

适应条件对鱼类续航游泳能力的影响

桂福坤*, 王萍, 吴常文

(浙江海洋学院浙江省海洋养殖装备与工程技术重点实验室, 浙江 舟山 316000)

摘要:以续航时间作为鱼类游泳能力的评测指标,就适应流速、适应时间、加速时间等适应条件以及测试流速4种因素对美国红鱼及黑鲷续航游泳时间的影响进行了研究。试验采用均匀设计,其中美国红鱼采用4因素8水平试验方案,黑鲷采用4因素7水平试验方案。试验研究和理论分析表明,加速时间对大流速条件下的续航时间有较大影响,而对小流速条件下的续航时间影响可以忽略,具体影响大小与鱼类的品种和规格、流速大小、加速时间等有关;适应流速建议控制在1.5 BL/s以内,以避免测试前鱼类过多的能量损失。尽管较长的适应时间更有利于鱼进行充分的调整以适应新的环境,但适应时间仍建议控制在60 min以内;测试流速对鱼类的续航时间有极为显著的影响,两种鱼的续航时间均随测试流速的增加呈幂函数规律衰减。

关键词:美国红鱼;黑鲷;适应流速;适应时间;加速时间;续航时间

中图分类号:Q 178.1; S 917

文献标识码:A

游泳能力对于鱼类和很多水生动物的生存至关重要,多数鱼类需要通过游泳逃避敌害、猎食、迁徙、求偶、躲避灾害环境^[1-3],因此得到了广泛研究。鱼类游泳能力通常以游泳速度和游泳时间加以描述,不少学者对鱼类游泳能力评价指标的含义进行了探讨与分类^[4-5]。目前,游泳速度指标通常包括冲刺游泳速度(burst swimming speed)^[5-7]、临界游泳速度(critical swimming speed)^[8-10]、最大续航游泳速度(maximum sustained swimming speed)^[11-12]、最优巡航游泳速度(optimum cruising swimming speed)^[13-14]等;游泳时间指标通常采用最大续航游泳时间(maximum sustained swimming time),即在某一恒定速度下的持续游泳直至疲劳所经历的时间。最大续航游泳时间和最大续航游泳速度是一个问题的两个方面,两者相互对应。由于指标意义简单明确,常作为测试环境因子对鱼类游泳能力影响的重要指标和测试方法^[5,15]。为简单起见,后文简称续航时间和续航速度。

室内水槽试验是测试鱼类游泳能力的重要手

段,试验时研究对象被移入水槽,并在水槽中适应一段时间,然后调整试验条件(通常指流速)至设定要求,观察记录试验对象的行为状态。很多学者都非常强调测试前的适应过程,但对适应条件的选择及其对试验结果的影响通常不做专门论证,致使测试结果缺乏足够的说服力,也使不同适应条件下的测试结果的比较缺乏依据。通常,适应条件可包括水温、光照、融氧、水质等环境条件,也可包括初始适应流速、适应时间、加速适应等测试条件。前者通常也是广泛关注的因子,而后者在试验中具有普遍性,即各种耐流试验均会涉及这一问题,其中加速适应体现为加速时间的长短,一般有缓慢加速^[16]、小步长加速^[17]、半突然加速^[18]和突然加速^[19]4种情况,但关于初始流速适应、适应时间和加速适应是否会对鱼类游泳的续航能力产生影响尚无学者进行研究和界定。本文即针对这一问题,选择美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)和黑鲷(*Acanthopagrus schlegel*)两种不同体型的鱼类,就适应流速、适应时间、加速时间3种适应条件对两种鱼续航时间的影响进行研究。

收稿日期:2010-05-01 修回日期:2010-06-04

资助项目:国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA100301);国家科技支撑计划(2007BAD43B07)

通讯作者:桂福坤,E-mail:gui2237@163.com

1 材料与方法

1.1 试验对象

试验对象美国红鱼和黑鲷各 34 尾,购于舟山市岱山县的深水养殖网箱基地,为 1 龄鱼。试验前,两种鱼分别在两个独立的大型玻璃水池(1 m × 1 m × 3 m)中暂养 2 周,水池海水温度控制在(21 ± 0.5) °C,通过充气泵保持水中溶解氧在 6.0 mg/L 以上,光照条件不作特殊控制,为实验室自然光照。两种鱼均以冰鲜去皮小虾作为饲料,每日按鱼总体重的 2% 进行投喂。暂养池具有水质过滤、紫外杀菌、自动控温、除氨装置等辅助系统,水质过滤系统每日清洗,并每 3 ~ 4 日更换三分之一的新鲜水体。试验用美国红鱼体长(32.2 ± 1.22) cm,体重(549.0 ± 59.1) g;试验用黑鲷体长(25.5 ± 1.2) cm,体重(461.9 ± 60.7) g。试验对象体征参数均为试验结束后测量。

1.2 试验设计

本文主要研究适应条件对美国红鱼和黑鲷两

种鱼类游泳能力测试的影响,采用续航时间作为两种鱼类游泳能力的评测指标。适应条件是指试验测试前,鱼在水槽中的适应流速、适应时间和由适应流速升至测试流速的加速时间 3 个因子,包括测试流速共计 4 个因子,采用均匀设计方法^[20-21]并忽略各因子的交互影响,以降低试验强度。美国红鱼续航时间试验采用 4 因子 8 水平的均匀设计试验方案,如表 1 所示,共需试验对象 32 尾。由于暂养过程中,3 尾黑鲷因惊吓跃出水池受伤,被放弃使用,同时考虑部分富余试验对象以做必要的补充试验,因此黑鲷续航时间试验采用 4 因子 7 水平的均匀设计试验方案,如表 2 所示,共需试验对象 28 尾。一般情况下,鱼类的续航时间与速度成反比关系,即续航时间随速度增大成单调递减特性^[12]。在 4 因子 7 水平和 4 因子 8 水平的均匀设计中,各有一对因子递增列和因子递减列,为了避免流速与续航时间关系的单调性对其它因子的影响,试验设计时将适应流速和测试流速两因子分别放在非单调列的第 2 列和第 3 列(表 1 和表 2)。

表 1 美国红鱼续航时间试验均匀设计方案
Tab.1 Uniform design for *S. ocellatus* tests

试验编号 no.	试验因子 factors			
	适应时间 (min) acclimation time periods	适应流速 (cm/s) acclimation flow velocities	测试流速 (cm/s) testing flow velocities	加速时间 (min) acceleration time periods
1	4	15	84	8
2	12	25	116	7
3	20	35	76	6
4	28	45	108	5
5	36	10	68	4
6	44	20	100	3
7	52	30	60	2
8	60	40	92	1

表 2 黑鲷续航时间试验均匀试验均匀设计方案
Tab.2 Uniform design for *A. schlegel* tests

试验编号 no.	试验因子 factors			
	适应时间 (min) acclimation time periods	适应流速 (cm/s) acclimation flow velocities	测试流速 (cm/s) testing flow velocities	加速时间 (min) acceleration time periods
1	4	12	62	6
2	12	20	80	5
3	20	28	56	4
4	28	8	74	3
5	36	16	50	2
6	44	24	68	1
7	52	32	86	7

两种试验对象的测试流速范围根据前期的相关试验经验进行设定,美国红鱼的测试流速范围为 60 ~ 116 cm/s,黑鲷的测试流速范围为 50 ~ 86 cm/

s,流速水平均匀递增。适应流速以大致 1.5 BL/s 为最大值,分别对应美国红鱼和黑鲷的最大适应流速为 45 cm/s 和 32 cm/s,适应流速水平均匀变化。

适应时间范围分别为 4 ~ 60 min 和 4 ~ 52 min, 适应时间水平增量均为 8 min。加速时间分别为 1 ~ 8 min 和 1 ~ 7 min, 加速时间水平增量均为 1 min。

1.3 试验方法

试验在专用鱼类耐流试验垂直循环水槽中进行, 水槽全长 335 cm, 玻璃观测视窗长 180 cm, 断面尺寸 30 cm × 30 cm, 水流采用螺旋桨推动, 无极变速, 造流流速范围 0 ~ 2.0 m/s, 流速由 0 增至 2.0 m/s 的加速时间小于 1 min, 两端设有网状稳流装置。水槽配有外联封闭式水温自动控制系统、水质过滤和充气系统。

试验前, 水槽中注入新鲜海水并调控水温在 $(21 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ 。每次试验随机取鱼 2 尾, 放入水槽并让其适应 1 h 以缓解转移至水槽新环境的压力, 期间水流速度控制在 5 cm/s。正式试验时, 按试验设计, 将水流流速在 1 min 内升至指定的适应流速, 并使鱼在此流速下适应到指定的适应时间, 随后流速在对应的加速时间内升至测试流速。以美国红鱼测试方案的第 1 组试验为例: 1 h 压力缓解后, 流速由 5 cm/s 升至适应流速 15 cm/s, 并在此流速下适应 4 min, 然后在 8 min 内将流速匀速升至对应的测试流速 84 cm/s。当试验对象接触后端网片, 放弃顶流 30 s 时试验结束, 也有学者以 20 s 作为结束标志^[22-23], 每组试验重

复 1 次。整个试验过程中, 温控系统、水质过滤系统、充气系统均保持开启状态。

1.4 数据处理与分析

两种鱼的试验历时采用时钟和数码摄像机 (Sony DCR-SR65) 进行全程记录, 作为计时分析依据。对于较短的测试时间 (< 120 min), 通过数码摄像机回放确定续航时间, 对较长的测试时间, 由于数码摄像机连续记录限制, 而采用时钟作为计时手段, 两种计时方法均精确到秒, 数据分析时采用均值作为分析依据。适应时间、适应流速、加速时间以及测试流速对两种鱼续航时间的影响通过 SPSS 统计分析软件 (V16.0) 采用向后回归法 (Regression Backward) 进行分析, 显著性水平为 $P < 0.01$ 。

2 结果

2.1 适应条件对美国红鱼续航时间的影响

美国红鱼在 8 组不同组合方案下的续航时间测试结果如表 3 所示, 测试结果以均值作为分析依据。表中出现个别试验的测试结果数据与同组次下其它结果差异较大者将舍弃 (表中带 * 号者), 并作补充验证试验 (表中 E 列)。由于美国红鱼试验对象总有效数量 34 尾, 正常测试使用 32 尾, 因此仅能对其中两组条件做补充试验。

表 3 美国红鱼续航时间试验结果
Tab. 3 Experimental sustained swimming time of *S. ocellatus*

试验编号 no.	续航时间 (min) sustained swimming time					均值 mean	标准差 standard error
	A	B	C	D	E ⁺		
1	41	59.8	17.5*	54.5	37.7	48.3	9.2
2	6.5	8.1	6.9	5.4	—	6.7	1.0
3	119	94.6	143.7	30.3*	—	119.1	20.0
4	8.1	11.1	7.9	11.3	—	9.6	1.6
5	238	190.3	268.5	232.2	—	232.3	27.9
6	15.5	16.3	14.9	17	—	15.9	0.8
7	583.3	515.7	38.2*	599.3	—	566.1	36.2
8	28	20	3.7*	21.2	26.8	24	3.5

要分析各因子对续航时间的影响 (或贡献大小), 首先对各因子与续航时间的关系分别进行拟合, 以初步判断各因子单独对续航时间的影响以及两者之间的关系模型 (图 1)。从适应时间、适应流速、加速时间分别与续航时间的散点图看, 似乎无合适的常规拟合模型, 而测试流速与续航时间呈显著幂函数关系, 续航时间随测试流速的增加而迅速缩短。

2.2 适应条件对黑鲟续航时间的影响

黑鲟在 7 组不同组合方案下的续航时间测试结果如表 4 所示。与美国红鱼的处理方式相同, 测试结果以均值作为分析依据。表中出现部分试验的测试结果数据与同组次下其它结果差异较大者将舍弃, 并作补充验证试验 (表中 E 列)。由于黑鲟试验对象总有效数量 31 尾, 正常测试使用 28 尾, 因此仅能对其中 3 组条件做补充试验。其中第

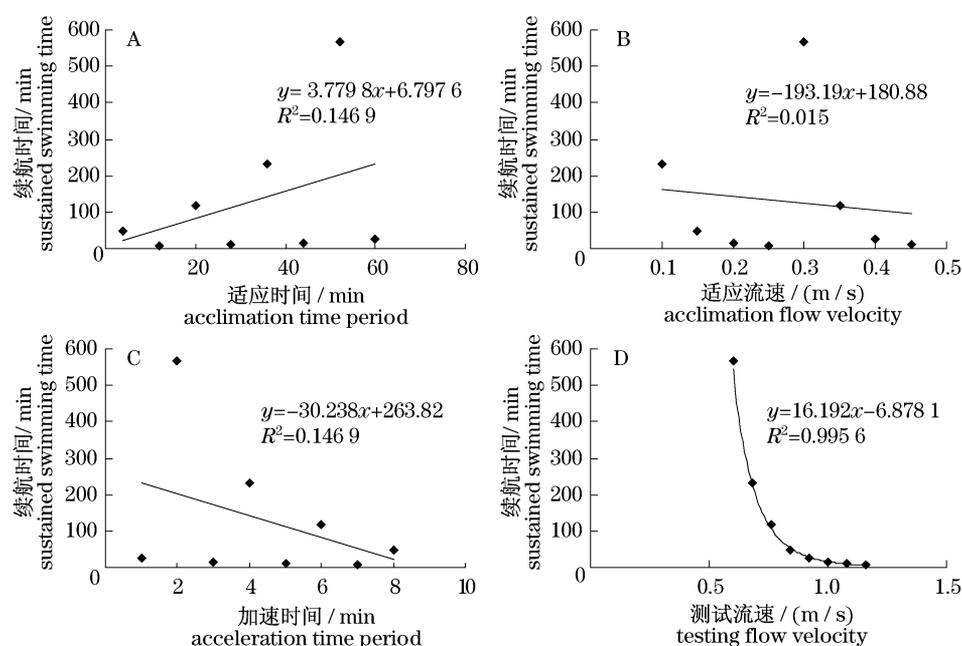


图1 各因子单独与美国红鱼续航时间的关系

Fig.1 Relationship between a single factor and sustained swimming time of *S. ocellatus*

表4 黑鲷续航时间试验结果

Tab.4 Experimental sustained swimming time of *A. schlegel*

试验编号 no.	续航时间(min) sustained swimming time					均值 mean	标准差 standard error
	A	B	C	D	E ⁺		
1	41.1*	117.6	10.4*	110.5	100.2	109.4	7.1
2	11.4	19.3	14.2	10.2	—	13	3.5
3	209.7	177.1	280.6	241.1	—	227.1	38.3
4	23.1	19.7	28	27.2	—	24.5	3.3
5	13.5*	474.7	452.1	523.8	79.7*	483.5	29.9
6	47.9	50.4	78.5	51.3	—	57	12.5
7	8.7	10.1	3.7*	9.1	9.0	9.2	0.5

5组补充试验数据仍然显著小于其它3组试验结果,再次放弃这一数据,而直接采用原有3组较为接近的数据。

与美国红鱼试验结果相似,适应时间、适应流速和加速时间与续航时间均无直观的曲线关系,而测试流速与续航时间呈现出良好的幂函数关系,续航时间随测试流速的增加而迅速衰减(图2)。

2.3 适应条件对续航游泳时间的显著性分析

尽管各适应条件与续航时间之间虽未表现出某种良好的曲线关系,但不能据此看出其对续航时间影响的大小,因此可进一步采用多因子线性回归分析,讨论各因子对续航时间的影响程度。

为进行多元线性回归分析,首先对两种鱼的测试流速进行幂函数转换处理,而其它适应条件

与续航时间因无直观的曲线关系而不作处理。其中美国红鱼的测试速度按公式 $V' = V^{-6.878}$ 处理,黑鲷的测试速度按公式 $V' = V^{-7.578}$ 处理。转换后将适应时间、适应流速、加速时间、转换测试流速和续航时间对应数据导入专业统计软件 SPSS 中,应用向后线性回归分析,检验各因子对续航时间的影响大小,显著性水平设为 $P < 0.01$,结果如表5和表6所示。结果表明,测试流速在各阶回归中,对两种鱼续航时间的影响均极为显著($P < 0.01$),而适应时间、适应流速、加速时间对两种鱼续航时间的影响均不显著($P > 0.05$)。表5和表6中,测试流速的回归系数与图1-d和图2-d中的回归系数有一定出入,系测试流速转换处理之截断误差所致。

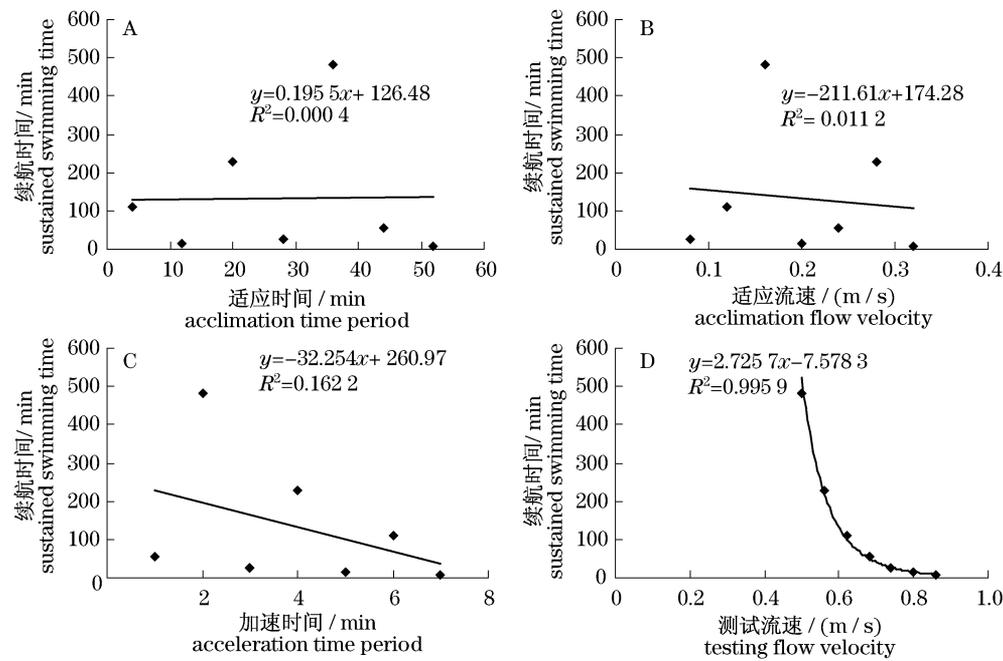


图 2 各因子单独与黑鲷续航时间的关系

Fig. 2 Relationship between a single factor and sustained swimming time of *A. schlegel*

表 5 美国红鱼续航时间的向后线性回归分析

Tab. 5 Backward linear regression analysis for the sustained swimming time of *S. ocellatus*

	回归模型 regression model	回归系数 coefficients	标准差 standard error	<i>t</i>	significance
1	适应时间 acclimation time period	-0.205	0.128	-1.598	0.185
	适应速度 acclimation flow velocity	26.070	18.015	1.447	0.221
	加速时间 acceleration time period	-0.741	0.647	-1.146	0.316
	测试流速 * testing flow velocity	16.997	0.200	84.776	0.000
2	适应时间 acclimation time period	-0.146	0.121	-1.207	0.282
	适应速度 acclimation flow velocity	11.242	12.916	0.870	0.424
	测试流速 * testing flow velocity	16.948	0.202	83.959	0.000
3	适应时间 acclimation time period	-0.061	0.069	-0.874	0.416
	测试流速 * testing flow velocity	16.916	0.194	87.007	0.000
4	测试流速 * testing flow velocity	16.803	0.143	117.352	0.000

注: * 流速按 $V' = V^{-6.878}$ 进行转换处理。Notes: * means the flow velocity transforms from $V' = V^{-6.878}$.

表 6 黑鲷续航时间的向后线性回归分析

Tab. 6 Backward linear regression analysis for the sustained swimming time of *A. schlegel*

	回归模型 regression model	回归系数 coefficients	标准差 standard error	<i>t</i>	significance
1	适应时间 acclimation time period	-0.358	0.281	-1.272	0.293
	适应速度 acclimation flow velocity	86.708	59.589	1.455	0.242
	加速时间 acceleration time period	-0.588	1.808	-0.325	0.766
	测试流速 * testing flow velocity	2.554	0.057	44.748	0.000
2	适应时间 acclimation time period	-0.333	0.238	-1.396	0.235
	适应速度 acclimation flow velocity	72.374	35.355	2.047	0.110
	测试流速 * testing flow velocity	2.556	0.050	51.067	0.000
3	适应时间 acclimation time period	30.150	19.969	1.510	0.191
	测试流速 * testing flow velocity	2.543	0.054	47.374	0.000
4	测试流速 * testing flow velocity	2.587	0.050	51.918	0.000

注: * 流速按 $V' = V^{-7.578}$ 进行转换处理。Notes: * means the flow velocity transforms from $V' = V^{-7.578}$.

3 讨论

3.1 加速时间对续航游泳时间的影响

适应条件对鱼类游泳能力的影响包括两个方面:一是积极影响,即足够的适应可使鱼得以充分地调整至最佳游泳状态^[22],续航时间得以延长;二是负面影响,过多的适应使鱼消耗了部分体力,缩短了续航时间。这两方面的影响在整个适应过程中是伴随存在的,找出各适应条件对续航游泳时间影响的极限范围,是确保鱼类游泳能力研究结果可靠的重要前提,也可为不同适应条件下进行的试验结果比较的有效性提供依据。

对于加速时间,过快的加速使鱼不能很快地调整以适应新的游泳状态,而过慢的加速则可能会消耗较多的体力,但我们既希望鱼有足够的适应时间,又不希望其在适应阶段消耗过多的体力。本试验中,我们对两种鱼采用不同的加速时间组合,鱼的体力消耗也不同,以续航时间比例作为分析依据,可按式(1)计算鱼在加速阶段的体力消耗情况:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{T} dt \quad (1)$$

式中, E 为体力消耗比例, t_1 为加速起始时间($t_1=0$), t_2 为加速结束时间, T 为 t 时刻对应的续航时间。由于采用均匀加速,因此速度与时间关系可用下式表示:

$$V = V_{t_1} + \frac{V_{t_2} - V_{t_1}}{\Delta T} \cdot t \quad (2)$$

式中, V_{t_1} 为加速起始时间对应的适应流速, V_{t_2} 为加速结束时间对应的测试流速, ΔT 为加速时间。续航时间与测试速度采用图1(d)和图2(d)对应的幂函数模型^[12,24]:

$$T = aV^b \quad (3)$$

式中, a 和 b 为回归系数。将式(2)和(3)带入(1),可得:

$$E = \int_{V_{t_1}}^{V_{t_2}} \frac{1}{aV^b} \cdot \frac{\Delta T}{V_{t_2} - V_{t_1}} dV \quad (4)$$

利用上式即可计算加速阶段的两种鱼的体力消耗情况(表7和表8)。

表7 美国红鱼加速阶段的体力消耗情况

Tab.7 Ratio of energy loss of *S. ocellatus* during acceleration stage

试验编号 no.	1	2	3	4	5	6	7	8
适应流速 V_{t_1} (m/s) acclimation flow velocity	0.15	0.25	0.35	0.45	0.1	0.2	0.3	0.4
测试流速 V_{t_2} (m/s) testing flow velocity	0.84	1.16	0.76	1.08	0.68	1	0.6	0.92
加速时间 ΔT (min) acceleration time period	8	7	6	5	4	3	2	1
体力消耗 E (%) ratio of energy loss	2.3	19.4	1.3	11.4	0.3	2.9	0.1	0.8

表8 黑鲷加速阶段的体力消耗情况

Tab.8 Ratio of energy loss of *A. schlegel* during acceleration stage

试验编号 no.	1	2	3	4	5	6	7
适应流速 V_{t_1} (m/s) acclimation flow velocity	0.12	0.2	0.28	0.08	0.16	0.24	0.32
测试流速 V_{t_2} (m/s) testing flow velocity	0.62	0.8	0.56	0.74	0.5	0.68	0.86
加速时间 ΔT (min) acceleration time period	6	5	4	3	2	1	7
体力消耗 E (%) ratio of energy loss	0.8	5.3	0.4	1.5	0.1	0.4	15.2

计算结果表明,在较大测试流速条件下,过长的加速时间会导致较大的体力消耗,进而影响测试结果。如美国红鱼在1.16 m/s的测试流速下,加速时间为7 min,加速阶段的体力消耗占19.4%;黑鲷在0.86 m/s的测试流速下,加速时间为7 min,加速阶段的体力消耗占15.2%。而对于其它流速下的体力消耗总体相对较小。由此也解释了在回归分析中,加速时间对续航时间的影响总体并不显著的原因。基于上述分析,在鱼

类续航游泳能力试验中,小流速情况对鱼的体力消耗影响不大,加速时间的选择范围可以较宽。而在大流速情况下,为避免过多的体力消耗,应尽量缩短加速时间,但具体加速时间与鱼的规格、品种、测试流速有关,视具体情况而定。在本文中,若以10%作为体力消耗比例的控制标准,对美国红鱼在1.16 m/s测试流速下的加速时间应控制在3.5 min以内,而黑鲷在0.86 m/s测试流速下的加速时间应控制在4.6 min以内。

3.2 适应流速和适应时间对续航游泳时间的影响

本试验美国红鱼和黑鲷两种鱼的最大适应流速分别为 45 cm/s 和 32 cm/s,对应相对速度分别为 1.40 BL/s 和 1.25 BL/s。利用续航时间和测试流速关系(图 1-d 和图 2-d)进行计算,可得对应

续航时间分别为 3 931.02 min 和 15 328.49 min。根据试验方案设计,在此适应流速下的适应时间分别为 28 min 和 52 min,仅占总续航时间的 0.71% 和 0.34%。其它适应流速和适应时间对应的体力消耗情况(仍以续航时间比例作为分析依据)如表 9 和表 10 所示。

表 9 美国红鱼各适应时间和适应流速对应的体力消耗情况
Tab.9 Ratio of energy loss of *S. ocellatus* during flow velocity acclimation stage

试验编号 no.	1	2	3	4	5	6	7	8
适应流速(m/s) acclimation flow velocity	0.15	0.25	0.35	0.45	0.1	0.2	0.3	0.4
适应时间(min) acclimation time period	4	12	20	28	36	44	52	60
体力消耗 E(%) ratio of energy loss	0.00	0.01	0.09	0.71	0.00	0.00	0.08	0.68

表 10 黑鲷各适应时间和适应流速对应的体力消耗情况
Tab.10 Ratio of energy losses of *A. schlegel* during flow velocity acclimation stage

试验编号 no.	1	2	3	4	5	6	7
适应流速(m/s) acclimation flow velocity	0.12	0.2	0.28	0.08	0.16	0.24	0.32
适应时间(min) acclimation time period	4	12	20	28	36	44	52
体力消耗 E(%) ratio of energy loss	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.34

由表 9 和表 10 可见,各种适应时间和适应流速情况下,鱼类在此阶段的体力消耗比例极小,多数情况下可以忽略,因此不会对最终的续航时间测定产生显著影响,与在显著性分析部分结论吻合。但按照上述方法,若在适应流速 2 BL/s 和 1 h 适应时间的情况下,美国红鱼和黑鲷在此适应阶段的体力消耗将分别达 18.0% 和 13.4%。若仍以 10% 作为体力消耗比例的控制标准,两种鱼在 60 min 适应时间内的最大适应流速分别为 1.84 BL/s (即 0.592 m/s) 和 1.92 BL/s (即 0.491 m/s),或者在 2 BL/s 适应流速下的最长适应时间分别不超过 33.4 min 和 44.8 min。很多学者常采用 60 min 作为试验鱼的适应时间^[12,22],故此结合上述分析建议适应流速最好不超过 1.5 BL/s,适应时间不超过 60 min。对应本试验研究的美国红鱼和黑鲷,在适应流速 1.5 BL/s 和适应时间 60 min 条件下,适应阶段的体力消耗比例仅分别为 2.5% 和 1.5%,对测试结果影响不大。

本文以美国红鱼和黑鲷为试验对象,研究了适应流速、适应时间和加速时间 3 种适应条件对两种鱼的续航游泳能力(续航时间)的影响。两种鱼虽然具有截然不同生态习性的,但续航时间和续航速度关系相同,满足普遍的幂函数关系,与其它学者关于鱼类游泳能力的相关研究结论吻

合^[12,24]。目前,关于适应流速、适应时间和加速时间等动力学适应条件对鱼类游泳能力测试的影响研究尚未见报道,本试验研究结论将对评价鱼类游泳能力的试验提供有价值的参考依据。

参考文献:

- [1] Stobutzki I C, Bellwood D R. An analysis of the sustained swimming abilities of pre-settlement and post-settlement coral reef fishes [J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 1994, 175(2): 275-286.
- [2] Watkins T B. Predator-mediated selection on burst swimming performance in tadpoles of the Pacific tree frog, *Pseudacris regilla* [J]. *Physiol Zool*, 1996, 69(1): 154-167.
- [3] Drucker E G. The use of gait transition speed in comparative studies of fish locomotion [J]. *Am Zool*, 1996, 36(6): 555-566.
- [4] Plaut I. Critical swimming speed: its ecological relevance [J]. *Comp Biochem Physiol*, 2001, A131(1): 41-50.
- [5] Hammer C. Fatigue and exercise tests with fish [J]. *Comp Biochem Physiol*, 1995, A112(1): 1-20.
- [6] Beamish F W H. Swimming capacity [M] // *Fish Physiology*. New York: Academic Press, 1978: 101-187.
- [7] Blaxter J H S. Swimming speeds of fish [C]. Bergen: FAO Conference on fish behavior in relation

- to fishing techniques and tactics,1969:19-27.
- [8] Jain K E, Hamilton J C, Farrell A P. Use of a ramp velocity test to measure critical swimming speed in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Comp Biochem Physiol*,1997, A117(4) :441-444.
- [9] Bellwood D R, Fisher R. Relative swimming speeds in reef fish larvae [J]. *Mar Ecol Prog Ser*,2001,211 : 299-303.
- [10] Mateus C S, Quintella B R, Almeida P R. The critical swimming speed of Iberian barbel *Barbus bocagei* in relation to size and sex [J]. *J Fish Bio*, 2008,73(7) :1783-1789.
- [11] Fisher R, Bellwood D R. The influence of swimming speed on sustained swimming performance of late stage reef fish larvae [J]. *Mar Biol*,2002,140(4) : 801-807.
- [12] Fisher R, Wilson S K. Maximum sustainable swimming speeds of late stage larvae of nine species of reef fishes [J]. *J Exp Mar Biol Ecol*,2004,312 (1) :171-186.
- [13] Ware D M. Bioenergetics of pelagic fish: theoretical change in swimming speed and ration with body size [J]. *J Fish Res Bd Can*,1978,35(2) :220-228.
- [14] Trump C L, Leggett W C. Optimum swimming speeds in fish: the problems of currents [J]. *Can J Fish Aquat Sci*,1980,37(7) :1086-1092.
- [15] Broughton N M, Goldspink G. Biochemical changes in the lateral muscles of roach, *Rutilus rutilus* from two habitats following exercise [J]. *J Fish Biol*, 1978,13(5) :613-618.
- [16] Beamish F W H. Swimming endurance of some Northwest Atlantic fishes [J]. *J Fish Res Bd Can*, 1966,23(2) :341-347.
- [17] Jones D R, Kiceniuk J W, Bamford O S. Evaluation of the swimming performance of several fish species from the Mackenzie River [J]. *J Fish Res Bd Can*, 1974,31(8) :1641-1647.
- [18] Broughton N M, Goldspink G, Jones N V. The effect of training on the lateral musculature of O-group roach, *Rutilus rutilus* (L.), and their fatigue in subsequent exercise tests [J]. *J Fish Biol*,1980,17 (2) :209-217.
- [19] Hunter J R. Sustained speed of jack mackerel, *Trachurus symmetricus* [J]. *Fish Bull*,1971,69(2) , 267-271.
- [20] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表 [M]. 北京:科学出版社,1994.
- [21] Fang K T. Uniform designs, *Encyclopedia of Statistics* [M]. 2nd Edition. New York: Wiley,2004.
- [22] Zeng L Q, Cao Z D, Fu S J, *et al.* Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. *Comp Biochem Physiol*,2009,153(2) :125-130.
- [23] Lee G C, Farrell A P, Lotto A, *et al.* The effect of temperature on swimming performance and oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon stocks [J]. *J Exp Biol*, 2003,206(18) :3239-3251.
- [24] Breen M, Dyson J O, Neill F G, *et al.* Swimming endurance of haddock (*Melanogrammus aeglefinus* L.) at prolonged and sustained swimming speeds, and its role in their capture by towed fishing gears [J]. *J Mar Sci*,2004,61(7) :1071-1079.

Influence of acclimation conditions on fish's sustainable swimming performance

GUI Fu-kun*, WANG Ping, WU Chang-wen

(Zhejiang Key Laboratory of Marine Aquaculture Facilities and Engineering Technology,
Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China)

Abstract: Swimming performance is considered a critical character determining survival in many fishes in the natural circumstances. For many fishes, swimming is the main way to avoid the attack from their predators, obtain food, find a mate, and so on. Experimental tests are important means for measuring the swimming performance of fish. Many influence factors on fish's swimming performance have been studied extensively. However, important as they are, no study has been carried out on the influence of acclimation time period, acclimation flow velocity and acceleration flow velocity on fish's swimming performance. Experimental results measured under different acclimation conditions are incomparable and are always open to question. In this paper, the effects of acclimation flow velocity, acclimation time period, acceleration time period and testing flow velocity on the sustained swimming time of *Sciaenops ocellatus* and *Acanthopagrus schlegel* were studied. The Uniform Design method was used in the experiments where a 4-factor and 8-level design was applied to *Sciaenops ocellatus* tests and a 4-factor and 7-level design was applied to *Acanthopagrus schlegel* tests. The experimental results and theoretical analysis showed that the acceleration time period has greater effect on the sustained swimming time under stronger flow velocities than that under slower flow velocities. The influence of acceleration time period on the sustained swimming time is also related to fish species, fish size, current velocity, etc. It is suggested that the maximal acclimation velocity should be limited to 1.5 BL/s to avoid significant energy loss of testing fish. The acclimation time is recommended not to exceed 60 min though a longer time may be better for the fish to adjust itself to a new environment. A well-fitted power-function relationship was found between the sustained swimming time and the testing flow velocities. The sustained swimming time decreases significantly as the flow velocity increases. The conclusions obtained in this paper may give an important guidance to the testing approaches of fish's swimming performance.

Key words: *Sciaenops ocellatus*; *Acanthopagrus schlegel*; acclimation flow velocity; acclimation time period; acceleration time period; sustained swimming time

Corresponding author: GUI Fu-kun. E-mail: gui2237@163.com