

凤眼莲对集约化甲鱼养殖污水的静态净化研究

袁桂良¹, 刘 鹰²

- (1. 杭州新科水产养殖有限公司, 浙江 杭州 310022;
2. 浙江大学农业生物环境工程研究所, 浙江 杭州 310029, E-mail: yinliu@mail.hz.zj.cn)

摘 要: 通过凤眼莲静态净化养殖污水的试验研究, 建立了凤眼莲静态净化养殖污水净水模型。凤眼莲对甲鱼污水中的氨态氮、亚硝氮和硝氮、COD、磷等的净化率分别为 71.5%、88.1%、68.5% 和 90.7%。

关键词: 凤眼莲; 甲鱼养殖污水; 净化

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0267(2001)05-0322-04

Static Purification of Water – Hyacinths on Wastewater from Intensive Raising Chinese – Turtle

YUAN Gui-liang¹, LIU Ying²

- (1. Hangzhou Xinke Aquaculture Ltd. Co., Hangzhou, 310022 China;
2. Zhejiang University, Hangzhou, 310029 China, E-mail: yinliu@mail.hz.zj.cn)

Abstract: A procedure for static purification of wastewater from raising Chinese – turtle has been described in the present paper. In addition, the purification mathematics model by the plants on the wastewater was constructed. The removal rates of ammonium – nitrogen, nitrite-nitrogen, COD, phosphorus in wastewater by the plant water-hyacinths was discovered to be 71.5%, 88.1%, 68.5% and 90.7%, respectively.

Keywords: water-hyacinths; Chinese – Turtle wastewater; purification

集约化甲鱼养殖是在加温、高密度条件下进行的,在有限的空间放养众多的生物一定会影响养殖系统的生态。单一种类的水产品,再加上大量的投喂饵料,所产生的排泄物及残饵,超过自然菌丛的代谢能力,使得有机物不能完全分解而积累于池底,使水质逐步恶化。目前养殖场多采用换水的方法来控制水质,而排放养殖污水不仅浪费大量的水和热能,并且这类污水具有很强污染性,若直接排入承接水体引起富营养化,污染水源,恶化环境,造成严重后果。另一方面,养殖污水中所含有的排泄物和饲料残渣,主要是蛋白质等有机物和氮、磷等营养物质,这些营养物质可作为植物很好的营养源。通过适当的工程手段,使养殖污水得到充分的循环利用,减少环境污染,是一个亟待解决的问题。

为减少资源浪费、减轻环境污染、改善水生生物生存环境,国内外对养殖水体的水质调控、改良净化、回用等进行了大量的研究,特别是对集约化养殖水生态系统,各国都研制出了一系列水质净化设备,提出了

许多行之有效的方法,但多不能作到资源的合理利用,容易造成附加的、不必要的能量投入。近年来,不少国家对养殖污水的出水水质要求越来越高^[1],科学家们在污水处理研究过程中都希望能找到一种经济、适用、高效的解决方法,尤其对中国这样一个发展中国家,既要加快经济的快速增长,又一定要保证农业的可持续发展。

凤眼莲对各种污染物——氮、磷、有机物、悬浮物、重金属、酚、氰、除草剂等化学品均有程度不等的去污能力,凤眼莲作为“治污能手”在污水生态处理系统中合理应用问题已成为国内外环保工作者共同研究的课题^[2-9]。在美国、日本、印度、菲律宾、印尼和泰国等都开展了关于凤眼莲的控制、管理和利用方法的研究(Gersbery M et al., 1986; Tchobanoglous G, 1988; Rogers M J et al., 1991),我国对水生维管束植物去污功能方面也作过许多研究(戴全裕, 1988; 唐进虞, 1996)。研究表明,凤眼莲对污水净化效率明显优于任何一种水生生物,能有效地去除水中的氮、磷等营养元素,降低 BOD,吸收和富集各种重金属、有毒化合物,而且还能控制藻类生长,使富营养水域变清澈。在水产养殖领域中,也屡有提到利用凤眼莲净水以延长

换水时间。但在合理应用方面研究甚少（陈锡涛，1994）。本研究通过凤眼莲静态净化养殖污水的试验研究，对凤眼莲净化养殖污水的过程进行分析，建立必要的净水模型，为这种植物滤器在净化养殖污水方面提供必要的科学依据。

1 材料与方法

凤眼莲：选择健壮无病的植株，试验前去掉枯损的茎叶。

试验盛水容器为两个长×宽×高=0.65 m×0.50 m×0.50 m 的 5 mm 厚玻璃水槽，水深为 0.40 m。池中装有甲鱼养殖污水，每池放入一定数量的凤眼莲，试验水温为 21℃—27℃，试验从 1999 年 6 月 4 日开始到 6 月 11 日结束，共计 8 d 时间。采用

HI9024 型便携式 pH 计测 pH、HI9143 型便携式溶氧仪测 DO、苯酚—次氯酸盐分光光度法测定氨态氮、硫脲（N₂H₆SO₃）还原法测亚硝酸盐氮和硝酸盐氮（Lut Ooms, 1992）、用重铬酸钾法测定 COD、钼蓝比色法测 P。

凤眼莲鲜重的测定：用吸水纸吸水，并挤去根部的水，称量。

凤眼莲干重的测定：用远红外烘箱，温度定在 70℃，烘 24 h 后称量。

每天上午 9:00 取样。

2 结果和讨论

2.1 凤眼莲对甲鱼养殖污水的净化

经凤眼莲净化前后，各水质指标的变化见表 1。

表 1 凤眼莲滤池中水质的变化

Table 1 Component of water in waterhyacinths filter pond

时间	试验槽 A ¹						试验槽 B ²					
	pH	DO	NH ₄ -N	NO _{2,3} -N	COD	P	pH	DO	NH ₄ -N	NO _{2,3} -N	COD	P
1999-06-05	8.05	5.2	39.68	0.95	80.50	1.53	7.96	2.6	82.10	1.71	153.70	1.36
1999-06-06	7.97	5.1	33.45	0.86	76.63	1.58	8.02	2.4	76.85	1.52	130.95	1.25
1999-06-07	7.83	4.9	30.28	0.52	52.49	1.30	7.97	2.7	63.12	1.43	106.59	1.10
1999-06-08	7.74	4.9	28.60	0.20	57.34	1.19	7.85	2.6	54.06	1.26	86.30	0.75
1999-06-09	7.66	4.7	23.64	0.12	43.98	0.53	7.74	2.6	38.63	0.53	66.03	0.53
1999-06-10	7.51	4.6	18.15	<0.05	39.66	0.47	7.73	2.4	29.45	0.50	45.67	0.37
1999-06-12	7.37	4.5	11.27	<0.05	32.41	0.12	7.70	2.6	23.08	0.32	30.22	0.16
去除率/%	8.4	13.5	71.6	95	56.6	92.2	3.3	0	71.9	81.2	80.3	88.2

注：除 pH 外，各水质指标的单位均为 mg·L⁻¹；1 槽中放入凤眼莲重量为 3.5 kg（11 kg·m⁻²）；2 槽中放入的凤眼莲重量 4.5 kg（14 kg·m⁻²）。

凤眼莲在水面极易屏蔽产生自屏蔽效应（shielding effect），其结果压迫环境和出现二次污染。据报道（陈锡涛，1994），稀屏（密度生物量为 15—20 kg·m⁻²）比密屏（密度生物量为 35—40 kg·m⁻²）对污水中的 COD、BOD₅、总氮、氨氮和无机磷去除率都要高，两者相差近 50%。稀屏比密屏更有利于环保和资源化利用，试验槽中凤眼莲的密度亦按稀屏设置，分别为 11 kg·m⁻² 和 14 kg·m⁻²，从表 1 得出，凤眼莲能同时去除污水中的氨态氮、亚硝氮和硝氮、COD、磷等。试验 7 d 后，试验槽 A 和试验槽 B 对氨态氮的去除率分别为 71.6% 和 71.9%，对亚硝氮和硝氮的去除率分别为 95% 和 81.2%。可见，凤眼莲对氨态氮有极强的吸收作用。由于氨态氮是甲鱼养殖的主要代谢产物，池中亚硝氮和硝氮的含量一般很少，凤眼莲对三氮的这种吸收机制，更有利于对水体的净化。凤眼莲对 COD 的去除率也较高，试验槽 A 和试验槽 B 分别达到了 56.6% 和 80.3%，试验开始时，试验槽 A 和试验

槽 B 水体的 COD 浓度相差较大，达到 73.2 mg·L⁻¹，试验结束时，两者相差仅为 2 mg·L⁻¹，且槽 B 水中的 COD 值要小于槽 A。凤眼莲对养殖污水中磷的去除率较高，试验槽 A 和试验槽 B 分别达到了 92.2% 和 88.2%。试验期间水体 pH 呈下降趋势，试验槽 A 和试验槽 B 分别减少了 0.68 个单位和 0.26 个单位。水中溶氧在试验期间变化较小，试验槽 B 基本未变。在本试验中，综合比较各槽的水质净化指标，可看出试验槽 A、试验槽 B 密度生物量的植株净化效率都较高。

经过凤眼莲处理的养殖污水，水质指标基本达到了国家规定的污水排放标准（GB8978—88），且水面无泡沫、油膜等，无异常气味，水色为褐绿色。

在试验期间，对其生长进行测定，数值见表 2。

试验槽 A 和 B 的生产系数分别为 0.21 kg·槽⁻¹ 和 0.18 kg·槽⁻¹（合 0.65 kg·m⁻² 和 0.55 kg·m⁻²）。凤眼莲通过收获，其净化作用才可以得以实现，同时，适度的收获，维持凤眼莲最大生长速率时的生长密

表 2 凤眼莲生长量测定结果 (kg·槽⁻¹)

Table 2 Biomass of waterhyacinths measured		试验槽 A	试验槽 B
项 目			
采样时间	1998-06-05	3.50	4.50
	1998-06-11	4.95	5.74
干重		0.236	0.275
生产量		1.45	1.24
生产系数		0.21	0.18

度,有利于提高其净化效率。在生产实践中,若利用凤眼莲大面积的处理养殖污水,可以每天或每隔一定时间按这个数量捞取利用,既能保持水面植物稀屏,又能使植物“产”、“销”得以平衡。凤眼莲净化能力与温度、光照、水体 pH 值、水中离子浓度等有很大关系(严国安等,1991),在实际运用过程中还需根据环境条件具体调整。收获的风眼莲可以综合利用。据报道(陈锡涛,1994):每平米凤眼莲日生产量可以养草鱼 2—4 尾,每尾年生长 1.5—2.0 kg;3 m² 凤眼莲日生产量可以养鹅 1.0—1.5 只,年生长发育 1.5—1.8 kg;每平米凤眼莲日生产量可以喂养福寿螺 95 只(3.8 kg),福寿螺可作为动物鲜活饵料,用于养甲鱼增重 0.045 kg。福寿螺是一种高蛋白低脂肪的水产品,具有对草饲料高的转化能力,饲料系数 6.2,也有报道为 4.72(涂金珠,1999),植物通过福寿螺转化为动物蛋白,养甲鱼是项投资少、收入高的饲养途径。

2.2 凤眼莲对甲鱼养殖污水中氨氮的净化模型

氨氮的含量是水质好坏的重要标志,同时,养殖污水中氨氮浓度是相对最高的,因而有必要对凤眼莲净化氨氮的效果进行定量分析。试验污水的氨氮浓度分别为 25 mg·L⁻¹, 30 mg·L⁻¹, 35 mg·L⁻¹ 和 40 mg·L⁻¹,氨氮的去除与滞留时间的关系见图 1。

模型描述:由图 1 所示,对每一污水浓度,凤眼莲对氨氮的吸收均属一级生化反应(高廷耀,1993),即:

$$\frac{ds}{dt} = -KS$$

(1)

图 1 滞留时间与氨氮去除的关系
Figure 1 Effect of residence time on the removal rate for ammonia - nitrogen

式中: S——污水浓度, mg·L⁻¹; t——污水滞留时间, d; K——去除率常数,与污水水质、水温等有关。

由(1)式有:

$$\ln(\frac{Se}{So}) = -Kt$$

(2)

得 $S_e = S_0e^{-Kt}$ 或 $\frac{S_e}{S_0} = e^{-Kt}$

(3)

式中: So——污水入流浓度, mg·L⁻¹; Se——污水出水浓度, mg·L⁻¹。

模型参数估计: 利用最小二乘法, 求得四个氨氮浓度下的去除常数 K 值(见表 3)。表 3 结果表明, 各浓度下的回归模型都显著, 且去除率常数 K 值与氨氮浓度有关, 氨氮浓度增加、K 值减小, 二者符合幂指数函数关系。

设 $K = K' \times S_0^m$

(4)

式中: K——去除率常数; So——氨氮浓度, mg·L⁻¹; K'、m——待定常数。

利用最小二乘法对表 3 数据进行处理后, 得到 $K' = 35.321, m = -1.594$, 于是有:

$$K = 35.321 \cdot S_0^{-1.594} \quad R^2 = 0.968$$

(5)

根据式(3)和式(5)最终得:

$$Se = So \times e^{-35.321 So^{exp(-1.594)} \cdot t}$$

(6)

式(6)即为凤眼莲对氨氮的静态净化模型。用该模型对上述浓度进行预测, 预测值的绝对误差为 1—3 mg·L⁻¹, 说明该模型是基本可靠的。

表 3 不同氨氮浓度下的去除率常数 K 值

Table 3 The constants (K) of removal at different ammonia concentrations		
氨氮浓度 /mg·L ⁻¹	去除率常数 K	相关指数 R ²
25	0.216 6	0.974 8
30	0.150 3	0.985 6
35	0.131 8	0.949 8
40	0.122 7	0.957 0

2.3 凤眼莲净化甲鱼养殖污水系统设计的几个问题

2.3.1 停留时间

整个系统停留时间为 7 d, 在试验期间, 对主要水化学指标的去除率达 70%—95% 之间, 出水水质达到国家污水二级标准。严国安(严国安等,1991)认为凤眼莲系统采用多级塘串联对污水进行一级、二级处理, 比相同总面积的单塘处理效率高(一是由于水力条件的改善, 降低了紊流、短流程度; 二是串联各级塘中生物相不同, 形成净化机理各异的生态系统, 有利于净化效率的提高), 系统停留时间及塘的串联级数尚需进一步研究。

2.3.2 净化塘面积计算

Cornwell(1977)曾提出凤眼莲净化 N、P 等污染物的计算公式,区尹正(1983)采用污水起止浓度和水量等参数来计算塘的表面负荷,再根据表面负荷推算净化污水所需的氧化塘面积;戴树桂等(1988)亦提出以凤眼莲生物量和凤眼莲体内某污染物的含量为基础的风眼莲塘所需的面积。实际上凤眼莲生物量中所含的某污染物的量与水体净化的量是有出入的,因此这类计算方法不太尽人意。吴振斌等(1987)提出根据表面净化率来计算塘面积。对于水生植物系统塘面积的计算既可借鉴氧化塘面积公式,又需考虑凤眼莲的生长状况及净化污水的性质。综合上述研究结果,可推导出系统的表面负荷计算公式:

$$P_s = \frac{F \times C_o - (F - E)C_e}{S \times T} \quad (7)$$

式中: P_s 为表面负荷, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; F 为进水污水量, L; C_o 为进水污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C_e 为出水污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; E 为蒸腾蒸发量, L; S 为塘(系统)面积; T 为停留时间。一般污水处理的 COD 指标达到规定要求时, 其它水质控制指标均已达到要求, 故表面负荷的计算以 COD 作为主要污染组分含量指标。由于不同月份系统的净化效率不同, 则表面负荷亦不相同, 所以在进行应用处理系统设计时必须校正: $P = P_s \times K$, 式中 P 为系统年均表面负荷; K 为系数, 取年平均去除率与最大去除率之比。故:

$$S = \frac{F \times C_o - (F - E) \times C_e}{P_s \times K \times T} \quad (8)$$

举例:若进水流量为 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (以年产 1 万只商品甲鱼的日换水量计算), 进水 COD 为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水要求达到 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, P_s 参考凤眼莲净化城市污水最大去除率月份的表面负荷为 $4.16 \times 10^3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (丁树荣, 1984), 停留时间仍取 7 d, K 取 0.8, 则 $S = 650 \text{ m}^2$ 。当然实际应用中还需考虑水深等因素。探索高效的凤眼莲净化养殖污水优化组合系统及各种人工强化措施, 以进一步提高净化效果、克服缺陷, 是下一步研究的重点。

3 结论

3.1 凤眼莲能同时去除甲鱼污水中的氨态氮、亚硝氮和硝氮、COD、磷等, 其净化率分别为 71.5%、

88.1%、68.5% 和 90.7%, 具有对养殖污水降解、净化水质的生态功能。经过 1 周的处理, 甲鱼养殖污水达到国家规定的有关污水排放标准要求。

3.2 在本试验条件下, 凤眼莲在甲鱼养殖污水中的生产系数为 $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

3.3 在本试验条件下, 凤眼莲对氨氮的净化模型为:

$$S_e = S_o \times e^{-35.321 S_o \exp(-1.594) \cdot t}$$

3.4 以年产 1 万只商品甲鱼的日换水量 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 推算, 采用凤眼莲塘净化处理需 650 m^2 水面, 凤眼莲日生产量为 390 kg。

参考文献:

- [1] 王建国, 等. 中国水环境态势与方略[J]. 农业环境与发展, 1999, 16(1): 8-12.
- [2] 王旭明, 等. 水芹菜对污水净化的研究[J]. 农业环境保护, 1999, 18(1): 34-35.
- [3] 艾尔肯·热合曼, 阿布都克里木·热合曼, 等. 利用水浮莲净化酿酒业污水的技术及其实践[J]. 环境科学与技术, 1996, (2): 41-44.
- [4] 刘庆余, 李捷. 漂浮水生植物对污水处理的研究[J]. 农业环境保护, 1991, 10(3): 101-104.
- [5] 刘忠翰. 污水芦苇碎石床处理出水养鱼回用技术研究[J]. 农业环境保护, 1999, 18(1): 14-18.
- [6] 齐玉梅, 高伟生. 凤眼莲净化水质及其后处理工艺探讨[J]. 环境科学进展, 1999, 7(2): 136-140.
- [7] 严国安, 李益健, 等. 水生植物系统对污水的处理及设计探讨[J]. 环境工程, 1991, 11(2): 16-21.
- [8] 何增耀. 环境监测[M]. 北京: 农业出版社, 1996. 369.
- [9] 李秀辰, 张国琛, 崔引安. 孔石莼对养鲍污水的静态净化研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(1): 173-176.
- [10] 陈锡涛, 叶春芳, 杉辛野, 等. 水生维管束植物自屏对水质净化资源化效应的研究[J]. 环境科学与技术, 1994, (2): 1-4, 9.
- [11] 周泽江, 杨景辉. 水葫芦在污水生态处理系统中的作用及其利用途径[J]. 生态学杂志, 1984, (5): 36-40.
- [12] 逢通, 濮培民, 魏阳春, 等. 人工生态系统净水水质模型研究[J]. 生态学报, 1998, 18(6): 629-633.
- [13] Gersberg R M, et al. Role of Aquatic Plants in wastewater Treatment by Artificial Wetlands[J]. Water Res, 1986, 20(3): 363-368.
- [14] Tchobanoglous G. Aquatic Plant System for Wastewater Treatment: Engineering Considering[A]. In: K R Reddy and W H Smith (Eds). Aquatic Plants for Wastewater and Resource Recovery[C]. Magnolia Publishing Inc, Orlando, FL, 27-29.