

国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2001AA627030)论文集

# 滩涂海水种植-养殖 系统技术研究

陈桂珠 彭友贵 主编

TanTu HaiShui ZhongZhi -YangZhi XiTong JiShu YanJiu



中山大学出版社

国家高技术研究发展计划（863 计划）项目（2001AA627030）论文集

# 滩涂海水种植－养殖系统技术研究

陈桂珠 彭友贵 主编

中山大学出版社

· 广州 ·

版权所有 翻印必究

图书在版编目 (CIP) 数据

滩涂海水种植—养殖系统技术研究/陈桂珠, 彭友贵主编. —广州: 中山大学出版社,  
2005. 10

ISBN 7-306-02632-1

I. 滩… II. ①陈… ②彭… III. ①红树林—种植—文集②江蓠属—海水养殖—文集  
IV. ①S796-53②S968.43-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 114426 号

---

责任编辑: 李文

封面设计: 方竹

责任校对: 海生

责任技编: 黄少伟

出版发行: 中山大学出版社

编辑部电话 (020) 84111996, 84113349

发行部电话 (020) 84111998, 84111160

地址: 广州市新港西路 135 号

邮编: 510275

传真: (020) 84036565

印刷者: 番禺市桥印刷厂

经销者: 广东新华发行集团

规格: 787 mm × 1092 mm 1/16 17 印张 2 彩插 417 千字

版次印次: 2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷

定价: 30.00 元

---

本书如有印装质量问题影响阅读, 请与承印厂联系调换



构建种植-养殖系统前的鱼塘



构筑的红树林种植岛与养殖沟



2002年3月刚种植的海桑养殖塘



种植2年的海桑养殖塘



2002年3月刚种植的秋茄养殖塘



种植2年的秋茄养殖塘



2002年3月刚种植的桐花树养殖塘



种植2年的桐花树养殖塘



红树林种植-养殖系统推广塘



红树林种植-养殖系统的鸟类景观



江蓠种植-养殖系统试验区



收获江蓠

## 《滩涂海水种植－养殖系统技术研究》编委会

主 编：陈桂珠 彭友贵

编 委：（以姓氏拼音为序）

鲍若峪 陈耿卿 陈桂珠

陈敏锋 黄凤莲 李适宇

刘蔚秋 彭友贵 吴进锋

夏北成 张汉华

# 序 言

随着全球人口增长和生活水平的不断提高,人类对水产品的需求越来越大,近30年来水产品消耗量翻了一番。由于传统的海洋捕捞已不能满足需要,人类对水产品不断增长的需求只能依靠大力发展水产养殖业来满足。据资料统计,20世纪80年代以来水产养殖产量年均递增11%,成为世界粮食经济发展最快的部分。中国是水产养殖大国。改革开放以来,中国水产养殖业持续、快速发展,自1999年始已成为世界上惟一的养殖产量超过捕捞产量的国家;养殖产量占水产品总产量的比重由1978年的29%上升到2000年的62%,是同期全球养殖总产量的72.4%。滩涂海水养殖是我国水产养殖的重要组成部分,占养殖总产量的18.6%,是海水养殖总产量的45%;且近10多年来,其产量以年均21.8%的速度增长。

随着水产养殖业的快速发展,水产养殖产生的污染日趋严重。养殖水域自身污染造成养殖水环境恶化,诱发养殖病害,影响养殖动物生长,甚至导致大量死亡。富含有机物和营养盐的养殖废水进入邻近水域,引起水体富营养化和水生生物群落结构改变,刺激近岸海域赤潮的发生。水产养殖污染已成为影响生态环境和制约水产养殖业持续、健康发展的重要因素。水产养殖污染问题已引起全球广泛关注,是水产养殖业和环境保护领域共同关心的热点问题。

生物技术是水产养殖污染治理的发展方向。生物技术强调系统中分解者、生产者、消费者之间的动态与合理平衡,保持养殖水体水质的良性循环。但目前植物净化技术,特别是适应海水环境生长的惟一木本植物——红树林以及大型海藻江蓠在滩涂海水复合生态养殖中的净化效应及其对养殖动物影响的大规模试验研究未见报道。2001年,以中山大学陈桂珠教授牵头的由中山大学环境科学与工程学院、生命科学学院和中国水产科学院南海水产研究所的专家组成的课题组向国家科技部申请国家高技术研究发展计划(863计划)项目支持,得到批准和资助。项目“滩涂海水种植-养殖系统技术研究”(2001AA627030)包括两部分:红树林海水种植-养殖系统研究和江蓠海水种植-养殖系统研究,项目实施时间为2001年11月至2005年12月。项目实施过程中,为了及时总结研究成果,探讨研究中出现的新问题,撰写了研究论文32篇,其中发表16篇。在此编辑成册,敬请有关专家、读者指正,欢迎就其中感兴趣的问题进行交流和讨论。本项目的实施,得到“863”项目专家组的大力支持和指导,借此机会表示衷心感谢!

由于时间仓促,疏忽、遗漏和不妥之处在所难免,敬请谅解。

编 者  
2005年8月

# 目 录

## 第一部分 红树林海水种植 - 养殖系统研究

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 红树林滩涂海水种植 - 养殖生态耦合系统初步研究 .....        | (3)   |
| 滩涂海水养殖生态模式研究 .....                    | (12)  |
| 红树林与水产养殖系统初步研究 .....                  | (21)  |
| 滩涂海水立体生态种植 - 养殖模式初步研究 .....           | (29)  |
| 滩涂海水种植 - 养殖系统红树植物生态变化研究 .....         | (35)  |
| 人工生境条件下几种红树植物的净初级生产力比较研究 .....        | (42)  |
| 滩涂海水种植 - 养殖系统红树植物凋落量研究 .....          | (54)  |
| 滩涂海水种植 - 养殖系统红树植物凋落叶的分解 .....         | (62)  |
| 红树林种植 - 养殖系统水产养殖亚系统中重金属的时空分布研究 .....  | (68)  |
| 水产养殖的循环经济与红树林种植 - 养殖耦合模式探讨 .....      | (77)  |
| 水生植物在水产养殖水处理中的应用 .....                | (85)  |
| 红树林种植 - 养殖系统的水质特征与净化效应评价 .....        | (97)  |
| 红树林种植 - 养殖系统营养盐及浮游植物的变化动态 .....       | (105) |
| 红树林种植 - 养殖系统浮游植物及营养盐在养殖周期内的动态研究 ..... | (111) |
| 滩涂海水种植 - 养殖系统细菌生态学研究 .....            | (117) |
| 滩涂海水种植 - 养殖系统换水周期内细菌的消长动态研究 .....     | (126) |
| 生物膜法处理养殖废水的研究 .....                   | (134) |
| 人工模拟养殖废水的微生物修复技术研究 .....              | (141) |
| 滩涂海水种植 - 养殖系统原位生物修复技术研究 .....         | (150) |
| 滩涂海水种植 - 养殖试验区环境自动监测系统设计 .....        | (158) |
| 滩涂海水种植 - 养殖系统的大气与水质环境测量 .....         | (180) |
| 环境生物信息系统的开发与应用 .....                  | (186) |

## 第二部分 江蓠海水种植 - 养殖系统研究

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 江蓠海水种植 - 养殖系统模式研究 .....     | (195) |
| 江蓠对虾混养效果研究 .....            | (202) |
| 江蓠与对虾混养的神经 - 模糊优化模型初探 ..... | (211) |

---

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| 红海湾浅海滩涂近江牡蛎养殖模式的研究 .....             | (219) |
| 红海湾海藻资源的研究 .....                     | (225) |
| 粤东长沙湾近江牡蛎线粒体 16S rRNA 基因序列变异分析 ..... | (230) |
| 粤西镇海湾近江牡蛎线粒体 16S rRNA 基因序列变异分析 ..... | (237) |
| 广西钦洲湾近江牡蛎线粒体 16S rRNA 基因序列变异分析 ..... | (243) |
| 近江牡蛎 16S rRNA 基因片段序列变异分析 .....       | (251) |
| 华南沿海 4 个地理群体江蓠的遗传变异分析 .....          | (259) |

## 第一部分

# 红树林海水 种植－养殖系统研究



# 红树林滩涂海水种植 - 养殖生态耦合系统初步研究\*

彭友贵<sup>1</sup> 陈桂珠<sup>1\*\*</sup> 余忠明<sup>2</sup> 殷 敏<sup>1</sup>

1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275;

2. 深圳海上田园旅游发展有限公司, 深圳 518104

**摘 要:** 为探讨红树林对养殖水体的净化效应以及对养殖动物生长的影响, 选择 3 种红树植物海桑 (*Sonneratia caseolaris*)、秋茄 (*Kandelia candel*) 和桐花树 (*Aegiceras corniculatum*) 构建滩涂海水种植 - 养殖生态耦合系统。系统设置 9 个试验塘和 1 个对照塘, 试验塘按 45%、30% 或 15% 的面积比例种植一种红树植物, 对照塘不种红树植物, 所有养殖塘均统一养殖美国红鱼 (*Sciaenops ocellatus*) 和星洲红鱼 (*Labidochromis flavigulus*)。通过系统运行 18 个月的生态监测显示, 海桑和桐花树生长较好, 对环境的适应能力强, 秋茄生长差, 成活率低; 红树植物对养殖海水具有净化作用, 其中桐花树的净化效果最好, 其次为秋茄; 系统中鱼的生长状况与红树植物的净化效应密切相关, 在种植桐花树的养殖塘美国红鱼和星洲红鱼生长快, 秋茄养殖塘次之, 海桑养殖塘的美国红鱼不及对照塘。初步研究结果表明, 在红树林滩涂海水种植 - 养殖生态耦合系统中, 桐花树具有推广示范价值; 应减少海桑的种植面积比例和单位面积种植密度; 秋茄生长慢, 适应性差, 不宜推广。

**关键词:** 水产养殖; 红树林; 生态耦合系统

被称为“蓝色农业”的海水养殖业近几十年来发展迅速<sup>[1]</sup>, 其中滩涂养殖在海水养殖中发展最快, 1986 ~ 1990 年年均增长 13.6%, 1990 年以后年均增长 21.8%<sup>[2]</sup>, 滩涂养殖产量在海水养殖总产量中的比重从 1986 年的 39% 上升到 2000 年的 45%。海水养殖业在产生巨大经济效益的同时, 也影响近海生态环境<sup>[3]</sup>。特别是随着集约化养殖的快速发展, 养殖动物的排泄物及残饵大量产生, 氮、磷等营养盐污染加速近岸海域富营养化, 诱发赤潮; 同时养殖水体恶化, 引发养殖病害, 严重影响了水产品安全与产量。水产养殖引起的水环境恶化问题已成为制约水产养殖业可持续发展的重要因素, 如何降低养殖过程中造成的水体污染也因此而成为水产养殖急待解决的关键问题。

目前水产养殖水处理主要有物理法、化学法和生物法等技术措施, 其中生物处理技术强调生态系统中分解者、生产者、消费者之间的动态与合理的平衡, 保持养殖水体水质的良性循环<sup>[4]</sup>, 被认为是经济可行<sup>[5]</sup>、副作用小<sup>[6]</sup>的水处理方法, 是养殖水处理技术的发展方向<sup>[7]</sup>。常用的生物处理技术主要是在养殖系统中接种有益微生物, 通过微生物的代谢作用将残余饵料、排泄废物、动植物残体以及有害气体 (如氨、硫化氢) 等分解为二氧化碳、硝酸盐、硫酸盐等<sup>[8]</sup>。藻类也具有净化养殖水体的功能, 利用水体中 CO<sub>2</sub>、营养

\* 原载:《中山大学学报》(自然科学版), 2004, 43(6): 150 ~ 154

\*\* 通讯作者。E-mail: chenguizhu@yeah.net

盐以及太阳能进行光合作用, 释放出  $O_2$ , 从而减少水体中营养污染物, 增加溶解氧, 一些微藻还是养殖动物的良好饲料<sup>[9-11]</sup>, 因而进行藻类与养殖动物混养可以减缓养殖水体的自身污染。国内外众多研究表明, 水生高等植物对水体具有较好的净化作用<sup>[12-23]</sup>。但目前这方面的研究多集中在水生草本植物对城镇污水、富营养化水体的净化方面, 对养殖水体净化的研究很少, 特别是水生木本植物对养殖水体净化效应的专门研究还未见报道。红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落, 其净化水质能力强<sup>[24-29]</sup>, 同时红树植物具有防风消浪、保护堤岸、美化环境等功能。本研究通过在滩涂海水养殖系统中人工种植红树林, 构建红树林海水种植 - 养殖生态耦合系统, 探索红树植物在系统中的生态适应性及其对养殖水体的净化效应和对养殖动物生长的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 种植 - 养殖生态耦合系统的构建

研究基地位于深圳市西部海岸海上田园旅游区的水产养殖区, 总面积  $35.7 \text{ hm}^2$ , 设有 9 个试验塘和 1 个对照塘 (各塘面积与分布见图 1)。试验塘中构筑种植岛栽种红树植物, 红树植物选择两种华南优势红树种秋茄 (*Kandelia candel*)、桐花树 (*Aegiceras corniculatum*) 和速生种海桑 (*Sonneratia caseolaris*), 每一红树植物分别按三种面积比例, 即红树林种植岛面积与试验塘面积之比——45%、30% 和 15%, 于 2002 年 3 月种植, 规格  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  对照塘不种红树植物。

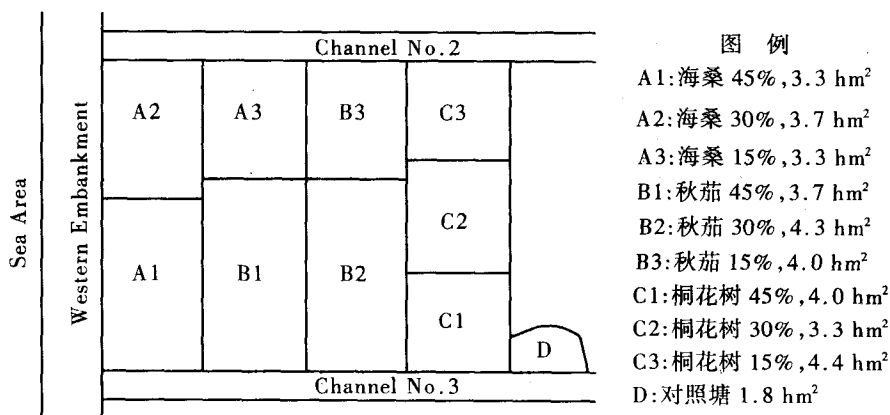


图 1 红树林种植 - 养殖生态耦合系统示意图

Fig. 1 Sketch map of mangrove planting-aquaculture system

### 1.2 养殖动物的投放与监测

种植 1 个月后, 各塘开闸进水; 2002 年 7 月投放鱼苗。鱼种选择生长快、市场销路

好的美国红鱼 (*Sciaenops ocellatus*), 鱼苗体长 2~3 cm, 平均体重 0.22 g/尾, 投放密度每公顷 7500 尾。2002 年 9 月加投星洲红鱼 (*Labidochromis flavigulus*), 鱼苗体长 4~10 cm, 平均每尾 10.3 g, 投放密度每公顷 9000 尾。所有鱼塘包括对照塘分别养殖面积大小在同一时间按相同的投饵方式和饵料投食, 每月随机捕捞测量一次鱼体全长、体重等生长指标, 养殖 1a 后成鱼收获。

### 1.3 红树植物的生长监测

在每个种植塘设置 3 个 5 m×5 m 的固定样方, 每季度监测一次红树植物的树高、基径(胸径)、成活率等生长状况。根据样方每木检尺结果, 估算各塘红树植物的平均高度、平均基径(胸径)以及单位面积成活株数等生长指标。同时在每个种植塘设置 3 个 1 m×1 m 的凋落物收集网, 每月收集一次凋落物, 求得系统中红树植物的凋落量。

红树植物的生物量测定, 通过选取标准木进行全株生物量实测以建立生物量与树高、基径的回归模型求得, 将历次生长调查数据代入模型, 估算不同时期单株、单位面积生物量。

### 1.4 水质监测

养殖系统各试验塘与对照塘每月更换一次养殖海水。从 2002 年 8 月开始运用常规化学方法监测水体中硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮、磷酸盐等指标, 每季度采样分析 1 次, 并进行换水周期的动态监测; 运用 YSI6600 水质参数自动测试仪监测水温、盐度、浊度、pH 值、溶解氧、叶绿素等项目, 每月分上、中、下旬监测 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 红树植物的生态变化

根据 2002 年 4 月至 2003 年 10 月监测结果显示(见表 1), 种植 18 个月后, 海桑生长最快, 年增高 289 cm, 基径年增长 49 mm, 树高和基径分别为种植时的 5.3 倍和 6.8 倍; 秋茄树高和基径增长了 48.9% 和 435%; 桐花树树高和基径增长了 22.7% 和 352%。同种植物不同种植比例间差异不显著。从成活率看出, 海桑和桐花树的成活率较高, 而秋茄成活率不足 60%, 特别是地势较低的种植地段, 由于长期受到养殖海水浸淹, 死亡率高, 说明秋茄对环境的适应性差。海桑属于嗜热树种, 对寒冷气候敏感, 冬季气温低时出现大量落叶和嫩梢枯死现象, 生长受到影响。

表 1 滩涂海水种植 - 养殖生态耦合系统红树植物生长变化

Table 1 Changes in growth of mangrove plants in planting-aquaculture ecological coupling system

| 种类  | 树高 (cm) |     | 基径 (mm) |      | 成活率 (%) |
|-----|---------|-----|---------|------|---------|
|     | 平均高     | 增高量 | 平均基径    | 增长量  |         |
| 海桑  | 535     | 434 | 86.1    | 73.5 | 97.3    |
| 秋茄  | 51      | 17  | 25.7    | 20.9 | 59.6    |
| 桐花树 | 103     | 19  | 44.4    | 34.5 | 96.0    |

依据选取的同期种植苗木茎高、基径与生物量的实测值以及种植 18 个月后标准木的树高、基径与全株生物量的测定值分别计算建立苗木、标准木的生物量与茎高、基径的回归方程 (见表 2), 根据回归方程和样方生长调查数据估算各试验塘红树植物单位种植面积生物量, 如表 3 所示。海桑的单位面积生物量最高, 平均达  $40041.86 \text{ kg/hm}^2$ , 比种植时增加 103.5 倍, 为秋茄同期生物量的 80.1 倍、桐花树的 5.4 倍; 秋茄和桐花树生物量分别比种植时增长 4.6 倍和 24.1 倍。

表 2 生物量回归方程

Table 2 Regressive equation of biomass

| 种类  | 苗木或标准木 | 回归方程                           | 相关系数     |
|-----|--------|--------------------------------|----------|
| 海桑  | 苗木     | $W = 0.001888 (D^2H)^{1.0234}$ | 0.9998** |
|     | 标准木    | $W = 0.012098 (D^2H)^{0.8469}$ | 0.9954** |
| 秋茄  | 苗木     | $W = 0.138484 (D^2H)^{0.6217}$ | 0.9977** |
|     | 标准木    | $W = 0.003341 (D^2H)^{0.9807}$ | 0.9685** |
| 桐花树 | 苗木     | $W = 0.021174 (D^2H)^{0.8068}$ | 0.9969** |
|     | 标准木    | $W = 0.000213 (D^2H)^{1.241}$  | 0.9498** |

\*\* 表示达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。

表 3 滩涂海水种植 - 养殖生态耦合系统红树植物生物量

Table 3 Biomass of mangrove plants in planting-aquaculture ecological coupling system

| 植物名称 | 单位面积生物量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) |          |
|------|----------------------------------------------|----------|
|      | 2002.04                                      | 2003.10  |
| 海桑   | 383.01                                       | 40041.86 |
| 秋茄   | 89.94                                        | 499.62   |
| 桐花树  | 298.19                                       | 7473.76  |

系统中红树植物的凋落量差异较大。各试验塘 3 月份种植红树植物, 7 月份开始有凋

落物产生,种植 18 个月海桑、秋茄和桐花树的单位面积凋落量分别为  $11191 \text{ kg/hm}^2$ 、 $61.9 \text{ kg/hm}^2$  和  $754.3 \text{ kg/hm}^2$ 。海桑的单位面积凋落量是秋茄的 181 倍、桐花树的 14.8 倍。三种红树植物的单位面积凋落物量大小与生物量高低相一致,说明高生长量伴随高归还量。

## 2.2 系统中鱼的生态变化

通过对美国红鱼和星洲红鱼的逐月生长监测结果显示(见图 2、图 3),美国红鱼在桐花树塘生长最快,平均每尾体重  $473.3 \text{ g}$ ,体长  $34.9 \text{ cm}$ ,其中 C1 塘(45% 桐花树)平均每尾体重达到  $488.5 \text{ g}$ ;秋茄塘次之,平均体重  $458.1 \text{ g}$ ,体长  $34.4 \text{ cm}$ 。桐花树塘与秋茄塘不同种植比例间的生长差异不显著。海桑种植塘只有 A3 塘捕获到美国红鱼,平均体重  $437 \text{ g}$ ,体长  $32.8 \text{ cm}$ 。对照塘的平均体重为  $438.1 \text{ g}$ ,略高于 A3 塘。

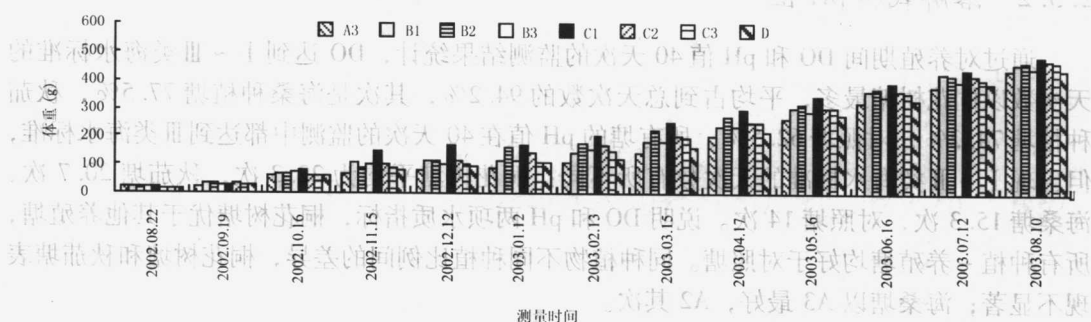


图 2 美国红鱼体重变化对比图

Fig. 2 Changes in weight of *Sciaenops ocellatus*

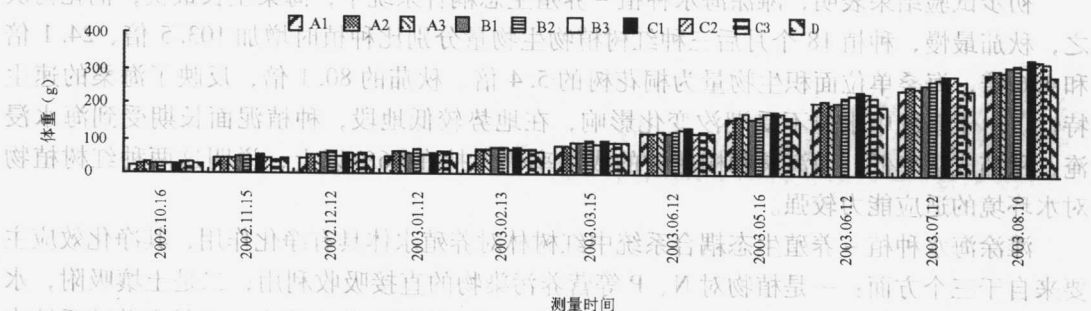


图 3 星洲红鱼体重变化对比图

Fig. 3 Changes in weight of *Labidochromis flavigulosa*

星洲红鱼在桐花树塘和秋茄塘生长速度相对较快,收获时桐花树塘平均体重  $330 \text{ g}$ ,体长  $24.2 \text{ cm}$ ,其中以桐花树 C1 塘的星洲红鱼生长较突出,平均体重达到  $335.5 \text{ g}$ ;秋茄塘平均体重  $314.4 \text{ g}$ ,体长  $23.8 \text{ cm}$ ;海桑塘平均体重  $296.5 \text{ g}$ ,体长  $23.8 \text{ cm}$ ,其中 A1 塘

平均体重只有 291.1 g。对照塘平均体重 287.8 g, 体长 23.8 cm。桐花树塘和秋茄塘的不同种植比例间差异不显著。

### 2.3 系统中养殖水质变化

#### 2.3.1 营养污染物

水产养殖主要产生为氮、磷等营养盐污染<sup>[3,30,31]</sup>。根据五次水质季度监测结果显示, 种植塘的总无机氮 (DIN) 和磷酸盐 ( $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ ) 多达到Ⅲ类以上水质标准, 对照塘 (D) 均未达到Ⅲ类海水水质标准, 说明养殖塘中种植红树植物对氮、磷等营养污染物具有较好的吸收作用, 减缓在水体中富集。就不同植物种类来看, 对氮、磷的净化效果缺乏规律性。同种植物不同种植比例间差异不明显。

#### 2.3.2 溶解氧和 pH 值

通过对养殖期间 DO 和 pH 值 40 天次的监测结果统计, DO 达到Ⅰ~Ⅲ类海水标准的天次数以桐花树塘最多, 平均占到总天次数的 94.2%, 其次是海桑种植塘 77.5%, 秋茄种植塘 74.2%, 对照塘 62.5%; 所有塘的 pH 值在 40 天次的监测中都达到Ⅲ类海水标准, 但出现Ⅰ~Ⅱ类海水标准的天次数有所不同: 桐花树塘平均为 22.3 次, 秋茄塘 20.7 次, 海桑塘 15.3 次, 对照塘 14 次。说明 DO 和 pH 两项水质指标, 桐花树塘优于其他养殖塘, 所有种植-养殖塘均好于对照塘。同种植物不同种植比例间的差异, 桐花树塘和秋茄塘表现不显著; 海桑塘以 A3 最好, A2 其次。

## 3 讨论

初步试验结果表明, 滩涂海水种植-养殖生态耦合系统中, 海桑生长最快, 桐花树次之, 秋茄最慢, 种植 18 个月后三种红树植物生物量分别比种植时增加 103.5 倍、24.1 倍和 4.6 倍, 海桑单位面积生物量为桐花树的 5.4 倍、秋茄的 80.1 倍, 反映了海桑的速生特性。由于系统中水位不受潮汐变化影响, 在地势较低地段, 种植泥面长期受到海水浸淹, 秋茄成活率低, 而海桑和桐花树的成活率仍保持在 96% 以上, 说明这两种红树植物对水环境的适应能力较强。

滩涂海水种植-养殖生态耦合系统中红树林对养殖水体具有净化作用, 其净化效应主要来自于三个方面: 一是植物对 N、P 等营养污染物的直接吸收利用; 二是土壤吸附, 水体中一些可溶性污染物渗透进入种植红树林的土壤, 被固定在土壤中; 三是在养殖系统中种植红树林使系统微环境改变, 如系统中微生物、浮游植物等的种类分布、数量发生变化, 系统的自净能力增强。由于生长特性不同, 决定了不同红树植物的净化效果存在差异。在本研究中, 桐花树的净化效果优于秋茄和海桑, 可能是由于桐花树长势较好, 除自身吸收一部分 N、P 等营养盐外, 形成的微环境还有利于系统水质自净。海桑虽然生长最快, 生物量最高, 但凋落物多, 归还量大, 特别是冬季大量落叶进入水体分解耗氧或沉入水底厌氧腐烂分解产生  $\text{H}_2\text{S}$ , 使水中溶解氧降低, pH 值下降, 从而又导致水质恶化。