

# 低温条件下鲫鱼幼鱼的游泳能力及其能量消耗\*

赵文文, 曹振东, 肖月吉, 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** 在(15±1)℃的条件下,测定鲫鱼(*Carassius auratus*)幼鱼的临界游泳速度(Critical swimming speed  $U_{crit}$ ,  $n=8$ )和高速游泳即1.5、1.8和2.1倍 $U_{crit}$ 下的耐受时间(Endurance,  $n=6$ );不同游泳速度(4.5、9、13.5、18、22.5、27、31.5、36 cm·s<sup>-1</sup>)的耗氧率(Oxygen consumption rate  $M_{O_2}$ );并计算出各自的单位距离的能量消耗(COT)。结果显示,鲫鱼幼鱼的绝对临界游泳速度( $U_a$ )为(26.29±1.85) cm·s<sup>-1</sup>,相对临界游泳速度( $U_r$ )为(3.36±0.22) BL·s<sup>-1</sup>(BL表示实验鱼体长,以厘米计),1.5、1.8和2.1倍 $U_{crit}$ 下的耐受时间分别为(72.54±21.51)(39.21±8.04)(11.84±1.83) s,  $M_{O_2}$ 随游泳速度( $U$ )的提高呈指数显著上升,可用 $M_{O_2}=81.085e^{0.0509U}$ ( $p<0.01$ ,  $r=0.84$ ,  $n=49$ )表示,在达到 $U_{crit}$ 时的鲫鱼幼鱼 $M_{O_2}$ 为(344.51±29.75) mg·h<sup>-1</sup>·kg<sup>-1</sup>,不同游泳速度下实验鱼COT差异显著( $p<0.05$ ),COT与 $U$ 之间的关系表达为:COT= $M_{O_2} \times 13.56 / (U \times 36)$ ,当速度为19.64 cm·s<sup>-1</sup>时,COT最低(4.225 J·kg<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>)。实验结果表明,低温条件下测定的鲫鱼幼鱼的临界游泳速度低于冷水性鱼类的水平,当游泳速度为74.73%  $U_{crit}$ 时鲫鱼幼鱼的COT最低,其能量效率最高。

**关键词** 临界游泳速度; 耐受时间; 耗氧率; 单位距离能量消耗; 低温; 鲫鱼幼鱼

中图分类号: Q955

文献标识码: A

文章编号: 1672-6693(2011)01-0013-05

游泳运动为鱼类捕食、逃逸、洄游、繁殖等提供必要的保障,是其重要的生存活动方式<sup>[1]</sup>。鱼类游泳运动能力的考察指标主要包括临界游泳速度(Critical swimming speed,  $U_{crit}$ )、耐受时间(Endurance)和爆发游泳速度(Burst swimming speed,  $U_{burst}$ )等<sup>[2]</sup>,前者主要以有氧代谢提供能量<sup>[3]</sup>,反映鱼类的持续运动能力<sup>[2]</sup>;而后两者作为鱼类无氧运动能力的评估指标<sup>[4]</sup>,与其加速运动能力有关<sup>[2]</sup>。相关报道多在15℃条件下以冷水性鱼类为对象<sup>[5-6]</sup>,广温性鱼类的资料目前较缺乏。15℃对于冷水性鱼类而言是适宜温度,而该温度却明显低于广温性鱼类适宜温度;另外,与鲫鱼同水域生存的伏击取食鱼类南方鲇(*Silurus meridionalis*)的相关研究已见报道<sup>[4]</sup>。提供更丰富的研究资料,将有助于揭示生存水域温度和生活习性对鱼类的游泳能力的影响。

鲫鱼(*Carassius auratus*)是一种广泛分布于我国重要水系的广温性鱼类<sup>[7]</sup>。长期以来对鲫鱼的研究主要集中在繁殖、生长效率、营养与饲料研发等与经济紧密相结合的方面<sup>[8]</sup>。本研究在15℃条件下以

鲫鱼幼鱼为研究对象,测定其临界游泳速度和在不同游泳速度下的耗氧率(Oxygen consumption rate,  $M_{O_2}$ ),考查鲫鱼在游泳过程中的能量需求及在各游泳速度下的单位距离能量消耗(Cost of transport, COT);为鱼类运动生理学的研究提供基础资料。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验鱼来源与驯化

实验鱼购自当地水产市场,在重庆师范大学进化生理与行为学实验室自净化循环控温水槽(规格为1.2 m×0.55 m×0.55 m,实际水量250 L,专利申请号为No. 200520010485.9)中驯化1个月。驯化期间以商业饲料每天饱足投喂1次,投喂后及时清除残饵和粪便,日换水量约为驯化水体的10%;实验用水为曝气控温后的自来水,驯化期间水温控制在(15±1)℃,溶氧含量在每升8 mg氧气以上,光周期为光照12 h:黑暗12 h。随后选取大小接近、健康状况良好的实验鱼( $n=26$ )并禁食2 d后在(15±1)℃条件下测定 $U_{crit}$ 、 $M_{O_2}$ 和耐受时间。

\* 收稿日期 2010-10-23 修回日期 2010-11-15

资助项目 国家自然科学基金(No. 30700087)/重庆市高校优秀人才支持计划(2009)/重庆市自然科学基金(No. 2010BB1089)

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: shijianfu9@hotmail.com

## 1.2 实验方案及操作

1.2.1  $U_{crit}$ 测定 采用本实验室自行研制的鱼类游泳代谢测定仪测定  $U_{crit}$  [9]。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  $4.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 随后按国际通用方法进行  $U_{crit}$  测定 [10]。开始测定的初始速度为  $4.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 速度增量均为  $4.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 各速度持续游泳历时均为 20 min, 直至实验鱼达到运动力竭状态。其中, 力竭的判定标准为实验鱼被水流冲至游泳管尾端筛板, 鱼体呈卷曲状态时间不低于  $20 \text{ s}$  [11]。然后取出实验鱼并测量体重及常规形态学参数(表 1)。

表 1 鲫鱼幼鱼不同实验组的形态学参数及临界游泳速度

Tab. 1 The critical swimming speed of juvenile crucian carp and morphological parameters in each experimental group used in this study

	$1U_{crit}$	$1.5U_{crit}$	$1.8U_{crit}$	$2.1U_{crit}$
重复数	8	6	6	6
体重/g	$9.88 \pm 0.55$	$9.88 \pm 0.79$	$9.62 \pm 0.39$	$9.90 \pm 0.49$
体长/cm	$7.80 \pm 0.10$	$7.85 \pm 0.18$	$7.77 \pm 0.06$	$7.83 \pm 0.08$
肥满度	$2.08 \pm 0.10$	$2.02 \pm 0.05$	$2.05 \pm 0.06$	$2.05 \pm 0.06$

注: 肥满度 = 体重  $\times$  100 / 体长<sup>3</sup>。

1.2.2 不同游泳速度下  $M_{O_2}$  的测定 用溶氧仪(HQ10, Hach Company, Loveland, Colorado, U. S. A.) 分别测定水体含氧量的变化得到实验鱼的耗氧水平。在上述测定  $U_{crit}$  的过程中, 每 2 min 测定一次封闭水体的溶氧值, 以溶氧值随时间变化斜率(Slope,  $S_t$ ) 的绝对值和水体的体积计算每尾鱼单位时间的耗氧量。在游泳速度的转换期间对密闭游泳管进行换水, 换水前的溶氧水平不低于每升 8 mg 氧气, 以使管内初始溶氧接近饱和。随后将仪器在相应的速度下分别在无实验鱼的情况下运行 20 min, 以扣除细菌耗氧量。

1.2.3 耐受时间测定 选取体重相近、身体健康的实验鱼 18 尾, 随机分为 3 组, 每组 ( $n=6$ ) 实验鱼分别在不同倍数的临界游泳速度即  $1.5U_{crit}$ 、 $1.8U_{crit}$  和  $2.1U_{crit}$  条件下测定其耐受时间。首先将单尾实验鱼放入游泳管中, 在低流速下 ( $4.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 适应 1 h, 再根据已测定的临界游泳速度将流速分别调至设定速度, 将实验鱼达到力竭所经历的时间作为耐受时间。

### 1.3 参数计算

绝对临界游泳速度(Absolutely critical swimming

speed  $U_a$ ) 的计算公式为

$$U_a = V + (t/\Delta T)\Delta V$$

式中  $U_a$  单位为  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta V$  是各速度梯度的速度增量, 本研究为  $4.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta T$  是各速度梯度下的设定时间, 本研究为 20 min;  $V$  是顺利完成设定时间的最大游泳速度(鱼力竭前一档速度);  $t$  是未能完成设定时间的实际持续游泳时间( $t < 20 \text{ min}$ )。

相对临界游泳速度(Relative critical swimming speed  $U_r$ ) 的计算公式为

$$U_r = U_a/BL$$

式中  $U_r$  (单位:  $BL \cdot \text{s}^{-1}$ ) 为相对临界游泳速度;  $U_a$  为绝对临界游泳速度;  $BL$  为实验鱼的体长(单位: cm)。

$M_{O_2}$  的计算公式为

$$M_{O_2} = (S_t \times 60 - S_0) \times V / (W/1000)$$

式中  $M_{O_2}$  的单位为  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , 其中 mg 为氧气质量;  $S_t$  为每档期间(20 min)溶氧值随时间变化的斜率; 60 指 60 min;  $S_0$  为 1 h 的细菌耗氧;  $V$  为运动呼吸仪的系统体积(3.5 L);  $W$  表示实验鱼体重(单位: g)。

$COT$  的计算公式为

$$COT = M_{O_2} \times 13.56 / (U \times 36) \quad (1)$$

式中  $COT$  单位以  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  表示,  $U$  为设的游泳速度, 13.56 为氧热当量系数(单位  $\text{J} \cdot \text{mg}^{-1}$ )<sup>[8]</sup>。

### 1.4 数据处理

实验数据采用 Excel2003 软件进行常规计算后, 用 SPSS17.0 软件进行多重比较(LSD)。统计值均用平均值  $\pm$  标准误(Mean  $\pm$  SE)表示, 显著性水平为  $p < 0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 鲫鱼幼鱼的 $U_{crit}$

经计算, 在  $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$  的低温条件下, 鲫鱼幼鱼的  $U_a$  为  $(26.29 \pm 1.85) \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $U_r$  为  $(3.36 \pm 0.22)BL \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 2.2 鲫鱼幼鱼高速运动的耐受时间

不同高速条件下( $1.5U_{crit}$ 、 $1.8U_{crit}$  和  $2.1U_{crit}$ ) 3 组实验鱼的耐受时间分别为  $(72.54 \pm 21.51)$ 、 $(39.21 \pm 8.04)$ 、 $(11.84 \pm 1.83) \text{ s}$ , 见图 1, 图中上标字母不同表示数据差异显著( $p < 0.05$ )。可以看出, 鲫鱼幼鱼的游泳耐受时间随速度的提升呈下降趋势,  $1.5U_{crit}$  组和  $1.8U_{crit}$  组的耐受时间均显著高于

2.1  $U_{crit}$  组 ( $p < 0.05$ ).

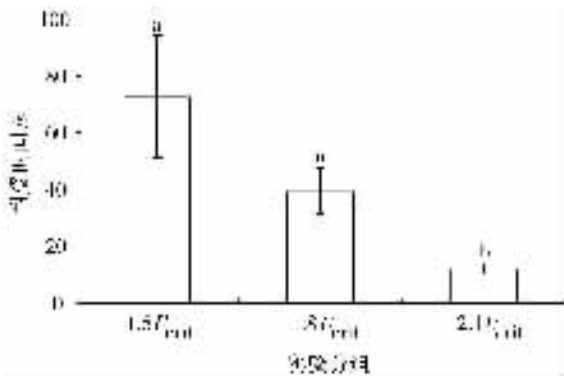


图 1 鲫鱼幼鱼在高速条件下的游泳耐受时间  
Fig. 1 The endurance of juvenile crucian carp with different times of  $U_{crit}$

2.3 鲫鱼幼鱼在不同游泳速度下的  $M_{O_2}$

鲫鱼幼鱼在低速 ( $4.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 时的  $M_{O_2}$  为 ( $112.01 \pm 14.99$ )  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , 仅为静止耗氧率的 138%。随游泳速度的不断增加, 其  $M_{O_2}$  呈指数上升趋势 (图 2); 经计算实验鱼临界游泳速度的代谢率 (耗氧率) 为 ( $344.51 \pm 29.75$ )  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。 $M_{O_2}$  与游泳速度 ( $U$ ) 关系的拟合方程为

$$M_{O_2} = 81.085e^{0.0509U} \quad (p < 0.01 \quad r = 0.84 \quad n = 49) \quad (2)$$

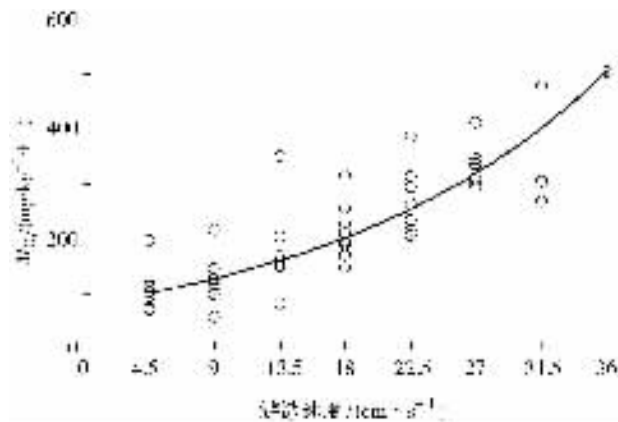


图 2 不同游泳速度下鲫鱼幼鱼的耗氧率  
Fig. 2 The oxygen consumption rate of juvenile crucian carp at different swimming speeds

2.4 不同游泳速度下鲫鱼幼鱼的  $COT$

分别对在不同的游泳速度下实验鱼的  $COT$  进行了计算 (图 3), 可以看出, 随游泳速度的不断增加, 鲫鱼幼鱼的  $COT$  呈先下降后逐渐上升的趋势 (图 3)。将 (2) 式代入 (1) 式, 可得

$$COT = 13.56 \times 81.085e^{0.0509U} / (U \times 36)$$

对上式求导,  $COT$  最低所对应的游泳速度 ( $U_{opt}$ ) 为  $19.64 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 即实验鱼游泳速度为其  $U_{crit}$  的 74.73% 时, 具有最高的能量效率。

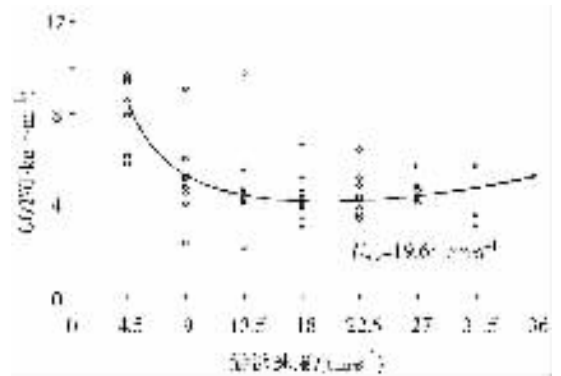


图 3 鲫鱼幼鱼在各游泳速度下的单位距离能量消耗  
Fig. 3 The cost of transport of juvenile crucian carp with different swimming speeds

3 讨论

鱼类种类繁多, 生活史复杂, 为实现不同生理活动所采用的运动方式也不尽相同<sup>[2]</sup>。临界游泳速度主要反映鱼类的有氧运动能力, 而耐受时间则主要反映鱼类的无氧运动能力<sup>[4]</sup>。鱼类临界游泳速度自被 Brett 首次提出后, 长期以来受到研究者的广泛关注<sup>[12]</sup>。近年来, 国内外学者分别从环境水温、光照条件、溶氧水平和不同种类等方面分别对鱼类的临界游泳速度展开了广泛研究, 发现以上因素都会不同程度地影响鱼类的游泳能力<sup>[13]</sup>。本研究结果与相同测定温度下的其它鱼类资料比较<sup>[4,5,14]</sup>, 鲫鱼幼鱼的临界游泳速度明显低于冷水性鱼类虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)<sup>[5]</sup> 和山鲮 (*Oncorhynchus clarki*)<sup>[14]</sup>。通常冷水性鱼类的适宜温度在  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  左右, 而广温性鱼类的适宜温度却在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  附近。鲫鱼幼鱼临界游泳速度明显低于冷水性鱼类的原因可能与各自的适宜温度不同有关。另外, 通过比较还发现鲫鱼幼鱼的临界游泳速度明显高于南方鲇的水平 (表 2)<sup>[4]</sup>。南方鲇是与实验鱼为同水域生存的鱼类, 面临同样的温度环境<sup>[15]</sup>。它们在相同测定温度下临界游泳能力表现出的差异, 可能与各自的生活习性有关: 鲫鱼是一种较活跃的杂食性鱼类, 而南方鲇却是一种伏击取食的肉食性鱼类<sup>[16]</sup>; 因此不同的摄食方式和生存对策会使动物表现为不尽相同的运动偏好和运动能力。

表2 不同鱼的游泳能力及相关参数

Tab. 2 Swimming capability and correlative parameters of different fishes used in this study compared to other teleosts

鱼类	温度/℃	体长/cm	$U_{crit}$ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$U_{crit}$ ( $BL \cdot \text{s}^{-1}$ )	文献来源
虹鳟 ( <i>O. mykiss</i> )	15	8.7	41.26	4.52	文献[5]
山鱒 ( <i>O. clarki</i> )	14	29.2	140.45	4.81	文献[14]
南方鲇 ( <i>S. meridionalis</i> )	15	9.09	22.62	2.49	文献[4]
鲫鱼 ( <i>C. auratus</i> )	15	7.80	26.29	3.36	本研究

鱼类的耗氧率通常随着游泳速度的增加呈现指数上升<sup>[17]</sup>。本研究结果(图2)与先前报道相似<sup>[3-5]</sup>。在游泳过程中,最大耗氧率(临界游泳速度下的代谢率)反映了鱼类有氧运动能力的大小<sup>[18]</sup>。有研究发现在接近临界游泳速度的过程中,一些鱼类的耗氧率会持续在一个相对稳定水平,出现一个平台,这是由于鱼类在接近临界游泳速度过程中会不同程度地依赖无氧代谢所致<sup>[4]</sup>。由于生活环境和生理状况的差异,不同鱼类无氧代谢占总代谢的比例会存在差异<sup>[19]</sup>。本研究的实验鱼耗氧率随着游泳速度的增加呈现指数上升,提示鲫鱼幼鱼游泳过程中的无氧代谢比例可能不会太高;另外,当鲫鱼幼鱼的游泳速度为74.73%  $U_{crit}$ 时,其能量消耗(COT)最低,而与其亲缘关系较近的锦鲤幼鱼在25℃条件下当游泳速度为25.34  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,即为52.80%  $U_{crit}$ 时COT最低<sup>[20]</sup>,表明鲫鱼幼鱼在低温下可能更适应相对较高的游泳速度,与其经常性寻食和避敌活动有关<sup>[21]</sup>。

## 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.鱼类的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] Reidy S P, Kerr S R, Nelson J A. Aerobic and anaerobic swimming performance of individual atlantic cod[J]. J Exp Biol, 2000, 203: 347-357.
- [4] 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]. Comp Biochem Physiol, 2009, 153: 125-130.
- [5] Alsop D H, Wood C M. The interactive effects of feeding and exercise on oxygen consumption, swimming perform-

ance and protein usage in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. J Exp Biol, 1997, 50: 1166-1180.

- [6] Schurmann H, Steffensen J F. Effects of temperature hypoxia and activity on metabolism of juvenile atlantic cod[J]. J Fish Biol, 1997, 200: 2337-2346.
- [7] 丁瑞华.四川鱼类志[M].成都:四川科学技术出版社,1994.
- [8] 岳敏娟,尤永隆,林丹军.温度对鲫鱼性腺分化的影响[J].动物学杂志,2009,44(1):9-16.
- [9] 赵文文,曹振东,付世建.持续时间对南方鲇游泳性能测定结果的影响[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2010,27(4):12-15.
- [10] 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]. Comp Biochem and Physiol, 1997, 117A: 441-444.
- [11] Fitzgibbon Q P, Strawbridge A, Seymour R S. Metabolic scope, swimming performance and the effects of hypoxia in the mullet *Argyrosomus japonicus* (Pisces: sciaenidae)[J]. Aquacul, 2007, 270: 358-368.
- [12] Brett J R, Hollands M, Alderdice D R. The effect of temperature on the cruising speed of young sockeye and coho salmon[J]. J Fish Res Bd Can, 1958, 15: 587-605.
- [13] 曾令清.温度对南方鲇幼鱼游泳能力和静止代谢率的影响[D].重庆:重庆师范大学,2008.
- [14] MacNutt M J, Hinch S G, Farrell A P, et al. The effect of temperature and acclimation period on repeat swimming performance in cutthroat trout[J]. J Fish Biol, 2004, 65: 342-353.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Beamish F W H, Howlett J C, Medland T E. Impact of diet on metabolism and swimming performance in juvenile lake trout *Salvelinus namaycush*[J]. J Can Fish Aqua Sci, 1989, 46: 384-388.
- [18] Farrell A P, Gampperl A K, Birtwell I K. Prolonged swimming recovery and repeat swimming performance of mature sockeye salmon *Oncorhynchus nerka* exposed to moderate hypoxia and pentachlorophenol[J]. J Exp Biol, 1998, 201: 2183-2193.
- [19] Lee C G, Farrell A P, Lotto A, et al. Excess post-exercise oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho salmon (*O. kisutch*) following critical speed swimming[J]. J Exp Biol, 2003, 206: 3253-3260.
- [20] 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.

[21] 郝生凡,兰丽莉,李国锋.青鱼生物学特点及养殖技术[J].黑龙江水产,2007(1):11-22.

## Animal Sciences

# The Swimming Capacity and Energy Expenditure of Juvenile Crucian Carp *Carassius auratus* at Low Temperature

ZHAO Wen-wen, CAO Zhen-dong, XIAO Yue-ji, FU Shi-jian

(Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, Laboratory of Evolutionary Physiology and Behaviour, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

**Abstract**: The critical swimming speed ( $U_{crit}$ ,  $n=8$ ), endurance time at high swimming speed (1.5, 1.8 and 2.1  $U_{crit}$ ) and the oxygen consumption rate at different swimming speeds (4.5, 9, 13.5, 18, 22.5, 27, 31.5 and 36  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) of the juvenile crucian carp (*Carassius auratus*) were measured at ( $15 \pm 1$ ) $^{\circ}\text{C}$ . Then calculated each cost of transport at different swimming speed respectively. The results showed that: the absolutely critical swimming speed of juvenile crucian carp ( $U_a$ ) was ( $26.29 \pm 1.85$ )  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$  and the relative critical swimming speed ( $U_r$ ) was ( $3.36 \pm 0.22$ )  $\text{BL} \cdot \text{s}^{-1}$ ; Endurance time at 1.5, 1.8 and 2.1  $U_{crit}$  of the juvenile crucian carp was ( $72.54 \pm 21.51$ ), ( $39.21 \pm 8.04$ ) and ( $11.84 \pm 1.83$ ) s, respectively. The oxygen consumption rate increased exponentially with the increasing of swimming speed ( $M_{O_2} = 81.085e^{0.0509U}$ ,  $p < 0.01$ ,  $r = 0.84$ ,  $n = 49$ ) and the oxygen consumption rate at critical swimming speed was ( $344.51 \pm 29.75$ )  $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ . The relationship between the cost of transport (COT) and the swimming speed was  $COT = M_{O_2} \times 13.56 / (U \times 36)$ . The results indicated that the critical swimming speed of juvenile crucian carp was lower than those of the fishes which live in cold water. The COT of crucian carp was lowest ( $4.225 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) when swimming at  $19.64 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  (74.73%  $U_{crit}$ ).

**Key words**: critical swimming speed; endurance; oxygen consumption rate; cost of transport; low temperature; juvenile crucian carp

(责任编辑 方兴)