

2种鱼类低氧耐受差异比较及调节指数与累积氧亏适用性分析^{*}

向平,张永飞,唐燕,张娜,付世建

(重庆师范大学 生命科学学院 进化生理与行为学实验室 淡水鱼类资源保护与利用重庆市重点实验室
动物生物学重庆市高校重点实验室,重庆 401331)

摘要:为探究2种生境淡水鱼类的低氧耐受能力及它们对低氧的应对策略差异,本研究选取静水生境的麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)和急流生境的光唇鱼(*Acrossocheilus fasciatus*)作为试验对象,初步验证调节指数(regulation index, RI)和累积氧亏(accumulated oxygen deficit, AOD)在表征淡水鱼类低氧耐受能力中的适用性,通过渐进性缺氧实验测量2种实验鱼的失去平衡点氧分压(oxygen partial pressure at loss of equilibrium, P_{LOE}),基于代谢率与氧分压的拟合曲线计算RI和AOD。结果显示:麦穗鱼的 P_{LOE} 低于光唇鱼,两者差异具有统计学意义($p < 0.05$),但麦穗鱼的RI和AOD高于光唇鱼,两者差异均具有统计学意义($p < 0.05$)。且麦穗鱼的 P_{LOE} 与RI呈统计学意义上的负相关($p < 0.05$), P_{LOE} 与AOD无统计学意义上的相关性。光唇鱼的 P_{LOE} 与RI和AOD均无统计学意义上的相关性。上述结果表明麦穗鱼具有更强的低氧耐受能力,可能与麦穗鱼更强的代谢调节能力和更大的无氧代谢潜能有关,而光唇鱼的低氧耐受能力相对较差。同时,RI和AOD能有效区分2个物种低氧耐受能力的种间差异,表明这2项指标在表征2种鱼类低氧耐受能力方面具有一定的适用性。

关键词:低氧耐受;调节指数;累积氧亏;麦穗鱼;光唇鱼

中图分类号:Q175

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2026)03-0040-07

鱼类低氧胁迫是指当水体氧分压低于维持鱼类基础生理活动所需代谢水平的需氧阈值时,对鱼类行为、生长、生存等产生负面影响的一种胁迫状态^[1-2]。其中,水体氧分压恰好满足鱼类标准代谢率(standard metabolic rate, SMR)时的氧压阈值称为临界氧分压(critical oxygen tension, P_{CRIT})^[3]。在面临低氧胁迫时,鱼类会通过改变行为活动、调节氧气供应、降低有氧代谢需求、增强无氧代谢等策略进行响应^[3-5]。这种响应分为2个阶段:第1阶段为氧调节阶段,当水体中溶解氧开始减少时,大多数鱼类通过优化氧气摄取和运输效率以维持相对稳定的代谢率,保障自身关键组织的氧气需求;第2阶段为氧顺应阶段,当水体中溶解氧进一步降低、氧气供应无法满足当前状态下的代谢需求时,鱼类将通过代谢下调、增强无氧代谢等方式维持低氧生存^[3,6-7]。实际上,鱼类低氧响应是一个连续渐变的过程,无法通过单一转折点,即 P_{CRIT} 点完全反映个体的生理变化状态。近些年来,研究者提出的调节指数(regulation index, RI)和累积氧亏(accumulated oxygen deficit, AOD)这2项指标能够量化个体代谢强度和代谢潜力,是综合评估鱼类整体低氧耐受性能的核心评价指标^[8-11]。RI契合鱼类个体低氧响应连续渐变的生理过程,能描述环境氧压降低与个体代谢率的动态变化关系,衡量鱼类渐进性缺氧过程中代谢调节的相对程度^[7-9]。AOD指标通过增加时间维度,描述鱼类个体从低于 P_{CRIT} 水平至身体失去平衡点氧分压(oxygen partial pressure at loss of equilibrium, P_{LOE})阶段的累积氧亏,进而反映严重缺氧条件下鱼类的无氧代谢供能潜力^[10-12]。在上述低氧耐受的相关评价指标中, P_{LOE} 可直接评估鱼类个体生存极限,RI和AOD则通过数据拟合分析以量化个体代谢调节强度和代谢潜力。对上述指标进行综合分析能较全面地反映鱼类的低氧耐受生理适应策略,然而目前有关淡水鱼类RI和AOD的相关研究较少。

栖息地环境特征是驱动物种适应性进化的重要因素之一^[4,13-14]。栖息地水体特征是驱动鱼类低氧适应性演化的关键环境因子,长期栖息于不同淡水生境的鱼类会在自然选择压力驱动下演化出差异化的低氧耐受能力与生理调节策略^[15-16]。基于此,本研究选取了2种分别代表静水与急流生境的典型淡水鱼类进行比较:麦穗鱼

^{*} 收稿日期:2026-02-08 修回日期:2026-04-13 网络出版时间:2026-06-15T16:28

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 32370509);重庆市研究生科研创新项目(No. CYS240352)

第一作者简介:向平,女,研究方向为鱼类生理生态, E-mail: 2023110513020@stu.cqnu.edu.cn;通信作者:付世建,男,教授,博士生导师, E-mail: shijianfu9@cqnu.edu.cn

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20260615.1140.002>

(*Pseudorasbora parva*), 隶属于鲤形目(Cypriniformes)鲤科(Cyprinidae)鮡亚科(Gobioninae)麦穗鱼属(*Pseudorasbora*), 主要栖息于池塘、河沟等静水区域; 光唇鱼(*Acrossocheilus fasciatus*), 隶属于鲤形目鲤科鮡亚科(Barbinae)光唇鱼属(*Acrossocheilus*), 多分布于水流湍急的山涧溪流中^[17-19]。两者栖息环境的水体溶解氧条件存在明显差异。静水生境溶解氧水平通常较低且波动剧烈, 流水生境的溶解氧水平相对充足^[20]。本研究拟以RI和AOD为核心分析指标, 并结合 P_{LOE} 进行综合分析。通过比较各指标的种间差异, 探讨 P_{LOE} 与RI和AOD的种内相关性, 从而揭示2种淡水鱼类应对自然环境特征的生理适应策略, 并检验RI和AOD在表征其低氧耐受能力方面的适用性。

1 材料与方法

1.1 实验鱼的来源与驯养

本研究所用麦穗鱼和光唇鱼幼鱼分别来源于四川省和浙江省的养殖渔场, 实验鱼幼鱼运回后统一置于实验室定制的循环养殖系统中驯养14 d。在整个驯养期间, 将水体溶解氧水平维持在 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 水温则恒定为 $(25 \pm 1.0) ^\circ\text{C}$, 光周期设置为13 h光照: 11 h黑暗。每天9:00用通威漂浮性饵料一次性饱食投喂实验鱼, 投喂1 h后用虹吸管清理水槽中剩余饵料和排泄物, 同时更换总水量的20%。驯养结束后, 随机选择大小接近的实验鱼进行皮下荧光标记, 便于每尾实验鱼的识别, 待恢复14 d后进行后续实验。实验鱼样本量、体质量和体长参数如表1所示。各项指标于实验鱼禁食48 h后测定, 以排除食物消化对实验结果的干扰。

表1 麦穗鱼与光唇鱼的体型参数
Tab. 1 Body size parameters of the *P. parva* and *A. fasciatus*

物种	样本量/尾	SMR测定		低氧耐受测定	
		体长/cm	体质量/g	体长/cm	体质量/g
麦穗鱼(<i>P. parva</i>)	58	4.68 ± 0.05	1.66 ± 0.05	4.75 ± 0.05	1.73 ± 0.06
光唇鱼(<i>A. fasciatus</i>)	50	4.73 ± 0.04	1.73 ± 0.05	4.85 ± 0.04	1.86 ± 0.05

注: 表中体长和体质量数据用“平均值±标准误”形式表示。

1.2 SMR测定

使用实验室自制间歇式呼吸代谢仪测定实验鱼的SMR^[21]。间歇式呼吸代谢仪具备换水模式和测定模式: 在换水模式下, 外循环水泵开启, 迅速更换每个呼吸室内的水体; 在测定模式下, 外循环水泵关闭, 呼吸室处于密闭状态, 无法与外界进行水体交换。每个呼吸室还配备内循环水泵, 以确保内部水体混合均匀, 呼吸室体积为0.128 L。在正式测定SMR前, 将实验鱼提前置于呼吸室内适应环境12 h以上, 再进行连续24 h的测定。本研究设定每10 min为1个测定周期, 其中2 min换水、8 min测定, 2 min内水更换率大于99%。在测定期间, 选用德国PreSens公司生产的Oxy-10 SMA测氧仪监测呼吸室内的水体溶解氧水平, 每20 s记录1次溶解氧质量浓度(单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。最后, 根据实验鱼呼吸耗氧导致的水体溶解氧水平变化计算实验鱼的代谢率 $\dot{M}_{O_2}$ (单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), 具体计算公式如下:

$$\dot{M}_{O_2} = 60 \times (K - K_0) \times V / M,$$

其中: K 和 K_0 分别为测定模式期间实验鱼所在呼吸室和空白呼吸室的水体溶解氧水平在单位时间内的下降率(单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$); V 是呼吸室扣除实验鱼体积后的体积(单位: L); M 为实验鱼体质量(单位: kg); 鱼的体积根据鱼体质量进行折算。为减小体质量的影响, 所有 $\dot{M}_{O_2}$ 统一按0.75指数校正至1 kg体质量标准^[22]。最后, 选取每尾实验鱼全部 $\dot{M}_{O_2}$ 测量值的20%分位数作为个体的SMR^[23]。本研究测得的SMR仅作为实验鱼AOD计算时的代谢基线。

1.3 低氧耐受测定

使用实验室自制的间歇式呼吸代谢仪测定实验鱼的低氧耐受能力^[24]。测定前将实验鱼放入呼吸室内适应1 h, 呼吸室体积为0.350 L。适应期间, 开启外循环水泵, 呼吸室维持换水模式。正式测定时, 关闭外循环水泵, 使呼吸室处于密闭状态, 每隔2 min用美国哈希公司生产的HQ30d型溶解氧测定仪记录1次呼吸室内溶解氧质量浓度。测定过程中需持续观察实验鱼的状态。随着呼吸室内溶解氧水平逐渐降低, 实验鱼逐渐出现缺氧反应, 当实验鱼失去平衡且20 s内未能恢复时, 即终止实验, 并记录此时呼吸室内的溶解氧质量浓度。该时刻对应

的溶解氧质量浓度换算为 25 ℃ 淡水条件下的氧分压(P_{O_2}),即个体的 P_{LOE} (单位:kPa)。整个过程的水温控制在 (25 ± 1.0) ℃。待测得 P_{LOE} 后,测量并记录实验鱼的体质量和体长参数。低氧耐受测定实验中实验鱼的代谢率 M'_{O_2} 计算公式如下:

$$M'_{O_2} = (D_k - D_{k+1}) \times V / (M \times t),$$

其中: D_k 和 D_{k+1} 分别是测定时间为 k 和 $k+1$ 时的溶解氧质量浓度(单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); t 为测定的间隔时间(单位:h);为减小体质量的影响,所有 M'_{O_2} 统一按 0.75 指数校正至 1 kg 体质量标准^[22]。

1.4 数据处理

根据低氧耐受测定实验中每尾实验鱼 M'_{O_2} 随 P_{O_2} 的变化关系绘制散点图(图 1),再采用单相联合回归方程对实验数据进行曲线拟合^[7-8,11]。曲线拟合完成后,分别进行理论完全氧顺应(0)和完全氧调节(1)的线性拟合。RI 为拟合曲线和完全氧顺应(0)所围深灰色区域的面积与完全氧顺应(0)、完全氧调节(1)和 y 轴(M'_{O_2})所构成的三角形即浅灰色区域面积的比值(图 2a)^[8]。 P_{CRIT} 通过 SMR 基线与拟合曲线的交点确定。AOD 为 SMR 基线与拟合曲线在 P_{CRIT} 和 P_{LOE} 之间所界定的面积积分(单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)(图 2b)^[10-11]。

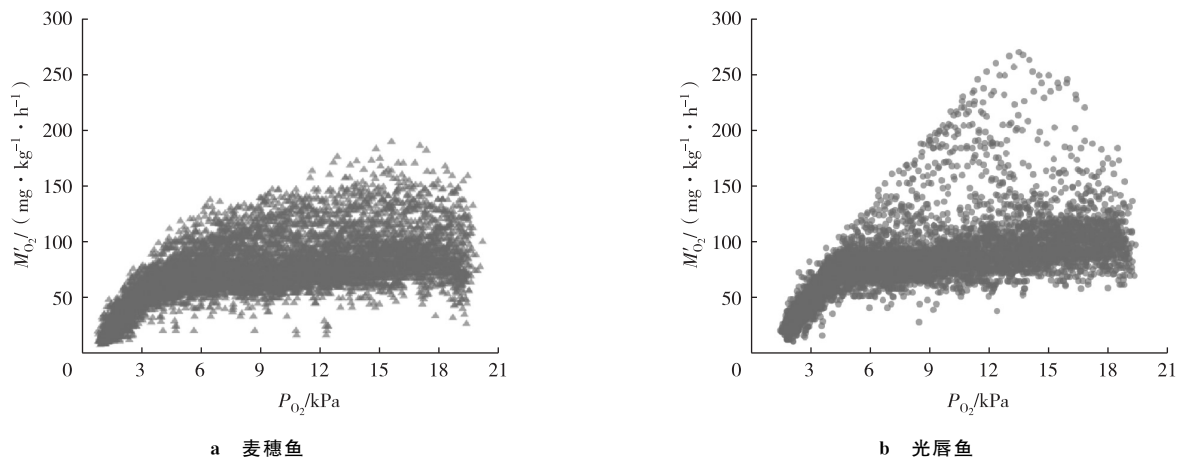
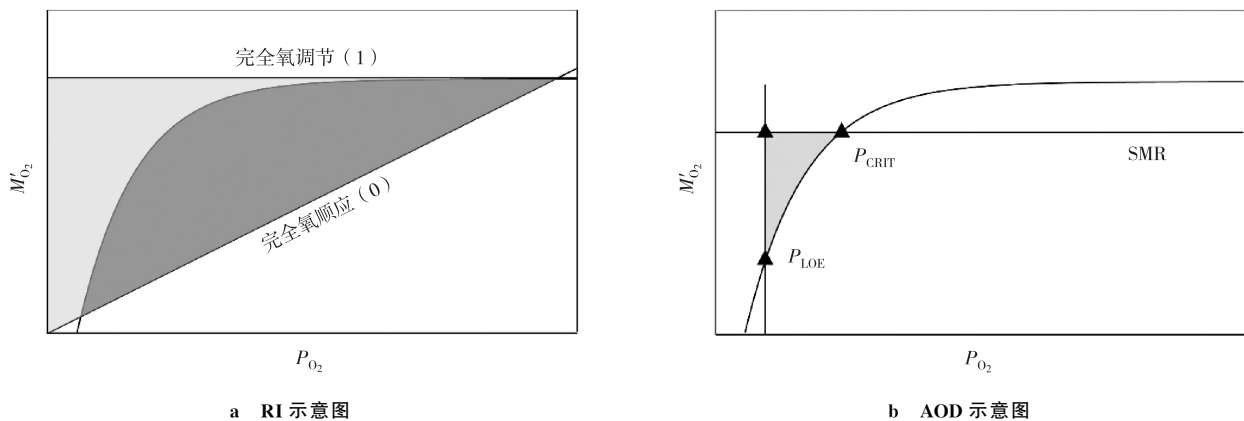


图 1 麦穗鱼和光唇鱼的 M'_{O_2} 与 P_{O_2} 关系的散点图

Fig. 1 Scatter plots of the relationship between M'_{O_2} and P_{O_2} in *P. parva* and *A. fasciatus*



注:图 a 中深灰色区域为拟合曲线和完全氧顺应(0)所围区域的面积,浅灰色区域为完全氧顺应(0)、完全氧调节(1)和 y 轴(M'_{O_2})所构成的三角形面积,RI 为深灰色区域面积比浅灰色区域面积;图 b 中水平实线代表 SMR,SMR 与拟合曲线的交点为 P_{CRIT} ,垂直实线为 $P_{O_2} = P_{LOE}$,浅灰色区域面积即为 AOD。

图 2 同一尾实验鱼基于渐进性缺氧过程中 M'_{O_2} 和 P_{O_2} 关系的 RI 和 AOD 计算示意图

Fig. 2 Schematic illustration of RI and AOD calculations based on the relationship between M'_{O_2} and P_{O_2} in the same experimental fish during progressive hypoxia

1.5 数据统计分析

使用 Excel 2010 软件完成数据的基础汇总,使用 R 软件(v 4.5.2)完成数据拟合与分析;通过“minpack.lm”

包的 nlsLM 函数对每尾实验鱼 M'_{O_2} 随 P_{O_2} 的变化情况进行曲线拟合,利用 R 内置函数进行完全氧顺应和氧调节的线性拟合,并计算积分面积。采用 Shapiro-Wilk 法对所有数据进行正态分布检验,采用 Levene 检验进行方差齐性分析。若正态性检验和方差齐性不符则使用非参数检验;若符合,则采用独立样本 t 检验比较 2 种实验鱼 P_{LOE} 、RI 和 AOD 的种间差异。通过线性回归模型分析 2 种实验鱼 P_{LOE} 与 RI 和 AOD 的相关性。 $p < 0.05$ 代表统计分析结果具有统计学意义。

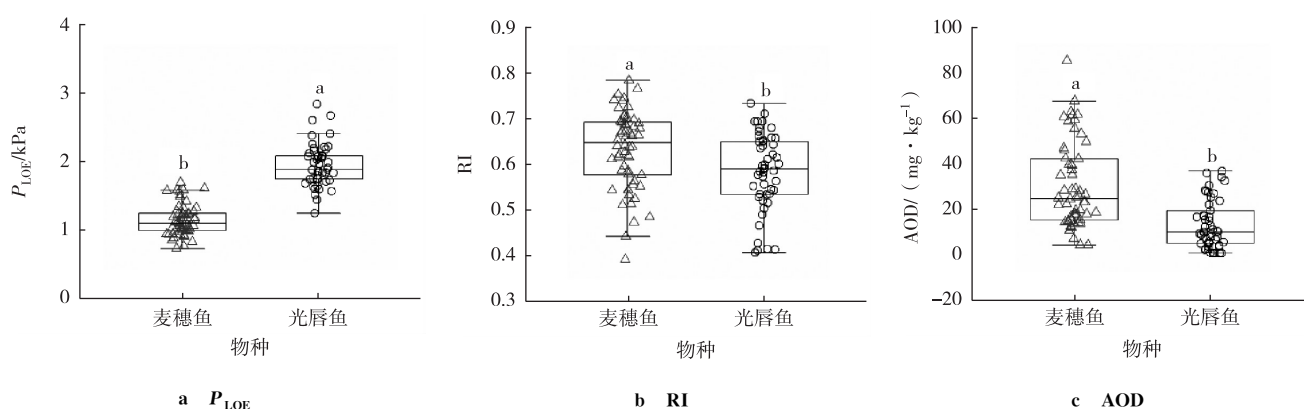
2 结果

2.1 麦穗鱼和光唇鱼低氧耐受指标的种间差异比较

图 3a 显示,麦穗鱼的 P_{LOE} 低于光唇鱼,两者具有统计学意义上的差异($p < 0.05$)。而图 3b、c 显示,麦穗鱼的 RI 和 AOD 均高于光唇鱼,且数据差异均具有统计学意义($p < 0.05$)。

2.2 麦穗鱼和光唇鱼种内相关性分析

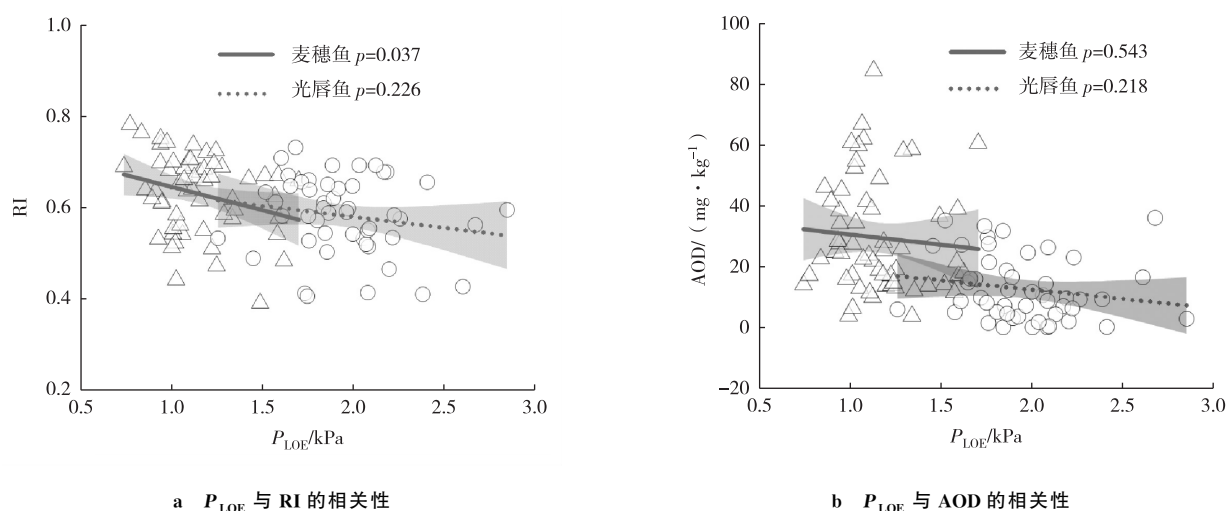
图 4a 显示,麦穗鱼的 P_{LOE} 与 RI 呈统计学意义上的负相关($p < 0.05$),但光唇鱼 P_{LOE} 与 RI 无统计学意义上的相关关系。此外,图 4b 显示,2 种实验鱼的 P_{LOE} 与 AOD 的相关关系均不具有统计学意义。



注:箱体的上下边界分别代表上四分位数和下四分位数,横线代表中位数;各个数据点代表个体的真实值,须线覆盖 1.5 倍四分位距内的数据值;不同小写字母表示 2 个物种低氧耐受指标的种间差异具有统计学意义($p < 0.05$)。

图 3 麦穗鱼和光唇鱼低氧耐受指标的种间差异比较

Fig. 3 Comparison of hypoxia tolerance indicators between *P. parva* and *A. fasciatus*



注:实线代表麦穗鱼的线性回归,虚线代表光唇鱼的线性回归,阴影区域为 95% 置信区间; $p < 0.05$ 时线性回归模型具有统计学意义。

图 4 麦穗鱼和光唇鱼低氧耐受指标的种内相关性分析

Fig. 4 Intraspecific correlations of hypoxia tolerance indicators in *P. parva* and *A. fasciatus*

3 讨论

鱼类低氧耐受能力演化与它的栖息地溶解氧水平的长期变化密切相关^[1,4,25]。本研究结果显示,处于静水生境的麦穗鱼比处于激流生境的光唇鱼具有更强的低氧耐受能力,具体表现为麦穗鱼的 P_{LOE} 明显低于光唇鱼,同时 RI 和 AOD 均明显高于光唇鱼。这一结果表明,麦穗鱼在低氧耐受能力上的优势是它长期适应小型静水、易缺氧生境所形成的生理功能协同进化的产物,该现象源于麦穗鱼高效的代谢调节能力与无氧代谢潜能。较强的代谢调节能力可能伴随更高的氧摄取和利用效率,有助于鱼类在低氧条件下维持代谢稳态,保障关键组织的氧供应;而增强的无氧代谢能力可代偿严重缺氧下的能量供应缺乏,延缓机体死亡进程^[3-4,7-8]。上述结果也与 2 种鱼类的淡水栖息地环境特征相符。

相关性分析结果显示,麦穗鱼的 P_{LOE} 与 RI 存在明显的负相关,表明代谢调节能力更强的个体存在更低的极端致死氧阈值,低氧耐受能力更强,也进一步说明调节能力在麦穗鱼应对缺氧环境中发挥重要作用。与已有研究观点一致:在生态位相似的物种或群体中,较高的 RI 通常对应更强的低氧耐受性,即更低的 P_{LOE} ^[9]。然而,光唇鱼的 P_{LOE} 与 RI 未呈现明显关联,提示有氧代谢调节可能在该物种低氧耐受适应过程中作用有限,这一结果与光唇鱼具有相对较弱的代谢调节能力结论一致。AOD 衡量了鱼类在低氧应激时依赖无氧代谢补偿基础代谢需求的能量总量^[11]。结果显示,2 种实验鱼的 P_{LOE} 与 AOD 均不具有统计学意义上的相关性。这可能是由于 P_{LOE} 指示的物种低氧耐受能力并非仅由无氧代谢潜能决定,还受限于机体的代谢调节能力、乳酸等代谢废物耐受能力与清除效率、氧化应激细胞损伤修复能力等多重因素^[3,26-27]。由此可见,低氧耐受是多种生理机制协调调整的综合体现,各指标之间不一定存在固定关联^[6]。

综上所述,本研究比较了麦穗鱼与光唇鱼在 P_{LOE} 、RI 和 AOD 上的种间差异,并分析了它们的 P_{LOE} 与 RI 和 AOD 的种内相关性,初步揭示了栖息于不同溶解氧环境中的 2 种淡水鱼类在低氧耐受能力和相关生理调节策略上的差异。静水生境麦穗鱼较强的低氧耐受能力可能与它较强的代谢调节能力和无氧代谢潜能有关,而急流生境光唇鱼的代谢调节能力与无氧代谢潜能均较弱。这种差异是 2 个物种对自然栖息地环境条件长期适应的结果。同时,尽管 P_{LOE} 、RI 和 AOD 的生理内涵和表征机制不同,但 3 者均在种间水平上一致反映了 2 种鱼类低氧耐受的种间差异,这表明 RI 和 AOD 在表征 2 种淡水鱼类低氧耐受能力方面具有一定的适用性。在实际运用中建议结合多个低氧耐受能力指标综合分析,且后续研究中应纳入更多不同生境的淡水鱼类加以验证。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘志飞, 汪峰, 陈帅钰, 等. 低氧胁迫对绿鳍马面鲈血液生理生化、鳃组织结构和肝脏抗氧化能力的影响[J]. *中国水产科学*, 2024, 31 (12): 1441-1452.
Liu Zhifei, Wang Feng, Chen Shuaiyu, et al. Effects of hypoxia stress on hematological physiology and biochemistry, gill histology and hepatic antioxidant capacity of black scraper *Thamnaconus septentrionalis*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2024, 31 (12): 1441-1452.
- [3] Bergstedt J H, Pfalzgraff T, Skov P V. Hypoxia tolerance and metabolic coping strategies in *Oreochromis niloticus*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2021, 257: 110956.
- [4] Heinrichs-caldas W, De Almeida-val V M F. Hypoxia tolerance in two amazon cichlids: mitochondrial respiration and cellular metabolism adjustments are result of species environmental preferences and distribution[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2021, 47 (6): 1759-1775.
- [5] Lima A R A, Booms E M, Lopes A R, et al. Early life stage mechanisms of an active fish species to cope with ocean warming and hypoxia as interacting stressors[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 341: 122989.
- [6] Borowiec B G, Hoffman R D, Hess C D, et al. Interspecific variation in hypoxia tolerance and hypoxia acclimation responses in killifish from the family Fundulidae[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2020, 223 (4): jeb209692.
- [7] Amador M H B, Schauer K L, McDonald M D. Does fluoxetine exposure affect hypoxia tolerance in the Gulf toadfish, *Opsanus beta*?[J]. *Aquatic Toxicology*, 2018, 199: 55-64.
- [8] Mueller C A, Seymour R S. The regulation index: a new method for assessing the relationship between oxygen consumption

- and environmental oxygen[J]. *Physiological and Biochemical Zoology*, 2011, 84 (5): 522-532.
- [9] Wood C M. The fallacy of the P_{crit} -are there more useful alternatives?[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2018, 221 (22): jeb163717.
- [10] Zhang Y F, Mauduit F, Farrell A P, et al. Exposure of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) to chemically dispersed oil has a chronic residual effect on hypoxia tolerance but not aerobic scope[J]. *Aquatic Toxicology*, 2017, 191: 95-104.
- [11] Zhang Y F, So B E, Farrell A P. Hypoxia performance curve: assess a whole-organism metabolic shift from a maximum aerobic capacity towards a glycolytic capacity in fish[J]. *Metabolites*, 2021, 11 (7): 447.
- [12] Claireaux G, Chabot D. Responses by fishes to environmental hypoxia: integration through Fry's concept of aerobic metabolic scope[J]. *Journal of Fish Biology*, 2016, 88: 232-251.
- [13] Pang X, Pu D Y, Xia D Y, et al. Individual variation in metabolic rate, locomotion capacity and hypoxia tolerance and their relationships in juveniles of three freshwater fish species[J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2021, 191: 755-764.
- [14] Zhang J H, Long R, Jing Y Y, et al. Loss of behavioral stress response in blind cavefish reduces energy expenditure[J]. *Zoological Research*, 2023, 44: 678-692.
- [15] Mandic M, Regan M D. Can variation among hypoxic environments explain why different fish species use different hypoxic survival strategies?[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2018, 221 (21): jeb161349.
- [16] Fu S J, Dong Y W, Killen S S. Aerobic scope in fishes with different lifestyles and across habitats: trade-offs among hypoxia tolerance, swimming performance and digestion[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2022, 272: 111277.
- [17] Benzer S, Benzer R. Growth properties of *Pseudorasbora parva* in Süreyyabey Reservoir: traditional and artificial intelligent methods[J]. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 2020, 36 (1): 149-156.
- [18] 周智成, 曹天玲, 刘如垚, 等. 基于线粒体 COI 基因的黄河流域麦穗鱼种群遗传多样性与遗传结构[J]. *生物多样性*, 2025, 33 (8): 127-140.
- Zhou Zhicheng, Cao Tianling, Liu Ruyao, et al. Genetic diversity and structure of *Pseudorasbora parva* population in the Yellow River basin based on the mitochondrial COI gene[J]. *Biodiversity Science*, 2025, 33 (8): 127-140.
- [19] 赵波, 黄泓豪, 郭勇垚, 等. 光唇鱼 (*Acrossocheilus fasciatus*) 雄性幼鱼不同水流速度下的精巢组织形态及转录组分析[J]. *海洋与湖沼*, 2025, 56 (6): 1473-1486.
- Zhao Bo, Huang Honghao, Guo Yongyao, et al. Morphological and transcriptomic analysis of testes in juvenile *Acrossocheilus fasciatus* under different water flow conditions[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2025, 56 (6): 1473-1486.
- [20] 张安杰, 曹振东, 付世建. 生境不完全重叠的两种鲤科鱼类耐低氧及运动能力比较[J]. *生态学报*, 2014, 34 (20): 5860-5867.
- Zhang Anjie, Cao Zhendong, Fu Shijian. Comparison of hypoxia tolerance and locomotor performance in two cyprinids with incompletely overlapped habitat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (20): 5860-5867.
- [21] 周文茜, 郑世龙, 张雨林, 等. 叉尾斗鱼标准代谢率和行为的个体差异及其关联[J]. *生态学杂志*, 2023, 42 (11): 2695-2701.
- Zhou Wenqian, Zheng Shilong, Zhang Yulin, et al. The individual differences of standard metabolic rate and behavior and their relationships in *Macropodus opercularis*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42 (11): 2695-2701.
- [22] West G B, Brown J H, Enquist B J. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology[J]. *Science*, 1997, 276 (5309): 122-126.
- [23] Reemeyer J E, Rees B B. Standardizing the determination and interpretation of P_{crit} in fishes[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2019, 222 (18): jeb210633.
- [24] 向平, 张永飞, 黄可人, 等. 摄食和短期饥饿对革胡子鲶热耐受和低氧耐受能力的影响[J]. *生态学杂志*, 2025, 44 (5): 1518-1524.
- Xiang Ping, Zhang Yongfei, Huang Keren, et al. The effects of feeding and short-term starvation on the thermal and hypoxia tolerance of *Clarias gariepinus*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, 44 (5): 1518-1524.
- [25] Zhang Y F, Xiang P, Fu S J. The responses of stress tolerance, physiological performance and energy metabolism to acclimation temperature between tropical and temperate fish species[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2025, 12: 1593656.
- [26] Somo D A, Chu K, Richards J G. Aerobic scope falls to nil at P_{crit} and anaerobic ATP production increases below P_{crit} in the tidepool sculpin, *Oligocottus maculosus*[J]. *Biology Letters*, 2022, 18 (12): 20220342.
- [27] Weber J M, Choi K, Gonzalez A, et al. Metabolic fuel kinetics in fish: swimming, hypoxia and muscle membranes[J].

Animal Sciences

Comparison of Hypoxia Tolerance Between Two Fish Species and Applicability Analysis of Regulation Index and Accumulated Oxygen Deficit

XIANG Ping, ZHANG Yongfei, TANG Yan, ZHANG Na, FU Shijian

(Animal Biology Key Laboratory of Chongqing Education Commission, Chongqing Key Laboratory of Conservation and Utilization of Freshwater Fishes, Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, College of Life Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: This study aims to investigate the differences in hypoxia tolerance and coping strategies between two freshwater fish species inhabiting two distinct habitats, and to preliminarily verify the applicability of the regulation index (RI) and accumulated oxygen deficit (AOD) in characterizing the hypoxia tolerance of freshwater fish species. *Pseudorasbora parva* from lentic habitats and *Acrossocheilus fasciatus* from lotic habitats were used as experimental animals. Through progressive hypoxia experiments, the oxygen partial pressure at loss of equilibrium (P_{LOE}) was measured for both fish species, and the RI and AOD were calculated based on the fitted curves of metabolic rate versus oxygen partial pressure. The results show that the P_{LOE} of *P. parva* is lower than that of *A. fasciatus*, and the difference between the two species is statistically significant ($p < 0.05$), while RI and AOD are higher than those of *A. fasciatus*, and the difference between the two species is statistically significant ($p < 0.05$). Furthermore, P_{LOE} in *P. parva* shows a statistically significant negative relationship with RI ($p < 0.05$), but no statistically significant relationship with AOD. In *A. fasciatus*, P_{LOE} shows no statistically significant relationships with either RI or AOD. These findings suggest that *P. parva* exhibits stronger hypoxia tolerance than *A. fasciatus*, which may be related to its greater metabolic regulation capacity and higher potential for anaerobic metabolism. In addition, RI and AOD effectively distinguish interspecific differences in hypoxia tolerance between the two fish species, suggesting that these two indicators are suitable for characterizing hypoxia tolerance in these two fish species.

Keywords: hypoxia tolerance; regulation index; accumulated oxygen deficit; *Pseudorasbora parva*; *Acrossocheilus fasciatus*

(责任编辑 陈新颖)