

### 3 种虾类养殖池塘污染强度及氮磷 营养物质收支研究

陈东兴<sup>1,2</sup>, 杨超<sup>1</sup>, 华雪铭<sup>2</sup>, 蔡春芳<sup>1\*</sup>, 曾庆飞<sup>3</sup>,  
谷孝鸿<sup>3</sup>, 王国清<sup>4</sup>, 张伟业<sup>4</sup>

(1. 苏州大学 基础医学与生物科学学院, 江苏 苏州 215123; 2. 上海海洋大学 水产与生命科学学院,  
上海 201306; 3. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008;  
4. 苏州市阳澄湖现代农业发展有限公司, 江苏 苏州 215141)

**摘要:** 为了明确青虾、南美白对虾和罗氏沼虾养殖池塘的污染强度, 2010—2011 年对 3 种虾塘塘内水质、排水水质及水源水质进行跟踪监测, 在此基础上测算了总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)和总悬浮物(TSS)的实际排放强度和估算排放强度, 以及氮(N)、磷(P)营养物质收支。结果显示, 青虾、南美白对虾和罗氏沼虾养殖池塘 TN 的实际排放强度分别为 37.2、181.0、148.0 kg/hm<sup>2</sup>, 估算排放强度分别为 34.5、77.9、59.8 kg/hm<sup>2</sup>; TP 的实际排放强度分别为 7.78、46.80、34.50 kg/hm<sup>2</sup>, 估算排放强度分别为 6.22、33.10、29.50 kg/hm<sup>2</sup>; COD<sub>Mn</sub> 的实际排放强度分别为 216、812、575 kg/hm<sup>2</sup>, 估算排放强度分别为 193、392、286 kg/hm<sup>2</sup>; TSS 的实际排放强度分别为 464、2 277、1 730 kg/hm<sup>2</sup>, 估算排放强度分别为 378、761、722 kg/hm<sup>2</sup>。青虾塘的 TP 和 COD<sub>Mn</sub>, 南美白对虾塘的 TN、COD<sub>Mn</sub> 和 TSS 及罗氏沼虾塘的 TN 和 TSS 的实际总排放强度显著高于估算排放强度。N、P 收支研究结果显示, 饵料是池塘 N、P 输入的主要来源, 分别占总输入的 68.32%~94.24% 和 73.09%~91.12%, 而饵料中 N、P 的保留率仅为 13.88%~20.67% 和 7.20%~9.57%。上述结果提示, 3 种虾类养殖池塘对周围环境的污染应受到重视, 提高饵料 N、P 保留率可减少养殖污染。

**关键词:** 青虾; 南美白对虾; 罗氏沼虾; 污染强度; 氮磷收支

中图分类号: S966.12 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2013)08-0132-05

### Pollution Fluxes and Budgets of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Three Types of Shrimp Culture Ponds

CHEN Dong-xing<sup>1,2</sup>, YANG Chao<sup>1</sup>, HUA Xue-ming<sup>2</sup>, CAI Chun-fang<sup>1\*</sup>, ZENG Qing-fei<sup>3</sup>,  
GU Xiao-hong<sup>3</sup>, WANG Guo-qing<sup>4</sup>, ZHANG Wei-ye<sup>4</sup>

(1. School of Biology & Basic Medical Sciences, Soochow University, Suzhou 215123, China;  
2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;  
3. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology,  
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;  
4. Suzhou Yangcheng Lake Modern Agricultural Development Co., Ltd., Suzhou 215141, China)

**Abstract:** In order to clear the culture pollution fluxes of three species of freshwater shrimp, including *Macrobrachium nipponense*, *Litopenaeus vannamei* and *Macrobrachium rosenbergii*, a survey on the inputs, production, water management, water quality of inflow and drainage was conducted

收稿日期: 2013-02-26

基金项目: 环保部环保公益项目科研专项(201009014)

作者简介: 陈东兴(1986-), 男, 山东青岛人, 在读硕士研究生, 研究方向: 动物营养与饲料科学。E-mail: dongxing\_chen@126.com

\* 通讯作者: 蔡春芳(1967-), 女, 江苏海门人, 副教授, 博士, 主要从事动物营养学和环境营养学研究。E-mail: caicf@suda.edu.cn

from 2010 to 2011. The total pollution fluxes (TPF) and compute pollution fluxes (CPF) of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chemical oxygen demand ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) and total suspended solids (TSS) were estimated, and the budgets of nitrogen and phosphorus were calculated. The results showed that TPF of TN were 37.2 kg/ha, 181.0 kg/ha and 148.0 kg/ha, while the CPF were 34.5 kg/ha, 77.9 kg/ha and 59.8 kg/ha, respectively. The TPF of TP were 7.78 kg/ha, 46.80 kg/ha and 34.50 kg/ha whereas the CPF were 6.22 kg/ha, 33.10 kg/ha and 29.50 kg/ha, respectively. The TPF of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  were 216 kg/ha, 812 kg/ha and 575 kg/ha, and the CPF of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  were 193 kg/ha, 392 kg/ha and 286 kg/ha, respectively. The TPF of TSS were 464 kg/ha, 2 277 kg/ha and 1 730 kg/ha, and the CPF of TSS were 378 kg/ha, 761 kg/ha and 722 kg/ha, respectively. For the TP and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  in *M. nipponense* ponds, the TN,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and TSS in *L. vannamei* ponds, and the TN and TSS in *M. rosenbergii* ponds, the TPF were significantly higher than the CPF. In the total input nutrients, 68.32%—94.24% of N and 73.09%—91.12% of P were taken by feed. But the retention of feed N and P were 13.88%—20.67% and 7.20%—9.57%, respectively. These results reveal that the pollution fluxes of the three types of shrimp culture ponds should be taken serious and increasing retention of feed N and P is a route to reduce the farming pollution.

**Key words:** *Macrobrachium nipponense*; *Litopenaeus vannamei*; *Macrobrachium rosenbergii*; pollution fluxes; nitrogen and phosphorus budget

水产养殖用水要求溶氧丰富,符合“肥、活、嫩、爽”标准<sup>[1]</sup>。而养殖过程中过量投入的饵料和肥料、养殖动物的排泄物和尸体等会引起水质恶化、病害多发<sup>[2]</sup>。于是“换水”被当成是提高水体溶氧、防病治病、改善水质、保障养殖动物生长的最重要手段<sup>[3]</sup>。养殖废水中氮(N)、磷(P)等营养物质含量一般比较高,大排大放的养殖方式会引起外界水体富营养化<sup>[4-5]</sup>,引起蓝藻暴发等严重后果。查明养殖污染强度、揭示养殖污染来源,是治理养殖污染的重要依据。随着人们消费水平的提高,虾类消费量也逐年增加。在太湖地区,南美白对虾、罗氏沼虾和青虾养殖规模较大。因此,2010—2011年对青虾、南美

白对虾和罗氏沼虾池塘养殖情况进行了调查,对进、排水水质进行了实地监测,估算了污染物排放量,建立了1个养殖周期内的氮磷收支方程,为制定虾类养殖污染治理对策提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 青虾、南美白对虾和罗氏沼虾养殖概况

以苏州市阳澄湖现代农业发展有限公司青虾养殖塘、苏州市水产养殖场有限公司内塘分公司的南美白对虾塘和罗氏沼虾塘为样本进行调查监测,每种养殖池塘各选取5口,3种虾类养殖池塘概况见表1。

表1 3种虾类养殖池塘概况

虾种类	池塘大小/ hm <sup>2</sup>	平均水深/m	放养密度/ (kg/hm <sup>2</sup> )	平均投饵量/ (kg/hm <sup>2</sup> )	平均产量/ (kg/hm <sup>2</sup> )	养殖周期
青虾	0.43±0.05	1.58±0.08	1.56±3.97	配合饲料 616±96; 豆粕 278±15.6	456±47.4	6个月,1 a 2茬
南美白对虾	0.57±0.10	1.71±0.25	0.87±0.13	配合饲料 9 914±4 110	5 796±1 565	5~6个月,1 a 1茬
罗氏沼虾	0.74±0.17	1.60±0.10	1.36±0.03	配合饲料 9 944±967	3 008±885	5~6个月,1 a 1茬

### 1.2 水样采集

水质跟踪监测包括养殖期和收获期2个阶段。监测的指标包括塘水和进、排水的总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、总悬浮物(TSS),测定方法分别依据 GB 11894—1989、GB 11893—1989、GB 11892—1989 和 GB 11901—1989 进行。

在每次排水时于出水口取不同时段的水样1 000 mL,其中500 mL加1 mL浓硫酸固定,用于TN、TP及 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 分析;另500 mL水样用于TSS测定。将池塘排水依水深的不同分为4个阶段:

100 cm以上,60~100 cm,30~60 cm,30 cm以下。每4 h取样1 000 mL,处理同上。

参照文献[6]方法采集塘内水样,水源水样采自进水河道。

### 1.3 污染强度计算

TN、TP、COD和TSS实际排放强度(TPF)及估算排放强度(NPF)计算方程如下:

$$\text{TPF}_X = (C_{\text{EX}} \times V_1 + \sum C_{\text{DXi}} \times V_i) / 1\,000 \quad (1)$$

$$\text{NPF}_X = (C_1 \times V_1 + C_2 \times V_2) / 1\,000 \quad (2)$$

式(1)中,X分别代表TN、TP、COD及TSS;

$TPF_x$  分别代表 TN、TP、COD 及 TSS 的实际排放强度(kg);  $C_{EX}$  为养殖期排出水中各主要污染物质量浓度(mg/L);  $V_1$  为养殖期排水量( $m^3$ );  $C_{DXi}$  为收获期 4 个阶段( $i=1,2,3,4$ )各主要污染物质量浓度(mg/L);  $V_i$  为收获期 4 个阶段( $i=1,2,3,4$ )的排水量。式(2)中,  $NPE_x$  分别代表 TN、TP、COD 及 TSS 的估算排放强度(kg);  $C_1$  为养殖期塘内水体中各主要污染物质量浓度(mg/L);  $C_2$  为收获期塘内水体中各主要污染物质量浓度(mg/L);  $V_2$  为收获期排水量( $m^3$ )。

同时, 参照文献[7]的方法, 估算饵料中 N、P 在渔获物体内的保留率。

$$N(P) \text{ 保留率} = [\text{渔获物中 } N(P) - \text{苗种中 } N(P)] / \text{饵料中 } N(P) \quad (3)$$

3 种虾类养殖池塘 N、P 收支采用物料平衡原理, 计算方程如下:

$$N(P)_{in} = W_{in} + S_s + F \quad (4)$$

$$N(P)_{out} = W_{out} + S_h + O \quad (5)$$

$$O = N(P)_{in} - W_{out} - S_h \quad (6)$$

式(4)中,  $W_{in}$  为通过池塘补水带入的 N、P( $kg/hm^2$ );  $S_s$  为通过苗种带入的 N、P( $kg/hm^2$ );  $F$  为通过饵料带入的 N、P( $kg/hm^2$ )。式(5)中,  $W_{out}$  为通过排水带出的 N、P( $kg/hm^2$ ), 是随养殖期排水排出 N、P 和随收获期排水排出 N、P 之和;  $S_h$  为通过渔获虾带出的 N、P( $kg/hm^2$ );  $O$  为通过其他途径输出的 N、P, 包括底泥沉积、N 的挥发、渗漏等( $kg/hm^2$ )。

#### 1.4 数据处理

收获期各时段排出水水质间差异用 Tukey 检验, 各污染物实际污染强度与估算污染强度之间的差异用  $t$  检验。显著水平为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 池塘进、排水量

3 种虾类养殖池塘进水量为  $15\,236 \sim 37\,149\,m^3/hm^2$ , 养殖期排水量为  $2\,640 \sim 27\,184\,m^3/hm^2$ , 收获期排水量为  $15\,800 \sim 17\,060\,m^3/hm^2$ 。其中, 南美白对虾池塘的进水量和排水量最大, 青虾池塘养殖期排水量最小(表 2)。

表 2 3 种虾类养殖池塘进、排水量  $m^3/hm^2$

虾种类	进水量	养殖期排水量	收获期排水量
青虾	$15\,236 \pm 3\,505$	$2\,640 \pm 415$	$15\,800 \pm 837$
南美白对虾	$37\,149 \pm 11\,325$	$27\,184 \pm 9\,957$	$17\,060 \pm 2\,484$
罗氏沼虾	$30\,952 \pm 12\,472$	$19\,143 \pm 10\,229$	$16\,000 \pm 1\,000$

### 2.2 池塘塘内水质、排水水质及水源水质污染物含量指标

养殖期内 3 种虾类池塘塘内水质与排水水质之间均无显著性差异。在收获期, 青虾塘排出水体中 TN 与 TP 含量随水位下降而升高, 但是差异不显著; 而青虾塘排出水中  $COD_{Mn}$  和 TSS 及南美白对虾和罗氏沼虾塘排出水中各污染物质量浓度均随水位下降而升高, 尤其是在最后 30 cm(图 1—4)。

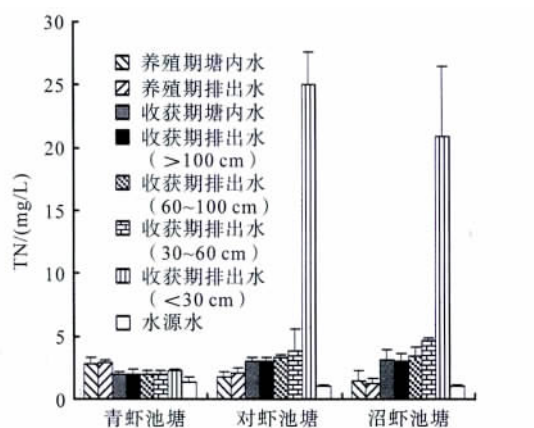


图 1 3 种虾类养殖池塘塘内水、排水及水源水 TN 含量

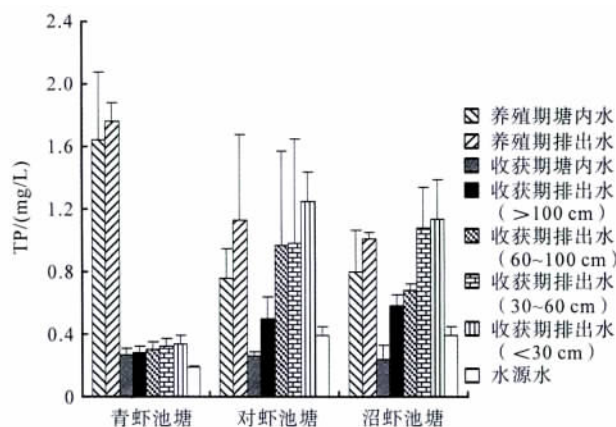


图 2 3 种虾类养殖池塘塘内水、排水及水源水 TP 含量

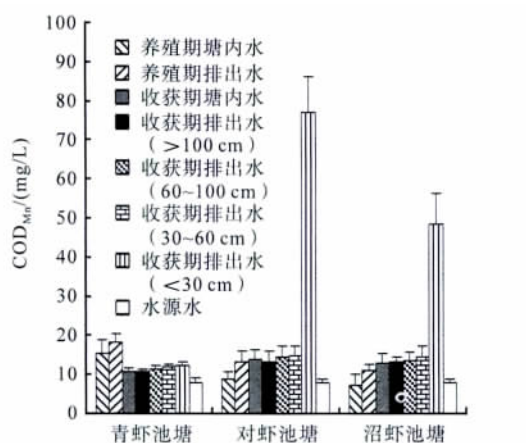


图 3 3 种虾类养殖池塘塘内水、排水及水源水  $COD_{Mn}$  含量

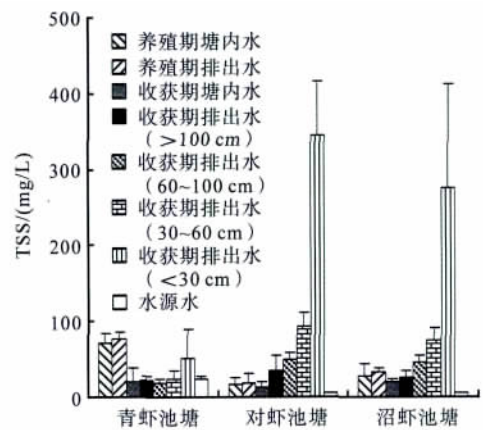


图 4 3 种虾类养殖池塘塘内水、排水及水源水 TSS

2.3 污染强度

3 种虾类养殖池塘 TN、TP、COD<sub>Mn</sub> 及 TSS 实际排放强度及估算排放强度见表 3。3 种虾类养殖池塘污染物实际排放强度均高于估算排放强度。其

中,青虾塘的 TP 和 COD<sub>Mn</sub>,南美白对虾塘的 TN、COD<sub>Mn</sub> 和 TSS 及罗氏沼虾塘的 TN 和 TSS 的实际总排放强度显著高于估算排放强度( $P<0.05$ )。

2.4 N、P 收支及饵料 N、P 保留率

从表 4 可以看出,饵料是青虾、南美白对虾、罗氏沼虾池塘 N、P 输入的主要来源,其中在 N 输入方面,分别占 68.32%、94.24%、94.23%;在 P 输入方面,分别占 73.09%、91.12%、90.81%。在 N、P 输出方面,3 种虾类结果不同,其中青虾 N、P 输出的主要来源是排水,分别占 48.39%和 64.96%。而南美白对虾、罗氏沼虾 N、P 输出的主要来源是其他途径,其在南美白对虾输出中分别占 54.30%、63.55%,在罗氏沼虾输出中分别占 60.91%、65.05%。

青虾塘、南美白对虾塘及罗氏沼虾塘 N 保留率分别为 13.88%、20.67%和 14.12%;P 保留率分别为 7.20%、8.53%和 9.57%。

表 3 3 种虾类养殖池塘各污染指标实际排放强度及估算排放强度 kg/hm<sup>2</sup>

虾种类	实际排放强度				估算排放强度			
	TN	TP	COD <sub>Mn</sub>	TSS	TN	TP	COD <sub>Mn</sub>	TSS
青  虾	37.2±3.71	7.78±0.21	216±9.59	464±129	34.5±2.75	6.22±0.83*	193±20.0*	378±305
南美白对虾	181.0±17.60	46.80±5.92	812±71.20	2 277±399	77.9±18.90*	33.10±10.20	392±95.4*	761±240*
罗氏沼  虾	148.0±9.98	34.50±13.40	575±156.00	1 730±242	59.8±32.20*	29.50±8.81	286±127.0	722±490*

注: \* 表示估算排放强度与实际排放强度差异显著( $P<0.05$ )。

表 4 3 种虾类养殖池塘 N、P 收支概况及饵料 N、P 保留率 %

项目	虾种类	输入			输出			保留率
		苗种	饵料	进水	排水	渔获物	其他	
N	青  虾	4.930	68.32	26.75	48.39	14.41	37.20	13.88
	南美白对虾	0.003	94.24	5.76	26.23	19.48	54.30	20.67
	罗氏沼  虾	0.010	94.23	5.77	25.78	13.31	60.91	14.12
P	青  虾	2.740	73.09	24.17	64.96	8.00	27.04	7.20
	南美白对虾	0.001	91.12	8.88	28.68	7.78	63.55	8.53
	罗氏沼  虾	0.010	90.81	9.19	26.25	8.70	65.05	9.57

3 结论与讨论

本研究结果表明,3 种虾类养殖池塘中 TN、TP、COD<sub>Mn</sub> 及 TSS 实际排放强度分别为 37.2~181.0 kg/hm<sup>2</sup>、7.78~46.80 kg/hm<sup>2</sup>、216~812 kg/hm<sup>2</sup> 和 464~2 277 kg/hm<sup>2</sup>。其中,南美白对虾池塘 TN、TP、COD<sub>Mn</sub> 及 TSS 实际排放强度最高,青虾塘各污染物实际排放强度最低。陈家长等<sup>[8]</sup>报道太湖流域青虾塘 TN、TP 污染强度为 28.66 kg/hm<sup>2</sup> 和 2.85 kg/hm<sup>2</sup>,可见同一养殖品种不同的养殖管理模式导致污染物排放量差异很大。Páez-osuna 等<sup>[9]</sup>报道,半精养虾塘排放的 TN、TP 分别为 52.1 kg/hm<sup>2</sup> 和 8.4 kg/hm<sup>2</sup>;而广东海水对虾池塘无机氮、无机磷、COD<sub>Mn</sub> 和 TSS 排放强度分别为

3.16 kg/hm<sup>2</sup>、1.48 kg/hm<sup>2</sup>、112.71 kg/hm<sup>2</sup> 和 407.92 kg/hm<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。本研究中南美白对虾塘和罗氏沼虾塘各污染物排放强度均高于上述报道。其原因可能在于南美白对虾和罗氏沼虾在养殖过程中有大量的饵料投入,其中约有 10%可能立即溶入水中变为悬浮物,造成水体污染<sup>[11]</sup>;另外,本研究中南美白对虾塘和罗氏沼虾塘养殖产量高,养殖对象的排泄物也是污染物的重要来源<sup>[2]</sup>。

与其他养殖种类相比,本研究中 3 种虾类养殖池塘中 TN、TP 实际排放强度均高于太湖流域河蟹塘 TN、TP 排放强度(13.6 kg/hm<sup>2</sup> 和 2.0 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[12]</sup>,南美白对虾 TN 和 TP 实际排放强度高于广西淡水斑点叉尾鮰养殖池塘 TN、TP 排放强度(178.50 kg/hm<sup>2</sup>、12.67 kg/hm<sup>2</sup>),但是 COD<sub>Mn</sub> 排

放强度要低于斑点叉尾鮰池塘  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的排放强度 ( $4\,174.50\text{ kg/hm}^2$ )<sup>[13]</sup>。可见,不同的养殖品种其污染排放强度是不同的。

此前,大多研究采用塘内水质计算污染强度<sup>[7,14]</sup>。通过比较各污染物实际排放强度和塘内水质估算排放强度可以看出,实际排放强度均高于估算排放强度,其中,青虾塘的 TP 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ,南美白对虾塘的 TN、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 TSS 及罗氏沼虾塘的 TN 和 TSS 的实际总排放强度显著高于估算排放强度。两者之间的差异主要是由收获期排水水质随水位的降低而升高造成的。沉积在池塘底泥中的营养盐通过水体的流动、养殖动物的搅动或人为的搅动又会重悬释放到水体中,加速表层底泥营养盐的溶出速度<sup>[15-16]</sup>。有研究表明<sup>[17]</sup>,底泥中污染物的释放率与水深和流速有关,在相同水深条件下,流速越大底泥的释放率越大;流速相同时,底泥的释放率随水深的增大而减小。Knösche 等<sup>[18]</sup>研究发现,当水体体积低于池塘体积的 1% 时,矿化底泥悬浮物显著释放,与本调查结果相一致。因此,在收获期用排水前塘内水质来计算污染强度是不准确的,尤其是底泥搅动剧烈的池塘。

从 3 种虾类养殖池塘 N、P 收支研究结果可以看出,饵料是池塘 N、P 输入的主要来源,分别占总输入的 68.32%~94.24% 和 73.09%~91.12%。这与已有的研究报道相一致<sup>[14,19-20]</sup>。在 N、P 输出方面,青虾 N、P 输出的主要来源是排水,而南美白对虾及罗氏沼虾通过其他途径输出 N、P 占有重要份额。本研究中饵料 N、P 的保留率分别为 13.88%~20.67% 和 7.20%~9.57%,即饵料中有 79.33%~86.12% 的 N 和 90.43%~92.80% 的 P 未被利用,而在已报道的半精养虾塘饵料中 N、P 的保留率可以达到 37%~47% 和 6%~25%<sup>[9,21]</sup>。显然,目前在 3 种虾类养殖过程中,饵料中 N、P 的保留率较低。此结果提示,解决这 3 种虾类养殖污染的有效途径是提高饵料中 N、P 的保留率,从而减少饵料中 N、P 随养殖废水的排放,降低 N、P 污染负荷。

#### 参考文献:

- [1] 付保荣,曹向宇,冷阳,等. 光合细菌对水产养殖水质和水生生物的影响[J]. 生态科学,2008,27(2):102-106.
- [2] 祁真,杨京平. 几种微生物制剂和微藻在水产养殖中的应用[J]. 水生生物学报,2004,28(4):85-89.
- [3] 刘宝金. 高温季节南美白对虾养殖管理技术[J]. 中国水产,2009(7):50-51.
- [4] 林泽新. 太湖流域水环境变化及缘由分析[J]. 湖泊科学,2002,14(2):111-116.
- [5] 秦伯强,吴庆农,高俊峰,等. 太湖地区的水资源与水环

- 境——问题、原因与管理[J]. 自然资源学报,2002,17(2):221-228.
- [6] 雷衍之. 养殖水环境化学实验[M]. 北京:中国农业出版社,2006:109-111.
- [7] 戴修赢,蔡春芳,徐升宝,等. 饵料结构对河蟹养殖池塘氮、磷收支和污染强度的影响[J]. 水生态学杂志,2010,3(3):52-56.
- [8] 陈家长,胡庚东,瞿建宏. 太湖流域池塘养殖青虾对环境的影响[C]. 首届全国农业面源污染与综合防治学术研讨会论文集,2004:96-99.
- [9] Páez-osuna F, Guerrero-galván S R, Ruiz-fernández A C, et al. Fluxes and mass balances of nutrients in a semi-intensive shrimp farm in north-western Mexico [J]. Marine Pollution Bulletin, 1997, 34(5):290-297.
- [10] 李纯厚,黄洪辉,林钦,等. 海水对虾池塘养殖污染物环境负荷量的研究[J]. 农业环境科学学报,2004,23(3):545-550.
- [11] 李绪兴. 水产养殖与农业面源污染研究[J]. 安徽农学通报,2007,13(11):61-67.
- [12] 陈家长,胡庚东,瞿建宏,等. 太湖流域池塘河蟹养殖向太湖排放氮磷的研究[J]. 农村生态环境,2005,21(1):21-23.
- [13] 黎小正,吴祥庆,庞燕飞,等. 广西淡水池塘养殖环境影响分析与评价[J]. 广西农业科学,2010,41(9):987-990.
- [14] 李金亮,陈雪芬,赖秋明,等. 凡纳滨对虾高位池养殖氮、磷收支研究及养殖效果分析[J]. 南方水产,2010,6(5):13-20.
- [15] Bloesch J. A review of methods used to measure sediment resuspension[J]. Hydrobiologia, 1994, 284:13-18.
- [16] 姜增华,唐明虎,俞小先,等. 家鱼高产养殖技术及氮磷收支分析[J]. 水产科技情报,2010,37(1):9-13.
- [17] 张坤,李彬,王道增. 动态水流条件下河流底泥污染物( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ )释放研究[J]. 环境科学学报,2010,30(5):985-989.
- [18] Knösche R, Schreckenbach K, Pfeifer M, et al. Balances of phosphorus and nitrogen in carp ponds[J]. Fisheries Management and Ecology, 2000, 7:15-22.
- [19] Jackson C, Preston N, Thompson P J, et al. Nitrogen budget and effluent nitrogen components at an intensive shrimp farm[J]. Aquaculture, 2003, 218(1/4):397-411.
- [20] Thakur D P, Lin C K. Water quality and nutrient budget in closed shrimp (*Penaeus monodon*) culture systems[J]. Aquacultural Engineering, 2003, 27(3):159-176.
- [21] Casillas-Hernández R, Magallón-Barajas F, Portillo-Clarck, et al. Nutrient mass balances in semi-intensive shrimp ponds from Sonora, Mexico using two feeding strategies: Trays and mechanical dispersal[J]. Aquaculture, 2006, 258:289-298.