

两种温度条件下四种鱼类临界游泳速度的比较

段辛斌 俞立雄 罗宏伟 王珂 陈大庆 刘绍平*

农业部长江中上游渔业资源环境科学观测实验站 中国水产科学研究院长江水产研究所 武汉 430223

摘要: 以鳊 (*Siniperca chuatsi*)、瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*)、鲫 (*Carassius auratus*)、鲮 (*Aristichthys nobilis*) 4种暖水性鱼类为研究对象, 分别在 $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ 和 $(10 \pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下测定它们的临界游泳速度, 采用 SPSS17.0 统计软件进行数据的分析比较。体长相近鱼类之间比较, 鳊的绝对临界游泳速度和相对临界游泳速度均显著性低于鲮 ($P < 0.01$), 瓦氏黄颡鱼的绝对临界游泳速度和相对临界游泳速度均显著性低于鲫 ($P < 0.01$)。通过比较两种温度条件下同种鱼的临界游泳速度, 结果发现 4 种鱼在这两种温度条件下的临界游泳速度均有极显著性差异 ($P < 0.01$), 在 $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下 4 种鱼的临界游泳速度极显著性高于 $(10 \pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下它们的临界游泳速度。

关键词: 临界游泳速度; 水温; 鳊; 瓦氏黄颡鱼; 鲫; 鲮

中图分类号: Q958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2015) 04-529-08

Critical Swimming Speed Comparison of Four Species of Fish at Two Acclimation Temperature

DUAN Xin-Bin YU Li-Xiong LUO Hong-Wei WANG Ke
CHEN Da-Qing LIU Shao-Ping*

*Scientific Observing and Experimental Station of Fishery Resources and Environment in the Upper and Middle Reaches of the Yangtze River,
Ministry of Agriculture, Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China*

Abstract: The critical swimming speed was measured in four fish species, mandarin fish (*Siniperca chuatsi*), darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachelli*), crucian carp (*Carassius auratus*) and bighead carp (*Aristichthys nobilis*), at $28 \pm 1^\circ\text{C}$ and $10 \pm 1^\circ\text{C}$ in the annular flume (Fig. 1) that mainly consists of two parts, power part and swimming area. The relationship between flow velocity in the tank and the impeller speed was showed in Fig. 2 and the flow velocity could be adjusted by controlling the impeller speed. SPSS 17.0 software was used for data processing and Duncan's multiple comparison procedure was used to compare the means of different groups. The absolute critical swimming speed and relatively critical swimming speed of mandarin fish was significantly lower than bighead carp while the absolute critical swimming speed and relatively critical swimming speed of darkbarbel catfish was significantly lower than crucian carp (Table 1). Temperature had

基金项目 公益性行业 (农业) 科研专项 (No. 201303056-5), 国家自然科学基金项目 (No. 51249004);

* 通讯作者, E-mail: lsp@yfi.ac.cn;

第一作者介绍 段辛斌, 男, 副研究员; 研究方向: 鱼类生态与保护; E-mail: duan@yfi.ac.cn。

收稿日期: 2014-10-08; 修回日期: 2015-03-02 DOI: 10.13859/j.cjz.201504004

extremely significant impacts on swimming performance by comparing of the critical swimming speed between two acclimation temperatures (Fig. 3). The critical swimming speed of fish at normal temperature was significantly higher than that at low temperature.

Key words: Critical swimming speed; Water temperature; *Siniperca chuatsi*; *Pseudobagrus vachelli*; *Carassius auratus*; *Aristichthys nobilis*

游泳能力对鱼类及很多水生动物的生存至关重要, 游泳行为是多数鱼类逃避敌害、猎食、迁徙、求偶和躲避灾害环境的重要手段(付世建等 2009)。关于鱼类游泳能力的研究已有 100 多年的历史。临界游泳速度是鱼类有氧运动能力的重要评价指标, 自 Brett (1964) 首次提出以临界游泳速度考察鱼类最大持续游泳能力后, 这一指标被广泛应用于鱼类的游泳能力研究。

温度能够直接或间接引起鱼类生理功能的变化, 从而显著影响到其游泳能力。大量研究表明, 鱼类的临界游泳速度与温度呈“线型”(Jain et al. 2003)或“钟形”(Kokita et al. 2002)的变化关系。“线型”是指鱼类的游泳能力随着温度的升高能够不断增强, “钟形”是指临界游泳速度随水温的升高而升高, 在最适温度时达到最大, 若温度继续增大, 超过鱼类的温度适应范围, 其临界游泳速度即开始下降。

本研究选用以下 4 种鱼类: 鳊 (*Siniperca chuatsi*) 是一种凶猛的肉食性鱼类, 伏击取食; 瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*) 是以肉食性为主的杂食性鱼类; 鲫 (*Carassius auratus*) 是以植食性为主的杂食性鱼类; 鳙 (*Aristichthys nobilis*) 是以滤食方式取食的杂食性鱼类。实验在低温与正常水温环境下分别测量了鳊、瓦氏黄颡鱼、鲫以及鳙的临界游泳速度, 以期了解不同温度条件下鱼类的游泳运动能力及其差异, 可为鱼类养殖、人工增殖放流、鱼道设计、鱼类栖息地恢复等方面提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验共分为 2 个阶段, 其中, 2013 年 12

月至 2014 年 1 月, 实验期间水温控制在低温 (10 ± 1) °C; 2014 年 8 ~ 9 月, 实验期间水温控制在常温 (28 ± 1) °C。实验所用的 4 种鱼 (体长: 14.5 ~ 31.0 cm, 体重: 35.2 ~ 574.6 g) 均购自湖北省监利县老江河国家四大家鱼原种场, 以幼鱼接近性成熟或刚刚达到性成熟的发育时期为主, 鱼体无损伤, 鳞片完整, 活动能力好且无疾病。实验前在曝气自来水的水箱 (80 cm × 60 cm × 50 cm) 中适应 2 d, 24 h 连续充氧, 保证溶氧量在 7 mg/L 以上, 每天换水一次。

1.2 实验装置

临界游泳速度的测定设备购自丹麦 Loligo System 公司, 其工作原理为在密闭空间内, 假设鱼类游泳速度与水流速度相等, 通过变频器改变电机的转速从而改变水流速度, 通过多孔整流器使游泳槽截面各处水流速度近似均匀, 使用流速仪测量不同叶轮转数下水流速度, 进而通过控制叶轮转数得到鱼类游泳速度。设备的体积为 90 L, 测试断面尺寸为 70 cm × 20 cm × 20 cm。环形实验水槽的壁面和盖子均采用透明的树脂玻璃, 可以从侧面和顶部清晰观察鱼的游泳行为 (图 1)。环形实验水槽内流速的测

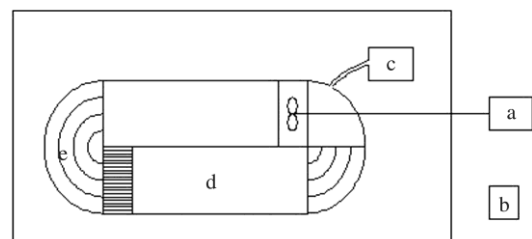


图 1 环形实验水槽

Fig. 1 Annular flume

a. 动力部分; b. 动力控制部分; c. 水泵; d. 游泳区域; e. 参数检测部位。

a. Power part; b. Control part; c. Water pump; d. Swimming area; e. Parameter detection area.

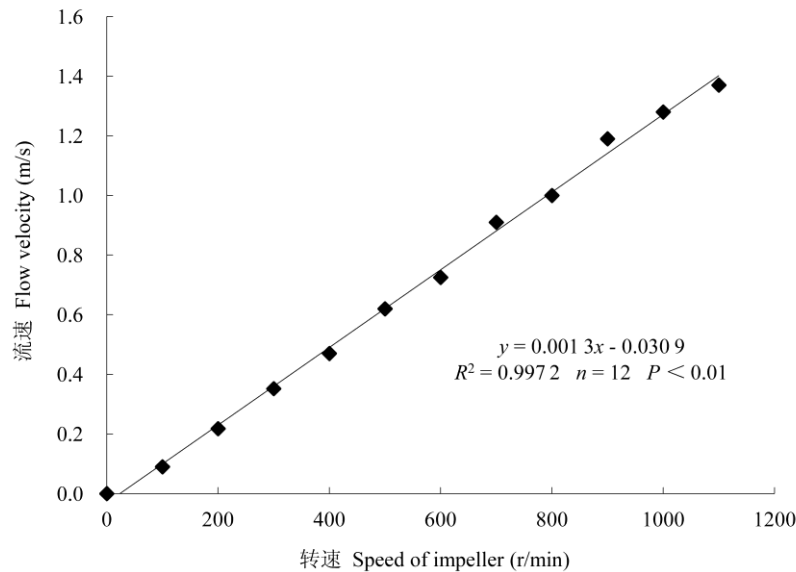


图 2 鱼类游泳区的水流速度与叶轮转速之间的对应关系

Fig. 2 Relationship between flow velocity in the experimental tank and the speed of impeller

定采用重庆水仪器厂 LS45A 型旋杯式流速仪 (测速范围: 0.015 ~ 3.500 m/s, 测量误差 $\leq 2\%$)。循环水槽中心水流速度 (m/s) 与叶轮转速 (r/min) 之间对应关系见图 2。

1.3 临界游泳速度的测定

正式实验前先进行预备实验, 估测实验鱼绝对临界游泳速度 U_e , 即绝对临界游泳速度估测值。估测方法是以每 2 min 增加 0.4 BL/s (BL = body length = 体长) 的速度增加水流速度, 直至实验鱼疲劳, 此时的水流速度即为 U_e 。以此确定实验鱼的绝对临界游泳速度的实际值 (absolutely critical swimming speed, U_a) 的速度增量。实验前先将实验鱼放置于低流速 (5 cm/s) 的环境中适应 1 h, 消除转移过程中对鱼体的胁迫。正式实验时, 每隔 5 min 将流速调高 0.5 BL/s 至 U_e 的 60%, 以后每隔 15 min 将流速提高 15% U_e , 直至实验鱼达到运动力竭状态。疲劳判定标准为实验鱼被水流冲至水槽尾纲丝网。整个游泳过程溶解氧含量不低于 7 mg/L。 U_a 的计算公式 (Zeng et al. 2009): $U_a = U + (t/T) \Delta U$, 式中, T 是在各速度梯度下设定时间 (15 min), U 是能顺利完成设定时间

的最大游泳速度, ΔU 是各速度梯度的速度增量, t 是未能完成设定时间的实际持续游泳时间 ($t < 15$ min)。

用上述方法测得实验鱼的绝对临界游泳速度, 为了一定程度上消除体长 (L_B , 单位 cm) 对游泳速度的影响, 本研究采用相对临界游泳速度 (relatively critical swimming speed, U_r , 单位为 BL/s), $U_r = U_a/L_B$ 。

由于部分实验鱼身体的最大横截面积超过游泳区横截面积的 10%, 引发阻挡效应, 根据相关文献 (Zeng et al. 2009) 本研究采用的校正公式为: $U_a(\text{校正}) = U_a \{1 + [0.4L_B/0.5(w + d)] (0.25\pi dw/A_t)^{3/2}\}$, 式中, w 表示实验鱼最大横截面积处的体宽 (cm), d 表示实验鱼最大横截面积处的体高 (cm), A_t 表示游泳区内的横截面积 (400 cm²)。

1.4 数据分析

实验数据采用 SPSS17.0 统计软件进行数据的分析比较, 两组间比较均采用独立样本 T 检验, 多组间比较采用单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 多重比较采用 Duncan 法检验, 显著性概率临界值设定为 0.05。使用

模型 $Y = a + bX$ 分析体长与临界游泳速度关系。结果以平均值 \pm 标准差 (Mean \pm SD) 表示。

2 结果与分析

2.1 两种温度条件下 4 种鱼类的临界游泳速度

4 种鱼临界游泳速度的测定见表 1。在 (28 ± 1) °C 水温条件下, 对比体长相近鱼的临界游泳速度可以发现, 鳊的绝对临界游泳速度和相对临界游泳速度均显著性低于鳙 ($P < 0.01$)。瓦氏黄颡鱼的绝对临界游泳速度和相对临界游泳速度均显著性低于鲫 ($P < 0.01$)。在 (10 ± 1) °C 水温条件下, 对比体长相近鱼的临界游泳速度可以发现, 鳊的绝对临界游泳速度和相对临界游泳速度均显著性低于鳙 ($P < 0.01$)。瓦氏黄颡鱼的绝对临界游泳速度和相对临界游泳速度均显著性低于鲫 ($P < 0.01$)。

2.2 低温环境下鱼类临界游泳速度的变化

常温条件下 4 种实验鱼的临界游泳速度与低温条件下的临界游泳速度相比均存在极显著性差异 ($P < 0.01$), 前者极显著性高于后者

(图 3)。

2.3 体长与临界游泳速度的关系

在 (28 ± 1) °C 水温条件下, 4 种鱼的临界游泳速度与体长的关系见图 4: 鲫的绝对临界游泳速度随着体长的增加而增大, 而相对临界游泳速度刚好相反; 瓦氏黄颡鱼和鳙的绝对临界游泳速度均随着体长的增加而增大, 但相对临界游泳速度随体长的增大并无明显变化; 鳊的绝对临界游泳速度和相对临界游泳速度与体长的关系均不明显。

3 讨论

3.1 4 种鱼的临界游泳

鱼类的游泳能力是由其生活习性, 形态特征以及摄食方式等决定。通过比较体长相近的鱼类, 鳊的绝对临界游泳速度和相对临界游泳速度均显著性低于鳙, 瓦氏黄颡鱼的绝对临界游泳速度和相对临界游泳速度均显著性低于鲫。鳊是主要在夜间捕食的底栖伏击型凶猛鱼类(李有根等 2011), 其视觉具有很强的光敏感性, 饵料鱼主要是浅

表 1 两种温度下 4 种鱼的临界游泳速度

Table 1 The critical swimming speed of fishes at two acclimation temperature

		鳊 Mandarin fish	鳙 Bighead carp	瓦氏黄颡鱼 Darkbarbel catfish	鲫 Crucian carp
常温 Normal temperature (28 ± 1) °C	重复数 Repeat	8	8	8	8
	体长 Length (cm)	28.88 ± 1.55	28.13 ± 1.55	19.13 ± 1.46	18.50 ± 1.20
	体重 Weight (g)	473.13 ± 67.69	445.00 ± 41.76	115.00 ± 16.98	191.88 ± 30.59
	绝对临界游泳速度 U_a (cm/s) Absolutely critical swimming speed	65.92 ± 3.88 ^a	77.55 ± 5.56 ^b	66.88 ± 4.92 ^a	81.85 ± 3.91 ^b
	相对临界游泳速度 U_r (BL/s) Relatively critical swimming speed	2.29 ± 0.14 ^a	2.76 ± 0.10 ^b	3.50 ± 0.13 ^c	4.43 ± 0.24 ^d
低温 Low temperature (10 ± 1) °C	重复数 Repeat	8	8	8	8
	体长 Length (cm)	27.88 ± 1.25	28.13 ± 0.64	15.00 ± 0.76	16.19 ± 0.80
	体重 Weight (g)	413.50 ± 43.27	442.38 ± 30.21	64.63 ± 20.72	123.75 ± 22.10
	绝对临界游泳速度 U_a (cm/s) Absolutely critical swimming speed	44.85 ± 3.64 ^a	60.45 ± 5.29 ^b	41.27 ± 4.74 ^a	65.62 ± 5.14 ^b
	相对临界游泳速度 U_r (BL/s) Relatively critical swimming speed	1.61 ± 0.11 ^a	2.15 ± 0.18 ^b	2.75 ± 0.22 ^c	4.05 ± 0.20 ^d

同一行中标有相同字母表示组间差异不显著, 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Values with the different letters in the same line mean a significant difference ($P < 0.05$), values with same letters mean no difference.

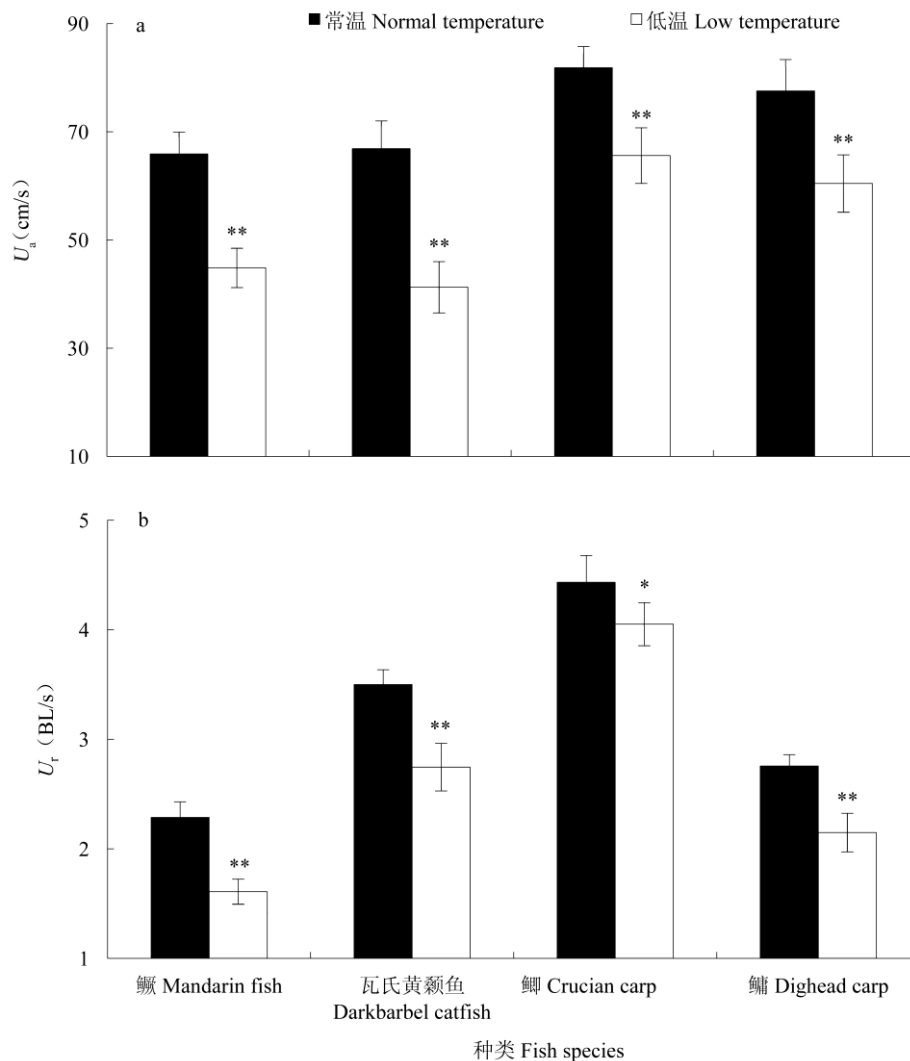


图 3 4 种鱼在常温与低温下临界游泳速度比较

Fig. 3 The critical swimming speed of fishes at normal and low temperatures

a. 4 种鱼在常温与低温下绝对临界游泳速度 (U_a) 比较; b. 4 种鱼在常温与低温下相对临界游泳速度 (U_r) 比较; * 表示具有显著性差异 ($P < 0.05$); ** 表示具有极显著性差异 ($P < 0.01$)。

a. The absolutely critical swimming speed (U_a) of fishes at normal and low temperatures; b. The relatively critical swimming speed (U_r) of fishes normal and low temperatures; Significance level is indicated with asterisks (* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$).

水底层鱼类, 如鮡科 (Gobioninae) 和鲮科 (Rhodeinae) 鱼类等。鳊主要通过其发达的弱光视觉以突袭的方式捕捉饵料鱼 (梁旭方等 1994), 在其生活的水体生态系统中处于最高的营养等级, 被捕食压力小, 因此其不具备较强的持续性游泳能力。鲮主要栖息于水体中上层, 食性以浮游动物为主, 也摄食部分大型浮游植

物, 作为半洄游性鱼类, 较高的持续性游泳能力对其长距离洄游具有重要意义。本研究中瓦氏黄颡鱼体长极显著性低于鳊, 但其绝对临界游泳速度与鳊没有显著差异。瓦氏黄颡鱼是以肉食性为主的杂食性鱼类, 处于相对较低的营养等级, 需要较高的运动能力以减小被捕食的概率, 且较高的临界游泳能力对其维持日常游

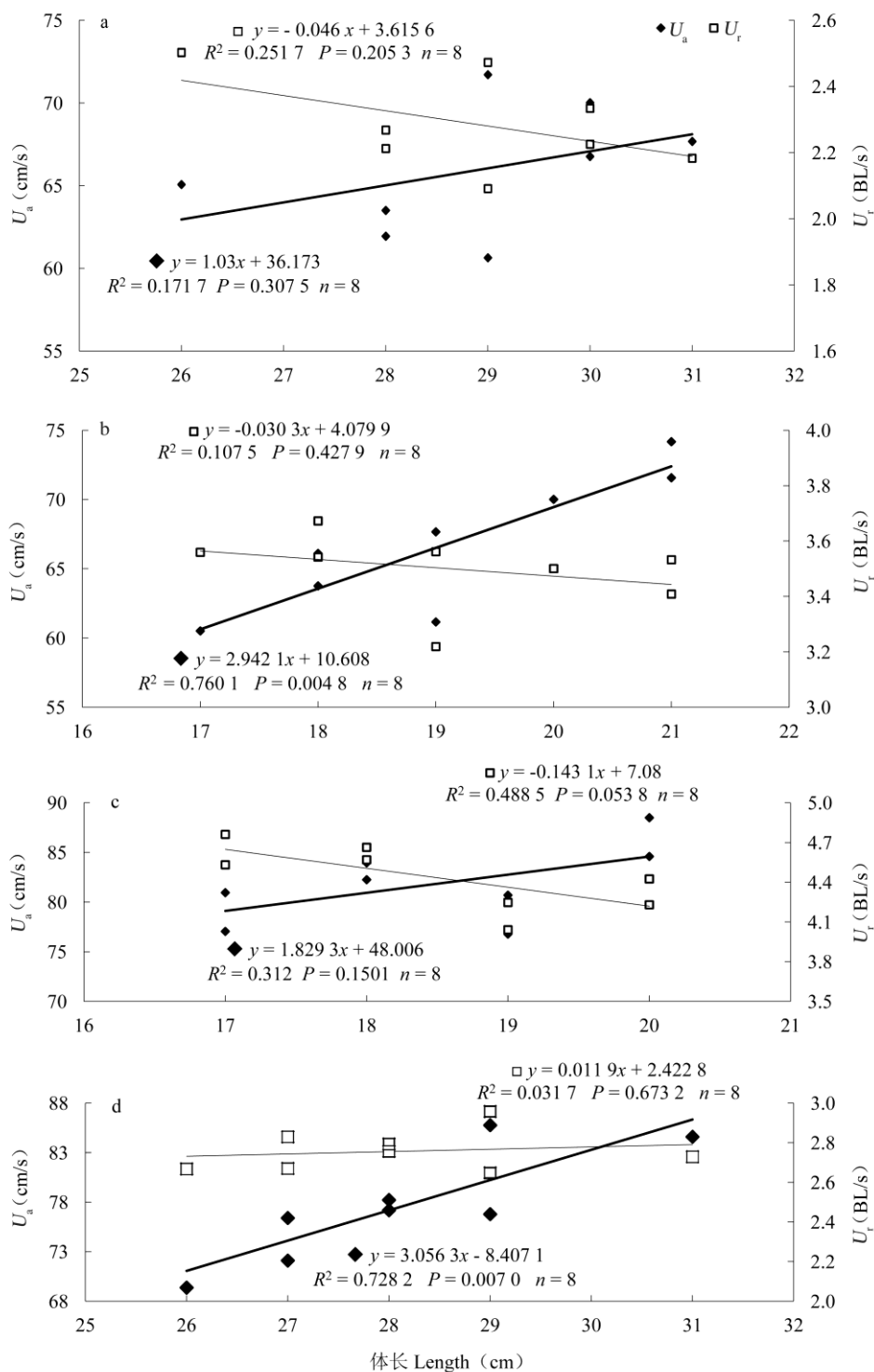


图 4 4 种鱼的临界游泳速度与体长关系

Fig. 4 Relationship between critical swimming performance and body length of fishes

a. 鳊; b. 瓦氏黄颡鱼; c. 鲫; d. 鲮。

a. *Simiperca chuatsi*; b. *Pelteobagrus vachelli*; c. *Carassius auratus*; d. *Aristichthys nobilis*.

泳活动，寻觅食物也显得尤为重要（鲜雪梅等 2010）。实验中鲫的体长与瓦氏黄颡鱼接近，显著性低于鳊和鳙，但鲫相对于其他 3 种鱼类具有更高的临界游泳速度，其作为一种活跃的杂食性鱼类，更高的游泳能力有利于其频繁觅食（赵文文等 2011）。从形态学和流体力学方面来说，新月形的尾鳍、较窄的尾柄、僵直的身体、流线型的体型以及合适的长宽比更有利于持续运动（闫冠杰 2012）。鲫的尾柄较宽，身体呈流线型，尾鳍为深叉形正尾，这也为鲫具备良好的游泳能力提供条件，相比之下鳊尾鳍呈圆形，瓦氏黄颡鱼非流线型体型，鳙体短背高，这也是鲫比其他三种鱼类具有更强游泳能力的一个重要原因。

3.2 低温环境对鱼类游泳能力的影响

水温的变化通常有两种类型，即长期的缓慢温度变化和短暂的急性温度变化，本研究的温度变化属于前者。温度是影响游泳能力的一个重要因子，水温改变时，鱼类将调解自身的生理及生化过程以适应新的环境（Zeng et al. 2009）。Hammer（1995）研究表明，对于暖水性鱼类，在最适水温范围内（25~30℃）最大持续游泳能力达到最大。从本研究的结果可以看出，4 种鱼类在常温时的游泳能力均极显著性高于低温条件下的游泳能力，这一结果也可以说明这类暖水性鱼类在夏季的运动能力要显著性高于冬季，这与夏季时大多数鱼类捕食能力强，代谢能力旺盛，生长迅速，冬季时代谢能力减弱，生长缓慢的情况相符。

3.3 鱼类的游泳速度与体长关系

多数的研究表明，随着体长增加，鱼类绝对临界游泳速度增加，相对临界游泳速度减小（Stobutzki 1998, Winger et al. 1999, Peterson et al. 2001）。本实验在（28±1）℃水温条件下，鲫的游泳行为符合上述情况，这可能有以下两方面原因：一是因为鱼类生长过程中肌肉随体长增加占总体重的百分比是按比例增加的；另一个原因是鱼在游泳时，单位体重所需要的推进功率与其个体大小成反比（夏皮罗 1979）。

瓦氏黄颡鱼和鳙的绝对临界游泳速度均随着体长的增加而增大，但相对临界游泳速度随体长的增大并无明显变化，鳊的绝对临界游泳速度和相对临界游泳速度与体长的关系均不明显，这一结果与乔云贵等（2012）的研究结果相似。也有研究发现大斑南乳鱼（*Galaxias maculatus*）稚鱼（Nikora et al. 2003）和三峰七鳃鳗（*Lampetra tridentata*）（Dauble et al. 2006）等鱼类的游泳能力与体长相关性不显著，研究人员分析这有可能是由防御结构和胸鳍形状等形态因素导致（Fulton et al. 2001），本研究中出现这种结果的可能原因是实验鱼的体长差异不够大，它们处于同一生长发育阶段，因此不同体长鱼类的临界游泳速度未达到显著性差异。

参 考 文 献

- Brett J R. 1964. The respiratory metabolism and swimming performance of young sockeye salmon. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 21(5): 1183-1226.
- Dauble D D, Moursund R A, Bleich M D. 2006. Swimming behaviour of juvenile Pacific lamprey, *Lampetra tridentata*. *Environmental Biology of Fishes*, 75(2): 167-171.
- Fulton C J, Bellwood D R, Wainwright P C. 2001. The relationship between swimming ability and habitat use in wrasses (Labridae). *Marine Biology*, 139(1): 25-33.
- Hammer C. 1995. Fatigue and exercise tests with fish. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 112(1): 1-20.
- Jain K E, Farrell A P. 2003. Influence of seasonal temperature on the repeat swimming performance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *The Journal of Experimental Biology*, 206(20): 3569-3579.
- Kokita T, Mizota T. 2002. Male secondary sexual traits are hydrodynamic devices for enhancing swimming performance in a monogamous filefish *Paramonacanthus japonicus*. *Journal of Ethology*, 20(1): 35-42.
- Nikora V I, Aberle J, Biggs 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.
- Peterson R H, Harmon P. 2001. Swimming ability of pre-feeding striped bass larvae. *Aquaculture International*, 9(5): 361-366.

- Stobutzki I C. 1998. Interspecific variation in sustained swimming ability of late pelagic stage reef fish from two families (Pomacentridae and Chaetodontidae). *Coral Reefs*, 17(2): 111–119.
- Winger P D, He P, Walsh S J. 1999. Swimming endurance of American plaice (*Hippoglossoides platessoides*) and its role in fish capture. *ICES Journal of Marine Science*, 56(3): 252–265.
- Zeng L Q, Cao Z D, Fu S J, et al. 2009. Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen). *Comparative Biochemistry and Physiology*, 153(2): 125–130.
- 付世建, 曹振东, 彭姜岚. 2009. 不同时间间隔重复力竭运动对南方鲢幼鱼耗氧率的影响. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 26(1): 13–16.
- 李有根, 徐济民, 黄平, 等. 2011. 池塘主养鳊鱼高产试验. *江西水产科学*, (3): 36–37.
- 梁旭方, 郑微云, 王艺磊. 1994. 鳊鱼视觉特性及其对捕食习性适应的研究 I. 视网膜电图光谱敏感性和适应特性. *水生生物学报*, 18(3): 247–253.
- 乔云贵, 黄洪亮, 黄妙芬, 等. 2012. 不同淡水鱼类游泳速度的初步研究. *湖南农业科学*, (15): 116–119.
- 夏皮罗 A H: 谈镐生, 译. 1979. 形与流——漫谈阻力流体动力学. 北京: 科学出版社.
- 鲜雪梅, 曹振东, 付世建. 2010. 4种幼鱼临界游泳速度和运动耐受时间的比较. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 27(4): 16–20.
- 闫冠杰. 2012. 鲤科鱼类形态及游泳能力的种间比较. 重庆: 重庆师范大学硕士学位论文, 12–18.
- 于晓明, 张秀梅. 2011. 鱼类游泳能力测定方法的研究进展. *南方水产科学*, 7(4): 76–84.
- 赵文文, 曹振东, 肖月吉, 等. 2011. 低温条件下鲫鱼幼鱼的游泳能力及其能量消耗. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 28(1): 13–17.