

# 珠三角养殖池塘水质模型建立及其应用研究\*

周劲风, 温琰茂, 李耀初  
(中山大学环境科学系, 广东 广州 510275)

**摘要:**以珠江三角洲的基塘式精养池塘为例, 经过参数率定、模型验证等工作, 建立了地方性精养池塘的水质模型。模型的验证结果表明模型的模拟基本上重现了养殖生产活动过程中生态系统的变化趋势, 可以为养殖池塘生态系统的研究和辅助地方的养殖管理工作提供一定的参考。利用建立的养殖池塘的水质模型研究了养殖池塘的水质影响因子和养殖容量的影响因素, 研究结果表明: 高密度精养池塘氧气的平衡机制已发生了较大的变化, 鱼类呼吸已成为耗氧的主要组分, 人工增氧的作用已接近甚至超过藻类产氧作用。溶氧浓度易受到各种机制的影响而发生较大的变化。养殖池塘  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  的主要来源是鱼类代谢, 主要消耗是藻类吸收, 二者在水中稳定性好。养殖池塘的养殖容量受到许多因素的影响, 内因有饵料的可消化率和可利用率, 外因有溶氧水平和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的累积等。在精养池塘, 随着饵料消化率提高, 主养鱼容量迅速增长, 最终受制于 DO 的不足和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的累积, 套养鱼容量随着主养鱼类的饵料利用率降低而增加, 最后受制于 DO 的不足。如果采用轮放, 轮捕的养殖方式, 将会更充分的利用养殖空间, 进一步扩大养殖容量。

**关键词:** 养殖池塘; 水质模型; 基塘; 珠江三角洲

中图分类号: S953.9 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2010)01-0119-06

## Establishment of Water Quality Model of Farming Ponds in the Pearl River Delta and its Application

ZHOU Jingfeng, WEN Yanmao, LI Yaochu

(Department of Environment Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The intensive hike-ponds in the Pearl River Delta are taken to establish a water quality model for pond farming. The results of model verification indicate that the simulation of the model fits the real situation well and it can be used as a research tool for pond aquaculture ecosystem or as a decision support tool for the management of pond farming. The model established is used to research main factors affecting the water quality and the carrying capacity of farming ponds. Results show that DO is generated mainly from phytoplankton photosynthesis and artificial oxygen enhancement, and consumed mainly by fish respiration. DO contents are influenced by various factors. TAN and SRP are generated mainly from fish metabolization and consumed mainly by absorption of phytoplanktons. They change much slowly compared with DO. The farming capacity of the farming ponds is influenced by many factors, including internal factors such as feed digestion and utilization and external factors such as the DO level and the TAN accumulation. The farming capacity of the mainly farmed fish increases with the increase of feed digestion rate and is restricted by the lack of DO and the high TAN concentration. The farming capacity of secondarily farmed fish increases with increasing availability of the heterotrophic feed caused by the decrease of digestion of feed for mainly farmed fish, and is restricted by the lack of DO. Mixed, rotational fishing model makes full exploitation of farming space, which can further extend the farming capacity in fish

\* 收稿日期: 2008-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40071074)

作者简介: 周劲风(1970年生), 女, 博士, 讲师; E-mail: zhoujinf@mail.sysu.edu.cn

ponds.

**Key words:** farming pond; water quality model; hike-pond; the Pearl River Delta

池塘养殖在我国具有悠久的历史,我国劳动人民在长期的实践中总结了许多科学合理的养殖经验,但一直缺乏系统研究。钟功甫等对珠江三角洲的基塘综合养殖系统开展了连续多年的现场调查和定点实测,获得了关于综合养殖的大量的基础数据,从能量流动和物质循环角度出发,建立了基塘立体种养的理论,提出了几种立体种养模式,探讨了通过人工调控和管理以实现种养系统的社会效益、生态效益和经济效益的最大化<sup>[1-2]</sup>。在养殖生产力迅速提高的今天,传统的经验已经不能有效地解决新的养殖模式下出现的环境问题。比如高密度投饵养殖,养多少才合适,怎样考虑混养问题,水质效果如何。养殖业急需科学的、定量的、预测性的养殖理论和决策支持工具。本文以目前珠江三角洲基塘地区典型的池塘养殖为研究对象,经过大量

文献调研工作和实地定点调查,建立了该地区的池塘养殖模拟模型,讨论了模型在池塘养殖管理方面的应用情况。

## 1 模型建立

### 1.1 概念模型

珠江三角洲基塘地区的养殖池塘,一般采用的是精养加套养的养殖模式,精养品种以人工饵料为食,套养品种则以浮游生物和有机碎屑等天然饵料为食。因此模型的生物部分考虑两条食物链,第一条是饵料—主养鱼,第二条是浮游生物、有机碎屑—套养鱼类;非生物组分考虑了影响池塘水质的几个关键因子,即氧,氨氮,无机磷酸盐,底泥中的总氮、总磷,池塘养殖的生态动力学概念模型见图 1。

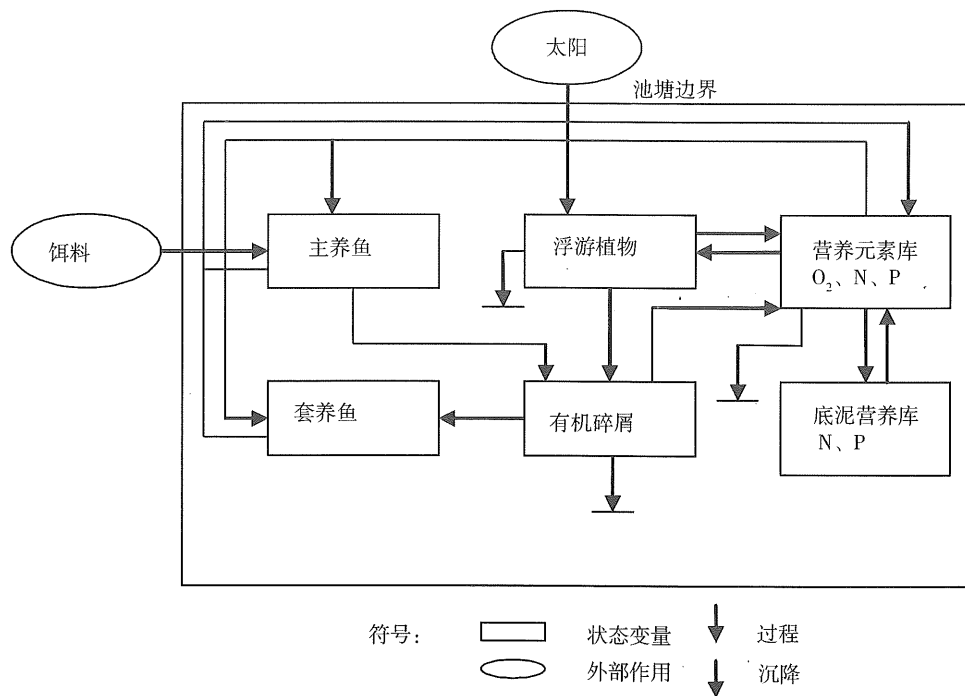


图 1 养殖池塘生态动力学概念模型

Fig. 1 Conceptualization of ecological and dynamical model for farming ponds

模型的状态变量包括主养鱼 (kg)、套养鱼 (kg)、浮游植物 (mg/L)、有机碎屑 (mg/L)、氧 (mg/L)、氨氮 (mg/L)、无机磷酸盐 (mg/L)、底泥中的总氮 (kg)、总磷 (kg)。动力学过程主要包括鱼类的生长、天然饵料的生成、氧平衡、氮平衡、磷平衡等,动力学过程的数学方程参见文

献<sup>[3]</sup>的相关表述。

### 1.2 模型实现和参数率定

典型池塘的调查期为 2002 年 3 月—2003 年 1 月,调查池塘 A1 和 A2,水面面积为 0.45 hm<sup>2</sup> 左右,水深为 1~2 m,在调查期内,主养加州鲈 (largemouth bass *Micropterus salmoides*),配套养殖

鳙鱼 (Bighead carp *Aristichthys nobilis*)。加州鲈的主要饵料是冷冻鲮鱼 (Mud carp *Cirrhinus molitorella*)，饵料系数约为 3.5，当年养殖产量约为  $1.8 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。养殖生产和池塘水质的调查内容见文献<sup>[4]</sup>。模型通过拟合 A1 池塘的养殖产量和水质情况来率定模型参数。

模型中涉及的参数众多，本研究根据当地养殖生产数据和实测水质数据率定的参数有， $\text{PO}_4^{3-}$  的沉降系数 ( $\text{cm}/\text{d}$ )  $k_{ps}$  60，底泥 N、P 的扩散速率 ( $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ )  $r_{\text{SN}}$  30,  $r_{\text{SP}}$  8，硝化系数  $k_m$  ( $1/\text{d}$ ) 0.2，沉降系数和分解系数 ( $1/\text{d}$ )  $k_s$  0.10,  $k_d$  0.10，鱼类的消化代谢系数和禁食代谢系数 ( $1/\text{d}$ )， $k_{\text{feed}}$  0.48,  $k_{\text{fast}}$  0.50，其他参数主要来自于文献研究成果。

模型方程采用欧拉公式进行数值求解<sup>[5]</sup>，步长为 1 d，模型输入为投饵量，光照，养殖池塘的特征参数和各状态变量由实际调查值给出。

### 1.3 模型的验证

模型的验证采用同期观测的 A2 养殖池塘的生产数据和水质观测数据。

模拟值和实测值的相对误差用误差系数 RE 来衡量， $\text{RE} = 2 \times (\text{SSIM} - \text{SOBS}) / (\text{SSIM} + \text{SOBS})$ ，SSIM 表示模拟值，SOBS 表示实测值，用这种方法是考虑到实测值和模拟值都是真实值的近似值<sup>[6-7]</sup>。模拟值和实测值的相对误差统计见表 1。

表 1 模拟值和实测值的相对误差频率统计

Table 1 Statistics of relative errors of simulated and monitored values

| 指标                         | <0.2 | 0.2~0.5 | 0.5~1 | >1   |
|----------------------------|------|---------|-------|------|
| $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | 1    | 0       | 0     | 0    |
| $\text{PO}_4^{3-}$         | 0    | 0.8     | 0.2   | 0    |
| DO                         | 0.6  | 0.2     | 0.2   | 0    |
| 浮游植物                       | 0.25 |         | 0.25  | 0.50 |

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的模拟效果最好，相对误差在 0.2 以下的频率为 1，DO 次之，相对误差在 0.2 以下的频率为 0.6， $\text{PO}_4^{3-}$  的模拟效果稍差，相对误差在 0.2~0.5 的频率为 0.8，浮游植物的模拟效果最差，相对误差 >1 的频率为 0.5。

DO 的模拟值在前期普遍高于实测值，这可能是高估了人工增氧造成的，后期同实测较接近，是因为人工增氧在后期较稳定，增氧开动的的时间较固定。 $\text{PO}_4^{3-}$  的模拟值大都高于实测值，这可能是对

其沉降系数估计偏低所致。浮游植物的模拟值都高于实测值，这可能是没有准确估计养殖管理的干扰，如泼洒硫酸铜、杀虫药等对藻类的影响。

考虑到人工生态系统中人为因素影响较大，且系统稳定性差，水质易发生较大的变化，还有实测数据的数量偏少，给参数率定带来一定的影响等因素，但仍基本上重现了养殖生产活动中生态系统的变化趋势，可以作为进一步养殖池塘生态系统的研究和用于指导和辅助地方养殖管理的参考。

## 2 模型应用

### 2.1 养殖池塘的水质影响因素

用上述模型模拟了观测池塘 6-10 月的水质变化情况，以每月 15 日的模拟结果来分析影响水质的各种机制在养殖期的强弱变化情况，见表 2。模拟结果表明，养殖池塘 DO 的主要来源是浮游植物产氧和人工增氧，二者在数值上相当，除了在 8 月浮游植物产氧量 ( $6.17 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ) 略大于人工增氧 ( $6 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ )，其他时间都是人工增氧略占优势，说明人工增氧已是精养池塘重要的增氧措施。DO 的主要消耗是养殖鱼类的呼吸，与其他消耗量相比占绝对优势，而且几乎是浮游植物产氧量的 2 倍，可以说精养养殖就是增氧养殖。溶氧在水中的浓度与各种消长机制的浓度速度相比是较小的，P/B (生产量/现存量) 约为 2.5，所以易受到各种机制的影响而发生较大的变化。

养殖池塘  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的主要来源是鱼类代谢 (占到 80% 左右)，主要消耗是藻类吸收和硝化作用，二者在量值上相当。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在水中的浓度较大，P/B 约为 1/3，说明稳定性强，各机制对它影响力较小。

养殖池塘  $\text{PO}_4^{3-}$  的主要来源是鱼类代谢 (占到 80% 以上)， $\text{PO}_4^{3-}$  的主要消耗是沉淀作用和藻类吸收，沉淀作用消耗的  $\text{PO}_4^{3-}$  大约是藻类吸收的 3~4 倍。 $\text{PO}_4^{3-}$  在水中的浓度较为稳定，P/B 约为 1，沉淀作用与鱼类代谢作用强度相当。

浮游植物对水质的影响可通过模拟其生产量增加 10% 对养殖生产的影响来说明，见表 3。从表 3 可见，如果浮游植物的生产量增加 10%，则溶解氧增幅为 3%， $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  降幅为 25%，水层中的有机物增加 11%，沉降的有机物量增加 11.5%。溶解氧虽然略有增加，但水层和底层的氧亏增加了 11%，所以浮游植物的生产量增加对水体溶氧环境没有根本的改善作用，但对水中的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的减少具有较明显的作用。在优质鱼养殖池塘中，浮游

植物的饵料作用已大大减弱, 但它在维持养殖生态系统的稳定和净化水质方面的功能是不能忽视也不能替代的, 前面的模拟研究结果也表明, 浮游植物

是溶氧的重要贡献者, 是池水中营养盐的主要净化者, 因此, 保持养殖池塘浮游植物的稳定是养殖管理工作的一项重要任务。

表 2 养殖期内影响水质的各种机制的消长情况<sup>1)</sup>

Table 2 The increasing and decreasing mechanisms of DO in farming ponds

| 水质因子及消长机制                       | 时间                                 |           |           |           |            |         |
|---------------------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|---------|
|                                 | 2002-6-15                          | 2002-7-15 | 2002-8-15 | 2002-9-15 | 2002-10-15 |         |
| DO                              | DO 浓度                              | 4.6       | 5.35      | 4.82      | 6.92       | 4.73    |
|                                 | 藻类产氧                               | 5.65      | 6         | 6.17      | 5.54       | 5.26    |
|                                 | 人工增氧                               | 6         | 8         | 6         | 8          | 8       |
|                                 | 大气溶解                               | 0.85      | 1.15      | 0.55      | 0.9        | 0.97    |
|                                 | 鱼类呼吸                               | 10.33     | 12.2      | 11.49     | 10.36      | 12.13   |
|                                 | 藻类呼吸                               | 1.13      | 1.2       | 1.23      | 1.11       | 1.05    |
|                                 | 有机碎屑呼吸                             | 1.32      | 0.27      | 1.06      | 0.75       | 0.78    |
|                                 | 底泥呼吸                               | 0.29      | 0.29      | 0.29      | 0.29       | 0.29    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 浓度 | 1.8       | 2         | 1.91      | 1.77       | 2.35    |
|                                 | 鱼类代谢                               | 0.63      | 0.74      | 0.7       | 0.63       | 0.74    |
|                                 | 藻类代谢                               | 0.09      | 0.1       | 0.1       | 0.09       | 0.08    |
|                                 | 其他生物代谢                             | 0.09      | 0.02      | 0.07      | 0.05       | 0.05    |
|                                 | 底泥交换                               | 0.02      | 0.02      | 0.02      | 0.02       | 0.02    |
|                                 | 藻类吸收                               | 0.45      | 0.48      | 0.49      | 0.44       | 0.42    |
|                                 | 硝化                                 | 0.46      | 0.42      | 0.59      | 0.45       | 0.56    |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>   | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> 浓度   | 0.072 6   | 0.081 8   | 0.078 7   | 0.071 0    | 0.085 4 |
|                                 | 鱼类代谢                               | 0.073 8   | 0.087 2   | 0.082 1   | 0.074 0    | 0.086 7 |
|                                 | 浮游植物代谢                             | 0.004 4   | 0.004 3   | 0.004 4   | 0.004 0    | 0.003 8 |
|                                 | 其他生物代谢                             | 0.004 7   | 0.001 0   | 0.003 8   | 0.002 7    | 0.002 8 |
|                                 | 底泥交换                               | 0.005 3   | 0.005 3   | 0.005 3   | 0.005 3    | 0.005 3 |
|                                 | 浮游植物吸收                             | 0.020 2   | 0.021 4   | 0.022 0   | 0.019 8    | 0.018 8 |
|                                 | 沉淀                                 | 0.068 6   | 0.076 3   | 0.072 5   | 0.066 2    | 0.079 7 |

1) 浓度单位为 mg·L<sup>-1</sup>, 过程单位为 mg·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>

## 2.2 养殖容量的影响因素研究

### 2.2.1 饵料消化率和配套养殖量的敏感性分析

饵料消化率和配套养殖量对养殖生产的影响情况可通过敏感性分析得出, 见表 3。

饵料消化率提高 10%, 则在保证鱼产量不降低的情况下, 只需投入原来投饵量的 88%。在这种投饵水平下, 套养鱼产量增加了 11%, 主养鱼维持原来水平, 溶解氧上升了 23%, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 减少了 45%, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 减少了 18.7%, 水中有机物减少了 8.2%, 底泥中有机物减少了 8.6%。溶解氧上升的原因是有机碎屑呼吸消耗减少了 23%, 鱼的呼吸消耗减少了 17%。鱼的呼吸包括两部分, 一是鱼的消化呼吸, 二是鱼的最低代谢呼吸, 因为饵料的消化率提高减少了鱼的消化呼吸, 虽然增加了鱼的禁食代谢呼吸, 但前者的减少大大超过后者的

增加, 故而鱼的呼吸总体上表现为明显的下降。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 减少的非常明显, 一方面是因为来源减少了, 另一方面是因为溶氧水平的提高增大了硝化作用, 在这两种作用下, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 表现为大幅下降。水中有机物浓度和底泥中有机物是潜在的耗氧大户, 只是因为水中溶氧条件的限制使得它们以氧亏的方式存在, 但它们的耗氧潜力是巨大的, 对水质有很大的威胁。因此提高饵料消化率对水体的溶氧环境有较好的改善作用。

配套养殖的鳙鱼增加 10% 的投放量, 则其养殖生产量增加 11%, DO 略有减少, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 减少了 18.7%, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、水层中的有机物、沉降的有机物量略增。DO 略有减少的原因是虽然有机碎屑呼吸减少了约 10%, 但鱼的呼吸增加了 1.6%, 鱼的呼吸增加的比率虽然小, 但基数大, 所以使得 DO

略有减少, 所以配套养殖要考虑 DO 的压力。增加配养鱼投放量对水体的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  减少有一定的作用, 因为配养鱼吞食了大量的的浮游生物 (饵料系

数约为 40), 浮游生物的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  排泄量减少的作用大过鱼排泄量增大的作用, 使得水体的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  减少。

表 3 浮游植物、饵料消化率和套养量的敏感性分析

Table 3 Sensitivity analysis of phytoplankton biomass, feed digestion and secondary fish biomass

| 敏感分析因子 | 指 标                                    | 原来                         | 现在    | 效果/%  |       |
|--------|--|----------------------------|-------|-------|-------|
| 浮游植物   | $\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | DO                         | 5.31  | 5.47  | +3    |
|        |  | $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | 1.87  | 1.4   | -25   |
|        |  | $\text{PO}_4^{3-}$         | 0.075 | 0.074 | 略减    |
|        | $m/\text{kg}$                          | 水层中有机物                     | 290   | 327   | +11   |
|        |  | 沉降的有机物                     | 115   | 130   | -11.5 |
|        |  | 鱼产量                        | 7757  | 8641  | +11   |
| 饵料消化率  | $\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | 1.87  | 1.02  | -45   |
|        |  | $\text{PO}_4^{3-}$         | 0.075 | 0.061 | -18.7 |
|        |  | DO                         | 5.31  | 6.55  | +23   |
|        | $m/\text{kg}$                          | 有机碎屑耗氧                     | 0.94  | 0.72  | -23   |
|        |  | 鱼呼吸耗氧                      | 10.83 | 9.07  | -17   |
|        |  | 水层中有机物                     | 291   | 267   | -8.2  |
| 套养量    | $\rho/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 沉降的有机物                     | 116   | 106   | -8.6  |
|        |  | 套养鱼产量                      | 881   | 982   | +11   |
|        |  | DO                         | 5.31  | 5.27  | 略减    |
|        | $m/\text{kg}$                          | $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | 1.87  | 1.52  | -18.7 |
|        |  | $\text{PO}_4^{3-}$         | 0.075 | 0.075 | 不变    |
|        |  | 有机碎屑耗氧                     | 0.94  | 0.85  | -9.6  |
|        | 鱼呼吸                                    | 10.83                      | 11    | -1.6  |       |
|        | 水层中有机物                                 | 291                        | 299   | 略增    |       |
|        | 沉降的有机物                                 | 116                        | 119   | 略增    |       |

2.2.2 养殖容量的影响因素分析 从上面的分析可以看出, 养殖池塘的养殖容量受到许多因素的影响, 饵料的可消化率和可利用率的对养殖的产量有很大的影响, 这是决定养殖产量的内因, 但养殖产量又要受到环境条件的制约, 如溶氧水平和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的累积等。有关研究表明, 养鱼池混养多种鱼类后, 总鱼产量大幅度地提高了, 鱼产量达到  $0.75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的已不罕见, 少数单产达到  $2.25 - 3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。在人工增氧条件下, 单养鲤可得到日产  $14.2 \text{ g}/\text{m}^2$  的产量, 单养罗非鱼得到  $16.7 \text{ g}/\text{m}^2$ , 但始终不能达到流水池塘和网箱的单产水平, 这是因为当鱼类达到一定密度后, 种群代谢产物的积累将成为抑制生长和限制单产的主导因素<sup>[8]</sup>。

对于封闭的精养池塘, 鱼类的呼吸和排泄作用非常强, 虽然可以通过人工增氧的途径从很大程度上缓 DO 的限制, 但对于  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的累积问题却不能很有效的解决。目前养殖池塘  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除

机制主要靠浮游植物的吸收作用和硝化作用, 浮游植物的吸收作用取决于浮游植物的生长水平, 在温度和营养盐的影响可忽略的情况下, 浮游植物的生产力受制于光照条件, 因此其对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的吸收作用是有限的; 硝化作用的强度又依赖于 DO 水平的高低, 在 DO 水平也不可能无限提高的情况下, 硝化作用的强度也是有限的。

综上所述, 设定精养池塘的养殖容量的环境限制性因子是 DO 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , 取  $\text{DO} > 3.0$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N} < 2.8$  为限制条件, 假设投饵量是根据鱼类的生长要求确定的, 主养鱼的养成规格为  $0.5 \text{ kg}$ , 人工增氧的最高值每天为  $8 \text{ mg}/\text{L}$ , 不考虑养殖期间的捕捞和轮放活动, 利用本章模型模拟了在不同的饵料消化率下养殖池塘的最大养殖容量, 见表 4。

从表 4 可以看出, 随着饵料消化率从 60% 提高到 90%, 主养鱼容量几乎增长了 1 倍, 在低消化率水平下, 主养鱼的生长受到饵料不足的制约, 在高消化率水平下, 主养鱼养殖容量受到代谢物

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的制约;套养鱼容量与主养鱼容量呈相反的趋势,在主养鱼容量最低时,套养鱼容量最高,在主养鱼容量最高时,套养鱼容量最低,在饵料消化率较高时,套养鱼容量受到天然饵料不足的限制,在饵料消化率较低时,套养鱼容量受到 DO 条件的限制。

表4 不同饵料消化率下养殖池塘的养殖容量

Table 4 Carrying capacities under different feed digestion in farming ponds

| 饵料消化率/% | 养殖容量<br>( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) |       |
|---------|--|-------|
|         | 主养鱼容量  | 套养鱼容量 |
| 90      | 21 684                                       | 1 965 |
| 80      | 20 436                                       | 2 456 |
| 70      | 18 630                                       | 3 036 |
| 60      | 10 526                                       | 4 026 |

模拟结果表明,养殖池塘的最大养殖容量可达到  $2.35 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,比报道的同类养殖池塘的最大鱼产力 ( $3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) 稍小。在模拟过程中发现,只有在养殖后期,随着养殖生物量的增加,DO 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  才逐渐成为养殖的限制因子,如果采用轮放,轮捕的养殖方式,将会进一步扩大养殖容量。

本模型只考虑了 DO 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  作为鱼养殖容量的环境制约因子,实际上养殖容量还要受到许多未知因素诸如种群代谢废物等的影响,对于其影响机制尚需进行大量实验,深入研究;而本模型也需要进一步完善,在模型结构上增加反映鱼类环境生理的系列参数。

### 3 小结

(1) 模型主要研究养殖池塘的两条食物链和影响水质的几个关键因子—溶氧,氨氮,无机磷酸盐之间的耦合关系,模型对养殖池塘的概化反映了养殖池塘主要的生态过程,模型的验证结果表明模型的模拟基本上重现了养殖生产活动过程中生态系统的变化趋势。

(2) 模型的模拟结果表明:养殖池塘溶氧主要来源于人工增氧和藻类产氧作用,鱼类呼吸是耗氧的主要机制,溶氧的 P/B (生产量/现存量) 约为 2.5,其在水中的浓度容易受到各种消长作用的影响而发生较大的变化;养殖池塘  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  的主要来源是鱼类代谢,主要消耗分别是藻

类吸收和沉淀作用,P/B 值分别为 1/3 和 1,二者的浓度在水中不易发生较大的变化。

(3) 养殖池塘的养殖容量受到许多因素的影响,包括饵料的可消化率和可利用率以及环境条件,如溶氧水平和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的累积等。在精养池塘,随着饵料消化率提高,主养鱼容量迅速增长,最终受制于 DO 的不足和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的累积,套养鱼容量随着饵料消化率降低而增加,最后受制于 DO 的不足。模拟结果表明,只有在养殖后期,随着养殖生物量的增加,DO 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  才逐渐成为养殖的限制因子。

(4) 在优质鱼养殖池塘中,浮游植物的饵料作用已大大减弱,但它在维持养殖生态系统的稳定和净化水质方面的功能是不能忽视也不能替代的,模拟研究结果表明,浮游植物是溶氧的重要贡献者,是池水中营养盐的主要净化者,因此,保持养殖池塘浮游植物的稳定是养殖管理工作的一项重要任务。

### 参考文献:

- [1] 钟功甫,邓汉增,吴厚水,等. 珠江三角洲基塘系统研究[M]. 北京:科学出版社,1987: 65-67,98-115.
- [2] 钟功甫,王增骐,吴厚水,等. 基塘系统的水陆相互作用[M]. 北京:科学出版社,1993:42-49,61-66.
- [3] LI L, YAKUPITIYAGE A. A model for food nutrient dynamics of semi-intensive pond fish culture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2003, 27:9-38.
- [4] 周劲风,温琰茂. 珠江三角洲基塘水产养殖对水环境的影响[J]. 中山大学学报:自然科学版,2004, 43(5): 103-106.
- [5] 韩丹夫,吴庆标. 数值计算方法. 杭州:浙江大学出版社,2006:208-230.
- [6] GALE P M, JIMENEZ, M C J, VERDEGEM, A, et al. Conceptualization and validation of a dynamic model for the simulation of nitrogen transformations and fluxes in fishponds[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 147: 123-152.
- [7] JAMU D M, PIEDRAHITA R H. An organic matter and nitrogen dynamics model for the ecological analysis of integrated aquaculture/agriculture systems: I. model development and calibration[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17:571-582.
- [8] 雷衍之. 无锡市河浮口高产鱼塘水质的研究[J]. 水产学报,1983, 7(3): 185-198.