozoa	0	1	1	0.90
等足类 Isopod	1	0	1	0.90
合计 Total	87	48	111	100

2.3 钦州湾浮游动物的分布特征

秋季,各调查站位浮游动物的丰度变化范围为 14.00—2320.63 个/m³,均值为 528.92 个/m³,呈现外湾沿岸向中部水域以及内湾逐渐减少的分布趋势(图 3),其中内湾和外湾的丰度均值分别为 59.22、822.49 个/m³,

内湾浮游动物丰度均值远远低于外湾。春季浮游动物丰度的变化范围为 1.00—218.75 个/m³,均值为 48.30 个/m³,外湾中部海域的丰度较高,内湾河口附近丰度偏低,呈现出由外湾向内湾递减的分布趋势,其中内湾和外湾的丰度均值分别为 11.70、65.63 个/m³,春季内湾丰度明显低于外湾。

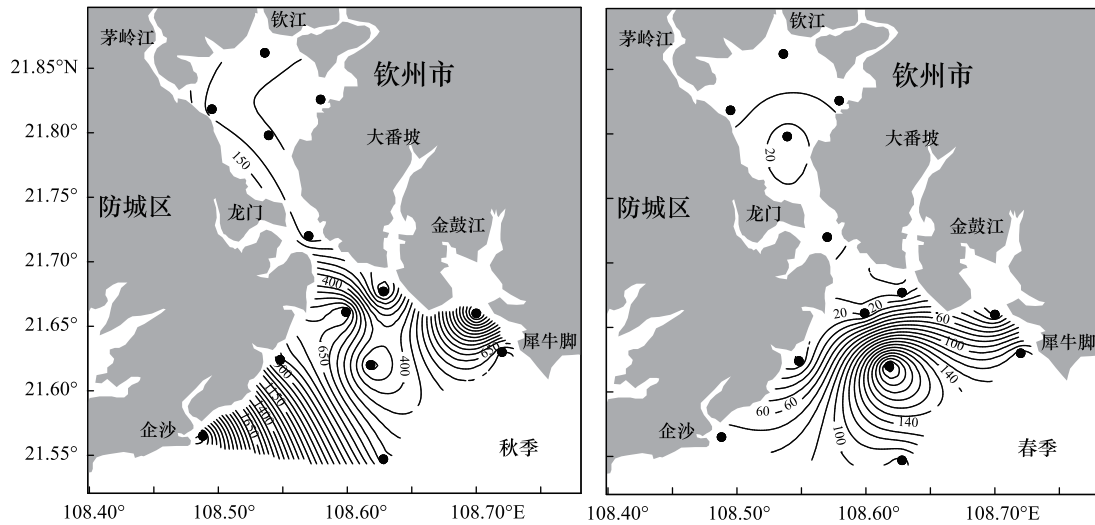


图 3 秋季和春季浮游动物丰度水平分布(个/m³)

Fig.3 Horizontal distribution of abundance of zooplankton in the Qinzhou Bay in autumn and spring

钦州湾浮游动物优势种共有 6 种(表 3),秋季和春季各为 5 种和 2 种,其中太平洋纺锤水蚤为两季共有的优势种。秋季以太平洋纺锤水蚤为第一优势种群,如图 4 所示,除 Q13 外其余站位均有分布,调查海域的平均丰度为 123.03 个/m³,其中外湾东侧金鼓江口 Q9 站位的丰度最高,达 645.00 个/m³;优势度居次的是长尾类幼虫,主要分布在外湾,其中以 Q11 站位的丰度最高。春季中华哲水蚤的优势度最高,但分布范围较小,仅出现在外湾的 Q9、Q10、Q12 和 Q13 站位;优势度居次的是太平洋纺锤水蚤,主要分布在内湾和外湾湾顶附近的站位(图 4)。

表 3 钦州湾秋季和春季浮游动物优势种的优势度及平均丰度

Table 3 Dominance and average abundance of dominant species in the Qinzhou Bay in autumn and spring

时间 Time	优势种 Dominance species	优势度 Y Degree of dominance	平均丰度 Average abundance/ (个/m ³)	占比 Percentage/%
春季 Spring	中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	0.151	23.66	49.02
	太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	0.031	2.42	5.01
秋季 Autumn	太平洋纺锤水蚤 <i>Acartia pacifica</i>	0.215	123.03	23.26
	长尾类幼虫 <i>Macrura larvae</i>	0.181	138.10	26.11
	肥胖三角蚤 <i>Evadne tergestina</i>	0.059	67.64	12.79
	亨生莹虾 <i>Lucifer hansenii</i>	0.058	40.11	7.58
	百陶箭虫 <i>Sagitta bedoti</i>	0.030	25.48	4.82

秋季浮游动物生物量的变化范围为 18.67—476.90 mg/m³,均值为 110.60 mg/m³,生物量较高的区域主要分布在外湾,生物量分布趋势呈现由外湾湾顶水域向四周逐渐降低,内湾和外湾生物量的均值分别为 26.39、163.23 mg/m³,内湾生物量均值远低于外湾(图 5)。春季浮游动物生物量的变化范围为 3.46—187.52 mg/m³,均值为 68.64 mg/m³,平面分布整体呈外湾中部水域向内湾递减,内湾和外湾生物量的均值分别为 28.20、93.92 mg/m³,内湾生物量明显低于外湾(图 5)。

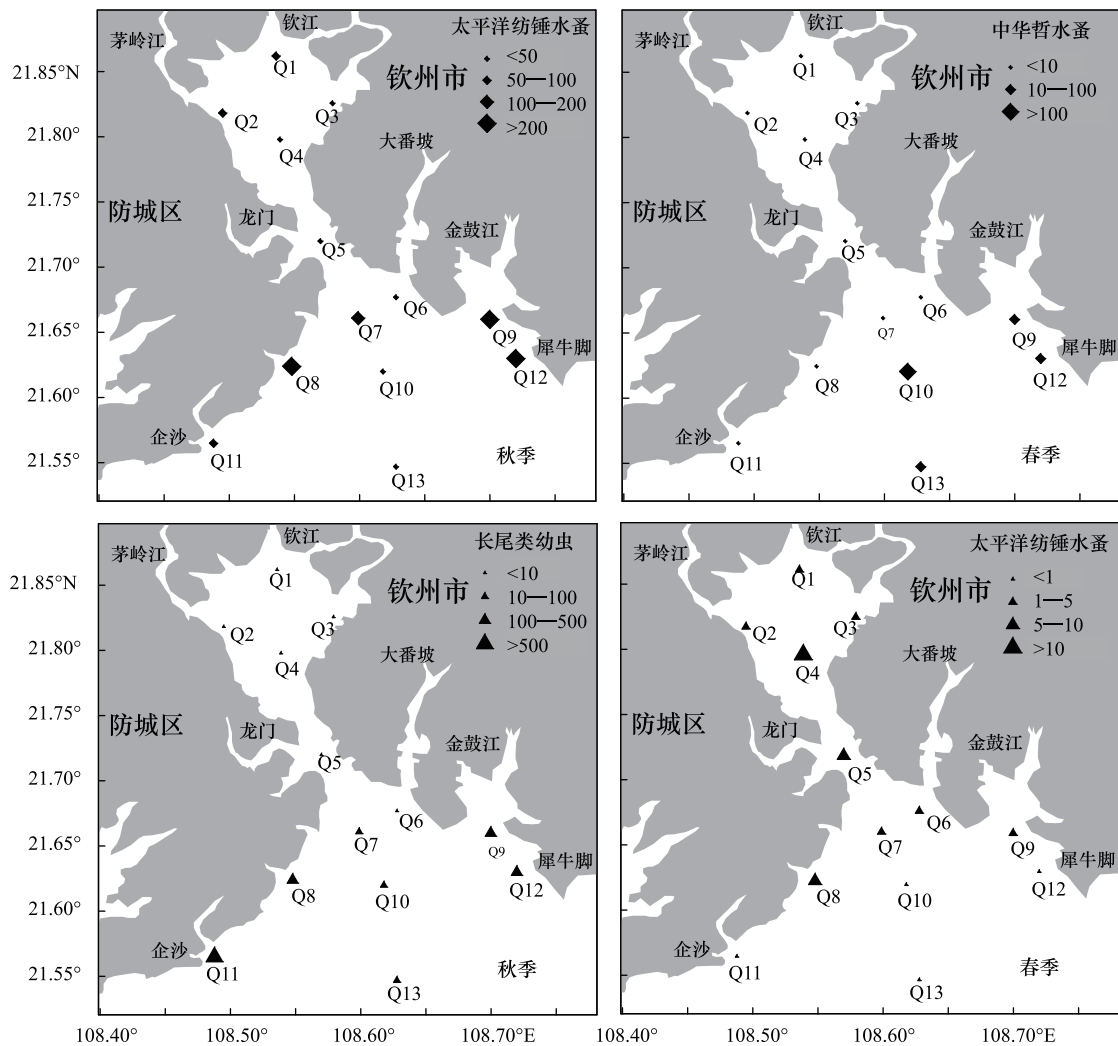


图 4 秋季和春季主要优势种丰度的水平分布(个/m³)

Fig.4 Horizontal distribution of abundance of dominant species in the Qinzhou Bay in autumn and spring

2.4 钦州湾浮游动物多样性指数

秋季,各调查站位浮游动物的多样性指数波动于 0.37—3.61 之间,均值为 2.22。其中内湾各站位多样性指数均值为 1.20,外湾多样性指数均值为 2.86,外湾多样性指数高于内湾。多样性指数较高的站位主要分布于外海海域(图 6)。春季,各测站浮游动物多样性指数变化幅度为 0—3.38,均值为 1.70。内湾各站位的多样性指数较低,均值为 1.10,外湾则相对较高,均值为 2.10。多样性较高的站位主要位于外湾西南部海域(图 6)。

2.5 钦州湾浮游动物的群落结构差异

钦州湾秋季和春季不同站位的浮游动物物种丰度多维尺度分析结果如图 7 所示。秋季,以 40%的群落相似性将 13 个站位的浮游动物群落分为组 I—组 VII 共 7 组(图 8),各区域浮游动物群落结构差异较大。其中组 I 包括了内湾以及湾颈的大部分站位,各站位间的相似度高达 71.23%,均以太平洋纺锤水蚤为主,但种类和丰度相对较低。春季,浮游动物群落分为组 I—组 VIII 共 8 组,其中组 VIII 包括了外湾的 Q10、Q12 和 Q13 共 3 个站位,各站位间的相似度高达 60.98%,均以中华哲水蚤为优势类群,且丰度也较高。总体而言,钦州湾秋季浮游动物群落为内湾区域相似性较高,春季为外湾区域相似性较高。

2.6 钦州湾浮游动物丰度与主要环境因子的相关关系

对可能影响钦州湾浮游动物群落理化因子进行的主成分分析(PCA),除材料与方法中提到的理化因子,

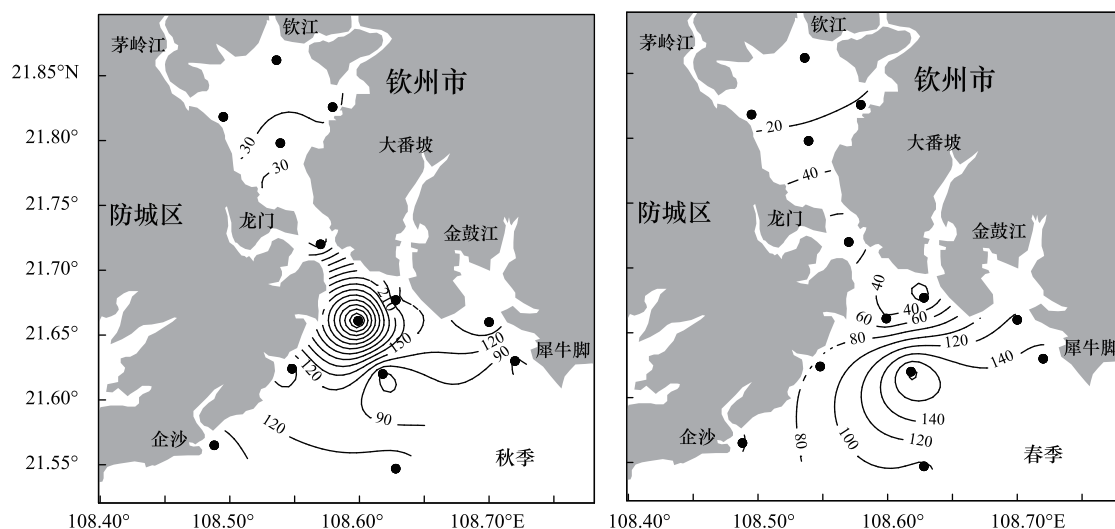
图 5 秋季和春季浮游动物生物量水平分布/(mg/m^3)

Fig.5 Horizontal distribution of biomass of zooplankton in the Qinzhou Bay in autumn and spring

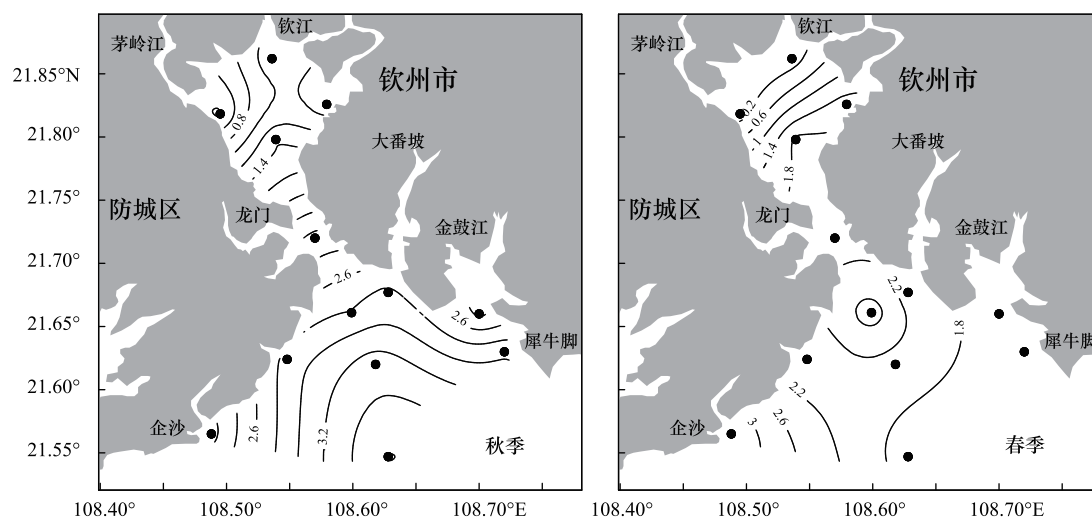


图 6 钦州湾秋季和春季浮游动物多样性的水平分布

Fig.6 Horizontal distribution of diversity index of zooplankton in the Qinzhou Bay in autumn and spring

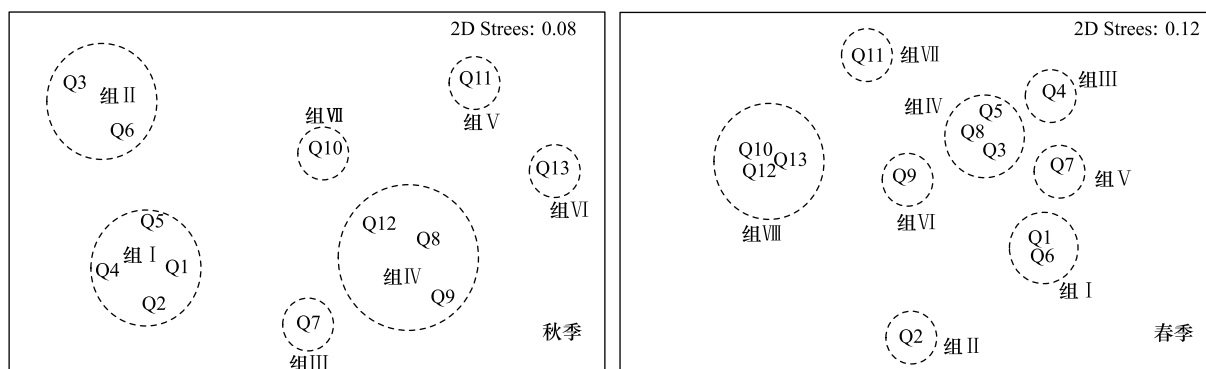


图 7 各站位浮游动物群落结构的多维尺度分析

Fig.7 Multidimensional scaling (MDS) of different zooplankton samples

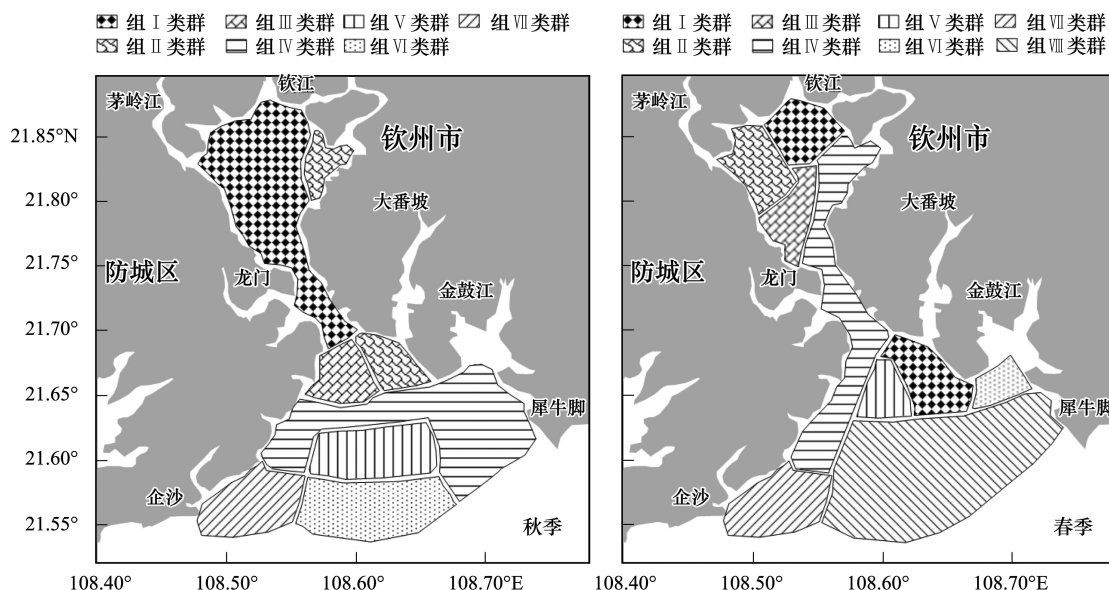


图8 钦州湾秋季和春季浮游动物群落结构类型以及分布示意图

Fig.8 Clusters and distributions of zooplankton community in the Qinzhou bay in autumn and spring

其余用于 PCA 分析的理化因子(透明度、溶解氧、化学需氧量、pH、铜、铅、锌、铬和镍)来源于广西海洋环境监测中心站 2014 年至 2015 年的监测数据。PCA 的结果显示第一主成分涉及的因素有硅酸盐(0.990)、无机氮(0.945)、盐度(0.942)、磷酸盐(0.903)。第二主成分涉及的因素有叶绿素 a(0.903)和水温(0.795)。因此,选取硅酸盐、无机氮、叶绿素 a、水温、盐度和磷酸盐作为主要环境因子。上述主要环境因子与浮游动物丰度相关性分析结果如表 4 所示。秋季钦州湾的浮游动物丰度与盐度显著正相关($P<0.05$),与无机氮、硅酸盐和磷酸盐显著负相关关系($P<0.05$);春季则与水温、盐度和叶绿素 a 显著正相关($P<0.05$),与无机氮和硅酸盐显著负相关($P<0.05$)。

表 4 钦州湾浮游动物丰度与环境因子的相关性

Table 4 The correlations between zooplankton abundance and environmental factors

环境因子 Environmental factors	水温 Temperature	盐度 Salinity	叶绿素 a Chl-a	无机氮 Dissolved inorganic nitrogen	硅酸盐 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
秋季 Autumn	0.468	0.579 *	0.051	-0.645 *	-0.669 *	-0.645 *
春季 Spring	0.584 *	0.573 *	0.598 *	-0.563 *	-0.607 *	-0.43

* ; $P<0.05$, 显著相关

3 讨论

3.1 钦州湾浮游动物优势种季节变化及其影响因素

本次调查发现钦州湾秋季和春季浮游动物的种类组成存在明显的季节变化,从秋季到春季浮游动物种类组成由暖水性向暖温性种类更替,优势种也发生了明显的季节演替。秋季浮游动物优势种的种类数较多,主要有太平洋纺锤水蚤、长尾类幼虫、肥胖三角溞、亨生莹虾和百陶箭虫(表 3);春季浮游动物种类较少,优势种只有中华哲水蚤和太平洋纺锤水蚤。太平洋纺锤水蚤为钦州湾秋季和春季共同的优势种类,该物种为典型的河口沿岸种类^[6]。钦州湾地处钦江、茅岭江等江河的入海口,海水盐度相对偏低,适宜太平洋纺锤水蚤生长。秋季,随着径流量的增加以及水温的上升,太平洋纺锤水蚤大量繁殖成为秋季第一优势种群,从内湾河口区至外湾均有分布。而随着水温降低及盐度增高,春季太平洋纺锤水蚤虽然在本次调查中居第二优势种群,但优

势度很低,而且主要出现在内湾以及外湾湾顶等盐度较低的海域,这表明了太平洋纺锤水蚤的分布与盐度密切相关。秋季地表径流影响范围的扩大可能是导致多维尺度分析中内湾多数站位群落之间无较大差异的主要原因。此外,通过比较 2012 年 3 月与 2015 年 3 月的环境因子,发现 2012 年钦州湾内湾的水温($<15^{\circ}\text{C}$)^[2]明显低于 2015 年的($>17^{\circ}\text{C}$,图 2),这直接导致了 2012 年 3 月的太平洋纺锤水蚤的分布范围较小^[2],同时也表明了水温是决定其分布的另一个重要因子。中华哲水蚤是适应较低温度的近岸暖温种类^[7],温度被认为是影响中华哲水蚤群落分布的重要环境因素^[8-9]。钦州湾地处亚热带,冬春季水温偏低,夏秋季水温较高,因此中华哲水蚤成为本次春季调查的绝对优势种。除了水温之外,盐度也是决定中华哲水蚤分布的重要决定要素,其最适盐度为 30 左右^[10],这导致其只分布在外湾盐度较高的海域。此外春季地表径流量减少,沿岸水势力减弱,外海水势力向湾内推进作用增强,中华哲水蚤随着外海水进入钦州湾,引起春季钦州湾多维尺度分析中外湾浮游动物群落相似性较高。钦州湾浮游动物主要优势种从秋季高温低盐的太平洋纺锤水蚤向春季低温高盐的中华哲水蚤演替,说明了该海域主要受到江河淡水输入和水温季节变化的影响,也反映了钦州湾浮游动物的亚热带河口海湾群落结构特性。

3.2 钦州湾浮游动物分布的主要影响因素

钦州湾受到茅岭江、钦江等大陆径流及北部湾外海水的综合影响,环境变化剧烈。由图 2 可以看出,钦州湾盐度、无机氮、硅酸盐及磷酸盐的变化特征均呈现出明显的河口特性,浮游动物丰度、生物量与上述因子的相关性分析结果也显示浮游动物分布受到了江河淡水输入的影响。秋季钦州湾沿岸水温与外海基本相同,水温较高(28.3°C)且均匀,与浮游动物丰度、生物量分布的关系较小。春季,钦州湾水温平面分布差异较大,呈现从河口向外湾递增的趋势,恰与浮游动物的分布特征相似,相关性分析也表明二者呈显著正相关。盐度是影响中华哲水蚤和太平洋纺锤水蚤生长的重要因素,而两者作为春季和秋季浮游动物的主要优势种,直接影响了浮游动物丰度的分布。浮游植物是浮游动物的重要饵料,浮游动物丰度与叶绿素 a 的正相关关系可能与浮游动物的选择性摄食有关^[11]。大多数以浮游植物为食的浮游动物与叶绿素 a 含量具有正相关,而以其他浮游动物为食的次级消费者(毛颚类、水母类等浮游动物)与叶绿素 a 的相关性不明显^[12]。春季外湾叶绿素 a 浓度较高的区域恰好也是中华哲水蚤的分布区,这与中华哲水蚤营植食性的特性一致^[13]。从无机氮、硅酸盐及磷酸盐的变化中可以看出,高浓度的营养盐与低盐度有较好的吻合关系,表明径流输入对海湾营养盐变化起着主导作用。一般来说,营养盐丰富的水域有利于浮游生物的生长,但钦州湾内湾浮游动物丰度较低,这可能跟营养盐结构比例失调有关:钦州湾长期处于磷限制状态^[14],即使在营养盐充沛的条件下浮游植物也无法大量生长繁殖,从而不能给更多的浮游动物生长提供食物来源,这可能是导致内湾浮游动物的丰度较低的原因。综上所述,江河淡水输入(盐度和营养盐)是决定钦州湾浮游动物平面分布的最主要因素。

3.3 钦州湾浮游动物群落结构及生物量的年际变化特征

2011—2012 年钦州湾调查结果显示(表 5),夏季和春季的第一优势种与本次调查秋季和春季的第一优势种一致,但优势种的丰度存在较大差异。2015 年春季第一优势种的丰度显著低于 2012 年春季,而 2014 年秋季第一优势种则明显高于 2011 年夏季。此外,2011 年夏季和 2012 年春季的第二优势种均为个体大小为 5—12 mm 的球形侧腕水母(*Pleurobrachia globosa*),而本次调查秋季和春季的第二优势种分别是个体大小仅 1.0—1.5 mm 的长尾类幼虫和太平洋纺锤水蚤,可见决定浮游动物生物量大小的优势种个体已趋向小型化,造成尽管此次调查浮游动物的丰度有所上升,但生物量明显下降。而这一现象在内湾尤为突出,秋季和春季内湾均以太平洋纺锤水蚤为唯一优势种,优势种群趋于单一化,因此这些因素直接引起了内湾和外湾浮游动物丰度和生物量的较大差异。

2011—2015 年 5 年间,钦州湾浮游动物群落结构发生了一定的变化,浮游动物种类趋于小型化、单一化,导致生物量呈下降的趋势。经初步分析,其原因可能有以下几个方面:

(1) 钦州湾湾颈及内湾海域高密度的牡蛎养殖相当于浮游植物过滤器:涨潮时外湾较高浮游植物生物量的水体在输送到内湾的过程中浮游植物被牡蛎大量摄食,导致了内湾浮游植物优势类群以蓝藻和青绿藻等超

微型类群为主,外湾则以硅藻等小型和微型浮游植物为优势类群^[2]。内湾粒级较小的浮游植物只能维持小型浮游动物的生长需求,而个体较大的浮游动物则更偏向外湾摄食粒级较大的硅藻食物,这可能是造成内湾浮游动物的丰度和生物量偏低的主要原因。近年来钦州湾牡蛎养殖区域从内湾扩大至外湾,养殖面积不断增加,至 2015 年养殖面积约为 100 hm²^[15],几乎与内湾茅尾海面积相当。高密度牡蛎养殖规模的扩大对钦州湾浮游动物群落结构分布造成了一定的影响。

(2) 钦州湾高密度大面积养殖的牡蛎不仅通过滤食浮游植物与浮游动物形成食物竞争关系,还会滤食相当一部分浮游动物的幼体、桡足类成体甚至是鱼卵和仔、稚鱼^[16-17],导致浮游动物的数量下降,从而对浮游动物群落结构产生一定的影响。尽管钦州湾牡蛎滤食浮游动物的种类和数量尚未有相关报道,但在本次调查中发现浮游动物幼体主要集中在外湾这一现象可以进一步反映牡蛎养殖给浮游动物带来的影响。值得注意的是,太平洋纺锤水蚤主要分布区域恰好也是牡蛎养殖区,这是否与牡蛎有选择性的滤食有关抑或是太平洋纺锤水蚤可以避开牡蛎的滤食作用,将有待进一步研究。

(3) 2015 年春季(3 月)内湾水温与 2012 年同期相比高了 2℃ 以上,钦州湾海域水温升高可能与全球气候变暖现象有关。气候变暖导致的水温升高会对浮游动物群落结构造成一定的影响。在全球气候变暖这一环境背景下,随着钦州湾燃煤电厂以及核电站的建设和运行,温排水的排放无疑会加剧水温升高给浮游动物带来的影响。有研究表明温排水会降低排水口附近海域浮游动物的种类、丰度及多样性^[18],并且温排水对大型浮游动物种类的分布有较大影响,而对中小型浮游动物种类分布几乎没有影响^[19]。尽管目前钦州湾还没有相关的研究报道,但温排水对钦州湾海洋生态的影响仍需引起关注。

(4) 钦州湾湾颈狭窄,加上多年来大规模围填海建设以及内湾和湾颈密集的牡蛎养殖严重降低了水体交换率,营养物质不易扩散,导致内湾常年处于富营养化状态^[20]。近几年的数据显示内湾富营养化程度日渐加剧^[14]。营养盐的持续输入改变水体中营养盐的组成和比率。许多研究表明,水体富营养化的加剧和营养盐结构的变化已使得近岸海域浮游植物群落构成趋于小型化^[21-22],并通过食物链的传递效应,进一步引起主要摄食者浮游动物的小型化^[23],这与本次研究结果一致。水体富营养化很可能是促进钦州湾浮游动物群落结构单一化和小型化的原因之一。

表 5 不同时期钦州湾浮游动物群落结构比较

Table 5 Comparison of community structure of zooplankton in Qinzhou Bay in different period

调查时间 Investigated time	平均丰度 Average abundance/ (个/m ³)	平均生物量 Average biomass/ (mg/m ³)	夏/秋季主要优势种和平均丰度 Dominant species in summer/ autumn and average abundance	春季主要优势种和平均丰度 Dominant species in spring and average biomass	文献来源 Literature source
2011—2012	161.55	259.45	太平洋纺锤水蚤(12.80 个/m ³)、球形侧腕水母	中华哲水蚤(76.00 个/m ³)、球形侧腕水母	[2]
2014—2015	288.61	89.62	太平洋纺锤水蚤(123.03 个/m ³)、长尾类幼虫	中华哲水蚤(23.66 个/m ³)、太平洋纺锤水蚤	本次调查

4 结语

钦州湾日益频繁的开发活动导致浮游动物群落结构发生了一定的变化。其中内湾受到的影响较大,其浮游动物群落组成较为简单,种类趋于小型化,群落结构较为脆弱,如不加以遏止,最终会给整个钦州湾海洋生态系统的稳定和健康带来威胁。今后需对钦州湾的海洋资源进行合理开发以及加强对水质的监控和环境管理,才能保持该海域生态环境可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 蓝文陆, 杨绍美, 苏伟. 环钦州湾河流入海污染物通量及其对海水生态环境的影响. 广西科学, 2012, 19(3): 257-262.
- [2] 蓝文陆, 李天深, 刘勐伶, 庞碧剑, 刘听明. 钦州湾丰水期和枯水期浮游动物群落特征. 海洋学报, 2015, 37(4): 124-132.

- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB17378.7—2007. 海洋监测规范第 7 部分:近海污染生态调查和生物监测. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [4] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鲶渔场的关系. 生态学杂志, 1989, 8(4): 13-15, 19-19.
- [5] 徐兆礼, 王云龙, 陈亚瞿, 沈焕庭. 长江口最大浑浊带区浮游动物的生态研究. 中国水产科学, 1995, 2(1): 39-48.
- [6] 高亚辉, 林波. 几种因素对太平洋纺锤水蚤摄食率的影响. 厦门大学学报: 自然科学版, 1999, 38(5): 751-757.
- [7] 陈清潮. 中华哲水蚤的繁殖、性比率和个体大小的研究. 海洋与湖沼, 1964, 6(3): 272-288.
- [8] 曹文清, 林元烧, 杨青, 李少菁. 我国中华哲水蚤生物学研究进展. 厦门大学学报: 自然科学版, 2006, 45(S2): 54-61.
- [9] Wang R, Zuo T, Wang K. The Yellow Sea Cold Bottom Water — an overwintering site for *Calanussinicus* (Copepoda, Crustacea). Journal of Plankton Research, 2003, 25(2): 169-183.
- [10] 黄加祺, 郑重. 温度和盐度对厦门港几种桡足类存活率的影响. 海洋与湖沼, 1986, 17(2): 161-167.
- [11] 杜萍, 徐晓群, 刘晶晶, 江志兵, 陈全震, 曾江宁. 象山港春、夏季大中型浮游动物空间异质性. 生态学报, 2015, 35(7): 2308-2321.
- [12] 骆鑫, 曾江宁, 徐晓群, 杜萍, 廖一波, 刘晶晶. 舟山海域夏、秋季浮游动物的分布特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 2016, 36(24): 8194-8204.
- [13] 杨纪明. 渤海中华哲水蚤摄食的初步研究. 海洋与湖沼, 1997, 28(4): 376-382.
- [14] 蓝文陆. 钦州湾枯水期富营养化评价及其近 5 年变化趋势. 中国环境监测, 2012, 28(5): 40-44.
- [15] 钦州市人民政府. 钦州年鉴 2016. 南宁: 广西人民出版社, 2016.
- [16] Gibbs M T. Interactions between bivalve shellfish farms and fishery resources. Aquaculture, 2004, 240(1/4): 267-296.
- [17] Davenport J, Smith RJJ W, Packer M. Mussels *Mytilus edulis*: significant consumers and destroyers of mesozooplankton. Marine Ecology Progress Series, 2000, 198: 131-137.
- [18] 傅强, 朱礼鑫, 沈鑫绿, 李道季. 滨海电厂温排水对临近海域浮游动物生态特征的影响研究. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(7): 25-33.
- [19] 徐晓群, 曾江宁, 曾淦宁, 陈全震, 廖一波, 高爱根, 寿鹿. 滨海电厂温排水对浮游动物分布的影响. 生态学杂志, 2008, 27(6): 933-939.
- [20] 闭文妮, 唐艳葵, 洪鸣, 顾湛琦. 钦州湾无机氮入海通量及其富营养化症状分析. 环境科学与技术, 2014, 37(1): 174-178.
- [21] Pan Y L, Rao D V S. Impacts of domestic sewage effluent on Phytoplankton from Bedford Basin, eastern Canada. Marine Pollution Bulletin, 1997, 34(12): 1001-1005.
- [22] Dippner J W. Competition between different groups of phytoplankton for nutrients in the Southern North Sea. Journal of Marine Systems, 1998, 14(1/2): 181-198.
- [23] 张才学, 龚玉艳, 王学锋, 孙省利. 湛江港湾浮游桡足类群落结构的季节变化和影响因素. 生态学报, 2011, 31(23): 7086-7096.