

不同温度下重复疲劳运动对鲢幼鱼游泳能力及代谢率的影响

蒋清^{1,2}, 黄应平^{1,2}, 袁喜^{1,2,3}, 靖锦杰^{1,2}, 高勇⁴, 涂志英^{1,2}

(1. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 三峡大学, 湖北宜昌 443002;

2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 三峡大学, 湖北宜昌 443002;

3. 中国科学院水生生物研究所, 湖北武汉 430072;

4. 中国长江三峡集团公司中华鲟研究所, 三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443002)

摘要:在自行设计的鱼类游泳能力测定装置中,采用流速递增法,测定了不同温度(10、15、20、25℃)条件下鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)幼鱼2次疲劳运动过程中临界游泳速度和耗氧率的变化,探究重复疲劳运动对鲢幼鱼游泳能力和活动代谢率的影响。结果表明,在10~25℃温度范围内,鲢幼鱼临界游泳速度随温度升高而呈线性增加($U_{crit,1} = 3.52 + 0.14T, R^2 = 0.98, P < 0.05$; $U_{crit,2} = 3.33 + 0.09T, R^2 = 0.97, P < 0.05$),重复运动后的临界游泳速度明显小于第1次。运动最大耗氧量(MMR)和标准代谢率(SMR)均随温度升高而增加,且第1次测试的耗氧率显著高于第2次;运动后过量耗氧率(Excess post-exercise oxygen consumption, EPOC)随着温度升高而增加,与温度相关性显著($P = 0.024$);第2次测试疲劳后EPOC较第1次低,疲劳运动对EPOC影响不显著($P = 0.36$);表明适宜温度范围内,温度对游泳能力和活动代谢具有促进作用,疲劳运动对鱼类游泳能力和活动代谢不利,有一定的抑制作用。

关键词:鲢;温度;游泳能力;运动后过量耗氧率

中图分类号:X143 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2016)06-0089-06

近年来,各种水利工程的兴建在给人类工作生活带来便利的同时,也破坏了河流原有的生态系统平衡,阻断了鱼类的洄游路线,修建各种过鱼设施在水利工程中已经成为必不可少的部分。在鱼道中,鱼类从河道下游回溯至上游时,大部分时间的运动表现为重复运动;因此,对重复运动条件下鱼类游泳能力及能量代谢变化的研究具有重要意义。

环境温度是鱼类生存的关键性环境因素之一,温度的改变对鱼类能量代谢产生直接影响,耗氧率反映了鱼类的代谢水平(Holt et al, 2015)。水温升高,酶的活性提高,维持鱼类活动强度也会增大,维持机体平衡的能量需求增加,代谢率升高(Qiang et al, 2014);超过适宜温度阈值,鱼体的生理机能发生改变,代谢率异常;不同温度下,鱼类连续游泳的能力也不一样(Lee et al, 2003)。常温下瓦氏黄颡

鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)的绝对临界游泳速度为3 BL/s左右,而在低温条件下其绝对临界游泳速度却在2 BL/s左右(段辛斌等,2015)。环境温度发生改变,鱼类会通过能量代谢和行为调节来维持自身平衡,保证顺利地洄游至河道上游。

鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)属鲤形目、鲤科,是江河-湖泊半洄游性鱼类,栖息在水域的中上层,性情活泼,善跳跃。水利工程的兴建极大地改变了鲢的栖息环境,其中库区及下游河段水温的变化,改变了水生生物的生存条件,对大多数鱼类的繁殖极为不利。目前,对鲢幼鱼游泳行为的研究包括水流障碍的模拟(胡运燊等,2015)、温度对其游泳能力及耗氧率的影响(房敏等,2013)、冲刺和诱导流速的测定(石小涛等,2014);对其运动后过量耗氧率(Excess post-exercise oxygen consumption, EPOC)受温度及疲劳影响的研究未见报道。本文利用实验室自制鱼类游泳能力测定装置,采用递增流速法测定了不同温度下鲢幼鱼连续游泳的耗氧率、最大耗氧率、日常代谢率、运动后过量耗氧率和临界游泳速度等参数,分析不同温度下连续运动对其活动代谢及疲劳恢复的影响,探究鲢幼鱼氧代谢恢复机制和重复运动能力,为改善人工流水养殖工艺及水利工程鱼道设计提供基础数据。

收稿日期:2015-12-15

基金项目:国家自然科学基金(51309140);国家水专项(2012ZX07104-003-04);三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室主任基金(0704102)及湖北省创新群体项目(2015CFA02)。

作者简介:蒋清,1991年生,男,在读研究生,专业方向为生态水利。E-mail: 1192450835@qq.com

通信作者:涂志英,1973年生,女,副教授,主要从事环境生态学。E-mail: zytu1111@163.com

1 材料与方法

1.1 试验材料

人工饲养的鲢幼鱼 50 尾购于宜都水产养殖场,用 0.3% 高锰酸钾浸泡 10 min 后,暂养于曝气后的鱼缸中驯养 2 周。驯化期间,每 2 d 饱食 1 次(饲料营养含量:蛋白质 >45%,脂肪 >6%,纤维素 <4%,灰分 <12%);进食 30 min 后,清除鱼缸内的残余物,换水量 50%,注入曝气后的自来水。用充气泵不停向水体充入空气,使溶氧水平大于 6.5 mg/L,自然水温(10~25℃),自然光照周期。

1.2 实验方法

将驯养 2 周的鲢幼鱼随机分到 4 个水箱,每箱 10 尾。利用制冷机和加热泵控制 4 个水箱的温度(10、15、20 和 25℃,温度变化 1~2℃/d),在设定温度下适应 1~2 周,饲养条件和换水与驯化期间相同。实验前 48 h 不投喂饵料。用细网将 1 尾驯养实验鱼转移至游泳能力测定装置密封区域(40 cm × 10 cm × 10 cm),装置内水温、水质等条件与驯养水箱相同,最小流速(0.06 m/s)适应 2 h。开始正式测试,5 min 内流速增加为 60% U_{crit} (预实验采用流速递增法确定临界游泳速度 U_{crit}),然后每隔 20 min 增加 15% U_{crit} ,每隔 5 min 记录 1 次溶氧量(DO),直至疲劳(判定标准:实验鱼被水流冲至游泳区后 20 s 不能重新调整进行游泳)(Lee et al, 2003);立即将流速调低至最小(0.06 m/s),让实验鱼休息恢复 60 min,其间每隔 3 min 记录 1 次溶氧量;然后用以上方法重复测试 1 次游泳至疲劳的过程。实验结束后将鱼取出称重,测量体长等相关参数(表 1)。

表 1 实验鲢幼鱼体重和体长

Tab.1 Body length and weight of test juvenile silver carps

温度/℃	10	15	20	25
体重/g	13.6 ± 0.2	13.7 ± 0.6	13.3 ± 0.6	13.5 ± 1.5
体长/cm	9.8 ± 0.2	9.8 ± 0.2	9.7 ± 0.1	9.9 ± 0.3

临界游泳速度的计算方法:

$$U_{crit} = U_{max} + \frac{t}{\Delta t} \Delta U$$

式中: U_{max} 为整个时间段内鲢幼鱼能够完成游泳的最大速度(BL/s), t 为在疲劳流速下游泳时间(min), Δt 为每个流速设置下的时间,在此实验中 $\Delta t = 20$ min, ΔU 为流速递增量。

耗氧率 [M_{O_2} , mg/(kg × h)] 计算方法:

$$M_{O_2} = V \frac{d(DO)}{dt} / M$$

式中: V 为试验装置密封区的体积(L,该实验的密封区体积为 15 L), $\frac{d(DO)}{dt}$ 为溶氧量随时间的变化率, M 为实验鱼的体重(kg)。幼鱼身体截面积小于游泳区截面积的 10%,因此可以近似认为鱼类游泳速度等于水流速度(Jain et al, 2003)。空白实验中,密封区的耗氧量远远小于鲢幼鱼的耗氧量,故水体微生物的耗氧量可以忽略不计。

过量耗氧率(EPOC)计算方法(实验鱼在力竭运动后恢复过程中,各个时间点高于运动前耗氧率的差值在时间上的积分):

$$EPOC = \int [M_{O_2}(t) - SMR] dt$$

式中: M_{O_2} 为疲劳后耗氧率, SMR 为标准代谢率。

1.3 数据处理

所有实验数据均采用 Origin 8.1 进行生物学统计分析,多个指标比较采用双因素方差分析(two way analysis of variance, ANOVA),并进行组间差异性比较,结果用平均数 ± 标准误差(Mean ± SE)表示,显著水平设定为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 不同温度条件下连续运动的临界游泳速度

实验温度(10、15、20、25℃)下,鲢幼鱼临界游泳速度(U_{crit})随着温度(T)的增加而呈线性增加(图 1)。第 1 次测试: $U_{crit,1} = 3.52 + 0.14 T$ ($R^2 = 0.98, P < 0.05$);第 2 次测试: $U_{crit,2} = 3.33 + 0.09 T$ ($R^2 = 0.97, P < 0.05$)。可见疲劳运动导致临界游泳速度显著下降($P < 0.05$)。

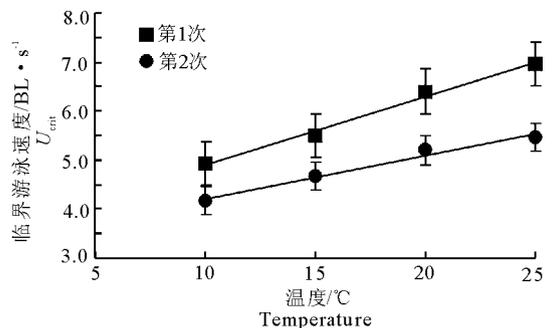


图 1 临界游泳速度与温度的关系

Fig.1 Variation of critical swimming speed with temperature

2.2 不同温度条件下连续运动的疲劳前耗氧率

根据耗氧曲线外推至纵坐标轴($U = 0$)获得标准代谢率(Reidy et al, 2000)见表 2 和图 2。连续运动条件下,标准代谢率 SMR_1 (第 1 次测试)和 SMR_2

(第 2 次测试) 随温度的升高而显著上升 量(MMR)随温度的上升而增加, MMR₁ 显著高于 (P < 0.05), 且 SMR₁ > SMR₂; 鲢幼鱼运动最大耗氧 MMR₂ (P < 0.05)。

表 2 不同温度下鲢幼鱼重复疲劳运动的标准代谢率 (SMR) 和运动最大耗氧量 (MMR)

Tab. 2 Maximum oxygen consumption (MMR) and standard metabolic rate (SMR) of juvenile silver carp during repeated swimming tests at different temperatures

温度/°C	SMR ₁ /mg · (kg · h) ⁻¹	SMR ₂ /mg · (kg · h) ⁻¹	MMR ₁ /mg · (kg · h) ⁻¹	MMR ₂ /mg · (kg · h) ⁻¹
10	376.15 ± 20.13 ^a	257.23 ± 10.85 ^a	988.25 ± 77.84 ^{ab}	827.85 ± 72.85 ^{ab}
15	645.48 ± 10.12 ^b	327.01 ± 22.60 ^b	1080.00 ± 80.00 ^a	918.50 ± 81.52 ^a
20	692.29 ± 10.90 ^{bc}	561.16 ± 15.71 ^{bc}	1399.00 ± 66.80 ^{bc}	1306.00 ± 61.60 ^{bc}
25	1064.22 ± 30.89 ^d	837.15 ± 16.80 ^d	1688.00 ± 64.53 ^d	1495.00 ± 54.84 ^d

注:不同小写字母 a、b、c、d 表示数据间差异显著 (P < 0.05)。

Note: Different lowercase letters (a, b, c, d) indicate significant differences (P < 0.05).

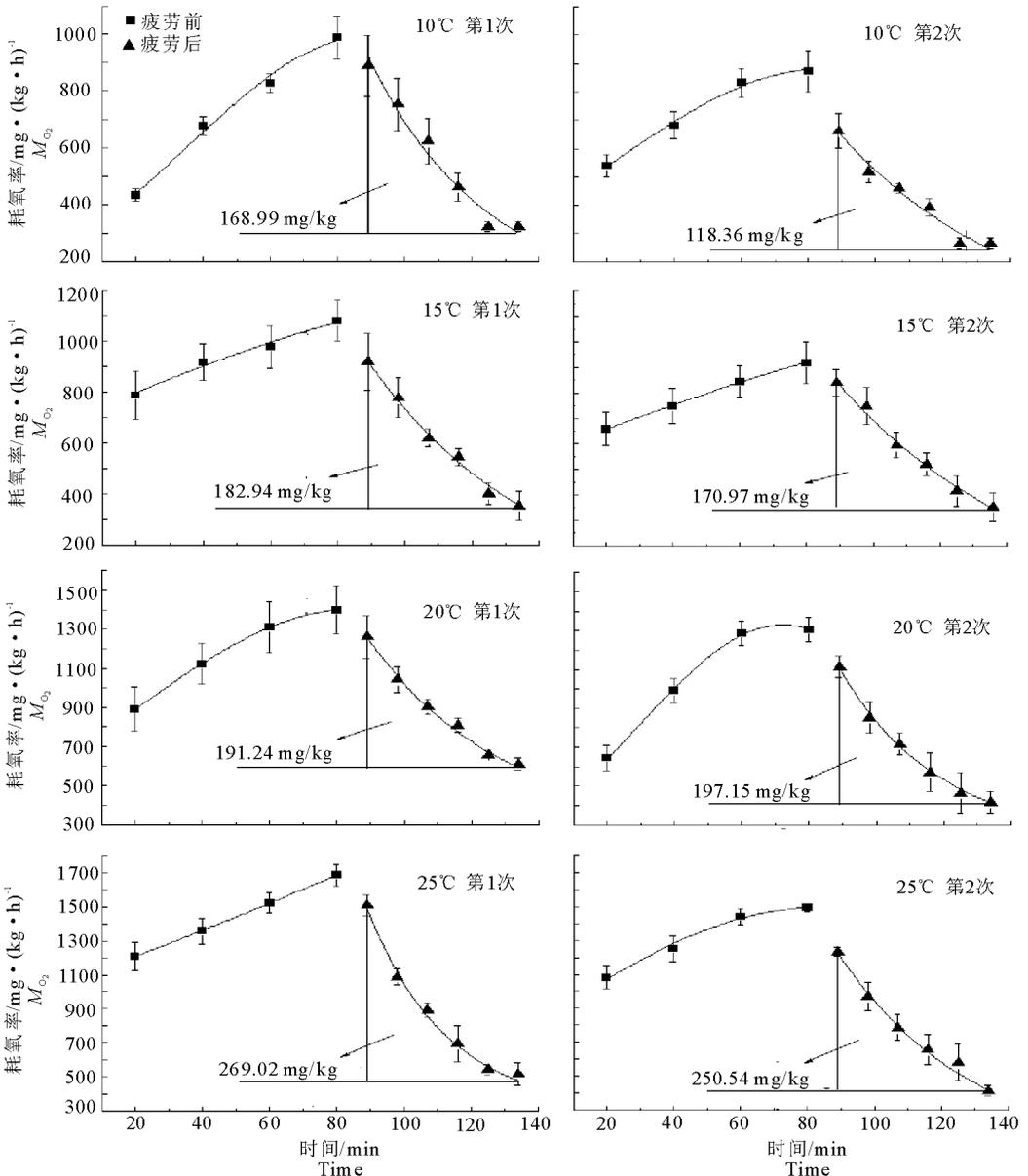


图 2 不同温度鲢幼鱼重复疲劳运动过程中的耗氧量变化

Fig. 2 Oxygen consumption rate of juvenile silver carp during repeated swimming tests at different temperatures

2.3 不同温度条件下连续运动的过量耗氧率

随着温度的上升, 鲢幼鱼的过量耗氧率 (EP-

OC) 呈增加趋势 (表 3)。换水休息后, 鲢幼鱼第 2

次运动的 EPOC 也随温度的上升而增加; 其中, 在

10、15、25℃时,第1次运动后的 EPOC 均显著高于第2次运动后的 EPOC;在20℃时,第1次运动后的

EPOC 比第2次运动后的 EPOC 略小,但两者接近相等。

表3 不同温度下鲢幼鱼重复疲劳运动的过量耗氧率

Tab.3 Excess post-exercise oxygen consumption (EPOC) of juvenile silver carp after repeated swimming tests conducted at different temperatures

测定 频次	不同温度下的 EPOC 测定值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			
	10℃	15℃	20℃	25℃
第1次	168.99 ± 28.85 ^a	182.94 ± 27.91 ^b	191.24 ± 27.94 ^a	269.02 ± 10.89 ^c
第2次	118.36 ± 31.32 ^b	170.97 ± 25.53 ^b	197.15 ± 20.42 ^a	250.54 ± 18.31 ^c

注:不同小写字母 a、b、c 表示数据间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters a, b, c, d show significant difference between the data ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 温度及疲劳运动对临界游泳速度变化的影响

临界游泳速度是衡量鱼类游泳能力的重要指标之一,而温度是影响其游泳能力的重要因素。鱼类游泳速度与温度通常呈“钟形”(Randall et al, 1991)或线性变化趋势(Jain et al, 1997);本研究发现,鲢幼鱼临界游泳速度随温度的升高呈线性增加。鲢属于温水性鱼类,适宜生活水温为20~30℃(唐丽君等,2014)。在实验设置温度(10~25℃)范围内临界游泳速度未达到最大值,可推测其最适宜水温为25~30℃。疲劳后的临界游泳速度明显小于初次测定的临界游泳速度,表明疲劳运动对临界游泳速度有显著的抑制作用。鱼类运动达到力竭,导致能量底物的供应不足或无氧代谢产物过度积累(田凯等,2010),且运动过量消耗导致有氧运动效率降低(房敏等,2014)都将对鱼类的游泳效率产生影响;因此修建鱼道时需充分考虑其疲劳后游泳能力的衰减,设置休息区域,使其充分恢复,保证鱼类有体能顺利通过鱼道。

3.2 温度及疲劳运动对耗氧率的影响

鱼类标准代谢率与实验测定的季节相关,夏季的标准代谢最为旺盛,而冬季要稍小(Seppanen et al, 2010)。研究表明,鲢幼鱼的标准代谢率随水温升高而上升,2次连续运动至疲劳后,发现 SMR_1 明显大于 SMR_2 , MMR_1 也显著高于 MMR_2 。长时间的运动导致血糖等能量物质过量消耗,鱼类呼吸代谢降低。鱼达到临界游泳速度(U_{crit})时对应的耗氧率为最大耗氧率(MMR),其2次运动的变化规律与 U_{crit} 的变化一致,表明MMR主要用于游泳运动所需的能量。MMR随温度的上升呈线性增加,与以往的研究结果一致(Claireaux et al, 2006; Norin et al, 2012);但超过适宜的温度,鱼类的心鳃功能出现一定程度的衰竭,导致MMR降低(Eliason et al, 2011)。

运动后过量耗氧率(EPOC)总量是鱼类在运动力竭后超过SMR的额外耗氧量,一定程度反映了鱼类的最大无氧代谢能力,因此EPOC的测定可用于探究鱼类无氧运动的内在生理机制和运动策略,并预测其游泳运动的恢复能力,也是设计鱼道休息室的重要参考指标(Webber et al, 2007);其值的大小与运动疲劳后的恢复能力呈负相关(Fu et al, 2009; Pang et al, 2015)。EPOC越小,鱼类的有氧呼吸占比越大,恢复能力越强。疲劳后耗氧率的恢复历时影响鱼类的再次运动能力(Milligan et al, 1996; Liu et al, 2013)。在不同水温条件下,鲢幼鱼第1次运动疲劳后的EPOC基本大于第2次,且2次运动测得的EPOC都随温度的升高而上升,表明重复疲劳运动对鲢幼鱼的无氧代谢能力具有抑制作用,即疲劳后的恢复能力增强;而温度升高,EPOC增大,疲劳后的恢复能力随之减小。疲劳运动使有氧代谢(MMR)下降、而无氧代谢(EPOC)增加,也表明鲢幼鱼达到 U_{crit} 所利用的能量主要由有氧呼吸提供。EPOC是各种生理过程对环境及能量代谢水平的综合反映(Cai et al, 2015; Mortillaro et al, 2015);对鱼类EPOC的研究有助于探究鱼类代谢恢复机制,考察鱼类重复运动能力,同时也可水利工程鱼道设计提供基础数据。

参考文献

- 段辛斌,俞立雄,罗宏伟,等,2015. 两种温度条件下四种鱼类临界游泳速度的比较[J]. 动物学杂志, 50(4): 529-536.
- 房敏,蔡露,高勇,等,2013. 温度对鲢幼鱼游泳能力及耗氧率的影响[J]. 水生态学杂志, 34(3): 49-53.
- 房敏,蔡露,高勇,等,2014. 运动消耗对草鱼幼鱼游泳能力的影响[J]. 长江流域资源与环境, 23(6): 816-820.
- 胡运燊,石小涛,陈求稳,等,2015. 鲢幼鱼通过水流速度障碍的模拟[J]. 生态学报, 35(8): 2652-2658.
- 石小涛,胡运燊,王博,等,2014. 运用免费计算机软件 -

- SwisTrack - 分析鲢幼鱼游泳行为[J]. 水生生物学报, 38(3): 588 - 591.
- 唐丽君, 张筱帆, 张堂林, 等, 2014. 水温对鲢早期发育的影响[J]. 华中农业大学学报, 33(1): 92 - 96.
- 田凯, 曹振东, 付世建, 2010. 速度增量及持续时间对瓦氏黄颡鱼幼鱼临界游泳速度的影响[J]. 生态学杂志, 29(3): 534 - 538.
- Cai L, Johnson D, Mandal P, et al, 2015. Effect of Exhaustive Exercise on the Swimming Capability and Metabolism of Juvenile Siberian Sturgeon[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 144(3): 532 - 539.
- Claireaux G, Couturier C, Groison A L, 2006. Effect of temperature on maximum swimming speed and cost of transport in juvenile European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) [J]. Journal of Experimental Biology, 209(17): 3420 - 3428.
- Eliason E J, Clark T D, Hague M J, et al, 2011. Differences in thermal tolerance among sockeye salmon populations [J]. Science, 332: 109 - 112.
- Fu S J, Zeng L Q, Li X M, et al, 2009. Effect of meal size on excess post-exercise oxygen consumption in fishes with different locomotive and digestive performance [J]. Journal of Comparative Physiology B, 179(4): 509 - 517.
- Holt R E, Jorgensen C, 2015. Climate change in fish: effects of respiratory constraints on optimal life history and behaviour [J]. Biology Letters, 11(2): 1 - 5.
- Jain K E, Farrell A P, 2003. Influence of seasonal temperature on the repeat swimming performance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. Journal of Experimental Biology, 206(20): 3569 - 3579.
- Jain K E, Hamilton J C, Farrell A P, 1997. Use of a ramp velocity test to measure critical swimming speed in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 117(4): 441 - 444.
- Lee C G, Farrell A P, Lotto A, et al, 2003. Excess post-exercise oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon following critical speed swimming [J]. Journal of Experimental Biology, 206(18): 3253 - 3260.
- Liu M, Wang Z, 2013. Adaptive changes of Zebrafish (*Danio rerio*) to anaerobic exercise training [J]. Zoological Research, 34(3): 190 - 195.
- Milligan C L, 1996. Metabolic recovery from exhaustive exercise in rainbow trout [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology, 113(1): 51 - 60.
- Mortillaro J M, Pouilly M, Wach M, et al, 2015. Trophic opportunism of central Amazon floodplain fish [J]. Freshwater Biology, 60(8): 1659 - 1670.
- Norin T, Malte H, 2012. Intraspecific Variation in Aerobic Metabolic Rate of Fish: Relations with Organ Size and Enzyme Activity in Brown Trout [J]. Physiological and Biochemical Zoology, 85(6): 645 - 656.
- Pang X, Yuan X Z, Cao Z D, et al, 2015. The effect of temperature on repeat swimming performance in juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. Fish Physiology and Biochemistry, 41(1): 19 - 29.
- Qiang J, He J, Yang H, et al, 2014. Temperature modulates hepatic carbohydrate metabolic enzyme activity and gene expression in juvenile GIFT tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed a carbohydrate-enriched diet [J]. Journal of Thermal Biology, 40: 25 - 31.
- Randall B C, 1991. Effects of environmental factors on exercise in fish [J]. Journal of Experimental Biology, 160(1): 113 - 126.
- Reidy S P, Kerr S R, Nelson J A, 2000. Aerobic and anaerobic swimming performance of individual Atlantic cod [J]. Journal of Experimental Biology, 203(2): 347 - 357.
- Seppänen E, Piironen J, Huuskonen H, 2010. Consistency of standard metabolic rate in relation to life history strategy of juvenile Atlantic salmon *Salmo salar* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 156(2): 278 - 284.
- Webber J D, Chun S N, MacColl T R, et al, 2007. Upstream swimming performance of adult white sturgeon: effects of partial baffles and a ramp [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 136(2): 402 - 408.

(责任编辑 万月华)

Effects of Fatigue and Temperature on the Swimming Performance and Metabolic Rate of Juvenile Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*)

JIANG Qing^{1,2}, HUANG Ying-ping^{1,2}, YUAN Xi^{1,2,3}, JING Jin-jie^{1,2}, GAO Yong⁴, TU Zhi-ying^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, P. R. China;

2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Hubei Province, Yichang 443002, P. R. China;

3. Institute of Hydrobiology of Chinese Academy of Sciences, Hubei Province, Wuhan 430072, P. R. China;

4. Institute of Chinese Sturgeon Research, China Three Gorges Project Corporation, Yichang 443002, P. R. China)

Abstract: Hydropower projects fragment natural river habitat and alter the downstream hydrologic regime, leading to serious declines, or even extinction, of wild fish populations. Silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*), a common semi-migratory fish species inhabiting in the Yangtze River basin, is dramatically declining in recent years due to dam construction, over-fishing, and pollution. To better understand the swimming performance and metabolic demands of silver carp during exhaustive exercise and to provide basic data for the optimizing fish passage design, we conducted a laboratory investigation of the changes in critical swimming speed and metabolic rate of juvenile silver carp using a stepped-velocity test. Two trials were carried out in a flume-type respirometer at four temperatures (10, 15, 20, 25°C) and the critical swimming speed was determined to study the effect of repeated fatigue swimming. Oxygen consumption rates during the swimming and recovery phases were measured. Based on the results, the effect of repeated fatigue on swimming ability and active metabolic rate of juvenile silver carp were analyzed. The test fish were randomly divided into four water tanks with ten fish in each group and acclimated for 1–2 weeks at the designated water temperature. Fish were then transferred to the respirometer two hours before the test at a low velocity (0.06 m/s) to acclimate to the swim chamber and the velocity was increased to 60% of the estimated critical swimming speed (U_{crit}) over 5 min and the flow velocity was then increased in increments of 0.15 U_{crit} at 20 min. intervals. The DO was recorded every 5 min and the test was complete when the test fish was exhausted. After a 60 min resting period, another test was carried out under the same conditions. After testing, the length and weight of the silver carp was measured. Results show that U_{crit} increased linearly with water temperature in the experimental range (10–25°C) in both trials; $U_{crit,1} = 3.52 + 0.14T$ ($R^2 = 0.98, P < 0.05$); $U_{crit,2} = 3.33 + 0.09T$ ($R^2 = 0.97, P < 0.05$). The U_{crit} of the juvenile silver carp in the second trial was clearly lower than in the first trial, but the difference was significant only at 10°C. The maximum metabolic rate (MMR) and standard metabolic rate (SMR) both increased with water temperature, but the MMR and SMR during the first trial were significantly higher than those during the second trial. The excess post-exercise oxygen consumption (EPOC) also increased with temperature and there was significant correlation ($P = 0.024$). The EPOC after the second trial was lower than that for the first trial, but the difference was not significant, indicating that fatigue did not significantly impact EPOC ($P = 0.36$). In conclusion, higher temperature increases the U_{crit} and MMR of silver carps over range of temperature in this study. Fatigue affects swimming ability and metabolic activity to some degree, but fatigue recovery is enhanced. Our results will provide reference data for the design of an effective fish passage for silver carp.

Key words: juvenile silver carp; temperature; swimming ability; excess post-exercise oxygen consumption