# 流速对鲫游泳行为和能量消耗影响的研究

袁 喜,涂志英,韩京成,石小涛,刘国勇,黄应平

(三峡大学 三峡库区生态环境教育部工程研究中心,湖北 宜昌 443002)

**摘要:**通过自制的鱼类游泳试验装置,研究了流速对鲫(*Carassius auratus*)游泳行为和能量消耗的影响。结果表明,鲫的摆尾频率、摆尾幅度随游泳速度变化有明显的规律。随着游泳速度的增加,鲫的摆尾频率与幅度都相应地增加。流速小于3倍体长/s与大于3倍体长/s,摆尾频率差异性显著($P<0.05$),而摆尾幅度差异性不明显。鲫单位时间耗氧率随着流速的增加而显著增加,并且随着速度的增加,鲫用于游泳所消耗的能量占总能量消耗逐渐趋于稳定,运动净耗氧率最大为90%。水温(16±1)℃时,体长12~20 cm鲫的相对极限流速为其(3.85±1.10)倍体长/s,绝对极限流速为(0.66±0.10) m/s;相同流速的温度环境中,随着体重的增加,耗氧量呈增加趋势。在相同的流速下,水温(10±1)℃时的游泳耗氧量小于(16±1)℃,而净耗氧率较大;温度(16±1)℃时,2.5倍体长/s的游泳速度有利于鲫生长代谢的能量积累。

**关键词:**鲫;游泳行为;能量消耗;耗氧率

**中图分类号:**Q412 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2011)04-0103-07

流速是影响鱼类生存和繁殖的重要水动力学因子。研究流速对鱼的生理影响,有助于了解其对流速的需求和选择适应性。鱼类游泳速度指标按其游泳状态区分通常包括临界游泳速度(critical swimming speed)、最大续航游泳速度(maximum sustained swimming speed)、最优巡航游泳速度(optimum cruising swimming speed)和爆发游泳速度(burst swimming speed)等(Trump & Leggett,1980; Hammer,1995; Fisher & Wilson,2004; Mateus et al,2008)。极限流速是最大有氧代谢能力评价的重要指标,通过测定极限流速中鱼类的能量代谢,评价其游泳能力,对鱼类的生长、捕食、繁殖、捕捞和鱼道建设等研究有很重要的生物学意义(Day & Butler,2005)。温度作为重要的生态因子,对鱼类代谢反应速率起控制作用,是影响其活动和生长的重要环境变量(Perry, 2005)。鱼类的存活、发育、摄食、生长和繁殖等活动均受水温的制约与影响。有研究表明,当饵料不受限制时,鱼类的摄食率和摄食次数随温度升高而增大,但超过最适生长温度后,摄食率及摄食次数反而下降(陈松波,2004a)。邓思平等(2000)研究表明,水温对鱼类胚胎的存活与发育也有着重要的影响;鱼类游泳肌的收缩时间会随温度的升高而缩短,从而影响其游泳速度(Rome et al,1990)。

对鱼类行为的研究,一般从其定向信号系统、器官结构与功能、高级神经作用以及复杂的行动方式等物种特性出发,研究鱼类生理生态行为与其对环境变化的适应机制之间的关系(茅绍廉,1985);而呼吸代谢是鱼类能量收支的重要组成部分,也是最敏感的变量之一,几乎所有的环境变异都会在代谢水平上呈现,在行为上有所体现(陈松波 等,2004b)。对代谢率的研究有助于了解鱼类的生理状况及其对外界环境的适应能力。

鲫(*Carassius auratus*)是一种典型的淡水鱼类,已有关于其游泳速度、呼吸代谢和不同流速下生理指标变化的报道(韩京成等,2010; Rome et al,1990);利用代谢等对其游泳行为、游泳能力及游泳过程中能量分配的研究少有报道。本试验在特定的密封游泳装置内,通过控制单因子条件温度或流速,对鲫在游泳过程中的生态行为及能量消耗的相关性等进行研究,并探讨其在运动过程中的能量代谢分配,为鱼类生理生态行为研究等提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验装置

DELIXI变速控制器;45 W输水泵,3 000 L/h;120 W电动机,1 400 r/min;总盛水体积80 L,密封

**收稿日期:**2011-01-10

**基金项目:**国家自然科学基金(No: 50979049,50639070-4,51179096/E090303);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划(No: T200703);湖北省环保专项基金(2008HB08)及湖北省自然科学基金创新群体项目(2009CDA020)资助。

**通讯作者:**黄应平。E-mail: chem_ctgu@126.com.

**作者简介:**袁喜,1987年生,男,研究生,主要从事水污染环境治理研究。

部位水体积30 L,游泳区域8.45 L;溶解氧测定仪;Vectrino小威龙点式流速仪(Nortek);探针式温度传感器;四线摄像装置。

自行设计的鱼类游泳能力测定装置(图1)由3部分组成,动力部分($a_1$,$a_2$),动力输出检测部分(b),鱼类游泳区域(c),溶解氧和温度参数检查部位(d)。在鱼类游泳区域内,电机带动螺旋桨产生流速,在稳流装置的作用下,形成均匀稳定的线性水流。动力检测部分,通过简易变频装置记录电机运动状况,便于试验操作。

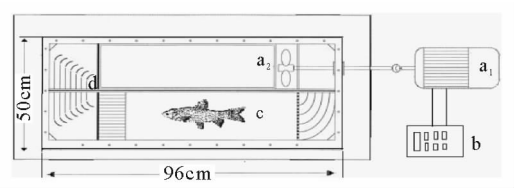


**图1 鱼类游泳能力测定装置**

**Fig. 1 Schematic diagram of the swimming capability testing apparatus**

利用Vetrino流速仪校调装置的流速,建立流速($Y$)与调节频率($X$)之间线性关系:$Y = 1.55 + 1.497X$,$R = 0.999$。设备流速0.100~0.764 m/s,装置内流速均匀稳定。通过频率调控电机转速,改变装置内水流速度的大小(图2)。

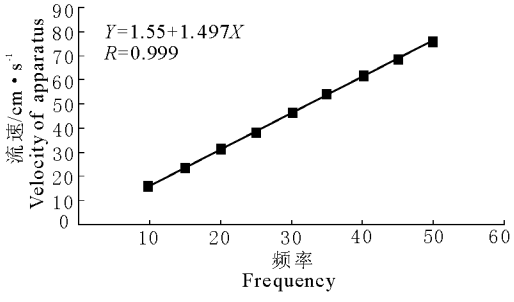


**图2 装置流速与调频器频率的关系**

**Fig. 2 Relationship between the velocity of the apparatus and the frequencies of the frequency variator**

## 1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验时间为2010年3~4月。试验用鲫取自三峡大学附近水库,活体运至试验室后,用5%食盐水消毒,小心放入0.5 m×1.0 m×1.0 m水槽中,水量0.3 $m^3$,上面覆盖薄板,防止鱼类受到干扰,驯养期间少量喂食,每2 d换水1次,利用充氧泵保持水体中有充足的溶氧量,驯养7 d左右。试验前48 h不喂食,将鱼放置在游泳区域,以最小流速0.1 m/s适应2 h,之后开始试验。试验过程中打开水泵,内外水充分循环,使溶解氧平衡。试验前关闭水泵进出水口,密封内部游泳区域,安装温度传感器和溶解氧测定仪,测定初始溶解氧浓度,记录温度及溶解氧饱和度。试验过程中,水中溶解氧饱和度在70%左右时,打开进出水口,连接水泵,内外水进行交换,增加室内水中溶氧量,换水时间5 min,平衡后开始测定水中溶氧量。开始试验时,连接录像装置,记录鱼在装置中的运动行为。试验结束,测量试验鱼的体重、体长和体最大宽度等相关参数。按照上述方法进行平行试验,每组5~8尾鱼,无鱼试验作为空白对照。

升温过程中,利用加温棒逐渐升温,控制在0.5℃/h。鱼类在试验温度下保持48 h,再进行试验。将鱼移入升温好的试验装置,利用加热棒使温度保持在设定试验温度范围。

1.2.2 指标测定

1.2.2.1 极限流速 测定鱼类的相对极限流速采用体长/秒计数(BL/s)。鱼在装置中,小流速下(0.1 m/s)适应2 h;然后每间隔20 min增加1次流速,增量为0.5 BL/s。流速增加过程中,鱼抵在装置后部时,6V电压瞬间电击,持续数次,鱼不游泳仍抵于装置后部,规定为疲劳。通过此时的流速及鱼在该流速下游泳的时间计算鱼的极限流速(Christopher,1996):$U_{crit} = U_f + [(T_i/T_f)U_i]$;式中:$U_f$为持续游泳20 min钟后仍然顶流时的流速,$U_i$为间隔时间流速增量,$T_i$是$U_f$下一流速持续顶流的时间,$T_f$是调速间隔时间。

1.2.2.2 静止耗氧率 禁食2 d的试验鱼装入呼吸室静息,分别于2 h后进行3次测定。静止耗氧率[mg/(kg·h)] = $\Delta O_2 \times V_b/m$;式中:$\Delta O_2$为呼吸室与空白溶氧的差值[mg/(L·h)],$V_b$是呼吸室体积(L),$m$为鱼体重(kg)。

1.2.2.3 耗氧率(SAM) 通过鱼在游泳过程中氧的消耗衡量其在运动过程中的能量消耗。试验过程中,首先让鱼在装置以小流速(0.1 m/s)适应2 h,然后密封装置,以鱼的体长衡量流速,间隔20 min改变1次流速,流速调动增量为0.5 BL,并用仪器测定水中溶氧量。耗氧率[mg/(kg·h)](或mg/h)计算公式(Ohlberger et al,2006):耗氧率 = $\Delta O_2 \times V_b/m$(或$\Delta O_2 \times V_b$);式中:$\Delta O_2$为呼吸室与空白溶氧的差值[mg/(L·h)],$V_b$是呼吸室体积(L),$m$为鱼体重(kg)。

1.2.2.4 净耗氧率(NCOT) 鱼在运动中实际耗氧量与理论耗氧量之比(Ohlberger et al,2006)。净耗氧率 = 实际耗氧量/理论耗氧量;理论耗氧量 = $(U^C)\cdot d$ + SAM;式中:$U$为相对流速(BL/s),$d$为

鱼体长(cm),$C$ 为体型系数(取 2.23)。

1.2.2.5　运动净耗氧率(NACOT)　除去静水中耗氧量后与总耗氧量之比。运动净耗氧率 =(耗氧量 - 静水中耗氧量)/耗氧量。

通过视频软件获得摆尾幅度及频率数据,试验过程获得数据通过 SPSS 软件包进行差异性分析,结果用平均数 ± 标准差(Mean ± SD)描述,差异性显著水平为 $P<0.05$。

## 2　试验结果

### 2.1　鲫生态行为与流速的关系

通过分析试验视频软件,获得对应流速下鲫($n=16$)的摆尾频率及幅度数据,建立其摆尾频率(图 3)、摆尾幅度(图 4)与游泳速度的关系。

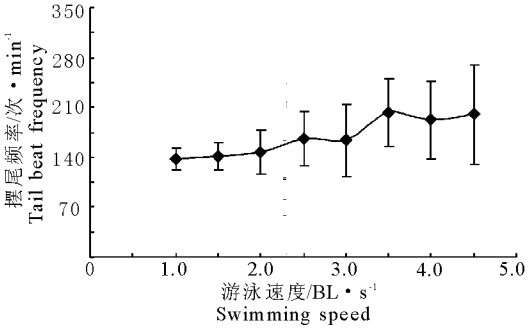


**图 3　游泳速度与摆尾频率的关系**

**Fig. 3　Relationship between the swimming speed and tail beat frequencies**

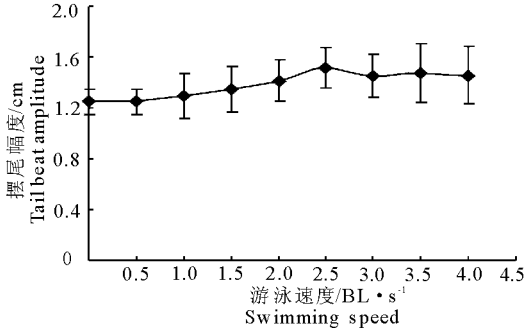


**图 4　游泳速度与摆尾幅度的关系**

**Fig. 4　Relationship between the swimming speed and tail beat amplitude**

结果表明,在测定的流速与鲫游泳行为关系范围内,摆尾频率随着游泳速度的增加逐渐增加,摆尾幅度略有增加。摆尾频率在游泳速度小于 3BL/s 与大于 3BL/s 差异显著($P<0.05$),摆尾幅度变化差异性不显著。静水或小流速条件下,鲫主要利用腮和鳍的运动来维持平衡与前进;大于 2.5BL/s 流速条件下,尾部、鳍及腮部均进入运动状态,腮部张合频率变大,尾部摆动频率与幅度均有增加,维持在流水中的平衡。试验还观察到,在流速变换点,当流速小于 2.5BL/s 时,鲫呈 S 型启动游泳;当流速大于 2.5BL/s 时,鲫呈 C 型启动游动。

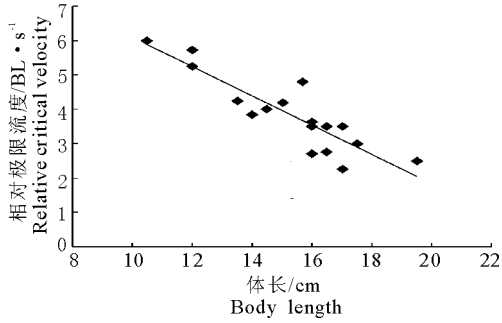


**图 5　相对极限流速与体长的关系**

**Fig. 5　Relationship between relative critical velocity and body length**

相对极限流速与体长关系表明,鲫的体长与所能抵抗的相对极限流速并不成正相关,体长较长的鱼其相对极限流速较小(图 5)。水温(16 ± 1)℃时,体长 12 ~ 20 cm 鲫的相对极限流速为其(3.85 ± 1.10) BL/s,绝对极限流速为(0.66 ± 0.10) m/s。

### 2.2　流速对鲫游泳能量的影响

2.2.1　流速对鲫呼吸耗氧的影响　试验温度(16 ± 1)℃,鲫($n=16$)在静水中耗氧率较小,仅为(41.59 ± 0.54) mg/(kg · h),在 1.0 BL/s 流速时,耗氧率有较大的提高,而且在测定的流速范围内,随着流速的增加,鲫的呼吸耗氧率增加。差异性分析表明,1.0 ~ 2.5 BL/s 流速范围内耗氧率差异性不显著,2.5 ~ 3.5 BL/s 流速范围内耗氧率差异性也不显著;而 1.0 ~ 2.5 BL/s 与 2.5 ~ 3.5 BL/s 耗氧率差异性显著($P<0.05$)(图 6)。比较(16 ± 1)℃与(10 ± 1)℃的耗氧量,可见温度高时鲫的耗氧量较大(图 7)。

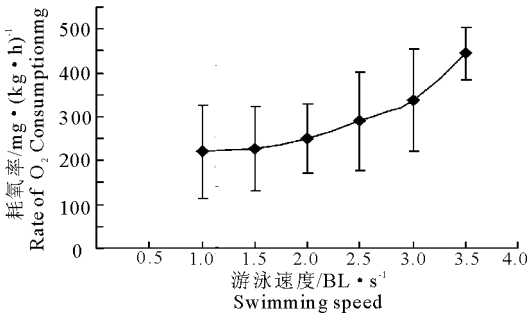


**图 6　游泳速度与耗氧率的关系**

**Fig. 6　Relationship between the swimming speed and the rate of $O_2$ consumption**

2.2.2　流速对鲫代谢速率的影响　水温(10 ± 1)℃时,运动耗氧率随着流速的增加呈减小趋势;

而水温(16±1)℃时,运动耗氧率随着流速的增加缓慢增加。比较(10±1)℃与(16±1)℃鲫的净耗氧率,前者更大(图8)。

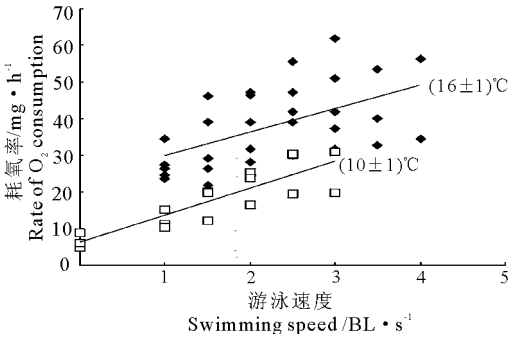


**图7 不同温度下游泳速度与耗氧率的关系**

**Fig. 7 Relationship between the swimming speed and the rate of $O_2$ consumption in different temperature**

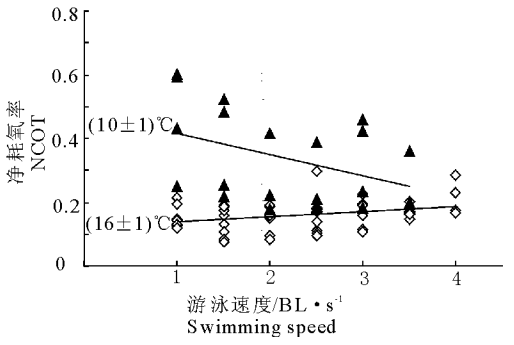


**图8 净耗氧率与游泳速度的关系**

**Fig. 8 Relationship between the net $O_2$ consumption (NCOT) and the swimming speed**

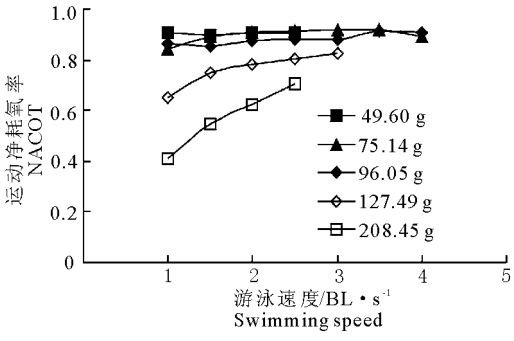


**图9 运动净耗氧率与游泳速度的关系**

**Fig. 9 Relationship between the net activity $O_2$ consumption (NACOT) and the swimming speed**

耗氧量的增加可以说明,随着流速的增加,鱼用于游泳的能量消耗也增加(图9)。随着流速的增加,鱼克服流水阻力做的功逐渐增加,流速增加到一定时候,鲫在流水中用于游泳的能量不会增加。差异性分析表明,1.0~2.0 BL/s和2.0~4.0 BL/s流速之间运动净耗氧率差异性均不显著($P<0.05$);而小流速1.0~2.0 BL/s与大流速2.0~4.0 BL/s的差异性水平显著($P<0.05$);且体重小的鱼比体重大的运动净耗氧率大,即小鱼在相同流速环境下单位体重消耗的能量比大鱼多。

研究结果表明,鲫在游泳过程中用于代谢和运动的能量分配是不同的。在流速趋于2.5 BL/s时,鲫用于生长代谢与运动的能量分配趋于平衡,最大时运动消耗的能量占总呼吸能量的90%。在测定流速范围内,随着流速的增加,耗氧量增加,即呼吸代谢增加;表明鲫在2.5 BL/s流速下,用于生长代谢的能量相对其它流速占总代谢能量比例大。

2.2.3 不同体重鲫的耗氧率差异 图10比较了不同体重鲫的耗氧率(mg/h),每组5尾,体重分别为(87.5±7.91) g、(116.36±6.07) g和(203.85±5.34) g,随着流速的增加,单位时间耗氧量呈增加趋势;且相同流速下,耗氧率随着鲫的体重增加而增加。

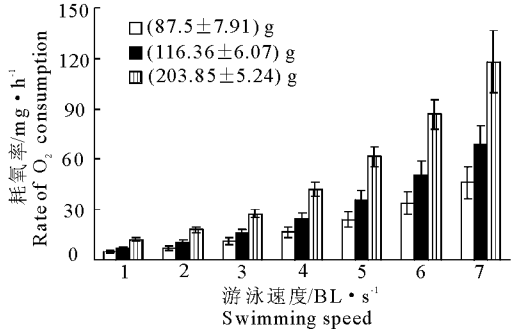


**图10 不同游泳速度和体重鲫的耗氧率变化**

**Fig. 10 Oxygen consumption rate in different swimming speed in *Carassius auratus* of different weight**

## 3 讨论

鱼类活动代谢有很大的变异性,许多生态因子如水流速度、水温、食物、敌害或社群压力、溶解氧浓度的影响等均会对鱼类代谢活动有显著的影响(李丹, 2009)。对于水流变化产生的刺激,鱼类往往最先表现为行为上的反应。行为模式的改变会引起新陈代谢的显著变化,以至引起机体能量需求的变化,测定过程中产生鱼类游泳能量分配与利用上的差异性(Fabrizio et al,2006)。

### 3.1 流速对鲫生态行为的影响

流速较大时,摆尾频率的波动幅度较大,整体趋势是随着流速的增加、摆尾频率增加,与Po-Jung Lin等(2008)报道的 *Onychostoma barbatula* 摆尾频率与相对流速呈线性相关并不一致。随着流速的增加,鲫的趋流行为增加,需要消耗的能量也会增加,表现为摆尾幅度增加即单位时间内摆尾次数的增

加。鱼游泳的启动姿势对鱼类的生存意义重大,当流速处于不同的变换点时,其表现出不同的游泳姿势,呈现 S 型或 C 型,即仅尾部摆动或全身摆动姿势。Frith & Blake(1995)通过研究白斑狗鱼(*Esox lucius*)的快速启动机制指出,S 型启动的效率逐渐增加,但总是小于 C 型启动,C 型启动游泳方式对鱼类的生存意义更大,S 型启动游泳在捕食中应用。本次试验中,鲫在大流速转换点时采用 C 型启动游泳方式,可能是试验时间设定过短,鱼类在小流速下适应不够,在处于大流速的瞬间产生了胁迫效应。

临界游泳速度和运动中耗氧率是目前对鱼类游泳过程中有氧运动能力评价常用的方法之一。在试验过程中,由于装置空间限制,处于狭窄空间时,鱼倾向于靠近箱壁,使得实测的极限游泳速度较真实的极限游泳速度偏大(Ohlberger et al,2006)。但考虑到鱼道建设中,鱼类的通过也是在限制性的空间之内,因此利用密闭装置测得的参数对鱼道建设有一定的参考意义;另外,在行进过程中,鱼类是集群通过的,群体游泳与个体单独游泳比较,所能抵抗的流速更大(James,2007)。临界游泳速度的测定与试验者设定的游泳持续时间及速度增量步长密切。试验时间过长使得底物不足,或者无氧代谢产物过度积累;设定时间短、速度增量步长大,则产生生理胁迫效应(Lee et al,2003);伴随更大比例的无氧代谢,降低游泳效率,使得测定的临界游泳速度偏低。试验设定的持续时间为 20 min,速度增量为 0.5 BL/s。试验中测得(16 ± 1)℃时,体长 12 ~ 20 cm鲫的相对极限流速为(3.85 ± 1.10) BL/s,绝对极限流速为(0.66 ± 0.10) m/s,与水利部交通部南京水利科学研究所(1982)报道的 0.7 m/s 相近;比赵文文等(2011)在试验温度(15 ± 1) ℃、体长(26.29 ± 1.85) cm 鲫获得的相对极限流速(3.36 ± 0.22) BL/s 大;符合鲫体长与所能抵抗的相对极限流速并不成正相关的结论。

### 3.2　流速对鲫代谢行为的影响

水流是强加给鱼类代谢系统一个额外负担,一般认为是鱼类生长的阻碍因子,阻碍了鱼类代谢系统对温度、食量等其它环境因子变化的充分反应;且在相同水温条件下,鱼类代谢率随着游泳速度的增加而增加。但有研究表明,在控制的流速范围内,随着流速增加,鱼类的生长率会随之增加,而且蛋白质等的转化效率也会增加(Houlihan & Laurent,1987; Davison,1989; Christiansen & Jobing,1990)。本试验研究中,鲫的耗氧率随着自身体重或环境流速的增加均呈增加趋势,体重小的鱼由于更加活泼,代谢更加快,在相同流速下运动净代谢率更大(Mwangangi & Mand Mutungi,1994)。对于鲫而言,代谢率并不是在静止时或者流速最大时利于其生长代谢的积累。试验结果显示,在小于 2.5BL/s 流速下,随着流速的增加,运动净耗氧率是逐渐增加的;而当流速大于 2.5BL/s 时,运动净耗氧率增加趋势平缓。在耗氧率同等增加的前提下,则有利于代谢积累能量的增加;而且在有水流的地方,溶氧更充足,水流携带丰富的营养物质能保证鱼类快速生长。(10 ± 1)℃与(16 ± 1)℃的水温比较,鲫的净耗氧率在前者中更大,但两者的净耗氧率变化呈相反的趋势,可能是在较低温度下,大流速时对鱼类胁迫作用更大,接近临界流速,低温环境下无氧代谢更快占主导地位,使得实际耗氧率增加量远小于理论代谢耗氧率(赵文文等, 2010)。

试验利用密封的游泳装置,通过拟定单因素试验,综合考虑鱼的行为及能量分配对流速与温度变化的响应,为其行为学及运动规律、生理活动规律和能量需求等生理生态行为的研究提供基础资料。

**参考文献**


陈松波. 2004a. 不同温度条件下鲤鱼摄食节律与呼吸代谢的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学.

陈松波, 陈伟兴; 范兆廷,等. 2004b. 鱼类呼吸代谢的研究进展[J]. 水产学杂志, 17(1): 82 – 89.

邓思平, 吴天利, 王德寿, 等. 2000. 温度对南方鲶幼鱼生长和发育的影响[J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 25(6): 674 – 679.

韩京成, 刘国勇, 梅朋森, 等. 2010. 温度对鲫血液生化指标和消化酶的影响[J]. 水生态学杂志, 3(1): 87 – 92.

李丹. 2009. 流速对杂交鲟和罗非鱼幼鱼游泳行为及活动代谢的影响[D]. 广州:暨南大学.

茅绍廉. 1985. 鱼类行动与捕鱼技术[M ]. 北京:海洋出版社:172 – 173.

水利部交通部南京水利科学研究所. 1982. 鱼道[M]. 北京:电力工业出版社:10.

赵文文, 曹振东, 付世建. 2010. 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, 27(4): 12 – 15, 25.

赵文文, 曹振东, 肖月吉, 等. 2011. 低温条件下鲫鱼幼鱼的游泳能力及其能量消耗[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版, 28(1):13 – 17.

Christiansen J S, Jobing M. 1990. The behavior and the relationship between food intake and growth of juvenile Arctic charr subjected to sustained exercise[J]. Can J Zool, 68:

2185 – 2191.

Christopher G. 1996. Lowe Kinematics and Critical Swimming Speed of Juvenile Scalloped Hammerhead Sharks[J]. The Journal of Experimental Biology, 199: 2605 – 2610.

Davison W. 1989. Training and its effects on teleost fish[J]. Comp Biochem Physiol, 94(A): 1 – 10.

Day N, Butler P J. 2005. The effects of acclimation to reversed seasonal temperature on the swimming performance of adult brown trout *Salmo trutta* [J]. The Journal of Experimental Biology, 208: 2683 – 2692.

Fabrizio Caputo, Mariana Fernandes Mendes de Oliveira, Benedito Sérgio Denadai, et al. 2006. Intrinsic Factors of the Locomotion Enenrgy Cost during Swimming[J]. Rev Bras Med Esporte, 12: 356 – 360.

Fisher R, Wilson S K. 2004. Maximum sustainable swimming speeds of late stage larvae of nine species of reef fishes[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 312(1): 171 – 186.

Frith H, Blake R. 1995. The mechanical power output and hydromechanical efficiency of northern pike (*Esox lucius*) fast-starts[J]. J Exp Biol, 198(9): 1863 – 1873.

Hammer C. 1995. Fatigue and exercise tests with fish[J]. Comp Biochem Physiol, A112(1): 1 – 20.

Houlihan D F, Laurent P. 1987. Effects of exercise training on the performance, growth, and protein turnover of rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J]. Can J Fish Aquat Sci, 44: 1614 – 1621.

James C Liao. 2007. A Review of Fish Swimming Mechanics and Behaviour in Alatered flows[J]. Phil Trans R Soc B, 362: 1973 – 1993.

Lee C G, Farrell A P, Lotto A, et al. 2003. Excess post-exercise oxygen consump tion in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon following critical speed swimming[J]. The Journal of Experimental Biology, 206: 3253 – 3260.

Mateus C S, Quintella B R, Almeida P R. 2008. The critical swimming speed of Iberian barbel *Barbus bocagei* in relation to size and sex[J]. J Fish Bio, 73(7): 1783 – 1789.

Mwangangi D, Mand Mutungi G. 1994. The efects of temperature acclimation on the oxygen consumption and emzyme activity of red and white muscle fibres isolated from the tropical freshwater fish *Oreochromis nilotlcus*[J]. Journal of Fish Biology, 44(6): 1033 – 1043.

Ohlberger J, Staaks G, HÖLKER F. 2006. Influence of morphology on swimming costs in Fish[J]. Journal of Comparative Physiology, B:127 – 138.

Perry A L, P J Low, J R Ellis, et al. 2005. Climate change and distribution shifts in marine fishes[J]. Science, 24: 1912 – 1915.

Po-Jung Lin, I-Hsun Ni, Bao-Quey Huang. 2008. *Onychostoma barbatula* (Cyprinidae) and applications to fishway design for rapid streams in Taiwan[J]. Raffles Bulletin of Zoology, 19: 273 – 284.

Rome L C, Funke R P, Alexander R M. 1990. The influence of temperature on muscle velocity and sustained performance in swimming carp[J]. Journal of Experimental Biology, 154:163 – 178.

Trump C L, Leggett W C. 1980. Optimum swimming speeds in fish: the problems of currents[J]. Can J Fish Aquat Sci, 37(7): 1086 – 1092.

(责任编辑 万月华)

# Effects of Folw Rate on Swimming Behavior and Energy Consumption of *Carassius auratus*

YUAN Xi, TU Zhi-ying, HAN Jing-cheng, SHI Xiao-tao, LIU Guo-yong, HUANG Ying-ping

(Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Hubei Yichang　443002, China)

**Abstract**: In the experiment, effects of folw rate on swimming behavior and energy consumption of *Carassius auratus* have been tested in the special experimental device. The results showed that the tail beat frequency, tail beat amplitude of *Carassius auratus* with swimming speed changes had obvious relations. As the swimming speed increased, the tail beat frequency and amplitude increased correspondingly. And tail beat frequency was quite different when the flow rate per second was less than 3 times body length (BL) and more than 3 times body length, but the tail beat amplitude difference was not obvious. The results also indicated that the oxygen consumption rate in unit time of *Carassius auratus* increased significantly, as the swimming speed increased. What was more, with the increased speed, the energy consumption of the swimming tended to be stable, and the maximum energy consumption rate was 90%. When the water temperature was around (16 ± 1) ℃, the critical velocity of 12 – 20 cm long fish was (3.85 ± 1.10) BL/s, and the absolutely critical velocity was (0.66 ± 0.10) m/s. The result also suggested that, in the temperature environment of the same flow rate, as the weight increases, the oxygen consumption tended to increase. And the oxygen consumption was greater at the temperature of (10 ± 1)℃ than at (16 ± 1)℃, but the net oxygen consumption was smaller. When the water temperature was (16 ± 1 )℃, swimming speed of 2.5 times body length per second was conducive to energy accumulation of *Carassius auratus* metabolism.

**Key words**: *Carassius auratus*; swimming behavior; energy consumption; oxygen consumption rate