

doi: 10.3969/j.issn.2095-0780.2011.05.004

## 对虾精养池塘碳、氮和异养细菌含量的变化及其相关性研究

罗亮<sup>1,2</sup>, 李卓佳<sup>2</sup>, 张家松<sup>2</sup>, 曹煜成<sup>2</sup>, 文国樑<sup>2</sup>, 杨莺莺<sup>2</sup>

(1. 大连海洋大学, 辽宁大连 116023; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东广州 510300)

**摘要:** 文章调查了广东省汕尾市红海湾对虾精养池塘水体中不同形式的碳(C)、氮(N)和异养细菌含量的变化, 并分析C和N对异养细菌的影响, 以期对养殖过程合理调控水质环境提供理论数据。结果发现, 池塘中不同形式的 $\rho(\text{C})$ 在养殖前、中期逐渐升高并达到最大值, 中、后期缓慢下降趋于稳定,  $\rho(\text{N})$ 在养殖前、中期较低, 后期升高并达到最大值; 异养细菌数在养殖中期的第56天和养殖后期的第98天出现2个高峰, 养殖第70天出现低谷。异养细菌数与总无机碳(TIC)和总碳(TC)呈现极显著正相关关系; 养殖中、后期异养细菌数与C/N(=TOC/TN)呈极显著负相关关系。结果表明, 养殖中、后期水体中C(主要是有机碳)成为影响异养细菌繁殖的限制性因素, 适当添加C源可以促进异养细菌繁殖, 吸收转化无机氮, 从而达到降低水体中无机氮浓度、提高物质循环利用效率的作用。

**关键词:** 对虾精细养殖; 碳; 氮; 异养细菌

中图分类号: S 917.1; S 968.22

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2011)05-0024-06

## Variation in contents of carbon, nitrogen and heterotrophic bacteria in intensive shrimp ponds and their correlation

LUO Liang<sup>1,2</sup>, LI Zhuojia<sup>2</sup>, ZHANG Jiasong<sup>2</sup>, CAO Yucheng<sup>2</sup>, WEN Guoliang<sup>2</sup>, YANG Yingying<sup>2</sup>

(1. Ocean University of Dalian, Dalian 116023, China; 2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** We studied the variation in contents of carbon (C), nitrogen (N) and heterotrophic bacteria in the intensive shrimp ponds in Shanwei Red Bay of Guangdong Province, and analyzed the effects of C and N on heterotrophic bacteria, so as to provide theoretical references for a reasonable regulation for water quality during culture period. The results show that carbon content gradually reaches the maximum during pre- and mid-culture periods but declines to stability in late period; the nitrogen content is relatively low during pre- and mid-culture periods but reaches the maximum in later period; the content of heterotrophic bacteria peaks in mid-culture period for 56 d and later period for 98 d, but reaches the lowest point after 70-day culture. The heterotrophic bacteria show a very significant positive correlation to TIC and TC. In late culture period, the heterotrophic bacteria show a very significant negative correlation to C/N (TOC/TN). Mainly carbon limits the propagation of heterotrophic bacteria in mid and late culture periods. Thus, addition of carbon in the ponds can promote propagation of heterotrophic bacteria, absorption and transformation of inorganic nitrogen, and reduce the concentration of inorganic nitrogen, finally improve the efficiency of material recycling.

**Key words:** intensive shrimp farming; carbon; nitrogen; heterotrophic bacteria

收稿日期: 2011-02-22; 修回日期: 2011-03-23

资助项目: 现代农业(虾)产业体系建设专项资金(NYCYTX-46); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国水产科学研究院南海水产研究所)资助项目(2010YD05); 国家自然科学基金项目(30800851); 公益性行业(农业)科研专项(201103034); 广东省科技计划项目(2010B020309001); 广东省海洋渔业科技推广专项(A201001B02); 广东省鱼病防治专项(2130108); 广东省自然科学基金项目(10151030002000008)

作者简介: 罗亮(1986-), 男, 硕士研究生, 从事对虾健康养殖技术研究。E-mail: llno.1@163.com

通讯作者: 李卓佳, E-mail: zhuojiali609@163.com

在对虾养殖池塘生态系统中,异养细菌既是物质和能量的贮存者,又是分解者,在物质循环和有机物质分解等方面发挥着重要的作用,其数量直接或间接地反映生态系统的代谢情况。作为异养细菌生长基质的营养物质,尤其是碳(C)和氮(N)含量对异养细菌生长和有机物质分解有重要影响,所以研究虾池生态系统中C、N与异养细菌含量变化及其相关性具有重要意义。赵卫红等<sup>[1,2]</sup>、王年斌等<sup>[3]</sup>和刘国才等<sup>[4]</sup>分别在实验室和养殖生产条件下调查了对虾养殖系统中各种形态的无机氮、有机氮、胶体有机碳、溶解有机碳和颗粒有机碳的动态变化;国内外学者对虾池水体和底质中细菌含量的变化情况报道较多<sup>[5-7]</sup>;也有一些关于养殖池塘中C、N与细菌含量关系的研究报道,如梅志平和施正峰<sup>[8]</sup>研究发现,向养鱼池水体中添加有机碳促进了细菌生长和细菌对无机氮的吸收。有国外学者研究认为,养殖水体中随着C/N的提高,异养细菌含量会显著升高;也有人认为C/N是水产养殖系统中的一个控制性因素<sup>[9-10]</sup>。

对虾精养池塘——高位池是一种集约化程度高、养殖效益好的对虾养殖模式,近年来在中国南方发展迅速。但因其养殖密度高和环境负荷大的特点,养殖过程生态环境的调控尤为重要。文章通过对养殖过程进行定期采样分析,旨在了解对虾精养池塘水体中不同存在形式的C、N和异养细菌含量的变动规律,分析C、N与异养细菌含量的关系,以期为指导对虾精养池塘水质环境调控提供一些理论数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 池塘条件

试验于2008年4月至8月在广东省汕尾市红海湾田乾镇东洲鸿泰养殖场进行。选取3口铺地膜海水高位池,每个池塘面积均为0.43 hm<sup>2</sup>,水深1.8~2.3 m,配备4台水车式和2台射流式增氧机,同时底部铺设管道式增氧系统。2008年4月9日投放凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)虾苗,密度135×10<sup>4</sup>尾·hm<sup>-2</sup>,2008年7月29日收获。养殖基本措施为放苗前进行池塘清洗和消毒,养殖用水经沙滤井过滤后消毒使用,养殖全程使用芽孢杆菌、乳酸杆菌、光合细菌和浮游微藻营营养素等调节水环境,养殖前期基本不换水,中期添水,中、后

期少量排污换水,每7~10 d换水5%,保持水深1.8~2.3 m,全程投喂配合饲料。养殖过程主要水质指标分别为盐度17~37,水温23.2~32.3℃,pH 7.21~9.37,溶解氧(DO)3.48~15.5 mg·L<sup>-1</sup>。

### 1.2 样品的采集和处理

放苗养殖28 d,养殖情况基本稳定,开始采集水样,以后每14 d采集1次。上午9:00用柱状采水器在池塘四角及中央各定量采集水样2 L,混合待用。取混合水样1 L,冷藏带回实验室用于检测相关水质指标。用灭菌的三角瓶取混合水样150 mL左右,冷藏带回实验室用于异养细菌含量检测。现场采用PHB-1型便携式pH计测定pH, Thermo Orion型号810便携式溶氧仪测定DO和水温,型号WYY-II便携式折射盐度计测量盐度。

### 1.3 异养细菌含量测定

异养细菌采用2216E培养基平板计数法。根据实际情况适当稀释水样,取0.1 mL于培养基中涂布,30℃恒温条件下培养48 h后计数。

### 1.4 化学指标测定

水质分析按照GB 17378.4-2007进行。氨氮(NH<sub>4</sub>-N)用次溴酸盐氧化法,硝酸盐氮(NO<sub>3</sub>-N)用锌-镉还原法,亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub>-N)用萘乙二胺分光光度法,总氮(TN)用过硫酸钾氧化法,总有机碳(TOC)、总无机碳(TIC)和总碳(TC)用非色散近红外光度法测定。总无机氮(TIN)为NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub>-N之和。

### 1.5 数据分析

采用SPSS 17.0软件对数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)。若有显著差异再做LSD多重比较。 $P < 0.05$ ,表示有显著差异; $P < 0.01$ ,表示有极显著差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 水体TOC、TIC和TC的变化

3个池塘水体的 $\rho$ (TOC)随着时间增加呈现先上升后下降的趋势,在养殖前期升至最高,随着养殖的进行逐渐下降并且趋于平缓(图1)。1<sup>#</sup>池 $\rho$ (TOC)最大值为15.90 mg·L<sup>-1</sup>,最小值为7.82 mg·L<sup>-1</sup>,平均为11.00 mg·L<sup>-1</sup>;2<sup>#</sup>池 $\rho$ (TOC)最大值为17.10 mg·L<sup>-1</sup>,最小值为8.81 mg·L<sup>-1</sup>,平均为11.94 mg·L<sup>-1</sup>;3<sup>#</sup>池 $\rho$ (TOC)最大值为24.60 mg·

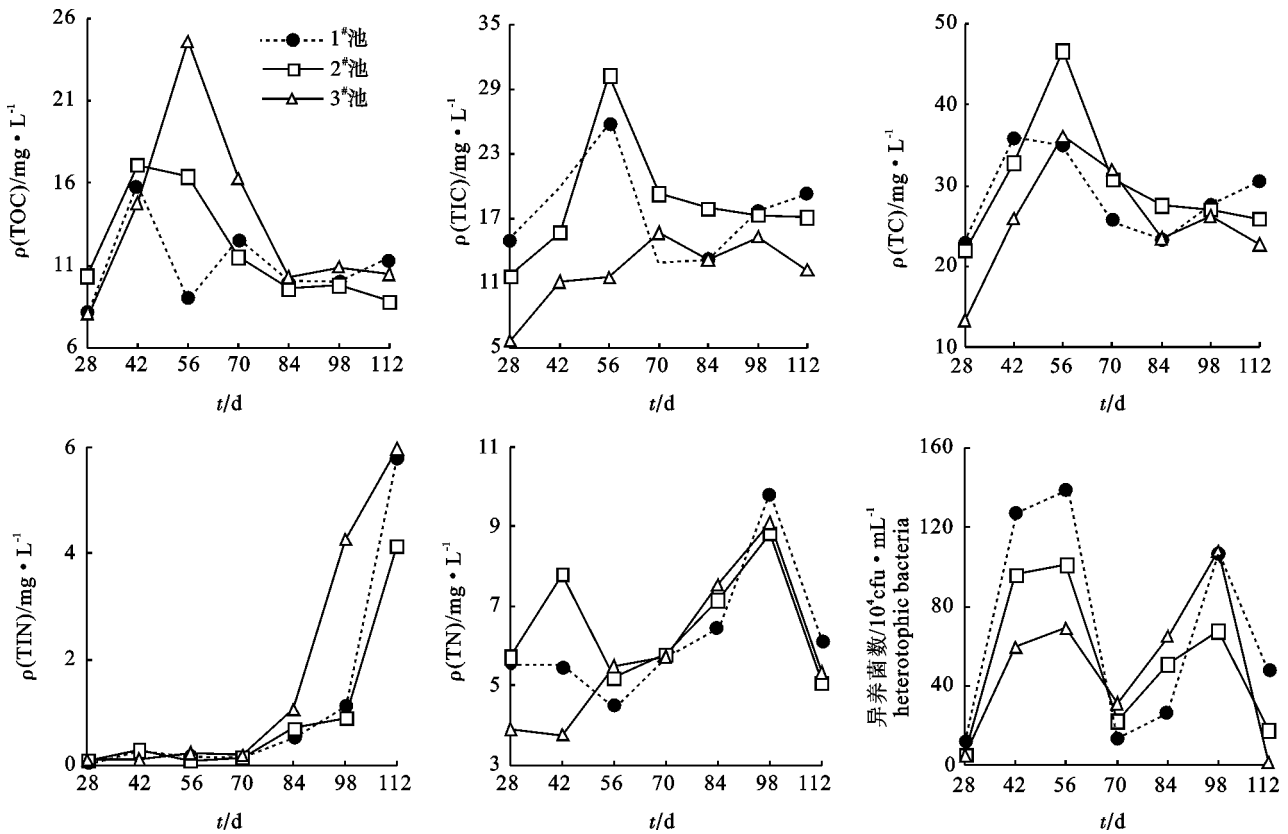


图1 养殖虾池水体 TOC、TIC、TC、TIN、TN 和异养细菌含量的变化

Fig. 1 Variation in contents of TOC, TIC, TC, TIN, TN and heterotrophic bacteria in shrimp ponds

$L^{-1}$ , 最小值为  $7.78 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 平均为  $13.59 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ 。

3个池塘水体的  $\rho(\text{TIC})$  在养殖前 56 d 逐渐升高, 中、后期基本保持稳定(图 1)。1#池  $\rho(\text{TIC})$  最大值为  $26.12 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 最小值为  $12.87 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 平均为  $17.71 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ ; 2#池  $\rho(\text{TIC})$  最大值为  $30.3 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 最小值为  $11.66 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 平均为  $18.46 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ ; 3#池  $\rho(\text{TIC})$  最大值为  $15.69 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 最小值为  $5.64 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 平均为  $12.08 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ 。

TC 为 TOC 与 TIC 之和, 整体呈现先升高后下降至平稳的趋势,  $\rho(\text{TC})$  最大值为  $46.70 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 最小值为  $13.42 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 平均为  $28.26 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ 。

## 2.2 水体 TIN 和 TN 的变化

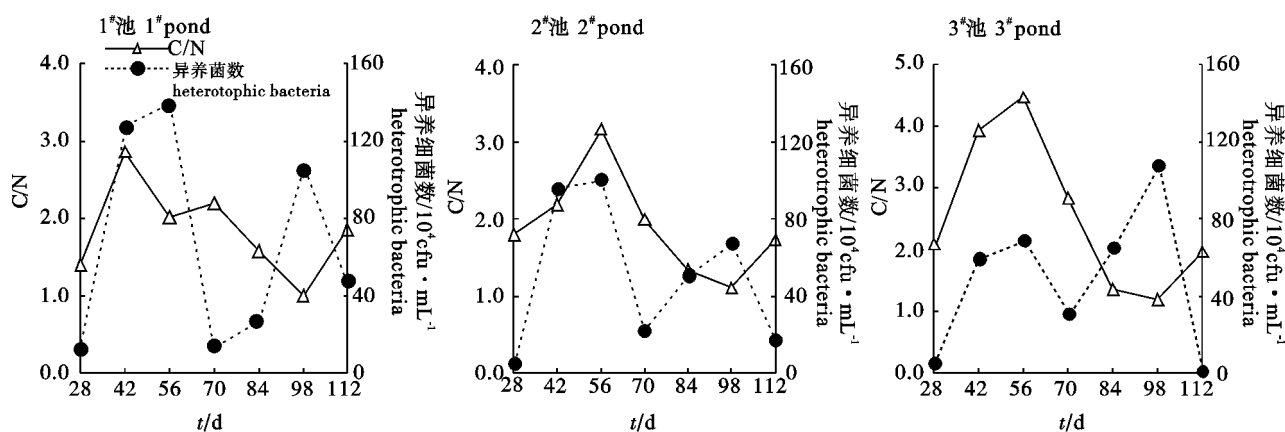
3个池塘水体的  $\rho(\text{TIN})$  在养殖前 70 d 一直处于较低水平, 之后开始上升, 养殖第 84 天以后快速升高, 在第 112 天达到最大值(图 1)。1#池  $\rho(\text{TIN})$  最大值为  $5.832 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 最小值为  $0.061 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 平均为  $1.166 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ ; 2#池  $\rho(\text{TIN})$  最大值为  $4.152 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 最小值为  $0.084 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 平均为  $0.906 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ ; 3#池  $\rho(\text{TIN})$  最大值为  $5.980 \text{ mg}$

$\cdot L^{-1}$ , 最小值为  $0.098 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 平均为  $1.702 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ 。

3个池塘水体的  $\rho(\text{TN})$  在养殖前 56 d, 1#池  $\rho(\text{TN})$  呈现下降的变化趋势, 2#和 3#池则呈相反的变化; 养殖第 56 天以后 3 个池塘  $\rho(\text{TN})$  一直处于升高的趋势, 第 98 天时各池塘  $\rho(\text{TN})$  升至最高, 随后迅速下降(图 1)。1#池  $\rho(\text{TN})$  最大值为  $9.96 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 最小值为  $4.46 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 平均为  $6.28 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ ; 2#池  $\rho(\text{TN})$  最大值为  $8.84 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 最小值为  $5.08 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 平均为  $6.51 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ ; 3#池  $\rho(\text{TN})$  最大值为  $9.11 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 最小值为  $3.76 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ , 平均为  $5.84 \text{ mg} \cdot L^{-1}$ 。

## 2.3 水体异养细菌含量的变化

从整个养殖过程来看, 3 个池塘水体异养细菌含量变化较一致(图 1), 在养殖第 56 天和第 98 天出现 2 个高峰, 养殖第 70 天出现低谷。1#池异养菌数最大值为  $1.39 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ , 最小值为  $9.70 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ , 平均为  $6.79 \times 10^5 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ ; 2#池异养菌数最大值为  $1.01 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ , 最小值为

图2 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>虾池 C/N 与异养细菌数比较Fig. 2 Comparison of C/N with heterotrophic bacteria in 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup> and 3<sup>#</sup> shrimp ponds

$5.45 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ , 平均为  $5.15 \times 10^5 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ ; 3<sup>#</sup>池异养菌数最大值为  $1.08 \times 10^6 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ , 最小值为  $1.35 \times 10^4 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ , 平均为  $4.84 \times 10^5 \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

#### 2.4 水体 C、N 与异养细菌含量的关系

通过统计软件分析得出, 养殖过程中池塘水体异养细菌含量与  $\rho(\text{TIC})$  和  $\rho(\text{TC})$  均呈现极显著正相关关系, 回归方程分别为  $y = (4.84x - 22.04) \times 10^4$  ( $R = 0.595$ ,  $n = 21$ ,  $P = 0.004 < 0.01$ ) 和  $y = (4.01x - 57.39) \times 10^4$  ( $R = 0.637$ ,  $n = 21$ ,  $P = 0.002 < 0.01$ ); 与  $\rho(\text{TOC})$  和  $\rho(\text{TN})$  均呈正相关性 ( $P$  分别为 0.187 和 0.130), 与  $\rho(\text{TIN})$  呈负相关性 ( $P = 0.562$ ), 但与  $\rho(\text{TOC})$ 、 $\rho(\text{TN})$  和  $\rho(\text{TIN})$  的相关关系都不显著 ( $P > 0.05$ )。分析结果说明池塘水体中  $\rho(\text{C})$  对异养细菌的繁殖具有重要影响。

因为细菌主要利用水体中的有机碳用于自身的生长、繁殖, 所以池塘水体中的 C/N 用 TOC/TN 表示。3 个池塘水体 C/N 的变化随着养殖时间的增加呈现先上升后下降的趋势 (图 2)。1<sup>#</sup>池在第 42 天达到最大值 2.86, 2<sup>#</sup>池和 3<sup>#</sup>池在第 56 天达到最大值, 分别为 3.16 和 4.47, 在第 98 天时 3 个池塘的 C/N 都下降至养殖周期的最低值 1.00 ~ 1.20, 随后有所回升, 在养殖末期的第 112 天时, 3 个池塘的 C/N 都为 1.83 左右。

养殖前 70 d 异养细菌数随着 C/N 的增加呈先上升后下降的趋势, 两者呈现正相关关系但不显著, 回归方程为  $y = (1.78x + 1.11) \times 10^5$  ( $R = 0.332$ ,  $n = 12$ ,  $P = 0.292 > 0.05$ ); 养殖中、后期

异养细菌数随着 C/N 的增加而下降, 两者呈现极显著负相关关系, 回归方程为  $y = (-4.71x + 12.59) \times 10^5$  ( $R = -0.712$ ,  $n = 12$ ,  $P = 0.009 < 0.01$ )。以上分析表明, 细菌的生长和繁殖等生理活动不仅受其所需各种营养元素如 C、N 含量的影响, 也受各种营养元素含量相对比例的制约。有学者也认为各种营养元素含量相对比例能够改变异养细菌对有机物质的分解能力<sup>[11]</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 水体 C 的变化规律

虾池生态系统中的 C 代谢尤其是有机碳代谢关系到投入物质的利用率和水质稳定, 研究其变化规律和代谢特点对于提高生态系统生产力、科学地管理水质具有重要意义<sup>[12]</sup>。刘国才等<sup>[12-13]</sup>研究认为在一个投饵的对虾养殖池塘中, 水体中有机碳主要来自浮游植物的初级生产力和所投喂的饲料, 其中浮游植物初级生产力产生的有机碳约占总量的 71% ~ 78%, 对虾饲料和饵料约占 12% ~ 20%, 浮游植物会把 90% 同化的无机碳通过有机碳的形式释放到水体中。游奎和马牲<sup>[14]</sup>在运用围隔试验生态学方法研究虾池生态系各有机碳库的代谢时发现,  $\rho(\text{TOC})$  变动范围在  $6.92 \sim 20.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间。刘国才和李德尚<sup>[15]</sup>研究得出虾池生态系  $\rho(\text{TOC})$  平均为  $13.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。该研究得出对虾精养池塘水体  $\rho(\text{TOC})$  范围在  $2.40 \sim 24.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间, 平均为  $12.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 与上述的研究基本一致。该研究中池塘水体有机碳在养殖前、中期逐渐积累并

达到高峰, 养殖中、后期下降。这可能是因为: 1) 水体中异养细菌的快速繁殖大量消耗有机碳用于自身物质合成; 2) 养殖中、后期排污量增加而流失; 3) 随着食物链而进入浮游动物等更高营养级生物; 从而使得水体中的有机碳含量降低(图1)。

无机碳也是反映生态系统中 C 元素含量变化的一个重要指标, 但目前关于对虾池塘水体无机碳的研究相对较少。该研究中  $\rho(\text{TIC})$  变化规律与  $\rho(\text{TOC})$  基本一致, 但其平均值要大于后者。无机碳不能被养殖生物或者细菌等直接利用, 但可以通过转化成有机碳被摄食利用, 池塘水体中各种形式存在的 C 具有相互转化和动态平衡的关系。

### 3.2 水体 N 的变化规律

EBELING 等<sup>[16]</sup>发现在高密度集约化养殖中,  $\text{NH}_4\text{-N}$  的积累成为一个限制养殖产量的重要因素。计新丽等<sup>[17]</sup>认为  $\text{NH}_4\text{-N}$  是养虾池中普遍存在的毒性物质, 不仅在高质量浓度时对虾体有致死作用, 即使在安全质量浓度范围内也显著影响虾体的生理功能。 $\text{NH}_4\text{-N}$  等无机氮质量浓度过高已成为制约鱼类生产、造成水体富营养化的主要环境因素<sup>[18]</sup>。该研究发现对虾精养池塘水体无机氮和 TN 质量浓度在养殖前期一直处于较低水平, 养殖中、后期迅速升高, 这主要因为养殖前期对虾个体小, 饲料投入量少, 代谢产物少, 再加上使用微生态制剂使对虾的代谢产物有效转化为无机营养被浮游植物所利用, 所以无机氮和 TN 的质量浓度较低。但随着对虾的生长, 投入饲料量增加, 排泄物增多, 细菌无法大量有效转化代谢产物, 从而导致进入水体中的氮快速积累增加。

### 3.3 水体异养细菌含量变化及与 C 和 N 的关系

异养细菌的生长、繁殖等生理活动受各种营养元素的含量及其相对比例所制约, 同时各种营养元素的含量及相对比例也能改变细菌对物质的分解能力。C 和 N 是细菌生长的主要营养物质, C、N 含量与比例对细菌的生长及分解物质能力的影响明显。由于细菌主要利用水体中的有机碳用于自身的生长、繁殖, 所以该研究以  $\text{TOC}/\text{TN}$  来表示养殖虾池水体的 C/N。该研究中异养细菌含量变化呈现先升高后下降, 然后再升高的变化趋势。异养细菌含量与 C 和 TN 在整个养殖过程中呈现正相关性, 与 TIN 呈负相关性。在养殖前、中期, 随着投入饲料量的增加, 水体中  $\rho(\text{TOC})$  和  $\rho(\text{TN})$  均逐渐增

高, 但  $\rho(\text{TOC})$  增加相对要大于  $\rho(\text{TN})$ , 所以 C/N 也随着升高, 此时异养细菌数随着 C/N 的增大而升高, 呈现正相关关系。在 C/N 较高的条件下异养细菌吸收水体中的无机氮(主要是  $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 转化为有机氮, 成为细菌自身的蛋白质而进入食物链, 使无机氮一直处于较低的水平。养殖中期以后, 随着投入饲料量加大, 对虾排泄物增多,  $\rho(\text{TN})$  迅速增加, 而  $\rho(\text{TOC})$  却降低, 导致 C/N 降低, 水体中异养菌数与 C/N 呈现极显著的负相关关系( $P < 0.01$ )。

在 C/N 较低的情况下, 异养细菌会将有机氮矿化为无机氮, 使得水体中的无机氮水平升高。有研究表明异养细菌生长所需 C/N 最适宜值为 4.5 ~ 6.7<sup>[19]</sup>, 由此可见精养虾池水体的 C/N 偏低, C(主要是有机碳)成为异养细菌生长的限制性因素。梅志平和施正峰<sup>[8]</sup>也发现池塘水体中有机碳水平往往较低, 通过添加有机碳有效促进了水体中细菌生长和对无机氮的吸收。在养殖中、后期如果要提高水体中异养细菌含量, 可以通过添加 C 源来实现。

对虾精养池塘是受人类活动直接影响的生态系统, 其内部的 C、N 和异养细菌含量均具有一定的变化规律并且相互影响和制约, 通过该研究得出, 在对虾精养池塘中、后期 C 成为一个影响异养细菌繁殖的重要因素, 因此, 在养殖生产中可以考虑在养殖中、后期合理添加 C 源, 促使异养细菌生长, 从而转化吸收水体无机氮, 促进物质循环利用, 改良水质, 优化养殖环境。

### 参考文献:

- [1] 赵卫红, 杨登峰, 王江涛, 等. 中国对虾养殖系统中无机和各形态有机 N、P 浓度及其变化[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(2): 1-5.  
ZHAO Weihong, YANG Dengfeng, WANG Jiangtao, et al. Concentration and dynamics of inorganic and size-fractionated organic N and P in the shrimp ecosystem[J]. Mar Environ Sci, 2006, 25(2): 1-5. (in Chinese)
- [2] 赵卫红, 杨登峰, 王江涛. 中国对虾养殖系统中溶解有机碳和胶体有机碳的动态变化[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(3): 16-20.  
ZHAO Weihong, YANG Dengfeng, WANG Jiangtao. Research on dynamic of DOC and COC in the prawn ecosystem[J]. Mar Environ Sci, 2004, 23(3): 16-20. (in Chinese)
- [3] 王年斌, 苏鹤声, 周泓. 虾池溶解有机碳动态分析[J]. 水产

- 科学, 1999, 18(4): 14-16.
- WANG Nianbin, SU Hesheng, ZHOU Hong. Kinetics analysis of dissolved organic carbon in prawn culture pool[J]. Fish Sci, 1999, 18(4): 14-16. (in Chinese)
- [4] 刘国才, 李德尚, 董双林. 对虾池生态系统溶解有机碳及颗粒有机碳的周日动态[J]. 水产学报, 1999, 23(3): 266-270.
- LIU Guocai, LI Deshang, DONG Shuanglin. Diurnal dynamics of DOC and POC in shrimp pond ecosystem[J]. J Fish China, 1999, 23(3): 266-270. (in Chinese)
- [5] 高尚德, 陈旭仁, 吴以平. 中国对虾养成期间虾池水体和底质中细菌含量的变化[J]. 水产学报, 1994, 18(2): 138-141.
- GAO Shangde, CHEN Xuren, WU Yiping. Variation of total bacteria number in shrimp pond waters and substrate during the adult culture of *Penaeus chinensis*[J]. J Fish China, 1994, 18(2): 138-141. (in Chinese)
- [6] 申玉春, 熊邦喜, 叶富良, 等. 凡纳滨对虾高位池细菌数量变化与水环境因子的关系[J]. 海洋科学, 2006, 30(7): 33-37.
- SHEN Yuchun, XIONG Bangxi, YE Fuliang, et al. Relationship of bacterial density to its environmental factors in higher-place ponds of *Litopenaeus vannamei*[J]. Mar Sci, 2006, 30(7): 33-37. (in Chinese)
- [7] 李卓佳, 李烁寒, 杨莺莺, 等. 凡纳滨对虾高位池养殖水体细菌变动及其与理化因子的关系[J]. 南方水产, 2010, 6(4): 6-12.
- LI Zhuojia, LI Shuohan, YANG Yingying, et al. Bacteria variation in *Litopenaeus vannamei* high level ponds and its relation with physical-chemical factors[J]. South China Fish Sci, 2010, 6(4): 6-12. (in Chinese)
- [8] 梅志平, 施正峰. 池塘生态系基质 C/N 比对游离细菌群落生长和有机 N 矿化作用的影响[J]. 上海水产大学学报, 1994, 3(1/2): 40-46.
- MEI Zhiping, SHI Zhengfeng. Effects of substrate C/N ratio on growth of planktonic bacterial assemblage and their N mineralization in fish pond ecosystem[J]. J Shanghai Fish Univ, 1994, 3(1/2): 40-46. (in Chinese)
- [9] AVNIMELECH Y. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems[J]. Aquaculture, 1999, 176(3/4): 227-235.
- [10] BURFORD M A, THOMPSON P J, MCINTOSH R P. Nutrient and microbial dynamics in high intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize[J]. Aquaculture, 2003, 219(1/2/3/4): 393-411.
- [11] GOLDMAN J C, CARON D A, DENNETT M R. Regulation of gross growth efficiency and ammonium regeneration in bacteria by substrate C : N ratio [J]. Limnol Oceanogr, 1987, 32(6): 1239-1252.
- [12] 刘国才. 对虾池综合养殖生态有机碳的代谢与平衡以及细菌的数量与生产力的研究[D]. 青岛: 青岛海洋大学, 1998.
- LIU Guocai. Study on metabolism and budget of organic carbon and the numerical dynamics and productivity of bacteria in shrimp polyculture enclosure ecosystems[D]. Qingdao: Qingdao Ocean University, 1998. (in Chinese)
- [13] 刘国才, 李德尚, 董双林, 等. 对虾综合养殖生态系有机碳的平衡[J]. 海洋学报, 2002, 24(6): 84-91.
- LIU Guocai, LI Deshang, DONG Shuanglin, et al. Budget of organic carbon in shrimp polyculture ecosystem[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(6): 84-91. (in Chinese)
- [14] 游奎, 马牲. 对虾养殖生态系中有机碳的初步研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(1): 51-55.
- YOU Kui, MA Shen. Preliminary study on organic carbon in shrimp cultural ecosystems[J]. J Qingdao Ocean Univ, 2002, 32(1): 51-55. (in Chinese)
- [15] 刘国才, 李德尚. 虾池生态系各有机碳库的储量[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 1056-1060.
- LIU Guocai, LI Deshang. Storage of the organic carbon pools in the shrimp ponds[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(6): 1056-1060. (in Chinese)
- [16] EBELING J M, TIMMONS M B, BISOGIN J J. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems[J]. Aquaculture, 2006, 257(1/2/3/4): 346-358.
- [17] 计新丽, 林小涛, 许忠能, 等. 海水养殖自身污染机制及其对环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(4): 66-71.
- JI Xinli, LIN Xiaotao, XU Zhongneng, et al. Mechanism of mariculture self-pollution and its effects on environment[J]. Mar Environ Sci, 2000, 19(4): 66-71. (in Chinese)
- [18] 李谷, 吴振斌, 侯燕松. 养殖水体氨氮污染生物修复技术研究[J]. 大连水产学院学报, 2004, 19(4): 281-286.
- LI Gu, WU Zhenbin, HOU Yansong. Perspective of bio-ecoremediation technology for ammonia removal from intensive aquaculture waters[J]. J Dalian Fish Univ, 2004, 19(4): 281-286. (in Chinese)
- [19] 苏跃朋, 马牲, 董双林. 施加有机降解菌制剂虾池底质中有机碳和总氮的变化[J]. 海洋科学, 2003, 27(1): 61-64.
- SU Yuepeng, MA Shen, DONG Shuanglin. Variations of TOC and TN factors of sediments in shrimp culture ponds by applying bio-degrading bacteria[J]. Mar Sci, 2003, 27(1): 61-64. (in Chinese)