

流沙湾水产养殖区浮游动物群落特征*

郭永坚 李俊伟 罗昭林 颀晓勇 陈素文 朱长波^① 郭奕惠

(中国水产科学研究院南海水产研究所 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室 广州 510300)

摘要 于2012年5月–2013年1月对流沙湾海区浮游动物进行了周年性的季度调查,共检出浮游动物41种、幼体17类,以桡足类居多(29种)。亚强次真哲水蚤(*Subeucalanus subcrassus*)、短尾类幼虫(*Brachyuran larva*)、长尾幼体(*Macruran larva*)在四季均有出现,并在3个季度中成为优势种。年均浮游动物丰度和生物量分别为48.12 ind./m³、13.43 mg/m³。扇贝主养区、鱼类网箱养殖区和珍珠贝养殖区的各季浮游动物丰度及生物量均低于对照区(非养殖区);大中型浮游动物主要出现在对照区,而在鱼、贝养殖区极少出现。冬季扇贝主养区多样性指数为各区最高,其浮游动物丰度、生物量迅速回升,高于鱼类网箱养殖区和珍珠贝养殖区,但仍低于对照区。研究结果显示,鱼、贝养殖区域流沙湾海区的浮游动物丰度及生物量比往年明显减小,浮游动物的小型化加剧。

关键词 流沙湾;浮游动物;扇贝;网箱;主成分分析

中图分类号 Q178.53 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2015)05-0008-11

流沙湾地处广东省雷州半岛西南部(22°21′–22°31′N, 109°47′–110°1′E),海湾面积约69 km²,为北西向葫芦型半封闭海湾,腰部南北向的沙嘴将港湾分为内港与外港。内港为泄湖,港口宽750 m,树枝状港汊呈长尖形峡湾,中央为深10–20 m、长8 km的溺谷状深槽,底质多为砾石和砂;外港水域广阔,水深达5–20 m,底质多为淤泥(谢恩义等,2009)。流沙湾拥有大面积的海草床、珊瑚礁和红树林(杨国欢等,2013),是我国海水珍珠贝苗和海水珍珠的重要生产基地,也是我国“南珠”的主产区之一(梁飞龙等,2007)。然而,随着珍珠贝养殖业的持续衰退,流沙湾海域水产养殖结构已发生明显变化:2008年前主要以马氏珠母贝(*Pinctada martensi*)为主(申玉春等,2010),其桩式延绳吊养面积高达1250 hm²;2012年调查显示,马氏珠母贝养殖面积剧降至272 hm²,墨西哥湾扇贝(*Argopecten irradians concentricus*)养殖面积则达到1132 hm²,网箱养殖面积为67.5 hm²(网箱数量超过4×10⁴个,且密布于湾口航道处)。

浮游动物通常具有生活史短、代谢活动强、分布

广泛等特点,对海洋环境的扰动非常敏感,是海洋生态系统长期变化的重要指示(Hays *et al.*, 2005; Beaugrand, 2009)。研究表明,水产养殖活动会对浮游动物群落产生重要影响(杜萍等,2011; Rey *et al.*, 2011; Dias *et al.*, 2012)。对流沙湾开展的环境调查时间主要集中于2005–2009年,且主要侧重于营养盐(王大鹏等,2011;王增焕等,2011;谢群等,2011)、浮游植物(程小倪等,2011;张才学等,2012;王大鹏等,2010)等,对浮游动物群落特征的研究则仅见于王彦等(2013)和张才学等(2013)的报道。在流沙湾养殖格局发生剧烈变化的背景下,对浮游动物群落结构展开研究,将有助于揭示流沙湾鱼贝养殖区浮游动物群落的生态学基本规律,并为该区域的水产养殖规划提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 采样站点的设定

分别于2012年5月(春季)、8月(夏季)、11月(秋

* 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-48)和广东省海洋渔业科技推广专项(A201101A06; Z201502)共同资助。
郭永坚, E-mail: gyjdxh@scsfri.ac.cn

^① 通讯作者:朱长波,副研究员, E-mail: changbo@ecowin.org

收稿日期:2014-10-27,收修改稿日期:2014-11-26

季)及 2013 年 1 月(冬季)对流沙湾内港、外港进行季度性采样调查, 图 1 中数字 1-10 代表采样站位。

其中, 外港采样点为 1-7 号站位, 包括邻近扇贝吊养区(墨西哥湾扇贝)的 2、3、6、7 号站位, 作为对照区的 4、5 号站位, 以及外港最邻近港口的 1 号站位。8-10 号站位属于内港采样区: 8 号站位为港口航道内狭长的网箱(鱼排)养殖区, 10 号站位位于内港深处的珍珠贝插桩养殖区, 9 号站介于 8、10 之间。其中, 网箱(鱼排)主要养殖品种有卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)、红鳍笛鲷(*Lutjanus erythropterus*)、紫红笛鲷(*Lutjanus argentimaculatus*)、石斑鱼(*Epinephelus* sp.)等。

1.2 浮游动物的采集与分析

浮游动物样品的采集与定量均按照《海洋调查规范 GB17763.7-2007》(中华人民共和国国家标准, 2007a)。定性样品采用浅水Ⅲ型浮游生物网自海底向海面垂直拖曳, 定量样品则用有机玻璃采水器收集表层及底层的水样(各 1L)进行混合, 现场经 5%浓度的福尔马林固定后, 于倒置显微镜下进行定量及定性分析。

物种多样性指数(H')采用 Shannon-Wiener 计算公式(Shannon *et al.*, 1963): $H' = -\sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$; 均匀度指数(J')采用 Pielou(1966)计算公式: $J' = H'/\log_2 S$; 优势度(Y)计算公式(孙军等, 2004): 为 $Y = (n_i/N) \cdot f_i$ 。

式中, s 为物种数, p_i 为第 i 物种在全部采样中的比例, n_i 为第 i 种的个体数, N 为所有种的个体总数, S 为样品种类总数, f_i 为第 i 种在各站点的出现频率。 $Y > 0.02$ 视为优势种。 N 为样品中所有总个体数。

1.3 环境因子的采集与分析

海水中溶氧(DO)、水温(T)、盐度(S)和 pH 采用美国 YSI-556 型多参数水质测量仪现场监测; 透明度(SD)采用 Secchi 盘测定。

营养盐水样经 -20°C 暂存后, 迅速带回实验室进行分析。其中, $\text{NO}_2\text{-N}$ 采用萘乙二胺分光光度法, $\text{NH}_4\text{-N}$ 采用次溴酸盐氧化法, $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用铈-镉还原法, 活性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)采用磷钼蓝分光光度法测定, TP 和 TN 采用过硫酸钾氧化法测定。以上方法均按照《海洋调查规范 GB17763.4-2007》(中华人民共和国国家标准, 2007b)指定方法进行。叶绿素 a (Chlorophyll- a , 简称为 Chl- a)和颗粒有机物(POM)样品分别采用丙酮萃取法(方志山等, 2007)和灼烧称重法(李振国等, 2006)测定。

1.4 数据处理和分析

图表采用 Origin 8.5 绘制。环境因子与浮游动物群落结构多样性的关系采用 CANOCO 4.5 软件进行分析。各季所有站点的环境因子数据及浮游动物丰度值除 pH 外均进行 $\lg(x+1)$ 转换。用于分析的浮游动物种类满足在各位点出现的频度 > 3 , 且在至少一个站点的相对丰度 $> 1\%$ (吕晋等, 2008)。满足上述筛选条件的物种按照拼音顺序编号, 并进行除趋势对应分析(DCA), 在此基础上, 对群落进行主成分分析(PCA)并绘制物种-样方双序图。采用 SPSS 20.0 对全年的浮游动物丰度、生物量及所有环境因子进行相关性分析, 依照 Pearson 相关系数两两比较, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著性水平。

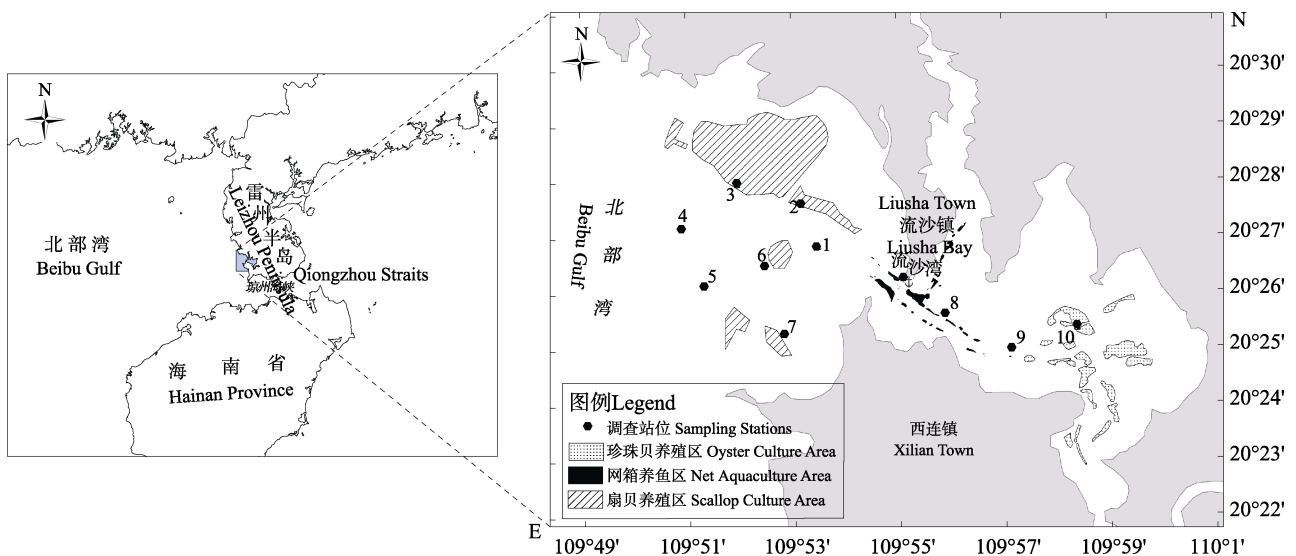


图 1 流沙湾采样站位

Fig.1 Sampling stations in Liusha Bay

2 结果

2.1 浮游动物的种类组成及丰度变化

调查结果显示, 2012–2013年流沙湾浮游动物共计7类41种, 各种幼体(包括鱼卵和仔鱼)17类。浮游动物以桡足类最多(29种), 尤以哲水蚤科为主, 其种类超过10属。十足类、毛颚类、枝角类分别为4、3、2种, 介形类、端足类、水母类各1种(表1)。

浮游动物丰度整体水平较低, 且具有明显的季节特征, 春夏两季平均水平相对较高(除对照区外, 丰度 $< 80 \text{ ind/m}^3$), 秋冬两季较低(丰度 $< 60 \text{ ind/m}^3$)。整体而言, 外港浮游动物丰度高于内港。对照区(4、5号站位)的浮游动物丰度普遍高于其他采样区域, 尤其在春夏两季; 春夏两季, 扇贝主养区(3号站位)的浮游动物丰度低于对照区和其他养殖区(图2)。

浮游动物生物量呈现明显的季节分化, 冬春两季相对较高(分别为 $8.58\text{--}31 \text{ mg/m}^3$, $12.58\text{--}68.02 \text{ mg/m}^3$),

表1 流沙湾浮游动物名录
Tab.1 Species list of zooplankton in the Liusha Bay

种类 Species	种类 Species
桡足类 Copepoda	端足类 Amphipoda
红眼纺锤水蚤 <i>Acartia erythraea</i>	螺赢蜚 <i>Corophium</i> sp.
刺尾纺锤水蚤 <i>Acartia spinicauda</i>	十足类 Decapoda
针刺拟哲水蚤 <i>Paracalanus aculeatus</i>	糠虾 <i>Mysidacea</i> sp.
强额拟哲水蚤 <i>Paracalanus crassirostris</i>	毛虾 <i>Acetes</i> sp.
小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i>	汉森莹虾 <i>Lucifer hanseni</i>
海洋伪镖水蚤 <i>Pseudodiaptomus marinus</i>	宽额假磷虾 <i>Pseudeuphausia latifrons</i>
伪镖水蚤 <i>Pseudodiaptomus</i> sp.	枝角类 Cladocera
驼背隆哲水蚤 <i>Acrocalanus gibber</i>	肥胖三角溞 <i>Pseudevadne tergestina</i>
微驼隆哲水蚤 <i>Acrocalanus gracilis</i>	鸟喙尖头溞 <i>Penilia avirostris</i>
长角隆哲水蚤 <i>Acrocalanus longicornis</i>	幼体 Larvae
中华哲水蚤 <i>Calanus sinicus</i>	鱼卵 Fish eggs
孔雀丽哲水蚤 <i>Calocalanus pavo</i>	仔鱼 Fish larva
微刺哲水蚤 <i>Canthocalanus pauper</i>	桡足类幼体 Copepod larva
瘦尾胸刺水蚤 <i>Centropages tenuiremis</i>	莹虾幼体 Lucifer larva
弓角基齿哲水蚤 <i>Clausocalanus arcuicornis</i>	长尾幼体 Macruran larva
精致真刺水蚤 <i>Euchaeta concinna</i>	长尾类无节幼虫 Nauplius larva (Macruran)
真刺水蚤 <i>Euchaeta</i> sp.	无节幼虫 Nauplius larva
真刺唇角水蚤 <i>Labidocera euchaeta</i>	蛇尾幼体 Ophiopluteus larva
瘦新哲水蚤 <i>Neocalanus gracilis</i>	棘皮动物幼体 Ectinodermata larva
细长腹剑水蚤 <i>Oithona attenuatus</i>	多毛类幼体 Polychaeta larva
筒长腹剑水蚤 <i>Oithona simplex</i>	磁蟹幼体 Porcellana larva
筒角水蚤 <i>Pontellopsis</i> sp.	小乌贼 Small cuttle fish
长刺小厚壳水蚤 <i>Scolecithricella longispinosa</i>	口足类幼体 Stomatophora larva
亚强次真哲水蚤 <i>Subeucalanus subcrassus</i>	长尾类溞状幼虫 Zoea larva (Macruran)
锥形宽水蚤 <i>Temora turbinata</i>	端足类幼体 Amphipoda Larva
钳形歪水蚤 <i>Totanus (Totanus) forcipatus</i>	异尾幼虫 Anomuran larva
驼背大眼剑水蚤 <i>Corycaeus gibbus</i>	藤壶幼体 Balanus larva
近缘大眼水蚤 <i>Corycaeus affinis Mcmurrichi</i>	短尾类幼虫 Brachyuran larva
强额孔雀水蚤 <i>Pavocalanus crassirostris</i>	腔肠动物辐射幼虫 Coelenterate actinula
水母类 Medusae	毛颚动物 Chaetognatha
球形侧腕水母 <i>Pleurobrachia globosa</i>	肥胖软箭虫 <i>Flaccisagitta enflata</i>
介形类 Ostracoda	百陶带箭虫 <i>Zonosagitta bedoti</i>
针刺真浮蜉 <i>Euconchoecia aculeata</i>	箭虫 <i>Zonosagitta</i> sp.

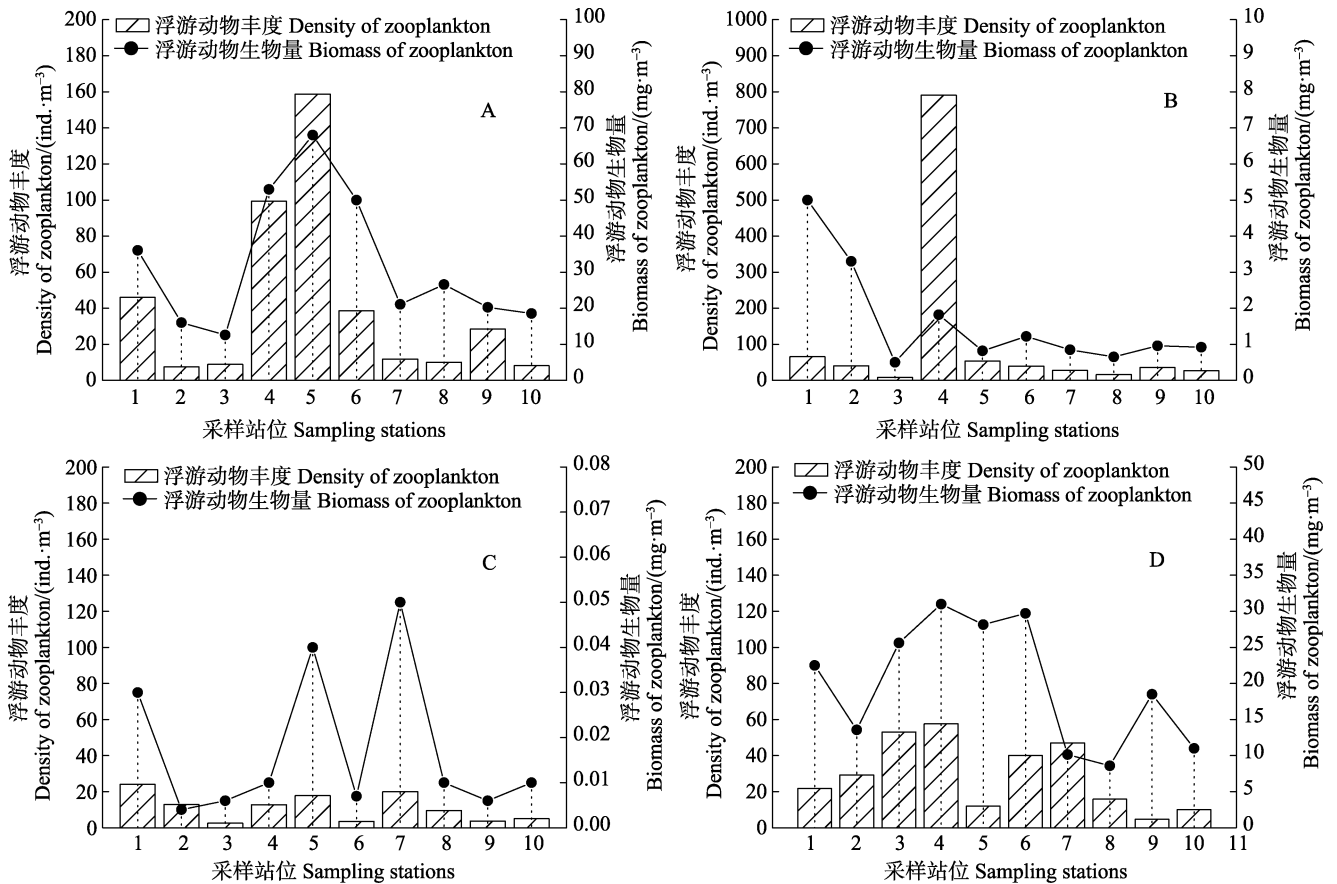


图 2 流沙湾各采样站位浮游动物丰度及生物量: 春(A), 夏(B), 秋(C), 冬(D)

Fig.2 The density and biomass of zooplankton at different sampling stations in the Liusha Bay: spring (A); summer (B); autumn (C); winter (D)

夏、秋两季则非常低(夏季 $0.5\text{--}5\text{ mg/m}^3$, 秋季 $0.00\text{--}40.05\text{ mg/m}^3$)。与丰度特征相似, 外港浮游动物生物量也普遍高于内港。春、秋两季对照区的浮游动物生物量高于其他站位。

2.2 优势种的季节变化

各季优势种变化差异明显, 且以桡足类种类最多(12种)。亚强次真哲水蚤(*Subeucalanus subcrassus*)、短尾类幼虫(*Brachyuran larva*)、长尾幼体(*Macruran larva*)在各个季节均有出现(表 2)。

2.3 浮游动物的多样性指数与均匀度的时空变化

春、夏两季位于内港的珍珠贝养殖区的多样性指数普遍高于外港平均水平; 而与夏季相比, 秋季多样性指数有所下降, 且表现为从外港向内港方向递减的趋势, 珍珠贝养殖区多样性指数仅为 0.72; 冬季除珍珠贝养殖区(1.85)外的各区多样性指数均值恢复至 2.5–3.0, 且数值较为接近(图 3)。

春、夏两季对照区(4、5号站)的浮游动物均匀度指数均值低于其他养殖区, 其中春季表现为外港向内

港方向递增; 进入秋季, 内港各区的均匀度指数低于外港; 冬季内港珍珠贝养殖区的均匀度指数有一定程度的升高(图 3)。

2.4 浮游动物丰度与采样站位、环境因子的相关性分析

采用 SPSS 软件对全年的浮游动物丰度、生物量及所有环境因子进行相关性分析, 依照 Pearson 相关系数两两比较(表 3)。浮游动物丰度与亚硝酸盐呈显著正相关($P < 0.05$), 与其他环境因子相关性不显著。与之相比, 浮游动物生物量与环境因子的相关性较好; 与亚硝酸盐呈显著正相关($P < 0.05$), 与总氮、氨氮、氮磷比、盐度呈极显著正相关($P < 0.01$); 与硝酸盐、叶绿素 *a*、颗粒有机物呈极显著负相关($P < 0.01$), 且与 pH 呈显著负相关($P < 0.05$)。

共计 28 种浮游动物满足 DCA 分析的筛选条件, 可进入梯度分析, 对物种按照拼音顺序编号(表 4)。

先对物种数据进行 DCA 分析, 结果显示, 春夏秋冬四季的前四排序轴以第一排序轴为最长, 其第一排序轴长分别为 1.988、2.025、2.463、2.545, 解释的

表 2 流沙湾浮游动物优势种优势度的季节变化
Tab.2 Seasonal variations in dominance of dominant species of zooplankton in Liusha Bay

种类 Species	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
红眼纺锤水蚤 <i>A. erythraea</i>			+	*
刺尾纺锤水蚤 <i>A. spinicauda</i>	*	+		*
驼背隆哲水蚤 <i>A. gibber</i>				++
微驼隆哲水蚤 <i>A. gracilis</i>	*		*	+
长角隆哲水蚤 <i>A. longicornis</i>		*	+	
筒长腹剑水蚤 <i>Oithona simplex</i>		+		
针刺拟哲水蚤 <i>Paracalanus aculeatus</i>		*		++
小拟哲水蚤 <i>Paracalanus parvus</i>			+	
强额孔雀水蚤 <i>P. cressirotris</i>		+	*	
亚强次真哲水蚤 <i>S. subcrassus</i>	+	*	+	+
钳形歪水蚤 <i>T. forcipatus</i>	*	+	*	
瘦尾胸刺水蚤 <i>C. tenuiremis</i>				+
螺赢蜚 <i>Corophium sp.</i>	++	*	+	
针刺真浮萤 <i>Euconchoecia aculeata</i>				++
肥胖软箭虫 <i>Flaccisagitta enflata</i>	*	+		
鱼卵 Fish eggs	+	*		++
仔鱼 Fish larva	++	*		
长尾幼体 Macruran larva	+	+	++	*
短尾类幼虫 Brachyuran larva	+	+	*	*

“*” 为 $Y < 0.02$, “+” 为 $0.02 \leq Y < 0.1$, “++” 为 $Y \geq 0.1$

“*” means $Y < 0.02$, “+” means $0.02 \leq Y < 0.1$, “++” means $Y \geq 0.1$

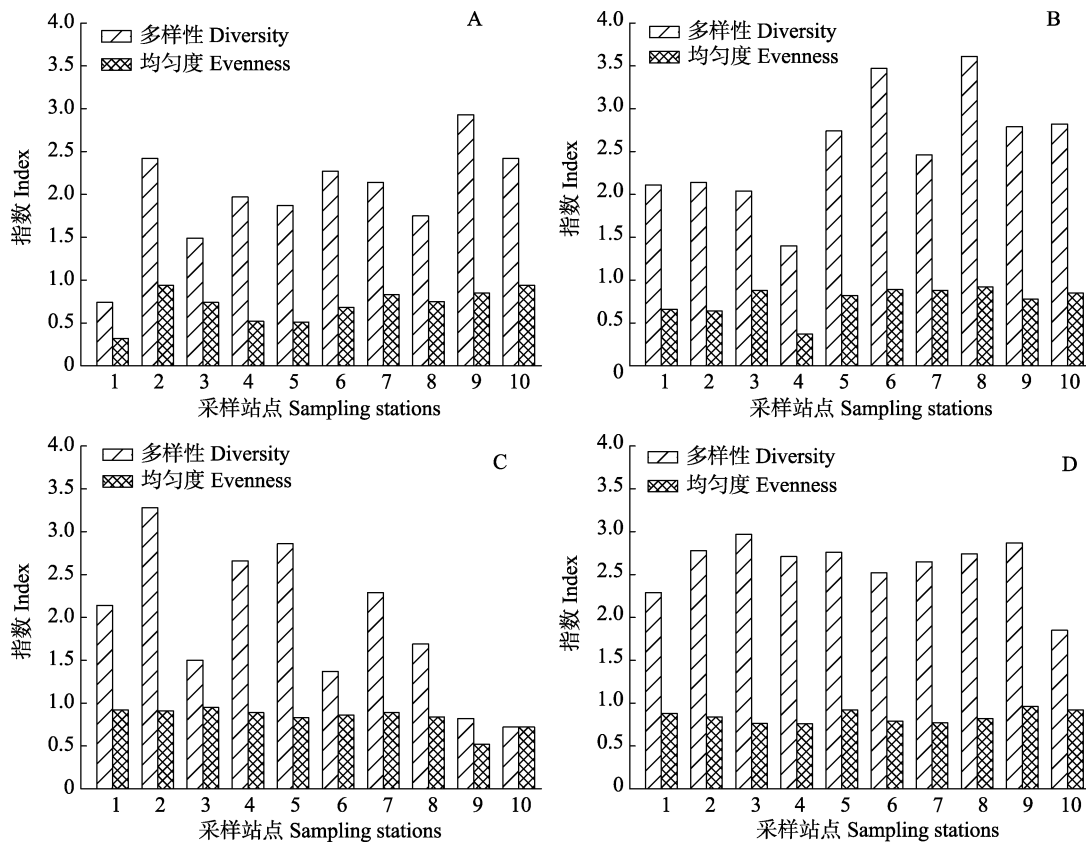


图 3 不同采样站位浮游动物多样性与均匀度指数: 春(A), 夏(B), 秋(C), 冬(D)
Fig.3 The diversity and evenness index of zooplankton at different sampling stations in Liusha Bay: spring (A); summer (B); autumn (C); winter (D)

表 3 浮游动物丰度、生物量与环境因子的相关性(N=10)

Tab.3 Correlation of zooplankton density, zooplankton biomass and environmental factors (N=10)

	NH ₄	NO ₂	NO ₃	TN	Chl- <i>a</i>	POM	S	pH	T	DO	SD	DIP	TP	N/P
丰度 Density	-0.064	0.398*	0.196	-0.097	-0.036	-0.238	0.079	-0.043	0.166	-0.023	0.134	0.114	0.007	-0.014
生物量 Biomass	0.442**	0.384*	-0.438**	0.479**	-0.410**	-0.464**	0.496**	-0.319*	-0.204	-0.073	0.187	-0.164	-0.241	0.464**

*表示在 0.05 水平上显著相关, **表示在 0.01 水平上显著相关

*Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed); **Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

表 4 参与 DCA 分析的流沙湾浮游动物名录

Tab.4 Catalogue of zooplankton species in the Liusha Bay analyzed by DCA

编码 Codes	种类 Species	编码 Codes	种类 Species
Cop01	<i>A. erythraea</i>	Lar01	<i>Brachyuran larva</i>
Cop02	<i>A. spinicauda</i>	Lar02	<i>Copepod larva</i>
Cop03	<i>A. gibber</i>	Lar03	Fish egg
Cop04	<i>A. longicornis</i>	Lar04	Fish larva
Cop05	<i>C. sinicus</i>	Lar05	Zoea larva (Macruran)
Cop06	<i>C. tenuiremis</i>	Lar06	Lucifer larva
Cop07	<i>E. concinna</i>	Lar07	Macruran larva
Cop08	<i>L. euchaeta</i>	Lar08	Porcellana larva
Cop09	<i>O. simplex</i>	Lar09	Ophiopluteus larva
Cop10	<i>P. aculeatus</i>	Lar10	Stomatophora larva
Cop11	<i>S. subcrassus</i>	Ost01	<i>E. aculeata</i>
Cop12	<i>T. forcipatus</i>	Cha01	<i>F. enflata</i>
Cop13	<i>P. parvus</i>	Cha02	<i>Z. sp.</i>
Cop14	<i>A. gracilis</i>	Amp01	<i>C. sp.</i>

物种变化率分别为 35.8%、43.6%、38.5%、47.5%。第一排序轴均<3, 适合线性模型(Estrada *et al.*, 2012)。

在 DCA 分析的基础上, 对群落进行 PCA 分析并绘制物种-样方双序图(图 4)。排序结果显示, 浮游动物群落具有明显的区域性差异。春季, 桡足类(尤其是亚强次真哲水蚤)以及鱼卵、仔鱼主要分布在对照区, 端足类(螺赢蜚)主要分布于外港靠近湾口的 1、6 号站位; 夏季, 靠近湾口的 1 号站位鱼卵最多, 而 4 号站位筒长腹剑水蚤分布最多, 5 号站位仔鱼和螺赢蜚最多; 秋季, 桡足类在 1 号站位有较多分布, 内港的长尾幼体分布多于外港; 冬季, 桡足类、鱼卵主要分布于外港采样区(尤其是 3 号站位), 仔鱼仅在 3、4、6 号站位出现, 针刺真浮萤在 3、4 号站位有较多分布。

3 讨论

3.1 浮游动物群落结构特征

北部湾浮游动物物种丰富, 且以水螅水母类(100

种)和桡足类居多(91 种)(郑白雯等, 2013)。2012–2013 年的调查显示, 流沙湾浮游动物共计 7 类 41 种, 其中桡足类最多(29 种, 占 70.73%)。作为半封闭型海湾, 流沙湾的浮游动物种类数远少于其西南侧的北部湾(370 种)以及湛江港湾(217 种)(张才学等, 2011), 接近于珠江口(李开枝等, 2005)、福清湾(林君卓, 2008)的调查结果。与 2008–2009 年的两次调查相比, 浮游动物种类数略低于张才学等(2013)的统计数据(49 种), 高于王彦等(2013)对内港的调查结果(19 种)(表 5)。由于后者调查区域仅限于内港, 其采集的样本量会相对偏少。以往的两次调查均使用浅水 I 型浮游生物网进行采集, 但该网主要用于个体较大的浮游动物(水母、箭虫、大型桡足类等)的采集, 对小型桡足类等个体较小的浮游动物的捕获效率则远低于中型网(Wu *et al.*, 2011), 甚至相差 10 倍以上(连喜平等, 2013)。考虑到 I 型浮游生物网对小型桡足类捕获的疏漏, 浅水 III 型采集的浮游动物种类可能比以往的两次调查更为减少。哲水蚤仍为流沙湾的优势种, 但主要的优势种已由针刺拟哲水蚤、小拟哲水蚤转变为亚强次真哲水蚤。阶段性的浮游动物频繁出现, 长尾、短尾幼体多次成为优势种。

整体而言, 浮游动物丰度、生物量和多样性指数均显示出秋季低于春、夏两季的趋势。在空间分布上, 浮游动物丰度和生物量普遍表现为外港高于内港, 秋季的浮游动物多样性指数及均匀度指数变化特征也与之相似。

依据饵料生物水平分级评价标准(陈作志等, 2011), 浮游动物生物量<10 mg/m³ 为低水平, 10–30 mg/m³ 为中低水平, 30–50 mg/m³ 为中等水平, 50–70 mg/m³ 为中高水平。因此, 春季外港的 1、4、5、6 号站点为中等水平, 其余各站均为中低水平; 夏季和秋季所有站点均处于低水平状态; 冬季绝大多数站点的饵料生物处于中低水平。

浮游动物年平均丰度和生物量分别为 48.12 ind./m³、13.43 mg/m³, 与珠江口、柘林湾、大鹏澳等海域相差 1 个以上数量级。浮游动物丰度明显低于 2008–2009

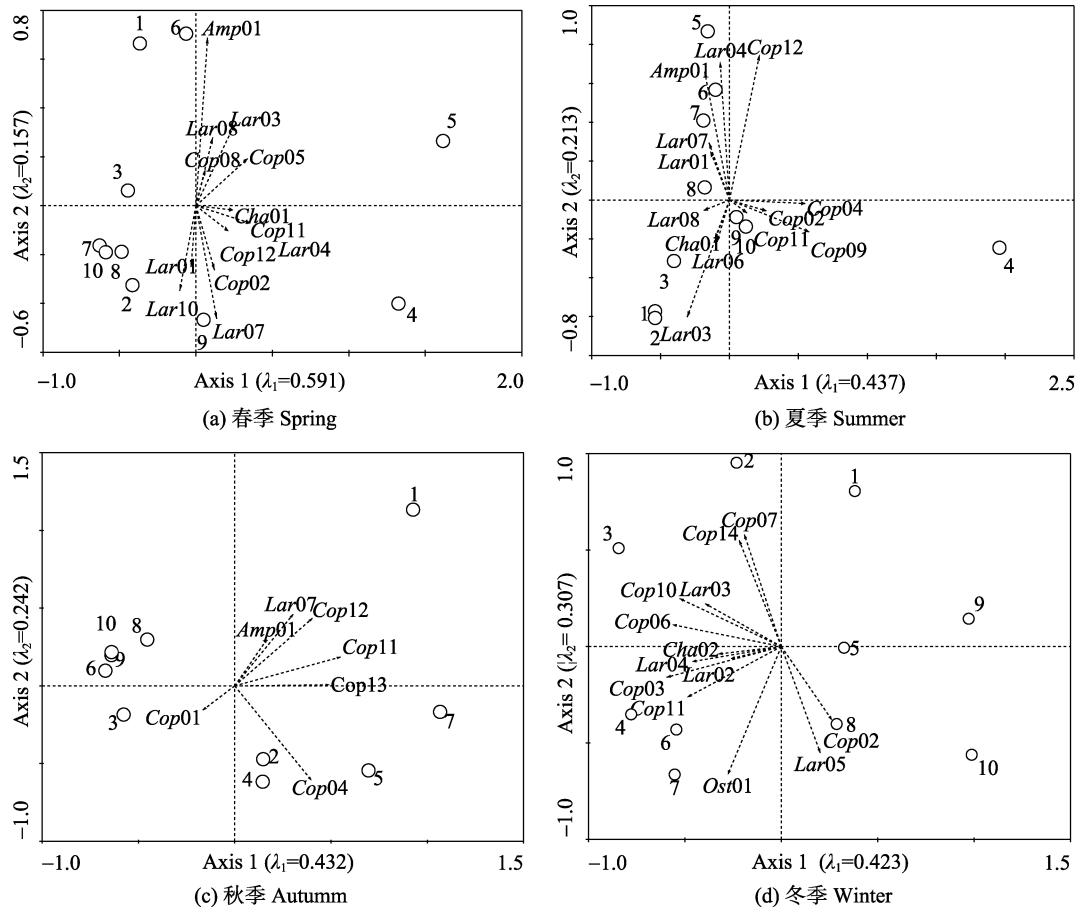


图4 浮游动物样方的PCA排序

Fig.4 PCA ordination of zooplankton community composition and samples

表5 流沙湾浮游动物群落结构与其他水域的比较

Tab.5 Comparison of community structure of zooplankton between the Liusha Bay and other waters

海域 Waters	调查时间 Investigation time	种类数 Species amount	丰度 Abundance (ind./m ³)	生物量 Biomass (mg/m ³)	多样性指数 Diversity index	文献 References
珠江口 Zhujiang River Estuary	2002-04-2002-09	49	1131	203	2.30	李开枝等, 2005
北部湾 Beibu Gulf	2000-10-2003-06	68	700	382	2.43	郑白雯等, 2013
三沙湾 Sansha Bay	2006-07-2007-11	370	—	—	—	刘育莎等, 2010
福清湾 Fuqing Bay	2007-02-2007-11	82	665	96	2.32-3.20	徐佳奕等, 2013
柘林湾 Zhelin Bay	2012-06-2011-05	71	244	—	2.02-3.12	林君卓, 2008
大鹏澳 Dapeng Cove	2005-10-2006-05	41	83	88	2.00-3.47	黄长江等, 2003
湛江港湾 Zhanjiang Bay	2001-04-2002-04	90	15800	228	2.20-2.87	邓邦平等, 2011
流沙湾 Liusha Bay	2007-05-2008-04	82	164-383	—	—	张才学等, 2011
	2009-02-2009-11	217	403(桡足类)	—	3.39	王彦等, 2013;
	2008-03-2009-02	19	8816000	0-7	0.11-0.60	张才学等, 2013
	2008-02-2008-11	49	85	132	2.29-3.39	
	2012-05-2013-01	41	48	13	0.72-3.61	

年的两次调查数据,多样性指数与前两次调查相当,但最高值与最低值间的差值加大。这种浮游动物种数、丰度和生物量跨年性的剧减现象同样见于广东省最大的网箱养殖基地—柘林湾:2002 年调查显示浮游动物丰度为 $15.8 \times 10^3 \text{ ind./m}^3$ (黄长江等, 2003), 但 2006 年仅为 $12.00\text{--}313.33 \text{ ind./m}^3$, 种类也由 90 种降为 36 种(马亚洲等, 2008)。

3.2 浮游动物群落与环境因子的相关性

温度和盐度是影响中国近海浮游动物群落结构最重要的环境因子(杜明敏等, 2013)。尽管温度与浮游动物丰度和生物量之间的相关系数不高,浮游动物种类的变化却与之密切相关:偏暖温带近岸种类中华哲水蚤、小拟哲水蚤分别出现在温度适中的春(28.84°C)、秋(25.89°C)两季,且后者在秋季为优势种;偏低温种类瘦尾胸刺水蚤在温度较低的冬季(19.51°C)成为优势种;亚热带外海种类亚强次真哲水蚤在各季均有出现;浮游动物幼体主要出现在水温相对较高的春季和夏季(30.73°C),并有较多种类在春季成为优势种。相关性分析显示,盐度与浮游动物生物量呈极显著正相关($P < 0.01$)。温度和盐度对浮游动物存活率有一定的交互作用,温度的变化会改变动物对盐度的适应范围(黄加祺等, 1986)。因此,流沙湾海域冬季盐度最高(32.13)、温度最低(19.51°C),亚热带外海种类如驼背隆哲水蚤、针刺拟哲水蚤、针刺真浮萤等均成为绝对优势种。

相关性分析显示,浮游动物生物量与 N 元素的相关性较强(主要表现为正相关),而与 P 元素的相关性较弱。这种相关性的差异可能是由于 2008–2009 年流沙湾海区主要呈 N 限制(N/P 比值为 $3.94\text{--}11.95$)(王彦等, 2013)转变为 2012–2013 年的 P 限制(N/P 比值为 $21.65\text{--}1287$)所引起。研究表明, N/P 比值与浮游动物总种数、丰度、多样性指数均具有显著或极显著的正相关关系(何本茂等, 2013)。

由于桡足类为主的浮游动物对浮游植物的摄食, Chl-*a* 浓度与浮游动物生物量呈极显著负相关($P < 0.01$)。这种负相关性同样见于黄凤鹏等(2009)对胶州湾海域的报道。与表征浮游植物现存量的 Chl-*a* 指标相比,表征悬浮物的 POM 与浮游动物的生物量呈更高的负相关性, POM 与浮游动物生物量的相关系数为 -0.464 ($P < 0.01$),这可能是由于浮游动物的食物来源除浮游植物外,还包括细菌等,尤其是冬季(对细菌的摄食率达 71%)(夏洁等, 2006)。

3.3 养殖活动对浮游动物群落结构的影响

根据位置分布,4 号、3 号、8 号、10 号站位分

别典型代表着对照区、扇贝主养区、鱼类网箱养殖区和珍珠贝养殖区。在 4 个季度的调查中,上述鱼、贝养殖区的浮游动物丰度及生物量均低于对照区,其差异在春夏两季尤为明显。PCA 分析结果(图 4)显示,鱼、贝养殖区与对照区之间的浮游动物种类和丰度差异显著,表明水产养殖活动会对浮游动物群落结构产生明显影响。研究表明,滤食杂食性鱼类对大型桡足类的滤食可显著影响浮游动物群落(陈炳辉等, 2012),贝类则主要通过食物竞争使桡足类生物量降低(王岩等, 1999)。

4 个典型区的群落结构以中小型桡足类为主,大中型浮游动物种类较少。春季,中华哲水蚤、亚强真哲水蚤、肥胖软箭虫、锥形宽水蚤等大中型浮游动物仅在对照区出现。其中,亚强真哲水蚤在浮游动物群落中占绝对优势(66.04%),仔鱼在对照区为优势种而在鱼、贝养殖区极少分布;夏季,亚强真哲水蚤和肥胖软箭虫丰度最高值出现在对照区(分别占总量的 0.3% 、 0.8%),最低值出现在扇贝主养区(分别占 0 、 0.2%),中小型桡足类(强额孔雀水蚤、筒长腹剑水蚤)在对照区大量出现(分别占 56.63% 、 27.08%),其他典型区则极少出现;秋季,鱼类网箱养殖区和对照区检出少量的红眼纺锤水蚤,而扇贝主养区则没有发现;冬季,对照区的大中型桡足类(针刺拟哲水蚤、亚强真哲水蚤、驼背隆哲水蚤、微驼隆哲水蚤)丰度最高,扇贝主养区次之,鱼类网箱养殖区和珍珠贝养殖区较小。水体富营养化的加重和营养盐结构的变化使近岸海域浮游植物群落构成趋于小型化,并通过食物链的传递进一步引起主要摄食者浮游动物的小型化(Pan *et al.*, 1997; 张才学等, 2011)。因此,鱼、贝养殖活动(尤其是扇贝养殖)加剧了近岸海域浮游动物的小型化。

由于游泳行为的不同,哲水蚤逃避捕食的能力要优于剑水蚤等其他桡足类(赵萍萍等, 2012),在相对较大的捕食压力和较低的食物竞争压力下,容易成为优势种。亚强次真哲水蚤是代表性的藻滤食种,其摄食率可达 19.76 ng/ind.d ,高于哲水蚤科、纺锤水蚤科等其他桡足类(李开枝等, 2012),但强额孔雀水蚤对浮游植物现存量的摄食压力更强,几乎是亚强次真哲水蚤形成的摄食压力的 3 倍(谭焯辉等, 2004)。春季亚强次真哲水蚤在对照区占绝对优势,夏季强额孔雀水蚤在对照区出现高值而未在鱼、贝养殖区检出,均表明对照区浮游植物资源较为丰富,而鱼、贝养殖区则相对匮乏。

小型桡足类主要分布于水体表层,春季小型桡足类在对照区出现高峰,其不同的形态(卵、无节幼体)和丰富的种类可为仔鱼的存活与生长提供广谱性的

饵料(王荣等, 2002), 因此春季仔鱼在对照区也呈优势分布。秋季正值网箱养鱼收获期, 养殖区内浮游动物受到的捕食压力减小, 因此红眼纺锤水蚤最多出现于鱼类网箱养殖区。从春季至秋季, 受食物竞争的影响, 扇贝主养区浮游动物丰度及生物量一直较低, 随着扇贝的养成, 冬季扇贝主养区浮游动物的食物竞争压力骤减, 浮游动物的生物量、丰度迅速回升, 高于鱼类网箱养殖区和珍珠贝养殖区, 浮游动物多样性指数接近 3.0, 高于其他站位。

浮游动物缺乏发达的游泳器官, 只能随波逐流, 径流、海流等水文因素均会影响其分布 (Marques *et al.*, 2007), 因此除源自鱼、贝的摄食活动影响外, 水交换能力的好坏对浮游动物群落结构和时空分布的影响也不可低估(李开枝等, 2005)。流沙湾内港和外港间的水交换能力较弱(罗昭林等, 2014), 延绳、筏架、网箱等养殖设施可明显降低水流速度及交换速率 (O'Donncha *et al.*, 2013; Petersen *et al.*, 2008; 黄长江等, 2005), 并造成向下传输的营养物质显著减少, 因此内港的鱼类网箱养殖区及珍珠贝养殖区的浮游生物丰度和生物量均低于外港靠近港口的 1 号站位。

参 考 文 献

- 马亚洲, 陈丕茂. 洪灾影响下饶平柘林湾浮游动物群落结构的初步研究. 海洋与渔业, 2008(8): 14-15
- 王大鹏, 曹占旺, 何安尤, 等. 流沙湾珍珠养殖区营养盐时空分布现状及分析. 广西水产科技, 2011(4): 21-31
- 王大鹏, 曹占旺, 张益峰, 等. 两个珍珠养殖海区浮游植物种群特征及其比较. 广西水产科技, 2010(2): 16-23
- 王岩, 张鸿雁. 不同单养和混养海水实验围隔浮游生物的研究. 中国水产科学, 1999, 6(3): 49-54
- 王荣, 张鸿雁, 王克, 等. 小型桡足类在海洋生态系统中的功能作用. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 453-460
- 王彦, 申玉春, 叶宁, 等. 流沙湾浮游生物的群落结构与时空分布. 广东海洋大学学报, 2013, 32(6): 66-73
- 王增焕, 柯常亮, 王许诺, 等. 流沙湾贝类养殖海域环境质量评价. 南方水产科学, 2011, 7(3): 24-30
- 中华人民共和国国家标准. 海洋监测规范. 第 4 部分: 海水分析. 北京: 中国标准出版社, 2007, 57-121
- 中华人民共和国国家标准. 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, 2007, 84-85
- 方志山. 综合水产养殖池悬浮颗粒物的动态变化研究. 厦门大学学报(自然科学版), 2007, 46(1): 131-134
- 邓邦平, 杨宇峰. 大鹏澳养殖海域表底层水环境及浮游动物群落结构的比较研究. 海洋环境科学, 2011, 30(4): 492-495
- 申玉春, 李再亮, 黄石成, 等. 流沙湾海域水产养殖结构与布局调查分析. 中国渔业经济, 2010, 28 (1): 105-109
- 吕晋, 郭红娟, 马学礼, 等. 武汉市湖泊蓝藻分布影响因子分析. 生态环境, 2008, 17(2): 515-519
- 刘育莎, 林元烧, 郑连明, 等. 福建省三沙湾饵料浮游动物生态特征研究. 厦门大学学报(自然科学版), 2010, 49(1): 102-108
- 孙军, 刘东艳, 徐俊, 等. 1999 年春季渤海中部及其邻近海域的网采浮游植物群落. 生态学报, 2004, 24(9): 2003-2016
- 杜明敏, 刘镇盛, 王春生, 等. 中国近海浮游动物群落结构及季节变化. 生态学报, 2013, 33(17): 5407-5418
- 杜萍, 刘晶晶, 徐晓群, 等. 象山港不同生境冬季浮游动物生态特征比较研究. 水产科技情报, 2011, 38(2): 92-99
- 李开枝, 尹健强, 黄良民, 等. 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
- 李开枝, 谭焯辉, 黄良民, 等. 珠江口浮游桡足类摄食研究. 热带海洋学报, 2012, 31(6): 90-96
- 李振国, 卢军, 王国祥, 等. 分光光度法测定浮游植物叶绿素 *a* 的比较研究. 中国环境监测, 2006, 22(2): 21-23
- 杨国欢, 侯秀琼, 孙省利, 等. 流沙湾食物网结构的初探—基于稳定同位素方法的分析结果. 水生生物学报, 2013, 37(1): 150-156
- 连喜平, 谭焯辉, 刘永宏, 等. 两种浮游生物网对南海北部浮游动物捕获效率的比较. 热带海洋学报, 2013, 32(3): 33-39
- 何本茂, 黎广钊, 韦蔓新, 等. 涠洲岛珊瑚礁海域氮磷比值季节变化与浮游生物结构的关系. 热带海洋学报, 2013, 32(4): 64-72
- 张才学, 孙省利, 陈春亮, 等. 流沙湾海草床海域浮游动物的群落结构和季节变化. 海洋与湖沼, 2013, 44(5): 1386-1394
- 张才学, 陈慧妍, 孙省利, 等. 流沙湾海草床海域浮游植物的时空分布及其影响因素. 生态学报, 2012, 32(5): 1527-1537
- 张才学, 龚玉艳, 王学锋, 等. 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
- 陈作志, 蔡文贵, 徐姗姗, 等. 广西北部湾近岸生态系统风险评价. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2977-2986
- 陈炳辉, 刘正文. 滤食杂食性鱼类放养对浮游动物群落结构的影响. 生态科学, 2012, 31(2): 161-166
- 林君卓. 福清湾及附近海域浮游动物的数量和分布. 台湾海峡, 2008, 27(1): 58-63
- 罗昭林, 朱长波, 郭永坚, 等. 流沙湾表层沉积物中碳、氮、磷的分布特征和污染评价. 南方水产科学, 2014, 10(3): 1-8
- 郑白雯, 曹文清, 林元烧, 等. 北部湾北部生态系统结构与功能研究 I. 浮游动物种类组成及其时空变化. 海洋学报, 2013, 35(6): 154-161
- 赵萍萍, 王志宏, 吴秋婷, 等. 洱海浮游桡足类群落结构对季节性休渔的响应. 应用与环境生物学报, 2012, 18(3): 421-425
- 夏洁, 高会旺. 南黄海东部海域浮游生态系统要素季节变化的模拟研究. 安全与环境学报, 2006, 6(4): 59-65
- 徐佳奕, 徐兆礼. 三沙湾浮游动物生态类群演替特征. 生态

- 学报, 2013, 33(5): 1413–1424
- 黄长江, 陈善文, 何歆, 等. 2001–2002 年粤东柘林湾浮游动物的生态学研究. 海洋与湖沼, 2003, 34(2): 117–130
- 黄长江, 董巧香, 吴常文, 等. 大规模增养殖区柘林湾叶绿素 *a* 的时空分布. 海洋学报, 2005, 27(2): 127–134
- 黄凤鹏, 黄景洲, 杨玉玲, 等. 胶州湾浮游桡足类时空分布. 生态学报, 2009, 29(8): 4045–4052
- 黄加祺, 郑重. 温度、盐度对厦门港春季主要桡足类呼吸率影响的实验研究. 海洋与湖沼, 1986, 17(2): 161–167
- 梁飞龙, 刘永, 邓陈茂, 等. 广东雷州流沙湾养殖企鹅珍珠贝多毛类寄生虫病的调查. 海洋水产研究, 2007, 28(2): 84–89
- 程小倪, 黄良民, 谭焯辉, 等. 流沙湾海域浮游植物群落结构的时空变化. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 13–18
- 谢恩义, 申玉春, 叶宁, 等. 流沙湾的底栖大型海藻调查. 广东海洋大学学报, 2009, 29(4): 30–35
- 谢群, 张瑜斌, 孙省利. 流沙湾海域水质的综合评价与分析. 中国环境监测, 2011, 27(1): 77–83
- 谭焯辉, 黄良民, 董俊德, 等. 三亚湾秋季桡足类分布与种类组成及对浮游植物现存量的摄食压力. 热带海洋学报, 2004, 23(5): 17–24
- Beaugrand G. Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas. Deep-Sea Res Part II: Topical Studies in Oceanography, 2009, 56(8): 656–673
- Dias J, Simões N, Bonecker C. Zooplankton community resilience and aquatic environmental stability on aquaculture practices: a study using net cages. Braz J Biol, 2012, 72(1): 1–11
- Estrada R, Harvey M, Gosselin M, *et al.* Late-summer zooplankton community structure, abundance, and distribution in the Hudson Bay system (Canada) and their relationships with environmental conditions, 2003–2006. Prog Oceanogr, 2012, 101(1): 121–145
- Hays GC, Richardson AJ, Robinson C. Climate change and marine plankton. Trends Ecol Evol, 2005, 20(6): 337–344
- Marques SC, Pardal MA, Pereira MJ, *et al.* Zooplankton distribution and dynamics in a temperate shallow estuary. Hydrobiologia, 2007, 587(1): 213–223
- O'Donncha F, Hartnett M, Nash S. Physical and numerical investigation of the hydrodynamic implications of aquaculture farms. Aquacult Eng, 2013, 52(1): 14–26
- Pan Y, Subba Rao DV. Impacts of domestic sewage effluent on phytoplankton from Bedford Basin, eastern Canada. Mar Pollut Bull, 1997, 34(12): 1001–1005
- Petersen JK, Nielsen TG, Van Duren LA, *et al.* Depletion of plankton in a raft culture of *Mytilus galloprovincialis* in Ría de Vigo, NW Spain. I. Phytoplankton. Aquat Biol, 2008, 4(2): 113–125
- Pielou EC. An introduction to mathematical ecology. New York: Wiley-Interscience, 1966: 1–286
- Rey DSP, Macrina TZ, Reiner E. Spatio-temporal variation of the zooplankton community in a tropical caldera lake with intensive aquaculture (Lake Taal, Philippines). Hydrobiologia, 2011, 64(1): 119–133
- Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication. London: University of Illinois Press, 1963: 125
- Wu CJ, Shin CM, Chiang KP. Does the mesh size of the plankton net affect the result of statistical analyses of the relationship between the copepod community and water masses? Crustaceana, 2011, 84(9): 1069–1083

(编辑 江润林)

Characteristics of Zooplankton Community in Aquaculture Areas of Liusha Bay

GUO Yongjian, LI Junwei, LUO Zhaolin, XIE Xiaoyong, CHEN Suwen,
ZHU Changbo^①, GUO Yihui

(Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300)

Abstract Seasonal investigations on zooplankton community in Liusha Bay were carried out from May 2012 to January 2013. A total of 41 species and 17 groups of pelagic larvae were recorded, in which the copepod was the majority (29 species). *Subeucalanus subcrassus*, Brachyuran larva and Macruran larva were the dominant species seasonally in three quarters. The annual average density and biomass were 48.12 ind./m³ and 13.43 mg/m³, respectively. In general, the density, biomass and diversity index of zooplankton were lower in autumn than those in spring and summer, and these indices in inner bay were lower than those in outer bay. The zooplankton density was barely positively correlated to nitrite, while the zooplankton biomass had significant correlations with multiple environmental factors such as nitrite, ammonium and total nitrogen. Compared with the control (non-culture area), the density and biomass in the main scallop culture area, the fish culture area and the oyster culture area were lower. Rarely found in culture areas, large and medium-sized zooplankton mainly appeared in the non-culture area. In autumn, the density of *Acartia erythraea* was higher in the fish culture area than those in the other areas. During winter, the diversity index of zooplankton in the main scallop culture area was the highest (2.97). Large and medium sized species of zooplankton mainly appeared in the control area in all reasons. In spring, *Subeucalanus subcrassus* appeared with absolute predominance (66.04%) in the control area. In summer, the biomass of *S. subcrassus* and *Flaccisagitta enflata* were the highest in the control area (accounting for 0.3% and 0.8%, respectively) and the lowest in the main scallop culture area (accounting for 0 and 0.8%, respectively). In autumn, a spot of *A. erythraea* were merely found in the control area and the fish culture area. The density and biomass in the main scallop culture area were rapidly increased from autumn to winter, although they were lower than those in the non-culture area but higher than those in the fish culture area and the oyster culture area. The results indicate an obvious decline in the density and biomass of zooplankton and a severe miniaturization of zooplankton in size in Liusha Bay with the culture of fish and shellfish.

Key words Liusha Bay; Zooplankton; Scallops; Fish cage; Principal components analysis

① Corresponding author: ZHU Changbo, E-mail: changbo@ecowin.org