

稀有鮡鲫对不同生境的选择性偏好

邱宁^{①②} 李文静^① 侯淼淼^① 王剑伟^{①*}

① 中国科学院水生生物研究所 武汉 430072;

② 交通运输部天津水运工程科学研究所, 水路交通环境保护技术交通行业重点实验室 天津 300456

摘要: 对不同生境的识别和选择性偏好是保障鱼类生存和繁衍的重要能力之一。以稀有鮡鲫(*Gobiocypris rarus*)为研究对象, 使用沙、水草和石块在观测水缸中进行多种排列组合以构建不同的生境类型, 基于在各区域的停留时长和中线跨越次数两项参数, 测试稀有鮡鲫对不同生境类型的偏好以及营养状态、生境组成物数量、环境照度对该行为影响。结果表明, 稀有鮡鲫对不同的生境类型具有明显的选择性偏好, 对仅水草生境偏好程度最高, 对仅石块生境的偏好程度最低。该偏好行为在 24 h 的禁食后变化不显著 ($P > 0.05$), 但生境组成物数量和环境照度对该行为具有显著影响 ($P < 0.05$), 其偏好程度随水草数量和照度的增加而增加, 在包含 8 棵水草及 1 000 lx 的照度下最高。

关键词: 生境类型; 选择性偏好; 稀有鮡鲫; 营养状态; 照度

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2021) 06-856-09

The Selective Preference of Rare Minnow (*Gobiocypris rarus*) to Different Habitats

QIU Ning^{①②} LI Wen-Jing^① HOU Miao-Miao^① WANG Jian-Wei^{①*}

① Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072;

② Key Laboratory of Environmental Protection Technology on Water Transport, Ministry of Transport, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China

Abstract: The identification and selective preference for different habitats is one of the important abilities to ensure the survival and reproduction of fish. The preference of Rare Minnow (*Gobiocypris rarus*) for different habitat and the effects of nutrient status, number of components and environmental illumination on this behavior were tested. Sand, aquatic plants, and stones were used in a variety of permutations and combinations in tank to create different habitat types. The behavior was quantified based on the time spent of fish in each area of tank and frequency of midline crossing. The effects of nutrient status, number of components and environmental illumination was tested under following condition respectively by the controlling the variable method: (1) Two groups of nutritional status of fish: food-deprived and well-fed. Fish

基金项目 湖北省科技支撑计划项目 (No. 2015BCE098);

* 通讯作者, E-mail: wangjw@ihb.ac.cn;

第一作者介绍 邱宁, 男, 助理研究员; 研究方向: 鱼类生态学、鱼类行为学; E-mail: qiuning181@163.com。

收稿日期: 2021-08-11, 修回日期: 2021-09-26 DOI: 10.13859/j.cjz.202106007

of food-deprived was stopped feeding for 24 h; (2) Four groups of ambient illumination: 500 lx, 1 000 lx, 1 500 lx, 2 000 lx; (3) Four groups of number of components: one, two, four, eight aquatic plants. Data were checked for assumptions of normality and assumptions of homogeneity of variance by using Kolmogorov-Smirnov and Levene tests and were analyzed by One Way Analysis of Variance and least significant difference (multiple-comparison tests). Statistical process and tests were done using the SPSS and Office Excel. Results showed that Rare Minnow had obvious preference to different habitat types ($P < 0.05$), and this preference degree was highest when containing only aquatic plants, and was lowest when containing only rocks (Fig. 2 and Fig. 3). This preference was not affected after food-deprived of 24 h ($P > 0.05$, Fig. 5), but was significantly affected by the number of habitat components ($P < 0.001$, Fig. 4) and environmental illumination ($P < 0.001$). It increased with the increase of number of aquatic plants and illumination, and was most obvious when containing 8 aquatic plants (Fig. 4) or under the illumination of 1 000 lx (Fig. 6). In conclusion, this study demonstrates that Rare Minnow had obvious preference to environment composed of aquatic plants and this preference was affected significantly by some environmental factors such as illumination and number of habitat components.

Key words: Habitat types; Selective preference; *Gobiocypris rarus*; Nutritional status; Illumination

鱼类的野外生境包含多种类型, 既有裸露的开阔水面, 也有由砂石和水生植物组成的复杂环境。有研究表明, 相对于裸露的开阔水域, 许多鱼类都明显偏好于包含复杂结构的环境。斑马鱼 (*Danio rerio*) 偏好于水缸中有水生植物的一边 (Kistler et al. 2011); 拟海龙 (*Syngnathoides biaculeatus*)、列牙鲷 (*Pelates quadrilineatus*) 及中华单角鲀 (*Monacanthus chinensis*) 三种海鱼均偏好于有海草的环境 (Burfeind et al. 2009); 云纹平鲷 (*Sebastes nebulosus*) 喜欢停留在水缸中的塑料植物中 (Lee et al. 2009); 湖鲟 (*Acipenser fulvescens*)、部分鲑鱼以及鲱形目 (Pleuronectiformes) 鱼类均偏爱有底沙的环境 (Ellis et al. 1997, Peake 1999, Benhaïm et al. 2009); 三刺鱼 (*Gasterosteus aculeatus*) (Candolin et al. 1998, Webster et al. 2004) 和莫桑比克罗非鱼 (*Oreochromis mossambicus*) (Galhardo et al. 2009) 等具有筑巢行为的鱼类也偏好于将巢穴建在环境复杂度较高的水域中。但也有一些大型掠食性鱼类如欧亚鲈鱼 (*Perca fluviatilis*) (Nelson et al. 1990) 和达氏鳊 (*Huso huso*) (Falahatkar et al. 2011) 等更偏爱光滑裸露的生境或没有明显的生境

偏好。

对于大部分鱼类, 栖息于结构复杂的水域中能够为它们带来明显的好处, 包括提高觅食效率、躲避强水流、拥有繁殖场所和躲避捕食者等 (Harmon 1986, Allouche 2002, Spence et al. 2007)。有研究指出, 结构复杂的环境可以从两个方面提高鱼类对捕食者的躲避, 一种是显著降低掠食性鱼类的捕食效率和攻击性 (Diehl 1988, Hjesj et al. 2004, Kopp et al. 2006); 另一种则是通过植物、木块及石块掩盖被捕食鱼类的轮廓 (Coulston et al. 1983, Savino et al. 1989)。不仅是野外生境, 人工饲养条件下的环境复杂度也会对鱼类产生明显的影响。环境复杂度的增加不仅能够提高动物的福利 (Olsson et al. 2002, Balcombe 2006), 增加实验数据的准确性 (Mason et al. 2007), 还能提高水产养殖中鱼类的生长速率 (Coulibaly et al. 2007)。因此, 栖息于复杂的生境中或许能够使处于被捕食地位的小型鱼类获得更大的舒适度和安全感。

稀有鮡鲫 (*Gobiocypris rarus*) 是我国长江上游特有的一种小型鱼类, 隶属于鲤形目鲤科鮡亚科鮡鲫属, 其野生群体仅分布于我国四川

省的汉源县、雅安市和乐山市等地(丁瑞华 1994, 陈宜瑜 1998, 曹文宣等 2003)。自被中国科学院水生生物研究所开发成模式鱼类以来, 稀有鮎鲫已经被大量地应用于繁殖生物学(Luo et al. 2017)、营养学(Wu et al. 2015)、分子生物学(He et al. 2010)和毒理学(Qin et al. 2013, Xiong et al. 2017)等方面的研究, 而关于其行为模式尤其是生境偏好行为方面的研究还极为缺乏。因此本研究旨在明确稀有鮎鲫对不同生境的选择性偏好行为, 以及该行为对内外部实验条件的响应方式, 以期进一步理解鱼类生境偏好行为的生物学和生态学意义。同时丰富稀有鮎鲫的行为学资料, 为提高稀有鮎鲫的动物福利提供理论指导, 并为其在鱼类行为学研究领域的应用提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 实验用鱼

本研究使用的稀有鮎鲫体长(2.02 ± 0.15) cm, 来自中国科学院水生生物研究所自行培育的封闭群。稀有鮎鲫饲养在循环水系统中, 水温维持在 $25 \sim 27$ °C, 光周期控制为光照与黑暗 12 h : 12 h, 光照时间为 8:00 ~ 20:00 时。每天两次(9:00 时和 15:00 时)饱食投喂冰冻的摇蚊(*Chironomidae* spp.)幼虫(北水科技有限公司, 天津, 中国)。

1.2 生境偏好测试

实验容器是长 × 宽 × 高为 30 cm × 15 cm × 20 cm 的观测水缸, 四面缸壁和底部用灰色不透明颜色纸包裹, 以减小周围环境的干扰。通过底部中线将观测水缸分为左右两个相等的部分, 一半保持空白作为裸露区, 另一半将沙、水草和石块两两组合形成 7 种搭配来模拟不同的生境, 分别为沙、水草、石块、沙加水草、沙加石块、水草加石块及沙加水草加石块(图 1)。将 7 种生境分别与裸露区配对(共 7 个观测水缸)进行实验。所用的沙为直径约 0.1 cm 的细河沙与直径约 0.5 cm 碎石的混合物; 所用水草为 4 棵洗净并在实验室暂养 10 d 以上的野生苦草(*Vallisneria spiralis*), 每棵约 6 片叶, 长度均为 13 ~ 15 cm; 所用石块为 10 块直径 5 ~ 8 cm 的砾石。所用沙、水草和石块均在实验前使用养殖系统水浸泡 7 d。观测水缸顶部的发光二极管(light-emitting diode, LED)照明灯提供 500 lx 的灯光照明。行为观测设备由一部高清电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)摄像头和相应的拍摄软件组成(金扬世纪科技发展有限公司, 深圳, 中国)。在每天固定的时间内(9:00 ~ 18:00 时)且稀有鮎鲫饱食的状态下进行实验。实验开始时, 观测水缸中注入曝气自来水, 水温为 $25 \sim 27$ °C。每次使用一尾鱼放入观测水缸, 2 min 的适应

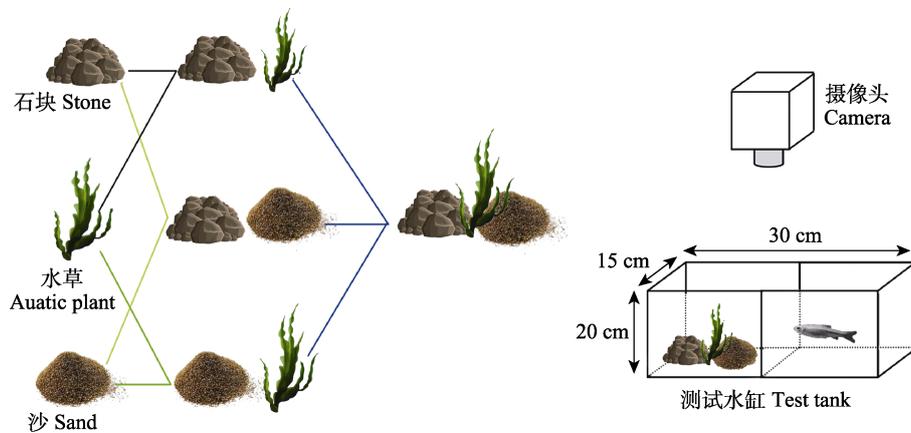


图 1 观测水缸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the observation tank

后开始观测，共观测 30 min，统计稀有鮡鲫在各个区域的总停留时长及中线跨越次数，每个实验组共 8 尾鱼参与测试，每尾鱼仅使用一次。为尽量减小其他因素影响，每次实验观测水缸方向均随机摆放，且尽量保证每次实验石块、水草等内容物的摆放方式一致。

1.3 不同实验条件下的生境偏好测试

1.3.1 环境内含物数量 使用仅水草生境的观测水缸进行实验。在环境复杂区中分别放置 1 棵、2 棵、4 棵和 8 棵水草，每棵水草的形态和叶片数均如 1.2 所述，统计在不同的实验组中稀有鮡鲫在两个区域的停留时长和中线跨越次数。

1.3.2 稀有鮡鲫的营养状态与环境照度 使用仅水草生境的观测水缸进行实验。设置禁食组与饱食组两个营养状态组。将部分稀有鮡鲫个体停食 24 h 获得禁食的实验鱼。通过调节 LED 灯的亮度和档位，设置 4 个照明梯度组，500 lx、1 000 lx、1 500 lx 和 2 000 lx。采用控制变量法进行测试，即当一个实验条件被改变时，其他实验条件均与 1.2 所述保持一致。

1.4 统计分析

所有数据采用 Kolmogorov-Smirnov 和

Levene 法分别进行正态分布和方差齐性检验。各实验组间采用单因素方差分析 (One Way Analysis of Variance) 和最小显著差异方法 (least significant difference, LSD) 多重比较进行组间差异分析。所有分析均利用 SPSS 20.0 软件进行。

2 结果

2.1 稀有鮡鲫对不同生境的偏好

稀有鮡鲫在各区域的停留情况在不同生境的观测水缸中具有显著差异 ($P < 0.001$, 图 2)。在沙加石块 ($P < 0.001$)、石块 ($P < 0.001$)、水草加石块 ($P < 0.001$) 和沙 ($P < 0.05$) 的生境中，稀有鮡鲫在裸露区的停留时间显著大于复杂环境区，而相比之下，在沙加水草 ($P < 0.001$)、沙加水草加石块 ($P < 0.001$) 和水草 ($P < 0.001$) 生境中，稀有鮡鲫在复杂环境区停留的时间则显著大于裸露区。此外，稀有鮡鲫跨越观测水缸中线的次数在不同生境的观测水缸中也有显著差异 ($P < 0.001$, 图 3)，在沙生境的观测水缸中跨越次数最高，而在石块和水草生境的观测水缸中则较低。

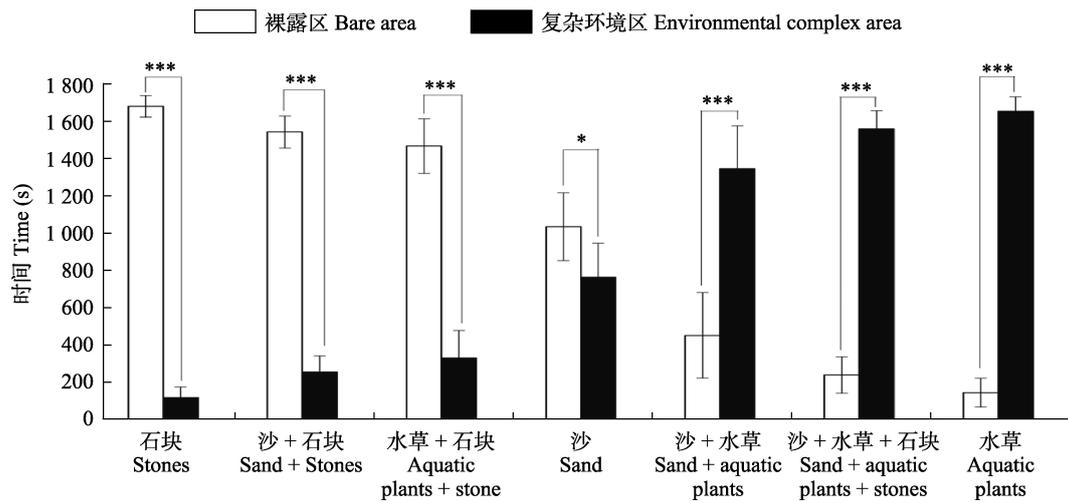


图 2 稀有鮡鲫在不同生境观测水缸中各区域的停留时间

Fig. 2 The time spent of Rare Minnow in each area of observation tank of different habitats

每组 8 次重复。8 repetitions in each group. * $P < 0.05$, *** $P < 0.001$

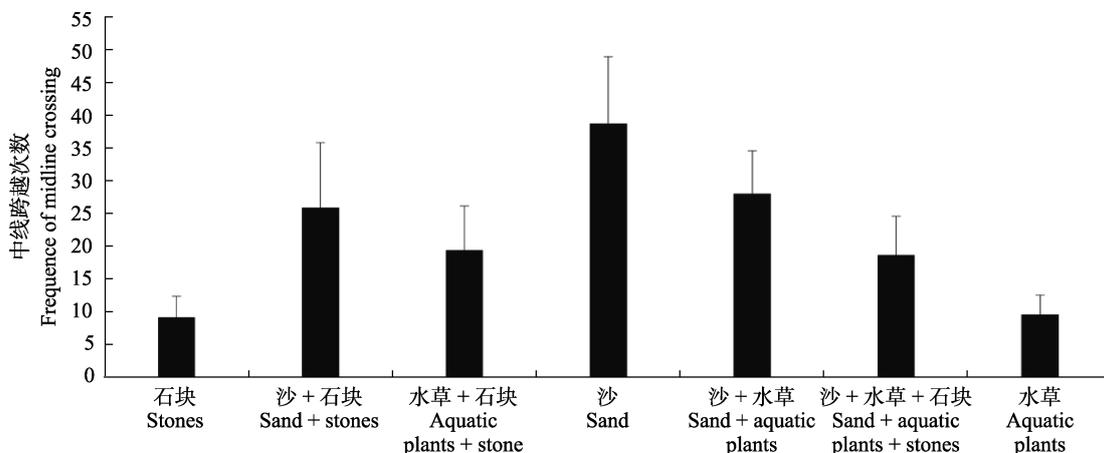


图3 稀有鮎鲫在不同生境观测水缸中的中线跨越次数

Fig. 3 The frequency of midline crossing of Rare Minnow in each area of observation tank of different habitat

每组 8 次重复。8 repetitions in each group.

2.2 不同实验条件下稀有鮎鲫的生境偏好

2.2.1 环境内含物的数量

当复杂环境区中包含不同数量的水草时，稀有鮎鲫的在复杂环境区的停留时长 ($P < 0.001$) 及中线跨越次数 ($P < 0.001$) 均显著不同 (图 4)。其在复杂环境区的停留时长随水草数量的增加而增加，在包含 8 棵水草时达到最大，为 ($1\ 695.75 \pm 44.58$) s；而中线跨越次数随水草数量的增加而减少，在包含 8 棵水草时达到最小，为 (8.00 ± 2.83) 次。组间多重差异分析结果显示，当观测水缸中仅包含 1 棵水草时，稀有鮎鲫在复杂

环境区的停留时长 ($P < 0.001$) 及中线跨越次数 ($P < 0.001$) 与其他各组均显著不同。

2.2.2 稀有鮎鲫的营养状态及环境照度

24 h 禁食后，稀有鮎鲫在观测水缸各区域的停留时长与饱食状态下没有显著差异 ($P > 0.05$, 图 5)，但其跨越中线的次数却显著低于饱食状态 ($P < 0.001$)。使用不同照度进行测试时，稀有鮎鲫在各区域的停留时长 ($P < 0.001$) 和中线跨越次数 ($P < 0.001$) 在各组之间均存在极显著差异 (图 6)。照度的增强极显著地减少了稀有鮎鲫跨越中线的次数，而增加了其在复杂

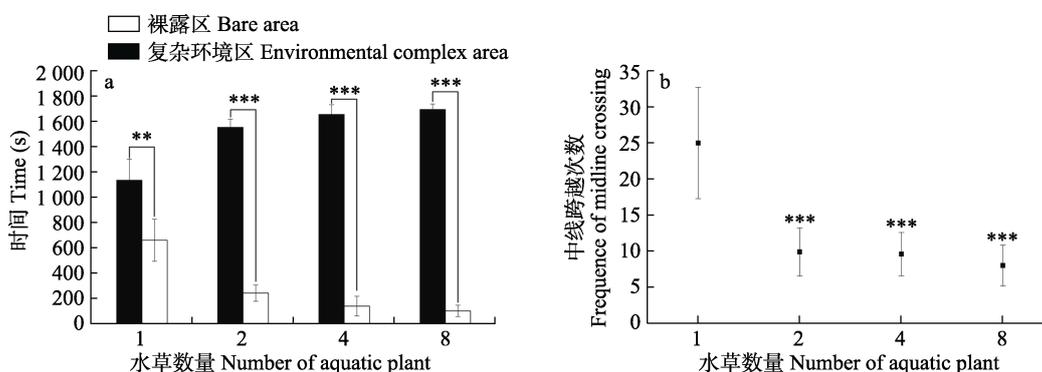


图4 环境中包含不同数量的水草时稀有鮎鲫在观测水缸各区域的停留时长 (a) 和中线跨越次数 (b)

Fig. 4 The time spent in each area (a) and frequency of midline crossing (b) of Rare Minnow in observation tank that contains different amounts of water grasses

每组 8 次重复。8 repetitions in each group. ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

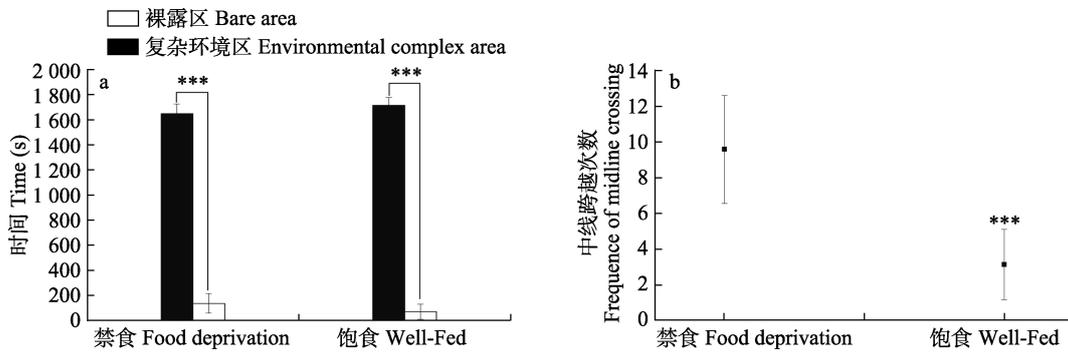


图5 不同营养状态下的稀有鮕鲫在观测水缸不同区域的停留时长 (a) 和中线跨越次数 (b)

Fig. 5 The time spent in each area of observation tank (a) and frequency of midline crossing (b) of Rare Minnow of different nutrition status

每组 8 次重复。8 repetitions in each group. *** $P < 0.001$

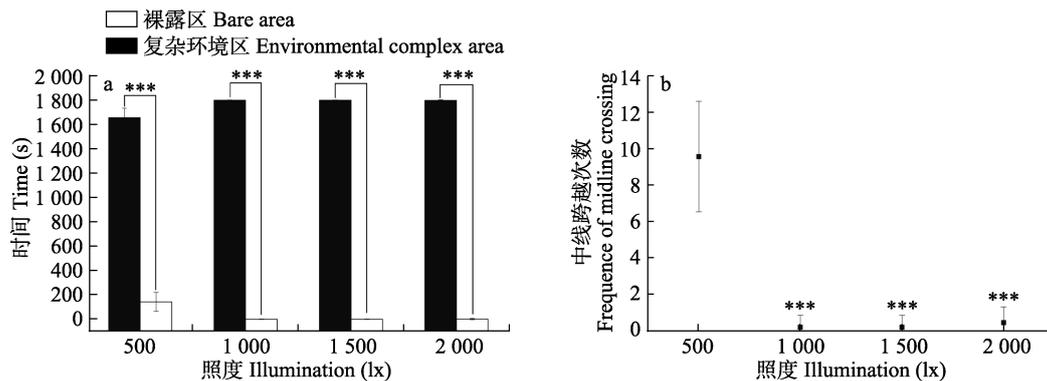


图6 不同照度下稀有鮕鲫在观测水缸不同区域的停留时长 (a) 和中线跨越次数 (b)

Fig. 6 The time spent in each area of observation tank (a) and frequency of midline crossing (b) of Rare Minnow under different illumination

每组 8 次重复。8 repetitions in each group. *** $P < 0.001$

环境区的停留时间。稀有鮕鲫在照度 1 000 lx 时中线跨越次数最少，为 (0.25 ± 0.66) 次，而在复杂环境区停留的时间最长，为 $(1 799.00 \pm 2.65)$ s。

3 讨论

3.1 稀有鮕鲫对不同生境的选择性偏好

稀有鮕鲫对不同生境的偏好性由强至弱的顺序大致为水草、裸区、沙、石块。鱼类在野外环境中面临的问题主要来自三个方面，觅食、

繁殖与躲避捕食者。稀有鮕鲫的主要食物，如枝角类、桡足类、藻类和植物碎屑等(Wang et al. 2017)，往往在水体岸边的水草中分布密度较大，因此在这些环境中能够更容易获取食物。作为一种产黏性卵的鱼类，稀有鮕鲫繁殖时，将卵粘附于水草等附着物上进行发育(王剑伟 1992)，而孵化后的仔鱼更需要水草作为它们的育苗场。因此在繁殖需求方面，富含水草的生境也明显优于裸区。大量研究表明，富含水草的复杂环境能够显著降低掠食性鱼类的捕食

效率和攻击性 (Diehl 1988, Kopp et al. 2006), 并且能够通过视线遮挡来掩盖小型鱼类的轮廓 (Coulston et al. 1983, Savino et al. 1989), 因此栖息于水草中能够帮助稀有鮟鮟躲避捕食者的攻击, 这也与本研究得出的稀有鮟鮟偏好于水草生境的结论一致。然而与水草生境类似, 由石块组成的野外生境同样可以为小型杂食性鱼类提供觅食、繁殖和躲避捕食者方面的优势, 但本研究中稀有鮟鮟并没有表现出对石块生境的偏好。根据之前的野外观测经验, 稀有鮟鮟主要栖息的沟渠、水塘等水体的石块缝隙中往往隐藏着鲇形目 (Siluriformes) 或吻虾虎鱼属 (*Rhinogobius*) 鱼类以及沼虾 (*Macrobrachium*) 等伏击型生物, 因此靠近这些石块缝隙会使稀有鮟鮟面临被捕食的风险。当对石块中潜在捕食者的恐惧超越了石块生境带来的繁殖和觅食方面的优势时, 稀有鮟鮟就会表现出对石块明显的厌恶。因此除了沙加水草加石块的组合外, 在其他所有包含了石块的生境中, 稀有鮟鮟均明显地偏好于裸露区。在使用底沙作为内容物时, 稀有鮟鮟都同样表现出了对复杂环境区的回避行为。之前报道的对沙质生境明显偏好的莫桑比克罗非鱼等鱼类大多具有在沙地筑巢的习性 (Galhardo et al. 2009), 因此它们对沙质生境的偏好很大程度上是由繁殖因素驱动的。而根据饲养观察和野外观测, 稀有鮟鮟在繁殖中没有筑巢和护幼的习性, 它们的野外栖息地也大多是淤泥底质, 因此稀有鮟鮟对底沙可能具有中性的偏好。另一方面, 本研究使用的稀有鮟鮟并非野外捕获, 而是已在实验室的繁育了 10 代的人工种群, 它们世代生活在实验室裸露的水族箱中, 已经对这种空旷裸露的环境产生了一定程度的适应。因此当面临中性偏好的底沙环境和从小生长的空旷环境时, 它们更倾向于选择裸露环境。此外, 在不同内容物的组合测试中, 稀有鮟鮟对不同生境的偏好总体上符合叠加效应, 即偏好的生境元素在组合时会增强其对复杂区域的偏好性, 而厌恶的生境元素则会呈现出相反的作用。

除了在各区域的停留时长外, 本研究还使用了中线跨越次数来评估稀有鮟鮟的生境偏好, 该参数在一定程度上表征了稀有鮟鮟在生境选择时的犹豫性。而该参数的统计结果也与停留时长大体一致, 即稀有鮟鮟在两个区域的停留时长差距越大, 其中线跨越次数越低, 反之亦然。

3.2 实验条件对稀有鮟鮟生境偏好的影响

稀有鮟鮟对不同生境的选择性偏好行为在不同的实验条件下具有一定的差异。24 h 的禁食没有显著改变稀有鮟鮟在两个区域的停留时长, 但却明显增加了它们的中线跨越次数, 这表明 24 h 禁食引发的觅食欲望尽管能促使稀有鮟鮟增加探索外部环境的次数, 但还不足以使它们长时间地离开复杂生境。根据实验观察, 使用禁食的稀有鮟鮟进行实验时, 尽管它们大部分时间仍然待在水草丛中, 但是活动频率和强度都明显增加了。它们在水草丛中频繁地巡游, 在草叶上做出啃食动作, 并且会偶尔进入裸露区绕游一圈后快速返回。照度测试中, 1 000 lx 是一个明显的分界点。随着照度的增加, 稀有鮟鮟花费在复杂环境区的时长在 1 000 lx 之后明显增加, 而中线跨越次数则在 1 000 lx 后剧烈减少。较高的照度会使稀有鮟鮟身体的视觉显著性变得更高, 更易被发现, 因此它们更加强烈地偏好于躲进有遮蔽物的地方。此外作为一种压力诱导因素, 照度的增加也会促使它们停留在具有更高舒适度和安全感的地方。在使用不同数量水草的测试中, 当水草数量由 1 棵增加到 4 棵时, 稀有鮟鮟对水草生境的偏好性会明显地增加。但当水草数量增加到 4 棵之后, 该偏好性的增速明显变缓, 以至于在水草由 4 棵增加到 8 棵时, 稀有鮟鮟无论是在两个区域的停留时长还是中线跨越次数均没有发生明显变化。这表明, 稀有鮟鮟对复杂生境的偏好存在一个阈值, 该阈值代表了稀有鮟鮟对复杂生境所能提供安全感的理想需求。在这个阈值之前, 生境越复杂, 遮蔽物越多, 安全感就越明显, 它们的偏好性也就越强。

但超越这个阈值之后, 多出的遮蔽物不仅不再能明显提高稀有鮡鲫的安全感, 反而会使其活动受到一定限制, 因此其偏好性就不再明显增加。

参 考 文 献

- Allouche S. 2002. Nature and functions of cover for riverine fish. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (365/366): 297–324.
- Balcombe J P. 2006. Laboratory environments and rodents' behavioural needs: a review. *Laboratory Animals*, 40(3): 217–235.
- Benhaïm D, Leblanc C, Lucas G. 2009. Impact of a new artificial shelter on Arctic charr (*Salvelinus alpinus*, L.) behaviour and culture performance during the endogenous feeding period. *Aquaculture*, 295(1/2): 38–43.
- Burfeind D D, Tibbetts I R, Udy J W. 2009. Habitat preference of three common fishes for seagrass, *Caulerpa taxifolia*, and unvegetated substrate in Moreton Bay, Australia. *Environmental Biology of Fishes*, 84(3): 317–322.
- Candolin U, Voigt H-R. 1998. Predator-induced nest site preference: safe nests allow courtship in sticklebacks. *Animal Behaviour*, 56(5): 1205–1211.
- Coulibaly A, Koné T, Ouattara N I, et al. 2007. Évaluation de l'effet d'un système de refuge sur la survie et la croissance des alevins de *Heterobranchus longifilis* élevés en cage flottante. *Belgian Journal of Zoology*, 137(1): 157.
- Coulston P, Maughan O E. 1983. Effects of removal of instream debris on trout populations. *Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society*, 99(3): 78–85.
- Diehl S. 1988. Foraging efficiency of three freshwater fishes: effects of structural complexity and light. *Oikos*, 53(2): 207–214.
- Ellis T, Hoowell B, Hughes R. 1997. The cryptic responses of hatchery-reared sole to a natural sand substratum. *Journal of Fish Biology*, 51(2): 389–401.
- Falahatkar B, Shakoorian M. 2011. Indications for substrate preferences in juvenile hatchery-reared great sturgeon, *Huso huso*. *Journal of Applied Ichthyology*, 27(2): 581–583.
- Galhardo L, Almeida O, Oliveira R F. 2009. Preference for the presence of substrate in male cichlid fish: Effects of social dominance and context. *Applied Animal Behaviour Science*, 120(3/4): 224–230.
- Harmon M E. 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in ecological research*, 15(1): 133–302.
- He Y F, Wang J W. 2010. Temporal variation in genetic structure of the Chinese rare minnow (*Gobiocypris rarus*) in its type locality revealed by microsatellite markers. *Biochemical Genetics*, 48(3/4): 312–325.
- Hjesj J, Johnsson Jr, Bohlin T. 2004. Habitat complexity reduces the growth of aggressive and dominant brown trout (*Salmo trutta*) relative to subordinates. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 56(3): 286–289.
- Kistler C, Heggin D, Würbel H, et al. 2011. Preference for structured environment in zebrafish (*Danio rerio*) and checker barbs (*Puntius oligolepis*). *Applied Animal Behaviour Science*, 135(4): 318–327.
- Kopp K, Wachlewski M, Eterovick P C. 2006. Environmental complexity reduces tadpole predation by water bugs. *Canadian Journal of Zoology*, 84(1): 136–140.
- Lee J S F, Berejikian B A. 2009. Structural complexity in relation to the habitat preferences, territoriality, and hatchery rearing of juvenile China rockfish (*Sebastes nebulosus*). *Environmental Biology of Fishes*, 84(4): 411–419.
- Luo S, Jin S, Su L, et al. 2017. Effect of water temperature on reproductive performance and offspring quality of rare minnow, *Gobiocypris rarus*. *Journal of Thermal Biology*, 67(1): 59–66.
- Mason G, Clubb R, Latham N, et al. 2007. Why and how should we use environmental enrichment to tackle stereotypic behaviour? *Applied Animal Behaviour Science*, 102(3/4): 163–188.
- Nelson W G, Bonsdorff E. 1990. Fish predation and habitat complexity: are complexity thresholds real? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 141(2/3): 183–194.
- Olsson I A S, Dahlborn K. 2002. Improving housing conditions for laboratory mice: a review of 'environmental enrichment'. *Laboratory animals*, 36(3): 243–270.
- Peake S. 1999. Substrate preferences of juvenile hatchery-reared lake sturgeon, *Acipenser fulvescens*. *Environmental Biology of Fishes*, 56(4): 367–374.

- Qin F, Wang L H, Wang X Q et al. 2013. BisphenolA affects gene expression of gonadotropin-releasing hormones and type I GnRH receptors in brains of adult rare minnow *Gobiocypris rarus*. *Comparative Biochemistry and Physiology Toxicology & Pharmacology*, 157(2): 192–202.
- Savino J F, Stein R A. 1989. Behavioural interactions between fish predators and their prey: effects of plant density. *Animal Behaviour*, 37(1): 311–321.
- Spence R, Ashton R, Smith C. 2007. Oviposition decisions are mediated by spawning site quality in wild and domesticated zebrafish, *Danio rerio*. *Behaviour*, 144(8): 953–966.
- Wang J, Cao W. 2017. *Gobiocypris rarus* as a Chinese native model organism: History and current situation. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 12(2): 20–33.
- Webster M M, Hart P J B. 2004. Substrate discrimination and preference in foraging fish. *Animal Behaviour*, 68(5): 1071–1077.
- Wu B, Luo S, Wang J. 2015. Effects of temperature and feeding frequency on ingestion and growth for rare minnow. *Physiology & Behavior*, 140(1): 197–202.
- Xiong X, Luo S, Wu B, et al. 2017. Comparative developmental toxicity and stress protein responses of dimethyl sulfoxide to rare minnow and zebrafish embryos/larvae. *Zebrafish*, 14(1): 60–68.
- 曹文宣, 王剑伟. 2003. 稀有鮎鲫——一种新的鱼类实验动物. *实验动物科学*, 20(1): 96–99.
- 陈宜瑜. 1998. 中国动物志: 硬骨鱼纲: 鲤形目 (中). 北京: 科学出版社, 50–51.
- 丁瑞华. 1994. 四川鱼类志. 四川: 四川科学技术出版社, 133–134.
- 王剑伟. 1992. 稀有鮎鲫的繁殖生物学. *水生生物学报*, 16(2): 165–174.