

胭脂鱼早期发育过程中集群行为的形成

石小涛^{1,2}, 王 博¹, 王 雪¹, 陈求稳², 白艳勤¹,
高 柱¹, 涂志英¹, 刘德富^{1*}

(1. 三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002;

2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 为了探讨胭脂鱼个体发育过程中集群行为的发生机理, 在 20 °C 水温下, 在胭脂鱼孵化后第 5 天开始至第 39 天, 记录体长, 采用视频分析的方法连续观察其游泳行为, 计算胭脂鱼的游泳速度(V), 相对全长最近邻距离(DNNL), 分离游泳指数(ISS), 根据胭脂鱼的游泳速度计算基于全长雷诺系数(RL)。结果显示, 随着日龄的增加, 胭脂鱼仔鱼全长呈 $y = 1.26033 - 0.01558x + 0.00315x^2 - (4.84978E - 5)x^3$ 增加, 游泳速度先增加后降低并趋于稳定, 在 19 日龄后相对全长游泳速度稳定于 $(2.45 + 0.15)$ TL/s。胭脂鱼仔鱼 ISS 随着时间显著降低, 至第 19 天时显著低于随机分布预期值, 至 32 天时稳定于最低值; DNNL 的变化趋势与 ISS 相符; 表明胭脂鱼仔鱼集群行为于 19 日龄(1.77 cm 全长)开始, 至 32 日龄(2.40 cm 全长)时形成紧凑的集群行为。RL 随日龄的增加呈 $y = -607.89161 + 156.80912x - 4.2129x^2 + 0.0379x^3$ 方程增加, 在仔鱼开口期(5-6 日龄)即大于 200, 在 19 日龄时值为 1111。结果表明, 仅从 RL 的角度不能解释胭脂鱼集群行为的发生, 胭脂鱼的集群行为可能更多的与生物学因素如游泳行为有关, 其游泳模式随着集群行为的发生由间歇高速游泳向持续巡游游泳转变。

关键词: 胭脂鱼; 仔鱼; 集群行为; 游泳速度; 水力学; 个体发育行为

中图分类号: Q 132; S 917.4

文献标志码: A

鱼类的个体发育过程中, 各种行为从无到有, 不断变化, 伴随着各种生理、形态变化的发生和器官的发育^[1-4]。集群行为是鱼类的常见行为之一, 被认为是重要的生存策略, 能给予确定的生态效益, 如降低捕食风险, 促进寻找食物^[5-6]。集群行为被证实在某些鱼类早期生活史即开始具备, 有关研究从方法的摸索到应用于生产实践已经取得了大量的成果^[7-9]。针对鱼类的早期发育行为, 学者们多聚焦于仔稚鱼对环境因子如光、底质和水流速度的行为响应, 较少研究其对水力特征的响应关系, 并且为数不多的仔鱼行为和水流关系的研究常选择水流速度为水流特征值^[10-11]。然而, 流速作为水力特征值并不能完全反映鱼类

所能感知的水流环境, 如其不能反映鱼类在流体中受到了阻力、浮力和惯性力等。伴随着水力学的发展, 各种指标被用于度量水的特性, 包括流速、动能梯度、涡量、雷诺系数和弗雷德数等^[7,12]。如何应用各种水力学指标以及先进的测量技术和数学模拟技术来揭示鱼类个体发育行为对水力学特征的适应策略, 是一个有待挖掘的领域。

胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)作为我国的二级保护动物, 在稚鱼阶段具有典型的集群行为, 但是其集群行为的发生过程尚不明确。基于全长雷诺系数是结合生物因素和水力学因素的一个指标, 被用于反映鱼类游泳过程以粘滞力或者惯性力为主导的特征^[7]。实验以胭脂鱼为对象, 对其早期

收稿日期:2012-11-30 修回日期:2013-01-28

资助项目: 楚天学者基金项目(KJ2010B002); 国家自然科学基金项目(50979049, 51009082); 中国博士后科学基金(20100480487); 公益性行业(水利部)科研专项(201201030, 201201028-02); 中国长江三峡集团公司科研项目(SDHZ2011117); 农业部海洋与河口渔业资源及生态重点开放实验室开放基金(20090011); 贵州北盘江电力股份有限公司合作项目(SDHZ2012137); 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验开放基金

通信作者: 刘德富, E-mail: fishlab@163.com

发育阶段集群行为的发生过程展开研究,基于全长雷诺系数尝试从水力学的角度探讨其适应策略。

1 材料与方法

1.1 实验材料

胭脂鱼受精卵由中国长江三峡集团公司中华鲟研究所和湖北宜昌三江渔业有限公司提供,在三峡大学生态水工学实验室孵化。受精卵孵化后,将其放在另一个自然光线充足的室内水池暂养,每2天换水一次,换水量为池水的1/2~1/3。在仔鱼开口后6d内用蛋黄喂养,其后加入捣碎的水蚯蚓投饵,喂养量随孵化的天数逐渐增加。实验期间仔鱼暂养于自然光线充足的室内水池,整个过程控制水温在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$,溶氧含量大于7 mg/L,氨氮水平小于0.01 mg/L,光照周期为自然光照周期。

1.2 实验装置

暂养池长55 cm × 宽35 cm × 高20 cm,使用100 W的充氧泵充氧。加温棒两根用于调节水温。小抄网配合塑料杯将实验鱼转移至实验水槽。实验水槽为直径25 cm高10 cm的圆形浅(水深3 cm)蓝色塑料盆。2个照明灯配合提供光照以保证视频的清晰度,同时避免录像时发生反光。仔鱼的行为采用摄像头(DCR-TRV50;索尼)及配套软件录制。

1.3 实验方法

从胭脂鱼孵化后第5天开始,每天上午10点钟开始实验,实验鱼实验时处于饥饿状态。每天测试3组实验鱼,每组10尾。每次测试将10条仔鱼从养殖池中随机捞取移入实验水槽后转移至摄像

头下,开始录像5 min。实验期间不充氧,以避免水流对鱼类行为的干扰,实验水槽内溶氧水平保持在6 mg/L以上。采用视频回放的方法分析视频第3分钟至第5分钟鱼类行为,以鱼体吻部代表个体的位置,配合Log Pro软件分析鱼类轨迹和位移,同时测量每条鱼的全长。评价鱼的行为使用指标游泳速度、相对全长最近邻距离(DNNL)和分离游泳指数(ISS),以全长雷诺数(RL)作为水力学参数。其中,最近邻距离(DNN)被用来评价鱼类群体的紧凑程度^[13],ISS表示鱼群中的平行游泳指数,DNN和ISS同时减少即表明集群开始。

游泳速度(cm/s)是仔鱼在1 s的间隔时间内游过的距离,相对全长游泳速度为游泳速度与全长的比值(TL/s)。每组实验鱼中随机选取3尾,每条鱼分10次随机观察,每次观察1 s,即每次实验取得30个随机游泳行为。

基于全长雷诺系数的测定^[7]: $RL = U \cdot TL / V$,其中RL为基于全长雷诺系数;U为每条胭脂鱼仔鱼的游泳速度的中间值;TL为鱼的全长;20°C时水的运动黏度 $V = 1.006 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

最近邻距离(DNN)及相对全长最近邻距离(DNNL)的测定:选择拟实验对象中的一条鱼作为中心,每组鱼随机快照10次;每次测量目标鱼与离它最近的另外4条鱼的距离,选择最短距离;同时以离中心鱼最近的4条鱼为目标同样计算每一条鱼到最近鱼的距离,因此针对一条中心鱼得到5个数据,取5个数据的平均值即为该界面下的DNN(图1-a)。然后以DNN为基础计算

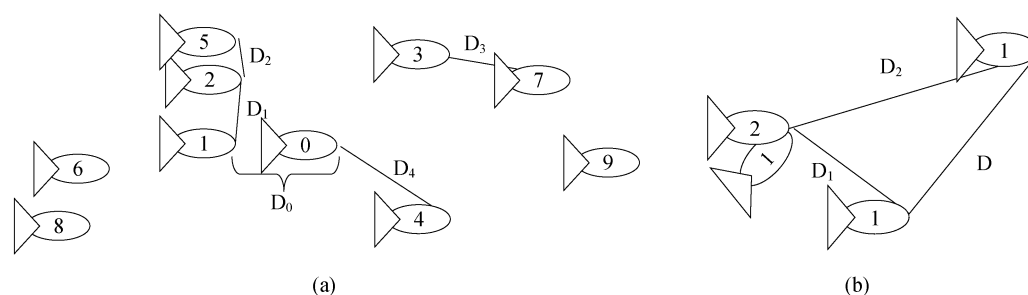


图1 最近邻距离(DNN)和分离游泳指数(ISS)的计算方法

(a) DNN的计算方法;图中共10尾鱼,鱼体上的数字代表编号;以鱼0为中心鱼计算DNN;首先找到离鱼0最近的鱼,即鱼1,然后找到离它最近的另外三条鱼(鱼2、3和4),分别计算离这五条鱼最近的鱼与各自的距离,即D0、D1、D2、D3和D4;最后计算,即 $DNN = (D0 + D1 + D2 + D3 + D4) / 5$ 。(b) ISS的计算方法。图中鱼1、鱼2表示二尾鱼,其中鱼1为目标个体,鱼2为相邻鱼;首先将鱼2的轨迹平移至其起始点与目标个体重叠,测量鱼1的游泳向量D1和2的游泳向量D2;最后计算 $ISS = 2D / (D1 + D2)$ 。

Fig. 1 Measurements of nearest neighbor distance (DNN) and separation swimming index (ISS)

(a) Fish number was marked in Arabic numerals (0-9), DNN for a focal fish 0 was calculated as mean of the nearest distance from four nearest fish (F1, F2, F3 and F4) and the distance to its nearest neighbor (F0), $DNN = (D0 + D1 + D2 + D3 + D4) / 5$. (b) Movements of the focal fish and the neighbouring fish in one second were expressed as vectors (D1 and D2). The difference between two vectors is the separation distance (D). ISS was defined as $ISS = 2D / (D1 + D2)$.

DNNL。DNNL = DNN/TL, 其中 DNN 是目标鱼到离它最近鱼的距离, TL 是鱼的全长^[7,9]。

分离游泳指数 (ISS) 的测定: 选择目标鱼个体后, 确定在某一瞬间与其最为邻近的个体并记录该个体的位置, 一秒钟后快照一次, 记录目标鱼和该个体的位置, 得到两条鱼的位移路径。将邻近个体的位置平移至与目标个体重叠, 得到一秒钟后两条鱼的相对距离。ISS = $2D/(D_1 + D_2)$, D1: 鱼 1 的游泳向量, D2: 相邻鱼 2 的游泳向量, D: 当向量起点一致时, 两个游泳向量之差的绝对值。当鱼的游泳方向完全平行时, 其值为 0, 当方向完全相反时, 其值为 2。当每条鱼处在随机的方向时, 其值被认为是 1.27^[7]。

2 结果

随着日龄的增加, 胭脂鱼仔鱼全长呈三次多项式方程增长 (图 2), 游泳速度及相对全长游泳速度均呈先增加后减少的趋势 (图 3)。相对全长游泳速度在 14 日龄时显著增加, 16 日龄时达到顶峰, 其后逐渐减小, 至 20 日龄时与 14 日龄前无显著差异并直至试验结束时仍维持在 $(2.14 \pm 0.16) \text{ TL/s}$ [$(5.34 \pm 0.37) \text{ cm/s}$]。基于全长雷诺系数 (RL) 随着日龄的增加呈三次多项式方程增长 (图 4), 在仔鱼开口期 (约 5~6 日龄) 即大于 200, 在 19 日龄时值为 1 111。分离游泳指数 (ISS) 首先与随机分布预期值 1.27 无显著差异, 从第 19 日龄时开始呈现显著低于随机分布预期值 1.27, 并逐渐呈现下降趋势, 至 32 日龄时稳定

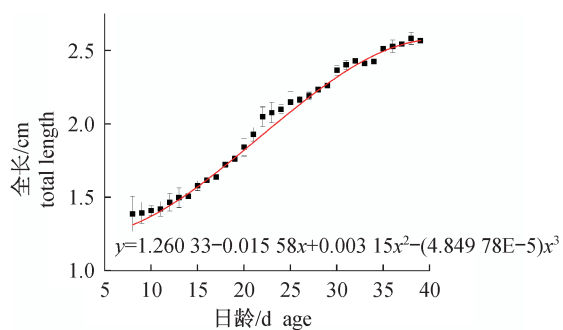


图 2 胭脂鱼仔鱼全长与日龄的关系
(平均值 \pm 标准差)

图中曲线示最佳拟合曲线 ($P < 0.05$, Adjusted $R^2 = 0.99$)。

Fig. 2 The relationship between age and total length of larval Chinese sucker (mean \pm SD)

The curve in the figure means best-fit nonlinear curve ($P < 0.05$, Adjusted $R^2 = 0.99$).

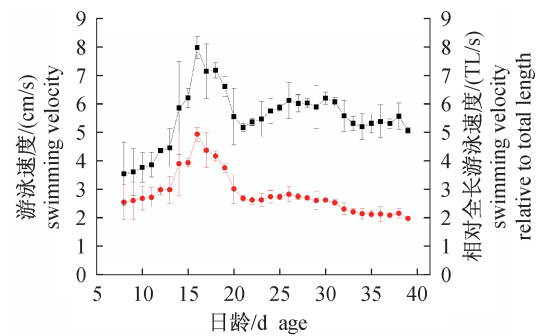


图 3 胭脂鱼仔鱼游泳速度及相对全长游泳速度与日龄的关系

■表示游泳速度, ●示相对全长游泳速度, 图中不同字母标记表示显著差异 ($P < 0.05$)。

Fig. 3 The relationship between age and swimming ability of larval Chinese sucker

■ denotes swimming velocity, ● denotes swimming velocity relative to total length. Data with different letters in the figure mean significant difference ($P < 0.05$).

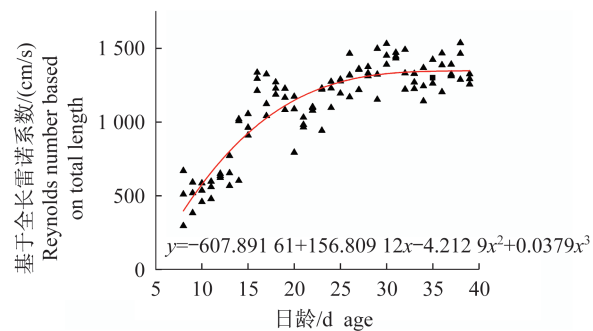


图 4 胭脂鱼仔鱼基于全长雷诺系数与日龄的关系
▲表示试验组的数据, 图中曲线表示最佳拟合曲线 ($P < 0.05$, Adjusted $R^2 = 0.81$)。

Fig. 4 The relationship between age and Reynolds number based on total length of larval Chinese sucker
▲ showed data for each group, the curve in the figure mean best-fit nonlinear curve ($P < 0.05$, Adjusted $R^2 = 0.81$).

维持在较低的水平 (图 5)。最近邻距离 (DNN) 及相对全长最近邻距离 (DNNL) 随着胭脂鱼仔鱼日龄的增加显著下降, 至 32 日龄时稳定维持在较低的水平 (图 6)。根据分离游泳指数 (ISS) 和相对全长最近邻距离 (DNNL) 的变化趋势, 确定胭脂鱼仔鱼形成于第 19 日龄, 全长为 1.77 cm (根据最优拟合曲线) 时, 其后胭脂鱼仔鱼的集群特征进一步凸显, 至 32 日龄时形成稳定紧凑的集群行为, 此时全长为 2.40 cm。观察发现, 胭脂鱼仔鱼在 14 日龄时平游并停留在水体表层, 至 16 日龄达到高峰, 其后逐渐下沉并保持在水体中下层。

游泳行为开始表现为从水体底部开始上窜(本质上为爆发游泳),到达水体上层后下沉,然后随着平游行为的出现表现为爆发-停留游泳行为即间歇高速游泳方式,最后出现较为规律的巡游行为即持续巡游游泳方式。

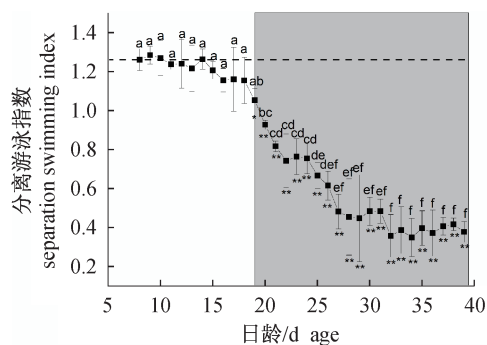


图5 胭脂鱼仔鱼分离游泳指数与日龄的关系

图中不同字母标记表示显著差异 ($P < 0.05$), * ($P < 0.05$) 与 ** ($P < 0.01$) 分别表示与随机方向时分离游泳指数值 1.27 比较有显著差异和极显著差异,阴影表示集群行为形成时间和紧凑集群行为的形成时间。

Fig. 5 The relationship between age and separation swimming index (ISS) of larval Chinese sucker

Data with different letters in the figure mean significant difference ($P < 0.05$), * ($P < 0.05$) and ** ($P < 0.01$) mean significantly smaller than 1.27, shadow means the onset of schooling and tight schooling.

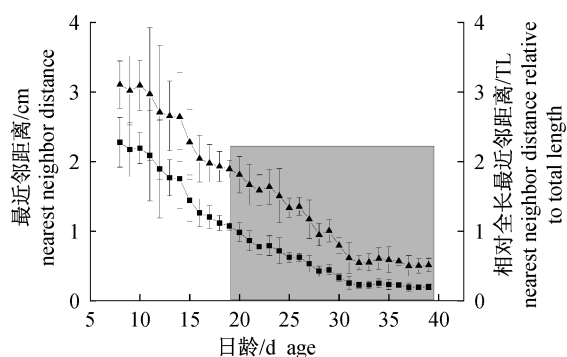


图6 胭脂鱼仔鱼最近邻距离和相对全长最近邻距离与日龄的关系

最近邻距离和相对全长最近邻距离随日龄增加显著减小 ($P < 0.05$),阴影表示集群行为形成时间和紧凑集群行为的形成时间。

Fig. 6 The relationship between age and nearest neighbor distance in DNN or DNNL of larval Chinese sucker

DNN and DNNL decreased significantly with age ($P < 0.05$), shadow means the onset of schooling and tight schooling.

3 讨论

鱼类的集群行为是在进化过程中演绎出来的生存策略^[5,10]。鱼类成群游动被证实可以降低个体能量的消耗,其主要的原理是鱼类个体能够利用有漩涡的小股水流来减少肌肉耗能,从受力的角度理解群体中的每一尾鱼在交错排列的行列中游泳,可利用周围鱼群产生的漩涡而使本身游泳的摩擦力或阻力降低,并利用群体产生的与游动方向同向的力^[4,14]。同时,多种其他的策略被认为能够提高集群鱼类的游泳效率,如鱼类身体上分泌出来的粘液可以降低在水中运动的流体摩擦力^[15];集群游泳时带头鱼不断地交换,以使个体能量均匀消耗比较,最终提高整个群体的行动效率^[16]。集群还可以提高鱼类的摄食成功率和降低被捕食的风险^[5,10]。胭脂鱼幼鱼在养殖过程中表现出较强的集群行为。在个体发育过程中,胭脂鱼仔鱼随着日龄的增加逐渐表现出集群行为,至19日龄形成集群行为,至32日龄时形成紧凑的集群行为,与多种鱼类类似,如黄带拟鲈 (*Pseudocaranx dentex*), 鲈 (*Scomber japonicus*), 鳀 (*Engraulis japonicus*), 蓝点马鲛 (*Scomberomorus niphonius*), 美洲鳀 (*Engraulis mordax*), 大西洋鲱 (*Clupea harengus*)。

尽管目前对鱼类的集群行为有一定的基础研究,但其发生机制尚不明确。实验中,全长雷诺系数 (RL) 作为水力学指标被用于探究集群行为的形成策略。RL 已被证明与仔鱼个体发育过程中集群行为的发生有关^[7]。在多种仔鱼发育过程中,RL 随着仔鱼的生长以几何级数增加^[7]。Weihs^[17]指出,在理论上当 RL 小于 20 时,粘滞力存在于鱼体附近的较大范围内,惯性力忽略不计;当 RL 大于 200 时,粘滞力只限于鱼体周围表面的边界层,此时惯性力占主导地位;RL 大于 20 小于 200 的水流流态是一个中间地带,在这种状态下,水流特征逐步从典型的粘性液体主导向由惯性转变。同时,Weihs^[17]还认为仔鱼在发育初期体长较小,RL 常小于 200,此时水流特性相对为典型的粘性液体,适合间歇高速游泳方式,因为在间歇全速游泳时,调整游泳速度和相邻鱼群的方向较为困难,不易集体行动,而持续巡游方式有利于集群居行为发生。对多种鱼类如黄带拟鲈、鲈、鳀、蓝点马鲛、美洲鳀、大西洋鲱和太平洋蓝鳍金

枪鱼的集群行为研究表明,集群行为发生时的环境由惯性力主导($200 > RL$)^[7]证实了 Weihls^[17]的推测。实验中胭脂鱼仔鱼集群行为的形成期 RL 大于 200,与上述研究结果类似,进一步证实了集群行为发生时的环境由惯性力主导。但是,上述多种鱼类集群行为发生前 RL 已经大于 200,如大西洋鲱^[6]和太平洋蓝鳍金枪鱼^[7],实验中胭脂鱼集群行为发生前(< 19 日龄) RL 大于 200,表明惯性力的环境并不能保证集群行为的发生,即仅从 RL 的角度不能解释集群行为的发生。此外,仔鱼开口期(5~6 日龄)的胭脂鱼 RL 已经大于 200,原因可能与胭脂鱼初孵仔鱼体长较大有关(胭脂鱼初孵仔鱼体长 > 10 mm,太平洋蓝鳍金枪鱼初孵仔鱼 < 10 mm^[7]),较大的体长对应较大的游泳速度,最终导致仔鱼期 RL 较大。胭脂鱼的集群行为可能更多的与生物学因素如游泳行为有关。胭脂鱼仔鱼发育过程中 RL 存在一定的波动,与仔鱼游泳速度有关,最终与游泳方式有关。胭脂鱼仔鱼游泳速度在集群开始前分布较为分散,最低速度为 0,部分异常值在较高的速度下出现;在集群行为形成后,游泳速度分布范围缩小,且最小值不为 0,因此胭脂鱼仔鱼游泳模式随着集群行为的发生由间歇高速游泳向持续巡航游泳转变。在紧凑的集群行为中,鱼类的游泳速度有一个相对的稳定值,如太平洋蓝鳍金枪鱼稳定在 $3 TL/s$ ^[7],实验中胭脂鱼仔鱼在紧凑的集群行为中游泳速度稳定在 $(2.14 \pm 0.161) TL/s$ 。这种集群游泳中稳定的游泳速度可能有利于群体的行动^[18],但有待进一步研究。

实验初步探讨了胭脂鱼仔鱼生物力学、游泳能力和群居习性之间的关系,结果表明集群行为发生于 19 日龄,紧凑的集群行为发生于 32 日龄,仅从 RL 的角度不能解释集群行为的发生,胭脂鱼的集群行为可能更多的与生物学因素如游泳方式有关。实验的不足体现在实验水深较浅,只允许水平方向的游泳行为定量,下一步的实验应该尽量研究较深的水深,以满足仔鱼对不同水层的选择需求。

参考文献:

[1] Masuda R. Behavioral ontogeny of marine pelagic fishes with the implications for the sustainable management of fisheries resources [J]. Aqua-Bio Science Monographs, 2009, 2(2): 1-56.

- [2] 何大仁. 俄国鱼类行为与感觉研究(I) [J]. 台湾海峡, 1996, 15(2): 191-199.
- [3] 何大仁, 周仕杰, 刘理东, 等. 几种幼鱼视觉运动反应研究 [J]. 水生生物学集刊, 1985, 9(4): 365-373.
- [4] Webb P W, Weihs D. Functional locomotor morphology of early life history stages of fishes [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1986, 115(1): 115-127.
- [5] Pitcher T J, Parrish J K. Function of shoaling behaviour in teleosts [M] // Pitcher T J. The behaviour of teleost fishes. London: Chapman & Hall, 1993: 363-439.
- [6] Gallego A, Heath M R. The development of schooling behaviour in Atlantic herring *Clupea harengus* [J]. Journal of Fish Biology, 1994, 45(4): 569-588.
- [7] Fukuda H, Torisawa S, Sawada Y, et al. Ontogenetic changes in schooling behaviour during larval and early juvenile stages of Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* [J]. Journal of Fish Biology, 2010, 76(7): 1841-1847.
- [8] 胡文革, 刘新成. 乌鳢鱼苗集群行为的观察及生态适应分析 [J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2001, 5(1): 46-47, 71.
- [9] Torisawa S, Takagi T, Fukuda H, et al. Schooling behaviour and retinomotor response of juvenile Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* under different light intensities [J]. Journal of Fish Biology, 2007, 71(2): 411-420.
- [10] 尚玉昌. 动物行为学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [11] Zhuang P, Kynard B, Zhang L, et al. Comparative ontogenetic behavior and migration of kaluga, *Huso dauricus*, and Amur sturgeon, *Acipenser schrenckii*, from the Amur River [J]. Environmental Biology of Fishes, 2003, 66(1): 37-48.
- [12] 刘稳, 诸葛亦斯, 欧阳丽, 等. 水动力学条件对鱼类生长影响的试验研究 [J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 812-817.
- [13] Clark P J, Evans F C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations [J]. Ecology, 1954, 35(4): 445-453.
- [14] Webb P W, Cotel A J, Meadows L A. Waves and eddies: effects on fish behavior and habitat distribution [M] // Domenici P, Kapoor B G. Fish locomotion: an eco-ethological perspective. Enfield: Science Publisher, 2010: 1-39.

- [15] Shephard K L. Functions for fish mucus [J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 1994, 4 (4) : 401 - 429.
- [16] Fish F E. Swimming strategies for energy economy [M] // Domenici P, Kapoor B G. Fish locomotion: An Eco-ethological perspective. Enfield: Science Publisher, 2010: 90 - 122.
- [17] Weihs D. Energetic significance of changes in swimming modes during growth of larval anchovy *Engraulis mordax* [J]. Fishery Bulletin, 1980, 77 (3) : 597 - 604.
- [18] Fisher R, Leis J M. Swimming speeds in larval fishes: from escaping predators to the potential for long distance migrating [M] // Domenici P, Kapoor B G. Fish locomotion: An Eco-ethological perspective. Enfield: Science Publisher, 2010: 333 - 373.

Ontogenetic changes in schooling behaviour during larval and early juvenile stages of Chinese sucker (*Myxocryprinus asiaticus*)

SHI Xiaotao^{1,2}, WANG Bo¹, WANG Xue¹, CHEN Qiuwen², BAI Yanqin¹,
GAO Zhu¹, TU Zhiying¹, LIU Defu^{1*}

(1. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yibin 443002, China;

2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Juveniles Chinese sucker (*Myxocryprinus asiaticus*) obtains schooling swimming behavior. However, it is unclear when and why they form schooling behavior. We researched the mechanism of schooling formation related to hydraulics. We analyzed swimming behavior of Chinese sucker that ranged from 5 to 39 days post hatching (dph) at 20 °C water temperature by video record. Swimming speed, nearest neighbor distance (DNN), separation swimming index (ISS) and the Reynolds number based on total length (RL) were calculated. ISS decreased significantly with age, significantly lower than random distribution value at 19 dph (1.77 cm in total length, TL) and became stable at the lowest value at 32 dph (2.40 cm, TL). DNN changed in a similar way to ISS. The variation of ISS and DNN illustrated the schooling behavior was formed at the 19 dph and became tight schooling at 32 dph. The total length increased with age at function $y = 1.26033 - 0.01558x + 0.00315x^2 - (4.84978E - 5) \times x^3$. Swimming speed first increased and then decreased and finally became stable at $2.45 + 0.15 TL/S$ after 19 dph. RL increased with age at function $y = -607.89161 + 156.80912x - 4.2129x^2 + 0.0379x^3$, RL exceeded 200 at 5 - 6 dph, equaled 1111 at 19 dph. Analyses showed that the RL did not explain the schooling behavior of Chinese sucker, and schooling behavior was more likely related to the swimming behavior, as swimming changed from intermittent sprinting to continuous cruising when schooling was formed.

Key words: *Myxocryprinus asiaticus*; larva; schooling behavior; swimming speed; hydraulics; ontogenetic behavior

Corresponding author: LIU Defu. E-mail: fishlab@163.com