

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*

田 凯 曹振东** 付世建

(重庆师范大学进化生理与行为学实验室, 重庆市动物生物学重点实验室, 重庆 400047)

摘 要 为了考查速度增量(Δv)和持续时间(Δt)2个参数变化对鱼类临界游泳速度(critical swimming speed, U_{crit})的影响,于25℃条件下,首先以15%临界游泳速度作为 Δv ,设置不同的持续时间(Δt :5,10,15,30,60 min);再以20 min作为 Δt ,设置不同的速度增量(Δv :5%,10%,15%,20%,30% U_{crit}),测定瓦氏黄颡鱼(*Pelteobag vachelli*)幼鱼的临界游泳速度。结果表明,随 Δt 的增加 U_{crit} 整体呈下降趋势, Δt 由5 min增加至60 min,绝对游泳速度(absolute swimming speed, U_a)由(47.4 ± 0.7) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 下降至(39.1 ± 1.5) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ($P < 0.05$),除15和30 min无显著差异外,其余各组间均存在显著差异($P < 0.05$);而 Δv 由5%提高至10% U_{crit} , U_a 由(44.1 ± 0.6) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 显著增加至(47.0 ± 0.4) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ($P < 0.05$),15%和20% U_{crit} 的 U_a 分别为(45.2 ± 0.2) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和(46.3 ± 0.8) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,与10% U_{crit} 组之间均无显著差异,但 Δv 增加至30% U_{crit} , U_a 下降至(41.7 ± 1.2) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$,显著低于其他各组水平($P < 0.05$)。表明采用不同的 Δv 和 Δt 对瓦氏黄颡鱼幼鱼 U_{crit} 的测定结果存在明显的影响;瓦氏黄颡鱼幼鱼 U_{crit} 测定适宜的 Δt 为15~30 min、 Δv 为10%~20% U_{crit} 。

关键词 瓦氏黄颡鱼;速度增量;持续时间;临界游泳速度

中图分类号 Q959.4 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2010)3-0534-05

Effects of velocity increment and duration on critical swimming speed of juvenile darkbarbel catfish. TIAN Kai, CAO Zhen-dong, FU Shi-jian (Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, Chongqing Normal University, Chongqing, 400047, China). Chinese Journal of Ecology 2010 29(3) 534-538.

Abstract: To investigate the effects of velocity increment and duration on the critical swimming speed (U_{crit}) of juvenile darkbarbel catfish (*Pelteobag vachelli*), the U_{crit} was determined with different velocity increment and duration at water temperature 25℃. The fish were first tested at the duration of 5, 10, 15, 30, and 60 min at a velocity increment of 15% U_{crit} (1.0 body length), and then, tested at a velocity increment of 5%, 10%, 15%, 20%, and 30% U_{crit} with a duration of 20 min. The absolute swimming speed (U_a) of experimental fish decreased from (47.4 ± 0.7) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ at 5 min to (39.1 ± 1.5) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ at 60 min ($P < 0.05$), but the U_a in 15 min group was not significantly different from that in 30 min group. The U_a increased from (44.1 ± 0.6) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ in 5% U_{crit} increment group to (47.0 ± 0.4) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ in 10% U_{crit} increment group ($P < 0.05$). There were no significant differences in U_a among the groups of 10%, 15%, and 20% U_{crit} , but the U_a in 30% U_{crit} increment group was significantly lower than that in other groups ($P < 0.05$). It was suggested that the values of critical swimming speed were profoundly affected by the velocity increment and duration, and the proper duration and velocity increment for darkbarbel catfish were 15-30 min and 10%-20% U_{crit} , respectively.

Key words: darkbarbel catfish; velocity increment; duration; critical swimming speed.

* 国家自然科学基金项目(30700087)、重庆市教委项目(KJ080823)和重庆市高校优秀人才支持计划资助项目。

** 通讯作者 E-mail: z. d. cao@ hotmail. com

收稿日期:2009-06-17 接受日期:2009-10-25

由于水环境和动物生存方式的多样性,各种鱼类通常在游泳运动的方式和能力上表现出很大的差异。处于临界游泳速度(critical swimming speed, U_{crit})状态下的鱼类,心输出量和耗氧率均可达到最大值(Thorarensen *et al.*, 1996),因此目前普遍采用临界游泳速度作为评价鱼类最大有氧运动能力的一个重要指标(Jain *et al.*, 1997)。游泳速度的测定基于鱼类在水流中逆流运动的生活习性,当鱼体截面积足够小时,则可将水流速度作为实验鱼的游泳速度。实验鱼在进行 U_{crit} 的测定前,通常需要在游泳管的微水流条件下进行一段时间(约为 60 min)的适应,然后将水流速度调到某一设定的初始速度(约为 50% ~ 70% U_{crit});此速度下持续一段时间(Δt)后,再以一定的速度增量(Δv)提高水流速度,通过不断提高水流速度并重复上述过程直至实验鱼力竭。临界游泳速度的计算公式如下:

$$U_{crit} = v + (t / \Delta t) \Delta v \quad (1)$$

式中: Δt 为各速度下统一设定的持续时间, t 是在最高速度下的实际持续时间($t \leq \Delta t$); Δv 为各速度梯度间的速度增量, v 为实验鱼能够完成持续时间(Δt)的最大游泳速度,即亚最高速度。自 Brett 于 1964 年提出上述测定方法以来,此方法一直被广泛使用(Jones & Randall, 1974 ;Hartwell & Otto, 1991 ;Kolok, 1991 ;Hawkins & Quinn, 1996);而实验中测定的持续时间(Δt)和速度增量(Δv)通常为研究者根据实验鱼自行设定(Lowe, 1996 ;Gree & Fisher, 2004)。临界游泳速度测量中 2 个参数(Δv 、 Δt)的改变是否可能对测定结果产生影响以及将会产生怎样的影响;一直引起学者的关注(Farlinger & Beamish, 1977 ;Hammer, 1995)。

瓦氏黄颡鱼(*Pelteobag vachelli*)不仅是一种重要的经济鱼类,也是一种常用的实验对象(陈锦云等, 2003 ;马旭州等, 2006)。本实验室相关研究显示,该种鱼的幼鱼具有较强的临界游泳能力(Liu *et al.*, 2009),在此基础上,本研究以该种鱼的幼鱼为实验对象,探讨不同的持续时间和速度增量对其临界游泳速度测定结果的影响,旨在为完善相关研究的实验测定方案提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验鱼的来源及驯化

实验鱼(体质量为 3.8 ~ 4.5 g, 体长为 5.5 ~ 6.0 cm)购于重庆合川水产养殖学校。实验前根据

相关文献在本实验室自净化循环控温水槽($L \times W \times H = 1.2 \text{ m} \times 0.55 \text{ m} \times 0.55 \text{ m}$, 实际水量 250 L, 专利申请号: 200520010485.9)驯化 3 周(Myrick & Cech, 2000),驯化期间用切碎的白鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)肉块作为饵料,每 2 d 饱足投喂 1 次,每次投喂 2 h 后清理残饵。实验水为曝气后的自来水,日换水量约为 20%,驯化期间不断向水中充气以维持水体中溶氧接近饱和状态,水温控制在 $(25.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,光周期为自然光周期。

1.2 实验方案与实验操作

实验开始前的预备实验在 $(25.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 条件下根据多数文献(Hawkins & Quinn, 1996 ;Lowe, 1996 ;Gree & Fisher, 2004 ;Fu *et al.*, 2009)提供的参数值(Δt 为 20 min, Δv 为 15% U_{crit})测得实验鱼的临界游泳速度,并据此确定 2 个参数的变化梯度:在 Δv 为 15% U_{crit} 的条件下分别设置 5 个不同的持续时间(Δt 5、10、15、30、60 min),每个处理设 6 个重复,在 Δt 为 20 min 条件下设置 5 个不同的速度增量(Δv 5%、10%、15%、20% 和 30% U_{crit}),每个处理设 10 个重复。采用实验室自行研制的压差式鱼类游泳能力测定装置(专利号: 00520010483. X)进行临界游泳速度的测定,仪器结构原理和具体操作详见张怡等(2007)。

实验鱼禁食 48 h 后,将单尾实验鱼放入游泳管内适应 1 h,水流速度调整为 $7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,接着将流速经 3 min 调到初始流速 $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (约为 50% U_{crit}),然后分别改变 2 个测定参数进行临界游泳速度的测定。当实验鱼被水流冲至游泳管尾部筛板身鱼体卷曲,且用细棒刺激鱼体无明显反应,且此状态维持时间 $\geq 20 \text{ s}$,则判定鱼体已达力竭状态(Lee *et al.*, 2003),此时即完成实验测定。所有实验鱼在实验结束后立即将鱼取出,称量体质量(g)并测体长(cm)。临界游泳速度可分为绝对临界游泳速度(absolute critical swimming speed, U_a)和相对临界游泳速度(relative critical swimming speed, U_r),为了在一定程度上消除体长对临界游泳速度带来的影响,将绝对临界游泳速度除以体长得到相对临界游泳速度(张怡等, 2007)。公式如下:

$$U_r = U_a / BL \quad (2)$$

式中, BL 为实验鱼体长(cm)。

1.3 数据分析

用 Excel (2003)对实验数据进行常规计算。然后采用 SPSS (12.0)软件进行单因素方差分析,所有

统计值均以平均值 ± 标准误表示 ,显著水平为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同 Δt 对瓦氏黄颡鱼幼鱼临界速度测定结果的影响

通过在不同持续时间(Δt)(5、10、15、30、60 min)条件下测定瓦氏黄颡鱼幼鱼的临界游泳速度发现 实验鱼的相对临界游泳速度(U_r)和绝对临界游泳速度(U_a)都随着持续时间(Δt)的增加呈现下降的趋势(图 1、表 1)。当持续时间(Δt)为 5 min 时实验鱼 U_a 最大(47.4 ± 0.7) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 60 min 处理组 U_a 最小(39.1 ± 1.5) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)(表 1)。而 15 和 30 min 处理组之间无显著差异 ,出现一个稳定平台 ,并且与其他各组间均存在显著差异($P < 0.05$)。

2.2 不同 Δv 对瓦氏黄颡鱼幼鱼临界速度测定结果的影响

结果显示 相对临界游泳速度(U_r)和绝对临界游泳速度(U_a)都随着 Δv 的增加呈现先升高后下降

表 1 不同持续时间(Δt)对瓦氏黄颡鱼幼鱼绝对临界游泳速度(U_a)的影响

Tab.1 Effect of different duration increment on the absolute critical swimming speed of *Pelteobag vachelli*

持续时间 Δt (min)	样本量 (n)	体质量 (g)	体长 (cm)	绝对临界 游泳速度 U_a ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
5	6	3.9 ± 0.2	6.1 ± 0.2	$47.4 \pm 0.7a$
10	6	4.0 ± 0.2	6.3 ± 0.2	$45.3 \pm 1.5b$
15	6	3.7 ± 0.2	6.0 ± 0.2	$42.9 \pm 1.3c$
30	6	4.0 ± 0.2	5.9 ± 0.2	$42.5 \pm 1.9c$
60	6	3.8 ± 0.2	5.9 ± 0.2	$39.1 \pm 1.5d$

数值为平均值 ± 标准误 ,同列不同字母为差异显著($P < 0.05$)。

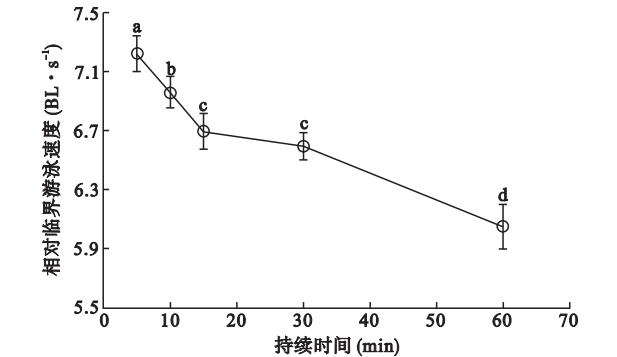


图 1 不同持续时间(Δt)对瓦氏黄颡鱼幼鱼相对临界游泳速度(U_r)的影响

Fig.1 Effect of different duration increment on the relative critical swimming speed of *Pelteobag vachelli*

不同上标的字母表示差异显著($P < 0.05$)。

表 2 不同速度增量(Δv)对瓦氏黄颡鱼幼鱼绝对临界游泳速度(U_a)的影响

Tab.2 Effect of different incremental speeds on the absolute critical swimming speed of *Pelteobag vachelli*

Δv (% U_{crit})	样本量 (n)	体质量 (g)	体长 (cm)	绝对临界 游泳速度 U_a ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
5	10	4.1 ± 0.2	6.8 ± 0.4	$44.1 \pm 0.6a$
10	10	4.3 ± 0.3	6.5 ± 0.3	$47.0 \pm 0.4b$
15	10	4.5 ± 0.3	6.6 ± 0.2	$45.2 \pm 0.2ab$
20	10	4.0 ± 0.2	6.6 ± 0.2	$46.3 \pm 0.8b$
30	10	4.3 ± 0.4	6.7 ± 0.2	$41.7 \pm 1.2c$

数值为平均值 ± 标准误 ,同列不同字母为差异显著($P < 0.05$)。

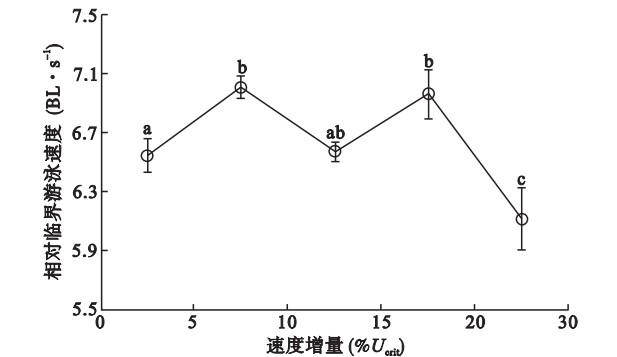


图 2 不同速度增量(Δv)对瓦氏黄颡鱼幼鱼相对临界游泳速度(U_r)的影响

Fig.2 Effect of different speed increment on the relative critical swimming speed of *Pelteobag vachelli*

不同上标的字母表示差异显著($P < 0.05$)

的趋势(图 2、表 2) ,在 Δv 为 30% U_{crit} 的时候 U_a 最低(41.7 ± 1.2) $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)(表 2) ,且与其他各处理之间存在显著差异($P < 0.05$)。当 Δv 为 10%、15%、20% U_{crit} 时 U_a 无显著差异(表 2) ,因此在 10%、15%、20% U_{crit} 处理组之间呈现一个相对稳定的平台(图 2)。

3 讨论

3.1 持续时间(Δt)对鱼类临界游泳速度的影响

目前多采用临界游泳速度指标评估并比较鱼类的最大有氧运动能力 ,因此其测定结果的可靠性显得尤为重要。有研究认为 , Δt 过短可能造成对测定结果的偏高估计(Hammer ,1995) ,但差异不会超过 7% ~ 9%(Farlinger & Beamish ,1977) ;反之 Δt 太长则不仅会造成测定结果的偏低估计 ,还会导致实验周期过长(Brett ,1967)。但也有研究发现 ,在一定的范围之内 Δt 的变化对最后的测定结果不会产生影响(Jones *et al.* ,1971) ,或影响很小(Hartwall & MOtto ,1991 ,Peake & McKinley ,1998)。本研究发

表 3 不同种鱼的临界游泳速度及测定参数

Tab.3 Critical swimming speed and parameters of different species of fish

种 类	体长 (cm)	温度 (°C)	持续时间 Δt (min)	速度增量 Δv (% U_{crit})	绝对临界游泳 速度 U_{crit} ($cm \cdot s^{-1}$)	文献来源
珊瑚礁鱼 <i>Valenciennae strigata</i>	1.6	28	5	2 ~ 10	16 ~ 57	Fisher <i>et al.</i> 2005
南方鲇 <i>Silurus meridionalis</i>	1.7	22	2	15	12	张怡等 2007
鳊 <i>Pimephales promelas</i>	29.5	15	30	17	57	Theodorakis <i>et al.</i> ,2000
鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>	15.1	10	20	20	44	Li <i>et al.</i> 2007
南方鲇 <i>Silurus meridionalis</i>	13.2	25	15	15	40	Fu <i>et al.</i> 2009
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobag vachelli</i>	5.5 ~ 6.0	25	15 ~ 30	10 ~ 20	47	本研究

现 ,瓦氏黄颡鱼幼鱼绝对临界游泳速度(U_a) ,在 Δt 为 5 min 时 ,较 15 和 30 min 的高约 10% ,较 60 min 的高约 15%(表 1) ,表明过短的 Δt 会造成临界游泳速度的过高估计 ;而当 Δt 分别为 15 和 30 min 时 ,绝对临界游泳速度(U_a)和相对临界游泳速度(U_r)均没有显著性差异($P < 0.05$) ,出现一个平台(图 1) ,因此可以认为瓦氏黄颡鱼幼鱼临界游泳速度测定的适宜持续时间为 15 ~ 30 min。已有研究发现 ,大西洋银河鱼(*Menidia menidia*)在不同的持续时间下的临界游泳速度也存在类似现象(Hartwell & Otto ,1991)。鱼类临界游泳速度测定过程通常以实验鱼达到力竭而终止(Lee *et al.* ,2003) ,有 2 个主要因素会造成实验鱼的力竭 :一方面可能由于能量底物的供给不足 ;另一方面则可能是无氧代谢的产物的过度积累(Hallén ,1996)。理论分析表明 ,过短的 Δt 会使无氧运动比例显著提高 ,进而导致临界游泳速度的偏高估计(Beamish ,1978) ;本研究在 Δt 为 5 min 时 ,瓦氏黄颡鱼幼鱼的临界游泳速度显著高于其他处理组的原因可能与此有关 ;本研究 Δt 为 60 min 时临界游泳速度明显下降则可能是由于底物供应不足所致。相关研究表明 ,当实验对象为早期发育的仔鱼时 ,所设定的 Δt 很短(2 ~ 5 min) ,而实验对象为幼鱼或成鱼时 ,所设定的 Δt 则较长(15 ~ 30 min)(表 3)。目前 ,有关 Δt 与发育阶段及体长的关系还缺乏有针对性的研究。

3.2 速度增量(Δv)对鱼类临界游泳速度的影响

在鱼类临界游泳速度测定方法的研究中 ,有关测定过程的速度增量(Δv)变化对临界游泳速度影响的资料较为匮乏。本研究结果显示 ,在 Δv 为 5% U_{crit} 和 30% U_{crit} 的情况下的 U_a 均低于其他实验组 ;因此测定黄颡鱼幼鱼临界游泳速度的适宜 Δv 范围在 10% ~ 20% U_{crit} 。由于 Δv 太小会因转换速度太多使整体测定时间过长 ,导致底物过多消耗而供应不足 ,进而造成对实验鱼测定结果的偏低估计 ; Δv

太大则测定速度提高过快 ,由此产生的水流刺激胁迫会造成姿势调整等应激性的生理效应(Drucker ,1996) ,这种效应不仅会伴随更多的无氧代谢 ,还会因此消耗更多的能量 ,从而降低游泳运动的能量效率 ,这样也可能会造成临界游泳速度测定结果的偏低估计。不同发育阶段鱼类的游泳能力有很大变化 ,测定方案所设置的 Δt 和 Δv 也不同(表 3)。其中 Δv 大多设定在 10% ~ 20% U_{crit} ,与 Δt 相比变化幅度明显较小。一般实验测定通过连续完成 3 ~ 5 个不同速度得以实现。在实验鱼对水流变化特别敏感的情况下 ,宜设定较低的 Δt (如较小的鱼) ;为了防止由此造成测定时间过长而产生底物不足的情况 , Δt 也常会设定较短(表 3)。总之 , Δv 测定参数的设定即要尽可能确保无氧代谢的比例足够低 ,胁迫尽可能小 ,还要考虑到实验对象的底物储备是否能够满足测定全过程的能量需求。因此 ,有关不同鱼类和同种鱼类不同发育阶段的临界游泳能力测定参数的设定有必要考虑实验对象的生态习性和生理特征。

参考文献

陈锦云,曹振东,谢小军. 2003. 温度对瓦氏黄颡鱼幼鱼静止代谢的影响. 西南师范大学学报,28(4):618-621.

马旭洲,王 武,甘 炼,等. 2006. 瓦氏黄颡鱼仔稚鱼生长与发育的研究. 大连水产学院学报,21(4):331-335.

张 怡,曹振东,付世建. 2007. 延长首次投喂对南方鲇仔鱼身体含能量、体长及游泳能力的影响. 生态学报,27(3):1161-1167.

Beamish FWH. 1978. Swimming capacity. Fish Physiology , Vol. 7. New York :Academic Press.

Brett JR. 1967. Swimming performance of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature. Journal of the Fisheries Research Board of Canada , 24 :1731-1741.

Drucker EG. 1996. The use of gait transition speed in comparative studies of fish locomotion. American Zoologist , 36 :

- 555-566.
- Farlinger S , Beamish FWH. 1977. Effects of time and velocity increments on the critical swimming speed of largemouth bass. *Transactions of the American Fisheries Society* , **106** : 436-439.
- Fisher R , Leis JM , Clark DL , *et al.* 2005. Critical swimming speeds of late-stage coral reef fish larvae : Variation within , among species and between locations. *Marine Biology* , **147** : 1201-1212.
- Fu SJ , Zeng LQ , Li XM , *et al.* 2009. The behavioural , digestive and metabolic characteristics of fishes with different foraging strategies. *The Journal of Experimental Biology* , **212** : 2296-2302.
- Green B , Fisher R. 2004. Temperature influences swimming speed , growth and larval duration in coral reef fish larvae. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* , **299** : 115-132.
- Hallén J. 1996. K⁺ balance in humans during exercise. *Acta Physiologica Scandinavica* , **156** : 279-286.
- Hammer C. 1995. Fatigue and exercise tests with fish. *Comparative Biochemistry Physiology* , **112A** : 1-20.
- Hartwell SI , Otto RG. 1991. Critical swimming capacity of the Atlantic Silverside , *Menidia menidia* L. *Estuaries* , **14** : 218-221.
- Hawkins DK , Quinn TP. 1996. Critical swimming velocity and associated morphology of juvenile coastal cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki clarki*) , steelhead trout (*Oncorhynchus mykiss*) , and their hybrids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* , **53** : 1487-1496.
- Jain KE , Hamilton JC , Farrell AP. 1997. Use of a ramped velocity test to measure critical swimming speed in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Comparative Biochemistry and Physiology* , **117A** : 441-444.
- Jones DR , Kiceniuk JW , Bamford OS. 1974. Evaluation of the swimming performance of several fish species from Mackenzie River. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* , **31** : 1641-1647.
- Jones DR , Randall DJ. 1971. The respiratory and circulatory systems. *Fish Physiology* , Vol 4. New York : Academic Press.
- Kolok AS. 1991. Photoperiod alters the critical swimming speed of juvenile largemouth bass , *Micropterus salmoides* , acclimated to cold water. *Copeia* , **91** : 1085-1090.
- Lee CG , Farrell AP , Lotto A , *et al.* 2003. Excess post-exercise oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon following critical speed swimming. *The Journal of Experimental Biology* , **206** : 3253-3260.
- Li DL , Fu CZ , Hu W. 2007. Rapid growth cost in " all-fish " growth hormone gene transgenic carp : Reduced critical swimming speed. *Chinese Science Bulletin* , **52** : 1501-1506.
- Liu Y , Cao ZD , Fu SJ , *et al.* 2009. The effect of exhaustive chasing training and detraining on swimming performance in juvenile darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachelli*). *Journal of Comparative Physiology* , **179B** : 847-855.
- Lowe CG. 1996. Kinematics and critical swimming speed of juvenile scalloped hammerhead sharks. *The Journal of Experimental Biology* , **199** : 2605-2610.
- Myrick CA , Cech JJ. 2000. Swimming performances of four California stream fishes : Temperature effects. *Environmental Biology of Fishes* , **8** : 289-295.
- Peake S , McKinley RS. 1998. A re-evaluation of swimming performance in juvenile salmonids relative to downstream migration. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* , **55** : 682-687.
- Theodorakis CW , Swartz CD , Rogers WJ , *et al.* 2000. Relationship between genotoxicity , mutagenicity , and fish community structure in a contaminated stream. *Aquatic Ecosystem Stress and Recovery* , **7** : 131-143.
- Thorarensen H , Gallaugh PE , Farrell AP. 1996. Cardiac output in swimming rainbow trout , *Oncorhynchus mykiss* , acclimated to seawater. *Physiological Zoology* , **69** : 139-153.

作者简介 田凯,男,1984年生,硕士研究生。主要从事鱼类生理生态学研究。E-mail : z. d. cao@ hotmail. com
责任编辑 李凤芹
