

禁食对锦鲤最大代谢与逆境耐受能力的影响^{*}

谭雪婷, 张永飞, 黄可人, 付世建

(重庆师范大学 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

重庆市动物生物学重点实验室, 重庆 401331)

摘要:为考察禁食对锦鲤(*Carassius auratus*)最大代谢率(MMR)、低氧耐受能力以及热耐受能力的影响,将实验用锦鲤随机均分为禁食 14 d 的禁食组和同期正常摄食的对照组,测定它们的 MMR、临界氧压(P_{crit})、失去平衡点(LOE)、临界高温(T_C^{max})、致死高温(T_L^{max})、临界低温(T_C^{min})和致死低温(T_L^{min}),并计算临界代谢率(CMR)。结果显示:与对照组相比,禁食组的 MMR 具有统计学意义上的提升($p < 0.05$);在低氧耐受实验中,禁食组与对照组的 P_{crit} 和 LOE 均无统计学意义上的差异,但禁食组的 CMR 与对照组相比有统计学意义上的下降($p < 0.05$);在热耐受实验中,与对照组相比,禁食组的 T_C^{max} 和 T_L^{max} 均有所下降而 T_C^{min} 和 T_L^{min} 均有所上升,且 4 个指标的组间差异均具有统计学意义($p < 0.05$)。上述结果提示锦鲤在经历短期禁食后 MMR 明显上升,耐低氧能力明显增强,但高、低温耐受能力均明显减弱。

关键词:禁食;热耐受;低氧耐受;最大代谢

中图分类号:Q175

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2024)06-0001-06

由于食物资源分布在自然界中具有时空异质性,因此食物匮乏甚至短期饥饿是鱼类等水生生物生存过程中常见的事件^[1]。一般而言,饥饿胁迫会影响鱼类的形态结构、生理功能和行为表现,鱼类为了应对食物短缺会通过调节自身的能量分配如降低新陈代谢、减少活动量等来降低代谢水平^[2]。因此,饥饿胁迫可能会对鱼类代谢能力、低氧耐受能力、热耐受能力等产生负面影响。然而也有研究表明,适当程度的饥饿对鱼类也有积极影响,如大口鲶(*Silurus meridionalis*)在禁食 14~28 d 的情况下可以保持游泳性能以促进觅食活动^[1]。

食物是动物获取能量的主要来源。食物资源匮乏可能会对动物的能量代谢产生影响。能量代谢是动物维持各种生理功能的基础,它的大小在实验中通常以动物个体的耗氧率来表征^[3]。最大代谢率(MMR)^[4]是指鱼类在给定温度下短时间内能量消耗的最大速率,反映了鱼类代谢的生理极限。食物资源匮乏可能导致鱼类 MMR 发生改变,从而影响它们的正常生理功能;另外,由于地理环境、极端天气和人为因素的影响,资源匮乏和水体环境缺氧对于鱼类等水生生物而言都是经常性的^[5-6]——这意味着鱼类在面临这些状况时机体内能量供给不足,并由此可能影响鱼类的耐低氧能力。同时,温度作为水生生态系统的“生态驱动力”,对鱼类等水生生物有着重大影响^[7]。一般而言,鱼类在面对由季节变化引起的水体温度缓慢变化时,有足够的时间调节自身新陈代谢水平和生理状态以适应温度变化;但水体温度因自然或人为因素而发生剧烈变化时,鱼类会受到温度胁迫且它们的生理功能也会因此受损,而资源匮乏则可能会加剧鱼类生理功能受损程度^[8]。因此,充分了解鱼类在资源匮乏时的能量代谢和抗逆能力变化情况对于合理有效地进行鱼类养殖生产和开展野生鱼类保护工作而言都是十分必要的。

锦鲤(*Carassius auratus*)为鲤形目(Cypriniformes)鲤科(Cyprinidae)鲤属(*Carassius*)的一种常见观赏性鱼类,具有较强的环境适应能力,是一种理想的实验动物模型。本研究选取锦鲤作为研究对象,考察了禁食对锦鲤的 MMR、低氧耐受能力及热耐受能力的影响,以便为探究鱼类禁食与逆境耐受能力之间关系的相关研究补充基础资料。

^{*} 收稿日期:2023-12-22 修回日期:2024-03-13 网络出版时间:2024-12-25T17:20

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 32370509)

第一作者简介:谭雪婷,女,研究方向为鱼类生理生态与行为, E-mail: 924392611@qq.com;通信作者:付世建,男,教授,博士生导师, E-mail: shijianfu9@hotmail.com

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20241225.1009.014>

1 材料与方法

1.1 实验鱼的来源及饲养条件

实验用锦鲤从重庆市当地水产养殖场购得并被放置在实验室自净化循环控温水槽中驯养 14 d, 驯养用水为充分曝气的自来水, 水温控制在 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 。驯养期间, 使用充气泵不断向水体中充入空气以保持水体溶解氧质量浓度在 $7.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上; 每日换水量约为养殖水体总体积的 $10\%\sim 20\%$; 昼夜光周期为 12 h 光照: 12 h 黑暗; 每日 9:00 以通威商业颗粒饲料饱足投喂 1 次, 投喂 1 h 后用虹吸管清理水槽中的粪便和剩余饵料。

1.2 实验方案与操作方法

挑选 150 尾健康且大小相近的实验鱼随机平均分为对照组和禁食组, 禁食组进行 14 d 的禁食处理, 对照组在此期间每日饱足投喂 1 次; 其他所有养殖条件均保持驯养期间时的设定。禁食处理完成后, 同时测定 2 组实验鱼的 MMR、临界氧压(P_{crit})、失去平衡点(LOE)、临界高温($T_{\text{C}}^{\text{max}}$)、临界低温($T_{\text{C}}^{\text{min}}$)、致死高温($T_{\text{L}}^{\text{max}}$)和致死低温($T_{\text{L}}^{\text{min}}$)。上述测定指标对应的实验鱼体型参数如表 1 所示。此外, 为了避免消化活动对指标测定产生影响, 对照组实验鱼在实验前需禁食 24 h 以上。

表 1 实验鱼的体型参数
Tab. 1 The body morphological parameters of the experimental fishes

测定指标	组别	样本量/尾	体质量/g	体长/cm	测定指标	组别	样本量/尾	体质量/g	体长/cm
MMR	对照组	13	5.03 ± 0.36	5.33 ± 0.11	$T_{\text{C}}^{\text{max}}, T_{\text{L}}^{\text{max}}$	对照组	15	5.31 ± 0.22	5.28 ± 0.09
	禁食组	12	4.32 ± 0.24	5.12 ± 0.10		禁食组	15	4.67 ± 0.16	5.29 ± 0.08
$P_{\text{crit}}, \text{LOE}$	对照组	12	5.21 ± 0.33	5.35 ± 0.12	$T_{\text{C}}^{\text{min}}, T_{\text{L}}^{\text{min}}$	对照组	15	5.10 ± 0.27	5.33 ± 0.11
	禁食组	12	4.14 ± 0.23	5.16 ± 0.10		禁食组	15	4.83 ± 0.16	5.23 ± 0.07

1.2.1 MMR 的测定

参照文献[9]中的“人工追赶法”来诱导实验鱼的 MMR。实验装置为内径、外径和高分别为 16、32 和 10 cm 的环形水道, 内嵌浙江森森实业有限公司生产的森森 HQB-4500 型小型循环水泵。首先打开水泵, 待水流稳定后将实验鱼放入实验装置内进行驱赶, 直至鱼体失去平衡达到完全力竭状态, 该过程一般在 10 min 内完成。将实验鱼驱赶至力竭状态后, 立即将它转移至密闭式呼吸代谢仪^[9]的呼吸室内; 在这一转移过程中鱼体在空气中约暴露 10 s, 由此能更好地激发实验鱼的代谢率达到 MMR; 代谢仪内含有微型水泵, 可以保证呼吸室内水体的溶解氧充分均质分布。随后, 使用美国哈希公司出品的哈希 HQ30d 型溶解氧测定仪测量并记录呼吸室内溶解氧质量浓度, 每 10 s 记录 1 次, 连续测量 5 min。记录结束后, 对溶解氧质量浓度和测量时间进行线性拟合, 求出斜率 S (单位: $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) 再计算 MMR。MMR 的计算公式^[9]如下:

$$V_{\text{MMR}} = (3\ 600 \times S \times V) / M,$$

其中: V_{MMR} 为实验鱼的 MMR (单位: $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), V 是呼吸室及附属循环系统扣除鱼体积后的体积 (单位: L), 鱼体积根据鱼的体质量折算得到, M 为实验鱼的体质量 (单位: kg)。

1.2.2 低氧耐受能力的测定

使用实验室自制的间歇式呼吸代谢仪^[10]测定实验鱼低氧耐受能力。在测定前将实验鱼转移至呼吸室内适应 1 h, 适应期间, 打开间歇式呼吸代谢仪的内外循环, 使呼吸室内外水体互通, 保持水体溶解氧质量浓度不变。测定开始时, 关闭外循环, 使呼吸室处于密闭状态, 保持内循环运作, 保证呼吸室内水体溶解氧均匀分布。测量期间, 仍使用哈希 HQ30d 型溶解氧测定仪每 2 min 记录 1 次呼吸室内溶解氧质量浓度, 待实验鱼由于缺氧而失去平衡达 20 s 仍不能恢复平衡时结束测定, 并记录此时呼吸室内的溶解氧质量浓度作为实验鱼的 LOE^[10]。上述测定完成后测量实验鱼的体质量、体长并计算代谢率, 具体计算公式如下:

$$M_{\text{O}_2} = ((D_{\text{O}_2, k} - D_{\text{O}_2, k+1}) \times V) / (M \times t),$$

其中: M_{O_2} 为实验鱼的代谢率 (单位: $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), $D_{\text{O}_2, k}$ 和 $D_{\text{O}_2, k+1}$ 分别为测定时刻 k 和 $k+1$ 时呼吸室内的溶解氧质量浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), t 为测定的间隔时间 (本研究中 $t=1/30\text{ h}$)。另外, 以代谢率出现明显下降时的环境溶解氧质量浓度作为 P_{crit} , 采用“双线法”求得此时对应的代谢率即为 CMR ^[10]。

1.2.3 热耐受能力的测定

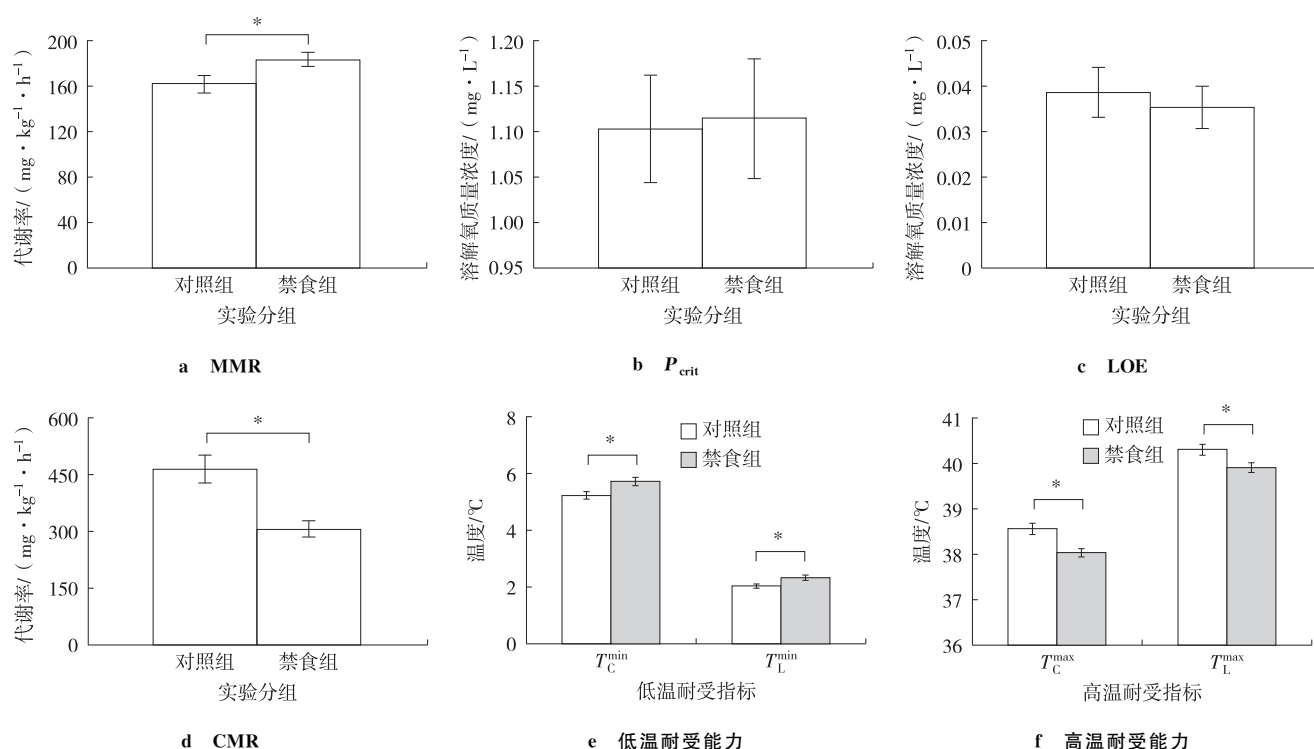
实验鱼的热耐受能力使用临界温度法测定^[10]。将实验鱼放置于装有 50 L 充分曝气水体的容器内适应 1 h, 该容器内设置了多个长×宽×高为 11.5 cm×9.5 cm×15 cm 的单元格, 每个单元格均只放置 1 尾实验鱼; 适应水温为 25 ℃, 水体溶解氧水平达到饱和状态。适应过程结束后, 采用额定功率为 3 000 W 的加热器或额定功率为 1 100 W 左右的冷水机对实验水体以 0.3 ℃·min⁻¹ 的速率进行升温或降温, 使用数字温度计监控水体温度变化情况以保证温度变化速率稳定。以实验鱼首次失去平衡并在 15 s 内仍不能恢复平衡时的温度作为 $T_C^{\max}$ 或 $T_C^{\min}$, 实验鱼鳃盖无反应时间达 10 s 时的温度作为 $T_L^{\max}$ 或 $T_L^{\min}$ ^[11-12]。

1.3 数据处理与统计

所有指标数据均用“平均值±标准误”形式表示。采用 Excel 2010 软件进行常规数据计算, 运用 SPSS 25.0 软件对所有实验指标进行统计分析, 禁食组与对照组实验鱼的指标数据差异采用独立样本 t 检验进行比较。当 $p < 0.05$ 时, t 检验的结果具有统计学意义。

2 结果

图 1a 显示: 与对照组相比, 禁食组的 MMR 有统计学意义上的提升 ($p < 0.05$), 升幅约为 13%。图 1b、c 则显示禁食组与对照组的 P_{crit} 和 LOE 无统计学意义上的差异; 但前者的 CMR 低于后者的 CMR, 两者差异在 $p < 0.05$ 水平具有统计学意义 (图 1d)。从图 1e、f 可知禁食后实验鱼的热耐受能力受到明显影响: 与对照组相比, 禁食组的 $T_C^{\min}$ 和 $T_L^{\min}$ 均有所上升而 $T_C^{\max}$ 与 $T_L^{\max}$ 均有所下降, 且这 4 个指标的组间差异均具有统计学意义 ($p < 0.05$)。



注: * 表示不同处理组实验鱼的指标差异具有统计学意义 ($p < 0.05$)。

图 1 禁食对锦鲤 MMR、低氧耐受能力和热耐受能力的影响

Fig. 1 The effect of fasting on MMR, hypoxic tolerance, and thermal tolerance of goldfish

3 讨论

3.1 禁食对锦鲤 MMR 的影响

由于自然界中食物分布不均, 鱼类获取食物资源在时间和空间上具有随机性, 鱼类在生命活动中经常会遭

遇饥饿胁迫。研究表明,饥饿会导致鱼类能量储备减少、生理功能受到影响^[13],而鱼类可以调节自身结构和生理功能以适应食物短缺。MMR 是鱼类代谢的生理极限,一般反映鱼类的最大有氧运动能力^[14]。本研究实验结果显示,经历 14 d 禁食处于饥饿状态下锦鲤的 MMR 与同期不禁食的同类相比有明显上升趋势。与上述结果有所差异的是,有研究发现随着饥饿时间的增加,鱼类的 MMR 呈现先上升(饥饿时间在 14 d 以内)后下降(饥饿时间在 14 d 之后)的趋势^[15]。由此可以推测,本研究中禁食组锦鲤的 MMR 没有出现下降趋势可能与设置的禁食时间较短有关。然而本研究得到的这一结果也表明,适度的禁食可以促进锦鲤最大有氧运动能力的改善,这可能更有利于该鱼种进行觅食等活动。此外,饥饿对 MMR 的影响因物种不同而有所差异,这可能与不同鱼种的摄食习惯、代谢模式以及对饥饿的耐受能力有关;而且多数鱼类在饥饿胁迫下不仅会降低自身能量代谢,还会尽可能将它维持在一定水平,从而保障再次获取食物或面临其他胁迫能及时做出反应^[16]。

3.2 禁食对锦鲤低氧耐受能力的影响

在自然界中,鱼类会受到多种环境因子的影响。当鱼类遭受饥饿和低氧这 2 种胁迫时,它的代谢需求会因饥饿胁迫而下降,它的低氧耐受能力可能会由此增强;然而饥饿胁迫同样会削弱鱼类生理调节能力,因而它的低氧耐受能力也有可能减弱。本研究结果显示,经过 14 d 禁食处理后的锦鲤与同期不禁食处理的同类相比,两者 P_{crit} 和 LOE 差异并不明显,但前者的 CMR 明显低于后者的 CMR。由此可见,锦鲤经历 14 d 的短期禁食后耐低氧能力还是有一定程度的增强。

P_{crit} 是衡量鱼类耐低氧能力的重要指标,通常是由鱼类获取氧气进行有氧代谢的能力来评判。然而鱼类耐低氧的能力不仅与它获取氧气的能力有关,而且与它进行无氧代谢的能力同样相关^[17],因为当水体中溶解氧质量浓度低于鱼类的 P_{crit} 时,鱼类的无氧代谢会被激活。锦鲤是一种极耐低氧环境的鱼类,当它所生活的水体环境中缺乏溶解氧时,它的机体可以开启乙醇(无氧)代谢以维持最基础的生理功能,并在面临饥饿时倾向于保存糖原而使用脂肪、蛋白质供能,以确保在缺氧时能够为机体关键部位提供能量^[18]。在本研究中,经过 14 d 禁食的锦鲤的 P_{crit} 和 LOE 并未出现明显改变可能与上述情况有关。此外,动物在饥饿胁迫下可能会进入低代谢状态以维持生命基本需求,此时体内蛋白质周转水平下降、ATP 消耗减少,从而会表现出较低的耗氧率;这在本研究中则体现为禁食处理后的锦鲤 CMR 明显比对照组同类的 CMR 更低,谭淦^[6]对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)的研究结果也与之一致。

3.3 禁食对锦鲤热耐受能力的影响

为了应对食物短缺,鱼类会调节自身能量分配以降低代谢水平,如停止生殖、降低维持代谢、减少活动量等。类似地,鱼类也可以通过调整代谢水平或生理状态来适应不断变化的环境温度。在本研究中,禁食 14 d 后的锦鲤与同期不禁食的同类相比,前者的 T_C^{max} 与 T_L^{max} 都有明显下降而 T_C^{min} 和 T_L^{min} 都有明显上升,可见短期的禁食处理降低了锦鲤的高、低温耐受能力。

禁食对鱼类高、低温耐受能力的影响机制并不相同。有研究发现,禁食 12 d 的瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)的免疫细胞吞噬能力、超氧化物歧化酶(SOD)活性均有所下降;而禁食处理的鲢鱼(*Miichthys miui*)的过氧化氢酶和 SOD 的活性也呈下降趋势^[19]。SOD 活性下降会影响鱼类的热激反应,而热激反应与鱼类的高温耐受能力相关;当受到高温胁迫时,为了应对热激反应,鱼类的热激蛋白水平会上升,并促进损伤蛋白质的修复和永久损伤蛋白质的分解^[20]。因此,禁食导致的 SOD 活性下降可能会导致鱼类高温耐受能力下降。鱼类对于饥饿的应对措施包括降低代谢、弱化氧化应激、动用身体储备能量供能等。有研究表明,禁食 2~4 d 的鱼类耐低温能力明显增强,这是由于脂质的分解代谢与自噬促进了鱼类的抗寒能力^[21]。一方面脂质代谢可直接为饥饿中的鱼体提供能量;另一方面它在冷应激中也作为一种信号分子,促进了热量的产生,由此可以增强鱼类低温耐受能力。然而在本研究中,与同期不禁食的同类相比,禁食 14 d 的锦鲤低温耐受能力明显下降;其中原因可能与本研究的禁食时间相对更长而饥饿与低温的双重胁迫已超过了实验鱼体内有关代谢的调节阈值有关。

综上所述,本研究结果表明短期禁食会对锦鲤部分生理功能造成影响,在促使该鱼种 MMR 明显上升、耐低氧能力明显增强的同时,也导致了它的高、低温耐受能力均明显减弱。禁食对鱼类的影响因鱼类在种类、习性、生境背景、适应性策略等方面的差异而可能有所不同,而锦鲤作为一种长期被人类驯养的观赏性鱼类,它在正常驯养状况下很少面临饥饿的情形,因此本研究所得结论不能过多延伸至自然生境中的鱼类;在自然生境中,各种鱼类所遭遇的饥饿情形更加复杂,还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] FU S J, PANG X, CAO Z D, et al. The effects of fasting on the metabolic interaction between digestion and locomotion in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2011, 158(4): 498-505.
- [2] WANG T, HUNG C C Y, RANDALL D J. The comparative physiology of food deprivation: from feast to famine [J]. Annual Review of Physiology, 2006, 68: 223-251.
- [3] 曾令清, 付世建, 曹振东. 鲫幼鱼 (*Carassius auratus*) 标准代谢个体差异与力竭后代谢特征及行为的关联 [J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1746-1755.
- ZENG L Q, FU S J, CAO Z D. Correlations between standard metabolic rate and metabolic characteristics after exhaustive exercise, and behavior in the juvenile crucian carp (*Carassius auratus*) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): 1746-1755.
- [4] KILLEN S S, NORIN T, HALSEY L G. Do method and species lifestyle affect measures of maximum metabolic rate in fishes? [J]. Journal of Fish Biology, 2017, 90(3): 1037-1046.
- [5] RICHARDS J G. Physiological, behavioral and biochemical adaptations of intertidal fishes to hypoxia [J]. Journal of Experimental Biology, 2011, 214(2): 191-199.
- [6] 谭谟. 不同投喂策略对大口黑鲈能量代谢特征、运动能力、低氧耐受的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- TAN G. Effects of different feeding strategies on the characteristics of energy metabolism, swimming performance and hypoxia tolerance of largemouth bass [D]. Chongqing: Southwest University, 2023.
- [7] ZHOU L Y, FU S J, FU C, et al. Effects of acclimation temperature on the thermal tolerance, hypoxia tolerance and swimming performance of two endangered fish species in China [J]. Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systemic and Environmental Physiology, 2019, 189(2): 237-247.
- [8] UNDERWOOD Z E, MYRICK C A, ROGERS K B. Effect of acclimation temperature on the upper thermal tolerance of Colorado River cutthroat trout *Oncorhynchus clarkii pleuriticus*: thermal limits of a North American salmonid [J]. Journal of Fish Biology, 2012, 80(7): 2420-2433.
- [9] 黄可人, 张永飞, 刘菡莹, 等. 消化活动与短期饥饿对不同摄食习性鱼类最大代谢的影响 [J]. 重庆师范大学学报 (自然科学版), 2023, 40(5): 49-54.
- HUANG K R, ZHANG Y F, LIU Q Y, et al. Effects of digestion and short-term starvation on the maximum metabolism rate of fish with different feeding habits [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2023, 40(5): 49-54.
- [10] 张永飞, 黄可人, 罗玉莲, 等. 力竭运动胁迫对三种鲤科鱼类低氧耐受和热耐受的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, 47(12): 1986-1992.
- ZHANG Y F, HUANG K R, LUO Y L, et al. Exhaustion exercise stress on hypoxia and thermal tolerances of three cyprinid species [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(12): 1986-1992.
- [11] DEBNATH D, PAL A K, SAHU N P, et al. Thermal tolerance and metabolic activity of yellowtail catfish *Pangasius pangasius* (Hamilton) advanced fingerlings with emphasis on their culture potential [J]. Aquaculture, 2006, 258(1/2/3/4): 606-610.
- [12] 黄梯基, 李秀明, 樊美黠, 等. 禁食对胭脂鱼幼鱼游泳能力、热耐受能力和自发运动的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, 47(6): 950-957.
- HUANG T J, LI X M, FAN M X, et al. Fasting on swimming performance, thermal tolerance and spontaneous activity juvenile *Myxocyprinus asiaticus* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(6): 950-957.
- [13] 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.
- [14] 唐金玉, 曾令清, 彭姜岚, 等. 饥饿对中华倒刺鲃幼鱼最大代谢和运动能力的影响 [J]. 重庆师范大学学报 (自然科学版), 2018, 35(3): 64-68.
- TANG J Y, ZENG L Q, PENG J L, et al. The effects of fasting on the maximum metabolism and locomotion performance in *Spinibarbus sinensis* [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2018, 35(3): 64-68.
- [15] 李秀明, 付世建, 张耀光. 饥饿对鲤幼鱼内脏器官指数和力竭运动后代谢特征的影响 [J]. 水生生物学报, 2021, 45(2): 259-266.
- LI X M, FU S J, ZHANG Y G. Effects of starvation on index of visceral organs and excess post-exercise oxygen consumption of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(2): 259-266.
- [16] 谢小军, 邓利, 张波. 饥饿对鱼类生理生态学影响的研究进展 [J]. 水生生物学报, 1998, 22(2): 181-188.
- XIE X J, DENG L, ZHANG B. Advance and studies on ecophysiological effects of starvation on fish [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1998, 22(2): 181-188.

- [17] 夏丹阳. 鲤的代谢特征与游泳能力、低氧耐受及生长性能的关联[D]. 重庆:西南大学,2021.
XIA D Y. The relationship between metabolic characteristics and swimming performance, hypoxia tolerance and growth performance in common carp[D]. Chongqing:Southwest University,2021.
- [18] De BOECK G, WOOD C M, IFTIKAR F I, et al. Interactions between hypoxia tolerance and food deprivation in *Amazonian oscars*, *Astronotus ocellatus*[J]. Journal of Experimental Biology, 2013, 216(24):4590-4600.
- [19] 庞旭. 基于温度变化的鱼类生理生态(热耐受、代谢及游泳)响应研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
PANG X. Research on the fish eco-physiological (thermal tolerance, metabolism and swimming) response based on temperature changes[D]. Chongqing:Chongqing University,2015.
- [20] HARADA K, MORITA T, DRGUCHI W, et al. High-temperature and starvation tolerances of juvenile Japanese Spanish mackerel *Scomberomorus niphonius*[J]. Fisheries Science, 2021, 87(4):513-519.
- [21] LU D L, MA Q, WANG J, et al. Fasting enhances cold resistance in fish through stimulating lipid catabolism and autophagy [J]. The Journal of Physiology, 2019, 597(6):1585-1603.

Physiological Ecology and Ethology of Fishes

Effects of Fasting on the Maximum Metabolism and Adversity Tolerance in Goldfish

TAN Xueting, ZHANG Yongfei, HUANG Keren, FU Shijian

(Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, Chongqing Key Laboratory of Conservation and Utilization of Freshwater Fishes, Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: To investigate the effects of fasting on maximum metabolism, hypoxia tolerance and heat tolerance of goldfish (*Carassius auratus*), experimental goldfish were randomly divided into normal feeding control group and fasting group for 14 days. The maximum metabolic rate (MMR), critical oxygen pressure (P_{crit}), loss of equilibrium point (LOE), critical high temperature (T_C^{max}), lethal high temperature (T_L^{max}), critical low temperature (T_C^{min}), and lethal low temperature (T_L^{min}) were measured, and the critical metabolic rate (CMR) was calculated. The results showed that: compared with the control group, the MMR of fasting group was significantly increased ($p < 0.05$). In hypoxic tolerance, the difference of P_{crit} and LOE between treatment group and control group was not statistically significant, but the CMR of fasting group was significantly decreased compared with that of control group ($p < 0.05$). In the heat tolerance experiment, compared with the control group, the T_C^{max} and T_L^{max} of the fasting group was decreased while the T_C^{min} and T_L^{min} of the fasting group was increased, and the differences of the four indices among the groups were statistically significant ($p < 0.05$). These results indicated that the MMR and hypoxia tolerance of goldfish increased significantly after short-term fasting, while the high and low temperature tolerance of the species decreased significantly.

Keywords: fasting; thermal tolerance; hypoxia tolerance; maximum metabolism

(责任编辑 方 兴)