

## 模拟机械撞击对草鱼仔鱼生理与运动行为表现的影响<sup>\*</sup>

张志明<sup>1</sup>, 杨 信<sup>2</sup>, 郎瑞琪<sup>2</sup>, 黄 辉<sup>3</sup>, 高 乐<sup>2</sup>, 陈启亮<sup>2</sup>, 付世建<sup>2</sup>, 熊满堂<sup>1</sup>, 王 军<sup>4</sup>, 李 星<sup>4</sup>, 付 成<sup>2</sup>

(1. 水利部中国科学院水工程生态研究所 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室/

湖北省水生态保护与修复工程技术研究中心, 武汉 430079;

2. 重庆师范大学 淡水鱼类资源保护与利用重庆市重点实验室, 重庆 401331;

3. 重庆南方大口鲶原种场, 重庆 401520; 4. 渝万铁路有限责任公司, 重庆 400014)

**摘要:**为考察机械撞击对产漂流性卵鱼类早期生活史的影响,以草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)仔鱼为研究对象,模拟了不同撞击速度(1.4、3.1和4.4 m·s<sup>-1</sup>,分别记为低速、中速和高速)和角度(45°和90°)的石板撞击,并设置不进行撞击处理的对照组,测定了实验鱼的死亡率、心率、运动行为及生长存活情况。结果显示:1)撞击速度对实验鱼即时死亡率和撞击处理结束24 h内的累计死亡率有统计学意义上的影响( $p < 0.05$ ),且这2个指标均随撞击速度的增大而上升。2)实验鱼在不同撞击速度处理结束24 h后的心率均高于对照组,数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ )。3)在撞击处理结束24 h后向实验水体中分别加入清水、食物信息素液或捕食者信息素液,在上述条件下经低速和中速撞击处理的实验鱼在运动行为指标上均高于对照组和经高速撞击处理的实验鱼,数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ ),而后两者的运动行为指标无统计学意义上的差异。4)石板撞击对实验鱼在撞击处理结束24 h后进行的14 d生长实验中的特定生长率无统计学意义上的影响,但对实验鱼在此期间的死亡率具有统计学意义上的影响( $p < 0.05$ ),且45°倾斜撞击情形下的死亡率比90°垂直撞击情形下更高。研究结果提示,石板撞击可能诱导了草鱼仔鱼的应激反应并增强了它们的运动行为对外界刺激的敏感性,而且高速撞击可能对它们的运动能力造成损害;总体而言,石板撞击对草鱼仔鱼具有持续性的负面影响。

**关键词:**机械撞击;漂流性卵;死亡率;运动行为;生长率

**中图分类号:**Q958.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2026)04-0048-08

产漂流性卵鱼类在生活史早期阶段尚不具备或仅具有较弱的自主游泳能力<sup>[1]</sup>,主要依赖水流进行被动漂移<sup>[2]</sup>。这一过程有助于卵和幼体向环境条件更适宜的生境迁移<sup>[3]</sup>。然而,自然河流尤其是山区河流,流经地域地形复杂,河床纵剖面起伏大,且这类河流往往具有明显的高流速特性;在长江上游部分河段,流速甚至超过4.0 m·s<sup>-1</sup><sup>[4]</sup>。此外,桥墩、船舶活动等人为干扰因素的叠加,进一步加剧了河道水动力环境的复杂性<sup>[5]</sup>。在较高流速水体中,漂流性鱼卵和仔鱼难以主动避让障碍物,在随水流漂移过程中易与岩石、河床底质或人工构造物发生机械撞击,受创和死亡的风险明显上升<sup>[6]</sup>。鱼类在早期发育阶段的存活状况对于种群数量的维持至关重要,因此,深入理解机械撞击对产漂流性卵鱼类生活史早期阶段的影响,仍是当前河流生态管理与鱼类资源保护中的重要科学问题<sup>[7]</sup>。

已有研究表明,紊动水流可对漂流性鱼卵产生碰撞冲击和摩擦作用,导致卵膜脱落或破裂<sup>[8-9]</sup>;机械撞击还可能引起鱼卵内部结构变形,并对卵黄膜造成损伤,从而阻碍胚胎正常发育<sup>[10-11]</sup>。然而,相较于鱼卵阶段,机械撞击对仔鱼的影响研究十分有限。仔鱼阶段标志着鱼类基本器官和组织结构的形成、多种生理功能的激活与逐步完善,同时鱼类个体开始具备一定的环境感知与互动能力<sup>[12]</sup>。在此阶段,外界机械撞击仍有可能对鱼类机体造成潜在损伤,进而影响鱼类生理机能和行为表现,并最终对鱼类长期存活产生不利影响。目前,这类影响的程度及作用机制仍有待进一步阐明。

草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)为鲤形目(Cypriniformes)鲤科(Cyprinidae)鱼类,广泛分布于长江、珠江等

<sup>\*</sup> 收稿日期:2026-03-03 修回日期:2026-04-13 网络出版时间:2026-07-15T09:09

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 32370509);重庆市教育委员会科学技术研究计划重点项目(No. KJZD-K202500504);新建重庆至万州高速铁路工程石沱长江大桥水生态补偿项目(No. YWGT-AH-202511-002)

第一作者简介:张志明,男,副研究员,博士,研究方向为鱼类生态学和涉水工程水生生态环境影响评价,E-mail: zhangzm@mail.ihe.ac.cn;

通信作者简介:付成,男,副教授,博士,E-mail: chengfu@cqnu.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20260714.1710.005

水系,是中国典型的产漂流性卵鱼类之一<sup>[13-14]</sup>。由于上述水系中水下自然与人工构造物密集分布,因而草鱼仔鱼在顺流而下的漂移过程中极易与桥墩、岩石等物体发生机械撞击。此外,不同河段的水流速度差异、构造物的形态多样性和诸如湍流一类的复杂水动力条件,均可能导致上述撞击的速度和角度出现明显变化。基于上述背景,本研究以草鱼仔鱼为研究对象,考察模拟不同速度和角度的机械撞击对仔鱼死亡率、心率、运动行为和生长存活的影响,期望为今后涉水工程的生态环境影响评估提供科学依据和基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验鱼来源与驯养

实验用草鱼仔鱼购自广东省鱼苗养殖基地,购入时处于出膜后 2~3 d 阶段。实验鱼被放置在 6 个直径 10 cm、高 9 cm、孔径 0.3 mm 的圆柱形漂浮式隔离网中进行室内驯养,且上述隔离网被置于长×宽×高为 40 cm×32 cm×30 cm 的玻璃缸内。实验用水为充分曝气后的自来水,每日换水量约为玻璃缸内水量的 20%。驯养期间使用充气泵保持水体中溶解氧水平处于饱和状态,并通过功率为 150 W 的恒温加热棒将水温控制在 (25.0±1.0) °C。光周期设为 12 h 光照:12 h 黑暗。每日分别于 9:30、12:30、15:30 和 18:30 定时各投喂 1 次解冻后的丰年虾(*Artemia salina*)。整个驯养过程持续 7 d。

### 1.2 撞击处理设计

本研究采用的撞击处理流程及装置参考 Yang 等人<sup>[6]</sup>的实验设计。撞击装置由释放装置与接收装置构成。释放装置为 1 个上端开口直径 120 mm、高 126 mm 的玻璃漏斗,漏斗下方连接 1 段硅胶管,并配有弹簧止水夹,用于控制实验鱼的释放时机。漏斗通过铁架台固定并使之位于接收装置的正上方,且可通过调节漏斗与接收装置的距离来改变撞击速度。接收装置为直径 44 cm、高 20 cm 的白色 PVC 材质圆盆,盆底正中部放置 1 块长×宽为 20 cm×20 cm 的磨砂面大理石板,且可根据实验需求调节其倾斜角度。

实验采用双因素设计,共设置 6 个撞击处理组,分别接受 6 种不同组合的撞击速度和角度处理,其中:1) 参考 Yang 等人<sup>[6]</sup>的实验设计,实验鱼从撞击装置中自由坠落高度分别为 10、50 和 100 cm,对应的理论撞击速度分别为 1.4、3.1 和 4.4 m·s<sup>-1</sup>(分别被记为低速撞击、中速撞击和高速撞击);2) 撞击角度通过调整接收装置中的大理石板的倾斜角度实现 45°倾斜撞击与 90°垂直撞击。另外设置 1 组对照组,其中的实验鱼仅进行与上述 6 个撞击组相同的捞取与转移操作,但不进行坠落撞击处理(即撞击速度为 0)。各撞击组均完成不少于 5 次独立重复实验,每次进行撞击的实验鱼数量在 30 尾左右,每组进行撞击的实验鱼数量为 139~189 尾。

### 1.3 实验流程

撞击处理流程如下:首先将漏斗调整至预定高度,然后将 1 个批次约 30 尾实验鱼带水转移至漏斗中,随即打开漏斗下方的止水夹,使仔鱼随水流下坠并撞击正下方的石板。撞击完成后,迅速收集接收盆中的仔鱼,分别统计存活与死亡个体数量以便计算即时死亡率,并将存活个体立即转移回原养殖系统。在撞击处理结束 24 h 后,再次统计参与撞击处理的仔鱼的存活情况用于计算累计死亡率;并从各撞击组中选取部分存活个体分别用于心率和运动行为的测定。然后进行时长为 14 d 的生长实验,通过考察实验鱼的特定生长率和死亡率来评估撞击处理可能对实验鱼产生的长期影响。

### 1.4 指标测定

#### 1.4.1 撞击后死亡率

该指标包括前文提及的即时死亡率和累计死亡率。

#### 1.4.2 心率

从每个实验组中随机选取 15 尾实验鱼,将它们分别置于体视显微镜下录制 1 min 视频。视频录制前允许实验鱼恢复 3 min。通过视频回放对心脏搏动次数进行计数,计算每组实验鱼的平均心率(单位:次·min<sup>-1</sup>)。

#### 1.4.3 运动行为

考察实验鱼在水体中含有食物信息或捕食者信息时的运动行为,以评估撞击处理对它们觅食和避敌能力的潜在影响。测定装置为 1 个长×宽×高为 40 cm×30 cm×20 cm 的白色泡沫箱,内置 6 个直径 10 cm 的培养皿,培养皿下方铺有 0.5 cm 方格纸。泡沫箱正上方架设 1 台摄像机,用于实验鱼运动行为的拍摄。测定开始时将单尾实验鱼转移至培养皿适应 3 min 后,向培养皿中注入 0.5 mL 信息素液,随即录制 5 min 时长的视频。食物信息素液为浸泡过丰年虾的水体,由每 100 mL 清水加入 0.5 g 冷冻丰年虾制得;捕食者信息素液为饲养过乌

鳢(*Channa argus*)的水体,此外增加不含上述信息素的清水作为对照<sup>[15]</sup>。运动行为测定为每个组 15 个重复,所有实验鱼个体均不重复使用。通过回放视频分析 5 min 内仔鱼的运动行为指标,即穿越格子数(单位:个)和总运动时间(单位:s),指标含义和相关计算方式参见文献[16]。

1.4.4 生长实验中的特定生长率和死亡率

生长实验在隔离网中进行,每个组 3 个平行样本,每个平行样本量为 29~42 尾。生长实验期间实验鱼的饲养方式与驯养期间一致。在饲养开始(第 0 天)和结束(第 14 天)时,对各实验组的个体进行计数,并拍照后使用 ImageJ 软件测量实验鱼的体长,计算基于体长的特定生长率。同时统计生长实验期间各实验组的累计死亡数量,计算这一期间的死亡率。

1.5 统计分析

所有指标数据均以“平均值±标准误”形式表示。使用 SPSS 26.0 软件进行数据的统计分析。采用 Shapiro-Wilk 检验对数据进行正态性检验,采用 Levene 检验对数据进行方差齐性检验。撞击速度和角度对实验鱼撞击后死亡率、心率、运动行为以及生长实验中的特定生长率和死亡率的影响使用一般线性模型进行分析。如某一因素对上述指标的影响具有统计学意义,则进一步进行事后多重比较(Duncan 检验)。上述统计检验和分析结果具有统计学意义的判定标准为  $p<0.05$ 。

2 结果

2.1 对撞击后死亡率和心率的影响

表 1 显示,2 个固定因素中只有撞击速度对实验鱼撞击后的即时死亡率和累计死亡率均具有统计学意义上的影响( $p<0.05$ ),故后续的多重比较不涉及撞击角度。而由图 1a 可知,经高速撞击处理的实验鱼即时死亡率高于对照组,且与后者的数据差异具有统计学意义( $p<0.05$ )。图 1b 则显示:实验鱼在接受不同撞击速度处理后的累计死亡率均高于对照组,数据差异均具有统计学意义( $p<0.05$ );同时,经高速撞击处理的实验鱼即时死亡率也比经低速撞击处理的实验鱼更高,两者数据差异也具有统计学意义( $p<0.05$ )。

同样地,只有撞击速度对实验鱼的心率具有统计学意义上的影响( $p<0.05$ ),因而后续的多重比较也不考虑撞击角度(表 1);由图 2 可知,实验鱼在接受不同撞击速度处理后的心率均高于对照组,与后者的数据差异均具有统计学意义( $p<0.05$ )。

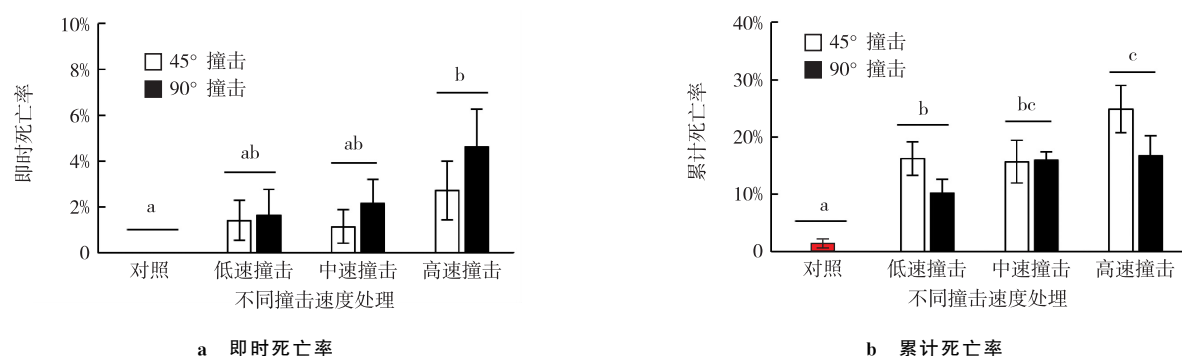
表 1 撞击速度和角度对草鱼仔鱼生理和运动行为指标影响的一般线性模型分析结果  
Tab. 1 Results of general linear model analysis on the effects of collision speed and angle on physiological and locomotor behavior indicators of *C. idella* larvae

| 指标               | 撞击速度                | 撞击角度                | 撞击速度×撞击角度          |
|------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 即时死亡率            | $F=3.910, p=0.016$  | $F=1.100, p=0.301$  | $F=0.327, p=0.806$ |
| 累计死亡率            | $F=16.535, p<0.001$ | $F=3.085, p=0.088$  | $F=1.151, p=0.342$ |
| 心率               | $F=12.029, p<0.001$ | $F=0.829, p=0.365$  | $F=2.010, p=0.117$ |
| 生长实验中的特定生长率      | $F=2.438, p=0.102$  | $F=0.000, p=0.997$  | $F=0.404, p=0.752$ |
| 生长实验中的死亡率        | $F=26.713, p<0.001$ | $F=14.637, p=0.001$ | $F=3.307, p=0.047$ |
| 穿越格子数(加入清水)      | $F=6.035, p=0.001$  | $F=0.027, p=0.870$  | $F=0.687, p=0.562$ |
| 运动时间(加入清水)       | $F=7.122, p<0.001$  | $F=0.985, p=0.323$  | $F=0.483, p=0.695$ |
| 穿越格子数(加入食物信息素液)  | $F=9.401, p<0.001$  | $F=0.000, p=0.991$  | $F=0.428, p=0.733$ |
| 运动时间(加入食物信息素液)   | $F=15.151, p<0.001$ | $F=0.158, p=0.692$  | $F=0.587, p=0.625$ |
| 穿越格子数(加入捕食者信息素液) | $F=12.123, p<0.001$ | $F=3.740, p=0.056$  | $F=1.172, p=0.324$ |
| 运动时间(加入捕食者信息素液)  | $F=6.727, p<0.001$  | $F=0.199, p=0.657$  | $F=0.159, p=0.924$ |

2.2 对运动行为的影响

从表 1 可以看出,在分别向驯养水体中加入清水、食物信息素液以及捕食者信息素液的情形下,也仅有撞击速度对实验鱼运动行为的影响具有统计学意义( $p<0.05$ ),故后续的多重比较不涉及撞击角度。如图 3a 所示,在加入清水后,经中速和低速撞击处理的实验鱼在 5 min 内的穿越格子数均多于经高速撞击处理的实验鱼,经中

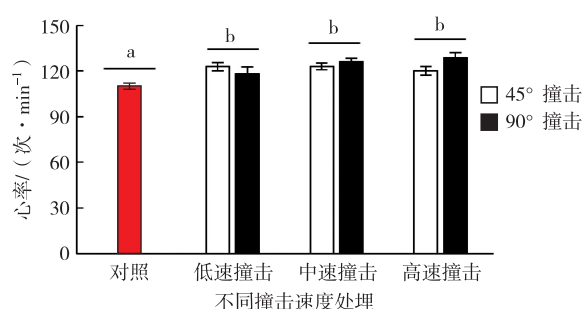
速撞击处理的实验鱼的该项指标也多于对照组,上述数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ )。而图 3b 显示,在加入食物信息素液后,经中速和低速撞击处理的实验鱼在 5 min 内的穿越格子数均多于对照组和经高速撞击处理的实验鱼,且数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ )。由图 3c 可知,在加入捕食者信息素液后,经中速撞击处理的实验鱼在 5 min 内的穿越格子数多于对照组和经低速和高速撞击处理的实验鱼,且经低速撞击处理的实验鱼的这一指标也多于对照组,上述数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ )。此外图 3d~f 显示,在上述 3 种情形下,经中速和低速撞击处理的实验鱼在 5 min 内的总运动时间均长于对照组和经高速撞击处理的实验鱼,数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ )。



注:不同小写字母表示经不同撞击速度处理的实验鱼的即时死亡率或累计死亡率数据差异具有统计学意义( $p < 0.05$ )。作为对照的实验鱼不进行撞击处理(撞击速度为 0),下同。

图 1 撞击速度和角度对草鱼仔鱼撞击后即时死亡率与累计死亡率的影响

Fig. 1 Effects of collision velocity and angle on immediate mortality and cumulative mortality in *C. idella* larvae following collision



注:不同小写字母表示经不同撞击速度处理的实验鱼心率数据差异具有统计学意义( $p < 0.05$ )。

图 2 撞击速度和角度对草鱼仔鱼心率的影响

Fig. 2 Effects of collision velocity and angle on heart rate in *C. idella* larvae

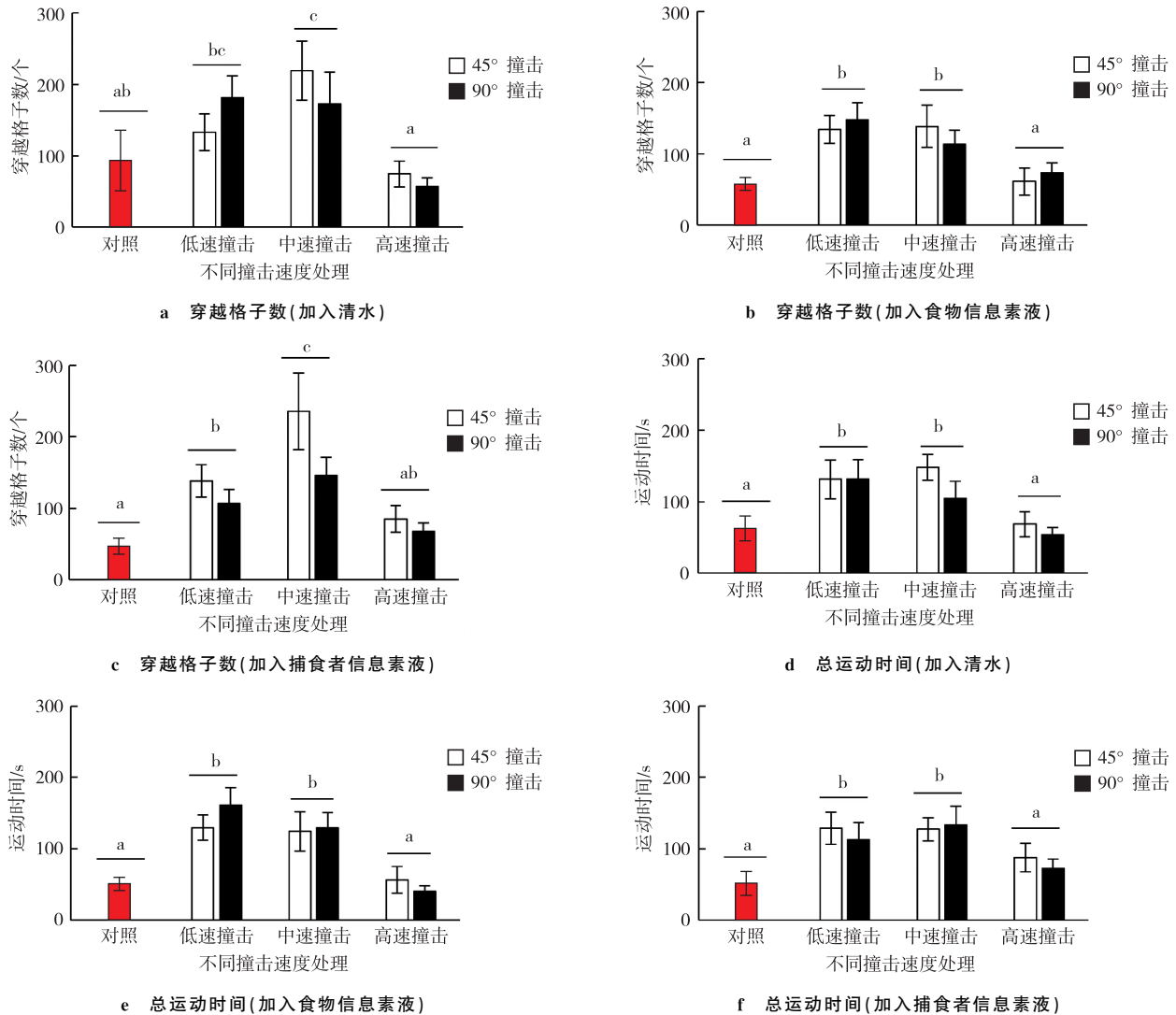
### 2.3 对生长实验中的特定生长率和死亡率的影响

表 1 和图 4a 显示:撞击速度和角度对实验鱼在生长实验中的特定生长率均无统计学意义上的影响,各实验组间数据差异均无统计学意义。由表 1 还可发现,撞击速度和角度对实验鱼在生长实验中的死亡率均有统计学意义上的影响,且 2 个因素存在交互作用( $p < 0.05$ )。图 4b 显示:经低速、中速和高速且 45°倾斜撞击处理的实验鱼在生长实验中的死亡率高于对照组,数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ );经中速和高速且 90°垂直撞击处理的实验鱼在生长实验中的死亡率高于对照组和经低速且 90°垂直撞击处理的实验鱼,数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ );此外,同样是经历低速撞击处理,撞击角度为 45°的实验鱼在生长实验中的死亡率高于撞击角度为 90°的实验鱼,两者数据差异具有统计学意义( $p < 0.05$ )。

## 3 讨论

已有研究表明,石板撞击可能导致漂流性鱼卵卵膜破裂,进而引发鱼卵死亡,且鱼卵孵化率随撞击速度的提高而降低<sup>[6]</sup>。然而,已孵出的早期仔鱼是否也会受到类似影响,以及撞击角度是否在撞击过程中起到一定的调节作用,相关研究依然不足。本研究发现,撞击速度对草鱼仔鱼的即时死亡率和累计死亡率均具有统计学意义

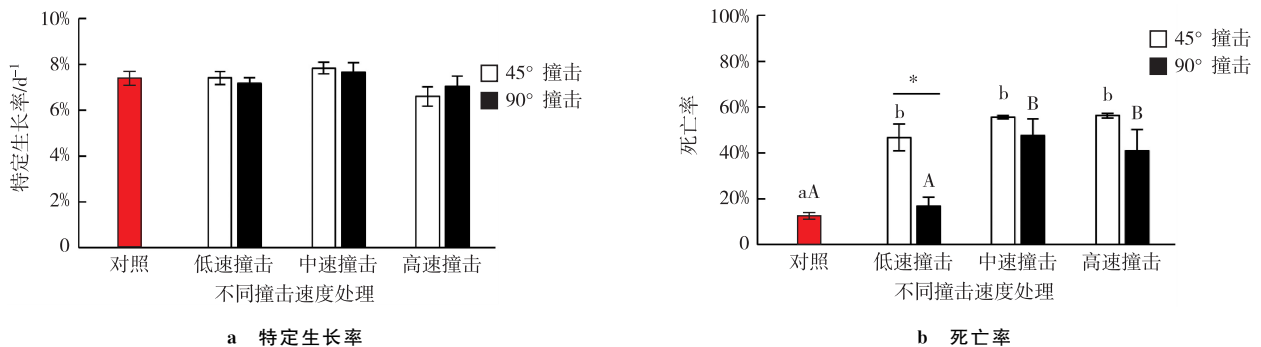
上的影响( $p < 0.05$ ),且这 2 个指标均有随撞击速度的提高而逐渐上升的趋势。值得注意的是,在本研究中,撞击后 24 h 内累计死亡率明显高于即时死亡率,表明有相当数量的实验鱼个体在撞击后并未立即死亡,尤其是经历高速撞击处理的实验鱼;然而这些个体所受损伤可能不可逆,并最终导致它们在撞击后的 24 h 内逐步死亡。



注:不同小写字母表示经不同撞击速度处理的实验鱼的运动行为指标数据差异具有统计学意义( $p < 0.05$ )。

图 3 不同信息素条件下撞击速度和角度对草鱼仔鱼运动行为的影响

Fig. 3 Effects of collision velocity and angle on locomotor behavior of *C. idella* larvae under different chemical cues



注:不同小写和大写字母分别表示在撞击角度为 45°和 90°时,经不同撞击速度处理的实验鱼在生长实验中的死亡率差异具有统计学意义( $p < 0.05$ );“\*”表示在撞击速度相同的情形下,经不同撞击角度处理的实验鱼在生长实验中的死亡率差异具有统计学意义( $p < 0.05$ )。

图 4 撞击速度和角度对草鱼仔鱼在生长实验中的特定生长率和死亡率的影响

Fig. 4 Effects of collision velocity and angle on specific growth rate and mortality of *C. idella* larvae in growth experiments

心率作为反映鱼类生理状态的重要指标,通常与能量代谢水平相关,并在一定程度上可指示个体所受到的胁迫水平<sup>[17]</sup>。有研究表明,斑马鱼(*Danio rerio*)仔鱼的心率随着噪声强度的增加而明显上升,且该变化与体内皮质醇水平呈正相关<sup>[18]</sup>。本研究中,草鱼仔鱼在经历3种不同撞击速度处理后,它们的心率均相对于对照组而言有统计学意义上的升高( $p < 0.05$ ),提示撞击可能诱发草鱼仔鱼的应激反应。该应激反应可能导致动物免疫力下降,而且这种因应激导致的代谢水平提升也可能不利于它们长期存活<sup>[19-21]</sup>,因此本研究中的石板撞击可能对草鱼仔鱼产生持续的负面影响。此外,草鱼仔鱼在经历3种不同撞击速度处理后心率增加也可能与它们的运动水平提升有关,因为与对照组相比,这些草鱼仔鱼整体上表现出更高的运动水平。此外本研究还发现撞击角度对草鱼仔鱼心率的影响并不明显,这可能与草鱼仔鱼体型较小、撞击受力方向受水体缓冲、心率作为整体性生理指标对局部受力差异不敏感等因素有关。

鱼类通过运动行为实现觅食、躲避捕食者并应对环境变化,因此运动行为对鱼类生存具有重要意义<sup>[22-23]</sup>。本研究探究了在不同信息素存在条件下撞击速度和角度对草鱼仔鱼运动行为的影响。结果表明,撞击速度是影响草鱼仔鱼运动行为的主要因素,而撞击角度的影响无统计学意义。同时,与对照组和经高速撞击处理的个体相比,经低速和中速撞击处理的草鱼仔鱼表现出更为活跃的运动行为。这提示后两者对不同信息素的加入具有更高的响应性,并可能因低速或中速撞击导致机体处于一定程度的应激状态,从而增强了自身对外界刺激的敏感性——在应激条件下,动物的神经内分泌系统被激活,从而可能提升它们对环境变化的敏感性和反应性<sup>[24-25]</sup>。值得注意的是,经高速撞击处理的草鱼仔鱼与对照组相比,两者的运动行为无统计学意义上的差异。本研究推测是由于较为剧烈的撞击导致草鱼仔鱼运动能力受损,从而掩盖或削弱了应激状态对运动行为的促进效应。此外,在向实验水体加入清水、食物信息素液和捕食者信息素液后,撞击对草鱼仔鱼运动行为的影响趋势均保持一致,表明信息素类型的差异并未改变撞击效应的基本模式。提示草鱼仔鱼在该阶段可能嗅觉系统尚未发育完善,尚难以准确区分不同信息素的类型<sup>[26]</sup>。

鱼类的生长和生存状态通常被视为衡量环境因子长期作用效果的重要评价指标<sup>[27]</sup>。本研究中,尽管撞击速度和角度对草鱼仔鱼在生长实验中的特定生长率均无统计学意义上的影响,但这2个因素对草鱼仔鱼在生长实验中的死亡率具有统计学意义上的影响( $p < 0.05$ )。这一结果进一步证实,石板撞击对草鱼仔鱼的长期生存有不利影响。死亡率的提高可能部分归因于之前提及的机体生理应激和代谢负担增加,因为仔鱼阶段正处于关键的营养敏感期,额外的能量消耗对仔鱼的生存极为不利<sup>[28-29]</sup>。另一方面,石板撞击可能引起草鱼仔鱼部分的组织器官受损,虽未导致它们立即死亡,但对它们的长期存活不利。此外,相对于90°垂直撞击情形而言,45°倾斜撞击情形下的草鱼仔鱼在生长实验中的死亡率普遍更高;特别是经低速撞击处理的草鱼仔鱼,它们在这2个撞击角度情形下的死亡率差异具有统计学意义( $p < 0.05$ )。该结果可能归因于45°倾斜撞击相较于90°垂直撞击更易诱发非对称机械负荷及局部组织损伤(例如体表擦伤),进而导致个体更易发生继发感染和死亡。值得注意的是,撞击并未导致草鱼仔鱼在生长实验中的特定生长率出现明显下降。这一现象可能源于本研究设计的生长实验周期较长,而草鱼仔鱼期对撞击高度敏感,因撞击产生潜在损伤或强烈应激反应的个体在生长实验期间大多死亡而未能被纳入特定生长率的统计,最终导致不同撞击处理组的该项指标未呈现统计学意义上的变化。

综上所述,石板撞击提升了草鱼仔鱼的死亡率和心率,并增强了它们的运动行为对环境变动的敏感性。相较于90°垂直撞击,45°倾斜撞击对草鱼仔鱼存活的负面影响更为明显。进一步地,本研究结果还揭示出石板撞击对草鱼早期生活史的负面影响具有明显的持续性效应。

#### 参考文献:

- [1] Pavlov D S. The downstream migration of young fishes in rivers: mechanisms and distribution[J]. Folia Zoologica, 1994, 43 (3): 193-208.
- [2] Makrakis M C, Refatti A, Keckeis H, et al. Importance of a turbulent river section below a giant waterfall for fish spawning: indications from drift and dispersion patterns of early life stages[J]. Ecohydrology, 2022, 15: e2356.
- [3] Schiemer F, Keckeis H, Kamler E. The early life history stages of riverine fish: ecophysiological and environmental bottlenecks[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2002, 133 (3): 439-449.
- [4] Huang Z L. Drifting with flow versus self-migrating: how do young anadromous fish move to the sea?[J]. iScience, 2019,

- 19: 772-785.
- [5] Li L Z, Li M H, Zeng R K, et al. High resistance to *Ichthyophthirius multifiliis* in *Percocypris pingi*, an endemic fish in Upper Yangtze River[J]. *Aquaculture*, 2023, 562: 738767.
- [6] Yang W, Zhang X B, Li G, et al. Effects of collision shock on semi-buoyant fish egg hatchings in high-speed streams[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2024, 49: e02785.
- [7] Vasconcelos L P, Alves D C, Agostinho A A, et al. Fish eggs and larvae drifting through hydropower reservoirs: a case study in the Brazilian Amazon[J]. *Hydrobiologia*, 2022, 849 (2): 357-372.
- [8] Jones M, Battaglione S C, Pankhurst P M. Sensitivity of striped trumpeter, *Latris lineata*, embryos to mechanical shock and simulated transport[J]. *Aquaculture International*, 2009, 17 (4): 331-340.
- [9] Prada A F, George A E, Stahlschmidt B H, et al. Influence of turbulence and in-stream structures on the transport and survival of grass carp eggs and larvae at various developmental stages[J]. *Aquatic Sciences*, 2019, 82 (1): 16.
- [10] Martin K L, Bailey K, Moravek C, et al. Taking the plunge: California grunion embryos emerge rapidly with environmentally cued hatching (ECH) [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2011, 51: 1-12.
- [11] Crisp D T. Some effects of application of mechanical shock at varying stages of development upon the survival and hatching time of British salmonid eggs[J]. *Hydrobiologia*, 1990, 194 (1): 57-65.
- [12] Falk-Petersen I B. Comparative organ differentiation during early life stages of marine fish [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2005, 19 (5): 397-412.
- [13] Chen D Q, Xiong F, Wang K, et al. Status of research on Yangtze fish biology and fisheries[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2009, 85 (4): 337-357.
- [14] 王渊洋, 李鸿, 柯森繁, 等. 四大家鱼幼鱼下行行为及流场偏好研究[J]. *水生态学杂志*, 2024, 45 (4): 117-124.  
Wang Yuanyang, Li Hong, Ke Senfan, et al. Swimming behaviours and flow field preferences of the four major Chinese carps during downstream migration[J]. *Journal of Hydroecology*, 2024, 45 (4): 117-124.
- [15] Lin A N, Li Y X, Yan Z, et al. Chemical cues released by predators' consumption of heterospecific prey alter the embryogenesis of zebrafish[J]. *Fishes*, 2024, 9 (3): 95.
- [16] Xia J G, Fu S J, Cao Z D, et al. Ecotoxicological effects of waterborne PFOS exposure on swimming performance and energy expenditure in juvenile goldfish (*Carassius auratus*) [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25 (8): 1672-1679.
- [17] Yousaf M N, Røn Ø, Keitel-Gröner F, et al. Heart rate as an indicator of stress during the critical swimming speed test of farmed Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) [J]. *Journal of Fish Biology*, 2024, 104 (3): 633-646.
- [18] Lara R A, Vasconcelos R O. Impact of noise on development, physiological stress and behavioural patterns in larval zebrafish[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 6615.
- [19] Dhabhar F S. Enhancing versus suppressive effects of stress on immune function: implications for immunoprotection and immunopathology[J]. *Neuroimmunomodulation*, 2009, 16 (5): 300-317.
- [20] Green J A. The heart rate method for estimating metabolic rate: review and recommendations [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2011, 158 (3): 287-304.
- [21] Boyce A J, Mouton J C, Lloyd P, et al. Metabolic rate is negatively linked to adult survival but does not explain latitudinal differences in songbirds[J]. *Ecology Letters*, 2020, 23 (4): 642-652.
- [22] Fu C, Yi L C, Wu W P, et al. Qingbo, a common cyprinid fish, responds diversely in behavior and locomotion to predators with different hunting modes[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2021, 47 (5): 1415-1427.
- [23] 付成, 曹振东, 付世建. 温度和饥饿对鲤鱼幼鱼静止代谢率及自发运动的影响[J]. *动物学杂志*, 2012, 47 (2): 85-90.  
Fu Cheng, Cao Zhendong, Fu Shijian. The influence of temperature and starvation on resting metabolic rate and spontaneous activity in juvenile *Cyprinus carpio*[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2012, 47 (2): 85-90.
- [24] Thaker M, Lima S L, Hews D K. Acute corticosterone elevation enhances antipredator behaviors in male tree lizard morphs[J]. *Hormones and Behavior*, 2009, 56 (1): 51-57.
- [25] Barton B A. Stress in fishes: a diversity of responses with particular reference to changes in circulating corticosteroids[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2002, 42 (3): 517-525.
- [26] Kasumyan A O. The olfactory system in fish: structure, function, and role in behavior[J]. *Journal of Ichthyology*, 2004, 44 (S2): S180-S223.
- [27] Canosa L F, Bertucci J I. The effect of environmental stressors on growth in fish and its endocrine control[J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2023, 14: 1109461.

- [28] McMahon S J, Munday P L, Donelson J M. Energy use, growth and survival of coral reef snapper larvae reared at elevated temperatures[J]. *Coral Reefs*, 2023, 42 (1): 31-42.
- [29] Von Herbing H I. Energetic costs of stress in developing fishes: quantifying allostasis and allostatic load[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2026, 64 (3): 1019-1033.

## Animal Sciences

### Effects of Simulated Mechanical Collision on Physiological and Locomotor Performance of *Ctenopharyngodon idella* Larvae

ZHANG Zhiming<sup>1</sup>, YANG Xin<sup>2</sup>, LANG Ruiqi<sup>2</sup>, HUANG Hui<sup>3</sup>, GAO Le<sup>2</sup>,  
CHEN Qiliang<sup>2</sup>, FU Shijian<sup>2</sup>, XIONG Mantang<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>4</sup>, LI Xing<sup>4</sup>, FU Cheng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem,  
Ministry of Water Resources/Hubei Engineering Research Center of Hydroecology Protection and Restoration,

Institute of Hydroecology, MWR & CAS, Wuhan 430079; 2. Chongqing Key Laboratory of Conservation and Utilization of  
Freshwater Fishes, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 3. Chongqing Southern Sheatfish Original Breeding Farm,  
Chongqing 401520; 4. Chongqing-Wanzhou Railway Co., Ltd., Chongqing 400014, China)

**Abstract:** To investigate the effects of mechanical collision on the early life stages of fish that produce drifting eggs, this study used *Ctenopharyngodon idella* larvae as the research subject. Simulated stone plate impacts were conducted at different velocities (1.4, 3.1, and 4.4 m · s<sup>-1</sup>, designated as low, medium, and high speeds, respectively) and angles (45° and 90°). A control group receiving no impact treatment was also established. The mortality rate, heart rate, locomotor behavior, and growth and survival of the experimental fish were measured. The results show that: 1) Collision velocity significantly affected the immediate mortality and the cumulative mortality within 24 h after collision treatment ( $p < 0.05$ ), and both indices increased with increasing collision velocity. 2) The heart rates of fish 24 h after treatments at all three collision velocities were significantly higher than those of the control group ( $p < 0.05$ ). 3) At 24 h after collision treatment, clean water, food pheromone solution, or predator pheromone solution was added separately to the test water. Under all three test conditions, the experimental fish subjected to low- and medium-velocity impact treatments exhibited significantly higher than those of the control group and the high-velocity collision group ( $p < 0.05$ ), whereas no significant differences were detected between the latter two groups. 4) Stone plate impact had no significant effect on the specific growth rate during the 14-day growth experiment initiated 24 h after collision treatment, but it significantly affected mortality during this period ( $p < 0.05$ ). Moreover, mortality was higher under the 45° oblique collision than under the 90° vertical collision. These results suggest that stone plate impact may induce stress responses in grass carp larvae and increase the sensitivity of their locomotor behavior to external stimuli, while high-velocity collisions may impair their locomotor capacity. Overall, stone plate impact exerts persistent negative effects on grass carp larvae.

**Keywords:** mechanical collision; pelagic eggs; mortality; locomotor behavior; growth rate

(责任编辑 方 兴)