



黑点青鳉的生长和摄食行为发育

陈剑明, 陈雅飞, 徐永健*, 宁燕, 戴铃灵

(宁波大学海洋学院, 应用海洋生物技术教育部重点实验室, 浙江宁波 315382)

摘要: 针对黑点青鳉实验室养殖成活率低的问题, 对其摄食行为发育进行研究, 了解其早期阶段的摄食行为发育状况, 为人工养殖提供理论依据。通过单摄像机结合镜面成像的方法, 对黑点青鳉胚后发育阶段90 d摄食行为的观察与分析, 研究了投喂卤虫无节幼体条件下黑点青鳉的生长特征和摄食行为发育。结果显示, 幼体体长平均生长率为2.579%/d, 体长与日龄间关系为 $y=3.132+0.383x-0.004x^2+0.00003x^3$, $R^2=0.98$ 。通过各项摄食行为指标将其幼体生长发育分为3期6个阶段: 仔鱼期(0~10 d)分为前仔鱼期(0~4 d)和后仔鱼期(5~10 d), 稚鱼期(11~30 d)分为前稚鱼期(11~18 d)、中稚鱼期(19~24 d)和后稚鱼期(25~30 d), 幼鱼期(31~65 d)。黑点青鳉幼体出膜4 d后开始投喂初孵卤虫, 至10 d所有鱼苗均能捕食。黑点青鳉仔鱼期幼体死亡率较高, 但摄食能力稳步提升, 至该期末, 摄食成功率提升至45%~55%, 摄食效率达0.5~0.6个/min; 稚鱼期幼体的各项摄食指标均有大幅度提升, 对饵料的响应时间不断缩短, 摄食速率提高, 响应距离也逐渐增长, 摄食量增大, 摄食成功率已提升至90%~95%; 幼鱼期各项摄食指标已接近成鱼, 摄食效率达9个/min以上, 摄食功能已趋于完善。研究表明, 黑点青鳉在仔鱼期对卤虫无节幼体的响应距离短、摄食速率低下, 摄食成功率与摄食效率均处于较低水平, 随着其自身的发育以及摄食能力的稳定提升, 摄食成功率和摄食效率逐步提高, 成活率趋于稳定。养殖期间, 通过密切注意黑点青鳉的摄食行为变化, 改变投喂的数量和频次, 使更多的仔鱼尽快过渡到稚鱼期, 可能是提高养殖成活率的一条有效途径。

关键词: 黑点青鳉; 仔稚鱼期; 生长; 摄食行为; 发育; 生态毒理学

中图分类号: S 965.3

文献标志码: A

黑点青鳉(*Oryzias melastigma*), 又名海水青鳉和印度马达卡(Indian medaka), 隶属辐鳍亚纲(Actinopterygii)、颌针鱼目(Beloniformes)、怪颌鳉科(Adrianichthyidae)、青鳉属(*Oryzias*), 原产于印度沿岸^[1]。由于黑点青鳉个体小、性别差异明显、世代周期短、产卵率高、对环境各类污染物的干预敏感、盐度适应范围宽等特点, 已被推荐为“一种理想的海洋模式鱼种”^[2-4]。黑点青鳉具有体色透明易于观察、行为敏捷的特点, 也是一种适于研究行为学的良好实验对象。目前

针对黑点青鳉摄食行为发育的研究尚未见报道。本实验对不同发育阶段的黑点青鳉的摄食行为进行拍摄, 并分析其摄食行为与其自身生长的情况, 为其功能器官的发育提供理论依据。

目前, 青鳉养殖主要用于提供实验材料和观赏。淡水类青鳉养殖技术相对简单、成活率高、繁殖能力强, 深受水族爱好者的喜爱, 而海水类青鳉养殖条件相对苛刻, 偏向于作为实验材料。水产养殖是在人工环境下驯养、繁殖和生产野生水生动物的过程, 在全过程的每个环

收稿日期: 2018-12-28 修回日期: 2019-03-05

资助项目: 国家自然科学基金(41276123); 宁波市自然科学基金(2017A610282); 宁波大学学科开放基金(xkzsc1508)

通信作者: 徐永健, E-mail: xuyongjian@nbu.edu.cn

节都需行为学作为指导,行为学是水产养殖的最基础学科^[5]。黑点青鲮的实验室养殖成活率较低,而目前该物种的已有研究主要集中于环境毒理学和分子生物学方面^[6-8],也有部分文献涉及黑点青鲮受精和发育方面的研究^[9-10],但未见有养殖技术方面的报道,该物种作为实验材料的供给因此受到了限制。摄食是动物有效获得营养物质与能量的重要来源,是鱼类生长发育和存活的基础,养殖成活率的问题易从摄食与营养角度解决,而摄食行为是水生动物最基本的行为之一。通过对黑点青鲮的摄食行为发育研究,有助于准确评价仔稚鱼的营养状况、生长率以及早期阶段的变化规律。本研究观察不同生长阶段黑点青鲮的摄食行为方式,探讨黑点青鲮不同生长阶段的摄食行为发育,为了解其营养需求和饵料投喂策略提供理论依据,以便对黑点青鲮的人工养殖提供指导,为其他海洋科学研究提供适宜的实验材料。

1 材料与amp;方法

1.1 实验对象与日常管理

实验于2016年9—12月在宁波大学水产养殖校内基地(宁波大学东校区)进行。实验用鱼黑点青鲮来自香港科技大学,经宁波大学培养繁育的子代作为实验材料,实验材料为清洁级。选取健康的黑点青鲮亲体10对,放入60 cm×45 cm×60 cm的玻璃水族缸中进行培育,让亲鱼自然受精后产出受精卵,用虹吸的方法分离受精卵并转移至孵化缸中,孵化条件为水温(28±1)℃、盐度25±1、充气培育(溶解氧5 mg/L),9~10 d孵出幼体。把幼体转移到光照培养箱(宁波江南仪器公司)中的22 cm×15 cm×17 cm长方体透明鱼缸中培育,幼体培育条件:砂滤海水,水温(26±1)℃,盐度25±1,光周期(L:D)为14:10,光照强度3 000 lx。首批初孵鱼苗658尾,全长约0.5~0.8 cm。

鱼苗初孵后30 h内不用投喂,之后投喂轮虫2 d,密度为10~15个/mL,分2次投喂。第4天起,每天9:00投喂初孵卤虫无节幼体(刚孵出12 h内),投喂量从5个/尾逐渐增加到150个/尾,1天投喂1次。隔天傍晚吸污1次,清除死鱼、残饵及排泄物等,记录自然死亡鱼苗数量。

1.2 实验方法

将鱼苗刚出膜当天记为1日龄(1 d),对同一

批次鱼苗进行为期90 d的连续养殖观察,1~30 d隔日随机抽样1次,31~60 d每5天抽样1次,61~90 d每10天抽样1次。分析黑点青鲮的体长、成活率,观察各期鱼的摄食行为。

生长率与成活率 各期黑点青鲮随机选取5尾以上,用游标卡尺测量鱼体长,利用SPSS 17.0对体长和日龄作回归方程分析,得到黑点青鲮的体长与生长日龄间的关系方程;以 $GL=(\ln L_2 - \ln L_1)/(t_2 - t_1)$ 作为体长瞬时生长率的计算公式;根据每日记录的鱼的自然死亡数量,计算黑点青鲮的成活率(%)=实验当日活鱼苗数/实验总鱼苗数×100%。

摄食行为观察 从第4天起(即投喂卤虫开始),按上述取样时间间隔,每次取5~8尾青鲮幼鱼观察摄食行为。这些实验幼鱼已提前被饥饿24 h处理,移至拍摄室后,先暂养在容器中(环境条件同“实验对象与日常管理”),观察各鱼有无异常反应,1 h后,再按要求逐个转移到观察容器(12 cm×8 cm×10 cm)中,适应1 h。之后定点投喂初孵卤虫,并拍摄记录摄食行为。摄食行为的拍摄采用SONY2216E便携式摄像机,方法为单摄像机结合防水镜计算鱼体三维坐标^[11]。每尾鱼的拍摄时长设置:投入饵料前2 min+摄食时间 $t+5$ min,其中 t 根据不同生长阶段而变化,0~30 d为10 min、31~60 d为15 min、61~90 d为20 min。实际拍摄时根据各鱼个体的摄食情况而定,本实验规定在鱼苗摄食某一个初孵卤虫后5 min内再无成功摄食即为饱食,立即停止实验。

1.3 数据分析

根据以上实验,通过反复观察所拍摄录像,分析有关参数来评估不同时期黑点青鲮的摄食行为发育状况(即摄食功能完善):

响应距离(mm)为黑点青鲮看到饵料(身体出现向饵料运动趋势)至所摄食饵料间的直线距离。

摄食量(个)为空腹个体的一次饱食量,即从开始摄食到某个饵料(后5 min内不再摄食)时的总摄食的初孵卤虫无节幼体个数,包括绝对摄食量和相对于体质量的相对摄食量。

摄食速率(个/s)为摄食稳定阶段成功进食1个饵料个体所花费的时间。根据不同鱼体大小,统计进食第2~10个卤虫无节幼体所需的时间(s)除以饵料个体数。

摄食成功率(%)为被成功进食的无节幼体数/攻击无节幼体的总次数×100%。

摄食效率(个/min)为在一次饱食过程中, 黑点青鲮在单位时间内摄入的饵料量。

黑点青鲮生长发育阶段的生长和行为参数的分析与比较采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)。实验数据以样本平均值±标准差(mean±SD)表示, 显著性水平置信区间设定为 $P<0.05$ 。分析数据软件采用SPSS 17.0。采用Sigmaplot 14.0软件绘制数据图。

2 结果

2.1 黑点青鲮的生长和养殖成活率

实验黑点青鲮在1~90 d内的平均生长率为2.579 %/d。其中0~10、10~20、20~30、30~60以及60~90 d各阶段的生长速率分别为8.451、3.864、1.653、1.568和1.387 %/d。前期的生长速率远远高于中后期。通过对该鱼的体长与日龄关系进行回归分析, 并根据显著性意义(P 值)、相关指数(R^2)选择最佳关系方程, 得到相关的表达方程为 $y=3.132+0.383x-0.004x^2+0.00003x^3$ ($R^2=0.98$, $P<0.05$)(图1)。

在实验室养殖条件下, 黑点青鲮的死亡率(近70%的个体死亡)主要集中于1~10 d。这一时期内鱼苗由于经历开口阶段, 由内源性营养转变为外源性营养, 造成较高的死亡率。第10天起, 鱼苗已完全适应外源营养, 成活率相对保持稳定(图2), 至90 d时的养殖成活率为 $32.52\pm 2.74\%$, 体长达 (3.12 ± 0.36) cm。

2.2 黑点青鲮摄食行为特性

根据实验观察, 黑点青鲮的摄食行为主要包括以下步骤: 潜伏(无意识游动)、追踪(发现猎

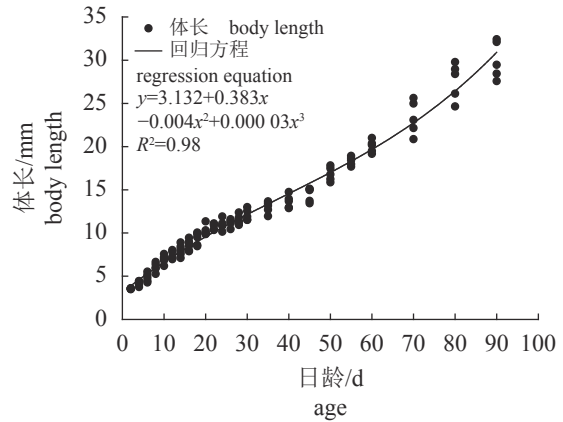


图1 黑点青鲮的体长与日龄间的关系

Fig. 1 Relationship between body length and day age of *O. melastigma*

物)后鱼体转向猎物方向并游至能攻击猎物的距离)、攻击(突然加速进攻猎物)、吞食。各步骤有关参数:

响应距离 响应距离为发现猎物并作出响应的最远距离。4~18 d的仔鱼对猎物的响应距离随日龄的增加而显著增长, 呈正比关系; 20~30 d, 仔鱼对猎物的相应距离呈波动性增长; 而后的35~90 d, 曲线较为平稳, 差异不显著($P>0.05$)(图3)。在35 d时, 黑点青鲮对饵料的响应距离已大幅增加, 为 (11.86 ± 2.35) mm, 为体长的 0.87 ± 0.13 倍。

摄食量 约有40%的黑点青鲮鱼苗能初次摄食卤虫幼体(4 d), 平均进食量为 (0.8 ± 0.26) 个卤虫幼体; 6和8 d摄食的鱼苗数量约为80%和87.5%, 平均进食量分别为 (1.75 ± 0.96) 和 (3.57 ± 1.90) 个卤虫幼体; 第10天, 100%的幼鱼均能捕

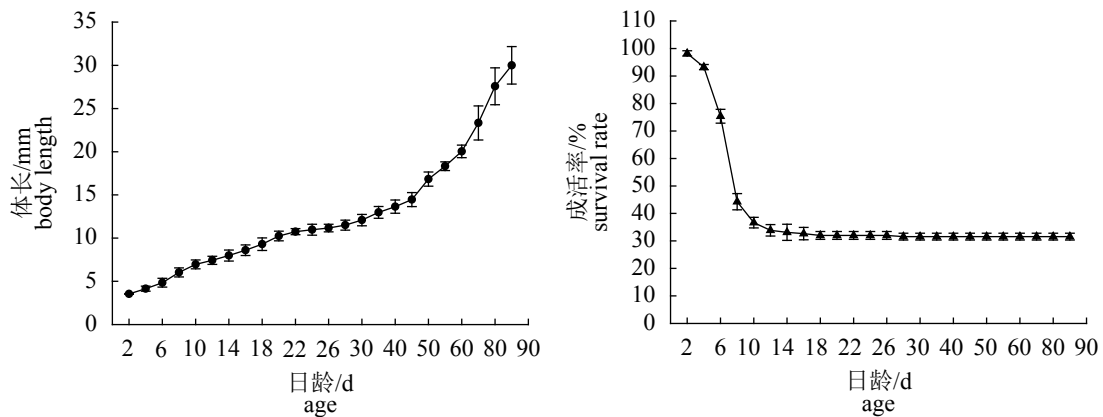


图2 养殖过程中黑点青鲮的生长及成活率变化

Fig. 2 Growth and survival rate of *O. melastigma*

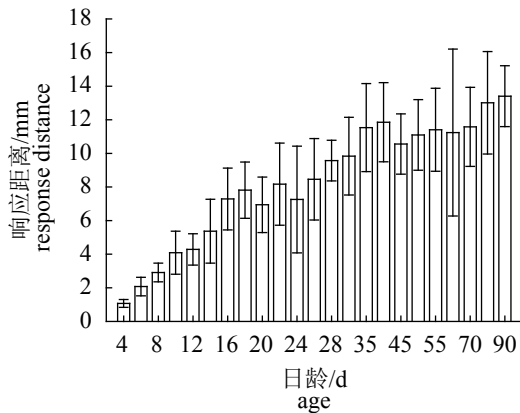


图3 黑点青鲮对卤虫的响应距离变化

Fig. 3 Variations of feeding response distance to *Artemia* for *O. melastigma*

食到卤虫幼体；第18天，摄食量由(11.71±4.11)增至(22.4±4.04)个/尾；而后摄食量逐步上升，第30天达(52.6±5.77)个/尾，30~60 d呈稳中略升趋势。70 d后，单鱼绝对摄食量平均保持在75个卤虫幼体以上，随日龄再增长不明显(图4)。从单位体长的摄食量分析(相对摄食量)，1~90 d的相对摄食量呈现先上升后下降的趋势，其中1~24 d的相对摄食量为上升阶段，而后在26~40 d时相对较为稳定，然后至90 d逐渐下降。实验过程中，最大的相对摄食量出现在第26天，为(4.64±1.28)个/mm体长。

摄食速率 随体长的增长，幼鱼的摄食速率也相应的发生变化(图5)。4 d时，平均摄食量仅0.87个，难以测定摄食速率。在6~10 d，黑点青鲮每秒摄食卤虫幼体的个数由(0.012±0.000)上升至(0.079±0.011)个，单位时间内摄食速率增加了6.58倍；在10~20 d，摄食速率稳中略升，单

个卤虫摄食所耗费的时间逐渐减少；在22~60 d，摄食速率略有波动，总体维持在(0.292±0.056)~(0.387±0.092)个/s。60 d后，速率又有大幅提升。总体上，黑点青鲮的摄食速率与生长日龄间的关系方程为 $y=0.0001x^3+0.0042x^2+0.0601x-0.0785$ ($R^2=0.92$, $P<0.01$)。

2.3 黑点青鲮摄食行为发育

本研究采用摄食成功率和摄食效率来评估黑点青鲮的摄食行为发育状况，探讨其摄食行为完善程度。鱼苗4~6 d的摄食成功率维持在较低水平，约20%；第8天，增加到约54%；30 d时达到95%水平，之后不再增长，由图6中可以看出鱼苗的摄食成功率与其日龄大小有密切的关系。黑点青鲮的摄食效率与成功率的变化曲线相似，后者有滞后效应。前期的摄食效率增长较快，从8日龄的(0.59±0.21)个/min开始快速升高，至40日龄时达到最高，增加了15倍多。之后的摄食效率维持在(9.11±0.92)~(10.41±2.62)个/min。

2.4 黑点青鲮早期发育阶段各鱼期的划分

依据个体生长和摄食行为发育情况，黑点青鲮幼鱼阶段的发育可为3期6个阶段：仔鱼期(前期仔鱼、后期仔鱼)，稚鱼期(前期稚鱼、中期稚鱼、后期稚鱼)和幼鱼期(表1)。

3 讨论

黑点青鲮在孵化后的几天内有着较高的生长速率，体长增长快。在此过程中，从内源性营养过渡到外源性营养，28 °C时，该周期约8~10 d。在该过程中有着较高的幼体死亡率，主

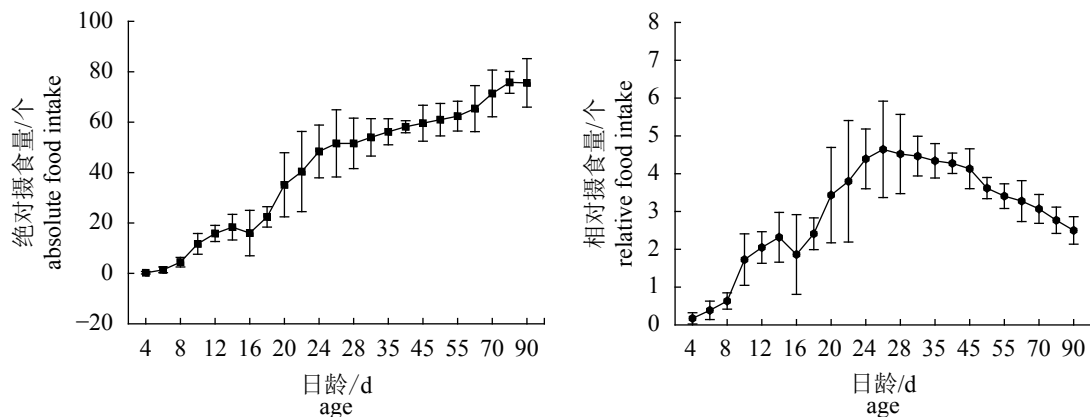


图4 黑点青鲮的摄食量变化

Fig. 4 Variations of food intake for *O. melastigma*

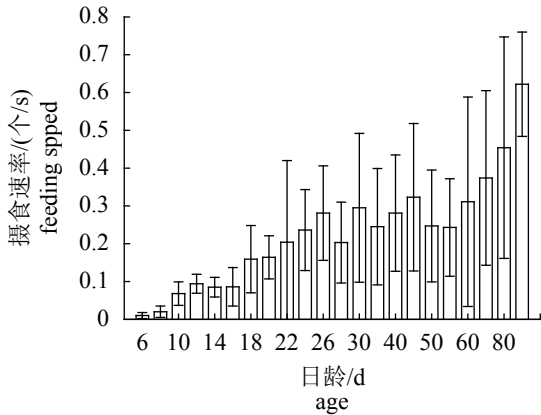


图5 黑点青鳞的摄食速率与生长日龄的关系

Fig. 5 Variations of feeding rate for *O. melastigma*

要原因是幼体难以获得生长所需的充足营养^[12], 而营养获取与幼体开口摄食有关; 当幼鱼完成这个转变从而适应外源营养化后, 死亡率大大降低, 本研究结果有力地说明了这一点(图2)。幼体的死亡率与摄食和营养有密切关系^[13], 本研究

从摄食功能完善和摄食行为发育的角度进行讨论。

摄食功能完善或摄食能力提高即摄食行为发育, 可以由摄食成功率及摄食效率来体现。摄食成功率与摄食效率有一定联系, 成功率高相应的摄食效率也高, 但后者具有一定的滞后性(图6)。而黑点青鳞对食物的响应时间/距离、摄食量(尤其是相对摄食量)以及摄食速率等, 直接地表明其在某一时刻的摄食行为特征。本实验采用模式鱼, 并全程采用卤虫无节幼体作为饵料, 因此消除了饵料种类、形状、粒径等对摄食成功率和摄食效率的影响。黑点青鳞摄食行为的发育与其自身功能器官的发育密切相关, 早期有研究认为视觉是鱼类摄食的最重要器官之一, 影响鱼类对食物的寻找和发现、辨认和选择、摄食时方向和姿势的调整等^[14]。黑点青鳞以白天摄食为主, 且运动敏捷, 而在暗环境中几乎不摄食不运动。作者在研究黑点青鳞的视觉结构与功能发育时, 发现黑点青鳞的视锥细胞椎体细长、排列规则, 呈典型的镶嵌结构, 光敏感性和视

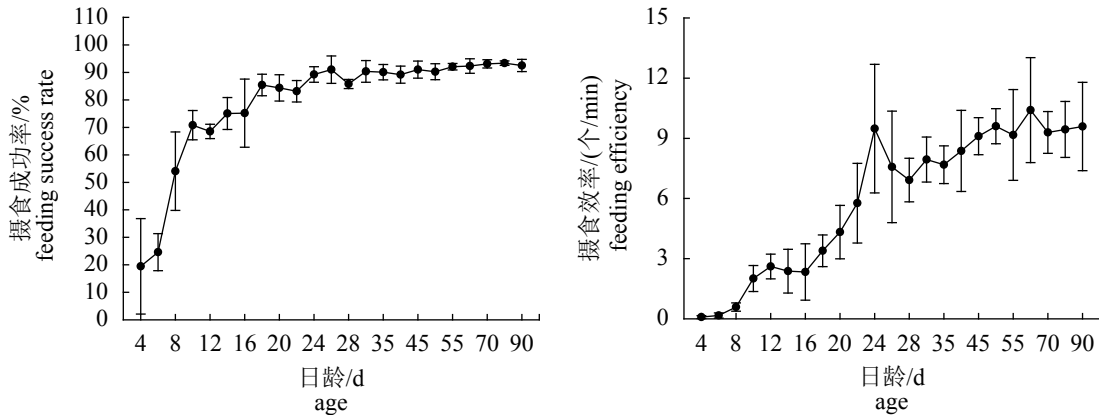


图6 黑点青鳞的摄食成功率、摄食效率与生长日龄间的关系

Fig. 6 Variations of feeding success rate and feeding efficiency for *O. melastigma*

表1 根据摄食行为发育程度进行胚后发育阶段描述

Tab. 1 Partition post-embryonic stages according to feeding behavior development

分期 stages	阶段 phases	特征描述 character description
仔鱼 larvae fish	前期仔鱼 pre-larvae	出膜至卵黄大部分被吸收、开始摄食外源营养阶段, 总体活动能力较弱, 营养主要来自卵黄。仅约40%个体能主动摄食, 摄食成功率约为20%, 摄食效率约为0.1~0.2个/min。此阶段为孵化后0~4 d
	后期仔鱼 post-larvae	接前期至卵黄消耗殆尽、完全依靠外源营养止。此阶段死亡率高, 生长迅速。摄食能力稳定提高, 至结束时, 摄食成功率、摄食效率分别提升至4%~55%、0.5~0.6个/min。此阶段为孵化后5~10 d
稚鱼 juvenile fish	前期稚鱼 pre-juvenile	完全摄取外界营养。所有鱼苗均能摄食, 摄食量较仔鱼有大幅提升。摄食成功率已达到较好水平, 为70%~80%, 摄食效率2~3个/min。此阶段为孵化后11~18 d
	中期稚鱼 mid-juvenile	成活率保持稳定, 摄食成功率出现拐点, 之后增长缓慢。摄食效率5~6个/min。此阶段为孵化后19~24 d
	后期稚鱼 post-juvenile	单位体长摄食量(相对摄食量)达到最大值, 摄食成功率已提升至较高水平, 达90%~95%, 摄食效率出现拐点, 之后增长缓慢。此阶段为孵化后25~30 d
幼鱼 young fish	幼鱼期 young fish	摄食各项指标存在一定波动但基本稳定, 接近成鱼, 即摄食行为发育成熟, 摄食功能趋于完善。此阶段为孵化后31~65 d

敏度强^[10]。因此,可以推断黑点青鲮的摄食行为发育与视觉的能力变化具有密切的关系。

本实验中,黑点青鲮4 d仔鱼摄食1个卤虫幼体需尝试4~7次(成功率约20%),这与卤虫幼体大小有一定关系,仔鱼成功摄食需要进行多次尝试并选择最佳角度。为了降低耗能,也由于活动能力弱,此时的仔鱼不会主动追逐饵料,只有饵料在进入视野3 mm(约为其体长30%)范围内,才会进行摄食尝试。仔鱼早期的视觉能力、化学感知能力、运动能力都还处于功能不完善阶段,因此摄食能力低下。开口摄食对于幼体成活率很重要,而从行为角度分析,开口饵料也非常重要,饵料的形状、粒径和密度等都会影响仔鱼的成功摄食和效率^[15]。该阶段黑点青鲮摄食卤虫的成功率低及开口的幼体比例低等都反映了该时期供给卤虫不是非常合适,黑点青鲮的视觉能力、化学感知能力、运动能力尚不完善,卤虫无节幼体具有一定的游泳能力而导致仔鱼不易捕获。然而,可利用生物饵料趋光的特性设置投饵区,以增加投饵区无节幼体的密度来提高黑点青鲮的摄食成功率和摄食效率。作者在研究黑点青鲮视觉结构与功能发育时,发现1~4 d时,尽管黑点青鲮的视网膜细胞已经是10层结构,但与晶状体之间的距离短,无法观察到较远视距的物体,同时视网膜上可投射光的面积也相对较小,表明此时黑点青鲮的视觉发育并未完善。发育到14~15 d,黑点青鲮的视网膜已能适应明暗环境的变化,与本研究黑点青鲮在此期间对饵料的响应距离大幅增加、摄食速率迅速提高、摄食效率也随之提高的结果相适应。23 d时,视网膜开始变薄,与晶状体之间的距离越来越大,同时视网膜上的可投射光的面积也大大增加,此时黑点青鲮具有观察较近和较远距离物体的能力。本研究中,22 d起,黑点青鲮的成活率、摄食成功率和摄食效率均开始趋于稳定,表明此时其摄食行为发育逐步趋于完善。中期仔鱼阶段,黑点青鲮的视网膜结构发生了较大变化,摄食能力迅速提高,其生活习性也开始由浮游转向底层生活。

随着黑点青鲮的生长,稚鱼的各项摄食行为指标均有大幅度提升,对饵料的响应时间在不断地缩短、响应距离也逐渐增长,摄食速率提高,摄食量也随之增大。稚鱼期为外源性营养阶段,受条件所限,获得的营养和能量限制了其生长速率。相对与仔鱼,稚鱼个体增大,

<http://www.sxuebao.cn>

对外界环境的适应能力增强,因此冒险行为表现大于仔鱼^[16-17],如潜伏时间明显缩短。随着运动和感觉器官的发育,游泳速度加快,响应距离变长,从开口到18 d响应距离迅速增加(图3),表明感觉器官在此阶段发育迅速;在18~35 d呈波动上升,可能与生活习性转变有关,之后保持稳定状态^[18]。稚鱼期的摄食速率也大大上升,应与其消化系统的完善,需要从外界获取更多的能量有关^[19]。而从相对摄食量分析,30 d前稚鱼通过摄食获得的能量主要用于体长的生长,其摄食速率、响应距离、摄食量三者说明仔鱼阶段获取的能量主要用于与摄食相关器官和系统的发育,这些系统的发育完善也能促进其本身摄食更多的饵料,获取更多的能量。

幼鱼阶段,摄食的各项指标基本已接近成鱼。摄食成功率的提高可减少鱼体在捕食过程中额外消耗能量,捕食效率也相应提高了,但由于进一步的发育,鱼体用于维持生命活动的能量占获取的绝大部分,因此生长速率始终维持在较低水平。鱼苗摄食效率与摄食量随日龄变化存在正相关关系,其他摄食行为指标随日龄变化也呈总体增长趋势。个体间的差异较大,存在较快生长的个体趋向于摄食较大尺寸猎物的现象,表明个体间因发育不同步导致的摄食行为参数存在显著的差异,即表现出不同的摄食策略^[20],这种变化被认为是对环境条件的自适应响应^[21-22]。因此,在此阶段可以开始差异化投饵,投喂一些混合有不同粒径大小的饵料,让不同大小的鱼有不同的选择。

综上所述,黑点青鲮在仔鱼期对卤虫无节幼体的响应距离短、摄食能力低下,随着其自身功能器官的发育以及摄食能力的稳定提升,摄食成功率和摄食效率逐步提高,成活率趋于稳定。本研究结果为黑点青鲮的人工养殖提供了理论基础。以摄食行为发育为基础,结合适宜的饵料和投喂策略,使更大比例的仔鱼更快地过渡到稚鱼期,提高养殖的成活率,可以指导黑点青鲮的规模化养殖生产。黑点青鲮作为新兴的海洋生态毒理学模式生物,大量的人工繁殖可为其他海洋研究提供实验材料,以期获得更完善、更丰富的实验数据和科学结论。

参考文献:

- [1] Abraham R. *Oryzias melastigma*. The IUCN red list of threatened species[EB/OL]. 2011. <http://www.iucnredlist>.

- org/details/172408/0.
- [2] Kong R Y C, Giesy J P, Wu R S S, *et al.* Development of a marine fish model for studying *in vivo* molecular responses in ecotoxicology[J]. *Aquatic Toxicology*, 2008, 86(2): 131-141.
- [3] Bo J, Cai L, Xu J H, *et al.* The marine medaka *Oryzias melastigma*-A potential marine fish model for innate immune study[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 63(5-12): 267-276.
- [4] Dong S J, Kang M, Wu X L, *et al.* Development of a promising fish model (*Oryzias melastigma*) for assessing multiple responses to stresses in the marine environment[J]. *BioMed Research International*, 2014(2014): 1-17.
- [5] 张东. 水生动物行为研究及其在水产养殖中的应用简述[J]. *水产学报*, 2013, 37(10): 1591-1600.
Zhang D. Applications of aquatic animal behavior in aquaculture[J]. *Journal of fisheries of China*, 2013, 37(10): 1591-1600(in Chinese).
- [6] Chen X. Development of the medaka *Oryzias melastigma* as a marine fish model for *in vivo* molecular toxicology[D]. Hong Kong, China: City University of Hong Kong, 2011.
- [7] Kenji M, Masato K, Kiyoshi N, *et al.* Application of the seawater medaka *Oryzias melastigma* (McClelland) for marine ecotoxicology. Medaka: biology, management, and experimental protocols[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019.
- [8] Yu W K, Shi Y F, Fong C C, *et al.* Gender-specific transcriptional profiling of marine medaka (*Oryzias melastigma*) liver upon BDE-47 exposure[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part D: Genomics and Proteomics*, 2013, 8(3): 255-262.
- [9] 陈漪, 王晓杰, 冉浩宇, 等. 海水模式种青鳞鱼(*Oryzias melastigma*)的胚胎发育观察[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(1): 71-82.
Chen Y, Wang X J, Ran H Y, *et al.* Developmental stages of a marine model fish—medaka *Oryzias Melastigma*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(1): 71-82(in Chinese).
- [10] 陈剑明, 刘肖岑, 徐永健. 模式生物黑点青鳞鱼的视觉结构与功能发育[J]. *中国实验动物学报*, 2018, 26(2): 150-157.
Chen J M, Liu X C, Xu Y J. Visual structure and functional development of marine medaka, *Oryzias melastigma*[J]. *Acta Laboratorium Animals Scientia Sinica*, 2018, 26(2): 150-157(in Chinese).
- [11] 徐盼麟, 韩军. 基于视频的水箱内鱼类行为观测系统[J]. *湖南农业科学*, 2011(19): 140-142.
Xu P L, Han J. Automated observation system for fish behavior based on video[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011(19): 140-142(in Chinese).
- [12] 陈国柱, 林小涛, 许忠能, 等. 饥饿对食蚊鱼仔鱼摄食、生长和形态的影响[J]. *水生生物学报*, 2008, 32(3): 314-321.
Chen G Z, Lin X T, Xu Z N, *et al.* The effect of starvation on feeding, growth and morphological development of the larvae of mosquito fish[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, 32(3): 314-321(in Chinese).
- [13] 殷名称. 鱼类仔鱼期的摄食和生长[J]. *水产学报*, 1995, 19(4): 335-342.
Yin M C. Feeding and growth of the larva stage of fish[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1995, 19(4): 335-342(in Chinese).
- [14] 魏开建, 张桂蓉, 张海明. 鳊鱼不同生长阶段中趋光特性的研究[J]. *华中农业大学学报*, 2001, 20(2): 164-168.
Wei K J, Zhang G R, Zhang H M. Studies on the phototactic characteristics of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) during different development stages[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2001, 20(2): 164-168(in Chinese).
- [15] 朱成德. 仔鱼的开口摄食期及其饵料综述[J]. *水产学报*, 1986, 10(1): 86-95.
Zhu C D. Aspects on the first-feeding stage and foods of fish larvae[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1986, 10(1): 86-95(in Chinese).
- [16] Nilsson P A, Brönmark C. Prey vulnerability to a gape-size limited predator: behavioural and morphological impacts on northern pike piscivory[J]. *Oikos*, 2000, 88(3): 539-546.
- [17] Sogard S M. Size-selective mortality in the juvenile stage of teleost fishes: a review[J]. *Bulletin of Marine Science*, 1997, 60(3): 1129-1157.
- [18] 王新安, 马爱军, 张秀梅, 等. 海洋鱼类早期摄食行为生态学研究进展[J]. *海洋科学*, 2006, 30(11): 69-74.
Wang X A, Ma A J, Zhang X M, *et al.* A review on feeding behavior ecology of early development stage of marine fish[J]. *Marine Sciences*, 2006, 30(11): 69-74(in Chinese).
- [19] 孙敏, 胡锦春, 朱金星, 等. 鱼类早期发育阶段消化系统的研究进展[J]. *水产养殖*, 2013, 34(4): 38-42.
Sun M, Hu J C, Zhu J X, *et al.* Advance in the research on digestive system development of early life history in fishes[J]. *Journal of Aquaculture*, 2013, 34(4): 38-42(in Chinese).
- [20] Ansari R H, Qadri S U. Individual variation in the foraging strategies of young yellow perch (*Perca flavescens*) from the Ottawa River[J]. *Hydrobiologia*, 1989, 174(3): 207-212.

- [21] Grageda M V C, Kotani T, Sakakura Y, *et al.* Effects of feeding copepod and *Artemia* on early growth and behaviour of the self-fertilizing fish, *Rivulus marmoratus*, under laboratory conditions[J]. *Aquaculture*, 2008, 281(1-4): 100-105.
- [22] McLaughlin R L. Behavioural diversification in brook charr: adaptive responses to local conditions[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2001, 70(2): 325-337.

Growth and feeding behavior development of a marine ecotoxicology mode fish-medaka (*Oryzias melastigma*)

CHEN Jianming, CHEN Yafei, XU Yongjian*, NING Yan, DAI Lingling

(Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology, School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315382, China)

Abstract: Aiming at the low survival rate of marine medaka (*Oryzias melastigma*), the experiment was carried out to understand the feeding behavior development of *O. melastigma* in early stage, so as to find a theoretical basis for breeding. The growth characteristics and feeding behavior of *O. melastigma* were observed and analyzed by feeding with *Artemia nauplii* during the first 90 days after hatching, by using a single camera, a waterproof-mirror and fish behavior analyze system. The results were as follows: its average growth rate in body length was 2.579%/d, and the relationship between body length and day-old age was $y=3.132+0.383x-0.004x^2+0.00003x^3$, $R^2=0.98$. Its larvae period could be divided into 3 stages (larvae stage was 0~10 d, juvenile stage was 11-30 d and young stage was 31-65 d) and 6 phases (pre-larvae was 0-4 d, post-larvae was 5-10 d, pre-juvenile was 11-18 d, mid-juvenile was 19-24 d, post-juvenile was 25-30 d, and young was 31-65 d) according to several indicators of the different feeding behavior. On the 4th day after hatching (DAH), *O. melastigma* were fed with *Artemia nauplii* that hatched within 12 hours. And all larvae can feed on *Artemia nauplii* on 10th day after hatching (DAH). There was high mortality rate in larvae stage but the feeding ability was improved steadily. By the end of the period, the feeding success rate increased to 45%-55%, and the feeding efficiency reached 0.5-0.6 ind./min. At the juvenile stage (26-30 d), all indicators of feeding behavior greatly improved, such as the response time to *Artemia* was shortened and the distance was elongated, the feeding rate increased, and food intake also increased. At the same time, the success rate of feeding rose to a high level, up to 90%-95%. At the young stage, all indicators of feeding behavior were very close to the adult fish. The feeding efficiency reached more than 9 ind./min. Its feeding behavior development was mature, and feeding function tends to perfect at this stage. Experiments show that *O. melastigma* had a low feeding ability with a short response distance to *Artemia nauplii*, and the feeding success rate and feeding efficiency were still at a low level. The feeding success rate and feeding efficiency were gradually increased with its own development and feeding ability improving, and the survival rate tended to be stable. It may be an effective way to increase the survival rate of breeding when paying close attention to the changes in feeding behavior of *O. melastigma* through changing the feeding quantity and frequency to make a faster larvae fish transition to the juvenile period.

Key words: *Oryzias melastigma*; larvae and juvenile; growth; feeding behavior; development; ecotoxicology

Corresponding author: XU Yongjian. E-mail: xuyongjian@nbu.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (41276123); Natural Science Foundation of Ningbo (2017A610282); Open Fund of Ningbo University(xkzscl1508)