

温度和饥饿对鲤鱼幼鱼静止代谢率及自发运动的影响

付成 曹振东 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 400047

摘要:分别在 15 和 25℃ 条件下对鲤鱼 (*Cyprinus carpio*) 幼鱼 [体重 (10.36 ± 0.22) g, $n = 88$] 进行 2 周的饥饿处理 (饥饿组) 或持续投喂 (对照组), 然后对实验鱼的静止代谢率 (resting metabolic rate, RMR) 进行了测定, 同时以活动期的胸鳍、尾鳍摆动频率, 观察期 (10 min) 胸鳍、尾鳍平均摆动次数, 和运动时间比为指标对实验鱼的自发运动进行了观察。研究发现: 温度和饥饿均显著影响鲤鱼幼鱼的静止代谢率 ($P < 0.05$); 在 15 与 25℃ 条件下饥饿分别导致静止代谢率下降了 19% 和 20%; 温度由 15℃ 上升至 25℃, 对照组与饥饿组静止代谢率分别增加了 83% 和 80%。在 15 与 25℃ 条件下, 饥饿对鲤鱼幼鱼的自发运动具有显著不同的影响 ($P < 0.05$), 且胸鳍和尾鳍的结果十分相似; 在 15℃ 饥饿组与对照组的胸鳍、尾鳍摆动频率 (活动期, 以下类同) 均无显著差异, 而饥饿组运动时间比显著低于对照组, 导致饥饿组的胸鳍、尾鳍平均摆动次数 (观察期, 以下类同) 均显著低于对照组 ($P < 0.05$); 而在 25℃ 饥饿组的胸鳍、尾鳍摆动频率均显著高于对照组, 运动时间比无显著差异, 导致饥饿组的胸鳍、尾鳍平均摆动次数均显著高于对照组 ($P < 0.05$)。研究结果提示, 在 15℃ 下鲤鱼幼鱼通过降低自发运动以降低能量消耗来适应饥饿, 而在 25℃ 条件下, 鲤鱼幼鱼通过增加自发运动来增大获取食物的机率以应对饥饿, 这可能与野外环境中不同温度下食物丰富度及鲤鱼幼鱼的生理状况有关, 但静止代谢率并未呈现与自发运动相关联的变化。

关键词: 温度; 饥饿; 鲤鱼幼鱼; 静止代谢率; 自发运动

中图分类号: Q965.128 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263(2012)02-85-06

The Influence of Temperature and Starvation on Resting Metabolic Rate and Spontaneous Activity in Juvenile *Cyprinus carpio*

FU Cheng CAO Zhen-Dong FU Shi-Jian*

Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour, Chongqing Key Laboratory of Animal Biology,
Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China

Abstract: The resting metabolic rate (RMR) of both starvation (2 weeks) and control juvenile *Cyprinus carpio* [body mass 10.36 ± 0.22 g, $n = 88$] were measured at both 15 and 25℃, respectively. The spontaneous activity indicated by fin (both pectoral and tail fins) beat frequency during movement (FBF_{movement}), average fin beat times during whole 10 min observation period ($FBF_{10\text{min}}$) and percent time spent moving (PTM) were measured at the same time. Both the temperature and starvation showed significant effects on RMR ($P < 0.05$). The RMR of starved fish exhibited a similar 19% - 20% decrease compared to that of control fish at

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 31172096), 重庆市高校优秀人才支持计划项目;

* 通讯作者, E-mail: shijianfu9@hotmail.com;

第一作者介绍 付成, 男, 硕士研究生; 研究方向: 鱼类生理生态学; E-mail: 715680048@qq.com。

收稿日期: 2011-08-16, 修回日期: 2011-12-27

both 15 and 25°C, respectively, while the RMR of control and starved fish increase by about 80% – 83% with the increase of temperature. The starvation has significantly different effect on spontaneous activity at different temperature ($P < 0.05$). When acclimated at 15°C, starvation treatment showed no effect on $\text{FBF}_{\text{movement}}$ while it elicited a significantly lower PTM, resulting in a significantly lower $\text{FBF}_{10\text{min}}$ in starved fish. However, starvation treatment showed no effect on PTM while it elicited a significantly higher $\text{FBF}_{\text{movement}}$, resulting in a significantly higher $\text{FBF}_{10\text{min}}$ in starved fish acclimated at 25°C. It suggested that when undergo starvation, the juvenile *C. carpio* reduce its spontaneous activity to save energy at 15°C, but increase its spontaneous activity possibly for food hunting at 25°C. The different responses of spontaneous activity to starvation of fish acclimated at different temperature may be related to the richness of food resources and physiological status condition of fish in wild environment at different temperature. However, starved fish showed a similar RMR response to temperature change when compared to control fish.

Key words: Temperature; Starvation; Juvenile *Cyprinus carpio*; Resting metabolic rate; Spontaneous activity

温度是影响鱼类生长、发育和生存的重要生态因子^[1]。静止代谢率 (resting metabolic rate, RMR) 指鱼类在安静、禁食状态下的代谢能量消耗,能够在一定程度上反映鱼体的生理状况^[2-3]。在一定温度范围内,鱼类的静止代谢率随水温的升高而上升^[4];自发性运动不依赖外部刺激,仅由动物内部的刺激或状态所引起的活动性,与鱼类的觅食、迁移、逃避敌害和捕食等行为密切相关^[5-8]。关于自发运动国内外研究者主要采用实验鱼单位时间内的移动距离^[9]、移动速度^[10]、尾鳍平均摆动次数、运动时间比^[11]等作为测量指标。研究发现海鲫 (*Embiotoca lateralis*) 胸鳍的自发运动与代谢消耗密切相关^[12]。大西洋鲑鱼 (*Salmo salar*) 的自发运动随温度升高而增加^[13]。

饥饿作为鱼类常常面临的生理胁迫,对鱼类的代谢、行为等均有着重要的影响^[14-15]。鱼类在饥饿过程中可以通过调节代谢水平、调整能量分配和身体储能物质的消耗速率等方式来适应饥饿^[16-18]。因此代谢率常常会随饥饿而下降。自发运动会增加鱼类与食物相遇的机会,但同时也会增加额外的能量消耗^[9],那么在饥饿状态下,为了存活更长的时间,鱼类是通过增加自发运动来增大获取食物的机会,还是通过降低自发运动来尽可能地节约能量是一个十分有趣的问题。

关于温度和饥饿对鱼类静止代谢率影响的报道较多^[19-21],但关于温度和饥饿双重因素作

用对鱼类静止代谢率与自发运动的影响鲜有报道。一方面温度对鱼类摄食、生长、代谢等生理功能有着重要的影响^[22],而另一方面自然界中环境温度与食物资源的丰富度密切相关,因此我们提出温度和饥饿对鱼类静止代谢率与自发运动的影响存在交互作用的假说。

鲤鱼 (*Cyprinids carpio*) 是广泛分布在温带地区淡水水域的底栖杂食性鱼类。其生性活泼好动,适应性强,是一种理想的实验材料。本实验以鲤鱼幼鱼为研究对象,通过研究温度和饥饿对鲤鱼幼鱼静止代谢率及自发运动的影响,考察鲤鱼幼鱼在不同温度下面临饥饿的适应性对策,同时通过多个自发运动指标的比较分析,拟为鱼类自发运动指标的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验鱼的来源及驯养 实验于 2011 年 2 月下旬至 3 月进行。实验用鲤鱼幼鱼购自当地渔民,实验前将实验鱼在本实验室自净化循环控温水槽 (250 L) 中驯养 2 周,驯养水温为 $(11 \pm 1)^\circ\text{C}$ (购买前养殖水温),实验用水为曝气后的自来水,用充气泵不断向水中充气使溶氧水平接近饱和,日换水量约为驯养水体的 10%,实验期间采用 24 h 全光照^[23]。

1.2 实验方案 驯养结束后,以每天 2°C 的速率分别将水温从驯养温度 $(11 \pm 1)^\circ\text{C}$ 升至实验设定的 15°C 与 25°C 2 个温度,再进行 2 周的温度驯化。对照组每天 9:00 时投喂一次商业饵

料至饱足,饥饿组不投喂,2 周后,选取身体健康、体重接近 (10.36 ± 0.22) g 的 88 尾鲤鱼幼鱼作为实验对象,进行静止代谢(4 组, $n = 10$) 和自发运动(4 组, $n = 12$) 的测定。实验期间其他养殖条件与驯化期一致。

1.3 静止代谢率的测定 静止代谢率采用本实验室自行设计的流水式呼吸代谢测定仪^[24] 进行测定。测定时,提前 48 h 将实验鱼(每组 10 尾)移入呼吸室适应环境,实验期间分别在每天的 9:00、15:00 和 21:00 时测定实验鱼的耗氧率,溶氧值采用溶氧仪(HQ20, Hach Company, USA)进行测定,连续测定 2 d,以耗氧率的平均值作为静止代谢率。计算静止代谢率 [$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$] 的公式为: $\text{RMR} = \Delta \text{O}_2 \times v/m$, 式中, ΔO_2 是实验呼吸室出水口处溶氧和空白呼吸室出水口处溶氧的差值 (mg/L), v 是实验呼吸室水流速度 (L/h), 由呼吸室出水口 1 min 流出水的质量称量计算获得, m 为每尾实验鱼的体重 (kg)。

1.4 自发运动的测定 将每组实验鱼(12 尾)分别移入单个养殖单元(120 L)中适应 24 h,在每天的 9:00、15:00 和 21:00 时用数码相机对实验鱼的活动进行持续 15 min 的拍摄,连续 2 d。为了避免放置相机和取相机时对鱼的干扰,只截取第 4 ~ 14 min 的视频进行分析。记录每尾实验鱼胸鳍、尾鳍的摆动次数及 10 min 之内实验鱼实际运动的时间(胸鳍、尾鳍任何部分在摆动都定义为鱼在运动,鱼静止超过 1 s 定义为停止运动),取 6 次的平均值。运动时间比(percent time spent moving, PTM),活动期胸鳍、尾鳍的摆动频率(fin beat frequency during movement, $\text{FBF}_{\text{movement}}$) 及 10 min 观察时间内胸鳍、尾鳍的平均摆动次数(fin beat frequency during 10 min, $\text{FBF}_{10\text{min}}$),用以下公式进行计算^[11]: $\text{PTM} = t/10$; $\text{FBF}_{\text{movement}} = n/t$; $\text{FBF}_{10\text{min}} = n/10$, 式中, t 为实验鱼在 10 min 内实际运动的时间(min), n 为胸鳍或尾鳍在 10 min 内摆动的次数(次)。

1.5 数据统计 实验数据以 Excel 进行常规计算后,采用 SPSS 17 对温度与饥饿的交互作用进行双因素方差分析。不同组之间比较采用

单因素方差分析。统计数据均以平均值 \pm 标准误差 (Mean \pm SE) 表示,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 温度和饥饿对静止代谢率的影响 温度和饥饿对鲤鱼幼鱼的静止代谢率均有显著的影响 ($P < 0.001$) (图 1)。在 15℃ 与 25℃ 水温条件下,饥饿组的静止代谢率分别下降 19% 和 20%,而对照组(15℃ 或 25℃ 正常投喂组,以下类同)与饥饿组的静止代谢率随温度上升至 25℃ 分别增加 83% 和 80% ($P < 0.05$)。

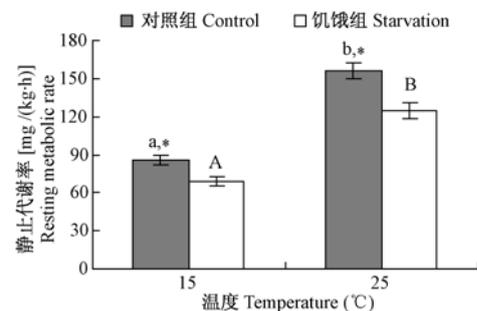


图 1 温度和饥饿对鲤鱼幼鱼静止代谢率的影响

Fig. 1 The effect of temperature and starvation on RMR in juvenile *Cyprinus carpio*

a, b (A, B): 不同字母表示不同温度组差异显著 ($P < 0.05$); * 表示饥饿与对照组之间差异显著 ($P < 0.05$)。

a, b (A, B): Different letters indicate significant difference between high and low temperature groups within either control or starvation groups ($P < 0.05$); *: Indicate significant difference between control and starvation groups within each temperature treatment ($P < 0.05$).

2.2 温度和饥饿对运动时间比的影响 温度和饥饿对运动时间比具有显著的影响且存在交互作用 ($P < 0.05$)。在 15℃, 饥饿导致运动时间比显著下降 ($P < 0.05$) (图 2), 但随着温度上升至 25℃, 饥饿组无显著变化, 而对照组显著下降 ($P < 0.05$), 导致 25℃ 饥饿组与对照组的运动时间比无显著差异。

2.3 温度和饥饿对鲤鱼幼鱼胸鳍、尾鳍活动期摆动频率及观察期平均摆动次数的影响 温度和饥饿对胸鳍和尾鳍摆动频率的影响十分相似, 且存在交互作用。在 15℃ 饥饿组和对照组胸鳍和尾鳍摆动频率均无显著差异。随着温度

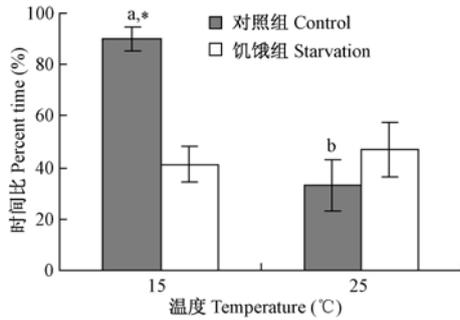


图2 温度和饥饿对鲤鱼幼鱼运动时间比的影响

Fig. 2 The temperature and starvation on PTM in juvenile *Cyprinus carpio*

a, b; 不同字母表示不同温度组差异显著;

* 表示饥饿与对照组之间差异显著 ($P < 0.05$).

a, b; Different letters indicate significant difference between high and low temperature groups ($P < 0.05$);

* : Indicate significant difference between control and starvation groups within each temperature treatment ($P < 0.05$).

上升至 25°C, 仅饥饿组摆动频率显著上升 ($P < 0.05$) (图 3), 而对照组无显著变化 (数值上甚至有所下降)。造成 25°C 饥饿组胸鳍、尾鳍摆动频率显著高于对照组 ($P < 0.05$)。

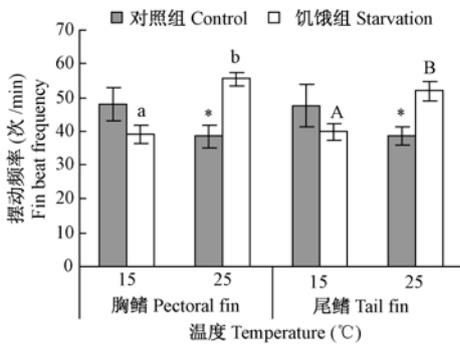


图3 温度和饥饿对鲤鱼幼鱼胸鳍、尾鳍活动期摆动频率的影响

Fig. 3 The effect of temperature and starvation on FBF_{movement} of pectoral and tail fins

in juvenile *Cyprinus carpio*

a, b(A, B); 不同字母表示不同温度组差异显著;

* 表示饥饿与对照组之间差异显著 ($P < 0.05$).

a, b(A, B); Different letters indicate significant difference between high and low temperature groups ($P < 0.05$);

* : Indicate significant difference between control and starvation groups within each temperature treatment ($P < 0.05$).

温度和饥饿对胸鳍、尾鳍的平均摆动次数影响显著且存在交互作用 ($P < 0.05$)。在 15°C 饥饿导致胸鳍、尾鳍平均摆动次数的显著下降 ($P < 0.05$), 随着温度上升至 25°C, 饥饿组胸鳍、尾鳍平均摆动次数无显著变化, 而对照组显著下降 ($P < 0.05$) (图 4), 导致 25°C 饥饿组平均摆动次数显著高于对照组 ($P < 0.05$)。

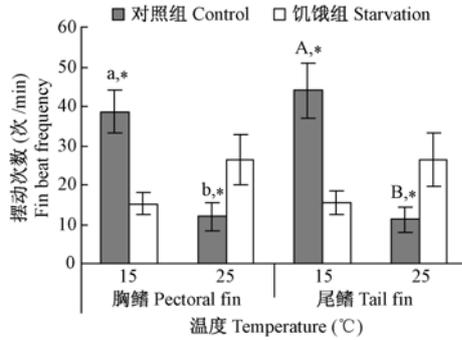


图4 温度和饥饿对鲤鱼幼鱼观察期胸鳍、尾鳍平均摆动次数的影响

Fig. 4 The effect of temperature and starvation on FBF_{10min} of pectoral and tail fins in juvenile

Cyprinus carpio

a, b(A, B); 不同字母表示不同温度组差异显著;

* 表示饥饿与对照组之间差异显著 ($P < 0.05$).

a, b(A, B); Different letters indicate significant difference between high and low temperature groups ($P < 0.05$);

* : Indicate significant difference between control and starvation groups within each temperature treatment ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 温度和饥饿对鲤鱼幼鱼静止代谢率的影响

鱼类静止代谢率是反映其生理状态的常用指标, 因此备受关注。一般情况下, 鱼类在适宜温度范围内, 静止代谢率随环境温度的上升而升高。有报道显示在水温从 15°C 上升至 25°C 后鳊鱼 (*Parabramis pekinensis*) 幼鱼静止代谢率上升了约 65% [4], 瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*) 幼鱼的静止代谢率上升了约 48% [20]。在本研究中, 10°C 的温度上升导致对照组与饥饿组的鲤鱼幼鱼静止代谢率分别上升了 83% 和 80%, 对鲢鱼 (*Silurus asotus*) 的研究结果与鲤鱼接近, 约 87% [25], 而 Miklos 发现底栖的暖

水性的豹纹鲨 (*Triakis semifasciata*), 周围水环境温度波动很大, 10℃ 的温度上升使其静止代谢率增加了 113%^[21], 本研究中的鲤鱼处于中间水平。可能不同的鱼类由于自身生理状况及所处生态环境的不同, 随着温度的升高, 其身体各器官活性增强及各种酶活性提高的幅度有着较大差异。

在长期饥饿状态下鱼类对其身体贮能的利用存在着两个相悖的适应需求: 一方面通过降低代谢水平可以减少能量消耗, 以使有限的身体贮能维持更长的生存时间; 另一方面尽可能将代谢保持在相对较高的水平, 以保证在重新获得食物供应或面临其他环境胁迫时能产生适当的应激反应^[14]。在饥饿过程中, 大多数鱼类的静止代谢率会随饥饿时间的延长逐渐下降^[19]。相关文献报道, 在 25℃ 条件下南方鲇 (*S. meridionalis*) 饥饿 14 d 后, 其静止代谢率下降了约 41%^[26]。本研究中, 在 15℃ 和 25℃ 的条件下, 饥饿导致静止代谢率分别降低了 19% 和 20% (下降幅度基本一致)。而鲇鱼在 25℃ 饥饿两周静止代谢率下降了约 26%^[19], 介于南方鲇和鲤鱼之间。相比之下, 南方鲇的静止代谢率下降得更快, 在遭遇食物短缺时, 南方鲇采用了更快地降低代谢水平的方式来适应饥饿环境, 这可能与南方鲇的生态习性有着密切的关系。而作为活泼好动的杂食性鱼类鲤鱼, 频繁摄食, 但单次摄食量小, 需要保持相对较高的代谢水平以满足日常觅食、逃避敌害等活动的能量需求。

不同温度条件下, 野外环境中的食物资源条件存在差异, 日常代谢消耗对生理储存能量造成的压力不同, 因此不同温度下鲤鱼静止代谢率对饥饿的反应可能不同, 然而本研究发现, 鲤鱼的静止代谢率对饥饿的反应在温度上具有保守性。

3.2 温度和饥饿对鲤鱼幼鱼自发运动的影响

对大西洋鲑鱼的研究发现其自发运动随温度升高而增加^[13]。而本研究中对照组鲤鱼自发运动(平均摆动次数)随温度上升至 25℃ 显著下降, 主要是通过运动时间比的下降实现, 摆动

频率的下降并不显著。有研究发现海鲫的胸鳍摆动频率与日常代谢相关^[12], 而在本研究中, 温度上升导致代谢率上升, 但活动性却有所下降。说明在不同温度下二者之间不存在关联。可能是因为静止代谢率随生理条件和环境状况变化较为剧烈, 而自发运动对代谢率变化的贡献相对较少。

动物在逆境条件下可能会降低自发运动来降低代谢消耗^[9]。Westerterp 发现老鼠 (*Mus musculus*) 在食物缺乏时会降低自发运动来节约能量^[15]。而一些鱼类, 如鲤鱼 (*Katsuwonus pelamis*) 在逆境下会通过增加自发运动来寻找合适的水域^[27]。本研究发现鲤鱼幼鱼自发运动水平受饥饿的影响显著, 有趣的是在低温下随着饥饿诱导自发运动下降(主要通过降低运动时间), 在高温下饥饿却诱导自发运动的增加(主要通过增加摆动频率来实现)。可能是因为不同温度下, 自然界食物资源丰富度不同, 鱼类代谢能量水平及能量储备也存在着较大差异, 鲤鱼在不同环境条件下采取不同的策略来应对饥饿胁迫。

本研究评价自发运动的指标中运动时间比主要反映实验鱼在 10 min 之内实际运动时间的长短, 而胸鳍摆动频率、尾鳍摆动频率则主要反应实验鱼胸鳍、尾鳍摆动速度的快慢。本研究中 15℃ 饥饿组的运动时间比显著小于对照组, 而摆动频率无显著差异, 导致饥饿组胸鳍、尾鳍平均摆动次数显著小于对照组。25℃ 饥饿组与对照组的运动时间比无显著差异, 而胸鳍、尾鳍摆动频率饥饿组显著大于对照组, 导致 25℃ 饥饿组胸鳍、尾鳍平均摆动次数显著大于对照组。可见, 在不同温度条件下, 饥饿处理对实验鱼自发运动特征的影响也不尽相同。

参 考 文 献

- [1] 王茂林, 姜志强, 张秀梅, 等. 温度和饥饿胁迫对红鳍东方鲀幼鱼生长和耗氧率的影响. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2009, 39(6): 1203-1207.
- [2] Fu S J, Xie X J. Nutritional homeostasis in carnivorous southern catfish (*Silurus meridionalis*): is there a mechanism for increased energy expenditure during

- carbohydrate overfeeding? *Comparative Biochemistry Physiology*, 2004, 139(3): 359–363.
- [3] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of fasting and repeat feeding on metabolic rate in southern catfish, *Silurus meridionalis* Chen. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 2005, 38(3): 191–198.
- [4] 陈波见, 曹振东, 付世建, 等. 温度对鳊鱼静止代谢和耐低氧能力的影响. *动物学杂志*, 2010, 45(5): 1–8.
- [5] Hunter J R. Swimming and feeding behavior of larval anchovy, *Engraulis mordax*. *Fishery Bulletin*, 1972, 70(3): 821–838.
- [6] Blaxter J H S, Staines M E. Food searching potential in marine fish larvae // Crisp D J. *European Marine Biology Symposium*. Cambridge: Cambridge University Press, 1971, 4: 467–485.
- [7] Blaxter J H S. Development of sense organs and behaviour of teleost larvae with special reference to feeding and predator avoidance. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1986, 115: 98–114.
- [8] Zhou T, Weis J S. Predator avoidance in mummichog larvae from a polluted habitat. *Journal of Fish Biology*, 1999, 54(1): 44–57.
- [9] Nilsson G E, Rosen P R, Johansson D. Anoxic depression of spontaneous locomotor activity in crucian carp quantified by a computerized imaging technique. *The Journal of Experimental Biology*, 1993, 180: 153–162.
- [10] Yliff M Y, Poncin P. Quantifying spontaneous swimming activity in fish with a computerized color video tracking system, a laboratory device using last imaging techniques. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2003, 28(1/4): 281–282.
- [11] Fu S J, Zeng L Q, Li X M, et al. The behavioural, digestive and metabolic characteristics of fishes with different foraging strategies. *The Journal of Experimental Biology*, 2009, 212(14): 2296–2302.
- [12] Tudorache C, Jordan A D, Svendsen J C, et al. Pectoral fin beat frequency predicts oxygen consumption during spontaneous activity in a labriform swimming fish (*Embiotoca lateralis*). *Environmental Biology of Fishes*, 2009, 84(1): 121–127.
- [13] Peterson R H, Anderson J M. Influence of temperature change on spontaneous locomotor activity and oxygen consumption of Atlantic salmon, *Salmo salar*, acclimated to two temperatures. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1969, 26(1): 93–109.
- [14] Mehner T, Wieser W. Energetics and metabolic correlates of starvation in juvenile perch (*Perca fluviatilis*). *Journal of Fish Biology*, 1994, 45(2): 325–333.
- [15] Westerterp K. How rats economize-energy loss in starvation. *Physiological Zoology*, 1977, 50(4): 331–362.
- [16] O' Connor K I, Taylor A C, Metcalfe N B. The stability of standard metabolic rate during a period of food deprivation in juvenile Atlantic salmon. *Journal of Fish Biology*, 2000, 57(1): 41–51.
- [17] Cook J T, Sutterl N A M, Meniven M A. Effect of food deprivation on oxygen consumption and body composition of growth-enhanced transgenic Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 2000, 188(1/2): 47–63.
- [18] Hung S S O, Liu W, Li H B, et al. Effect of starvation on some morphological and biochemical parameters in white sturgeon, *Acipenser Transmontanus*. *Aquaculture*, 1997, 151(1/4): 357–363.
- [19] 汤洪芬, 曹振东, 付世建. 饥饿对鲈鱼幼鱼静止代谢率的影响. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2007, 24(1): 72–76.
- [20] 陈锦云, 曹振东, 谢小军. 温度对瓦氏黄颡鱼幼鱼静止代谢的影响. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2003, 28(4): 618–620.
- [21] Miklos P, Katzman S M, Cechjr J J. Effect of temperature on oxygen consumption of the leopard shark, *Triakis semifasciata*. *Environmental Biology of Fishes*, 2003, 66(1): 15–18.
- [22] Myrick C A, Cech J J. Temperature influences on California rainbow trout physiological performance. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2000, 22(3): 245–254.
- [23] Fu S J. The specific dynamic action of southern catfish, *Silurus meridionalis* Chen, fed diets containing either raw or precooked corn starch or glucose. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2007, 33(2): 135–141.
- [24] Fu S J, Xie X J, Cao Z D. Effect of meal size on postprandial metabolic response in southern catfish (*Silurus meridionalis*). *Comparative Biochemistry and Physiology: A*, 2005, 140(4): 445–451.
- [25] 杨振才, 谢小军, 孙儒泳. 鲈鱼的静止代谢率及其与体重、温度和性别的关系. *水生生物学报*, 1995, 19(4): 368–373.
- [26] 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*). *Comparative Biochemistry and Physiology: A*, 2011, 158(4): 498–505.
- [27] Dizon A E. Effect of dissolved oxygen concentration and salinity on swimming speed of two species of tunas. *Fishery Bulletin*, 1977, 75(3): 649–653.