

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20241015001

http://www.yykxjz.cn/

陈枫, 李娇, 公丕海, 关长涛. 视觉与侧线器官对许氏平鲈趋礁行为的影响. 渔业科学进展, 2025, 46(4): 108–117

CHEN F, LI J, GONG P H, GUAN C T. Effects of visual and lateral line organs on reefing behavior of *Sebastes schlegelii*. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(4): 108–117

视觉与侧线器官对许氏平鲈趋礁行为的影响*

陈 枫^{1,2} 李 娇^{2①} 公丕海² 关长涛²

(1. 大连海洋大学水产与生命学院 辽宁 大连 116036;

2. 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室(中国水产科学研究院黄海水产研究所) 山东 青岛 266071)

摘要 本研究通过破坏视觉器官、破坏侧线器官及二者结合等处理手段, 对比分析视觉、侧线对许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)趋礁行为的作用。研究设置 1 个对照组和 5 个处理组, 共 6 个实验组, 将实验鱼投放在人工鱼礁的固定距离处, 统计分析在 12 h 内鱼礁周围实验鱼的瞬时聚集率与数量稳定后的瞬时聚集率均值, 并进行多因素方差分析。结果显示, 视觉器官与侧线器官均为主要影响因素, 在实验鱼的可视范围内, 视觉系统在许氏平鲈趋礁行为中产生极显著的影响($P<0.01$), 视觉被破坏降低了实验鱼的瞬时聚集率和变化趋势。侧线器官被破坏也对其趋礁行为产生极显著的影响($P<0.01$), 在视觉系统被破坏的情况下, 侧线系统的作用变得尤为重要。处理侧线的硫酸庆大霉素浓度越高, 实验鱼的瞬时聚集率和变化趋势越低, 表明硫酸庆大霉素处理浓度与侧线被破坏程度呈正相关。当视觉系统与侧线系统二者均被破坏时, 许氏平鲈的趋礁效率会显著降低, 二者交互效应不显著($P>0.05$)。本研究为岩礁鱼类的保护和增殖及海洋栖息地的修复和营造提供了重要参考。

关键词 许氏平鲈; 视觉器官; 侧线器官; 人工鱼礁; 趋礁行为

中图分类号 S953.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2025)04-0108-10

人工鱼礁是为了修复和改善海域生态环境而设置的人造构造物, 其目的是为鱼类及其他海洋生物提供栖息、繁殖和觅食的场所, 改善捕捞作业方式, 并有助于保护鱼类及修复海洋底质环境。20 世纪初, 日本和美国等国家率先开展了人工鱼礁的建设和研究, 逐渐扩展到全球范围。21 世纪初, 人工鱼礁的功能和种类不断丰富, 包括集鱼礁、产卵礁、养护礁等, 以适应不同的生态需求和渔业管理目标(李磊等, 2018; 沈璐等, 2022)。这些努力不仅对海洋生态系统的恢复和渔业资源的增殖至关重要, 也对提升海洋牧场的可持续发展具有深远的意义(Yoon *et al.*, 2014; 袁旻等, 2022; 张怀慧等, 2001)。人工鱼礁可以模拟自然礁石的特性, 从而吸引并聚集鱼类, 利用其趋礁行为促进生态恢复和资源增殖(孙军等, 2022; 姚佳等,

2021)。已有研究表明, 多种鱼类如黄鳍棘鲷(*Acanthopagrus latus*)、大黄鱼(*Larimichthys crocea*)、斑马鱼(*Danio rerio*)、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)、黑鲷(*Sparus macrocephalus*)和褐菖鲈(*Sebastes marmoratus*)等(江满菊等, 2023; 李磊等, 2019; 王淼等, 2010)具有显著的趋礁行为。目前, 对鱼类趋礁行为的感受器官调控机制研究尚不充分。

许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)是我国北方沿海地区的重要经济鱼类, 主要分布在东海、黄海和渤海(刘海波等, 2021; 丁奎等, 2014; 席杨等, 2020; 王晓艳等, 2024)。该鱼类在自然环境中展现出明显的趋礁行为, 即它们偏好聚集在岩礁及人工鱼礁周围, 这种行为帮助它们在上述结构物中寻找栖息和觅食的场所(刘鸿雁等, 2018; 邱宁等, 2023; 张宗航等, 2018)。随

* 国家重点研发计划(2023YFD2401105)和国家自然科学基金(32002442)共同资助。陈 枫, Email: 451107500@qq.com

① 通信作者: 李 娇, 高级工程师, Email: lijiao@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2024-10-15, 收修改稿日期: 2024-11-06

着近海渔业资源的逐渐减少, 许氏平鲈的人工养殖和增殖放流变得愈发重要, 其对人工鱼礁的依赖性使其在北方海洋牧场建设中具有极高的经济和生态价值(吴忠鑫等, 2012; 郭浩宇等, 2015; 杨红生, 2016)。许氏平鲈的趋礁行为和生存策略与其感觉器官的功能密切相关。视觉系统和侧线系统是许氏平鲈在捕食、避敌和社交行为中的关键感官, 帮助许氏平鲈在清晰的水域中识别饵料、掠食者以及其他鱼类, 但在浑浊或光线不足的环境中, 视觉的作用会受到限制。因此, 许氏平鲈依赖于其高度发达的侧线系统来弥补视觉上的不足。侧线系统由机械感受器和电感受器组成, 能够感知水流、压力和电场的微弱变化, 使许氏平鲈能够在复杂的水域中准确探测到移动的饵料和潜在的威胁。本研究旨在揭示许氏平鲈的感觉器官在趋礁行为中的作用, 为许氏平鲈的趋礁机制提供基础生物学资料, 也为其人工驯养及物种保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验对象

本研究选用天源水产公司培育的许氏平鲈作为实验对象。实验鱼共 200 尾, 体长范围为 14.1~21.9 cm, 平均体长为 17.1 cm; 体重范围为 89.1~279.1 g, 平均体重为 175.2 g。实验开始前, 在水槽中暂养 72 h, 期间保持正常充氧, 不进行投喂。实验时, 将实验鱼随机捕捞, 每组实验用鱼 40 尾。

1.2 实验方法

麻醉处理: 在透明的容积为 20 L 的溶液配比桶中准备 10 L 海水, 用电子天平称量 1 g 的粉末状 的鱼用麻醉剂 MS-222, 将麻醉剂放入海水中, 搅拌至完全溶解, 将实验鱼放入 1 mg/mL 的 MS-222 溶液中, 麻醉时间为 2 min。每桶麻醉剂麻醉处理 20 尾实验鱼, 之后重新配制溶液使用(张坤等, 2021; 官曙光等, 2011; 杨林等, 2024)。

眼球玻璃体破坏: 准备长 6 cm、直径 1 mm 的细钢针, 为防止细菌感染, 对钢针进行消毒处理。具体操作: 准备 75% 的医用酒精, 用棉签蘸取医用酒精擦拭钢针。将麻醉完毕的实验鱼捞出, 使用消毒过的钢针破坏眼球玻璃体。顺时针、逆时针分别转 10 圈, 以确保眼球的玻璃体完全浑浊。处理过后在眼睛伤口处涂抹红霉素软膏以防感染(孙理彬, 2006)。

侧线感觉器官破坏: 硫酸庆大霉素可以破坏侧线器官的感受器细胞(Lloyd *et al*, 2018), 因此, 选择硫

酸庆大霉素作为破坏侧线的试剂。本研究使用 2 种不同浓度的硫酸庆大霉素溶液对实验鱼进行处理, 分别为 5 mg/mL 和 8 mg/mL, 在实验前一天的 18:00 将实验鱼放入配制好的硫酸庆大霉素溶液中, 在实验当天 06:00 将实验鱼捞出放入暂养桶中, 处理时间均为 12 h (van Trump *et al*, 2010; Brown *et al*, 2011)。

实验包括 1 个对照组和 5 个处理组, 共 6 组实验, 处理方法见表 1。实验鱼在开始实验前被放置在投放处 1 h 以适应环境。实验时间为每天 08:00—20:00, 期间不充气和投喂。实验期间, 全程进行视频录制, 每 30 min 拍照记录一次, 保持静水状态。

表 1 实验分组命名和实验鱼处理方法
Tab.1 Naming and treatment methods of fish in different experimental groups

组别 Group	视觉 Vision	侧线器官 Lateral line organ
A1	正常 Normal	不处理 Unprocessed
B1	被破坏 Damaged	不处理 Unprocessed
B2	正常 Normal	5 mg/mL 硫酸庆大霉素处理 Treated with 5 mg/mL gentamicin sulfate
B3	被破坏 Damaged	5 mg/mL 硫酸庆大霉素处理 Treated with 5 mg/mL gentamicin sulfate
B4	正常 Normal	8 mg/mL 硫酸庆大霉素处理 Treated with 8 mg/mL gentamicin sulfate
B5	被破坏 Damaged	8 mg/mL 硫酸庆大霉素处理 Treated with 8 mg/mL gentamicin sulfate

1.3 实验条件

实验在烟台天源水产公司的养殖水池中进行, 水池规格为 8.0 m×8.0 m×1.2 m(长×宽×高)。水池底部和内壁涂有蓝色水产养殖专用环保涂料, 用红色水产养殖专用环保涂料将水池分割为 15×16=240 个区域, 每个区域大小为 0.5 m×0.5 m。水池四面池壁水面上方 30 cm 处按照等距离分别安装了 4 个灯泡, 共 16 个, 确保实验区域的均匀照明。实验水深为 0.7 m, 水温为 11~13 ℃, pH 为 7.2~7.6。实验场地周围用带有颜色的遮光布围起。使用 8 台型号相同的彩色水下摄像机, 统一加固的外壳固定在不锈钢支架上, 实时监测 4 个鱼礁周围的许氏平鲈行为。摄像头设置在距离人工鱼礁 1.2 m 的侧后方。使用鱼眼摄像头对整个实验水池进行全景监测以捕捉所有实验鱼的活动情况, 场地示意图 1。

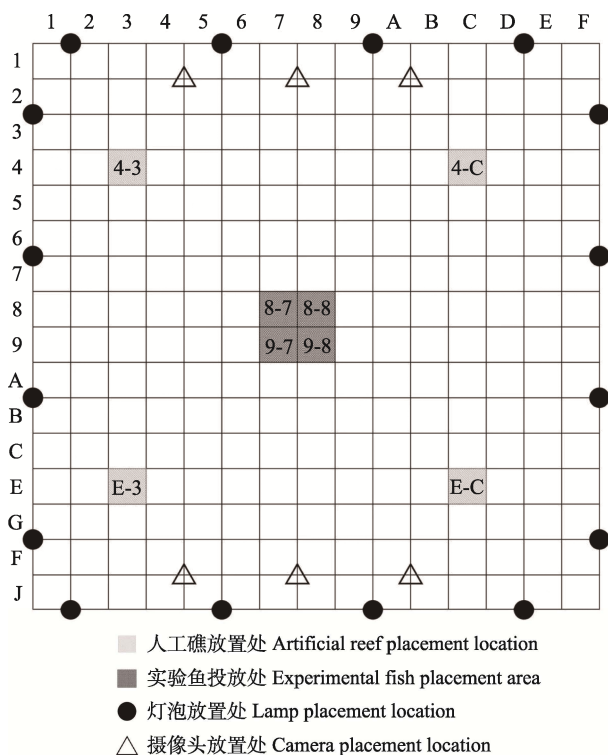
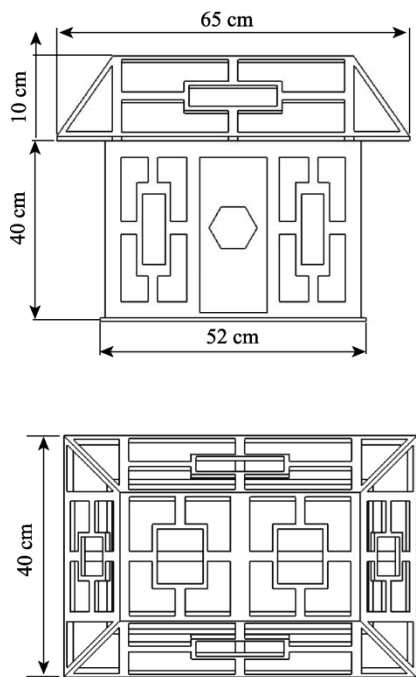


图 1 区域划分示意图

Fig.1 Schematic diagram of regional division

水池内设置人工鱼礁,鱼礁结构示意图见图 2、图 3。鱼礁分为上下两部分,底部尺寸为 52 cm × 33 cm × 40 cm,具有 15 cm × 10 cm 的开孔;上部尺寸为 65 cm × 40 cm × 10 cm,顶部设置少量开口。人工鱼礁被分



别安置在距池壁 2 m 处的 4 个区域(图 1 中代号:4-3、4-C、E-3、E-C)。将场地的中间区域(图 1 中代号:8-7、8-8、9-7、9-8)设置为实验鱼投放处,实验开始前投放处采用隔离围挡,实验开始时,准时提升隔离围挡,确保实验开始前实验鱼距离鱼礁的位置相近。

1.4 计算公式

瞬时聚集率(P): 某个特定时间特定鱼礁周围出现实验鱼尾数与实验鱼总尾数的百分比。

$$P = \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \times 100\%$$

式中, n_i 为特定时间点实验鱼在某鱼礁的出现尾数, N_i 为单次实验中实验鱼总尾数。

瞬时聚集率均值(P_j): 某个时间段内连续瞬时聚集率的平均值。

$$P_j = \left(\frac{\sum_{j=1}^M P_j}{M} \right) \times 100\%$$

式中, P_j 表示瞬时聚集率, M 为在某个特定时间段内的瞬时时间点个数($M \leq 13$)。

1.5 数据处理与统计分析

使用 Excel 2018、IBM SPSS Statistics 22 进行数据统计,分析方法采用多因素方差分析, $P < 0.05$ 表示具有显著性差异。

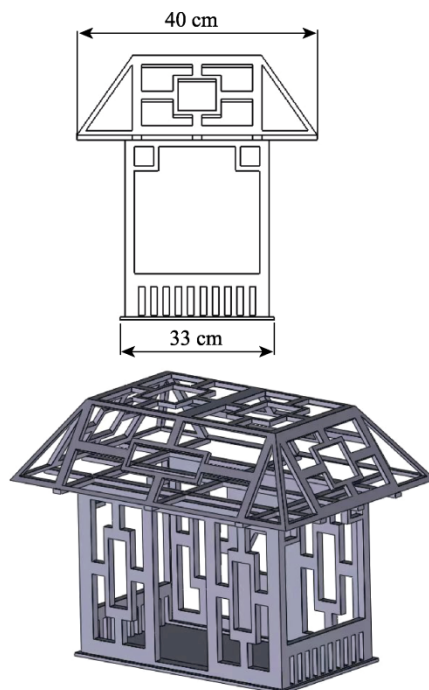


图 2 人工鱼礁模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of artificial reef model

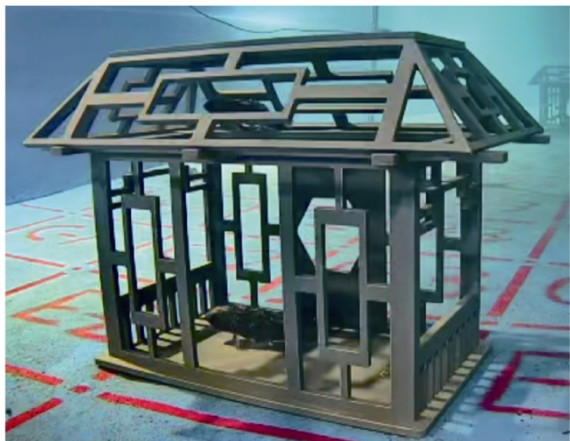


图3 人工鱼礁模型实物图

Fig.3 Physical model of artificial reef

2 结果与分析

2.1 不同处理条件下许氏平鲈趋礁行为描述

在本实验中,通过分析并对比许氏平鲈在不同处理方式下在不同鱼礁周围的瞬时聚集率发现,随着时间增加,所有人工鱼礁周围的瞬时聚集率均呈现增加趋势,在实验后半段,瞬时聚集率逐渐趋于稳定。在 08:00—09:00,所有实验组 4 个鱼礁周围

的聚集率极低,显示鱼类在该时间段活动欲望较低,因为在该时间段实验水池的温度较低且实验鱼并未完全适应实验场地。随后,09:00—10:00,鱼礁周围聚集率开始上升,但上升速度较为缓慢;在 10:00—16:00,实验水温逐渐上升并且实验鱼逐渐适应实验场地,实验鱼的活动性显著增强,上升速度显著提高;在 16:00 左右达到高峰;进入 16:00—20:00 时间段,聚集率趋于稳定并维持在较高水平,显示人工鱼礁对许氏平鲈的持续诱集效果(图 4)。

通过观察不同处理方式下许氏平鲈的趋礁行为发现,A1 组正常实验鱼在初期通常保持静止,集中在水池底部,活跃性较低。经过 10~30 min 的适应期后,部分鱼类开始向人工鱼礁进行试探性游动,最终,大多数鱼逐渐表现出明确的围绕水池环形游动行为并进入人工鱼礁。随着时间增加,鱼类活动逐渐集中在鱼礁内部,数量远高于外部并在内部停留时间较长。B1 组为视觉被破坏的鱼,由于缺少视觉信息,适应时间延长,约 1 h 后,开始出现试探性游动行为,活跃性降低,未出现类似于正常实验鱼的围绕水池绕圈行为,趋近人工鱼礁的速度明显减慢,一些鱼待在原地,不进行广泛活动。该处理方法下的实验鱼在接近鱼礁时常出现碰壁现象,与正常实验鱼相比,实验

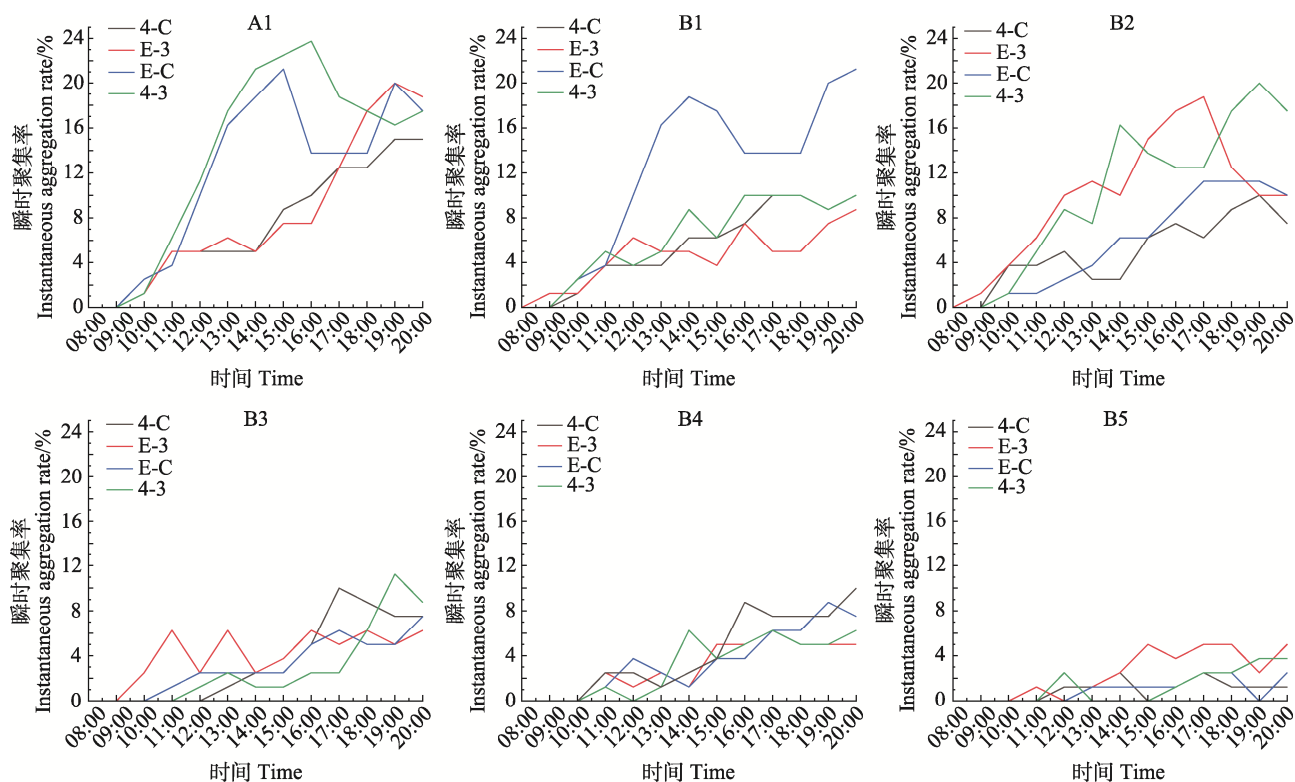


图4 不同处理条件下 4 个人工鱼礁的瞬时聚集率随时间变化趋势

Fig.4 The temporal variation trend of instantaneous aggregation rates for four artificial reefs under different treatment conditions

鱼在鱼礁内部的停留欲望并不强,鱼礁内部的数量较少,鱼礁外部与内部的比值接近1:1。处理组B2(视觉正常、5 mg/mL 硫酸庆大霉素处理)鱼,由于缺少侧线器官所提供的信息,适应时间稍长,约30 min之后,开始出现试探性游动行为,侧线被破坏的鱼活跃性较高,试探性游动范围较大,与视觉被破坏鱼相比适应时间较短,可以较快地趋向人工鱼礁并准确定位,但仍未出现围绕水池环形游动行为,鱼礁内部数量仍远高于外部。将处理组B2与B4(视觉正常、8 mg/mL 硫酸庆大霉素处理)进行对比可以发现,使用高浓度庆大霉素处理的实验鱼相较于低浓度,适应时间更长,出现试探性游动行为的时间点更晚,趋礁欲望更弱,大部分实验鱼都停留在原地,鱼礁内部的数量与外部数量的比值降低,鱼礁内部的数量仍高于外部数量。B3组(视觉被破坏、5 mg/mL 硫酸庆大霉素处理)的实验鱼,其视觉和侧线器官这两种主要感知鱼礁的器官受到影响,因此,实验鱼的趋礁欲望更低,适应时间显著增加,在2 h之后才有少量实验鱼进行试探性游动,并且游动范围有限。这些鱼在接近人工鱼礁时频繁出现碰壁现象,难以准确定位和进入鱼礁的缝隙。某些实验鱼在游动时身体出现倾斜、抬头或低头的行为,显示出严重的身体协调问题。B5组(视觉被破坏、8 mg/mL 硫酸庆大霉素处理)的实验鱼,其趋礁欲望极度降低,并且适应时间最长,在3 h后有极少数的实验鱼开始进行试探性游动,且游动范围极小,更加频繁地出现碰壁现象,游动时频繁出现倾斜、抬头和低头行为,个别实验鱼出现与水平面倾角大于45度的现象。

2.2 不同处理条件下瞬时聚集率的变化

在08:00—09:00,所有实验组的瞬时聚集率均为0,表明在环境适应的初期阶段,鱼类几乎没有表现出明显的聚集行为。09:00—10:00,处理组B5的聚集率仍为0,其他组的聚集率均开始上升,其中,A1、B1、B2三组的上升速率明显高于B3和B4组。随着时间推移,10:00—16:00,所有实验组的聚集率开始显著上升。对照组A1在10:00时的聚集率为6.25%,并迅速上升至15:00时的60.00%,B1和B2组在12:00和13:00时的聚集率分别达到了23.75%和30.00%,随后在15:00时分别上升至37.50%和41.25%。B3组的聚集率在14:00时为8.75%,并在15:00时达到10.00%。B4和B5组的聚集率较低,B4组在15:00时为16.25%,而B5组的聚集率为6.25%。16:00—20:00,各组的聚集率趋于稳定。A1组在16:00时的聚集率为55.00%,并在19:00时达到71.25%,随后在20:00

略微下降至68.75%。B1和B2组的聚集率在18:00时分别为38.75%和50.00%,并在20:00时分别保持在46.25%和45.00%。B3组的聚集率在19:00时达到28.75%,在20:00时略增至30.00%。B4组在19:00时为26.25%,20:00时为28.75%;B5组在18:00时为23.75%,20:00时为28.75%(图5)。

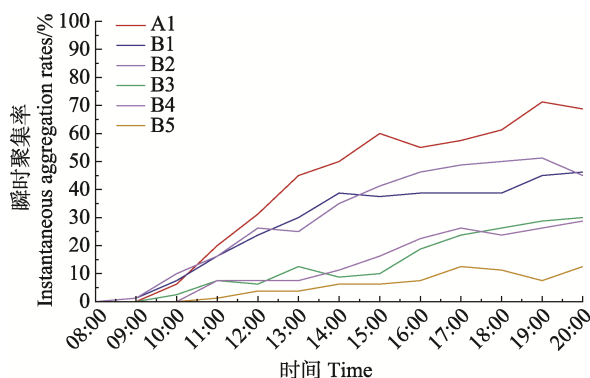


图5 不同处理条件下瞬时聚集率随时间变化趋势

Fig.5 The temporal variation trend of instantaneous aggregation rates under different treatment conditions

将25%作为低瞬时聚集率的阈值,分析得到全部实验组达到阈值的时间:A1为3.5 h,B1为4.5 h,B2为4.0 h,B3为7.5 h,B4为8.5 h,B5未达到阈值。

结果表明,视觉正常的组(A1、B2和B4组)在达到低聚集阈值的时间上明显快于视觉被破坏的组(B1、B3和B5组),突出了正常视觉在鱼类趋礁行为中的重要性。A1组的聚集时间为3.5 h,B2组为4.0 h,B4组则为8.5 h。B2组虽然使用了药物处理破坏了侧线器官,但由于其正常的视觉能力,依然能较快达到低聚集阈值。在视觉被破坏的组中,B1组的聚集时间为4.5 h,B3组则显著延长至7.5 h,而B5组未达到阈值,这显示在视觉和侧线双重损伤的情况下,趋礁行为受到极大抑制。

将45%作为高瞬时聚集率的阈值,分析得到全部实验组到达阈值的时间:A1为5.0 h,B1为11.0 h,B2为8.0 h,B3、B4、B5均未达到阈值。

结果表明,A1、B1和B2组可以达到高瞬时聚集率阈值,A1组在达到高瞬时聚集率阈值所花费的时间为5 h,相对其他处理组较少,B1组达到阈值所花费的时间为11 h,大于B2组花费的时间(8 h)。B3、B4和B5组未达到阈值,说明如果对实验鱼的视觉和侧线器官进行较大程度的破坏时,会显著降低实验鱼的趋礁能力,最终导致鱼礁区周围的瞬时聚集率无法达到较高的阈值。

将统计数据的变化趋势进行分析可以得出,对照组A1组的上升速度最快,显示鱼类在身体完全正常情

况下的聚集率上升最快。B1 和 B2 处理组的上升速度一般, 表明如果仅破坏实验鱼的视觉或侧线器官, 实验鱼仍可以通过未被破坏的其他感觉器官感知鱼礁的具体位置, B3 组的上升速度较慢。B2 和 B4 处理组的实验结果表明, 硫酸庆大霉素处理浓度越大, 实验鱼的趋礁效率越低。因此, 推测硫酸庆大霉素处理的浓度和侧线器官破坏的程度呈正相关, 侧线器官破坏程度越大, 实验鱼趋向人工鱼礁的效率越低。B5 处理组的上升速度最慢, 表明实验鱼的视觉和侧线完全被破坏, 会导致实验鱼几乎完全失去感知鱼礁的能力, 且其活动性会大大降低。

2.3 不同处理条件下稳定后瞬时聚集率分析与比较

在 16:00—20:00 时间段, 瞬时聚集率进入稳定阶段。计算对照组 A1, 处理组 B1、B2、B3、B4、B5 的瞬时聚集率均值分别为 62.75%、41.50%、48.25%、25.50%、25.50%、10.25% (表 2)。将视觉正常实验鱼

分组进行比较, 瞬时聚集率均值由大到小依次为 A1、B2、B4。将视觉破坏实验鱼分组进行比较, 组内瞬时聚集率均值由大到小依次为 B1、B3、B5。将侧线正常鱼分组进行分析, 组内瞬时聚集率均值由大到小依次为 A1、B1, 将侧线轻度鱼破坏分组进行比较, 组内瞬时聚集率均值由大到小依次为 B2、B3。将侧线重度破坏鱼分组进行比较, 组内瞬时聚集率均值由大到小依次为 B4、B5。

将稳定后的瞬时聚集率进行多因素方差分析, 结果显示, 视觉系统在许氏平鲈趋礁行为中产生极显著的影响($P<0.01$), 视觉破坏降低了鱼类的稳定后瞬时聚集率。侧线器官破坏也对趋礁行为产生极显著的影响($P<0.01$), 在视觉系统被破坏的情况下, 侧线系统的作用变得尤为重要, 二者均为主要影响因素。且处理侧线的庆大霉素浓度越高, 实验鱼的稳定后瞬时聚集率越低。视觉系统与侧线系统二者交互效应不显著($P>0.05$)。

表 2 不同处理条件下稳定后瞬时聚集率均值
Tab.2 The mean instantaneous aggregation rates after stabilization under different treatment conditions

不同侧线处理方法 Different lateral line treatment methods	稳定后瞬时聚集率均值 The mean instantaneous aggregation rate after stabilization/%	
	视觉正常 Normal vision	视觉被破坏 Visual damaged
侧线正常 Lateral line normal	62.75±7.04 ^{aA}	41.50±3.79 ^{aB}
低浓度处理 Low concentration treatment	48.25±2.59 ^{bA}	25.50±4.47 ^{bB}
高浓度处理 High concentration treatment	25.50±2.44 ^{cA}	10.25±2.56 ^{cB}

注: 数据标有不同小写字母表示相同视觉处理方式下不同侧线处理方式的瞬时聚集率之间差异显著($P<0.05$); 数据标有不同大写字母表示相同侧线处理条件下不同视觉处理条件的瞬时聚集率之间差异显著($P<0.05$)。

Note: Data with different lowercase letters indicate significant differences in the instantaneous aggregation rates under different lateral line treatment conditions within the same visual treatment ($P<0.05$). Data with different uppercase letters indicate significant differences in the instantaneous aggregation rates under different visual treatment conditions within the same lateral line treatment ($P<0.05$).

3 讨论

在许氏平鲈的趋礁行为中, 视觉系统发挥了至关重要的作用(王仁龙等, 2018; 张硕等, 2008)。相关实验研究表明, 当鱼类的视觉受到干扰或完全失效时, 其对人工鱼礁的定位和聚集能力显著下降。在光线不足或环境复杂的情况下, 这一影响尤为明显。视觉系统被破坏使得鱼类难以准确识别鱼礁的位置和结构, 从而影响它们在鱼礁中的聚集行为。当水质清晰且距离在视觉范围内, 视觉信息作为主要的定位手段, 能够有效地指导鱼类趋向目标。因此, 良好的视觉能力对于鱼类在环境中的导航和行为选择至关重要。在视觉系统正常的条件下, 鱼类能够迅速识别鱼礁, 进行有效趋向和聚集, 但当视觉受到影响时, 这种行为的

精确性和效率会大大降低, 且实验鱼还会出现碰壁、对鱼礁感知不明显等行为, 显示了视觉系统在鱼类趋礁行为过程中的重要作用。侧线系统在许氏平鲈的趋礁行为中也发挥关键的作用(李娇等, 2020)。该系统能够感知水流和压力变化, 为鱼类提供关于环境动态的重要信息。当视觉被破坏或环境条件不利于视觉感知时, 侧线系统帮助鱼类通过感知水流和压力变化来进行导航和觅食。这种现象使鱼类能够在复杂的环境中保持有效的趋礁行为, 说明侧线系统在视觉系统缺陷情况下的重要性和有效性。在许氏平鲈的趋礁行为中, 视觉和侧线系统的作用是互补的。本研究发现, 视觉和侧线系统均正常时, 许氏平鲈的趋礁行为非常明显, 视觉系统正常, 仅对侧线系统进行低浓度硫酸庆大霉素处理的情况下, 实验鱼的聚集率仍能达到较

高水平,但当使用高浓度处理的情况下,聚集率显著降低。当视觉系统受到干扰时,实验鱼仍能依靠侧线系统进行趋礁行为,并且聚集率最终达到较高水平,当视觉系统与侧线系统均被完全破坏时,实验鱼的礁区聚集率最低。以上结果说明,视觉系统与侧线系统二者在鱼类的趋礁行为中共同发挥作用,确保了鱼类能够在多种环境条件下成功地进行趋礁,体现了感官系统在鱼类行为适应中的复杂性和灵活性。

本研究发现,许氏平鲈视觉对其鱼礁感知作用十分显著,此现象可能是由于本实验条件的局限性。实验中实验鱼到鱼礁的最大距离为 3.5 m。根据相关研究和预实验的观察,该范围小于许氏平鲈成鱼的视线距离(冯春雷等, 2009; 苏锦祥, 2010)。鱼礁一开始就放置在许氏平鲈的有效视觉区域,因此,视觉对趋礁行为的影响比侧线器官的影响要大。未来的研究可以通过扩大实验场地或探索更复杂的环境条件,以全面评估各感官系统在不同情况下的作用。这不仅能增强对鱼类行为的理解,也有助于制定更有效的保护和管理策略。进一步研究可以聚焦于不同环境条件下的感官系统相互作用,此外,结合生态模型和数据分析,可以更深入地探讨视觉与侧线系统的相互依赖性及其对种群动态的影响。通过这种方式,可以为维护海洋生态系统的健康和生物多样性提供更加全面的科学依据。最终,优化人工鱼礁的设计与管理,将有助于提高其对鱼类的吸引力,从而促进生态系统的恢复和可持续发展。许氏平鲈的趋礁行为是视觉和侧线系统综合作用的结果。视觉系统主要提供目标的直接感知和定位能力,而侧线系统则在视觉信息不足时提供关键的补充支持。这种综合作用不仅揭示了许氏平鲈在环境适应中的感官系统功能,也为人工鱼礁的设计和海洋生态系统的管理提供了重要的科学依据。

参 考 文 献

- BROWN A D, MUSSEN T D, SISNEROS J A, *et al.* Reevaluating the use of aminoglycoside antibiotics in behavioral studies of the lateral line. *Hearing Research*, 2011, 272(1/2): 1–4
- DING K, ZHANG H, ZHANG X M, *et al.* Comparative analysis of genetic variation in cultured and wild populations of black rockfish (*Sebastes schlegelii*) based on mitochondrial DNA control region. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(6): 769–777 [丁奎, 张辉, 张秀梅, 等. 基于线粒体控制区的许氏平鲈养殖群体与野生群体比较研究. *水产学报*, 2014, 38(6): 769–777]
- FENG C L, LI Z G, HUANG H L, *et al.* Application of fish behavior research in fishing. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2009, 24(2): 166–170 [冯春雷, 李志国, 黄洪亮, 等. 鱼类行为研究在捕捞中的应用. *大连水产学院学报*, 2009, 24(2): 166–170]
- GUAN S G, GUAN J, LIU H J, *et al.* Anesthetic effect of MS-222 on juveniles of *Sebastes schlegelii*. *Marine Sciences*, 2011, 35(5): 100–105 [官曙光, 关健, 刘洪军, 等. MS-222 麻醉许氏平鲈幼鱼的初步研究. *海洋科学*, 2011, 35(5): 100–105]
- GUO H Y, ZHANG X M, GAO T X. Effects of artificial shelters and feeding frequency on growth and behavior of juvenile *Sebastes schlegelii*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(2): 319–331 [郭浩宇, 张秀梅, 高天翔. 人工隐蔽物及投喂频率对许氏平鲈幼鱼生长和行为的的影响. *中国水产科学*, 2015, 22(2): 319–331]
- JIANG M J, GUO Y, QIN C X, *et al.* Behavioral response of juvenile *Acanthopagrus latus* to artificial reef models with different opening shapes and diameters. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(12): 1496–1506 [江满菊, 郭禹, 秦传新, 等. 黄鳍棘鲷幼鱼对不同开孔形状和直径的人工鱼礁模型的行为响应. *中国水产科学*, 2023, 30(12): 1496–1506]
- LI J, GONG P H, CHANG Q, *et al.* Research progress on behavioral ecology of reef fish. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(6): 192–199 [李娇, 公丕海, 常青, 等. 岩礁鱼类行为生态学研究进展. *渔业科学进展*, 2020, 41(6): 192–199]
- LI L, CHEN D, PENG J X, *et al.* Comparison of attraction effects of three artificial reef models for black porgy *Sparus macrocephalus*, sea perch *Lateolabrax maculatus* and large yellow croaker *Larimichthys crocea*. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, 34(3): 413–418 [李磊, 陈栋, 彭建新, 等. 不同人工鱼礁模型对黑棘鲷、中国花鲈和大黄鱼的诱集效果比较. *大连海洋大学学报*, 2019, 34(3): 413–418]
- LI L, CHEN D, PENG J X, *et al.* On the attractive effects of three artificial reef models for *Sparus macrocephalus*. *Marine Fisheries*, 2018, 40(5): 625–631 [李磊, 陈栋, 彭建新, 等. 3 种人工鱼礁模型对黑棘鲷的诱集效果研究. *海洋渔业*, 2018, 40(5): 625–631]
- LIU H B, REN X Z, ZHANG Q, *et al.* Numerical modeling of fish movement in a recirculating aquaculture tank: In the case of Schlegel's black rockfish *Sebastes schlegelii*. *Journal of Dalian Ocean University*, 2021, 36(6): 995–1002 [刘海波, 任效忠, 张倩, 等. 循环水养殖池内鱼类运动数值模型的建立——以许氏平鲈为例. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(6): 995–1002]
- LIU H Y, LÜ H B, ZHANG P D, *et al.* Attraction effect of artificial reef model and macroalgae on juvenile *Sebastes schlegelii* and *Hexagrammos otakii*. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(1): 48–59 [刘鸿雁, 吕洪斌, 张沛东,

- 等. 人工鱼礁模型和大型海藻对许氏平鲈和大泷六线鱼幼鱼的诱集作用. 水产学报, 2018, 42(1): 48–59]
- LLOYD E, OLIVE C, STAHL B A, *et al.* Evolutionary shift towards lateral line dependent prey capture behavior in the blind Mexican cavefish. *Developmental Biology*, 2018, 441(2): 328–337
- QIU N, YU Y, JIA J N, *et al.* Thigmotaxis of six species of fish in different water layers of the Yangtze River. *Sichuan Journal of Zoology*, 2023, 42(4): 381–389 [邱宁, 喻焱, 贾建娜, 等. 6 种不同水层长江鱼类的趋触行为. 四川动物, 2023, 42(4): 381–389]
- SHEN L, ZHANG N H, TIAN T, *et al.* Organisms attachment on 3D printed concrete artificial reefs. *Journal of Dalian Ocean University*, 2022, 37(4): 584–591 [沈璐, 张年华, 田涛, 等. 3D 打印混凝土人工鱼礁的生物附着效果. 大连海洋大学学报, 2022, 37(4): 584–591]
- SU J X. *Ichthyology and marine fish culture*. 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2010 [苏锦祥. 鱼类学与海水鱼类养殖. 第2版. 北京: 中国农业出版社, 2010]
- SUN J, SONG Y Y, SHI Y F, *et al.* Progress of marine biodiversity studies in China seas in the past decade. *Biodiversity Science*, 2022, 30(10): 181–195 [孙军, 宋煜尧, 施义锋, 等. 近十年中国海洋生物多样性研究进展. 生物多样性, 2022, 30(10): 181–195]
- SUN L B. An experimental study on retinopathy of traumatic eyeball rupture. Master's Thesis of Zhengzhou University, 2006. [孙理彬. 眼球破裂视网膜病变的实验研究. 郑州大学硕士研究生学位论文, 2006]
- VAN TRUMP W J, COOMBS S, DUNCAN K, *et al.* Gentamicin is ototoxic to all hair cells in the fish lateral line system. *Hearing Research*, 2010, 261(1/2): 42–50
- WANG M, ZHANG S Y, WANG W D, *et al.* Experimental study on the juvenile *Sparus macrocephalus*'s tendency to different structural spaces of artificial reef. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(11): 1762–1768 [王淼, 章守宇, 王伟定, 等. 人工鱼礁的矩形间隙对黑鲷幼鱼聚集效果的影响. 水产学报, 2010, 34(11): 1762–1768]
- WANG R L, WANG Z B, JIANG H B, *et al.* Growth and feeding characteristics of *Sebastes schlegelii* in 'specific developmental periods'. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(5): 39–50 [王仁龙, 王志宝, 姜海滨, 等. 许氏平鲈“特定发育期”生长与摄食特性的研究. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(5): 39–50]
- WANG X Y, LI B S, SUN Y Z, *et al.* The repair effect of arginine on soybean meal-induced enteritis of *Sebastes schlegelii*. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, 45(3): 76–86 [王晓艳, 李宝山, 孙永智, 等. 精氨酸对许氏平鲈豆粕型肠炎的修复作用研究. 渔业科学进展, 2024, 45(3): 76–86]
- WU Z X, ZHANG L, ZHANG X M, *et al.* Nekton community structure and its relationship with main environmental variables in Lidao artificial reef zones of Rongcheng. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21): 6737–6746 [吴忠鑫, 张磊, 张秀梅, 等. 荣成俚岛人工鱼礁区游泳动物群落特征及其与主要环境因子的关系. 生态学报, 2012, 32(21): 6737–6746]
- XI Y, TIAN T, YANG J, *et al.* Reef approaching behavior of juvenile *Sebastes schlegelii* under different flow fields. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(3): 399–406 [席杨, 田涛, 杨军, 等. 许氏平鲈幼鱼在不同流场环境下的趋礁行为研究. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 399–406]
- YANG H S. Construction of marine ranching in China: Reviews and prospects. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(7): 1133–1140 [杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望. 水产学报, 2016, 40(7): 1133–1140]
- YANG L, ZHANG B Y, MENG Z, *et al.* Anesthetic effect of MS-222 on juvenile black rockfish (*Sebastes schlegelii*). *Progress in Fishery Sciences*, 2024, 45(6): 109–118 [杨林, 张邦胤, 孟振, 等. MS-222 对许氏平鲈幼鱼麻醉效果的研究. 渔业科学进展, 2024, 45(6): 109–118]
- YAO J, ZHU T, LIU H, *et al.* Responses of microbiome in different material-based artificial reefs to oil contamination. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2021, 60(1): 73–83 [姚佳, 朱婷, 刘浩, 等. 不同材质人工鱼礁微生物组对油污污染的响应. 复旦学报(自然科学版), 2021, 60(1): 73–83]
- YOON E A, TAKANO A, SON G, *et al.* Density variation of fish and zooplankton around artificial reef area. *Journal of the Fishing Technology Institute*, 2014, 7(1): 52
- YUAN Y, XIAN W W, ZHANG H. An review of the ecological carrying capacity of fishery resources in China based on the Ecopath model. *Marine Sciences*, 2022, 46(7): 105–119 [袁咏, 线薇薇, 张辉. 基于生态通道模型的我国渔业资源生态容量研究进展. 海洋科学, 2022, 46(7): 105–119]
- ZHANG H H, SUN L. On reproduction increase of the sea aquatic resources by artificial fish-reef engineering. *Resources Science*, 2001, 23(5): 6–10 [张怀慧, 孙龙. 利用人工鱼礁工程增殖海洋水产资源的研究. 资源科学, 2001, 23(5): 6–10]
- ZHANG K, LIU S C, FAN X P, *et al.* Review on strategies and key technologies of live fish transportation. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2021, 41(5): 137–144 [张坤, 刘书成, 范秀萍, 等. 鱼类保活运输策略与关键技术研究进展. 广东海洋大学学报, 2021, 41(5): 137–144]
- ZHANG S, SUN M C, CHEN Y. The attractive effects of different structural artificial reef models on juvenile Schlegel's rockfish *Sebastes schlegelii* and fat greenling *Hexagrammos otakii*. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2008, 23(1): 13–19 [张硕, 孙满昌, 陈勇.

人工鱼礁模型对大泷六线鱼和许氏平鲈幼鱼个体的诱集效果. 大连水产学院学报, 2008, 23(1): 13–19]

ZHANG Z H, DONG J Y, ZHANG X M, *et al.* Effects of environmental enrichment on the distribution of *Sebastes*

schlegelii in early developmental stages. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(22): 8223–8233 [张宗航, 董建宇, 张雪梅, 等. 环境丰容对早期发育阶段许氏平鲈趋礁行为的影响. 生态学报, 2018, 38(22): 8223–8233]

(编辑 马瑾艳)

Effects of Visual and Lateral Line Organs on Reefing Behavior of *Sebastes schlegelii*

CHEN Feng^{1,2}, LI Jiao^{2①}, GONG Pihai², GUAN Changtao²

(1. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116036, China;

2. State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract Artificial reefs are increasingly used in marine ecosystems to support biodiversity and provide refuge for fish species. To maximize the effectiveness of artificial reefs, understanding the mechanisms by which fish locate and aggregate around them is essential. Sensory cues are critical in guiding fish navigation and aggregation behaviors. Vision and the lateral line system are particularly important for detecting environmental features and predators among the primary sensory modalities. However, the specific contributions of these two sensory systems and their potential interactions in guiding fish toward artificial reefs remain poorly understood. This study investigated the effects of impairing the visual and lateral line systems, both independently and in combination, on the aggregation behavior of *Sebastes schlegelii*, a species that relies heavily on these sensory modalities for habitat selection.

This study aimed to assess whether visual and lateral line system impairments affect the fish's ability to aggregate around artificial reefs. We designed six experimental groups to explore the impacts of various impairments on aggregation behavior. The groups were as follows: (1) Normal group with no sensory impairments; (2) Visual impairment group with visual cues blocked using physical methods to destroy; (3) Mild lateral line impairment group with the lateral line system partially disrupted using a gentle treatment; (4) Visual + mild lateral line impairment group with combined visual and mild lateral line impairments; (5) Severe lateral line impairment group, with the lateral line system extensively disrupted; and (6) Visual + severe lateral line impairment group, with severe impairments to both sensory systems. Aggregation behavior was measured by observing the number of fish within a defined proximity to an artificial reef over a 12-h period, which allowed us to examine immediate and sustained responses.

Our findings demonstrated that fish in the normal group exhibited the highest levels of aggregation, confirming that visual and lateral line cues are essential for guiding fish towards artificial reefs. This supports the hypothesis that these sensory systems are crucial in habitat selection and aggregation. Fish in the visual and mild lateral line impairment groups showed significantly reduced aggregation compared with the normal group, suggesting that visual and lateral line cues are critical for efficient navigation and habitat selection. Notably, fish in the severe and visual + severe

① Corresponding author: LI Jiao, Email: lijiao@ysfri.ac.cn

lateral line impairment groups exhibited even lower levels of aggregation, indicating that more severe impairments to either or both sensory systems result in further decreases in aggregation behavior.

Notably, this study found no significant interaction between the two sensory impairments. Although impairing the visual and lateral line systems (either mildly or severely) resulted in a considerable reduction in aggregation compared to impairing either system alone, the effects were additive rather than synergistic. This means that impairing the two sensory systems did not result in a compounded or exaggerated loss of aggregation behavior. Instead, the loss of aggregation behavior owing to sensory impairments occurred independently for each system. For example, fish with only visual impairments showed reduced aggregation, and fish with only lateral line impairments showed a similar reduction. The combined impairments led to a further decrease in aggregation, which was not notably greater than the expected sum of the individual impairments.

These results indicate that visual and lateral line systems are crucial for fish aggregation behavior; however, impairments to these systems do not synergistically amplify the overall effect. In particular, impairing both sensory systems reduces aggregation behavior more than impairing either system alone, but the lack of an interaction effect implies that the two systems do not jointly influence aggregation in a compounded manner. This finding has implications for understanding how fish navigate toward artificial reefs and could guide the design of future reef structures. For example, artificial reefs that target the enhancement of one sensory modality (such as visual cues) may remain effective in supporting fish aggregation, as the loss of one sensory system does not appear to severely compromise aggregation behavior.

However, notably, these conclusions are based on the behavior of *S. schlegelii* in the context of this specific study. The lack of interaction between sensory systems in this species may not apply universally to all fish species. Some species may rely more heavily on one sensory modality over another, or they may exhibit different types of sensory integration. Therefore, further studies are needed to explore the sensory preferences and behavior of other fish species in relation to artificial reefs.

This study also highlights the broader ecological implications of artificial reef design. Understanding the role of sensory systems in fish aggregation can inform strategies to optimize the placement and features of artificial reefs, making them more effective in supporting marine biodiversity. In particular, this study underscores the importance of considering the sensory ecology of target species when designing artificial habitats and provides valuable insights into how sensory impairments affect fish behavior and ecological interactions.

Key words *Sebastes schlegelii*; Visual organs; Lateral line organs; Artificial reefs; Reef-taxis behavior