

## 鲇鱼幼鱼的胃排空率及其模型分析\*

李可贵, 曹振东, 付世建

(重庆师范大学 进化生理与行为学实验室 重庆市动物生物学重点实验室, 重庆 400047)

**摘要:**为考察肉食性鱼类摄食后胃内含物的变化情况并探究肉食性鱼类消化生理特征,以鲇鱼幼鱼为对象,在(25.0 ± 0.5)℃温度下采用实验鱼体重8%的泥鳅为饵料进行投喂,分别在摄食后0、1、3、6、12、18、24、36、48 h测定胃内含物湿重、干重并计算占其摄食量的百分比,随后分别采用线性、指数、平方根3种数学模型对胃内含物百分比的变化进行拟合并比较上述不同方法的拟合程度。结果显示,摄入食物的湿重、干重均呈现随时间减少的趋势,3种模型均能较好地拟合鲇鱼幼鱼的胃内含物百分比的变化( $p < 0.01$ )。研究认为3个模型中平方根模型对湿重和干重百分比变化的拟合最佳,分别为 $Y^{0.5} = 10.11 - 0.26t$  ( $r^2 = 0.94$ ,  $p < 0.01$ )和 $Y^{0.5} = 10.27 - 0.24t$  ( $r^2 = 0.87$ ,  $p < 0.01$ )。

**关键词:** 鲇鱼; 胃排空率; 数学模型

中图分类号: Q591.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-6693(2009)03-0008-04

胃排空率(Gastric evacuation rate)是反映动物对食物消化过程的一个重要指标。鱼类的胃排空率为摄食后胃内含物占摄入量百分比的减少速率,有的研究也采用胃排空时间(Gastric evacuation time)来反映胃内含物的变化。其同摄食率、转化率、消化率和吸收率一样,都是鱼类消化生理的重要功能参数<sup>[1-3]</sup>。将实验室测得的胃排空率数据与野外自然种群胃内含物特征相结合,常被用来研究鱼类在自然环境中的日摄食量、摄食周率和生态转换效率等一些相关生态学问题<sup>[4]</sup>。鱼类胃排空率除受鱼体自身生理状况和实验方法的影响外,还受鱼的种类、摄食水平、温度、生活习性以及饥饿时间等因素影响<sup>[4-6]</sup>。因此鱼类胃排空率的表现方式繁杂,进而使抽象描述这一变化过程的数学方法多样——在相关文献中所采用的数学模型竟有10余种。目前较为常用的有指数、线性和平方根3种拟合模型<sup>[6-7]</sup>。尽管多数研究能采用不同的数学方法拟合实验数据并加以比较,但这些实验大都以群体投喂的方式,因此无法避免摄食水平差异对胃排空率所造成的影响——该影响使研究对象的相关特征不易显现。另外,更多关注鱼类胃排空率与其消化道结构、生活史对策的联系,将有助于通过数学模型揭示不同鱼类的相关生理特征。

亚洲东部的肉食性经济鱼类,有关这种鱼的摄食代谢及饥饿适应等方面的研究已有报道,资料表明鲇鱼不仅摄食量高且摄食水平易于控制<sup>[8-10]</sup>,是采用定量投喂方法开展排空率研究的适宜对象。为此,本研究测定了鲇鱼幼鱼摄食后不同历时胃内含物的湿重和干重,计算了相应的百分比并将其变化并分别采用直线、平方根、指数3种模型进行拟合。通过拟合程度的比较和生活习性的分析,以揭示该种鱼的消化生理特征,从而为相关研究提供基础资料。

### 1 材料与方法

#### 1.1 实验鱼的来源及驯化

实验用鱼购自重庆西山街水产市场,经浓度为8%的食盐消毒处理后,转移至自净化循环控温水槽内(长×宽×高为1.2 m×0.55 m×0.55 m),在(25.0 ± 0.5)℃条件下驯化2周。驯化期间用去除头部、内脏和脊柱的鲜泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)饱足投喂,每天2次。实验用水为曝气控温后的自来水,并用充气泵不断向驯化水体泵入空气以保证水体溶氧量(以单位体积水中溶解氧的质量表示)不低于7 mg·L<sup>-1</sup>,日换水量约为水体总量的10%,光照为自然光照。

#### 1.2 实验方法

实验开始前,随机抽取健康个体,转移至单元格

鲇鱼(*Silurus asotus* Linnaeus)是一种广泛分布

\* 收稿日期 2008-12-09 修回日期 2009-04-08

资助项目: 国家自然科学基金(No. 30700087)

作者简介: 李可贵,男,硕士研究生,研究方向为鱼类生理生态;通讯作者: 付世建, E-mail: shijianfu9@hotmail.com

内单独喂养,在此期间每3 d(确保胃排空)用10%实验鱼体重的鲜泥鳅投喂1次,持续2次,随后选取完全摄食的45尾作为实验材料,饥饿3 d后将去头、去尾的鲜泥鳅切成大小相等的颗粒( $0.5 \pm 0.05$ ) g,按照实验鱼体重的8%对每尾鱼进行定量投喂,所有实验鱼均在0.5 h内摄食完毕。

分别在摄食后0、1、3、6、12、18、24、36、48 h取样,每次取样5尾。胃内含物湿重、干重测定采用如下方法:首先用10 g/L的乌来糖将鱼麻醉,由泄殖孔打开鱼的腹腔,使整个消化道暴露,再用棉线系紧食道和胃幽门,分别剪断棉线两侧并取出胃,随后打开胃并刮取胃内容物至玻璃皿中<sup>[11]</sup>,用分析天平称量后得到湿重,最后将玻璃皿放至70℃下烘干至恒重,得到干重。通过计算分别得到胃内含物湿重、干重占摄食量百分比。

### 1.3 数据统计及分析

实验结果用平均值±标准误(Mean±S.E.)表示,用SPSS11.5进行统计分析,采用Excel2003进

行绘图。本研究采用直线、指数、平方根3种数学模型拟合实验数据<sup>[5-6]</sup>,通式分别为: $Y = a - bt$ 、 $Y = ae^{-bt}$ 、 $Y^{0.5} = a - bt$ 。式中 $Y$ 为胃内含物湿重或干重占摄食量的百分比, $a$ 为常数, $b$ 为瞬时排空率(研究中以每 $h$ 胃内含物湿重或干重占摄食量的百分比表示), $t$ 为摄食后的时间。

## 2 结果与分析

### 2.1 鲇鱼幼鱼胃内含物随时间的变化

鲇鱼幼鱼摄食后胃内含物湿重、干重百分比随时间呈现减少的趋势基本一致(表1)。在摄食后1~3 h的初始阶段,胃内含物的湿重、干重百分比变化均十分缓慢,统计结果无显著差异;摄食后3~12 h,上述2项指标迅速降低,与初始阶段的水平存在显著差异( $p < 0.05$ );摄食后12~18 h,这2项指标趋于稳定,而在摄食后18~24 h时段,2项指标又出现显著减少( $p < 0.05$ ),直到摄食后48 h基本排空。

表1 鲇鱼幼鱼摄食后胃内含物干重、湿重及百分比的变化

Tab.1 The change of the chyme in the juvenile Chinese catfish stomach after feeding

参数	时间/h									
	0	1	3	6	12	18	24	36	48	
体重/g	58.87±4.31	58.55±7.17	61.62±6.60	46.62±3.70	55.22±3.87	53.61±5.87	49.65±3.63	46.24±3.85	45.59±6.02	
摄食量/g	4.70±0.30	4.50±0.56	5.05±0.56	3.55±0.35	4.45±0.27	4.45±0.51	4.00±0.28	3.75±0.36	3.55±0.49	
摄食水平/%	7.98±0.07	7.88±0.02	8.00±0.04	7.92±0.12	8.04±0.13	8.21±0.15	8.00±0.10	8.14±0.01	7.88±0.01	
胃内含物湿重/g	4.545 4±0.36	4.316 0±0.53	5.221 1±0.28	2.406 3±0.22	1.818 7±0.13	1.728 4±0.21	0.15±0.01	0.037 4±0.002	0	
湿重百分比/%	96.76±5.19 <sup>a</sup>	94.50±2.10 <sup>a</sup>	104.82±5.00 <sup>a</sup>	64.26±2.84 <sup>b</sup>	41.17±0.16 <sup>c</sup>	40.14±1.01 <sup>c</sup>	5.65±0.57 <sup>d</sup>	1.02±0.05 <sup>e</sup>	0	
胃内含物干重/g	0.745±0.05	0.669 6±0.32	1.033 8±1.30	0.500 1±0.03	0.371 8±0.03	0.341 1±0.04	0.019 9±0.001	0.004 5±0.001	0	
干重百分比/%	100.0±5.98 <sup>a</sup>	96.05±13.06 <sup>a</sup>	96.04±10.05 <sup>a</sup>	84.54±5.47 <sup>b</sup>	52.27±1.59 <sup>c</sup>	49.59±2.24 <sup>c</sup>	4.79±0.59 <sup>d</sup>	0.79±0.23 <sup>e</sup>	0	

注:表中各行上标字母不同的数据间差异显著( $p < 0.05$ )

### 2.2 鲇鱼幼鱼的胃排空数学模型

分别采用直线、指数、平方根3种数学模型拟合实验数据,发现3种模型均能较好地拟合鲇鱼幼鱼的胃排空过程(图1)。通过比较模型的 $r^2$ 和 $p$ 值后发现,用湿重百分比表示胃内含物时,平方根模型 $Y^{0.5} = 10.11 - 0.26t$ ( $r^2 = 0.94$ ,  $p < 0.01$ )和指数模型 $Y = 160.84e^{-0.13t}$ ( $r^2 = 0.92$ ,  $p < 0.01$ )均拟合得较好,直线模型 $Y = -2.30t + 87.64$ ( $r^2 = 0.81$ ,  $p < 0.01$ )次之(图1a);用干重百分比表示胃内含物时,平方根模型 $Y^{0.5} = 10.27 - 0.24t$ ( $r^2 = 0.87$ ,  $p < 0.01$ )拟合最好,直线模型 $Y = -2.40t + 93.19$ ( $r^2 = 0.79$ ,  $p < 0.01$ )次之,指数模型 $Y = 175.47e^{-0.13t}$ ( $r^2 = 0.72$ ,  $p < 0.01$ )最差(图1b)。统计结果表明以湿重百分比参数拟合的3个模型的相关系数均略高于干

重的相关系数。

## 3 讨论

### 3.1 鲇鱼幼鱼的胃排空特征

鱼类由于食性的分化和消化道结构的差异,胃排空方式复杂多样。目前研究发现主要表现为3种形式<sup>[7,12]</sup>。第1种排空特征是摄食后出现一个快速排空的过程,随后排空速率则明显下降。这种形式被称为固有的或内在的排空方式,通常出现在鱼类摄入小而易碎的低能量食物后,以浮游生物为食的小型海洋鱼类,如赤鼻棱鳉(*Thryssa kammalensis*)、玉筋鱼(*Ammo-clytes personatus*)、斑鲮(*Clupanodon punctatus*)和小鳞鲢(*Hemirhamphus*)等<sup>[12]</sup>。第2种排空特征是排空率随时间呈直线变化。一般认为这

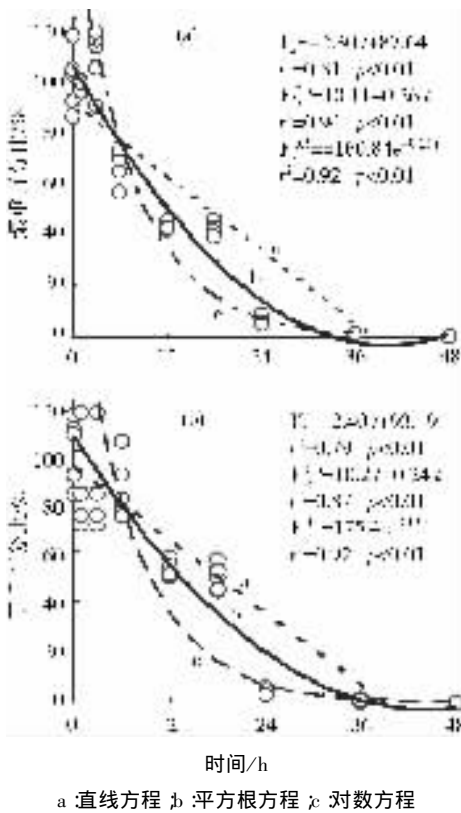


图1 3种数学模型对鲇鱼幼鱼的胃内含物湿重、干重百分比变化的拟合结果

Fig. 1 The fitting results of the percent of the wet and dry weight chime in Chinese catfish by three mathematical models

种方式出现在摄入大而完整的高能量食物后。黑鲷 (*Sparus macrocephalus*) 等大量肉食性鱼类多以这种方式排空<sup>[4,16]</sup>。第3种排空特征是最初的排空较慢,紧跟着一个时段的快速排空,随后又进入相对较慢的排空阶段。在上述3种排空方式中,鲇鱼幼鱼倾向于第3种,即最初的排空率变化较慢,接着迅速,然后又趋于平稳,直至完全排空(表1)。鲇鱼为典型的肉食性鱼类,胃容量较大,摄食后食物在胃内消化时间久,故排空时间长,呈现出阶段性排空的特征。而纵观鱼类在不同环境条件下的进化历程,则不难发现胃排空方式是否呈现阶段性以及呈现怎样的阶段性,是其摄食习性和对不同食物类型适应的集中表现。

### 3.2 鲇鱼幼鱼的3种排空模型比较

由于鱼类摄食排空方式及影响因素多样,因此用于定量描述摄食排空规律的数学模型也表现为多种方式<sup>[4,6,12-13,15]</sup>。本研究中,采用3种数学模型对实验数据进行拟合。经统计分析,无论是用湿重还是干重百分比表示胃内含物的变化,都以平方根模型拟合得最好。有研究发现,许多肉食性鱼类的

排空模型接近直线型<sup>[13-14]</sup>,与本研究结果不尽相同。这应与鱼类的生活习性有关。本研究中所采用的实验对象为鲇鱼,处于较高营养级,属于伏击取食鱼类,摄食量大且摄食后一般处于静止状态,有足够的时间进行食物的消化和吸收<sup>[8]</sup>,故直线模型不能很好的拟合胃排空过程。以上3种数学模型都假设食物从胃中排出是平滑、连续的过程,但实际情况却复杂得多。食物从胃中排出,刺激十二指肠感受器,从这些感受器反馈的信号导致幽门口半径和胃肌活性的改变,导致胃内食物的排空过程可能呈现脉冲方式<sup>[6]</sup>。因此,深入了解鱼类排空的生理机制,将有助于更好地建立和理解鱼类的排空模型。

鱼类的胃排空率除了受多种环境因素的影响外<sup>[4-6]</sup>,还与胃内含物样本的处理方法和所采用的指标有关。当分别以湿重、干重和体积表示胃内含物的变化时,便得到不同的排空模型<sup>[7]</sup>。有人认为用湿重估计胃内含物不够准确,建议将结果用干重表示<sup>[15]</sup>。本研究结果表明,以湿重百分比参数拟合的3个模型的相关系数均略高于干重的相关系数。这可能是由于干重的数量小,称量误差较大所致。然而,无论用湿重还是干重表示胃内含物百分比的变化都以平方根模型拟合得最好,表明鲇鱼幼鱼的胃排空特征不因样本处理方法的改变而改变,具有稳定的数学表达方式。

### 参考文献:

- [1] Swenson W A, Smith L L. Gastric digestion, food consumption and food conversion and efficiency in walleye (*Stizostedion vitreum vitreum*) [J]. Fish Res Board Can, 1973, 30: 1327-1336.
- [2] Eggers D M. Factors in interpreting data obtained by diet sampling of fish stomachs [J]. Fish Res Board Can, 1977, 34: 290-294.
- [3] Elliott J M, Persson L. The estimation of daily rates of food consumption for fish [J]. Ani Ecol, 1978, 47: 977-993.
- [4] Jobling M. Mathematical models of gastric emptying and the estimation of daily rates of food consumption for fish [J]. Fish Biol, 1981, 19: 245-257.
- [5] Flowerdew M, Grove D J. Some observations of the effect of body weight, temperature, meal size and quality on gastric emptying time in turbot (*Scophthalmus maximus*) using radiography [J]. J Fish Biol, 1979, 14: 229-238.
- [6] 张波, 孙耀, 唐启升. 鱼类的胃排空率及其影响因素 [J]. 生态学报, 2001, 21(4): 665-670.
- [7] Hopkins T E, Larson R J. Gastric evacuation of three food

- type in the black and yellow rockfish *Sebastes chrysamelas* ( Jordan and Gilbert ) [ J ]. J Fish Biol ,1990 ,36 :673-682.
- [ 8 ] Fu S J ,Cao Z D ,Peng J L. Effect of meal size on postprandial metabolic response in Chinese Catfish( *Silurus asotus Linnaeus* ) [ J ]. J Comp Physiol B ,2006 ,176 :489-495.
- [ 9 ] 汤洪芬 ,曹振东 ,付世建. 饥饿对鲇鱼幼鱼静止代谢率的影响 [ J ]. 重庆师范大学学报 ,2007 ,24( 1 ) :72-75.
- [ 10 ] 李黎 ,曹振东 ,付世建. 力竭性运动后鲇鱼幼鱼乳酸、糖原和葡萄糖水平的变动 [ J ]. 水生生物学报 ,2007 ,31( 6 ) :880-885.
- [ 11 ] Taylor J R ,Grosell M. Feeding and osmoregulation :double function of the marine teleost intestine [ J ]. J Exp Biol ,2006 ,209 :2939-2951.
- [ 12 ] 孙耀 ,刘勇 ,于森 ,等. 渤、黄海 4 种小型鱼类摄食排空率的研究 [ J ]. 海洋与湖沼 ,2002 ,33( 6 ) :679-684.
- [ 13 ] 余方平 ,许文军 ,薛利建 ,等. 美国红鱼的胃排空率 [ J ]. 海洋渔业 ,2007 ,29( 1 ) :49-52.
- [ 14 ] 张波 ,孙耀 ,唐启升. 真鲷的胃排空率 [ J ]. 海洋水产研究 ,1999 ,20( 2 ) :86-89.
- [ 15 ] Paakkonen J P ,Marjomakitj T J. Gastric evacuation rate of burbot fed single-fish meals at different temperatures [ J ]. J Fish Biol ,1997 ,50 :555-563.
- [ 16 ] 张波 ,孙耀 ,唐启升. 黑鲷的胃排空率 [ J ]. 应用生态学报 ,2000 ,11( 2 ) :287-289.

## Analysis of Gastric Evacuation Rate and Its Mathematical Model in Chinese Catfish ( *Silurus asotus Linnaeus* )

LI Ke-gui , CAO Zhen-dong , FU Shi-jian

( Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour , Chongqing Key Laboratory of Animal Biology , Chongqing Normal University , Chongqing 400047 , China )

**Abstract :** To investigate the character of the mass of the chyme in stomach and the gastric evacuation rate of carnivorous fish species , the dry and wet mass of chyme in stomach of Chinese catfish( *Silurus asotus Linnaeus* ) is determined at (  $25 \pm 0.5$  ) °C at 0 , 1 , 3 , 6 , 12 , 18 , 24 , 36 and 48 h after feeding. Cutlets of freshly kill loach species ( *Misgurnus anguillicaudatus* ) without viscera. Head and tail are used as test diet , with meal size about 8% ( body mass ) in this study. The percent of the wet and dry mass ( % the mass of invest food ) are calculated , then the change of the percent of the wet and dry mass ( % the mass of invested food ) is simulated by three mathematical models in common uses for the gastric evacuation , including linear , exponential and square root model and the degree of simulation is compared. The results show that the wet and dry chymes both decrease after feeding. According to the statistical test , all of these three kinds of models fit the experimental data quite well , and the analysis shows that the square root model is the best , whether or not the remnant chyme in stomach is expressed by the percent of wet mass or dry mass. When the remnant chime in stomach is expressed by the percent of wet mass and dry mass , the square root models are  $Y^{0.5} = 10.11 - 0.26t$  (  $r^2 = 0.94$  ,  $p < 0.01$  ) and  $Y^{0.5} = 10.27 - 0.24t$  (  $r^2 = 0.87$  ,  $p < 0.01$  ).

**Key words :** *Silurus asotus Linnaeus* ; gastric evacuation rate ; mathematic model

( 责任编辑 方 兴 )