

饥饿对南方鲇幼鱼胃排空及其数学模型选择的影响

曾令清^{1,2}, 李凤杰¹, 李秀明¹, 皇甫加清¹, 付世建², 曹振东², 张耀光^{1*}

(1. 西南大学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. 重庆师范大学进化生理与行为学实验室, 动物生物学重庆市市级重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 为研究饥饿对南方鲇幼鱼胃排空及其数学模型选择产生的影响, 实验在(25±0.5) °C条件下, 在对照组(饥饿 0 d, S0)和饥饿组(饥饿 16 d, S16; 饥饿 32 d, S32)实验鱼摄入 6%BW(百分比体质量)泥鳅饵料后的不同时间分别测定胃内容物重量及其百分比, 用常见 3 个数学模型对实验数据进行拟合并比较。结果发现, 随摄食后时间的增加, 3 个实验组的胃内容物重量及其百分比均呈现阶段性减少变化特征, 但饥饿组(S16, S32)胃内容物重量百分比的下降速率明显慢于 S0 对照组($P<0.05$); S0 对照组和饥饿组(S16, S32)胃排空的最优数学模型均为平方根模型; S32 饥饿组的胃排空率(0.188 %/h)明显小于 S0 对照组(0.239 %/h)($P<0.05$), 两个饥饿组的胃排空时间(均为 64 h)显著长于 S0 对照组(36 h), 二者都延长了近 78%。研究表明, 饥饿对南方鲇幼鱼的胃排空特征及其最优数学模型未产生显著影响, 但明显降低该种鱼的胃排空率并延长胃排空时间。

关键词: 南方鲇; 饥饿; 胃排空; 消化生理; 数学模型

中图分类号: Q 493.99; S 917.4

文献标志码: A

环境变迁、季节更替等因素常导致动物栖息环境食物资源的时空异质性^[1-2]。在自然界中, 食物资源的时空变动主要包括时间短、频率高(如潮汐、昼夜节律), 时间短、频率低(如急剧气候变化), 时间长、频率高(如季节更替)和时间长、频率低(如缓慢气候变动、长期生态改变和严重人为干扰活动等)4 种类型^[3]。因此, 动物在生活史中常因食物资源的短缺而受到不同程度的饥饿胁迫, 并通过行为、形态和生理层面等方面的调节以适应栖息环境食物资源的短缺逆境^[3]。作为水生态系统变温动物有胃鱼类能否将其胃内食物有效消化并排入肠道中进行营养吸收的能力影响其生长、繁殖等生命活动^[4-5]。胃排空率(Gastric evacuation rate, GER)是指摄食后食物从胃排入至肠道的速率^[6-7], 该方面的相关研究包括野外调查和实验室研究^[7-8]。除水温、摄食水平、食物性质、体质量和种类等因素外^[6-13],

饥饿也会明显影响鱼类的胃排空活动^[9, 12, 14-15]。由于在经历饥饿之后鱼类将面临再次进行摄食活动, 因此, 该方面的相关研究具有重要的生态学意义和生产实践的指导意义。国外的相关研究已有报道^[9, 12, 14-15], 目前国内该方面的研究资料较少。

南方鲇(*Silurus meridionalis*)是我国长江、珠江等流域的大型凶猛性、伏击捕食鱼类, 主要以中、小型鱼类为食物^[16], 在水生态系统中处于较高的营养等级, 已成为相关理论研究的重要研究对象^[1, 16-19]。目前, 有关该种鱼的生物学特征、繁殖生物学、摄食代谢、运动能力和胃排空特征等方面的研究报告十分丰富^[1-2, 16-19], 然而有关饥饿对该种鱼胃排空的研究尚未涉及。为此, 本研究以不同饥饿时间处理的南方鲇幼鱼为实验对象, 在摄食 6% 体质量(body weight, BW)泥鳅(*Misgurnus an-*

收稿日期: 2011-12-04 修回日期: 2012-05-29

资助项目: 国家“九七三”计划前期研究专项(2010CB134405); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903048-08); 西南大学研究生科技创新项目(ky2009008)

通讯作者: 张耀光, E-mail: zhangyg@swu.edu.cn

guillicaudatus) 饵料后的不同时间取样、测定胃内容物重量及其百分比(胃内容物重量/摄食饵料重量), 分别以常见 3 种数学模型(线性、指数和平方根模型)对胃内容物重量的百分比进行拟合, 考察饥饿是否对南方鲇幼鱼的最优胃排空数学模型、胃排空率和胃排空时间产生影响, 将有助于揭示伏击摄食类型鱼类在面对食物资源变动的环境中的胃排空特征及消化生理机制。

1 材料与方 法

1.1 实验鱼及其驯化

实验于 2010 年 10—12 月完成, 实验鱼为西南大学淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室人工繁殖的南方鲇苗种, 在实验室装有自循环水过滤系统的 3 个水泥池中(2.0 m×1.5 m×1.0 m)分别驯养 3 个月, 养殖密度为 200 尾。驯养期间, 以新鲜的泥鳅肉块为饵料, 每隔 3 天在 19:00 饱足投喂一次, 投饵 2 h 后用虹吸管清理残饵及粪便, 同时更换 20% 体积的水体, 以维持水质。驯养水体为经曝气后的自来水, 用气泵向水泥池持续充入空气, 通过溶氧仪(HACH, HQ_{40d})监测水体溶氧水平而使水体的溶氧水平平均高于 7 mg O₂/L。水体温度控制在 (25±0.5) °C, pH=7.6±0.4, 光周期设定为 12 L : 12 D。

1.2 实验设计与取样步骤

挑选大小接近、健康的南方鲇幼鱼(均在最后一次摄食 72 h 后)至流水式鱼类代谢仪的呼吸室(Ø60×270 mm)中进行单尾鱼驯化 9 d。代谢仪的水温、水体 pH、溶氧和光周期均与驯养期一致。对每个实验组的单尾鱼投喂约 6%BW 新鲜泥鳅肉块, 在呼吸室里最后一次摄食饵料后的第 3 天(即呼吸室驯化第 9 天), 分别测量实验鱼的体长(cm)和体质量(g), 然后开始进行摄食对照实验[对照组 S0: (83.45 ± 0.63) g, (83.45 ± 0.63) cm, (20.5 ± 0.1) cm, n=48]和饥饿实验, 所有正式实验的摄食水平(6%)和饵料(泥鳅)与驯化期一致。饥饿结束之后, 分别测量两个饥饿组实验鱼[饥饿 16 d 组(S16): (79.24 ± 1.23) g, (21.6 ± 0.1) cm, n=48; 饥饿 32 d 组(S32): (77.05 ± 0.6) g, (20.8 ± 0.1) cm, n=48]的体长(cm)和体质量(g), 再对每个饥饿组的单尾鱼投喂约 6%BW 新鲜泥鳅肉块, 进入胃排空实验。对照组(S0)和饥饿组(S16, S32)的取样时间均设定在摄食

后的 0、4、8、16、24、36、48 和 64 h, 每个取样点的样本量均为 6 尾。取样时间由本研究的预备实验获得, 最长取样时间为 64 h。

取样步骤^[19]: 先将鱼从呼吸室取出至冰冻解剖盘上, 迅速处死实验鱼; 从肛门旁沿腹中线剪至下颌, 取出内脏团; 用镊子分别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重量已知的 5 mL 离心管中, 再用万分之一电子天平测量离心管重量, 两次离心管重量之差即为胃内容物湿重。胃内容物重量百分比(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尾鱼摄食饵料重量的百分比, W_0 表示在取样时间时胃内容物的重量, W_1 表示实验鱼的摄食饵料重量。

1.3 数学模型的选择

南方鲇幼鱼胃排空的最优数学模型为平方根模型^[19]。本研究目标之一是考察饥饿是否对南方鲇幼鱼胃排空数学模型的选择产生影响。由于饥饿导致实验鱼体质量的明显降低, 饥饿组的摄食量均明显小于对照组(表 1)。为排除摄食量的差异, 将采用胃内容物重量百分比进行 3 个实验组胃排空相关参数的拟合并比较。因此, 本研究采用常用的 3 个数学模型(线性、指数和平方根)分别拟合胃内容物重量百分比的变化规律^[6]:

a. 线性模型: $Y = A - B \times t$

b. 指数模型: $Y = A \times e^{-B \times t}$

c. 平方根模型: $Y^{0.5} = A - B \times t$

式中, Y 为胃内容物重量百分比, A 为常数, B 为瞬时排空率(%/h), t 为取样时间(h)。本研究以相关系数(R^2)、残差平方和(residual sum of squares, RSS)及残差的标准差(standard deviation of residual, SDR)为评选标准^[7], 分析 3 种数学模型的最优性。

1.4 数据处理与统计分析

所有实验数据用 Excel 2003 作常规计算。实验参数用 Statistics 8.0 软件进行双因素(饥饿和时间)方差分析(Two-way analysis of variance), 若发现各时间点存在显著差异则以 Tukey's HSD 进行多重比较。3 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±标准误

(mean±SE)表示, 显著水平定为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 饥饿对胃排空特征的影响

对照组(S0)和饥饿组(S16, S32)的实验鱼体质量、摄食量(饵料湿重)及摄食水平在各个取样时间上均无明显差异(表 1, $P>0.05$)。随摄食后时间的增加, 3 个实验组的胃内容物重量及其百分比均呈现显著减少的阶段性变化特征(图 1), 并且重量和百分比的变化具有较好的同步性(表 1)。其中, 在摄食后 0~4 h, S0 组和 S16 组的胃内容物重量的百分比开始下降($P<0.05$), 但 S32 组仍保持稳定($P>0.05$)。在摄食后 8 h 时, 3 个实验组胃内容物重量百分比分别显著下降了 18.2%、16.4% 和 14.1%(表 1, $P<0.05$), 此时 S32 组的胃内容物重量百分比仍明显大于 S0 组(表 1, $P<0.05$)。在摄食后 24 h 时, 3 个实验组的胃内容物重量百分比再次显著下降, 分别仅占相应饵料重量的 45.2%、56.5% 和 67.1% (表 1, $P<0.05$), 并且两个饥饿组的胃内容物重量百分比均明显高于 S0 组(表 1, $P<0.05$)。在摄食后 36 h 时, S0 组的胃内容物已全部排空, 而 S16 组和 S32 组分别剩 2.1% 和 4.5%, 但二者间并无明显差异(表 1, $P>0.05$)。再过 12 h, S16 组和 S32 组的胃内容物仍还有 0.19% 和 0.49%, 二者直至摄食后 64 h 时才全部排空。

2.2 饥饿对胃排空模型选择的影响

虽然所采用的线性、指数和平方根模型均能较好拟合对照组(S0)和饥饿组(S16, S32)胃内容物重

量百分比数据, 但以相关系数(R^2)、残差平方和(RSS)及残差的标准差(SDR)为标准三者之间存在明显的差异(表 2)。首先, 以 R^2 为标准, 对照组(S0)和饥饿组(S16, S32)的平方根模型的拟合度均优于各自的线性模型和指数模型(表 2)。其次, 以 RSS 为标准, 对照组(S0)的最优数学模型依次为平方根、线性和指数模型, 而两饥饿组(S16, S32)数学模型最优性均分别为平方根、指数和线性模型。最后, 以 SDR 为标准, 发现对照组(S0)和饥饿组(S16, S32)的数学模型最优性与 RSS 的评价结果基本一致(表 2)。综合上述三个评价结果, 平方根模型仍是描述南方鲇幼鱼胃排空特征的最优数学模型。

2.3 饥饿对胃排空率和胃排空时间的影响

采用平方根模型对 S0 组、S16 组、S32 组的胃内容物重量百分比进行参数拟合。结果显示, 不同饥饿组的胃排空率不尽相同(表 2, 图 1)。其中, S0 组和 S16 组的胃排空率分别为 0.239 %/h 和 0.277 %/h, 明显高于 S32 组的 0.188 %/h ($P<0.05$)。相比于 S0 组, S32 组的胃排空率下降了约 20%。此外, 3 个组的胃排空时间也存在明显差异。S0 组的 100% 胃排空时间仅为 36 h, 而 S16 组和 S32 组均为 64 h, 延长了近 78%(表 1, 图 1)。

3 讨论

3.1 饥饿对胃排空特征及其数学模型选择的影响

由于环境变动、季节更替和食物资源时空分布的不均一性, 在自然界中鱼类经常面临食物资源

表 2 南方鲇幼鱼胃内容物重量百分比的模型参数的比较

Tab. 2 Parameters comparisons of the diet mass percentage in juvenile southern catfish using three mathematical models

实验组 experimental groups	数学模型 mathematical models	A	B	R^2	RSS	SDR	P
S0	线性 linear $Y=A-B\times t$	101.10±2.46	-2.99±0.12	0.953	2419.43	8.98	<0.01
	指数 exponential $Y=A\times e^{-B\times t}$	110.79±4.25	-0.061±0.006	0.918	4260.13	11.74	<0.001
	平方根 square-root $Y^{0.5}=A-B\times t$	10.43±0.13	-0.239±0.013	0.962	1966.43	8.06	<0.01
S16	线性 linear $Y=A-B\times t$	88.53±4.88	-2.41±0.20	0.768	19006.47	21.02	<0.001
	指数 exponential $Y=A\times e^{-B\times t}$	111.30±5.00	-0.076±0.008	0.885	9419.02	14.62	<0.001
	平方根 square-root $Y^{0.5}=A-B\times t$	10.35±0.17	-0.277±0.016	0.917	6104.71	12.30	<0.01
S32	线性 linear $Y=A-B\times t$	95.11±3.75	-1.81±0.11	0.865	10118.32	15.90	<0.01
	指数 exponential $Y=A\times e^{-B\times t}$	113.11±3.92	-0.049±0.004	0.927	4874.34	12.74	<0.001
	平方根 square-root $Y^{0.5}=A-B\times t$	10.50±0.12	-0.188±0.009	0.963	2813.37	8.31	<0.01

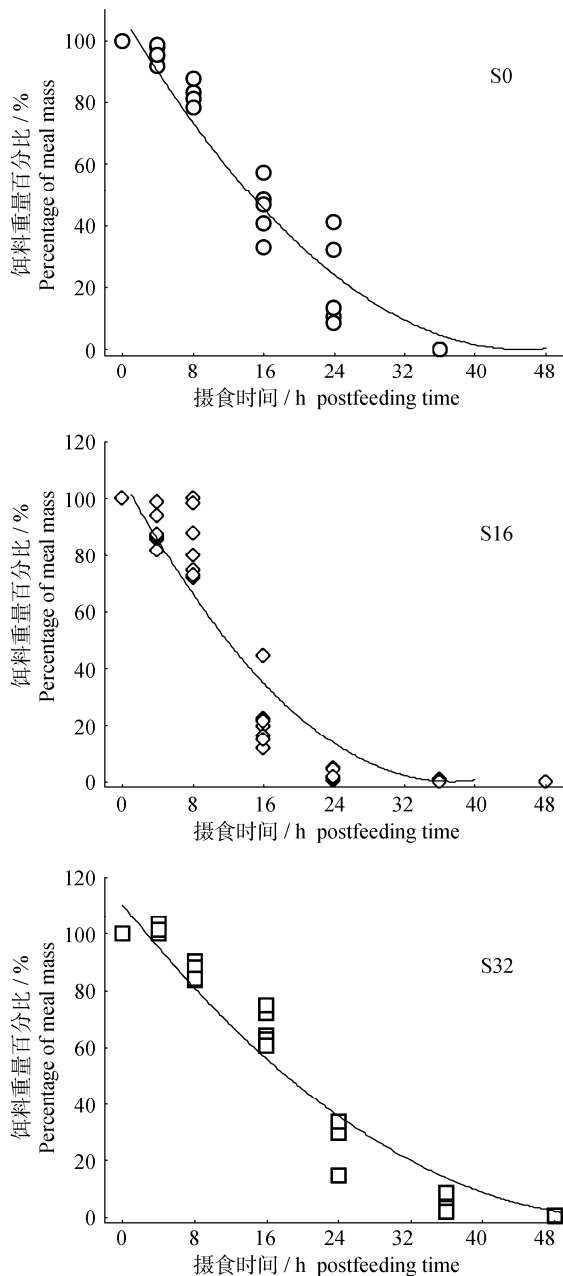


图1 不同饥饿时间条件下南方鲇幼鱼胃内容物重量百分比的平方根拟合曲线

Fig. 1 The square root curves fitted to gastric evacuation data of juvenile southern catfish under different periods of starvation.

的短缺^[1]。鱼类胃排空特征因其个体大小、摄食习性、食性和消化道结构等差异而不尽相同。鱼类胃排空特征主要包括3种类型,即先快后慢如斑鲦(*Clupanodon punctatus*)、玉筋鱼(*Ammoclytes personatus*)等^[8],相对恒定如大比目幼鱼(*Hippoglossus stenolepis*)^[9]、棕鲷(*Salmo trutta*)^[14]以及先慢后快再慢如南方鲇^[19]、鲇^[20]。研究报告,南方鲇幼鱼的最优排空模型更倾向于上述3种胃排空类型

的第3种,即胃排空特征呈现先慢后快再慢的变化规律^[19]。本研究发现,S0对照组和两饥饿组(S16,S32)胃内容物重量及其百分比随摄食后时间的增加均呈现先慢(0~4 h)、后快(4~24 h)、再慢(24~64 h)的变化特征,这与前期的研究结果类似,表明饥饿对南方鲇幼鱼的胃排空特征并未产生显著的影响,这种固有胃排空特征可有有利于南方鲇在经历长期饥饿后仍保持相同的饵料处理方式。类似的研究结果出现在大比目幼鱼,该种鱼的饥饿组(饥饿7 d)的胃排空特征也不受饥饿显著影响,与其对照组相似,但该种鱼的胃排空特征倾向于上述3种胃排空类型的第二种,即相对恒定型^[9]。

资料显示,南方鲇幼鱼胃排空的最优数学模型为平方根模型^[19]。由于长期饥饿易导致鱼类消化系统功能和结构的显著下调^[21],这种下调的消化系统功能状态在继饥饿后首次恢复摄食可能影响鱼类的胃排空过程。本研究所采用3种常用数学模型(线性、指数和平方根)均能较好拟合S0对照组和饥饿组(S16,S32)的实验数据,但在以相关系数(R^2)、残差平方和(RSS)及残差的标准差(SDR)为标准时,发现S0对照组和饥饿组(S16,S32)的最优数学模型一致,均为平方根模型。综合3个评价标准的结果,饥饿期间平方根模型仍是描述南方鲇幼鱼胃排空过程的最优数学模型,表明其胃排空的生理机制(如胃肌肉收缩幅度和频率、胃泌激素的分泌及其调控)可能受环境食物资源丰度的影响较小。

3.2 饥饿对胃排空率和胃排空时间的影响

胃排空率是评价动物消化功能及食物可消化性的重要指标之一,还影响动物的食物消化率、生理代谢水平和摄食率等^[11],也是动物消化道功能状态的间接反映。研究报告,饥饿对真鲷(*Phoxinus phoxinus*)和喀拉鲃(*Catla catla*)胃排空率的影响并不显著^[22-23]。然而,多数研究发现,饥饿后虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)在首次恢复摄食后的胃排空率明显小于对照组,前者的胃排空率(0.059 g/h)约为后者(0.104 g/h)的一半^[12];饥饿也导致鲑(*Salmo salar*)在首次恢复摄食后的胃排空率小于对照组^[15];短期饥饿(1~6 d)对棕鲷的胃排空率无明显影响,但长期饥饿(10~20 d)却能显著降低该种鱼的胃排空率^[14]。本研究用平方根模型分别对3个实验组的数据进行参数拟合,发现S32组的胃排空率(0.188 %/h)明显小于对照组(S0, 0.239 %/h),降低

了约 20%, 说明长期饥饿明显降低了南方鲇幼鱼的胃排空率。此外, 不论以何种数学方程拟合得到的胃排空率, 不难发现: S32 组的胃排空率均相应小于 S0 组, 表明这种由饥饿导致胃排空率明显下降的趋势并不因拟合方程的不同而发生改变。胃排空率降低的可能原因是: 饥饿期间, 由于无消化负荷鱼类的消化系统显著下调生理功能和组织结构, 饥饿时间越长, 消化系统的萎缩程度越高^[24]; 在继饥饿首次恢复摄食后鱼类高度萎缩的消化系统一方面承担大量的生理负荷(营养物质的消化、吸收, 酶的合成和分泌, 代谢产物的排泄等), 另一方面机体还动员相关机制对自身消化系统的功能和结构进行修复, 机体分配给消化的能量支出明显低于未饥饿的个体, 这导致了消化时间的延长, 呈现出较低的胃排空率。

研究发现, 不同饥饿时间(5, 10 和 15 d)对喀拉鲃的胃排空时间均无显著影响^[23]。然而, 饥饿对南方鲇幼鱼胃排空时间的影响却十分明显。本研究发现, S0 对照组仅用 36 h 完全排空胃中食物, 而 S16 组和 S32 组则在摄食后 64 h 才完全将胃中食物排入肠道, 二者的 100% 胃排空时间均延长了近 78%。由于饥饿导致南方鲇幼鱼体质量的显著减少, 本研究设定的摄食水平均为 6%。因此, 饥饿组的摄食量明显小于对照组。饥饿组实验鱼排空较小的摄食量所花费的时间却远远多于较大摄食量的对照组, 这也表明饥饿组实验鱼的消化系统的功能已发生下调, 虽然这种功能的下调可以减少机体的能量消耗, 但付出的代价之一是胃排空能力的降低, 这是动物对环境食物资源匮乏的适应性表现。此外, 前期研究显示, 体质量为 58.5 g 的南方鲇幼鱼在摄食 6%BW 泥鳅饵料后的胃排空时间为 36 h^[19], 这与本研究 S0 对照组的結果一致, 但本研究实验鱼体质量(83.5 g)及摄食量均明显大于前期研究^[19], 推测相近发育阶段的南方鲇幼鱼可能具有接近的食物消化处理能力, 由于摄食量的差异而呈现出不同的胃排空率和相近的胃排空时间。

参考文献:

- [1] 谢小军, 邓利, 张波. 饥饿对鱼类生理生态学影响的研究进展[J]. 水生生物学报, 1998, 22(2): 181-188.
- [2] 张怡, 曹振东, 付世建. 延迟首次投喂对南方鲇(*Silurus meridionalis* Chen)仔鱼身体含能量、体长及游泳能力的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1161-1167.
- [3] Mccue M D. Starvation physiology: Reviewing the different strategies animals use to survive a common challenge[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A:Molecular & Integrative Physiology, 2010, 156(1): 1-18.
- [4] Lemieux H, Blier P, Dutil J D. Do digestive enzymes set a physiological limit on growth rate and food conversion efficiency in the Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. Fish Physiology and Biochemistry, 1999, 20(4): 293-303.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Hurst T P. Temperature and state-dependence of feeding and gastric evacuation in juvenile Pacific halibut[J]. Journal of Fish Biology, 2004, 65(1): 157-169.
- [10] Andersen N G. The effect of meal size on gastric evacuation in whiting[J]. Journal of Fish Biology, 1998, 52(4): 743-755.
- [11] 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.
- [12] Kristiansen H R. Effects of handling, discreet meals and body weight on the individual variation of gastric emptying parameters[J]. Aquaculture Research, 1998, 29(10): 717-729.
- [13] 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.
- [14] Elliott J M. Rates of gastric evacuation in brown trout, *Salmo trutta* L. [J]. Freshwater Biology, 1972, 2(1): 1-18.
- [15] Talbot C, Higgins P J, Shanks A M. Effects of pre- and post-prandial starvation on meal size and evacuation rate of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L. [J]. Journal of Fish Biology, 1984, 25(5): 551-560.
- [16] 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, 1980, 45-52.
- [17] 张耀光, 谢小军. 南方鲇的繁殖生物学研究: 性腺发育及周年变化[J]. 水生生物学报, 1996, 20(1): 8-16.
- [18] Zeng L Q, Cao Z D, Fu S J, et al. Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A:Molecular & Integrative Physiology, 2009, 153(2): 125-130.

- [19] 曾令清, 李凤杰, 曹振东, 等. 南方鲇幼鱼胃排空特征及其数学模型[J]. 水产学报, 2011, 35(2): 58–64.
- [20] 李可贵, 曹振东, 付世建. 鲇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.
- [21] German D P, Neuberger D T, Callahan M N, *et al.* Feast to famine: The effects of food quality and quantity on the gut structure and function of a detritivorous catfish (Teleostei: Loricariidae)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A*, 2010, 155(3): 281–293.
- [22] Russell N R, Wootton R J. Satiety, digestive tract evacuation and return of appetite in the European minnow, *Phoxinus phoxinus* (Cyprinidae) following short periods of pre-prandial starvation[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 1993, 38 (4): 385–390.
- [23] Naik M, Reddy H R V, Annappaswamy T S. Influence of diet composition, starvation and feeding frequency on gastric evacuation rates in Catla, *Catla catla* (Hamilton) fingerlings [J]. *Indian Journal of Animal Sciences*, 2000, 70(10): 1091–1093.
- [24] 付世建, 邓利, 张文兵, 等. 南方鲇幼鱼胃和肝脏的组织结构及其在饥饿过程中的变化[J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 1999, 24(3): 336–342.

Effect of starvation on gastric evacuation and associated mathematical models in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*)

ZENG Ling-qing^{1,2}, LI Feng-jie¹, LI Xiu-ming¹, HUANG FU Jia-qing¹, FU Shi-jian²,
CAO Zheng-dong², ZHANG Yao-guang^{1*}

(1. Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Education of Ministry, Key Laboratory of Aquatic Science of Chongqing, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, Key Laboratory of Animal Biology of Chongqing, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: To investigate the effects of starvation on gastric evacuation and associated mathematical models in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*), experimental fish of both control group (starved 0 d, S0) and starvation groups (starved 16 d, S16; starved 32 d, S32) were all fed a 6% BW loach diet at (25 ± 0.5)°C. After diet offered, the wet masses of stomach content at each sampling time were collected and determined. The percentages (wet mass of residual diet/wet mass of total diet) of residual diet in stomach were also calculated and fitted to three common mathematical equations (linear, exponential and square-root). The results of present study showed that the wet masses of stomach content and percentages of residual diet of both control group and starvation groups decreased significantly, exhibiting a phased trend whereas the decrease rate of percentages of residual diet in starvation groups was lower than that in the S0 control group ($P < 0.05$). Based on the three evaluation standards, the good fit mathematical equation of both the S0 control group and the two starvation groups (S16, S32) was the square-root model. The gastric evacuation rate (0.188 %/h) of the S32 group was much lower than that (0.239 %/h) of the S0 control group whereas the gastric evacuation time (all 64 h) of the two starvation groups was much longer than that (36 h) of the S0 control group, prolonging approximately 78%. Our results suggest that the gastric evacuation and its associated mathematical models did not change after starvation while starvation can decrease significantly the gastric evacuation rate and prolong significantly the evacuation time. All of these findings are adaptive consequences of the natural selection in the southern catfish.

Key words: *Silurus meridionalis*; starvation; gastric evacuation; digestion physiology; mathematical models

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