

文章编号: 1674-5566(2026)01-0024-12

DOI: 10.12024/jsou.20240904637

不同饵料对菊黄东方鲀生长、胃排空特征和消化酶活性的影响

解志龙, 于小雯, 侯文杰

(上海市水产研究所/上海市水产技术推广站, 上海 200433)

摘要: 为探究摄食不同饵料(冰鲜鱼、膨化饲料和粉状饲料)对菊黄东方鲀(*Takifugu flavidus*)生长、胃排空率及胃排空过程消化酶活性变化的影响,进行了为期60 d的室内生长实验,每组设置3个重复,每个重复30尾菊黄东方鲀幼鱼,每次投喂时做到饱食投喂。同步进行胃排空率实验,仍设置3个组别,每组3个重复,分别在摄食后0、2、4、6、8、10、12、14和16 h比较摄食不同饵料后胃内容物百分比,同时进行肝脏和肠道组织采样,测定摄食不同饵料后消化酶活性变化。结果表明:(1)自养殖20 d开始至实验结束,粉状饲料组菊黄东方鲀幼鱼的平均体质量均显著($P<0.05$)高于膨化饲料组,而粉状饲料组和冰鲜鱼组之间无显著性差异($P>0.05$),就摄食率而言膨化饲料组显著最低($P<0.05$),而冰鲜鱼组与粉状饲料组之间无显著差异;(2)就摄食不同饵料后胃内容物百分比变化而言,摄食粉状饲料胃排泄速率最快,摄食冰鲜鱼次之,而摄食膨化饲料胃排泄最慢,摄食不同饵料后最优胃排空模型均为平方根模型;(3)就摄食不同饵料50%和80%胃排空理论时间而言,粉状饲料组的胃排空时间均最短,冰鲜鱼组次之,膨化饲料组最长,其中80%胃排空的理论时间为10.43、11.29和11.44 h;(4)摄食不同饵料后菊黄东方鲀肝脏中3种消化酶随时间推移整体呈现“M”型变化趋势,肠道中消化酶整体变化呈现先升高后下降的趋势,肠道和肝脏中糜蛋白酶和淀粉酶活性高低与饵料的底物浓度呈正相关关系。综上,膨化饲料硬度高和软化时间长的物理特性可能延缓了鱼体胃排空进程,进而造成摄食率下降,加之膨化饲料蛋白含量低进一步制约了菊黄东方鲀的生长发育。建议继续开展菊黄东方鲀最适蛋白需求的研究,同时进一步优化膨化饲料配方,提升膨化饲料的消化利用效率。

关键词: 菊黄东方鲀; 生长; 胃排空; 消化酶活性

中图分类号: S 963.7 文献标志码: A

菊黄东方鲀(*Takifugu flavidus*)隶属于鲀形目(Tetraodontiformes)鲀科(Tetraodontidae)东方鲀属(*Takifugu*),具有味道鲜美、食用习俗悠久、营养丰富和经济价值高的特点。近年来随着菊黄东方鲀人工繁育和养殖技术的突破,逐渐成为沿海地区海水养殖增产增效的养殖新品种之一^[1]。针对菊黄东方鲀的研究主要集中在生物学特性^[2-3]、繁殖生物学^[4]、养殖模式^[5]和营养品质^[6]等方面,但有关菊黄东方鲀营养需求、饵料投喂以及配合饲料研发的研究相对滞后。目前,菊黄东方鲀规模化池塘养殖使用的饵料主要有冰鲜鱼和粉状饲料^[7],但冰鲜鱼存在营养不全面、来源不稳定、易携带致病菌等缺点^[8];粉状饲料投喂时需现用现拌,操作繁琐,水中溶失率高^[7]。膨化饲

料制粒过程需高温高压处理,能有效杀菌脱毒,且适口性好,利于消化和吸收^[9-10],有研究表明使用膨化饲料代替粉状饲料可以显著降低饵料系数,降低养殖系统的N、P排放^[7],因此通过饵料对比评估膨化饲料在菊黄东方鲀养殖中的应用潜力具有重要的现实意义。

鱼类胃排空率(Gastric evacuation rate)是指鱼类摄食饵料后食糜从胃中排出的速率,胃排空的快慢直接影响饵料在消化道中消化吸收时间,进而影响鱼类的摄食量、消化率和生理代谢水平,是评价鱼类消化、生理及生态研究的重要参数^[11-12]。通过设置胃排空率实验可以计算胃排空时间,据此设置合适的投喂间隔,提高养殖对象生长和养殖性能,获得更大的经济效益^[13]。众多

收稿日期: 2024-09-14 修回日期: 2025-03-11

基金项目: 上海市2025年水产遗传资源保护和开发利用补贴项目(沪农委〔2025〕27号)

作者简介: 解志龙(1998—),男,助理工程师,研究方向为水产动物营养生理和生态养殖。E-mail:bif_zlxie@163.com

通信作者: 侯文杰, E-mail:wjhou01@163.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydxxb.com>

研究表明影响胃排空率的因素有温度、投喂频率、规格大小、饲料颗粒大小和形状以及能量密度,且有研究表明饲料的粒径和形状以及能量密度能显著影响其排空率^[14-15],因此通过探究不同饵料对鱼类胃排空率的影响,有利于理解不同饵料在鱼体内的消化吸收过程,更深入全面的评估摄食饵料的优劣情况,实验结果将为进一步了解菊黄东方鲀胃排空规律提供参考。

鱼类的消化过程主要依靠消化系统所分泌消化酶对食物的酶解,主要分为蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶等3大类,影响鱼类消化酶活性的因素主要包括温度、pH、底物浓度、摄食饵料的差异、不同生长发育情况等^[16]。鱼类消化酶活性的高低直接决定着对主要营养物质的消化和吸收,并且影响鱼类胃排空模型,同时也是衡量鱼类生理生化的关键指标^[17-18]。菊黄东方鲀摄食不同饵料后,不同器官消化酶活性可以衡量其对主要营养成分的消化和吸收情况,同时也是评估其对不同饵料适应程度的有效指标。鉴于此,拟研究摄食不同饵料(冰鲜鱼、膨化饲料和粉状饲料)对菊黄东方鲀生长、胃排空特征及消化酶活性的影响,

计算摄食不同饵料后胃排空时间,旨在了解不同饵料对菊黄东方鲀消化和吸收过程的影响,为实际养殖中饵料种类的选择和合适投喂间隔提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验在上海市水产研究所启东科研基地进行,实验用鱼为池塘养殖的菊黄东方鲀2月龄幼鱼。实验共设计3个组别,分别为冰鲜鱼组(G1)、膨化饲料组(G2)和粉状饲料组(G3),其中冰鲜鱼主要由小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)和带鱼(*Trichiurus lepturus*)组成,购买自启东市吕四港,保存于-20℃冷库内,投喂时将鱼头和杂质去掉后用切鱼机将其切碎,切碎后单块质量约为1g。膨化饲料和粉状饲料均为商业饲料,统一购买于福州海马饲料有限公司,其中膨化饲料粒径为2.0 mm;粉状饲料每次投喂前,需加入与饲料质量相同的自来水拌料成饲料团,且现拌现用。3种饵料的常规生化见表1。

表1 3种饵料的常规生化组成
Tab. 1 Proximate composition of three experimental diets

项目 Items	冰鲜鱼 Iced trash fish	膨化饲料 Expanded diet	粉状饲料 Powder soft diet	%干物质
水分 Moisture	76.24±2.07 ^a	10.25±0.05 ^c	51.31±1.19 ^b	
粗蛋白 Crude protein	56.68±4.01 ^a	41.24±0.94 ^b	44.63±2.81 ^b	
总脂 Total lipid	26.46±2.02 ^a	15.03±0.44 ^b	5.32±0.09 ^c	
总碳水化合物 Total carbohydrate	2.12±0.63 ^a	2.21±0.26 ^a	4.68±0.77 ^b	

注:同行数据不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Notes: Values within the same row with different letters mean significant difference ($P<0.05$).

1.2 实验设计

从室外池塘中捕获约1 000尾规格一致的菊黄东方鲀2月龄幼鱼,分组暂养于3个室内水泥池(长×宽×高=7 m×3 m×1 m)内,每个室内水泥池分别投喂冰鲜鱼、膨化饲料和粉状饲料进行驯养,驯养7 d后从3个水泥池内依次随机挑选幼鱼开始正式的生长养殖实验和胃排空率实验。生长养殖实验设置3个组别,每组3个重复,挑选活力较好、规格大小基本一致的菊黄东方鲀幼鱼,随机移入9个玻璃缸(长×宽×高=80 cm×50 cm×50 cm)内,每个玻璃缸内放置30尾,共计270尾,其平均体质量为(13.79±0.34)g。养殖实验共持续60 d,每天7:00和14:00分两次进行饵料投

喂,每次投喂时均做到饱食投喂,投喂1 h后将残饵捞除,每天换水100%,整个养殖期间水体的水质指标均维持在:温度20~22℃;pH 6.7~8.2;溶解氧>5.0 mg/L;氨氮浓度<0.45 mg/L;亚硝酸盐浓度<0.3 mg/L。

胃排空率实验同样设置3个组别,每组3个重复,共计使用9个玻璃缸,每个玻璃缸内同样放置30尾鱼,其平均体质量为(13.68±0.49)g。预实验发现实验用鱼在摄食饵料14 h后胃内容物基本排空,据此设置8个采样时间点,分别为摄食后0、2、4、6、8、10、12、14、16 h。正式开始实验前所有实验用鱼均禁食24 h,实验开始后做到一次性饱食投喂,摄食饵料10 min后清除所有残饵,定

义此刻为摄食0 h的采样时间。

1.3 实验采样

1.3.1 生长性能

实验开始后每10 d进行生长打样,打样时从每个鱼缸内收集所有的菊黄东方鲀并计数,用干毛巾轻轻包裹吸掉体表水分后,使用电子天平对其进行精准称重(精确到0.01 g),据此计算每个组别的平均体质量,打样完毕后,对每个组别的体质量增长率(Weight gain rate, WGR)和特定生长率(Specific growth rate, SGR)进行计算;实验过程中准确记录每个玻璃缸内每天消耗饲料量,实验结束后统计每个玻璃缸内菊黄东方鲀成活个体数量,据此计算最终成活率(Survival rate, SR),同时统计每个重复内摄食饲料总量用于饵料系数(Feed conversion rate, FCR)和摄食率(Feeding rate, FR)的计算。计算公式:

$$R_{WGR}=100\% \times (M_t - M_{t-1}) / M_{t-1} \quad (1)$$

$$R_{SGR}=100\% \times (\ln M_t - \ln M_{t-1}) / T \quad (2)$$

$$R_{SR}=100\% \times N / N_0 \quad (3)$$

$$R_{FCR}=F / (N \times M - N_0 \times M_0) \quad (4)$$

$$R_{FR}=F / [60 \times (N \times M + N_0 \times M_0) / 2] \quad (5)$$

式中: R_{WGR} 为体质量增长率,%; R_{SGR} 为特定生长率,%/d; R_{SR} 为成活率,%; R_{FCR} 为饵料系数; R_{FR} 为摄食率,%; M 为第t日幼鱼的平均体质量,g; M_{t-1} 为第t-1日幼鱼的平均体质量,g; T 为采样的间隔时间,d; N 为实验结束时幼鱼存活数量,条; N_0 指实验开始时幼鱼数量,条; M 指实验结束时幼鱼的平均体质量,g; M_0 指实验开始时幼鱼平均体质量,g。

1.3.2 胃排空百分比

一次性饱食投喂后,分别在摄食饵料0、2、4、6、8、10、12、14、16 h进行采样,从每个重复内随机选择3尾幼鱼,测量完体质量后进行活体解剖,取出胃组织后用吸水纸吸干表面水分称重,随后用宽头镊子挤出胃内容物,多次蒸馏水清洗后,同样用吸水纸吸干胃表面水分后再称重,两次称重的差值即为胃内容物的质量。胃内容物残余百分比计算公式:

$$P=W_t / W_0 \times 100\% \quad (6)$$

式中: P 为胃内容物质量占总摄食量的百分比,%; W_t 为在t小时取样时胃内容物的质量,g; W_0 为饱食状态下的总摄食量,g。

1.3.3 胃排空模型

参照丛湘明等^[19]的研究,选用常用的3种数

学模型,即线性模型、指数模型和平方根模型分别对菊黄东方鲀幼鱼胃内含物百分比随摄食后时间变化的数据进行拟合,绘制胃排空率曲线,通过比较各拟合模型的相关系数(R^2)来选择最佳排空模型,根据最佳模型计算摄食不同饵料的50%、80%和100%胃排空的理论时间。3种模型的数学表达式:

$$\text{线性模型: } Y=A-B \times t \quad (7)$$

$$\text{指数模型: } Y=A \times e^{-Bt} \quad (8)$$

$$\text{平方根模型: } Y^{0.5}=A-B \times t \quad (9)$$

式中: Y 为胃内容物的质量,g; A 为常数; B 为瞬时排空率,g/h; t 为摄食后的时间,h。

1.3.4 消化酶活性

鱼体解剖完毕取出胃后,保留肝脏和肠道组织,储存于-20 °C冰箱内,用于后续淀粉酶、脂肪酶和糜蛋白酶活性测定。测定时先进行样品前处理准确称取0.2 g肝脏和肠道装入2 mL的离心管中,加入1 mL预冷的生理盐水用微型匀浆器匀浆30 s后,在4 °C 8 000 r/min条件下离心15 min,用一次性注射器取中层清液用于消化酶测定。随后使用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒分别测定肝脏和肠道中的淀粉酶、脂肪酶和糜蛋白酶等活性。

1.4 数据分析及统计

数据以平均值±标准差(Mean±SD)来表示,使用SPSS 24.0软件进行统计分析,采用Levene法进行方差齐性检验,当不满足齐性方差时对百分比数据进行反正弦或平方根处理,通过单因素方差分析判断组间是否具有显著性差异,取 $P<0.05$ 为差异显著,使用Graphpad Prism 9软件对实验数据进行绘图。

2 结果

2.1 不同饵料对生长的影响

不同饵料投喂下菊黄东方鲀平均体质量的变化情况如表2所示。在整个养殖过程中摄食粉状饲料组的幼鱼平均体质量最高,冰鲜鱼组次之,膨化饲料组最低。且自养殖20 d开始至实验结束,粉状饲料组菊黄东方鲀幼鱼的平均体质量均显著高于膨化饲料组($P<0.05$);在养殖30、50和60 d 3个时间点上,冰鲜鱼组菊黄东方鲀幼鱼的平均体质量也显著高于膨化饲料组($P<0.05$);但粉状饲料组和冰鲜鱼组之间无显著性差异($P>0.05$)。

表2 不同饵料投喂对菊黄东方鲀平均体质量的影响
Tab. 2 Effects of different feeding patterns on average body mass of juvenile *T. flavidus*

养殖时间 Culturing time/d	平均体质量 Average body mass/g		
	冰鲜鱼组(G1)	膨化饲料组(G2)	粉状饲料组(G3)
	Iced trash fish group	Expanded diet group	Powder soft diet group
0	13.64±0.40	13.89±0.44	13.83±0.23
10	16.95±0.90	16.30±0.71	17.84±0.96
20	21.45±1.27 ^{ab}	19.61±1.44 ^b	23.09±1.61 ^a
30	26.65±1.43 ^a	23.01±1.50 ^b	28.51±2.22 ^a
40	31.88±1.97 ^{ab}	27.34±2.81 ^b	34.03±3.31 ^a
50	34.83±2.28 ^a	28.96±3.17 ^b	37.31±2.92 ^a
60	36.95±2.88 ^a	30.72±2.95 ^b	39.71±2.73 ^a

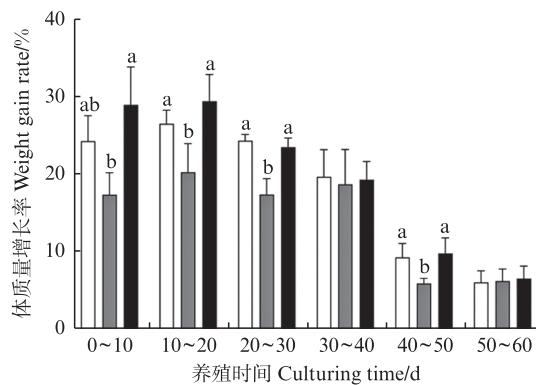
注:同行数据不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Notes: Values within the same row with different letters mean significant difference ($P<0.05$).

不同饵料投喂下菊黄东方鲀体质量增长率(WGR)和特定生长率(SGR)的变化情况如图1所示,且体质量增长率(WGR)的变化与特定生长

率(SGR)变化趋势基本相似。除30~40 d和50~60 d各组WGR和SGR无显著差异外,其余时间段粉状饲料组的WGR和SGR均为最高,而膨化饲料组最低,且粉状饲料组和冰鲜鱼组的幼鱼均显著高于膨化饲料组的幼鱼($P<0.05$),粉状饲料组和冰鲜鱼组之间无显著差异($P>0.05$)。就WGR和SGR整体变化趋势而言,随着养殖时间的延长不同饵料投喂下菊黄东方鲀幼鱼的WGR和SGR均呈明显的下降趋势。

不同饵料投喂下菊黄东方鲀成活率、饵料系数和摄食率的差异如表3所示。其中膨化饲料组成活率较高,但各组之间无显著差异($P>0.05$);就饵料系数而言,冰鲜鱼组显著最高($P<0.05$),粉状饲料组次之,而膨化饲料组显著最低($P<0.05$);同样地,就各组摄食率而言膨化饲料组仍显著最低($P<0.05$),而冰鲜鱼组与粉状饲料组之间无显著差异($P>0.05$)。



方柱上方不同小写字母表示不同饵料投喂模式间差异显著($P<0.05$)。

The different letters above the columns indicated significant difference among different feeding patterns at the same time ($P<0.05$).

图1 不同饵料对菊黄东方鲀体质量增长率和特定生长率的影响

Fig. 1 Effects of different feeding patterns on weight gain rate and specific growth rate of juvenile *T. flavidus*

表3 不同饵料投喂对菊黄东方鲀成活率、饵料系数和摄食率的影响
Tab. 3 Effects of different feeding patterns on survival rate, feeding rate and feed conversion rate of juvenile *T. flavidus*

项目 Items	冰鲜鱼组(G1) Iced trash fish group	膨化饲料组(G2) Expanded diet group	粉状饲料组(G3) Powder soft diet group
成活率 Survival rate/%	76.67±5.77	85.56±5.09	81.11±5.09
饵料系数 Feed conversion rate	3.36±0.46 ^a	2.08±0.06 ^c	2.71±0.19 ^b
摄食率 Feeding rate/%	3.89±0.45 ^a	2.12±0.06 ^b	3.58±0.10 ^a

注:同行数据不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Notes: Values within the same row with different letters mean significant difference ($P<0.05$).

2.2 不同饵料对胃排空特征的影响

菊黄东方鲀饱食不同饵料后,其胃内容物随时间的变化呈逐渐下降的趋势(表4)。且前6 h

内胃内容物百分比迅速下降,随后逐步放缓,摄食后16 h胃内容物基本排空。就摄食不同饵料后胃内容物百分比变化而言,摄食粉状饲料胃排

泄速率最快,摄食冰鲜鱼次之,而摄食膨化饲料胃排泄速率最慢,且在摄食后4 h、6 h、12 h、14 h

时,粉状饲料组的胃内容物百分比显著($P<0.05$)低于其他两组。

表4 摄食不同饵料后菊黄东方鲀胃内容物百分比变化

Tab. 4 Percentage change of gaxtric contents after feeding different diets of juvenile *T. flavidus*

摄食后时间 Postprandial time/h	胃内容物百分比 Percentage of gaxtric contents			%
	冰鲜鱼组(G1) Iced trash fish group	膨化饲料组(G2) Expanded diet group	粉状饲料组(G3) Powder soft diet group	
0	100	100	100	
2	84.20±9.19	83.14±12.21	81.69±7.92	
4	69.31±9.91 ^a	64.51±7.18 ^{ab}	56.45±6.11 ^b	
6	47.83±3.12 ^a	47.16±4.32 ^{ab}	42.96±2.81 ^b	
8	37.81±4.35	40.38±4.28	35.94±4.27	
10	29.54±3.91	31.18±3.43	26.91±4.45	
12	19.20±1.29 ^a	20.04±2.53 ^a	15.06±1.99 ^b	
14	4.12±0.47 ^a	4.98±0.69 ^a	1.40±0.18 ^b	
16	0 ^b	1.16±0.99 ^a	0 ^b	

注:同行数据不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Notes: Values within the same row with different letters mean significant difference ($P<0.05$).

使用线性、指数和平方根模型对摄食不同饵料菊黄东方鲀幼鱼的胃内容物百分比数据进行拟合,并绘制胃排空模型图(图2)。结果表明各组3种模型的相关系数均大于0.95,都能较好的拟合各组实验数据。将表2和图2结合来看,各组各模型前6 h胃内容物百分比呈现急速下降趋势,其中粉状饲料组下降最快,4 h胃内容物百分比已达

56.45%,随后各组各模型缓慢下降至12 h时,胃内容物已排空80%左右。就投喂冰鲜鱼组和膨化饲料组相关系数(R^2)而言,平方根模型>线性模型>指数模型,最优模型为平方根模型;就投喂粉状饲料组相关系数(R^2)而言,平方根模型>指数模型>线性模型,最优模型仍为平方根模型。

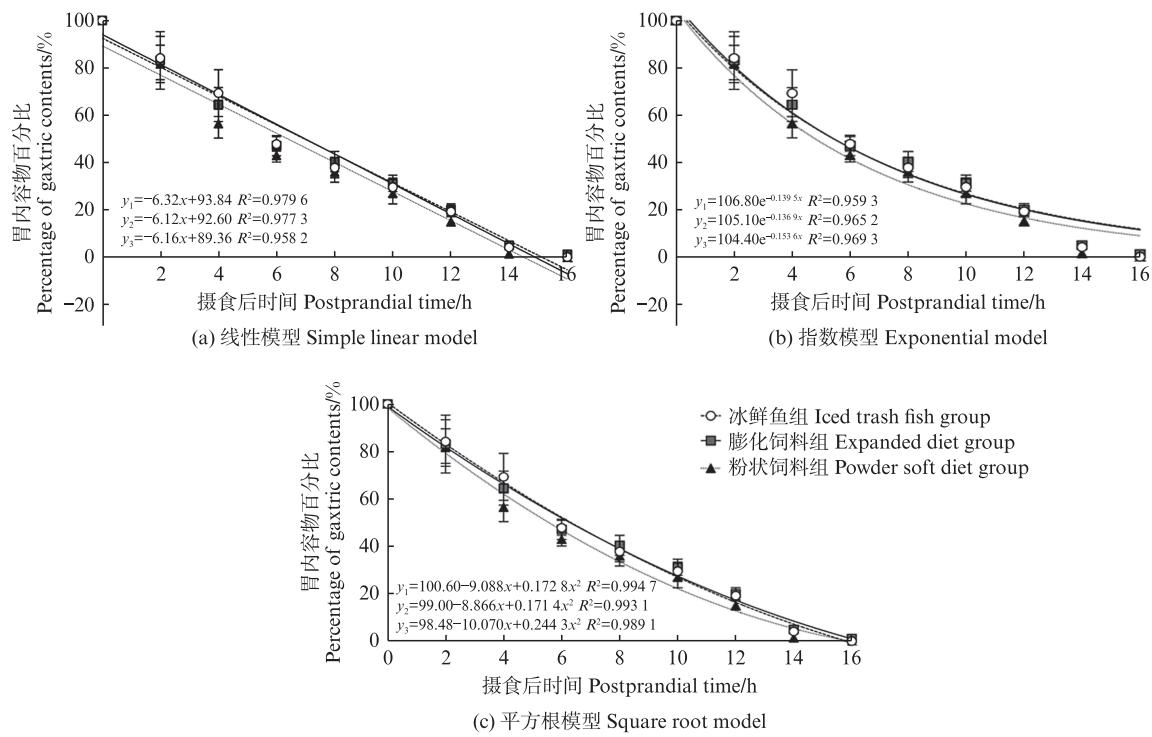


图2 不同饵料投喂下菊黄东方鲀胃排空模型

Fig. 2 Mathematical models for gastric evacuation with different feeding patterns in juvenile *T. flavidus*

根据对各组胃排空模型进行比较,确定不同饵料投喂下菊黄东方鲀的最佳胃排空模型为平方根模型,不同投喂模式下菊黄东方鲀最佳胃排空模型及50%、80%和100%胃排空的理论时间如表5所示,计算可知摄食冰鲜鱼、膨化饲料和粉状饲料的50%胃排空的理论时间分别为6.33、6.29和5.56 h,80%胃排空的理论时间分别为

11.29、11.44和10.43 h。就摄食不同饵料的50%和80%胃排空理论时间而言,粉状饲料组的胃排空时间均最短,冰鲜鱼组次之,膨化饲料组最长。就摄食不同饵料的100%胃排空理论时间而言,冰鲜鱼组理论胃排空时间为15.84 h略短于粉状饲料组的15.96 h,膨化饲料组仍为最长。

表5 不同饵料投喂下菊黄东方鲀最佳胃排空模型

Tab. 5 Optimal mathematical models for gastric evacuation with different feeding patterns in juvenile *T. flavidus*

组别 Group	最佳数学模型 Optimal mathematical model	相关系数 <i>R</i> ²	50%胃排空的理论 时间(GE ₅₀)/h	80%胃排空的理论 时间(GE ₈₀)/h	100%胃排空的理论 时间(GE ₁₀₀)/h
冰鲜鱼组 Iced trash fish group	$y=100.60-9.088x+0.1728x^2$	0.9947	6.33	11.29	15.84
膨化饲料 Expanded diet group	$y=99.00-8.866x+0.1714x^2$	0.9931	6.29	11.44	16.31
粉状饲料 Powder soft diet group	$y=98.48-10.070x+0.2443x^2$	0.9891	5.56	10.43	15.96

2.3 不同饵料对消化酶活性的影响

在菊黄东方鲀幼鱼摄食不同饵料后16 h内,肝脏中淀粉酶活性、脂肪酶活性和糜蛋白酶活性的变化如图3所示。摄食3种饵料后菊黄东方鲀肝脏中3种消化酶随时间推移整体呈现“M”型变化趋势,即首先达到最大值后下降,直至达到另一峰值后再下降,且3组整体变化趋势类似。就肝脏淀粉酶活性而言,粉状饲料组的淀粉酶活性最高,膨化饲料组次之,冰鲜鱼组最低,且除0、2、6和14 h外,粉状

饲料组和膨化饲料组的淀粉酶活性显著高于冰鲜鱼组($P<0.05$);就脂肪酶活性而言,膨化饲料组最高,冰鲜鱼组次之,粉状饲料最低,且除12、14和16 h外,膨化饲料组的脂肪酶活性显著高于粉状饲料组($P<0.05$);就糜蛋白酶活性而言,冰鲜鱼组活性最高,粉状饲料组次之,膨化饲料组最低,且整个胃排空过程中除6和10 h时,冰鲜鱼组糜蛋白酶活性与膨化饲料组无显著差异外,其余时间均显著高于粉状饲料组和膨化饲料组($P<0.05$)。

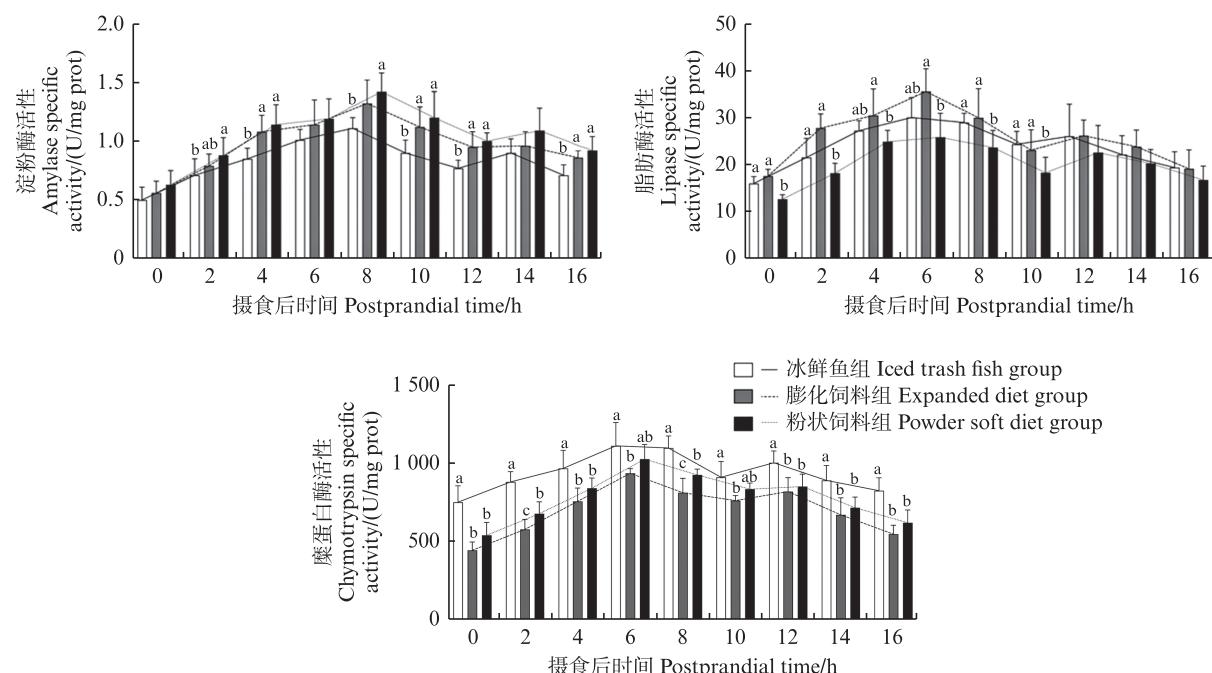


图3 菊黄东方鲀摄食不同饵料16 h内肝脏中消化酶变化

Fig. 3 Changes of digestive enzymes in the liver of juvenile *T. flavidus* during 16 hours after feeding different diets

胃排空过程中,菊黄东方鲀幼鱼肠道中淀粉酶活性、脂肪酶活性和糜蛋白酶活性的变化如图4所示,肠道中消化酶整体变化呈现先升高后下降的趋势,且只存在1个波峰。就肠道中淀粉酶活性而言,与肝脏中基本类似,即粉状饲料组的淀粉酶活性最高,膨化饲料组次之,冰鲜鱼组最低,且除0、16 h外,粉状饲料组淀粉酶活性均显著高于冰鲜鱼组($P<0.05$);就脂肪酶活性而言,膨化饲料组最高,冰鲜鱼组次之,粉状饲料最低,且除0、14和16 h外,膨化饲料组的脂肪酶活性显

著高于粉状饲料组($P<0.05$),且仅在2和10 h时,膨化饲料组的脂肪酶活性显著高于冰鲜鱼组($P<0.05$);肠道中各组糜蛋白酶活性差异也与肝脏中基本一致,即冰鲜鱼组活性最高,粉状饲料组次之,膨化饲料组最低,且整个胃排空过程中冰鲜鱼组糜蛋白酶活性均显著高于粉状饲料组和膨化饲料组($P<0.05$),特别的是,在8和16 h两个时间点内,膨化饲料组的糜蛋白酶活性显著低于粉状饲料组($P<0.05$)。

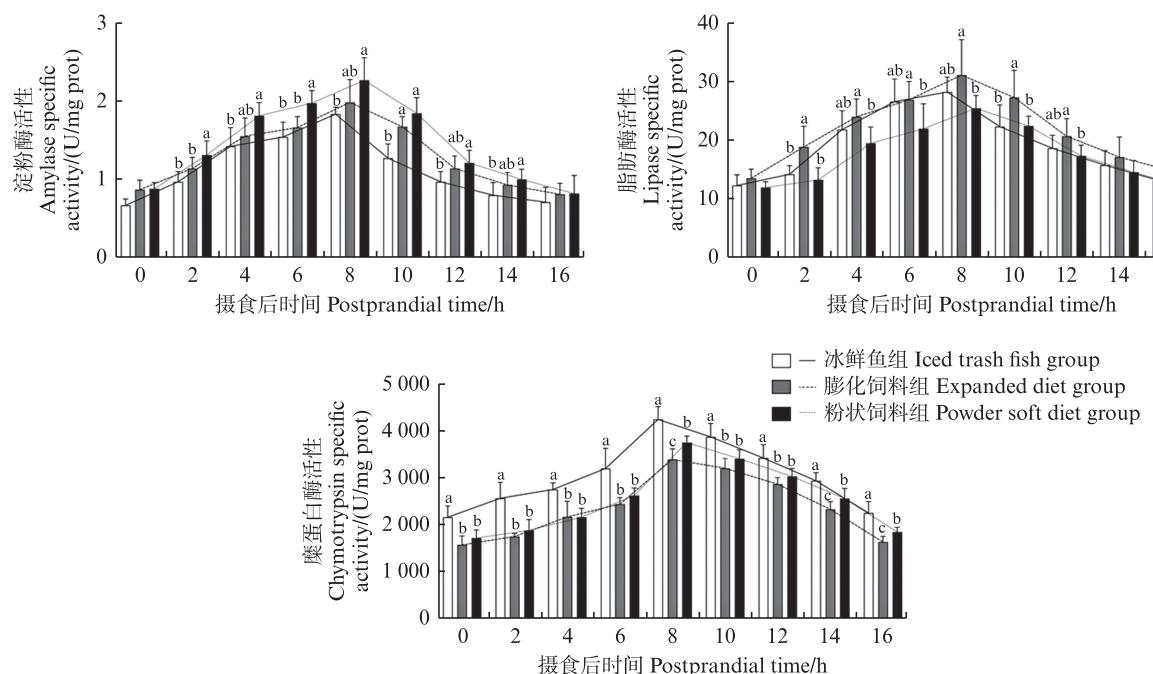


图4 菊黄东方鲀摄食不同饵料16 h内肠道中消化酶变化

Fig. 4 Changes of digestive enzymes in the intestines of juvenile *T. flavidus* during 16 hours after feeding different diets

3 讨论

3.1 不同饵料投喂对生长的影响

生长是评估经济鱼类产业发展最重要的性状之一,通过探求饵料营养与生长的关系,提升鱼类的生长效率意味着可以缩短其养殖时间,节约养殖成本,增加经济和生态效益^[20]。鱼类生长性能不仅能反映其生存状况和生活环境质量,还能间接反映投喂饵料的营养水平以及养殖对象对饵料的利用效率^[21]。蛋白质是决定鱼类生长发育的首要营养元素^[22],有研究表明暗纹东方鲀幼鱼蛋白需求量为46%~49%^[23],红鳍东方鲀幼鱼获得最大生长率和最佳生长效果的最适蛋白量为41%~45%^[24]。虽然目前尚未见针对菊黄东

方鲀幼鱼最适蛋白质需求的研究,但菊黄东方鲀作为偏肉食性海水养殖品种,对蛋白质具有较高的营养需求。在本研究中,膨化饲料组的生长性能最差,这可能是因为膨化饲料的蛋白含量(41.24%)较低,不能满足菊黄东方鲀能量代谢和日常生长需要;此外膨化饲料组胃排空速率慢,食欲恢复时间长,每天第二次喂料时主动摄食量可能会减少,每日饲料摄食率低的结果也可说明膨化饲料组可能存在营养摄入相对不足的情况,会直接影响生长发育。当饲料蛋白水平超过最佳需求量时,由于非蛋白供能不足,部分蛋白质被分解供能,鱼类的生长速度显著下降^[25];同时有研究表明野杂鱼易氧化酸败,造成水质恶化的同时含有的组织胺、重金属等毒素也不利于组织

蛋白的积累^[26],会影响摄食生物的生长速度和最终体质量,粉状饲料组平均体质量略高于冰鲜鱼组可能与以上两个因素有关。

3.2 不同饵料投喂对胃排空特征的影响

饵料是影响鱼类胃排空率的重要因素之一,饵料的种类、化学性质、物理性质和投喂频率会显著影响鱼类的胃排空率^[15]。胃排空速率受饵料的能量密度影响,KHUAN 等^[27]通过添加不同浓度的高岭土配合饲料投喂美洲红点鲑(*Salvelinus fontinalis*),发现饵料能量密度与胃排空率呈负相关;HOFER 等^[28]研究发现用高脂肪含量的卤虫投喂拟鲤(*Rutilus rutilus* L.)时,其排空速率更慢。在本研究中,粉状饲料中脂肪含量仅为 5.32%,低于膨化饲料和冰鲜鱼的脂肪含量。脂肪含量低会直接造成饲料整体能量密度低,进而导致胃排空较快,但具体影响过程和机制尚需进一步开展相关研究。饵料颗粒的大小和形状是控制胃排空的重要因素,饵料颗粒越小、越细长,会增大饵料与消化酶的接触面积,因此比大颗粒饵料消化得更快或更彻底^[29]。而在本研究中菊黄东方鲀摄食粉状饲料时多次啃食饲料,进入消化道后饲料形状多样,可能会增大与消化酶的接触面积,有利于提高胃排空速率。但小颗粒食物胃排出速率快,再进入肠道时未经过足够的胃消化,会降低营养吸收效率,可能会造成饵料浪费^[30]。有研究表明鱼类选择最适饵料颗粒大小时可能取决于饵料的硬度^[31],粉状饲料拌料时添加约 50% 的水,成料时较软,菊黄东方鲀消化压力低,排空相对较快。而膨化饲料硬度高、软化时间长会减缓胃排空的进行,从而影响胃排空速率。曾萌冬等^[32]研究表明摄食不同饵料会影响胃黏膜和肌层厚度,从而使胃壁舒张程度和食物贮存量发生变化,但胃壁组织学变化是否会影响胃排空速率尚未经过证实,这也许会为今后开展胃排空研究提供新路径和新方法。

鱼类因食性、消化道结构、神经系统调控模式的不同,其排空方式具有明显的多样性,排空模型也不尽相同^[14]。本研究拟合了摄食 3 种饵料后菊黄东方鲀的胃排空模型,虽然 3 种模型都能较好展现菊黄东方鲀幼鱼胃排空变化,但结合模型相关系数和实际胃排空过程,发现菊黄东方鲀的最佳胃排空模型均为平方根模型,这为菊黄东方鲀幼鱼的饲料合理开发、投喂策略优化提供了

重要参数。了解鱼类食欲恢复的时间对于饵料的投喂频率至关重要,GROVE 等^[33]认为当胃内容物排空达 50% 时,鱼类的食欲恢复已超 50%;RICHE 等^[34]认为当胃内容物排空达 80%,食欲基本完全恢复。但有学者研究认为,最佳投喂频率和时间间隔除考虑食欲恢复情况外,还需结合摄食节律和实际养殖现状^[35]。丛湘明等^[19]认为,鱼类的最佳投喂时间可设置在食欲开始恢复和完全恢复之间,在本研究中粉状饲料组 50% 和 80% 的胃排空时间分别为 5.56 h 和 10.43 h,因此菊黄东方鲀幼鱼投喂粉状饲料时的投喂间隔可设置为 5.5~10.5 h,投喂其他饵料时仍可用同种方式计算合适的投喂间隔。

3.3 不同饵料投喂对消化酶的影响

消化酶是参与消化生理功能的重要组成部分,不同的消化器官分泌消化酶具有不同的功能,且各种消化酶活性的变化与鱼类的食性、消化器官的结构密切相关^[36]。消化酶活性水平代表着其对饵料中营养成分消化、吸收和利用的能力,直接影响养殖对象的生长发育进程^[37]。肝脏是硬骨鱼类主要消化腺,肠道是营养成分主要消化吸收部位,肝脏和肠道摄食后消化酶活性的变化往往呈现一定的规律^[38]。钟国防等^[36]研究发现在暗纹东方鲀中,除胃蛋白酶外的其他消化酶活性按大小顺序依次为肠、肝胰脏、胃,华雪铭等^[39]也发现暗纹东方鲀肠道中蛋白酶、淀粉酶活性均高于肝胰脏,这与本研究中菊黄东方鲀肠道蛋白酶、淀粉酶活性高于肝脏的结果一致。

鱼类蛋白酶种类较多,多数硬骨鱼类肠道内蛋白酶活性显著高于肝胰脏,这主要是因为肝脏分泌的蛋白酶只有进入肠道内被激活才能具有消化活性,且肠道对蛋白酶具有较强的吸附能力^[40]。逯尚尉等^[41]在点带石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)研究发现投喂鱼肉组蛋白酶活性显著高于投喂配合饲料组,李芹等^[42]研究也发现投喂活饵料组的瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)蛋白酶活性显著高于驯化组和饲料组,以上研究均表明蛋白酶活性与其摄食饵料中粗蛋白含量呈正相关,这可能是在本研究中冰鲜鱼组活性远高于两种饲料组的原因之一;冰鲜鱼的微量活性物质可能会促进鱼类蛋白酶的分泌^[43],而配合饲料中因缺乏活性因子,导致蛋白酶活性显著低于冰鲜鱼组。同样地,不同饵料组的淀粉酶活性与

底物浓度密切相关^[41]，粉状饲料由于需要添加高含量的高筋面粉来保持饲料黏性，因此碳水化合物的含量显著高于其他两组，这可能也是诱导菊黄东方鲀肝脏和肠道内淀粉酶活性偏高的原因。目前，鱼类脂肪酶活性与饵料脂肪含量的关系存在较大分歧，有学者认为脂肪酶活性与饵料呈正相关关系^[42]，而有的研究认为脂肪酶活性与饵料没有密切关系或呈现负相关^[41, 44]。在本研究中虽然冰鲜鱼种脂肪含量较膨化饲料高，但膨化饲料组的脂肪酶含量却高于冰鲜鱼组，可能是因为膨化饲料中添加的油脂种类较易促进脂肪酶分泌，这也说明饵料对鱼类脂肪酶活性的影响比较复杂，还有待进一步开展相关研究。

4 结论

综上所述，菊黄东方鲀摄食不同饵料后胃排空类型基本一致，最佳模型均为平方根模型。不同饵料的能量密度、颗粒大小和形状影响胃排空速率，其中摄食膨化饲料组胃排空速率最慢，50%、80% 和 100% 的胃排空时间分别为 6.29、11.44 和 16.31 h，本研究为确定不同饵料的理论投喂时间提供了参考；肝脏和肠道中消化酶活性在胃排空过程中呈显著规律性变化，参与菊黄东方鲀摄食后营养物质的消化吸收，其中蛋白酶和淀粉酶活性与饵料的底物浓度呈正相关关系；膨化饲料硬度高和软化时间长的物理特性可能延缓了鱼体胃排空进程，进而造成摄食率下降，加之膨化饲料蛋白含量低进一步制约了菊黄东方鲀的生长发育。建议继续开展菊黄东方鲀最适蛋白需求的研究，同时进一步优化膨化饲料配方，提升膨化饲料的消化利用效率。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献：

- [1] 周裕华, 周文玉, 潘桂平. 不同饵料投喂对菊黄东方鲀营养品质的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(21): 137-140.
- [2] 刘永士, 施永海, 张根玉, 等. 菊黄东方鲀当年鱼种养殖阶段消化酶活性研究[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(4): 92-97.
- [3] LIU Y S, SHI Y H, ZHANG G Y, et al. Digestive enzyme activity of juvenile tawny puffer (*Takifugu flavidus*) cultured in ponds[J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(4): 92-97.
- [4] 施永海, 张根玉, 刘建忠, 等. 低盐对菊黄东方鲀幼鱼生长、存活、耗氧、鳃 Na^+/K^+ -ATP 酶以及肝抗氧化酶的影响[J]. 动物学杂志, 2015, 50(3): 415-425.
- [5] SHI Y H, ZHANG G Y, LIU J Z, et al. Effects of low salinity on the growth, survival, oxygen consumption, gill Na^+/K^+ -ATPase, and liver antioxidantase of young fish tawny puffer *Takifugu flavidus* [J]. Chinese Journal of Zoology, 2015, 50(3): 415-425.
- [6] 施永海, 张根玉, 刘建忠, 等. 菊黄东方鲀仔稚鱼的生长、发育及行为生态[J]. 水产学报, 2010, 34(10): 1509-1517.
- [7] SHI Y H, ZHANG G Y, LIU J Z, et al. Growth, development and behavior ecology of tawny puffer (*Takifugu flavidus*) larvae and juveniles [J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(10): 1509-1517.
- [8] 陈永杰, 倪庆胜, 张忠华. 菊黄东方鲀与长江刀鲚池塘混养试验[J]. 水产科技情报, 2022, 49(6): 339-342.
- [9] CHEN Y J, NI Q S, ZHANG Z H. Study on the polyculture of *Takifugu flavidus* and *Coilia nasus* in ponds [J]. Fisheries Science & Technology Information, 2022, 49(6): 339-342.
- [10] 徐嘉波, 施永海, 张根玉, 等. 菊黄东方鲀不同组织脂肪酸的组成及含量分析[J]. 食品科学, 2014, 35(16): 133-137.
- [11] XU J B, SHI Y H, ZHANG G Y, et al. Analysis of lipid and fatty acid composition in different tissues of adult female and male *Takifugu flavidus* [J]. Food Science, 2014, 35(16): 133-137.
- [12] 刘永士, 施永海, 谢永德, 等. 膨化沉性饲料和粉状饲料对菊黄东方鲀生长和氮磷收支的影响[J]. 水产科技情报, 2018, 45(5): 253-258.
- [13] LIU Y S, SHI Y H, XIE Y D, et al. Effects of the inflated sinking feeds and powder feed on growth of *Takifugu flavidus* and budgets of nitrogen and phosphorus [J]. Fisheries Science and Technology Information, 2018, 45(5): 253-258.
- [14] 麦康森, 赵锡光, 谭北平, 等. 我国水产动物营养研究与渔用饲料的发展战略研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2001, 20(s1): 1-5.
- [15] MAI K S, ZHAO X G, TAN B P, et al. Studies on the developmental strategies of aquaculture nutrition and feed industry development in China [J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2001, 20(s1): 1-5.
- [16] 王常安, 徐奇友, 许红, 等. 膨化饲料和颗粒饲料对哲罗鲑生长、体成分、消化酶活性和血液生化指标影响的比较[J]. 水产学报, 2008, 21(2): 47-54.
- [17] WANG C A, XU Q Y, XU H, et al. Effects of feeding

- extruded and pelleted diet on the growth, body composition, digestive enzyme activities and plasma biochemical indexes of *Hucho taimen* [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2008, 21(2): 47-54.
- [10] 胡毅,陈云飞,张德洪,等.不同碳水化合物和蛋白质水平膨化饲料对大规格草鱼生长、肠道消化酶及血清指标的影响[J].水产学报,2018,42(5):777-786.
- HU Y, CHEN Y F, ZHANG D H, et al. Effects of different dietary carbohydrate and protein levels on growth, intestinal digestive enzymes and serum indexes in large-size grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(5): 777-786.
- [11] DÜRRANI Ö, SEYHAN K, BAŞÇINAR N, et al. Satiation meal and the effects of meal and body sizes on gastric evacuation rate in brook trout *Salvelinus fontinalis* fed commercial pellets [J]. Journal of Fish Biology, 2016, 89(2): 1227-1238.
- [12] JIA Y D, GAO Y H, JING Q Q, et al. Gastric evacuation and changes in postprandial blood biochemistry, digestive enzymes, and appetite-related genes in juvenile hybrid grouper (*Epinephelus moara* ♀ × *E. lanceolatus* ♂) [J]. Aquaculture, 2021, 530: 735721.
- [13] GAO X Q, WANG X, WANG X Y, et al. Effects of different feeding frequencies on the growth, plasma biochemical parameters, stress status, and gastric evacuation of juvenile tiger puffer fish (*Takifugu rubripes*) [J]. Aquaculture, 2022, 548: 737718.
- [14] 王妍,王庆奎,赵鸿昊,等.鱼类消化道排空率的研究进展[J].河北渔业,2023(6):23-28,38.
- WANG Y, WANG Q K, ZHAO H H, et al. Advance on fish digestive tract evacuation rate [J]. Hebei Fisheries, 2023(6): 23-28, 38.
- [15] 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.
- 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.
- [16] 徐革锋,陈侠君,杜佳,等.鱼类消化系统的结构、功能及消化酶的分布与特性[J].水产学杂志,2009,22(4):49-55.
- XU G F, CHEN X J, DU J, et al. Fish digestive system: it's structure, function and the distributions and characteristics of digestive enzymes [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2009, 22(4): 49-55.
- [17] 刘襄河,叶超霞,郑丽勉,等.饲料糊精水平对暗纹东方鲀幼鱼生长、消化酶活性和血液生化指标的影响[J].水产学报,2013,37(9):1359-1368.
- LIU X H, YE C X, ZHENG L M, et al. Effect of dietary dextrin levels on growth, activities of digestive enzyme and blood biochemical indices of juvenile obscure puffer (*Takifugu obscurus*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(9): 1359-1368.
- [18] LI X, LIU S T, FAN K P, et al. Effects of illumination intensities on growth, digestive and metabolic enzyme activities and antioxidant capacities of juvenile *Takifugu rubripes* [J]. Aquaculture, 2022, 548: 737594.
- [19] 丛湘明,李向,华雪铭,等.大口黑鲈摄食含小肽饲料后的胃排空特征和消化酶活性变化[J].动物营养学报,2022,34(7):4642-4656.
- CONG X M, LI X, HUA X M, et al. Gastric evacuation characteristic and digestive enzyme activity change of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fed diets supplemented with small peptides [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(7): 4642-4656.
- [20] 殷艳慧,蒋万胜,潘晓赋,等.水产养殖鱼类生长性状研究进展[J].中国水产科学,2020,27(4):463-484.
- YIN Y H, JIANG W S, PAN X F, et al. Recent progress in growth trait of aquaculture fish [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2020, 27(4): 463-484.
- [21] CAI C F, SONG L, WANG Y L, et al. Assessment of the feasibility of including high levels of rapeseed meal and peanut meal in diets of juvenile crucian carp (*Carassius auratus gibelio* ♀ × *Cyprinus carpio* ♂) : growth, immunity, intestinal morphology, and microflora [J]. Aquaculture, 2013, 410-411: 203-215.
- [22] JOBLING M. National Research Council (NRC) : nutrient requirements of fish and shrimp [J]. Aquaculture International, 2012, 20(3): 601-602.
- [23] 杨州,杨家新.暗纹东方鲀幼鱼对蛋白质的最适需要量[J].水产学报,2003,27(5):450-455.
- YANG Z, YANG J X. Optimum protein requirement of juvenile *Takifugu obscurus* [J]. Journal of Fisheries of China, 2003, 27(5): 450-455.
- [24] KIM S S, LEE K J. Dietary protein requirement of juvenile tiger puffer (*Takifugu rubripes*) [J]. Aquaculture, 2009, 287(1/2): 219-222.
- [25] 杨严鸥.饲料质量和摄食水平对不同食性鱼类生长和活动的影响[D].武汉:华中农业大学,2003.
- YANG Y O. Effect of diet quality and ration level on growth and activity of fishes with different feeding habits [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2003.
- [26] 张金彪,杨筱珍,范朋,等.两种常见海水鱼高温贮存过程中挥发性盐基氮和生物胺含量变化[J].水生生物学报,2012,36(2):284-290.
- ZHANG J B, YANG X Z, FAN P, et al. Changes in total volatile basic nitrogen and biogenic amines in two common species of marine fish at high temperature [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(2): 284-290.
- [27] DÜRRANI Ö, SEYHAN K. Gastric evacuation rates in farmed brook trout subjected to a range of feeding conditions fed commercial pellets [J]. Aquaculture, 2019, 513: 734390.

- [28] HOFER R, FORSTNER H, RETTENWANDER R. Duration of gut passage and its dependence on temperature and food consumption in roach, *Rutilus rutilus* L: laboratory and field experiments[J]. *Journal of Fish Biology*, 1982, 20(3): 289-299.
- [29] JOBLING M. Influences of food particle size and dietary energy content on patterns of gastric evacuation in fish: test of a physiological model of gastric emptying [J]. *Journal of Fish Biology*, 1987, 30(3): 299-314.
- [30] HOSSAIN M, HAYLOR G, BEVERIDGE M. The influence of food particle size on gastric emptying and growth rates of fingerling African catfish, *Clarias gariepinus* Burchell, 1822 [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2000, 6(2): 73-76.
- [31] KNIGHTS B. Food particle-size preferences and feeding behaviour in warmwater aquaculture of European eel, *Anguilla anguilla* (L.) [J]. *Aquaculture*, 1983, 30 (1/4): 173-190.
- [32] 曾萌冬, 徐俊, 宋银都, 等. 配合饲料替代活饵对鳜生长性能、消化功能及小肽转运载体基因表达的影响[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(1): 228-237.
- ZENG M D, XU J, SONG Y D, et al. Effects of replacing live bait with compound feed on growth, digestion and expression of small peptide transporter (*PepT1*) gene of *Siniperca chuatsi* [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(1): 228-237.
- [33] GROVE D J, LOIZIDES L G, NOTT J. Satiation amount, frequency of feeding and gastric emptying rate in *Salmo gairdneri* [J]. *Journal of Fish Biology*, 1978, 12 (5): 507-516.
- [34] RICHE M, HALEY D I, OETKER M, et al. Effect of feeding frequency on gastric evacuation and the return of appetite in tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) [J]. *Aquaculture*, 2004, 234(1/4): 657-673.
- [35] 张鹏飞, 常青, 陈四清, 等. 绿鳍马面鲀幼鱼昼夜摄食节律及胃排空模型研究[J]. *渔业科学进展*, 2020, 41 (1): 104-111.
- ZHANG P F, CHANG Q, CHEN S Q, et al. Diet feeding rhythm and analysis of gastric evacuation associated mathematical models in juvenile *Thamnaconus septentrionalis* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(1): 104-111.
- [36] 钟国防, 周洪琪, 华雪铭. 玉米蛋白粉替代鱼粉对暗纹东方鲀消化酶活性的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(2): 227-236.
- ZHONG G F, ZHOU H Q, HUA X M. Effect of corn gluten meal partially replaced fish meal on digestive enzymes activities in puffer (*Fugu obscurus*) [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(2): 227-236.
- [37] FERNÁNDEZ I, MOYANO F J, DÍAZ M, et al. Characterization of α -amylase activity in five species of Mediterranean sparid fishes (Sparidae, Teleostei) [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2001, 262(1): 1-12.
- [38] 李明月, 高云红, 万金铭, 等. 黄条鰈幼鱼胃排空特征、消化酶活性及摄食调控基因表达[J]. *水产学报*, 2022, 46(6): 906-916.
- LI M Y, GAO Y H, WAN J M, et al. Gastric evacuation characteristics, digestive enzyme activity and appetite-related genes expression in juvenile yellowtail kingfish (*Seriola aureovittata*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(6): 906-916.
- [39] 华雪铭, 周洪琪, 张宇峰, 等. 饲料中添加壳聚糖和益生菌对暗纹东方鲀幼鱼生长及部分消化酶活性的影响[J]. *水生生物学报*, 2005, 29(3): 299-305.
- HUA X M, ZHOU H Q, ZHANG Y F, et al. Effect of dietary supplemental chitosan and probiotics on growth and some digestive enzyme activities in juvenile *Fugu obscurus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, 29(3): 299-305.
- [40] 殷宁, 赵强, 李朝晖, 等. 暗纹东方鲀蛋白酶活性的研究[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2001, 24(1): 101-104.
- YIN N, ZHAO Q, LI Z H, et al. Preliminary studies on protease activities in *Fugu obscurus* cultured in fishery [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*, 2001, 24(1): 101-104.
- [41] 逯尚尉, 刘兆普, 余燕. 不同饵料对点带石斑鱼幼鱼生长、营养成分及组织消化酶活性的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(5): 648-653.
- LU S W, LIU Z P, YU Y. Effect of different diets on growth, nutritive composition and digestive enzyme activities of juvenile *Epinephelus malabaricus* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19 (5) : 648-653.
- [42] 李芹, 刁晓明. 不同饵料对瓦氏黄颡鱼稚鱼生长和消化酶活性的影响[J]. *水生态学杂志*, 2009, 2(1): 98-102.
- LI Q, DIAO X M. Growth and digestive enzyme activities of *Pelteobagrus vachelli* juvenile fed on different diets[J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, 2(1): 98-102.
- [43] LE RUYET J P, ALEXANDRE J C, THÉBAUD L, et al. Marine fish larvae feeding: formulated diets or live prey? [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1993, 24(2): 211-224.
- [44] 王重刚, 陈品健, 顾勇, 等. 不同饵料对真鲷稚鱼消化酶活性的影响[J]. *海洋学报*, 1998, 20(4): 103-106.
- WANG Z G, CHEN P J, GU Y, et al. Effect of different diets on digestive enzymes activity of *Pagrosomus major* juvenile[J]. *Haiyang Xuebao*, 1998, 20(4): 103-106.

Effects of different feeding diets on the growth, gastric evacuation and digestive enzyme activity of juvenile tawny puffer (*Takifugu flavidus*)

XIE Zhilong, YU Xiaowen, HOU Wenjie

(Shanghai Fisheries Research Institute/Shanghai Fisheries Technical Extension Station, Shanghai 200433, China)

Abstract: To investigate the effects of different diets (iced trash fish, expanded diet and powder soft diet) on growth performance, gastric evacuation, and digestive enzyme activity in *Takifugu flavidus*, a 60-day indoor growth experiment was conducted with three replicates per group, each containing 30 individuals, and the fish in all cages continued to be fed respectively with above three diets to apparent satiation. Gastric evacuation rate experiment was conducted using the same dietary groups (three replicates each), with sampling of gastric contents at 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, and 16 hours postprandial to determine percentage residual stomach content. Meanwhile, liver and intestinal tissues were collected for analysis of digestive enzyme activity variations. The results showed that: (1) From day 20 onward, the average body weight in powder soft diet group was significantly higher than that expanded diet group ($P<0.05$), while showing no significant difference from iced trash fish group ($P>0.05$). In terms of feeding rate, the expanded diet group was significantly lowest ($P<0.05$), while there was no significant difference between the iced trash fish group and the powder soft diet group; (2) In terms of the percentage change of gastric contents after feeding different diets, the gastric evacuation rate was the fastest when feeding powder soft diet, followed by iced trash fish, and the slowest when feeding expanded diet, with the square root model providing optimal fit for all dietary groups. (3) In terms of the theoretical 50% and 80% gastric evacuation times, the gastric evacuation time of the powder soft diet group was the shortest, the iced trash fish group was the second-longest, and expanded diet group had the longest time, the 80% gastric evacuation time was 10.43 h, 11.29 h and 11.44 h, respectively; (4) Live digestive enzymes displayed an "M" type variation trend over time across all diets, while intestine digestive enzymes exhibited initial increase followed by decline. Chymotrypsin and amylase activities in both tissues showed positive correlations with substrate concentrations in respective diets. These results suggest that the physical properties of expanded diets (e.g., high hardness and delayed softening) may delay gastric evacuation, thereby reducing feeding rate. Coupled with its suboptimal protein content, these factors collectively constrain the growth potential of *Takifugu flavidus*. This study highlights the urgent to carry out research on the optimal protein requirements of *Takifugu flavidus*, and further optimize the expanded diet formula to improve the digestion and utilization efficiency.

Key words: *Takifugu flavidus*; growth; gastric evacuation; digestive enzyme activity