

## 水产养殖废水循环利用及多余藻类生物量资源化

韩士群<sup>1</sup>, 严少华<sup>1\*</sup>, 范成新<sup>2</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**摘要:** 论文采用多个池塘循环养殖生态系统, 利用“藻类-螺类-鲈鱼-微生物”营养链关系对养殖废水中多余有机质、营养盐的去除, 研究了养殖废水净化、循环利用及水体多余藻类生物量资源化。结果表明, 在系统运行的各个时期 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的平均去除率都超过 80%, 对总氨(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>+NH<sub>3</sub>) 去除率达 97.17%, 效果最好; TP 的去除率达 94.17%, COD<sub>cr</sub> 的去除率为 71.87%。出水口 TN、TP、叶绿素平均值均达到湖泊 III 类水标准; COD<sub>cr</sub> 达到了 I 类水质标准。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、总氨(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>+NH<sub>3</sub>)、溶解氧含量都符合渔业水质标准要求。该系统处理能力的稳定性较高, 可以调控藻类种群结构、充分利用水体藻类和营养物质、将其转化为螺贝类或者价格更高的鲈鱼等增加养殖效益, 还可以节约水资源, 减少养殖废水排放量。

**关键词:** 水资源; 养殖废水; 循环利用; 藻类资源化

**中图分类号:** S932.4; P745 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3037(2008)04-0560-08

我国是水产养殖大国, 而水产养殖产业极大地消耗水资源, 那么如何使养殖废水循环利用将是生态环境研究的发展趋势。目前关于养殖废水循环利用研究主要针对工厂化水产养殖<sup>[1,2]</sup>。国外采用封闭式循环流水养殖方式对水产养殖污水进行净化回用, 但净化重点在于去除污水中的有机物质, 对于水产污水的硝化和脱氮处理方面, 还缺乏有效的治理技术<sup>[3,4]</sup>。国内对水产养殖污水净化与水资源再生利用研究尚处起步阶段, 净化处理技术尚停留在传统工艺上, 去除氮化合物效果差<sup>[5]</sup>。池塘养殖投放饲料所含的氮利用率只有 12%~16%, 磷利用率只有 10%~17%<sup>[6]</sup>, 其残剩饲料和鱼类排泄物形成的污染物对水体、沉积物等造成严重污染, 导致养殖水体藻类生物量过剩, 出现藻类和鱼类争氧的矛盾, 养殖生态系统遭到破坏。池塘养殖过程中定期更新换水, 造成了水资源的巨大浪费, 而国外高成本、高能耗的水处理模式对于以池塘养殖为主的我国渔业生产不现实, 难以广泛应用。李德尚等<sup>[7,8]</sup>研究了海水养殖的多个池塘生态系循环换水养殖技术, 但关于淡水池塘养殖废水循环利用和水体藻类过剩生物量利用的研究未见报道。因此, 研究养殖水体富余藻类的资源化利用以及养殖废水的处理和循环利用技术具有重要意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 池塘状况及试验用水

试验于 2005 年 5~7 月进行, 试验池为 10m×5.5m×1.5m 水泥池, 每个池底铺 10cm 泥

收稿日期: 2007-01-10; 修订日期: 2007-12-23。

基金项目: 江苏省海洋渔业项目(HYKF-SJ07-0099); 江苏省太湖专项(BS2007116); 江苏省农科院重点领域资助。

第一作者简介: 韩士群(1966-), 男, 江苏宿迁人, 博士, 副研究员, 主要从事水资源和湖泊生态研究。

\* 通讯作者简介: 严少华, 研究员, 博士生导师, 从事资源环境研究。

土;试验用水抽自大型鱼塘,每个试验池放水  $75\text{m}^3$ 。试验用的螺类铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa* Reeve) 和贝类三角帆蚌 (*Hyriopsis cumingii* (Lea)) 从河流中捞取。银鲫 (*Carassius auratus*)、鲈鱼 (*Lateolabrax Japonica*) 由江苏明天滩涂科技公司提供。

## 1.2 方法

### 1.2.1 试验设计

设对照养殖、循环养殖 2 个处理,每个处理设 3 个平行。对照鱼池、循环鱼池放养 4.0kg 银鲫,喂饲料(含氮 5.6%,磷 0.58%)450g/d。循环水泵流量  $8\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,每天工作 2 次,每次 30min,9d 一个循环(循环鱼池剩水  $3\text{m}^3$ ),共运行 54d。螺、贝池放养 5kg 铜锈环棱螺,2.5kg 三角帆蚌,不放养鱼类;鲈鱼池仅放养鲈鱼 3 尾平均重 300g,其成活率为 100%,将螺和贝压碎喂养,平均每天喂养 70g 螺和 20g 贝。微生物处理池内挂固定化微生物(光合细菌 + 芽胞杆菌 + 硝化细菌 + 反硝化细菌,菌体  $2.0 \times 10^8 \text{cfu/L}$ )。

### 1.2.2 生态系统及流程设计

具体流程见图 1。



图 1 藻类资源化与废水循环利用流程

g. 1 The flow chart of algae resources utilization and aquaculture wastewater recycling

### 1.2.3 分析测定方法

溶解氧,碘量法 GB7489;生化需氧量,稀释与接种法 GB7488;凯氏氮,GB11891;非离子氨,纳氏试剂比色法 GB7479,根据地表水环境质量标准(GHZZB 1-1999)附录表 A1 氨的水溶液中非离子氨的百分比以及表 A2 总氨( $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$ )浓度,其中非离子氨浓度指标以  $0.020\text{mg/L}$  进行换算。硝酸盐,紫外分光光度法;亚硝酸盐,分光光度法,GB 7493-87;总磷,钼酸铵分光光度法 GB 11893-89;化学需氧量,重铬酸盐法,GB 11914-89;叶绿素 a,分光光度法。藻类分类、数量和生物量测定采用显微镜检计数法<sup>[9]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 水体不同指标的动态变化

图 2 显示了对照鱼池、循环鱼池、螺贝池、鲈鱼池以及微生物处理后出水口水体中各项指标的动态变化。对照鱼池水体各项指标均呈上升趋势,到第 36 天水质呈恶化状态,水体藻类大量繁殖,鱼类浮头严重,出现死鱼现象,因此进行更换河水,对照池中除了溶解氧外,其它各项指标大幅度下降达到谷值。螺贝池、鲈鱼池、循环鱼池的各项营养指标变化趋势都相似,都呈下降趋势。微生物处理池出水口中各项指标的变化曲线波动较小,说明系统处理能力的稳定性较高;养殖废水经过系统处理后流回循环养鱼池,循环养鱼池中各项指标都大幅度地降低,运行中仅用循环水,无需更换河水,鱼类生长状况良好,系统经过 54d 运行后,养鱼池的各项含量接近出水池,说明水质得到改善。

### 2.2 底泥中主要营养物质

对照鱼池底泥中总氮、总磷和有机质分别为 0.84%、0.33% 和 2.89%,而循环养殖鱼塘底泥分别为 0.36%、0.11% 和 1.45%,分别为对照含量的 42.86%、33.33% 和 50.17%。统计结果

(表1)表明,处理鱼池底泥中总氮、总磷和有机质和对照之间达到了极显著的差异。

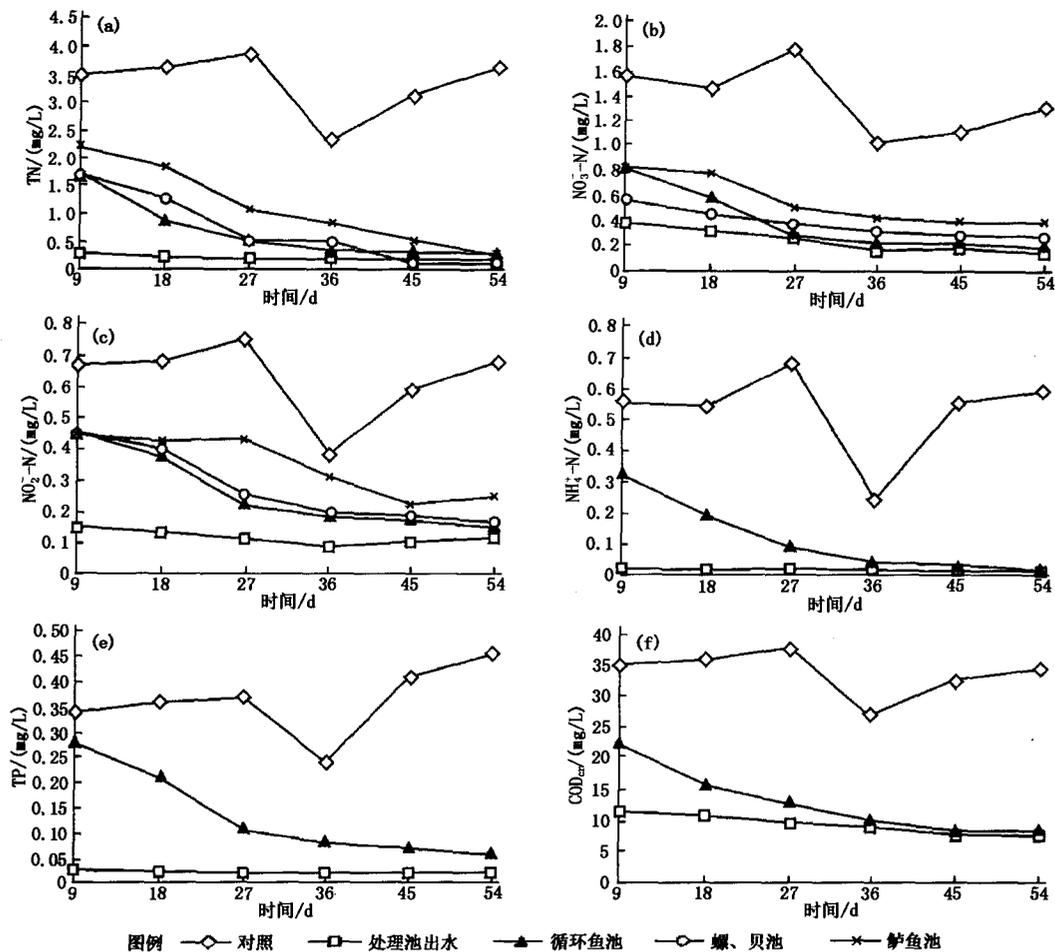


图2 水体中TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP和COD<sub>cr</sub>变化

Fig.2 Dynamics of TN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP and COD<sub>cr</sub> of different treatment

表1 底泥主要营养成分

Table 1 The main nutrition in the substrate sludge

处理	总氮/%	总磷/%	有机质/% 处理
对照鱼池	0.84 ± 0.097	0.33 ± 0.031	2.89 ± 0.28
循环鱼池	0.36 ± 0.045**	0.11 ± 0.001**	1.45 ± 0.18**

注:\*\*表示差异极显著(P<0.01),下表同。

### 2.3 处理效果

试验期间,对照鱼池、循环鱼池、螺贝池、鲈鱼池以及出水口(微生物处理池)水质指标的平均值见表2。循环鱼池水体中4种形态氮、总磷、化学耗氧以及叶绿素含量均明显低于对照鱼池,溶解氧含量高于对照鱼池。经统计分析,循环鱼池的各项水质指标和对照池之间的差异达到极显著水平(P<0.01)。养殖废水经螺、贝池的过滤后,饲料残渣和粪便等有机质被过滤,水体藻类被滤食,总氮、硝态氮、总磷以及叶绿素含量明显下降,差异达极显著水平。从螺、贝池抽出的水经过鲈鱼池,水体氮、磷等指标有所上升,但是总磷和溶解氧和对照鱼池仍达及

显著差异。鲈鱼池抽出的水经过微生物处理后,有机质被分解,水体氮素等指标下降,溶解氧升高,水质明显好转。在系统运行的各个时期出水池  $\text{TN}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、总氮( $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$ ) 的去除率分别为 94.01% ,94.51% ,81.81% ,97.17%。处理系统对总氮( $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$ ) 去除率最大。对照池总氮浓度为 3.34mg/L,是湖泊 III 类水标准的 11.13 倍,系统处理后大幅度减少,出水口 TN 平均值为 0.20mg/L 达到 III 类水标准。湖泊水标准对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、总氮( $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$ ) 含量未作要求,其含量和渔业水质标准进行比较,养鱼废水经过系统处理后,出水池  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、总氮( $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$ ) 含量完全符合标准要求, $\text{NO}_2^- - \text{N}$  刚好达到标准要求。出水池 TP 的去除率达 94.17%,符合湖泊 III 类水标准。处理后出水的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除率为 71.87%,不仅符合 III 类水标准,而且达到了 I 类水质标准(15mg/L 以下)。

表 2 养殖废水处理效果

Table 2 Effect of aquaculture wastewater treatment

处理	总氮/(mg/L)	硝态氮/(mg/L)	亚硝态氮/(mg/L)	总氮/(mg/L)	总磷/(mg/L)	化学耗氧/(mg/L)	叶绿素/(mg/L)	溶解氧/(mg/L)
对照鱼池	3.34 ± 0.27	2.37 ± 0.16	0.66 ± 0.056	0.53 ± 0.049	0.36 ± 0.041	33.59 ± 3.78	0.32 ± 0.045	3.84 ± 0.44
循环鱼池	0.33 ± 0.032 **	0.19 ± 0.02 **	0.12 ± 0.005 **	0.016 ± 0.043 **	0.023 ± 0.006 **	16.45 ± 1.44 **	0.12 ± 1.13 **	5.21 ± 0.77 **
螺、贝池	0.69 ± 0.21 **	0.38 ± 0.16 **	0.25 ± 0.73	0.13 ± 0.33	0.023 ± 0.042 **	22.89 ± 1.11	0.11 ± 0.032 **	5.66 ± 0.76 **
鲈鱼池	1.11 ± 0.21	0.65 ± 0.17	0.36 ± 0.077	0.17 ± 0.035	0.025 ± 0.065 **	28.56 ± 2.78	0.12 ± 0.045	4.98 ± 0.45 **
出水口	0.20 ± 0.025 **	0.13 ± 0.021 **	0.12 ± 0.006 **	0.015 ± 0.049 **	0.021 ± 0.006 **	9.45 ± 0.78 **	0.0085 ± 1.16 **	5.76 ± 0.76 **
III 类水标准	0.3	n. a.	n. a.	n. a.	0.025	20	0.01	n. a.
渔业水标准	n. a.	20.0	0.12	0.13 NH3(0.02)	n. a.	n. a.	n. a.	5.0

注:参照地表水环境质量标准(GH2B 1-1999)中湖泊水库特定项目标准值 III 类水标准值和渔业水质标准(GB11607-89);n. a. 表示未作要求。

对照鱼池叶绿素 0.32mg/L,藻类生物量 139.46mg/L,叶绿素远远超过湖泊 III 类水标准,藻类生物量大于高产鱼塘藻类生物量的上限。经过螺、贝类的过滤后以及微生物处理后,叶绿素含量达到湖泊 III 类水标准;对照鱼池由于藻类过量繁殖,特别是早晨溶解氧不符合渔业水质标准,处理池溶解氧符合标准。

## 2.4 水体藻类生态调控、资源化和废水再利用

### 2.4.1 螺、贝和鲈鱼生长动态

试验期间,铜锈环棱螺的生物量增长曲线经回归后呈极显著的线性关系,其回归方程为  $y = 1\ 268.2x + 5\ 249.6$ ,  $R^2 = 0.9418 > P_{0.01}(df=4)$ (图 3)。放养的铜锈环棱螺成活率高达 99% 以上,并且一般成体体内有 8~10 个幼螺,放入水体后陆续产下幼体,因此螺的增殖速度很快,螺的增长速度也很快,54d 螺生物量增加为原来的 2.42 倍。

同样,三角帆蚌的生物量增长曲线经回归后呈极显著的线性关系,其回归方程为  $y = 450.39x + 101.2$ ,  $R^2 = 0.9403 > P_{0.01}(df=4)$ 。贝的繁殖要求在一定条件下,如鲢鱼作载体,本试验中三角蚌没有出现增殖现象,其成活率仅 85%,54d 螺生物量增加为原来的 1.88 倍。

鲈鱼的生物量曲线经回归后也呈极显著的线性关系,其回归方程为  $y = 41.409x +$

865.46,  $R^2 = 0.9298$ 。

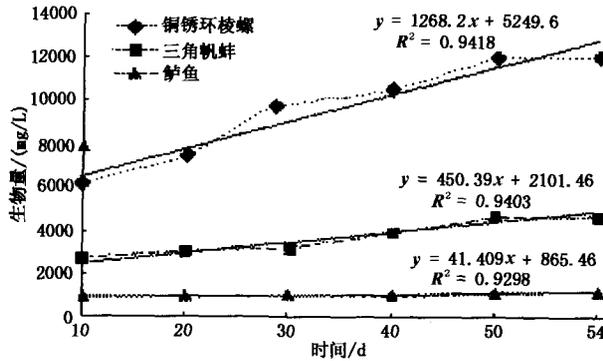


图3 铜锈环棱螺,三角帆蚌和鲈鱼生物量变化

Fig. 3 Biomass dynamics of *Bellamya aeruginosa*, *Hyriopsis cumingii* and weever

2.4.2 对水体藻生态调控

对照鱼池和循环鱼池藻类数量、生物量差异很大,经系统处理后水体藻类总数量明显减少。试验期间,对照鱼池多次镜检水体藻总数的平均值为  $62\ 675.43 \times 10^6 \text{ ind/L}$ ,循环鱼池为  $26.61 \times 10^6 \text{ ind/L}$ ,对照水体藻数量是循环处理的 2 355.3 倍,经统计分析,其差异达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ),见表 3。

表3 藻类数及生物量

Table 3 The algae numbers and biomass

处理		蓝藻门	绿藻门	硅藻门	裸藻门	甲藻门	隐藻门	黄藻门	合计
对照池	数量/ $(10^6 \text{ ind/L})$	62 668.77	4.35	2.17	0.06	0.035	0.01	0.033	62 675.43
	生物量/(mg/L)	128.34	5.77	4.26	0.57	0.04	0.43	0.046	139.46
循环池	数量/ $(10^6 \text{ ind/L})$	10.23	9.54	4.66	0.96	0.43	0.4	0.39	26.61
	生物量/(mg/L)	3.24	7.87	3.16	2.42	0.77	0.96	0.99	19.41

试验期间,对照鱼池和循环鱼池水体藻类平均生物量分别是 139.46mg/L 和 19.41 mg/L,处理后藻类生物量仅为对照的 13.92%,经统计分析其差异达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。对照池水体蓝藻生物量 128.34mg/L,占总生物量的 91.0%,其中铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa* Kütz) 占绝对优势,其平均生物量为 120.30mg/L,占蓝藻生物量的 93.7%,6~9 月大量繁殖,形成了水华;循环池水体蓝藻门生物量是 3.24mg/L,占总生物量的 16.7%,其中微囊藻生物量是 0.032mg/L,仅占总生物量的 0.162%,绿藻门成为优势种群,其生物量为 7.87mg/L,占总生物量的 40.5%。对照鱼池水体生物量最多的藻依次是:铜绿微囊藻、水华鱼腥藻 (*Anabaena flos-aquae* (Lyngb.) Bre' b)、斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus* (Turb.) Kütz.) 等。循环鱼池水体生物量最多的藻依次是:优美胶毛藻 (*Chaetophpra elegans* Roth)、针型纤维藻 (*Ankistrodesmus acicularis* (A. Br.) Korsch.)、尖细栅藻 (*Scenedesmus acuminats*(Lag.) Chod.) 和铜绿微囊藻。试验期间,循环鱼池中铜绿微囊藻的平均生物量仅 0.032mg/L,这样的生物量不能形成水华。从水体表观来看,试验期间 7、8、9 三个月对照水池长满水华,而循环处理池始终没有出现水华。

2.4.3 藻类资源化和废水再利用

铜锈环棱螺、三角帆蚌通过滤食,将鱼池水体中藻类、有机质等进行转化从而对水体氮

和磷等进行消减;鲈鱼通过摄食螺和贝将其氮、磷转化为自身的蛋白质。本试验中用于喂养鲈鱼的铜锈环棱螺重量为 3 780g,三角帆蚌贝 1 080g,螺类净增加重量为 3 335.78g,因此螺、贝的实际增重分别为 7 115.78g、2 203.46g,鲈鱼增重 210.56g。根据 3 种动物的氮、磷含量以及净增重进行换算(表 4),3 种动物合计去除水体氮素 133.39g、磷 16.92g,显然放养螺、贝类可以减少养鱼水体氮、磷,降低水体富营养化。

试验中对照鱼池由于水质恶化,不得不更换河水,第 36 天排出 40.76m<sup>3</sup> 养殖废水的同时进入等量河水;而循环养鱼池由于采用了经过滤和微生物净的化循环水养殖,试验期间水质良好,没有更换河水。

表 4 螺、蚌、鲈鱼的增重及其去除水体氮、磷量

Table 4 Weighting gaining of spiral shell, clamshell and perch as well as nitrogen and phosphorus removal from water

铜锈环棱螺			三角帆蚌			鲈鱼		
净增重/g	去除氮/g	去除磷/g	净增重/g	去除氮/g	去除磷/g	增重/g	去除氮/g	去除磷/g
0.84	3 335.78	97.04	12.14	1 123.46	30.46	3.94	210.56	5.89

### 3 讨论

#### 3.1 螺、蚌类对水体藻类的控制和利用

当池塘水质超过富营养化标准后,水体藻类生物量大幅度增加,但据李永函<sup>[10]</sup>等研究一般以 100mg/L 藻类生物量为肥水上限,而传统高产塘很少超过 50mg/L,试验中对照鱼池达 139.46mg/L,不仅大于高产塘标准而且远超过肥水上限,显然鱼类生长和产量受到影响。

铜锈环棱螺取食活动对藻类群落的组成、数量、生物量有显著的影响,同时螺类的取食改变了水体藻类群落的物种多样性以及群落的演替进程,与 Vermaat<sup>[11]</sup>研究结果一致。和 Stevenson<sup>[12]</sup>报道的螺类优先刮食丝状藻不一致,本研究表明,挂养时,在藻类藻细胞密度较高的情况下螺类以滤食方式为主。挂养铜锈环棱螺和三角蚌水体优美胶毛藻、渐狭毛枝藻(*Stigeoclonium elongatum* (Has.) Kütz)等丝状藻生物量增加,这与挂养框为丝状藻类提供了生存场所有关。与 Van<sup>[13]</sup>的螺类可抑制富营养化湖泊中的着生藻类在春季大暴发研究结论相似,试验期间对照鱼池夏季长满水华,但循环鱼池藻类生物量变化平稳,始终没有暴发水华,将螺的生物量和水体藻类生物量进行回归,其回归方程为  $y = 139.86 - 0.011x$ ,  $r = -0.9646 > P_{0.01}$  ( $df = 4$ ),二者呈显著的负相关性。除了和螺、贝类的滤食抑制藻类生长有关,还与水体营养降低有关。但关于螺类对藻类生长和水体营养的影响具有争论,Mulholland<sup>[14]</sup>研究表明通过摄食着生藻类加快了营养物质周转速率,从而对金鱼藻的生长起促进作用。然而,Cuker<sup>[15]</sup>认为螺类的取食并没有增加营养物质的可利用性,本文研究结果和其一致。由于藻细胞延缓了螺类消化时间,使营养物质得以在螺类消化系统内循环利用。本文研究结果表明,适量放养螺类、蚌类可以控制藻类水华的暴发。

试验池 50m<sup>2</sup>,如果将鱼池换算成大水面养殖鱼塘则鱼塘放养螺类 450 ~ 500kg/hm<sup>2</sup>,可以净增螺类约 667kg/hm<sup>2</sup>,成体螺类可以作为水产品销售,也可以作为鲈鱼等饵料,生产鲈鱼约 42kg/hm<sup>2</sup>。根据市场价格,可以提高养殖效益约 630 元/hm<sup>2</sup>。采用“鱼-螺、贝-鲈鱼-微生物净化”多池循环水综合养殖模式,不但经济效益显著增加,而且社会效益也显著提高,是“资源-产品-再生资源-再生产品”经济发展模式的有益探索。

#### 3.2 养殖水体净化和循环利用

鱼塘生态系统所能消除过多营养盐和有机物的自身净化能力是有限的,一旦超出了负

荷力,缺氧和有毒的代谢废物会严重影响养殖动物的生存和生长<sup>[16]</sup>;螺、贝类在调节养殖生态系统、控制藻类繁殖和净化水质方面有显著的作用,主要由于螺、贝类以藻类、有机质等为食,并且还可以直接吸收溶解的营养物,试验中发现养鱼废水经过滤后透明度大幅度增加,这与螺的絮凝作用有关。

循环养殖水体中氮素总量比对照减少了 376.82g,但是铜锈环棱螺、三角帆蚌和鲈鱼生物体从水中带走的氮素是 133.39g,这种总量上的较大差异显示了微生物处理池中固定化微生物的脱氮作用。由铵态氮到氮气的转化过程,需要硝化和反硝化作用。通常,养殖水体中硝化细菌能够达到的最大浓度为  $2.00 \times 10^6$  cfu/L,反硝化细菌为  $3.80 \times 10^6$  cfu/L<sup>[17]</sup>。这个数量对于高密度的渔业养殖生产远远不够,不足以降低  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量, $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  浓度持续积累危害鱼类。固定化小球中光合细菌、芽胞杆菌、硝化细菌、反硝化细菌的数量处于动态变化,其曲线波动较大,总的趋势是各微生物的数量都逐渐减少其总数也减少,31d 后,4 种微生物的总数由开始  $157.51 \times 10^6$  cfu/L 减少到  $13.43 \times 10^6$  cfu/L,但仍高于对照水体,为了维持水体微生物浓度,第 32 天增加一次固定化微生物小球。固定化小球的脱氮速率可以反映内部微生物的活性,其起始脱氮速率是  $4.3 \times 10^{-2}$  mgN/L · h,随着时间延长,脱氮速率逐渐减小,第 31 天后,脱氮速率是  $2.8 \times 10^{-4}$  mgN/L · h。将小球内 4 种微生物总数和与脱氮速率进行回归分析,其方程为  $y = -6.23 \times 10^{-3} + 1.86 \times 10^{-5} x$  ( $r=0.77 > r_{0.01}=0.74, n=11$ ),呈正相关。本研究中采用固定化技术,人为地增加水体微生物数量,利用光合细菌促进有机质分解,硝化细菌对水体的铵态氮进行氧化,芽胞杆菌、反硝化细菌进行反硝化的脱氮作用。同样,磷的总量方面也存在差异,是与螺类的絮凝作用有关,还是由于其它原因有待进一步探讨。

鱼塘水质污染来源主要是饲料和鱼类粪便,饵料释放到水中的氮约为 35g/kg,鱼、虾向水中排氮 0.57g/kg · d。1kg 鱼、虾 1d 污染水体  $1.5 \sim 2.1\text{m}^3$  (按地表水排放标准计算),规模化养殖造成江、河、湖水水质富营养化。生产上,鱼塘养殖期间出现水质恶化时往往采用排水并引入新水调节水质,如果按照本文循环水养殖推算,一个养殖周期内可以节水约  $8000\text{m}^3/\text{hm}^2$ ,并且可以相应减少养殖废水的排放对环境的污染。当然,本研究是建立在较小规模下进行的,扩大规模将该循环养殖技术应用于生产有待进一步完善。

### 参考文献 (References):

- [1] Chin K K, Ong S L, Foa S C. Water treatment and recycling system for intensive fish farming[J]. *Water Science & Technology*, 1993, 27(1): 141 - 148.
- [2] Kuai L. Ammonium removal by the oxygen limited autotrophic nitrification denitrification system[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(1): 4500 - 4506.
- [3] Toh S K, Webb R, Ashbolt N J. Enrichment of autotrophic anaerobic ammonium-oxidizing consortia from various wastewaters [J]. *Microbial Ecology*, 2002, 43(1): 154 - 167.
- [4] Mac Millan R J, Cawthorn R J, White S K, et al. Design and maintenance of a closed artificial seawater system for long-term holding of bivalve shellfish[J]. *Aquaculture Engineering*, 1994, 13(4): 241 - 250.
- [5] 万红,宋碧玉,扬毅. 工厂化水产养殖废水处理的研究与展望[J]. 中国农机化, 2006, (5): 54 - 56. [WAN Hong, SONG Bi-yu, YANG Yi. A review of wastewater treatment in industrial aquaculture. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2004, (5): 54 - 56.]
- [6] Marco V Acosta, Nassar Juliom Morell, Jorge E Corredor. Nitrogen budget of a tropical semi-intensive freshwater fish culture pond[J]. *World Aquac. Soc.*, 1994, 25(2): 261 - 269.
- [7] 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 - 49. [HUANG

- Guo-qiang, LI De-shang, DONG Shuang-lin. A new shrimp poly-pond recirculating system. *Marine Sciences*, 2001, 25 (4):48-49. ]
- [ 8 ] WU Xiongfei, ZHAO Zhidong, LI Deshang. Closed recirculating system for shrimp-mollusk polyculture [ J ]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2005, 23 (4):461-468.
- [ 9 ] Moss B. Ecology of Freshwater [ M ]. London: Oxford, 1980. 87-90.
- [ 10 ] 李永函. 淡水生物学 [ M ]. 北京: 高等教育出版社, 1994. 214-241. [ LI Yong-han. Freshwater Biology. Beijing: Higher Education Press, 1994. 214-241. ]
- [ 11 ] Vermaat J E. Periphyton removal by freshwater micrograzers [ A ]. In: van Vierssen, et al. Lake Veluwe, A Macrophyte-dominated System under Eutrophication Stress [ C ]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994. 213-249.
- [ 12 ] Stevenson R J, Lowe R L. Algal Ecology Freshwater Benthic System [ M ]. San Diego: Academic Press, 1996. 343-347.
- [ 13 ] Van Vierssen W. The influence of human activities on the functioning of macrophyte dominated aquatic ecosystems in the coastal area of Western Europe Int Symp Aquat Macrophytes, Nijmegen [ J ]. *The Netherlands*, 1983:273-281.
- [ 14 ] Mulholland P J, et al. The effect of grazing intensity on phosphorus spiraling in autotrophic streams [ J ]. *Oecologia*, 1983, 58:358-366.
- [ 15 ] Cuker B E. Grazing and nutrient interactions in controlling the activity and composition of the epilithic algal community of an arctic lake [ J ]. *Limnol. Oceanogr.*, 1983, 28:133-141.
- [ 16 ] Boyd C E. Practical aspects of chemistry in pond aquaculture [ J ]. *The Progressive Fish Culturist*, 1997, (59):85-93.
- [ 17 ] Yossi Tal, Joy E M Watts, Susan B Schreier. Characterization of the microbial community and nitrogen transformation processes associated with moving bed bioreactors in a closed recirculated mariculture system [ J ]. *Aquaculture*, 2003, 215 (1-4):187-202.

## Recycling of Aquaculture Wastewater and Reusing the Resources of Redundant Algae Biomass

HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, FAN Cheng-xin

(1. Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Nanjing Institute of Geography & Limnology, CAS, Nanjing 210008, China )

**Abstract:** This paper studies aquaculture wastewater purification, recycling and reusing the resource of redundant algae biomass of aquaculture wastewater, from which recirculating aquaculture ecosystem was adopted for several ponds, in brief, through Algae-Snails-Weever-Microbial chain to remove the surplus nutrient and organic material of aquaculture wastewater. Result showed that the average removal rate of TN,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  was more than 80%, and the removal rate of total ammonia ( $\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3$ ) was the highest, up to 97.17%; the removal rate of TP and  $\text{COD}_{\text{cr}}$  was 94.17% and 71.87%, respectively. The mean content of outlet's TN and TP and chlorophyll reached Category III lake water standard, COD value reached Type I water level, nitrogen and dissolved oxygen contents were in accordance with the requirement of the fishing industry water quality standards. The ability of the high stability of the system can control algae population structure, and make full use of water algae biomass and nutrients, so energy will be translated into higher prices or shellfish and weever to increase aquaculture efficiency, hence this system can not only save water resources but also decrease the discharge of wastewater.

**Key words:** water resources; aquaculture wastewater; recycling; algae resources utilization