

气泡幕对虹鳟阻拦效果研究

周默 黄六一 尤鑫星 蓝恭海 李玉岩 刘晓

OBSTRUCTING EFFECT OF BUBBLE CURTAIN ON RAINBOW TROUT (*ONCORHYNCHUS MYKISS*)

ZHOU Mo, HUANG Liu-Yi, YOU Xin-Xing, LAN Gong-Hai, LI Yu-Yan, LIU Xiao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0403>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

静水与流水下气泡幕对异齿裂腹鱼的阻拦效应

BLOCKING EFFECT OF STATIC WATER AND FLOWING WATER BUBBLE CURTAIN ON *SCHIZOTHORAX OCONNORI*

水生生物学报. 2020, 44(3): 595–602 <https://doi.org/10.7541/2020.073>

虹鳟Fc受体Fc γ R的 α 和 γ 亚基基因的克隆及表达分析

MOLECULAR CLONING AND EXPRESSION ANALYSIS OF THE α AND γ SUBUNIT GENES OF Fc γ R IN RAINBOW TROUT (*Oncorhynchus mykiss*)

水生生物学报. 2019, 43(1): 27–36 <https://doi.org/10.7541/2019.004>

虹鳟*spindlin*基因克隆及不同倍性的表达分析

CLONING AND EXPRESSION ANALYSIS OF *SPINDLIN* GENE IN DIFFERENT PLOIDY RAINBOW TROUT

水生生物学报. 2021, 45(1): 14–21 <https://doi.org/10.7541/2021.2019.193>

鲟鲤鱼网箱养殖环境微生物菌群结构及潜在病原菌分析

ANALYSIS OF MICROBIAL COMMUNITIES STRUCTURE AND POTENTIAL PATHOGENS IN STURGEON CAGE CULTURE ENVIRONMENT

水生生物学报. 2021, 45(6): 1255–1263 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.072>

发酵有机肥对主养草鱼池塘水质调控效果研究

THE EFFECTS OF FERMENTED ORGANIC FERTILIZER ON WATER QUALITY IN POLYCULTURE PONDS DOMINATED WITH GRASS CARP

水生生物学报. 2018, 42(1): 171–181 <https://doi.org/10.7541/2018.022>

武汉市沙湖摇蚊亚化石记录的湖泊生态环境变化

ECOLOGICAL ENVIRONMENT CHANGES INFERRED FROM SUBFOSSIL CHIRONOMID RECORD OF SHAHU LAKE IN WUHAN CITY

水生生物学报. 2018, 42(1): 162–170 <https://doi.org/10.7541/2018.021>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2023.2022.0403

气泡幕对虹鳟阻拦效果研究

周默 黄六一 尤鑫星 蓝恭海 李玉岩 刘 晓

(中国海洋大学水产学院, 青岛 266003)

摘要: 为探究不同工况下气泡幕对虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的阻拦效果, 在光照环境下分别采用4种孔距(1.0、2.0、3.0和4.0 cm)、4种孔径(0.5、1.0、1.5和2.0 mm)和3种气量(60、120和180 L/min)产生的气泡幕, 用单一变量法对虹鳟进行阻拦实验, 获得所用工况中阻拦效果最优的工况; 在此基础上, 进行黑暗环境下气泡幕对虹鳟的阻拦效果实验。结果显示: (1)在光照环境下, 所用工况中阻拦效果最优的工况为孔径1.0 mm、孔距2.0 cm、气量120 L/min的气泡幕, 阻拦率为 $(96.32 \pm 3.99)\%$; (2)在黑暗环境下, 空白实验中游过气泡幕管道上方的鱼尾次数为光照环境下的63.37%, 阻拦率为 $(87.48 \pm 2.55)\%$ 。研究结果可为大水体养殖虹鳟的捕捞技术研究提供参考。

关键词: 气泡幕; 光照环境; 黑暗环境; 阻拦率; 虹鳟

中图分类号: Q178.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2023)12-2003-08



水下气泡幕, 是通过充气设备、输气管道和开孔出气管组合而成的装置, 在水下特定深度处生成的一种气泡幕墙。气泡幕对鱼类感觉器官(如视觉、听觉等)产生刺激, 从而改变鱼群原有游泳路径, 达到阻拦鱼群路径、缩小鱼群活动空间的作用, 实现阻拦和聚拢鱼群的效果。相对于传统的拦网式诱驱鱼技术, 水下气泡幕具有低成本、无污染和无损伤等优点, 在海洋增殖、渔业捕捞和水利工程等领域已有一些应用实例^[1-3]。目前国内外关于气泡幕对鱼阻拦效果的研究仍以室内实验为主, 且对气泡幕阻拦机制的研究尚浅。徐是雄等^[4]发现在0—120 L/min气量范围内, 随气量的增加, 气泡幕对鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)幼鱼的阻拦效果呈现先上升后下降的变化趋势。赵锡光等^[5, 6]探究了出气管开孔孔径和孔距对黑鲷(*Sparus macrocephalus*)游泳阻拦率的影响, 结果表明孔径0.5 mm、孔距5.0 cm时的气泡幕阻拦效果最佳, 平均阻拦率达75%。此外, 一些学者探究了不同实验鱼种和鱼群密度对气泡幕阻拦效果的影响。刘理东等^[7]研究表明气泡幕对尼罗罗非鱼(*Tilapia nilotica*)、鲢、鳙(*Aristichthys nobilis*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)和

鲫(*Carassius auratus*)5种淡水鱼类均有阻拦效果, 且阻拦率存在明显的种间差异。黄六一等^[8]研究了气泡幕对不同密度许氏平鲈(*Sebastes schlegeli*)鱼群阻拦效果的影响, 得出气泡幕对不同密度鱼群的均有较好的阻拦效果, 但未发现鱼群密度与阻拦率存在很强的相关性。

一系列的研究结果表明在气泡幕对鱼的阻拦过程中, 鱼的视觉、听觉和机械振动感觉均能感知到气泡幕的存在, 使其发生多种形式的趋避反应。Welton等^[9]在弗罗姆河用玻璃通道, 探究了气泡幕装置对大西洋鲑(*Salmo salar* L.)幼鱼迁徙方向偏转的影响, 结果显示其效率在白天低于夜间近44%。Leander等^[10]用气泡幕装置引导大西洋鲑顺流迁徙的室内实验结果显示, 光照环境下气泡幕对大西洋鲑的阻拦效果明显高于黑暗环境。赵锡光等^[6]在通过实验测得气泡幕产生的两个声压峰中, 最大声压峰在1 kHz以下低频区, 另一个在3—9 kHz高频区, 而大多数鱼类的听觉范围小于1 kHz^[11]。赵锡光等^[12]研究了气泡幕对黑鲷的阻拦作用机制, 比较了同种参数气泡幕对正常视觉与失去视觉黑鲷的阻拦效果, 结果发现黑暗环境下气泡幕对其阻拦率下降约

收稿日期: 2022-09-30; 修订日期: 2023-01-04

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0901003)资助 [Supported by the National Key Research and Development Plan, Far-reaching Large-scale Aquaculture Equipment and Mode of Marine Industrialization (2019YFD0901003)]

作者简介: 周默(1997—), 男, 硕士研究生; 主要研究方向为鱼类行为学。E-mail: zhoumo@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 黄六一(1970—), 男, 博士, 教授; 主要研究方向为渔具渔法和鱼类行为学。E-mail: huangly@ouc.edu.cn

40%。Zielinski等^[13]发现仅在水槽中播放录制的气泡幕声音同样对鲤(*Cyprinus carpio*)有一定的阻拦效果。尹入成等^[14]发现在全黑暗的环境下,异齿裂腹鱼(*Schizothorax oconnori*)的侧线能够感知气泡幕破裂时产生的机械振动,认为这是鱼类对气泡幕产生趋避作用的主要因素。

虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)隶属于硬骨鱼纲,鲑形目,鲑科,大麻哈鱼属的一种冷水性淡水鱼类,原产于北美地区。自1959年首次引进以来,我国先后从不同国家引进了数个虹鳟品系^[15]。虹鳟等鲑鳟鱼类作为目前世界上海水养殖最成功的鱼类,在挪威、智利等国家自然海域有大量养殖^[16]。但由于我国所处地理位置自然海域夏秋季水温偏高,制约着我国海上鲑鳟鱼类养殖产业的发展。多年调查发现,在我国黄海海域夏秋季会生成一个巨大的冷水团,具有潜源(水深20—30 m)、低温、溶氧充足等特点,为自然海域全年养殖冷水鱼提供了可行的条件^[17]。2021年由 中国海洋大学联合日照万泽丰渔业有限公司、青岛武船重工等单位联合研制的“深蓝1号”全潜式大型钢结构网箱在黄海冷水团已取得虹鳟规模化养殖成功。为充分利用黄海冷水团适宜养殖虹鳟等冷水鱼的水体,全潜式网箱在夏季(7—10月)需将网箱顶部下潜到水下20 m以下,网箱内部处于黑暗环境中^[17]。在此条件下如何实现网箱内养殖虹鳟的拦截聚集,实现按需捕捞,是该养殖模式需要深入研究的问题。本研究以虹鳟为研究对象,开展不同孔径、孔距、气量产生的气泡幕在光照和黑暗环境下对虹鳟的阻拦效果研究,探究气泡幕对虹鳟的阻拦作用及阻拦机制,为我国深远海大型网箱养殖虹鳟的鱼群控制技术和捕捞装备的研发提供理论参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验鱼

实验虹鳟采购于山东省潍坊市临朐县某养殖有限公司,共120尾,平均体长(208.0 ± 18.9) mm,平均体高(44.0 ± 1.5) mm,平均体宽(23.0 ± 2.3) mm。在实验期间将虹鳟暂养于室内圆形养殖水槽中,水温15—19℃,溶氧9.5—10 mg/L。每日投喂1次,保证虹鳟的正常生长。

1.2 实验设备及布设

实验在中国海洋大学水产学院动力水槽(观测段:长4.0 m,宽1.2 m,水深1.0 m)中进行。如图1所示,在实验水槽观测段出入口分别用网目大小35 mm的拦截网控制虹鳟的活动范围;在水槽底部中央处铺设长度1.2 m的聚丙烯(PPR)管(外径20.0 mm,内径17.0 mm),管的两端用绝缘胶带密封,在管道上侧开等距等径小孔(孔距分别为1.0、2.0、3.0和4.0 cm,孔径分别为0.5、1.0、1.5和2.0 mm),共制作7种规格气泡幕管道;将电动空压机(JB-800W*4,浙江藤井空压机有限公司)通过直径6.0 mm的热塑性聚氨酯橡胶(TPU)软管连接气泡幕管道,进行60、120和180 L/min三种气量充气操作;水槽室内全屋用遮光布遮挡门窗,进行遮光处理,用遮光布覆盖水槽观测段的视窗;光照环境的实验光源是在水槽中部上方距离1.7 m处安装的20 W荧光灯,打开时水面照度200 lx;光照实验和黑暗实验中分别采用GoPro 9相机(GoPro Inc.)与松典254K型红外相机(深圳市索达数码科技有限公司),拍摄虹鳟的行为反应。其中,黑暗实验用三台850 nm的红外补光灯(HG-IR2030-90W,宏光视讯)进行光源补充,便于黑暗中拍摄虹鳟的影像。

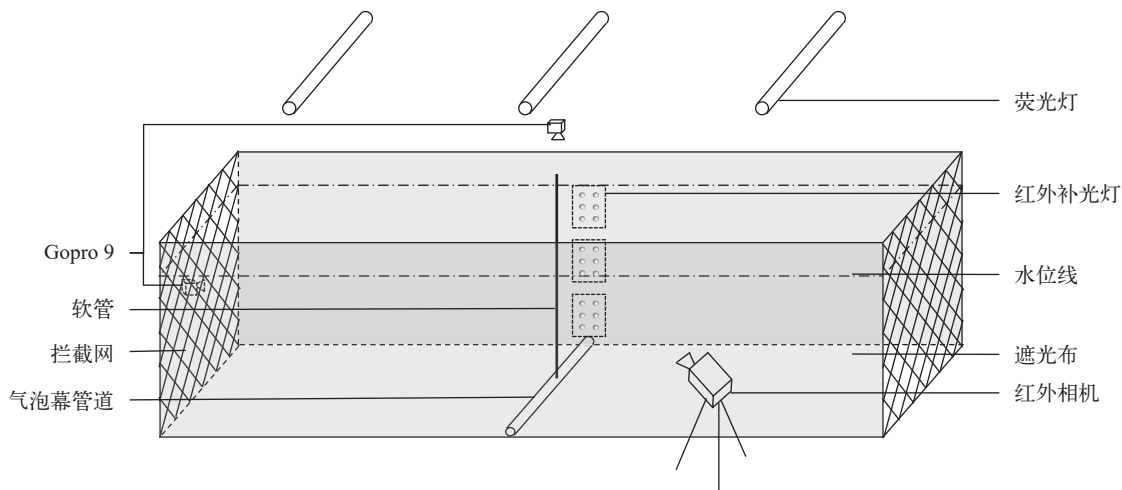


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

1.3 实验工况

每次实验从暂养水槽中随机选取10尾虹鳟放入实验水槽中, 先进行约30min的环境适应, 待虹鳟在实验水槽内自由游动, 无明显的应激反应后开始实验。实验水体平均溶氧为 (9.23 ± 0.32) mg/L, 平均溶氧饱和度为 $(89.03 \pm 3.12)\%$ 。实验工况设置如表1所示。光照实验采用单一变量法依次开展: (1)孔径1.0 mm, 气量120 L/min时, 进行孔距为1.0、2.0、3.0和4.0 cm的气泡幕阻拦实验, 确定阻拦率最优的孔距A; (2)孔距A, 气量120 L/min时, 进行孔径为0.5、1.5和2.0 mm的气泡幕阻拦实验, 确定最优孔径B; (3)孔距A, 孔径B时, 进行气量为60和180 L/min的气泡幕阻拦实验, 确定最优气量C。其次, 选用光照实验所用工况中阻拦率最佳的气泡幕生成工况(孔距A、孔径B和气量C)进行黑暗环境下的气泡幕阻拦实验。在光照环境实验和黑暗环境实验前, 分别进行铺设气泡幕管道而不通气的空白实验。每种工况实验时长为1h, 进行3次重复实验, 实验期间用相机记录虹鳟的过幕行为。

1.4 数据处理与分析

采用阻拦率(Obstructing rate, OR)表示气泡幕对实验鱼的阻拦效果^[7]。阻拦率越高表示实验鱼更倾向于在原有空间内活动, 气泡幕的阻拦效果更好。计算公式如下:

$$OR = (1 - NPT/NPA) \times 100$$

式中, OR为阻拦率, %; NPT为单位时间内虹鳟个体主动通过气泡幕的次数, 次; NPA为单位时间内空白实验中虹鳟通过气泡管上方的次数, 次。每组实验采用记录的1h视频数据, 通过肉眼多次计数, 统计每10min内虹鳟主动通过气泡幕的平均次数。虹鳟每主动游过(头部先通过)气泡幕管道上方计为有

效过幕次数1次, 而被动穿过(因气泡幕卷吸作用, 尾部先通过)气泡幕管道上方, 作为无效通过。总的过幕次数为有效过幕次数之和。计算得到每10min气泡幕对虹鳟的阻拦率, 用于后续分析。

为进一步探究孔径、孔距和气量与阻拦率的关系, 建立出气速度(即压缩气体从气泡幕管道中喷出时的速度^[18])与阻拦率的响应模型。出气速度计算公式如下:

$$v = Q/S = 4QD/\pi LR^2$$

式中, v 为出气速度, m/s; Q 为气量, L/min; S 为出气面积, m^2 ; D 为气泡幕孔距, m; L 为气泡幕管道长度, m; R 为气泡幕孔径, m。

用小样本数据的S-W检验(Shapiro-Wilk test), 分析各工况下虹鳟过幕次数数据的正态性; 在此基础上, 采用配对样本 T 检验, 比较光照环境与黑暗环境间, 空白实验中虹鳟游过气泡幕管道上方的次数, 和通气实验中气泡幕对虹鳟阻拦率的均值差异; 采用独立样本 T 检验, 比较不同工况条件下的实验与空白实验之间, 虹鳟通过幕次数的均值差异; 采用单因素方差分析(One-way ANOVA), 分析各因素不同水平下的气泡幕阻拦率是否存在差异性。数据分析均利用SPSS 25.0软件, 以 $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果

2.1 空白实验中虹鳟在光照环境和黑暗环境中的行为差异

空白实验观测发现, 在光照环境下, 虹鳟在游动过程中偶会出现突进游动和个体追逐等现象, 但大多在水槽下层自由游动, 两侧拦截网与气泡幕管对虹鳟的活动方式未造成明显的吸引或驱赶等影响; 在黑暗环境下, 虹鳟的游泳行为与光照环境下类似, 但虹鳟个体的追逐行为减少, 活动水层变浅。统计发现, 黑暗环境中虹鳟穿越气泡幕管道上方的次数比光照环境下显著减少(T -test, $P < 0.05$), 平均减少36%(图2)。

2.2 光照环境下气泡幕对虹鳟阻拦率

行为描述 观测发现, 所有实验中气泡幕的形成瞬间对虹鳟均存在明显的刺激, 主要体现为流速加快且游泳方向多变。随后虹鳟行为趋于稳定, 在水体下层平稳游动, 偶尔突然调转方向, 以暴发速度进行短距离游动, 有时虹鳟会出现倒着游的现象。虹鳟有时也会游向气泡幕, 在接触气泡幕前调转方向, 或直接穿过气泡幕。

不同工况气泡幕对虹鳟的阻拦率 如图3所示, 在孔径1.0 mm、气量120 L/min时, 四种孔距

表1 实验工况
Tab. 1 Test conditions

工况 Condition	孔距 Hole spacing (cm)	孔径 Hole diameter (mm)	气量 Gas flow (L/min)	光照 Illumination
I	1.0	1.0	120	有
II	2.0	1.0	120	
III	3.0	1.0	120	
IV	4.0	1.0	120	
V	A	0.5	120	
VI	A	1.5	120	无
VII	A	2.0	120	
VIII	A	B	60	
IX	A	B	180	
X	A	B	C	

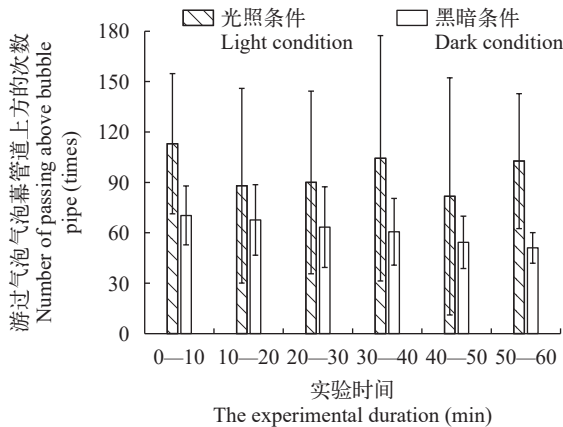


图2 光照和黑暗环境下虹鳟游过气泡气泡幕管道上方的次数
Fig. 2 The number of *Oncorhynchus mykiss* swimming above the bubble curtain pipe under light and dark condition

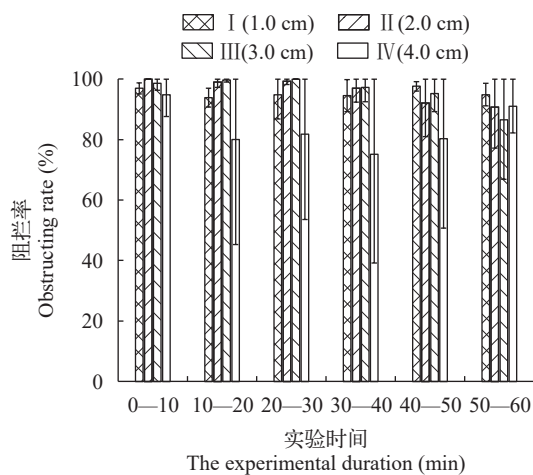


图3 不同孔距气泡幕对虹鳟的阻拦率(孔径1.0 mm, 气量120 L/min)
Fig. 3 Obstructing rate of *Oncorhynchus mykiss* by bubble curtain with different hole spacing (1.0 mm hole diameter, 120 L/min gas flows)

(1.0、2.0、3.0和4.0 cm)的气泡幕对虹鳟均有明显的阻拦效果(T -test, $P<0.05$), 其中孔距为2.0 cm的气泡幕阻拦率最高, 显著高于孔距4.0 cm (One-way ANOVA, $P<0.05$), 与孔距1.0 cm和3.0 cm差异不显著 (One-way ANOVA, $P>0.05$)。

如图4所示, 在孔距2.0 cm、气量120 L/min时, 4种孔径(0.5、1.0、1.5和2.0 mm)的气泡幕均对虹鳟有明显的阻拦效果(T -test, $P<0.05$), 其中孔径为1.0 mm的气泡幕阻拦率最高, 但与孔径0.5、1.5和2.0 mm差异不显著 (One-way ANOVA, $P>0.05$)。

如图5所示, 在孔距2.0 cm、孔径1.0 mm时, 3种气量(60、120和180 L/min)的气泡幕均对虹鳟有明显的阻拦效果(T -test, $P<0.05$), 其中气量为120 L/min的气泡幕阻拦率最高, 显著高于气量180 L/min (One-

way ANOVA, $P<0.05$), 与气量60 L/min差异不显著 (One-way ANOVA, $P>0.05$)。综上所述, 在光照环境, 孔径1.0 mm、孔距2.0 cm、气量120 L/min的气泡幕对虹鳟的阻拦效果在所用工况气泡幕中最佳, 阻拦率为 $(96.32\pm3.99)\%$, 且随孔径、孔距、气量的增大, 气泡幕对虹鳟1h的平均阻拦率均呈现先增加后减小的趋势(表2)。

气泡幕出气速度与阻拦率的响应关系 通过出气速度计算公式, 得到气泡幕在各工况下的出气速度(表3)。在10.61—84.88 m/s出气速度内, 对阻拦率进行回归拟合(图6), 得到拟合公式为: $OR = -0.0063v^2 + 0.505v + 86.486$, $R^2 = 0.8367$, 其中二次项系数 $P=0.008<0.05$, 一次项系数 $P=0.016<0.05$, 常数项 $P=4.3\times10^{-7}<0.05$ 。由拟合公式可得阻拦率最高

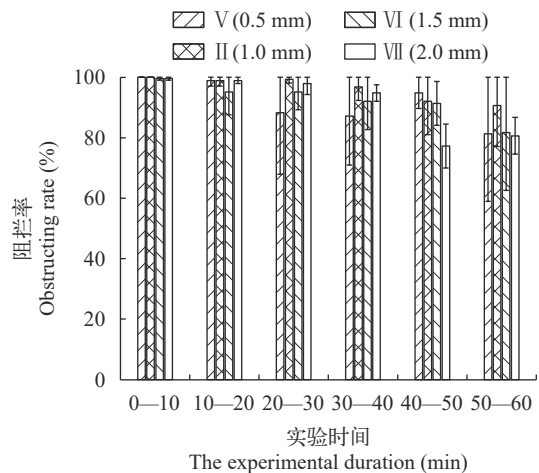


图4 不同孔径气泡幕对虹鳟的阻拦率(孔距2.0 cm, 气量120 L/min)
Fig. 4 Obstructing rate of *Oncorhynchus mykiss* by bubble curtain with different hole diameter (2.0 cm hole spacing, 120 L/min gas flows)

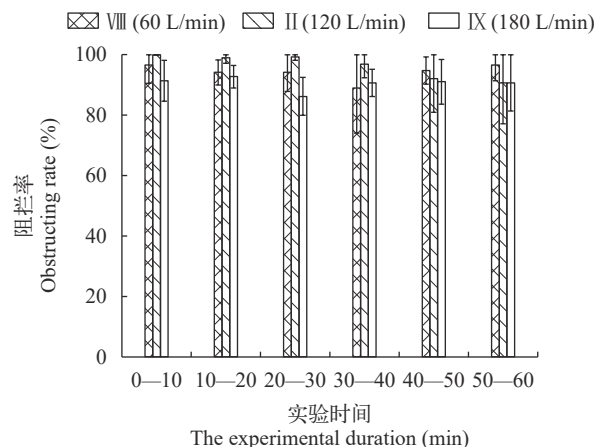


图5 不同气量气泡幕对虹鳟的阻拦率(孔径1.0 mm, 孔距2.0 cm)
Fig. 5 Obstructing rate of *Oncorhynchus mykiss* by bubble curtain with different gas flows (1.0 mm hole diameter, 2.0 cm hole spacing)

表 2 不同工况气泡幕对虹鳟1h的平均阻拦率

Tab. 2 Average obstructing rate of *Oncorhynchus mykiss* by bubble curtain under different conditions during 1h

工况 Condition	孔距 Hole spacing (cm)	孔径 Hole diameter (mm)	气量 Gas flow (L/min)	1h平均 阻拦率 Average obstructing rate for 1h (%)
I	1.0			95.40±1.49 ^{ab}
II	2.0			96.32±3.99 ^a
III	3.0	1.0	120	96.20±5.05 ^{ab}
IV	4.0			83.84±7.47 ^b
V		0.5		91.78±7.35 ^a
II	2.0	1.0	120	96.32±3.99 ^a
VI		1.5		92.52±6.05 ^a
VII		2.0		91.55±9.95 ^a
VIII			60	94.13±2.79 ^{ab}
II	2.0	1.0	120	96.32±3.99 ^a
IX			180	90.45±2.22 ^b

注: 不同小写字母表示不同显著性水平($P<0.05$)Note: Different lower-case letters denote significant differences ($P<0.05$)

表 3 不同工况气泡幕的出气速度

Tab. 3 Gas ejection velocity of bubble curtain under different conditions

工况 Condition	出气速度 Gas ejection velocity (m/s)
I	21.22
II	42.44
III	63.67
IV	84.88
V	169.77
VI	18.86
VII	10.61
VIII	21.22
IX	63.66

的出气速度为40.08 m/s, 与工况 II ($v=42.44$ m/s) 最为接近。

2.3 黑暗环境下气泡幕对虹鳟的阻拦率

在工况 II (孔径1.0 mm, 孔距2.0 cm, 气量120 L/min) 的黑暗环境实验中, 气泡幕的生成瞬间, 未发现虹鳟的游泳行为产生明显变化。在气泡幕形成后一段时间内, 虹鳟常被气泡上升时带动的水流冲到水体上层, 而水体上层和下层水流方向不同, 使虹鳟在水槽内无法保持身体稳定。随后, 虹鳟逐渐适应水流环境, 在水槽中平稳游动, 偶尔也出现突然调转方向, 以暴发速度进行短距离游动的现象。在虹鳟游向气泡幕的过程中, 虹鳟头部接触到气泡幕时会受到惊吓, 掉头游动或直接穿过气泡幕。虹

鳟有时出现倒着游的现象, 与光照环境下相似。

如图 7 所示, 黑暗环境下气泡幕对虹鳟1h的平均阻拦率为(87.48±2.55)%, 依然存在明显的阻拦效果(T -test, $P<0.05$)。黑暗环境中气泡幕对虹鳟的阻拦率与光照环境下存在显著差异(T -test, $P<0.05$), 平均阻拦率下降10%左右。

3 讨论

3.1 虹鳟穿越气泡幕的方式

实验观察发现, 虹鳟穿过气泡幕的方式可分为被动性和主动性两种方式。由于水槽空间的局限性, 气泡幕的上升过程会带动周围的水体, 在水槽内形成环流^[19](图 8)。本研究发现虹鳟喜欢在水槽的中下水层活动, 在气泡幕形成后, 虹鳟由于其趋流性, 顶流向水槽两端游动, 以克服环流的作用, 而虹鳟的位置相对于水槽基本保持不变, 大部分时间保持平稳游动。虹鳟偶尔会因水流流速过大出现倒退的情况, 甚至被气泡幕卷吸^[14], 被迫穿过气泡

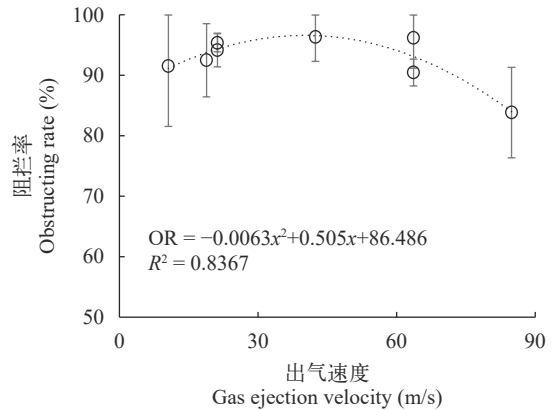


图 6 出气速度与阻拦率的拟合曲线

Fig. 6 Relationship between gas ejection velocity and obstructing rate

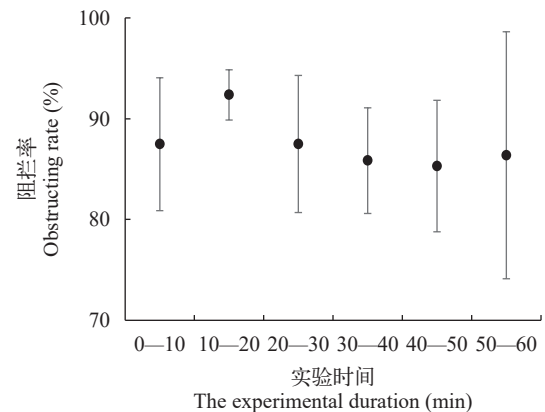


图 7 黑暗环境下气泡幕对虹鳟的阻拦率

Fig. 7 Obstructing rate of *Oncorhynchus mykiss* by bubble curtain in dark condition

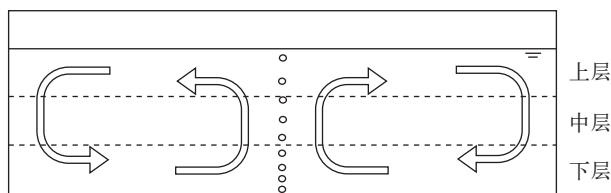


图8 水槽内环流示意图

Fig. 8 Schematic diagram of circulation in the flume

幕,这与白艳勤等^[20]的研究中花鲢(*Hemibarbus maculatus*)和白甲鱼(*Onychostoma sima*)出现倒着游靠近气泡幕的现象类似,这属于虹鳟被动穿过气泡幕方式。虹鳟在顶流平稳游动时偶尔会突然调转方向,以暴发速度进行短距离游动,或顺水流游向气泡幕,此时虹鳟通常会被气泡幕阻拦,但也存在虹鳟直接穿过气泡幕的情况,这属于虹鳟主动穿过气泡幕方式。

3.2 光照与黑暗条件对阻拦率的影响

鱼类主动游向气泡幕时,其视觉、听觉等器官在一定距离内可以感知到气泡幕的形状和振动,对鱼产生惊吓,使其在气泡幕前调转方向,从而游离气泡幕,达到阻拦效果^[21]。实验发现,在光照环境下气泡幕形成的瞬间,虹鳟有明显的应激反应,表现为游速加快、方向多变;在黑暗环境下气泡幕形成的瞬间,虹鳟没有明显的应激反应,说明气泡幕通过视觉作用对虹鳟的行为有一定影响,这是由于在黑暗环境下虹鳟的视觉无法感知到气泡幕的存在。在光照环境下,游向气泡幕的大部分鱼在接触气泡幕前便调转方向;在黑暗环境下,游向气泡幕的虹鳟会在头部接触气泡时受到惊吓,产生应激反应,说明在光照环境下,虹鳟能通过视觉提前感知到气泡幕,从而做出行为反应,而在黑暗环境下,虹鳟只能通过其他感官近距离感知气泡幕。工况II气泡幕在光照和黑暗环境下对虹鳟的阻拦率分别为 $(96.32 \pm 3.99)\%$ 和 $(87.48 \pm 2.55)\%$,黑暗环境下平均阻拦率较光照环境降低了10%左右,说明在视觉上气泡幕对虹鳟的阻拦有一定的作用,但不是主导作用。虹鳟的听觉和机械振动等其他感官哪一种起主导作用需要在今后进一步深入研究。另外鱼种不同、鱼对气泡幕的适应能力不同均可能造成阻拦效果的差异^[8, 14, 19, 22, 23]。

3.3 气泡幕参数对阻拦率的影响

气泡密集的气泡幕对虹鳟视线遮挡率高,更像一堵“气泡墙”,使虹鳟不会轻易穿过,而气泡稀疏的气泡幕无法完全阻断鱼对气泡幕另一侧环境的感知。不同的孔径、孔距和气量的气泡幕在气体喷出时发出的声音大小、振动的频率高低也不同,

可能对虹鳟有不同程度的影响。根据研究结果可知,气泡幕对虹鳟1h的平均阻拦率随孔径、孔距、气量的增加,均呈先增加后减小的趋势。实验中发现,与工况II相比,在同气量下,出气面积小(孔距大或孔径小)的气泡幕,气体喷出速度较大,气泡稀疏,视觉上的遮挡率较低,即虹鳟看向气泡幕另一侧的视线无法完全被气泡遮挡,如IV;而出气面积大(孔距小或孔径大)的气泡幕则会使管道内远离进气口处气压不足,难以将管内水体排出,因此此处的气泡断断续续,或无气体喷出,无法形成完整的气泡幕,如工况VII。与工况II相比,出气面积相同时,气量小的气泡幕气泡稀疏,如工况VIII;气量大的气泡幕气体喷出速度较大,带动水体形成的环流流速较大,可能会加强气泡幕对虹鳟的卷吸作用,如工况IX。从出气速度的角度分析,出气速度小的气泡幕气泡稀疏,出气速度大的气泡幕环流速度大、卷吸作用强,与实验结果一致。另外,孔距大的气泡幕底部会有较大的缝隙(如工况IV),使该水层的鱼类更易穿过气泡幕。

4 结论

为探究气泡幕对虹鳟的阻拦作用及阻拦机制,本研究通过单一变量法,分别用4种孔径、4种孔距及3种气量的气泡幕对虹鳟进行了阻拦实验,并对比了在黑暗条件与光照条件下阻拦率的差异,得到如下结论:(1)虹鳟穿过气泡幕的方式可分为被动性和主动性两种方式。(2)在本研究所设置的工况中,工况II,即孔径1.0 mm、孔距2.0 cm、气量120 L/min的气泡幕阻拦效果最佳,阻拦率为 $(96.32 \pm 3.99)\%$ 。(3)气泡幕对虹鳟1h的平均阻拦率,随孔径、孔距、气量的增大,均呈现先增加后减小的趋势,随出气速度增大同样呈先增大后减小的趋势。阻拦率与出气速度的拟合公式为: $OR = -0.0063v^2 + 0.505v + 86.486$, $R^2 = 0.8367$ 。(4)在黑暗环境下,工况II气泡幕对虹鳟的阻拦率为光照条件的90.82%,说明在视觉上气泡幕对虹鳟的阻拦有一定的作用,但不是主导作用。

参考文献:

- [1] Fan W T, Liu Y, Wang Q, et al. The blocking effect of bubble curtain on *Schizothorax oconnori* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(5): 1433-1437. [范纹彤, 刘雁, 王谦, 等. 气泡幕对异齿裂腹鱼的阻拦效果 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(5): 1433-1437.]
- [2] Stewart H A, Wolter M H, Wahl D H. Laboratory investigations on the use of strobe lights and bubble curtains to deter dam escapes of age-0 muskellunge [J]. *North Ameri-*

- can Journal of Fisheries Management*, 2014, **34**(3): 571-575.
- [3] Flores M N, Leighton T G, White P R, *et al.* The response of common carp (*Cyprinus carpio*) to insonified bubble curtains [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2021, **150**(5): 3874.
- [4] Xu S X, Lin C Y, Luo J, *et al.* Approach-avoidance behavior of juvenile silver carp to a bubble curtain at different gas flows [J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, **39**(1): 69-75. [徐是雄, 林晨宇, 罗佳, 等. 鲢幼鱼对不同气量气泡幕的趋避行为 [J]. 水生生态学杂志, 2018, **39**(1): 69-75.]
- [5] Zhao X G, He D R, Liu L D. The Intercepting effects of bubble curtains with different hole diameters on black porgy (*Sparus macrocephalus*) [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1989, **28**(1): 83-87. [赵锡光, 何大仁, 刘理东. 几种孔径气泡幕对黑鲷的阻拦作用 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1989, **28**(1): 83-87.]
- [6] Zhao X G, He D R, Liu L D. The intercepting effects of bubble curtains with different air-hole spacing on *sparus macrocephalus* [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1997, **28**(3): 285-293. [赵锡光, 何大仁, 刘理东. 不同孔距固定气泡幕对黑鲷的阻拦效果 [J]. 海洋与湖沼, 1997, **28**(3): 285-293.]
- [7] Liu L D, He D R. The reaction of five fresh-water fishes to immovable bubble curtain [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1988, **27**(2): 214-219. [刘理东, 何大仁. 五种淡水鱼对固定气泡幕反应初探 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1988, **27**(2): 214-219.]
- [8] Huang L Y, Chen J, Li L, *et al.* Study on the deterrent effect of bubble curtain on rockfish (*Sebastes schlegelii*) [J]. *Fishery Modernization*, 2016, **43**(6): 55-60. [黄六一, 陈婧, 李龙, 等. 气泡幕对许氏平鲈的阻拦效果研究 [J]. 渔业现代化, 2016, **43**(6): 55-60.]
- [9] Welton J S, Beaumont W R C, Clarke R T. The efficacy of air, sound and acoustic bubble screens in deflecting Atlantic salmon, *Salmo salar* L. smolts in the River Frome, UK [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2002, **9**(1): 11-18.
- [10] Leander J, Klaminder J, Hellström G, *et al.* Bubble barriers to guide downstream migrating Atlantic salmon (*Salmo salar*): an evaluation using acoustic telemetry [J]. *Ecological Engineering*, 2021(160): 106141.
- [11] Xing B B, Yin L M, Zhang G S, *et al.* Progress on the auditory characteristics of fish and their application [J]. *Marine Fisheries*, 2018, **40**(4): 495-503. [邢彬彬, 殷雷明, 张国胜, 等. 鱼类的听觉特性与应用研究进展 [J]. 海洋渔业, 2018, **40**(4): 495-503.]
- [12] Zhao X G, Liu L D, He D R. A study on the intercepting mechanism of an air-bubble curtain on black porgy (*Sparus macrocephalus*) [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, **29**(1): 35-40. [赵锡光, 刘理东, 何大仁. 气泡幕对黑鲷阻拦作用机制初探 [J]. 海洋与湖沼, 1998, **29**(1): 35-40.]
- [13] Zielinski D P, Voller V R, Svendsen J C, *et al.* Laboratory experiments demonstrate that bubble curtains can effectively inhibit movement of common carp [J]. *Ecological Engineering*, 2014(67): 95-103.
- [14] Yin R C, Lin C Y, Shi X T, *et al.* Blocking effect of static water and flowing water bubble curtain on *Schizothorax oconnori* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(3): 595-602. [尹入成, 林晨宇, 石小涛, 等. 静水与流水下气泡幕对异齿裂腹鱼的阻拦效应 [J]. 水生生物学报, 2020, **44**(3): 595-602.]
- [15] Wang B Q, Gu W, Xu G F. *Oncorhynchus mykiss* Shuikel 1 [J]. *China Fisheries*, 2021(10): 89-95. [王炳谦, 谷伟, 徐革锋. 虹鳟“水科1号” [J]. 中国水产, 2021(10): 89-95.]
- [16] Hu G, Wang B Q. An overview of global rainbow trout breeding industry with insight into reference to China [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2017, **30**(3): 1-6. [户国, 王炳谦. 国际虹鳟育种产业简介及其对我国的借鉴意义 [J]. 水产学杂志, 2017, **30**(3): 1-6.]
- [17] Dong S L. Researching progresses and prospects in large Salmonidae farming in cold water mass of Yellow Sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, **49**(3): 1-6. [董双林. 黄海冷水团大型鲑科鱼类养殖研究进展与展望 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, **49**(3): 1-6.]
- [18] Yin R C. The influence mechanism of bubble curtain of different specifications on the approach-avoidance behavior of fishes and its engineering application design [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020. [尹入成. 不同规格气泡幕对鱼类趋避行为影响机制及其工程应用设计 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.]
- [19] Chen Y, Zhang P D, Zhang S, *et al.* The intercepting effects of bubble curtains with different density on *Fugu rubripes* [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2002, **17**(3): 234-239. [陈勇, 张沛东, 张硕, 等. 不同密度固定气泡幕对红鳍东方鲀的阻拦效果 [J]. 大连水产学院学报, 2002, **17**(3): 234-239.]
- [20] Bai Y Q, Luo J, Niu J T, *et al.* Avoidance responses of *Hemibarbus maculatus* and *Onychostoma sima* to bubble curtains with different density [J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, **34**(4): 63-69. [白艳勤, 罗佳, 牛俊涛, 等. 不同密度气泡幕对花鲢和白甲鱼的阻拦效应 [J]. 水生态学杂志, 2013, **34**(4): 63-69.]
- [21] Qiao Y G, Huang H L, Huang M F, *et al.* Application of bubble curtains in fish behavior research [J]. *Modern Fisheries Information*, 2011, **26**(12): 29-32. [乔云贵, 黄洪亮, 黄妙芬, 等. 气泡幕在鱼类行为研究中的应用 [J]. 现代渔业信息, 2011, **26**(12): 29-32.]
- [22] Chen Z, Huang L Y, Huang H L, *et al.* Studies on obstructing effect of air-bubble curtain on *Sebastes schlegelii* [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, **47**(3): 51-57. [陈钊, 黄六一, 黄洪亮, 等. 固定气泡幕对许氏平鲈阻拦效果的研究 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, **47**(3): 51-57.]

- [23] Zhao X G, He D R, Liu L D. Comparison on the reactions of *sparus macrocephalus* and *Epinephelus awoara* to a bubble curtain [J]. *Journal of Ocean University of*

Qingdao, 1997, 27(1): 33-40. [赵锡光, 何大仁, 刘理东. 黑鲷和青石斑鱼对气泡幕反应的比较 [J]. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(1): 33-40.]

OBSTRUCTING EFFECT OF BUBBLE CURTAIN ON RAINBOW TROUT (*ONCORHYNCHUS MYKISS*)

ZHOU Mo, HUANG Liu-Yi, YOU Xin-Xing, LAN Gong-Hai, LI Yu-Yan and LIU Xiao

(Fisheries college, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), as a kind of cold water fish with rich nutrition and high value, has become one of the important aquaculture species of large sea cage in China. The underwater bubble curtain has the advantages of low cost, no pollution and no damage in catching and displacing fish. It has been applied in the control of fish in marine ranches, catching and displacing fish in river channels and intakes. In 2021, the “Shenlan 1” fully submersible large-scale steel structure cage developed by China has achieved large-scale rainbow trout farming in the cold water mass of the Yellow Sea. In order to make full use of the cold water mass in the Yellow Sea to cultivate cold water fish, realize the interception and aggregation of rainbow trout in the dark environment after the cage diving, and improve the fishing efficiency, we explored the obstructing effect of bubble curtain on rainbow trout under different conditions. The experiment was carried out in a light-tight room, under the light environment, four kinds of hole spacing (1.0, 2.0, 3.0 and 4.0 cm), four kinds of hole diameter (0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 mm) and three kinds of gas flows (60, 120 and 180 L/min) were used to generate bubble curtain. The obstructing experiment of rainbow trout was carried out by single variable method, and the optimal obstructing effect was obtained. On this basis, the obstructing effect of bubble curtain on rainbow trout under the optimal condition of dark environment was tested. The results showed that under the light environment, the optimal obstructing effect was the bubble curtain with hole diameter of 1.0 mm, hole spacing of 2.0 cm and gas flow of 120 L/min, and the obstructing rate was $(96.32 \pm 3.99)\%$. In the dark environment, the swimming speed of rainbow trout decreased significantly. The number of fish tail swimming above the bubble curtain pipe was 63.37% in the light environment, and the obstructing rate was $(87.48 \pm 2.55)\%$. It was observed that rainbow trout passed through the bubble curtain in passive and active ways. In light and dark environment, there are differences in the behavior and obstructing rate of rainbow trout, indicating that rainbow trout can perceive the bubble curtain in advance through vision, so as to make behavioral response. In dark environment, rainbow trout can not perceive the existence of bubble curtain visually, but it can only perceive bubble curtain through other senses at close range. The visual effect of bubble curtain on rainbow trout plays a certain role in the obstructing process. The bubble curtain with dense bubbles is more like a “bubble wall”, which prevents rainbow trout from passing through easily. However, the bubble curtain with sparse bubbles can not completely block the perception of the environment on the other side. This study explores the bubble curtains on the block mechanism of rainbow trout, the results can be used for inside the cages bubble curtains block fish, achieve the congregation of fish and other fishing gear partial fishing method and for large deep sea trout fish aquaculture control technology and fishing equipment research and development to provide theoretical reference and technical support.

Key words: Bubble curtain; Light environment; Dark environment; Obstructing rate; Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)