

象山港三种不同养殖方式对浮游动物群落的影响

杜萍^{1,2}, 徐晓群², 徐旭丹², 周孔霖², 骆鑫³,
陈全震², 曾江宁², 寿鹿², 张德民^{1*}

(1. 宁波大学海洋学院, 浙江宁波 315211;

2. 国家海洋局第二海洋研究所, 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 浙江杭州 310012;

3. 广西壮族自治区海洋环境监测中心站, 广西北海 536000)

摘要: 为探究不同营养类型养殖方式对半封闭海湾浮游生态系统的影响, 于2015年在象山港的鱼类网箱养殖、牡蛎筏式养殖和海带筏式养殖3种养殖区内外分别进行大、中型和中、小型浮游动物群落及相关环境因子的四季研究。结果显示, 牡蛎养殖区内大、中型浮游动物群落结构变化明显, 夏、秋季优势种太平洋纺锤水蚤的优势度下降, 冬季优势种腹针胸刺水蚤的优势度上升; 网箱养殖区内浮游动物群落变化不明显, 变化主要为大、中型浮游动物优势种, 春、冬季腹针胸刺水蚤的优势度下降, 秋季优势种种类组成变化明显; 海带养殖区内浮游动物群落和优势种变化均不明显。此外, 3种养殖方式对浮游动物的生物量、丰度和 α 多样性均未产生明显影响。结合象山港的水文特征和养殖区内外环境因子, 研究表明, 牡蛎养殖区浮游动物群落变化是牡蛎滤食行为和铁港水交换能力差的综合结果, 而浮游动物优势种变化可能与水体总磷含量较高有关; 因目前网箱养殖规模小且西沪港水动力条件较好, 网箱区内局部环境和浮游动物的变化较小; 海带养殖因面积小且仅春、冬季养殖, 不足以对水质和浮游动物产生影响。此外, 本研究显示不同环境中, 大、中型浮游动物群落结构的变异较中、小型浮游动物明显, 这可能与中、小型浮游动物群落的稳定性较高有关。

关键词: 鱼类养殖; 海带养殖; 牡蛎养殖; 浮游动物; 海湾

中图分类号: S 965

文献标志码: A

我国是世界第一海水养殖大国, 水产养殖业在缓解人类食物需求和海洋资源过度捕捞压力的同时, 也带来了不容忽视的环境问题。海水养殖品种包含鱼类、甲壳类、贝类和藻类等, 其中, 鱼类网箱养殖、贝类筏式养殖和藻类筏式养殖是我国海湾浅海养殖的3种典型类型, 不同养殖类型具有不同的营养方式和环境效应。Chopin等^[1]将水产养殖生物分为投喂性养殖种类(如鱼类)和获取性养殖种类(如滤食性动物、大型海藻)。董双林等^[2]依据养殖生态系统运

转的代谢类型或驱动因素将水产养殖系统分为自养型(如海带养殖系统)和异养型养殖系统(如贝类养殖系统、鱼类网箱养殖系统)。滤食性贝类养殖在生产管理上属于获取性养殖种类, 在生态学上则是异养型养殖系统, 可从水体中净提取氮、磷、碳等物质, 但又会因生物沉积作用(粪便或假粪的沉积)而在养殖区下部形成能量和物质的蓄积, 造成养殖区自身局部污染。

象山港是浙江省重要水产养殖基地, 水产资源丰富, 养殖业发展早。20世纪60年代前已开

收稿日期: 2016-10-16 修回日期: 2017-01-18

资助项目: 海洋公益性行业科研专项(201305043-3, 201505027-4, 201405007); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(LORCE计划, JG1714); 浙江省自然科学基金(LY14D060007); 浙江省重中之重学科开放基金项目(XKZSC1411); 宁波大学王宽诚基金

通信作者: 张德民, E-mail: zhangdemin@nbu.edu.com

始海带和滩涂贝类养殖, 20世纪80年代和90年代初受市场价格、苗种繁育和养殖技术等的影响, 海带养殖面积下降, 牡蛎筏式养殖和网箱养殖开始发展, 90年代后期网箱养殖进入发展高峰, 2002年网箱数量达6万多只^[3]。此后, 随着临港工业发展, 养殖面积逐渐缩减, 近年, 在国家“生态文明建设”战略方针的指导下, 开始发展新型海洋经济, 严格控制养殖数量^[4]。目前, 浅海养殖主要有以上3种, 其中, 贝类筏式养殖主要分布在港顶支港铁港, 鱼类网箱养殖和藻类筏式养殖主要分布在湾中支港西沪港, 其中贝类和网箱养殖时间为全年, 海带养殖主要为冬、春两季。

浮游动物是海洋次级生产力, 是浮游食物网中承上启下的重要一环, 受到海水和食物化学元素变化的影响^[5], 同时对温、盐和海流敏感, 是很多海洋环境变化研究中的生物载体^[6]。目前我国近海浮游动物研究对象主要包括浅水I型浮游生物网(筛绢孔径505 μm)采集的大、中型浮游动物和浅水II型浮游生物网(筛绢孔径160 μm)采集的中、小型浮游动物。其中, 中、小型浮游动物的研究曾在我国长期受到忽视, 2000年后的研究显示, 中、小型浮游动物生物量高, 且在食物网中的营养传递作用和饵料作用更重要^[7-9]。

本实验将在象山港鱼类网箱养殖、牡蛎筏式养殖和海带筏式养殖3种养殖区内外分别采集大、中型和中、小型浮游动物, 研究营养方式不同的养殖方式对浮游动物群落的影响差异。实验将分析不同养殖区内的浮游动物群落是否与对照点存在差异; 归纳不同养殖区的环境特征, 揭示引起浮游动物差异的主要环境因子; 阐释3种养殖方式对浮游生态系统的环境效益, 为海湾养殖的合理布局和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

象山港是位于浙江省北部(121.40°~122.20°E, 29.40°~29.90°N)的狭长形半封闭海湾, 纵长约60 km, 港内宽窄不一, 一般约3~8 km, 口门宽约20 km。由于海湾狭长, 象山港水交换速率和控制机理的区域性变化较大^[10-11], 狭湾由此被分为7个生态亚区^[12](图1)。狭湾口靠近外海, 平流

和潮交换强烈, 90%水交换周期只有5 d, 越靠近湾顶越慢, 湾中90%水交换周期约60 d, 湾顶可达80 d^[10-11]。水体理化因子^[13-15]和浮游生物群落结构通常也呈明显梯度空间异质性^[16-17]。

本实验分别选取位于港顶铁港内的牡蛎养殖区和位于港中西沪港的网箱养殖区、海带养殖区为研究区域, 铁港和西沪港分属于不同的生态亚区, 环境背景差异较大, 通常铁港内盐度和悬浮物浓度较西沪港低^[13], 无机营养盐和颗粒有机碳浓度等较西沪港高^[14-15]。牡蛎养殖区面积约为0.3 km², 养殖品种主要为褶牡蛎(*Ostrea plicatula*), 每年11月至翌年2月对2~3龄的牡蛎进行收割, 养殖不投饵, 牡蛎生长主要依靠滤食水体中的浮游生物和颗粒物; 网箱养殖区面积约为0.45 km², 养殖品种主要为日本真鲷(*Lateolabrax japonicas*)和大黄鱼(*Larimichthys crocea*), 养殖喂食小杂鱼和复合饲料; 海带养殖区面积约为0.72 km², 养殖品种海带(*Laminaria japonica*)为低温种, 每年10月中下旬挂苗, 翌年4月份收割, 养殖过程不投放养料。

1.2 样品采集及分析

铁港和西沪港的环境背景差异较大, 无法直接比较养殖区内的差异以说明养殖方式的生态影响, 故本实验分别在各养殖区外邻近区域选择对照区; 因海带养殖区和网箱养殖区距离较近, 可选取共同的对照点。基于以上原则, 本实验设置5个采样区, 每个采样区3个平行站位, 具体为: 牡蛎养殖区O0 (S1、S2、S3)、牡蛎养殖对照区C1 (S4、S5、S6)、网箱养殖区F0 (S7、S8、S9)、海带养殖区K0 (S10、S11、S12)、网箱和海带养殖共同对照区C2 (S13、S14、S15), 对照区距养殖区边缘的距离约为1000 m (图1)。样品采集分别于2015年1月(冬季)、4月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季)进行。

大、中型和中、小型浮游动物样品依据《海洋调查规范》(GB/T 12763.6-2007)^[18]分别用带Hydro-bios流量计的浅水I型和浅水II型浮游生物网由底至表垂直拖网采集, 将样品装入1 L塑料瓶中, 加中性甲醛溶液固定保存(终浓度5%)带回实验室。每站浅水I型和浅水II型浮游生物网各采集1网。浮游动物样品于室内用孔径160 μm的筛绢过滤, 挑去杂物后用感量0.1 mg电子天平称湿重, 根据湿重和滤水量计算湿重生物量。种

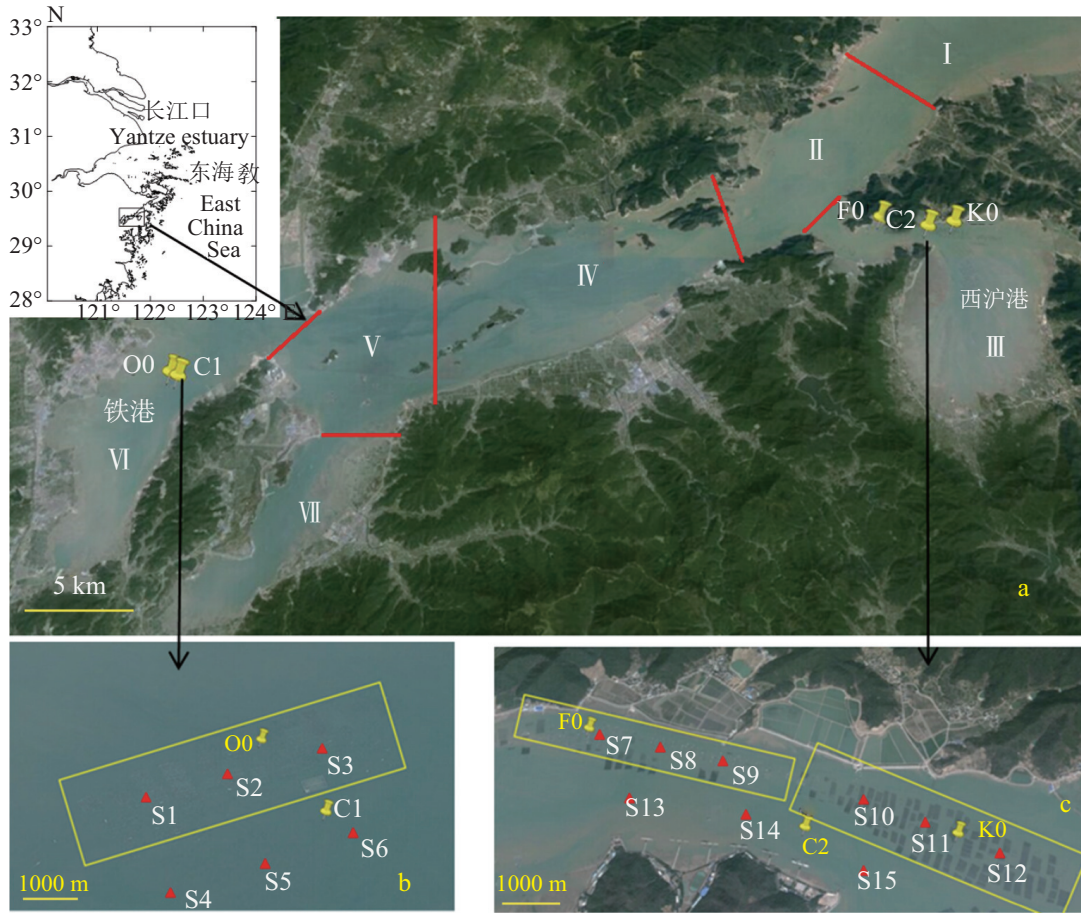


图 1 采样站示意图

Fig. 1 Sampling stations

类鉴定和计数在体视镜(Zeiss SteREO Discovery V8)和显微镜(Leica DM2500)下进行, 根据个体数量和滤水量计算丰度。原生动植物鉴定到属, 后生浮游动物成体鉴定到种, 甲壳类幼体鉴定到科, 其他类群幼体鉴定到纲。

象山港水深一般为10~20 m, 根据《海洋监测规范》(GB 17378.3-2007)^[19]分别采集表层、底层水测定相关环境因子。理化因子按《海洋监测规范》(GB 17378.4-2007)^[20]方法测定: 温度(水温表法)、盐度(盐度计法)、水深(超声波测深法)现场测定; pH值(pH计法)、溶解氧(dissolved oxygen, DO)(碘量法)、悬浮物(suspended solids, SS)(重量法)、溶解无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)硝酸盐NO₃-N、亚硝酸盐NO₂-N、铵盐NH₄-N分别采用锌片还原分光光度法、萘乙二胺分光光度法、次溴酸盐氧化法、活性磷酸盐PO₄-P(磷钼蓝分光光度法)、活性硅酸盐SiO₄-Si(硅钼黄法)和总氮(高温高压消解法)、总磷(高

温高压消解法)、总有机碳(高温燃烧法)于实验室内测定。叶绿素a(Chl. a)按《海洋调查规范》(GB/T12763.6-2007)^[18]于实验室内采用萃取荧光法测定。

1.3 数据分析

浮游动物α多样性特征选取物种数(Richness)和Shannon-Wiener多样性指数(H')2个参数, Shannon-Wiener多样性指数(H')的计算公式:

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

式中, P_i为该站第i种浮游动物个体数占该站总个体数的比值, S代表该站动物的种类数。

优势度(Y)计算公式:

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

式中, N为该海区出现的所有种类的总丰度; n_i为第i种的丰度; f_i为该种在各站位出现的频率。取Y≥0.02时, 即为浮游动物优势种。

由于浮游动物样品为由低到表垂直拖网得

到的整个水柱的样品,因此,用于环境相关性分析的环境因子取表、底层水的平均值。

采用SPSS 20.0中的单因素非参数方差分析法(Kruskal-Wallis, K-W检验)检验浮游动物生物量、丰度、多样性和环境因子的季节间及区域间差异,当 $P < 0.05$ 时,再进行成对比较。应用PRIMER 6.0基于Bray-Curtis距离对浮游动物群落的时间和区域差异进行双因素交互相似性分析(Two-Way crossed Analysis of similarities, Two-Way crossed ANOSIM)。采用CANOCO软件包首先对浮游动物物种数据进行去趋势典范对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),当最大梯度值小于3时,采用冗余分析法(redundancy analysis, RDA)分析浮游动物群落与环境因子的关系,当最大梯度值大于4时,采用典范对应分析法(canonical correspondence analysis, CCA)分析浮游动物群落与环境因子的关系。采用SigmaPlot 10.0和OriginPro 9.0软件绘制浮游动物参数和物种组成的柱状图。

2 结果

2.1 环境因子

环境因子季节间的K-W检验结果显示,除叶绿素 a 外,其他11种环境因子均具有明显的季节差异(表1)。区域间的K-W检验结果显示,海带养殖区K0与对照区C2相比,所有环境因子四季均无显著差异;牡蛎养殖区O0与对照区C1相比,春季悬浮物SS较高、溶解氧DO较低,秋季总磷TP,冬季温度T较高;网箱养殖区F0与对照区C2相比,春季DO较低,秋季总磷TP较高(表1)。

2.2 浮游动物群落

生物量和丰度 浮游动物生物量和丰度存在明显的季节变化。但区域间的K-W检验结果显示,3种养殖区与对应对照区相比,大、中型和中、小型浮游动物生物量和丰度在四季均无显著差异;区域间的差异主要存在于铁港与西沪港间(图2)。

α 多样性特征 浮游动物物种数和多样性指数(H')也基本存在明显季节差异(除中、小型浮游动物 H')。3种养殖区的大、中型和中、小型浮游动物物种数和多样性指数与对照区相比,在四季均无显著差异(图3)。

优势种 根据优势种公式分别计算四季各区域的优势种,并将相对丰度比例大于5%的物种绘制出物种组成图(图4)。研究海区的浮游动物优势种具有明显的季节演替现象和区域间差异,区域间差异首先是铁港与西沪港的差异,其次是养殖区内外的差异。

3类养殖区相比,牡蛎养殖区和网箱养殖区内外的浮游动物优势种差异水平明显较海带养殖区内外的差异大,且大、中型浮游动物的优势种区域差异较中、小型浮游动物明显。牡蛎养殖区与对照区C1相比,夏季大、中型浮游动物优势种类数较多、太平洋纺锤水蚤的相对丰度较低,中、小型浮游动物中拟铃虫属(*Tintinnopsis* sp.)纤毛虫的相对丰度较高;秋季大、中型浮游动物中太平洋纺锤水蚤(*Acartia pacifica*)相对丰度也较低、而汤氏长足水蚤(*Calanopia thompsoni*)较高,中、小型浮游动物中,针刺拟哲水蚤(*Paracalanus aculeatus*)的相对丰度较高、小长腹剑水蚤(*Oithona nana*)较低;冬季大、中型浮游动物中腹针胸刺水蚤的相对丰度远高于对照点,中、小型浮游动物中四刺窄腹剑水蚤(*Limnoithona tetraspina*)的相对丰度较高。网箱养殖区F0与对照区C2相比,春季大、中型浮游动物中腹针胸刺水蚤(*Centropage abdominalis*)的相对丰度低、鱼卵和短尾类幼体等的相对丰度较高,中、小型浮游动物中桡足类幼体的相对丰度较高、针刺拟哲水蚤较低;秋季大、中型浮游动物的优势种类组成差异大,太平洋纺锤水蚤、宽尾刺糠虾(*Acanthomysis laticauda*)和桡足类无节幼体仅在网箱养殖区内为优势种,而球型侧腕水母(*Pleurobrachia globosa*)、微刺哲水蚤(*Canthocalanus pauper*)、针刺拟哲水蚤、背针胸刺水蚤(*Centropages dorsispinatus*)和尖尾海萤(*Cypridina acuminata*)仅在对照区为优势种;冬季大、中型浮游动物第一优势种腹针胸刺水蚤的相对丰度较低,而四刺窄腹剑水蚤较高,中、小型浮游动物中针刺拟哲水蚤相对丰度较高。海带养殖区K0与对照区C2相比,冬季,大、中型浮游动物中腹针胸刺水蚤的相对丰度稍低,而小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)和四刺窄腹剑水蚤稍高,中、小型浮游动物优势种中出现抱球虫属(*Globigerina*)有孔虫。

群落结构 浮游动物群落结构的季节与区域Two-Way crossed ANOSIM分析结果显示,

表 1 环境因子的区域差异和季节差异

Tab. 1 Differences in environmental parameters among areas and among seasons

季节 seasons	区域 areas	温度/°C T	盐度 S	酸碱度 pH	悬浮物/ (mg/L) SS	溶解氧/ (mg/L) DO	溶解无机 氮/(mg/L) DIN	活性磷酸 盐/(mg/L) PO ₄ -P	活性硅酸 盐/(mg/L) SiO ₃ -Si	总有机碳/ (mg/L) TOC	总氮/ (mg/L) TN	总磷/ (mg/L) TP	叶绿素a/ (μg/L) Chl. a
春季 spring	O0	18.6±0.2 ^b	25.27±0.09 ^a	8.029±0.002 ^a	17.5±5.6 ^b	8.0±0.1 ^{ab}	0.726±0.038 ^a	0.043±0.001 ^a	1.298±0.022 ^a	1.182±0.071 ^a	0.854±0.032 ^b	0.063±0.003 ^b	2.377±0.225 ^{ab}
	C1	18.5±0.2 ^b	25.50±0.03 ^{ab}	8.045±0.005 ^b	7.6±1.1 ^a	8.3±0.1 ^c	0.712±0.008 ^b	0.037±0.003 ^b	1.127±0.007 ^b	1.263±0.085 ^{ab}	0.861±0.053 ^b	0.052±0.002 ^{ab}	2.898±0.530 ^b
	F0	17.0±0.3 ^a	26.10±0.00 ^c	8.030±0.001 ^b	10.8±1.3 ^{ab}	8.0±0.0 ^a	0.68±0.037 ^a	0.037±0.000 ^b	1.306±0.021 ^b	1.555±0.167 ^{cd}	0.819±0.056 ^{bc}	0.052±0.000 ^{ab}	1.793±0.057 ^a
	K0	17.7±0.1 ^{ab}	26.07±0.04 ^{bc}	8.045±0.005 ^b	7.9±1.6 ^a	8.1±0.1 ^{abc}	0.655±0.022 ^a	0.035±0.000 ^b	1.264±0.028 ^b	1.715±0.551 ^{cd}	0.727±0.012 ^b	0.049±0.001 ^b	1.830±0.215 ^a
	C2	17.8±0.8 ^{ab}	26.06±0.02 ^{bc}	8.050±0.028 ^a	9.8±1.6 ^{ab}	8.2±0.1 ^{bc}	0.644±0.063 ^a	0.034±0.003 ^b	1.253±0.055 ^b	1.330±0.087 ^{abc}	0.704±0.046 ^b	0.048±0.003 ^b	1.507±0.549 ^a
全区 whole	17.9±0.7 ^b	25.8±0.4 ^c	8.04±0.01 ^c	10.07±4.41 ^A	8.14±0.14 ^c	0.683±0.046 ^A	0.037±0.003 ^A	1.250±0.072 ^A	1.409±0.303 ^A	0.793±0.077 ^A	0.053±0.006 ^A	2.081±0.601 ^A	
夏季 summer	O0	26.7±0.1 ^{ab}	19.05±0.17 ^{ab}	7.850±0.008 ^b	14.7±2.8 ^a	6.7±0.1 ^a	1.041±0.024 ^{bc}	0.063±0.000 ^c	2.296±0.044 ^b	1.480±0.162 ^b	1.110±0.011 ^{bc}	0.082±0.002 ^{bc}	2.785±0.837 ^{ab}
	C1	27.2±0.0 ^b	18.93±0.12 ^a	7.869±0.009 ^{ab}	24.2±4.1 ^{ab}	6.7±0.1 ^a	1.043±0.026 ^c	0.061±0.001 ^{bc}	2.270±0.082 ^b	1.822±0.067 ^b	1.142±0.029 ^c	0.084±0.002 ^c	3.357±0.709 ^b
	F0	25.8±0.3 ^a	20.51±0.05 ^{bc}	7.908±0.006 ^b	47.7±22.9 ^b	6.6±0.1 ^a	0.982±0.026 ^{bc}	0.054±0.001 ^{ab}	1.958±0.040 ^{ab}	1.860±0.282 ^b	1.039±0.042 ^{ab}	0.076±0.003 ^{ab}	1.282±0.283 ^a
	K0	25.8±0.1 ^a	20.25±0.54 ^{bc}	7.913±0.005 ^b	38.3±5.8 ^b	6.6±0.0 ^a	0.968±0.010 ^{ab}	0.054±0.000 ^{ab}	1.909±0.017 ^a	1.710±0.414 ^a	1.036±0.033 ^{ab}	0.075±0.003 ^{ab}	1.193±0.128 ^a
	C2	25.9±0.3 ^a	20.42±0.25 ^c	7.909±0.011 ^b	23.5±4.0 ^{ab}	6.6±0.1 ^a	0.948±0.016 ^a	0.054±0.000 ^a	1.939±0.090 ^{ab}	1.415±0.121 ^a	0.985±0.018 ^a	0.073±0.003 ^a	1.188±0.238 ^a
全区 whole	26.3±0.6 ^b	19.8±0.8 ^A	7.89±0.03 ^B	29.69±15.27 ^B	6.65±0.09 ^A	0.996±0.044 ^c	0.057±0.004 ^B	2.074±0.185 ^B	1.657±0.277 ^B	1.063±0.063 ^c	0.078±0.005 ^c	1.961±1.053 ^A	
秋季 autumn	O0	24.2±0.1 ^a	19.20±0.12 ^{ab}	7.766±0.020 ^a	31.0±3.6 ^{ab}	6.9±0.0 ^a	0.940±0.023 ^b	0.074±0.002 ^{bc}	2.047±0.010 ^c	1.442±0.030 ^b	0.980±0.034 ^a	0.097±0.000 ^c	2.702±0.348 ^c
	C1	24.2±0.1 ^a	19.10±0.10 ^a	7.787±0.048 ^a	22.4±5.6 ^a	7.0±0.0 ^a	0.959±0.019 ^b	0.075±0.000 ^c	2.039±0.008 ^{bc}	1.968±0.814 ^a	1.018±0.020 ^a	0.092±0.003 ^b	2.552±0.212 ^{bc}
	F0	24.3±0.1 ^a	20.69±0.20 ^{ab}	7.783±0.018 ^a	199.4±85.0 ^b	6.8±0.2 ^a	0.797±0.009 ^a	0.061±0.003 ^{ab}	1.772±0.052 ^{ab}	4.807±3.513 ^b	0.890±0.058 ^a	0.093±0.005 ^b	1.500±0.148 ^{bc}
	K0	24.4±0.1 ^a	20.87±0.03 ^{bc}	7.809±0.011 ^a	100.0±16.7 ^{bc}	6.8±0.0 ^a	0.806±0.005 ^{ab}	0.061±0.001 ^a	1.756±0.008 ^{ab}	2.621±0.757 ^b	0.903±0.056 ^a	0.087±0.002 ^{ab}	1.238±0.083 ^a
	C2	24.3±0.1 ^a	20.92±0.21 ^c	7.821±0.014 ^a	67.8±20.9 ^{bc}	6.8±0.0 ^a	0.793±0.009 ^a	0.061±0.002 ^{ab}	1.736±0.054 ^a	4.343±2.285 ^b	0.916±0.067 ^a	0.084±0.002 ^a	1.420±0.330 ^{ab}
全区 whole	24.3±0.1 ^c	20.2±0.9 ^A	7.79±0.03 ^A	84.11±74.28 ^C	6.86±0.086 ^B	0.859±0.078 ^B	0.066±0.007 ^B	1.870±0.149 ^B	3.036±2.133 ^B	0.941±0.066 ^B	0.091±0.005 ^D	1.882±0.670 ^A	
冬季 winter	O0	10.6±0.0 ^c	23.56±0.02 ^{ab}	8.189±0.008 ^{bc}	15.9±2.5 ^{ab}	9.4±0.1 ^{bc}	0.877±0.020 ^{bc}	0.047±0.000 ^c	1.193±0.030 ^a	1.148±0.093 ^a	0.953±0.011 ^b	0.065±0.002 ^a	3.597±0.299 ^{bc}
	C1	10.2±0.1 ^c	23.53±0.04 ^a	8.230±0.018 ^c	13.1±4.0 ^a	9.9±0.1 ^c	0.897±0.022 ^c	0.046±0.002 ^{bc}	1.268±0.198 ^a	2.108±0.621 ^a	0.982±0.027 ^b	0.067±0.002 ^a	15.372±4.720 ^c
	F0	10.4±0.1 ^{bc}	25.07±0.21 ^c	8.162±0.004 ^a	104.4±33.8 ^b	9.2±0.1 ^a	0.805±0.048 ^{bc}	0.043±0.002 ^{bc}	1.214±0.052 ^a	2.797±1.311 ^a	0.943±0.040 ^{ab}	0.067±0.003 ^a	1.207±0.182 ^a
	K0	10.5±0.1 ^{bc}	24.83±0.18 ^{bc}	8.167±0.010 ^{bc}	56.5±15.0 ^{bc}	9.3±0.1 ^{ab}	0.739±0.060 ^{ab}	0.039±0.005 ^{ab}	1.292±0.174 ^a	2.190±0.495 ^a	0.920±0.045 ^{ab}	0.065±0.002 ^a	1.528±0.284 ^{ab}
	C2	10.5±0.1 ^{bc}	24.67±0.07 ^{bc}	8.176±0.006 ^{bc}	40.6±17.0 ^{bc}	9.4±0.0 ^{bc}	0.712±0.027 ^a	0.037±0.001 ^a	1.068±0.042 ^a	2.243±0.415 ^a	0.855±0.020 ^a	0.062±0.001 ^a	1.580±0.058 ^{ab}
全区 whole	10.4±0.2 ^A	24.3±0.7 ^B	8.18±0.03 ^D	46.09±37.78 ^{BC}	9.46±0.24 ^C	0.806±0.082 ^B	0.043±0.005 ^A	1.207±0.131 ^A	2.097±0.816 ^B	0.931±0.051 ^B	0.065±0.003 ^B	4.657±5.893 ^A	

注: O0. 牡蛎养殖区; C1. 牡蛎养殖对照区; F0. 网箱养殖区; K0. 海带养殖区; C2. 网箱和海带养殖对照区; Whole. 全区, 即季节均值。T. 温度; S. 盐度; pH. 酸碱度; SS. 悬浮物; DO. 溶解氧; DIN. 溶解无机氮; PO₄-P. 活性磷酸盐; SiO₃-Si. 活性硅酸盐; TOC. 总有机碳; TN. 总氮; TP. 总磷; Chl. a. 叶绿素a。小写字母不同表示区域间差异显著, 大写字母不同表示季节差异显著, P<0.05

Notes: O0: oyster farm; C1: control of oyster farm; F0: fish farm; K0: kelp farm; C2: control of fish farm and kelp farm; Whole: whole areas, that is seasonal average. T: temperature; S: salinity; pH: potential of hydrogen; SS: suspended solids; DO: dissolved oxygen; DIN: dissolved inorganic nitrogen; PO₄-P: phosphate; SiO₃-Si: silicate; TOC: total organic carbon; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus; Chl a: chlorophyll a. Difference in lowercase indicates significant difference in areas, difference in capital indicates significant difference in seasons, P<0.05

大、中型和中、小型浮游动物群落均存在极其显著的季节差异和区域差异, 但区域差异主要为铁港和西沪港间的差异, 而养殖区内外的差异仅存在于牡蛎养殖区O0与对照区C1的大、中型浮游动物群落之间(表2)。

2.3 浮游动物群落与环境因子的关系

分别选取相对丰度大于5%的大、中型和

中、小型浮游动物物种与12种环境因子进行相关性分析。物种数据的DCA分析显示, 大、中型浮游动物物种的最大梯度值为3.249, 中、小型浮游动物物种的最大梯度值为2.734, 因此相关性分析分别选用CCA和RDA。

CCA和RDA的蒙特卡罗检验(Monte Carlo test)表明, 第一轴和全部轴对物种分布均具极显著影响(P<0.05), 故排序结果是可信的。CCA

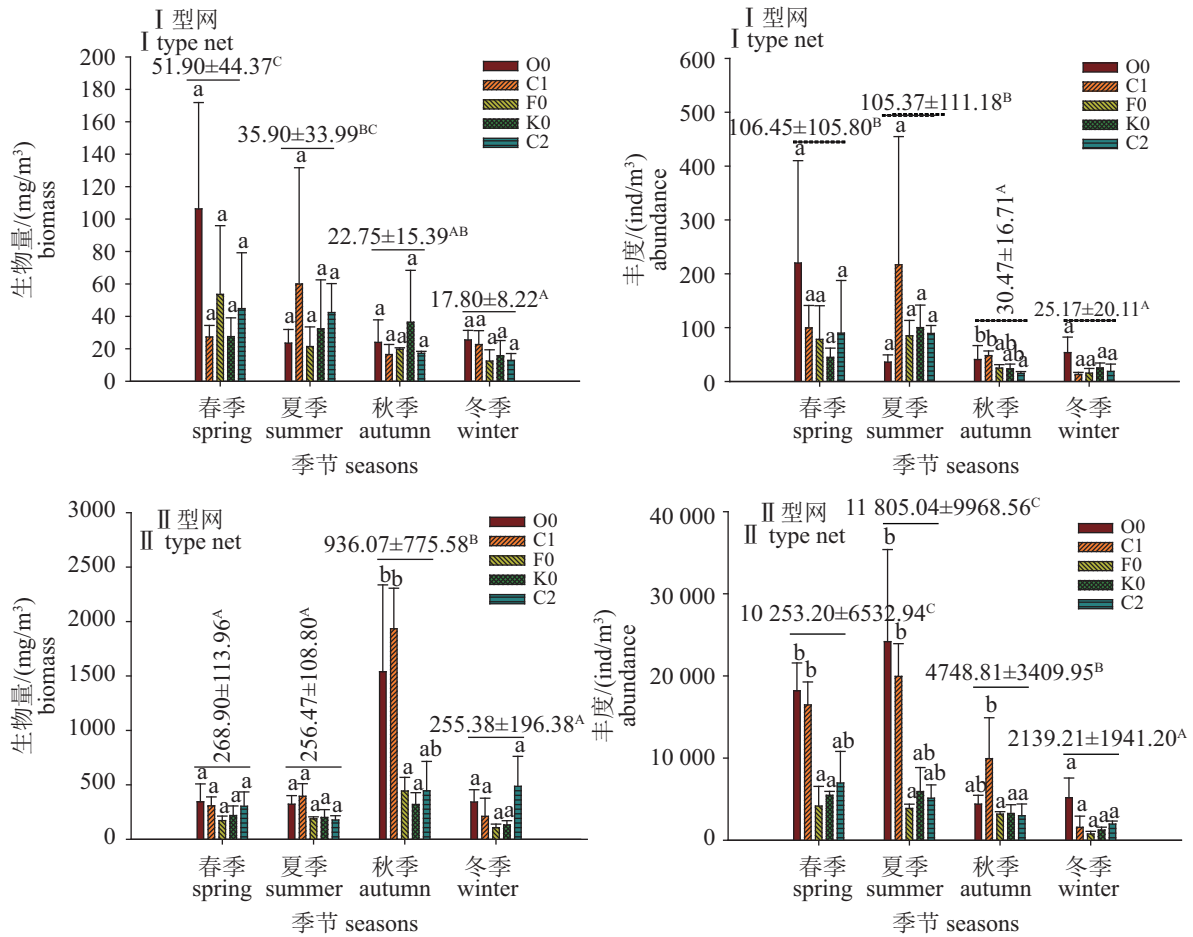


图 2 浮游动物生物量和丰度的区域差异和季节差异

小写字母不同表示区域间差异显著，大写字母不同表示季节差异显著(P<0.05)，下同

Fig. 2 Differences in zooplankton biomass and abundance among areas across four seasons

Difference in lowercase indicates significant difference in areas, difference in capital indicates significant difference in seasons(P<0.05), the same below

统计信息显示：12种环境因子可解释大、中型浮游动物群落总变量的59.19%(所有典范特征值之和1.849/所有特征值之和3.124)，第一轴和第二轴的特征值分别解释了55.3%和42.1%的物种变量，且物种与环境的相关系数分别达到0.956和0.941。RDA统计信息显示：12种环境因子可解释中、小型浮游动物群落总变量的58.8%，第一轴和第二轴的特征值分别解释33.6%和20.1%的物种变量，相关系数分别为0.783和0.825，表明浮游动物物种与环境的相关性较好。

从CCA和RDA排序图看，除叶绿素a外，其他环境因子均影响着浮游动物的分布(图5)。“I型网”CCA排序图显示：第一象限物种(26、18、8、16、4和24)主要分布在盐度、DO和pH较高，温度、氮、磷、硅营养水平较低的环境中；第二象限物种(17、14、15、7、2、19、1、20、

21、9、25、23)主要分布在高SS、TOC、TP和PO₄-P的环境中；第三象限物种(10、11、3、6、5、22、13)主要分布在盐度、DO和pH较低，而氮、硅营养较丰富的环境中；第四象限物种(12、27)主要分布在SS、TOC较低的环境中。“II型网”RDA排序图中，第一象限物种(2、5、8、3)主要分布在高氮、磷、硅营养，低盐度、DO和pH的环境中；第三象限物种1和6主要分布在高盐度、DO和pH，低氮、磷、硅营养的环境中；第四象限物种(7、9、10、11、4)主要分布在低SS和TOC的环境中。

为确定养殖区内外浮游动物优势种的差异是否由环境因子变化引起，实验将差异优势种所处的环境特征进行比较，并与养殖区内外环境因子差异对照。结果发现，多数差异优势种所处的环境特征相似；有些差异优势种所处

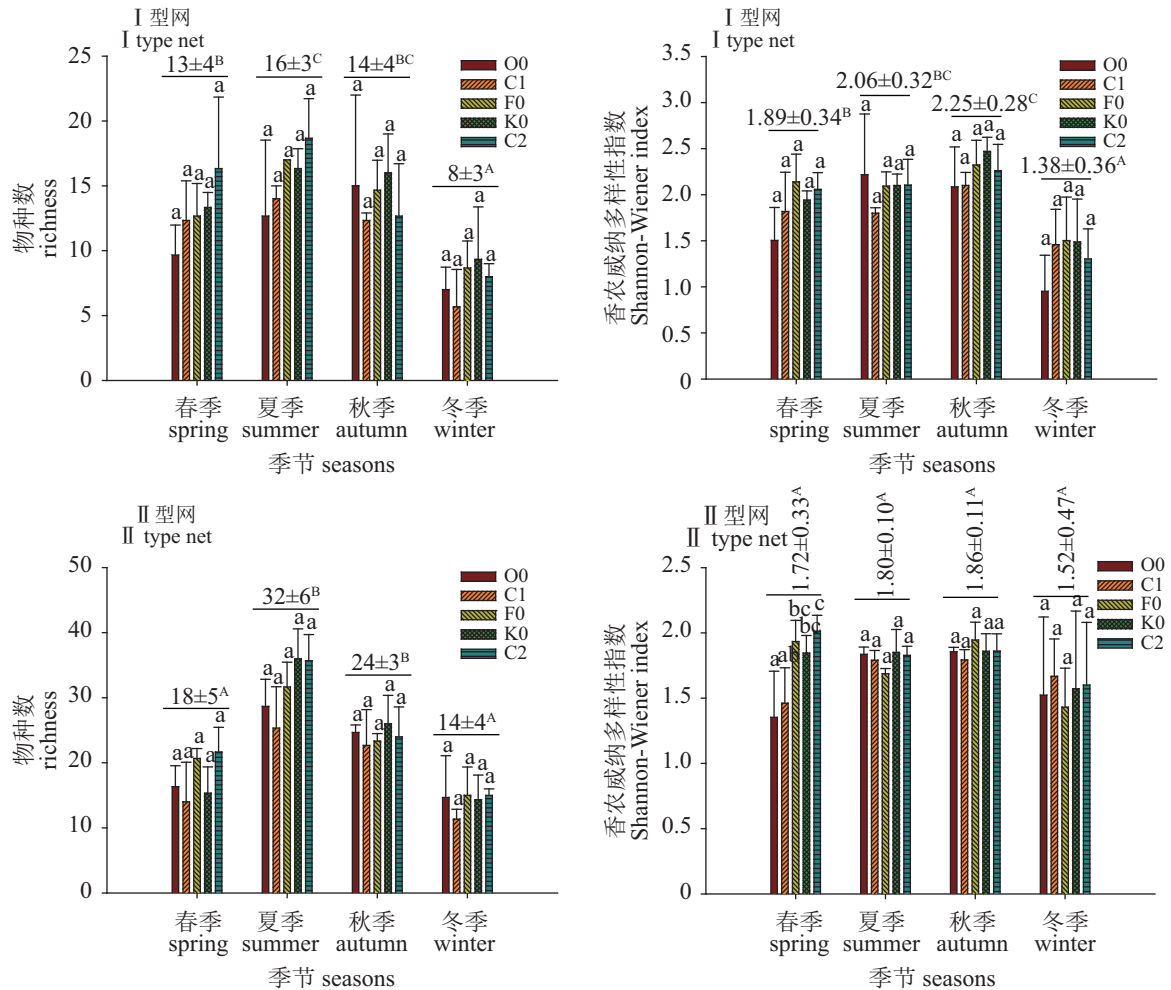


图 3 浮游动物物种数和多样性指数的区域差异和季节差异

Fig. 3 Differences in zooplankton richness and diversity index among areas across four seasons

环境特征存在差异, 但与养殖区内外环境因子的差异不一致。因此, 多数浮游动物优势种的变化并非由养殖引起, 而仅有秋季牡蛎养殖区的优势种变化(太平洋纺锤水蚤相对丰度较低、汤氏长足水蚤较高)可能与养殖区内总磷TP含量高有关。

3 讨论

3.1 不同养殖区的环境特征

鱼类网箱养殖依靠投喂饵料供鱼类生长, 大量的剩余饵料和鱼类粪便释放到水体和沉积物中, 会增加环境中有机和无机物含量; 而牡蛎养殖和海带养殖均无人工投饵, 且海带生长需吸收水体中的无机盐, 被认为是环境友好型养殖; 牡蛎生长则会滤食水体中的有机物, 一定程度减少水体的营养负荷, 但贝类的粪便也

会增加水体中的有机物含量。因此, 理论上, 3种养殖区内的水质应各有特征。而本实验中, 海带养殖区内外环境因子未见明显差异, 牡蛎和网箱养殖区内外有显著差异的环境因子并不多, 主要为春季网箱养殖区的悬浮物浓度较高, 春季牡蛎和网箱养殖区溶解氧浓度较低, 秋季牡蛎和网箱养殖区的总磷浓度较高。

春、秋季, 养殖区内外水体溶解氧和营养物质的区域差异与网箱和牡蛎养殖活动有一定关系。春季, 鱼类和牡蛎的生长开始活跃, 生物呼吸作用和有机质降解消耗氧气增多, 导致养殖区内溶解氧浓度偏低。养殖活动通常会造成碳、氮、磷有机物在沉积物中稳定积累^[21-22], 但由于养殖活动的季节性, 水体中营养物质通常具有季节性的区域变化。如对深澳湾的研究发现, 龙须菜生长旺盛的春、夏季, 水体中的无机氮、磷营养盐水平较低; 而秋季, 海区内

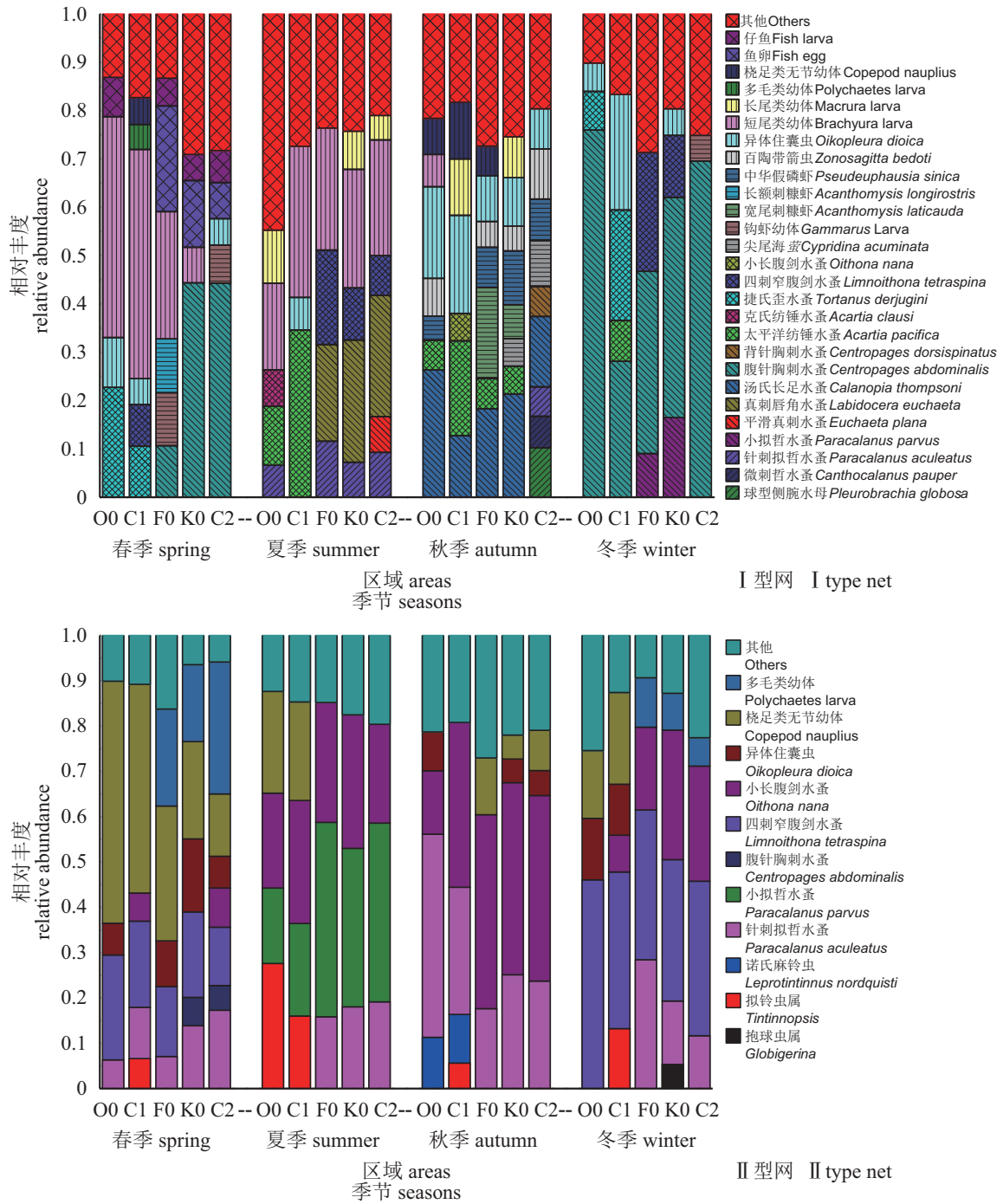


图 4 不同区域四季的浮游动物优势种物种组成

Fig. 4 Zooplankton dominant species at different sampling areas across four seasons

养殖以太平洋牡蛎与石斑鱼为主，水体则呈现高氮、高磷，这主要与养殖投饵有关^[23]。实验结果显示，网箱养殖区的无机营养盐和总有机碳、总氮、总磷四季都比对照点高，只是达到显著差异的只有秋季的总磷浓度，因此网箱养殖活动对水体营养物质的增加具有重要贡献。而牡蛎养殖区的多数营养物质浓度低于对照区

($P>0.05$)，尤其是总有机碳、总氮和溶解无机氮，因此牡蛎养殖区的自身环境总体较好，但秋季总磷显著高于对照区，可能与牡蛎收割有关。生态计量学理论显示，浮游植物可以根据周围环境中的营养浓度调节其自身的磷含量^[24]，秋季海水中N/P比仅为13左右(其他季节的N/P为16~21)，低于Redfield比值，因此，秋季浮游植

表 2 浮游动物群落季节和区域差异的双因素交互 ANOSIM 检验

Tab. 2 Two-Way crossed ANOSIM on differences in zooplankton communities across seasons and areas

		季节 seasons				区域 areas			
		春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn		O0	C1	F0	K0
I 型网 I type net	总R total R	R=0.902, P=0.001			总R total R	R=0.414, P=0.001			
	夏季 summer	0.793**			C1	0.352*			
	秋季 autumn	0.993**	0.852**		F0	0.611**	0.630**		
	冬季 winter	0.674**	0.963**	0.993**	K0	0.685**	0.736**	-0.028	
					C2	0.657**	0.657**	0.157	-0.074
II 型网 II type net	总R total R	R=0.790, P=0.001			总R total R	R=0.451, P=0.001			
	夏季 summer	0.985**			C1	0.074			
	秋季 autumn	0.933**	0.911**		F0	0.917**	0.722**		
	冬季 winter	0.667**	0.896**	0.733**	K0	0.880**	0.685**	0.037	
					C2	0.806**	0.694**	0.037	-0.194

注: *表示显著差异($P<0.05$), **表示极显著差异($P<0.01$)

Notes: * indicates significant differences ($P<0.05$), ** indicates very significant differences ($P<0.01$)

物体内的磷含量会相对较高; 而秋季成熟牡蛎的收割, 大大减少了牡蛎对浮游植物的滤食^[25], 叶绿素 a 浓度较对照区高。即高磷含量、高丰度的浮游植物可能是造成牡蛎养殖区总磷含量较高的原因。

本研究认为海水交换和养殖规模小是象山港网箱和牡蛎养殖区内外环境因子差异较小的主要原因。夏季, 水动力条件最好, 流速和水交换量普遍大于其他季节, 污染物的迁移扩散能力较强^[12], 虽然鱼类和牡蛎的生长代谢率高(夏季海带已收割), 但养殖规模小, 污染物可得到及时扩散, 不足以造成养殖区内外环境因子差异。冬季, 牡蛎、网箱和海带养殖区内均有养殖生物生长, 但是由于水温低, 生物代谢率较低, 所以, 养殖区内外的各项环境因子也均无明显差异。2000年象山港网箱养殖数量有4万多只, 且多聚集在水交换能力较差的港顶, 研究显示, 网箱区水质无机营养盐参数超过一般海区水平, 且区内溶解无机氮比区外高10%, 无机磷的高值均出现在网箱密集区^[3]; 而2015年象山港网箱养殖数量已大大减少, 养殖区内外有明显差异的营养物质也仅有秋季总磷。因此, 研究认为网箱养殖的环境效应与养殖规模关系密切。

3.2 不同养殖活动对浮游动物的影响

浮游动物生活在水中, 受到周围理化环

境的影响, 但浮游动物具有明显的稳态性特征^[26], 因此会通过选择性摄食、调节自身代谢或空间迁移来保持自身稳态性。同时, 浮游动物是食物链中的重要组分, 群落结构会受到捕食和被捕食关系的影响, 根据水生生物间的摄食粒径关系, 粒径大于160 μm 的浮游动物在网箱养殖区内主要为养殖鱼类的饵料, 而在牡蛎养殖区内主要为牡蛎的摄食竞争者, 竞争捕食粒径小于100 μm 的悬浮物、浮游植物和原生动物^[27-29]。

从本实验结果看, 象山港牡蛎、网箱和海带3种养殖方式对大、中型和中、小型浮游动物的生物量、丰度、物种数和多样性指数均未产生明显影响; 对中、小型浮游动物的群落结构也无明显影响。只有牡蛎养殖和网箱养殖引起了某些季节浮游动物优势种丰度比例的变化; 牡蛎养殖引起了大、中型浮游动物群落结构的明显变化。环境因子的影响分析中仅发现牡蛎养殖区秋季的大、中型浮游动物优势种变化可能与养殖区内总磷含量较高有关。

牡蛎养殖区大、中型浮游动物群落结构发生明显变化可能是牡蛎滤食行为和铁港水交换能力差的综合结果。牡蛎主要滤食粒径为5~110 μm 的小型浮游生物^[28-29], 与大、中型浮游动物是摄食竞争者, 因此当夏季温度高, 牡蛎代谢快时, 牡蛎养殖区内的大、中型浮游动物平

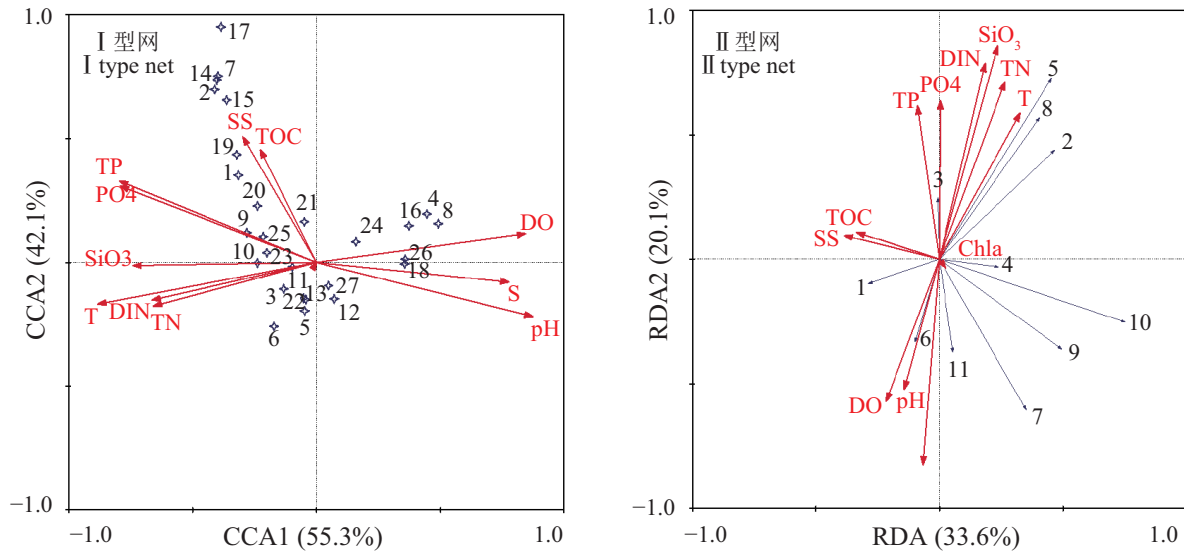


图5 浮游动物物种与环境因子的CCA或RDA排序图

T. 温度; S. 盐度; pH. 酸碱度; SS. 悬浮物; DO. 溶解氧; DIN. 溶解无机氮; PO₄-P. 活性磷酸盐; SiO₃-Si. 活性硅酸盐; TOC. 总有机碳; TN. 总氮; TP. 总磷; Chl. *a*. 叶绿素*a*. 浮游动物物种代码. I型网. 第一象限(4. 小拟哲水蚤, 8. 腹针胸刺水蚤, 16. 钩虾幼体, 18. 长额刺糠虾, 24. 多毛类幼体, 26. 鱼卵); 第二象限(1. 球形侧腕水母, 2. 微刺哲水蚤, 7. 汤氏长足水蚤, 9. 背针胸刺水蚤, 14. 小长腹剑水蚤, 15. 尖尾海萤, 17. 宽尾刺糠虾, 19. 中华假磷虾, 20. 百陶带箭虫, 21. 异体住囊虫, 23. 长尾类幼体, 25. 桡足类无节幼体); 第三象限(3. 针刺拟哲水蚤, 5. 平滑真刺水蚤, 6. 真刺唇角水蚤, 10. 太平洋纺锤水蚤, 11. 克氏纺锤水蚤, 13. 四刺窄腹剑水蚤, 22. 短尾类幼体); 第四象限(12. 捷氏歪水蚤, 27. 仔鱼). II型网. 第一象限(2. 拟铃虫属, 3. 麻铃虫属, 5. 小拟哲水蚤, 8. 小长腹剑水蚤); 第三象限(1. 抱虫虫属, 6. 腹针胸刺水蚤); 第四象限(4. 针刺拟哲水蚤, 7. 四刺窄腹剑水蚤, 9. 异体住囊虫, 10. 桡足类无节幼体, 11. 多毛类幼体)

Fig. 5 The CCA or RDA plot on relationship between zooplankton species and environment factors

T. temperature; S. salinity; pH. potential of hydrogen; SS. suspended solids; DO. dissolved oxygen; DIN. Dissolved Inorganic Nitrogen; PO₄-P. Phosphate; SiO₃-Si. Silicate; TOC. Total Organic Carbon; TN. Total Nitrogen; TP. Total Phosphorus; Chl. *a*. Chlorophyll *a*. Codes of zooplankton species. I type net. The first quadrant (4. *P. parvus*, 8. *C. abdominalis*, 16. Gammarus larva, 18. *A. longirostris*, 24. Polychaetes larva, 26. Fish egg); The second quadrant (1. *P. globos*, 2. *C. pauper*, 7. *C. thompsoni*, 9. *C. dorsispinatus*, 14. *O. nana*, 15. *C. acuminata*, 17. *A. laticauda*, 19. *P. sinica*, 20. *Z. bedoti*, 21. *O. dioica*, 23. Macrura larva, 25. Macrura larva); The third quadrant (3. *P. aculeatus*, 5. *E. plana*, 6. *L. euhaeta*, 10. *A. pacifica*, 11. *A. clausi*, 13. *L. etraspina*, 22. Brachyura larva); The fourth quadrant (12. *T. derjugini*, 27. Fish larva). II type net. The first quadrant (2. *Tintinnopsis*. sp, 3. *Leprotintinnus*. sp, 5. *P. parvus*, 8. *O. nana*); The third quadrant (1. *Globigerina*. sp, 6. *C. abdominalis*); The fourth quadrant (4. *P. aculeatus*, 7. *L. etraspina*, 9. *O. dioica*, 10. macrura larva, 11. polychaetes larva)

均丰度低于养殖区外, 反之, 春、冬季温度低, 牡蛎代谢慢, 又由于养殖区内流速慢, 外界干扰较少^[30], 区内的大、中型浮游动物平均丰度高于养殖区外。同样原因, 铁港夏、秋季第一优势种太平洋纺锤水蚤由于只能摄食较小的藻类(2.9~66.7 μm), 对较大藻类(150~200 μm)几乎不摄食^[31], 故受到牡蛎摄食竞争的影响, 绝对丰度和相对丰度均明显下降; 而冬季, 牡蛎养殖区内温度相对较高且牡蛎对浮游动物的摄食竞争弱, 故第一优势种腹针胸刺水蚤的绝对丰度和相对丰度都高于对照区。此外, 牡蛎养殖区位于象山港港顶的支港, 是全港水动力条件最差的区域, 通常海水95%的净交换率需要4个月; 而网箱养殖区和海带养殖区位于西沪港内, 该处的海水与外海水体交换仅需要1~2个月^[12]。

浮游动物是一类随波逐流的生物, 在水交换能力较强的西沪港区域, 浮游动物群落不易形成养殖区内外明显差异; 而在水动力差的铁港区域, 牡蛎养殖区内外的浮游动物交换也较弱, 容易形成区内外差异。

2000年, 象山港港顶栖凤双山海域网箱数量有2万只左右, 养殖区内外大、中型浮游动物的比较研究发现, 养殖区内的浮游动物生物量和丰度明显低于非养殖区, 主要与鱼类摄食作用和网箱养殖区内水质差有关^[32]。而本研究却发现网箱养殖区内外浮游动物生物量和丰度无明显差异, 浮游动物优势种的变化也非网箱养殖区内外环境差异所致。其主要原因应是西沪港港口水动力条件好和网箱养殖规模小, 水体中积存的污染物量不足以引起浮游动物发生明显变化。

本研究中海带养殖未表现出对水质的改善作用, 养殖区内外的浮游动物群落结构也无明显差异。研究认为, 主要原因是目前海带养殖区的规模小且仅在冬、春两季养殖, 对营养盐的吸收量有限; 同时, 该养殖区位于水动力条件较好的西沪港港口, 区内外的营养物质可以得到及时交换, 以使养殖区内环境因子和浮游动物都不足以发生变化。

浮游动物对磷的敏感性早在20世纪90年代初就已被提出——浮游植物的数量并不是决定浮游动物生物量的关键因子, 其营养结构, 特别是磷的含量对于浮游动物才是至关重要的^[33]。生长速率假说(growth rate hypothesis, GRH)也指出, 饵料中磷含量的变化直接影响着浮游动物的生长速率^[34], 因为有机体的磷含量决定了核糖核酸(ribose nucleic acid, RNA)的形成, 并作用于核糖体, 进而对蛋白质和生长速率产生影响^[35-36]。有研究表明, 在低C:N和C:P的高质食物源区, 往往出现高磷含量、高生长率的浮游动物^[37], 如浮游细菌的元素组成相对稳定, 且C:P和N:P较低, 当海水中浮游细菌相对比例增加时, 有可能促进小粒径、磷含量相对较高的浮游动物生长^[38-39]; 又如磷需求量较高的浮游动物当遇到饵料磷含量增加时, 能够迅速繁殖成为优势种, 而自身磷需求较低的浮游动物更适应低磷的水域^[40-41]。因此, 饵料的营养结构可一定程度地改变浮游动物的种群动态和群落结构。本实验结果中浮游动物优势种受磷含量影响可以从以上理论角度解释, 但是由于缺乏汤氏长足水蚤、太平洋纺锤水蚤等浮游动物元素组成的针对性研究, 无法确定汤氏长足水蚤的C:P是否比太平洋纺锤水蚤低, 因此本结果与GRH的一致性还有待验证。

从本实验结果看, 当环境变化时, 大、中型浮游动物群落较中、小型浮游动物会先发生变化, 主要原因可能是中、小型浮游动物群落的稳定性较强。通常认为, 生物群落的多样性^[42-43]和连贯性^[44]是影响系统稳定性的主要因素。多样性主要指较小空间尺度内的物种多样性, 受种群动态和物种相互作用等生物内在机制影响; 连贯性是指较大区域内不同生境的分散度, 受空间机制影响^[44]。本研究中, 与大、中型浮游动物相比, 中、小型浮游动物的物种丰富度和丰度均较高, 群落结构的区域差异也较小, 即象

山港生态系统中, 中、小型浮游动物的群落多样性和连贯性均较大、中型浮游动物高, 群落稳定性较强。

感谢国家海洋局第二海洋研究所化学组刘小涯高级工程师、赵晨辉和陈文深同学、生物组廖一波和江志兵副研究员、汤雁滨助理研究员在论文完成过程中提供的帮助!

参考文献:

- [1] Chopin T, Buschmann A H, Hailing C, *et al.* Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: A key toward sustainability[J]. *Journal of Phycology*, 2001, 37(6): 975-986.
- [2] 董双林, 李德尚, 潘克厚. 论海水养殖的养殖容量[J]. *青岛海洋大学学报*, 1998, 28(2): 253-258.
Dong S L, Li D S, Pan K H. On the carrying capacity of mariculture[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1998, 28(2): 253-258(in Chinese).
- [3] 宁修仁, 胡锡钢. 象山港养殖生态和网箱养鱼的养殖容量研究与评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
Ning X R, Hu X G. *Aquacultural ecology and carrying capacity assessment on fish cage in Xiangshan Bay*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2002 (in Chinese).
- [4] 宁波市规划局. 象山港区域空间保护和利用规划2013-2030[Z]. 2015年.
Ningbo Planning Bureau. *The planning of the space protection and use in Xiangshan Bay (2013-2030)*[Z]. 2015 (in Chinese).
- [5] Tsoi W Y, Hadwen W L, Fellows C S. Spatial and temporal variation in the ecological stoichiometry of aquatic organisms in an urban catchment[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2011, 30(2): 533-545.
- [6] 李君华, 李少菁, 朱小明. 海洋浮游动物多样性及其分布对全球变暖的响应[J]. *海洋湖沼通报*, 2008(4): 137-144.
Li J H, Li S J, Zhu X M. Effects of global warming on marine zooplankton in the oceans[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2008(4): 137-144(in Chinese).
- [7] 王荣, 王克. 两种浮游生物网捕获性能的现场测试[J]. *水产学报*, 2003, 27(S): 98-102.

- Wang R, Wang K. Field test of capture capabilities of two plankton nets[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2003, 27(S): 98-102(in Chinese).
- [8] 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[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(5): 453-460.
Wang R, Zhang H Y, Wang K, *et al.* Function performed by small copepods in marine ecosystem[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 453-460(in Chinese).
- [9] 张武昌, 张翠霞, 肖天. 海洋浮游生态系统中小型浮游动物的生态功能[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(11): 1195-1201.
Zhang W C, Zhang C X, Xiao T. Role of microzooplankton in marine planktonic ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(11): 1195-1201(in Chinese).
- [10] 董礼先, 苏纪兰. 象山港水交换数值研究 II. 模型应用和水交换研究[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(5): 465-470.
Dong L X, Su J L. Numerical study of water exchange in Xiangshangang Bay II. Model application and water exchange study[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(5): 465-470(in Chinese).
- [11] 董礼先, 苏纪兰. 象山港盐度分布和水体混合 II. 混合分析[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(3): 322-326.
Dong L X, Su J L. Salinity distribution and mixing in Xiangshangang Bay II. Mixing analysis[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(3): 322-326(in Chinese).
- [12] 黄秀清, 王金辉, 蒋晓山, 等. 象山港海洋环境容量及污染物总量控制研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 61-68.
Huang X Q, Wang J H, Jiang X S, *et al.* Study on marine environmental capacity and total pollutant control in Xiangshan Bay[M]. Beijing: Ocean Press, 2008: 61-68 (in Chinese).
- [13] 董礼先, 苏纪兰. 象山港盐度分布和水体混合 I. 盐度分布和环流结构[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(2): 151-158.
Dong L X, Su J L. Salinity distribution and mixing in Xiangshangang Bay I. Salinity distribution and circulation pattern[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(2): 151-158(in Chinese).
- [14] 张丽旭, 蒋晓山, 蔡燕红. 象山港海水中营养盐分布与富营养化特征分析[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(5): 488-491.
Zhang L X, Jiang X S, Cai Y H. Characteristics of nutrient distributions and eutrophication in seawater of the Xiangshan Harbor[J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(5): 488-491(in Chinese).
- [15] 尹维翰, 曹志敏, 蓝东兆, 等. 象山港颗粒有机碳的分布及其影响因子[J]. *海洋环境科学*, 2007, 26(6): 550-552, 567.
Yin W H, Cao Z M, Lan D Z, *et al.* Distribution characteristics and influence factors of particulate organic carbon in Xiangshan Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2007, 26(6): 550-552, 567(in Chinese).
- [16] Jiang Z B, Zhu X Y, Gao Y, *et al.* Spatio-temporal distribution of net-collected phytoplankton community and its response to marine exploitation in Xiangshan Bay[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(4): 762-773.
- [17] 杜萍, 徐晓群, 刘晶晶, 等. 象山港春、夏季大中型浮游动物空间异质性[J]. *生态学报*, 2015, 35(7): 2308-2321.
Du P, Xu X Q, Liu J J, *et al.* Spatial heterogeneity of macro- and meso-zooplankton in Xiangshan Bay in spring and summer[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2308-2321(in Chinese).
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范 第6部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.6-2007 Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: China Standard Press, 2008 (in Chinese).
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.3-2007 海洋监测规范 第3部分: 样品采集、贮存与运输[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.3-2007 The specification for marine monitoring—Part 3: Sample collection storage and transportation[S]. Beijing: China Standard Press, 2008 (in Chinese).
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.4-2007 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社,

2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.4-2007 The specification for marine monitoring—Part 4: Seawater analysis[S]. Beijing: China Standard Press, 2008 (in Chinese).
- [21] 黄小平, 郭芳, 黄良民. 大鹏澳养殖区柱状沉积物中氮、磷的分布特征及污染状况研究[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(1): 91-97.
Huang X P, Guo F, Huang L M. Distribution characteristics and pollution of nitrogen and phosphorus in core sediments of marine culture area in Dapeng Cove[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(1): 91-97(in Chinese).
- [22] 黄长江, 董巧香, 林俊达, 等. 粤东大规模海水增养殖区柘林湾表层沉积物中的含水量、有机质、氮和磷[J]. 海洋学报, 2008, 30(2): 38-50.
Huang C J, Dong Q X, Lin J D, *et al.* Sediment water, organic matter, nitrogen and phosphorus contents in a large-scale mariculture located in Zhelin Bay, eastern Guangdong Province, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(2): 38-50(in Chinese).
- [23] 杜虹, 郑兵, 陈伟洲, 等. 深澳湾海水养殖区水化因子的动态变化与水质评价[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(6): 816-823.
Du H, Zheng B, Chen W Z, *et al.* Variation of water chemical factors and assessment of water quality of Shen'ao Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(6): 816-823(in Chinese).
- [24] Su Q, Jiang X, Li J J. Phosphorus limitation and excess carbon in zooplankton[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 191-195.
- [25] Jiang Z B, Chen Q Z, Zeng J N, *et al.* Phytoplankton community distribution in relation to environmental parameters in three aquaculture systems in a Chinese subtropical eutrophic bay[J]. Marine Ecology Progress Series, 2012, 446: 73-89.
- [26] 苏强. 浮游动物化学计量学稳态性特征研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7213-7219.
Su Q. The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7213-7219(in Chinese).
- [27] Lam-hoi T, Rougier C. Zooplankton assemblages and biomass during a 4-period survey in a northern Mediterranean coastal lagoon[J]. Water Research, 2001, 35(1): 271-283.
- [28] Trottet A, Roy S, Tamigneaux E, *et al.* Impact of suspended mussels (*Mytilus edulis* L.) on plankton communities in a Magdalen Islands lagoon (Québec, Canada): A mesocosm approach[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2008, 365(2): 103-115.
- [29] Trottet A, Roy S, Tamigneaux E, *et al.* Influence of suspended mussel farming on planktonic communities in Grande-Entrée Lagoon, Magdalen Islands (Québec, Canada)[J]. Aquaculture, 2008, 276(1-4): 91-102.
- [30] 蒋增杰, 方建光, 门强, 等. 桑沟湾贝类筏式养殖与环境相互作用研究[J]. 南方水产, 2006, 2(1): 23-29.
Jiang Z J, Fang J G, Men Q, *et al.* Studies on the interaction between shellfish long-line culture and environment in Sungo Bay[J]. South China Fisheries Science, 2006, 2(1): 23-29(in Chinese).
- [31] 高亚辉, 林波. 几种因素对太平洋纺锤水蚤摄食率的影响[J]. 厦门大学学报, 1999, 38(5): 751-757.
Gao Y H, Lin B. Effects of some factors on feeding rates of *Acartia pacifica*[J]. Journal of Xiamen University, 1999, 38(5): 751-757(in Chinese).
- [32] 王春生, 刘镇盛, 何德华. 象山港浮游动物生物量和丰度的季节变动[J]. 水产学报, 2003, 27(6): 595-599.
Wang C S, Liu Z S, He D H. Seasonal dynamics of zooplankton biomass and abundance in Xiangshan Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 2003, 27(6): 595-599(in Chinese).
- [33] Hessen D O. Nutrient element limitation of zooplankton production[J]. The American Naturalist, 1992, 140(5): 799-814.
- [34] Saikia S K, Nandi S. C and P in aquatic food chain: A review on C : P stoichiometry and PUFA regulation[J]. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, 2010(398): 3.
- [35] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, *et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.
- [36] 苏强. 生长速率假说及其在浮游动物营养动力学中的研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1204-1210.
Su Q. Growth rate hypothesis research progresses: Implications for zooplankton[J]. Advances in Earth

- Science, 2012, 27(11): 1204-1210(in Chinese).
- [37] Sterner R W, Elser J J. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere[M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [38] Iwabuchi T, Urabe J. Phosphorus acquisition and competitive abilities of two herbivorous zooplankton, *Daphnia pulex* and *Ceriodaphnia quadrangula*[J]. Ecological Research, 2010, 25(3): 619-627.
- [39] Makino W, Cotner J B, Sterner R W, *et al.* Are bacteria more like plants or animals? Growth rate and resource dependence of bacterial C : N : P stoichiometry[J]. Functional Ecology, 2003, 17(1): 121-130.
- [40] Elser J J, Watts T, Bitler B, *et al.* Ontogenetic coupling of growth rate with RNA and P contents in five species of *Drosophila*[J]. Functional Ecology, 2006, 20(5): 846-856.
- [41] DeMott W R, Pape B J. Stoichiometry in an ecological context: Testing for links between *Daphnia* P-content, growth rate and habitat preference[J]. Oecologia, 2005, 142(1): 20-27.
- [42] Loreau M, de Mazancourt C. Biodiversity and ecosystem stability: A synthesis of underlying mechanisms[J]. Ecology Letters, 2013, 16: 106-115.
- [43] Wang S P, Loreau M. Biodiversity and ecosystem stability across scales in metacommunities[J]. Ecology Letters, 2016, 19(5): 510-518.
- [44] Guelzow N, Muijsers F, Ptacnik R, *et al.* Functional and structural stability are linked in phytoplankton metacommunities of different connectivity[J]. Ecography, 2016, 87(2): 996-1007.

Effects of three different aquaculture activities on zooplankton community in Xiangshan Bay

DU Ping^{1,2}, XU Xiaoqun², XU Xudan², ZHOU Konglin², LUO Xin³,
CHEN Quanzhen², ZENG Jiangning², SHOU Lu², ZHANG Demin^{1*}

(1. School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Key Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, State Oceanic Administration,
Second Institute of Oceanography, Hangzhou 310012, China;

3. Marine Environmental Monitoring Center of Guangxi, Beihai 536000, China)

Abstract: To explore the effects of three different aquacultures on planktonic ecosystem in semi-closed bay, the macro- and meso-zooplankton community, meso- and micro-zooplankton community and 12 kinds of associated environmental factors were studied inside and outside the fish cage aquaculture, kelp raft aquaculture, and farms in Xiangshan Bay via seasonal cruises during 2015. The results demonstrate that: compared with the control areas in the oyster farm, the macro- and meso-zooplankton community composition changed obviously, and the dominance of *Acartia pacifica* declined during summer and autumn, while that of *Centropages abdominalis* went up in winter; in the fish farm, the dominant species of macro- and meso-zooplankton changed, with the dominance of *Centropages abdominalis* declining during spring and winter, and dominant species composition changing obviously in autumn; however, in the kelp farm, there was no marked change in zooplankton community; moreover, the effects of the three different aquacultures on biomass, abundance and α -diversity of zooplankton community were nonsignificant. Analyzing the above results, combined with the hydrological characteristics in Xiangshan Bay and the environmental factors inside and outside the farms, we considered, the change in zooplankton community was a comprehensive result of oyster filter-feeding behavior and the poor water exchange capacity in Tie Harbor, and the zooplankton dominant species variation might relate to elevated total phosphorus content in the farm; in our study, fish cage aquaculture effects on environment and zooplankton were less, mainly due to the small aquaculture scale recently and good hydrodynamic condition in Xihu Harbor; the kelp aquaculture was inadequate to influence the water quality and zooplankton community, because of its small cultural scale and short cultural period every year (only in spring and winter). In addition, the variation in macro- and meso-zooplankton was more obvious than that in meso- and micro-zooplankton, which may be related to the higher stability in meso- and micro-zooplankton community.

Key words: fish aquaculture; kelp aquaculture; oyster aquaculture; zooplankton; bay

Corresponding author: ZHANG Demin. E-mail: zhangdemin@nbu.edu.com

Funding projects: National Marine Public Welfare Research Project of China (201305043-3, 201505027-4, 201405007); Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY14D060007); Open Fund of Zhejiang Provincial Top Key Discipline of Aquaculture in Ningbo University (XKZSC1411); KC Wong Magna Fund of Ningbo University