

## 流沙湾养殖结构优化与生态环境生物修复技术

申玉春, 陈文霞, 朱春华, 叶宁, 谢恩义, 梁飞龙, 杜晓东, 吴灶和\*  
(广东省南海水产经济动物增殖重点实验室, 广东海洋大学, 广东 湛江 524025)

**摘要:**建立了一种贝-鱼-藻养殖结构优化与生态环境生物修复系统,该系统通过网栏设置33.3 hm<sup>2</sup>半封闭的养殖海区进行试验研究,在示范海区内设置3个功能不同的养殖区,贝类养殖与珍珠培育区、鱼类网箱养殖区、大型海藻栽培区,进行鱼类与大型海藻间养和珍珠培育。经过10个月的结构优化养殖和生态环境生物修复控制,示范海区水域水质和生物环境得以明显改善。示范海区透明度显著高于毗邻海区( $P < 0.05$ ),悬浮物含量显著低于毗邻海区( $P < 0.05$ );示范海区总氮、总磷营养盐浓度随养殖期的延长逐渐升高,到9月份达到最高值,以后则逐渐下降;示范海区水域浮游生物数量随养殖时间的延长逐渐升高,浮游生物量明显高于毗邻海区( $P < 0.05$ )。示范海区养殖生物生长良好,共收获鱼类21 365 kg、大型海藻3 091.3 kg、珍珠33.5 kg。育珠贝存活率为73.9%、育珠贝留核率为49.9%,优质珠比率13.7%、珠层厚度平均472  $\mu\text{m}$ ,珍珠质量明显提高。示范海区光能利用率为0.20%,总能量转化效率为34.58%,单位净产量耗总能为2.891 9 MJ/kg。

**关键词:**养殖结构;生态环境;生物修复;流沙湾

**中图分类号:** X 171.1; S 917

**文献标识码:** A

流沙湾位于广东省湛江市雷州半岛西南部,处于徐闻县西部、雷州市西南部交界海域(20°22' ~ 20°31'N, 109°55' ~ 110°1'E)。是一个口小腹大呈西北向葫芦形的半封闭型海湾,海湾面积约69 km<sup>2</sup>。湾口宽约750 m(流沙角至石马角),为树枝状港汊呈长尖形峡湾,地形独特,最远深入陆地16 km。自然地理条件十分优越,是我国海水珍珠贝苗和海水珍珠的重要生产基地之一。近年来,流沙湾水域养殖总面积达到13.6 km<sup>2</sup>,占流沙湾海域总面积的19.7%。其中贝类养殖面积为12.5 km<sup>2</sup>,占流沙湾水域养殖面积的91.9%,近三年平均生产海水珍珠产量达到18.5 t<sup>[1]</sup>。随着流沙湾珍珠养殖面积急剧扩大,海湾水质和底质环境质量大幅度下降,导致珠母贝病害频发,培育的珍珠颗粒变小、珠层变薄、商品率降低,品级降低,在国际市场竞争力明显减弱<sup>[2]</sup>。因此,研究流沙湾养殖结构优化与养殖污染调控技术,改善海湾生态环境,对振兴流沙湾“南珠”产业具有

重要的意义。关于养殖结构优化、养殖自身污染控制与生物修复技术的研究,国内外学者研究的较少。有研究表明,栽植水草、放养螺蛳可明显改善养殖中华绒螯蟹的太湖水质环境状况<sup>[3]</sup>。龙须菜、菊花心江蓠对减轻养殖污水对海区的污染,防止水体富营养化,抑制赤潮的发生有积极作用<sup>[4-5]</sup>。赵卫国等<sup>[6]</sup>、申玉春等<sup>[7]</sup>分别从营养级食物链角度研究了水库和虾池环境的生物调控方法。Kinoshita等<sup>[8]</sup>、Giangrande等<sup>[9]</sup>分别用多毛类动物对海湾和养殖废水环境进行了修复,认为通过培养扩散多毛小头虫并促进其群体快速性增长,可以加快其分解底质中有机物的速率,从而对底质环境加以修复。

### 1 材料与方法

#### 1.1 规划与设计

**设计思想** 水产养殖结构优化的基本思想是建立多元养殖系统,使投入系统中的物质和能

收稿日期:2010-01-23 修回日期:2010-05-13

资助项目:广东省科技计划项目(2007A032600004);国家公益性行业科研专项(Nyhyzx07-047)

通讯作者:吴灶和, Tel:0759-2383023, E-mail: Wuzh@gdou.edu.cn

量最大限度的被处于不同营养级和生态位的多种养殖生物充分利用,转化为水产品<sup>[7]</sup>,也就是使系统内物质和能量转化效率最大化。生物修复技术是利用植物、动物和微生物吸收、降解、转化水体中的污染物,使污染物的浓度降低到可接受的水平,或将有毒有害的污染物转化为无害的物质<sup>[10]</sup>。本研究将二者有机的结合起来,根据流沙湾养殖生产实际,在贝类养殖比较集中的海区,网栏构建养殖结构优化与生态环境生物修复研究示范区。将在生态位上具有互补和生物修复功能的贝、鱼、藻等不同种经济动植物,以适宜的设计比例养殖在示范区中,根据海湾水文动力学特征,确定不同种生物的养殖区域布局。投入系统中的物质和能量(饲料),随着水流在不同养殖海区间传输,可被营养级和生态位不同的多种养殖生物充分利用,物质利用率得以提高,从而减少海湾水体有机残余物质及营养盐数量,水质环境得以净化。以期建立一种贝-鱼-藻养殖结构优化与水质环境生物自修复系统。

**总体布局** 在流沙湾大井水域选择低潮期水深不低于2 m的海区,网栏设置33.3 hm<sup>2</sup>半封闭的养殖结构优化及其生态环境生物修复研究示范海区。在示范海区内设置3个不同的养殖区,贝类养殖与育珠区、鱼类养殖区和大型海藻栽培区(图1)。3个不同的养殖区采取中央平行布设的方式设置,平行间距基本保持一致。此外,在网栏内放养一定数量的鱼、虾、蟹和贝等进行粗放式混养。

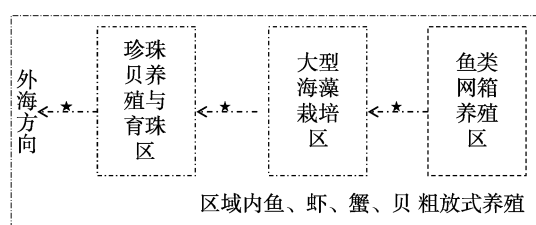


图1 贝-鱼-藻优化养殖结构及生态环境修复系统(★示范海区内采样点)

外海方向 open sea direction; 珍珠贝养殖与育珠区 pearl oyster culture area; 大型海藻栽培区 marine macro-algae cultivation area; 鱼类网箱养殖区 fish cage culture area; 区域内鱼、虾、蟹、贝粗放式养殖 fish, shrimp, crabs, shellfish were cultured by extensive style.

Fig. 1 The optimal culture structure of shellfish-fish-algae and its ecological environment bioremediation system (Star markers were several sampling points in the demonstrative sea area)

**养殖区规划与设置** 贝类养殖与育珠区: 用直径7~10 cm长6 m左右的木条打入海底作为桩柱,桩间左右间距均为5 m,桩间用直径1 cm的尼龙绳相互牵连,形成独立的面积为 $0.4 \times 10^4 \text{ m}^2$ 左右的吊贝育珠单元。每个单元之间相距20 m,便于机动船进出,进行洗贝、清贝等养殖生产作业。育珠贝笼吊于牵连绳上,行间距与贝笼间距均为0.5 m。育珠贝笼为底面直径0.4 m、高0.3 m的锥形笼(图2)。

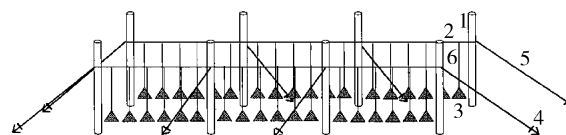


图2 贝类养殖与育珠设施示意图

1. 桩柱, 2. 主绳, 3. 贝笼, 4. 锚, 5. 锚绳, 6. 吊绳。

Fig. 2 The facility schematic diagram of shellfish culture and pearl cultivation

1. pile column, 2. main rope, 3. shellfish cage, 4. anchor, 5. mooring rope, 6. hoist cable.

**鱼类网箱养殖区:**将2根长60 m、直径20 mm的主缆绳,绑系泡沫塑料浮子制作成主浮绳,相间4 m平行排列,两端分别连结主锚绳和主铁锚并拉紧固定。将多根副缆绳绑系泡沫塑料浮子制作成副浮绳,分别与2根主浮绳相连接,形成1组多个 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 浮绳式网箱的柔韧性支持框架。大浮子为长1.0 m、直径0.5 m的圆柱体,连接于横向副浮绳两端,间距4.5 m;小浮子为长0.50 m、直径0.25 m的圆柱体,间距1 m排列。网箱 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 绑系在由主浮绳和副浮绳所组成的正方形支持框架上,在2根主浮绳之间串连式排列,间距0.5 m。形成近海浮绳式网箱养殖系统(图3)。

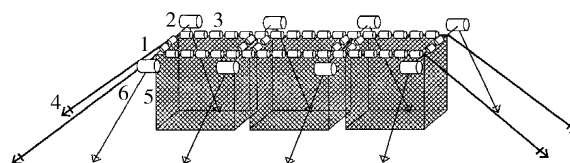


图3 浮绳式网箱设施示意图

1. 主缆绳, 2. 大泡沫浮子, 3. 小泡沫浮子, 4. 锚, 5. 网箱, 6. 锚绳。

Fig. 3 The facility schematic diagram of floating rope cage

1. main cable, 2. big foam float, 3. small foam float, 4. anchor, 5. net cage, 6. mooring rope.

**大型海藻栽培区:**将2根长60 m、直径20 mm的主缆绳绑系球形硬质塑料浮子,制作成主浮绳,

相间 4 m 平行排列,通过主锚和锚绳拉紧固定于海中。硬质塑料浮子直径为 0.15 m,间距 1 m。在 2 根主浮绳之间每 4 m 绑系 1 根直径 5 cm、长 4.2 m 的毛竹,使 2 根主浮绳保持固定的间距。将直径为 8 mm 的聚乙烯绳制成苗绳,直接系附于 2 根主浮绳之间。苗绳间距 0.2 m。在苗绳上夹苗,苗距为 0.1 m,平均每簇 2~3 株(图 4)。

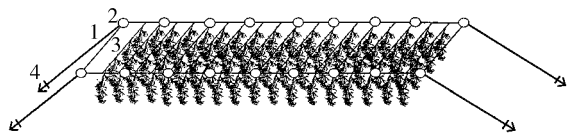


图 4 大型海藻栽培设施示意图

1. 主缆绳, 2. 浮子, 3. 苗绳, 4. 锚。

Fig. 4 The facility schematic diagram of macro-algae cultivation

1. main cable, 2. float, 3. seeding rope, 4. anchor.

**养殖结构优化试验** 于 2008 年 3 月至 2009 年 1 月,在面积为 33.3 hm<sup>2</sup> 海域养殖示范海区进行养殖结构优化与生态环境生物修复试验。其中,贝类养殖与育珠区面积 2.0 × 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>,浮绳式网箱鱼类养殖区面积 3.2 × 10<sup>2</sup> m<sup>2</sup> (20 个网箱),大型海藻栽培区面积 1.35 × 10<sup>3</sup> m<sup>2</sup>。

### 1.2 养殖生物放养

**粗放式混合养殖** 2008 年 3 月 6 日,在示范海区中,放养蓝子鱼、凡纳滨对虾、锯缘青蟹、菲律宾蛤仔进行粗放式混养,充分利用水域中的天然饵料生物,提高水体物质与能量的生物转化效率。

**贝类养殖与珍珠培育** 2008 年 3 月 6 日,在示范区进行马氏珠母贝育珠试验,吊养施术贝,贝壳高 5.0~6.5 cm,体重 40~50 g。每笼吊养插核贝 35 只,在 2.0 × 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> 有效养殖海区内,共投放插核珠母贝 4.5 × 10<sup>5</sup> 只。

**鱼类养殖** 2008 年 3 月 6 日,在示范海区进行投饵养殖肉食性海水鱼类。投放鱼的种类和规格分别为卵形鲳鲹平均体重 12.1 g、体长 3~6 cm、数量 20 000 尾;川纹笛鲷平均体重 10.4 g、体长 4~5 cm、数量 20 000 尾;尖吻鲈平均体重 11.3 g、体长 5~6 cm、数量 10 000 尾。鱼类养殖方式为沿主浮绳方向采取分排间养模式。

**海藻栽培** 2008 年 10 月 14 日,在示范海区栽培大型海藻羊栖菜、马尾藻,其中羊栖菜栽培面积为 1 000 m<sup>2</sup>、马尾藻栽培面积为 350 m<sup>2</sup>。两

种海藻采取间种方式栽培。羊栖菜苗种来源于浙江省洞头县全人工培育的有性生殖幼孢子体苗,马尾藻苗种采自流沙湾周边外海海区。

### 1.3 水质及生物指标测定

**测定指标** 在示范海区内设置 3 个采样站,分别在鱼类网箱养殖区、大型海藻栽培区、贝类养殖与育珠区之间及其下游(图 1)。在距离示范海区外缘 2 km 处,沿涨潮方向设置 3 个采样站。每月采集一次水样(用 5 L 有机玻璃采水器采集),测定示范海区内及毗邻海区水温、盐度、透明度、营养盐、悬浮物、浮游生物数量,并监测示范海区内养殖生物的生长情况。采集投入和产出生物样品测定其能值。

**测定与分析方法** 悬浮物定量:取表、中、底混合水样 2 L,准确取水样 1 500 mL,用 0.45 μm 滤膜(使用前用纯水充分洗涤,编号、烘干恒重)抽滤。将带有悬浮有机物的滤膜转移到培养皿中,在 80 °C 条件下烘干测其恒重,即得悬浮物的数量。

**能值测定:** 鱼、贝、藻、饲料(颗粒饲料和饵料鱼),在 70 °C 的条件下烘干至恒重,测定样品的水分含量。然后用粉碎机将烘干好的样品粉碎、磨细、混匀,用 5E-1C 电脑量热仪测其能值。其中浮游植物初级生产力能量按 1gO<sub>2</sub> = 6.1 g 浮游植物湿重,444.7 g 浮游植物湿重 = 1 MJ 折算<sup>[11]</sup>。

**生态效率:** 每周用 ST-80C 型数字式照度计测定周日光照强度,记录天气情况,换算出实验期间单位面积接受的总太阳辐射能的量。生态系统各环节的生态效率计算公式<sup>[12-13]</sup>如下:

光能利用率 = 初级生产力(MJ)/太阳辐射能(MJ);

光能转化效率 = 生物净产量(MJ)/太阳辐射能(MJ);

总能量毛转化效率 = 生物毛产量(MJ)/总投入能(投入生物能 + 饲料能 + 初级生产力)(MJ);

总能量净转化效率 = 生物净产量(MJ)/总投入能(投入生物能 + 饲料能 + 初级生产力)(MJ);

单位净产量耗饲料能 = 饲料能(MJ)/生物净产量(kg);

单位净产量耗总能 = 总投入能(MJ)/生物净产量(kg)。

盐度用 WYY-II 型手持折射仪测定,氮、磷营

养盐用光电比色法测定,其它项目分析按GB17378—1998《海洋监测规范》进行。

#### 1.4 数据的统计分析

采用 SPSS 11.5 对数据进行单因素方差分析和 Duncan 氏多重比较,以  $P < 0.05$  作为差异显著水平,描述性统计值采用平均值  $\pm$  标准误 (Mean  $\pm$  SE) 表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 水质状况

经过 10 个月的结构优化养殖和生态环境生物修复控制,示范海区水域生态环境得以明显改善(表 1),示范海区水质状况与毗邻海区比较差异显著。

表 1 示范海区与毗邻海区水质状况(2008)

Tab. 1 The water quality condition of the demonstrative sea area and its adjacent sea area (2008)

指标 index	海区 sea area	月份 month				
		3	4	5	6	7
水温(°C) water temperature	示范海区	23.0	26.2	29.4	30.0	32.4
	毗邻海区	23.1	26.3	29.5	30.1	32.4
盐度 salinity	示范海区	31.5	31.0	30.0	30.0	29.5
	毗邻海区	30.0	29.0	29.0	28.5	28.0
透明度(cm) transparency	示范海区	120.3 $\pm$ 1.5 <sup>D</sup>	136.0 $\pm$ 0.6 <sup>E</sup>	160.3 $\pm$ 0.9 <sup>G</sup>	164.7 $\pm$ 0.3 <sup>HI</sup>	170.3 $\pm$ 0.3 <sup>J</sup>
	毗邻海区	110.7 $\pm$ 0.7 <sup>C</sup>	203.3 $\pm$ 1.7 <sup>M</sup>	121.7 $\pm$ 0.9 <sup>D</sup>	151.3 $\pm$ 1.3 <sup>F</sup>	172.0 $\pm$ 1.2 <sup>J</sup>
总氮(mg/L) TN	示范海区	0.671 $\pm$ 0.002 <sup>A</sup>	0.845 $\pm$ 0.032 <sup>AB</sup>	1.893 $\pm$ 0.088 <sup>EF</sup>	2.147 $\pm$ 0.004 <sup>FGH</sup>	1.452 $\pm$ 0.005 <sup>CD</sup>
	毗邻海区	1.662 $\pm$ 0.045 <sup>DE</sup>	1.783 $\pm$ 0.090 <sup>DEF</sup>	1.654 $\pm$ 0.017 <sup>DE</sup>	2.260 $\pm$ 0.068 <sup>GHI</sup>	4.204 $\pm$ 0.208 <sup>M</sup>
总磷(mg/L) TP	示范海区	0.052 $\pm$ 0.004 <sup>A</sup>	0.126 $\pm$ 0.009 <sup>ABC</sup>	0.678 $\pm$ 0.055 <sup>F</sup>	1.047 $\pm$ 0.048 <sup>H</sup>	1.496 $\pm$ 0.039 <sup>I</sup>
	毗邻海区	0.342 $\pm$ 0.023 <sup>D</sup>	0.137 $\pm$ 0.007 <sup>ABC</sup>	0.081 $\pm$ 0.004 <sup>AB</sup>	0.483 $\pm$ 0.014 <sup>E</sup>	0.688 $\pm$ 0.007 <sup>F</sup>
悬浮物(mg/L) suspended matter	示范海区	27.33 $\pm$ 0.63 <sup>I</sup>	26.48 $\pm$ 0.88 <sup>I</sup>	24.18 $\pm$ 1.04 <sup>H</sup>	20.19 $\pm$ 0.52 <sup>FG</sup>	14.56 $\pm$ 0.59 <sup>DE</sup>
	毗邻海区	15.42 $\pm$ 0.72 <sup>E</sup>	19.14 $\pm$ 0.41 <sup>F</sup>	26.72 $\pm$ 1.19 <sup>I</sup>	18.61 $\pm$ 0.36 <sup>F</sup>	21.95 $\pm$ 1.23 <sup>GH</sup>

指标 index	海区 sea area	月份 month				
		8	9	10	11	12
水温(°C) water temperature	示范海区	32.7	31.2	28.1	20.2	17.2
	毗邻海区	32.7	31.2	28.4	20.3	17.2
盐度 salinity	示范海区	29.4	29.0	28.0	27.0	26.5
	毗邻海区	27.5	27.0	26.5	26.0	26.0
透明度(cm) transparency	示范海区	181.0 $\pm$ 0.6 <sup>K</sup>	191.7 $\pm$ 1.5 <sup>L</sup>	159.7 $\pm$ 0.9 <sup>G</sup>	181.0 $\pm$ 0.6 <sup>K</sup>	203.0 $\pm$ 1.5 <sup>M</sup>
	毗邻海区	102.3 $\pm$ 1.5 <sup>B</sup>	101.3 $\pm$ 0.7 <sup>B</sup>	81.7 $\pm$ 1.7 <sup>A</sup>	161.7 $\pm$ 1.7 <sup>GH</sup>	166.7 $\pm$ 1.7 <sup>I</sup>
总氮(mg/L) TN	示范海区	2.446 $\pm$ 0.025 <sup>HU</sup>	2.897 $\pm$ 0.081 <sup>K</sup>	2.571 $\pm$ 0.080 <sup>JK</sup>	2.113 $\pm$ 0.080 <sup>FGH</sup>	1.398 $\pm$ 0.105 <sup>CD</sup>
	毗邻海区	2.818 $\pm$ 0.061 <sup>JK</sup>	3.273 $\pm$ 0.008 <sup>L</sup>	2.076 $\pm$ 0.031 <sup>FGH</sup>	1.095 $\pm$ 0.031 <sup>BC</sup>	0.942 $\pm$ 0.487 <sup>A</sup>
总磷(mg/L) TP	示范海区	1.541 $\pm$ 0.034 <sup>J</sup>	1.752 $\pm$ 0.083 <sup>K</sup>	1.418 $\pm$ 0.027 <sup>I</sup>	0.819 $\pm$ 0.038 <sup>G</sup>	0.534 $\pm$ 0.054 <sup>E</sup>
	毗邻海区	0.227 $\pm$ 0.005 <sup>C</sup>	0.384 $\pm$ 0.006 <sup>D</sup>	0.201 $\pm$ 0.009 <sup>C</sup>	0.185 $\pm$ 0.009 <sup>C</sup>	0.169 $\pm$ 0.013 <sup>BC</sup>
悬浮物(mg/L) suspended matter	示范海区	13.43 $\pm$ 0.28 <sup>CDE</sup>	12.63 $\pm$ 0.62 <sup>BCD</sup>	11.95 $\pm$ 0.46 <sup>BC</sup>	10.84 $\pm$ 0.59 <sup>B</sup>	7.24 $\pm$ 0.33 <sup>A</sup>
	毗邻海区	27.14 $\pm$ 1.16 <sup>I</sup>	26.68 $\pm$ 0.56 <sup>I</sup>	22.08 $\pm$ 1.40 <sup>GH</sup>	12.82 $\pm$ 0.63 <sup>BCD</sup>	11.47 $\pm$ 0.49 <sup>BC</sup>

注:示范海区 model sea; 毗邻海区 adjacent sea area。表中数据为 3 个样站的平均值。同行数据右上角标有不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Notes: The data in the table were the average value of three sample points. Different letters were marked in the top right corner of the same row data indicated significant differences ( $P < 0.05$ ).

养殖期间示范海区及毗邻海区水温变化在 17.2 ~ 32.7 °C 之间,盐度变化在 26.0 ~ 31.5 之间,水温和盐度与海域自然气候变化规律一致,没有显著差异。

示范海区与毗邻海区透明度平均值分别为 166.8 cm、137.3 cm; 悬浮物含量平均值分别为 16.88 mg/L、20.20 mg/L。单因素方差分析显

示,透明度与悬浮物含量月际间差异显著,表现为示范海区透明度整体高于毗邻海区,悬浮物含量低于毗邻海区。示范海区与毗邻海区总氮平均值分别为 1.843 mg/L、2.177 mg/L; 总磷平均值分别为 0.946 mg/L、0.290 mg/L。单因素方差分析显示总氮与总磷含量月际间差异显著,但变化趋势各不相同。示范海区总氮含量随养殖期的延长

呈先上升后下降,再上升再下降的变化趋势;总磷含量呈先上升后下降趋势。在养殖初期的3月份,总氮、总磷含量均处于最低水平,到9月份达到最高值,总氮、总磷含量分别为(2.897 ± 0.081) mg/L 和(1.752 ± 0.083) mg/L。而毗邻海区总氮含量随养殖期的延长总体呈现先上升后下降、再上升再下降趋势、总磷营养盐含量的变化趋势呈波浪式变化,最高值出现在7月份,总氮、总磷含量分别为(4.204 ± 0.208) mg/L 和(0.688 ±

0.007) mg/L。

## 2.2 浮游生物

示范海区与毗邻海区浮游植物生物量平均值分别为3.79 mg/L、1.77 mg/L,浮游动物生物量平均值分别为2.99 mg/L、1.56 mg/L(表2),示范海区浮游生物量明显高于毗邻海区。单因素方差分析表明,浮游植物生物量月际间差异显著;浮游动物生物量3月份差异不显著,其余月份差异显著。

表2 示范海区与毗邻海区浮游生物状况(2008)

Tab.2 The state of plankton in the demonstrative sea area and its adjacent sea area(2008)

月份 month	浮游植物(mg/L) phytoplankton		浮游动物(mg/L) zooplankton	
	示范海区 model sea	毗邻海区 adjacent sea area	示范海区 model sea	毗邻海区 adjacent sea area
3	1.24 ± 0.06 <sup>BC</sup>	0.06 ± 0.01 <sup>A</sup>	1.37 ± 0.04 <sup>D</sup>	1.42 ± 0.07 <sup>DE</sup>
4	1.42 ± 0.05 <sup>BC</sup>	0.11 ± 0.02 <sup>A</sup>	1.65 ± 0.06 <sup>E</sup>	0.15 ± 0.01 <sup>AB</sup>
5	1.67 ± 0.06 <sup>C</sup>	0.49 ± 0.10 <sup>A</sup>	2.41 ± 0.08 <sup>G</sup>	0.38 ± 0.04 <sup>B</sup>
6	2.36 ± 0.04 <sup>D</sup>	0.53 ± 0.04 <sup>A</sup>	2.82 ± 0.07 <sup>H</sup>	0.29 ± 0.03 <sup>AB</sup>
7	3.01 ± 0.1 <sup>E</sup>	1.12 ± 0.06 <sup>B</sup>	3.12 ± 0.04 <sup>I</sup>	0.05 ± 0.01 <sup>A</sup>
8	4.11 ± 0.13 <sup>G</sup>	1.63 ± 0.03 <sup>C</sup>	3.49 ± 0.14 <sup>J</sup>	3.01 ± 0.13 <sup>HI</sup>
9	5.77 ± 0.08 <sup>H</sup>	3.67 ± 0.13 <sup>FG</sup>	3.67 ± 0.08 <sup>J</sup>	1.09 ± 0.03 <sup>C</sup>
10	7.03 ± 0.46 <sup>I</sup>	3.73 ± 0.09 <sup>FG</sup>	4.51 ± 0.19 <sup>L</sup>	4.01 ± 0.10 <sup>K</sup>
11	7.74 ± 0.37 <sup>J</sup>	3.92 ± 0.03 <sup>FG</sup>	4.78 ± 0.18 <sup>M</sup>	4.03 ± 0.09 <sup>K</sup>
12	3.58 ± 0.21 <sup>F</sup>	2.43 ± 0.08 <sup>D</sup>	2.05 ± 0.06 <sup>F</sup>	1.16 ± 0.04 <sup>CD</sup>

注:表中数据为3个样站的平均值。同列数据右上角标有不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Notes: The data in the table were the average value of three sample points. Different letters were marked in the top right corner of the same column data indicated significant differences( $P < 0.05$ ).

在10个月的养殖期内示范海区水域浮游生物数量呈逐渐升高的变化趋势,至11月达最高值,浮游植物和浮游动物生物量分别为(7.74 ± 0.37) mg/L 和(4.78 ± 0.18) mg/L。毗邻海区浮游植物数量随季节的变化呈先上升后平稳增长至11月份呈现急剧下降的趋势,在11月份生物量达到最高值,为(3.92 ± 0.03) mg/L;而浮游动物数量随季节变幻呈波浪式震荡变化,规律性不明显。

## 2.3 贝、鱼、藻生长与育珠效果

**贝类生长与育珠效果** 经过10个月的示范育珠养殖试验,插核马氏珠母贝壳高达到6~7 cm,体重达到45~65 g,生长良好。主要表现在贝壳厚度增加,贝肉即软体部重量增加,贝壳表面光洁,附着物少;贝体闭壳有力,足丝生长旺盛即足丝粗壮,附着牢固。插核珠母贝存活率为73.9%,其中,休养期存活率为87.4%,育珠期存活率为84.6%;育珠贝留核率为49.9%,其中,休养期留核率为72.6%,育珠期留核率为68.7%。于2009年1月12日采收,共收获珍珠33.5 kg,

其中优质珍珠4.6 kg,优质珠比率13.7%。珠层厚度达300~600 μm,平均472 μm(表3)。

**鱼类生长** 于2009年1月13日捕捞,示范海区鱼类网箱养殖区共生产鲜鱼21 365 kg,其中卵形鲳鲹10 285 kg,川纹笛鲷7 000 kg,尖吻鲈4 080 kg。饵料系数,卵形鲳鲹为干料1.6,川纹笛鲷为冰鲜鱼4.0,尖吻鲈为冰鲜鱼4.5。终末成活率,卵形鲳鲹为74.3%,川纹笛鲷为64.2%,尖吻鲈为61.7%。鱼类生长情况见表4。

**藻类生长** 于2009年3月14日收获,示范海区共生产大型海藻3 091.3 kg,其中羊栖菜593.8 kg,马尾藻2 497.5 kg。大型藻类生长情况见表5。

## 2.4 能量转化效率

在10个月的实验期内示范海区接受太阳总辐射能为13 427.1 MJ/m<sup>2</sup>总输入能1 122 204.6 MJ,总输出生物能404 533.33 MJ,净输出生物能388 045.4 MJ(表6)。示范海区光能利用率为0.20%,光合能总转化效率为8.35%,总能量毛转化效率为36.05%,总能量净转化效率为

34.58%, 单位净产量耗饲料能为 2.703 1 MJ/kg, 单位净产量耗总能为 2.891 9 MJ/kg。

表 3 马氏珠母贝养殖与育珠效果

Tab. 3 The effects of shellfish culture and pearl cultivation of *Pinctada martensii*

育珠方式 methods of pearl cultivation	优化育珠 optimized of pearl cultivation	传统育珠 traditional pearl cultivation
休养期存活率(%) recuperation survival rate	87.4(78.4~92.3)	69.6 <sup>[14]</sup> /86.8 <sup>[15]</sup>
休养期留核率(%) recuperation remained nucleus rate	72.6(61.1~81.3)	54.7 <sup>[14]</sup> /45.0 <sup>[15]</sup>
育珠期存活率(%) cultivation survival rate	84.6(73.6~93.8)	82.7 <sup>[14]</sup> /71.9 <sup>[15]</sup>
育珠期留核率(%) pearl cultivated remained nucleus rate	68.7(64.8~78.5)	39.0 <sup>[15]</sup>
成珠率(%) pearl formation rate	82	80 <sup>[14]</sup>
珠层厚度(μm) thickness of pearl layer	472(300~600)	100~120 <sup>[16]</sup>

注:① 括号内数据分别为成活率、留核率、珠层厚度范围;② 休养期存活率 = 休养期存活贝数/育珠贝总数;育珠期存活率 = 育珠期存活贝数/休养期存活贝数;③ 休养期留核率 = (插核粒数 - 脱核粒数)/休养期存活贝数;育珠期留核率 = 开珠粒数/开贝个数;④ 成珠率 = 收珠总数/育珠贝总数,即平均每只贝收珠粒数。

Notes:① The data in the brackets were the survival rate, the remained nucleus rate, and the pearl layer thickness range of *Pinctada martensii* respectively; ② The survival rate of the recuperation = the survival number of shellfish during the recuperation/the total number of pearl shellfish; The survival rate of pearl cultivation = the survival number of shellfish during the pearl cultivation/the survival number of shellfish during the recuperation; ③ The remained nucleus rate of the recuperation = (the number of nucleus-insertion-the number of nucleus-removal)/the survival number of shellfish during the recuperation; the remained nucleus rate of pearl cultivation = the number of open-pearls/the number of open-shellfishes; ④ The pearl formation rate = the total number of harvested pearls/ the total number of pearl shellfish, that was an average number of harvested pearls of each shellfish.

表 4 示范海区网箱养殖鱼类放养与生长情况(2008)

Tab. 4 The stocking and growth conditions of cage-cultured fish in the demonstrative sea area(2008)

种类 species	项目 item	日期 date			
		3月6日	6月12日	9月12日	12月15日
卵形鲳鲹 <i>Trachinotus ovatus</i>	体长(cm) length	3~6	20~15	22~28	30~35
	体重(g) weight	8~15	250~350	400~600	550~750
	每箱尾数(尾) number in each cage	5 000	2 510	2 140	1 870
	网箱数(个) the number of each cage	4	6	7	8
川纹笛鲷 <i>Litaniae sebae</i>	体长(cm) length	4~5	16~22	25~32	33~37
	体重(g) weight	6~12	120~150	350~400	450~600
	每箱尾数(尾) number in each cage	5 000	2 200	1 870	1 620
尖吻鲈 <i>Lates calcarifer</i>	网箱数(个) the number of each cage	4	6	7	8
	体长(cm) length	5~6	20~26	30~42	32~45
	体重(g) weight	10~13	300~350	420~700	450~750
尖吻鲈 <i>Lates calcarifer</i>	每箱尾数(尾) number in each cage	3 333	2 100	1 560	1 555
	网箱数(个) the number of the cage	3	3	4	4

表 5 示范海区栽培大型藻类生长情况和收获产量

Tab. 5 The growth condition and harvest yield of macro-algae in the demonstrative sea area

项目 item	平均株高(cm) average height						鲜重(kg) fresh weight
	2008-10	2008-11	2008-12	2009-01	2009-02	2009-03	2009-03
羊栖菜 <i>Sargassum fusiforme</i>	5.73 ± 4.03	11.78 ± 6.54	22.10 ± 8.94	26.40 ± 9.25	31.68 ± 7.79	38.7 ± 12.53	593.8
马尾藻 <i>Sargassum</i>	6.5 ± 1.67	14.50 ± 2.63	26.50 ± 4.95	33.12 ± 7.36	42.97 ± 11.70	56.65 ± 43.21	2 497.5

表 6 示范海区投入与产出物质能量值  
Tab. 6 The energy of input and output materials in the demonstrative sea area

项目 item	初能值(MJ/kg) initial energy value	终能值(MJ/kg) terminal energy value	投入能(MJ) input energy	毛输出能(MJ) gross output energy	净输出能(MJ) net output energy
卵形鲳鲹 <i>Trachinotus ovatus</i>	22.63	23.24	3 920.55	166 623.21	162 702.7
川纹笛鲷 <i>Litaniae sebae</i>	23.47	24.61	3 769.03	126 842.4	123 073.4
尖吻鲈 <i>Lates calcarifer</i>	22.72	23.21	1 833.55	66 202.53	64 368.98
马氏珠母贝 <i>Pinctada martensii</i>	0.76	0.82	6 001.25	7 952.36	1 951.11
羊栖菜 <i>Sargassum fusiforme</i>	12.16	13.24	285.67	7 157.48	6 871.81
马尾藻 <i>Sargassum</i>	12.43	13.86	677.91	29 755.35	29 077.44
卵形鲳鲹饲料 feed of <i>Trachinotus ovatus</i>	14.9	14.9	245 194.40	-	-
冰鲜杂鱼饲料 feed of ice fresh mixed fish	22.95	22.95	803 716.89	-	-
浮游植物初级生产力 primary productivity	-	-	56 805.40	-	-
合计 total	-	-	1 122 204.65	404 533.33	388 045.44

### 3 讨论

#### 3.1 养殖结构优化与生态环境修复的基本原理

试验建立贝-鱼-藻复合生态系统,在贝类养殖与育珠区开展网箱养鱼、间养大型藻类,根据海湾水域的营养类型和水文特点,确定合理的布局、间养密度和放养数量,就是利用贝类、鱼类和藻类等不同类型养殖生物在生态位上的互补作用,使海湾水域中的物质和能量得以充分利用。在贝-鱼-藻复合型生态系统中,贝类养殖与珍珠培育是养殖系统的主体。网箱投饵养殖海水鱼类是系统中能量的提供者。投入到网箱中的饵料首先被鱼类所利用,生产优质海水鱼类,没有被利用的残饵以及鱼类粪便和代谢废物直接进入养殖海域,随着潮汐水流在各养殖区间流动,其中的有

机碎屑可以直接被珍珠贝所滤食,溶解有机物矿化分解产生氮、磷等营养元素,增加了水体中的营养物质,提高了水体的初级生产力,促进浮游植物繁殖和生长,为贝类提供充足的饵料。随着养殖时间的延长投饵量加大,产生的废弃物增多,可能导致水体富营养化,在 10 月份引入大型藻类,通过其吸收利用降低水体的营养盐负荷,水质状况得以改善(图 5)。理论上,在相对封闭的海湾水域,大型海藻与浮游植物对营养盐的利用存在竞争关系,在竞争中一般浮游植物处于优势地位,因为浮游植物生长的半饱和常数比大型海藻低,对氮源的亲和力高,因此在增养殖后期适当的间养大型海藻对浮游植物增殖不会造成大的影响,反而对净化水质、减少悬浮物的积累有良好的作用。

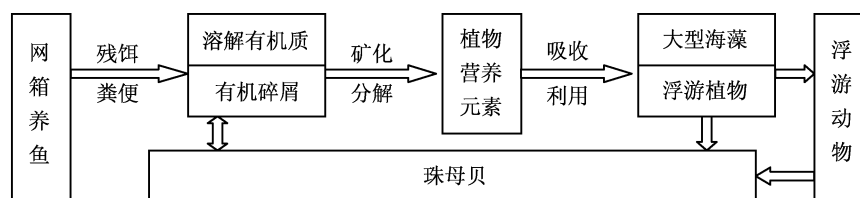


图 5 示范海区生态系统内物质循环图

网箱养鱼 fish cultured in net cage; 残饵 bait; 粪便 faeces; 溶解有机质 dissolved organic matter; 有机碎屑 detritus; 矿化 mineralization; 分解 decomposition; 植物营养元素 plant nutrient elements; 吸收 absorbability; 利用 utilization; 大型海藻 macro-algae; 浮游植物 phytoplankton; 浮游动物 zooplankton; 珠母贝 fucata.

Fig. 5 The schematic diagram of material cycle of ecosystem in the demonstrative sea area

#### 3.2 示范海区生态系统中氮、磷的营养水平

试验结果表明示范海区总氮、总磷营养盐浓度总体上随养殖期的延长逐渐升高,到 9 月份达到最高值,以后则逐渐下降。这是水域中氮、磷营养盐的增补作用与消耗作用矛盾运动的结果。水

域中氮、磷营养盐的增补过程主要有两个方面:一是外源性饲料、肥料的投入,以饲料中氮的含量 100% 计算,研究认为双壳贝类排放到水体中的氮占总投入氮的 75%,鲍鱼、鲑鳟鱼和虾类排放到水体中的氮分别为投入氮的 60% ~ 75%, 70% ~

75%和77%~94%<sup>[17]</sup>。二是内源性各类生物的代谢废物及其残骸经过一系列的生物化学过程把含氮有机物释放到水中。生物残骸在异养微生物的作用下,可经过氨化作用迅速转变为氨态氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ );沉积于底质中的含氮有机物在适当的条件下,也会被异养微生物分解矿化转变为氨态氮;固氮藻类在其生长过程中,把所同化氮总量的20%~60%释放回到水中;大型动物和浮游动物在正常生命活动过程中排泄含氮废物,多以氨的形式释放到水中。鱼类排泄的磷绝大部分呈正磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ )形式,某些鱼类所释放的总磷中正磷酸盐所占的比率为85%~95%,有的种类甚至高达100%<sup>[18]</sup>。养殖生态系统中鱼类的正磷酸盐排泄率与浮游植物正磷酸盐摄取率的比值,是反映磷排泄在系统磷再循环过程中的重要指标之一。Lamarra<sup>[19]</sup>根据湖泊围栏实验结果认为,鲤(*Cyprinus carpio*)的磷排泄是湖泊初级生产者的主要营养物来源;Brabrand等<sup>[18]</sup>对Gjersjøen湖中的拟鲤(*Rutilus rutilus*)研究得出,该种群5~10月的磷释放率基本等于湖泊的磷负荷,其中在浮游植物严重缺磷的7~9月,来自该种群的磷供给率大约为外源磷供给率的2倍。氮、磷营养盐的消耗过程主要在于浮游植物和大型藻的吸收利用。在示范海域进行投饵网箱养殖吃食性鱼类,加强了水域氮、磷营养盐的增补作用,吊贝育珠由于贝类等滤食作用使生物转化过程得以加强。10月份在示范海区栽培羊栖菜和马尾藻,增加了水体中氮、磷营养盐的消耗因子。有研究表明栽培收获每吨羊栖菜可从海水中去除氮和磷分别为2.60 kg和0.14 kg,栽培收获每吨马尾藻可从海水中去除氮和磷分别为2.01 kg和0.11 kg<sup>①</sup>。

### 3.3 示范海区生态系统浮游生物的生物量

试验结果表明示范海区水域浮游生物数量随养殖时间的延长逐渐升高,且示范海区浮游生物量明显高于毗邻海区。一方面,网箱养鱼导致水域中有充分的氮、磷营养盐补充,从而促进浮游植物的生长,浮游动物通过摄食浮游植物,其生物量也会显著提高。另一方面,养殖贝类的滤食作用会对浮游生物量产生显著的影响。贝类对浮游生物的滤食效应会间接导致一些生长速率较慢的浮游生物的生物量逐渐降低,达到不可恢复的水平,使得生长较快的浮游生物成为优势种<sup>[20]</sup>。同样

浮游动物对浮游植物的摄食,也起到消减低生长速率浮游植物的作用。贝类和鱼类等滤食性动物的滤食作用,可加快水体中的营养盐循环<sup>[21]</sup>,为浮游植物的生长提供一定的补偿,补偿效应大于滤食效应使浮游生物生物量升高。此外,贝类和鱼类等滤食性动物的滤食作用能够促进水体中悬浮物的沉降,增加水体的透明度,光照条件改善也有利于浮游植物生物量的增加,随之由于饵料数量的增加,浮游动物的生物量也相应的增加。

### 3.4 示范海区养殖生物的生态作用

**贝类生长与育珠效果** 示范海区吊养的马氏珠母贝生长良好,与传统育珠方式相比,所培育的珍珠质量有明显的提高。一方面,投饵养殖吃食性鱼类增加了水体的饵料数量和种类,提高了初级生产力水平,育珠贝饵料供应充足,贝体生长较好,体质健壮;养殖后期适度进行大型海藻栽培,不仅降低水体富营养化负荷,并且释放氧气,改善养殖海区溶氧状况,从而改善养殖海区的水质状况;养殖海区水质和生物环境得已全面改善。另一方面,降低了育珠贝养殖密度,养殖容量更为合理。传统育珠方式使用的育珠笼底直径为0.3 m,每笼吊养育珠贝50~70个,每3~4米浮绳吊贝15~30笼<sup>[16]</sup>,基本属于交错式无笼隙吊养,致使笼内育珠母贝相互叠压,分散不均匀,病害易于传播,加之贝笼网目偏小,导致污损生物及浮泥堵塞网目,阻碍水流,影响笼内水体交换,造成溶氧与饵料供应不足。育珠母贝的叠压还会影响彼此的开壳活动和正常的摄食、呼吸<sup>[22]</sup>,严重影响育珠母贝的生长和存活。优化养殖育珠贝笼底面直径为0.4 m,放养插核贝35只,吊贝笼行间距与笼间距均为0.5 m。育珠单元相隔较远,吊养笼隙较大,保证了育珠母贝个体的生存空间以及水流畅通,并可最大程度获得充足的饵料。使得优化养殖育珠模式明显提高了育珠贝成活率,改善了成珠品质。

**鱼类生长及其生态作用** 示范海区网箱养殖鱼类生长良好,饲料系数卵形鲳鲆从传统养殖干料1.3~2.1<sup>[23]</sup>降至1.6,川纹笛鲷从传统养殖冰鲜鱼3.3~6.8<sup>[24]</sup>降至4.0,尖吻鲈从传统养殖冰鲜鱼5.0~6.0<sup>[25]</sup>降至4.5;卵形鲳鲆、川纹笛鲷、尖吻鲈的相对增重率和特定增长率分别是242.83%和0.41%、133.33%和0.28%、126.67%和0.27%。

① 李再亮. 羊栖菜和马尾藻的生长特性及其对水体中氮、磷营养盐吸收效率的研究,2010.



饲料系数低于传统单品种粗放式养殖水平,增重率和特定生长率均高于传统养殖水平。放养吃食性鱼类的主要生态作用在于参与物质循环过程中产生一定数量的无机营养盐和有机物,提高水体的初级生产力。由养殖鱼类饵料碎屑、尸体腐屑及粪便颗粒构成的悬浮碎屑和沉积物等有机物,经过自溶或微生物分解后可为系统中的其他生物提供饵料和营养盐。有研究表明养殖系统内放养鱼类可加速水体中营养物再循环<sup>[26-27]</sup>,鱼类调节水体营养物再循环的途径和机制,包括其排泄和排粪,尸体腐屑的营养物再生等,其中鱼类营养物排泄是网箱养殖鱼类营养物调节的主要方式之一<sup>[28-31]</sup>。

**大型海藻的生态作用** 示范海区在 10 月份引进羊栖菜和马尾藻等大型海藻后,水体中氮、磷营养盐负荷明显降低,水质环境明显改善。大型海藻作为海洋生态系统中重要的初级生产者,有较强的生物滤器功能,其生长过程可大量吸收 C、N、P 等生物营养元素,同时释放氧气,有效抑制厌氧致病微生物的生长。与浮游植物对营养盐的利用不同,大型藻类吸收水体中的营养盐,合成自身的生物量,最终可以通过收获的途径向外界输出,使水域营养盐负荷降低,具有良好的环境效应。因此,在鱼、贝养殖区栽培一定量的经济价值较高的大型海藻,不仅可通过收获大型海藻提高养殖经济效益,而且可有效的降低营养盐的浓度,维持水体中较高的溶氧量,降低鱼贝发生窒息和水质恶化的危险性,从而保证养殖活动安全有序<sup>[32]</sup>。

### 3.5 示范海区的能量转化效率

能量转换效率是水产养殖生态系统研究的核心问题之一。养殖生态系统能量输入可分为两个部分:一是人工投饵、施肥的能量输入,二是太阳辐射能和集水区的有机质输入;输出能则主要是最终经济水产品和沉积底质的沉积物。示范海区实验期间太阳辐射总能为 13 427.1 MJ/m<sup>2</sup>,光能利用率为 0.20%,光合能总转化效率为 8.35%。这显著高于主养青鱼池塘<sup>[35]</sup>、贝类单养池塘<sup>[33]</sup>、虾贝藻混养池塘<sup>[33-34]</sup>生态系统的的光合能转化效率。示范海区总能量毛转化效率为 36.05%,净转化效率为 34.58%。比传统池塘养殖的能量转化效率高得多,主养青鱼池塘为 11.33%~12.20%<sup>[35]</sup>;主养草鱼、鲢鱼的池塘为 11.69%<sup>[36]</sup>;主养鲢、鳙、非鲫高

产池塘为 15.93%<sup>[37]</sup>;对虾单养为 12.24%、虾藻混养为 28.36%、虾贝藻混为 26.70%<sup>[33]</sup>;水库网箱养殖罗非鱼为 17.9%~23.9%<sup>[38]</sup>。示范海区单位净产量耗饲料能为 2.703 1 MJ/kg,单位净产量耗总能为 2.891 9 MJ/kg,二者显著低于虾、贝、藻混养模式<sup>[33-34]</sup>。合理的养殖结构是提高生态系统能量转化效率的有效措施。本实验以马氏珠母贝插核育珠为养殖经济主体,卵形鲳鲷、川纹笛鲷、尖吻鲈为结构主体,间种大型海藻优化示范海区水质环境,贝类既可利用养殖鱼类的残饵,实现自身生长和珠层积累,又在一定程度上净化了水质,同时满足了养殖鱼类定时定点摄食人工和冰鲜饵料的生理特点。这种养殖布局充分利用了不同水层的饵料生物与碎屑,促进了物质和能量的转化,多层分级的合理利用了资源,因此,该优化的复合生态系统表现了较高的能量转化效率。

### 参考文献:

- [1] 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[J]. 渔业经济研究,2010,28(1):105-109.
- [2] 叶富良. 我国南珠养殖业现状及发展对策. 21 世纪中国海洋开发战略[M]. 北京:海洋出版社,2001:246-255.
- [3] 黄鹤忠,王永强,程建新,等. 太湖中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 养殖模式优化及其生态环境效应研究[J]. 海洋与湖沼,2006,37(5):430-437.
- [4] 汤坤贤,游秀萍,林亚森,等. 龙须菜对富营养化海水的生物修复[J]. 生态学报,2005,25(11):3044-3051.
- [5] 汤坤贤,焦念志,游秀萍,等. 菊花心江蓠在网箱养殖区的生物修复作用[J]. 中国水产科学,2005,12(2):156-161.
- [6] 赵卫国,胡荣花,李少华. 利用生物调控技术对大浪淀水库水生生态系统的修复[J]. 河北工程技术高等专科学校学报,2003,(4):15-17.
- [7] 申玉春,熊邦喜,叶富良,等. 虾-鱼-贝-藻养殖结构优化试验研究[J]. 水生生物学报,2007,31(1):30-38.
- [8] Kinoshita Kyoko, Tamaki Sayaka, Ykshioka Miho, et al. Bioremediation of organically enriched sediment deposited below fish farms with artificially mass-cultured colonies of a deposit-feeding polychaete *Capitella* sp. I [J]. Fisheries Science, 2008,74:77-87.
- [9] Giangrande A, Cavallo A, Licciano M, et al.

- Utilization of the filter feeder polychaete *Sabella spallanzanii* Gmelin (*Sabellidae*) as bioremediation in aquaculture [J]. *Aquaculture International*, 2005, 13:129-136.
- [10] 安鑫龙,周启星. 水产养殖自身污染及其生物修复技术[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(9): 1-6.
- [11] 刘思俭,曾淑芳. 江蕨在不同水层中的光合作用与生长[J]. 水产学报, 1982, 6(1): 59-64.
- [12] Li S F. Energy structure and efficiency of a typical Chinese integrated fish farm [J]. *Aquaculture*, 1987, 65:105-118.
- [13] 李吉方,董双林,文良印,等. 盐碱地池塘不同养殖模式的能量利用比较[J]. 中国水产科学, 2003, 10(2): 143-147.
- [14] 符韶,邓陈茂,梁飞龙. 马氏珠母贝养殖与育珠笼具的改进[J]. 实验与技术, 2001, 25(3): 23-24.
- [15] 劳赞,邓陈茂,梁盛. 马氏珠母贝术前处理的研究[J]. 水产科学, 2003, 22(4): 27-29.
- [16] 杨伟. 湛江市珍珠业的现状、问题及对策[J]. 水产科技, 2006, (4): 33-34.
- [17] Bergheim A, Tyvold T, Seymour E A. Effluent loadings and sludge removal from land-based salmon farming tanks [M]. London: AS Special Publication, 1991. 14-27.
- [18] Brabrand A, Faafeng B A, Nilssen J P M. Relative importance of phosphorus supply to phytoplankton production: fish excretion versus external loading [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1990, 47:364-372.
- [19] Lamarra V A. Digestive activities of carp as a major contributor to the nutrient loading of lakes [J]. *Verh Int Ver Limnol*, 1975, 19:2461-2468.
- [20] 杨东妹,陈宇炜,刘正文,等. 背角无齿蚌滤食对营养盐和浮游藻类结构影响的模拟[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 228-234.
- [21] 董双林. 鲢鱼的放养对水质影响的研究进展[J]. 生态学杂志, 1994, 13(2): 66-68.
- [22] 王梅芳,刘永,杨涛,等. 企鹅珍珠贝主要污损生物的初步研究[J]. 湛江海洋大学学报, 2006, 26(4): 88-90.
- [23] 杨火盛. 卵形鲳鲹人工养殖试验 [J]. 福建水产, 2006(1): 39-41.
- [24] 钟建兴,郑惠东,陈有铭. 川纹笛鲷人工育苗及生长的初步观察[J]. 福建水产, 2004(4): 44-46.
- [25] 张桂林. 尖吻鲈的生物学及其养殖[J]. 内陆水产, 2000(1): 34.
- [26] Northcote T G. Fish in the structure and function of freshwater ecosystems: a 'top-down' view [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1988, 45:361-379.
- [27] Threlkeld S T. Planktivory and planktivore biomass effects on zoo-plankton, phytoplankton, and the trophic cascade [J]. *Limnol Oceanogr*, 1988, 33: 1362-1375.
- [28] Schindler D E. Nutrient regeneration by sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) fry and subsequent effects on zooplankton and phytoplankton [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1992, 49:2498-2506.
- [29] Mather M E, Vanni M J, Wissing T E, et al. Regeneration of nitrogen and phosphorus by bluegill and gizzard shad; effect of feeding history [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1995, 52:2327-2338.
- [30] Vanni M J, Layne C D. Nutrient recycling and herbivory as mechanisms in the 'top-down' effect of fish on algae in lakes [J]. *Ecology*, 1997, 78: 21-40.
- [31] Drenner R W, Gallo K L, Baca R M, et al. Synergistic effects of nutrient loading and omnivorous fish on phytoplankton biomass [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1998, 55:2087-2096.
- [32] Neori A, Krom M D, Ellner S P, et al. Seaweed biofilters as regulators of water quality in integrated fish-sea-weed culture units [J]. *Aquaculture*, 1996, 141:183-199.
- [33] 董贯仓,田相利,董双林,等. 几种虾、贝、藻混养模式能量收支及转化效率的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(6): 899-906.
- [34] 包杰,田相利,董双林,等. 对虾、青蛤和江蕨混养的能量收支及转化效率研究[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(suppl): 27-32.
- [35] 吴乃薇,边文冀,姚宏禄. 主养青鱼池塘生态系统能量转换率的研究 [J]. 应用生态学报, 1992, 3(4): 333-338.
- [36] 康春晓,雷惠僧,谭玉钧. 以草鱼、鲢为主养鱼的池塘能量转换效率初探[J]. 水产科技情报, 1990, 17(2): 47-50.
- [37] 姚宏禄. 主养鲢鳙非鲫高产池塘的能量转换效率 [J]. 农村生态环境, 1990, (3): 42-46.
- [38] 鲁双庆,刘树平,陈向峰,等. 水库网箱养殖罗非鱼及其生态经济效益研究 [J]. 水产科学, 1996, 15(1): 23-25.

## The technology research on optimal culture structure and ecological environment bioremediation of Liusha Bay

SHEN Yu-chun, CHEN Wen-xia, ZHU Chun-hua, YE Ning, XIE En-yi,  
LIANG Fei-long, DU Xiao-dong, WU Zao-he \*

(Key Laboratory of Aquaculture in South China Sea for Aquatic Economic Animal,  
Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524025, China)

**Abstract:** An optimal culture structure of shellfish-fish-algae and its ecological environment bioremediation system were established and studied in the paper. The experimental study was carried out in a semi-enclosed sea area of 33.3 hm<sup>2</sup> by net fence. The system includes three different functions culture areas: the shellfish and pearl culture area, the fish net cage culture area and the macro-algae culture area. The interculture of fish, shellfish and macro algae and pearl rearing were implemented in the demonstrative sea area. After 10 months of optimal structure culture and ecological environment bioremediation control, the water quality and biological environment of the demonstrative sea area were obviously improved. The transparency of the demonstrative sea area was significantly higher than its adjacent sea area ( $P < 0.05$ ), while the suspended substance content was significantly lower than its adjacent sea area ( $P < 0.05$ ); The concentration of total nitrogen and total phosphorus in the demonstrative sea area was increased with the cultural period of time, the high peak was in September, then it was decreased with the further cultural period of time; The biomass of plankton in the demonstrative sea area was increased with the cultural period of time, and significantly higher than its adjacent sea area ( $P < 0.05$ ). The marine aquaculture organisms in the demonstrative sea area grew well, the output of fishes, macro-algae and pearls respectively reached 21 365 kg, 3 091.3 kg and 33.5 kg. The survival rate of pearl oyster (*Pinctada martensii*) reached 73.9%, the remained nucleus ratio of pearl oyster reached 49.9%, the percentage of high grade pearl was 13.7%, and the pearl layer thickness was 472 μm on average. It can be concluded that the quality of pearl was significantly improved. The photosynthetic energy efficiency reached 0.20% in the demonstrative sea area, the total energy conversion efficiency was 34.58%, the total energy consumption per unit of net yield was 2.8919 MJ/kg.

**Key words:** culture structure; ecological environment; bioremediation; Liusha Bay

**Corresponding author:** WU Zao-he. E-mail: Wuzh@gdou.edu.cn