

# 切鳍标记对唐鱼游泳能力的影响

刘明中 林小涛\* 许忠能 徐采 姚达章

暨南大学水生生物研究所 水体富营养化与赤潮防治广东普通高校重点实验室 广州 510632

**摘要:** 本研究通过测定完全切除背鳍、臀鳍、尾鳍或双侧胸鳍后唐鱼 (*Tanichthys albonubes*) 临界游泳速度来评价切鳍标记对游泳能力的影响。研究结果表明, 在速度增量 ( $\Delta U$ ) 为 36 mm/s, 持续时间 ( $\Delta t$ ) 分别为 5 min、10 min、15 min、20 min、25 min、30 min 的条件下, 唐鱼临界游泳速度会随着持续时间的延长而降低。鳍组织完整的唐鱼 [体长 ( $24 \pm 1$ ) mm], 在不同持续时间 ( $\Delta t$ ) 条件下, 其绝对临界游泳速度 ( $U_{crit}^a$ ) 为 ( $251.98 \pm 11.04$ ) ~ ( $333.78 \pm 12.44$ ) mm/s; 同等条件下, 切除唐鱼的背鳍或臀鳍均不会对其绝对临界游泳速度造成显著影响 ( $P > 0.05$ ), 但切除尾鳍或胸鳍后其临界游泳速度与对照组相比极显著降低 ( $P < 0.01$ ), 切除尾鳍后绝对临界游泳速度平均下降 47.20%, 切除胸鳍后平均下降 22.98%, 后二者间也存在极显著的差异 ( $P < 0.01$ )。研究表明, 背鳍切除可作为野外唐鱼短期标记-重捕的手段之一。

**关键词:** 唐鱼; 临界游泳速度; 鳍组织切除; 标记-重捕; 迁移

中图分类号: Q955 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263(2014)06-930-08

## Influences of Fins Amputation on Swimming Ability of *Tanichthys albonubes*

LIU Ming-Zhong LIN Xiao-Tao\* XU Zhong-Neng XU Cai YAO Da-Zhang

Key Laboratory for Water Eutrophication and Red Tide Control, Department of Education of Guangdong Province, Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

**Abstract:** This research aimed at assessing the influence of fins amputation to the fish swimming ability of *Tanichthys albonubes*. We amputated the dorsal fins, anal fins, caudal fins and pectoral fins fully as each treatment to measure the critical swimming speed at durations 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 25 min and 30 min ( $\Delta t$ ) under the speed of 36 mm/s. Then we calculated the absolute critical swimming speed ( $U_{crit}^a$ ) by equation  $U_{crit}^a = U_{max} + (t/\Delta t)\Delta U$ . All the observed value was analyzed with One-way ANOVA and Two-way ANOVA. The critical swimming speeds of the treated fish became slower as the swimming duration became longer. The control fish with intact fins (BL =  $24 \pm 1$  mm) had absolute critical swimming speed ( $U_{crit}^a$ ) from  $251.98 \pm 11.04$  mm/s to  $333.78 \pm 12.44$  mm/s in different duration length. In the same condition, the critical swimming speed  $U_{crit}^a$  was not significantly influence by the dorsal fins or anal fins amputation ( $P > 0.05$ ). However, the  $U_{crit}^a$  in the fish without caudal fins or pectoral fins was significantly influenced ( $P < 0.01$ ). The removal of caudal fins and pectoral fins decreased 47.20% and 22.98% of the absolute critical swimming speeds comparing with control fish, respectively ( $P < 0.01$ , Fig. 2). The experimental conclusion of this research is that the fully amputation of the dorsal fins on this fish can been used to conduct marking and

**基金项目** 国家自然科学基金项目 (No. 30970555), 中央高校基本科研业务费专项 (No. 21613105);

\* 通讯作者, E-mail: tlinxt@jnu.edu.cn;

**第一作者介绍** 刘明中, 男, 硕士研究生; 研究方向: 唐鱼的生态学保护与种群恢复; E-mail: 814314523@qq.com。

收稿日期: 2014-03-01, 修回日期: 2014-06-12

recapture experiments on this fish in the wild.

**Key words:** *Tanichthys albonubes*; Critical swimming speed; Fins amputation; Marking and recapture experiment; Move

唐鱼 (*Tanichthys albonubes*) 是主要生活在华南地区溪流生境中的一种小型鲤科鱼类, 由于人类活动的干扰导致数量锐减, 甚至曾经一度被认为已在野外灭绝。近年来在广东、广西、海南等少数地区重新发现有唐鱼自然种群存在, 引起人们的关注 (刘汉生等 2008)。唐鱼现已被列为国家 II 级重点保护水生野生动物 (易祖盛等 2004)。

唐鱼在溪流中的迁移行为是种群动态研究中的重要环节。但唐鱼个体小, 野生个体体长一般不超过 3 cm, 在研究迁移行为时如何进行标记重捕成为一个难题。之前本研究室曾采用过茜素络合物浸泡标记唐鱼耳石的方法 (赵天等, 另文发表), 但此法须解剖之后才能观察耳石有无标记, 因此不适合基于体表识别的多次放流-重捕的连续性跟踪观察。已有报道, 鳍组织切除可作为鱼类体外短期标记的有效方法 (杨君兴等 2013), 但由于鱼鳍是重要的游泳器官, 切鳍标记必须选择合适的鳍组织, 且这种方法一般只适合大型鱼类, 关于小型鱼类的研究则鲜见报道。

鱼类的临界游泳速度是指特定条件下鱼能够进行持续游泳运动的最大速度, 是评价鱼类最大有氧运动能力的重要指标 (Brett et al. 1973, Vanhooydonck et al. 2001, 王萍等 2010)。其中不考虑鱼体大小的游泳速度绝对值被称为绝对临界游泳速度 (absolute critical swimming speed), 而相对于鱼体长的临界游泳速度则为相对临界游泳速度 (relative critical swimming speed) (Lowe 1996, Green et al. 2003)。本研究采用自行制作的实验装置测定切除不同鳍组织后唐鱼的临界游泳速度, 以探讨各部位鳍组织缺失对唐鱼游泳能力的影响, 旨在评价鳍组织切除是否适于唐鱼野外体标标记法, 从而为研究唐鱼的标记放流以及其在溪流的迁移行为提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方 法

**1.1 实验材料** 实验用鱼于 2012 年夏季采自广东从化塘肚地区附近的森林溪流中 (23°30'51"N, 113°29'43"E), 溪流水流湍急, 水质清澈, 底质为砂砾。

采回的唐鱼用曝气自来水驯养在长 × 宽 × 高为 70 cm × 18 cm × 43 cm 的长方体玻璃水槽中, 每日饱食投喂新鲜摇蚊幼虫 1 次, 静水饲养, 每 2 d 换水 2/3, 水温保持在 25℃ 左右。饲养 1 周后, 选取体表无损伤, 体长 (24 ± 1) mm 的唐鱼进行实验。

**1.2 实验装置** 鱼类临界游泳速度测定装置参考 McIntire 等 (1964) 的设计并作了改进 (图 1)。装置主体是一个长 × 宽 × 高为 80 cm × 16 cm × 8 cm 的无盖玻璃缸, 玻璃缸内侧长边两端各嵌入以直径为 16 cm 的塑料水管切割而成的半圆结构, 中间用长 64 cm、高 7.5 cm、厚 0.5 cm 的玻璃板隔开, 从而形成一个环形水道, 实验时在水道中加入曝气自来水, 水深 7 cm。在环形水道其中一条直道上设置一个直径为 20 cm 的圆形水轮, 水轮上共安装 6 个叶片。水轮固定在轴上并通过弹性联轴器与电动机连接, 通过调节电动机和水轮的转速可以控制环形水道中水流速度。在环形水道另一侧的直道中, 在前后相距 50 cm 处各设置 1 个不锈钢网形成一个游泳速度测定区, 即图 1 中黑色虚线内的区域, 把实验鱼限制在该区域范围内, 以保证其处于流速均匀的位置。

### 1.3 实验方法

**1.3.1 实验装置的流速测定和调节** 将精密水位流速测定仪 (澳大利亚 Starflow 6526) 的探头放入流速测定区, 将控制开关从第 1 档逐一调至第 9 档, 测出各个档位 (刻度) 下对应的水流速度, 用 Excel 求出各个刻度和水流速度之间的函数关系式, 即可根据此函数式得出实验

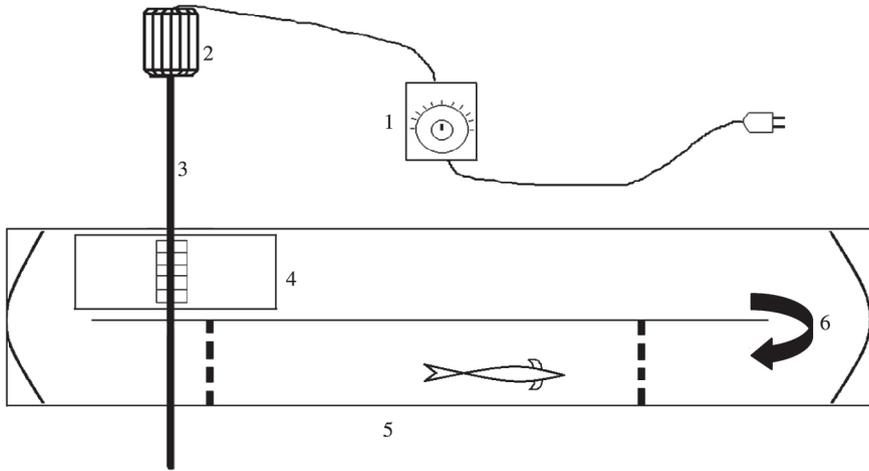


图1 临界游泳速度测定装置示意图(俯视)

Fig. 1 Schematic of apparatus for critical swimming speed testing (overlooking)

1. 控制开关; 2. 电动机; 3. 传动轴; 4. 水轮; 5. 流速测定区; 6. 水流方向。

1. Control switch; 2. Electromotor; 3. Drive shaft; 4. Blades; 5. Area for testing; 6. Flow direction.

设定的各流速在控制开关上所对应的刻度值。正式实验时, 只需将开关逐一调至这些刻度, 即可完成对不同流速的设定。

**1.3.2 实验设计** 唐鱼的绝对临界游泳速度的计算公式  $U_{crit}^a = U_{max} + (t/\Delta t)\Delta U$ , 式中,  $U_{crit}^a$  表示绝对临界游泳速度(mm/s),  $U_{max}$  是实验鱼出现力竭状态所对应流速的前一档流速, 即亚最高流速(田凯等 2010)。力竭状态的判断标准为: 实验鱼停止游动, 靠在测定区域下游拦网上静止不动的时间超过 30 s, 且轻弹拦网时实验鱼也没有反应则视为力竭(涂志英等 2012)。 $t$  是实验鱼在力竭状态所对应流速下的持续游泳时间(min);  $\Delta t$  为实验设定的每一流速梯度的持续时间(min),  $\Delta U$  为每一次提速时的速度增量(mm/s)。

将分别完全切除背鳍、臀鳍、尾鳍或双侧胸鳍作为其中一个实验处理。根据实验用鱼的体长范围( $24 \pm 1$  mm)设定实验鱼标准体长(body length, BL)为 24 mm。本研究将  $\Delta U$  设定为  $1.5 \text{ BL/s}$ (即  $36 \text{ mm/s}$ )的固定值(Kieffer et al. 2009), 对应每个鳍组织切除处理分别设定 5、10、15、20、25、30 min 6 个  $\Delta t$ , 构成不同鳍组织切除与  $\Delta t$  的 30 个实验组合, 重点考察不同部位鳍组织切除对唐鱼临界游泳速度的影响。每

个实验组合重复 10 次, 每次用实验鱼 1 尾, 共 300 尾。

**1.3.3 绝对临界游泳速度的测定方法** 实验开始时将 1 尾实验鱼移入测定装置, 将水流速度从 0 开始经设定的  $\Delta t$  时间后逐一上调一个流速梯度。随着水流速度升高和实验时间的延长, 唐鱼最终出现力竭状态, 记录此时的水流速度和时间( $t$ ), 根据公式计算出唐鱼的绝对临界游泳速度  $U_{crit}^a$ 。由于本实验中鱼体最大的横截面积小于水流通道横截面积的 10%, 因此其绝对游泳速度不需要进行校正(McFarlane et al. 2004, 石小涛等 2012)。实验期间光照强度为 100 ~ 500 lx, 水温  $25 \sim 26^\circ\text{C}$ 。

**1.3.4 数据处理** 运用 SPSS17.0 统计软件, 对全部  $U_{crit}^a$  的观察值分别进行不同切鳍部位和不同持续时间( $\Delta t$ )两个变量的单因素方差分析以及双因素方差分析。所有统计值以平均值  $\pm$  标准差表示。

## 2 实验结果

**2.1 鳍组织切除与持续时间交互作用对绝对临界游泳速度的影响** 对所得的各组  $U_{crit}^a$  值进行双因素方差分析。不同鳍组织切除与不同的持续时间以及两者的交互作用均会对唐鱼的绝

对临界游泳速度产生极显著影响 ( $P < 0.01$ ) (表 1)。

**2.2 鳍组织切除对唐鱼绝对临界游泳速度的影响** 对切除同一鳍组织的唐鱼在不同  $\Delta t$  值下的  $U_{crit}^a$  求平均值 (图 2)。对照组  $U_{crit}^a$  总平均值 ( $285.60 \pm 10.17$ ) mm/s, 变化范围 ( $251.98 \pm 11.04$ ) ~ ( $333.78 \pm 12.44$ ) mm/s, 单因素方差分析结果表明, 与对照组相比切除唐鱼的背鳍或臀鳍对绝对临界游泳速度都没有显著性的影响 ( $P > 0.05$ ), 而切除胸鳍或尾鳍则对绝对临界游泳速度产生极显著的影响 ( $P < 0.01$ ), 尤其是尾鳍切除的影响最大, 切除尾鳍后的绝对临界游泳速度不但极显著低于对照组, 也极显著低于胸鳍切除组 ( $P < 0.01$ )。

**2.3 持续时间 ( $\Delta t$ ) 对唐鱼绝对临界游泳速度的影响** 本实验设定 6 个  $\Delta t$ , 对同一  $\Delta t$  下不同鳍组织切除的  $U_{crit}^a$  求平均值, 并进行单因素方差分析, 以考察持续时间对  $U_{crit}^a$  的影响 (图 3)。 $\Delta t$  对实验鱼绝对临界游泳速度产生了显著的影响, 随着持续时间的延长, 绝对临界游泳速度逐渐下降。其中, 5 min 组对应的绝对临界游泳速度值最大, 与 10 min 组差异显著 ( $P < 0.05$ ), 与其余各组间均差异极显著 ( $P < 0.01$ ); 10 min 组除与 5 min、15 min 组差异显著 ( $P < 0.05$ ), 与其余各组也均存在极显著差异 ( $P < 0.01$ ); 而 25 min 组与 30 min 组对应的绝对临界游泳速度最小, 两组之间没有显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

表 1 鳍组织切除与持续时间对唐鱼绝对临界游泳速度 ( $U_{crit}^a$ ) 影响的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA to the absolute critical swimming speed of *Tanichthys albonubes*

不同处理 Treatment groups	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F	显著性差异 Significance
鳍组织切除 Fins amputation	4	282 318.564	855.913	0.000
持续时间 Duration	5	27 970.679	844.799	0.000
鳍组织切除×持续时间 Fins amputation × Duration	20	1 418.373	4.300	0.000

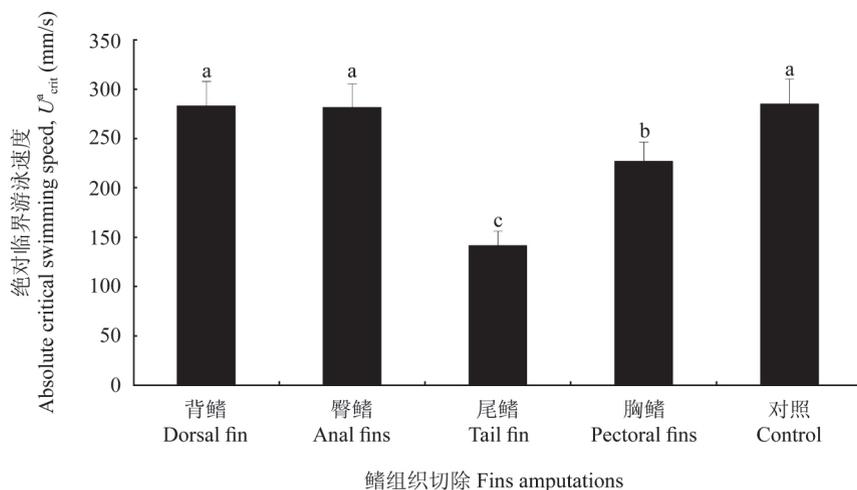


图 2 不同鳍组织切除对唐鱼绝对临界游泳速度 ( $U_{crit}^a$ ) 的影响

Fig. 2 The influence of fins amputation on absolute critical swimming speed of fish *Tanichthys albonubes*

图中数据柱上标注不同字母表示两组间差异显著,  $P < 0.05$ 。

Different letters above the bars mean significant differences between them,  $P < 0.05$ .

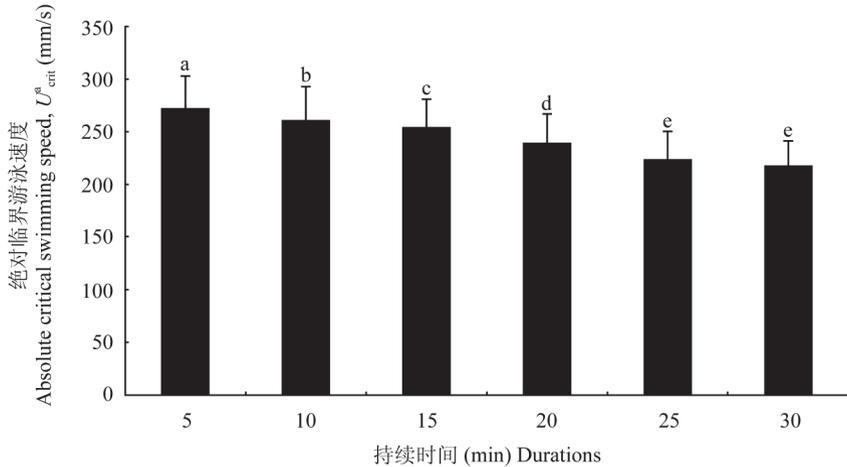


图3 持续时间 ( $\Delta t$ ) 对唐鱼绝对临界游泳速度 ( $U_{crit}^a$ ) 的影响

Fig. 3 The influence of time duration on absolute critical swimming speed of fish *Tanichthys albonubes*

图中数据柱上标注不同字母表示两组间差异显著,  $P < 0.05$ 。

Different letters above the bars mean significant differences between them,  $P < 0.05$ .

### 3 讨论

**3.1 唐鱼与其他鱼类临界游泳速度比较** 鱼类的游泳能力与体长、体型、鳍组织和肌肉组织结构等因素密切相关 (Peake et al. 1998)。因此在比较不同鱼类或同类不同大小个体的游泳能力时, 为抵消体长对临界游泳速度的影响, 应将绝对临界游泳速度 ( $U_{crit}^a$ , mm/s) 按照公式  $U_{crit}^r = U_{crit}^a / BL$  换算为相对临界游泳速度 ( $U_{crit}^r$ , BL/s)。

个体小的鱼类, 一般具有较小的绝对临界游泳速度和较大的相对临界游泳速度。唐鱼虽然绝对临界游泳速度较小, 但其相对临界游泳速度却比许多其他淡水鱼类大 (表 2)。这除了其本身属于小型鱼类外, 可能与其栖息环境亦有关系。唐鱼长期生活在华南地区丘陵森林溪流中, 经现场实际测量, 其所在溪流水流速度常达到 200 ~ 300 mm/s, 而在雨季水量增大时流速则更高。本研究室在进行野外唐鱼标记-重捕实验时发现, 野生唐鱼能够逆流穿越长度约 3.5 m, 坡度为 10°, 流速约为 500 mm/s 的溪流急流区域。这些研究结果都证明唐鱼是一种游泳能力较强的鱼类, 这很可能是长期适应

溪流流水环境的结果。此外, 由于不同研究者设定的  $\Delta t$  和  $\Delta U$  值不同, 而这两个参数又与  $U_{crit}^r$  值密切相关。因此表 2 结果只能在一定程度上反映不同鱼类游泳能力的对比情况。若需要更加全面客观地比较不同鱼类的游泳能力, 应该在相同实验条件下进行研究。

**3.2 持续时间 ( $\Delta t$ ) 对唐鱼临界游泳速度的影响** 本研究主要目的是探究不同部位鳍组织的切除对唐鱼游泳能力的影响, 将不同持续时间也设为一个变量只是为了更加全面地反映唐鱼临界游泳速度。与瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*) 的研究结果相似 (田凯等 2010), 唐鱼的临界游泳速度也随着  $\Delta t$  的增大而降低。研究表明,  $\Delta t$  过短可能造成对测定结果的偏高估计, 但太长则不仅会造成测定结果偏低 (Fisher et al. 2005), 还会致使实验周期过长。因此对鱼类进行临界游泳速度测定时, 合理地设定  $\Delta t$  十分重要 (Plaut 2002, 曾令清等 2011)。根据本研究结果, 结合实验操作的实际情况分析, 若  $\Delta t$  小于 5 min 则实验操作时流速提升的间隔过短, 不利于观察记录; 若大于 25 min, 则唐鱼会过早出现力竭状态, 从而使  $U_{crit}^a$  随  $\Delta t$  增加而降低的幅度趋于稳定, 造成测量误差。因

表 2 唐鱼与其他鱼类的相对临界游泳速度 ( $U_{crit}^r$ ) 比较Table 2 The relative critical swimming speed comparison between *Tanichthys albonubes* and other fishes

种类 Species	体长(cm) Body length	速度增量 (mm/s) Velocity increment	持续时间 (min) Durations	绝对临界游泳速 (mm/s) Absolute critical swimming speed	相对临界游泳速 (BL/s) Relative critical swimming speed	文献来源 References
虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	38.80	15.00	—	1 210.17	3.12	Kolok 1991
南方大口鲶 <i>Silurus meridionalis</i>	1.70	18.09	2	120.60	7.09	张怡等 2007
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	15.10	22.65	20	440.01	2.91	Li et al. 2007
细鳞裂腹鱼 <i>Schizothorax chongi</i>	10.60	10.60	30	110.28	1.15	袁喜等 2012
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	5.50	93.99	15	469.98	8.55	田凯等 2010
胭脂鱼 <i>Myxocyprinus asiaticus</i>	6.51	72.06	20	480.37	7.38	石小涛等 2012
唐鱼 <i>Tanichthys albonubes</i>	2.40	36.00	15	285.60	11.90	本研究

此,在研究唐鱼这样的鲤科小型溪流鱼类临界游泳速度时,  $\Delta t$  设定为 10 ~ 20 min 比较合适。

### 3.3 切除不同鳍组织对唐鱼游泳能力的影响

鱼鳍是鱼类重要的游泳器官,对鱼在水中游泳时的前进、拐弯、急停、升降以及鱼体的平衡都起到重要作用,并且不同鳍组织其功能不尽相同。尾鳍是最重要的游泳器官,通过左右摆动为鱼的前进运动提供动力,同时控制游动的方向;胸鳍起到平衡鱼体,控制游动时的急停、升降和前进方向的作用,同时也提供向前的动力;而腹鳍、臀鳍和背鳍主要对鱼体的平衡起到协助作用(李林春 2009)。分别切除虹鳟的背鳍、胸鳍、腹鳍、臀鳍或脂鳍后,均不会导致其游泳能力下降(Horak 1969)。由于唐鱼的腹鳍十分细小,在切除操作时极易伤及鱼体,故本研究没有进行腹鳍切除处理。从研究结果看,切除尾鳍对唐鱼游泳能力影响最大,切除后其临界游泳速度明显下降。其次是胸鳍,切除后也导致临界游泳速度下降。这与两种鳍各自的功能及其相互配合对游泳运动的重要性有关(Oufiero et al. 2011)。而臀鳍和背鳍在游泳时只起到协助平衡的作用,因此其中一种鳍的缺失不至于影响唐鱼整体游泳能力。但根据鱼

类游泳时背上腹下的特性,切除背鳍组织更便于直接观察水中的唐鱼是否被标记。因此,对唐鱼这样的小型鱼类进行体外标记时,可选择背鳍组织的切除。由于鳍组织在短期内可以再生,因此该方法比较适合短期间内连续跟踪的体外标记。

另据报道,切除某些重要鳍组织后会影响到有些鱼类的游泳能力或灵活性,如切除隆背骨尾鱼(*Chlorophthalmus acutifrons*)的尾鳍上半叶后不但会降低游泳能力,还可能影响到实验鱼在游泳管道内的灵活性或定位能力(Ward 2003)。相关研究还表明,鳍组织切除后,鱼类生理上的胁迫增大,致使鱼体虚弱,易遭到捕食,使鱼类的存活率降低(张堂林等 2003)。但切除所有偶鳍后,梭鱼(*Chelon haematocheilus*)幼鱼的捕食能力并没有受到影响(Wagner et al. 2009)。关于唐鱼切鳍标记对其行为习性等是否产生影响有待于后续的研究。

### 3.4 鱼鳍的再生与功能补偿

唐鱼各部位鳍组织被完全切除约 15 d 之后可完全重新长出,尤其以背鳍和臀鳍的生长速度最为快速,说明鳍组织再生能力较强。唐鱼作为一种小型鱼

类,其各部位鳍组织面积都较小,若实验时只实行部分切除,一方面很难做到每个个体切除的份量相同,另一方面鳍组织部分切除后会在短时间内重新长出,因此不利于野外实地回捕时肉眼观察和识别,故本研究中采用鳍组织完全切除处理的方法。另外,鱼类被切除鳍组织后,为使其游泳能力尽量少受影响而普遍产生一定程度的行为补偿现象(Kasapi et al. 1993, Domenici et al. 2010)。蓝鳃太阳鱼(*Lepomis macrochirus*)胸鳍组织被切除30%后,会通过增加胸鳍摆动幅度和频率以及调整身体姿势来补偿因鳍面积减少而降低的制动性(Higham et al. 2005)。鳊鱼(*Parabramis pekinensis*)在尾鳍组织被半切除或全切除后,会通过增加尾部残余部分的摆幅和摆动频率来弥补尾鳍切除造成的不良影响(闫东娟 2013, 杨晗等 2013)。至于唐鱼是否存在类似现象,同样有待进一步的研究。

## 参 考 文 献

- Brett J R, Grass N R. 1973. Metabolic rates and critical swimming speeds of Sockeye Salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to size and temperature. *The Journal of Fisheries Research Board of Canada*, 30(3): 379 - 387.
- Domenici P, Kapoor B G. 2010. *Fish locomotion*. Enfield: Science Publishers, 123 - 170.
- Fisher R, Leis J M, Clark D L, et al. 2005. Critical swimming speeds of late-stage coral reef fish larvae: Variation within, among species and between locations. *Marine Biology*, 147(5): 1201 - 1212.
- Green B S, Fisher R. 2003. Temperature influences swimming speed, growth and larval duration in coral reef fish larvae. *The Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 229(1): 115 - 132.
- Higham T E, Malas B, Jayne B C, et al. 2005. Constraints on starting and stopping: behavior compensates for reduced pectoral fin area during braking of the bluegill sunfish *Lepomis macrochirus*. *The Journal of Experimental Biology*, 208(4): 4735 - 4746.
- Horak D L. 1969. The effect of fin removal on stamina of hatchery-reared rainbow trout. *Progressive Fish Culturist*, 31(4): 217 - 220.
- Kasapi M, Domenici P, Blake R W, et al. 1993. The kinematics and performance of the escape response in the knife fish (*Xenomystus nigri*). *Canadian Journal of Zoology*, 71(3): 189 - 195.
- Kieffer J D, Arsenault L M, Litvak M K. 2009. Behavior and performance of juvenile short nose sturgeon *Acipenser brevirostrum* at different water velocities. *Journal of Fish Biology*, 74(3): 674 - 682.
- Kolok A S. 1991. Photoperiod alters the critical swimming speed of juvenile largemouth bass, *Micropterus salmoides*, acclimated to cold water. *Copeia*, 32(4): 1085 - 1090.
- Oufiero C E, Walsh M R, Reznick D N, et al. 2011. Swimming performance trade-offs across a gradient in community composition in Trinidadian killifish (*Rivulus hartii*). *Ecology*, 92(1): 170 - 179.
- Li D L, Fu C Z, Hu W, et al. 2007. Rapid growth cost in "all-fish" growth hormone gene transgenic carp: Reduced critical swimming speed. *Chinese Science Bulletin*, 52(5): 1501 - 1502.
- Lowe C. 1996. Kinematics and critical swimming speed of juvenile scalloped hammerhead sharks. *The Journal of Experimental Biology*, 199(3): 2605 - 2610.
- McFarlane W J, Cubitt K F, Williams H, et al. 2004. Can feeding status and stress level be assessed by analyzing patterns of muscle activity in free swimming rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss Walbaum*)? *Aquaculture*, 239(1): 467 - 484.
- McIntire C D, Garrison R L, Phinney H K, et al. 1964. Primary production in laboratory streams. *Limnology and Oceanography*, 9(1): 92 - 102.
- Peake S, McKinley R S. 1998. A re-evaluation of swimming performance in juvenile salmonids relative to downstream migration. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(5): 682 - 687.
- Plaut I. 2002. Does pregnancy affect swimming performance of female Mosquitofish, *Gambusia affinis*? *Functional Ecology*, 16(2): 290 - 295.
- Vanhooydonck B, Damme R V, Aerts P. 2001. Speed and stamina trade-off in lacertid lizards. *Evolution*, 55(6): 1040 - 1048.
- Wagner C P, Einfalt L M, Scimone A B, et al. 2009. Effects of Fin-clipping on the foraging behavior and growth of age-0 muskellunge. *North American Journal of Fisheries Management*, 29(6): 1644 - 1652.
- Ward D L. 2003. Effects of marking techniques and handling on swimming ability of Bonytail Chub. *Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science*, 36(1): 34 - 36.
- 李林春. 2009. 实用鱼类学. 北京: 化学工业出版社, 56 - 157.

- 刘汉生, 易祖盛, 林小涛. 2008. 唐鱼的繁殖行为和胚胎发育研究. 水生态学杂志, 1(2): 22 - 27.
- 石小涛, 陈求稳, 刘德富, 等. 2012. 胭脂鱼幼鱼的临界游泳速度. 水生生物学报, 36(1): 133 - 136.
- 田凯, 曹振东, 付世建. 2010. 速度增量及持续时间对瓦氏黄颡鱼幼鱼临界游泳速度的影响. 生态学杂志, 29(3): 534 - 538.
- 涂志英, 袁喜, 王从峰, 等. 2012. 亚成体巨须裂腹鱼游泳能力及活动代谢研究. 水生生物学报, 36(4): 682 - 687.
- 王萍, 桂福坤, 吴常文. 2010. 鱼类游泳速度分类方法的探讨. 中国水产科学, 17(5): 1137 - 1145.
- 闫东娟. 2013. 尾鳍切除和恢复生长对不同生境的两种鲤科鱼快速启动能力的影响. 重庆: 重庆师范大学硕士学位论文, 8 - 21.
- 杨晗, 曹振东, 付世建. 2013. 尾鳍缺失对鳊鱼幼鱼游泳能力、能量效率与行为的影响. 水生生物学报, 37(2): 157 - 161.
- 杨君兴, 潘晓斌, 陈小勇, 等. 2013. 中国淡水鱼类人工增殖放流现状. 动物学研究, 34(4): 267 - 280.
- 易祖盛, 陈湘舜, 巫锦雄, 等. 2004. 野生唐鱼在广东的再发现. 动物学研究, 25(6): 551 - 555.
- 袁喜, 涂志英, 韩京诚, 等. 2012. 流速对细鳞裂腹鱼游泳行为及能量消耗影响的研究. 水生生物学报, 36(2): 270 - 275.
- 曾令清, 张耀光, 付世建, 等. 2011. 双向急性变温对南方鲇幼鱼静止耗氧率和临界游泳速度的影响. 水生生物学报, 35(2): 276 - 281.
- 张堂林, 李钟杰, 舒少武. 2003. 鱼类标志技术的研究进展. 中国水产科学, 10(3): 246 - 253.
- 张怡, 曹振东, 付世建, 等. 2007. 延迟首次投喂对南方鲇 (*Silurus meridionalis* Chen) 仔鱼身体含能量、体长及游泳能力的影响. 生态学报, 27(3): 1161 - 1167.