

DOI: 10.12264/JFSC2023-0304

禁食对 8 种幼鱼游泳运动能力的影响

林小菊^{1,2}, 俞立雄², 吴池杰^{2,3}, 王敏^{2,4}, 田辉伍², 王珂², 刘明典², 段辛斌²

1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;
2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 国家农业科学重庆观测实验站, 湖北 武汉 430223;
3. 长江大学动物科学技术学院, 湖北 荆州 434025;
4. 西南大学生命科学学院, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 为了探究不同种类幼鱼在禁食胁迫下的游泳能力, 本研究以青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、鲫(*Carassius auratus*)、长薄鳅(*Leptobotia elongata*)、泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)、台湾泥鳅(*Paramisgurnus dabryanus* ssp.) 8 种幼鱼为对象, 采用流速递增法测定了不同禁食时间(0 d、2 d、5 d、10 d、15 d)条件下 8 种鱼类的感应流速(U_{ind})、临界游泳速度(U_{crit})、爆发游泳速度(U_{burst})。结果表明: 8 种鱼类游泳能力均为感应流速<临界游泳速度<爆发游泳速度。感应流速平均值的变化范围在(6.12~12.78) cm/s, 其中草鱼、鲢和鳙的感应流速较接近且对流速的感应较敏感, 感应流速为 4.75~7.75 cm/s。8 种实验鱼的游泳速度存在显著差异($P<0.05$), 其中青鱼和长薄鳅的临界游泳速度和爆发游泳速度最高, 分别为(121.65±3.19) cm/s、(143.48±5.77) cm/s、(85.08±3.23) cm/s、(132.68±8.52) cm/s, 游泳能力较差的为台湾泥鳅[(19.28±1.90) cm/s、(31.53±2.14) cm/s]。禁食对感应流速的影响不显著($P>0.05$), 但实验鱼的临界游泳速度和爆发游泳速度随禁食时间的延长呈线性下降, 其中临界游泳速度的下降幅度较爆发游泳速度更为显著($P<0.05$)。在禁食 0 d 和 2 d 时, 实验鱼的临界和爆发游速无显著差异($P>0.05$); 禁食 5 d 时, 两者开始呈现下降趋势; 禁食 5 d 后, 临界和爆发游速分别下降了 13%~51%和 9%~39%。禁食 10 d 后, 临界和爆发游速分别下降了 29%~70%和 20%~55%, 其中 10 d 禁食期间的游泳速度降低幅度最为显著。因此, 禁食 10 d 是影响鱼类游泳能力的关键时期。禁食对幼鱼的感应流速无显著影响, 但临界游泳速度和爆发游泳速度受禁食时间影响明显, 且禁食时间越长, 游泳能力下降越显著。此外, 临界游泳速度与爆发游泳速度之间的差异可能源于不同游泳方式在能量消耗方面的差异。

关键词: 禁食; 感应流速; 临界游泳速度; 爆发游泳速度

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)12-1457-11

鱼类的游泳能力是指鱼类游泳的持续时间和强度^[1], 是鱼类重要的生存和生活习性之一, 游泳行为是多数鱼类捕食猎物、逃避敌害^[2]、迁徙^[3]等一系列生存活动的重要生理基础, 它对鱼类的生存和繁殖具有重要意义。感应流速(induced velocity, U_{ind})是鱼类所能感知到的最小水流速度^[4], 为过鱼设施的低流速设计提供科学依据。临界游

泳速度(critical swimming speed, U_{crit})是鱼类最大可持续流速, 也是鱼类所能克服的最大水流速度^[5]。该流速也被用于评价鱼类最大有氧运动能力, 与鱼类日常活动如洄游、巡游等有持久性运动有关。爆发游泳速度(burst swimming speed, U_{burst})也称逃逸速度, 是鱼类游泳的最大速度, 也是衡量鱼类无氧游泳能力的指标之一, 体现了鱼类瞬间的

收稿日期: 2023-11-12; 修订日期: 2023-12-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(32202942); 国家重点研发计划项目(2022YFC3202001); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2023TD09).

作者简介: 林小菊(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向为鱼类行为学. E-mail: 3232180093@qq.com

通信作者: 段辛斌, 研究员, 研究方向为渔业资源. E-mail: duan@yfi.ac.cn

最快冲刺能力^[6], 通常与捕食、逃逸、穿越急流等快速且短时间的运动有关。

鱼类生活在不同的环境中, 为了适应不同的环境, 它们会表现出不同的游泳特性。鱼类游泳能力与体长、水温、水流速度、溶解氧、禁食等因素密切相关。由于自然界食物资源空间分布的差异、季节周期的交替和环境的快速变化, 鱼类常常面临食物不足的胁迫^[7]。禁食会导致鱼类体内储存的能量和营养物质储备逐渐减少, 它们无法摄取足够的食物来维持自身正常的机体代谢和运动能力。同时, 在禁食时会导致肌肉中的酶类活性和肌肉代谢能力下降, 以及游泳所需要的能量物质也会减少, 这可能会进一步影响鱼类的游泳运动能力。

本研究选取分布于我国江河、湖泊中的 8 种淡水鱼类作为实验对象。青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)^[8]主要栖息于江河、湖泊中下层的静水水体中, 属肉食性鱼类。草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)^[8]主要栖息于江河、湖泊的中下层静水水体中, 属草食性鱼类。鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)^[8]主要栖息于江河干流及附属水体的上层, 属浮游生物食性的鱼类。鳙(*Aristichthys nobilis*)^[8]主要栖息于流水或较大静水水体的中上层, 属滤食方式取食的杂食性鱼类。这四种鱼被合称为“四大家鱼”, 是我国特有的经济鱼类, 是江河、湖泊洄游性鱼类。鲫(*Carassius auratus*)^[8]主要栖息于底层的静水水域中, 属植食性为主的杂食性鱼类。长薄鳅(*Leptobotia elongata*)^[8]主要栖息于江河中上游江段水流较缓的底部, 属偏动物食性的杂食性鱼。长薄鳅为长江上游特有鱼类, 为我国易危物种^[9], 长薄鳅是典型的河道洄游性鱼类。泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)^[10]、台湾泥鳅(*Paramisgurnus dabryanus ssp.*)^[11]主要栖息于有底淤泥的静水或缓和流水域中的底层, 是以动物性食物为主的杂食性动物。实验测量了 8 种幼鱼在禁食条件下的感应流速、临界游泳速度和爆发游泳速度, 了解不同禁食程度对这 8 种鱼的游泳能力影响的差异, 研究结果有助于更好地了解四大家鱼、鲫、长薄鳅、泥鳅和台湾泥鳅幼鱼的行为生态习性, 还可为其过鱼设施设计和增殖

放流环境的选择以及增殖放流技术的改进提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究于 2023 年 6—8 月在湖北监利长江四大家鱼老江河原种场开展, 实验所用鱼类均取自老江河原种场和四川水产养殖公司, 实验鱼活力正常, 外观无伤且鳞片完整。在实验前, 实验鱼在循环养殖水槽中暂养 2 周, 养殖水采自老江河。在暂养期间, 每日 8:00 和 17:00 投喂两次配合饲料, 投喂量约为暂养水体中实验鱼体重总量的 3%, 每日换水量约为暂养水体的 30%。实验期间, 养殖用水和实验用水均用双层 200 目滤网过滤的老江河水, 水温控制在 23~28 °C, 溶解氧 7.0~8.0 mg/L。

1.2 实验设计

每种鱼随机挑选规格相近的实验鱼 60 尾分成 3 组, 分别为感应流速测定组、临界游泳速度测定组和爆发游泳速度测定组, 每组 20 尾实验鱼, 初始体长和体重分别为: 青鱼(10.74±0.75) cm, (19.49±1.62) g; 草鱼(5.52±0.26) cm, (3.18±0.56) g; 鲢(3.53±0.21) cm, (0.78±0.13) g; 鳙(4.57±0.18) cm, (1.69±0.45) g; 鲫(3.32±0.17) cm, (0.98±0.04) g; 长薄鳅(5.49±0.19) cm, (1.89±0.21) g; 泥鳅(7.04±0.85) cm, (2.67±0.65) g; 台湾泥鳅(6.94±0.32) cm, (2.84±0.46) g。本研究设置 5 组禁食梯度, 分别为 0 d、2 d、5 d、10 d 和 15 d, 每个禁食梯度组均测定 4 尾鱼。实验开始时将实验鱼移至游泳能力测定装置密封区域内, 控制游泳水槽内环境条件(水温、水质等)与暂养水槽相同, 让实验鱼在低流速(5 cm/s)中适应 2 h。实验水温 23~28 °C, 溶解氧 7.0~8.0 mg/L。

1.3 实验装置

鱼类游泳速度测定设备购自丹麦 Loligo system 公司, 实验水槽主要由电动机、变频器、螺旋桨和游泳室组成。其工作原理是电动机的转速由变频器调节, 电动机带动螺旋桨旋转, 进而在游泳室中制造出流速可调的水流, 通过使用流速仪测量不同叶轮转数下的水流速度, 并据

此控制叶轮转速, 从而获得鱼类的游泳速度。环形实验水槽体积为 90 L, 游泳测试区域尺寸为 20 cm×20 cm×70 cm (图 1)。使用溶氧仪(上海维赛仪器公司的 YSI550A)测定溶氧, 流速仪(重庆水

文仪器厂 LS45A 型旋杯式)测定不同叶轮转速下环形实验水槽游泳区域内的流速, 建立鱼类游泳区域水流速度(m/s)与叶轮转速(r/min)之间的关系。

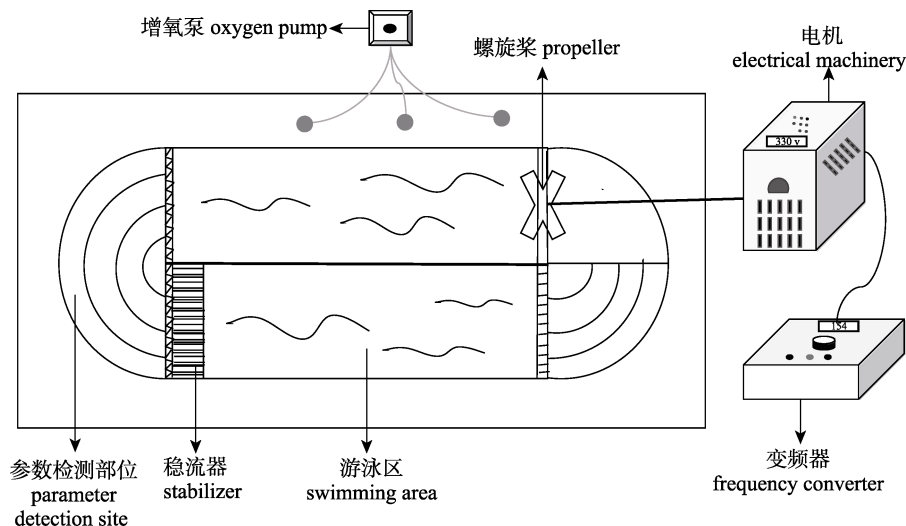


图 1 鱼类游泳能力测试水槽

Fig. 1 Annular flume for testing fish swimming capacity

1.4 游泳速度的测定

1.4.1 感应流速的测定 实验开始前, 测量实验鱼的体长与体重, 将单尾实验鱼放于游泳能力测试水槽的游泳室中, 在静水中适应 1 h 以消除在转移中对鱼类所造成的影响。当鱼类适应新环境后开始正式实验, 用微调的方式, 以 0.01 m/s 为初始速度每隔 20 s 逐步增大频率来调节水流速度, 速度增量始终为 0.01 m/s, 每次时间间隔为 20 s, 同时观察实验鱼的游动方向, 当实验鱼开始由顺水流游动转变为逆水流游动的行为时^[12-14], 记录此时的水流速度, 便为实验鱼的感应流速, 即绝对感应流速(U_{ind}^a)。

相对感应流速(U_{ind}^r , 单位为 BL/s)的计算公式为:

$$U_{ind}^r = U_{ind}^a / BL$$

1.4.2 临界游泳速度 游泳速度测定时先测量实验鱼体长、体重, 再将单尾实验鱼放入游泳室中, 在 0.5 BL/s (body length, BL)的流速下适应 20 min, 以消除转移过程的影响之后实验开始, 记录实验开始的时间。测定过程中, 在初始速度下(1.0 BL/s)持续游泳 20 min 后, 若实验鱼可再持续游泳

20 min 则不断增加水流速度, 速度增量(U_2)始终为 1.0 BL/s, 每次时间间隔(T_2)为 20 min, 直到实验鱼产生疲劳停止游泳, 疲劳的评定标准为实验鱼停在游泳室末端拦网 20 s 以上^[12-14]。疲劳后的实验鱼不再用于其他实验数据的测定。

绝对临界游泳速度(U_{crit}^a , 单位为 cm/s)的计算公式为:

$$U_{crit}^a = U_1 + (T_1 / T_2) \times U_2$$

式中, U_1 是实验鱼能够持续游泳 20 min 的最高流速(cm/s); U_2 是速度增量(1.0 BL/s); T_1 是实验鱼在最高流速下的游泳时间($T_1 < 20$ min); T_2 是时间间隔(20 min)。

相对临界游泳速度(U_{crit}^r , 单位为 BL/s)的计算公式为:

$$U_{crit}^r = U_{crit}^a / BL$$

1.4.3 爆发游泳速度 爆发游泳速度的测定方法与 U_{crit} 的测定方法相同, 但是在流速的递增周期和时间步长上的选择上有所不同。

游泳速度测定时先测量实验鱼体长、体重, 再将单尾实验鱼放入游泳室中, 在 0.5 BL/s 的流速下适应 1 h 以消除转移过程中的影响。测定过

程中,在初始速度下(1.0 BL/s)持续游泳 20 min 后,不断增加水流速度,速度增量(U_2)始终为 1.0 BL/s,每次时间间隔(T_2)为 20 s,直至实验鱼达到疲惫状态停止游泳^[12-13]。

绝对爆发游泳速度(U_{burst}^a , 单位为 cm/s)的计算公式为:

$$U_{burst}^a = U_1 + (T_1/T_2) \times U_2$$

式中, U_1 是实验鱼能够持续游泳 20 s 的最高流速(cm/s); U_2 为速度增量(1.0 BL/s); T_2 为时间间隔(20 s); T_1 为上次增速至鱼疲劳的时间($T_1 < 20$ s)。

相对爆发游泳速度(U_{burst}^r , 单位为 BL/s)的计算公式为:

$$U_{burst}^r = U_{burst}^a / BL$$

1.5 数据分析

实验数据使用 Excel 2016 进行常规计算,随后采用 SPSS 25.0 统计软件进行相关数据统计分析。采用双因素方差分析(two-way ANOVA)检测种类和禁食程度对游泳速度相关参数的影响;不同种类和不同禁食程度下的 U_{ind} 、 U_{crit} 和 U_{burst} 比较采用单因素方差分析(one-way ANOVA),利用 Duncan 法进行多重比较及显著性检验。统计值均以平均值±标准差(mean±SD)表示,显著性概率临界值为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同禁食程度下 8 种幼鱼感应流速、临界流速、爆发流速的比较

不同禁食天数中 8 种实验鱼的 U_{ind} 对比如图 2 所示,禁食 0 d、2 d、5 d 和 10 d,实验鱼种类之间感应流速存在显著差异($P < 0.05$),禁食 0 d 时 U_{ind}^a 平均值台湾泥鳅(11.94±0.82) cm/s 显著高于其他鱼类(6.71±0.60) cm/s,而 U_{ind}^r 平均值鲫(2.26±0.09) BL/s 显著高于其他鱼类(0.88±0.08) BL/s;第 15 天台湾泥鳅、长薄鳅、鲫的平均 U_{ind}^a 和 U_{ind}^r 也分别显著高于其他鱼类 4.79 cm/s 和 0.77 BL/s。

不同禁食程度下 8 种鱼 U_{crit} 不同(图 2)。实验鱼种类之间临界游泳速度存在显著差异($P < 0.05$),禁食 0 d 时 U_{crit}^a 青鱼最高,为(121.65±3.19) cm/s,

而 U_{crit}^r 鲫最高,为(16.43±0.23) BL/s; U_{crit}^a 和 U_{crit}^r 均为台湾泥鳅最低,分别为(24.15±2.16) cm/s 和(3.48±0.31) BL/s;禁食 5 d 时,8 种实验鱼临界游泳速度开始出现变化,青鱼 U_{crit}^a (105.55±4.77) cm/s 最高,鲫 U_{crit}^r 最高,为(11.60±0.71) BL/s;长薄鳅、草鱼次之,鳙和鲢再次之, U_{crit}^a 和 U_{crit}^r 均为泥鳅[(27.43±1.13) cm/s、(3.61±0.15) BL/s]、台湾泥鳅[(19.28±1.90) cm/s、(2.79±0.27) BL/s]最低;经历禁食 10 d 和 15 d 时,8 种实验鱼游泳速度发生显著变化,但 10 d 和 15 d 禁食组间没有显著差异($P > 0.05$)。禁食 15 d 时长薄鳅 U_{crit}^a 和 U_{crit}^r 分别为(51.33±2.33) cm/s、(10.63±0.86) BL/s 最高,台湾泥鳅 U_{crit}^a 和 U_{crit}^r 分别为(17.03±1.94) cm/s、(1.50±0.29) BL/s 最低;根据图 2 中不同禁食程度下 U_{crit}^a 变化可知,青鱼的 U_{crit} 随禁食天数的增加降低得最快,台湾泥鳅和鲫降低的最慢。

不同禁食程度下 8 种鱼 U_{burst} 不同(图 2)。实验鱼种类之间爆发游泳速度存在显著差异($P < 0.05$),禁食 0 d 时青鱼 U_{burst}^a (143.48±5.77) cm/s 最高,而 U_{burst}^r 长薄鳅最高(24.17±1.55) BL/s,草鱼次之,泥鳅、鳙、鲫和鲢再次之, U_{burst}^a 和 U_{burst}^r 均为台湾泥鳅最低,分别为(47.38±1.57) cm/s 和(6.82±0.23) BL/s;禁食 5 d 时,8 种实验鱼的爆发游泳速度开始出现变化,青鱼 U_{burst}^a (130.40±3.41) cm/s 最高,长薄鳅 U_{burst}^r (19.51±0.48) BL/s 最高,草鱼次之,鳙、鲢和鲫再次之, U_{crit}^a 和 U_{crit}^r 均为泥鳅和台湾泥鳅最低,分别为(58.03±2.06) cm/s、(7.65±0.27) BL/s 和(31.53±2.14) cm/s、(4.56±0.31) BL/s;经历禁食 10 d 和 15 d 时,8 种实验鱼游泳速度发生显著变化,但 10 d 和 15 d 禁食组间没有显著差异($P > 0.05$)。禁食 15 d 时长薄鳅 U_{burst}^a 和 U_{burst}^r 分别为(107.58±13.79) cm/s、(19.78±2.54) BL/s 最高,台湾泥鳅分别为(16.92±2.63) cm/s、(2.19±0.34) BL/s 最低;根据图 2 中不同禁食程度下 U_{burst}^a 变化可知,青鱼和长薄鳅的 U_{burst} 随禁食天数的增加降低得最快。

在 0~15 d 的禁食范围内,这 8 种鱼的游泳速度都是 U_{burst} 高于 U_{crit} , U_{ind} 显著低于 U_{burst} 和 U_{crit} (图 2)。

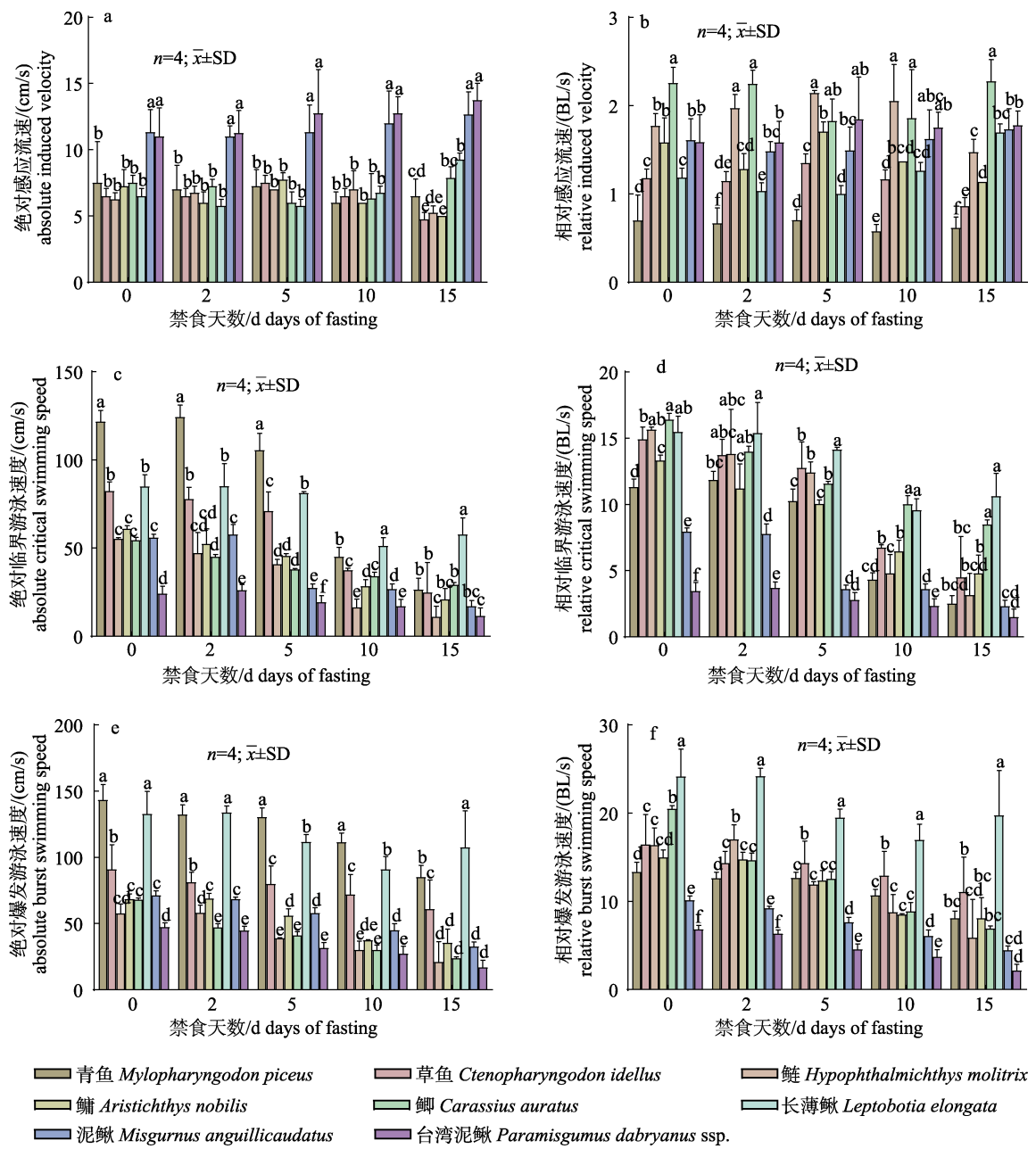


图 2 8 种鱼类在不同禁食时间下游泳速度的比较
不同小写字母表示同一禁食处理不同鱼类间游泳速度差异显著($P < 0.05$).
Fig. 2 Comparison of swimming speed of eight fish species at different fasting times
Different lowercase letters indicate significant differences in swimming speed between
different fish with the same fasting treatment ($P < 0.05$).

2.2 种类和禁食对 8 种实验鱼游泳参数影响

以这 8 种鱼类的游泳速度作为协变量, 种类和禁食为固定变量, 对实验得到的所有游泳速度进行双因素协方差分析。结果显示, 种类对 U_{ind} 有显著性影响, 禁食对 U_{ind} 无显著性影响, 种类和禁食的交互效应均对 8 种实验鱼的 U_{ind} 有显著

影响($P < 0.05$)。种类对 U_{crit} 有显著性影响, 禁食对 U_{crit} 有显著性影响, 种类和禁食的交互效应均对 8 种实验鱼的 U_{crit} 有显著影响($P < 0.05$)。种类对 U_{burst} 有显著性影响, 禁食对 U_{burst} 有显著性影响, 种类和禁食的交互效应均对 8 种实验鱼的 U_{burst} 有显著影响($P < 0.05$)(表 1)。

表 1 种类和禁食对实验鱼游泳参数影响的
双因素方差分析表

Tab. 1 The effect of species and fasting on swimming
parameters based on a two-way analysis of variance (ANOVA)

$n=4; \bar{x} \pm SD$

处理组 treatment group	种类 species	禁食 fasting	交互效应 interaction effect
自由度 degree of freedom	7	4	28
U_{ind}	$F=58.782$ $P<0.0001^*$	$F=1.369$ $P=0.249$	$F=2.959$ $P<0.0001^*$
U_{crit}	$F=250.874$ $P<0.0001^*$	$F=340.406$ $P<0.0001^*$	$F=18.675$ $P<0.0001^*$
U_{burst}	$F=291.755$ $P<0.0001^*$	$F=118.149$ $P<0.0001^*$	$F=1.919$ $P=0.008^*$

注: *表示影响显著($P<0.05$).

Note: * indicates a significant effect ($P<0.05$).

2.3 禁食胁迫下 8 种鱼感应流速、临界流速、爆发流速的变化

8 种鱼的 U_{ind} 随着禁食天数的变化见图 3。 U_{ind} 平均值的变化范围在 4.75~13.75 cm/s, 其中草鱼最低, 为 4.75 cm/s, 其次是鲢(5.25 cm/s)和鳙(5.00 cm/s), 再次是青鱼、鲫、长薄鳅和泥鳅, 台湾泥鳅(13.75 cm/s)最高, 台湾泥鳅的 U_{ind} 显著高于其他鱼类 40%~50%。长薄鳅、台湾泥鳅、泥鳅、鲫的 U_{ind} 有所升高, 从 0 d 到 15 d 时分别增加了 2.75 cm/s、2.75 cm/s、1.35 cm/s 和 0.38 cm/s。

随禁食天数增加, 实验鱼 U_{crit} 均逐渐降低(图 3)。禁食 0 d 和 2 d 时, 实验鱼的 U_{crit} 均无显著差异($P>0.05$), 禁食 5 d 时 U_{crit} 开始出现降低的趋势, 但均显著高于禁食 10 d 和 15 d 时($P<0.05$)。在禁食 10 d 时, 青鱼和鲢降低得最为显著, 其 U_{crit} 分别比 0 d 降低了 62.9%和 70.3%, 其次是草鱼、鳙和泥鳅降低了 50%左右, 其他鱼类降低了 30%左右。

随禁食天数增加, 实验鱼 U_{burst} 均逐渐降低(图 3)。禁食 0 d、2 d, 实验鱼的 U_{burst} 无显著差异($P>0.05$), 第 5 天时开始降低, 前两天均显著高于禁食 10 d 和 15 d ($P<0.05$)。禁食 10 d 时, 鲫的 U_{burst} 比 0 d 的最为显著, 降低了 55.5%, 其次是鲢、鳙、泥鳅、台湾泥鳅的降低了 40%左右, 青鱼、草鱼、长薄鳅降低了 25%。

随着禁食天数的增加, 对 U_{ind} 无显著影响

($P>0.05$), 但对 U_{crit} 和爆发流速有显著影响($P<0.05$), 其中 U_{crit} 比爆发流速降低的更为显著。从 0 d 禁食到 10 d 时实验鱼的 U_{crit} 和爆发流速分别下降了 29%~70%和 21%~48%。

3 讨论

3.1 8 种幼鱼感应流速和游泳能力比较

本研究结果显示, 感应流速平均值最低为(6.35±0.23) cm/s, 最高为(12.30±0.48) cm/s, 其中草鱼、鲢和鳙的感应流速较接近且对流速的感应较敏感, 感应流速为 4.75~7.75 cm/s, 其次是青鱼、鲫和长薄鳅, 泥鳅和台湾泥鳅对流速的感应最为迟钝, 显著高于其他鱼类 40%~50%。这些结果表明不同鱼类种类之间感应流速存在显著差异。生活在不同水层的鱼类均表现出对一定水流速度的适应性, 其中, 上层鱼类往往对水流具有相对较高的敏感度^[15]。此外, 水流速度对于具有洄游习性的鱼类而言, 是寻找洄游路径的重要依据。因此, 洄游性鱼类对水流速度的感知相对敏锐^[16-17]。青鱼和草鱼属于中下层鱼类, 鲢和鳙属于中上层鱼类, 这 4 种鱼类都属于江河洄游性鱼类, 具有较强的游泳能力; 长薄鳅、泥鳅、台湾泥鳅属于底层鱼类, 但长薄鳅是典型的性洄游鱼类, 因此, 对流速的感应更为灵敏。

游泳能力作为鱼类生存的关键生理特性之一^[18], 在各类鱼中呈现出显著的差异, 这与鱼体的形态结构、能量代谢特性、选择压力^[19]以及栖息地水流环境等因素密切相关^[20]。本研究, 青鱼、草鱼和长薄鳅的临界游泳速度和爆发游泳速度显著高于鳙、泥鳅、鲢和鲫, 其中台湾泥鳅的游泳速度最慢。体长对鱼类游泳能力有着重要影响, 通常较大的鱼会比较小的鱼类游泳速度快, 耐力也会更强。青鱼体长比长薄鳅和草鱼大一倍左右, 因此其具备较强的游泳能力。目前研究发现, 流线型的体型是鱼类游泳效率高、游泳能力强的重要因素之一^[21-22]。青鱼和草鱼的体型呈圆筒形, 而鲢、鳙和鲫的体型则较为侧扁。本研究中, 青鱼和草鱼的临界游泳速度高于鲢、鳙和鲫。由于圆筒形的体型更符合流线型, 青鱼和草鱼在游泳运动中受到的阻力较小, 游泳速度更快, 这

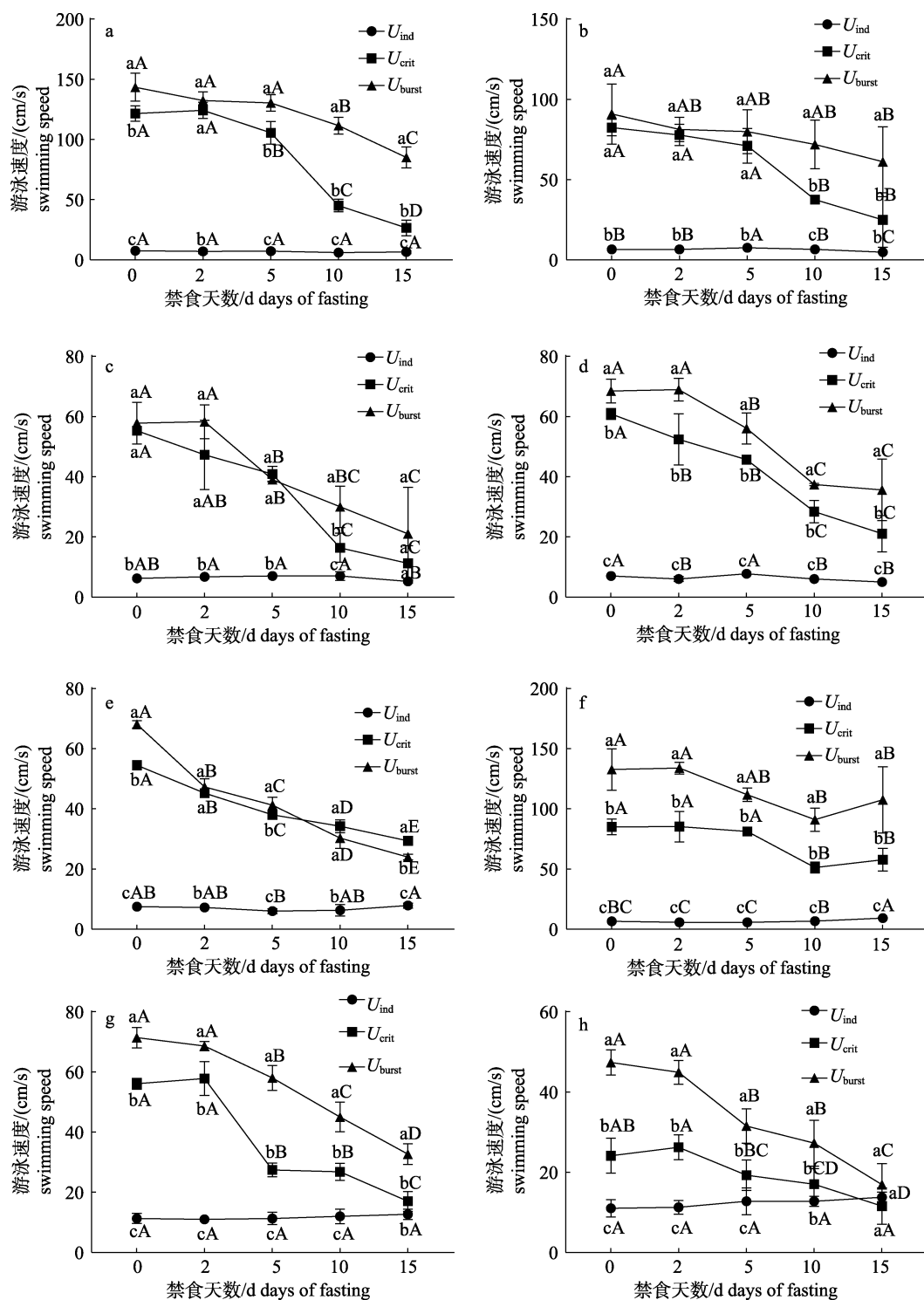


图 3 禁食对 8 种鱼类游泳速度的影响

a. 青鱼; b. 草鱼; c. 鲢; d. 鳊; e. 鲫; f. 长薄鳅; g. 泥鳅; h. 台湾泥鳅。不同小写字母表示同一禁食处理组不同游泳速度间差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示不同禁食处理组间某一特定游泳速度差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 3 Effect of fasting on swimming speed of eight fish species

a. *Mylopharyngodon piceus*; b. *Ctenopharyngodon idellus*; c. *Hypophthalmichthys molitrix*; d. *Aristichthys nobilis*; e. *Carassius auratus*; f. *Leptobotia elongata*; g. *Misgurnus anguillicaudatus*; h. *Paramisgurnus dabryanus* ssp. Different lowercase letters indicate significant differences in swimming speeds of same treatment group ($P < 0.05$); different capital letters indicate significant differences in a particular swimming speed between different fasting treatment groups ($P < 0.05$).

有助于灵活地躲避敌害^[23-24]。相比之下,侧扁形的鲢、鳙和鲫在游泳时受到的阻力较大,游泳速度相对较慢。本研究中,长薄鳅的游泳速度显著大于泥鳅和台湾泥鳅。这可能与两者所处的生境水流速度及生活习性有关。长薄鳅为底层鱼类,喜栖于水流速度较缓的水域中的石砾缝间,是凶猛肉食性鱼类,捕食能力较强。且在江河涨水时,长薄鳅会表现出溯水上游的习性,因此具有更强的游泳能力。泥鳅和台湾泥鳅都为底栖鱼类,喜栖息于水流较缓的底层和有淤泥的静水或池塘边的浅水区域,因此游动能力较弱。

本研究发现,感应流速显著小于临界游泳速度和爆发游泳速度,同时实验鱼的爆发游泳速度大于临界游泳速度。这是因为感应流速是鱼类所能感知到的最小水流速度^[4];而临界游泳速度是鱼类最大的可持续流速^[25],持续游泳时间体现了鱼类在一定水流冲击下的耐受能力,游泳时间越长则表明其耐受能力也就越强,同时也是鱼类所能克服的最大水流速度;爆发游泳速度是鱼类游泳的最大速度,是体现出鱼类瞬间的最快冲刺能力^[6],一般短时间内不会受到环境等因素的影响。

3.2 禁食胁迫对 8 种鱼游泳能力的影响

由于自然环境中食物来源会随着季节、水域和水流等产生波动,鱼类常常面临短期或长期的禁食胁迫^[26]。随着禁食时间的延长,机体主要的储能物质逐渐耗竭,最终导致游泳能力的下降^[27]。在本研究中,实验鱼的临界游泳速度随禁食时间增加呈线性下降。在禁食 10 d 时,青鱼和鲢降低得最为显著,其临界游泳速度分别比 0 d 降低了 62.9%和 70.3%。在王吉桥等^[28]的研究中发现,鲤(*Cyprinus carpio*)、鳙、草鱼、鲢不同种鱼苗的耐禁食能力中鲢的耐禁食能力最弱。青鱼相较于其他实验鱼体型大能量储备也较多,但游泳能力强,消耗的能量也相应的较多,故在禁食状态下游泳能力下降幅度较大。在面临食物缺乏时,为了增加获得食物的机会,鱼类会减少自身能量的消耗,在短期内的禁食胁迫下通常会促使鱼类自身的游泳能力增强,以维持更长的生存时间。长薄鳅随禁食时间增加游泳速度降低趋势没有四大家鱼显著,在禁食 10 d 时,其临界游泳速度比 0 d 降低了

39.6%,但 15 d 比 10 d 时又增加了 12.7%。这可能是因为长薄鳅是偏动物食性的杂食性鱼类^[29],具有胃,消化道较短,在进食初期,胃排空速度较快,但随着胃饱满度的降低,排空速度逐渐减慢^[30],故耐禁食能力较强,游泳速度随着禁食时间的增加降低得相对较小。同时,随着胃饱满度下降,长薄鳅开始寻找食物又促使其游泳能力增强。

在本研究中,实验鱼的爆发游泳速度均随禁食时间增加呈线性下降。在禁食 10 d 时,鲫的爆发游泳速度降低得最为显著,其爆发游泳速度比 0 d 降低了 55.4%。而与彭韩柳依等^[31]研究结果相反,14~28 d 禁食对快速启动逃逸速度没有显著影响,这可能是因为鱼体差异,鱼体较小耐禁食能力较差,故爆发游泳速度降低最为显著。青鱼和草鱼的爆发游泳速度在禁食时间增加的情况下仍然高于其他鱼类,这一现象表明这两种鱼的爆发游泳速度受禁食的影响相对较小,可能与圆筒形态特征有助于鱼类在各种环境条件下保持较高的游泳效率和耐力。长薄鳅的爆发游泳速度在禁食 15 d 时游泳速度反而比 10 d 的增加了 18.2%。这可能是由于长薄鳅作为一种凶猛的肉食性鱼类,在经历 10 d 的禁食后已达到其耐饥极限,因此迫切寻找食物。而成功捕食的关键因素在于有着较高的爆发运动速度。

本研究发现,禁食对感应流速没有显著影响,但 0 d 禁食到 10 d 实验鱼的临界游泳速度和爆发游泳速度分别下降了 29%~70%和 21%~48%。这表明感应流速受禁食影响相对较小,这可能与鱼类具有逆水流而游动的习性有关。感应水流速度主要取决于鱼体侧线器官对水流方向的感知,当水流速度达到一定阈值时鱼类发生向下游动的趋势,鱼类将会选择逆水流游动的行为^[15]。这一行为不受到能量消耗的影响,是鱼类为生存进化而来的行为机制。禁食后临界游泳速度和爆发游泳速度均显著下降,但第 10 天禁食时导致临界游泳速度的下降幅度比爆发游泳速度更为显著,说明临界游泳速度对禁食更为敏感。在禁食状态下,鱼类通过调整和转移内脏器官内的内源性能量物质储备,以保持肌肉组织的生理活性和游泳能力^[32-33]。因此,相较于肌肉组织的能量物质,

鱼类禁食对肝脏等组织能量物质的消耗更为显著。由于临界游泳速度是有氧运动, 运动持续时间较长, 因此依赖循环系统的功能, 给心肺、肝脏等组织来提供能量物质; 而爆发游泳速度是一种无氧运动, 更多地依赖于肌肉自身的能量物质储备^[31]。不同的禁食程度对鱼类游泳方式的影响存在一定的差异, 使得临界游泳速度对禁食的敏感度比爆发游泳速度更高。

综上所述, 游泳能力是鱼类成功捕食的关键指标, 禁食对 8 种实验幼鱼的临界游泳速度、爆发游泳速度有显著性影响, 10 d 禁食时游泳速度降低的幅度最为显著, 禁食 10 d 是禁食对鱼类游泳能力影响的关键点。这表明随着禁食时间增加会削弱幼鱼的游泳能力, 从而降低其摄食、避险以及洄游的能力, 这种现象可能进一步导致鱼类生存和繁殖能力的下降。实验比较结果显示, 在各类食性鱼类中, 临界游泳速度和爆发游泳速度对禁食的敏感度存在显著差异, 不同种类鱼类的游泳能力对禁食的响应可能与其形态结构、能量代谢特性、生活习性及栖息环境等有关。因此, 在鱼类增殖放流前, 要选择经过营养加强和游泳能力驯化较好的鱼类, 这对于提高鱼类增殖放流后的生存能力和强化放流效果都具有重要意义。

参考文献:

- [1] Shi X T, Chen Q W, Huang Y P, et al. Review on the methods to quantify fish's ability to cross velocity barriers in fish passage[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(22): 6967-6972. [石小涛, 陈求稳, 黄应平, 等. 鱼类通过鱼道内水流速度障碍能力的评估方法[J]. *生态学报*, 2011, 31(22): 6967-6972.]
- [2] Long Z M, Zhu F Y, Duan X B, et al. Responses of locomotor ability of juveniles of the four major Chinese carps to predation stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(2): 342-351. [龙珍满, 朱峰跃, 段辛斌, 等. 四大家鱼幼鱼运动能力对捕食胁迫的响应[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(2): 342-351.]
- [3] Ni H, Rong G W, Zheng Q H, et al. Analysis on fish passing efficiency problems in design and operation of fishways[J]. *Pearl River*, 2019, 40(4): 76-81. [倪欢, 戎贵文, 郑青辉, 等. 鱼道设计与运行过程中影响过鱼效率的相关问题分析[J]. *人民珠江*, 2019, 40(4): 76-81.]
- [4] Wang Y M, Li Z M, Tu Z Y, et al. Fishway design based on the swimming ability of two *Schizothorax* species in the Yalung River, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2785-2792. [王永猛, 李志敏, 涂志英, 等. 基于雅砻江两种裂腹鱼游泳能力的鱼道设计[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2785-2792.]
- [5] Kokita T, Mizota T. Male secondary sexual traits are hydrodynamic devices for enhancing swimming performance in a monogamous filefish *Paramonacanthus japonicus*[J]. *Journal of Ethology*, 2002, 20(1): 35-42.
- [6] Hechter D T, Hasler C T. Repeatability of burst swimming performance in medaka (*Oryzias latipes*)[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2019, 45(4): 1299-1307.
- [7] 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. [黄悌基, 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.]
- [8] Ding R H. The fishes of Sichuan, China[M]. Chengdu: Sichuan Scientific & Technical Publishers, 1994, 1-641. [丁瑞华. 四川鱼类志[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994: 1-641.]
- [9] Liu H Y, Xiong F, Duan X B, et al. Estimating population parameters and abundance of Elongate loach (*Leptobotia elongata*) in the Jiangjin section of the Upper Yangtze River[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2016, 51(6): 993-1002. [刘红艳, 熊飞, 段辛斌, 等. 长江上游江津江段长薄鳅种群参数和资源量评估[J]. *动物学杂志*, 2016, 51(6): 993-1002.]
- [10] Liu X R, Ma X B, Zhang N, et al. Effects of chlorogenic acid in feed on the growth performance, digestive enzyme activity, immune function, and antioxidant capacity of loach (*Misgurnus anguillicaudatus*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(10): 99-112. [刘晓蕊, 马喜波, 张南, 等. 饲料中绿原酸对泥鳅生长性能、消化酶活性、免疫功能及抗氧化能力的影响[J]. *水产学报*, 2023, 47(10): 99-112.]
- [11] Miao D X, Chen J H, Yan M, et al. Study on salinity tolerance of juvenile *Paramisgurnus dabryanus* ssp.[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(4): 138-142. [苗德霞, 陈嘉豪, 闫密, 等. 台湾泥鳅幼鱼耐盐特性研究[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(4): 138-142.]
- [12] Cai L, Katopodis C, Johnson D, et al. Case study: Targeting species and applying swimming performance data to fish lift design for the Huangdeng Dam on the upper Mekong River[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 122: 32-38.
- [13] Cai L, Hou Y Q, Johnson D, et al. Swimming ability and behavior of Mrigal carp *Cirrhinus mrigala* and application to

- fishway design[J]. Aquatic Biology, 2018, 27: 127-132.
- [14] Hu J L, Wang P Y, Chen H B, et al. Effects of the diversity of flow velocity on the upstream migration behavior of grass carp in the reaches of spur dikes[J]. Water, 2023, 15(17): 3091.
- [15] Zhang L B, Yao W Z, Song Y Q. Preliminary study on the induction velocity of three Cobitidae species in Heishui River[J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43(2): 102-107. [张连博, 姚维志, 宋一清. 黑水河 3 种鳅科鱼类感应流速的初步研究[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(2): 102-107.]
- [16] Yang Y, Yan Z M, Qiao Y. Description and review of hydraulic conditions of fish habitats[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(2): 125-130. [杨宇, 严忠民, 乔晔. 河流鱼类栖息地水力学条件表征与评述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 125-130.]
- [17] Bai Y Q, Lu B, Luo J, et al. Induction velocity of juvenile grass carp, silver carp, and darkbarbel catfish[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 2085-2089. [白艳勤, 路波, 罗佳, 等. 草鱼、鲢和瓦氏黄颡鱼幼鱼感应流速的比较[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2085-2089.]
- [18] Brett J R. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1964, 21(5): 1183-1226.
- [19] Fu C, Fu S J, Yuan X Z, et al. Predator-driven intra-species variation in locomotion, metabolism and water velocity preference in pale chub (*Zacco platypus*) along a river[J]. The Journal of Experimental Biology, 2015, 218: 255-264.
- [20] Fu X, Fu C, Fu S J. Comparison of swimming ability among five freshwater fish species[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(5): 1629-1635. [付翔, 付成, 付世建. 五种淡水鱼类幼鱼游泳能力的比较[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1629-1635.]
- [21] Fu S J, Cao Z D, Yan G J, et al. Integrating environmental variation, predation pressure, phenotypic plasticity and locomotor performance[J]. Oecologia, 2013, 173(2): 343-354.
- [22] Fu S J, Cao Z D, Zeng L Q, et al. Fish swimming: Strategy and adaptive evolution[M]. Beijing: Science Press, 2014. [付世建, 曹振东, 曾令清, 等. 鱼类游泳运动: 策略与适应性进化[M]. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [23] Wang X, Liao D Y, Yu L X, et al. Effect of temperature gradient on the critical swimming speed of four major Chinese carps[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(2): 53-61. [王晓, 廖冬芽, 俞立雄, 等. 温度梯度对四大家鱼临界游泳速度的影响[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(2): 53-61.]
- [24] Cai L, Fang M, Johnson D, et al. Interrelationships between feeding, food deprivation and swimming performance in juvenile grass carp[J]. Aquatic Biology, 2014, 20(1): 69-76.
- [25] Yu Y, Xie M Y. Evaluation status of swimming ability in fish[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(19): 116-118. [于洋, 谢明原. 鱼类游泳能力评价指标及其测定方法研究现状[J]. 农业与技术, 2021, 41(19): 116-118.]
- [26] Xiong Y Y, Chen L, Li Y, et al. Swimming ability of juvenile tiger puffer, *Takifugu rubripes* with different body masses and starvation levels[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(6): 940-949. [熊玉宇, 陈雷, 李莹, 等. 不同体质量和饥饿程度对红鳍东方鲀幼鱼游泳能力的影响[J]. 水生生物学报, 2023, 47(6): 940-949.]
- [27] Qin Y L, Peng H Y L, Fu S J. Effects of food deprivation on fast-start swimming and predator-prey interaction between a predator and prey fish species[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(9): 2429-2434. [覃英莲, 彭韩柳依, 付世建. 饥饿对捕食者鱼和猎物鱼快速启动游泳能力及捕食-逃逸行为的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2429-2434.]
- [28] Wang J Q, Mao L J, Jiang J Y, et al. Lethal time and histological changes in starved common carp, silver carp, bighead carp and grass carp fry and fingerlings[J]. Journal of Dalian Fisheries College, 1993, 8(Z1): 58-65. [王吉桥, 毛连菊, 姜静颖, 等. 鲤、鲢、鳙、草鱼苗和鱼种饥饿致死时间的研究[J]. 大连水产学院学报, 1993, 8(Z1): 58-65.]
- [29] Li L. Studies on the feeding ecology of dominant fishes and food web structure of fishes in the Yibin reach of Yangtze River[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. [李雷. 长江宜宾江段长薄鳅摄食生态及鱼类食物网结构的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.]
- [30] Huang Y Y, Long Z H, Zhou B, et al. Study on diet feeding rhythm and gastric evacuation models of juvenile *Leptobotia elongata*[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, 34(2): 171-177. [黄颖颖, 龙治海, 周波, 等. 长薄鳅幼鱼摄食节律及其胃排空模型的研究[J]. 江西农业学报, 2022, 34(2): 171-177.]
- [31] Peng H L Y, Cao Z D, Fu S J. Effect of starvation on swimming performance of juvenile crucian carp[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(10): 2756-2760. [彭韩柳依, 曹振东, 付世建. 饥饿对鲫鱼幼鱼游泳能力的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2756-2760.]
- [32] Collins A L, Anderson T A. The influence of changes in food availability on the activities of key degradative and metabolic enzymes in the liver and epaxial muscle of the golden perch[J]. Journal of Fish Biology, 1997, 50(6): 1158-1165.
- [33] McCue M D. Starvation physiology: Reviewing the different strategies animals use to survive a common challenge[J]. Comparative Biochemistry and Physiology A: Molecular & Integrative Physiology, 2010, 156(1): 1-18.

Effect of fasting on the swimming exercise ability of eight juvenile species

LIN Xiaoju^{1,2}, YU Lixiong², WU Chijie^{2,3}, WANG Min^{2,4}, TIAN Huiwu², WANG Ke², LIU Mingdian², DUAN Xinbin²

1. School of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. National Agricultural Science Observing and Experimental Station of Chongqing, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Wuhan 430223, China;
3. School of Animal Science and Technology, Yangtze University, Jingzhou 434025, China;
4. Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Ministry of Education, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: This study was conducted to explore the swimming ability of different species of juveniles under fasting stress. Herring (*Mylopharyngodon piceus*), grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*), silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*), bighead (*Aristichthys nobilis*), crucian carp (*Carassius auratus*), long loach (*Leptobotia elongata*), loach (*Misgurnus anguillicaudatus*), and Taiwan loach (*Paramisgurnus dabryanus ssp.*) were studied. The induced flow rate (U_{ind}), critical swimming speed (U_{crit}), and burst swimming speed (U_{burst}) were determined for different periods of fasting (0, 2, 5, 10, 15 d). For all the eight fish species, the following result is obtained: induced flow speed < critical swimming speed < burst swimming speed. The variation in the average induction flow rate ranges from (6.12–12.78) cm/s. Meanwhile, the induction flow rate of grass carp, silver carp, and bighead is close to and sensitive to the flow rate, and the induction flow rate is 4.75–7.75 cm/s. The swimming speeds of the eight fish species were significantly different ($P < 0.05$). Among the eight experimental fish, the critical swimming velocity and burst velocity were the highest for herring (121.65±3.19 cm/s, 143.48±5.77 cm/s), which were followed by that of long loach (85.08±3.23 cm/s, and 132.68±8.52 cm/s). The critical swimming velocity and burst swimming velocity of the Taiwanese loach were slower, which were (19.28±1.90) cm/s and (31.53±2.14) cm/s, respectively. The effect of fasting on the induced flow rate was not significant ($P > 0.05$); however, the critical swimming speed and burst swimming speed decreased linearly with fasting time, and the decrease in critical swimming speed was more significant than that in the burst swimming speed ($P < 0.05$). At 0 d and 2 d, the critical and burst speeds were significant ($P > 0.05$); at 5 d; after 5 d, the critical and burst speeds decreased by 13% to 51% and 9% to 39%, respectively. After 10 d of fasting, critical and burst swimming speeds decreased by 29%–70% and 20%–55%, respectively, with the most significant reduction in swimming speed during 10d fasting. Therefore, 10 d is a critical period that affects the swimming ability of fish. Fasting had no significant effect on the induced flow rate of juveniles; however, the critical swimming speed and burst swimming speed were significantly affected by the fasting time and a longer decrease in swimming ability. Moreover, the difference between critical and burst swimming speeds may stem from differences in energy expenditure between the different swimming modes.

Key words: fasting, induced flow speed, critical swimming speed, burst swimming speed

Corresponding author: DUAN Xinbin. E-mail: duan@yfi.ac.cn