

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20191216001

http://www.yykxjz.cn/

高云红, 景琦琦, 黄滨, 关长涛, 张佳伟, 李文升, 翟介明, 贾玉东. 云龙石斑鱼胃排空特征和摄食消化特性研究. 渔业科学进展, 2021, 42(1): 92-99

Gao YH, Jing QQ, Huang B, Guan CT, Zhang JW, Li WS, Zhai JM, Jia YD. Characteristics of gastric evacuation and feeding digestion in "Yunlong" groupers (*Epinephelus moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂). Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(1): 92-99

云龙石斑鱼胃排空特征和摄食消化特性研究*

高云红^{1,3} 景琦琦^{2,3} 黄滨^{2,3} 关长涛^{2,3} 张佳伟⁴
李文升⁴ 翟介明⁴ 贾玉东^{2,3①}

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306; 2. 青岛国家科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071; 3. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071; 4. 莱州明波水产有限公司 莱州 261400)

摘要 为阐明养殖新品种云龙石斑鱼(*Epinephelus moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)摄食胃排空特征和消化酶活性变化规律, 本研究检测了体重为(680.35±39.84) g 云龙石斑鱼摄食后胃内容物百分比, 比较了线性模型、平方根模型和立方模型对胃排空曲线的拟合程度, 分析了云龙石斑鱼摄食后血清中葡萄糖、皮质醇含量和肝脏消化酶活性变化, 并对胃排空率与消化酶进行了相关性分析。结果发现, 云龙石斑鱼摄食后, 胃排空率呈典型的先慢后快再慢的消化类型。3种模型均能拟合云龙石斑鱼的胃排空数据, 其中, 立方模型拟合效果最佳。由立方模型可知, 云龙石斑鱼胃 80%排空(食欲基本恢复)时间为 9.5 h, 100%排空(食欲完全恢复)约为 14.8 h。血清中葡萄糖、皮质醇含量及肝脏中消化酶(淀粉酶、糜蛋白酶和脂肪酶)活性在摄食胃排空过程中均呈先升高后降低的趋势。摄食后, 血清中皮质醇、葡萄糖含量和肝脏内消化酶活性逐渐升高, 0~3 h 上升速率较慢, 3~6 h 内呈急剧上升的变化趋势, 且在摄食后 6 h, 血清中皮质醇、葡萄糖含量和肝脏内消化酶活性达到最高($P<0.05$), 之后呈显著下降趋势, 云龙石斑鱼瞬时排空速率与消化酶活性呈正相关($P<0.05$)。综上, 基于云龙石斑鱼胃排空特征和摄食消化特性, 结合生产实践, 在食欲基本恢复后开始投喂, 投喂间隔为 10 h 左右, 每日投喂 2 次, 效果最佳。

关键词 云龙石斑鱼; 胃排空率; 数学模型; 皮质醇; 葡萄糖; 消化酶

中图分类号 S965 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)01-0092-08

鱼类的摄食和消化是一个复杂的动态生理过程, 多种激素和消化酶参与其中, 保证其有序进行。在激素和消化酶的作用下, 鱼类形成各自特有的胃排空类型, 一直以来, 研究者都将胃排空率 (Gastric

evacuation rate, GER)作为评价鱼类消化功能的重要指标(余方平等, 2007)。胃排空率是指摄食后食物从胃中排出的速率(李可贵等, 2009)。自20世纪60年代起, 胃排空率被广泛应用于鱼类生理、生态学的评价。迄

* 山东省重大科技创新工程项目(2018SDKJ0303-4)、科技部国家重点研发项目(2019YFD0900904)和中国水产科学研究院创新团队项目(2020TD51)共同资助 [The work was supported by Major Scientific and Technological Innovation Projects in Shandong Province (2018SDKJ0303-4), National Key R&D Program of China (2019YFD0900904), and Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2020TD51)]. 高云红, E-mail: gaoyunhong2016@163.com

① 通讯作者: 贾玉东, 副研究员, E-mail: jiajd@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2019-12-16, 收修改稿日期: 2020-01-05

今为止,国内学者已对多种养殖鱼类的胃排空率进行了系统研究,并以多种数学模型拟合胃排空率,为科学制定养殖鱼类投喂频率提供重要参数。冯宪斌等(2012)深入分析了岩原鲤(*Procypris rabaudi*)幼鱼胃排空率和摄食量;余方平等(2007)测定了美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)的胃排空率;郭浩宇等(2017)阐明了许氏平鲷(*Sebastes schlegelii*)幼鱼的胃排空特征;仇登高等(2018)明确了投喂频率对鞍带石斑鱼(*Epinephelus lanceolatus*)胃排空率及消化酶的影响。研究表明,鱼类胃排空率受自身内在因素和诸多外在因素的共同影响,如鱼类的种属、日龄、饲养温度、饲料种类、投喂频率等(张波等,2001)。摄食后,鱼类摄食神经中枢产生神经冲动,刺激下丘脑垂体分泌促进摄食或抑制摄食因子,加之食物摄入后对胃肠道刺激,生理性反馈调控摄食因子分泌,引起血液生理指标和消化酶活性的变化,影响鱼类摄食行为发生。而摄食消化过程中,胃排空率与鱼类血液生理状态和消化酶活性变化是否具有相关性目前尚未有深入研究。因此,阐明鱼类血液生理、消化酶和胃排空之间的关系,将有助于了解其食欲恢复状况,科学制定最佳投喂方案,对鱼类高效健康养殖和经济性状调控意义重大。

云龙石斑鱼(*E. moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)是由中国水产科学研究院黄海水产研究所与莱州明波水产有限公司选育的石斑鱼新品种,其父本为鞍带石斑鱼,母本为云纹石斑鱼(*E. moara*),云龙石斑鱼兼具二者优点,具有肉质鲜美、营养价值高、生长速度快的特点(唐江等,2018;李振通等,2019;成美玲等,2018)。2016年初全面推向市场后,获得了极高赞誉。目前,对云龙石斑鱼的研究主要集中在亲本表型数量性状分析、幼鱼温度和盐度适应调控机制(邢道超等,2017)、肌肉营养成分分析及品质评价(王林娜等,2018)等方面,而有关云龙石斑鱼摄食投喂的研究尚未见报道。本文通过研究云石斑鱼摄食后胃排空特征,比较线性模型、平方根模型和立方模型对胃排空曲线的拟合程度,构建云龙石斑鱼胃排空的数学模型,查明云龙石斑鱼摄食后血清中葡萄糖、皮质醇含量和肝脏消化酶活性的变化规律,旨在优化云龙石斑鱼养殖投喂策略,为实现标准化养殖提供有效技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验鱼由莱州明波水产有限公司提供,共150尾,平均体重为(680.35±39.84)g,体长为(30.05±1.72)cm。实验前在5m×5m×1.5m养殖池中暂养1周(50尾/池,共

3个养殖池),水温为18℃~19℃,溶氧为9~10mg/L,pH为7.8~8.2,NH₃-N<0.5mg/L。采用循环水饲养,每天投喂2次(间隔12h)。投喂海童系列商品配合饲料(粗蛋白≥48%,粗脂肪≥10%,粗灰分≤17.0%,Ca≤4.0%,赖氨酸≥2.5%,总磷≥1.5~3.0,含少量几丁质的虾或蟹)。

1.2 实验设计与样品收集

实验开始前24h停止投喂,以保证其消化道彻底排空。实验开始时,用颗粒饲料进行一次性饱食投喂,1h后清除残饵。在投喂后0、3、6、9、12、15、18和24h,依次从每个养殖池中取6尾鱼,MS-222(100mg/L)麻醉,解剖取样。测定全长、体长和体重,尾静脉取血,置于1.5ml的EP管中,静置15~20min,3500r/min离心10min,取上清液,保存于-20℃,用于检测皮质醇和葡萄糖含量。解剖取出胃、肝脏和肠组织。以滤纸吸干胃表面水分、称重,排净胃内容物;用蒸馏水反复清洗胃内壁,滤纸吸干、称重,所得重量差值即为胃内容物质量(湿重)(曾令清等,2011);肝脏和肠组织于-20℃保存,用于检测消化酶活性。

1.3 样品处理与指标检测

1.3.1 血清中皮质醇和葡萄糖含量测定 血清中葡萄糖含量采用南京建成公司试剂盒检测,血清中的葡萄糖经葡萄糖氧化酶的作用生成葡萄糖酸和H₂O₂,后者在过氧化物酶的作用下,将还原性4-氨基安替比林与酚偶联缩合成可被分光光度计测定的物质,所用波长为505nm,单位为mmol/L。血清中皮质醇含量采用竞争法检测,向预先包被了抗体的酶标孔中加入样本,再加入生物素标记的识别抗原,在37℃下孵育30min,经PBST洗涤5次后,加入亲和素HRP,在37℃下孵育30min,洗涤后加入显色液,37℃显色10min,再加入终止液,在450nm波长下检测,单位为ng/ml。

1.3.2 消化酶的测定 准确称重肝脏和肠组织,按重量(g):体积(ml)=1:9,加入9倍体积1.2%的生理盐水,冰水浴条件下机械匀浆,2500r/min,离心10min,取上清液,以生理盐水1:9稀释为1%组织匀浆。肝脏和肠组织总蛋白浓度,淀粉酶、糜蛋白酶、脂肪酶比活力均采用南京建成公司试剂盒检测,波长为562、660、580和660nm,所用仪器为UV 2800紫外可见分光光度计。

1.3.3 胃排空率计算 胃内容物残余百分比计算公式为:

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

式中, P 表示任一取样时间胃内容物重量(湿重)

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(谢小军等, 1998)。

用线性、立方根和平方根 3 种数学模型分别拟合云龙石斑鱼胃排空率实验数据。各数学模型公式如下:

线性模型: $Y=A-Bt$

立方模型: $Y=At^3+Bt^2+Ct+D$

平方根模型: $Y^{0.5}=A-Bt$

式中, Y 为胃内残余食物的湿重; t 为进餐后的时间; A 、 B 、 C 、 D 为常数。

采用 SPSS 18.0 和 GraphPad Prism 7.0 进行数据统计分析及绘图。通过比较分析各拟合模型的相关系数(R^2)、残差标准差(SDR)、残差平方和(RSS)值, 确定云龙石斑鱼最佳胃排空模型。

以相邻取样点胃内容物量差值(S_t)的自然对数值与所对应的间隔取样时间(t)进行线性回归, 其线性方程为:

$$\ln S_t = at + b$$

式中, 所得线性方程的斜率 a 即为云龙石斑鱼的瞬时排空率(刘丽华等, 2005)。

1.4 数据分析

实验数据采用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 当差异达到显著水平, 进行 Duncan 氏多重比较。数据用平均值±标准误(Mean±SEM)表示, $P < 0.05$ 为差异显著。3 种数学模型的参数 A 、 B 、 C 、 D 均由统计软件进行曲线拟合得到。

2 结果

2.1 云龙石斑鱼胃排空特征及胃排空模型

饱食投喂后, 云龙石斑鱼的胃内容物百分比随时间呈规律性变化(图 1)。投喂后, 云龙石斑鱼胃内容物百分比呈逐渐下降的趋势, 3~6 h 急剧下降, 由 88.5% 降至 33.2%, 差异显著($P < 0.05$), 0~3、6~15 h 胃内容物百分比下降速率较缓, 摄食后 15 h, 胃内容

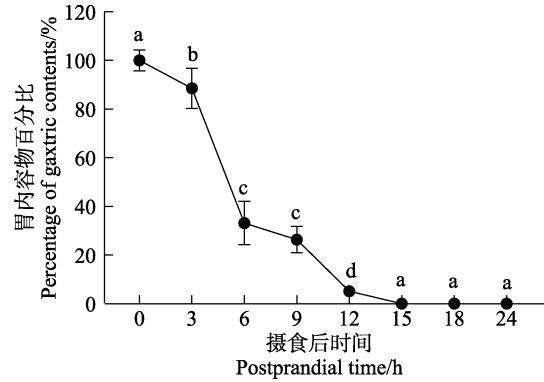


图 1 云龙石斑鱼胃排空变化

Fig.1 The changes of gastric evacuation of Yunlong grouper (*E. moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)

数据以平均值±标准误表示, 显著性差异用小写字母表示 ($P < 0.05$, $n=10$), 下同

Data are presented as Mean±SEM, the significant differences are shown in lower-case letters ($P < 0.05$, $n=10$). The same as below

物基本排空, 属于典型的先慢后快再慢胃排空类型。

利用 SPSS 软件将实验结果与数学模型进行拟合, 可知线性模型、平方根模型、立方模型均可拟合本实验胃排空率(图 2)。从 R^2 来看, 立方模型>平方根模型>线性模型; 从 RSS 来看, 线性模型>平方根模型>立方模型; 从 SDR 来看, 线性模型>平方根模型>立方模型(表 2)。综合 R^2 、RSS、SDR 结果, 立方模型对云龙石斑鱼胃排空率的拟合程度最佳, 其公式为 $Y = -0.001t^3 + 0.099t^2 - 2.644t + 20.677$, 根据公式可得, 投喂后 14.8 h, 胃内容物完全排空。

2.2 云龙石斑鱼消化酶的变化

云龙石斑鱼消化酶呈规律性变化(图 3)。饱食投喂后 0~3 h, 云龙石斑鱼肝脏内淀粉酶活性无显著变化, 3~6 h 呈急剧上升趋势($P < 0.05$), 6 h 时活性达到最高值(0.151 U/g prot), 之后呈下降趋势, 至投喂后 15 h 时, 肝脏内淀粉酶活性恢复至初始水平, 而投喂后云龙石斑鱼肠道内的淀粉酶活性无显著变化, 且肝脏内淀粉酶活性高于肠道内淀粉酶活性(图 3A)。肝肠内的糜蛋白酶、脂肪酶活性均呈现先升高后降低的变

表 1 云龙石斑鱼胃排空曲线的 3 种数学模型拟合

Tab.1 The fitting with 3 types of mathematical models for gastric evacuation of Yunlong grouper (*E. moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)

模型 Model	公式 Equation	R^2	RSS*	SDR**
线性模型 Linear model	$Y = -0.757t + 13.591$	0.670	539.93	14.59
平方根模型 Square root model	$Y^{0.5} = 4.4878 - 0.248t$	0.943	92.76	2.58
立方模型 Cubic model	$Y = -0.001t^3 + 0.099t^2 - 2.644t + 20.677$	0.946	88.790	2.54

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

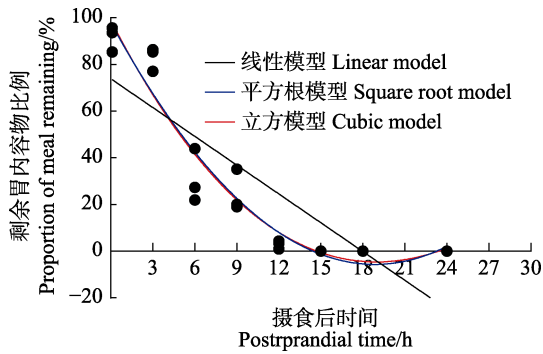


图 2 云龙石斑鱼胃排空曲线的 3 种数学模型拟合
Fig.2 The fitting with 3 types of mathematical models for gastric evacuation of Yunlong grouper (*E. moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)

化趋势, 且均在饱食投喂后 6 h 时, 活性达到最高 ($P < 0.05$), 随后显著下降(图 3B、图 3C)。同时, 肠道内糜蛋白酶活性显著高于肝脏 ($P < 0.05$)。如表 2 所示, 云龙石斑鱼瞬时胃排空率与肝肠消化酶(除肠道内淀粉酶)均呈正相关 ($P < 0.05$), 消化酶之间无显著相关性。

2.3 云龙石斑鱼血清皮质醇和葡萄糖的变化

云龙石斑鱼血清中皮质醇和葡萄糖的含量均呈

先升高后降低的变化趋势(图 4)。投喂后 0~3 h, 云龙石斑鱼血清中葡萄糖含量逐渐升高, 3~6 h 急剧升高, 差异性显著 ($P < 0.05$), 6 h 时葡萄糖含量达到最高 (21.02 mmol/L), 6~18 h 呈下降趋势, 18 h 后血清中葡萄糖含量不再变化(图 4A)。血清中皮质醇含量同葡萄糖含量呈相似的变化趋势, 投喂后, 血清中皮质醇含量逐渐升高, 3~6 h 急剧增加, 差异显著 ($P < 0.05$), 6 h 时, 其含量达到最高 (152.6 mmol/L)。6 h 后, 血清中皮质醇含量呈显著下降趋势, 12 h 后无显著差异 (图 4B; $P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 鱼类胃排空方式与模型选择

鱼类种属多样, 摄食习性和消化道结构存在差异, 胃排空方式复杂多样。研究表明, 鱼类胃排空方式主要有 3 种类型: 直线下降型、先快后慢型和先慢后快再慢型。胃排空类型与食物类型、饲料组成及鱼类摄食偏好存在显著相关性, 以大而不易碎食物为食的鱼类, 胃排空方式多为直线下降型, 如黑鲷 (*Acanthopagrus schlegelii*) (张波等, 2001)、美国红鱼 (余方平等, 2007);

表 2 云龙石斑鱼瞬时排空率与消化酶相关性分析
Tab.2 Correlation between instantaneous emptying rate and digestive enzymes in Yunlong grouper (*E. moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)

项目 Items	瞬时排空率 Instantaneous emptying rate (a)	肝脏 Liver			肠道 Intestine		
		淀粉酶 Amylase	糜蛋白酶 Chymotrypsin	脂肪酶 Lipase	淀粉酶 Amylase	糜蛋白酶 Chymotrypsin	脂肪酶 Lipase
瞬时排空率 Instantaneous emptying rate (a)	1	0.843**	0.759*	0.725*	0.401	0.762*	0.943**
肝淀粉酶 Liver amylase		1	0.463	0.471	0.070	0.688	0.552
肝糜蛋白酶 Liver chymotrypsin			1	0.659	0.167	0.624	0.600
肝脂肪酶 Liver lipase				1	0.363	0.609	0.719*
肠淀粉酶 Intestine amylase					1	0.415	0.425
肠糜蛋白酶 Intestine chymotrypsin						1	0.654
肠脂肪酶 Intestine lipase							1

注: *: 相关性在 0.05 水平显著(单尾); **: 相关性在 0.01 水平显著(双尾)

Notes: *: The correlation was significant at 0.05 (single tailed); **: The correlation was significant at 0.01 (two-tailed)

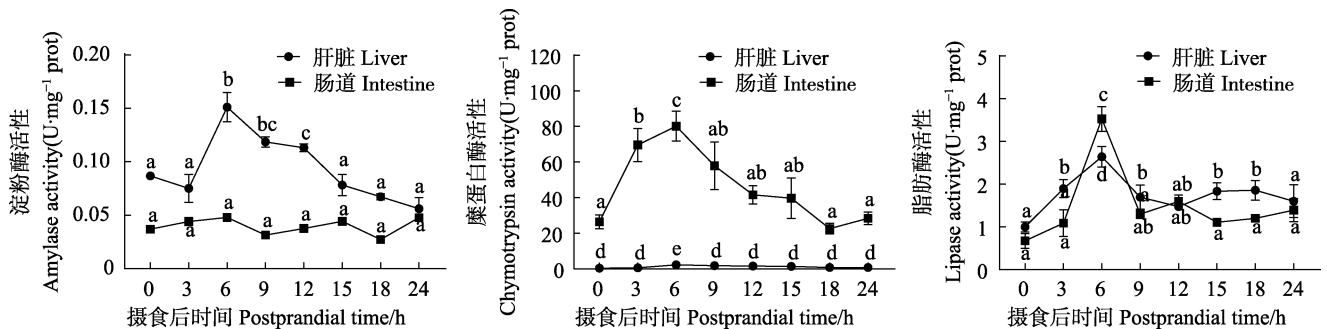


图 3 云龙石斑鱼摄食 24 h 内消化酶变化

Fig.3 Changes of digestive enzymes of Yunlong grouper (*E. moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂) within 24 hours of feeding

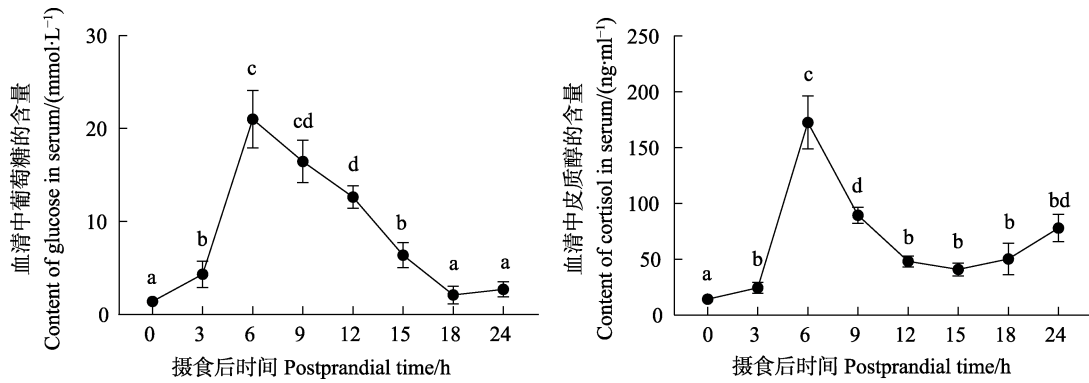


图 4 云龙石斑鱼摄食 24 h 内血清中葡萄糖和皮质醇变化
Fig.4 Changes of glucose and cortisol in serum of Yunlong grouper (*E. moara* ♀×*E. lanceolatus* ♂) within 24 hours after ingestion

以小而易碎食物为食的鱼类，多呈先快后慢型，也被称为固有的内在排空方式，如：黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*) (覃志彪等, 2011)、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*) (孙晓峰等, 2011)。本研究中，投喂云龙石斑鱼颗粒饲料中添加了几丁质外壳的虾或蟹，延缓了消化酶与食物作用的时间，云龙石斑鱼胃排空方式呈先慢后快再慢型。日本皇姑鱼(*Nibe japonica*) (朱云海等, 2013)、俄罗斯鲟鱼(*Acipenser gueldenstaedtii*) (张涛等, 2015)也呈现类似的胃排空方式。

鱼类的胃排空方式复杂多样，如何选择并构建合适的胃排空数学模型存在较大争议。Jobling(1981)首次以数学模型评估了鱼类胃排空率变化。随后，各国研究者纷纷开展了以数学模型拟合胃排空率的研究，但如何选择合适的数学模型拟合数据，鉴于鱼类种属间差异，仍要根据具体情况进行深入分析研究。目前，常见的数学拟合模型有线性模型、指数模型和平方根模型 3 种(张波等, 2001)。本研究中，线性模型、平方根模型、立方模型均可拟合实验数据，通过统计学分析发现，立方模型拟合度最佳。Ruohonen 等(1998)对虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的研究发现，在投喂后 15 h，胃内容物消化完全，但在其胃排空率达到 80%~90%时(投喂后 6 h)，其食欲已经基本恢复，所以，将投喂后 6 h 作为最适投喂间隔。Riche 等(2004)对尼罗罗非鱼的研究同样可以证实这一点。根据立方模型公式得出，云龙石斑鱼在投喂后 9.5 h 胃排空率达到 80%，14.8 h 时，胃内容物全部排空。

3.2 消化酶活性分析

消化酶依据消化对象不同分为淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶和纤维素酶，其活性变化直接影响鱼类对营养物质的消化吸收，进而调控鱼类的生长发育(Vera et al., 2007)。鱼类消化酶活性受鱼类种属、生理状态、发

育阶段等内在因素和水温、盐度、饲料等外在因素共同影响(黄瑾等, 2011)。鱼类食性不同，消化道内消化酶组成和活性存在显著差异，肉食性鱼类消化道短，食物的消化吸收主要在肠道，肠道中蛋白酶活性远高于其他组织(区又君等, 2012; 向泉, 2002; 吴水清, 2014)。本研究结果显示，摄食后云龙石斑鱼肝脏和肠道内消化酶活性均呈规律性变化，且在肝脏和肠道内消化酶分布有所不同。肝脏中淀粉酶呈先升高后降低的变化趋势，肠道内淀粉酶活性无显著变化，肠道内糜蛋白酶活性显著高于肝脏内糜蛋白酶活性，脂肪酶在肝脏和肠道内活性均呈先升高后降低的趋势。吴婷婷等(1994)对鳊鱼(*Siniperca chuatsi*)、青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、鲤(*Cyprinus carpio*)、鲫(*Carassius auratus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)和鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)消化酶活性的研究中也得到了类似结果，发现草鱼、鲤、鲢肝脏内淀粉酶活性要高于肠道内淀粉酶活性，但青鱼和鲫肝脏内淀粉酶活性显著低于肠道内淀粉酶活性。付新华等(2005)对大菱鲂(*Scophthalmus maximus*)的研究发现，肠是水解脂肪和淀粉的主要器官，而肠水解蛋白的能力较弱。鱼类消化酶分布广泛，种属差异必然会造成其时空分布及表达活性不同。Santos 等(2016)也得出了相似的结论。云龙石斑鱼作为肉食性鱼类，其糜蛋白酶活性和脂肪酶活性显著高于淀粉酶活性，同时，胃排空速率与肝肠消化酶呈显著正相关关系。

3.3 血液生理学变化

哺乳动物下丘脑中存在中枢葡萄糖感应器和整合与发放食欲信号的中枢，可通过监测机体内葡萄糖的变化控制动物体的摄食情况(杨丽萍等, 2014)。Fuentes 等(2013)发现，鱼类存在与哺乳动物类似的摄食调控机制，葡萄糖同样对鱼类的摄食有着重要的调控作

用。本研究中, 摄食后, 云龙石斑鱼血清中葡萄糖含量显著升高, 6 h 时达到峰值, 且在 3~12 h 时, 血清中葡萄糖含量持续维持在较高水平, 认为此时云龙石斑鱼食欲尚未恢复, 不适宜投喂。李晨晨等(2018)在对黄颡鱼的研究中指出, 摄食后鱼体血清葡萄糖浓度显著升高, 且饲喂不同饲料葡萄糖升高浓度有所不同。皮质醇为糖皮质激素, 皮质醇诱导葡萄糖水平升高, 促进脂肪积累(Kominiarek *et al.*, 2018)。葡萄糖和皮质醇协同作用, 共同参与调节鱼类摄食和营养物质的摄取。Milligan 等(2003)对虹鳟的研究发现, 皮质醇可以激活肝脏内酶活性, 促进糖元合成。因此, 摄食后 4~9 h 中, 血清中皮质醇浓度显著升高, 可能主要用于葡萄糖合成, 但具体代谢调控机制尚不明确, 需要进一步研究。

4 结论

综上所述, 摄食后云龙石斑鱼血清内葡萄糖和皮质醇含量、肝脏及肠道内消化酶活性均呈规律性变化, 胃排空率呈典型的先慢后快再慢类型, 其最优拟合模型为立方模型, 根据模型可知, 云龙石斑鱼食欲基本恢复时间为投喂后 9.5 h (80%胃排空), 基于以上数据结合生产实际, 云龙石斑鱼每日饲喂 2 次, 每次间隔 10 h 左右效果最佳。

参 考 文 献

- Cheng ML, Tian YS, Wu YP, *et al.* Chromosome karyotype analysis of hybrids of *Epinephelus moara*♀×*Epinephelus lanceolatus*♂. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(2): 67–75 [成美玲, 田永胜, 吴玉萍, 等. 云纹石斑鱼(♀)×鞍带石斑鱼(♂)杂交后代染色体核型分析. *渔业科学进展*, 2018, 39(2): 67–75]
- Feng XB, Yang DG, Li Q, *et al.* Gastric evacuation rate and daily food consumption of artificially-reared juvenile rock carp *Procypris rabaudi* (Tchang). *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(4): 654–661 [冯宪斌, 杨德国, 李茜, 等. 人工养殖条件下岩原鲤幼鱼排空率与摄食量. *中国水产科学*, 2012, 19(4): 654–661]
- Fu XH, Sun M, Sun SC. Activity of digestive enzymes in *Scophthalmus maximus*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(1): 26–32 [付新华, 孙谧, 孙世春. 大菱鲆消化酶的活力. *中国水产科学*, 2005, 12(1): 26–32]
- Fuentes EN, Safian D, Einarsdottir IE, *et al.* Nutritional status modulates plasma leptin, AMPK and TOR activation, and mitochondrial biogenesis: Implications for cell metabolism and growth in skeletal muscle of the fine flounder. *General and Comparative Endocrinology*, 2013, 186: 172–180
- Guo HY, Zhang XM, Zhang ZH, *et al.* Study on feeding habits of *Sebastes schlegelii* larvae and gastric evacuation rate of juvenile. *Journal of Fisheries of China*, 2017, 41(2): 285–296 [郭浩宇, 张秀梅, 张宗航, 等. 许氏平鲉仔、稚鱼的摄食特性及幼鱼胃排空率. *水产学报*, 2017, 41(2): 285–296]
- Huang J, Xiong BX, Chen J, *et al.* Research advances in digestive enzyme of fish and its influencing factors. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011(5): 129–131, 141 [黄瑾, 熊邦喜, 陈洁, 等. 鱼类消化酶活性及其影响因素的研究进展. *湖南农业科学*, 2011(5): 129–131, 141]
- Jobling M. Mathematical models of gastric emptying and the estimation of daily rates of food consumption for fish. *Journal of Fish Biology*, 1981, 19(3): 245–257
- Kominiarek MA, Grobman W, Adam E, *et al.* Stress during pregnancy and gestational weight gain. *Journal of Perinatology*, 2018, 38(5): 462–467
- Li CC, Huang WW, Jin M, *et al.* Effects of fish meal replacement with soybean protein concentrate on growth performance, feed utilization and digestive enzyme and antioxidant enzyme activities of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*). *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(1): 375–386 [李晨晨, 黄文文, 金敏, 等. 大豆浓缩蛋白替代鱼粉对黄颡鱼生长、饲料利用、消化酶和抗氧化酶活性的影响. *动物营养学报*, 2018, 30(1): 375–386]
- Li KG, Cao ZD, Fu SJ. Analysis of gastric evacuation rate and its mathematical model in Chinese catfish (*Silurus asotus* Linneus). *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2009, 26(3): 8–11 [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, 26(3): 8–11]
- Li ZT, Cheng ML, Tian YS, *et al.* Analysis of the morphological differences between hybrid “*Epinephelus moara*♀ × *E. lanceolatus*♂” and its parents. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(4): 73–83 [李振通, 成美玲, 田永胜, 等. 杂交种“云龙石斑鱼”与亲本的形态差异分析. *渔业科学进展*, 2019, 40(4): 73–83]
- Liu LH, Yang SY, Feng JP, *et al.* Studies on growth and ecological conversion efficiency of young fish of *Hapabgenys nitens*. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2005, 24(1): 109–114 [刘丽华, 杨圣云, 冯洁婷, 等. 斜带髯鲷幼鱼生长和生态转换效率的研究. *台湾海峡*, 2005, 24(1): 109–114]
- Milligan CL. A regulatory role for cortisol in muscle glycogen metabolism in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* Walbaum. *Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(18): 3167–3173
- Ou YJ, Liao GY, Li JE. Morphology and histology of the digestive tract in *Cheilinus undulatus*. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(6): 86–92 [区又君, 廖光勇, 李加儿. 波纹唇鱼消化道的形态学和组织学. *热带海洋学报*, 2012, 31(6): 86–92]
- Qin ZB, Zhao HX, Zhao HL, *et al.* Effects of feeding frequency on gastric evacuation, growth performance and body composition of juvenile darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachellii*). *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(4): 506–511 [覃志彪, 赵海祥, 赵华林, 等. 投喂频率对瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachellii*)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]
- Qiu DG, Zheng LY, Huang ZC, *et al.* The effect of feeding frequency on growth performance, food intake and immune enzyme activities of *Epinephelus lanceolatus* in flowing water cultivation. Journal of Southwest University (Natural Science), 2018, 40(7): 51-57 [仇登高, 郑乐云, 黄种持, 等. 投喂频率对流水养殖鞍带石斑鱼生长、摄食及免疫酶活力的影响. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(7): 51-57]
- Riche M, Haley DI, Oetker M, *et al.* Effect of feeding frequency on gastric evacuation and the return of appetite in tilapia *Oreochromis niloticus*. Aquaculture, 2004, 234(1): 657-673
- Ruohonen K, Vielma J, Grove DJ. Effects of feeding frequency on growth and food utilization of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed low-fat herring or dry pellets. Aquaculture, 1998, 165(1-2): 111-121
- Santos JF, Soares KLS, Assis CRD, *et al.* Digestive enzyme activity in the intestine of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) under pond and cage farming systems. Fish Physiology and Biochemistry, 2016, 42(5): 1259-1274
- Sun XF, Feng J, Chen JH, *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*). Journal of Fisheries of China, 2011, 35(11): 1677-1683 [孙晓峰, 冯建, 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]
- Tang J, Tian YS, Li ZT, *et al.* Analysis of genetic characters in *Epinephelus moara*, *E. lanceolatus* and their hybrids. Journal of Agricultural Biotechnology, 2018, 26(5): 819-829 [唐江, 田永胜, 李振通, 等. 云纹石斑鱼和鞍带石斑鱼及其杂交后代遗传性状分析. 农业生物技术学报, 2018, 26(5): 819-829]
- Vera LM, Pedro ND, Gómez-Milán E, *et al.* Feeding entrainment of locomotor activity rhythms, digestive enzymes and neuroendocrine factors in goldfish. Physiology & Behavior, 2007, 90(2): 518-524
- Wang LN, Tian YS, Tang J, *et al.* Analysis and quality evaluation of nutritional components in the muscle of *Epinephelus moara*, *E. lanceolatus* and hybrid "Yunlong grouper". Journal of Fisheries of China, 2018, 42(7): 1085-1093 [王林娜, 田永胜, 唐江, 等. 云纹石斑鱼、鞍带石斑鱼及杂交“云龙斑”肌肉营养成分分析及品质评价. 水产学报, 2018, 42(7): 1085-1093]
- Wu SQ. Studies on post-embryonic development of Qinglong grouper (*Epinephelus coioides*♀×*E. lanceolatus*♂) and histochemistry and immunohistochemistry of digestive tract in juveniles. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2014 [吴水清. 斜带石斑鱼(♀)×鞍带石斑鱼(♂)杂交子代早期发育及幼鱼消化道组织化学和免疫组织化学的研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2014]
- Wu TT, Zhu XM. Studies on the activity of digestive enzymes in mandarin fish, black carp, grass carp, common carp, crucian carp and silver carp. Journal of Fishery Sciences of China, 1994, 1(2): 10-17 [吴婷婷, 朱晓鸣. 鳊鱼、青鱼、草鱼、鲤、鲫、鲢消化酶活性的研究. 中国水产科学, 1994, 1(2): 10-17]
- Xiang X. Study on the main digestive enzyme activities and enzymolysis kinetics to feeds protein of *Silurus asotus* Linnaeus. Master's Thesis of Southwest University, 2002 [向象. 鲇消化道主要消化酶活性及对饲料蛋白质酶解动力学研究. 西南农业大学硕士研究生学位论文, 2002]
- Xie XJ, Deng L, Zhang B. Advances and studies on ecophysiological effects of starvation on fish. Acta Hydrobiologica Sinica, 1998, 22(2): 181-188 [谢小军, 邓利, 张波. 饥饿对鱼类生理生态学影响的研究进展. 水生生物学报, 1998, 22(2): 181-188]
- Xing DC, Song XF, Peng L, *et al.* Effects of temperature and salinity on oxygen consumption rate and ammonia excretion rate of juvenile grouper. Fishery Modernization, 2017, 44(3): 7-14 [邢道超, 宋协法, 彭磊, 等. 温度与盐度对云龙石斑鱼幼鱼耗氧率和排氨率的影响. 渔业现代化, 2017, 44(3): 7-14]
- Yang LP, Qin CB, Zheng WJ, *et al.* Progress in research on the regulation of glucose sensing and carbohydrate metabolism in fish. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(9): 1639-1649 [杨丽萍, 秦超彬, 郑文佳, 等. 鱼类的葡萄糖感知与糖代谢调节研究进展. 水产学报, 2014, 38(9): 1639-1649]
- Yu FP, Xu WJ, Xue LJ, *et al.* The gastric evacuation rate of *Sciaenops ocellatus*. 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]
- Zeng LQ, Li FJ, Cao ZD, *et al.* The analysis of gastric evacuation characteristics and associated mathematical models in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*). 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]
- Zhang B, Sun Y, Tang QS. Gastric evacuation rate of fish and its influence factors. 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]
- Zhang T, Li WJ, Zhuang P. Analysis of gastric evacuation characteristics and associated mathematical models in juvenile *Acipenser gueldenstaedtii*. Marine Fisheries, 2015, 37(2): 151-155 [张涛, 李伟杰, 庄平. 俄罗斯鲟幼鱼的胃排空特征及其数学模型. 海洋渔业, 2015, 37(2): 151-155]
- Zhu YH, Wang YB, Hu ZH, *et al.* Gastric evacuation of juvenile *Nibea japonica*. 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]

Characteristics of Gastric Evacuation and Feeding Digestion in “Yunlong” Groupers (*Epinephelus moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)

GAO Yunhong^{1,3}, JING Qiqi^{2,3}, HUANG Bin^{2,3}, GUAN Changtao^{2,3}, ZHANG Jiawei⁴,
LI Wensheng⁴, ZHAI Jieming⁴, JIA Yudong^{2,3}①

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306;

2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071; 3. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 4. Mingbo Aquatic Co. Ltd., Laizhou 261400)

Abstract In the present study, the gastric evacuation rates, hepatic and intestinal digestive enzyme activities, and serum glucose and cortisol concentrations in “Yunlong” groupers (*Epinephelus moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂: body weight (680.35±39.84) g) were evaluated to illustrate the characteristics of gastric evacuation and digestive enzyme activity. In addition, the degree of fitting of the gastric emptying curve was analyzed using a linear model, square root model, and cubic root model. The gastric evacuation rates of “Yunlong” groupers exhibited a typical curve digestive pattern (slow-fast-slow) during the gastric evacuation process. All the three mathematical models could fit the gastric evacuation data of “Yunlong” groupers; however, the cubic model obtained the optimal result. According to the cubic model, 80% (appetite basic recovery) and 100% (complete recovery of appetite) gastric emptying occurred at feeding after 9.5 hours and 14.8 hours in “Yunlong” groupers, respectively. The hepatic and intestinal digestive enzyme (amylase, chymotrypsin, and lipase) activities increased significantly from 0 to 6 h, and then decreased from 9 to 24 h during the gastric evacuation process in “Yunlong” groupers. The concentrations of serum glucose and cortisol corresponded with digestive enzyme activities during gastric emptying in “Yunlong” groupers. In addition, serum cortisol and glucose concentrations and digestive enzyme activity increased slowly from 0 h to 3 h, then increased significantly from 3 h to 6 h ($P<0.05$), with the highest values obtained at 6 h, and then decreased significantly until gastric evacuation was completed ($P<0.05$). In addition, the gastric evacuation rate was positively correlated with digestive enzyme activity during gastric evacuation in “Yunlong” groupers. In conclusion, the results reveal that the optimal interval feeding recommended is at 10 h and twice per day, based on the gastric evacuation rate and feeding digestion characteristics of “Yunlong” groupers in captivity.

Key words “Yunlong” groupers (*Epinephelus moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂); Gastric evacuation rate; Mathematical model; Cortisol; Glucose; Digestive enzyme

① Corresponding author: JIA Yudong, E-mail: jiayd@ysfri.ac.cn