

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190122003

http://www.yykxjz.cn/

张鹏飞, 常青, 陈四清, 徐郑鑫, 赵捷杰. 绿鳍马面鲈幼鱼昼夜摄食节律及胃排空模型研究. 渔业科学进展, 2020, 41(1): 104–111

Zhang PF, Chang Q, Chen SQ, Xu ZX, Zhao JJ. Diet feeding rhythm and analysis of gastric evacuation associated mathematical models in juvenile *Thamnaconus septentrionalis*. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(1): 104–111

绿鳍马面鲈幼鱼昼夜摄食节律 及胃排空模型研究*

张鹏飞^{1,2} 常青^{2①} 陈四清^{2,3} 徐郑鑫^{2,4} 赵捷杰^{1,2}

- (1. 农业农村部鱼类营养与环境生态研究中心 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306;
2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071; 3. 青岛海洋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; 4. 淮海工学院 连云港 222005)

摘要 为探究绿鳍马面鲈(*Thamnaconus septentrionalis*)幼鱼昼夜摄食节律及胃排空模型,分别采用一次饱食投喂法(将一昼夜划分为8个时段,分别为06:00、09:00、12:00、15:00、18:00、21:00、00:00和03:00,每个时段作1个处理,每天每个处理饱食投喂1次)和分段式连续投喂法(将一昼夜划分为与一次饱食投喂法相同的8个时段,每天每个实验桶连续投喂8次)两种方法研究绿鳍马面鲈幼鱼的昼夜摄食节律,实验持续7 d。此外,分别测定绿鳍马面鲈幼鱼[体重为(4.28±0.46)g]饱食后0、2、4、6、8、10、12、14、16、20、24和28 h时的胃内容物湿重,并用线性模型、指数模型和平方根模型3种数学模型拟合了绿鳍马面鲈幼鱼的胃排空率。结果显示,(1)在两种投喂方式下,实验鱼均表现为24 h一周期的摄食节律。在分段式连续投喂方式下,摄食率在03:00、06:00、09:00和12:00无显著差异,在15:00达到峰值后急速降低($P<0.05$),并在00:00达到最低值;饲料效率与一次饱食投喂方式下的03:00、06:00、15:00和18:00投喂组无显著差异,特定生长率显著高于一次饱食投喂($P<0.05$)。(2)在一次饱食投喂方式下,实验鱼在18:00后摄食率急速降低($P<0.05$),并在00:00达到最低值;实验鱼在09:00和12:00投喂组的特定生长率和饲料效率显著高于一天中的其他时间($P<0.05$),每天09:00~12:00时间段投喂绿鳍马面鲈幼鱼可显著提高其生长和饲料效率。(3)3种模型中,胃排空率用平方根模型拟合得最好,方程为 $y^{0.5}=2.802-0.204t$ ($R^2=0.987$);根据平方根模型,胃内饲料在饱食投喂10 h左右完全排空,达到投喂前水平,80%胃排空时间为6 h。综合上述指标,建议在生产实践中每天09:00~15:00时间段饱食投喂绿鳍马面鲈幼鱼3次,每次间隔3 h。

关键词 绿鳍马面鲈;摄食节律;饲料效率;特定生长率;胃排空率

中图分类号 S965.3 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2020)01-0104-08

自然条件下,鱼类为适应温度、光照、饵料等环境因素变化而表现出一种特定的摄食规律,称为摄食

* 农业部外海渔业开发重点实验室开放课题(LOF 2017-05)、广东省渔业生态环境重点实验室开放基金(FEEL-2017-10)和中国水产科学研究院黄海水产研究所级基本科研业务费项目(20603022017014)共同资助 [This work was supported by Key Laboratory of Open-Sea Fishery Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (LOF 2017-05), Fund of Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment (FEEL-2017-10), and Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, YSFRI, CAFS (20603022017014)]. 张鹏飞, E-mail: 1573852630@qq.com

① 通讯作者: 常青, 研究员, E-mail: changqing@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2019-01-22, 收修改稿日期: 2019-02-27

节律(韩冬, 2005)。鱼类的摄食节律显著影响其生长性能, 根据鱼类的摄食节律制定适宜的投喂时间, 可显著提高饲料效率, 降低养殖成本及减轻水质污染(Boujard *et al.*, 1992; Azzaydi *et al.*, 1999)。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(张波等, 2000)。胃排空率影响鱼类的摄食量、生理代谢水平和食物消化率(Sweka *et al.*, 2004), 同时, 胃排空率还可以评估鱼类消化功能及评价鱼类的投喂频率(Cortés, 1997; 孙晓锋等, 2011)。对鱼类的摄食节律和胃排空模型进行研究, 在鱼类食欲恢复、大多数体细胞增殖期间投喂饲料, 能显著提高其摄食率, 并最大化的增加饲料效益(Spieler, 1977; 朱云海等, 2013)。

绿鳍马面鲈(*Thamnaconus septentrionalis*), 俗称面包鱼、马面鱼、扒皮鱼(丁民权, 1994), 主要分布于日本、朝鲜半岛沿海及中国的东海、南海、黄海、渤海和台湾沿海, 其中东海的产量较高(张家男, 2011)。绿鳍马面鲈主要在 60~120 m 水深区域索饵, 属外海暖温性近底层鱼类(秦忆芹, 1981); 富含高度不饱和脂肪酸 EPA、DHA 和牛磺酸等氨基酸, 是营养价值极高的健康食品(徐大风等, 2018)。绿鳍马面鲈曾在 20 世纪 80 年代之前, 是中国第二大海洋捕捞经济鱼类, 仅次于带鱼(*Trichiurus lepturus*)(许学龙等, 1992), 但由于近些年的过度捕捞, 其资源量急剧下降, 产量已无法满足人们的需求, 迫切需要进行人工养殖。养殖过程中, 应根据养殖对象的摄食规律及食欲恢复时间, 制定合理的投喂策略(汪春玲等, 2018)。本研究以绿鳍马面鲈为对象, 旨在为其适宜投喂时间、投喂方法等提供理论依据, 以期降低养殖成本、提高养殖效益。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验于 2018 年 9 月在山东省烟台市天源水产有限公司进行, 实验鱼为 2018 年 6 月该公司人工繁育所得的同一批次绿鳍马面鲈幼鱼。实验鱼在 6.3 m×1.8 m×2.0 m 的水泥池中饲养, 孵化 30 d 后, 每日 09:00 和 15:00 饱食投喂进口新爱鱼仔商品饲料 1 次, 直至实验开始。实验饲料与日常投喂的饲料成分相同(进口新爱鱼仔 5 号配合饲料, 林兼产业株式会社生产), 粒径为 3 mm。剔除不规则颗粒后, 随机数 3 份 1000 粒称重, 平均重量为 0.018 g, 计算每粒饲料的重量, 以便计算摄食量。

1.2 实验方法

1.2.1 绿鳍马面鲈昼夜摄食节律实验 分别采用两种实验方法来探究绿鳍马面鲈幼鱼[初始体重为(4.50±0.36) g]的昼夜摄食节律。第 1 种方法为“一次饱食投喂昼夜摄食节律法”, 将 1 天分为 8 个时间段, 分别为 06:00、09:00、12:00、15:00、18:00、21:00、00:00 和 03:00; 每个时间段作为 1 个处理水平, 每个处理设置 3 个重复, 每天每个实验桶仅饱食投喂 1 次。第 2 种方法为“分段式连续投喂昼夜摄食节律法”, 将 1 天分为 8 个时间段(与一次饱食投喂昼夜摄食节律法中的时间段保持一致), 连续饱食投喂 8 次, 1 个处理, 3 个重复。

1.2.2 绿鳍马面鲈胃肠排空实验 实验开始前 2 d 停止喂食, 使其胃肠排空。随机取 8 尾鱼, 解剖观察所有鱼胃肠内均无饲料后, 开始实验。实验期间, 实验鱼[初始体重为(4.28±0.46) g]在 09:00 饱食投喂与昼夜摄食节律实验相同的饲料 1 次, 取样时间设定在摄食后 0、2、4、6、8、10、12、14、16、20、24 和 28 h。每次取样时, 将每缸中的实验鱼随机捞出 8 尾, 放入含有 100 mg/L MS-222 水溶液的塑料桶中进行深度麻醉。解剖, 取出鱼胃和肠, 用滤纸吸干表面水分, 称重。然后, 解剖鱼胃, 取出胃内容物, 用蒸馏水清洗胃, 再用滤纸吸干胃表面水分, 称重, 2 次所得重量差值即为胃内饲料重量(湿重), 每次所得胃内饲料重量的平均值作为该取样时间的胃内饲料重量。

1.3 饲养管理

绿鳍马面鲈幼鱼的昼夜摄食节律实验在 27 个圆形平底塑料缸(直径为 80 cm, 体积为 300 L)组成的室内流水养殖系统中进行。将绿鳍马面鲈幼鱼从暂养池转入实验系统中驯养, 暂养时间为 7 d。实验开始前, 将实验鱼饥饿 2 d, 从中随机挑选体质健壮、大小均一的个体, 每缸 20 尾, 每个处理设置 3 个平行。实验中, 绿鳍马面鲈分别按照两种实验方法进行饱食投喂, 投喂结束后, 用虹吸管将剩余饲料吸出。分别记录每个实验桶每次投喂的饲料重量、残饵粒数、实验开始和结束时各桶中实验鱼重量、特定生长率(由每个实验桶中 20 尾鱼的总初始重量和总终末重量计算得到)。实验期间的水温为 24.5℃~26.0℃, pH 为 6.8~7.0, 白天为自然光照, 夜间使用白炽灯照明, 水面全天光照强度为 2000~3000 lx, 溶解氧>7.2 mg/L, 氨氮<0.5 mg/L。实验鱼昼夜摄食节律实验周期为 7 d。

将绿鳍马面鲈胃排空实验所使用的 150 尾实验鱼放养于 1 个圆形平底塑料缸中(直径为 160 cm, 体

积为 1200 L), 流水养殖, 微充气, 实验水温为 24℃。

1.4 数学模型

分别采用指数模型、线性模型和平方根模型来拟合胃内含物重量的变化规律。

线性模型: $Y=A-B \times t$

指数模型: $Y=A \times e^{-B \times t}$

平方根模型: $Y^{0.5}=A-B \times t$

式中, Y 为瞬时胃内残余饲料湿重=胃内残余饲料湿重(g)/鱼体重(g) $\times 100$, B 为瞬时胃排空率, t 为摄食后时间(h), A 为常数。通过比较各拟合模型的相关系数(R^2)、残差平方和(RSS)及残差的标准差(SDR)来选择绿鳍马面鲈幼鱼的最佳胃排空模型。

1.5 数据分析与统计

摄食量(g)=投喂总量-(残饵粒数 \times 单位颗粒重量)

特定生长率(%/d)= $100 \times (\ln \text{ 终末体重} - \ln \text{ 初始体重}) / \text{实验天数}$

摄食率(%bw)= $100 \times \text{总干物质摄食量} / (\text{初始体重} + \text{终末体重}) / 2$

平均摄食率(%bw/d)= $100 \times \text{总干物质摄食量} / [\text{实验天数} \times (\text{初始体重} + \text{终末体重}) / 2]$

饲料效率(%)= $100 \times \text{鱼体增重(湿重)} / \text{总摄食量(干重)}$

结果以平均值 \pm 标准误(Mean \pm SE)表示。采用 SPSS 20.0 统计软件进行分析, 实验结果经单因素方差分析(One-way ANOVA)后, 若差异显著, 则进行邓肯多重比较, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 投喂方式对摄食节律的影响

两种投喂方式下, 绿鳍马面鲈在一昼夜的不同时间段表现出不同的摄食强度(图 1)。在一次饱食投喂条件下, 绿鳍马面鲈在 09:00、12:00、15:00 和 18:00 投喂组的日摄食率明显高于 03:00、06:00、21:00 和 00:00 投喂组($P < 0.05$)。综合 1~7 d 的日摄食率来看, 绿鳍马面鲈表现为 24 h 一周期的日摄食率, 摄食高峰有 4 个, 分别为 09:00、12:00、15:00 和 18:00。绿鳍马面鲈 7 d 的平均摄食率表现出与日摄食率相同的变化规律。

在分段式连续投喂下, 一昼夜中每个时间点的摄食率均低于一次饱食投喂摄食率; 绿鳍马面鲈的摄食率在 15:00 出现 1 个摄食高峰, 之后日摄食率逐渐下降并在 00:00 达到最低值($P < 0.05$); 综合 1~7 d 的日摄

食率, 绿鳍马面鲈也表现出 24 h 一周期的日摄食率。绿鳍马面鲈 7 d 的平均摄食率仅在 15:00 出现 1 个摄食高峰。

2.2 投喂时间段对生长性能的影响

投喂时间段对绿鳍马面鲈幼鱼的特定生长率和饲料效率有显著影响。12:00 投喂组的总摄食量最高, 分段式连续投喂条件下的总摄食量约为一次饱食投喂条件下 12:00 投喂组的 2.8 倍(图 2)。一次饱食投喂条件下绿鳍马面鲈特定生长率的最大值出现在 12:00 投喂组, 其次为 09:00、15:00、18:00 投喂组, 最小值出现在 00:00 投喂组, 最大值约为最小值的 13 倍(图 3)。分段式连续投喂条件下的特定生长率约为一次饱食投喂条件下特定生长率最大值的 1.3 倍。一次饱食投喂条件下 12:00 投喂组的饲料效率最高, 其次为 09:00 投喂组, 饲料效率的最小值也出现在 00:00 投喂组, 最大值约为最小值的 3.8 倍(图 4)。分段式连续投喂条件下的饲料效率与一次饱食投喂条件下 03:00、06:00、15:00 和 18:00 投喂组无显著差异($P > 0.05$)。

2.3 消化道排空时间及胃排空模型

绿鳍马面鲈在摄食后, 0~10 h 胃内含物比率急剧下降, 在 10 h 基本完全排空(图 5)。而在摄食后 0~4 h 全肠内含物比率迅速升高并在 4 h 达到最大值, 4~8 h 全肠内含物比率基本不变, 8 h 后迅速下降, 在 24 h 时基本已完全排空。分别使用 3 种数学模型拟合绿鳍马面鲈胃排空实验数据, 以相关系数 R^2 、残差平方和(RSS)及残差的标准差(SDR)为参考, 优劣程度均为平方根模型>线性模型>指数模型(表 1), 因此, 平方根模型更适于描述绿鳍马面鲈胃排空曲线。由平方根模型可得, 胃内容物在饱食投喂后 10 h 左右完全排空, 达到投喂前水平; 80%胃排空时间为 6 h。

3 讨论

3.1 投喂方式对绿鳍马面鲈昼夜摄食节律影响

本研究采取一次饱食投喂和分段式连续投喂两种方法来研究绿鳍马面鲈的摄食节律。比较发现, 一次饱食投喂条件下绿鳍马面鲈日摄食率在 09:00 达到峰值后保持稳定, 18:00 后开始下降, 并在 00:00 达到最低值; 分段式连续饱食投喂条件下, 绿鳍马面鲈在 15:00 日摄食率达到峰值后开始下降, 同样在 00:00 达到最低值。两种实验方法均表明, 绿鳍马面鲈的摄食节律为 24 h 一周期, 均较好地反应出绿鳍马面鲈的日摄食节律, 与其他学者的研究结果不同(韩冬, 2005; 郑珂珂等, 2010; 董桂芳等, 2013), 对比上述学者的研

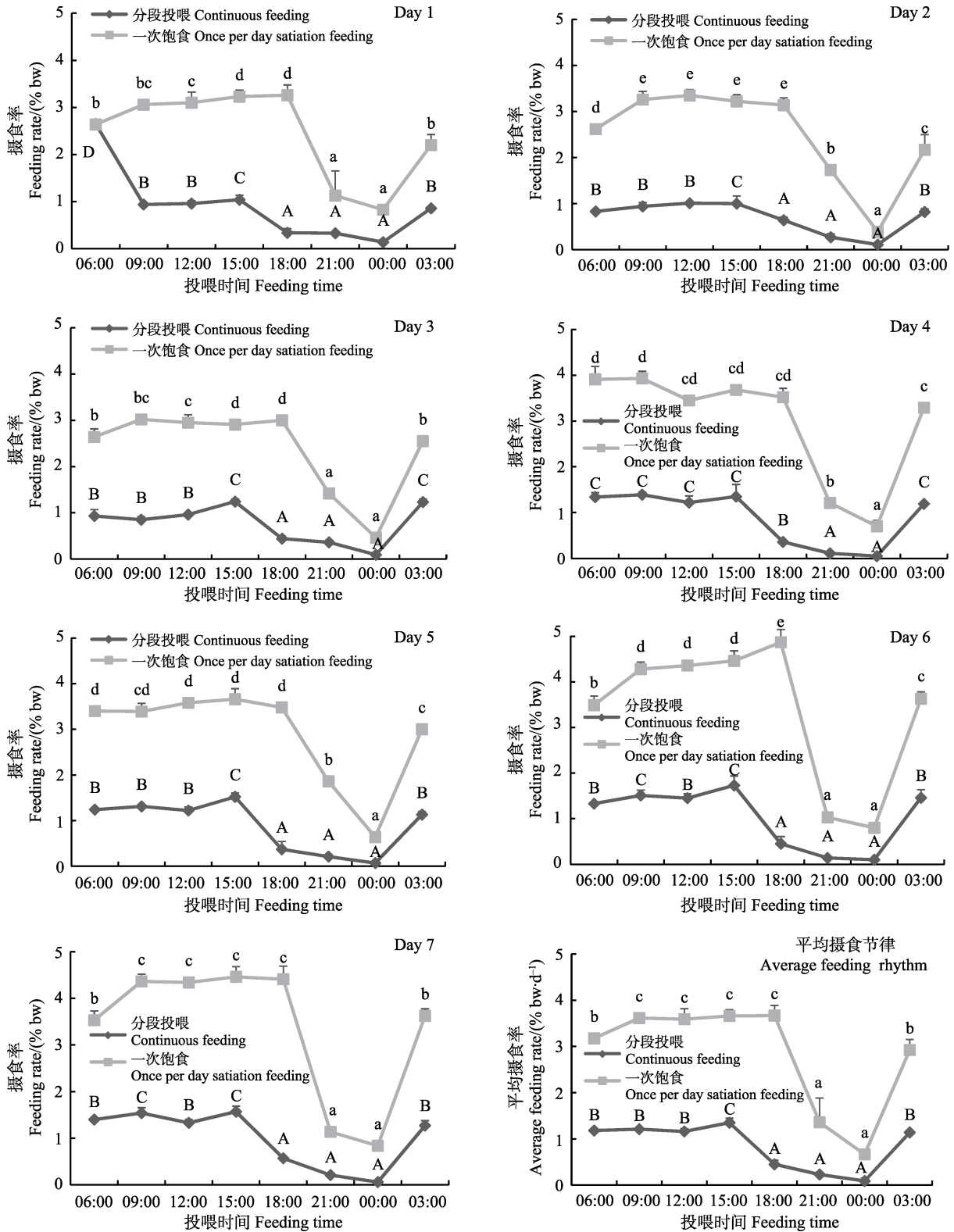


图 1 一次饱食投喂和分段式连续投喂下绿鳍马面鲈的昼夜摄食节律变化(平均值±标准误, $n=3$)
 Fig.1 Variations of diet feeding rhythm of *T. septentrionalis* under a once-per-day satiation feeding and a continuous feeding at a fixed interval (Mean±SE, $n=3$)

不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同
 Data with different lowercase letters are significantly different at $P < 0.05$;
 Data with different capital letters are significantly different at $P < 0.05$. The same as below

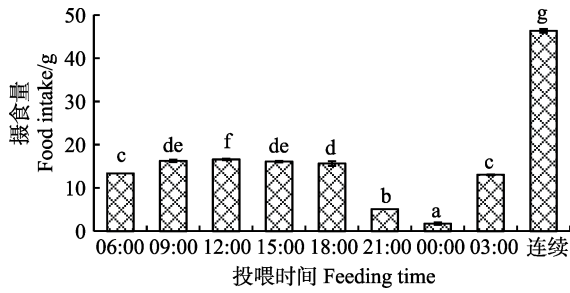


图2 不同投喂时间段下绿鳍马面鲈幼鱼的摄食量
Fig.2 Food intake of *T. septentrionalis* at different feeding time

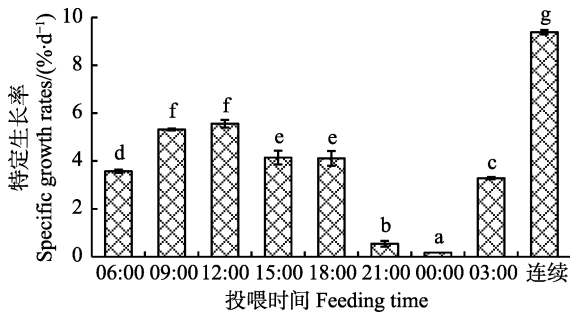


图3 不同投喂时间段绿鳍马面鲈幼鱼的特定生长率
Fig.3 Specific growth rate of *T. septentrionalis* at different feeding time

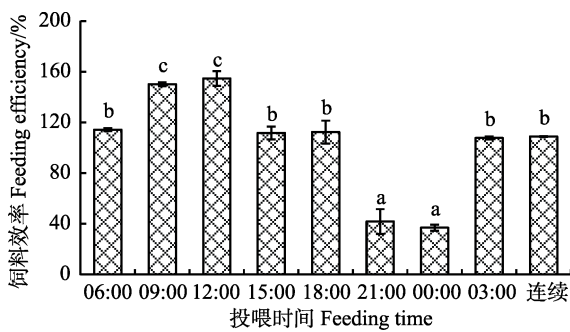


图4 不同投喂时间段下绿鳍马面鲈幼鱼的饲料效率
Fig.4 Feeding efficiency of *T. septentrionalis* at different feeding time

表1 绿鳍马面鲈幼鱼胃排空曲线的3种数学模型拟合
Tab.1 The imitation with three types of mathematical models for gastric evacuation of *T. septentrionalis*

数学模型 Model	公式 Equation	R ²	RSS	SDR
线性模型 Linear model	$y = -0.7559t + 7.2943$	0.962	1.577	0.562
指数模型 Exponential model	$y = 12.482e^{-0.367t}$	0.820	2.071	0.644
平方根模型 Square root model	$y^{0.5} = 2.802 - 0.204t$	0.987	0.341	0.261

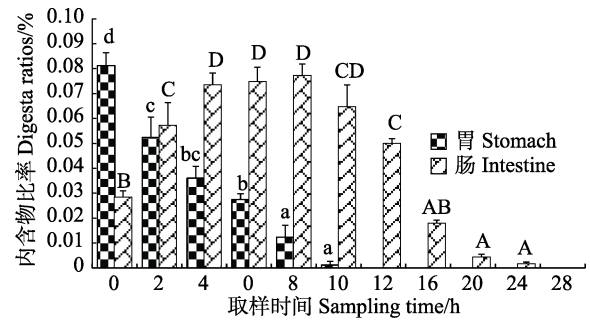


图5 绿鳍马面鲈摄食后胃和全肠内含物比例变化 (平均值±标准误, n=8)

Fig.5 Post-prandial digesta ratios of stomach and intestines of *T. septentrionalis* (Mean±SE, n=8)

究结果,分析认为,绿鳍马面鲈抢食活泼、消化速率快,可能是两种实验方法均较好反应摄食节律的原因。

鱼类的摄食节律分为白天摄食、晚上摄食、晨昏摄食和无明显节律4种类型(Helfmann, 1986)。研究发现,绿鳍马面鲈在一次饱食投喂条件下,09:00~18:00投喂组的日摄食率高于21:00~06:00投喂组;分段式连续投喂条件下,日摄食率在15:00达到峰值后开始下降,这表明绿鳍马面鲈是白天摄食型鱼类,与宝石鲈(*Scortum barcoo*)(孙砚胜等, 2012)、台湾泥鳅(*Paramisgurnus* sp.)(张运邦等, 2017)等摄食节律相同。鱼类的摄食节律与环境、温度、光照等密切相关(Fraser et al, 1995),秦忆芹(1981)对东海外海绿鳍马面鲈摄食习性的研究中发现,傍晚到上半夜(18:15~21:00)其摄食强度最高,而本研究两种投喂方式下,该时间段的摄食率均显著低于03:00~18:00 ($P < 0.05$),这可能是由于实验环境、实验鱼存在差异,其研究的是海洋中的绿鳍马面鲈摄食强度,属野生鱼类,摄食强度受到海洋中温度、光照及饵料种类、数量等影响;本研究的实验条件为工厂化海水流水养殖系统,具有稳定的环境及充足的饲料,实验鱼是经人工驯化2年的亲鱼繁育所得。

3.2 投喂时间段对绿鳍马面鲈幼鱼生长性能的影响

鱼类的摄食节律是对自然界中温度、光照、索饵、躲避天敌等外界因素长期的适应所形成的,这种规律会影响鱼类一天中的营养分配及代谢强度,索饵活动时间较强,可能其对食物的利用率也较高(麦康森等, 2011)。本研究中,不同投喂时间段的绿鳍马面鲈特定生长率差异显著,09:00和12:00投喂组绿鳍马面鲈的特定生长率约为21:00和00:00的13倍。Zoccarato等(1993)对虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)摄食时间及摄食水平的研究发现,16:00投喂组实验鱼生长显著高于09:00投喂组。不同投喂时间段对幼鱼生长具有显著

影响的报道也见于鲈形目的研究中,表现为在夜间投喂,生长效果比白天要好,这与其夜间摄食的习性相对应(Hogendoorn, 1981; Baras *et al.*, 1998; Bolliet *et al.*, 2001)。郑珂珂等(2010)对大菱鲂(*Scophthalmus maximus* L.)的摄食节律及适宜投喂时间研究中发现,15:00、18:00、03:00投喂的实验鱼特定生长率为06:00、09:00、12:00投喂实验鱼特定生长率的2倍。这说明投喂时间对鱼类的特定生长率有一定的影响。

本研究也发现,不同时间投喂的绿鳍马面鲈对饲料利用存在差异,绿鳍马面鲈的饲料效率表现为09:00和12:00投喂组显著高于其他时刻($P<0.05$),21:00和00:00投喂组的饲料效率最低。对于其他鱼类,部分学者提出无法判定对饲料利用的差异是源于摄食率还是饲料效率(Sundararaj *et al.*, 1982)。对于绿鳍马面鲈来说,一次饱食投喂条件下,09:00和12:00投喂组的摄食率与15:00和18:00投喂组无显著性差异,但是饲料效率却表现为09:00和12:00投喂组显著高于15:00和18:00投喂组($P<0.05$),这表明投喂时间对绿鳍马面鲈生长的影响可能主要是由饲料效率引起。投喂时间对饲料效率具有显著影响的研究也有很多报道,如Noeske-Hallin等(1985)对斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)适宜投喂时间的研究发现,不同投喂时间,其饲料效率差异显著;Baras等(1996)对淡水白鲈(*Piaractus brachypomus*)的研究发现,夜间投喂的实验鱼比白天投喂的实验鱼饲料转化效率高。郑珂珂等(2010)在对大菱鲂幼鱼的昼夜摄食节律研究中发现,投喂国产鲈鲷类商品饲料时,15:00和18:00投喂组大菱鲂饲料效率显著高于其他投喂组,约为06:00、09:00和12:00投喂组的2倍。这充分的说明,根据鱼类的摄食节律,合理的安排投喂时间,可促进鱼类的生长和提高饲料利用。

3.3 绿鳍马面鲈胃肠排空时间及胃排空模型

胃肠排空显著影响鱼类的食欲,排空率在一定程度能够反应鱼类的可摄食量(Riche *et al.*, 2004)。但养殖实践中并不能完全按照胃排空时间来确定投喂时间的间隔,如崔超等(2014)研究投喂频率对俄罗斯鲟(*Acipenser gueldenstaedti*)幼鱼生长的影响时,建议每天投喂频率 ≥ 4 次,时间间隔 <6 h;而张涛等(2015)研究俄罗斯鲟幼鱼胃排空模型时,认为80%胃排空的15h作为投喂间隔可使饲料获得充分利用。本研究以胃肠内含物质量分析法研究绿鳍马面鲈的胃肠排空时间。绿鳍马面鲈在摄食4h后胃内含物下降约52%,肠内含物4h达到最大值,并在4~8h维持不变,在24h基本完全排空。根据平方根模型,绿鳍马面鲈胃

内容物完全排空的时间为10h左右,80%胃排空的时间为6h左右,理论上投喂间隔6h可使绿鳍马面鲈食欲基本得到恢复。在对其摄食节律的研究中发现,分段式连续投喂条件下,仅间隔3h的09:00和12:00摄食量并无差异;一次饱食投喂条件下,09:00和12:00投喂组的饲料效率及特定生长率均最佳。因此,以胃排空率达到80%作为投喂最佳时间间隔的判定指标并不充分,还要考虑到鱼类的摄食节律。

4 结论

本研究中,一次饱食投喂条件下的绿鳍马面鲈在每天09:00和12:00时间段的摄食率、特定生长率及饲料效率均表现出最佳的效果,表明每天09:00~12:00时间段投喂绿鳍马面鲈可显著提高其生长和饲料利用效率。分段式连续投喂8次的条件下,总摄食量为一次饱食投喂条件下12:00投喂组的2.8倍,但特定生长率仅为1.3倍,增加投喂量,在生长性能上并未得到对应的倍数增加趋势;日摄食率在15:00达到峰值后开始下降,并在00:00达到最小值,表明多次投喂时,绿鳍马面鲈摄食强度从15:00开始逐渐降低。根据平方根模型,绿鳍马面鲈幼鱼投喂后3h胃排空率可达较高水平(41%),同时,在投喂实验中发现,投喂3h后实验鱼抢食依旧十分活泼。综合上述指标,建议在生产实践中,每天09:00~15:00时间段饱食投喂绿鳍马面鲈幼鱼3次,每次间隔3h。

参 考 文 献

- Azzaydi M, Martínez FJ, Zamora S, *et al.* Effect of meal size modulation on growth performance and feeding rhythms in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*, L.). *Aquaculture*, 1999, 170(3-4): 253-266
- Baras E, Mélard C, Grignard JC, *et al.* Comparison of food conversion by pirapatinga *Piaractus brachypomus* under different feeding times. *Progressive Fish-Culturist*, 1996, 58(1): 59-61
- Baras E, Tissier F, Westerloppe L, *et al.* Feeding in darkness alleviates density-dependent growth of juvenile vundu catfish *Heterobranchus longifilis* (Clariidae). *Aquatic Living Resources*, 1998, 11(5): 335-340
- Bolliet V, Azzaydi M, Boujard T. Effect of feeding time on feed intake and growth. In: Houlihan D, Boujard T, Jobling M. *Food intake in fish*. Oxford: Blackwell Science Inc, 2001, 233-249
- Boujard T, Leatherland JF. Circadian rhythms and feeding time in fishes. *Environmental Biology of Fishes*, 1992, 35(6): 109-131
- Cortés. A critical review of methods of studying fish feeding

- based on analysis of stomach contents: Application to *elasmobranch* fishes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54(3): 726–738
- Cui C, Yu N, Long LN, *et al.* Effects of feeding frequency on growth, digestive enzymes activities and ammonia excretion of juvenile Russian sturgeon, *Acipenser gueldenstaedtii*. *Marine Fisheries*, 2014, 36(1): 35–43 [崔超, 禹娜, 龙丽娜, 等. 投喂频率对俄罗斯鲟幼鱼生长、消化酶活力和氨氮排泄的影响. *海洋渔业*, 2014, 36(1): 35–43]
- Ding MQ. On the stocks of filefish *Navodon septentrionalis* and their distributions in the East China Sea. *Journal of Fisheries of China*, 1994, 18(1): 45–56 [丁民权. 东海绿鳍马面鲀群体及其分布. *水产学报*, 1994, 18(1): 45–56]
- Dong GF, Yang YO, Chen L, *et al.* Diet feeding rhythm and gastrointestinal evacuation time of juvenile channel catfish and hybrid sturgeon. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(5): 876–884, 890 [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, 890]
- Fraser NHC, Heggenes J, Metcalfe NB, *et al.* Low summer temperatures cause juvenile Atlantic salmon to become nocturnal. *Canadian Journal of Zoology*, 1995, 73(3): 446–451
- Han D. Modeling for feeding system and pollution evaluation in Chinese longsnout catfish. Doctoral Dissertation of Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005 [韩冬. 长吻鮠投喂管理和污染评估动态模型的研究. 中国科学院水生生物研究所博士研究生学位论文, 2005]
- Helfmann GS. Fish behaviour by day, night and twilight. In: Pitcher TJ (eds.). *The behaviour of teleost fishes*. Boston: Springer, 1986, 366–387
- Hogendoorn H. Controlled propagation of the African catfish, *Clarias lazera* (C. & V.): IV. Effect of feeding regime in fingerling culture. *Aquaculture*, 1981, 24: 123–131
- Mai KS, Chen LQ, Chen NS, *et al.* Nutrition and feed of aquatic animals. Beijing: China Agriculture Press, 2011, 10–53 [麦康森, 陈立桥, 陈乃松, 等. 水产动物营养与饲料学. 北京: 中国农业出版社, 2011, 10–53]
- Noeske-Hallin TA, Spieler RE, Parker NC, *et al.* Feeding time differentially affects fattening and growth of channel catfish. *Journal of Nutrition*, 1985, 115(9): 1228–1232
- Qin YQ. A study on the feeding habit of the filefish of Dong Hai. *Journal of Fisheries of China*, 1981, 5(3): 245–251 [秦忆芹. 东海外海绿鳍马面鲀摄食习性的研究. *水产学报*, 1981, 5(3): 245–251]
- Riche M, Haley DI, Oetker M, *et al.* Effect of feeding frequency on gastric evacuation and the return of appetite in tilapia (*Oreochromis niloticus*)(L.). *Aquaculture*, 2004, 234(1–4): 657–673
- Spieler RE. Diel and seasonal changes in response to stimuli: A plague and a promise for mariculture. *Proceedings of the Annual Meeting–World Mariculture Society*, 1977, 8(1–4): 865–882
- 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]
- Sun YS, Zhang XQ, Shi DJ, *et al.* Feeding rhythm and daily food intake of Jade Perch *Scortum barcoo*. *Fisheries Science*, 2012, 31(1): 28–31 [孙砚胜, 张秀倩, 史东杰, 等. 宝石鲈摄食节律和日摄食率的初步研究. *水产科学*, 2012, 31(1): 28–31]
- Sundararaj BI, Nath P, Halberg F. Circadian meal timing in relation to lighting schedule optimizes catfish body weight gain. *Journal of Nutrition*, 1982, 112(6): 1085–1097
- Sweka JA, Cox MK, Hartman KJ. Gastric evacuation rates of brook trout. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2004, 133(1): 204–210
- Wang CL, Liang MQ, Xu HG. Optimum feeding frequency for *Litopenaeus vannamei* during the breeding period. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(4): 74–82 [汪春玲, 梁萌青, 徐后国. 凡纳滨对虾亲虾繁殖期间适宜投喂频率的研究. *渔业科学进展*, 2018, 39(4): 74–82]
- Xu DF, Liu K, Wang PF, *et al.* Analysis of nutritional composition in the muscle of *Thamnaconus septentrionali*. *Marine Sciences*, 2018, 42(5): 122–129 [徐大风, 刘琨, 王鹏飞, 等. 绿鳍马面鲀肌肉营养成分分析和营养评价. *海洋科学*, 2018, 42(5): 122–129]
- Xu XL, Zheng YJ, Liu S. Estimation of stock size of filefish *Thamnaconus modestus* in the East China Sea and Yellow Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1992, 23(6): 651–656 [许学龙, 郑元甲, 刘松. 东、黄海绿鳍马面鲀的资源评估. *海洋与湖沼*, 1992, 23(6): 651–656]
- Zhang B, Sun Y, Tang QS. Gastric evacuation rate of black sea bream (*Sparus macrocephalus*). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 287–289 [张波, 孙耀, 唐启升. 黑鲷的胃排空率. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 287–289]
- Zhang JN. Reproductive regulation and fry breeding technology of *Thamnaconus septentrionalis* Günther. Master's Thesis of China Ocean University, 2011 [张家男. 绿鳍马面鲀的生殖调控与苗种繁育技术. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2011]
- Zhang T, Li WJ, Zhuang P, *et al.* 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, 等. 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]
- Zhang YB, Wang YM, Pu ZW, *et al.* Feeding rhythm and daily feeding amount of larval Taiwan loach. *Journal of Neijiang Normal University*, 2017, 32(8): 77–81 [张运邦, 王永明, 蒲宗旺, 等. 台湾泥鳅仔鱼摄食节律及日摄食量. *内江师范学院学报*, 2017, 32(8): 77–81]
- Zheng KK, Fang W, Kong FH, *et al.* Feeding rhythm and optimal

- feeding time for turbot *Scophthal musmaximus* L. juvenile. Fishery Modernization, 2010, 37(5): 26–30 [郑珂珂, 方伟, 孔凡华, 等. 大菱鲆幼鱼的摄食节律及适宜投喂时间. 渔业现代化, 2010, 37(5): 26–30]
- Zhu YH, Wang YB, Hu ZH. 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]
- Zoccarato I, Boccignone M, Palmegiano GB, et al. Meal timing and feeding level: Effect on performance in rainbow trout. In: Fish nutrition in practice. Ed. INRA, Les Colloques, 1993, 297–300

(编辑 马瑾艳)

Diet Feeding Rhythm and Analysis of Gastric Evacuation Associated Mathematical Models in Juvenile *Thamnaconus septentrionalis*

ZHANG Pengfei^{1,2}, CHANG Qing^{2①}, CHEN Siqing^{2,3}, XU Zhengxin^{2,4}, ZHAO Jiejie^{1,2}

(1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition (CREEFN) of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071; 4. Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005)

Abstract To investigate the diet feeding rhythm of juvenile of *Thamnaconus septentrionalis* and gastric emptying model, a once-per-day satiation feeding treatment (one day was divided into eight time periods, each time period was used as one treatment, and the fish of each treatment were fed to apparent satiation once a day) and a continuous feeding treatment with fixed intervals (one day was divided into eight time periods, the fish in each tank were fed to apparent satiation, eight times a day) were conducted for 7 days. The experimental fish [(4.28±0.46) g] were removed at various intervals (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 24, and 28 h) after satiation feeding. The wet mass of the chyme was determined and the applicability of the three mathematical models (linear model, exponential model, and square root model) was compared by the fitness of gastric evacuation data in juvenile *T. septentrionalis*. The results showed that *T. septentrionalis* exhibit a 24 h diet feeding cycle under two feeding scenarios. The feeding rate under the segmental continuous feeding mode was not significantly different at 03:00, 06:00, 09:00, and 12:00, but decreased rapidly after reaching a peak at 15:00 ($P<0.05$), and at 0:00 reached the lowest value ($P<0.05$). The feed efficiency was not significantly different at 03:00, 06:00, 15:00, and 18:00 in the once-per-day satiation feeding, and the specific growth rate was significantly higher than that of a once-per-day satiation feeding ($P<0.05$). (2) The feeding rate of experimental fish decreased rapidly after 18:00 in the continuous feeding with a fixed interval ($P<0.05$), and reached the lowest value at 00:00 ($P<0.05$). The specific growth rate and feed efficiency at 09:00 and 12:00 in the experimental fish were significantly higher than at the other times of the day ($P<0.05$), optimal feeding times in *T. septentrionalis* culturing were during 15:00~18:00. (3) Among the three models, the gastric emptying rate was best fitted the square root model, and the equation was $y^{0.5}=2.802-0.204t$ ($R^2=0.987$). According to the square root model, the feed in the stomach was fed for 10 h. The left and right sides were completely emptied to the level before feeding, and the 80% gastric emptying time was 6 h. Based on the above indicators, it is recommended to feed the *T. septentrionalis* 3 times every day during the production practice from 09:00 to 15:00, with an interval of 3 h.

Key words *Thamnaconus septentrionalis*; Feeding rhythm; Feeding efficiency; Specific growth rate; Gastric evacuation rate

① Corresponding author: CHANG Qing, E-mail: changqing@ysfri.ac.cn