

## 秦岭细鳞鲑与同域物种拉氏鲮的行为差异及浊度依赖性\*

庞健<sup>1,2</sup>, 王丽英<sup>1</sup>, 赵灵芝<sup>1,2</sup>, 李悦<sup>1,2</sup>, 张宏<sup>3</sup>, 夏继刚<sup>1,2</sup>

(1. 重庆师范大学 鱼类生态与保护研究中心; 2. 重庆师范大学 进化生理与行为学实验室 动物生物学重庆市高校重点实验室 淡水鱼类资源保护与利用重庆市重点实验室, 重庆 401331; 3. 陕西太白山国家级自然保护区管理局, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为探究浊度对秦岭细鳞鲑(*Brachymystax tsinlingensis*)及同域分布鱼类拉氏鲮(*Phoxinus lagowskii*)行为的影响,采用自制的行为拍摄装置,分别测定2种鱼类在不同浊度水体中的活跃性指标运动距离、静止时间以及勇敢性指标开阔区停留时间、进入开阔区次数,分析2种实验鱼的行为差异及浊度依赖性。结果显示:1) 秦岭细鳞鲑和拉氏鲮的活跃性和勇敢性指标存在明显的种间差异,无论水体浊度如何,与拉氏鲮相比,秦岭细鳞鲑的运动距离均更长、静止时间和开阔区停留时间均更短,组间数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ );但进入开阔区次数无统计学意义上的差异。2) 浊度对2种实验鱼的活跃性指标有统计学意义上的影响( $p < 0.05$ ),但对勇敢性指标无统计学意义上的影响,且浊度与物种的交互作用对两者的活跃性和勇敢性指标均无统计学意义上的影响;3) 无论水体浊度如何,拉氏鲮的部分活跃性指标与部分勇敢性指标均呈统计学意义上的正相关或负相关( $p < 0.05$ ),但秦岭细鳞鲑的活跃性和勇敢性指标均无统计学意义上的相关关系。上述研究结果提示浊度对秦岭细鳞鲑与拉氏鲮的行为反应有明显影响,潜在增加它们的额外能量消耗,未来需加强对秦岭细鳞鲑栖息地水体浊度的监测与管理。

**关键词:** 鱼类行为; 同域物种; 浊度; 秦岭细鳞鲑; 拉氏鲮

中图分类号: Q175

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2026)01-0055-09

鱼类行为是指鱼类个体或群体对外部环境刺激(如光照、温度、水流、捕食者、食物等)和内部生理状态(如激素水平、繁殖需求等)作出的可观测、可量化的反应和适应性活动模式的总和<sup>[1]</sup>。个性(personality)行为体现了不同时空条件下鱼类个体间行为的稳定差异,与种群动态、遗传变异、物种形成等有关<sup>[2]</sup>,并涵盖勇敢性、活跃性、探索性、社会性、攻击性等多个方面。活跃性指鱼类个体在熟悉或非新异环境中的日常活动行为<sup>[3]</sup>;活跃性较强的个体通常身体状况更好<sup>[4]</sup>,但过度活动可能不利于能量储存进而影响生长。勇敢性体现了鱼类在面对已知且具有挑战性或有潜在捕食风险环境时的认知能力以及所采取的行为对策;勇敢性强的鱼类往往可以更快地接触新异事物,从而快速发现新的资源或占据新的生存空间,但同时也可能面临更大的捕食风险<sup>[5]</sup>。探究不同环境背景下同域鱼类个性行为的表达模式及差异对于理解它们如何适应环境以及存在怎样的种间相互作用具有重要的生态学意义。

浊度表示水体中环境悬浮颗粒对光的散射程度,通常以单位 NTU(nephelometric turbidity unit)来衡量。悬浮颗粒无论是泥沙、藻类、浮游生物还是腐殖质都会散射光线,从而影响水体中物体的可见度与可探测性<sup>[6]</sup>。森林砍伐、采矿采沙、农业生产、污水排放等人类活动以及山体滑坡、泥石流等自然灾害都会导致水体浊度升高<sup>[7]</sup>。在高浊度环境中,鱼类的生存受到悬浮颗粒物的直接影响。有研究表明:悬浮的细小颗粒会粘附或堵塞鳃部,阻碍气体交换,导致鱼类窒息死亡,并且悬浮在水中的细微泥沙还会磨损幼鱼的表皮<sup>[8]</sup>;而浮游生物的大量繁殖则会使水体含氧量大幅下降并导致鱼类缺氧<sup>[9]</sup>。此外,浊度的升高也可能通过破坏鱼类的视觉感知来改变它们的行为<sup>[6]</sup>,例如:在高浊度环境中的大西洋鳕(*Gadus morhua*)幼鱼的自发活动明显增强,但捕食效率降低<sup>[10]</sup>;较高的浊度不仅影响了裸盖鱼(*Anoplopoma fimbria*)追逐猎物的速度并导致该鱼种捕获猎物的成功率降低<sup>[11]</sup>,还严重破坏依靠视觉捕食的美洲红点鲑(*Salvelinus fontinalis*)的摄食行为<sup>[12]</sup>。以上研究表明,浊度对鱼类生存适合度关联的行为特征有明显影响;但作为对水体浊度高度敏感的溪流鱼类,它们的行为如何响应浊

\* 收稿日期:2025-10-15 修回日期:2025-12-08 网络出版时间:2026-03-03T13:47

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 32470511);重庆市自然科学基金创新发展联合基金(No. CSTB2024NSCQ-LZX0061)

第一作者简介:庞健,男,研究方向为鱼类生理生态与行为学,E-mail:2245917818@qq.com;通信作者简介:夏继刚,男,教授,博士生导师,E-mail:jigangxia@163.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20260302.1738.012

度变化却鲜见研究报道。

秦岭细鳞鲑(*Brachymystax stinlingensis*)俗称梅花鱼,为鲑形目(Salmoniformes)鲑科(Salmonidae)细鳞鲑属(*Brachymystax*)鱼类,是国家二级重点保护水生野生动物,也是目前世界上分布最南端的几种鲑科鱼类之一<sup>[13-17]</sup>。该鱼种分布地域范围狭窄,仅分布于中国秦岭山涧溪流,分布区主要涉及长江流域汉江水系(渭水河、西水河、子午河等)及黄河流域渭河水系(黑河、石头河、千河等),是秦岭溪流生态系统重要的旗舰物种与环境指示种<sup>[18-19]</sup>。在秦岭细鳞鲑栖息地中,拉氏鳊(*Phoxinus lagowskii*)是最为常见的伴生鱼类。拉氏鳊俗称柳根鱼,为鲤形目(Cypriniformes)鲤科(Cyprinidae)鳊属(*Phoxinus*)小型野生经济鱼类<sup>[20]</sup>;它广泛分布于中国长江以北河流的干、支流中,环境适应性较强。近些年来,受全球气候变化与人为活动的影响,秦岭地区洪水等自然灾害频发,溪流浊度上升,对区域内水生生物的生存和繁殖构成了潜在威胁。作为对栖息环境要求极为严苛的溪流鱼类,秦岭细鳞鲑的行为是否受水体浊度影响及如何受后者影响?它和同域分布鱼类拉氏鳊的行为表达模式及浊度依赖性是否一致?对这些问题的探究可为秦岭细鳞鲑种群栖息地保护与生态修复提供重要理论启发。为此,本研究通过自制的行为拍摄装置,分别测定了这 2 种鱼类在不同浊度环境中的一系列行为指标,对它们的行为差异及浊度依赖性进行了探讨。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验动物

实验用秦岭细鳞鲑和拉氏鳊均来源于陕西陇县秦岭细鳞鲑国家级自然保护区科研基地,科研基地毗邻渭河水系千河支流蒲峪河流域。实验前将实验鱼暂养于直径为 200 cm 的圆形流水自净化水槽中,其中装有从实验鱼自然栖息地引流至实验基地的河水,深度为 50 cm。水槽内的水体以  $76.45 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$  速率实时更新(即每 1 s 水体更换量约为暂养水体总体积的 0.005%),实验期间实时监测水槽内环境参数的变化,并将水温控制在  $(14 \pm 1.22) \text{ }^\circ\text{C}$ ,而溶解氧质量浓度保持在  $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以上。暂养期间每日 9:00 和 18:00 用黄粉虫(*Tenebrio molitor*)幼虫分别饱足投喂实验鱼 1 次。

### 1.2 实验设计

实验水体与暂养水体同源,且测试期间实验水槽的水温、溶解氧质量浓度等环境条件与暂养期间保持一致。以良好状态的实验水体作为日常对照,以多数情况下经历中等暴雨并于暴雨停止 2 d 后浊度相对稳定的实验水体作为浊度处理。在本研究中,上述 2 种实验水体被分别称为清澈水体和浑浊水体(图 1)。经检测,清澈水体和浑浊水体的浊度分别为  $(2.94 \pm 0.20)$  和  $(12.00 \pm 0.10)$  NTU。实验开始前,测定实验水槽内水体浊度以及光照度,然后将单尾身体健康的实验鱼放入浑浊水体或清澈水体中。基于预实验研究结果,15 min 后多数实验鱼均能恢复到正常的自发游泳状态;因此实验鱼在上述水体中的适应期设为 15 min。待实验鱼适应实验水体后,启动摄像头拍摄记录实验鱼的行为,拍摄时长为 5 min。拍摄结束后再次测定实验缸内水体的浊度、光照度等理化参数;且在行为测试完成后测定实验鱼体长、体质量等体型规格参数(表 1)。单尾鱼行为测试完成后将测试水槽内水体进行更换,并冲洗 3 次以确保水槽内无实验鱼化学信息残留。为减少昼夜节律对行为测试结果可能产生的影响,所有实验均在 9:00—18:00 进行。

### 1.3 实验装置

实验鱼行为拍摄装置由实验水槽和监视系统构成。实验水槽材质为不透明 PP 板,长、宽、高分别为 125、50、50 cm,水槽内实验水体的深度为 20 cm。根据文献<sup>[21]</sup>,将占据实验水槽底部面积 1/9 的中央区域划分为开闾区(open area)。监视系统由 Logitech Webcam Pro 920 型摄像机及电脑组成。摄像机放置于实验水槽正上方,电脑放置于距离实验水槽 3 m 以外的区域,以便在拍摄实验鱼行为的同时尽可能减少记录人员对实验鱼的干扰(图 2)。

### 1.4 水体浊度设置

本研究选用高岭土构建浊度环境,采用齐威 WGZ-1B 型便携浊度计对实验水体的浊度进行测定。高岭土由微小的黏土颗粒组成,颗粒表面积大能长时间悬浮在水中,可有效模拟暴雨后水体中悬浮颗粒物浓度增加导致的浊度升高<sup>[22]</sup>。为获取稳定且符合目标数值的浊度环境,通过预实验对不同配制方法和参数进行了探索,结果显示:若要达成稳定的浊度条件,需在行为测试实验前 1 日的夜晚配制浊度母液。浊度母液的配制方法如下:在与实验鱼暂养水槽规格相同的实验水槽内,将高岭土粉和与实验鱼暂养水体同源的水体以 1:1 000 质量比进行

充分混合,随后让混合液静置沉淀,在此期间高岭土的大颗粒粉末在重力作用下自然沉降,从而构建起相对稳定的浊度母液体系。次日实验前,取浊度母液上层较为均匀的水体稀释 50 倍进行二次配制,得到所需的浑浊水体。此方法能够在实验期间提供相对稳定的浊度环境(表 1)。

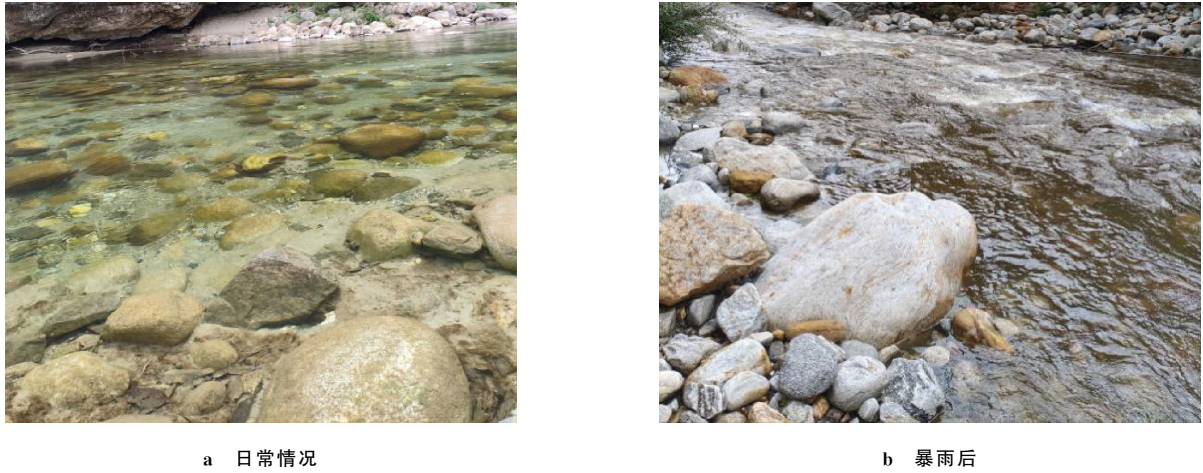


图 1 实验鱼栖息地(蒲峪河)在日常情况下和在暴雨后的水体浊度比较

Fig. 1 Comparison of water turbidity in the experimental fish habitat (Puyu River) under normal conditions and after a rainstorm

表 1 实验鱼体型参数及实验前后水体浊度变化

Tab. 1 Body sizes of the experimental fish and water turbidity before and after the experiment

物种	环境	样本量/尾	体质量/g	体长/cm	肥满度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	浊度/NTU	
						实验前	实验后
秦岭细鳞鲑 ( <i>Brachymystax stinlingensis</i> )	清澈水体	32	51.09±5.96	14.96±0.54	1.36±0.03	2.95±0.05	2.96±0.05
	浑浊水体	32	57.32±5.10	16.06±0.36	1.29±0.03	12.12±0.04	12.05±0.05
拉氏鲻 ( <i>Phoxinus lagowskii</i> )	清澈水体	30	9.19±0.60	8.82±0.23	1.32±0.04	2.97±0.04	2.97±0.05
	浑浊水体	30	9.67±0.70	8.72±0.20	1.40±0.04	12.16±0.04	12.05±0.05

注:肥满度为体质量与体长立方的比值再乘 100 后得到的值。

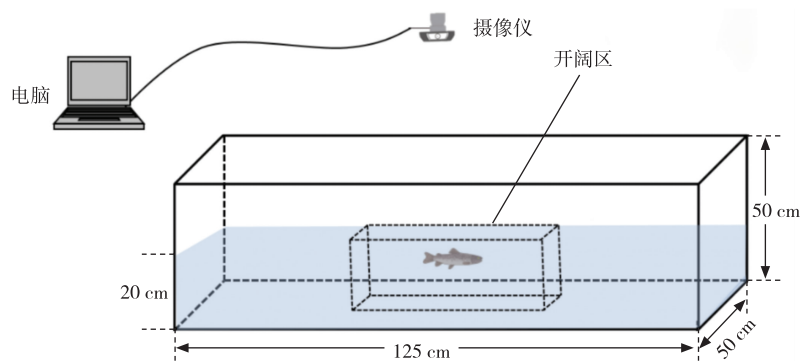


图 2 实验鱼行为拍摄装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental fish behavior monitoring system

### 1.5 行为指标提取

首先通过软件“格式工厂”将拍摄视频帧率转换为  $30 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$ ,同时采用 Etho Vision XT 9.0 动物运动轨迹跟踪软件对视频进行解析。采用双盲法对经过不同处理的实验鱼行为视频进行解析。实验鱼的活跃性通过以下 2 个指标来衡量:1) 运动距离(单位:cm),即实验鱼在整个实验水槽中的总移动距离;2) 静止时间(单位:s),即实验鱼在实验水槽中处于静止状态下的累积时长。实验鱼质心位移大于  $1.75 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  时被认定为处于运动状态,反之则为静止状态。实验鱼的勇敢性通过以下 2 个指标来衡量:1) 开阔区停留时间(单位:s),即实验鱼在

开阔区停留的累积时长;2) 进入开阔区次数,即实验鱼进入开阔区的总次数。当实验鱼的整个头部位于开阔区时被认为进入开阔区,反之则位于开阔区外。

## 1.6 数据分析

所有行为指标数据均用“平均值±标准误”形式表示。采用 SPSS 22.0 软件对行为指标数据进行统计分析。首先通过 Shapiro-Wilk 法、Levene 检验分别考察数据的正态性和方差齐性。若数据具有正态性和方差齐性,采用双因素方差分析考察浊度和物种因素对实验鱼行为的影响,采用独立样本  $t$  检验分析组间差异,并运用 Pearson 相关性分析检测实验鱼勇敢性指标与活跃性指标的关联度。若数据不具有正态性和方差齐性,采用 Scheirer-Ray-Hare 分析考察浊度和物种因素对实验鱼行为的影响,采用 Mann-Whitney  $U$  检验分析组间差异,同时运用 Spearman 相关性分析检测勇敢性指标与活跃性的关联度。当  $p < 0.05$  时,上述统计分析结果具有统计学意义。

## 2 结果与分析

### 2.1 秦岭细鳞鲑与拉氏鲮的行为差异及浊度依赖性

表 2 显示:浊度对实验鱼的活跃性指标有统计学意义上的影响( $p < 0.05$ ),但对勇敢性指标无统计学意义上的影响;物种对实验鱼除进入开阔区次数以外的行为指标均有统计学意义上的影响( $p < 0.05$ );浊度与物种的交互作用对实验鱼的活跃性和勇敢性指标均无统计学意义上的影响。

表 2 秦岭细鳞鲑与拉氏鲮的行为差异及浊度依赖性

Tab. 2 Effects of turbidity on behavioral differences between *B. tsinlingensis* and *P. lagowskii*

影响因素	活跃性		勇敢性	
	运动距离	静止时间	开阔区停留时间	进入开阔区次数
浊度	$H = 5.987, p = 0.016$	$H = 7.763, p = 0.006$	$H = 0.044, p = 0.834$	$H = 0.247, p = 0.620$
物种	$H = 31.273, p < 0.001$	$H = 17.982, p < 0.001$	$H = 7.996, p = 0.006$	$H = 2.800, p = 0.097$
浊度×物种	$H = 0.123, p = 0.726$	$H = 0.717, p = 0.399$	$H = 0.610, p = 0.945$	$H = 0.262, p = 0.610$

由图 3a、b 可知,与在清澈水体中的情形相比,秦岭细鳞鲑在浑浊水体中的运动距离更长而静止时间更短,组间数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ )。然而,该鱼种在不同浊度环境中的开阔区停留时间和进入开阔区次数无统计学意义上的差异(图 3c、d)。图 3 还显示,无论水体浊度如何,拉氏鲮的活跃性和勇敢性指标均无统计学意义上的差异。

实验鱼的行为表现存在种间差异。从图 3a~c 可见,与拉氏鲮相比,秦岭细鳞鲑在 2 种实验水体中的运动距离均更长、静止时间和开阔区停留时间均更短,组间数据差异均具有统计学意义( $p < 0.05$ )。然而无论水体浊度如何,2 种实验鱼进入开阔区次数无统计学意义上的差异(图 3d)。

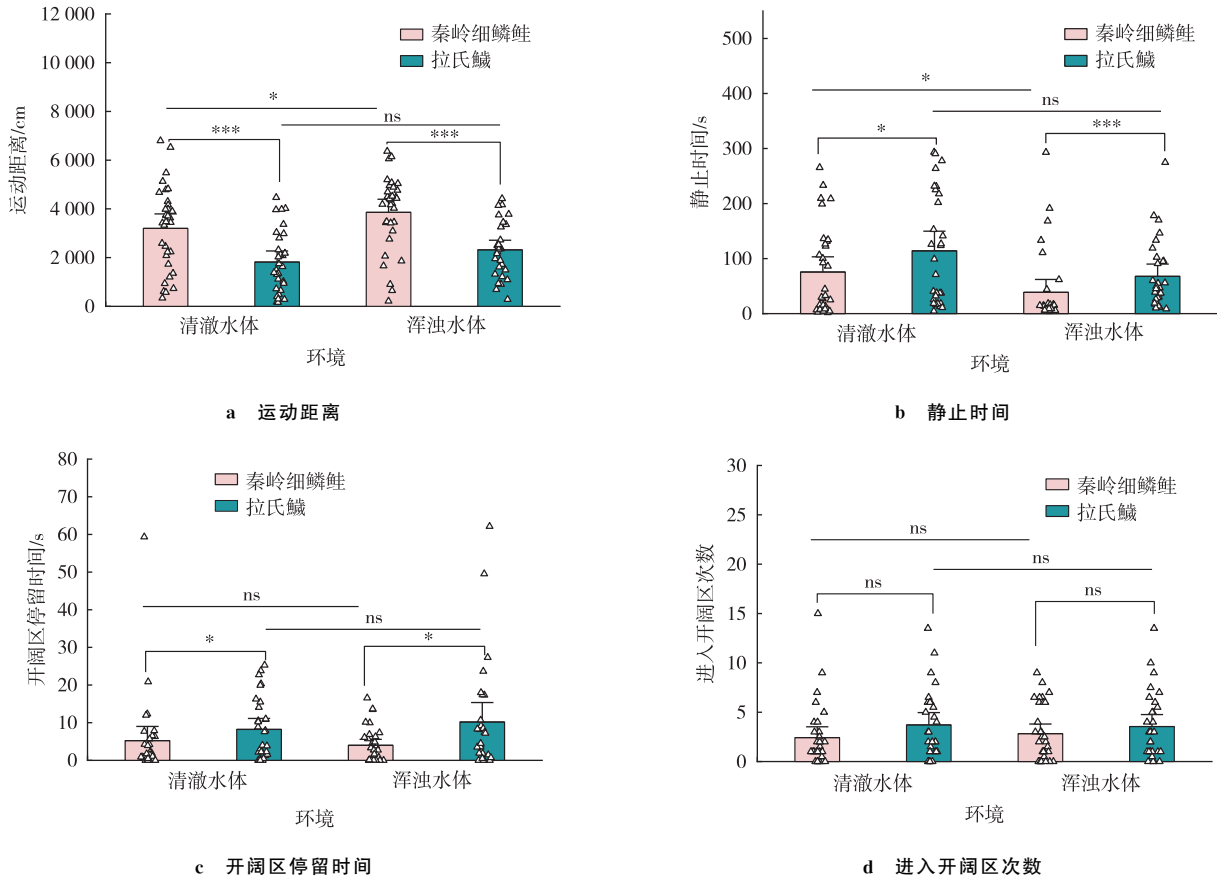
### 2.2 不同浊度环境中实验鱼活跃性与勇敢性指标的相关性

图 4a、b 显示:在清澈水体中,秦岭细鳞鲑活跃性指标与勇敢性指标间无统计学意义上的相关性;拉氏鲮活跃性指标运动距离、静止时间分别与勇敢性指标进入开阔区次数呈统计学意义上的正相关和负相关( $p < 0.05$ )。图 4c、d 则显示:在浑浊水体中,秦岭细鳞鲑活跃性指标与勇敢性指标间无统计学意义上的相关性;拉氏鲮活跃性指标静止时间与勇敢性指标进入开阔区次数呈统计学意义上的负相关( $p < 0.05$ )。

## 3 讨论

秦岭细鳞鲑与同域分布物种拉氏鲮的行为存在种间差异。本研究结果显示:相较于拉氏鲮,秦岭细鳞鲑活跃性更高而勇敢性更低,具体表现为秦岭细鳞鲑的运动距离更长、静止时间和开阔区停留时间更短。通常情况下,鱼类的勇敢性和活跃性与它们在自然环境中所面临的捕食风险有关<sup>[23]</sup>,适应高捕食风险环境的鱼类往往冒险行为更多而活动水平较低。研究表明,来自高捕食风险区的埃氏短棒鲮(*Brachyraphis episcopi*)种群相较于其他低风险河流中的埃氏短棒鲮种群要更加勇敢<sup>[24]</sup>。对处于高捕食风险环境中的河鲈(*Perca fluviatilis*)进行研究,也得到了相似的结果<sup>[25]</sup>。此外,猎物鱼在面对高捕食压力时,往往通过降低活动水平以减少与捕食者相遇

的概率<sup>[26-27]</sup>。例如,在遭遇捕食胁迫时,宽鳍鱲(*Zacco platypus*)、中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)、白斑狗鱼(*Esox lucius*)等鱼类的活跃性均明显降低<sup>[28-30]</sup>。在本研究中,由于拉氏鲮种群在自然界中面临水中的秦岭细鳞鲑、陆上的水獭(*Lutra lutra*)以及空中的冠鱼狗(*Ceryle lugubris guttulate*)、红嘴蓝鹊(*Urocissa erythroryncha*)等捕食者的多重捕食胁迫,因而较大的捕食压力可能导致该鱼种表现出相对较高的勇敢性和较低的活跃性;秦岭细鳞鲑的勇敢性则低于拉氏鲮,这可能与前者作为秦岭溪流生态系统中的顶级捕食者面临的捕食风险较小有关。



注：“\*”“\*\*\*”分别表示组间数据差异在  $p < 0.05$  和  $p < 0.001$  水平具有统计学意义, ns 表示组间数据差异没有统计学意义。

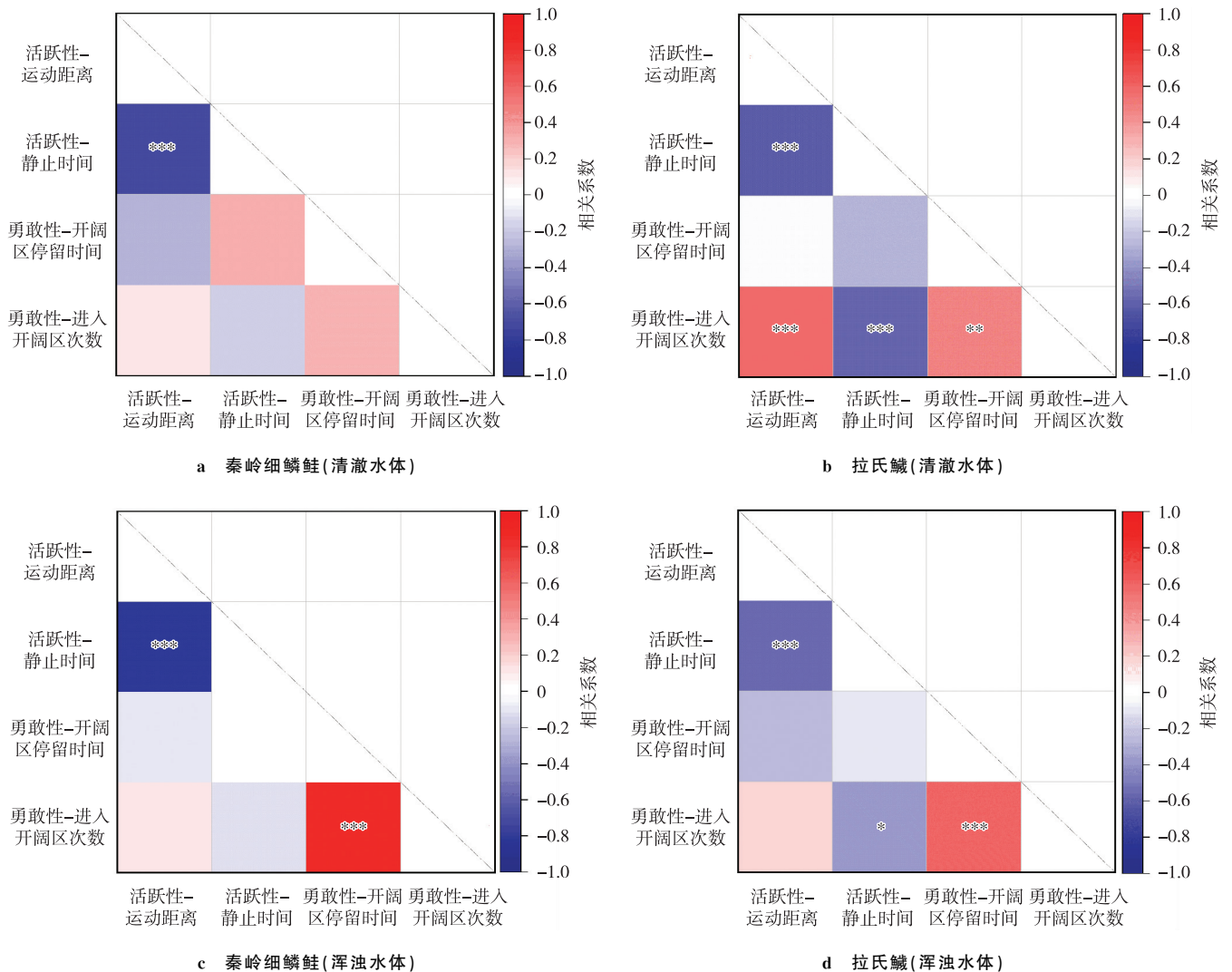
图 3 不同浊度环境中实验鱼的个性特征

Fig. 3 Behavior of the experimental fish under different turbidity conditions

浊度对秦岭细鳞鲑与拉氏鲮的活跃性均有明显影响。在本研究中,这 2 种鱼类在浑浊水体中的活跃性均比在清澈水体中更高,具体表现为它们在浑浊水体中的运动距离更长、静止时间更短。在浊度较高的环境中,鱼类活跃性的增强可能与自身视觉受限有关——由于视觉通讯受阻、资源搜寻效率下降,因而鱼类探索食物的活动时间也随之延长<sup>[31]</sup>。然而也有研究表明,浊度较高的环境也可以为猎物鱼提供“视觉掩护”,即鱼类处于浑浊水体中时能够比处于清澈水体中时更加安全地进行摄食或风险觅食活动<sup>[32]</sup>。例如,大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)更倾向于在浑浊水域觅食,研究者认为这种偏好并非由于猎物鱼无法察觉捕食者,而是因为它们所感知到的生态收益(如与反捕食相关的成本降低)抵消了潜在的捕食风险<sup>[32]</sup>。类似地,中等程度的浊度升高能明显降低太平洋鲑鱼(*Oncorhynchus nerka nerka*)幼鱼迁徙途中被水中和空中捕食者捕食的概率<sup>[33-34]</sup>。在本研究中,随着水体浊度的升高,秦岭细鳞鲑与拉氏鲮均表现得更为活跃,该结果与上述研究结果较为相近;同时浊度对 2 种实验鱼的勇敢性无明显影响,提示它们的勇敢性一般、生态可塑性较低,相关机制有待于进一步探究。此外,本研究还发现,秦岭细鳞鲑与拉氏鲮行为的种间差异并不具有浊度依赖性。面对水体浊度环境变化时,秦岭细鳞鲑和拉氏鲮具有一致的行为响应模式,表明二者作为同域物种可能具有相同或相似的浊度适应机制。

阐明鱼类不同行为特征的关系是理解鱼类行为对策的重要方面。多数研究表明,鱼类个性特征之间存在高

度关联,例如:三刺鱼(*Gasterosteus aculeatus*)从幼体阶段到成体阶段,它的勇敢性、活跃性和探索性之间一直存在正相关关系<sup>[35]</sup>;高体鳊鲂(*Rhodeus ocellatus*)和麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)在有捕食者胁迫的环境中,活跃性与勇敢性呈明显的正相关<sup>[36]</sup>;孔雀鱼(*Poecilia reticulata*)活跃性与勇敢性呈正相关<sup>[37]</sup>。“高活跃、高勇敢”的个体往往也具有更高的基础代谢率和更短的生命史周期,这从生理机制上解释了活跃性和勇敢性会协同变化的原因,即两者共享相同的内在生理基础<sup>[38]</sup>。然而,环境变化可能导致鱼类不同个性特征之间的相关性消失。有研究表明,白斑狗鱼的活跃性、勇敢性等个性特征的相关性在不同测量背景下并不持续存在<sup>[39]</sup>;而三刺鱼不同个性特征在缺乏捕食者的稳定环境中无相关关系,但是在引入捕食者后却出现了明显的相关性,表明鱼类不同行为特征间的相关性具有环境依赖性<sup>[40]</sup>。本研究发现,无论水体浊度如何,拉氏鳊的活跃性与勇敢性指标均呈明显正相关,但秦岭细鳞鲑的活跃性与勇敢性指标均无统计学意义上的相关关系,其中原因可能与秦岭细鳞鲑勇敢性较低以及测试环境较为单一有关,因此相关机制有待深入探究。



注:“\*”“\*\*”“\*\*\*”分别表示指标间的相关性在  $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$  和  $p < 0.001$  水平具有统计学意义。

图 4 不同浊度环境中实验鱼个性指标的关联

Fig. 4 Correlations between behavioral traits of the experimental fish under different turbidity conditions

综上所述,秦岭细鳞鲑与同域分布物种拉氏鳊的行为存在种间差异,但该差异不具有浊度依赖性。浊度对 2 种实验鱼的勇敢性无明显影响,但浊度升高的同时秦岭细鳞鲑与拉氏鳊活跃性也明显增强,两者的额外能量消耗也因此增加。在全球气候变化与人为活动导致水体浊度升高的背景下,应加强对秦岭溪流生态系统水体浊度的监测与管理,禁止在秦岭细鳞鲑关键栖息地进行采砂作业,同时应加强对秦岭森林-溪流生态系统的一体化保护并防止水土流失。

## 参考文献:

- [1] KEENLEYSIDE M H A. Diversity and adaptation in fish behaviour[M]. New York:Springer-Verlag,1979.
- [2] 张婧,付世建,夏继刚. 鱼类“个性”行为及其研究进展[J]. 生态学杂志,2017,36(12):3623-3628.  
ZHANG Q,FU S J,XIA J G. Recent progress on the personality of fish[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(12):3623-3628.
- [3] 赵浩翔,龚文奥,夏继刚,等. 养殖环境颜色和光照强度对慈鲷个性行为的影响[J]. 水生生物学报,2025,49(3):153-161.  
ZHAO H X,GONG W A,XIA J G,et al. Color and illumination intensity in aquaculture environment on personality behavior of cichlids[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2025,49(3):153-161.
- [4] ÁLVAREZ D,NICIEZA A G. Is metabolic rate a reliable predictor of growth and survival of brown trout (*Salmo trutta*) in the wild?[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,2005,62(3):643-649.
- [5] FRASER D F,GILLIAM J F,DALEY M J,et al. Explaining leptokurtic movement distributions; intrapopulation variation in boldness and exploration[J]. The American Naturalist,2001,158(2):124-135.
- [6] KIMBELL H S,MORRELL L J. Turbidity influences individual and group level responses to predation in guppies,*Poecilia reticulata* [J]. Animal Behaviour,2015,103:179-185.
- [7] GRAY S M,BIEBER F M E,MCDONNELL L H,et al. Experimental evidence for species-specific response to turbidity in imperilled fishes[J]. Aquatic Conservation:Marine and Freshwater Ecosystems,2014,24(4):546-560.
- [8] SUTHERLAND A B,MEYER J L. Effects of increased suspended sediment on growth rate and gill condition of two southern Appalachian minnows[J]. Environmental Biology of Fishes,2007,80(4):389-403.
- [9] DIAZ R J,ROSENBERG R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems[J]. Science,2008,321(5891):926-929.
- [10] MEAGER J J,SOLBAKKEN T,UTNE-PALM A C,et al. Effects of turbidity on the reactive distance, search time, and foraging success of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,2005,62(9):1978-1984.
- [11] DE ROBERTIS A,RYER C H,VELOZA A,et al. Differential effects of turbidity on prey consumption of piscivorous and planktivorous fish[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,2003,60(12):1517-1526.
- [12] SWEKA J A,HARTMAN K J. Effects of turbidity on prey consumption and growth in brook trout and implications for bioenergetics modeling[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,2001,58(2):386-393.
- [13] ZHAO Y H,ZHANG C G. Threatened fishes of the world:*Brachymystax lenok tsinlingensis* Li,1966 (Salmonidae) [J]. Environmental Biology of Fishes,2009,86(1):11-12.
- [14] 陶渝镇,王丽英,黄青峰,等. 秦岭细鳞鲑仔稚鱼分布模式及其栖息地环境特征[J]. 水生生物学报,2024,48(10):1716-1723.  
TAO Y Z,WANG L Y,HUANG Q F,et al. Distribution patterns and habitat environmental characteristics of *Brachymystax tsinlingensis* larval fish[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2024,48(10):1716-1723.
- [15] XIA J G,PENG M R,HUANG Y,et al. Acute warming in winter eliminates chemical alarm responses in threatened Qinling lenok *Brachymystax lenok tsinlingensis* [J]. Science of the Total Environment,2021,764:142807.
- [16] 彭敏锐,郑雪丽,李平,等. 温度和重复测定对秦岭细鳞鲑快速启动反应、游泳性能及力竭后代谢特征的影响[J]. 生态学报,2021,41(6):2505-2514.  
PENG M R,ZHENG X L,LI P,et al. Effects of temperature and repeat measurement on fast-start,swimming performance and post-exhaustion metabolic characteristics in *Brachymystax lenok tsinlingensis* [J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(6):2505-2514.
- [17] 夏静怡,郑雪丽,李平,等. 秦岭细鳞鲑(*Brachymystax tsinlingensis*)与细鳞鲑(*Brachymystax lenok*)当年幼鱼几何形态学特征的比较[J]. 生态学杂志,2023,42(4):905-910.  
XIA J Y,ZHENG X L,LI P,et al. A comparative study on geometric morphology between current-year juvenile *Brachymystax tsinlingensis* and *Brachymystax lenok* [J]. Chinese Journal of Ecology,2023,42(4):905-910.
- [18] XIA J G,MA Y J,FU C,et al. Effects of temperature acclimation on the critical thermal limits and swimming performance of *Brachymystax lenok tsinlingensis*: a threatened fish in Qinling Mountain region of China[J]. Ecological Research,2017,32(1):61-70.
- [19] 吴奇,王洪,王丽英,等. 秦岭细鳞鲑与拉氏鲮代谢特征及游泳能力的比较[J]. 水生生物学报,2025,49(7):31-38.  
WU Q,WANG H,WANG L Y,et al. Comparative study of metabolic characteristics and swimming performance between

- Brachymystax tsinlingensis* and *Phoxinus lagowskii*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(7): 31-38.
- [20] 黄青峰, 邓楚可, 夏静怡, 等. 秦岭细鳞鲑与同域物种拉氏鲢几何形态学特征: 生活史阶段效应及种间差异[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(4): 922-929.
- HUANG Q F, DENG C K, XIA J Y, et al. Geometric morphology of *Brachymystax tsinlingensis* and sympatric *Phoxinus lagowskii*: life-history stage effects and interspecific differences[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(4): 922-929.
- [21] CACHAT J, STEWART A, GROSSMAN L, et al. Measuring behavioral and endocrine responses to novelty stress in adult zebrafish[J]. *Nature Protocols*, 2010, 5(11): 1786-1799.
- [22] COOPER W E, PÉREZ-MELLADO V, BAIRD T, et al. Effects of risk, cost, and their interaction on optimal escape by nonrefuging Bonaire whiptail lizards, *Cnemidophorus murinus*[J]. *Behavioral Ecology*, 2003, 14(2): 288-293.
- [23] MATHIS A, CHIVERS D P, SMITH R J F. Cultural transmission of predator recognition in fishes: intraspecific and interspecific learning[J]. *Animal Behaviour*, 1996, 51(1): 185-201.
- [24] BROWN C, JONES F, BRAITHWAITE V. *In situ* examination of boldness-shyness traits in the tropical poeciliid, *Brachyraphis episcopi*[J]. *Animal Behaviour*, 2005, 70(5): 1003-1009.
- [25] MAGNHAGEN C. Risk-taking behaviour in foraging young-of-the-year perch varies with population size structure[J]. *Oecologia*, 2006, 147(4): 734-743.
- [26] 易恋淳, 肖玲韬, 付世建, 等. 短期捕食胁迫对中华倒刺鲃幼鱼行为特征的影响[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(2): 30-35.
- YI L C, XIAO L T, FU S J, et al. Effects of short-term predation stress on behavioral characteristics of juvenile *Spinibarbus sinensis*[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2019, 36(2): 30-35.
- [27] TANG Z H, HUANG Q, WU H, et al. The behavioral response of prey fish to predators: the role of predator size[J]. *PeerJ*, 2017, 5: e3222.
- [28] LEHTINIEMI M. Swim or hide: predator cues cause species specific reactions in young fish larvae[J]. *Journal of Fish Biology*, 2005, 66(5): 1285-1299.
- [29] FU C, YI L C, WU W P, et al. Qingbo, a common cyprinid fish, responds diversely in behavior and locomotion to predators with different hunting modes[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2021, 47(5): 1415-1427.
- [30] FU C, FU S J, CAO Z D, et al. Habitat-specific anti-predator behavior variation among pale chub (*Zacco platypus*) along a river[J]. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 2015, 48(4): 267-278.
- [31] HARVEY B C, WHITE J L. Use of benthic prey by salmonids under turbid conditions in a laboratory stream[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2008, 137(6): 1756-1763.
- [32] FERRARI M C O, RANÅKER L, WEINERSMITH K L, et al. Effects of turbidity and an invasive waterweed on predation by introduced largemouth bass[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2014, 97(1): 79-90.
- [33] MCELROY K N, BEAKES M P, MERZ J E. Hide and seek: turbidity, cover, and ontogeny influence aggregation behavior in juvenile salmon[J]. *Ecosphere*, 2018, 9(4): e02175.
- [34] ABRAHAMS M V, KATTENFELD M G. The role of turbidity as a constraint on predator-prey interactions in aquatic environments[J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 1997, 40(3): 169-174.
- [35] BELL A M, STAMPS J A. Development of behavioural differences between individuals and populations of sticklebacks, *Gasterosteus aculeatus*[J]. *Animal Behaviour*, 2004, 68(6): 1339-1348.
- [36] 李秦蕾, 刘香, 张宁, 等. 两种生态相关猎物鱼个性的种间差异及其捕食者效应[J]. *水生生物学报*, 2022, 46(6): 788-795.
- LI Q L, LIU X, ZHANG N, et al. Interspecific differences in the personalities of two ecologically related prey fish and the effects of their predator[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(6): 788-795.
- [37] BUDAEV S V. "Personality" in the guppy (*Poecilia reticulata*): a correlational study of exploratory behavior and social tendency[J]. *Journal of Comparative Psychology*, 1997, 111(4): 399-411.
- [38] DAMMHAHN M, DINGEMANSE N J, NIEMELÄ P T, et al. Pace-of-life syndromes: a framework for the adaptive integration of behaviour, physiology and life history[J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2018, 72(3): 62.
- [39] NYQVIST M J, GOZLAN R E, CUCHEROUSSET J, et al. Absence of a context-general behavioural syndrome in a solitary predator[J]. *Ethology*, 2013, 119(2): 156-166.
- [40] BELL A M, SIH A. Exposure to predation generates personality in threespined sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus*) [J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(9): 828-834.

## Animal Sciences

## Effects of Turbidity on Behavioral Differences Between *Brachymystax Tsinlingensis* and Its Sympatric *Phoxinus Lagowskii*

PANG Jian<sup>1,2</sup>, WANG Liying<sup>1</sup>, ZHAO Lingzhi<sup>1,2</sup>, LI Yue<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong<sup>3</sup>, XIA Jigang<sup>1,2</sup>

(1. Fish Ecology and Conservation Research Center, Chongqing Normal University;

2. Chongqing Key Laboratory of Conservation and Utilization of Freshwater Fishes, Animal Biology Key Laboratory of Chongqing Education Commission, Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, Chongqing Normal University, Chongqing 401331;

3. Shaanxi Taibaishan National Nature Reserve Administration, Yangling Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To investigate the effects of turbidity on the behavior of *Brachymystax tsinlingensis* and its sympatric *Phoxinus lagowskii*, a custom-made behavioral recording apparatus was used to record behavioral parameter matrices for both experimental fish species under varying turbidity water bodies. These parameters included activity indicator movement distance, motionless time and boldness indicator cumulative duration in the open area, number of entries into the open area. The differences in behavioral responses and their dependence on turbidity were analyzed subsequently. The results show that: 1) Significant interspecific differences in the activity and boldness indicators were found between *B. tsinlingensis* and the *P. lagowskii*. Regardless of water turbidity, *B. tsinlingensis* exhibited longer movement distances, shorter immobility durations, and shorter residence times in open areas compared to *P. lagowskii*. The differences in these parameters between groups were statistically significant ( $p < 0.05$ ). However, no statistically significant difference was observed in the frequency of entering open areas. 2) Turbidity has statistically significant effect on the activity indicators of the two experimental fish species ( $p < 0.05$ ), but no statistically significant effect on their boldness indicators. Furthermore, the interaction between turbidity and species had no statistically significant effect on either the activity or boldness indicators of the fish. 3) Regardless of water turbidity, certain activity indicators of *P. lagowskii* were statistically significantly correlated (either positively or negatively) with certain boldness indicators ( $p < 0.05$ ). In contrast, no statistically significant correlations were found between the activity and boldness indicators of *B. tsinlingensis*. These findings suggest that turbidity significantly influences the behavioral responses of *B. tsinlingensis* and *P. lagowskii*, potentially increasing their additional energy expenditure. Future efforts should strengthen monitoring and management of water turbidity in *B. tsinlingensis* habitats.

**Keywords:** fish behavior; sympatric species; turbidity; *Brachymystax tsinlingensis*; *Phoxinus lagowskii*

(责任编辑 方 兴)