

研究简报

鱼的体长、游速与耐力的关系 及其在拖网作业中的应用

THE RELATION BETWEEN THE SIZE, SWIMMING SPEED AND ENDURANCE OF FISH AND ITS APPLICATION TO THE TRAWLING

郑奕

(上海水产大学人文与基础学院, 200090)

ZHENG Yi

(College of the Humanities & Basic Science, SFU, 200090)

关键词 游速, 耐力, 拖网

KEYWORDS swimming speed, endurance, trawling

中图分类号 S972.13

水下观察表明,当拖网在慢拖时,鱼群在网口前方以与拖速相同的速度同网具保持一定距离游动,直至耐力不支而逐渐进入网内。Wardle[1983]的实验发现,当拖速在1.5~2.0m/s时,鱼被驱集到网口前方游弋,一段时间后较小的鱼相继进入网囊,而较大的鱼在半个小时的观察时间内,始终在网口前方游动,最终未被捕获。因此不难发现,鱼的游速与耐力(本文以鱼在该速度下所能持续的时间刻划耐力)对拖网作业的影响很大,而这方面的系统论述不多,故有必要加以研究。

1 鱼的游速与耐力的能量模型

由于鱼游动所需的能量来源于自身肌肉中的能量储存,故本文假定鱼在一定速度下的耐力与鱼的全身肌肉量成正比。Bainbridge[1961]认为鱼的肌肉量与体长的关系为 $M = 0.005 L^{2.9}$, 式中 M 为肌肉量, L 为鱼的体长。

由此假设即可推出鱼在游动过程中所消耗的全部能量 E 与 $L^{2.9}$ 成正比,即成以下比例式

$$E = K_1 L^{2.9} \quad (1)$$

K_1 为比例系数。

另一方面,鱼在游动过程中需克服水阻力做功。将鱼近似为刚体,则在速度 V 游动时鱼克服水的阻力所需产生的力 F 满足

$$F = 1/2 \rho S V^2 C_d \quad (0 < V \leq V_{MAX}) \quad (2)$$

ρ 为水的密度, S 为湿水面积, V 为鱼的游速, V_{MAX} 为鱼的最大游速, C_d 为阻力系数。一般情形下 C_d 与雷诺数和边界层流有关[Bainbridge 1961],对特定的鱼种和特定的海域, C_d 可视为常数。由于 S 正比于 L^2 ,即 $S = K_2 L^2$, K_2 为常数,代入式(2)得:

$$F = 1/2 \rho C_d K_2 L^2 V^2 = K_3 L^2 V^2 \quad (3)$$

上式中 $K_3 = 1/2 \rho C_d K_2$ 近似取为常数。若设 η 为能量转移系数,则有

$$\eta E = F V T \quad (4)$$

这里 T 为在速度 V 下的耐力。在对鱼的推进效率的研究中发现:鱼的推进效率随鱼的体长变长而增加[Webb 1977],而鱼的游速增加,推进效率则有所降低[周应祺 1985]。考虑到能量转换系数与鱼的推进效率成正比,故假设

$$\eta = K_4 L / V \quad (5)$$

其中 K_4 为常数,与水温有关。将式(1)、式(3)、式(5)代入式(4)得 $K_4 L K_1 L^{2.9} / V = K_3 L^2 V^2 V T$,整理得:

$$T = K L^{1.9} / V^4 \quad (6)$$

这里 $K = K_1 K_4 / K_3$ 为常数, V 介于 0 至 V_{MAX} 之间。式(6)即为鱼的游速与耐力的能量模型。

2 大西洋鲑鱼的游速与耐力的回归模型

为了对式(6)进行验证和进一步修正,本文从 Wardle 和 He[1988]及 He 和 Wardle[1988]的实验结果中采集整理得到关于体长 L 、游速 V 与耐力 T (实验值)的数据如表1。

表1 鱼的体长、游速对耐力的影响

Tab. 1 The effect of endurance on the size and swimming speed of fish

体长 L (m)	游速 V (m/s)	耐力 T (实验值)(s)	耐力 T' (理论值)(s)
0.03	0.19	12000	9917.7
0.03	0.32	1200	1368.1
0.03	0.60	120	125.5
0.03	1.10	12	12.5
0.3	0.65	12000	11392
0.3	1.19	1200	1144.4
0.3	2.10	120	132.2
0.3	4.00	12	11.4
3	2.35	12000	10607
3	3.95	1200	1474.4
3	7.10	120	158.8
3	14.50	12	10.5

为了验证式(6)能量模型中 L 、 V 幂次的正确性, 设鲈鱼的游速与耐力的模型为 $T = K_5 L^x / V^y$, 其量纲 T 为秒, L 为米, V 为米/秒。将其转化为线性形式为 $\ln T = x \ln L - y \ln V + \ln K_5$, 用 SAS 统计分析系统对该式做二元线性回归, 得 $\ln T = 2.1 \ln L - 3.8 \ln V + 10.4$, 即

$$T = e^{10.4} \times L^{2.1} / V^{3.8} \quad (7)$$

考虑到式(7)中 L 、 V 的幂次与能量模型式(6)中 L 、 V 的幂次相近, 二者相互验证, 故可认为式(7)中 L 、 V 的幂次是合理的。为了进一步增加式(7)的回归显著性, 将其改写为 $(a/T)^b = c(L^{2.1}/V^{3.8})$, 其中 a 、 b 、 c 为待定系数, 线性化后为

$$\ln(1/T) = m \times \ln(L^{2.1}/V^{3.8}) + n \quad (8)$$

其中 m 、 n 为待定系数。利用表中数据对式(8)进行一元线性回归, 得

$\ln(1/T) = -0.999 \ln(L^{2.1}/V^{3.8}) - 10.22$, $r = 0.98$ 。即 $T = e^{10.22} \times (L^{2.1}/V^{3.8})^{0.999}$, 近似地取

$$T = e^{10.22} \times (L^{2.1}/V^{3.8}) \quad (9)$$

式(9)即为大西洋鲈鱼的游速与耐力的回归模型。对表1中由实验测定的 L 、 V 的值由式(9)计算得耐力的理论值 T' 列于表中最后一行。可以发现计算值与实验值已相当接近, 故式(9)较好地刻划了大西洋鲈鱼的体长、游速与耐力间的关系。

3 结语

研究由能量分析得到的模型即式(6)与由回归分析得到的模型即式(9), 可以发现二者形式已相当接近, 故本文认为: 鱼的体长 L 、游速 V 与耐力 T 的关系可以归结为

$$T = \gamma L^2 / V^{3.9} \quad (0 < V \leq V_{\max}, 0 < L \leq L_{\max}) \quad (10)$$

这里 γ 为常数, 与鱼的种类和生活水域有关, 若进一步仔细分析, 应与水温也有关。特别的, 对大西洋鲈鱼有 $T = e^{10.22} \times L^{2.09} / V^{3.8}$, $r = 0.98$ 的关系。

4 在拖网作业中的应用

4.1 拖网的作业方式

根据结论式(10), 对拖网的作业方式进行分析。当拖网拖速为 V 时, 则船对拖网做功

$$W = F_z V T \quad (11)$$

其中 F_z 为拖网阻力, T 为拖网作业时间。由于我国沿海多采用二片式拖网, 故取拖网阻力估算式为

$$F_z = 80 \times d/a \times L_{w0} C_{w0} V^{1.5} = K_6 V^{1.5} \quad (12)$$

其中 d/a 为网具线面积系数, L_{w0} 为网具拉直总长, C_{w0} 为网具网口拉直周长, V 为拖速 [崔建章 1997]。取 $K_6 = 80 \times d/a \times L_{w0} C_{w0}$, 在网具一定时可视为常数。当网口对准优势体长为 L_0 的鱼群后, 以速度 V 进行捕捞时, 由式(10)拖网最短作业时间 T 应满足

$$T = \gamma L_0^2 / V^{3.9} \quad (0 < V \leq V_{\max}) \quad (13)$$

将式(12)、(13)代入式(11)为 $W = K_6 V^{1.5} V \gamma L_0^2 / V^{3.9} = C L_0^2 / V^{1.4}$ ($0 < V \leq V_{\max}$), 这时 W 为船对拖网做功的最小值, C 为常数。由上式可见, 在拖速不超过鱼的最大游速情况下, V 越大, 整个捕获过程中渔船对拖网做功越小。因此当网口对准鱼群后, 以较快的速度拖网, 比较经济。

但是,较快的拖速也会使鱼群受惊,四散逃离;高速拖网的手纲也可能将个别鱼群赶开(切断),使其处在捕捞范围之外[赵永泉 1980]。故当水域中鱼群密度不大时,慢拖的集鱼效果要比快拖好。同时,由式(12)可推出,扫过长度为 s 的水域,拖网做功 $W = F_{2s} = K_0 V^{1.5} s$,故扫过长度相同的水域,慢拖比快拖要做功少,节约能源。基于以上二点,当水域中鱼群密度不大时,应先以慢拖驱集鱼群,则效果较佳。

通过以上分析后,得出结论:在拖网作业中,当鱼群比较分散时,可采用“先慢拖后快拖”的策略,即慢拖一段时间后在网口驱集形成鱼群,再快拖予以捕捞;当鱼群比较集中时,则可使网口直接对准鱼群,快拖予以捕捞,并且当以拖速 V_0 快速捕捉优势体长为 L_0 的鱼群时,拖网作业时间应大于 $\gamma L_0^2 / V_0^{3.9}$ 。这种策略,能加强集鱼效果,减少渔船对网具的做功,从而节约能源,提高渔获量。

4.2 关于改进网囊的一个设想

由式(10)知,当拖速为 V_0 时, $T = \gamma L^2 / V_0^{3.9}$,即体长较短的鱼耐力要比体长较长的鱼耐力差体长的二次方的量阶。因此拖网作业中,开始有相当一段时间网囊中应以幼鱼为主,只有在较长的一段时间后大鱼才进入网囊。基于这个分析,笔者设想:在拖网作业初,若能将网囊的底部打开,以速度 V 拖网 $T = \gamma L^2 / V_0^{3.9}$ 时间后,才关闭网囊底部,则可以保证大部分体长不超过 L_0 的幼鱼得以从网囊中逃生,这对保护渔业资源、提高渔获质量是十分有利的。要实现这个设想,就必须对现有网囊的结构和用料进行改进,使网囊底部的开闭能在船上加以控制,这给网具的设计与制造提出了一个新的课题,有待于今后进一步加以研究。

本文承导师周应祺教授提供大量中外文献,并予以指导、审阅,谨致感谢。

参 考 文 献

- 周应祺. 1985. 鱼类最高游速的研究. 水产学报, 9(2):116
- 崔建章. 1997. 渔具与渔法学. 北京:中国农业出版社. 113
- 赵永泉(译). 1980. 深水拖网要素计算. 北京:海洋出版社. 110
- Bainbridge R. 1961. Problems of fish locomotion. Symp Zool Soc Lond. 5:13~32
- He P, Wardle C S. 1988. Endurance at intermediate swimming speeds of Atlantic mackerel, *Scomber scombrus* L., herring, *Clupea herengus* L. and saithe, *Pollachius virens* L. J Fish Biol. 32:255~266
- Wardle C S. 1983. Fish reactions to towed fishing gears. In: Experimental Biology at Sea. London & New York etc. Academic Press, 167~195
- Wardle C S, He P. 1988. Burst swimming speeds of mackerel, *Scomber scombrus* L. Fish Biol. 32:471~478
- Webb P S. 1977. Effects of size on performance and energetics of fish. In: Scale effects in animal locomotion London & New York: Academic Press. 315~331