

无氧运动训练和停训对大鲵幼体游泳能力和力竭运动后代谢的影响

邓春林 付世建 李秀明

ANAEROBIC EXERCISE TRAINING AND DETRAINING ON SWIMMING PERFORMANCE AND EXCESS POST-EXERCISE OXYGEN CONSUMPTION IN JUVENILE *ANDRIAS DAVIDIANUS*

DENG Chun-Lin, FU Shi-Jian, LI Xiu-Ming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2024.2024.0037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

饥饿对鲤幼鱼内脏器官指数和力竭运动后代谢特征的影响

EFFECTS OF STARVATION ON INDEX OF VISCERAL ORGANS AND EXCESS POST-EXERCISE OXYGEN CONSUMPTION OF JUVENILE COMMON CARP (*CYPRINUS CARPIO*)

水生生物学报. 2021, 45(2): 259–266 <https://doi.org/10.7541/2021.2019.167>

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 *MEGALOBrama 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>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2024.2024.0037

无氧运动训练和停训对大鲵幼体游泳能力和力竭运动后代谢的影响

邓春林 付世建 李秀明

(重庆师范大学进化生理与行为学实验室, 淡水鱼类资源保护与利用重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 为了考察无氧运动训练和停训对两栖动物运动能力及其能量代谢特征的影响, 将实验对象大鲵(*Andrias davidianus*)幼体分为6个组: 训练对照组(TC)、2天1次训练组(TOT)、1天1次训练组(TOO)、停训对照组(DC)、2天1次停训组(DOT)、1天1次停训组(DOO)。在20℃下, 训练组(TOT和TOO)进行持续3周2天1次或1天1次力竭追赶训练, 停训组(DOT和DOO)进行持续3周2天1次或1天1次力竭追赶训练后停训1周, 随后测定相对感应流速、相对暴发游泳速度及力竭运动后过量耗氧。研究发现: 所有组的相对感应流速之间都没有显著差异。TOO组相对暴发游泳速度显著高于TC组和TOT组, DOO组相对暴发游泳速度显著低于TOO组($P<0.05$)。所有组的运动前代谢率和峰值时间之间都无显著差异。TOO组运动后代谢峰值、代谢率增量、运动后恢复时间和过量耗氧都显著高于TC组和TOT组, DOO组运动后代谢峰值、代谢率增量、运动后恢复时间和过量耗氧都显著低于TOO组($P<0.05$)。综上所述: (1)无氧运动训练显著提高了大鲵幼体的无氧运动能力, 这可能与无氧代谢功能的增强有关; (2)无氧运动训练的效果与其训练强度密切相关, 并且维持时间较短。

关键词: 无氧运动训练; 停训; 暴发游泳速度; 力竭运动后代谢; 大鲵

中图分类号: Q178.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)08-1315-07



根据对氧气的需求, 可以将动物的运动训练方式分为有氧和无氧两种类型^[1, 2]。有氧运动训练过程中动物主要动用红肌进行有氧代谢供能, 持续时间通常在1个月以上, 而无氧运动训练过程中则主要由白肌进行无氧代谢供能, 通常持续几秒到几分钟^[3-5]。动物的形态结构、生理功能和行为特征会在运动训练后发生显著的变化, 不过训练效果的维持时间差异较大, 研究者认为可能与动物的种类和训练方式密切相关^[1, 3, 6]。

暴发游泳(Burst swimming)是一种持续时间短且耗能高的运动方式, 是其无氧运动能力的重要评价指标之一, 直接影响着水生动物捕捉食物和逃避敌害等活动的执行^[7, 8]。在力竭运动结束后, 动物在恢复期间的耗氧量水平比起力竭运动之前明显增加, 这些耗氧量称之为力竭运动后过量耗氧(Excess post-exercise oxygen consumption, EPOC),

是其无氧代谢能力的重要评价指标^[9, 10]。水生动物的暴发游泳能力和EPOC与其自身状态相关, 同时也受到各种生态因子的影响^[7, 11, 12]。不过, 两栖动物运动生理功能对运动训练的响应研究资料还鲜有报道^[13, 14]。

大鲵(*Andrias davidianus*), 隶属两栖纲(Amphibia), 有尾目(Caudata), 隐鳃鲵科(Cryptobrachidae)。大鲵主要栖息于清澈溪流石隙间, 其幼体主要通过外鳃在水中气体交换, 尾部侧扁, 具有明显的游泳行为^[15]。由于过度开发和人为干扰导致其栖息地萎缩, 野生大鲵种群数量稀少^[16]。大鲵人工养殖个体的捕食和避敌能力较差可能是影响其增殖放流效果的重要原因^[17]。有关大鲵疾病与防治、生理与发育、遗传与进化及保护与开发等方面的研究已有大量报道^[18]。不过, 大鲵运动功能对运动训练响应的相关研究资料还未见报道。本研究对

收稿日期: 2024-01-29; 修订日期: 2024-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(32370509); 重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-MSX0623); “成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020023)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (32370509); the National Natural Science Foundation of Chongqing Committee (CSTB2022NSCQ-MSX0623); the ‘Chengdu-Chongqing Economic Circle’ Project of the Science and Technology Research Program of the Chongqing Education Commission of China (KJCX2020023)]

作者简介: 邓春林(1999—), 男, 硕士研究生; 研究方向为水生动物生理生态。E-mail: 529036372@qq.com

通信作者: 李秀明, 教授; E-mail: xiumingli418@hotmail.com

象选用大鲵幼体,考察不同强度无氧运动训练及停训对其相对感应流速、相对暴发游泳速度和力竭运动后代谢特征的影响,分析其运动生理功能对运动训练的响应策略,为其人工养殖个体增殖放流前的野化训练提供重要的参考资料。

1 材料与方法

1.1 研究对象来源与驯养

大鲵幼体来源于湖南省临武县珠江源大鲵养殖场,在循环水养殖系统(长×宽×高, 2 m×1 m×0.5 m)内驯养4周。养殖系统水深10 cm,通过空调和充气泵控制养殖水温和溶解氧水平分别为(20.0±0.5)℃和(7.0±0.5) mg/L,光周期设置为10D:14L。每天(09:00)饱足喂养1次(饵料为摇蚊幼虫),残饵和粪便被及时清理。每天用经过充分曝气的自来水更换三分之一养殖水体。

1.2 无氧运动训练

在驯养适应期结束后,随机挑选180尾大小基本一致的大鲵幼体[(10.53±0.22) g, (12.39±0.09) cm]分为6个组,训练对照组(Training control group, TC)、1次/2d训练组(Training group once every two days, TOT)、1次/d训练组(Training group once every one day, TOO)、停训对照组(Detraining control group, DC)、1次/2d停训组(Detraining group once every two days, DOT)、1次/2d停训组(Detraining group once every one day, DOO)。每个组设置3个重复,每个重复10尾,每个重复10尾大鲵幼体养殖在一个单独的立方体单元格(30 cm×30 cm×30 cm)中。用铁丝网制作的养殖单元格放置在循环水养殖系统中,所有单元格间水体连通,水体深度10 cm。

TOT组和TOO组分别执行持续3周的1次/2d或1次/d力竭追赶训练处理。力竭追赶训练在室内白天(15:00)进行,光照条件与驯养期间白天一致。完成各训练组所有个体的训练需要的时长约2h,所有个体训练时的光照条件和设置的光照周期一致。

力竭追赶训练程序:将单尾大鲵幼体从养殖单元格中取出放入水深10 cm,直径50 cm的“环形力竭运动装置”中,在2min内通过柔软的毛笔不断地触碰其尾部,驱赶大鲵幼体快速地持续运动,当其对毛笔触碰刺激无明显应激反应时判断为达到力竭状态,随后将其转移回养殖单元格^[19]。DOT组和DOO组先分别执行持续3周的1次/2d或1次/d相同的力竭追赶训练处理,随后停训1周。TC组和DC组不进行训练处理。无氧运动训练和停训期间其他养殖条件与驯养期间相同。

1.3 感应流速和暴发游泳速度测定

从每个组的每个重复单元格中随机选取3尾(共9尾)大鲵幼体进行感应流速和暴发游泳速度的测定。经过训练和停训处理后,随机挑选用于测定相关参数的大鲵幼体的体重体长参数见表1。感应流速和暴发游泳速度测定方法详见参考文献^[19]。简要介绍如下:将单尾大鲵幼体转移到水流速度约为6 cm/s(约0.5倍体长/秒, bl/s)“水生动物游泳代谢测定仪”(3.5 L)中适应1h。随后启动电脑程序持续增加流速(加速度为0.167 cm/s²)并计时。当实验个体呈现出明显的游泳状态时的水流速度与其体长的比值作为相对感应流速($U_{r-induction}$, bl/s)。实验个体停留在测定仪末端20s不再继续游泳定义为力竭状态,此时的流速与其体长的比值作为相对暴发游泳速度($U_{r-burst}$, bl/s)。

1.4 力竭运动前后代谢率测定

本研究中通过自制的“循环密闭式代谢测定仪”(150 mL)对大鲵幼体力竭运动前后代谢率进行测定。测定方法详见参考文献^[19]。简要介绍如下:单尾大鲵幼体放置在测定仪呼吸管中禁食48h后,通过溶氧测定仪(HQ30, Hach Company)在09:00、15:00和21:00分别测定并计算该个体10个耗氧值[mg O₂/(kg·h)],将总共30个耗氧值的平均值作为该个体的力竭运动前代谢率(即,静止代谢率)。代谢率计算公式:

表1 大鲵幼体体重和体长(平均值±标准误)

Tab. 1 The body mass and body length of juvenile Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) in the present study (mean±SE)

指标Index	EPOC			游泳能力Swimming performance		
	样本数 Sample (ind.)	体重 Body mass (g)	体长 Body length (cm)	样本数 Sample (ind.)	体重 Body mass (g)	体长 Body length (cm)
训练对照组TC	9	11.87±1.18	12.92±0.45	9	11.94±0.90	12.74±0.41
2天1次训练组TOT	9	11.39±1.11	12.79±0.42	9	12.06±1.15	13.10±0.41
1天1次训练组TOO	9	12.09±1.20	13.10±0.50	9	12.51±1.22	13.02±0.50
停训对照组DC	9	11.71±0.98	12.62±0.40	9	11.48±1.16	12.92±0.46
2天1次停训组DOT	9	11.49±0.99	12.72±0.39	9	11.58±0.50	12.73±0.23
1天1次停训组DOO	9	12.31±1.49	13.00±0.52	9	11.76±0.86	12.67±0.41

$$VO_2 = (G_t - G_0) \times V \times 60 / (M \times 1000) \quad (1)$$

式中, VO_2 [$\text{mg O}_2/(\text{kg} \cdot \text{h})$]为代谢率, G_t 和 G_0 分别为实验个体在呼吸管内的耗氧斜率和呼吸管内细菌耗氧斜率, V 为呼吸管体积(0.15 L), 60为60min, M 为大鲵幼体体质量(g)。

力竭运动前代谢率测定结束以后, 从呼吸管中取出大鲵幼体放入“环形力竭运动装置”中, 使用毛笔在2min内追赶其达到力竭状态(详见上文“力竭追赶训练程序”)。随后迅速将其放回“循环密闭式代谢测定仪”中并计时, 前10min内每1min测定一次耗氧率, 随后每5min测定一次耗氧率, 测定历时90min。计算以下EPOC相关参数: 运动前代谢率 [$\text{mg O}_2/(\text{kg} \cdot \text{h})$]、运动后代谢峰值 [$\text{mg O}_2/(\text{kg} \cdot \text{h})$]、峰值时间(min)、代谢率增量 [$\text{mg O}_2/(\text{kg} \cdot \text{h})$]、运动后恢复时间(min)、过量耗氧 ($\text{mg O}_2/\text{kg}$)。各参数计算方法详见相关文献[20]。

1.5 统计分析

本研究运用Excel 2003和SPSS 19.0软件对数据进行常规计算和统计分析, 通过平均值 $\pm$ 标准误 ($\text{mean} \pm \text{SE}$)表示所有数据。无氧运动训练和停训对所有参数的影响采用双因素方差分析(ANOVA), 无氧运动训练对所有参数的影响采用单因素方差分析, 如果差异显著采用LSD法进行多重比较, 停训对所有参数的影响采用 t -Test分析。 $P < 0.05$ 为显著性水平。

2 结果

2.1 $U_{r\text{-induction}}$ 和 $U_{r\text{-burst}}$

无氧运动训练和停训对大鲵幼体 $U_{r\text{-induction}}$ 没有显著影响(表2和图1)。TOO组 $U_{r\text{-burst}}$ 显著高于TC组和TOT组 ($F_{2,53}=12.523$, $P < 0.001$); DC组和DOT组的 $U_{r\text{-burst}}$ 分别与TC组和TOT组之间没有显著差异; DOO组 $U_{r\text{-burst}}$ 显著低于TOO组 ($P < 0.05$; 表2和图1)。

2.2 力竭运动后代谢

实验个体力竭运动后代谢率都呈现出“先迅速升高, 后缓慢下降”的变化趋势。TC、TOT和TOO三个组的运动前代谢率和峰值时间都没有显著性差异(表2)。TOO组运动后代谢峰值 ($F_{2,53}=9.201$, $P < 0.001$)、代谢率增量 ($F_{2,53}=8.183$, $P = 0.001$)、运动后恢复时间 ($F_{2,53}=3.997$, $P = 0.025$)和过量耗氧 ($F_{2,53}=4.942$, $P = 0.011$)都显著高于TC组和TOT组, DOO组运动后代谢峰值、代谢率增量、运动后恢复时间和过量耗氧都显著低于TOO组 ($P < 0.05$; 表2和表3)。

表2 无氧运动训练和停训对大鲵幼体游泳能力和力竭运动后代谢参数的双因素方差统计分析表

Tab. 2 The effect of anaerobic exercise training and detraining on several variables related to swimming performance and EPOC in juvenile Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) based on the results of Two-way analysis of variance (ANOVA)

指标 Index	训练影响 Training effect	停训影响 Detraining effect	交互影响 Interaction effect
相对感应流速 Relative induction velocity	$F_{2,53}=0.555$, $P=0.578$	$F_{1,53}=0.030$, $P=0.863$	$F_{2,53}=0.212$, $P=0.810$
相对暴发游泳速度 Relative burst swimming speed	$F_{2,53}=12.523$, $P < 0.001$	$F_{1,53}=2.614$, $P=0.112$	$F_{2,53}=11.522$, $P < 0.001$
运动前代谢率 Pre-exercise metabolic rate	$F_{2,53}=0.194$, $P=0.824$	$F_{1,53}=4.006$, $P=0.051$	$F_{2,53}=1.084$, $P=0.346$
运动后代谢峰值 Peak post-exercise metabolic rate	$F_{2,53}=9.201$, $P < 0.001$	$F_{1,53}=18.782$, $P < 0.001$	$F_{2,53}=8.901$, $P=0.001$
达到峰值时间 Time to reach the peak metabolic rate	$F_{2,53}=2.940$, $P=0.062$	$F_{1,53}=4.643$, $P=0.036$	$F_{2,53}=0.016$, $P=0.984$
代谢率增量 Increment of metabolic rate	$F_{2,53}=8.183$, $P=0.001$	$F_{1,53}=12.316$, $P=0.001$	$F_{2,53}=6.648$, $P=0.003$
运动后恢复时间 The recovery time after the exercise	$F_{2,53}=3.997$, $P=0.025$	$F_{1,53}=0.072$, $P=0.790$	$F_{2,53}=3.825$, $P=0.029$
过量耗氧 EPOC magnitude	$F_{2,53}=4.942$, $P=0.011$	$F_{1,53}=1.109$, $P=0.298$	$F_{2,53}=9.254$, $P < 0.001$

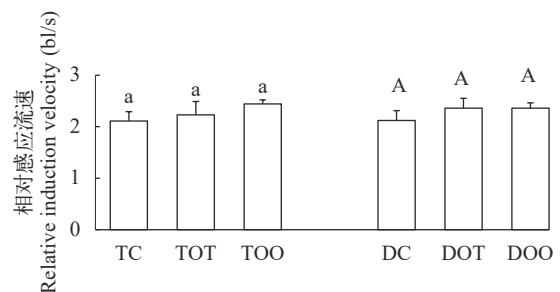


图1 无氧运动训练和停训对大鲵幼体相对感应流速的影响 (平均值 $\pm$ 标准误)

Fig. 1 The effect of anaerobic exercise training and detraining on relative induction velocity in juvenile Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) ($\text{mean} \pm \text{SE}$)

TC. 训练对照组; TOT. 训练1次/2d组; TOO. 训练1次/d组; DC. 停训对照组; DOT. 停训1次/2d组; DOO. 停训1次/d组; 上标小写字母不同表示训练组之间差异显著, 上标大写字母不同表示停训组之间差异显著; 下同

TC. Training control group; TOT. Training group once every two days; TOO. Training group once every day; DC. Detraining control group; DOT. Detraining group once every two days; DOO. Detraining group once every day. Different lower letters indicate significant differences in different training treatment groups ($P < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences in different detraining treatment groups ($P < 0.05$); The same applies below

3 讨论

3.1 无氧运动训练与停训对 $U_{r-induction}$ 和 $U_{r-burst}$ 的影响

水流是水生动物生活史中重要的生态因子,对其形态、生理和行为都能产生显著影响^[1]。能够诱导水生动物产生自发游泳行为的水流速度称之为感应流速,它具有明显的种间差异,在物种保护实践具有重要的参考价值^[21, 22]。本研究发现,大鲵幼体的感应流速大约在2.21—2.44 bl/s,这与我们之前的研究结果相似^[19]。无氧运动训练(1次/2d或1次/d, 21d)对大鲵幼体的感应流速都没有产生显著性影响(图1)。我们之前的研究也发现,不同摄食水平

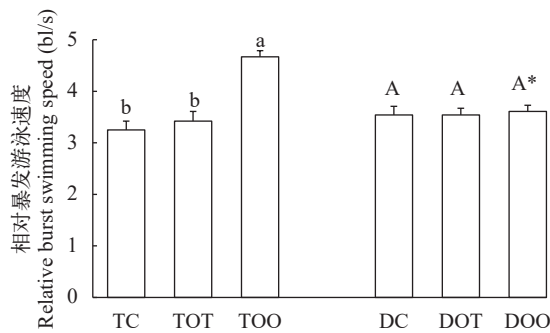


图2 无氧运动训练和停训对大鲵幼体相对暴发游泳速度的影响(平均值±标准误)

Fig. 2 The effect of anaerobic exercise training and detraining on relative burst swimming speed in juvenile Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) (mean±SE)

*表示训练组和停训组之间差异显著

The asterisk (*) denotes a significant difference in values between training and detraining groups ($P < 0.05$)

下大鲵幼体的感应流速也并未发生显著变化^[19]。由此表明,相同规格(发育阶段)大鲵幼体的感应流速比较稳定,且受环境因子的影响很小。

以往研究发现,动物的运动能力可以从适当的运动训练中获益^[1, 3, 6],但有关两栖动物运动训练的研究资料较少^[13, 14]。科罗澳拟蟾(*Pseudophryne corroboree*)经过4周的逃逸运动训练后,其跳跃速度显著增加^[13]。豹蛙(*Rana pipiens*)经过力竭追赶训练(3次/w, 6.5周)后,跳跃至力竭的总次数显著增加^[14]。本研究发现,1次/d无氧运动训练(21d)显著提高了大鲵幼体的暴发游泳速度,而1次/2d无氧运动训练(21d)却对其暴发游泳速度没有显著影响(图2)。由此表明,无氧运动训练能够改善大鲵幼体的运动能力,但其效果依赖于训练强度的大小。改善的暴发游泳速度有利于大鲵幼体在野外环境中的捕食和逃逸活动,进而可能提高其野外生存能力。不过,本研究还发现停训1次/2d组和停训1次/d组与停训对照组的暴发游泳速度无显著差异(图2)。由此表明,停训1周后大鲵幼体的暴发游泳速度下降并恢复到训练之前的水平,训练效果持续时间相对较短。这种结果与无氧运动训练及停训后的瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)幼鱼相似^[3]。

3.2 无氧运动训练与停训对力竭运动后代谢特征的影响

大鲵幼体在禁食48h后且相对静止的状态下测定获得的力竭运动前代谢率,能够反映其基本的维持能量代谢(图3)。本研究发现,训练1次/2d组、1次/d组和对照组之间力竭运动前代谢都无显著性差异(表3),表明其维持能量代谢在力竭追赶训练

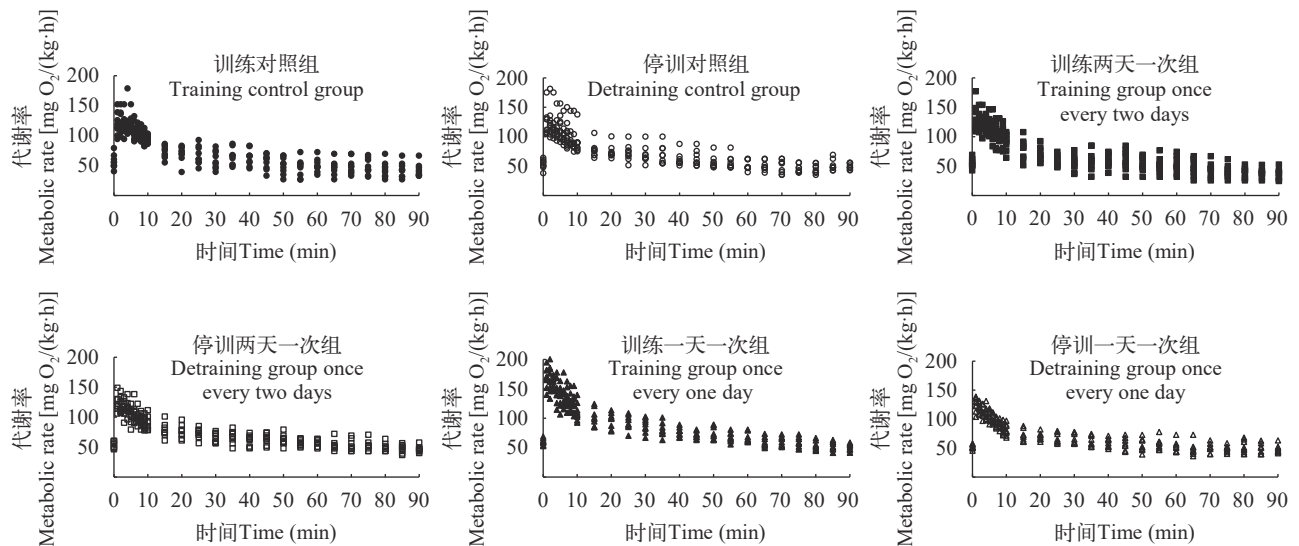


图3 无氧运动训练和停训对大鲵幼体力竭运动后代谢反应的影响

Fig. 3 The effect of anaerobic exercise training and detraining on excess post-exercise oxygen consumption (EPOC) response in juvenile Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*)

条件下表现得相对保守。这种现象在瓦氏黄颡鱼和锦鲤(*Carassius auratus*)幼鱼等水生动物的研究中也发现^[3, 23]。无氧运动训练也可能导致水生动物的力竭运动前代谢产生显著的变化。例如, 南方鲇(*Silurus meridionalis*)和岩原鲤(*Procypris rabaudi*)幼鱼运动前代谢率在无氧运动训练后分别呈现出显著增加和降低的趋势^[5, 24]。这些研究结果表明, 水生动物维持能量代谢反应在无氧运动训练后表现出明显的种间差异。

动物在力竭运动后其耗氧率会显著增加, 在此过程中的代谢率峰值往往被用作其有氧代谢能力的评价指标之一, 它与维持代谢率之间的差值(即代谢率增量)代表着动物进行各种有氧代谢活动的有效代谢空间大小^[20, 25]。由于运动过程中代谢途径的差异, 通常认为无氧和有氧运动训练分别有利于水生动物无氧和有氧代谢能力的改善^[1]。但是也有研究表明, 水生动物有氧代谢能力也能够从无氧运动训练中得到改善。例如力竭追赶训练(1次/d, 14d)导致瓦氏黄颡鱼运动后代代谢峰值显著增加^[3]。南方鲇运动后代代谢峰值在力竭运动训练(1次/d, 15d)后也显著提高^[24]。本研究发现, 力竭追赶训练(1次/d, 21d)显著提高了大鲵幼体运动后代代谢峰值(表 3)。由此表明, 无氧运动训练能够显著改善大鲵幼体的有氧代谢能力。有研究发现, 力竭追赶训练(3次/周, 6.5周)后豹蛙肌肉柠檬酸合成酶活性显著提高, 暗示其有氧代谢能力的显著改善^[14]。此外, 大鲵幼体的代谢率增量在力竭运动训练(1次/d, 21d)后也显著增加(表 3), 暗示其进行各种有氧代谢活动的有效代谢空间显著扩大。本研究发现, 停训 1 次/d 组的运动后代代谢峰值和代谢率增量显著低于

训练 1 次/d 组, 与停训对照组无显著差异(表 3)。由此表明, 力竭追赶训练对大鲵幼体有氧代谢能力和代谢空间的改善效果并不能维持超过 1 周的时间, 这与瓦氏黄颡鱼的研究结果相似^[3]。

动物 EPOC 的大小与机体乳酸耐受、糖原代谢及内环境酸碱平衡等因素相关, 是反映其无氧代谢能力的重要指标之一^[26]。迄今为止, 无氧运动训练对水生动物 EPOC 大小的影响没有得出一致的结论。例如, 瓦氏黄颡鱼、南方鲇和岩原鲤幼鱼的 EPOC 大小在力竭追赶训练后没有显著性变化, 但是锦鲤和中华倒刺鲃幼鱼的 EPOC 大小在力竭追赶训练后显著增大^[3, 5, 23, 24]。力竭追赶训练(3次/周, 6.5周)后的豹蛙肌肉总乳酸含量和糖原消耗与对照组没有显著差异, 研究者认为其无氧代谢能力并没有获得改善^[14]。本研究发现, 训练 1 次/d 组的 EPOC 大小显著高于训练对照组和训练 1 次/2d 组, 停训 1 次/d 组的 EPOC 大小与停训对照组没有显著不同(表 3)。由此可见, 大鲵幼体的无氧代谢能力能够从力竭追赶训练中获益, 这可能是其暴发游泳能力显著提高的重要原因之一。不过, 这种正面效果与训练强度相关, 相对较大的训练强度(1次/d)似乎更有利于其无氧代谢能力的提高, 但是其维持时间相对较短。

综上所述, 大鲵幼体经过无氧运动训练后其游泳能力及有氧和无氧代谢功能显著增强, 这有利于其觅食和避敌等活动, 提高其野外生存率。因此, 无氧运动训练可以考虑作为一种潜在有效的大鲵幼体增殖放流前野化训练的手段之一。不过, 大鲵幼体是否能够从无氧运动训练中获益与训练的程度密切相关, 并且 1 周后其训练效果将消失。因此,

表 3 无氧运动训练和停训对大鲵幼体力竭运动后代代谢参数的影响(平均值±标准误)

Tab. 3 The effects of anaerobic exercise training and detraining on several parameters of excess post-exercise oxygen consumption (EPOC) response in juvenile Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*; mean±SE)

指标 Index	运动前代谢率 Pre-exercise metabolic rate [mg O ₂ /(kg·h)]	运动后代代谢峰值 Peak post-exercise metabolic rate [mg O ₂ /(kg·h)]	达到峰值时间 Time to reach the peak metabolic rate (min)	代谢率增量 Increment of metabolic rate [mg O ₂ /(kg·h)]	运动后恢复时间 The recovery time after the exercise (min)	过量耗氧 EPOC magnitude (mg O ₂ /kg)
训练对照组 TC	56.21±3.79	131.81±7.30 ^b	2.66±0.55	75.59±7.11 ^b	44.44±3.58 ^b	16.31±1.43 ^b
训练 2 天 1 次组 TOT	55.44±2.59	135.06±6.49 ^b	1.89±0.39	79.61±6.80 ^b	47.22±5.47 ^b	16.68±2.21 ^b
训练 1 天 1 次组 TOO	60.22±1.69	176.48±5.16 ^a	1.89±0.26	116.26±6.15 ^a	66.11±2.74 ^a	33.26±3.05 ^a
停训对照组 DC	53.69±2.61	128.47±7.57	2.00±0.45	74.78±6.93	50.55±4.37	21.00±3.49
停训 2 天 1 次组 DOT	54.06±1.88	125.20±3.82	1.22±0.15	71.14±3.97	52.78±4.18	20.42±2.62
停训 1 天 1 次组 DOO	52.09±1.28*	127.38±3.58*	1.33±0.17	75.28±2.63*	51.66±4.56*	18.11±2.29*

注: “*”表示训练组和停训组之间差异显著($P<0.05$); 上标小写字母不同表示不同训练处理组之间差异显著($P<0.05$)

Note: The asterisk (*) denotes a significant difference in values between training and detraining groups ($P<0.05$); different lower letter indicate significant differences in different training group ($P<0.05$)

延长运动训练正面效果的训练制度仍有待进一步优化,运动训练对其环境耐受能力(热耐受和低氧耐受等)和行为特征的影响仍有待进一步研究。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Davison W. The effects of exercise training on teleost fish, a review of recent literature [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1997, **117**(1): 67-75.
- [2] Pearson M P, Spriet L L, Stevens E D. Effect of sprint training on swim performance and white muscle metabolism during exercise and recovery in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1990, **149**(1): 45-60.
- [3] Liu Y, Cao Z D, Fu S J, *et al.* The effect of exhaustive chasing training and detraining on swimming performance in juvenile darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachelli*) [J]. *Journal of Comparative Physiology B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 2009, **179**(7): 847-855.
- [4] 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.
- [5] Li X M, Zhang Y G, He C M, *et al.* 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*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(1): 78-85. [李秀明, 张耀光, 何春梅, 等. 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 [J]. 水生生物学报, 2019, **43**(1): 78-85.]
- [6] Lu Y, Wu H, Deng L J, *et al.* Improved aerobic and anaerobic swimming performance after exercise training and detraining in *Schizothorax wangchiachii*: implications for fisheries releases [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A, Molecular & Integrative Physiology*, 2020(245): 110698.
- [7] Xia J G, Li X M, Fu S J. Effects of pfos on burst swimming performance and metabolic recovery in juvenile *Spinibarbus sinensis* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(2): 356-361. [夏继刚, 李秀明, 付世建. PFOS对中华倒刺鲃幼鱼爆发游泳及运动后代谢恢复的影响 [J]. 水生生物学报, 2019, **43**(2): 356-361.]
- [8] Fu S J, Cao Z D, Zeng L Q, *et al.* Fish Swimming: Strategy and Adaptive Evolution [M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-2. [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: 1-2.]
- [9] Gaesser G A, Brooks G A. Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review [J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1984, **16**(1): 29-43.
- [10] Børsheim E, Bahr R. Effect of exercise intensity, duration and mode on post-exercise oxygen consumption [J]. *Sports Medicine*, 2003, **33**(14): 1037-1060.
- [11] Li K G, Cao Z D, Fu S J. Effect of feeding on excess post-exercise oxygen consumption in juvenile Chinese catfish (*Silurus asotus* Linnaeus) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(6): 1036-1040. [李可贵, 曹振东, 付世建. 摄食对鲢鱼幼鱼力竭性运动后过量耗氧的影响 [J]. 水生生物学报, 2012, **36**(6): 1036-1040.]
- [12] Zeng L Q, Zhang Y G, Cao Z D, *et al.* Effect of temperature on excess post-exercise oxygen consumption in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) following exhaustive exercise [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2010, **36**(4): 1243-1252.
- [13] McInerney E P, Byrne, P G, Silla, A J. The effect of dietary antioxidants and exercise training on the escape performance of Southern Corroboree frogs [J]. *Behavioural Processes*, 2017(144): 46-50.
- [14] Cummings J W. Physiological and biochemical adaptations to training in *Rana pipiens* [J]. *Journal of Comparative Physiology*, 1979(134): 345-350.
- [15] Peng L Y. Study on the biological characteristics and the evolution of Chinese giant salamander [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2010: 28-81. [彭亮跃. 中国大鲵基础生物学及其进化的研究 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2010: 28-81.]
- [16] Turvey S T, Chen S, Tapley B, *et al.* Imminent extinction in the wild of the world's largest amphibian [J]. *Current Biology*, 2018, **28**(10): R592-R594.
- [17] Gao Y, Liu J Y, Zhang T T, *et al.* Preliminary study on acclimation of cultured Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) before stock enhancement [J]. *Journal of Economic Animal*, 2017, **21**(3): 155-163. [高宇, 刘鉴毅, 张婷婷, 等. 养殖中国大鲵在增殖放流前野化训练初探 [J]. 经济动物学报, 2017, **21**(3): 155-163.]
- [18] Wang W B, Liu P, Dou L L, *et al.* A survey of Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(2): 464-472. [王文博, 刘品, 窦玲玲, 等. 中国大鲵研究概况 [J]. 水生生物学报, 2021, **45**(2): 464-472.]
- [19] Hou Q M, Fu S J, Huang T J, *et al.* Meal size on swimming performance and excess post-exercise oxygen consumption in juvenile *Andrias davidianus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(12): 2028-2036. [侯起淼, 付世建, 黄悌基, 等. 摄食水平对大鲵幼体游泳能力和力竭运动后代谢的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(12): 2028-2036.]
- [20] Li X M, Yuan J M, Zhang Y G, *et al.* The effect of aerobic exercise training and feeding on excess post-exercise oxygen consumption in juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(2):

- 277-284. [李秀明, 袁建明, 张耀光, 等. 有氧运动训练和摄食对中华倒刺鲃幼鱼力竭运动后代谢特征的影响 [J]. 水生生物学报, 2017, **41**(2): 277-284.]
- [21] 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.]
- [22] Wang X C, Xing J J. Comparison of induction velocities for five fish species [J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, **39**(2): 77-81. [王晓臣, 邢娟娟. 5种鱼感应流速比较分析 [J]. 水生态学杂志, 2018, **39**(2): 77-81.]
- [23] Xia W, Fu S J, Peng J L, *et al.* The effect of exhaustive exercise training on the anaerobic metabolism for juvenile crucian carp [J]. *Journal of Chongqing Normal University* (Natural Science), 2011, **28**(4): 16-18. [夏伟, 付世建, 彭姜岚, 等. 力竭运动训练对锦鲤幼鱼无氧代谢能力的影响 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2011, **28**(4): 16-18.]
- [24] Cao Z D, Fu S J. The effect of exhaustive exercise training and fasting on post-exercise oxygen consumption rate in southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, **33**(5): 837-843. [曹振东, 付世建. 力竭性运动锻炼和饥饿对南方鲇运动后过量耗氧的影响 [J]. 水生生物学报, 2009, **33**(5): 837-843.]
- [25] Fu S J, Zeng L Q, Li X M, *et al.* Effect of meal size on excess post-exercise oxygen consumption in fishes with different locomotive and digestive performance [J]. *Journal of Comparative Physiology B, Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology*, 2009, **179**(4): 509-517.
- [26] Kieffer J D, Wakefield A M, Litvak M K. Juvenile sturgeon exhibit reduced physiological responses to exercise [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2001, **204**(Pt 24): 4281-4289.

ANAEROBIC EXERCISE TRAINING AND DETRAINING ON SWIMMING PERFORMANCE AND EXCESS POST-EXERCISE OXYGEN CONSUMPTION IN JUVENILE *ANDRIAS DAVIDIANUS*

DENG Chun-Lin, FU Shi-Jian and LI Xiu-Ming

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

Abstract: To investigate the effects of anaerobic exercise training and detraining on swimming performance and excess post-exercise oxygen consumption (EPOC) in juvenile *Andrias davidianus*, 180 samples of *A. davidianus* were randomly divided into six groups, each containing 30 fish: a training control group (TC), a training group once every two days (TOT), a training group once every one day (TOO), a detraining control group (DC), a detraining group once every two days (DOT), and a detraining group once every one day (DOO). The individuals in different groups underwent various treatments at a temperature of 20°C to measure relative induced velocity, relative burst swimming speed, and EPOC. The results showed no significant difference in relative induced velocity among the groups. However, the relative burst swimming speed of TOO group was significantly higher than that of the TC and TOC groups, while the relative burst swimming speed of DOO group was significantly lower than that of the TOO group ($P < 0.05$). There were no significant differences observed in pre-exercise metabolic rate of time to peak metabolic rate among all groups. Nevertheless, peak post-exercise metabolic rate, metabolic rate increment, duration, and EPOC magnitude were significantly higher in the TOO group compared to the TC and TOC groups ($P < 0.005$). Similarly, peak post-exercise metabolic rate, metabolic rate increment, duration, and EPOC magnitude of DOO group were significantly lower than those of the TOO group ($P < 0.05$). Our results suggested that (1) anaerobic exercise training significantly enhances the anaerobic exercise capacity of juvenile *A. davidianus*, possibly due to improved anaerobic metabolism function, and (2) the training effect of anaerobic exercise on juvenile *A. davidianus* is closely related to the training intensity and lasts for a short duration.

Key words: Anaerobic exercise training; Detraining; Burst swimming speed; Excess post-exercise oxygen consumption; *Andrias davidianus*