

生态工程化循环水池塘养殖系统

刘兴国^{1,2}, 刘兆普¹, 徐皓², 顾兆俊², 朱浩²

(1. 南京农业大学海洋生物学重点开放实验室, 南京 210095; 2. 农业部渔业装备与工程重点开放实验室, 上海 200092)

摘要: 为解决池塘养殖污染、水资源浪费和水产品安全等问题, 针对传统淡水鱼类池塘养殖特点, 设计了一种生态工程化循环水池塘养殖系统, 系统由生态沟渠、生态塘、潜流湿地和养殖池塘组成, 面积比为 1:5:3:30, 系统中池塘呈串联结构排列, 池塘对角方向建设有水层交换过水设施, 系统利用 1 级动力提升形成循环水流。在池塘养殖密度 0.20~0.82 kg/m³ 和系统水体日交换量 10%~15% 的情况下, 水质检测结果表明, 池塘养殖水体中的氨氮、亚硝态氮、硝态氮、总氮、总磷、化学需氧量 (COD) 等水质指标分别低于 1.89、0.20、1.50、3.27、0.59、9.0 mg/L, 均低于对照池塘, 并符合淡水池塘养殖用水标准。生态工程化设施水体净化效果研究表明, 潜流湿地对养殖排放水体中总氮、总磷和 COD 的去除率分别高于 52%、39% 和 17%; 生态沟渠对养殖水体中总氮、总磷和 COD 的平均去除率超过 18.35%、17.39% 和 18.18%; 生态塘对养殖水体中总氮、总磷和 COD 的平均去除率分别为 24.72%、26.32% 和 5.86%。与传统池塘养殖模式相比, 生态工程化循环水池塘养殖系统可节约养殖用水 63.6%, 减少 COD 排放 81.9%, 有明显的节水、减排效果。

关键词: 池塘, 生态, 水质, 循环水系统

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.041

中图分类号: S9, X5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0237-08

刘兴国, 刘兆普, 徐皓, 等. 生态工程化循环水池塘养殖系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 237—244.

Liu Xingguo, Liu Zhaopu, Xu Hao, et al. Ecological engineering water recirculating ponds aquaculture system[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 237—244. (in Chinese with English abstract)

0 引言

据《中国渔业年鉴 2008》资料, 2007 年中国有内陆养殖面积 4 413 Khm², 养殖产量 1.971×10⁷ t, 其中池塘养殖产量占内陆养殖产量的 68.54%^[1], 池塘养殖已成为中国水产养殖的主要形式和水产品供应的主要来源。由于中国的多数养殖池塘建于 20 世纪 60、70 年代, 目前普遍存在着破败陈旧、坍塌淤积严重、设施化水平不高等问题。同时, 由于多数水产养殖场采取传统的生产方式, 其生产粗放、水资源浪费、养殖污染等问题也严重制约了池塘养殖业的发展^[2]。据统计, 在浙江的杭嘉湖地区, 每生产 1 kg 淡水鲤科鱼类需要耗水 10~13.4 m³, 排放氨氮 2.63 kg^[3], 池塘养殖已成为一些地区重要的面污染源^[4-5]。生态工程化养殖模式可有效解决水产养殖的污染、耗水等问题^[6-7]。20 世纪 90 年代以来, 由于养殖病害不断爆发, 人们开始研究池塘复合生态养殖模式, 如黄国强等^[8]试验用多个池塘循环水养殖对虾 (*Fenneropenaeus chinensis*), 每个池塘既是养殖池又是水处理池, 取得了一定的效果。冯敏毅等^[9]用混合微生态制剂 (*Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Bacillus licheniformis*)、菲律宾蛤 (*Ruditapes philippinarum*)、江蓠 (*Gracilaria tenuistip*) 进行养殖水体净化试验, 发现复合养殖系统的养殖效果是最好的。

申玉春^[10]研究建立了高位池塘复合生物调控对虾养殖方法, 该方法既可提高养殖产量, 又能减少养殖排放。杨勇^[11]通过研究“渔、稻共作”生态系统的生态特点, 建立了复合种养生态模型, 有效控制了养殖污染, 提高了种养效益。郭立新^[12]研究了部分高等陆生植物对养殖废水的净化作用, 为高等陆生植物应用于养殖水体净化提供了参考。泮进明等^[13]研究提出了“零排放”循环水养殖“机械-细菌-草”综合水处理系统。李谷^[14]研究了复合人工湿地-池塘养殖生态系统的水体净化效果。

在国外, Scott^[15]提出了水产养殖生态工程的设计原则。Wang Jaw-kai^[16]研究建立了基于微藻 (*Chactoceros.muelleri Lemmermann*) 的南美白对虾 (*Litopenaeus.vannamei*) 生态工程化循环水养殖系统, 该系统有效提高了饲料利用率, 减少了养殖污染。以色列的 Sofia Morais^[17]研究构建了“虾 (*L.vannamei*) -藻 (*Navicula lenzii*) -轮虫 (*Rotifer*)”复合养殖系统, 提高了系统对营养物质的转化效率。Barry^[18]将水产养殖与湿地系统相结合, 建立了基于湿地净化养殖排放水的养殖系统, 有效降低了养殖污染排放。Steven^[19]研究了人工湿地对于的养殖排放水体中总悬浮物 (total suspended solid, TSS)、三态氮 (氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐) 有较高的去除效果。台湾的 Lin^[20]研究了基于表面流和潜流湿地的循环水养殖系统, 并应用于对虾养殖; David^[21]将湿地作为生物滤器, 用于高密度养虾系统对鱼池中总悬浮颗粒、总氮、总磷的去除率分别达到了 88%、72% 和 86%。

本文针对中国大宗淡水鱼类池塘养殖特点, 设计了一种内陆池塘生态工程化循环水养殖系统, 该系统利用水产养殖场的池塘排列结构实现上下水层交换和水体流动, 利

收稿日期: 2010-09-01 修订日期: 2010-10-12

基金项目: 国家自然科学基金 (30600086); 国家大宗淡水鱼类产业技术体系 (nycytx-9-12)

作者简介: 刘兴国 (1965—), 男, 山东潍坊人, 研究员, 博士, 主要从事水生生物学与渔业生态工程研究。南京 南京农业大学海洋生物学重点开放实验室, 210095。Email: liuxg1223@163.com

用排水沟渠构建生态渠道，利用闲置地构建生态塘和潜流湿地，通过一级动力提升，实现池塘养殖水体循环和净化作用，达到了“节能、减排、生态、安全、高效”的养殖目的，为池塘健康养殖系统模式构建提供了参考。

1 系统设计

1.1 设计原则

生态工程化池塘循环水养殖系统由生态沟渠、生态塘、潜流湿地和 3 个养殖池塘组成。养殖池塘通过过水设施串联沟通，3#池塘排放水通过水位控制管溢流到生态沟渠，在生态沟渠初步净化处理后通过水泵将水提升到生态塘，在生态塘内进一步沉淀与净化后自流到潜流湿地，潜流湿地出水经过复氧池后自流到 1#养殖池塘，形成循环水养殖系统（图 1）。

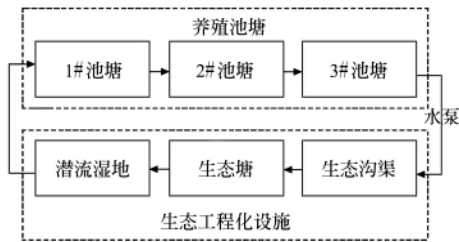


图 1 生态工程化池塘循环水养殖系统工艺图
Fig.1 Flow chart of the ecological engineering recirculating pond aquaculture system

系统设计依据：

1) 潜流湿地

潜流湿地容积

$$V = Q_{av}t/\varepsilon^{[22]} \quad (1)$$

式中， Q_{av} 为平均流量， m^3/d ； t 为水力停留时间， d ； V 为湿地容积， m^3 ； ε 为湿地孔隙率，无量纲。

根据水产养殖排放水情况，确定 t 为 0.4 d； ε 为 0.50（粒径 50mm 砾石）； Q_{av} 为 $1\,500\,m^3/d$ 。

则 $V=1\,200\,m^3$ ，潜流湿地深度为 0.8 m，建设面积应为 $1\,500\,m^2$ 。

2) 生态沟渠与生态塘

参照《污水稳定塘设计规范》^[23]

$$A=QS_0t/N_A \quad (2)$$

式中， A 为生态塘面积， m^2 ； Q 为污水流量， m^3/d ； S_0 为进水 BOD_5 ， g/m^3 ； t 为水力停留时间， d ； N_A 为面积负荷， $g/(m^2 \cdot d)$ 。

根据长期监测结果，淡水鱼池塘排放水的 S_0 为 $40\,mg/L$ ， N_A 为 $40\,g/(m^2 \cdot d)$ ， Q 为 $1\,500\,m^3/d$ ， t 为 1.5 d，则生态塘面积（ A ）为 $2\,750\,m^2$ 。

1.2 系统结构

本生态工程化池塘循环水养殖系统由 3 个养殖池塘（ $15\,000\,m^2$ ）， $1\,500\,m^2$ 潜流湿地， $2\,500\,m^2$ 生态塘，和 $500\,m^2$ 生态沟渠组成。池塘呈排列布局，进排水渠道在池塘两侧，生态塘和潜流湿地区在池塘的一端，生态沟渠的进水端与外河水源相接，可以提取外河水作为补充水，同时外河水源在进入池塘前也得到处理（图 2）。

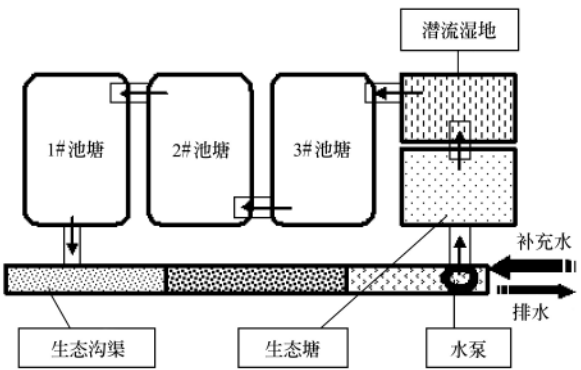


图 2 生态工程化池塘循环水养殖系统布置图
Fig.2 Layout of the ecological engineering recirculating aquaculture system

池塘养殖品种主要是草鱼和团头鲂，另外还搭配养殖鲢鱼、鳙鱼、鲫鱼等，养殖周期内的载鱼负荷量为 $0.20\sim0.82\,kg/m^3$ ；湿地植物主要有大漂、雍菜、水花生、茭白、鸢尾、美人蕉、再力花、芦苇等。

表 1 生态工程化养殖系统设计参数

Table 1 Design parameters of the ecological engineering aquaculture system

内 容	参 数	内 容	参 数
生态工程化系统	生态沟渠、生态塘、潜流湿地、养殖池塘	水交换量	$1\,500\,m^3/d$
潜流湿地面积	$1\,500\,m^2$	池塘水交换率	10%
生态塘面积	$2\,500\,m^2$	池塘载鱼密度	$0.20\sim0.82\,kg/m^3$
生态沟渠面积	$500\,m^2$	补充水量	$>10\%$
池塘面积	$15\,000\,m^2$		

1.3 生态沟渠

生态沟渠利用养殖池塘的排水渠构建，长 200 m，水泥预制板护坡，倒梯形结构，上口宽 2.5 m，下口宽 1.5 m，深 2.0 m。用围网将沟渠分为 3 个部分，池塘出水口端为 50 m 的漂浮植物区，中间为 100 m 的生物网箱区，进水口段为 50 m 的漂浮植物区。

漂浮植物区主要放置水浮莲、水葫芦等水生植物，水体内还放置了贝类、滤食性和杂食性鱼类等。

生物浮床用直径 50~100 mm UPVC 管和网目 1 cm 的聚乙烯网片制作（图 3）。在该区段，生物浮床面积占水面 20%~30%。生物浮床在生态渠道内有 2 种布置方式，一是每间隔 3~5 m 放置 1 个生物浮床，并在浮床

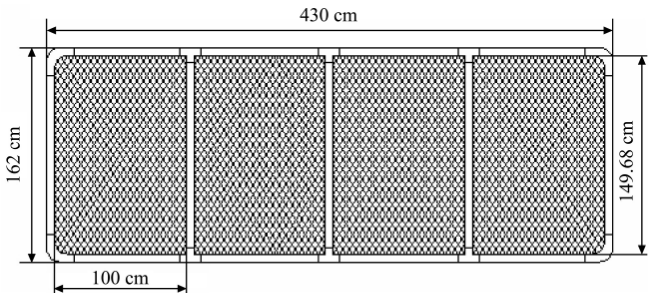


图 3 生物浮床平面图
Fig.3 Ichnography of the ecological floating bed

的 4 角系上绳子固定在岸上；另一种方式是各个浮床串联起来成排放置。浮床上面种植蔬菜、生菜、水芹等水生植物。生态沟渠内放养河蚌、螺蛳、杂食性鱼类等，生物量为 3~5 kg/m³。

1.4 生态塘

利用池塘改造而成，面积 2 500 m²（宽 40 m，长 62.5 m）。沿长度方向分别为 30 m 的植物种植区和 22 m 的深水区（图 4）。植物种植区水深 0.5 m，种植茭白、莲藕等水生植物。深水区水深 2 m，放置生物网箱，网箱内放置滤食性鱼类、贝类等，生态塘水体放养鲢鳙等滤食性鱼类和鲫鱼等杂食性鱼类，放养密度 0.05 kg/m²。生态塘四周为 3 m 宽的挺水植物种植区，水深 0.5 m，种植水葱、再力花、菖蒲、芦苇等。

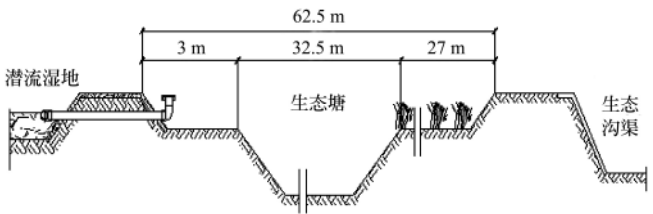


图 4 生态塘剖面示意图
Fig.4 Cross-section draw of the ecological pond

1.5 潜流湿地

潜流湿地面积 1 500 m²（宽 40 m，长 37.5 m）。湿地基质采用 3 级碎石级配，基质厚度为 70 cm，底部铺设 0.5 mm HDPE 塑胶布做防渗处理。潜流湿地进、出水区为宽度 1.5 m，粒径 50~80 mm 碎石过滤区。水处理区长 34.5 m。

基质分为 3 层：底层为 30 cm 厚，粒径 50~80 mm 碎石层；中间为 30 cm 厚，粒径 20~50 mm 碎石层；上层为 10 cm 厚，粒径 10~20 mm 碎石（图 5）。

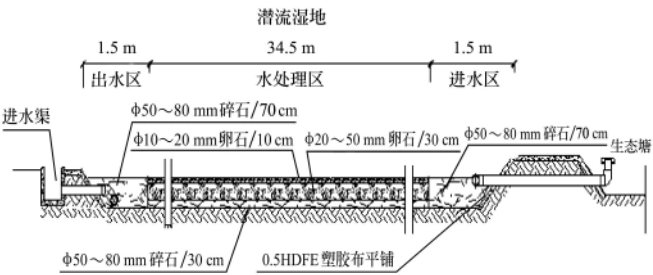


图 5 潜流湿地剖面示意图
Fig.5 Cross-section draw of the subsurface flow constructed wetland

湿地植物选用美人蕉、鸢尾、菖蒲等根系发达、生物量大、多年生的水生植物。

表 2 潜流湿地设计参数

Table 2 Design parameters of the subsurface flow constructed wetland

参数	内容	范围	备注
水力停留时间	$t = V\varepsilon/Q_{av}$	0.5~4 d	t 为水力停留时间，d； V 为湿地容积，m ³ ； ε 为湿地孔隙率，无量纲； Q_{av} 为平均流量，m ³ /d
水力坡度	$i = dh/dl$	0.5%~2%	i 为水力坡度，无量纲； h 为湿地平均水深，m； l 为湿地平均长度，m
孔隙率	ε	0.30~1.0	
表面负荷率	$ALR = (Q)(C_0)/As$	BOD 80~120 kg/(hm ² ·d)	As 为湿地处理面积，m ² ； Q 为湿地进水量，m ³ ； C_0 为进水污染物浓度，kg/m ³ ； ALR 为表面负荷率，kg/(hm ² ·d)
系统深度	h	40~80 m	
长度	$L = (As)/(W)$	20~40 m	L 为湿地长度，m； W 为湿地宽度，m
长宽比	L/W	(1~3) : 1	

1.6 池塘过水设施

循环水养殖系统的养殖池塘共 3 个，在池塘间对角部位建设过水设施，单个池塘面积为 5 000 m²（长 100 m，宽 50 m），水深 2 m，池塘坡比 2.5 : 1。

池塘过水设施由过水井、过水管路、插管、格网等组成。过水井为水泥砖砌结构，深度与池塘深度相同，面积为 0.6 m²（1 m×0.6 m）。水井底部安装 2 条直径 200UPVC 管过水管线，进水端安装穿孔溢水插管和防鱼格网，当系统内的水循环流动时，前面池塘的上层富氧水可进入到后面池塘的底部，实现水层交换和改善池塘的底部养殖环境（图 6）。

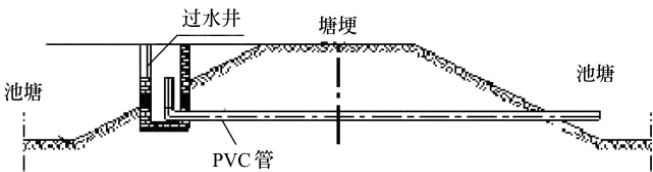


图 6 池塘过水设施示意图
Fig.6 Schematic diagram of the ponds water flow facilities

2 试验方法与结果分析

2.1 试验方法

系统试验在上海市松江浦南“中国水产科学研究院池塘生态工程研究中心”基地，养殖试验从 2009 年 3 月 25 日开始到 11 月 20 日结束。试验期间分别在养殖池塘、生态沟渠、生态塘、潜流湿地选择了 7 个取样点，并选择一个与试验池塘养殖结构一致的 5#池塘作为对照。

池塘养殖品种为草鱼和鳊鱼，养殖期间池塘载鱼量的变动范围为 0.20~0.82 kg/m³。

水样采集和处理方法执行《水质和废水监测分析方法》^[24]，水温、pH 值、溶解氧、ORP 指标，用 YSI556 多功能水质分析仪；总氮、总磷、高锰酸盐指数、铵氮、亚硝态氮、硝酸盐氮用 HACH DR-2800 测定。

试验数据用 SPSS13.0 软件统计，用单因子方差分析和 Duncan's 进行多重比较和差异显著性检验。

2.2 系统水质特征

2.2.1 池塘养殖水体营养盐

1) 总氮、总磷

试验期内, 水质监测数据表明 5#对照池塘水体中的总氮质量浓度均值为 $(4.19 \pm 1.10) \text{ mg/L}$, 而 1#、2#、3#池塘的总氮质量浓度分别为 $(0.86 \pm 0.02) \text{ mg/L}$ 、 $(1.05 \pm 0.04) \text{ mg/L}$ 、 $(2.18 \pm 1.09) \text{ mg/L}$ (图 7a)。

5#池塘中水体的总磷质量浓度为 $(1.61 \pm 0.08) \text{ mg/L}$, 而 1#、2#、3#池塘水体的总磷质量浓度分别为 $(0.24 \pm 0.07) \text{ mg/L}$ 、 $(0.35 \pm 0.09) \text{ mg/L}$ 、 $(0.46 \pm 0.12) \text{ mg/L}$ (图 7b)。

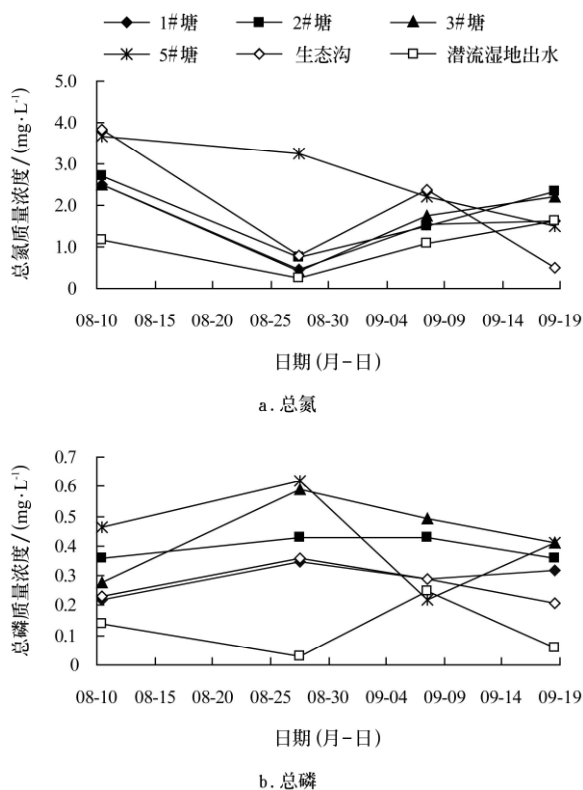


图 7 池塘水体中的总氮、总磷

Fig.7 Total nitrogen and total phosphorous of the recirculating aquaculture ponds

养殖期间, 池塘水体中的总氮、总磷值呈规律性波动, 从 1#塘到 3#塘, 水体中的总氮、总磷浓度不断上升, 但在整个养殖试验期间, 生态工程化循环水养殖系统池塘内的总氮、总磷浓度均低于对照池塘。

2) 化学需氧量 (COD)、铵氮

系统运行初期循环水养殖池塘与对照塘水体的 COD (chemical oxygen demand) 值差异不显著, 20 d 后循环水养殖池塘水体的 COD_{Mn} 值与对照塘出现差异, 其中 1#塘的 COD_{Mn} 含量要显著低于对照塘, 沿着水流方向 2#、3#池塘水体的 COD_{Mn} 值逐步升高, 表明 1#、2#、3#池塘有机物积累的是逐渐增加的。养殖期间内循环水系统内池塘的 COD_{Mn} 值低于 9.0 mg/L , 明显低于 5#对照池塘 COD_{Mn} 值 $(12.30 \pm 1.10) \text{ mg/L}$ (图 8a)。

养殖水体中的铵氮主要由鱼类排泄物、分泌物以及动植物尸体等含氮有机物分解产生。铵氮在水体中以离子氨 (NH_4^+) 和非离子氨 (NH_3) 2 种形态存在, 它们之间可以相互转换^[25]。养殖期间, 循环水系统内 3 个池塘

水体中的铵氮、亚硝态氮、硝态氮质量浓度与对照池塘相比相对稳定, 并始终维持在 1.89 、 0.2 、 1.50 mg/L 以下 (图 8b), 符合淡水池塘养殖用水标准^[26], 也没有对鱼类生长造成影响。

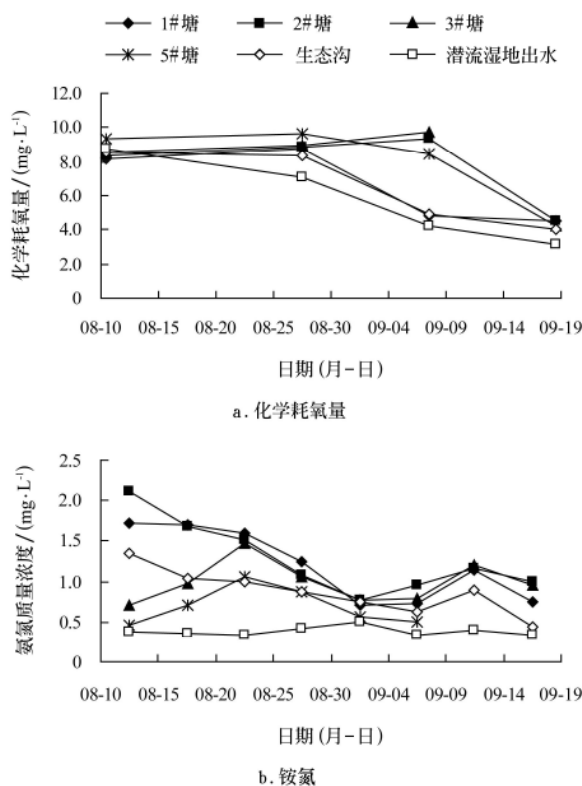
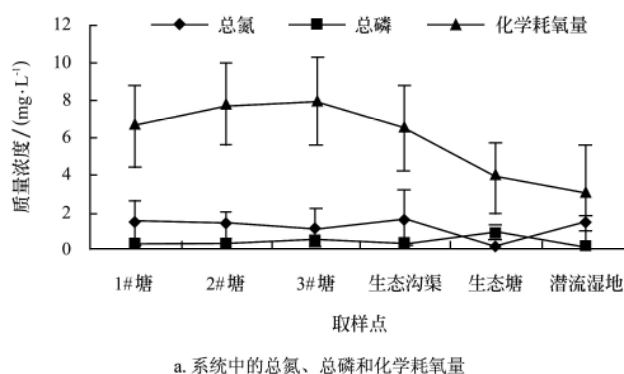


图 8 池塘水体中的化学耗氧量和铵氮

Fig.8 Chemical oxygen demand and ammonia nitrogen of the recirculating aquaculture ponds

2.2.2 循环水养殖系统水质变化

图 9 是养殖试验期间循环水养殖系统内总氮 (total nutrient, TN)、总磷 (total phosphorus, TP)、化学耗氧量 (chemical oxygen demand, COD) (图 9a) 和三态氮 (图 9b) 的变化情况, 从图中看出, 沿着水流方向, 养殖池塘水体中的三态氮、总氮、总磷、COD 等水质指标有明显趋高现象, 在经过生态工程化设施后这些水质指标出现了明显下降。说明沿着水流方向, 养殖池塘水体中的营养盐浓度逐步积累, 在经过生态工程化设施后水体中的营养盐得到了有效地净化吸收, 从而维持了池塘水体中营养盐的平衡, 节约了养殖用水, 减少了排放水对外界的污染。



a. 系统中的总氮、总磷和化学耗氧量

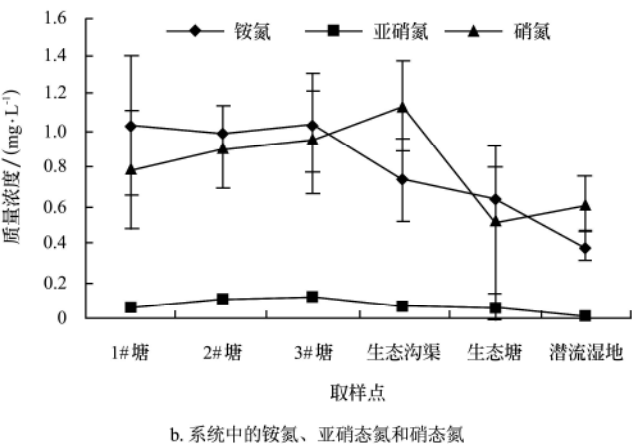


图 9 循环养殖系统中主要水质指标变化
Fig.9 Changes of the water quality index in the recirculating aquaculture system

养殖试验期间池塘养殖水体中的铵氮、亚硝态氮、硝态氮、总氮、总磷、COD_{Mn}等水质指标分别低于 1.89、0.20、1.50、3.27、0.59、9.0 mg/L，均低于 5#对照池塘和淡水池塘养殖水质标准。

2.3 生态工程化设施的净化作用

2.3.1 潜流湿地

潜流湿地是生态工程化养殖系统中主要的设施部分，表 3 是养殖运行期间潜流湿地进、出水的水温、pH 值、溶氧（DO）、氧化还原电位（ORP）变化情况。从表 3 中看出，同一时期潜流湿地进出水体的盐度变化不大，说明潜流湿地对水体的盐度影响不大。

表 3 潜流湿地进出水的理化指标

Table 3 Physical and chemical index of the subsurface flow constructed wetland influent and effluent						
时间	水样	温度/ ℃	盐度	溶解氧质量 浓度/(mg·L ⁻¹)	pH	氧化还原电位/ mV
6 月 10 日	进水 I	26.38	0.35	4.39	8.72	141.96
	出水	25.01	0.35	1.33	8.24	145.92
7 月 10 日	进水	29.46	0.33	4.57	8.87	116.23
	出水	28.02	0.33	1.26	8.10	122.06
8 月 10 日	进水	30.82	0.30	4.69	8.69	131.99
	出水	30.55	0.30	2.06	8.04	147.30
9 月 10 日	进水	26.94	0.31	3.88	7.99	121.70
	出水	26.26	0.31	0.79	7.81	137.20

但与进水相比，潜流湿地出水的 pH 值、溶解氧、氧化还原电位都出现显著下降 ($p<0.05$)，反映了湿地系统内部生化反应的状态。

表 4 是潜流湿地对总氮、总磷和 COD 等营养盐的净化情况。试验运行期间，潜流湿地进出水体的总氮、总磷和 COD 指标有明显差异 ($p<0.05$)，表明潜流湿地对养殖水体中的氮、磷营养盐有明显的去处效果，分析发现潜流湿地对养殖水体中的总氮、总磷和 COD 的去除率分别在 52%~59%、39%~69%和 17%~35% 范围内。

从表 4 中发现，随着养殖时间的延长，潜流湿地对总氮、总磷和 COD 的去除效率越来越高，说明随着水生

植物的生长和湿地生态效率的提高，其净化效率会逐步提高。

表 4 潜流湿地水质净化效果
Table 4 Water purify efficiency of subsurface flow constructed wetland

		mg·L ⁻¹		
时间	水样	总氮质量浓度	总磷质量浓度	COD _{Mn}
6 月	进水	1.34±0.15	0.28±0.07	6.10±1.70
	出水	0.64±0.05	0.18±0.04	5.00±1.56
	去除率/%	52	35	18
7 月	进水	1.22±0.18	0.43±0.08	7.56±1.29
	出水	0.56±0.04	0.26±0.02	6.27±1.05
	去除率/%	54	39	17
8 月	进水	1.39±0.18	0.44±0.07	4.92±0.96
	出水	0.57±0.02	0.16±0.01	3.20±0.87
	去除率/%	59	64	35
9 月	进水	1.72±0.32	0.42±0.08	6.50±1.80
	出水	0.65±0.06	0.14±0.02	3.77±1.02
	去除率/%	62	67	42

注：实验结果为平均值±标准差。

2.3.2 生态沟渠

试验运行期间，生态沟渠的植物生物量平均变化范围为 2.0~35.0 kg/m²。水质分析发现，生态沟渠进、出水的铵氮、亚硝态氮、硝态氮、总氮、总磷、化学耗氧量等水质指标存在着显著差异 ($p<0.05$)，表明生态沟渠对养殖排放水有明显的净化作用。数据分析显示，生态沟渠对养殖水体中的铵氮、亚硝态氮、硝态氮、总氮、总磷和 COD 的去除率达到 49.49%、62.50%、-28.75%、18.35%、17.39%和 18.18%（表 5）。其中出水的硝态氮明显高于进水，说明生态沟的氧化作用使更多的亚硝态氮转化为硝态氮。

2.3.3 生态塘

与生态沟渠一致，养殖运行期间对生态塘进、出水的铵氮、亚硝态氮、总氮、总磷、化学耗氧量等水质指标等水质指标进行了检测分析，检测数据发现生态塘进出水的水质指标有明显差异 ($p<0.05$)，生态塘对养殖水体中的铵氮、亚硝态氮、硝态氮、总氮、总磷和 COD 的去除率分别为 24.00%、50.00%、17.48%、24.72%、26.32%和 5.86%（表 5）。

2.4 节水与减排分析

据调查，在中国的江浙等池塘养殖主产区，传统池塘养殖一般每年换水 3~5 次^[27]，而生态工程化循环水养殖系统每年的最大排放量不超过 2 次，且排放水为生态塘净化水。

池塘养殖用水主要用于换水、蒸发补水和捕鱼排水。据气象资料，江浙地区的年平均降水量 1 078.1 mm，年平均蒸发量 1 346.3 mm^[28]，由此推算，该地区池塘养殖的蒸发补充水量约为 268.2 mm/a，约为总水体的 13.4%。

生态工程化池塘养殖系统中的耗水主要是补充蒸发和捕鱼排水，其补充水量与传统池塘一致，其排水主要是清塘排水，一般 1 年 1 次。表 6 是生态工程化循环水养殖模式与传统养殖模式的用水与排放情况比较。

表 5 生态沟渠和生态塘水质净化效果

Table 5 Water purify efficiency of eco-ditch and eco-ponds influent and effluent		mg · L ⁻¹				
		NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	COD
生态沟	进水	0.99 ^a ±0.25	0.16 ^a ±0.06	0.80 ^a ±0.29	2.18 ^a ±0.99	7.92 ^a ±2.36
	出水	0.50 ^b ±0.25	0.06 ^b ±0.04	1.03 ^b ±0.43	1.78 ^b ±1.32	6.48 ^b ±2.33
	去除率%	49.49	62.50	-28.75	18.35	18.18
生态塘	进水	0.50 ^b ±0.25	0.06 ^b ±0.04	1.03 ^b ±0.43	1.78 ^b ±1.32	6.48 ^b ±2.33
	出水	0.38 ^c ±0.10	0.03 ^c ±0.03	0.85 ^c ±0.33	1.34 ^c ±0.35	6.10 ^c ±1.70
	去除率%	24.00	50.00	17.48	24.72	5.86

注：表中同列不同小写字母表示显著性差异（ $P<0.05$ ）。

表 6 不同养殖方式用水与污染排放比较

Table 6 Water consumption and pollution emissions comparison of different aquaculture mode

内 容	补充水/(m ³ · kg ⁻¹)		总氮排放/ (g · m ⁻³)	总磷排放/ (g · m ⁻³)	COD 排放/ (g · m ⁻³)
	蒸发补充	排水量			
传统池塘养殖	0.18	4.0~6.7	16.8~28.1	6.4~10.8	49.2~82.4
生态工程化养殖	0.18	1.3~2.6	1.7~3.5	0.4~0.7	7.9~15.9
平均减少率%		63.6	88.4	93.6	81.9

注：总氮排放(单位产量的总氮排放量)=排放水体中总氮含量×单位产品排水量；总磷排放与 COD 排放计算方法同总氮排放。补充水以养每千克鱼需补充水的立方米数计。

3 结论与讨论

3.1 结论

1) 与传统池塘养殖模式相比，生态工程化池塘养殖系统可减少养殖用水 60% 以上，减少氮、磷和 COD 排放 80% 以上，因而具有良好的“节能、减排”效果，符合我国水产养殖发展要求。

2) 生态工程化设施与养殖水面相比应有合理的比例；生态沟渠、生态塘、潜流湿地和养殖池塘的组成也应有一定的比例，生态工程化设施一般不超过系统面积的 20%。

3) 潜流湿地是生态工程化设施系统中的主要部分，其中的填料、植物等对湿地的净化效果影响较大，在构建潜流湿地时应尽量选择比表面积大、空隙率高的填料和当地的水生植物。

4) 生态工程化池塘养殖系统的运行要结合池塘养殖要求和生态工程化设施的净化特点，池塘养殖水体中的营养盐要维持在养殖需要的范围内，一般可通过控制水流量大小和时间进行调控。

3.2 讨论

生态工程化池塘循环水养殖模式具有“生态、安全、高效”的特点，是改变传统养殖方式、提高养殖效果的有效途径，但还有很多的问题需要开展研究。建设生态工程化养殖系统的目的是为了改善养殖水质，使池塘养殖水质更适合养殖需要。所以，在建设生态工程化池塘养殖系统时，应充分考虑池塘养殖特点、气候特点、场地结构等因素，系统构建应考虑充分发挥不同组分的功能，做到结构简单、效率最高。同时应研究适用于水产

养殖水处理的人工湿地^[29]、生态塘^[30]、高效藻类塘^[31]、生态沟渠^[32]、生物浮床^[33]、生态坡^[34]、曝气生物净化系统^[35]等生态工程设施构建技术，研究和建立针对不同池塘养殖特点的生态工程化系统建设技术。

与工业、生活等污水相比，水产养殖排放水主要是氮、磷污染，其质量浓度也相对较低（[TN]<5.0 mg/L，[TP]<1.0 mg/L）^[36]。所以，在设计生态工程化养殖系统时要结合养殖排放水体特点，根据池塘养殖的“理想”水质要求和生态工程化设施的净化能力，建立营养盐流动调控技术工艺，发挥生态工程化调控池塘养殖水质的作用

生态工程化养殖模式在国内刚刚起步，目前还缺乏相应的管理技术。研究建立包括设施构建、动植物选择与搭配、养殖技术等方面的管理技术体系，以及相应的增氧技术、藻类调控技术、底质改良技术等，对于完善生态工程化养殖模式技术体系，实现技术推广是必要的。

[参 考 文 献]

[1] 中国渔业年鉴[M].北京:中国农业出版社, 2008: 197—205.

[2] 徐皓, 刘兴国, 吴凡. 淡水池塘规范化改造与养殖系统模式构建[J]. 中国水产, 2009, 405(8): 7—9.

Xu Hao, Liu Xingguo, Wu Fan. Freshwater ponds standardize and culture system constructed[J]. Chinese Fisheries, 2009, 405(8): 7—9. (in Chinese with English abstract)

[3] 黄欢, 汪小泉, 韦肖杭, 等. 杭嘉湖地区淡水水产养殖污染物排放总量的研究[J]. 中国环境监测, 2007, 23(2): 94—97.

Huang Huan, Wang Xiaoquan, Wei Xiaohang, et al. An research on the quantity of discharged pollutant of freshwater breed aquatics in Hangjiahu area[J]. Environmental monitoring in China, 2007, 23(2): 94—97. (in Chinese with English abstract)

[4] 罗国芝. 水产养殖规划环境影响评价研究[D]. 上海:同济大学, 2007.

Luo Guozhi. Aquaculture Environmental Impact Assessment [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese with English abstract)

[5] 周劲风, 温琰茂. 珠江三角洲基塘水产养殖对水环境的影响[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(5): 104—106.

Zhou Jinfeng, Wen Yanmao. Effects of fish aquaculture on water environment in the zhujiang river delta[J]. Acta

- Scientiarum Natcralum Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(5): 104—106. (in Chinese with English abstract)
- [6] 黄朝禧, 赵凤岐. 水产养殖工程学研究进展[J]. 山西农业大学学报, 2005, 25(1): 93—96.
Hang Chaoxi, Zhao Fengqi. Review of aquaculture engineering science[J]. Journal of Shanxi Agric Univ, 2005, 25(1): 93—96. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李明锋, 李成瑞. 生态渔业的实证分析与理论思考[J]. 现代渔业信息, 2008, 23(1): 12—15.
Li Mingfeng, Li Chengrui. Demonstration analysis and theoretic thought ecological fisheries[J]. Modern Fisheries Information. 2008, 23(1): 12—15. (in Chinese with English abstract)
- [8] 黄国强, 李德尚, 董双林. 一种新型对虾多池循环水综合养殖模式[J]. 海洋科学, 2001, 25(4): 48—50.
Hang Guoqiang, Li Deshang, Dong Shuanglin. A new shrimp poly-ponded recirculation polyculture system[J]. Marine Sciences, 2001, 25(4): 48—50. (in Chinese with English abstract)
- [9] 冯敏毅, 马茏, 郑振华. 利用生物控制养殖池污染的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(1): 89—94.
Feng Menyi, Ma Sheng, Zheng Zhenhua. Study of biological methods for pollution-control of shrimp ponds[J]. Periodical of ocean university of China. 2006, 36(1): 89—94. (in Chinese with English abstract)
- [10] 申玉春. 对虾高位池生态环境特征及其生物调控技术[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003.
Shen Yuchun. Study on Ecological Environmental Characteristics of Prawn Culture in Higher-Place Ponds and Biomanipulation Technology[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨勇. 稻渔共作生态特征与安全优质高效生产技术研究[D]. 镇江: 扬州大学, 2004.
Yang Yong. Study on Ecological Characteristics and Technique for Safe Good Quality and High Benefit of Rice-Fish Culture[D]. Zhenjiang: Yangzhou University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郭立新. 高等陆生植物对养殖废水的净化作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
Guo Lixin. Purification of Aquiculturie Wastewater by High Terrestril Plant Cultivated with Recycling Water System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [13] 泮进明, 姜雄辉. 零排放循环水水产养殖机械-细菌-草综合水处理系统研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 237—241.
Pan Jinming, Jiang Xionghui. Integrated system combined with machinery, bacteria and grass to treat wastewater from a zero—discharge recirculation aquaculture system[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 237—241. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李谷. 复合人工湿地-池塘养殖生态系统特征与功能[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
Li Gu. Studies on the Characteristics and Function of an Integrated Constructed Wetland-Pond Aquaculture Ecosystem[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy Science, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [15] Scoatt D. Bergenetal design principles for ecological engineering[J]. Ecological Engineering, 2001, 18(2): 201—210.
- [16] Wang Jaw-Kai. Conceptual design of a microalgae-based recirculating oyster and shrimp system[J]. Aquacultural Engineering, 2003, 28(1): 37—46 .
- [17] Sofia Morais, Michal Torten, Oryia Nixon, et al. Food intake and absorption are affected by dietary lipid level and lipid source in sea bream (*Sparus aurata* L.) larvae[J]. Jonurnal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2006, 331(1): 51—63.
- [18] Barry A. Preliminary investigation of an integrated aquaculture-Wetland ecosystem using tertiary treated municipal wastewater in Losangeles County California[J]. Ecology Engineering, 1998, 10(4): 341—354.
- [19] Steven T, Paul R A, Michael D G, et al. Aquaculture sludge removal and stabilization within created wetlands[J]. Aquaculture Engineering, 1999, 18(4): 81—92.
- [20] Lin Yingfeng, Jing Shuhren, Lee Deryuan, et al. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetland system[J]. Aquaculture, 2002, 209(1/2/3/4): 169—184.
- [21] Divid R, Tilly, Harish Badrinarayanan, et al. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture[J]. Aquaculture Engineering, 2002, 26(2): 81—109.
- [22] 华涛, 周启星, 贾宏宇. 人工湿地污水处理工艺设计关键及生态学问题[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1289—1293.
Hua Tao, Zhou Qixing, Jia Hongyu. Designing cruxes and ecological issues of constructed wetland systems for wastewater treatment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7): 1289—1293. (in Chinese with English abstract)
- [23] CJJ/T54—93, 污水稳定塘设计规范[S].
- [24] 魏复盛, 徐晓白, 阎吉昌, 等. 水和废水监测分析方法指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [25] 雷衍之. 养殖水环境化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [26] SC/T 9101-2007, 淡水池塘养殖排水排放要求[S].
- [27] 徐皓, 倪琦, 刘晃. 我国水产养殖设施模式分析[J]. 科学养鱼, 2008, 3: 1—2.
Xu Hao, Ni Qi, Liu Huang. Aquaculture facilities analysis in China[J]. Scientific Fish Farming, 2008, 3: 1—2. (in Chinese with English abstract)
- [28] 上海地方志办公室. 自然地理(气候) [DB/OL]. <http://www.shtong.gov.cn/node2/node4/node2250/shanghai/node53635/node53640/node53642/userobject1ai35520.html>, 1998-8-15.
- [29] 刘长发, 晏再生, 张俊新. 养殖水处理技术的研究进展[J]. 大连水产学院报, 2005, 20(2): 142—146.
Liu Changfa, Yan Zaisheng, Zhang Junxin. Advances in treatment technology of effluent from aquaculture. Journal of Dalian Fisheries University, 2005, 20(2): 142—146. (in Chinese with English abstract)

- [30] 黄梅, 李小兵. 我国生态塘污水处理工艺的研究与应用[J]. 企业技术开发, 2004, 23(14): 19—21.
Huang Mei, Li Xiaobing. On the research and practice of ecological pond techniques in treating wastewater in china[J]. Technological Development of Enterprise, 2004, 23(14): 19—21. (in Chinese with English abstract)
- [31] 刘兴国, 邵征翌, 徐皓. 高效藻类塘技术及其在水产养殖中的应用[J]. 渔业现代化, 2010, 37(1): 6—10.
Liu Xingguo, Shao Zhengyi, Xu Hao. Research and application of high rate algal ponds in aquaculture[J]. Fishery Modernization, 2010, 37(1): 6—10. (in Chinese with English abstract)
- [32] 周香香, 张利权, 袁连. 上海崇明岛前卫村沟渠生态修复示范工程评价[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 394—400.
Zhou Xiangxiang, Zhang Liquan, Yuan Lian. Evaluation on a demonstration project of ecological restoration of ditches at Qianwei village of Chongming county, Shanghai Chinese[J]. Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 394—400. (in Chinese with English abstract)
- [33] 卢进登, 帅方敏, 赵丽娅, 等. 人工生物浮床技术治理富营养化水体的植物遴选[J]. 湖北大学学报: 自然科学版, 2005, 27(4): 402—404.
Lu Jindeng, Shuai Fangmin, Zhao Liya, et al. Choosing plants for treating eutrophic water by artificial floating rafts[J]. Journal of Hubei University: Nature Science, 2005, 27(4): 402—404. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李海东, 林杰, 张金池, 等. 生态护坡技术在河道边坡水土保持中的应用[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(1): 119—123.
Li Haidong, Lin Jie, Zhang Jinchi, et al. Discussion on the application of ecological slope protection technology for stream channel[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2008, 32(1): 119—123. (in Chinese with English abstract)
- [35] 谢曙光, 张晓健, 王占生. 曝气生物滤池最新发展和运用[J]. 水处理技术, 2004, 30(1): 4—7.
Xie Shuguang, Zhang Xiaojian, Wang Zhansheng. Most recent development and application of biological aerated filter[J]. Technology of Water Treatment, 2004, 30(1): 4—7. (in Chinese with English abstract)
- [36] 王彦波, 岳斌, 许梓荣. 池塘养殖系统氮、磷收支研究进展[J]. 饲料工业, 2005, 26(18): 49—51.
Wang Yanbo, Yue Ben, Xu Zirong. Progress of pond aquaculture nitrogen and phosphorus balance studies[J]. Feed Industry, 2005, 26(18): 49—51. (in Chinese with English abstract)

Ecological engineering water recirculating ponds aquaculture system

Liu Xingguo^{1,2}, Liu Zhaopu¹, Xu Hao², Gu Zhaojun², Zhu Hao²

(1. Nanjing Agricultural University Marine Biological Key Open Laboratory, Nanjing 210095, China;

2. Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture, Shanghai 200092, China)

Abstract: According to the characteristics of traditional freshwater ponds in aquaculture, a system of ecological engineering water recirculation ponds aquaculture was designed to solve the problems of aquatic pollution, waste of water and the safety of aquatic product. The system was composed of an eco-ditch, an eco-pond, constructed underflow wetlands and aquaculture ponds, with the area ratio of 1:5:3:30. In the system, the aquaculture ponds were arranged in series, and water flow facilities were built in the pond diagonal to exchange the upper and lower layer water. An impetus was used to circulate the water in the system. At the fish density of 0.20–0.82 kg/m³ and daily water exchange rate of 10%–15% in the system, the concentrations of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen, total nitrogen, total phosphorus and COD_{Mn} were lower than 1.89, 0.20, 1.50, 3.27, 0.59, and 9.0 mg/L, respectively, which were all lower than those of the control pond and satisfied the standards of national aquaculture water quality. The water purification results of ecological engineering facilities showed that, the removal rates of total nitrogen, total phosphorus and COD_{Mn} from the aquaculture emissions were above 52%, 39% and 17%, respectively, in the constructed underflow wetlands. The average removal rates of total nitrogen, total phosphorus and COD_{Mn} were above 18.35%, 17.39% and 18.18%, respectively, in the ecological ditch. And the average removal rates of total nitrogen, total phosphorus and COD_{Mn} were 24.72%, 26.32% and 5.86%, respectively, in the eco-pond. Compared to the traditional pond aquaculture, the ecological engineering water recirculation ponds aquaculture system can save as much as 63.6% water and reduce 81.9% COD emissions, which show significant effects on water saving and pollution emission reducing.

Key words: pond, ecology engineering, water quality, recirculating aquaculture system