

# 循环水养鱼系统中氨氮产生量估算模型的研究

刘 晃, 顾川川

(农业部渔业装备与工程技术重点实验室, 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

**摘要:** 循环水养鱼作为一种未来水产养殖的发展方向, 其系统设计越来越受到关注, 其中系统设计关键问题之一是快速去除水中的氨氮, 因此准确得到氨氮产生量是系统设计中一个关键步骤。该研究基于物质平衡原理, 同时假设每次投喂到鱼池中的饲料能及时地被养殖鱼摄食, 并且养殖鱼排泄的粪便能在未被分解就快速排出系统, 得到氨氮产生量的估算模型。该模型中氨氮产生量与循环水养殖系统的投喂量、饲料中蛋白质的含量和氮污染物的转化率成正比。在实际应用中该模型能较准确地估算出循环水养殖系统中的氨氮产生量, 而且在考虑安全系数时, 得到的估算值相比实际值大, 符合工程设计中的系统安全需要。

**关键词:** 循环水养鱼; 系统设计; 氨氮; 估算模型

doi: 10.3969/j.issn.1007-9580.2012.05.002

中图分类号: S959

文献标识码: A

文章编号: 1007-9580(2012)05-007-05

循环水养鱼系统是把现代工程原理和方法应用到水产养殖工程上, 具有节水、节地、高密度集约化和排放可控的特点, 符合可持续发展的要求。近年来在中国得到快速发展, 特别是养殖品种的增加和水处理技术的创新<sup>[1]</sup>。循环水养鱼系统中主要是依靠人工投饵促进鱼类生长, 提高养殖产量, 系统中随饲料输入的氮只有部分能被鱼类所摄取, 剩余部分则直接进入水体。由于鱼类对营养成分固有的同化效率, 加之所摄入的相当部分又以排泄物形式进入水体, 故养殖水体中氮负荷将增加, 鱼类赖以生存的生态环境易遭受破坏<sup>[2]</sup>。氮排泄物是蛋白质的代谢终产物, 氨是鱼类主要的氮代谢产物之一, 而鱼类代谢受到如鱼类品种、体重、饲料、养殖方式、溶氧、温度等因素的影响<sup>[3]</sup>。鱼类蛋白质代谢过程中, 用于呼吸代谢底物的氨基酸中的氨基不能被代谢掉, 需经过脱氨基和转氨基被排泄, 鱼类排泄的含氮物主要是肝和肾中产生的氨氮<sup>[3]</sup>, 真骨鱼的氮排泄物主要为氨氮及尿素<sup>[4]</sup>, 氨氮是鱼类的主要排泄物<sup>[5]</sup>。当水体中氨氮浓度过高对鱼体内酶

的催化作用和细胞膜的稳定性产生严重影响, 并破坏排泄系统和渗透平衡, 水中亚硝酸盐浓度过高对鱼也会产生毒害, 主要表现在影响鱼虾体内氧的运输、重要化合物的氧化及损坏器官<sup>[6]</sup>。因此, 氨氮是循环水养殖系统设计中需考虑的核心问题<sup>[2]</sup>。循环水养殖系统设计关系到整体投资、运行成本和实际运行状况等, 其设计的关键问题之一是如何快速去除水中溶解性有害物质(包括氨氮)<sup>[7]</sup>。Losordo等<sup>[8-9]</sup>将物质平衡关系应用于循环水养殖系统的设计, 通过假设建立了氨氮产生量的估算方程。目前大部分研究还是基于特定品种和养殖环境的, 本研究的目的是通过文献的收集和整理, 建立适合于循环水养鱼系统设计的氨氮产生量估算模型。

## 1 估算方法

### 1.1 估算模型的建立

鱼类主要是通过鳃排出氨氮, 只有少量是随尿液排出<sup>[10-12]</sup>。在大多数情况下, 氨氮是最主要的排泄物, 氨氮占总氮的比例在 80% ~

收稿日期: 2012-09-06 修回日期: 2012-10-03

基金项目: 国家科技支撑计划课题“节能环保型循环水养殖工程装备与关键技术研究”(2011BAD13B04); 科研院所技术开发研究专项项目“节能型高密度循环水养殖系统关键技术研究示范”(2010EG134287)

作者简介: 刘晃(1973—), 男, 副研究员, 硕士, 主要从事水产养殖工程研究。E-mail: liuhuang@fmiri.ac.cn

98% 之间<sup>[4, 13-14]</sup>。因此,可以近似地认为养殖鱼排出氮污染物全都转化为氨氮,这样计算的结果可能会比实际的情况数据偏大一些,但是这也是符合系统设计中数据选择时,要尽可能确保安全运行的基本原则。氨氮在养殖水体中主要以非离子态氨( $\text{NH}_3$ )和离子态氨 $\text{NH}_4^+$ 两种形式存在,其中,水体中溶解性的非离子态氨,不带电荷,容易穿过生物膜,引起总铵态氮对鱼类胁迫毒害<sup>[15]</sup>,一般认为非离子态氨( $\text{NH}_3$ )的毒性比较大。在氨氮浓度( $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ )一定的条件下,非离子态氨和离子态氨之间的比例会随着温度和 pH 值改变,在循环水养殖系统设计中一般使用氨氮浓度来表示<sup>[8]</sup>。因此,水体中的氨氮浓度是水产养殖中一个需要控制的重要因素之一,也是循环水养鱼系统设计中的关键点。循环水养殖系统中氨氮产生量也就可表示为:

$$P_{\text{TAN}} = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, \dots) \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{TAN}}$ —氨氮产生量(kg/d);  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ —鱼类品种、体重、饲料、养殖方式、溶氧、温度等因素。

许多研究表明,在摄食时,鱼的排泄率主要受摄食率的影响,温度的作用较小,而体重几乎没有影响,摄食鱼的排泄率与摄食率成直线关系<sup>[10, 16-17]</sup>。因此,氨氮产生量可以用投喂速率和饲料中蛋白质百分比来表示。循环水养鱼系统中鱼类的新陈代谢和饲料残饵的生物降解决定了氮污染物的产生量,如果假设循环水养鱼系统中设计合理,每次投喂到鱼池中的饲料能及时地被养殖鱼摄食,并且养殖鱼排泄的粪便能在未被分解就快速的排出系统。这样就可以将饲料残饵生物降解的影响因素忽略不计,基于物质平衡原理和之前的假设,即可以得到氨氮产生量的计算公式如式(2):

$$P_{\text{TAN}} = \alpha \times FA \times PC \times 0.16 \times \eta \quad (2)$$

式中:  $\alpha$ —安全系数,一般可以选择 1.2 ~ 1.6;  $FA$ —每天投喂的饲料量(kg/d);  $PC$ —饲料中蛋白质的含量(%); 0.16—系数,饲料蛋白质中氮的含量为 16%;  $\eta$ —鱼类摄食单位饲料通过代谢产生氮污染物转化率(%)。

这样氨氮产生量就可以通过循环水养殖系统

的投喂量、饲料中蛋白质的含量和氨氮转化率计算得到。

## 1.2 精度检验

模型精度是指估算模型拟合的好坏程度,即由估算模型所得到的值与实际值拟合程度的优劣。精度可以采用绝对误差、相对误差、方差或标准差表示。本模型采用相对误差来表示,同时考虑到工程设计中要增加安全系数,以保证在特殊情况下也能保证系统稳定运行,因此在计算模型精度是要扣除安全系数的影响,计算公式如式(3):

$$MPE = [(y_j - \hat{y}_j) / \hat{y}_j] \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $MPE$ —相对误差(%);  $y_j$ —检验实验值(kg/d);  $\hat{y}_j$ —模型估算值(kg/d)。

## 2 计算实例

以设计一套年产 50 t 罗非鱼(*Tilapia*) 工厂化循环水养鱼系统为例,每年生产 2 个批次,收获时的规格为平均 500 g/尾。每个批次的最大生物量为 25 t,设计养殖密度为 50 kg/m<sup>3</sup>。

### 2.1 罗非鱼养殖资料

罗非鱼养殖初期饲料中蛋白质含量开始应为 32% ~ 35%,每天投饲量为鱼体总重量的 3% ~ 5%。当个体规格长至 200 g 左右,投饲量可调至鱼体总重的 2%,并保证饲料中蛋白质含量在 27% ~ 29%。当其个体达到 300 g 左右时,罗非鱼进入生长最快的时期,日投饲量保持在鱼体重的 1% ~ 2%,饲料中蛋白质含量在 35% 以上<sup>[18]</sup>。在系统设计时一般要考虑最大负荷量,因此本例中选择日投饲量为鱼体重的 2%,饲料中蛋白质含量为 35%。

### 2.2 罗非鱼的氮污染物转化率

根据杨严鸥等<sup>[19]</sup>的研究报道,奥尼罗非鱼的氮污染物转化率为 62.93% ~ 64.45%。在系统设计时一般要考虑最大负荷量,因此本例中氮污染物转化率选择为 65%。

### 2.3 氨氮产生量的估算

考虑到本循环水养鱼系统中采用的物理过滤设施较为完备,安全系数( $\alpha$ )选取为 1.4,并将收集文献资料得到的有关设计参数整理后,见表 1。

表 1 设计参数  
Tab. 1 Design parameter

参数	数值
最大生物量 $BM/\text{kg}$	25 000
收获规格 $FW/(g/\text{尾})$	500
投喂率(占体重) $FR/\%$	2
饲料中蛋白质含量 $PC/\%$	35
安全系数 $\alpha$	1.4
氮污染物转化率 $\eta/\%$	65

计算过程如下:

(1) 每天投喂饲料量的计算

$$FA = BM \times FR = 25\,000 \times 2\% = 500 (\text{kg/d})$$

(2) 每天氮氮产生量的计算

$$P_{\text{TAN}} = \alpha \times FA \times PC \times 0.16 \times \eta = 1.4 \times 500 \times 35\% \times 0.16 \times 0.65 \approx 25.48 (\text{kg/d})$$

因此,本例中循环水养殖系统每天的氮氮产生量为 25.48 kg。

#### 2.4 精度检验

根据本例设计得到的一套罗非鱼(*Tilapia*)工厂化循环水养鱼系统在实际生产中得到的氮氮产生量约为 17.70 kg/d。则相对误差为:

$$\text{MPE} = [17.70 - (25.48/1.40)] / 17.70 \times 100\% = -2.8\%$$

本例中的相关误差为 -2.8%,估算值与实际值比较接近,而且在考虑安全系数的情况下估算值比实际值大不少,这符合工程设计中应遵循的安全优先的设计原则。

### 3 讨论

#### 3.1 关于安全系数的选择

循环水养殖系统最重要的功能是为养殖动物提供一个健康的环境。系统需要有不同的装置处理污染物,以保持水质干净,有充足的氧气、适宜的温度范围和恰当的水化学参数。在循环水养殖系统中,一般通过生物过滤器的硝化作用,也就是利用硝化细菌将水中的氨氮氧化成几乎没有毒性的硝酸盐<sup>[20]</sup>。因此,氮氮产生量的估算关系到循环水养殖系统中关键环节生物过滤器的配置。在氮氮产生量估算模型中的假设之一是每次投喂到鱼池中的饲料能及时得被养殖鱼摄食,并且养殖鱼排泄的粪便能在未被分解就快速的排出

系统。在系统设计一般是考虑到在最恶劣条件下,系统也能保证正常运行,这就需要有一个安全系数。在选择安全系数时,一般取决于设计人员的经验,主要是考虑系统设计时所选用的物理处理工艺,如果系统采用的物理处理方法比较完整,设有多重过滤措施,鱼排泄的粪便就能及时充分的被去除,安全系数就可以选择小一点,可以是 1.2 ~ 1.4; 如果系统采用的物理处理方法比较简单,鱼排泄的粪便去除的效果就不一定太理想,安全系数就要选择大一点,可以是 1.4 ~ 1.6。

#### 3.2 关于氮污染物转化率的确定

鱼类代谢的氮排泄物受到如鱼类品种、体重、饲料、养殖方式、溶氧、温度等因素的影响,在现有的研究报道中,由于实验条件的差异,鱼类氮污染物转化率的差别很大,从 13.3% ~ 84.8% 不等,但大多数是在 60% ~ 85%<sup>[10, 21-25]</sup>。因此,在系统设计中氮污染物转化率确定是十分重要的。目前的氮污染物转化率的确定方法主要有两种,一是通过收集相关的研究报道,从中找到与系统设计计划选择的养殖品种、体重、饲料、养殖方式、溶氧、温度相似的有关数据,其中最关键影响因素是养殖品种,来确定系统设计中所需的氮污染物转化率;二是可以进行小规模模拟实验来获得系统设计中所需的氮污染物转化率,实验可以参考 Solomon 和 Brafield 设计的装置<sup>[26]</sup>进行。方法一比较简单,但是数据可能误差会大一些,方法二较为复杂,但数据比较准确。对于一般性项目可以先采用方法一,通过文献检索收集相关资料,如果未能找到有价值的文献,再采用方法二进行模拟试验取得相关的数据。但是,对于比较重要的项目,还是直接采用方法二进行模拟试验以取得更加准确的数据。

### 4 结论

基于物质平衡原理,同时假设每次投喂到鱼池中的饲料能及时得被养殖鱼摄食,并且养殖鱼排泄的粪便能在未被分解就快速排出系统,得到氮氮产生量的估算模型。氮氮产生量与循环水养殖系统的投喂量、饲料中蛋白质的含量和氮污染物的转化率成正比。在实际应用中该模型能较准确的估算出循环水养殖系统中的氮氮产生量,而且在考虑安全系数时,估算值与实际值比较接近,

而且估算值比实际值大,符合工程设计中应遵循的系统安全优先的设计原则。□

### 参考文献

- [1] 陈军,徐皓,倪琦,等.我国工厂化循环水养殖发展研究报告[J].渔业现代化,2009,36(4):1-7.
- [2] 李谷,吴振斌,侯燕松,等.养殖水体氮的生物转化及其相关微生物研究进展[J].中国生态农业学报,2006(1):11-15.
- [3] 王桂芹.鱼类蛋白质营养生理的研究[M].长春:吉林大学出版社,2011:1-52.
- [4] ELLIOTT J M. Energetics of freshwater teleosts[C]// Miller P J. Fish phenology: anabolic adaptiveness in teleosts. London: Academic Press for the ZSL, 1979:29-61.
- [5] 崔奕波.鱼类生物能量学的理论与方法[J].水生生物学报,1989(4):369-383.
- [6] 王彦波,许梓荣,邓岳松.水产养殖中氨氮和亚硝酸盐氮的危害及治理[J].饲料工业,2002(12):46-48.
- [7] 刘晃,陈军,倪琦,等.基于物质平衡的循环水养殖系统设计[J].农业工程学报,2009,25(2):161-166.
- [8] TIMMONS M B, LOSORDO T M. Aquaculture Water Reuse Systems: Engineering Design and Management[M]. Amsterdam: Elsevier, 1994:9-60.
- [9] LOSORDO T M. An introduction to recirculating production systems design: Engineering Aspects of Intensive Aquaculture [C]// WANG J. Engineering Aspects of Intensive Aquaculture. Ithaca, NY: Northeast Regional Agricultural Engineering Service, 1991:32-47.
- [10] BEAMISH F W H, THOMAS E. Effects of dietary protein and lipid on nitrogen losses in rainbow trout, *Salmo gairdneri* [J]. Aquaculture, 1984, 41(4):359-371.
- [11] SAYER M D J, DAVENPORT J. The relative importance of the gills to ammonia and urea excretion in five seawater and one freshwater teleost species[J]. Journal of Fish Biology, 1987, 31(4):561-570.
- [12] SMITH H W. The excretion of ammonia and urea by the gills of fish [J]. Journal of Biological Chemistry, 1929, 81(3):727-742.
- [13] 周洪琪,潘兆龙,李世钦,等.摄食和温度对草鱼氮排泄影响的初步研究[J].上海水产大学学报,1999(4):293-297.
- [14] 线薇薇,朱鑫华.梭鱼标准代谢、内源氮排泄与体重和温度的关系[J].青岛海洋大学学报:自然科学版,2002(3):368-374.
- [15] 樊英鑫,荣冬青,陈叙光,等.非离子态氮对金鱼藻生长与生理特性的影响[J].河北北方学院学报:自然科学版,2009(2):36-41.
- [16] SAVITZ J, ALBANESE E, JEAN EVINGER M, et al. Effect of ration level on nitrogen excretion, nitrogen retention and efficiency of nitrogen utilization for growth in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Journal of Fish Biology, 1977, 11(2):185-192.
- [17] CUI Y, WOOTTON R J. Bioenergetics of growth of a cyprinid, *Phoxinus phoxinus*: the effect of ration, temperature and body size on food consumption, faecal production and nitrogenous excretion [J]. Journal of Fish Biology, 1988, 33(3):431-443.
- [18] 王文彬.罗非鱼养殖技术之五四个关键时间罗非鱼的饲养技巧[J].中国水产,2005(6):48-50.
- [19] 杨严鸥,解绶启,熊邦喜,等.饲料质量对丰鲤和奥尼罗非鱼氮及能量收支的影响[J].水生生物学报,2004(4):337-343.
- [20] 朱松明.循环水养殖系统中生物过滤器技术简介[J].渔业现代化,2006(2):16-18.
- [21] 李军,徐世宏,薛玉平.日粮水平对黑鲟幼鱼氮收支的影响[J].海洋与湖沼,1998(4):368-373.
- [22] 孙耀,张波,郭学武,等.鲈鱼能量收支及其饵料种类的影响[J].海洋水产研究,1999(2):96-100.
- [23] 孙耀,张波,唐启升.摄食水平和饵料种类对黑鲟能量收支的影响[J].海洋水产研究,2001(2):32-37.
- [24] 孙丽华,陈浩如,黄洪辉,等.摄食水平和饵料种类对军曹鱼幼鱼生长及氮收支的影响[J].热带海洋学报,2010(4):94-101.
- [25] 孙耀,张波,陈超,等.摄食水平和饵料种类对3种海洋鱼类生长和生长效率的影响[J].中国水产科学,2000(3):41-45.
- [26] SOLOMON D J, BRAFIELD A E. The Energetics of Feeding, Metabolism and Growth of Perch (*Perca fluviatilis* L.) [J]. Journal of Animal Ecology, 1972, 41(3):699-718.

(下转第15页)

### · 信息 ·

## 挪威研发养殖网箱环境状况实时监测系统

来自挪威海洋研究所、Nofima 和奥斯陆大学的研究人员成功地研发出了测量鲑鱼养殖网箱环境条件的新技术。该套装置能够测量并将数据通过网络连续不断地传送到一个用于分析的数据库中。操作人员能通过互联网实时查看网箱中正在发生的情况。该套装置中,有一个测量浮标被放置在网箱中央,它能在网箱中上下运动,被它用来测量水的温度、含氧量、盐度、叶绿素(荧光)和颗粒物(浑浊度)。另有一个探针用来测量网箱中的水流速度和水质。还有一个专用声纳探测网箱中不同深度水层的鱼类密度。研究人员还研发了能提供有关鲑鱼呼吸型态详细数据的仪器。这一新型装置可以提供远比以往精确的数据,并能让人们更为容易地找到鱼类的各种应激反应、疾病暴发、死亡率增加以及食欲不振的原因。

(www.thefishsite.com)

## Construction and production property analysis of a energy saving water recycling system for *Epinephelus fuscoguttatus* culture

LI Lin-chun<sup>1</sup>, CHEN Fang-ping<sup>1</sup>, YAN Xi-zhu<sup>2</sup>,

SONG Wu-lin<sup>3</sup>, WANG Qi-xin<sup>3</sup>, CHEN Jian-guo<sup>4</sup>, LI Lin-bao<sup>4</sup>

(<sup>1</sup> Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 316012, China;

<sup>2</sup> Fishery College of Jimei University, Xiamen 361021, China;

<sup>3</sup> The General Station of Fishery Technique Promotion of Fujian Province, Fuzhou 350003, China;

<sup>4</sup> The Jianguo Abalone Culture Farm of Zhangpu County, Zhangpu Fujian Province, 363200, China)

**Abstract:** The energy saving water recycling system for *Epinephelus fuscoguttatus* culture consisted of fish pond, protein separator, purifying trough and water recycling pump. The water recycling and purifying facility was built above one side of the fish pond, and each pond had one water recycling and purifying facility correspondingly. During the experiment in eight months, by the comprehensive eco-purification of bio-film degradation and plant absorption, water recycling rate was 88%, the fish yield density was 19.74 kg/m<sup>3</sup>. The daily weight gain of the fish was 1.14 g/(ind·d), and the fish weight gained 11.55 fold. The cost of the purifying facility for per unit water volume and the per unit yield were 507.3 yuan/m<sup>3</sup> and 28.21 yuan/kg respectively. The electric energy consumption of per unit production was 3.813 kW·h/kg, 6.05 yuan/kg. The results showed that the system has a good production property with low cost and energy saving.

**Key words:** energy saving aquaculture; water recycling system; production cost

---

(上接第 10 页)

## Study on estimation model of fish ammonia produce in recirculating aquaculture system

LIU Huang, GU Chuan-chuan

(Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture; Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Recirculating aquaculture is one of the development trends of the future aquaculture. And the system designs are being paid more and more attention. The key of system design is rapid removal of total ammonia-nitrogen. Therefore, the estimation model of fish total ammonia-nitrogen produce is important extremely to system design. Based on the material balance principle, the model to estimate the amount of total ammonia-nitrogen produced was established, assuming that feed have been eaten timely and faces have been removed from system before breaking. In this model, total ammonia-nitrogen produced increased with feeding rate, protein percentage of feed and nitrogen conversion rate. In practical application, the calculated values agree basically with those of actual operation. In consider with the safety factor, the results estimated were greater than actual values, which was accord with the system safety design needs.

**Key words:** recirculating aquaculture system; system design; pollution load; ammonia; estimation model