

红树林滩涂海水种植—养殖生态耦合系统初步研究^{*}

彭友贵¹, 陈桂珠¹, 余忠明², 殷 敏¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275;

2. 深圳海上田园旅游发展有限公司, 广东 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; 海桑应减少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

中图分类号: X52; S967 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2004) 06-0150-05

被称为“蓝色农业”的海水养殖业近几十年来发展迅速^[1], 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%^[2], 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%。海水养殖业产生巨大经济效益的同时, 也影响近海生态环境^[3]。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^[4], 被认为是经济可行^[5]、副作用小^[6]的水处理方法, 是养殖水处理技术的发展方向^[7]。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CO₂、硝酸盐、硫酸盐等^[8]。藻类也具有净化养殖水体的功能, 利用水体中CO₂、营养盐以及太阳能进行光合作用, 释放出O₂, 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^[9-11], 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净化作用^[12-23]。但已有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^[24-29], 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

^{*} 收稿日期: 2004—09—02

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2003AA627030)

作者简介: 彭友贵(1968年生), 男, 博士生; 通讯联系人: 陈桂珠, 博士生导师; E-mail: chenguihu@yeah.net

的水产养殖区，总面积 35.7 hm²，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 2 种华南优势红树种秋茄 *Kandelia candel*、桐花树 *Aegiceras comiculatum* 和引进种海桑 *Sonneratia caseolaris*，每一红树植物分别按 3 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 m×1 m。对照塘不种红树植物。

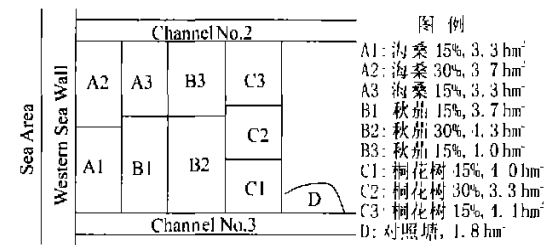


图 1 红树林种植—养殖生态耦合系统示意图
Fig. 1 Sketch map of mangrove planting-aquaculture system

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，平均体质量 0.22 g/尾，投放密度 7 500 尾/hm²。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 9 000 尾/hm²。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、体质量等生长指标，养殖 1 a 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（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

Tah 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（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见表 3。海桑的单位面积生物量最高，平均达 40 041.86 kg/hm²，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。

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 11 191、61.9 和 754.3 kg/hm²。海桑的单位面积凋落量是秋茄的 181 倍、桐花树的 14.8 倍。3 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。

表 2 生物量回归方程

Tah 2 Regressive equation of biomass

种类	样品	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单位面积生物量

Tah 3 Unitarea biomass of mangrove plants in planting-aquaculture ecological coupling system kg/hm²

植物	200204	200310
海桑	383.01	40041.86
秋茄	89.94	499.62
桐花树	298.19	7473.76

2.2 系统中鱼的生态变化

对美国红鱼和星洲红鱼的逐月生长监测结果显示（图 2，3），美国红鱼在桐花树塘生长最快，平均每尾体质量 473.3 g，体长 34.9 cm，其中 C1 塘（45%桐花树）平均每尾体质量达到 488.5 g；秋茄塘次之，平均体质量 458.1 g，体长 34.4 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，平均体质量 437 g，体长 32.8 cm。对照塘的平均体质量为 438.1 g，略高于 A3 塘。

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质量 330 g，体长 24.2 cm，其中以桐花树 C1 塘的星洲红鱼生长较突出，平均体质量达到 335.5 g；秋茄塘平均体质量 314.4 g，体长 23.8 cm；海桑塘平均体质量 296.5 g，体长 23.8 cm，其中 A1 塘平均体质量只有 291.1 g。对照塘平均体质量 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 水产养殖主要产生氮、磷等营养盐污染^[3,30,31]。根据 5 次水质季度监测结果显示，种植塘的总无机氮（DIN）和磷酸盐（PO₄³⁻-P）多达到 II 类以上水质标准，对照塘（D）均未达到 II 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 ~ II 类海水标准的天数以桐花树塘最多，平均占到总天次数

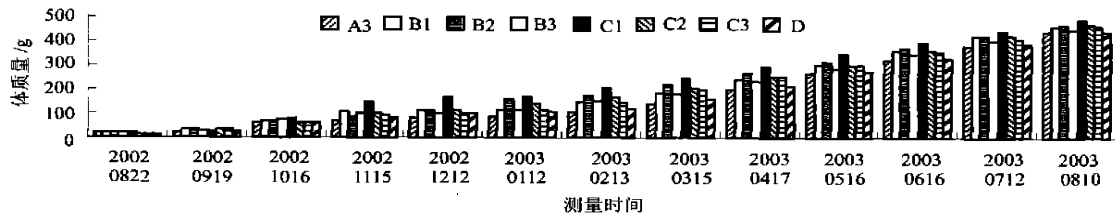


图 2 美国红鱼体质量变化对比图
Fig. 2 Changes in weight of *Sciaenops ocellatus*

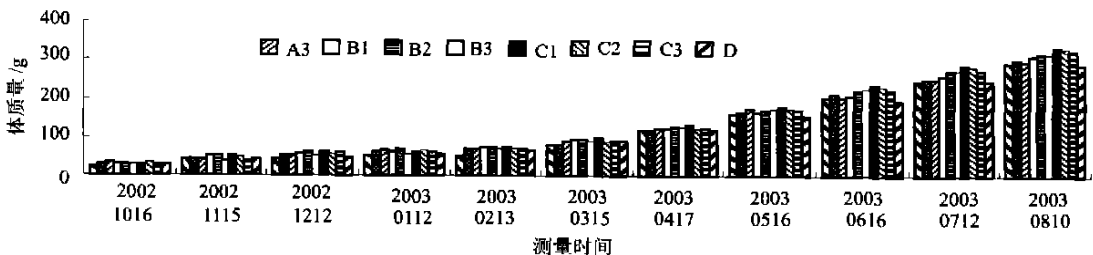


图 3 星洲红鱼体质量变化对比图
Fig. 3 Changes in weight of *Labidochromis flaviguluxa*

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II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3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演, 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 H_2S , 使水中溶解氧降低, pH值下降, 从而又导致水质恶化。

系统中鱼的生长在各试验塘间存在差异, 主要受水质影响。总的来看, 桐花树塘的水质优于秋茄塘, 秋茄塘优于海桑塘, 鱼的生长状况与水质的好坏基本一致, 桐花树塘和秋茄塘的美国红鱼、星洲红鱼均比对照塘生长快。而海桑塘对美国红鱼的生长产生不利影响, 可能是由于海桑塘特别是A1、A2塘的海桑种植面积大, 凋落物多而使水质较差, 影响鱼的成活与生长, 或是由于美国红鱼难以适应有海桑生长的环境, 具体原因有待于研究。

从初步研究结果来看, 桐花树对环境的适应能力强, 水质净化效果较好, 促进鱼类生长, 有推广示范价值, 但种植—养殖面积比例应控制在多大才具有最佳的生态—经济效益, 还有待于进一步研究。海桑生长快, 凋落量大, 在种植—养殖生态耦合系统中, 种植面积比例不应超过15%, 种植间距以3~4m为宜。秋茄对环境的适应性差, 生长慢, 不宜在种植—养殖生态耦合系统中推广应用。

参考文献:

- [1] 张福绥. 21世纪我国的蓝色农业[J]. 中国工程科学, 2000, 2(12): 21—27.
- [2] 钱薇薇, 朱鑫华. 海水养殖业的发展及前景[J]. 中国水产, 2000(2): 18—19.
- [3] 董汉林, 潘克厚, UWE BROCKMANN. 海水养殖对沿岸生态环境影响的研究进展[J]. 青岛海洋大学学报, 2000, 30(4): 575—582.
- [4] 颜京松. 废水处理与利用生态工程(I)特征和原理[J]. 城市环境与生态, 2000, 13(5): 1—5.
- [5] 周华, 孙建歧. 水产养殖业的水处理技术综述[J]. 渔业现代化, 2000(4): 27—29.
- [6] 王如定. 海水养殖对环境的污染及其防治[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2003, 22(1): 60—62.
- [7] 刘利平, 王武. 水产养殖中水处理技术的现状与展望[J]. 水产科学, 2002, 21(2): 35—37.
- [8] 刘卫东, 苏浩, 邓立康. 微生物在水产养殖中的应用[J]. 水产科学, 2001, 20(2): 28—31.
- [9] 余伯良. 微型藻的培养及其在养殖中的应用[J]. 广东饲料, 1999(2): 13—14.
- [10] 吴琴瑟. 螺旋藻在水产养殖中的应用[J]. 湛江水产学院学报, 1994, 14(2): 76—80.
- [11] 黄建辉. 大弹涂鱼养殖底藻培植技术[J]. 科学养鱼, 2001(6): 27.
- [12] 丁树荣. 高等水生维管束植物在城镇污水资源化中的作用及发展前景[J]. 中国环境科学, 1984, 4(2): 10—14.
- [13] 王崇效. 凤眼莲净化含酚污水的研究I. 盆栽和氧化塘试验及几种环境条件对除酚的影响[J]. 环境科学学报, 1986, 6(2): 207—215.
- [14] 陈毓华, 汪俊三, 梁明易, 等. 华南地区11种高等水生维管植物净化城镇污水效益评价[J]. 农村生态环境学报, 1995, 11(1): 26—29.
- [15] 高吉喜, 叶春, 杜娟, 等. 水生植物对面源污水净化效率研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(3): 247—251.
- [16] 葛滢, 王晓月, 常杰. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(6): 690—692.
- [17] 由文辉, 刘淑媛, 钱晓燕. 水生经济植物净化受污染水体研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2000(1): 99—102.
- [18] 吴振斌, 邱东茹, 贺锋, 等. 水生植物对富营养水体水质净化作用研究[J]. 武汉植物学研究, 2001, 19(4):

299—303.

[19] GERSBERG R M, ELKINS B V, LYON S R, et al. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands [J]. Wat Res. 1986, 20(3): 363—368.

[20] MOSS B. Engineering and biological approaches to the restoration for eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components [J]. Hydrobiologia. 1990, 200/201: 367—377.

[21] TANNER C C, CLAYTON J S, UPSDELL M P. Effects of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands II. Removal of nitrogen and phosphorus [J]. Wat Res. 1995, 29(1): 27—34.

[22] HARBERL R, PERFLER R, MAYER H. Constructed wetlands in Europe [J]. Wat. Sci. Tech., 1995, 32(3): 305—315.

[23] VERMAAT J E, HANIF M K. Performance of common duckweed species (*Lemnaceae*) and the waterfem *Azolla filiculoides* on different types of waste water [J]. Wat Res, 1998, 32(9): 2569—2576.

[24] 马骅. 人工合成污水对桐花树模拟湿地的影响及湿地净化效应研究[D]. 广州: 中山大学, 1996.

[25] 陈桂珠, 陈桂葵, 谭凤仪, 等. 白骨壤模拟湿地系统对污水的净化效应[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(4): 23—26.

[26] 缪绅裕. 模拟条件下排污对秋茄湿地的影响及系统的净化效应[D]. 广州: 中山大学, 1994.

[27] CHU H Y, CHEN N C, YEUNG M C, et al. Tide-tank system simulating mangrove wetland for removal of nutrients and heavy metals from wastewater [J]. Wat Sci Tech, 1998, 38(1): 361—368.

[28] WONG Y S, TAM N F Y, LAN C Y. Mangrove wetlands as wastewater treatment facility: A field trial [J]. Hydrobiologia, 1997, 352: 49—59.

[29] YE Y, TAM N F Y, WONG Y S. 2001. Livestock wastewater treatment by a mangrove pot-cultivation system and the effect of salinity on the nutrient removal efficiency [J]. Marine Pollution Bulletin, 42(6): 513—521.

[30] 计新丽, 林小涛, 许忠能, 等. 海水养殖自身污染机制及其对环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(4): 66—71.

[31] 曹立业. 水产养殖中氮、磷污染[J]. 水产学杂志, 1996, 9(1): 76—77.

Mangrove and Planting aquaculture Ecological Coupling System

PENG You gu¹, CHEN Gui zhu¹, SHE Zhong ming², YIN Min¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Shenzhen Waterlands Tourism Development Ltd., Shenzhen 518104, Guangdong, China)

Abstract: In order to research the effect of mangrove planting in seabeach fishponds on water quality's improvement and famed animals' growth, three mangrove plants, *Sonneratia caseolaris*, *Kandelia candel* and *Aegiceras corniculatum*, were chosen to construct planting aquaculture ecological coupling system. The system consisted of 9 planting fishponds and 1 control fishpond. Every planting fishpond was planted with a species of mangrove plant with a planting breeding area proportion of 45 :55, 30 :70 or 15 :85; in control fishpond there was no mangrove plant. *Sciaenops ocellatus* and *Labidochromis flavigulus* were raised in all fishponds by the same method. The results of survey on the system during 18 months after its operation showed that *S. caseolaris* and *A. corniculatum* grew well in the system while *K. candel* had a low survival percentage, and mangrove plants played an important role in improving water quality and enhancing fish's growth. In fishponds planted with *A. corniculatum* the water quality was the best and fish grew more rapidly than that in other fishponds. Fishponds with *K. candel* came the next, but in fishponds with *S. caseolaris* didn't grow as rapidly as in control fishpond. According to the preliminary study on the coupling system, it was suggested that the system be worthy of spreading in the areas suitable for mangrove's growth and *A. corniculatum* be the acceptable plant in the system, and for *S. caseolaris* the planting proportion should be reduced and the distance between plants should be enlarged; *K. candel* is not the appropriate candidate of plant in the system for its low growth and bad adaptability.

Key words: aquaculture; mangrove; ecological coupling system