

## 5 月龄、7 月龄中华鲟子二代光照偏好性研究

王 恒<sup>1,2</sup>, 危起伟<sup>1,2,3\*</sup>, 李 伟<sup>1,2</sup>, 刘 猛<sup>2</sup>,  
李 雷<sup>1,2</sup>, 杜 浩<sup>1,2,3</sup>, 李罗新<sup>2,3</sup>

(1. 华中农业大学水产学院, 湖北 武汉 430070;

2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223;

3. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 江苏 无锡 214081)

**摘要:** 为获取全人工繁殖中华鲟后代的光照偏好及其可能适应人工环境的遗传行为改变, 通过黑白底质颜色选择、趋光性和最适光照选择实验, 并采用个体与群体实验相结合的方式对 5 月龄、7 月龄中华鲟子二代幼鱼光照偏好进行了研究。黑白底质实验结果表明, 5 月龄和 7 月龄幼鱼偏好白色底质。趋光性个体实验结果表明, 5 月龄对光亮区 (200 ~ 250 lx) 的选择较为显著 ( $P < 0.05$ ), 7 月龄对过渡区 (20 ~ 50 lx) 选择较为显著 ( $P < 0.05$ ); 群体实验结果表明, 5 月龄和 7 月龄幼鱼均对过渡区 (20 ~ 50 lx) 的选择较为显著 ( $P < 0.05$ ), 此现象可能与“信号—适应”假说和最适光照范围有关。最适光照实验结果表明, 5 月龄幼鱼对 45 ~ 135 lx 照度区选择显著高于其他区域 ( $P < 0.05$ ); 7 月龄幼鱼较多地选择 23 ~ 202 lx 照度区, 表明随着年龄增大, 中华鲟子二代幼鱼对光照的可接受范围变大。研究表明, 中华鲟子二代 5 月龄和 7 月龄幼鱼偏好白色底质, 最适照度为 20 ~ 200 lx。实验结果可以为中华鲟子二代人工养殖和放流提供参考。

**关键词:** 中华鲟子二代; 幼鱼; 黑白底质颜色选择; 趋光性; 最适光照; 鱼类行为

**中图分类号:** S 965.2

**文献标志码:** A

中华鲟 (*Acipenser sinensis*) 为国家一级保护动物, 近年来由于葛洲坝、三峡大坝等水利工程建设 and 环境污染等原因, 其产卵场和野生种群数量受到严重威胁<sup>[1-3]</sup>, 2010 年被 IUCN 列为极危 (CR) 等级。在 1981 年, 研究人员提出用人工繁殖放流补充中华鲟资源量来缓解葛洲坝水利枢纽工程对中华鲟的影响<sup>[4]</sup>。1983 年 11 月, 中华鲟首次突破葛洲坝下游“半人工繁殖”<sup>[5]</sup>, 1984 年开始对中华鲟鱼苗进行人工放流<sup>[6]</sup>, 但人工繁殖放流的数量无法完全弥补自然繁殖的不足<sup>[7]</sup>, 中华鲟野生群体数量仍在衰减, 长江中华鲟群体呈现出明显的高龄化现象<sup>[8]</sup>。中华鲟全人工繁殖的突破<sup>[9]</sup>, 为人工增殖放流恢复中华鲟野生种群带来了转机。

中华鲟行为方面的研究多集中在野生和子一

代个体, 庄平等<sup>[10-11]</sup>首次在洄游、趋光性和栖息水深选择等方面对子一代中华鲟仔稚鱼进行了系统的研究; 顾孝连等<sup>[12-14]</sup>对长江口野生幼鱼底质类型选择、趋光性、藏匿性等做了报道, 填补了中华鲟幼鱼行为学研究的空白; 柴毅等<sup>[15-16]</sup>研究了中华鲟感觉器官的早期发育, 主要侧重视觉的发育和早期趋光行为; 何绪刚<sup>[17]</sup>得出了环境盐度的持续刺激可改变中华鲟幼鱼盐度喜好的结论。其中, 大部分研究涉及光照, 体现了光照选择在鱼类行为中的重要性。关于子二代幼鱼的研究仅张建明等<sup>[18]</sup>报道了慢性拥挤胁迫对子二代中华鲟幼鱼生长、摄食行为的影响, 中华鲟子二代幼鱼的研究比较匮乏。

被饲养动物经历若干世代后, 一些遗传性的

收稿日期: 2014-02-19 修回日期: 2014-03-23

资助项目: 国家自然科学基金 (31172413); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203086)

通信作者: 危起伟, E-mail: weiqw@yfi.ac.cn

行为可能丢失或改变<sup>[19-26]</sup>,世代间隔较长的中华鲟可能在子二代就发生细微改变。目前已经发现,人工养殖中华鲟子一代在性成熟雌性个体大小方面产生了显著改变,仅为长江野生雌性最小成熟个体体质量的40%~50%,这与养殖空间不足有关<sup>[9]</sup>。因此,子二代个体存在较大可能产生适应人工养殖的环境偏好改变。本研究从光照偏好角度进行探索,依据野生中华鲟入海时间(5月龄处于纯淡水环境,7月龄进入长江口处于淡咸水环境<sup>[27-29]</sup>)可能带来的月龄差异,选择5月龄、7月龄中华鲟子二代进行研究,通过黑白底质颜色选择、趋光性和最适光照3个实验相互结合来探讨其对光照强度的偏好,为子二代幼鱼人工养殖环境优化和后代演化提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验用鱼

实验鱼为长江水产研究所荆州太湖中华鲟保育和增殖放流中心2012年11月全人工繁殖的中华鲟子二代。5月龄、7月龄实验阶段各随机抽取20尾用于实验,实验鱼在实验前10天放入实验装置进行适应,并测量体长和体质量,减少实验时的应激反应,减少误差。5月龄体长为 $(28.7 \pm 1.9)$  cm,叉长为 $(30.6 \pm 2.1)$  cm,体质量为 $(152.0 \pm 41.8)$  g;7月龄体长为 $(43.0 \pm 3.1)$  cm,叉长为 $(46.0 \pm 3.2)$  cm,体质量为 $(536.7 \pm 127.0)$  g。

实验鱼每天早、中、晚3次投喂鲟鱼饲料。实验场所为室内,自然光周期,水下照度为 $0 \sim (100 \pm 30)$  lx,水源为经曝气、过滤的地下水,实验环境和实验前人工养殖环境一致。实验期间每2天测一次水温,5月龄阶段为 $17.8 \sim 19.1$  °C,7月龄阶段为 $19.2 \sim 20.2$  °C。实时观察实验鱼适应期摄食情况。实验鱼从第2天起开始摄食,昼夜摄食行为强度相似;第5天起摄食行为达到最大,摄食行为明显,基本恢复到实验前状态,可以认为已经完全适应实验环境。实验鱼在实验开始前2小时内不喂食,避免饱腹对实验产生干扰。

### 1.2 实验装置

**实验水槽** 实验水槽为水泥池,规格为 $3.6 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ (长×宽×高),水深33 cm,以2块隔板分成面积相等的3个区域( $2.4 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ ),养殖区、实验区和暂养区(图1)。隔板为双层铁网片,外围包裹100目尼龙纱网并嵌入卡槽,仅水流能通过,投饵区域远离实验

区并靠近出水口,及时清理残饵,防止气味扩散影响实验鱼选择。养殖区为实验鱼适应期和实验期养殖区域;实验区为主要实验区域,正上方有红外摄像机进行录像记录;暂养区为防止重复抽样的实验鱼暂养区域。进水口在暂养区右上方边缘,垂直向下水流,将其控制在中等水流时,整个水体基本处于无流速状态。水池采用24 h不间断持续供水,保证溶氧的充足和水质优良。此设计使实验鱼养殖和实验期间达到同水同流、周边环境相似,相比将养殖和实验水槽分开,应激性更小,环境适应时间更短。实验地点为单独实验室,减少环境干扰。

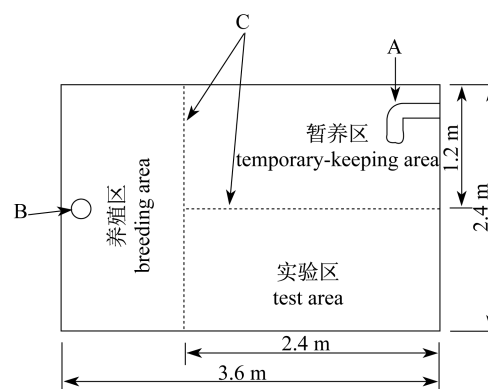


图1 实验水槽俯视图

A. 进水管(垂直水流); B. 出水口; C. 隔片

Fig. 1 Top view of test tank

A. inlet (vertical flow); B. outlet; C. septa

**黑白底质选择实验装置** 在实验区用黑色、白色瓷砖铺设成左右面积相等的2个区域<sup>[10,12]</sup>(图2)。每组实验结束后更换黑白底质位置,消除位置适应带来的误差。

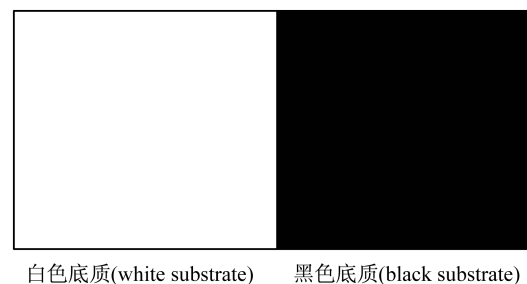


图2 黑白底质选择实验示意图

Fig. 2 Sketch map for substrate color preference test

**趋光性实验装置** 在实验区一端以2只45 W白炽灯提供光源,以遮光板对光源遮挡,使实验区形成面积相等的3个不同照度区域<sup>[11,13]</sup>,用水

下照度计 ZDS-10 测照度(上海嘉定学联仪表厂,量程 0 ~ 10 000 lx,精确度 0.01 lx),暗区为 1 ~ 8 lx,过渡区为 20 ~ 50 lx,亮区为 180 ~ 250 lx(图 3)。每组实验后调换亮区暗区位置,消除误差。

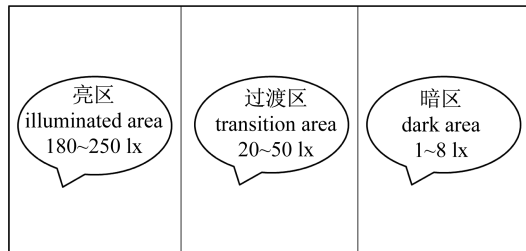


图 3 趋光性实验示意图

Fig. 3 Sketch map for illumination intensity preference test

**最适光照实验装置** 与趋光性实验装置类似,去掉遮光板,以水平照明方式形成 10 ~ 250 lx 的均匀光照度梯度。通过在水槽正上方平行悬挂细棉线,使其在录像画面中形成 6 个面积相等的照度区,以棉线正下方对应界线的平均照度为区域间分界,从亮到暗为 202 ~ 250 lx, 135 ~ 202 lx, 74 ~ 135 lx, 45 ~ 74 lx, 23 ~ 45 lx, 10 ~ 23 lx, 记为 A ~ F 区(图 4),每组实验后调换光源位置。分区仅为统计实验鱼在整个梯度中分布的范围,分区的多少不影响实验鱼的选择,只影响统计结果的可操作性和精确性。

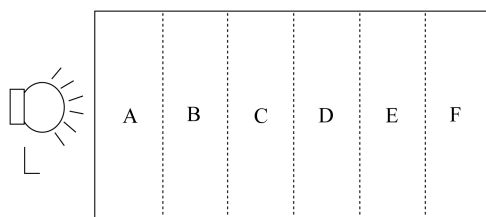


图 4 最适光照实验示意图

L. 光源; A. 202 ~ 250 lx; B. 135 ~ 202 lx; C. 74 ~ 135 lx; D. 45 ~ 74 lx; E. 23 ~ 45 lx; F. 10 ~ 23 lx

Fig. 4 Sketch map for the optimum illumination test

L. light source; A. 202 ~ 250 lx; B. 135 ~ 202 lx; C. 74 ~ 135 lx; D. 45 ~ 74 lx; E. 23 ~ 45 lx; F. 10 ~ 23 lx

### 1.3 实验方法

**黑白底质选择实验** 实验分别对 5 月龄、7 月龄鱼分组进行个体实验和群体实验,每个月龄组的实验鱼随机分为 2 组。5 月龄时,随机选择 10 尾进行个体实验,并作为第 1 组实验鱼,每次从实验水槽中央(黑白底质交界处)用捞网放入 1 尾鱼,适应 5 min 后,利用红外摄像机录像统计随

后 5 min 内实验鱼在黑白区域的停留时间,实验结束后把鱼放入暂养区。在不对调黑白底质的情况下,剩余 10 尾进行群体实验,并作为第 2 组实验鱼。将 10 尾实验鱼同时放入实验水槽,适应 1 h 后,每 0.5 小时记录 1 次黑白区域内的幼鱼数量。第 2 组鱼的群体实验结束后,对调黑白位置,开始进行第 1 组实验鱼的群体实验,之后不对调黑白位置进行第 2 组实验鱼的个体实验。个体实验均在白天进行,实验前后进行照度测定。群体实验增加了夜晚无光状态下(照度 < 0.1 lx)的分布作为对比,其中一组从白天到夜晚连续观察,另一组从夜晚到白天连续观察,由于中华鲟子二代幼鱼昼夜摄食强度相同,与野生中华鲟幼鱼一致<sup>[12]</sup>,可排除昼夜节律对实验的干扰。实验期间,实验人员放完鱼后远离实验场所,避免人为干扰。7 月龄组实验方法与 5 月龄组实验方法相同。

本实验选择的设计方法,使单组鱼的个体实验和群体实验的黑白位置条件相反,2 组间个体和群体实验间的黑白位置也相反,且单组个体与群体实验相隔 1 d,符合行为学实验要求,避免了实验鱼产生位置适应影响结果<sup>[30]</sup>,也解决了实验样本获得困难的问题。

**趋光性实验** 实验与黑白底质实验类似,鱼从过渡区中央放入水槽<sup>[13]</sup>。由于 7 月龄中华鲟子二代幼鱼较大,7 月龄群体实验每组从 10 尾中抽取 6 尾进行实验。

**最适光照实验** 和趋光性实验类似,只去掉了遮光板,照度均匀分布。实验只进行个体实验,每组随机选择 6 尾分别从 6 个照度区放入实验水槽,适应 5 min 后,利用红外摄像机记录 5 min 内实验鱼在每个光照度区的停留时间。一组实验结束后对调光源位置进行下一组实验。

### 1.4 数据统计

所有实验以实验鱼胸鳍及胸鳍以上部分全部进入某区域为标准,表示幼鱼处于该区域,开始进行计时或计数。

**黑白底质选择实验** 个体实验时,通过录像回放统计实验幼鱼在白色(或黑色)底质中活动的时间百分比,将百分比进行反正弦变换(实际进行正态性检验和方差齐性检验,符合正态的不做反正弦变换),求其 95% 置信区间(confidence interval, CI),如果此区间不包含 50%,则对此选择具有显

著性偏好,反之偏好不显著;群体实验时,同样通过数量百分比的0.95 CI判断偏好性<sup>[12]</sup>。对不同月龄间差异显著性使用非参数方法 Mann-Whitney Test 检验和 Duncan 多重比较结合,显著水平  $P = 0.05$ 。所有实验数据使用 SPSS 19.0 进行统计分析。

**趋光性实验** 个体实验通过录像统计幼鱼在3个区域内的活动时间百分比,群体实验统计数量百分比。用非参数方法统计 Kruskal-Wallis Test 检验各区域内活动时间和数量百分比差异显著性<sup>[13]</sup>,利用单因素方差分析(One-Way ANOVA)中 Duncan 多重比较检验两两区域间的差异显著性。

**最适光照实验** 通过录像统计单尾鱼在某个照度区分布时间占总实验时间(5 min)的百分比,作为在该区的停留频率,利用 Duncan 氏多重比较检验不同照度区分布时间的差异显著性,得出6个区中实验鱼最偏好的区域,此区域的照度范围即为实验鱼的最适照度区间。分区越多,最适照度范围越精确,但考虑到以实验鱼胸鳍及胸鳍以上部分全部进入区域为统计标准,分区的大小必须大于实验鱼胸鳍至头部的长度(大约1/3体长),综合考虑,本研究设立6个区。

## 2 结果

### 2.1 黑白底质的选择结果

个体实验中,实验照度为76~113 lx(5月龄)和69~103 lx(7月龄),5月龄中华鲟子二代幼鱼在白色和黑色底质的时间百分比分别为(79.2% ± 24.5%)和(20.8% ± 24.5%),7月龄为(63.5% ± 22.1%)和(36.5% ± 22.1%);5月龄幼鱼在白色底质中时间百分比平均值的0.95 CI为(72.9%~95.1%),7月龄为(53.7%~76.4%),均不含50%(图5),表明5月龄和7月龄中华鲟子二代幼鱼个体均对白色底质有显著性偏好。群体实验进行白天有光和夜晚无光对比,白天照度为80~120 lx(5月龄)和71~112 lx(7月龄),5月龄中华鲟子二代幼鱼在白色和黑色底质的数量百分比分别为(67.5% ± 20.0%)和(32.5% ± 20.0%),7月龄为(60.0% ± 18.6%)和(40.0% ± 18.6%);5月龄幼鱼在白色底质中数量百分比平均值的0.95 CI为58.2%~76.8%,7月龄为51.3%~68.7%,均不包含50%(图6),表

明5月龄和7月龄子二代幼鱼群体对白色底质同样具有显著偏好性,与个体一致;夜晚对比群体实验中,无光(照度 < 0.1 lx)状态下,5月龄中华鲟子二代在白色和黑色底质中的数量百分比分别为(56.0% ± 10.7%)和(44.0% ± 10.7%),7月龄为(54.0% ± 17.6%)和(46.0% ± 17.6%);5月龄幼鱼在白色底质中数量百分比平均数的0.95 CI为48.3%~63.7%,7月龄为45.8%~62.2%,均包含50%(图7),表明5月龄和7月龄子二代幼鱼群体在极低照度下对黑白底质没有显著偏好性。

对5月龄和7月龄幼鱼个体在白色底质中的时间百分比进行 Mann-Whitney Test 非参数检验,有显著性差异( $P = 0.016$ ),说明7月龄对白色底质的偏好低于5月龄。对5月龄和7月龄子二代群体在白天处于白色底质的数量百分比进行 Mann-Whitney Test 非参数检验,无显著性差异( $P = 0.167$ ),但从数据上看,7月龄对白色底质的选择百分比仍小于5月龄。综上所述,5月龄和7月龄中华鲟子二代皆偏好白色底质,但7月龄的偏好性已经开始减弱。在夜晚进行的群体无光对比实验中,利用 Duncan 氏多重比较,5月龄与7月龄间对黑白底质的选择均不存在显著偏好( $P > 0.05$ )。

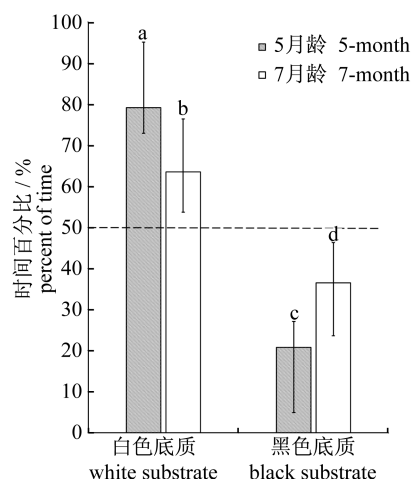


图5 中华鲟子二代幼鱼对底质颜色的选择(个体实验)

柱状图表示时间(数量)百分比平均数,误差线表示95% CI。柱状图上字母相同表示差异不显著;字母不同表示差异显著,下同

Fig. 5 Preference for substrate color of juvenile *F<sub>2</sub> A. sinensis* (individual test)

Bars represent mean percent of time (number), error bar means 95% CI. Bars with the same letter are not significant difference, whereas are significant difference, the same below

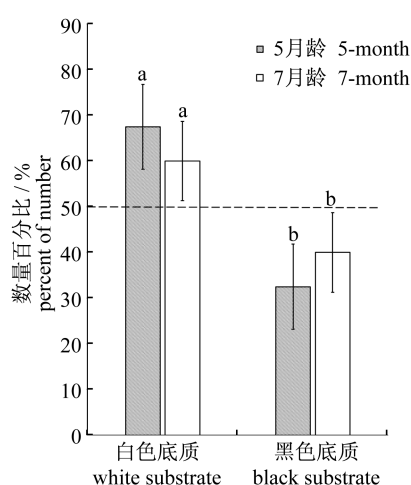


图 6 中华鲟子二代幼鱼对底质颜色的选择  
(光亮条件下群体实验)

Fig. 6 Preference for substrate color of  
juvenile *F<sub>2</sub> A. sinensis*

(population test under illuminated situation)

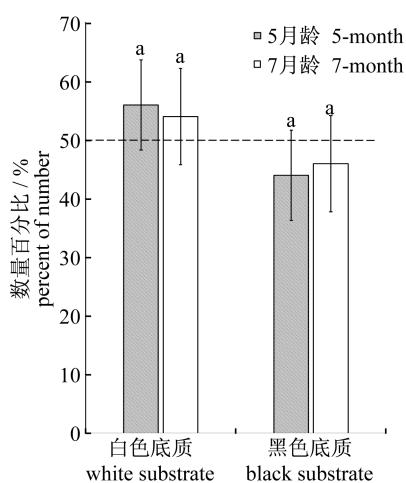


图 7 中华鲟子二代幼鱼对底质颜色的选择  
(黑暗条件下群体实验)

Fig. 7 Preference for substrate color of  
juvenile *F<sub>2</sub> A. sinensis*

(population test under dark situation)

## 2.2 趋光性的选择结果

个体实验中,5 月龄中华鲟子二代幼鱼在 3 个区域(亮区、过渡区、暗区)内的时间百分比依次为(51.7% ± 31.7%)、(36.0% ± 23.3%)和(12.3% ± 13.4%),呈显著性差异( $P < 0.05$ ),幼鱼偏好亮区;7 月龄依次为(27.6% ± 18.9%)、(44.2% ± 16.3%)和(28.1% ± 23.6%),幼鱼个体在过渡区的时间百分比多于亮区和暗区,且差异显

著( $P < 0.05$ ),亮区和暗区间无显著性差异( $P > 0.05$ )(图 8)。群体实验中,5 月龄中华鲟子二代幼鱼在 3 个区域(亮区、过渡区、暗区)内的时间百分比依次为(25.0% ± 11.5%)、(45.0% ± 12.4%)和(30.0% ± 12.1%),7 月龄依次为(24.2% ± 19.8%)、(44.1% ± 20.4%)和(31.7% ± 17.0%)(图 9),2 个月龄幼鱼在过渡区的时间均多于亮区和暗区,且差异显著( $P < 0.05$ ),亮区和暗区间无显著性差异( $P > 0.05$ )(图 9)。

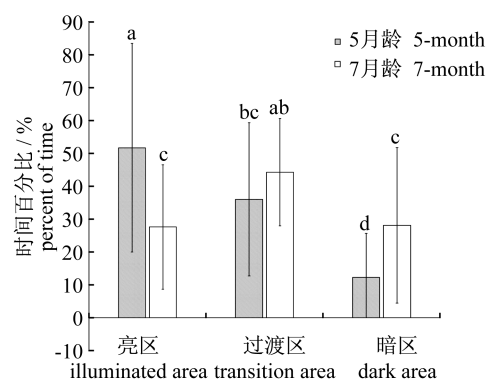


图 8 中华鲟子二代幼鱼趋光性(个体实验)

Fig. 8 Preference for illumination intensity of  
juvenile *F<sub>2</sub> A. sinensis* (individual test)

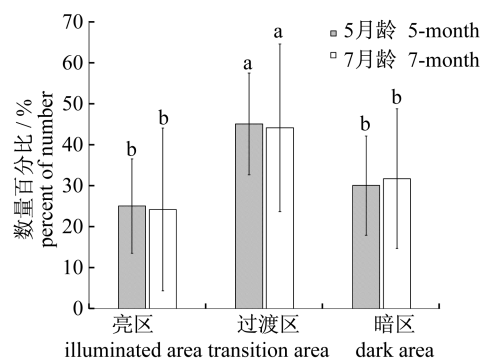


图 9 中华鲟子二代幼鱼趋光性(群体实验)

Fig. 9 Preference for illumination intensity of  
juvenile *F<sub>2</sub> A. sinensis* (population test)

## 2.3 最适光照的选择结果

5 月龄中华鲟子二代幼鱼在 6 个光梯度区的时间百分比分别为(5.8% ± 6.4%)(A 区), (17.1% ± 10.2%)(B 区), (30.4% ± 11.7%)(C 区), (25.2% ± 8.6%)(D 区), (13.6% ± 11.2%)(E 区), (7.9% ± 9.6%)(F 区)(图 10)。结果表明中华鲟子二代幼鱼在 C 区的时间最多,差异显著( $P < 0.05$ ),D 区和 C 区的时间百

分比相近,无显著性差异( $P > 0.05$ ),且多于其他区。7月龄中华鲟子二代在6个区的时间百分比为(11.1% ± 9.7%)(A区);(19.1% ± 11.9%)(B区);(23.2% ± 9.3%)(C区);(21.7% ± 10.3%)(D区);(18.5% ± 12.2%)(E区);(6.4% ± 6.6%)(F区)(图10)。与5月龄相同,7月龄子二代在C区的时间最多,差异显著( $P < 0.05$ ),但其在B~E区的时间百分比无显著性差异( $P > 0.05$ )。相比5月龄,7月龄中华鲟子二代适合照度范围更广。

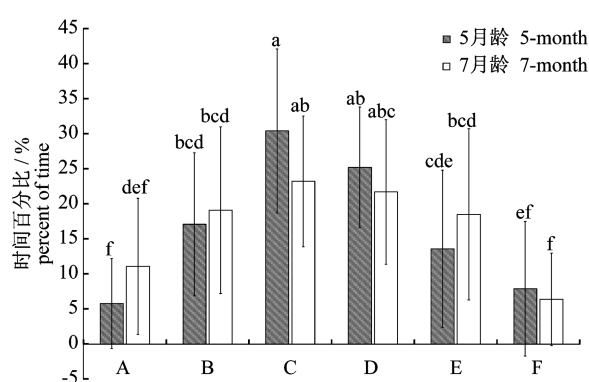


图10 中华鲟子二代幼鱼最适光照

Fig. 10 Preference for the optimum illumination of juvenile  $F_2$  *A. sinensis*

A. 202 - 250 lx; B. 135 - 202 lx; C. 74 - 135 lx; D. 45 - 74 lx; E. 23 - 45 lx; F. 10 - 23 lx

### 3 讨论

#### 3.1 中华鲟子二代幼鱼个体、群体间和不同月龄间的光照偏好差异

除了5月龄趋光性实验,其他实验个体、群体间的结果保持一致。本实验结果表明,5月龄中华鲟子二代个体偏好亮区,而群体偏好过渡区,群体可能干扰了幼鱼对偏好光照区域的选择。结合最适照度实验的结果,5月龄中华鲟子二代偏好45~135 lx照度区域,处于过渡区和亮区交界处。根据“信号—适应”假说,光照在开始阶段对鱼具有食物和集群的生物学信号意义,一段时间后因为视觉对光的适应更趋向强光区,最后在强光刺激性进行绕光源旋转的圆周运动<sup>[30-31]</sup>。群体实验的幼鱼暴露在光源下的时间长于个体实验,更容易产生实验鱼在光亮区的圆周运动。亮区进行旋转运动的幼鱼阻挡了其他幼鱼进入亮区,迫使其他幼鱼更多停留在过渡区中的适宜照度区域。

野生中华鲟幼鱼群体相比于个体,其趋光程度也有所下降<sup>[13]</sup>,但未出现如本实验群体转变为趋向过渡区的情况,可能是其趋光程度较强,最适照度区不覆盖过渡区。个体和群体选择不同的现象在墨西哥湾鲟(*Acipenser oxyrinchus desotoi*)<sup>[32]</sup>中出现过,单尾墨西哥湾鲟选择卵石,而群体可能由于种内竞争回避卵石或者无选择。

不同月龄实验中,7月龄对白色底质的选择比5月龄有所下降,光照选择范围更宽泛。5月龄野生中华鲟处于长江中下游,为纯淡水环境,7月龄野生中华鲟已经来到长江口,处于咸淡水环境,9月龄左右开始入海进入咸水环境<sup>[27-29]</sup>。5月龄和7月龄野生中华鲟的栖息地环境改变巨大,趋性行为具有遗传性<sup>[33-34]</sup>,理论上会使5月龄和7月龄的中华鲟子二代幼鱼产生环境偏好的差异。光照偏好的可接受范围变广,说明从5月龄到7月龄,光照对中华鲟子二代的限制越来越小,幼鱼可能正从依赖视觉捕食向依赖其他器官捕食转变。

#### 3.2 中华鲟子二代幼鱼与野生中华鲟幼鱼的光照偏好差异

本实验相关野生数据仅有长江口中华鲟幼鱼(7月龄左右)的行为学研究<sup>[12-14]</sup>。在黑白底质选择的结果上,本实验与野生数据大致相同,只有在低照度下(照度 < 0.1 lx),中华鲟子二代幼鱼对黑白底质无显著选择性,而长江口中华鲟幼鱼在高照度(124.0~146.0 lx)和低照度(1.2~1.4 lx)下都显著地选择白色底质<sup>[12]</sup>,原因可能是低照度的选择不同。本实验设计的低照度极低,不足顾孝连<sup>[12]</sup>设计的10%,在这种照度条件下可能无法分辨黑白。低照度下总体黑白选择虽然无显著差异,但白色底质的选择仍稍多于黑色,这是因为其中一组是从有光到无光进行的连续实验,在有光实验阶段对白色区域产生了一定的位置适应<sup>[30]</sup>,间接证明了中华鲟子二代幼鱼对白色底质的选择。

趋光性实验中,长江口7月龄中华鲟幼鱼显著趋光<sup>[13]</sup>,本研究结果表明7月龄子二代幼鱼更趋向于过渡区,趋光性较弱,但5月龄是趋光的。产生这种差异的原因可能是7月龄中华鲟不依靠视觉捕食,对光照的偏好更容易受环境影响,子二代中华鲟对人工养殖光照环境产生了适应性改变。根据梁旭方<sup>[35]</sup>和庄平等<sup>[36]</sup>研究,长江口中

华鲟幼鱼、1 龄中华鲟及成年中华鲟主要依靠电感觉器官、嗅觉和触觉进行觅食过程,视觉作用不是很大。顾孝连等<sup>[13]</sup>虽然得出中华鲟幼鱼显著趋光,但同时发现光照对摄食强度无影响,中华鲟幼鱼的捕食效率与光照强度无关,幼鱼不依靠视觉捕食,光线更多作为幼鱼寻找食物丰富的栖息地的信号,信号意义大于利用视觉捕食的意义。本实验鱼所处的养殖环境照度为 10 ~ 100 lx,此照度成为食物丰富信号,决定了本实验鱼对过渡区的偏好。从月龄间差异可以推断,5 月龄到 7 月龄可能是中华鲟视觉作用发生转变的重要时期。

中华鲟子二代来自 10 年以上人工养殖状态下的子一代,在人为条件影响下,子一代中华鲟很可能产生适应人工养殖环境的变异,并遗传给后代,使子二代某些野外生存所必需的遗传行为发生改变,如洄游、避敌和捕食等。Darwin<sup>[37]</sup>在物种起源第一章就提到了家养动物的大量变异情况。这种现象在水生动物也广泛存在,有正面的变异,如抗病性增强,环境适应力增强<sup>[22-23]</sup>,也有生长性能下降、遗传变异水平降低的负面变异<sup>[19,21]</sup>。本实验的结果与野生中华鲟幼鱼存在一定的偏差,已经产生了微小的变异,可能是暂时的适应,未对遗传行为产生影响,也可能已经产生遗传变异,还需要进一步研究证明。

### 3.3 中华鲟子二代幼鱼光照偏好改变的意义

中华鲟子二代幼鱼光照偏好相比野生幼鱼,在 7 月龄已经有所改变,结合中华鲟性成熟个体的小型化趋势<sup>[9]</sup>,人工养殖已经对中华鲟的生物学特征产生了影响。这种改变在子二代放流后可能会对野生种群的遗传多样性产生冲击。因此,建议谨慎放流中华鲟子二代。月龄间的差异研究表明,随着年龄的增长,中华鲟子二代幼鱼对光照的可接受范围变大。7 月龄最适照度范围比较宽泛,建议从 7 月龄以后开始进行放流或转移至室外养殖,以获得更好效果。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Wei Q W, Ke F E, Zhang J M, *et al.* Biology, fisheries and conservation of sturgeons and paddlefish in China [ J ]. *Developments in Environmental Biology of Fishes*, 1997, 48(1-4): 241-255.
- [ 2 ] Wei Q W, Chen X H, Yang D G, *et al.* Variations in spawning stock structure of *Acipenser sinensis* within 24 years since damming of Gezhouba Dam [ J ]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(4): 452-457. [ 危起伟, 陈细华, 杨德国, 等. 葛洲坝截流 24 年来中华鲟产卵群体结构的变化. *中国水产科学*, 2005, 12(4): 452-457. ]
- [ 3 ] Wang C Y, Kynard B, Wei Q W, *et al.* Spatial distribution and habitat suitability indices for non-spawning and spawning adult Chinese sturgeons below Gezhouba Dam, Yangtze River; Effects of river alterations [ J ]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2013, 29(1): 31-40.
- [ 4 ] Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences. Suggestion of species and measures to save the fish related to Gezhouba Dam water conservancy in Yangtze River [ J ]. *China Water Resources*, 1981(3): 25-29. [ 中国科学院水生生物研究所. 关于长江葛洲坝水利枢纽救鱼对象和措施的意见. *中国水利*, 1981(3): 25-29. ]
- [ 5 ] Fu C J, Liu X T, Lu D C, *et al.* The artificial captivity and estrualization test of Chinese sturgeon [ J ]. *Freshwater Fisheries*, 1983(4): 38-40. [ 傅朝君, 刘宪亭, 鲁大椿, 等. 中华鲟人工蓄养和催情试验. *淡水渔业*, 1983(4): 38-40. ]
- [ 6 ] Fu C J, Liu X T, Lu D C, *et al.* The artificial propagation of Chinese sturgeon lowers the Gezhouba Dam [ J ]. *Freshwater Fisheries*, 1985(1): 1-5. [ 傅朝君, 刘宪亭, 鲁大椿, 等. 葛洲坝下中华鲟人工繁殖. *淡水渔业*, 1985(1): 1-5. ]
- [ 7 ] Chang J B. Structure and dynamics of the spawning stock of Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, in the Yangtze River [ D ]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 1999. [ 常剑波. 长江中华鲟繁殖群体结构特征和数量变动趋势研究. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 1999. ]
- [ 8 ] Yi J F, Tang D M, Liu D H, *et al.* Present status of spawning stock of Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, in the Yangtze River [ J ]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, 23(6): 554-559. [ 易继舫, 唐大明, 刘灯红, 等. 长江中华鲟繁殖群体资源现状的初步研究. *水生生物学报*, 1999, 23(6): 554-559. ]
- [ 9 ] Wei Q W, Li L X, Du H, *et al.* Research on technology for controlled propagation of cultured Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [ J ]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(1): 1-11. [ 危起伟, 李罗新, 杜浩, 等. 中华鲟全人工繁殖技术研究. *中国水产科学*, 2013, 20(1): 1-11. ]

- [10] Zhuang P. Ontogenetic behavior of sturgeons (*Acipenseridae*) with comments on evolutionary and practical significance [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 1999. [庄平. 鲟科鱼类个体发育行为学及其在进化与实践上的意义. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 1999.]
- [11] Zhuang P, Kynard B, Zhang L Z, *et al.* Ontogenetic behavior and migration of Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis* [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2002, 65(1): 83 - 97.
- [12] Gu X L. Study on behavioral ecology of juvenile Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) captured from the estuary of Yangtze River on laboratory conditions [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2007. [顾孝连. 长江口中华鲟 (*Acipenser sinensis* Gray) 幼鱼实验行为生态学研究. 上海: 上海海洋大学, 2007.]
- [13] Gu X L, Zhuang P, Zhang L Z, *et al.* Illumination intensity preference and its effects on feeding efficiency of juvenile Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis* captured from the Estuary of Yangtze River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2009, 33(5): 778 - 783. [顾孝连, 庄平, 章龙珍, 等. 长江口中华鲟幼鱼趋光行为及其对摄食的影响. 水产学报, 2009, 33(5): 778 - 783.]
- [14] Gu X L, Zhuang P, Zhang L Z, *et al.* Substrate preference of juvenile Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* captured from Yangtze River estuary [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(2): 213 - 217. [顾孝连, 庄平, 章龙珍, 等. 长江口中华鲟幼鱼对底质的选择. 生态学杂志, 2008, 27(2): 213 - 217.]
- [15] Chai Y. Development of sense organs and the behavior function during Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) ontogeny [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006. [柴毅. 中华鲟感觉器官的早期发育及其行为机能研究. 武汉: 华中农业大学, 2006.]
- [16] Chai Y, Xie C X, Wei Q W, *et al.* Development of retina and behavior during Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* Gray) early ontogeny [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(6): 920 - 922. [柴毅, 谢从新, 危起伟, 等. 中华鲟视网膜早期发育及趋光行为观察. 水生生物学报, 2007, 31(6): 920 - 922.]
- [17] He X G. Study on the osmotic physiology and salinity preference of Chinese sturgeon during sea water adaptation [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008. [何绪刚. 中华鲟海水适应过程中生理变化及盐度选择行为研究. 武汉: 华中农业大学, 2008.]
- [18] Zhang J M, Guo B F, Gao Y. Effects of chronic crowding stress on growth, feeding, and behavior in Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* F<sub>2</sub> juveniles [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(3): 592 - 598. [张建明, 郭柏福, 高勇. 中华鲟幼鱼对慢性拥挤胁迫的生长、摄食及行为反应. 中国水产科学, 2013, 20(3): 592 - 598.]
- [19] Yang X M, Li S F. Growth differences and biochemical genetic changes between wild stock and hatchery populations of silver carp and grass carp from Yangtze River [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1996, 3(4): 1 - 10. [杨学明, 李思发. 长江鲢、草鱼原种—人繁群体生长差异与生化遗传变化. 中国水产科学, 1996, 3(4): 1 - 10.]
- [20] Zhang Z W, Han Y P, Zhong X M, *et al.* Genetic structure analyses of grass carp populations between wild and cultured ones [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2007, 14(5): 720 - 725. [张志伟, 韩曜平, 仲霞铭, 等. 草鱼野生群体和人工繁殖群体遗传结构的比较研究. 中国水产科学, 2007, 14(5): 720 - 725.]
- [21] Wang W J, Kong J, Zhuang Z M, *et al.* Isozyme variation of the wild and hatchery populations of Red Seabream [J]. *Chinese Biodiversity*, 2000, 8(4): 391 - 396. [王伟继, 孔杰, 庄志猛, 等. 真鲷野生群体和人工繁殖群体的同工酶遗传差异. 生物多样性, 2000, 8(4): 391 - 396.]
- [22] Ji R X, Zou W Z, Yan Q P, *et al.* Immunogenicity and WSSV resistance of anti-WSSV *Penaeus japonicus* F<sub>3</sub> [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2008, 32(1): 98 - 104. [纪荣兴, 邹文政, 鄢庆彬, 等. 日本对虾抗白斑病子三代的抗白斑综合征病毒感染能力及免疫特性. 水产学报, 2008, 32(1): 98 - 104.]
- [23] Liu J Y, Tan Y A, Tan Q S, *et al.* Research on Chinese giant salamander F<sub>2</sub> adaptability and growth advantages [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2006, 25(2): 387 - 390. [刘鉴毅, 谭永安, 谭启森, 等. 中国大鲵子二代适应能力及生长优势的研究. 四川动物, 2006, 25(2): 387 - 390.]
- [24] Guan Y Y, Liu W G, He M X. Genetic variation during four generations of selective breeding in the pearl oyster *Pinctada fucata* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(4): 764 - 770. [管云



- 雁,刘文广,何毛贤. 马氏珠母贝选育群体 4 个世代的遗传变异. 中国水产科学, 2013, 20 (4): 764 - 770. ]
- [25] Victor B C. Settlement strategies and biogeography of reef fishes [ M ] // Sale P F. The Ecology of Fishes on Coral Reefs. New York: Academic Press, 1991: 231 - 260.
- [26] Barlow G W. The relevance of behavior and natural history to evolutionarily significant units [ M ] // Nielsen J L. Evolution and the Aquatic Ecosystem. Bethesda: American Fisheries Society, 1995: 169 - 175.
- [27] The Changjiang Aquatic Resources Survey Group, Sichuan Province. The biology of the sturgeons in Changjiang and their artificial propagation [ M ]. Chengdu: Sichuan Scientific and Technical Publishing House, 1988: 1 - 173. [ 四川长江水产资源调查组. 长江鲟鱼类生物学及人工繁殖研究. 成都: 四川省科技出版社, 1988: 1 - 173. ]
- [28] Wang C Y. Migrations for reproduction of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) and its habitat selection in the Yangtze River [ D ]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. [ 王成友. 长江中华鲟生殖洄游和栖息地选择. 武汉: 华中农业大学, 2012. ]
- [29] Li L X, Zhang H, Wei Q W, *et al.* Occurrence time and amount variation of juvenile Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis* at Xupu, Changshu section of Yangtze River after closure of Three Gorges Dam [ J ]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18 (3): 611 - 618. [ 李罗新, 张辉, 危起伟, 等. 长江常熟溆浦段中华鲟幼鱼出现时间与数量变动. 中国水产科学, 2011, 18 (3): 611 - 618. ]
- [30] He D R, Cai H C. Fish Behavior [ M ]. Xiamen: Xiamen University Press, 1998: 1 - 387. [ 何大仁, 蔡厚才. 鱼类行为学. 厦门: 厦门大学出版社, 1998: 1 - 387. ]
- [31] Yin M C. Fish Ecology [ M ]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2007: 158 - 161. [ 殷名称. 鱼类生态学. 北京: 中国农业出版社, 2007: 158 - 161. ]
- [32] Chan M D, Dibble E D, Kilgore K J. A laboratory examination of water velocity and substrate preference by age-0 Gulf sturgeons [ J ]. Transactions of the American Fisheries Society, 1997, 126 (2): 330 - 333.
- [33] Fan Z Q. Animal Behavior [ M ]. Beijing: Science Press, 1988: 1 - 304. [ 范志勤. 动物行为. 北京: 科学出版社, 1988: 1 - 304. ]
- [34] Shang Y C. Animal Ethology [ M ]. Beijing: Peking University Press, 2004: 1 - 384. [ 尚玉昌. 动物行为学. 北京: 北京大学出版社, 2004: 1 - 384. ]
- [35] Liang X F. The structure and function of the ampullae on the ventral part of the snout of Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* Gray) [ J ]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1996, 27 (1): 1 - 5. [ 梁旭方. 中华鲟吻部腹面罗伦氏囊结构与功能的研究. 海洋与湖沼, 1996, 27 (1): 1 - 5. ]
- [36] Zhuang P, Zhang L Z, Luo G, *et al.* Function of sense organs to the feeding behavior of juveniles Chinese sturgeon captured from the Yangtze estuary [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2008, 32 (4): 475 - 481. [ 庄平, 章龙珍, 罗刚, 等. 长江口中华鲟幼鱼感觉器官在摄食行为中的作用. 水生生物学报, 2008, 32 (4): 475 - 481. ]
- [37] Darwin C. On the Origin of Species [ M ]. London: John Murray, 1866: 7 - 45.

## Light intensity preferences of 5-month and 7-month F<sub>2</sub> Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*)

WANG Heng<sup>1,2</sup>, WEI Qiwei<sup>1,2,3\*</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>, LIU Meng<sup>2</sup>, LI Lei<sup>1,2</sup>, DU Hao<sup>1,2,3</sup>, LI Luoxin<sup>2,3</sup>

(1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture,

Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China;

3. Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

**Abstract:** After the success of completely controlled propagation in Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*), it is necessary to find out the possible behavior variation between wild group and second generation. We combined individual test and population test in 3 different experiments: test of substrate color preference, illumination intensity preference and the optimum illumination. The results showed that both 5-month and 7-month juvenile F<sub>2</sub> *A. sinensis* significantly chose white substrate (95% Confidence interval of preference on white substrate does not contain 50%). 5-month juvenile F<sub>2</sub> *A. sinensis* individuals significantly chose illuminated area (200 – 250 lx) ( $P < 0.05$ ), while 7-month ones significantly chose transition area (20 – 50 lx) ( $P < 0.05$ ). Both 5-month and 7-month juvenile F<sub>2</sub> *A. sinensis* populations preferred transition area (20 – 50 lx) ( $P < 0.05$ ) in population test. The different choice of illumination intensity preference between individuals and population in 5-month F<sub>2</sub> *A. sinensis* may be related to ‘signal-adaptation hypothesis’ and the optimum illumination range. 5-month juvenile F<sub>2</sub> *A. sinensis* significantly chose illumination area of 45 – 135 lx ( $P < 0.05$ ); 7-month juvenile F<sub>2</sub> *A. sinensis* significantly chose illumination area of 23 – 202 lx ( $P < 0.05$ ). It meant that with the increasing age, F<sub>2</sub> *A. sinensis* strengthened its adaptability to illumination. From all above, both 5-month and 7-month juvenile F<sub>2</sub> *A. sinensis* preferred white substrate, and the optimum illumination range was 20 – 200 lx. Compared with the existing wild juveniles data, their phototaxis has already declined.

**Key words:** F<sub>2</sub> *Acipenser sinensis*; juvenile; preference on black and white substrate; illumination intensity; the optimum illumination; fish behaviors

**Corresponding author:** WEI Qiwei. E-mail: weiqw@yfi.ac.cn