

# 持续时间对南方鲇游泳性能测定结果的影响\*

赵文文, 曹振东, 付世建

(重庆师范大学 生命科学学院 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:**为考查测定临界游泳速度( $U_{crit}$ )方案中的持续时间( $\Delta t$ )对南方鲇(*Silurus meridionalis* Chen)幼鱼的 $U_{crit}$ 及其代谢率的影响,于25℃条件下以 $6.0\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 为速度增量( $\Delta v$ ),分别在 $\Delta t$ 为20和40 min时测定实验鱼的 $U_{crit}$ 和运动代谢率( $V_{O_2}$ )。结果显示在 $\Delta t$ 为20和40 min时实验鱼的绝对临界游泳速度( $U_a$ )分别为( $31.89 \pm 1.29$ )和( $30.17 \pm 0.98$ ) $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,相对临界游泳速度( $U_r$ )分别为( $4.22 \pm 0.16$ )和( $4.05 \pm 0.14$ ) $BL\cdot\text{s}^{-1}$ ( $BL$ 表示实验鱼的体长,以厘米计),两个临界游泳指标不同处理间均无显著差异;而 $\Delta t$ 为20 min时的最大运动代谢率( $AMR$ )为( $183.36 \pm 12.80$ ) $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,显著高于 $\Delta t$ 为40 min下( $139.66 \pm 8.75$ ) $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的水平( $p < 0.05$ );另外,当 $\Delta t$ 为40 min时,前20 min和后20 min的 $AMR$ 分别为( $152.08 \pm 10.79$ )和( $121.61 \pm 6.68$ ) $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,前者显著高于后者( $p < 0.05$ ),却显著低于 $\Delta t$ 为20 min处理组的水平( $p < 0.05$ )。上述结果表明,不同的持续时间对南方鲇幼鱼的 $U_{crit}$ 的测定结果无明显影响,而对 $AMR$ 存在着显著性的影响,这种影响可能与实验鱼的应激反应程度有关,也可能由于运动过程中无氧代谢的不同比例所致。

**关键词:**持续时间,南方鲇幼鱼,临界游泳速度,代谢率

中图分类号:Q955

文献标识码:A

文章编号:1672-6693(2010)04-0012-04

游泳作为鱼类实现逃逸、捕食、繁殖等行为的主要的运动方式,为其生存、生长及繁衍提供了基本保证<sup>[1]</sup>。由于水体环境的多样性,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。衡量鱼类运动能力的指标主要有耐受力(Endurance)、临界游泳速度(Critical swimming speed  $U_{crit}$ )和爆发游泳速度(Burst swimming speed)等,分别反映鱼类的持续和加速运动能力<sup>[2]</sup>。由于鱼类在临界游泳速度的状态下的心输出量和代谢率均可达到最大值<sup>[3]</sup>,因此普遍将其作为评价鱼类最大有氧运动能力的一个重要指标<sup>[4]</sup>。游泳运动过程伴随着鱼体持续的能量消耗,而代谢率是评价鱼类能量代谢的重要指标,对于探讨能量代谢适应对策至关重要<sup>[2]</sup>。

测定鱼类 $U_{crit}$ 目前普遍采用Brett于1964年提出方法<sup>[5-7]</sup>;相关文献报道,实验测定中采用不同的持续时间( $\Delta t$ )和速度增量( $\Delta v$ )可能会对结果产生影响<sup>[8-9]</sup>。笔者所在研究组的相关研究则提出( $\Delta t$ )的影响可能更重要<sup>[10]</sup>。

南方鲇(*Silurus meridionalis* Chen)是广泛分布于长江中上游的专性肉食性鱼类,为我国重要的经济养殖鱼类,同时也是一种常用的实验对象<sup>[11]</sup>;有关该种鱼幼鱼的游泳能力研究已有报道<sup>[11-12]</sup>。为了考查测定 $U_{crit}$ 方案中的持续时间对南方鲇幼鱼的 $U_{crit}$ 及其代谢率的影响,于25℃条件下以 $6.0\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 为速度增量( $\Delta v$ ),分别在 $\Delta t$ 为20和40 min时测定实验鱼的 $U_{crit}$ 和最大运动代谢率( $AMR$ ),为鱼类游泳能力的测定和相关代谢的研究提供新资料,并有助于理解不同测定条件对实验结果的影响,进一步完善并规范实验测定方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验鱼及其驯化

南方鲇幼鱼购自于重庆市合川水产学校,在自制循环控温水槽(250 L)中驯化2周;采用曝气后的自来水,日换水量约为20%,水温为( $25 \pm 1$ )℃,通过不断向水中充入空气,以确保水体溶氧含量不低

\* 收稿日期 2010-03-15 修回日期 2010-03-26

资助项目 国家自然科学基金(No. 30700087)

作者简介 赵文文,女,硕士研究生,研究方向为鱼类生理生态,通讯作者:付世建, E-mail: shijianfu@hotmail.com

于每升 7 mg。驯化期间每天以白鲢肉块饱足投喂 1 次,每次投喂 1 h 后清除残饵。从中挑选无伤、健康且体重、体长相近的南方鲇幼鱼共 14 尾作为实验对象。

## 1.2 实验方案及操作

实验设计分为 2 组,持续时间( $\Delta t$ )分别为 20 和 40 min 2 组的速度增量( $\Delta v$ )均为  $6.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;实验温度为  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,每组的样本量为 7 尾。

1.2.1  $U_{\text{crit}}$  的测定 测定设备采用鱼类游泳代谢测定仪(实验室自制)<sup>[13]</sup>,其整体结构和工作原理已在相关文献报道<sup>[14-15]</sup>。测定前实验鱼禁食 2 d,测定时,首先将单尾实验鱼放入游泳管中适应 1 h 以消除转移过程的胁迫影响,适应期间管内流速约为  $6.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (约 1 倍体长)随后按国际通用方法进行  $U_{\text{crit}}$  测定。测定过程中,在初始速度( $6.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )下持续游泳 20 和 40 min 后,根据相关文献<sup>[4,11]</sup>和预备实验结果,不断增加水流速度  $\Delta v$  始终为  $6.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (约  $U_{\text{crit}}$  的 15%),直至实验鱼达到运动力竭状态,力竭的评判标准为鱼停在游泳管尾部筛板 30 s 以上<sup>[16]</sup>。然后取出实验鱼并测量体重及常规形态学参数(表 1)。 $U_{\text{crit}}$  的计算公式为

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

式中  $v$  是实验鱼所具有的次最大速度(完成设定持续时间的最大速度,单位为  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $\Delta v$  取  $6.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta t$  在本研究中分别取 20、40 min;  $t$  是在最大速度下实际持续时间( $t < \Delta t$ )。

表 1 不同  $\Delta t$  下南方鲇幼鱼  $U_{\text{crit}}$  的比较

Tab. 1 The effect of duration on the critical swimming speed of juvenile southern catfish

$\Delta t$ /min	体重 /g	体长 /cm	体高 /cm	$U_a$ /( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$U_r$ /( $BL \cdot \text{s}^{-1}$ )
20	$3.68 \pm 0.13$	$7.56 \pm 0.09$	$1.18 \pm 0.03$	$31.89 \pm 1.29$	$4.22 \pm 0.16$
40	$3.35 \pm 0.14$	$7.46 \pm 0.10$	$1.12 \pm 0.03$	$30.17 \pm 0.98$	$4.05 \pm 0.14$

采用  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$  量纲的上式计算结果可称为绝对临界游泳速度( $U_a$ ),以  $BL \cdot \text{s}^{-1}$  为量纲则称为相对临界游泳速度,其计算公式为

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

式中  $BL$  为实验鱼的体长(单位为  $\text{cm}$ )。

1.2.2 运动代谢率( $V_{O_2}$ )的测定 采用本实验室自行研制的鱼类游泳代谢仪测定实验鱼在游泳过程中的耗氧率。在上述测定  $U_{\text{crit}}$  的同时每 2 min 记录一

次封闭水体溶氧值,以溶氧值随时间变化斜率( $S_t$ )的绝对值和水体的体积计算每尾鱼每分钟的耗氧量。水体含氧量采用溶氧仪(HQ10, Hach Company, Loveland, Colorado, U. S. A.)检测。实验结束后将实验鱼取出称重并测量体长。随后将仪器在相应的速度下分别空转(无实验鱼)20 和 40 min,以便扣除细菌耗氧量。实验期间游泳代谢仪内水体的溶氧水平不低于 85% 饱和度<sup>[17]</sup>。 $V_{O_2}$  的计算公式如下

$$V_{O_2} = (S_t - S_b) \times 60 \times V \times (1/m)^{0.75} \quad (3)$$

式中  $V_{O_2}$  为实验鱼的标准体重的代谢率(单位为  $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其中  $\text{mg}$  为氧的消耗量); $S_b$  是相应速度和时间下空转时溶氧值随时间变化斜率的绝对值; $V$  是扣除实验鱼后的仪器水体的体积(单位为 L); $m$  为鱼体体重(单位为  $\text{kg}$ )。为消除体重对代谢率的影响,将体重标准化为 1  $\text{kg}$ ,0.75 为体重校正指数<sup>[18]</sup>。

## 1.3 统计方法

实验数据用 Excel 2003 进行常规计算,然后用  $t$ -test 进行单因素比较,并采用 SPSS14.0 软件进行统计检验。统计值用平均数  $\pm$  标准误(Mean  $\pm$  SE)描述,差异显著性水平为  $p < 0.05$ 。

## 2 实验结果

### 2.1 对 $U_{\text{crit}}$ 测定的影响

表 1 中显示,在  $\Delta t$  为 20、40 min 条件下,实验鱼  $U_a$  分别为  $(31.89 \pm 1.29)$ 、 $(30.17 \pm 0.98) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , $U_r$  分别为  $(4.22 \pm 0.16)$ 、 $(4.05 \pm 0.14) BL \cdot \text{s}^{-1}$ ;两个临界游泳指标不同处理间均无显著差异。

### 2.2 对在不同游泳速度下的 $V_{O_2}$ 的影响

研究中两个不同持续时间对测定过程南方鲇幼鱼不同游泳速度下的  $V_{O_2}$  都呈随游泳速度的提高而上升的趋势(图 1),将两个不同持续时间条件下  $V_{O_2}$  与游泳速度之间的关系进行指数拟合,方程分别为:  
 $Y = 50.96e^{0.038X}$  ( $p < 0.01$ ,  $R^2 = 0.81$ ,  $n = 38$ ) (4)  
 $Y = 45.34e^{0.037X}$  ( $p < 0.01$ ,  $R^2 = 0.77$ ,  $n = 36$ ) (5)  
 图 1 中可见持续时间为 20 min 组的曲线在 40 min 组上方,尽管两条曲线之间无显著差异,但在相同速度下 20 min 组的  $V_{O_2}$  可能比 40 min 组的更大。

### 2.3 对 AMR 的影响

通过将实验鱼持续时间 40 min 组的 AMR 进一步划分为前 20 min(pre-20)和后 20 min(back-20)两

组,对 20 min、40 min、pre-20、back-20 等 4 组的数据进行统计分析,结果如图 2 所示(图中带不同上标的字母表示差异显著( $p < 0.05$ ))。持续时间 20 min 组的 AMR 显著高于 40 min 组、pre-20 组和 back-20 组( $p < 0.05$ ),其具体数值依上述表述顺序分别为( $183.36 \pm 12.80$ )、( $139.66 \pm 8.75$ )、( $152.08 \pm 10.79$ )和( $121.61 \pm 6.68$ )  $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;pre-20 组的 AMR 显著高于 back-20 组的水平( $p < 0.05$ );而 40 min 组、pre-20 组、back-20 组之间的 AMR 均无显著性差异。

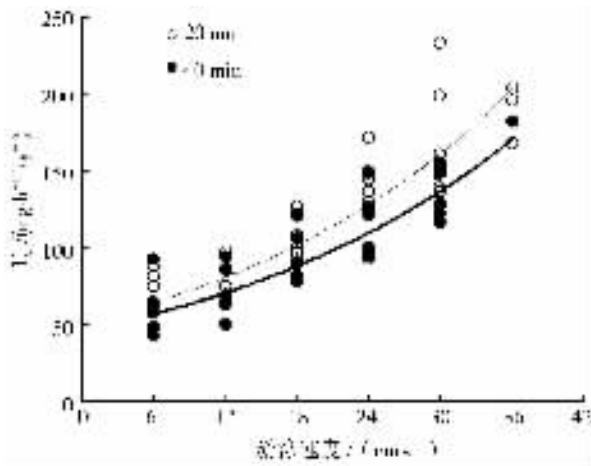


图 1 两个持续时间下南方鲇幼鱼在不同游泳速度下的  $V_{O_2}$

Fig. 1 The metabolic rate of swimming speed of juvenile southern catfish in both experimental groups

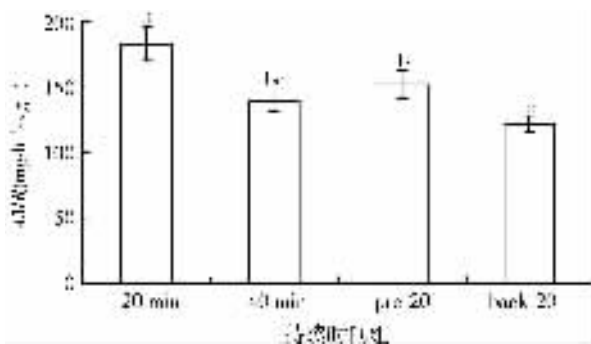


图 2 南方鲇幼鱼在不同持续时间下运动各组间 AMR 的比较

Fig. 2 The comparison of the AMR of juvenile southern catfish of the each swimming group

### 3 讨论

$U_{crit}$  是评估鱼类的最大有氧运动能力的重要指标,其测定结果的可靠性显得尤为重要。有研究发

现,在一定的范围之内  $\Delta t$  的变化对最后的测定结果不会产生影响<sup>[19]</sup>,或影响很小<sup>[6,20]</sup>;也有研究认为过短的  $\Delta t$  可能造成对测定结果的偏高估计<sup>[21]</sup>,但一般误差不会超过 7%~9%<sup>[22]</sup>。较南方鲇活跃的瓦氏黄颡鱼(*Pelteobag vachelli* Richardson)是肉食性为主的杂食性鱼类,处于相对较低的营养等级,在自然条件下随时可能面临被捕食的危险<sup>[23]</sup>。临界游泳能力对于其维持日常游泳活动、寻觅食物显得尤为重要。本研究组近期以瓦氏黄颡鱼幼鱼为对象,开展了有关不同  $\Delta t$ 、 $\Delta v$  对  $U_{crit}$  测定结果的影响,结果显示小于 15 min 的  $\Delta t$  会造成对  $U_{crit}$  的偏高估计,而当  $\Delta t$  分别为 15、30 min 时,  $U_{crit}$  无显著差异<sup>[10]</sup>。本研究在  $\Delta t$  分别为 20、40 min 条件下  $U_{crit}$  没有显著性差异,与上述结果基本一致。

本实验的结果还表明南方鲇幼鱼在 20、40 min 持续时间下的游泳运动所诱导的 AMR 存在显著性差异,且在前者条件下 AMR 大于在后者条件下的情况。这一现象的可能机制在于:首先,在速度提升过程中,鱼类的变速游泳运动会需要机体提供更多的能量;其次,速度转换时会产生明显的代谢应激,使运动代谢水平高于运动的实际能量需求;并且,测定过程中较长的持续时间可能使实验鱼的代谢生理功能得以充分调节,进而使代谢应激在相同速度提升的条件下处于较低水平;另外,通常实验鱼的无氧代谢主要发生在接近力竭状态,致使有氧代谢供能的比例下降<sup>[24-25]</sup>,因此持续时间 20 min 南方鲇幼鱼的 AMR 显著高于持续时间 40 min 时的水平。值得注意的是,持续时间 40 min 组中南方鲇幼鱼的 AMR 在前 20 min 时显著高于后 20 min 时,这一现象的内在机制可能也与上述推论有关。

实验测定参数可能会对鱼类  $U_{crit}$ <sup>[10]</sup> 及其最大运动耗氧率产生一定的影响,这种影响因种类和大小的不同而改变,其中不同持续时间对最大运动耗氧率的影响较  $U_{crit}$  更大。因此,如果在测定鱼类  $U_{crit}$  过程中同时测定最大运动耗氧率,那么选择较长的持续时间将有助于降低代谢应激等产生的影响,提高实验数据的可靠性。

参考文献:

- [1] 付世建,曹振东,彭姜岚.不同时间间隔重复力竭运动对南方鲇幼鱼耗氧率的影响[J].重庆师范大学学报(自然科学版)2009,26(1):13-16.
- [2] 付世建,曹振东,谢小军.鱼类摄食代谢和运动代谢研究

- 进展 J]. 动物学杂志 2008 43(2):150-159.
- [ 3 ] Thorarensen H ,Gallaugher P E ,Farrell A P. Cardiac output in swimming rainbow trout ,*Oncorhynchus mykiss* ,acclimated to seawater[ J ]. Physiological Zoology ,1996 69 :139-153.
- [ 4 ] Jain K E ,Hamilton J C ,Farrell A P. Use of a ramped velocity test to measure critical swimming speed in rainbow trout ( *Oncorhynchus mykiss* ) [ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology ,1997 ,117A :441-444.
- [ 5 ] Jones D R ,Kiceniuk J W ,Bamford O S. Evaluation of the swimming performance of several fish species from mackenzie river[ J ]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada ,1974 31 :1641-1647.
- [ 6 ] Hartwell S I ,Otto R G. Critical swimming capacity of the atlantic silverside ,*Menidia menidia*( L. ) [ J ]. Estuaries , 1991 ,14 :218-221.
- [ 7 ] Hawkins D K ,Quinn T P. Critical swimming velocity and associated morphology of juvenile oastal cutthroat trout ( *Oncorhynchus clarkii* ) ,steelhead trout ( *Oncorhynchus mykiss* ) and their hybrids[ J ]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences ,1996 53 :1487-1496.
- [ 8 ] Lowe C G. Kinematics and critical swimming speed of juvenile scalloped hammerhead sharks[ J ]. Journal of Experimental Biology ,1996 ,199 :2605-2610.
- [ 9 ] Green B ,Fisher R. Temperature influences swimming speed ,growth and larval duration in coral reef fish larvae [ J ]. Experimental Marine Biology Ecology 2004 299 :115-132.
- [ 10 ] 田凯 ,曹振东 ,付世建. 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 2010 , 29(3) :534-538.
- [ 11 ] Zeng L Q ,Cao Z D ,Fu S J ,et al. Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish( *Silurus meridionalis* Chen ) [ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology 2009 ,153A :125-130.
- [ 12 ] Pang X ,Cao Z D ,Peng J L ,et al. The effects of feeding on the swimming performance and metabolic response of juvenile southern catfish *Silurus meridionalis* acclimated at different temperatures[ J ]. Comparative Biochemistry and Physiology ,2010 ,155A :253-258.
- [ 13 ] 张怡 ,曹振东 ,付世建. 延迟首次投喂对南方鲇( *Silurus meridionalis* Chen )仔鱼身体含能量、体长及游泳能力的影响[ J ]. 生态学报 2007 27(3) :1161-1167.
- [ 14 ] Guy C ,Christine C ,Anne L G. Effect of temperature on maximum swimming speed and cost of transport in juvenile european sea bass( *Dicentrarchus labrax* ) [ J ]. The Journal of Experimental Biology 2006 209 :3420-3428.
- [ 15 ] 付世建 ,李秀明 ,赵文文 等. 不同溶氧水平下锦鲤的运动和代谢适应对策[ J ]. 重庆师范大学学报( 自然科学版 ) 2010 27(3) :14-18.
- [ 16 ] Fitzgibbon Q P ,Strawbridge A ,Seymour RS. Metabolic scope ,swimming performance and the effects of hypoxia in the mulloway ,*Argyrosomus japonicus*( Pisces :Sciaenidae ) [ J ]. Aquaculture 2007 270 :358-368.
- [ 17 ] Ohlberger J ,Staaks G ,Holker F. Swimming efficiency and the influence of morphology on swimming costs in fishes [ J ]. Journal Comparative Physiology 2006 ,176B :17-25.
- [ 18 ] 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 Comparative Physiology 2009 ,179B :509-517.
- [ 19 ] Jones D R ,Randall D J. The respiratory and circulatory systems[ M ]. New York :Academic Press ,1971.
- [ 20 ] Peake S ,Mekinley R S. A re-evaluation of swimming performance in juvenile salmonids relative to downstream migration[ J ]. Canada Journal Fish Aquatic Science ,1998 , 55 :682-687.
- [ 21 ] Hammer C. Fatigue and exercise tests with fish[ J ]. Comparative Biochemistry Physiology ,1995 ,112A :1-20.
- [ 22 ] Farlinger S ,Beamish F W H. Effects of time and velocity increments on the critical swimming speed of largemouth bass( *Micropterus salmoides* ) [ J ]. Transactions of the American Fisheries Society ,1977 ,106 :436-439.
- [ 23 ] 陈锦云 ,曹振东 ,谢小军. 温度对瓦氏黄颡鱼幼鱼静止代谢的影响[ J ]. 西南师范大学学报( 自然科学版 ) , 2003 28(4) :618-621.
- [ 24 ] Burgetz I J ,Rojas-vargas A ,Hinch S G ,et al. Initial recruitment of anaerobic metabolism during submaximal swimming in rainbow trout( *Oncorhynchus mykiss* ) [ J ]. The Journal of Experimental Biology ,1998 201 :2711-2721.
- [ 25 ] Lee C G ,Farrell A P ,Lotto A ,et al. The effect of temperature on swimming performance and oxygen uptake in adult sockeye ( *Oncorhynchus nerka* ) and coho ( *O. kisutch* ) salmon stocks [ J ]. The Journal of Experimental Biology 2003 , 206 :3239-3251.

## Animal Sciences

## Effects of Duration on the Measurement of Swimming Performance of Southern Catfish

ZHAO Wen-wen , CAO Zhen-dong , FU Shi-jian

( Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior , Chongqing Key Laboratory of Animal Biology , College of Life Sciences ,  
Chongqing Normal University , Chongqing 400047 , China )

**Abstract :** To investigate the effects of test duration ( $\Delta t$ ) on the values of the critical swimming speed ( $U_{crit}$ ) and metabolic rate in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*), the  $U_{crit}$  and swimming metabolic rate ( $V_{O_2}$ ) with the velocity increment ( $\Delta v$ )  $6.0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  at water  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  were measured using two different duration (20 and 40 min). The results revealed that : when the duration was 20 and 40 min , the absolutely critical swimming speed ( $U_a$ ) was ( $31.89 \pm 1.29$ ) and ( $30.17 \pm 0.98$ )  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$  while the relative critical swimming speed ( $U_r$ ) was ( $4.22 \pm 0.16$ ) and ( $4.05 \pm 0.14$ )  $\text{BL} \cdot \text{s}^{-1}$  respectively. Experimental treatment had no significant effect on the values of critical swimming speed ; but the maximum swimming metabolic rate of 20 min duration was ( $183.36 \pm 12.80$ )  $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which was significantly higher than that of 40min duration group ( $139.66 \pm 8.75$ )  $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Furthermore , for fish in the 40 min duration group , the AMR calculated as the first 20 min and the latter 20 min were ( $152.08 \pm 10.79$ ) and ( $121.61 \pm 6.68$ )  $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  respectively. The former value was significantly higher than that of the latter ( $p < 0.05$ ), but both were marked lower than that of 20 min duration group ( $p < 0.05$ ). The results showed that : test duration had no significant effect as for the measure value of critical swimming speed in juvenile southern catfish while it had remarkable effect on the maximum swimming metabolic rate. The effect may relate to the stress response to increased water speed or due to different anaerobic metabolism ratio during swimming.

**Key words :** duration ; juvenile southern catfish ; critical swimming speed ; metabolic rate

( 责任编辑 方 兴 )