

几种幼鱼曲线游泳能力的比较研究*

周仕杰 何大仁 吴清天†

(厦门大学海洋学系, 厦门 361005)

提要 于1989年3—5月, 利用视觉运动反应方法测定了黑鲷、黄鳍鲷、鲮鱼、鲤鱼和白鲢5种幼鱼的曲线游泳能力。结果表明, 幼鱼游泳速度随环形水道半径增加而加快, 但加快的速率逐渐减缓。随游泳时间的延长, 游泳速度线性下降, 实测耐久时间, 黑鲷为66.7min; 黄鳍鲷为66.8min; 鲮鱼为104.4min; 鲤鱼为70.3min; 白鲢为58.8min。游泳能力指数, 黑鲷为290.6; 黄鳍鲷为147.3; 鲮鱼为485.2; 鲤鱼为243.5; 白鲢为154.2。5种幼鱼曲线游泳能力指数大小顺序为鲮鱼>黑鲷>鲤鱼>白鲢>黄鳍鲷。曲线游泳能力的不同与鱼的大小、体型及生态习性等因素有关。

关键词 幼鱼 曲线游泳能力

鱼类游泳行为的研究至今已有近百年历史(官之梅等, 1981; 殷名称, 1989; Hoar et al., 1978)。多数是研究鱼类的直线游泳能力和机制, 很少涉及曲线游泳行为。鱼类在生活过程中除作直线运动外, 曲线运动也是不可少的(Wardle, 1986)。近年有少数学者对鱼类曲线游泳行为作了初步探讨(He, P. et al., 1988; Weihs, 1981)。这些问题的研究有一定理论价值, 对拖网捕捞也有参考意义。作者利用鱼类视觉运动反应方法, 对几种幼鱼曲线游泳行为作了初步研究, 本文报告了曲线游泳速度与游泳轨迹的曲率半径的关系, 游泳速度随游泳持续时间的延长的变化规律。

1 材料与方 法

1.1 实验材料 采用3种海水幼鱼和两种淡水幼鱼, 分别于1989年3—5月捕自自然海区和淡水养殖场。黑鲷(*Sparus macrocephalus*), 体长1.7—2.5cm; 黄鳍鲷(*Sparus latus*), 体长3.5—4.8cm; 鲮鱼(*Mugil cephalus*), 体长2.0—2.7cm; 鲤鱼(*Cyprinus carpio*), 体长1.8—2.9cm; 白鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*), 体长2.5—2.8cm。实验期间幼鱼暂养于自然光线充足的室内水池, 每日适量投饵, 经常换水, 保持鱼生理状态正常。

1.2 实验装置 实验的关键装置是一个能刺激幼鱼产生视觉运动反应的圆桶形屏幕, 直径在40cm, 高为35cm。可以正、反向自由旋转, 内侧设置黑白相间的垂直条纹, 条纹宽度均为5cm。屏幕中央套放两个不同直径的圆形透明玻璃容器, 两容器间便隔成一环

* 农牧渔业部资助和福建省自然科学基金项目, C89002号。

† 现在厦门第二海洋渔业公司。

收稿日期: 1990年3月13日, 接受日期: 1993年6月11日。

形水道,实验时鱼即游动于该水道之中。换置不同直径的玻璃容器可得到各种曲率半径的环形水道。光线从装置下方射入,在屏幕内侧形成照度为 10^2lx 的均匀白色光场,以利视觉运动反应保持稳定。屏幕由直流电机带动旋转,转速经多用数字测试仪监测。

1.3 实验步骤

1.3.1 测定不同曲率半径水道中幼鱼游泳速度的实验 水道半径 R 分为 5 个梯度,即 2.3, 4.1, 6.0, 7.6, $10.0 \pm 1 \text{cm}$ 。鱼从暂养池移入预先安装好的某一半径水道中适应 5 min, 旋转屏幕, 鱼即产生追随屏幕条纹的运动(视觉运动反应)。待游泳稳定后, 测定 1 min 内游泳的圈数 N , 由 $v = 2\pi RN/60$ 求得每秒游泳线速度, 再除以鱼体长得到以体长表示的游泳速度。一种半径水道测定结束后换另一半径水道。每次测定一尾鱼, 共测 10 尾。同一尾鱼在相同水道中重测 4 次, 这样同一半径共有 40 个实测数据。

1.3.2 游泳速度随游泳时间延长而变化的实验 水道半径恒定为 $6.8 \pm 1 \text{cm}$ 。幼鱼从暂养池移入后适应 5 min, 旋转屏幕, 引发鱼的追随反应。待游泳稳定后, 即测定 1 min 内的游泳圈数, 作为实验开始时 (0 min) 的游泳速度。尔后每隔 5 min 测一次游速(测 1 min), 直到鱼疲乏不再跟随游动, 记下时间, 即耐久时间。依同法重复测定 10 尾幼鱼。

1.3.3 实验条件 实验过程中始终使屏幕旋转速度超前于鱼的追随速度, 但又保持黑白条纹的运转频率低于鱼眼的闪光融合频率, 从而不致使鱼因产生闪光融合而失去追随反应。因此不同的半径、屏幕旋转速度需作适当调节。实验发现, $35-50 \text{c/min}$ 较适宜。

水温自动控制在 $20 \pm 1^\circ \text{C}$ 。自然海水, 盐度在 25.9—26.4。淡水用预先静置 48 h 以上的自来水。水体经常充气, 保证有足够的溶解氧。

2 试验结果

2.1 试验 1 游泳速度与游泳轨迹曲率半径的关系 测定了黑鲷、黄鳍鲷、鲤鱼和白鲢 4 种幼鱼在 5 级半径环形水道中的游泳速度。结果为 10 尾鱼的重测 4 次共 40 次的平均值, 见表 1、图 1。

表 1 4 种幼鱼在 5 个半径水道中的游泳速度 (BL/s)¹⁾

Tab. 1 Swimming speeds of young fishes of *Sparus macrocephalus*, *S. latus*, *Cyprinus carpio* and *Hypophthalmichthys molitrix* in curved tracks with five different radii

R (cm)		2.3	4.1	6.0	7.6	10.0
幼 鱼	黑 鲷	5.46	5.71	6.29	6.55	6.76
	黄鳍鲷	3.19	3.34	3.52	3.67	3.79
	鲤 鱼	5.21	5.83	6.80	7.20	7.62
	白 鲢	3.75	4.49	5.05	5.36	5.76

1) BL/s 指体长/秒, 是游泳速度单位。

方差分析表明, 4 种幼鱼曲线游泳速度有极显著差异, F 值均大于 $F_{0.01}$ 界面值。鲤鱼游速最快, 黑鲷次之, 黄鳍鲷最小。方差分析还表明, 水道半径对游泳速度有极显著影响 ($F > F_{0.01}$)。游泳速度随游泳水道半径的增大而增快(图 1); 在半径较小时游速增加的速率较快, 而在半径较大时增加较缓慢。从理论上推测, 半径无限增大后环形水道将接近于直形水道, 曲线游泳速度也将趋于一条渐近线——直线游泳速度。因此以双曲线

$1/v = b1/R + a$ 模型对试验数据作回归分析, 得如下方程

$$\text{黑鲷 } \frac{1}{v} = 0.11 \frac{1}{R} + 0.14, \quad \text{黄鳍鲷 } \frac{1}{v} = 0.142 \frac{1}{R} + 0.26,$$

$$\text{鲤鱼 } \frac{1}{v} = 0.188 \frac{1}{R} + 0.12,$$

$$\text{白鲢 } \frac{1}{v} = 0.279 \frac{1}{R} + 0.15。$$

回归显著性和相关性检验证明, 4 种幼鱼 $v-R$ 方程均具显著意义 ($F > F_{0.05}$)。当 $R \rightarrow \infty$ 时, 求得直线游泳速度 v , 黑鲷为 7.14; 黄鳍鲷为 3.90; 鲤鱼为 8.40; 白鲢为 6.67(BL/s)。

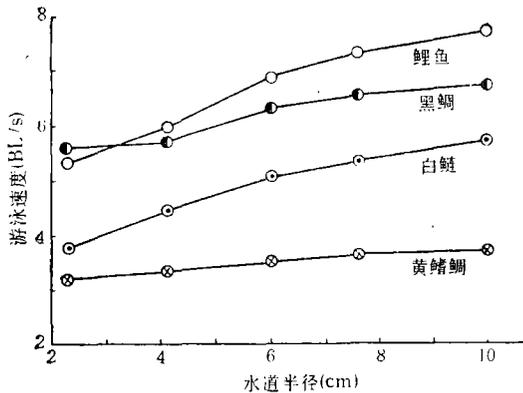


图 1 4 种幼鱼在不同半径水道中的游泳速度
Fig. 1 Swimming speeds of young fishes of *Sparus macrocephalus*, *S. latus*, *Cyprinus carpio* and *Hypophthalmichthys molitrix* in curved tracks with different radii

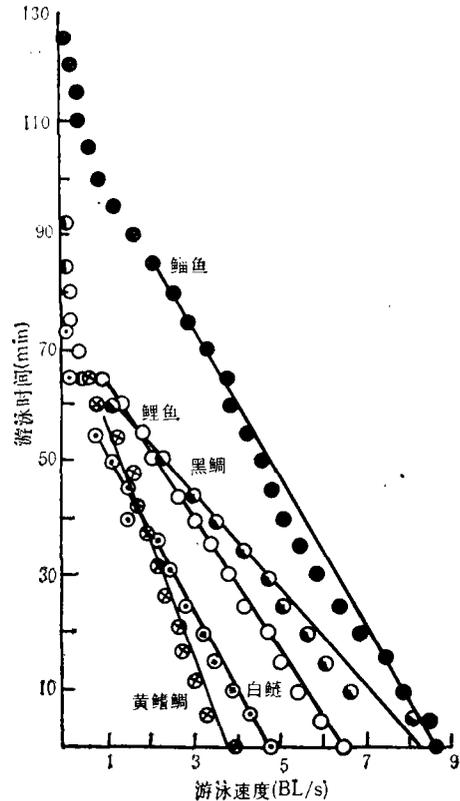


图 2 5 种幼鱼游泳速度和游泳持续时间的关系
Fig. 2 Relationship between swimming speed and endurance time of young fishes of *Sparus macrocephalus*, *S. latus*, *Mugil cephalus*, *Cyprinus carpio* and *Hypophthalmichthys molitrix*

2.2 试验 2 游泳速度与游泳持续时间的关系 测定了黑鲷、黄鳍鲷、鲮鱼、鲤鱼和白鲢 5 种, 各 10 尾幼鱼随游泳持续时间的延长而变化的曲线游泳速度。屏幕运动初期, 鱼游速较快; 随着时间的延长游速逐渐减缓, 并偶而出现回头或在小范围打转现象; 最后由于疲劳而停下, 不再跟随屏幕条纹运动。但是, 此时若用外物驱赶测试鱼, 有时还可迫使鱼再度跟随游动数分钟至十多分钟。结果表明, 游泳速度 v 随持续时间 t 的延长而下降, 在 10 尾鱼均有跟随反应的时间范围内, 两变量几乎呈负线性相关。对 $v-t$ 作直线回归得:

$$\text{黑鲷 } v = -0.120t + 8.35, \quad \text{黄鳍鲷 } v = -0.049t + 3.80,$$

$$\text{鲮鱼 } v = -0.078t + 8.70, \quad \text{鲤鱼 } v = 0.087t + 6.51,$$

$$\text{白鲢 } v = -0.071t + 4.68。$$

F 检验证明 5 种幼鱼 $v-t$ 回归方程均具极显著意义 ($F > F_{0.01}$)。图 2 是实测结果和回归直线。

5 种幼鱼游泳的耐久时间有所不同, 实测值见表 2。若令 $v = 0$, 可从上述回归方程中算得理论上游泳耐久时间。结果是: 黑鲷, 69.6; 黄鳍鲷, 77.6; 鲮鱼, 111.5; 鲤鱼, 74.8; 白鲢, 65.9(min)。理论值与实测值较接近。

表 2 5 种幼鱼游泳耐久时间 (min)

Tab. 2 The endurance time of young fishes of *Sparus macrocephalus*, *S. latus*, *Mugil cephalus*, *Cyprinus carpio* and *Hypophthalmichthys molitrix*

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均	
幼 鱼	黑 鲷	68	59	92	60	60	64	57	65	74	68	66.7
	黄鳍鲷	74	60	61	56	58	70	73	69	72	73	66.8
	鲮 鱼	93	112	128	83	104	106	117	93	112	96	104.4
	鲤 鱼	69	64	68	62	70	66	84	75	78	67	70.3
	白 鲢	58	50	63	58	73	67	58	57	56	58	58.8

为了从游泳速度和游泳时间两方面综合评价鱼类的游泳能力, 把图 2 直线及其延长线与 v, t 轴围成的面积定为游泳能力指数 SAL (Swimming Ability Index), 即

$$SAL = \int_0^T v dt$$

式中, T 为鱼最终停止跟随游泳的时间 (min), 即理论耐久时间。代入直线回归方程, 得 5 种幼鱼的 SAL : 黑鲷, 290.6; 黄鳍鲷, 141.3; 鲮鱼, 485.2; 鲤鱼, 243.5; 白鲢, 154.2。说明鲮鱼游泳能力最强, 黄鳍鲷最弱。

3 讨论与结语

3.1 视觉运动反应方法测定游泳速度的特点 视觉目标诱发鱼类产生追随性游泳行为, 已被许多学者所描述 (Harden-Jones, 1963; Wardle, 1986)。已有人利用这种视觉运动反应研究鱼类的游泳能力 (He, P. et al., 1988)。与其他试验方法相比较 (如最常用的循环管道中趋流行为方法), 视觉运动反应使鱼保持更自然的状态, 同时没有水流对鱼的运动产生副作用, 使测定结果更准确。此外, 作者认为, 这一方法是研究鱼类曲线游泳和研究游泳速度随游泳持续时间而变化的规律的最佳方法, 此时很难应用其它试验方法。

但是视觉运动反应易受许多生物和非生物因素的影响。利用该方法研究游泳行为的首要条件是受试鱼具有明显的视觉运动反应。因此该方法不能应用于所有鱼类, 尤其是底栖性成鱼。同时试验中还必须注意控制适宜的视野结构、运动速度、光强、水温等环境因素 (何大仁等, 1987)。

Hoar 等 (1978), 把鱼类游泳速度划分为 3 种情况: 突发速度、延长性速度 (prolonged speed) 和耐久速度。其中延长性游泳定义为鱼能维持 15s 到 200min 的游泳。本实验视觉运动反应引发的游泳是一种较自然的运动, 容易坚持游数十分钟, 但最终因疲劳而停止跟随, 因此应视为延长性游泳。当停止跟随后若鱼受到伤害性刺激 (如外物驱赶), 尚可逃游一段时间。说明屏幕运动条纹对鱼的视觉刺激不是伤害性的, 视觉运动引起的游泳

是一种较自然的运动。可以认为,视觉运动反应方法测定的游泳速度,就鱼本身而言,在任何时刻都是最适最高游速。这一速度由此刻鱼的生理状态(体力状态)决定,而并不取决于外界刺激物(屏幕条纹)的速度。

3.2 游泳速度与游泳轨迹曲率半径的关系 Weihs (1981) 在研究和比较了鱼类直线和曲线游泳时的代谢率后指出,以相同速度游泳时,曲线游泳比直线游泳消耗更多的能量;反之,亦然。直线游速快于曲线游速。这一研究提示,若消耗相同的能量,游泳轨迹半径大时游速快;半径小时游速慢。本试验结果表明,随半径的增大,4种幼鱼的游泳速度均提高。这是由于速度相同时较大半径水道中游泳产生的离心力较小,鱼可将更多的能量用作向前推动的有效功,且更易于调整躯体的平衡。随半径的提高,游速提高的速率有所减缓。从理论上推测,半径无限增大,游泳速度将趋于直线游泳速度。由于实验装置限制,本实验水道半径范围尚太窄,计算的回归方程和直线游速与实际情况可能有误差。

3.3 游泳能力的综合评价指标 仅以游泳速度衡量鱼类的游泳能力,而没有一个完整的时间概念,是不全面的。这一认识如今已被学者们所接受。许多研究者在测定鱼类游泳速度时都同时考虑到时间因素。日本学者 Katsumi 等 (1975) 还提出游泳能力指数 (SAI) 的方法。流行的实验方法是,刺激并控制鱼类以人为预定的速度游泳,观察鱼能以该恒定速度游多长时间,如此可获得一系列游速——维持游泳时间的对应结果(官之梅等, 1981; He, P. et al., 1988; Hoar et al., 1978)。作者也从游泳速度和游泳时间两方面综合测定了5种幼鱼的游泳能力。然而与其他研究者不同,我们不是人为控制鱼以恒定的速度游泳,而是让其始终以最适最高速度游泳,因而所获结果是这种最适最高游速随游泳时间延长的变化规律。文中游泳能力指数 SAI 与 Katsumi 也有所不同。

3.4 几种幼鱼曲线游泳能力的比较 方差分析表明,本实验5种幼鱼游泳能力有极显著差异。从实验1的4种幼鱼在不同半径水道中游泳速度测定结果(图1)容易看出,鲤鱼曲线游泳速度最快;黑鲷次之;黄鳍鲷最慢。计算的理论直线游泳速度也有这样的差别。实验2的5种幼鱼曲线游泳能力指数大小顺序为:鲮鱼>黑鲷>鲤鱼>白鲢>黄鳍鲷,与实验1结果基本相符。作者认为,曲线游泳能力的不同与鱼的大小、体型及生态习性等有关。阻力实验发现,纺锤形物体的长度为其断面最大直径的4.5倍时所受的流体阻力最小(茅绍廉,1985)。快速游泳的鲑鱼体长是其身体最大断面直径的3.5—5.5倍,金枪鱼为4.0—4.7倍。我们测量了5种幼鱼体长/体高值,鲮鱼为3.70;鲤鱼为3.57;黑鲷为2.50;白鲢为3.33;黄鳍鲷为2.30。与实验结果比较,可知体型对游泳速度确有影响。另外白鲢游速较慢可能与这种滤食性鱼活动性不强有关。有实验表明,白鲢游速比鲤鱼、鲫鱼、长春鲮等小(官之梅等,1981)。5种幼鱼中黄鳍鲷个体最大。个体大的鱼比个体小的鱼视觉运动反应较弱些(何大仁等,1987)。而且个体大的鱼按体长计算的游泳速度是比个体小的鱼小(Wardle, 1975)。这些因素可能对黄鳍鲷游速都有不利作用。

参 考 文 献

- 何大仁等,1987,影响尼罗罗非鱼视觉运动反应的因素,水生生物学报,11(3): 255—267。
官之梅、刘文都、陈佩薰,1981,几种淡水经济鱼类游泳能力的研究,鱼类学论文集,第一集,科学出版社(北京), 133—139。
茅绍廉,1985,鱼类行为与捕鱼技术,海洋出版社(北京),22—38。

- 殷名称, 1989, 海洋鱼类仔鱼在早期发育和饥饿期的巡游速度, *海洋与湖沼*, **20**(1): 1—9。
- Harden-Jones, F. R., 1963, The reaction of fish to moving backgrounds, *J. Exp. Biol.*, **40**:437—446.
- He, P. & Wardle, C. S., 1988 Endurance at intermediate swimming speeds of Atlantic mackerel, *Scomber scomber* L., herring, *Clupea harengus* L., and saithe, *Pollachius virens* L., *J. Fish Biol.*, **33**: 225—266.
- Hoar, W. S. & Randall, D. J. (eds), 1978, *Fish Physiology VII. Locomotion*, Academic Press (New York), pp. 101—187.
- Katsumi, T., Takeshi, K. & Masaharu, N., 1975, Swimming ability of fish, *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, **41**(2):167—174.
- Wardle, C. S., 1975, Limit of fish swimming speed, *Nature*, **255**:725—727.
- Wardle, C. S., 1986, Fish behavior and fishing gear, *In The Behavior of Teleost Fishes*, ed by Pitcher, T. J., Croom Helm Ltd. (London & Sydney), pp. 463—495.
- Weihs, D., 1981, Effect of swimming path curvature on the energetics of fish motion, *U. S. Fish. Bull.*, **79**:171—176.

COMPARATIVE STUDY ON CURVE SWIMMING ABILITY OF SOME YOUNG FISHES

Zhou Shijie, He Daren, Wu Qingtian

(*Oceanography Department, Xiamen University 361005*)

ABSTRACT

A March to May, 1989 study on the swimming ability of five young fishes, black porgy (*Sparus macrocephalus*), yellow porgy (*Sparus latus*), grey mullet (*Mugil cephalus*), carp (*Cyprinus carpio*) and silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) in curved tracks (including swimming speed and continued swimming time) with the optomotor response method showed: curve swimming speed of the carp was the fastest black porgy the second, and yellow porgy the slowest. With the increase of the radius of the circular track, the swimming speed increased, but the rate of this increase slowed down gradually. The swimming speed decreased linearly with the prolongation of sustained swimming time. Endurance time measured were 66.7min for black porgy, 66.8min for yellow porgy, 104.4min for grey mullet, 70.3 min for carp, and 58.8min for silver carp. The swimming ability index for black porgy was 209.6, for yellow porgy 147.3, for grey mullet 485.2, for carp 243.5, and for silver carp 154.2. The order of the value of the curve swimming ability index was grey mullet > black porgy > carp > silver carp > yellow porgy. The differences of curve swimming ability were related to the size of fish, body type and ecological habit. This paper proves that the optomotor response method is the best for the study of the pattern of curve swimming of fish and the rule of change of swimming speed with swimming endurance time.

Key words Young fish Curve swimming ability