

Lin X J, Yu L X, Zeng Y P, et al. Fasting on swimming ability in four major carp species of different sizes [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(8): 082509. [林小菊, 俞立雄, 曾钰评, 等. 禁食对不同规格四大家鱼游泳能力的影响 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(8): 082509.]

禁食对不同规格四大家鱼游泳能力的影响

林小菊^{1,2*} 俞立雄^{1*} 曾钰评^{1,2} 吴池杰^{1,3} 王珂¹ 刘明典¹ 段辛斌¹

(1. 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, 武汉 430223; 2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 3. 长江大学动物科学技术学院, 荆州 434025)

摘要: 研究旨在探讨禁食时间对不同体长青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*Hypophthalmichthys nobilis*)四种淡水鱼类游泳能力的影响。研究选取了体长不同[短W组(4.34±0.21)–(7.86±0.29) cm、中S组(14.53±0.25)–(15.6±0.68) cm、长E组(20.29±0.7)–(23.4±0.51) cm]的实验鱼3组($n=40$), 在分别饥饿0、2d、5d、10d和15d后测定感应流速、临界游泳速度及暴发游泳速度以评估禁食时间及体长对鱼类游泳能力的影响。结果显示, 感应流速、临界游泳速度及暴发游泳速度均与体长相关。绝对临界游泳速度和绝对暴发游泳速度(cm/s)随着体长的增加而增加, 而相对临界游泳速度和相对暴发游泳速度(BL/s) (体长, BL)则随体长的增加而降低。每种鱼在两个单独的体长组(W、S、E组)的感应流速、临界游泳速度和暴发游泳速度存在显著差异($P<0.05$)。四大家鱼的感应流速、临界游泳速度和暴发游泳速度大小排序为青鱼>草鱼>鳙>鲢。在禁食条件下, 感应流速无显著性变化($P>0.05$), 但临界游泳速度和暴发游泳速度均显著降低($P<0.05$), 呈现出逐渐下降的趋势。在禁食0–15d内, 四大家鱼的感应流速W组显著高于S组($P<0.05$), 均显著高于E组($P<0.01$), 临界游泳速度、暴发游泳速度W组显著低于S组($P<0.05$), 均显著低于E组($P<0.01$)。结果表明, 与W组相比, S组和E组在禁食条件下游泳能力受影响较小, 建议放流体长超10 cm的四大家鱼。在S组和E组5d禁食后, 游泳能力未显著下降。适度禁食可能提升捕食能力, 但长时间禁食会削弱游泳能力, 影响摄食和逃避捕食者的能力, 降低存活率。因此, 放流前应避免长时间禁食, 确保游泳能力, 增强野外生存能力和摄食成功率。四大家鱼幼鱼游泳能力受体长和禁食影响, 体长增加游泳能力增强, 禁食则相反。建议放流时挑选体型较大(10 cm以上)、营养良好的鱼苗, 以提高存活率和增殖放流项目成效。研究为四大家鱼的增殖放流技术的优化提供了理论依据。

关键词: 禁食; 体长; 四大家鱼; 感应流速; 临界游泳速度; 暴发游泳速度

中图分类号: Q178.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)08-082509-11

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2024.0471 **CSTR:** 32229.14.SSSWXB.2024.0471



增殖放流作为一种关键的生态修复策略, 通过向水域中投放人工培育的原种幼鱼或成鱼, 以提升水生生物资源的丰度, 维护生物多样性, 推动水域生态平衡的重建。这对于确保渔业资源的可持续性利用及促进渔业经济的持续发展具有深远的意

义。而增殖放流成效的优劣受到多种因素的共同影响, 包括生态环境状况、物种选择及放流的数量、地点和时间等。增殖放流的鱼类一般为人工养殖环境下培育的幼苗, 它们的野外捕食能力弱甚至匮乏, 进而导致其常处于饥饿状态。而饥饿状态

收稿日期: 2024-12-02; **修订日期:** 2025-01-06

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中华人民共和国水利部-中国长江三峡集团有限公司长江水科学研究联合基金(U2240214); 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)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation Committee - Ministry of Water Resources of the People's Republic of China - China Three Gorges Corporation Joint Fund Project for Yangtze River Water Science Research (U2240214); Central Public Welfare Research Institute Basic Scientific Research Business Fund of China Academy of Fishery Sciences (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; 俞立雄(1991—), 男, 博士; 研究方向为渔业资源保护。E-mail: yulixiong@yfi.ac.cn *共同第一作者

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

会减弱鱼类的游泳能力,导致放流后幼苗的死亡率增高,显著地影响了增殖放流的成效^[1]。因此,为提升增殖放流活动的成活率,必须对放流鱼苗进行严格的筛选,确保个体健康且体质强健。同时,改善放流鱼苗的培育条件,提高其生存能力,以确保增殖放流活动能有效促进水域生态系统的恢复及生物多样性的保护^[2]。

在自然环境中,鱼类展现出对不同生态条件的适应性以及多样化的游泳行为,这些特征是多种生态因素综合作用的结果。这些因素包含了鱼类个体大小、食物资源情况及水温、流速、溶解氧等。由于环境中食物资源在时间和空间分布的不均及环境条件波动对食物可获得性的影响,鱼类经常遭遇食物匮乏的挑战^[3]。这种挑战会对鱼类的能量和营养储备产生不利影响,进而影响其运动能力。同时,在人工繁殖放流活动中,鱼类摄食、躲避敌害、迁徙、进行群体活动及对环境适应等生态行为习性也会影响其存活率。这些生态习性与游泳能力紧密相连,都是鱼类生存的重要因素。在蔡露等^[4]众多学者的研究中发现体长对游泳能力具有显著影响,一般而言,体型较大的鱼类在游泳速度和耐力方面优于体型较小的鱼类。这种现象可能与肌肉构成、骨骼结构、鱼鳍形态、体型及生活习性等因素密切相关。

本研究选取了在长江流域普遍存在的四种主要经济鱼类,青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)及鳙(*Hypophthalmichthys nobilis*),即“四大家鱼”^[5]。它们不仅具有重要的经济价值,还在江河湖泊生态系统中扮演关键角色。特别是洄游习性,对长江中游生态平衡至关重要。鱼类迁徙有助于保持水域生物多样性,影响水体营养和物质流动。因此,研究这些鱼类对渔业经济和长江流域生态保护管理都极为重要。苗种放流规格是增殖放流成功的关键,影响成活率、回捕率 and 经济效益。确定最佳放流规格,通过实验和实践,对提高成活率和回捕率至关重要^[6]。本实验对四大家鱼幼鱼在禁食状态下不同体长组的感应流速、临界游泳速

度及暴发游泳速度进行了测定,目的是探究放流时的鱼体规格和禁食对游泳性能的影响。本研究结果可为放流个体大小选择、环境选择及放流技术的优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究于湖北监利的长江四大家鱼老江河原种场开展。实验中所使用的四大家鱼,均取自该原种场,且所有实验鱼均表现出正常的活力,外观无损伤,鳞片完整无缺。在实验开始前,实验鱼在循环养殖水槽中暂养2周,期间所用的养殖水均为经过曝气的自来水。在暂养阶段,每天2次,分别于早上8点和傍晚5点喂食配合饲料,每次喂食量约为实验鱼总体重的3%。同时,每日更换约30%的暂养水体。在实验期间,实验用水与养殖用水均使用经过曝气的自来水,保持水温在23—28℃(自然水温)。溶解氧含量保持在7.0—8.0 mg/L。

1.2 实验设计

本研究选取了180尾状况良好的实验鱼,将其根据体长分为3组(短体长组W组;中等体长组S组;长体长组E组),每组60尾,用于感应流速、临界游泳速度和暴发游泳速度的测定(表1)。同时,设置5个不同的禁食梯度,即0、2d、5d、10d和15d,每个梯度测定4尾鱼。在实验开始前,实验鱼被转移到游泳能力测定装置的密封区域,并确保游泳水槽内的环境条件与暂养水槽保持一致。

1.3 实验装置

本项研究使用了从丹麦Loligo Systems公司购置的鱼类游泳速度测量设备。实验所用的水槽主要包括电动机、变频器、螺旋桨及游泳室等部件。运作机制简述:变频器控制电动机转速,电动机带动螺旋桨转动,形成可调节的水流。通过流速仪测量不同叶轮转速下的水流速度,并据此调整叶轮转速,以测定鱼类游泳速度。本实验采用的环形水槽体积为90 L,其游泳测试区的尺寸设定为20 cm×20 cm×70 cm(图1)。在研究过程中,使用重庆水文仪器厂的LS45A型号旋杯式流速仪来测定环形水

表1 实验鱼初始体长体重

Tab. 1 The initial body length and weight of experimental fish (mean±SD, n=4)

种类/规格 Species/ Specification	青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>		草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>		鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>		鳙 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	
	体长Body length (cm)	体重Body weight (g)	体长Body length (cm)	体重Body weight (g)	体长Body length (cm)	体重Body weight (g)	体长Body length (cm)	体重Body weight (g)
W组W group	7.86±0.29	10.74±0.75	5.52±0.26	3.18±0.56	4.34±0.21	1.40±0.21	4.57±0.18	1.69±0.45
S组S group	14.58±0.60	54.98±8.9	14.53±0.25	54.65±3.42	15.6±0.68	61.33±8.33	15.08±0.26	69.83±3.74
E组E group	23.4±0.51	148.75±3.56	21.18±0.41	123±3.94	20.5±0.69	129.5±18.34	20.29±0.7	138±16.4

槽内不同叶轮转速下的水流速度, 进而确立鱼类游泳区域的水流速度(m/s)与叶轮转速(r/min)之间的对应关系(图 2)。利用上海维赛仪器公司生产的 YSI550A 型号溶氧仪来监测溶解氧含量。

1.4 游泳速度的测定

感应流速(U_{ind}) 感应游速(U_{ind})又称起点游速, 是鱼类所能感知到的最小水流速度, 用于描述鱼类对水流变化的敏感度^[7]。在实验开始前, 将实验鱼置于测试水槽的游泳室内静水适应 1h, 以消除转移过程中可能对鱼类造成的干扰。在适应新环境后, 实验正式开始。本研究采用微调流速递增方法, 以 1 cm/s 作为起始速度, 每隔 20s 增加 1 次水流速度, 速度增量恒定为 1 cm/s。在每次速度提升后, 观察实验鱼的游动方向^[8-10]。当观察到实验鱼从随波逐流变为逆流而行时^[11], 记录此时的水流速度, 此速度代表了实验鱼的感应流速, 即绝对感应流速(U_{ind}^a)。在实验结束后, 对实验鱼进行体长和体重的测量, 并进行记录。

相对感应流速(U_{ind}^r , 单位为 BL/s)的计算公式:

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

临界游泳速度(U_{crit}) 临界游泳速度(U_{crit})是指鱼类能够持续进行游泳的最大速度。该指标可

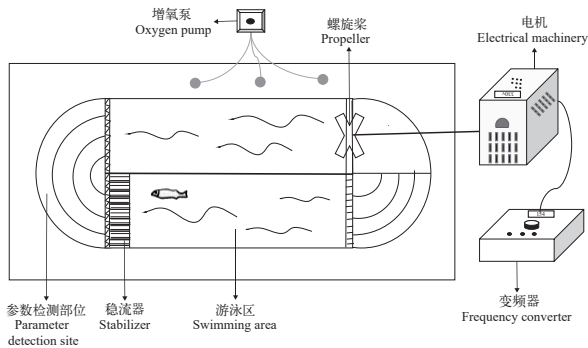


图 1 鱼类游泳能力测试水槽

Fig. 1 Annular flume for testing fish swimming capacity

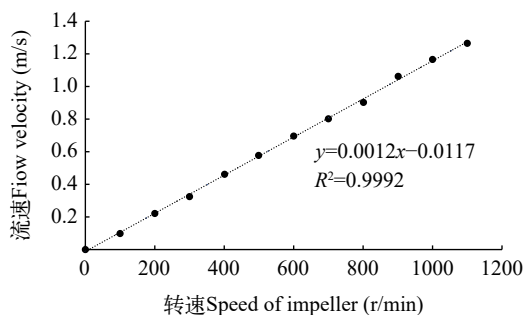


图 2 鱼类游泳区的水流速度与叶轮之间的对应关系

Fig. 2 Correspondence between water flow velocity in the fish swimming area and the impeller

作为评估不同鱼类栖息地生态环境质量的重要参数^[12]。测试时, 首先将单尾实验鱼置于游泳室内, 并在 0.5 BL/s 的流速下进行 20min 的适应性训练, 以消除转移过程中的应激效应。在适应性训练完成后, 实验随即开始, 并记录实验的起始时间点。在测试过程中, 实验鱼在初始速度 1.0 BL/s 下持续游泳 20min 后, 若实验鱼能够继续游泳 20min, 则逐步提升水流速度。速度增量 (U_2) 恒定为 1.0 BL/s, 每次提升速度的时间间隔 (T_2) 为 20min, 直至实验鱼因疲劳而停止游泳。疲劳的判定标准是实验鱼在游泳室末端的拦网处停留超过 20s^[8-10]。在实验结束后, 对实验鱼进行体长和体重的测量并记录。

绝对临界游泳速度(U_{crit}^a , 单位为 cm/s)的计算公式:

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

式中, U_1 是实验鱼能够持续游泳 20min 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 ($T_1 < 20min$); T_2 是时间间隔 (20min)。

相对临界游泳速度(U_{crit}^r , 单位为 BL/s)的计算公式:

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

暴发游泳速度(U_{brust}) 暴发游泳速度(U_{brust})作为评估鱼类在遭遇捕食者或逃避捕食时的冲刺反应速度的指标, 具有重要的生态学意义^[13]。测定时, 首先将单尾实验鱼置于游泳室内, 并在 0.5 BL/s 的流速下进行 1h 的适应性训练, 以消除转移过程中可能产生的应激效应。在测试阶段, 实验鱼将在初始速度 (1.0 BL/s) 下持续游泳 20min, 随后逐步提升水流速度。速度增量 (U_2) 恒定为 1.0 BL/s, 每次速度提升的时间间隔 (T_2) 为 20s, 直至实验鱼达到疲劳极限并停止游泳^[8, 9]。在实验结束后, 对实验鱼的体长和体重进行再次测量并记录。

绝对暴发游泳速度(U_{brust}^a , 单位为 cm/s)的计算公式:

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

式中, U_1 是实验鱼能够持续游泳 20s 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 (20s); T_1 为上次增速至鱼疲劳的时间 ($T_1 < 20s$)。

相对暴发游泳速度(U_{brust}^r , 单位为 BL/s)的计算公式:

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

1.5 数据分析

本研究首先采用 Excel 2016 软件对实验数据进

行基础计算处理,再利用SPSS 25.0统计分析软件对数据进行统计分析。运用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同体长及不同禁食程度下的 U_{ind} 、 U_{crit} 和 U_{burst} 进行对比分析,若结果显著,则采用Duncan多重比较检验组间差异。采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)检测体长和禁食对游泳速度相关参数的影响。所有统计结果均以平均值±标准差(mean±SD)的形式展现,显著性水平阈值设定为 $P<0.05$ 。

2 结果

2.1 体长与感应流速、临界游速、暴发游速的关系

如图3所示,四大家鱼 U_{ind}^r 、 U_{crit}^r 、 U_{burst}^r 、 U_{ind}^a 、 U_{crit}^a 、 U_{burst}^a 与体长之间均存在显著的相关性($P<0.05$,表2)。四大家鱼的 U_{ind}^r 、 U_{crit}^r 、 U_{burst}^r 均随着体长增加而呈现下降的趋势,鲢、鳙的 U_{ind}^r 下降尤为显著,分别从W组的1.44和1.42 BL/s降低到E组的0.38和0.36 BL/s;而青鱼的 U_{crit}^r 、 U_{burst}^r 下降最为显著,分别从W组的15.48和17.57 BL/s降低到E组的5.87和6.57 BL/s。相对地, U_{ind}^a 、 U_{crit}^a 、 U_{burst}^a 则随着体长增加而上升,其中青鱼、鳙的 U_{ind}^a 上升最为显著,分别从W组的7.25和6.5 cm/s升高至E组的8.5和7.75 cm/s;鲢的 U_{crit}^a 、 U_{burst}^a 上升最为显著,分别从W组时的55.3和57.6 cm/s升高至E组的84.79和84.79 cm/s。此外, U_{ind} 、 U_{crit} 和 U_{burst} 与体长之间均呈现出二次函数关系(表2)。在4种实验鱼中, U_{ind} 、 U_{crit} (W、S组)、 U_{burst} (W、S组)大小排序:青鱼<草鱼<鳙<鲢,而在 U_{crit} (E组)、 U_{burst} (E组)游泳速度大小排序:青鱼<草鱼<鲢<鳙。

2.2 禁食条件下感应流速、临界游速、暴发游速的变化

随着禁食天数增加,3个体长组四大家鱼对 U_{ind} 无显著性影响($P>0.05$),对 U_{crit} 和 U_{burst} 均表现出显著性影响($P<0.05$),呈逐渐降低趋势(图4—6)。 U_{ind}^r 和 U_{ind}^a 的平均值分别在0.35—1.44 BL/s和6.25—8.5 cm/s, U_{ind}^r 以鲢最高,为1.58—0.38 BL/s,青鱼最

低,为0.86—0.35 BL/s; U_{ind}^a 以青鱼最高,为7.25—8.5 cm/s,鲢最低,为6.25—7.38 cm/s。

W组实验鱼禁食0和2d时,实验鱼的 U_{crit} 和 U_{burst} 均无显著差异($P>0.05$),但显著高于禁食5d、10d和15d的速度($P<0.05$)。鲢的 U_{crit} 和 U_{burst} 下降最为显著, U_{crit}^r 、 U_{burst}^r 从禁食0时的12.74和13.27 BL/s分别降至禁食15d时的2.46和4.61 BL/s, U_{crit}^a 、 U_{burst}^a 从禁食0时的55.3和57.6 cm/s分别降至禁食15d时的11.23和21 cm/s。青鱼、草鱼的 U_{crit} 次之,最后鳙 U_{crit}^r 和 U_{crit}^a 分别降低了8.52 BL/s和39.8 cm/s。鳙、青鱼的 U_{burst} 次之,最后草鱼 U_{burst}^r 和 U_{burst}^a 分别降低

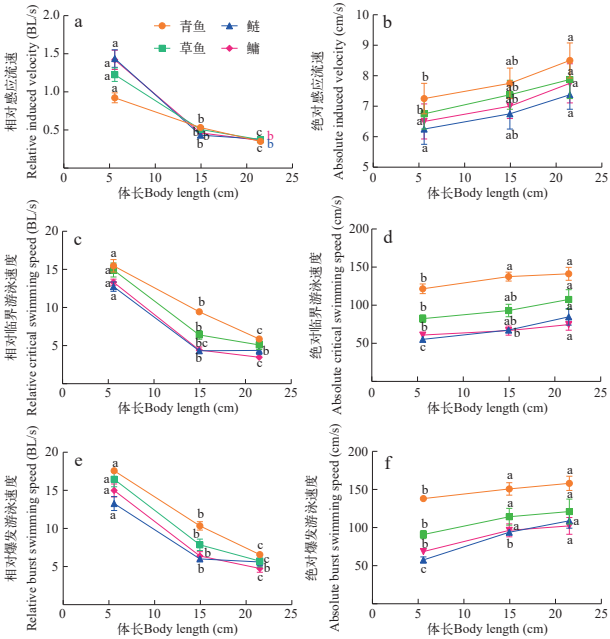


图3 四大家鱼在不同体长下游泳速度的比较

Fig. 3 Comparison of swimming speed of the four major carp species at different body lengths

不同小写字母表示不同体长组同一鱼类间游泳速度差异显著($P<0.05$);下同

Lowercase letters indicate significant differences in swimming speed among different size groups of the same fish species ($P<0.05$); The same applies below

表2 四大家鱼的 U_{ind} 、 U_{crit} 和 U_{burst} 与体长的相关分析

Tab. 2 Analysis of the correlation between U_{ind} , U_{crit} , and U_{burst} of the four major carp species and body length (mean±SD, $n=4$)

种类 Species	U_{ind}^a & BL	U_{ind}^r & BL	U_{crit}^a & BL	U_{crit}^r & BL	U_{burst}^a & BL	U_{burst}^r & BL
青鱼	$U_{ind}^a=0.08BL+6.63$ ($R^2=0.56, P<0.05$)	$U_{ind}^r=-0.03BL+1.13$ ($R^2=0.88, P<0.05$)	$U_{crit}^a=1.16BL+115.59$ ($R^2=0.54, P<0.05$)	$U_{crit}^r=-0.58BL+19.24$ ($R^2=0.927, P<0.05$)	$U_{burst}^a=1.20BL+130.33$ ($R^2=0.59, P<0.05$)	$U_{burst}^r=-0.66BL+21.74$ ($R^2=0.92, P<0.05$)
草鱼	$U_{ind}^a=0.07BL+6.35$ ($R^2=0.49, P<0.05$)	$U_{ind}^r=-0.06BL+1.47$ ($R^2=0.90, P<0.05$)	$U_{crit}^a=1.59BL+72.57$ ($R^2=0.60, P<0.05$)	$U_{crit}^r=-0.65BL+17.72$ ($R^2=0.89, P<0.05$)	$U_{burst}^a=1.98BL+81.63$ ($R^2=0.59, P<0.05$)	$U_{burst}^r=-0.47BL+14.96$ ($R^2=0.43, P<0.05$)
鲢	$U_{ind}^a=0.07BL+5.90$ ($R^2=0.48, P<0.05$)	$U_{ind}^r=-0.07BL+1.73$ ($R^2=0.95, P<0.05$)	$U_{crit}^a=1.76BL+46.13$ ($R^2=0.70, P<0.05$)	$U_{crit}^r=-0.60BL+15.01$ ($R^2=0.93, P<0.05$)	$U_{burst}^a=3.36BL+42.67$ ($R^2=0.94, P<0.05$)	$U_{burst}^r=-0.28BL+10.48$ ($R^2=0.22, P<0.05$)
鳙	$U_{ind}^a=0.07BL+6.11$ ($R^2=0.50, P<0.05$)	$U_{ind}^r=-0.07BL+1.65$ ($R^2=0.90, P<0.05$)	$U_{crit}^a=0.79BL+56.64$ ($R^2=0.55, P<0.05$)	$U_{crit}^r=-0.61BL+15.42$ ($R^2=0.91, P<0.05$)	$U_{burst}^a=2.06BL+60.77$ ($R^2=0.77, P<0.05$)	$U_{burst}^r=-0.63BL+17.29$ ($R^2=0.93, P<0.05$)

了5.34 BL/s和29.48 cm/s。

S组实验鱼禁食0、2d和5d时,实验鱼的 U_{crit} 和 U_{burst} 均无显著差异($P>0.05$),但二者速度显著高于禁食10d和15d($P<0.05$)。青鱼的 U_{crit} 和 U_{burst} 下降最为显著, U_{crit}^r 、 U_{burst}^r 从禁食0时的9.44和10.34 BL/s分别降至禁食15d时的3.39和5.94 BL/s, U_{crit}^a 、 U_{burst}^a

从禁食0时的137.59和150.74 cm/s分别降至禁食15d时的52.88和92.56 cm/s。草鱼、鲢 U_{crit} 和 U_{burst} 次之,最后鳙 U_{crit}^r 和 U_{burst}^a 分别降低了1.53 BL/s和23.13 cm/s, U_{burst}^r 和 U_{burst}^a 分别降低了1.43 BL/s和21.74 cm/s。

E组实验鱼禁食0、2d、5d和10d时,实验鱼的 U_{crit} 和 U_{burst} 无显著差异($P>0.05$),但均显著高于禁

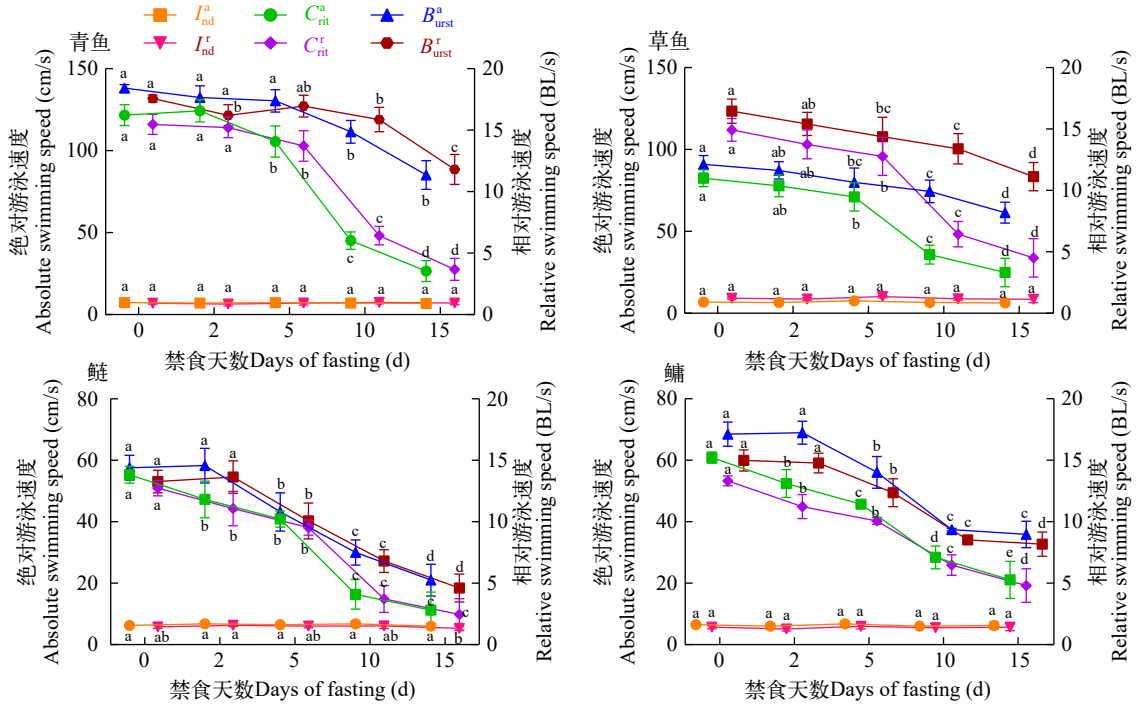


图4 W组四大家鱼在不同禁食梯度下游泳速度的比较

Fig. 4 Comparison of swimming speeds of the four major carps in W section at different fasting gradients

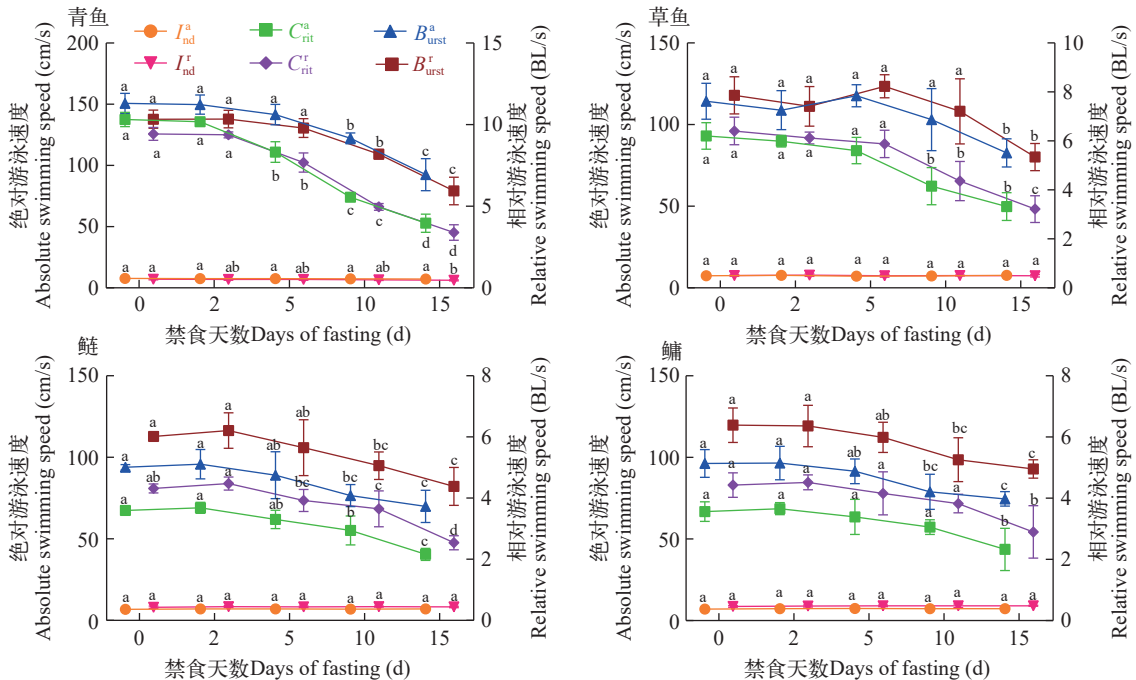


图5 S组四大家鱼在不同禁食梯度下游泳速度的比较

Fig. 5 Comparison of swimming speeds of the four major carps in S section at different fasting gradients

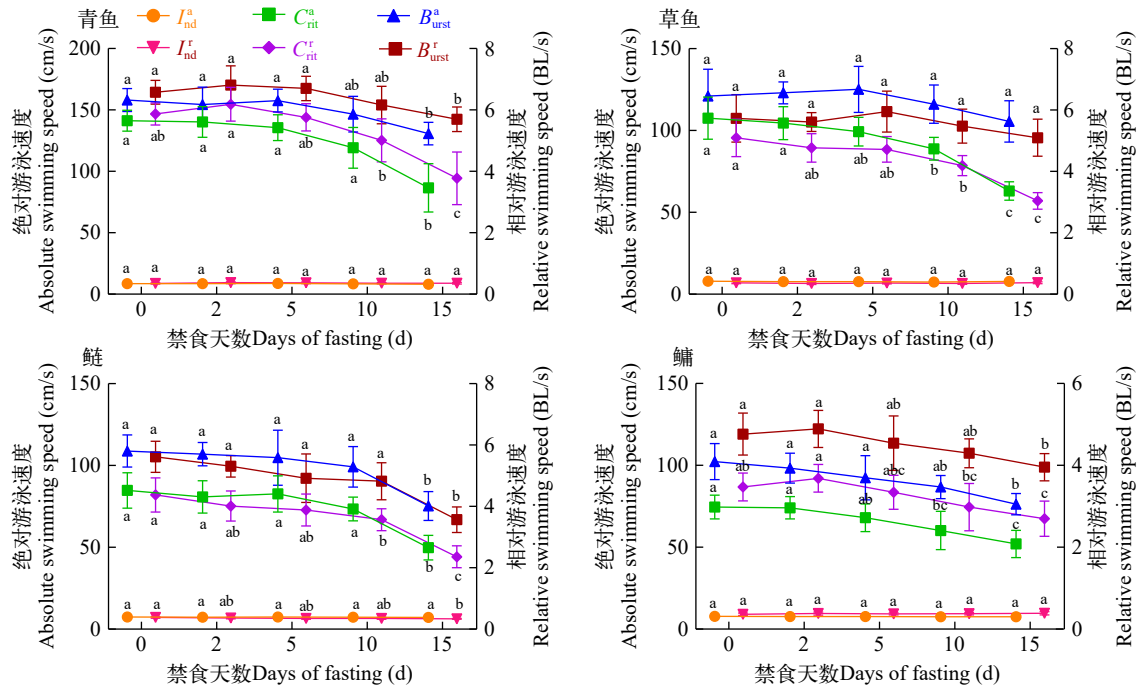


图6 E组四大家鱼在不同禁食梯度下游泳速度的比较

Fig. 6 Comparison of swimming speeds of the four major carps in section E at different fasting gradients

食15d时($P<0.05$), 且 U_{burst} 到禁食15d时降低趋势缓和。鲢的 U_{crit} 和 U_{burst} 降低最为显著, U_{crit}^r 、 U_{burst}^r 从禁食0时的4.38和5.62 BL/s分别降至禁食15d时的2.36和3.57 BL/s, U_{crit}^a 、 U_{burst}^a 从禁食0时的84.79和108.85 cm/s分别降至禁食15d时的49.79和75.28 cm/s。草鱼 U_{crit}^r 降低最为显著从禁食0时的107.62 cm/s降至禁食15d时的63.03 cm/s。草鱼、青鱼 U_{crit} 次之, 鳙 U_{crit}^r 和 U_{crit}^a 分别降低了0.78 BL/s和22.54 cm/s。鳙、青鱼 U_{burst} 次之, 草鱼 U_{burst}^r 和 U_{burst}^a 分别降低了0.63 BL/s和15.56 cm/s。

2.3 体长与禁食对游泳速度的影响

以四大家鱼种类作为协变量, 体长和禁食为固定变量, 对实验得到的所有 U_{ind}^a 、 U_{crit}^a 、 U_{burst}^a 进行双因素协方差分析。结果显示, 体长与禁食及二者的交互作用对四大家鱼的 U_{ind}^a 、 U_{burst}^a 无显著影响($P>0.05$), 而对四大家鱼的 U_{crit}^a 有显著影响($P<0.05$; 表3)。

禁食0—15d, 四大家鱼的 U_{crit} 和 U_{burst} 均随禁食天数增加而降低。W组四大家鱼的游泳速度在10d和15d时均呈显著下降趋势, 与0相比, U_{ind} 下降了3.91%—7.95%、0.1—8.63%, U_{crit} 下降了51.43%—70.81%、63.96%—80.68%, U_{burst} 下降了9.73%—48.74%、32.43%—65.3%。S组四大家鱼的游泳速度在10d和15d时呈显著下降趋势, 与0相比, U_{ind} 下降了0.11%—7.07%、1.43%—12.46%, U_{crit} 下降了13.67%—47.37%、34.51%—64.03%, U_{burst} 下降了

表3 体长和禁食对实验鱼游泳参数影响的双因素方差分析表

Tab. 3 Two-way ANOVA table for the effects of body length and fasting on swimming parameters of experimental fish (mean±SD, $n=4$)

处理组 Treatment group	种类 Species	体长 Body length	禁食 Fasting	体长 * 禁食 Body length * Fasting
自由度 Degree of freedom	1	2	4	8
U_{ind}	$F=45.89$ $P<0.0001^*$	$F=61.12$ $P<0.0001^*$	$F=1.47$ $P=0.21$	$F=0.86$ $P=0.55$
U_{crit}	$F=399.64$ $P<0.0001^*$	$F=120.73$ $P<0.0001^*$	$F=100.38$ $P<0.0001^*$	$F=3.93$ $P<0.0001^*$
U_{burst}	$F=530.18$ $P<0.0001^*$	$F=170.19$ $P<0.0001^*$	$F=42.32$ $P<0.0001^*$	$F=1.06$ $P=0.40$

8.37%—20.82%、22.41%—42.54%; E组禁食四大家鱼 U_{ind} 、 U_{crit} 和 U_{burst} 在15d时呈显著降低趋势, 比0时降低了0.17%—11.27%、22.32%—46.07%、11.03%—36.48%。总体上, 禁食条件下四大家鱼W组的 U_{ind} 显著高于S组($P<0.05$), 均显著高于E组($P<0.01$), W组 U_{crit} 和 U_{burst} 显著低于S组($P<0.05$), 均显著低于E组($P<0.01$; 图4—6)。

3 讨论

3.1 四大家鱼的游泳能力

本研究显示, 青鱼、草鱼、鲢、鳙的 U_{ind} 差异不显著, 但鲢对流速的感应较敏感, U_{ind}^a 为6.25—

7.38 cm/s, 青鱼对流速的感应最为迟钝, 比鲢、鳙高8.82%—13.79%。四大家鱼之间 U_{ind} 的差异可能与其长期生活环境和生活习性有关, 草鱼与青鱼是中下层水域的鱼类, 鲢和鳙栖息于中上层水域^[14]。作为江湖洄游性鱼类^[15], 其适应了各自水层的特定水流速度。在水体中, 各个水层的流速有所差异, 上层的流速较快, 而随着深度的增加, 流速逐渐降低。因此, 生活在水体上层且喜欢跳跃的鲢对水流速度的变化最为敏感。青鱼对水流的敏感度最低。

在本研究中, 观察到不同鱼类的 U_{crit} 表现出显著的种间差异。具体而言, 四大家鱼中的青鱼的 U_{crit} 显著高于其他鱼类, 其速度在24.8%—54.54%。草鱼的 U_{crit} 次之, 介于82.42—107.62 cm/s。相比之下, 鳙与鲢在 U_{crit} 上未显示出显著差异($P>0.05$)。这些差异可能归因于鱼类的体型、行为习性、栖息地环境及形态特征等多种因素, 这些因素共同作用导致了鱼类游泳能力的显著差异性^[16]。当前的研究表明, 流线型的体型是鱼类实现高效游泳和强大游泳能力的关键因素之一^[17, 18]。青鱼与草鱼呈现出圆筒形的体态, 而鲢与鳙则具备更为侧扁的形态特征。基于流体力学原理, 青鱼与草鱼的圆筒形体态更趋近于理想的流线型, 因此在游泳过程中所遭遇的阻力较小, 从而能够实现较高的游泳速度。相对而言, 侧扁体态的鲢与鳙在游泳时所受阻力较大, 导致其游泳速度相对较慢。进一步地, 青鱼偏好栖息于底层水域, 而草鱼则倾向于在河岸区域活动。鲢与鳙主要栖息于上层水域, 其中鲢表现出较为活泼的性情, 常有跳跃行为。

四大家鱼中的青鱼展现出显著的高速度优势, 其 U_{burst} 超出其他鱼类23.39%—58.3%, 其次是草鱼, 其速度介于90.88—121.12 cm/s。相比之下, 鳙与鲢在 U_{burst} 上未表现出显著差异($P>0.05$)。本研究结果与熊锋等^[19]的研究发现相一致。鲢展现出显著的跳跃行为, 而草鱼则表现出相对较高的活动性。相比之下, 鳙表现出胆怯的特性, 其行动较为迟缓, 这些现象可能与鱼类的行为生态学特征相关^[20]。

3.2 体长对四大家鱼游泳能力的影响

个体大小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^[21]。不同个体大小的鱼具有不同的游泳能力, 光泽黄颡鱼(*Pelteobagrus nitidus*)^[22]、裂腹鱼(*Schizothorax*)^[23]、白斑红点鲑(*Salvelinus leucomaenis*)^[24]、齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)及重口裂腹鱼(*Schizothorax davidi*)^[25]等研究表明鱼类的 U_{ind}^a 、 U_{crit}^a 、 U_{burst}^a 随体长增加而升高, 而 U_{ind}^r 、 U_{crit}^r 、 U_{burst}^r 随体长增加而下降。在本研究中, 4种主要淡水鱼

类的幼鱼在 U_{ind}^a 、 U_{crit}^a 、 U_{burst}^a 和 U_{ind}^r 、 U_{crit}^r 、 U_{burst}^r 方面, 均展现出与先前研究一致的变化趋势。进一步的分析揭示, 这些鱼类在不同体长组间[短W组(4.34±0.21)—(7.86±0.29) cm、中S组(14.53±0.25)—(15.6±0.68) cm、长E组(20.29±0.7)—(23.4±0.51) cm]的 U_{ind} 、 U_{crit} 和 U_{burst} 上存在显著差异($P<0.05$), 这强调了游泳能力与体长之间的紧密联系。

鱼类具有逆流的本能, 其通过侧线系统感知水流的方向。然而, 当水流速度达到鱼类感知阈值时, 鱼类将逆流而行, 以克服水流的冲击力^[26]。不同大小的鱼类在流速的选择上表现出显著差异。在本研究中, 结果显示鱼类的 U_{ind}^a 与其体长之间存在正相关关系, E组的四大家鱼, 体长显著大于S组和W组四大家鱼, 这也可能是E组实验鱼 U_{ind}^a 较高的原因。小规格的鱼类倾向于选择较低的流速, 并且能够适应更宽泛的流速范围。相比之下, 大规格的鱼类则偏好较高的流速, 并且它们适应的流速范围相对较窄^[27]。因此, 体型较小的鱼类对水流速度更为敏感, 显示出较低的 U_{ind}^a 。

研究显示, 这些鱼类在W、S和E组的 U_{crit} 值为55.3—141.23 cm/s (3.47—15.48 BL/s), U_{burst} 值为57.6—158.1 cm/s (4.76—17.57 BL/s)。与早期研究结果相比较, 体长较大的鱼类在 U_{crit} 和 U_{burst} 方面表现更为优异。体长与游泳能力之间的关系呈现出多样性, 这可能归因于随着鱼类体型的增大, 其表面积与肌肉重量的比例相应增加, 而鱼类克服体重所需的推进力则与体长成反比^[28, 29]。

3.3 禁食对感应流速和游泳能力的影响

由于食物供应时空波动及鱼类洄游、繁殖等习性, 鱼类常常会遭遇短期或长期饥饿^[30]。大量实验研究表明, 饥饿状况显著降低了鱼类的游泳性能, 如谭淦等^[31]对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)的研究, 熊玉宇等^[32]对红鳍东方鲀(*Takifugu rubripe*)的实验均表明, 随着饥饿持续时间的增加, 这些鱼类的 U_{crit} 呈现下降趋势。本研究结果与先前的研究相一致, 即禁食显著削弱了四大家鱼的游泳性能。同时, 本研究发现, 禁食对 U_{ind} 无显著影响。随着禁食时间的延长, 鱼类的 U_{crit} 和 U_{burst} 均表现出下降趋势。这可能是由于其能量储备不足, 无法维持长期持续的游泳活动。 U_{ind} 与鱼类逆流游动的习性存在相关性^[33], 不受禁食状态下能量消耗的影响。 U_{burst} 作为一种厌氧运动, 主要消耗白肌中的三磷酸腺苷(ATP)和磷酸肌酸(CP), 这两种高能量物质的含量在禁食状态下似乎并未受到影响^[34]。相对而言, U_{crit} 作为一种有氧运动, 主要涉及红肌中糖原的消耗, 而这种物质在禁食后会显著减少^[35]。

本研究在禁食15d条件下, W组 U_{ind} 、 U_{crit} 和 U_{burst} 较对照组分别下降了0.1%—8.63%、63.96%—80.68%、32.43%—65.3%。对于S组, 在禁食15d后, U_{ind} 、 U_{crit} 、 U_{burst} 较对照组分别下降了1.43%—12.46%、34.51%—64.03%、22.41%—42.54%。此外, E组在禁食15d条件下, U_{ind} 、 U_{crit} 和 U_{burst} 分别较对照组下降了0.17%—11.27%、22.32%—46.07%和11.03%—36.48%。在禁食的情况下, 鱼类的游泳能力降低, 这可能是因为肌肉内的酶活性降低、肌肉代谢能力减弱, 以及游泳所需能量物质的减少^[35, 36]。禁食条件下四大家鱼的W组 U_{ind} 显著高于S组($P<0.05$), 均显著高于E组($P<0.01$), W组 U_{crit} 、 U_{burst} 显著低于S组($P<0.05$), 均显著低于E组($P<0.01$)。研究发现, 与小规格的鱼类相比, 大规格的鱼类在禁食状态下的游泳能力受禁食影响的程度相对较低。此现象可能与鱼类的生理构造及能量代谢机制紧密相关。具体而言, 体型较大的鱼类往往具备更丰富的能量储备, 这使得它们在食物匮乏的环境中能够持续生存更长时间。此外, 较大的体型可能有助于降低能量消耗, 原因在于它们的静止代谢率受饥饿的影响相对较小^[37]。关于游泳能力与饥饿之间的关系, 研究推测, 体长较长的鱼类在饥饿时通过降低游泳速度和频率来实现能量消耗的最小化。

经过15d的禁食处理后, 不同体长段的青鱼和鲢的 U_{crit} 显著降低, 分别较禁食前下降了38.7%—78.18%和41.28%—79.7%。本研究揭示了不同鱼类苗种对禁食的耐受性存在显著差异, 其中鲢的耐禁食能力最弱, 与王吉桥等^[38]的研究结果一致。青鱼作为肉食性鱼类, 食物消化速度较快, 其游泳能力较强, 相应的能量消耗也较高。相比之下, 鲢在相同条件下对饥饿的耐受性较低, 这可能与食物来源和消化效率与青鱼的差异有关。因此, 在禁食状态下青鱼和鲢的游泳能力下降幅度较大。同时, 鲢和鳙的 U_{burst} 也显著降低, 分别比禁食前减少了30.84%—63.54%和25.39%—47.63%。这一现象可能与能量代谢和肌肉适应性密切相关。鲢、鳙比青鱼和草鱼更依赖食物供给以维持能量和肌肉功能。长期食物短缺导致能量耗竭, 影响游泳能力。肌肉结构和功能的适应性变化也是关键, 因为它们直接影响鱼类运动能力。食物不足时, 鲢、鳙肌肉可能得不到足够营养, 影响其结构和功能^[39], 进而降低游泳能力。

游泳能力对于鱼类的生存具有决定性作用^[40], 它直接关联到鱼类的摄食行为、逃避天敌、繁殖活动及分布模式。提升放流苗种的游泳能力能够显著扩大其环境适应范围并提高存活率。研究发

现, 相较于W组、S组与E组的游泳能力在禁食条件下表现出较小的受影响程度, 建议对体长超过10 cm的四大家鱼进行放流。此外, S组、E组在经历5d禁食后, 四大家鱼的游泳能力未见显著下降。适度的禁食可能对鱼类放流后的捕食能力产生积极影响, 从而提高其存活率。然而, 人工养殖环境下培育的苗种往往缺乏必要的捕食经验, 饥饿状态会削弱其游泳能力, 进而影响摄食行为和逃避捕食者的能力, 这可能导致存活率的降低。因此, 苗种在放流前应避免长时间禁食, 以确保其游泳能力不受影响, 这对于增强其在野外的生存能力和提高摄食成功率至关重要。四大家鱼幼鱼的游泳能力会受到体长和禁食状态的明显影响, 这进一步决定了它们放流后的摄食效率、躲避捕食者的能力及存活率。随着体长的增加, 四大家鱼幼鱼的游泳能力会得到增强, 而禁食则会导致游泳能力的下降。在实施鱼类增殖放流项目中, 建议优先挑选体型较大(10 cm以上)且营养状况良好的鱼苗。此类选择对于提高放流后鱼类群体的存活率具有显著的正面效应, 并且能够有效提升整个增殖放流项目的成效。其原因在于, 体型较大的鱼苗往往展现出更强的竞争力与适应性, 营养状况良好的鱼苗则表现出更健康的体态和更佳的生长潜能。因此, 这些因素的综合作用有助于提升鱼类增殖放流的成活率, 对于近水域生态系统的恢复及生物多样性的保护具有重要的实践意义。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Chen S H, Tian T, Yu X M, *et al.* Research progress on wild training for breeding and releasing fish: a review [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2024, **39**(4): 684-697. [陈诗鸿, 田涛, 于晓明, 等. 增殖放流鱼类的野化训练研究进展 [J]. 大连海洋大学学报, 2024, **39**(4): 684-697.]
- [2] Shi X T, Chen Q W, Zhuang P, *et al.* Life skill trainings for hatchery fish to improve its foraging and anti-predation capability in natural environment: a review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(12): 3235-3240. [石小涛, 陈求稳, 庄平, 等. 提高摄食-反捕食能力导向的鱼类野化训练方法述评 [J]. 生态学杂志, 2012, **31**(12): 3235-3240.]
- [3] Qian Z X, Xu Y Q, Fang Y F. The effects of starvation on fish [J]. *Bulletin of Biology*, 2006, **41**(6): 9-11. [钱周兴, 徐永清, 方一峰. 饥饿对鱼类的影响 [J]. 生物学通报, 2006, **41**(6): 9-11.]
- [4] Cai L, Hou Y Q, Jin Y, *et al.* Response of fish swimming ability to body length and its application in fishway

- design [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(5): 209-215. [蔡露, 侯铁群, 金瑶, 等. 鱼游泳能力对体长的响应及其在鱼道设计中的应用 [J]. *农业工程学报*, 2021, **37**(5): 209-215.]
- [5] 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.]
- [6] Li X H. Cultivation techniques of artificial propagation and release of bighead carp fry [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2023, **43**(36): 92-93. [李雪华. 人工增殖放流鳙鱼苗种培育技术 [J]. *农业工程技术*, 2023, **43**(36): 92-93.]
- [7] 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.]
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Chen Y Y, Wang X C, Wang H, *et al.* Comparative analysis of induced current velocity of six benthic fishes in Hanjiang River [J]. *China Fisheries*, 2023(11): 76-78. [陈媛媛, 王晓臣, 王华, 等. 汉江六种底栖性鱼类感应流速比较分析 [J]. *中国水产*, 2023(11): 76-78.]
- [12] Farrell A P. Comparisons of swimming performance in rainbow trout using constant acceleration and critical swimming speed tests [J]. *Journal of Fish Biology*, 2008, **72**(3): 693-710.
- [13] Plaut I. Critical swimming speed: its ecological relevance [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular & Integrative Physiology*, 2001, **131**(1): 41-50.
- [14] Li J, Xia Z Q, Dai H C, *et al.* Effect of the Three Gorges Reservoir initial filling on downstream habitat suitability of the typical fishes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(8): 892-900. [李建, 夏自强, 戴会超, 等. 三峡初期蓄水对典型鱼类栖息地适宜性的影响 [J]. *水利学报*, 2013, **44**(8): 892-900.]
- [15] 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.]
- [16] Silva A T, Lucas M C, Castro-Santos T, *et al.* The future of fish passage science, engineering, and practice [J]. *Fish and Fisheries*, 2018, **19**(2): 340-362.
- [17] 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.
- [18] Fu S J, Cao Z D, Zeng L Q, *et al.* Fish Swimming: Strategy and Adaptive Evolution [M]. Beijing: Science Press, 2014: 2-3. [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: 2-3.]
- [19] Xiong F, Wang C F, Liu D F, *et al.* Comparative study of burst swimming speed of black carp, grass carp, silver carp and bighead carp from Songhua River [J]. *Ecological Science*, 2014, **33**(2): 339-343. [熊锋, 王从锋, 刘德富, 等. 松花江流域青鱼、草鱼、鲢及鳙突进游速比较研究 [J]. *生态科学*, 2014, **33**(2): 339-343.]
- [20] Liu H J, Wang C F, Zhu L K, *et al.* Comparative study of critical swimming speeds for juvenile silver and bighead carp [J]. *Journal of Hydroecology*, 2016, **37**(4): 63-69. [刘慧杰, 王从锋, 朱良康, 等. 鲢鳙幼鱼临界游泳速度的比较研究 [J]. *水生态学杂志*, 2016, **37**(4): 63-69.]
- [21] Wang M, Luo S. The swimming performance of Cyprinidae in China: a review [J]. *Jiangxi Fishery Science and Technology*, 2020(4): 32-36. [王猛, 罗思. 我国鲤科鱼类游泳能力综述 [J]. *江西水产科技*, 2020(4): 32-36.]
- [22] Su Q G, Song B L, Liu L G, *et al.* Comparison of sensing flow velocity and preferred flow velocity between shinning catfish and bigeye mandarin fish in Yuanshui River, China [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2021, **34**(6): 53-58. [苏仟根, 宋波澜, 刘良国, 等. 沅水光泽黄颡鱼和大眼鳊的感应流速和喜好流速比较 [J]. *水产学杂志*, 2021, **34**(6): 53-58.]
- [23] Hou Y, Cai L, Wang X, *et al.* Swimming performance of 12 Schizothoracinae species from five rivers [J]. *Journal of Fish Biology*, 2018, **92**(6): 2022-2028.
- [24] Zhang Y Q, Yin J S, Xu G F, *et al.* Effects of the water temperature and the weight on the critical swimming speed and oxygen consumption rate of *Salvelinus leucomaenis* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(4): 661-668. [张永泉, 尹家胜, 徐革峰, 等. 水温 and 体重对白斑红点鲑临界游泳速度和游动耗氧率的影响 [J]. *水生生物学报*, 2015, **39**(4): 661-668.]
- [25] Zhang D Y, He C S, Qi G X, *et al.* Measurement and application of swimming capability for three typical fish species of the upper Dadu River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2024, **45**(4): 108-116. [张东亚, 贺春山, 齐国新, 等. 大渡河上游几种典型鱼类克流能力研究及应用 [J].

- 水生生态学杂志, 2024, **45**(4): 108-116.]
- [26] Cai L, Wang W Y, Wang H L, *et al.* Response of induced flow speed to fish body length and its application in flow design of fish passage facilities [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(2): 176-181. [蔡露, 王伟营, 王海龙, 等. 鱼感应流速对体长的响应及在过鱼设施流速设计中的应用 [J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(2): 176-181.]
- [27] Du H, Ban X, Zhang H, *et al.* Preliminary observation on preference of fish in natural channel to water velocity and depth: case study in reach of Yangtze River from Jiangkou Town to Yuanshi Town [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, **27**(10): 70-74. [杜浩, 班璇, 张辉, 等. 天然河道中鱼类对水深、流速选择特性的初步观测——以长江江口至涪市段为例 [J]. *长江科学院院报*, 2010, **27**(10): 70-74.]
- [28] Tan J, Li H, Guo W, *et al.* Swimming performance of four carps on the Yangtze River for fish passage design [J]. *Sustainability*, 2021, **13**(3): 1575.
- [29] Cai L, Chen J, Johnson D, *et al.* Effect of body length on swimming capability and vertical slot fishway design [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020(22): e00990.
- [30] Hvas M, Stien L H, Oppedal F. The effect of fasting period on swimming performance, blood parameters and stress recovery in Atlantic salmon post smolts [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2021(255): 110913.
- [31] Tan G, Shi H Y, Chen Y J, *et al.* Feeding and fasting on swimming performance and hypoxia tolerance of micropterus salmoides [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(6): 826-831. [谭淦, 史函颖, 陈拥军, 等. 摄食和饥饿对大口黑鲈游泳运动能力和低氧耐受的影响 [J]. *水生生物学报*, 2022, **46**(6): 826-831.]
- [32] Xiong Y Y, Chen L, Li Y, *et al.* Swimming ability of juvenile Tiger Puffer, *Takifugu rubripes* with different body masses and starvations 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.]
- [33] Wang X C, Lü B B, Xing J J, *et al.* Induced flow speed and its relationship to body length of two Schizothoracinae fishes in upper reaches of Yellow River [J]. *South China Fisheries Science*, 2020, **16**(4): 47-53. [王晓臣, 吕彬彬, 邢娟娟, 等. 黄河上游2种裂腹鱼感应流速及其与体长的关系 [J]. *南方水产科学*, 2020, **16**(4): 47-53.]
- [34] Xi D, Zhang X, Lü H, *et al.* Adaptive responses of feeding and swimming behaviors in black rockfish, *Sebastes schlegelii*, under starvation at juvenile and young stages [J]. *Aquaculture Reports*, 2024(35): 102019.
- [35] Yu X, Chen L, Cui W, *et al.* Effects of acute temperature and salinity changes, body length and starvation on the critical swimming speed of juvenile tiger puffer, *Takifugu rubripes* [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2018, **44**(1): 311-318.
- [36] Zhang S L. Study on swimming ability and swimming behavior of *Schizothorax filament* and *Schizothorax brevis* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. [张沙龙. 长丝裂腹鱼和短须裂腹鱼的游泳能力和游泳行为研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.]
- [37] Li J, Qin Y, Jiang M J, *et al.* Effects of starvation on body mass, resting metabolic rate, and hematological indices in *Oreochromis niloticus* [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2022, **39**(6): 39-45. [李健, 覃悦, 蒋美君, 等. 饥饿对尼罗罗非鱼体质量、静止代谢率和血液学指标的影响 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2022, **39**(6): 39-45.]
- [38] 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 Ocean University*, 1993, **8**(2-3): 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**(2-3): 58-65.]
- [39] Wan J J, Zhang G Q, Shen M F, *et al.* Effects of starvation on muscle quality and intestinal microbiota of early wintering *Aristichthys nobilis* [J]. *Journal of Aquaculture*, 2023, **44**(5): 1-8. [万金娟, 张国清, 沈美芳, 等. 饥饿胁迫对鳙肌肉品质及肠道健康的影响 [J]. *水产养殖*, 2023, **44**(5): 1-8.]
- [40] Deng C K, Huang Q F, Li P, *et al.* Comparative studies on burst swimming performance of *Brachymystax tsinlingensis* and sympatric *Phoxinus lagowskii* in different life history stages [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(9): 3999-4008. [邓楚可, 黄青峰, 李平, 等. 不同生活史阶段秦岭细鳞鲑与同域物种拉氏鱊爆发游泳能力比较研究 [J]. *生态学报*, 2024, **44**(9): 3999-4008.]

FASTING ON SWIMMING ABILITY IN FOUR MAJOR CARP SPECIES OF DIFFERENT SIZES

LIN Xiao-Ju^{1,2}, YU Li-Xiong¹, ZENG Yu-Ping^{1,2}, WU Chi-Jie^{1,3}, WANG Ke¹, LIU Ming-Dian¹ and DUAN Xin-Bin¹

(1. National Agricultural Sciences Chongqing Observation Station, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China; 2. College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. College of Animal Science and Technology, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

Abstract: This study aims to explore the effects of fasting time on the swimming ability of four species of freshwater fish with different body lengths: *Mylopharyngodon piceus* (black carp), *Ctenopharyngodon idellus* (grass carp), *Hypophthalmichthys molitrix* (silver carp), and *Hypophthalmichthys nobilis* (bighead carp). Three groups of experimental fish with different body lengths were selected: short [Group W (4.34 ± 0.21)—(7.86 ± 0.29) cm], medium [Group S (14.53 ± 0.25)—(15.6 ± 0.68) cm], and long [Group E (20.29 ± 0.7)—(23.4 ± 0.51) cm] ($n=40$). After fasting for 0, 2, 5, 10, and 15 days, the induced flow velocity, critical swimming speed, and burst swimming speed were measured to assess the effects of fasting time and body length on the swimming ability of the fish. The results showed that the induced flow velocity, critical swimming speed, and burst swimming speed were all related to body length. The absolute critical swimming speed and absolute burst swimming speed (cm/s) increased with body length, while the relative critical swimming speed and relative burst swimming speed (BL/s) (body length, BL) decreased with increasing body length. There were significant differences in induced flow velocity, critical swimming speed, and burst swimming speed among the three separate body length groups (W, S, E) for each species of fish ($P<0.05$). The order of induced flow velocity, critical swimming speed, and burst swimming speed for the four major carp species was black carp>grass carp>bighead carp>silver carp. Under fasting conditions, there was no significant change in induced flow velocity ($P>0.05$), but both critical swimming speed and burst swimming speed significantly decreased ($P<0.05$), showing a gradual downward trend. Within the range of 0—15 fasting days, the induced flow velocity of Group W was significantly higher than that of Group S ($P<0.05$), and both were significantly higher than that in Group E ($P<0.01$), while the critical swimming speed and burst swimming speed of Group W were significantly lower than those of Group S ($P<0.05$), and both were significantly lower than those of Group E ($P<0.01$). The results indicate that compared with Group W, Groups S and E are less affected in swimming ability under fasting conditions, suggesting the release of four major carp species with body lengths over 10 cm. After fasting for 5 days, Groups S and E did not show significant decline in swimming ability. Moderate fasting may enhance feeding ability, but long-term fasting weakens swimming ability, affects feeding, reduces the ability to escape predators, and ultimately lower survival rates. Therefore, fasting should be avoided before release to ensure swimming ability, enhance survival ability in the wild, and increase feeding success rates. In conclusion, the swimming ability of juvenile carp species is affected by body length and fasting, with swimming ability increasing as body length increases, and fasting having the opposite effect. It is recommended to select larger (over 10 cm) and well-nourished fry for release to improve survival rates and the success of stock enhancement projects. The findings of this study provide an important theoretical basis for the optimization of stock enhancement techniques for the four major carp species.

Key words: Fasting; Body length; Four major fish species; Inductive flow velocity; Critical swimming speed; Burst swimming speed