

格栅和光色对黑鲷穿梭与群聚行为的影响

庄保陆¹, 张宇雷¹, 倪琦¹, 叶章颖², 刘晃¹

(1 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 农业农村部渔业装备与工程技术重点实验室, 上海 200092;

2 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 农业农村部设施农业装备与信息化重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要:鱼穿梭格栅的行为和之后在格栅一侧的群聚行为是直接影响活鱼分级效果的关键因素。设计一套由玻璃水槽、变色LED灯、摄像头和电脑等组成的试验平台, 并使用Matlab软件进行黑鲷(*Acanthopagrus schlegeli*)行为视频的分析, 以此探究分级格栅的存在对黑鲷行为的影响, 以及黑鲷对格栅颜色、材质和光色的偏好, 并测试格栅和光照组合措施对黑鲷穿梭和群聚行为的影响效果。结果显示: 格栅的存在对黑鲷在水槽内的游动产生了显著的抑制, 黑鲷并未表现出喜好在格栅中穿梭的行为; 格栅颜色的存在进一步抑制了黑鲷穿梭格栅的活跃程度, 黑鲷对红色和蓝色格栅较为排斥, 对绿色和无色透明格栅的排斥性较低; 黑鲷对银色钢质格栅最为排斥, 而对透明亚克力材质格栅排斥性最低; 黑鲷对蓝色光有极高的趋光性, 对红色光有强避光性。在黑鲷的格栅分级系统设计时, 可引入光触发自分级技术, 在格栅两侧分别设置蓝、红色光, 有助于实现迅速且稳定的分级。该研究结果可对鱼类分级装备及其辅助设施的研发提供一定的参考。

关键词:水产养殖; 鱼类行为; 规格分级; 分级格栅; 光色; 穿梭率; 群聚率

中图分类号: S969.39

文献标志码: A

文章编号: 1007-9580(2019)06-040-08

由于养殖对象个体之间存在无法避免的初始规格及综合竞争能力差异, 经数月养殖后, 同一养殖群体内的个体规格将呈现明显差异, 且通常会出现较大的个体越长越快, 较小的个体越长越慢甚至停止生长导致死亡的情况^[1]。这种情况的出现将降低饲料利用率、增加养殖成本, 并导致养成规格不统一, 无法批量上市等问题, 大幅拉低养成品的售价, 缩减生产效益。所以, 养殖过程中通常会定期对养殖对象开展分级分池操作^[2-3]。国内目前主要通过人工捞鱼让鱼离水后经人工检视或简易工具辅助来实现分级分池, 存在劳动强度大, 且使鱼因严重的驱赶、捕捞、离水而产生应激反应和机械损伤, 影响后续养殖或销售品相等问题。挪威、美国和智利等水产养殖发达国家主要采用吸鱼泵、计数器和辊式分级机联用的自动分级装备与技术, 但也存在鱼类应激和损伤等问题。

为了解决上述问题, 国内外学者提出了养殖池或网箱内带水分级的理念, 并就此开展了一些设计与测试工作。例如, Steven等^[4]测试了一种适用于

圆形养殖池内的钢制折叠式分级格栅, 并联合二氧化碳驱赶、气力提升等技术实现分级分池, 北极红点鲑和虹鳟小鱼的分级率为70%~90%; 关长涛等^[5]、鲁伟等^[6]在网箱中使用PVC管和连接线等制作柔性分级格栅用于许氏平鲈的分级, 分级率为90.3%。郑国富等^[7]使用不锈钢方管、PE网衣和绳索等制成刚性分级设备用于真鲷的分级, 分级率为93.3%; 宋利明等^[8-9]分别使用PVC管和钢丝制作刚性分级格栅, 使用PPR管和绳索制作柔性分级格栅, 用于养殖网箱中大黄鱼的分级, 分级率大于90%。当前, 国内相关研究主要集中在网箱分级装置设计与性能测试和一些养殖品种对网具颜色以及光色、光照强度的行为和生理反应等方面^[10-15], 但以养殖对象对格栅分级装置的行为反应等为主要内容的研究较少, 尚不成体系。

以黑鲷(*Acanthopagrus schlegeli*)为研究对象, 旨在探讨分级格栅的存在对黑鲷行为的影响, 以及黑鲷对格栅颜色、材质和光色等的偏好, 并测试格栅和光照组合措施对黑鲷穿梭和群聚行为的影

收稿日期: 2019-08-16

基金项目: 农业农村部设施农业装备与信息化重点试验室开放基金“现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-47)”; 国家重点研发计划资金(2017YFD0701704)

作者简介: 庄保陆(1982—), 男, 助理研究员, 研究方向: 水产养殖工程。E-mail: zhuangbaolu@fmiri.ac.cn

通信作者: 刘晃(1973—), 男, 研究员, 研究方向: 水产养殖工程和渔业装备战略。E-mail: liuhuag@fmiri.ac.cn

响,以期对鱼类分级格栅及其辅助设施的设计和提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 试验系统

本试验在位于江苏如东的中国水产科学研究院水产养殖生态工程试验研究基地工业化循环水养殖中试车间内进行,该车间具有良好的遮光、保温效果,且无显著的噪音等影响。试验所用玻璃水槽尺寸为 $2.8\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ ($L \times W \times H$),水深 0.33 m 。水槽外部底面与支架间整体铺设灰色 PVC 板,避免水槽底面下的管阀等透过玻璃底板对试验用鱼产生视觉干扰;在水槽内部两端设置了相同的曝气增氧管、电加热器和排污口,且两端均用相同的 PVC 孔板将这些装置与试验用鱼活动区隔离,确保水槽两端设备设置情况、水质条件、水流状态和自然光照条件等均对称相同。在水槽中部设置格栅插槽,用于更换或去除不同的试验格栅;在格栅两侧鱼类活动区上方分别设置长度 0.91 m 、功率 14.4 W 的遥控变色 LED 灯;在水槽外距水槽一侧 2.0 m 处设置一个 200 万像素的摄像头并连接电脑,用于人工观察和自动采集水槽内试验用鱼行为视频和图片。使用不透光的黑色 HDPE 薄膜将试验水槽和摄像头所在区域进行隔离,避免周边其他因素对试验用鱼的行为产生干扰。试验系统设置如图 1 所示。前期观察表明,未施加试验因子时,试验用鱼在水槽中呈自然的分散均布状态,无显著的应激行为与偏好性群聚。

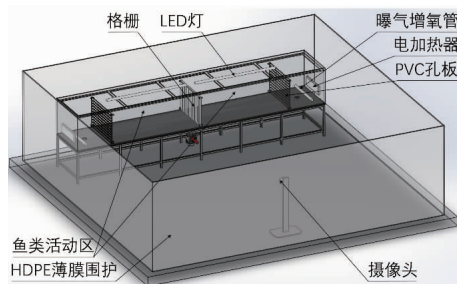


图1 试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

黑鲷最适水温区间 $17\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,最适盐度区间 $25 \sim 28$ ^[16]。据此,试验全程维持水温 $24\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,盐度 25 ,溶氧 $6.0 \sim 7.5\text{ mg/L}$,pH $8.0 \sim 8.5$ 。试验期间投饲量少,通过每天换水 2 次每次 15% 等方法维持水质指标在适宜区间内。经抽查,

$\text{TAN} \leq 0.2\text{ mg/L}$, $\text{NO}_2^- - \text{N} \leq 0.5\text{ mg/L}$ 。

1.2 试验动物

从养殖场池塘中拉网捕获同一养殖批次的 120 尾 12 月龄黑鲷,在基地室内养殖池养殖 30 日,以避免起捕、运输和受伤等带来的应激反应而影响试验用鱼的行为。然后随机捞取 30 尾经测量形体参数后放入试验水槽,在水槽中适应性养殖 7 d 后开始正式试验。试验所用 30 尾黑鲷体宽 W 为 $15 \sim 30\text{ mm}$,其中, $10 \sim 15\text{ mm}$ 的 2 尾, $15 \sim 20\text{ mm}$ 的 11 尾, $20 \sim 25\text{ mm}$ 的 14 尾, $25 \sim 30\text{ mm}$ 的 3 尾,体宽分布状态趋近于正态分布,与自然养殖群体体宽分布状态一致。试验用鱼体宽分布状态如图 2 所示。

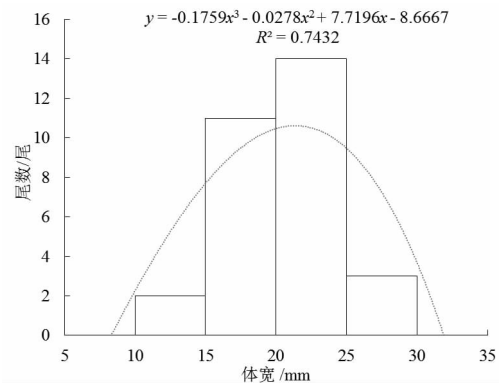


图2 试验用鱼体宽分布状态

Fig. 2 Body width distribution of experimental fish

1.3 试验设计

格栅由框和杆构成,框的材质为透明亚克力,尺寸为 $480\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 330\text{ mm}$ ($L \times W \times H$),上边框开设直径 10 mm 通孔,下边框内面开设直径 10 mm 深 5 mm 的凹槽,用于更换和固定不同颜色和材质的杆。杆直径 10 mm ,有效长度 310 mm 。试验测试 4 种相邻杆净间距(格栅间距 D)的格栅,对应制作 4 种框,其相邻上边框通孔及下边框凹槽的中心距分别为 25 mm 、 30 mm 、 35 mm 和 40 mm ,确保格栅间距 D 分别为 $D_1 = 15\text{ mm}$ 、 $D_2 = 20\text{ mm}$ 、 $D_3 = 25\text{ mm}$ 和 $D_4 = 30\text{ mm}$ 。 4 种格栅间距 D 分别对应杆的数量 n 为 15 、 13 、 11 和 9 根,杆为透明亚克力材质。格栅设计如图 3 所示。

试验 1:首先测试不同格栅间距 D 对黑鲷穿梭行为的影响,获得穿梭率 R 值最高的格栅间距 $D_{R\max}$;然后测试 $D_{R\max}$ 下不同杆颜色对黑鲷穿梭行为的影响, 4 种颜色分别为红色、绿色、蓝色和无

色透明,杆为亚克力材质;最后测试 D_{Rmax} 下不同杆材质对黑鲟穿梭行为的影响,4 种材质分别为透明亚克力、原色杉木、黑色橡胶和银色钢棒。上述试验各自均重复 6 次,每次试验间隔 2 h。试验开始时,鱼均自然均布于格栅两侧。每次人为更换格栅 2 h 后再录制视频,以避免人为干扰带来试验误差。每次试验均由摄像头和电脑录制时长 ≥ 10 min 的 avi 格式视频,录像帧数设置为 25 FPS,帧间距为 0.04 s,远小于黑鲟单次完全穿梭格栅所需时间,确保能录取到黑鲟穿梭格栅的即时图像。因黑鲟昼夜活动频繁程度有所不同,故所有试验均在白天进行,以避免因昼夜行为习性不同而带来试验误差。

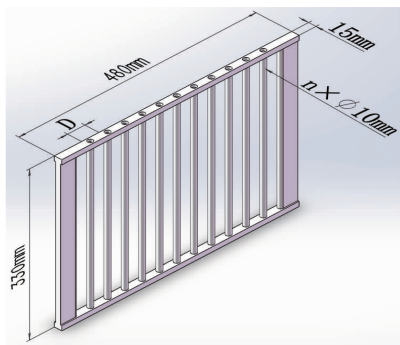


图3 格栅设计

Fig. 3 Grille design

试验 2:首先测试不同光色和光色组合对黑鲟群聚行为的影响;然后观察光色组合作用下黑鲟穿梭格栅以及群聚的行为。试验测试的 5 种光色分别为白色、蓝色、橘色、红色和绿色,不同的光色由七彩遥控变色 LED 灯提供。使用 EVERFINE PLA-20 光照分析仪检测 5 种光色光谱,光谱参数见表 1。每种试验重复 6 次,每次试验间隔 2 h。试验开始时,鱼均自然均布于水槽中或格栅两侧。

表 1 5 种光的光谱参数

Tab. 1 Spectral parameters of five kinds of light

光色	波长/nm	频率/Hz	功率/W	照度/Lx
白色	450 ~ 465	50	2.8	62
蓝色	450 ~ 460	50	2.8	63
橘色	610 ~ 620	50	2.8	58
红色	645 ~ 660	50	2.8	59
绿色	525 ~ 555	50	2.8	64

注:LED 灯管距水面 75mm,照度值为贴近水面处的检测值

1.4 数据处理

1.4.1 穿梭次数获取方法

前期在水槽中放入圆点整列标准模板^[17],然后各拍摄一张最小体长和最大体长黑鲟的侧面图片,自吻端至尾鳍末端裁剪图片,经灰度化和二值化处理后计算获得最小鱼体全长 L_{min} 和最大鱼体全长 L_{max} ,并计算获得灰度值 255 的连通域面积 S_{min} 和 S_{max} ,即分别为最小和最大体长黑鲟的图像面积。每次试验均由摄像头和电脑录制时长 ≥ 10 min 的 avi 格式视频。首先,截取时长 10 min 的视频,使用图像处理工作站和 Matlab 软件将每个视频转存为约 1.5 万张序列分帧图片,然后将所有分帧图片中格栅所在位置两侧各稍大于 $L_{min}/2$ 的图像区域进行批处理裁剪保存。接着将所有经过裁剪保存图片进行灰度化和二值化处理并保存。根据文献,鱼类灰度图二值化阈值通常在 30 ~ 36 之间^[18-19],经人工多次比较选定二值化阈值 $\theta = 33$ 为最优,经此处理后绝大部分背景像素点被有效排除,同时保留清晰且较为完整的鱼体和格栅图像特征。不同阈值的二值化图像如图 4 所示。紧接着去除零散点,进行灰度值 255 的连通域标记和面积计算,去除单个连通域面积 $\leq S_{min}$ 的所有图片。最后,计算所有保留的图片中连通域面积 $S \geq S_{min}$ 的连通域数量 N_1 ,计算所有保留的图片中连通域面积 $S \geq S_{max}$ 的连通域数量 N_2 ,则 $N_0 = N_1 + N_2$ 即为黑鲟穿梭格栅的次数,该次数包括多尾黑鲟同时穿梭格栅的情况。然而,该处理方法存在着将 ≥ 3 尾黑鲟同时穿梭格栅且鱼体图像连通的情况计算为 2 次穿梭的缺点,但通过预试验观察发现 ≥ 3 尾黑鲟同时穿梭格栅的情况几乎从未发生,故不予考虑。

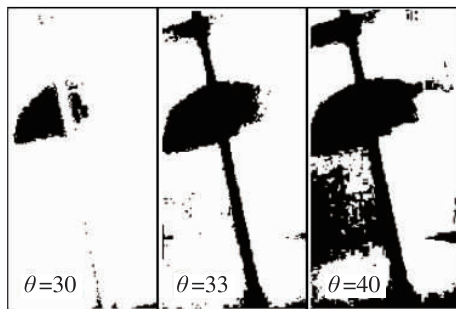


图4 同一图片经不同二值化阈值处理后的图像

Fig. 4 Images of a picture processed by different binary thresholds

1.4.2 穿梭率 R 的定义

为与格栅分级生产实际情况一致,存在部分鱼体宽大于部分格栅间距的情况,每次试验实际可穿梭格栅的鱼尾数不同,导致穿梭次数无法直接反映穿梭行为偏好,故引入穿梭率 R ,其计算公式如下:

$$R = \frac{N_0}{b} \quad (1)$$

式中: R 为穿梭率,次/尾; N_0 为穿梭次数,次; b 为体宽小于 D 的鱼尾数,尾。

1.4.3 群聚率 P 的定义及其获取方法

群聚率 P 用于表征试验用鱼在水槽指定区域内的集群情况,其计算公式如下:

$$P = \frac{n}{B} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P 为群聚率; n 为水槽中指定区域内的尾数;当水槽中无格栅时 B 为试验用鱼总尾数,本试验中 B 取 30,当水槽中有格栅时 B 为体宽小于格栅间距 D 的尾数, $B = b$;群聚率 P 由人工查验视频中鱼群的聚集情况并计算指定区域内的尾数而获得。

1.4.4 趋光性强度分级

依据 P 的范围,将趋光性强度划分为 9 个级别,每个级别对应的群聚率区间见表 2。

表 2 趋光性强度级别划分
Tab. 2 Classification of phototaxis levels

级	群聚率(P)	符号	趋光性强度
1	$P \geq 85\%$	+	极强趋光性
2	$75\% \leq P < 85\%$	+	强趋光性
3	$65\% \leq P < 75\%$	+	中等趋光性
4	$55\% \leq P < 65\%$	+	低趋光性
5	$45\% \leq P < 55\%$	0	无明显反应
6	$35\% \leq P < 45\%$	—	低避光性
7	$25\% \leq P < 35\%$	—	中等避光性
8	$15\% \leq P < 25\%$	—	强避光性
9	$P < 15\%$	—	极强避光性

1.4.5 数据统计

使用 Excel 2016 进行数据整理和制图,使用 SPSS 19.0 进行显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 格栅间距对黑鲷穿梭行为的影响

由图 5 可见,无格栅时黑鲷自由穿梭于水槽

鱼类活动区两端,每 10 min 穿梭水槽中线(即当有格栅时,格栅所安装的位置)的穿梭次数为 49.83 ± 2.86 次,穿梭率 R_0 为 1.66 ± 0.10 次/尾。格栅材质为透明亚克力时,格栅间距 $D_1 = 15$ mm 的穿梭次数为 0.50 ± 0.55 次,穿梭率 R_1 为 0.25 ± 0.27 次/尾;格栅间距 $D_2 = 20$ mm 的穿梭次数为 2.50 ± 1.05 次,穿梭率 R_2 为 0.19 ± 0.08 次/尾;格栅间距 $D_3 = 25$ mm 的穿梭次数为 7.17 ± 1.72 次,穿梭率 R_3 为 0.27 ± 0.06 次/尾;格栅间距 $D_4 = 30$ mm 的穿梭次数为 18.83 ± 6.11 次,穿梭率 R_4 为 0.62 ± 0.20 次/尾。无格栅时的穿梭次数和穿梭率均显著高于有格栅时。 D_4 的穿梭次数和穿梭率也显著高于 D_1 、 D_2 和 D_3 ,且 R_4 显著大于 R_1 、 R_2 和 R_3 ($P < 0.05$); D_2 的穿梭最不频繁, R_3 最低,仅为无格栅时的 11.4% 左右。

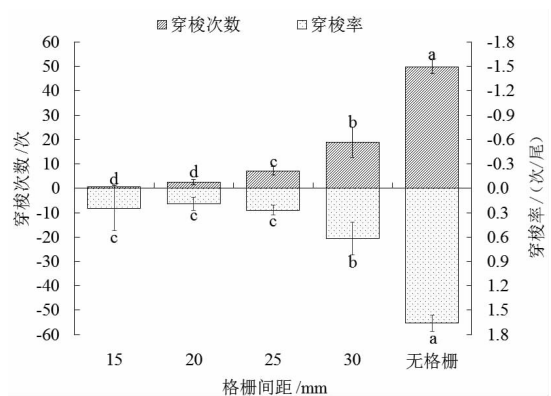


图 5 不同格栅间距下黑鲷穿梭次数和穿梭率

Fig. 5 Shuttle times and shuttle ratio of *Acanthopagrus schlegeli* with different grille spacing

由此可见,格栅的存在对黑鲷在水槽内的游动产生了显著的抑制作用,黑鲷并未表现出喜好在格栅中穿梭的行为。当格栅间距为 15 mm 时,穿梭次数和穿梭率的标准差均大于均值,数据存在较大的发散性,试验结果存在偶然性。这是由于受到试验条件(鱼体宽度小于 15 mm 的仅有 2 尾)的限制,样本数较少导致的。当格栅间距为 30 mm 时,所有试验用鱼体宽均小于格栅间距,均可通过格栅,此时穿梭次数和穿梭率均显著高于其他间距的格栅。这可能是由于体宽较大的大规模试验用鱼对鱼群产生了引领作用,带动鱼群频繁穿梭格栅,而当鱼群中有鱼因体宽大于格栅间距而不能穿过格栅时,引领作用消失,表现为穿梭

率 R_1 、 R_2 、 R_3 差异不显著,这种作用会降低小规格鱼的分级率,使大小规格鱼分级不完全,对分级效果带来不利的影响,故引入光照试验以期弱化此不利影响。

2.2 格栅颜色对黑鲷穿梭行为的影响

由图 6 可见,当格栅为亚克力材质、间距为 25 mm 时,红色格栅的穿梭次数为 4.00 ± 2.10 次,穿梭率 R_r 为 0.15 ± 0.08 次/尾;绿色格栅的穿梭次数为 5.83 ± 2.32 次,穿梭率 R_g 为 0.22 ± 0.09 次/尾;蓝色格栅的穿梭次数为 4.17 ± 2.86 次,穿梭率 R_b 为 0.15 ± 0.11 次/尾;无色透明格栅的穿梭次数为 7.17 ± 1.72 次,穿梭率 R_t 为 0.27 ± 0.06 次/尾。无色透明的格栅其穿梭次数和穿梭率均小于无色透明格栅。红色格栅时黑鲷的穿梭最不频繁,穿梭率 R_r 为最低,仅为无色透明格栅的 56.0% 左右,无格栅时的 9.0% 左右。

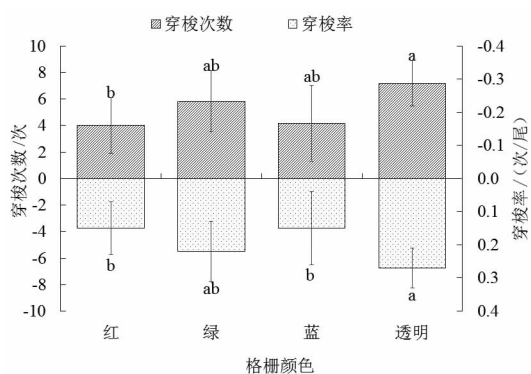


图 6 不同格栅颜色下黑鲷穿梭次数和穿梭率

Fig. 6 Shuttle times and shuttle ratio of *Acanthopagrus schlegeli* with different grille colors

由此可见,格栅颜色的存在进一步抑制了黑鲷穿梭格栅的活跃程度,且黑鲷对格栅颜色的回避程度为红色和蓝色显著大于透明 ($P < 0.05$),绿色格栅的穿梭率与无色透明格栅的差异不显著 ($P > 0.05$),效果近似。大量有关网具的研究发现^[11-12, 20-21],网片对鱼的阻拦效果与网片颜色有着密切的关系,同时,背景颜色是一个极为重要的因素,通常网片颜色与背景颜色的对比度越小,网片对鱼的阻拦效果就越差。本试验结果相当于透明格栅的阻拦效果最差,绿色、蓝色次之,红色最好,可能是因为透明格栅与试验所用透明玻璃水槽背景相同,而红色与背景对比最为强烈。

2.3 格栅材质对黑鲷穿梭行为的影响

由图 7 可见,格栅间距为 25 mm 时,透明亚克力格栅的穿梭次数为 7.17 ± 1.72 次,穿梭率 R_p 为 0.27 ± 0.06 次/尾;原色木头格栅的穿梭次数为 5.00 ± 1.41 次,穿梭率 R_w 为 0.19 ± 0.05 次/尾;黑色橡胶格栅的穿梭次数为 6.00 ± 1.26 次,穿梭率 R_m 为 0.23 ± 0.05 次/尾;银色钢棒格栅的穿梭次数为 3.00 ± 1.41 次,穿梭率 R_s 为 0.11 ± 0.05 次/尾。由此可见,格栅材质对黑鲷穿梭格栅的行为产生了影响,且银色钢棒格栅的穿梭最不频繁,穿梭率 R_s 为最低,仅为透明亚克力格栅的约 40.7%,无格栅的约 6.6%。黑鲷对格栅材质的回避程度为:银色钢棒显著大于黑色橡胶和透明亚克力 ($P < 0.05$)。但是,材质本身附带了颜色,这样的影响应该是颜色与材质共同作用的结果。

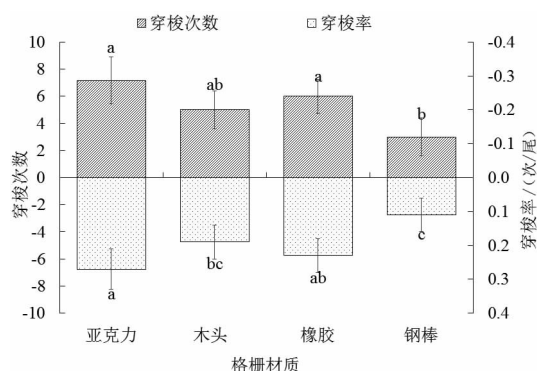


图 7 不同格栅材质下黑鲷穿梭次数和穿梭率

Fig. 7 Shuttle times and shuttle ratio of *Acanthopagrus schlegeli* with different grille materials

2.4 光色对黑鲷群聚行为的影响

开启格栅一侧鱼类活动区上方的 LED 灯,并变换不同光色,通过测试光区群聚率 (P) 评估黑鲷对光色的偏好。试验时一侧为有色光照,另一侧为室内昏暗自然光,重复测试 3 次后对调两侧光照再重复测试 3 次,每次试验间隔 2 h,计算 P 值,结果见表 3。

由表 3 可见,试验用黑鲷对白色光有中等强度的趋光性,对蓝色光有极高的趋光性,对橘色光近似于无明显反应,对红色光表现出强避光性,对绿色光有强趋光性。黑鲷对光色的偏好程度为:蓝色、绿色和白色显著大于橘色和红色 ($P <$

0.05)。张磊^[22]对黑鲷的灯光驯化试验发现,红光和黄光最不符合黑鲷的习性,绿光和蓝光最适合黑鲷的生活习性,与本试验结果基本一致。

开启格栅两侧鱼类活动区(1区和2区)上方的LED灯,并变换不同光色组合,通过测试光区群聚率(P)评估黑鲷对光色的选择性偏好。每组重复测试3次后对调两侧光照再重复测试3次,每次试验间隔2 h,计算 P 值,结果见表4。

表3 单一光色对黑鲷群聚与趋光性的影响
Tab.3 Effects of light color on the congregation and phototaxis of *Acanthopagrus schlegeli*

光色	群聚率	趋光性强度
白色	70.3%	+ +
蓝色	85.2%	+ + + +
橘色	44.5%	-
红色	18.5%	- - -
绿色	77.8%	+ + +

表4 光色组合对黑鲷群聚的影响
Tab.4 Effects of light color combination on the congregation of *Acanthopagrus schlegeli*

1区光色	2区光色	1区平均群聚率	稳态群聚平均耗时/min
白色	白色	50.0%	8
蓝色	白色	81.5%	10
橘色	白色	59.3%	9
红色	白色	22.2%	2
绿色	白色	70.4%	15
蓝色	红色	92.6%	1

由表4可见,相较于白色光,试验用黑鲷对蓝色光显示出强趋光性,对绿色光显示出中等趋光性,对橘色光显示出低趋光性,对红色光显示出强避光性。相较于红色光,黑鲷对蓝色光表现出迅速且清晰的选择性偏好,在短时间内快速形成稳定的群聚。试验结果再次证明,黑鲷对光色的偏好程度为:蓝色和绿色显著大于白色、橘色和红色($P<0.05$)。这是由于黑鲷一般栖息于 $<50\text{ m}$ 水深的近岸海域底层,其栖息环境光场主要以蓝色或蓝绿色光为主。黑鲷视网膜中存在视杆、单锥和孪生双锥三种光感受细胞,视网膜细胞形态组合是与其生存的浅海底层弱光环境相适应的。黑鲷的视杆色素为视紫红质VP485₁,吸收光谱峰

值为485 nm(蓝或蓝绿色光),该吸收光谱与黑鲷栖息水层中日光能量分布相对应,也与该水层中的生物光场相适应^[23]。日本学者川本曾用石鲷进行有色光反应试验,其结果表明,石鲷对绿色和天蓝色最为偏好^[24]。本试验的黑鲷与石鲷自然栖息环境相似,故对光色的反应雷同。由此可见,黑鲷对蓝色光和绿色光的偏好是具备组织学、生物化学、电生理学基础的,并与其自然栖息水层的光学环境相一致。

2.5 光色组合对黑鲷穿梭行为的影响

使用间距25 mm的透明亚克力格栅,同时开启格栅两侧的蓝色光和红色光,测试群聚率和形成稳态群聚后的穿梭率。试验重复3次,每次试验间隔2 h。结果显示,蓝色光照区的群聚率平均为90.3%,形成稳态群聚的平均耗时为2 min,形成稳态群聚后10 min内的平均穿梭率为0.01次/尾。由此可见,格栅两侧同时使用蓝色光和红色光照射,可使黑鲷快速穿过格栅至蓝色光一侧形成较为稳定的群聚,并可大幅减少黑鲷重新穿过格栅返回另一侧的情况发生。这样的光色偏好效应有助于大幅提高格栅分级的效果,具有重要的应用价值。Moritz等^[2]用光照诱导欧洲鲑鲈幼鱼自行穿过格栅实现分级,试验结果显示,光照侧鱼尾数为黑暗侧的7倍,且格栅两侧鱼群内部的体长差异性均显著降低。该试验结果也证明了光照诱导鱼群自行穿过格栅实现分级具有可行性,光触发自分级技术具有良好的应用前景。

3 结论

格栅的存在对黑鲷在水槽内的游动产生了显著的抑制,黑鲷并未表现出喜好在格栅中穿梭的行为。格栅颜色的存在进一步抑制了黑鲷穿梭格栅的活跃程度,黑鲷对红色和蓝色格栅较为排斥,对绿色和无色透明格栅的排斥性较低。格栅颜色的选择是格栅设计的重要环节之一。黑鲷对银色钢质格栅最为排斥,而对透明亚克力材质格栅排斥性最低。黑鲷分级格栅的制作以透明亚克力材质为优。黑鲷对蓝、绿、白、橘、红色光具有分辨能力,并表现出对蓝色光有极高的趋光性,对红色光有强避光性。在黑鲷的格栅分级系统设计时,可引入光触发自分级技术,在格栅两侧分别设置蓝、红色光,有助于实现迅速且稳定的分级。 □

参考文献

- [1] ASSAF B, SHEENAN H, GIDEON H, et al. Effects of larger fish and size grading on growth and size variation in fingerling silver perch [J]. *Aquaculture International*, 2000, 8 (5): 391-401.
- [2] MORITZ T, CARSTEN S, STEFAN M. Self-grading of larval pike-perch (*Sander lucioperca*), triggered by positive phototaxis [J]. *Aquacultural Engineering*, 2016(72): 13-19.
- [3] 袁万安, 杨松全, 刘本祥. 分级饲养法在鱼类网箱养殖生产上的应用价值研究[J]. *北京水产*, 2000 (2): 15.
- [4] SUMMERFELT S T, DAVIDSON J, WILSON G, et al. Advances in fish harvest technologies for circular tanks[J]. *Aquacultural Engineering*, 2009, 40 (2): 62-71.
- [5] 鲁伟, 关长涛, 林德芳, 等. 网箱养殖鱼类柔性分级系统的试验研究[J]. *海洋水产研究*, 2004, 25(3): 61-67.
- [6] 关长涛, 黄滨, 林德芳, 等. 深水网箱养殖鱼类的分级与起捕技术[J]. *现代渔业信息*, 2004, 20(7): 3-6.
- [7] 郑国富, 唐衍力, 邵青, 等. 养殖鱼规格分级设备试验研究[J]. *江西水产科技*, 2006(2): 43-46.
- [8] 宋利明, 张禹, 周应祺, 等. 网箱养殖大黄鱼两种间距分级栅分级效果的比较[J]. *水产学报*, 2006, 30(6): 785-790.
- [9] 宋利明, 吕凯凯, 张禹, 等. 网箱养殖大黄鱼柔性分级装置设计与试验[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2009, 28(2): 170-175.
- [10] 朱玉蓉, 陈宜瑜, 刘焕彰. 鳊鱼对颜色的辨别和学习[A]. 中国海洋湖沼动物学会鱼类学分会第七届会员代表大会暨朱元鼎教授诞辰 110 周年学术研讨会学术论文摘要集[C]. 2006.
- [11] 方金, 宋利明, 蔡厚才, 等. 网箱养殖大黄鱼对颜色和光强的行为反应[J]. *上海水产大学学报*, 2007, 16(3): 269-274.
- [12] 蔡厚才, 何大仁, 周仕杰, 等. 尼罗罗非鱼对不同颜色定置网片的反应特征[J]. *台湾海峡*, 1992, 11(1): 69-73.
- [13] 赵宁宁, 周邦维, 李勇, 等. 环境光色对工业化养殖豹纹鳃棘鲈幼鱼生长、肤色及生理指标的影响[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(4): 976-984.
- [14] 周显青, 牛翠娟, 李庆芬. 光照对鱼类生理活动影响的研究进展[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(6): 59-61.
- [15] 何大仁. 鱼类行为学[M]. 福建: 厦门大学出版社, 1998: 105-117.
- [16] 仲雷. 海水池塘养殖黑鲷技术简介[J]. *齐鲁渔业*, 2007, 24(11): 12.
- [17] 王文静, 徐建瑜, 吕志敏等. 基于机器视觉的水下鲜鲷鱼类质量估计[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 153-157.
- [18] 张志强, 牛智有, 赵思明, 等. 基于机器视觉技术的淡水鱼质量分级[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 350-354.
- [19] 张志强, 牛智有, 赵思明. 基于机器视觉技术的淡水鱼品种识别[J]. *农业工程学报*, 2011, 27 (11): 388-392.
- [20] 神田献二, 小池篤. 漁網の色に関する研究 I-III [J]. *日本水産学会誌*, 1958, 23(10): 612-624.
- [21] 神田献二, 小池篤. 漁網の色に関する研究-IV [J]. *日本水産学会誌*, 1958, 23(11): 680-683.
- [22] 张磊. 海洋牧场鱼类驯化技术研究及装备设计[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
- [23] 郑微云, 李伦平, 薛雄志, 等. 黑鲷视网膜结构与视觉特性研究[J]. *热带海洋*, 1995, 14(2): 53-60.
- [24] 周应祺. 应用鱼类行为学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 35-36.

Effect of grilles and light colors on the shuttle and congregation behavior of *Acanthopagrus schlegeli*

ZHUANG Baolu¹, ZHANG Yulei¹, NI Qi¹, YE Zhangying², LIU Huang¹

(1 Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Fishery Equipment and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200092, China; 2 College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Key Laboratory of Equipment and Informatization in Environment Controlled Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: The key factors that directly affect the grading efficiency of live fish are the behaviors of fish shuttling through the grille and congregating on one side of grille after shuttle. An experimental platform consisting of glass tank, LED lamps, camera and computer was designed, and videos of *Acanthopagrus schlegeli* behavior were analyzed by Matlab, the purpose of which was to study the effects of graded grille on the behavior of *Acanthopagrus schlegeli* and the preference of *Acanthopagrus schlegeli* for grille colors, materials and light colors, and test the effects of grille and light combination on the shuttle and congregation behavior of *Acanthopagrus schlegeli*. The results showed that the presence of grilles significantly inhibited the swimming of *Acanthopagrus schlegeli* in the tank, and *Acanthopagrus schlegeli* did not show a preference for shuttling through the grilles; the grille colors further inhibited the activity of *Acanthopagrus schlegeli* to shuttle through the grilles, and *Acanthopagrus schlegeli* is more repulsive to red and blue grilles and less repulsive to green and colorless transparent grilles; *Acanthopagrus schlegeli* is most repulsive to silver steel grilles and least repulsive to transparent PMMA grilles; *Acanthopagrus schlegeli* has high phototaxis to blue light and strong photophobia to red light. In the design of grille grading system of *Acanthopagrus schlegeli*, the light-triggered self-grading technology can be introduced, and blue and red light can be set on both sides of the grille, which is conducive to achieving rapid and stable grading. The results can provide some references for the research and development of fish classification equipment and auxiliary facilities.

Key words: aquaculture; fish behavior; size grading; graded grille; light color; shuttle ratio; congregation ratio