

## 南方鲇幼鱼的胃排空特征及其数学模型

曾令清<sup>1</sup>, 李凤杰<sup>1</sup>, 曹振东<sup>2</sup>, 张耀光<sup>1\*</sup>

(1. 西南大学生命科学学院, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室,  
水产科学重庆市市级重点实验室, 重庆 400715;  
2. 重庆师范大学生命科学学院, 进化生理与行为学实验室, 重庆 400047)

**摘要:** 为考察摄食后专性肉食性鱼类南方鲇幼鱼胃内容物重量的变化特征并确定其最优数学模型, 研究以南方鲇幼鱼为实验对象, 在 25 °C 条件下以 6% (5.8% ± 0.2%) 鱼体重的新鲜泥鳅肉块 [(3.33 ± 0.09) g] 为实验饵料, 分别在摄食后 0、2、4、8、16、24、36、48 h 测定南方鲇幼鱼 [(58.45 ± 1.66) g, (19.4 ± 0.2) cm, n = 48] 胃内容物的湿重和干重。研究表明, 随摄食后时间的延长, 胃内容物的湿重和干重均显著下降 ( $P < 0.01$ ), 二者的摄食量百分比也具类似的变化特征 ( $P < 0.01$ ); 三种数学模型均能较好地拟合胃内容物重量的变化过程, 但三者之间在以相关系数 ( $R^2$ )、残差平方和 ( $RSS$ ) 及残差的标准差 ( $SDR$ ) 为标准仍存在明显差异。用平方根模型对南方鲇幼鱼胃内容物湿重和干重数据的拟合结果最优, 其方程分别为  $Y^{0.5} = 1.889 - 0.051 \times t$  ( $R^2 = 0.87, P < 0.001$ ) 和  $Y^{0.5} = 0.870 - 0.024 \times t$  ( $R^2 = 0.86, P < 0.001$ ); 南方鲇幼鱼在 25 °C 下的胃排空率为 0.051 g/h, 其 99% 胃排空时间为 36.7 h, 该种鱼近 99% 胃排空时间的实测值为餐后 36 h, 这与最优数学模型的计算结果较为接近; 南方鲇与鲇具有类似的胃排空特征和相同的最优数学排空模型。

**关键词:** 南方鲇; 胃排空率; 数学模型; 消化生理

**中图分类号:** S 917

**文献标识码:** A

摄食之后, 鱼类能否迅速将胃中饵料消化并排入肠道中进行吸收的能力影响鱼类的生长率<sup>[1]</sup>。胃排空率 (gastric evacuation rate, GER, g/h) 是指摄食后食物从胃中排出的速率<sup>[1-3]</sup>, 不仅是评价动物消化功能及食物可消化性的重要指标之一, 还影响鱼类的食物消化率、生理代谢水平和摄食率<sup>[4-5]</sup>。相关研究包括野外实验和实验室研究, 前者倾向于研究在自然界中鱼类的饵料组分、食性和食物网等方面, 而后者集中于人工饵料开发、饵料转换率和生态健康养殖等方面, 二者的结合常用来估计鱼类在自然界中的日摄食率、捕食关系及在食物链上的营养等级<sup>[1,6]</sup>。国外的相关研究开展较早, 资料报道十分丰富, 其研究对象更多始于软骨鱼类, 如柠檬鲨 (*Negaprion brevirostris*) 和蓝鲨 (*Prionace glauca*), 硬骨鱼类

如溪红点鲑 (*Salvelinus fontinalis*) 的研究报道也陆续出现<sup>[1-2,4-5,7]</sup>。国内相关研究起步较晚, 在 20 纪末才陆续出现有关硬骨鱼类的胃排空率研究报道, 研究对象包括海洋鱼类如黑鲷 (*Sparus macrocephalus*)、真鲷 (*Pagrosomus major*)、美国红鱼 (*Sciaenops ocellatus*) 和淡水鱼类如鲇 (*Silurus asotus*)<sup>[3,8-11]</sup>。温度、摄食水平、食物性质、饥饿时间和鱼的种类及其生态习性等因素均会影响鱼类的胃排空过程<sup>[5-6,12-13]</sup>。由于栖息环境、食性、摄食策略等的差异, 鱼类胃排空的方式复杂多样, 目前未见统一的理论模型表述<sup>[3]</sup>, 已有文献所采用的数学模型多达 10 余种<sup>[13]</sup>, 其中常采用线性、指数和平方根 3 种模型<sup>[3,8-11]</sup>。鱼类胃排空数学模型评选指标主要包括: 相关系数 ( $R^2$ )、残差平方和 (residual sum of squares, RSS)

收稿日期: 2010-10-04 修回日期: 2010-11-14

资助项目: 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (200903048); 西南大学研究生科技创新项目 (ky2009008)

通讯作者: 张耀光, Tel: 023-68253005, E-mail: zhangyg@swu.edu.cn

及残差的标准差 (standard deviation of residual, SDR) 等<sup>[2]</sup>。相关研究多以群养投喂,以平均摄食水平作为个体样本的摄入量<sup>[13]</sup>,忽略了鱼个体间摄食水平的差异,从而影响胃排空率测定结果的准确性<sup>[3]</sup>。为此,本研究将采用单养方式进行胃排空率测定实验。

近期有关鲈的胃排空研究已见报道<sup>[2]</sup>。鲈和南方鲈 (*Silurus meridionalis*) 均是一种肉食性经济养殖鱼类,该两种鱼的摄食量大且摄食水平易于控制,二者的生态习性典型,是采用定量投喂方法开展消化生理研究的适宜对象<sup>[14-15]</sup>,然而后者生长较快,体型较大,性成熟较晚<sup>[15]</sup>。南方鲈的生物学特征、摄食代谢、游泳能力、组织学和消化能力等方面研究已有报道<sup>[14-19]</sup>,但有关其胃排空的研究资料尚未见报道。有关南方鲈幼鱼的胃排空特征、南方鲈和食性相同近源种鲈的胃排空过程是否存在差异,及其二者的消化特征是否满足相同的最优数学模型将是本研究重点关注的问题。为此,本实验在南方鲈幼鱼摄食后的不同时间分别测定胃内含物的湿重及其干重,计算相应重量的百分比(胃内容物重量/鱼体总摄食量),分别用线性、指数和平方根模型对实验数据进行拟合,以确定南方鲈幼鱼的最优胃排空数学模型,并结合鲈的研究资料<sup>[3]</sup>,以揭示南方鲈幼鱼的胃排空的生理机制及消化生理特征,不仅有助于长江上游不同水域(渠化江段)食物网物流、能量流和营养等级的建立,还为重要经济鱼类的饵料开发、摄食率和合理投喂等水产养殖研究提供有益资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验鱼的来源

实验于2009年8月至9月进行。人工繁殖的南方鲈幼鱼购自于四川水产学校,暂养于西南大学水产科学实验室水泥池(1.5 m × 1.2 m × 0.5 m)中两周。在此期间,以新鲜的、切碎且洗净的泥鳅 (*Misgurnus anguillicaudatus*) 肉块为投喂饵料,每天19:00投喂一次,投喂2 h后用虹吸管清除残饵及粪便。池中水体为经曝气后的自来水,以气泵向水泥池持续充入空气,使溶氧水平高于6 mg O<sub>2</sub>/L。水体温度控制在(25 ± 0.5) °C,光周期设定为2 L:12 D。

### 1.2 实验鱼驯化与操作方法

将60尾大小相当、鱼体健康的南方鲈幼鱼转

移至流水式鱼类呼吸代谢仪中进行单尾鱼呼吸室(Ø60 mm × 270 mm)驯化6 d。水温、溶氧水平和光周期均与暂养期一致。资料表明,摄食8%鱼体重泥鳅饵料的南方鲈幼鱼的摄食代谢已在摄食后72 h完全恢复至静止代谢水平<sup>[15]</sup>。因此,在驯化期间每隔3 d投喂单尾鱼6%鱼体重的新鲜泥鳅肉块,观察、记录实验鱼的摄食情况,以选取能迅速摄食6%鱼体重饵料的鱼个体作为研究对象。在选取的48尾[(58.45 ± 1.66) g, (19.4 ± 0.2) cm]实验鱼摄食6%鱼体重饵料之后3天(以确保胃排空)才进行正式实验。对单尾鱼投喂6% (5.8% ± 0.2%) 鱼体重的泥鳅饵料(3.33 ± 0.09) g,所有实验鱼均能在30 min之内摄食完毕。取样时间设定在摄食后0、2、4、8、16、24、36和48 h,每次随机取样6尾以测量胃内容物湿重及其干重。

取样方法如下:先将单尾鱼从呼吸室取出至解剖盘上,棒击鱼头部迅速处死实验鱼;首先测量实验鱼的体长(cm)和体重(g);迅速从肛门沿腹中线剪至下颌,暴露内脏;用镊子夹紧胃贲门部和幽门部,剪断并置于培养皿中,剪开胃底使胃内容物全部置于培养皿中,将固态胃内容物放入已知重量的离心管内;用电子分析天平测量胃内容物的湿重,最后放置于60 °C烘箱持续烘干至恒重。摄食量百分比(胃内容物重量/总摄食量)由下列公式计算:

$$P(\%) = W_0/W_1 \times 100$$

式中, $P$ 表示单尾鱼的胃内容物重量占该鱼总摄食量的百分比, $W_0$ 表示在取样时间时胃内容物的重量, $W_1$ 表示实验鱼的总摄食量。

### 1.3 数学模型

用线性、指数和平方根模型分别拟合胃内容物重量的变化规律<sup>[2]</sup>:

a. 线性模型:  $Y = A - B \times t$

b. 指数模型:  $Y = A \times e^{-Bt}$

c. 平方根模型:  $Y^{0.5} = A - B \times t$

式中, $Y$ 为胃内容物的重量(湿重或干重), $A$ 为常数, $B$ 为瞬时排空率(g/h), $t$ 为餐后时间(h)。

以相关系数( $R^2$ )、残差平方和( $RSS$ )及残差的标准差( $SDR$ )为评选标准<sup>[2]</sup>,分析三种数学模型的最适性,确定南方鲈幼鱼的最优胃排空模型。

### 1.4 数据处理与统计分析

用Excel(2003)对所有实验数据作常规计

算。实验数据用 Statistics(6.0) 软件进行单因素方差分析(ANOVA),若发现各时间点存在显著差异则以最小显著差数法(LSD)进行多重比较。三种数学模型的参数 A、B 均由统计软件进行曲线拟合得到。所有统计值均以平均值  $\pm$  标准误(Mean  $\pm$  SE)表示,显著水平定为  $P < 0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 南方鲇幼鱼胃内容物重量的变化特征

实验鱼的体重、摄食量及摄食水平在各个取样时间上均无明显差异( $P > 0.05$ )。随餐后时间的延长,南方鲇幼鱼胃内容物重量(湿重和干重)及摄食量百分比均呈显著减少的阶段性变化特

征,并且重量和摄食百分比的同步性较好(表1)。在餐后0~2 h之间,胃内容物重量无明显变化( $P > 0.05$ ),而胃内容物百分比开始下降( $P > 0.05$ )。在餐后2~8 h之间,胃内容物湿重和干重分别显著下降了38.6%和34.7%(表1, $P < 0.05$ ),而同期湿重和干重百分比分别显著下降了32.1%和29.3%(表1, $P < 0.05$ )。在餐后8~36 h之间,胃内容物湿重和干重以分别显著下降了56.3%和49.5%(表1, $P < 0.05$ ),二者数据的变异程度也降低;在餐后36 h,胃内容物基本排空,其湿重和干重百分比均于小于1%,再过12 h,胃完全排空(表1,图1)。

表1 南方鲇幼鱼胃内容物重量及其百分比的变化  
Tab.1 The change trait of diet mass of the stomach in juvenile southern catfish

参数 parameters	餐后时间(h) postprandial time							
	0	2	4	8	16	24	36	48
胃内容物湿重(g) wet mass of SC	3.62 $\pm$ 0.37 <sup>a</sup>	3.45 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>	2.73 $\pm$ 0.36 <sup>b</sup>	2.01 $\pm$ 0.25 <sup>b</sup>	0.92 $\pm$ 0.18 <sup>c</sup>	0.35 $\pm$ 0.11 <sup>cd</sup>	0.02 $\pm$ 0.01 <sup>d</sup>	0
湿重百分比(%) percentage of wet mass	100.0 $\pm$ 0.0 <sup>a</sup>	97.4 $\pm$ 2.8 <sup>a</sup>	86.2 $\pm$ 3.0 <sup>b</sup>	65.3 $\pm$ 4.5 <sup>c</sup>	30.2 $\pm$ 5.7 <sup>d</sup>	10.6 $\pm$ 3.3 <sup>d</sup>	0.82 $\pm$ 0.005 <sup>f</sup>	0
胃内容物干重(g) dry mass of SC	0.83 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>	0.71 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	0.54 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	0.42 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	0.19 $\pm$ 0.04 <sup>c</sup>	0.07 $\pm$ 0.02 <sup>cd</sup>	0.006 $\pm$ 0.001 <sup>d</sup>	0
干重百分比(%) percentage of dry mass	100.0 $\pm$ 0.0 <sup>a</sup>	86.7 $\pm$ 3.0 <sup>b</sup>	74.2 $\pm$ 3.0 <sup>c</sup>	57.4 $\pm$ 3.2 <sup>d</sup>	27.9 $\pm$ 5.1 <sup>e</sup>	10.3 $\pm$ 3.1 <sup>f</sup>	0.75 $\pm$ 0.005 <sup>e</sup>	0

注:同一行上标字母不同的数据表示差异显著( $P < 0.05$ ),SC表示胃内容物。

Notes: The data that shared the different superscript in the same row are significantly different ( $P < 0.05$ ). SC is the abbreviation of the stomach content.

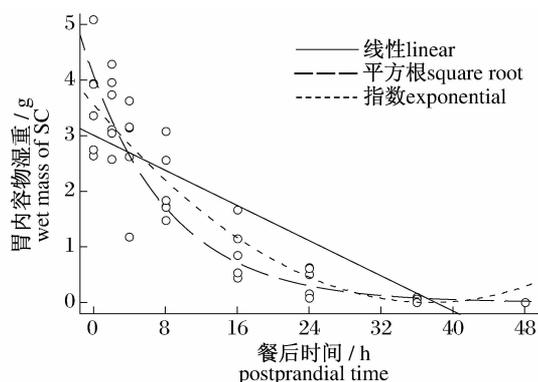


图1 三种数学模型对南方鲇幼鱼胃内容物湿重的拟合曲线

Fig.1 The three mathematical equations fitted to gastric evacuation data of juvenile southern catfish

### 2.2 南方鲇幼鱼的胃排空率和胃排空时间

以胃排空模型估计南方鲇幼鱼的胃排空率,发现三种数学模型的常数 B 值不尽相同(表2);

此外,用胃内容物湿重数据计算得到的50%和99%胃排空时间均短于干重数据。对于线性模型而言,南方鲇幼鱼胃排空率(以湿重和干重计)分别为0.079 g和0.018 g,50%和99%胃排空的理论时间分别为19.05、37.72和17.67、34.98 h。对于指数模型而言,南方鲇幼鱼胃排空率分别为0.086 g和0.093 g,50%和99%胃排空的理论时间分别为8.06、53.54和7.45、49.52 h。对于平方根模型而言,南方鲇幼鱼胃排空率分别为0.051 g和0.024 g(表2),50%和99%胃排空的理论时间分别为18.52、36.67和18.13、35.89 h。另外,由三种数学模型对胃内容物湿重和干重分别计算得到的99%胃排空时间的的时间差距:指数模型(4.02 h) > 线性模型(2.74 h) > 平方根模型(0.78 h)。

### 2.3 南方鲇幼鱼胃排空率的模型选择

结果发现,所采用的线性、指数和平方根模型

均能较好拟合南方鲇幼鱼胃内容物数据,但在以相关系数( $R^2$ )、残差平方和( $RSS$ )及残差的标准差( $SDR$ )为标准三者之间仍存在明显的差异(表2)。首先,以相关系数 $R^2$ 值为标准,发现用同种数学模型分别拟合胃内容物湿重和干重数据,两者的拟合结果差异不大(如线性模型:0.73和0.71,平方根模型:0.87和0.86);但在不同数学模型中,指数和平方根模型的拟合结果差异不明显,但前两者均优于线性模型(表2)。其次,以

$RSS$ 为标准,发现三种数学模型对胃内容物干重数据的拟合结果均明显好于湿重数据;依 $RSS$ 值的大小,数学模型的最适性分别为平方根、指数和线性模型。最后,以残差的标准差( $SDR$ )为标准,发现三种数学模型的最适性与 $RSS$ 为评选标准基本一致(表2)。综合 $R^2$ 、 $RSS$ 及 $SDR$ 的选择结果,平方根模型是描述南方鲇幼鱼胃排空规律的最优数学模型。

表2 南方鲇幼鱼胃内容物重量变化规律的模型比较

Tab. 2 Comparison of three mathematical models fitted to gastric evacuation data in juvenile southern catfish

模型 models		A	B	$R^2$	RSS	SDR	P
线性 linear $Y = A - B \times t$	湿重 wet mass	3.010 ± 0.168	0.079 ± 0.007	0.73	29.52	0.79	<0.001
	干重 dry mass	0.636 ± 0.037	0.018 ± 0.002	0.71	1.45	0.18	<0.001
指数 exponential $Y = A \times e^{-Bt}$	湿重 wet mass	3.842 ± 0.174	0.086 ± 0.009	0.87	14.07	0.55	<0.001
	干重 dry mass	0.833 ± 0.037	0.093 ± 0.010	0.88	0.62	0.11	<0.001
平方根 square-root $Y^{0.5} = A - B \times t$	湿重 wet mass	1.889 ± 0.038	0.051 ± 0.004	0.87	4.28	0.28	<0.001
	干重 dry mass	0.870 ± 0.018	0.024 ± 0.002	0.86	0.72	0.28	<0.001

### 3 讨论

#### 3.1 南方鲇幼鱼的胃排空特征

由于发育阶段、摄食习性、食性和消化道结构的差异,鱼类胃排空方式不尽相同。资料表明,鱼类胃排空特征包括3种类型<sup>[12-13]</sup>。第1种排空类型是摄食后胃内容物快率排入肠道,随后胃排空率则显著下降。这种固有的、内在的排空方式典型地发生在那些摄食小而易碎的低能量食物(如浮游生物)的鱼类中,如斑鲦(*Clupanodon punctatus*)、玉筋鱼(*Ammoclytes personatus*)、小鳞鲢(*Hemirhamphus sajori*)和赤鼻棱鯉(*Thryssa kammalensis*)等小型海洋鱼类<sup>[6]</sup>。第2种排空特征是胃内容物重量随餐后时间的延长呈直线下降,主要出现在那些摄入大而不碎食物的鱼类中。虾和蟹等动物的几丁质外壳延迟了胃蛋白酶的消化及食糜的排出。第3种排空特征是胃排空率先低后快再低的特征,该类鱼如鲇<sup>[3]</sup>。本研究发现,南方鲇幼鱼在摄食后0~2h的胃内容物重量无显著下降,而在摄食后2~24h,胃内容物重量下降明显,最后在摄食后24~48h胃排空率又明显降低。本研究的实验饵料为新鲜泥鳅肉块,其物理性质既不同于浮游生物又不同于含几丁质外壳的甲壳动物,在物理消化(搅拌和磨碎)

和化学消化(胃蛋白酶)双重作用下,含高能量的肌组织先被降解成食糜而排入肠道,随消化时间的延长,胃中仅剩含低能量的椎骨和鱼刺,呈现出缓慢的胃排空过程。因此,在上述3种胃排空特征中,南方鲇幼鱼的最优排空模型更倾向于第3种。

#### 3.2 南方鲇幼鱼的胃排空最优模型

鱼类的胃排空方式繁杂,因而反映该生理过程的数学模型多种多样,目前已报道的数学模型有10余种,常采用的数学模型包括线性、指数和平方根模型<sup>[3,8-11]</sup>。某些肉食性鱼类如黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacares*)、大眼梭鲈(*Stizostedion vitreum*)、溪红点鲑、黑鲷和美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)是以线性排空胃中饵料<sup>[9-10,20-21]</sup>;红点猫鲨(*Schroederichthys chilensis*)和银大马哈鱼(*Oncorhynchus kisutch*)却是以指数方式进行胃排空活动<sup>[22-23]</sup>;而平方根模型则是鲇、方氏云鲷(*Enedrias fangi*)和真鲷的最优胃排空模型<sup>[3,8,24]</sup>。本研究发现,平方根模型是南方鲇幼鱼胃排空的最优数学模型。描述胃排空变化的数学模型假定鱼类胃中食物排入肠道的过程是平滑、连续的,因此得到的胃排空率是个常数,却不能客观反映实际不平滑、不连续而呈现脉冲式的鱼类胃排空过程<sup>[12-13]</sup>。因此,有关鱼类胃肌产生的推动力、神

经调控机制等相关研究将有助于清晰了解胃排空生理机制<sup>[13]</sup>。

胃内容物的表达方式包括湿重及其百分比、干重及其百分比和体积等<sup>[3,8,22]</sup>。因此,胃排空模型及其模型参数  $B$  (胃排空率) 的量纲 (g/h 或百分比) 也不尽相同。研究发现,如个别取样点的胃内容物湿重的百分比有超过 100% 的现象<sup>[9]</sup>,这不仅与以湿重表达胃内容物重量时偏高估计相关,而且还可能与实验鱼的群养投喂方式、抽样样本量少有关。然而,以干重为拟合数据与单尾投喂方式的结合,同时增加样本量,在一定程度上可避免该现象的产生,进而提高实验精度和准确性<sup>[12,20]</sup>。本研究发现,综合相关系数 ( $R^2$ )、残差平方和 ( $RSS$ ) 及残差的标准差 ( $SDR$ ) 的比较结果,干重数据的拟合结果在整体上优于湿重,并且胃内容物重量及其百分比的变化是以平方根模型拟合最好,表明南方鲈幼鱼固有的胃排空特征的数学表达方式不因胃内容物的表达方式而改变,与鲈的研究结论一致<sup>[3]</sup>。

### 3.3 南方鲈与鲈最优胃排空模型比较

鲈幼鱼的胃内容物的下降速率呈先慢后快再慢的变化规律<sup>[3]</sup>,这与本研究对象南方鲈幼鱼的胃排空特征较为相似。南方鲈同鲈一样在一次性大量摄食后,消化时间较长<sup>[19]</sup>,呈现阶段性的胃排空特征。数学模型可以估计自然界中鱼类的胃排空率。鲈幼鱼胃排空的最优数学模型是平方根模型<sup>[3]</sup>,这也是南方鲈幼鱼的最优胃排空模型。南方鲈和鲈均是一种肉食性经济养殖鱼类,广泛分布于长江、嘉陵江等水系中,喜栖息于开敞水体,营底栖生活<sup>[14-15]</sup>,处于食物链的上层,具有较高的营养等级,生态习性类似,生态位接近<sup>[14]</sup>,二者的胃均为典型的 U 型,胃壁肌肉层厚,胃容量大<sup>[18-19]</sup>。南方鲈和鲈的胃排空特征不仅类似,而且二者的最优排空模型一致(即平方根模型),这与二者的相同栖息环境、生态习性和消化生理特征等因素密切相关。

由平方根模型拟合,在 25 °C 南方鲈幼鱼的胃排空率为 0.051 g/h,与相同温度下鲈幼鱼的胃排空率较为接近(0.072 g/h,同种数学模型拟合得到)<sup>[3]</sup>,但小于海洋鱼类小鳞鲢(26 °C,0.085 g/h)<sup>[6]</sup>。南方鲈幼鱼 99% 的胃排空时间为 36.7 h,明显短于鲈幼鱼的 99% 的胃排空时间(42.5 h)<sup>[3]</sup>。在摄食后 36 h,我们发现实验鱼胃中只剩

椎骨和鱼刺,其胃内容物重量百分比(0.82% 和 0.75%,表 1)均小于 1%,这与平方根模型计算得到的 99% 胃排空时间(36.7 h)较为接近,表明平方根模型估计南方鲈幼鱼的胃排空时间更为准确。与鲈相比,南方鲈的食性更为专一,生长较快,体型较大<sup>[14]</sup>,这可能与鲈较高的特殊动力作用系数(SDA 系数)、较长的 SDA 时间<sup>[25]</sup>和较长的胃排空时间(36.7 h vs 42.5 h)有关,还可能与二者生长素水平、糖酵解酶活性、胃肠消化酶活性和同化率的差异密切相关。因此,有关南方鲈与鲈生长性能差异的研究值得关注。

感谢本实验室王志坚老师、蒲德永老师和金丽老师在实验过程中提供的帮助。

### 参考文献:

- [1] PRINCIPE N D, KRAFT C E, MILLS E L. Gastric evacuation and daily ration of naturally produced age-0 Chinook Salmon in lake Ontario [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2007, 136 (5): 1206 - 1215.
- [2] CORTEZ E. A critical review of methods of studying fish feeding based on analysis of stomach contents; application to elasmobranch fishes [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1997, 54 (3): 726 - 738.
- [3] 李可贵,曹振东,付世建. 鲈鱼幼鱼的胃排空率及其模型分析[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2009, 26(3): 1 - 4.
- [4] JONES B C, GEEN G H. Food and Feeding of Spiny Dogfish (*Squalus acanthias*) in British Columbia Waters [J]. J Fish Res Bd Canada, 1977, 34: 2067 - 2078.
- [5] SWEKA J A, COX M K, HARTMAN K J. Gastric evacuation rates of brook trout [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2004, 133 (1): 204 - 210.
- [6] 孙耀,刘勇,张波,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.
- [7] PERSSON L. Patterns of food evacuation in fishes; a critical review [J]. Environmental Biology of Fishes, 1986, 16(3): 51 - 58.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 孙耀,马志敏,刘勇,等.东海、黄海不同生长时期鳀鱼的胃排空率[J].海洋学报,2006,28(3):103-108.
- [11] 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.
- [12] HOPKINS T E, LARSON R J. Gastric evacuation of three food types in the black and yellow rockfish *Sebastes chrysomelas* [J]. Journal of Fish Biology, 1990,36(5):673-681.
- [13] 张波,孙耀,唐启升.鱼类胃排空率及其影响因素[J].生态学报,2001,21(4):665-670.
- [14] 施白南.嘉陵江南方大口鲶的生物学研究[J].西南师范大学学报:自然科学版,1980(2):45-52.
- [15] 施白南.嘉陵江鲶鱼的生物学简介[J].西南师范大学学报:自然科学版,1980(2):53-59.
- [16] FU S J, XIW X J, CAO Z D. Effect of meal size on postprandial metabolic response in southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. Comp Biochem Physiol (A), 2005,140(4):445-451.
- [17] ZENG L Q, CAO Z D, FU S J, *et al.* Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. Comp Biochem Physiol (A), 2009,153(2):125-130.
- [18] 刘怀如,潘宝平.南方鲇消化道组织形态学的研究[J].天津师范大学学报,2002,22(4):38-42.
- [19] 叶元土,杜仕梅,冯兴无,等.长吻鲈和南方大口鲶胃肠道消化能力的研究[J].动物学研究,1997,18(3):305-313.
- [20] OLSON R J, BOGGS C H. Apex predation by yellowfish tuna (*Thunnus albacares*): independent estimates from gastric evacuation and stomach contents, bioenergetics, and cesium concentrations [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1986,43(9):1760-1775.
- [21] SWENSON W A, SMITH L L. Gastric digestion, food consumption, feeding periodicity, and food conversion efficiency in walleye [J]. J Fish Res Bd Can, 1973,30(9):1327-1336.
- [22] AEDO G, ARANCIBIA H. Gastric evacuation of the redspotted catshark under laboratory conditions [J]. Journal of Fish Biology, 2001,58(5):1454-1457.
- [23] RUGGERONE G T. Gastric evacuation rates and daily ration of piscivorous coho salmon, *Oncorhynchus kisutch* Walbaum [J]. J Fish Biol, 1989,34(3):451-464.
- [24] 刘顺涛,郭学武,陈政强.方氏云鲷的排空率研究[J].海洋水产研究,2002,23(4):20-23.
- [25] FU S J, CAO Z D, PENG J L. Effect of meal size on postprandial metabolic response in Chinese Catfish (*Silurus asotus*) [J]. Journal of Comparative Physiology B, 2006,176(5):489-495.

## The analysis of gastric evacuation characteristics and associated mathematical models in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*)

ZENG Ling-qing<sup>1</sup>, LI Feng-jie<sup>1</sup>, CAO Zheng-dong<sup>2</sup>, ZHANG Yao-guang<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Education of Ministry,

Key Laboratory of Aquatic Science of Chongqing, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, School of Life Science,

Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

**Abstract:** To examine the change traits of chyme mass and fit to the gastric evacuation data in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*), forty eight experimental fish [ (58.45 ± 1.66) g, (19.4 ± 0.2) cm ] were fed individually with a loach meal [ (3.33 ± 0.09) g ] equivalent to 6% (5.8% ± 0.2%) of the catfish's body mass, and removed from the various intervals (0, 2, 4, 8, 16, 24, 36, 48 h) after feeding at 25 °C. The wet and dry mass of the chyme were determined and the applicability of three mathematical models was compared by the good of fitness fitted to gastric evacuation data in juvenile southern catfish. The results of present study showed that; the wet and dry mass of remaining food in stomach as well as percentage of food residual decreased profoundly as postprandial time increased; Though three mathematical models all fitted well the gastric evacuation data, there still were several significant differences among these regression results. As mentioned above, it suggested that the best mathematical model fitted to gastric evacuation data in juvenile southern catfish was the square-root model and its regression equations for wet mass and dry mass of the chyme mass were  $Y^{0.5} = 1.889 - 0.051 \times t$  ( $R^2 = 0.87, P < 0.001$ ) and  $Y^{0.5} = 0.870 - 0.024 \times t$  ( $R^2 = 0.86, P < 0.001$ ), respectively; The gastric evacuation rate of *S. meridionalis* was among the range of 0.051 g/h, and the 99% of gastric evacuation time was among the range of 36.7 h which was similar to the actual measurement values (36 h) in the present study; The juvenile southern catfish and Chinese catfish possess the similar gastric evacuation characters and the optimum mathematical model was the square-root model.

**Key words:** *Silurus meridionalis*; gastric evacuation rate; mathematical model; digestion physiology

**Corresponding author:** ZHANG Yao-guang. E-mail: zhangyg@swu.edu.cn