

不同生境鱼类在模拟捕食风险下对隐蔽场所的选择偏好:以中华倒刺和德玛森小岩鲷为例

曾足仙 李武新 付世建

HABITAT-SPECIFIC FISH PREFERENCE FOR SHELTER SELECTION UNDER SIMULATED PREDATION RISK:
A CASE STUDY OF CHINESE BARB (*SPINIBARBUS SINENSIS*) AND CICHLID (*CHINDONGO DEMASONI*)

ZENG Zu-Xian, LI Wu-Xin, FU Shi-Jian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2024.2023.0379>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四种鲤科鱼类对捕食胁迫行为响应的种间比较

INTERSPECIFIC COMPARISON OF THE BEHAVIORAL RESPONSES TO PREDATION STRESS IN FOUR CYPRINIDS
水生生物学报. 2021, 45(5): 1154–1163 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.285>

捕食驯化对胭脂鱼和中华倒刺游泳行为、应激和免疫功能的影响

THE EFFECT OF PREDATION ACCLIMATION ON SWIMMING BEHAVIOR, STRESS AND IMMUNE RESPONSES OF
JUVENILE *MYXOCYPRINUS ASIATICUS* AND *SPINIBARBUS SINENSIS*
水生生物学报. 2021, 45(5): 1112–1119 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.015>

鱼类双重荧光标记研究——以中华倒刺幼鱼为例

STUDY ON DOUBLE FLUORESCENCE MARKING OF *SPINIBARBUS SINENSIS* JUVENILE
水生生物学报. 2021, 45(1): 29–38 <https://doi.org/10.7541/2021.2019.257>

PFOS对中华倒刺幼鱼爆发游泳及运动后代谢恢复的影响

EFFECTS OF PFOS ON BURST SWIMMING PERFORMANCE AND METABOLIC RECOVERY IN JUVENILE *SPINIBARBUS SINENSIS*
水生生物学报. 2019, 43(2): 356–361 <https://doi.org/10.7541/2019.044>

浅水湖泊四种渔具捕捞选择性及对鱼类群落影响比较研究

COMPARISONS OF SELECTIVITY BY FOUR FISHING METHODS ON FISH COMMUNITY ASSESSMENT IN A SHALLOW
YANGTZE LAKE, AND IMPLICATIONS FOR FISHERY MANAGEMENT
水生生物学报. 2018, 42(6): 1107–1115 <https://doi.org/10.7541/2018.136>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2024.2023.0379

不同生境鱼类在模拟捕食风险下对隐蔽场所的选择偏好： 以中华倒刺鲃和德玛森小岩鲷为例

曾足仙 李武新 付世建

(重庆师范大学进化生理与行为学实验室, 重庆市动物生物学重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 为了考察鱼类在模拟捕食风险下对隐蔽场所的选择偏好, 研究选取栖息环境迥异的中华倒刺鲃幼鱼 (*Spinibarbus sinensis*) 和德玛森小岩鲷 (*Chindongo demasoni*) 幼鱼为实验对象, 比较两种鱼对不同类型(水草、树枝和砾石)和不同颜色(蓝色、红色和绿色水草)隐蔽场所的选择偏好。研究发现: (1)在不同类型隐蔽场所中, 模拟捕食刺激前, 中华倒刺鲃和德玛森小岩鲷均偏好水草, 前者对砾石表现出回避, 而后者则是偏好; (2)在模拟捕食刺激后, 两种鱼对水草的偏好更为显著; (3)在不同颜色隐蔽场所中, 模拟捕食刺激前, 中华倒刺鲃首次选择绿色水草占比最高, 德玛森小岩鲷则为红色水草; (4)在模拟捕食刺激后, 中华倒刺鲃在不同颜色隐蔽场所的停留时间占比无显著差异, 德玛森小岩鲷在红色水草的停留时间占比最高。研究表明: 中华倒刺鲃和德玛森小岩鲷对不同类型的隐蔽场所偏好一致, 对不同颜色隐蔽场所的偏好表现出种间差异, 这可能与二者不同的栖息环境和生活习性密切相关。

关键词: 隐蔽场所; 模拟捕食刺激; 种间差异; 反捕食行为; 隐蔽场所选择偏好

中图分类号: Q178.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)07-1205-09



捕食是动物在自然界经常遭遇的逆境胁迫, 鱼类根据捕食压力、栖息地生境条件和自身特征进化出相应的应对策略, 采用逃逸、集群和利用隐蔽场所等方式躲避捕食者^[1-4]。其中逃逸需要消耗大量能量并对机体自身运动能力有较高的要求; 集群尽管可以稀释捕食风险, 但会造成空间和溶氧等资源竞争加剧; 相较而言, 合理利用隐蔽场所可以明显降低鱼类的捕食风险并减少日常能量消耗^[5-9]。因此, 隐蔽场所常常作为动物在众多环境资源中优先选择的一个重要保护屏障。研究发现, 隐蔽场所的存在不仅能够干扰捕食者视线和优化个体在空间中分配活动的方式, 还有利于增强学习认知和改善生长^[10-12]。例如, 与隐蔽场所丰富的环境相比, 简易隐蔽场所中的许氏平鲈 (*Sebastes schlegelii*) 表现出空间认知能力降低和攻击性增强^[13]。因此, 设置隐蔽场所已被作为饲养鱼类重要的福利条件^[14, 15]。

然而, 鱼类对不同隐蔽场所偏好的理论研究目前却较为匮乏。

无论是科学研究还是生产应用, 对于鱼类隐蔽场所的类型, 研究者通常参考鱼类的栖息环境相似度, 大多选择为塑料水草和砾石等; 而考虑到人类的视觉感官效果, 颜色的选择却十分丰富^[16, 17]。鱼类是否根据栖息地生境条件(捕食压力、捕食者行为和生理特征、常见隐蔽场所特征)和自身生理生态特征(运动能力、身体颜色等)选择不同类型和颜色的隐蔽场所值得进一步研究^[5]。因此, 本研究的目标是探讨不同生境的鱼类对隐蔽场所类型和颜色的偏好是否存在差异。

为了完成本研究的目标, 本研究选取了中华倒刺鲃 (*Spinibarbus sinensis*) 和德玛森小岩鲷 (*Chindongo demasoni*) 作为实验对象。两种鱼类都有着相对复杂的生存环境, 但它们在生境中遭受捕食胁迫的

收稿日期: 2023-11-17; 修订日期: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(32370509); 重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX0835)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (32370509); the Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2021jcyj-msxmX0835)]

作者简介: 曾足仙(1999—), 女, 硕士研究生; 研究方向为鱼类行为学。E-mail: 3185066051@qq.com

通信作者: 付世建(1973—), 男, 博士; 研究方向为鱼类生理生态学。E-mail: shijianfu9@cqnu.edu.cn

强度是存在着差异的^[18–20]。中华倒刺鲃体色为灰绿色,主要分布在我国长江上游流域,栖息于底质为砾石的山地河流当中,常在有水草及水生植物的岸边浅水地带觅食;德玛森小岩鲷体色为蓝色,体侧有不规则的黑色条纹,起源于非洲热带水体,常躲避在砾石缝里。与中华倒刺鲃栖息环境相比,德玛森小岩鲷生存环境中面临的捕食风险更高,可能对隐蔽场所的需求更大。本研究比较分析了两种鱼类在模拟捕食刺激前后,对不同类型和不同颜色隐蔽场所的选择偏好表现,不仅有利于理解鱼类反捕食策略的进化机制,还能够对增加鱼类养殖福利等生产实践提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 实验鱼来源与方案

实验鱼中华倒刺鲃幼鱼购买于重庆市永川区水花鱼养殖专业合作社,80尾[体重(2.72 ± 0.49) g; 体长(5.23 ± 0.36) cm];实验鱼德玛森小岩鲷(*Chindongo demasoni*)幼鱼购买于重庆市沙坪坝区马氏水族馆,80尾[体重(2.10 ± 0.46) g; 体长(4.18 ± 0.31) cm]。在实验前以每个养殖单元(宽45 cm, 长125 cm, 高35 cm)10尾的密度驯养2周。每天早上09:30喂食,光照:黑暗=12h:12h,温度(25 ± 1)°C,所有养殖单元都配置了定期清洗的生物过滤器、持续曝气和水循环系统。

本实验用到的装置为辐射性6臂迷宫(图1)^[21],迷宫装置为6臂迷宫外加1个圆形的环境水体(半径100 cm, 水深7 cm)以保持实验水体的温度,每个臂均为20 cm×42 cm长方体结构,中部为正六边体,边长20 cm,迷宫水深5 cm。摄影机放置于迷宫的正上方(索尼AX60, 4K)。实验前,将3种不同类型(绿色水草、绿色树枝和绿色砾石)或3种不同颜色(红色水草、蓝色水草和绿色水草)隐蔽场所随机间隔

放在不同的3个迷宫臂中。再将1尾鱼放置在其中一个由不透明挡板遮住的空白臂中,适应10min;随后,轻轻地移除挡板,持续拍摄10min实验鱼在模拟捕食刺激前对隐蔽场所的选择偏好;在10min后,当实验鱼再次游到初始放置的适应臂位置时,用模拟捕食者白鹭模型(*Egretta garzetta*; 长28 cm),对实验鱼进行持续10s的模拟捕食刺激^[22];再拍摄6min实验鱼经模拟捕食刺激后的选择偏好;视频拍摄结束后用格式工厂将视频格式帧数转码成15帧/s。

由于饲养期间德玛森小岩鲷非自然死亡1尾,为确保实验一致性,本研究中所有实验组都取39尾实验鱼进行实验。对两种鱼分别进行单尾拍摄($N=39$),体重、体长数据见表1。所有实验鱼均使用一次,为消除消化活动等因素对实验鱼行为偏好的影响,实验鱼测定前均禁食24h且实验条件与驯化时相同。

1.2 实验参数测定

由于6臂迷宫无法使用相应软件提取实验鱼的运动轨迹,遂采用双盲的方法利用人工观察视频进行参数(首次选择特定隐蔽场所的占比^[23,24]、实验鱼在特定隐蔽场所的停留时间占比及探索频率)的分析^[25],以验证中华倒刺鲃和德玛森小岩鲷在模拟捕食刺激前后对隐蔽场所的选择偏好。因移除挡板的操作会刺激实验鱼,从而造成其首次选择特定隐蔽场所时可能表现出虚假应激反应,于是我们提取了39组视频中的首次选择隐蔽场所的数据,其余参数选取其中21组视频进行分析,相关参数的计算方法:

首次选择特定隐蔽场所的占比(%):在提起适应器之后,观察实验鱼鳃盖后沿首次超过任意一个隐蔽场所所在臂前沿的比例。

隐蔽场所停留时间占比(%):实验鱼在观测时间段分别停留在特定隐蔽场所的累积时间占总时

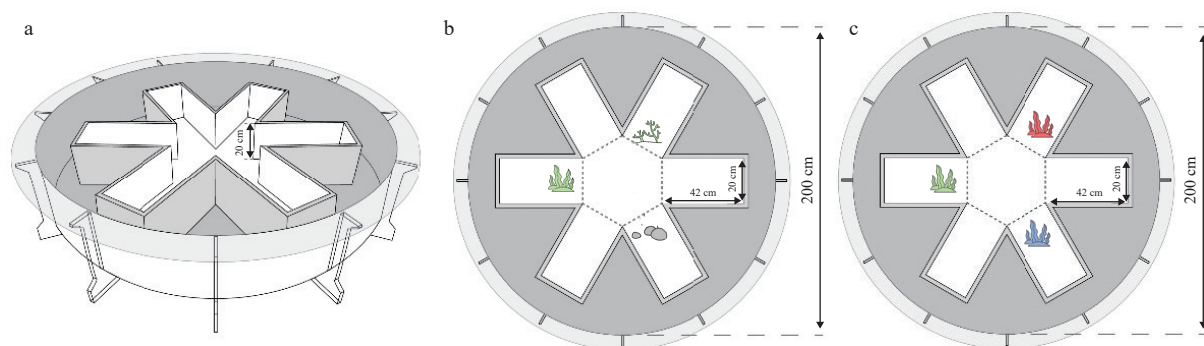


图1 鱼类行为观测装置

Fig. 1 The structure of device used in the present study

a. 装置示意图; b. 不同类型隐蔽场所; c. 不同颜色隐蔽场所

a. schematic of device; b. different types of shelters; c. different colored shelters

长的百分比。

探索频率(次/min): 在提起适配器之后, 当实验鱼鳃盖后沿超过其中一个臂前沿, 鳃部再超出这个臂, 则记为1次, 根据探索次数和拍摄时长计算得出探索频率。

1.3 数据统计与分析

本实验采用了Microsoft Excel 2010软件进行常规计算, SPSS 27.0软件进行统计分析, 除首次选择特定隐蔽场所占比外的所有结果均用平均值 $\pm$ 标准差(mean $\pm$ SD)表示, 显著水平为 $P<0.05$ 。采用二项式分析比较实验鱼首次选择特定隐蔽场所占比与3个隐蔽场所的平均概率(即随机水平33.3%)的差异。其余参数(隐蔽场所停留时间占比、探索频率)首先检验数据的正态性和方差齐性; 再采用广义线性混合模型(以测定序号为随机变量)分析不同类型(水草、树枝和砾石)、不同颜色(蓝色、红色和绿色)隐蔽场所和模拟捕食刺激对两种实验鱼(中华倒刺鲃vs.德玛森小岩鲷)在隐蔽场所停留时间和

表 1 中华倒刺鲃和德玛森小岩鲷的鱼体大小(平均值 $\pm$ 标准差, $N=39$)

Tab. 1 The body size of two experimental fish species (mean $\pm$ SD, $N=39$)

指标 Index	中华倒刺鲃 <i>S. sinensis</i>		德玛森小岩鲷 <i>C. demasoni</i>	
	类型选择 Type selection	颜色选择 Color selection	类型选择 Type selection	颜色选择 Color selection
体重Body weight (g)	2.59 $\pm$ 0.58	2.84 $\pm$ 0.35	2.08 $\pm$ 0.49	2.11 $\pm$ 0.46
体长Body length (cm)	5.11 $\pm$ 0.40	5.34 $\pm$ 0.30	4.16 $\pm$ 0.32	4.19 $\pm$ 0.32

探索频率的影响; 若广义线性混合模型分析差异显著, 则采用 t 检验对隐蔽场所类型、颜色和模拟捕食刺激前、后之间的差异进行比较。

2 结果

2.1 两种鱼类对不同类型隐蔽场所的选择偏好

模拟捕食刺激对两种实验鱼首次选择特定隐蔽场所占比的影响 由图2可知, 中华倒刺鲃在模拟捕食刺激前倾向于首先选择水草作为隐蔽场所($P<0.05$), 对砾石的隐蔽场所偏好显著低于随机水平($P<0.001$); 而德玛森小岩鲷在模拟捕食刺激前倾向于首次选择砾石作为隐蔽场所($P<0.01$)。在模拟捕食刺激后, 中华倒刺鲃和德玛森小岩鲷均首次选择水草作为隐蔽场所($P<0.01$; $P<0.001$), 其中德玛森小岩鲷对树枝的隐蔽场所偏好显著降低($P<0.001$)。

模拟捕食刺激对两种实验鱼在不同类型隐蔽场所停留时间占比和探索频率的影响 双因素线性混合模型分析发现隐蔽场所的类型对两种实验鱼停留时间占比和探索频率均有显著影响($P<0.05$; 表2), 而模拟捕食刺激仅对德玛森小岩鲷探索频率有显著影响; 另外, 隐蔽场所类型和模拟捕食刺激对两种实验鱼停留时间占比和探索频率的影响均存在显著交互作用。

由图3可知, 在模拟捕食刺激前后, 中华倒刺鲃和德玛森小岩鲷水草臂的停留时间占比均为最高, 且在模拟捕食刺激后该偏好表现得更为显著; 模拟捕食刺激导致空白臂停留时间占比下降, 水草臂停

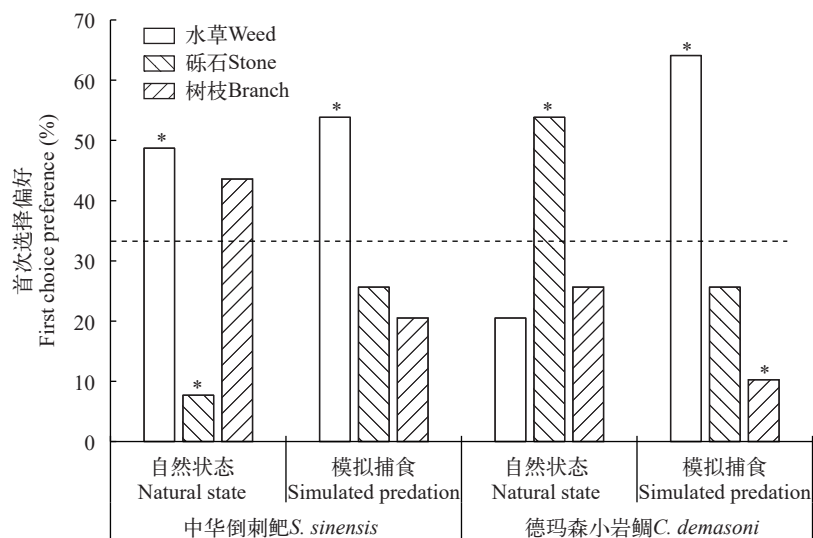


图2 模拟捕食对两种鱼类首次选择不同类型隐蔽场所的影响

Fig. 2 Effects of simulated predation on the first choice of different types of shelter in two fish species

*表示不同类型隐蔽场所与随机水平(即虚线表示的33.33%)之间存在显著差异

* indicates significant differences between different types of shelter and random levels (i.e., 33.33% represented by dashed lines)

留时间上升($P<0.05$), 其他臂没有显著变化。

由图 4 可知, 在模拟捕食刺激前, 中华倒刺鲃对水草和树枝的探索频率均高于空白臂和砾石, 而德玛森小岩鲷对水草和砾石的探索频率高于空白臂和树枝; 在模拟捕食刺激后, 两种实验鱼对水草、砾石和树枝的探索频率均显著下降, 其中中华倒刺鲃对砾石和树枝的探索频率在模拟捕食刺激后甚至低于空白臂。

2.2 两种实验鱼对不同颜色隐蔽场所的选择偏好

模拟捕食刺激对两种实验鱼首次选择隐蔽场所的影响 由图 5 可知, 中华倒刺鲃模拟捕食刺激前倾向于首次选择绿色水草作为隐蔽场所($P<0.05$), 而德玛森小岩鲷选择红色水草的占比最高($P<0.05$); 在模拟捕食刺激后, 相比于红色和绿色水草, 中华倒刺鲃首次选择蓝色水草占比较高, 德玛森小岩鲷对3种颜色隐蔽场所首次选择占比更接近

表 2 隐蔽场所类型和模拟捕食刺激对两种鱼类选择偏好影响的广义线性混合模型分析统计表

Tab. 2 The effects of shelter type and simulated predation stimulus on the fish choice preference based on the statistical table of generalized linear mixed model analysis

种类 Species	指标 Index	隐蔽场所类型 Type of shelter	模拟捕食 Simulated predation	隐蔽场所类型×模拟捕食 T×S
中华倒刺鲃 <i>S. sinensis</i>	停留时间占比 Proportion of dwell time	$F_{3,160}=22.603$ ** $P<0.001$	$F_{1,160}=1.355$ $P=0.246$	$F_{3,160}=4.246$ ** $P=0.006$
	探索频率 Exploration frequency	$F_{3,160}=22.603$ ** $P<0.001$	$F_{1,160}=1.355$ $P=0.246$	$F_{3,160}=4.246$ ** $P=0.006$
	停留时间占比 Proportion of dwell time	$F_{3,160}=23.817$ ** $P<0.001$	$F_{1,160}=0.845$ $P=0.359$	$F_{3,160}=8.413$ ** $P<0.001$
德玛森小岩鲷 <i>C. demasoni</i>	停留时间占比 Proportion of dwell time	$F_{3,160}=3.257$ * $P=0.023$	$F_{1,160}=24.223$ ** $P<0.001$	$F_{3,160}=4.760$ ** $P=0.003$
	探索频率 Exploration frequency			

注: *表示影响显著($P<0.05$); **表示影响极显著($P<0.01$); 下同
Note: * indicates a significant effect ($P<0.05$); ** indicates a highly significant effect; The same applies below

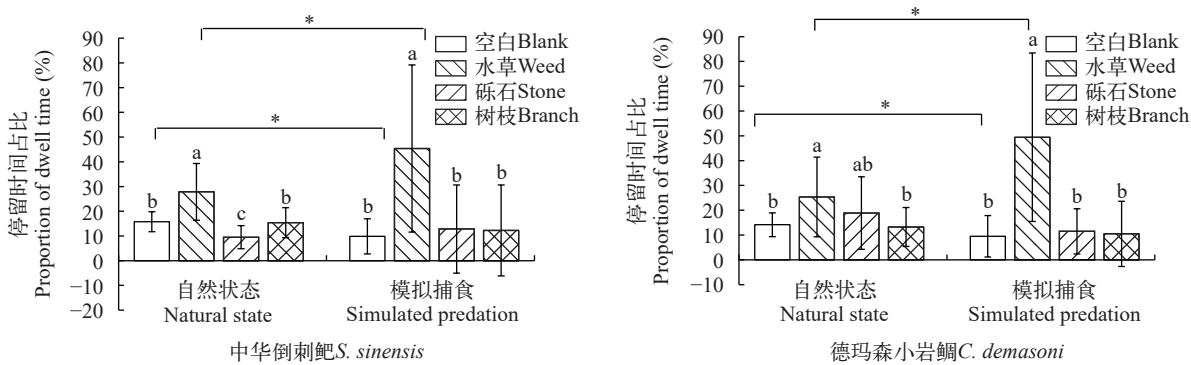


图 3 模拟捕食前后两种鱼类在不同类型隐蔽场所中的停留时间占比

Fig. 3 Percentage of dwell time in different types of shelters for the two fish species before and after simulated predation

a, b. 表示不同隐蔽场所类型间显著差异; *表示模拟捕食刺激前后存在显著差异; 下同

a, b. indicate significant difference among different shelter types; * indicates significant difference in natural state and simulated predation stimulus; The same applies below

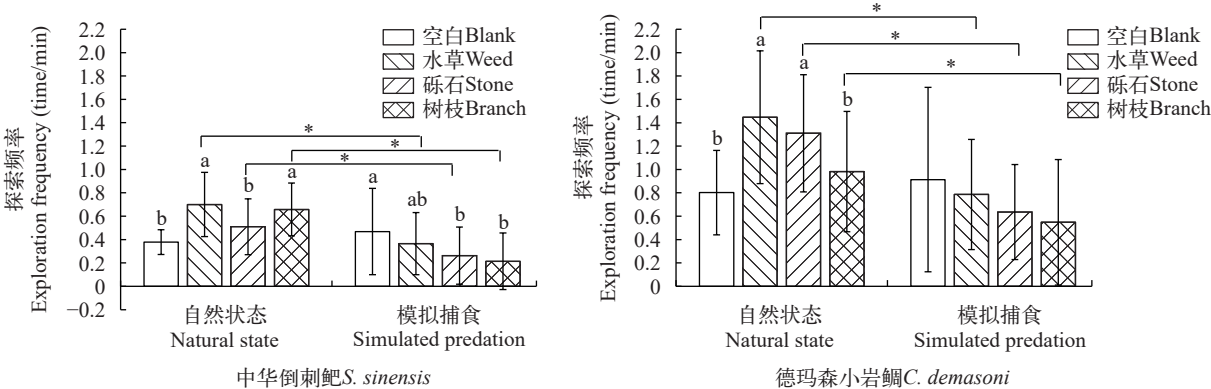


图 4 模拟捕食前后两种鱼类在不同类型隐蔽场所中的探索频率

Fig. 4 Exploration frequency in different types of shelters for the two fish species before and after simulated predation

随机水平(33.33%)。

模拟捕食对两种实验鱼在不同颜色隐蔽场所停留时间和探索频率的影响 双因素线性混合模型分析发现隐蔽场所的颜色对两种实验鱼停留时间占比有显著影响($P<0.05$;表 3), 而模拟捕食则对两种鱼的探索频率有显著影响; 除德玛森小岩鲷的隐蔽场所停留时间占比外, 其余各参数均表现出

隐蔽场所颜色和模拟捕食的交互作用。

由图 6 可知, 两种实验鱼在模拟捕食刺激后对无隐蔽场所的空白臂偏好显著降低; 中华倒刺鲃无论是模拟捕食刺激前还是模拟捕食刺激后对 3 个隐蔽场所的停留时间占比均无显著差异; 德玛森小岩鲷模拟捕食刺激前对 3 个隐蔽场所的停留时间占比无显著差异, 但模拟捕食刺激后, 其在红色水草的

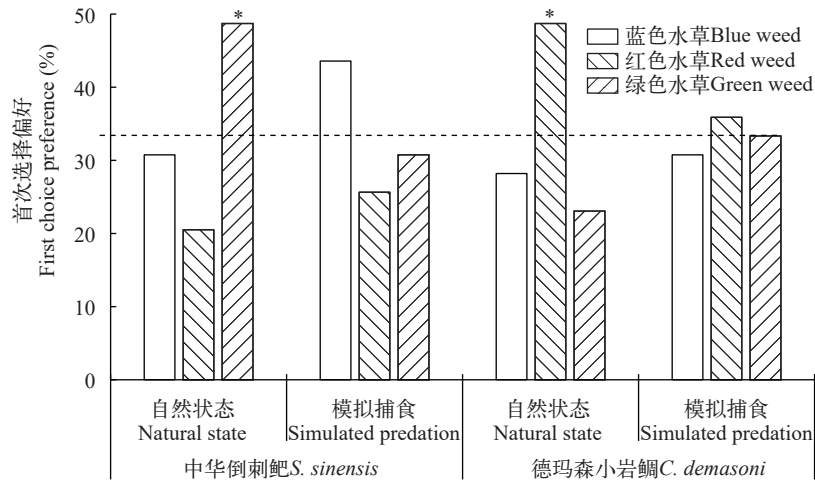


图 5 模拟捕食对两种鱼类首次选择不同颜色隐蔽场所的影响

Fig. 5 Effects of simulated predation on the first choice of shelters with different colors in two fish species

*表示选择偏好与随机水平(即虚线表示的33.33%)之间存在显著差异

* indicates significant differences between choice preference and random level (i.e., 33.33% represented by dashed lines)

表 3 隐蔽场所的颜色和模拟捕食刺激对两种鱼类选择偏好影响的广义线性混合模型分析统计表

Tab. 3 The effects of sheltered color and simulated predation stimulus on the fish choice preference based on the statistical table of generalized linear mixed model analysis

种类 Species	指标 Index	隐蔽场所的颜色 Color of shelter	模拟捕食 Simulated predation	隐蔽场所的颜色×模拟捕食 C×S
中华倒刺鲃 <i>S. sinensis</i>	停留时间占比 Proportion of dwell time	$F_{3,160}=7.560$ **$P<0.001$	$F_{1,160}=0.644$ $P=0.423$	$F_{3,160}=2.658$ *$P=0.050$
	探索频率 Exploration frequency	$F_{3,160}=0.964$ $P=0.411$	$F_{1,160}=16.773$ **$P<0.001$	$F_{3,160}=5.306$ **$P=0.002$
	停留时间占比 Proportion of dwell time	$F_{3,160}=6.021$ **$P=0.001$	$F_{1,160}=0.960$ $P=0.329$	$F_{3,160}=1.997$ $P=0.117$
德玛森小岩鲷 <i>C. demasoni</i>	探索频率 Exploration frequency	$F_{3,160}=3.169$ *$P=0.026$	$F_{1,160}=34.420$ **$P<0.001$	$F_{3,160}=11.379$ **$P<0.001$

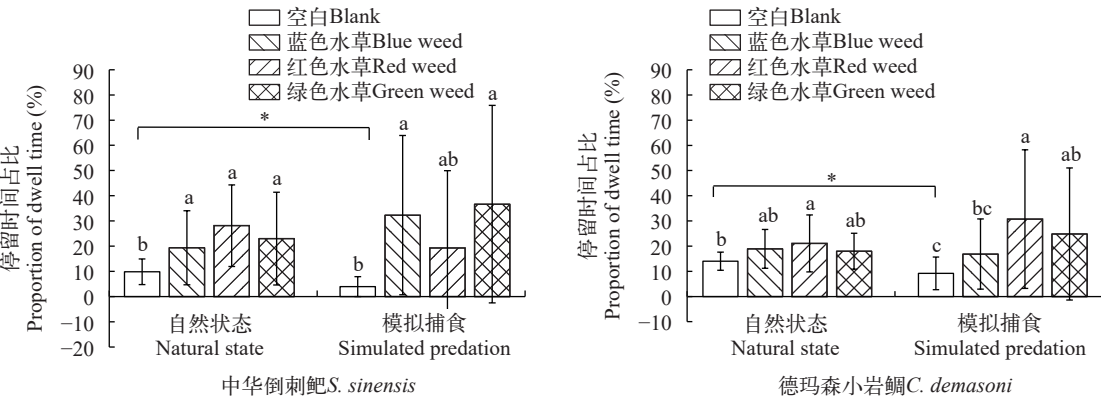


图 6 模拟捕食前后两种鱼类在不同颜色隐蔽场所中的停留时间占比

Fig. 6 Percentage of dwell time in different colored shelters for the two fish species before and after simulated predation

停留时间相比于蓝色水草显著加长。

由图 7 可知,除无隐蔽场所的比较外,两种实验鱼在模拟捕食刺激后对隐蔽场所的探索频率均显著低于刺激前;中华倒刺鲃模拟捕食刺激前后对 3 个隐蔽场所的探索频率均无显著差异;德玛森小岩鲷模拟捕食刺激前对 3 个隐蔽场所的探索频率无显著差异,但模拟捕食刺激后对绿色水草的探索频率显著下降。

3 讨论

3.1 两种实验鱼对不同类型隐蔽场所的选择偏好比较

本研究发现模拟捕食刺激前中华倒刺鲃和德玛森小岩鲷对隐蔽场所偏好相较于砾石和树枝,均更偏好水草。但两者对砾石的选择却存在种间差异,中华倒刺鲃在首次选择隐蔽场所占比和停留时间上对砾石表现出回避,德玛森小岩鲷则表现出偏好。中华倒刺鲃生活在以砾石为底质的流水中,夜间常到水草附近觅食。因此中华倒刺鲃偏好水草可能是由于觅食习惯,但回避砾石的结果与预期不一致,可能的原因:砾石在鱼类养殖中常被视为改善生境的重要因素之一,即属于自然底质而非隐蔽场所^[26],故而可能表现出对砾石的回避。然而,德玛森小岩鲷生活在捕食风险高且生境中包含许多砾石和较少水生植物的环境中,常躲避在砾石缝中。因此选择砾石的原因可能与其栖息环境资源结构和习性密切相关。另外研究还发现两种鱼在隐蔽场所停留时间占比上没有差异,而德玛森小岩鲷的探索频率显著高于中华倒刺鲃,这与以往的研究结果一致,即来自高捕食生境的鱼类会增加对捕食者的侦察行为^[27, 28]。

在模拟捕食刺激后,中华倒刺鲃对水草的偏好在首次选择隐蔽场所占比和停留时间上显著增加,

对树枝的偏好降低;同样地,德玛森小岩鲷对水草的偏好显著增加,对砾石的偏好降低。可能是由于砾石和树枝的躲避面积小于水草,两种实验鱼经过权衡后,选择更有利于躲避捕食者的隐蔽场所,例如研究表明三刺鱼(*Gasterosteus aculeatus*)偏好上方有遮挡板和水草的环境^[14];多带新亮丽鲷(*Neolamprologus multifasciatus*)更偏好完好无损、更大或孔径更宽的贝壳^[29]。这提示鱼类在没有捕食者时优先选择与栖息环境相似的隐蔽场所,当存在捕食风险时,选择最有利的隐蔽场所。另外,模拟捕食刺激后两种鱼的探索频率远远少于模拟捕食刺激前,这与我们预期一致,通过减少频繁探索环境来降低捕食风险,这也是鱼类常用的反捕食策略^[30]。

3.2 两种实验鱼对不同颜色隐蔽场所的选择偏好比较

通过不同类型隐蔽场所的实验结果我们了解到两种实验鱼都偏好水草,因此选择不同颜色的水草作为隐蔽场所,探究鱼类对不同颜色隐蔽场所偏好的最优选择。研究结果发现两种实验鱼仅在首次选择特定隐蔽场所上存在选择差异,即中华倒刺鲃模拟捕食刺激前首次选择绿色水草隐蔽场所,而德玛森小岩鲷则选择红色水草,其余参数均未表现显著差异。许多关于鱼类颜色偏好的研究结果表明,鲤科鱼类通常偏好红色和蓝色^[31, 32],但是不同物种或同一物种间的颜色偏好不同生长阶段可能会存在差异^[31]。这提示中华倒刺鲃选择绿色水草可能是颜色偏好或选择与栖息环境一致的颜色可能更有利于鱼类找到丰富的食物资源^[33, 34]。关于德玛森小岩鲷首次选择红色水草的原因可能有以下两个:(1)自然环境食物偏好,环境中的浮游动物和微型甲壳动物等含有类胡萝卜素从而表现为红色^[35],这可能使得实验鱼将红色隐蔽场所视为食物奖励^[36, 37];(2)自身的颜色偏好,有研究表明,淡黑

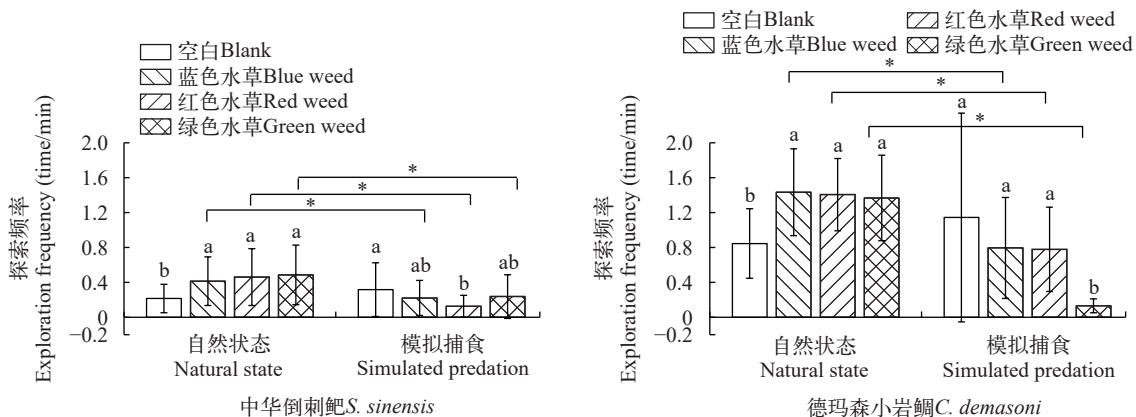


Fig. 7 Exploration frequency in different types of shelters for the two fish species before and after simulated predation

镊丽鱼(*Labidochromis caeruleus*)偏好红色和绿色^[36], 然而德玛森小岩鲷与淡黑镊丽鱼同属慈鲷科, 我们猜测德玛森小岩鲷也可能偏好红色。

在模拟捕食刺激后, 中华倒刺鲃对不同颜色隐蔽场所均无显著偏好, 进一步说明其处于陌生环境中 and 面临捕食风险时优先考虑自身安全而不是颜色偏好。有研究表明, 慈鲷自身体色会影响配偶选择, 这也暗示了慈鲷的颜色偏好机制可能比想象的更为复杂^[38]。但在我们的实验结果中没有发现德玛森小岩鲷偏好与体色一致的隐蔽场所(即蓝色水草), 甚至在蓝色水草的停留时间比在红色水草的停留时间更短。有研究发现, 波氏蓝首鱼(*Tropheus polli*)雄性对基因相关但颜色不同和基因不相关但颜色相同的雌性无显著偏好, 这说明在本实验中体色可能不影响德玛森小岩鲷对隐蔽场所的选择^[39]。德玛森小岩鲷在捕食风险下的反捕食策略是优先避敌, 其次为营养需求^[33], 所以在本研究结果中发现模拟捕食刺激后德玛森小岩鲷对红色水草的首次选择减少和对绿色水草的首次选择增加, 说明红色水草并不是德玛森小岩鲷在面对捕食者攻击时的最佳选项, 模拟捕食刺激前表现出的对红色水草的偏好实际上可能是自身对红色的偏好。令人困惑的是, 在模拟捕食刺激后, 德玛森小岩鲷对绿色水草的探索频率显著下降, 同时停留时间又没有显著减少, 这说明德玛森小岩鲷减少了对绿色水草的能量消耗, 进一步表明德玛森小岩鲷视绿色水草为最优隐蔽场所。有研究表明, 大西洋鲑(*Salmon salar*)在有隐蔽场所的环境中标准代谢率会降低^[5], 同时小口黑鲈(*Micropterus dolomieu*)的静止代谢率也显著降低^[7], 这可能也是德玛森小岩鲷长时间停留在绿色水草周围的重要原因。

4 结论

中华倒刺鲃幼鱼和德玛森小岩鲷幼鱼对不同类型和不同颜色隐蔽场所的偏好存在显著的种间差异, 这可能与它们的栖息环境和习性密切相关。在遭遇捕食风险时, 两种实验鱼会优先选择覆盖面积大的隐蔽场所。两种实验鱼在没有模拟捕食刺激时, 可能根据自身颜色偏好选择隐蔽场所, 但在遭遇模拟捕食后会优先考虑隐蔽场所, 其次才是颜色偏好。基于本研究的研究结果, 我们建议在进行此类鱼类行为学实验时, 增加鱼类驯化环境的养殖福利(例如, 增加水草或砾石等), 这可能会使得实验的结果更加可靠。在今后的研究中, 我们还将进一步探究不同驯化环境(例如不同颜色和类型隐蔽场所)对鱼类在模拟捕食风险下的反捕食行为的影响。

参考文献:

- [1] Álvarez D, Nicieza A G. Predator avoidance behaviour in wild and hatchery reared brown trout: The role of experience and domestication [J]. *Journal of Fish Biology*, 2003, **63**(6): 1565-1577.
- [2] Long Z M, Zhu F Y, Duan X B, *et al.* Responses of locomotor ability of juveniles of the four major Chinese carps to predation stress [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(2): 342-351. [龙珍满, 朱峰跃, 段辛斌, 等. 四大家鱼幼鱼运动能力对捕食胁迫的响应 [J]. 生态学杂志, 2023, **42**(2): 342-351.]
- [3] Yang Y, Ling H, Fu S J, *et al.* Effects of ecological context and metabolic phenotype on collective behaviour of qingbo *Spinibarbus sinensis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(11): 4447-4459. [杨亚, 凌鸿, 付世建, 等. 环境类型和代谢表型对中华倒刺鲃群体行为的影响 [J]. 生态学报, 2021, **41**(11): 4447-4459.]
- [4] Fu S J, Li J Q. The effect of simulated predation stimulation on shoaling behavior of *Spinibarbus sinensis* with different sociability [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(12): 2382-2387. [付世建, 李佳倩. 模拟捕食刺激对不同社会性中华倒刺鲃鱼群行为的影响 [J]. 生态学杂志, 2022, **41**(12): 2382-2387.]
- [5] Chrétien E, Cooke S J, Boisclair D. Does shelter influence the metabolic traits of a teleost fish [J]? *Journal of Fish Biology*, 2021, **98**(5): 1242-1252.
- [6] Pang X, Yuan X Z, Cao Z D, *et al.* The effects of fasting on swimming performance in juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*) at two temperatures [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2014(42): 25-32.
- [7] Millidine K J, Armstrong J D, Metcalfe N B. Presence of shelter reduces maintenance metabolism of juvenile salmon [J]. *Functional Ecology*, 2006, **20**(5): 839-845.
- [8] Matsuzaki S I S, Sakamoto M, Kawabe K, *et al.* A laboratory study of the effects of shelter availability and invasive crayfish on the growth of native stream fish [J]. *Freshwater Biology*, 2012, **57**(4): 874-882.
- [9] Jolles J W, Laskowski K L, Boogert N J, *et al.* Repeatable group differences in the collective behaviour of stickleback shoals across ecological contexts [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018, **285**(1872): 20172629.
- [10] Allouche S. Nature and functions of cover for riverine fish [J]. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 2002(365-366): 297-324.
- [11] Gwak W S. Effects of shelter on growth and survival in age-0 black sea bass, *Centropristis striata* (L.) [J]. *Aquaculture Research*, 2003, **34**(15): 1387-1390.
- [12] Pollen A A, Dobberfuhl A P, Scace J, *et al.* Environmental complexity and social organization sculpt the brain in Lake Tanganyikan cichlid fish [J]. *Brain Behavior and Evolution*, 2007, **70**(1): 21-39.

- [13] Zhang Z, Fu Y, Shen F, *et al.* Barren environment damages cognitive abilities in fish: behavioral and transcriptome mechanisms [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021(794): 148805.
- [14] Jones N A R, Spence R, Jones F A M, *et al.* Shade as enrichment: testing preferences for shelter in two model fish species [J]. *Journal of Fish Biology*, 2019, **95**(4): 1161-1165.
- [15] Li W, Rong K, Qin L R, *et al.* Research progress of aquatic animal behavior and its application in fisheries [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(5): 1171-1180. [李为, 荣宽, 覃丽蓉, 等. 水产动物行为及其在渔业中的应用研究进展 [J]. 水生生物学报, 2021, **45**(5): 1171-1180.]
- [16] Maia C M, Alves N P C, Tatemoto P. Juvenile Nile tilapia fish avoid red shelters [J]. *Journal of Applied Animal Welfare Science*, 2021, **24**(1): 98-106.
- [17] Pichirikkat R R, Zhu X M, Lei W, *et al.* Rearing tank color influences survival and growth of the early larvae of the yellow catfish, *Pelteobagrus fulvidraco*, Richardson [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(2): 177-184.
- [18] Yan G J, He X K, Cao Z D, *et al.* An interspecific comparison between morphology and swimming performance in cyprinids [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2013, **26**(8): 1802-1815.
- [19] Fu S J, Fu C, Yan G J, *et al.* Interspecific variation in hypoxia tolerance, swimming performance and plasticity in cyprinids that prefer different habitats [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2014, **217**(4): 590-597.
- [20] Li S, Konings A F, Stauffer J R J. A revision of the *Pseudotropheus elongatus* species group (Teleostei: Cichlidae) with description of a new genus and seven new species [J]. *Zootaxa*, 2016, **4168**(2): 353-381.
- [21] Long J X, Fu S J. Spatial learning of individual cichlid fish and its effect on group decision making [J]. *Animals*, 2022, **12**(10): 1318.
- [22] Li J Q. Effects of starvation and simulated predation on group dynamics of experimental fish (*Spinibarbus chinensis*) [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2022. [李佳倩. 饥饿和模拟捕食对实验鱼和中华倒刺鲃成群动态的影响 [D]. 重庆: 重庆师范大学, 2022.]
- [23] Maia C M, Volpato G L. Preference index supported by motivation tests in Nile tilapia [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(4): e0175821.
- [24] Wang L P, Zhang D, Liu X, *et al.* Simulated predator risk on behavior, swimming ability and stress response of juvenile large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(6): 796-810. [王莉平, 张东, 刘鑫, 等. 模拟捕食者风险对大黄鱼幼鱼行为、游泳能力及应激水平的影响 [J]. 水生生物学报, 2022, **46**(6): 796-810.]
- [25] Wallace K J, Hofmann H A. Equal performance but distinct behaviors: sex differences in a novel object recognition task and spatial maze in a highly social cichlid fish [J]. *Animal Cognition*, 2021, **24**(5): 1057-1073.
- [26] Näslund J, Johnsson J I. Environmental enrichment for fish in captive environments: effects of physical structures and substrates [J]. *Fish and Fisheries*, 2016, **17**(1): 1-30.
- [27] Heg D, Bachar Z, Brouwer L, *et al.* Predation risk is an ecological constraint for helper dispersal in a cooperatively breeding cichlid [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2004, **271**(1555): 2367-2374.
- [28] Archard G A, Braithwaite V A. Increased exposure to predators increases both exploration and activity level in *Brachyrhaphis episcopi* [J]. *Journal of Fish Biology*, 2011, **78**(2): 593-601.
- [29] Fan J. Association of personality with cognitive ability and ability to escape from enemy in freshwater fishes [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2022. [樊捷. 淡水鱼类个性与认知能力及逃避敌害能力的关联 [D]. 重庆: 重庆师范大学, 2022.]
- [30] Bose A P H, Windorfer J, Böhm A, *et al.* Structural manipulations of a shelter resource reveal underlying preference functions in a shell-dwelling cichlid fish [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2020, **287**(1927): 20200127.
- [31] Siregar P, Juniardi S, Audira G, *et al.* Method standardization for conducting innate color preference studies in different zebrafish strains [J]. *Biomedicine*, 2020, **8**(8): 271.
- [32] Park J S, Ryu J H, Choi T I, *et al.* Innate color preference of zebrafish and its use in behavioral analyses [J]. *Molecules and Cells*, 2016, **39**(10): 750-755.
- [33] Zhang N, Li J Q, Fu C, *et al.* Percentage of starved individuals in a group and simulated predation risk on the collective behavior of *Chindongo demasoni* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(6): 989-996. [张娜, 李佳倩, 付成, 等. 鱼群中饥饿个体比例和模拟捕食风险对德玛森小岩鲷群体行为的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(6): 989-996.]
- [34] Dangles O, Irschick D, Chittka L, *et al.* Variability in sensory ecology: expanding the bridge between physiology and evolutionary biology [J]. *The Quarterly Review of Biology*, 2009, **84**(1): 51-74.
- [35] Rodd F H, Hughes K A, Grether G F, *et al.* A possible non-sexual origin of mate preference are male guppies mimicking fruit [J]? *Proceeding Biological Sciences*, 2002, **269**(1490): 475-481.
- [36] Zhao H X, Gong W A, Zhang J H, *et al.* Preference of *Labidochromis caeruleus* for environment and fish shoal with different color [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2022, **39**(6): 46-51. [赵浩翔, 龚文奥, 张久荭, 等. 淡黑镊丽鱼对不同环境颜色 and 不同颜色鱼群的选择偏好 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2022, **39**(6): 46-51.]

- [37] Cui P, Sheng Y T, Yang Y J, *et al.* Effects of dietary algae *Dunaliella salina*, *Schizochytrium limacinum* and *Chlorella vulgaris* on growth performance, body color and partial biochemical indices of *Labidochromis caeruleus* [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2018, **33**(6): 716-721. [崔培, 盛叶婷, 杨燕菁, 等. 饲料中添加不同藻粉对非洲王子鱼生长、体色及部分生化指标的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2018, **33**(6): 716-721.]
- [38] Carleton K L, Parry J W L, Bowmaker J K, *et al.* Colour vision and speciation in Lake Victoria cichlids of the genus *Pundamilia* [J]. *Molecular Ecology*, 2005, **14**(14): 4341-4353.
- [39] Zoppoth P, Koblmüller S, Sefc K M. Male courtship preferences demonstrate discrimination against allopatric colour morphs in a cichlid fish [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2013, **26**(3): 577-586.

HABITAT-SPECIFIC FISH PREFERENCE FOR SHELTER SELECTION UNDER SIMULATED PREDATION RISK: A CASE STUDY OF CHINESE BARB (*SPINIBARBUS SINENSIS*) AND CICHLID (*CHINDONGO DEMASONI*)

ZENG Zu-Xian, LI Wu-Xin and FU Shi-Jian

(Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: The utilization of shelters represents a crucial anti-predator behavioral strategy among fish species. Shelters preference, a key facet of this strategy, seems intricately linked to various factors, including habitat conditions, as well as physiological and morphological characteristics of organisms. In this study, juvenile Chinese barb (*Spinibarbus sinensis*) and juvenile cichlid (*Chindongo demasoni*) were employed as fish model. The objective was to investigate shelter selection preference for different types (e.g., weed, branch and stone) and colors (e.g., blue, red and green) in response to simulated predator attacks. The main results of this study are as follows: (1) Among different shelters, both Chinese barb and cichlid exhibited a preference for weed under natural conditions. Chinese barb demonstrated an aversion of stone, while cichlid showed a preference for stone. (2) The preference for weed became more pronounced in both Chinese barb and cichlid after simulated predation attack. (3) Concerning different color shelters, the highest percentage of the first choice for green weed was observed in the natural state for Chinese barb, while cichlid displayed the highest percentage of first choice for red weed. (4) Following simulated predation attacks, there was no significant difference in the dwell time proportion in different color shelters by Chinese barb. However, cichlid exhibited the highest dwell time proportion in red weed. These results suggested that Chinese barb and cichlid consistently exhibit preferences for different types of shelters, with interspecific differences in selection preferences for shelters of different colors. These differences may be closely linked to their distinct habitats and habits.

Key words: Shelter; Predation risk; Interspecific differences; Antipredator behavior; Shelter selection preference