

温度和流速对细鳞鲑(*Brachymystax lenok*)幼鱼游泳能力的影响及其与呼吸代谢的关系*

徐革锋^{1,2} 牟振波¹ 韩英² 刘洋¹ 郝其睿¹ 白庆利¹

(1. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所 哈尔滨 150070; 2. 东北农业大学动物科技学院水产系 哈尔滨 150030)

摘要 通过鱼类游泳代谢测定装置,研究了 5 个温度(4、8、12、16 和 20°C)水平下细鳞鲑(*Brachymystax lenok*)幼鱼的爆发游泳速度(BS)、临界游泳速度(U_{crit})及其测定过程中的呼吸代谢率和不同恒定流速条件下的最大续航游泳时间,并分析比较了幼鱼摄食与空腹状态下相关测试指标的差异,探讨了温度和流速对细鳞鲑幼鱼游泳能力的影响。结果表明,5 个温度水平下摄食组和空腹组细鳞鲑幼鱼的 BS 不存在显著差异($P>0.05$),且各实验组的 BS 对温度均无依赖关系,其摄食组和空腹组的线性拟合方程分别为 $Y_{\text{摄食}} = -0.0336x^2 + 0.2424x + 0.27$ ($R^2 = 0.929$)和 $Y_{\text{空腹}} = -0.045x^2 + 0.317x + 0.192$ ($R^2 = 0.9158$); 5 个温度水平下,摄食组和空腹组细鳞鲑幼鱼的 U_{crit} 分别为: (0.42±0.0038)和 (0.43±0.001)、(0.42±0.0038)和(0.46±0.0099)、(0.46±0.0025)和(0.47±0.0076)、(0.43±0.0081)和(0.43±0.0010)、0.47±0.0014 和(0.48±0.0012)m/s,且随着温度升高和流速增大,摄食组较空腹组的呼吸耗氧率分别增加了 17.80%(4°C)、32.24%(8°C)、19.39%(12°C)、39.39%(16°C)和 19.48%(20°C); 在最适温度条件下(16°C),不同测试流速对摄食组和空腹组细鳞鲑幼鱼的最大续航游泳时间存在显著性差异($P<0.05$),采用非线性拟合得到了 8 个测试流速与最大续航游泳关系的幂函数模型,由幂函数方程可知,最大续航游泳时间与测试流速呈负相关性,摄食组与空腹组存在显著性差异($P<0.05$),且随着流速增大,其最大续航游泳时间缩减剧烈。本研究认为,在设计大坝鱼道过程中应充分考虑不同温度条件和摄食条件下鱼类的爆发游泳速度和临界游泳速度参数,且如果考虑春秋季节细鳞鲑幼鱼上溯的有效通过率,那么鱼道的入口流速应小于 0.65m/s,鱼孔处流速小于 0.42 m/s。

关键词 细鳞鲑; 幼鱼; 游泳能力; 流速; 续航能力

中图分类号 S965 doi: 10.11693/hyhz20140800228

游泳能力是水生动物生存与进化的重要条件,例如大多鱼类就是利用出色的游泳能力来捕食、求偶、迁徙和逃避敌害(Yanase *et al*, 2007),因此得到了广泛研究,并对大坝和堤堰等水利工程的鱼道设计方面提供了大量参考数据(涂志英等, 2011)。而洄游鱼道要达到最佳的过鱼能力则必须构建鱼类游泳能力的评价模型,目前,游泳速度和游泳时间已被作为评价鱼类游泳能力的关键指标,且大多学者对鱼类游泳能力评价指标也进行了分类与探讨(Hammer, 1995;

Plaut, 2001)。并利用游泳时间将游泳能力划分为最大续航游泳速度(maximum sustained swimming speed)(Fisher *et al*, 2002, 2004)、最优巡航游泳速度(optimum cruising swimming speed)(Fisher *et al*, 2000)、最大游泳速度(maximum domed swimming speed)(Rodríguez *et al*, 2006)、临界游泳速度(critical swimming speed)(Farrell, 2008; 田凯等, 2010)和爆发游泳速度(burst swimming)(Beamish, 1978; Wardle *et al*, 1988)等,游泳时间指标通常参照最大续航游泳时间,即在某一

*中央级公益性科研院所基本科研业务费专项, HSY201312 号; “十二五”农村领域国家科技计划, 2012BAD26B05 号。徐革锋, 副研究员, 在读博士, E-mail: xgffish@hotmail.com

通讯作者: 白庆利, 研究员, E-mail: bqlharbin@163.com

收稿日期: 2014-08-26, 收修改稿日期: 2015-02-24

恒定流速下持续游泳直至疲劳状态所经历的时间。目前, 由于爆发式游泳速度、临界游泳速度和最大续航游泳时间指标意义简单明确, 常被作为测试环境因子对鱼类游泳能力影响的重要指标(Broughton *et al.*, 1978)。

水槽实验法作为测试鱼类游泳能力的基础研究手段被广泛应用(Fisher *et al.*, 2002, 2004; 田凯等, 2010; 桂福坤等, 2010)。这种实验方法优点是易于直接观测和定量比较。Beach(1984)认为, 研究鱼类的有效游泳模型不但要考虑冲刺游泳速度, 还要考虑可持续游泳速度, 并且这两种游泳方式间可以平缓过渡, 此外还应考虑水温的影响。目前, 水槽实验法中最常用的鱼类游泳测试仪器均源自 Brett(1964)式呼吸仪的改进设计。本研究选择了细鳞鲑(*Brachymystax lenok*)幼鱼作为实验动物, 目前该鱼是我国“十二五”期间主推的名特优品种之一, 近年来在有关细鳞鲑的生物学、疾病和代谢模式等方面的报道较多(刘洋等, 2011; 马波等, 2005; 徐革锋等, 2014a, b), 但未见在游泳能力方面的研究报道。本文借鉴桂福坤等(2010)方法, 通过调整流速和水温来研究幼鱼阶段细鳞鲑的游泳能力, 因此, 本研究在 5 个温度处理水平下测定空腹和摄食后细鳞鲑幼鱼的爆发游泳速度和临界游泳速度, 并在最适温度和不同流速条件下研究幼鱼最大续航游泳时间及其相应耗氧率情况, 探讨温度和流速对细鳞鲑幼鱼游泳能力的影响, 旨在为今后开展鲑鱼类的洄游鱼道设计以及行为生态学方面的研究提供有价值的资料。

1 材料与方 法

1.1 实验鱼及暂养条件

细鳞鲑幼鱼(*B. lenok*)取自黑龙江水产研究所渤海冷水性鱼类试验站, 共 80 尾, 体长为(15.32±1.53)cm, 体重为(58.70±2.55)g。

实验鱼被分组暂养于不同的控温水族箱内(1.5m×0.5m×0.6m), 每天以 2°C 的变温速率将水温从初始温度(10°C) 分别调整至设定的实验温度(4、8、12、16 和 20°C), 溶解氧大于 8.0mg/L, 每组暂养时间不少于两周。当实验鱼适应了暂养环境, 继而进行为期 20d 的实验饲养, 采用虹鳟饲料(北京思诺)每日按鱼总体重的 2%进行投喂, 每天投喂两次。

1.2 实验仪器与实验方案

实验仪器为鱼类游泳代谢测定仪(丹麦进口, 图 1), 实验区为环形水槽, 其观测窗长 0.46m (测试区), 水

流断面 0.14m×0.14m。测试区上游设有稳流装置, 下游设有不锈钢遮挡网, 且该区域可进行全自动控温、循环和充氧, 该装置具有可调速叶轮电机、自动监测溶解氧和温度的探头, 能够自动测定实验鱼的呼吸耗氧量和游泳速度。

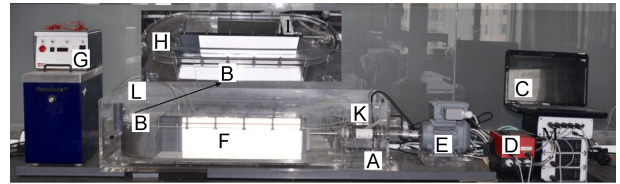


图 1 鱼类游泳代谢测定仪

Fig.1 The structure of fish swimming-MO₂ determining device
A: 开放式水浴槽; B: 环形水道(含测试区); C: 电脑控制系统; D: 变频电源总成; E: 变速电机; F: 环形水道的测试区; G: 控温系统; H: 多孔导向水道; I: 螺旋桨; K: 循环水泵系统; L: 溶解氧、温度和氨氮测定探头; M: 溶解氧、温度和氨氮等控制总成

实验方案: 水温设 5 个处理, 分别为 4、8、12、16 和 20°C。实验分为空腹组和摄食组, 且均依照温度处理各分为 5 个实验组, 每组 8 尾鱼, 筛选出耗氧量最大的温度条件作为实验的最适温度。空腹组在实验前将鱼停止摄食 48 h。选取 1 尾放入测试区, 每个温度水平的测定设 3 个有效重复组, 主要测定不同温度条件下, 实验鱼空腹和摄食情况下的爆发游泳速度和临界游泳速度。在最适温度条件, 测试流速设 8 个处理(0.25、0.30、0.35、0.40、0.45、0.50、0.55 和 0.6 m/s), 测定各个恒定流速下实验鱼的最大续航游泳时间。

1.3 测定方法

1.3.1 爆发游泳速度(BS)的测定 采用短时间内提速法对实验鱼游泳能力进行测定, 首先将实验鱼移到测定仪中适应 2 h, 之后以 0.30m/s 的初始速度开始测定实验, 测试周期为 20 s(ΔT), 流速梯度增量为 0.05 m/s(ΔV), 以测试时间不足 20 s 为判定标准。

1.3.2 临界游泳速度(U_{crit})的测定 采用逐步提速法对实验鱼的可持续游泳能力和呼吸代谢进行测定, 计算公式如下(Brett, 1964):

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

式(1)中, U_{crit} 表示临界游泳速度(m/s), V 为完成末次测定的流速(如测定时长小于 20 min, 该速度值应为前一测定周期的流速)(m/s), ΔV 为各测试梯度的速度增量, T 为在各速度梯度下设定的测定周期($T=20\text{min}$), t 为在末次测定流速下未能完成设定周期的实际持续游泳时间($t < 20\text{min}$)。

1.3.3 最大续航游泳时间的测定 在最适温度条件下, 实验鱼从以初始速度开始持续性游泳直至以实验设定流速拒绝游泳结束所历经的时间。

1.3.4 耗氧率(MO_2)测定 根据仪器的溶解氧探头自行测定适时溶解氧量与体重的关系进行自动换算。

1.4 数据统计分析

本研究采用 SPSS 18.0 统计软件进行数据分析, 获得实验结果均以 $mean \pm S.D$ 进行表示, 不同温度条件下爆发式游泳速度、临界游泳速度和最大续航游泳时间及其相应呼吸代谢值的差异采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和独立样本 T 检验(显著水平为 $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 温度对 BS 的影响

在适温范围内, 温度变化对摄食组和空腹组的 BS 影响不显著($P > 0.05$)(图 2), 但在 $16^\circ C$ 条件两实验组的 BS 均达到峰值; 在相同温度条件下, 摄食组与空腹组的爆发游泳速度也不存在显著性差异($P > 0.05$)(图 2), 且在 $4^\circ C$ 条件下, 摄食组和空腹组的 BS 均显著低于其它各组($P < 0.05$)。在测定细鳞鲑幼鱼爆发游泳速度过程中发现, 摄食和温度对细鳞鲑幼鱼的 BS 的影响不敏感, 只有在 $4^\circ C$ 低温刺激下, 摄食组和空腹组的实验鱼爆发游泳速度相对较低, 分别为 (0.58 ± 0.028) 和 (0.62 ± 0.028) m/s, 较其它各实验组分别低了 13.43% 和 13.90% ($8^\circ C$)、14.71% 和 20.51% ($12^\circ C$)、24.68% 和 29.55% ($16^\circ C$)、14.71% 和 19.48% ($20^\circ C$)。通过图 2 可见, 由于在测定 BS 过程中细鳞鲑幼鱼对温度敏感度不高, 其适温范围可界定在 $8-20^\circ C$ 。温度对摄食组和空腹组实验鱼爆发游泳速度的影响可以通过模型模拟体现, 即将爆发游泳速度作为变量 Y , 温度作为自变量 x , 摄食组和空腹组的线性模拟方程分别为 $Y_{\text{摄食}} = -0.0336x^2 + 0.2424x + 0.27$

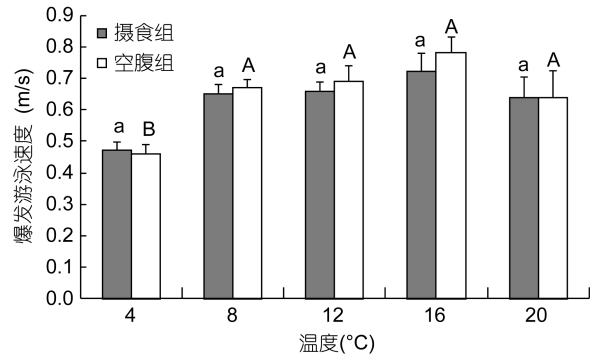


图 2 温度对细鳞鲑幼鱼爆发游泳能力的影响

Fig.2 The effect of temperature on the burst swimming ability
a, b: 上标字母不同表示摄食组不同温度水平组之间差异显著; A, B: 上标字母不同表示空腹组不同温度水平组之间差异显著; *: 表示同一温度水平下摄食组和空腹组之间差异显著

($R^2 = 0.929$)和 $Y_{\text{空腹}} = y = -0.045x^2 + 0.317x + 0.192$ ($R^2 = 0.9158$)。

2.2 温度与 U_{Crit} 和呼吸耗氧率的关系

在持续游泳条件下, 随着温度升高, 摄食组和空腹组的平均耗氧率呈先升高后降低趋势变化, 但它们的 MO_2 范围区间随着温度升高而缩小, 表明随着温度升高, 细鳞鲑幼鱼的呼吸代谢更加旺盛, 其肌肉代谢不断增强。在 $4^\circ C$ 条件, 摄食组与空腹组的耗氧率不存在显著性差异($P > 0.05$); 但在其它温度条件下, 摄食组的呼吸耗氧率显著高于空腹组($P < 0.05$); 在相同温度条件下, 摄食组的 MO_2 较空腹组分别提高了 17.80% ($4^\circ C$)、32.25% ($8^\circ C$)、19.39% ($12^\circ C$)、39.39% ($16^\circ C$) 和 6.61% ($20^\circ C$)。本研究发现, 在持续游泳状态下细鳞鲑幼鱼呼吸耗氧率表现出对温度极其敏感的特性, 但摄食组和空腹组的 U_{Crit} 未见规律性变化(表 1)。摄食组的平均耗氧率峰值出现在 $16^\circ C$ 条件, 但其最大 U_{Crit} 值出现在 $20^\circ C$ 条件; 空腹组的平均耗氧率峰值出现在 $20^\circ C$ 条件, 且其最大 U_{Crit} 值同样也出现在 $20^\circ C$ 条件。在 $4^\circ C$ (适温范围外) 和 $16^\circ C$ (最适

表 1 温度对细鳞鲑幼鱼 U_{Crit} 和呼吸耗氧率的影响
Tab.1 The effect of temperature on U_{Crit} and the rate of oxygen consumption

温度 (°C)	摄食组			空腹组		
	MO_2 [mgO ₂ (kg·h)]	MO_2 范围[mgO ₂ (kg·h)]	U_{Crit} (m/s)	MO_2 [mgO ₂ (kg·h)]	MO_2 范围[mgO ₂ (kg·h)]	U_{Crit} (m/s)
4	263.30±88.44 ^c	139.75—371.50	0.42±0.0038 ^b	223.51±74.81 ^d	121.62—345.00	0.43±0.001 ^b
8	380.41±56.61 ^d	290.07—435.00	0.46±0.0025 ^a	287.65±59.59 ^c	196.88—365.00	0.46±0.0099 ^a
12	465.48±52.38 ^c	420.10—548.50	0.46±0.0025 ^a	389.87±43.24 ^b	322.76—450.50	0.47±0.0076 ^a
16	899.61±61.76 ^a	853.50—955.00	0.43±0.0081 ^b	645.39±43.91 ^a	595.66—724.10	0.43±0.0010 ^b
20	701.25±40.07 ^b	672.57—752.00	0.47±0.0014 ^a	657.80±51.79 ^a	621.49—720.00	0.48±0.0012 ^a

同一列中含有不同字母的呈显著差异($P < 0.05$)

温度)条件, 摄食组的 U_{crit} 显著小于其它各温度条件的测试值($P < 0.05$), 空腹组的情况也同样如此。但同等温度条件下, 摄食组与空腹组的 U_{crit} 不存在显著差异($P > 0.05$)。

2.3 流速对最大巡航游泳时间的影响

根据持续游泳条件下测定幼鱼呼吸耗氧率的结果, 选定 16°C 条件为其最适温度条件, 即幼鱼的代谢最旺盛。因此, 在此温度条件下, 选择 0.25、0.30、0.35、0.40、0.45、0.50、0.55 和 0.60 m/s 共 8 个流速条件, 测定细鳞鲑幼鱼的最大续航游泳时间, 结果表明, 幼鱼的最大续航游泳时间会随着流速增大而显著减少($P < 0.05$)(图 3)。相对于 0.25 m/s 条件, 随着测试流速增加, 摄食组的最大续航游泳时间分别减少了 8.3%(0.30 m/s)、30.12%(0.35 m/s)、90.24%(0.40 m/s)、94.88%(0.45 m/s)、97.80%(0.50 m/s)、99.11%(0.55 m/s) 和 99.68%(0.60 m/s); 空腹组的最大续航游泳时间在上述相同条件相对减少了 10.72%(0.30 m/s)、29.58%(0.35 m/s)、88.21%(0.40 m/s)、93.66%(0.45 m/s)、97.53%(0.50 m/s)、98.65%(0.55 m/s) 和 99.64%(0.60 m/s)。当流速提高到 0.50 m/s 以上, 其最大续航游泳时间将减少到不足 20 min, 当以 0.60 m/s 流速测定时, 摄食组最大续航游泳时间为 2.57 min, 而空腹组的也仅为 3.27 min。在同等温度条件下, 只有当流速为 0.3、0.35 和 0.6 m/s 时, 摄食组与空腹组的最大续航游泳时间不存在显著性差异($P > 0.05$); 其它流速条件下均存在显著性差异($P < 0.05$)(图 3)。将恒定流速 V 与最大续航游泳时间(T)拟合成幂指数函数模型, 摄食组的幂指数模型为 $V_{\text{摄食}} = 3540.3e^{-0.886T}$ ($R^2 = 0.9661$), 空腹组的为 $V_{\text{空腹}} = 3764.6e^{-0.845T}$ ($R^2 = 0.965$)。

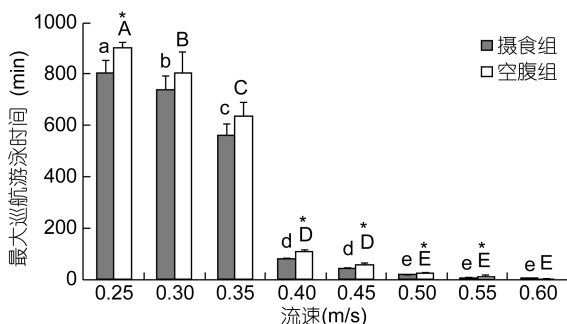


图 3 不同测试流速对于细鳞鲑幼鱼最大续航游泳时间的影响
Fig.3 The effect of different flow velocities on the maximum sustained swimming time

a—e: 上标字母不同表示摄食组不同温度水平组之间差异显著;
A—E: 上标字母不同表示空腹组不同温度水平组之间差异显著;
*: 表示同一温度水平下摄食组和空腹组之间差异显著

3 讨论

在自然界中, 鱼类游泳行为是一系列复杂的综合运动状态, 主要以阶段性的持续式游泳、暂停及偶尔性的爆发游泳相互穿插发生(Castro-Santos, 2005; Kieffer, 2010)。通常鱼类的游泳能力可分为 3 大类, 以速度方式可定义为: 持续游泳速度(通常在该模式下鱼类游泳行为可维持 200min 以上)、耐久游泳速度(通常在该模式下鱼类游泳行为可维持 20s—200min)以及临界游泳速度和爆发游泳速度(通常在该模式下鱼类游泳行为无法维持 20s (Hammer, 1995))。袁喜等(2011)和田凯等(2010)认为, 水温是影响鱼类游泳能力的主要因素, 而流速则是其游泳能力的评价结果。蔡露等(2013)认为, 鱼类的临界游泳速度和爆发游泳速度与鱼道设计紧密相关, 即鱼道鱼孔处流速主要参考临界游泳速度, 而鱼道入口处的最大流速设置应主要参考爆发游泳速度(不得高于鱼类爆发游泳速度)。以鲑鳟鱼生殖洄游为例, 爆发流速为其穿越障碍到达产卵场提供了保障, 但持续和耐久游泳状态则在长距离洄游中发挥重要作用(Powers *et al.*, 1985)。因此, 不同流速条件下, 鱼类最大续航游泳时间就成了修建鱼道单位长度的重要参考, 进而本研究对上述问题进行了深入研究。

3.1 温度对细鳞鲑幼鱼爆发游泳速度的影响

Nikora 等(2003)的研究认为, 温度的改变基本上不会对鱼类的突进游泳能力产生影响($P > 0.05$)。本研究结果印证了该观点, 即细鳞鲑幼鱼在 $8—20^{\circ}\text{C}$ 条件, 其爆发游泳速度无显著性差异。在适温范围内($8—20^{\circ}\text{C}$), 由于较高水温缩短了肌肉收缩的时间, 因此细鳞鲑幼鱼运动活跃, 但在温度适应范围外(例如 4°C 条件), 由于肌肉收缩机能障碍而导致游泳能力降低。通常, 温水性鱼类在 $25—30^{\circ}\text{C}$ 能获得最大极限游泳速度, 冷水性鱼类的则发生在 $15—20^{\circ}\text{C}$ (Hammer, 1995), 这与本研究结果一致。本研究发现, 在适温范围内, 细鳞鲑幼鱼的爆发游泳速度与温度的关系遵循钟形曲线; 且在相同温度条件下, 摄食和空腹对于细鳞鲑幼鱼的爆发游泳速度不存在显著性差异。与四种鲑科鱼 *Salvelinus alpinus*、*S. namaycush*、*S. fontinalis* 和 *Oncorhynchus nerka* (Hammer, 1995)在不同温度条件下的极限游泳速度比较发现, 温度和体长是影响鱼类游泳能力的主要因素, 且体长影响更为明显。但 Hammer(1995)的研究认为, 同一尾鱼在不同温度条件的爆发游泳速度存在显著性差异。因此,

在鱼道入口处设计的流速应低于大多数鱼类的爆发游泳速度,依据本研究结果,在不同温度条件,细鳞鲑幼鱼的爆发游泳速度在 0.47—0.78 m/s 范围。对于细鳞鲑幼鱼而言,如果单纯考虑春季和夏季上溯情况,根据北方的气温条件,温度应在 8—16°C,因此其鱼道入口处的最大流速设置应不大于 0.65m/s 为宜。

3.2 温度对 U_{crit} 和呼吸耗氧率的影响

温度是影响鱼类游泳能力的重要因素,当水温改变时,鱼类通过调整自身生理和生化过程去适应温度的变化,从而影响到鱼类的游泳能力,但随着水温升高,鱼类体内各种酶类活性也随之增强,使得组织和肌肉代谢旺盛,从而导致鱼类耗氧率随之升高(Lyon *et al.*, 2008)。有研究表明,鱼类 U_{crit} 先随着温度升高而增大直至达到极值,随后反而呈下降趋势变化(Randall *et al.*, 1991; Anttila *et al.*, 2008)。但对于不同鱼类, U_{crit} 对温度的敏感性有不同的表现,如褐鲈(*Salmo trutta*)在 14—18°C 条件,其 U_{crit} 对温度变化不敏感(Altamiras *et al.*, 2002),虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)在 14—17°C 条件,对温度不敏感(Randall *et al.*, 1991)。而细鳞鲑幼鱼在 8—16°C 条件,其 U_{crit} 对温度变化同样不敏感,说明了鲑鳟鱼类在水温越接近其最适游泳温度条件时,其机体代谢处于最优条件,维持了其运动代谢优先的模式,从而对于温度的变化没有表现出依赖关系。但温度对持续游泳过程中鱼类的呼吸代谢率影响十分显著,且在同等温度条件,细鳞鲑幼鱼摄食组显著高于空腹组的呼吸代谢率。结果表明,温度和摄食是影响其呼吸代谢率的关键因子。随着水温的升高,鱼类体内各种酶的活性增强,外在表现为各组织的活性增强,从而导致鱼类耗氧率随之增加。本研究比较发现,细鳞鲑幼鱼的呼吸代谢率较同等温度条件的其它鲑鳟鱼类的更强,例如红点鲑(*Salvelinus fontinalis*)(杨贵强等, 2009)和虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)(Kieffer *et al.*, 1998),且对温度的依赖性较强。通常鱼道内的水温冬季高夏季低,因此,在鱼道设计时要充分考虑温度因素,即在鱼类洄游季节,要考虑大多主要鱼类的通过能力。对于鲑鳟鱼类而言,鱼道鱼孔处流速应低于主要通过鱼类的最小 U_{crit} ,例如:在黑龙江流域如果兴建大坝,根据本研究结果,其鱼道鱼孔处流速至少不能高于 0.42 m/s,这样就不会影响细鳞鲑幼鱼的通过。

3.3 流速对最大巡航游泳时间的影响

郑金秀等(2010)认为,生物学与水力学是关系到鱼道设计成败的两大关键因素,即鱼类的游能力与

鱼道内的水流参数的匹配度至关重要。鱼道进出口设计、布局结构、池室规划以及进口的吸引水流和鱼道内的设计流速等,都应根据鱼类的游泳能力确定。而在鱼道内,鱼类的游泳能力主要取决于流速的大小,在洄游期,水温已成为恒定因素,因此流速关系着鱼类的游泳能力,且主要表现在最大续航游泳时间上,即合适的流速能使鱼类游泳距离增加。如鱼道的流速应按鱼类的耐久游泳速度和最大续航游泳时间设计,在修建较长的鱼道时,通过鱼类的巡航游泳时间计算其最大游泳距离,以此确定休息池的距离。我国大型水利枢纽工程都设计在南方,对于温水性鱼类的鱼道设计较为成熟,但对于鲑鳟鱼类的鱼道设计缺乏数据参考。未来将在北方地区也会兴建大坝拦水工程,因此关于鲑鳟鱼类游泳能力的研究就显得尤为重要。而鱼道最为关键的设计参数就是流速,这个参数关系着鱼类的最大续航游泳时间,间接关系其游泳距离,也就决定了鱼道的坡度和长度。因此,掌握鱼类的最大续航游泳时间对鱼道设计至关重要。

参 考 文 献

- 马 波, 尹家胜, 李景鹏, 2005. 黑龙江流域两种细鳞鲑的形态学比较及其分类地位初探. 动物分类学报, 30(2): 257—260
- 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. 生态学杂志, 29(3): 534—538
- 刘 洋, 徐革锋, 陈玉春等, 2011. 细鳞鲑气单胞菌的分离、鉴定及药敏试验. 大连海洋大学学报, 26(3): 277—280
- 杨贵强, 徐绍刚, 王跃智等, 2009. 温度和摄食对溪红点鲑幼鱼呼吸代谢的影响. 应用生态学报, 20(11): 2757—2762
- 郑金秀, 韩德举, 胡望斌等, 2010. 与鱼道设计相关的鱼类游泳行为研究. 水生态学杂志, 3(5): 104—110
- 袁 喜, 涂志英, 韩京成等, 2011. 流速对鲫游泳行为和能量消耗影响的研究. 水生态学杂志, 32(4): 103—109
- 桂福坤, 王 萍, 吴常文, 2010. 适应条件对鱼类续航游泳能力的影响. 水产学报, 34(8): 1227—1235
- 徐革锋, 王裕玉, 韩 英等, 2014a. 不同温度条件下运动和摄食对细鳞鲑幼鱼代谢模式的影响. 应用生态学报, 25(4): 1156—1162
- 徐革锋, 尹家胜, 韩 英等, 2014b. 温度对细鳞鲑幼鱼最大代谢率和代谢范围的影响. 水生态学杂志, 35(3): 56—60
- 涂志英, 袁 喜, 韩京成等, 2011. 鱼类游泳能力研究进展. 长江流域资源与环境, 20(S1): 59—65
- 蔡 露, 房 敏, 涂志英等, 2013. 与鱼类洄游相关的鱼类游泳特性研究进展. 武汉大学学报(理学版), 59(4): 363—368
- Altamiras J, Axelsoon M, Claireaux G *et al.*, 2002.

- Cardiorespiratory status of triploid brown trout during swimming at two acclimation temperatures. *Journal of Fish Biology*, 60(1): 102—116
- Anttila K, Järvilehto M, Mänttari S, 2008. The swimming performance of brown trout and whitefish: the effects of exercise on Ca^{2+} handling and oxidative capacity of swimming muscles. *Journal of Comparative Physiology B*, 178(4): 465—475
- Beach M H, 1984. Fish passes design-Criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fish in rivers. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Lowestoft, Fisheries Resource Technical Reports, 78: 45
- Beamish F W H, 1978. Swimming Capacity. In: Hoar R, ed. *Fish Physiology*. New York: Academic Press, 101—187
- Brett J R, 1964. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *Journal of Fisheries Research Board Canada*, 21(5): 1183—1226
- Broughton N M, Goldspink G, 1978. Biochemical changes in the lateral muscles of roach, *Rutilus rutilus* from two habitats following exercise. *Journal of Fish Biology*, 13(5): 613—618
- Castro-Santos T, 2005. Optimal swim speeds for traversing velocity barriers: an analysis of volitional high-speed swimming behavior of migratory fishes. *Journal of Experimental Biology*, 208(3): 421—432
- Farrell A P, 2008. Comparisons of swimming performance in rainbow trout using constant acceleration and critical swimming speed tests. *Journal of Fish Biology*, 72(3): 693—710
- Fisher R, Bellwood D R, Job S D, 2000. Development of swimming abilities in reef fish larvae. *Marine Ecology Progress Series*, 202: 163—173
- Fisher R, Bellwood D, 2002. The influence of swimming speed on sustained swimming performance of late-stage reef fish larvae. *Marine Biology*, 140(4): 801—807
- Fisher R, Wilson S K, 2004. Maximum sustainable swimming speeds of late-stage larvae of nine species of reef fishes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 312(1): 171—186
- Hammer C, 1995. Fatigue and exercise tests with fish. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 112(1): 1—20
- Kieffer J D, 2010. Perspective-Exercise in fish: 50+ years and going strong. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 156(2): 163—168
- Kieffer J D, Alsop D, Wood C M, 1998. A respirometric analysis of fuel use during aerobic swimming at different temperatures in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Journal of Experimental Biology*, 201: 3123—3133
- Lyon J P, Ryan T J, Scroggie M P, 2008. Effects of temperature on the fast-start swimming performance of an Australian freshwater Fish. *Ecology of Freshwater Fish*, 17(1): 184—188
- Nikora V I, Aberle J, Biggs B J F *et al*, 2003. Effects of fish size, time-to-fatigue and turbulence on swimming performance: a case study of *Galaxias maculatus*. *Journal of Fish Biology*, 63(6): 1365—1382
- Plaut I, 2001. Critical swimming speed: its ecological relevance. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 131(1): 41—50
- Powers P D, Orsborn J F, 1985. New concepts in fish ladder design: analysis of barriers to upstream fish migration, volume IV of IV, Investigation of the physical and biological conditions affecting fish passage success at culverts and waterfalls. Project No.198201400 (BPA Report DOE/BP-36523-1). Bonneville Power Administration, Portland, OR
- Randall D, Brauner C, 1991. Effects of environmental factors on exercise in fish. *The Journal of Experimental Biology*, 160(1): 113—126
- Rodríguez T T, Agudo J P, Mosquera L P *et al*, 2006. Evaluating vertical-slot fishway designs in terms of fish swimming capabilities. *Ecological Engineering*, 27(1): 37—48
- Wardle C S, He P, 1988. Burst swimming speeds of mackerel, *Scomber scombrus* L. *Journal of Fish Biology*, 32(3): 471—478
- Yanase K A, Eayrs S, Arimoto T, 2007. Influence of water temperature and fish length on the maximum swimming speed of sand flathead, *Platycephalus bassensis*: Implications for trawl selectivity. *Fisheries Research*, 84(2): 180—188

EFFECTS OF TEMPERATURE AND FLOW VELOCITY ON SWIMMING OF JUVENILE MANCHURIAN TROUT *BRACHYMYSTAX LENOK* (PALLAS) AND THE RELATIONSHIP TO RESPIRATORY METABOLISM

XU Ge-Feng^{1,2}, MOU Zhen-Bo¹, HAN Ying², LIU Yang¹, HAO Qi-Rui¹, BAI Qing-Li¹

(1. Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China;

2. College of Animal Science and Technology, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract We determined the burst swimming speed (BSS), the critical swimming speed (CSS) and the respiratory metabolism of at five different temperatures (4, 8, 12, 16 and 20°C), and the maximum sustained swimming (MSS) time of juvenile Manchurian trout *Brachymystax lenok* (Pallas) by a fish swimming-MO₂ determining device. Differences between feeding and fasting groups were compared. The effects of temperature and flow velocity on the swimming ability were evaluated. The results show there was no significant difference ($P>0.05$) in BS between the feeding and fasting groups at five temperatures. Values of CSS of the two groups at the five temperatures were, respectively, (0.42±0.0038) and (0.43±0.001), (0.42±0.0038) and (0.46±0.0099), (0.46±0.0025) and (0.47±0.0076), (0.43±0.0081) and (0.43±0.0010), and (0.47±0.0014) and (0.48±0.0012) m/s. Furthermore, comparing to the fasting group, oxygen consumption rate of the feeding group increased by 7.80% (4°C), 32.24% (8°C), 19.39% (12°C), 39.39% (16°C), and 19.48% (20°C) with the increases in temperature and flow velocity. The MSS times were significantly different in flow velocity in all groups. In addition, we constructed power exponential equations of the MSS time vs flow velocity, indicating a negative correlation between them. The MSS time decreased significantly with the increase in flow velocity. Therefore, the BSS and CSS at different conditions of temperature and feeding should be carefully considered in the design of fishway at a dam. Particularly, when considering the upstream migration in spring and autumn, flow velocity at the entrance of fishway should be <0.65m/s, and <0.42 m/s at the hole of fishway.

Key words *Brachymystax lenok* (Pallas); juvenile fish; swimming capacity; flow velocity; sustained swimming capacity