

鲤鱼摄食生长与呼吸耗氧动态模型的研究

朱松明

(浙江农业大学)

崔引安 吴春江

(北京农业工程大学)

唐素英

(北京市水产科学研究所)

提 要 建立了鲤鱼摄食生长与呼吸耗氧动态模型,并结合网箱养鲤鱼高产试验数据进行了参数估计与模型检验,结果表明模拟值与试验值吻合很好。为高产养鲤鱼的生产管理与经济评估提供了量化依据,为鱼类的摄食生长与呼吸耗氧的研究提供了新的方法。

关键词 鲤鱼 摄食生长 呼吸耗氧 动态模型

1 引 言

随着科学技术的发展,农业生产中量化决策管理的程度越来越高。例如,在集约化养鸡业中,每个鸡种都有一整套严格完整的科学管理数据,使生产过程具有很高的透明度,能够主动明确地进行生产分析与调节管理,从而达到高产高效之目的。

目前,水产养殖业基本还处于经验的、静态的水平,量化分析管理的程度还比较低。就鱼类摄食生产与呼吸耗氧来说,文献中见到的极大多数都是一些经验数据或是比较简单的定量关系。摄食生长取决于饲料的投喂,表面看来投喂饲料是很简单的一件事,其实却包含着很强的科学性与技巧性,它直接影响着饲料报酬、鱼的增重、生产成本与经济效益。鱼的呼吸耗氧是增氧管理,防止缺氧死鱼的重要依据。因此,开展鱼类摄食生长与呼吸耗氧的定量分析研究,对于水产业向高产高效发展,具有重要的理论意义与实用价值。

2 鱼类摄食生长模型

消化吸收过程属于生化反应过程,其反应速度随温度而变化。鱼类是变温动物,其体温约等于水温。因此,鱼的摄食生长与水温密切相关。随着鱼体的长大,鱼的消化吸收器官的尺寸与功能随之增大。所以,摄食生长量也不断增加。此外,鱼类的摄食生长还与其品种、体质以及水质状况等因素有关,当然鱼的体质与水质状况对其摄食生长的影响可以通过强化管理而加以限制或者避免。因此,在正常情况下它们不属于必然的影响因素。有些学者根据消化吸收机理与实验结果提出鱼的最大摄食量与水温呈指数函数关系,与体重呈幂函数关系的论点(Elliott, 1975; 谢小军, 1989^[1]等)。据此,本文提出下列关系式:

$$F = F_0 \cdot \theta_f^{T-20} \cdot W^P \quad (1)$$

式中 F —每条鱼每天的最大摄食量/ $\text{g} \cdot \text{fish}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; F_0 —比例系数; θ_f —为摄食生长的温度底系数; P —为摄食体重指数; T —水温, $^{\circ}\text{C}$; W —鱼体重, g 。

生产上,人们常用日饵率(即每天的摄食量或投饵量与鱼体重量的比值)来描述摄食情

况,则有:

$$f = 100 \frac{F}{W} = 100F_0 \cdot \theta_f^{T-20} \cdot W^{P-1} \quad (2)$$

式中 f 为日饵率, (%)/d。

设 K 为饲料系数(即某一时期的投饵量与鱼体净重的比值),则鱼体的日增重为 F/K , 即:

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{F}{K}$$

取极限后可推得:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{F_0}{K} \cdot \theta_f^{T-20} \cdot W^P$$

一般地,鱼体生长模型可表示为:

$$\frac{dW}{dt} = K_s \frac{F_0}{K} \theta_f^{T-20} W^P \quad (3)$$

式中 t —时间,d; K_s —摄食饱和系数(即实际摄食量与最大摄食量的比值)。

根据生产试验总结,当投喂优质的配合颗粒饲料时,鲤鱼的正常日饵率见表1。若按此表投喂饲料时,饱和系数 $K_s=1$,将式(2)取对数进行线性化处理,并用表1数据进行多元线性回归,可求得各参数的取值如下:

$$F_0 = 0.03516 \quad \theta_f = 1.118 \quad P = 0.842$$

因此,鲤鱼在正常情况下的摄食模型为:

$$F = 0.03516 \cdot 1.118^{T-20} \cdot W^{0.842} \quad (4)$$

鲤鱼生长模型为:

$$\frac{dW}{dt} = 0.03516 \frac{K_s}{K} \cdot 1.118^{T-20} \cdot W^{0.842} \quad (5)$$

表1 高产养鲤日饵率表 (%·d⁻¹)

Tab. 1 The daily feeding rate for high-yield Cyprinus Carpio culture (%·d⁻¹)

| T/°C | 重量 W/g | | | | | |
|------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | 30~50 | 50~100 | 100~200 | 200~300 | 300~500 | 500~700 |
| 15 | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.5 |
| 16 | 1.2 | 1.1 | 1.0 | 0.8 | 0.7 | 0.6 |
| 17 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.0 | 0.9 | 0.8 |
| 18 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.3 | 1.1 | 1.0 |
| 19 | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.2 |
| 20 | 2.0 | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.4 |
| 21 | 2.3 | 2.1 | 2.0 | 1.9 | 1.8 | 1.6 |
| 22 | 2.5 | 2.4 | 2.3 | 2.2 | 2.0 | 1.8 |
| 23 | 2.8 | 2.7 | 2.6 | 2.4 | 2.2 | 2.0 |
| 24 | 3.2 | 3.0 | 2.9 | 2.7 | 2.4 | 2.2 |
| 25 | 3.5 | 3.2 | 3.1 | 3.0 | 2.6 | 2.4 |
| 26 | 3.7 | 3.4 | 3.2 | 3.2 | 2.8 | 2.6 |
| 27 | 4.0 | 3.6 | 3.5 | 3.4 | 3.0 | 2.8 |
| 28 | 4.5 | 3.8 | 3.7 | 3.6 | 3.1 | 3.0 |
| 29 | 5.0 | 4.2 | 3.9 | 3.8 | 3.3 | 3.1 |
| 30 | 6.0 | 4.5 | 4.2 | 4.0 | 3.5 | 3.3 |

3 鱼类呼吸耗氧模型

鱼类呼吸耗氧也属于一种生化反应过程,它与水温、溶解氧浓度、鱼的品种和体重等有关。呼吸耗氧速度与水温的关系一般可用指数函数表示,与体重的关系用幂函数表示(谢小军,1989;Winberg,1956)^[1]。因此,本文提出下列复合关系式:

$$Y = Y_0 \cdot K_c \cdot \theta^{T-20} \cdot W^b \quad (6)$$

式中 Y —呼吸耗氧速度, $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{fish}^{-1}$; Y_0 —比例系数; θ —呼吸耗氧温度底系数; b —呼吸耗氧体重指数; K_c —溶解氧对呼吸耗氧的影响系数。

在生化反应中,反应速度与底物浓度之间的关系常用 Michaelis—Menten 方程表示,对于系数 K_c ,可表示为:

$$K_c = \frac{C}{C_s + C} \quad (7)$$

式中 C —溶解氧浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; C_s —溶解氧半饱和常数, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, (Semi-saturation constant, 见图 2)。

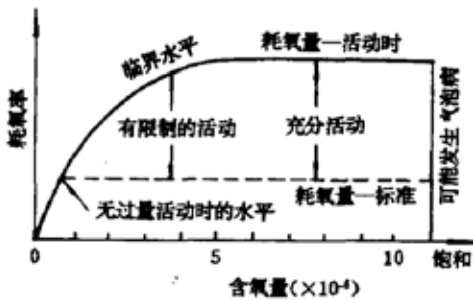


图 1 鱼类呼吸耗氧原理假设图 (Jones, 1964)

Fig. 1 The hypothetic graph on principle of fish respiration (Jones, 1964).

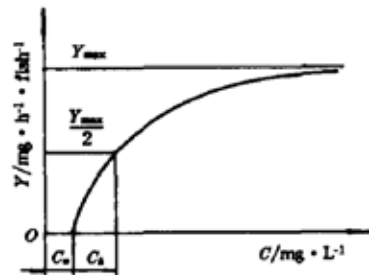


图 2 鱼类呼吸的溶氧窒息点与半饱和常数 Fig. 2 DO suffocating value and semi-saturation constant of fish respiration.

Jones(1964)曾提出了鱼类呼吸耗氧原理的假设图(见图 1)^[2],以说明溶氧浓度与鱼类呼吸耗氧的关系。比较式(7)与图 1 可得,两者表达了同等的含义。

事实上,当溶氧浓度低于某个极限值时,任何一种鱼类都会因缺氧而窒息死亡,这个极限值称为溶氧窒息点。所以窒息点都是大于零的,呼吸耗氧速度与溶氧的关系曲线不可能通过原点。根据这个事实,本文对式(7)作如下修正:

$$K_c = \frac{C - C_0}{C_s + (C - C_0)} \quad C > C_0 \quad (8)$$

式中 C_0 为溶氧窒息点, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

因此,鱼类呼吸耗氧模型为:

$$Y = Y_0 \frac{C - C_0}{C_A + (C - C_0)} \cdot \theta_T^{T-20} \cdot W^b \quad (9)$$

习惯上,人们常用每公斤鱼体的小时耗氧量来描述鱼类的呼吸需氧量,由式(9)可得:

$$R = 1000Y_0 \frac{C - C_0}{C_A + (C - C_0)} \cdot \theta_T^{T-20} \cdot W^{b-1} \quad (10)$$

式中 R —每公斤鱼体的耗氧速度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

图3为鲤鱼呼吸耗氧与溶氧关系的试验结果,试验时水温约 24°C ,试验所用的材料与方法见文献[7]。表2是鲤鱼呼吸耗氧模型各参数的取值,其中 C_0 与 C_A 的取值是由试验结果确定的, θ_T 与 b 的取值是参考前人研究结果选定的, Y_0 的取值是通过(6)式求得的,即:

$$Y_0 = \frac{C_A + (C + C_0)}{1000(C - C_0)} \cdot R \cdot \theta_T^{20-T} \cdot W^{1-b} \quad (11)$$

因此,鲤鱼呼吸耗氧的模型为:

$$R = 359 \cdot \frac{C - 0.5}{C + 0.3} \cdot 1.07^{T-20} \cdot W^{-0.18}$$

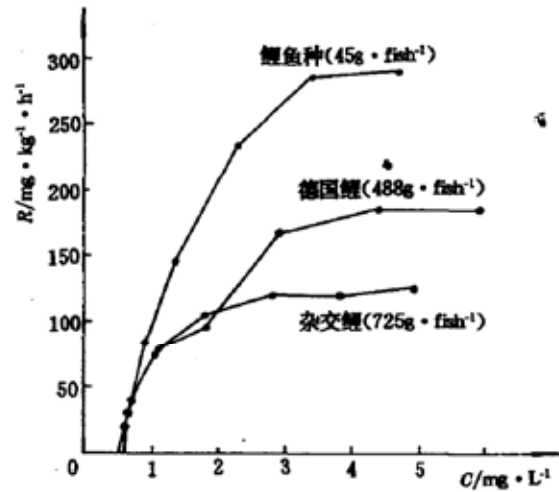


图3 鲤鱼呼吸耗氧速度与溶解氧的关系 (试验时水温 24°C)

Fig. 3 The relationship between respiration rate and DO for Cyprinus Carpio

表2 鲤鱼呼吸耗氧参数估值

Tab. 2 The estimate values for parameters of respiration of Cyprinus Carpio

| 参 数 | 前人估值 | | 本文估值 | |
|--|--------------------|--|-------|--------|
| | 取值 | 提出者 | 取值 | 估值方法 |
| $C_0/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.2~0.8 0.2~2.8 | [3]Duadoroff等,1970 [4]Nakamural,1948;Black,1953; Sigler,1958;Burns,1966等 | 0.5 | 试验估值 |
| $C_A/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | | 未见到 | 0.8 | |
| $Y_0/\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{fish}^{-1}$ | | 未见到 | 0.359 | |
| θ_T | 1.07 | [5]Piper等,1982 | 1.07 | 参考前人估值 |
| | 1.115 | [3]Shell,1965 | | |
| b | 0.67~1.0 | [1]Jobling,1985 | 0.82 | |
| | 0.82 | [3]Schroeder,1975 | | |

4 结果与讨论

1989年,笔者在安徽省太湖县花凉亭水库开展网箱养鱼高产技术示范,其中鲤鱼成鱼网箱养殖面积约 $1/15 \text{ hm}^2$ (即:面积为 25m^2 的网箱27个),现以其中的5号网箱为例进行讨论,该网箱养殖基本状况见表3。

现根据水库水温变化模拟结果(见图4),对5号网箱的鲤鱼摄食生长与呼吸耗氧进行模拟运算。

表3 5号网箱养殖生产基本数据

Tab. 3 Cyprinus Carpio production data for net—cage 5

| | |
|--------|---|
| 网箱面积 | $5 \times 5\text{m}^2$ |
| 网箱吃水深度 | 2.2 m |
| 放养日期 | 1989年4月15日 |
| 放养量 | 200 kg |
| 成活率 | 92.25% |
| 放养规格 | $53.5 \text{ g} \cdot \text{fish}^{-1}$ |
| 总产鱼量 | 2550.4 kg |
| 鲤鱼出箱规格 | $739 \text{ g} \cdot \text{fish}^{-1}$ |
| 净增重倍数 | 12.8 |
| 总投饵量 | 5979 kg |
| 饲料系数 | 2.527 |



图4 花凉亭水库表层水温
模拟曲线与实测值

Fig. 4 Computed and observed seasonal variation of surface water temperature in Hualiangting reservoir (1989)

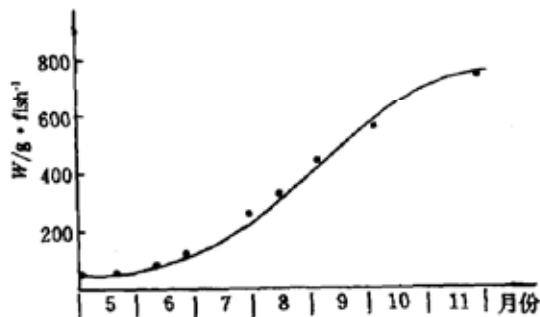


图5 5号网箱鲤鱼生长模拟曲线
与抽样检测值

Fig. 5 Computed and observed Cyprinus Carpio weight of net-cage 5

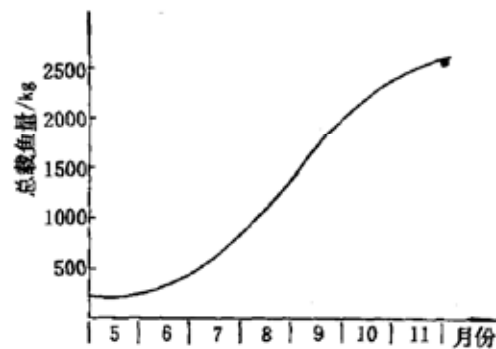


图6 5号网箱总载鱼量模拟结果

Fig. 6 Computed total weight of Cyprinus Carpio of net—cage 5

图5是鲤鱼尾重的模拟结果与抽样检测值,图6为5号网箱总载鱼量模拟结果。1989年11月28日,该网箱共收获鲤鱼2550.4 kg,平均尾重739 g,而12月1日的总载鱼量模拟值为2587.5 kg,尾重模拟值为750 g,可见两者非常接近。图7、图8分别是5号网箱的日投饵量与累计投饵量的模拟结果与实际值,至11月28日,该网箱实际共投喂饲料5979 kg,而

模拟结果为 6288 kg, 与实际吻合。

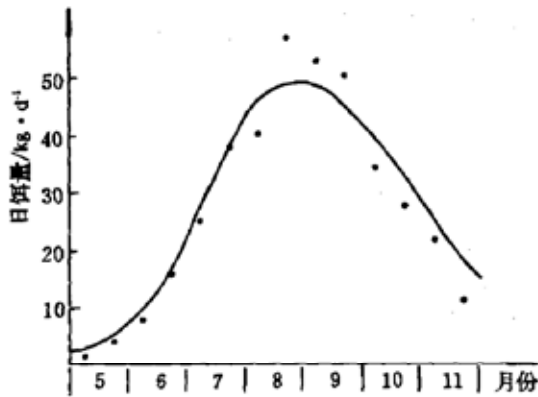


图7 5号网箱日投饲量
模拟曲线与实际值

Fig. 7 Computed and observed
daily feeding amount of net-cage 5

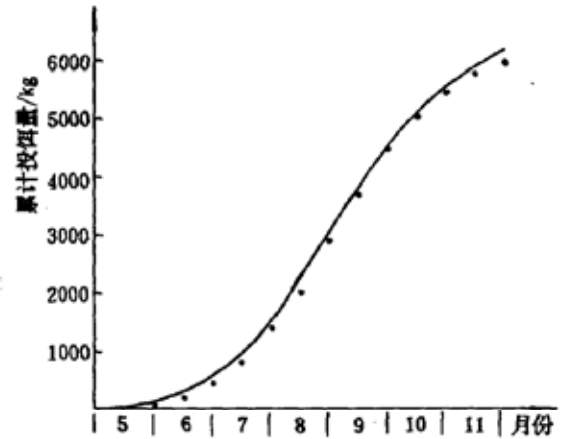


图8 5号网箱累积投饲量
模拟曲线与实际值

Fig. 8 Computed and observed cumulative
feeding amount of net-cage 5

图9为5号网箱鲤鱼呼吸耗氧的模拟结果,其最大耗氧量在9月中旬,约 $350 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 。据测定该水库表层水的溶氧量一般都在 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,如果鲤鱼正常摄食生长的溶氧量要求在 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上^[6],则该网箱内静止水体能供鲤正常呼吸耗氧的时期是37.7 min,即要求网箱水体的更新周期小于37.7 min,或要求水体的流动速度大于 $0.133 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。一般水库的水体流速是能达到此要求的,因而不大会出现缺氧死鱼的现象。据测定,花凉亭水库高产网箱内的溶氧量一般都在 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,没有明显低于箱外的溶氧量。

通过模拟运算,可以对鱼类的摄食生长与呼吸耗氧进行预测分析,从而为鱼场规划、生产管理与效益评估等提供了量化依据。例如,生长一定数量的商品鱼,则可以根据当地的水温条件与饲料资源等确定鱼种的放养规格与数量,确定合理的饲料配制与饲养期各阶段的饲料需求量,可以分析生产过程中的经济投入与产出,以优化合理的方式组织生产管理。又如,在北纬约 40° 的北京地区,网箱养鲤的鱼种放养规格要求尾重75 g左右,才能长到500 g以上的商品规格^[6];而在北纬约 30° 的花凉亭水库,53.5 g尾重的鱼种即能长到700 g以上,可见鱼种的放养规格还可以再小一些,或者饲料的配制标准可以适

当地低一些。此外,如果对模型的参数进行适当的估值,则本文提出的模型也同样适用于其

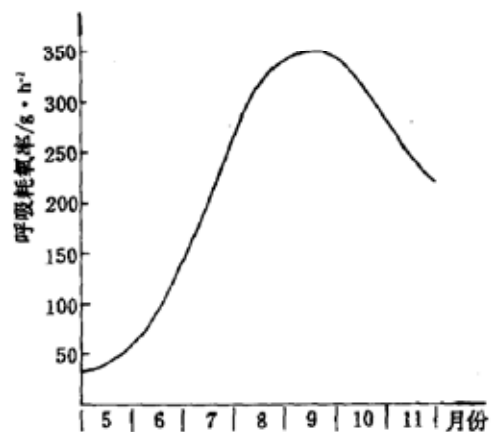


图9 5号网箱鲤鱼呼吸耗氧率模拟结果
Fig. 9 Computed oxygen consumption rate
of net-cage 5

它鱼类的养殖。

参 考 文 献

- 1 谢小军. 南方鲇的能量收支的研究. 北京师范大学博士学位论文. 1989年9月, 35~47, 48~75
- 2 F W 惠顿著[美]. 中国水产科学院东海水产所等译. 水产养殖工程, 北京: 农业出版社, 1987, 118~125
- 3 Boyd C E. Water Quality Management for Pond Fish Culture. Elsevier Scientific Publishing Company. 1982. 37~44, 179~191
- 4 Lannan J E., Smitherman R O, et al. Principles and Practices of Pond Aquaculture. Oregon State University Press. 1986, 141~149
- 5 R. 贝尔卡. 活鱼运输述评. 粮农组织欧洲内陆渔业咨询委员会技术文献. 1986, 2~3
- 6 戴朝芦. 网箱养鲤高产技术. 北京: 科学普及出版社. 1987, 23~44, 83~101
- 7 朱松明. 高产鱼池水生态环境系统的研究. 北京农业工程大学博士学位论文. 1990, 6, 17~18, 28~29, 42

A Study on Kinetic Models of Feeding-growth and Oxygen Consumption for *Cyprinus Carpio*

Zhu Songming

(Zhejiang Agricultural University)

Cui Yinan Wu Chunjiang

(Beijing Agricultural Engineering University)

Tang Suying

(Beijing Fisheries Research Institute)

Abstract

The kinetic models of feeding-growth and oxygen consumption for *Cyprinus Carpio* were established. The calibration and evaluation of the models were made with the values tested in high-yield net-cage culture of *Cyprinus Carpio*. Modelling results fit the real cases very well. A few new methods and quantitative references were presented for management and economic evaluation as well as further research of fish culture.

Key words *Cyprinus Carpio* Feeding-growth Oxygen consumption Model