

斑点叉尾鲷对全植物蛋白饲料的胃排空及 消化道内容物特性研究

朱伟星, 华雪铭*, 钟国防, 税春, 睢敏,
王坛, 王刚, 陈晓明, 吴钊, 孔纯

(上海海洋大学农业部水产种质资源与利用重点开放实验室, 上海 201306)

摘要:为研究斑点叉尾鲷[体质量(115.55 ± 7.54)g]对全植物蛋白饲料的胃排空,实验比较了3种常用数学模型对其排空曲线的拟合程度,同时探究了摄食过程中消化道内容物的水分、pH和消化酶的变化规律。结果发现,3种数学模型均可较好地描述斑点叉尾鲷胃排空曲线,平方根模型最适于定量描述,指数模型次之,线性模型较差。根据平方根模型分别计算得到斑点叉尾鲷胃50%排空时间为12.8 h(以干重计),完全排空约36 h。在摄食后0~36 h内,内容物水分含量在后肠保持不变,在胃部呈缓慢上升趋势,而在前肠和中肠则呈先上升后下降趋势。消化道各段内容物pH在摄食后3 h内均显著下降,3~30 h间总体保持平稳状态,在30 h后又呈显著上升趋势。消化道各段蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶比活力在摄食3 h内显著上升,并在3~30 h内保持相对稳定水平,摄食30 h后呈显著下降趋势。整个摄食过程中,消化道各段消化酶比活力大小依次为前肠>中肠>后肠>胃。研究表明,斑点叉尾鲷在摄食过程中,消化道各段内容物的水分、pH和消化酶比活力均随时间呈现相应的规律性变化。而这些内环境参数的相互作用,综合影响了特定胃排空时间的形成。

关键词:斑点叉尾鲷;胃排空;数学模型;内容物

中图分类号: S 963

文献标志码: A

胃排空率(gastric evacuation rate, GER)指摄食后食物从胃排至肠道的速率,是鱼类生理、生态学的重要参数^[1]。胃排空率的变化直接引起胃肠道排空时间的变化,且对饲料与酶作用的时间影响显著,进而影响酶消化与营养物质的吸收。有关鱼类胃排空,国外早在20世纪90年代对软骨鱼类开展了相关的研究,如柠檬鲨(*Negaprion brevirostris*)^[2],之后陆续在硬骨鱼类中见诸报道。国内的研究相对较晚,到20世纪末才开始出现鱼类胃排空的报道,如黑鲷(*Sparus macrocephalus*)、真鲷(*Pagrosomus major*)、美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)、鲇(*Silurus asotus*)、鳊(*Engraulis japonicus*)^[3-7]。鱼类胃排空受诸多外在因素的影响,如温度、饲料组成、投食频率及饥饿时间等^[8],但是由外在因素引发的机体生理状况的

变化及最终影响胃排空的内在机制尚不清楚。鱼类在摄食过程中由于饲料和水的摄入,会导致胃肠道中离子平衡的改变^[9],从而引起消化道内环境的变化,如pH、消化酶活性^[10-11],而这一变化最终会导致鱼类胃排空的改变^[12]。因此,研究鱼类消化过程中内容物特性的变化具有重要意义。

斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)隶属于鲶形目(Siluriformes),鲶科(Amblycipitidae),又称河鲶、沟鲶、美洲鲶,原产于北美洲,具有食性杂、抗病力强、适应性广、生长快、肉质细嫩、营养丰富经济价值高等特点,已成为我国当前一个重要的淡水养殖品种。斑点叉尾鲷属杂食性鱼类,其消化生理过程复杂。目前业内已开始在斑点叉尾鲷养殖中使用全植物性蛋白饲料,由于植物性原料中含有大量的抗营养因子,这会影响营养物质的消

收稿日期:2014-11-26 修回日期:2015-01-14

资助项目:国家海洋可再生能源专项资金项目(SHME2011SW02);上海高校知识服务平台上海海洋大学水产动物遗传育种中心(ZF1206);上海海洋大学优秀研究生论文培育计划

通信作者:华雪铭, E-mail: xmhua@shou.edu.cn

化吸收过程,最终影响鱼类的摄食规律和生长状态^[13]。目前有关斑点叉尾鮰对全植物蛋白饲料的消化生理研究尚未受到关注。本实验以内容物法探究斑点叉尾鮰胃排空率,同时关注不同摄食时间后不同消化道部位 pH、水分及消化酶的变化,以期探明斑点叉尾鮰胃排空与消化道内环境变化之间的内在关系,为进一步研究其摄食规律及消化生理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验在上海海洋大学营养生态养殖中心进行,挑选 270 尾体格健壮、大小一致的斑点叉尾鮰,暂养于 9 个 400 L 循环养殖系统中,每个循环水养殖系统放养 30 尾鱼。用全植物蛋白饲料驯养 4 周,每天投饵 2 次(8:00、17:00)。实验开始时鱼体质量为(115.55 ± 7.54)g。养殖期间水温为 26.5 °C;为保证水质清新,每天用虹吸法排污并用曝气自来水换水 1/3 ~ 1/4,保持水中溶氧大于 5 mg/L, NH₃-N 小于 0.5 mg/L, pH 7.0 ~ 7.5, 水温为 25 ~ 28 °C。各组水质基本保持一致。全植物蛋白饲料以豆粕(38.0%)、菜粕(10.0%)、花生粕(5.0%)、棉粕(5.0%)、酒糟蛋白(5.0%)、麦麸(11.0%)、全麦粉(15.8%)、瓜尔豆胶(0.5%)、植物油(3.0%)、磷酸氢钙(2.0%)、预混料(1.0%)、赖氨酸(0.2%)、蛋氨酸(1.4%)、乌贼膏(2.0%)、三氧化二铬(0.1%) 配制而成,其概略营养成分:粗蛋白 35.4%、粗脂肪 6.2%、粗灰分 6.6%、水分 8.5%、总能 20.6 MJ/kg。

1.2 实验设计

实验开始前 36 h 停止投喂,保证其消化道彻底排空。实验开始时用全植物蛋白饲料进行一次饱食投喂,1 h 后清除残饵。为减少实验过程中对鱼的应激,在摄食 0、3、6、9、12、18、24、30、36 h 后,依次从 9 个养殖系统中各取 10 尾鱼解剖取样。胃内容物残余百分比由下列公式计算^[1]: $P(\%) = W_0/W_1 \times 100$ 。式中, P 表示任一取样时间胃内容物重量占总摄食量的百分比, W_0 表示在任一取样时间时胃内容物的重量, W_1 表示实验鱼饱食状态下的总摄食量。

用线性、指数和平方根模型分别拟合胃内容物的重量^[1]。

线性模型: $Y = A - Bt$

指数模型: $Y = Ae^{-Bt}$

平方根模型: $Y^{0.5} = A - Bt$

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 为摄食后时间(h)。通过比较各拟合模型的相关系数(R^2)、残差平方和(RSS)、残差的标准差(SDR)来选择斑点叉尾鮰的最佳排空模型。

1.3 取样及测定方法

先将单尾鱼从实验桶中取出,置于含有 100×10^{-6} 丁香酚的水中,待其昏迷后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,剪开胃使内容物全部流入已知重量的离心管内称重。肠道划分参照李萍等^[14]的描述:幽门胃到肠第一个回折为前肠,第一个回折到最后一个回折为中肠,最后一个回折至肛门为后肠。用镊子夹紧每段肠道前后两端并剪断,将内容物全部置于已知重量的离心管内称重。

内容物水分含量按 GB/T 6435 - 2006 方法测定。内容物 pH 值测定根据麦康森^[15]和 Morales 等^[16]方法:取消化道各段(胃、前肠、中肠和后肠)内容物分别加 2 倍质量的去离子水匀浆,于 4 °C 条件下 14 000 r/min 离心 15 min,取上清液,用 pH 计测定其 pH 值。蛋白酶活力采用福林酚法^[17],酶活力定义:每毫克蛋白在 40 °C 下每分钟水解酪蛋白产生 1 μg 酪氨酸,定义为 1 个蛋白酶活力单位(U/g prot)。淀粉酶活力采用碘-淀粉比色法测定,酶活力定义:每毫克蛋白在 37 °C 与底物作用 30 min,水解 10 mg 淀粉定义为 1 个淀粉酶活力单位(U/g prot)。脂肪酶使用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒,酶活力定义:37 °C 条件下,每毫克蛋白在本反应体系中与底物反应 1 min,每消耗 1 μg 底物为一个酶活力单位(U/g prot)。采用全自动生化分析仪测定所有样品中的酶蛋白含量。

1.4 数据处理与统计分析

用 Excel 2007 对所有实验数据作常规计算。实验数据用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),若发现各时间点存在显著差异则进行 Duncan 氏多重比较。3 种数学模型的参数 A、B 均由统计软件 SPSS 17.0 进行曲线拟合得到。所有统计值均以平均值 ± 标准差(mean ± SD)表示,显著水平定为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 斑点叉尾鮰胃排空率的模型选择及胃排空时间

用线性、指数和平方根 3 种数学模型估计斑点叉尾鮰的胃排空率(图 1),分析模型的相关系数 R^2 和显著性检验 P 值,可以确定 3 种数学模型均能很好地拟合实验数据。但为了选择斑点叉尾鮰胃排空率的最佳模型,以相关系数(R^2)、残差平方和(RSS)及残差的标准差(SDR)进一步比较 3 种数学模型(表 1)。结果发现,用湿重表示胃

内容物时,3 种模型的相关系数 R^2 非常接近,综合考虑 RSS 值和 SDR 值,最优模型为平方根模型;而用干重表示胃内容物时,平方根模型的 R^2 值优于线性模型和指数模型,并且平方根模型的 RSS 值和 SDR 值都较其他两种模型的小,可见用干重表示时也以平方根模型的拟合最好。因此,通过综合比较 R^2 、RSS 值和 SDR 值可知,在本实验条件下,平方根模型是模拟斑点叉尾鮰胃排空规律的最优模型。根据平方根模型分别计算斑点叉尾鮰胃 50% 排空时间为 12.8 h(以干重计),而完全排空则大约需要 36 h。

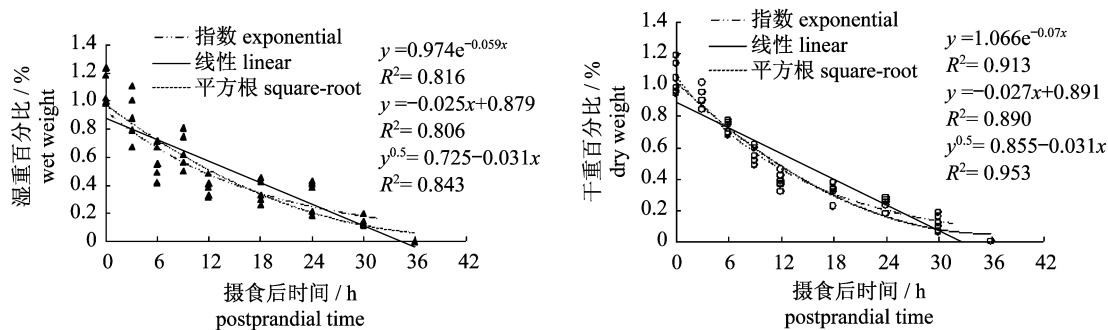


图 1 3 种数学模型对斑点叉尾鮰胃内容物湿重、干重百分比变化的拟合结果

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

表 1 斑点叉尾鮰胃内容物重量变化规律的模型比较

Tab. 1 Comparison of three mathematical models fitted to gastric evacuation data in channel catfish

模型 models		A	B	R^2	RSS *	SDR **
线性 linear	湿重 wet mass	0.879	0.025	0.806	1.170	0.149
$Y = A - Bt$	干重 dry mass	0.891	0.027	0.890	0.681	0.113
指数 exponential	湿重 wet mass	0.974	0.059	0.816	3.632	0.131
$Y = Ae^{-Bt}$	干重 dry mass	1.067	0.072	0.913	2.257	0.067
平方根 square-root	湿重 wet mass	0.725	0.031	0.843	0.950	0.134
$Y^{0.5} = A - Bt$	干重 dry mass	0.855	0.031	0.953	0.294	0.074

注: * RSS 为残差平方和; ** SDR 为残差的标准差

Notes: * RSS. residual sum of squares. ** SDR. standard difference residual

2.2 内容物水分、pH 及消化酶变化

水分变化 摄食后 36 h 内斑点叉尾鮰消化道各段内容物水分变化如图 2 所示。在整个摄食过程中消化道各段内容物水分含量大小依次为前肠 > 中肠 > 后肠 > 胃。胃内容物水分在摄食 3~6 h 后显著升高 ($P < 0.05$), 随后呈缓慢上升趋势。而前肠和中肠内容物水分则表现先上升后下降的变化, 拐点出现在摄食后 12 h 左右。后肠内容物水分在整个消化过程中保持相对稳定, 各取样时间点间无显著性变化 ($P > 0.05$)。

pH 变化 斑点叉尾鮰消化道各段内容物 pH 在摄食后 36 h 内呈现不同的变化规律(图 3)。消化道各段内容物 pH 在摄食后 3 h 内均显著下降 ($P < 0.05$); 其中胃内容物 pH 在摄食后 6 h 内由 5.6 下降到 4.5 ($P < 0.05$), 之后则保持相对稳定状态; 前肠内容物 pH 则在 3~24 h 内保持在 7.0 左右; 而中肠和后肠内容物 pH 则略高于前肠, 且分别在摄食后 3~24 h 和 3~30 h 保持在 7.2 左右, 在各取样时间点间无显著性变化 ($P > 0.05$)。前肠、中肠和后肠内容物 pH 在摄食后的 30~36 h 恢复或接近至初始水平。

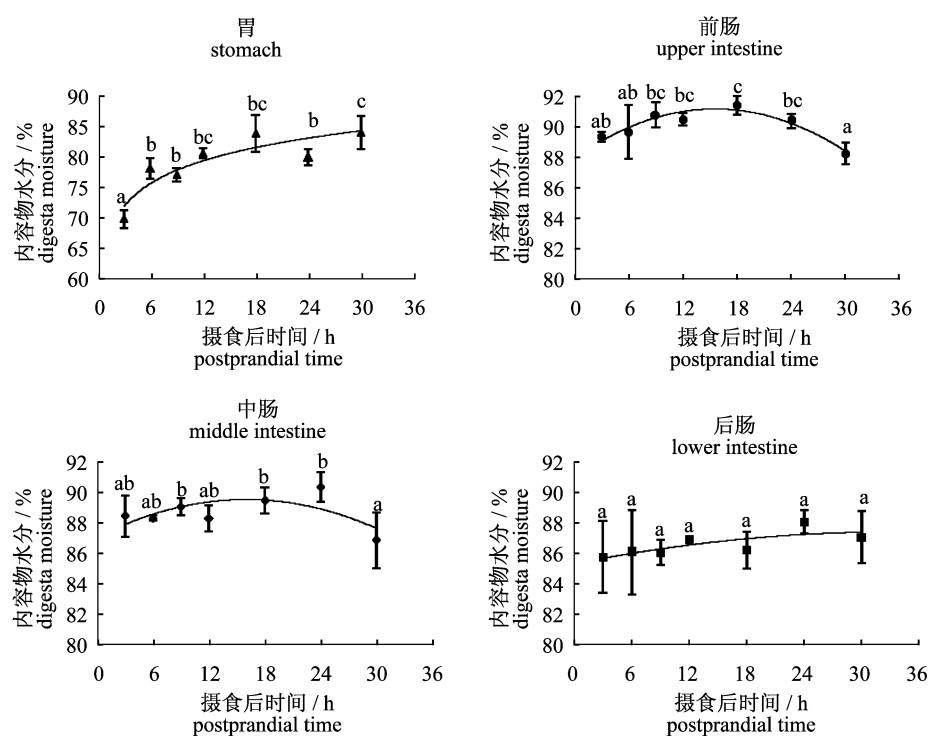


图2 斑点叉尾鮰摄食 36 h 内消化道各段内容物水分变化

Fig. 2 The change of digesta moisture in different portions of the gastrointestinal tract of channel catfish within 36 h after feeding

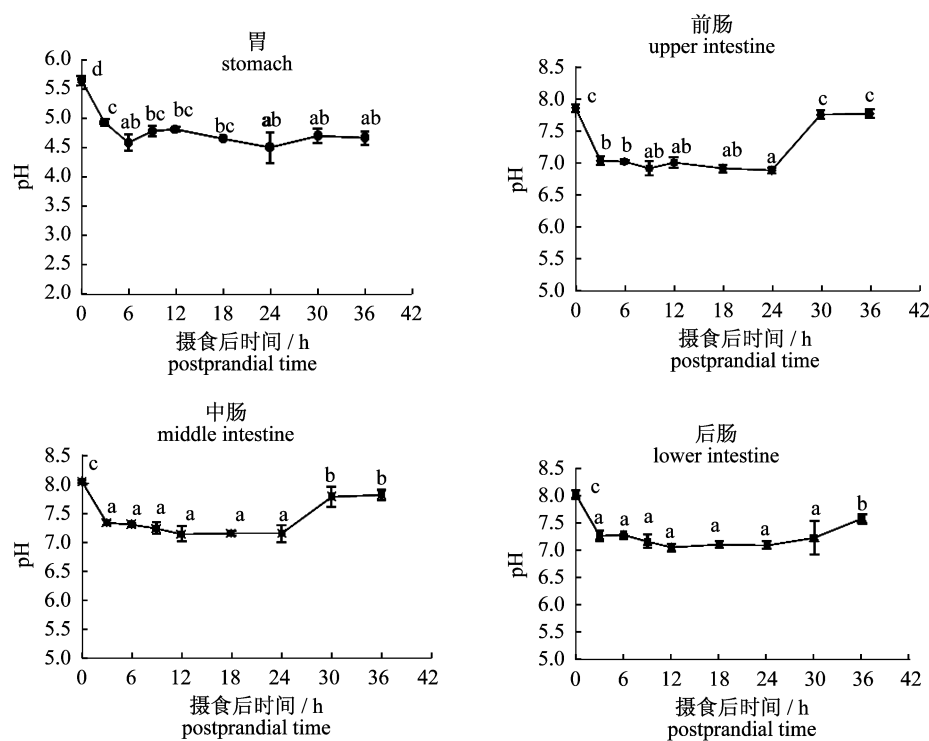


图3 斑点叉尾鮰摄食 36 h 内消化道各段内容物 pH 变化

Fig. 3 The change of digesta pH in different portions of the gastrointestinal tract of channel catfish within 36 h after feeding

消化酶比活力变化 消化道各段蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶比活力在摄食 3 h 之内迅速显著上升 ($P < 0.05$); 在 3 ~ 30 h 内, 除在第 12 h 出现明显上升外, 总体保持相对稳定水平, 各时间点之

间无显著性差异 ($P > 0.05$); 摄食 30 h 后 3 种消化酶的比活力呈显著下降趋势 ($P < 0.05$) (图 4)。整个摄食过程中消化道各段消化酶比活力大小依次为前肠 > 中肠 > 后肠 > 胃。

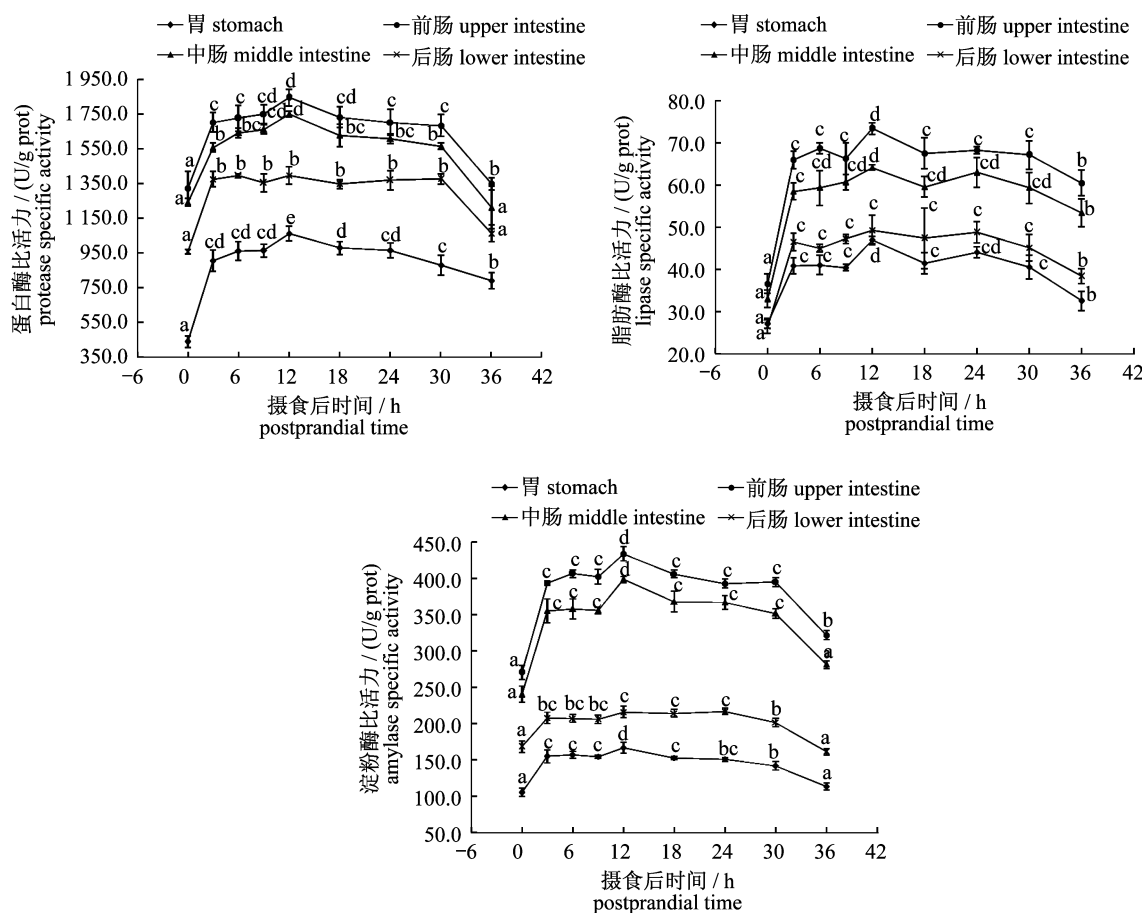


图 4 斑点叉尾鲷摄食 36 h 内消化道各段内容物消化酶变化

Fig. 4 The change of digestive enzymes specific activity in different portions of the gastrointestinal tract of channel catfish within 36 h after feeding

3 讨论

3.1 斑点叉尾鲷的胃排空特征

不同鱼类因食性及消化道结构不同, 其胃排空的方式复杂多样。研究发现鱼类主要存在 3 种典型的排空方式: ①先快后慢型, 也被称为固有的、内在的排空方式, 如玉筋鱼 (*Ammodytes personatus*) 和小鳞鲷 (*Hemirhamphus sajori*) 等以浮游生物为食的小型海洋鱼类^[18], 投喂饲料的瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*)^[19] 和尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)^[20] 也显示出类似的排空特征; ②直线型的下降方式, 如黑鲷^[5] 和美国红鱼^[7] 等大型肉食性鱼类均以该方式排空; ③先

慢后快再慢的方式, 如日本黄姑鱼 (*Nibea japonica*)^[21]、南方鲇 (*Silurus meridionalis*)^[11]。斑点叉尾鲷为杂食性偏肉食性鱼类, 胃容量较大, 摄食后食物在胃内消化时间久, 故排空时间长。在本实验条件下斑点叉尾鲷呈先快后慢的排空特征, 在摄食 13 h 后约 50% 胃内容物已排空, 36 h 时胃和全肠内容物含量均降至最低。而董桂芳等^[22] 用含 20% 白鱼粉的饲料投喂 10.8 g 斑点叉尾鲷, 结果发现 50% 和 98% 胃排空时间分别为 9 和 24 h。覃志彪等^[19] 以 5.9 g 左右和 28.3 g 左右瓦氏黄颡鱼为研究对象, 投喂含 30% 鱼粉的饲料发现其完全排空时间分别为 36 和 40 h。这些结果的差异可能是因为鱼的大小、种类及饲料组

成的不同而造成。

3.2 斑点叉尾鲟的胃排空最优模型

鱼类的排空方式复杂,因此最佳模型的选择备受争议^[1]。目前国内外研究中最常用的有线性模型、指数模型和平方根模型。以上3种模型假设的前提是食物从胃进入肠道是一个比较平滑且连续的过程。但是在实际的鱼类胃排空过程中内容物是以脉冲方式进入前肠的^[8]。因此想要通过理想的胃排空模型深入研究鱼类排空的生理机制,还需要进一步完善具体因素的参数。此外,胃内容物的表示方法不同,其结果也不尽相同。Hopkins等^[23]分别用湿重、干重和体积表示胃内容物量,得到不同的排空模型。Paakkonen等^[24]认为,湿重对胃内容物的有机物数量估计较差。在目前尚无更好的模型情况下,本实验仍采用上述3种模型估计斑点叉尾鲟的胃排空率。研究表明,3种数学模型均能很好地拟合实验数据,且平方根模型是模拟斑点叉尾鲟胃排空规律的最优模型。而胃内容物的表示方式对斑点叉尾鲟胃排空模型选择的影响不大。在同一种模型中,用内容物干重表示的结果优于湿重,这与曾令清等^[1]对南方鲇的胃排空模型研究结果相似。

3.3 内容物中水分、pH及消化酶变化

饲料进入胃部后,其水分含量的增加是消化的首要步骤。研究表明,胃内容物水分大致通过以下途径获得:饲料中的水分、吞饮及胃部分泌^[25]。此外,饲料中含有的渗透性物质(如非淀粉多糖),使胃内容物对细胞外液具有高渗效应,也会导致水分进入胃部^[8]。胃内容物水分在维持渗透压平衡、调节pH和食物消化等过程中具有重要意义。Nikolopoulou等^[9]对金头鲷(*Sparus aurata*)和欧洲鲈(*Dicentrarchus labrax*)的研究发现:二者胃内容物水分含量在摄食后1h内均显著上升,但二者由于种类的差异,胃内容物水分含量也存在差异,最终导致胃排空的不同。在本实验中,前肠内容物水分与胃部相比有所增加,而在整个摄食过程中前肠内容物水分呈现先上升后下降的趋势,相似的结果在虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[26]的研究中已有报道。由于前肠中的胆汁和胰腺分泌物具有较高浓度的碳酸氢盐,在其发挥较强的渗透调节作用时,前肠内容物水分含量就表现为升高,因此,前肠内容物水分含量的升高是胆汁和胰腺分泌物综合作用的

结果^[27]。中肠内容物水分变化规律与前肠相似,但水分含量总体上较前肠有所下降,这表明前肠是水分的主要吸收部位^[26]。而经过消化吸收后的内容物进入后肠后其基本成分已接近粪便,粪便中适宜的水分含量在保证粪便脆度和减少有机物排入养殖水体等方面发挥重要作用^[27]。因此,本实验中斑点叉尾鲟后肠内容物水分含量在整个消化过程中保持在相对稳定的水平,对金头鲷和大西洋鲑(*Salmo salar*)等的研究也发现类似结果^[28-30]。

内容物pH的变化影响到内容物的酸化过程,最终也影响到鱼类的胃排空率。目前已有相关研究报道鱼类摄食过程中胃部内容物pH的变化规律^[8]。Deguara等^[31]发现金头鲷在摄食后8h,pH从5.5下降到2.5,而在10h后又恢复到原来水平。本实验中斑点叉尾鲟摄食后3h内pH也有显著下降,但是没有降到如此低的水平。这可能是因为两者投喂前饥饿时间不同所致^[9],也可能与鱼的种类有关。除此之外,鱼类的摄食量也影响着内容物的pH,饲料摄入量越低,内容物的酸化越快。斑点叉尾鲟摄食后12h内,尽管内容物水分和胃酸在一直增加,但内容物pH却保持相对稳定的水平,这可能是因为内容物所具有的缓冲能力起到了稳定pH的作用。在摄食后24h,随着消化酶对内容物的消化,内容物的缓冲能力逐渐减弱,于是pH显著上升^[32]。机体为了保障粘膜上皮的完整性和胰腺肠道消化酶活性,由胃进入前肠的内容物在胆汁和胰腺所分泌的高浓度碳酸氢盐的作用下,被迅速碱化,其pH也随之由酸性变为碱性^[33]。而在摄食后30~36h,前肠、中肠和后肠内容物已基本排空,其内环境又恢复至摄食前状态,所以pH也恢复至初始水平。

消化酶作为鱼类消化过程中的重要影响因素,对鱼类的生长发育具有极其重要的作用。鱼类在摄食过程中随着时间的变化,其内容物中的消化酶也会呈现相应的变化^[34]。在本实验中发现摄食过程中消化道各段中3种消化酶比活力大小依次为前肠>中肠>后肠>胃。有研究指出,蛋白酶在中性或弱碱性环境中活性较高^[35]。胃中的pH较低,前肠中pH为中性,并且在摄食后相对较长时间段内保持稳定,这就为蛋白酶创造了一个较为合适的中性环境。而对于脂肪酶来说,斑点叉尾鲟胃内的脂肪酶最适pH(5.5)与其

内部环境的 pH 不相符,所以胃内脂肪酶活性一般较弱。肠的 pH 环境为中性或偏碱性,这正好与其脂肪酶最适 pH(7.0)相适应,所以肠内的脂肪酶活性一般较强^[36]。斑点叉尾鮰胃和肠道中的淀粉酶的最适 pH 分别为 5.5 和 7.5^[36],本实验中胃和肠道 pH 在摄食后基本维持在 4.5 和 7.2 左右,胃内较低 pH 环境不利于淀粉酶起作用^[37],而肠道却为淀粉酶提供了较适宜的 pH 环境。此外,本实验中斑点叉尾鮰消化道各段中,3 种消化酶的比活力在摄食后 12 h 均显著上升,这可能与鱼类的昼夜摄食节律性有关^[38]。

综上所述,斑点叉尾鮰在摄食过程中,消化道内环境中的水分、pH 和消化酶均随时间呈现相应的规律性变化。而这些内环境参数相互影响,共同作用于斑点叉尾鮰的摄食和消化过程,最终形成了特定的胃排空时间。在本实验条件下斑点叉尾鮰对全植物蛋白饲料 50% 和完全胃排空时间分别为 12.8 和 36 h。

参考文献:

- [1] Zeng L Q, Li F J, Cao Z D, *et al.* The analysis of gastric evacuation characteristics and associated mathematical models in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(2): 231 - 237. [曾令清, 李凤杰, 曹振东, 等. 南方鲇幼鱼的胃排空特征及其数学模型. 水产学报, 2011, 35(2): 231 - 237.]
- [2] Cortés 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] Li K G, Cao Z D, Fu S J. Analysis of gastric evacuation rate and its mathematical model in Chinese Catfish (*Silurus asotus* Linnaeus) [J]. Journal of Chongqing Normal university: Natural Science, 2009, 3(26): 1 - 4. [李可贵, 曹振东, 付世建. 鲇鱼幼鱼的胃排空率及其模型分析. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2009, 3(26): 1 - 4.]
- [4] Zhang B, Sun Y, Guo X W, *et al.* Gastric evacuation rate of red sea bream (*pagrosomus major*) [J]. Marine Fisheries Research, 1999, 20(2): 86 - 89. [张波, 孙耀, 郭学武, 等. 真鲷的胃排空率. 海洋水产研究, 1999, 20(2): 86 - 89.]
- [5] Zhang B, Sun Y. Gastric evacuation rate of black sea bream (*Sparus macrocephalus*) [J]. Chinese Journal Of Applied Ecology, 2000, 11(2): 287 - 289. [张波, 孙耀. 黑鲷的胃排空率. 应用生态学报, 2000, 11(2): 287 - 289.]
- [6] Sun Y, Ma Z M, Liu Y, *et al.* The gastrice vacuation rate of anchovy *Engrauli japonicus* in different growth stages in Huanghai Sea and East China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(3): 103 - 108. [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. 海洋学报, 2006, 28(3): 103 - 108.]
- [7] Yu F P, Xu W J, Xue L J, *et al.* The gastric evacuation rate of *Sciaenops ocellatus* [J]. Marine Fisheries, 2007, 29(1): 49 - 52. [余方平, 许文军, 薛利建, 等. 美国红鱼的胃排空率. 海洋渔业, 2007, 29(1): 49 - 52.]
- [8] Zhang B, Sun Y, Tang Q S. Gastric evacuation rate of fish and its influence factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(4): 665 - 670. [张波, 孙耀, 唐启升. 鱼类的胃排空率及其影响因素, 生态学报, 2001, 21(4): 665 - 670.]
- [9] Nikolopoulou D, Moutou K A, Fountoulaki E, *et al.* Patterns of gastric evacuation, digesta characteristics and pH changes along the gastrointestinal tract of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) and European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 2011, 158(4): 406 - 414.
- [10] Tibaldi E, Hakim Y, Uni Z, *et al.* Effects of the partial substitution of dietary fish meal by differently processed soybean meals on growth performance, nutrient digestibility and activity of intestinal brush border enzymes in the European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) [J]. Aquaculture, 2006, 261(1): 182 - 193.
- [11] Yufera M, Fernandez Diaz C, Vidaurreta A, *et al.* Gastrointestinal pH and development of the acid digestion in larvae and early juveniles of *Sparus aurata* (Pisces: teleostei) [J]. Marine Biology, 2004, 144(5): 863 - 869
- [12] Fountoulaki E, Alexis M N, Nengas I, *et al.* Effect of diet composition on nutrient digestibility and digestive enzyme levels of gilthead bream (*Sparus aurata* L.) [J]. Aquaculture Research, 2005, 36(13): 1243 - 1251.
- [13] Hua X M, Wang S Z, Chen Y Q, *et al.* Effect of phytase on vertebral shapes and non-specific immune related enzymes activities in channel catfish (*Ictalurus punctatus*) [J]. Journal of Zhejiang

- University: Agriculture and Life Sciences, 2014, 40 (1):94 - 102. [华雪铭,王世忠,陈瑶琴,等.植酸酶对斑点叉尾鲷脊椎形态和非特异性免疫相关酶活力的影响.浙江大学学报:农业与生命科学版,2014,40(1):94 - 102.]
- [14] LI P, Jin L, Kuang G Q. Preliminary study on morphology and histology of the digestive system in *Ictalurus punctatus* [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(4):929 - 932. [李萍,金丽,匡刚桥.斑点叉尾鲷消化系统形态学和组织学的初步研究.湖北农业科学,2010,49(4):929 - 932.]
- [15] Mai K S. Aquatic Animal Nutrition and Feed Science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011:244 - 297. [麦康森.水产动物营养与饲料学[M].北京:中国农业出版社,2011:244 - 297.]
- [16] Morales G A, Marquez L, Saenz De Rodriganez M, et al. Effect of phytase supplementation of a plant-based diet on phosphorus and nitrogen bioavailability in sea bream *sparus aurata* [J]. Aquaculture Nutrition, 2014, 20(2):172 - 182.
- [17] Pan L Q, Wang K X. The experimental studies on activities of digestive enzyme in the larvae *Penaeus chinensis* [J]. Journal of Fisheries of China, 1997, 21(1):26 - 31. [潘鲁青,王克行.中国对虾幼体消化酶活力的实验研究.水产学报,1997,21(1):26 - 31.]
- [18] Sun Y, Liu Y, Zhang B, et al. Gastric Evacuation Rates of 4 small-size fish species in bohai and yellow seas [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(6):679 - 684. [孙耀,刘勇,张波,等.渤、黄海4种小型鱼类摄食排空率的研究.海洋与湖沼,2002,33(6):679 - 684.]
- [19] Qin Z B, Zhao H X, Zhao H L, et al. Effects of feeding frequency on gastric evacuation, growth performance and body composition of juvenile darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachelli* Richardson) [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(4):506 - 511. [覃志彪,赵海祥,赵华林,等.投饲频率对瓦氏黄颡鱼幼鱼胃排空、生长效益及体组成影响.海洋与湖沼,2011,42(4):506 - 511.]
- [20] Sun X F, Feng J, Chen J H, et al. Effects of feeding frequency on gastric evacuation, growth benefit and body composition of juvenile genetic improved farmed tilapia strain of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(11):1677 - 1683. [孙晓锋,冯健,陈江虹,等.投喂频率对尼罗系吉富罗非鱼幼鱼胃排空、生长性能和体组成的影响.水产学报,2011,35(11):1677 - 1683.]
- [21] Zhu Y H, Wang Y B, Hu Z H, et al. Gastric evacuation of juvenile *Nibea japonica* [J]. Marine Fisheries, 2013, 35(4):448 - 452. [朱云海,王跃斌,胡则辉,等.日本黄姑鱼幼鱼的胃排空率.海洋渔业,2013,35(4):448 - 452.]
- [22] Dong G F, Yang Y O, Chen L, et al. Diet feeding rhythm and gastrointestinal evacuation time of juvenile channel catfish and hybrid sturgeon [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(5):876 - 884. [董桂芳,杨严鸥,陈路,等.斑点叉尾鲷和杂交鲟幼鱼昼夜摄食节律和胃肠排空时间的研究.水生生物学报,2013,37(5):876 - 884.]
- [23] Hopkins T E, Larson R J. Gastric evacuation of three food types in the black and yellow rockfish *Sebastes chrysomelas* (Jordan and Gilbert) [J]. Journal of Fish Biology, 1990, 36(5):673 - 681.
- [24] Paakkonen J P, Marjomaki T J. Gastric evacuation rate of burbot fed single-fish meals at different temperatures [J]. Journal of Fish Biology, 1997, 50(3):555 - 563.
- [25] Kristiansen H R, Rankin J C. Discrimination between endogenous and exogenous water sources in juvenile rainbow trout fed extruded dry feed [J]. Aquatic Living Resources, 2001, 14(6):359 - 366.
- [26] Bucking C, Wood C M. Water dynamics in the digestive tract of the freshwater rainbow trout during the processing of a single meal [J]. The Journal of Experimental Biology, 2006a, 209(10):1883 - 1893.
- [27] Bucking C, Wood C M. Gastrointestinal processing of Na^+ , Cl^- , and K^+ during digestion: Implications for homeostatic balance in freshwater rainbow trout [J]. American Journal of Physiology Regulatory Integrative and Comparative Physiology, 2006, 291(6):1764 - 1772.
- [28] Leenhouders J I, Adjei-Boateng D, Verreth J A J, et al. Digesta viscosity, nutrient digestibility and organ weights in African catfish (*Clarias gariepinus*) fed diets supplemented with different levels of a soluble non-starch polysaccharide [J]. Aquaculture Nutrition, 2006, 12(2):111 - 116.
- [29] Fernandez F, Miquel A G, Guinea J, et al. Digestion and digestibility in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) the effect of diet composition and ration size [J]. Aquaculture, 1998, 166(1-2):67 - 84.
- [30] Refstie S, Bakke-McKellep A M, Penn M H, et al.

- Capacity for digestive hydrolysis and amino acid absorption in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed diets with soybean meal or inulin with or without addition of antibiotics [J]. *Aquaculture*, 2006, 261 (1): 392 - 406.
- [31] Deguara S, Jauncey K, Agius C. Enzyme activities and pH variations in the digestive tract of gilthead sea bream [J]. *Journal of Fish Biology*, 2003, 62 (5): 1033 - 1043.
- [32] Bucking C, Wood C M. The effect of postprandial changes in pH along the gastrointestinal tract on the distribution of ions between the solid and fluid phases of chime of rainbow trout [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2009, 15(3): 282 - 296.
- [33] Boge G, Leydet M, Houvet D. The effects of hexavalent chromium on the activity of alkaline phosphatase in the intestine of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquatic Toxicology*, 1992, 23(3-4): 247 - 260.
- [34] Vera L M, De Pedro N, Gomez-Milan E, et al. Feeding entrainment of locomotor activity rhythms, digestive enzymes and neuroendocrine factors in goldfish [J]. *Physiology & Behavior*, 2007, 90 (2 - 3): 518 - 524.
- [35] Klahan R, Areechon N, Yoonpundh R, et al. Characterization and activity of digestive enzymes in different sizes of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) [J]. *Kasetsart Journal*, 2009, 43(1): 143 - 153.
- [36] Song W, Zhang Q. Research on the activity of the digestive enzyme of *Ictalurus punctatus* [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(29): 16259 - 16261. [宋威,张芹. 斑点叉尾鲷消化酶活性研究 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(29): 16259 - 16261.]
- [37] Hua X M, Wang S Z, Chen Y Q, et al. Effect of plant-based diet supplemented with phytase on digestive enzyme activities in grass carp and NEW GIFT Nile tilapia [J]. *Chinese Journal of Zoology* 2013, 48(4): 562 - 568. [华雪铭,陈瑶琴,王世忠,等. 植酸酶对草鱼和新吉富罗非鱼消化酶活性的影响. 动物学杂志, 2013, 48(4): 562 - 568.]
- [38] Cao X L, Guo B, Peng M, et al. Circadian rhythms of digestive enzyme activities of *Ctenopharyngodon idella* of different developmental stages [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2009, 7(1): 120 - 123. [曹香林,郭蓓,彭墨,等. 不同发育阶段草鱼消化酶活力的变化及其昼夜节律. 河南农业科学, 2009, 7(1): 120 - 123.]

**Patterns of gastric evacuation and digesta characteristics in the
gastrointestinal tract of channel catfish (*Ictalurus punctatus*)
when fed plant protein based diet**

ZHU Weixing, HUA Xueming*, ZHONG Guofang, SHUI Chun, JU Min,
WANG Tan, WANG Gang, CHEN Xiaoming, WU Zhao, KONG Chun
(Key Laboratory of Freshwater Fishery Germplasm Resources, Ministry of Agriculture,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The present experiment was conducted to investigate gastric evacuation rates, change of digesta moisture content, pH values and digestive enzyme specific activity along the gastrointestinal tract of channel catfish [body weight (115.55 ± 7.54) g] fed plant protein based diet. Three kinds of models used to fit the gastric evacuation were compared. The results showed that; all of these three kinds of models could fit the experimental data quite well, and the square root model was the best, followed by the exponential model and the linear model. The asymptotic level of 50% and 98% gastrointestinal evacuation calculated by the square root model (dry weight basis) apparently reached at 12.8 h and 36 h, respectively. Digesta moisture in the stomach showed a slow increasing trend, the upper intestine and middle intestine showed an increasing trend after the fall, while no changes were found in the lower intestine. The pH values in each part of the gastrointestinal tract decreased significantly within 3 h after feeding ($P < 0.05$), no remarkable changes were found ($P > 0.05$) from 3 to 30 h after feeding, while a noteworthy increasing level, recovering or drawing near the initial level was observed in intestine, within 30 – 36 h after feeding ($P < 0.05$). The digestive enzyme activity had a significant increase within 3 h ($P < 0.05$) and kept at a stable level within 3 – 30 h, while had a significant decrease ($P < 0.05$) 30 h after feeding. The digestive enzyme specific activity varied in different gastrointestinal sections, and ranged as upper intestine > middle intestine > lower intestine > stomach. In summary: In this study the digesta moisture, pH value and digestive enzyme along the gastrointestinal tract of channel catfish showed a regular change after feeding, and gastric evacuation pattern was affected by the interaction of these factors.

Key words: *Ictalurus punctatus*; gastric evacuation; mathematical model; digesta

Corresponding author: HUA Xueming. E-mail: xmhua@shou.edu.cn