DOI: 10.3724/SP.J.1035.2011.00578

不同流速下杂交鲟幼鱼游泳状态与活动代谢研究

李 丹 林小涛 朱志明 衣萌萌

(暨南大学水生生物研究所, 热带亚热带水生态工程教育部工程研究中心, 广州 510632)

摘要: 为研究水流速度对杂交鲟幼鱼行为和代谢的影响, 探讨游泳状态与活动代谢及相关游泳运动参数之间的关系, 在 26℃水温下, 使用特制的鱼类游泳行为和活动代谢同步测定装置, 测定了杂交鲟幼鱼在 0.1、0.3、0.5 m/s 三种流速和静水条件下的游泳状态、趋流率、摆尾频率和耗氧率。结果表明: 随着流速的增大, 杂交鲟幼鱼逆流前进和逆流静止游泳状态所占时间比例显著减少, 而逆流后退所占时间比例显著增加, 顺流而下时间比例有所上升。在 0.0—0.3 m/s 的流速范围内, 杂交鲟幼鱼各个时段的平均趋流率、摆尾频率和耗氧率均随着流速的增加而增大, 在 0.3 m/s 流速下分别达到 100%、(2.53±0.34) Hz 和(490.99±164.59) mg O_2/(kg·h)。当流速增加至 0.5 m/s 时, 在趋流率仍保持 100%的情况下, 其耗氧率相比 0.3 m/s 增加了 21.86%, 而摆尾频率却减小了 6.70%。实验过程杂交鲟幼鱼趋流率与摆尾频率呈显著线性正相关, 而摆尾频率与耗氧率在大部分时段却无相关性。随着时间的延长, 各流速组杂交鲟幼鱼趋流率、摆尾频率和耗氧率呈现不同的变化趋势, 其趋流率均相对稳定; 但摆尾频率均随时间延长呈下降趋势, 而耗氧率则在实验前 9h 随时间延长逐渐增加, 随后趋于稳定。研究结果提示: 杂交鲟幼鱼游泳状态的变化与流速有关, 而反映运动强度大小的摆尾频率与活动代谢率的关系受到游泳状态的显著影响, 同时也与运动代谢特征的时间变化有关。

关键词: 杂交鲟; 流速; 游泳状态; 趋流率; 摆尾频率; 耗氧率; 活动代谢

中图分类号: Q493.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2011)04-0578-08

鱼类代谢包括标准代谢、活动代谢和特殊动力作用[1,2], 其中活动代谢是指鱼体以一定强度游泳运动时所消耗的能量, 是能量收支基本方程中较难确定的组分[3], 其代谢强度与活动状态和运动强度密切相关。目前关于活动代谢的定量研究方法尚不甚成熟, 国内此方面研究资料不多[4−7], 付世建等[8]报道锦鲫(*Caresses auratus*)在不同溶解氧水平下采取不同的运动和能量代谢对策以适应不同环境溶氧条件。朱宴苹等[9]研究不同游泳速度下瓦氏黄颡(*Pelteobagrus vachelli*)幼鱼的有氧和无氧代谢反应, 结果发现幼鱼到达临界游泳速度时的无氧代谢功率比例仅为 11.0%, 表明其游泳运动主要以有氧代谢供能。而国外多采用特定的呼吸仪把实验鱼限制在一定的空间, 研究流速对活动代谢的影响[10−13]。作者在之前的研究发现: 如果实验鱼被置于一个可相对自由活动的空间逆流游泳时, 可观察到其会呈现逆流前进、逆流静止或逆流后退等不同的游泳状态, 其游泳状态及其他几个游泳相关参数明显受流速的影响且呈现一定的时间变化[14,15]。而在不同游泳状态下鱼类活动代谢特征以及与此相关的主要游泳器官尾鳍等的运动特点发生了哪些变化? 目前尚未有此方面的详细报道。

本研究以杂交鲟(黑龙江鳇 *Huso duricus* Georgi♂×史氏鲟 *Acipenser schrencki* Brandt♀) 幼鱼为实验材料, 采用特制的鱼类游泳行为和活动代谢同步测定装置, 设定不同的流速以诱导实验鱼在相对自由的条件下产生不同游泳状态, 测定其相应的游泳行为参数和活动代谢强度, 探讨它们之间的关

收稿日期: 2010-10-12; 修订日期: 2011-04-25

基金项目: 广东省科技计划项目(No.20108B020309005); 广州市科技计划项目(2010Z1-E401); 广东省海洋渔业科技推广专项项目(No. A200901H03)资助

作者简介: 李丹(1981—), 女, 山东定陶人; 博士; 主要从事养殖环境与动物生理生态方面的研究。E-mail: swxlidan@163.com

通讯作者: 林小涛, E-mail: tlinxt@jnu.edu.cn

系及其时间变化规律, 拟为深入研究鱼类运动与活动代谢理论以及建立更为精确的鱼类能量收支模型提供基础数据。

1　材料与方法

1.1　实验鱼来源和暂养

实验用鱼为广州市先步农业发展有限公司嘉禾水产苗种场提供的杂交鲟幼鱼。实验前将幼鱼在室内循环水养殖系统(流速为 0.009 m/s)驯化 30d。驯化期间每天 8: 00 和 18: 00 点两次饱足投喂北京友谊恒通饲料有限公司生产的统一牌鲟鱼配合饲料(粗蛋白质≥45%, 脂肪≥10%, 粗纤维≤3%, 粗灰分≤17%)。暂养水温为(26±0.5)℃, 溶解氧含量大于 6 mg/L, 光照为室内自然光, 照度(1200±100)lx, 日间光照不足时用日光灯补充照明。实验鱼体质量为(56.10±4.95) g, 体长(21.08±0.27) cm。

1.2　实验装置及实验方法

采用自行设计的鱼类游泳行为和活动代谢同步测定装置(发明专利号 ZL200710026636.3)[16], 其基本结构是一个用透明材料制成的容积 72 L(r=31cm, h=25cm)、内具有 1 个环流通道的圆形可密封水槽(呼吸仪), 测定装置中装有两个可调速的水泵, 各连接一条喷水管于环形通道左右两侧, 因喷水方向相反而在呼吸仪中形成一个环流通道, 实验鱼置于其中, 可以进行长时间的自由游泳运动(图 1)。

本实验设定 0.1、0.3、0.5 m/s 三个流速组和一个 0.0 m/s 静水对照组, 其中静水组实际上由于溶解氧维持和测定的需要通过水交换保持微流状态, 流速实测值为 0.009 m/s, 近似为 0.0 m/s 流速。每一组设定 3 个重复和 1 个无鱼空白对照组。在每个装置中放 4 尾受试鱼, 4 个实验组共用杂交鲟幼鱼 48 尾, 实验前让鱼断食 48h, 其中后 24h 将实验鱼移入实验装置在 0.009 m/s 微流水中适应。流速采用流速水位计(澳大利亚 Unidata, Model 6526B)测量。实验期间水温(26±0.5)℃, 采用连续光照, 照度(1200±100) lx。

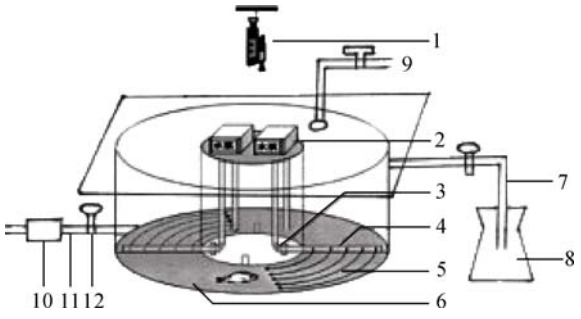


图 1　鱼类游泳行为和活动代谢测定装置

Fig. 1　The device for measuring swimming behavior and activity metabolism of fish

1. 摄像机; 2. 水泵; 3. 水泵调节阀; 4. 水泵喷水管; 5. 水流方向; 6. 环形泳道; 7. 出水管; 8. 采样瓶; 9. 气体排出管; 10. 流量调节装置; 11. 进水管; 12. 阀门

1. Video tape recorder; 2. Pump; 3. Adjusting valve; 4. Spouting pipe; 5. Flow direction; 6. Ring-shaped swimming lane; 7. Drainage water pipe; 8. Sampling bottle; 9. Exhausting air bubble pipe; 10. Water control; 11. Entering water pipe; 12. Switch

实验进行 24h。实验开始后采集呼吸仪水样时间为 0.5h、1h、2h、3h, 3h 后每隔 3h 采样 1 次, 每次分别采集进、出水口水样各 250 mL, 然后用碘量法测定水样的溶解氧含量, 根据进水口以及出水口水体的溶解氧含量的差值计算鱼类的耗氧率。每次采集水样时使用安装在测定装置上方的摄像机同步拍摄实验鱼的游泳行为 20min, 然后将所拍录像转换成 MPEG4 视频文件, 在计算机上分析各种游泳行为参数。

1.3　计算公式

本研究把不同流速下鱼的游泳状态分为 4 种, 即逆流前进、逆流静止、逆流后退和顺流而下, 其中逆流静止是指受试鱼呈现相对静止状态。相关游泳行为参数计算方法如下:

趋流率 F (%) = $\Sigma ni/Nj$ [17,18]

摆尾频率 TBF (Hz) = TBT/t_1[19,20]

各种游泳状态的时间比例 P (%)= t_2 / T[21,22]

上式中趋流率 F 指实验鱼逆流游泳次数占总观察次数的百分比。式中 ni 指第 i (i = 1, 2, 3, …, 12) 尾实验鱼在观察期间被记录的逆流游泳的次数, Nj 指总的记录次数(每次观察时间持续 10min, 此间每 10s 记录一次)。测定静水对照组实验鱼“趋流率”时, 设定第一次观察到的实验鱼的游泳方向即为“逆流”方向; TBT 是每尾鱼在被观察期间总的摆尾次数, t_1 为观察时间(s); t_2 是每尾鱼在被观察期间呈现某一游泳状态的时间, T 为总的观察时间(min);

耗氧率: OCR[mg/(kg·h)] = ($H_1 - H_0$) ×V/m

H_1 是实验组进水与出水溶解氧含量的差值(mg/L), H_0 是无鱼空白对照组进水与出水溶解氧含量的差值(mg/L), V 是测定装置进出水的流量(L/h), m 为实验鱼湿体质量(kg)。

在特定的体重、温度和营养状况下, 鱼类的基础代谢相对稳定[23], 因此本研究通过测定杂交鲟幼鱼在不同流速下的耗氧率, 用以反映不同运动状态

下活动代谢的变化。

1.4 数据处理

实验数据均用平均值±标准差（Mean ± SD）表示，用 SPSS12.0 软件进行统计和相关分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)，并利用 LSD 多重比较法对各组数据的差异进行显著性检验，显著性水平为 P <0.05。

2 结果

2.1 不同流速下杂交鲟幼鱼各种游泳状态的时间比例

不同流速下杂交鲟幼鱼呈现各种游泳状态的时间比例(图 2)。随着流速增加，杂交鲟幼鱼主要游泳状态由逆流静止转为逆流后退。在 24h 的观察中，静水条件下只出现“逆流前进”和“顺流而下”两种状态，两种状态的时间分布并不相同，“逆流前进”约占 79.24%。在 0.1 m/s 流速下大部分时段出现 4 种游泳状态，整体上以逆流静止为主，保持在 20.2%—80.1%的水平；其次为逆流前进，保持在 8%—42.1%的水平；逆流静止加逆流前进的时间比例随时间延长呈减少趋势。在 0.3 m/s 流速下，整体上以逆流后退为主，保持在 62.5%—89.2%的水平，随着时间的延长,逆流后退的百分比呈平缓降低的趋势，而顺流而下时间比例却有所增加。在 0.5 m/s 流速下几乎没有观察到逆流前进，整体上以逆流后退为主，约占 92.2%—95.4%，且随时间延长，逆流后退比例有所增加。

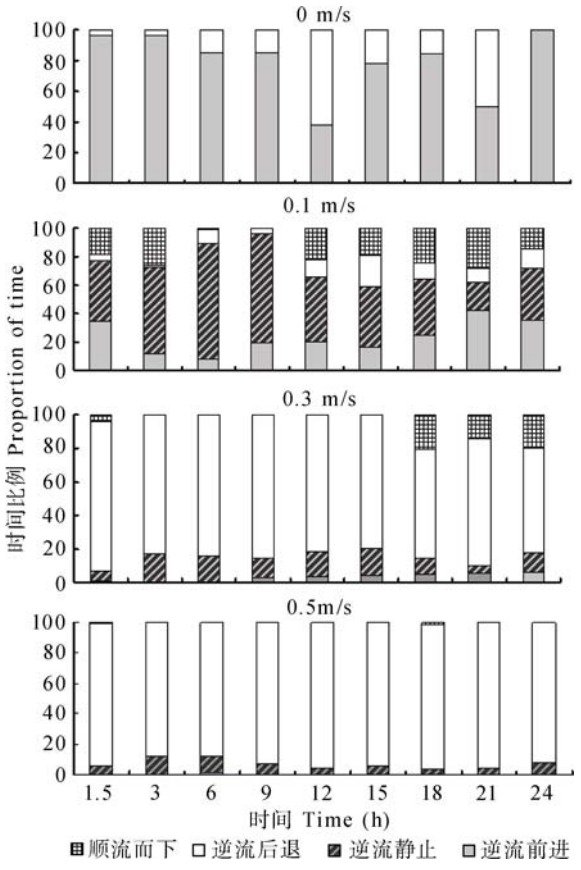


图 2 24h 内在不同流速下杂交鲟幼鱼各种游泳状态的时间比例

Fig. 2 Effect of flow rate on time proportion of swimming behavior in juvenile hybrid sturgeon in 24h

2.2 不同流速下杂交鲟幼鱼趋流率、摆尾频率和耗氧率的变化

不同流速下杂交鲟幼鱼趋流率、摆尾频率和耗氧率及其时间变化(图 3—5)。在静水条件下杂交鲟幼鱼各时段平均“趋流率”为 82.3%，摆尾频率为(1.95±0.15) Hz，平均耗氧率为(331.60±106.99) mg O_2/(kg·h)；在 0.1 m/s 流速条件下平均趋流率为 84.4%，摆尾频率为(1.91±0.15) Hz，平均耗氧率为(357.60±132.04) mg O_2/(kg·h)；在 0.3 m/s 流速条件下平均趋流率接近 100%，平均摆尾频率为(2.53±0.34) Hz，平均耗氧率为(490.90±164.59) mg O_2/(kg·h)；在 0.5 m/s 流速条件下，平均趋流率约为 99.6%，平均摆尾频率为 (2.36±0.28) Hz，平均耗氧率为 (598.30±91.90) mg O_2/(kg·h)。经方差分析发现，大部分时段静水组和 0.1 m/s 流速组的趋流率、摆尾频率无显著性差异(P>0.05)，0.3 m/s 和 0.5 m/s 流速组趋流率和摆尾频率均显著高于静水组和 0.1 m/s 流速组(P<0.05)，而 0.3 m/s 和 0.5 m/s 两流速组间趋流率无显著性差异，但大部分时段 0.3 m/s 流速组的摆尾频率大于 0.5 m/s 流速组。比较同一时段内不同流速下耗氧率发现，9h 前各时段耗氧率总体上随流速增大而增加，以 0.5 m/s 组的耗氧率最高，0.3 m/s 组次之；9h 后各时段耗氧率总体上仍然随流速增大而增加，但大部分时段 0.3 m/s 组和 0.5 m/s 组没有显著的差异(P>0.05)。

不同流速下杂交鲟幼鱼趋流率、摆尾频率和耗氧率随时间的变化趋势为：同一流速下杂交鲟幼鱼趋流率的时间变化趋势不明显，实验期间在 0.0 m/s 和 0.1 m/s 流速下趋流率稳定在 80%左右，而在 0.3 m/s 和 0.5 m/s 流速下整个过程趋流率几乎保持在 100%。在 0.1 m/s 条件下摆尾频率在 2.25—1.78 Hz 之间变化，由开始时的 3.05 Hz 降低了 13.2%，随着时间延长摆尾频率逐渐减少，随后维持在一定水平上。0.3 m/s 和 0.5 m/s 流速组的摆尾频率呈递减趋势，0.3 m/s

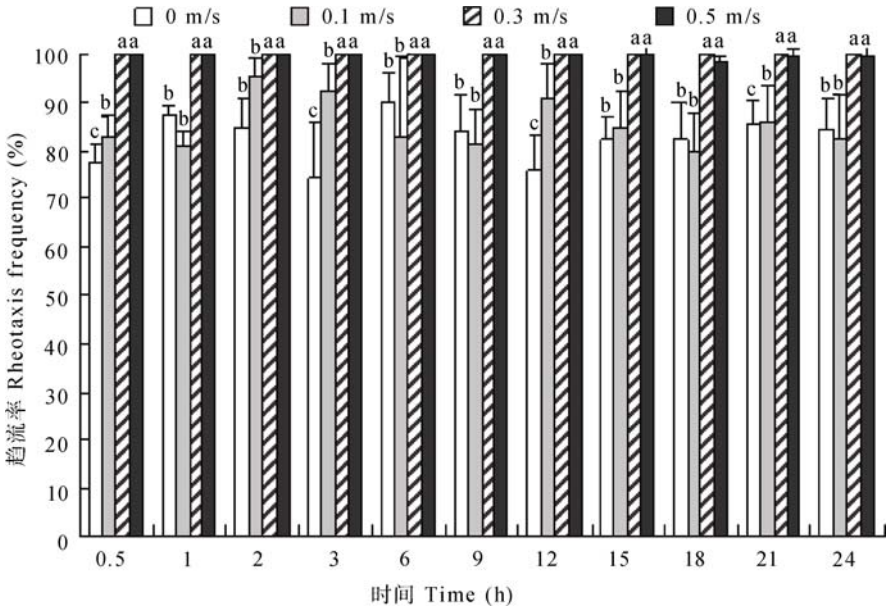


图 3　24h 内在不同流速下杂交鲟幼鱼趋流率(F)的时间变化

Fig. 3　The variation of rheotaxis frequency in hybrid sturgeon at different flow rates in 24h

不同小写字母表示同一时段不同流速间有显著性差异(P<0.05), 以下同

Different letters mean significant difference (P<0.05) between flow rate groups at the same phase. The same bellow

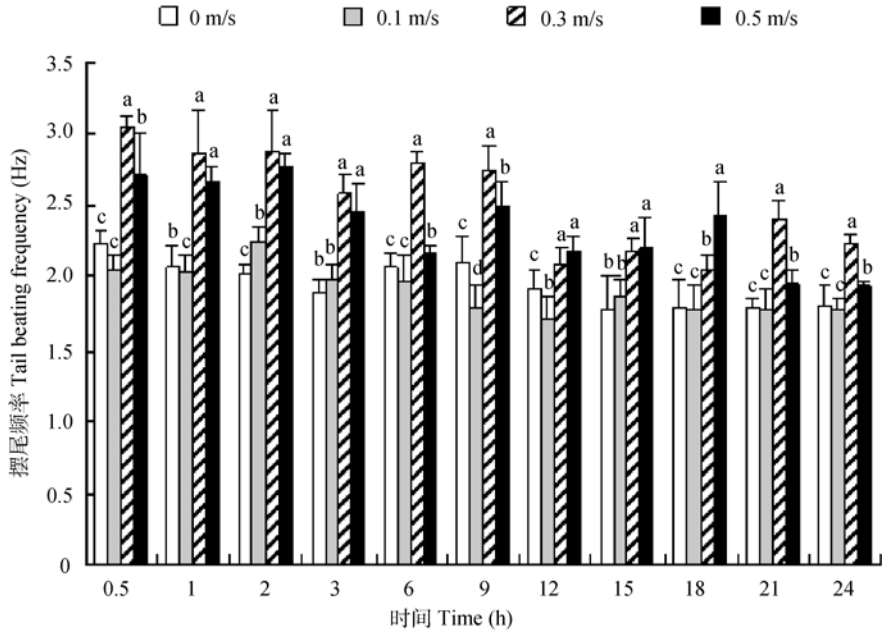


图 4　24h 内在不同流速下杂交鲟幼鱼摆尾频率的变化

Fig. 4　The variation of tail beating frequency in hybrid sturgeon at different flow rates in 24h

由开始的 3.03 Hz 减少到 24h 时的 2.23 Hz, 降低了 26.4%; 0.5 m/s 流速组由开始的 2.71 Hz 下降到 24h 的 1.94 Hz, 降低了 28.4%。在同一流速下耗氧率随时间的变化趋势为: 9h 前都有随着时间延长逐渐增加的趋势, 与实验开始时比较, 9h 时段 0.3 m/s 组的耗氧率增幅最大, 达 3.42 倍, 而 0.5 m/s 组仅增加了 0.83 倍。9h 后各组各时段耗氧率的变化平缓, 趋于稳定。

对实验过程各时段摆尾频率与趋流率和耗氧率分别进行相关分析(表 1)。各时段杂交鲟幼鱼摆尾频率(TBF)与趋流率(RHF)均呈显著的线性正相关(P<0.05); 但摆尾频率和耗氧率绝大部分时段无相关

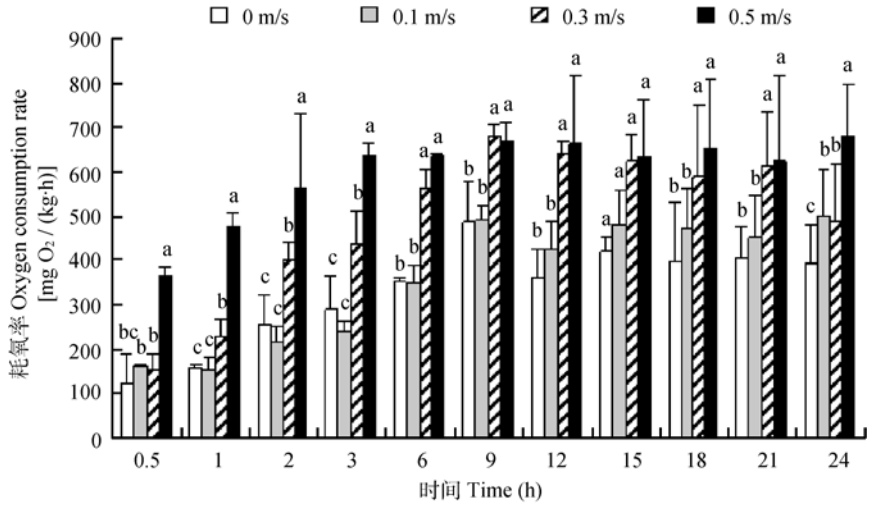


图 5 24h 内在不同流速下杂交鲟幼鱼耗氧率的变化

Fig. 5 The variation of oxygen consumption rate (*OCR*) in hybrid sturgeon at different flow rates in 24h

表 1 不同时间段杂交鲟幼鱼摆尾频率(***TBF***)与趋流率(***RHF***)和耗氧率(***OCR***)相关性分析

Tab. 1 Correlation analysis between tail beating frequency (*TBF*) and rheotaxis frequency (*RHF*), oxygen consumption rate (*OCR*) in hybrid sturgeon at different time phases

时间 Time (h)	摆尾频率 (*TBF*) 与趋流率 (*RHF*)	*R*	*N*	*P*	摆尾频率 (*TBF*) 与耗氧率 (*OCR*)	*R*	*N*	*P*
0.5	线性相关	0.549	48	<0.05	无相关		12	<0.05
1	线性相关	0.747	48	<0.05	无相关		12	<0.05
2	线性相关	0.766	48	<0.05	线性相关	0.551	12	<0.05
3	线性相关	0.722	48	<0.05	线性相关	0.507	12	<0.05
6	线性相关	0.579	48	<0.05	无相关		12	>0.05
9	线性相关	0.799	48	<0.05	无相关		12	>0.05
12	线性相关	0.515	48	<0.05	线性相关	0.578	12	<0.05
15	线性相关	0.807	48	<0.05	无相关		12	>0.05
18	线性相关	0.625	48	<0.05	无相关		12	>0.05
21	无相关		48	>0.05	无相关		12	>0.05
24	线性相关	0.709	48	<0.05	无相关		12	>0.05

(P >0.05)。如果仅对趋流率相近的 0.3 m/s 和 0.5 m/s 两组进行相关分析，摆尾频率与耗氧率、趋流率之间均不相关(P >0.05)。

3 讨论

3.1 在不同流速下杂交鲟幼鱼游泳状态与代谢特征

鱼类逆流而游的行为称为趋流性，趋流性强弱可用趋流率表示。本研究杂交鲟幼鱼摆尾频率随着趋流率增加相应增大，两者呈显著的线性相关。这是因为尾鳍的摆动可以产生游泳推进力，随着流速和趋流率的增加，逆流游泳所需动力也相应增加，为此必须通过加大摆尾频率才能保持逆流状态。但趋流率只是反映流水条件下鱼头部逆向水流方向的比率[24,25]，即使鱼类同处于逆向水流的方向，却可能因出现上述不同的游泳状态而呈现与该状态相应的摆尾频率和游泳速度等游泳行为指标[14,15]，进而形成不同的游泳行为和活动代谢的关系模式。

作者已报道了 90min 短时间内不同流速下杂交鲟幼鱼游泳行为的变化，结果表明杂交鲟幼鱼的游泳状态明显受到所处流速的影响[14]。本文进一步延长时间，研究了 24h 内不同流速下杂交鲟幼鱼游泳行为的变化，结果发现，随着流速的增大，逆流前进和逆流静止的比例减少，逆流后退的比例增加。而红鳍银鲫(*Barbodes schwanenfeldi*)则呈现不同的规律，随着流速增大其逆流静止的比例增多，逆流前进的状态减少。这种差异的产生可能与不同鱼的

形态特征、耐流能力有关[15]。红鳍银鲫体呈侧扁形, 尾鳍正尾型, 而杂交鲟体呈细纺锤形, 歪尾型, 尾柄细而有力, 较红鳍银鲫细长, 因此后者游泳能力更强。另一方面, 在上述 4 种游泳状态中, 顺流而下比较特殊, 其在不同流速下出现的原因有所不同: 静水条件下由“逆流前进”改为“顺流而下”是完全随意的, 与水流无关; 而在 0.1 m/s 低流速下的顺流而下是因为幼鱼对于此水流刺激还不够敏感, 趋流率没有达到最大值, 游泳方向的改变同样带有一定的随机性; 在 0.3 m/s 流速下因水流刺激增强, 幼鱼更多地以逆流状态游泳, 只在实验末期, 可能由于趋流欲望有所减弱而出现少许时间的“顺流而下”; 而在 0.5 m/s 高流速下则几乎不出现“顺流而下”的现象。

鱼鳍是鱼类重要的游泳器官, 如果以产生推进力大小来衡量, 以尾鳍最为重要, 因而一般情况下可用摆尾频率作为衡量运动强度的指标之一[2,26]。在特定条件下, 摆尾频率与耗氧率大都呈正相关甚至是线性正相关关系[2,27,28]。而本研究发现, 实验过程大多时段摆尾频率与耗氧率并不相关, 尤其是流速较高的两组, 其摆尾频率与耗氧率完全没有相关关系。这可能是因为在高流速下伴随幼鱼游泳状态的变化各个游泳器官的作用及其运动强度也发生了相应的变化。

比较不同流速下幼鱼的游泳状态, 尽管在 0.3 m/s 流速和 0.5 m/s 流速下幼鱼均以逆流后退的游泳状态为主, 但是在 0.5 m/s 流速下逆流后退比例大于 0.3 m/s 流速, 而逆流静止的时间比例却小于前者。以红鳍银鲫和杂交鲟幼鱼的实验结果均证实在逆流前进和逆流静止状态下的摆尾频率均大于逆流后退[14,15], 这样, 在两组趋流率均几乎保持 100%的情况下, 0.5 m/s 流速组摆尾频率的下降便可以理解。然而, 摆尾频率的下降意味着运动量的减少, 为何其活动代谢率却不相应减少呢？这与鱼类另外一个游泳运动器官—胸鳍有关。Tudorache, *et al*.[29]研究海鲫(*Embiotoca lateralis*)时发现, 其正常向前游泳时胸鳍的主要作用在于控制身体平衡和转向等, 在静水条件下游泳速度与胸鳍摆动频率之间没有显著的相关性, 而胸鳍摆动频率与耗氧率却呈显著正相关, 说明胸鳍的主要作用并不是提供前进时的推动力。吴冠豪和曾理江[30]报道鲫鱼(*Carassius auratus*)处于不同游泳状态如前进、倒游(相当本文的逆流后退)和拐弯时, 其运动行为学参数如胸鳍、尾鳍的摆动频率、摆动幅度以及摆动角和扭转角等都不同, 这与不同游泳状态下游泳推动力的主要来源不同有关: 当其前游时, 主要推动力来源于鱼尾鳍的摆动, 倒游时则主要来自胸鳍。本研究当流速增大到 0.5 m/s 时, 已相当于杂交鲟幼鱼体长的 2.5 倍, 实验鱼因超出了其耐流范围[31]而表现出以逆流后退为主的游泳状态。在这种被动的游泳状态下, 一方面要努力恢复逆流向前的姿势, 另一方面要保持身体平衡, 这些都要加大胸鳍的运动强度因而增加了能量消耗。所以在逆流后退时, 尽管尾鳍摆动频率下降, 但整体上活动代谢水平并不相应减少甚至反而有所上升。

3.2　杂交鲟幼鱼游泳行为和活动代谢的时间变化

随着水流处理时间的延长, 在趋流率保持相对稳定的情况下, 各实验组尤其是高流速组幼鱼摆尾频率呈现逐渐减少趋势, 但实验初期其耗氧率却随时间延长而增大, 9h 后基本趋缓, 维持在一定水平上。摆尾频率的下降是由于上述随时间变化幼鱼所处的主要游泳状态不同所引起, 尤其在高流速条件下, 逆流静止状态逐渐减少, 而逆流后退或顺流而下的状态增加。而耗氧率在实验初期显著增加, 除与游泳状态变化相关外, 可能还因为实验初期实验鱼对水流条件变化反应较大, 剧烈的运动导致机体能量供不应求, 表现为氧的需要超过氧的供应而出现氧债[32]。在此种情况下幼鱼即使完成同等强度的运动量, 也由于需要偿还氧债而导致耗氧率的上升[33], 但氧债的出现使机体无法长时间持续进行较大强度的运动, 到了实验中后期, 耗氧率趋于稳定。在一般情况下, 长时间游泳时, 由于激烈的运动将消耗大量能量而无法持久, 所以鱼类大多都采用一般的耐久速度, 从而保持稳定的运动量和代谢率。欧洲鳗鲡(*Anguilla anguilla*)以 0.5 BL/S 速度持续游泳 90d, 期间耗氧率一直维持在(36.9±2.9)mg O_2/(kg·h)的稳定水平上[34]。关于杂交鲟在进行更长时间的游泳运动时其游泳行为与活动代谢的关系及其变化规律有待进一步研究。

参考文献:

[1] Cui Y B. Bioenergetics of fishes: theory and methods [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1989, **14**(3): 369—384 [崔亦波. 鱼类生物能量学的理论与方法. 水生生物学报, 1989, **14**(3): 369—384]

[2] Steinhausen M F, Steffensen J F, Andersen N G. Tail beat

frequency as a predictor of swimming speed and oxygen consumption of saithe (*Pollachius virens*) and whiting (*Merlangius merlangus*) during forced swimming [J]. *Marine Biology*, 2005, **148**: 197—204

[3] Yang Z C, Sun R Y. Research progress on fish active metabolism [J]. *Journal of Hebei Normal University* (Natural Science Edition), 1993, **3**: 77—80 [杨振才, 孙儒泳. 鱼类活动代谢的研究进展. 河北师范大学学报(自然科学版), 1993, **3**: 77—80]

[4] Yang Z C, Xie X J, Sun R Y. Effects of ration level on the daily total metabolism, specific dynamic action and activity metabolism of the oriental sheatfish (*Silurus asotus* Linnaeus) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1996, **20**(4): 333—338 [杨振才, 谢小军, 孙儒泳. 日粮水平对鲇鱼日总代谢、特殊动力作用和活动代谢的影响. 水生生物学报, 1996, **20**(4): 333—338]

[5] Wang D H, Wang Z W. Locomotion energetic and thermoregulation in root voles (*Microtusoeconomus*) [J]. *Acta Theriologica Sinica*, 1998, **4**: 292—298 [王德华, 王祖望, 根田鼠的活动代谢率. 兽类学报, 1998, **4**: 292—298]

[6] Wang M. Fish active metabolism research in brief [J]. *Marine Science*, 1999, **2**: 23—25 [王瑁. 鱼类活动代谢研究简况. 海洋科学, 1999, **2**: 23—25]

[7] Ma Z M. Metabo1ic energy of Japanese sea bass (*Latelabra japonicus*) and its main influence factor [D]. Ocean University of China. 2004 [马志敏. 花鲈的代谢能及其主要影响因素. 中国海洋大学. 2004]

[8] Fu S J, Li X M, Zhao W W, *et al*. The locomotive and metabolic strategies of goldfish under different dissolved oxygen level [J]. *Journal of Chongqing Normal University* (Natural Science), 2010, **27**(3): 14—18 [付世建, 李秀明, 赵文文, 等. 不同溶氧水平下锦鲫的运动和代谢适应对策.重庆师范大学学报(自然科学版), 2010, **27**(3): 14—18]

[9] Zhu Y P, Cao Z D, Fu S J. Aerobic and anaerobic metabolism in response to different swimming speed of juvenile dark-barbel catfish (*Pelteobagrus vachelli* Richardson) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, **34**(5): 905—912 [朱晏苹, 曹振东, 付世建. 不同游泳速度条件下瓦氏黄颡幼鱼的有氧和无氧代谢反应. 水生生物学报, 2010, **34**(5): 905—912]

[10] Brett J R. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockehe salmon [J]. *Journal of the Fisheries Research Board Canada*, 1964, **21**: 1183—1226

[11] Blazka P, Volf M, Cepela M. A new type of respirometer for the determination of the metabolism of fish in the active state [J]. *Physiologia Bohemoslovenica*, 1976, **9**: 553—558

[12] Dabrowski K R. A new type of metabolism chamber for the determination of active and postprandial metabolism of fish, and consideration of results for coregonid and salmon juveniles [J]. *Journal of Fish Biology*, 1986, **28**: 105—107

[13] Leonard B K, Leonard D R, Ueda H. Active metabolic rate of masu salmon determined by respirometry [J]. *Fisheries Science*, 2000, **66**: 481—484

[14] Li D, Lin X T, Li X, *et al*. Effects of water current on swimming performance of juvenile hybrid sturgeon (*Huso duricus* Georgi♂×*Acipenser schrencki* Brandt♀) [J]. *Freshwater Fisheries*, 2008, **38**(6): 46—51 [李丹, 林小涛, 李想, 等. 水流对杂交鲟幼鱼游泳行为的影响. 淡水渔业, 2008, **38**(6): 46—51]

[15] Li X, Lin X T, Song B L, *et al*. Effects of water velocities on swimming performances of juvenile *Barbbodes schwanenfeldi* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2010, **45**(2): 126—133 [李想, 林小涛, 宋波澜, 等. 流速对红鳍银鲫幼鱼游泳状态的影响. 动物学杂志, 2010, **45**(2): 126—133]

[16] Song B L, Lin X T, Wang W J, *et al*. Effects of water velocities on rheotaxis behaviour and oxygen consumption rate of *Barbodes schwanenfeldi* [J]. *Acta Zoologica Sinica*, 2008, **54**(4): 686—694 [宋波澜, 林小涛, 王伟军, 等. 不同流速下红鳍银鲫趋流行为与耗氧率的变化. 动物学报, 2008, **54**(4): 686—694]

[17] 今井义弘, 高谷义幸. 回流水槽による北海道西南沿岸の鱼类の行动观察 [J]. 北水实验报, 1998, (52): 9—16

[18] Blake R W. Biomechanics of rheotaxis in six teleost genera [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 2006, **84**: 1173—1186

[19] Ohlberger J, Staaks G, Holker F. Estimating the active metabolic rate in fish based on tail beat frequency and body mass [J]. *Journal of Experimental Zoology*, 2007, **307A**: 296—300

[20] Theagarten L S. Caudal fin in the white shark, *Carcharodon carcharias* (Lamnidae): a dynamic propeller for fast, efficient swimming [J]. *Journal of Morphology*, 2005, **264**: 233—252

[21] Blake R W, Chan K H S, Kwok E W Y. Finlets and steady swimming performance of *Thunnus albacares* [J]. *Journal of Biology*, 2005, **67**: 1434—1445

[22] Iwata M. Downstream migratory behavior of salmonids and its relationship with cortisol and throid hormones:a review [J]. *Aquaculture*, 1995, **135**:131—139

[23] Clarke A, Johnston N M. Scaling of metabolic rate with body mass and temperature in teleost fish [J]. *Journal of Animal Ecology*, 1999, **68**: 893—905

[24] He D R. The study of fish behavior and sense of Russia (I) [J]. *Taiwan Strait*, 1996, **15**(2): 191—199 [何大仁. 俄国鱼类行为与感觉研究(I) .台湾海峡, 1996, **15**(2): 191—199]

[25] Zhang S, Chen Y. Preliminary study on the rheotaxis of juvenile Sebastodes fuscescens [J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2005, **14**(3): 282—287 [张硕, 陈勇. 黑鲠幼鱼趋流性的初步研究. 上海水产大学学报, 2005, **14**(3): 282—287]

[26] Hunter J R, Zweifel J R. Swimming speed, tail beat frequency, tail beat amplitude and size in Jack mackerel, *Trachurus symmetricus*, and other fishes [J]. *Fishery Bulletin*, 1971, **69**: 253—266

[27] Herskin J, Steffensen J F. Energy saving in sea bass swimming in a school: measurements of tail beat frequency and oxygen consumption at different swimming speeds [J].

Journal of Fish Biology, 1998, **53**: 366—376

[28] Lowe C G. Metabolic rates of juvenile scalloped hammerhead sharks (*Sphyrna lewini*) [J]. *Marine Biology*, 2001, **139**: 47—453

[29] Tudorache C, Jordan A D, Svendsen J C, *et al*. Pectoral fin beat frequency redicts oxygen consumption during spontaneous activity in a labriform swimming fish (*Embiotoca lateralis*) [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2009, (84): 121—127

[30] Wu G H, Zeng L J. Three-dimensional measuring method with video tracking for free swimming fish [J]. *Science in China*, 2007, **37**(6): 760—766 [吴冠豪, 曾理江. 用于自由游泳鱼三维测量的视频追踪方法. 中国科学, 2007, **37**(6): 760—766]

[31] He D R. The behavior of teleost fishes [M]. Xiamen: Xiamen University House. 1998, 141—145 [何大仁. 鱼类行为学. 厦门: 厦门大学出版社. 1998, 141—145]

[32] Lin H R. Fish Physiology [M]. Guangzhou: Guangdong Higher Education House. 1999, 57 [林浩然. 鱼类生理学. 广州: 广东高等教育出版社. 1999, 57]

[33] Li Y C, Huang Y M. Comparative physiology [M]. Beijing: Higher Education House. 1985, 133—134 [李永材, 黄溢明. 比较生理学. 北京: 高等教育出版社. 1985, 133—134]

[34] Thillart G V, Ginneken V V, Korner F, *et al*. Endurance swimming of European eel [J]. *Journal of Fish Biology*, 2004, **65**: 312—318

EFFECTS OF FLOW RATE ON SWIMMING STATES AND ACTIVITY METABOLISM IN JUVENILE HYBRID STURGEON

LI Dan, LIN Xiao-Tao, ZHU Zhi-Ming and YI Meng-Meng

(*Institute of Hydrobiology*; *Jinan University*; *Engineering Research Center of Tropical and Subtropical Aquatic Ecological Engineering*, *Ministry of Education*, *Guangzhou* 510632, *China)*

Abstract: In order to study the effects of flow rate on swimming performance and activity metabolism, discuss the relationship between swimming states, rheotaxis frequency, tail beating frequency and oxygen consumption rate, the effects of different flow rates (0.0, 0.1, 0.3, and 0.5 m/s) on swimming states and in juvenile hybrid sturgeon (*Huso duricus* Georgi♂×*Acipenser schrencki* Brandt♀), weight of (56.10±4.95) g and body length of (21.08±0.27) cm, were studied. The experimental temperature was 26℃ and the instrument for measuring swimming behavior and activity metabolism was used. The results showed that swimming states of juvenile hybrid sturgeon were apparently affected by flow rate. With increasing water velocity, the proportion of behavior of swimming forward or keeping stable decreased. While time proportion of behavior of moving backward or swimming downstream increased. Rheotaxis frequency, tail beating frequency and oxygen consumption rate of juvenile hybrid sturgeon, peaking at 100%, (2.53±0.34) Hz and (490.99±164.59) mg O_2/(kg·h) of each sampling time, at the flow rate of 0.3 m/s were higher than those at the flow rate of 0.0 m/s. Compared to the parameters at the flow rate of 0.3 m/s, though rheotaxis frequency of fish kept stable by 100% at the flow rate of 0.5 m/s, oxygen consumption rate was increased by 21.86%, while tail beating frequency was decreased by 6.7%. There were linear correlations between tail beating frequency and rheotaxis frequency, while there was no correlation between tail beat frequency and oxygen consumption rate. Rheotaxis frequency, tail beating frequency and oxygen consumption rate exhibited different trends with the experimental time. Rheotaxis frequency kept stable, while tail beating frequency decreased with the experimental time. Oxygen consumption rate increased and the maximum appeared in the 9h, then the index decreased and maintained stable. The results showed that swimming state of juvenile Hybrid sturgeon was apparently affected by flow rate, while the relations between tail beat frequency which reflects exercise intensity and oxygen consumption rate were influenced by swimming states, meanwhile it also related to the time changes of the characteristic of exercise metabolism.

Key words: Hybrid sturgeon; Flow rate; Swimming state; Rheotaxis frequency; Tail beat frequency; Oxygen consumption rate; Activity metabolism