

暗纹东方运动训练后游泳能力和呼吸代谢的变化

顾玲玲 冯广朋 韩志强

EXERCISE TRAINING ON THE SWIMMING PERFORMANCE AND RESPIRATION METABOLISM OF *TAKIFUGU OBSCURUS*

GU Ling-Ling, FENG Guang-Peng, HAN Zhi-Qiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2023.2023.0031>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

PFOS对中华倒刺幼鱼爆发游泳及运动后代谢恢复的影响

EFFECTS OF PFOS ON BURST SWIMMING PERFORMANCE AND METABOLIC RECOVERY IN JUVENILE *SPINIBARBUS SINENSIS*

水生生物学报. 2019, 43(2): 356–361 <https://doi.org/10.7541/2019.044>

游泳加速模式对团头鲂和南方鲇的最大游泳速度及运动代谢的影响

EFFECTS OF ACCELERATION MODES ON MAXIMUM SWIMMING SPEED AND ACTIVITY METABOLISM IN *MEGALOBRAHA AMBLYCEPHALA* AND *SILURUS MERIDIONALIS*

水生生物学报. 2020, 44(3): 603–611 <https://doi.org/10.7541/2020.074>

鲫幼鱼游泳运动能力的个体变异与表型关联

INDIVIDUAL VARIATION AND PHENOTYPIC CORRELATIONS IN SWIMMING PERFORMANCE OF JUVENILE CRUCIAN CARP

水生生物学报. 2018, 42(3): 561–570 <https://doi.org/10.7541/2018.070>

力竭追赶训练对两种鲤科鱼类呼吸循环系统参数和力竭运动后代谢特征的影响

THE EFFECT OF EXHAUSTIVE CHASING TRAINING ON PARAMETERS OF RESPIRATORY AND CIRCULATORY SYSTEM AND EXCESS POST-EXERCISE OXYGEN CONSUMPTION IN JUVENILE QINGBO (*SPINIBARBUS SINENSIS*) AND ROCK CARP (*PROCYPRIS RABAUDI*)

水生生物学报. 2019, 43(1): 78–85 <https://doi.org/10.7541/2019.010>

秦岭细鳞鲑代谢及低氧耐受能力对温度驯化的响应

THE METABOLISM AND HYPOXIA TOLERANCE OF *BRACHYMYSTAX LENOK TSINLINGENSIS* IN RELATION TO TEMPERATURE ACCLIMATION

水生生物学报. 2017, 41(1): 201–205 <https://doi.org/10.7541/2017.25>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2023.2023.0031

暗纹东方鲀运动训练后游泳能力和呼吸代谢的变化

顾玲玲^{1,2} 冯广朋^{1,2,3} 韩志强¹

(1. 浙江海洋大学水产学院, 舟山 316022; 2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;
3. 上海长江口渔业资源增殖和生态修复工程技术研究中心, 上海 200090)

摘要: 为了探讨增殖放流活动中持续运动训练对暗纹东方鲀游泳运动能力和呼吸代谢的作用, 经不同的强度(0.75和1.5 BL/s)和时间(1、2和4周)运动训练后, 分别测定暗纹东方鲀的临界游泳速度(U_{crit})、突进游泳速度(U_{burst})、静止代谢率(RMR)和活动代谢率(AMR)。结果表明, 低强度(0.75 BL/s)持续训练1周后, 暗纹东方鲀的 U_{burst} 、RMR、AMR无显著变化, 而 U_{crit} 显著提高; 持续训练2周, 暗纹东方鲀的 U_{crit} 、 U_{burst} 、RMR和AMR变化趋于稳定; 持续训练4周后 U_{burst} 、RMR无显著变化, 而 U_{crit} 显著下降($P<0.05$), AMR显著提高($P<0.05$)。高强度(1.5 BL/s)持续训练2周后, 暗纹东方鲀的 U_{crit} 、 U_{burst} 、RMR和AMR仍无显著变化; 持续训练4周后暗纹东方鲀的 U_{crit} 、 U_{burst} 和RMR均无显著变化, 而AMR显著下降($P<0.05$)。研究结果总体揭示, 短期的低强度训练(0.75 BL/s训练1—2周)提高了暗纹东方鲀的临界游泳能力; 持续的低强度训练(0.75 BL/s训练2—4周)提高了暗纹东方鲀的活动代谢率, 因此, 开展适当的运动训练对于提高暗纹东方鲀放流后的运动能力有一定作用, 有助于提升放流成活率和放流成效。

关键词: 临界游泳速度; 突进游泳速度; 静止代谢率; 活动代谢率; 暗纹东方鲀

中图分类号: Q178.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2023)12-2011-07



暗纹东方鲀(*Takifugu obscurus*), 隶属于辐鳍亚纲、鲀形目鲀科、东方鲀属, 为江海洄游性鱼类, 主要分布于太平洋西岸的中国近海区域以及长江中下游地区、朝鲜半岛和日本^[1]。20世纪60年代以前我国长江流域暗纹东方鲀的资源极为丰富, 1954年仅长江江苏段河豚产量就达到1000吨^[2], 然而由于环境污染、过度捕捞等, 其野生资源量急速下降。为恢复暗纹东方鲀资源量, 近年来长江口暗纹东方鲀的规模化增殖放流活动逐步开展, 每年放流数量达数十万尾。

放流苗种的存活率是影响增殖放流效果的重要因素, 然而放流所用的暗纹东方鲀苗种均来自于人工繁育和养殖, 在饵料丰富且无敌害的养殖水体中, 暗纹东方鲀摄食和躲避敌害的能力较弱, 导致其在野外环境中的存活率较低, 影响放流效果。为提高鱼类野外释放存活率, 许多学者对鱼类进行运动训练。运动训练是通过改变鱼类养殖环境中的

水流速度, 对其形成刺激, 促使鱼类的游泳行为或者生理代谢等发生改变以适应环境变化, 进而提高其到达自然环境中的存活率^[3]。其中鱼类游泳能力的高低对鱼类摄食存活、生长发育及躲避敌害是至关重要的, 也是机体保证代谢正常的重要因子^[4,5]。目前评价鱼类游泳能力的指标包括巡游速度、临界游泳速度(Critical swimming speed, U_{crit})和突进游泳速度(Burst swimming speed, U_{burst})^[6,7]。临界游泳速度是指鱼类在进行有氧运动时的最大可持续游泳速度, 通常用来作为评价鱼类有氧运动能力的指标^[8], 可反映鱼类游泳能力受不同环境因子影响后的变化, 其测定耗时相对较短, 可操作性较强, 因此使用范围较广; 突进游泳速度又称为爆发性游泳速度, 是指鱼类在较短时间内(不大于20s)可达到的最大游泳速度, 通常以白肌中的糖原、ATP和磷脂作为燃料, 可以反映鱼类无氧运动的能力, 衡量鱼类运动过程中的加速能力^[9,10], 一般只与鱼种和体长

收稿日期: 2023-02-06; 修订日期: 2023-04-11

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2020YFD0900805); 上海长江水生生物保护基金会项目(2021CL03)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2020YFD0900805); Project of Shanghai Yangtze River Fish Protection Foundation (2021CL03)]

作者简介: 顾玲玲(1998—), 女, 硕士研究生; 研究方向为渔业资源养护与利用。E-mail: gllsgxxn@163.com

通信作者: 冯广朋, 男, 博士, 研究员; 主要从事渔业资源增殖保护与开发利用研究。E-mail: fgp7711@163.com

相关^[11],突进游泳速度在自然界中与配对行为、种内竞争、捕获猎物、逃避敌害和穿越激流等行为有关^[12],可评价鱼类对自然风险的规避能力。运动作为鱼类重要的生理活动之一,常受到呼吸和循环系统功能的限制。呼吸代谢是鱼类生长发育过程中最基本的活动之一,通常与鱼类自身因素、生境变化及活动状态密切相关^[13],一般通过耗氧率的变化来反映。其中,静止代谢率(Resting metabolic rate, RMR)是指健康动物个体在某一温度、禁食且静止状态下的最小能量代谢,可反映鱼类维持整体生理状况和能量消耗的情况,只有当个体能量代谢水平高于该值时才能保证其生理功能的正常^[14];活动代谢率(Activity metabolic rate, AMR)是指鱼类在特定温度下进行临界运动的最大代谢率,表示鱼体可为机体其他生理功能(如消化、排泄、繁殖、逃避捕食和迁徙洄游等)提供的最大代谢潜能^[15]。

目前,国内外有关运动训练对鱼类游泳能力影响的研究已有很多,但多集中在鲤科鱼类、鲢鳙鱼类等,其他鱼类的相关研究较少。暗纹东方鲀作为长江口重要经济物种,其游泳能力相关的研究较为少见。为了评价运动训练对暗纹东方鲀游泳能力和呼吸代谢的影响,本研究测定了不同训练强度和训练时间下暗纹东方鲀的临界游泳速度、突进游泳速度、静止代谢率及活动代谢率的变化。研究结果有助于了解暗纹东方鲀对水流变化的适应特征,为放流地点的选择提供依据,也为今后暗纹东方鲀野化训练相关技术的优化奠定基础。

1 材料与方法

1.1 实验鱼饲养及管理

实验所用暗纹东方鲀为上海市阿顺特种水产养殖专业合作社人工繁育的健康个体,实验鱼体长为 (13.81 ± 0.64) cm,体重为 (75.14 ± 12.00) g。实验鱼暂养于中国水产科学研究院东海水产研究所的养殖桶内,每日8:30定时投喂,饵料为复合型饵料,购自于上述合作社中,全天不间断充氧,含氧量 ≥ 7 mg/L,温度为 $23.5\text{--}24^\circ\text{C}$,光照为自然光,实验时各条件保持一致,开展游泳能力测试前禁食24h。

1.2 实验方法和实验装置

实验流速按实验鱼体长的倍数设定为1个对照组和2个流速组 $[0.75\text{ BL/s}(9.94\text{ cm/s})$ 和 $1.5\text{ BL/s}(20.72\text{ cm/s})]$,实际测量值分别为 0 、 9.73 和 20.50 cm/s [在实验开始前测定暗纹东方鲀感应流速为 $(7.30 \pm 1.59)\text{ cm/s}$],所设流速可被实验鱼感知。流速测定采用L1206B型旋桨式流速仪(江苏南水水务科技有限公司)。每日8:00开始训练,每训练0.5h停训1.5h,

每日总训练时间达6h。训练时间设定3个梯度,分别为持续1周、2周和4周。

实验装置购自丹麦Loligo Systems公司,内置1个封闭式循环水槽,水槽体积为90 L,实验观察区(实验对象游泳区)尺寸约为 $66\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。在实验过程中相关参数设置均在计算机上进行,仪器配备软件AutoRespTM,同步读取实验鱼的耗氧率变化。在装置上方装有一个摄像机,用以观测记录实验过程(图1)。

1.3 测定指标

临界游泳速度 本实验采用“流速递增法”测定暗纹东方鲀的临界游泳速度。实验开始前先利用6尾暗纹东方鲀(健康无损伤)对绝对临界游泳速度进行预实验,取其平均值得出 U_c^a 。在正式实验时,将健康无损伤的实验鱼放入装置中,在低流速(5 cm/s)中适应1h,随后每隔5min增加 0.5 BL/s ,至 $60\%U_c^a$ 后每隔15min增加 $15\%U_c^a$,直至实验鱼力竭疲劳。具体方法参照王晓等^[16]对四大家鱼各游泳速度的测定步骤。当实验鱼尾部贴下游网壁无法游动超过20s时即视为疲劳,记录此时的水流速度。由于本实验所用暗纹东方鲀身体的横截面积(Cross-sectional area)并未超过游泳区域横截面的5%,没有引发阻挡效应(Solid blocking effect),所以 U_{crit} 无须校正。临界游泳速度的计算公式如下:

$$U_{\text{crit}}^a = U_{\text{max}} + (t/T)\Delta U \quad (1)$$

式中, U_{crit}^a 是绝对临界游泳速度, U_{max} 是鱼类在设定时间段的最大游泳速度, t 是最后未完成一个完整阶段性增速的时间($t < 15\text{ min}$), T 是设定时间(15 min), ΔU 是设定时间内速度的增量($15\%U_c^a$)。

突进游泳速度 突进游泳速度的测定方法类似于临界游泳速度。测定前需禁食24h,实验开始后先将实验鱼置于 5 cm/s 流速中适应1h,随后快速将流速提高至 $60\%U_c^b$,后每20s增加 $15\%U_c^b$,直至

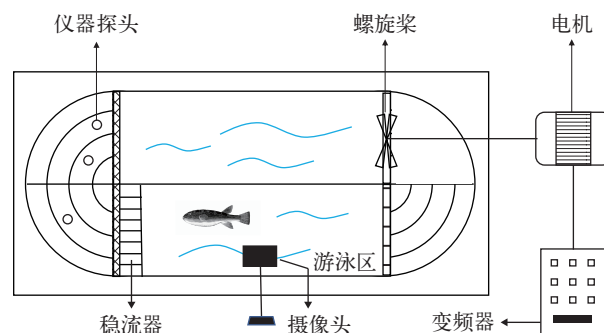


图1 鱼类游泳能力测定装置

Fig. 1 Apparatus for the determination of swimming ability of fish

鱼体疲劳不再游动。突进游泳速度的计算公式如下:

$$U_{burst}^a = U_{i-1} + (t/T)\Delta U \quad (2)$$

式中, U_{burst}^b 为绝对突进游泳速度, U_{i-1} 为鱼类停止游泳前的次最大游泳速度, t 为鱼类最后未完成一个完整阶段性增速的时间(小于20s), T 为20s, ΔU 为 $15\%U_e^b$ 。

静止代谢率 将实验鱼放置于游泳区适应1h, 在静水条件下每20min利用软件AutoRespTM测得溶氧量, 持续2h, 通过初末溶氧差计算实验鱼的耗氧率, 计算公式如下:

$$MO_2 = \frac{V}{M} \times \frac{d(DO)}{dt} \quad (3)$$

式中, V 是密封游泳区的体积(L), M 是鱼体质量(kg), $\frac{d(DO)}{dt}$ 是密封游泳区溶氧量随时间变化的斜率。

活动代谢率 在测定临界游泳速度的同时测定其游泳耗氧率, 即从实验初始阶段到暗纹东方鲀力竭时的耗氧率。计算公式同(3)。

1.4 数据统计及分析

实验数据利用IBM SPSS Statistics 26进行双因素方差分析, 探究训练强度与训练时间不同因素及其交互作用下暗纹东方鲀游泳能力和呼吸代谢率的变化, 梯度为0、0.75和1.5 BL/s, 训练1周、2周和4周, 采用Duncan's多重比较法进行组间比较。统计值均使用平均值±标准差(mean±SD)表示, 统计结果 $P < 0.05$ 时认为差异显著。图形绘制均在OriginPro 2021中完成。

2 结果

2.1 暗纹东方鲀运动训练后游泳能力的变化

临界游泳速度 结果显示, 训练强度和训练时间对暗纹东方鲀 U_{crit} 水平无交互作用 ($P > 0.05$)。但在不同强度和时间持续训练后, 暗纹东方鲀临界游泳速度存在显著差异 ($P < 0.05$; 图2)。在整个训练过程中, 1.5 BL/s训练组的临界游泳速度相较于对照组略有升高, 但二者之间无显著差异 ($P > 0.05$); 0.75 BL/s实验组在训练1周后显著升高 ($P < 0.05$), 训练2周后 U_{crit} 显著高于其他组 ($P < 0.05$), 达到相对较高水平; 在训练4周后, U_{crit} 显著下降 ($P < 0.05$)。在训练4周后, 训练组暗纹东方鲀的临界游泳速度较对照组分别提高了11.02%(0.75 BL/s)和8.07%(1.5 BL/s)。

突进游泳速度 结果显示, 训练强度和训练时间对暗纹东方鲀 U_{burst} 水平无交互作用 ($P > 0.05$)。在不同强度和时间持续训练后, 暗纹东方鲀突进游泳速度不存在显著差异 ($P > 0.05$; 图3)。在训练4周

后, 训练组暗纹东方鲀突进游泳速度均低于对照组 ($P > 0.05$)。

2.2 暗纹东方鲀运动训练后呼吸代谢的变化

静止代谢率 结果显示, 训练强度和训练时间对暗纹东方鲀静止代谢率水平无交互作用 ($P > 0.05$)。在不同强度和时间持续训练后, 暗纹东方鲀静止代谢率不存在显著差异 ($P > 0.05$; 图4)。随着训练时间的延长, 0.75 BL/s训练组的静止代谢率有升高的趋势, 而1.5 BL/s训练组则呈现先上升后下降的趋势, 训练4周后基本降为对照组水平。

活动代谢率 结果显示, 训练强度和训练时

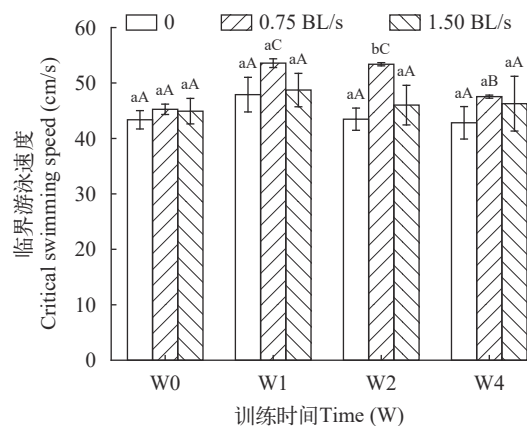


图2 暗纹东方鲀临界游泳速度随训练强度和时间变化趋势
Fig. 2 Change of critical swimming speed with exercise time and intensity of *Takifugu obscurus*

小写字母表示相同训练时间下不同训练强度之间的显著性差异 ($P < 0.05$), 大写字母表示相同的训练强度下不同训练时间之间的显著性差异 ($P < 0.05$); 下同

Lowercase letters are significant differences between different training intensities at the same training time ($P < 0.05$), and uppercase letters are significant differences between different training times at the same training intensity ($P < 0.05$); The same applies below

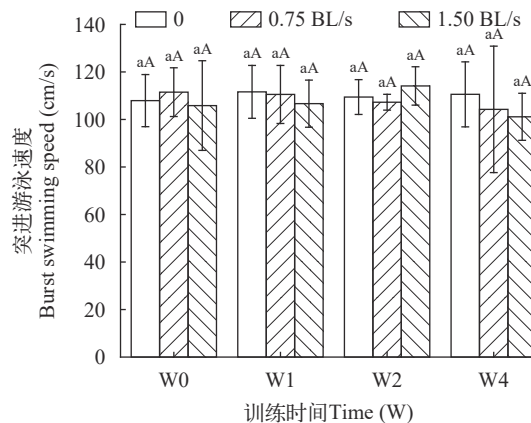


图3 暗纹东方鲀突进游泳速度随训练强度和时间变化趋势
Fig. 3 Change of burst swimming speed with exercise time and intensity of *T. obscurus*

间对暗纹东方鲀的活动代谢率水平具有显著的交互作用(图 5; $P < 0.05$)。在不同强度和时间持续训练后, 暗纹东方鲀的活动代谢率存在显著差异($P < 0.05$)。在相同训练强度下, 0.75 BL/s 训练组训练2周变化不显著, 在训练4周后显著提升($P < 0.05$); 1.5 BL/s 训练组的耗氧率随着训练时间的延长呈现先上升后下降的趋势, 在训练4周后则显著下降($P < 0.05$)。在相同训练时间下, 在训练2周后各组耗氧率无显著性变化, 在训练4周后0.75 BL/s 训练组高于对照组($P < 0.05$), 而1.5 BL/s 训练组显著低于对照组($P < 0.05$)。

3 讨论

运动训练对不同鱼类的影响不同。一方面不同鱼类经运动训练后 U_{crit} 的变化不同, 一些鱼类在进行运动训练后其 U_{crit} 会显著提高, 例如鲈鲤(*Perococypris pingi*)^[17]、宽鳍鱲(*Zacco platypus*)^[18]; 而经

过运动训练后的草鱼(*Ctenopharyngodon*)^[3] U_{crit} 显著下降。另一方面不同鱼类经运动训练后代谢率的变化也不同, 例如黄尾鲷(*Seriola lalandi*)^[19] 的RMR上升; 而斑马鱼(*Danio rerio*)^[20] 则表现为不变; 虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[21] 的RMR甚至下降。此外, 不同鱼类经运动训练后 U_{crit} 和RMR变化的相关性也有所不同。鲤(*Cyprinus carpio*) 在经过4周的持续运动后, U_{crit} 显著提升, 而RMR却显著下降^[22]; 以60% U_{crit} 训练中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*) 2周后, 其 U_{crit} 显著提升, 而RMR变化不显著^[23]。本研究结果同样发现, 暗纹东方鲀 U_{crit} 升高, 而RMR变化却不明显。 U_{crit} 和RMR之间变化趋势的不同可能是因为不同鱼类应对持续运动的“能量分配转换策略”(Switching strategy of energy allocation)不同^[24], 即鱼体能量在一种高水平的生长和高水平的游泳活动之间存在权衡。

不同的训练强度对鱼类的影响不同。研究表明, 对于大多数鱼类而言, 适中的水流速度对鱼体有积极作用, 而流速过高或过低时都会对鱼体产生一定的负面影响^[25]。例如, 训练强度为1和2 BL/s 时, 齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*) 的累积存活率优于4 BL/s 强度组和静水组的鱼^[26]。当鱼体长期处在高强度运动状态下, 不仅会导致机体免疫力下降^[27-29], 损害鱼体健康, 而且还会过量消耗体内的能量储备, 形成运动性疲劳, 影响鱼类的游泳活动^[30], 但训练时间过短又无法达到训练效果。在训练1周后, 0.75 BL/s 暗纹东方鲀 U_{crit} 和RMR一定程度上均有所升高。研究表明鱼类的RMR升高, 运动能力也会增强^[31, 32]。在相同的训练时间下, 0.75 BL/s 的 U_{crit} 和RMR均高于1.5 BL/s 训练组, 说明该训练强度下的暗纹东方鲀有氧运动能力较强。这可能是由于中低强度的运动训练会提高鱼类的能量利用效率, 而高强度的运动训练可能提高了鱼类的基础代谢水平, 导致其耗能过高, 形成运动性疲劳^[33, 34], 并且长期高强度的训练过程中肌体会产生大量自由基, 导致细胞损伤, 个体免疫机能下降, 不利于游泳能力的提高^[30]。此外, 研究表明当RMR上升时, 鱼类的生化代谢活性也会随之而升高, 鱼类可具备更强的生长潜能^[35], 这意味着0.75 BL/s 训练组的生长潜能优于1.5 BL/s 训练组。

不同的训练时间对鱼类的影响也不同。在一般情况下, AMR的提高有助于鱼体在游泳过程中进行其他生理活动, 有利于提高鱼类游泳能力^[36, 37]。本研究发现训练4周后0.75 BL/s 训练组的RMR和AMR均有明显提升, 这意味着训练4周后的暗纹东方鲀维持自身生理状况以及为其他生理功能提供

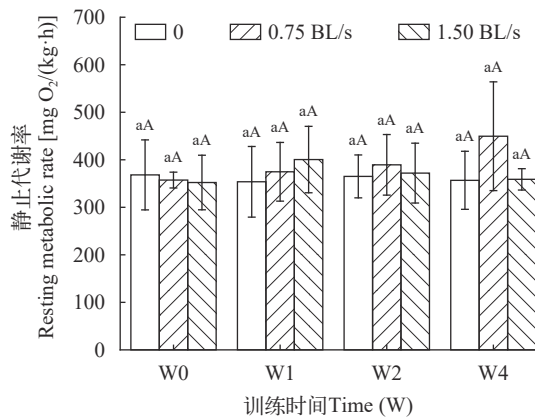


图4 暗纹东方鲀静止代谢率随训练强度和时间变化趋势

Fig. 4 Change of resting metabolic rate with exercise time and intensity of *T. obscurus*

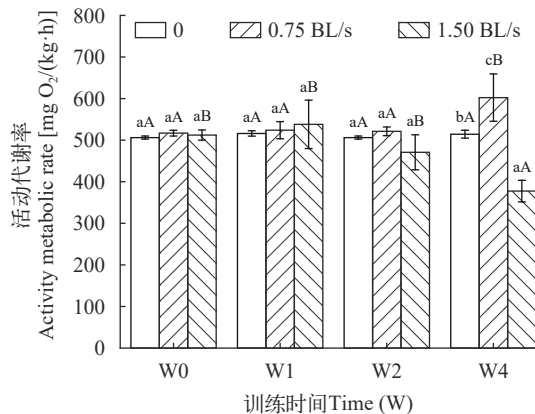


图5 暗纹东方鲀活动代谢率随训练强度和时间变化趋势

Fig. 5 Change of Activity metabolic rate with exercise intensity and time of *T. obscurus*

能量的潜能有所提升;然而训练4周后暗纹东方鲀的 U_{crit} 显著下降,这说明暗纹东方鲀 U_{crit} 可能不会随着训练时间的延长而增加。一方面可能是该时期的能量更多用于消化代谢^[24];另一方面也有可能是长期运动训练已使暗纹东方鲀产生疲劳,在进行能量权衡后减少游泳耗能以维持其他生理功能。因此,以0.75 BL/s的强度训练4周可能并不利于提高暗纹东方鲀的游泳能力。

持续运动训练对暗纹东方鲀 U_{burst} 的影响并不显著,而研究表明持续运动训练可提高鱼类的 U_{burst} ,例如虹鳟^[38]突进游泳历时延长,这可能是鱼种的不同而导致的不同训练效果。训练4周后暗纹东方鲀的 U_{burst} 较对照组均有所下降,与 U_{crit} 变化趋势一致,也能说明训练时间过长可能会导致暗纹东方鲀产生运动性疲劳,并不利于其游泳能力的提升。因此,在开展暗纹东方鲀的运动训练时,训练时间应少于4周。

4 结论

暗纹东方鲀的运动训练研究表明,短期低强度训练(0.75 BL/s训练1—2周)提高了暗纹东方鲀的临界游泳能力;持续低强度训练(0.75 BL/s训练2—4周)提高了暗纹东方鲀的活动代谢率。因此,本文建议暗纹东方鲀的运动训练强度以0.75 BL/s、训练时间以2周为宜。本研究对今后优化暗纹东方鲀放流前的关键技术环节、提高放流后的野外成活率有指导意义。然而,目前增殖放流前的野化训练多是在室内进行,其驯化环境与野外环境存在较大差别,今后在开展野化训练时应加强对野外环境的模拟,以期对暗纹东方鲀的增殖放流提供更精确的参考数据。

参考文献:

- [1] Wen X. Physiological response and molecular mechanism of *Takifugu fasciatus* to low temperature stress [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019: 9. [文鑫. 暗纹东方鲀(*Takifugu fasciatus*)应对低温胁迫的生理响应和分子机制研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2019: 9.]
- [2] Zhuang P, Zhang T, Li S F, *et al.* Fishes of the Yangtze Estuary (2nd Edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 606-610. [庄平, 张涛, 李圣法, 等. 长江口鱼类(第2版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 606-610.]
- [3] Peng Y F. The effect of exercise training on swimming ability and behavior of grass carp [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021: 7-8. [彭玉凤. 运动训练对草鱼游泳能力及行为影响研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021: 7-8.]
- [4] Ou Y J, Li J E, Liu Q. Studies on behavior selectivity and swimming ability of *Megalonibea fusca* in early development stages [J]. *Ecological Science*, 2016, **35**(4): 1-11. [区又君, 李加儿, 柳琪. 褐毛鲢早期发育阶段行为选择和游泳能力的研究 [J]. 生态科学, 2016, **35**(4): 1-11.]
- [5] Li S P, Liu X, Lin T T, *et al.* Muscle fiber plasticity, stress physiology, and muscle transcriptome determine the inter-individual difference of swimming performance in the large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. *Aquaculture*, 2023(567): 739247.
- [6] Kieffer J D. Perspective-Exercise in fish: 50+ years and going strong [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A, Molecular & Integrative Physiology*, 2010, **156**(2): 163-168.
- [7] Plaut I. Critical swimming speed: its ecological relevance [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A, Molecular & Integrative Physiology*, 2001, **131**(1): 41-50.
- [8] 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.
- [9] Cao P, Mu X P, Baiyinbaoligao, *et al.* Study on swimming behavior of juvenile grass carp for the fish channel hydraulic design [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, **48**(12): 1456-1464. [曹平, 穆祥鹏, 白音包力皋, 等. 与鱼道水力设计相关的草鱼幼鱼游泳行为特性研究 [J]. 水利学报, 2017, **48**(12): 1456-1464.]
- [10] Langerhans R, Reznick D. Ecology and Evolution of Swimming Performance in Fishes: Predicting Evolution with Biomechanics [M]. Enfield, NH: Science Publishers, 2010: 200-248.
- [11] Cai L, Fang M, Tu Z Y, *et al.* Research progress on the fish swimming performance related to migration [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2013, **59**(4): 363-368. [蔡露, 房敏, 涂志英, 等. 与鱼类洄游相关的鱼类游泳特性研究进展 [J]. 武汉大学学报(理学版), 2013, **59**(4): 363-368.]
- [12] Goolish E M. The Scaling of aerobic and anaerobic muscle power in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1989, **147**(1): 493-505.
- [13] Das S K, De M, Ghaffar M A, *et al.* Effects of temperature on the oxygen consumption rate and gill fine structure of hybrid grouper, *Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂ [J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2021, **33**(2): 101358.
- [14] Pang X, Fu S J, Cao Z D, *et al.* The effects of fasting and acclimation temperature on the resting metabolism and swimming performance in qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(7): 1854-1860. [庞旭, 付世建, 曹振东, 等. 饥饿和温度驯化对中华倒刺鲃静止代谢和游泳能力的影响 [J]. 生态学报, 2016, **36**(7): 1854-1860.]
- [15] Xia D Y. The relationship between metabolic characteristics and swimming performance, hypoxia tolerance and

- growth performance in common carp [D]. Chongqing: Southwest University, 2020: 2-3. [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, 2020: 2-3.]
- [16] 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.]
- [17] Lu Y, Li M H, Gan W X, *et al.* Effect of exercise training and detraining on swimming performance of juvenile *Percocypris pingi* [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 2019, **38**(4): 361-367. [鲁艳, 李茂华, 甘维熊, 等. 运动训练和停训对鲈鲤幼鱼游泳能力的影响 [J]. *四川动物*, 2019, **38**(4): 361-367.]
- [18] Liu H S, Cao Z D, Fu S J. Effects of flow stimulation on the swimming performance and metabolism in juvenile *Zacco platypus* [J]. *Journal of Chongqing Normal University* (Natural Science), 2015, **32**(1): 35-40. [刘海生, 曹振东, 付世建. 水流刺激对宽鳍鳊幼鱼的游泳和代谢的影响 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2015, **32**(1): 35-40.]
- [19] Brown E J, Bruce M, Pether S, *et al.* Do swimming fish always grow fast? Investigating the magnitude and physiological basis of exercise-induced growth in juvenile New Zealand yellowtail kingfish, *Seriola lalandi* [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2011, **37**(2): 327-336.
- [20] Bagatto B, Pelster B, Burggren W W. Growth and metabolism of larval zebrafish: effects of swim training [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2001, **204**(Pt 24): 4335-4343.
- [21] Larsen B K, Skov P V, McKenzie D J, *et al.* The effects of stocking density and low level sustained exercise on the energetic efficiency of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared at 19°C [J]. *Aquaculture*, 2012(324-325): 226-233.
- [22] Xia W. Effects of exercise training on swimming performance and metabolic regime in juvenile common carp (*Cyprinus carpio*) [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2012: 13-19. [夏伟. 运动训练对鲤鱼(*Cyprinus carpio*)幼鱼游泳能力的影响及其代谢机制探讨 [D]. 重庆: 重庆师范大学, 2012: 13-19.]
- [23] Zhao W W, Pang X, Peng J L, *et al.* The effects of hypoxia acclimation, exercise training and fasting on swimming performance in juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2012, **38**(5): 1367-1377.
- [24] Wieser W, Forstner H, Medgyesy N, *et al.* To switch or not to switch: partitioning of energy between growth and activity in larval cyprinids (Cyprinidae: Teleostei) [J]. *Functional Ecology*, 1988, **2**(4): 499-507.
- [25] Secombes C J, Ellis A E. The Immunology of Teleosts [M]. London: John Wiley & Sons, Ltd, 2012: 133-150.
- [26] Li X M, Yu L J, Wang C, *et al.* The effect of aerobic exercise training on growth performance, digestive enzyme activities and postprandial metabolic response in juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2013, **166**(1): 8-16.
- [27] Yu S N, Wei X L, Wei F S, *et al.* Effects of different exercise intensity on growth and serum and liver antioxidant indices of *Sparus macrocephalus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, **42**(2): 255-263. [虞顺年, 魏小岚, 韦芳三, 等. 不同运动强度对黑鲮生长、血清和肝脏抗氧化指标的影响 [J]. *水生生物学报*, 2018, **42**(2): 255-263.]
- [28] Wei X L, Yu S N, Yang Y, *et al.* Effects of exercise intensity on growth, blood innate immunity, hepatic antioxidant capacity, and HSPs70 mRNA expression of *Epinephelus coioides* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, **24**(5): 1055-1064. [魏小岚, 虞顺年, 阳艳, 等. 运动强度对斜带石斑鱼生长、非特异性免疫和肝脏抗氧化能力的影响 [J]. *中国水产科学*, 2017, **24**(5): 1055-1064.]
- [29] Wang M L, Zhang X M, Huang G Q, *et al.* The effects of water current on locomotion behavior and metabolism of juvenile swimming crab *Portunus trituberculatus* [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2009, **24**(4): 321-324. [王茂林, 张秀梅, 黄国强, 等. 水流对三疣梭子蟹幼蟹运动行为和代谢的影响 [J]. *大连水产学院学报*, 2009, **24**(4): 321-324.]
- [30] Fan W, Liu Y, Wei X L, *et al.* Effects of exercise intensity and time on the serology of juvenile *Lutjanus argentimaculatus* [J]. *Marine Fisheries*, 2020, **42**(5): 618-633. [范雯, 刘永, 魏小岚, 等. 不同运动强度和训练时间对紫红笛鲷幼鱼血清生理生化指标的影响 [J]. *海洋渔业*, 2020, **42**(5): 618-633.]
- [31] Pang X, Cao Z D, Fu S J. The effects of temperature on metabolic interaction between digestion and locomotion in juveniles of three cyprinid fish (*Carassius auratus*, *Cyprinus carpio* and *Spinibarbus sinensis*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2011, **159**(3): 253-260.
- [32] Guderley H. Locomotor performance and muscle metabolic capacities: impact of temperature and energetic status [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2004, **139**(3): 371-382.
- [33] Song B L, Lin X T, Xu Z N. Effects of upstream exercise training on feeding efficiency, growth and nutritional components of juvenile tinfoil barbs (*Barbodes schwanenfeldi*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, **36**(1): 106-114. [宋波澜, 林小涛, 许忠能. 逆流运动训练对多鳞四须鲃摄食、生长和体营养成分的影响 [J]. *水产学报*, 2012, **36**(1): 106-114.]
- [34] Liu M, Yuan J L, Lian Q P, *et al.* Different water flow

- rates on the growth performance, antioxidant capacity, energy metabolism and tissue structure of *Micropterus salmoides* under an in-pond recirculating aquaculture system [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47(1): 25-36. [刘梅, 原居林, 练青平, 等. 不同流速对流水槽大口黑鲈生长性能、抗氧化能力、能量代谢及组织结构的影响 [J]. *水生生物学报*, 2023, 47(1): 25-36.]
- [35] Ling H, Fu S J, Zeng L Q. Predator stress decreases standard metabolic rate and growth in juvenile crucian carp under changing food availability [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2019(231): 149-157.
- [36] Lee C G, Farrell A P, Lotto A, *et al.* The effect of temperature on swimming performance and oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon stocks [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2003, 206(Pt 18): 3239-3251.
- [37] Gallagher P E, Thorarensen H, Kiessling A, *et al.* Effects of high intensity exercise training on cardiovascular function, oxygen uptake, internal oxygen transport and osmotic balance in chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) during critical speed swimming [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(Pt 16): 2861-2872.
- [38] Pearson M, Spriet L, Stevens E. Effect of sprint training on swim performance and white muscle metabolism during exercise and recovery in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1990(149): 45-60.

EXERCISE TRAINING ON THE SWIMMING PERFORMANCE AND RESPIRATION METABOLISM OF *TAKIFUGU OBSCURUS*

GU Ling-Ling^{1,2}, FENG Guang-Peng^{1,2,3} and HAN Zhi-Qiang¹

(1. School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Fisheries Resources Enhancement and Ecological Restoration of the Yangtze Estuary, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to investigate the effect of continuous exercise training on the swimming performance and respiration metabolism of *Takifugu obscurus* during proliferation and release activities, the critical swimming speed (U_{crit}), burst swimming speed (U_{burst}), resting metabolic rate (RMR) and active metabolic rate (AMR) of *T. obscurus* were measured after exercise training at different intensities (0.75 and 1.5 BL/s) and durations (1, 2 and 4 weeks). The results showed that after 1 week of continuous training at low intensity (0.75 BL/s), U_{burst} , RMR and AMR had no significant changes, while U_{crit} was significantly increased. Following 2 weeks of continuous training, U_{crit} , U_{burst} , RMR and AMR remained relatively stable. After 4 weeks of continuous training, U_{burst} and RMR showed no significant change, while U_{crit} decreased significantly ($P < 0.05$) and AMR increased significantly ($P < 0.05$). After 2 weeks of high intensity (1.5 BL/s) training, there were no significant changes in U_{crit} , U_{burst} , RMR and AMR of *T. obscurus*. After 4 weeks of continuous training, U_{crit} , U_{burst} and RMR did not change significantly, while AMR decreased significantly ($P < 0.05$). The results showed that short periods of low-intensity training (0.75 BL/s training for 1 to 2 weeks) improved the critical swimming capacity of *T. obscurus*, while continuous low-intensity training (0.75 BL/s training for 2—4 weeks) increased the active metabolic rate of *T. obscurus*. Therefore, proper exercise training may play a certain role in improving the swimming capacity of *T. obscurus* after releasing, which is helpful to improve the survival rate and releasing effect.

Key words: Critical swimming speed; Burst swimming speed; Resting metabolic rate; Activity metabolic rate; *Takifugu obscurus*