

流水和静水条件下鲢幼鱼对不同强度光源的趋性研究

王 琼, 林晨宇, 罗 佳, 祝 银, 刘 雁, 刘国勇, 刘德富, 石小涛

(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)

摘要:结合鱼类的集群行为,探究了在流水和静水处理下鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)幼鱼的光强偏好。实验流速工况设置包括静水和流水(流速为0.1 m/s),光强水平设置为0、10、20、40、70、110 lx,并依次进行了实验对象的个体(1尾)实验和群体(5尾)实验。结果显示:(1)个体流水处理在不同光照度水平下的吸引率和排斥率均无显著性差异($P > 0.05$),但个体静水处理20 lx和110 lx组的光吸引率显著大于40 lx和70 lx组($P < 0.05$),其他均无显著差异($P > 0.05$);(2)不同流速和实验鱼数量下的光吸引率,由高到低依次为群体流水处理、群体静水处理、个体流水处理、个体静水处理。光排斥率由高到低依次为个体静水处理、个体流水处理、群体静水处理、群体流水处理。研究表明,一定水流速度能够刺激鲢幼鱼趋流,从而提高光的吸引作用,且群体的趋光性要强于个体;(3)流水处理下,鲢幼鱼的最近邻距离(DNN,群体紧凑程度指标)随光强的增大,先减小后增大,集群程度先升高后降低,其中,70 lx水平对应的DNN显著高于0 lx($F = 1.489, P < 0.05$),而静水处理下各光强水平对应的实验鱼DNN无显著性差异($P > 0.05$),集群行为无明显变化。

关键词:鲢;光照强度;集群行为;流水;静水

中图分类号:Q331 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2018)05-0060-07

随着水利工程的大力发展,堤坝等挡水建筑物改变了天然河流的生态环境,阻碍了上下游之间正常的物质交流,使河流连通性受到破坏,导致河道中鱼类总量的减少和物种多样性的下降。为帮助鱼类过坝、保护洄游物种、修复河流连通性,世界各国在拦河建筑物主体或上下游区域修建了多种类型的过鱼设施(梁园园等,2014;朱海峰等,2015);同时,为保证过鱼效率,工程人员及相关科研人员尝试在过鱼设施进口处及其周边辅以水流、灯光、气泡幕等诱鱼驱鱼措施,其中灯光诱鱼作为一种广泛应用的无损定向诱驱鱼技术,开始在相关过鱼工程中得到尝试和发展。

大多数鱼类的行为如生长、捕食、躲避敌害、洄游等都与视觉感知有关;而光照强度则是影响鱼类视力的重要因素之一。Mohamed Gabr等(2007)研究发现三齿雅罗幼鱼(*Tribolodon hakonensis*)在增加光强的情况下比在减弱光强的情况下更为活跃;白艳勤等(2014)通过鱼类对光照强度和颜色的选择

实验,发现不同类型的水生生物对光照度的敏感性及对光照颜色的辨别能力不同;王武等(2008)则通过观察瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)幼鱼在不同光照条件下的游动情况,发现光照会对其造成环境胁迫。Hikaru等(2015)研究了光照强度与个体体长对白岩幼鱼(*Sebastes cheni*)游泳速度和集群效应的作用,发现随着光照强度的增大,幼鱼的洄游速度增大,光照强度最大时,幼鱼的爆发游泳速度随其体长的增大而增加。由于幼鱼通过集群效应躲避敌害的本能还未形成,所以鱼群的密集程度不随光照强度而改变。除此之外,鱼类对光环境的感知也与其所处环境中的水流形态有关。水动力条件对鱼类生长、活动规律等均有一定的影响(王从锋等,2016)。基于鱼类自身的趋流特性,适当范围的水流速度对鱼类能够产生一定的诱集作用。钟金鑫等(2013)通过测定实验鱼在不同流速状态下的游泳状态、趋流率等,研究了水流速度对鳊鱼(白鱼(*Anabarilius grahmi*))游泳行为的影响,发现一定的流速是保持较高趋流率的必要条件;而罗佳等(2015)通过研究光倒刺鲃(*Spinibarbus hollandi*)在不同流速下对气泡幕和闪光灯的趋避行为,发现在特定的水流条件下闪光能够对光倒刺鲃产生吸引作用。由此可见,水流速度也是鱼类趋避行为的影响因素之一。在不同水流流速条件下,鱼类对光照的选择可能有所不同。

收稿日期:2017-01-10

基金项目:国家自然科学基金(51579136);中国电力建设股份有限公司科技项目(DJ-ZDXM-2014-04)。

作者简介:王琼,1995年生,女,主要从事水利工程研究。E-mail:1721345717@qq.com

通信作者:石小涛,1981年生,男,教授。E-mail:sxtshanghai@163.com

光照强度与水流速度及目标鱼类的集群行为三者之前是相互关联的。在开发适用于过鱼设施的光诱导技术时,根据目标鱼类及工程现场情况,需要对 3 个因素进行综合考量和研究。目前,国内外相关研究多集中于其中 1 个或 2 个变量,而较少将光照、水流流态、集群行为三者结合。鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)是我国内陆水域主要的滤食性鱼类和经济鱼种,分布于全国各大水系,具有典型江湖洄游特性,对水流流态较为敏感。因此,本研究以鲢作为实验对象,探究其在流水和静水处理下对不同光强水平光源的趋避行为以及集群效应在这一过程中产生的影响,旨在为相关的理论研究与工程应用提供参考。

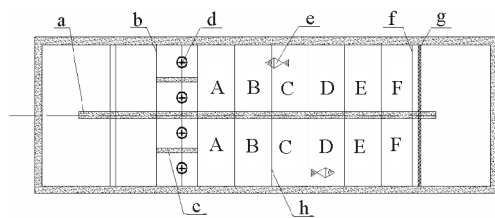
1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

实验用鲢幼鱼由湖北枝江某养殖场提供,平均体长(13.24 ± 1.16) cm,平均体重(34.52 ± 8.21) g。实验鱼运回后暂养于直径 2.0 m、高 0.5 m、水深 0.3 m 的圆形浅蓝色玻璃纤维水缸内。暂养用水为曝气后的自来水,每 2 天更换 1 次,换水量为池水的 1/3~1/2。暂养时自然光周期,水温为 18℃,溶氧含量大于 7 mg/L,pH 7.1~7.3。每天投喂 2 次(07:30 和 18:30),暂养 7 d,待其状况稳定、正常进食和游动后开始实验。实验时随机选取健康且体长均等的鲢幼鱼。在实验结束后,将实验鱼放入暂养水池。根据鱼类行为学实验要求,同一实验鱼不再重复实验,以防止其对环境产生适应,影响实验结果的准确性。

1.2 实验装置

鲢在不同水流状态下对光照强度的选择实验装置为自行设计的大型开放式鱼类游泳水槽。水槽建于室内,便于控制光照、流速等参数。该装置主要由水槽系统、灯光控制系统、监控系统 3 个部分组成。水槽系统主体为砖混结构,内部隔板为灰色玻璃材质,结合水阀以提供流速可控的循环水。灯光控制系统为 4 个 220 V、1000 W 碘钨灯,连接变压器以控制光源的光照强度。碘钨灯均匀列于实验区水槽前方上端。监控系统由监视器和红外摄像机组成,2 个 SN-UA3160GP 红外摄像机置于实验区上方 3 m 处,通过录像系统对实验进行观察和记录实验数据。实验采用 2 个 MHS-B15W 红外补光灯进行补光,补光灯置于实验区后方高 3.5 m 处。不同水流状态鲢幼鱼的光强选择实验装置见图 1。



a-分隔物;b-拦网;c-分隔板;d-碘钨灯;

e-实验鱼;f-拦网;g-叠梁门;h-分区线

图 1 在不同水流状态下鲢幼鱼对光照强度的选择实验装置模式图(俯视)

a-barrier; b-net; c-barrier; d-Iodine-tungsten lamp;
e-test fish; f-net; g-gate; h-section boundary

Fig.1 Schematic of tank for testing light intensity preference under different flow conditions (top view)

1.3 实验方法

实验前,控制水槽中水温与暂养水温一致。实验用水为小型水库循环水(不需进行曝气处理)。实验水深为 0.2 m。实验设置 2 种水流工况(0 m/s、0.1 m/s),并在 2 种水流工况下分别设置 7 个光强水平(0、10、20、40、70、110 lx),每个水平下都进行个体和群体实验。

实验时,从暂养水槽中随机捞取 1 尾鱼(或 5 尾鱼)放入实验区进行适应。暗适应(光照强度为 0 lx)30 min 后,在 2 min 内均匀地将光源光强调至实验光强,同时调整流速至实验流速,1 min 后开启红外摄像机,连续记录 60 min 至实验结束。每组实验重复 3 次。为了避免自然光的影响,试验时间为当日 19:00 至次日 06:00。

实验完成后,对所采集视频进行图像处理。每隔 10 s 统计 1 次实验鱼(1 尾或 5 尾鱼)分别在各区域(A、B、C、D、E、F 区)的出现次数,以鱼体吻部代表个体的位置,将总出现次数作为对应处理下的分布情况。

实验鱼的集群行为用最近邻距离(DNN)进行描述。DNN 越小,表示鱼的集群程度越高。在群体鱼实验中,选择实验对象中的 1 尾作为中心鱼,其周边的 4 尾鱼即为邻近鱼,在一定实验周期内随机快照 10 次;每次测量中心鱼与邻近鱼的距离并选择最短距离;同时以离中心鱼最近的鱼为目标同样计算每尾鱼到最近鱼的距离,因此针对 1 尾中心鱼得到 5 个数据,取 5 个数据的平均值即为 DNN。

1.4 数据处理

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验实验鱼在不同水平下出现次数百分比的差异是否显著,检验用 SPSS 15.0 统计软件进行。采用回归分

析确定实验鱼集群行为与光照选择之间的关系。统计值用平均值±标准差(Mean±SD)表示, $P < 0.05$ 表示差异显著。统计指标包括光吸引率、光排斥率、总吸引率和最近邻距离(DNN)。其中,光吸引率、光排斥率和总吸引率计算公式如下:

$$\text{光吸引率} = \frac{(A+B)\text{区鱼停留总数}}{\text{记录次数} \times \text{试验鱼总数}} \times 100\%$$

$$\text{光排斥率} = \frac{F\text{区鱼停留总数}}{\text{记录次数} \times \text{试验鱼总数}} \times 100\%$$

$$\text{总吸引率} = \text{光吸引率} - \text{光排斥率}$$

2 结果与分析

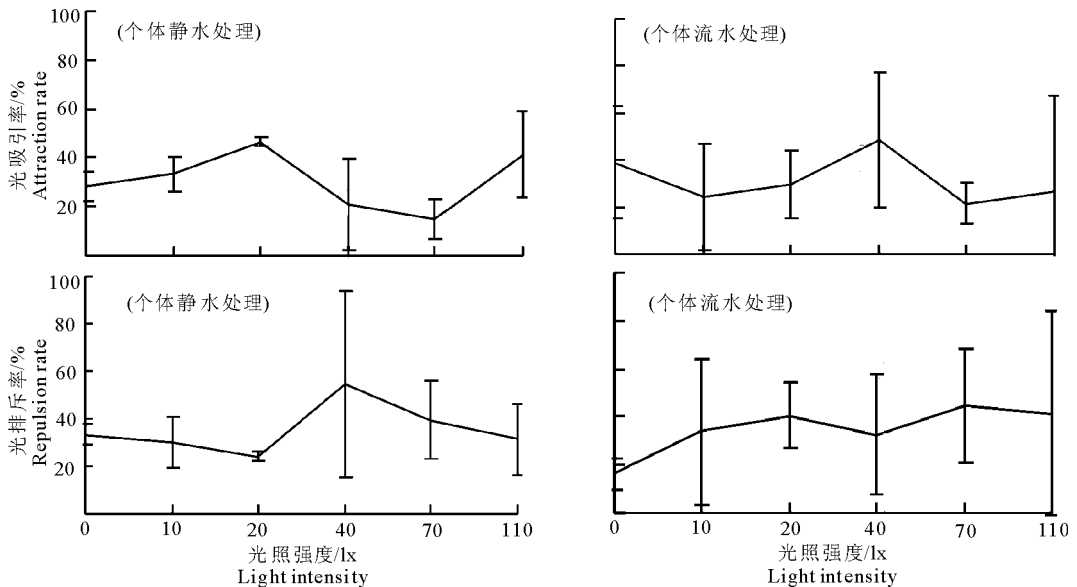
2.1 鲢幼鱼个体对光照强度的选择

在鲢幼鱼的个体实验中,个体流水处理在不同光照度水平下的吸引率和排斥率均无显著性差异($P > 0.05$);但在个体静水处理有显著性差异,20 lx、110 lx下的光吸引率显著大于40 lx、70 lx下的光吸引率($F = 3.223, P < 0.05$);其他均不存在显著性差异($P > 0.05$),总体呈先上升、后下降、再上升的趋势(图2)。2个水流处理对应的平均光吸引

率分别为(31.50±23.19)%和(30.91±9.83)%;平均光排斥率分别为(34.95±23.63)%和(35.52±14.63)%。数据表明,在个体实验中,流水处理下的光吸引率大于静水处理,而流水处理下的光排斥率小于静水处理。

2.2 鲢幼鱼集群行为

2.2.1 流水和静水中群体的光照强度选择 实验表明,群体流水处理与静水处理在不同光照度水平下的吸引率和排斥率均无显著性差异($P > 0.05$) (图3)。两个水流处理对应的平均光吸引率分别为(60.06±22.09)%和(48.86±12.97)%;平均光排斥率分别为(7.22±10.04)%和(20.63±12.08)%。在群体实验中,流水处理下的光吸引率大于静水处理,而流水处理下的光排斥率小于静水处理。不同流速和实验鱼数量下的光吸引率,由高到低依次为:群体流水处理、群体静水处理、个体流水处理、个体静水处理。光排斥率由高到低依次为:个体静水处理、个体流水处理、群体静水处理、群体流水处理。实验表明,一定水流速度能够刺激鲢幼鱼趋流,从而提高光的吸引作用,且群体的趋光性要强于个体。



相同字母表示差异不显著($P > 0.05$),不同字母表示差异显著($P < 0.05$),无字母表示差异性均不显著($P > 0.05$)。

图2 鲢幼鱼个体在不同光照强度下的光吸引率与排斥率

The same letters indicate insignificant differences ($P > 0.05$), different letters indicate significant differences ($P < 0.05$), no letters indicate that all the differences are insignificant ($P > 0.05$)

Fig.2 Variation of optical attraction and repulsion rates with light intensity for fish individuals

2.2.2 集群行为分析

(1) 鲢幼鱼在不同光照水平下的集群行为。经 One-way ANOVA 检验,在不同光强水平的 DNN 值有所差异,总体分布于 3~6 cm。流水处理下的 DNN 值普遍大于静水处理,呈现先下降、后上升的

趋势,且当光照度水平为 70 lx 时,其 DNN 值达到最低,显著低于 0 lx ($F = 1.489, P < 0.05$),集群程度明显增高,而其他各光照水平之间不存在显著性差异($P > 0.05$) (图4)。相比之下,静水处理下的 DNN 值不随光照强度的改变而改变,各光照度水平

间不存在差异性($P>0.05$)。这表明当所处环境不存在流速时,鲢幼鱼的集群程度与环境光强无关。(2)鲢幼鱼集群程度与光强选择之间的关系。回归分析可见,流水处理下的总吸引率随 DNN 值的增

大呈现出减小的趋势(图 5)。即鲢幼鱼群体的集群程度越高,其趋光率越大。这表明当所处环境存在一定流速时,鲢幼鱼的趋光性与其自身的集群行为密切相关。

表 1 不同处理下的光吸引率与光排斥率

Tab.1 Optical attraction and repulsion rates for each treatment

处理组	个体流水处理	个体静水处理	群体流水处理	群体静水处理
光吸引率/%	31.50±23.19	30.91±9.83	60.06±22.09	48.86±12.97
光排斥率/%	34.95±23.63	35.52±14.63	7.22±10.04	20.63±12.08

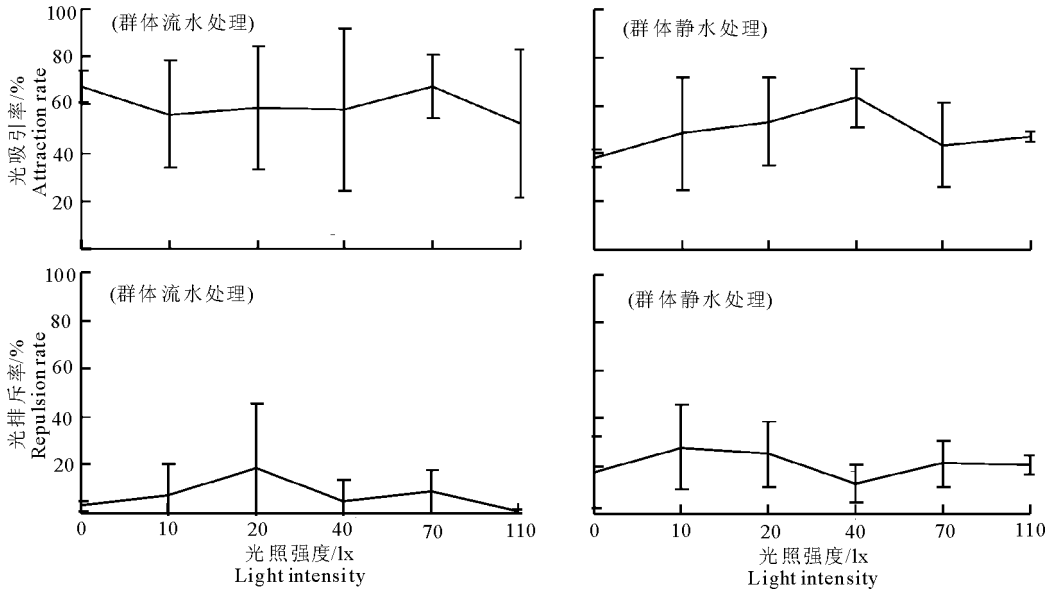


图 3 鲢幼鱼群体在不同光照强度下的光吸引率与光排斥率

Fig.3 Variation of optical attraction and repulsion rates with light intensity for fish groups

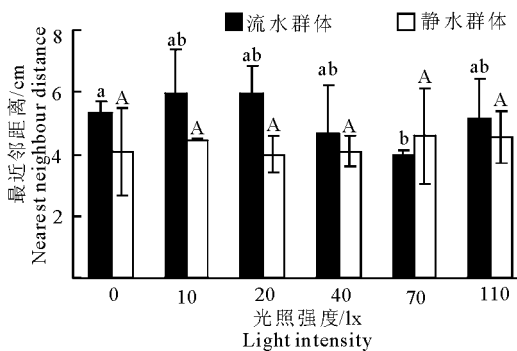


图 4 鲢幼鱼群体在不同光照强度下的最近邻距离 DNN

Fig.4 Variation of distance to nearest neighbor (DNN) with light intensity

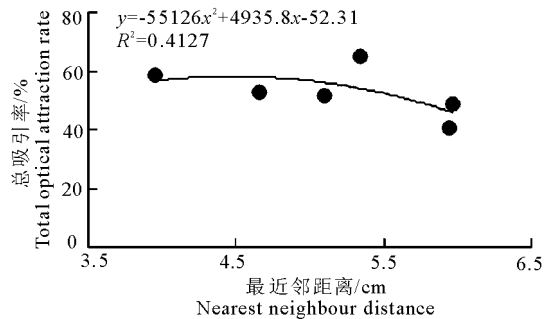


图 5 最近邻距离 DNN 与总吸引率之间的关系

Fig.5 Relationship of DNN and total optical attraction rate

3 讨论

3.1 鲢幼鱼对光照强度的选择

水生生物对于光照强度存在一定生理趋性。鱼类根据其不同的行为反应可分为正趋光性、负趋光性和无趋光性。不同生物所呈现出的不同趋性主要与自身的生理机制有关(Marchesan et al, 2005),

如视力敏锐度、虹膜颜色等。研究发现,不同种类或相同种类不同龄期的鱼类对光照强度的敏感性不同(Hikaru et al, 2015);此外,鱼类对光环境的趋避反应还与其所生存的环境如水域、水层等有着密切的关系,这属于生物对栖息环境的一种进化现象(Torizawa et al, 2011)。中上层鱼类大多表现为正趋

光反应,如鲤等;底层鱼类则由于栖息、繁殖和索饵于河底而呈负趋光性,如瓦氏黄颡鱼、草鱼、曼氏无针乌贼等(郑美丽等,1980;白艳勤等,2014;王从锋等,2016)。鲢生活在河流、湖泊的中上层水层,生性活泼,喜欢跳跃,适应能力较强,本实验中,鲢幼鱼在2种水流工况下的个体实验和群体实验中,实验鱼的光排斥率均不随光照度水平的变化而变化,呈现出无趋性,仅在个体静水处理实验中光吸引率呈现先上升、后下降、再上升的趋势,其他情况均呈现出无趋性。造成该结果的原因可能是实验槽底有一定的斜坡。该研究结果与白艳勤等(2014)和秦孝辉等(2015)的结论一致,即鲢对不同强度光源呈现无趋性。

3.2 水流速度与集群效应对鲢趋光性的影响

鱼类生长及活动规律与水动力学条件有着一定的关系(秦孝辉等,2015)。多数鱼类具有趋流性,洄游性鱼类则需要通过调整自身的游泳速度和方向来适应水的流速和流向,以保持逆流游泳状态或停留在某一特定位置上(何大仁,1998)。并且洄游性鱼类可以根据流速的大小及方向判定洄游路径。不同鱼类的感应流速,偏好流速不同,对水流流速的行为反应也不尽相同。

本研究通过设置流水处理以激发鲢幼鱼本身的趋流特性。实验结果显示,流水情况下,实验鱼个体的光吸引率和光排斥率无显著变化,水流对提高实验鱼的趋光率帮助较小。分析其可能的原因,虽然实验装置中的平均流速达到0.1 m/s,已超过同体长范围鲢幼鱼的感应流速(白艳勤,2013),但由于水槽中流速分布不均匀,特别是侧壁处,流速已小于实验对象的感应流速,整体流场无法使鱼长时间处于趋流状态。相比之下,在群体实验中,流水处理显著提高了鲢幼鱼的光吸引率而降低了其光排斥率。这与实验对象在集群条件下的“保标性”有关。在实验过程中,同组处理的实验鱼之间通常通过视觉定位保持相对稳定的位置关系。5尾鱼的总体位置往往取决于处于最前端的“领头鱼”,而“领头鱼”则为一定时间段内趋流性最强的鱼。由此可知,鲢幼鱼群体在自身视觉特性和趋流性的共同作用下,趋光率得以提高。

在野外环境中,鱼类普遍存在集群行为。集群与鱼类的视觉感知密切相关,鱼类群体相对于个体,更能够快速发现捕食者和食物,其涉及的机制包括其对捕食者的“混淆效应”(confusion effect)(Shelton et al,2014)、“稀释效应”(dilution effect)(Ro-

berts,1996)及猎物的“多眼效应”(many eyes effect)(Krakauer,1995)。本研究发现,鲢幼鱼的群体和个体实验在不同流速处理下的光吸引率,由大到小依次为:群体流水处理、群体静水处理、个体流水处理、个体静水处理;光排斥率由大到小依次为:个体静水处理、个体流水处理、群体静水处理、群体流水处理。这说明在趋流性和鱼眼“保标性”的共同作用下,鲢幼鱼的趋光性能够得到明显的提升;而当所处环境存在一定流速时,鲢幼鱼的光趋性与其自身的集群行为密切相关。在流水处理下,实验鱼的DNN呈现先减小、后增大的趋势。相反,当实验鱼处于静水中时,其集群程度无明显变化,可见鲢幼鱼的集群行为在不同的水流形态下呈现不同的表现形式。这可能是由于鱼在一定流速进行顶流行为时,需要通过视觉中的参照物判定自身位置,从而调整游泳姿态;而不同的光强,则通过改变其他鱼在目标鱼视野中的清晰度而改变两者间相对距离,从而影响了鱼群的集群程度。另外,从集群程度与总吸引率之间的关系可以看出,流水情况下,随着鲢幼鱼集群程度的增大,其趋光率逐渐增加。分析其原因,认为鲢幼鱼个体间的距离越短,相互之间的跟随性就越强,鱼群中“领头鱼”的作用就愈发明显,其总体趋光率就愈强。

本次实验表明,在研究鱼类的趋光性时,集群效应和水流流速都起到了不可忽视的作用。因此,后续研究应结合水流速度和集群效应,进一步探讨鱼类在不同水流条件与集群行为下的光驱性。上述结论在现有研究中少有报道,本实验提出鱼类趋光性受水流条件与集群行为的影响,可为相关研究及工程管理提供参考数据。

参考文献

- 白艳勤,路波,罗佳,等,2013.草鱼、鲢和瓦氏黄颡鱼幼鱼感应流速的比较[J].生态学杂志,32(8):2085-2089.
- 白艳勤,王雪,刘德富,等,2014.瓦氏黄颡鱼和鲢对光照强度和颜色的选择[J].水生生物学报,38(2):216-221.
- 何大仁,1998.鱼类行为学[M].厦门:厦门大学出版社:141-145.
- 梁园园,刘德富,石小涛,等,2014.集运鱼船研究综述[J].长江科学院院报,31(2):25-29.
- 罗佳,白艳勤,林晨宇,等,2015.不同流速下气泡幕和闪光对光倒刺鲃趋避行为的影响[J].水生生物学报,39(5):1065-1068.
- 秦孝辉,王从锋,刘德富,等,2015.不同光照强度对鲢、草鱼的诱集效果研究[J].南方水产科学,11(3):47-52.

- 王从锋,陈明明,刘德富,等,2016.基于葛洲坝1号船闸模型的水流诱鱼试验研究[J].长江流域资源与环境,25(6):974-980.
- 王武,李伟纯,马旭洲,等,2008.水温与光照对瓦氏黄颡鱼幼鱼行为的影响[J].生态学杂志,27(5):791-796.
- 张辉,王印庚,荣小军,等,2009.刺参的趋光性以及对附着基颜色的感应行为[J].生态学杂志,28(3):477-482.
- 郑美丽,肖金华,郑微云,等,1980.曼氏无针乌贼的趋光特性[J].厦门大学学报(自然科学版),19(3):91-99.
- 钟金鑫,张倩,李小荣,等,2013.不同流速对鳊鱼白鱼游泳行为的影响[J].生态学杂志,32(3):655-660.
- 朱海峰,刘流,路波,等,2015.鱼类下行过坝相关工程措施综述[J].长江科学院院报,32(10):33-37.
- Hikaru Nakano, K Hirakawa, J Shoji, 2015. Development of swimming speed and schooling behavior of juvenile white rockfish (*Sebastes cheni*) in relation to ambient light intensity[J]. Fishery Bulletin, 113(2):121-128.
- Jorge Paramo, Renato A. Quinones, Argiro Ramirez et al, 2003. Relationship between abundance of small pelagic fishes and environmental factors in the Colombian Caribbean Sea: an analysis based on hydroacoustic information[J]. Aquatic Living Resources, 16:239-245.
- Krakauer D C, 1995. Groups confuse predators by exploiting perceptual bottlenecks: a connectionist model of the confusion effect[J]. Behavioral Ecology & Sociobiology, 36(6):421-429.
- Mohamed Gabr, Yasuzumi Fujimori, Susumu Shimizu, et al, 2007. Trawling experiment in a circular water tank to assess the effects of towing speed, light intensity, and mesh shape on active escape of undersized fish[J]. Fisheries Science, 73:557-564.
- Marchesan M, Spoto M, Verginella L, et al, 2005. Behavioural effects of artificial light on fish species of commercial interest[J]. Fisheries Research, 73(1/2):171-185.
- Roberts G, 1996. Why individual vigilance declines as group size increases[J]. Animal Behaviour, 51(5):1077-1086.
- Shelton D S, Price B C, Ocasio K M, et al. 2015. Density and Group Size Influence Shoal Cohesion, but Not Coordination in Zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Journal of Comparative Psychology, 129(1):72-77.
- Torisawa, S, Fukuda H, Suzuki K et al, 2011. Schooling behaviour of juvenile Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* depends on their vision development[J]. Journal of Fish Biology, 79(5):1291-1303.

(责任编辑 万月华)

Phototaxis of Individual and Group *Hypophthalmichthys molitrix* in Flowing and Still Water

WANG Qiong, LIN Chen-yu, LUO Jia, ZHU Yin, LIU Yan, LIU Guo-yong, LIU De-fu, SHI Xiao-tao

(Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region,
China Three Gorges University, Yichang 443002, P.R.China)

Abstract: Water control structures have changed the ecology of natural rivers, interrupting connectivity and decreasing fish populations and diversity. Fish behavior is highly dependent on vision and eyesight relating with light intensity. In this study, the effects of light intensity and flow velocity on phototaxis and schooling behavior of *Hypophthalmichthys molitrix* (silver carp) were investigated. Experiments included the behavior of a single fish and groups of five fish at flow velocities of 0 m/s (still water) and 0.1 m/s (flowing water) and at light intensity levels of 0, 10, 20, 40, 70 and 110 lx. And video recording system was used to help observe and collect the experimental data, the occurring frequencies in each area were collected to calculate the attraction and repulsion rates. There were three primary findings: (1) For individual fish in still water, the rates of optical attraction for 20 lx and 110 lx groups were significantly higher those in 40 lx and 70 lx groups, and the optical repulsion rate did not vary with light intensity. The rates of optical attraction and repulsion did not vary with light intensity for individual fish in flowing water. (2) At different flow velocities and group size, the optical attraction rate was in the order, group in flowing water > group in still water > individual in flowing water > individual in still water and the optical repulsion rate was in the reverse order. This shows that flow enhances phototaxis in silver carp fingerlings and phototaxis is more pronounced in a group (schooling) than with an individual fish. (3) In flowing water, the distance to nearest neighbor (DNN) increased and then decreased with illumination intensity and DNN at 70 lx was significantly higher than at 0 lx ($F=1.489$, $P<0.05$). In still water there were no significant differences ($P>0.05$) among illumination treatments and no changes were observed in fish schooling behavior.

Key words: *Hypophthalmichthys molitrix*; light intensity; schooling behavior; flowing water; still water