

逆流运动训练对多鳞四须鲃摄食、生长和体营养成分的影响

宋波澜^{1,2}, 林小涛^{1*}, 许忠能¹

(1. 暨南大学水生生物研究所, 热带亚热带水生态工程教育部工程研究中心, 广东 广州 510632;

2. 河北农业大学海洋学院, 河北 秦皇岛 066003)

摘要: 在室内条件下[水温(28±1)℃], 设置0.7 BL/s和2.0 BL/s 2个流速组以及一个静水对照组, 研究了不同逆流运动训练对多鳞四须鲃幼鱼[体质量(75.21±2.82)g]摄食、生长和体营养成分的影响。实验分1~23 d和23~45 d两个阶段, 共进行45 d。实验结果表明, 多鳞四须鲃平均日摄食率随流速增加而增大, 但体长特定生长率、体质量特定生长率和食物转换率均以0.7 BL/s组最高, 静水组次之, 2.0 BL/s组最低, 且三者间差异显著($P < 0.05$)。不同流速下多鳞四须鲃肌肉水分和灰分含量差异不显著($P > 0.05$), 但随流速增大, 多鳞四须鲃肌肉中蛋白质含量增加, 而脂肪含量却显著下降。在实验末期, 2.0 BL/s流速组的氨基酸总含量(82.63%)、必需氨基酸总含量(34.34%)和鲜味氨基酸总含量(33.50%)均显著高于静水对照组(78.27%, 32.6%, 30.63%) ($P < 0.05$)。研究表明, 较低流速(0.7 BL/s)的运动训练明显促进多鳞四须鲃的生长, 提高食物转化率和增加肌肉蛋白质含量, 高流速(2.0 BL/s)的运动训练不利于生长, 但却能显著提高肌肉必需氨基酸和鲜味氨基酸含量。

关键词: 多鳞四须鲃; 运动训练; 流速; 摄食; 生长; 体营养成分

中图分类号: Q 958.8; S 917

文献标志码: A

养殖鱼类的品质和体营养成分除受饲料质量的影响外, 与养殖环境也有着密切的关系。目前水产养殖越来越多采用高密度集约化的方式, 这种养殖方式在一定程度上限制了鱼类的活动空间, 减少了其运动强度。水流是鱼类外界环境一种重要的生态因子, 一定的水流条件会促进鱼类的游泳运动, 增强活动代谢, 改善其生理功能^[1-4], 而长期的运动训练会影响鱼类的肉质和体营养组成^[5]。关于运动训练对养殖鱼类生长及体营养组成的影响已有一些研究报道, 其中尤以洄游性冷水鱼类居多, 但不同鱼类及不同训练方法其研究结果却不尽相同^[6-12]。多鳞四须鲃(*Barbodes schwanenfeldi*), 又名红鳍银鲫, 分类上隶属于鲤形目(Cypriniformes)、鲤科(Cyprinidae)、鲃亚科(Barbinae)、四须鲃属(*Barbodes*)。多鳞四须鲃为热带性鱼类, 原产地为泰国、印度尼西亚和马来西亚等国家, 自然条件

下栖息于东南亚地区的湄公河流域, 为定居性鱼类, 一般不作长距离游泳。因具有较高的观赏价值和食用价值, 近年来被我国南方地区引进, 生产上一般采用池塘静水养殖的方式^[13], 但生长速度相对缓慢, 影响了其作为肉用鱼类的推广。本研究以多鳞四须鲃为对象, 通过水流刺激诱导其进行逆流游泳, 探讨运动训练对其摄食、生长和体营养组成的影响, 在理论上可以丰富鱼类运动与营养代谢方面的内容, 实践上可为今后改善养殖条件, 提高养殖鱼类的生长速度、完善品质和营养价值提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验鱼来源和暂养

2007年6月—2008年1月在暨南大学水生生物研究所水生动物培养室进行。实验用鱼为广州市白云区嘉禾水产科学研究所人工繁育的多鳞四

收稿日期:2011-04-23 修回日期:2011-07-16

资助项目:广东省科技计划项目(20108B020309005);广州市科技计划项目(2010Z1-E401);广东省海洋渔业科技推广专项项目(A200901H05)

通讯作者:林小涛, E-mail: tlinxt@jnu.edu.cn

须鲃幼鱼。实验前在室内循环水养殖水槽驯养(流速 0.009 m/s),每天于 9:00 和 18:00 投喂锦峰牌杂食性鱼配合饲料(粗蛋白质 $\geq 39\%$ 、粗纤维 $\leq 5\%$ 、脂肪 $\geq 3\%$ 、粗灰分 $\leq 15\%$),投喂后 1 h 吸污,清除水槽内粪便和残饵。暂养期间水体溶解氧含量 6.2~8.0 mg/L,水温(28 \pm 1) °C,光照为室内自然光,白天光强约为(1 200 \pm 100) lx。暂养 1 个月取体质量(75.21 \pm 2.82) g、体长(15.12 \pm 1.35) cm 的幼鱼用作实验材料。

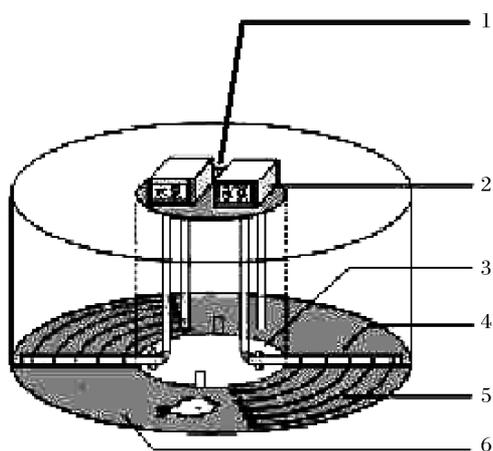


图 1 鱼类运动训练装置

1. 中央圆形平台, 2. 水泵, 3. 水泵调节阀, 4. 水泵喷水管, 5. 水流方向, 6. 环形泳道。

Fig. 1 The device of exercise training of fish

1. round center, 2. pump, 3. adjusting valve, 4. spouting pipe, 5. flowing direction, 6. ring-shaped swimming lane.

1.2 实验设计

实验流速按实验鱼体长倍数设定 0.7 BL/s (0.1 m/s)、2.0 BL/s (0.3 m/s) 两个水平和一个静水对照组 (0 BL/s)。流速采用流速水位计(澳大利亚, Unidata M6526c)测定。采用自行设计的圆柱形水槽(图 1), 其基本结构是在一个用透明材料制成的容积 72 L ($r=31$ cm, $h=25$ cm) 的圆筒状水槽中装上两个可调速的水泵, 各连接一条喷水管于水槽内的环形通道左右两侧, 因喷水方向相反而形成环流通道, 实验鱼置于其中。每个流速条件设 3 个平行水槽, 每一水槽放置 10 尾鱼。每天于 2 次投喂时各停止水流 2 h, 投喂时间为 9:00 和 18:00, 每次投喂上述配合饲料直到实验鱼不再摄食, 0.5 h 后收集残饵于 150 目筛网中, 并置于 70 °C 的烘箱烘干至恒重, 用电子天秤(上海, HANGPING JA 1003 型)称量(精确至 1.0 mg)并计算残饵干重。每个流

速下另称 3 份各 1.0 g 饲料投入空白的养殖水槽中于 1 h 后回收, 测定饲料在水中的溶失率。残饵量由饲料的溶失率及含水率校正而得, 每日的摄食量由投饵量与残饵量之差求得。实验周期为 45 d, 实验开始时从备用的实验鱼中取样 9 尾作为初始样品; 实验开始后于实验中期(23 d)和实验末期(45 d)当天上午投喂之前取样, 每个实验组从各平行水槽分别取 3 尾共 9 尾鱼作样品。实验用水为充分曝气后的自来水, 每天于第二次投喂 2 h 后换水 1/3, 实验过程连续充气使各水槽内溶解氧保持在 6.2 mg O₂/L 以上; 水温为(28.0 \pm 1.0) °C; 室内自然光照, 日间照度约为(1 200 \pm 100) lx。

1.3 测定指标及方法

摄食和生长指标 鱼体质量采用电子天秤(上海, HANGPING JA 1003 型)称量(精确至 1.0 mg), 鱼体长采用数显游标卡尺(日本, 三丰/500-171)测定(精确至 0.01 cm)。相关计算公式如下:

$$\text{平均日摄食率 FR}(\%) = 100 \times C / [t \times (W_1 + W_2) / 2]$$

$$\text{体质量特定生长率 WSGR}(\%/d) = 100 \times (\ln W_2 - \ln W_1) / t$$

$$\text{体长特定生长率 LSGR}(\%/d) = 100 \times (\ln L_2 - \ln L_1) / t$$

$$\text{食物转化率: FCR}(\%) = 100 \times (W_2 - W_1) / C$$

式中, W_1 和 W_2 、 L_1 和 L_2 分别为实验开始时 (t_1) 和一定时间后 (t_2) 的鱼湿体质量 (g) 和体长 (cm), C 是 t_1 到 t_2 期间实验鱼摄食饲料总干重 (g), t 是 t_1 和 t_2 的时间间隔 (d)。

体成分指标 鱼体营养成分分析用背部肌肉。从背鳍下方与侧线之间取两侧的肌肉, 每一个平行水槽 3 尾鱼肌肉称重干燥测定含水率, 然后碾碎等量均匀混合, 装于密封袋内于 -20 °C 下保存, 用于相关的测定。

含水率采用 70 °C 常压干燥法测定; 蛋白质含量采用自动凯氏定氮仪(瑞典, FOSS Kjeltec TM2300)测定; 脂肪含量采用索氏提取系统(瑞典, FOSS Soxtec Avanti 2055)测定; 灰分采用高温灼烧法测定, 将样品置于马福炉在 550 °C 焚烧 7 h, 剩余物即为鱼体灰分。

无氮浸出物采用差值法计算:

$$\text{无氮浸出物}(\%) = [1 - (\text{水分} + \text{蛋白质} + \text{脂肪} + \text{灰分})] \times 100.$$

样品重复测定2次,当相对偏差超过2%时,增加重复次数。结果取两个测定值的平均数。

肌肉氨基酸组成用氨基酸自动分析仪(日本,日立835-50型)分析。

1.4 数据处理

实验数据用EXCEL进行常规计算后,用SPSS 12.0进行统计分析。数据均用平均值±标准差(mean±SD)表示,对各组数据的差异采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)并进行Duncan氏多重比较,显著性水平为0.05。

2 结果

2.1 不同流速运动训练后多鳞四须鲃摄食和生长指标变化

不同流速下多鳞四须鲃的体长特定生长率(LSGR)见图2-a。1~23 d时段,以0.7 BL/s组

生长率最高,静水组(0 BL/s)次之,2.0 BL/s组最低,且三者差异显著($P < 0.05$);23~45 d时段,2.0 BL/s和0.7 BL/s两个流速组之间差异不显著,但均显著高于静水组($P < 0.05$)。不同流速下多鳞四须鲃的体质量特定生长率(WSGR)见图2-b。1~23 d和23~45 d时间段均以0.7 BL/s组最高,静水组次之,2.0 BL/s组最低,且三者间差异显著($P < 0.05$)。不同流速下多鳞四须鲃的平均日摄食率(FR)见图2-c。1~23 d时段0.7 BL/s组和2 BL/s组间差异不显著,但均显著高于静水组($P < 0.05$);23~45 d时段以2.0 BL/s组最高,0.7 BL/s组次之,静水组最低,三组间差异显著($P < 0.05$)。不同流速下多鳞四须鲃的食物转换率(FCR)见图2-d。1~23 d和23~45 d时段均以0.7 BL/s组最高,静水组次之,2.0 BL/s组最低,且三者间差异显著($P < 0.05$)。

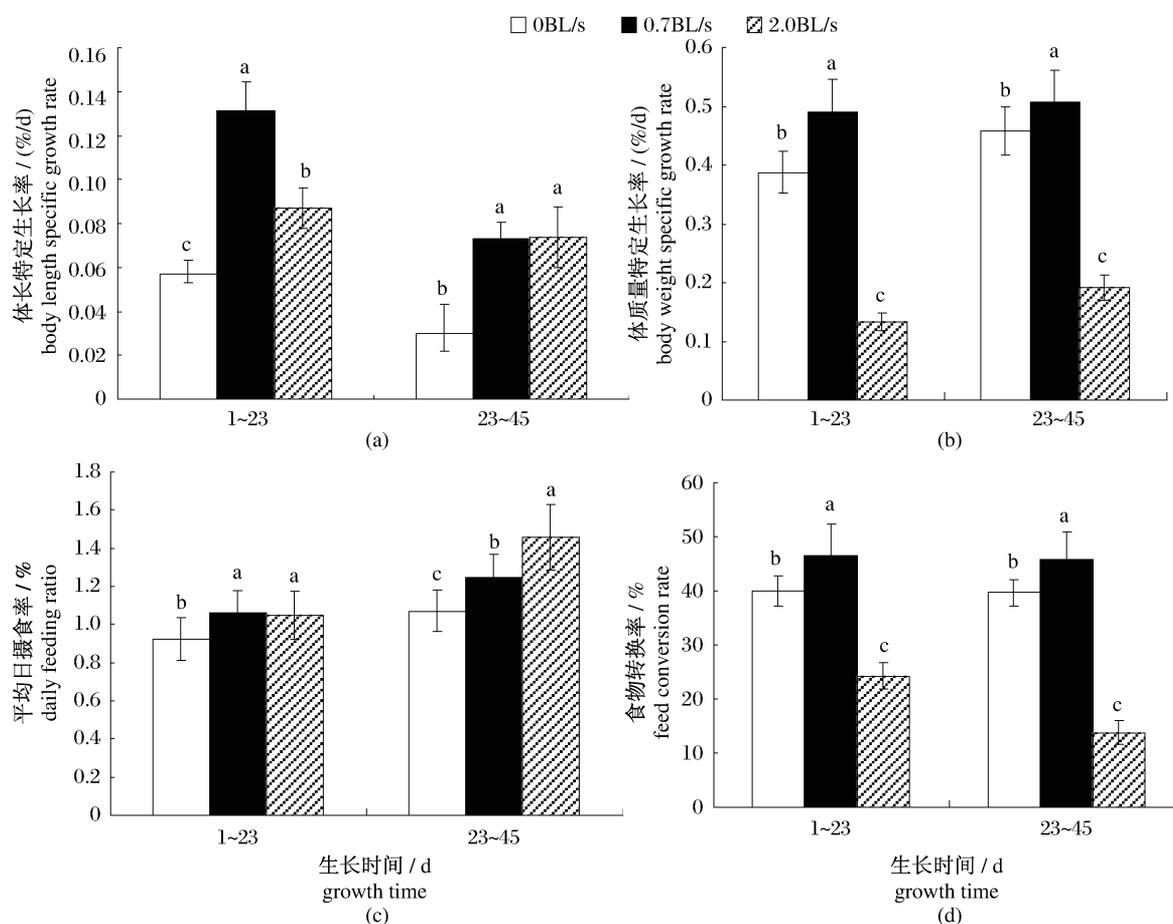


图2 不同流速运动训练后多鳞四须鲃生长和摄食指标变化

不同字母表示同一时间段不同流速间有显著性差异($n=9, P < 0.05$)。

Fig. 2 The growth and feeding indexes of *B. schwanenfeldi* under the exercise training with different water velocities

Different letters in superscript indicate significant differences in the same time phase at different water velocities($n=9, P < 0.05$).

2.2 不同流速运动训练后多鳞四须鲃体基本营养成分变化

不同流速运动训练后多鳞四须鲃鱼体基本营养成分见表 1。同一流速下随着时间的延长,各组肌肉中水分含量变化不明显($P > 0.05$),而同一时段不同流速下肌肉的水分含量差异亦不显著($P > 0.05$)。随着时间的延长,静水对照组肌肉中蛋白质含量变化同样不明显($P > 0.05$),基本稳定在 82.52% ~ 83.01% 范围内,而两个流速组其蛋白质含量则随时间延长显著增加($P < 0.05$)。同一时段各组蛋白质含量随流速增加呈显著增加趋势,实验中期(23 d),2.0 BL/s 组(86.26%)显著高于 0.7 BL/s 组(84.68%)和对照组(83.01%)($P < 0.05$),0.7 BL/s 组和静水对照组间差异不显著($P > 0.05$)。实验末期(45 d)3 个实验组肌肉蛋白质含量变化趋势与实验中期类似,但各组间差异均显著($P < 0.05$)。静水对照组多鳞四须鲃肌肉脂肪含量在实验前后没有显著变化($P > 0.05$),基本稳定在 10.62% ~ 11.18% 范围内,其他流速组脂肪含量在实验中期和实验末期变化也不明显($P > 0.05$)。但在同一时段各组脂肪含量随流速增加呈显著降低趋势,实验中期(23 d)静水对照组(10.93%)显著高于 0.7 BL/s 组(6.70%)和 2.0 BL/s 组(4.79%)($P < 0.05$)。实验末期(45 d)3 个实验组脂肪含量变化与实验中期类似,同样以对照组最高(10.62%)、0.7 BL/s 组次之(6.31%),2.0 BL/s 组最低(4.87%),各组间差异均显著($P < 0.05$)。

静水组和 2.0 BL/s 组多鳞四须鲃肌肉灰分随时间延长显著增加($P < 0.05$),而 0.7 BL/s 组随时间变化不明显($P > 0.05$),同一时段不同流速下多鳞四须鲃肌肉灰分含量差异也不显著($P > 0.05$)。多鳞四须鲃肌肉无氮浸出物除实验末期静水组显著减少外其余各组均随时间变化不明显($P > 0.05$),而同一时段无氮浸出物均以 2.0 BL/s 组最高,显著高于 0.7 BL/s 组和静水组,而后两组之间无显著性差异($P > 0.05$)。

2.3 不同流速运动训练后多鳞四须鲃肌肉氨基酸组成及其含量变化

实验末期各组多鳞四须鲃肌肉氨基酸组成如表 2 所示。多鳞四须鲃肌肉中共检测到了 17 种氨基酸(色氨酸因用酸水解处理被破坏,未另作测定),其中有 7 种必需氨基酸(EAA),分别是蛋氨酸(Met)、苯丙氨酸(Phe)、苏氨酸(Thr)、异亮氨酸(Ile)、缬氨酸(Val)、亮氨酸(Leu)和赖氨酸(Lys),还有两种半必需氨基酸即组氨酸(His)和精氨酸(Arg)。静水组多鳞四须鲃肌肉 17 种氨基酸总量(TAA)占肌肉干样重的 81.27%,必需氨基酸(EAA)为 33.6%,非必需氨基酸(NEAA)为 47.7%,EAA 占 TAA 的 41.34%。多鳞四须鲃肌肉中谷氨酸(Glu)含量最高,为 13.67%,而天门冬氨酸、甘氨酸和丙氨酸的含量也较高,分别为 9.11%、4.29% 和 5.25%,这 4 种氨基酸呈鲜味或甘味。此外,脯氨酸(2.9%)、丝氨酸(2.02%)也同甘味有关,以上这 6 种呈味氨基酸占氨基酸总量的 43.8%。

表 1 不同流速运动训练后多鳞四须鲃体基本营养组成

Tab. 1 Nutritional components of *B. schwanefeldi* under the exercise training with different water velocities

时间/d time	流速/(BL/s) water velocity	水分/% moisture	蛋白质/% protein	脂肪/% lipid	灰分/% crude ash	无氮浸出物/% nitrogen-free extract
1	0	76.79 ± 1.19 ^A	82.52 ± 0.33 ^A	10.93 ± 0.27 ^A	5.38 ± 0.11 ^B	1.20 ± 0.09 ^A
23	0	77.40 ± 1.28 ^{Aa}	83.01 ± 1.67 ^{Ab}	11.18 ± 0.34 ^{Aa}	5.41 ± 0.49 ^{Aa}	1.40 ± 0.21 ^{Ab}
	0.7	77.68 ± 4.65 ^{Aa}	84.68 ± 2.10 ^{Bb}	6.70 ± 0.25 ^{Ab}	5.60 ± 0.11 ^{Aa}	1.02 ± 0.27 ^{Ab}
	2.0	78.62 ± 0.55 ^{Aa}	86.26 ± 1.13 ^{Ba}	4.79 ± 0.41 ^{Ac}	5.44 ± 0.30 ^{Ba}	3.51 ± 0.52 ^{Aa}
45	0	77.34 ± 2.57 ^{Aa}	82.73 ± 1.13 ^{Ac}	10.62 ± 0.25 ^{Aa}	5.65 ± 0.07 ^{Aa}	1.00 ± 0.22 ^{Bb}
	0.7	78.41 ± 2.08 ^{Aa}	87.02 ± 1.03 ^{Ab}	6.31 ± 0.55 ^{Ab}	5.61 ± 0.04 ^{Aa}	1.06 ± 0.15 ^{Ab}
	2.0	78.98 ± 1.51 ^{Aa}	89.12 ± 0.44 ^{Aa}	4.87 ± 0.32 ^{Ac}	5.84 ± 0.12 ^{Aa}	3.17 ± 0.38 ^{Aa}

注:蛋白质、脂肪等均为干重含量;数据以 3 个平行的平均值 ± 标准差表示;同一列数据标有不同大写字母表示同一流速各时间段间差异显著($P < 0.05$),相同字母表示差异不显著($P > 0.05$);同一列数据标有不同小写字母表示同一时段各流速组间差异显著($P < 0.05$),相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)。

Notes: The crude protein, crude lipid and ash are dry matter; Values of 3 replicates are calculated as means ± SD; Different capital letters within the same column indicate significant difference ($P < 0.05$) in different time phase at the same water velocities, the same letters represent no significant difference ($P > 0.05$); Different small letters indicate significant difference ($P < 0.05$) in the same time phase at different water velocities, the same letters represent no significant difference ($P > 0.05$).

表2 实验末期不同流速运动训练组多鳞四须鲃肌肉氨基酸组成比较(干重)
Tab.2 Comparison of amino acid composition in muscles of *B. schwanenfeldi* under the exercise training with different water velocities at the end of the experiment(DM/dry mass)

氨基酸/% amino acid	训练前 before training	训练后 after training		
		流速/(BL/s) water velocity		
		0	0.7	2.0
天冬氨酸 Asp	9.11 ± 0.09	8.63 ± 0.11 ^b	8.78 ± 0.12 ^b	9.18 ± 0.30 ^{0a}
苏氨酸 Thr*	3.13 ± 0.09	3.28 ± 0.08 ^a	3.29 ± 0.03 ^a	3.31 ± 0.18 ^a
丝氨酸 Ser	2.02 ± 0.10	2.40 ± 0.09 ^a	2.38 ± 0.07 ^a	2.29 ± 0.20 ^a
谷氨酸 Glu	13.67 ± 0.12	12.93 ± 0.21 ^b	13.00 ± 0.17 ^b	13.57 ± 0.35 ^a
脯氨酸 Pro	2.90 ± 0.02	2.62 ± 0.14 ^a	2.80 ± 0.08 ^a	2.85 ± 0.15 ^a
甘氨酸 Gly	4.29 ± 0.02	3.90 ± 0.02 ^b	4.13 ± 0.04 ^a	4.19 ± 0.15 ^a
丙氨酸 Ala	5.52 ± 0.02	5.16 ± 0.08 ^b	5.31 ± 0.03 ^b	5.56 ± 0.22 ^a
胱氨酸 Cys	0.17 ± 0.01	0.17 ± 0.02 ^a	0.18 ± 0.01 ^a	0.19 ± 0.01 ^a
缬氨酸 Val*	4.62 ± 0.01	4.39 ± 0.09 ^a	4.49 ± 0.06 ^a	4.69 ± 0.18 ^a
蛋氨酸 Met*	2.55 ± 0.03	2.48 ± 0.05 ^a	2.52 ± 0.03 ^a	2.62 ± 0.13 ^a
异亮氨酸 Ile*	4.27 ± 0.03	4.09 ± 0.04 ^a	4.14 ± 0.06 ^a	4.31 ± 0.17 ^a
亮氨酸 Leu*	7.42 ± 0.05	7.11 ± 0.05 ^b	7.18 ± 0.06 ^b	7.50 ± 0.26 ^a
酪氨酸 Tyr	2.65 ± 0.03	2.71 ± 0.02 ^a	2.65 ± 0.02 ^a	2.71 ± 0.12 ^a
苯丙氨酸 Phe*	3.80 ± 0.02	3.62 ± 0.02 ^a	3.71 ± 0.08 ^a	3.86 ± 0.14 ^a
赖氨酸 Lys*	7.81 ± 0.19	7.63 ± 0.05 ^b	7.71 ± 0.07 ^b	8.05 ± 0.27 ^a
组氨酸 His*	2.39 ± 0.04	2.08 ± 0.04 ^a	2.19 ± 0.01 ^a	2.40 ± 0.12 ^a
精氨酸 Arg*	5.27 ± 0.05	5.06 ± 0.03 ^a	5.10 ± 0.01 ^a	5.34 ± 0.18 ^a
氨基酸总含量(TAA)	81.27 ± 1.21	78.27 ± 0.84 ^b	79.53 ± 0.76 ^b	82.63 ± 2.87 ^a
必需氨基酸总含量(EAA)	33.60	32.60 ^b	33.03 ^b	34.34 ^a
EAA/TAA	41.34	41.65	41.53	41.56

注: * 表示必需氨基酸;各种氨基酸含量为其占氨基酸总量的百分比;氨基酸总含量和必需氨基酸总含量为其占肌肉干重的百分比。数据以3个平行的平均值 ± 标准差表示;同一行数据标有不同字母表示差异显著($P < 0.05$),相同字母表示差异不显著($P > 0.05$);表3注同。

Notes: * indicates essential amino acid; The content of each kind of amino acid is as percentage of the total amount of amino acid; The total amount of amino acid and essential amino acid are as percentage of dry matter of fish muscle; Values of 3 replicates are calculated as means ± SD and values within the same row with different letters represent significant differences($P < 0.05$), with the same letters indicating no significant difference($P > 0.05$); The same as Tab. 3.

运动训练对多鳞四须鲃肌肉氨基酸含量有一定影响。与静水对照组相比,0.7 BL/s 流速组肌肉各种氨基酸含量差异均不显著,但2.0 BL/s 流速组的亮氨酸、天门冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸和赖氨酸分别增加了5.6%、6.3%、5.0%、7.4%、7.8%和5.5% ($P < 0.05$),其余氨基酸含量则没有显著性的差异($P > 0.05$)。另外,2.0 BL/s 流速组的氨基酸总含量(82.63%,总氨基酸占肌肉干重百分比)和必需氨基酸总含量(34.34%,必需氨基酸占肌肉干重百分比)相比静水组(78.27%,32.6%)分别增加了5.5%和5.3% ($P < 0.05$)。

不同流速运动训练对多鳞四须鲃肌肉谷氨酸、天门冬氨酸、甘氨酸和丙氨酸等鲜味氨基酸含量产生一定影响(表3)。在实验结束时2.0 BL/s

流速组4种鲜味氨基酸含量均显著高于0.7 BL/s 流速组和静水对照组($P < 0.05$),而后两组间则没有显著性的差异($P > 0.05$)。

表3 实验末期不同流速运动训练组多鳞四须鲃肌肉鲜味氨基酸比较

Tab.3 Comparison of delicious amino acids of *B. schwanenfeldi* under the exercise training with different water velocities at the end of the experiment

鲜味氨基酸/% delicious amino acid	流速/(BL/s) water velocity		
	0	0.7	2.0
谷氨酸 Glu	12.93 ± 0.21 ^b	13.00 ± 0.17 ^b	13.57 ± 0.35 ^a
天门冬氨酸 Asp	8.63 ± 0.11 ^b	8.78 ± 0.12 ^b	9.18 ± 0.30 ^a
甘氨酸 Gly	3.90 ± 0.02 ^b	4.13 ± 0.04 ^b	4.19 ± 0.02 ^a
丙氨酸 Ala	5.16 ± 0.08 ^b	5.31 ± 0.03 ^b	5.56 ± 0.22 ^a
合计 total	30.63 ± 0.40 ^b	30.84 ± 0.26 ^b	33.50 ± 0.22 ^a

3 讨论

3.1 逆流运动训练对多鳞四须鲃摄食和生长的影响

生活在流水中的中上层鱼类大多具有趋流性,它们能根据流速和流向调整自身的游泳速度和运动方向,使其保持逆流游泳状态或停留在某一特定位置上^[14]。因此,鱼类的游泳状态、运动强度和能量消耗明显受水流速度的影响^[15-16]。一般情况下,鱼类能够承受的极限流速值(V)与其体长(BL)相关,可用公式 $V = (2 - 3) BL$ 表示^[14]。本研究所使用的实验鱼体长为 15 cm 左右,其极限流速值约为 30 ~ 45 cm/s。据此,本研究设定 0.7 和 2.0 BL/s 两种流速,前者小于极限流速值,后者则接近其极限流速。研究结果发现,经过 23 或 45 d 不同流速运动训练,3 组实验鱼的摄食、生长和食物转换率出现显著性的差异。其中摄食率随流速增加而明显加大,而生长率和食物转化率却均以低流速组最大,静水组次之,而高流速组生长最慢,食物转化率最低。

养殖条件下,水流直接影响鱼类的游泳运动,而运动的增加将影响其新陈代谢和生理功能,进而影响鱼类生长发育^[17]。关于水流引发的鱼类游泳运动对生长的影响,目前研究结果还存在一定的争议^[5-9,18-23]。一般来说,对于一些属洄游性的或游泳能力强的大型鱼类如大多数鲑科鱼类 (*Salmonidae*)^[18]、西伯利亚鲟 (*Acipenser baeri*)^[8]、条纹石鲈 (*Morone saxatilis*)^[21-22]、黄尾鲋 (*Seriola lalandei*)^[5] 等,适宜流速下长期游泳运动对生长有明显促进作用。相反,对于一些体形扁平或运动能力弱的鱼类如金鱼 (*Carassius auratus*)^[23]、日本鲷 (*Paralichthys olivaceus*)^[7]、加州大比目鱼 (*Paralichthys californicus*)^[9] 等,长期高强度的游泳运动,反而明显降低生长速度。还有研究证明,一定条件下鱼类生长率和食物转化率与游泳速度呈负相关^[17,22],其原因被认为在于水流对鱼类代谢系统产生额外负担,如一些鲽类等体形扁平的鱼类在游泳过程中需要以很高的能量代价去维持身体平衡^[9]。这些研究结果提示,鱼类游泳运动与生长的关系除受自身体长大小影响外,还与其形态结构和生态习性有关。多鳞四须鲃体侧扁,自然条件下栖息于东南亚地区的湄公河流域,为定居性鱼类,游泳能力一般。作

者曾研究不同流速下多鳞四须鲃的游泳行为和活动代谢,发现静水条件下其活动少,代谢水平低;但随着流速增加,其趋流率、摆尾频率增大,耗氧率相应增加,如体长 15.6 cm 的幼鱼在 0.7 BL/s 流速下的摆尾频率和耗氧率比静水组分别提高了 48.1% 和 28.0%^[15]。这说明 0.7 BL/s 流速运动训练组之所以取得最高的生长率和食物转化效率,是因为在较低流速水流刺激下,多鳞四须鲃趋流行为增加,摆尾频率加大,代谢活动加强,日摄食率增加,对饵料的消化吸收率提高的缘故。但鱼类的耐流能力都有一定的上限,当流速增至 2.0 BL/s 时,已达到或接近实验鱼的极限流速,与静水对照组相比,此时幼鱼摆尾频率和耗氧率分别增加了 341% 和 228%,反映其运动强度显著增大^[15]。高强度运动势必会过量消耗体内能量储备并增加运动性疲劳,造成急性和慢性应激,对鱼类的生长和其他生理功能产生负面影响,这可能是本研究高流速组生长最慢、食物转化率最低的原因。

3.2 逆流运动训练对多鳞四须鲃体营养成分的影响

鱼体的组成是反映鱼类的营养水平和生理状态的重要指标,水流引起的运动强度对肌肉的生化指标有显著的影响。长期游泳训练可以改变鱼的肌肉结构,并且增加一些鲑科鱼类蛋白质合成率^[24],但对肌肉蛋白质含量影响并不明显^[6,17],而脂肪含量在运动训练后往往发生明显改变^[7,10-12,21-22]。本研究发现,随着流速的增加,各实验组多鳞四须鲃肌肉中水分、灰分和无氮浸出物含量差异不显著,但蛋白质含量随流速增加呈显著增加,而脂肪含量却随流速增加呈显著降低趋势,尤其在高流速组表现更加明显。Ogata 等^[7]发现在 2.1 BL/s 流速下饲养的日本鲷胸鳍肌肉中脂肪含量明显低于 0.9 BL/s 流速组,原因在于平时极少活动的平扁形的鲷类在急流中需要频繁地进行变翼运动来对抗水流使身体保持平衡,从而更多地消耗胸鳍肌肉的脂肪作为能源。但一些游泳能力强的尤其是洄游性鱼类在以适宜游泳速度运动后其体侧红肌有更高的脂肪含量,如虹鳟 (*Salmo gairdneri*)^[10]、大西洋鲑 (*Salmo salar*)^[18]、溪红点鲑 (*Salvelinus fontinalis*)^[11]、条纹石鲈^[12,21-22] 等。目前关于运动训练影响脂肪代谢机制的研究不多,且主要集中于洄游性冷水

鱼类。一般洄游性鱼类肌肉中脂肪水平较高^[25], Anttila 等^[26]以即将入海洄游的幼鳟 (*Salmo trutta*) 为材料, 研究运动训练对肌肉脂肪代谢的影响, 发现运动训练能增加鳟对血浆中游离脂肪酸的利用能力, 其结果因脂肪酸的再酯化导致运动训练后红肌中脂肪水平升高, 而对照组红肌中脂肪水平相对较低, 且红肌中脂肪酶—酯酶活性显著高于运动组, 反映其更多利用肌肉自身的脂肪作能源。Magnoni 等^[27]的研究也证实运动训练能显著激活虹鳟红肌脂蛋白脂肪酶的活性, 增加其对血脂的利用能力。多鳞四须鲃为热带淡水定居性鱼类, 自然条件下一般不作长距离游泳运动, 本研究在流水刺激诱导下发生的持续游泳运动需消耗大量的能量, 促进体内脂肪的氧化分解, 致使肌肉脂肪含量显著减少, 而蛋白含量相对增加, 但其具体作用机制尚不甚明了。关于运动训练对不同鱼类脂肪代谢影响的差异及其详细机制有待进一步的研究。

本研究还发现运动训练明显影响多鳞四须鲃肌肉不同氨基酸含量。在实验末期, 与静水对照组和 0.7 BL/s 流速组相比, 2.0 BL/s 流速组的总氨基酸含量以及亮氨酸等 6 种氨基酸、必需氨基酸和多种鲜味氨基酸含量均显著增加。说明长时间高强度运动训练能提高鱼体营养价值, 使鱼肉口味更鲜美。这可能与高强度运动下蛋白质和氨基酸代谢变化有关, 而目前关于运动训练影响蛋白质及氨基酸代谢的生理生化机制还不是很清楚。

4 小结

本研究结果表明, 运动强度及训练持续时间对多鳞四须鲃生长和体营养组成产生显著的影响。低流速下持续训练可促进多鳞四须鲃的生长, 提高食物转化率并在一定程度上增加蛋白质相对含量。高流速高强度持续运动训练因过多的能量消耗而降低多鳞四须鲃的生长率和食物转化率, 但在显著提高蛋白质相对含量的同时增加了必需氨基酸和鲜味氨基酸的比例。由于运动训练对鱼类的影响除与不同种类的生理生态特性有关外, 还与训练方法包括运动强度和持续时间等条件参数也有密切的关系^[17]。本研究实施期间不间断训练, 每天运动训练时间定为 20 h, 两个流速组间梯度跨度较大, 因此, 今后有必要在更为细小的运动强度和运动时间梯度下研究运动训练对多

鳞四须鲃生长和营养组成的影响, 并探讨其作用机制。

参考文献:

- [1] McDonald D G, Milligan C L, Mcfarlane W J, et al. Condition and performance of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*): effects of rearing practices on hatchery fish and comparison with wild fish [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1998, 55: 1208 - 1219.
- [2] Mcfarlane W J, McDonald D G. Relating intramuscular fuel use to endurance in juvenile rainbow trout [J]. Physiological and Biochemical Zoology, 2002, 75: 250 - 259.
- [3] McClelland G B, Graig P M, Dhekney K, et al. Temperature and exercise-induced gene expression and metabolic enzyme changes in skeletal muscle of adult zebrafish (*Dania rerio*) [J]. The Journal of Physiology, 2006, 557: 739 - 751.
- [4] Anttila K, Jarvilehto M. The swimming performance of brown trout and whitefish the effects of exercise on Ca²⁺ handling and oxidative capacity of swimming muscles [J]. Journal of Comparative Physiology, Part B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology, 2008, 178(4): 465 - 475.
- [5] Ogata H, Oku H. The effects of swimming exercise on growth and whole-body protein and fat contents of fed and unfed fingerling yellowtail [J]. Fisheries Science, 2000, 66: 1100 - 1105.
- [6] Jobling M, Baardvik B M, Christiansen J S. The effects of prolonged exercise training on growth performance and production parameters in fish [J]. Aquaculture International, 1993, 1: 95 - 111.
- [7] Ogata H, Oku H. Effects of water velocity on growth performance of juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* [J]. Journal of World Aquaculture Society, 2000, 31: 225 - 231.
- [8] 黄宇宇, 程起群, 高露娇, 等. 流速、温度对西伯利亚鲟幼鱼生长的影响 [J]. 水产学报, 2007, 31(1): 31 - 37.
- [9] German E M, Raul H P, Douglas E C. Effect of water velocity on the growth of California halibut (*Paralichthys californicus*) juveniles [J]. Aquaculture, 2007, 271: 206 - 215.
- [10] Nahhas R, Jones N V, Goldspink G. Growth, training and swimming ability of young trout (*Salmo*

- gairdneri* R.) maintained under different salinity conditions [J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 1982, 62: 699 – 708.
- [11] East P, Magan P. The effect of locomotor activity on the growth of brook charr, *Salvelinus fontinalis* Mitchil [J]. Canadian Journal of Zoology, 1987, 65: 843 – 846.
- [12] Heisuke N, Nishino H, Nematipor G R, *et al.* Effects of water velocities on lipid reserves in ayu [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1991, 57: 1737 – 1741.
- [13] 李国文, 林碧海, 谢刚, 等. 红鳍银鲫的人工繁殖技术 [J]. 淡水渔业, 2005, 35(2): 55 – 56.
- [14] 何大仁, 蔡厚才. 鱼类行为学 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1998: 141 – 388.
- [15] 宋波澜, 林小涛, 王伟军, 等. 不同流速下红鳍银鲫趋流行为与耗氧率的变化 [J]. 动物学报, 2008, 54(4): 686 – 694.
- [16] 李想, 林小涛, 宋波澜, 等. 流速对红鳍银鲫幼鱼游泳状态的影响 [J]. 动物学杂志, 2010, 45(2): 126 – 133.
- [17] Davison W. The effects of exercise training on teleost fish, a review of recent literature-energetic consequences and dependence on water oxygen tension [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part A: Physiology, 1997, 117(1): 67 – 75.
- [18] Totland G, Kryvvi H, Jodestol K, *et al.* Growth and composition of the swimming muscle of adult Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) during long-term sustained swimming [J]. Aquaculture, 1987, 66: 299 – 313.
- [19] Bengtson D, Willey S, Mcaffrey E, *et al.* Effects of water velocity on conditioning of summer flounder *Paralichthys dentatus* for net pens [J]. Journal of Applied Aquaculture, 2003, 14: 133 – 142.
- [20] Foster I, Ogata H. Growth and whole-body lipid content of juvenile red sea bream reared under different conditions of exercise training and dietary lipid [J]. Fisheries Science, 1996, 62(3): 404 – 409.
- [21] Young P S, Cech J J J. Optimum exercise conditioning velocity for growth, muscular development, and swimming performance in young-of-the-year striped bass (*Morone saxatilis*) [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1994, 51: 1528 – 1534.
- [22] Young P S, Cech J J J. Effects of exercise conditioning on stress responses and recovery in cultured and wild young-of-the-year striped bass, *Morone saxatilis* [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1993, 50: 2094 – 2099.
- [23] Davison W, Goldspink G. The effect of training on the swimming muscles of the goldfish (*Carassius auratus*) [J]. Experimental Biology, 1978, 74: 115 – 122.
- [24] Houlihan D F, Laurent P. Effects of exercise training on the performance. Growth, and protein turnover of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1987, 44: 1614 – 1621.
- [25] Mecclelland G B. Fat for fire: the regulation of lipid oxidation with exercise and environmental stress [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 2004, 139(3): 443 – 460.
- [26] Anttila K, Jantti M. Effect of training on lipid metabolism in swimming muscle of sea trout (*Salmo trutta*) [J]. Journal of Comparative Physiology, Part B: Biochemical, Systemic, and Environmental Physiology, 2010, 180(5): 707 – 714.
- [27] Magnoni L, Weber J M. Endurance swimming activates trout lipoprotein lipase: plasma lipids as a fuel for muscle [J]. Journal of Experimental Biology, 2007, 210: 4016 – 4023.

Effects of upstream exercise training on feeding efficiency, growth and nutritional components of juvenile tinfoil barbs (*Barbodes schwanenfeldi*)

SONG Bo-lan^{1,2}, LIN Xiao-tao^{1*}, XU Zhong-neng

(1. Engineering Research Center of Tropical and Subtropical Aquatic Ecological Engineering,
Ministry of Education, Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

2. Department of Fishery Sciences, Ocean College of Hebei Agricultural University, Qinhuangdao 066003, China)

Abstract: The objective of this study was to determine the impact of upstream exercise training on feeding efficiency, growth, and nutritional components of juvenile tinfoil barb *Barbodes schwanenfeldi* (weight 75.21 ± 2.82 g). The experiment included two stages, 1–23 d and 23–45 d. After water current treatment (0 BL/s, 0.7 BL/s, 2.0 BL/s) for 45 d, the daily feeding ratio (FR) increased significantly with increasing water velocities. The maximum values of the body weight specific growth rate (SGR), body length SGR and feed conversion rate (FCR) were in the water current of 0.7 BL/s, the second maximum values of those were in 0 BL/s and the minimum values were in 2.0 BL/s, with significant differences among the three ($P < 0.05$). No significant difference in crude ash and water contents in muscles was observed among the treatments with various water velocities ($P > 0.05$). The protein contents of fish muscles increased greatly with the increase of water velocities, while the lipid contents of muscles dropped with increasing water velocities. At the end of the experiment, the contents of total amino acid (TAA), essential amino acid (EAA), and delicious amino acid of the fish treated with the water velocities of 2.0 BL/s were 82.63%, 34.34%, and 33.50%, respectively, being significantly higher than respective values of controls (78.27%, 32.6%, 30.63%) ($P < 0.05$). Our result indicated that the lower water currents (0.7 BL/s) could effectively promote growth of juvenile tinfoil barb, improve feed conversion rates, and increase protein contents of fish muscles. The exercise training under the high flow (2.0 BL/s) was unsuitable to growth, but it could increase the contents of EAA and delicious amino acids in muscles of juvenile tinfoil barb. The result could provide basis to improve culturing conditions and nutritional quality of tinfoil barb *B. schwanenfeldi*.

Key words: *Barbodes schwanenfeldi*; exercise training; water velocity; food intake; growth performance; nutritional component

Corresponding author: LIN Xiao-tao. E-mail: tlinxt@jnu.edu.cn