

文章编号:1000 - 0615(2004)06 - 0689 - 06

闭合循环水产养殖 - 植物水栽培综合生产系统的 工艺设计及运行效果

谭洪新^{1,2}, 刘艳红³, 朱学宝², 罗国芝², 周 琪¹

(1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092;
2. 上海水产大学设施渔业研究所, 上海 200090; 3. 蒙自师范高等专科学校, 云南 蒙自 661100)

摘要: 闭合循环水产养殖 - 植物水栽培综合生产系统主要由鱼类养殖池、蔬菜和花卉水培渠、循环水处理系统构成, 是一种新型“养殖 - 种植 - 水质净化”生产模式。在上海市青浦区的实践表明: 单位水体红罗非鱼 (*Tilapia mossambica* () × *Tilapia nilotica* ()) 和暗纹东方鲀 (*Fugu obscurus*) 的产量分别达到 $58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $12.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 养殖期间, 氨氮浓度 $< 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝氮浓度 $< 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{DO} > 5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 水栽培蔬菜生长良好, 对氨氮、亚硝氮、硝氮、总氮、磷酸盐和 COD 的最大去除率分别为 57.46%、51.72%、3.7%、10.67%、9.72% 和 21.78%, 水培蔬菜渠进水和出水的平均 N/P 分别为 6.60 1 和 6.53 1; 生物过滤器对流经水体的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、COD 一次性去除率分别为 44.79%、20.31%、20.10%; 泡沫分离 - 臭氧消毒装置对养殖水体中异养细菌的去除率为 93.58%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除率为 39.00%、38.10%, 能明显提高水体中的 pH 和 DO。

关键词: 水产养殖; 植物水栽培; 工艺设计

中图分类号: S954 **文献标识码:** A

The producing effect and technological design for integrated system of closed circulating aquaculture and plant hydroponics

TAN Hong-xin^{1,2}, LIU Yan-hong³, ZHU Xue-bao², LUO Guo-zhi², ZHOU Qi¹

(1. State Key Lab. of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Institute of Aquacultural Engineering, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China;

3. High Normal College of Mengzi, Mengzi 661100, China)

Abstract: The integrated system of closed circulating aquaculture and plant hydroponics was designed, according to the principle of agri-ecological engineering. It includes fish-ponds, vegetable and flower hydroponics trenches, circulating water treatment units. It is a new producing model for aquaculture-crop-water cleansing. The objectives of this study are demonstration of agri-ecological engineering project, and studying the relation of energy flow between aquaculture and plant hydroponics. The results of Qingpu of Shanghai indicate: The fish output of red tilapia (*Tilapia mossambica* () × *Tilapia nilotica* ()) and obscure puffer (*Fugu obscurus*) is $58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $12.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ respectively, during culturing, concentration of ammonia-N, nitrite-N is respectively $< 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $< 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{DO} > 5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; The hydroponic vegetable has good growth, and its

收稿日期:2003-06-20

资助项目:上海市科技兴农重点攻关项目[农科攻字(2000)第6-10号]

作者简介:谭洪新(1968-),男,四川资阳人,副研究员,现为同济大学在职博士研究生。主要从事集约化养殖水处理技术和环境生态学的研究和教学。E-mail: hxtan@shfu.edu.cn

maximal purification rates of ammonia-N, nitrite-N, nitrate-N, total-N, phosphate-P and COD are 57.46%, 51.72%, 3.7%, 10.67%, 9.72% and 21.78% respectively, average N/P ratio of inlet and outlet is 6.60 1 and 6.53 1 respectively; The biofilter removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and COD were 44.79%, 20.31%, 20.10% respectively; The foam-separation and ozonic-sterilization device reduced the heterotrophic bacteria number by 93.58%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ by 39.00%, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ by 38.10% in water through the reacting unit, raised pH and DO in the water through the device.

Key words :aquaculture; plant hydroponics; technologic design

以农业生态工程为理论基础,建设具较高科技含量、较强自我调节功能和稳定性的现代生态型集约化综合生产系统是世界农业(包括水产养殖业)发展的必由之路。这种生产方式是21世纪现代农业的发展方向。同时,控制水产养殖活动形成的环境面源污染,实现水产养殖的可持续发展,是当前和今后一段时间急需解决的问题^[1]。闭合循环水产养殖-植物水栽培综合生产系统将高密度水产养殖外排污水无机化后,用于水培经济作物,减少了养殖污水直接外排引起的水体富营养化问题;其次,生产系统外排的少数废水进入人工湿地污水净化系统,进一步转化为可收集生物量,将生产系统对环境的污染减少到最低,并保证了系统的无公害化生产。本生产模式的广泛应用,有利于水产业实现可持续发展。本文研究了闭合循环水产养殖-植物水栽培综合生产系统的工艺设计及运行效果,为该生产模式的推广提供参考。

1 材料与方法

1.1 闭合循环水产养殖-植物水栽培综合生产系统的工艺原理

闭合循环水产养殖系统采用水处理及回复利用技术实现鱼类的高密度养殖($> 50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$),处理后的养殖水经多次回复利用后会有部分无毒性的营养盐或有机物积累在系统中,将这些营养盐作为经济植物的营养源,一方面可变废为宝,另一方面可净化水质。这种利用闭合循环水产养殖系统进行鱼类高密度养殖,同时利用养殖废水进行植物栽培的生产系统叫做闭合循环水产养殖-植物水栽培综合生产系统。在该生产系统中,微生物降解鱼类粪便或残余饲料等形成的高浓度溶解性营养盐有利于植物快速生长。在闭合循环系统中日换水量为1%~5%,溶解性营养物积累量接近植物水培液的浓度,特别是氮元素在循环系统

中的浓度较高^[2]。

1.2 闭合循环水产养殖-植物水栽培综合生产系统的工艺流程及特点

系统简介 由闭合循环水产养殖系统与经济作物水栽培系统构建的综合生产系统,是利用鱼类工厂化养殖和蔬菜花卉水培生产工艺特点,发挥“渔”、“菜”两种生产方式的能量与生态互补性,引用水处理和水质控制技术,经集成化而形成的“养殖-种植-水质净化”新型生产模式。主要由鱼类养殖池、蔬菜或花卉水培渠、循环水处理系统(包括一级净化系统、水处理生化反应器、泡沫分离-臭氧消毒装置、曝气及控温装置)等功能单元组成。该系统有 50 m^3 的鱼池4个; 100 m^2 的植物水栽培渠4条;循环水处理系统1套。河道水经湿地系统预处理后作为综合系统的原水。

工艺流程 闭合循环水产养殖-植物水栽培综合生产系统工艺流程及基本配置见图1,2。

工艺特点 发挥了“渔”、“菜”两种不同生产方式潜在的能量与生态互补性,形成一种“养、种、净化”三合一的新型生产模式。采用水处理工艺及设备,实现高密度养殖及蔬菜的周年生产,且提高了产品的品质和安全性。养鱼废水和污染物在生产系统的净化和利用,可以做到对环境的污染零排放,具有明显的环境效益。

该系统适用于养殖淡水名贵鱼类,种植蔬菜和花卉等经济作物,有利于提高经济效益。

主要工艺参数 本系统每立方水体的设计最大载鱼负荷为 60 kg ,日投饵率不超过鱼体重的3%,人工饲料的蛋白质含量不超过45%,最大日换水量不超过总水体量的5%。根据物料衡算和各水处理单元正常工况下的工作效率,增加15%的安全系数,确定系统的水体日循环量为8~12次。

1.3 常规检测指标

pH:PHS—3D多功能pH计;异养细菌:平板

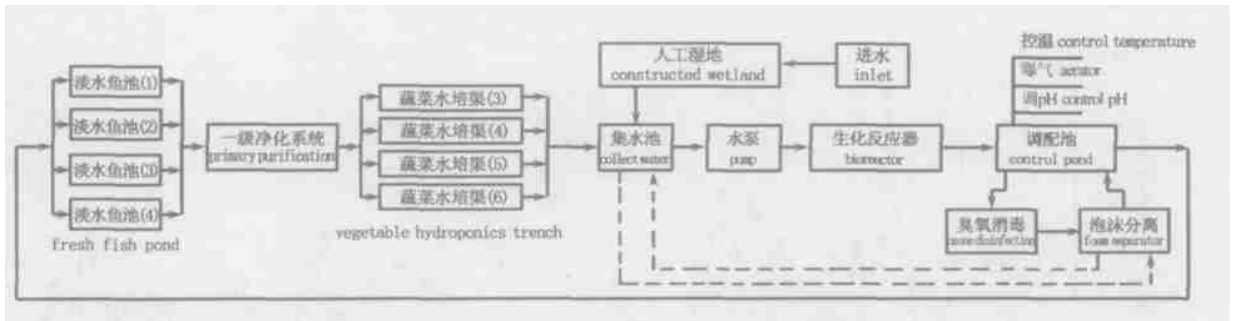


图 1 闭合循环水产养殖 - 植物水栽培综合生产系统工艺流程

Fig. 1 Technologic flow chart for the integrated system of closed circulating aquaculture and plant hydroponics

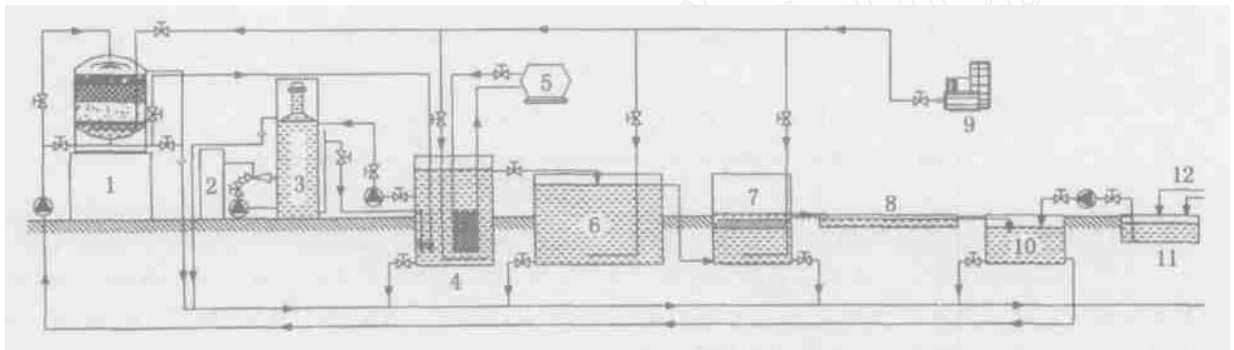


图 2 闭合循环水产养殖 - 植物水栽培综合生产系统配置

Fig. 2 Scheme diagram for the integrated system of closed circulating aquaculture and plant hydroponics

1 生化反应器, 2 臭氧发生器, 3 泡沫分离器, 4 调配池, 5 供热锅炉, 6 鱼类养殖池, 7 一级净化池, 8 植物水栽培渠, 9 漩涡鼓风机, 10 集水池, 11 人工湿地, 12 进水

1 bioreactor, 2 ozone generator, 3 foam separator, 4 control pond, 5 boiler, 6 farming fish pond, 7 primary purification, 8 plant hydroponics trench, 9 vortex blower, 10 collect water pond, 11 constructed wetland, 12 inlet

计数法; 剩余臭氧: 碘量法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$: 纳氏试剂比色法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$: 磺胺-萘乙二胺比色法; COD: 酸式高锰酸钾; DO: 碘量法/YSI—多功能溶氧仪; 硝氮: 镉-铜还原法; 总氮和总磷: 同时消化法测定^[3]。

1.4 系统启动

系统采用经人工湿地系统预处理的河道水为原水。放鱼前, 运行系统 2 周, 采用自然挂膜方法使生物反应器内滤料形成净化功能。选择体质健康、无外伤的红罗非鱼(放养 1 池)和暗纹东方鲈(放养 3 池)为实验对象, 每天投喂 4 次, 日投饵量为 1.5% ~ 2.0%。水培蔬菜有生菜和草莓(各 2

条水培渠), 其中 50m² 栽培生菜(850 株, 间距 25cm × 25cm), 50 m² 栽培草莓(850 株, 间距 25cm × 25cm)。系统所有设备按操作规范运行。

2 结果与讨论

2.1 单位水体鱼产量

在闭合循环水产养殖 - 植物水栽培综合生产系统中进行红罗非鱼和暗纹东方鲈的高密度养殖。经 95 ~ 170d 养殖, 红罗非鱼和暗纹东方鲈的鱼载量分别达到 58kg · m⁻³, 12.2kg · m⁻³。生长情况见表 1; 养殖期间, 平均氨氮浓度 < 1.5 mg · L⁻¹, 平均亚硝氮浓度 < 0.8 mg · L⁻¹(图 3)。

表 1 红罗非鱼和暗纹东方鲈生长情况

Tab. 1 The growth condition of red tilapia and obscure puffer

项目 item	养殖周期(d) culture period	放养规格(g ind ⁻¹) start weight	放养密度(ind m ⁻³) start density	单位产量(kg m ⁻³) output per cube	成活率(%) survival rate	饲料系数 food coefficient
暗纹东方鲈 obscure puffer	170	65.8	110	12.2	91.7	1.8
红罗非鱼 red tilapia	95	250	120	58.0	96.1	1.49

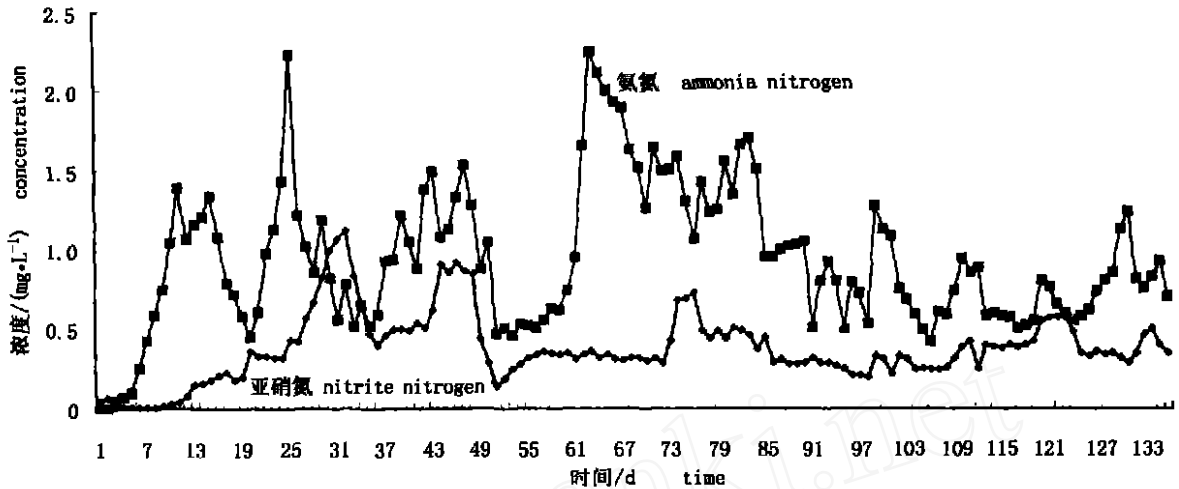


图3 生产阶段系统内氨氮、亚硝氮变化情况

Fig. 3 Changes in ammonia-N, nitrite-N of system during producing period

2.2 植物栽培及水质净化效果

在闭合循环水产养殖-植物水栽培综合生产系统中进行生菜和草莓水栽培及净化效果试验。结果表明,养殖废水提供的营养源能充分满足水培蔬菜的需要,蔬菜生长状况良好,经45d水培可收获一茬生菜,生菜平均单株湿重为350g,株高为25~35cm,最长须根长为60~75cm;草莓植入后15d开始开花,挂果率较高。

水栽培蔬菜对养殖水体具有一定的净化功能,对氨氮、亚硝氮、硝氮、总氮、磷酸盐和COD的最大去除率分别为57.46%、51.72%、3.7%、10.67%、9.72%和21.78%;水培蔬菜进水和出水的平均N/P值分别为6.60和6.53。水栽培植物的水质净化效果见表2。Jungersen^[4]利用鳗鱼养殖废水水培西红柿时,其N/P进水值为6.3,出水为6.1。本试验结果与其相似,表明水体中氮和磷能比较均衡地被利用。当水体中不存在营养元素限制时,植物能很好地吸收利用水体中的无机营养盐。

2.3 生化反应器、泡沫分离-臭氧消毒装置的净化效果

在闭合循环水产养殖-植物水栽培综合生产系统中进行鱼类和植物生产的同时,检测了水处理系统的净化效果。表3表明,生物过滤器对流经水体的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、COD一次性去除率分别为44.79%、20.31%、20.10%。泡沫分离-臭

氧消毒装置的水处理效果表明(表4),泡沫分离-臭氧消毒装置对养殖水体中异养细菌的去除率为93.58%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除率为39.00%、38.10%,能明显提高水体中的pH和DO,对COD的去除效果不明显。在满足鱼类生长需要的前提下,最大限度地降低水处理单元的设备配置、降低成本,该综合系统的水体循环量达到每天8~12次,水体在各处理单元的理论水力停留时间低于10min,且反应底物浓度较低,各净化单元的一次性去除率较低,但能满足生产需要。

闭合循环水产养殖系统常采用物理、化学和生物方法进行养殖废水的处理并实现回用。如采用沉淀、砂滤或机械过滤进行固液分离;浸没式或滴流式生物过滤器、生物转盘、流化床等生物处理方法氧化有机物、进行硝化和反硝化作用。但传统方法成本一般较高。近年来,在人工湿地净化养殖废水并回用方面取得了一定的效果^[5-7]。丁永良等^[8]进行了鱼菜共生系统的中试研究,取得了单期净产鲤鲫 $14.26\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和莴苣 $3.3\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的效果。闭合循环水产养殖-植物水栽培综合生产系统既保留了传统水处理单元(如一级净化系统,水处理生化反应器、泡沫分离-臭氧消毒装置、曝气装置)的高效性,同时又将低成本水处理单元(植物净化)应用到系统中,从而形成综合生产系统,既降低了生产系统对设备的依赖,又能实现系统较高的载鱼量。

表 2 一个单循环中蔬菜水培渠进水和出水的水质指标平均变化情况

Tab. 2 The water quality changes of hydroponic vegetables area inlet and outlet in one circulation

	1 号草莓水培渠 strawberry trench no. 1		2 号生菜水培渠 lettuce trench no. 2		3 号草莓水培渠 strawberry trench no. 3		4 号生菜水培渠 lettuce trench no. 4	
	进水 inlet	出水 outlet	进水 inlet	出水 outlet	进水 inlet	出水 outlet	进水 inlet	出水 outlet
	氨氮 (mg L ⁻¹) ammonia-N	0.798	0.725	0.804	0.620	0.805	0.729	0.786
亚硝氮 (mg L ⁻¹) nitrite-N	0.348	0.352	0.351	0.352	0.336	0.343	0.331	0.344
硝氮 (mg L ⁻¹) nitrate-N	24.473	23.567	24.477	24.127	23.940	23.847	23.917	23.097
总氮 (mg L ⁻¹) total nitrogen	30.995	27.800	30.978	28.763	31.408	28.878	30.820	27.530
磷酸盐 (mg L ⁻¹) phosphate-P	3.775	3.739	3.807	3.772	3.924	3.787	3.863	3.835
COD (mg L ⁻¹)	8.76	8.52	9.09	7.11	8.91	8.43	8.54	8.37
N/P	6.79	6.59	6.73	6.65	6.39	6.58	6.48	6.30
TN/P	8.21	7.43	8.14	7.63	8.00	7.63	7.98	7.18
氨氮去除率 (%) ammonia removal rate	9.15 (1.90 ~ 16.19)		22.83 (1.29 ~ 57.46)		9.40 (2.20 ~ 18.43)		10.83 (2.48 ~ 18.52)	
亚硝氮去除率 (%) nitrite removal rate	- 1.01 (- 10.45 ~ 12.45)		- 0.04 (- 11.02 ~ 51.72)		- 1.96 (- 11.36 ~ 8.53)		- 3.81 (- 18.09 ~ 8.53)	
硝氮去除率 (%) nitrate removal rate	3.70		1.43		0.39		3.43	
总氮去除率 (%) total nitrogen removal rate	10.31		7.15		8.06		10.67	
磷酸盐去除率 (%) phosphate removal rate	0.94 (0.67 ~ 4.03)		0.91 (0.05 ~ 9.72)		3.49 (0.02 ~ 5.03)		0.70 (2.71 ~ 7.75)	
COD 去除率 (%) COD removal rate	2.74		21.78		5.39		2.00	

注: 1. 每条水培渠进口和出口氨氮样本数为 54; 亚硝氮为 60; 硝氮为 19; 总氮为 12; 磷酸盐为 30; COD 为 19。2. 去除率 (%) = (进口 - 出口) / 进口; 数值为平均去除率 (最小去除率 ~ 最大去除率)

Notes: 1. the water samples numbers of ammonia-N, nitrite-N, nitrate-N, total nitrogen, phosphate, COD in inlet and outlet is respectively 54, 60, 19, 12, 30, 19. 2. removal rate (%) = (inlet-outlet)/inlet; numbers express: average removal rate (min. removal rate-max. removal rate)

表 3 生物滤器进出口水质的变化情况

Tab. 3 Changes of water quality of inlet and outlet filters

水质指标 water quality index	pH	mg L ⁻¹							
		NH ₄ ⁺ -N		NO ₂ ⁻ -N		NO ₃ ⁻ -N		COD	
		C	R	C	R	C	R	C	R
进水口 inlet	8.0 ± 0.45 7.5 ~ 8.47	0.96 ± 0.32 0.47 ~ 1.53		0.64 ± 0.26 0.14 ~ 1.12		7.58 ± 2.28 5.46 ~ 10.73		12.14 ± 7.78 7.23 ~ 15.45	
出水口 outlet	7.89 ± 0.37 7.46 ~ 8.38	0.53 ± 0.23 0.22 ~ 0.90	44.79	0.51 ± 0.22 0.12 ~ 0.95	20.31	8.12 ± 3.12 5.68 ~ 11.35	- 7.12	9.70 ± 6.47 5.78 ~ 12.36	20.10

注: 生物滤器进出口水样样本数为 20; C 为浓度, 表示为均值 ± S. D. (极小值 ~ 极大值); R 为去除率, R (%) = (C_e - C_i) / C_e × 100; C_e 为进口浓度, C_i 为出口浓度

Notes: The water samples numbers of filter's inlet and outlet is 20; C is concentration value, numbers express: average ± S. D. (min. value-max. value); R is removal rate, R (%) = (C_e - C_i) / C_e × 100; C_e inlet concentration, C_i outlet concentration

表 4 泡沫分离-臭氧装置反应塔进水口出水口水质指标变化情况

Tab. 4 Changes of several water quality indexes in inlet and outlet of foam separation and ozonic sterilization device

实验 experiment	NH ₄ ⁺ -N (mg L ⁻¹)		NO ₂ ⁻ -N (mg L ⁻¹)		pH		bacterium number (CFU · 100mL ⁻¹)		COD (mg L ⁻¹)		DO (mg L ⁻¹)	
	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet	inlet	outlet
	1	1.00	0.61	0.63	0.39	7.15	7.31	873	56	11.24	10.5	6.5
2	1.06	0.61	0.85	0.64	7.16	7.29	1138	896	10.05	9.03	5.6	6.3

3 结论

水产养殖-植物水栽培综合生产系统是一种新型的“养殖-种植-水质净化”生产模式,强调不同生产方式潜在的能量与生态互补性。该生产模式为解决高密度水产养殖带来的环境污染问题提供了有益的尝试。单位水体红罗非鱼和暗纹东方鲀的产量分别达到 $58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $12.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 养殖期间,氨氮浓度 $< 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亚硝氮浓度 $< 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{DO} > 5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 水栽培蔬菜生长良好,对氨氮、亚硝氮、硝氮、总氮、磷酸盐和 COD 的最大去除率分别为 57.46%、51.72%、3.7%、10.67%、9.72% 和 21.78%,水培蔬菜渠进水和出水的平均 N/P 值分别为 6.60 和 6.53; 生物过滤器对流经水体的 NH_4^+-N 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、COD 一次性去除率分别为 44.79%、20.31%、20.10%; 泡沫分离-臭氧消毒装置对养殖水体中异养细菌的去除率为 93.58%, NH_4^+-N 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除率为 39.00%、38.10%,能明显提高水体中的 pH 和 DO。

参考文献:

[1] Tilley D R, Badrinarayanan H, Rosati R, *et al.* Constructed

wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture [J]. *Aquacultural Engineering*, 2002, 26:81 - 109.

- [2] James E R, Thomas M L, Michael P M. Recirculating aquaculture tank production systems: integrating fish and plant culture [M]. SRAC Publication No. 454:1 - 8.
- [3] Grasshoff K. Methods of seawater analysis [M]. Verlag Chime/Weinheim/New York, 1999. 159 - 206.
- [4] Jungersen G. Resource-saving and ecological aspects of using wastewater from eel breeding as a source of nutrients, water, and carbon dioxide from plant production [A]. Etnier C, Guterstam B (eds), *Ecological engineering for wastewater treatment proceedings* [M]. Sweden: Stensund Folk College, 1991. 208 - 215.
- [5] David R T, Harish B, Ronald R, *et al.* Constructed wetland as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture [J]. *Aquacultural Engineering*, 2002, 26(2):81 - 109.
- [6] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, *et al.* Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetland system [J]. *Aquac*, 2002, 209(2):169 - 184.
- [7] Schulz C, Gelbrecht J, Rennert B. Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow [J]. *Aquac*, 2003, 217:207 - 221.
- [8] Ding Y L, Zhang M H, Zhang J H, *et al.* Researches on fish and vegetable co-existing system [J]. *J Fish Sci China*, 1997, 4(5):70 - 75. [丁永良,张明华,张建华,等. 鱼菜共生系统的研究 [J]. *中国水产科学*, 1997, 4(5):70 - 75.]